



**Βέλτιστες πρακτικές παραγωγής ενέργειας
(energy harvesting) σε ανεμογεννήτριες με χρήση
συστημάτων κίνησης διαρκούς μεταβαλλόμενης
σχέσης (cvt)**

από

Κωνσταντίνος Κούτρας

Διατριβή για τη λήψη Βασικού Διπλώματος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δ. Δημογιαννόπουλος

Καθηγητής

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



Optimization of energy harvesting practices in wind-turbines by the use of continuously variable transmission (cvt) gearboxes

by

Konstantinos Koutras

Diploma Thesis

Advisor:

D. Dimogiannopoulos

Professor

University of West Attica

Department of Industrial design and Production Engineering

Athens, September 2024

**Βέλτιστες πρακτικές παραγωγής ενέργειας (energy harvesting) σε
ανεμογεννήτριες με χρήση συστημάτων κίνησης διαρκούς μεταβαλλόμενης
σχέσης (cvt)**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

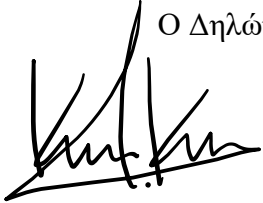
A/a	Όνοματεπώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Ψηφιακή Υπογραφή
1	Δημήτριος Δημογιαννόπουλος	Καθηγητής Επιβλέπων	
2	Δημήτριος Κάντζος	Καθηγητής	
3	Χρήστος Δρόσος	Επίκουρος Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Κούτρας του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 19389043 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Κωνσταντίνος Κούτρας

Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	17
<i>Abstract</i>	18
<i>Αναγνωρίσεις</i>	19
<i>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</i>	20
<i>Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</i>	22
2.1 Η αξία της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας	22
2.2 Τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα	24
2.2.1 Ρότορας (Πλήμνη) και πτερόγια ανεμογεννήτριας (Blades and Rotor)	25
2.2.2 Σύστημα κίνησης (Drive Train)	26
2.2.3 Ηλεκτρογεννήτρια (Generator)	26
2.2.3.1 Σύγχρονες Γεννήτριες Σταθερού Μαγνήτη (PMSG)	27
2.2.3.1.1 Σύστημα Διέγερσης (Excitation System)	27
2.2.3.1.2 Μαγνητικές ροές – Διατάξεις μαγνητικών πόλων στις γεννήτριες τύπου PMSG	28
2.2.3.1.3 Τύποι ρότορα για ηλεκτρογεννήτριες τύπου PMSG	30
2.2.3.1.4 Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και η προώθησή της στο δίκτυο	30
2.2.3.2 Επαγωγικές Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης Μαγνήτη (DFIG)	31
2.2.3.2.1 Η αρχή λειτουργίας ηλεκτρογεννήτριας τύπου DFIG	32
2.2.3.3 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ γεννητριών τύπου PMSG και DFIG	33
2.2.3.4 Γεννήτρια τύπου SCIG (Squirrel Cage Induction Generator)	34
2.2.3.5 Τοπολογία A/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG με μετατροπέα	36
2.2.3.6 Τοπολογία A/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου WRIG χωρίς μετατροπέα	37
2.2.3.7 Τοπολογία A/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG ή EESG με κιβώτιο ταχυτήτων	38
2.2.4 Μετατροπέας (Converter) και Ελεγκτής (Controller)	40
2.2.5 Σύστημα Ασφαλείας	41
2.2.6 Θάλαμος (Nacelle)	41
2.2.6 Δομικά Μέρη	42
2.3 Τα συστήματα κίνησης των Ανεμογεννητριών	43
2.3.1 A/Γ άμεσης μετάδοσης και A/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων	43
2.3.1.1 DDWT – A/Γ Άμεσης Μετάδοσης	44
2.3.1.2 GWT – A/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων	46
2.4 Ορισμός του προβλήματος	48
2.4.1 Αιτίες μείωσης της αξιοπιστίας των A/Γ	52
2.5 Λόγος Tip Speed Ration A/Γ	53
2.6 Συντελεστής Ισχύος (C_p) A/Γ	55
2.7 Παρουσίαση παραδείγματος υπολογισμού C_p και TSR	56
2.8 Συστήματα συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης (CVT) στις A/Γ	59
2.8.1 Αυτόματο κιβώτιο CVT με χρήση συστήματος ιμάντων – τροχαλιών (Automatically Regulated CVT – ARCVT)	61
2.8.2 Nu Vinci CVT (NVCVT)	64
2.8.3 Chain CVT (CCVT) – Χρήση αλυσίδας αντί ιμάντα	68
2.8.4 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ARCVT, NVCVT και CCVT	69

2.8.5	Συμπεράσματα χρήσης υπαρχόντων κιβωτίων CVT	70
2.9	Συστήματα μετάδοσης κίνησης μεταβλητής σχέσης (<i>Variable gear ratio transmission – VRG</i>)	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μοντέλο εξομοίωσης Ανεμογεννήτριας μέσω MATLAB/Simulink®		75
3.1	Δεδομένα ανέμου και προετοιμασία χρήσης τους	75
3.1.1	Συλλογή δεδομένων προφίλ ανέμου	76
3.1.2	Δημιουργία προφίλ ανέμου μέσω Simulink®	77
3.2	Μελέτη και προσομοίωση μοντέλου Α/Γ μέσω Simulink®	83
3.2.1	Φυσικά χαρακτηριστικά Α/Γ	84
3.2.2	Καθολικό σύστημα ελέγχου καταστάσεων λειτουργίας Α/Γ (<i>Supervisory Control subsystem</i>)	84
3.2.3	Ελεγκτής Ισχύος (<i>Power Controller - Converter</i>)	87
3.2.3.1	MPPT Control (<i>Maximum Power Point Tracker</i>)	88
3.2.3.2	Derating Control	89
3.2.4	Σύστημα ελέγχου γωνίας συστροφής πτερυγίων Α/Γ (<i>Wind turbine Pitch Controller subsystem</i>)	90
3.2.4	Ηλεκτρογεννήτρια, Σύστημα κίνησης, μετατροπέας και ηλεκτρικό δίκτυο Α/Γ	91
3.2.4.1	Είσοδος Α/Γ – Μοντέλο ανέμου	92
3.2.4.2	Α/Γ – Wind Turbine Block	94
3.2.4.2.1	Wind Turbine: Rotor Hub Subsystem	94
3.2.4.2.1	Wind Turbine: Nacelle	95
3.2.4.2.1.1	Υδραυλικό σύστημα φρεναρίσματος	95
3.2.4.2.1.2	Σύστημα κίνησης και κιβώτιο ταχυτήτων – Drive Train and Gearbox	95
3.2.4.2.1.3	Ηλεκτρογεννήτρια Α/Γ – DFIG Generator	98
Κεφάλαιο 4 Εξομοίωση και προσθήκη συστήματος CVT στο υπάρχον μοντέλο Ανεμογεννήτριας του MATLAB/Simulink®		100
4.1	Κατανόηση διαδικασίας ανάπτυξης μοντέλου κιβωτίου CVT	100
4.2	Ανάπτυξη μοντέλου κιβωτίου CVT στο Simulink®	102
4.3	Ανάπτυξη μοντέλου δυναμικής σχέσης κιβωτίου CVT	104
4.3.1	Βέλτιστη σχέση μετάδοσης κιβωτίου CVT	104
Κεφάλαιο 5 Προσομοίωση μοντέλων Α/Γ μέσω του Simulink®, παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων		109
5.1	Σενάριο ανέμου 1°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	110
5.3	Σενάριο ανέμου 3°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	118
5.4	Σενάριο ανέμου 4°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	122
5.5	Σενάριο ανέμου 5°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	125
5.6	Σενάριο ανέμου 6°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	128
5.7	Σενάριο ανέμου 7°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	131
5.8	Σενάριο ανέμου 8°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	134
5.9	Σενάριο ανέμου 9°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	137

5.10	Σενάριο ανέμου 10°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	140
5.11	Σενάριο ανέμου 11°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	143
5.12	Σενάριο ανέμου 12°: Προσομοίωση και αποτελέσματα	146
5.13	Συγκεντρωτικά συμπεράσματα προσθήκης κιβωτίου CVT σε δεδομένη Α/Γ	149
5.14	Περιορισμοί και προτάσεις βελτίωσης λειτουργίας κιβωτίων CVT σε Α/Γ	152
	<i>Βιβλιογραφικές Αναφορές</i>	<i>153</i>
	<i>Αναφορές διαδικτυακών πηγών</i>	<i>155</i>
	<i>Παράρτημα Α</i>	<i>156</i>
	<i>Παράρτημα Β</i>	<i>157</i>

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ραβδόγραμμα με τις εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου ανά πηγή ενέργειας....	24
Εικόνα 2: Fishbone Chart: Τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας	24
Εικόνα 3: Φάσεις λειτουργίας Α/Γ ως προς την παραγωγή ενέργειας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου	25
Εικόνα 4: Πλάγια όψη ηλεκτρογεννήτριας τύπου PMSG [Choi, 2022].....	28
Εικόνα 5: Ακτινική ροή μαγνητικής πυκνότητας (Πηγή).....	29
Εικόνα 6: Αξονική ροή μαγνητικής πυκνότητας (Πηγή).....	29
Εικόνα 7: Τοπολογίες ρότορα σε γεννήτριες τύπου PMSG	30
Εικόνα 8: Διάγραμμα διεργασιών μεταξύ ηλεκτρογεννήτριας - μετατροπέα και ηλεκτρικού δικτύου (Grid)	31
Εικόνα 9: Ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG.....	31
Εικόνα 10: Διάγραμμα διεργασιών μεταξύ ηλεκτρογεννήτριας (DFIG) - Μετατροπέα και Δικτύου.....	32
Εικόνα 11: Διαφορά μεταξύ fixed speed και variable speed Α/Γ ως προς την απόδοση ανά ταχύτητα ανέμου [S. Nursebo 2013]	35
Εικόνα 12: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG χωρίς μετατροπέα	35
Εικόνα 13: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG με μετατροπέα.....	36
Εικόνα 14: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου WRIG χωρίς μετατροπέα.....	37
Εικόνα 15: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG με κιβώτιο ταχυτήτων	38
Εικόνα 16: Βάρος μόνιμων μαγνητών ηλεκτρογεννήτριας PMSG ανά MW ανάλογα με τα στάδια του πλανητικού συστήματος μετάδοσης κίνησης [Pavel, 2017]	40
Εικόνα 17: Τοπολογία θαλάμου σε Α/Γ (Πηγή).....	41
Εικόνα 18: Εσωτερικό πύργου στο σημείο σύνδεσης με το θάλαμο (Πηγή)	42
Εικόνα 19: Μια Α/Γ με σύστημα κίνησης ως απλοποιημένο κύκλωμα κλειστού βρόχου	43
Εικόνα 20: Τοπολογία Α/Γ τύπου Direct Drive (DDWT).....	43
Εικόνα 21: Τοπολογία Α/Γ τύπου Geared (GWT)	44
Εικόνα 22: Πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης - Planetary gearing system (Πηγή)	46
Εικόνα 23: Ολοκληρωμένο πλανητικό σύστημα μετάδοσης [Liou, 2014]	47
Εικόνα 24: Failure Rate & Downtime σε Α/Γ τύπου Geared <1MW	49
Εικόνα 25: Failure Rate & Downtime για Α/Γ τύπου Geared >1MW	49
Εικόνα 26: Failure Rate & Downtime για Α/Γ τύπου Direct Drive 2MW	50
Εικόνα 27: Ποιοτική αναπαράσταση πτερυγίου Α/Γ και του σημείου μέτρησης της ταχύτητας (tip speed).....	53
Εικόνα 28: Κυκλική κίνηση πτερυγίων Α/Γ.....	54
Εικόνα 29: Κοινό διάγραμμα συντελεστή ισχύος, παραγόμενης ισχύος Α/Γ και μέγιστο TSR συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (Κώδικας: Παράρτημα Α).....	57
Εικόνα 30: Διάγραμμα Venn για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανταγωνιστικότητα μιας Α/Γ	61
Εικόνα 31: Automatically Regulated CVT (ARCVT) [Mangialardi, 1995]	62
Εικόνα 32: Εμπρός και Πλάγια όψη κινητήριας τροχαλίας ARCVT	63
Εικόνα 33: Τα βασικά εξαρτήματα του Nu Vinci CVT (Πηγή).....	65
Εικόνα 34: Τα μόρια του EHL μεταξύ δίσκου εξόδου και σφαίρας	66
Εικόνα 35: Κατηγοριοποίηση σχέσεων μετάδοσης μεταξύ άξονα εισόδου και εξόδου ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου	66
Εικόνα 36: Βασικά μέρη CCVT	68

Εικόνα 37: Παραγόμενη ισχύς Α/Γ σταθερού (fixed) και μεταβλητού (variable) βήματος πτερυγίου ανά φάση λειτουργίας [h. Geng, 2014]	71
Εικόνα 38: Διάταξη συστήματος κίνησης Α/Γ με VRG.....	72
Εικόνα 39: Παραγωγή ισχύος Α/Γ fixed speed χωρίς VRG και με VRG	73
Εικόνα 40: Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ανέμου μέσα στο περιβάλλον του Simulink® ..	77
Εικόνα 41: Ταχύτητα ανέμου ως προς το οριζόντιο επίπεδο με φορά προς τη Δύση	77
Εικόνα 42: Ιδανική μεταβολή διεύθυνσης ανέμου	78
Εικόνα 43: Μεταβολή απόλυτης τιμής ταχύτητας ανέμου.....	78
Εικόνα 44: Ταχύτητα ανέμου ως προς τον οριζόντιο άξονα	79
Εικόνα 45: Dryden Wind Turbulance Model Block.....	79
Εικόνα 46: Εισαγωγή διεύθυνσης ανέμου στο Dryden Wind Turbulance Model.....	80
Εικόνα 47: Αναπαράσταση διεύθυνσης ανέμου στο χώρο μέσω DCM	80
Εικόνα 48: Ρύθμιση υπόλοιπων παραμέτρων.....	81
Εικόνα 49: Διακύμανση Ανέμου	81
Εικόνα 50: Ολοκληρωμένο μοντέλο ανέμου Α/Γ	82
Εικόνα 51: Ταχύτητα ανέμου ανά μονάδα χρόνο με την επιπλέον διακύμανση	82
Εικόνα 52: Μοντέλο Α/Γ στο περιβάλλον του Simulink® με τροποποιημένο μοντέλο εισόδου	83
Εικόνα 53: Supervisory control subsystem μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	86
Εικόνα 54: Είσοδοι και έξοδοι ελεγκτή ισχύος ή μετατροπέα Α/Γ μέσα από το περιβάλλον	

του Simulink®

87

Εικόνα 55: Ελεγκτής Ισχύος Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	88
Εικόνα 56: Έλεγχος του MPPT μέσα από το περιβάλλον του Simulink®.....	89
Εικόνα 57: Έλεγχος Derating μέσα από το περιβάλλον του Simulink®.....	89
Εικόνα 58: Είσοδοι και έξοδοι του συστήματος ελέγχου συστροφής των πτερυγίων μέσα από το περιβάλλον του Simulink®.....	90
Εικόνα 59: Συστάδα υποσυστημάτων Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	92
Εικόνα 60: Κατανομή ταχύτητας ανέμου με ίδιες ακραίες τιμές, αλλά με διάστημα δειγματοληψίας 10sec και 60sec αντίστοιχα.....	92
Εικόνα 61: Μεγεθυμένη αναπαράσταση διαγράμματος ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το χρόνο με σκοπό την ανάδειξη της διαφοράς μεταξύ χρήσης και μη χρήσης φίλτρου	93
Εικόνα 62: Εσωτερικό (level 1) Wind turbine block.....	94
Εικόνα 63: Υποσύστημα θαλάμου (Nacelle) Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink® ..	95
Εικόνα 64: Υδραυλικό σύστημα φρεναρίσματος μέσα από το περιβάλλον του Simulink®..	95
Εικόνα 65: Κιβώτιο ταχυτήτων Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	96
Εικόνα 66: Σύστημα μετρήσεων γωνιακής ταχύτητας και ροπής άξονα ηλεκτρογεννήτριας μέσα από το περιβάλλον του Simulink®.....	97
Εικόνα 67: Σχηματική απεικόνιση παρόμοιου κιβωτίου ταχυτήτων δεδομένης Α/Γ [Grujicic, 2014]	97
Εικόνα 68: Είσοδοι και έξοδος της DFIG type generator μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	98
Εικόνα 69: Μοντέλο κιβωτίου CVT όπως αυτό δημιουργήθηκε μέσω του Simulink	100
Εικόνα 70: Διάγραμμα ροής βασικής αρχής λειτουργίας κιβωτίου CVT	101
Εικόνα 71: Variable Gear Transmission Block μέσα από το περιβάλλον του Simulink®...	102
Εικόνα 72: Ideal Rotational Motion Sensor μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	102

Εικόνα 73: Δοκιμαστικό πρόγραμμα για ανάδειξη απόκρισης Variable Gear Transmission μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	103
Εικόνα 74: Απόκριση μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 73	103
Εικόνα 75: Ολοκληρωμένο μοντέλο δυναμικού υπολογισμού σχέσης μετάδοσης κιβωτίου CVT.....	104
Εικόνα 76: Βέλτιστη σχέση μετάδοσης κίνησης μέσα από το περιβάλλον του Simulink....	105
Εικόνα 77: Οριοθέτηση και αναδιαμόρφωση βέλτιστης σχέσης μετάδοσης στο εύρος 0.505 - 2.17 μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	106
Εικόνα 78: Επίδραση Block First Order Hold σε μία ημιτονοειδή συνάρτηση	107
Εικόνα 79: Μηχανισμός απενεργοποίησης του κιβωτίου CVT μόλις η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει τα 12,5m/s.....	108

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αποτύπωμα πηγών ηλεκτρικής ενέργειας σε CO ₂ e/kWh	23
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Α/Γ - Vestas V66 - 1.65 MW (Δεδομένα)	56
Πίνακας 3: Δεδομένα υπολογισμού C _p	57
Πίνακας 4: Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ARCVT, NVCVT και CCVT	69
Πίνακας 5: Παράδειγμα δεδομένων ανέμου ενός δεκαλέπτου.....	76
Πίνακας 6: Βασικές παράμετροι ανεμογεννήτριας – Simulink ®.....	84
Πίνακας 7: Επεξήγηση καταστάσεων λειτουργία Α/Γ.....	85
Πίνακας 8: Μεταβάσεις Κατάστασης λειτουργίας τριών βασικών σεναρίων.....	85
Πίνακας 9: Είσοδοι και έξοδοι Supervisory control subsystem μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	86
Πίνακας 10: Απόκριση Pitch System ανάλογα με την κατάσταση λειτουργία της Α/Γ	90
Πίνακας 11: Wind Turbine Pitch Control στην κατάσταση λειτουργίας 2 μέσα από το περιβάλλον του Simulink®	91
Πίνακας 12: Ανάλυση μερών κιβωτίου ταχυτήτων Α/Γ	96
Πίνακας 13: Energy Yield πρώτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ.....	112
Πίνακας 14: Energy Yield δεύτερου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ	117
Πίνακας 15: Energy Yield τρίτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ.....	121
Πίνακας 16: Energy Yield τέταρτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ	125
Πίνακας 17: Energy Yield πέμπτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ	128
Πίνακας 18: Energy Yield έκτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ.....	131
Πίνακας 19: Energy Yield έβδομου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ	133
Πίνακας 20: Energy Yield όγδοου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ	136
Πίνακας 21: Energy Yield ένατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ.....	139
Πίνακας 22: Energy Yield δέκατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ.....	142
Πίνακας 23: Energy Yield ενδέκατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ.....	146
Πίνακας 24: Energy Yield δωδέκατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ	149
Πίνακας 25: Συγκεντρωτικά Συμπεράσματα χρήσης κιβωτίου CVT σε Α/Γ ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	151

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: 1 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	110
Διάγραμμα 2: Model A1: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	110
Διάγραμμα 3: Model A1: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	111
Διάγραμμα 4: Model B1: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	111
Διάγραμμα 5: Model B1: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	112
Διάγραμμα 6: High speed shaft angular for Wind Turbine model 1 without and with CVT	112
Διάγραμμα 7: 2 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	114
Διάγραμμα 8: Model A2: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	115
Διάγραμμα 9: Model A2: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	115
Διάγραμμα 10: Model B2: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production Wind speed vs Time	116
Διάγραμμα 11: Model B2: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	116
Διάγραμμα 12: High speed shaft angular for Wind Turbine model 2 without and with CVT	117
Διάγραμμα 13: 3 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	118
Διάγραμμα 14: Model A3: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	118
Διάγραμμα 15: Model A3: Generator angular velocity - Torque after Gear Train – Generator RPM vs Time.....	119
Διάγραμμα 16: Model B3: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	119
Διάγραμμα 17: Model B3: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	120
Διάγραμμα 18: High speed shaft angular for Wind Turbine model 3 without and with CVT	121
Διάγραμμα 19: 4 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	122
Διάγραμμα 20: Model A4: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	122
Διάγραμμα 21: Model A4: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	123
Διάγραμμα 22: Model B4: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	123
Διάγραμμα 23: Model B4: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	123

Διάγραμμα 24: High speed shaft angular for Wind Turbine model 4 without and with CVT	124
Διάγραμμα 25: 5° σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	125
Διάγραμμα 26: Model A5: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	125
Διάγραμμα 27: Model A5: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	126
Διάγραμμα 28: Model B5: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	126
Διάγραμμα 29: Model B5: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time.....	126
Διάγραμμα 30: High speed shaft angular for Wind Turbine model 5 without and with CVT	127
Διάγραμμα 31: 6° σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	128
Διάγραμμα 32: Model A6: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	128
Διάγραμμα 33: Model A6: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	129
Διάγραμμα 34: Model B6: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time.....	129
Διάγραμμα 35: Model B6: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time.....	129
Διάγραμμα 36: High speed shaft angular for Wind Turbine model 6 without and with CVT	130
Διάγραμμα 37: 7° σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	131
Διάγραμμα 38: Model A7: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	131
Διάγραμμα 39: Model A7: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	132
Διάγραμμα 40: Model B7: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	132
Διάγραμμα 41: Model B7: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	
132	
Διάγραμμα 42: High speed shaft angular for Wind Turbine model 7 without and with CVT	133
Διάγραμμα 43: 8° σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	134
Διάγραμμα 44: Model A8: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	134
Διάγραμμα 45: Model A8: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	135
Διάγραμμα 46: Model B8: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	135

Διάγραμμα 47: Model B8: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	135
Διάγραμμα 48: High speed shaft angular for Wind Turbine model 8 without and with CVT	136
Διάγραμμα 49: 9 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	137
Διάγραμμα 50: Model A9: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	137
Διάγραμμα 51: Model A9: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	138
Διάγραμμα 52: Model B9: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time	138
Διάγραμμα 53: Model B9: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	138
Διάγραμμα 54: High speed shaft angular for Wind Turbine model 9 without and with CVT	139
Διάγραμμα 55: 10 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	140
Διάγραμμα 56: Model A10: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time.....	140
Διάγραμμα 57: Model A10: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time.....	141
Διάγραμμα 58: Model B10: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time	141
Διάγραμμα 59: Model B10: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time.....	141
Διάγραμμα 60: High speed shaft angular for Wind Turbine model 10 without and with CVT	142
Διάγραμμα 61: 11 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	143
Διάγραμμα 62: Model A11: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time	143
Διάγραμμα 63: Model A11: Generator angular velocity - Torque after Gear Train Generator RPM vs Time.....	144
Διάγραμμα 64: Model B11: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time	144
Διάγραμμα 65: Model B11: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	145
Διάγραμμα 66: High speed shaft angular for Wind Turbine model 11 without and with CVT	146
Διάγραμμα 67: 12 ^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)	146
Διάγραμμα 68: Model A12: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time	147
Διάγραμμα 69: Model A12: Generator angular velocity - Torque after Gear Train Generator RPM vs Time.....	147
Διάγραμμα 70: Model B12: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time	148

Διάγραμμα 71: Model B12: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time	148
Διάγραμμα 72: High speed shaft angular for Wind Turbine model 12 without and with CVT	149

Σηματολογία βασικών εννοιών	
Συντομογραφία	Επεξήγηση
A/Γ	Ανεμογεννήτρια
DD	Direct Drive - άμεση μετάδοση σχέσης χωρίς σύστημα κίνησης
DDWT	Direct Drive Wind Turbine – A/Γ άμεσης μετάδοσης
G	Geared - Σύστημα με σύστημα κίνησης και κιβώτιο ταχυτήτων
GWT	Geared Wind Turbine – A/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων
A/C	Alternating Current - Εναλλασσόμενο ρεύμα
DC	Direct Current - Συνεχές ρεύμα
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator - Σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια μόνιμου μαγνήτη
DFIG	Doubly Fed Induction Generator - Επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια διπλής τροφοδότησης
RF	Radial Flux - Ακτινική μαγνητική ροή
AF	Axial Flux - Αξονική μαγνητική ροή
CVT	Continuously Variable Transmission – Σύστημα συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης
ARCVT	Automatically Regulated CVT
NVCVT	Nu Vinci CVT
CCVT	Chain CVT
TSR	Tip Speed Ratio – λόγος ταχύτητας άκρων πτερυγίων A/Γ προς την ταχύτητα του ανέμου
CVP	Continuously Variable Planetary – Συνεχώς μεταβαλλόμενο πλανητικό σύστημα μετάδοσης
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator - Επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού
WRIG	Wound Rotor Induction Generator – Επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα
EESG	Electrically Excited Synchronous Generator – Σύγχρονη ηλεκτρικά διεγερόμενη ηλεκτρογεννήτρια

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και την αξιολόγηση μεθόδου με την οποία η περιστροφική κίνηση που εκτελεί ο άξονας της ηλεκτρογεννήτριας μιας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) θα γίνεται με τρόπο τέτοιο, ώστε ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ανέμου η εξαγόμενη ενέργεια θα παράγεται κατά το βέλτιστο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται λόγος για μία λύση που έχει ήδη προταθεί στη βιβλιογραφία και επανέρχεται προς εξέταση περιοδικά. Η λύση αυτή αναφέρεται στη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων διαρκώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης (continuously variable transmission – CVT) είτε συμπληρωματικά είτε αντικαθιστώντας το συμβατικό κιβώτιο, το οποίο παραδοσιακά τοποθετείται στις Α/Γ. Η χρήση ενός CVT συμβάλλει στη διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα της ηλεκτρογεννήτριας σε βέλτιστα επίπεδα, ενώ γενικότερα αυτό που χαρακτηρίζει ένα CVT είναι η αυξημένη προσαρμοστικότητά του υπό διάφορες και μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αναλύονται όλα τα βασικά υποσυστήματα μιας Α/Γ από το υποσύστημα εισόδου μέχρι και το υποσύστημα της εξόδου της, δηλαδή από την εισαγόμενη αιολική ενέργεια στην εξαγόμενη ηλεκτρική, δίνοντας όμως ιδιαίτερη έμφαση στο υποσύστημα της μετάδοσης κίνησης από τα πτερύγιά της στην ηλεκτρογεννήτρια. Αναφέρονται οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες βλαβών που έχουν παρατηρηθεί σε Α/Γ, καθώς και το πως ένα κιβώτιο CVT θα μπορούσε ενδεχομένως να τις μειώσει. Επίσης, παρουσιάζονται ορισμένες ήδη υπάρχουσες, σε θεωρητικό τουλάχιστον επίπεδο, λύσεις με χρήση του CVT σε Α/Γ, οι αρχές λειτουργία τους, αλλά και οι περιορισμοί χρήσης τους. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, πραγματοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB®, η προσομοίωση της λειτουργίας μίας Α/Γ με ρεαλιστικά δεδομένα εισόδου, η οποία διαθέτει συμβατικό κιβώτιο ταχυτήτων. Σε αυτήν την Α/Γ προστίθεται ένα τροποποιημένο σύστημα CVT δημιουργημένο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στο υπάρχον μοντέλο Α/Γ και στη συνέχεια εκτελούνται προσομοιώσεις για διαφορετικά σενάρια ανέμων. Τέλος, συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα και καταγράφονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα για την εκάστοτε περίπτωση, τα οποία δείχνουν πως τελικά ένα σύστημα CVT θα συνέβαλε στη βελτίωση της παραγωγικότητας μίας ήδη υπάρχουσας Α/Γ ειδικότερα κατά της χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου.

Abstract

The present diploma thesis has as purpose the study and the evaluation of a method with which the rotational motion of the generator shaft will be rotating in such a way that in relation to the wind characteristics the energy production will be producing optimally. More specifically, there is a solution, which has already been proposed in the literature, which is periodically reviewed. This solution refers to the use of a continuously variable transmission system (CVT) either a supplement or a replacement for the conventional transmission system, that are traditionally parts of wind turbines. Using a CVT, the rotational speed of the generator shaft being maintained at the optimum levels. Also, CVTs are well known about their higher adaptability under various circumstances. All the basic subsystems of a wind turbine are analyzed, beginning from the wind energy which move its blades and ending with the electrical energy which is the product of the wind turbine operation. Special emphasis is given to the drive train of the wind turbine and the way that the motion being transferred from the blades to the generator. The most common types of failures are listed, as well as how a CVT system could potentially reduce them. Additionally, some already existed, at least at theoretical level, solutions using CVT, their working principle, but also the limitation of their usage are presented. In the last part of this work, with the help of the Matlab software, the simulation of the operation of a wind turbine with realistic input data, which has a conventional gearbox is carried out. In the other hand a modified CVT system is inserted into this wind turbine model and different simulations for different wind scenarios are then performed. Last but not least, the results are collected and the corresponding conclusions are recorded for each case.

Αναγνωρίσεις

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Γ. Δημογιαννόπουλο για την συνεχή υποστήριξη της διπλωματικής μου διατριβής, για την υπομονή που επέδειξε, αλλά και για τη σημαντική καθοδήγηση, την οποία μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου για την πνευματική στήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχε, καθώς συνετέλεσαν στην ολοκλήρωση του εγχειρήματος αυτού.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σκοπός της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση μεθόδου με την οποία μία ανεμογεννήτρια (Α/Γ) θα μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια κατά το βέλτιστο τρόπο. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει πρώτα να κατανοηθεί ο τρόπος λειτουργίας μίας Α/Γ, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συνεργάζονται όλα τα υποσυστήματά της μεταξύ τους, ώστε να μετατρέψουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Μελετώντας το ιστορικό και τη συχνότητα των βλαβών των Α/Γ συμπεραίνεται πως ένα από τα περισσότερο ευαίσθητα, αλλά και ταυτοχρόνως κρίσιμα, υποσυστήματά της είναι το σύστημα κίνησής της με όλα τα μέρη που το απαρτίζουν. Γενικότερα, το σύστημα κίνησης είναι υπεύθυνο για τον πολλαπλασιασμό των στροφών του ρότορα της Α/Γ, δηλαδή του άξονα που περιστρέφεται σύμφωνα με την περιστροφή των πτερυγίων της, ώστε οι πολλαπλασιασμένες πλέον στροφές να καταλήξουν στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας και έπειτα να ξεκινήσει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εξαιτίας λοιπόν της κρισιμότητας του συγκεκριμένου υποσυστήματος, επιτακτική είναι η ανάγκη εύρεσης τρόπων τροποποίησής του με σκοπό τόσο την αύξηση της αποδοτικότητας όσο και της αξιοπιστίας του, διατηρώντας όμως παράλληλα όσο το δυνατόν χαμηλότερο το λειτουργικό κόστος της εκάστοτε Α/Γ.

Αναλυτικότερα, στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία και βασίζεται η τρέχουσα διπλωματική εργασία. Ακολουθώντας μία παραγωγική συλλογιστική πορεία επεξηγούνται οι γενικές και βασικές αρχές λειτουργίας των υποσυστημάτων των Α/Γ και στην συνέχεια γίνεται η κατηγοριοποίησή τους βάσει του συστήματος κίνησης και του τύπου της ηλεκτρογεννήτριας τους. Στη συνέχεια, ορίζεται το πρόβλημα της αξιοπιστίας των Α/Γ και μελετώνται οι συχνότερες αιτίες βλαβών τους ανά υποσύστημα. Συμπληρωματικά, αναφέρονται αναλυτικά οι δημοφιλέστερες προτάσεις της βιβλιογραφίας για χρήση συγκεκριμένων κιβωτίων συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης για Α/Γ, καθώς και οι αρχές λειτουργίας τους. Πραγματοποιείται η μεταξύ τους σύγκριση με όλα τα έως τώρα διαθέσιμα στοιχεία και καταγράφονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό κλείνει, έχοντας παρουσιάσει παράλληλα και την τεχνολογική πρόοδο της χρήσης κιβωτίου αυτού του τύπου στις Α/Γ μεγάλης ονομαστικής ισχύος μέχρι και σήμερα.

Στο **Κεφάλαιο 3** βάσει των όσων είχαν παρουσιαστεί προηγουμένως και του γνωστικού υποβάθρου που αποκτήθηκε, πραγματοποιείται με τη βοήθεια του υπολογιστικού λογισμικού Matlab[®] και του πακέτου Simulink[®], προσομοίωση ενός ρεαλιστικού μοντέλου Α/Γ, το οποίο και αποτελεί παράδειγμα του παραπάνω υπολογιστικού περιβάλλοντος. Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ότι δημιουργείται ένα ρεαλιστικό μοντέλο ανέμου, τα δεδομένα του οποίου είναι επίσης ρεαλιστικά. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται αφορούν διάφορα σενάρια

ανέμου και καταγράφονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είναι κυρίως σχετικά με την αποτελεσματικότητα της Α/Γ ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Έπειτα, στο **Κεφάλαιο 4** αναπτύσσεται ένα σύστημα συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης κίνησης, το οποίο έχει προταθεί από τη βιβλιογραφία. Αυτό το σύστημα λοιπόν, μεταφέρεται με διάφορες τροποποιήσεις που παρουσιάζονται, στο περιβάλλον του Simulink® και από εκεί στο ήδη υπάρχον μοντέλο της Α/Γ του Κεφαλαίου 3. Ομοίως, το τροποποιημένο πλέον μοντέλο δοκιμάζεται στα ίδια σενάρια ανέμου με το μη τροποποιημένο και καταγράφονται τα αποτελέσματα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής διατριβής, στο **Κεφάλαιο 5**, παρουσιάζονται όλες οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των δύο μοντέλων στα ίδια σενάρια ανέμου, μελετώνται και στη συνέχεια εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Παράλληλα, αναφέρονται και οι περιορισμοί, που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των μοντέλων και θα πρέπει να σημειωθεί πως αν δε ληφθούν υπόψιν θα προκύψουν διαφόρων ειδών ζητήματα σχετικά με τη λειτουργία του υπάρχοντος μοντέλου, καθώς μία Α/Γ είναι ένα ηλεκτρομηχανολογικό πολυμεταβλητό σύστημα διάφορων εισόδων και εξόδων.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η ανασκόπηση των βιβλιογραφικών πηγών στις οποίες βασίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, πραγματοποιείται η ανασκόπηση των βασικών αρχών λειτουργίας των Α/Γ μέσω της ανάλυσης των υποσυστημάτων τους και της κατηγοριοποίησής τους ανάλογα με το σύστημα κίνησης και της ηλεκτρογεννήτριας που διαθέτουν. Έπειτα, αναλύονται οι συχνότερες αιτίες βλαβών μίας Α/Γ σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα χρόνου λειτουργίας και τέλος εισάγεται η πρόταση της χρήσης κιβωτίων συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης στις Α/Γ και αναφέρονται με λεπτομέρεια οι έως τώρα δημοφιλέστερες προτάσεις εισαγωγής κιβωτίων συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης κίνησης στις Α/Γ, με σκοπό τη μείωση συγκεκριμένων κατηγοριών βλαβών, καθώς και την αύξηση της παραγωγικότητάς τους.

2.1 Η αξία της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας

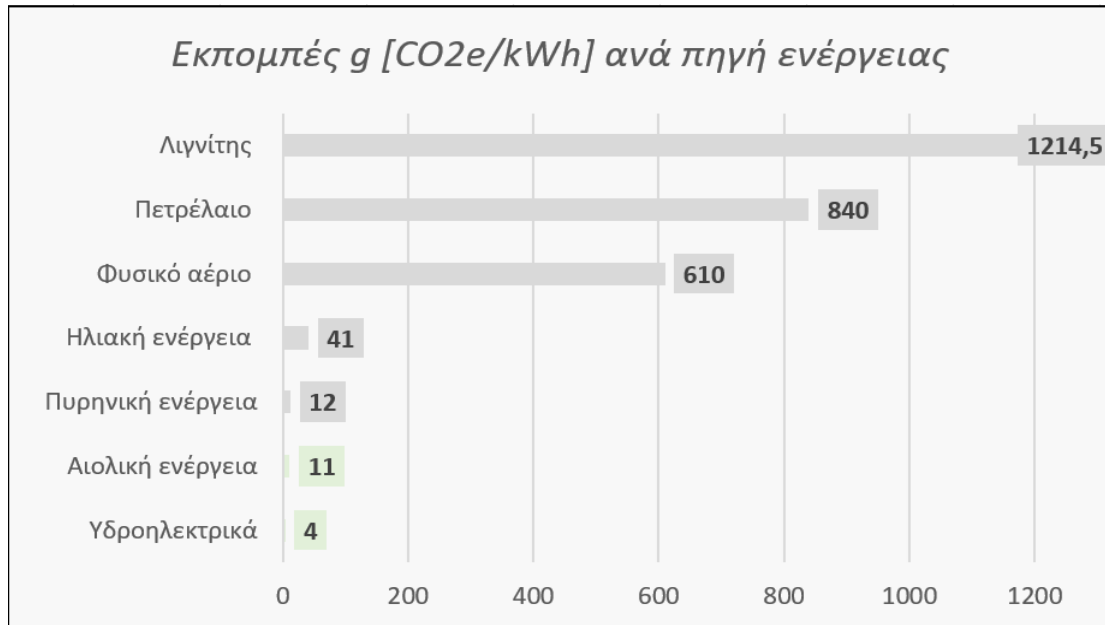
Ο άνθρωπος καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας του αναζητούσε και αναζητά συνεχώς νέους τρόπους βελτίωσης της καθημερινότητάς του είτε εξελίσσοντας τα ήδη υπάρχοντα εργαλεία του είτε εφευρίσκοντας νέα. Μία από τις ιδέες, οι οποίες στη συνέχεια υλοποιήθηκαν, ήταν η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί, πως στη σύγχρονη εποχή η αιολική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως μέσω των ανεμογεννητριών (Α/Γ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την αποφυγή χρήσης των ορυκτών καυσίμων και άλλων μη ανανεώσιμων πηγών. Αντίθετα, παρόλο που η αξιοποίησή της αποτελούσε ζήτημα τουλάχιστον από τα προηγούμενα 2.000 με 3.000 έτη, αλλά λόγω της τεχνολογικής προόδου της εκάστοτε εποχής, η χρήση και ο σκοπός της ήταν διαφορετικοί. Το πιο δημοφιλές παράδειγμα είναι ο ανεμόμυλος, ο οποίος χρησιμοποιούταν για την άλεση σιτηρών ή για τη λειτουργία αντλιών νερού, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική για τις μύλοπετρες και σε δυναμική για το ανέβασμα του νερού αντίστοιχα. Η εφεύρεση και λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος αντικατέστησε την ανθρώπινη εργασία, η οποία πραγματοποιούταν με τη βοήθεια των ζώων, ενώ παράλληλα οι άνθρωποι καταπονούνταν σωματικά ή ακόμα και διακινδύνευαν τη ζωή τους σε μερικές περιπτώσεις. Αντίστοιχα, οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες πλέον είναι υπεύθυνες αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντικαθιστούν μέχρι στιγμής έως έναν σημαντικό βαθμό την εξόρυξη λιγνίτη, η οποία είναι επικίνδυνη τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον.

Μπορεί οι πρώτες ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να άρχισαν ήδη να κατασκευάζονται στις αρχές του 20ου αιώνα, η παραγωγή τους ωστόσο δεν ήταν μαζική και δεν συνέφεραν οικονομικά, καθώς η τεχνολογία της εποχής εκείνης δεν το επέτρεπε. Στη σύγχρονη εποχή και από τα μέσα του 20ου αιώνα και έπειτα, ξεκίνησαν οι πιο ουσιαστικές μελέτες για την κατασκευή Α/Γ, δεδομένης και

της πολύ περισσότερο ανεπτυγμένης τεχνολογίας σε σχέση με παλαιότερα. Έτσι, από τις αρχές του 21ου αιώνα και ύστερα και ειδικότερα τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη αυτού τομέα είναι αξιοσημείωτη. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται πρωτίστως στο γεγονός ότι η αιολική ενέργεια παρέχεται δωρεάν από το περιβάλλον, είναι ανανεώσιμη και σε μεγάλη ποσότητα, ενώ παράλληλα είναι καθαρή, δηλαδή δεν επιβαρύνει περαιτέρω το περιβάλλον με διοξείδιο του άνθρακα και με άλλες ρυπογόνες ουσίες και αέρια του θερμοκηπίου. Η ανάγκη για τη χρήση αυτών των συστημάτων γίνεται όλο και πιο επιτακτική, λόγω της περιβαλλοντικής και κλιματικής κρίσης που αντιμετωπίζει ο άνθρωπος και δεν θα ήταν συμφέρον να συνεχίζει να αρκείται στη λύση των μη ανανεώσιμων και περιορισμένων ορυκτών καυσίμων βλάπτοντας περαιτέρω το περιβάλλον, ενώ μπορεί η διαδικασία αυτή να αποφευχθεί. Ο Πίνακας 1 και η Εικόνα 1 σύμφωνα με την αναφορά του 2014 της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC) [AR5, 2014], παρουσιάζουν τη σύγκριση μεταξύ των διάφορων μέσων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως προς το ισοδύναμο διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπουν, δηλαδή στη μονάδα μέτρησης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε τόνους (CO₂e) ανά κιλοβατώρα (kWh). Διακρίνεται ξεκάθαρα ότι από περιβαλλοντική σκοπιά, οι ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή ίσης ποσότητας ενέργειας, εκλύουν μηδενικό σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα διοξείδιο του άνθρακα, αλλά από την άλλη η χρήση τους δεν είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει στην ανθρωπότητα να βασιστεί εξ ολοκλήρου σε αυτές. Ο λόγος που συμβαίνει το τελευταίο βέβαια, είναι δευτερογενής και έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι αποθήκες ενέργειας δεν είναι τόσες που να μπορούν να αποθηκεύσουν όλη την ενέργεια που παράγεται. Παρακάτω θα γίνει λόγος για το πως μπορούν οι Α/Γ να γίνουν περισσότερο οικονομικά συμφέρουσες, έτσι ώστε τελικά να υπερτερήσουν και να επικρατήσουν έναντι των υπόλοιπων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε, οι συνέπειες της κλιματικής κρίσης να περιοριστούν. Σημειώνεται ότι η ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου που εκλύεται από τις Α/Γ και τα φωτοβολταϊκά, οφείλεται στο στάδιο της παραγωγής τους στο εργοστάσιο, στη συντήρησή τους ή κατά την ανακύκλωση κάποιων μερών τους.

Αποτύπωμα πηγών ηλεκτρικής ενέργειας σε CO₂e/kWh		
<i>Πηγή</i>	<i>Κύριο μέσο παραγωγής</i>	<i>~ [CO₂e/kWh]</i>
Υδροηλεκτρικά	Υδροηλεκτρικό φράγμα	4g
Αιολική ενέργεια	Ανεμογεννήτριες	11g
Πυρηνική ενέργεια	Πυρηνικός αντιδραστήρας	12g
Ηλιακή ενέργεια	Φωτοβολταϊκά συστήματα	41g
Φυσικό αέριο	Εξόρυξη / γεώτρηση	290-930g
Πετρέλαιο	Εξόρυξη / γεώτρηση	510-1170g
Λιγνίτης	Εξόρυξη	740-1689g

Πίνακας 1: Αποτύπωμα πηγών ηλεκτρικής ενέργειας σε CO₂e/kWh

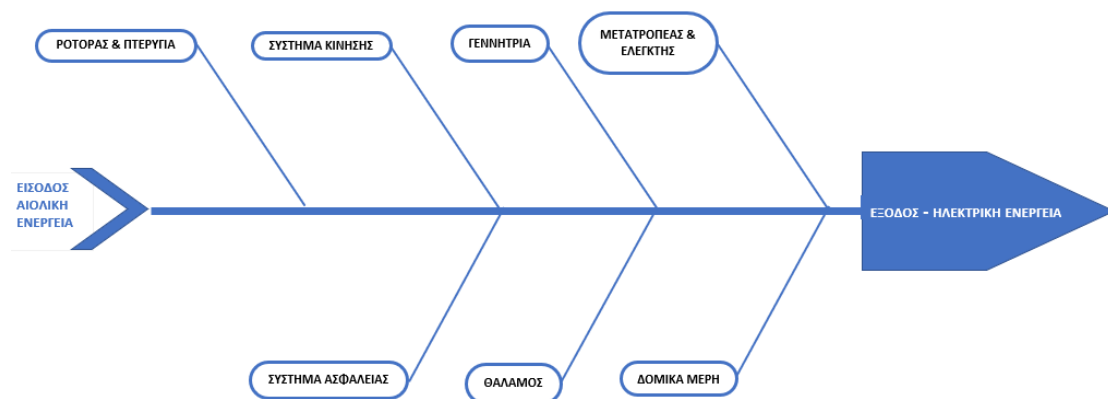


Εικόνα 1: Ραβδόγραμμα με τις εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου ανά πηγή ενέργειας

2.2 Τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Μία Α/Γ αποτελεί ένα ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα, το οποίο ως είσοδο έχει τον αέρα (αιολική ενέργεια) και ως έξοδο την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί την εκάστοτε εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ της εισόδου και της εξόδου υπάρχουν πολλά επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία και θα επεξηγηθούν, ενώ συνολικότερα στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο σύστημα κίνησης της Α/Γ.

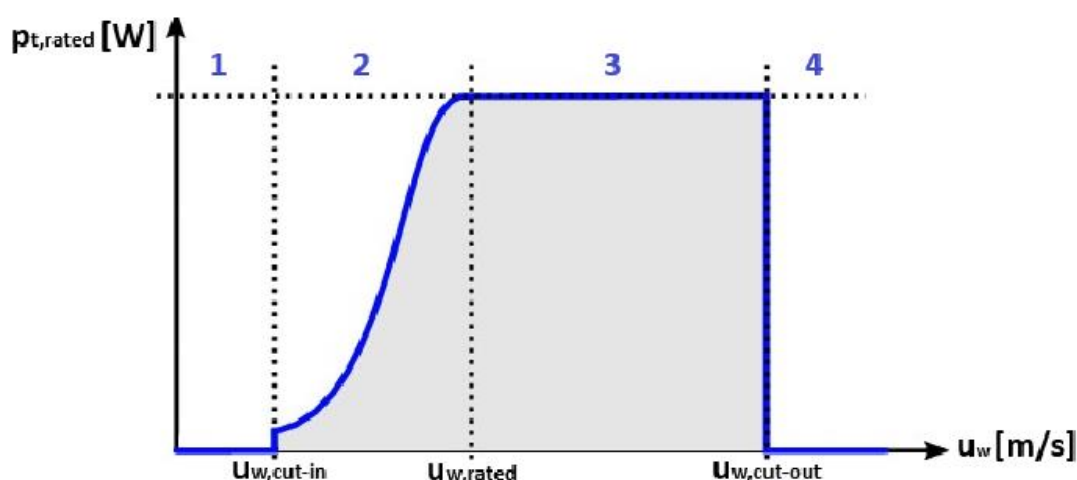
Τα βασικά υποσυστήματα της Α/Γ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επτά μεγάλες κατηγορίες [Reder, 2016], με βάση τη λειτουργία του καθενός από αυτά (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Fishbone Chart: Τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας

2.2.1 Ρότορας (Πλήμνη) και πτερύγια ανεμογεννήτριας (Blades and Rotor)

Πρόκειται για το μέρος της Α/Γ, το οποίο έρχεται πρώτο σε επαφή με τον αέρα. Ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, τα πτερύγια περιστρέφονται ως προς τον οριζόντιο άξονα (roll axis) ή και προς τον εγκάρσιο άξονα (pitch axis). Η λειτουργία μιας Α/Γ μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις φάσεις (Εικόνα 3) ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Όπως κάθε σύστημα έτσι και αυτό, απαιτεί μια ελάχιστη ενέργεια για να αρχίσει να λειτουργεί και στη συγκεκριμένη περίπτωση θα χρειαστεί μια ελάχιστη ταχύτητα ανέμου. Αν u_w είναι η ταχύτητα του ανέμου και $u_{w,cut-in}$ η ελάχιστη αυτή ταχύτητα, τότε η πρώτη φάση λειτουργίας της Α/Γ είναι όταν $u_w < u_{w,cut-in}$ και άρα το έργο που παράγεται είναι μηδενικό. Η δεύτερη φάση λειτουργίας είναι όταν $u_w > u_{w,cut-in}$. Εξαιτίας, της ορισμένης αντοχής των υλικών των μηχανικών και ηλεκτρονικών μερών της Α/Γ, οι δυνατότητές της για απορρόφηση της ενέργειας είναι ως έναν βαθμό περιορισμένες, οπότε και υπάρχει μία μέγιστη ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια της οποίας τα πτερύγια περιστρέφονται κατά το μέγιστο ρυθμό, ενώ συστρέφονται και κατά τον εγκάρσιο άξονα και κατ' επέκταση αποδίδουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια ($p_{t,rated}$). Όταν λοιπόν το σύστημα δέχεται τη μέγιστη δυνατή u_w , τότε αυτή ορίζεται ως $u_{w,rated}$ (Τρίτη φάση). Παρόλα αυτά αν αυτή η ταχύτητα ξεπεραστεί ($u_{w,cut-out}$) τότε το σύστημα μέσω μηχανισμών σταματά την περιστροφή, με σκοπό την προφύλαξη των υπόλοιπων υποσυστημάτων από υπερθέρμανση, υπερτροφοδότηση και άλλα σημαντικά συμβάντα που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες (Τέταρτη φάση) [Hackl, 2018]. Όπως θα αναφερθεί και στις επόμενες ενότητες η μεγαλύτερη πρόκληση για τη βέλτιστη απόδοση ως προς την παραγόμενη ισχύ, είναι να επιτυγχάνεται η όσο το δυνατόν γρηγορότερη μεταβολή από τη δεύτερη στην τρίτη φάση λειτουργίας της Α/Γ.



Εικόνα 3: Φάσεις λειτουργίας Α/Γ ως προς την παραγωγή ενέργειας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου

2.2.2 Σύστημα κίνησης (Drive Train)

Σκοπός του συστήματος κίνησης μιας Α/Γ είναι να μεταδώσει την περιστροφική ενέργεια που λαμβάνει μέσω του αργού άξονά της (Low speed or rotor shaft), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την πλήμνη (ρότορα), στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας ή αλλιώς στο γρήγορο άξονά της (High speed shaft or generator shaft). Η βασική κατηγοριοποίηση των Α/Γ ως προς το σύστημα κίνησής τους γίνεται σε Α/Γ που διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων και σε Α/Γ που χρησιμοποιούν μία εναλλακτική μέθοδο μετάδοσης της κίνησης. Στην πρώτη περίπτωση, όταν γίνεται αναφορά σε κιβώτιο ταχυτήτων, οι μέχρι τώρα Α/Γ χρησιμοποιούν μια δεδομένη σχέση μετάδοσης και στην ουσία αφού η περιστροφική κίνηση των πτερυγίων μεταφερθεί στον άξονα του ρότορα, περνάει από μία διάταξη γραναζιών όπου και γίνεται ο πολλαπλασιασμός των στροφών, ανάλογα με μία, και πάλι, ορισμένη σχέση πολλαπλασιασμού των στροφών αυτού. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου το σύστημα κίνησης δεν περιλαμβάνει κιβώτιο ταχυτήτων, χρησιμοποιώντας την περιστροφική ταχύτητα του ρότορα, και δίχως πολλαπλασιασμό στροφών, παράγεται η αντίστοιχη ηλεκτρική ισχύς. Παρακάτω γίνεται εκτενής αναφορά στα συστήματα κίνησης, καθώς και στον τρόπο λειτουργίας αυτών

2.2.3 Ηλεκτρογεννήτρια (Generator)

Η ηλεκτρογεννήτρια μιας Α/Γ αποτελεί ένα πολύ κρίσιμο υποσύστημα, καθώς είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και τα χαρακτηριστικά αυτής. Στην ουσία με το που λάβει την περιστροφική ενέργεια από το σύστημα κίνησης μέσω του γρήγορου άξονα, τελικός σκοπός της είναι να τη μετατρέψει σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) συγκεκριμένης και σταθερής συχνότητας, το οποίο στη συνέχεια θα καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο. Γενικότερα, όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν διαφορετικές Α/Γ, διαφορετικών δυνατοτήτων και κατ' επέκταση διαφορετικών τεχνολογιών.

Τα είδη αυτά διαχωρίζονται σε έξι βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε εφαρμογής. Πριν όμως γίνει η κατηγοριοποίηση των Α/Γ βάσει των ηλεκτρογεννητριών που διαθέτουν, θα πρέπει να γίνει μια κατηγοριοποίηση ως προς τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδεται η κίνηση, από τα πτερύγια και τον ρότορα προς τα υπόλοιπα υποσυστήματα, καθώς υπάρχουν συγκεκριμένοι συνδυασμοί συστημάτων.

Οι Α/Γ διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ως προς το σύστημα κίνησής τους, σε εκείνες που δεν χρησιμοποιείται σύστημα κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων και η μετάδοση γίνεται απευθείας από τον βασικό περιστρεφόμενο, αργό άξονα του ρότορα στην ηλεκτρογεννήτρια (DDWT – άμεσης μετάδοσης) και σε εκείνες που μεταξύ ρότορα και ηλεκτρογεννήτριας υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων (GWT). Το κάθε ένα από τα είδη αυτά έχει τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά του βασιζόμενα στα έως τώρα δεδομένα.

Οι πιο δημοφιλείς τύποι ηλεκτρογεννητριών που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ είναι δύο, οι σύγχρονες γεννήτριες σταθερού μαγνήτη (PMSG) και οι επαγωγικές διπλής τροφοδότησης (DFIG), οι οποίες διαφέρουν τόσο ως προς τον τρόπο λειτουργίας όσο και ως προς διάφορα άλλα χαρακτηριστικά, όπως η αξιοπιστία, η απόδοση και η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που εξάγουν. Βέβαια, συνολικά τα είδη ηλεκτρογεννητριών που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ μέχρι και σήμερα είναι έξι, καθώς οι ιδιαιτερότητες και οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής δεν καλύπτονται αποκλειστικά από τις PMSG και τις DFIG που αναφέρθηκαν. Στα ακριβώς επόμενα υποκεφάλαια γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στους τύπους των ηλεκτρογεννητριών αυτών, στην τοπολογία τους και στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν.

2.2.3.1 Σύγχρονες Γεννήτριες Σταθερού Μαγνήτη (PMSG)

Οι σύγχρονες γεννήτριες σταθερού μαγνήτη (PMSG) αποτελούν μέχρι και σήμερα [Κο, 2010] μια αρκετά δημοφιλή επιλογή για τις Α/Γ και ειδικότερα για εκείνες των οποίων η ονομαστική ισχύς ξεπερνά το 1 MW.

Επεξηγηματικά, ο όρος «ονομαστική ισχύς» αναφέρεται στη μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παράγει μία ηλεκτρογεννήτρια και μετριέται συνήθως σε MW, όταν γίνεται λόγος για Α/Γ μεγάλων διαστάσεων.

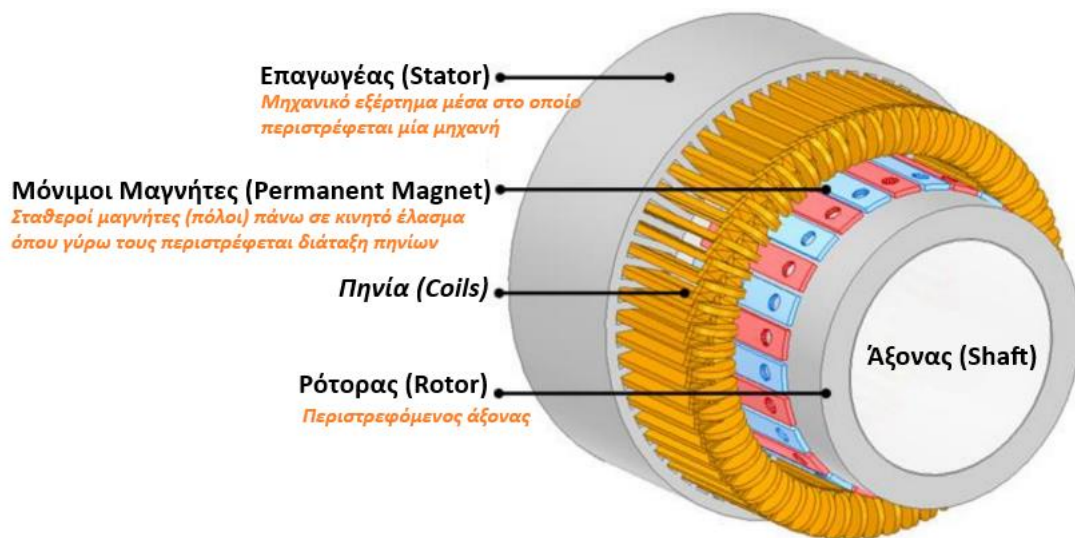
Το ξεχωριστό που προσφέρει μια τέτοια λύση είναι η μη απαίτηση τοποθέτησης κιβωτίου ταχυτήτων στο σύστημα κίνησής της. Αντ' αυτού με βάση τη δεδομένη ταχύτητα του ανέμου και άρα για τη δεδομένη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, με τη βοήθεια μιας συγκεκριμένης, για κάθε εφαρμογή, διάταξης μαγνητικών πόλων, επιτυγχάνεται η εξαγωγή της επιθυμητής συχνότητας εναλλασσόμενου AC ρεύματος, όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα παρακάτω. Ο αναφερόμενος αριθμός των μαγνητικών πόλων, επιλέγεται στη φάση της μελέτης του συνολικού έργου, ανάλογα με τα εκάστοτε γεωμορφολογικά και άλλων ειδών δεδομένα της περιοχής, καθώς τα χαρακτηριστικά της διάταξης καθορίζουν κατά έναν μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες μιας Α/Γ κυρίως ως προς τη διαχειριζόμενη ροπή. Επεξηγηματικά, κατά τη λειτουργία της Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG, η γωνιακή ταχύτητα του άξονα του ρότορα είναι ίση με εκείνη που καταλήγει στην είσοδο της ηλεκτρογεννήτριας σε αντίθεση με τις γεννήτριες άλλου τύπου που θα αναφερθούν. Αξίζει να σημειωθεί πως ένας βασικός λόγος της ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος ήταν να αποφευχθεί η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων, ώστε να μειωθούν τα διάφορα κόστη που θα προέκυπταν από τις συχνές βλάβες και τη συντήρησή του. Παρόλα αυτά όπως θα δούμε στη συνέχεια, προκύπτουν άλλα ζητήματα με τη χρήση μιας ηλεκτρογεννήτριας PMSG.

2.2.3.1.1 Σύστημα Διέγερσης (Excitation System)

Στις γεννήτριες τύπου PMSG, απαιτείται η ύπαρξη ενός μαγνητικού πεδίου, το οποίο με χρήση συγκεκριμένης διάταξης πηνίων θα πρέπει να περιστρέφεται κατά την

περιστροφή του ρότορα. Για να εξασφαλιστεί όμως η παρουσία του πεδίου αυτού, χρειάζεται η προσθήκη ενός συστήματος διέγερσης, δηλαδή η προσθήκη μιας άλλης δευτερεύουσας διάταξης, μιας διάταξης μόνιμων μαγνητών. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται η ανάγκη για παρουσία κάποιας εξωτερικής ηλεκτρικής τροφοδοσίας, καθώς αρκούν τα παραπάνω για να παραχθεί ενέργεια, κατά την περιστροφή του ρότορα. Στην (Εικόνα 4) διακρίνονται τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία ηλεκτρογεννήτρια του τύπου αυτού.

Σημειώνεται πως χρησιμοποιώντας τους μόνιμους μαγνήτες ως σύστημα διέγερσης, μηδενίζονται ουσιαστικά οι απώλειες σε περίπτωση που αντί για εκείνους υπήρχε μία εξωτερική DC τάση, όπως συμβαίνει στις γεννήτριες τύπου EESG, έναν άλλον, όχι και τόσο διαφορετικό, τύπο ηλεκτρογεννήτριας, ο οποίος και αναφέρεται παρακάτω.



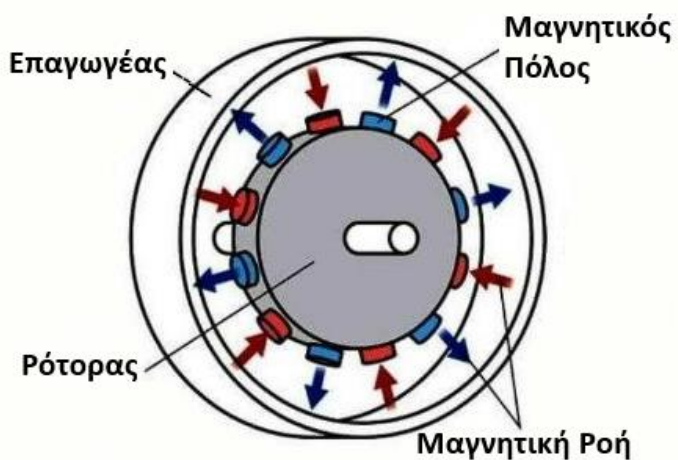
Εικόνα 4: Πλάγια όψη ηλεκτρογεννήτριας τύπου PMSG [Choi, 2022]

2.2.3.1.2 Μαγνητικές ροές – Διατάξεις μαγνητικών πόλων στις γεννήτριες τύπου PMSG

Αφού λοιπόν καθορίστηκε το σύστημα διέγερσης της ηλεκτρογεννήτριας, χρειάζεται να καθοριστεί και η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής [Rivani, 2018].

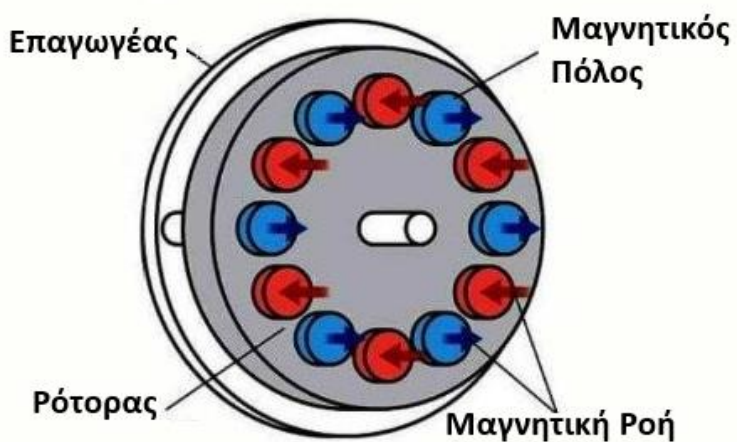
Στην ακτινική ροή (radial flux - RF), η μαγνητική ροή ρέει κάθετα στον άξονα περιστροφής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, ενώ στη διάταξη της αξονικής ροής (axial flux - AX) η μαγνητική ροή ρέει παράλληλα στον άξονα περιστροφής της (Εικόνα 6)

Ακτινική Ροή - Radial Flux



Εικόνα 5: Ακτινική ροή μαγνητικής πυκνότητας (Πηγλή)

Αξονική Ροή - Axial Flux

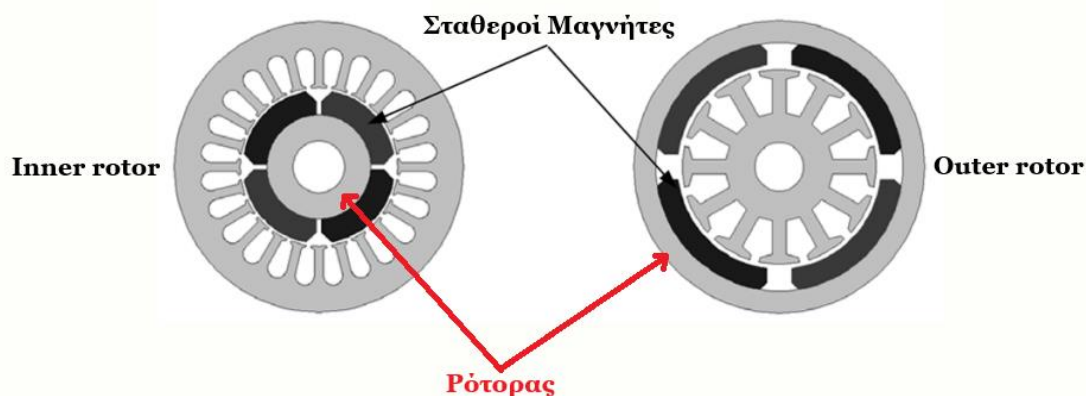


Εικόνα 6: Αξονική ροή μαγνητικής πυκνότητας (Πηγλή)

Σε γενικές γραμμές και από συμπεράσματα που καταγράφονται στη βιβλιογραφία, οι γεννήτριες τύπου PMSG με AF παρατηρείται πως είναι πιο αποδοτικές σε χαμηλές ταχύτητες και έχουν χαμηλότερο βάρος σε σχέση με εκείνες με RF [Ahmed, 2013].

2.2.3.1.3 Τύποι ρότορα για ηλεκτρογεννήτριες τύπου PMSG

Υπάρχουν δύο είδη τοπολογιών στις γεννήτριες τύπου PMSG που σχετίζονται με τη θέση του ρότορα (Εικόνα 7) .



Εικόνα 7: Τοπολογίες ρότορα σε γεννήτριες τύπου PMSG

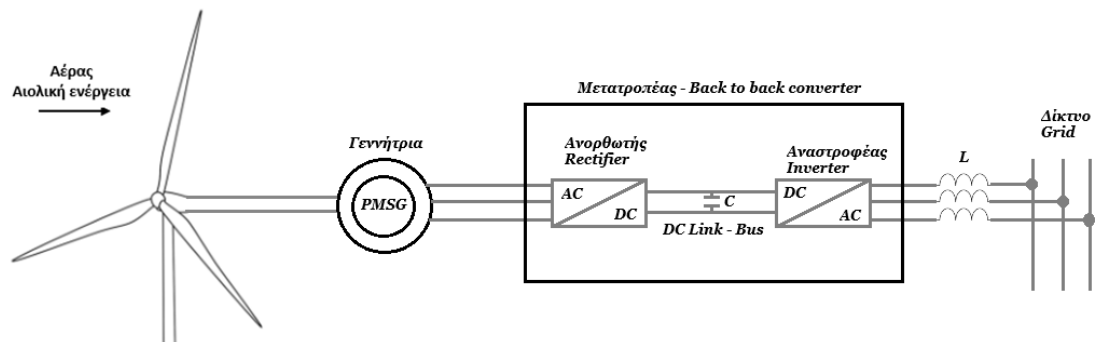
Στην πρώτη περίπτωση, στα αριστερά, ο ρότορας βρίσκεται μεταξύ του κύριου άξονα και των σταθερών μαγνητών (Inner Rotor), ενώ στη δεύτερη, στα δεξιά, βρίσκεται στο εξωτερικό σημείο του συστήματος (Outer Rotor).

Στη δεύτερη τοπολογία επιτυγχάνεται καλύτερη ψύξη, καθώς το σύστημα ψύξης της ηλεκτρογεννήτριας βρίσκεται έξω από αυτήν. Στην περίπτωση του outer rotor μπορεί να επιτευχθεί η εξασφάλιση μεγαλύτερης ροπής, καθώς λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας υπάρχει η δυνατότητα της τοποθέτησης περισσότερων μαγνητικών πόλων και άρα αναλογικά ο κάθε πόλος δέχεται μικρότερο μαγνητικό φορτίο σε σχέση με την περίπτωση του inner rotor, με αποτέλεσμα να μπορεί να διαχειριστεί περισσότερες μαγνητικές ροές. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, στην αρχή λειτουργίας των DDWT, ο αριθμός των πόλων καθορίζει και τη ροπή που μπορεί να διαχειριστεί η Α/Γ.

2.2.3.1.4 Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και η προώθησή της στο δίκτυο

Αρχικά, αφού το σύστημα από τη μεριά της ηλεκτρογεννήτριας λάβει AC ρεύμα μεταβλητής συχνότητας, το μεταβιβάζει στο πρώτο στοιχείο του μετατροπέα, δηλαδή τον ανορθωτή (Rectifier) που θα μετατρέψει το ρεύμα αυτό σε ρεύμα συνεχούς τάσης. Στη συνέχεια αυτό μεταβαίνει μέσω ενός συνδέσμου ρεύματος DC (DC Bus), ο οποίος θα διασφαλίσει την μεταφορά του ρεύματος χωρίς αυξομειώσεις, στο επόμενο σημείο του μετατροπέα, δηλαδή τον αναστροφέα (inverter), μετατρέποντας το εισαγόμενο DC ρεύμα σε AC σταθερής, αυτή τη φορά, συχνότητας στη μεριά του δικτύου (Grid)

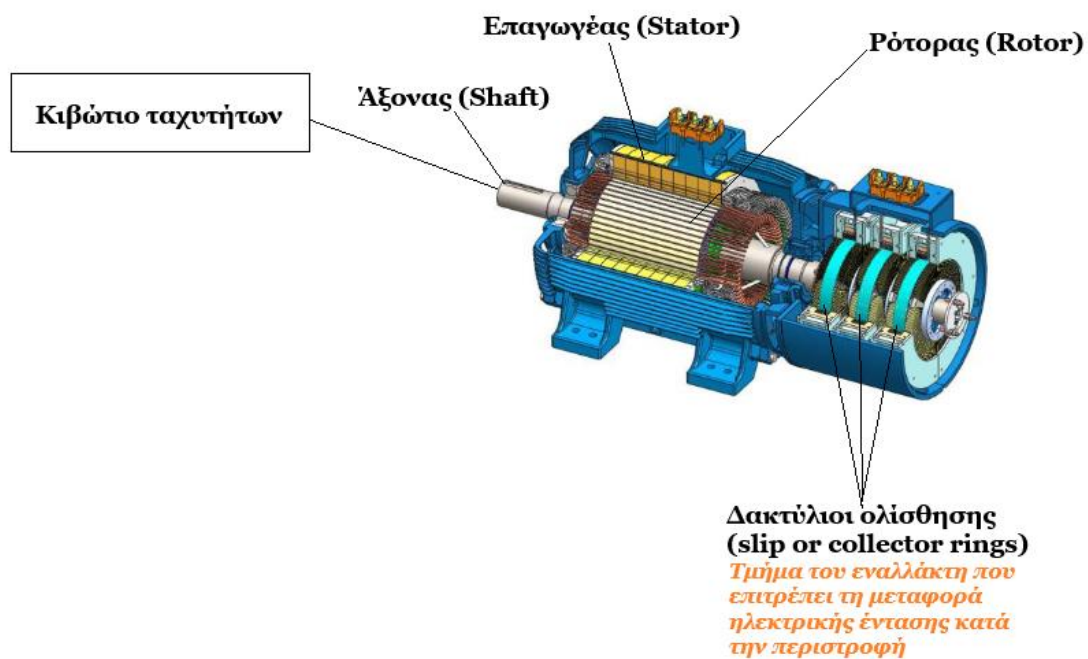
[Ulutas, 2019]. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται το διάγραμμα διεργασιών μεταξύ της ηλεκτρογεννήτριας τύπου PMSG – μετατροπέα (Converter) και ηλεκτρικού δικτύου (Grid).



Εικόνα 8: Διάγραμμα διεργασιών μεταξύ ηλεκτρογεννήτριας - μετατροπέα και ηλεκτρικού δικτύου (Grid)

2.2.3.2 Επαγωγικές Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης Μαγνήτη (DFIG)

Μία ακόμα εξίσου δημοφιλής επιλογή ηλεκτρογεννήτριας που χρησιμοποιείται σε Α/Γ είναι η επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG), της οποία τα βασικά μέρη φαίνονται στην Εικόνα 9. Η τοποθέτηση μίας τέτοιου τύπου ηλεκτρογεννήτρια σε Α/Γ, απαιτεί και την τοποθέτηση συστήματος κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς αυτό θα αποτελέσει το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στην περιστροφική κίνηση του άξονα του ρότορα και εκείνου της ηλεκτρογεννήτριας.

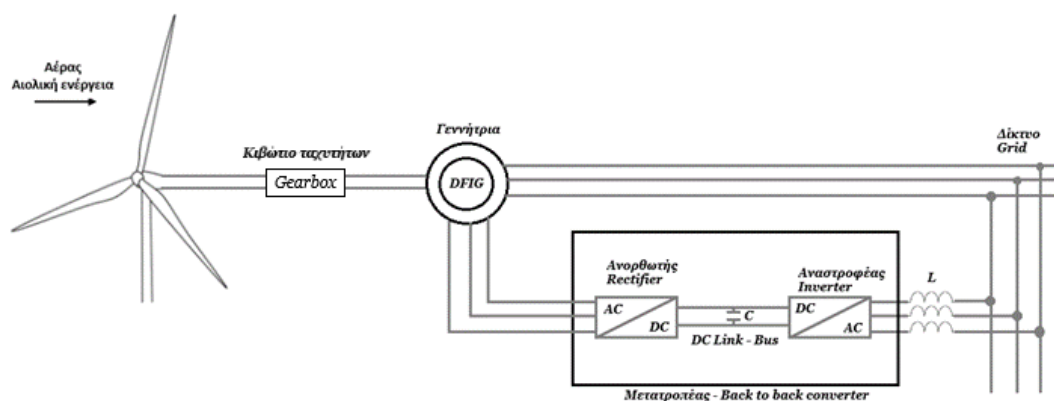


Εικόνα 9: Ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG

2.2.3.2.1 Η αρχή λειτουργίας ηλεκτρογεννήτριας τύπου DFIG

Η αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου ηλεκτρογεννήτριας είναι πιο περίπλοκη από αυτήν των PMSG, καθώς οι DFIG αποτελούνται από αρκετά περισσότερα και πολυπλοκότερα μέρη. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε, παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ ρότορα και ηλεκτρογεννήτριας. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως οι στροφές του ρότορα, μεταδίδονται σε έναν άλλο άξονα πριν καταλήξουν στην ηλεκτρογεννήτρια με μια σταθερή και ορισμένη εξ αρχής σχέση.

Πιο συγκεκριμένα αφού οι στροφές του αργού άξονα περάσουν από το κιβώτιο ταχυτήτων και πολλαπλασιαστούν μεταβιβάζονται στον περιστρεφόμενο άξονα της ηλεκτρογεννήτριας (generator shaft). Παράλληλα, ο επαγωγέας (stator) είναι συνδεδεμένος απευθείας στο τριφασικό δίκτυο, το οποίο είναι συχνότητας 50 ή 60 Hz – ανάλογα με το σύστημα – ενώ παράλληλα το ρεύμα μεταβλητής συχνότητας του ρότορα μεταβιβάζεται στον μετατροπέα AC/DC/AC. Το μεταβλητής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα του ρότορα μεταβιβάζεται στη μία μεριά του μετατροπέα και μετατρέπεται σε συνεχή τάση, ενώ στη συνέχεια η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται για το σταθερής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα στη μεριά του δικτύου. Στην ουσία μόλις το 25 με 30% του ρεύματος που καταλήγει στο δίκτυο προέρχεται από τη διαδικασία που γίνεται στον μετατροπέα, καθώς το υπόλοιπο προέρχεται απευθείας από τον επαγωγέα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διακυμάνσεις στη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος δεν είναι τέτοιες που να χρειάζεται να μεταφερθεί όλο το ρεύμα από το ρότορα στο μετατροπέα και από εκεί στο δίκτυο, οπότε και το μεγαλύτερο μέρος του είναι ήδη γνωστό ή δεδομένο, όπως δηλαδή συμβαίνει με τις γεννήτριες PMSG. Συμπερασματικά, κάθε φορά, σε κάθε κύκλο το εξερχόμενο ρεύμα από το ρεύμα του μετατροπέα συγκρίνεται με το ζητούμενο ρεύμα και επανακαθορίζεται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του δικτύου, αλλά και το ρεύμα του επαγωγέα [Demirovic, 2016]. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται το διάγραμμα διεργασιών μεταξύ ηλεκτρογεννήτριας, μετατροπέα και του δικτύου.



Εικόνα 10: Διάγραμμα διεργασιών μεταξύ ηλεκτρογεννήτριας (DFIG) - Μετατροπέα και Δικτύου

2.2.3.3 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ γεννητριών τύπου PMSG και DFIG

Με βάση τις παραπάνω αναφορές για τον τρόπο λειτουργίας των δύο αυτών τύπων γεννητριών που τοποθετούνται στις Α/Γ, εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για το πότε χρησιμοποιείται ο κάθε ένας, αλλά και τους τομείς στους οποίους υπερτερεί ο ένας έναντι του άλλου.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των γεννητριών τύπου PMSG έναντι των DFIG είναι ότι δεν απαιτείται η προσθήκη κιβωτίου ταχυτήτων στο σύστημα κίνησής τους και ο λόγος είναι η ύπαρξη ενός περισσότερο ισχυρού μετατροπέα (Full-power Converter), ο οποίος στην ουσία προσαρμόζει κάθε φορά την παραγόμενη συχνότητα, ώστε να φτάσει εκείνη που απαιτείται από το δίκτυο, ανάλογα πάντα με τη διάταξη των μόνιμων μαγνητών που διαθέτει η εκάστοτε ηλεκτρογεννήτρια. Εκτός αυτού, οι ηλεκτρογεννήτριες τύπου PMSG έχουν πιο αυξημένο βαθμό απόδοσης, αφού όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το σύστημα διεγέρσεώς τους, το πεδίο μεταξύ πηνίων και μόνιμων μαγνητών δεν παρουσιάζει απώλειες, καθώς στην ουσία δεν απορροφά ηλεκτρική ενέργεια [Serrano-González, 2016].

Από την άλλη τα κόστη των μόνιμων μαγνητών, όπως και ο ενισχυμένος μετατροπέας που χρησιμοποιείται αυξάνουν κατά πολύ το κόστος και φυσικά όσο μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος είναι η Α/Γ, τόσο μεγαλύτερα θα είναι και τα αντίστοιχα εξαρτήματα και αντίστοιχα τόσο περισσότεροι θα είναι οι μόνιμοι μαγνήτες που θα τοποθετηθούν. Αυτού του τύπου οι γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε Α/Γ ονομαστικής ισχύος αποκλειστικά άνω του 1 MW, καθώς εξαιτίας της αδυναμίας τους να διαχειριστούν μεγάλες διακυμάνσεις της εισερχόμενης κινητικής ενέργειας, κατασκευάζονται με μεγαλύτερα πτερύγια. Όσο μεγαλύτερα είναι τα πτερύγια μίας Α/Γ τόσο πιο ανεπηρέαστες είναι οι ίδιες στις ξαφνικές αλλαγές του ανέμου. Το θετικό είναι πως ο μετατροπέας μπορεί και φτάνει στο στόχο του πιο εύκολα, αλλά από την άλλη χάνεται πολύτιμη ενέργεια λόγω της πιο αργής της απόκρισης στις όχι μεγάλες αλλαγές του ανέμου, τις οποίες ίσως μία Α/Γ με μικρότερα πτερύγια θα μπορούσε να τις αξιοποιήσει καλύτερα από θέμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αντίθετα, στις ηλεκτρογεννήτριες τύπου DFIG που χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων, η ένταση του ρεύματος εντός της ηλεκτρογεννήτριας DFIG ρυθμίζεται με τη βοήθεια ενός απλούστερου μετατροπέα ηλεκτρικής ισχύος (Power converter). Ο μετατροπέας αυτός διαχειρίζεται καλύτερα την ηλεκτρική ενέργεια, καθώς όπως διακρίνεται και από τη διάταξη που φαίνεται στην Εικόνα 10, μπορεί να ανταποκριθεί πιο άμεσα στις ανάγκες του δικτύου (Grid) [Serrano-González 2016]. Επίσης, μπορεί να διαχειριστεί ευκολότερα την εισαγόμενη περιστροφική ενέργεια, καθώς φτάνει στην ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG ήδη με μία συγκεκριμένη συχνότητα ανάλογη της σχέσης μετάδοσης που διαθέτει το εκάστοτε κιβώτιο ταχύτητας. Επιπροσθέτως, η ηλεκτρογεννήτρια του τύπου αυτού έχει τη δυνατότητα ρύθμισης των στροφών και άρα της περιστροφικής ταχύτητας του άξονα που φτάνει σε αυτήν στο εύρος +/- 30% της

ονομαστικής του, βάσει των χαρακτηριστικών της εκάστοτε Α/Γ. Για αυτό το κόστος του μετατροπέα είναι χαμηλότερο σε σχέση με εκείνο που τοποθετείται στις γεννήτριες τύπου PMSG, όπως επίσης και η χωρητικότητα του αναστροφέα είναι μικρότερη λόγω της διαχείρισης μικρότερων διακυμάνσεων.

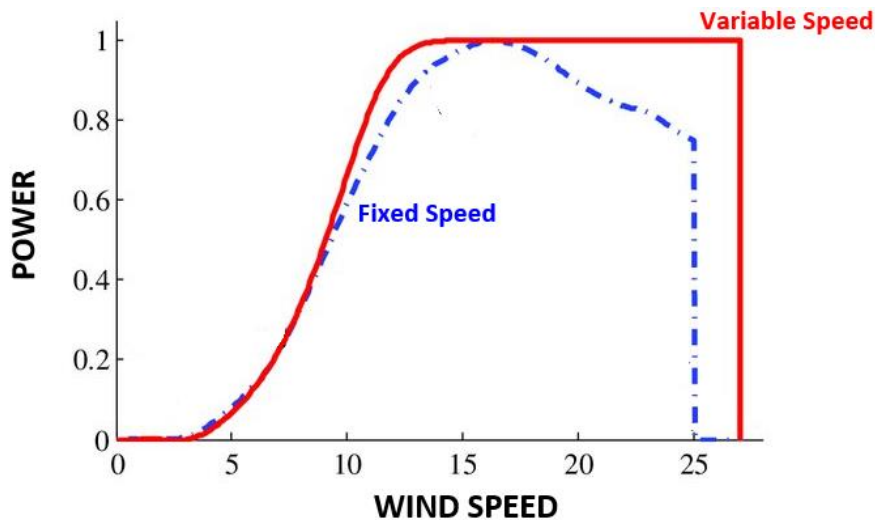
Έτσι λοιπόν γεννήτριες τύπου DFIG τοποθετούνται σε Α/Γ ονομαστικής ισχύος τόσο μικρότερης του 1MW όσο και μεγαλύτερης, αλλά όσο πιο μεγάλη είναι η ονομαστική ισχύς τόσο και πιο οικονομικά ασύμφορη γίνεται η εγκατάσταση μεγαλύτερων εξαρτημάτων σε αυτές.

Φυσικά, όπως αναφέρθηκε υπάρχουν, άλλα τέσσερα είδη τοπολογιών Α/Γ, που με τη σειρά τους παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά δεν είναι τόσο δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια όσο οι τοπολογίες με τις γεννήτριες τύπου PMSG και DFIG που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

2.2.3.4 Γεννήτρια τύπου SCIG (Squirrel Cage Induction Generator)

Οι γεννήτριες τύπου SCIG (Επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού) σύμφωνα με τον S. González αποτελούσαν μια αρκετά δημοφιλή επιλογή για τη χρήση τους σε Α/Γ, τη χρονική περίοδο 2005 μέχρι και περίπου το 2010. Στην Ασία, το 2005, το 45% των Α/Γ διέθετε μία τέτοιου τύπου ηλεκτρογεννήτρια, αλλά με την πάροδο των χρόνων η χρήση τους μειωνόταν ώσπου από το 2010 και έπειτα η χρήση τους περιορίστηκε σε ποσοστό κάτω του 5% παγκοσμίως. Σε αυτό συντέλεσε κατά έναν βαθμό η ανάπτυξη της τεχνολογίας και κατ' επέκταση η εύρεση καινοτόμων και πιθανότατα πιο αξιόπιστων συστημάτων.

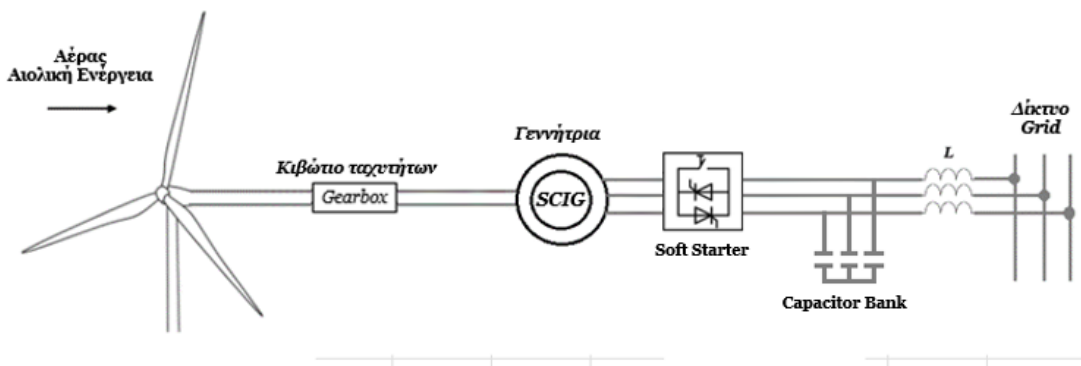
Γεννήτριες τύπου SCIG χρησιμοποιήθηκαν σε Α/Γ σταθερού βήματος πτερυγίων (fixed speed) και όχι σε Α/Γ μεταβλητού βήματος πτερυγίων (variable speed). Η διαφορά των fixed speed με εκείνες των variable speed (Εικόνα 11) είναι ότι στην πρώτη περίπτωση η Α/Γ μπορεί να μεγιστοποιήσει την απόδοσή της μόνο για μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, ενώ στη δεύτερη, σε ένα αρκετά πιο μεγάλο εύρος ταχυτήτων (Εικόνα 11) . Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πως στις Α/Γ μεταβλητού βήματος πτερυγίων, χρησιμοποιούν το σύστημα συστροφής των πτερυγίων (Pitch System) βάσει της ταχύτητας του ανέμου σε αντίθεση με τις Α/Γ σταθερού βήματος που δεν το διαθέτουν [Κανελλόπουλος, 2008].



Εικόνα 11: Διαφορά μεταξύ fixed speed και variable speed A/T ως προς την απόδοση ανά ταχύτητα ανέμου [S. Nursebo 2013]

Οι A/T οι οποίες διαθέτουν αυτού του τύπου τη ηλεκτρογεννήτρια αποτελούν μία σχετικά απλούστερη εκδοχή των A/T με ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG, καθώς ενώ διαθέτουν σύστημα κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων δεν ισχύει το ίδιο και για τον μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα, όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 12 στη θέση του μετατροπέα τοποθετούνται, άλλα, δευτερεύοντα και απλούστερα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση των διακυμάνσεων του ρεύματος.

Αρχικά, συνδέεται σε σειρά με τη ηλεκτρογεννήτρια ένας soft starter, με σκοπό την πιο ομαλή μεταφορά του ρεύματος κατά την εκκίνηση της παραγωγής ενέργειας στο δίκτυο, δηλαδή στο σημείο όπου $u_w > u_{w, cut-in}$. Στην ίδια τοπολογία, παράλληλα συνδεδεμένη με τη ηλεκτρογεννήτρια βρίσκεται και μια συστοιχία πυκνωτών (Capacitor Bank), της οποίας ο ρόλος είναι η μείωση της άεργου ισχύος που καταλήγει στο δίκτυο και που προέρχεται από την επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια.



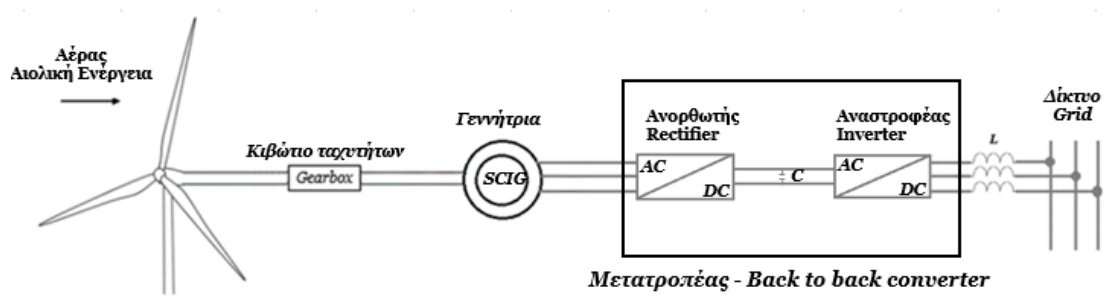
Εικόνα 12: Τοπολογία A/T με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG χωρίς μετατροπέα

Συνολικά, οι Α/Γ που διαθέτουν γεννήτριες τύπου SCIG, εξαιτίας της μη τοποθέτησης μετατροπέα, το κόστος τόσο των εξαρτημάτων όσο και της συντήρησης είναι μικρότερο σε σχέση με εκείνα άλλων διατάξεων. Από την άλλη, λόγω της απουσίας μετατροπέα το σύστημα εμφανίζεται αρκετά ευαίσθητο κατά τη διάρκεια των διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου. Οι συνέπειες των διακυμάνσεων αυτών είναι η όλο και περισσότερη παραγωγή άεργης ισχύος, η οποία ως έναν βαθμό αντισταθμίζεται με τη βοήθεια των πυκνωτών, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι αρκετή η αντιστάθμιση αυτή. Επίσης, από τη στιγμή γίνεται αναφορά για μια Α/Γ τύπου fixed speed δεν πραγματοποιείται σε κανένα στάδιο έλεγχος της ταχύτητάς των πτερυγίων σε σχέση με εκείνη του ανέμου, ενώ δεν υπάρχει ούτε το σύστημα συστροφής των πτερυγίων (pitch system). Από αυτό συνεπάγεται ότι οι Α/Γ αυτού του τύπου δέχονται αυξημένη μηχανική καταπόνηση, πράγμα που επιβαρύνει ακόμη περισσότερο τη λειτουργία της, αλλά και αυξάνει περαιτέρω κατά κάποιο βαθμό τα κόστη συντήρησής της, παρόλο που τα συστήματα από τα οποία αποτελείται έχουν μικρότερο κόστος.

Συνοψίζοντας, οι Α/Γ με SCIG και χωρίς μετατροπέα αποτελούν μια οικονομική, αλλά όχι και τόσο αποδοτική λύση για Α/Γ σε βάθος χρόνου.

2.2.3.5 Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG με μετατροπέα

Οι Α/Γ που διαθέτουν ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG με μετατροπέα στην ουσία αντιμετωπίζουν κατά έναν βαθμό τα όποια προβλήματα προκύπτουν σε εκείνες που δεν διαθέτουν. Επιπλέον, η τοπολογία της (Εικόνα 13), θυμίζει εκείνη των Α/Γ με γεννήτριες τύπου DFIG, οι οποίες να σημειωθεί πως είναι και εκείνες επαγωγικές.



Εικόνα 13: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG με μετατροπέα

Με την εισαγωγή του μετατροπέα όμως, παύουν να υφίστανται πολλά από τα σημαντικά προβλήματα που θα προέκυπταν από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και της άεργης ισχύος που παράγει η ηλεκτρογεννήτρια. Οπότε, συγκριτικά με την προηγούμενη τοπολογία της ίδιας ηλεκτρογεννήτριας (Εικόνα 12) η τρέχουσα περιγραφόμενη Α/Γ υπερέχει στον τομέα της διαχείρισης του ρεύματος, όπως επίσης είναι και τύπου variable speed και άρα έχει τη δυνατότητα του ελέγχου της ταχύτητας

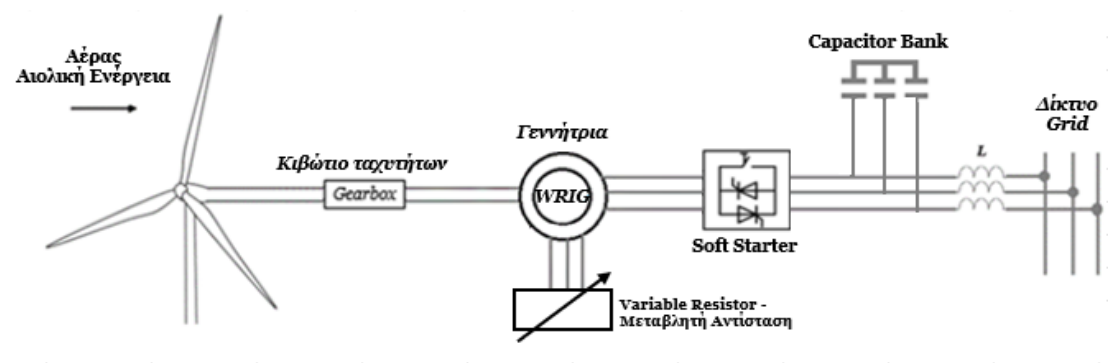
των πτερυγίων. Επίσης, σε σχέση με τις γεννήτριες τύπου PMSG χρησιμοποιείται λιγότερο ισχυρός μετατροπέας και άρα σε σύγκριση μαζί τους, το κόστος είναι μικρότερο. Παράλληλα, η ηλεκτρογεννήτρια SCIG είναι και εκείνη φθηνότερη από την αντίστοιχη DFIG, οπότε θα μπορούσε να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα και πάνω από όλα συμφέρουσα λύση, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, καθώς οι γεννήτριες τύπου DFIG είναι περισσότερο αξιόπιστες όσο αυξάνεται η ονομαστική τους ισχύς.

Τα μειονεκτήματα που φέρει μια τοπολογία σαν αυτή είναι όμοια εκείνων που φέρει και εκείνη των DFIG, δηλαδή οι συχνές βλάβες ή οι συντηρήσεις του κιβωτίου ταχυτήτων.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι με βάση τα ίδια στοιχεία που παρουσιάστηκαν από τον S. González, αυτού του τύπου η τοπολογία αποτελούσε περίπου το 15% των συνολικών Α/Γ παγκοσμίως, εκτός Ασίας, μέχρι και το 2014.

2.2.3.6 Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου WRIG χωρίς μετατροπέα

Στην περίπτωση αυτής της τοπολογίας, η Α/Γ διαθέτει μια επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG), σύστημα κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων, ενώ η διαδικασία ελέγχου της ταχύτητας γίνεται με τη χρήση μιας μεταβλητής αντίστασης. Επίσης, χρησιμοποιούνται και σε αυτήν την περίπτωση soft starter και συστοιχία πυκνωτών αντί για μετατροπέα, όπως στην περίπτωση της Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 14: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου WRIG χωρίς μετατροπέα

Η τοπολογία (Εικόνα 14) αυτή υπερέχει εμφανώς ως προς τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας σε σχέση με εκείνη της SCIG χωρίς μετατροπέα, καθώς υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της σε ένα σχετικά μικρό εύρος το οποίο είναι περίπου 10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.

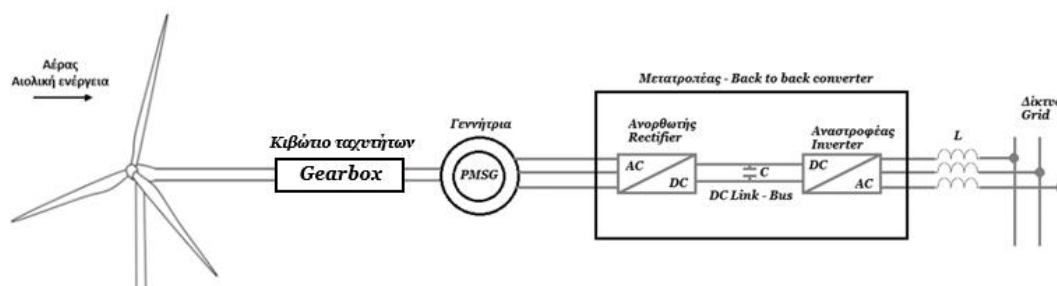
Όπως και στην περίπτωση της Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου SCIG χωρίς μετατροπέα έτσι και εδώ, οι απώλειες είναι μεγάλες λόγω της απουσίας του μετατροπέα, γεγονός που επηρεάζει την απόδοση.

Επιπλέον, η ηλεκτρογεννήτρια τύπου WRIG είναι πιο ακριβή και χρειάζεται συχνότερες συντηρήσεις από ότι οι SCIG γενικότερα, λόγω της επιπλέον πολυπλοκότητά της. Κατά την περίοδο 2005 με 2014 δεν αποτέλεσαν ιδιαίτερα δημοφιλή επιλογή, καθώς τόσο στην Ασία, την Ευρώπη όσο και στην Βόρεια Αμερική, τη δεκαετία αυτή αποτελούσαν μόλις το περίπου 7% των συνολικών εγκατεστημένων Α/Γ. Βέβαια στον υπόλοιπο κόσμο η εικόνα αντιστράφηκε, καθώς το 2005 σχεδόν μία στις δύο Α/Γ διέθεταν γεννήτριες τύπου WRIG. Με την πάροδο των χρόνων όμως η χρήση του περιορίστηκε σημαντικά, ώσπου και σταμάτησαν να προτιμώνται σε Α/Γ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος.

2.2.3.7 Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG ή EESG με κιβώτιο ταχυτήτων

Σύμφωνα με αυτήν την τοπολογία, η Α/Γ διαθέτει ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG ή EESG. Σημειώνεται πως η ηλεκτρογεννήτρια τύπου EESG ή αλλιώς ηλεκτρικά ενεργή σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια έχει ως σύστημα διέγερσης μια εξωτερική ηλεκτρική πηγή αντί για διάταξη μόνιμων μαγνητών (PMSG). Εξαιτίας της απαίτησης για εξωτερική τροφοδοσία, αλλά και των μεγαλύτερων απωλειών και της μικρότερης αποδοτικότητας που χαρακτηρίζουν τις γεννήτριες τύπου EESG, επιλέγεται η αναφορά της τοπολογίας με τη χρήση ηλεκτρογεννήτριας τύπου PMSG.

Η τοπολογία αυτή λοιπόν είναι ακριβώς σαν εκείνη που διακρίνεται στην Εικόνα 8, αλλά με την προσθήκη ενός κιβωτίου ταχυτήτων μεταξύ του άξονα του ρότορα και της ηλεκτρογεννήτριας (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Τοπολογία Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG με κιβώτιο ταχυτήτων

Έγινε λόγος για τις Α/Γ άμεσης μετάδοσης, οι οποίες χρησιμοποιούν γεννήτριες τύπου είτε PMSG είτε EESG. Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελεί μια υποκατηγορία αυτών, καθώς η Α/Γ παύει να είναι άμεσης μετάδοσης με την ύπαρξη του κιβωτίου ταχυτήτων.

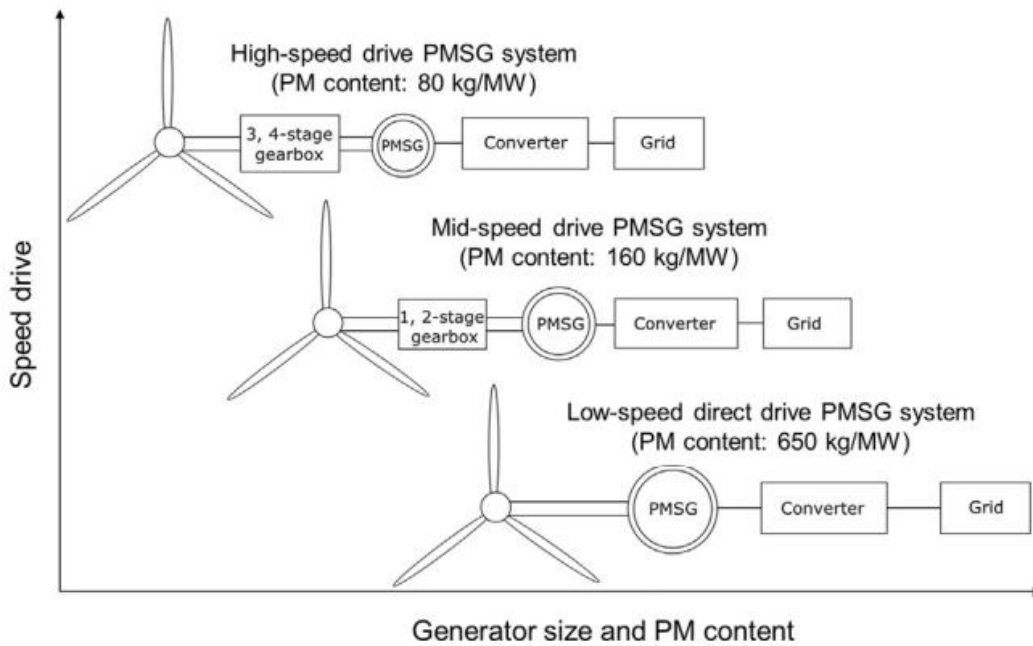
Με την προσθήκη ενός κιβωτίου ταχυτήτων μειώνεται το μέτρο της ροπής που θα κληθεί να διαχειριστεί η ηλεκτρογεννήτρια σε σχέση με εκείνη που θα διαχειριζόταν αν αυτό δεν υπήρχε. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε το κόστος της ηλεκτρογεννήτριας να μειωθεί σημαντικά, αφού δεν θα χρειάζεται πλέον τον ίδιο αριθμό μαγνητών για να παράγει την επιθυμητή ηλεκτρική ενέργεια. Συμπερασματικά, αφού η ηλεκτρογεννήτρια PMSG δεν θα κληθεί να διαχειριστεί όλη τη ροπή του άξονα του ρότορα δεν απαιτείται να διαθέτει και τον αριθμό των μόνιμων μαγνητών που θα διέθετε αν δεν υπήρχε το κιβώτιο ταχυτήτων. Έτσι λοιπόν, όσο μεγαλύτερη η σχέση πολλαπλασιασμού του κιβωτίου τόσο και λιγότεροι οι μόνιμοι μαγνήτες της ηλεκτρογεννήτριας, άρα και τόσο πιο συμφέρουσα θα είναι οικονομικά η λειτουργία και η συντήρηση της Α/Γ συνολικά.

Έγινε αναφορά στο γεγονός ότι όσο πιο μεγάλης ονομαστικής ισχύος είναι μια Α/Γ τόσο και μεγαλύτερα θα είναι προφανώς τα εξαρτήματα που θα απαιτηθούν για την ορθή λειτουργία της. Με την ενσωμάτωση ενός κιβωτίου ταχυτήτων πλέον δεν απαιτείται η αύξηση του μεγέθους και των δυνατοτήτων της ηλεκτρογεννήτριας PMSG, καθώς η βοήθεια που προσφέρει το κιβώτιο ταχυτήτων στη διαχείριση της ροπής αντισταθμίζει το ρόλο των μαγνητικών πόλων που θα είχαν εγκατασταθεί [Pavel, 2017].

Ενδεικτικά, στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται το πόσο βάρος αποφεύγεται από τη ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG, λόγω των μαγνητών που δεν υπάρχουν εξαιτίας της παρουσίας κιβωτίων ταχυτήτων πολλαπλών σταδίων. Παρακάτω θα γίνει πιο εκτενής αναφορά στην αρχή λειτουργίας των κιβωτίων ταχυτήτων πολλαπλών σταδίων.

Σημειώνεται πως οι Α/Γ που χρησιμοποιούν ηλεκτρογεννήτρια PMSG χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων συνήθως διαθέτουν αρκετά μεγάλα πτερύγια έτσι ώστε να παράγουν όσο το δυνατόν περισσότερη από τη διαθέσιμη ισχύ, δηλαδή να επιτυγχάνουν υψηλό συντελεστή ισχύος C_p σε κάποια φάση της λειτουργίας τους, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά παρακάτω. Η λύση αυτή όμως παρά τα πλεονεκτήματα, απαιτούσε την τοποθέτηση πολλών μαγνητών ώστε να μπορεί να ανταπεξέρχεται η ηλεκτρογεννήτρια στη ροπή που δημιουργείται λόγω του ανέμου.

Για παράδειγμα αν μια Α/Γ έχει ονομαστική ισχύ 5 MW, αυτό σημαίνει πως με βάση τα στοιχεία της (Εικόνα 16) οι μαγνήτες θα ζύγιζαν περίπου τρεις τόνους, όταν με την τοποθέτηση ενός κιβωτίου τριών ή τεσσάρων σταδίων, οι μαγνήτες που θα απαιτούνταν δεν θα ζύγιζαν ούτε μισό τόνο, δηλαδή περίπου το 13% του βάρους τους. Μόνο και μόνο το γεγονός αυτό, μειώνει αρκετά τις απαιτήσεις της ηλεκτρογεννήτριας, πράγμα που μειώνει κατά τρόπο ανάλογο το κόστος της.



Εικόνα 16: Βάρος μόνιμων μαγνητών ηλεκτρογεννήτριας PMSG ανά MW ανάλογα με τα στάδια του πλανητικού συστήματος μετάδοσης κίνησης [Pavel, 2017]

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν, η χρήση του συγκεκριμένου κιβωτίου ταχυτήτων που χρησιμοποιείται παρουσιάζει τα δικά του μειονεκτήματα, όπως η ανάγκη για συχνή συντήρηση ή οι συχνές βλάβες που παρουσιάζει. Επίσης, εξαιτίας της φύσης των γεννητριών PMSG, ο μετατροπέας θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός ώστε να δεχθεί και να μεταβιβάσει το AC ρεύμα στο δίκτυο με τον επιθυμητό τρόπο, όπως δηλαδή συμβαίνει και με τις Α/Γ άμεσης μετάδοσης. Μία άλλη διατύπωση είναι ότι μία τοπολογία σαν και αυτή διαθέτει τα μειονεκτήματα, αλλά και παράλληλα τα πλεονεκτήματα των Α/Γ τύπου DDWT και GWT.

Συνοψίζοντας, μπορεί το ζήτημα του κόστους μιας ισχυρής ηλεκτρογεννήτριας τύπου PMSG να αντισταθμίζεται με τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων και της σημαντικής μείωσης των μόνιμων μαγνητών, αλλά όχι σε βαθμό τέτοιο που να αποτελέσει μια ξεκάθαρα πιο αποδοτική λύση. Βέβαια, κατά το διάστημα 2005 μέχρι και το 2010 οι Α/Γ αυτής της τοπολογίας δεν ξεπερνούσαν το 5% των εγκατεστημένων Α/Γ παγκοσμίως, αλλά την επόμενη πενταετία και μόνο στην Ευρώπη το ποσοστό εγκατάστασής τους σχεδόν διπλασιάστηκε.

2.2.4 Μετατροπέας (Converter) και Ελεγκτής (Controller)

Όπως αναφέρθηκε λεπτομερώς παραπάνω, ο μετατροπέας, όπως και ο ελεγκτής, αποτελούν ηλεκτρικά κυκλώματα τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την ηλεκτρογεννήτρια. Τα βασικά του μέρη, τα οποία συναντώνται σχεδόν σε όλες τις τοπολογίες που παρουσιάστηκαν είναι ο ανορθωτής (rectifier), ο οποίος δέχεται τριφασικό AC ρεύμα μεταβλητής συχνότητας από τη ηλεκτρογεννήτρια, ο σύνδεσμος συνεχούς ρεύματος (DC link ή DC Bus) που μεταφέρει το συνεχές ρεύμα στο επόμενο

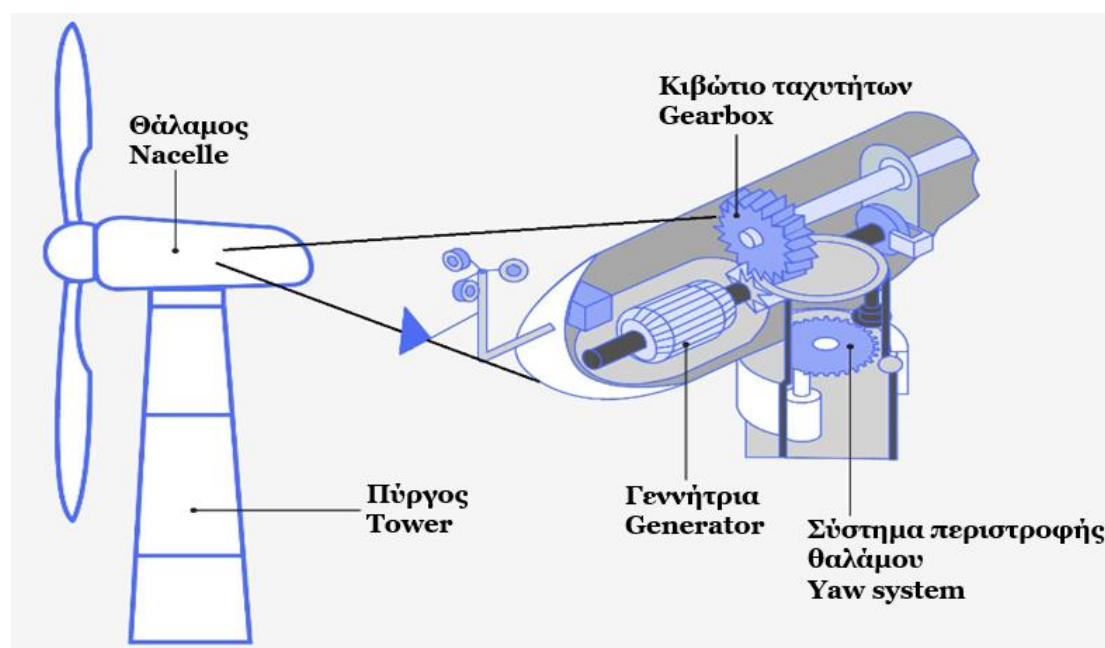
στοιχείο χωρίς απώλειες, και τον αναστροφέα (inverter) που σχηματίζει το AC ρεύμα σταθερής συχνότητας και το παρέχει στο δίκτυο, με βάση πάντα τον καθορισμό τους από τον ελεγκτή, ο οποίος βέβαια είναι μέρος του ίδιου συστήματος.

2.2.5 Σύστημα Ασφαλείας

Σε περίπτωση κάποιας σοβαρής δυσλειτουργίας είτε κατά τη λειτουργία είτε κατά τη συντήρηση της Α/Γ το σύστημα αυτό προβαίνει σε συγκεκριμένες ενέργειες για την αντιμετώπισή της, όπου αυτό είναι δυνατό. Αν για παράδειγμα υπερθερμανθεί κάποιο εξάρτημα, μέσω διάφορων μηχανισμών μπορεί να το ψύξει ή ακόμα και να το θέσει εκτός λειτουργίας έως ότου επιθεωρηθεί από τους υπεύθυνους μηχανικούς.

2.2.6 Θάλαμος (Nacelle)

Πρόκειται για το επάνω μέρος της Α/Γ, μέσα στο οποίο βρίσκονται τα πέντε πρώτα υποσυστήματα της Α/Γ που αναφέρθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί πως συνήθως στο πίσω μέρος του, φέρει και συστήματα προσανατολισμού και μέτρησης του ανέμου, έτσι ώστε να ελέγχεται η λειτουργία της Α/Γ (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Τοπολογία θαλάμου σε Α/Γ (Πηγή)

Επίσης, στο κάτω μέρος του, στην περιοχή όπου γίνεται η σύνδεση μεταξύ πύργου και θαλάμου, υπάρχει ένα σύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο να περιστρέφει ολόκληρο το θάλαμο κατά τον κατακόρυφο άξονα (yaw axis), έτσι ώστε να αυξάνεται η απόδοση ή αντίθετα να προφυλάσσεται η Α/Γ αν ο άνεμος πνέει επικίνδυνα προς μη ιδανική κατεύθυνση ή αν οι ριπές ανέμου απειλούν να προκαλέσουν βλάβες αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελεί ίσως και το σημαντικότερο για τη λειτουργία της

Α/Γ, καθώς η σωστή λειτουργία του συμβάλλει πολλές φορές τόσο άμεσα όσο και έμμεσα στην απόδοση, αλλά και στη διάρκεια ζωής της ίδιας συνολικά.

Εκτός του ότι με τον καταλληλότερο προσανατολισμό η αποδοτικότητα θα αυξηθεί, μειώνονται σε ορισμένες περιπτώσεις και τα φορτία που δέχονται τα πτερύγια από τον άνεμο και άρα θα υπάρξει μικρότερη φθορά, αλλά παράλληλα η ηλεκτρογεννήτρια ή το σύστημα κίνησης δεν θα κληθούν να διαχειριστούν τόσο ισχυρές δυνάμεις, όταν φυσικά αυτό θα μπορεί να αποφευχθεί. Έτσι λοιπόν, ο κύκλος ζωής της Α/Γ αυξάνεται, ενώ ταυτοχρόνως τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας μειώνονται κατά κάποιο βαθμό όσο ισχυρότερο είναι το yaw system [Kim, 2014].

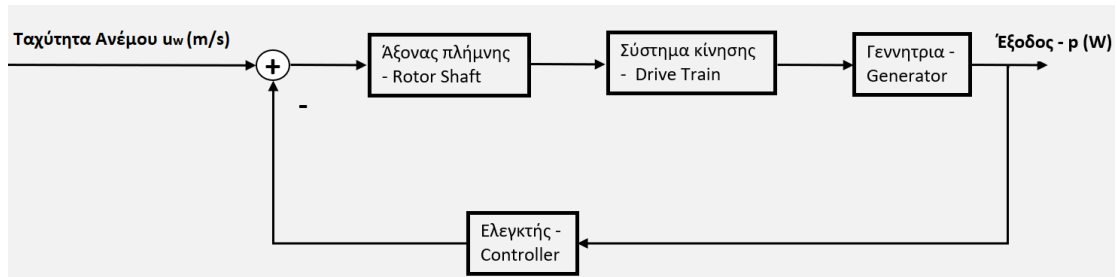
2.2.6 Δομικά Μέρη

Πρόκειται στην ουσία για το σώμα, τον πύργο της ανεμογεννήτριας και τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται ο θάλαμος με τον σταθμό της βάσης της Α/Γ. Ο πύργος αποτελεί το μέσο με το οποίο η παραγόμενη ισχύς, περνάει στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ειδική δίοδος για να διασφαλίζεται η πρόσβαση στο θάλαμο από τους μηχανικούς, ενώ κατά μήκος αυτού υπάρχουν καλώδια που καταλήγουν στη βάση και από εκεί στο δίκτυο και το σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: Εσωτερικό πύργου στο σημείο σύνδεσης με το θάλαμο (Πηγή)

Στην **Εικόνα 19** φαίνεται μία απλοϊκή, στοιχειώδης αναπαράσταση των βασικών υποσυστημάτων ως ένα διάγραμμα (block diagram) συστήματος κλειστού βρόχου.



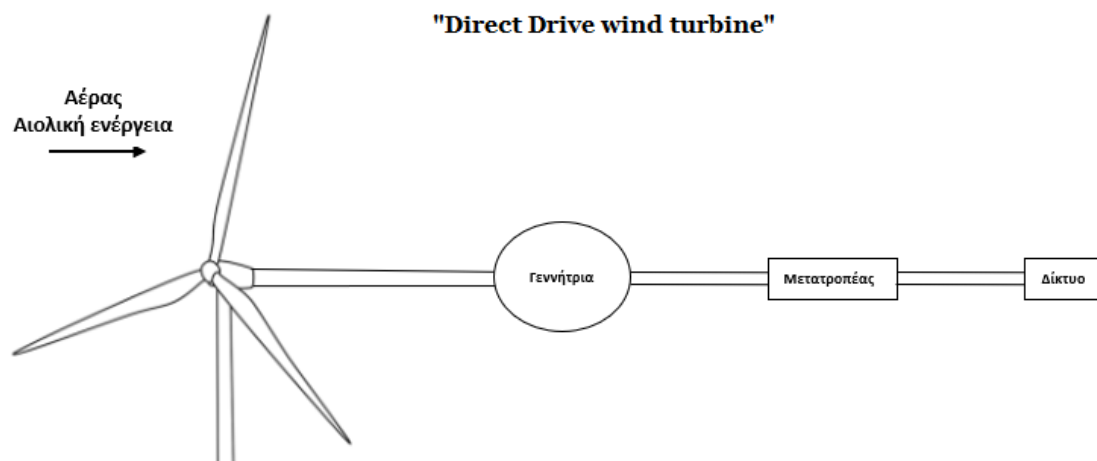
Εικόνα 19: Μια Α/Γ με σύστημα κίνησης ως απλοποιημένο κύκλωμα κλειστού βρόχου

2.3 Τα συστήματα κίνησης των Ανεμογεννητριών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το σύστημα κίνησης μίας Α/Γ αποτελεί ένα αρκετά καθοριστικό υποσύστημα για την ποιότητα, αλλά και την ποσότητα της ενέργειας που θα καταλήξει στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές λειτουργίας των πιο δημοφιλών συστημάτων κίνησης των Α/Γ.

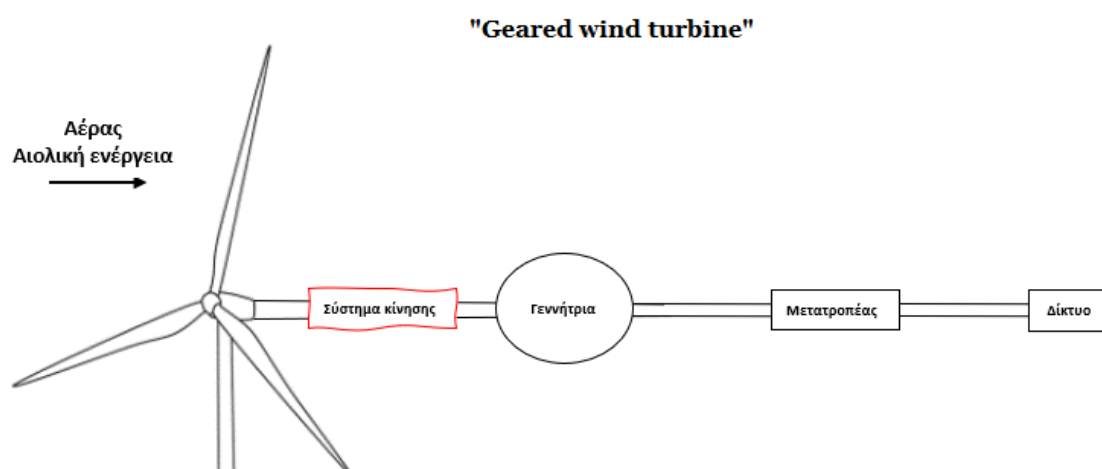
2.3.1 Α/Γ άμεσης μετάδοσης και Α/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων

Οι Α/Γ που συγκαταλέγονται στις DDWT, δηλαδή σε αυτές όπου η μετάδοση των στροφών μεταφέρεται άμεσα στη ηλεκτρογεννήτρια και στις οποίες δεν τοποθετείται κιβώτιο ταχυτήτων, διαθέτουν δηλαδή ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG ή αρκετά πιο σπάνιο ηλεκτρογεννήτρια τύπου EESG, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Τοπολογία Α/Γ τύπου Direct Drive (DDWT)

Επίσης, οι Α/Γ που διαθέτουν σύστημα κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων είναι εξοπλισμένες με επαγωγικές γεννήτριες είτε τύπου DFIG, που είναι περισσότερο δημοφιλείς είτε SCIG είτε WRIG (Εικόνα 21).



Εικόνα 21: Τοπολογία Α/Γ τύπου Geared (GWT)

Όπως αναφέρθηκε, τα συστήματα κίνησης είναι υπεύθυνα για την μετάδοση κίνησης από τα πτερύγια στη ηλεκτρογεννήτρια. Η μέθοδος κίνησης στις Α/Γ πραγματοποιείται είτε με τις διατάξεις Direct Drive είτε με τις διατάξεις Geared [Ragheb, 2010].

2.3.1.1 DDWT – Α/Γ Άμεσης Μετάδοσης

Η μετάδοση κίνησης από την περιστροφή των πτερυγίων στην ηλεκτρογεννήτρια της Α/Γ πραγματοποιείται άμεσα, χωρίς την διαμεσολάβηση κάποιου κιβωτίου ταχυτήτων. Αυτό το είδος συστήματος χρησιμοποιείται στις Α/Γ με ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG και στην ουσία αντί να υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων, ορισμένης σχέσης μετάδοσης, υπάρχουν πόλοι, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη ρύθμιση του τελικού εξαγόμενου AC ρεύματος. Οπότε, αντί να καθορίζεται η ταχύτητα του άξονα της ηλεκτρογεννήτριας, όπως θα γινόταν με την ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων, καθορίζεται το AC ρεύμα με τον άξονα του ρότορα και της ηλεκτρογεννήτριας να έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα.

Ειδικότερα, η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδώσει μια Α/Γ τύπου DDWT, όπως αναφέρθηκε, εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των πόλων, αλλά και τη διάταξη αυτών. Γενικότερα, αναλόγως με τις απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης, για να παραχθεί το AC ρεύμα της ζητούμενης συχνότητας, οι μαγνητικοί πόλοι που θα τοποθετηθούν μπορεί να είναι από 4 ή 6 έως 100 και περισσότεροι. Όσο αυξάνονται οι πόλοι, τόσο λιγότερες θα είναι και οι μέγιστες στροφές (RPM) της ηλεκτρογεννήτριας. Με την αυξομείωση των μαγνητικών πόλων, καθορίζονται και οι δυνατότητες της Α/Γ ως προς τη διαχειριζόμενη ροπή [Ragheb, 2010]. Πιο συγκεκριμένα έστω ότι η ζητούμενη συχνότητα (f [Hz]) του AC που φτάνει στο δίκτυο είναι 60Hz, όπου “ n ” είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων και G_{RPM} είναι οι στροφές ανά λεπτό που πραγματοποιεί η ηλεκτρογεννήτρια.

Τα μεγέθη συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$f = n \frac{G_{rpm}}{120} [Hz] \quad (1)$$

Η συχνότητα μετρούμενη σε Hz εκφράζει τον αριθμό των κύκλων μιας διεργασίας ανά δευτερόλεπτο. Στη σχέση (1) γίνεται η μετατροπή σε λεπτά, δηλαδή 60 sec, όμως επειδή ο αριθμός των πόλων (n) είναι πάντοτε ζυγός, τότε ο χρόνος πολλαπλασιάζεται με το δύο και άρα στον παρονομαστή εισάγεται ο αριθμός 120 sec.

$$(1) \rightarrow G_{rpm} = \frac{f * 120}{n} \quad (2)$$

Βάσει της σχέσης (2) οι G_{RPM} είναι αντιστρόφως ανάλογες του αριθμού των μαγνητικών πόλων (n) και άρα όσο περισσότερους πόλους διαθέτει η ηλεκτρογεννήτρια τόσο πιο λίγες θα είναι οι G_{RPM} για συγκεκριμένης συχνότητας ρεύματος (50 ή 60 Hz). Επιπροσθέτως, όπως τονίστηκε στις Α/Γ του τύπου αυτού, δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων, αλλά η σχέση μετάδοσης (G) είναι συγκεκριμένη και προκαθορισμένη ήδη από τη φάση της μελέτης και κατασκευής. Αυτή καθορίζεται με τη βοήθεια της σχέσης (3), αφού όμως πρώτα καθοριστεί από τις σχέσεις (1) και (2) η τιμή των G_{RPM} .

$$G = \frac{G_{rpm}}{R_{rpm}} \quad (3)$$

Όπου G, η μία και μοναδική σχέση μετάδοσης και R_{RPM} οι στροφές που δέχεται ως είσοδο η ηλεκτρογεννήτρια από το ρότορα.

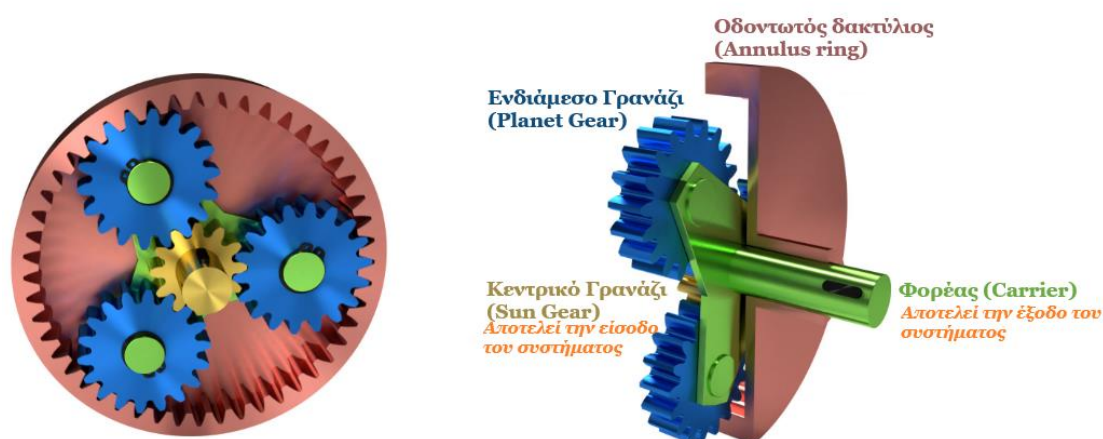
Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου Α/Γ είναι ότι δεν απαιτείται συχνή συντήρηση, λόγω κυρίως λιγότερων εξαρτημάτων, όμως όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, οι παράγοντες που τις επηρεάζουν είναι αρκετοί. Από την άλλη το κόστος κατασκευής τέτοιων Α/Γ είναι αρκετά αυξημένο κυρίως λόγω των υλικών κατασκευής τους, αλλά και των μεγαλύτερων εξαρτημάτων που απαιτούν λόγω του μεγέθους τους.

Σημειώνεται επίσης, πως λόγω του σχεδιασμού τους, η συντήρησή τους, όταν εκείνη χρειαστεί, είναι αρκετά πιο δύσκολη και πολλές φορές περισσότερο χρονοβόρα, καθώς ορισμένες φορές χρειάζεται η σύντομη αποσυναρμολόγηση ορισμένων αποσπώμενων εξαρτημάτων, ώστε να ελεγχθούν περισσότερο εξονυχιστικά.

2.3.1.2 GWT – Α/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων

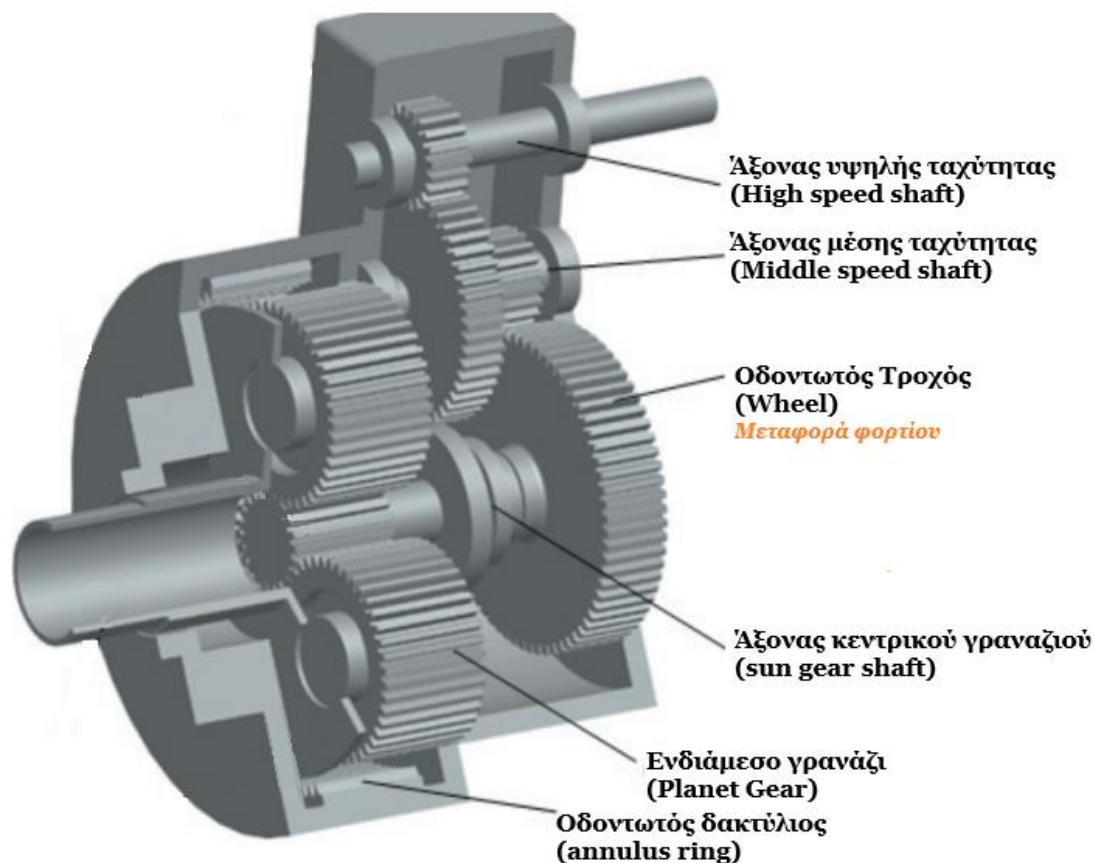
Αυτός ο τύπος συστήματος κίνησης χρησιμοποιείται σε Α/Γ που διαθέτουν επαγωγικές γεννήτριες για ονομαστική ισχύ περίπου μέχρι και 4 MW. Μία δημοφιλής επιλογή είναι η χρήση μιας κυκλικής σειράς από αλληλοσυνδεμένα γρανάζια, ένας επικυκλικός ή πλανητικός μηχανισμός στο κέντρο των οποίων υπάρχει το κεντρικό γρανάζι (sun) που συνδέεται με τον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας, ενώ ενδιάμεσα υπάρχουν και άλλα γρανάζια (planets) που στην ουσία αυξάνουν της στροφές του άξονα, ενώ παράλληλα μειώνουν και την εισαγόμενη σε αυτά ροπή.

Όλα τα παραπάνω είναι μέρος ενός περιστρεφόμενου άξονα, και αποτελούν το σύστημα το οποίο δέχεται τις πραγματικές στροφές των πτερυγίων και στη συνέχεια τις εξάγει προς τη ηλεκτρογεννήτρια πολλαπλασιασμένες ανάλογα με την εκάστοτε σχέση, η οποία είναι ορισμένη από τη φάση της μελέτης της Α/Γ (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης - Planetary gearing system ([Πηγή](#))

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται ένα πιο ολοκληρωμένο πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης (Planetary gearing system), καθώς περιέχει και το μέρος με το οποίο μεταδίδεται η κίνηση από εκείνο στο επόμενο μέρος του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή το επόμενο σύστημα είναι η ηλεκτρογεννήτρια της Α/Γ



Εικόνα 23: Ολοκληρωμένο πλανητικό σύστημα μετάδοσης [Liou, 2014]

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23, το κεντρικό γρανάτζι λαμβάνει έναν αριθμό στροφών, οι οποίες είναι και οι πραγματικές στροφές των πτερυγίων, μέσω του άξονα χαμηλής ταχύτητας (Low speed shaft). Στη συνέχεια ανάλογα με τον αριθμό των οδοντώσεων του κεντρικού γραναζιού και των υπόλοιπων ενδιάμεσων γραναζιών, προκύπτει μία συγκεκριμένη σχέση, όπως για παράδειγμα η 1:10 που σημαίνει πως το σύστημα λαμβάνει στην έξοδό του τιμή ίση με 10 φορές την τιμή της εισόδου. Στη συνέχεια ανάλογα με την ορισμένη και σταθερή σχέση μετάδοσης του εκάστοτε κιβωτίου, μέσω του άξονα μέσης ταχύτητας (middle speed shaft) και του γραναζιού του, η τελική περιστροφική ταχύτητα παράγεται παράλληλα στον άξονα υψηλής – και τελικής - ταχύτητας (High speed shaft), του οποίου οι στροφές είναι και εκείνες που αποτελούν την είσοδο της ηλεκτρογεννήτριας DFIG. Στην ουσία η εισερχόμενη χαμηλή περιστροφική κίνηση υψηλής ροπής μετατρέπεται σε υψηλότερη περιστροφική κίνηση, χαμηλής ροπής.

Τόσο από την αρχή λειτουργίας των Α/Γ άμεσης μετάδοσης όσο και εκείνων με κιβώτιο ταχυτήτων, προκύπτει ότι δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποια μέθοδος μετάδοσης κίνησης, η οποία να μεταβάλλει δυναμικά τη σχέση μετάδοσής της, από τον άξονα του ρότορα στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας, όπου και παράγεται το ρεύμα. Στις Α/Γ άμεσης μετάδοσης, επιλέγεται εξ' αρχής η διάταξη και το πλήθος των μόνιμων μαγνητών, ενώ στις Α/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων το μέγεθος και οι οδοντώσεις των

γρاناζιών από τα οποία απαρτίζεται το κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό λοιπόν θα είναι και το ζήτημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

2.4 Ορισμός του προβλήματος

Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι Α/Γ κατά τη λειτουργία τους, είναι η συνεχώς μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου. Ο σκοπός μιας Α/Γ είναι να διατηρεί την εύρυθμή της λειτουργία της ως προς την απόδοση σε ηλεκτρική ισχύ, αλλά και παράλληλα να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αξιόπιστη [Alkan, 2012].

Ένα από τα σημαντικότερα υποσυστήματα μιας Α/Γ, όπως αναφέρθηκε, είναι το σύστημα κίνησης (drive train), το οποίο μπορεί είτε να περιλαμβάνει είτε να μην περιλαμβάνει κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox). Στην ουσία είναι υπεύθυνο για την όσο γίνεται πιο ομαλή μεταβίβαση της κινητικής ενέργειας του ανέμου από τα πτερύγια και τον άξονα του ρότορα στη ηλεκτρογεννήτρια. Σημειώνεται ότι σε μια Α/Γ, τα πιο κοστοβόρα εξαρτήματα αμέσως μετά τα πτερύγια και τον πύργο της, είναι εκείνα του συστήματος κίνησής της [Graca, 2013]. Το γεγονός αυτό αποτελεί ίσως τον πιο σημαντικό λόγο για τον οποίο, οι διάφορες εταιρείες αποσκοπούν τόσο στο να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής όσο και της αξιοπιστίας των συστημάτων κίνησης. Δυστυχώς, δεν είναι λίγοι οι παράγοντες, οι οποίοι καταπονούν τα συστήματα κίνησης προκαλώντας τους βλάβες (failures) ή διακόπτουν την λειτουργία τους για πολλές ώρες ή μέρες με σκοπό την επισκευή ή φροντίδα τους (downtime).

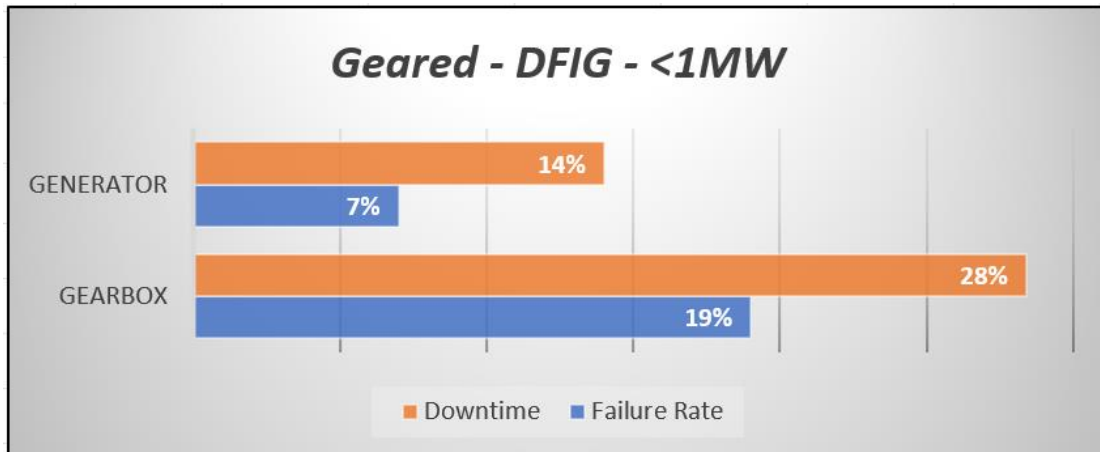
Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μίας έρευνας με αρκετά μεγάλο δείγμα, που δημοσιεύτηκε το 2016 [Reder, 2016]. Η έρευνα αυτή, η οποία έχει ως δείγμα 4300 Α/Γ διαφορετικού είδους και ονομαστικής ισχύος και συγκεντρώνει ποσοτικά στοιχεία σχετικά με τον ρυθμό βλαβών (πραγματικές βλάβες ανά χρόνο λειτουργίας Α/Γ) και το χρόνο συντήρησης ανά εξάρτημα και υποσύστημα, κατά το οποίο διάστημα η Α/Γ δεν λειτουργεί (Downtime). Πιο αναλυτικά οι Α/Γ που χρησιμοποιούν σύστημα άμεσης μετάδοσης (Direct Drive – DD) έχουν ονομαστική ισχύ 2MW, ενώ οι υπόλοιπες που χρησιμοποιούν κιβώτιο ορισμένων σχέσεων μετάδοσης (Geared – G), 0,85 – 2 MW. Έτσι λοιπόν μπορεί να γίνει και μία σύγκριση ως προς ένα όμοιο εύρος ονομαστικής ισχύος.

Φυσικά, όπως σε κάθε σύστημα ή μηχανήμα (machine) τόσο στο χώρο της βιομηχανίας όσο και στο χώρο της ενέργειας, απαιτεί ανά κάποιες ώρες λειτουργίας εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης των διάφορων μερών τους.

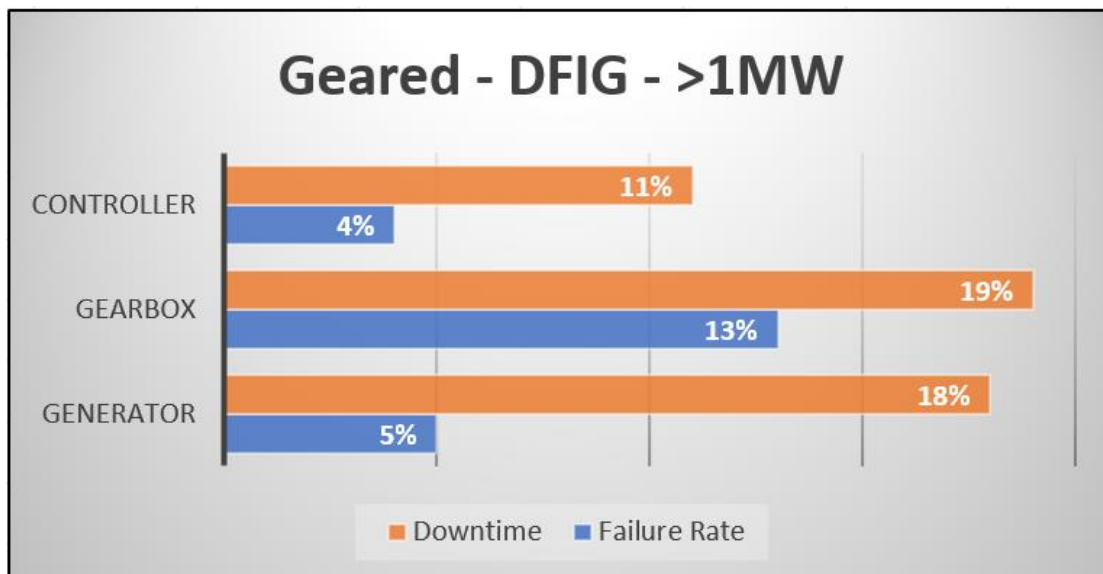
Οι ώρες εκτός λειτουργίας (Downtime) αναφέρεται σε εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης. Η σύγκριση και πάλι μπορεί να πραγματοποιηθεί, καθώς μπορεί η συντήρηση να είναι προγραμματισμένη ή και προληπτική (Planned or Preventive Maintenance), αλλά όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, ο κάθε τύπος Α/Γ έχει τους δικούς του χρόνους συντήρησης. Σημειώνεται, πως ένας άλλος τύπος συντήρησης είναι η διορθωτική συντήρηση, ο οποίος και αποτελεί το χειρότερο τύπο της, καθώς

συμβαίνει όταν προκύψει βλάβη στο σύστημα και κατά τη διάρκεια του σταματήματός του, αλλάζονται ορισμένα ανταλλακτικά επί τόπου.

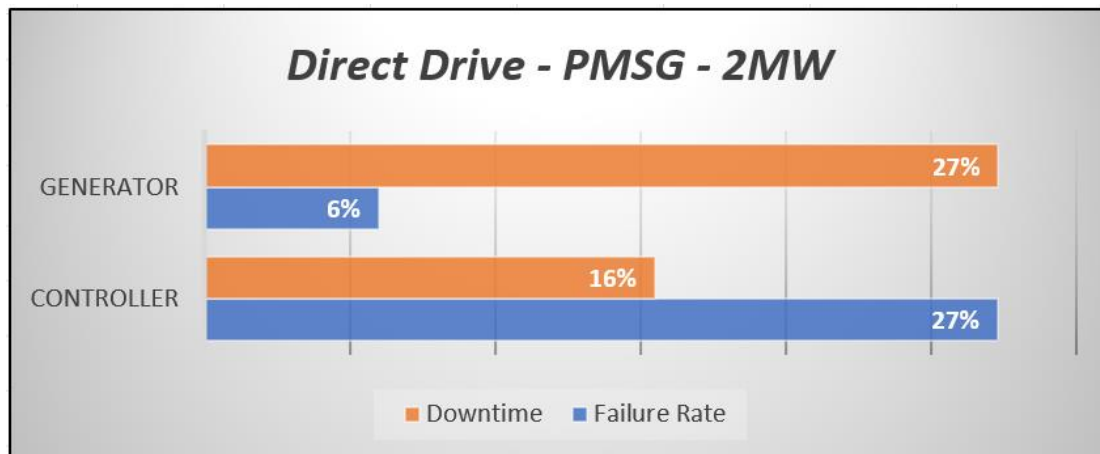
Οι βλάβες (Failures) αναφέρονται σε περισσότερα κρίσιμα γεγονότα, τα οποία δεν επιδιορθώνονται με την απλή αλλαγή ανταλλακτικών, αλλά απαιτούν, σε πολλές περιπτώσεις, από πολλές ώρες μέχρι και ημέρες.



Εικόνα 24: Failure Rate & Downtime σε A/T τύπου Geared <1MW



Εικόνα 25: Failure Rate & Downtime για A/T τύπου Geared >1MW



Εικόνα 26: Failure Rate & Downtime για A/Γ τύπου Direct Drive 2MW

Σε προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στο γεγονός ότι η ονομαστική ισχύς των GWT σπάνια ξεπερνά τα 4 MW, καθώς μετά οι A/Γ του τύπου αυτού γίνονται οικονομικά ασύμφορες λόγω της μεγάλης αύξησης του μεγέθους των εξαρτημάτων τους. Στην Εικόνα 24 και στην Εικόνα 25 διακρίνονται ο ρυθμός βλαβών και ο χρόνος που παραμένει συνολικά η A/Γ εκτός λειτουργίας, αποκλειστικά εξαιτίας της ηλεκτρογεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων, ενώ προφανώς τα υπόλοιπα υποσυστήματα είναι υπεύθυνα για όλα τα υπόλοιπα σφάλματα.

Αρχικά, ως προς το ρυθμό βλαβών και του χρόνου εκτός λειτουργίας των GWT κάτω του 1 MW, ο ρυθμός βλάβης της ηλεκτρογεννήτριας είναι κατά σχεδόν 30% (Failure Rate 7% έναντι 5%) μεγαλύτερος από εκείνων των GWT άνω του 1MW. Ο βασικός λόγος είναι ότι στις παλαιότερες A/Γ μικρότερης ονομαστικής ισχύος, δεν υπάρχει pitch system, και άρα η ηλεκτρογεννήτρια λάμβανε ασυνήθιστα υψηλές στροφές σε ορισμένες περιπτώσεις, μέχρι να σταματήσει η παραγωγή ενέργειας όταν η ταχύτητα των πτερυγίων έφτανε την $u_{w,cut-out}$, η οποία ταυτιζόταν σχεδόν με τη $u_{w,rated}$. Από την άλλη οι GWT άνω του 1MW παρουσιάζουν μικρότερα ποσοστά βλαβών εξαιτίας της ηλεκτρογεννήτριας, καθώς λόγω του ότι διαθέτουν pitch system, αλλά και επειδή μπορούν να διαχειριστούν μεγαλύτερες ροπές, οι διακυμάνσεις στη συχνότητα περιστροφής είναι μικρότερες.

Ως προς το χρόνο εκτός λειτουργίας η διαφορά της τάξης του 25% (14% και 18% αντίστοιχα) έγκειται στο γεγονός ότι η ηλεκτρογεννήτρια των GWT άνω του 1MW είναι μεγαλύτερη σε όγκο, από ότι η αντίστοιχη ηλεκτρογεννήτρια των GWT κάτω του 1MW και άρα απαιτείται αναλογικά περισσότερος χρόνος για την εκάστοτε εργασία. Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που μπορούν να αυξήσουν τα ποσοστά των δύο αυτών δεικτών, όπως κάποια δυσλειτουργία του ελεγκτή που ενδεχομένως να μην εντόπισε έγκαιρα την $u_{w,cut-out}$ ή οι ακραίες καιρικές συνθήκες.

Όσον αφορά το κιβώτιο ταχυτήτων, οι GWT κάτω του 1MW, παρουσιάζουν περίπου 30% μεγαλύτερο ρυθμό βλαβών, όπως και ανάλογα αυξημένο χρόνο εκτός λειτουργίας σε σχέση με τις GWT άνω του 1MW. Ο λόγος είναι οι αρκετά συχνές διακυμάνσεις

στην ταχύτητα του ανέμου, οι οποίες λόγω της μικρότερης διάστασης της Α/Γ επηρεάζουν κατά μεγαλύτερο βαθμό τη διάταξη γραναζιών του κιβωτίου, με αποτέλεσμα να προκαλούνται διάφορες αστοχίες.

Από την άλλη, οι GWT άνω του 1MW, μη επηρεαζόμενες τόσο από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, είναι αρκετά πιο αξιόπιστες ως προς το κιβώτιο ταχυτήτων τους. Βέβαια, και στις δύο περιπτώσεις τα ποσοστά των δύο δεικτών είναι σχετικά υψηλά, αλλά αυτό σχετίζεται γενικότερα με την τοποθέτηση αυτών των τύπων κιβωτίων ταχυτήτων, στα οποία, όπως αναφέρεται παρακάτω παρουσιάζουν πολυάριθμα ζητήματα αξιοπιστίας.

Μια ακόμη σύγκριση που αξίζει να γίνει είναι αυτή μεταξύ των GWT ονομαστικής ισχύος άνω του 1MW και των DDWT των 2MW, μιας και οι δύο τύποι των Α/Γ αυτών διαχειρίζονται πιο υψηλές ροπές και είναι αρκετά μεγαλύτερων διαστάσεων.

Παρατηρείται παρεμφερής ρυθμός βλαβών στις Α/Γ και των δύο κατηγοριών, αλλά στις DDWT, απαιτείται σχεδόν 35% περισσότερος χρόνος εκτός λειτουργίας της Α/Γ αποκλειστικά λόγω της ηλεκτρογεννήτριας. Εξαιτίας της απουσίας κιβωτίου ταχυτήτων, ο ελεγκτής είναι ισχυρότερος από τον αντίστοιχο των GWT, καθώς καλείται να ανταπεξέλθει σε αρκετά υψηλότερες απαιτήσεις. Σύμφωνα με την Εικόνα 26, οι DDWT παρουσιάζουν ένα αρκετά αυξημένο ποσοστό βλαβών της τάξης του 27%, ενώ χρόνο εκτός λειτουργίας 16%, λόγω ηλεκτρογεννήτριας και ελεγκτή αντίστοιχα.

Συνεπώς, από τα παραπάνω αυτά στοιχεία, εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο στο οποίο πρέπει να αξιολογηθεί ποια επιλογή είναι περισσότερο οικονομικά βιώσιμη, αν το κριτήριο είναι αυτό, από τη στιγμή που και οι δύο κατηγορίες αναφέρονται στο ίδιο εύρος ονομαστικής ισχύος.

Αθροιστικά ο ελεγκτής και η ηλεκτρογεννήτρια της DDWT ευθύνονται, σύμφωνα με την έρευνα, για το περίπου 43% του συνολικού χρόνου που η Α/Γ μένει ανενεργή, ενώ η ηλεκτρογεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων και ο ελεγκτής είναι υπεύθυνα για περίπου το 48% του αντίστοιχου χρόνου. Αντίθετα, όσον αφορά το ρυθμό βλαβών μόνο ο ελεγκτής παρουσιάζει ποσοστό της τάξης του 27%, πράγμα που μειώνει αρκετά την αξιοπιστία της DDWT συνολικά, όταν οι ρυθμοί βλαβών τόσο του ελεγκτή όσο και της ηλεκτρογεννήτριας των GWT είναι κατά 80% με 85% μικρότεροι.

Συμπερασματικά, οι GWT παραμένουν περισσότερο χρόνο εκτός λειτουργίας, με βάση τους δείκτες που παρουσιάστηκαν, σε σχέση με τις DDWT, κυρίως λόγω της ύπαρξης ενός πολύπλοκου συστήματος, το κιβώτιο ταχυτήτων. Οι DDWT παρουσιάζουν έναν αρκετά μεγαλύτερο ρυθμό βλάβης, λόγω του ενισχυμένου ελεγκτή τους [Reder, 2016].

Ο αντισταθμιστικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν από τους εκάστοτε υπεύθυνους μηχανικούς είναι αν οι συχνές βλάβες του ελεγκτή, που συνήθως κρατούν από πολλές ώρες μέχρι και ημέρες, συμφέρουν οικονομικά σε σχέση με τον πιο αυξημένο χρόνο downtime των GWT, λόγω των αιτιών που αναφέρθηκαν. Συνολικά λοιπόν οι GWT χαρακτηρίζονται από περισσότερο χρόνο downtime, λόγω της

πολυπλοκότητας των εξαρτημάτων που χρήζουν συντήρησης, αλλά στις DDWT οι βλάβες που προκύπτουν είναι περισσότερο χρονοβόρες, λόγω κυρίως της φύσης του ελεγκτή. Παρακάτω, γίνεται μια πιο αναλυτική αναφορά στις αιτίες των βλαβών ή των διακοπών λειτουργίας, κυρίως των μηχανικών μερών της Α/Γ.

2.4.1 Αιτίες μείωσης της αξιοπιστίας των Α/Γ

Το σύστημα κίνησης και ειδικότερα το κιβώτιο ταχυτήτων, είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα, του οποίου, όπως αναφέρθηκε, ο βαθμός πολυπλοκότητας αυξάνεται με την αύξηση της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Παρόλα αυτά, οι λόγοι που τα κάνουν επιρρεπή σε βλάβες και αστοχίες είναι σχετικά απλοί και εύκολα κατανοητοί.

Οι ξαφνικές και σφοδρές ριπές ανέμου και η ακανόνιστη καταπόνηση που δέχεται η Α/Γ προκαλούν πολλές φορές ζημιές κυρίως στα μηχανικά μέρη του συστήματος κίνησης, όπως για παράδειγμα γδαρσίματα και φθορές στα γρανάζια [Graca, 2013], λόγω της απρόβλεπτης κίνησης του άξονα του ρότορα.

Όπως είχε αναφερθεί όσο μικρότερα είναι τα πτερύγια μίας Α/Γ τόσο πιο ευαίσθητη θα είναι μπροστά σε ισχυρότερους ανέμους.

Επίσης, η απότομη επιτάχυνση ή επιβράδυνση του άξονα του ρότορα, καθώς ο άνεμος μπορεί τη μία στιγμή να έχει διεύθυνση για παράδειγμα 25° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και λίγο αργότερα να δεχθεί δυνατότερο αέρα από αρκετά διαφορετική γωνία. Το τελευταίο συμβαίνει συνήθως κατά τις ριπές του ανέμου. Το παραπάνω, όπως είναι και λογικό προκαλεί κραδασμούς και γενικότερη αποσταθεροποίηση μεταξύ άξονα ρότορα και κιβωτίου ταχυτήτων και μπορεί να προκληθεί βλάβη στο τμήμα όπου βρίσκονται οι ενώσεις τους. Όλα αυτά τα συμβάντα ενδέχεται να οδηγήσουν σε αποκολλήσεις μικρών μερών των εξαρτημάτων, τα οποία στη συνέχεια ενδέχεται να σφηνώσουν μέσα στις οδοντώσεις των γραναζιών και να προκαλέσουν ακόμα και σπασίματα [Mustafa, 2020].

Από την άλλη μεριά, στις γεννήτριες τύπου PSMG, όπου και δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων, από τις ξαφνικές αυξομειώσεις της συχνότητας του AC ρεύματος, ο ελεγκτής (Controller) στην προσπάθειά του να αντισταθμίσει της αυξομειώσεις αυτές, παράγοντας σταθερής συχνότητας AC ρεύματος είτε δημιουργείται πρόβλημα στον ίδιο είτε στη ηλεκτρογεννήτρια. Σημειώνεται όμως, πως επειδή στις Α/Γ άμεσης κίνησης που διαθέτουν ηλεκτρογεννήτρια τύπου PMSG, οι ξαφνικές ριπές του ανέμου δεν επηρεάζουν τόσο την απόδοσή της, λόγω των μεγαλύτερων πτερυγίων τους και κατ' επέκταση της μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος τους.

Τέλος, οι ακραίες καιρικές συνθήκες συμβάλλουν και αυτές στην μείωση της αξιοπιστίας των συστημάτων κίνησης, καθώς για παράδειγμα υπό συνθήκες παρατεταμένου καύσωνα, μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις διακοπής ρεύματος για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των εξαρτημάτων. Ομοίως σε συνθήκες παρατεταμένης υγρασίας και υψηλής υγρασίας παρουσιάζονται προβλήματα στις μονάδες κλιματισμού

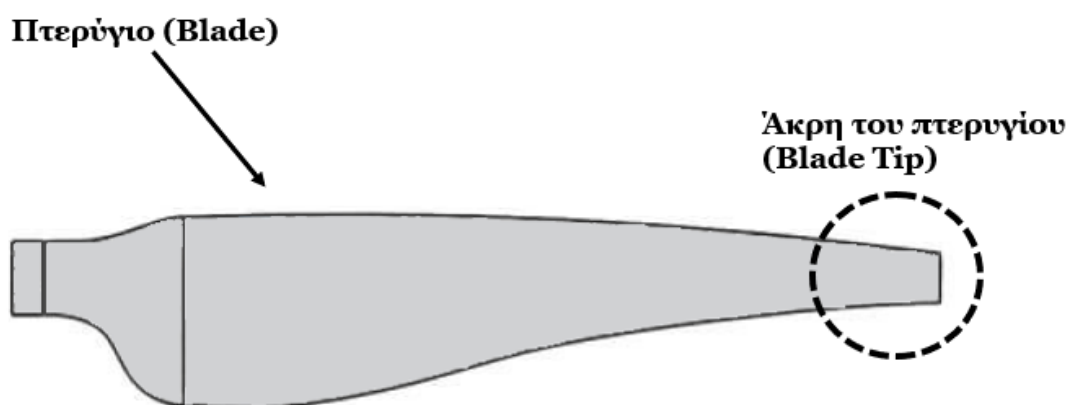
τους και δεν γίνεται σωστά ούτε η ψύξη, αλλά ούτε και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι η ενδεδειγμένες για να αποδώσει ο ελεγκτής το μέγιστο δυνατό.

Συμπερασματικά, τα συστήματα κίνησης αποτελούν ίσως το πιο κρίσιμο υποσύστημα της Α/Γ, αφού απαιτούν και τον περισσότερο χρόνο συντήρησης και άρα και περισσότερος χρόνος που η Α/Γ δεν θα παράγει ρεύμα.

2.5 Λόγος Tip Speed Ration A/Γ

Στις Α/Γ που φέρουν σύστημα κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων (GWT), το πρώτο υποσύστημα που έρχεται σε επαφή με το σύστημα κίνησης είναι εκείνο των πτερυγίων και του ρότορα. Βάσει της προσφοράς σε αιολική ενέργεια από το περιβάλλον, αλλά και το σχεδιασμό των πτερυγίων της εκάστοτε Α/Γ προκύπτει ένας λόγος μεταξύ της γραμμικής ταχύτητας (u) των άκρων (Εικόνα 27) των πτερυγίων προς την πραγματική ταχύτητα του ανέμου (u_w), αναφερόμενος ως Tip Speed Ratio ή εν συντομία TSR ή απλώς (λ).

Αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τη μελέτη και το σχεδιασμό μιας Α/Γ, ο οποίος προσαρμόζεται στις εκάστοτε απαιτήσεις και στα δεδομένα μιας μελέτης. Σημειώνεται πως από τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται, έτσι μεταβάλλεται και ο TSR, καθώς εξαρτάται από το λόγο ταχυτήτων που αναφέρθηκε [Vasel-Be-Hagh, 2022].



Εικόνα 27: Ποιοτική αναπαράσταση πτερυγίου Α/Γ και του σημείου μέτρησης της ταχύτητας (*tip speed*)

Από φυσικής και τεχνικής άποψης, τα πτερύγια μιας Α/Γ, περιστρέφονται ως προς τον οριζόντιο άξονα (Roll Axis), δηλαδή ως προς τον άξονα περιστροφής του ρότορα.

Παράλληλα το κάθε σημείο των πτερυγίων, εκτελεί κυκλική κίνηση με ακτίνα την απόστασή του από τον άξονα περιστροφής του ρότορα. Όπως αναφέρθηκε ο λόγος TSR αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό χαρακτηριστικό των Α/Γ, το οποίο έχει άμεση σχέση με την μεταγενέστερη απόδοσή τους. Σύμφωνα με αυτόν το λόγο, θα πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η γραμμική ταχύτητα της άκρης του ενός πτερυγίου (Γ), η οποία θα είναι και η μέγιστη σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο σημείο, όπως για παράδειγμα στα (Α) και (Β). Όλα τα σημεία (Εικόνα 28) που απαρτίζουν το πτερύγιο εκτελούν κυκλική

κίνηση ως ένα σώμα και άρα διανύουν την μία περιστροφή σε χρόνο T , όμως το κάθε σημείο λόγω της διαφορετικής απόστασής του από τον άξονα περιστροφής διανύει απόσταση R_A, R_B και R_Γ αντίστοιχα με $R_\Gamma > R_B > R_A$.

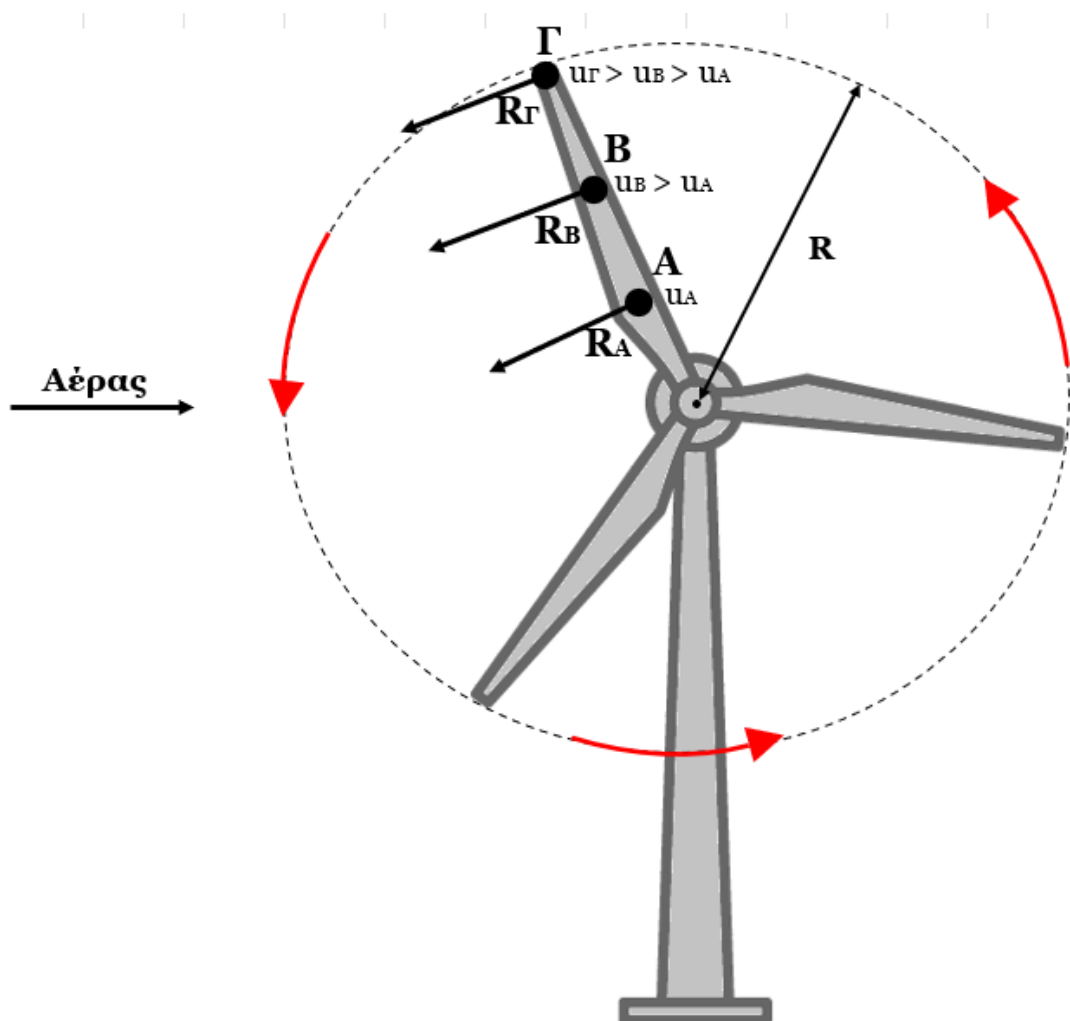
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ [rad/s]} \quad (4)$$

$$u = \omega \cdot R \text{ [m/s]} \quad (5)$$

Άρα, από τις σχέσεις (4) και (5) προκύπτει η σχέση μεταξύ γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας (ω).

$$u = \frac{2\pi}{T} \cdot R \Rightarrow u = \frac{2\pi R}{T} \quad (6)$$

Αν εφαρμοστεί η (6) για κάθε ένα από τα τρία σημεία που διακρίνονται στην Εικόνα 28, προκύπτει το συμπέρασμα ότι $u_\Gamma > u_B > u_A$, για σταθερό χρόνο T .



Εικόνα 28: Κυκλική κίνηση πτερυγίων Α/Γ

Όσον αφορά τον υπολογισμό του λόγου TSR, το σημείο ενδιαφέροντος θα είναι στην περιοχή του σημείου Γ, δηλαδή περίπου στο τελευταίο 5% του μήκους του πτερυγίου [Mohammadi, 2016].

Η πραγματική ταχύτητα του ανέμου, μετριέται με τον κατάλληλο μετρητή και οι μονάδες μέτρησής της είναι τα [m/s].

Βέβαια, ο λόγος TSR δεν αρκεί από μόνος του για να διακριθεί το πόσο αποδοτική είναι η Α/Γ.

2.6 Συντελεστής Ισχύος (C_p) Α/Γ

Ο συντελεστής ισχύος μιας Α/Γ (C_p) εκφράζει την αποδοτικότητά της, καθορίζοντας την πραγματική απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια ως προς τη μέγιστη που θα μπορούσε να παράγει το σύστημα θεωρητικά κατά ορισμένη ταχύτητα ανέμου χωρίς απώλειες, όπως διακρίνεται στη σχέση (7).

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} d \pi R^2 u_w^3} \quad (7)$$

Όπου P_t , είναι η πραγματική ισχύς της Α/Γ για δεδομένη ταχύτητα ανέμου μετρούμενη σε Watts [W], d είναι η πυκνότητα του αέρα μετρούμενη σε $[\text{kg}/\text{m}^3]$ και u_w η ταχύτητα του ανέμου μετρούμενη σε [m/s]

Όπως σε όλες της μηχανές ή τα συστήματα που λαμβάνουν μία είσοδο και επιστρέφουν μια έξοδο, έτσι και στις Α/Γ υπάρχουν αρκετά μεγάλες απώλειες ως προς το ποσοστό της προσφερόμενης αιολικής ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

Λόγος γίνεται για το όριο του Betz (Betz Limit), σύμφωνα με το οποίο η μέγιστη απόδοση της Α/Γ, δηλαδή το μέγιστο C_p , δεν ξεπερνά την τιμή 0.593 ή 59.3% [Jamdade, 2013]. Με άλλα λόγια, η μέγιστη θεωρητική αποδοτικότητα της Α/Γ σε ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να ξεπεράσει το 59.3% αυτής που θα μπορούσε να παράγει χωρίς τις απώλειες. Στην πραγματικότητα για να θεωρείται καλή η απόδοση μιας Α/Γ, αρκεί η μέγιστη απόδοσή της να κυμαίνεται μεταξύ του 35% με 42% [Jamdade, 2013]. Το όριο του Betz που αναφέρθηκε προέκυψε από θεωρητικούς υπολογισμούς και αναφέρεται σε απώλειες εξαιτίας των διαφορών απωλειών ενέργειας εντός των κυκλωμάτων, όσο και εξαιτίας της φύσης ή της σύστασης και της αντοχής των υλικών που απαρτίζουν την εκάστοτε Α/Γ. Χωρίς να αναλυθούν λεπτομερώς τα είδη των απωλειών, αρκεί να παρατηρήσει κανείς ότι το όριο αυτό, ορίστηκε από τον Betz σχεδόν έναν αιώνα από σήμερα, το 1919.

Μπορεί από τότε η τεχνολογία να έχει αναπτυχθεί ραγδαία, αλλά δεν έχει αναφερθεί περίπτωση Α/Γ που να έχει ξεπεράσει το όριο αυτό ως προς την απόδοσή της. Παρόλα αυτά από μαθηματικής και θεωρητικής άποψης είναι λογικό, καθώς δίνοντας έμφαση στη σχέση (7), ο παρονομαστής έχει αρκετά μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης από ότι ο

αριθμητής, ειδικά όταν ο αριθμητής τείνει να σταθεροποιηθεί. Το τελευταίο συμβαίνει όταν η ηλεκτρογεννήτρια αρχίζει να παράγει ισχύ ίση με την ονομαστική της ισχύ (P_{rated}) και άρα μένοντας εκείνη σταθερή, η ταχύτητα ανέμου του παρονομαστή μπορεί να αυξάνεται συνεχώς και άρα ο συντελεστής ισχύος να μειώνεται συνεχώς.

2.7 Παρουσίαση παραδείγματος υπολογισμού C_p και TSR

Για την περαιτέρω κατανόηση των παραπάνω εννοιών κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση των δεδομένων μίας πραγματικής Α/Γ (Πίνακας 2), καθώς και ο υπολογισμός και στη συνέχεια η αναπαράσταση των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Vestas V66 - 1.65			
Ισχύς	Ονομαστική Ισχύς	1.650	kW
	$U_{w, cut-in}$	4	m/s
	$U_{w, rated}$	15	m/s
	$U_{w, cut-out}$	25	m/s
Ρότορας	Διάμετρος	66	m
	Αριθμός πτερυγίων	3	
	max speed	19	rpm
	tip speed	66	m/s
Γεννήτρια		DFIG	
Σύστημα κίνησης		3-stage Planetary gearing system	

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Α/Γ - Vestas V66 - 1.65 MW (Δεδομένα)

Όσον αφορά την εξαγωγή του λόγου TSR, υπολογίζεται μόνο τη στιγμή κατά την οποία η Α/Γ ξεκινά να παράγει τη μέγιστη ισχύ (P_{max} ή P_{rated}), δηλαδή την ονομαστική της. Η ταχύτητα του ανέμου, όταν η παραγόμενη ισχύς είναι μέγιστη, είναι $u_{w, rated} = 15$ m/s.

Με βάση τη σχέση (6), αλλά και τα δεδομένα που παρουσιάζονται παραπάνω (Πίνακας 2), ο ρότορας κατά την $u_{w, rated}$ περιστρέφεται με ρυθμό 19 RPM, δηλαδή ολοκληρώνει μία περιστροφή σε χρόνο $T = 3.15$ s. Άρα ο ζητούμενος λόγος (λ) υπολογίζεται ως εξής:

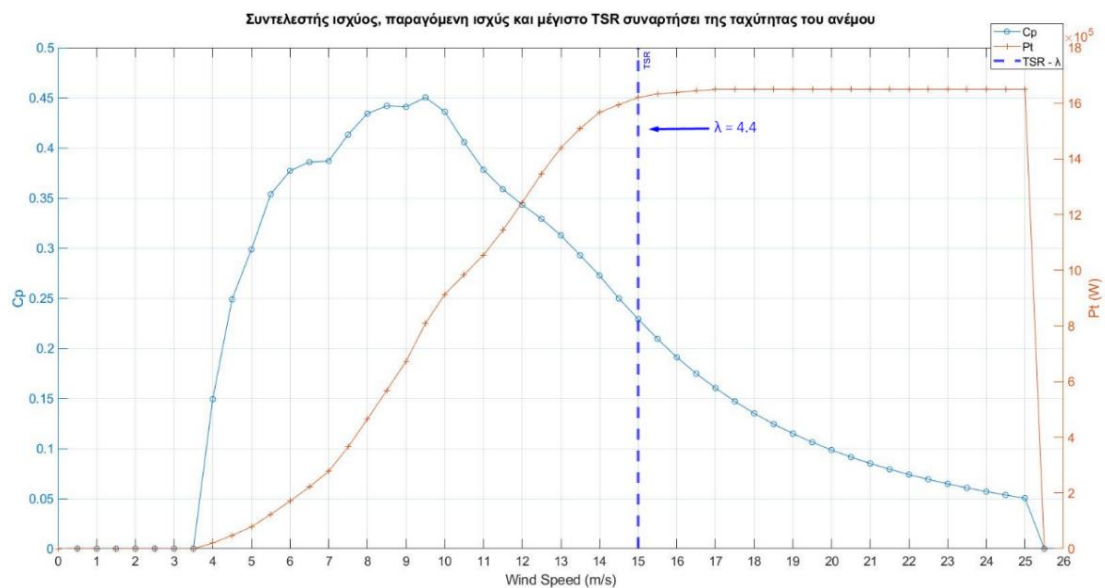
$$\lambda = \frac{2\pi R}{T} \cdot \frac{1}{u_w} = \frac{65.79}{15} \approx 4.4 \quad (8)$$

Έτσι λοιπόν, βάσει της σχέσης (8) υπολογίζεται πως $TSR(\lambda) = 4.4$

Όσον αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος C_p (7) με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab (Πίνακας 3), αφού έγινε η εισαγωγή της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ για την εκάστοτε ταχύτητα ανέμου, αναπαραστάθηκαν σε κοινό διάγραμμα οι συντελεστές ισχύος και το μέγιστο TSR συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29.

Χαρακτηριστικό			Μονάδα
d	Πυκνότητα αέρα	1.225	[kg/m ³]
r	Μήκος πτερυγίου	33	m
P _t	Παραγόμενη ισχύς		[W]
P _{max}	Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς χωρίς απώλειες		[W]
u _w	Ταχύτητα ανέμου [0,25.5] με βήμα 0.5		[m/s]

Πίνακας 3: Δεδομένα υπολογισμού C_p



Εικόνα 29: Κοινό διάγραμμα συντελεστή ισχύος, παραγόμενης ισχύος Α/Γ και μέγιστο TSR συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (Κώδικας: Παράρτημα Α)

Εκείνο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι όταν $C_p = C_{p,max} \approx 0.45$ η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ δεν είναι η μέγιστη, αλλά ούτε και $u_w = u_{w,rated} = 15$ m/s, αλλά $u_w = 9.5$ m/s.

Γενικότερα, κάθε Α/Γ ξεκινά κάποια στιγμή, για δεδομένη $u_{w,rated}$, να παράγει τη μέγιστη ισχύ της που ισούται με την ονομαστική της, δηλαδή την $P_{t,max}$ που αποτελεί τον αριθμητή του κλάσματός της (6). Ταυτοχρόνως, για όταν $u_w > u_{w,rated}$ ο

παρονομαστής του ίδιου κλάσματος αυξάνεται συνεχώς, ενώ η παραγόμενη ισχύς παραμένει στο μέγιστό της σημείο μέχρι και την $u_{w,cut-out}$.

Ο C_{pmax} της συγκεκριμένης Α/Γ θεωρείται αρκετά ανταγωνιστικός, καθώς στην ουσία δύσκολα επιτυγχάνεται C_p μεγαλύτερος του περίπου 0.42, όπως αναφέρθηκε. Επίσης, για αύξηση της u_w από την $u_{w,cut-in}$ μέχρι και περίπου τα 5 m/s, ο C_p φτάνει ήδη την τιμή 0.3. Στη συνέχεια όμως και όταν η u_w κυμαίνεται μεταξύ 5.5 m/s και 7 m/s, διακρίνεται ξαφνική μείωση στο ρυθμό αύξησης του C_p , ενώ όμως αργότερα και μέχρι την ταχύτητα των 9.5 m/s, όπου είναι, παίρνει και τη μέγιστη τιμή του. Έχει εμφανώς πιο μεγάλο ρυθμό αύξησης.

Το ίδιο, αλλά σε μικρότερη ένταση, παρατηρείται και για τις ταχύτητες ανέμου μεταξύ 8.5 m/s και 9.5 m/s, δηλαδή λίγο πριν γίνει μέγιστος ο συντελεστής ισχύος. Εκτός όμως από τα σημεία που αναφέρθηκαν, για το διάστημα όπου η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από 9.5 m/sec έως και τα 15 m/sec, η τιμή του C_p μειώνεται με τρόπο σχεδόν γραμμικό. Στο ίδιο διάστημα, η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται σχεδόν γραμμικά, αλλά όταν η ισχύς γίνει μέγιστη, όταν $u_w=15$ m/sec, η τιμή του C_p μειώνεται τετραγωνικά. Αυτό συμβαίνει επειδή η συγκεκριμένη Α/Γ είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να μπορεί να αντισταθμίζει την ποσότητα της χαμένης ενέργειας, όσο όμως η P_t αυξάνεται. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μόλις $P_t = P_{t,max}$, τότε η αντισταθμιστική αυτή ικανότητα παύει να είναι ισχυρή, μέχρι και την $u_{w,cut-out}$, όπου η παραγωγή ενέργειας σταματά.

Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες από τη στιγμή που η Α/Γ αποτελείται από αρκετά και σύνθετα υποσυστήματα. Εκ πρώτης όψεως δεν μπορεί να δοθεί σαφής απάντηση για το ποιο ή ποια υποσυστήματα εμφανίζουν αδυναμίες ως προς την ορθή διαχείριση της ενέργειας των πτερυγίων και του ρότορα με αποτέλεσμα να χάνεται πολύτιμη ισχύς για εκείνα τα συγκεκριμένα εύρη των ταχυτήτων του ανέμου. Ενώ, όπως είναι λογικό, η καμπύλη της παραγόμενης ισχύος είναι σταθερά αύξουσα μέχρι την $u_{w,rated}$, παρουσιάζει μείωση του ρυθμού αύξησής της υπό την επίδραση των παραπάνω ευρών u_w .

Ενδεχομένως, με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος μετάδοσης, το πρόβλημα αυτό να αμβλυνόταν και η παραγόμενη ισχύς να παρουσίαζε πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Με τον τρόπο αυτό, ίσως να μπορούσε να παραχθεί συνολικά περισσότερη ενέργεια για τον ίδιο χρόνο σε σχέση με την τρέχουσα Α/Γ, καθιστώντας την πιο αποδοτική.

Ως προς την μέγιστη τιμή του λόγου TSR (λ), στη συγκεκριμένη Α/Γ είναι πιο αυξημένη από την τυπική ή θεωρητική ιδανική τιμή του λόγου αυτού για Α/Γ τριών πτερυγίων (n). Πιο συγκεκριμένα, η τιμή (λ_{opt}) προκύπτει από την παρακάτω σχέση [Ragheb, 2014]:

$$\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{3} \approx 4.19 \quad (9)$$

Η τιμή λ_{opt} δύναται να αυξηθεί κατά περίπου μέχρι και 30%, με τον κατάλληλο σχεδιασμό κυρίως του συστήματος πτερυγίων με τον ρότορα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η Α/Γ που μελετάται, η Vestas 166 ονομαστικής ισχύος 1.65 MW, επιτυγχάνει λόγο TSR κατά περίπου 5% μεγαλύτερο σε σχέση με τον αντίστοιχο θεωρητικό ιδανικό.

Σημειώνεται πως τα παραπάνω δεδομένα αφορούν τη λειτουργία της Α/Γ με μηδενική συστροφή των πτερυγίων ως προς τον άξονά τους (pitch angle) [M. Ragheb 2014].

2.8 Συστήματα συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης (CVT) στις Α/Γ

Έχοντας ως δεδομένα, όλα τα προβλήματα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, επιτακτική είναι η ανάγκη των επιστημόνων να καταφύγουν στην αναζήτηση, στη μελέτη και στη παραγωγή ενός εναλλακτικού συστήματος κίνησης.

Με βάση τις μελέτες που αναφέρθηκαν, τόσο οι Α/Γ με κιβώτιο ταχυτήτων (Geared), όσο και αυτές που δεν διέθεταν (Direct Drive) παρουσιάζουν εξίσου σημαντικά προβλήματα στο κιβώτιο και στον ελεγκτή αντίστοιχα, ενώ και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκαν υψηλά ποσοστά βλαβών και έκτακτων παρεμβάσεων.

Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα, ότι τόσο για τη διατήρηση ή μείωση του λειτουργικού κόστους όσο και για την βέλτιστη παραγωγή ενέργειας, κρίνεται αναγκαίο να βρεθεί μια λύση, τέτοια ώστε να πραγματοποιείται μια καλύτερη διαχείριση των πραγματικών στροφών, δηλαδή αυτών του άξονα του ρότορα. Με άλλα λόγια αναζητείται ένα νέο και πιο αξιόπιστο σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Μία πρόταση προς αυτήν την κατεύθυνση είναι η χρήση ενός κιβωτίου συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων μετάδοσης (CVT), το οποίο μη έχοντας ορισμένο αριθμό σχέσεων, όπως γίνεται στις Α/Γ με σύστημα κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων (GWT), αλλά ουσιαστικά άπειρες, μπορεί συνεχώς να επιλέγει την καλύτερη δυνατή σχέση ανάλογα με την περίπτωση και τις εκάστοτε ανάγκες που προκύπτουν από τις εκάστοτε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Φυσικά, ένα σύστημα, μια τεχνολογία σαν και αυτή θα κληθεί να προσαρμοστεί πάνω στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία των γεννητριών, του μετατροπέα, αλλά και των υπόλοιπων εξαρτώμενων από αυτό, υποσυστήματα. Ειδικότερα, ο σκοπός είναι η Α/Γ που διαθέτει σύστημα CVT, να είναι πιο αποδοτική και μακροχρόνια περισσότερο οικονομικά συμφέρουσα από οποιαδήποτε άλλη που δεν διαθέτει, κατά κάποιο βαθμό. Φυσικά, όπως θα παρουσιαστεί διεξοδικά παρακάτω, το σύστημα CVT δεν είναι ανάγκη να αντικαταστήσει να αντικαταστήσει το συμβατικό κιβώτιο ταχυτήτων, αλλά συνδυαστικά με εκείνο να βελτιώσει την απόδοση της Α/Γ.

Μια τέτοια καινοτόμα μέθοδος που αναμένεται να βελτιώσει την παραγωγή ενέργειας από τις Α/Γ, κάνει την εμφάνισή της τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς μέχρι και σήμερα δεν έχει εφαρμοστεί σε καμία Α/Γ μεγάλης κλίμακας, παρά μόνο σε λιγοστές ανεμογεννήτριες πολύ μικρών διαστάσεων για πειραματικούς σκοπούς.

Λόγος γίνεται για τη χρήση συστήματος συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων (CVT), ως συστήματα κίνησης, τα οποία θα τοποθετούνται είτε μεταξύ του ρότορα και της ηλεκτρογεννήτριας της ανεμογεννήτριας είτε μεταξύ του υπάρχοντος κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρογεννήτριας.

Η επιστημονική κοινότητα αναζητά μια νέα λύση παραγωγής ενέργειας, η οποία όμως παράλληλα να είναι εκτός από πιο αποδοτική και πιο οικονομική. Το μεγαλύτερο ζήτημα που αντιμετωπίζει μια Α/Γ, ως σύστημα, είναι η διατήρηση του ελέγχου της συχνότητας του εξαγόμενου ρεύματος. Διαφορετικά, το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα αυτά, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί η μεταβλητή ταχύτητα του ανέμου, η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει όλη την αλυσίδα μετατροπών ενέργειας, δηλαδή από κινητική σε μηχανική και από μηχανική σε ηλεκτρική.

Μέχρι στιγμής τα υπάρχοντα συστήματα κίνησης ή κιβωτίων που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες, είναι αρκετά αποδοτικά, αλλά εμφανίζουν σημαντικά προβλήματα, τα οποία με τη χρήση συστημάτων κίνησης, τα οποία θα εμπεριέχουν τεχνολογίες CVT θα μπορούσαν να αμβλυνθούν κατά έναν βαθμό.

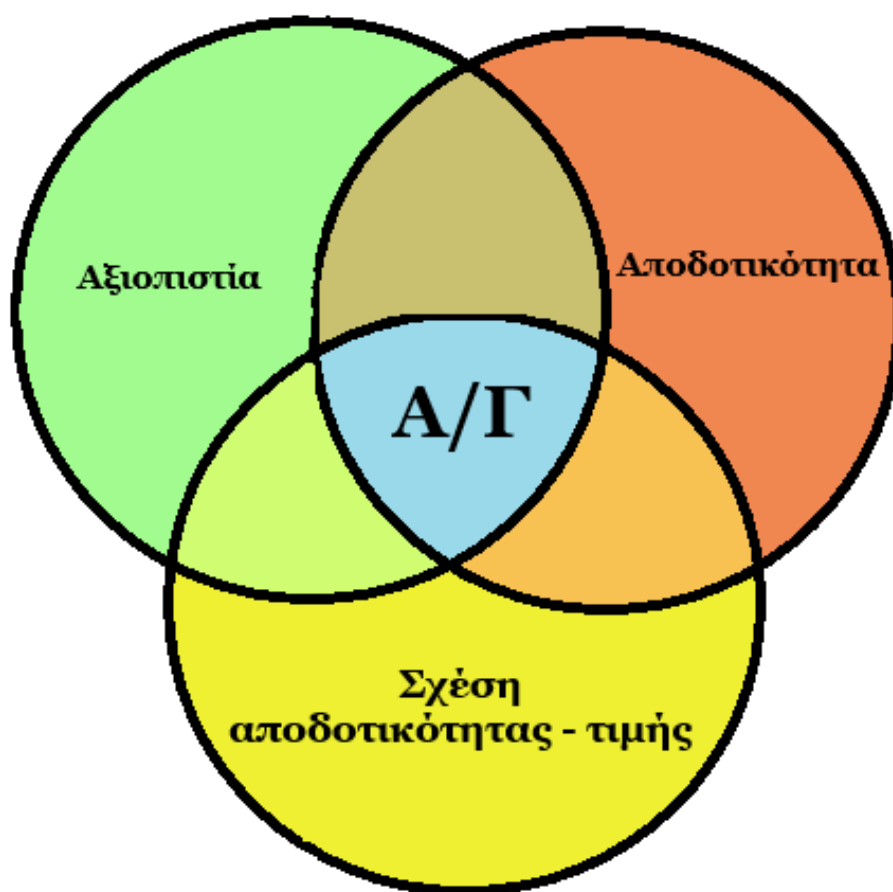
Αξίζει να σημειωθεί πως τα συστήματα CVT χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, ήδη από τη δεκαετία του '60. Από τη μία μπορεί οι τεχνολογίες CVT να μην έχουν εφαρμοστεί στις Α/Γ μεγάλης κλίμακας, αλλά από την άλλη με βάση τα τόσα επιστημονικά δεδομένα και τα μικρής κλίμακας πειράματα, σίγουρα θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια, πρώτα από όλα συμφέρουσα, εναλλακτική σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, αν συνεχίσει να επιβεβαιώνεται η καλύτερη αποδοτικότητα, η ενισχυμένη δυνατότητα ελέγχου τους, καθώς και η ικανότητα προσαρμοστικότητας ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις [Yin, 2017].

Ένας από τους λόγους που οδήγησε στη σκέψη για τη χρήση κιβωτίου CVT στις Α/Γ, είναι η ανάγκη και ο προβληματισμός που δημιούργησε η συνεχώς μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου. Εξαιτίας αυτού του λόγου, οι ρυθμοί βλαβών και οι χρόνοι εκτός λειτουργίας των διαφόρων τύπων Α/Γ, που παρουσιάστηκαν, είναι αρκετά υψηλοί. Έτσι λοιπόν, με τη χρήση συστήματος CVT, αποκτάται η δυνατότητα συνεχούς μεταβολής της εξόδου κατά τον πιο βέλτιστο ή επιθυμητό τρόπο, ανάλογα με τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου.

Παρακάτω, γίνεται μια ανάλυση των συστημάτων CVT, τα οποία είναι πιο πιθανό να κριθούν καταλληλότερα για τη χρήση του στις Α/Γ, καθώς υπάρχουν και πολλές άλλες μελέτες που λόγω της υστέρησής τους τόσο ως προς τη ροπή που μπορούν να διαχειριστούν και την αξιοπιστία τους όσο και ως προς την ικανότητά τους για κατασκευή σε μεγαλύτερη κλίμακα [Alkan, 2012]. Η προσθήκη της τεχνολογίας CVT στα συστήματα κίνησης των Α/Γ, σίγουρα θα της προσδώσουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα ως προς τη μεταβλητή τους είσοδο, την αιολική ενέργεια.

Γενικότερα, το πόσο ανταγωνιστική είναι μία Α/Γ από μία άλλη καθορίζεται από τρεις παράγοντες. Το πόσο αποτελεσματική είναι ανάλογα με τις δυνατότητές της, το πόσο

αξιόπιστη είναι, αλλά και η σχέση της τιμής με την απόδοσή της [Mangialardi, 1992] (Εικόνα 30).



Εικόνα 30: Διάγραμμα Venn για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανταγωνιστικότητα μίας Α/Γ

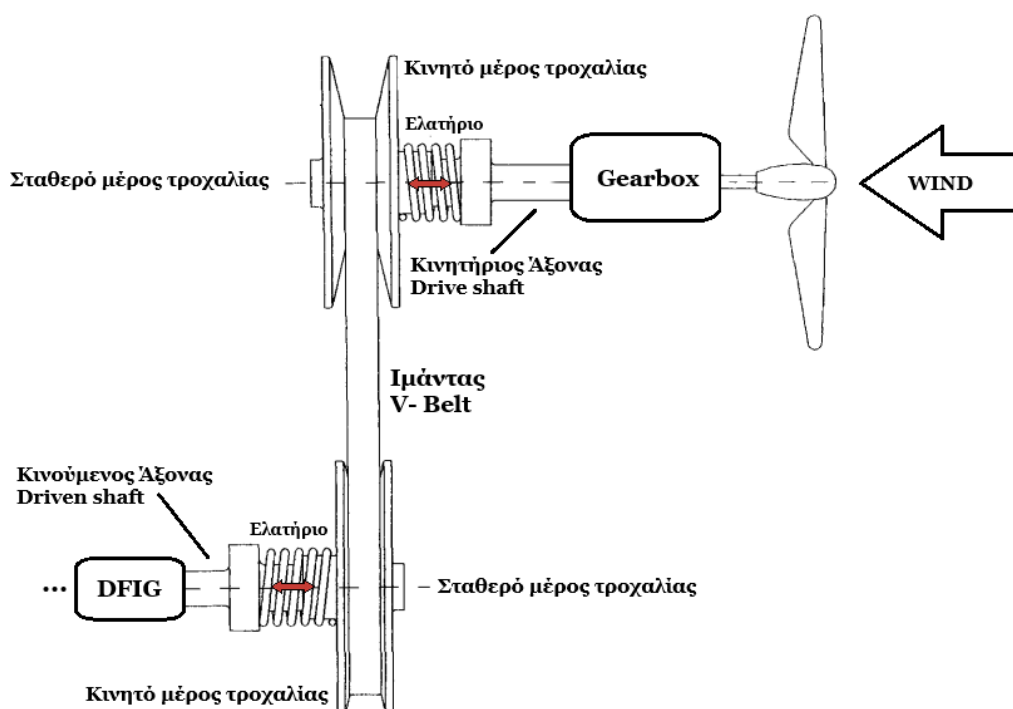
2.8.1 Αυτόματο κιβώτιο CVT με χρήση συστήματος ιμάντων – τροχαλιών (Automatically Regulated CVT – ARCVT)

Η συνεχώς μεταβαλλόμενη μετάδοση κίνησης με τη χρήση ιμάντων αποτελεί την πιο δημοφιλή επιλογή μετάδοσης κίνησης, καθώς με όχι και τόσο περίπλοκο τρόπο, επιτυγχάνεται η συνεχής αλλαγή σχέσης μεταξύ των δύο βασικών αξόνων του κιβωτίου, του άξονα χαμηλής (εισόδου) και του άξονα υψηλής (εξόδου) ταχύτητας, χωρίς όμως να υπάρχουν διακριτές ή πεπερασμένες σχέσεις μετάδοσης [Yin, 2017].

Οι αναφερόμενες σχέσεις μετάδοσης θεωρητικά είναι άπειρες, αφού αν ένα ιδανικό σύστημα έχει τη δυνατότητα να εκφράζει με τη μέγιστη ακρίβεια τη συνεχώς μεταβαλλόμενη είσοδό του, ένα κιβώτιο CVT σαν και αυτό που μελετάται θα μπορούσε να εκφράσει και αυτό με τη σειρά του την αντίστοιχη έξοδό του στη

ηλεκτρογεννήτρια, κατά τον πιο βέλτιστο τρόπο σε σχέση με τα υπάρχοντα κιβώτια ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται ήδη στις Α/Γ.

Ως προς το τεχνικό σκέλος των κιβωτίων ταχυτήτων CVT με ιμάντα που είναι προορισμένα για ανεμογεννήτριες [Mangialardi, 1993], αποτελούνται από δύο κωνικές τροχαλίες (pulleys) μεταβλητής διαμέτρου και συνδέονται με έναν ειδικό ιμάντα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετάδοση της κίνησης από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας (Low speed shaft) ή αλλιώς τον άξονα του ρότορα, στον άξονα υψηλής ταχύτητας (High speed shaft), δηλαδή σε εκείνον της ηλεκτρογεννήτριας. Ως προς τις τροχαλίες, εκείνη που φέρει τον άξονα του ρότορα ονομάζεται drive pulley, δηλαδή η τροχαλία εκείνη που κινεί τον κοινό ιμάντα του συστήματος ανάλογα με την κίνηση του άξονά της, ενώ η τροχαλία στην οποία μεταδίδεται η κίνηση μέσω του ιμάντα ονομάζεται driven pulley. Η κάθε τροχαλία μεταβάλλει κάθε φορά την εσωτερική της διάμετρο, ανάλογα με τις απαιτήσεις και την παραγόμενη ροπή, μέσω μηχανισμού ελατηρίου συγκεκριμένης σταθεράς K που αυτό διαθέτει (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: *Automatically Regulated CVT (ARCVT) [Mangialardi, 1995]*

Εξαιτίας της αδυναμίας της παραπάνω διάταξης CVT να διαχειρίζεται αρκετά μεγάλες ροπές, αναγκαία κρίνεται εγκατάσταση ενός κιβωτίου ταχυτήτων σταθερής σχέσης, όπως για παράδειγμα ένα όμοιο με εκείνο που αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.1.2, το πλανητικό σύστημα μετάδοσης σταθερής σχέσης.

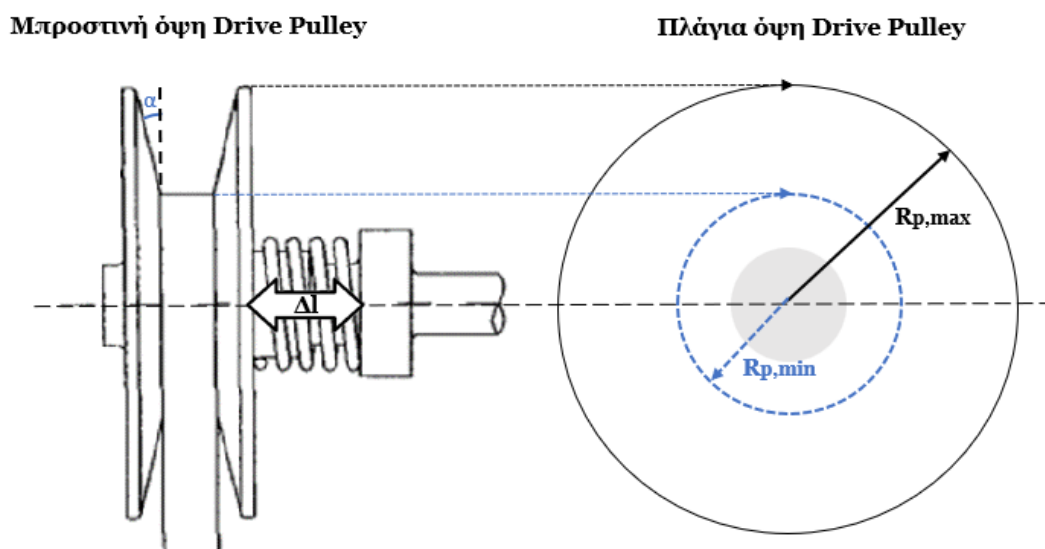
Με την παρουσία λοιπόν του συστήματος αυτού ενδιάμεσα του ARCVT και του άξονα του συμβατικού κιβωτίου ταχυτήτων, στο ARCVT δεν μπορούν να αναπτυχθούν μεγάλες ροπές, αλλά μικρότερες και πιο διαχειρίσιμες, καθώς οι περιστροφές φτάνουν

στον κινητήριο άξονά της ήδη με μία συγκεκριμένη σχέση, ανάλογα με το κιβώτιο που είναι εγκατεστημένο. Για παράδειγμα αν το πλανητικό σύστημα μετάδοσης έχει σχέση 1:45, ο κινητήριος άξονας του CVT θα περιστρέφεται με 45 RPM.

Επιπλέον με τη χρήση των ελατηρίων για την οριζόντια αύξηση ή μείωση της διαμέτρου της κάθε κωνικής τροχαλίας, αποφεύγεται η χρήση ενός πνευματικού ή υδραυλικού συστήματος ελέγχου, καθώς εκείνα εκτελούν τη διαδικασία αυτή αυτομάτως λόγω των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών τους.

Αφού η περιστροφική κίνηση μεταφερθεί στον κινητήριο άξονα του ARCVT, το κινητό μέρος της κινητήριας τροχαλίας ξεκινά ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας (RPM) να μετατοπίζεται προς τα αριστερά ή τα δεξιά με τη βοήθεια του ελατηρίου. Το ελατήριο σταθεράς ελαστικότητας (K) είναι στην ουσία συνδεδεμένο πάνω στη βάση στήριξής του, η οποία βρίσκεται πάνω στον κινητήριο άξονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31.

Ειδικότερα, όταν το ελατήριο επιμηκυνθεί κατά $\Delta l_{max}/2$, τότε η εσωτερική διάμετρος της τροχαλίας (Pitch diameter) και κατ' επέκταση και η ακτίνα της R_p θα είναι μέγιστη. Δηλαδή, θα ισχύει ότι $R_p = R_{p,max}$. Αντιθέτως, όταν το ελατήριο βρίσκεται στη μέγιστη συσπείρωσή του, τότε για την εσωτερική διάμετρο της τροχαλίας θα ισχύει ότι: $R_p = R_{p,min}$ (Εικόνα 32).



Εικόνα 32: Εμπρός και Πλάγια όψη κινητήριας τροχαλίας ARCVT

Ακριβώς την ίδια λειτουργία εκτελεί και η άλλη τροχαλία, με βάση πάντα τη μετατόπιση του κινητού μέρους της κινητήριας τροχαλίας. Η γενική αρχή που διέπει το σύστημα αυτό είναι ότι όσο πιο μεγάλη είναι η εσωτερική διάμετρος της κινητήριας τροχαλίας, τόσο και πιο μεγάλη είναι η ροπή που εισέρχεται στο σύστημα.

Το ARCVT είναι φτιαγμένο έτσι ώστε με το που υπάρξει μια μεταβολή στη θέση του κινητού μέρους της πρώτης τροχαλίας, να υπάρξει η αντίθετη αντίδραση στο

αντίστοιχο μέρος της δεύτερης. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις κατά τις οποίες μπορεί να υπάρξει μια κατηγοριοποίηση ως προς τη σχέση λόγου μετάδοσης κίνησης, δηλαδή η αναλογία της εσωτερικής διαμέτρου των τροχαλιών και άρα της ταχύτητας γενικότερα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η R_p τόσο μεγαλύτερη είναι και η ροπή που μπορεί να διαχειριστεί η τροχαλία και όσο η $R_p > R_s$ (Η ακτίνα της δεύτερης τροχαλίας) τόσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα, αλλά η ροπή μεγαλύτερη.

Όταν $R_p = R_s$, τότε επικρατεί μία μέση κατάσταση και ο λόγος μετάδοσης είναι 1:1, ενώ όταν $R_p < R_s$, τότε η ταχύτητα εξόδου είναι υψηλότερη.

Δεδομένου πως για να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα στις Α/Γ απαιτείται η χρήση πλανητικού συστήματος μετάδοσης ενός σταδίου, η μέγιστη ροπή που θα κληθεί να διαχειριστεί το ARCVT δεν θα είναι ίδια με εκείνη που θα φέρει αρχικά ο άξονας του ρότορα.

Όπως διακρίνεται από τον τρόπο λειτουργίας του και τα μηχανικά του μέρη, το ARCVT χαρακτηρίζεται σαφώς από μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε σχέση με τα είδη υπάρχοντα συστήματα, όπως επίσης και από μικρότερο βαθμό πολυπλοκότητας. Επιπλέον, λόγω των παραπάνω είναι πιο οικονομικό, καθώς βάσει της διαχείρισης που κάνει, μειώνεται η ανάγκη ύπαρξης ενός πολύ ισχυρού μετατροπέα, αφού οι διακυμάνσεις του παραγόμενου ρεύματος θα βρίσκονται εντός ενός σχετικά μικρότερου εύρους.

Με βάση τις ήδη υπάρχουσες μελέτες στα άρθρα του Mangialardi, βγαίνει το συμπέρασμα ότι είναι περίπου κατά 10% πιο αποδοτικά από ότι τα συμβατικά συστήματα μετάδοσης, καθώς και μπορούν να διατηρούν για μεγαλύτερο διάστημα τη μέγιστη δυνατή ισχύ κατά τη διάρκεια των διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου. Διατυπώνοντάς το διαφορετικά, η απόδοση των συστημάτων αυτών δεν επηρεάστηκε τόσο εύκολα από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου. Από την άλλη, η χρήση του πλανητικού συστήματος πριν από το ARCVT συνεχίζει να προκαλεί τα προβλήματα των GWΤ ως προς τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης, όπως και ανεβάζει το συνολικό κόστος. Συμπερασματικά, το σύστημα αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει εναλλακτική, αν είναι συμφέρουσα και ευνοϊκή η σχέση αποδοτικότητας – τιμής.

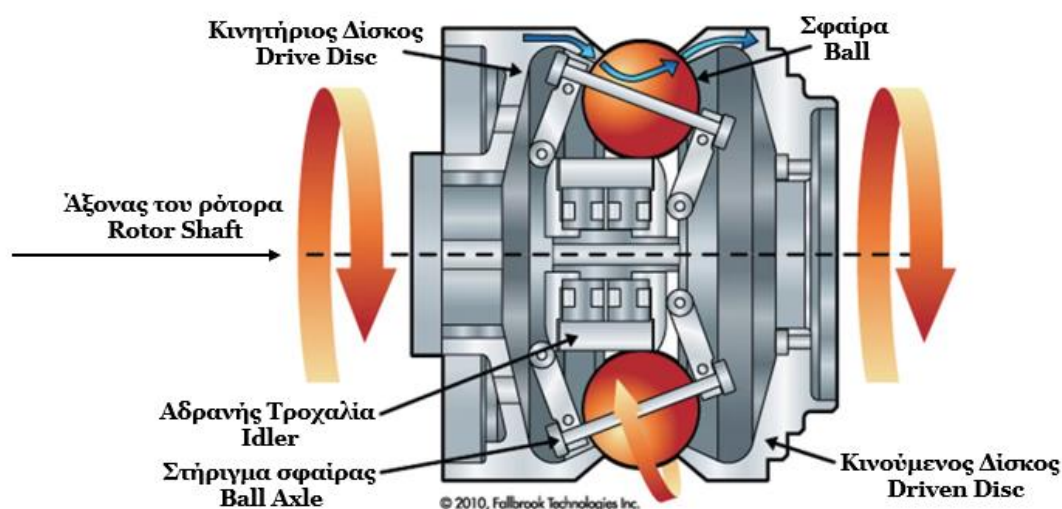
2.8.2 Nu Vinci CVT (NVCVT)

Το σύστημα αυτό εμφανίζει ορισμένες ομοιότητες με τα πλανητικά συστήματα μετάδοσης κίνησης ως προς τη διάταξη, αλλά διαφέρει κατά πολύ ως προς το είδος των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία καλείται και Nu Vinci CVP (Continuous Variable Planetary Transmission), καθώς μοιάζει με ένα πλανητικό σύστημα μετάδοσης, το οποίο όμως μπορεί και μεταβάλλει τη σχέση του δυναμικά.

Το Nu Vinci CVT (NVCVT), όπως είναι και η επίσημη ονομασία του, έκανε την εμφάνισή του στις αρχές του 2000 στα ποδήλατα, ενώ αργότερα μέχρι και σήμερα σε ορισμένους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας. Τα χαρακτηριστικά του είναι τέτοια που δημιουργούν προοπτικές για την εισχώρησή τους και στον τομέα της αιολικής ενέργειας και τις Α/Γ.

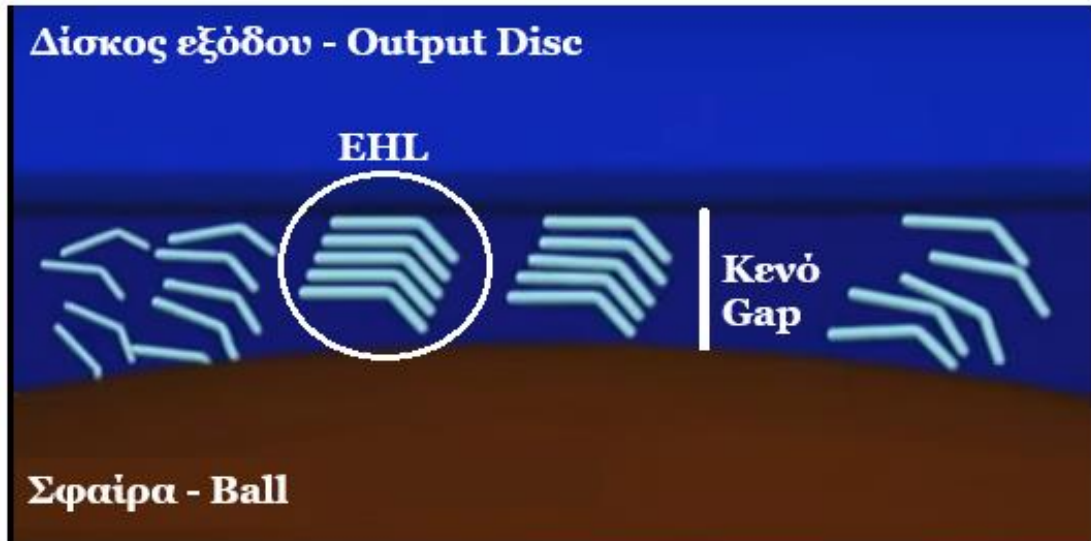
Η καινοτομία αυτού του τύπου CVT, ο οποίος αναπτύχθηκε από την Fallbrook Inc., σε σχέση με τα ARCVT είναι ότι η μετάδοση της κίνησης πραγματοποιείται με τη βοήθεια σφαιρών, αντί για τον ιμάντα, όπως γινόταν με την περίπτωση του ARCVT. Τα βασικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το NVCVT, όπως αυτά διακρίνονται στην Εικόνα 33, είναι οι δύο δίσκοι που είναι υπεύθυνοι για την εισαγωγή (Drive Disc) και για την εξαγωγή (Driven Disc) της περιστροφικής κίνησης. οι σφαίρες (balls), οι οποίες ενώ βρίσκονται μέσα σε ειδικά στηρίγματα (Ball Axles) αρχικά εξαιτίας της δύναμης που τους ασκείται από τον κινητήριο δίσκο και όντας πάνω στην αδρανή τροχαλία (Idler) εκτελούν περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα του στηρίγματός τους.

Το άλλο άκρο των σφαιρών μεταφέρει τη ροπή και άρα την περιστροφική κίνηση στον κινούμενο δίσκο από όπου και καταλήγει τελικά στη ηλεκτρογεννήτρια [Cortell 2004].



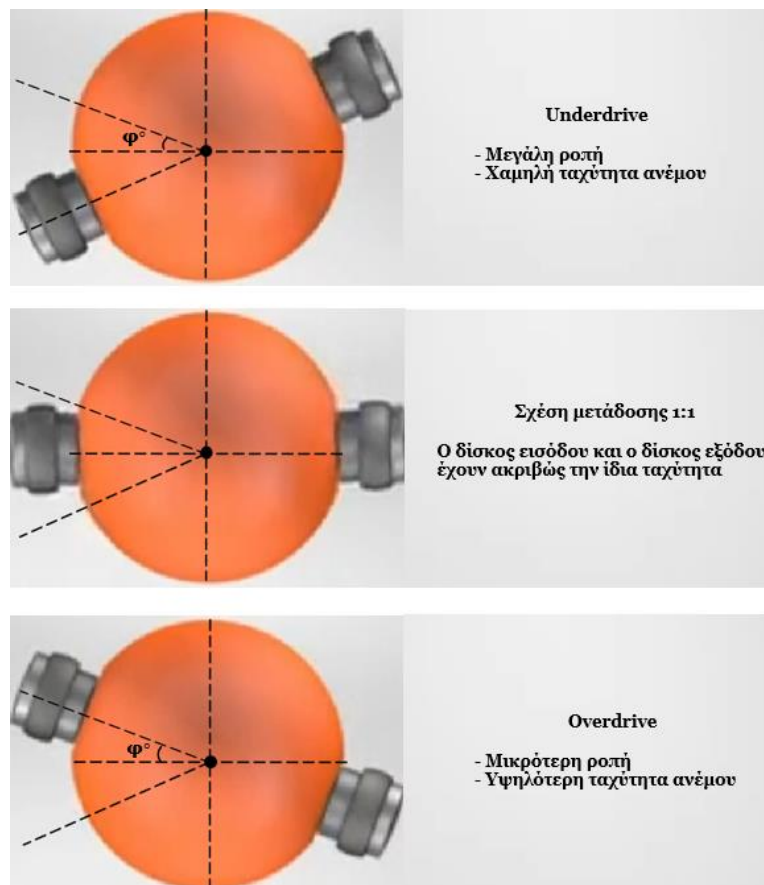
Εικόνα 33: Τα βασικά εξαρτήματα του Nu Vinci CVT (Πηγή)

Η αδρανής τροχαλία, πάνω στην οποία περιστρέφεται η κάθε σφαίρα, δεν παρέχει ενέργεια στο σύστημα, αλλά έχοντας την ίδια περιστροφική ταχύτητα με εκείνη του άξονα του ρότορα (Rotor shaft), αποτελεί απλώς το πεδίο πάνω στο οποίο περιστρέφεται η κάθε σφαίρα. Ανάλογα με τις στροφές του άξονα του ρότορα, μετατοπίζεται κατά μήκος του η αδρανής τροχαλία με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται αναλόγως και οι άξονες περιστροφής των σφαιρών. Η αναφερόμενη ροπή μεταφέρεται χάρις την ύπαρξης του ειδικού υγρού (EHL), το οποίο βρίσκεται στον αρκετά περιορισμένο κενό χώρο μεταξύ των σφαιρών και των δίσκων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34.



Εικόνα 34: Τα μέρη του EHL μεταξύ δίσκου εξόδου και σφαίρας

Το κενό αυτό μεταβάλλεται, για κάθε μεταβολή της αδρανούς τροχαλίας με αποτέλεσμα όταν ο χώρος αυτός είναι ακόμη πιο περιορισμένος, η πίεση του EHL στο σημείο αυτό να είναι μεγαλύτερη και έτσι αντίστοιχα μεγαλύτερη θα είναι και η μεταφερόμενη ροπή.



Εικόνα 35: Κατηγοριοποίηση σχέσεων μετάδοσης μεταξύ άξονα εισόδου και εξόδου ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 υπάρχουν τρεις βασικές περιπτώσεις αλλαγής σχέσης μετάδοσης του NVCVT. Στην περίπτωση όπου η u_w είναι χαμηλή, το σύστημα χρειάζεται μεγαλύτερη δύναμη για να ξεκινήσει την κίνησή του και έτσι παράγει μεγαλύτερη ροπή (Underdrive), ενώ σχηματίζεται γωνία φ° μεταξύ στηρίγματος και του οριζόντιου άξονα.

Όταν η σχέση μετάδοσης είναι 1:1 σημαίνει πως και οι δύο δίσκοι έχουν την ίδια περιστροφική ταχύτητα και αυτό συμβαίνει συνήθως τις στιγμές όπου γίνεται η μετάβαση από overdrive σε underdrive, αλλά και τις στιγμές όπου η ταχύτητα του ανέμου τείνει στη μέγιστη.

Τέλος, όταν οι απαιτήσεις για ροπή είναι μικρότερες (over drive), ο κινητήριος δίσκος κινείται με μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με τον κινούμενο και συμβαίνει κατά τις υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

Συνοψίζοντας, το σημαντικότερο πλεονέκτημα του Nu Vinci CVT είναι πως μπορεί να καλύψει σχεδόν όλες τις ανάγκες ενός συστήματος όπως η A/G ως προς τη διαχειριζόμενη ροπή. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όσο περισσότερες οι σφαίρες τόσο και μεγαλύτερη η ροπή που μπορεί να διαχειριστεί το σύστημα. Ο μέγιστος αριθμός σφαιρών που μπορούν να τοποθετηθούν σε μία τέτοια διάταξη είναι δώδεκα, ενώ ο ελάχιστος, τρεις [Cortell 2004]. Οπότε, όσον αφορά τη ροπή, το NVCVT είναι το μόνο που εγγυάται τη μεγιστοποίησή της. Επιπροσθέτως, όπως όλα τα συστήματα CVT, έτσι και αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή προσαρμοστικότητα αλλά το συγκεκριμένο δεν απαιτεί την τοποθέτηση συστήματος μείωσης της ροπής του άξονα του ρότορα (1-stage planetary gearing system), όποτε εξάγεται το συμπέρασμα πως μπορεί να προσαρμόζεται πιο εύκολα σε ακόμα μεγαλύτερα φορτία. Αξίζει να σημειωθεί πως τα συστήματα που λειτουργούν με όμοιο τρόπο ως προς τη μετάδοση κίνησης, χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ομαλότητα στις μεταβάσεις από underdrive σε overdrive και το αντίστροφο.

Ωστόσο, για τη συνεχή λειτουργία του Nu Vinci CVT, απαιτείται εξωτερική ενέργεια, αλλά και επιπλέον σύστημα ελέγχου, ειδικότερα στην εκκίνηση της λειτουργίας, όταν δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται λίγο πάνω από την $u_{w,cut-in}$. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο συντελεστής ισχύος των A/G παρουσιάζει τον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησής της σε εκείνες τις u_w . Επομένως, άλλα συστήματα και διατάξεις πιθανότατα να είναι κατά κάποιο βαθμό πιο αποδοτικά στις συγκεκριμένες συνθήκες.

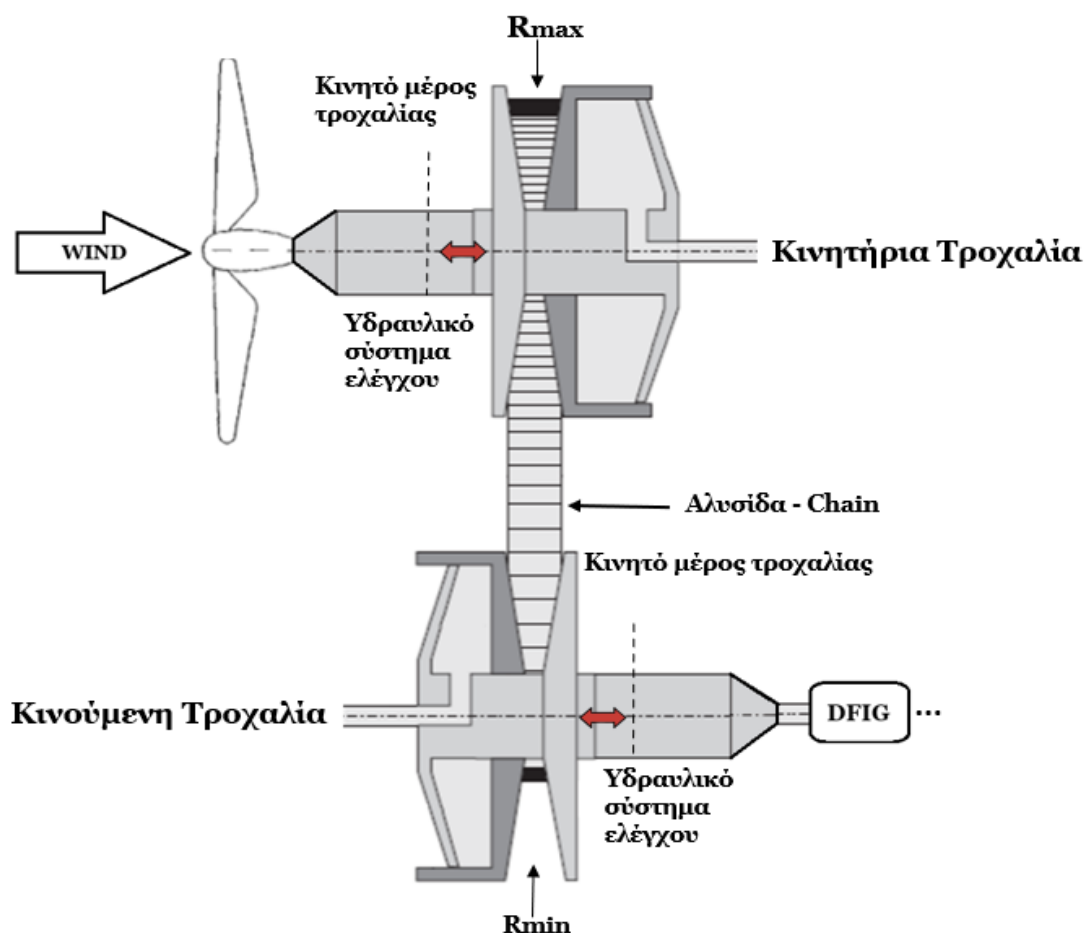
Μπορεί η εξωτερική ενέργεια που απαιτείται για την παραπάνω λειτουργία να μην είναι τόσο σημαντική, αλλά με τη χρήση του επιπλέον ελεγκτή, η πολυπλοκότητα του συστήματος και αυξάνεται. Από την άλλη συνολικά το σύστημα δεν απαιτεί τη χρήση υλικών υψηλής αξίας, καθώς το EHL είναι εκείνο που λόγω της μοναδικής γεωμετρίας του NVCVT συντελεί στην παραγωγή της απαιτούμενης ροπής.

Εξετάζεται η επέκταση της χρήσης του και στον τομέα της αιολικής ενέργειας, αλλά μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποια Α/Γ που έστω και πειραματικά να το χρησιμοποιήσει. Βέβαια, αν δεν αντιμετωπιστούν σε κάποιο βαθμό τα μειονεκτήματα του συστήματος αυτού, η χρήση του με τα μέχρι τώρα δεδομένα θα είναι οικονομικά ασύμφορη.

2.8.3 Chain CVT (CCVT) – Χρήση αλυσίδας αντί ιμάντα

Το CCVT πρόκειται στην ουσία για ένα σύστημα CVT αρκετά όμοιο ως προς την αρχή λειτουργίας του με το ARCVT. Η ειδοποιός διαφορά τους είναι πως στο CCVT αντί η κίνηση να μεταφέρεται μέσω ιμάντα, μεταφέρεται μέσω αλυσίδας και αντί για τη χρήση ελατηρίων για τη μετατόπιση των κινητών μερών των τροχαλιών, χρησιμοποιούνται εξωτερικά υδραυλικά συστήματα ελέγχου [Alkan 2012].

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 36) διακρίνονται τα βασικά εξαρτήματα του CCVT, ενώ σημειώνεται πως για την ορθή λειτουργία της κίνησης της αλυσίδας και την επίτευξη της κατά το δυνατόν μεγαλύτερης απόδοσης, γίνεται χρήση ειδικών λιπαντικών υγρών μηχανών, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν και το υλικό κατασκευής της αλυσίδας [Srivastava 2009].



Εικόνα 36: Βασικά μέρη CCVT

Παρατηρείται πως σε αντίθεση με το ARCVT, στο CCVT δεν τοποθετείται κάποιο ενδιάμεσο σύστημα γραναζιών για μείωση της εισερχόμενης ροπής, καθώς το δεύτερο λόγω των υλικών κατασκευής έχει μεγαλύτερη αντοχή και αξιοπιστία ακόμα και σε αρκετά μεγαλύτερες ροπές. Επιπλέον, το CCVT διαθέτοντας υδραυλικά συστήματα για τη μετατόπιση των κινούμενων μερών των δύο τροχαλίων, επιτυγχάνουν σε ορισμένες περιπτώσεις αρκετά πιο αποτελεσματικό έλεγχο, καθώς είναι εμφανώς πιο ισχυρά από τα ελατήρια, τα οποία πάντοτε θα έχουν τη δική τους ορισμένη σταθερά ελατηρίου (K).

Βέβαια συνολικά το CCVT, ανάλογα πάντα με την κλίμακα κατασκευής έχει πιο υψηλό κόστος, αλλά υπάρχει μια αντιστάθμιση στο γεγονός ότι στα ARCVT απαιτείται ενδιάμεσο πλανητικό σύστημα μετάδοσης και άρα συχνότερες βλάβες και μεγαλύτεροι χρόνοι συντήρησης.

Τέλος, τα CCVT από την παραπάνω έρευνα που έγινε, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε Α/Γ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος από ότι τα ARCVT, καθώς χωρίς σημαντική μείωση αξιοπιστίας και απόδοσης μπορούν και ανταπεξέρχονται σε υψηλότερες απαιτήσεις. Από την άλλη θα πρέπει να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ αποδοτικότητας και τιμής.

2.8.4 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ARCVT, NVCVT και CCVT

Αξίζει να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση μεταξύ αυτών των τριών ειδών CVT, καθώς βάσει της βιβλιογραφικής έρευνας, αυτά είναι τα συστήματα CVTλ, τα οποία βρίσκονται κάπως πιο κοντά στο να χρησιμοποιηθούν στις Α/Γ, καθώς πληρούν σε γενικές γραμμές τους τρεις παράγοντες που προσδίδουν στις Α/Γ περισσότερη ανταγωνιστικότητα (Εικόνα 30).

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των κιβωτίων CVT που αναφέρθηκαν προηγουμένως και έτσι μπορεί να γίνει μία πιο άμεση σύγκριση μεταξύ τους ως προς διάφορα χαρακτηριστικά.

Είδος / Χαρακτηριστικό	Αξιοπιστία	Κόστος	Απόδοση	Εισαγόμενη Ροπή	Χρήση σε Α/Γ
ARCVT <i>Autom. Reg. CVT</i>	Υψηλή	Πολύ Χαμηλό	Υψηλή	χαμηλή	Μόνο για πειραματικούς λόγους
NVCVT <i>Nu Vinci CVT</i>	Υψηλή	Πολύ υψηλό	Υψηλή	Πολύ υψηλή	Όχι, δεν υπάρχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα
CCVT <i>Chain CVT</i>	Πολύ υψηλή	Χαμηλό	Υψηλή	Υψηλή	Μεγάλη πιθανότητα χρήσης τους

Πίνακας 4: Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ARCVT, NVCVT και CCVT

2.8.5 Συμπεράσματα χρήσης υπαρχόντων κιβωτίων CVT

Αρχικά, τα CCVT εξαιτίας της αντοχής τους σε μεγαλύτερες ροπές θα μπορούσαν να καλύψουν το κενό που υπάρχει στις GWT, καθώς εκείνες χρησιμοποιούνται κυρίως σε Α/Γ ονομαστικής ισχύος μέχρι και 4 MW. Το ίδιο ισχύει και για το NVCVT σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά δεν υπάρχουν αρκετά επιστημονικά δεδομένα για να το αποδείξουν.

Από την άλλη τα ARCVT λειτουργούν με έναν πιο απλοϊκό τρόπο, χωρίς να απαιτούν τη χρήση υδραυλικών συστημάτων ή άλλων συστημάτων ελέγχου για την μεταβολή σχέσης, όπως γίνεται με τα άλλα δύο CVT. Αυτό το κάνει αρκετά πιο οικονομικό από τη μία, αλλά ταυτοχρόνως και πιο ανίσχυρο όταν καλείται να διαχειριστεί πιο μεγάλες ροπές.

Από τα τρία αυτά είδη CVT, ως προς την ανάπτυξη και χρήση του σε Α/Γ σε πιο πρώιμο στάδιο βρίσκεται το NVCVT, αλλά έχει σημαντικές προοπτικές. Τα ARCVT εξαιτίας των προχωρημένων μελετών που έχουν γίνει, φαίνεται πως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε Α/Γ χαμηλής ονομαστικής ισχύος, λόγω του χαμηλού κόστους και της αδυναμίας τους να χειριστούν μεγάλα φορτία. Ο λόγος που ακόμα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ενδεχομένως είναι η ανάγκη τοποθέτησης ενδιάμεσου συστήματος γραναζιών το οποίο αυξάνει κατά πολύ το κόστος της Α/Γ.

Το CCVT φαίνεται πως αποτελεί την καλύτερη λύση από τις τρεις, λόγω της μεγαλύτερης προσαρμοστικότητάς του, της όχι και τόσο μεγαλύτερης πολυπλοκότητάς του, του όχι και τόσο υψηλού σε σχέση με άλλες GWT κόστους του και της υψηλής αξιοπιστίας του. Φυσικά, σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μαζί με πλανητικό σύστημα μετάδοσης, το συνολικό κόστος ίσως γίνει ασύμφορο.

Τέλος, ως προς την απόδοση και τα τρία είδη φαίνεται πως στη θεωρία τουλάχιστον είναι αρκετά αποδοτικά, αλλά για αυτό κυρίως ευθύνεται η γενικότερη φιλοσοφία των συστημάτων συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης, δηλαδή η απουσία γραναζιών και άλλων όμοιων μηχανολογικών εξαρτημάτων που είναι αρκετά πιο επιρρεπή σε φθορές.

2.9 Συστήματα μετάδοσης κίνησης μεταβλητής σχέσης (Variable gear ratio transmission – VRG)

Εκτός λοιπόν από τα συστήματα CVT που αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχει και ένας άλλος παρεμφερής τύπος συστήματος, ο οποίος εξακολουθεί να αλλάζει δυναμικά τη σχέση μετάδοσής του, αλλά με αρκετά διαφορετικό τρόπο.

Λόγος γίνεται για το σύστημα μετάδοσης μεταβλητής σχέσης ή αλλιώς VRG, του οποίου η τεχνολογία απορρέει από τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας [Yin, 2017], όπως δηλαδή και τα CVT. Εξάλλου, και αυτός ο τύπος μετάδοσης ανήκει στις Α/Γ, οι

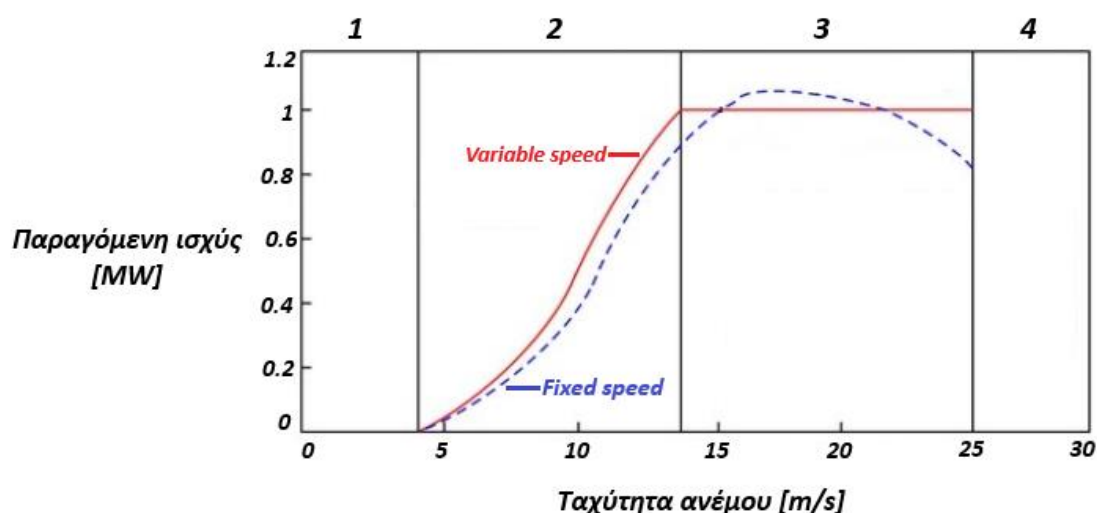
οποίες μεταβάλλουν δυναμικά τη σχέση μετάδοσής τους, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

Μέχρι και σήμερα δεν έχει εγκατασταθεί καμία Α/Γ τέτοιου είδους, αλλά έχουν γίνει αρκετές προσομοιώσεις και μελέτες πάνω σε πραγματικά δεδομένα περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς φανερώνουν μια νέα εναλλακτική προς την ίδια κατεύθυνση με εκείνη των συστημάτων CVT, δηλαδή τη δυναμική μεταβολή της σχέσης μετάδοσής τους, αλλά αναφέρονται στις Α/Γ σταθερού βήματος πτερυγίων.

Αρχικά, οι Α/Γ μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης, οι οποίες χρησιμοποιούν το σύστημα VRG, μπορούν να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, μεταβάλλοντας τη σχέση μετάδοσης σε διάφορες φάσεις της λειτουργίας τους. Επίσης, οι Α/Γ σταθερού βήματος πτερυγίων (fixed speed) με την προσθήκη ενός συστήματος VRG θα μεγιστοποιούσαν την απόδοσή τους ως προς την παραγόμενη ισχύ σε σχέση με την ίδια Α/Γ χωρίς VRG, αλλά με ένα συμβατικό πλανητικό σύστημα μετάδοσης.

Αν γινόταν σε πρώτη φάση η σύγκριση μεταξύ των φάσεων λειτουργίας των Α/Γ σταθερού και μεταβλητού βήματος πτερυγίων, θα εξαγόταν το συμπέρασμα ότι οι πρώτες χάνουν αρκετή από την διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύ, λόγω της απουσίας του συστήματος συστροφής των πτερυγίων (pitch system), όπως φαίνεται στην

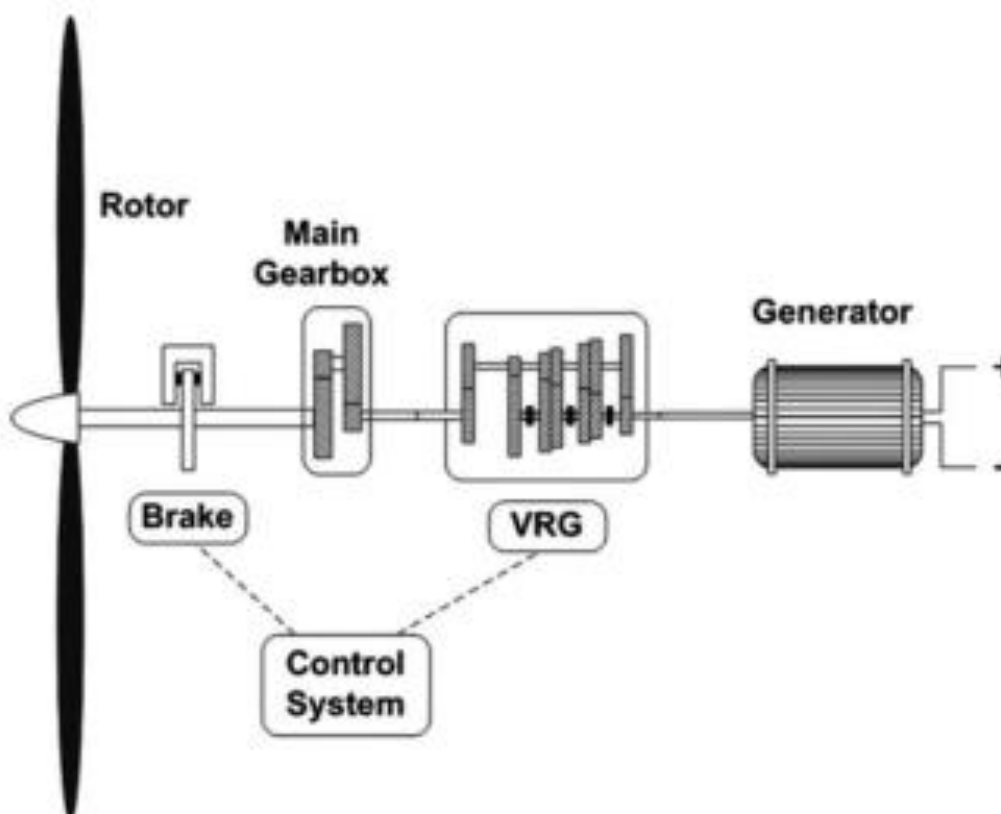
Εικόνα 37. Σημειώνεται πως αυτή η ποιοτική σύγκριση αναφέρεται σε δύο Α/Γ, ίδιας ονομαστικής ισχύος, τύπου GWT, οι οποίες διαθέτουν ένα συμβατικό πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης.



Εικόνα 37: Παραγόμενη ισχύς Α/Γ σταθερού (fixed) και μεταβλητού (variable) βήματος πτερυγίου ανά φάση λειτουργίας [h. Geng, 2014]

Ταυτόχρονα, ενώ στη φάση (regime) λειτουργίας 1 φαίνεται ξεκάθαρα πως από θέμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος η Α/Γ τύπου variable speed υπερέχει έναντι της Α/Γ τύπου fixed speed, δεν συμβαίνει το ίδιο στη φάση 3. Στη φάση λειτουργίας 3 θα μπορούσε κανείς να πει πως η παραγόμενη ισχύς είναι σχεδόν η ίδια με την Α/Γ τύπου variable speed να υπερέχει και πάλι, αλλά αυτή τη φορά κατά αρκετά μικρότερο βαθμό.

Όσον αφορά την τοπολογία μιας Α/Γ που ενσωματώνει ένα σύστημα VRG στο σύστημα κίνησης της, διαθέτει το κύριο κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο είναι ένα πλανητικό σύστημα ενός σταδίου, το σύστημα VRG διακριτών σχέσεων μετάδοσης, έναν συμπλέκτη για την απομόνωση και εναλλαγή ταχυτήτων και στη συνέχεια μια επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια [D. Chen, 2012], όπως φαίνεται στην Εικόνα 38.



Εικόνα 38: Διάταξη συστήματος κίνησης Α/Γ με VRG

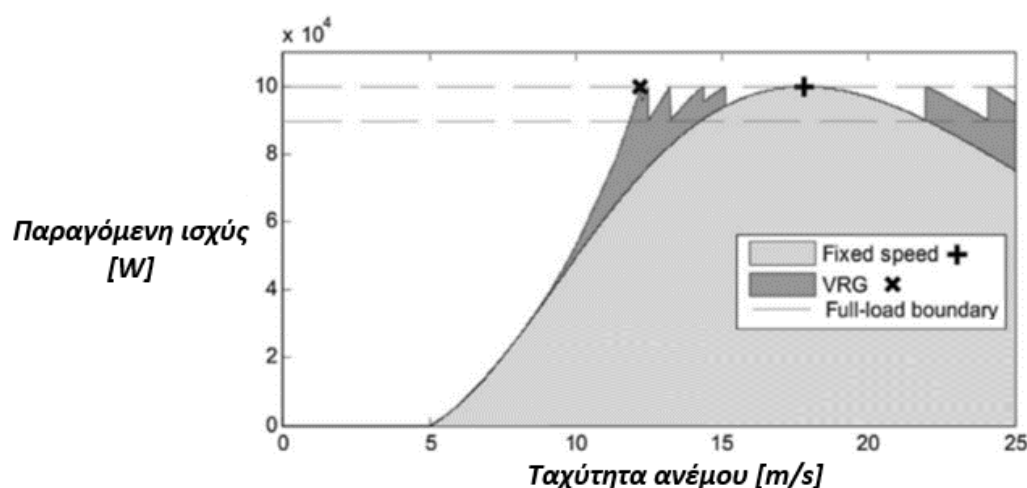
Παρατηρείται η απουσία του μετατροπέα και ο λόγος είναι ότι η συγκεκριμένη διάταξη ενσωματώνεται σε Α/Γ με σταθερό βήμα περυγίων, αλλά και εξαιτίας της ύπαρξης διακριτών ταχυτήτων δίνεται η δυνατότητα στον ρότορα να περιστρέφεται με μεταβαλλόμενες ταχύτητες, όσο η ηλεκτρογεννήτρια έχει σχεδόν σταθερή έξοδο [D. Chen, 2012]. Φυσικά υπάρχει ένα αρκετά σύνθετο σύστημα ελέγχου το οποίο ανάλογα με την είσοδο, δηλαδή την ταχύτητα του ανέμου, καθορίζει τη σωστή σχέση του VRG, αλλά και την ενεργοποίηση του φρένου (brake) κατά την $u_{w,cut-out}$.

Επιπροσθέτως, ο ρόλος του βασικού κιβωτίου ταχυτήτων (main gearbox) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του VRG, καθώς με την ύπαρξή του, το VRG δεν δέχεται πολύ υψηλές καταπονήσεις λόγω των ροπών που δημιουργούνται.

Συμπληρωματικά, μπορεί από τη μία η ηλεκτρογεννήτρια σταθερής ταχύτητας να έχει ως έξοδο μια σχεδόν σταθερή συχνότητα, αλλά τοποθετούνται ορισμένα βοηθητικά ηλεκτρικά κυκλώματα για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων, όπως εκείνα των Α/Γ που φαίνονται στην Εικόνα 12 και στην Εικόνα 14.

Γενικότερα, η προσθήκη των συστημάτων VRG στις Α/Γ σταθερού βήματος πτερυγίων μπορούν να αυξήσουν κατά σχεδόν 35% την απόδοση ως προς την ηλεκτρική ισχύ σε σχέση με εκείνες που δεν το διαθέτουν και χρησιμοποιούν ένα συμβατικό κιβώτιο ταχυτήτων στις φάσεις όπου $u_w < u_{w, rated}$ [D. Chen, 2011].

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της λειτουργίας μιας τέτοιου τύπου Α/Γ από τον D. Chen, η Α/Γ με VRG μπορεί να παράγει συνολικά μέχρι και 10% περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από ότι η ίδια Α/Γ χωρίς το VRG, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39: Παραγωγή ισχύος Α/Γ fixed speed χωρίς VRG και με VRG

Συνολικά ως σύστημα είναι εμφανές ότι βελτιώνει την απόδοση των Α/Γ σταθερού βήματος πτερυγίου, καθώς εξαλείφει και την ανάγκη χρήσης μετατροπέα, πράγμα που μειώνει το συνολικό κόστος. Από την άλλη η χρήση τόσο του κύριου κιβωτίου ταχυτήτων όσο και του VRG αυξάνουν το κόστος συντήρησης και το χρόνο εκτός λειτουργίας, λόγω των αυξημένων καταπονήσεων που δέχονται στα μηχανικά τους μέρη, ειδικότερα στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου.

Για την μείωση της σημαντικότητας αυτών των προβλημάτων, τα VRG δεν σχεδιάζεται να εγκατασταθούν σε Α/Γ μεγάλης ονομαστικής ισχύος, αλλά σε Α/Γ μικρού με μεσαίου μεγέθους, καθώς είναι γνωστό πως σε αυτά τα μεγέθη τα προβλήματα που αναφέρθηκαν αντιμετωπίζονται αρκετά εύκολα και αποτελούν μόλις το περίπου 5% των συνολικών σε αντίθεση με άλλους τύπους Α/Γ που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες [D. Chen, 2012].

Σκοπός λοιπόν είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης μικρότερων fixed speed A/Γ.

Επιπροσθέτως, τα συστήματα VRG είναι πιο ισχυρά από τα αντίστοιχα CVT λόγω της μεγαλύτερης ροπής που μπορούν να διαχειριστούν, αλλά εξαιτίας των περιορισμών που τίθενται ως προς την επεκτασιμότητά τους, τα CVT υπερτερούν, καθώς δεν διαθέτουν εξαρτήματα τα οποία είναι τόσο επιρρεπή στις φθορές και άρα υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο ως προς την αύξηση των δυνατοτήτων τους.

Τέλος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 39 μπορεί η παραγωγή ρεύματος να είναι μεγαλύτερη με τη χρήση VRG κατά την αλλαγή των σχέσεων, αλλά αυτές οι απότομες διακυμάνσεις που παρατηρούνται (spikes) δημιουργούν προβλήματα στην ποιότητα της ενέργειας που παράγεται, αλλά και στην ηλεκτρογεννήτρια που καλείται να τα διαχειριστεί. Σαφώς και θα μπορούσε να προστεθεί ένας μετατροπέας για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, όπως γίνεται και με άλλες διατάξεις, αλλά θα πρέπει να διερευνηθεί το αν το κέρδος σε ηλεκτρική ισχύ είναι τόσο μεγαλύτερο σε σχέση με τις A/Γ χωρίς VRG που να αποτελέσει μια οικονομικά βιώσιμη λύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μοντέλο εξομοίωσης Ανεμογεννήτριας μέσω MATLAB/Simulink®

Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάζεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού λογισμικού Matlab® και του περιβάλλοντος εξομοίωσης του Simulink® μία ρεαλιστική προσέγγιση του τρόπου λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα μελετάται ο τρόπος με τον οποίο η είσοδος μίας ανεμογεννήτριας, δηλαδή η αιολική ενέργεια καταλήγει στην έξοδό της, έχοντας όμως μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

3.1 Δεδομένα ανέμου και προετοιμασία χρήσης τους

Γενικότερα για να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε προσομοίωση φυσικού συστήματος, απαραίτητη είναι η παροχή δεδομένων, είτε αυτά είναι πραγματικά είτε τεχνητά. Για την προσομοίωση φυσικών συστημάτων, τα βασικά δεδομένα που ενδιαφέρουν εκείνον που τα μελετά είναι τα μεγέθη που δέχονται ως είσοδο σε σχέση με το χρόνο. Στην περίπτωση της μοντελοποίησης μιας Α/Γ, τα δεδομένα ενδιαφέροντος είναι η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου για δεδομένες χρονικές στιγμές.

Έτσι λοιπόν, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ρεαλιστικών δεδομένων ανέμου με σκοπό την όσο καλύτερη και ακριβέστερη λειτουργία του μοντέλου της Α/Γ.

Πρόκειται για δεδομένα τα οποία λαμβάνονταν από το 2006 έως και το 2020 από διάφορων ειδών ελεγκτές PLC και αφορούν τιμές μεγεθών λειτουργικών μερών μίας συγκεκριμένης Α/Γ υπό συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου, στο ύψος του θαλάμου της (Nacelle). Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα που εμπεριέχονται στο παρόν σύνολο δεδομένων [Byrne, 2023] αναφέρονται στην παραγόμενη ενέργεια, στη γωνία συστροφής των πτερυγίων, σε θερμοκρασίες διάφορων υποσυστημάτων, τις γωνιακές ταχύτητες των αξόνων και διάφορες άλλες τιμές που αφορούν τη λειτουργία της συγκεκριμένης Α/Γ.

Για όλα τα παραπάνω αναφέρεται η απόλυτη τιμή της ταχύτητας του ανέμου μετρούμενη σε [m/s] και η διεύθυνσή του μετρούμενη σε [°]. Το διάστημα δειγματοληψίας είναι τα δέκα λεπτά (10 min) και ο θάλαμος της Α/Γ βρίσκεται σε υψόμετρο 60 m. Σημαντική λεπτομέρεια είναι ότι η διεύθυνση του ανέμου δίνεται σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο αυτό και με διεύθυνση τις 0°, δηλαδή σε συνθήκες απόλυτα ανατολικού ανέμου, ταυτίζεται με το μέτρο της.

Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα που αφορούν τη λειτουργία της δεδομένης Α/Γ αγνοούνται, καθώς η Α/Γ του μοντέλου που θα παρουσιαστεί παρακάτω έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

3.1.1 Συλλογή δεδομένων προφίλ ανέμου

Το μοναδικό μειονέκτημα του συνόλου δεδομένων που περιγράφηκε είναι το σχετικά μεγάλο διάστημα δειγματοληψίας. Όπως είναι λογικό, τόσο η ταχύτητα όσο και η διεύθυνση του ανέμου είναι αδύνατο να παραμείνουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του δεκαλέπτου.

Για αυτόν το λόγο και με σκοπό το μοντέλο του ανέμου να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό αναζητήθηκε τρόπος με τον οποίο θα προστεθούν διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου ανά σταθερό και ορισμένο χρονικό διάστημα T [sec].

Έστω λοιπόν ότι για ένα συγκεκριμένο δεκάλεπτο, ο άνεμος έχει τα χαρακτηριστικά που αναφέρει ο Πίνακας 5.

time [sec]	wind speed [m/sec]	wind direction [°]
0	5	0
600	16,2	36,00

Πίνακας 5: Παράδειγμα δεδομένων ανέμου ενός δεκαλέπτου

Στη φάση αυτή δημιουργείται η ανάγκη προσθήκης διακυμάνσεων μεταξύ αυτών των δύο ακραίων τιμών στα 0 και τα 600 sec.

Με σκοπό τη μείωση της πολυπλοκότητας και του χρόνου υπολογισμού των εξόδων του μοντέλου της Α/Γ, έχει επιλεγθεί η κάθε διακύμανση να εισάγεται ανά 60 sec και άρα οι δύο τιμές θα μετατραπούν σε δέκα.

Αρχικά, εισάγονται στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB® τα παραπάνω δεδομένα, τα οποία αφορούν συνολικό διάστημα 10 min ή 600 sec. Οι δύο αυτές γραμμές δεδομένων θα πρέπει να εισαχθούν ως αριθμητικός πίνακας (numeric matrix), ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα με την μετέπειτα επεξεργασία του.

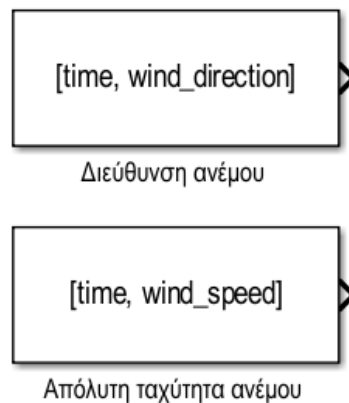
Αφού γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις και οι μετατροπές στην κατάλληλη μορφή πίνακα τύπου [time, wind_speed, wind_direction], γίνεται ο διαχωρισμός στους εξής δύο υποπίνακες: [time, wind_speed], [time, wind_direction]. Έτσι λοιπόν, τα απαραίτητα δεδομένα για τη δημιουργία του μοντέλου ανέμου έχουν δημιουργηθεί

Στο Παράρτημα Β αναγράφεται ο κώδικας μέσω του οποίου έγινε η συλλογή και ο διαχωρισμός των δεδομένων.

3.1.2 Δημιουργία προφίλ ανέμου μέσω Simulink®

Αρχικά δημιουργούνται οι εισόδοι του συστήματος, οι οποίοι είναι οι πίνακες που δημιουργήθηκαν στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB®.

Για να πραγματοποιηθεί αυτό, οι μεταβλητές που έχουν τη μορφή πινάκων εισάγονται σε δύο blocks “from workspace”, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40 και ρυθμίζεται το διάστημα δειγματοληψίας στα 60 sec.

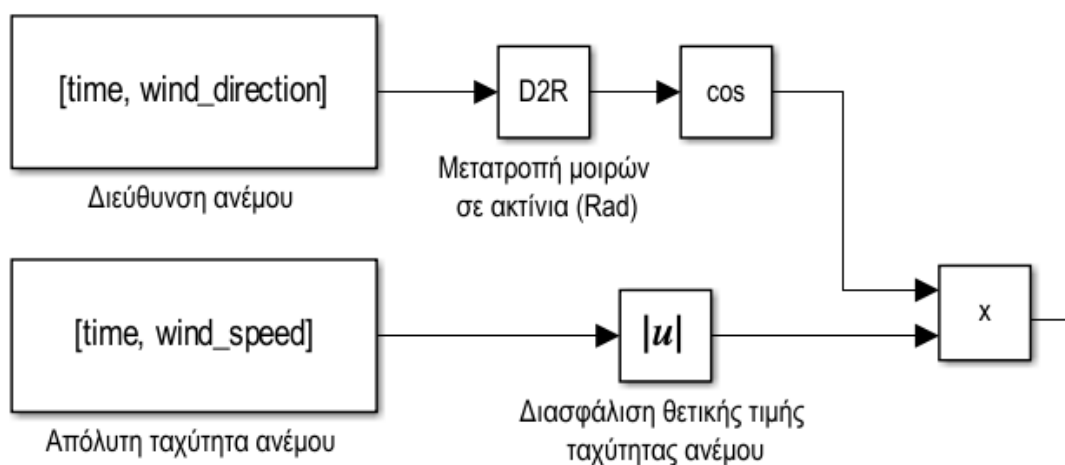


Εικόνα 40: Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ανέμου μέσα στο περιβάλλον του Simulink®

Στην τρέχουσα περίπτωση η διεύθυνση ανέμου δίνεται ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Όμως, η ταχύτητα του ανέμου έχει τρεις συνιστώσες, τις $u_{w,x}$, $u_{w,y}$ και $u_{w,z}$. Για τις απαιτήσεις της εφαρμογής θα πρέπει να θεωρηθεί ο προσανατολισμός της Α/Γ στο χώρο. Επιλέγεται η φορά της τα είναι προς τη Δύση, άρα πάντοτε ο άνεμος θα υπολογίζεται ως προς αυτήν την διεύθυνση, σύμφωνα με τη σχέση (10)

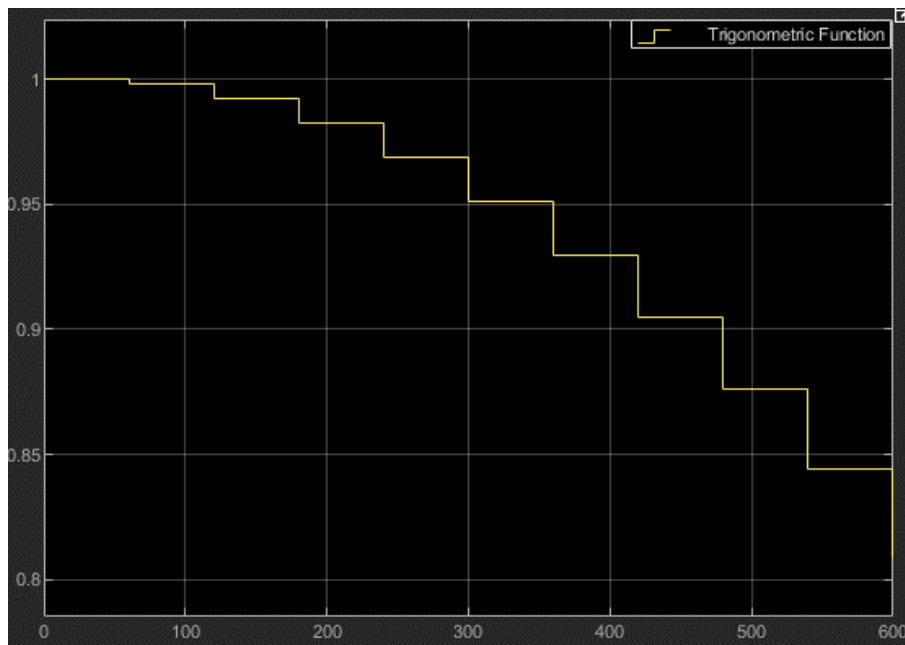
$$u_{w,x} = \|\vec{u}_w\| * \cos(\varphi^{\circ}) \quad (10)$$

Στην Εικόνα 41 φαίνεται η μεταφορά της παραπάνω σχέσης στο Simulink®.



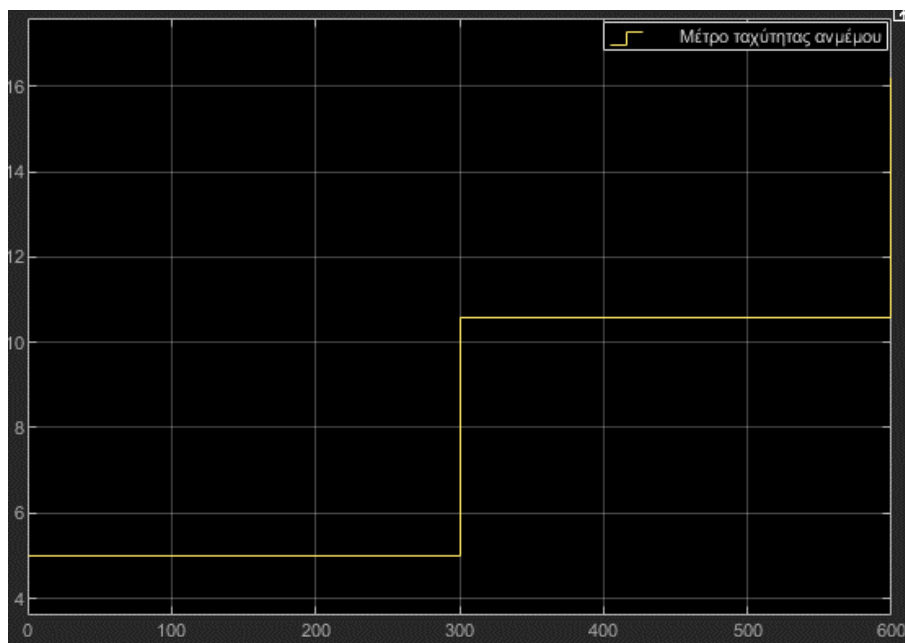
Εικόνα 41: Ταχύτητα ανέμου ως προς το οριζόντιο επίπεδο με φορά προς τη Δύση

Στο σημείο αυτό υπολογίζεται μέχρι στιγμής η ταχύτητα του ανέμου, ανά 60 sec. Στην ουσία ο πολλαπλασιασμός του μέτρου της ταχύτητας με το ημίτονο της διεύθυνσής του προσθέτει από μόνος του μία διακύμανση, καθώς στο συγκεκριμένο παράδειγμα, τόσο την $t_0=0$ όσο και την $t_1=600$ sec, η γωνία είναι σχεδόν η ίδια. Έτσι λοιπόν, ανά 60 sec το σήμα πλησιάζει βηματικά την τελική τιμή του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 42.



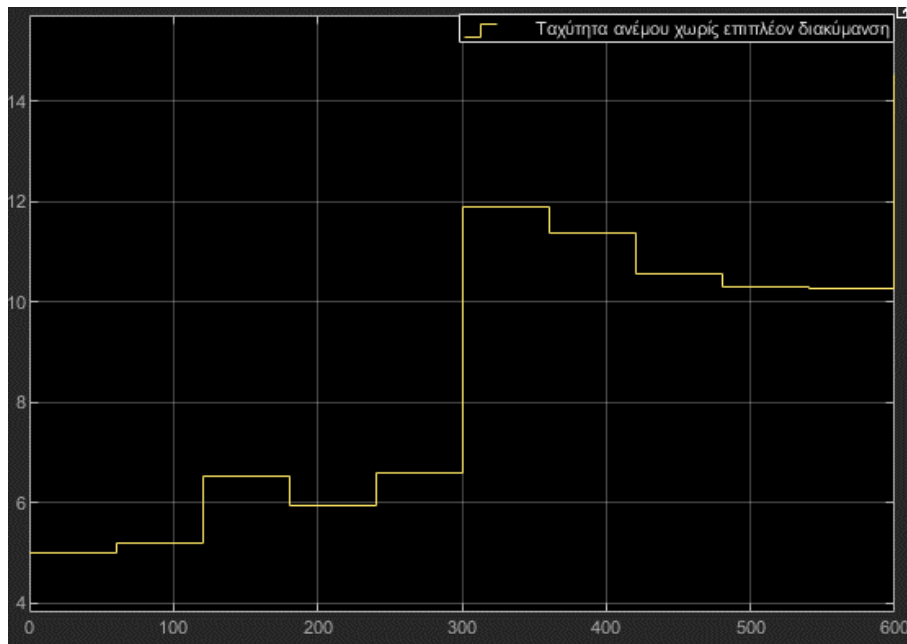
Εικόνα 42: Ιδανική μεταβολή διεύθυνσης ανέμου

Ενώ, το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται ως εξής:



Εικόνα 43: Μεταβολή απόλυτης τιμής ταχύτητας ανέμου

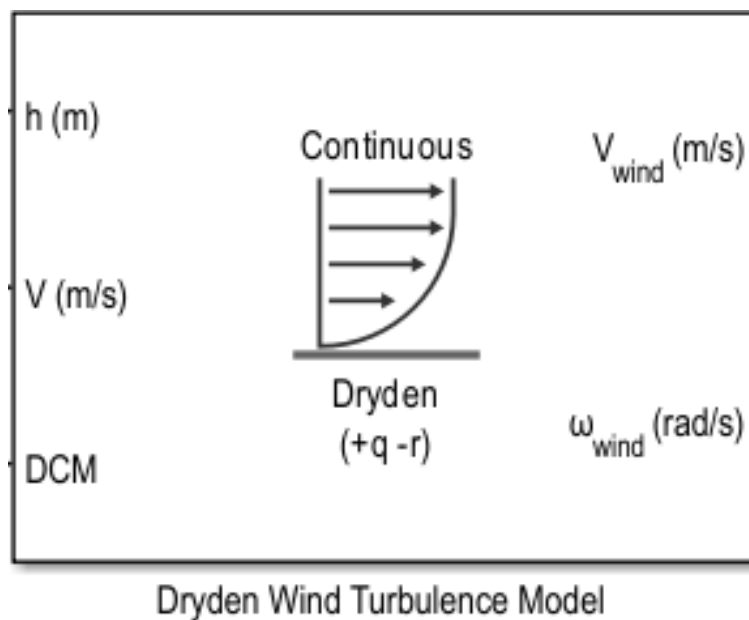
Ο πολλαπλασιασμός των δύο παραπάνω, εξάγουν την ταχύτητα του ανέμου ως προς το οριζόντιο επίπεδο Εικόνα 43.



Εικόνα 44: Ταχύτητα ανέμου ως προς τον οριζόντιο άξονα

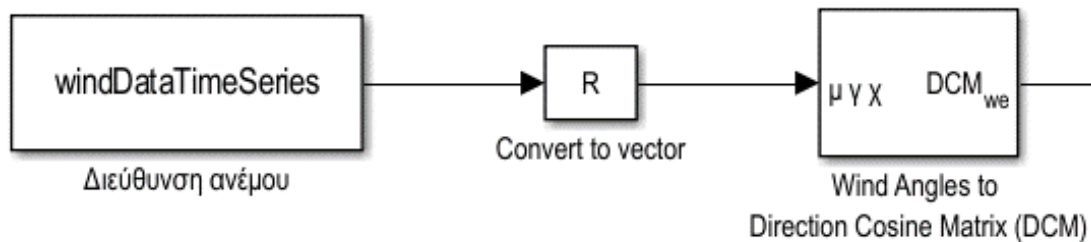
Για να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό το παραπάνω σενάριο θα πρέπει να προστεθεί μια επιπλέον διακύμανση στον άνεμο που διακρίνεται στην Εικόνα 43.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί το παραπάνω θα χρησιμοποιηθεί το εξής block του Simulink® (Εικόνα 45). Λόγος γίνεται για το “Dryden Wind Turbulence Model” της βιβλιοθήκης Aerospace Blockset.



Εικόνα 45: Dryden Wind Turbulence Model Block

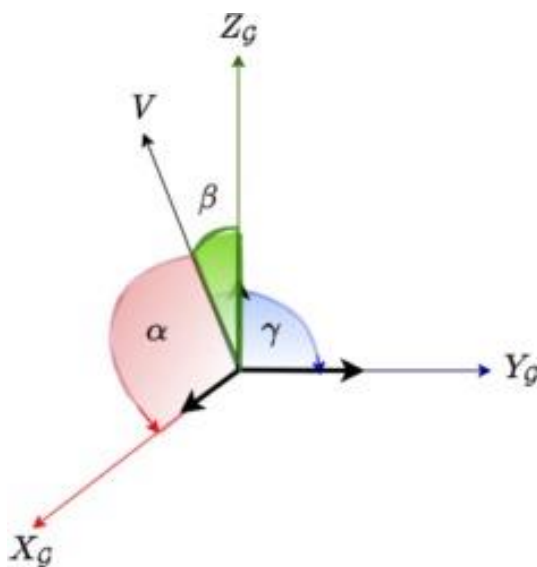
Το Block αυτό δέχεται ως είσοδο (DCM) τη διεύθυνση ανέμου ανά 60 sec και στις τρεις διαστάσεις. Στην ουσία επειδή υπάρχει μόνο η διεύθυνση του ανέμου ως προς τον άξονα x'x, θεωρείται πως στα άλλα δύο επίπεδα η γωνία είναι μηδέν.



Εικόνα 46: Εισαγωγή διεύθυνσης ανέμου στο Dryden Wind Turbulence Model

Εξαιτίας της αδυναμίας του “Dryden Wind Turbulence Model” να δεχθεί τιμές οι οποίες βρίσκονται σε πίνακα, η διεύθυνση ανέμου περνά ανά 60 sec από ένα “Reshape” block, το οποίο στην ουσία χωρίζει τον πίνακα σε γραμμές και λαμβάνει μία γραμμή ανά 60 sec μεταβιβάζοντάς την στο επόμενο Block.

Στη συνέχεια μέσω του Block “Wind Angles to Direction Cosine Matrix (DCM)” οι διευθύνσεις αυτές μετατρέπονται σε Direction Cosine Matrix, το οποίο στην ουσία αναπαριστά τη διεύθυνση του ανέμου στο επίπεδο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αναπαράσταση αυτή γίνεται ως προς τον οριζόντιο άξονα και μόνο.

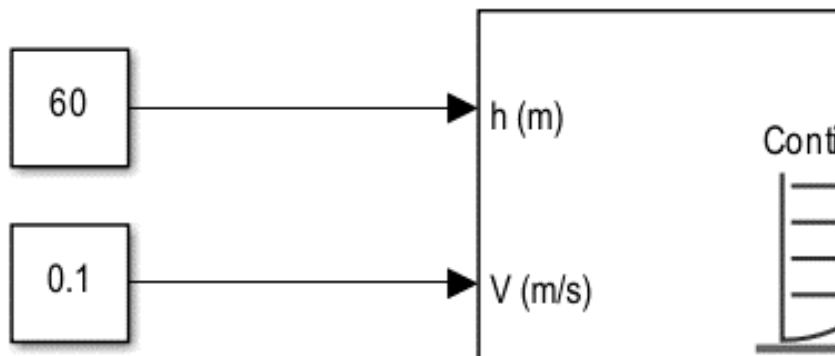


Εικόνα 47: Αναπαράσταση διεύθυνσης ανέμου στο χώρο μέσω DCM

Καθώς, το Dryden Wind turbulence Model, προέρχεται από το χώρο της αεροπορίας, ορισμένες παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν έχουν να κάνουν με την ταχύτητα και το υψόμετρο του αεροσκάφους, ώστε έτσι να υπολογιστεί η διακύμανση του ανέμου.

Η είσοδος “h(m)” αναφέρεται στο υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται το αεροσκάφος. Στην περίπτωση της Α/Γ εισάγεται το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται ο θάλαμός της.

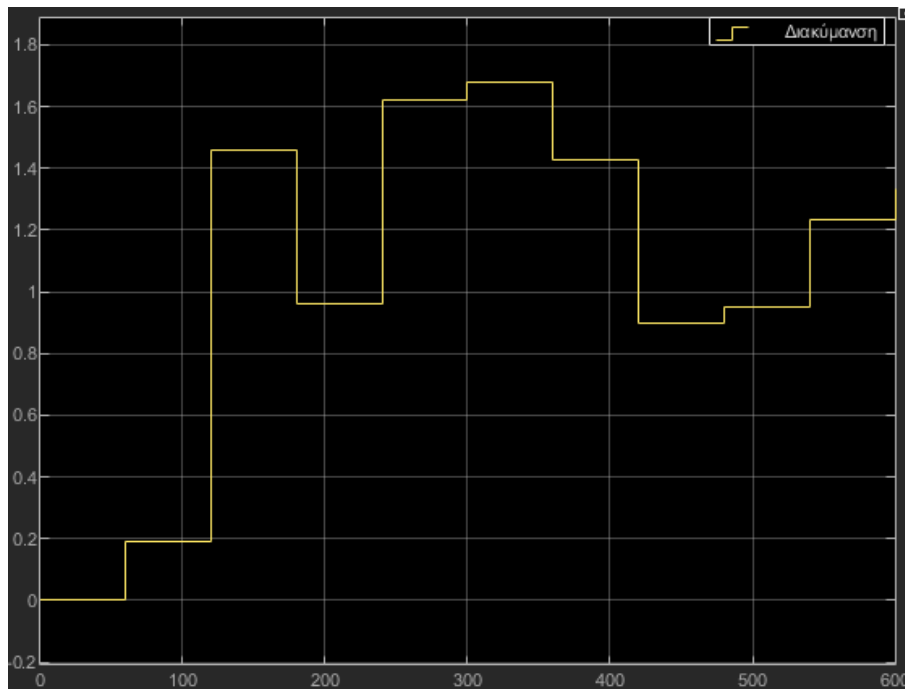
Η είσοδος “V(m/s)” αναφέρεται στην ταχύτητα του αεροσκάφους μία δεδομένη στιγμή. Τοποθετείται μία εικονική μεταβλητή (dummy variable), η οποία δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.



Εικόνα 48: Ρύθμιση υπόλοιπων παραμέτρων

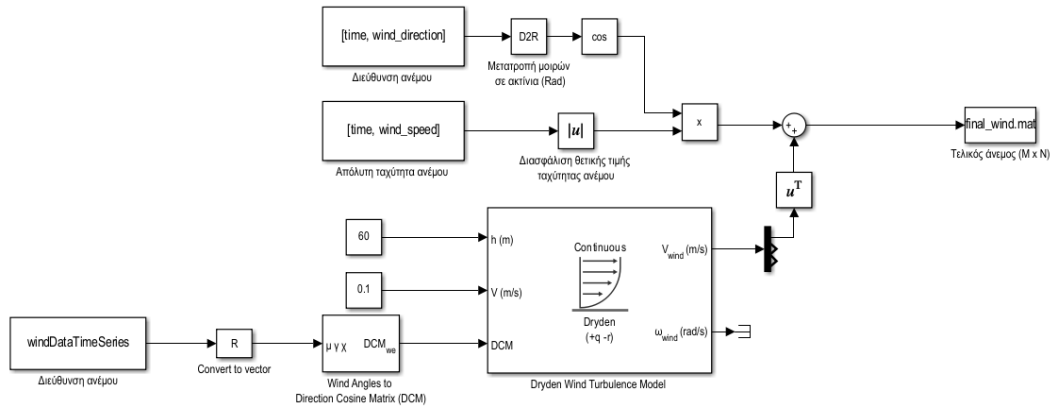
Έτσι λοιπόν εξάγεται μία διακύμανση ως προς και τις τρεις διευθύνσεις του χώρου. Για αυτόν το λόγο, το σήμα εξόδου εισάγεται σε ένα “Demux” block το οποίο διαχωρίζει τον εξαγόμενο πίνακα σε σειρές και καθώς έχει τρεις εισόδους, επιλέγεται να διατηρηθεί η πρώτη, δηλαδή η διακύμανση στον άξονα x’x. Στη συνέχεια το σήμα αυτό εισάγεται σε ένα “transpose” block μέσω του οποίου ο πίνακας τύπου [M x N] μετατρέπεται σε [N x M] (Εικόνα 48). Η αναφερόμενη διακύμανση στην ουσία μπορεί να ερμηνευτεί και ως θόρυβος στην ταχύτητα του ανέμου που προκύπτει από τη σχέση (10)

Τελικώς, εξάγεται η παρακάτω διακύμανση ως ταχύτητα ανέμου (Εικόνα 49).



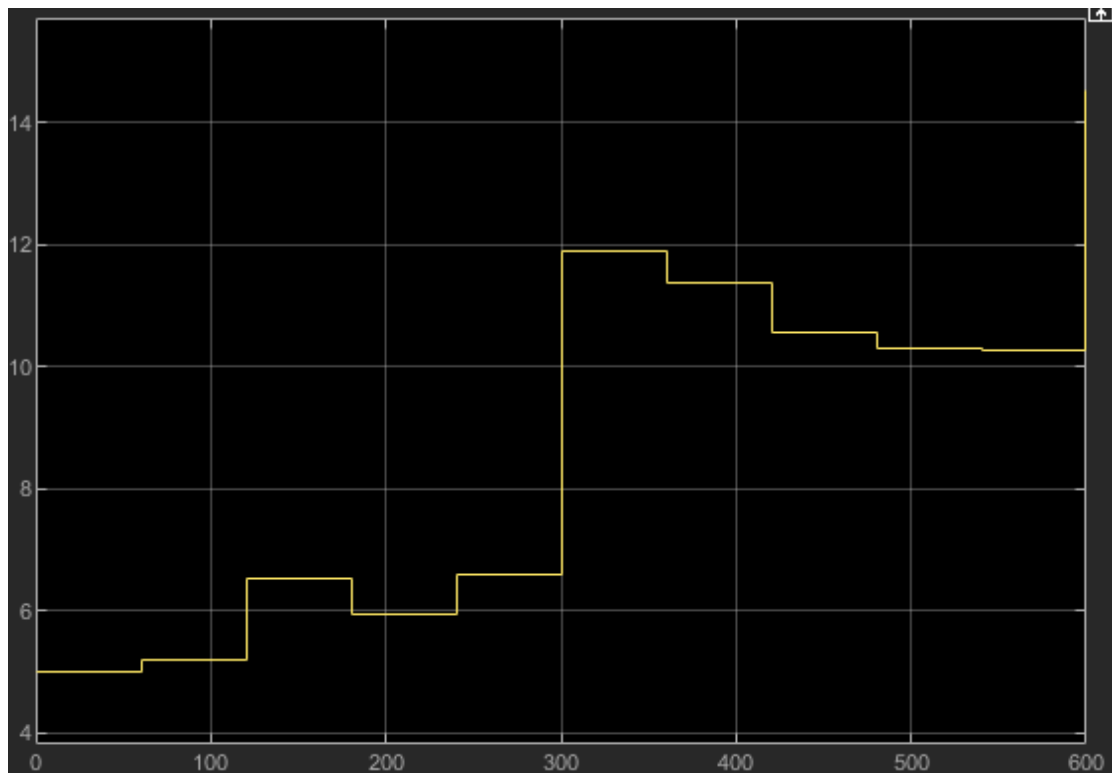
Εικόνα 49: Διακύμανση Ανέμου

Τέλος, στην Εικόνα 50 παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο μοντέλο ανέμου, το οποίο λαμβάνει δεδομένα και δημιουργεί διάφορα προφίλ ανέμου, τα οποία παρακάτω θα αναφέρονται ως σενάρια ανέμου. Τα σενάρια αυτά προκύπτουν από την πρόσθεση μεταξύ της ταχύτητας ανέμου, βάση της σχέσης και της διακύμανσης που εξάγεται από το Dryden Wind Turbulence Model.



Εικόνα 50: Ολοκληρωμένο μοντέλο ανέμου A/G

Το τελικό μοντέλο ανέμου έχει την παρακάτω μορφή (Εικόνα 51):



Εικόνα 51: Ταχύτητα ανέμου ανά μονάδα χρόνο με την επιπλέον διακύμανση

3.2 Μελέτη και προσομοίωση μοντέλου Α/Γ μέσω Simulink®

Αφού λοιπόν η είσοδος του συστήματος έχει μοντελοποιηθεί, αρκεί μόνο η εισαγωγή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, προκειμένου να ληφθεί η έξοδος του μοντέλου, η οποία και θα προσομοιώνει ένα περισσότερο ρεαλιστικό προφίλ ανέμου ως προς τον οριζόντιο άξονα, x'x.

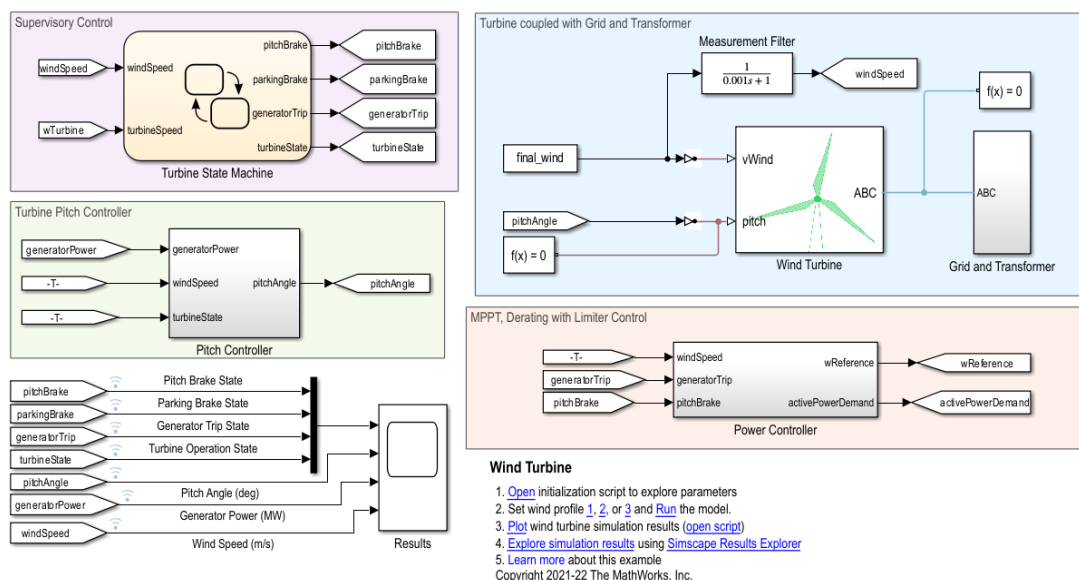
Η έξοδος του μοντέλου ανέμου που αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.2, εξάγεται σε ένα εξωτερικό αρχείο (.mat), το οποίο μεταφέρεται στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB® ως πίνακας και διατηρείται.

Το μοντέλο εξομοίωσης της Α/Γ που παρουσιάζεται παρακάτω θα έχει ως είσοδο το παραπάνω αρχείο (.mat), έτσι ώστε να μειωθεί ο βαθμός πολυπλοκότητας της εισόδου αυτής.

Σημειώνεται πως το παρακάτω μοντέλο αρχικά θα παρουσιαστεί όπως ακριβώς δίνεται από την © 1994-2024 The MathWorks, Inc. (Copyright 2021-22 The MathWorks, Inc.) και βρίσκεται στον παρακάτω σύνδεσμο:

<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/wind-turbine.html>

Στην Εικόνα 52 παρουσιάζεται το μοντέλο της Α/Γ με είσοδο ένα συγκεκριμένο μοντέλο ανέμου, το οποίο δημιουργήθηκε πραγματοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 52: Μοντέλο Α/Γ στο περιβάλλον του Simulink® με τροποποιημένο μοντέλο εισόδου

Παρακάτω, γίνεται ο διαχωρισμός των βασικών υποσυστημάτων που διακρίνονται στην Εικόνα 52 σε υποκεφάλαια, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των βασικών λειτουργιών τους.

3.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά Α/Γ

Αρχικά, η Α/Γ για την οποία γίνεται λόγος είναι τύπου Geared (GWT), καθώς το σύστημα κίνησής της αποτελείται από ένα πλανητικό σύστημα μετάδοσης δύο σταδίων. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω ο άξονας του ρότορα εισάγεται στο σύστημα σύστημα αυτό (Gear Train) και η ταχύτητά του πολλαπλασιάζεται συνολικά τρεις φορές μέχρι η πολλαπλασιασμένη αυτή ταχύτητα να καταλήξει στην είσοδο της ηλεκτρογεννήτριας.

Η ηλεκτρογεννήτρια που διαθέτει είναι τύπου DFIG και η ονομαστική ισχύς της Α/Γ είναι το 1.5 MW.

Ο Πίνακας 6 εμπεριέχει όλες τις βασικές παραμέτρους της Α/Γ που θα χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Βασικές Παράμετροι Ανεμογεννήτριας - Simulink®		
Τύπος Παραμέτρου	Τιμή Παραμέτρου	Μονάδα Μέτρησης
Μήκος πτερυγίων	35,25	m
$U_{w, cut-in}$	4	m/s
$U_{w, rated}$	12	m/s
$U_{w, cut-out}$	20	m/s
$U_{t, cut-in}$	12	RPM
$U_{t, cut-out}$	11	RPM
min pitch angle	1	°
max pitch angle	25	°
Pitch brake	95	°
Συχνότητα ηλεκτρικού δικτύου	60	Hz
Ονομαστική Ισχύς Α/Γ	1,5	MW
Μέγιστη ταχύτητα γεννήτριας	~1200	RPM

Πίνακας 6: Βασικές παράμετροι ανεμογεννήτριας – Simulink ®

3.2.2 Καθολικό σύστημα ελέγχου καταστάσεων λειτουργίας Α/Γ (Supervisory Control subsystem)

Το υποσύστημα Supervisory Control είναι υπεύθυνο για τη μετάβαση της κατάστασης λειτουργίας της Α/Γ από μία κατάσταση (State) σε μία άλλη. Αναλυτικότερα, ο Πίνακας 7 παρουσιάζει και επεξηγεί τις τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας της Α/Γ, καθώς και τις αντίστοιχες βασικές παραμέτρους οι οποίες απαιτούνται κάθε φορά για τη μετάβαση στην εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας.

Καταστάσεις λειτουργίας Α/Γ - Supervisory control subsystem						
Simulink® Wind Turbine Exampe	State No. - Name				Επεξήγηση τιμών καταστάσεων λειτουργίας ανεμογεννήτριας	
	0	1	2	3		
	Park Brake	Startup	Generating	Pitch Brake		
Parameter	Parking Brake	1	0	0	0	0: Η Α/Γ λειτουργεί ή τείνει να λειτουργήσει 1: Η Α/Γ δεν λειτουργεί, τα πτερύγια είναι σταματημένα
	Generator Trip	1	1	0	0	0: Η γεννήτρια παράγει ενέργεια ή τείνει να παράξει ενέργεια 1: Η γεννήτρια δεν παράγει ενέργεια
	Pitch Brake	1	0	0	1	0: Η κλίση των πτερυγίων βρίσκεται μεταξύ 1° και 25° 1: Εφαρμόζεται κλίση 95° στα πτερύγια της Α/Γ και η παραγωγή ενέργειας σταματά

Πίνακας 7: Επεξήγηση καταστάσεων λειτουργία Α/Γ

Φυσικά, οι καταστάσεις που αναφέρει ο Πίνακας 7 παραπάνω ενεργοποιούνται (1) ή απενεργοποιούνται (0) με τη μεταβολή των παρακάτω ανάλογα με τις τιμές των φυσικών μεγεθών, δηλαδή της ταχύτητας του ανέμου (u_w) και την ταχύτητα του άξονα του ρότορα (u_t) όπως υποδεικνύει ο Πίνακας 8.

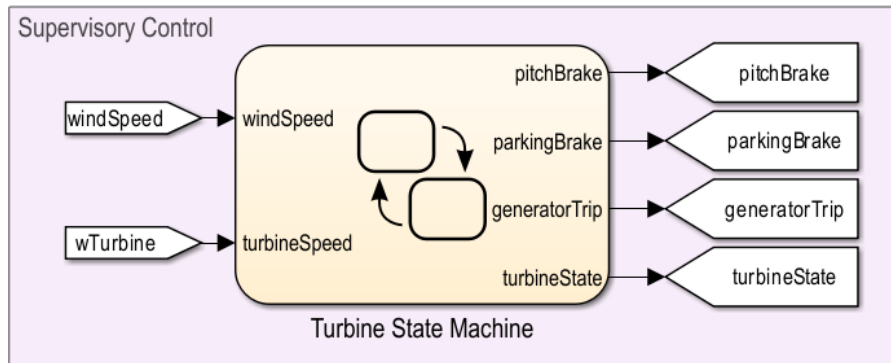
Βασικές μεταβάσεις από κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας - Supervisory control subsystem						
Σενάριο	Τρέχουσα Κατάσταση λειτουργίας	Ταχύτητα Ανέμου (u_w)	Λογικός Τελεστής	Ταχύτητα άξονα ρότορα (u_t)	Διάρκεια συνθήκης [sec]	Επόμενη Κατάσταση λειτουργίας
Μετάβαση						
Σενάριο 1	Park Brake	$u_w > u_{w, cut-in}$	AND	-	0,1	Startup
		$u_w < u_{w, cut-out}$				
	Startup	-	-	$u_t > u_{t, cut-in}$	0,1	Generating
	Generating	$u_w < u_{w, cut-in}$	OR	-	0,1	Pitch Brake
		$u_w > u_{w, cut-out}$		-		
-		$u_t > u_{t, cut-out}$				
Pitch Brake	-	-	$u_t < u_{t, park}^*$	0,1	Park Brake	
Σενάριο 2	Park Brake	$u_w > u_{w, cut-in}$	AND	-	0,1	Startup
		$u_w < u_{w, cut-out}$				
	Startup	$u_w < u_{w, cut-in}$	OR	-	1	Pitch Brake
		$u_w > u_{w, cut-out}$		-	1	
Pitch Brake	-	-	$u_t < u_{t, park}^*$	0,1	Park Brake	
Σενάριο 3	Park Brake	$u_w > u_{w, cut-in}$	AND	-	0,1	Startup
		$u_w < u_{w, cut-out}$				
	Startup	-	-	$u_t > u_{t, cut-in}$	0,1	Generating
	Generating	$u_w < u_{w, cut-in}$	OR	-	0,1	Pitch Brake
		$u_w > u_{w, cut-out}$		-		
		-		$u_t > u_{t, cut-out}$		
	Pitch Brake	$u_w \leq u_{w, cut-in, upper}^*$	AND	-	2	Startup
$u_w > u_{w, cut-in}$		-				
			$u_t < u_{t, cut-in}$			
...

* $u_{t, cut-in, upper} = 18 \text{ RPM}$
** $u_{t, park} = 2,2 \text{ RPM}$

Simulink® ~ Wind Turbine Exampe

Πίνακας 8: Μεταβάσεις Κατάστασης λειτουργίας τριών βασικών σεναρίων

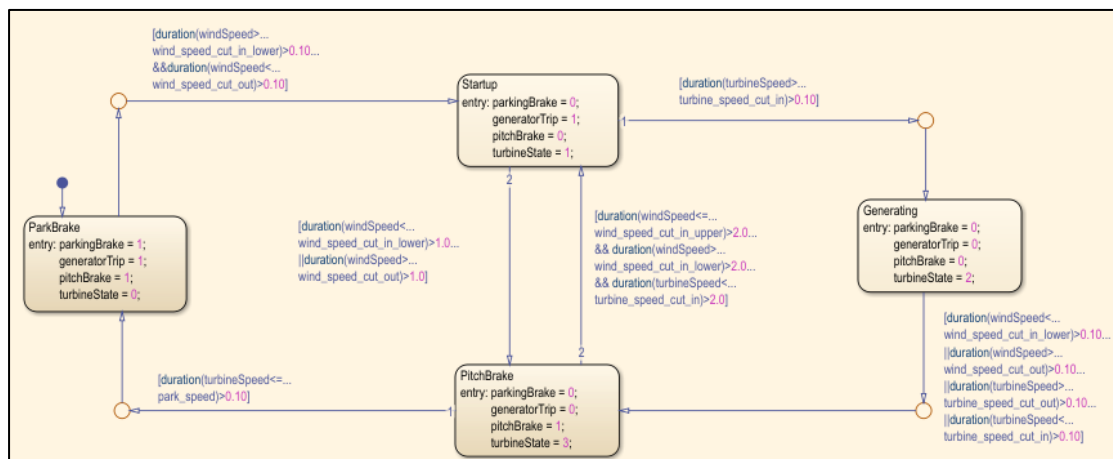
Οι παραπάνω μεταβάσεις των καταστάσεων λειτουργίας της Α/Γ συμβαίνουν όπως ακριβώς υποδεικνύει ο Πίνακας 8, βάσει των δεδομένων που λαμβάνει από τα φυσικά μεγέθη που περιγράφονται (wind speed και turbine speed). Επιπλέον, το σύστημα αυτό εξάγει και τις αντίστοιχες καταστάσεις Parking Brake, Pitch Brake, Generator Trip και Turbine State (Πίνακας 9) , καθώς τα χρησιμοποιεί παράλληλα ως είσοδο σε άλλα υποσυστήματα που θα αναλυθούν παρακάτω.



Πίνακας 9: Είσοδοι και έξοδοι Supervisory control subsystem μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Σημειώνεται πως το Parking Brake, αναφέρεται σε ένα δευτερεύον υδραυλικό σύστημα, το οποίο δεν έχει καμία σχέση με το Pitch Brake, καθώς αυτό σταματά απότομα ακόμα και τον άξονα του ρότορα.

Στην φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο καθολικός έλεγχος του μοντέλου με εισόδους και εξόδους συνεχούς χρόνου μέσα από το περιβάλλον του Simulink όπως περιέγραψε ο Πίνακας 8.

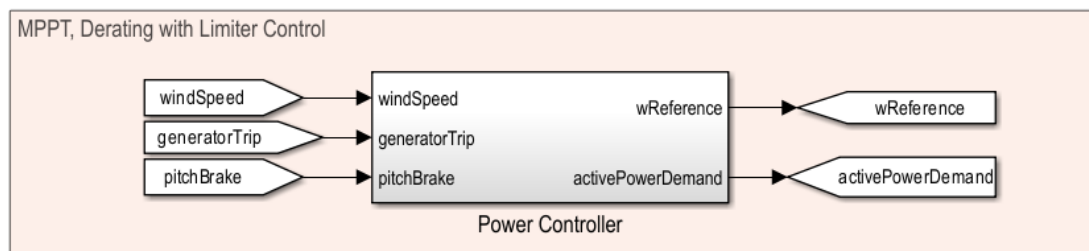


Εικόνα 53: Supervisory control subsystem μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

3.2.3 Ελεγκτής Ισχύος (Power Controller - Converter)

Ο ελεγκτής ισχύος (Power controller) αποτελεί ένα κρίσιμο υποσύστημα όχι μόνο για τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας που δέχεται, αλλά και για τον δυναμικό έλεγχο της ζήτησής των εκάστοτε απαιτήσεων του δικτύου (Grid).

Στην Εικόνα 54 διακρίνονται οι είσοδοι και οι έξοδοι του συστήματος του ελεγκτή ισχύος.



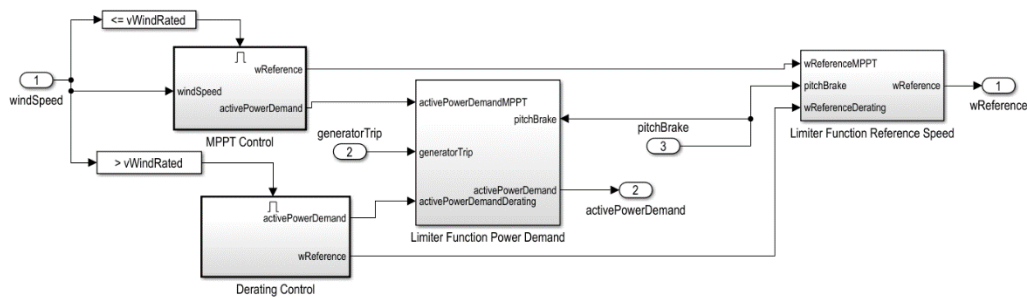
Εικόνα 54: Είσοδοι και έξοδοι ελεγκτή ισχύος ή μετατροπέα Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Τα δεδομένα λοιπόν που χρειάζεται ο ελεγκτής για να λειτουργήσει κατά τρόπο ορθό, είναι η ταχύτητα του ανέμου (wind speed), η κατάσταση λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας (generator trip) και του φρένου του συστήματος συστροφής των περυγίων (pitch brake) της Α/Γ.

Η πρώτη έξοδος του συστήματος είναι η ιδανική ταχύτητα που θα πρέπει να έχει η ηλεκτρογεννήτρια (wReference) προκειμένου να παράγει τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ, ανάλογα πάντα με τα δεδομένα της εισόδου. Η δεύτερη έξοδος (activePowerDemand) αναφέρεται στη ζήτηση για ηλεκτρική ισχύ που έχει την εκάστοτε στιγμή το ηλεκτρικό δίκτυο, προκειμένου να επιτύχει την επιθυμητή συχνότητα εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος, δηλαδή τα 60 Hz. Φυσικά, και οι δύο αυτές έξοδοι υπολογίζονται για κάθε μία τιμή που εισάγεται στον ελεγκτή ανά μονάδα χρόνου.

Να σημειωθεί πως η προσομοίωση γίνεται σε ένα σύστημα συνεχούς χρόνου, του οποίου όλα τα συστήματα επικοινωνούν μεταξύ τους και εμπεριέχουν υποσυστήματα κλειστού βρόχου με ανατροφοδοτήσεις. Για αυτό το λόγο, όλες οι δυναμικές μεταβλητές και τα αποτελέσματα υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο παρόλο που το διάστημα δειγματοληψίας των εισόδων που αναφέρθηκαν νωρίτερα είναι ορισμένο στα 60 sec.

Αναλυτικότερα, με βάση την Εικόνα 55 γίνεται περισσότερο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του ελεγκτή ισχύος της Α/Γ που μελετάται.



Εικόνα 55: Ελεγκτής Ισχύος Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

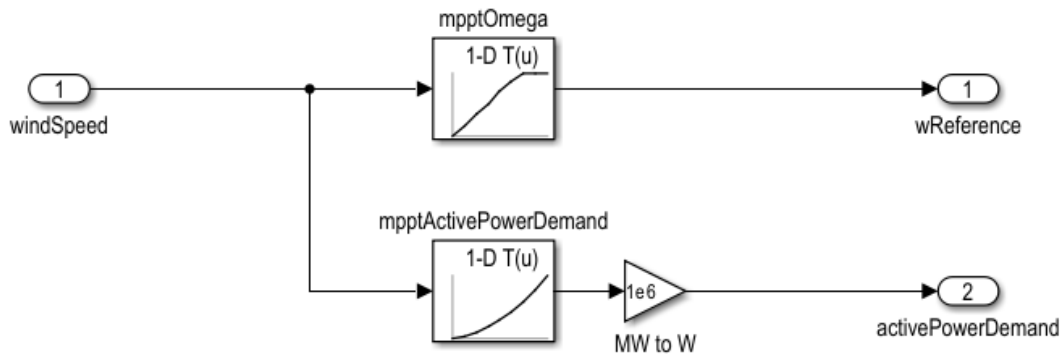
Αρχικά, εισάγεται στο σύστημα η ταχύτητα του ανέμου. Στη συνέχεια αν εκείνη είναι μικρότερη ή ίση της $u_{w,rated}$ εισάγεται στο υποσύστημα “MPPT Control” ενώ αν είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας αυτή εισάγεται στο υποσύστημα “Derating Control”. Πριν εξηγηθούν τα παραπάνω υποσυστήματα θα πρέπει να κατανοηθεί πως αυτά προφανώς δεν μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα και άρα οι ιδανικές στροφές τις ηλεκτρογεννήτριας ($wReference$) για τον αντίστοιχο άνεμο που εξάγονται από αυτά θα προέρχονται είτε από το ένα είτε από το άλλο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

Τέλος, τα υποσυστήματα αυτά καθορίζουν και τις καταστάσεις λειτουργίας της Α/Γ, καθώς ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν το Pitch Brake και τη ηλεκτρογεννήτρια. Η έξοδος λοιπόν πάντα θα είναι οι ιδανικές στροφές που θα πρέπει να έχει η ηλεκτρογεννήτρια ($wReference$) υπολογισμένες είτε μέσω του Derating είτε μέσω του MPPT control.

3.2.3.1 MPPT Control (Maximum Power Point Tracker)

Ο ρόλος του MPPT Controller είναι να αντιλαμβάνεται κάθε φορά για κάθε συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας ανέμου που λαμβάνει, την ταχύτητα με την οποία θα πρέπει η ηλεκτρογεννήτρια να κινηθεί έτσι ώστε να αποδώσει τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό εξάγεται και η μεταβλητή “ $wReference$ ” που αναφέρθηκε (σε rad/sec), αλλά και η αντίστοιχη ζήτηση της ηλεκτρικής ισχύος (σε Watt). Αν τελικά καταφέρει η ηλεκτρογεννήτρια να επιτύχει ή όχι την εκάστοτε ζητούμενη γωνιακή ταχύτητα δεν εξαρτάται πάντοτε από τις δικές της και μόνο ικανότητες, αλλά και από το προφίλ του ανέμου, το οποίο αν αλλάζει συχνά δυσκολεύει κατά πολύ τη διαδικασία που περιγράφηκε (Εικόνα 56).

Γενικότερα, οι τιμές που εξάγει ο ελεγκτής του MMPT είναι στην ουσία προκαθορισμένες βάσει των κατασκευαστικών και φυσικών χαρακτηριστικών τις εκάστοτε Α/Γ. Διατυπώνοντάς το διαφορετικά, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, αναμένεται η αντίστοιχη δεδομένη γωνιακή ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψιν τον συντελεστή ισχύος της (C_p).

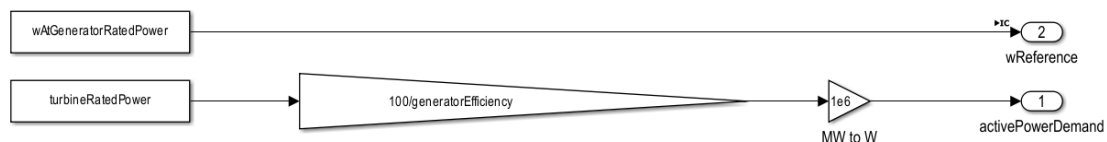


Εικόνα 56: Έλεγχος του MPPT μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

3.2.3.2 Derating Control

Ο ελεγκτής “Derating” ενεργοποιείται μονάχα όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την $u_{w,rated}$ (Εικόνα 57). Στην ουσία όταν η ταχύτητα φτάσει εκείνη την τιμή θα πρέπει η γωνιακή ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας να είναι μέγιστη, όπως ανάλογα μέγιστη θα πρέπει να είναι και η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται. Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί και προστατευτικά για όλα τα ηλεκτρονικά μέρη που έπονται της ηλεκτρογεννήτριας, καθώς ο άνεμος με το που φτάσει στην $u_{w,rated}$ δεν επιτρέπει στη ηλεκτρογεννήτρια να παράγει περισσότερο ρεύμα. Φυσικά, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω, όταν ο άνεμος ανέβει αρκετά απότομα, πολλές φορές ο έλεγχος του Derating δεν προλαβαίνει να επιβάλει στη ηλεκτρογεννήτρια να σταθεροποιήσει της στροφές τις με αποτέλεσμα η παραγωγή να ανεβαίνει στιγμιαία μέχρι το μέγιστο σημείο που μπορεί να διαχειριστεί ο μετατροπέας (transformer), δηλαδή σχεδόν τα 1.8MW, ο οποίος είναι σχεδιασμένος ώστε μπορεί να διαχειριστεί περιπτώσεις σαν και αυτή. Αντίστοιχα θέτει και το αντίστοιχο όριο ως προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία ξεπερνά κατά 10% την ονομαστική της, καθώς προφανώς λόγω των διάφορων απωλειών του συστήματος αν η τιμή αυτή ταυτιζόταν με την ονομαστική της, πιθανότατα δεν θα μπορούσε να τη φτάσει.

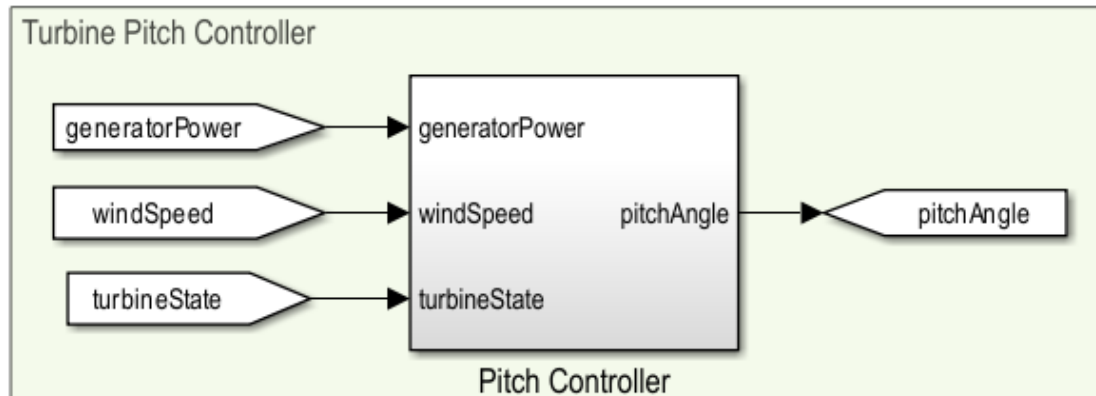
Θεωρητικά, βάσει και του C_p , η τρέχουσα ηλεκτρογεννήτρια έχει απόδοση 90%, άρα αυτό σημαίνει πως πετυχαίνει τη μέγιστη γωνιακή της ταχύτητα στα 13,2 m/s και όχι στα 12 που είναι η $u_{w,rated}$. Για αυτόν το λόγο, στον έλεγχο του Derating η ενέργεια που καλείτε να παραχθεί ώστε να διατηρηθεί είναι κατά 10% αυξημένη.



Εικόνα 57: Έλεγχος Derating μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

3.2.4 Σύστημα ελέγχου γωνίας συστροφής πτερυγίων Α/Γ (Wind turbine Pitch Controller subsystem)

Το σύστημα ελέγχου της συστροφής των πτερυγίων αποτελεί ένα όχι και τόσο περίπλοκο, σε σχέση με τα υπόλοιπα, υποσύστημα της Α/Γ, καθώς εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και τις καταστάσεις λειτουργίας της Α/Γ που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.2.2 (Εικόνα 58).



Εικόνα 58: Είσοδοι και έξοδοι του συστήματος ελέγχου συστροφής των πτερυγίων μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Ως εισόδους ο παραπάνω ελεγκτής έχει την παραγόμενη ισχύ της ηλεκτρογεννήτριας (generatorPower), την ταχύτητα του ανέμου (windspeed) και την κατάσταση λειτουργίας της Α/Γ (turbineState), ενώ προφανώς ως έξοδο αποδίδει τη γωνία συστροφής των πτερυγίων.

Για να κατανοηθούν περισσότερο οι ζώνες και τα διαστήματα λειτουργίας του συστήματος συστροφής των πτερυγίων της Α/Γ, δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 10).

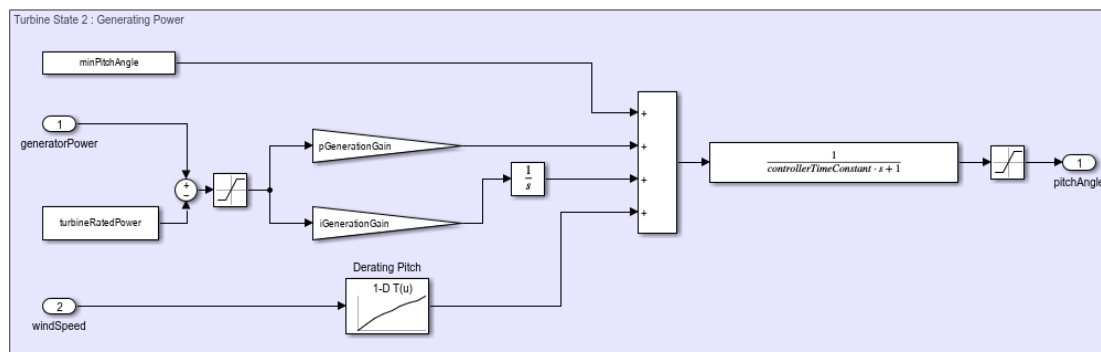
Λειτουργία ελεγκτή γωνίας συστροφής πτερυγίων - Wind turbine Pitch Control Subsystem				
Simulink®	State No. - Name			
Wind Turbine	0	1	2	3
Example	Park Brake	Startup	Generating	Pitch Brake
Δράση του Pitch Brake System	Η γωνία συστροφής των πτερυγίων της Α/Γ είναι 95°. Εφαρμόζεται αεροδυναμικό φρενάρισμα	Διατηρεί την ελάχιστη γωνία συστροφής των πτερυγίων μεταξύ, δηλαδή στη 1°, μέχρι η γεννήτρια να ξεκινήσει την παραγωγή ενέργειας και να μεταβεί στην κατάσταση λειτουργίας 2.	Εδώ σε συνεργασία με τον έλεγχο τόσο του MPPT όσο και του Derating, η γωνία συστροφής είτε διατηρείται στη 1° μέχρι ο άνεμος να φτάσει την $w_{w,rated}$ είτε αυξάνεται μέχρι τις 25°, όταν ο άνεμος την ξεπεράσει αντίστοιχα.	Η γωνία συστροφής των πτερυγίων της Α/Γ είναι 95°. Εφαρμόζεται αεροδυναμικό φρενάρισμα

Πίνακας 10: Απόκριση Pitch System ανάλογα με την κατάσταση λειτουργία της Α/Γ

Η ιδιαιτερότητα στα στοιχεία που παρουσιάζει ο Πίνακας 10 είναι ότι στην κατάσταση 1 (Startup) το Pitch control system διατηρεί τη γωνία συστροφής των πτερυγίων στη 1°, δηλαδή στην ελάχιστη δυνατή. Ο λόγος είναι ότι με τον τρόπο αυτό δεν αφήνει να αυξηθεί η αεροδυναμική αντίσταση που δημιουργεί ο άνεμος στα

περυγία της Α/Γ και έτσι βοηθά την Α/Γ να μεταβεί στην κατάσταση λειτουργίας 2 (Generating) και να ξεκινήσει η παραγωγή ενέργειας.

Αυτό όμως που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι εκείνο που συμβαίνει κατά την κατάσταση λειτουργίας 2 (Πίνακας 11)



Πίνακας 11: Wind Turbine Pitch Control στην κατάσταση λειτουργίας 2 μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Το παραπάνω μπορεί να χωριστεί σε δύο μικρότερες φάσεις λειτουργίας και πάλι ανάλογα με το αν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της $u_{w,rated}$.

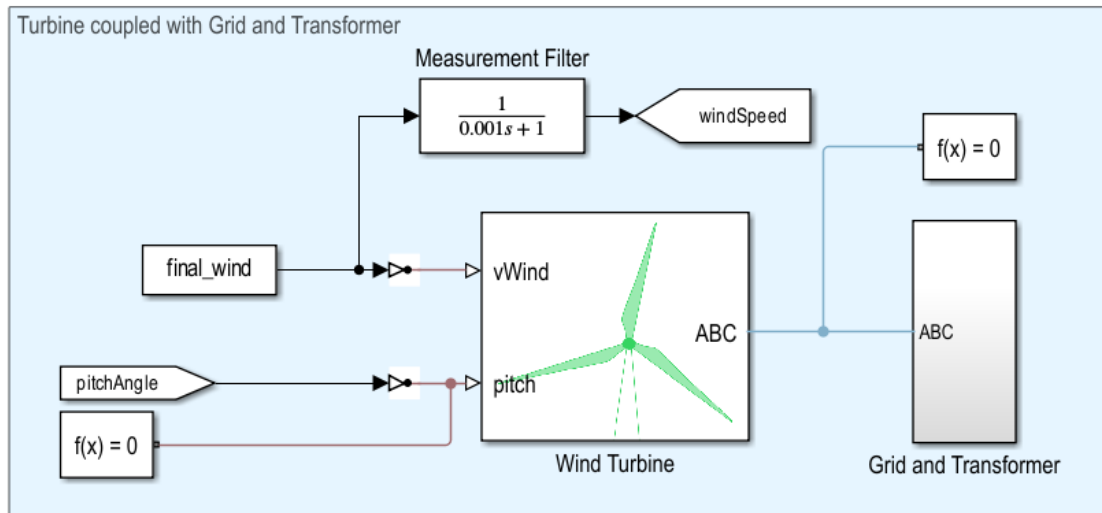
Στην περίπτωση κατά την οποία $u_w \leq u_{w,rated}$, η γωνία συστροφής των πτερυγίων διατηρείται στην ελάχιστη δυνατή, δηλαδή στη 1° . Αυτό υποδεικνύεται και από τον έλεγχο του MPPT, ο οποίος πραγματοποιείται ταυτόχρονα.

Αντίθετα, στην περίπτωση κατά την οποία $u_w > u_{w,rated}$, η γωνία συστροφής των πτερυγίων της Α/Γ κυμαίνεται από μεταξύ 1° και 25° , ανάλογα πάντα και με το έλεγχο του Derating το οποίο έχει προκαθορισμένες αντιστοιχίσεις μεταξύ ταχύτητας ανέμου και γωνίας συστροφής πτερυγίων.

3.2.4 Ηλεκτρογεννήτρια, Σύστημα κίνησης, μετατροπέας και ηλεκτρικό δίκτυο Α/Γ

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι βασικές λειτουργίες των κύριων υποσυστημάτων της Α/Γ που μελετάται, ξεκινώντας από την είσοδο, δηλαδή το μοντέλο ανέμου και καταλήγοντας στην έξοδο και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

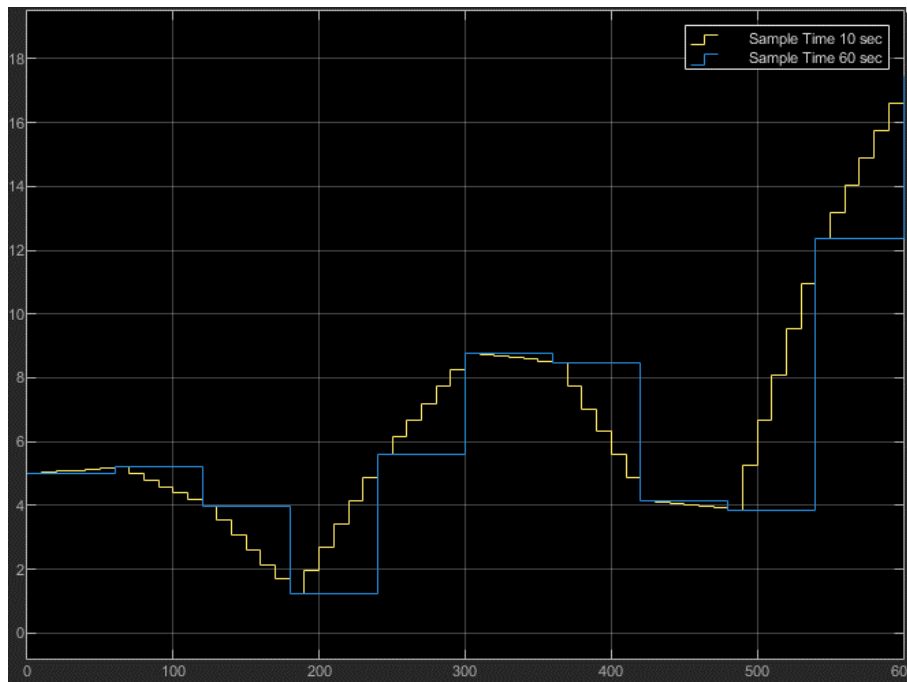
Στην φαίνεται το περιγραφόμενη συστάδα υποσυστημάτων, των οποίων η ανάλυση πραγματοποιείται στα επόμενα υποκεφάλαια.



Εικόνα 59: Συστάδα υποσυστημάτων Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

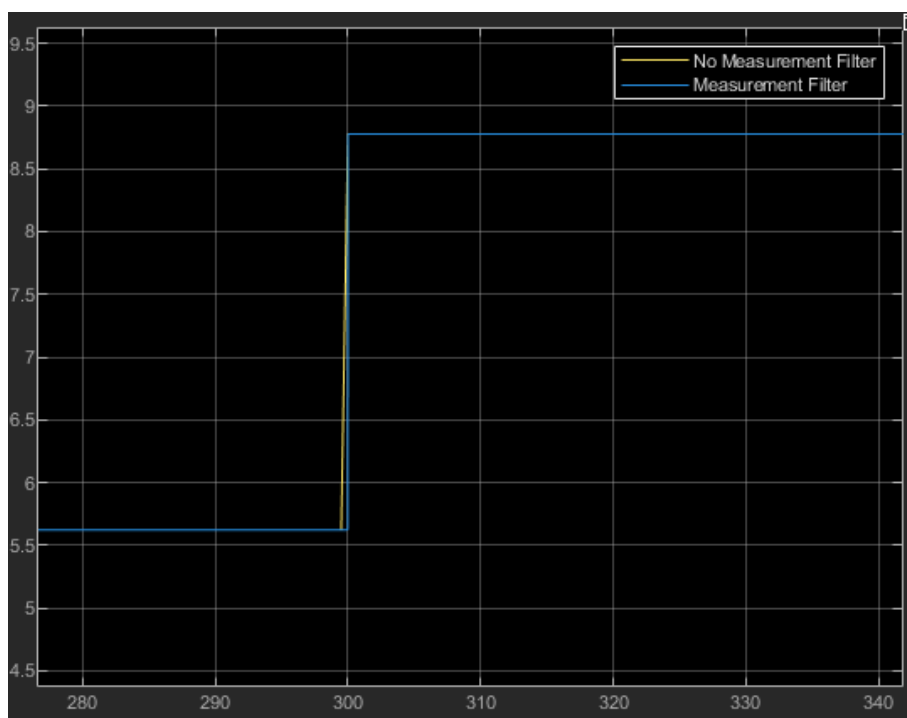
3.2.4.1 Είσοδος Α/Γ – Μοντέλο ανέμου

Η εξωτερική είσοδος της Α/Γ, δηλαδή το μοντέλο ανέμου, όπως αυτό παρουσιάστηκε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.1.2 αποτελείται από ένα αρχείο (.mat) με την τελική ταχύτητα ανέμου ανά 60 sec. με τις αντίστοιχες διακυμάνσεις. Με σκοπό την αύξηση της μεταβολής του ανέμου κατά το ελάχιστο δυνατό, το διάστημα δειγματοληψίας του αρχείου εισόδου της Α/Γ ορίζεται στα 10 sec. Στην ουσία αυτό που προστίθεται είναι ότι για παράδειγμα από την $t_0=0$ μέχρι την $t_1=60$ sec ο άνεμος μεταβαίνει από τη μία ταχύτητα στην άλλη πραγματοποιώντας ένα μικρό βήμα (step) ανά 10 sec αντί για ένα μεγάλο ανά 60 sec, χωρίς φυσικά οι δύο ακραίες τιμές να μεταβάλλονται. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ακόμα περισσότερο ρεαλιστικό το μοντέλο ανέμου (Εικόνα 60).



Εικόνα 60: Κατανομή ταχύτητας ανέμου με ίδιες ακραίες τιμές, αλλά με διάστημα δειγματοληψίας 10sec και 60sec αντίστοιχα

Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 59) χρησιμοποιείται μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού της μορφής : $A/(T * s + 1)$, ως φίλτρο μέτρησης, με $A=1$ και $T=0.001$ sec. Αυτό στην ουσία προσθέτει μία πολύ μικρή καθυστέρηση στο σήμα της ταχύτητας του ανέμου με αποτέλεσμα να το κάνει κατά ένα βαθμό περισσότερο γραμμικό κατά τη μετάβαση από τη μία τιμή στην άλλη, ανά 10 sec, όπως ακριβώς φαίνεται στην (Εικόνα 61). Στην προκειμένη περίπτωση αυτό δεν χρησιμοποιείται ως είσοδος στο μοντέλο, παρά μόνο για την αναπαράσταση των τιμών στο γράφημα μεταξύ ταχύτητας ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο που θα παρουσιαστεί παρακάτω.



Εικόνα 61: Μεγενθυμένη αναπαράσταση διαγράμματος ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το χρόνο με σκοπό την ανάδειξη της διαφοράς μεταξύ χρήσης και μη χρήσης φίλτρου

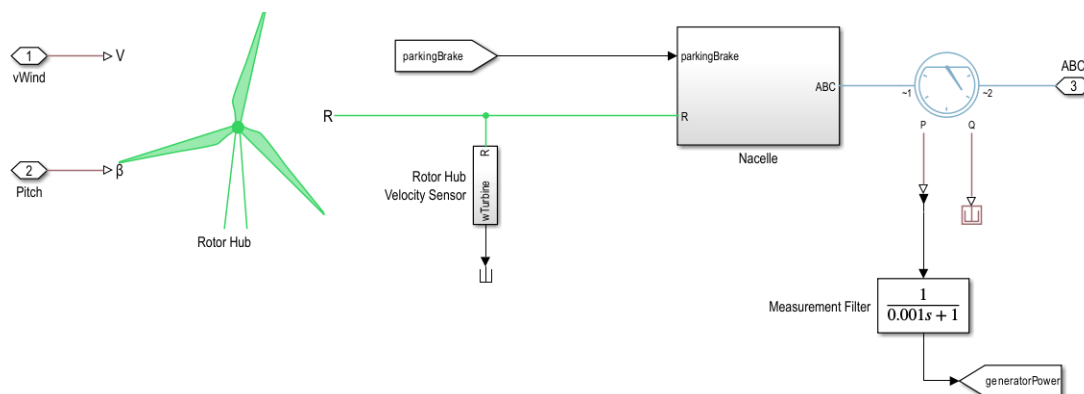
Η δευτερεύουσα είσοδος που προκύπτει από την κύρια είσοδο, δηλαδή την ταχύτητα του ανέμου, είναι η γωνία συστροφής των πτερυγίων της Α/Γ, η οποία προκύπτει με τρόπο που αναφέρθηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3.2.4.

Παρατηρείται πως μεταξύ των εισόδων και του Block “Wind Turbine” πως οι ενώσεις δεν είναι σήματα όμοια με προηγουμένως, αλλά μετατροπείς που μετατρέπουν τα σήματα του Simulink® (ένωση μαύρου χρώματος) που περιέχουν δεδομένα σε φυσικά σήματα, δηλαδή σήματα που παράγονται εξαιτίας κάποιας δραστηριότητας, όπως για παράδειγμα η ροπή που παράγεται κατά την περιστροφή των πτερυγίων της Α/Γ. Το block που το επιτυγχάνει αυτό είναι το “Simulink-PS Converter” (Εικόνα 59).

Επίσης, το πριν όσο και μετά το block “Wind turbine” τοποθετούνται τα blocks “Solver Configuration”, στα οποία αναγράφεται το “ $f(x) = 0$ ”. Το block αυτό καθορίζει τις ρυθμίσεις που θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση, βάσει των οποίων θα λυθούν οι διάφορες εξισώσεις του συστήματος (Εικόνα 59).

3.2.4.2 A/Γ – Wind Turbine Block

Το Wind Turbine Block (Εικόνα 62), όπως και όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα (subsystems) από το οποία απαρτίζεται, ανήκουν στη βιβλιοθήκη του Simulink®, Simscape®.



Εικόνα 62: Εσωτερικό (level 1) Wind turbine block

3.2.4.2.1 Wind Turbine: Rotor Hub Subsystem

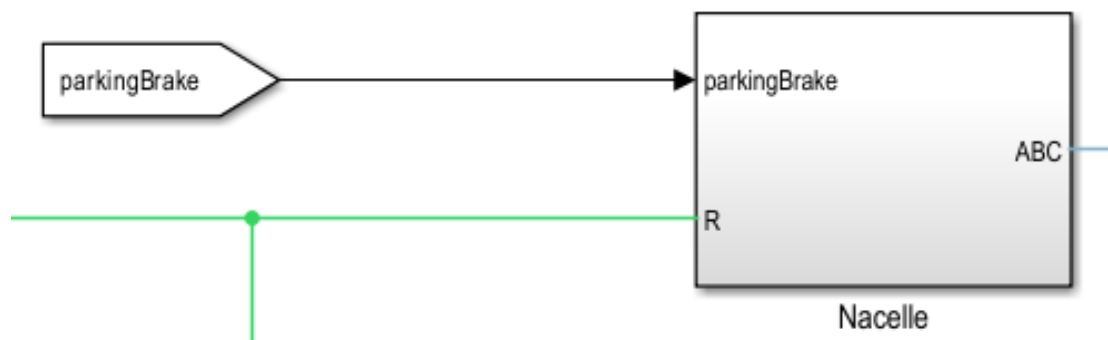
Το Block “Rotor Hub” στην ουσία αποτελεί το φυσικό σύστημα των πτερυγίων της A/Γ και του άξονα του ρότορά της. Ως εισόδους δέχεται την ταχύτητα του ανέμου και τη γωνία συστροφής των πτερυγίων, οι οποίες επεξηγήθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.2.4.1.

Οι παράμετροι του block αυτού, οι οποίοι είναι ρυθμισμένοι εσωτερικά, αφορούν το C_p σε συνάρτηση με τους λόγους TSR και τη γωνία συστροφής των πτερυγίων, τους λόγους TSR ανά ταχύτητα ανέμου, καθώς και το μήκος των πτερυγίων της A/Γ. Όλα τα προηγούμενα αφορούν δηλαδή προκαθορισμένα χαρακτηριστικά της A/Γ, τα οποία έχουν να κάνουν με την κατασκευή της. Επίσης, εισάγεται η ροπή αδράνειας του ρότορα ($3.963.845 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), καθώς και η πυκνότητα του αέρα στο ύψος του θαλάμου της A/Γ ($1,15 \text{ kg}/\text{m}^3$). Τέλος, καθορίζεται και η ευαισθησία των πτερυγίων της A/Γ ως προς την ταχύτητα ανέμου που είναι ίση με $0,01 \text{ m}/\text{sec}$ και γωνιακή ταχύτητα ίση με $0.01 \text{ rad}/\text{sec}$.

Συμπερασματικά, αφού ληφθούν οι είσοδοι που αναφέρθηκαν και περάσουν μέσα από το σύστημα πτερυγίων – ρότορα, εξάγεται η ροπή του άξονα του ρότορα, η οποία όπως γράφτηκε αποτελεί ένα φυσικό σήμα.

3.2.4.2.1 Wind Turbine: Nacelle

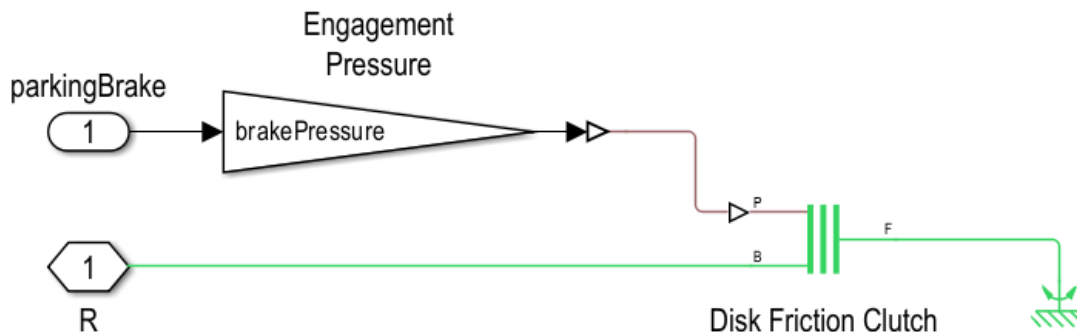
Στο θάλαμο (Nacelle) της Α/Γ εισέρχεται ο άξονας του ρότορα, ο οποίος εμπεριέχει το σύστημα του υδραυλικού φρεναρίσματος, το σύστημα κίνησης με το κιβώτιο ταχυτήτων και την ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG.



Εικόνα 63: Υποσύστημα θαλάμου (Nacelle) Α/Γ μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

3.2.4.2.1.1 Υδραυλικό σύστημα φρεναρίσματος

Το υδραυλικό σύστημα φρεναρίσματος (Εικόνα 64), πρόκειται για ένα σχετικά απλό υποσύστημα, καθώς η ενεργοποίησή του εξαρτάται αποκλειστικά από το αν η Α/Γ βρίσκεται ή όχι στην κατάσταση λειτουργίας 0 (Park Brake).

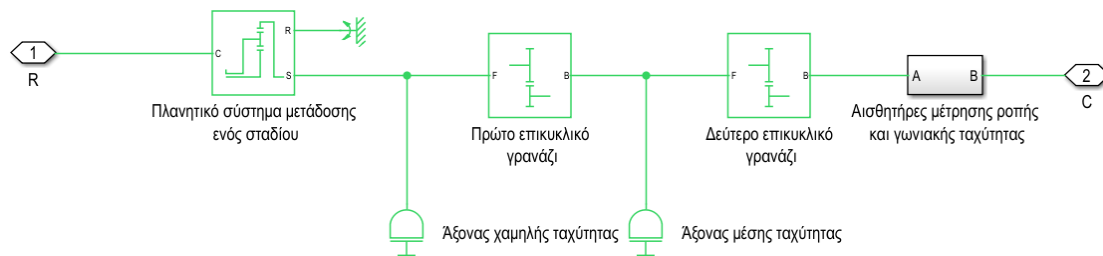


Εικόνα 64: Υδραυλικό σύστημα φρεναρίσματος μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

3.2.4.2.1.2 Σύστημα κίνησης και κιβώτιο ταχυτήτων – Drive Train and Gearbox




Το σύστημα κίνησης και πιο συγκεκριμένα το κιβώτιο ταχυτήτων της Α/Γ που εμπεριέχεται σε αυτό, αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής διατριβής.

Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση του υποσυστήματος αυτού. Στην (Εικόνα 65) παρουσιάζεται το κιβώτιο ταχυτήτων της Α/Γ του παραπάνω παραδείγματος μέσα από το περιβάλλον του Simulink®.



Εικόνα 65: Κιβώτιο ταχυτήτων A/G μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

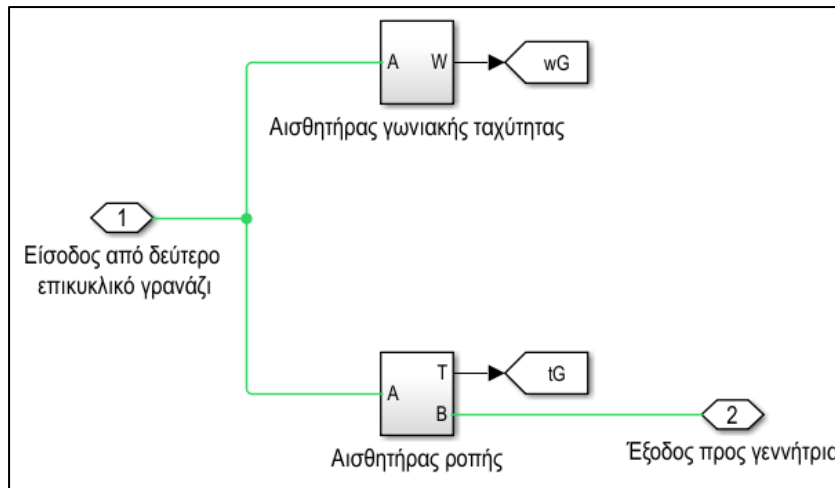
Αναλυτικότερα, ο (Πίνακας 12) παρουσιάζει τα Blocks που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω σύστημα. Σημειώνεται πως όλα τα Blocks που είναι σχετικά με φυσικά σήματα (πράσινο χρώμα) που προέρχονται από την ευρύτερη βιβλιοθήκη Simscape® και πιο συγκεκριμένα το πακέτο Driveline.

Ανάλυση μερών κιβωτίου ταχυτήτων A/G παραδείγματος Simulink®			
Υποσύστημα μετάδοσης Κίνησης	Ονομασία Block του Simulink®	Σχέση πολλαπλασιασμού (Gear Ratio)	Συνολική σχέση πολλαπλασιασμού (Total Gear Ratio)
	Planetary Gear	1:5	~ 1:46,5
	Simple Gear	1:3,05	
	Simple Gear	1:3,05	
Simulink® ~ Wind Turbine Exampe			

Πίνακας 12: Ανάλυση μερών κιβωτίου ταχυτήτων A/G

Όλα τα παραπάνω Blocks συμπεριφέρονται ως πολλαπλασιαστές των γωνιακών ταχυτήτων των αντίστοιχων αξόνων.

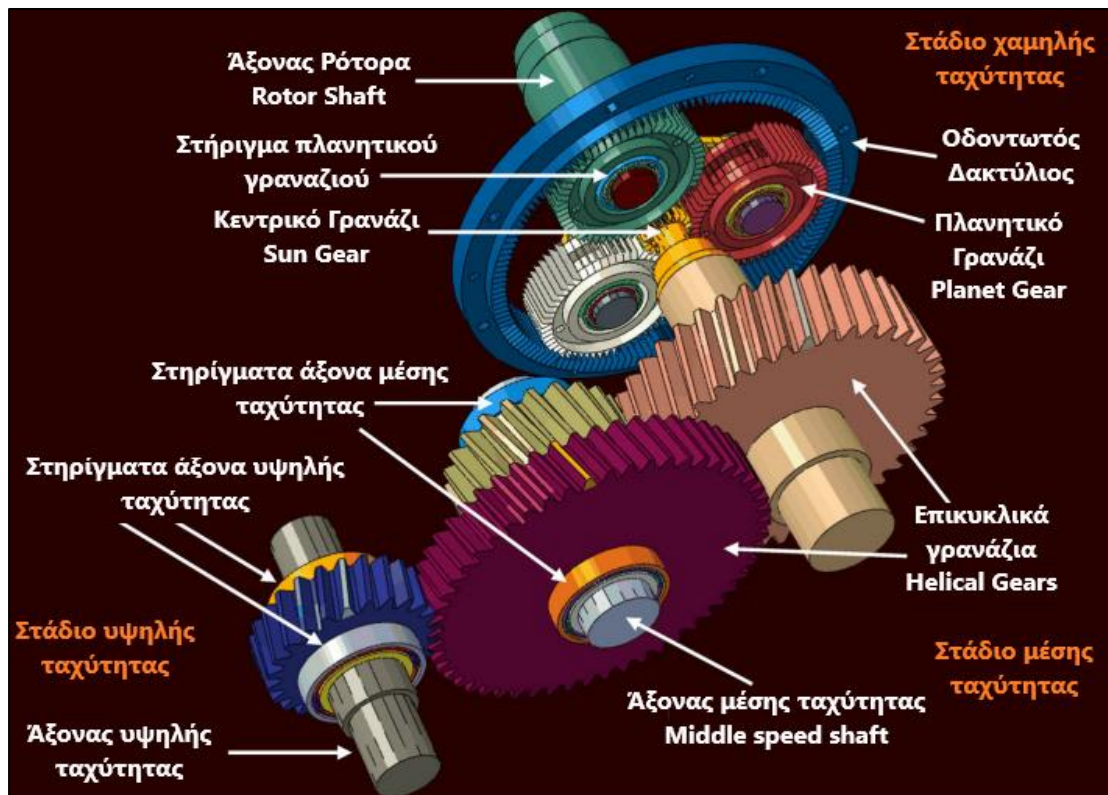
Ανάμεσα στο δεύτερο επικυκλικό γρανάζι και την έξοδο του συστήματος, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 65, είναι συστήματα μέτρησης γωνιακής ταχύτητας και ροπής που έχουν προστεθεί με σκοπό την καλύτερη κατανόηση, αλλά και παρακολούθηση της απόκρισης του άξονα υψηλής ταχύτητας που βρίσκεται αμέσως μετά το κιβώτιο ταχυτήτων, ο οποίο καταλήγει στην ηλεκτρογεννήτρια (Εικόνα 66).



Εικόνα 66: Σύστημα μετρήσεων γωνιακής ταχύτητας και ροπής άξονα ηλεκτρογεννήτριας μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Σημειώνεται πως δεν έχει πραγματοποιηθεί καμία τροποποίηση στις φυσικές παραμέτρους των αξόνων, των γραναζιών και των σχέσεων μετάδοσής τους.

Τέλος, άξια παρουσίασης είναι η οπτικοποίηση του συστήματος που αναπαριστά η (Εικόνα 65), καθώς με τον τρόπο αυτό γίνονται περισσότερο αντιληπτά και κατανοητά τα μέρη του παρόντος κιβωτίου ταχυτήτων (Εικόνα 67).

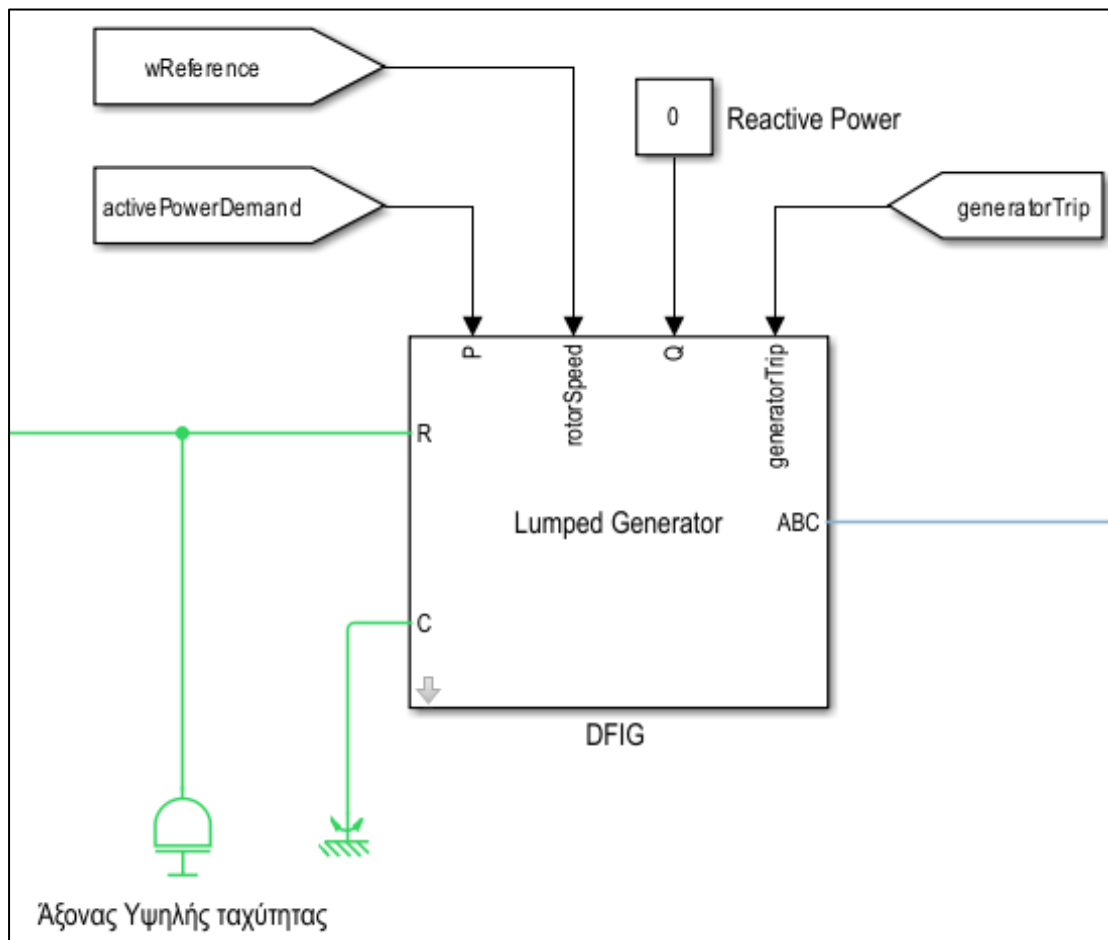


Εικόνα 67: Σχηματική απεικόνιση παρόμοιου κιβωτίου ταχυτήτων δεδομένης A/G [Grujicic, 2014]

3.2.4.2.1.3 Ηλεκτρογεννήτρια Α/Γ – DFIG Generator

Το παρόν υποσύστημα, η ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG, αποτελεί τον πυρήνα της Α/Γ καθώς όλα τα προηγούμενα δεδομένα που προκύπτουν από διεργασίες των υπόλοιπων υποσυστημάτων, συντελούν στην ορισμένη περιστροφική ενέργεια του άξονα υψηλής ταχύτητας που θα καταλήξει σε αυτήν.

Καθώς, το θέμα της τρέχουσας εργασίας δεν μελετά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί μία ηλεκτρογεννήτρια τύπου DFIG, σαν και αυτή του μοντέλου, θα αναλυθεί ο βασική αρχή λειτουργίας της βάσει των εισόδων και της εξόδου της (Εικόνα 68).



Εικόνα 68: Είσοδοι και έξοδοι της DFIG type generator μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Αρχικά, στη ηλεκτρογεννήτρια εισέρχεται ο άξονας υψηλής ταχύτητας, ο οποίος προέρχεται από το κιβώτιο ταχυτήτων της Α/Γ.

Επίσης, τα υπόλοιπα δεδομένα που απαιτούνται για την ορθή λειτουργία της είναι η δυναμική ζήτηση ισχύος (activePowerDemand), η ιδανική ταχύτητα (wReference) που θα πρέπει να έχει η ίδια ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου του MPPT και του Derating και τη μηδενική τιμή της άεργου ισχύος (Reactive Power) που της έχει προστεθεί.

Επισημαίνεται πως η άεργη ισχύς της ηλεκτρογεννήτριας αναφέρεται στην ισχύ που παράγεται, ώστε να δημιουργηθεί το μαγνητικό πεδίο μεταξύ του επαγωγέα (stator) και

του άξονα υψηλής ταχύτητας (Εικόνα 9). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η τιμή αυτή έχει επιλεγεί να είναι μηδενική, για λόγους απλοποίησης του βαθμού πολυπλοκότητας του μοντέλου, των εξισώσεων με το οποίο πραγματοποιεί τους υπολογισμούς, αλλά και για τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης.

Επιπροσθέτως, η λειτουργία της ηλεκτρογεννήτριας εξαρτάται προφανώς από την εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας της Α/Γ και πιο συγκεκριμένα από την παράμετρο “Generator Trip”, η οποία αν είναι ενεργοποιημένη η ηλεκτρογεννήτρια δεν παράγει, ενώ όταν είναι απενεργοποιημένη, η ηλεκτρογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Η παραπάνω διαδικασία και το έργο της ηλεκτρογεννήτριας ήταν να επιτύχει τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβλητής συχνότητας, σε ρεύμα συνεχούς τάσης (DC) και να το μεταβιβάσει στον μετατροπέα ο οποίος θα το μετατρέψει σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας (60 Hz).

3.2.4.3 Ηλεκτρικό δίκτυο (Grid and Transformer)

Το τελευταίο μέρος της Α/Γ είναι το σύστημα που λαμβάνει το συνεχές ρεύμα (DC) της ηλεκτρογεννήτριας και το μετατρέπει μέσω του μετατροπέα σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σταθερής πλέον συχνότητας, το οποίο καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.2.4.

Κεφάλαιο 4

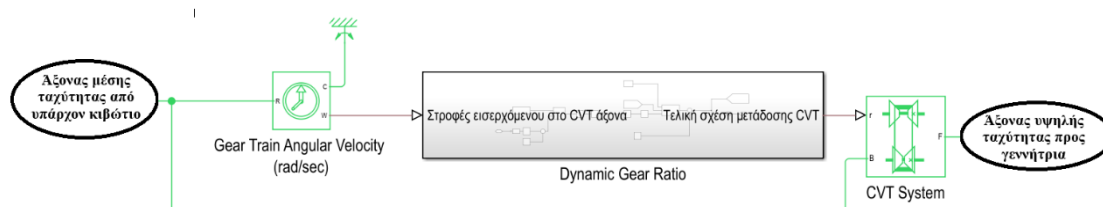
Εξομοίωση και προσθήκη συστήματος CVT στο υπάρχον μοντέλο Ανεμογεννήτριας του MATLAB/Simulink®

Το Κεφάλαιο αυτό έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη ενός μοντέλου, το οποίο θα εξομοιώνει τη χρήση ενός κιβωτίου ή συστήματος διαρκούς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης (CVT).

Το μοντέλο το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια, έχει προστεθεί στο ήδη υπάρχον μοντέλο της Α/Γ, του οποίου τα υποσυστήματα περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Βάσει βιβλιογραφίας, ένα κιβώτιο CVT δεν μπορεί να αναλάβει εξ' ολοκλήρου το ρόλο του κιβωτίου ταχυτήτων, λόγω των αυξημένων ροπών που θα δέχεται από τον άξονα του ρότορα. Επίσης, δεδομένης της σχετικά υψηλής ονομαστικής ισχύος της Α/Γ, αλλά και του μεγέθους των πτερυγίων της, αποφασίστηκε πως θα διατηρηθεί το κιβώτιο ταχυτήτων του υποκεφαλαίου 3.2.4.2.1.2 και να προστεθεί επιπλέον το κιβώτιο CVT, μαζί φυσικά με τον άξονά του.

Σημειώνεται πως για την δημιουργία του μοντέλου CVT (Εικόνα 69) με τη βοήθεια του MATLAB/Simulink® έχουν χρησιμοποιηθεί παρατηρήσεις που έγιναν τόσο βάσει της διπλωματικής διατριβής του Alkan [Alkan, 2012] όσο και της μελέτης ανάπτυξης και προσθήκης κιβωτίου CVT σε Α/Γ των Martens και Albers [Martens & Albers, 2003].



Εικόνα 69: Μοντέλο κιβωτίου CVT όπως αυτό δημιουργήθηκε μέσω του Simulink

4.1 Κατανόηση διαδικασίας ανάπτυξης μοντέλου κιβωτίου CVT

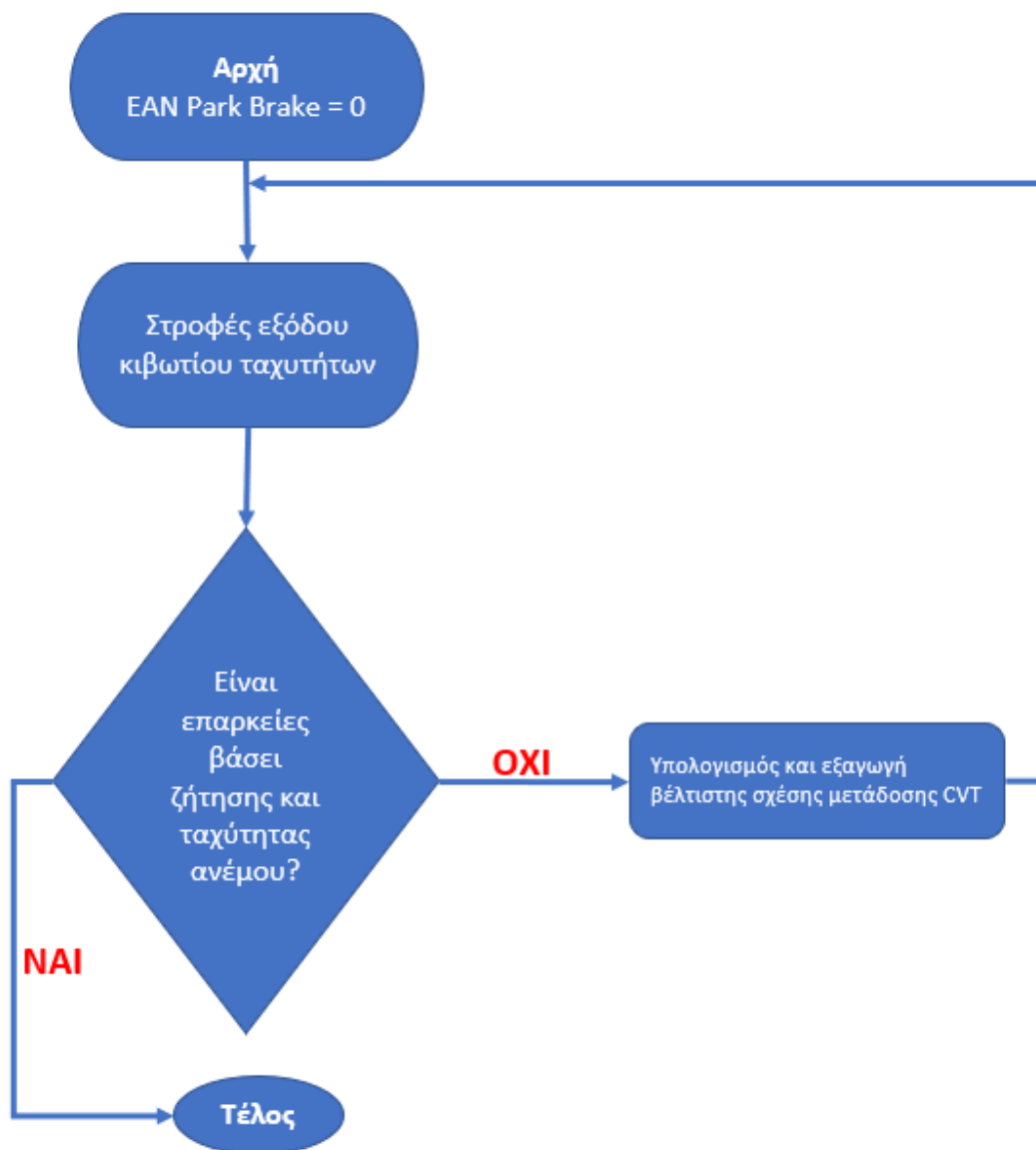
Σκοπός του κιβωτίου CVT είναι να διαβάσει τις στροφές που δέχεται από το ήδη υπάρχον κιβώτιο ταχυτήτων του υποκεφαλαίου 3.2.4.2.1.2 και να τη συγκρίνει με τις βέλτιστες που θα έπρεπε να είχε με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Διατυπώνοντάς το διαφορετικά, κάθε φορά, για κάθε μονάδα χρόνου, το CVT καλείται να υπολογίσει τη σχέση μετάδοσης που θα πρέπει το ίδιο να επιλέξει έτσι ώστε, βάσει εισόδου, αλλά και παραγόμενης ενέργειας να συμβάλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας της Α/Γ.

Επισημαίνεται πως η σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων που προηγείται του αντίστοιχου CVT είναι προκαθορισμένη και μάλιστα σταθερή στο περίπου 1:46,5. Το κιβώτιο CVT, όπως περιγράφεται διεξοδικά παρακάτω, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου και

παραγόμενη ενέργειας, μπορεί είτε να αυξήσει είτε να μειώσει την παραπάνω σχέση μετάδοσης.

Αυτή είναι η γενικότερη φιλοσοφία και καινοτομία των κιβωτίων CVT, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.8.2 με το Nu Vinci CVT, το ARCVT και το CCVT, όπου ανάλογα με την απαιτούμενη ροπή, η σχέση μεταξύ των τροχαλιών μπορεί να μεταβεί σε overdrive, underdrive και 1:1. Φυσικά αυτό που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι και η ζήτηση και η ανάγκη που έχει την εκάστοτε στιγμή το δίκτυο για παραγωγή ρεύματος, αλλά και η ικανότητα της ηλεκτρογεννήτριας να ανταποκριθεί στις δυναμικές εισόδους της.

Για να κατανοηθεί καλύτερα η χρήση του CVT πραγματοποιείται η παρουσίαση της αρχής λειτουργίας του στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Εικόνα 70). Τέλος, η παρακάτω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς, καθώς είναι ένας βρόχος επαναλήψης.

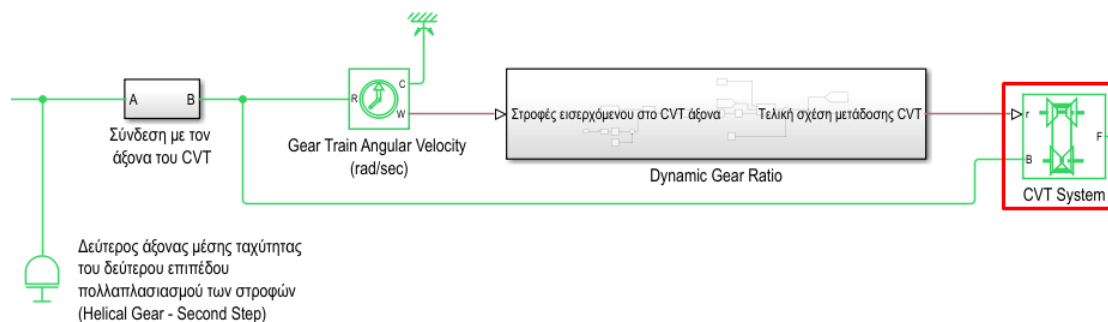


Εικόνα 70: Διάγραμμα ροής βασικής αρχής λειτουργίας κιβωτίου CVT

4.2 Ανάπτυξη μοντέλου κιβωτίου CVT στο Simulink®

Αρχικά, αυτό που διαφοροποιεί ένα απλό σύστημα πολλαπλασιασμού των εισαγόμενων σε αυτό στροφών (Simple Gear) με το κιβώτιο CVT είναι πως στην πρώτη περίπτωση πραγματοποιείται, αναλόγως τη σχέση, ένας συγκεκριμένος πολλαπλασιασμός, ενώ στη δεύτερη, η σχέση μετάδοσης εξαρτώμενη από τις εισαγόμενες στροφές αποδίδει μία δυναμικά τη σχέση μετάδοσής της.

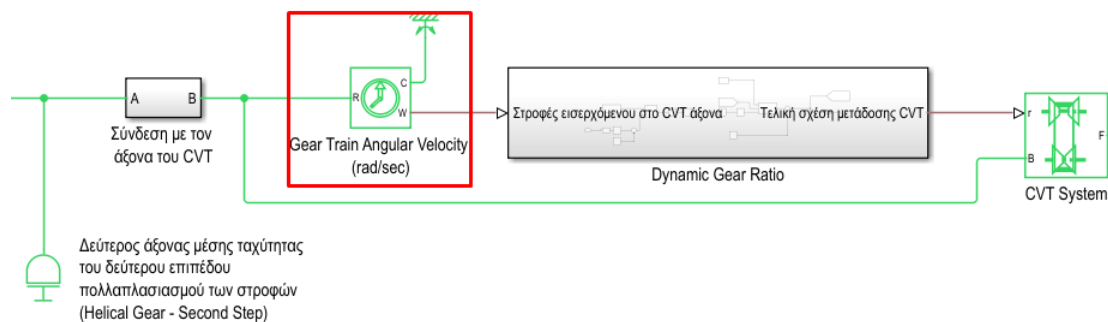
Η βιβλιοθήκη του Simulink®, Driveline, η οποία αναφέρθηκε και σε άλλα σημεία της εργασίας, περιέχει το Block το οποίο εξομοιώνει την απόκριση ενός κιβωτίου CVT. Γίνεται λόγος για το Block “Variable Gear Transmission”, το οποίο και διακρίνεται στην (Εικόνα 71).



Εικόνα 71: Variable Gear Transmission Block μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

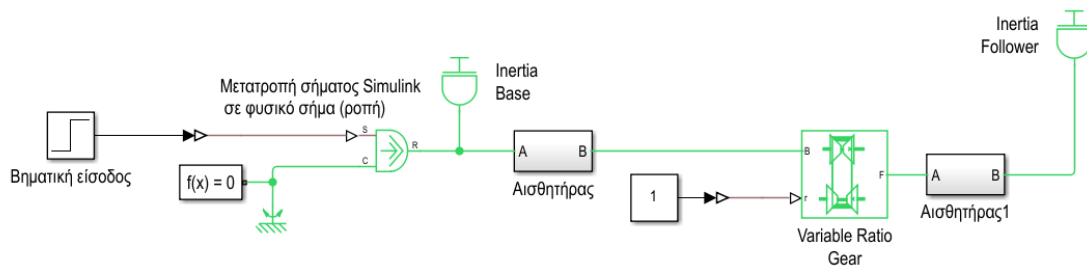
Το Block αυτό αρχικά αποτελεί τη συνέχεια του προηγούμενου κιβωτίου ταχυτήτων, μέσω του δεύτερου άξονα μέσης ταχύτητας που έχει προστεθεί. Η σύνδεση που πραγματοποιείται αφορά φυσικό σήμα, καθώς πρόκειται για περιστρεφόμενους άξονες που μεταφέρουν ροπή από την πύλη “B” μέσα σε αυτό.

Ταυτόχρονα, μέσω του Block “Ideal Rotational Motion Sensor” (Εικόνα 72) μετρείται η γωνιακή ταχύτητα του άξονα που προηγείται και που καταλήγει στο “CVT System” και εισάγεται στο subsystem “Dynamic Gear Ratio”.



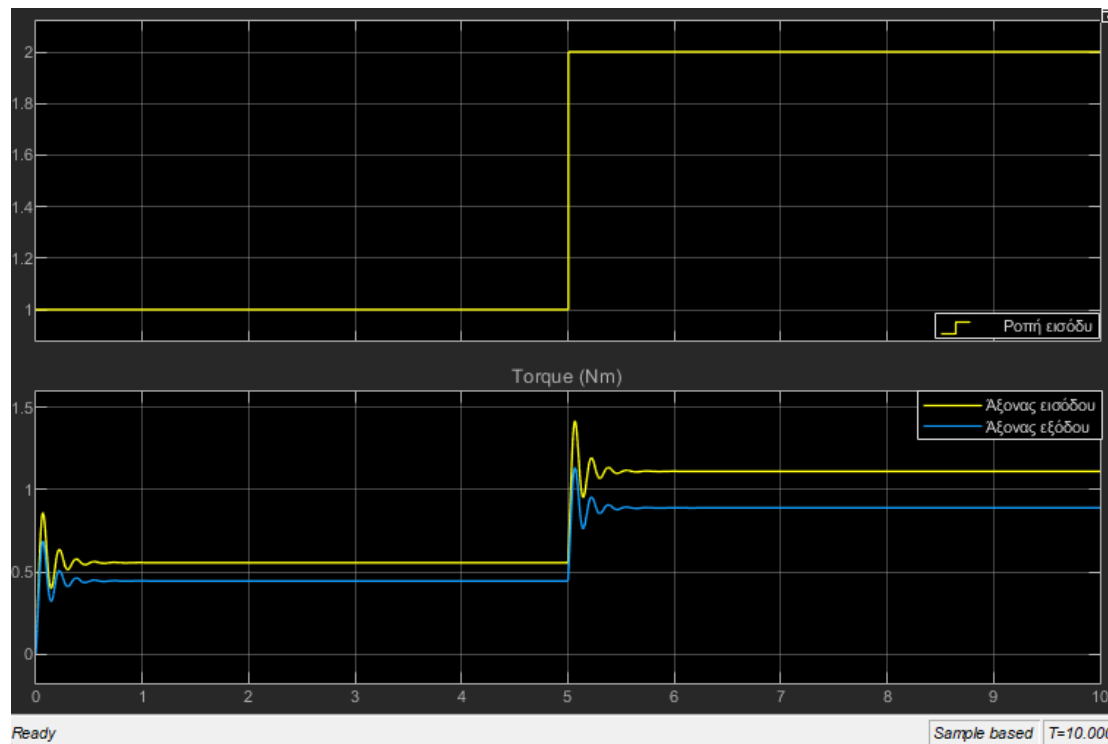
Εικόνα 72: Ideal Rotational Motion Sensor μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Πριν επεξηγηθεί το subsystem “Dynamic Gear Ratio”, θα παρουσιαστεί η λειτουργία του Block “Variable Gear Transmission”, δοκιμάζοντας την απόκρισή του σε βηματική είσοδο και με σταθερή σχέση 1:1 (Εικόνα 73).



Εικόνα 73: Δοκιμαστικό πρόγραμμα για ανάδειξη απόκρισης Variable Gear Transmission μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Στην (Εικόνα 74) παρουσιάζεται η απόκριση του Variable Gear Transmission σε βηματική είσοδο, όπου από τα 0 έως και τα 5sec παρέχει στο σύστημα ροπή ίση με 1 Nm και από τα 5 έως και τα 10sec, διπλασιάζει την είσοδό της. Επίσης, η σχέση (Ratio) που έχει το CVT είναι ορισμένη και ίση με 1, καθώς για τους λόγους της ξεχωριστής δοκιμής και ανάδειξης της απόκρισής του δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη ζήτηση. Τέλος, το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης είναι τα 10sec.

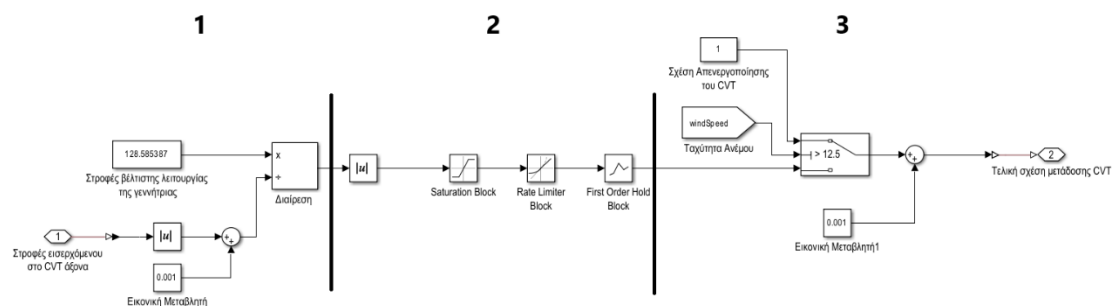


Εικόνα 74: Απόκριση μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 73

Αποδεικνύεται λοιπόν, πως όντως το Variable Gear Transmission δεν λειτουργεί ως ένας απλός πολλαπλασιαστής στροφών, όπως το Simple Gear, αλλά ως ένα σύστημα κλειστού βρόχου, το οποίο μάλιστα χρειάζεται χρόνο T για να καταφέρει και να σταθεροποιήσει την έξοδό του. Επιπροσθέτως, στο διάγραμμα της ροπής σε σχέση με το χρόνο παρατηρείται πως ακόμα και τη στιγμή που σταθεροποιείται η ροπή, εκείνη δεν φτάνει την τιμή της εισόδου της, λόγω των διάφορων απωλειών του συστήματος.

4.3 Ανάπτυξη μοντέλου δυναμικής σχέσης κιβωτίου CVT

Το στοιχείο και στη συγκεκριμένη περίπτωση το μοντέλο, το οποίο δίνει στο κιβώτιο CVT την ικανότητα να μεταβάλλει δυναμικά τη σχέση του, ανάλογα με την είσοδό του είναι το μοντέλο δυναμικής σχέσης μετάδοσης το Dynamic Gear Ratio ή αλλιώς CVT Ratio (Εικόνα 75).



Εικόνα 75: Ολοκληρωμένο μοντέλο δυναμικού υπολογισμού σχέσης μετάδοσης κιβωτίου CVT

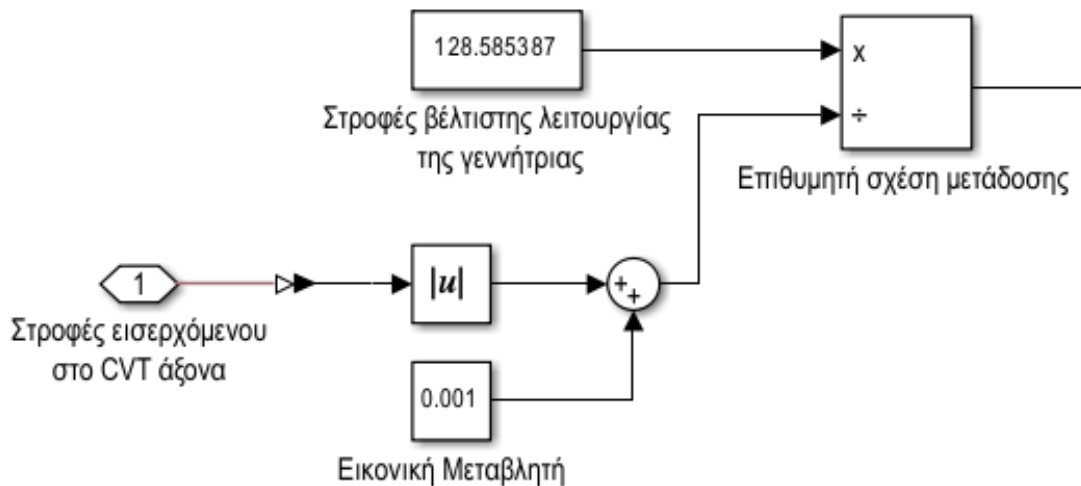
Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου που παρουσιάζει η (Εικόνα 75) προτιμήθηκε να εξηγηθεί το κάθε μέρος του σε ξεχωριστά υποκεφάλαια.

4.3.1 Βέλτιστη σχέση μετάδοσης κιβωτίου CVT

Σύμφωνα με τον Alkan, η βέλτιστη σχέση μετάδοσης ενός συστήματος σαν το CVT θα πρέπει να είναι τέτοια που να διατηρεί συνεχώς στο μέγιστο τη γωνιακή ταχύτητα του άξονα υψηλής ταχύτητας, για κάθε είσοδο που παίρνει. Αυτό προφανώς δεν μπορεί να συμβεί κατά απόλυτο βαθμό, λόγω των περιορισμών που διέπουν ένα τόσο περίπλοκο σύστημα, αλλά και των φυσικών χαρακτηριστικών του.

Παρόλα αυτά, το κιβώτιο CVT είναι ένα σύστημα, το οποίο μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της παραγωγικότητας της Α/Γ, διατηρώντας συχνότερα την ηλεκτρογεννήτρια σε παραγωγή και απορροφώντας μικρές και μεγάλες διακυμάνσεις (spikes) κατά τη λειτουργία της.

Στην Εικόνα 76 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το υπολογίζεται η βέλτιστη σχέση μετάδοσης [Alkan, 2012]



Εικόνα 76: Βέλτιστη σχέση μετάδοσης κίνησης μέσα από το περιβάλλον του Simulink

Αρχικά, στον επάνω κλάδο του μοντέλου, διακρίνονται οι στροφές βέλτιστης λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας.

Στον κάτω κλάδο, εισάγονται ανά μονάδα χρόνου, δυναμικά, οι στροφές του εισερχόμενου στο CVT άξονα, από τις οποίες λαμβάνεται η απόλυτη τιμή τους, καθώς το πρόσημο δηλώνει απλώς τη φορά περιστροφής του άξονα, η οποία και είναι αδιάφορη της συνολικής διεργασίας. Επίσης, στις στροφές αυτές έχει προστεθεί μία εικονική μεταβλητή (dummy variable), της οποίας ο ρόλος είναι να αποτρέψει τη διαίρεση με το μηδέν όταν ο άξονας είναι ακίνητος.

Τέλος, ο πρώτος κλάδος διαιρείται με τον δεύτερο και προκύπτει η βέλτιστη σχέση μετάδοσης ανά μονάδα χρόνου.

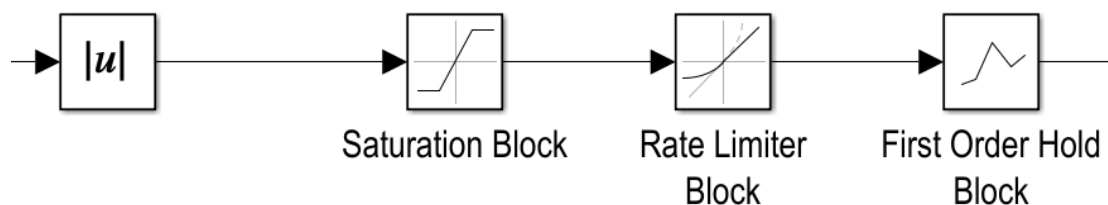
4.3.2 Οριοθέτηση βέλτιστης σχέσης μετάδοσης CVT

Το πρόβλημα που προκαλεί ο παραπάνω υπολογισμός της σχέσης μετάδοσης του CVT είναι πως για παράδειγμα όταν η ταχύτητα του άξονα περιστροφής είναι στα 25 rad/sec, κάνοντας τη διαίρεση με τις βέλτιστες στροφές τις ηλεκτρογεννήτριας, δηλαδή τα περίπου 128 rad/sec η σχέση μετάδοσης που θα προέκυπτε θα ισούταν με 8,5. Αυτό θα σήμαινε πως αν λαμβανόταν υπόψιν η σχέση πολλαπλασιασμού που ήδη είχε το συμβατικό κιβώτιο ταχυτήτων, ο πολλαπλασιασμός που θα γινόταν θα έριχνε το σύστημα σε αστάθεια, βγάζοντας λανθασμένα αποτελέσματα.

Για το λόγο αυτό, και σύμφωνα με τη μελέτη των Martens και Albers [Martens & Albers, 2003] και τη μελέτη τους “Wind Turbine Study”: Investigation into CVT application in wind turbines”, υπολογίστηκε πως για τη συγκεκριμένη εφαρμογή η οριοθέτηση της δυναμικής σχέσης του CVT μεταξύ του 0,505 και 2,17 θα περιόριζε το παραπάνω πρόβλημα. Ο λόγος είναι πως έτσι θα έχει τη δυνατότητα να μεταβαίνει ανάλογα με τις απαιτήσεις σε σχέσεις underdrive, 1:1 και overdrive μεταξύ της πρώτης και τη δεύτερης τροχαλίας του, χωρίς όμως να αυξάνει τη σχέση του τόσο πολύ

περισσότερο. Έτσι λοιπόν, ο τρόπος εύρεσης της βέλτιστης σχέσης μετάδοσης διατηρείται, αλλά προσαρμόζεται στο εύρος αυτό.

Επισημαίνεται, πως το παραπάνω εύρος δεν ισχύει γενικά για τις σχέσεις των κιβωτίων CVT, αλλά στο συγκεκριμένο κιβώτιο που μελετήθηκε και μοντελοποιήθηκε από τους Martens και Albers και το οποίο, όπως αναφέρθηκε προορίζεται για χρήση σε Α/Γ. (Εικόνα 77).



Εικόνα 77: Οριοθέτηση και αναδιαμόρφωση βέλτιστης σχέσης μετάδοσης στο εύρος 0.505 - 2.17 μέσα από το περιβάλλον του Simulink®

Αναλυτικότερα, αφού ληφθεί η βέλτιστη σχέση μετάδοσης για τις δεδομένες απαιτήσεις του συστήματος, το σήμα διασφαλίζεται πως έχει θετικό πρόσημο, καθώς απαιτείται μόνο το μέτρο του.

Στη συνέχεια, περνώντας το σήμα μέσα από ένα Saturation Block, η τιμή του προσαρμόζεται και επανακαθορίζεται μεταξύ 0,505 και 2,17. Για παράδειγμα, αν η βέλτιστη σχέση είναι εξ' αρχής μέσα σε αυτό το εύρος τότε οι δύο τιμές ταυτίζονται. Σε διαφορετική περίπτωση, η σχέση αναπροσαρμόζεται βάσει του εύρους.

Έπειτα, η τελική σχέση περνά και από το Rate Limiter Block το οποίο είναι υπεύθυνο για την οριοθέτηση του ρυθμού αύξησης ή μείωσης της εισόδου του, δηλαδή της παραγώγου ή της κλίσης της. Πιο συγκεκριμένα, το block αυτό έχει ρυθμιστεί να οριοθετεί τις λαμβανόμενες τιμές που σχηματίζουν κλίσεις με τις προηγούμενες τιμές όχι κάτω του -30% και όχι παραπάνω του 30% τους.

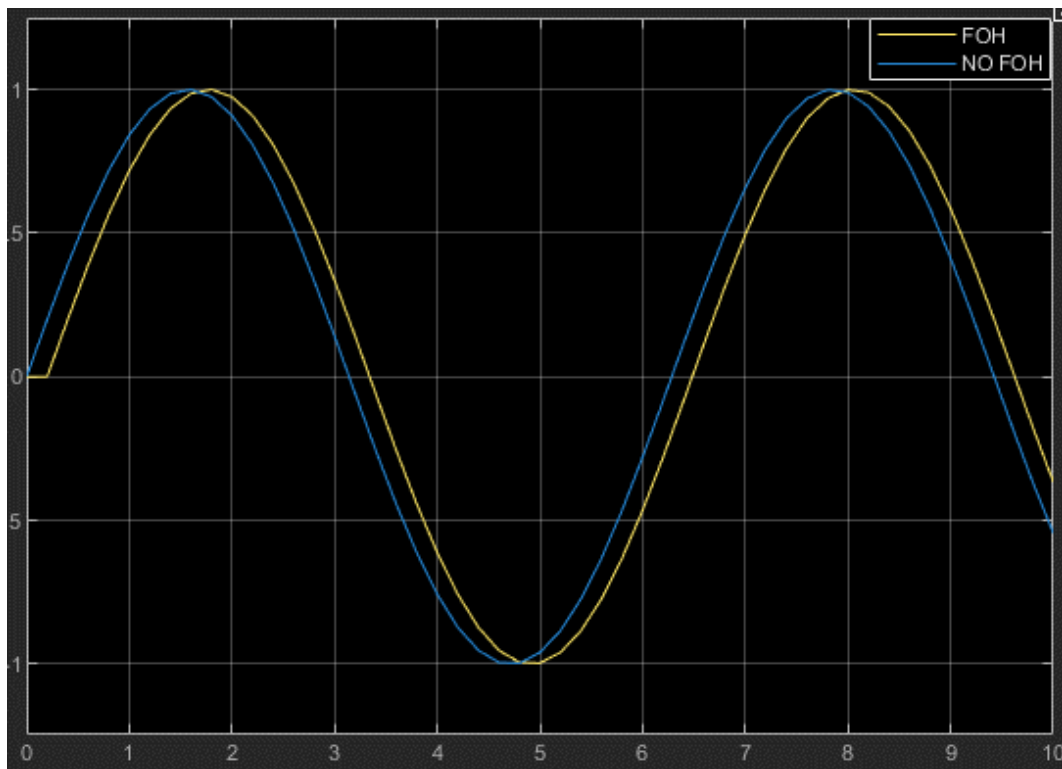
Τέλος, αφού το σήμα έχει φτάσει σε αυτό το σημείο, προκύπτει η ανάγκη φιλτραρίσμάτος του, ώστε το Variable Gear Transmission να λειτουργήσει κατά τρόπο περισσότερο ορθό.

Για αυτόν το λόγο εισάγεται το block “First order Hold (FOH)”, το οποίο ανακατασκευάζει το συνεχές σήμα εισόδου και προσθέτει σε αυτό μία μικρή καθυστέρηση της τάξης των εκατοστών του δευτερολέπτου. Με τον τρόπο αυτό δίνεται περισσότερος χρόνος στο Variable Gear Transmission να σταθεροποιήσει την εκάστοτε σχέση του, καθώς η κάθε μία από τις σχέσεις θα διατηρείται για λίγο περισσότερο χρόνο από ότι θα διατηρούταν αν δεν υπήρχε η καθυστέρηση αυτή. Αν λοιπόν η καθυστέρηση δεν υπήρχε, το Variable Gear Ratio θα είχε περισσότερες και συχνότερες διακυμάνσεις, γεγονός που θα επηρέαζε και την απόδοσή του.

Με τον τρόπο αυτό, όπως θα παρουσιαστεί και κατά τις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 5, το κιβώτιο CVT θα έχει απόκριση όμοια με εκείνη που φαίνεται στην Εικόνα 73.

Τέλος, το συγκεκριμένο Block έχει ρυθμιστεί εσωτερικά να δέχεται δεδομένα συνεχούς χρόνου (Allow continuous inputs) και ουσιαστικά, όπως αναφέρθηκε προσθέτει μία μικρή καθυστέρηση μεταξύ σήματος εισόδου και εξόδου.

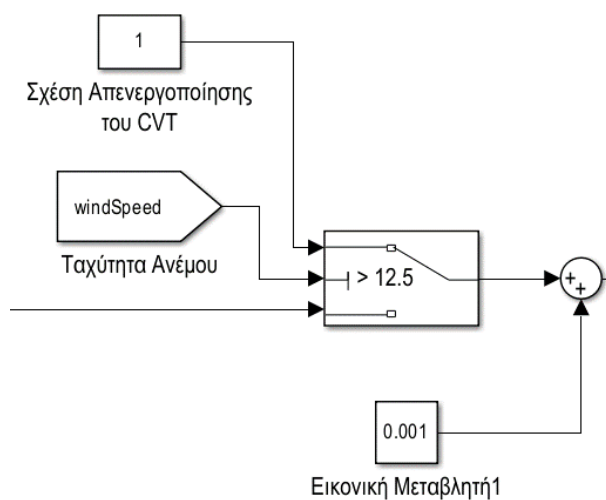
Στην Εικόνα 78 διακρίνεται το πως λειτουργεί το Block “First order hold” (FOH) πάνω σε μία ημιτονοειδή συνάρτηση (NO FOH).



Εικόνα 78: Επίδραση Block First Order Hold σε μία ημιτονοειδή συνάρτηση

4.3.3 Προσθήκη περιορισμού χρήσης του κιβωτίου CVT και εξαγωγή τελικών στροφών

Το τελευταίο μέρος του κιβωτίου CVT αποτελεί η συνθήκη που του απενεργοποιεί, δηλαδή επαναφέρει τη σχέση μετάδοσης σε αυτή που ήταν χωρίς αυτό, δηλαδή 1. Αυτό έχει ρυθμιστεί να συμβαίνει λίγο πάνω από την $u_{w, rated}$, όταν και η δυναμική σχέση του CVT που δημιουργήθηκε παραπάνω, έτεινε στην σχέση αυτή (Εικόνα 79).



Εικόνα 79: Μηχανισμός απενεργοποίησης του κιβωτίου CVT μόλις η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει τα 12,5m/s

Έχει προστεθεί και μία ακόμα εικονική μεταβλητή, ώστε να αποτραπεί ο μηδενισμός του Dynamic Gear Ratio, όταν ο άξονας εισόδου δεν κινείται.

Τέλος, με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται δυναμικά η σχέση του κιβωτίου CVT και εξάγεται η αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα από αυτό στον άξονα υψηλής ταχύτητας, δηλαδή στην ηλεκτρογεννήτρια.

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση μοντέλων A/Γ μέσω του Simulink®, παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων

Στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής διατριβής πραγματοποιείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων δώδεκα προσομοιώσεων των δέκα λεπτών (600 sec), τόσο του μοντέλου της τρέχουσας A/Γ όσο και του του μοντέλου της A/Γ αυτής με την προσθήκη του κιβωρίου του CVT μέσω του Simulink®.

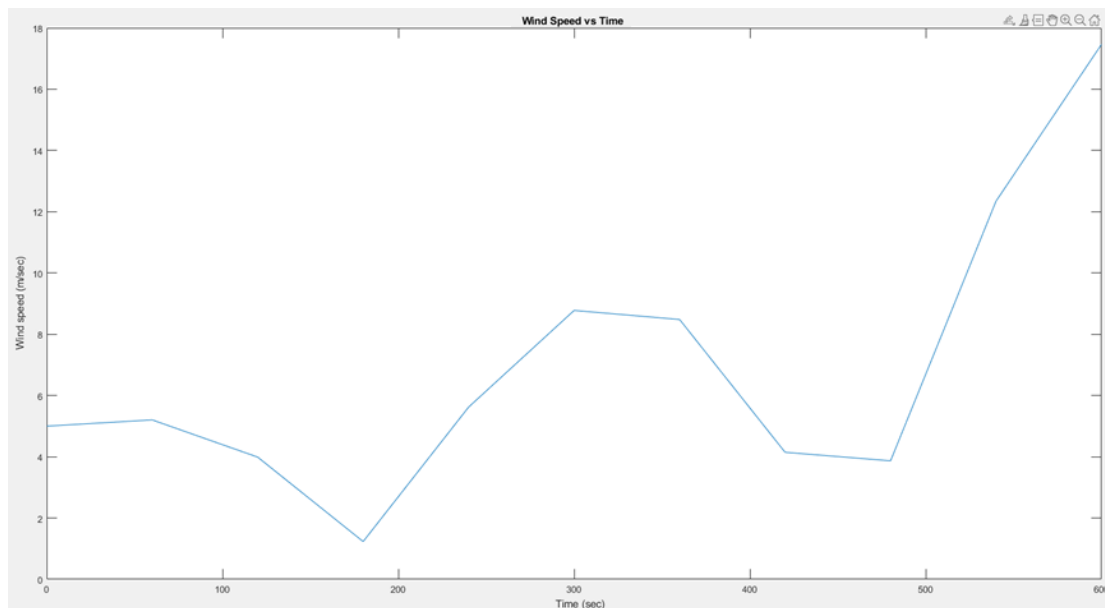
Αρχικά, κάθε ένα από τα υποκεφάλαια 5.1 έως και 5.12, θα αφορούν την προσομοίωση των παραπάνω μοντέλων υπό διαφορετικό σενάριο ανέμου, ενώ στη συνέχεια θα καταγράφονται οι αντίστοιχες παρατηρήσεις και τα επιμέρους συμπεράσματα που θα προκύπτουν.

Στο υποκεφάλαιο 5.13, θα παρουσιαστούν τα τελικά και συγκεντρωτικά συμπεράσματα για το βαθμό χρησιμότητας της προσθήκης ενός κιβωτίου CVT σε ήδη υπάρχουσες A/Γ με χαρακτηριστικά όμοια της υπάρχουσας.

Στο υποκεφάλαιο 5.14, το οποίο θα αποτελέσει και το τελευταίο, θα αναφερθούν οι διάφοροι περιορισμοί στη χρήση ενός κιβωτίου CVT, βάσει των συμπερασμάτων που θα έχουν αναφερθεί, αλλά και τρόποι ενδεχόμενης περεταίρω βελτίωσης της απόδοσής του.

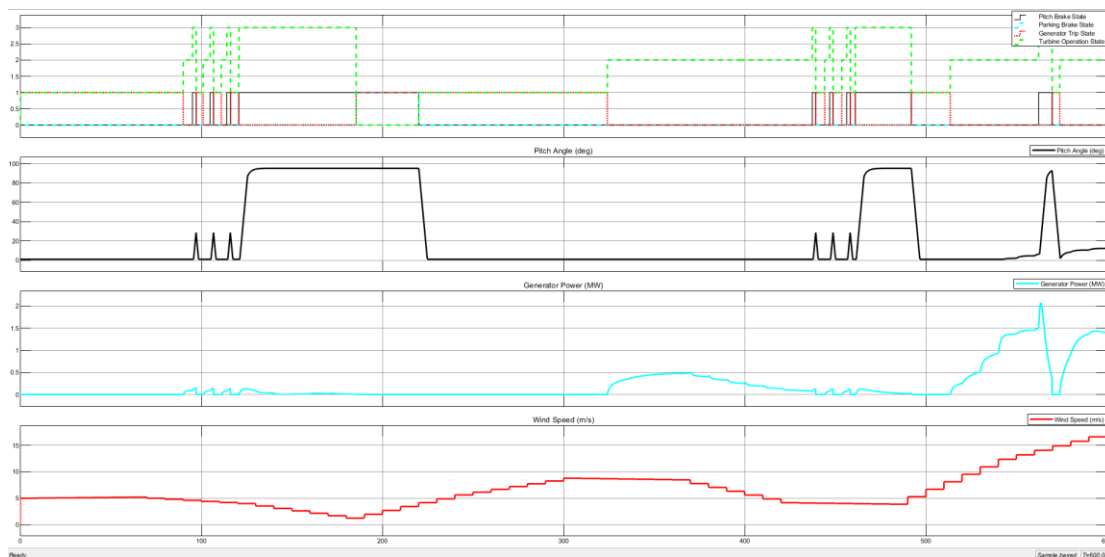
Από εδώ και στο εξής το μοντέλο A/Γ χωρίς CVT θα αναφέρεται ως Μοντέλο Α, ενώ το μοντέλο της A/Γ με CVT, ως Μοντέλο Β. Μάλιστα θα προστίθεται και ένας αριθμός δίπλα από τον τύπου του μοντέλου, ο οποίος θα υποδηλώνει τον εκάστοτε αριθμό σεναρίου ανέμου στον οποίο δοκιμάστηκε το εκάστοτε μοντέλο. Για παράδειγμα, το Μοντέλο B5 αναφέρεται στην προσομοίωση του Μοντέλου Β, δηλαδή του μοντέλου A/Γ με CVT υπό το 5^ο σενάριο ανέμου.

5.1 Σενάριο ανέμου 1^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

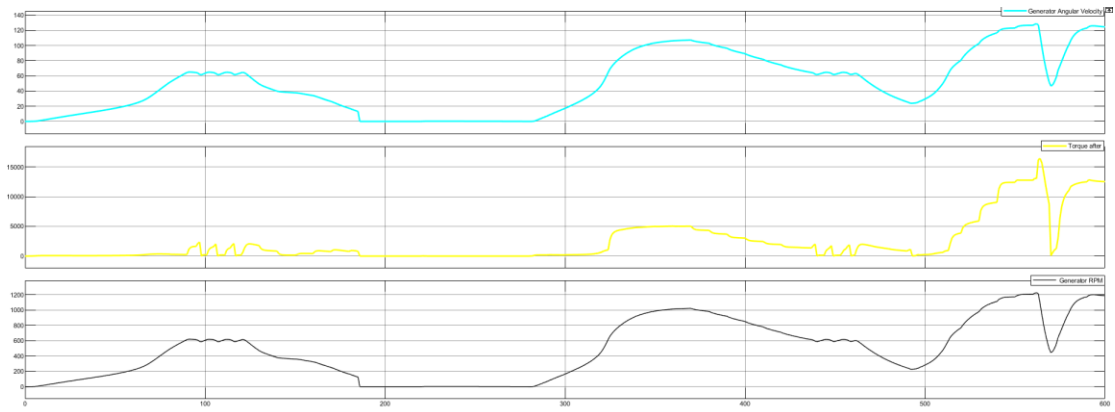


Διάγραμμα 1: 1^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ταχύτητας του ανέμου (wind speed) σε σχέση με το χρόνο (Time) μέσα από το υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB® και αποτελεί το πρώτο σενάριο ανέμου. Στη συνέχεια, το παραπάνω σενάριο ανέμου εισάγεται, όπως ακριβώς παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.4.1 στο μοντέλο εξομοίωσης της Α/Γ στο Simulink®. Στο σημείο αυτό ξεκινά η προσομοίωση των 600 sec του Μοντέλου Α (Διάγραμμα 2 και Διάγραμμα 3).

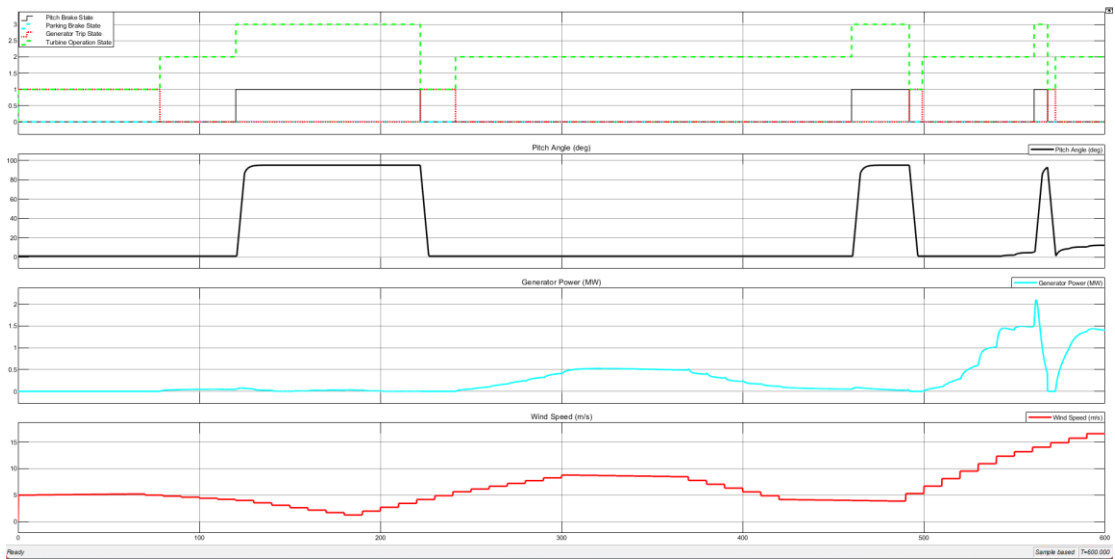


Διάγραμμα 2: Model A1: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time

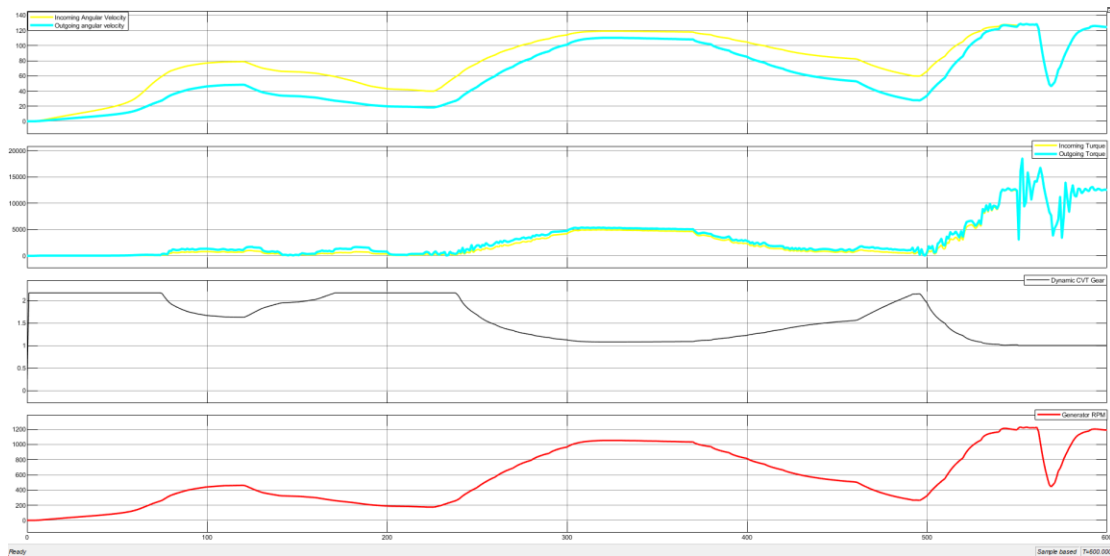


Διάγραμμα 3: Model A1: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για το μοντέλο B1, για το οποίο όμως μπορούν να εξαχθούν και άλλες πληροφορίες, όπως το πως μεταβάλλεται η σχέση του κιβωτίου του CVT σε σχέση με το χρόνο, αλλά και το πως αυτό μεταφράζεται σε αλλαγές στα μέτρα των γωνιακών ταχυτήτων και των ροπών των αξόνων πριν και μετά το CVT αντίστοιχα (Διάγραμμα 4 και Διάγραμμα 5).

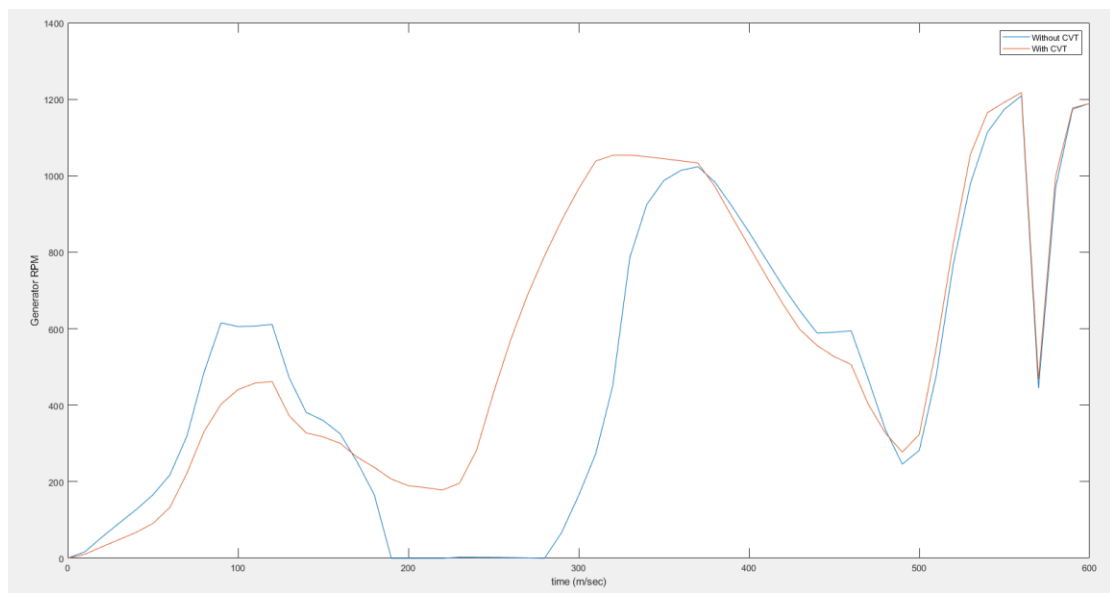


Διάγραμμα 4: Model B1: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



Διάγραμμα 5: Model B1: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζονται οι γωνιακές ταχύτητες των γρήγορων αξόνων ανά μοντέλο Α/Γ, έτσι ώστε να γίνουν περισσότερο ευδιάκριτες οι μεταξύ τους διαφορές.



Διάγραμμα 6: High speed shaft angular for Wind Turbine model 1 without and with CVT

Ο Πίνακας 13 παρουσιάζει την ηλεκτρική ισχύ (Energy yield) μετρούμενη σε MW που παράχθηκε ανά μοντέλο Α/Γ κατά το διάστημα των 600 sec.

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο Α - Α/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο Β - Α/Γ με CVT	Διαφορά
1	124	157	26,60%

Πίνακας 13: Energy Yield πρώτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ

Αρχικά, στο πρώτο σενάριο ανέμου και με βάση το Διάγραμμα 1 ξεκινά με u_w λίγο μεγαλύτερης της $u_{w,cut-in}$. Στη συνέχεια η u_w παρουσιάζοντας ένα μεγάλο ρυθμό

αύξησης φτάνει σχεδόν στα 10 m/s, ενώ στη συνέχεια ξαναπέφτει κάτω από την $u_{w,cut-in}$ και τελικά ανεβαίνει μέχρι και πάνω από την $u_{w,cut-out}$. Έτσι λοιπόν το σενάριο αυτό εμπλέκει και τις τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας της Α/Γ.

Κατά την προσομοίωση του Μοντέλου Α1 και σύμφωνα με το Διάγραμμα 2, παρατηρείται πως στο χρονικό διάστημα $t = [90,130]$ sec, τείνει να ενεργοποιηθεί το Pitch Brake με το που πέσει η ταχύτητα του ανέμου κάτω από την $u_{w,cut-in}$ με αποτέλεσμα να προκληθούν αυτές οι διακυμάνσεις (spikes), οι οποίες όπως φαίνεται είχαν αντίκτυπο και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και κατά το χρονικό διάστημα $t = [410,490]$ sec, κατά το οποίο η u_w πέφτει για πολύ λιγότερο χρόνο κάτω της $u_{w,cut-in}$.

Κατά την προσομοίωση του Μοντέλου Β1 και σύμφωνα με το Διάγραμμα 4, δεν εμφανίζονται spikes στα σημεία που εμφανίστηκαν κατά την προσομοίωση του Μοντέλου Α, καθώς το Pitch Brake ενεργοποιείται λίγο αργότερα. Ο λόγος είναι η δυνατότητα της δυναμικής αλλαγής σχέσης, η οποία λόγω της μικρής καθυστέρησης που έχει επέτρεψε στην ουσία, η σχέση αυτή να μεταβληθεί πιο ομαλά και η παραγωγή ενέργειας να συνεχιστεί εξίσου ομαλά. Επίσης, παρατηρείται, πως στο Μοντέλο Β1, κατά το μεσαίο διάστημα της προσομοίωσης, όπου η ταχύτητα του ανέμου άρχισε να είναι μεγαλύτερη της $u_{w,cut-in}$, η παραγωγή ενέργειας ξεκίνησε περίπου την $t = 250$ sec, ενώ το Μοντέλο Α1 ξεκίνησε να παράγει ενέργεια τη στιγμή $t = 330$ sec, δηλαδή έχασε σχεδόν 80 sec παραγωγής. Εκτός αυτού, τη στιγμή που ξεκινά η παραγωγή του Μοντέλου Α1, φαίνεται πως αυτή δεν ξεκινά τόσο ομαλά όσο ξεκίνησε η παραγωγή του Μοντέλου Β1, με αποτέλεσμα την περαιτέρω καταπόνηση του μετατροπέα.

Στη συνέχεια και καθώς η ταχύτητα του ανέμου ξεπέρασε την $u_{w, rated}$ και καθώς εμφάνισε μεγάλο ρυθμό αύξησης και τα δύο μοντέλα είχαν οριακά την ίδια συμπεριφορά, ως προς την παραγόμενη ισχύ. Στο Μοντέλο Β1, καθώς λόγω της ρύθμισης που έχει γίνει, παρατηρείται μία μεγάλη διακύμανση στο μέτρο της ροπής του γρήγορου άξονα. Ο λόγος είναι πως το Variable Gear Ratio εξαναγκάζεται να λειτουργήσει με μία ορισμένη και σταθερή σχέση και λόγω της μεγάλης ροπής που περνά τη στιγμή εκείνη από το σύστημα, δυσκολεύεται να σταθεροποιήσει την τιμή της ροπής. Βέβαια, η διακύμανση αυτή δεν επηρεάζει καθόλου τη γωνιακή ταχύτητα του γρήγορου άξονα.

Το Διάγραμμα 6 κάνει περισσότερο κατανοητή την παραπάνω ανάλυση. Αρχικά και στο διάστημα με τα spikes που αναφέρθηκαν, συνολικά η ηλεκτρογεννήτρια του Μοντέλου Α1 είχε μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα σε σχέση με την αντίστοιχη του Μοντέλου Β1 που ενώ απέφυγε τα spikes η αντίστοιχη ταχύτητα ήταν μικρότερη. Η μεγάλη διαφορά βρίσκεται στο μεσαίο μέρος της προσομοίωσης, όπου η γωνιακή ταχύτητα του γρήγορου άξονα του Μοντέλου Β1 είναι ξεκάθαρα και διαρκώς πιο αυξημένη σε σχέση με εκείνη του Μοντέλου Α1. Στο τελευταίο κομμάτι, οι συνολικές διαφορές δεν οδηγούν σε κάποιο ιδιαίτερο συμπέρασμα.

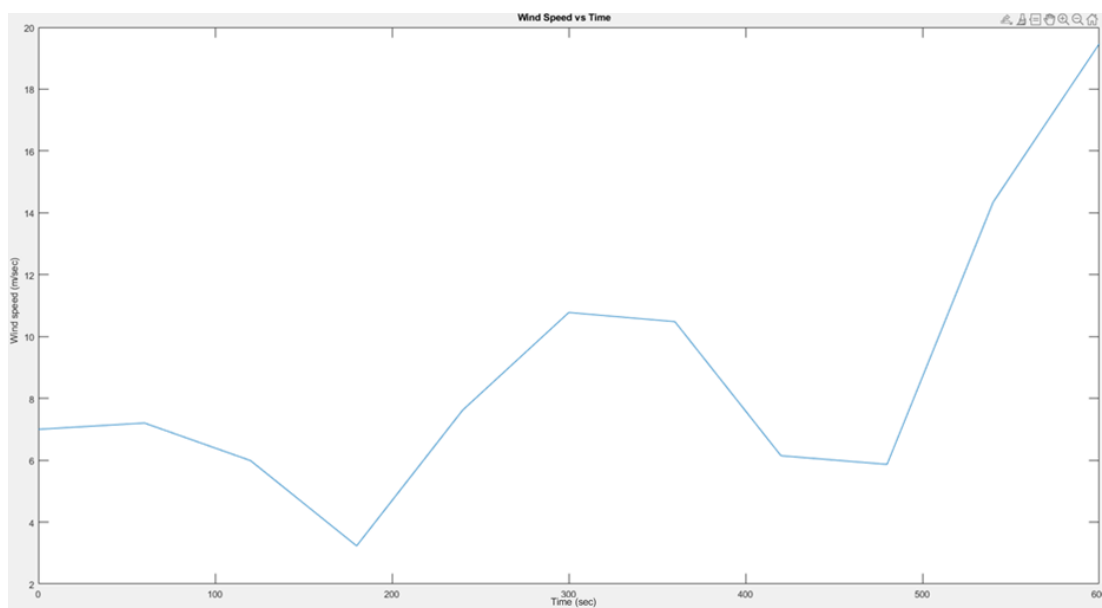
Το σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι κατά τη λειτουργία του Μοντέλου Β1 η ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας, δηλαδή του γρήγορου άξονα, δεν

μηδενίζεται ποτέ αλλά παραμένει κατ' ελάχιστο στην περιοχή των 200 RPM. Βέβαια, κατά το διάστημα αυτό η Α/Γ βρίσκεται σε κατάσταση Pitch Brake και στην ουσία δεν παράγει μηδαμινή ισχύ, αλλά λόγω της δυναμικής σχέσης του CVT, η οποία διατηρεί τις στροφές στην τιμή αυτή, η ηλεκτρογεννήτρια θα είναι πιο έτοιμη να παράγει ρεύμα, όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί, από ότι η ηλεκτρογεννήτρια του Μοντέλου Α1. Το παραπάνω επαληθεύεται, καθώς γύρω στη χρονική στιγμή $t = 240 \text{ sec}$, όταν $u_w > u_{w, \text{cut-in}}$ το Μοντέλο Β1 ξεκινά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σχεδόν άμεσα.

Τέλος, τα spikes που αναφέρθηκαν μπορεί να μην επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας και την ποσότητα αυτής, αλλά σίγουρα δυσκολεύουν τη λειτουργία του μετατροπέα της Α/Γ, καθώς οι απότομες μεταβολές τον φθείρουν περισσότερο, όπως συμβαίνει και κατά την πιο απότομη εκκίνησης της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας.

Η υπεροχή του Μοντέλου Β1 έναντι του Μοντέλου Α1 υπό το πρώτο σενάριο ανέμου, επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Πίνακας 13, καθώς παράγει σχεδόν 27% περισσότερη ηλεκτρική ισχύ από ότι το Μοντέλο Α1 στο ίδιο χρονικό διάστημα.

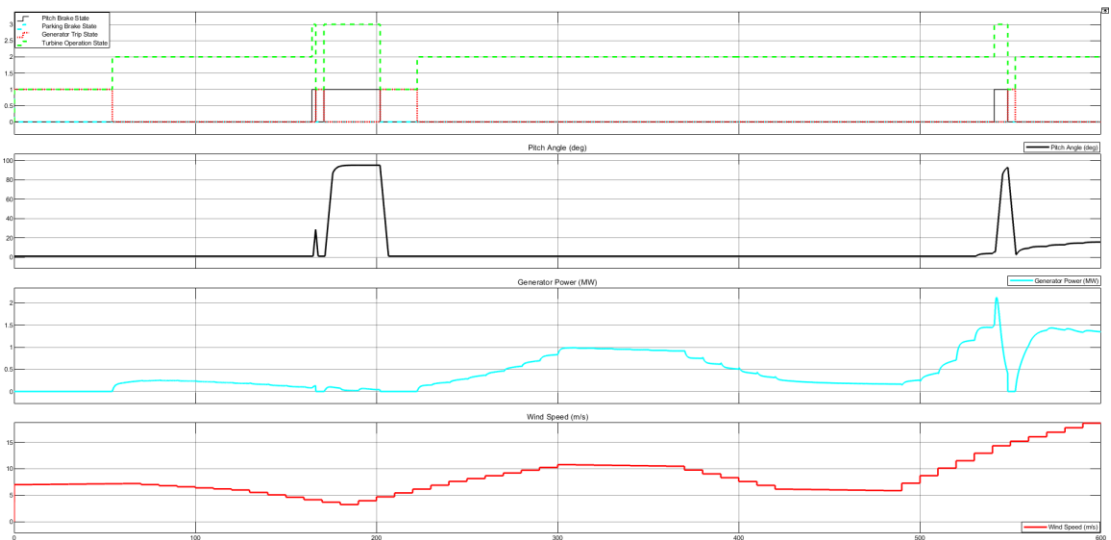
5.2 Σενάριο ανέμου 2^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα



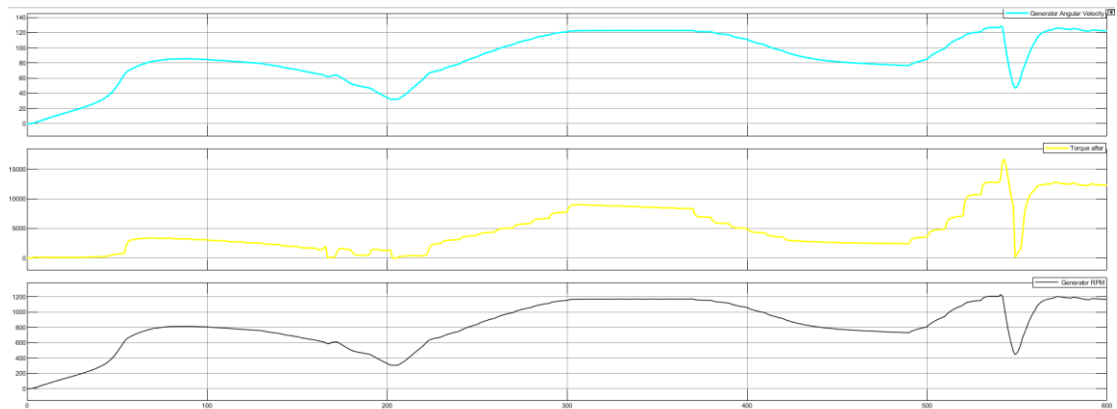
Διάγραμμα 7: 2^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

Το δεύτερο σενάριο ανέμου έχει προκύψει από την κατακόρυφη μετατόπιση του πρώτου σεναρίου κατά δύο μονάδες προς τα πάνω (+2) κατά τον οριζόντιο άξονα. Η βασική διαφορά είναι η πολύ πιο σπάνια μείωση της ταχύτητας του ανέμου κάτω από την $u_{w, \text{cut-in}}$ και κατ' επέκταση η σπανιότερη ενεργοποίηση του Pitch Brake.

Στο σενάριο αυτό (Διάγραμμα 7), η ταχύτητα του ανέμου ξεκινά όντας μεγαλύτερη της $u_{w, \text{cut-in}}$, ενώ συνεχίζοντας μειούμενη πέφτει λίγο κάτω από αυτήν στα σχεδόν 170 sec. Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος τις προσομοίωσης και με ομαλές διακυμάνσεις του ανέμου, η u_w διατηρείται κάτω της $u_{w, \text{cut-out}}$, αλλά υπερβαίνοντας την $u_{w, \text{rated}}$ και εμπλέκοντας το Pitch System.

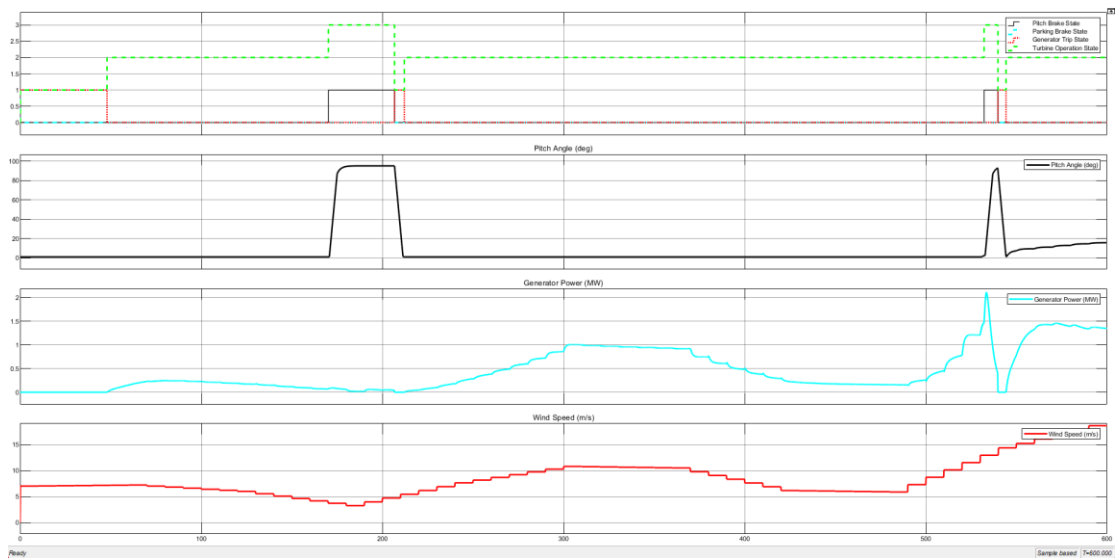


Διάγραμμα 8: Model A2: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time

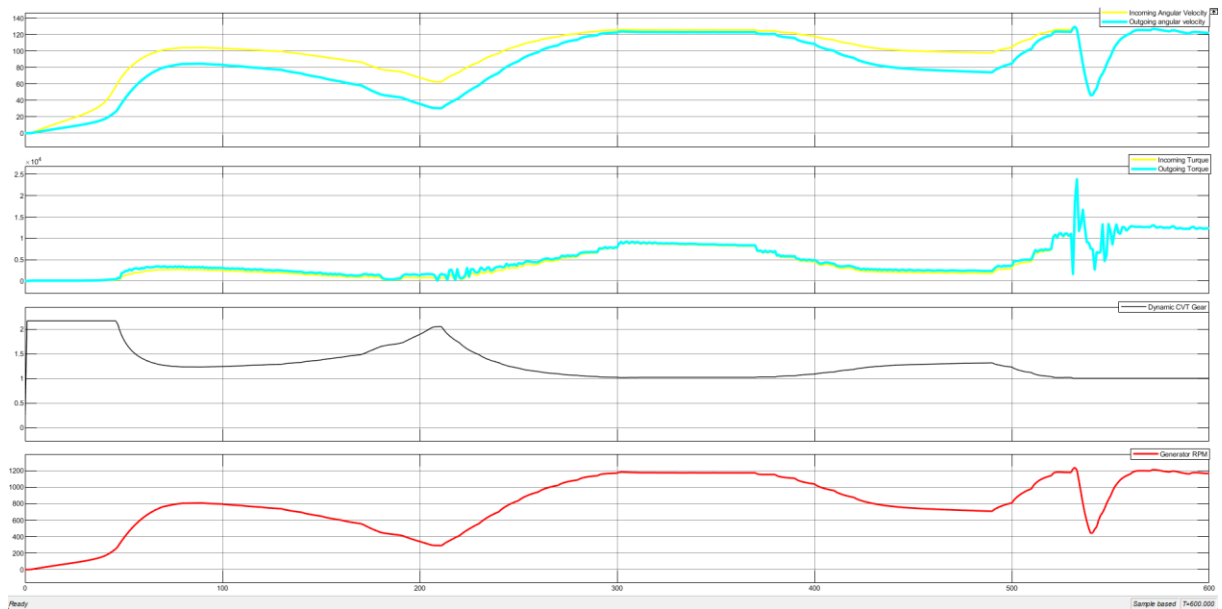


Διάγραμμα 9: Model A2: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 8 και το Διάγραμμα 9 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A2, ενώ το Διάγραμμα 10 και το Διάγραμμα 11 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B2.



Διάγραμμα 10: Model B2: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production
Wind speed vs Time

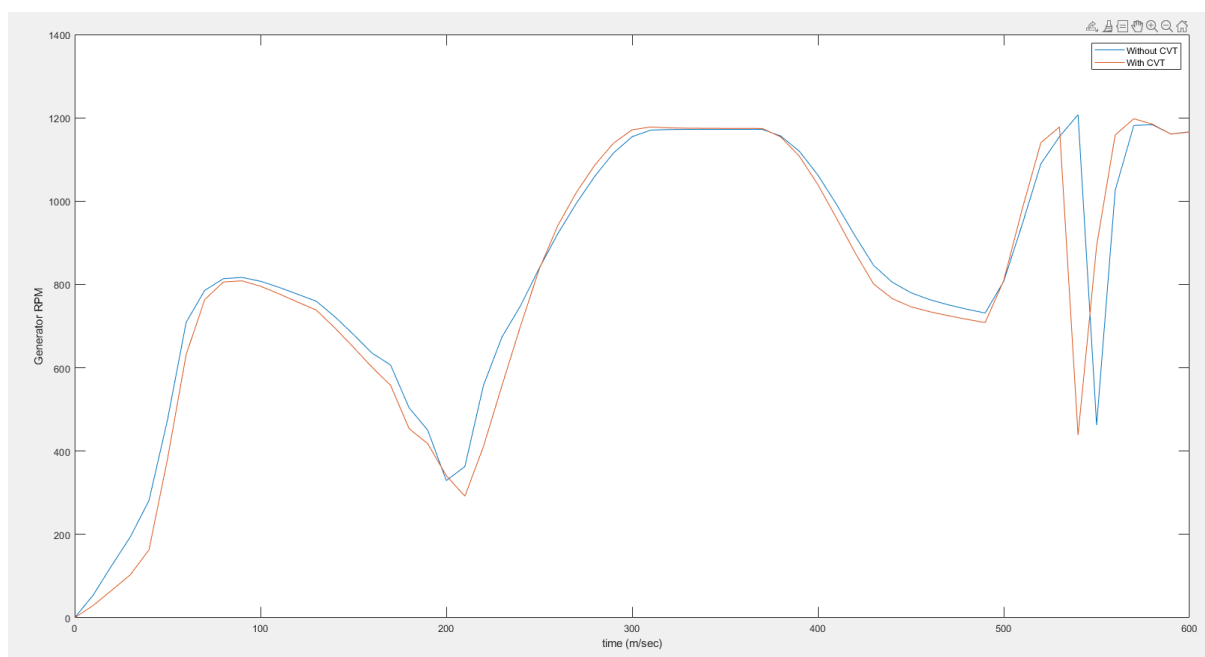


Διάγραμμα 11: Model B2: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου A2 παρατηρείται πως η παραγωγή ενέργειας ξεκινά γύρω στα 50 sec μετά την εκκίνησή της, αλλά ακριβώς τη στιγμή που η $u_w < u_{w,cut-in}$ παρατηρείται και εδώ ένα spike πριν ανοίξει το Pitch Brake. Στη συνέχεια και μέχρι τα 550 sec η παραγωγή ενέργειας γίνεται με τρόπο ομαλό και ανάλογο της ομαλής αυξομειώσης της u_w μέχρι που λόγω της απότομης αύξησης του ρυθμού μεταβολής της, η A/G δεν μπορεί να τη διαχειριστεί και ανοίγει στιγμιαία το Pitch Brake. Αυτό φυσικά έχει ως αποτέλεσμα τη διακοπή της παραγωγής ενέργειας για μερικά sec. Αφού μειωθεί το φορτίο που δέχτηκαν τα πτερύγια και επιβραδυνθεί ο άξονας του ρότορα, σχεδόν αμέσως φτάνει να παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, δηλαδή την ονομαστική της (Διάγραμμα 8 και Διάγραμμα 9).

Από την άλλη, στο συγκεκριμένο σενάριο ανέμου, το Μοντέλο B2 παρατηρείται πως συνολικά έχει παρόμοια απόκριση τόσο ως προς τις στροφές τις γεννήτριας (Διάγραμμα 12) όσο και ως προς την παραγωγικότητα (Διάγραμμα 10). Η διαφορά που δεν έχει άμεσο αντίκτυπο στους δείκτες που αναφέρθηκαν, βρίσκεται στο σημείο όπου $u_{w, cut-in} < u_w$, όπου στην περίπτωση του Μοντέλου A2 υπήρξε spike, ενώ στην περίπτωση του Μοντέλου B2 υπήρξε απορρόφηση του spike αυτού.

Συνολικά λοιπόν, στο τρέχον σενάριο, όπως φαίνεται και από το (Διάγραμμα 12) το Μοντέλο A2 υπερέχει κατά ελάχιστο αριθμό RPM και αυτό δείχνει και ο Πίνακας 14, βάσει του οποίου παράχθηκαν 0,37% λιγότερα MW κατά την προσομοίωση του σεναρίου αυτού από το μοντέλο B2. Εδώ λοιπόν, το μοντέλο B2 συμβάλει αποκλειστικά στην προφύλαξη του μετατροπέα της Α/Γ, καθώς όπως αναφέρθηκε απορρόφησε το spike. Τέλος, δεν φαίνεται πως αύξησε την απόδοση της Α/Γ.

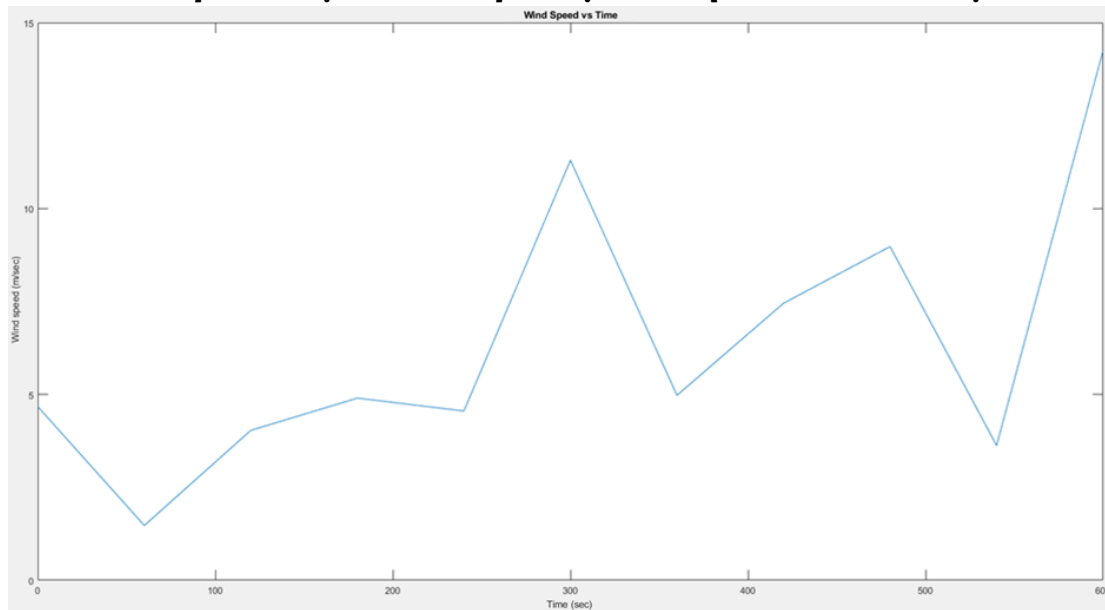


Διάγραμμα 12: High speed shaft angular for Wind Turbine model 2 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - Α/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - Α/Γ με CVT	Διαφορά
2	271	270	-0,37%

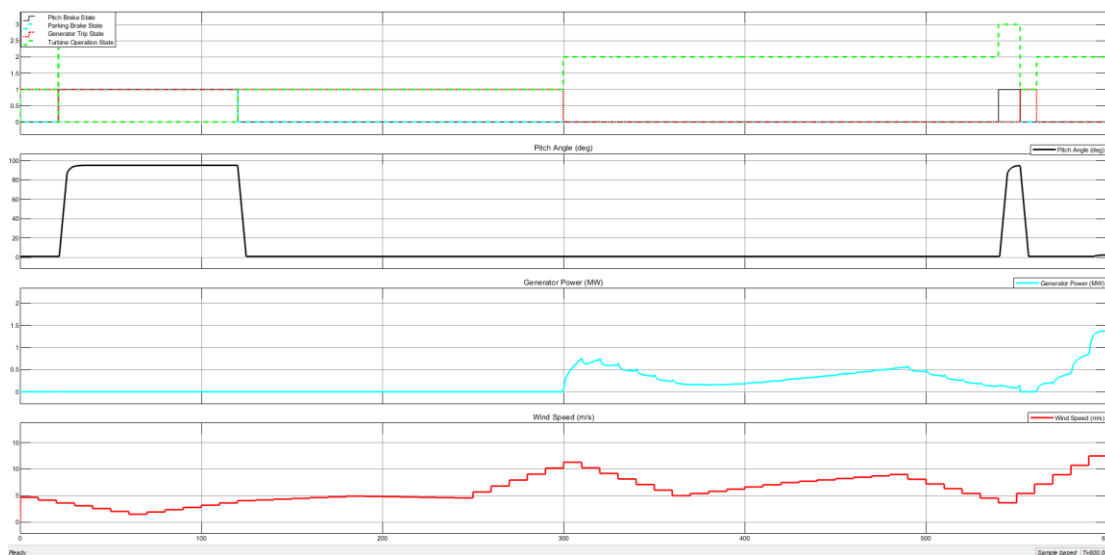
Πίνακας 14: Energy Yield δεύτερου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ

5.3 Σενάριο ανέμου 3^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

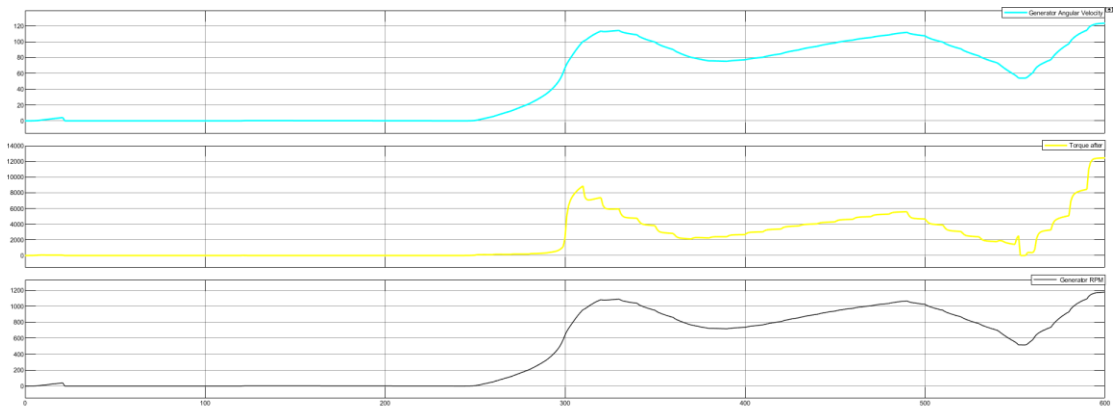


Διάγραμμα 13: 3ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

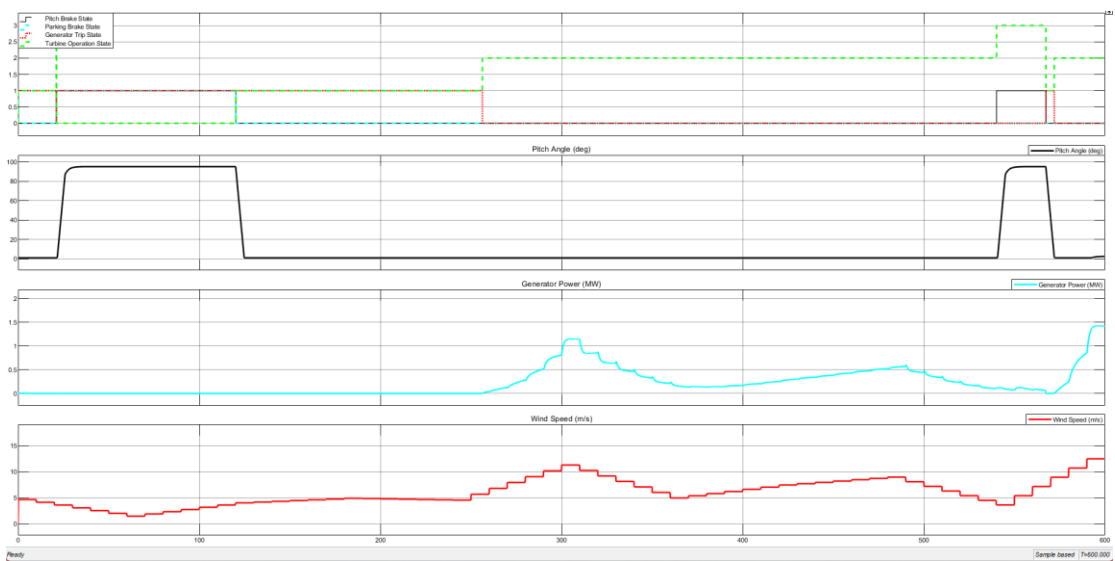
Το τρίτο σενάριο ανέμου συνολικά χαρακτηρίζεται από περισσότερες και πιο απότομες διακυμάνσεις στην u_w . Αρχικά, $u_w > u_{w,cut-in}$ αλλά μετά από σχεδόν 30 sec όπου $u_w < u_{w,cut-in}$, από τα 120 sec και μέχρι τα σχεδόν 540 sec η ταχύτητα του ανέμου αυξομειώνεται με διάφορους ρυθμούς, όταν σε εκείνο το χρονικό σημείο, αυξάνεται πολύ απότομα ο ρυθμός μεταβολής της με την τιμή της να φτάνει σχεδόν την $u_{w,cut-out}$.



Διάγραμμα 14: Model A3: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time

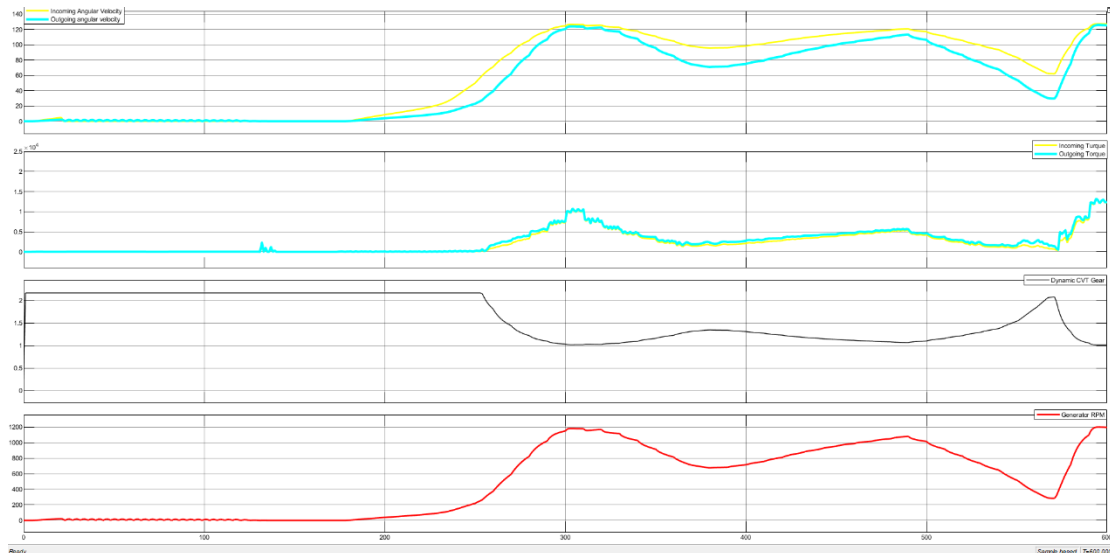


Διάγραμμα 15: Model A3: Generator angular velocity - Torque after Gear Train – Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 16: Model B3: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time

Το Διάγραμμα 14 και το Διάγραμμα 15 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A3, ενώ το Διάγραμμα 16 και το Διάγραμμα 17 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B3.



Διάγραμμα 17: Model B3: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ratio – Generator RPM vs Time

Κατά την προσομοίωση του Μοντέλου A3 με βάση το Διάγραμμα 14 η παραγωγή της ενέργειας ξεκινά σχεδόν 200 sec μετά την αύξηση της u_w πάνω από την $u_{w,cut-in}$. Στη συνέχεια η παραγωγή της ενέργειας ξεκινά με έναν απότομο τρόπο όταν $t = 300sec$ και αυξομειώνεται ανάλογα με την αντίστοιχη αυξομείωση της ταχύτητας του ανέμου μέχρι την ξαφνική και απότομη αύξηση του ρυθμού της, η οποία και θα προκαλέσει τη σύντομη ενεργοποίηση του Pitch Brake. Στη συνέχεια η απόκριση είναι ίδια με εκείνη του Μοντέλου A2.

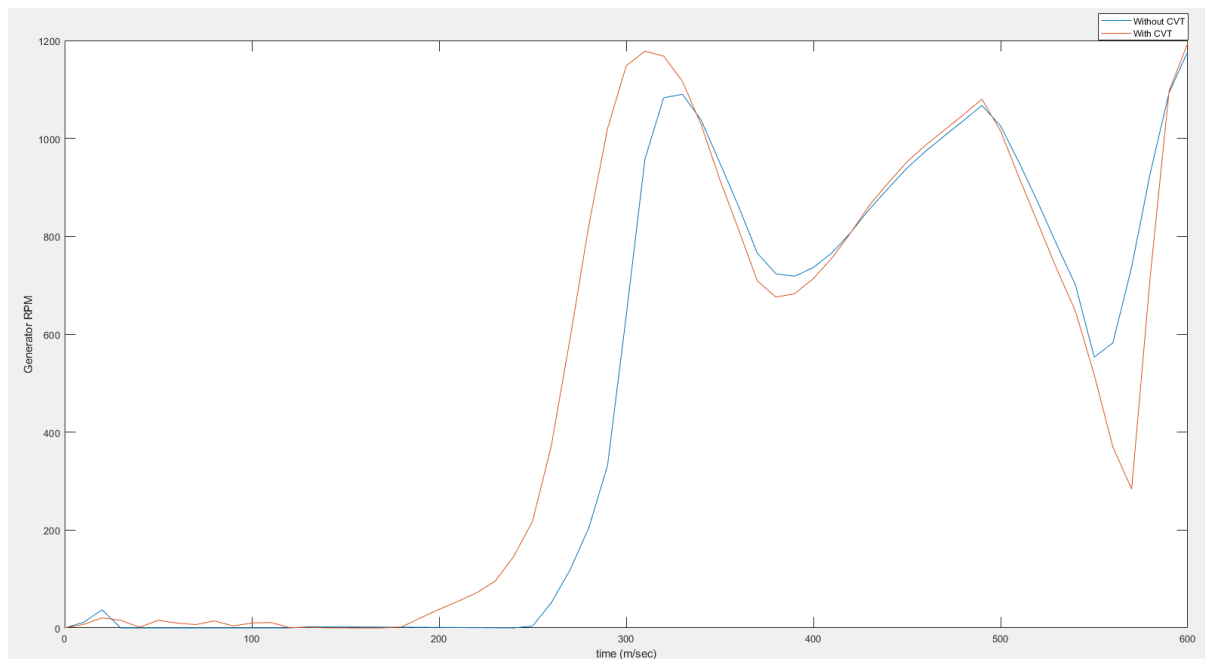
Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι πως κατά την προσομοίωση του Μοντέλου B3, η παραγωγή ενέργειας ξεκινά σχεδόν 50 sec νωρίτερα και μάλιστα με τρόπο ομαλό (Διάγραμμα 16). Στη συνέχεια η συμπεριφορά της παραγωγικότητάς του είναι ανάλογη εκείνης της αυξομείωσης της u_w .

Με βάση το Διάγραμμα 18 και κατά το διάστημα $t = [0,190]$ sec οι στροφές του γρήγορου άξονα δεν ήταν μηδενικές και αυτό συντέλεσε στην πιο γρήγορη ανταπόκρισή του, όταν $u_w > u_{w,cut-in}$. Αντίθετα το Μοντέλο A3 είχε πολύ πιο αργή αλλά και απότομη απόκριση που εκτός από την υστέρησή του σε παραγόμενη ενέργεια, δυσκόλεψε το έργο του μετατροπέα. Παρόλα αυτά, λίγο πριν την απότομη αύξηση της u_w , σεδόν τη στιγμή $t = 550$ sec, το Μοντέλο B3 είχε πιο αργή απόκριση από το Μοντέλο A3 και αυτό συνέβη λόγω του Pitch Brake που στην περίπτωση του Μοντέλου B3 ήταν ενεργοποιημένο για σχεδόν 20 sec περισσότερα.

Σημειώνεται πως στο Σενάριο 2 τα Μοντέλα A2 και B2 είχαν τον ίδιο χρόνο απόκρισης αμέσως μετά την απενεργοποίηση του Pitch Brake, ενώ δεν ίσχυσε το ίδιο για τα A3 και B3. Ο λόγος είναι πως στο σενάριο 2 η ταχύτητα του ανέμου βρισκόταν αρκετά seconds πάνω από την $u_{w,cut-in}$ με αποτέλεσμα η ταχύτητες των γρήγορων αξόνων και των δύο μοντέλων (Διάγραμμα 12) να μην είναι σχεδόν μηδενικές όπως στο Σενάριο 2. Στο Σενάριο 3, το Μοντέλο B3 έχει πιο γρήγορη απόκριση λόγω της δυναμικής του σχέσης (Διάγραμμα 17). Η δυναμική σχέση του Μοντέλου B2 δεν βοήθησε το ίδιο,

καθώς οι στροφές του γρήγορου άξονα ήταν ήδη στα σχεδόν 300 RPM και άρα η σχέση αυτή θα βρισκόταν περίπου στο 1.5, το οποίο όπως φαίνεται δεν ήταν αρκετό ώστε να αποδώσει κέρδος έναντι του Μοντέλου A2.

Συνολικά, το Μοντέλο B3 παρήγαγε σχεδόν 18,4% περισσότερα MW από ότι το Μοντέλο A3 υπό το ίδιο σενάριο ανέμου (Πίνακας 15).

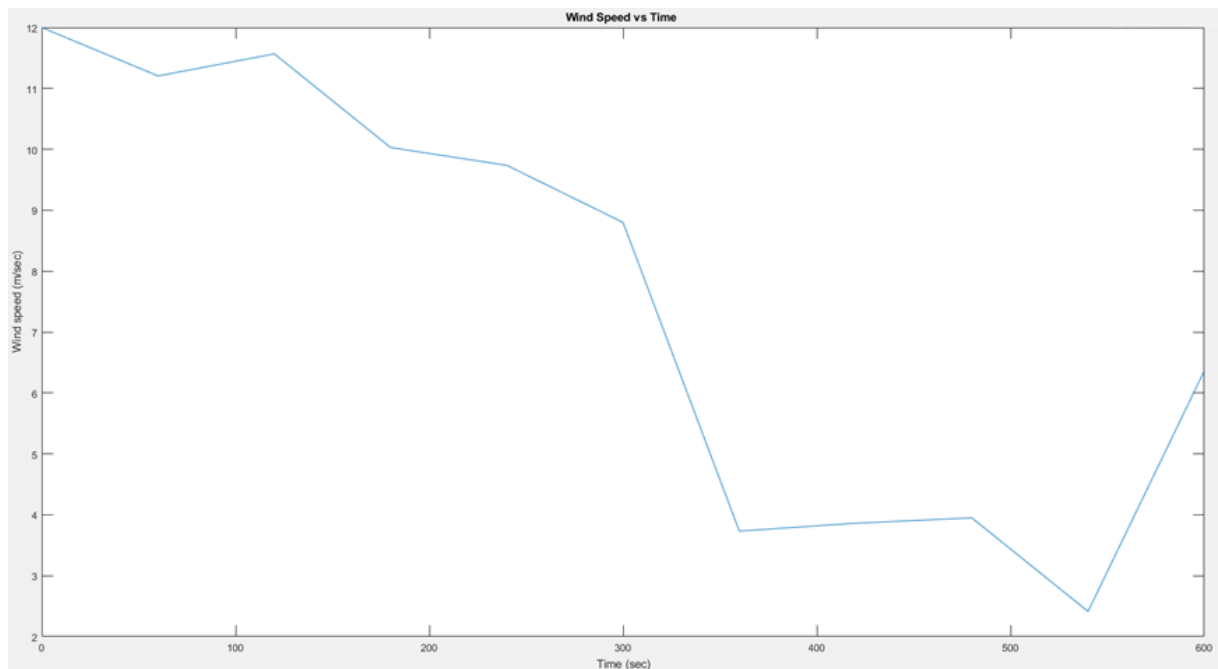


Διάγραμμα 18: High speed shaft angular for Wind Turbine model 3 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - A/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - A/Γ με CVT	Διαφορά
3	148	175	18,24%

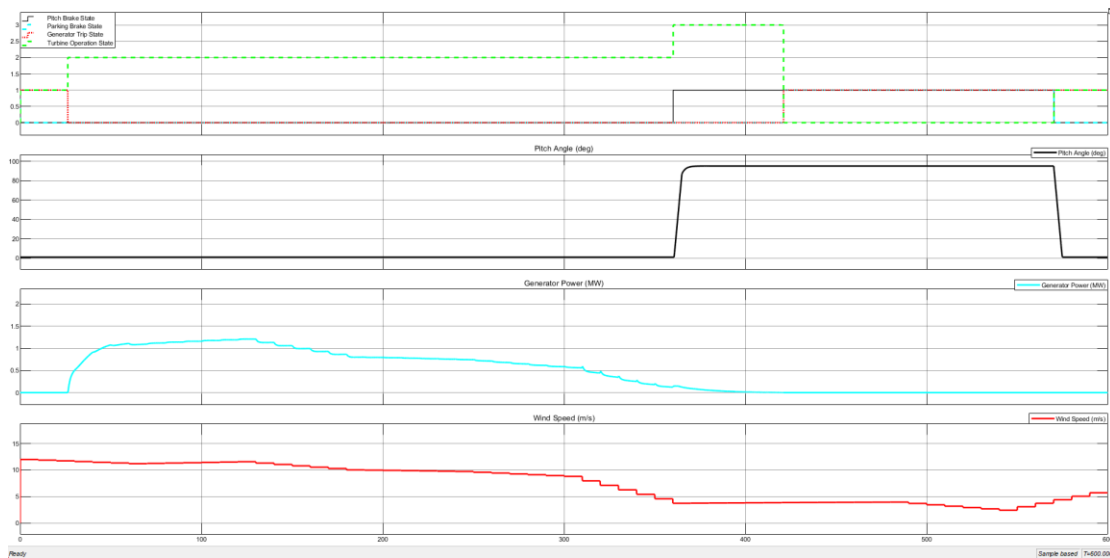
Πίνακας 15: Energy Yield τρίτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.4 Σενάριο ανέμου 4^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

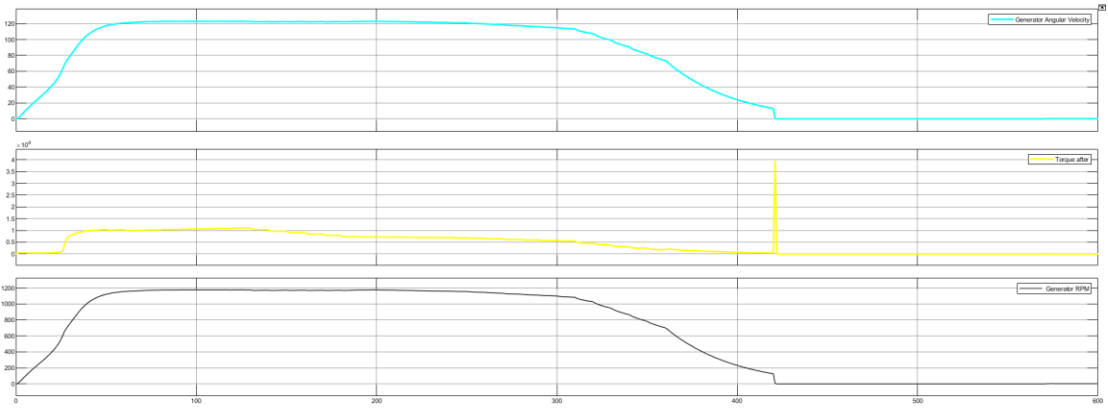


Διάγραμμα 19: 4^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

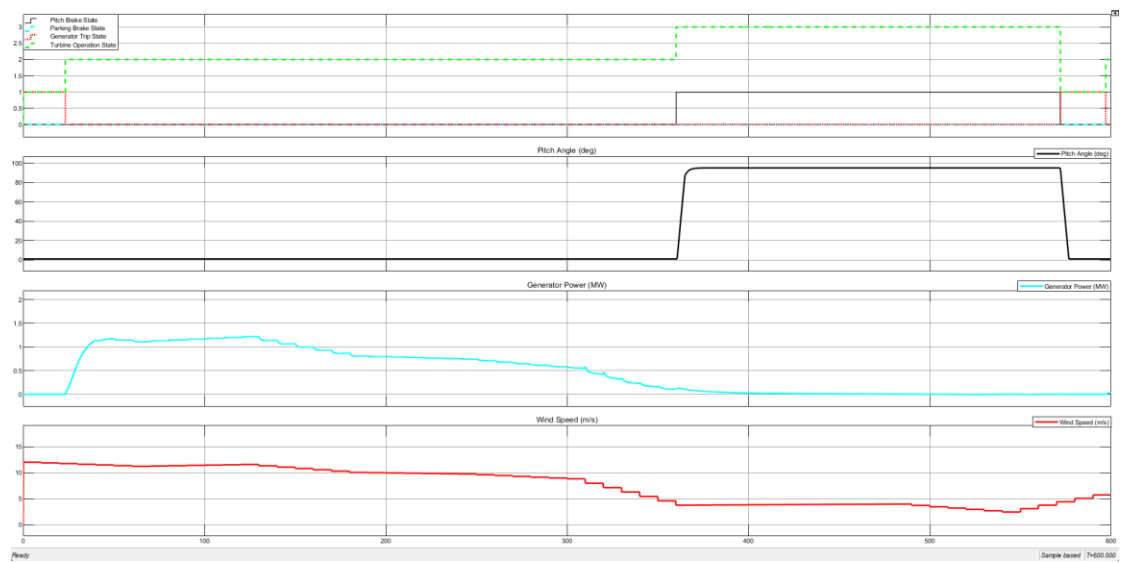
Το 4^ο σενάριο ανέμου, ξεκινά με ταχύτητα ανέμου η οποία σχεδόν ισούται με την $u_{w,rated}$, και με σχετικά ομαλές διακυμάνσεις, καταλήγει να πέφτει κάτω της $u_{w,cut-in}$ γύρω στην $t = 350\text{sec}$. Κατά το τελείωμα του σεναρίου, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει το ρυθμό μεταβολής της φτάνοντας πιο πάνω από την $u_{w,cut-in}$.



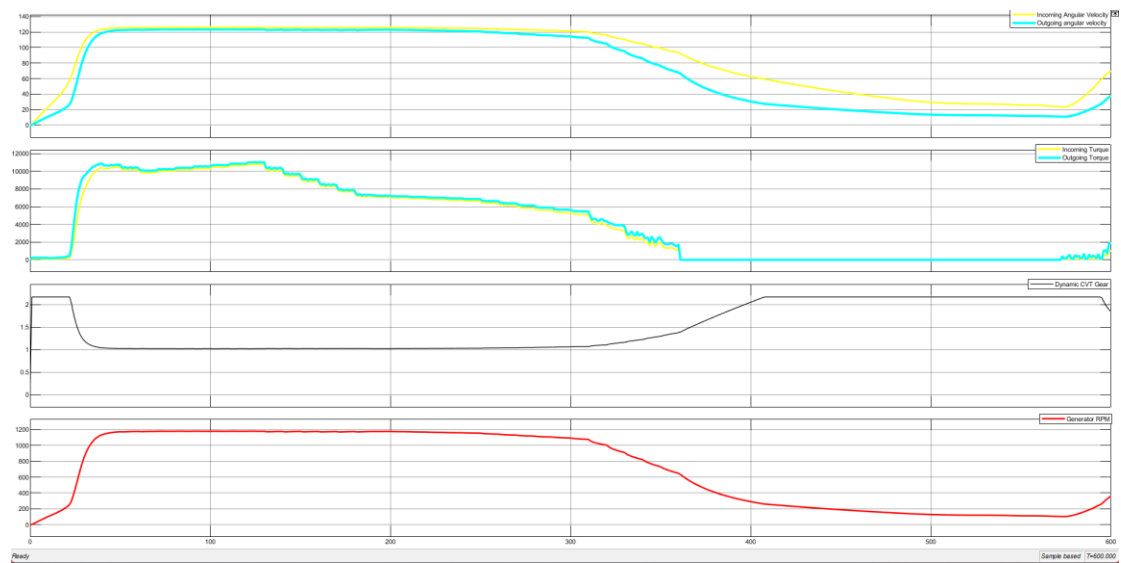
Διάγραμμα 20: Model A4: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time



Διάγραμμα 21: Model A4: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 22: Model B4: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



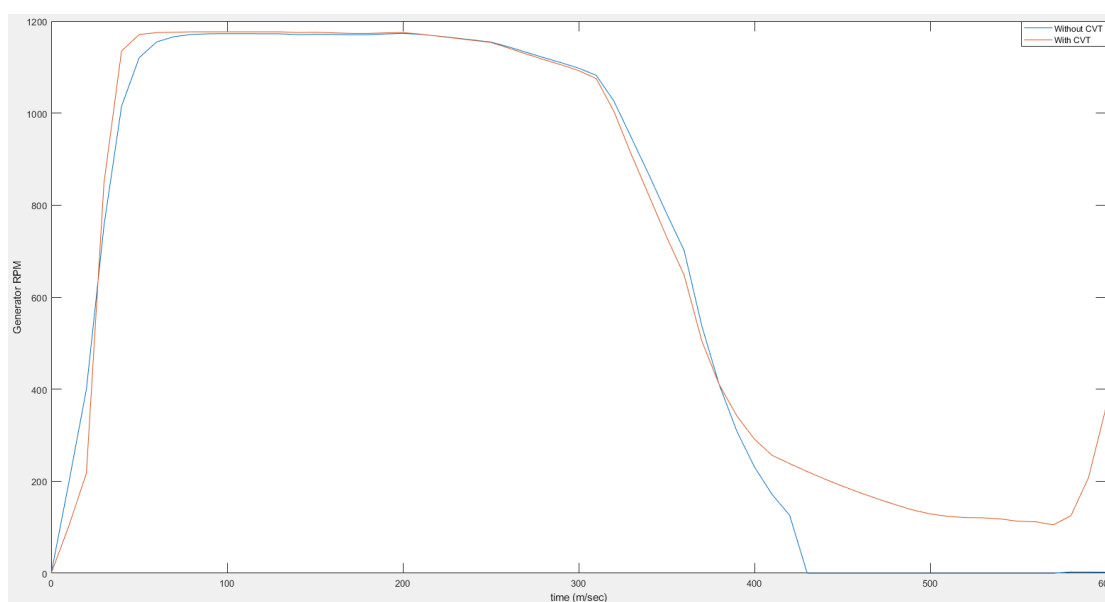
Διάγραμμα 23: Model B4: Shafts angular velocities before and after CVT - Shafts Torque before and after CVT - Dynamic CVT Ratio - Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 20 και το Διάγραμμα 21 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A4, ενώ το Διάγραμμα 22 και το Διάγραμμα 23 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B4.

Αρχικά, κατά την $t = 30\text{sec}$ το Μοντέλο A4 ξεκινά να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με σχετικά απότομο τρόπο, ενώ στη συνέχεια ο τρόπος που γίνεται η παραγωγή είναι ανάλογος της ταχύτητας του ανέμου. Μετά την $t=360\text{sec}$ παραγωγικότητά του μηδενίζεται μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης, στο τέλος της οποίας η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται αρκετά απότομα. Το μοντέλο B4 ξεκινά την παραγωγή ενέργειας ελάχιστα πιο νωρίς από ότι το Μοντέλο A4, αλλά κατά τρόπο περισσότερο ομαλό. Στη συνέχεια και η δική του παραγωγικότητα γίνεται με τρόπο ανάλογο της ταχύτητας του ανέμου.

Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι πως όταν το Pitch Brake ήταν ενεργοποιημένο στο διάστημα $t=[360,580]$ sec και τα δύο μοντέλα σταμάτησαν προφανώς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, το Μοντέλο B4 έχει διατηρήσει τις στροφές του γρήγορου άξονά του στις σχεδόν 200RPM (Διάγραμμα 24) με αποτέλεσμα να είναι πιο έτοιμο να ξεκινήσει να παράγει ενέργεια όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί πάνω από την $u_{w,\text{cut-in}}$. Αυτό φαίνεται από τον τρόπο που αυξάνονται τα RPM του μοντέλου B4 από την $t = 580\text{sec}$ μέχρι και την $t = 600\text{sec}$. Αντίθετα το Μοντέλο A4 δεν πετυχαίνει την ίδια διατήρηση καθώς, δεν διαθέτει τη δυνατότητα ρύθμισης της σχέσης τους. Το ίδιο συνέβη και με τα σενάρια ανέμου 1 και 3.

Συνολικά, το μοντέλο B4 παρήγαγε 2,59% περισσότερα MW από ότι το A4 στο ίδιο σενάριο ανέμου. Η διαφορά αυτή δεν παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, αλλά το γεγονός ότι παρά το Pitch Brake το Μοντέλο B4 διατήρησε την ταχύτητα του γρήγορου άξονά του στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό. Άρα λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα πως παρά την ενεργοποίηση του Pitch Brake οι στροφές του γρήγορου άξονα αργούν να μηδενιστούν στο Μοντέλο B4 (Πίνακας 16).

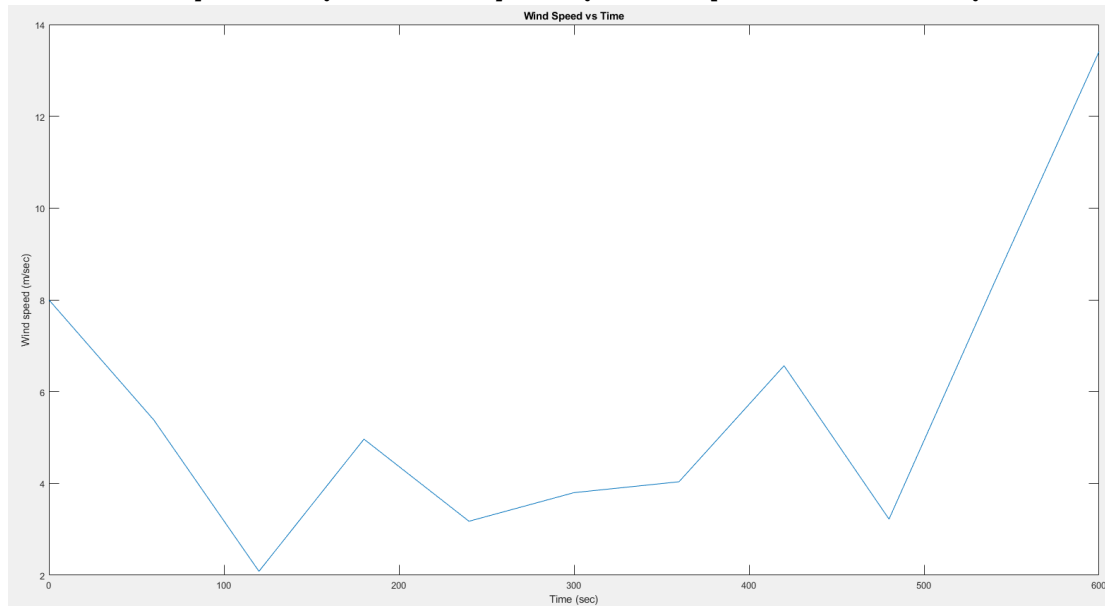


Διάγραμμα 24: High speed shaft angular for Wind Turbine model 4 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Χωρίς CVT	Με CVT	Διαφορά
4	270	277	2,59%

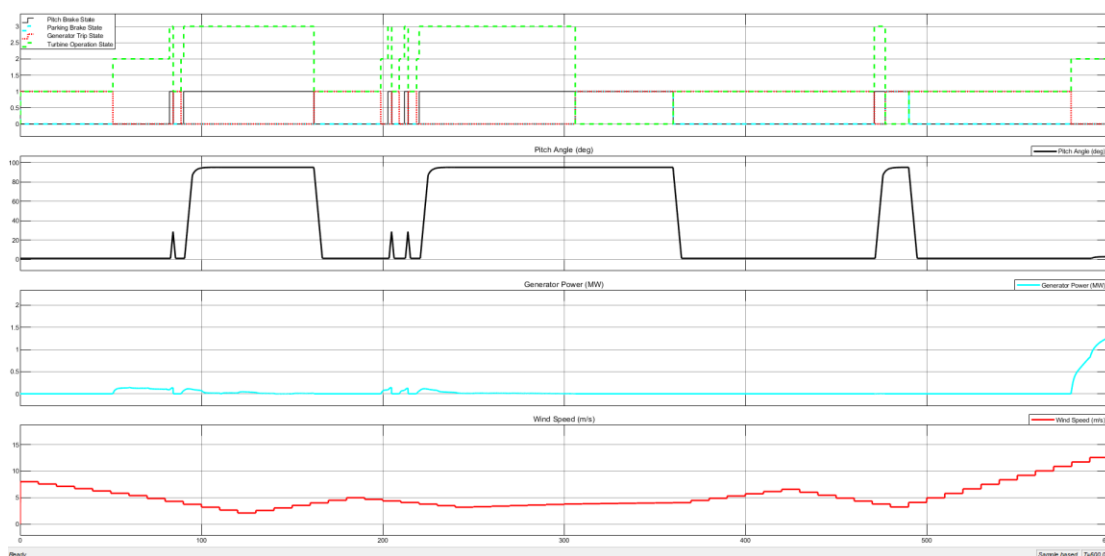
Πίνακας 16: Energy Yield τέταρτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.5 Σενάριο ανέμου 5^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

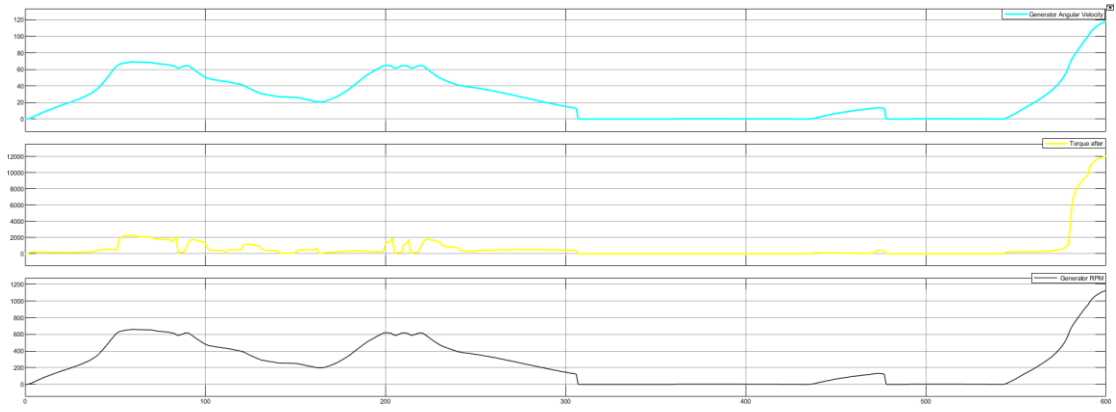


Διάγραμμα 25: 5^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

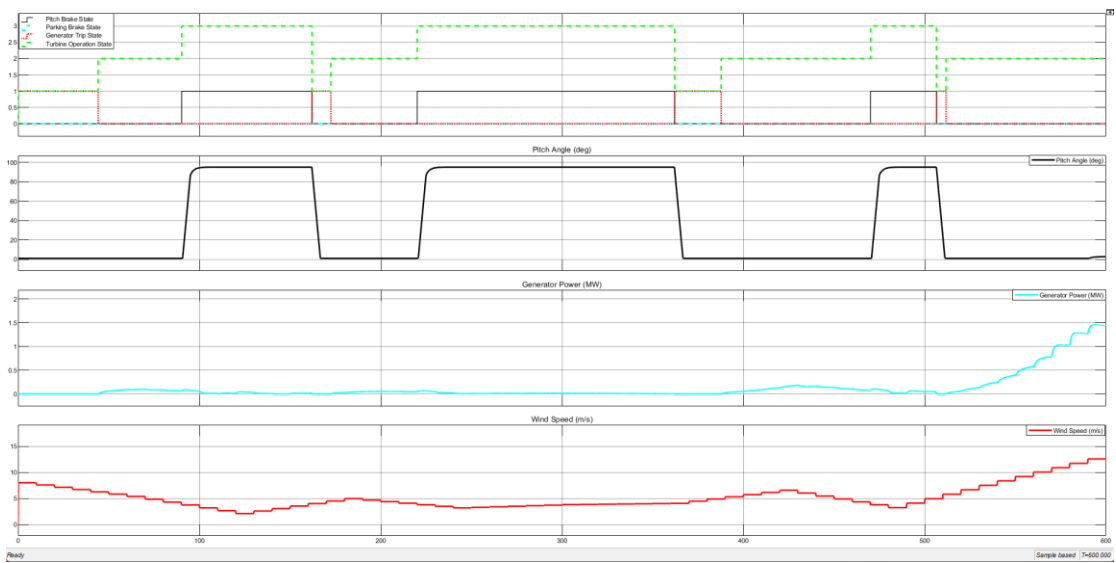
Κατά το 5^ο Σενάριο ανέμου (Διάγραμμα 25) η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει αρκετές αυξομειώσεις, ξεκινώντας από αρκετά πάνω της $u_{w,cut-in}$ και κατεβαίνοντας τρεις φορές κάτω από την τιμή αυτή, καταλήγει σε μεγάλη αύξηση του ρυθμού μεταβολής της, όπως έγινε και σε προηγούμενα σενάρια.



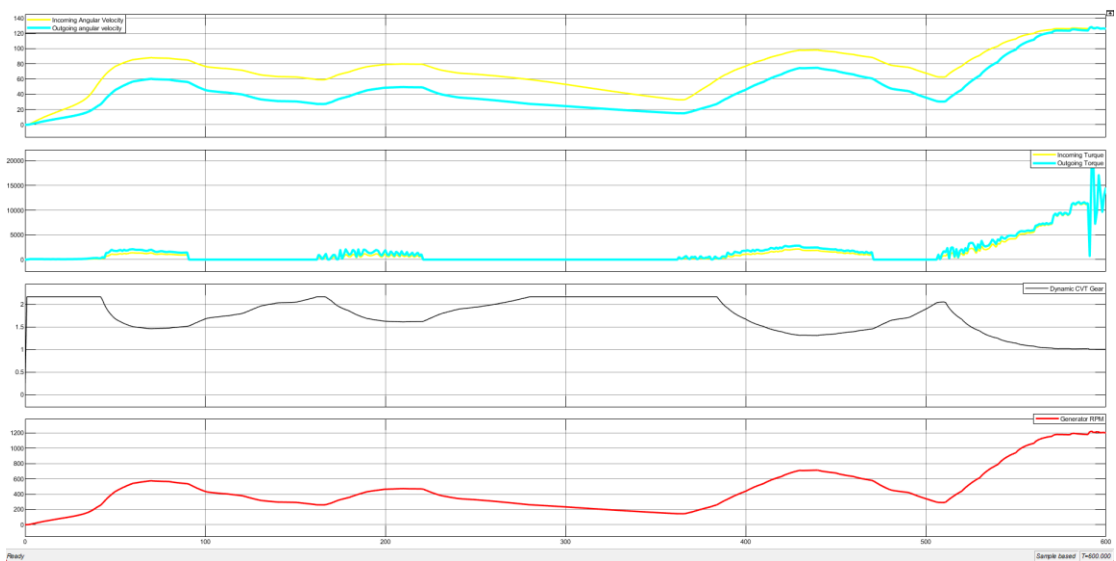
Διάγραμμα 26: Model A5: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time



Διάγραμμα 27: Model A5: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 28: Model B5: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time



Διάγραμμα 29: Model B5: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time

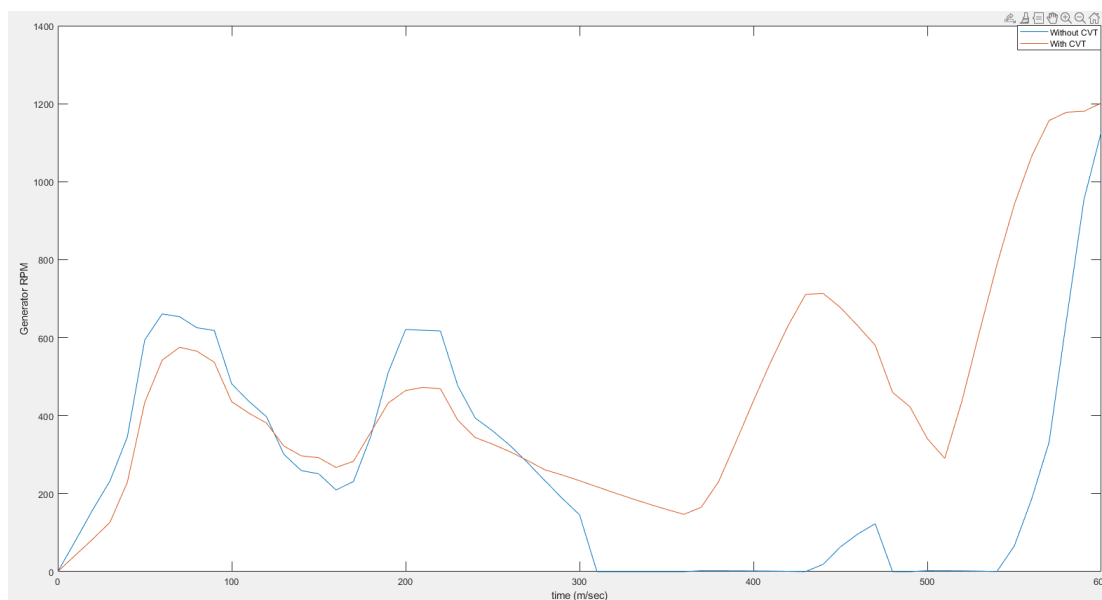
Το Διάγραμμα 26 και το Διάγραμμα 27 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A5, ενώ το Διάγραμμα 28 και το Διάγραμμα 29 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B5.

Κατά την προσομοίωση του Μοντέλου A5 παρατηρήθηκαν και πάλι, όπως στα σενάρια 1 και 2, τα spikes στο Pitch system και κατ' επέκταση στον μετατροπέα της Α/Γ. Αυτό και πάλι συμβαίνει στις φάσεις κατά τις οποίες οι ταχύτητα του ανέμου πέφτει κάτω από την $u_{w,cut-in}$ και ενεργοποιείται το Pitch Brake. Η παραγωγή ενέργειας ξεκινά τη στιγμή $t=580sec$ όταν και η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά την $u_{w,cut-in}$ παρουσιάζοντας μεγάλη επιτάχυνση.

Αντιθέτως το Μοντέλο B5 εξακολουθεί να απορροφά τα spikes που αναφέρθηκαν διατηρώντας μία και μιν μικρή, αλλά ελάχιστη παραγωγή ενέργειας, χωρίς να καταπονείται ο μετατροπέας. Η παραγωγή ενέργειας ξεκινά τη στιγμή $t=540sec$, δηλαδή 40 sec νωρίτερα από ότι ξεκίνησε η παραγωγή του μοντέλου A5.

Και πάλι λοιπόν παρατηρείται και από τις στροφές τις γεννήτριας, πως όσο οι στροφές του γρήγορου άξονα του Μοντέλου A5 είναι σχεδόν μηδενικές, οι αντίστοιχες του Μοντέλου B5 διατηρούνται σε επίπεδο τέτοιο που η παραγωγή αρχίζει γρηγορότερα. Σημειώνεται πως και εδώ φαίνεται πως αν η ταχύτητα του ανέμου είναι γύρω στα 2m/sec μεγαλύτερης της $u_{w,cut-in}$ η σύντομη πτώση της ταχύτητας του ανέμου κάτω της $u_{w,cut-in}$ δεν φαίνεται πως το επηρεάζει.

Για αυτόν το λόγο υπάρχει και αυτή η διαφορά στην απόδοση των δύο μοντέλων. Το μοντέλο B5 παράγει σχεδόν διπλάσια (199%) ηλεκτρική ενέργεια από το Μοντέλο A5 στο ίδιο σενάριο ανέμου (Πίνακας 17).

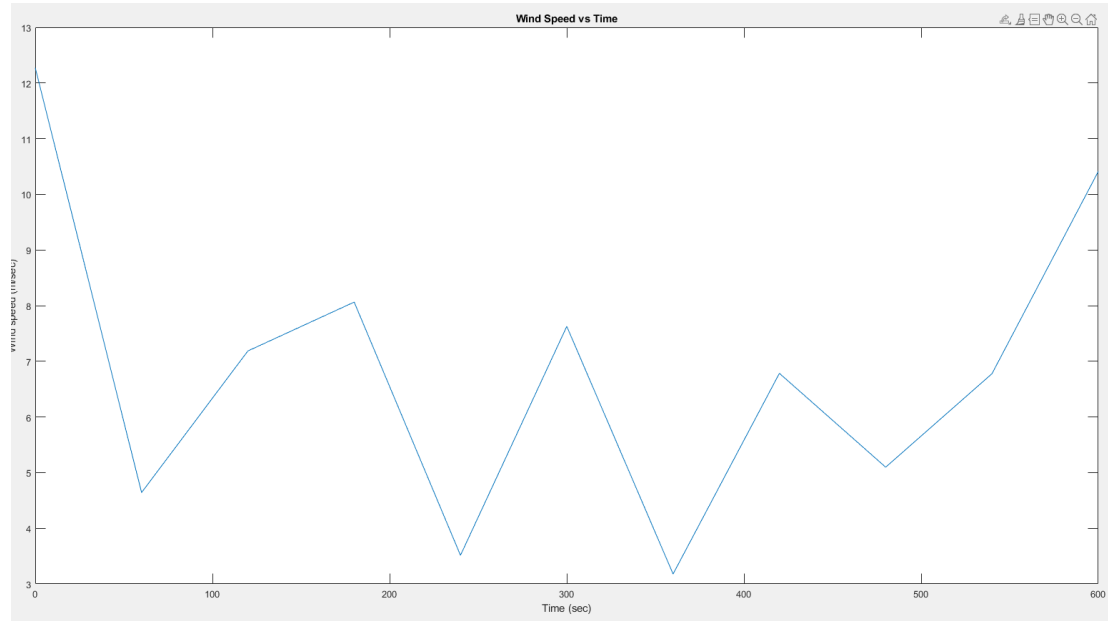


Διάγραμμα 30: High speed shaft angular for Wind Turbine model 5 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - A/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - A/Γ με CVT	Διαφορά
5	25,7	77	199,61%

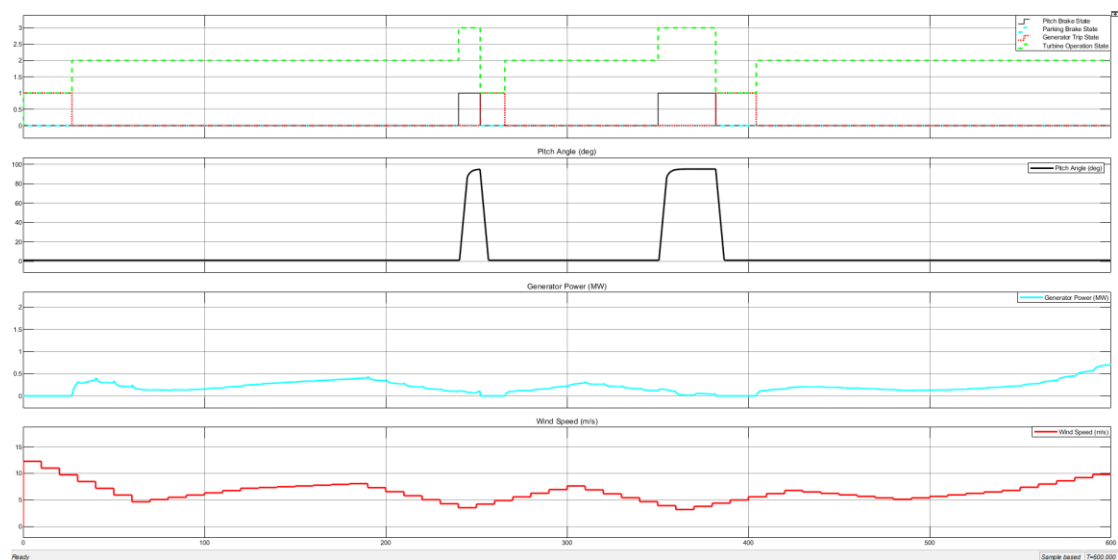
Πίνακας 17: Energy Yield πέμπτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.6 Σενάριο ανέμου 6^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

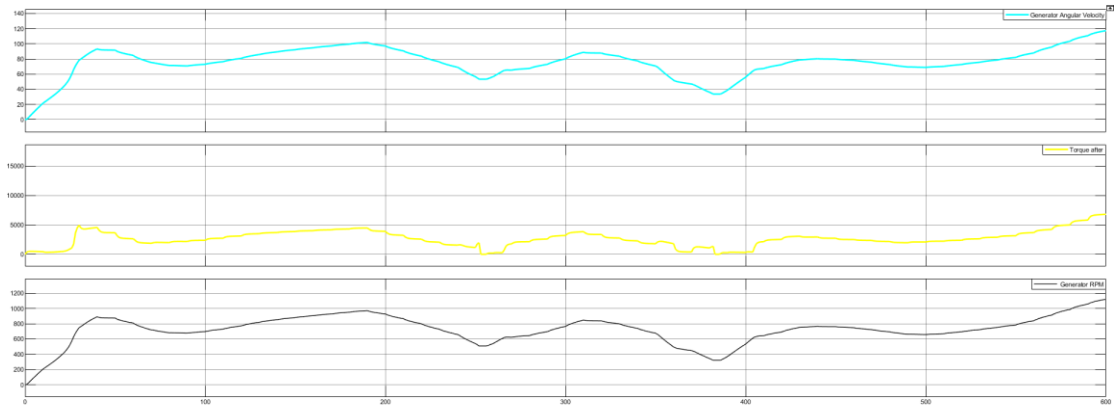


Διάγραμμα 31: 6^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

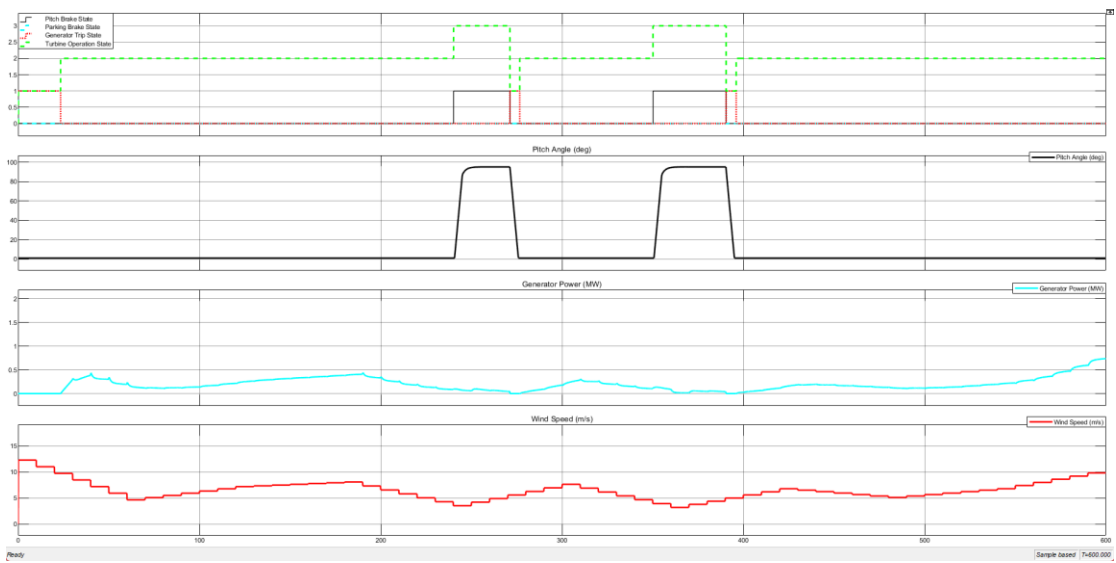
Στο 6^ο Σενάριο Ανέμου (Διάγραμμα 31), η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει περισσότερες διακυμάνσεις, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου πέφτει κάτω της $u_{w, cut-in}$ δύο φορές, μέχρι να αρχίσει να αυξάνεται ως και το τέλος της προσομοίωσης.



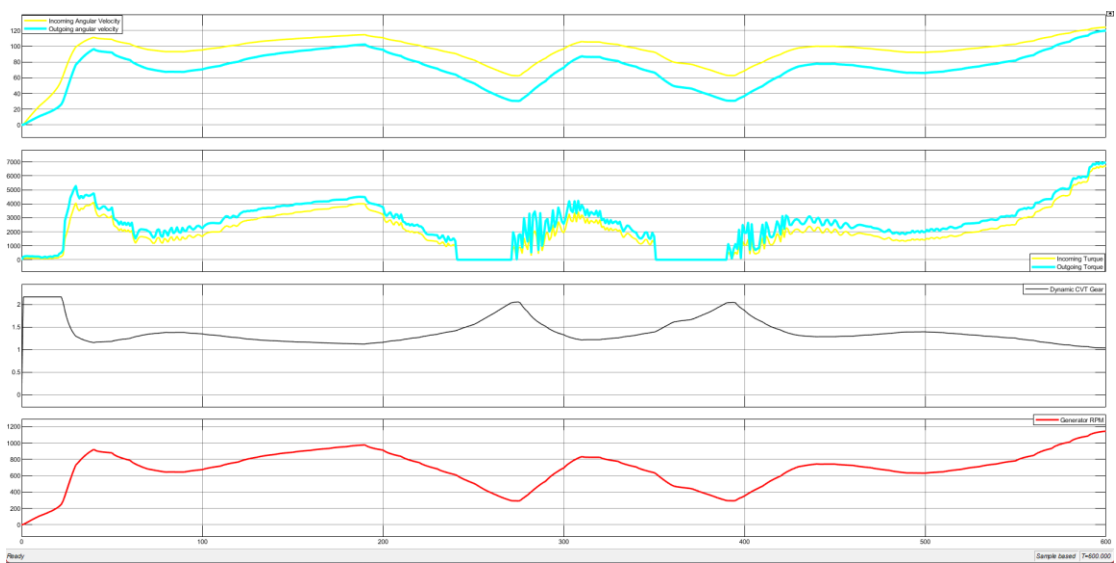
Διάγραμμα 32: Model A6: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



Διάγραμμα 33: Model A6: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 34: Model B6: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time



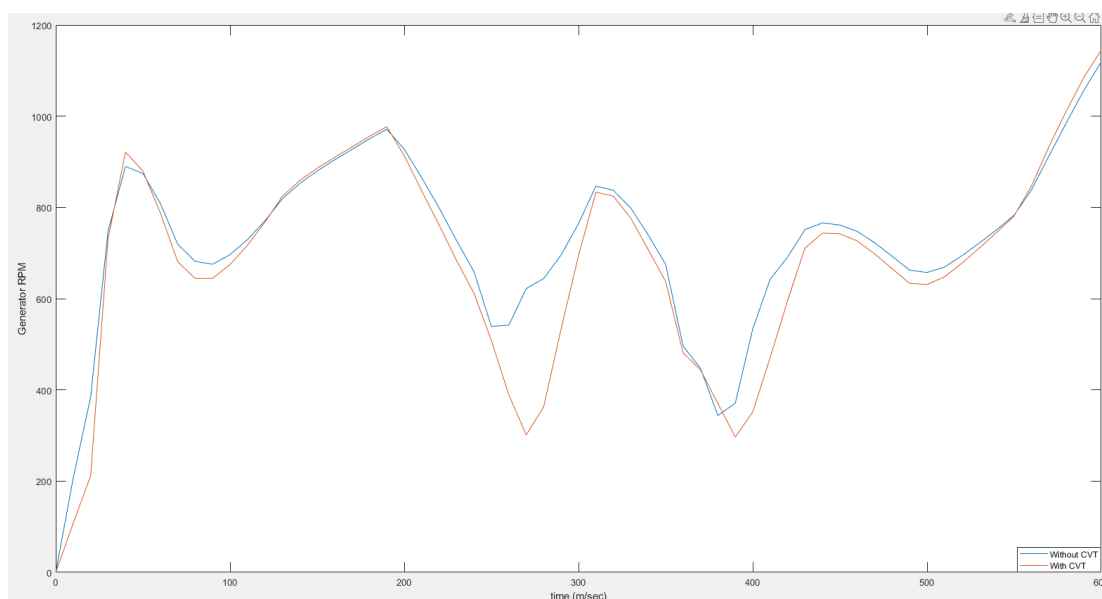
Διάγραμμα 35: Model B6: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ratio – Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 32 και το Διάγραμμα 33 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου Α6, ενώ το Διάγραμμα 34 και το Διάγραμμα 35 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου Β6.

Κατά την προσομοίωση του Μοντέλου Α6 η παραγωγή ξεκινά και πάλι κατά όχι και τόσο ομαλό τρόπο και η παραγωγικότητά του μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Το Pitch Brake ανοίγει δύο φορές, λόγω της πτώσης της ταχύτητας του ανέμου κάτω από την $u_{w, cut-in}$.

Όμοια απόκριση ως προς την παραγωγικότητα παρουσιάζει και το Μοντέλο Β6, το οποίο ξεκινά κατά έναν μικρό βαθμό πιο ομαλά την παραγωγή ενέργειας. Παρόλα αυτά, το διάστημα του πρώτου Pitch Brake του διαρκεί σχεδόν το διπλάσιο χρόνο από ότι το αντίστοιχο του Μοντέλου Α6, πράγμα που αποτυπώνεται και στην παραγωγικότητά του. Διαρκεί περισσότερο και το δεύτερο Pitch Brake, αλλά αυτήν τη φορά η διαφορά είναι αρκετά μικρότερη. Στη συνέχεια και κατά την $t=550sec$ η στροφές του γρήγορου άξονα του μοντέλου Β6 είναι περισσότερες από τις αντίστοιχες του Α6, αλλά μέχρι εκείνο το σημείο ίσχυε το αντίστροφο (Διάγραμμα 36).

Στο συγκεκριμένο σενάριο το μεγαλύτερο διάστημα Pitch Brake είναι ο παράγοντας που έκανε το Μοντέλο Β6 να παράγει κατά 2,56% λιγότερα MW υπό το ίδιο σενάριο ανέμου. Γενικότερα, στο Μοντέλο Β, αξίζει να επισημανθεί πως έχει προστεθεί ένα ακόμη άξονας στο σύστημα, πράγμα που κάνει την περιστροφή του κατά κάποιον μικρό βαθμό πιο δύσκολη. Δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια αν ο παραπάνω είναι ο μοναδικός λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, αλλά βάσει και των υπόλοιπων σεναρίων, όταν τα Μοντέλα με κιβώτιο CVT έχουν όμοια γωνιακή ταχύτητα γρήγορου άξονα με τα μοντέλα χωρίς το κιβώτιο CVT, τα πρώτα υστερούν κατά έναν μικρό βαθμό ως προς την ταχύτητα του άξονα αυτού (Πίνακας 18).

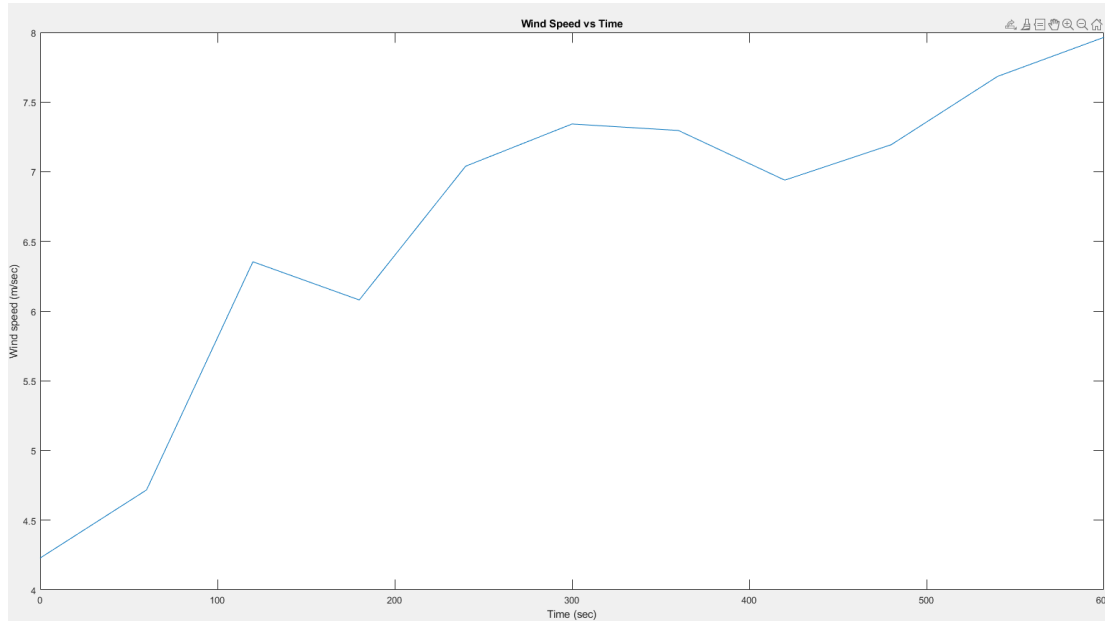


Διάγραμμα 36: High speed shaft angular for Wind Turbine model 6 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - A/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - A/Γ με CVT	Διαφορά
6	117	114	-2,56%

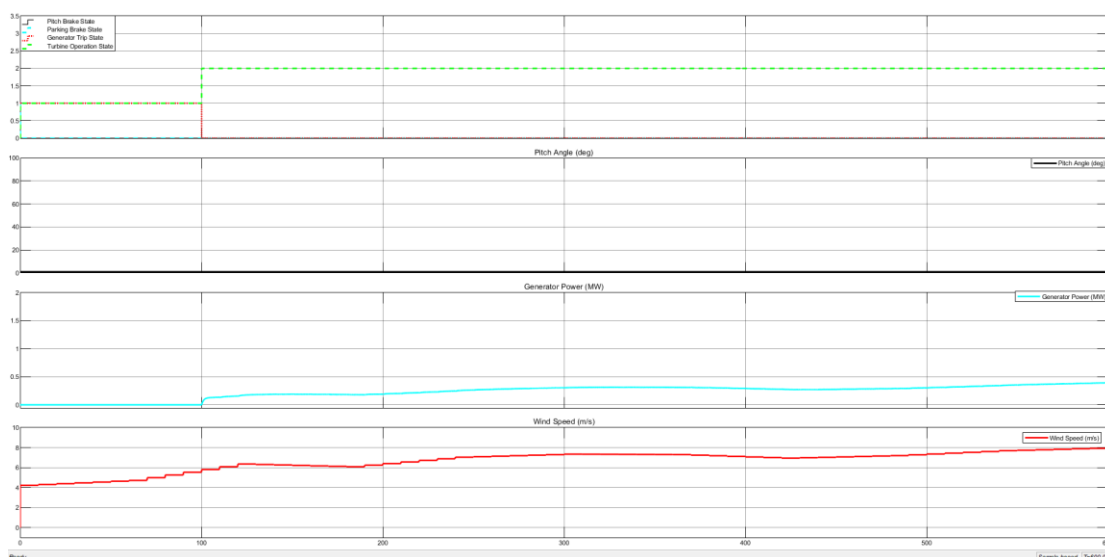
Πίνακας 18: Energy Yield έκτου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.7 Σενάριο ανέμου 7^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

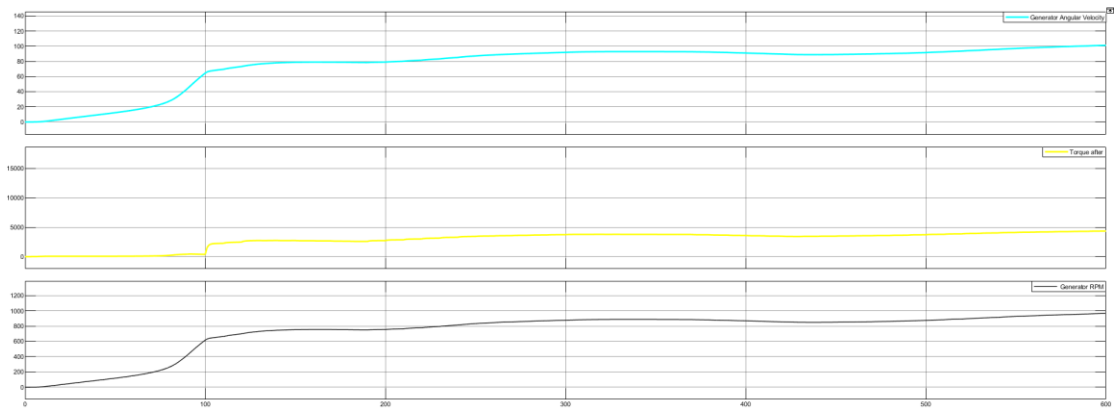


Διάγραμμα 37: 7^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

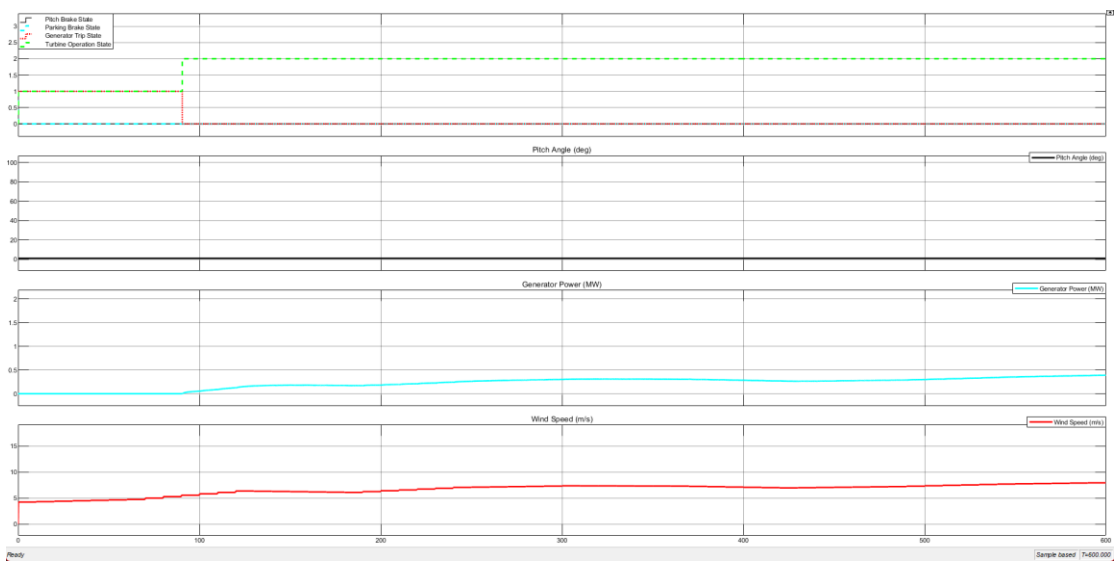
Κατά το 7^ο Σενάριο ανέμου (Διάγραμμα 37), η ταχύτητά του ξεκινά λίγο πάνω από την $u_{w,cut-in}$ και με μικρές και σχετικά ομαλές διακυμάνσεις καταλήγει σχεδόν σε $u_w = 8\text{m/s}$.



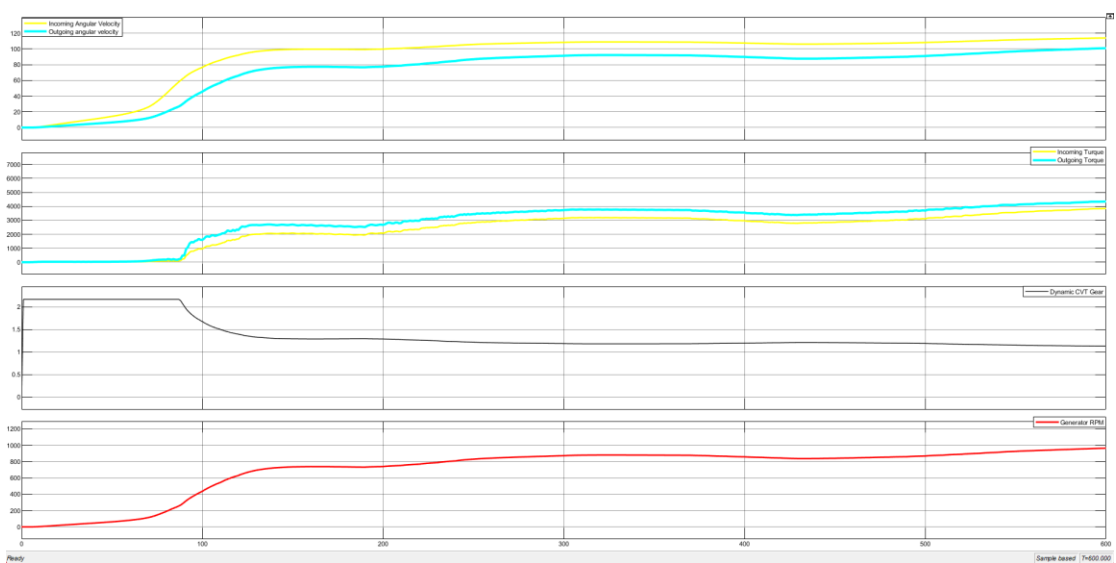
Διάγραμμα 38: Model A7: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



Διάγραμμα 39: Model A7: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



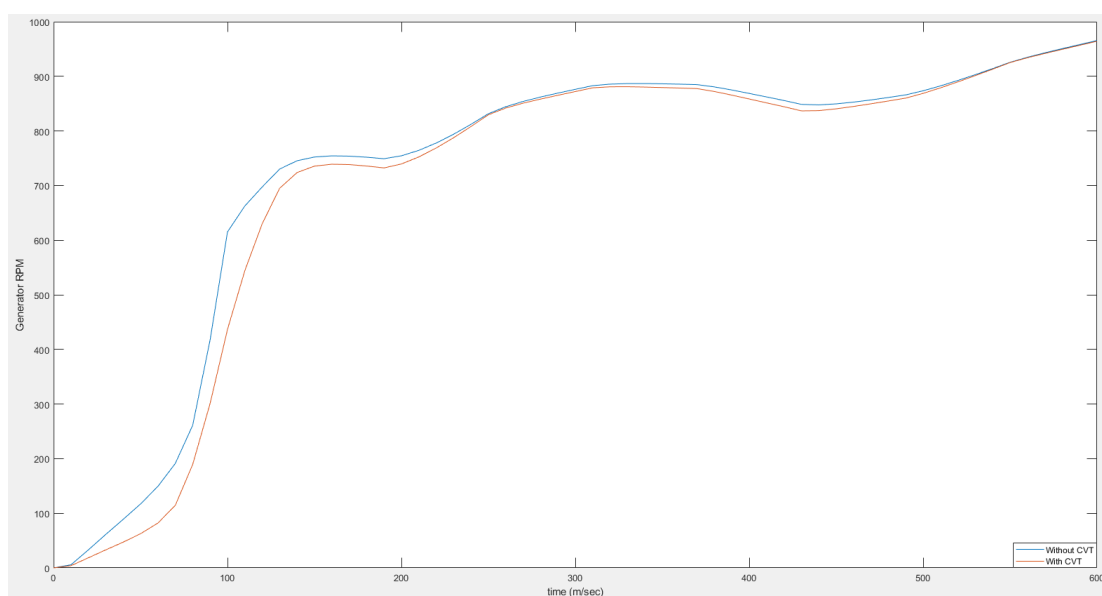
Διάγραμμα 40: Model B7: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time



Διάγραμμα 41: Model B7: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 38 και το Διάγραμμα 39 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A7, ενώ το Διάγραμμα 40 και το Διάγραμμα 41 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B7.

Το παρόν σενάριο δεν παρουσιάζει αποτελέσματα άξια σύγκρισης και δεν φαίνεται πως το Μοντέλο B7, δηλαδή η χρήση του κιβωτίου CVT να αυξάνει την αποδοτικότητα της Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα παράγει κατά 1,46% λιγότερα MW υπό το ίδιο σενάριο ανέμου. Στο σενάριο αυτό, καθώς ο άνεμος είναι σχετικά ομαλός και χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, σημαντικό ρόλο παίζει ο επιπλέον άξονας που έχει προστεθεί. Σημειώνεται πως οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου από τη μία είναι αρκετές, αλλά βρίσκονται σε ένα μικρό εύρος τιμών (Πίνακας 19).

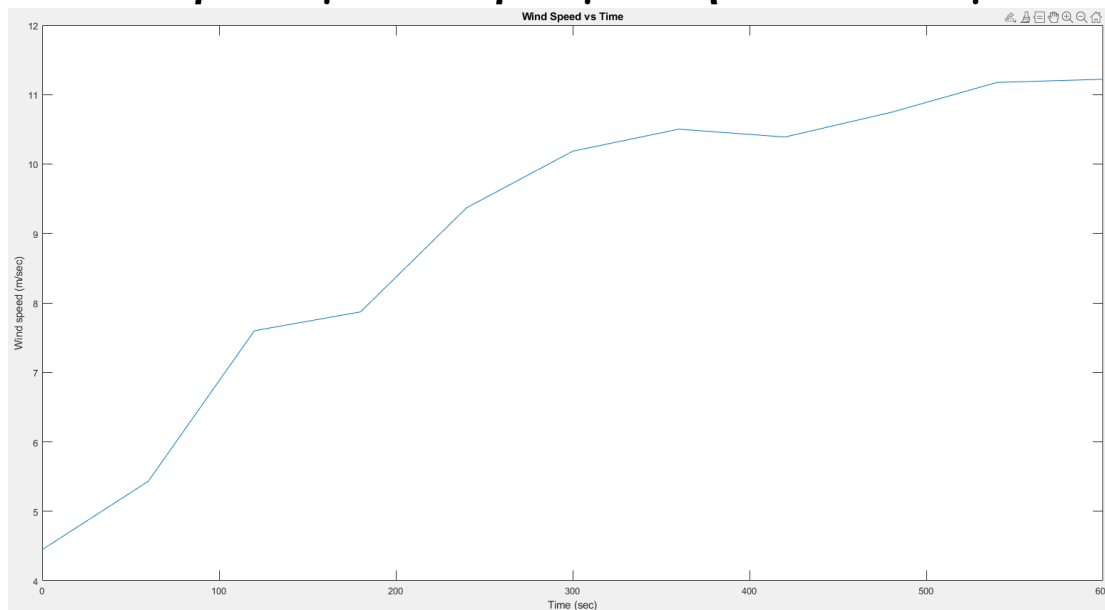


Διάγραμμα 42: High speed shaft angular for Wind Turbine model 7 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - Α/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - Α/Γ με CVT	Διαφορά
7	137	135	-1,46%

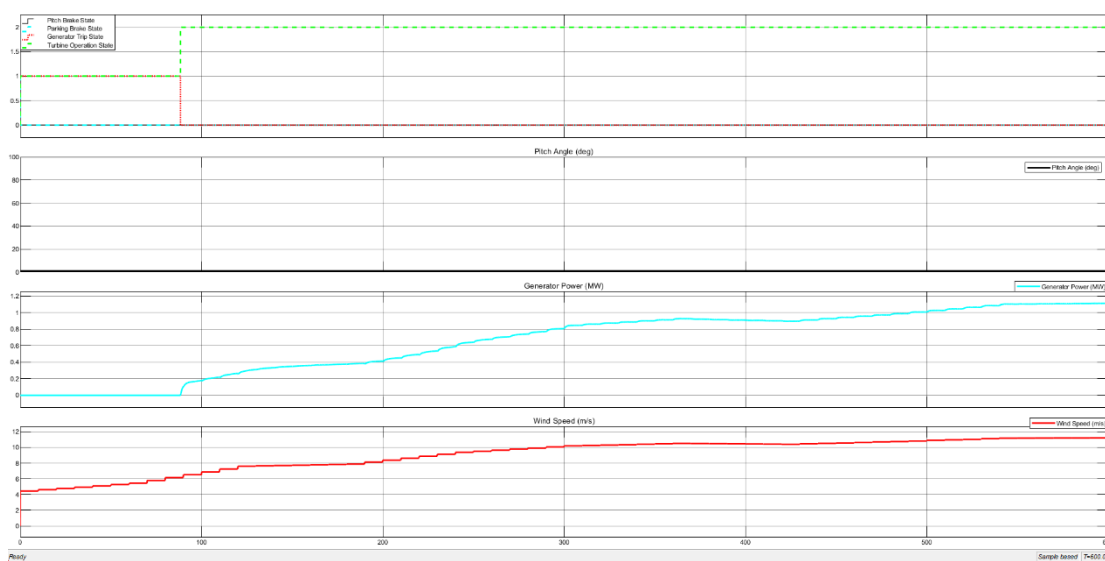
Πίνακας 19: Energy Yield εβδομομ Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ

5.8 Σενάριο ανέμου 8^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

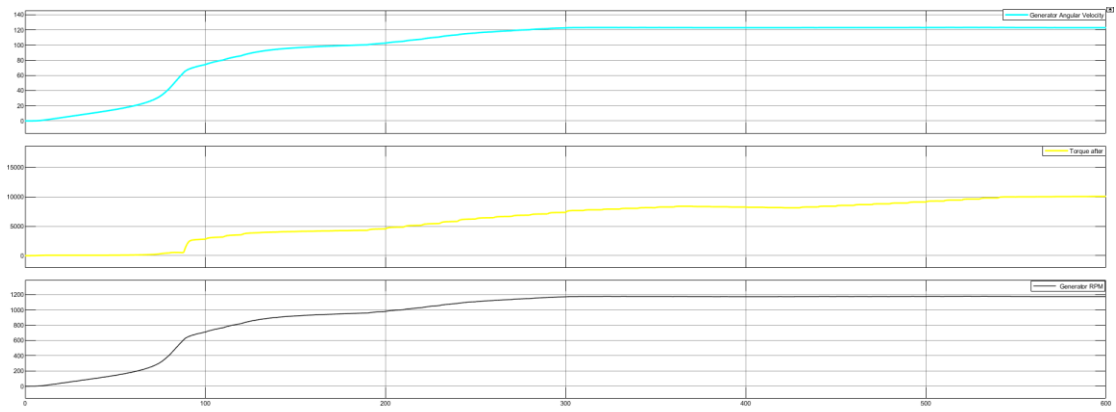


Διάγραμμα 43: 8^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

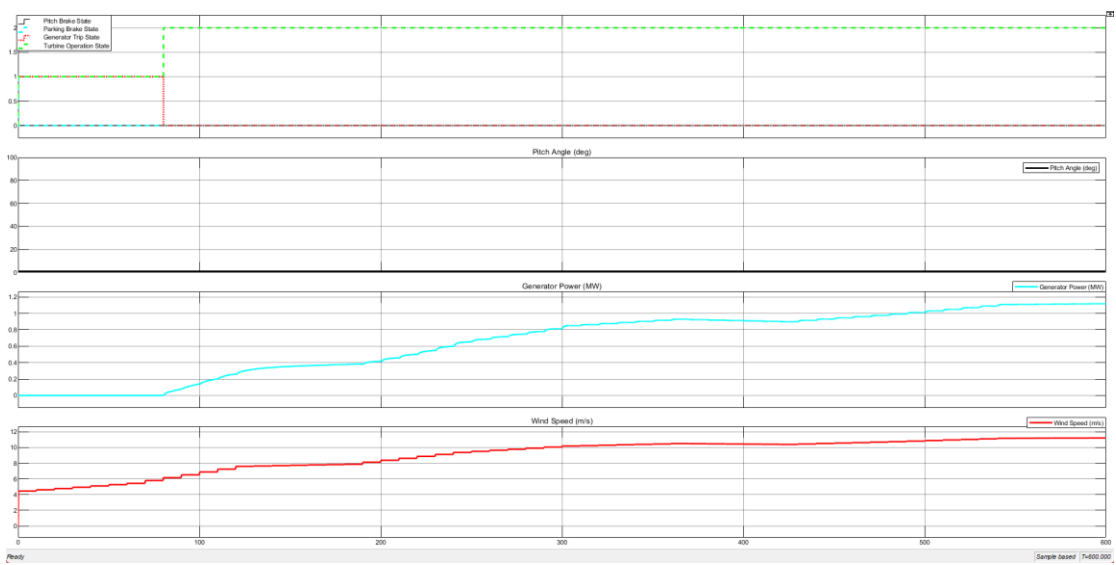
Το 8^ο Σενάριο ανέμου (Διάγραμμα 43) έχει όμοια χαρακτηριστικά με το 7^ο αλλά οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου βρίσκονται στο διάστημα [4,5 , 11,2] και όχι στο [4,3 , 8] του σεναρίου 7.



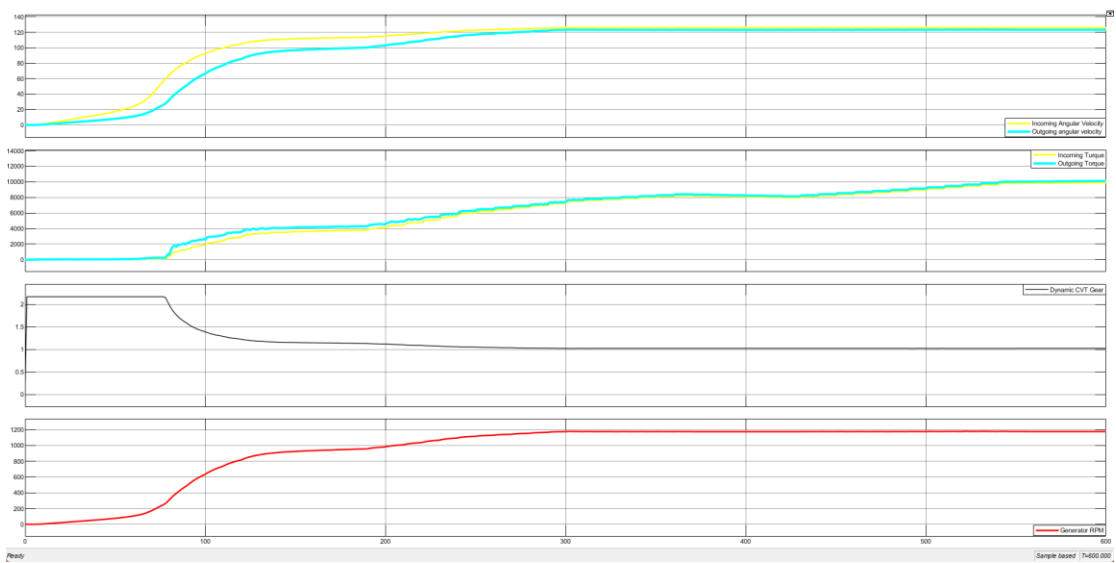
Διάγραμμα 44: Model A8: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



Διάγραμμα 45: Model A8: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 46: Model B8: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time

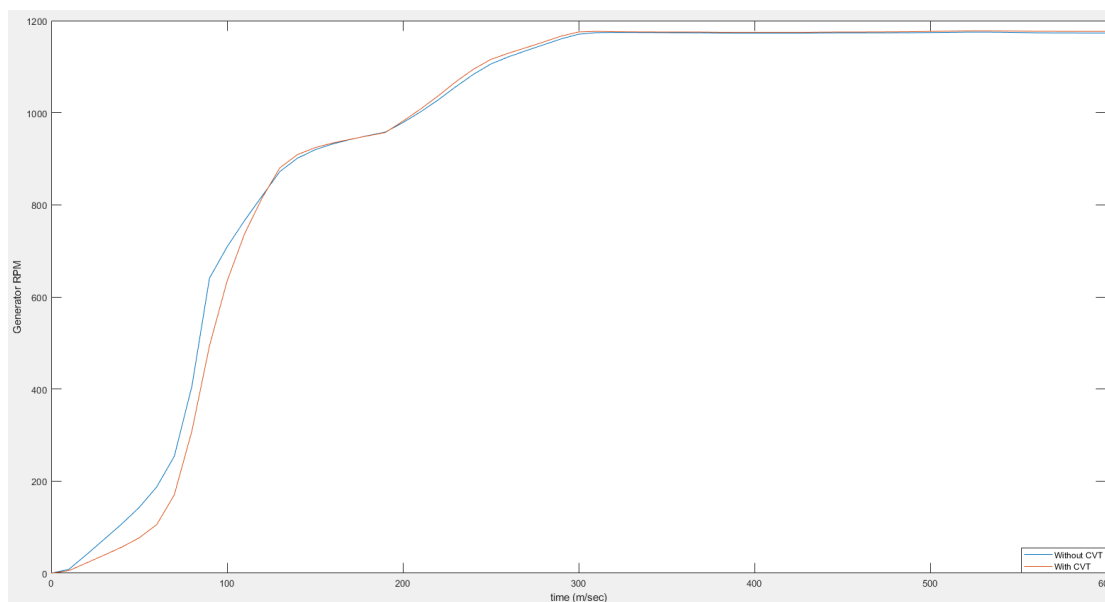


Διάγραμμα 47: Model B8: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 44 και το Διάγραμμα 45 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A8, ενώ το Διάγραμμα 46 και το Διάγραμμα 47 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B8.

Εδώ λοιπόν το Μοντέλο B8 ξεκινά λίγο περισσότερο ομαλά και πιο γρήγορα την παραγωγή ενέργειας από ότι το A8. Από τη στιγμή $t = 110\text{sec}$ κάποια στιγμή και μετά παρουσιάζει οριακά μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης της παραγωγικότητάς τη, αλλά και της γωνιακής ταχύτητας του γρήγορου άξονά της (Διάγραμμα 48). Για αυτόν το λόγο, παράγεται οριακά περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από το Μοντέλο B8.

Συνολικά, και τα δυο μοντέλα παράγουν την ίδια ποσότητα ενέργειας με σχεδόν όμοιο τρόπο. Ούτε σε αυτό το σενάριο φαίνεται πως η προσθήκη του κιβωτίου CVT συμβάλλει ιδιαίτερα στην αύξηση της παραγωγικότητας της A/Γ (Πίνακας 20).

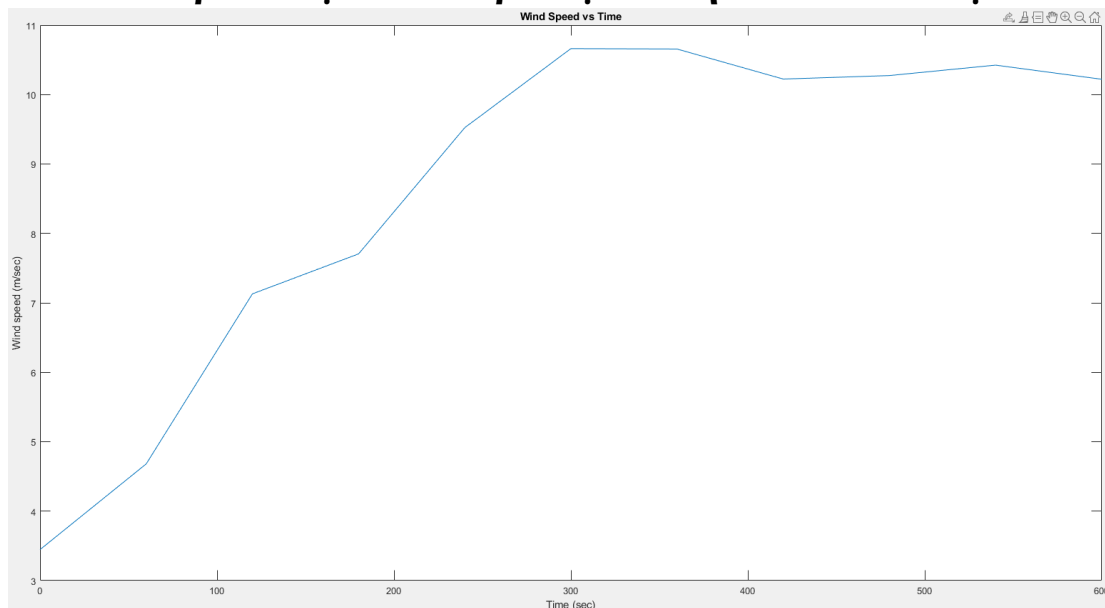


Διάγραμμα 48: High speed shaft angular for Wind Turbine model 8 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - A/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - A/Γ με CVT	Διαφορά
8	388	392	1,03%

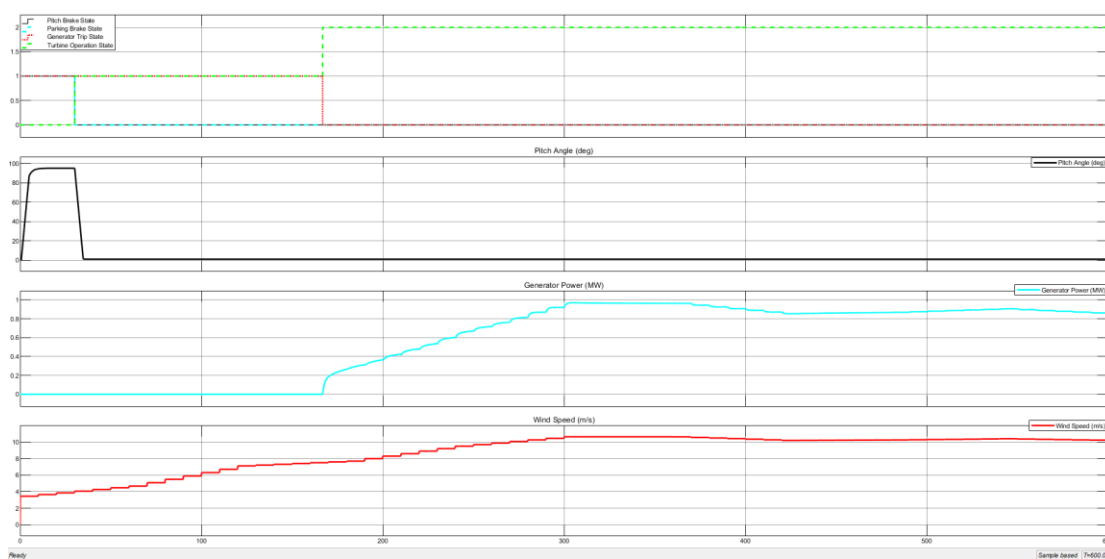
Πίνακας 20: Energy Yield όγδου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.9 Σενάριο ανέμου 9^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

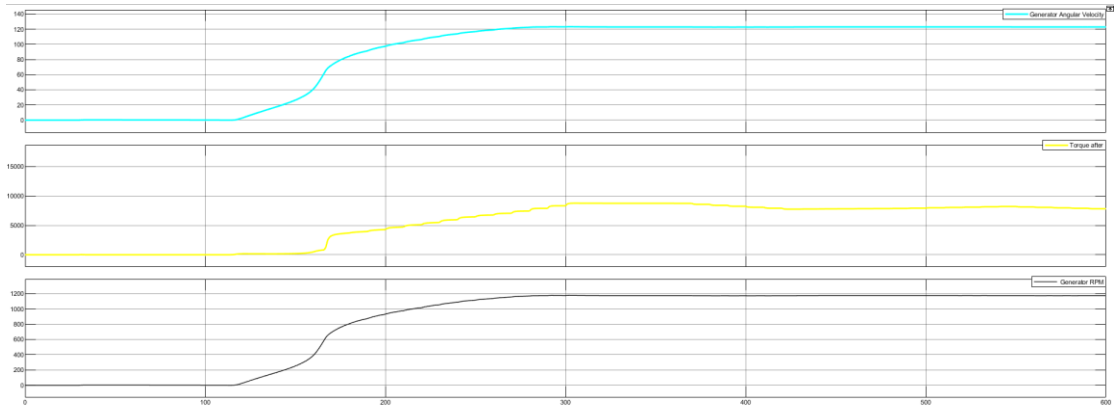


Διάγραμμα 49: 9^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

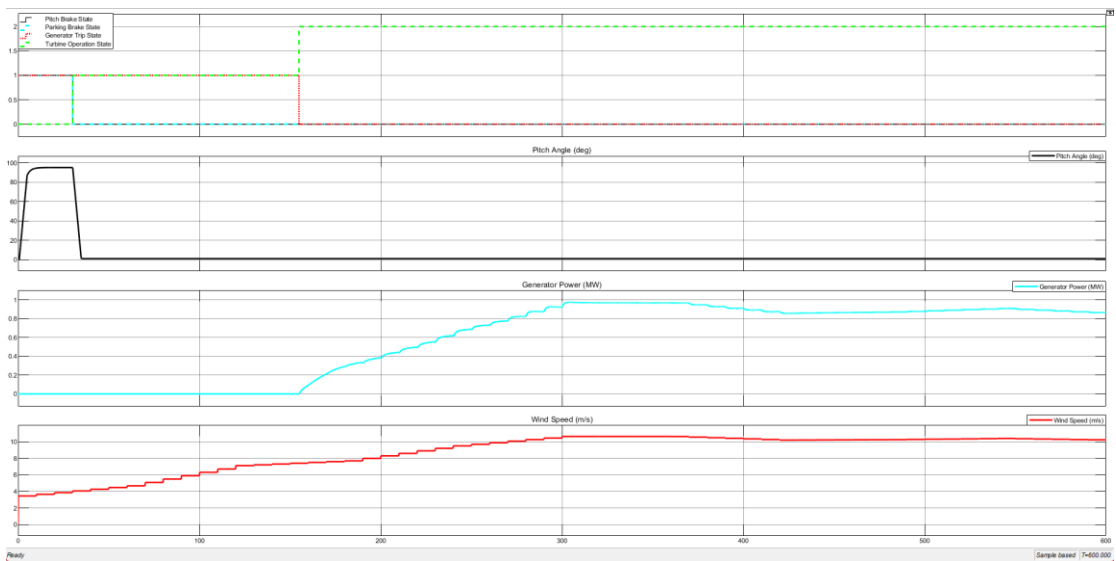
Κατά το 9^ο Σενάριο ανέμου (Διάγραμμα 50), η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη των σεναρίων 8 και 9. Η διαφορά είναι ότι αφού η u_w φτάσει περίπου την $u_{w,rated}$, σχεδόν σταθεροποιείται.



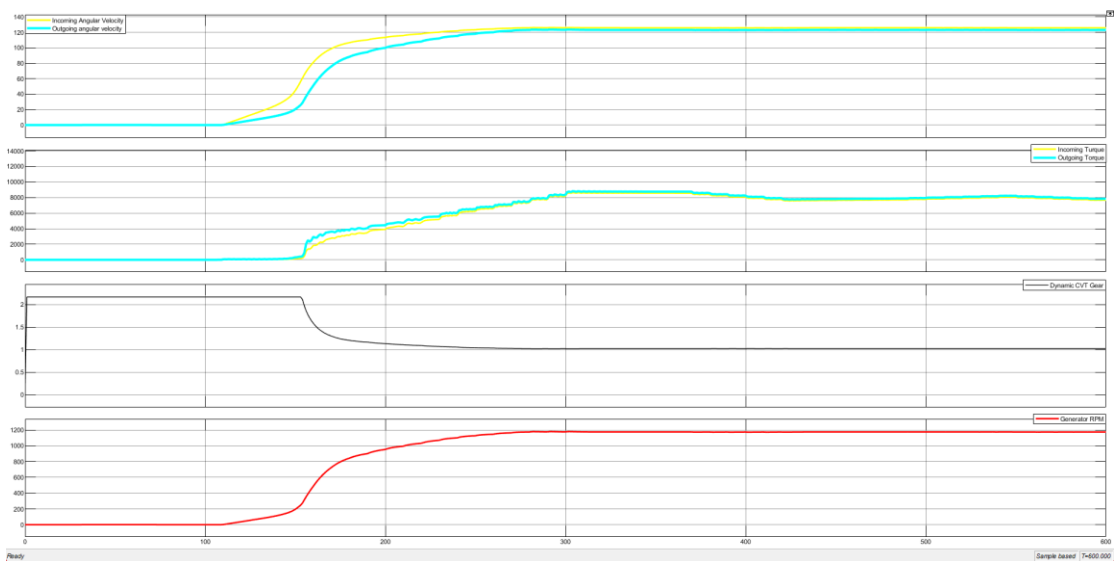
Διάγραμμα 50: Model A9: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



Διάγραμμα 51: Model A9: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 52: Model B9: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time



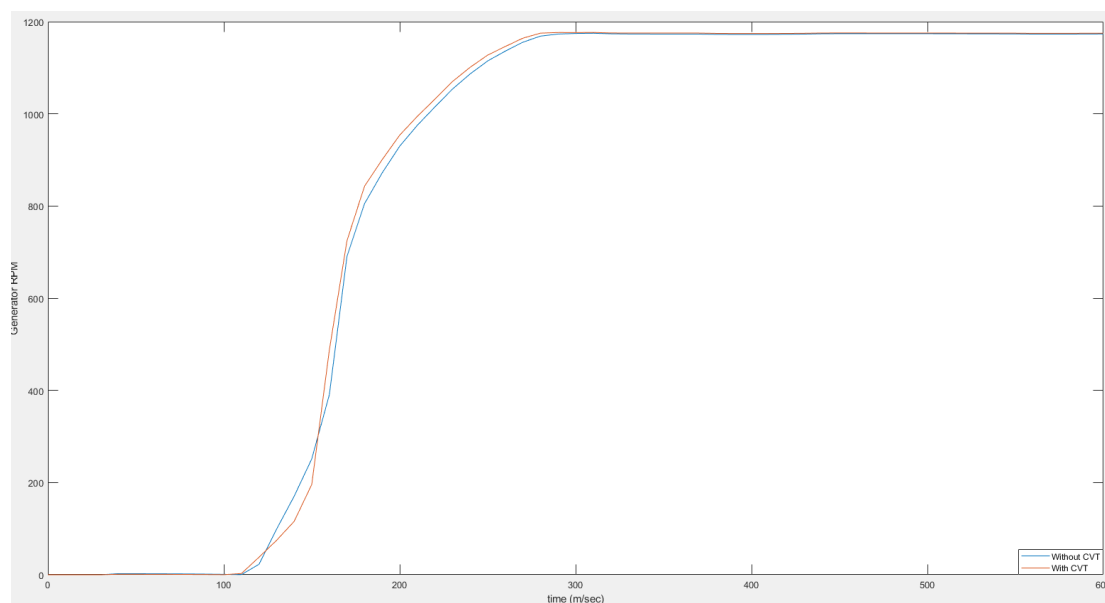
Διάγραμμα 53: Model B9: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ratio – Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 50 και το Διάγραμμα 51 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A9, ενώ το Διάγραμμα 52 και το Διάγραμμα 53 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B9.

Κατά την προσομοίωση του Μοντέλου A9, η παραγωγή ενέργειας ξεκινά και πάλι με περισσότερο απότομο τρόπο, καθώς και κατά λίγο πιο αργά από ότι η παραγωγή ενέργειας του Μοντέλου B9.

Παρόλα αυτά, και με βάση το Διάγραμμα 54, μέχρι τα 150sec οι στροφές του γρήγορου άξονα λόγω της πιο απότομης εκκίνησης της παραγωγής ενέργειας, είναι μεγαλύτερη, αλλά στη συνέχεια και μέχρι την $t=300\text{sec}$ όπου η ταχύτητα σχεδόν μεγιστοποιείται, η κατάσταση αντιστρέφεται.

Λόγω της παραπάνω συμπεριφοράς, το Μοντέλο B9 παρήγαγε 2,92% περισσότερη ενέργεια υπό το ίδιο σενάριο ανέμου από ότι το Μοντέλο A9 (Πίνακας 21).

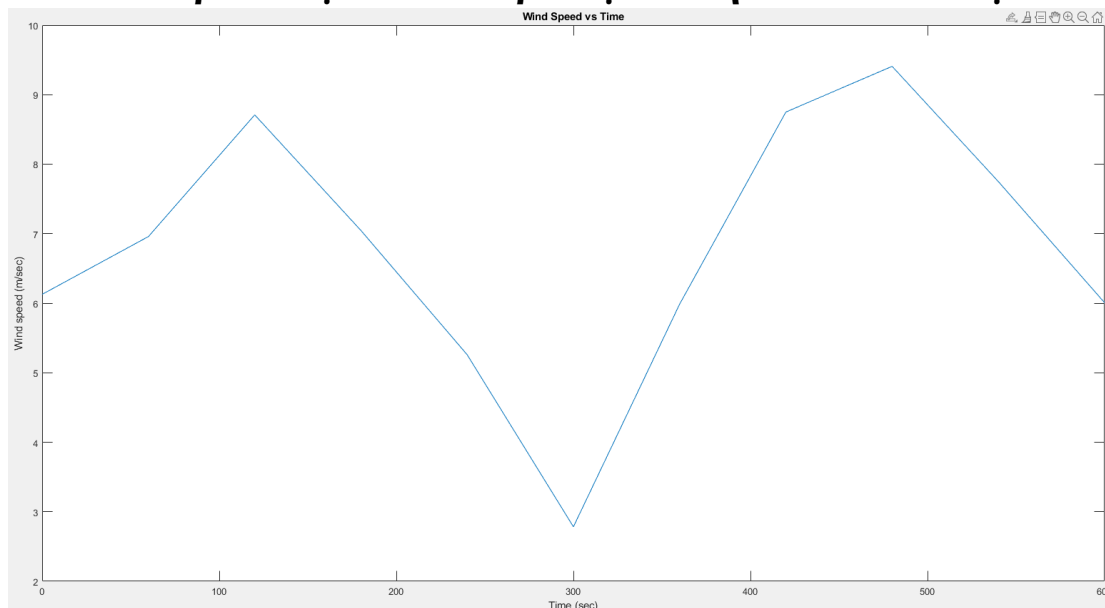


Διάγραμμα 54: High speed shaft angular for Wind Turbine model 9 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [$\text{MW} \cdot 10^6$] στα 600sec		
	Μοντέλο A - A/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - A/Γ με CVT	Διαφορά
9	342	352	2,92%

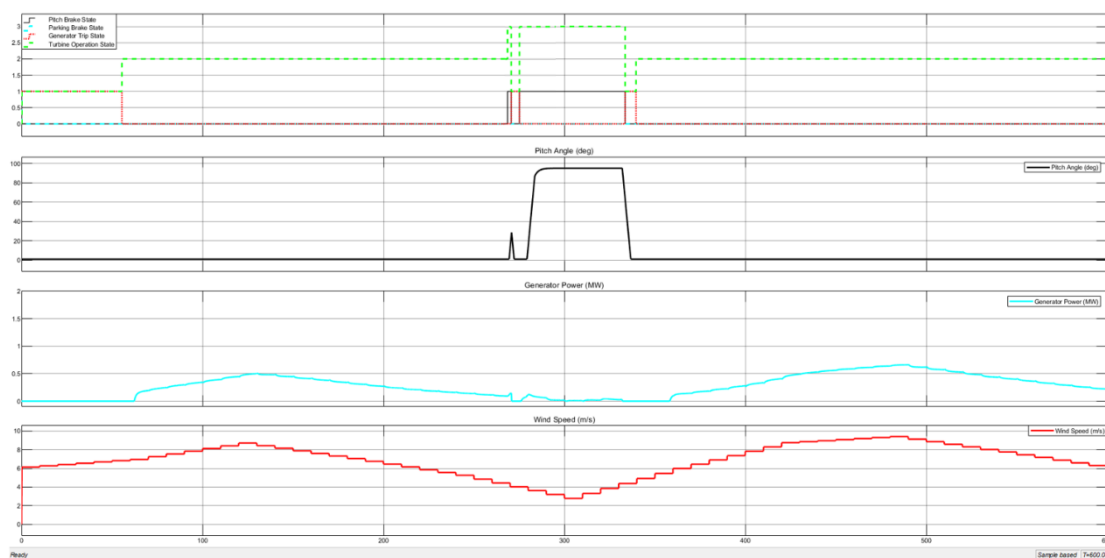
Πίνακας 21: Energy Yield ένατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.10 Σενάριο ανέμου 10^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

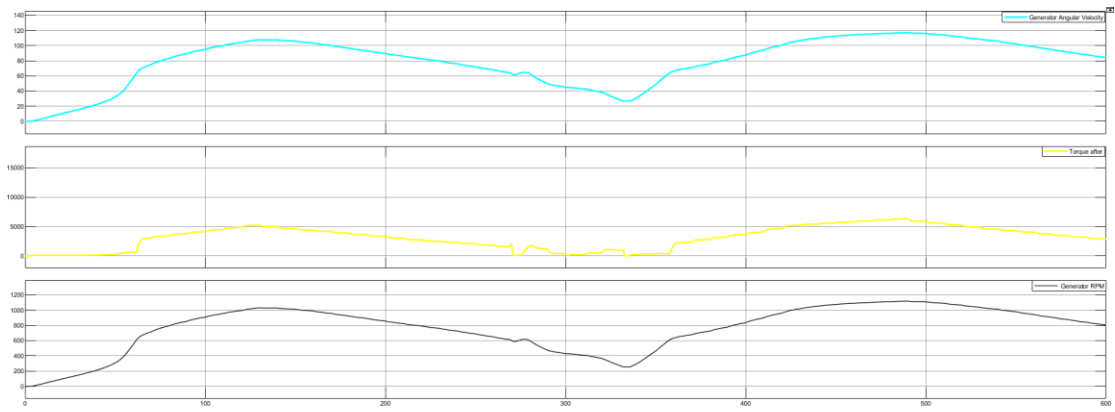


Διάγραμμα 55: 10ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

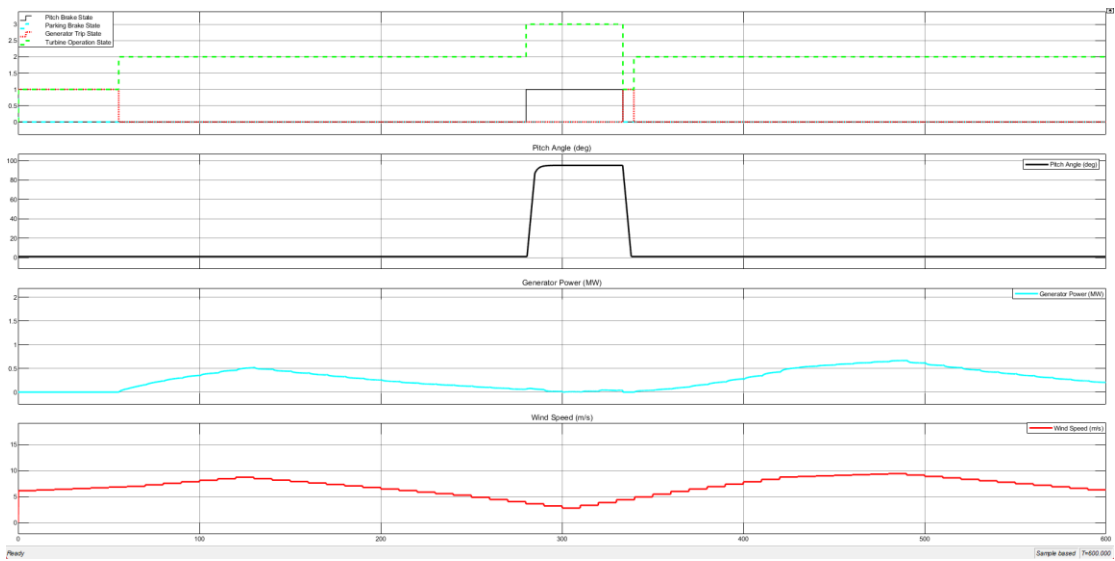
Στο 10^ο Σενάριο ανέμου (Διάγραμμα 55) η ταχύτητα του ανέμου ξεκινά πάνω από τη $u_{w,cut-in}$, και περίπου στα 120sec φτάνει στα σχεδόν 9m/s. Στη συνέχεια πέφτει αρκετά μέχρι και κάτω από την $u_{w,cut-in}$ και ανεβαίνει ξανά στα ίδια επίπεδο με πριν σχετικά απότομα. Τέλος, η u_w μειώνεται μέχρι και περίπου τα 6 m/s.



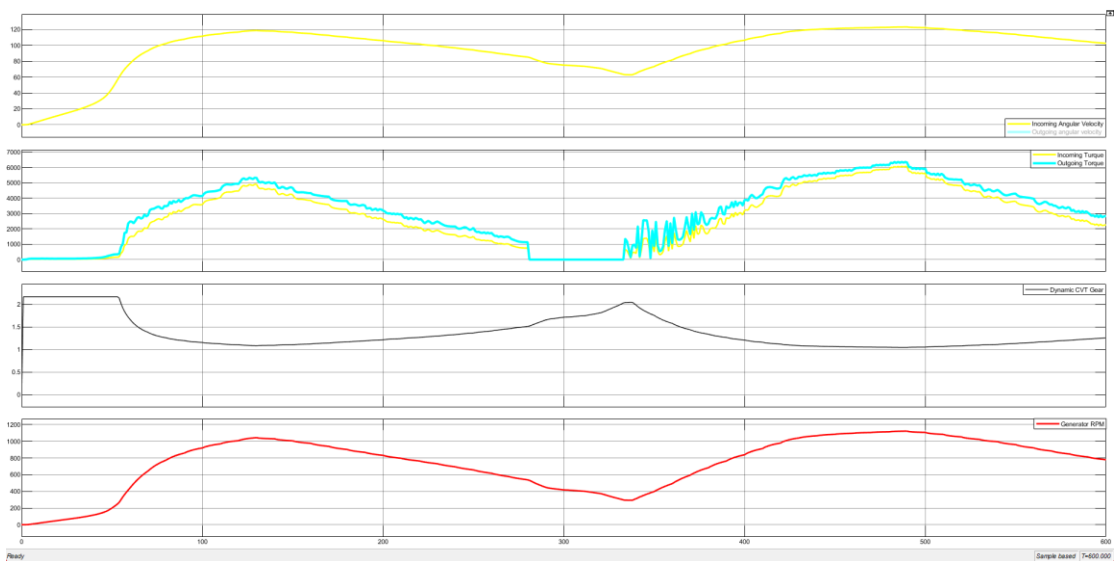
Διάγραμμα 56: Model A10: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time



Διάγραμμα 57: Model A10: Generator angular velocity - Torque after Gear Train - Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 58: Model B10: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production - Wind speed vs Time



Διάγραμμα 59: Model B10: Shafts angular velocities before and after CVT - Shafts Torque before and after CVT - Dynamic CVT Ratio - Generator RPM vs Time

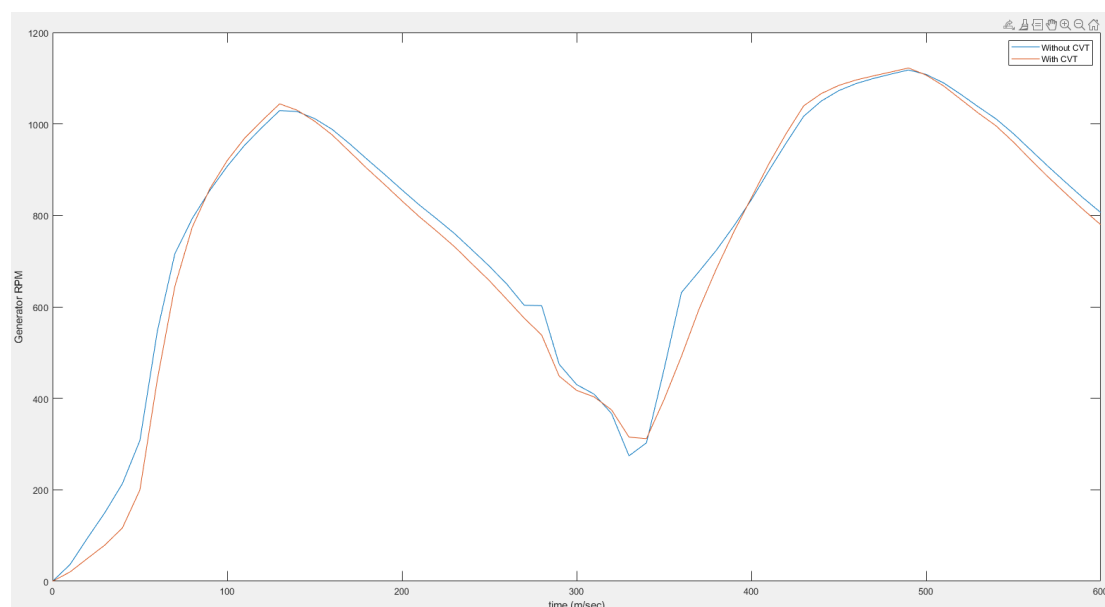
Το Διάγραμμα 56 και το Διάγραμμα 57 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A10, ενώ το Διάγραμμα 58 και το Διάγραμμα 59 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B10.

Το τρέχον σενάριο παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανέμου συνολικά, αλλά αυτές δεν γίνονται απότομα, καθώς για μεταβολή σχεδόν 5m/sec χρειάστηκε χρόνος σχεδόν 180sec. Αντίθετα, σε άλλα προηγούμενα σενάρια, όπως το 1 και το 3 παρουσίασαν πιο απότομες μεταβολές.

Για την προσομοίωση του Μοντέλου A10 παρουσιάστηκε και εδώ spike και πάλι λίγο πριν η ταχύτητα του ανέμου πέσει κάτω από την $u_{w,cut-in}$. Στη συνέχεια και αφού άνοιξε το Pitch Brake η παραγωγή ενέργειας έγινε με τρόπο ανάλογο της διακύμανσης του ανέμου.

Αντίστοιχη απόκριση είχε και το Μοντέλο B10 τόσο ως προς την παραγωγικότητα όσο και ως προς τη γωνιακή ταχύτητα του γρήγορου άξονά του. Η μεγάλη διαφορά είναι το spike που αποτράπηκε στην περίπτωση του Μοντέλου B10 και άρα προφύλαξε και σε αυτήν την περίπτωση τον μετατροπέα.

Συνολικά και τα δύο μοντέλα παρήγαγαν τα ίδια MW υπό το ίδιο σενάριο ανέμου (Πίνακας 23).

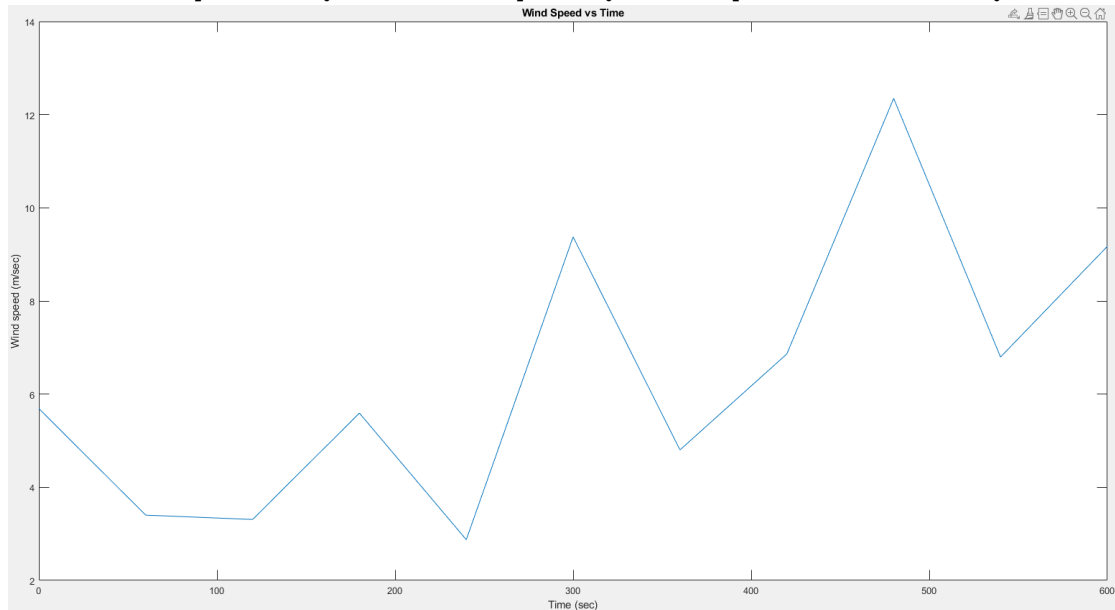


Διάγραμμα 60: High speed shaft angular for Wind Turbine model 10 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Μοντέλο A - A/Γ χωρίς CVT	Μοντέλο B - A/Γ με CVT	Διαφορά
10	163	163	0,00%

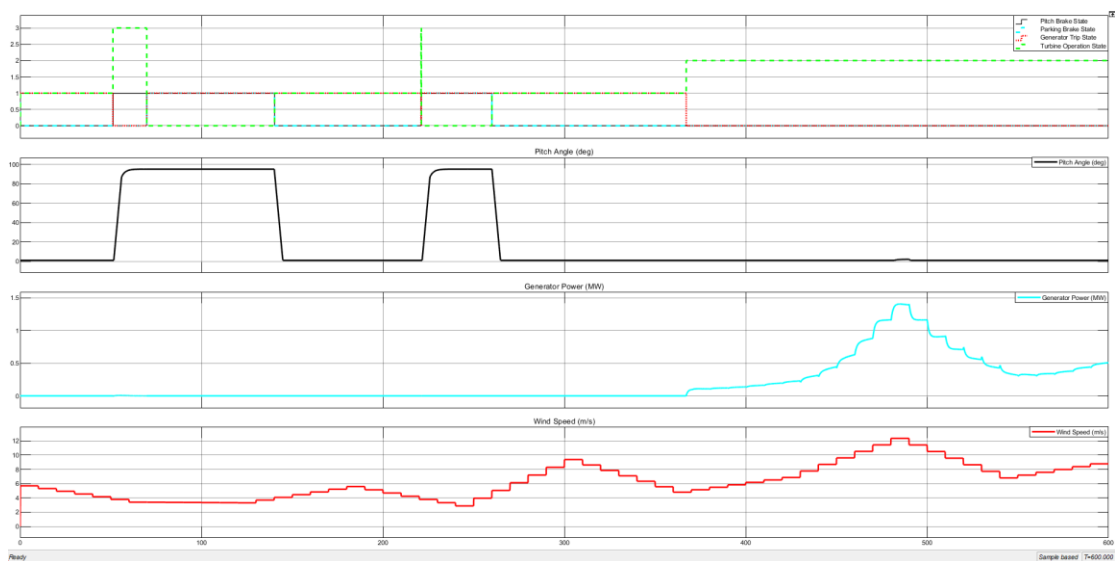
Πίνακας 22: Energy Yield δέκατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/Γ

5.11 Σενάριο ανέμου 11^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

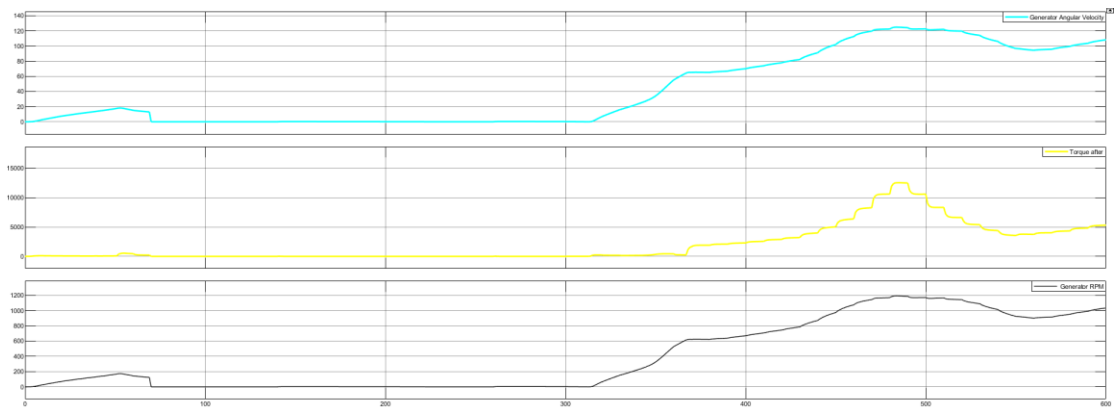


Διάγραμμα 61: 11^ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

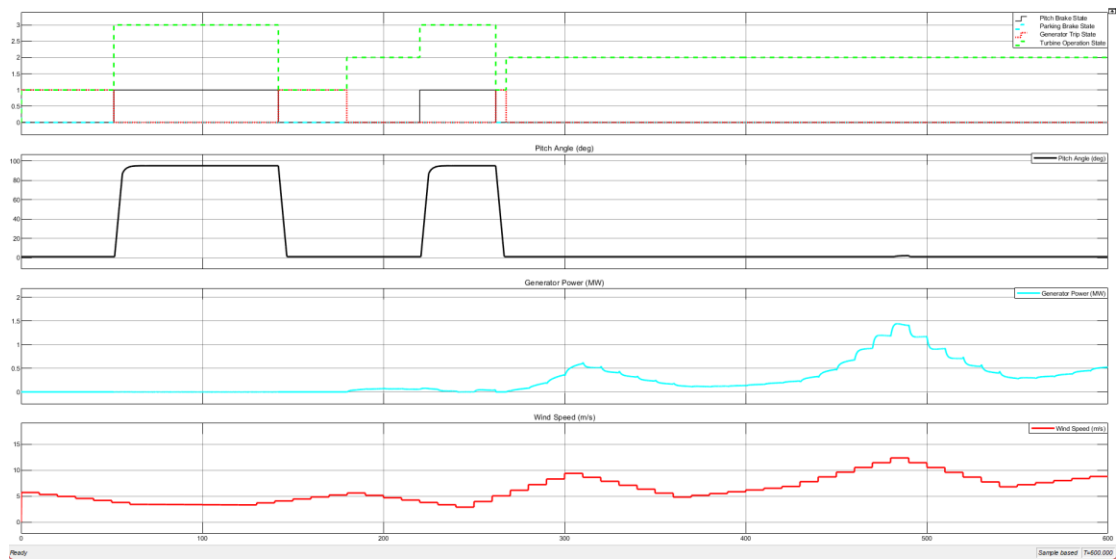
Κατά το 11^ο Σενάριο ανέμου (Διάγραμμα 61), η διακύμανση του ανέμου παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, λόγω των περισσότερων εναλλαγών. Η ταχύτητα του ανέμου ξεκινώντας πάνω από την $u_{w,cut-in}$ πραγματοποιώντας μικρές αλλά απότομες διακυμάνσεις πέφτει κάτω της $u_{w,cut-in}$ δυο φορές μέχρι την $t=230sec$. Στη συνέχεια παρουσιάζοντας μεγάλο ρυθμό αύξησης ανεβαίνει σχεδόν 2 m/sec κάτω από την $u_{w, rated}$ στην οποία και φτάνει στα 480sec μετά από μια πιο έντονη διακύμανση. Τέλος, η u_w μειώνεται απότομα και αυξάνεται και πάλι μέχρι να φτάσει τα σχεδόν 10m/sec κατά τη λήξη της προσομοίωσης.



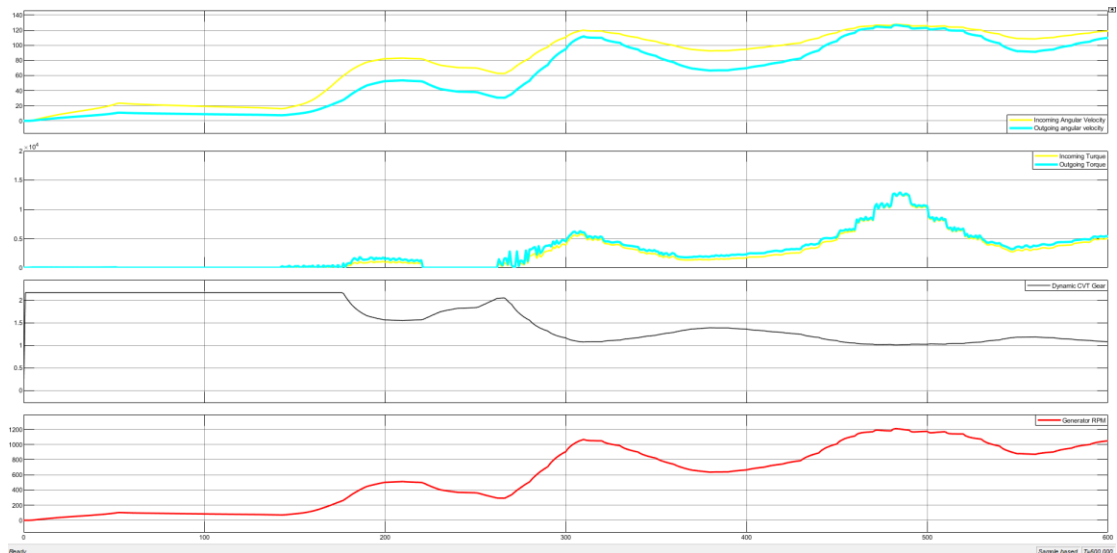
Διάγραμμα 62: Model A11: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production –Wind speed vs Time



Διάγραμμα 63: Model A11: Generator angular velocity - Torque after Gear Train Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 64: Model B11: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time



Διάγραμμα 65: Model B11: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ratio – Generator RPM vs Time

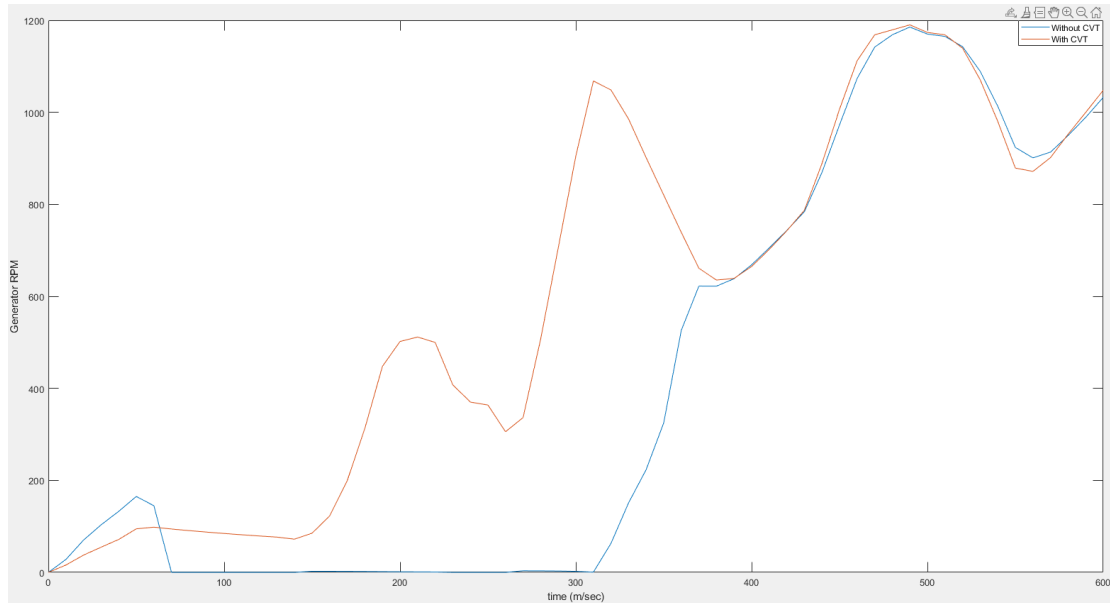
Το Διάγραμμα 62 και το Διάγραμμα 63 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A11, ενώ το Διάγραμμα 64 και το Διάγραμμα 65 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B11.

Το Μοντέλο A11, λόγω των διαδοχικών Pitch Brake που ανοίγουν, δεν καταφέρνει να ξεκινήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι την $t=370\text{sec}$, όταν και αυτή ξεκινά και συνεχίζει με τρόπο ανάλογο της ταχύτητας του ανέμου.

Αντίθετα, το Μοντέλο B11 παρά τα Pitch Brake που ανοίγουν για τον ίδιο χρόνο, διατηρώντας τις στροφές (Διάγραμμα 66) του γρήγορου άξονα σε ένα αρκετά καλό και μη μηδενικό επίπεδο αντίθετα με τις αντίστοιχες του Μοντέλου A11, κατάφερε να παράγει ενέργεια σχεδόν κατά 100sec παραπάνω, καθώς επίσης και ακόμα περίπου 50sec όπου εκεί η παραγωγή ήταν σαφώς μικρότερη.

Άρα λοιπόν και κατά αυτό το σενάριο επιβεβαιώνεται η καλύτερη ικανότητα του CVT να προσαρμόζεται στον άνεμο που μεταβαίνει από την $u_w < u_{w,\text{cut-in}}$ σε $u_w > u_{w,\text{cut-in}}$.

Έτσι, συνολικά το Μοντέλο B11 παρήγαγε κατά 30,1% περισσότερα MW από ότι το A11 υπό το ίδιο σενάριο ανέμου(Πίνακας 23).

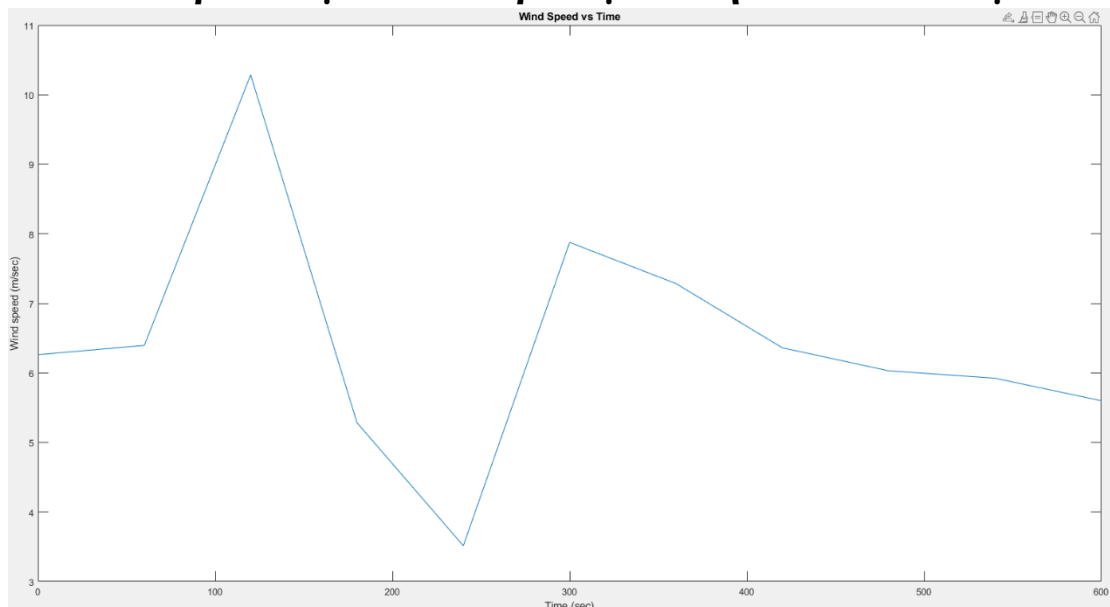


Διάγραμμα 66: High speed shaft angular for Wind Turbine model 11 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Χωρίς CVT	Με CVT	Διαφορά
11	116	151	30,10%

Πίνακας 23: Energy Yield ενδέκατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο A/T

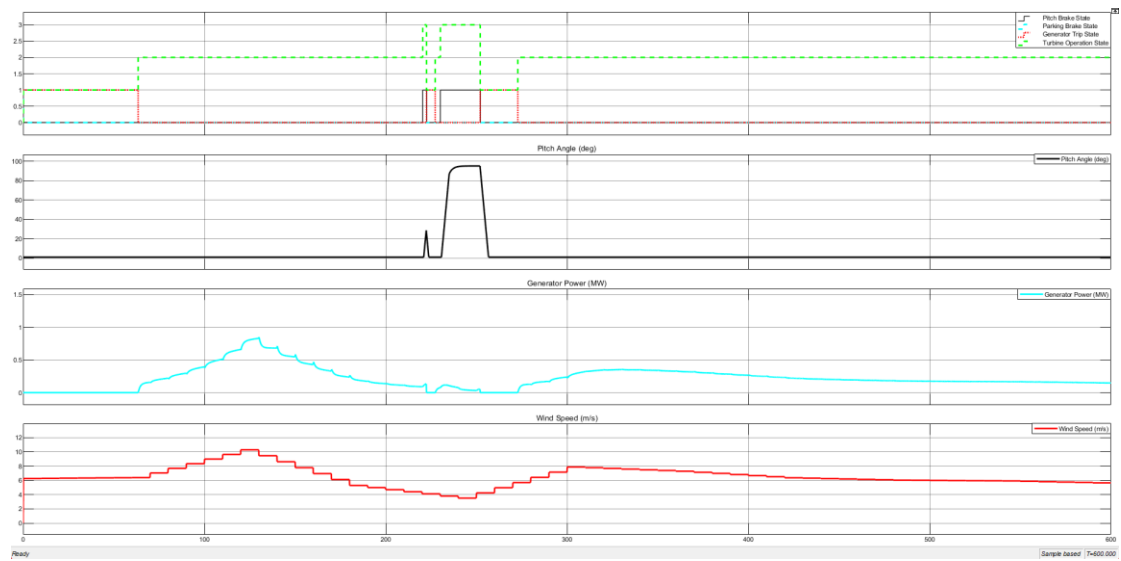
5.12 Σενάριο ανέμου 12^ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα



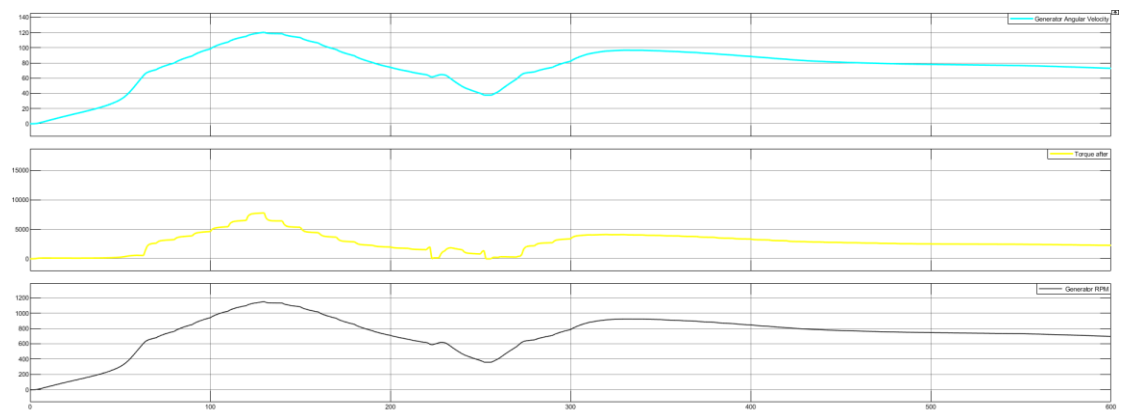
Διάγραμμα 67: 12ο σενάριο ανέμου - Ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο (MATLAB®)

Κατά το 12 σενάριο ανέμου η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει αρχικά μεγάλες, αλλά ομαλές διακυμάνσεις, αλλά αυτή τη φορά ο άνεμος είναι κοντά στην $u_{w, rated}$ και κατευθύνεται προς ταχύτητα μικρότερης της $u_{w, cut-in}$ από όπου και αυξάνεται απότομα.

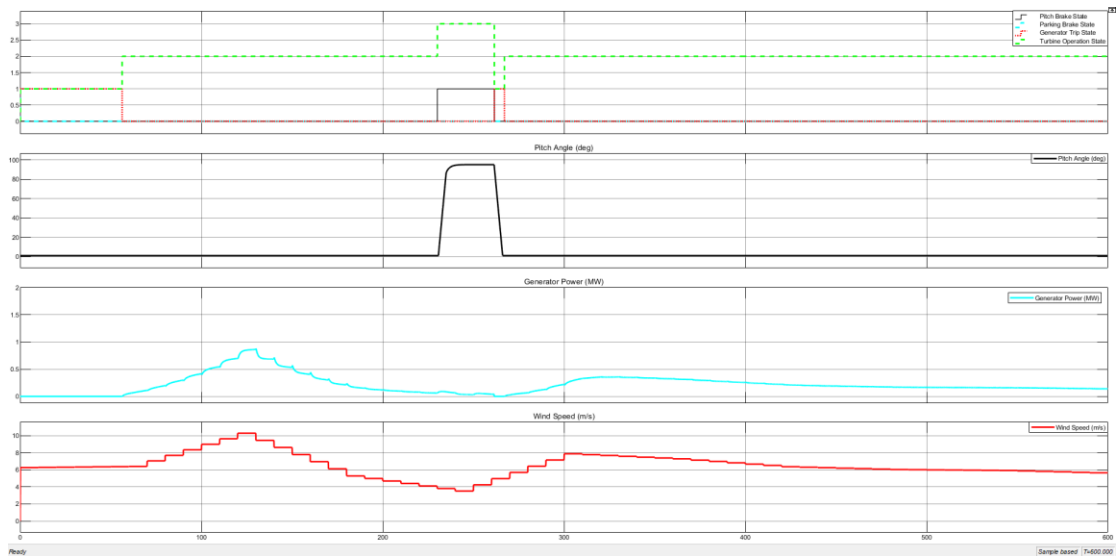
Στη συνέχεια η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται κατά τρόπο αρκετά ομαλό μέχρι και το τέλος του σεναρίου.



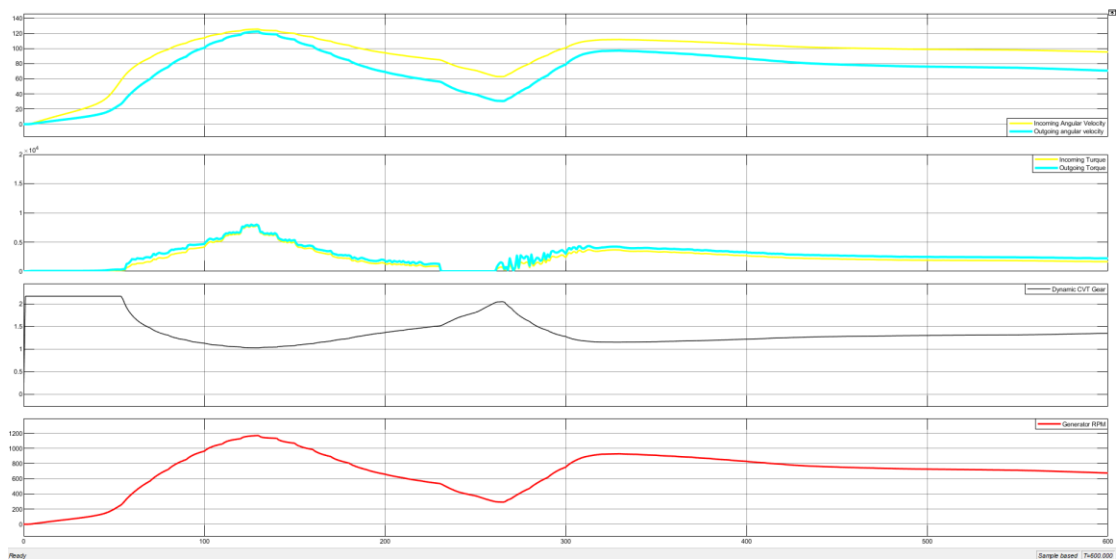
Διάγραμμα 68: Model A12: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time



Διάγραμμα 69: Model A12: Generator angular velocity - Torque after Gear Train Generator RPM vs Time



Διάγραμμα 70: Model B12: Wind Turbine operation states - Pitch angle - Energy production – Wind speed vs Time

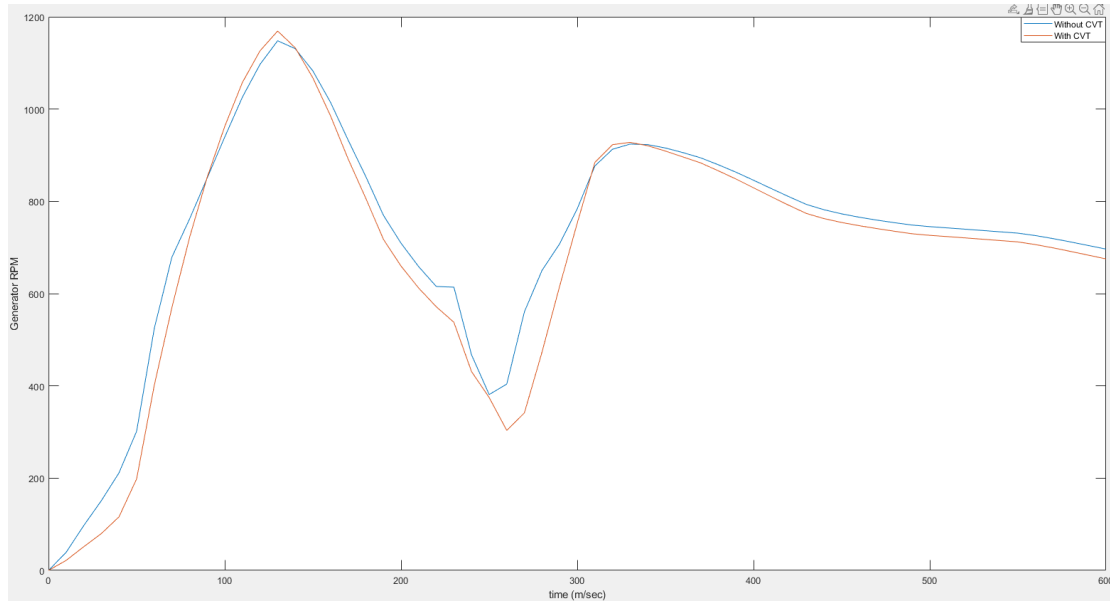


Διάγραμμα 71: Model B12: Shafts angular velocities before and after CVT – Shafts Torque before and after CVT – Dynamic CVT Ration – Generator RPM vs Time

Το Διάγραμμα 68 και το Διάγραμμα 69 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου A12, ενώ το Διάγραμμα 70 και το Διάγραμμα 71 αναφέρονται στην προσομοίωση του Μοντέλου B12.

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου A12 παρατηρείται και πάλι spike, πράγμα που δεν παρατηρείται κατά την προσομοίωση του Μοντέλου B12.

Συνολικά το μοντέλο B12 παράγει κατά 0,37% λιγότερες MW (Πίνακας 24) από ότι το A12 στο ίδιο σενάριο ανέμου, ίσως λόγω του ενός παραπάνω άξονα που διαθέτει η A/Γ του μοντέλου B12 και άρα η συνολική ροπή αδράνειας του συστήματος κίνησής του είναι μεγαλύτερη (Πίνακας 24). Σε κάθε περίπτωση η υστέρηση ως προς τη γωνιακή ταχύτητα του γρήγορου άξονα δεν είναι σημαντική.



Διάγραμμα 72: High speed shaft angular for Wind Turbine model 12 without and with CVT

Αριθμός Σεναρίου	Παραγωγή ενέργειας [MW*10 ⁶] στα 600sec		
	Χωρίς CVT	Με CVT	Διαφορά
12	131	130	-0,76%

Πίνακας 24: Energy Yield δωδέκατου Σεναρίου ανέμου ανά μοντέλο Α/Γ

5.13 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα προσθήκης κιβωτίου CVT σε δεδομένη Α/Γ

Στο τρέχον υποκεφάλαιο και με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω δώδεκα προσομοιώσεων υπό δώδεκα διαφορετικά σενάρια ανέμου των δέκα λεπτών, θα παρουσιαστούν τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα για τη χρησιμότητα της προσθήκης ενός κιβωτίου CVT σε μία Α/Γ σαν και αυτή που παρουσιάστηκε.

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί πως ορισμένα από τα σενάρια που παρουσιάστηκαν παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά και για αυτό κρίνεται σκόπιμη η κατηγοριοποίησή τους ως προς αυτά.

Την πρώτη κατηγορία την αποτελούν τα Σενάρια ανέμου 10 και 12, κατά τα οποία υπήρξαν διακυμάνσεις ανέμου, αλλά ήταν αρκετά ομαλές. Σε αυτά τα δύο σενάρια τα Μοντέλα B10 και B12 δεν παρήγαγαν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, αλλά προστάτησαν κατά κάποιον βαθμό τον μετατροπέα, καθώς απορρόφησαν τα spikes κατά την πτώση της u_w κάτω της $u_{w,cut-in}$. Επίσης, η προσθήκη ενός ακόμα άξονα μεταξύ κύριου κιβωτίου ταχυτήτων και κιβωτίου CVT, είναι πιθανό πως συντέλεσε κατά κάποιον βαθμό στη μικρή υστέρηση των Μοντέλων B10 και B12 ως προς την γωνιακή ταχύτητα των γρήγορων αξόνων τους.

Τη δεύτερη κατηγορία την αποτελούν τα Σενάρια ανέμου 7,8 και 9, τα οποία και παρουσίασαν ταχύτητες ανέμων, οι οποίες όντας αύξουσες κατά το μεγαλύτερο μέρος

των προσομοιώσεων, κυμαίνονταν κάθε φορά σε διαφορετικά εύρη ταχυτήτων. Κατά τις προσομοιώσεις των σεναρίων αυτών, παρατηρήθηκε πως όταν ο άνεμος κυμαινόταν εντός σχετικά μικρού εύρους ταχυτήτων το κιβώτιο CVT δεν ωφέλησε ιδιαίτερα την παραγωγικότητα της Α/Γ, αλλά όταν το εύρος αυτό αυξήθηκε, η εικόνα αντιστράφηκε κατά έναν μικρό αλλά υπολογίσιμο βαθμό. Και στα σενάκια αυτά παρατηρήθηκε πιο ομαλή εκκίνηση κατά την έναρξη της παραγωγής ενέργειας, των μοντέλων Β έναντι των Μοντέλων Α.

Η Τρίτη κατηγορία απαρτίζεται από τα Σενάκια 1 και 2, όπου το 2^ο αποτελείται από τις ταχύτητες ανέμου του 1^{ου} σεναρίου αυξημένες κατά 2 m/s. Κατά το 1^ο σενάκι παρατηρήθηκε μεγάλο κέρδος του Μοντέλου Β1 σε σχέση με το Α1, τόσο λόγω της απορρόφησης των έξι spikes και της πιο αυξημένης παραγωγικότητας όσο και της προφύλαξης του μετατροπέα. Από την άλλη, το Μοντέλο Α2 του δεύτερου σεναρίου ανέμου κατάφερε να απενεργοποιήσει νωρίτερα το Pitch Brake με αποτέλεσμα να μη χάσει πολύτιμο χρόνο παραγωγής σε αντίθεση με το Μοντέλο Β2. Παρόλα αυτά, το Μοντέλο Β2 με τη χρήση της δυναμικής σχέσης που διαθέτει το κιβώτιο CVT αντιστάθμισε κατά έναν βαθμό την απώλεια της ενέργειας που αναφέρθηκε.

Το Σενάκι ανέμου 4 αποτελεί από μόνο του την κατηγορία 4. Το σενάκι αυτό παρουσίασε ταχύτητα ανέμου με μειούμενο ρυθμό, κατά το οποίο αναδείχθηκε η ικανότητα του Μοντέλου Β4 να διατηρεί τη γωνιακή ταχύτητα του γρήγορου άξονά του για κάποιο διάστημα ακόμα και όταν $u_w < u_{w,cut-in}$, σε αντίθεση με το Α4. Με τον τρόπο αυτό είναι περισσότερο έτοιμο να ξεκινήσει την παραγωγή ενέργειας με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου πάνω από την $u_{w,cut-in}$.

Η τελευταία κατηγορία αποτελείται από τα Σενάκια ανέμου 3,5,6 και 11 κατά τα οποία οι διακυμάνσεις του ανέμου ήταν περισσότερες, αλλά και πιο έντονες. Σε γενικές γραμμές τα σενάκια αυτά ανέδειξαν την ικανότητα του κιβωτίου CVT να απορροφά τα spikes και να βοηθά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να ξεκινήσει πιο ομαλά, αλλά και πιο γρήγορα. Από την άλλη, στην περίπτωση του σεναρίου 6, το Pitch Brake έμεινε περισσότερο δευτερόλεπτα ενεργοποιημένο στην περίπτωση του Μοντέλου Β6 από ότι στην περίπτωση του Μοντέλου Α6 με αποτέλεσμα αυτό να έχει έναν μικρό αντίκτυπο στην παραγωγή ενέργειας. Παρόλα αυτά, στα σενάκια αυτά τα Μοντέλα Β παρουσίασαν και τη μεγαλύτερη διαφορά σε ως προς την απόδοσή τους.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται τα παραπάνω συγκεντρωμένα με σκοπό την καλύτερη κατανόησή τους (Πίνακας 25).

Συγκεντρωτικά συμπεράσματα χρήσης κιβωτίου CVT σε δεδομένη Α/Γ			
ΚΑΤ.	Σενάριο	Αξιολόγηση χρήσης κιβωτίου CVT ως προς την παραγωγικότητα	Energy Yield [MW ^{10^6}]
1	10	Δεν παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, αλλά υπήρξε απορρόφηση των spikes	0,00%
	12	Δεν παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, αλλά η εκκίνηση της παραγωγής της έγινε κατά τρόπο περισσότερο ομαλό	-0,76%
2	7	Δεν παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, αλλά η εκκίνηση της παραγωγής της έγινε κατά τρόπο περισσότερο ομαλό (μικρό εύρος uw)	-1,46%
	8	Παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, η εκκίνηση της παραγωγής ενέργειας έγινε κατά τρόπο πιο ομαλό (μεγάλο εύρος uw)	1,03%
	9	Παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, η εκκίνηση της παραγωγής ενέργειας έγινε κατά τρόπο πιο ομαλό και πιο γρήγορο (μεγάλο εύρος uw)	2,92%
3	1	Παράχθηκε αρκετά περισσότερη ενέργεια, απορροφήθηκαν και τα 6 spikes, η παραγωγή ενέργειας ξεκίνησε αρκετά νωρίτερα και πιο ομαλά	26,60%
	2	Δεν παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, αλλά η εκκίνηση της παραγωγής της έγινε κατά τρόπο περισσότερο ομαλό	-0,37%
4	4	Παράχθηκε λίγη περισσότερη ενέργεια, η παραγωγή της οποίες ξεκίνησε με τρόπο περισσότερο ομαλό και λίγο πιο γρήγορο	2,59%
5	3	Παράχθηκε αρκετά περισσότερη ενέργεια, η παραγωγή ενέργειας ξεκίνησε αρκετά νωρίτερα και πιο ομαλά	18,24%
	5	Παράχθηκε αρκετά περισσότερη ενέργεια, η παραγωγή ενέργειας ξεκίνησε αρκετά νωρίτερα και πιο ομαλά, καθώς και απορροφήθηκαν και τα 3 spikes	199,61%
	6	Δεν παράχθηκε περισσότερη ενέργεια, η παραγωγή της ξεκίνησε πιο ομαλά και λίγο πιο γρήγορα	-2,56%
	11	Παράχθηκε αρκετά περισσότερη ενέργεια, η παραγωγή ενέργειας ξεκίνησε αρκετά νωρίτερα και πιο ομαλά	30,10%

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικά Συμπεράσματα χρήσης κιβωτίου CVT σε Α/Γ ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Συγκεντρωτικά, με βάση τα παραπάνω, τα Μοντέλα Β χάρις την παρουσία κιβωτίου CVT μπορούν και προφυλάσσουν τον μετατροπέα από spikes και απότομες εκκινήσεις παραγωγής ενέργειας. Επίσης, μετά την απενεργοποίηση του Pitch Brake, τα Μοντέλα Β ξεκινούν την παραγωγή ενέργειας νωρίτερα με αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερης ενέργειας, αρκεί βέβαια πριν η u_w πέσει κάτω της $u_{w, cut-in}$ να βρίσκεται κατά περίπου 2 m/s πάνω από αυτήν, ώστε να έχει το σύστημα την απαιτούμενη ώθηση για να διατηρήσει τη γωνιακή ταχύτητα του γρήγορου άξονα, όσο το Pitch Brake είναι ενεργοποιημένο. Το τελευταίο είναι το σημείο στο οποίο το κιβώτιο CVT συνεισφέρει περισσότερο. Συμπληρωματικά, είναι ευδιάκριτο το γεγονός ότι στα σενάρια όπου τα Μοντέλα Α υπερτερούν, υπερτερούν κατά ελάχιστο βαθμό από τα Μοντέλα Β στα αντίστοιχα σενάρια. Η διαφορά αυτή, όπως αναφέρθηκε, είναι πολύ πιθανό να εξαρτάται από τα φυσικά μεγέθη του άξονα που προστέθηκε στο σύστημα, χωρίς παράλληλη μεταβολή των υπόλοιπων αντίστοιχων παραμέτρων.

Τέλος, το κιβώτιο CVT αποτελεί μία χρήσιμη προσθήκη σε μία ήδη υπάρχουσα Α/Γ, καθώς φαίνεται πως μπορεί να βελτιώσει την απόδοσή της σε συγκεκριμένες περιόδους και περιοχές λειτουργίας μιας Α/Γ, αν φυσικά ληφθούν υπόψιν οι περιορισμοί και οι τρόποι βελτίωσής τους που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 5.14.

5.14 Περιορισμοί και προτάσεις βελτίωσης λειτουργίας κιβωτίων CVT σε Α/Γ

Συνολικά, το παρόν μοντέλο που αναπτύχθηκε, στην ουσία προστέθηκε σε ένα ήδη υπάρχον μοντέλο Α/Γ μέσα στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink® και για αυτόν το λόγο τροποποιήθηκε για να μπορέσει να ταιριάζει με τις απαιτήσεις του συστήματος αυτού, χωρίς παράλληλα να ρυθμιστούν διάφορες παράμετροι, οι οποίες να είχαν να κάνουν με φυσικά χαρακτηριστικά φυσικών μεγεθών. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των μεγεθών δεν θα μπορούσαν να τροποποιηθούν, καθώς στην πραγματικότητα οι παράμετροι που τα καθορίζουν είναι πολλαπλάσιες.

Το μόνο που στην ουσία προστέθηκε ήταν ο άξονας που βρίσκεται μεταξύ κύριου κιβωτίου ταχυτήτων και κιβωτίου CVT, ο οποίος όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, μείωσε κατά έναν βαθμό την απόδοση των μοντέλων με κιβώτιο CVT.

Εκτός αυτού, φάνηκε πως στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου το Μοντέλο Β δεν μπορούσε να ανταποκριθεί κατά τρόπο ορθό, καθώς ενεργοποιούταν το σύστημα του Pitch Brake του, ενώ το Μοντέλο Α καθυστερούσε περισσότερο την ενεργοποίησή του. Το γεγονός αυτό πιθανότητα να οφείλεται ως έναν βαθμό στην αδυναμία των κιβωτίων CVT να διαχειριστούν μεγάλες ροπές, όπως δηλαδή αναφέρθηκε και διεξοδικά ως μειονέκτημα στο Κεφάλαιο 2, όπως προέκυψε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Επιπροσθέτως, αυτό που θα μπορούσε να βελτιωθεί είναι η εύρεση συστήματος που θα μειώσει το χρόνο απόκρισης του κιβωτίου CVT, έτσι ώστε η εκάστοτε σχέση του να μεταδίδεται στο γρήγορο άξονα της εκάστοτε Α/Γ ακόμα πιο γρήγορα.

Πιθανότατα η τροποποίηση του συμβατικού κιβωτίου ταχυτήτων που θα βρίσκεται πριν το κιβώτιο CVT, θα πρέπει να είναι τέτοιο που θα συμβάλει περισσότερο αποτελεσματικά στην μείωση της ροπής που εισέρχεται σε αυτό.

Τέλος, η μελέτη των δύο παραπάνω προτάσεων και η ταυτόχρονη υλοποίησή τους, ίσως αυξήσουν κατά σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα των Α/Γ που θα φέρουν κιβώτιο διαρκούς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης κίνησης (CVT).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Ahmed, D. «An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine.» 2013.
- Alkan, Deniz. *Investigating CVT as a Transmission System Option for Wind Turbines*. 2012.
- Apata, O. «Wind Turbine Generators: Conventional and Emerging Technologies.» 2017.
- AR5. 2014.
- Bharani, R. «A Review Analysis on Performance and Classification of Wind Turbine Gearbox Technologies.» 2022.
- Byrne, Raymond. "Multi-annual time series operational data for a Vestas V52 wind turbine in a coastal peri-urban environment in Ireland ." *Elsevier*, 2023.
- Chen, D. «Performance of a 100 kW wind turbine with a Variable Ratio Gearbox.» 2012.
- . «Wind energy conversion with a variable-ratio gearbox: design and analysis.» 2011.
- . «Wind energy conversion with a variable-ratio gearbox: design and analysis.» 2011.
- Choi, J. Y. «Semi-3D Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Generator Considering Bolting and Overhang Structure.» 2022.
- Cortell, J. «Motion Technologies CRADA CRD-03-130: Assessing the Potential of a Mechanical Continuously Variable Transmission.» 2004.
- Demirovic, N. «The Phasor Simulation of Wind Turbines with Double Fed Induction Generator.» 2016.
- Graca, B. «FAILURE AND OIL ANALYSIS IN WIND TURBINE GEARBOXES.» 2013.
- Grujicic, M. «Wind-Turbine Gear-Box Roller-Bearing Premature-Failure Caused by Grain-Boundary Hydrogen Embrittlement: A Multi-physics Computational Investigation.» 2014.
- . «Wind-Turbine Gear-Box Roller-Bearing Premature-Failure Caused by Grain-Boundary Hydrogen Embrittlement: A Multi-physics Computational Investigation.» 2014.
- Hackl, C. «Full- and Reduced-Order State-Space Modeling of Wind Turbine Systems with Permanent Magnet Synchronous Generator.» 2018.
- Hackl, C. «Modeling and control of modern wind turbine systems: An introduction.» 2017.
- Jamdade, P.G. «Assessment of Power Coefficient of an Offline Wind Turbine Generator System.» 2013.
- Kim, M-G. «Yaw Systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and design methods.» 2014.
- Ko, Hee-Sang. «Modeling and control of PMSG-based variable-speed wind turbine.» 2010.

- Leena, G. «COMPARATIVE STUDY OF DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR AND PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM.» 2019.
- Liou, Y. «Pitting Fault Detection of a Wind Turbine Gearbox Using Empirical Mode Decomposition.» 2014.
- MANGIALARD, L. «THE ADVANTAGES OF USING CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSIONS IN WIND POWER SYSTEMS .» 1992.
- MANGIALARDI, L. «AUTOMATICALLY REGULATED C.V.T. IN WIND POWER SYSTEMS .» 1993.
- MANGIALARDI, L. «DYNAMIC BEHAVIOUR OF WIND POWER SYSTEMS EQUIPPED WITH AUTOMATICALLY REGULATED CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION.» 1995.
- Mohammadi, M. «A New Method for Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Optimization.» 2016.
- Mustafa, A. «Wind Turbine Failures Review and Gearbox Condition Monitoring.» 2020.
- Nursebo, S. «Maximizing the Integration of Wind Power in Distribution System.» 2013.
- Pavel, Claudiu C. «Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines.» 2017.
- Polinder, H. «Trends in Wind Turbine Generator Systems .» 2013.
- Ragheb, M. *Optimal tip speed ratio*. 2014.
https://users.wpi.edu/~cfurlong/me3320/DProject/Ragheb_OptTipSpeedRatio2014.pdf.
- Ragheb, M. «Wind Turbine Gearbox Technologies.» 2010.
- Reder, M. D. «Wind Turbine Failures - Tackling current Problems in Failure Data Analysis.» 2016.
- Rivani, N. H. «Design and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Generator 12 Slots 8 Poles for Small Scale Wind Turbine.» 2018.
- Serrano-González, J. «Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis .» 2016.
- Srivastava, N. «A review on belt and chain continuously variable transmissions (CVT): Dynamics and control.» 2009.
- Tawfic, K. B. «Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review.» 2018.
- Ulutas, A. «Variable-Speed Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine Modeling and Simulation.» 2019.
- Vasel-Be-Hagh, A. «Tip Speed Ratio Optimization: More Energy Production with Reduced Rotor Speed.» 2022.
- Wittenmark, Bjorn. «Computer Control: An Overview.» 2014.

Yin, X. «An up to date review of continuously variable speed wind turbines with mechatronic variable transmission.» 2017.

Κανελλόπουλος, Δ. Β. *Αιολική Ενέργεια - Σχεδιάζοντας στις αυλές των ανέμων*. Ίων, 2008.

Αναφορές διαδικτυακών πηγών

Εικόνα 5: [This Inside-Out Motor for EVs Is Power Dense and \(Finally\) Practical - IEEE Spectrum](#)

Εικόνα 6: [This Inside-Out Motor for EVs Is Power Dense and \(Finally\) Practical - IEEE Spectrum](#)

Εικόνα 17: [Understanding the Key Parts of a Wind Turbine \(titanww.com\)](#)

Εικόνα 18: [Understanding the Key Parts of a Wind Turbine \(titanww.com\)](#)

Εικόνα 22: [How does a planetary gear work? | tec-science](#)

Εικόνα 33: [Overview of the NuVinci Continuously Variable Transmission Hub for Electric Bikes | Electric Bike Forums \(electricbikereview.com\)](#)

Πίνακας 2: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/15-vestas-v66-1.65>

Παράρτημα Α

```
uw = [0:1/2:25.5]; % Ταχύτητα του ανέμου [m/s]
uw = uw(:);

% Cp = Pt/Pmax

% Όπου, Cp: Σταθερά ισχύος A/Γ, Pt: Παραγόμενη ισχύς A/Γ
% Όπου Pmax: Η διαθέσιμη ισχύς που θα μπορούσε να παραχθεί χωρίς τις
απώλειες

% Pmax = (1/2)*d*pi*(r^2)*(uw^3)

d = 1.225; % Η πυκνότητα του αέρα [kg/(m^3)]
pi = 3.14159; % Μαθηματική σταθερά
r = 33; % Το μήκος του πτερυγίου της Vestas V66-1.65 [m]

uw_cubed = power(uw,3); % uw^3
r_cubed = power(r,2); %r^2

Pmax = (1/2)*d*pi*r_cubed*uw_cubed; % Υπολογισμός του Pmax για την εκάστοτε
ταχύτητα ανέμου

Pt =
[0,0,0,0,0,0,0,0,20000,47500,78200,123300,170670,222000,278000,365200,465850
,568500,673300,808900,913600,984000,1054400,1143350,1242900,1347000,1439350,
1509200,1567000,1595000,1620670,1633500,1639000,1644500,1650000,1650000,1650
000,1650000,1650000,1650000,1650000,1650000,1650000,1650000,1650000,1650000,
1650000,1650000,1650000,0];

Pt = Pt(:); % Παραγόμενη ισχύς A/Γ για την εκάστοτε ταχύτητα ανέμου

Cp = Pt./Pmax;

% Γραφική αναπαράσταση uw - Cp και uw - Pt σε κοινό γράφημα

figure
yyaxis left
plot(uw,Cp,'-o')

yyaxis right
plot(uw,Pt,'-+')
grid

xl = xline(15,'--b','TSR');

legend('Cp','Pt','TSR - λ')
xl.LineWidth = 3;
```

Παράρτημα Β

Αρχικοποίηση μεταβλητών - πινάκων μοντέλου ανέμου

```
time=wind_data(:,1); % Χρόνος: Από το dataset που εισάγεται κάθε φορά
wind_speed=wind_data(:,2); % Ταχύτητα ανέμου: Από το dataset που εισάγεται
κάθε φορά
wind_direction=wind_data(:,3); % Διεύθυνση ανέμου: Από το dataset που
εισάγεται κάθε φορά

A = zeros(2,1); % Μηδενικός Πίνακας για γωνία ανέμου στον Y
B = zeros(2,1); % Μηδενικός Πίνακας για γωνία ανέμου στον Z

C = wind_direction; % Πίνακας με γωνίες ανέμου ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Z = cat(2,C,A,B); % Πίνακας μορφής [2 0 0] (Γωνία X Y Z)

save('Z.mat', 'Z'); % Αποθήκευση Πίνακα Z για την εισαγωγή του ως είσοδο στο
μοντέλο ανέμου

windDataTimeSeries = timeseries(Z, time); % Δημιουργία Timeseries για τη
διεύθυνση του ανέμου σε σχέση με το χρόνο

save('windDataTimeSeries.mat', 'windDataTimeSeries');
size(windDataTimeSeries);

wind_per_min = transpose(anemos); % Από το αρχείο ανέμου που δημιουργήθηκε,
υπολογίζεται ο ανάστροφός του

final_wind = wind_per_min(:,1:2);
final_time = wind_per_min(:,1);
per_min = wind_per_min(:,2);

plot(final_time,per_min); % Εξαγωγή γραφικής παράστασης τελικής ταχύτητας
άνεμου σε σχέση με το χρόνο

xlabel("Time (sec)");
ylabel("Wind speed (m/sec)");
title("Wind Speed vs Time");
```

Κώδικας παρουσίασης διαγράμματος γωνιακών ταχυτήτων γεννήτριας μοντέλου A/Γ με και χωρίς CVT

```
cvtgenerator = abs(cvtgenerator); % Στροφές γεννήτριας (RPM) μοντέλου με CVT
nocvtgenerator = abs(nocvtgenerator); % Στροφές γεννήτριας (RPM) μοντέλου με
CVT
xronos = (0:10:600); % Χρόνος ανά 10 sec μέχρι 600 sec

plot(xronos,nocvtgenerator,xronos,cvtgenerator) %% Δημιουργία γραφήματος
στροφών γεννητριών μοντέλου με και χωρίς CVT

ylabel("Generator RPM")
xlabel("time (m/sec)")
legend("Without CVT", "With CVT")
```