



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

**ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ
ΠΑΡΚΟΥ ΥΠΟ ΑΠΟΚΟΠΗ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΕΛΕΝΗΣ ΠΑΥΛΙΔΟΥ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ
ΠΑΡΚΟΥ ΥΠΟ ΑΠΟΚΟΠΗ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της
ΕΛΕΝΗΣ ΠΑΥΛΙΔΟΥ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη Μαρτίου 2010.

.....

.....

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Βουρνάς Κωνσταντίνος

Παπαθανασίου Σταύρος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

.....
ΕΛΕΝΗ ΠΑΥΛΙΔΟΥ

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

Copyright © Ελένη Παυλίδου, 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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Μουτή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τη συνεχή παρουσία του στην πορεία της έρευνας, την καθοδήγησή του και γενικότερα την άριστη συνεργασία που είχαμε. Χωρίς τις επιστημονικές συμβουλές και την ενθάρρυνσή του θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους Μαρία Αντώνη και Θανάση Ξανθόπουλο για την άριστη συνεργασία μας και τη σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Αθήνα, Μάρτιος 2010

Ελένη Παυλίδου

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας συμμετοχής αιολικού πάρκου αποτελούμενου από ανεμογεννήτριες (στο εξής Α/Γ) μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης (στο εξής ΓΕΔΤ), στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εξετάζεται σύστημα τριών ζυγών με σύγχρονη νηζελογεννήτρια, φορτίο και αιολικό πάρκο τριών Α/Γ, από τις οποίες η μία προτείνεται να λειτουργεί αποδίδοντας πολύ χαμηλό ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος της. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται στρατηγική αποφόρτισης μέσω ελέγχου της γωνίας βήματος της έλικας. Με αυτόν τον τρόπο η απορριπτόμενη ισχύς μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα, κατά την εμφάνιση συμβάντος αύξησης του φορτίου. Πραγματοποιούνται στο λογισμικό Simulink του περιβάλλοντος Matlab προσομοιώσεις συμβολής της Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα όπου τη ρύθμιση αναλαμβάνει εξολοκλήρου η συμβατική μονάδα παραγωγής. Το σύνολο των αποτελεσμάτων σχολιάζεται και εξάγονται τα συνεπακόλουθα συμπεράσματα.

Λέξεις-Κλειδιά

Πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, έλεγχος γωνίας βήματος έλικας, στρατηγική ποσοστιαίας αποφόρτισης.

Abstract

The subject of this Diploma Thesis is the examination of the possibility of the participation of a variable speed-variable pitch wind generator with a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) in primary load-frequency control of an Electric Power System. A three-bus system is examined, which includes a synchronous diesel generator, a load and a wind park composed by three wind generators, one of which, is suggested to operate yielding a very low percentage of its maximum available wind power. For this purpose, a pitch-controlled deloading strategy is presented. In this way, the reserve of power can be used by the wind generator in order to meet under-frequency occurrences due to load increase. In the Simulink software of the Matlab environment, simulations of contribution of wind generator to load-frequency control are conducted and the results are compared to the equivalent one's, where the frequency control is completely undertaken by the conventional power unit. The results are then discussed and followed by the final conclusions.

Key-words

Primary load-frequency control, variable speed-variable pitch wind generator, doubly fed induction generator, pitch control, strategy of deloaded operation.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	19
1.1	Αιολική ενέργεια στην ηλεκτροπαραγωγή.....	19
1.2	Αντικείμενο της διπλωματικής.....	20
1.3	Σχετικές εργασίες με το θέμα και συμβολή της παρούσας.....	21
1.4	Οργάνωση των Κεφαλαίων της εργασίας.....	22
2	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	23
2.1	Ανεμογεννήτρια.....	23
2.1.1	Γενική περιγραφή μιας Α/Γ και βασικά υποσυστήματα.....	23
2.1.2	Τύποι και τοπολογίες Α/Γ.....	28
2.1.3	Μηχανικό μέρος της Α/Γ.....	35
2.1.4	Ηλεκτρικό μέρος της Α/Γ.....	42
2.1.5	Συστήματα ελέγχου της Α/Γ.....	58
2.1.6	Σύνδεση Α/Γ στο ηλεκτρικό δίκτυο.....	64
2.2	Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας.....	73
2.2.1	Ανάγκη για Ρ.Φ.Σ.....	73
2.2.2	Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα Ρ.Φ.Σ.....	74
2.2.3	Στατισμός.....	75
2.2.4	Συμμετοχή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση.....	76
2.3	Μοντέλο συστήματος.....	77
2.3.1	Μοντέλο συστήματος ως στρεφόμενη μάζα.....	77
2.3.2	Λοιποί συντελεστές του συστήματος.....	78
3	Προτεινόμενη μέθοδος Ρ.Φ.Σ. από Α/Π.....	85
3.1	Βασική ιδέα.....	85
3.2	Ποσοστιαία αποφόρτιση μέσω της γωνίας βήματος.....	86
3.3	Συστήματα ελέγχου και look-up tables.....	87
3.4	Ευστάθεια της μεθόδου.....	89
4	Θεμελίωση προβλήματος.....	91
4.1	Αναφορά προς τα μοντέλα.....	91

4.2	Βασικά σενάρια προς προσομοίωση	93
4.3	Χαρακτηριστικά και παράμετροι συντελεστών του προβλήματος.....	94
5	Προσομοιώσεις και αποτελέσματα	99
5.1	Σενάριο 1: Ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής και χαμηλό φορτίο	101
5.2	Σενάριο 2: Ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής και υψηλό φορτίο.....	108
5.3	Σενάριο 3: Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και χαμηλό φορτίο	115
5.4	Σενάριο 4: Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και υψηλό φορτίο	122
5.5	Σενάριο 5: Ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου και μείωση του ανέμου σε ταχύτητα κάτω της ονομαστικής	129
5.6	Σενάριο 6: Πολύ υψηλή συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας από την Α/Γ3.....	134
6	Σχολιασμός, συγκρίσεις και παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.....	139
7	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	145
8	Βιβλιογραφία	147

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Α/Α σχήματος	Τίτλος	Σελίδα
2.1	Βασικά υποσυστήματα μιας Α/Γ	23
2.2	Α/Γ οριζοντίου και κατακορύφου άξονα	25
2.3	Σχηματική παράσταση της ατράκτου	28
2.4	Α/Γ σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής	33
2.5	Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια	34
2.6	Α/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης	34
2.7	Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή $C_p(\lambda, \beta)$	37
2.8	Μοντέλο παραγωγής μηχανικής ισχύος	38
2.9	Ισοδύναμο μοντέλο τριών στρεφόμενων μαζών	39
2.10	Μηχανικό σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών	40
2.11	Μοντέλο δύο μαζών του μηχανικού μέρους της Α/Γ	42
2.12	Ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης της ΓΕΔΤ	44
2.13	Αλληλουχία τυλιγμάτων μιας 3-φασικής μηχανής επαγωγής	45
2.14	Τυλίγματα μιας 3-φασικής μηχανής επαγωγής	45
2.15	Μετασχηματισμός στο πλαίσιο dq0	50
2.16	Ισοδύναμο d κύκλωμα της ΓΕΔΤ	52
2.17	Ισοδύναμο q κύκλωμα της ΓΕΔΤ	53
2.18	Μοντέλο ΓΕΔΤ	56
2.19	Μοντέλο υπολογισμού της ροής του στάτη	57
2.20	Μοντέλο υπολογισμού της ροής του δρομέα	57
2.21	Μοντέλο υπολογισμού των ρευμάτων στάτη και δρομέα	57
2.22	Μοντέλο υπολογισμού ισχύος της ΓΕΔΤ	58
2.23	Μοντέλο υπολογισμού της ηλεκτρικής ροπής	58
2.24	Καμπύλη ισχύος της Α/Γ	59
2.25	Μοντέλο ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων	60
2.26	PI ελεγκτής της γωνίας του βήματος	60
2.27	Μοντέλο ελέγχου της ενεργούς ισχύος στο στρεφόμενο πλαίσιο	62
2.28	Μοντέλο ελέγχου της άεργους ισχύος στο στρεφόμενο πλαίσιο	63
2.29	Έλεγχος μέγιστης απομάστευσης ισχύος	64
2.30	Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας	75
2.31	Μοντέλο δικτύου ως στρεφόμενη μάζα	78
2.32	Εμβολοφόρος μηχανή	79
2.33	Μοντέλο νηξελογεννήτριας	79
2.34	Μοντέλο θερμοστατικού φορτίου	81
2.35	Μοντέλο γραμμής-μεταφοράς νηξελογεννήτριας-φορτίου	83
2.36	Μοντέλο γραμμής-μεταφοράς Α/Γ-φορτίου	84
2.37	Μοντέλο υπολογισμού απωλειών γραμμής	84
3.1	Καμπύλες C_p αντίστοιχες σε διάφορα ποσοστά αποφόρτισης	87
3.2	Μοντέλο αποφόρτισης μέσω ελέγχου του βήματος	88
3.3	Συνολική διάταξη ελέγχου της τεχνικής αποφόρτισης	89
3.4	Εξήγηση της ευστάθειας της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης	89
4.1	Το υπό μελέτη σύστημα	91
4.2	Μοντέλο φορτίου-συχνότητας του υπό μελέτη συστήματος	92
4.3	Αιολικό πάρκο με συμμετοχή μιας Α/Γ στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας	93
5.1	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	102
5.2	Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	102

A/A σχήματος	Τίτλος	Σελίδα
5.3	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	103
5.4	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	103
5.5	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	104
5.6	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	104
5.7	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	105
5.8	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	105
5.9	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	106
5.10	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	106
5.11	Σύγκριση της ισχύος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	107
5.12	Σύγκριση της γωνίας βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	107
5.13	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	109
5.14	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	109
5.15	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	110
5.16	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	110
5.17	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	111
5.18	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	111
5.19	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	112
5.20	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	112
5.21	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	113
5.22	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου άνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	113
5.23	Σύγκριση της ισχύος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	114

A/A σχήματος	Τίτλος	Σελίδα
5.24	Σύγκριση της γωνίας βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής	114
5.25	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	116
5.26	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	116
5.27	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	117
5.28	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	117
5.29	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	118
5.30	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	118
5.31	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	119
5.32	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	119
5.33	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	120
5.34	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	120
5.35	Σύγκριση της ισχύος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	121
5.36	Σύγκριση της γωνίας βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	121
5.37	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	123
5.38	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	123
5.39	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	124
5.40	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	124
5.41	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	125
5.42	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	125
5.43	Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	126
5.44	Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	126

A/A σχήματος	Τίτλος	Σελίδα
5.45	Γωνία βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	127
5.46	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	127
5.47	Σύγκριση της ισχύος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	128
5.48	Σύγκριση της γωνίας βήματος της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	128
5.49	Συχνότητα δικτύου σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	130
5.50	Ισχύς της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	130
5.51	Γωνία βήματος της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	131
5.52	Συχνότητα δικτύου σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	131
5.53	Ισχύς της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	132
5.54	Γωνία βήματος της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής	132
5.55	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	133
5.56	Σύγκριση της ισχύος της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	133
5.57	Σύγκριση της γωνίας βήματος της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	134
5.58	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	135
5.59	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	136
5.60	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	137
5.61	Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	138
6.1	Σύγκριση της τάσης του ζυγού των A/Γ, σε μεταβολή υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	142
6.2	Σύγκριση ισχύος της A/Γ3, σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης	143

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Α/Α πίνακα	Τίτλος	Σελίδα
1	Χαρακτηριστικά των Α/Γ	95
2	Παράμετροι του μοντέλου δύο μαζών των Α/Γ	95
3	Χαρακτηριστικά του ΡΙ ελεγκτή του βήματος	95
4	Παράμετροι της ΓΕΔΤ	95
5	Χαρακτηριστικά του ΡΙ ελεγκτή της ΓΕΔΤ	96
6	Παράμετροι της Σύγχρονης Γεννήτριας	96
7	Χαρακτηριστικά των ΡΙ ελεγκτών της Σύγχρονης Γεννήτριας	96
8	Χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς	96
9	Υπόμνημα συντομογραφιών προσομοιώσεων και αποτελεσμάτων	100
10	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 1-Above-Low Load	101
11	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 2-Above-High Load	108
12	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 3-Below-Low Load	115
13	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 4-Below-High Load	122
14	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 5- Ταυτόχρονη αύξηση φορτίου και μείωση ανέμου-Below-High Load	129
15	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Above-Low Load	135
16	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Above-High Load	135
17	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Below-Low Load	136
18	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Below-High Load	137

1

Εισαγωγή

1.1 Αιολική ενέργεια στην ηλεκτροπαραγωγή

Η ανάγκη για αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (στο εξής ΑΠΕ), άρχισε να απασχολεί τη διεθνή κοινότητα κατά τη δεκαετία του 1970, με αφορμή την πετρελαϊκή κρίση, οπότε έγινε αντιληπτό ότι απαιτείται ορθότερη αξιοποίηση όλων των ενεργειακών πόρων. Τα χρόνια που ακολούθησαν, την ανάγκη για ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών ενέργειας ενίσχυσαν τα αποτελέσματα της ρύπανσης του περιβάλλοντος, που άρχισαν να γίνονται εμφανή. Εξαιτίας της ανεξέλεγκτης χρήσης ορυκτών καυσίμων, ιδιαίτερα στις αναπτυγμένες χώρες, η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου ήταν δραματική, με συνέπειες τη δημιουργία της τρύπας του όζοντος, τις κλιματικές αλλαγές και τη γενικότερη διαταραχή του φυσικού περιβάλλοντος [1].

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, έγιναν ενέργειες και λήφθηκαν πρωτοβουλίες από φορείς και περιβαλλοντικές οργανώσεις, με σημαντικότερη παγκόσμια προσπάθεια το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο συνυπέγραψαν 55 χώρες σύμφωνα με το οποίο δεσμεύτηκαν με βραχυπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων και γενικότερα για την ελάττωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Η Ελλάδα, που συμμετείχε επίσης στη Σύνοδο του Κιότο και υπέγραψε το Πρωτόκολλο, δεσμεύτηκε να μειώσει τις εκπομπές κατά 5% σε σχέση με το 1990 [2]. Επιπλέον, σύμφωνα με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020 πρέπει το 20% της καταναλισκόμενης ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ [3]. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του

Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), η συστηματική εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μπορεί να καλύψει έως και 15% των αναγκών της Ελλάδας σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό ΑΠΕ μπορεί να καλυφθεί από άλλες εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή και η υδροηλεκτρική [4].

Παρά τα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας, που συνδυάζονται με τη σχετικά χαμηλή τιμή της, δεν υπάρχει αξιοπιστία της διαθεσιμότητάς της λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα του ανέμου. Γι' αυτό το λόγο, όταν η αιολική ενέργεια αποτελεί σημαντικό μέρος της ηλεκτροπαραγωγής, απαιτείται διατήρηση ισόποσης στρεφόμενης εφεδρείας από τους συμβατικούς σταθμούς, γεγονός που συνεπάγεται πιθανή αντιοικονομική λειτουργία τους ή εξώθησή τους στα τεχνικά τους ελάχιστα. Το ανωτέρω μπορεί να αποφευχθεί με σβέση συμβατικών σταθμών, όμως με αυτό τον τρόπο μειώνεται η αδράνεια του δικτύου και συνεπώς η συγκράτηση της βύθισης της συχνότητας [5].

Προτεινόμενη λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η συμμετοχή των Α/Γ στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας (στο εξής ΡΦΣ). Η ΡΦΣ θα μπορούσε να γίνει, καταρχήν, με αποφόρτιση των Α/Γ ή/και αδρανειακή συμμετοχή τους μέσω σχετικής σύζευξης τους προς το δίκτυο. Παρ' όλα αυτά, ως τώρα η συμμετοχή των Α/Γ στη ΡΦΣ έχει σχεδόν μηδενική πρακτική εφαρμογή και γι' αυτό απαιτείται η επέκταση των ερευνών που έχουν γίνει και ο εμπλουτισμός τους με νέα πεδία[6].

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα συμμετοχής αιολικού πάρκου (στο εξής Α/Π) στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, με απόδοση ισχύος προς το δίκτυο, για την αντιμετώπιση βύθισης συχνότητας που μπορεί να συμβεί από είσοδο φορτίου ή από απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής. Για το σκοπό αυτό, μοντελοποιείται ηλεκτρικό σύστημα τριών ζυγών, στο οποίο είναι συνδεδεμένο Α/Π με τρεις Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος, με ΓΕΔΤ Από τις τρεις Α/Γ, η μία λειτουργεί σε υψηλής τιμής ποσοστιαία αποφόρτιση (της τάξης 70-80%), αποδίδοντας μόνο ένα 20-30% της διαθέσιμης ισχύος της στο δίκτυο, μεταβάλλοντας κατάλληλα τη γωνία του βήματος των πτερυγίων της. Σε περίπτωση βύθισης της συχνότητας, η απορριπτόμενη ισχύς διοχετεύεται στο δίκτυο, εκτελώντας ΡΦΣ.

Αφού ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση του συστήματος, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου και γίνεται συγκριτική μελέτη περιπτώσεων, όπου η ΡΦΣ μπορεί να πραγματοποιείται μόνο από τη συμβατική μονάδα παραγωγής ή και με συμμετοχή της μίας Α/Γ του Α/Π.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάδειξη ενός τρόπου ταχείας και ικανοποιητικής ΡΦΣ με σημαντική συνεισφορά ισχύος από Α/Γ.

1.3 Σχετικές εργασίες με το θέμα και συμβολή της παρούσας

Σχετικά με την Πρωτεύουσα ΡΦΣ από Α/Γ έχουν γίνει αρκετές μελέτες και δημοσιεύσεις, που προτείνουν εναλλακτικούς τρόπους συμμετοχής.

Στην [7] μελετώνται Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος με δυνατότητα λειτουργίας υπό αποφόρτιση κατά συγκεκριμένο ποσοστό και συμβολής στη ΡΦΣ σε περίπτωση μεταβολής της συχνότητας. Η στρατηγική βασίζεται σε έλεγχο αυξημένης γωνιακής ταχύτητας ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή αποφόρτιση. Η εφαρμογή αυτής της στρατηγικής προϋποθέτει μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, μέθοδος ανακριβούς και εξαρτώμενης τόσο απ' την ποιότητα μέτρησης του ανέμου όσο και από τη στοχαστικότητα του. Στην παρούσα εργασία δεν απαιτείται μέτρηση ή πρόβλεψη του ανέμου σε οποιοδήποτε σημείο της προτεινόμενης στρατηγικής.

Στην [8] αναπτύσσεται στρατηγική αποφόρτισης μέσω μεταβολής του βήματος. Σε αυτήν, η απόκριση συχνότητας μεταφράζεται σε μεταβολή της γωνίας βήματος και όχι της ισχύος, όπως συμβαίνει στην κλασική συνάρτηση στατισμού. Αντίθετα, στην παρούσα εργασία υλοποιείται κλασική φιλοσοφία στατισμού και αποφόρτισης (ως στρεφόμενη εφεδρεία) μέσω ευθέως ελέγχου της ενεργούς ισχύος.

Στην [9] μελετάται η συμμετοχή στη ΡΦΣ από Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος υπό στρατηγική αποφόρτισης μέσω μεταβολής του βήματος για ταχύτητες ανέμου μόνο άνω της ονομαστικής. Στην παρούσα εργασία η αποφόρτιση και άρα η συμμετοχή στη ΡΦΣ εφαρμόζεται σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου.

Στη [10] παρουσιάζεται μια στρατηγική ΡΦΣ με αποφόρτιση κατά 20% της ΓΕΔΤ μέσω της γωνίας βήματος των πτερυγίων χωρίς μέτρηση ανέμου και με έλεγχο ενεργού ισχύος. Παρ' όλα αυτά τόσο σε αυτήν όσο και σε όσες προαναφέρθηκαν, η στρατηγική προτείνει εφαρμογή της ανεξαρτήτως μεγέθους ροπής. Όμως, όπως αναφέρεται στην [22], στις υψηλές ροπές και για χρόνους φαινομένων της τάξης μερικών δευτερολέπτων, όπως η ΡΦΣ, που συμπίπτουν με τις ιδιοσυχνότητες των πτερυγίων, υπάρχει κίνδυνος συντονισμού τους σε κρίσιμες ταλαντώσεις.

Στην [11], έπειτα από συγκριτική μελέτη που παρουσιάζεται, προτείνεται ως αποτελεσματικότερη μέθοδος αποφόρτισης η λειτουργία της Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος με ΓΕΔΤ υπό αυξημένη γωνιακή ταχύτητα δρομέα. Οι συγγραφείς, για τις ανάγκες της στρατηγικής, επιτρέπουν αυξημένη ταχύτητα δρομέα έως και 50% άνω της ονομαστικής για αποφόρτιση 10% που σημαίνει αύξηση της ισχύος που θα διαχειρίζεται ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του δρομέα ως εκ της ισόποσης αύξησης της

ολίσθησης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η συμμετοχή της Α/Γ στη ΡΦΣ με ιδιαίτερα θετικό τρόπο, αλλά σε υψηλούς ανέμους, κοντά ή και άνω της ονομαστικής ταχύτητας, η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργίας προϋποθέτει υπερδιαστασιολόγηση του μετατροπέα. Στην παρούσα εργασία δεν προϋποτίθεται σχετική ανάγκη.

Όσον αφορά εναλλακτικούς τρόπους συμμετοχής των Α/Γ στη ΡΦΣ, έχει επίσης προταθεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης της αδράνειας της Α/Γ μέσω σχετικής σύζευξης [12].

Εν κατακλείδι, στην παρούσα εργασία και μέσα από την προτεινόμενη μέθοδο αποφεύγεται η λειτουργία της Α/Γ υπό σφάλματα συχνότητας σε υψηλές ροπές που αποτελούν παράγοντα καταπόνησης και κινδύνου κρίσιμων ταλαντώσεων, δεν απαιτείται πρόβλεψη ή μέτρηση ανέμου λόγω της στοχαστικής και ασαφούς για την παραγόμενη μηχανική ισχύ φύσης του, δεν προαπαιτείται υπερδιαστασιολόγηση του μετατροπέα για τις ανάγκες της αποφόρτισης και δε γίνεται χρήση στρατηγικής που ενέχει αστάθεια, όπως η αποφορτισμένη λειτουργία της Α/Γ υπό μειωμένη γωνιακή ταχύτητα δρομέα [11]. Τέλος, στην παρούσα εργασία μοντελοποιείται και δίκτυο μικρού αριθμού ζυγών για να φανεί και η επιρροή της τάσης του δικτύου στα φαινόμενα.

1.4 Οργάνωση των Κεφαλαίων της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθεται εκτενής περιγραφή των Α/Γ και της μοντελοποίησης των βασικών υποσυστημάτων τους, περιγράφεται το ζήτημα της ΡΦΣ και παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος τριών ζυγών που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η προτεινόμενη ιδέα για ΡΦΣ με Α/Γ που αποφορτίζεται μέσω της γωνίας βήματος, παρουσιάζεται η υλοποίηση της μεθόδου και εξετάζεται η ευστάθειά της.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η θεμελίωση του προβλήματος, με παρουσίαση του συνολικού συστήματος που μοντελοποιήθηκε, των βασικών περιπτώσεων που θα μελετηθούν και των τιμών των παραμέτρων που τέθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για έξι διαφορετικά σενάρια κατάστασης του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 6 σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε καθεμία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται συνολικά τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

Στο Κεφάλαιο 8 παρατίθεται η βιβλιογραφία και οι δημοσιεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές της παρούσας εργασίας.

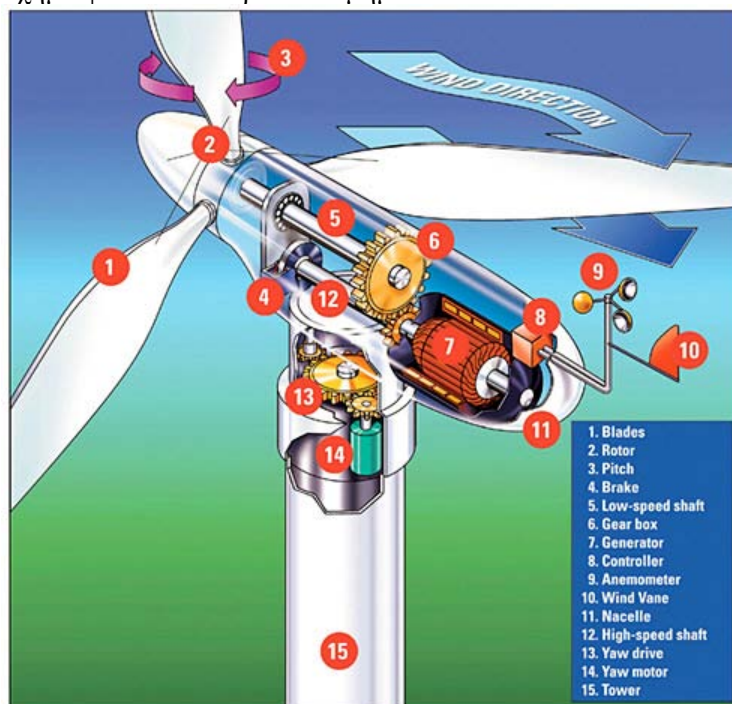
2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Ανεμογεννήτρια

2.1.1 Γενική περιγραφή μιας Α/Γ και βασικά υποσυστήματα

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελείται μια Α/Γ:



Σχήμα 2.1: Βασικά υποσυστήματα μιας Α/Γ.

Διακρίνονται, λοιπόν, τα εξής βασικά στοιχεία σε μια Α/Γ:

- ❖ Η νασσέλλα, που περικλείει τα στοιχεία της Α/Γ.
- ❖ Ο δρομέας, το κινούμενο μέρος της Α/Γ, που αποτελείται από τα πτερύγια, την πλήμνη και τον άξονα.
- ❖ Το κιβώτιο ταχυτήτων, για τον πολλαπλασιασμό των στροφών του άξονα.
- ❖ Η ηλεκτρική γεννήτρια.
- ❖ Ο έλεγχος της κλίσης των πτερυγίων (pitch control).
- ❖ Ο μηχανισμός περιστροφής της ατράκτου (yaw control).
- ❖ Το σύστημα πέδησης.
- ❖ Το ανεμόμετρο.
- ❖ Τα ηλεκτρονικά ισχύος με τα συστήματα ελέγχου.
- ❖ Οι διατάξεις αντιστάθμισης και τα φίλτρα.
- ❖ Οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας (ηλεκτρονόμοι προστασίας, σύστημα ομαλής εκκίνησης κλπ).
- ❖ Ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης, όποτε υπάρχει.

Περιγράφοντας συνοπτικά τη λειτουργία μιας Α/Γ, αρχικά η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται από το δρομέα σε στρεφόμενη μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια διοχετεύεται μέσω του άξονα στο ρότορα της γεννήτριας. Σε κάποιες περιπτώσεις, μεταξύ του δρομέα και της γεννήτριας, παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων, που πολλαπλασιάζει τις στροφές του άξονα χαμηλών στροφών. Στο ρότορα της ηλεκτρικής γεννήτριας, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αποδίδεται στο δίκτυο, ενώ συνηθίζεται να παρεμβάλλεται και ένας μετασχηματιστής ανύψωσης για την προσαρμογή της τάσης σε αυτή του δικτύου.

Προκειμένου να επιτυγχάνεται καλύτερη λειτουργία της Α/Γ, χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ελέγχου τόσο του μηχανικού όσο και του ηλεκτρικού τμήματός της.

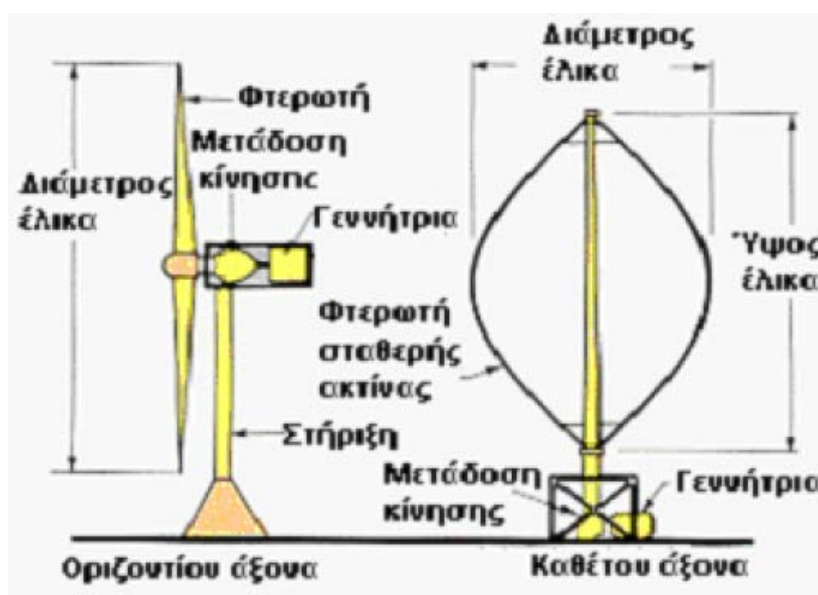
Ο μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού (yaw control) περιστρέφει την άτρακτο και την έλικα, ώστε το επίπεδο περιστροφής του δρομέα να είναι συνεχώς κάθετο προς την κατεύθυνση του ανέμου ώστε ο δρομέας να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την ενέργεια του. Βέβαια, τα στρεφόμενα πτερύγια, έχοντας μεγάλες σταθερές αδράνειας, παράγουν υψηλές γυροσκοπικές ροπές κατά τη διάρκεια του προσανατολισμού, που συχνά έχουν ως αποτέλεσμα υψηλό θόρυβο, ο οποίος υπερβαίνει τα τοπικά αποδεκτά όρια.

Ο έλεγχος της γωνίας βήματος πραγματοποιείται μέσω ενός σερβομηχανισμού, που αλλάζει τη γωνία των πτερυγίων, με σκοπό την ελεγχόμενη εκμετάλλευση ισχύος σε διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Στις περισσότερες συνδεσμολογίες Α/Γ χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου. Μέσω αυτών ελέγχεται η ισχύς που ανταλλάσσεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου.

Τέλος, διατάξεις αντιστάθμισης είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της παραγόμενης ισχύος, ενώ διατάξεις, όπως το σύστημα ομαλής εκκίνησης και ο διακόπτης αποσύνδεσης, διασφαλίζουν την ομαλή ζεύξη αλλά και απόζευξή της, όταν αυτό είναι απαραίτητο, όπως σε περίπτωση βραχυκυκλώματος [13].

Οι Α/Γ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό του άξονά τους σε κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 2.2: Α/Γ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.

Κατακόρυφου άξονα Α/Γ

Στις Α/Γ κατακόρυφου άξονα, ο δρομέας είναι τοποθετημένος κατακόρυφα. Υπάρχουν τρεις τύποι Α/Γ κατακόρυφου άξονα. Ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος είναι ο τύπου Darrieus. Οι άλλοι δύο είναι η Α/Γ τύπου Savonius και η «μεταβαλλόμενης γεωμετρίας» Α/Γ, που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν σύστημα προσανατολισμού του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου (yaw mechanism) για να είναι αποτελεσματικές, γεγονός σημαντικό κυρίως σε περιοχές όπου η κατεύθυνση του ανέμου έχει υψηλή μεταβλητότητα. Ακόμη, η τοποθέτηση του συστήματος μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια (πολλαπλασιαστής στροφών, γεννήτρια) γίνεται στο έδαφος, οπότε δεν απαιτείται πυλώνας. Γενικά, η δομή Α/Γ κατακόρυφου άξονα είναι απλούστερη κατασκευαστικά, αλλά παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα. Το κατώτερο μέρος του δρομέα είναι πολύ κοντά στο έδαφος, οπότε λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου έχει μέτρια συνολική απόδοση, ενώ η αεροδυναμική της ισχύς

ταλαντώνεται έντονα λόγω της συνεχούς αλλαγής του βήματος των πτερυγίων. Επιπλέον, δεν εκκινούν μόνες τους, αλλά πρέπει αρχικά να λειτουργήσουν σαν κινητήρες, παίρνοντας ρεύμα απ' το δίκτυο [13].

Οριζόντιου άξονα Α/Γ

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα συγκεντρώνουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα και γι' αυτό είναι οι πλέον διαδεδομένες. Έχουν τον άξονα περιστροφής του δρομέα τοποθετημένο οριζόντια και σχεδόν παράλληλα με την κατεύθυνση ροής του ανέμου. Γενικά, έχουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή, αλλά η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να τοποθετηθούν στην κορυφή του πύργου, γεγονός που κάνει το σχεδιασμό τους πιο σύνθετο και ακριβό. Άλλο μειονέκτημά τους είναι η ανάγκη ύπαρξης σερβομηχανισμού, για τον προσανατολισμό της έλικας προς τον άνεμο.

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα αποτελούνται από τα εξής βασικά μέρη:

❖ Τον πύργο

Επί του πύργου τοποθετείται η έλικα και η άτρακτο. Το ύψος του κυμαίνεται στο εύρος των 50-120 μέτρων. Για Α/Γ μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, ο πύργος είναι ελαφρά ψηλότερος από τη διάμετρο της έλικας. Για Α/Γ μικρού μεγέθους, ο πύργος είναι συνήθως λίγες φορές μεγαλύτερος από τη διάμετρο της έλικας για να αποφεύγεται το φτωχό αιολικό περιεχόμενο σε μικρά ύψη πάνω από το έδαφος.

Οι σύγχρονοι πύργοι κατασκευάζονται είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε από μέταλλο (δικτυωτοί ή συνθηθέστερα σωληνωτοί). Κατά την κατασκευή του πύργου, κύριο μέλημα είναι η αποφυγή συνθηκών συντονισμού. Οι ταλαντώσεις του και οι περιοδικές καταπονήσεις του που προέρχονται από τις διακυμάνσεις του ανέμου, πρέπει όσο το δυνατό να ελαχιστοποιούνται. Βασικής σημασίας για την επιλογή του πύργου είναι ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του, σε συνδυασμό με την συνολική συναρμολόγηση της Α/Γ [13].

❖ Το δρομέα

Ο δρομέας αποτελείται από τα πτερύγια, την πλήμνη και τον άξονα, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Τα πτερύγια έχουν την αεροδυναμική μορφή των ελίκων αεροπλάνων, με αρκετή συστροφή και συνεχή μείωση της διατομής τους, από τη βάση προς τα άκρα. Η τεχνολογία κατασκευής τους εξελίσσεται συνεχώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος της Α/Γ. Για τις μεγάλες Α/Γ η κατασκευή των πτερυγίων είναι ανάλογη με αυτή των ελίκων των αεροπλάνων, για τους μεσαίου μεγέθους ανεμοκινητήρες (στο εξής Α/Κ) χρησιμοποιούνται υαλονήματα σε πολλαπλές στρώσεις και εναλλαγή κατευθύνσεων, ενώ για μικρού μεγέθους Α/Κ χρησιμοποιούνται υλικά όπως πολυουρεθάνη, ξύλο και υαλόνημα. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται και οι ταλαντώσεις των

πτερυγίων προκαλούν μια σταθερή μηχανική καταπόνηση που επιδιώκεται να ελαχιστοποιηθεί κατά το σχεδιασμό τους.

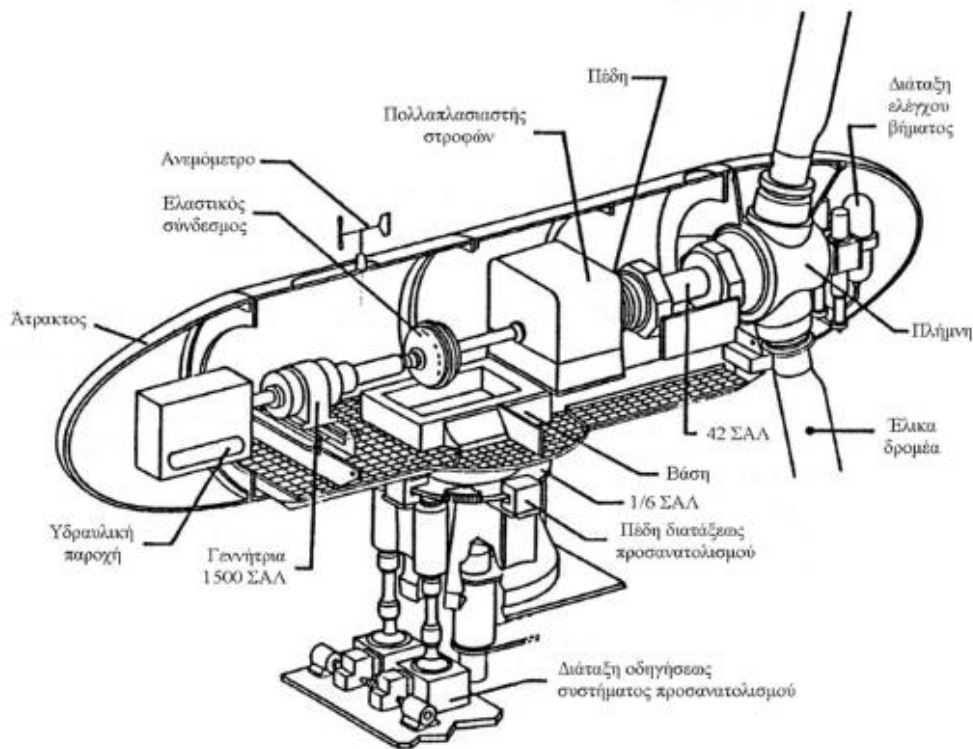
Η στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή, επηρεάζοντας καθοριστικά τον τρόπο ελέγχου ισχύος στροφών της Α/Γ, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Το πτερύγιο μπορεί να αποτελείται από δύο τμήματα, ένα σταθερό στηριζόμενο στον άξονα και ένα ρυθμιζόμενο ακροπτερύγιο.

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα, ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους, χωρίζονται σε μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες ή πολύπτερες. Οι μονόπτερες είναι φτηνότερες, αλλά απαιτείται η τοποθέτηση αντίβαρου στην πλήμνη για εξισορρόπηση, ενώ ανάλογο πρόβλημα προκύπτει σε μικρότερη έκταση και στις δίπτερες Α/Γ. Στην ηλεκτροπαραγωγή χρησιμοποιούνται κυρίως τρίπτερες Α/Γ, καθώς είναι πιο σταθερές. Μηχανές με περισσότερα πτερύγια είναι διαθέσιμες και μπορούν να εκκινήσουν εύκολα, καθώς μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπιδρά με τον άνεμο. Όμως, καθώς έχει αποδειχτεί οι τρίπτεροι έλικες έχουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος από τους πολύπτερους, αν και οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως στην άντληση υδάτων.

Όσο αφορά την κατεύθυνση με την οποία ο άνεμος προσπίπτει στο δρομέα, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα χωρίζονται σε ανάντη (up wind) και κατάντη (down wind). Κάθε τύπος παρουσιάζει υπέρ και κατά σε ότι αφορά τη μηχανική καταπόνηση. Στις Α/Γ ανάντη, καθώς ο άνεμος περνάει πρώτα από το δρομέα, δεν υπάρχει το πρόβλημα του φαινομένου σκίασης του πύργου, αλλά απαιτείται μηχανισμός προσανατολισμού ώστε να διατηρείται ο δρομέας στην κατεύθυνση του ανέμου. Αντιθέτως, στις Α/Γ κατάντη, δεν απαιτείται μηχανισμός προσανατολισμού, αλλά κάθε φορά που ένα από τα πτερύγια της έλικας περνάει μπροστά από τον πύργο, αυτός παρεμβάλλεται και παρεμποδίζει την ομαλή ροή του ανέμου, με αποτέλεσμα να προκαλείται ταλάντωση στον Α/Κ και στην παραγόμενη ισχύ [13].

❖ Την άτρακτο (ή νασσέλλα)

Η άτρακτος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 που ακολουθεί, περιλαμβάνει το σύστημα έδρασης του δρομέα στον πύργο, τον πολλαπλασιαστή στροφών, τη γεννήτρια, το μηχανισμό ελέγχου του βήματος των πτερυγίων, το σύστημα περιστροφής και προσανατολισμού καθώς και το μηχανικό φρένο [13].



Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση της ατράκτου.

2.1.2 Τύποι και τοπολογίες Α/Γ

2.1.2.1 Κατάταξη των Α/Γ ως προς την γωνιακή ταχύτητά τους

Μια Α/Γ μπορεί να είναι είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών. Κάθε λειτουργία συγκεντρώνει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

❖ Α/Γ σταθερών στροφών (fixed speed)

Οι Α/Γ σταθερών στροφών συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και λειτουργούν σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής, λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Πρακτικά, η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και ίση με τη σύγχρονη, με αποκλίσεις της τάξης περίπου του 1%, δηλαδή όσο και η ολίσθηση ονομαστικής λειτουργίας.

Αν και είναι οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν, ακόμα και στις μέρες μας αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι από τις ήδη λειτουργούσες Α/Γ. Μπορούν να λειτουργούν είτε με γεννήτριες επαγωγής είτε με σύγχρονες γεννήτριες, όμως επιλέγεται πάντα η χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, κυρίως τύπου κλωβού, καθώς οι σύγχρονες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαίτερα υψηλή ταλαντωτική συμπεριφορά της

απόκρισής τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου και το αυξημένο κόστος και βάρος τους.

Ορισμένοι κατασκευαστές εξοπλίζουν τις Α/Γ με δύο γεννήτριες, μία που θα λειτουργεί σε περιόδους με μικρή ταχύτητα ανέμου και μία μεγαλύτερη που θα λειτουργεί σε περιόδους με πιο ισχυρούς ανέμους. Με τη χρήση διπλής γεννήτριας επιτυγχάνεται καλύτερη αεροδυναμική απόδοση, καλύτερα χαρακτηριστικά ζεύξης και υψηλότερος συντελεστής ισχύος στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Εναλλακτική τους σχεδίαση είναι οι γεννήτριες μεταβλητών πόλων, που ανάλογα με τον τρόπο που συνδέονται τα τυλίγματα του στάτη, εργάζονται με διαφορετικό αριθμό πόλων και έτσι λειτουργούν σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.

Οι Α/Γ σταθερών στροφών εξαπλώθηκαν τόσο πολύ χάρη στα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνουν, όπως:

- ❖ Μικρό κόστος, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι σημαντικό.
- ❖ Απλή κατασκευή και σχετικά μικρό βάρος.
- ❖ Εξαιρετική αξιοπιστία και περιορισμένη ανάγκη συντήρησης.

Σημαντικά μειονεκτήματά τους συγκριτικά με τις Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι τα ακόλουθα:

- ❖ Λειτουργώντας υπό μη βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και επειδή η ταχύτητα τους είναι σχεδόν σταθερή σε σχέση με την ταχύτητα του δικτύου, δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τις ριπές του ανέμου υπό μορφή μηχανικής ενέργειας, με αποτέλεσμα αυτές να προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος του δικτύου.
- ❖ Η ασύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιείται απαιτεί την απορρόφηση άεργης ισχύος της, καθώς δεν μπορεί να ρυθμίσει το συντελεστή ισχύος, ο οποίος είναι χαμηλός.
- ❖ Κατά την εκκίνηση και τη ζεύξη-απόζευξη των γεννητριών σταθερών στροφών, παρατηρούνται έντονα μεταβατικά φαινόμενα.

Όλα τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη στροφή τόσο του επιστημονικού ενδιαφέροντος όσο και των κατασκευαστών προς τις Α/Γ μεταβλητών στροφών, οι οποίες φαίνονται να δίνουν ικανοποιητική λύση σε πολλά από τα παραπάνω προβλήματα [5].

Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών (variable speed)

Τα τελευταία χρόνια οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν καταστεί ο κυρίαρχος τύπος των ανά έτος εγκαθιστάμενων Α/Γ. Το αυξημένο ενδιαφέρον σε αυτές οφείλεται στα ελκυστικά

χαρακτηριστικά τους, εξαιτίας της παρουσίας του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, που επιτρέπει την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων των διαχειριστών του δικτύου.

Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν πιο πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα από τις Α/Γ σταθερών στροφών. Είναι εφοδιασμένες με επαγωγική (κλωβού ή τυλιγμένου δρομέα) ή με σύγχρονη γεννήτρια (με τύλιγμα πεδίου ή μονίμων μαγνητών) και μετατροπέα ισχύος. Χάρη στην παρουσία του μετατροπέα, μπορούν και λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα περιστροφής τους βελτιστοποιείται με βάση την τιμή του εισερχόμενου ανέμου, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Για να είναι η απόδοση της Α/Γ βέλτιστη, πρέπει η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί σημαντική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων. Κάτι τέτοιο σχεδιάστηκε παλαιότερα με διάφορες μεθόδους, όπως με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά αργότερα οι μέθοδοι αυτές εγκαταλείφθηκαν. Τη θέση των παραπάνω μεθόδων πήραν τα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπέων συχνότητας τα οποία έχουνε περιορισμένες απώλειες και είναι αρκετά αξιόπιστα. Τα συστήματα αυτά παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δίκτυο και στην ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι η ταχύτητα περιστροφής αποδεδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου κάνοντας δυνατή τη μεταβολή της εντός ευρύτερων ορίων. Ο μετατροπέας ισχύος λειτουργεί έτσι ώστε οι μεταβολές του ανέμου να παύουν να αποτελούν πρόβλημα και οι διακυμάνσεις ισχύος να απορροφώνται από αλλαγή στην ταχύτητα της Α/Γ.

Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν πληθώρα σημαντικών πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις Α/Γ σταθερών στροφών, όπως:

- ❖ Μειωμένες μηχανικές καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και αυξημένη διάρκεια ζωής της Α/Γ.
- ❖ Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και προσαρμογή της Α/Γ στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες, καθώς χάρη στην ιδιότητα της μεταβλητής ταχύτητας, είναι δυνατή η συνεχής προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας της Α/Γ στην ταχύτητα του ανέμου έτσι ώστε να ο αεροδυναμικός συντελεστής να διατηρείται στη μέγιστη δυνατή τιμή του.
- ❖ Μειωμένος ακουστικός θόρυβος, καθώς είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, σε περίπτωση ασθενούς ανέμου.
- ❖ Δυνατότητας απαλοιφής το κιβώτιο ταχυτήτων.

Επίσης, η παρουσία του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος δίνει στην Α/Γ τη δυνατότητα να εκπληρώσει τις υψηλές τεχνικές απαιτήσεις που επιβάλλονται από τους διαχειριστές δικτύων, όπως:

- ❖ Παραγωγή ελεγχόμενης ενεργούς και αέργου ισχύος.
- ❖ Καλύτερης ποιότητας παρεχόμενης ισχύς εξόδου (μείωση διακυμάνσεων ισχύος, βελτιωμένο επίπεδο flicker, περιορισμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης).
- ❖ Γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα.

Κάποια μειονεκτήματα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι τα ακόλουθα:

- ❖ Αυξημένο κόστος λόγω των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονικών ισχύος.
- ❖ Απώλειες στον μετατροπέα ισχύος.
- ❖ Αυξημένη πολυπλοκότητα.
- ❖ Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο και ανάγκη εγκατάστασης φίλτρων στο δίκτυο.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, πολλά από τα παραπάνω προβλήματα αναμένεται να επιλυθούν, κάτι που θα κάνει τις Α/Γ μεταβλητών στροφών ακόμη πιο ελκυστικές [5], [13].

2.1.2.2 Κατάταξη των Α/Γ ως προς τον τύπο των πτερυγίων τους

Ένα κριτήριο διαχωρισμού των Α/Γ είναι ο τύπος των πτερυγίων τους και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους, προκειμένου να περιορίζεται η παραγόμενη αεροδυναμική ισχύς [14].

❖ Α/Γ με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control)

Πρόκειται για Α/Γ με πτερύγια, που μπορούν να περιστραφούν κατά το διαμήκη άξονά τους. Με τη μεταβολή του βήματος της έλικας, δηλαδή της γωνίας β που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση της κίνησης (pitch angle), ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η ασκούμενη ροπή. Η γωνία β παίρνει τιμές $0^\circ - 90^\circ$. Πιο συγκεκριμένα, για έλεγχο ισχύος, παίρνει τιμές $0^\circ - 35^\circ$ περίπου. Όταν η Α/Γ λειτουργεί με άνεμο πάνω από τον ονομαστικό, τα πτερύγια στρέφονται κατά κατάλληλη γωνία μέσα από ένα σύστημα ελέγχου, και έτσι εξασφαλίζεται ότι δε θα αναπτυχθεί ροπή μεγαλύτερη της ονομαστικής. Βέβαια, για να σταματήσει η περιστροφή της Α/Γ (αεροδυναμική πέδηση) όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της έλικας σε μηχανική καταπόνηση, τα πτερύγια στρέφονται στις 90° , ώστε να παρουσιάσουν την ελάχιστη αντίσταση.

Χάρη στο pitch control αναπτύσσονται χαμηλότερα φορτία στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της Α/Γ, περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς χωρίς διακοπή της λειτουργίας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε χαμηλό άνεμο. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του ελέγχου τους καθώς και η καταπόνηση των πτερυγίων λόγω αδρανειακής φόρτισης.

❖ **A/Γ με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο (passive stall control)**

Πρόκειται για A/Γ με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και ισχύος του δρομέα (passive stall control), χωρίς έλεγχο βήματος. Διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Η ανυψωτική δύναμη παύει να αυξάνεται και έτσι περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια και αποφεύγεται η φόρτιση της A/Γ πέρα από τα όρια για τα οποία έχει σχεδιαστεί.

Στα υπέρ αυτού του τρόπου ελέγχου είναι η απλότητα της κατασκευής, το χαμηλό κόστος και η απουσία ανάγκης συντήρησης, αποφεύγοντας κινούμενα τμήματα στο δρομέα και πολύπλοκα συστήματα ελέγχου. Βασικά μειονεκτήματα είναι τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται στο δρομέα και στο δομικό σύστημα, η αδυναμία ρύθμισης της ισχύος εξόδου και η μειωμένη παραγόμενη ισχύς σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

❖ **A/Γ με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (active stall control)**

Τελευταία, παρατηρείται η τάση να χρησιμοποιείται ενεργός έλεγχος του βήματος των πτερυγίων σε A/Γ 1 MW και μεγαλύτερες (active stall). Η διαφορά αυτού του τρόπου ελέγχου σε σχέση με τον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων είναι ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή και η A/Γ πρόκειται να υπερφορτιστεί, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα (negative pitch control), ώστε να γίνει πιο έντονο το φαινόμενο stall (stall effect) και να αποκοπεί με αυτόν τον τρόπο η περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Το εύρος τιμών της γωνίας είναι μικρό, περίπου $0^\circ - 4^\circ$.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και κατά συνέπεια δεν καταπονείται το σύστημα σε περιόδους ριπών ανέμου. Επίσης, η A/Γ μπορεί να αποδίδει σχεδόν την ονομαστική της ισχύς σε όλες τις υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε αντίθεση με A/Γ που χρησιμοποιούν passive stall control. Εκτός της καλύτερης απόδοσης, επιτυγχάνεται επίσης ευκολότερη εκκίνηση και αποσύνδεση.

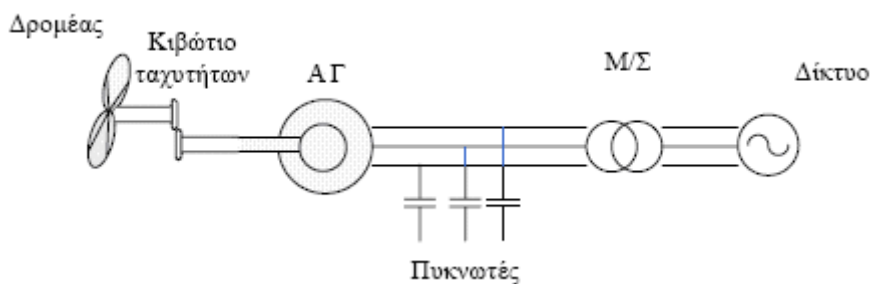
2.1.2.3 *Βασικές τοπολογίες των A/Γ*

Υπάρχουν διάφορες τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους της A/Γ, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται, η οποία μπορεί να είναι επαγωγής, σύγχρονη ή συνεχούς ρεύματος. Η γεννήτρια επαγωγής με δρομέα κλωβού χρησιμοποιείται σε σχετικά μικρά μεγέθη A/Γ που παράγουν ισχύ της τάξης των KW, ενώ αυτή με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίους απαντάται σε A/Γ μέσου και μεγάλου μεγέθους, με παραγωγή ισχύος έως και 5MW. Η σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους A/Γ, οι οποίες είναι είτε ηλεκτρικά διεγερόμενες είτε με μόνιμους μαγνήτες. Τέλος, γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

χρησιμοποιούνται από μικρού μεγέθους Α/Γ και σε πολύ μικρή έκταση, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας και αναγκών συντήρησης [15].

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι βασικοί τρόποι σύνδεσης των Α/Γ στο δίκτυο και τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας.

❖ Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα)

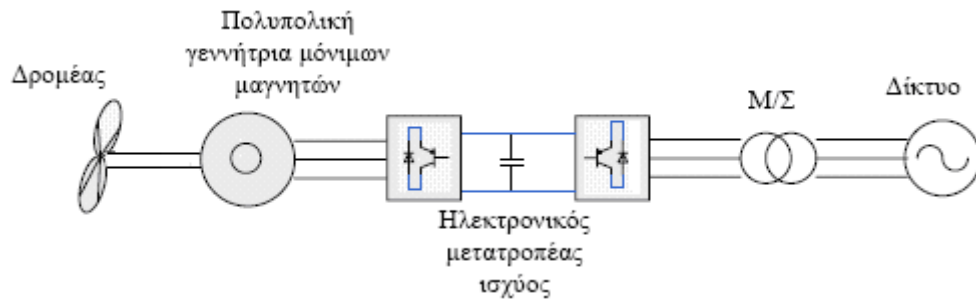


Σχήμα 2.4: Α/Γ σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής.

Σε αυτήν την τοπολογία, καθώς οι ταχύτητες του δρομέα και της γεννήτριας διαφέρουν, απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο επιτυγχάνει τη σύζευξή τους. Η ολίσθηση της γεννήτριας είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1%, οπότε γενικά αυτές οι Α/Γ θεωρούνται σταθερών στροφών. Η σταθερή ταχύτητα του δρομέα προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων και τον αριθμό ζευγών πόλων της ασύγχρονης γεννήτριας. Ο στάτης συνδέεται στο δίκτυο μέσω μιας διάταξης ομαλής εκκίνησης και μιας συστοιχίας πυκνωτών, για περιορισμό της κατανάλωσης έργου ισχύος. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως “the Danish design” και συνήθως συνδυάζεται με stall control.

Το πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος της. Παρ’ όλα αυτά, πρέπει να είναι και μηχανικά πιο στιβαρή, λόγω των μεγάλων μηχανικών καταπονήσεων, καθώς η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να αλλάζει αισθητά, με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να μεταφράζονται απευθείας σε διαταραχές της ροπής. Επίσης, παρατηρούνται μεγαλύτερες διαταραχές στην ισχύ εξόδου, οι οποίες σε ασθενή δίκτυα συνεπάγονται και διαταραχές στην τάση (flicker) [5], [15].

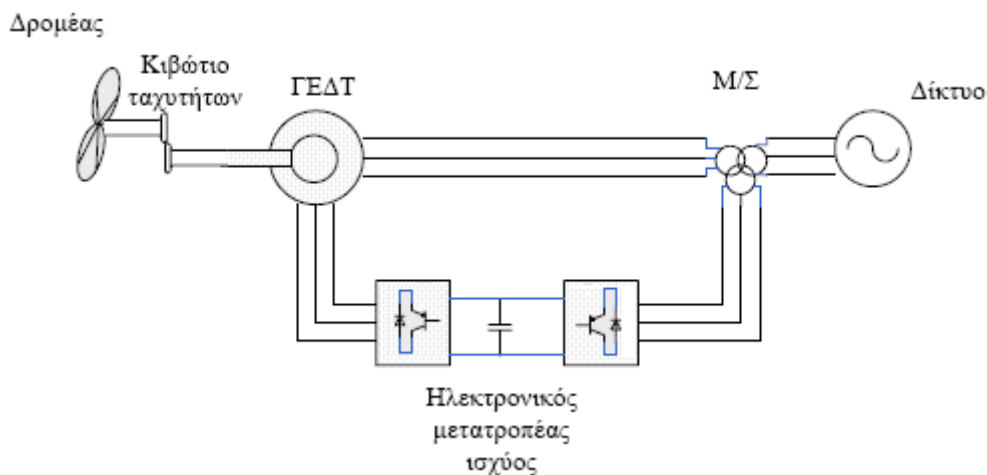
❖ **Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια**



Σχήμα 2.5: A/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια.

Σε αυτές τις A/Γ, η σύγχρονη γεννήτρια έχει την ίδια ταχύτητα με το δρομέα, γι' αυτό δεν απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το κόστος και το βάρος της διάταξης, αυξάνεται η αξιοπιστία και ελαττώνεται ο θόρυβος. Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, που της επιτρέπουν να λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα και να παράγει ισχύ ακόμη και σε αρκετά χαμηλό αριθμό στροφών. Επιπλέον, η γεννήτρια μπορεί να αυτοδιεγείρεται είτε με μόνιμους μαγνήτες, είτε με ηλεκτρική διέγερση. Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι απαιτεί μεγάλη και πολύπλοκη γεννήτρια και μεγάλο μετατροπέα ο οποίος διαχειρίζεται το 100% της παραγόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες και το κόστος του [16].

❖ **Μεταβλητών στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης**



Σχήμα 2.6: A/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Σε αυτήν την τοπολογία απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς ο δρομέας στρέφεται με διαφορετική ταχύτητα από αυτήν της ασύγχρονης γεννήτριας. Ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο ενώ ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος EP/ΣP/EP (back to back AC/DC/AC), στον οποίο συνδέεται μέσω δαχτυλιδιών (slip rings). Ο μετατροπέας

αυτός είναι διπλής κατεύθυνσης και αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς πηγής τάσης: το μετατροπέα που συνδέεται στην πλευρά της μηχανής και τον μετατροπέα που συνδέεται στην πλευρά του δικτύου. Μεταξύ τους συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται ένας πυκνωτής στόχος του οποίου είναι να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στην τάση της συνεχούς σύνδεσης. Οι μετατροπείς ελέγχουν την τάση του δρομέα και επομένως την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγεται. 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 αυτό.

Χάρη στο μετατροπέα, η λειτουργία της ΓΕΔΤ είναι πιο ευέλικτη, συγκρινόμενη με τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική ταχύτητα του ρότορα, εγχύοντας στο δρομέα ρεύματα μεταβλητής συχνότητας. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, ενώ ταυτόχρονα δε διαχειρίζεται την πλήρη ισχύ, αλλά μόνο ένα ποσοστό της, περίπου 20-30%, μειώνοντας τις απώλειες και το κόστος του [15].

2.1.3 Μηχανικό μέρος της Α/Γ

2.1.3.1 Αεροδυναμική παραγωγή ισχύος

Οι διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα έχουν σαν αποτέλεσμα τη συνεχή μετακίνηση των αέριων μαζών και, συνεπώς, την ανάπτυξη κινητικής ενέργειας, την οποία εκμεταλλεύεται η Α/Γ. Αυτή η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στρεφόμενη μηχανική μέσω της έλικας, η οποία θεωρείται ένας δίσκος μετατροπής ενέργειας που παρεμβάλλεται στην πορεία του ανέμου.

Ένα ρεύμα αέρα διατομής A , στιγμιαίας ταχύτητας V , ίδιας σε όλη τη διατομή και πυκνότητας ρ , αν δεν παρεμβαλλόταν στην πορεία του η έλικα, θα έδινε ισχύ:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (2.1)$$

όπου:

ρ , η πυκνότητα του αέρα, που σε συνήθεις συνθήκες είναι 1.25 kg/m^3

$A = \pi R^2 \text{ (m}^2\text{)}$, η διατομή θεωρητικού δίσκου ακτίνας $R \text{ (m)}$

V_w , η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται όταν παρεμβάλλονται εμπόδια. Κατά τον υπολογισμό της ισχύος, χρησιμοποιείται συνήθως η οριαία μέση τιμή της ταχύτητας και αγνοείται η τυρβώδης συνιστώσα της.

Όμως, όπως συμβαίνει πάντα όταν γίνεται μετατροπή ενέργειας, υπάρχουν απώλειες και μόνο ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου δεσμεύεται από την έλικα. Έχει αποδειχτεί ότι αυτή η ενέργεια προκύπτει από την έκφραση:

$$P_M = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (2.2)$$

Ο λόγος $\frac{P_M}{P_W} = C_p$ λέγεται αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και εκφράζει το ποσό της κινητικής ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια από την Α/Γ. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκμεταλλεύσιμη αεροδυναμική ισχύς [13].

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- 1) Το λόγο της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου, που συμβολίζεται με λ :

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_R}{V_W} \quad (2.3)$$

Όπου ω_R η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας σε rad/sec . Ο λ είναι αδιάστατο μέγεθος

- 2) Τη γωνία β του πτερυγίου.

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής C_p ονομάζεται «όριο του Betz» και ισούται με :

$$C_{p_max} = 0.593$$

Το όριο του Betz εκφράζει τη μέγιστη μηχανική ενέργεια που μπορεί να ληφθεί από την κινητική ενέργεια του ανέμου μέσω μιας ιδανικής έλικας. Στην πράξη, τυπικές βέλτιστες τιμές στις οποίες κυμαίνεται ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι 0.4-0.5 [13].

Μεγάλος αριθμός προσεγγιστικών εκφράσεων έχει αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου και της γωνίας βήματος έλικας [25].

Μερικές από αυτές είναι οι:

$$1) \quad C_p = (1.12 - 0.022 \cdot \beta^2 - 2.8) \cdot e^{-0.38 \frac{R}{\lambda}} \quad (2.4)$$

$$2) \quad C_p = 0.73 \cdot \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58 \cdot \beta - 0.002 \cdot \beta^{2.14} - 13.2 \right) \cdot e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (2.5)$$

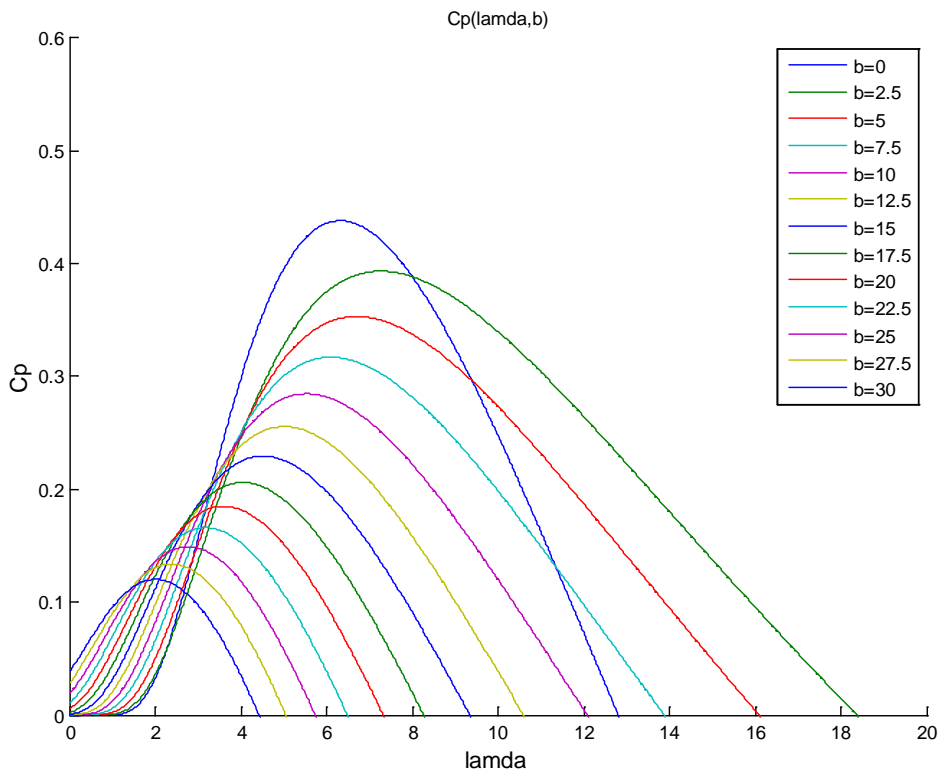
$$\text{όπου: } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.02 \cdot \beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}$$

$$3) C_p = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.6)$$

$$\text{όπου: } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{1}{\beta^3 + 1}$$

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο προσεγγιστικός τύπος (2.6).

Σύμφωνα με αυτόν, παρουσιάζονται παρακάτω οι καμπύλες C_p συναρτήσεως του λ , για διάφορες γωνίες β , σχεδιασμένες στο πρόγραμμα Matlab/R2008a . Έχει θεωρηθεί Α/Γ με $R=30m$.

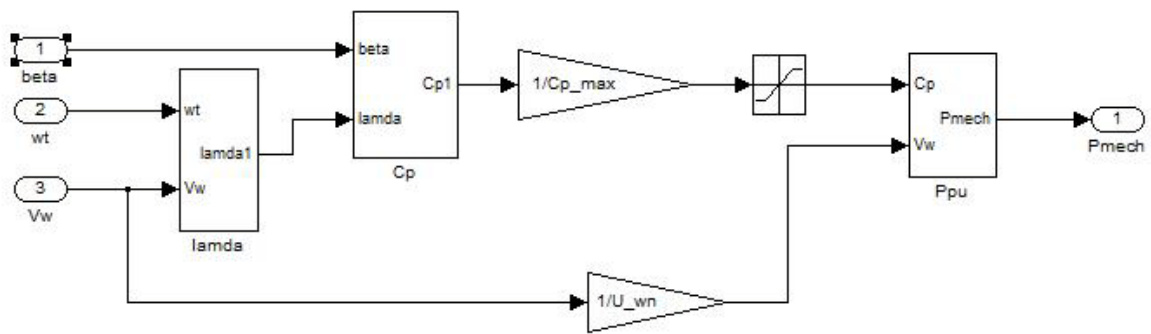


Σχήμα 2.7: Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή $C_p(\lambda, \beta)$.

Όπως φαίνεται, το C_p γίνεται μέγιστο για γωνία $\beta = 0^\circ$.

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, κατασκευάζεται στο Matlab/Simulink το μοντέλο υπολογισμού της αεροδυναμικής ισχύος, όπου η ελεγχόμενη γωνία β του βήματος της έλικας, μαζί με την ταχύτητα του ανέμου και την ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ αποτελούν τις εισόδους και η μηχανική ισχύς την έξοδο.

Το μοντέλο, όπως κατασκευάστηκε στο Simulink, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.8: Μοντέλο παραγωγής μηχανικής ισχύος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.8, η ταχύτητα του ανέμου κανονικοποιείται διαιρούμενη με την ονομαστική της, ενώ αντίστοιχη κανονικοποίηση υφίσταται και ο αεροδυναμικός συντελεστής δια του C_{p_opt} . Οπότε η υπολογιζόμενη αεροδυναμική ισχύς προκύπτει σε ανά μονάδα τιμές ως εξής:

$$P_{pu} = \frac{P_M}{P_N} = \frac{\frac{1}{2}\rho A C_p V_w^3}{\frac{1}{2}\rho A C_{p_opt} V_{w,nom}^3} \Rightarrow$$

$$P_{pu} = \frac{C_p V_w^3}{C_{p_opt} V_{w,nom}^3} \quad (2.7)$$

Η αεροδυναμική ροπή που αντιστοιχεί στην αεροδυναμική ισχύ που παράγεται από τη σχέση (2.2), είναι:

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_R} \quad (2.8)$$

Ή σε ανά μονάδα τιμές:

$$T_{pu} = \frac{P_{pu}}{\omega_{R,pu}} \quad (2.9)$$

Οι απότομες μεταβολές του ανέμου είναι δυνατό να παράγουν ισχύ κατά πολύ μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη, εξαιτίας των αεροδυναμικών φαινομένων, τα οποία δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Κατά μέσο όρο όμως, η σχέση (2.2) ισχύει, και χρησιμοποιείται στη συνέχεια [5].

2.1.3.2 Αεροελαστικό μοντέλο δύο μαζών

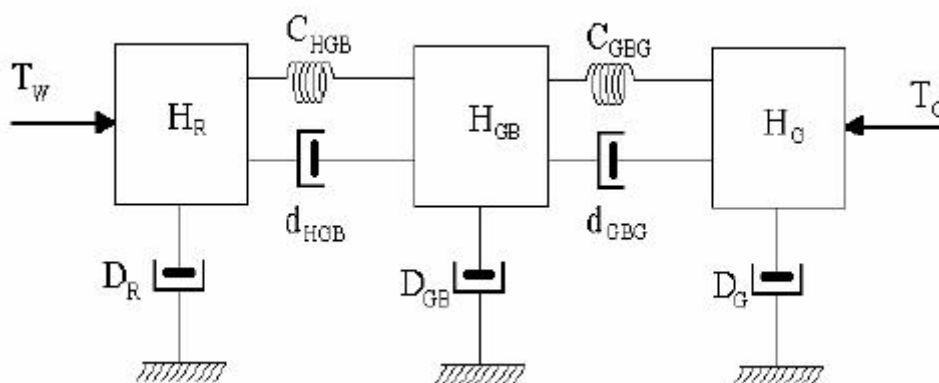
Το αεροελαστικό σύστημα μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, περιλαμβάνει τα παρακάτω κύρια στοιχεία:

- 1) Την έλικα και την πλήμνη της, όπου συνδέονται τα πτερύγια,
- 2) Το κιβώτιο ταχυτήτων με τους εκατέρωθεν άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας και τους συνδέσμους τους και
- 3) Τη γεννήτρια ως στρεφόμενο στοιχείο.

Για την προσομοίωση του μηχανικού μέρους των Α/Γ, λαμβάνεται υπ' όψη μόνο το περιστροφικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης και δε μελετάται η δυναμική των πτερυγίων. Για την αναπαράσταση των περιστροφικών χαρακτηριστικών του συστήματος μετάδοσης της κίνησης χρησιμοποιείται η κλασική μέθοδος μοντελοποίησης των ελαστικά συνδεδεμένων στρεφόμενων μαζών, αφού οι Α/Γ κάνουν χρήση ελαστικών αξόνων για τη μείωση της καταπόνησης του μηχανικού μέρους και της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος.

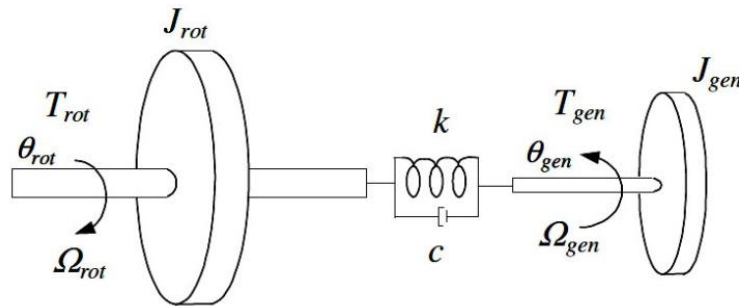
Τα βασικά στρεφόμενα μέρη του μηχανικού συστήματος είναι η έλικα της Α/Γ, το κιβώτιο ταχυτήτων και ο δρομέας της γεννήτριας. Κάθε στρεφόμενη μάζα χαρακτηρίζεται από την αδράνειά της, J και από ένα συντελεστή τριβών, D , που εκφράζει τις απώλειες ροπής κατά την περιστροφική κίνηση και ονομάζεται εξωτερικός συντελεστής απόσβεσης. Ειδικότερα, το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελείται από δύο στρεφόμενα τμήματα με διαφορετικές ταχύτητες, που συνδέουν την έλικα και τη γεννήτρια μέσω των αξόνων χαμηλών και υψηλών στροφών, αντίστοιχα. Κάθε άξονας παριστάνεται μέσω ενός στοιχείου ελαστικότητας/απόσβεσης, με σταθερά δυσκαμψίας C και συντελεστή εσωτερικής απόσβεσης d [13].

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια γενική διάταξη του μοντέλου τριών στρεφόμενων μαζών της Α/Γ.



Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο μοντέλο τριών στρεφόμενων μαζών.

Στην συγκεκριμένη εργασία, για λόγους απλότητας, χρησιμοποιείται απλοποιημένο μηχανικό σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.10 που ακολουθεί, το οποίο προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια προσομοίωσης. Αυτή η απλοποίηση γίνεται καθώς ο άξονας υψηλών στροφών μπορεί να θεωρηθεί σημαντικά άκαμπτος και επομένως η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων να θεωρηθούν μία ενιαία μάζα [13]. Οπότε τα βασικά στρεφόμενα τμήματα του μηχανικού μέρους που θα μοντελοποιηθεί είναι πρώτον, η έλικα και δεύτερον, το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια μαζί.



Σχήμα 2.10: Μηχανικό σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών.

Για την προσομοίωση του μοντέλου δύο μαζών της A/Γ στον υπολογιστή, πρέπει να γραφούν οι εξισώσεις κατάστασης του συστήματος. Για τη γραφή των εξισώσεων κατάστασης στρεφόμενων ελαστικά συνδεδεμένων μαζών, υπάρχουν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Σύμφωνα με την πρώτη, ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι γωνιακές θέσεις και ταχύτητες των μαζών, ενώ κατά τη δεύτερη, ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι γωνιακές ταχύτητες και οι ροπές ελαστικότητας. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιείται η πρώτη μεθοδολογία.

Οπότε, οι εξισώσεις κατάστασης του συστήματος δύο μαζών είναι οι ακόλουθες, ανηγμένες στην πλευρά χαμηλών στροφών:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_E \\ \omega'_G \\ \Delta\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_E+d_L}{J_E} & -\frac{d_L}{J_E} & -\frac{C_L}{J_E} \\ -\frac{d_L}{J'_{GB,G}} & -\frac{D'_{GB,G}+d_L}{J'_{GB,G}} & \frac{C_L}{J'_{GB,G}} \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_E \\ \omega'_G \\ \Delta\theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_E} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J'_{GB,G}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_W \\ T_G \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Συμβολίζεται:

T_W , η αεροδυναμική ροπή που αναπτύσσεται πάνω στην τουρμπίνα από τον άνεμο ($Nt \cdot m$).

T_G , η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας ($Nt \cdot m$).

ω_E , η γωνιακή ταχύτητα της μάζας της τουρμπίνας (rad/s).

ω'_G , η γωνιακή ταχύτητα της μάζας της γεννήτριας (rad/s).

$\Delta\theta_1$, η γωνία μετατόπισης (rad).

D_E , ο εξωτερικός συντελεστής απόσβεσης της τουρμπίνας ($Nt \cdot m \cdot s/rad$).

$D'_{GB,G}$, ο εξωτερικός συντελεστής απόσβεσης της γεννήτριας και του κιβωτίου ($Nt \cdot m \cdot s/rad$).

J_E , η αδράνεια της τουρμπίνας (kg/m^2).

$J'_{GB,G}$, η αδράνεια της γεννήτριας και του κιβωτίου (kg/m^2).

d_L , ο συντελεστής εσωτερικής απόσβεσης ($Nt \cdot m \cdot s/rad$).

C_L , η σταθερά δυσκαμψίας ($Nt \cdot m/rad$).

Αν θεωρηθεί αμελητέα η εξωτερική απόσβεση που εισάγεται σε σχέση με την απόσβεση που παρέχει το ηλεκτρικό μέρος, δηλαδή $D_E=0$ και $D'_{GB,G}=0$, τότε οι εξισώσεις απλοποιούνται περισσότερο:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_E \\ \omega'_G \\ \Delta\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d_L}{J_E} & -\frac{d_L}{J_E} & -\frac{C_L}{J_E} \\ -\frac{d_L}{J'_{GB,G}} & -\frac{d_L}{J'_{GB,G}} & \frac{C_L}{J'_{GB,G}} \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_E \\ \omega'_G \\ \Delta\theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_E} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J'_{GB,G}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_W \\ T_G \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Αν γραφούν αναλυτικά οι παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει:

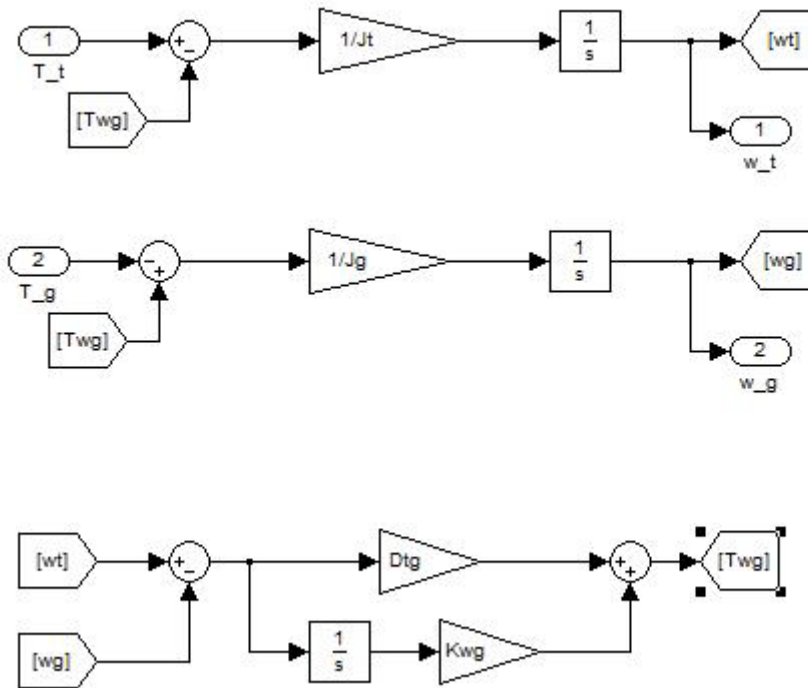
$$\begin{aligned} T_W - T_{WG} &= J_E \frac{d\omega_E}{dt} \\ T_{WG} - T_G &= J'_{GB,G} \frac{d\omega'_G}{dt} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Όπου συμβολίστηκε:

$$T_{WG} = C_L \cdot \Delta\theta_1 + d_L \cdot (\omega_E - \omega'_G)$$

Αυτές οι εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιωθεί το μοντέλο δύο μαζών με τη χρήση του Simulink, του προγράμματος Matlab. Το μοντέλο έχει σαν εισόδους την αεροδυναμική ροπή που παράγει η Α/Γ και την ηλεκτρική αντιρροπή της ΓΕΔΤ. Οι έξοδοι του μοντέλου είναι η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και η γωνία μεταξύ των δύο αξόνων.

Οπότε, το μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι το εξής:



Σχήμα 2.11: Μοντέλο 2 μαζών του μηχανικού μέρους της A/G.

2.1.4 Ηλεκτρικό μέρος της A/G

2.1.4.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τις ΓΕΔΤ

Οι ασύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε διάφορες ταχύτητες, χωρίζονται σε μηχανές κλωβού και μηχανές με δακτυλιοφόρο δρομέα. Οι γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης (doubly fed induction machines) αποτελούν έναν τύπο μηχανής επαγωγής με δακτυλιοφόρο δρομέα.

Ο δρομέας της ασύγχρονης μηχανής με δακτυλιοφόρο δρομέα έχει όμοια τυλίγματα με αυτά του στάτη. Τα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται με δακτυλίους, πάνω στους οποίους εφάπτονται ψήκτρες, για να υπάρχει πρόσβαση στις εντάσεις του δρομέα. Εφαρμόζεται στο στάτη συμμετρική τριφασική εναλλασσόμενη τάση, που δημιουργεί σε αυτόν συμμετρικά ρεύματα. Αυτά τα ρεύματα δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, που με τη σειρά του επάγει ρεύματα στα τυλίγματα του δρομέα τα οποία δημιουργούν ένα δεύτερο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των δύο αυτών μαγνητικών πεδίων, δημιουργείται ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία στρέφει το δρομέα, που προσπαθεί να φτάσει την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Στη λειτουργία κινητήρα, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του

στάτη, δηλαδή της σύγχρονης ταχύτητας, ενώ στη λειτουργία γεννήτριας η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη της σύγχρονης.

Όταν συνδεθεί στα τυλίγματα του δρομέα ο μετατροπέας ισχύος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, τότε η διάταξη ονομάζεται ΓΕΔΤ, καθώς η γεννήτρια ανταλλάσσει ισχύ τόσο μέσω του στάτη όσο και μέσω του δρομέα.

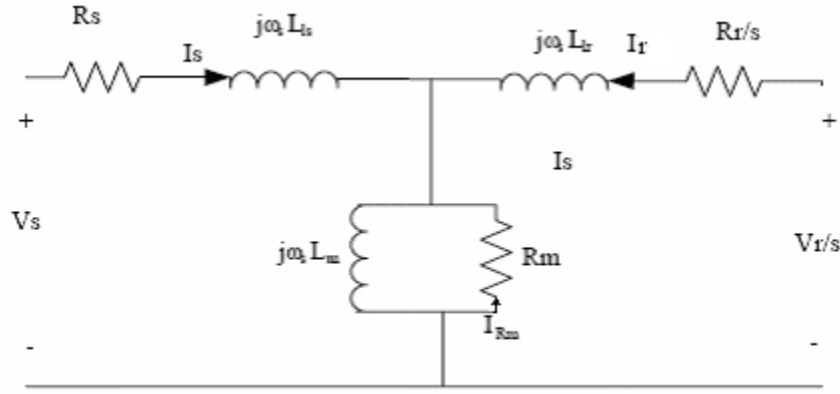
Στο σύστημα ΓΕΔΤ, επιτρέπεται η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα μεγάλο αλλά συγκεκριμένο ανά περίπτωση εύρος. Για να είναι δυνατή τόσο η υποσύγχρονη όσο και η υπερσύγχρονη λειτουργία της γεννήτριας σε αυτό το εύρος, ο μετατροπέας ισχύος πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει με ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ο μετατροπέας ισχύος διπλής κατεύθυνσης AC/DC/AC.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, ο μετατροπέας αποτελείται από έναν ανορθωτή AC/DC στη μεριά της γεννήτριας και από έναν αντιστροφέα DC/AC στη μεριά του δικτύου. Μεταξύ του ανορθωτή και του αντιστροφέα υπάρχει πυκνωτής, για την εξομάλυνση της τάσης στο σημείο αυτό. Ο μετατροπέας παρέχει τη διέγερση της γεννήτριας και υλοποιεί τη λειτουργία μεταβλητών στροφών μέσω του ελέγχου του ρεύματος δρομέα με μεταβλητή συχνότητα. Πετυχαίνει μεγάλο εύρος συχνοτήτων, και ελέγχει τη συχνότητα, αποσυνδέοντας τη συχνότητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου. Από τη μεριά του δικτύου, ο μετατροπέας ελέγχει το συντελεστή ισχύος, και επομένως την άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου [15].

2.1.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης της ΓΕΔΤ

Αν και οι A/Γ , λόγω της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, λειτουργούν σε μεταβατική κατάσταση, οι μεταβολές των στροφών είναι σχετικά αργές, λόγω της μεγάλης αδράνειας του ανεμοκινητήρα. Οπότε, δεδομένου ότι οι χρονικές σταθερές του μηχανικού μέρους των A/Γ είναι σημαντικά μεγαλύτερες των χρονικών σταθερών του ηλεκτρικού μέρους, μπορούν να αγνοούνται τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα και κατά την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς των A/Γ , είναι δυνατό να προσομοιώνονται οι γεννήτριες με το ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης. Μόνο όταν οι μεταβολές του ανέμου και αντίστοιχα της μηχανικής ροπής είναι πολύ γρήγορες, απαιτείται η χρήση του μεταβατικού μοντέλου [13].

Το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ στη μόνιμη κατάσταση, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12. Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα εκφράζει τη ΓΕΔΤ είτε έχει χρησιμοποιηθεί συνδεσμολογία αστέρα είτε τριγώνου.



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης της ΓΕΔΤ.

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στο παραπάνω κύκλωμα, προκύπτει:

$$\begin{aligned} V_s &= R_s I_s + j\omega_s L_{ls} I_s + j\omega_s L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \\ \frac{V_r}{s} &= \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_s L_{lr} I_r + j\omega_s L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \\ 0 &= R_m I_{Rm} + j\omega_s L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Όπου συμβολίστηκε:

V_s : η τάση στο στάτη	R_s : η αντίσταση του στάτη
V_r : η τάση στο δρομέα	R_r : η αντίσταση του δρομέα
I_s : το ρεύμα στο στάτη	R_m : η αντίσταση μαγνήτισης
I_r : το ρεύμα στο δρομέα	L_{ls} : η επαγωγή σκέδασης του στάτη
I_{Rm} : το ρεύμα μαγνήτισης	L_{lr} : η επαγωγή σκέδασης του δρομέα
ω_s : η ταχύτητα του στάτη	L_m : η επαγωγή μαγνήτισης
s : η ολίσθηση	

Η ολίσθηση ισούται με $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$, όπου ω_r η ταχύτητα του δρομέα.

Επιπλέον, μπορεί να οριστεί η πεπλεγμένη ροή διακένου, η ροή του στάτη και η ροή του δρομέα, αντίστοιχα, ως:

$$\begin{aligned} \Psi_m &= L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \\ \Psi_s &= L_{ls} I_s + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{ls} I_s + \Psi_m \\ \Psi_r &= L_{lr} I_r + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{lr} I_r + \Psi_m \end{aligned} \quad (2.14)$$

Αμελώντας τις απώλειες μαγνήτισης και τις ωμικές απώλειες, που θεωρούνται πολύ μικρές, υπολογίζεται η μηχανική ισχύς P_m που παράγει η ΓΕΔΤ, η οποία αποτελεί το άθροισμα της ισχύος του στάτη P_s του δρομέα P_r . Έπειτα από πράξεις προκύπτουν, τελικά, οι σχέσεις που εκφράζουν τη συμβολή του στάτη και του δρομέα στην παραγωγή ισχύος:

$$P_s \approx P_m / (1 + |s|) \quad (2.15)$$

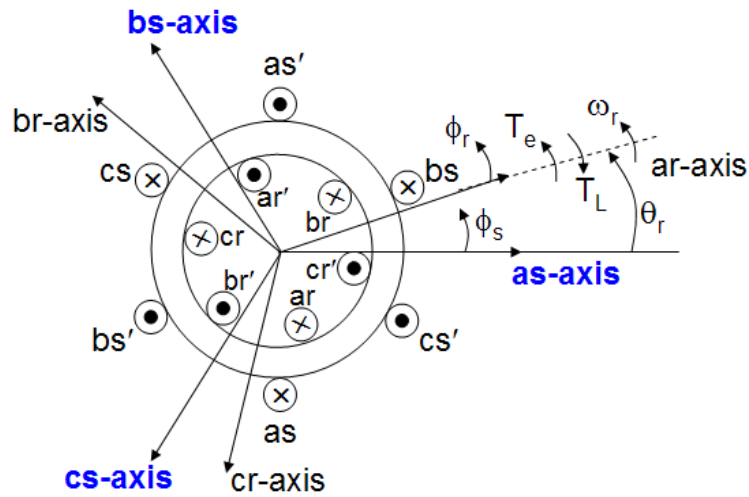
$$P_r \approx |s| P_m / (1 + |s|) \quad (2.16)$$

Για υπερσύγχρονη λειτουργία, όπου ισχύει $-1 < s < 0$, ο δρομέας παράγει ενεργό ισχύ, ενώ για υποσύγχρονη, όπου ισχύει $0 < s < 1$, απορροφά ισχύ.

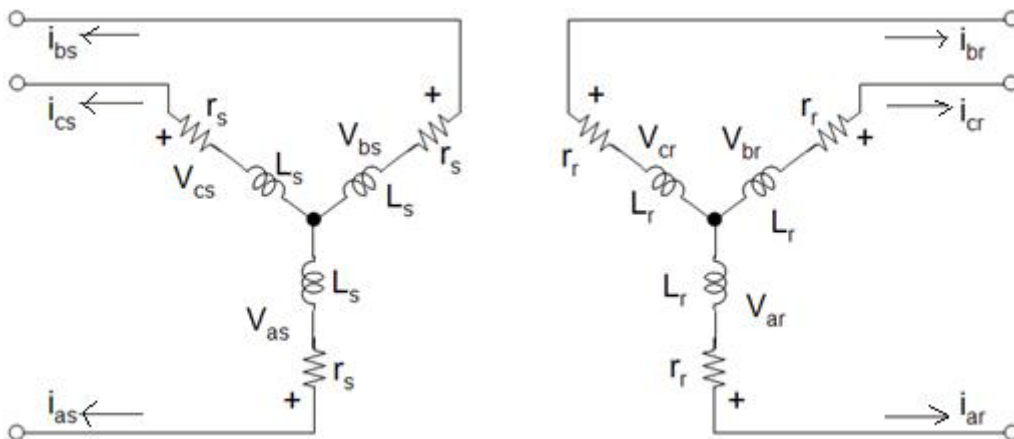
2.1.4.3 Θεωρία συστημάτων αναφοράς, μετασχηματισμοί εξισώσεων και μοντελοποίηση της ΓΕΔΤ

2.1.4.3.1 Μηχανές επαγωγής στο abc πλαίσιο αναφοράς

Τα τυλίγματα και η αλληλουχία των τυλιγμάτων μιας 2-πολικής, 3-φασικής μηχανής επαγωγής, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.13: Αλληλουχία τυλιγμάτων μιας 3-φασικής μηχανής επαγωγής.



Σχήμα 2.14: Τυλίγματα μιας 3-φασικής μηχανής επαγωγής.

Τα τυλίγματα του στάτη, N_s , είναι πανομοιότυπα με αντίσταση r_s και τα τυλίγματα του δρομέα, N_r , μπορούν να προσεγγιστούν σαν πανομοιότυπα τυλίγματα με αντίσταση r_r . Θεωρούμε ότι τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα είναι συμμετρικά, 3-φασικά, ημιτονοειδώς διανεμημένα κατά 120° στο χώρο.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν τα τυλίγματα του στάτη συνδεθούν σε μία 3-φασική πηγή, αναπτύσσονται συμμετρικά 3-φασικά ρεύματα και εγκαθιδρύεται μια στρεφόμενη ΜΕΔ διακένου, η οποία στρέφεται σε ταχύτητα καθοριζόμενη από τη συχνότητα των ρευμάτων του στάτη και τον αριθμό των πόλων. Αν η ταχύτητα του δρομέα είναι διαφορετική από την ταχύτητα της στρεφόμενης ΜΕΔ, συμμετρικά 3-φασικά ρεύματα θα εγχυθούν στα τυλίγματα του δρομέα. Τα εγχυόμενα ρεύματα του δρομέα δημιουργούν με τη σειρά τους μια ΜΕΔ διακένου η οποία στρέφεται σε σχέση με το δρομέα σε ταχύτητα αντίστοιχη στη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα. Η ταχύτητα της ΜΕΔ αυτής είναι ίδια με την ταχύτητα της ΜΕΔ διακένου που εγκαθίσταται από τα ρεύματα που ρέουν στα τυλίγματα του στάτη. Αυτές οι δύο ΜΕΔ στρεφόμενες μαζί μπορούν να θεωρηθούν σαν δύο συγχρόνως στρεφόμενα ζεύγη μαγνητικών πόλων. Η ροπή παράγεται σαν αλληλεπίδραση των δύο αυτών πόλων. Όταν ο δρομέας στρέφεται σε συγχρονισμό με την ΜΕΔ διακένου, δεν παράγεται ροπή [17].

Οι αντιδράσεις επαγωγής της μηχανής επαγωγής μπορούν να εκφραστούν από τις γνωστές σχέσεις για μία σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση της μηχανής επαγωγής το διάκενο αέρα είναι ομοιογενές. Όλες οι αυτεπαγωγές του στάτη είναι ίσες με L_{ss} και οι αλληλεπαγωγές του στάτη ίσες με L_s :

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_{ls} + L_{ms} \\ L_s &= -\frac{1}{2}L_{ms} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Η επαγωγή μαγνήτισης L_{ms} μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$L_{ms} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (2.18)$$

Συνεπώς, οι αυτεπαγωγές του δρομέα είναι ίσες με L_{rr} και οι αλληλεπαγωγές ίσες με L_r :

$$L_{rr} = L_{lr} + L_{mr} \quad (2.19)$$

Η επαγωγή μαγνήτισης του δρομέα εκφράζεται ως εξής:

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{2}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (2.20)$$

Αμελώντας τον κορεσμό, την υστέρηση και τα ρεύματα αυτεπαγωγής, και υποθέτοντας καθαρά ημιτονοειδή διανομή των κυμάτων της ροής, οι εξισώσεις της μηχανής σε λειτουργία γεννήτριας, γράφονται ως εξής στο πλαίσιο αναφοράς abc:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{abcs} &= -r_{abcs} \cdot \bar{i}_{abcs} - p \bar{\lambda}_{abcs} \\ \bar{V}_{abcr} &= -r_{abcr} \bar{i}_{abcr} - p \bar{\lambda}_{abcr} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\lambda}_{abcs} \\ \bar{\lambda}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{abcs} \\ \bar{i}_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Όπου:

$$\bar{\mathbf{L}}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{L}}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Ο πίνακας των αλληλεπαγωγών που αναπτύσσονται μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα είναι:

$$\bar{\mathbf{L}}_{sr} = \bar{\mathbf{L}}_{rs} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Ανάγονται τα μεγέθη του δρομέα στην πλευρά του στάτη:

$$i'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} i_{abcr}, \quad V'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} V_{abcr}, \quad \lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr}, \quad L_{ms} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{sr} \quad (2.25)$$

Έτσι, ορίζεται:

$$[\bar{\mathbf{L}}'_{sr}] = \frac{N_s}{N_r} [\bar{\mathbf{L}}_{sr}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Επιπλέον, ισχύει:

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 L_{ms}, \quad [\mathbf{L}'_r] = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 [\mathbf{L}_r] \quad (2.27)$$

Οπότε από τη σχέση (2.23) προκύπτει:

$$[\mathbf{L}'_r] = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Όπου :

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr}$$

Έτσι λοιπόν, οι εξισώσεις για την τάση και τη ροή του στάτη και του δρομέα (2.21, 2.22), ξαναγράφονται με όλα τα μεγέθη ανηγμένα στην πλευρά του στάτη:

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{r}_s - p\mathbf{L}_s & -p\mathbf{L}'_{sr} \\ -p(\mathbf{L}'_{sr})^T & -\mathbf{r}'_r - p\mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

και

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

όπου :

$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r$$

2.1.4.3.2 Εισαγωγή νέων συστημάτων αναφοράς

Η δυναμική συμπεριφορά της AC μηχανής είναι πολύ δύσκολο να αναλυθεί, επειδή τα τριφασικά τυλίγματα του δρομέα κινούνται σε σχέση με αυτά του στάτη, με αποτέλεσμα οι συντελεστές της μηχανής να μεταβάλλονται και οι εξισώσεις να είναι αρκετά πολύπλοκες. Μία αλλαγή μεταβλητών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί η πολυπλοκότητα των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων.

Πρώτος ο R.H.Park στη δεκαετία του 1920 εισήγαγε μια νέα θεωρία ανάλυσης των ηλεκτρικών μηχανών για να λύσει το προαναφερθέν πρόβλημα. Πρότεινε μια αλλαγή στις μεταβλητές, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα να αντικατασταθούν οι αρχικές μεταβλητές (τάσεις, ρεύματα, πεπλεγμένες ροές) που σχετίζονται με τα τυλίγματα του στάτη της σύγχρονης μηχανής, με μεταβλητές που σχετίζονται με εικονικά τυλίγματα στρεφόμενα μαζί με το δρομέα, με τη σύγχρονη ταχύτητα. Δηλαδή, μετασχημάτισε τις μεταβλητές του στάτη σε ένα σύγχρονο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, προσαρμοσμένο στο δρομέα, εξαλείφοντας τους χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές.

Αυτός ο μετασχηματισμός, που ονομάστηκε μετασχηματισμός του Park, έφερε επανάσταση στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών, καθώς κατάφερε να απαλείψει όλες τις εξαρτώμενες από το χρόνο επαγωγές από τις εξισώσεις τάσης της σύγχρονης μηχανής, οι οποίες οφείλονται είτε σε ηλεκτρικά κυκλώματα σε σχετική κίνηση είτε σε ηλεκτρικά κυκλώματα με μεταβλητή μαγνητική αντίσταση. Καθώς με το μετασχηματισμό Park οι επαγωγές δεν είναι πια χρονομεταβλητές, η ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών απλοποιείται αρκετά. Αργότερα, αποδείχτηκε ότι ο μετασχηματισμός γενικεύεται σε ένα πλαίσιο που στρέφεται με οποιαδήποτε ταχύτητα και απαλείφει όλες τις εξαρτώμενες από χρόνο επαγωγές, εκφράζοντας τις μεταβλητές του στάτη και του δρομέα σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, το γνωστό ως αυθαίρετο σύστημα αναφοράς (arbitrary reference frame) [17].

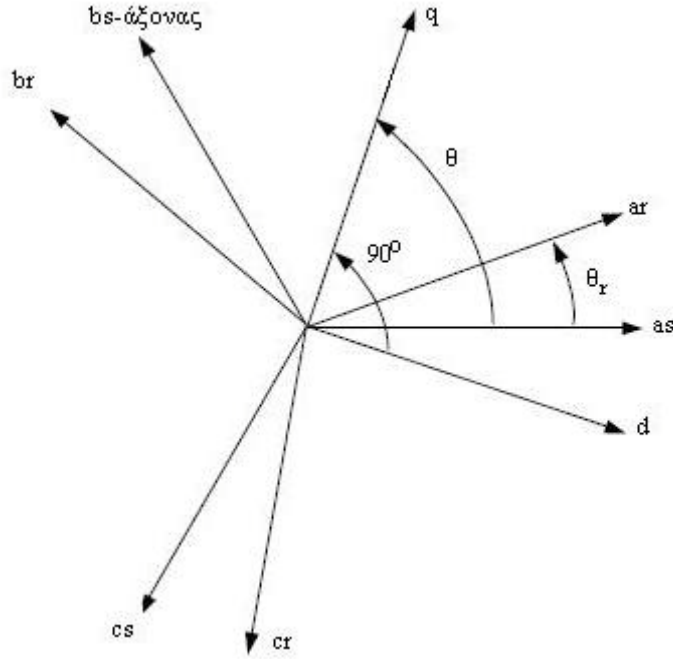
2.1.4.3.3 Μετασχηματισμός εξισώσεων της ΓΕΔΤ στο $dq\theta$ πλαίσιο

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την προσομοίωση της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης, είναι εκφρασμένο στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς και ως μεταβλητές κατάστασης χρησιμοποιούνται οι ροές των τυλιγμάτων. Ως μεταβλητές κατάστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα ρεύματα, μόνο που στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις κατάστασης περιέχουν δύο παραγωγίσεις. Έτσι, είναι πιο αξιόπιστο να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο με μεταβλητές κατάστασης τις ροές των τυλιγμάτων.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου, λαμβάνονται όλες τις εξισώσεις της ΓΕΔΤ ανηγμένες στην πλευρά του στάτη και στη συνέχεια, μετασχηματίζονται σε ένα $dq\theta$ σύστημα αναφοράς, το οποίο περιστρέφεται σε γωνιακή ταχύτητα ω_s , δηλαδή με τη γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του στάτη, κατά την κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα. Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου θεωρείται ότι:

- Ο q-άξονας (quadrature axis) είναι σε προπορεία 90° ως προς τον d-άξονα (direct axis), στην κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα.
- Υιοθετείται σύμβαση γεννήτριας, δηλαδή τα ρεύματα του στάτη είναι εξερχόμενα από τους αντίστοιχους ακροδέκτες και η ενεργός και η άεργος ισχύς έχουν θετικό πρόσημο όταν προσφέρονται στο δίκτυο.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι στρεφόμενοι άξονες d,q, στους οποίους θα μεταφερθούν οι μεταβλητές a,b,c του δρομέα και του στάτη, εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Park. Ο μηδενικός άξονας (zero axis) είναι κάθετος στη σελίδα. Πιο συγκεκριμένα, οι εξισώσεις της ΓΕΔΤ μετασχηματίζονται στο dq-πλαίσιο, χρησιμοποιώντας κατάλληλους πίνακες μετασχηματισμού.



Σχήμα 2.15: Μετασχηματισμός στο πλαίσιο dq0.

Για το στάτη, ο μετασχηματισμός στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\bar{\mathbf{f}}_{dq0s} = \mathbf{K}_s \bar{\mathbf{f}}_{abcs} \quad (2.31)$$

όπου:

$$\begin{aligned} (\bar{\mathbf{f}}_{dq0s})^T &= \begin{bmatrix} \bar{f}_{ds} & \bar{f}_{qs} & \bar{f}_{0s} \end{bmatrix} \\ (\bar{\mathbf{f}}_{abcs})^T &= \begin{bmatrix} \bar{f}_{as} & \bar{f}_{bs} & \bar{f}_{cs} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Το \mathbf{f} μπορεί να είναι ρεύμα, τάση ή πεπλεγμένη ροή.

Για τον πίνακα μετασχηματισμού των μεγεθών του στάτη ισχύει:

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Ο αντίστροφος πίνακας μετασχηματισμού των μεγεθών του στάτη αποδεικνύεται ότι είναι:

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta & 1 \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Η γωνία θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα q και του άξονα της φάσης a .

Ισχύει :

$$\theta = \int_0^t \omega_s(t) dt + \theta(0) \quad (2.34)$$

όπου $\theta(0)$ είναι η αρχική γωνία.

Αντίστοιχα, για το δρομέα, ο μετασχηματισμός στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\bar{\mathbf{f}}_{dq0r} = \mathbf{K}_r \bar{\mathbf{f}}_{abcr} \quad (2.35)$$

όπου :

$$\begin{aligned} (\bar{\mathbf{f}}_{dq0r})^T &= \begin{bmatrix} \bar{f}_{dr} & \bar{f}_{qr} & \bar{f}_{0r} \end{bmatrix} \\ (\bar{\mathbf{f}}_{abcr})^T &= \begin{bmatrix} \bar{f}_{ar} & \bar{f}_{br} & \bar{f}_{cr} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Για τον πίνακα μετασχηματισμού των μεγεθών του δρομέα ισχύει:

$$\mathbf{K}_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \beta & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \beta & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

και ο αντίστροφος πίνακας αποδεικνύεται ότι είναι:

$$(\mathbf{K}_r)^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \beta & \cos \beta & 1 \\ \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Η γωνία β ισούται με $\theta - \theta_r$, όπου θ_r η γωνία του δρομέα ως προς το στάτη στο abc-πλαίσιο.

Οπότε, οι εξισώσεις των τάσεων και των ροών μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{dq0s} &= \mathbf{K}_s \bar{V}_{abcs} \\ V'_{dq0r} &= \mathbf{K}_r \bar{V}'_{abcr} \end{aligned} \quad (2.38)$$

και πιο αναλυτικά:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= -r_s i_{ds} + \omega_s \lambda_{qs} - p \lambda_{ds} & V'_{dr} &= -r'_r i'_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda'_{qr} - p \lambda'_{dr} \\ V_{qs} &= -r_s i_{qs} - \omega_s \lambda_{ds} - p \lambda_{qs}, & V'_{qr} &= -r'_r i'_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda'_{dr} - p \lambda'_{qr} \\ V_{0s} &= -r_s i_{0s} - p \lambda_{0s} & V'_{0r} &= -r'_r i'_{0r} - p \lambda'_{0r} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Οπότε τελικά:

$$\begin{aligned} V_{dqs} &= -r_s i_{dqs} - j\omega_s \lambda_{dqs} - p\lambda_{dqs} \\ V'_{dqr} &= -r'_r i'_{dqr} - j(\omega_s - \omega_r) \lambda'_{dqr} - p\lambda'_{dqr} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Όπου ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

Για τις πεπλεγμένες ροές προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dq0s} \\ \lambda'_{dq0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_r)^{-1} \\ \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq0s} \\ i'_{dq0r} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

όπου

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} &= \begin{bmatrix} L_{ls} + M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M = \frac{3}{2} L_{ms} \\ \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} &= \begin{bmatrix} L'_{lr} + M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M = \frac{3}{2} L_{mr} \end{aligned}$$

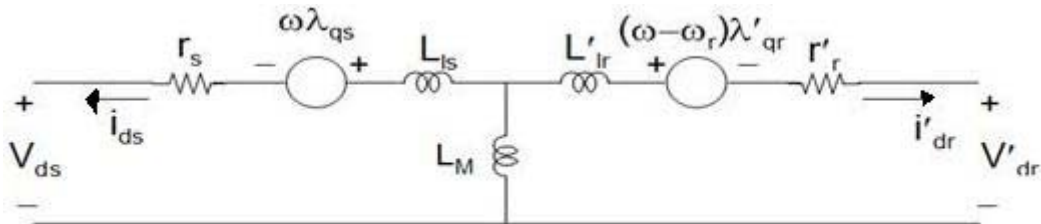
Επίσης, αποδεικνύεται ότι:

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_r)^{-1} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

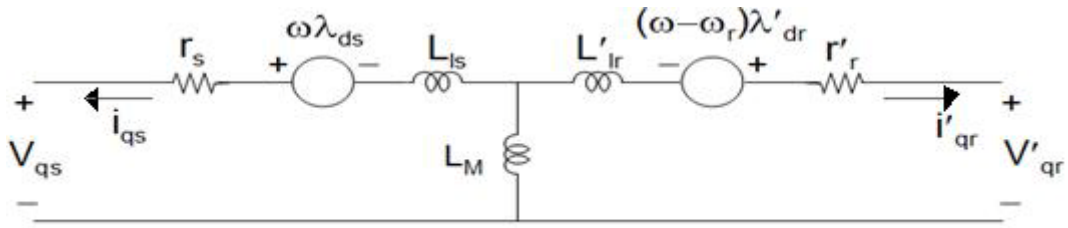
Οπότε τελικά,

$$\begin{aligned} \lambda_{dqs} &= L_{ls} i_{dqs} + M(i_{dqs} + i'_{dqr}) \\ \lambda'_{dqr} &= L'_{lr} i'_{dqr} + M(i_{dqs} + i'_{dqr}) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Ο άξονας μηδενικής συνιστώσας δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς το σύστημα που μελετάται είναι συμμετρικό τριφασικό και δε μελετώνται ασύμμετρα σφάλματα.



Σχήμα 2.16: Ισοδύναμο d κύκλωμα της Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.



Σχήμα 2.17: Ισοδύναμο q κύκλωμα της Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.

Όσο αφορά τη ροπή, αποδεικνύεται ότι η στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P}{2} (i_{abc_s})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} (L'_{sr}) i'_{abc_r} \\ &= \frac{P}{2} [(\mathbf{K}_s)^{-1} i_{dq0_s}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} (L'_{sr}) (\mathbf{K}_r)^{-1} i'_{dq0_r} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Μετά από πράξεις προκύπτει:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (2.45)$$

Άλλες ισοδύναμες εκφράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, συναρτήσκει πεπλεγμένων ροών και ρευμάτων του στάτη και του δρομέα, αντίστοιχα, είναι:

$$\begin{aligned} T_e &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ T_e &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \end{aligned} \quad (2.46)$$

2.1.4.3.4 Αναγωγή στο ανά μονάδα σύστημα

Ως τώρα, όλες οι εξισώσεις έχουν γραφτεί θεωρώντας ότι οι παράμετροι παίρνουν πραγματικές τιμές. Όμως, καθώς είναι σύνηθες να εκφράζονται οι παράμετροι της μηχανής και των συστημάτων ενέργειας σε ανά μονάδα τιμές, είναι απαραίτητο να μετατραπούν και οι εξισώσεις τάσης και πεπλεγμένης ροής της γεννήτριας στο ανά μονάδα σύστημα. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει πρώτα να οριστεί μια βάση, για καθένα μέγεθος. Συγκεκριμένα, για τις dq μεταβλητές, επιλέγονται οι παρακάτω βάσεις [15]:

Ως βάση τάσης επιλέγεται η μέγιστου πλάτους φασική τάση $V_b = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_N$, όπου V_N η ονομαστική τάση (RMS τιμή).

Ως βάση ισχύος επιλέγεται η $S_b = S_N$, όπου S_N είναι η ονομαστική τριφασική ισχύς της γεννήτριας επαγωγής.

Η βάση έντασης είναι το μέγιστου πλάτους φασικό ρεύμα, $I_b = \frac{\sqrt{2} S_N}{\sqrt{3} V_N}$ και η βασική αντίσταση η $Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_N^2}{S_N}$.

Επιπλέον, επιλέγεται ως βασική ταχύτητα η ονομαστική ταχύτητα της γεννήτριας $\omega_N = 2\pi f_N$, οπότε η βάση ροπής είναι $T_b = \frac{P S_N}{2 \omega_N}$.

Τέλος, καθώς η ροή μετριέται σε Wb, η βάση ροής είναι $\lambda_b = \frac{V_b}{\omega_b} = \frac{V_N \sqrt{2}}{\omega_N \sqrt{3}}$.

Με βάση τα παραπάνω, οι εξισώσεις τάσεων της ΓΕΔΤ, στο dq πλαίσιο, μετατρέπονται στο ανά μονάδα σύστημα ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{dqs} &= -r_s i_{dqs} - j \frac{\omega_s}{\omega_N} \psi_{dqs} - \frac{1}{\omega_N} p \psi_{dqs} \\ V'_{dqr} &= -r'_r i'_{dqr} - j \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_N} \psi'_{dqr} - \frac{1}{\omega_N} p \psi'_{dqr} \end{aligned} \quad (2.47)$$

Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών εκφράζονται ανά δευτερόλεπτο:

$$\begin{aligned} \psi_{dqs} &= X_{ls} i_{dqs} + X_m (i_{dqs} + i'_{dqr}) \\ \psi'_{dqr} &= X'_{lr} i'_{dqr} + X_m (i_{dqs} + i'_{dqr}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

Οι επαγωγικές αντιδράσεις X προκύπτουν εάν οι επαγωγές πολλαπλασιαστούν με τη βασική γωνιακή ταχύτητα και έχουν μονάδα το 1Ω , ενώ οι πεπλεγμένες ροές έχουν αντικατασταθεί από πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο, Ψ , και έχουν μονάδα το 1Volt.

Η εξίσωση της ροπής, με όλα τα μεγέθη εκφρασμένα ανά μονάδα, γίνεται στο ανά μονάδα σύστημα:

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (2.49)$$

2.1.4.3.5 Μοντελοποίηση της Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

Όπως με το μηχανικό μοντέλο δύο μαζών της Α/Γ, για να προσομοιωθεί η λειτουργία μιας συμμετρικής γεννήτριας επαγωγής στον υπολογιστή, είναι απαραίτητο να γραφτούν οι εξισώσεις της υπό τη γενική μορφή $\dot{x} = f(x, u, t)$. Ξαναγράφονται, λοιπόν, οι εξισώσεις (2.47) στην κατάλληλη μορφή:

$$\begin{aligned} \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} &= -V_{ds} - r_s i_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \\ \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} &= -V_{qs} - r_s i_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \\ \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} &= -V'_{dr} - r'_r i'_{dr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{qr} \\ \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} &= -V'_{qr} - r'_r i'_{qr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{dr} \end{aligned} \quad (2.50)$$

Προκειμένου να γίνει πιο απλή η διαδικασία της μοντελοποίησης, γίνονται οι εξής παραδοχές:

$$\begin{aligned}
 V_R &= \gamma V_r' \\
 i_R &= i_r' / \gamma \\
 \psi_R &= \gamma \psi_r' \\
 r_R &= \gamma^2 r_r' \\
 X_S &= \gamma X_{ls} + \gamma^2 X_{lr}' \\
 X_M &= \gamma X_m
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

Όπου συμβολίζεται:

$$\gamma = \frac{X_{ls} + X_m}{X_m}$$

Οπότε, οι εξισώσεις (2.48) γίνονται:

$$\begin{aligned}
 \psi_s &= X_M (i_s + i_R) \\
 \psi_R &= \psi_s + X_S i_R
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

Οι εξισώσεις λειτουργίας της μηχανής έχουν αναχθεί στο χώρο κατάστασης. Ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων καθώς και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, όπως υπολογίζεται στο μοντέλο δύο μαζών. Οπότε, δεδομένου ότι η μηχανή που θα μελετηθεί δε διαθέτει τυλίγματα αποσβέσεως, τελικά το μοντέλο είναι πέμπτου βαθμού, με μεταβλητές κατάστασης τις $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}, \omega_r$.

Έτσι, λοιπόν, το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης περιλαμβάνει καταρχήν τις εξισώσεις του στάτη, όπου είσοδος είναι η τάση και η σύγχρονη ταχύτητα του δικτύου, στο οποίο συνδέεται απευθείας ο στάτης, καθώς και το ρεύμα του στάτη. Αντίστοιχα, στις εξισώσεις του δρομέα δίνονται είσοδοι η σύγχρονη ταχύτητα του δικτύου, η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας όπως υπολογίζεται από το μηχανικό μοντέλο δύο μαζών, το ρεύμα του δρομέα καθώς και η ελεγχόμενη τάση του δρομέα, στην οποία γίνεται αναφορά σε επόμενη παράγραφο. Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο, όπως προκύπτουν από τις παραπάνω εξισώσεις, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ρευμάτων στάτη και δρομέα, και ανατροφοδοτούν τις εξισώσεις υπολογισμού των ροών.

Στο σημείο αυτό, από την τάση του δικτύου, τη τάση του δρομέα και τα ρεύματα στάτη και δρομέα, μπορεί να υπολογιστεί και η συνολική ενεργή και άεργος ισχύς που παράγεται συνολικά από τη ΓΕΔΤ.

$$P = \text{Re}\{V_s I_s^* + V_r I_r^*\} = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} + V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \tag{2.53}$$

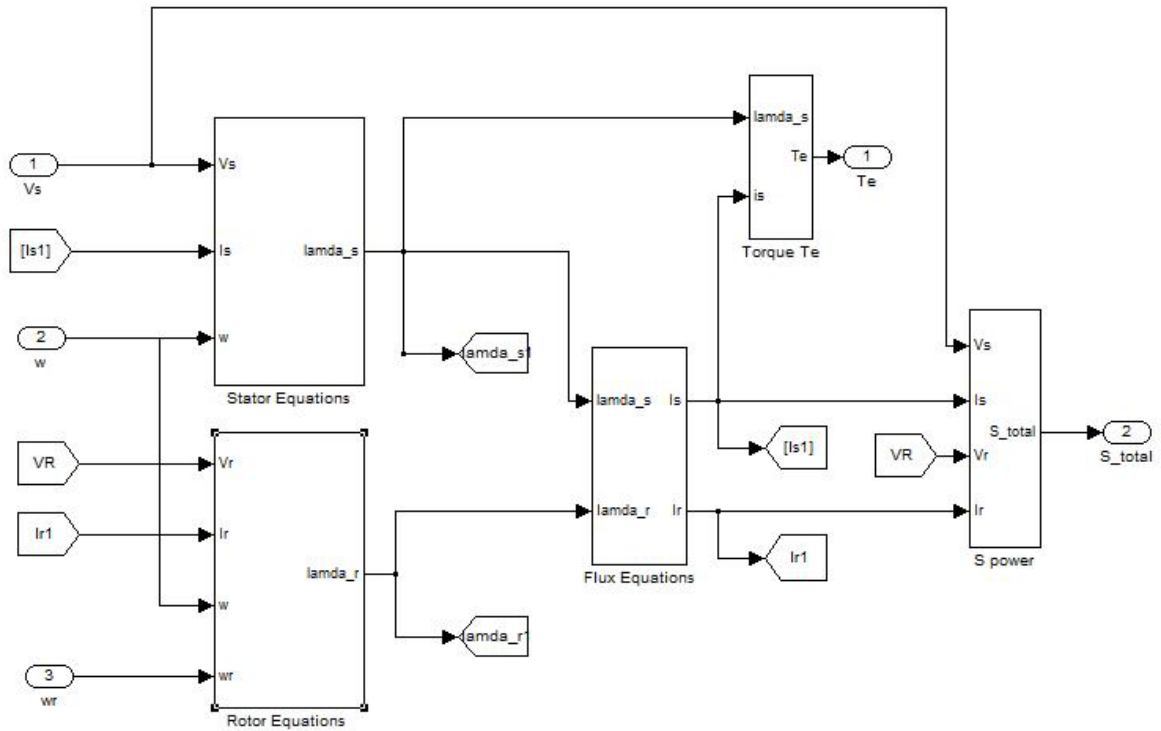
$$Q = \text{Im}\{V_s I_s^* + V_r I_r^*\} = -V_{ds} I_{qs} + V_{qs} I_{ds} - V_{dr} I_{qr} + V_{qr} I_{dr} \tag{2.54}$$

Ακόμη, μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική ροπή, όπως δίνεται από τη σχέση (2.49):

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}.$$

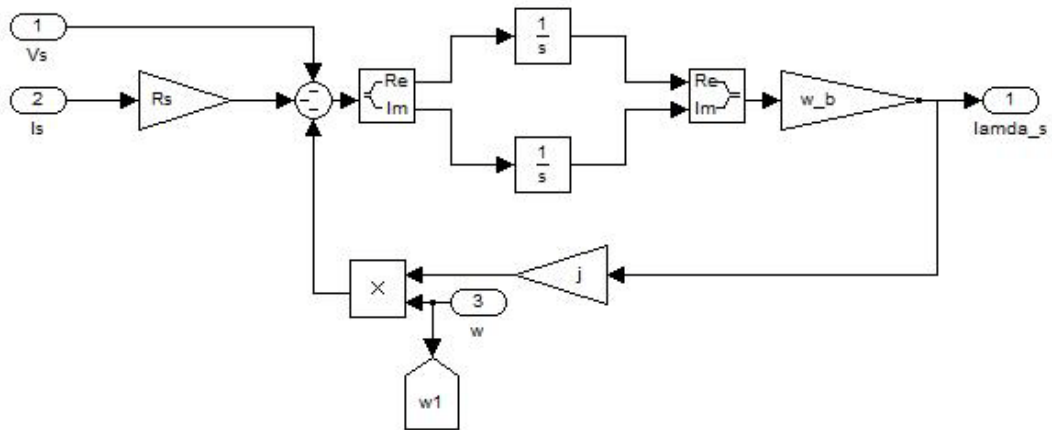
Ισχύει $Re\{j\psi_s i_s\} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}$, οπότε με την πεπλεγμένη ροή του στάτη ανά δευτερόλεπτο και το ρεύμα στάτη, όπως προκύπτει από το μοντέλο της ΓΕΔΤ, υπολογίζεται και η ηλεκτρική ροπή.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται το μοντέλο της Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης, που κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, σε ανά μονάδα τιμές.

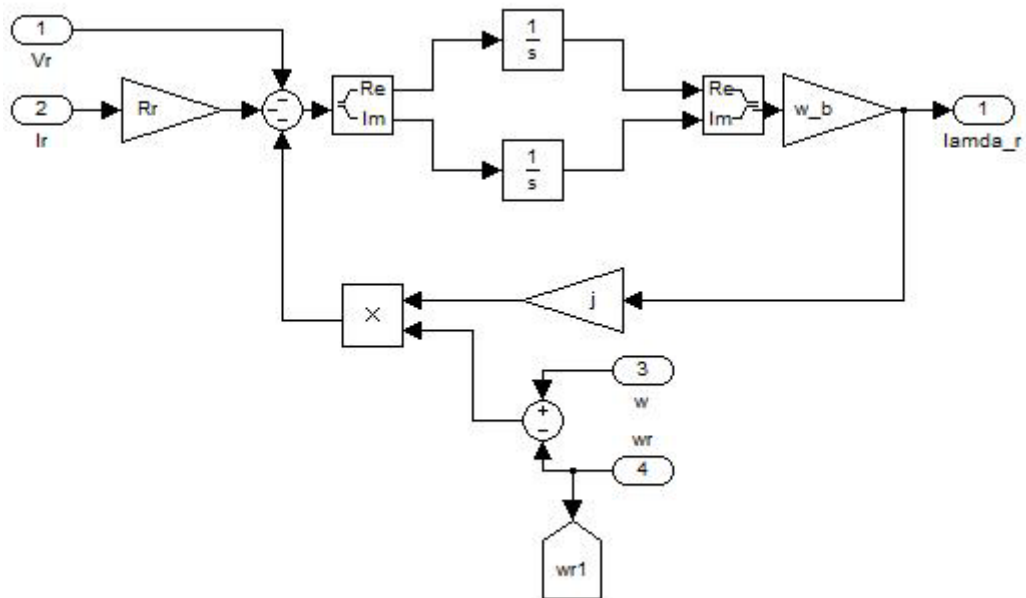


Σχήμα 2.18: Μοντέλο Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.

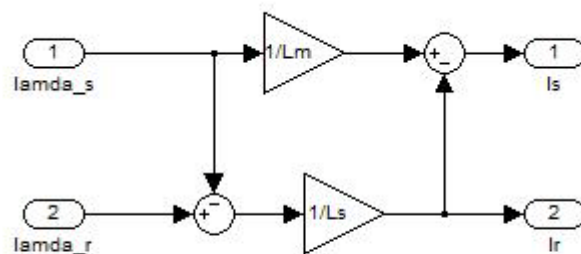
Τα επιμέρους υποσυστήματα του μοντέλου της ΓΕΔΤ, παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν:



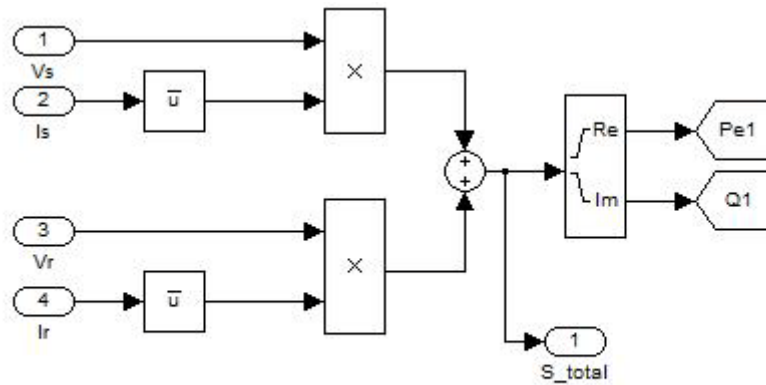
Σχήμα 2.19: Μοντέλο υπολογισμού της ροής του στάτη.



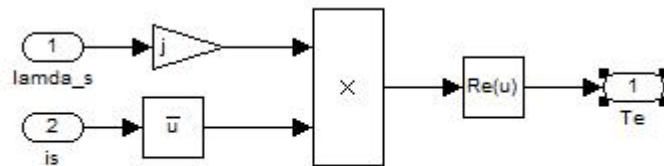
Σχήμα 2.20: Μοντέλο υπολογισμού της ροής του δρομέα.



Σχήμα 2.21: Μοντέλο υπολογισμού των ρευμάτων στάτη και δρομέα.



Σχήμα 2.22: Μοντέλο υπολογισμού ισχύος της ΓΕΔΤ.



Σχήμα 2.23: Μοντέλο υπολογισμού της ηλεκτρικής ροπής.

2.1.5 Συστήματα ελέγχου της Α/Γ

2.1.5.1 Έλεγχος γωνίας βήματος έλικας (pitch control)

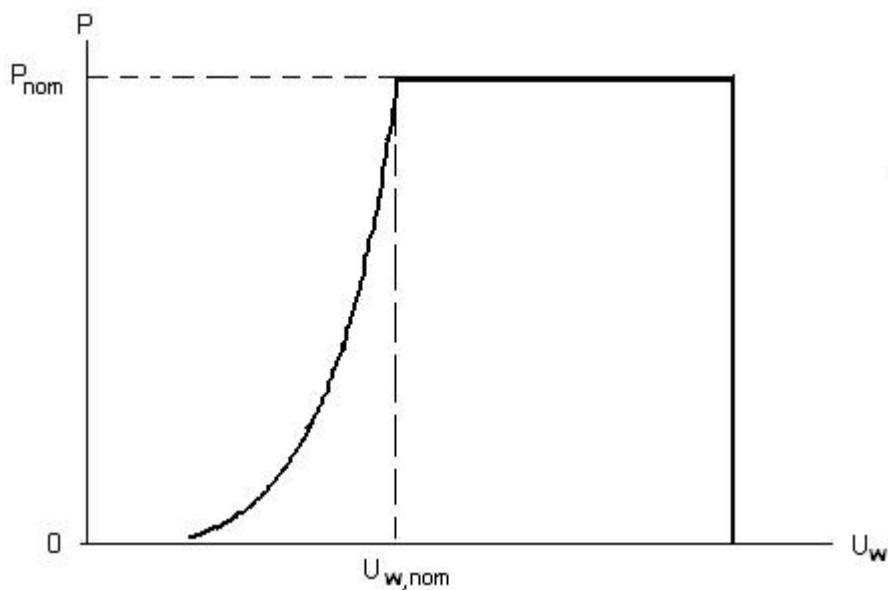
Προκειμένου η Α/Γ να λειτουργεί σε ασφαλείς συνθήκες και στη μέγιστη απόδοση, σύστημα ελέγχου προσαρμόζει τη λειτουργία της ανάλογα με τις συνθήκες ανέμου που επικρατούν. Για ανέμους με ταχύτητα πάνω από την ονομαστική, πρέπει να περιοριστεί η παραγωγή μηχανικής ισχύος, ώστε να μην ξεπεράσει η Α/Γ τα ονομαστικά της μεγέθη. Η τεχνική, η οποία χρησιμοποιείται σε Α/Γ μεταβλητών στροφών – μεταβλητού βήματος, στηρίζεται στον έλεγχο της γωνίας του βήματος και είναι η εξής:

- Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ταχύτητας εισόδου και μικρότερες της ονομαστικής, δηλαδή στην περιοχή ταχυτήτων ανέμου από V_{cut-in} μέχρι $V_{w,nom}$, η Α/Γ αρχίζει να παράγει ωφέλιμο έργο. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, η γωνία του βήματος της έλικας παραμένει σταθερή και ίση με 0° , ή μικρότερη. Η Α/Γ λειτουργεί θεωρητικά υπό συνθήκες μεγιστοποίησης της παραγόμενης αεροδυναμικής ισχύος, γεγονός που, σύμφωνα με τη σχέση (2.2), σημαίνει ότι η Α/Γ παράγει ισχύ υπό βέλτιστο C_p , $C_{p,opt} = 0.4382$, (για τα αεροδυναμικά δεδομένα

της παρούσας εργασίας), το οποίο επιτυγχάνεται διατηρώντας το λόγο λ σε σταθερή τιμή $\lambda_{opt} = 6.32498$. Οπότε, σύμφωνα με τη σχέση (2.3), η ταχύτητα του δρομέα αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου.

- Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής και μέχρι την ταχύτητα αποκοπής $V_{cut-out}$, η Α/Γ λειτουργεί υπό τεχνική περιορισμού της παραγόμενης ισχύος στην ονομαστική τιμή της, μέσω του ελέγχου βήματος έλικας, που προκαλεί μείωση της τιμής του C_p .
- Σε ταχύτητες ανέμου πάνω από την ταχύτητα αποκοπής, $V_{cut-out}$, η Α/Γ τίθεται εκτός λειτουργίας προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτισή της.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει η καμπύλη ταχύτητας ανέμου και μηχανικής ισχύος:

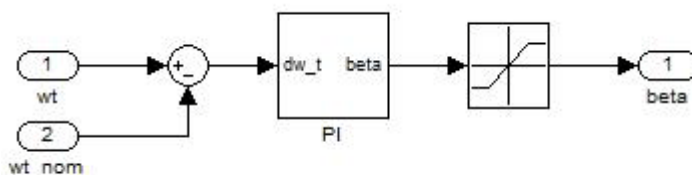


Σχήμα 2.24: Καμπύλη ισχύος της Α/Γ.

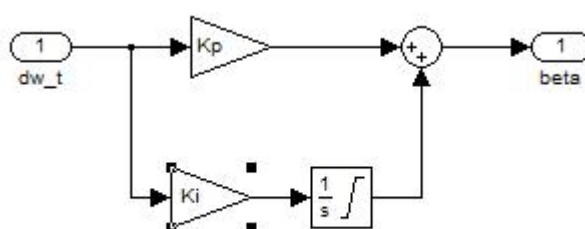
Για να επιτευχθεί λοιπόν η λειτουργία μέγιστης απομάστευσης ισχύος που περιγράφηκε παραπάνω, πρέπει να ελεγχθεί η γωνία β , ώστε να παίρνει την κατάλληλη τιμή κάθε φορά. Κατά την μοντελοποίηση του ελέγχου του βήματος στο Simulink, χρησιμοποιείται αναλογικός-ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής, ο οποίος δέχεται στην είσοδό του το σφάλμα μεταξύ της μετρούμενης ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ και της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής της, δηλαδή της ονομαστικής. Όταν το σφάλμα είναι αρνητικό, ο ελεγκτής δίνει μηδενική γωνία αναφοράς, ενώ όταν είναι θετικό ο ελεγκτής διαμορφώνει τέτοια γωνία βήματος ώστε οι στροφές της Α/Γ να επανέλθουν στις ονομαστικές. Κατά αυτό τον τρόπο, σε περιπτώσεις ανέμου με ταχύτητα πάνω της ονομαστικής, περιορίζεται η ταχύτητα του δρομέα στην ονομαστική της τιμή και η εισερχόμενη αεροδυναμική ισχύς ρυθμίζεται στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Η έξοδος του ελεγκτή περνάει από έναν περιοριστή, με όρια 0° και 90° . Σε επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας, ο έλεγχος της γωνίας βήματος θα

συμπληρωθεί, προκειμένου να ανταποκρίνεται στο στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο, όπως κατασκευάστηκε στο Simulink.



Σχήμα 2.25: Μοντέλο ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων



Σχήμα 2.26: PI ελεγκτής της γωνίας του βήματος

2.1.5.2 Έλεγχος ενεργού και άεργους ισχύος

2.1.5.2.1 Εισαγωγή στο διανυσματικό έλεγχο

Πριν την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, ο έλεγχος περιοριζόταν αποκλειστικά στο μηχανικό μέρος. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μετατροπέων συχνότητας με ηλεκτρονικά ισχύος, δίνεται πλέον η δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλου τμήματος του ελέγχου της Α/Γ μέσω του ηλεκτρικού συστήματος, οπότε ο έλεγχος γίνεται πιο ευέλικτος αλλά και πιο αξιόπιστος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις ΓΕΔΤ, ο μετατροπέας συχνότητας, μέσω των οποίων συνδέεται ο δρομέας στο δίκτυο, επιτυγχάνει τον έλεγχο της ισχύος, κατά ένα επιλεχθέν ποσοστό. Στην παρούσα μελέτη δε μοντελοποιήθηκε κάποια διάταξη μετατροπέα, αλλά εντάχθηκε ο έλεγχος της ισχύος στο μοντέλο της ΓΕΔΤ και επιτεύχθηκε εξολοκλήρου μέσω του δρομέα.

Όμως, όπως είναι γνωστό, το πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής δεν ευνοεί την ανάπτυξη συμβατικών τεχνικών ελέγχου για τον έλεγχο της, λόγω της μη γραμμικότητάς του και των επαγωγών της μηχανής, που μεταβάλλονται καθώς αυτή στρέφεται. Η θεωρία του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στην αξιοποίηση του μετασχηματισμού του Park και στην επιλογή ενός κατάλληλου dq πλαισίου, προκειμένου να

αποσυζευχθούν οι εξισώσεις της μηχανής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η απλοποίηση του μοντέλου της μηχανής σε ένα σύστημα εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί τεχνικές διανυσματικού ελέγχου, με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη, του δρομέα ή του διακένου. Σύμφωνα με την κλασική στρατηγική διανυσματικού ελέγχου, που θα εφαρμοστεί και στην παρούσα εργασία, το πλαίσιο αναφοράς για τον διανυσματικό έλεγχο είναι προσανατολισμένο κατά τη θέση του διανύσματος ροής του στάτη, οπότε η συνιστώσα q της ροής αυτής μηδενίζεται. Με άλλα λόγια, ο άξονας d του πλαισίου αναφοράς ορίζεται από τη θέση της μαγνητικής ροής στάτη, με αποτέλεσμα να απαλείφεται η μια από τις μεταβλητές κατάστασης (η συνιστώσα q της μαγνητικής ροής του στάτη) και να απλοποιούνται σημαντικά οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της γεννήτριας [16].

2.1.5.2.2 Έλεγχος της ενεργούς ισχύος

Η ενεργός ισχύς P μπορεί να ελεγχθεί μέσω της ηλεκτρικής ροπής, αφού ισχύει η σχέση:

$$P = T_e \cdot \omega_r \quad (2.55)$$

Ξαναγράφεται η έκφραση για την ηλεκτρική ροπή, με όλα τα μεγέθη σε ανά μονάδα τιμές:

$$T_e = \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}$$

Ισχύει:

$$\vec{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} = \lambda_s \cdot e^{j\varphi} \quad (2.56)$$

Εάν στραφεί το διάνυσμα λ_s κατά τη γωνία $e^{-j\varphi}$, τότε μηδενίζεται η q συνιστώσα της ροής του στάτη και ισχύει $\lambda_s = \lambda'_{ds}$, όπου με τόνο συμβολίζεται κάθε μέγεθος στο στραμμένο πλαίσιο.

Οπότε στο στραμμένο πλαίσιο ισχύει για την ροπή:

$$T_e = \lambda'_{ds} i'_{qs} \quad (2.57)$$

Όμως ισχύει από τη σχέση (2.43) $\lambda'_s = L_{ls} i'_s + M(i'_s + i'_r)$, οπότε:

$$\begin{aligned} \lambda'_{ds} &= L_{ls} i'_{ds} + M(i'_{ds} + i'_{dr}) \\ \lambda'_{qs} &= 0 \Rightarrow i'_{qs} = -\frac{M}{L_{ls} + M} i'_{qr} \end{aligned} \quad (2.58)$$

Από τη σχέση (2.58) προκύπτει ότι:

$$i'_{qs} \propto -i'_{qr}$$

Και συνεπώς ισχύει:

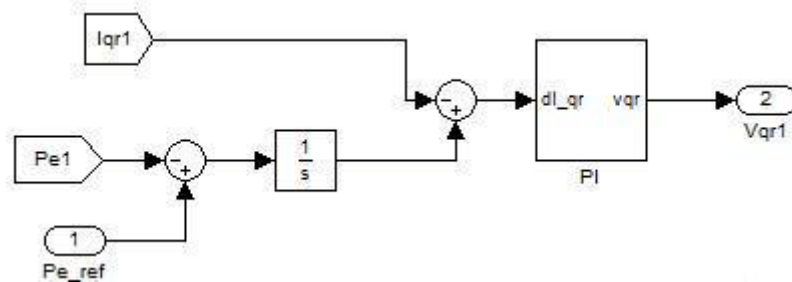
$$T_e \propto -\psi'_{ds} i'_{qr} \quad (2.59)$$

Θεωρώντας ότι ψ'_{ds} είναι περίπου σταθερό καθώς επιβάλλεται από το δίκτυο και ίσο με ψ_s , προκύπτει ότι:

$$\Delta T_e \propto -\Delta i'_{qr} \quad (2.60)$$

Επομένως, ελέγχοντας την q συνιστώσα του ρεύματος δρομέα, μπορεί να ελεγχθεί η ηλεκτρική ροπή και συνεπώς η ενεργός ισχύς.

Κατά τη μοντελοποίηση, συγκρίνεται η πραγματική ισχύς με ένα σήμα αναφοράς, και από αυτή τη διαφορά προκύπτει ένα σήμα αναφοράς της q συνιστώσα του ρεύματος δρομέα. Αυτό με τη σειρά του συγκρίνεται με την πραγματική τιμή του ρεύματος και το σήμα που προκύπτει περνάει μέσα από έναν ελεγκτή PI, από όπου εξάγεται τελικά η q συνιστώσα της τάσης του δρομέα. Βέβαια, αρχικά το ρεύμα έχει στραφεί κατά τη γωνία $-\varphi$, όπως προαναφέρθηκε, και στο τέλος η τάση που προκύπτει επαναφέρεται στο αρχικό πλαίσιο με στροφή κατά τη γωνία φ .



Σχήμα 2.27: Μοντέλο ελέγχου της ενεργούς ισχύος στο στραμμένο πλαίσιο.

2.1.5.2.3 Έλεγχος της άεργου ισχύος

Η ύπαρξη μετατροπέα εναλλασσομένου-συνεχούς-εναλλασσομένου στην πλευρά του δρομέα και η υπόθεση ότι ο αντιστροφέας προς την πλευρά του δικτύου διαχειρίζεται μόνο ενεργό ισχύ αποδίδοντας μηδενική άεργο, συνεπάγεται ότι η άεργος ισχύς της A/Γ ισούται με αυτή του στάτη. Ως εκ τούτου και ξαναγράφοντας την εξίσωση (2.54) με όλα τα μεγέθη στραμμένα στο νέο πλαίσιο dq, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο αυτής της εργασίας, προκύπτει:

$$Q = V'_{qs} I'_{ds} - V'_{ds} I'_{qs} \quad (2.61)$$

Οι εξισώσεις των τάσεων του στάτη ξαναγράφονται, αγνοώντας τα μεταβατικά φαινόμενα της ροής του στάτη ως καλυπτόμενα απ' τον έλεγχο:

$$V'_{ds} = -r_s i'_{ds} + \omega_s \lambda'_{qs} \quad (2.62)$$

$$V'_{qs} = -r_s i'_{qs} - \omega_s \lambda'_{ds} \quad (2.63)$$

Από τη σχέση (2.58) ισχύει $\lambda'_{qs} = 0$ και επιπλέον, αμελώντας τις ωμικές απώλειες, οι εξισώσεις της τάσης του στάτη γίνονται:

$$V'_{ds} = 0 \quad (2.64)$$

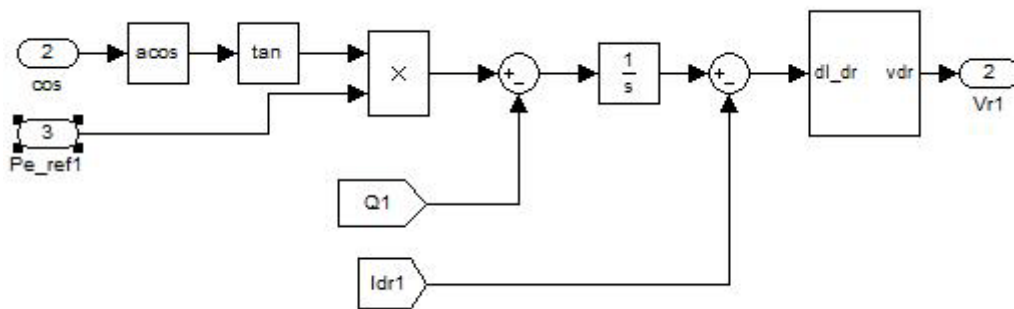
$$V'_{qs} = -\omega_s \lambda'_{ds} \quad (2.65)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις και από την έκφραση (2.58) για τις ροές στο στραμμένο πλαίσιο, προκύπτει:

$$i'_{dr} = -\frac{V'_{q,s} \omega_b}{M \omega_s} - \frac{(L_{ls} + M) \cdot Q}{V'_{q,s} M} \quad (2.66)$$

Συνεπώς η άεργος ισχύς της Α/Γ μπορεί να οδηγηθεί από τον έλεγχο ρεύματος στο στραμμένο πραγματικό άξονα.

Κατά τη μοντελοποίηση, όπως και στον έλεγχο της πραγματικής ισχύος, συγκρίνεται η μετρούμενη άεργος ισχύς με ένα σήμα αναφοράς, και από αυτή τη διαφορά προκύπτει ένα σήμα αναφοράς της d συνιστώσα του ρεύματος δρομέα. Αυτό με τη σειρά του συγκρίνεται με την πραγματική τιμή του ρεύματος και το σήμα που προκύπτει περνάει μέσα από έναν ελεγκτή PI, από όπου εξάγεται τελικά η d συνιστώσα της τάσης του δρομέα. Και πάλι έχουν πραγματοποιηθεί οι κατάλληλες στροφές στα μεγέθη του δρομέα.



Σχήμα 2.28: Μοντέλο ελέγχου της άεργης ισχύος στο στραμμένο πλαίσιο.

Η τιμή αναφοράς της άεργης ισχύος, όπως φαίνεται και στο μοντέλο, προκύπτει από τη σχέση που συνδέει την ενεργό και την άεργο ισχύ, για φιλοσοφία ελέγχου σταθερού συντελεστή ισχύος:

$$Q_{ref} = P_{ref} \tan \varphi \quad (2.67)$$

2.1.5.2.4 Look-up table έλεγχου μέγιστης απομαστευόμενης ισχύος

Κατά την πραγματοποίηση του ελέγχου της ενεργής και της άεργης ισχύος, η ΓΕΔΤ θα απορροφά όλη την ισχύ που είναι διαθέσιμη από το μηχανικό μέρος της Α/Γ. Ακολουθείται, δηλαδή, στρατηγική μέγιστης απομαστευόμενης ισχύος.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προκειμένου να λειτουργεί η Α/Γ υπό συνθήκες μέγιστης απομάστευσης ισχύος, ακολουθείται η εξής τεχνική:

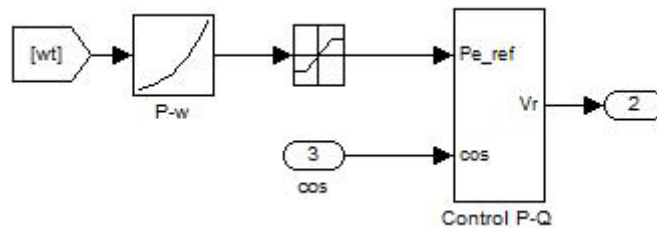
- Για ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής, η Α/Γ λειτουργεί υπό βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή, που επιτυγχάνεται για $\lambda = \lambda_{opt}$ και γωνία $\beta = 0^\circ$. Ισχύει η σχέση (2.3), και αντικαθιστώντας την ταχύτητα ανέμου στη σχέση (2.2), προκύπτει:

$$P_M = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p_max} \cdot \left(\frac{\lambda_{opt} \cdot \omega_R}{R} \right)^3 \quad (2.68)$$

- Για ταχύτητες ανέμου πάνω της ονομαστικής, η Α/Γ πρέπει να λειτουργεί ελεγχόμενα, ώστε να περιορίζεται η ταχύτητα του δρομέα στις ονομαστικές τιμές και να σταθεροποιείται η παραγόμενη ισχύς στην ονομαστική της τιμή. Για το σκοπό αυτό ενεργοποιείται ο έλεγχος της γωνίας βήματος των πτερυγίων.

$$P_M = P_N \quad (2.69)$$

Με βάση τα παραπάνω, κατασκευάστηκε Look-up table που με είσοδο την ταχύτητα του δρομέα, δίνει σαν έξοδο τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ κάθε στιγμή. Αυτή η τιμή, χρησιμοποιείται σαν σήμα αναφοράς ενεργούς ισχύος για τη ΓΕΔΤ. Στην έξοδο του Look-up table χρησιμοποιείται ένας περιοριστής, ώστε να περιοριστεί η τιμή αναφοράς στην ονομαστική ισχύ. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι το εξής:



Σχήμα 2.29: Έλεγχος μέγιστης απομαστευόμενης ισχύος.

2.1.6 Σύνδεση Α/Γ στο ηλεκτρικό δίκτυο

2.1.6.1 Γενικά στοιχεία

Η σύνδεση των Α/Γ σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), του οποίου η ισχύς των συμβατικών μονάδων παραγωγής που λειτουργούν είναι πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ των Α/Γ, επιφέρει επιπτώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται σε αυτή την παράγραφο. Προκειμένου να συνδεθούν Α/Γ στο δίκτυο, πρέπει να πληρούνται κάποια κριτήρια, τα οποία θα εξασφαλίζουν ότι οι διαταραχές που θα προκληθούν θα είναι εντός επιτρεπών ορίων [5].

Η ποιότητα ισχύος χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή όταν τηρούνται τα χαρακτηριστικά της τάσης που ορίζουν εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί. Σημαντικότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι οι αργές και οι ταχείες μεταβολές της τάσης, το flicker και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης, τα οποία αποτελούν και κριτήρια εξέτασης της δυνατότητας

σύνδεσης στο δίκτυο. Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων παραγωγής, όπως οι Α/Γ, είτε πρόκειται για το δίκτυο μέσης τάσης (στο εξής ΜΤ), είτε για το δίκτυο χαμηλής τάσης (στο εξής ΧΤ), πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

Η βασικότερη προϋπόθεση για τη σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής στο δίκτυο είναι η επάρκεια των στοιχείων του δικτύου (υποσταθμού, μετασχηματιστών και γραμμών). Εάν οι υπάρχουσες γραμμές δεν επαρκούν ή προκύπτουν ανεπίτρεπτες διαταραχές της τάσης, τότε εξετάζονται οι παρακάτω λύσεις:

- Ενίσχυση του υφιστάμενου δικτύου ΜΤ
- Απ' ευθείας σύνδεση στους ζυγούς ΜΤ του υποσταθμού (στο εξής Υ/Σ) ΥΤ/ΜΤ μέσω αποκλειστικής γραμμής
- Προσθήκη νέου Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ
- Κατασκευή νέου Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ

Υπάρχουν δύο βασικοί περιορισμοί ως προς το επίπεδο τάσης που μπορεί να συνδεθεί μια εγκατάσταση παραγωγής Α/Γ:

- Εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 100 kW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο ΧΤ.
- Εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 20 MW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο ΜΤ.

Στη συγκεκριμένη εργασία ενδιαφέρει η σύνδεση στο δίκτυο ΜΤ, η οποία και αναλύεται παρακάτω.

Επιπρόσθετα βασικά κριτήρια που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων μονάδων παραγωγής στο δίκτυο, είναι τα ακόλουθα:

- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Αργές μεταβολές της τάσης, στη μόνιμη κατάσταση
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές flicker
- Εκπομπές αρμονικών

Επιπλέον, πρέπει να ελέγχονται οι πιθανές επιπτώσεις που θα επιφέρει η σύνδεση Α/Γ, κατά τη διάρκεια μη ομαλής λειτουργίας του δικτύου, όπως στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, οπότε η ύπαρξή τους μπορεί να προκαλέσει μη ανεκτές καταπονήσεις των στοιχείων του δικτύου. Τέλος, πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο να δημιουργηθούν επικίνδυνες

καταστάσεις απομονωμένης λειτουργίας κάποιου τμήματος του δικτύου, το οποίο θα απομονωθεί από την κύρια τροφοδότηση, και θα τροφοδοτείται μόνο από τις Α/Γ, με τάση και συχνότητα που θα απέχουν πολύ από τις ονομαστικές τιμές τους, θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.

2.1.6.2 Σύνδεση στο δίκτυο MT

Η σύνδεση εγκατάστασης παραγωγής στο δίκτυο γίνεται μέσω διάταξης ζεύξης, η οποία πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα διακοπής ρεύματος φορτίου, να περιλαμβάνει τρόπο ορατής απόζευξης και να είναι ανά πάσα στιγμή προσιτή στο προσωπικό της ΔΕΗ. Για την επιλογή των διατάξεων ζεύξης πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέγιστη ισχύς βραχυκύκλωσης, στην οποία συμβάλλει τόσο το δίκτυο όσο και οι μονάδες των γεννητριών.

Ως ισχύ βραχυκύκλωσης S_c σε ένα σημείο του δικτύου ορίζεται η ονομαστική τάση επί την ένταση που θα εμφανιστεί αν στο σημείο αυτό συμβεί πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα. Η ισχύς βραχυκύκλωσης αποτελεί ένα μέτρο για το κατά πόσο το δίκτυο είναι ισχυρό στο σημείο σύνδεσης της εγκατάστασης παραγωγής. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς βραχυκύκλωσης, τόσο ισχυρότερο είναι το δίκτυο και τόσο μικρότερη πτώση τάσης προκαλείται από τη σύνδεση.

Η ζεύξη των εγκαταστάσεων παραγωγής στο δίκτυο είναι δυνατή μόνο όταν η τάση και η συχνότητα του δικτύου είναι κοντά στις ονομαστικές τιμές και συγκεκριμένα διαφέρουν από αυτές λιγότερο από τα όρια ρύθμισης των σχετικών προστασιών τάσης και συχνότητας. Ασύγχρονες γεννήτριες, όπως αυτές που χρησιμοποιούν οι Α/Γ του αιολικού πάρκου αυτής της διπλωματικής, είναι προτιμότερο να συνδέονται χωρίς τάση, με αριθμό στροφών μεταξύ 95% και 105 % των σύγχρονων, μέσω διάταξης ομαλής εκκίνησης. Για σύγχρονες γεννήτριες απαιτείται διάταξη συγχρονισμού, η οποία εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες συγχρονισμού, δηλαδή διαφορά τάσης μικρότερη από 10%, διαφορά συχνότητας μικρότερη από 0.5 Hz και διαφορά φασικής γωνίας μικρότερη από 10°.

Φυσικά, για την προστασία της εγκατάστασης του παραγωγού αλλά και όλων των συνδεδεμένων εγκαταστάσεων, απαιτείται η τοποθέτηση συστήματος προστασίας απόζευξης, που εξασφαλίζει την άμεση απόζευξη της όταν εμφανιστούν ανεπίτρεπτες διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας. Μέσω της προστασίας απόζευξης αποτρέπεται η νησιδοποίηση τμήματος του δικτύου που έχει απομονωθεί από το υπόλοιπο δίκτυο, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει την εμφάνιση σοβαρών υπερεντάσεων, ιδιαίτερα στην περίπτωση ασύγχρονων γεννητριών που αυτοδιεγείρονται, καθώς και να θέσει σε κίνδυνο το προσωπικό που εργάζεται στο δίκτυο. Το σύστημα προστασίας απόζευξης περιλαμβάνει τουλάχιστον προστασίες υπότασης, υπέρτασης, υποσυχνότητας και υπερσυχνότητας. Η επιτήρηση της

τάσης πρέπει να γίνεται και στις τρεις φάσεις, ώστε να ανιχνεύονται ακόμη και μονοφασικές διαταραχές. Η επιτήρηση της συχνότητας αρκεί να γίνεται σε μία μόνο φάση.

2.1.6.3 Αργές μεταβολές της τάσης

Οι αργές μεταβολές της τάσης προκαλούνται λόγω της αλλαγής στη ροή των φορτίων κατά τη λειτουργία των Α/Γ. Πρόκειται για μεταβολές της τάσης μόνιμης κατάστασης, οι οποίες εκφράζονται από μέσες τιμές 10 min της τάσης (όπως προβλέπεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 50160) και μπορεί να οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής ή σε μεταβολές του φορτίου του δικτύου. Συχνά χρησιμοποιείται η εκατοστιαία μεταβολή της τάσης, $\varepsilon(\%)$, η οποία εκφράζει τη μεταβολή της τάσης ανηγμένη επί της ονομαστικής τάσης του δικτύου:

$$\varepsilon(\%) = 100 \cdot \frac{\Delta U}{U_N} \quad (2.70)$$

Εάν ΔU είναι η προκαλούμενη μεταβολή της τάσης επί της σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης του δικτύου $\widetilde{Z}_k = R_k + jX_k$, λόγω του ρεύματος των εγκαταστάσεων, τότε πρέπει να χρησιμοποιείται η ονομαστική φασική τάση, οπότε:

$$\varepsilon(\%) = 100 \cdot \frac{\Delta U}{(U_N/\sqrt{3})} \quad (2.71)$$

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160, στο δίκτυο ΜΤ οι αποκλίσεις της μέσης τιμής 10 min της τάσης, $\varepsilon(\%)$, πρέπει να μην υπερβαίνουν το 10% της ονομαστικής τάσης για το 95% του χρόνου μέτρησης, ο οποίος ορίζεται ίσος με 1 εβδομάδα.

Όταν εξετάζεται η σύνδεση μιας εγκατάστασης παραγωγής ή περισσότερων, σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου ή σε πολύ κοντινά σημεία, η διαδικασία εξέτασης γίνεται σε δύο στάδια. Αν από τους προσεγγιστικού υπολογισμούς του πρώτου σταδίου εξέτασης προκύψει ότι παραβιάζονται τα τιθέμενα όρια, τότε απαιτείται η λεπτομερέστερη εξέταση του δεύτερου σταδίου, αλλιώς επιτρέπεται η σύνδεση του παραγωγού, όσον αφορά τους περιορισμούς των αργών μεταβολών της τάσης. Το δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται απ' ευθείας όταν εξετάζεται η σύνδεση στο δίκτυο περισσότερων του ενός παραγωγών με διαφορετικά σημεία σύνδεσης, καθώς και σε περιπτώσεις δικτύων με σημαντικά μήκη υπόγειων ή υποβρύχιων καλωδίων, όπου η τάση είναι ήδη σημαντικά αυξημένη.

❖ Προσεγγιστική μέθοδος

Στο σημείο κοινής σύνδεσης (στο εξής ΣΚΣ), δηλαδή το πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο του δικτύου, υπολογίζεται ο λόγος βραχυκύκλωσης R_k :

$$R_k = \frac{S_k}{S_{mcA}} \quad (2.72)$$

Όπου S_k είναι η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου στο ΣΚΣ και S_{mCA} η μέγιστη τιμή μόνιμης κατάστασης της φαινόμενης ισχύος εξόδου της εγκατάστασης παραγωγής (μέση τιμή 10 min). Εάν η εγκατάσταση παραγωγής περιλαμβάνει περισσότερες από μία μοναδιαίες εγκαταστάσεις, όπως στην παρούσα διπλωματική εργασία που εξετάζεται αιολικό πάρκο με τρεις Α/Γ, ισχύει $P_{mCA} = \sum_{i=1}^N P_{mCE,i}$ και $Q_{mCA} = \sum_{i=1}^N Q_{mCE,i}$, οπότε από το άθροισμά τους υπολογίζεται η S_{mCA} . Εάν, λοιπόν, ικανοποιείται η συνθήκη $R_k \geq 33$, τότε οι προκαλούμενες μεταβολές της τάσης θεωρούνται αποδεκτές και η σύνδεση επιτρέπεται.

Όταν η σύνθετη αντίσταση του δικτύου είναι σημαντικά επαγωγική, με τον παραπάνω υπολογισμό περιορίζεται η επιτρεπόμενη ισχύς των εγκαταστάσεων περισσότερο από όσο πραγματικά απαιτείται. Στην περίπτωση αυτή, η αναμενόμενη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ μπορεί να εκτιμηθεί από την προσεγγιστική σχέση:

$$\varepsilon(\%) = 100 \frac{S_{mCA}}{S_k} \cdot \cos(\psi_k + \varphi_A) = \frac{100}{R_k} \cos(\psi_k + \varphi_A) \quad (2.73)$$

όπου $\psi_k = \tan^{-1} \left(\frac{X_k}{R_k} \right)$ είναι η φασική γωνία της σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως του δικτύου $\widetilde{Z}_k = R_k + jX_k$, και $\varphi_A = \tan^{-1} \left(-\frac{Q_A}{P_A} \right)$ είναι η φασική γωνία του ρεύματος στην έξοδο των εγκαταστάσεων παραγωγής, όπου έχει θεωρηθεί σύμβαση γεννήτριας, δηλαδή το ρεύμα θεωρείται εξερχόμενο από την εγκατάσταση και η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι θετικές όταν παράγονται από την εγκατάσταση.

Η υπολογιζόμενη από τη σχέση (2.73) μεταβολή της τάσης πρέπει να είναι κατ' απόλυτη τιμή μικρότερη του 3%, οπότε:

$$|\varepsilon| \leq 3\% \leftrightarrow S_{mCA} \leq \frac{S_k}{33|\cos(\psi_k + \varphi_A)|} \quad (2.74)$$

❖ Ακριβής μέθοδος

Όταν παραβιάζονται τα όρια της προσεγγιστικής μεθόδου ή σε σύνθετες περιπτώσεις δικτύων, όταν εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης περισσότερων του ενός παραγωγών, η εξέταση πρέπει να γίνει με τον υπολογισμό ροής φορτίου στο εξεταζόμενο δίκτυο. Συγκεκριμένα, πρέπει να υπολογιστούν τέσσερις ροές φορτίου, για τις ακραίες λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος:

- 1) Μέγιστο φορτίο-Ελάχιστη παραγωγή
- 2) Μέγιστο φορτίο-Μέγιστη παραγωγή
- 3) Ελάχιστο φορτίο-Ελάχιστη παραγωγή
- 4) Ελάχιστο φορτίο-Μέγιστη παραγωγή

Οι καταστάσεις ελάχιστης και μέγιστης παραγωγής αφορούν το σύνολο των εγκαταστάσεων παραγωγής που είναι συνδεδεμένες ή θα συνδεθούν στο δίκτυο. Οι χρησιμοποιούμενες ισχύεις εξόδου των εγκαταστάσεων πρέπει να είναι οι μέγιστες τιμές ισχύος μόνιμης κατάστασης

(τιμές 10 λεπτών, P_{mcA} και Q_{mcA} , για κάθε εγκατάσταση). Για την κατάσταση ελάχιστης παραγωγής θεωρείται ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής είναι εκτός λειτουργίας. Τέλος, στις καταστάσεις μέγιστου και ελάχιστου φορτίου χρησιμοποιούνται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές 10 min του φορτίου του υπό εξέταση δικτύου, κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Από τις ροές φορτίου για τις τέσσερις καταστάσεις, προκύπτουν η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της τάσης κάθε κόμβου j , $U_{min,j}$ και $U_{max,j}$.

Τα κριτήρια που τίθενται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση των εγκαταστάσεων παραγωγής στα θεωρούμενα σημεία σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΣΔ) είναι τα ακόλουθα:

- Η μέση τάση κάθε κόμβου, $U_{med,j}$, δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο του 5% από την ονομαστική:

$$0.95 \cdot U_N \leq U_{med,j} = \frac{U_{min,j} + U_{max,j}}{2} \leq 1.05 \cdot U_N \quad (2.75)$$

- Η διακύμανση της τάσης, ΔU , περί τη μέση τιμή $U_{med,j}$, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% της ονομαστικής τάσης κατ' απόλυτη τιμή, δηλαδή :

$$2 \cdot \Delta U = U_{max,j} - U_{min,j} \leq 0.06 \cdot U_N \quad (2.76)$$

2.1.6.4 Ταχείες μεταβολές της τάσης-Flicker

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160, ταχείες μεταβολές της τάσης είναι οποιεσδήποτε γρήγορες μεταβολές της ενδεικνύμενης (RMS) τιμής της, οι οποίες συμβαίνουν σε χρονικές κλίμακες από 1 κύκλο έως αρκετά δευτερόλεπτα, και οπωσδήποτε εντός διαστήματος μικρότερου των 10 min. Ταχείες μεταβολές συμβαίνουν λόγω χειρισμών στις εγκαταστάσεις παραγωγής, όπως ζεύξη-απόζευξη των Α/Γ στο δίκτυο, ή και εξαιτίας της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων, που οφείλονται σε μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ή και σε συνεχείς ταλαντώσεις.

Με τον όρο flicker, ορίζεται η προκαλούμενη οπτική ενόχληση από τις διακυμάνσεις της φωτεινότητας λαμπτήρων πυρακτώσεως, εξαιτίας αντίστοιχων διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας τους, που μπορεί να προκληθεί κατά τη λειτουργία εγκαταστάσεων παραγωγής. Κατά την εξέταση των γρήγορων μεταβολών, πρέπει να εκτιμώνται το μέγεθος των αναμενόμενων μεταβολών της τάσης στο ΣΚΣ καθώς και οι προκαλούμενες εκπομπές flicker, χειρισμού αλλά και κανονικής λειτουργίας.

2.1.6.4.1 Χειρισμοί

Η προκαλούμενη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ εξαιτίας των χειρισμών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα αντίστοιχα όρια, τα οποία εξαρτώνται από την αναμενόμενη συχνότητα

χειρισμών r . Δυσμενέστερη περίπτωση χειρισμών είναι συνήθως οι χειρισμοί ζεύξης, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση.

Η προκαλούμενη μεταβολή της τάση λόγω χειρισμών d_{max} (%), υπολογίζεται ως εξής:

$$d_{max} (\%) = 100 \cdot k \cdot \frac{S_{nE}}{S_k} \quad (2.77)$$

Όπου S_{nE} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της μοναδιαίας εγκατάστασης για την οποία το γινόμενο $k \cdot S_{nE}$ είναι μέγιστο. Ο συντελεστής k πρέπει να τίθεται ίσος με το συντελεστή μεταβολής της τάσης, $k_U(\psi_k)$, της μοναδιαίας εγκατάστασης, ο οποίος για αιολικές εγκαταστάσεις δίνεται στο σχετικό πιστοποιητικό δοκιμών για το δυσμενέστερο από πλευράς επιπτώσεων στην τάση χειρισμό και είναι εκφρασμένος συναρτήσει της γωνίας βραχυκύκλωσης του δικτύου.

Εκτός από τον περιορισμό της μέγιστης βύθισης τάσης, πρέπει ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται και ότι το προκαλούμενο flicker εξαιτίας χειρισμών στις εγκαταστάσεις παραγωγής δεν υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση. Ορίζεται flicker βραχείας διάρκειας P_{st} το μέτρο της προκαλούμενης οπτικής διαταραχής λόγω flicker για χρονικό διάστημα παρατήρησης 10 λεπτών, με κατώφλι ενόχλησης την τιμή 1. Επιπλέον, ορίζεται το flicker μακράς διάρκειας P_{lt} ως το μέτρο της οπτικής ενόχλησης λόγω flicker για χρονικό διάστημα παρατήρησης 120 λεπτών. Η τιμή του δείκτη αυτού προκύπτει από τις διαδοχικές τιμές του P_{st} σε 12 διαστήματα των 10 λεπτών, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st,i})^3} \quad (2.78)$$

Στην περίπτωση όπου οι επιμέρους τιμές $P_{st,i}$ είναι ίσες μεταξύ τους, όπως κατά την κανονική λειτουργία Α/Γ, τότε $P_{lt} = P_{st}$.

Πρέπει, λοιπόν, να ελέγχεται αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί $P_{st} \leq E_{P_{st}}$ και $P_{lt} \leq E_{P_{lt}}$, όπου $E_{P_{st}}$, $E_{P_{lt}}$ είναι αντίστοιχα τα όρια εκπομπών flicker βραχείας και μακράς διάρκειας για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση.

Σε δίκτυα ΜΤ, τα συνολικά διαθέσιμα όρια flicker, για το σύνολο των εγκαταστάσεων που συνδέονται στο συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου, είναι $G_{P_{st}} = 0.79$ και $G_{P_{lt}} = 0.63$. Εάν στο δίκτυο ΜΤ δε συνδέονται άλλες εγκαταστάσεις παραγωγών ή καταναλωτών οι οποίες προκαλούν διαταραχή flicker, τότε τα παραπάνω όρια μπορούν να διατεθούν εξ ολοκλήρου στην υπό εξέταση εγκατάσταση, οπότε $E_{P_{st}} = G_{P_{st}} = 0.79$ και $E_{P_{lt}} = G_{P_{lt}} = 0.63$. Όμως, εάν στο δίκτυο ΜΤ ενδέχεται να συνδεθούν και άλλες εγκαταστάσεις που ίσως προκαλέσουν διαταραχή flicker, το συνολικά διαθέσιμο όριο πρέπει να κατανεμηθεί μεταξύ τους, ανάλογα προς την ονομαστική τους ισχύ.

Το flicker που προκαλείται εξαιτίας των χειρισμών μιας Α/Γ δίνεται από τις εξής σχέσεις:

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0.31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_N}{S_k} \quad (2.79)$$

$$P_{lt} = 8 \cdot N_{120}^{0,31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_N}{S_k} \quad (2.80)$$

όπου $N_{10}^{0,31}$ και $N_{120}^{0,31}$ είναι ο μέγιστος αριθμός χειρισμών εντός περιόδου 10 και 120 λεπτών, αντίστοιχα, που δίνεται στο πιστοποιητικό δοκιμών και $k_f(\psi_k)$ ο συντελεστής flicker χειρισμών της Α/Γ, που δίνεται επίσης στο πιστοποιητικό δοκιμών, ως συνάρτηση της γωνίας ψ_k της σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης του δικτύου.

Για εγκατάσταση αιολικού πάρκου, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$P_{st\Sigma} = \frac{18}{S_k} \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10,i} \cdot (k_{f,i}(\psi_k) \cdot S_{N,i})^{3,2} \right]^{0,31} \quad (2.81)$$

$$P_{lt\Sigma} = \frac{8}{S_k} \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120,i} \cdot (k_{f,i}(\psi_k) \cdot S_{N,i})^{3,2} \right]^{0,31} \quad (2.82)$$

όπου N_{wt} είναι ο αριθμός των Α/Γ του αιολικού πάρκου και ο δείκτης i υποδηλώνει τα μεγέθη της Α/Γ i .

Εάν δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός των δεικτών flicker της εγκατάστασης, τότε ο περιορισμός των εκπομπών flicker κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια επιτυγχάνεται περιορίζοντας τη συχνότητα των χειρισμών, ώστε $r \leq \frac{3.5}{d_{max}^3}$ χειρισμοί/λεπτό. Επιπλέον, διαδοχικοί χειρισμοί πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 1.5 λεπτά μεταξύ τους.

2.1.6.4.2 Κανονική λειτουργία

Όπως και για τους χειρισμούς, έτσι και για την κανονική λειτουργία της εγκατάστασης πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι εκπομπές flicker διατηρούνται εντός των ορίων, $E_{P_{st}}$, $E_{P_{lt}}$, τα οποία είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά των χειρισμών. Ο υπολογισμός των δεικτών flicker, στην περίπτωση εγκατάστασης μιας Α/Γ, γίνεται από τη σχέση:

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k, v_a) \cdot \frac{S_N}{S_k} \quad (2.83)$$

όπου $c(\psi_k, v_a)$ είναι ο συντελεστής flicker της Α/Γ, ο ποίος δίνεται στο πιστοποιητικό μετρήσεων της Α/Γ υπό μορφή πίνακα, για μια σειρά τιμών της γωνίας της σύνθετης αντίστασης ψ_k του δικτύου στο ΣΚΣ και της μέσης ετήσιας ταχύτητας v_a του ανέμου, μετρούμενης στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ.

Εάν εξετάζεται η εγκατάσταση αιολικού πάρκου με περισσότερες Α/Γ, τότε ο συνολικός δείκτης flicker στο ΣΚΣ προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \cdot S_{N,i})^2} \quad (2.84)$$

2.1.6.5 Εκπομπές αρμονικών

Λόγω της ύπαρξης μη γραμμικών στοιχείων και φορτίων, η τάση του δικτύου παρουσιάζει πάντα απόκλιση από την ιδεατή καθαρά ημιτονοειδή κυματομορφή, και το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με την κυματομορφή των ρευμάτων. Αυτές οι κυματομορφές μπορούν να

αναλυθούν κατά Fourier σε σειρά ημιτονοειδών συνιστωσών διαφορετικών συχνοτήτων, που αποτελούν τις αρμονικές συνιστώσες του εξεταζόμενου μεγέθους. Η βασική αρμονική συνιστώσα συχνότητας 50 Hz ονομάζεται θεμελιώδης συνιστώσα, ενώ οι συνιστώσες των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους ονομάζονται αρμονικές. Όταν η προς σύνδεση εγκατάσταση παραγωγής διαθέτει διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, απαιτείται έλεγχος των αρμονικών. Ενδιαφέρουν οι εκπομπές αρμονικών μόνο κατά την κανονική λειτουργία των εγκαταστάσεων και όχι για τις μεταβατικές περιόδους διάρκειας λίγων δευτερολέπτων. Η τήρηση των ορίων αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης εξασφαλίζεται όταν ικανοποιείται ο παρακάτω περιορισμός για όλες τις αρμονικές συνιστώσες, τάξης $h \leq 40$ του ρεύματος εξόδου:

$$I_h \leq L_h \cdot S_k \cdot \frac{S_A}{S_t} \quad (2.85)$$

Όπου:

I_h : η μέγιστη τιμή της αρμονικής συνιστώσας τάξης h του ρεύματος εξόδου κατά την κανονική λειτουργία της εγκατάστασης (σε A), που δίνεται στο πιστοποιητικό δοκιμών του προς εγκατάσταση εξοπλισμού και αναφέρεται στην πλευρά MT

L_h : το ανηγμένο όριο εκπομπών αρμονικών ρεύματος (σε A/MVA) που προκύπτει από γνωστό πίνακα, ανάλογα με την ονομαστική τάση του δικτύου και την τάξη της αρμονικής συνιστώσας

S_k : η ισχύς βραχυκύκλωσης (σε MVA) στο ΣΚΣ της εγκατάστασης

S_A : η ονομαστική ισχύς εγκαταστάσεων που συνδέονται (ή αναμένεται να συνδεθούν)

S_t : η συνολική ισχύς εγκαταστάσεων που συνδέονται (ή αναμένεται να συνδεθούν) στο δίκτυο MT και οι οποίες προκαλούν αρμονική παραμόρφωση

Εάν η εγκατάσταση παραγωγής περιλαμβάνει περισσότερες της μίας μοναδιαίες εγκαταστάσεις που προκαλούν αρμονική παραμόρφωση, τότε το ρεύμα I_h της σχέσης (2.85) πρέπει να είναι το συνολικό αρμονικό ρεύμα εξόδου τάξης h της εγκατάστασης παραγωγής, που προκύπτει από τις αρμονικές εντάσεις των επιμέρους εγκαταστάσεων σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες άθροισης αρμονικών. Στην περίπτωση που τα τιθέμενα όρια παραβιάζονται, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα περιορισμού των εκπομπών αρμονικών, όπως εγκατάσταση φίλτρων, ή να επιλέγεται σημείο σύνδεσης με υψηλότερη ισχύ βραχυκύκλωσης.

2.1.6.6 Ενδιάμεσες και υψίσυχνες αρμονικές

Συνιστώσες της ανάλυσης Fourier, των οποίων η συχνότητα δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους, ονομάζονται ενδιάμεσες αρμονικές. Για τις εκπομπές ενδιάμεσων αρμονικών συχνότητας κάτω των 2 kHz ($h < 40$, $h \neq$ ακέραιος), μπορεί να χρησιμοποιείται το όριο της σχέσης (2.85), οπότε, το κριτήριο ελέγχου διαμορφώνεται ως εξής:

$$I_h \leq L_h \cdot S_k \quad (2.86)$$

Με την εφαρμογή του ορίου αυτού εξασφαλίζεται γενικά ότι η προκαλούμενη αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου είναι μικρότερη του 0.1-0.2% της ονομαστικής.

Οι υψίσυχνες αρμονικές συνιστώσες, αυτές, δηλαδή, που ανήκουν στην περιοχή συχνοτήτων 2-9 kHz, ενδιαφέρουν κυρίως για την αξιολόγηση διατάξεων που διαθέτουν μετατροπείς ισχύος με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM). Τότε, το όριο της προκαλούμενης αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης, συμπεριλαμβανομένων και των ενδιάμεσων αρμονικών, τίθεται ίσο με 0.2% της ονομαστικής τάσης. Η τήρηση αυτού του ορίου εξασφαλίζεται όταν ικανοποιείται η συνθήκη (1.2.4-1), όπου το όριο L_h λαμβάνεται διπλάσιο από αυτό των ενδιάμεσων αρμονικών χαμηλής συχνότητας, δηλαδή $L_h = 0.06/h$ για τάση δικτύου 20 kV και $L_h = 0.08/h$ για τάση 15 kV.

2.2 Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας

2.2.1 Ανάγκη για Ρ.Φ.Σ.

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ρύθμιση τάσης και συχνότητας αποτελεί θεμελιώδες πρόβλημα. Προκειμένου να διατηρείται το σύστημα ευσταθές και να λειτουργεί ομαλά, πρέπει να υπάρχουν διατάξεις που ρυθμίζουν την τάση και τη συχνότητα, ώστε να διατηρούνται σε σταθερές τιμές. Η ρύθμιση της συχνότητας γίνεται μέσω της ενεργούς ισχύος, ενώ η ρύθμιση της τάσης γίνεται μέσω της άεργης ισχύος.

Όσο αφορά τη συχνότητα, που ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη εργασία, η διατήρησή της σε συγκεκριμένο πεδίο τιμών είναι πολύ σημαντική για την αξιοπιστία του δικτύου. Οι διακυμάνσεις προκαλούνται από διαφορές ανάμεσα στην παραγόμενη και τη ζητούμενη ισχύ. Οπότε, η ρύθμιση της συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί συνεχώς την κανονική της τιμή. Αν δεν υπάρχει ρύθμιση και αυξηθεί το φορτίο παραπάνω από την παραγόμενη ισχύ, θα αυξηθεί η ηλεκτρομαγνητική αντιρροπή με αποτέλεσμα να επιβραδυνθούν οι δρομείς των γεννητριών και να μειωθεί η συχνότητα του συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση του φορτίου τροφοδοτείται αρχικά από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων γεννητριών, οπότε η μείωση των στροφών θα είχε ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται το ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης σε συχνότητα χαμηλότερη της ονομαστικής. Αναλόγως, αν μειωθεί το φορτίο, ο δρομέας επιταχύνεται και η συχνότητα αυξάνεται. Στη μόνιμη κατάσταση η τιμή της συχνότητας ταλαντώνεται γύρω από την ονομαστική της τιμή, δηλαδή γύρω από την τιμή

των 50 Hz . Τόσο η υποσυχνότητα όσο και η υπερσυχνότητα είναι ανεπιθύμητες καταστάσεις, που προκαλούν προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του συστήματος [16].

Η υποσυχνότητα προκύπτει από την απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής ή την αύξηση του φορτίου. Στην περίπτωση πτώσης της συχνότητας, οι μονάδες που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα υφίστανται σοβαρή καταπόνηση, καθώς καλούνται να αναλάβουν το επιπλέον φορτίο και να υπερφορτωθούν, ενώ παράλληλα η ψύξη τους μειώνεται εξαιτίας της συνεπακόλουθης μείωσης των στροφών τους. Επιπλέον, είναι πιθανόν να επικρατήσουν χαμηλές τάσεις στο σύστημα, γεγονός που θα ενεργοποιήσει τους ρυθμιστές τάσεως των μονάδων, με αποτέλεσμα να προχωρήσουν σε αύξηση της διέγερσης. Οι συνθήκες αυτές τείνουν να προκαλέσουν υπερθέρμανση είτε του στάτη είτε του δρομέα, και με αυτόν τον τρόπο υπάρχει κίνδυνος απώλειας κάποιας μονάδας εξαιτίας της λειτουργίας κάποιας προστασίας, όπως η υπερθέρμανση στάτη, η υπερθέρμανση δρομέα, η υποδιέγερση κλπ. Δεδομένου ότι το σύστημα βρίσκεται ήδη σε συνθήκες έλλειψης παραγωγής, απώλεια οποιασδήποτε επιπλέον μονάδας θα επιδεινώσει την ήδη κρίσιμη κατάσταση και ίσως οδηγήσει σε αλληπάλληλες απώλειες μονάδων, μέχρι την τελική γενική διακοπή του συστήματος (black out).

Η υπερσυχνότητα είναι αποτέλεσμα περίσσειας παραγωγής, η οποία μπορεί να προκύψει από αντίστοιχη απώλεια φορτίου. Στην κατάσταση αυτή, λόγω των υψηλών στροφών αυξάνεται η ψύξη των μονάδων παραγωγής και οι τάσεις του συστήματος να βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα, γεγονός που θα ενεργοποιήσει τους ρυθμιστές τάσεως των μονάδων να λειτουργήσουν προς την κατεύθυνση μείωσης των τάσεων. Απώλεια οποιασδήποτε μονάδας θα λειτουργήσει θετικά για τις υπόλοιπες, δεδομένου ότι θα συμβάλλει στη γρήγορη αποκατάσταση συνθηκών ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, όμως, είναι δυνατόν κάτω από ορισμένες συνθήκες το σύστημα να οδηγηθεί σε αστάθεια, να μειωθεί η αδράνειά του και οι μονάδες παραγωγής να χωριστούν σε ομάδες και να αποσυγχρονιστούν μεταξύ τους [19].

Όσον αφορά την πτώση συχνότητας, προκειμένου να μην παρατηρούνται τα παραπάνω φαινόμενα, οι γεννήτριες δεν παράγουν την μέγιστη δυνατή ισχύ, ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης διατηρώντας στρεφόμενη εφεδρεία, αυξάνοντας και την ισχύ και επιτυγχάνοντας P.Φ.Σ.

2.2.2 Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα P.Φ.Σ.

Η εξισορρόπηση παραγόμενης ισχύος και φορτίου και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, οι οποίοι ελέγχουν τη μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές. Υπάρχουν δυο επίπεδα ελέγχου της συχνότητας, η πρωτεύουσα ρύθμιση για μια βραχυχρόνια

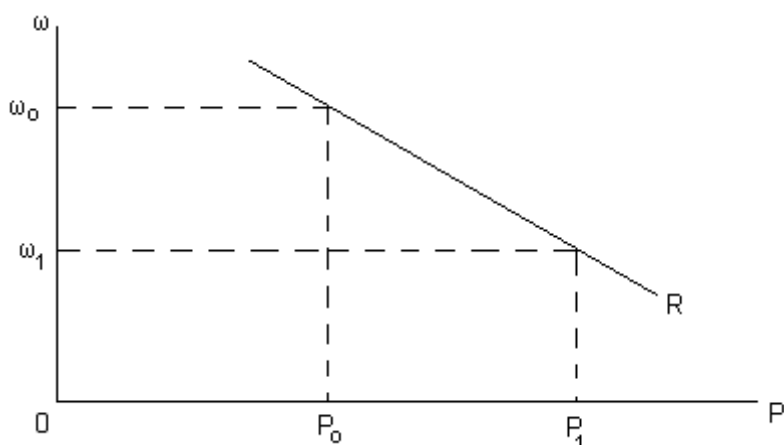
προσαρμογή της ισχύος και η δευτερεύουσα ρύθμιση για την εξάλειψη των μόνιμων σφαλμάτων.

Η πρωτεύουσα ρύθμιση γίνεται σε κάθε μονάδα παραγωγής ξεχωριστά και βασικό ρόλο σε αυτή διαδραματίζει ο ρυθμιστής στροφών. Αναφέρεται κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται βραχυχρόνια προσαρμογή της ισχύος. Όταν αυξηθεί το φορτίο, οι στρεφόμενες γεννήτριες δίνουν κινητική ενέργεια για να το καλύψουν, και γι' αυτό μειώνονται οι στροφές τους και συνεπώς η συχνότητα. Με το ρυθμιστή στροφών, όμως, ελέγχεται η μηχανική ισχύς που παράγεται στις γεννήτριες ώστε να ανταποκρίνεται στη ζήτηση φορτίου και έτσι, να σταθεροποιείται η συχνότητα. Είσοδος του ρυθμιστή είναι η συχνότητα περιστροφής και έξοδός του η παραγόμενη ισχύς.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση αναφέρεται σε μακροχρόνιες μεταβολές της ισχύος και αντισταθμίζει τα μόνιμα σφάλματα που αφήνει η πρωτεύουσα ρύθμιση. Πραγματοποιείται μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών που υπάρχει στους ρυθμιστές στροφών, με κατάλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας της γεννήτριας [20].

2.2.3 Στατισμός

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η Ρ.Φ.Σ. του δικτύου γίνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών. Οι ρυθμιστές στροφών μπορούν να θεωρηθούν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας είτε της ισχύος. Αν μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο, ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα, ενώ αν η γεννήτρια συνδέεται σε ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής της είναι δεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής ελέγχει την παραγόμενη ισχύ. Κάθε επιλογή ρύθμισης του μηχανισμού αλλαγής στροφών αντιστοιχεί σε μία ευθύγραμμη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της οποίας η κλίση καλείται στατισμός της μονάδας.



Σχήμα 2.30: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Ο στατισμός ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = -\frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (2.87)$$

Κατά την αύξηση του φορτίου, προκαλείται πτώση της συχνότητας του δικτύου από την αρχική τιμή ω_0 στην τελική τιμή νέας ισορροπίας του συστήματος ω_1 . Αυτό το γεγονός, μετά το τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης, θα έχει οδηγήσει στην αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος από την αρχική τιμή P_0 στη νέα τιμή P_1 . Μεγάλος στατισμός συνεπάγεται μικρή μεταβολή στην παραγωγή και συνεπώς μικρή ρύθμιση, ενώ μικρός στατισμός συνεπάγεται μεγάλη συμμετοχή στην εξισορρόπηση της συχνότητας του δικτύου. Ο στατισμός, λοιπόν, διαφοροποιεί το ρόλο που διαδραματίζει κάθε μονάδα σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα και καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι μονάδες που λειτουργούν παράλληλα μοιράζονται το κοινό τους φορτίο [20].

2.2.4 Συμμετοχή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1.1, παρά το γεγονός ότι η διεύθυνση αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή αυξάνεται συνεχώς, η συμμετοχή των Α/Γ στη Ρ.Φ.Σ. εφαρμόζεται ελάχιστα ή και καθόλου στην πράξη [6]. Ως τώρα αυτή τη λειτουργία την επιτελούν αποκλειστικά οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής. Παρ' όλα αυτά, έχουν γίνει μελέτες που εξετάζουν τρόπους με τους οποίους οι Α/Γ μπορούν να συνεισφέρουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας. Οι προτεινόμενοι τρόποι για να επιτευχθεί αυτό σχετίζονται με την αδρανειακή απόκριση, την ποσοστιαία αποφόρτιση ή με ένα συνδυασμό αυτών των δύο μεθόδων.

Όσον αφορά την αδρανειακή απόκριση, πρέπει να επισημανθεί ότι η αδράνεια του συστήματος, δηλαδή ο συνδυασμός των αδρανειών των γεννητριών και των φορτίων που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα και θεωρούνται στρεφόμενες μάζες, καθορίζει πόσο γρήγορα αλλάζει η συχνότητα του δικτύου σε μια ανισορροπία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Θεωρείται ότι μια στρεφόμενη μάζα μπορεί να συνεισφέρει στην αδράνεια του συστήματος, όταν μια αλλαγή στη συχνότητα προκαλεί αλλαγή στη ταχύτητα περιστροφής της και συνεπώς στην κινητική ενέργειά της. Αυτή η κινητική ενέργεια που μεταβάλλεται και μπορεί να αποδοθεί ή αντίστοιχα να απορροφηθεί από το σύστημα, ονομάζεται αδρανειακή απόκριση. Οπότε, μπορεί θεωρητικά μια Α/Γ να συνεισφέρει στη ρύθμιση συχνότητας μέσω της αδρανειακής της απόκρισης [12].

Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο, την ποσοστιαία αποφόρτιση, η Α/Γ περιορίζεται στο να παράγει ισχύ κατά ένα ποσοστό μικρότερη από την εκάστοτε προσφερόμενη από το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό. Έτσι, το επιπλέον ποσοστό μπορεί να αξιοποιηθεί και να αποδοθεί στο δίκτυο σε περίπτωση αύξησης φορτίου ή απώλειας παραγωγής. Η ποσοστιαία

αποφόρτιση επιτυγχάνεται είτε μεταβάλλοντας τη γωνία των πτερυγίων είτε μεταβάλλοντας κατάλληλα την ταχύτητα του δρομέα [11].

2.3 Μοντέλο συστήματος

2.3.1 Μοντέλο συστήματος ως στρεφόμενη μάζα

Σύμφωνα με το μοντέλο μεταβολών ισχύος-ροπής, το σύστημα μπορεί να αναπαριστάται ως μια στρεφόμενη μάζα, που έχει μια ισοδύναμη συνολική ροπή. Μπορεί, λοιπόν, να αγνοηθεί η τοπολογία του δικτύου και να θεωρηθεί ότι η ροπή αδράνειάς του συναθροίζεται με τις ροπές αδράνειας των γεννητριών, ενώ το φορτίο μπορεί να αποτυπωθεί συγκεντρωμένο και αναπαριστώμενο ως μια αντιρροπή [16].

Όσον αφορά την κάθε γεννήτρια, ισχύει ότι η μηχανική ενέργεια που παράγεται, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του δρομέα της γεννήτριας που είναι στερεά συνδεδεμένος πάνω στον ίδιο άξονα. Από αυτή την κινητική ενέργεια αντλεί η γεννήτρια ενέργεια μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που ασκείται στο δρομέα από το συνδυασμό των μαγνητικών της πεδίων. Η ροπή αδράνειας J του άξονα της γεννήτριας συμπεριλαμβάνει τη μηχανή, το δρομέα της γεννήτριας και τη διεγέρτρια στην περίπτωση που είναι στρεφόμενη. Η κινητική ενέργεια της μηχανής στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής ω_s μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ονομαστικής της ισχύος P_N :

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = HP_N \quad (2.88)$$

όπου H είναι η χρονική σταθερά αδράνειας της γεννήτριας, που έχει διαστάσεις χρόνου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο στρεφόμενος άξονας αποτελεί αποθήκη κινητικής ενέργειας. Όταν αυξάνεται η μηχανική ισχύς, η κινητική ενέργεια αυξάνεται και αυτή και ο άξονας επιταχύνεται. Όταν αυξάνεται η ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου και άρα η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η γεννήτρια, η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια ελαττώνεται και ο άξονας επιβραδύνεται.

Η ροπή επιταχύνσεως T_A της γεννήτριας είναι η διαφορά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_E από τη μηχανική ροπή T_M :

$$T_A = T_M - T_E \quad (2.89)$$

Οπότε η εξίσωση επιταχύνσεων της γεννήτριας διατυπώνεται συναρτήσει των ροπών:

$$T_A = T_M - T_E = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.90)$$

και αντικαθιστώντας τη ροπή αδράνειας συναρτήσει της σταθεράς αδράνειας H από τη σχέση (2.88), η εξίσωση (2.90) γίνεται για ανά μονάδα τιμές:

$$T_{A,pu} = T_{M,pu} - T_{E,pu} = 2H \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (2.91)$$

Όπου το $\Delta\omega$ εκφράζει την ανά μονάδα απόκλιση της ταχύτητας από τη σύγχρονη.

Αντίστοιχα ορίζεται η ισχύς επιταχύνσεως P_A της γεννήτριας ως η διαφορά της ηλεκτρικής ισχύος P_E που παράγει η γεννήτρια από τη μηχανική ισχύ P_M :

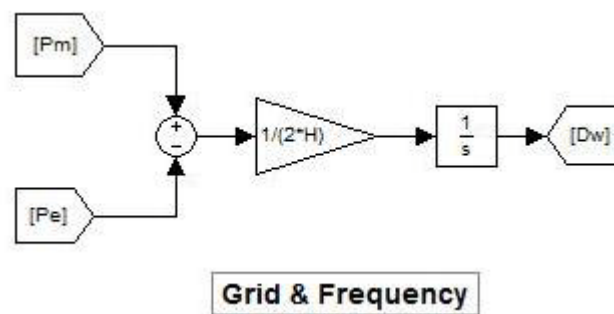
$$P_A = P_M - P_E \quad (2.92)$$

Αν αμεληθούν οι απώλειες της γεννήτριας, που είναι πολύ μικρές συγκριτικά με την παραγόμενη ισχύ, η ηλεκτρομαγνητική ισχύς P_E αντιστοιχεί στην ισχύ που απορροφά η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_E , οπότε καθεμία από τις παραπάνω ισχύεις συνδέεται με τις ροπές με τη σχέση $P = \omega T$. Αν κανονικοποιηθεί αυτή η σχέση και δεδομένου ότι για σύγχρονη μηχανή οι αποκλίσεις από τη σύγχρονη ταχύτητα είναι πολύ μικρές, οι ανά μονάδα τιμές ροπής και ισχύος γίνονται ίσες.

Οπότε ισχύει η σχέση (2.92) και για τις ισχύεις εκφρασμένες σε ανά μονάδα τιμές:

$$P_{A,pu} = P_{M,pu} - P_{E,pu} = 2H \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (2.93)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, μοντελοποιείται το σύστημα ως στρεφόμενη μάζα και από τη διαφορά της ζητούμενης ισχύος από την παραγόμενη, δίνει σαν έξοδο την απόκλιση της ταχύτητας από τη σύγχρονη, σε ανά μονάδα τιμές [20].



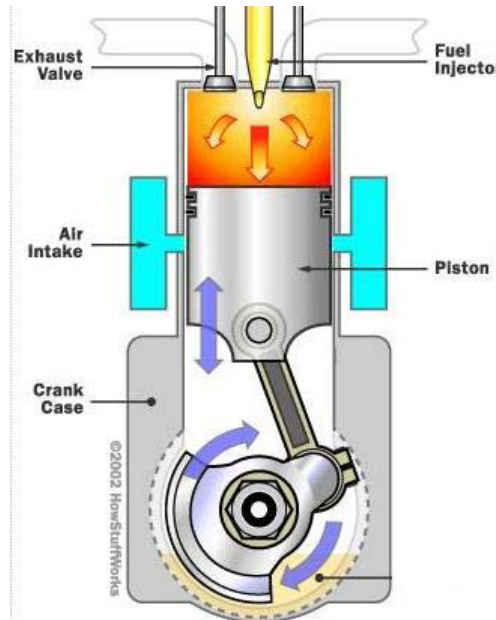
Σχήμα 2.31: Μοντέλο δικτύου ως στρεφόμενη μάζα

2.3.2 Λοιποί συντελεστές του συστήματος

2.3.2.1 Νηξελογεννήτρια

Η νηξελογεννήτρια είναι μια εμβολοφόρος μηχανή. Όπως παρουσιάζεται στο 2.32, περιλαμβάνει έναν κύλινδρο με ένα έμβολο, το οποίο εκτελεί παλινδρομική κίνηση μέσα σε αυτόν, μεταξύ δύο ακραίων θέσεων. Η αρχή λειτουργίας της εμβολοφόρου μηχανής συνοψίζεται ως εξής: διοχετεύεται καύσιμο (νηξέλ στην προκειμένη περίπτωση) και αέρας μέσα στον κύλινδρο, καθώς το έμβολο μετακινείται στην κατώτερη θέση. Καθώς το έμβολο επιστρέφει στην ανώτερη θέση, το μίγμα συμπιέζεται και με αυτόν τον τρόπο αυξάνει η θερμοκρασία του και τελικά εκρήγνυται. Η έκρηξη αναγκάζει το έμβολο να μετακινηθεί πάλι προς την κατώτερη θέση, παράγοντας ενέργεια, ενώ τα αέρια της έκρηξης αποβάλλονται.

Καύσιμο και αέρας διοχετεύονται εκ νέου στον κύλινδρο, για να επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία. Το έμβολο είναι συνδεδεμένο με ένα σύστημα διωστήρα-στροφάλου, στο οποίο μεταφέρεται η κινητική του ενέργεια, για να προκαλέσει στη συνέχεια την περιστροφική κίνηση του άξονα της γεννήτριας.

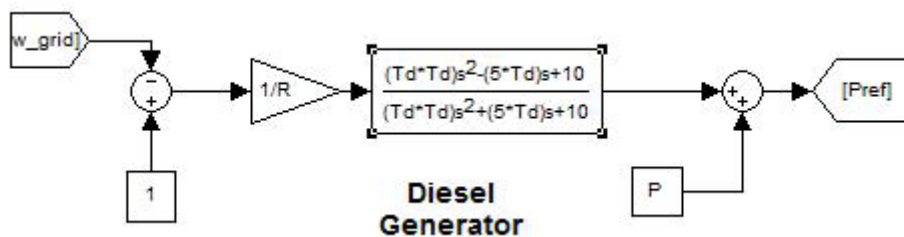


Σχήμα 2.32: Εμβολοφόρος μηχανή

Κατά τη μοντελοποίηση της νηξελογεννήτριας, στη συγκεκριμένη εργασία, υιοθετήθηκε το δυναμικό μοντέλο δεύτερης τάξης, που έχει επικυρωθεί ότι προσεγγίζει με επαρκή ακρίβεια τη λειτουργία της μηχανής [21]. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η χρονική υστέρηση T_D της μηχανής προσεγγίζεται ως εξής:

$$e^{-sT_D} = \frac{10 - 5T_D s + T_D^2 s^2}{10 + 5T_D s + T_D^2 s^2} \quad (2.94)$$

Η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου αποτελεί την είσοδο του μοντέλου. Όταν ανιχνεύεται μη μηδενικό σήμα, η νηξελογεννήτρια ελέγχει τη μεταβολή της συχνότητας, αυξομειώνοντας την παραγωγή ισχύος με αντίστοιχη αυξομείωση διοχέτευσης καυσίμου στον κύλινδρο. Η αδράνεια της νηξελογεννήτριας θεωρείται ως η συνολική αδράνεια του δικτύου.



Σχήμα 2.33: Μοντέλο νηξελογεννήτριας.

2.3.2.2 Σύγχρονη γεννήτρια

Στις σύγχρονες μηχανές, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το συνεχές ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα του δρομέα, περιστρέφεται μαζί του με την ίδια ταχύτητα. Προκειμένου να παράγεται σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή, το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα, δηλαδή τη σύγχρονη.

Η μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας στηρίχτηκε στις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν μια συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα, οι οποίες προκύπτουν έπειτα από τις παραδοχές ότι αμελούνται η μαγνητική υστέρηση και ο μαγνητικός κορεσμός, και ότι οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα [16].

Σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2.1.4 της παρούσας εργασίας, με όλα τα μεγέθη ανηγμένα στην πλευρά του στάτη και χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Park στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, που κινείται στην περίπτωση της σύγχρονης μηχανής μαζί με το δρομέα, οι εξισώσεις των τάσεων και των πεπλεγμένων ροών για το στάτη και το δρομέα προκύπτουν τελικά ανά μονάδα ως εκ του [17].

Για τις εξισώσεις τάσης του στάτη ισχύει:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= -r_s i_{ds} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} p \psi_{ds} \\ V_{qs} &= -r_s i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi'_{ds} + \frac{1}{\omega_b} p \psi'_{qs} \end{aligned} \quad (2.95)$$

όπου:

V_{ds}, V_{qs} , οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα

i_{ds}, i_{qs} , τα ρεύματα των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα

ψ_{ds}, ψ_{qs} , οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα

r_s , η ωμική αντίσταση του στάτη

Οι εξισώσεις τάσης για τα τυλίγματα του δρομέα χωρίς τυλίγματα απόσβεσης είναι:

$$V_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.96)$$

όπου:

V_{fd} , η τάση του τυλίγματος διέγερσης

i_{fd} , το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης

ψ_{fd} , η πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης

r_{fd} , η ωμική αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}\psi_{ds} &= -X_{ls}i_{ds} + X_{md}(-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd}) \\ \psi_{qs} &= -X_{ls}i_{qs} + X_{mq}(-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \\ \psi_{fd} &= X_{lfd}i_{fd} + X_{md}(-i_{ds} + i_{fd} + i_{kd})\end{aligned}\quad (2.97)$$

όπου:

X_{ls} , X_{lfd} , οι αυτεπαγωγές του στάτη και του τυλίγματος διέγερσης

X_{md} , X_{mq} , οι αμοιβαίες επαγωγικές αντιδράσεις στον άξονα d και q αντίστοιχα

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε ανά μονάδα τιμές ισούται με:

$$T_e = \psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}\quad (2.98)$$

Όσον αφορά τον έλεγχο της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας, ακολουθείτε και πάλι η λογική διανυσματικού ελέγχου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.1.5.2 αυτής της εργασίας. Συνεπώς, ελέγχοντας την τάση διέγερσης, επιτυγχάνεται έλεγχος της άεργου ισχύος και εξ αυτής ο έλεγχος της τάσης ακροδεκτών θεωρώντας αρκούντως μικρές τις ωμικές απώλειες.

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας όπως παρουσιάζεται και στο [17], με έλεγχο όπως αναλύεται στο [16].

2.3.2.3 Φορτίο

Το φορτίο που θα μοντελοποιηθεί στην παρούσα εργασία θεωρείται θερμοστατικό φορτίο. Τέτοιου είδους φορτία είναι συσκευές που ελέγχονται από θερμοστάτες (κλιματισμός, μπόιλερ κτλ). Η δυναμική συμπεριφορά των θερμοστατικών φορτίων μοντελοποιείται με μια ισοδύναμη χρονικά μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα [23]:

$$T_L \cdot \dot{G} = \frac{P_o}{V^2} - G\quad (2.99)$$

όπου:

T_L , η σταθερά χρόνου της θερμοστατικής αποκατάστασης φορτίου

G , η αγωγιμότητα του φορτίου

V , η τάση στο ζυγό του φορτίου

P_o , η αρχική τιμή του φορτίου

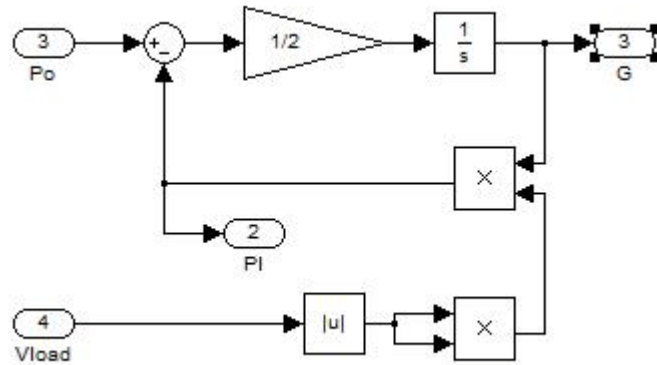
Ισχύει για το φορτίο, κάθε στιγμή, η σχέση:

$$P = G \cdot V^2\quad (2.100)$$

Η σχέση (2.99) γίνεται:

$$\begin{aligned}V^2 \cdot T_L \cdot \dot{G} &= P_o - G \cdot V^2 \Rightarrow \\ T_L \cdot \dot{G} &= P_o - G \cdot V^2\end{aligned}\quad (2.101)$$

Με βάση τη σχέση (2.101), αναπτύσσεται το μοντέλο του φορτίου. Είσοδοι του μοντέλου είναι η τάση V στο ζυγό του φορτίου και το φορτίο μονίμου καταστάσεως P_o . Από την παραπάνω διαφορική εξίσωση προκύπτει η χρονικά μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα του φορτίου G , καθώς και η στιγμιαία ισχύς του P .



Σχήμα 2.34: Μοντέλο θερμοστατικού φορτίου.

2.3.2.4 Γραμμές μεταφοράς

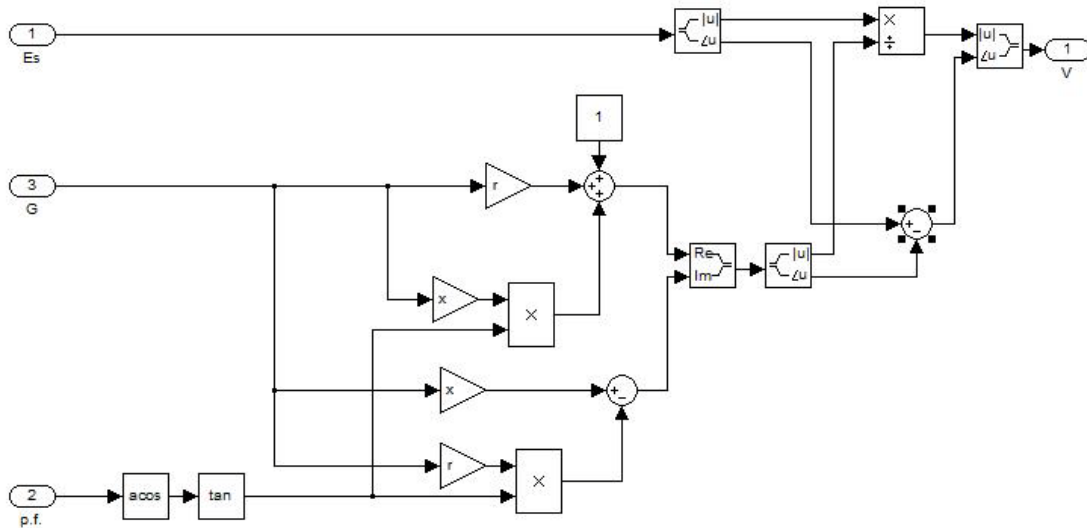
Οι γραμμές μεταφοράς έχουν ως αποτέλεσμα την πτώση της τάσης μεταξύ των ζυγών. Αν θεωρηθεί ένα απλό σύστημα με δύο ζυγούς, όπου συμμετέχει μια γεννήτρια και ένα φορτίο, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η γραμμή μεταφοράς από τη νηζελογεννήτρια προς το φορτίο, κατασκευάζεται ένας διαιρέτης τάσης. Αν V_{diesel} είναι η τάση στο ζυγό της γεννήτριας, V_{load} η τάση στο ζυγό του φορτίου, $r_1 + jx_1$ η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς κατά τη μοντελοποίηση γραμμής μικρού μήκους και $G + jB$ η αγωγιμότητα του φορτίου, ισχύει:

$$V_{load} = \frac{1}{(r_1 + jx_1) + \frac{1}{G + jB}} \cdot V_{diesel} \quad (2.102)$$

Έπειτα από πράξεις και με τη χρήση της σχέσης $B = -G \tan \varphi$, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$V_{load} = \frac{1}{(1 + G \cdot r_1 + G \cdot x_1 \cdot \tan \varphi) + j(x_1 \cdot G - r_1 \cdot G \cdot \tan \varphi)} \cdot V_{diesel} \quad (2.103)$$

Με βάση την έκφραση (2.103), μοντελοποιείται η γραμμή μεταφοράς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.35, με βάση το μοντέλο μικρού μήκους γραμμής. Το μοντέλο δέχεται σαν είσοδο την τάση του δικτύου, το συντελεστή ισχύος και τη χρονικά μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα, και τελικά εξάγει την τάση του ζυγού του φορτίου.



Σχήμα 2.35: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς νηξελογεννήτριας-φορτίου.

Για τη μοντελοποίηση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ του φορτίου και κάποιας άλλης μονάδας παραγωγής, η οποία δεν κάνει ρύθμιση τάσης αλλά της επιβάλλεται η τάση από το δίκτυο, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία. Αν V_{wp} η τάση στο ζυγό της μονάδας παραγωγής (π.χ. μιας Α/Γ), V_{load} η τάση στο ζυγό του φορτίου, $r_2 + jx_2$ η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς και $G + jB$ η αγωγιμότητα του φορτίου, ισχύει:

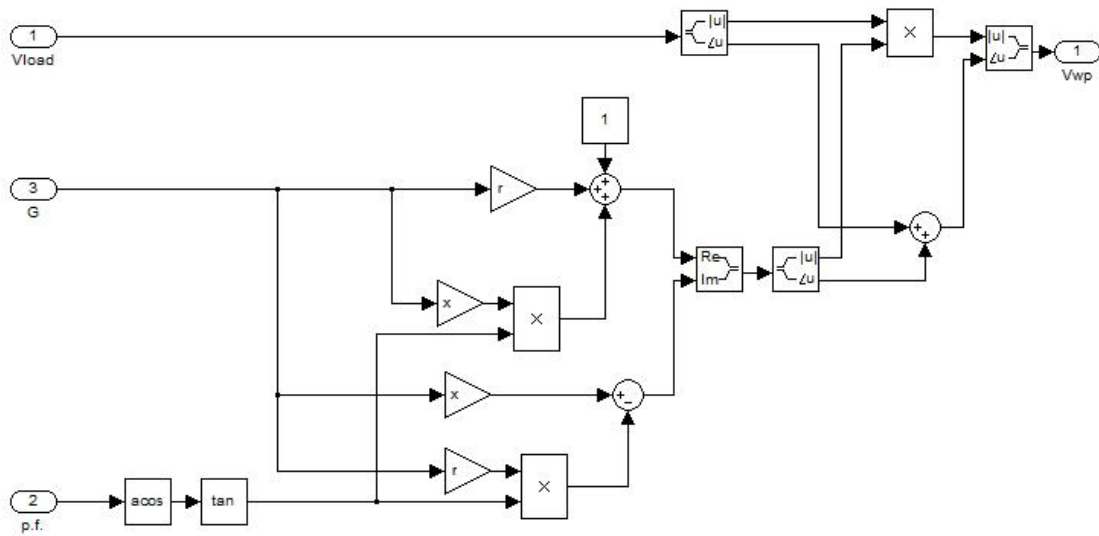
$$V_{load} = \frac{1}{\frac{G+jB}{(r_2+jx_2)+\frac{1}{G+jB}}} \cdot V_{wp} \quad (2.104)$$

Με χρήση και πάλι της σχέσης $B = -G \tan \varphi$, εξάγεται:

$$V_{load} = \frac{1}{(1+G \cdot r_2 + G \cdot x_2 \cdot \tan \varphi) + j(x_2 \cdot G - r_2 \cdot G \cdot \tan \varphi)} \cdot V_{wp} \Rightarrow$$

$$V_{wp} = [(1 + G \cdot r_2 + G \cdot x_2 \cdot \tan \varphi) + j(x_2 \cdot G - r_2 \cdot G \cdot \tan \varphi)] \cdot V_{load} \quad (2.105)$$

Με βάση την έκφραση (2.105) κατασκευάζεται το μοντέλο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.36, το οποίο δέχεται σαν είσοδο την τάση του φορτίου, το συντελεστή ισχύος και τη χρονικά μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα του φορτίου, και τελικά εξάγει την τάση του ζυγού της Α/Γ.



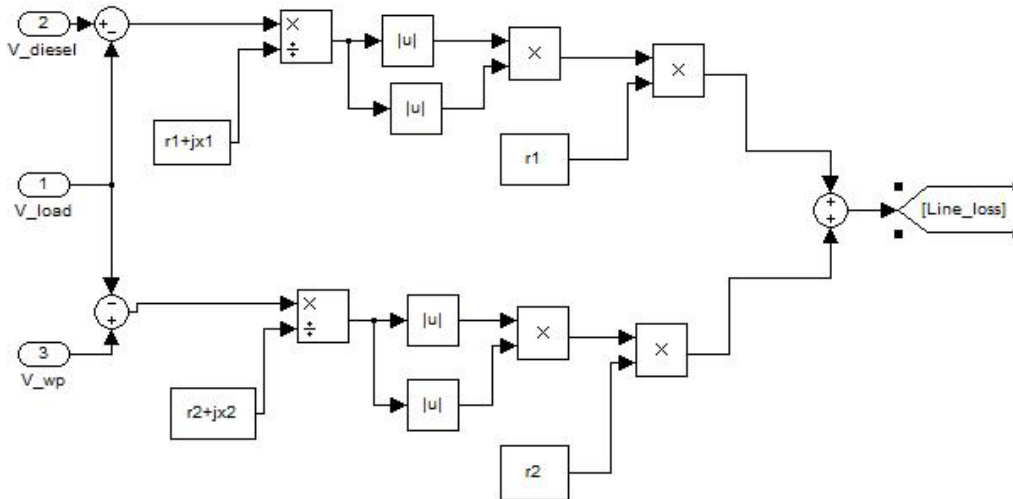
Σχήμα 2.36: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς A/Γ-φορτίου.

Οι απώλειες των παραπάνω γραμμών μεταφοράς υπολογίστηκαν με βάση τις σχέσεις:

$$P_{loss1} = i^2 r_1 = \left| \frac{V_{diesel} - V_{load}}{r_1 + jx_1} \right|^2 \cdot r_1 \quad (2.106)$$

$$P_{loss2} = i_2^2 r_2 = \left| \frac{V_{wp} - V_{load}}{r_2 + jx_2} \right|^2 \cdot r_2 \quad (2.107)$$

Το μοντέλο που κατασκευάστηκε για το συνολικό υπολογισμό των απωλειών σε ένα σύστημα δύο ζυγών είναι:



Σχήμα 2.37: Μοντέλο υπολογισμού απωλειών γραμμής.

3

Προτεινόμενη μέθοδος Ρ.Φ.Σ. από Α/Γ

3.1 Βασική ιδέα

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η πρωτεύουσα Ρ.Φ.Σ. από Α/Γ, και πιο συγκεκριμένα η ρύθμιση περιπτώσεων υποσυχνότητας. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.2.4 αυτής της εργασίας, προκειμένου να συμμετέχει η Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας, ένας τρόπος είναι η ποσοστιαία αποφόρτιση της Α/Γ, έτσι ώστε σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας, να μπορεί να διοχετεύσει το πλεόνασμα της ισχύος στο δίκτυο. Προτείνεται, λοιπόν, η αποφόρτιση μιας Α/Γ με κατάλληλη μεταβολή του βήματος της γωνίας των περυγίων της. Δηλαδή, πλέον, η γωνία β δε θα μεταβάλλεται μόνο πάνω από τις ονομαστικές ταχύτητες, προκειμένου να διατηρεί την ισχύ σταθερή, αλλά θα αυξομειώνεται ανάλογα με το επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης της Α/Γ. Μάλιστα, κρίνεται σκόπιμο να λειτουργεί η Α/Γ σε πολύ υψηλά επίπεδα αποφόρτισης, «υπό αποκοπή», προκειμένου να αποφεύγονται μεταβολές ταλαντωτικής φύσης σε υψηλές ροπές. Η μελέτη θα γίνει στα πλαίσια ενός αιολικού πάρκου, ώστε να είναι δυνατόν η μια Α/Γ να απορρίπτει μεγάλο μέρος της παραγόμενης ισχύος της, ενώ οι άλλες να λειτουργούν δίνοντας το μέγιστο της διαθέσιμής τους.

3.2 Ποσοστιαία αποφόρτιση μέσω της γωνίας βήματος

Αν είναι επιθυμητό να παρέχεται από την Α/Γ ένα μόνο ποσοστό της συνολικά διαθέσιμης ισχύος, πρέπει να επανασχεδιαστεί ο έλεγχος της γωνίας του βήματος, ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη αποφόρτιση.

Η ενέργεια που είναι επιθυμητό να αποδίδεται από την Α/Γ, εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_{new} = P_M(1 - x) \quad (3.1)$$

όπου:

P_M , η συνολικά διαθέσιμη ισχύς

P_{new} , η ισχύς που είναι επιθυμητό να δίνει η Α/Γ

x , το ποσοστό αποφόρτισης

Για ταχύτητες ανέμου μέχρι και την ονομαστική, αφού έτσι και αλλιώς σε μεγαλύτερες ταχύτητες δεν αυξάνεται περαιτέρω η ισχύς αλλά ελέγχεται, αν αντικατασταθεί η σχέση (2.2) της αεροδυναμικής ισχύος στην έκφραση (3.1), προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho A C_{p,new} (\lambda_{new}, \beta_{new}) V_w^3 &= \frac{1}{2} \rho A C_{p,max} V_w^3 \cdot (1 - x) \Rightarrow \\ C_{p,new} (\lambda_{new}, \beta_{new}) &= C_{p,max} \cdot (1 - x) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2.1.3.1 αυτής της εργασίας, εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας-ακροπτερυγίου λ και τη γωνία βήματος της έλικας. Αν, στην τεχνική αποφόρτισης, διατηρηθεί ο λόγος ταχύτητας-ακροπτερυγίου ίδιος με τον αντίστοιχο στην τεχνική μέγιστης απομάστευσης ισχύος, τότε ο νέος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος διαφοροποιείται από τον αρχικό μεταβάλλοντας κατάλληλα τη γωνία βήματος της έλικας, προκειμένου να επιτυγχάνεται το κατάλληλο ποσοστό αποφόρτισης.

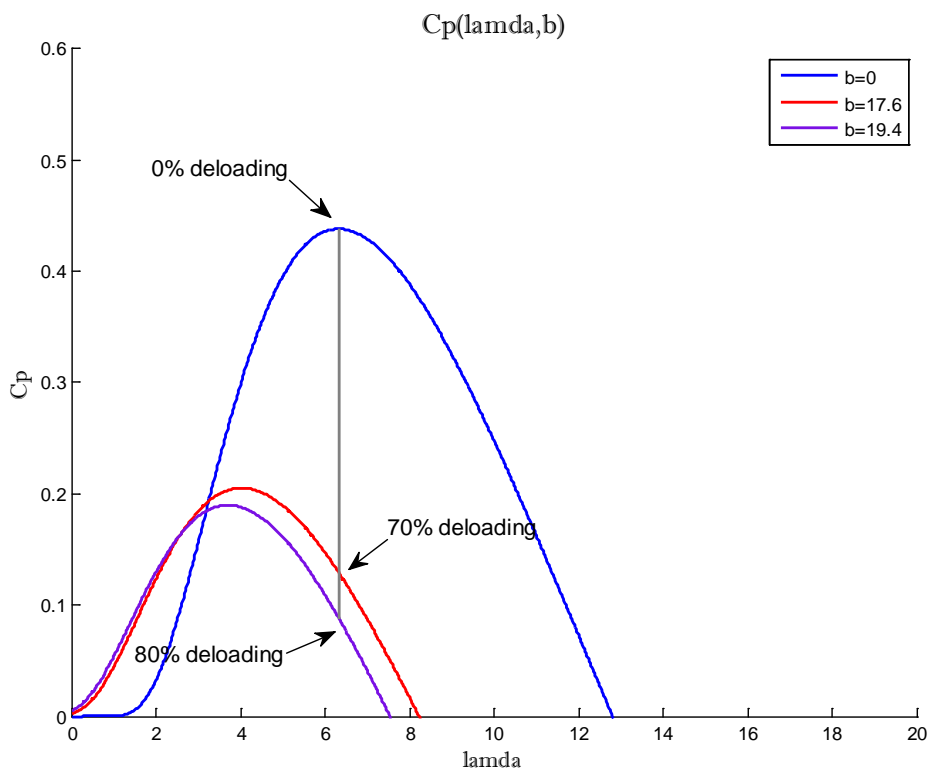
Δηλαδή, πρέπει να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος που για κάθε ποσοστά αποφόρτισης x , από 0 έως 1, να υπολογίζει τη γωνία β_{new} για την οποία ισχύει:

$$C_{p,new} (\lambda_{opt}, \beta_{new}) = C_{p,max} \cdot (1 - x)$$

Με βάση αυτή τη λογική, κατασκευάστηκε αλγόριθμος με τα εξής βασικά βήματα:

1. Υπολογισμός της τιμής $C_{p,max}$ για $\lambda = \lambda_{opt}$ και $\beta = 0^\circ$.
2. Επανάληψη για ανά μονάδα τιμές επιθυμητής απομαστευόμενης ισχύος $(1 - x)$ από 0 έως 1, με βήμα 0.05.
 - a. Επανάληψη για γωνίες 0° έως 90° .
 - i. Υπολογισμός της τιμής $C_{p,new} (\lambda_{opt}, \beta_{new})$
 - ii. Αν $C_{p,new} (\lambda_{opt}, \beta_{new}) = (1 - x) C_{p,max}$, κρατείται η τιμή $(1 - x)$ σε έναν πίνακα και η τιμή β_{new} στην αντίστοιχη θέση ενός άλλου πίνακα.

Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκε ένας πίνακας που αντιστοιχίζει κάθε ποσοστό ζητούμενης ισχύος στην κατάλληλη γωνία βήματος, προκειμένου να επιτευχθεί ποσοστιαία αποφόρτιση.



Σχήμα 3.1: Καμπύλες C_p αντίστοιχες σε διάφορα ποσοστά αποφόρτισης

3.3 Συστήματα ελέγχου και look-up tables

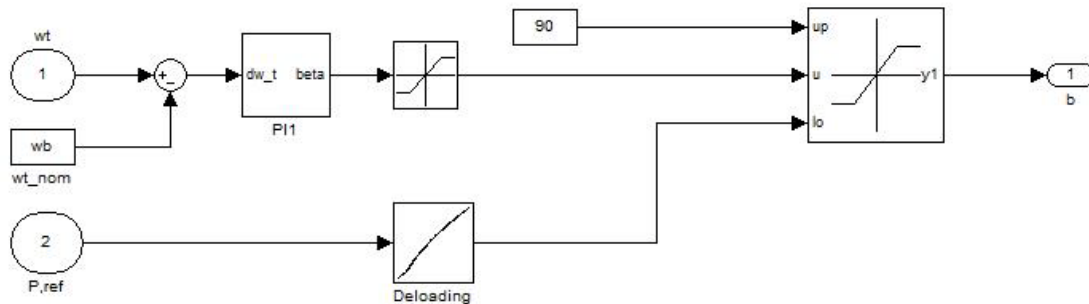
Προκειμένου να εφαρμοστεί η τεχνική αποφόρτισης που περιγράφηκε, πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις και προσαρμογές στα συστήματα ελέγχου της Α/Γ.

Όσο αφορά τον ήδη υπάρχοντα έλεγχο βήματος, είναι απαραίτητο να ενσωματώσει την απαιτούμενη αλλαγή στο βήμα για την εκάστοτε ζητούμενη αποφόρτιση. Καταρχήν, απαιτείται πλέον να γίνεται έλεγχος του βήματος για ταχύτητες ανέμου και κάτω της ονομαστικής. Οπότε, κατασκευάστηκε look-up table, στο οποίο ενσωματώθηκαν οι τιμές του πίνακα, που προέκυψαν από τον αλγόριθμο στην προηγούμενη παράγραφο. Είσοδος του look-up table είναι η ζητούμενη ισχύς σε ανά μονάδα τιμές και έξοδος η αντίστοιχη γωνία βήματος. Οπότε, αυτή η γωνία είναι η ελάχιστη για να λειτουργεί η Α/Γ στο αντίστοιχο ποσοστό αποφόρτισης σε κάθε περιοχή λειτουργίας.

Για να συνεχίσει να ελέγχεται ότι η Α/Γ δε θα ξεπερνά της ονομαστικές στροφές, θα πρέπει η γωνία β για περιορισμό της ισχύος στην ονομαστική, που προκύπτει από τον κλασικό έλεγχο

του βήματος, να είναι μεγαλύτερη της γωνίας β_{new} , που απαιτείται για την αποφόρτιση. Σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει η γωνία β να γίνει μεγαλύτερη από 90° .

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, λοιπόν, κατασκευάστηκε νέο μοντέλο ελέγχου της γωνίας του βήματος, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2: Μοντέλο αποφόρτισης μέσω ελέγχου του βήματος.

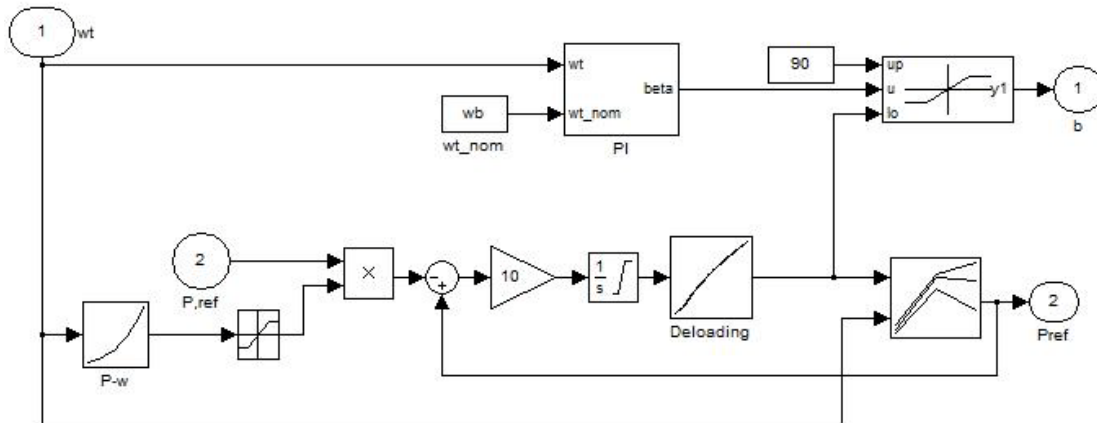
Είναι επίσης απαραίτητο να τροποποιηθεί ο τρόπος που εξάγεται η ισχύς αναφοράς, η οποία δίνεται στον έλεγχο της ΓΕΔΤ ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή ηλεκτρική ισχύς. Στην περίπτωση αποφόρτισης της Α/Γ κατά κάποιο ποσοστό, πρέπει η ισχύς αναφοράς να προκύπτει ως το αντίστοιχο ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας, ώστε να παρέχεται το επιθυμητό σημείο αναφοράς λειτουργίας στο δρομέα στη ΓΕΔΤ. Οπότε, η συνολικά διαθέσιμη ισχύς δεν μπορεί πια να εξαχθεί μόνο από την καμπύλη ισχύος-γωνιακής ταχύτητας και το αντίστοιχο look-up table.

Για ταχύτητες μέχρι και την ονομαστική, όπου $P_{pu} = 1$ είναι η μέγιστη αναφορά παραγόμενης ισχύος, ισχύει:

$$P_{pu} = \frac{P_M}{P_N} = \frac{C_p(\lambda_{opt}, \beta_{new}) V_w^3}{C_{p,max} \cdot V_{w,N}^3} = \frac{C_p(\lambda_{opt}, \beta_{new}) \cdot \left(\frac{\omega R}{\lambda_{opt}}\right)^3}{C_{p,max} \cdot \left(\frac{\omega_{NR}}{\lambda_{opt}}\right)^3} \Rightarrow$$

$$P_{pu} = \frac{C_p(\lambda_{opt}, \beta_{new}) \cdot \omega^3}{C_{p,max} \cdot \omega_N^3} \quad (3.3)$$

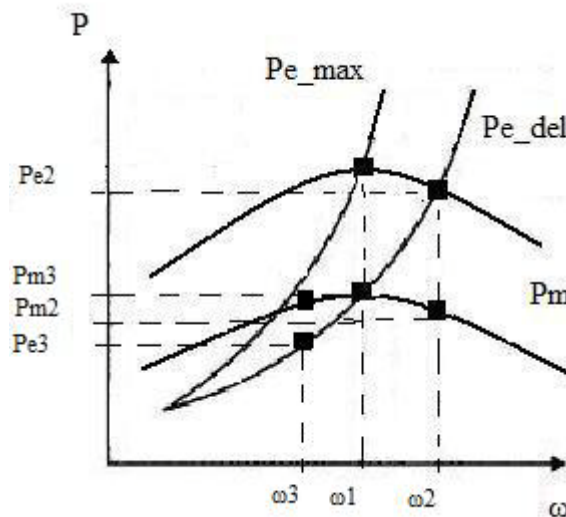
Από αυτή τη σχέση φαίνεται ότι η ισχύς, που είναι διαθέσιμη από την αποφορτιζόμενη Α/Γ και η οποία θα δοθεί ως αναφορά για την ισχύ που θα απορροφήσει η ΓΕΔΤ, μπορεί να υπολογιστεί από τη γωνία β και τη γωνιακή ταχύτητα. Κατασκευάστηκε, λοιπόν, αλγόριθμος, που υπολόγισε έναν δισδιάστατο πίνακα με εισόδους τη γωνιακή ταχύτητα και τη γωνία βήματος και έξοδο την αντίστοιχη ισχύ. Αυτές οι τιμές ενσωματώθηκαν στο σχετικό look-up table, ενώ για να γίνεται πιο αξιόπιστο ο έλεγχος, δημιουργείται και σήμα σφάλματος μέσω ανάδρασης. Δηλαδή, αφαιρείται η ζητούμενη τιμή ισχύος από την ισχύ αναφοράς, ώστε όσο το σήμα εισόδου είναι αρνητικό, ο ολοκληρωτής να αυξάνει το σήμα εξόδου, μέχρι να γίνει ίσο με το επιθυμητό. Έτσι, προέκυψε η ακόλουθη συνολική διάταξη ελέγχου:



Σχήμα 3.3: Συνολική διάταξη ελέγχου τεχνικής αποφόρτισης.

3.4 Ευστάθεια της μεθόδου

Η προτεινόμενη στρατηγική λειτουργίας που προτείνεται, θέτει ένα θέμα ευστάθειας του μηχανικού συστήματος της Α/Γ σχετικά με το αν σε κάθε νέο προτεινόμενο σημείο λειτουργίας της για διάφορες ταχύτητες ανέμου, η επιβραδύνουσα ροπή (δηλαδή η ηλεκτρική αντιροπή) αρκεί για να καταστείλει τυχούσα επιτάχυνση της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα. Όμοιο ζήτημα τίθεται και για την επάρκεια επιταχύνουσας ροπής (δηλαδή της αεροδυναμικής ροπής) σε περίπτωση επιβράδυνσης του δρομέα.



Σχήμα 3.4: Εξήγηση της ευστάθειας της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, αν εφαρμόζεται η στρατηγική αποφόρτισης που περιγράφηκε, Pe_del είναι η καμπύλη λειτουργίας Α/Γ υπό αποφόρτιση, Pm η καμπύλη της μηχανικής ισχύος και $\omega1$ η αρχική ταχύτητα του δρομέα. Αν ο δρομέας επιταχυνθεί, η

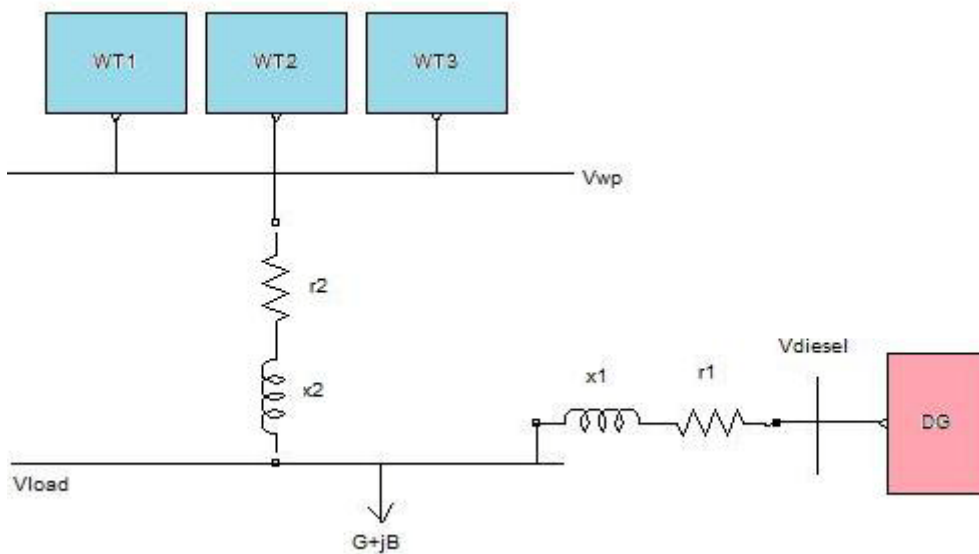
ηλεκτρική επιβραδύνουσα ροπή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μηχανική επιταχύνουσα, ώστε να καταφέρει το σύστημα να επιστρέψει στο αρχικό σημείο ευσταθούς λειτουργίας. Οπότε, αν $\omega_2 > \omega_1$, πρέπει να ισχύει $T_{e2} > T_{m2}$. Όμως ισχύει ότι $T_{e2} = \frac{P_{e2}}{\omega_2}$ και $T_{m2} = \frac{P_{m2}}{\omega_2}$. Άρα, αφού $P_{e2} > P_{m2}$, ισχύει η συνθήκη ευστάθειας. Αντίστοιχα, αποδεικνύεται ότι και στην περίπτωση επιβράδυνσης του δρομέα, ισχύει ότι η μηχανική επιταχύνουσα ροπή είναι μεγαλύτερη της ηλεκτρικής αντιροπής, οπότε το σύστημα είναι και πάλι ευσταθές. Συνολικά, εφαρμόζοντας τη προτεινόμενη μέθοδο αποφόρτισης, δεν ενδέχεται να προκληθεί κατάσταση αστάθειας στο μηχανικό σύστημα της Α/Γ.

4

Θεμελίωση προβλήματος

4.1 Αναφορά προς τα μοντέλα

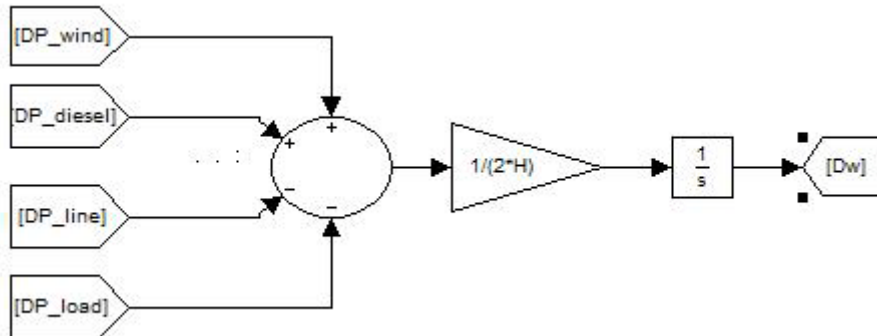
Η μορφή του συστήματος που θα μελετηθεί φαίνεται στο Σχήμα 4.1, που ακολουθεί. Πρόκειται για σύστημα τριών ζυγών, που αποτελείται από μια σύγχρονη νηζελογεννήτρια, φορτίο και από αιολικό πάρκο τριών ίδιων Α/Γ.



Σχήμα 4.1: Το υπό μελέτη σύστημα.

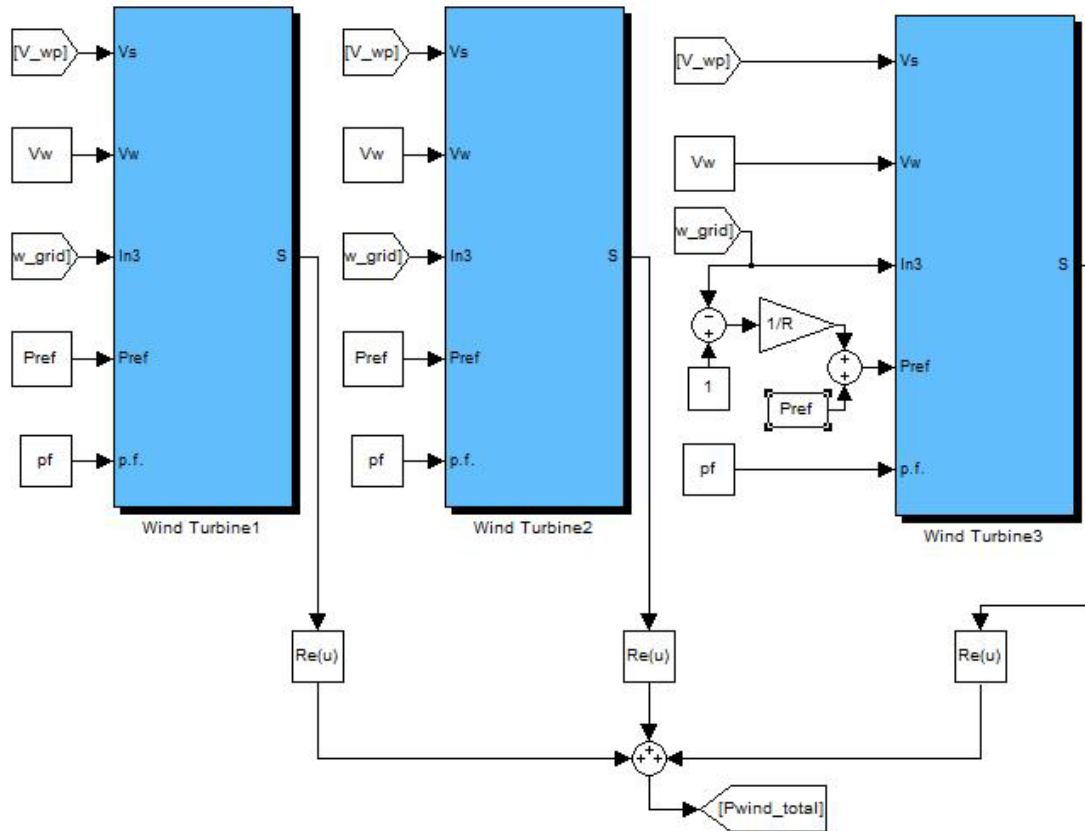
Με βάση τα μοντέλα της νηξελογεννήτριας, της σύγχρονης γεννήτριας, του φορτίου, των γραμμών μεταφοράς και της Α/Γ, που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2, σχηματίζεται το συνολικό μοντέλο του συστήματος.

Χρησιμοποιείται το μοντέλο του συστήματος ως στρεφόμενη μάζα, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.3.1. Ισχύς παράγεται από τη νηξελογεννήτρια και τις Α/Γ, καταναλώνεται από το φορτίο, ενώ υπάρχουν και κάποιες απώλειες γραμμής. Οπότε, το σύστημα αναπαρίσταται ως εξής:



Σχήμα 4.2: Μοντέλο φορτίου-συχνότητας του υπό μελέτη συστήματος.

Προκειμένου να συμμετέχει η μία Α/Γ στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας, είναι απαραίτητο να δέχεται το σήμα μεταβολής της συχνότητας, και σύμφωνα με την εκάστοτε χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας, να αυξομειώνει την παραγωγή της. Αν R είναι ο στατισμός της εκάστοτε χαρακτηριστικής που χρησιμοποιείται, το μοντέλο του αολικού πάρκου του υπό μελέτη συστήματος, με μία Α/Γ να συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας, συνοψίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.3: Αιολικό πάρκο με συμμετοχή μιας Α/Γ στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας.

4.2 Βασικά σενάρια προς προσομοίωση

Το μοντέλο του συστήματος, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιείται για να προσομοιωθούν και να εξεταστούν περιπτώσεις μεταβολών ανέμου και αύξησης φορτίου. Έτσι, μελετάται η απόκριση του συστήματος παρουσία και απουσία της Α/Γ στη ΡΦΣ.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μόνο η πρωτεύουσα Ρ.Φ.Σ. και μόνο περιπτώσεις υποσυχνότητας προκαλούμενες από αύξηση φορτίου.

Οι προσομοιώσεις έγιναν στο πρόγραμμα Matlab/Simulink, έκδοσης 7.6.0 (R2008a) και χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι προσομοίωσης ode23t (Mod. Stiff/Trapezoidal) και ode45 (Dormand-Prince). Τελικά, οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στην εργασία έχουν γίνει με την ode23t (Mod. Stiff/Trapezoidal).

Προσομοιώνονται οι εξής βασικές περιπτώσεις:

- 1) Για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, παρουσιάζεται η συμπεριφορά της συχνότητας σε περίπτωση αύξησης φορτίου, όταν:
 - a) Οι Α/Γ1,2,3, δίνουν όλη τη διαθέσιμη ισχύ τους και γίνεται ρύθμιση μόνο από την νηζελογεννήτρια.

- b) Η Α/Γ3 λειτουργεί αποφορτιζόμενη κατά 80% και συμμετέχει από κοινού με τη νηξελογεννήτρια στη ρύθμιση, με στατισμό $R=0.1$.
- c) Η Α/Γ3 λειτουργεί αποφορτιζόμενη κατά 80% και συμμετέχει από κοινού με τη νηξελογεννήτρια στη ρύθμιση, με στατισμό $R=0.033$.

Αυτά τα σενάρια εξετάζονται τόσο για υψηλό όσο και για χαμηλό φορτίο.

- 2) Για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζεται επίσης η συμπεριφορά της συχνότητας στις τρεις βασικές περιπτώσεις a,b,c που προαναφέρθηκαν. Τα σενάρια εξετάζονται τόσο για υψηλό όσο και για χαμηλό φορτίο.
- 3) Για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, όπου η Α/Γ3 λειτουργεί αποφορτιζόμενη κατά 70% και συμμετέχει στη Ρ.Φ.Σ, παρουσιάζεται η συμπεριφορά της συχνότητας σε περίπτωση ταυτόχρονης αύξησης του φορτίου και μείωσης του ανέμου της.
- 4) Παρουσιάζεται η περίπτωση πολύ μικρού στατισμού της Α/Γ3, δηλαδή πολύ υψηλής συμμετοχής στη ρύθμιση της συχνότητας από την Α/Γ, για κάθε περίπτωση ανέμου (πάνω ή κάτω της ονομαστικής ταχύτητας) και φορτίου (υψηλό ή χαμηλό).

Θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα ανέμου για το Α/Π δεν είναι απαραίτητα κοινή για όλες τις Α/Γ.

4.3 Χαρακτηριστικά και παράμετροι συντελεστών του προβλήματος

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρατίθενται τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των συντελεστών του συστήματος που μοντελοποιήθηκε. Η επιλογή τους έγινε με βάση τις δημοσιεύσεις [8], [10], [11].

❖ Ανεμογεννήτριες

Μοντελοποιήθηκαν τρεις ίδιες τρίπτερες Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Παράμετρος	Τιμή
Διάμετρος δρομέα	30 m
Ταχύτητα δρομέα	10-30 ΣΑΛ
Ονομαστική ισχύς	2.13 MW
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	14.0116 m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut in)	5 m/s
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής (cut out)	25 m/s
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	1:106

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά αεροδυναμικού μοντέλου των Α/Γ

Παράμετρος	Τιμή
J_E	$3 \cdot 10^6 (kg \cdot m^2)$
$J'_{GB,G}$	$100 (kg \cdot m^2)$
d_L	$5 \cdot 10^6 (N \cdot m \cdot s/rad)$
C_L	$15 \cdot 10^6 (N \cdot m/rad)$
w_{in}	2.9541 (rad/s)
$theta_{in}$	0°

Πίνακας 2: Παράμετροι του αεροελαστικού μοντέλου 2 μαζών των Α/Γ

Ως $theta_{in}$ συμβολίζεται η αρχική γωνία μεταξύ του άξονα του δρομέα και του άξονα της γεννήτριας, ενώ ως w_{in} συμβολίζεται η αρχική ταχύτητα περιστροφής.

Παράμετρος	Τιμή
Αναλογικό κέρδος k_p	25
Ολοκληρωτικό κέρδος k_i	5

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά PI ελεγκτών της γωνίας βήματος έλικας

❖ **Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής τροφοδότησης**

Παράμετρος	Τιμή
Αντίσταση στάτη r_s	0.0046 (p.u.)
Αντίσταση δρομέα r_R	0.0038 (p.u.)
Αντίδραση μαγνήτισης X_M	2 (p.u.)
Αντίδραση σκέδασης X_S	0.12 (p.u.)

Πίνακας 4: Παράμετροι της ΓΕΔΤ

Παράμετρος	Τιμή
Αναλογικό κέρδος k_{p2}	0.24
Ολοκληρωτικό κέρδος k_{i2}	0.0076

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά PI ελεγκτών της ΓΕΔΤ

Τα κέρδη των PI ελεγκτών επιλέχτηκαν σύμφωνα με την [24].

❖ **Νηζελογεννήτρια**

Χρησιμοποιήθηκε νηζελογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 10 MW με χρονική σταθερά $T_D = 0.05 \text{ sec}$ και σταθερά αδράνειας ίση με 3.5 sec .

❖ **Σύγχρονη γεννήτρια**

Παράμετρος	Τιμή
Αντίσταση στάτη R_S	0.003 (p.u.)
Αντίσταση δρομέα R_f	0.006 (p.u.)
Αμοιβαία επαγωγική αντίδραση M_f	1.66 (p.u.)
Αυτεπαγωγή στάτη L_S	1.78 (p.u.)
Αυτεπαγωγή δρομέα L_f	1.8 (p.u.)

Πίνακας 6: Παράμετροι της Σύγχρονης Γεννήτριας

Παράμετρος	Τιμή
Αναλογικό κέρδος k_{p3}	4.95
Ολοκληρωτικό κέρδος k_{i3}	0.00825

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά PI ελεγκτών της Σύγχρονης Γεννήτριας

Τα κέρδη των PI ελεγκτών επιλέχτηκαν σύμφωνα με την [24].

❖ **Γραμμές μεταφοράς**

Θεωρήθηκε ότι η κάθε γραμμή μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε είναι 95 ACSR και έχει μήκος 10 km. Αν με δείκτη 1 συμβολίζονται τα μεγέθη της γραμμής μεταξύ νηζελογεννήτριας και φορτίου, ενώ με δείκτη 2 τα μεγέθη της γραμμής μεταξύ φορτίου και αιολικού πάρκου, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις, είναι:

Παράμετρος	Τιμή
Αντίσταση r_1	2.2 Ω
Επαγωγική αντίδραση x_1	3.3 Ω
Αντίσταση r_2	2.2 Ω
Επαγωγική αντίδραση x_2	3.3 Ω

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς

❖ **Δίκτυο**

Πρόκειται για δίκτυο Μέσης Τάσης 20 kV. Η βάση ισχύος είναι 10 MVA.

❖ **Φορτίο**

Η χρονική σταθερά του θερμοστατικού φορτίου θεωρήθηκε ίση με $T_L = 2 \text{ sec}$.

5

Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Στους πίνακες που ακολουθούν, οι τιμές ισχύος αναγράφονται σε βάση ισχύος 10 MVA, ενώ μόνο στις γραφικές παραστάσεις της A/Γ3 παρουσιάζονται σε βάση 1 MVA. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται στις γραφικές παραστάσεις και τους πίνακες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος/Λειτουργία	Συντομογραφία
Ταχύτητες ανέμου πάνω της ονομαστικής	Above
Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής	Below
Υψηλό φορτίο	High load
Χαμηλό φορτίο	Low load
Λειτουργία όπου όλες οι Α/Γ δίνουν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ και ρύθμιση συχνότητας γίνεται μόνο από τη νηζελογεννήτρια	Classic
Λειτουργία όπου οι δύο Α/Γ δίνουν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ τους, η Α/Γ3 αποφορτίζεται και ρύθμιση συχνότητας γίνεται από τη νηζελογεννήτρια και την Α/Γ3	Deloading
Ο στατισμός της Α/Γ3 είναι 0.1	R1
Ο στατισμός της Α/Γ3 είναι 0.033	R2
Ο στατισμός της Α/Γ3 είναι 0.02	R3
Τιμή της συχνότητας στη μέγιστη βύθιση	f_{min}
Μέγιστη βύθιση συχνότητας	Δf_{min}
Τιμή μόνιμης κατάστασης της συχνότητας στη νέα ισορροπία	f_c
Σφάλμα της συχνότητας μόνιμης κατάστασης στη νέα ισορροπία	$ \Delta f_c $
Ισχύς της Α/Γ3	P_{w3}
Αρχική αποδιδόμενη ισχύς της Α/Γ3	$P_{w,αρχ}$
Αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος της Α/Γ3 στη νέα κατάσταση ισορροπίας	ΔP_w
Αρχική αποδιδόμενη ισχύς της νηζελογεννήτριας	$P_{d,αρχ}$
Αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος της νηζελογεννήτριας στη νέα κατάσταση ισορροπίας	ΔP_d
Αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος της Α/Γ3 στη νέα κατάσταση ισορροπίας, ως ποσοστό επί της αρχικής αποδιδόμενης ισχύος της	$\frac{\Delta P_w}{P_{w,αρχ}} \cdot 100\%$
Αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος της νηζελογεννήτριας στη νέα κατάσταση ισορροπίας, ως ποσοστό επί της αρχικής αποδιδόμενης ισχύος της	$\frac{\Delta P_d}{P_{d,αρχ}} \cdot 100\%$
Γωνία βήματος της Α/Γ3	$beta$
Αρχική γωνία βήματος της Α/Γ3	$b_{αρχ}$
Τελική γωνία βήματος της Α/Γ3	$b_{τελ}$

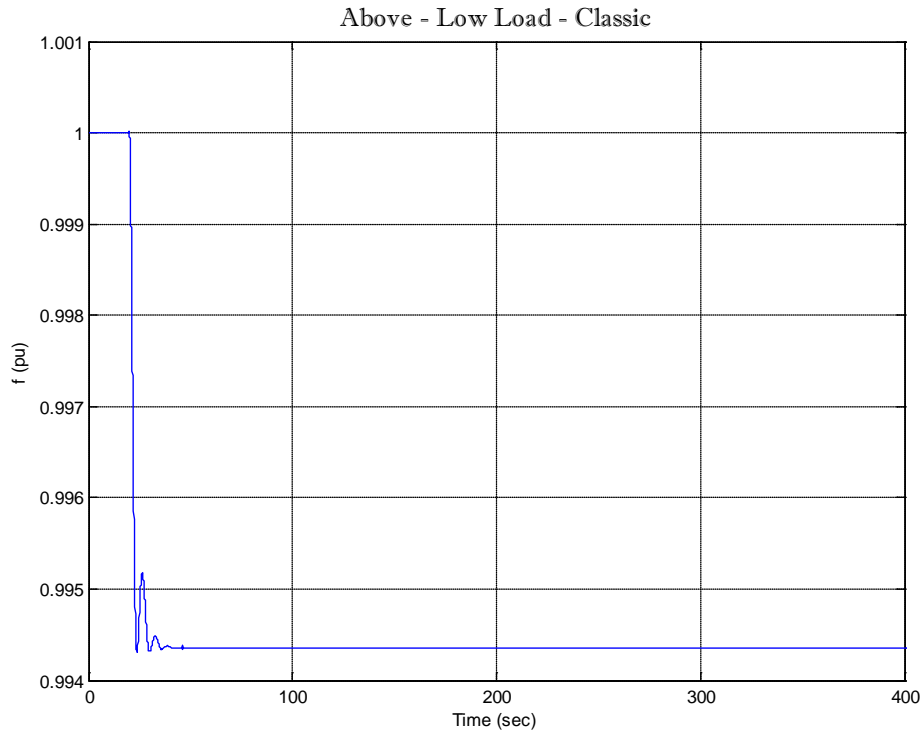
Πίνακας 9: Υπόμνημα συντομογραφιών προσομοιώσεων και αποτελεσμάτων

5.1 Σενάριο 1: Ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής και χαμηλό φορτίο

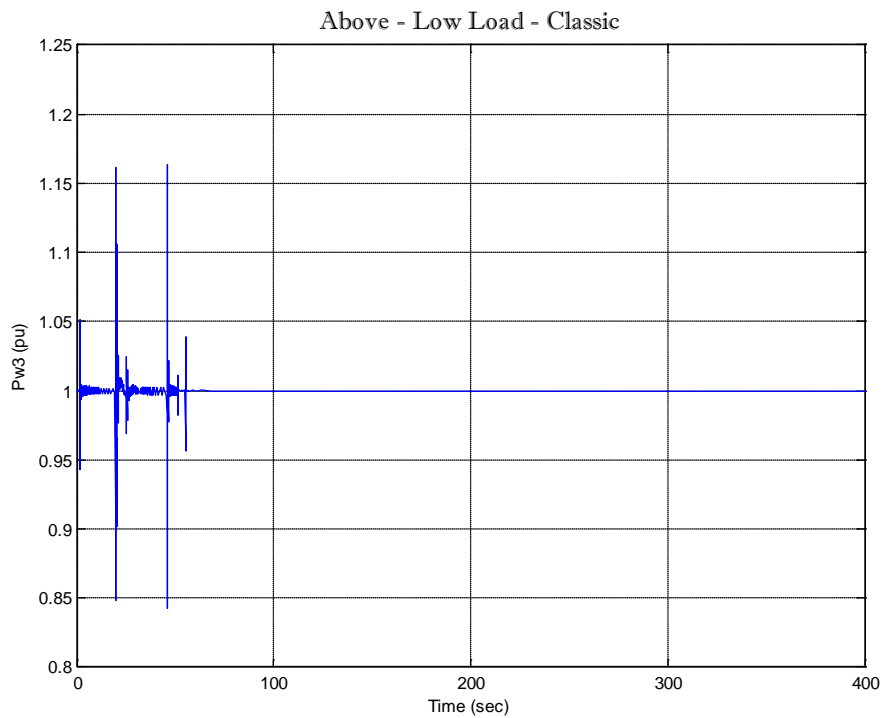
- ❖ Η ταχύτητα ανέμου είναι πάνω της ονομαστικής. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι στην Α/Γ1 η ταχύτητα ανέμου είναι 16 m/sec , στην Α/Γ2 είναι 15.5 m/sec και στην Α/Γ3 είναι 15 m/sec.
- ❖ Η Α/Γ3 αποφορτίζεται κατά 80%.
- ❖ Η νηξελογεννήτρια ζητείται να αποδίδει 0.7 pu ισχύ.
- ❖ Το φορτίο είναι χαμηλό και μεταβάλλεται από 0.8 σε 0.85 pu στα 20sec.

Ρύθμιση συχνότητας	Classic	Deloading - R1	Deloading – R2
f_{min} (pu)	0.9943	0.9969	0.9984
Δf_{min} (pu)	0.0057	0.0031	0.0016
f_c (pu)	0.9944	0.9971	0.9986
$ \Delta f_c $ (pu)	0.0056	0.0029	0.0014
$P_{w,αρχ}$ (pu)	0.1	0.02	0.02
ΔP_w (pu)	0	0.0286	0.042
$P_{d,αρχ}$ (pu)	0.552	0.631	0.6315
ΔP_d (pu)	0.056	0.0283	0.0142
$\frac{\Delta P_w}{P_{w,αρχ}}$ (%)	0	143	210
$\frac{\Delta P_d}{P_{d,αρχ}}$ (%)	10.14	4.48	2.25
$b_{αρχ}$ (°)	3.46	21.35	21.44
$b_{τελ}$ (°)	3.47	16.47	13.74

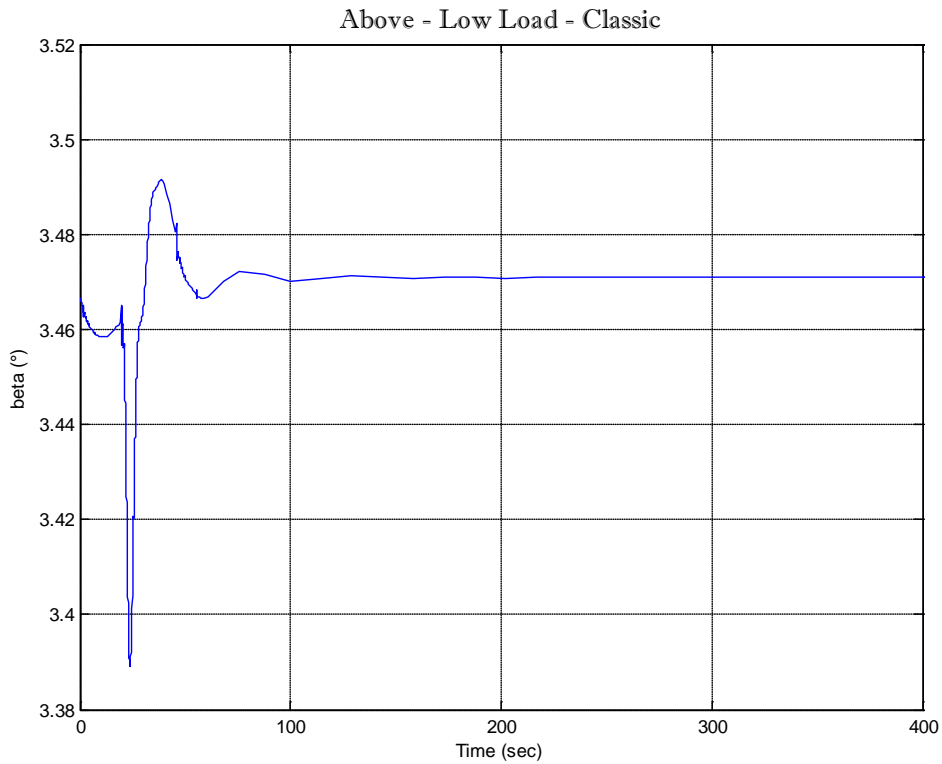
Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 1- Above-Low Load



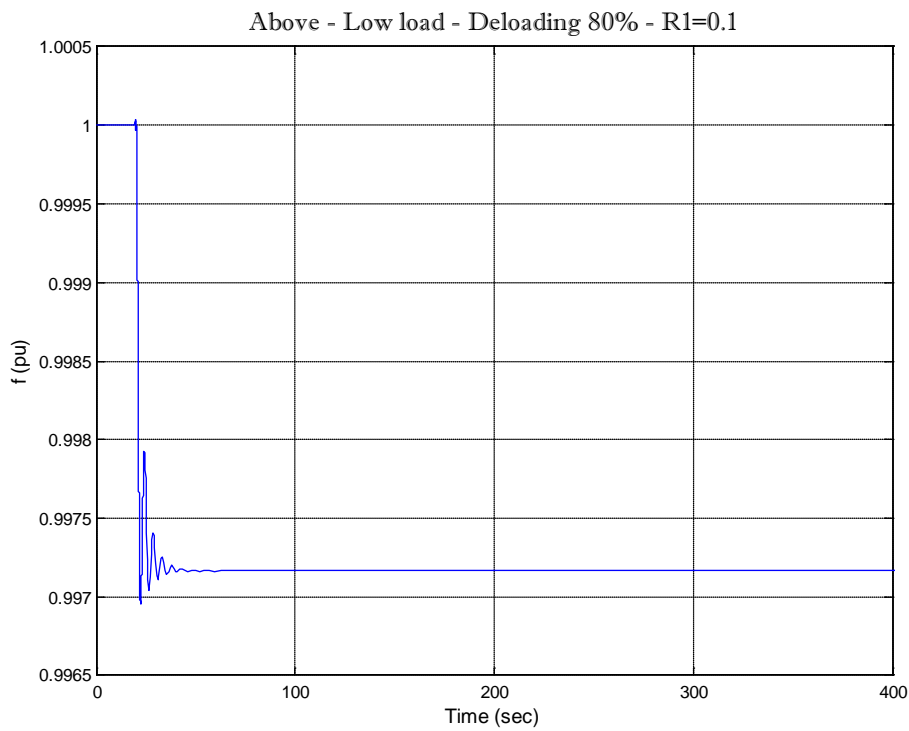
Σχήμα 5.1: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



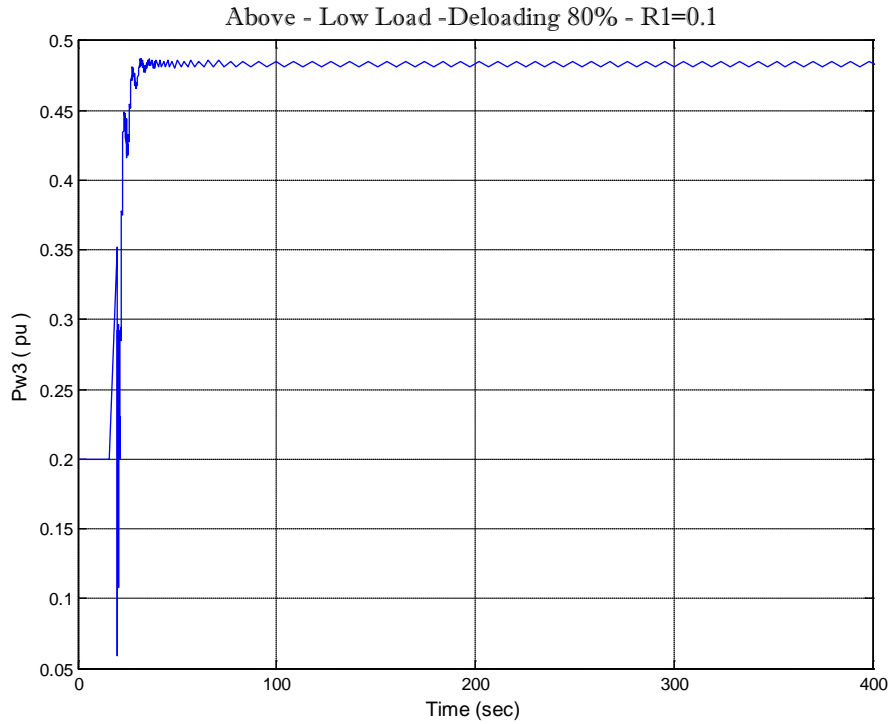
Σχήμα 5.2: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



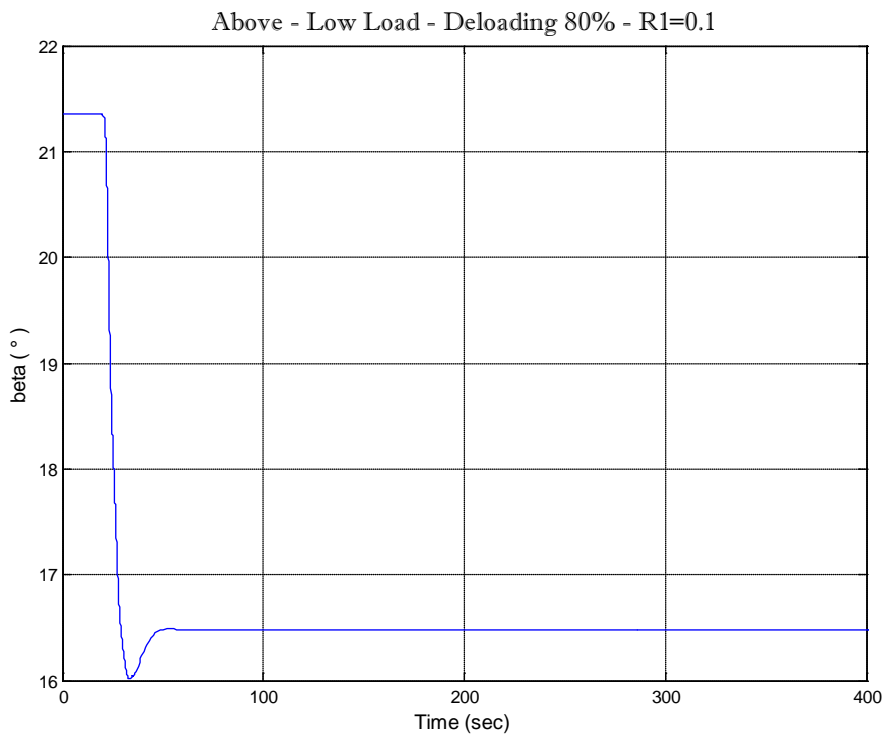
Σχήμα 5.3: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



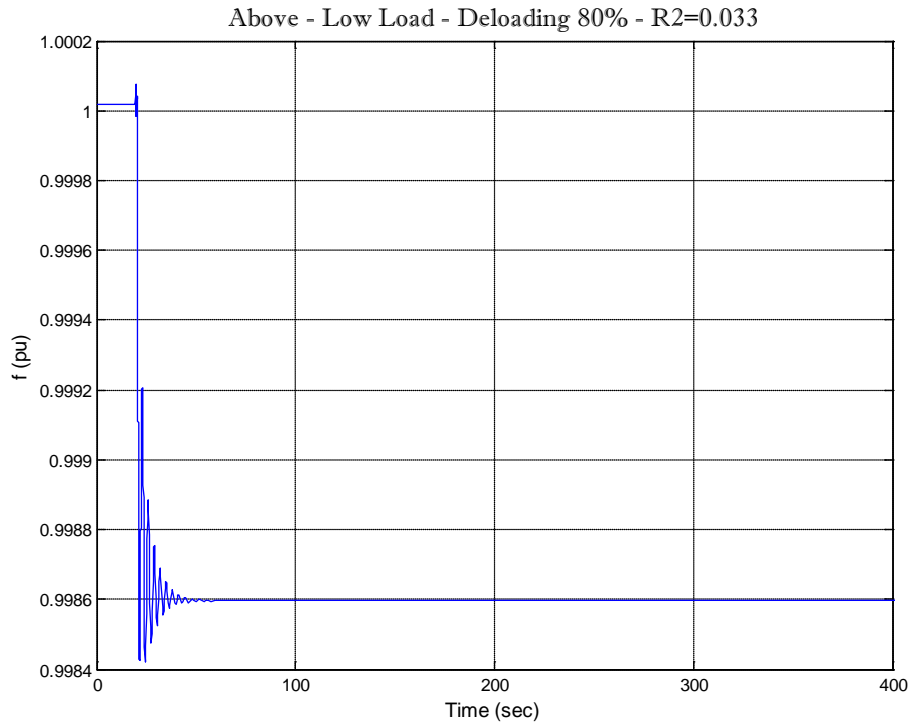
Σχήμα 5.4: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



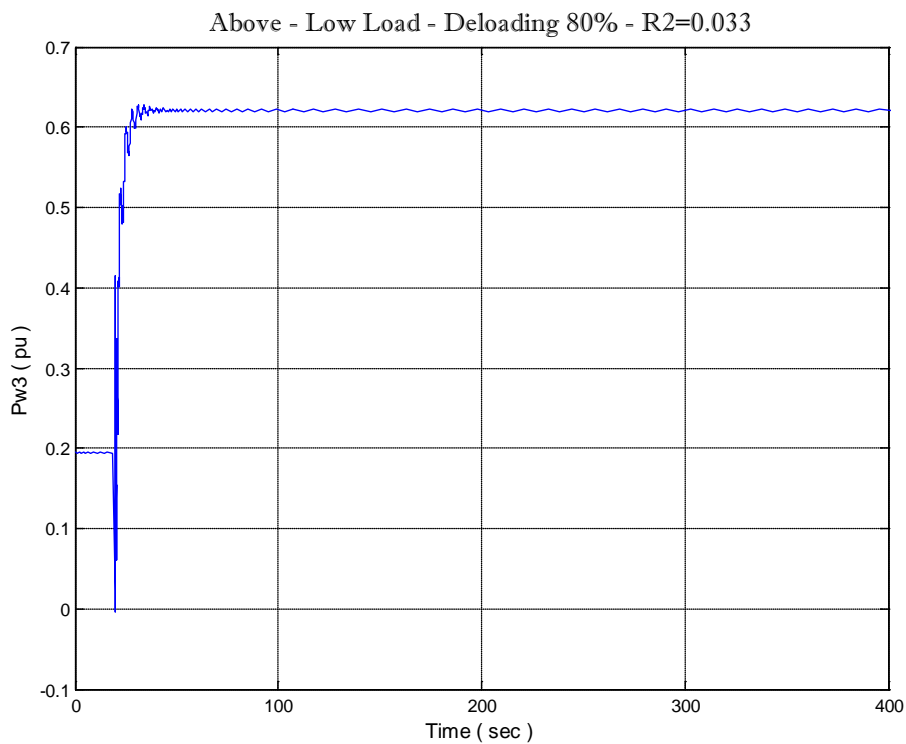
Σχήμα 5.5: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



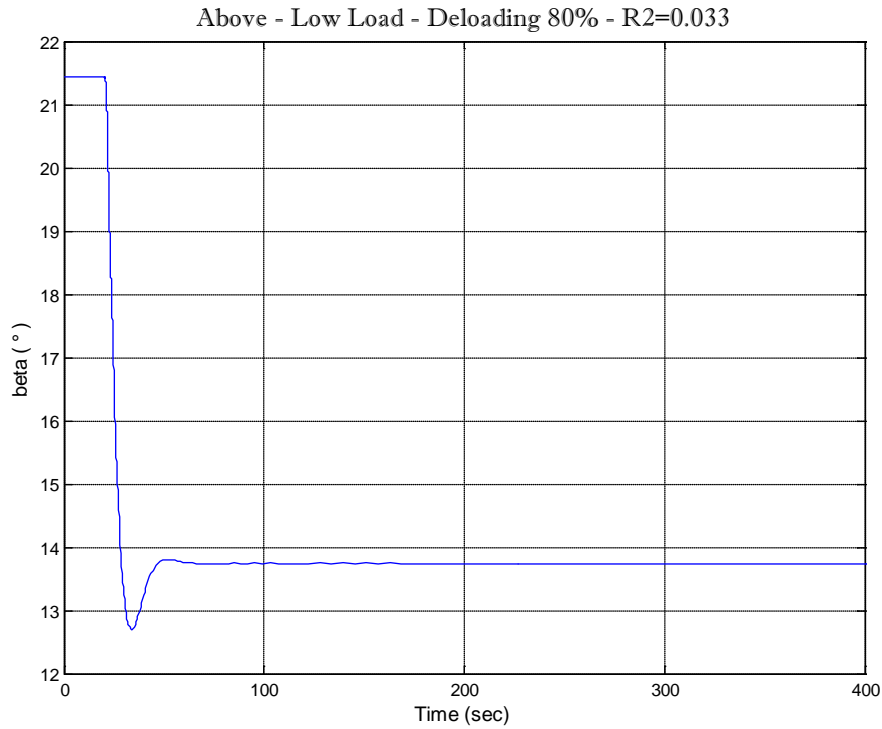
Σχήμα 5.6: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



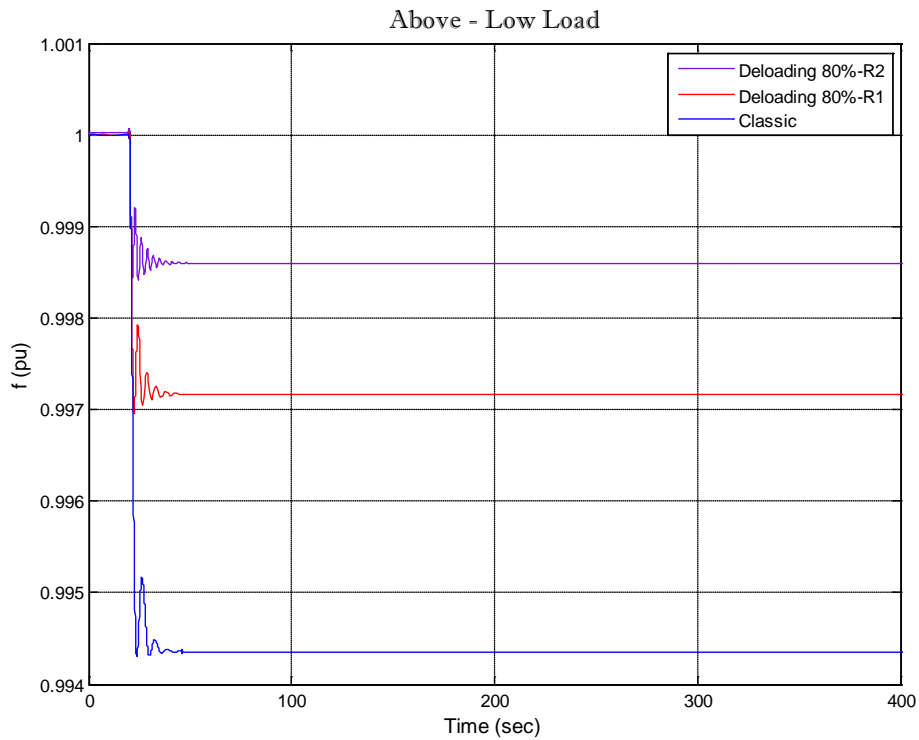
Σχήμα 5.7: Συχνότητα του δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ3 στη ρύθμιση, με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



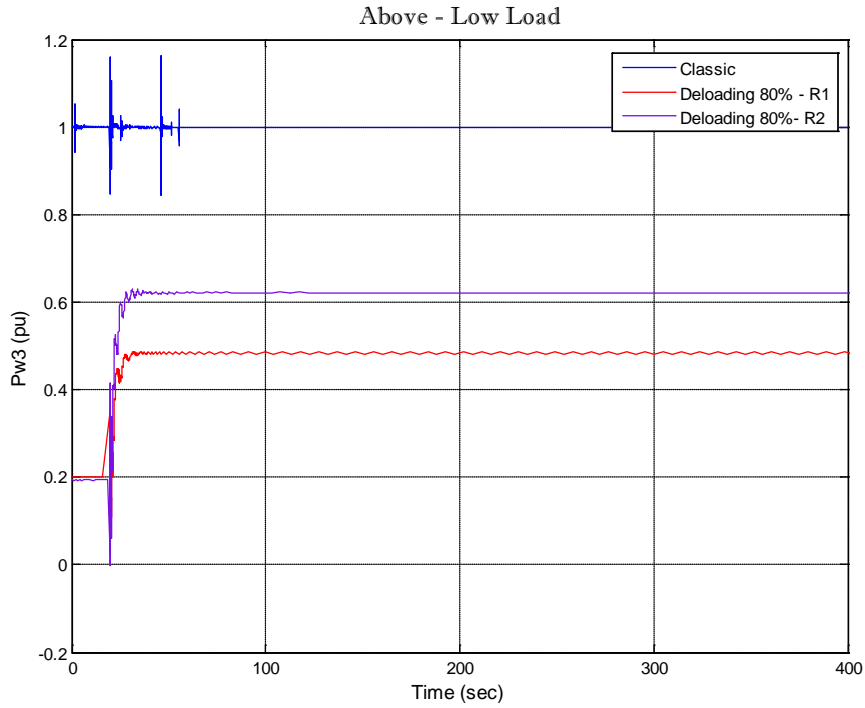
Σχήμα 5.8: Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



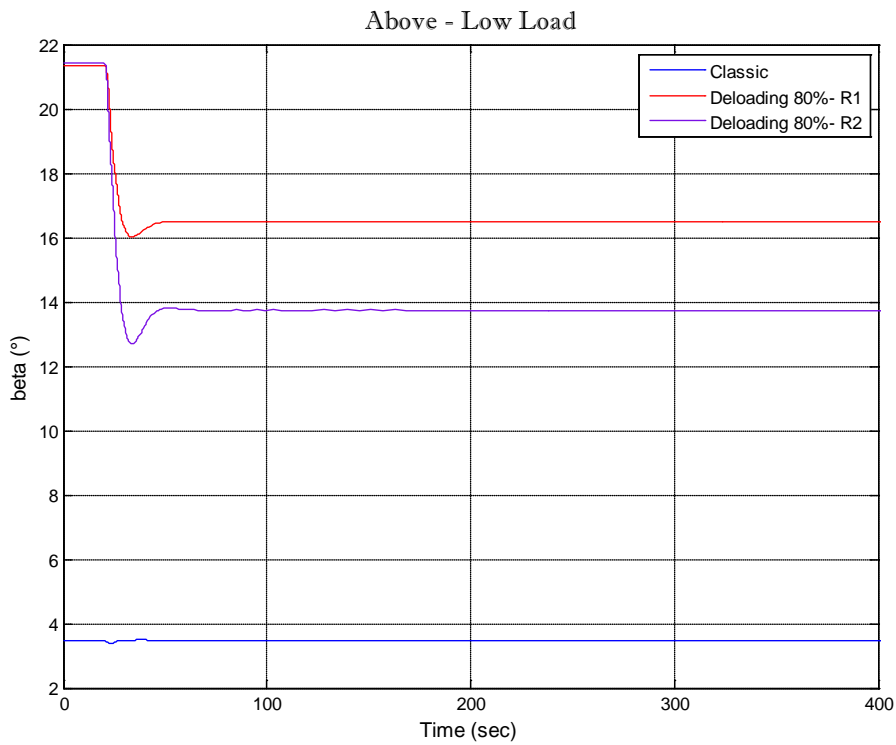
Σχήμα 5.9: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



Σχήμα 5.11: Σύγκριση της ισχύος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



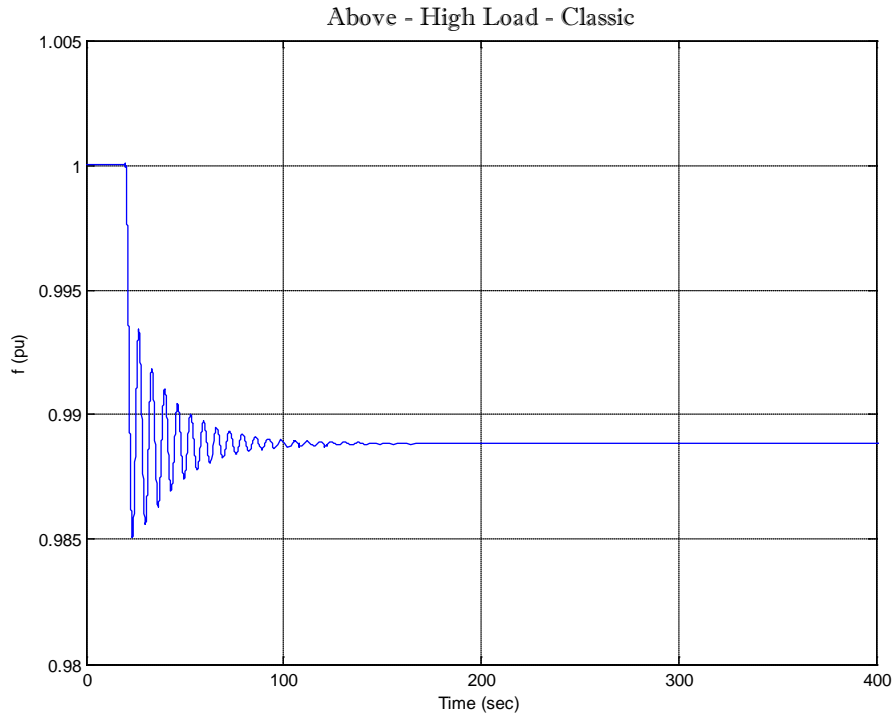
Σχήμα 5.12: Σύγκριση της γωνίας βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

5.2 Σενάριο 2: Ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής και υψηλό φορτίο

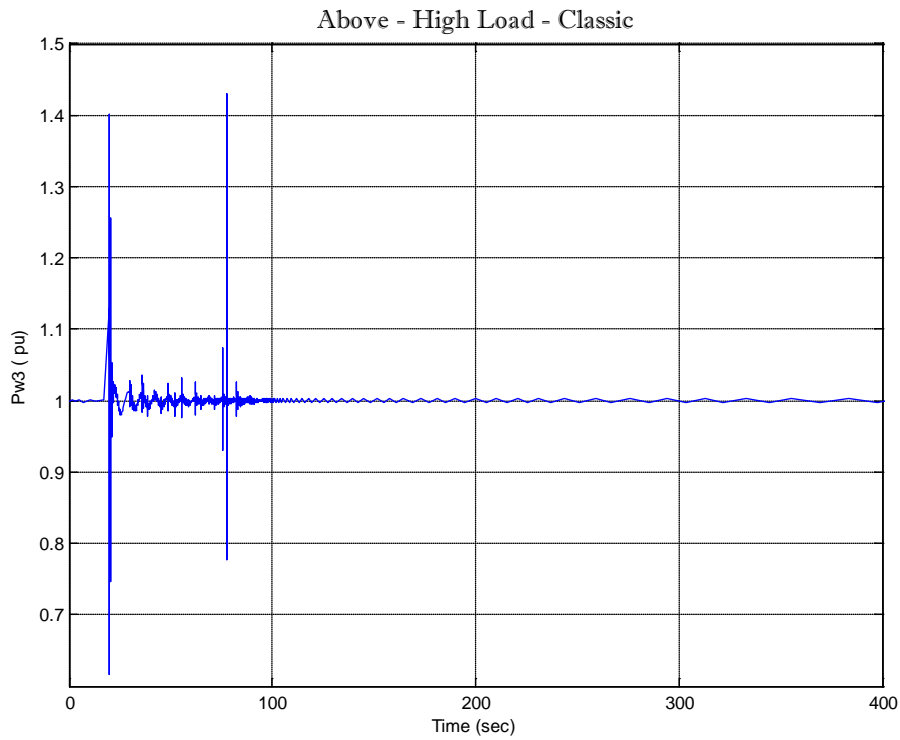
- ❖ Η ταχύτητα ανέμου είναι πάνω της ονομαστικής. Θεωρείται και πάλι ότι στην Α/Γ1 η ταχύτητα ανέμου είναι 16 *m/sec* , στην Α/Γ2 είναι 15.5 *m/sec* και στην Α/Γ3 είναι 15 *m/sec*.
- ❖ Η Α/Γ3 αποφορτίζεται κατά 80%.
- ❖ Η νηξελογεννήτρια ζητείται να αποδίδει 0.8 pu ισχύ.
- ❖ Το φορτίο είναι υψηλό και μεταβάλλεται από 0.95 σε 1.05 pu στα 20sec.

Ρύθμιση συχνότητας	Classic	Deloading - R1	Deloading – R2
$f_{min} (pu)$	0.985	0.9925	0.9939
$\Delta f_{min} (pu)$	0.015	0.0075	0.0061
$f_c (pu)$	0.9888	0.9944	0.9967
$ \Delta f_c (pu)$	0.0112	0.0056	0.0033
$P_{w,αρχ} (pu)$	0.1	0.02	0.02
$\Delta P_w (pu)$	0	0.056	0.08
$P_{d,αρχ} (pu)$	0.7125	0.79	0.791
$\Delta P_d (pu)$	0.1115	0.057	0.0332
$\frac{\Delta P_w}{P_{w,αρχ}} (%)$	0	280	400
$\frac{\Delta P_d}{P_{d,αρχ}} (%)$	15.65	7.22	4.2
$b_{αρχ} (^\circ)$	3.51	21.35	21.36
$b_{τελ} (^\circ)$	3.52	10.52	3.51

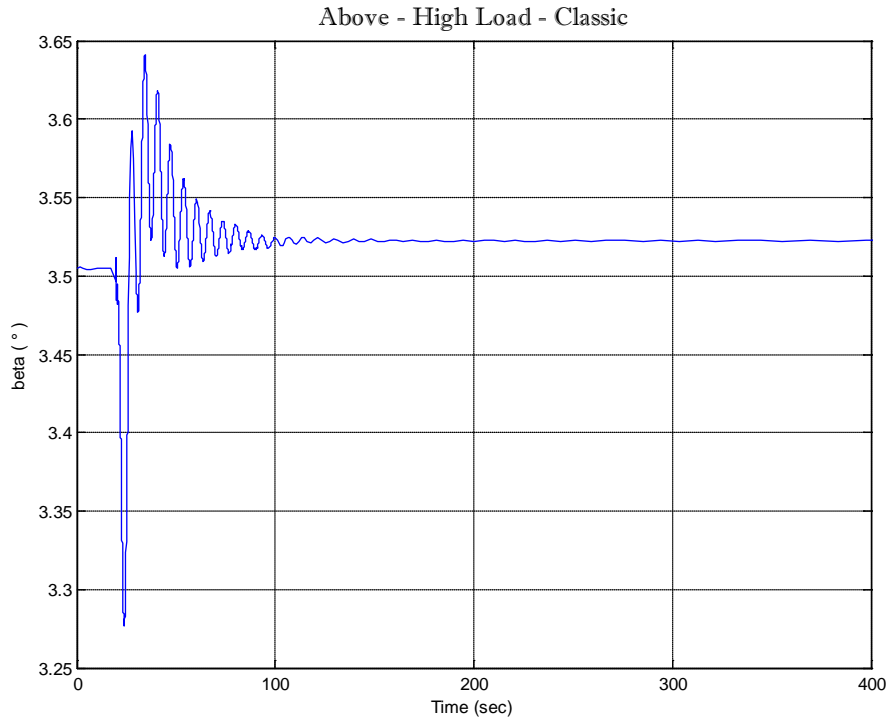
Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 2-Above-High Load



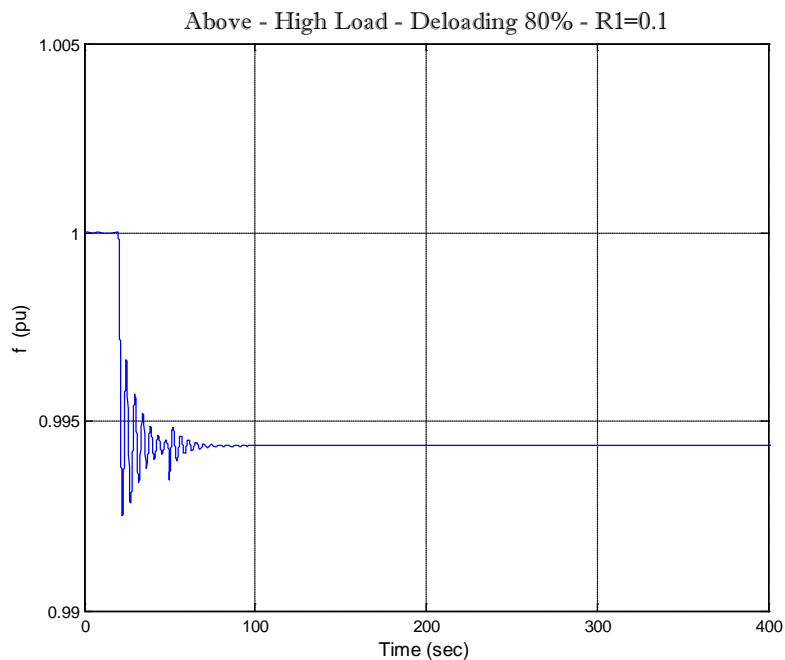
Σχήμα 5.13: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



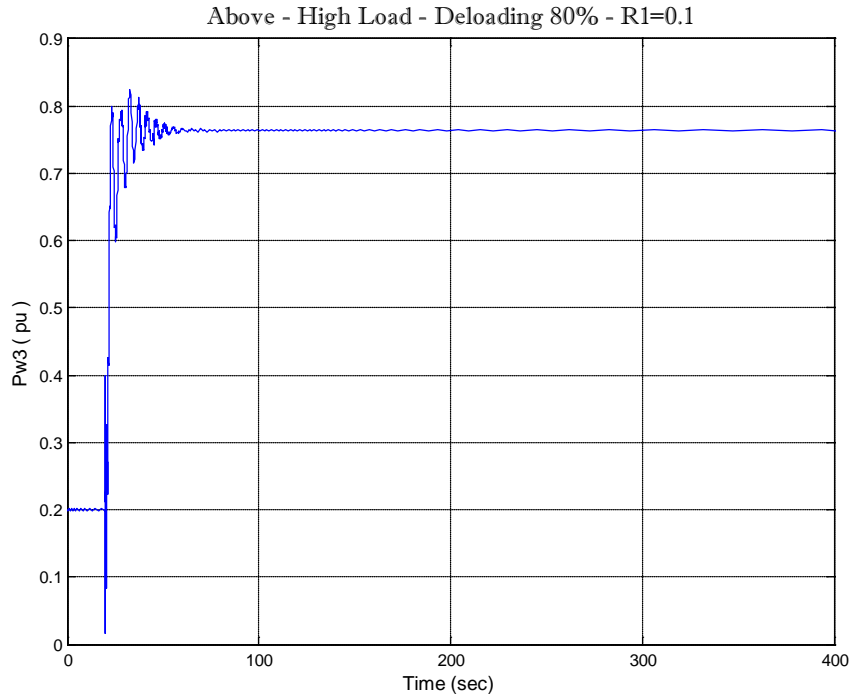
Σχήμα 5.14: Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



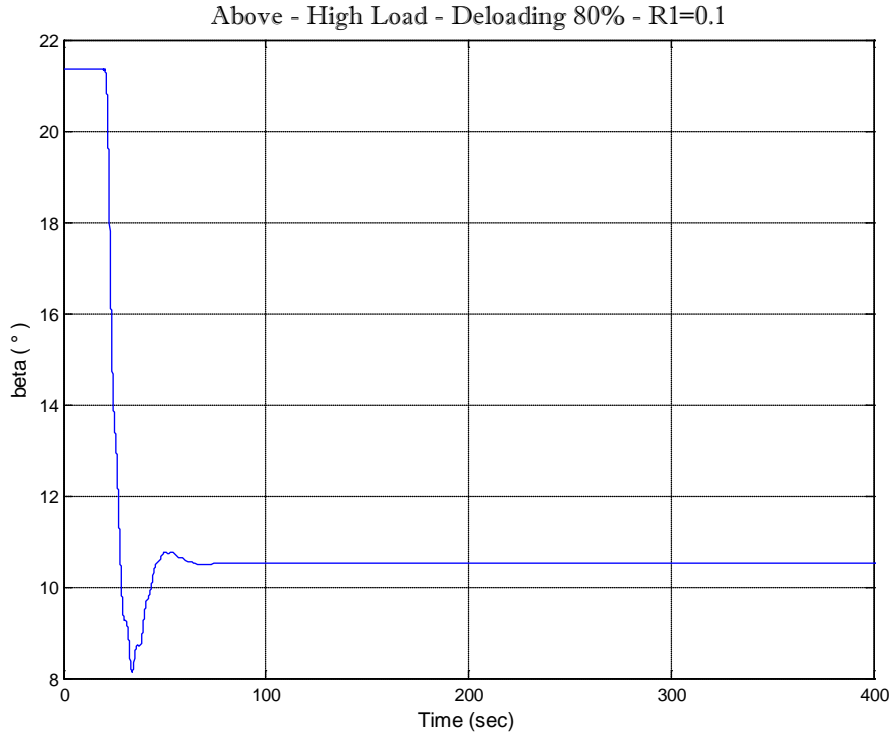
Σχήμα 5.15: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



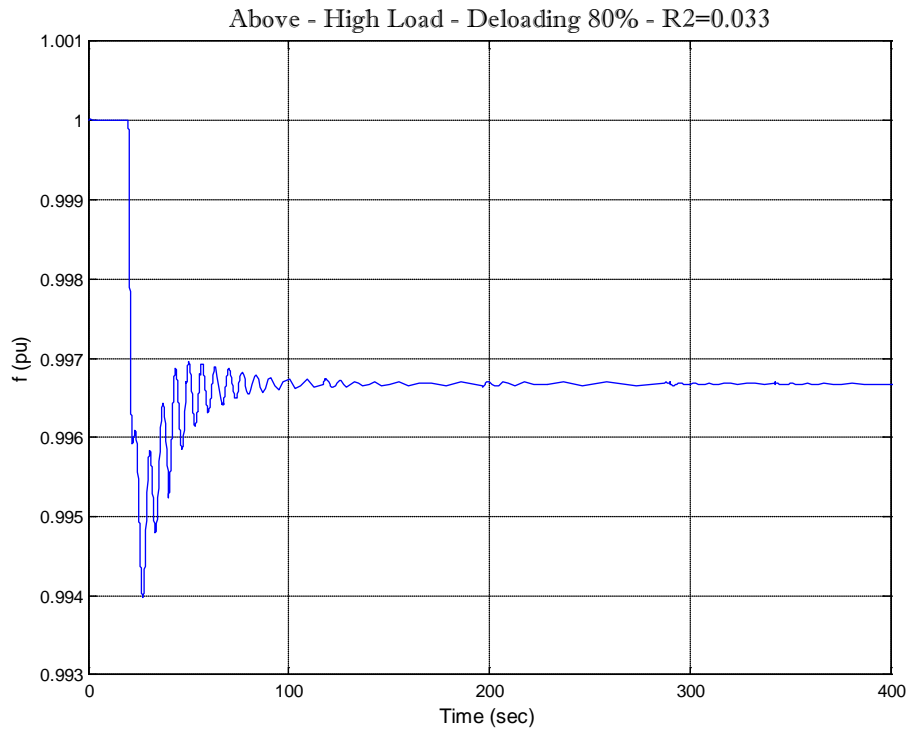
Σχήμα 5.16: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



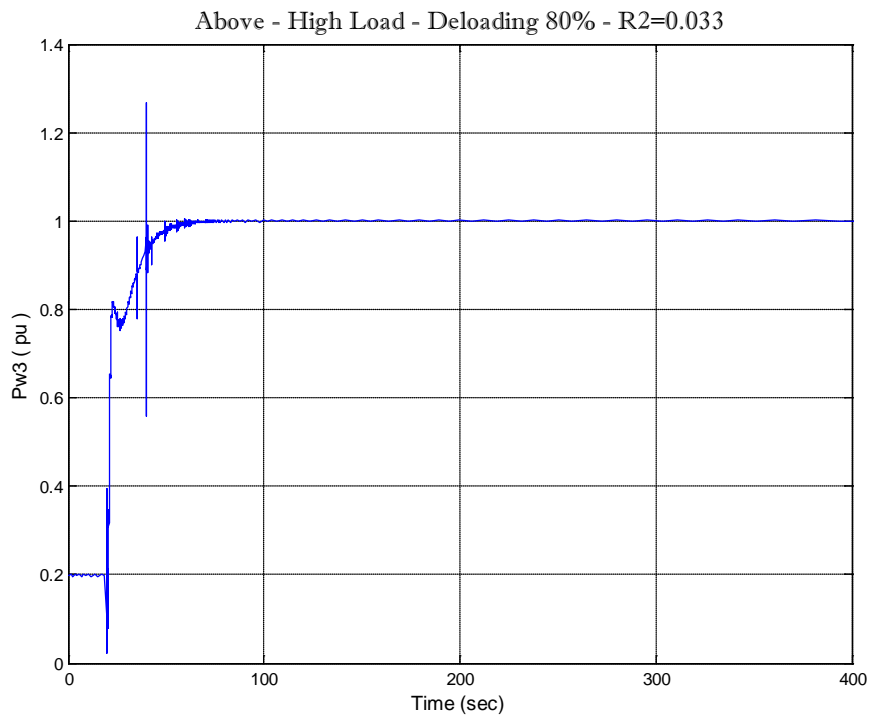
Σχήμα 5.17: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



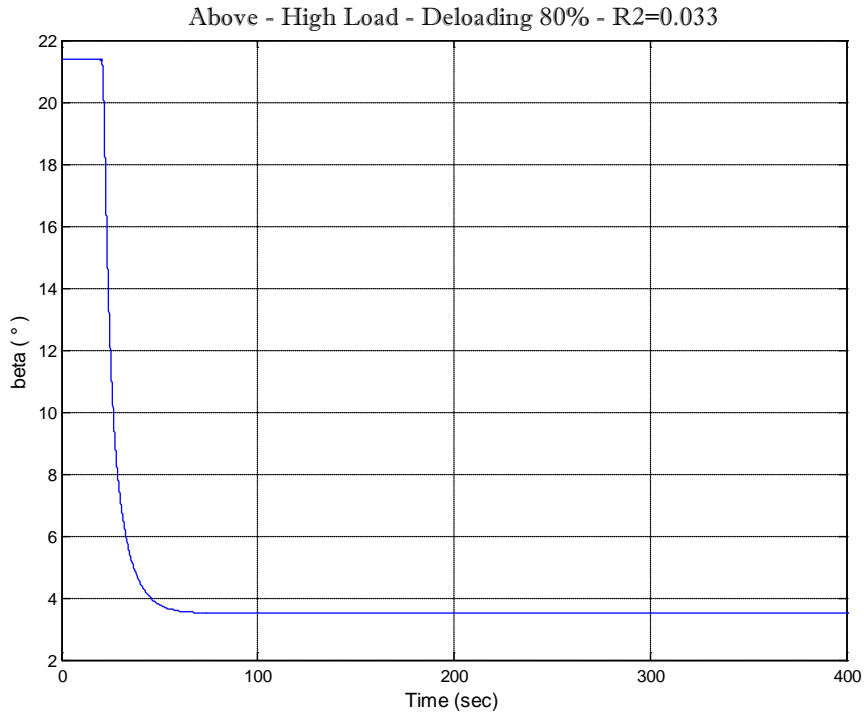
Σχήμα 5.18: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



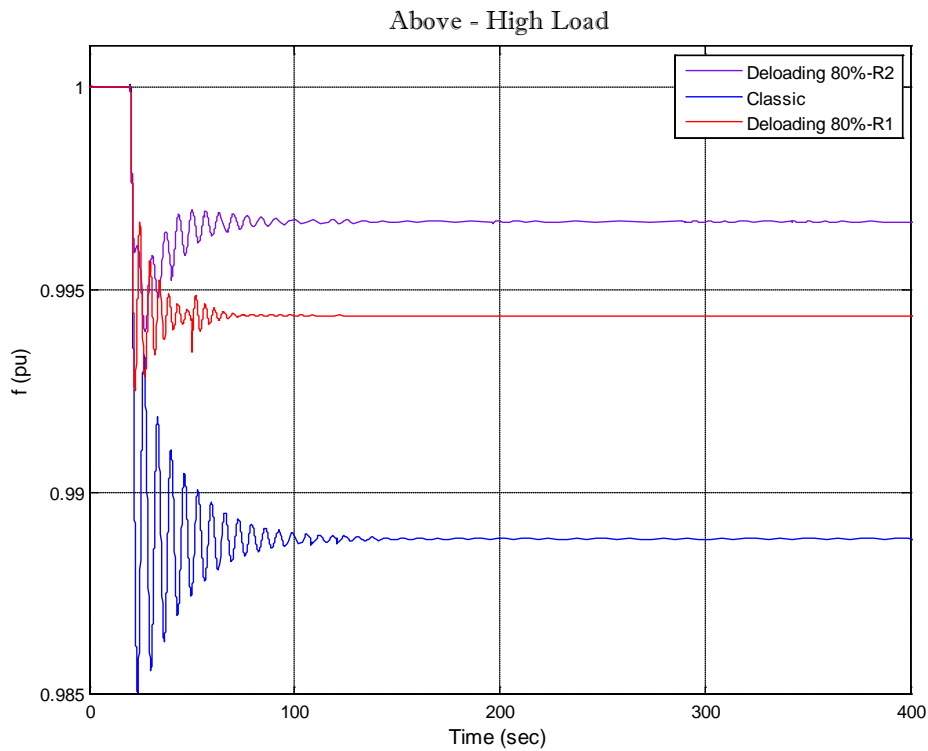
Σχήμα 5.19: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



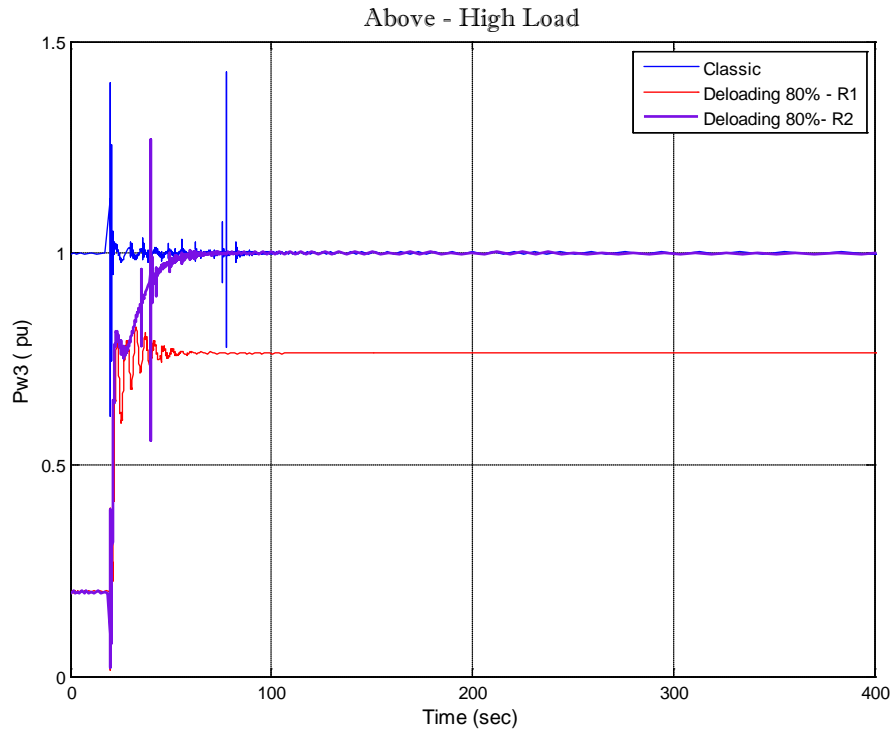
Σχήμα 5.20: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



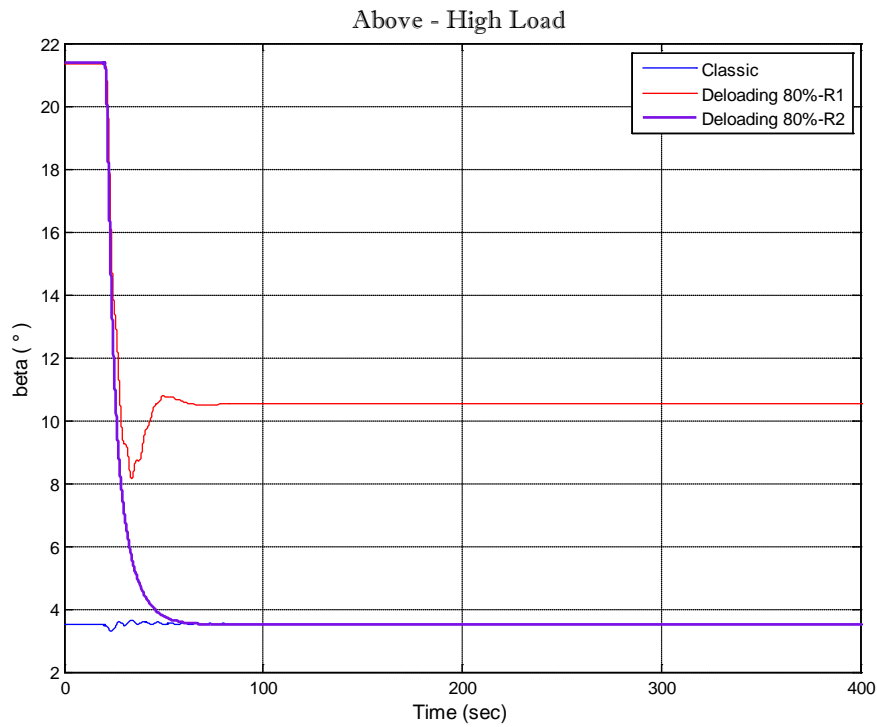
Σχήμα 5.21: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής.



Σχήμα 5.22: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση της ισχύος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



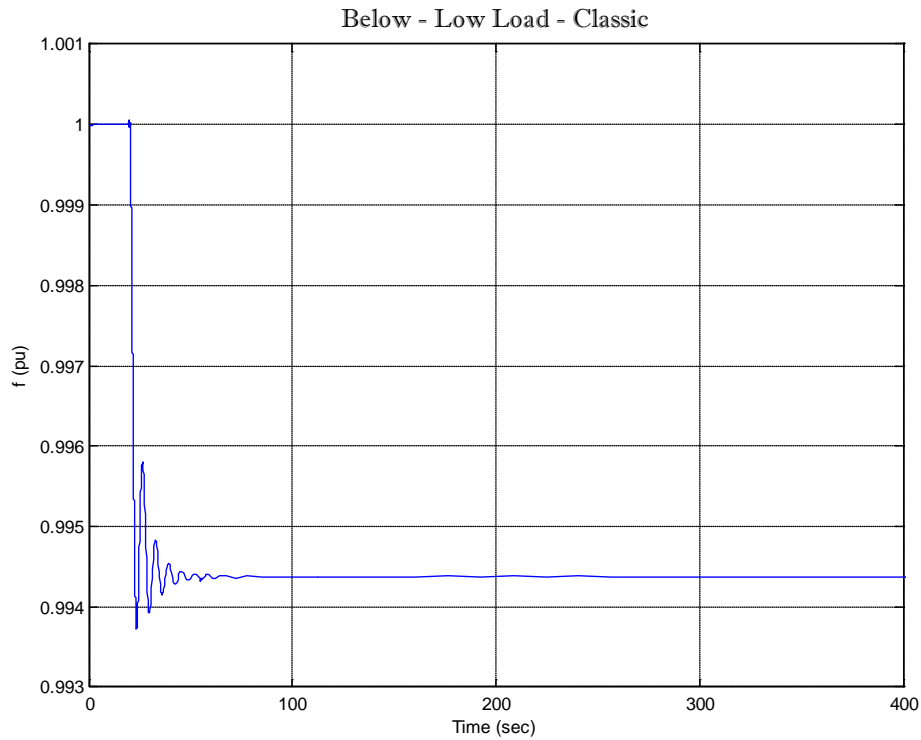
Σχήμα 5.24: Σύγκριση της γωνίας βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

5.3 Σενάριο 3: Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και χαμηλό φορτίο

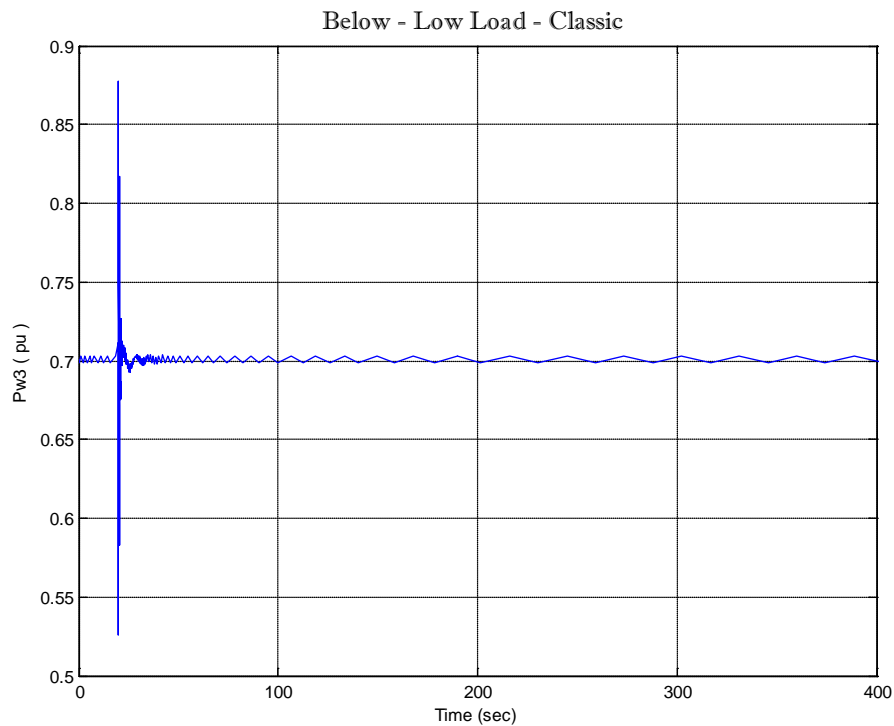
- ❖ Η ταχύτητα ανέμου είναι κάτω της ονομαστικής. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι στην Α/Γ1 η ταχύτητα ανέμου είναι 12 m/sec , στην Α/Γ2 είναι επίσης 12m/sec και στην Α/Γ3 είναι 12.5 m/sec.
- ❖ Η Α/Γ3 αποφορτίζεται κατά 80%.
- ❖ Η νηξελογενητήρια ζητείται να αποδίδει 0.7 pu ισχύ.
- ❖ Το φορτίο είναι χαμηλό και μεταβάλλεται από 0.8 σε 0.85 pu στα 20sec.

Ρύθμιση συχνότητας	Classic	Deloading - R1	Deloading – R2
$f_{min} (pu)$	0.9937	0.9961	0.9977
$\Delta f_{min} (pu)$	0.0063	0.0039	0.0023
$f_c (pu)$	0.9944	0.9967	0.9982
$ \Delta f_c (pu)$	0.0056	0.0033	0.0018
$P_{w,αρχ} (pu)$	0.071	0.0142	0.0142
$\Delta P_w (pu)$	0	0.0234	0.0384
$P_{d,αρχ} (pu)$	0.6568	0.712	0.712
$\Delta P_d (pu)$	0.0562	0.033	0.018
$\frac{\Delta P_w}{P_{w,αρχ}} (%)$	0	164.79	270.42
$\frac{\Delta P_d}{P_{d,αρχ}} (%)$	8.56	4.63	2.53
$b_{αρχ} (^\circ)$	0	19.42	19.42
$b_{τελ} (^\circ)$	0	12.46	6.68

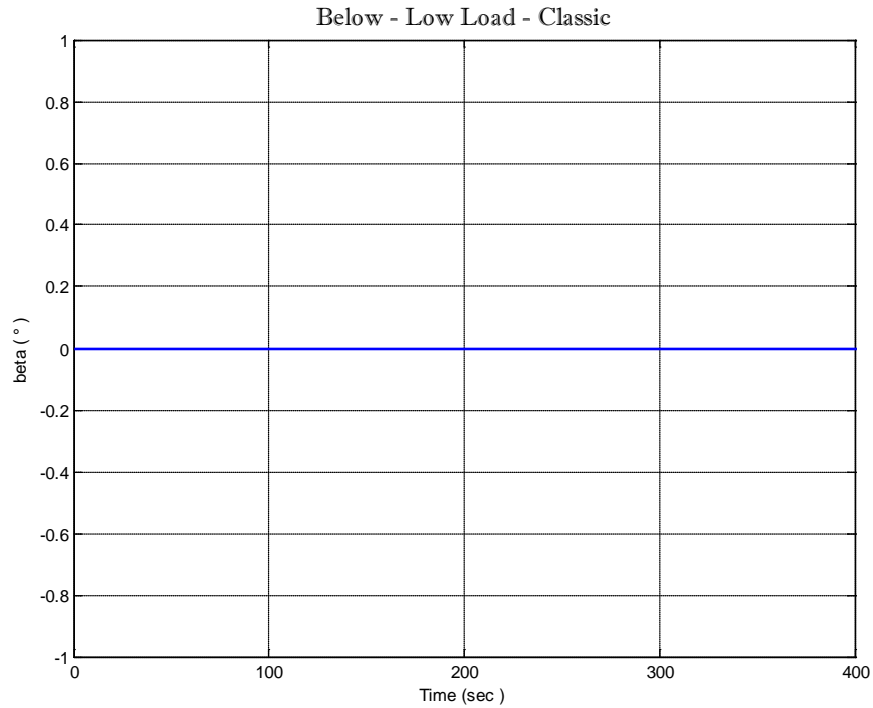
Πίνακας 12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 3-Below-Low Load



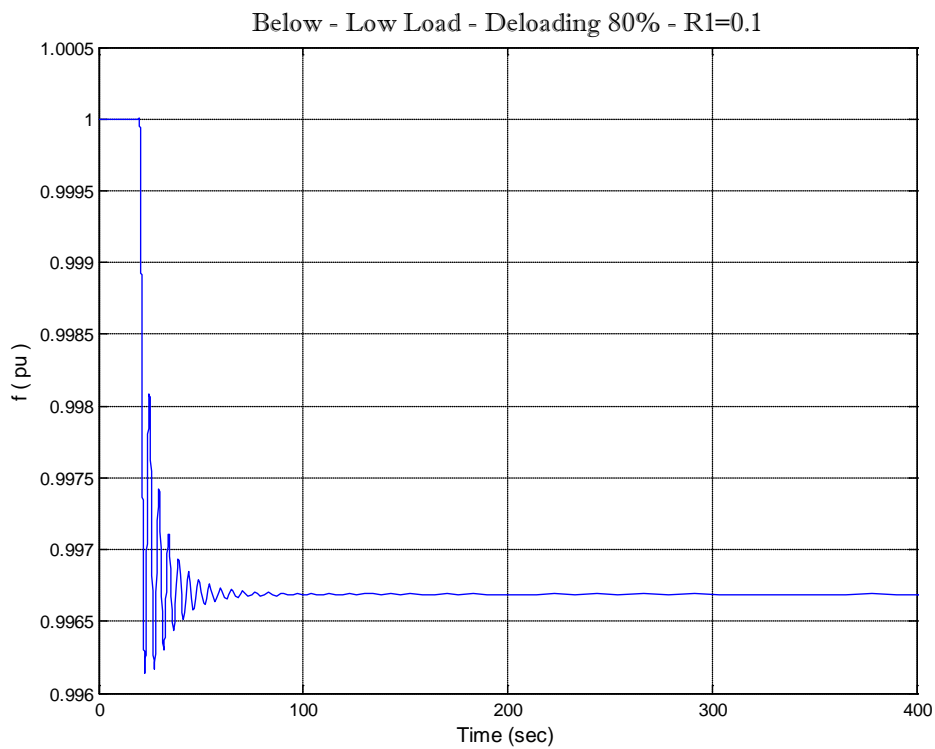
Σχήμα 5.25: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



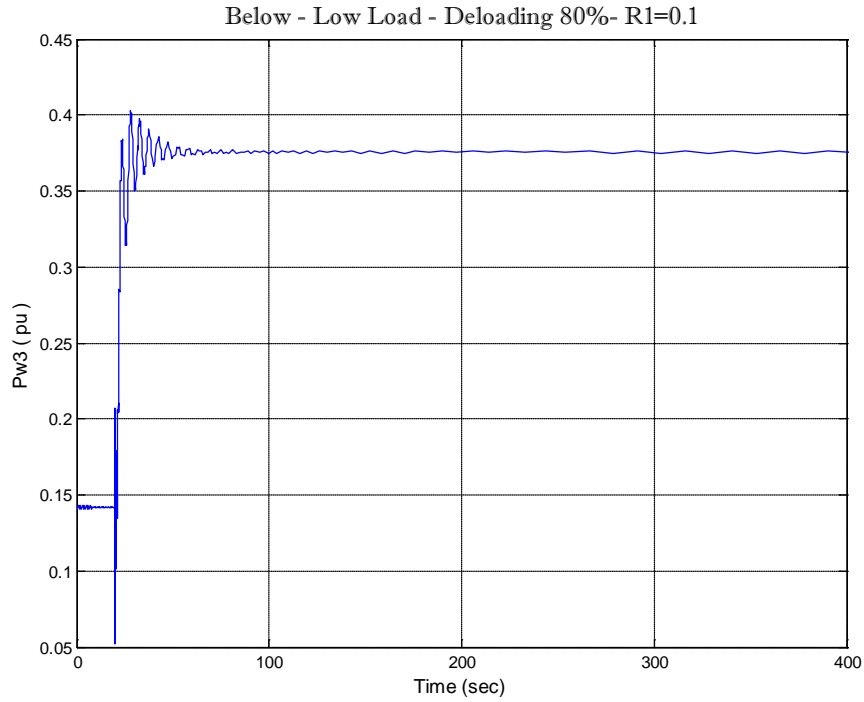
Σχήμα 5.26: Ισχύς της A/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



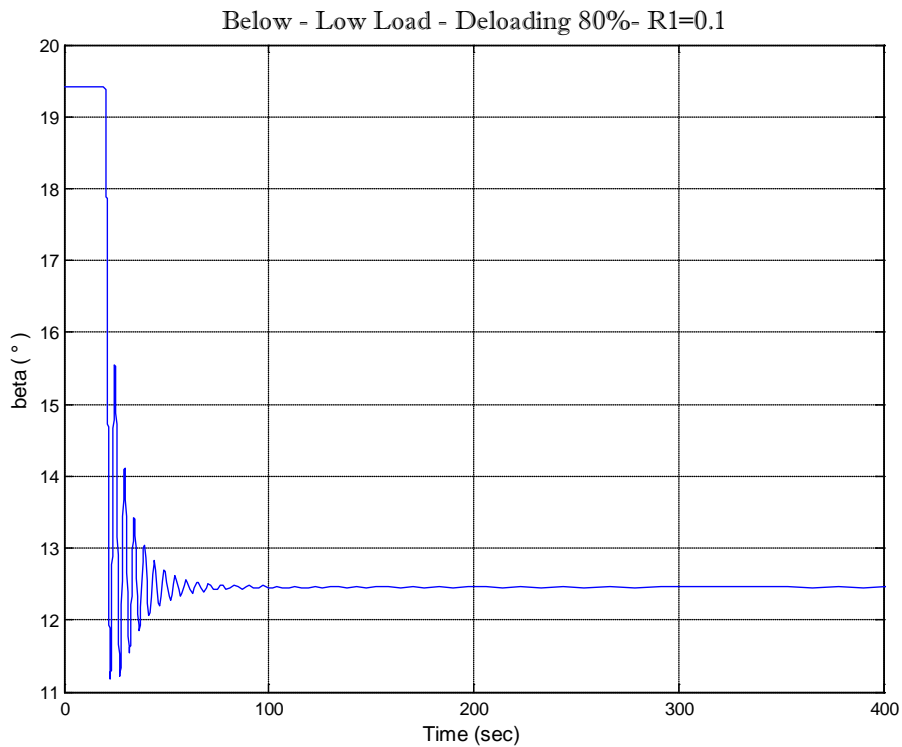
Σχήμα 5.27: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



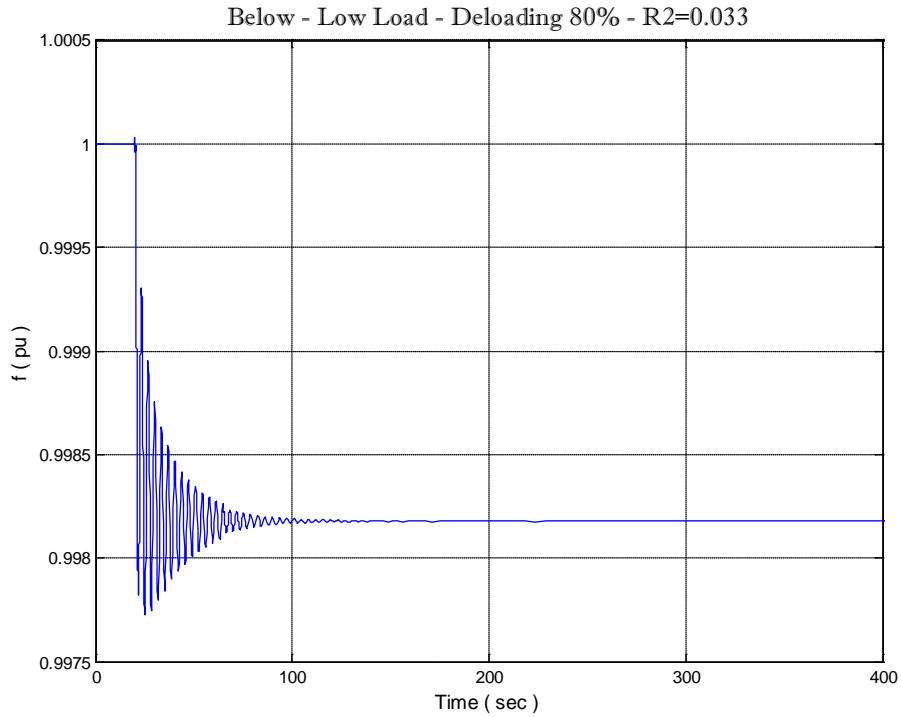
Σχήμα 5.28: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



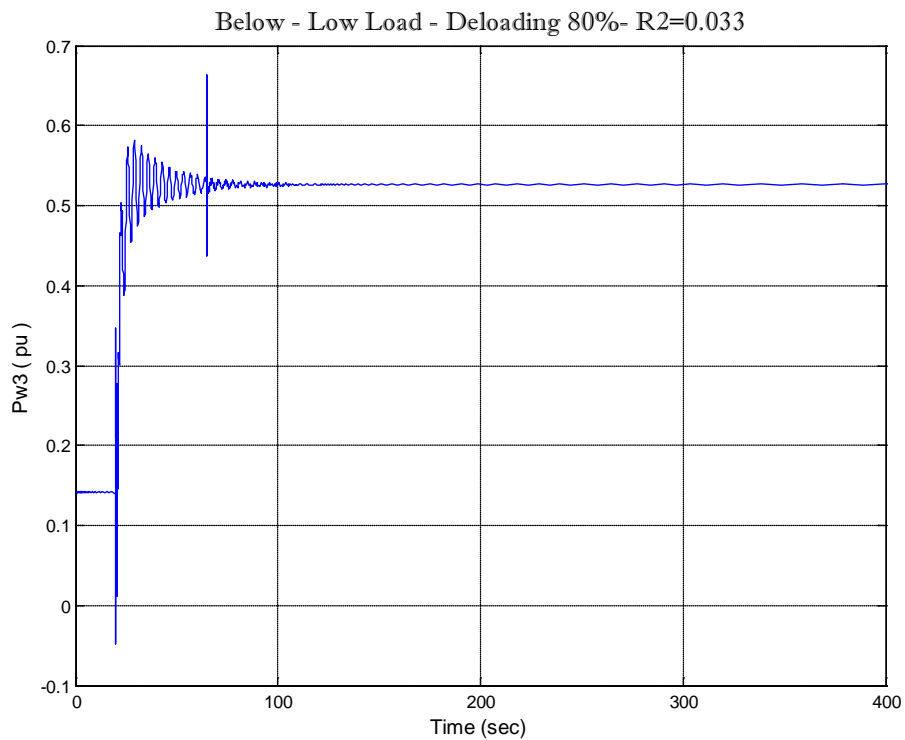
Σχήμα 5.29: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



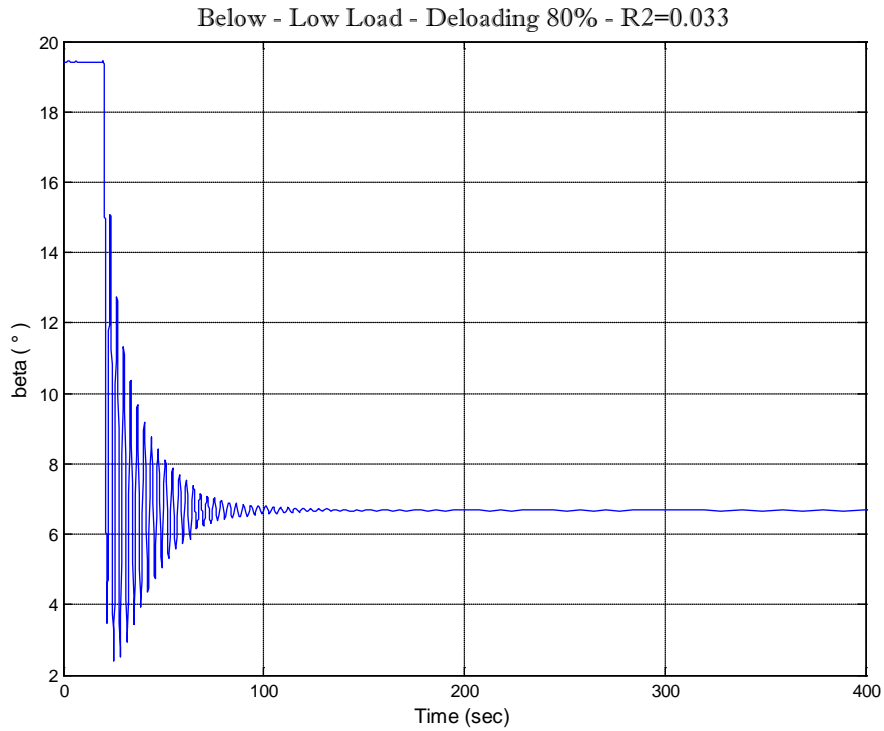
Σχήμα 5.30: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



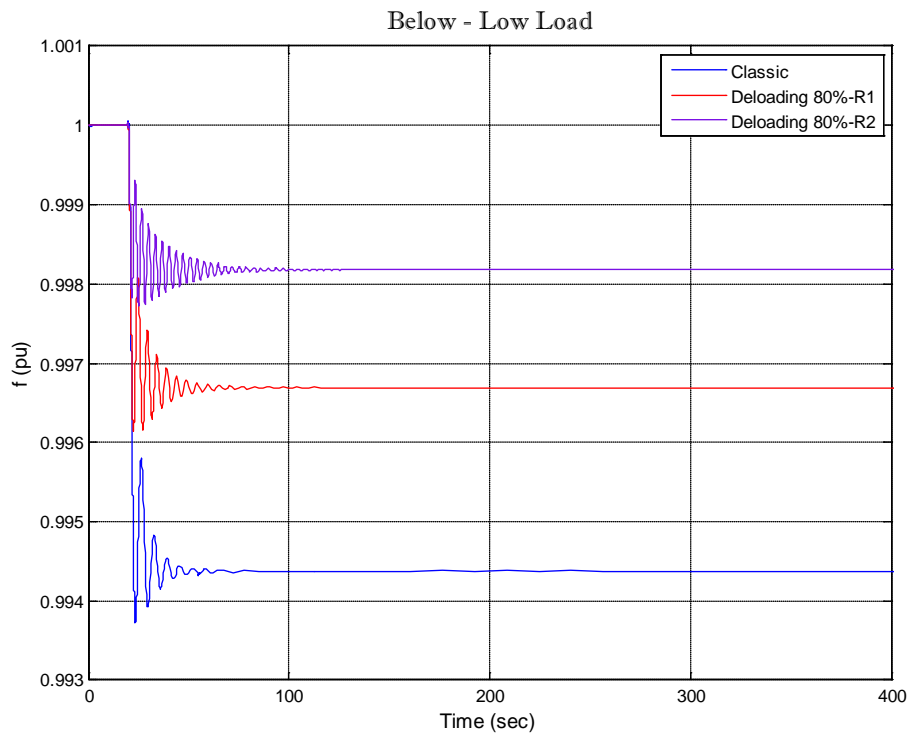
Σχήμα 5.31: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



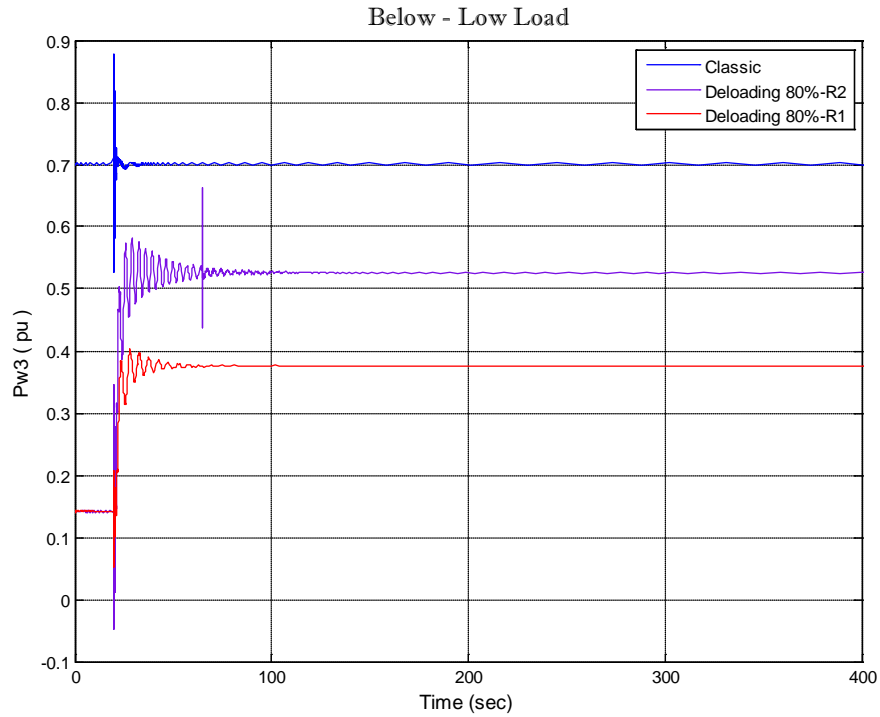
Σχήμα 5.32: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



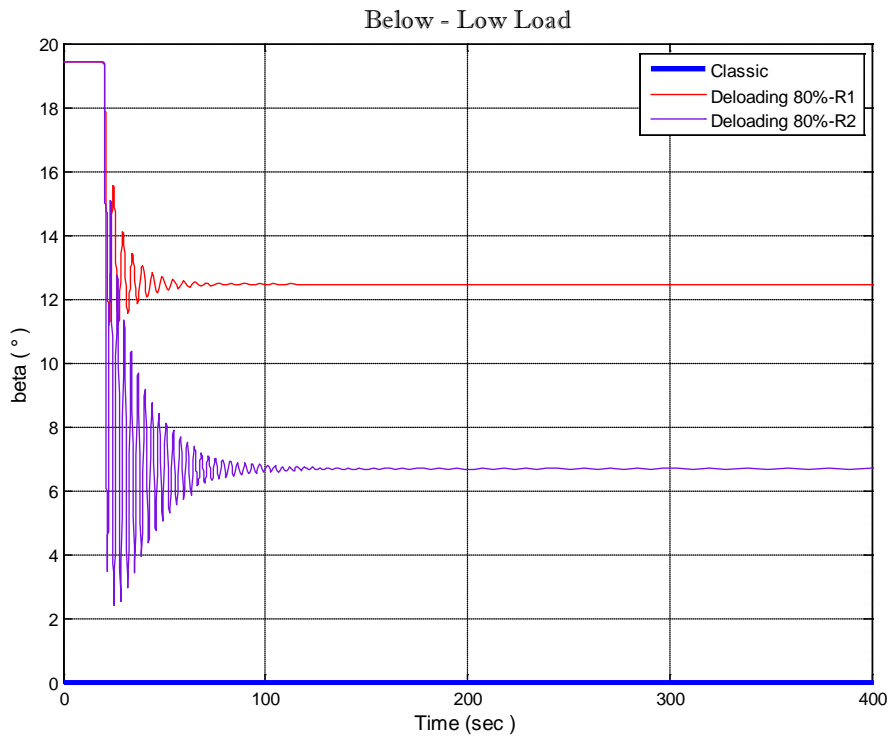
Σχήμα 5.33: Γωνία βήματος της Α/Γ σε μεταβολή χαμηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



Σχήμα 5.34: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



Σχήμα 5.35 : Σύγκριση της ισχύος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



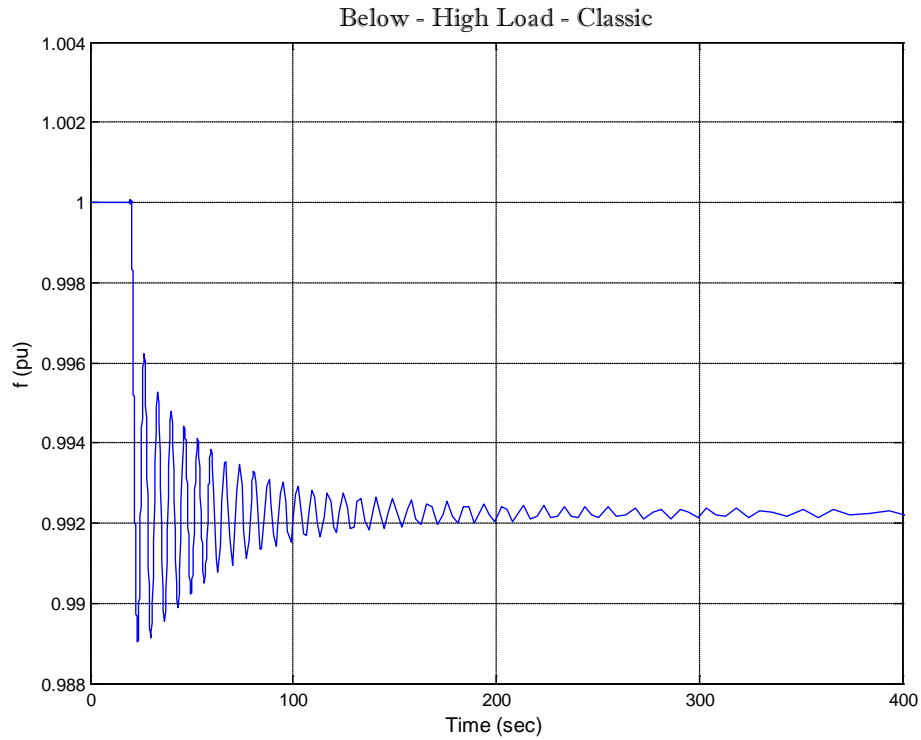
Σχήμα 5.36: Σύγκριση της γωνίας βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

5.4 Σενάριο 4: Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και υψηλό φορτίο

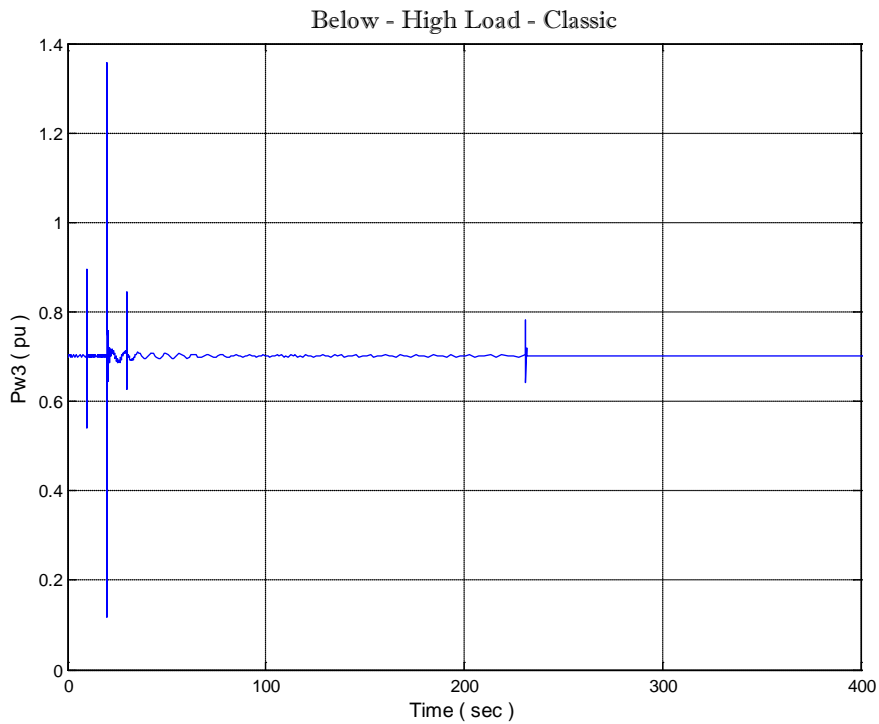
- ❖ Η ταχύτητα ανέμου είναι κάτω της ονομαστικής. Θεωρείται και πάλι ότι στην Α/Γ1 η ταχύτητα ανέμου είναι 12 m/sec , στην Α/Γ2 είναι επίσης 12m/sec και στην Α/Γ3 είναι 12.5 m/sec.
- ❖ Η Α/Γ3 αποφορτίζεται κατά 80%.
- ❖ Η νηξελογεννήτρια ζητείται να αποδίδει 0.8 pu ισχύ.
- ❖ Το φορτίο είναι υψηλό και μεταβάλλεται από 0.93 σε 1 pu στα 20sec.

Ρύθμιση συχνότητας	Classic	Deloading – R1	Deloading – R2
$f_{min} (pu)$	0.989	0.9934	0.9963
$\Delta f_{min} (pu)$	0.011	0.0066	0.0037
$f_c (pu)$	0.9922	0.9954	0.9975
$ \Delta f_c (pu)$	0.0078	0.0046	0.0025
$P_{w,αρχ} (pu)$	0.071	0.0142	0.0142
$\Delta P_w (pu)$	0	0.0324	0.0533
$P_{d,αρχ} (pu)$	0.7937	0.8484	0.8404
$\Delta P_d (pu)$	0.0773	0.0458	0.0256
$\frac{\Delta P_w}{P_{w,αρχ}} (%)$	0	228.17	375.35
$\frac{\Delta P_d}{P_{d,αρχ}} (%)$	9.74	5.4	3.02
$b_{αρχ} (^\circ)$	0	19.43	19.43
$b_{τελ} (^\circ)$	0	9.17	1

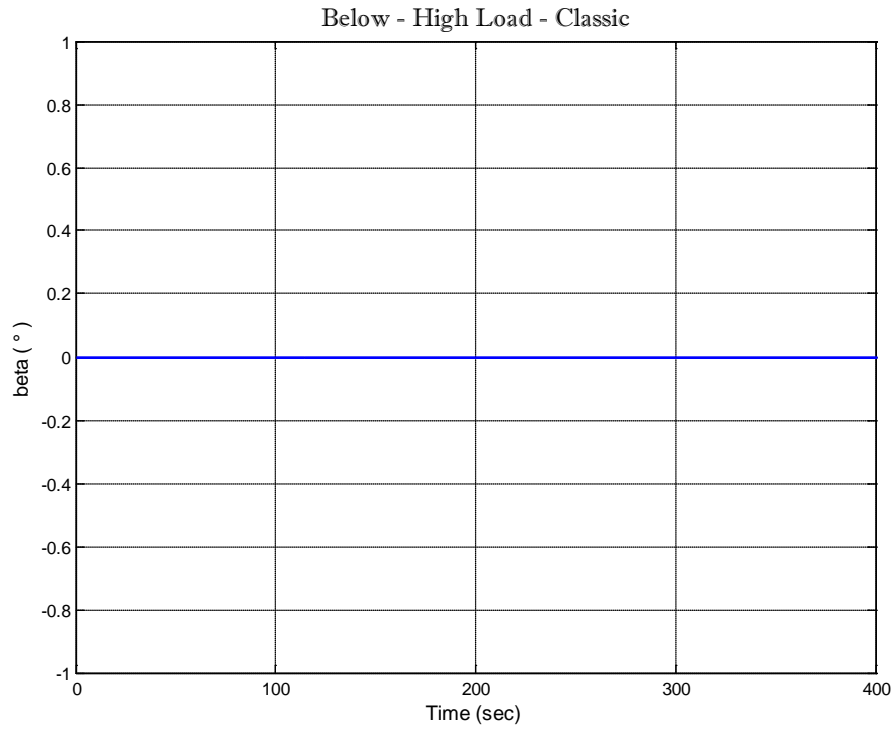
Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 4-Below-High Load



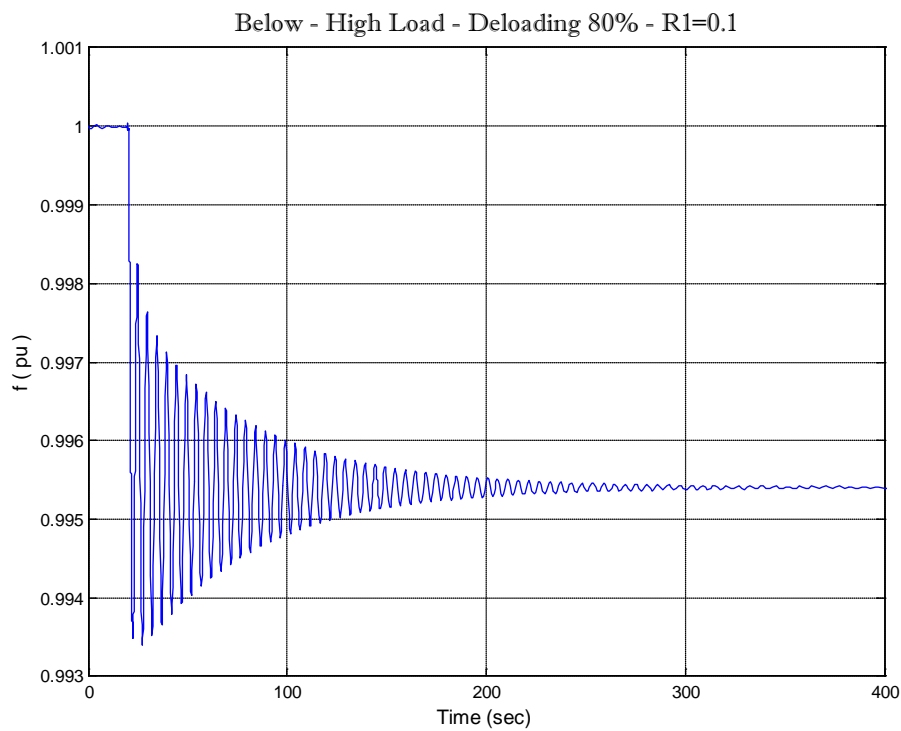
Σχήμα 5.37: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



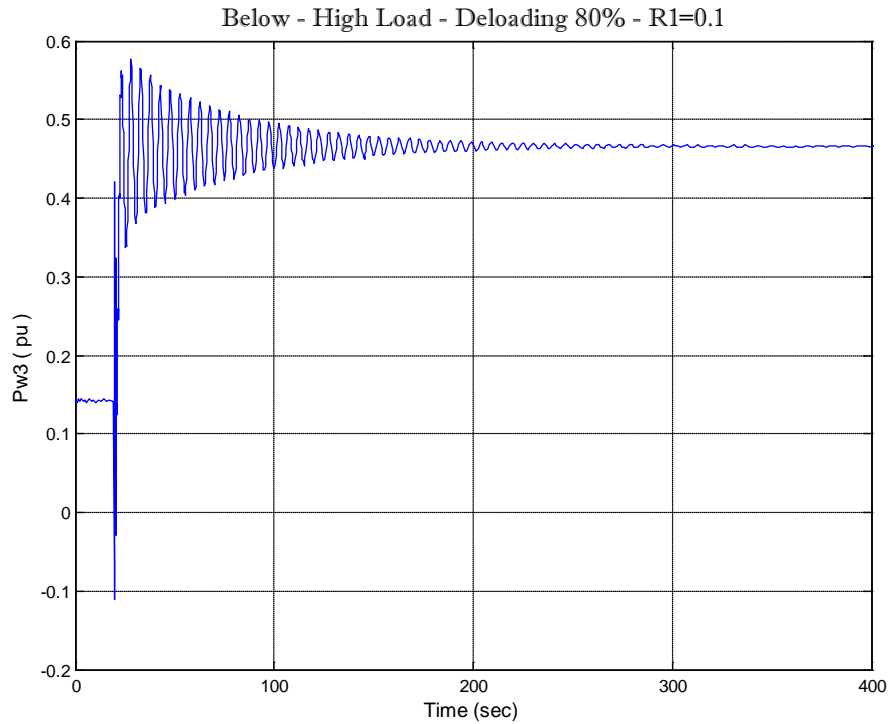
Σχήμα 5.38: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



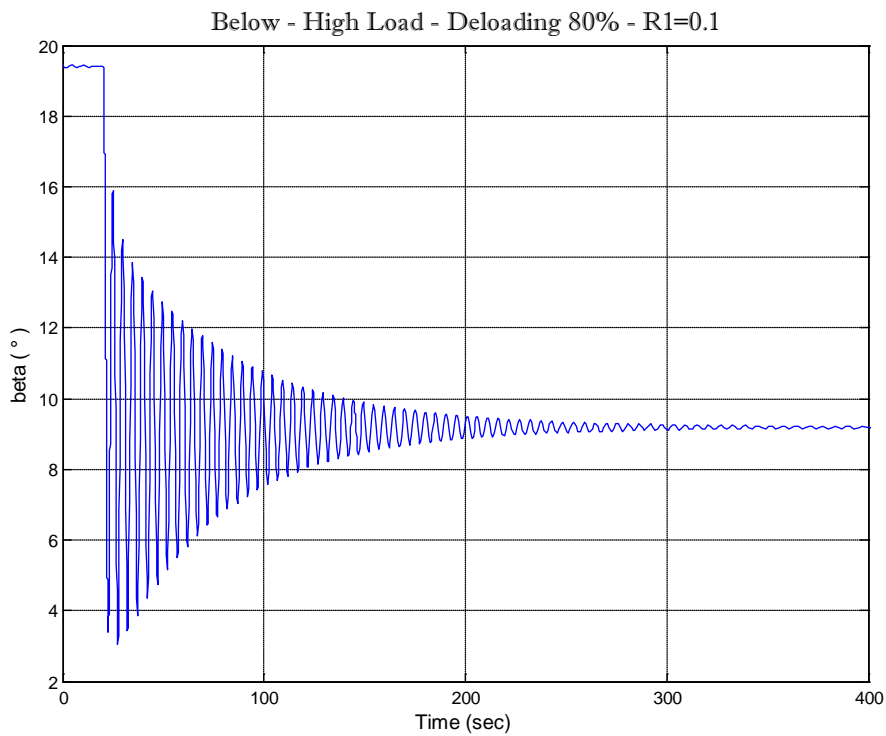
Σχήμα 5.39: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



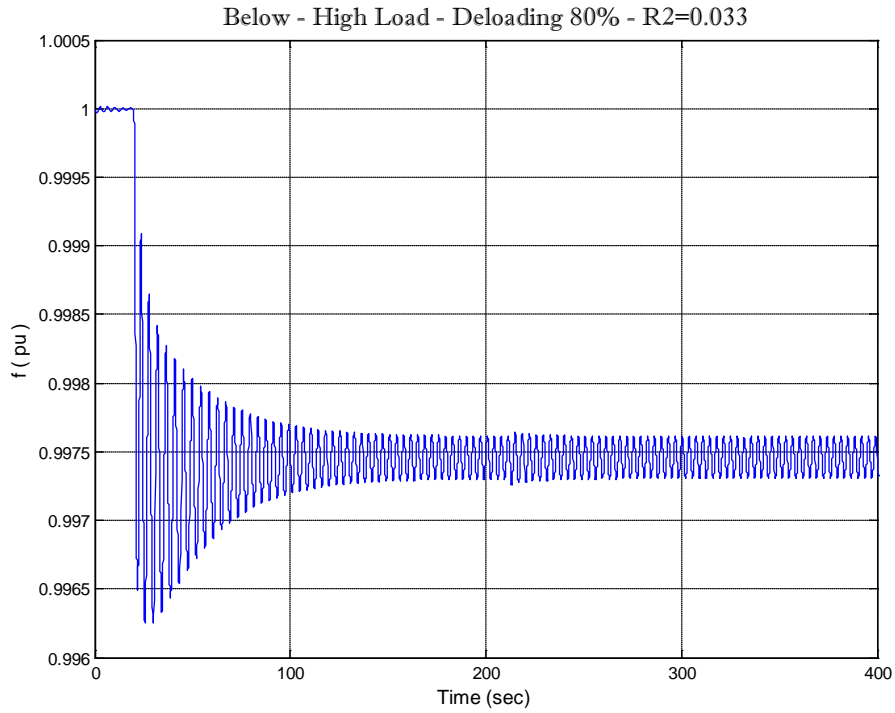
Σχήμα 5.40: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



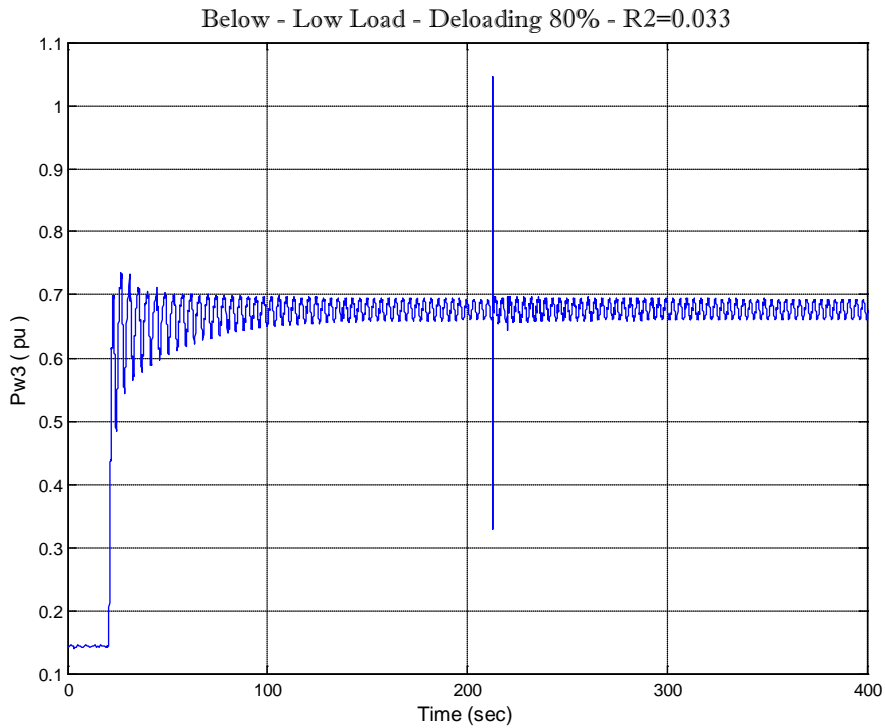
Σχήμα 5.41: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



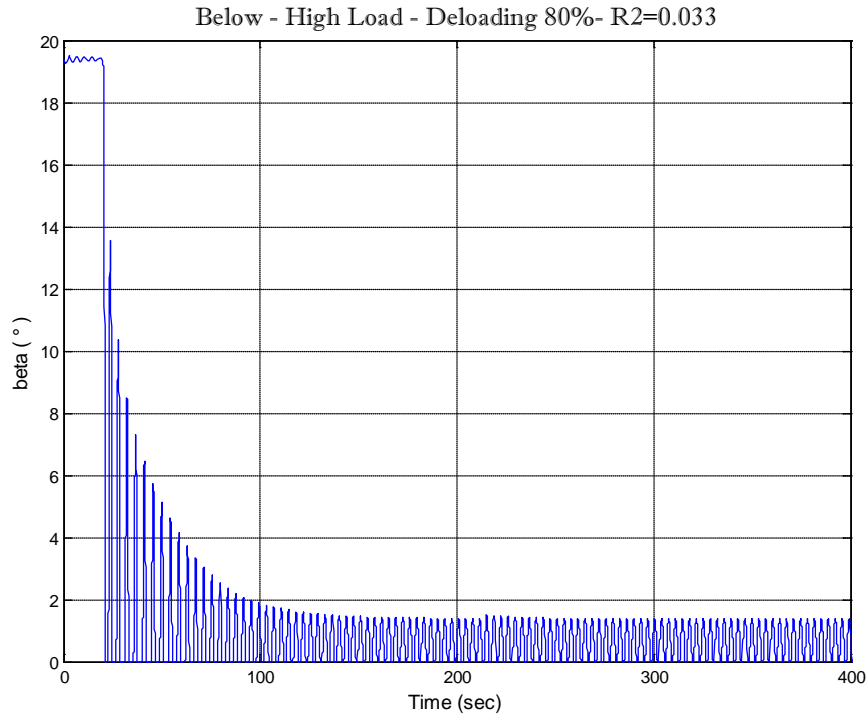
Σχήμα 5.42: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



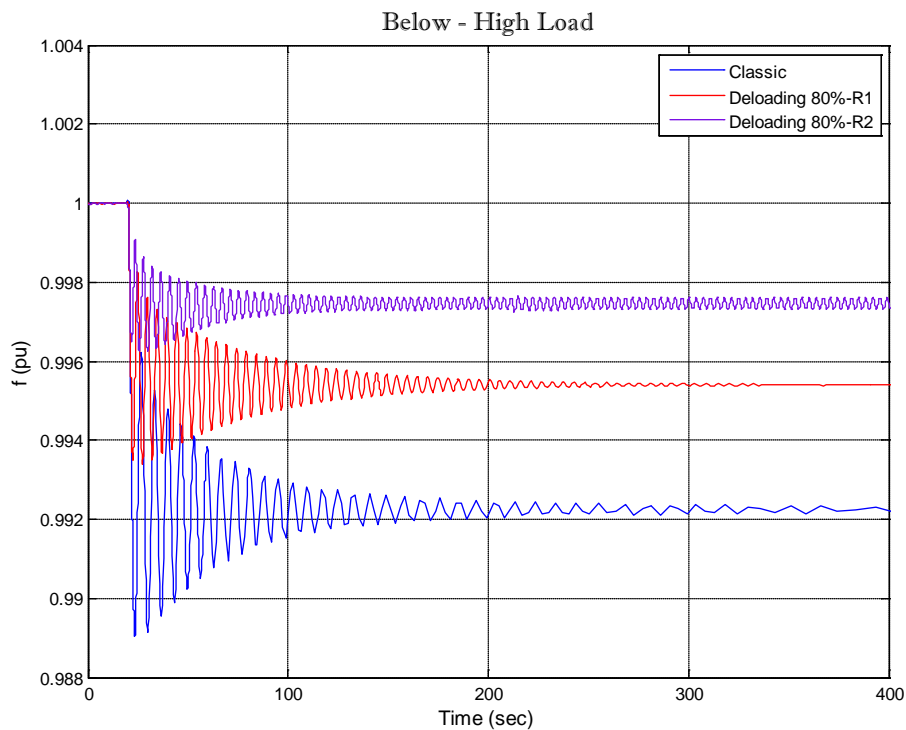
Σχήμα 5.43: Συχνότητα δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



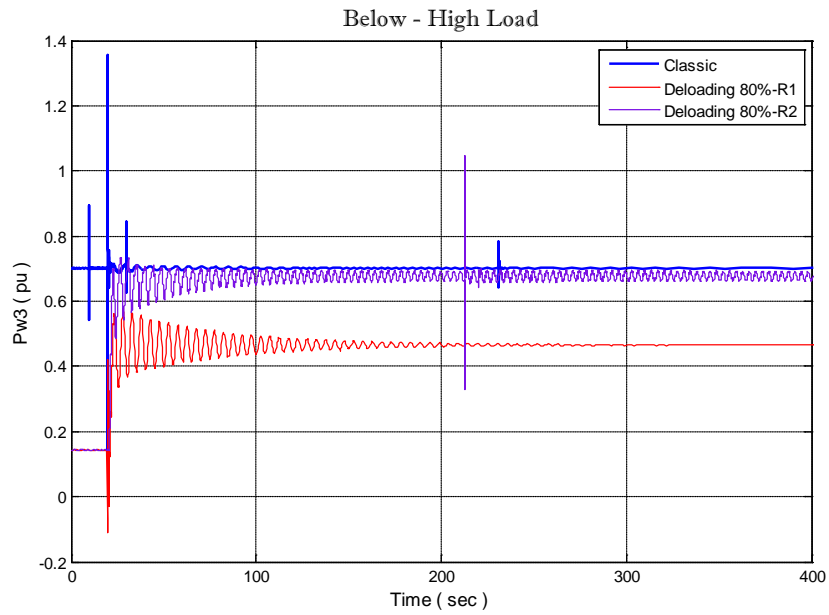
Σχήμα 5.44: Ισχύς της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



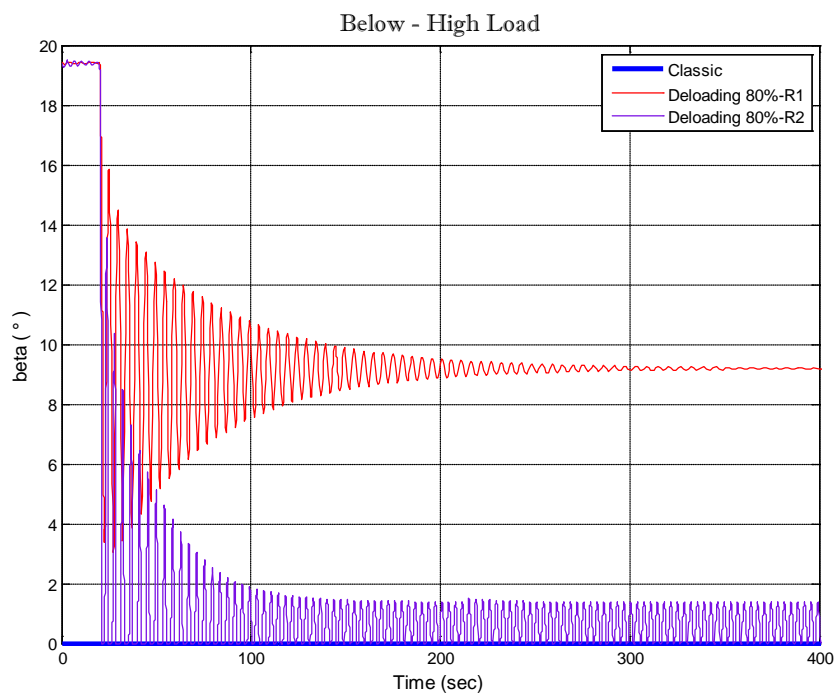
Σχήμα 5.45: Γωνία βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.033 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



Σχήμα 5.46: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



Σχήμα 5.47 : Σύγκριση της ισχύος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



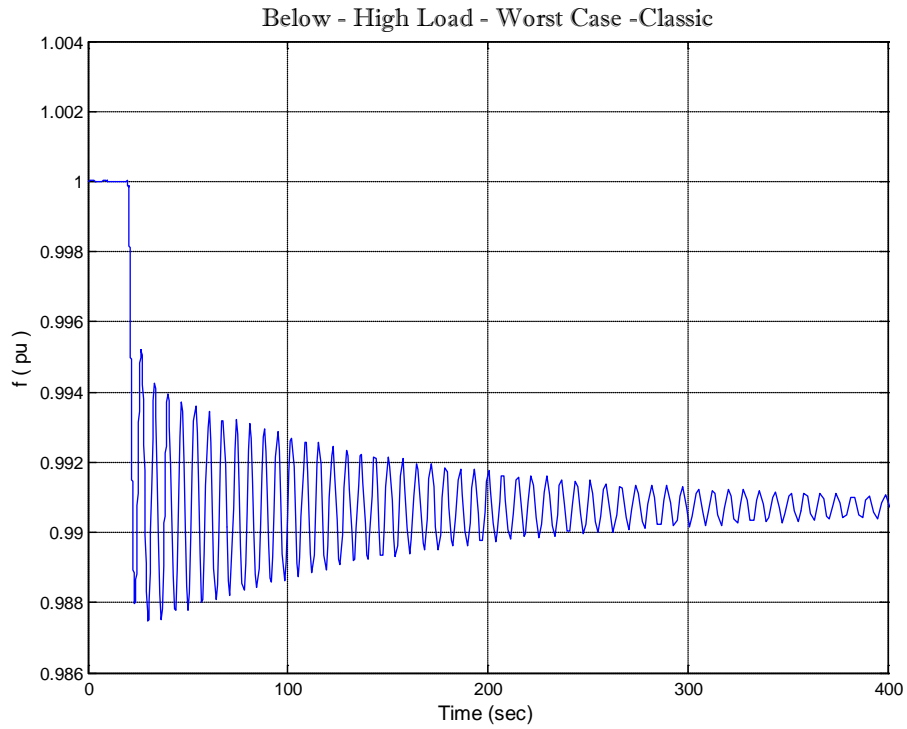
Σχήμα 5.48: Σύγκριση της γωνίας βήματος της Α/Γ3 σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

5.5 Σενάριο 5: Ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου και μείωση του ανέμου σε ταχύτητα κάτω της ονομαστικής

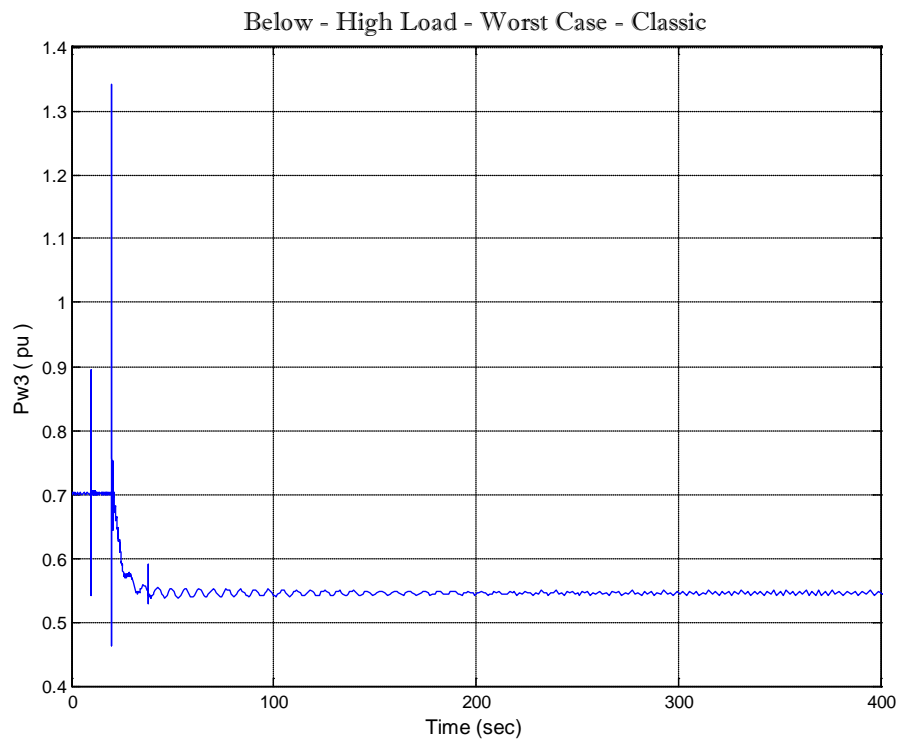
- ❖ Η ταχύτητα ανέμου είναι κάτω της ονομαστικής. Θεωρείται, της πριν, ότι στην A/Γ1 η ταχύτητα ανέμου είναι 12 m/sec , στην A/Γ2 είναι της 12m/sec και στην A/Γ3 είναι 12.5 m/sec, ενώ τη χρονική στιγμή που μεταβάλλεται το φορτίο, η ταχύτητα της A/Γ3 γίνεται 11.5 m/sec.
- ❖ Η A/Γ3 αποφορτίζεται κατά 70%.
- ❖ Η νηζελογεννήτρια ζητείται να αποδίδει 0.8 pu ισχύ.
- ❖ Το φορτίο είναι υψηλό και μεταβάλλεται από 0.93 σε 1 pu στα 20sec.

Ρύθμιση συχνότητας	Classic	Deloading – R1
f_{min} (pu)	0.9873	0.9941
Δf_{min} (pu)	0.0127	0.0059
f_c (pu)	0.9907	0.9956
$ \Delta f_c $ (pu)	0.0093	0.0044
$P_{w,αρχ}$ (pu)	0.071	0.02
ΔP_w (pu)	0	0.0282
$P_{d,αρχ}$ (pu)	0.7937	0.842
ΔP_d (pu)	0.0923	0.043
$b_{αρχ}$ (°)	0	17.82
$b_{τελ}$ (°)	0	0

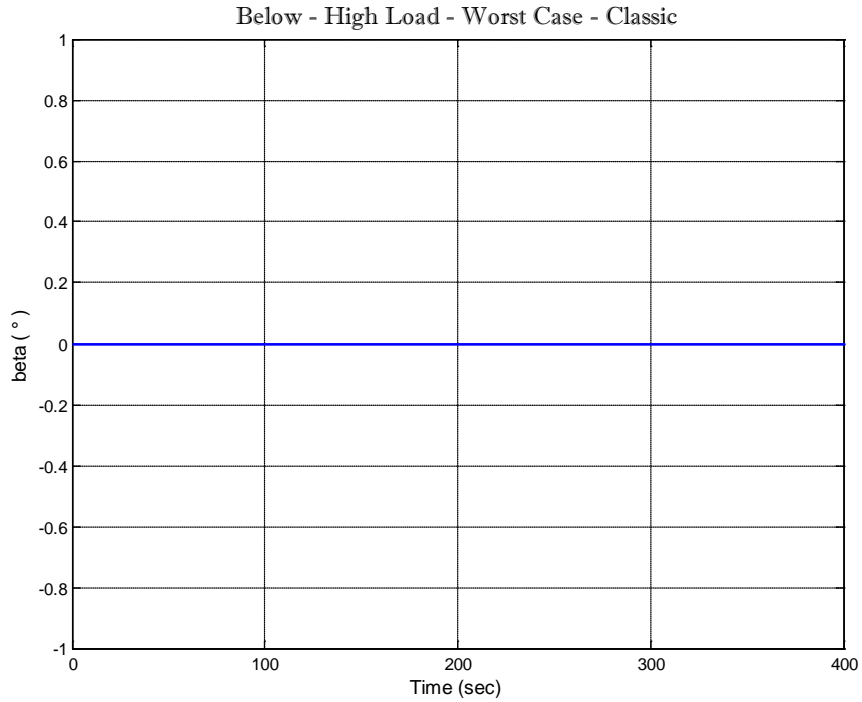
Πίνακας 14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 5-ταυτόχρονης αύξησης φορτίου και μείωσης ανέμου – Below-High Load



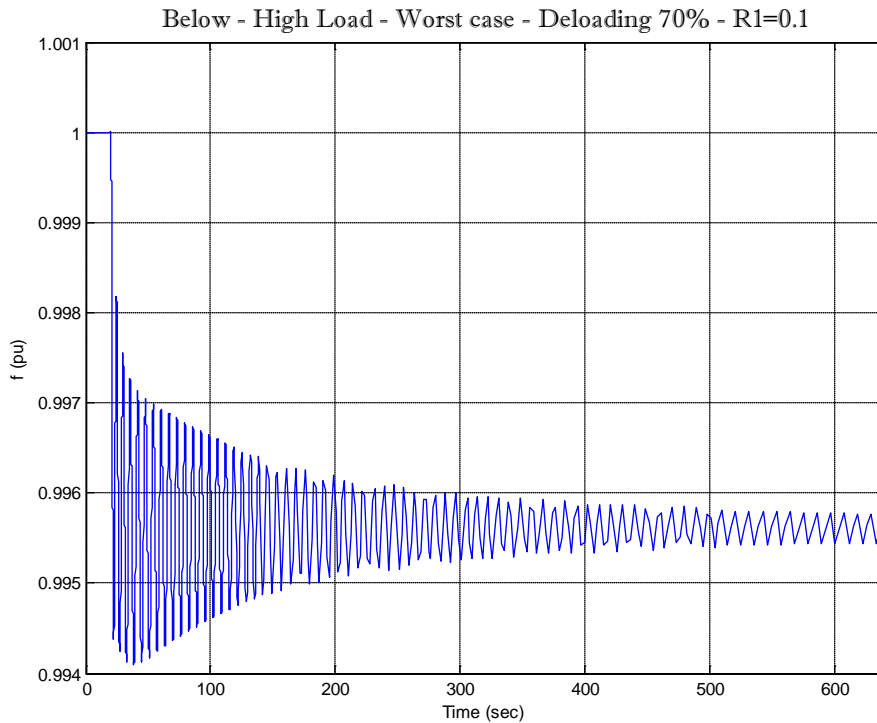
Σχήμα 5.49: Συχνότητα δικτύου σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, χωρίς τη συμμετοχή A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



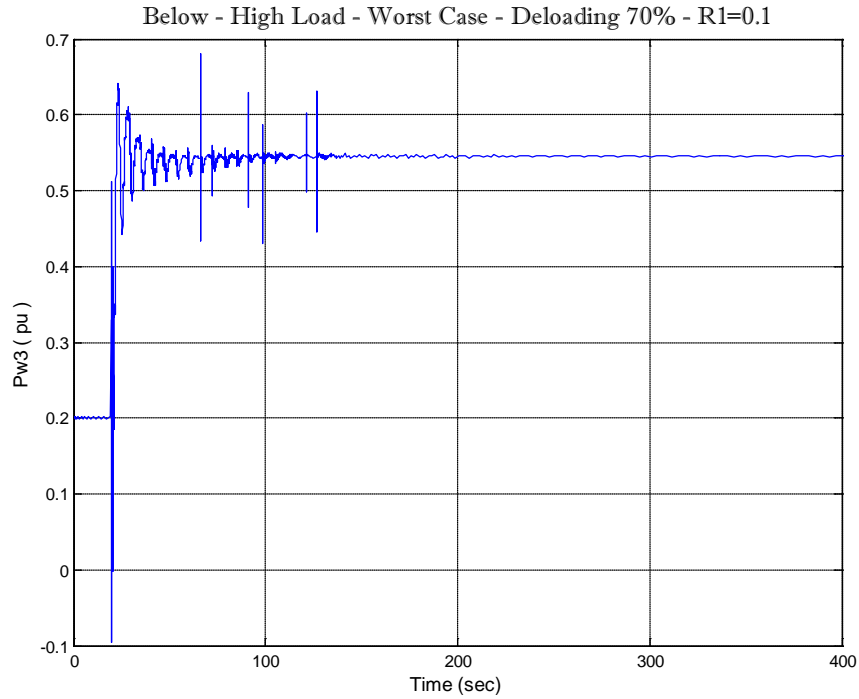
Σχήμα 5.50: Ισχύς της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, χωρίς τη συμμετοχή της A/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



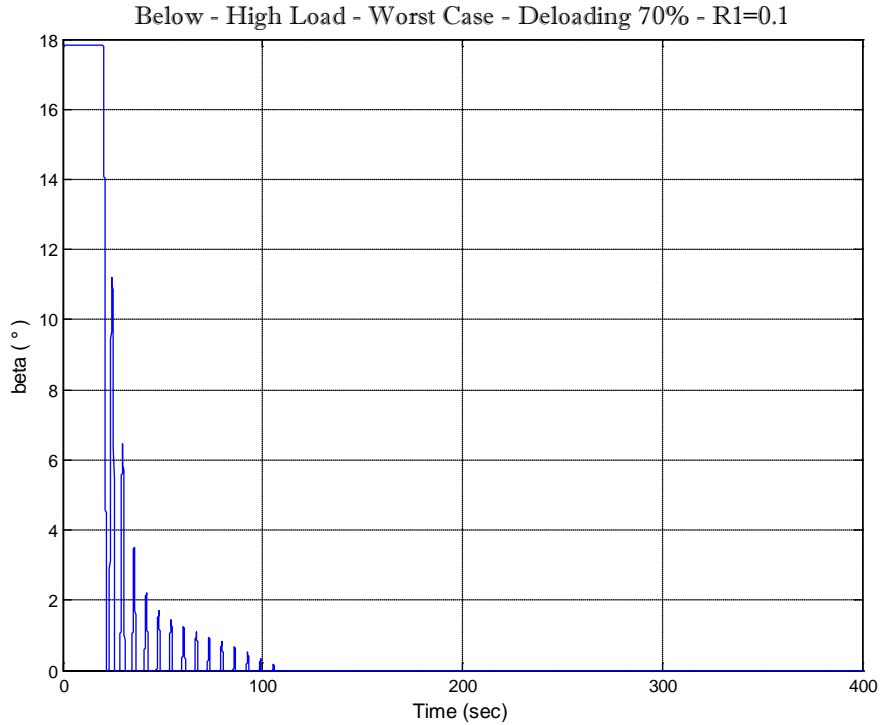
Σχήμα 5.51: Γωνία βήματος της Α/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, χωρίς τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



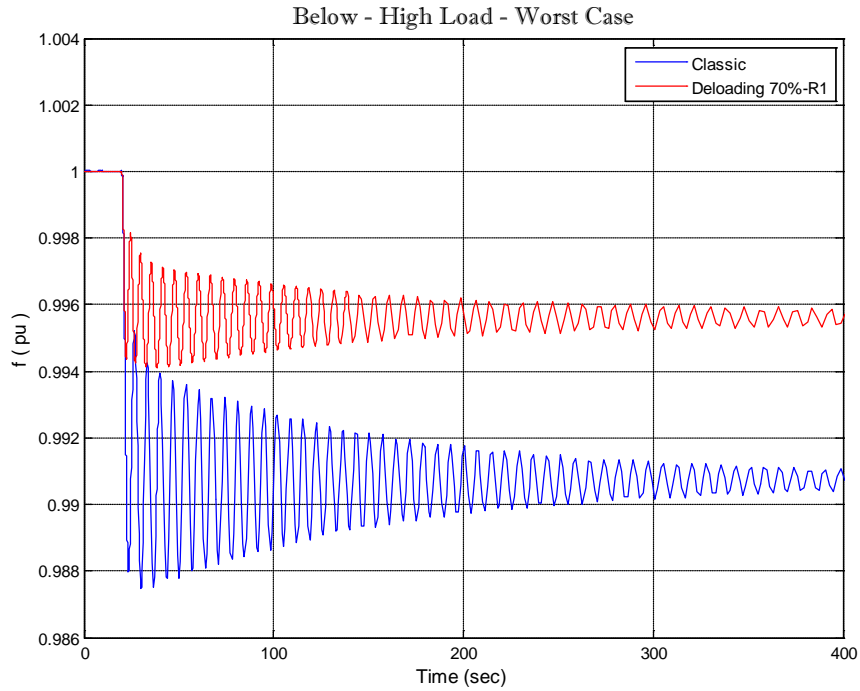
Σχήμα 5.52: Συχνότητα δικτύου σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, υπό τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



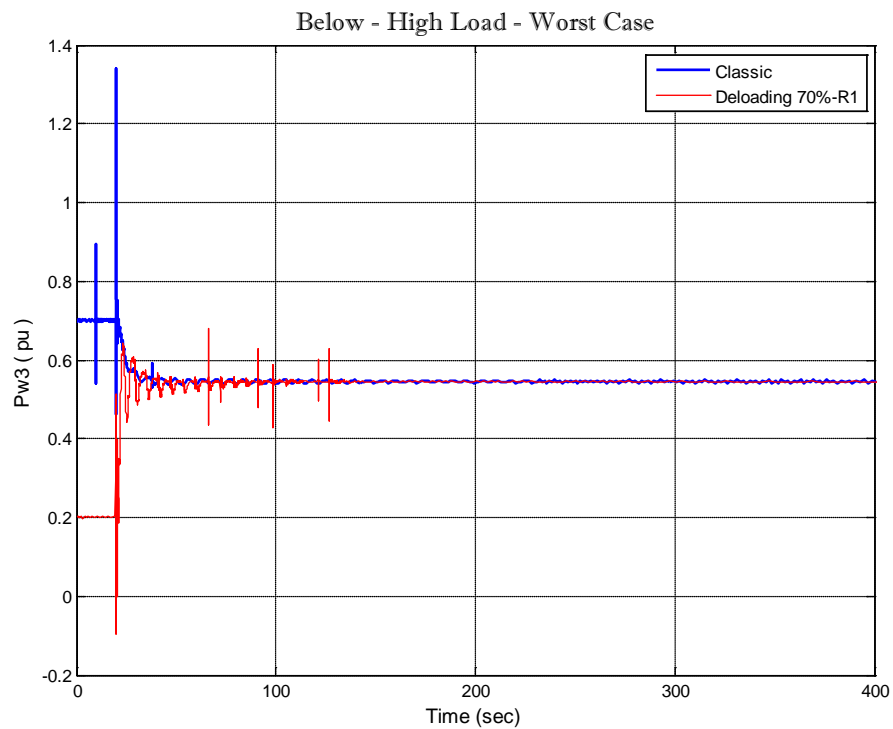
Σχήμα 5.53: Ισχύς της Α/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, υπό τη συμμετοχή Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



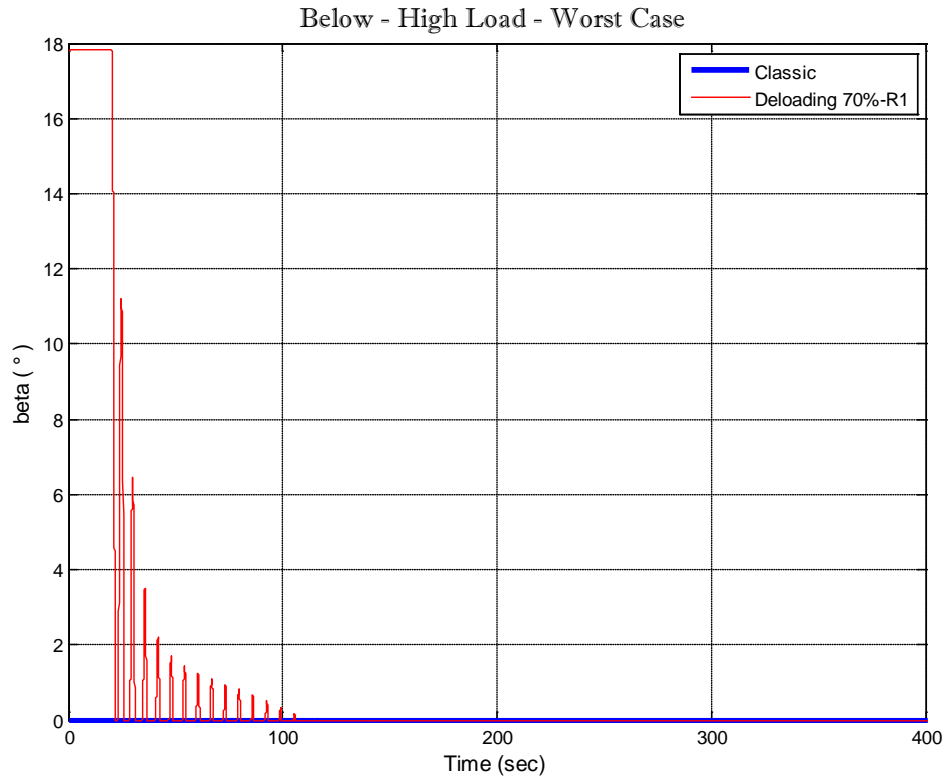
Σχήμα 5.54: Γωνία βήματος της Α/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, υπό τη συμμετοχή Α/Γ στη ρύθμιση με στατισμό 0.1 και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής.



Σχήμα 5.55: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



Σχήμα 5.56: Σύγκριση της ισχύος της Α/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.



Σχήμα 5.57: Σύγκριση της γωνίας βήματος της A/Γ3, σε ταυτόχρονη αύξηση υψηλού φορτίου και μείωση ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

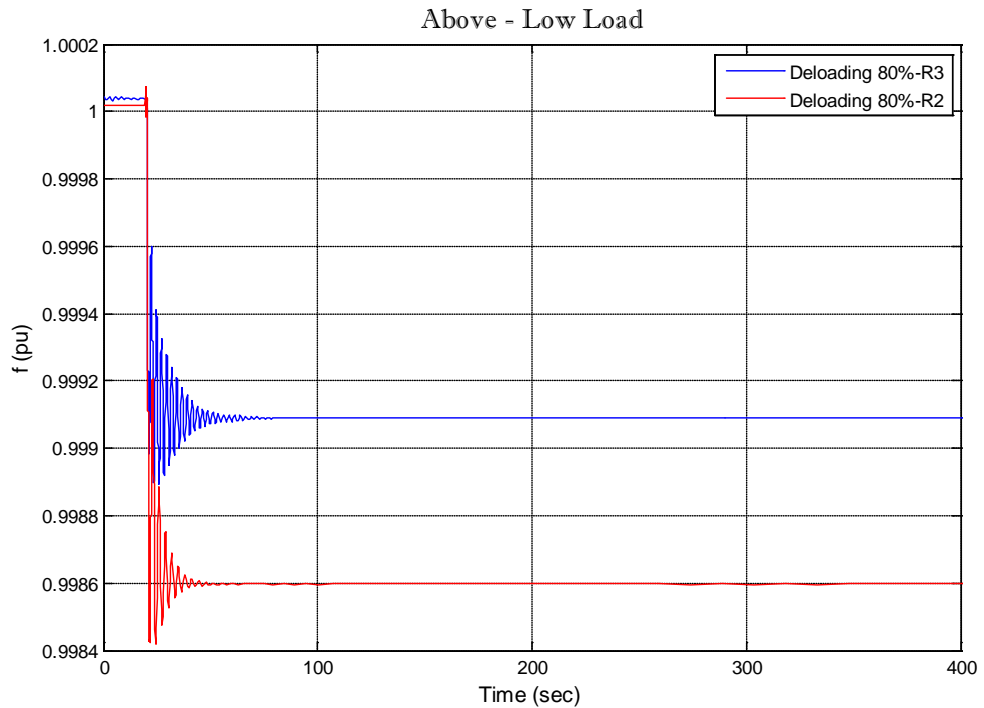
5.6 Σενάριο 6: Πολύ υψηλή συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας από την A/Γ3

Εξετάζονται εκ νέου όλα τα σενάρια 1 έως 4, όπου η A/Γ3 αποφορτίζεται κατά 80% και συμμετέχει περισσότερο στη ρύθμιση, καθώς ο στατισμός της είναι αισθητά μικρότερος: $R3 = 0.02$. Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου παρατίθενται στα ίδια διαγράμματα με τα αντίστοιχα των σεναρίων 1 έως 4, για στατισμό της A/Γ3 $R2 = 0.033$.

❖ Ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής και χαμηλό φορτίο

Ρύθμιση συχνότητας	Deloading – R3	Deloading – R2
$f_{min} (pu)$	0.9989	0.9984
$f_c (pu)$	0.9991	0.9986

Πίνακας 15: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Above-Low Load

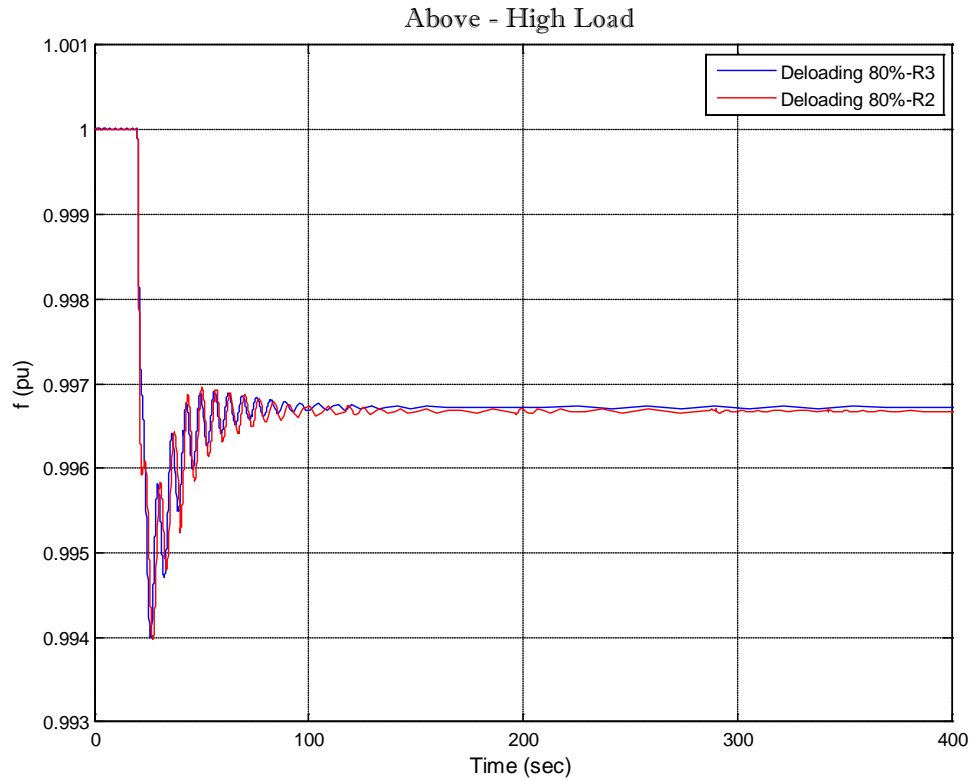


Σχήμα 5.58: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

❖ Ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής και υψηλό φορτίο

Ρύθμιση συχνότητας	Deloading – R3	Deloading – R2
$f_{min} (pu)$	0.994	0.9939
$f_c (pu)$	0.9967	0.9967

Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Above-High Load

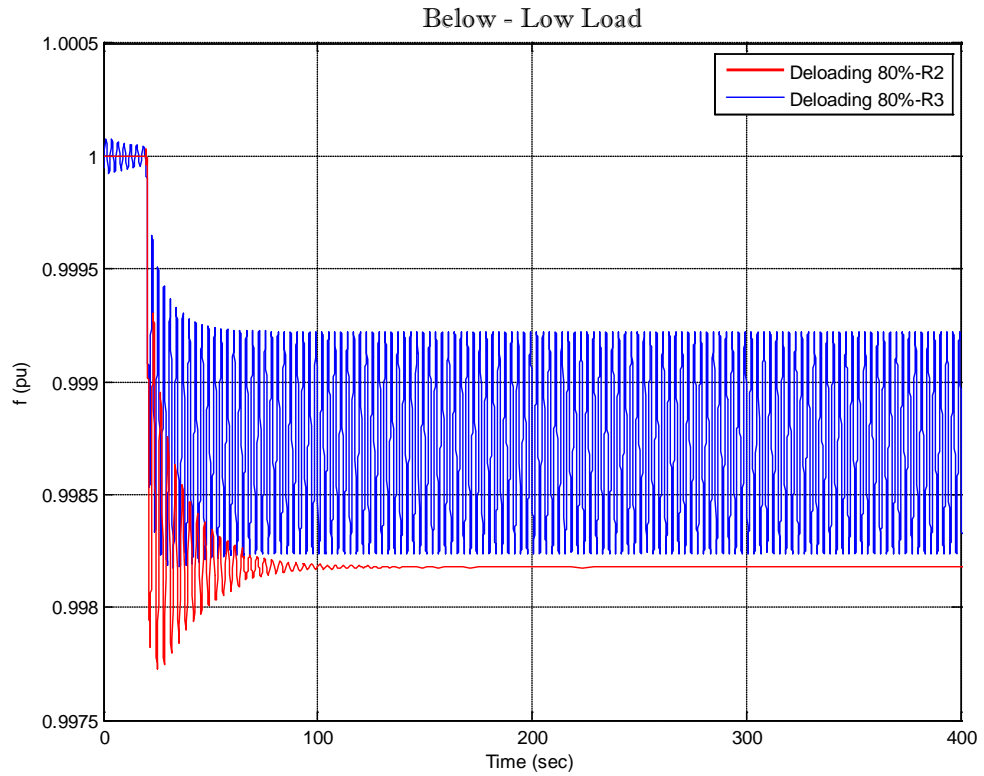


Σχήμα 5.59: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

❖ Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και χαμηλό φορτίο

Ρύθμιση συχνότητας	Deloading – R3	Deloading – R2
f_{min} (pu)	0.9981	0.9977
f_c (pu)	0.9986	0.9982

Πίνακας 17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Below-Low Load

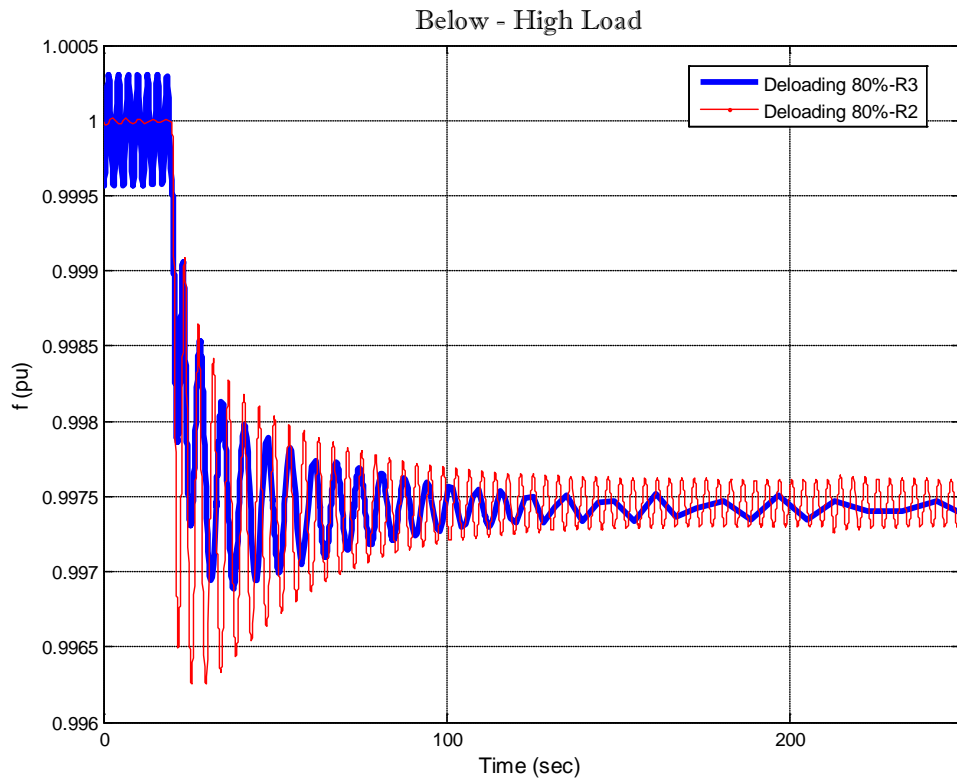


Σχήμα 5.60: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή χαμηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

❖ Ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και υψηλό φορτίο

Ρύθμιση συχνότητας	Deloading – R3	Deloading – R2
$f_{min}(pu)$	0.9969	0.9963
$f_c(pu)$	0.9974	0.9975

Πίνακας 18: Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 6-Below-High Load



Σχήμα 5.61: Σύγκριση της συχνότητας δικτύου σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

6

Σχολιασμός, συγκρίσεις και παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα και οι αντίστοιχοι πίνακες τιμών, που συμπεριλαμβάνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν, για τα εκάστοτε σενάρια συνθηκών ανέμου, φορτίου και ρύθμισης συχνότητας.

Γενική διαπίστωση είναι ότι, όταν η Α/Γ3 συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, επιτυγχάνεται καλύτερη ρύθμιση απ' ό,τι στην περίπτωση που τη ΡΦΣ αναλαμβάνει εξολοκλήρου η νηξελογεννήτρια. Δηλαδή, η βύθιση συχνότητας είναι μικρότερη και η τελική τιμή ισορροπίας πιο κοντά στην ονομαστική. Η υψηλότερη συμμετοχή στη ΡΦΣ γενικά βελτιώνει ακόμη περισσότερο τη ρύθμιση, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις προκαλεί ταλαντώσεις, εξαιτίας της υπερβολικής ευαισθησίας της Α/Γ3 ακόμη και σε πολύ μικρές μεταβολές της συχνότητας. Βέβαια, πολύ μικρός στατισμός, άρα πολύ υψηλή συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση, ενδέχεται να προκαλέσουν ακόμη πιο έντονη ταλάντωση, που είναι ανεπιθύμητη.

Κάποιες στιγμιαίες υπερακοντίσεις της ισχύος οφείλονται στη μέθοδο προσομοίωση. Οι μικρές ταλαντώσεις της ισχύος οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της τάσης, η οποία, σε κάθε περίπτωση επιβεβαιώθηκε ότι είναι εντός των ορίων που επιτρέπουν τη σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο ΜΤ.

Πιο συγκεκριμένα, στις διάφορες περιπτώσεις συνθηκών, παρατηρείται:

❖ Σενάριο 1: Above-Low Load

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10, στην περίπτωση συμμετοχής της A/G3 στη ΡΦΣ με στατισμό $R1=0.1$, η βύθιση συχνότητας είναι αρκετά μικρότερη και η τελική τιμή ισορροπίας πιο κοντά στην ονομαστική κατά 0.003 p.u. Η κάλυψη του επιπρόσθετου φορτίου διαμοιράζεται εξίσου στην A/G3 και τη νηξελογεννήτρια. Μάλιστα, η A/G3 δίνει περίπου το 50% της διαθέσιμης ισχύος, ενώ αρχικά έδινε 20%, καθώς λειτουργούσε αποφορτιζόμενη. Με μείωση του στατισμού στην τιμή $R2=0.033$, βελτιώνονται ακόμη περισσότερο (επιπλέον 001p.u.) η βύθιση και η τιμή ισορροπίας, και η A/G3 δίνει περίπου 60%, δηλαδή τριπλασιάζει την παροχή ισχύος της. Το επιπρόσθετο φορτίο καλύπτεται κατά 75% περίπου από την A/G και μόλις κατά 25%, από τη νηξελογεννήτρια.

Καθώς πρόκειται για μια ευνοϊκή περίπτωση, αφού το φορτίο είναι χαμηλό και μεταβάλλεται μόνο κατά 0.05 p.u., η διατάραξη της ισορροπίας δεν είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά με τα άλλα σενάρια, ακόμη και στην περίπτωση ρύθμισης μόνο από την νηξελογεννήτρια, ενώ οι χρόνοι αποκατάστασης για τις τρεις περιπτώσεις ρύθμισης που εξετάστηκαν είναι μικροί, της τάξης των 10 sec, και παρόμοιοι.

❖ Σενάριο 2: Above-High Load

Σε αυτό το σενάριο, καθώς το φορτίο είναι υψηλό και η αύξησή του, συγκριτικά με το Σενάριο 1, μεγάλη (0.1), όσο αφορά τη συχνότητα παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά του συστήματος, αλλά με τιμές χαμηλότερες απ' ό,τι στο προηγούμενο σενάριο. Και πάλι είναι αισθητή η βελτίωση στη βύθιση συχνότητας και την τελική της τιμή, μεταξύ της κλασικής ρύθμισης και της ΡΦΣ με $R1$. Επίσης, όπως και παραπάνω, κατά τη ΡΦΣ με $R2$, οι προαναφερθείσες τιμές βελτιώνονται ακόμη περισσότερο.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 11, στην περίπτωση συμμετοχής της A/G3 στη ΡΦΣ με στατισμό $R1$, η κάλυψη του επιπρόσθετου φορτίου διαμοιράζεται και πάλι εξίσου στην A/G3 και τη νηξελογεννήτρια. Μάλιστα, η A/G3 δίνει περίπου το 75% της διαθέσιμης ισχύος, ενώ αρχικά έδινε 20%, καθώς λειτουργούσε αποφορτιζόμενη. Με μείωση του στατισμού στην τιμή $R2$, η A/G3 πενταπλασιάζει την παροχή ισχύος της και δίνει όλη τη διαθέσιμη ισχύ της, κάτι που φαίνεται και από τα συγκριτικά διαγράμματα ισχύος και γωνίας (Σχήμα 5.23, Σχήμα 5.24), όπου η τελική ισχύς της A/G3 και η τελική γωνία β είναι οι ίδιες τόσο στην κλασική ρύθμιση όσο και στη ρύθμιση με $R2$. Το επιπρόσθετο φορτίο καλύπτεται κατά 75% περίπου από την A/G και μόλις κατά 25%, από τη νηξελογεννήτρια.

❖ Σενάριο 3: Below-Low Load

Παρατηρώντας τον Πίνακα 12, είναι εμφανές ότι αναφορικά με τη συχνότητα, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά του Σεναρίου 1, όπου και εκεί το φορτίο ήταν χαμηλό και η μεταβολή του μικρή. Η ρύθμιση της συχνότητας είναι αισθητά καλύτερη όταν συμμετέχει και η Α/Γ3. Για ρύθμιση με R1, η Α/Γ3 δίνει τελικά περίπου το 50% της διαθέσιμης ισχύος της (0.071), δηλαδή 0.0376 p.u.σε βάση ισχύος νηξελογεννήτριας. Για ρύθμιση με R2, η Α/Γ3 σχεδόν τετραπλασιάζει την ισχύ που δίνει, φτάνοντας το 75% της διαθέσιμης ισχύος, δηλαδή 0.0526 p.u.σε βάση ισχύος νηξελογεννήτριας, και η κάλυψη του φορτίου γίνεται κατά 70% από την Α/Γ και κατά 30% από τη νηξελογεννήτρια.

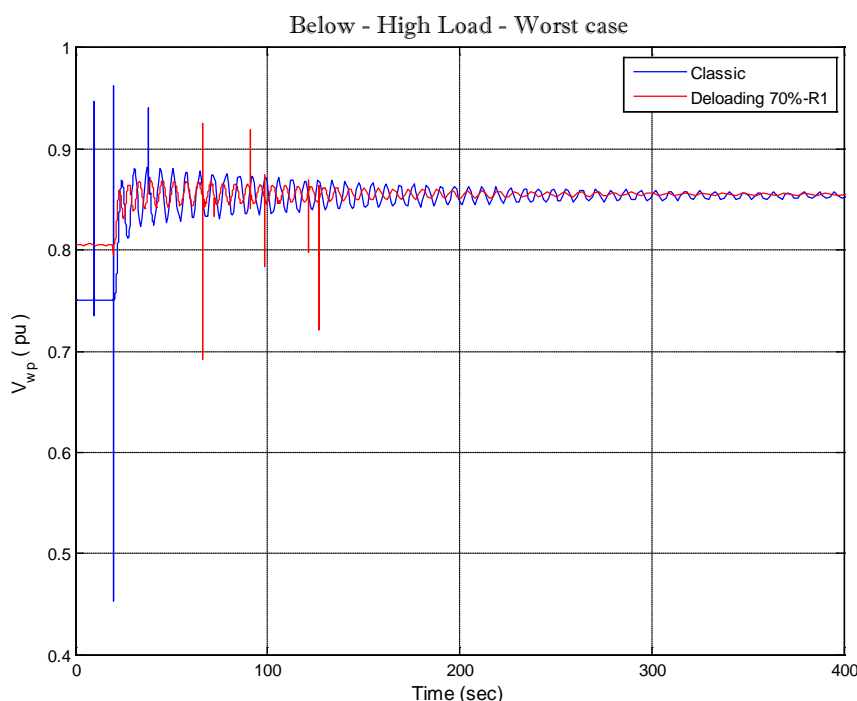
❖ Σενάριο 4: Below-High Load

Και σε αυτήν την περίπτωση η ρύθμιση με Α/Γ έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη βύθιση συχνότητας. Επιπλέον, ενώ κατά την κλασική ρύθμιση, η συχνότητα παρουσιάζει κάποια ταλάντωση, που μάλλον οφείλεται στα φαινόμενα τάσης, αυτή η ταλάντωση διορθώνεται με τη συμμετοχή της Α/Γ3 στη ρύθμιση, για την περίπτωση στατισμού R1. Ωστόσο, για στατισμό της Α/Γ3 R2, παρατηρείται αμείωτη ταλάντωση αλλά σε μικρό εύρος (μόλις 0.0003 p.u.), που οφείλεται στη μικρή τιμή στατισμού που καθιστά την Α/Γ πολύ ευαίσθητη σε κάθε μικρή μεταβολή της συχνότητας του δικτύου. Από τα διαγράμματα της ισχύος και της γωνίας β, καθώς και από τον Πίνακα 13, φαίνεται ότι στη ρύθμιση με R2 η Α/Γ δίνει όλη τη διαθέσιμη ισχύ της (γωνία βήματος σχεδόν 1°) και αναλαμβάνει το 65% της αύξησης του φορτίου.

❖ Σενάριο 5: Worst case

Πρόκειται για μια δύσκολη κατάσταση για το σύστημα, καθώς τη στιγμή που αυξάνεται το φορτίο, μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου, και συνεπώς μειώνεται η διαθέσιμη ισχύς της Α/Γ3. Μάλιστα, καθώς εξετάζεται υψηλή μεταβολή του φορτίου, η μείωση της διαθέσιμης ισχύος επηρεάζει ακόμη περισσότερο την ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας από την Α/Γ. Ωστόσο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 14 και το διάγραμμα 5.55, η συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση, με στατισμό R1, καταρχήν βελτιώνει τη βύθιση και την τελική τιμή της συχνότητας κατά 0.006 σε σχέση με την κλασική ρύθμιση. Επιπλέον, ενώ στην περίπτωση ρύθμισης μόνο απ' τη νηξελογεννήτρια η συχνότητα παρουσιάζει αρκετή ταλάντωση (0.001 γύρω από την τελική τιμή), όταν συμμετέχει στη ρύθμιση και η Α/Γ3, η ταλάντωση περιορίζεται στο μισό (0.0005 γύρω από την τελική τιμή), ενώ αποκαθίσταται και πιο γρήγορα η ισορροπία. Η απόσβεση της ταλάντωσης καθυστερεί, καθώς τα φαινόμενα τάσης είναι πιο έντονα απ' ότι στα προηγούμενα σενάρια που εξετάστηκαν. Η διακύμανση της τάσης του ζυγού του

αιολικού πάρκου, για τις δύο περιπτώσεις ρύθμισης που εξετάστηκαν, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.1: Σύγκριση της τάσης του ζυγού των Α/Γ, σε ταυτόχρονη μεταβολή υψηλού φορτίου και μείωση του ανέμου, για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, η τάση του ζυγού των Α/Γ δεν είναι σταθερή αλλά έχει διακύμανση, γι' αυτό και εμφανίζονται ταλαντώσεις στη συχνότητα, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος της ενεργούς ισχύος έχει γίνει υποθέτοντας σταθερή την τάση του ζυγού. Η ταλάντωση της τάσης είναι μεγαλύτερη όταν η Α/Γ δε συμμετέχει στη ρύθμιση, και γι' αυτό το λόγο είναι μεγαλύτερη και η ταλάντωση της συχνότητας στην αντίστοιχη περίπτωση.

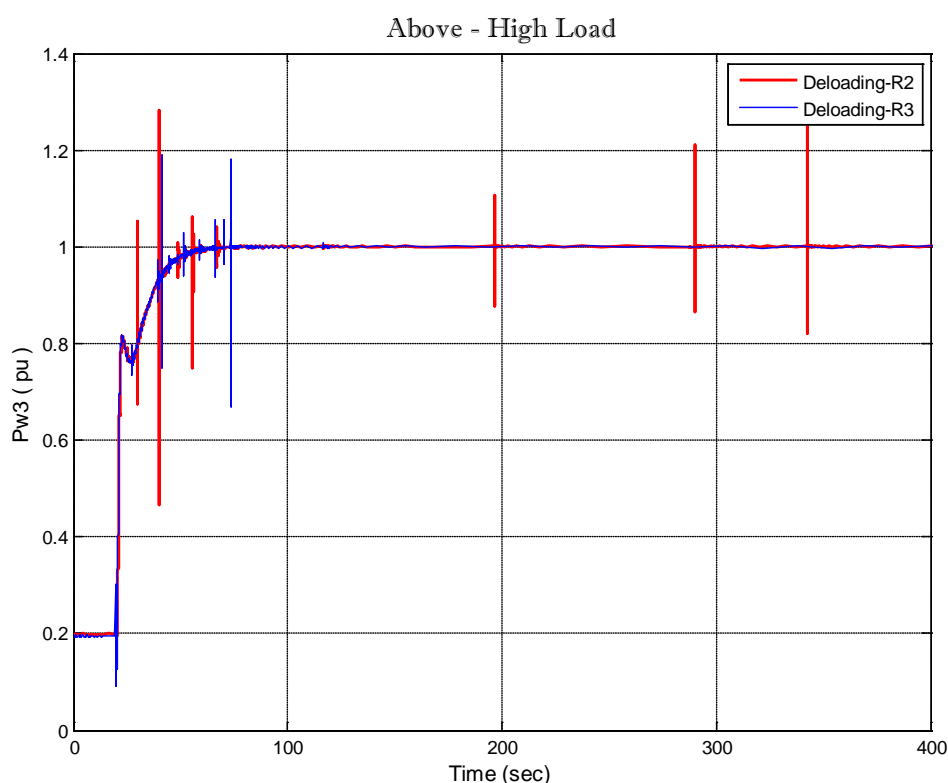
Από τα διαγράμματα 5.56 και 5.57, για την ισχύ και τη γωνία β της Α/Γ3, αντίστοιχα, φαίνεται ότι η Α/Γ3 δίνει τελικά όλη τη διαθέσιμη ισχύ της, 0.052 p.u., προκειμένου να κάνει ΡΦΣ.

❖ Σενάριο 6: Πολύ υψηλή συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας απ' την Α/Γ3

Στα Σχήματα 5.58-5.61 παρουσιάζεται η συχνότητα, για ρύθμιση με συμμετοχή της Α/Γ3 με στατισμό R2 και R3, για τις τέσσερις βασικές υποπεριπτώσεις συνθηκών ανέμου (ταχύτητα πάνω και κάτω της ονομαστικής) και φορτίου (υψηλού και χαμηλού).

Στην περίπτωση ταχύτητας ανέμου πάνω της ονομαστικής και για χαμηλό φορτίο, η βύθιση και η τελική τιμή της συχνότητας βελτιώνεται για ρύθμιση με R3, αλλά μόλις κατά 0.0005p.u.

Σε ταχύτητα κάτω της ονομαστικής και σε υψηλό φορτίο, παρατηρείται ότι η συχνότητα παίρνει τις ίδιες σχεδόν τιμές και για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί ήδη με στατισμό R2 η A/Γ3 χρειάστηκε να δώσει όλη τη διαθέσιμη ισχύ της για να κάνει ΡΦΣ, οπότε κατά την επιλογή ρύθμισης με στατισμό R3, δεν υπάρχει επιπλέον απόθεμα ισχύος ώστε να γίνει πιο έντονη η συμμετοχή της A/Γ3. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.2: Σύγκριση της ισχύος της A/Γ3, σε μεταβολή υψηλού φορτίου και για ταχύτητα ανέμου πάνω της ονομαστικής, για διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης.

Σε ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής και μεταβολή χαμηλού φορτίου, παρατηρείται ότι όταν η A/Γ3 συμμετέχει στη ρύθμιση με στατισμό R3, υπάρχει έντονη ταλάντωση στη συχνότητα, και μάλιστα όχι μόνο μετά την είσοδο του επιπρόσθετου φορτίου, αλλά και νωρίτερα, στην κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Αυτό δείχνει πόσο ευαίσθητος είναι ο μηχανισμός ρύθμισης της A/Γ3, ακόμη και σε πάρα πολύ μικρές μεταβολές της συχνότητας που μπορεί να συμβαίνουν στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Η τελική

τιμή της συχνότητας είναι πιο κοντά στην ονομαστική για ρύθμιση με στατισμό R3, απ' ότι με στατισμό R2, αν και μόλις κατά 0.0004 p.u., με ταλαντώσεις της τάξης του 0.1%.

Σε μεταβολή υψηλού φορτίου, είναι αξιοσημείωτο ότι αν και για ρύθμιση με στατισμό R2 παρατηρείται αμείωτη ταλάντωση στη συχνότητα, της τάξης του 0.3%, για ρύθμιση με στατισμό R3 δεν υφίσταται ταλάντωση. Από αυτό το γεγονός προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν ευθύνεται απαραίτητα και μόνο ο πολύ μικρός στατισμός για τις ταλαντώσεις της συχνότητας. Επιπλέον, ενδέχεται να είναι υπεύθυνα και τα look-up tables που χρησιμοποιήθηκαν και που έχουν κατασκευαστεί με περιορισμένο πλήθος τιμών, υπολογίζοντας τις ενδιάμεσες τιμές εξόδου με γραμμική παρεμβολή.

7

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα σύστημα όπου, A/G μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος, που χρησιμοποιεί ΓΕΔΤ, συμμετέχει στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, λειτουργώντας υπό αποκοπή και αποφορτιζόμενη μέσω μεταβολής της γωνίας του βήματος. Για το σκοπό αυτό, μοντελοποιήθηκε δίκτυο τριών ζυγών, με σύγχρονη νηξελογεννήτρια, φορτίο και αιολικό πάρκο τριών ίδιων A/G, από τις οποίες η μία συμμετέχει στην ΡΦΣ, έπειτα από την κατάλληλη τροποποίηση της διάταξης ελέγχου της γωνίας βήματος, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η αποφόρτιση της A/G σε οποιοδήποτε επιθυμητό ποσοστό.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν επιβεβαίωσαν το στόχο ανάπτυξης της εργασίας, δηλαδή την ανάδειξη βελτιωμένης ΡΦΣ από τη συμμετοχή A/G, συγκριτικά με την ισχύουσα, ως τώρα, ΡΦΣ που γίνεται μόνο από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Διαπιστώθηκε βελτίωση στη ρύθμιση της συχνότητας, με μικρότερη βύθιση και βελτιωμένη τελική τιμή, πιο κοντά στην ονομαστική.

Ταυτόχρονα παρουσιάστηκε η αδυναμία απεριόριστης αύξησης της συμμετοχής A/G στη ρύθμιση, λόγω εγγενούς αδυναμίας των lookup tables.

Οστόσο, προκειμένου να προκύψουν πιο ακριβή αποτελέσματα και συμπεράσματα, αλλά και να αποκτηθεί καλύτερη αντίληψη για την αξία και τις δυνατότητες πρωτεύουσας ρύθμισης από A/G, υπάρχουν αρκετά σημεία που επιδέχονται περαιτέρω έρευνα και μελέτη. Καταρχήν,

μπορούν να κατασκευαστούν πιο ακριβή look-up tables προκειμένου να εξαλειφθούν τα σχετικά σφάλματα, καθώς και να χρησιμοποιηθούν look-up tables που δε κάνουν γραμμική παρεμβολή, αλλά μια καλύτερη προσέγγιση στις πραγματικές τιμές, όπως τα look-up tables με cubic spline παρεμβολή. Ακόμη, καθώς η προτεινόμενη μέθοδος εμπλέκει κυρίως το μηχανικό μέρος της Α/Γ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μοντέλο περισσότερων μαζών, ώστε να είναι πιο ακριβή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πρέπει να εξεταστεί το σύστημα, εμπεριέχοντας έλεγχο της τάσης του ζυγού των Α/Γ, καθώς και να μελετηθεί δίκτυο, με σύνθετα και ποικίλα μοντέλα γεννητριών, γραμμών και φορτίων. Ακόμη, επιβάλλεται η σύγκριση και ο συνδυασμός της προταθείσας μεθόδου με τη μέθοδο έγχυσης αδράνειας στο δίκτυο εκ μέρους της Α/Γ, καθώς και η σύνθεση μελέτης με περισσότερες παραγωγικές μονάδες που θα συμμετέχουν στη ΡΦΣ. Τέλος, είναι απαραίτητη μια οικονομική μελέτη, που θα δικαιολογεί τη μη αξιοποίηση του προσφερόμενου αιολικού δυναμικού κατά τόσο υψηλό ποσοστό.

Συνολικά, προκύπτει το συμπέρασμα ότι εφόσον γίνουν κατάλληλες μελέτες και επεκτάσεις της προταθείσας μεθόδου, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος που χρησιμοποιούν ΓΕΔΤ, μπορούν να συμβάλλουν στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με αποτελεσματικό τρόπο, υιοθετώντας τη μέθοδο ποσοστιαίας αποφόρτισής τους, μέσω μεταβολής του βήματος των πτερυγίων τους.

8

Βιβλιογραφία

- [1] eDray, Philip, Cagin, Seth, *Between earth and sky: how CFCs changed our world and endangered the ozone layer*, New York: Pantheon Books, 1993.
- [2] Ηνωμένα Έθνη, *Πρωτόκολλο του Κιότο στα πλαίσια της Συνδιάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Αλλαγές*, Συνδιάσκεψη Ηνωμένων Εθνών, Δεκέμβριος 1997.
- [3] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, *Δράση για το κλίμα, Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας*, 11 Ιανουαρίου 2010,
http://ec.europa.eu/climateaction/eu_action/renewable_energy/index_el.htm
- [4] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 20 Ιανουαρίου 2010,
<http://www.cres.gr/kape/datainfo/statistics.htm>
- [5] Σ. Παπαθανασίου, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σημειώσεις Παραδόσεων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.
- [6] CIGRE Technical Brochure, *Modeling and Dynamic Behavior of Wind Generation as it Relates to Power System Control and Dynamic Performance*, prepared by CIGRE WG C4.601 on Power Systems Security Assessment, January 2006.
- [7] R.G. de Almeida, E.D. Castronuovo, J. Pecos Lopes, *Optimum Generation Control in Wind Parks carrying out System Operator Requests*, IEEE Transactions on Power Systems, VOL.21, May 2006.

- [8] L. Holdsworth, J. B. Ekanayake, N. Jenkins, *Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed Induction Generator-based Wind Turbines*, John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [9] J.F. Conroy, R. Watson, *Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation*, IEEE Transactions on Power Systems, VOL.23, NO.2, May 2008.
- [10] P. Moutis, E. Loukarakis, S. Papathanasiou, N.D. Hatziargyriou, *Primary Load-Frequency Control from Pitch Controlled Wind Turbines*, IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
- [11] N. Janssens, G. Lambin, N. Bragard, *Active Power Control Strategies of DFIG Wind Turbines*, IEEE Power Tech 2007, Lausanne, 2007.
- [12] A. Mullane, M. O'Malley, *The Inertial Response of Induction-Machine-Based Wind Turbines*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.20, 2005.
- [13] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1997.
- [14] Danish Wind Industry Association, 1 June 2009,
<http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wtrb/powerreg.htm>
- [15] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [16] P. Kundur, *Power system stability and control*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [17] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, *Analysis of electric machinery and Drive Systems*, Second Edition, IEEE Press, Willey Inter-science, 2002.
- [18] Z. Lubosny, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*, Springer Publications, Germany, 2003.
- [19] IEEE Generating Plant Abnormal Frequency Working Group, *Summary of the Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*, IEEE Transactions on Power Delivery, VOL.3, NO.1, 1998.
- [20] Β. Παπαδιά, Κ. Βουρνάς, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και τάσεως*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [21] L.N. Hannett, F.P. de Mello, G.H. Tyllinski, W.H. Becker, *Validation of Nuclear Plant Auxiliary Power Supply by Test*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, 1982.
- [22] Β. Ριζιώτης, *Ph.D.-Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της Απώλειας Στήριξης σε Δρομείς Α/Γ*, Αθήνα.
- [23] T. Vav Cutsem, C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1998.

- [24] A. Petersson, L. Harnefors, T. Thiringer, *Evaluation of Current Control Methods for wind Turbines using Doubly-fed Induction Machines*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.20, 2005.
- [25] Παναγιώτης Μουτής, Διπλωματική Εργασία: *Η συμβολή των Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών-Μεταβλητού Βήματος στην Πρωτεύουσα Ρύθμιση Φορτίου-Συχνότητας*, Αθήνα, Νοέμβριος 2007.

