



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ**

Διπλωματική Εργασία

Πεκόπουλος Χρήστος

Επιβλέπων:	Ελευθέριος Τσουκαλάς	Καθηγητής Π.Θ
Συνεπιβλέπων:	Δημήτριος Μπαργιώτας	Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ
Μέλος επιτροπής:	Φώτιος Πλέσσας	Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ

Βόλος, Φεβρουάριος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

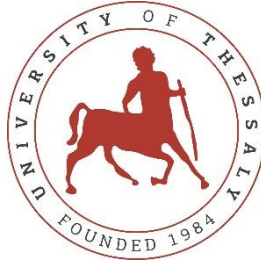
**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ
ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ**

Διπλωματική Εργασία

Πεκόπουλος Χρήστος

Επιβλέπων:	Ελευθέριος Τσουκαλάς	Καθηγητής Π.Θ
Συνεπιβλέπων:	Δημήτριος Μπαργιώτας	Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ
Μέλος επιτροπής:	Φώτιος Πλέσσας	Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ

Βόλος, Φεβρουάριος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**MODELLING CONTROL AND SIMULATION OF A WIND
TURBINE WITH FULL POWER CONVERTER**

Diploma Thesis

Pekopoulos Christos

Supervisor:	Eleftherios Tsoukalas	Professor UTH
Co-Supervisor:	Dimitrios Bargiotas	Associate Professor UTH
Examiner:	Fotis Plessas	Associate Professor UTH

Volos, February 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους επιβλέποντες καθηγητές αλλά και ιδιαίτερος στον κύριο Ιωάννη Μάντζαρη, για την πολύτιμη βοήθεια, υπομονή και καθοδήγηση που μου προσέφερε, στην ολοκλήρωση των προσομοιώσεων και την εκπόνησή της.

Επιπλέον θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου, στην οικογένειά μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα, και να τους αφιερώσω την παρούσα εργασία, για τη στήριξη και την συμπαράστασή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

«Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής».

Ο Δηλών

(Υπογραφή)

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή

Ημερομηνία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για την ηλεκτροπαραγωγή, μέσω των ανεμογεννητριών και ειδικότερα η εμβάθυνση στην λειτουργία και τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα ισχύος. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται ανάλυση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, επεξήγηση των επιμέρους στοιχείων της, των διαφόρων τύπων της, καθώς και της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Επίσης, υλοποιείται ένα μοντέλο που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα ισχύος και εξετάζεται η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου συνδεδεμένου σε ένα ΣΗΕ.

Αρχικά, παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία σχετικά με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και γίνεται συγκριτική ανάλυση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από την οποία προκύπτει ότι αποτελεί μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες σε εθνικό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Παράλληλα, αναφέρονται οι δυσκολίες που προκύπτουν από την ενσωμάτωσή της σε ένα υφιστάμενο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν το τρόπο περιγράφονται οι προκλήσεις που εμφανίζονται για την ανάπτυξή της, όχι μόνο ως μορφή ενέργειας στο οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο, αλλά και στο φυσικό επίπεδο κατασκευής και σύνδεσης, των Α/Γ με το δίκτυο.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, η ανεμογεννήτρια και εξηγείται ο τρόπος αλληλεπίδρασής της με τον άνεμο. Γίνεται εκτενής ανάλυση της λειτουργίας όλων των βασικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται και των νόμων της αεροδυναμικής οι οποίοι περιγράφουν την λειτουργία της. Με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Simulink, του προγράμματος Matlab, υλοποιείται ένα μοντέλο μίας ανεμογεννήτριας, με πλήρη μετατροπέα ισχύος. Αφού αναλυθεί ο τρόπος υλοποίησης του, στη συνέχεια γίνονται προσομοιώσεις και εξετάζονται τα αποτελέσματα στις τέσσερις βασικές περιοχές λειτουργίας της, οι οποίες ορίζονται με βάση την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι γίνεται πιο σαφής η λειτουργία της και ο τρόπος με τον οποίο συνεργάζεται το κάθε επιμέρους σύστημα, για την αποδοτικότερη μετατροπή της αιολικής, σε ηλεκτρική ενέργεια, ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου στην οποία λειτουργεί.

Τέλος μοντελοποιείται ένα αιολικό πάρκο με έξι ανεμογεννήτριες, και εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά του, όταν συνδέεται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η έγχυση αέργου ισχύος γίνεται είτε με έλεγχο τάσης ή με έλεγχο συντελεστή ισχύος. Στην ανάλυση αυτή γίνεται εμφανές ότι με τη λειτουργία του πλήρη μετατροπέα ισχύος, απομονώνονται στο μέγιστο βαθμό οι διαταραχές που προκύπτουν κατά τις απότομες αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου, από την έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, η ανεμογεννήτρια καταφέρνει να λειτουργεί βέλτιστα σε μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων ανέμου, ενώ παράλληλα η παροχή ισχύος είναι πιο σταθερή και ασφαλής.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to look through the exploitation of wind energy used for power generation, through wind turbines and more specifically to investigate in depth the operation and control of the wind turbine with a full power converter unit. In this context, wind turbine technology, is thoroughly analysed, along with an explanation of its subsystems, as well as the different types and its operation. A model connected to the network through a full power converter unit is implemented and the operation of a wind park connected to a Power Supply Grid (PSG) is also being considered. At first, key data regarding the exploitation of wind energy are presented, while at the same time a comparative analysis of other renewable energy sources is made, which shows that it is one of the fastest growing technologies at both national and global level. In parallel, the difficulties arising from its integration into an existing power supply grid are mentioned. This clarifies the challenges that emerge for its development, not only as a form of energy at the economic and social level, but also at the physical level, regarding the construction and the connection of the wind turbines to the grid.

The machine responsible for the wind generation, the wind turbine is examined, while in parallel, its interaction with the wind is also explained. An extensive analysis is made, concerning the operation of all the key elements it consists of, as well as, of all the aerodynamic laws which describe its operation. Furthermore, with the utilization of the Simulink simulation toolbox of the Matlab software, a wind turbine model with full converter is being implemented. Once its implementation has been explained, some simulations take place and then the results in the main four wind operating areas are examined, based on the speed of the wind. Hence, its operation and how each individual system works, become more evident, in order to make the conversion of wind into electrical energy more efficient, regardless of the wind speed in which it operates. Finally, a wind farm with six wind turbines is modeled and its dynamic behavior is examined, when connected to a power grid. Reactive power injection to the grid is performed, either by voltage control or by

power factor control. In this analysis it is apparent that, during the operation of the full power converter, the disruptions resulting from sudden changes in wind speed, are isolated in the infusions of both active and reactive power into the grid, to the highest degree. As a result, the wind turbine is able to operate at a higher wind speed, while in parallel the power supply is more stable and secure.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	13
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	13
1.1 Αξιολόγηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	13
1.2 Η αιολική ενέργεια και στοιχεία ανάπτυξης της διεθνώς.....	15
1.3 Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στο ελληνικό σύστημα.....	18
1.4 Προβλήματα από την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα ΣΗΕ	23
1.5 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	26
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	26
2.1 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών	26
2.2 Το μηχανικό σύστημα - Αεροδυναμική συστήματος Α/Γ.....	30
2.3 Αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης.....	36
2.4 Τεχνικές αεροδυναμικού ελέγχου.....	39
2.5 Ηλεκτρικό σύστημα.....	42
2.6 Σύγχρονες διατάξεις Α/Γ.....	44
2.7 Η ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	51
Η Α/Γ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟ SIMULINK.....	51
3.1 Περιγραφή των προδιαγραφών της Α/Γ προς προσομοίωση.....	51
3.2 Ανάπτυξη του μοντέλου σε περιβάλλον Simulink.....	53
3.2.1 Παράσταση αεροδυναμικού μέρους.....	53
3.2.2 Υπολογισμός της μηχανικής ισχύος και ροπής.....	58
3.2.3 Διαφορική εξίσωση κίνησης δρομέα Α/Γ.....	60
3.2.4 Παράσταση ελεγκτή ενεργού ισχύος της Α/Γ.....	60
3.2.5 Ελεγκτής άεργου ισχύος.....	63

3.2.6 Μετατροπείας ισχύος.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	68
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	
SIMULINK.....	68
4.1 Καθορισμός περιοχών λειτουργίας Α/Γ.....	68
4.2 Απόκριση μοντέλου σε βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	70
4.2.1 Αύξηση ανέμου σε αρχική συνθήκη λειτουργίας στην περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή (Περιοχή 2).....	71
4.2.2 Αύξηση ταχύτητας ανέμου με μετάβαση από την περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή στην περιοχή μέγιστης ταχύτητας λειτουργίας.....	73
4.2.3 Αύξηση ανέμου σε λειτουργία της Α/Γ σε μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας.....	76
4.2.4 Αύξηση ανέμου σε συνθήκες λειτουργίας της Α/Γ σε πλήρη ισχύ.....	78
4.3 Απόκριση μοντέλου σε αυξομείωση της ταχύτητας του ανέμου	80
4.4 Απόκριση μοντέλου σε βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου.....	83
4.4.1 Περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή.....	83
4.4.2 Βηματική μείωση ανέμου από την περιοχή ονομαστικής ισχύος.....	84
4.4.3 Βηματική μείωση ανέμου στην περιοχή λειτουργίας ονομαστικής ισχύος.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	88
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ Α/Γ ΣΥΝΔΕΟΜΕΝΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	88
5.1 Περιγραφή αιολικού πάρκου και γραμμής διανομής.	88
5.2 Βηματική αύξηση του ανέμου στην περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή....	89
5.2.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.	89
5.2.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.	92
5.2.3. Ρύθμιση τάσεως.....	94

5.3 Βηματική αύξηση του ανέμου στην περιοχή ονομαστικής ισχύος.....	96
5.3.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.....	96
5.3.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.....	98
5.3.3. Ρύθμιση τάσεως.....	101
5.4 Βηματική μείωση του ανέμου στην περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή.....	102
5.4.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.....	102
5.4.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.....	105
5.4.3. Ρύθμιση τάσεως.....	106
5.5 Βηματική μείωση του ανέμου στην περιοχή ονομαστικής ισχύος.	108
5.5.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.	108
5.5.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.....	109
5.5.3. Ρύθμιση τάσεως.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	113
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
ΒΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

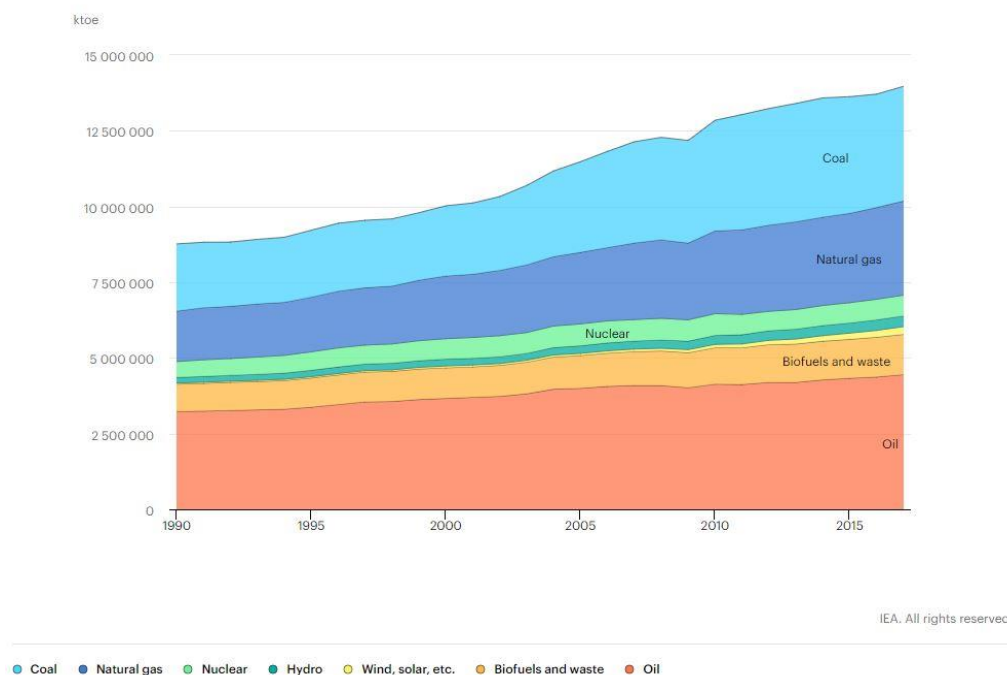
1.1 Αξιολόγηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία σημαντική εξέλιξη στις τεχνολογίες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, με την ολοένα και αυξανόμενη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ή αλλιώς ΑΠΕ. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής το οποίο έχει γίνει εντονότερο τις τελευταίες δεκαετίες, για την αντιμετώπιση του οποίου δόθηκε μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. Οι ΑΠΕ, ως βασικό τους στόχο έχουν τη μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα και τη σταδιακή απεξάρτηση των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου από τα ορυκτά καύσιμα. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι και τεχνικές για την εκμετάλλευση των φυσικών πηγών ενέργειας, όπως είναι ο άνεμος, η γεωθερμία, η κίνηση του νερού και άλλα, για την παραγωγή ενέργειας. Αυτό που κάνει όμως τις ΑΠΕ να ξεχωρίζουν (πλην των μονάδων βιομάζας και βιοαερίου), είναι η άμεση αξιοποίηση της ενέργειας που εκμεταλλεύονται, χωρίς την ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία ή τη μετατροπή της σε άλλη μορφή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των ορυκτών καυσίμων, πρέπει πρώτα να γίνει η καύση τους για τη μετατροπή σε θερμική ενέργεια και εν συνεχεία η τελευταία να μετατραπεί σε ηλεκτρική, κάτι το οποίο περιορίζει τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Επίσης, επειδή ορισμένες ΑΠΕ σχηματίζονται χάρις την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και την αιολική ενέργεια, μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάντλητες πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που προκύπτει από την καύση βιομάζας και βιοαερίου προκύπτει από την ενέργεια που δεσμεύεται στα φυτά διαμέσου της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, σχετίζεται δηλαδή με την αλληλεπίδραση ανάμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία και στους ιστούς των φυτών. Η αιολική ενέργεια εξαρτάται από τους ανέμους που προκαλούνται μέσω της θέρμανσης της ατμόσφαιρας από την ηλιακή ακτινοβολία. Αντίστοιχα η κυματική ενέργεια προκύπτει από τους ανέμους. Μόνο η γεωθερμική ενέργεια δεν προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία,

αλλά από τα γεωθερμικά πεδία στο υπέδαφος της γης, τα οποία έχουν πεπερασμένη διάρκεια ζωής. Τέλος, οι ΑΠΕ είναι πολύ πιο φιλικές προς το περιβάλλον, αφού το ρυπογόνο αποτύπωμά τους, είναι μικρό, σε αντίθεση όλους με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Επιγραμματικά οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ θεωρούνται οι εξής:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια από σταθμούς μικρής ισχύος
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα και παλίρροιες

Παρόλα τα θετικά στοιχεία των ΑΠΕ που προαναφέρθηκαν, και τη σταθερά αυξανόμενη διείσδυσή τους στην παγκόσμια αγορά ενέργειας, αυτές συνεχίζουν να έχουν συμπληρωματικό ρόλο στη παγκόσμια παραγωγή ενέργειας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 σύμφωνα με τα στοιχεία του παγκόσμιου οργανισμού ενέργειας [1].



Σχήμα 1.1: Συνεισφορά όλων των πηγών ενέργειας παγκοσμίως μέχρι το 2016.

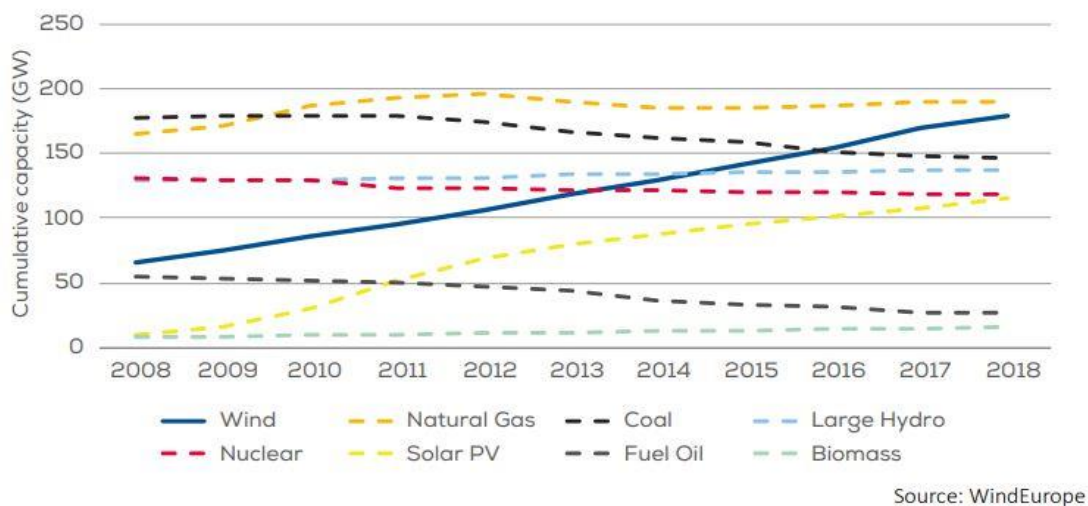
Αυτό οφείλεται κυρίως στα υψηλά κόστη ανάπτυξης νέων ενεργειακών εφαρμογών που μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά ανά περιοχή ως και 35% [2], στα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής τους, καθώς και σε πολιτικές ή/και οικονομικές σκοπιμότητες που προκύπτουν στο παγκόσμιο ενεργειακό στερέωμα. Επίσης, απαιτείται μεγάλο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης, μαζί με μεγάλη αναλογικά έκταση γης, για την εγκατάστασή τους. Τέλος, σημαντικός παράγοντας για κάποιες μορφές ΑΠΕ είναι η έντονη μεταβλητότητα της παραγωγής τους, εφόσον εξαρτώνται άμεσα από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένες. Για παράδειγμα, η παραγωγή ηλεκτρισμού από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές λόγω της τυχαίας μεταβολής στην ταχύτητα του ανέμου ανά περιοχή. Είναι ενδεικτικό ότι μια αύξηση από 6m/s σε 10m/s της μέσης ταχύτητας του ανέμου μπορεί να αυξάνει την παραγωγή ενέργειας έως και 134%. [2]

1.2 Η αιολική ενέργεια και στοιχεία ανάπτυξης της διεθνώς

Σε αυτό το κοινωνικό και τεχνολογικό πλαίσιο, ο τομέας της αιολικής ενέργειας έχει αναπτυχθεί με ταχύτατο ρυθμό, αποτελώντας μία από τις πιο βασικές μορφές ΑΠΕ, η οποία αυξάνει συνεχώς τη διεύθυνσή της. Καθώς η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας έχει πλέον ωριμάσει αρκετά, όλο και περισσότερες χώρες την υιοθετούν φτάνοντας συνεχώς σε νέα ρεκόρ εγκατεστημένης ισχύος. Περιοχές όπως, η Ινδία, η Μέση Ανατολή, η Αυστραλία κ.α. αναδύονται στο προσκήνιο, με ολοένα και περισσότερες επενδύσεις, πρωταρχικά στην αιολική και επακόλουθα στις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές. Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 1.2 και Σχήμα 1.3 που απεικονίζουν την ολοένα και αυξανόμενη χρήση της αιολικής ενέργειας συγκριτικά με τις υπόλοιπες μορφές ΑΠΕ και τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Επίσης, σημαντικό ρόλο πλέον αναλαμβάνουν οι κυβερνήσεις κρατών, μεγάλοι επενδυτές, ακόμη και οι πετρελαϊκές εταιρίες, εντείνοντας τις προσπάθειές τους για την προώθηση της αιολικής ενέργειας και των ΑΠΕ γενικότερα. Καθώς αντιλαμβάνονται τα οικονομικά οφέλη που

μπορούν να επωμιστούν μέσα από την προώθηση των ΑΠΕ, δημιουργούν νέες ευκαιρίες και περιβάλλοντα εξέλιξής τους, ώστε να αναπτυχθούν περαιτέρω [2],[3].

Σε αυτήν την διαδικασία συνέβαλε και η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, η οποία έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη συνεχόμενη μείωση του κόστους κατασκευής τους. Με αυτόν το τρόπο το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από ανεμογεννήτριες έχει φτάσει σε επίπεδα συγκρίσιμα με το κόστος συμβατικών μονάδων, ακόμη και για σχετικά μεγάλες ισχείς. Ενδεικτικά, μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) σημερινής τεχνολογίας είναι σε θέση να παράγει ετησίως έως και 180 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, με κόστος ανά kWh λιγότερο από το μισό, σε σχέση με μια ανεμογεννήτρια τεχνολογίας της δεκαετίας του 1980. [2]



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη των διαφόρων πηγών ενέργειας για το διάστημα από το 2008 ως το 2018

Στο Σχήμα 1.3, φαίνεται η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε MW ανά έτος, σε παγκόσμιο επίπεδο, σύμφωνα με τα στοιχεία που εκδίδει το παγκόσμιο συμβούλιο αιολικής ενέργειας (GWEC). Όπως φαίνεται υπάρχει μία σταθερά ανοδική πορεία στην συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύ, με τις πέντε πιο σημαντικές χώρες παγκοσμίως να είναι οι εξής: [3]

- Κίνα (200GW)

- Αμερική (97GW)
- Γερμανία (60GW)
- Ινδία (35GW)
- Ισπανία (24GW)

Historic development of total installations
GW



Σχήμα 1.3: Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε MW για χερσαίες και υπεράκτιες Α/Γ, ανά έτος σε παγκόσμιο επίπεδο.

Μία από τις πρωτοπόρους στην παγκόσμια αιολική αγορά αποτελεί η Ευρώπη, η οποία βρίσκεται στις πρώτες θέσεις σε εγκατεστημένη αιολική ισχύ φτάνοντας τα 189GW. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2 που αφορά την ανάπτυξη των διαφόρων μορφών ενέργειας σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς αναμένεται να ξεπεράσει σε μέγεθος, μέσα στο επόμενο έτος αυτή των μονάδων φυσικού αερίου, ενώ οι νέες εγκαταστάσεις μονάδων φυσικού αερίου και γαιάνθρακα που δημιουργήθηκαν το 2018 κυμάνθηκαν σε πολύ χαμηλά επίπεδα με μόλις 0.9GW ισχύ. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4, για το έτος 2018, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη έφτασε τις 2.645TWh. Για την κάλυψη αυτής της ανάγκης, χρησιμοποιήθηκε αιολική ενέργεια σε ένα ποσοστό της τάξης του 14%, από τη συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε. Παράλληλα για

μία ημέρα του ίδιου χρόνου, παράχθηκε αρκετή αιολική ενέργεια, ώστε να καλύψει το 1/3 (ή 98GW κατά μέσο όρο) περίπου της συνολικής ενεργειακής ζήτησης για όλη την Ευρώπη. [4]

EU ELECTRICITY CONSUMPTION (TWH) ¹²	ONSHORE WIND ENERGY PRODUCTION (TWH)	OFFSHORE WIND ENERGY PRODUCTION (TWH)	TOTAL WIND ENERGY PRODUCTION (TWH)	SHARE OF EU CONSUMPTION MET BY WIND ENERGY
2,645	309	53	362	14%

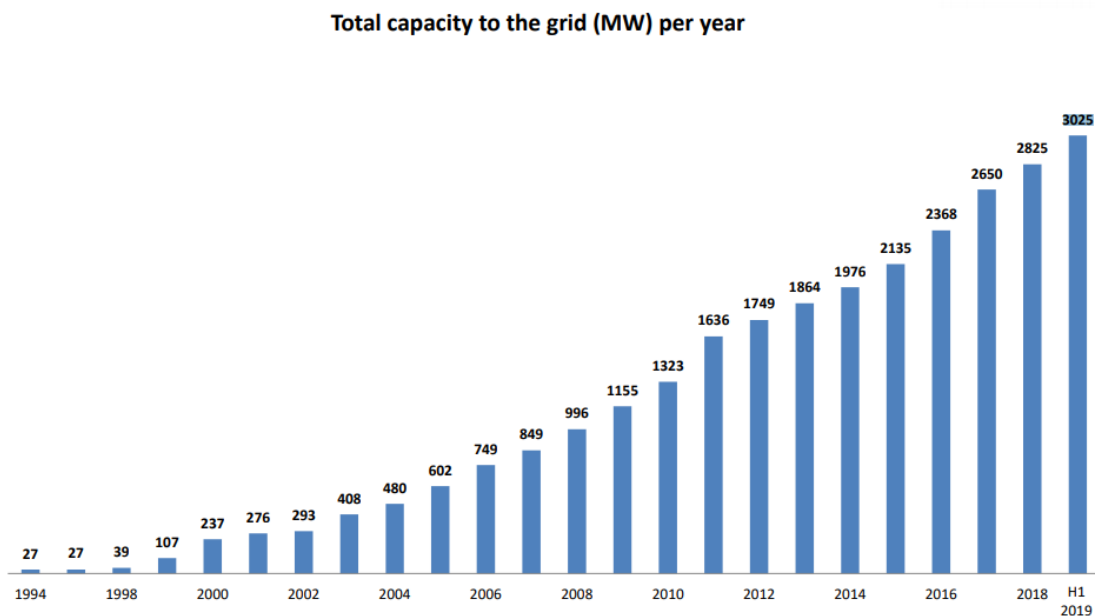
Σχήμα 1.4: Η συνολική παραγωγή ισχύος για το 2018 από χερσαίες και υπεράκτιες Α/Γ στην Ευρώπη σε αντιστοιχία με τις ενεργειακές της ανάγκες.

Σύμφωνα με το παγκόσμιο συμβούλιο GWEC, οι προβλέψεις ανάπτυξης για την αγορά της αιολικής ενέργειας παραμένουν θετικές και θα κυμαίνονται σε μία αύξηση του 2.7% ανά έτος για την επόμενη τετραετία (2019-2023). Επίσης, αναμένεται να προστεθούν τουλάχιστον 300GW νέας αιολικής εγκατεστημένης ισχύος, το οποίο αντιστοιχεί σε πάνω από 60 GW ανά έτος, έως το 2023. Σε εμπορικό επίπεδο, οι κυβερνήσεις θα παραμείνουν το κύριο μέσο, ανάπτυξης και προώθησης τους, με τη χρήση ελκυστικών μεσοπρόθεσμων συμβολαίων, τα οποία θα επωφελούν ισάξια και τις δύο πλευρές [3].

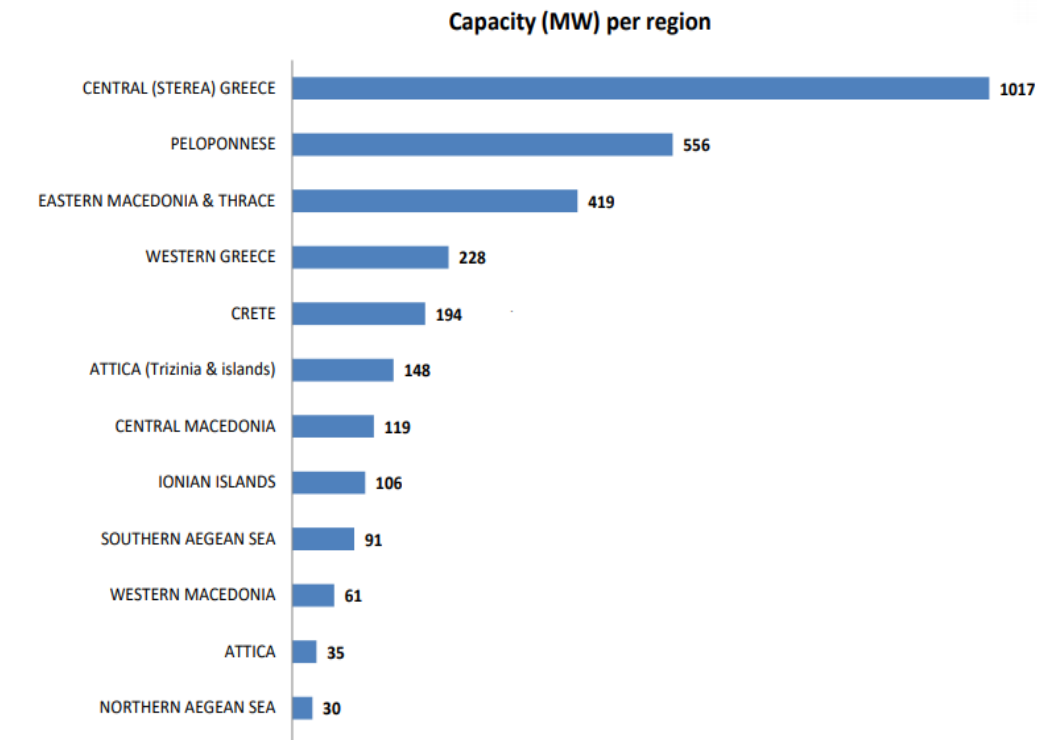
1.3 Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στο ελληνικό σύστημα

Όσον αφορά στον Ελλαδικό χώρο, σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (Ε.Λ.Ε.Τ.Α.Ε.Ν) τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μία σταθερά αυξανόμενη πορεία της αιολικής παραγωγής στο ελληνικό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5, στην περίοδο των χρόνων από το 1994 έως και το 2019 υπήρξε αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά στην Ελλάδα, περίπου 100 φορές, γεγονός που μας δείχνει ότι, κάθε χρόνο υπήρχε αύξηση της τάξεως του 20%. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μόνο την τελευταία δεκαετία από το 2009 έως και το 2019, η παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα σημείωσε σημαντική άνοδο, σε ποσοστό 261%.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι, εξαιτίας της πολιτικής της Ε.Ε όσον αφορά στις ΑΠΕ, έχει παρατηρηθεί αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες συνολικά στις ενεργειακές επενδύσεις αλλά και στη δημιουργία αιολικών πάρκων σε όλη την Ελλάδα. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6 , η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα το 2019 έφτασε συνολικά τα 3025 MW, με την περιοχή της Στερεάς Ελλάδας να κατέχει την πρώτη θέση στην κατανομή ισχύος [15].



Σχήμα 1.5: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα ανά έτος



Σχήμα 1.6: Κατανομή αιολικού δυναμικού της Ελλάδας ανά περιοχή

Σύμφωνα και με τους στόχους που έχουν τεθεί για τη περίοδο 2020-2030 στο πλαίσιο των Ευρωπαϊκών πολιτικών, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξή τους. Οι στόχοι αυτοί περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τα εξής: [7]

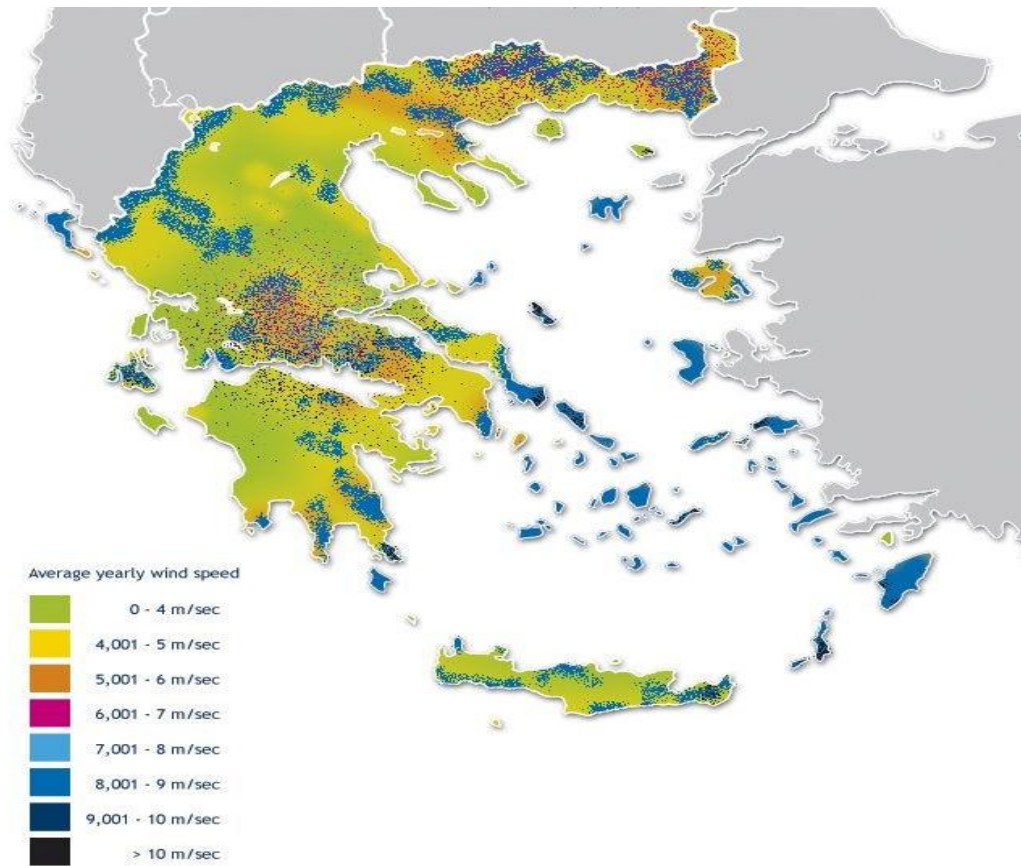
- Μείωση των συνολικών εκπομπών από αέρια του θερμοκηπίου (Ατθ) κατά τουλάχιστον 40%, σε σχέση με το 1990.
- Το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση να ανέλθει τουλάχιστον στο 35%.
- Να επιτευχθεί βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 38% σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή μεθοδολογία. Δηλαδή η τελική κατανάλωση ενέργειας να μην ξεπεράσει τα 16.5 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ), ενώ παράλληλα να επιτευχθούν τουλάχιστον 7 εκατομμύρια ΤΙΠ εξοικονόμησης ενέργειας.

Μέχρι στιγμής η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της χώρας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που διαθέτει, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αιολική ενέργεια, η οποία είναι και η επικρατέστερη. Στον Πίνακα 1.1, εμφανίζεται η ανάπτυξη της αιολικής έναντι των υπολοίπων ΑΠΕ για το διάστημα 2014-2020, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΑΔΜΗΕ. [8]

Πίνακας 1.1: Η συνολική παραγωγή ισχύος και οι νέες συνδέσεις για τις διάφορες ΑΠΕ στην Ελλάδα για το διάστημα 2014-2020.[8]

ΕΙΔΟΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)		
	Με μη Δεσμευτικές Προσφορές Σύνδεσης ⁽¹⁾	Με Οριστικές Προσφορές Σύνδεσης ⁽¹⁾	Σε λειτουργία ⁽²⁾
Α/Π	15116	2322	3064
ΜΥΗΣ	199	6	239
ΣΗΘΥΑ	61	17	105
Φ/Β	642	843	2569
ΣΒΙΟ	97	0	85
Η/Θ	121	0	0
ΣΥΝΟΛΟ	16236	3188	6062

Επίσης, όσον αφορά στις προσφορές νέων συνδέσεων για αιολικά πάρκα, αν θεωρηθεί ένα λογικό ποσοστό υλοποίησης αυτών, αναμένεται να καλύψουν τους εθνικούς στόχους που έχουν τεθεί για τη χώρα [8]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η Ελλάδα είναι μία χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και πλήθος νησιών κάτι το οποίο και σε συνδυασμό με τους ισχυρούς ανέμους που πνέουν σε αυτές τις περιοχές, προσδίδουν σημαντικά περιθώρια εκμετάλλευσης της. Ενδεικτικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.7, ιδιαίτερα στις νησιωτικές και παράκτιες περιοχές η μέση ταχύτητα του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 9,001-10 m/sec η οποία αποτελεί ιδανική τιμή για τη λειτουργία των Α/Γ, κάνοντας έτσι ιδανικότερη τη χρήση των Α/Γ, έναντι οποιασδήποτε άλλης μορφής ΑΠΕ. [14]



Σχήμα 1.7: Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

Αξίζει να επισημανθεί ότι παρά το γεγονός ότι το αιολικό δυναμικό της χώρας είναι πλούσιο, και ότι η εγκατεστημένη ισχύς ολοένα και αυξάνεται, υπάρχουν ακόμη αρκετά προβλήματα σε πολλά επίπεδα όσον αφορά την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας και την ανάπτυξη αιολικών πάρκων. Πιο συγκεκριμένα, για να καταστεί εφικτή και ενεργειακά αποδοτική η εγκατάσταση των Α/Γ, θα πρέπει να τεθούν υπόψιν τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε τοποθεσίας, καθώς επίσης και η περιβαλλοντική της κατάσταση. Παράλληλα, οι επενδύσεις τέτοιου τύπου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο οικονομικά ωφέλιμες, ώστε να καταστούν βιώσιμες σε βάθος χρόνου. Τέλος είναι εξίσου σημαντικό να γίνουν αποδεκτές από το πολιτικό και ιδιαιτέρως από το κοινωνικό επίπεδο, για την κατάλληλη ενσωμάτωσή τους στα σύγχρονα περιβάλλοντα.

1.4 Προβλήματα από την αύξηση διείσδυσης των μονάδων ΑΠΕ στα ΣΗΕ

Με την εισαγωγή των ΑΠΕ στα συστήματα των ΣΗΕ μπορεί να δημιουργούνται προβλήματα στην λειτουργία τους, εξαιτίας της μη ελέγξιμης και στοχαστικής παραγωγής ενέργειας. Το πρόβλημα μπορεί να γίνεται εντονότερο όταν οι μεταβολές εμφανίζονται σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες συνθήκες διαταραχών ή και βλαβών στο δίκτυο. Μέχρι σήμερα τα δίκτυα των ΣΗΕ ήταν σχεδιασμένα για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μόνο προς την κατεύθυνση των καταναλωτών, ώστε δηλαδή η ροή ισχύος να γίνεται από την υψηλή τάση στην μέση και χαμηλή τάση. Η εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής, δημιουργεί συνθήκες μεταφοράς ενέργειας και στην αντίθετη κατεύθυνση, αναλόγως τη ζήτηση. Για παράδειγμα ένας οικιακός καταναλωτής με την ενσωμάτωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ή μιας Α/Γ στο χώρο του, μπορεί να τροφοδοτεί και το δίκτυο, στέλνοντας με αντίθετη φορά ενέργεια στο δίκτυο. Μία τέτοια αλλαγή μπορεί να επιφέρει τα εξής:

- Υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος του δικτύου.
- Υποβάθμιση της ευστάθειας του δικτύου με απότομες αλλαγές στη τάση
- Υποβάθμιση της ασφάλειας του δικτύου
- Αλλαγές στα ρεύματα που προκύπτουν από σφάλματα δικτύου και αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης.
- Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος των μονάδων ΑΠΕ

Ο σχεδιασμός και η κατάλληλη ένταξη των μονάδων ΑΠΕ είναι απαραίτητος προκειμένου να αντιμετωπίζονται αυτές οι πιθανές επιπτώσεις και να διασφαλίζεται η καλή λειτουργία των ΣΗΕ.

Τέλος, ένα ακόμα βασικό πρόβλημα που προκύπτει, είναι η δυσκολία στην ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής ισχύος από τις ΑΠΕ που συμμετέχουν σε ένα ΣΗΕ. Αν και οι μέθοδοι πρόβλεψης έχουν εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, υπάρχουν αρκετές αποκλίσεις. Για παράδειγμα οι σύγχρονες τεχνικές πρόβλεψης που υπάρχουν για την αιολική παραγωγή σε χρονικό ορίζοντα 24 έως 26 ώρες έχουν ένα σφάλμα που μπορεί να φτάσει και

να ξεπεράσει το 30% της πραγματικής παραγωγής. Έτσι αν και η ανάγκη για αποθήκευση της ενέργειας για τη καλύτερη διαχείρισή της προϋπήρχε, με την εισαγωγή των ΑΠΕ αυξάνεται σημαντικά [16].

1.5 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αναφέρονται οι πιο βασικές εξ' αυτών και εξετάζεται η διεύθυνση της αιολικής στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Γίνεται αναφορά στην εξέλιξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα μας και στο τέλος αναφέρονται σύντομα προκλήσεις που προκύπτουν από τη διεύθυνση των μονάδων ΑΠΕ στα ΣΗΕ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες των ανεμογεννητριών και γίνεται αναφορά στα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζονται και στις βασικές τεχνολογίες στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία τους. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των βασικών μεγεθών που αφορούν το αεροδυναμικό κομμάτι και τις τεχνικές ελέγχου, για την καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασής τους με τον άνεμο. Τέλος παρουσιάζονται βασικά στοιχεία σχετικά με τη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση της γεννήτριας και γίνεται αναφορά στις πιο σύγχρονες διατάξεις Α/Γ που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του μοντέλου της Α/Γ που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Simulink με βάση το μοντέλο της εργασίας [19]. Εισαγωγικά γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά της Α/Γ που χρησιμοποιήθηκε και στην συνέχεια γίνεται ανάλυση της λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων της. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η λειτουργία του αεροδυναμικού ελέγχου της Α/Γ για τη μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ροπή στο δρομέα της. Επίσης, αναλύεται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος για τη κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας του δρομέα. Έπειτα, παρουσιάζεται η λειτουργία του ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει την έγχυση της ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο. Τέλος παρουσιάζεται η λειτουργία του μετατροπέα της ηλεκτρικής ισχύος ο οποίος χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση της Α/Γ με το δίκτυο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την δυναμική προσομοίωση σε διάφορα σενάρια αύξησης και μείωσης της ταχύτητας του ανέμου, στις τέσσερις βασικές περιοχές λειτουργίας της Α/Γ. Για τον σκοπό αυτό παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα βασικά μεγέθη που περιγράφουν την λειτουργία της Α/Γ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της δυναμικής προσομοίωσης ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενου από έξι Α/Γ το οποίο συνδέεται σε ένα τυπικό δίκτυο. Εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου η παραγωγή ισχύος ρυθμίζεται με σταθερό συντελεστή ισχύος ή με σταθερή τάση για κάθε μία από τις βασικές περιοχές λειτουργίας των Α/Γ.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη της παρούσας εργασίας και αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη των προηγούμενων κεφαλαίων.

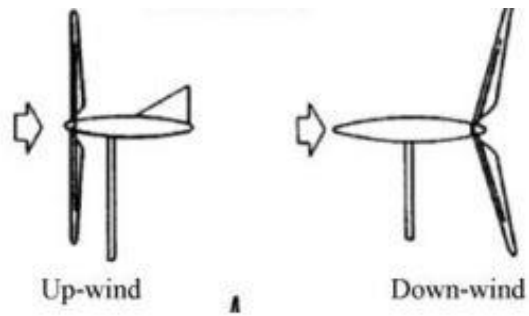
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

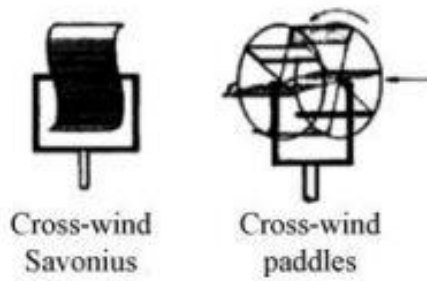
2.1 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, η ανεμογεννήτρια και η έννοια του στρεφόμενου δρομέα υπό την επίδραση του ανέμου που διαμορφώθηκε στη σημερινή τεχνολογική της μορφή, έχει αναπτυχθεί κυρίως τις τελευταίες δύο δεκαετίες του αιώνα που πέρασε. Αρχικά οι ανεμογεννήτριες ήταν ένας απλός συνδυασμός της τεχνολογίας των επαγωγικών ηλεκτρικών μηχανών (ασύγχρονων) και της τεχνογνωσίας στο τομέα της αεροδυναμικής (Α/Γ σταθερών στροφών). Με την παράλληλη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και την ολοένα αυξανόμενη διεύθυνση της αιολικής ενέργειας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), διαμορφώθηκαν νέοι τύποι ανεμογεννητριών (Α/Γ μεταβλητών στροφών). Οι Α/Γ γενικώς οργανώνονται σε αιολικά πάρκα και συνδέονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλόγως τον προσανατολισμό των αξόνων της Α/Γ σε σχέση με τη φορά του ανέμου διακρίνονται σε:

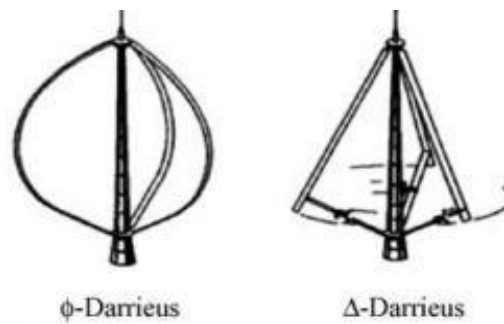
- Οριζοντίου άξονα, όπου ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι συγκεκριμένες Α/Γ διακρίνονται σε «up-wind» και «down-wind» αναλόγως εάν η πτερωτή βρίσκεται μπροστά ή πίσω από τον πύργο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 .
- Οριζοντίου άξονα, «cross-wind» στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης, αλλά κάθετος προς την κατεύθυνση της ροής του ανέμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 .
- Κάθετου άξονα, στις οποίες, ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 .



Σχήμα 2.1: Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα



Σχήμα 2.2: Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα.



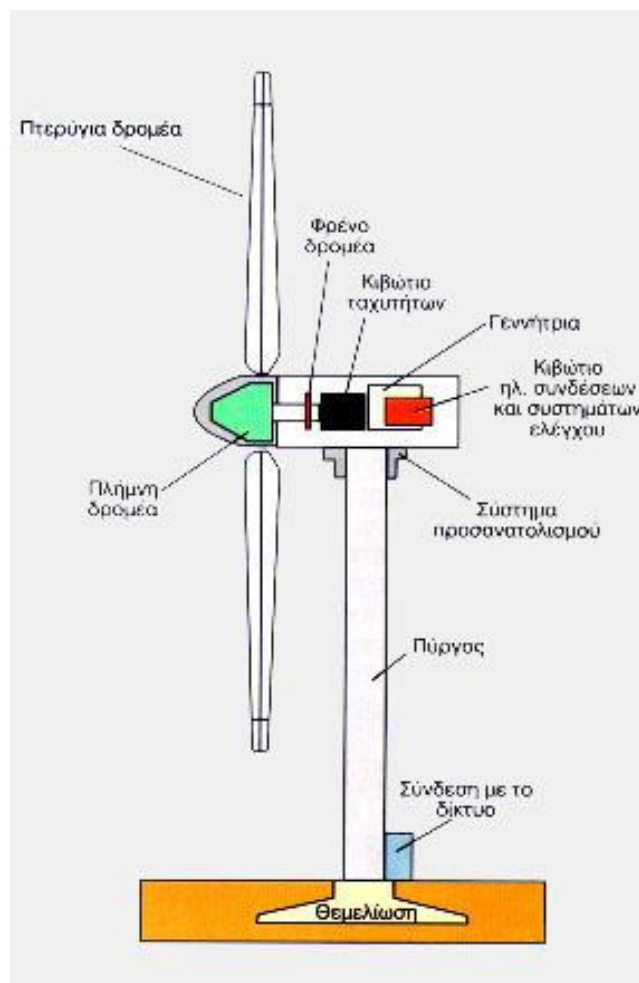
Σχήμα 2.3: Οι Α/Γ κάθετου άξονα

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν επικρατήσει οι Α/Γ οριζόντιου άξονα «up-wind», αυτές δηλαδή στις οποίες ο δρομέας τους βρίσκεται παράλληλα με το έδαφος και η πτερωτή βρίσκεται στο εμπρόσθιο μέρος του πύργου. Τα κυριότερα επιμέρους κομμάτια από τα οποία αποτελείται μία τέτοια σύγχρονη ανεμογεννήτρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 και στο Σχήμα 2.5 είναι τα εξής:

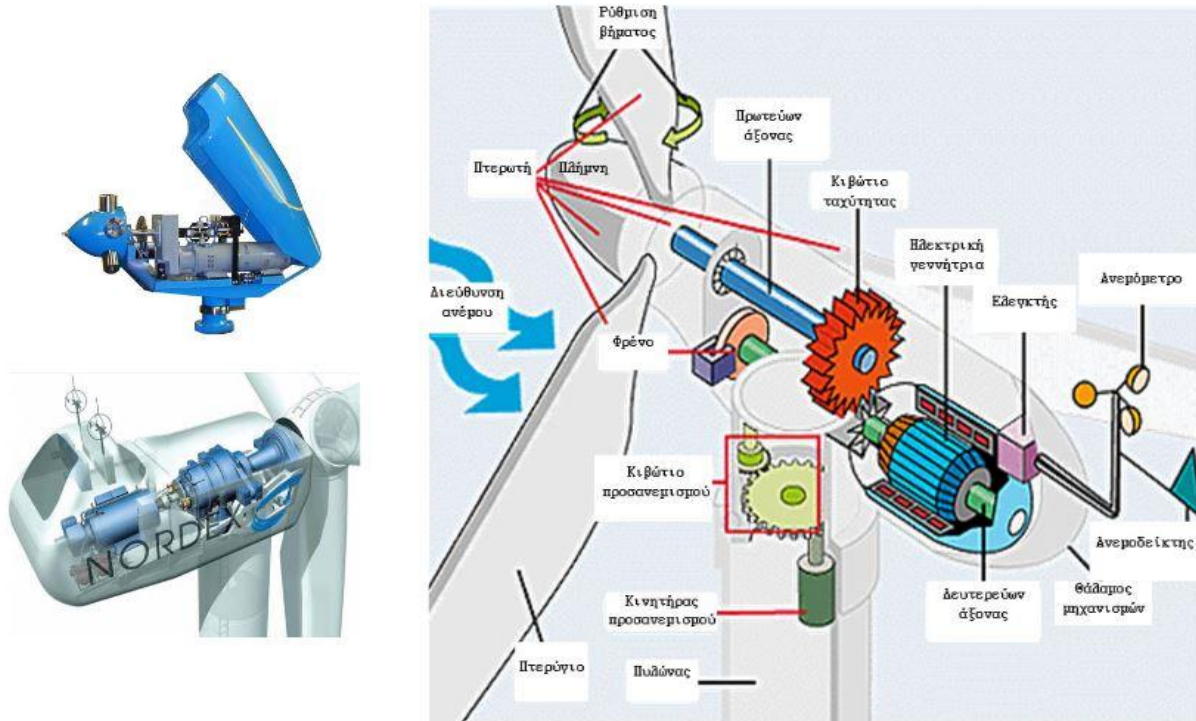
- Τα πτερύγια, τα οποία είναι συνήθως τρία και τα οποία είναι κατασκευασμένα από ενισχυμένο πολυεστέρα, για μεγαλύτερη αντοχή στις καταπονήσεις και μικρό βάρος. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης με την οποία δέχονται τον άνεμο.
 - Το σύστημα προσανατολισμού, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
 - Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει κατάλληλα την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.
 - Την ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική, η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Συνήθως υπάρχει και ένα σύστημα πέδης, το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο, που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας για την ασφαλή ακινητοποίηση του δρομέα όταν απαιτείται.
 - Ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας μπορεί να υπάρχουν και διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για την σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο.
 - Τον πύργο, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός με υλικό κατασκευής είτε από συνθετικά υαλονημάτα ή ανθρακονήματα, είτε σίδηρου.
- [13]
- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει

όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Μια επίσης σημαντική διάκριση μεταξύ των τύπων των Α/Γ αναλόγως του τρόπου λειτουργίας τους είναι η διάκριση μεταξύ Α/Γ σταθερών και μεταβλητών στροφών. Η σημασία της διάκρισης αυτής θα αναλυθεί παρακάτω, ωστόσο η διάκριση αυτή αναφέρεται στο αν η ταχύτητα περιστροφής κατά την λειτουργία της Α/Γ μπορεί να μεταβάλλεται εντός ενός εύρους ή όχι.



Σχήμα 2.4: Τα βασικά μέρη μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα.



Σχήμα 2.5: Τα βασικά μέρη μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα.

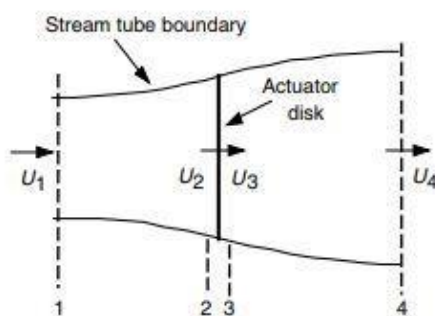
2.2 Το μηχανικό σύστημα - Αεροδυναμική συστήματος Α/Γ

Η λειτουργία της Α/Γ βασίζεται σε δύο συστήματα μετατροπής ενέργειας:

- Το μηχανικό σύστημα, το οποίο μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ροπή στο δρομέα της
- Το ηλεκτρικό σύστημα, στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ροπή του δρομέα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Όσον αφορά στο μηχανικό σύστημα, ο αεροδυναμικός σχεδιασμός της Α/Γ είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, για την όσο το δυνατόν πιο αποδοτική αλληλεπίδρασή της με τον άνεμο. Για αυτό το λόγο, θα αναφερθούν τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν το αεροδυναμικό της κομμάτι, την αλληλεπίδραση του ανέμου με την πτερωτή, η οποία μετατρέπει σε μηχανική ισχύ την

κινητική ενέργεια του ανέμου. Στην ουσία πρόκειται για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια Α/Γ από τον άνεμο και συγκεκριμένα στα πτερύγια της πτερωτής της. Η Α/Γ μπορεί να θεωρηθεί ως ένας δίσκος μετατροπής ενέργειας, όπου ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα της Α/Γ θεωρείται ιδανικός. Ο αέρας (ρευστό) υφίσταται μεταβολή της ενέργειας του, μεταβολή η οποία εκφράζεται με την μείωση της στατικής του πίεσης. Επιπλέον ο δρομέας θεωρείται σαν ένας δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό, εξ' ου και η ονομασία του «δίσκος ενέργειας». Το Σχήμα 2.6 , δείχνει το ροϊκό σωλήνα της Α/Γ που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα. Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) πριν από το δίσκο (θέση 1) έχει στατική πίεση p και πλησιάζει με ταχύτητα U_1 . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς πολύ μακριά μετά από το δίσκο (θέση 4), όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση του περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου (U_4) θα είναι μικρότερη από την αρχική (U_1). Για λόγους διατήρησης της μάζας μέσα στο ροϊκό σωλήνα, θα πρέπει η διατομή, άρα και η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από το δρομέα, δηλαδή να υπάρχει διαστολή του ρεύματος του αέρα.



Σχήμα 2.6: Ροϊκός σωλήνας της Α/Γ

Με βάση την αρχή διατήρησης της ορμής προκύπτει ότι η δύναμη που ασκείται και επιβραδύνει τον αέρα στον ροϊκό σωλήνα είναι:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (1)$$

Για σταθερή ροή $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_2 = \dot{m}$, όπου \dot{m} είναι ο ρυθμός μεταβολής της μάζας έχουμε :

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2)$$

Επίσης με βάση την αρχή του Bernoulli ισχύει ότι:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (3)$$

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (4)$$

Με βάση τα παραπάνω θεωρείται ότι

$$p_1 = p_4 = p, U_2 = U_3 = U$$

και συνεπώς προκύπτει:

$$\frac{1}{2}\rho(U_1^2 - U_4^2) = p_2 - p_3 \quad (5)$$

Αν A το εμβαδό του δίσκου, η δύναμη μπορεί να εκφραστεί ως η διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές του δίσκου:

$$T = A(p_2 - p_3) \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας στην (6) την (5) λαμβάνουμε :

$$T = \frac{1}{2}\rho A(U_1^2 - U_4^2) \quad (7)$$

Εξισώνοντας τις (7),(2) λαμβάνουμε :

$$U = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (8)$$

Θέτοντας

$$a = \frac{U_1 - U}{U_1} \quad (9)$$

Προκύπτει ότι :

$$U = U_1(1 - a) \quad (10)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (11)$$

Η ισχύς είναι ίση με : $P = \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) U = \frac{1}{2} \rho A U (U_1 - U_4)(U_1 + U_4)$ (12)

Αντικαθιστώντας τις (10),(11) στην (12) προκύπτει:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_1^3 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (13)$$

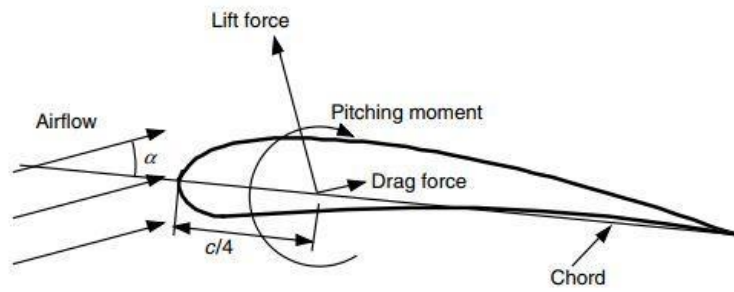
Προκύπτει δηλαδή ότι η ισχύς που αποδίδεται στην Α/Γ ισούται με το ενεργειακό περιεχόμενο του ανέμου στην είσοδο του ροϊκού σωλήνα επί έναν συντελεστή $(4\alpha(1-\alpha)^2)$. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται αεροδυναμικός συντελεστής και στο εξής συμβολίζεται με C_p .

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} = \frac{\text{Rotor power}}{\text{Power in the wind}} \quad (14)$$

Αυτό το αδιάστατο μέγεθος εκφράζει το λόγο της ισχύος του ανέμου που ανακτάται από την Α/Γ. Η μέγιστη τιμή του, υπολογίζεται θέτοντας $dC_p/da = 0$ οπότε η μέγιστη τιμή του προκύπτει για $\alpha = \frac{1}{3}$ και ισούται με $C_{pmax} = 16/27 = 0.5926$. Το όριο αυτό αναφέρεται ως όριο του Beltz και υποδηλώνει ότι σε ιδανικές συνθήκες η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας δεν μπορεί να ξεπεράσει το 59,3% [4], [5]. Για τη μετατροπή αυτού του ποσοστού ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του άξονα της πτερωτής βασικό ρόλο παίζουν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Τα πτερύγια είναι κατασκευές με ειδικό γεωμετρικό σχήμα και χρησιμοποιούνται για να αναπτυχθούν μηχανικές δυνάμεις λόγω της σχετικής κίνησης τους και του αέρα, ώστε να παραχθεί μηχανική ροπή στον άξονα της πτερωτής. Οι δυνάμεις που ασκούνται στα πτερύγια της Α/Γ είναι ποικίλες, αλλά η ανάλυση τριών βασικών δυνάμεων βοηθάει στην ευκολότερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 ορίζονται οι εξής δυνάμεις:

- Δύναμη ανύψωσης (Lift force): Ορίζεται ως η κάθετη δύναμη ως προς την κατεύθυνση του εισερχόμενου αέρα προς το πτερύγιο και είναι αποτέλεσμα της άνισης πίεσης στο πάνω και κάτω μέρος του πτερυγίου.
- Οπισθέλκουσα δύναμη (Drag force): Ορίζεται ως η παράλληλη δύναμη ως προς την κατεύθυνση του εισερχόμενου αέρα προς το πτερύγιο, προερχόμενη από την τριβή του αέρα με την επιφάνεια του πτερυγίου και από την άνιση πίεση.
- Pitching moment – Ορίζεται ως η ροπή που παράγεται από τον άνεμο στο πτερύγιο και είναι κάθετη στους άξονες της τομής ενός πτερυγίου.

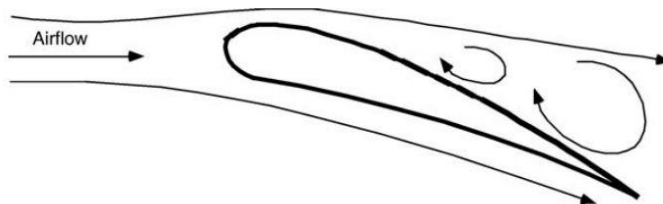


Σχήμα 2.7 : Οι δυνάμεις που ασκεί ο άνεμος στο πτερύγιο.

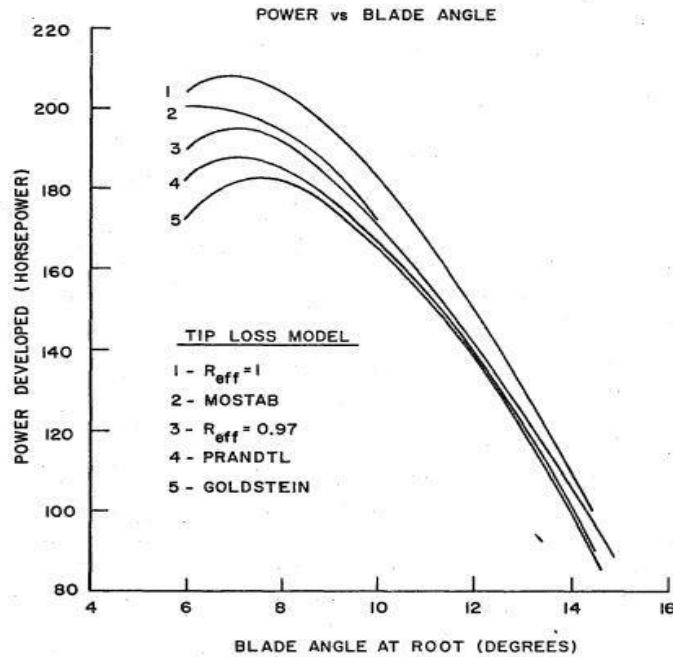
Οι αλλαγές στην πίεση του ανέμου στην επιφάνεια των πτερυγίων, δημιουργούνται από αλλαγές στην ταχύτητα του και μπορούν να εξηγηθούν καλύτερα χρησιμοποιώντας την αρχή του Bernoulli. Όταν η ροή του αέρα επιταχύνεται γύρω από τη εμπρόσθια κυκλική επιφάνεια του πτερυγίου, η στατική πίεση του (αέρα) μειώνεται. Καθώς η ροή του αέρα φτάνει το πίσω μέρος του πτερυγίου, αρχίζει να επιβραδύνεται και έτσι η στατική πίεση που ασκείται στην επιφάνεια του πτερυγίου έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται. Έτσι σε μία κατάλληλη κλίση του πτερυγίου ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, η ροή του επιταχύνεται περισσότερο στο άνω μέρος από το κάτω δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μία συνολική δύναμη ανύψωσης στο πτερύγιο. Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο το οποίο προκύπτει από τη μελέτη της αεροδυναμικής των Α/Γ όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.8 , είναι το φαινόμενο απώλειας στήριξης (stall). Σύμφωνα με αυτό, καθώς η σχετική γωνία πρόσπτωσης του αέρα με το

πτερύγιο αυξάνεται, από κάποια οριακή τιμή της γωνίας και μετά, η ροή αέρα αρχίζει να αποκολλάται από την επιφάνεια του πτερυγίου με αποτέλεσμα να μειώνεται η δύναμη ανύψωσης. Παρακάτω γίνεται εμφανής η επίδραση του φαινομένου στην αποδιδόμενη ισχύ, καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου πάνω στο πτερύγιο. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζονται για το ίδιο πτερύγιο οι υπολογισμοί ισχύος με πέντε διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού απωλειών, και αποτυπώνεται εμφανώς ότι η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου μετά από κάποια τιμή οδηγεί σε πολύ μεγάλη μείωση της μηχανικής ισχύος, οδηγεί δηλαδή στην εμφάνιση του φαινομένου απώλειας αεροδυναμικής στήριξης.

Η εξάρτηση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα πτερύγια από την γωνία πρόσπτωσης του ανέμου χρησιμοποιείται στη παρούσα μοντελοποίηση, μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος, το οποίο αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια και προσαρμόζει αναλόγως την ταχύτητα του ανέμου, την κλίση των πτερυγίων και κατά συνέπεια την αεροδυναμική τους απόδοση, για την κατάλληλη παραγωγή ενέργειας σε ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας [5], [12], [13].



Σχήμα 2.8 : Απεικόνιση του φαινομένου απώλειας στήριξης (stall).



Σχήμα 2.9 : Διάγραμμα αποδιδόμενης ισχύος μίας Α/Γ, ως προς τη γωνία των πτερυγίων της.

2.3 Αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης

Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου που θα αναπτυχθεί στο επόμενο κεφάλαιο, θα γίνει ανάλυση κάποιων βασικών εξισώσεων και μεγεθών που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους των Α/Γ. Βασικά μεγέθη που θα αναλυθούν είναι:

- Η γωνία βήματος των πτερυγίων «β»
- Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου «λ» ή “TSR”
- Οι συντελεστές «λι» και «Cr»

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η σχετική γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια της Α/Γ έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται και συνεπώς στην μετατροπή της ενέργειας. Για το λόγο αυτό ορίζεται η παράμετρος λ (λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου ως προς την ταχύτητα του ανέμου U), η οποία αποτελεί την εφαιπόμενη της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου και επιδρά σημαντικά στην απόδοση μιας

A/Γ. Οι πιο σημαντικές παράμετροι μιας A/Γ όπως, η αεροδυναμική απόδοση, οι μηχανικές καταπονήσεις και ο θόρυβος που παράγει εξαρτώνται άμεσα από αυτόν τον συντελεστή.

Ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου λ , είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και η εξίσωση που τον περιγράφει είναι η εξής:

$$\lambda = \omega r R / U_w \quad (15)$$

όπου ωr : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων (σε rad/s)

R : η ακτίνα διαγραφής της πτερωτής (σε m)

U_w : η ταχύτητα του ανέμου (σε m/s)

Ένα πτερόγιο που είναι σχεδιασμένο για υψηλές ταχύτητες ανέμου, αναπτύσσει χαμηλή ροπή στις χαμηλές ταχύτητες του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται υψηλότερες τιμές στην ταχύτητα εκκίνησης και μεγαλύτερη δυσκολία στην αυτόνομη εκκίνηση της A/Γ. Για μεγαλύτερες τιμές του λόγου TSR, μπορεί να αυξηθεί ακόμη περισσότερο η απόδοση της A/Γ, αλλά η παράλληλη αύξηση στο θόρυβο και τις μηχανικές καταπονήσεις μπορεί να ξεπερνάνε τα όποια οφέλη. Στην εξίσωση (14) προέκυψε ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης. Αυτός ο συντελεστής αποτελεί μια ιδιαίτερα κρίσιμη μεταβλητή η οποία εξαρτάται από την αεροδυναμική των πτερυγίων και την σχετική γωνία πρόσπτωσης του ανέμου. Ειδικότερα ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τον λόγο λ και την γωνία βήματος των πτερυγίων η οποία συμβολίζεται με «β». Μια τυπική εξίσωση για την μοντελοποίηση του αεροδυναμικού συντελεστή, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική είναι η εξής:

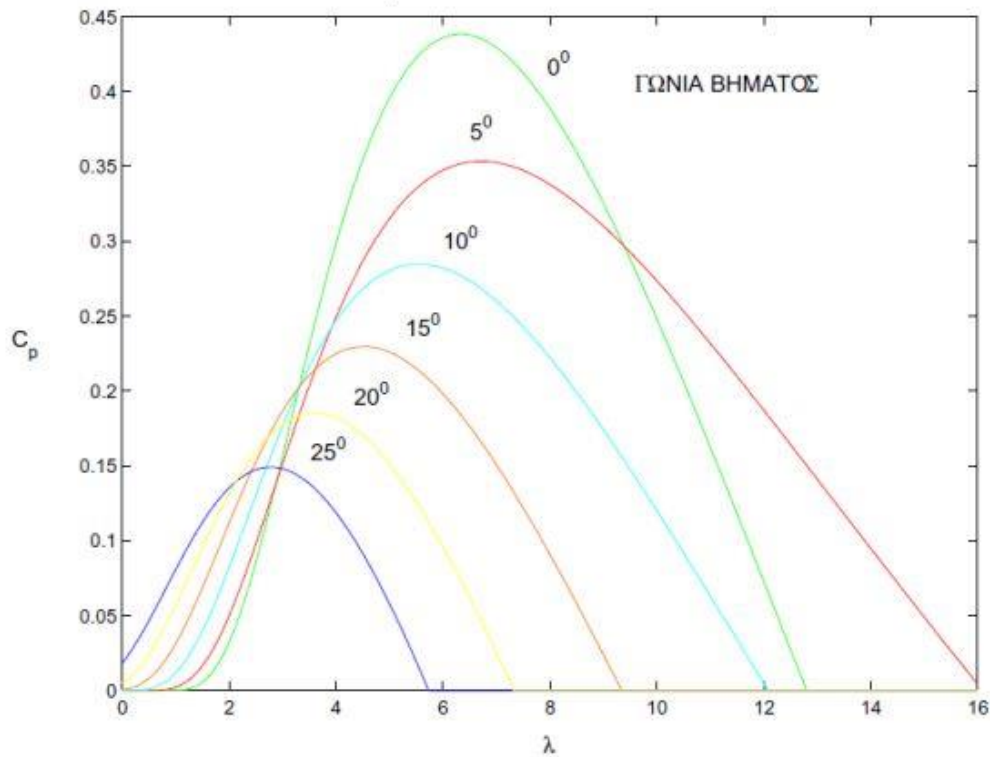
(16)

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12,5}{\lambda_i}}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (17)$$

Ο συντελεστής λ_i είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή C_p και εξαρτάται τόσο από το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίων λ , όσο και από την τρέχουσα τιμή

της κλίσης των πτερυγίων β της A/Γ . Στους παραπάνω τύπους (16, 17) φαίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των τιμών τους. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται καμπύλες για τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος για διαφορετικές τιμές της γωνίας βήματος. Είναι εμφανές ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p μειώνεται, όσο αυξάνεται η γωνία βήματος β . Επίσης, από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής έχει μια μέγιστη τιμή για μια τιμή του λ . Δηλαδή η ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης μεγιστοποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου, αναλογίας δηλαδή μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό υποδηλώνει ότι σε κάθε ταχύτητα του ανέμου αντιστοιχεί διαφορετική ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης. Συνεπώς, αν μια A/Γ είναι μεταβλητών στροφών μπορεί να μεγιστοποιεί την ισχύ που παράγει σε όλες τις ταχύτητες του ανέμου εφόσον δεν επισερχονται άλλοι περιορισμοί, ενώ αντίθετα μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών μεγιστοποιεί τον αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης σε μία μόνο ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 2.10: Ενδεικτικές τιμές αλλαγής του συντελεστή C_p για διάφορες τιμές του β .

2.4 Τεχνικές αεροδυναμικού ελέγχου

Οι Α/Γ αναλόγως το αεροδυναμικό τους σύστημα ελέγχου διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Ανεμογεννήτριες με έλεγχο απώλειας στήριξης (Passive Stall)

Οι Α/Γ αυτού του τύπου, έχουν μη κινούμενα, ως προς τον άξονα τους, πτερύγια σε σταθερή κλίση. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει την γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια. Η γεωμετρία του πτερυγίου είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένη έτσι ώστε όταν ο άνεμος ξεπεράσει την τιμή που ορίζουμε ως ονομαστική ταχύτητα ανέμου (στην οποία η Α/Γ παράγει την ονομαστική ισχύ), να δημιουργείται το φαινόμενο stall στο πίσω μέρος της επιφάνειας του πτερυγίου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η μηχανική ισχύς της πτερωτής δεν θα ξεπερνά τα επίπεδα σχεδιασμού. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι η απλότητα του και η αξιοπιστία του καθώς αποφεύγεται η χρήση κινούμενων μερών [5], [6].

- Ανεμογεννήτριες με έλεγχο γωνίας βήματος (Pitch Control)

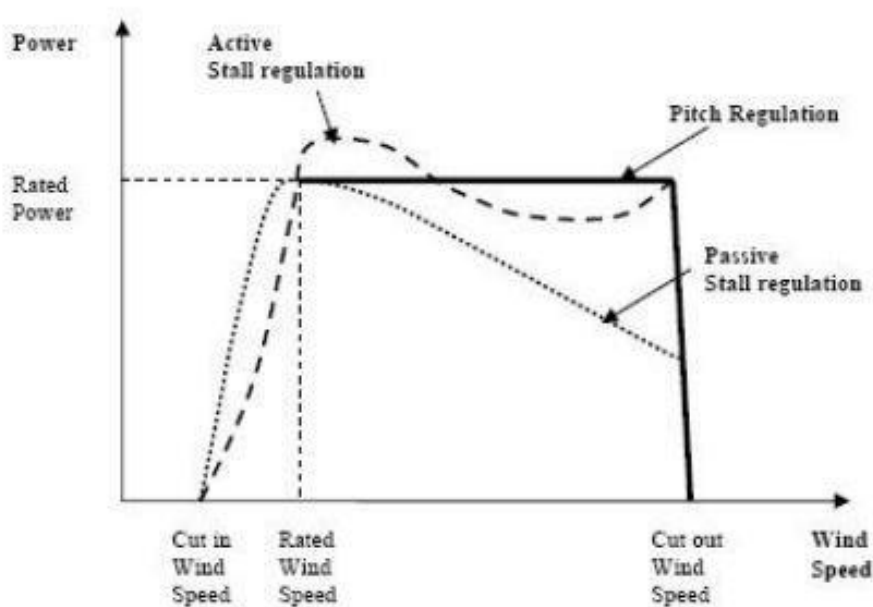
Ο πιο διαδεδομένος τύπος αεροδυναμικού ελέγχου είναι η προσαρμογή της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε να μεταβληθεί ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος. Σε αντίθεση με τις Α/Γ με σταθερά πτερύγια, ο έλεγχος γωνίας βήματος δίνει την δυνατότητα τροποποίησης της γωνίας των πτερυγίων, δηλαδή την μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια. Ο έλεγχος αυτός κυρίως ενεργοποιείται σε ταχύτητες ανέμου που υπερβαίνουν την ονομαστική, όπου ο έλεγχος γωνίας βήματος μεταβάλλει την κλίση των πτερυγίων ώστε να διατηρηθεί η μηχανική ισχύς της πτερωτής στα ονομαστικά επίπεδα. Η αλλαγή κλίσης γίνεται υδραυλικά και είναι συνήθως μόλις κάποιες μοίρες. Πιο συγκεκριμένα, όταν η παραγωγή ισχύος αυξηθεί πάνω από μία προκαθορισμένη μέγιστη τιμή, στέλνεται ένα σήμα στο σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος για να περιστρέψει τα πτερύγια, μειώνοντας έτσι τη σχετική γωνία πρόσπτωσης του αέρα στο πτερύγιο, με σκοπό τη μείωση της δύναμης της άνωσης και της παραγόμενης ισχύος. Βασικό μειονέκτημα είναι το αυξημένο κόστος, λόγω της προσθήκης επιπλέον συστημάτων ελέγχου. Επίσης, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου μικρές μεταβολές στη ταχύτητά του προκαλούν μεγάλες μεταβολές στην απόδοση ισχύος, καθώς το σύστημα αυτό δεν είναι αρκετά γρήγορο ώστε να ανταποκρίνεται άμεσα σε αυτές [5], [6], [9].

- Ανεμογεννήτριες ενεργής απώλειας στήριξης (Active stall)

Αυτός ο τύπος ελέγχου συνήθως χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μεγαλύτερες του 1 MW. Στην κατηγορία αυτή ο τρόπος ελέγχου των πτερυγίων είναι παρόμοιος με τον έλεγχο γωνίας βήματος, με τη μόνη διαφορά ότι όταν πρόκειται να ξεπεραστεί το μέγιστο αποδεκτό επίπεδο ισχύος, τα πτερύγια στρέφονται προς την αντίθετη κατεύθυνση από ότι πριν, αυξάνοντας τη γωνία πρόσπτωσης του αέρα στο πτερύγιο. Αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση του φαινομένου stall και ο περιορισμός της μηχανικής ισχύος. Για την αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων χρησιμοποιούνται λίγες προκαθορισμένες θέσεις σε αντίθεση με τον έλεγχο γωνίας βήματος, όπου το βήμα αλλαγής γωνίας είναι μικρότερο [5], [6]

- Συνδυασμοί τεχνικών αεροδυναμικού ελέγχου

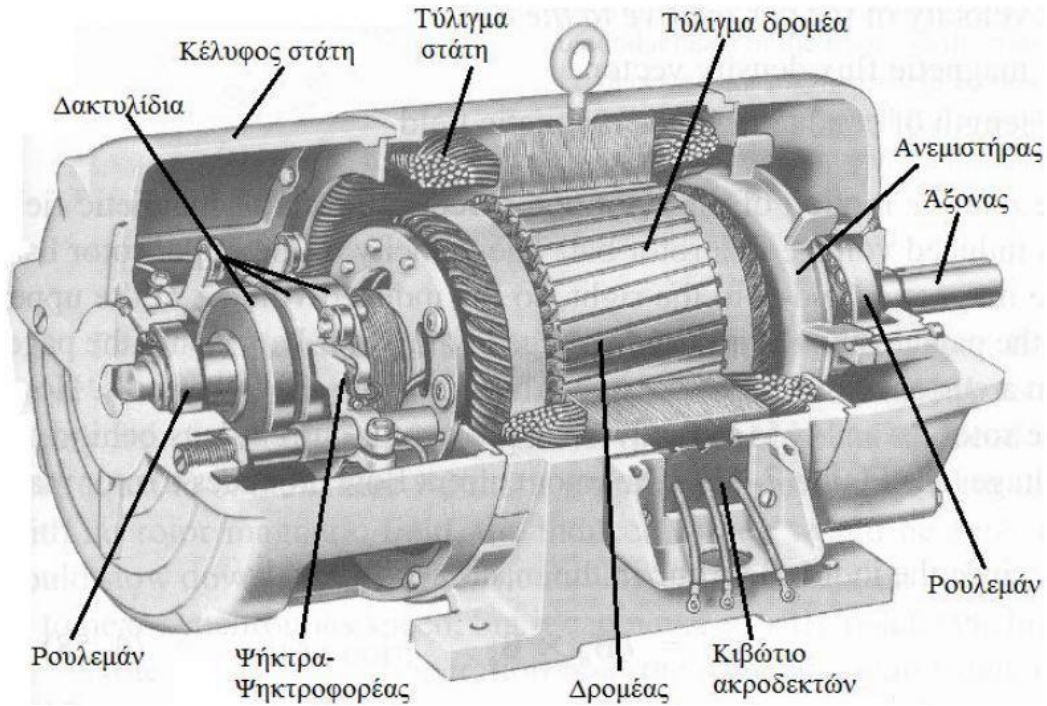
Επιπρόσθετα, υπάρχουν και ανεμογεννήτριες που συνδυάζουν τις παραπάνω τεχνικές αεροδυναμικού ελέγχου. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι ο συνδυασμός Stall-Pitch, ο οποίος χρησιμοποιείται σε Α/Γ σταθερών στροφών και συνδυάζει τη μεταβλητή γωνία βήματος του πτερυγίου με την αξιοποίηση του φαινομένου stall. Για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου από την ονομαστική εφαρμόζεται ο έλεγχος ενεργής απώλειας στήριξης (Active stall) για τη σταθεροποίηση της παραγωγής ισχύος. Αντίθετα, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου ρυθμίζεται η γωνία βήματος για τη μεγιστοποίηση παραγωγής ισχύος. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι ο έλεγχος αυτός είναι αρκετά απλός και αποτελεσματικός για Α/Γ σταθερής ταχύτητας, εμφανίζει υψηλά επίπεδα θορύβου και ως εκ τούτου οι ανεμογεννήτριες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρές εφαρμογές [5]. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η διαφορά στην παραγωγή ισχύος ανάλογα με τον τύπο αεροδυναμικού ελέγχου ανά ταχύτητα ανέμου. Φαίνεται ότι ο έλεγχος γωνίας βήματος κρατάει σταθερή τη μηχανική ισχύ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής. Αντίθετα, στον έλεγχο τύπου stall για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής η ισχύς μειώνεται [5].



Σχήμα 2.11 : Ισχύς Α/Γ ως προς την ταχύτητα του ανέμου για κάθε τύπο αεροδυναμικού ελέγχου.

2.5 Το ηλεκτρικό σύστημα

Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε ηλεκτρική επιτυγχάνεται μέσω της ηλεκτρικής μηχανής. Οι ηλεκτρικές μηχανές αναλόγως του τρόπου λειτουργίας τους, διακρίνονται στις γεννήτριες και στους κινητήρες. Οι γεννήτριες μετατρέπουν τη μηχανική ισχύ που προσφέρεται στον άξονά τους σε ηλεκτρική ισχύ, ενώ αντίστροφα οι κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ που προσφέρεται από το δίκτυο σε μηχανική ισχύ στον άξονά τους. Η μετατροπή της ισχύος από τη μία μορφή στην άλλη, πραγματοποιείται από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται ανάμεσα στα τυλίγματα του δρομέα και του στάτη της μηχανής. Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αναλόγως τον τύπο τάσης εξόδου κατηγοριοποιούνται σε ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εγκαθίστανται μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος οι οποίες διακρίνονται στις σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές. Για τις εφαρμογές των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται σύγχρονες ή ασύγχρονες μηχανές που λειτουργούν ως γεννήτριες. Στο Σχήμα 2.12 εμφανίζονται τα βασικά στοιχεία που αποτελούν μία σύγχρονη μηχανή.



Σχήμα 2.12: Σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή

Όσον αφορά τις ασύγχρονες γεννήτριες, αυτές είναι πιο δημοφιλείς σε εφαρμογές Α/Γ επειδή έχουν μικρότερο κόστος για κατασκευή τους καθώς δεν είναι πολύπλοκες.

Ανάλογα με την κατασκευή του τυλίγματος στο δρομέα οι ασύγχρονες μηχανές χωρίζονται σε:

- Δακτυλιοφόρες μηχανές ή μηχανές με τυλιγμένο δρομέα (wound rotor).
- Μηχανές βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (squirrel-cage rotor).

Επειδή, οι ασύγχρονες γεννήτριες απορροφούν από το δίκτυο μεγάλα ποσά άεργης ισχύος, θεωρείται ότι συμπεριφέρονται ως ένα ισχυρό επαγωγικό φορτίο, δηλαδή εργάζονται υπό χαμηλό συντελεστή ισχύος. Για το λόγο αυτό απαιτείται η διόρθωση του συντελεστή ισχύος, με την τοποθέτηση πυκνωτών τοπικά, εφόσον δεν υπάρχουν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος [5], [9], [10]. Στην περίπτωση που η ασύγχρονη γεννήτρια συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα πρέπει να είναι πλησίον της σύγχρονης ταχύτητας.

Στην περίπτωση αυτή, ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου, ο δρομέας της Α/Γ περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα η οποία καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, τον λόγο στο κιβώτιο ταχυτήτων και το σχεδιασμό της Α/Γ. Συνήθως η εκκίνηση αυτών των μηχανών γίνεται με τη χρήση του ανέμου, ώστε να αποκτήσει ο δρομέας την κατάλληλη ταχύτητα πριν συνδεθεί με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Στις αρχές του 1990, οι πρώτες Α/Γ που χρησιμοποιούνταν ήταν οι Α/Γ σταθερών στροφών. Εφόσον ανάμεσα στην γεννήτρια και το δίκτυο παρεμβάλλεται μετατροπέας ισχύος, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα δεν απαιτείται να είναι κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα και είναι εφικτή η λειτουργία της Α/Γ σε μεταβλητές στροφές. Οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος [5]. Όπως θα φανεί παρακάτω η λειτουργία μεταβλητών στροφών εκτός από την περίπτωση αυτή, καθίσταται δυνατή όταν ο δρομέας της ασύγχρονης γεννήτριας συνδέεται μέσω μετατροπέα στο δίκτυο ενώ ο στάτης συνδέεται απευθείας.

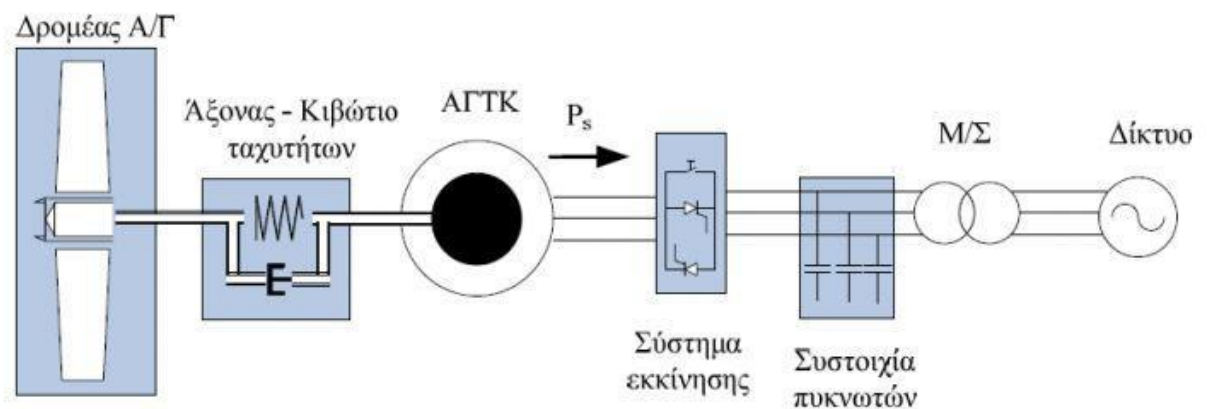
2.6 Σύγχρονες διατάξεις Α/Γ

Οι ανεμογεννήτριες σήμερα έχουν ομαδοποιηθεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες ανάλογα με το αν είναι σταθερών ή μεταβλητών στροφών και με τη χρήση ή μη, ηλεκτρονικών ισχύος και αναφέρονται αναλυτικότερα παρακάτω:

- Η Α/Γ σταθερών στροφών με μηχανή επαγωγής

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13 σε αυτή τη διάταξη, η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη απευθείας στο δίκτυο. Η ισχύς που παράγεται στο δρομέα της Α/Γ ελέγχεται αεροδυναμικά από τα πτερύγια μέσω stall, active stall ή pitch συστήματος. Στη συνέχεια, υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων για τη σύνδεση του δρομέα σε ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, η οποία συνδέεται απευθείας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός μετασχηματιστή. Επίσης, χρησιμοποιείται και ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter) για ομαλότερη σύνδεση και μια συστοιχία πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος που

καταναλώνει η ασύγχρονη γεννήτρια. Λόγω του ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε σταθερές στροφές, η απόδοσή της μεγιστοποιείται σε μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Έτσι συχνά, για την αύξηση της απόδοσης, είναι εφοδιασμένη με δύο ομάδες τυλιγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, το ένα χρησιμοποιείται κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (συνήθως 8 ζεύγη πόλων) και το άλλο για μέτριες και υψηλές ταχύτητες ανέμου (4 ή 6 ζεύγη πόλων). Κάποια από τα πλεονεκτήματα της είναι η αξιοπιστία, η απλή σχεδίαση και το χαμηλό κόστος, ενώ μειονεκτήματά της είναι η μειωμένη ενεργειακή απόδοση και οι επιδράσεις της Α/Γ στη λειτουργία του δικτύου, εφόσον διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταφράζονται σε διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο [5], [9], [25].

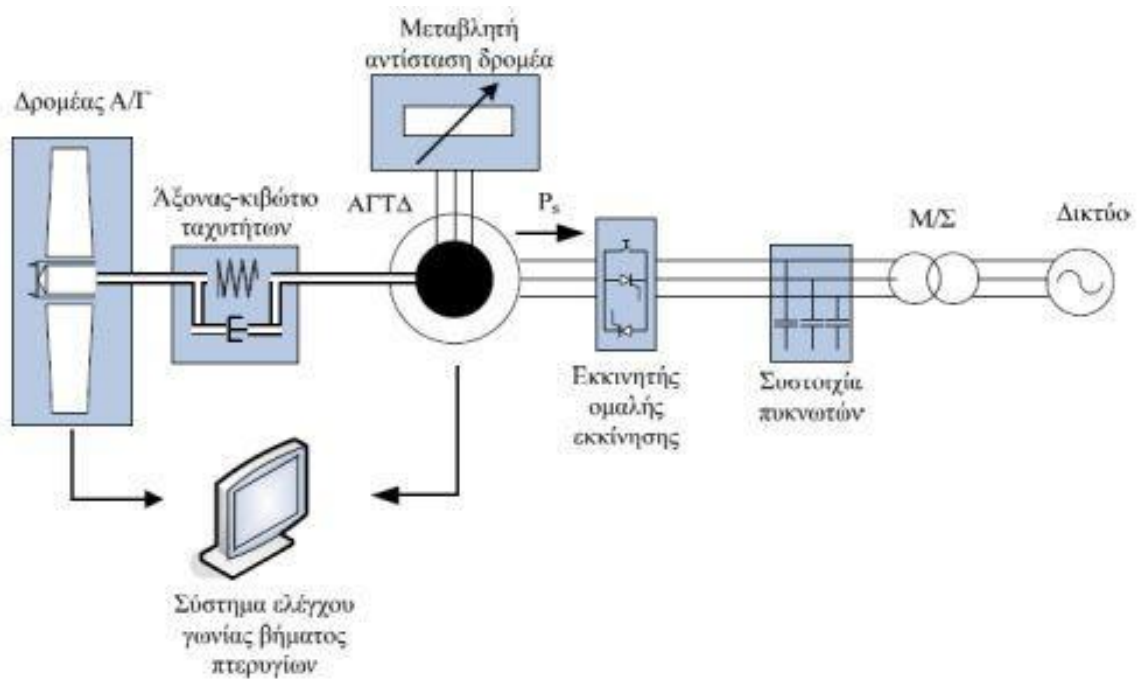


Σχήμα 2.13 : Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού

- Η Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14 η διάταξη αυτού του τύπου των ανεμογεννητριών είναι παρόμοια με αυτής στην προηγούμενη, καθώς και στην κατηγορία αυτή υπάρχει ο soft starter και μία συστοιχία πυκνωτών. Η βασική διαφοροποίηση είναι η προσθήκη εξωτερικά ρυθμιζόμενης αντίστασης, για τον μερικό έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Με την μεταβολή της ωμικής αντίστασης του δρομέα τροποποιείται η καμπύλη ροπής-ολίσθησης και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται περιορισμένη μεταβλητότητα στις στροφές του

δρομέα, σε εύρος 0-10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα του. Έτσι, βελτιώνεται η απόδοση, ενώ παράλληλα περιορίζονται οι μηχανικές καταπονήσεις. Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι ως μειονέκτημα έχει τη δημιουργία αυξημένων ωμικών απωλειών λόγω της εξωτερικής αντίστασης και την αύξηση του κόστους λόγω των επιπρόσθετων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται. Τέλος, όπως και την προηγούμενη κατηγορία Α/Γ, οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ ικανοποιούνται από τη συστοιχία πυκνωτών αντιστάθμισης στον τερματικό ζυγό. Για τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, εφαρμόζεται ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων [5], [9].

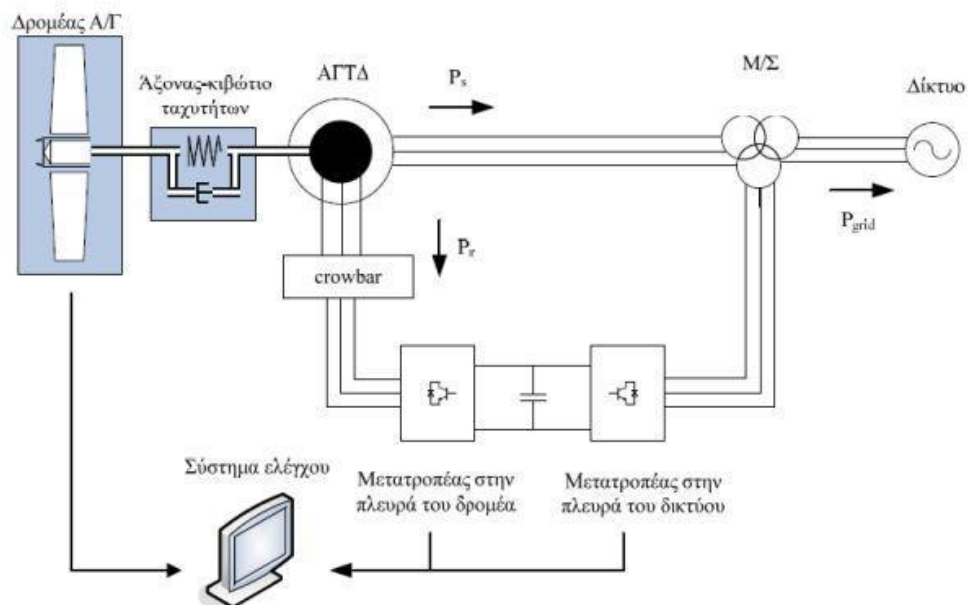


Σχήμα 2.14: Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης

- Η Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης (Double Fed Induction Gen.)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15 ο τύπος αυτός αποτελείται από μια ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (WRIG), συνδεδεμένη μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων με τον άξονα της

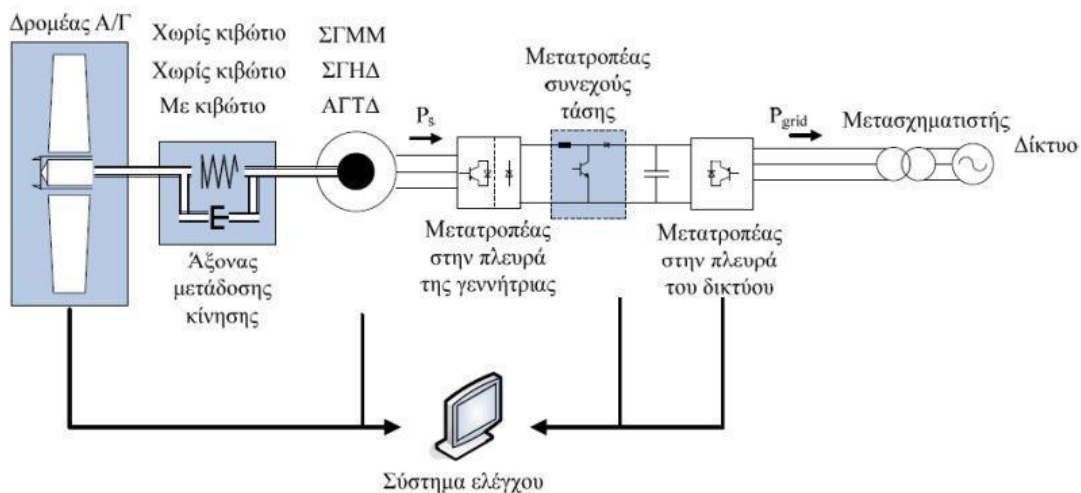
πτερωτής. Η διαφορά με τις Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια μεταβλητής αντίστασης δρομέα είναι ότι, αντί να μεταβάλλεται η αντίσταση των τυλιγμάτων στον δρομέα, εφαρμόζεται μία ελεγχόμενη τάση στο τύλιγμα του δρομέα μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Αντίθετα με τον τύπο της Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης, στην περίπτωση των Α/Γ διπλής τροφοδότησης δεν υπάρχουν αυξημένες ωμικές απώλειες και η ισχύς εγχέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Στις Α/Γ διπλής τροφοδότησης ελέγχονται οι στροφές με κατάλληλη ρύθμιση της συχνότητας του πλάτους και της φάσης της τάσης που εφαρμόζεται στον δρομέα. Η ανεμογεννήτρια έχει εύρος ταχύτητας περίπου $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας παραμένει σχεδόν σταθερή σε διαταραχές της ταχύτητας του ανέμου σε αντίθεση με μία ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών όπου αυτές οι διαταραχές μεταφράζονται σε διαταραχές στο δίκτυο. Λόγω της μεταβλητότητας των στροφών έχει το πλεονέκτημα της αποδοτικής λειτουργίας σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Επίσης ως Α/Γ μεταβλητών στροφών, επιτυγχάνει χαμηλά επίπεδα ακουστικού θορύβου, αφού μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες όταν η φόρτιση της είναι μειωμένη [9], [10].



Σχήμα 2.15: Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης (Double Fed Induction Gen.)

- Η Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος

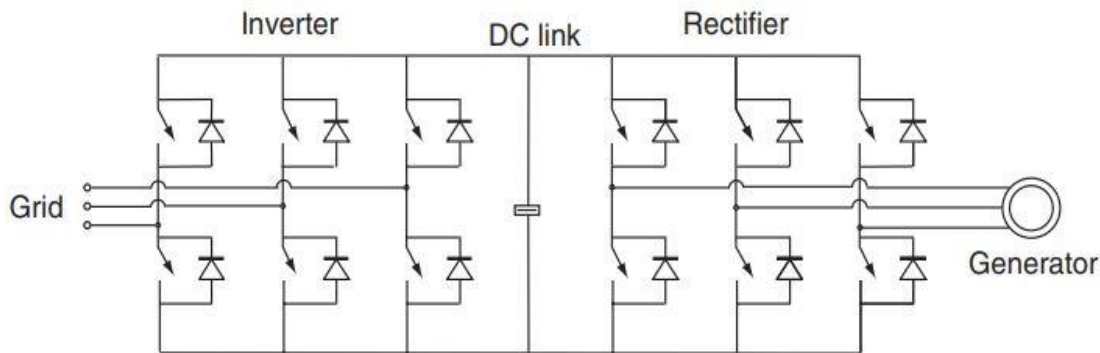
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16 η Α/Γ με πλήρη μετατροπέα ισχύος, αποτελείται από την γεννήτρια (σύγχρονη ή ασύγχρονη) η οποία συνδέεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων (ή χωρίς) στην περωτή. Η σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός μετατροπέα ισχύος, ο οποίος αποδεσμεύει την ταχύτητά περιστροφής της περωτής από τη συχνότητα του δικτύου και παρέχει την απαραίτητη αντιστάθμιση σε άεργο ισχύ που απαιτεί η γεννήτρια για την ομαλότερη σύνδεση στο δίκτυο. Η γεννήτρια όταν είναι ασύγχρονη, έχει κιβώτιο ταχυτήτων. Στην περίπτωση σύγχρονης πολυπολικής γεννήτριας μόνιμων μαγνητών το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να παραληφθεί, λόγω της μειωμένης σύγχρονης ταχύτητας της γεννήτριας. Ο δρομέας της γεννήτριας, εφόσον αυτή είναι σύγχρονη, μπορεί να διεγερθεί είτε ηλεκτρικά είτε από μόνιμους μαγνήτες. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου Α/Γ είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης διάταξης. Το εύρος λειτουργίας των μεταβλητών στροφών είναι μεγαλύτερο από τις Α/Γ διπλής τροφοδότησης, ενώ επίσης η δυνατότητα παράλειψης του κιβωτίου ταχυτήτων επιφέρει σημαντικές μειώσεις στο κόστος και την πολυπλοκότητα της [9], [10].



Σχήμα 2.16: Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος

2.7 Η Α/Γ με πλήρη μετατροπέα

Η Α/Γ που θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία είναι η Α/Γ μεταβλητών στροφών πλήρους μεταροπέα ισχύος. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες και έχουν πλέον γίνει η κυρίαρχη επιλογή στην αγορά. Αυτή η κατηγορία Α/Γ είναι σχεδιασμένη να αποδίδει τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων του ανέμου, αντί για μόνο μία. Καθώς αλλάζει η ταχύτητα του ανέμου, ο λόγος λ της ταχύτητας ακροπτερυγίου ως προς την ταχύτητα του ανέμου, παραμένει σταθερός για μια περιοχή λειτουργίας αποδίδοντας έτσι το μέγιστο συντελεστή ισχύος σε κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρικά μέρη αυτού του τύπου των Α/Γ είναι αρκετά πιο περίπλοκα και ακριβά. Βασικό στοιχείο των Α/Γ αυτών είναι ο μετατροπέας ισχύος που παρεμβάλεται μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου σύνδεσης. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από μια διάταξη ανόρθωσης της εναλλασσόμενης τάσης των τυλιγμάτων του στάτη. Η DC τάση που προκύπτει στην έξοδο του ανορθωτή τροφοδοτεί έναν αντιστροφέα ο οποίος παράγει εναλλασσόμενη τάση και συνδέεται με το δίκτυο. Μια τυπική διαμόρφωση μιας Α/Γ αυτού του τύπου εμφανίζεται και στο Σχήμα 2.17 και έχει ως στόχο την πλήρη αποδέσμευση της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ από τη συχνότητα του δικτύου. Η παράσταση του σχήματος 2.17 διαφέρει ελαφρώς από αυτή του σχήματος 2.16 και αποτελεί μια εναλλακτική διαμόρφωση. Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται ότι συνδυαστικά με τον ανορθωτή εγκαθίσταται και ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter) ώστε να γίνει εφικτός ο έλεγχος του ρεύματος και της τάσης.



Σχήμα 2.17 : Τοπολογία πλήρους μετατροπέα τύπου “back to back”.

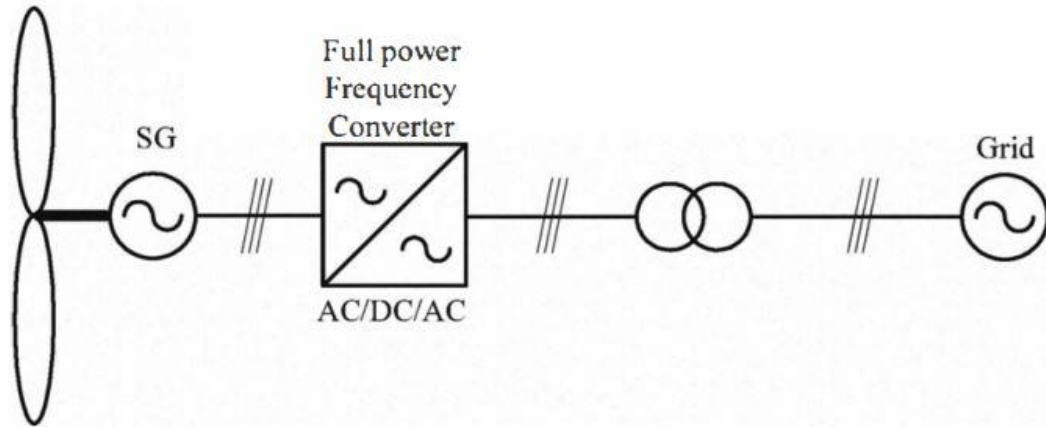
Σε κάθε περίπτωση η διάταξη του πλήρους μετατροπέα δίνει την δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο, το οποίο αποτελεί και ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Ο έλεγχος της ανταλλαγής αέργου ισχύος με το δίκτυο μπορεί να γίνεται είτε διατηρώντας το συντελεστή ισχύος στη πλευρά του δικτύου σταθερό, είτε ελέγχοντας τη τάση του ζυγού όπου συνδέεται η ανεμογεννήτρια. Ο έλεγχος της έγχυσης ενεργού ισχύος γίνεται με βάση τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT), ενώ παράλληλα μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου δεν προκαλούν μεταβολές της έγχυσης ισχύος αλλά κυρίως αλλαγές στην ταχύτητα της γεννήτριας. Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα είναι, η αυξημένη παραγωγή ενέργειας, η βελτίωση της ποιότητας ισχύος που παράγεται και η μείωση στις καταπονήσεις των μηχανικών μερών της. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι όλα ανεβάζουν το συνολικό κόστος κατασκευής, αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το πλήθος των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται, λόγω των εξειδικευμένων ηλεκτρονικών ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η Α/Γ ΠΛΗΡΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟ SIMULINK

3.1 Περιγραφή τεχνικών χαρακτηριστικών της Α/Γ προς προσομοίωση

Μία γενική σύνοψη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα προσομοίωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 μαζί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.1 . Πρόκειται για μία ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται είναι μία σύγχρονη πολυ-πολική σχεδιασμένη για χαμηλές ταχύτητες ($n = \frac{120f}{p}$). Έτσι επιτυγχάνεται η σύνδεση του δρομέα της γεννήτριας με τη πτερωτή, χωρίς τη χρήση κιβωτίου. Η γεννήτρια μπορεί να διεγείρεται είτε ηλεκτρικά, είτε με μόνιμους μαγνήτες. Για την επίτευξη της μεταβλητότητας στην ταχύτητα του δρομέα και την αποδέσμευση της ταχύτητας του δρομέα από τη συχνότητα του δικτύου, η σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρη μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση των τυλιγμάτων του στάτη της γεννήτριας, σε AC τάση με συχνότητα αυτής του δικτύου. Αυτή η διάταξη αποτελείται από έναν ανορθωτή AC/DC και έναν αντιστροφέα DC/AC οι οποίοι συνδέονται σε σειρά, «back to back». Επίσης, όσον αφορά το αεροδυναμικό της μέρος, η Α/Γ διαθέτει την δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control) και τον κατάλληλο ηλεκτρονικό ελεγκτή. Η λειτουργία του είναι να τροποποιεί την γωνία βήματος έτσι ώστε σε ταχύτητες ανέμων υψηλότερες της ονομαστικής να μειώνει την μηχανική ροπή και να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων της Α/Γ, για την κατάλληλη παραγωγή ενέργειας [19].



Σχήμα 3.1: Ένα τυπικό διάγραμμα μιας Α/Γ με πλήρη μετατροπή.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικές τιμές της Α/Γ.

Χαρακτηριστικά Α/Γ	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	2MW
Ταχύτητα δρομέα	9-18 ΣΑΛ
Διάμετρος πτερυγίων	37.5 m
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut-in)	3 m/s
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής (cut-out)	25 m/s

3.2 Ανάπτυξη του μοντέλου σε περιβάλλον Simulink

Το συγκεκριμένο μοντέλο που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας βασίστηκε στην εργασία [19] στην οποία περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά στοιχεία μοντελοποίησης Α/Γ αυτού του τύπου. Για τις ανάγκες της ανάπτυξης του μοντέλου:

- Αμελείται η δυναμική συμπεριφορά των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα ισχύος και υιοθετείται μια απλοποιημένη προσέγγιση για την μοντελοποίηση του μετατροπέα.
- Αμελείται η ελαστικότητα του κοινού άξονα που συνδέει την πτερωτή με τον δρομέα της γεννήτριας.
- Δεν μοντελοποιείται το ηλεκτρικό μέρος της γεννήτριας εφόσον παρεμβάλεται ο μετροπέας ισχύος μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου.

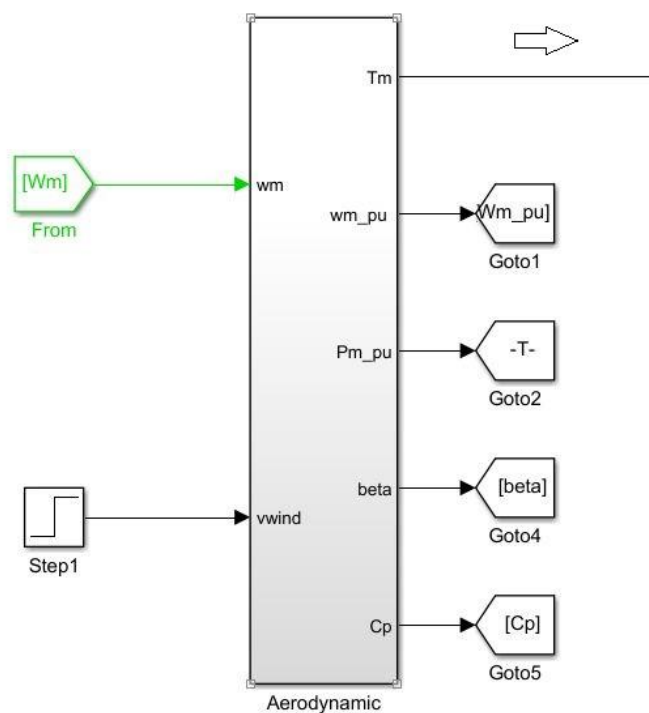
Ξεκινώντας την παρουσίαση του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του Simulink του Matlab, θα παρουσιαστούν τα επιμέρους τμήματα που το απαρτίζουν. Θα γίνει μία περιγραφή του τρόπου λειτουργίας τους και σε συνδυασμό με όσα έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί. Πιο συγκεκριμένα θα αναλυθούν τα εξής υποσυστήματα που έχουν υλοποιηθεί στο παρόν μοντέλο:

- Αεροδυναμικό μέρος
- Διασύνδεση αεροδυναμικού - Μηχανικού μέρους
- Ελεγκτής ενεργού ισχύος
- Ελεγκτής αέργου ισχύος

3.2.1 Παράσταση αεροδυναμικού μέρους

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται το μπλοκ για τον υπολογισμό της παραγόμενης μηχανικής ισχύος και ροπής. Για τον υπολογισμό τους, απαιτείται ο υπολογισμός των τιμών του αεροδυναμικού

συντελεστή απόδοσης « C_p » και του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίων « λ », οι οποίες εξαρτώνται από την τιμή της γωνίας βήματος « β » των πτερυγίων της Α/Γ και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω_m . Η γωνία βήματος προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν κάθε φορά την τρέχουσα τιμή « ω_m » της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Στις επόμενες υποενότητες που ακολουθούν, αναλύεται το κάθε τμήμα του μοντέλου πιο διεξοδικά.

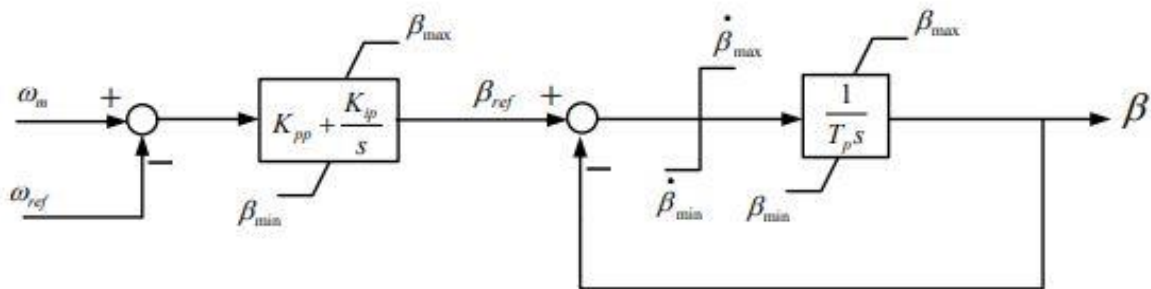


Σχήμα 3.2: Το συνολικό μπλοκ του αεροδυναμικού ελέγχου της Α/Γ.

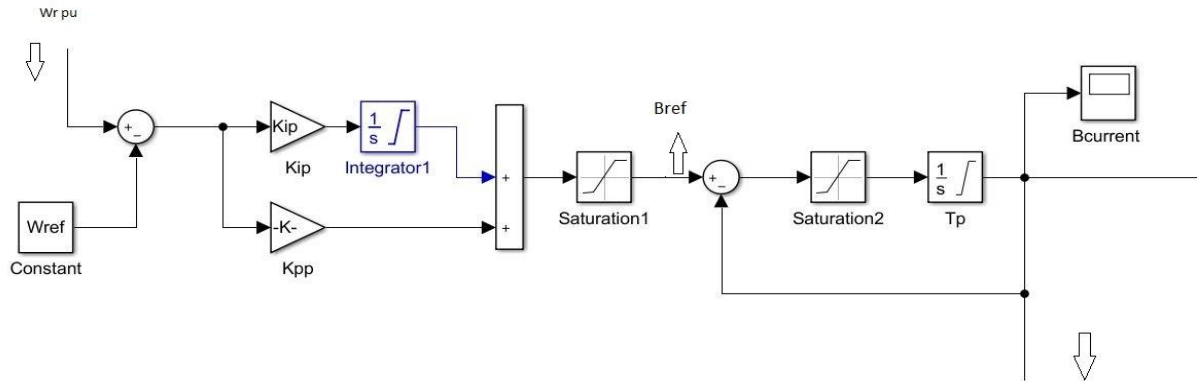
Έλεγχος γωνίας βήματος

Στο Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4 αντίστοιχα απεικονίζονται, η γενική δομή του μοντέλου για τη ρύθμιση της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ και η αντίστοιχη υλοποίηση του στο

περιβάλλον του Simulink. Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο τμήμα απο το Σχήμα 3.3 , φαίνεται το μπλοκ ελέγχου της γωνίας βήματος από το οποίο προκύπτει μια τιμή για την επιθυμητή γωνία βήματος (αναφοράς). Η διαφορά, μεταξύ της ταχύτητας του δρομέα ω_m και της ταχύτητας αναφοράς του ω_{mref} αποτελεί σήμα εισόδου στο μπλοκ του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή από όπου και προκύπτει το σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος (β_{ref}). Το σήμα γωνίας αναφοράς εισάγεται στη διάταξη μεταβολής γωνίας βήματος των πτερυγίων, η οποία μεταβάλλει τη γωνία των πτερυγίων με χρονική καθυστέρηση T_p , ενώ επίσης θεωρείται και περιορισμός στο ρυθμό μεταβολής της γωνίας, δηλαδή στην ταχύτητα στρέψης των πτερυγίων. Το δεύτερο μπλοκ απο το Σχήμα 3.3, μοντελοποιεί την απόκριση αυτού του μηχανισμού επιτυγχάνοντας μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της δυναμικής μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων. Με βάση τα παραπάνω υλοποιήθηκε το μοντέλο ελέγχου γωνίας βήματος στο Simulink που εμφανίζεται στο Σχήμα 3.4 [19].



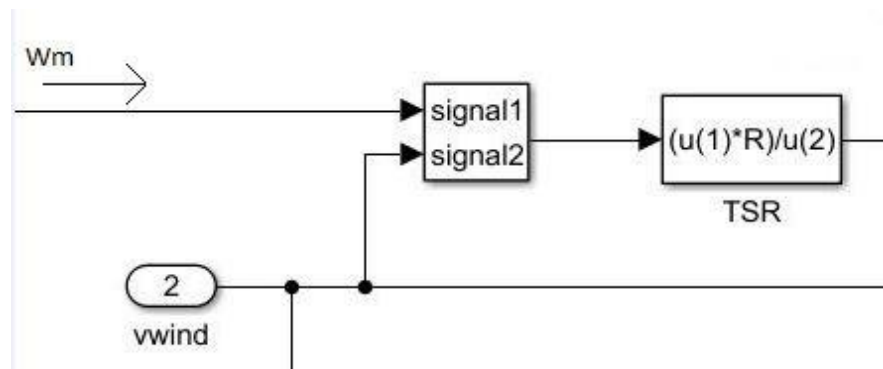
Σχήμα 3.3: Το μοντέλο ρυθμιστή της γωνίας βήματος των πτερυγίων



Σχήμα 3.4: Το μοντέλο ρυθμιστή της γωνίας βήματος των πτερυγίων στο Simulink

Υπολογισμός γωνιακής ταχύτητας ακροπτερυγίου

Στο Σχήμα 3.5, φαίνεται το μπλοκ υπολογισμού του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίων της Α/Γ. Στο κομμάτι με την ονομασία «TSR» πραγματοποιείται ο υπολογισμός της εξίσωσης που περιγράφει το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου.

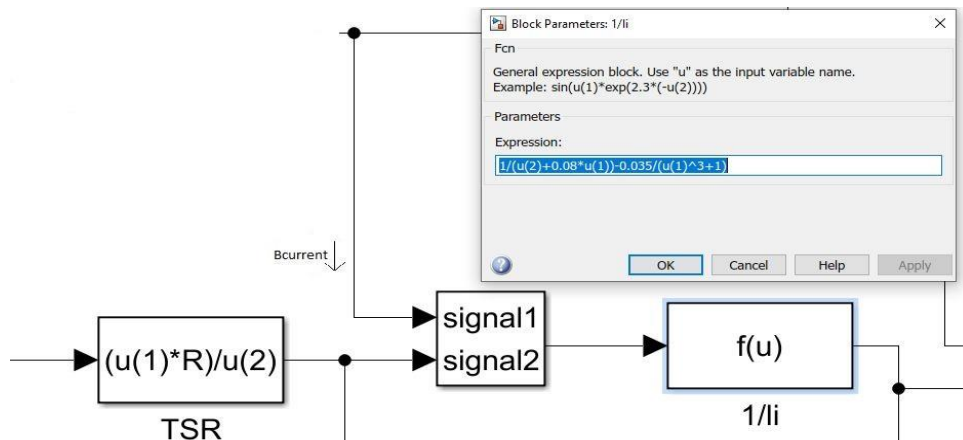


Σχήμα 3.5: Το simulink μπλοκ υπολογισμού του λόγου TSR.

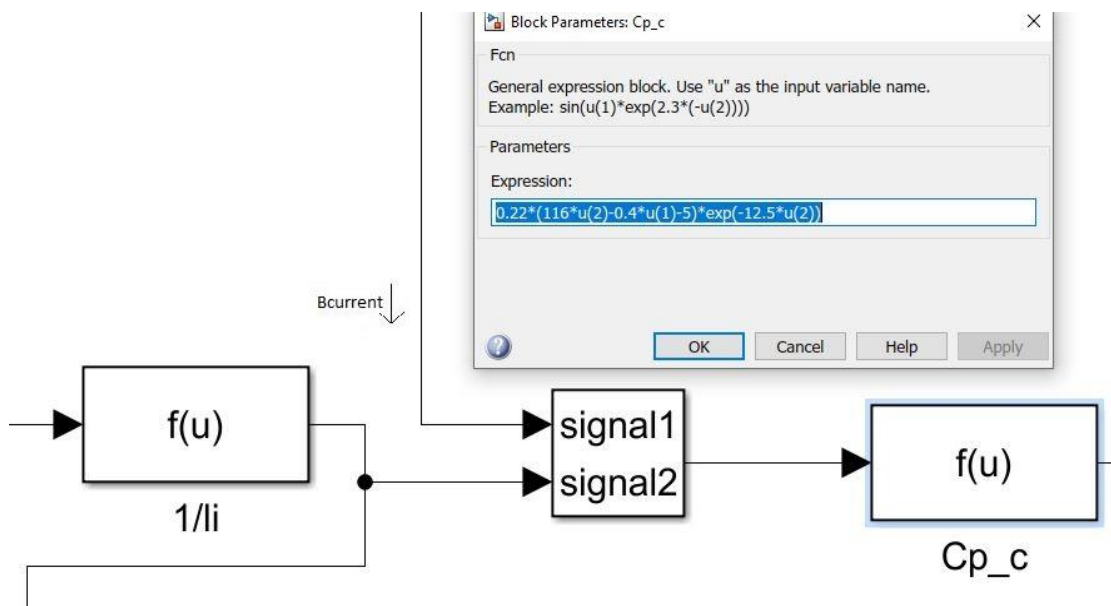
Μπλοκ αεροδυναμικού συντελεστή απόδοσης

Ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις (16), (17). Τα αντίστοιχα μπλοκ του συντελεστή «li» και

του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος βάσει της τιμής του λ , φαίνονται στο Σχήμα 3.6 και Σχήμα 3.7 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.6: Το simulink μπλοκ υπολογισμού του συντελεστή l_i .



Σχήμα 3.7: Το simulink μοντέλο υπολογισμού του αεροδυναμικού συντελεστή C_p .

3.2.2 Υπολογισμός της μηχανικής ισχύος και ροπής

Στο Σχήμα 3.8, φαίνεται το μπλοκ υπολογισμού της παραγόμενης μηχανικής ισχύος P , στο οποίο υλοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p \quad (18)$$

Για τον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος, το μπλοκ του Simulink, θα έχει τις εξής μεταβλητές ως εισόδους :

ρ : Η πυκνότητα του αέρα (σε kg/m²)

A : Το μήκος των πτερυγίων (σε m)

U_{wind} : Η ταχύτητα του ανέμου (σε m/s)

C_p : Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

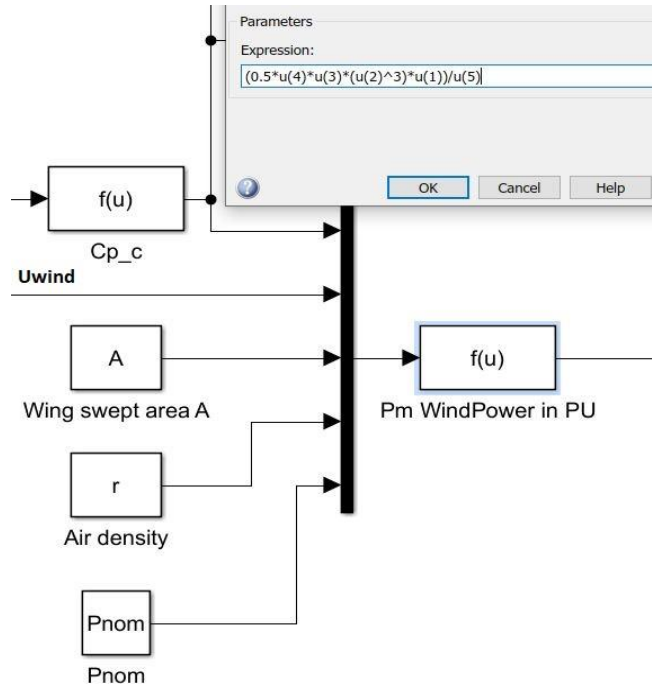
Για τον υπολογισμό της τιμής της ισχύος στο ανά μονάδα σύστημα, η φυσική τιμή διαιρείται με την ονομαστική της τιμή P_{nom} . Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (18), η διαθέσιμη ενέργεια ανά πάσα στιγμή, εξαρτάται από την τιμή της ταχύτητας του ανέμου υψωμένη στη τρίτη δύναμη. Αυτό σημαίνει ότι μια μικρή αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου, προκαλεί πολύ μεγάλες αλλαγές στη μηχανική ισχύ εφόσον δεν τροποποιηθούν άλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας όπως η γωνία βήματος ή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Στο Σχήμα 3.9, φαίνεται το μπλοκ υπολογισμού της μηχανικής ροπής T_m (σε ανά μονάδα σύστημα), η οποία ασκείται στον άξονα της A/Γ σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση [19]:

$$T_m = P_m / \omega_m \quad (19)$$

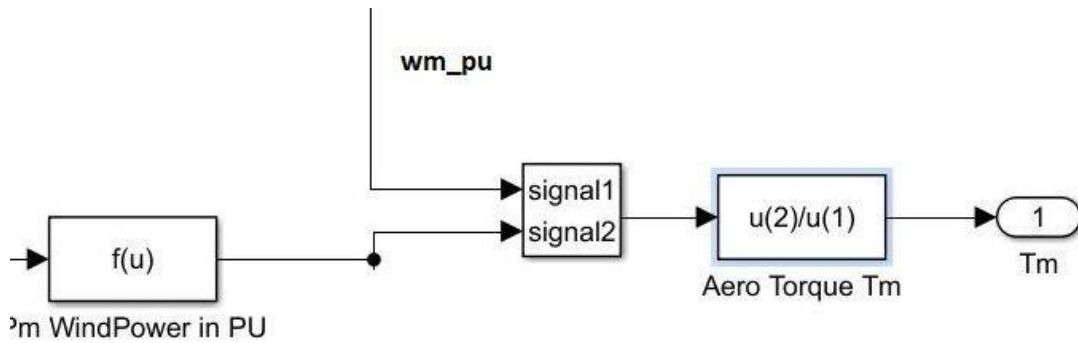
Για τον υπολογισμό της ροπής, το αντίστοιχο μπλοκ του Simulink, σύμφωνα με το παραπάνω τύπο, θα έχει τις εξής μεταβλητές ως εισόδους :

P_m : Η μηχανική ισχύς στον άξονα της A/Γ (στο ανά μονάδα σύστημα)

ω_m : Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων (στο ανά μονάδα σύστημα)



Σχήμα 3.8: Το τμήμα του μοντέλου για τον υπολογισμό της παραγόμενης μηχανικής ισχύος P.



Σχήμα 3.9: Το simulink μπλοκ υπολογισμού της μηχανικής ροπής T_m

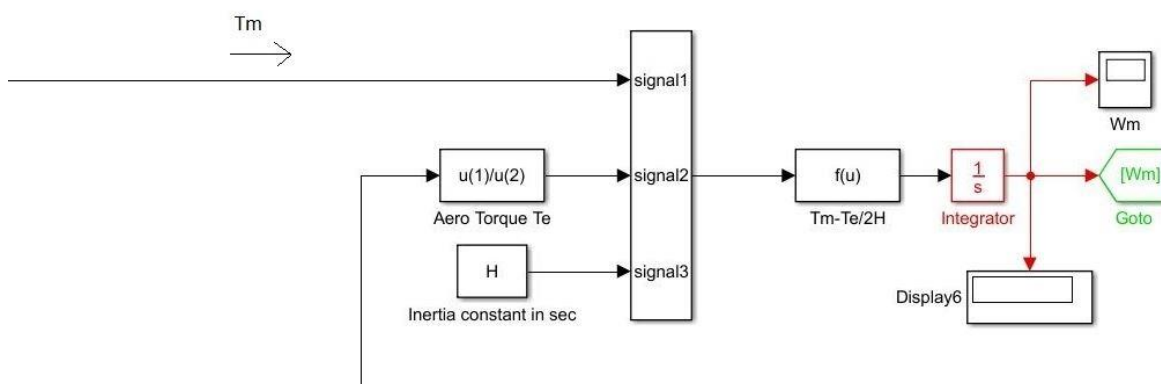
3.2.3 Διαφορική εξίσωση κίνησης δρομέα A/Γ

Για την παράσταση του άξονα της A/Γ, χρησιμοποιείται η εξίσωση κίνησης, στο ανά μονάδα σύστημα η οποία είναι η ακόλουθη :

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega_m}{dt} \quad (20)$$

Όπου H : σταθερά αδράνειας

Για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της A/Γ, ολοκληρώνεται η διαφορά μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής ροπής στον άξονα της A/Γ. Ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας είναι αντιστρόφως ανάλογος της σταθεράς αδράνειας H . Η υλοποίησή του στο Simulink εμφανίζεται και στο Σχήμα 3.10 .



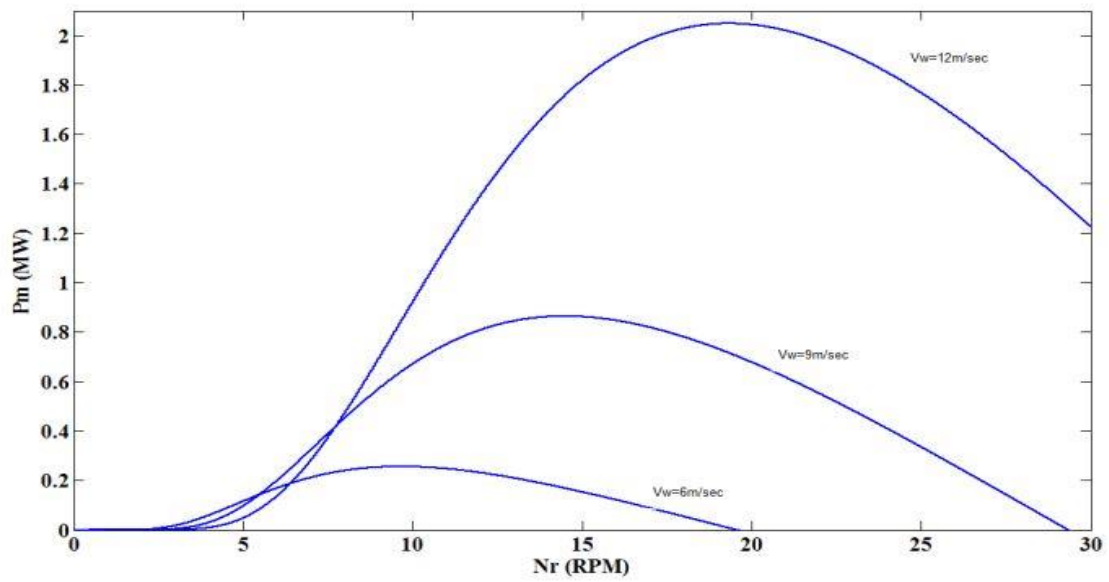
Σχήμα 3.10: Το τμήμα υπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της A/Γ

3.2.4 Παράσταση ελεγκτή ενεργού ισχύος της A/Γ

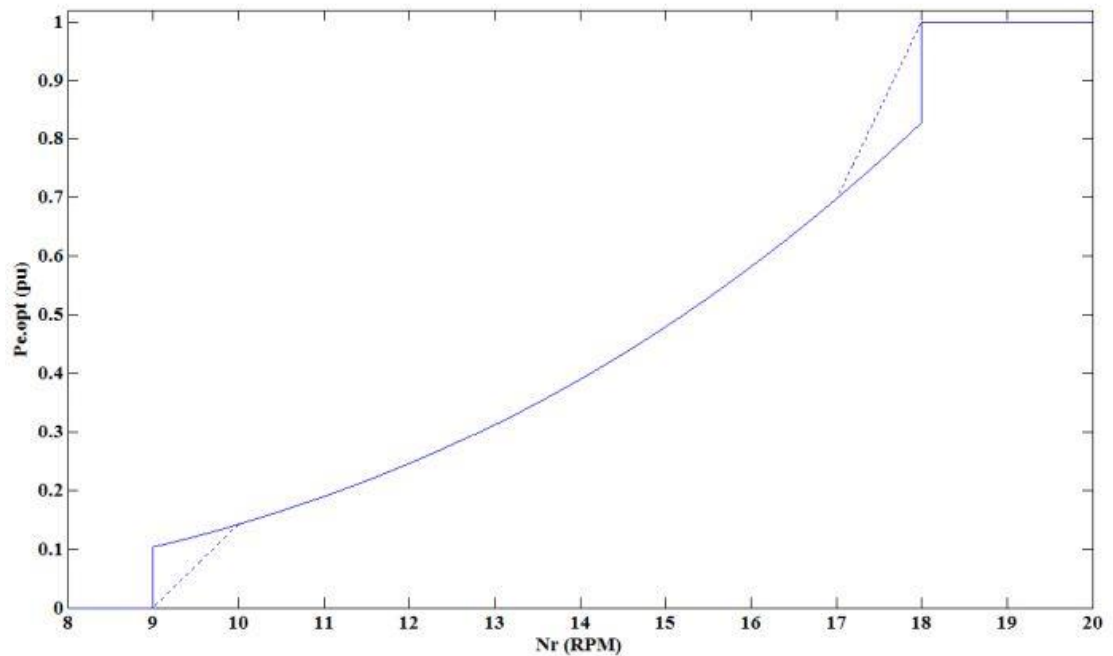
Ο έλεγχος ενεργού ισχύος της A/Γ αντιστοιχίζει σε κάθε ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της A/Γ ένα σημείο ρύθμισης για την ενεργό ισχύ που θα εγχύει ο μετατροπέας ισχύος. Το

σημείο ρύθμισης αυτό καθορίζεται με βάση τη στρατηγική της μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14 και την ταυτόχρονη ικανοποίηση περιορισμών ως προς την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.11 για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει μία συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ, για την οποία η ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο είναι μέγιστη. Ενοποιώντας όλα αυτά τα σημεία (για τα οποία η ισχύς είναι μέγιστη στις διάφορες τιμές του ανέμου) σε ένα γράφημα, καθορίζουμε τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που θα επιδιώκουμε να λαμβάνουμε σε κάθε ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ. Αυτή η περιοχή λειτουργίας είναι η περιοχή μέγιστης απολαβής ισχύος η οποία περιορίζεται από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, η οποία στην προκειμένη περίπτωση έχει τιμή 18 ΣΑΛ.

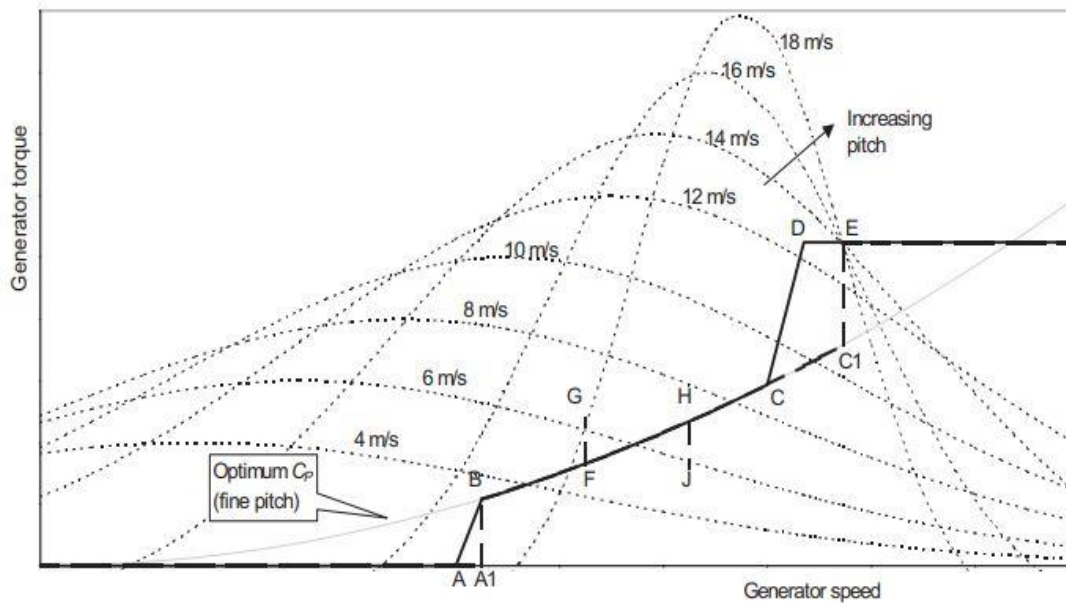
Κάνοντας μία υπέρθεση των παρακάτω γραφημάτων από το Σχήμα 3.11 και το Σχήμα 3.12 προκύπτει ένα γράφημα ενδεικτικά σαν αυτό του Σχήματος 3.13 . Συνεπώς, η καμπύλη της μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί κάθε φορά σε ένα σημείο τομής με κάποια καμπύλη της μηχανικής ισχύος για μία δεδομένη ταχύτητα ανέμου. Αυτό το σημείο ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς που μπορούμε να εξάγουμε από τον άνεμο σε κάθε περίπτωση. Αξίζει σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι αν και κατά τις αλλαγές του ανέμου θα υπάρχουν μεταβατικές περίοδοι, στη μόνιμη κατάσταση, το σύστημα πάντα θα ισορροπεί στην μέγιστη ισχύ ή στην μέγιστη ταχύτητα περιστροφής. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η μέγιστη απόδοση σε κάθε ταχύτητα ανέμου -μικρότερη της ονομαστικής- χωρίς την ανάγκη μέτρησης του με ξεχωριστό σύστημα. Για την αποφυγή προβλημάτων στους υπολογισμούς μεταξύ των διαφορετικών περιοχών λειτουργίας υλοποιείται η διακεκομμένη γραμμή αντί της συνεχόμενης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12 [19] .



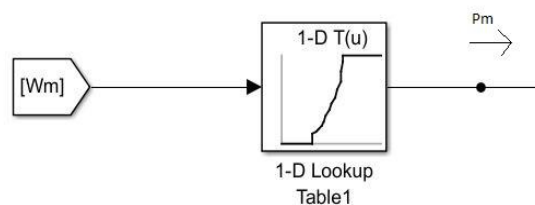
Σχήμα 3.11: Ενδεικτικές καμπύλες μηχανικής ισχύος (σε MW), ως προς τη περιστροφική ταχύτητα του δρομέα, για διάφορες τιμές ανέμων



Σχήμα 3.12: Ενδεικτική καμπύλη μέγιστης αεροδυναμικής ισχύος (σε pu) ως προς την ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ



Σχήμα 3.13: Συνδυασμός των καμπυλών μηχανικής ισχύος και μέγιστης αεροδυναμικής ισχύος (σε ρυ) ως προς την ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ

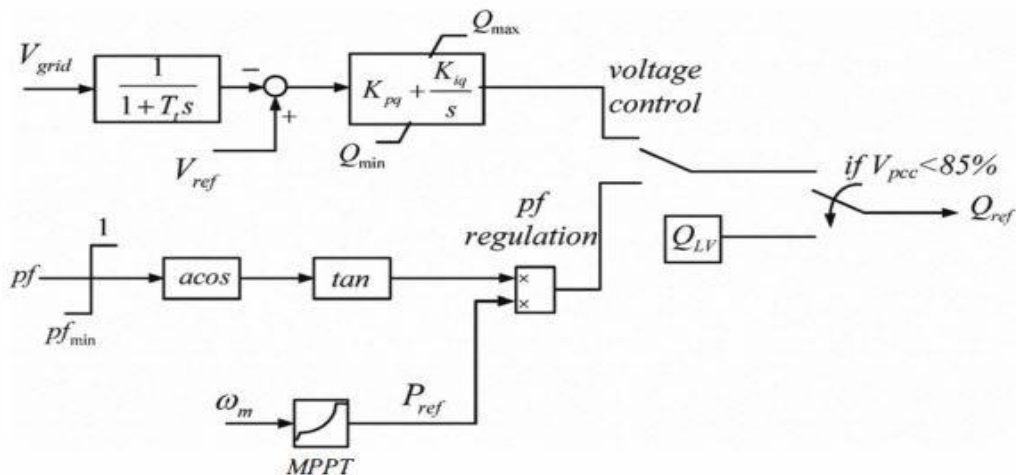


Σχήμα 3.14: Υλοποίηση ελεγκτή MPPT στο Simulink

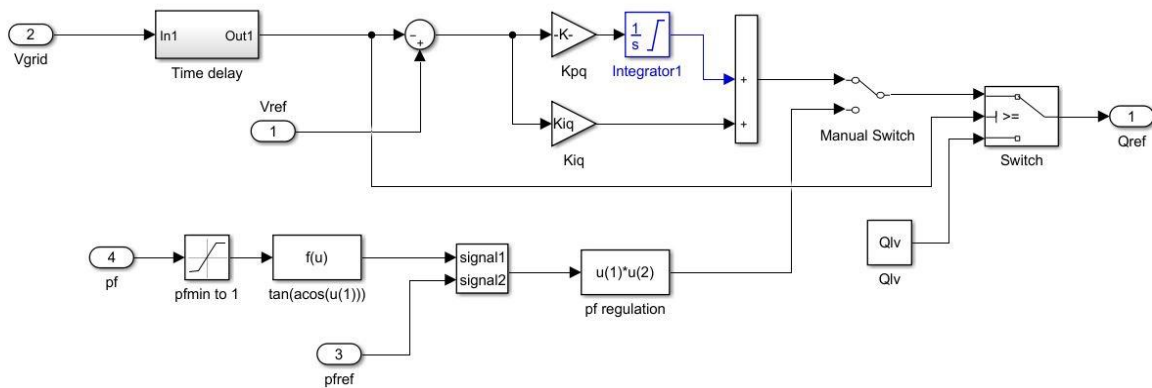
3.2.5 Ελεγκτής ελέγχου αέργου ισχύος

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, στις Α/Γ με πλήρη μετατροπέα ισχύος είναι δυνατός ο ανεξάρτητος έλεγχος της εγχυόμενης ενεργού και αέργου ισχύος. Ως προς τον έλεγχο αέργου ισχύος υλοποιήθηκαν δύο βρόχοι ελέγχου: α) έλεγχος τάσης β) έλεγχος συντελεστή ισχύος. Εφόσον είναι ενεργός ο πρώτος βρόχος, γίνεται ρύθμιση της τάσης στο ζυγό στον οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Για την ρύθμιση της τάσης θεωρείται ένας αναλογικός-

ολοκληρωτικός ελεγκτής, ο οποίος ως σήμα εισόδου δέχεται τη διαφορά της μετρούμενης τιμής της τάσης από μια επιθυμητή τιμή, που ορίζεται εξωτερικά ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15 και Σχήμα 3.16 . Στην έξοδο διαμορφώνεται ένα σήμα, το οποίο θα αποτελεί την τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ. Ο δεύτερος βρόχος, υλοποιεί έλεγχο σταθερού συντελεστή ισχύος. Χρησιμοποιώντας τη σχέση $Q = P \cdot \tan\phi$ (21), διαμορφώνεται για την εκάστοτε τιμή αναφοράς της ενεργού ισχύος η τιμή αναφοράς της αεργού ισχύος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ένας προκαθορισμένος συντελεστής ισχύος λειτουργίας της Α/Γ. Για τον έλεγχο αέργου ισχύος στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται η μέτρηση της τερματικής τάσης [19].



Σχήμα 3.15: Απλοποιημένο σχήμα ελεγκτή ελέγχου άεργου ισχύος



Σχήμα 3.16: Υλοποίηση ελεγκτή ελέγχου άεργου ισχύος στο Simulink.

3.2.6 Μετατροπέας ισχύος

Για τη μοντελοποίηση του μετατροπέα χρησιμοποιείται το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (d-q πλαίσιο αναφοράς), το οποίο περιστρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου. Η d συνιστώσα αφορά την ενεργό και η q την άεργο ισχύ. Τα αντίστοιχα ρεύματα που εγχύει ο μετατροπέας στο δίκτυο υπολογίζονται ως εξής [19]:

(21)

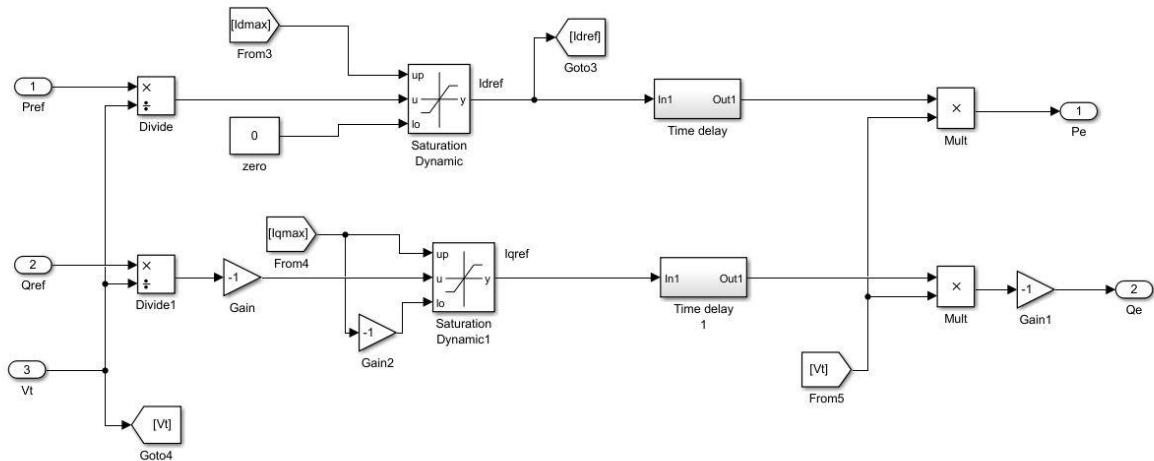
$$I_{dref} = \frac{P_{ref} V_d}{V_d^2} = \frac{P_{ref}}{V_t}$$

$$I_{qref} = \frac{-Q_{ref} V_d}{V_d^2} = -\frac{Q_{ref}}{V_t}$$

(22)

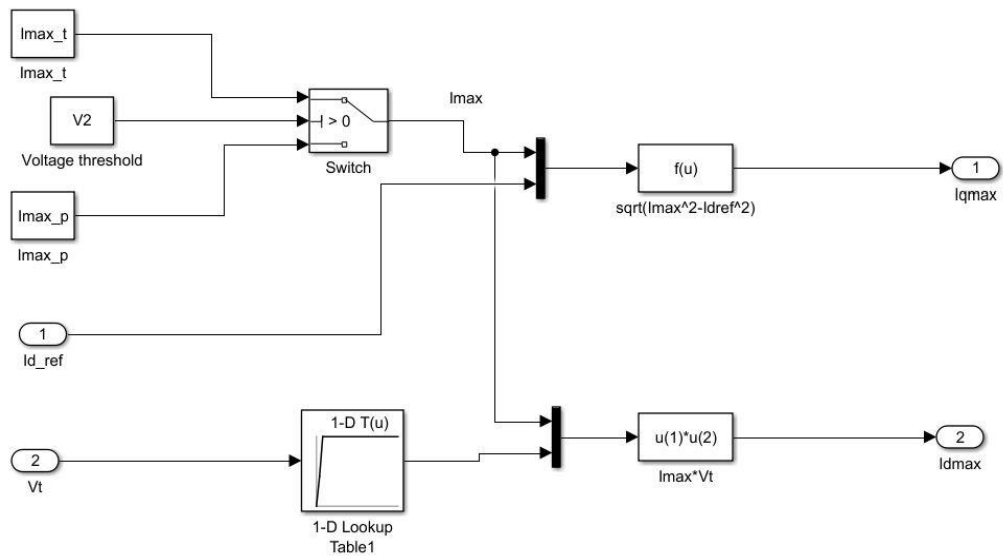
Η ένδειξη ref αντιστοιχεί στην επιθυμητή τιμή για την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος και του αντίστοιχου ρεύματος από τον μετατροπέα. Για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας θεωρούμε ότι οι τιμές αυτές επιτυγχάνονται από τον μετατροπέα με μια μικρή χρονική καθυστέρηση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πρωτοβάθμιες συναρτήσεις μεταφοράς στα μπλοκ με την ονομασία “time delay”, για την αναπαράσταση των καθυστερήσεων στους βρόχους του μετατροπέα, οι οποίες προκύπτουν από τα φυσικά χαρακτηριστικά των ελεγκτών

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η διάταξη του μετατροπέα για την έγχυση της ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο όπως έχει υλοποιηθεί στο περιβάλλον του Simulink.

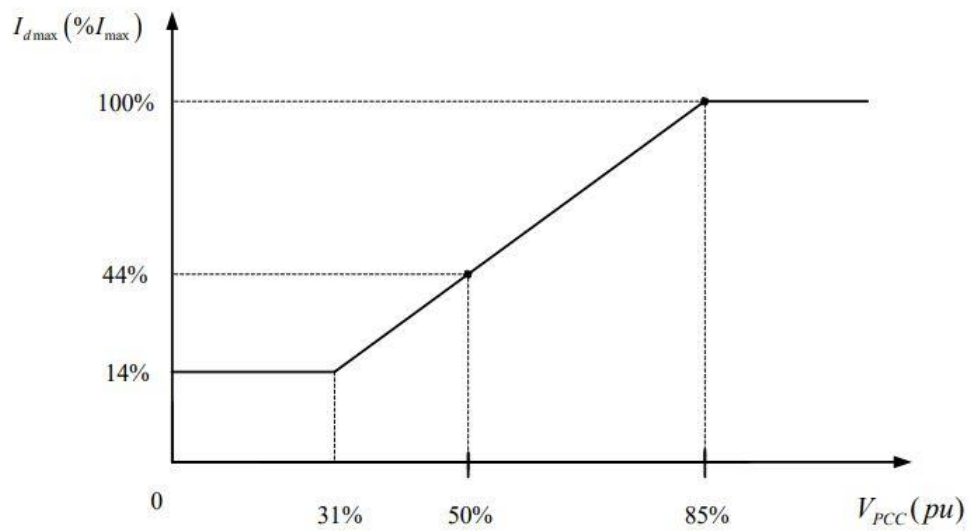


Σχήμα 3.17: Υλοποίηση μετατροπέα ισχύος στο Simulink.

Τέλος είναι σημαντικό να υλοποιηθούν οι περιοριστές ρεύματος ιδιαίτερα για σενάρια όπου εμφανίζονται χαμηλές τάσεις. Τα όρια ρεύματος για το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφονται στην εργασία [19]. Συγκεκριμένα, η τιμή του περιοριστή για την ενεργό συνιστώσα θα είναι ίση με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος εξόδου, όταν η τάση στο σημείο σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από 85% όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19 . Όταν γίνει μικρότερη, η μέγιστη τιμή της ενεργού συνιστώσας του ρεύματος περιορίζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18 .



Σχήμα 3.18: Υλοποίηση περιοριστών ρεύματος στο Simulink.



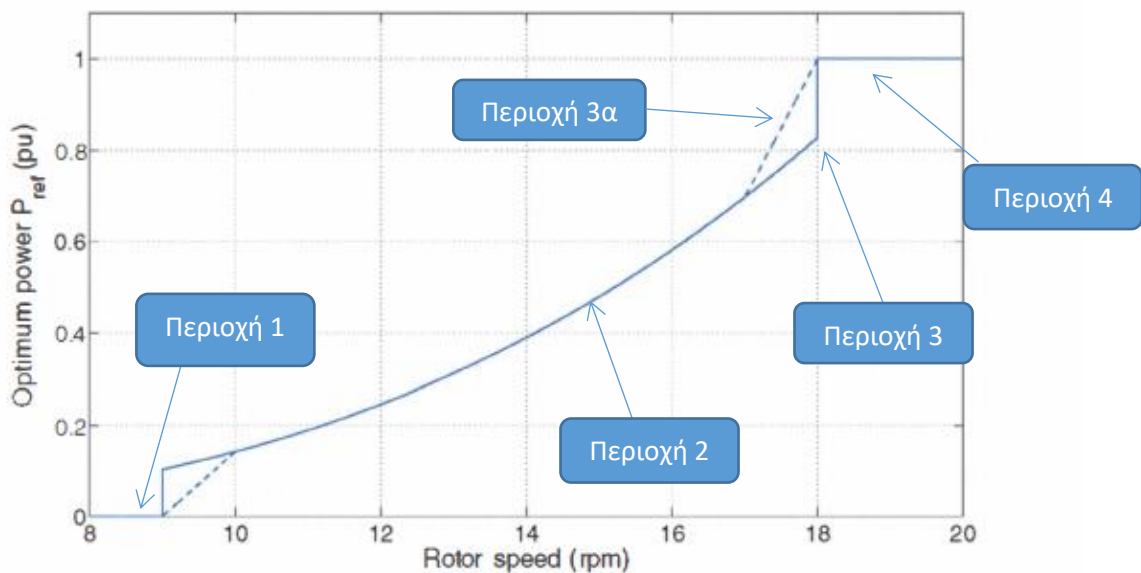
Σχήμα 3.19: Διάγραμμα περιοριστών ρεύματος στο Simulink.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK

4.1 Καθορισμός περιοχών λειτουργίας Α/Γ.

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν στην ενότητα 3.2.4 ο έλεγχος ενεργού ισχύος της Α/Γ, γίνεται έτσι ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς για όλες τις τιμές ταχύτητας ανέμου σύμφωνα με τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος που έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες. Παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιούνται και ο περιορισμός ως προς την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ. Για να επιτευχθεί αυτό, μπορούμε να χωρίσουμε τις ταχύτητες του ανέμου που υφίστανται κάθε στιγμή σε περιοχές, ανάλογα με την λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Για την μελετώμενη ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 4.1, οι κατηγορίες έχουν οριστεί ως εξής [19]:



Σχήμα 4.1: Περιοχές λειτουργίας της Α/Γ, ανάλογα με την ταχύτητα του δρομέα της.

- Περιοχή 1 (Αποκοπή): Για ανέμους μικρότερης ταχύτητας από την ταχύτητα του ανέμου εκκίνησης της Α/Γ, η οποία είναι ίση με 5.6 m/s, δεν είναι δυνατή η λειτουργία της και για αυτό το λόγο παραμένει ανενεργή.
- Περιοχή 2 (Βέλτιστου αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης, στις 9-18ΣΑΛ): Αφορά το εύρος ταχύτητας ανέμου μεγαλύτερης ταχύτητας από την ταχύτητα ανέμου εκκίνησης της Α/Γ. Στην περιοχή αυτή, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και σε βέλτιστο συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης C_p (16). Από την εξίσωση (15) του λόγου λ φαίνεται ότι καθώς αυξάνει η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται παράλληλα και η ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ. Όμως εφόσον η μέγιστη ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ είναι στις 18ΣΑΛ (ή $Wr=1.885\text{rad/s}$), υπολογίζεται ότι, ότι η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου για αυτήν την περιοχή είναι τα 11.2m/s.
- Περιοχή 3 (Μέγιστης ταχύτητας δρομέα με ισχύ χαμηλότερη της ονομαστικής, στις 18ΣΑΛ): Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει το εύρος ταχυτήτων ανέμου μεγαλύτερων από 11.2m/s (στην οποία αντιστοιχεί παραγόμενη ισχύς μεγαλύτερη από 0.83αμ), έως την τιμή ανέμου στην οποία με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, η ανεμογεννήτρια φτάνει την ονομαστική της τιμή της παραγόμενης ισχύος. Η τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο σημείο αυτό είναι 12m/s. Σε αυτή την περιοχή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα παραμένει σταθερή και ίση με τη μέγιστη τιμή της στις 18ΣΑΛ. Άρα από την εξίσωση (15) φαίνεται ότι, εφόσον η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται και η ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ παραμένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της, ο συντελεστής λ θα μειώνεται. Η μείωση αυτή οδηγεί με τη σειρά της και σε μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή C_p , αφού τα δύο μεγέθη εξαρτώνται άμεσα, όπως φαίνεται από την εξίσωση (16).
- Περιοχή 4 (Υψηλών ταχυτήτων ανέμου στην ονομαστική ισχύ, στις 18ΣΑΛ): Η περιοχή αυτή αφορά το εύρος ταχυτήτων ανέμου για τις οποίες η ισχύς παραμένει ίση με την ονομαστική. Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει τιμές της ταχύτητας ανέμου μεγαλύτερες των 12m/s (όριο περιοχής 3), αφού πλέον τίθεται σε λειτουργία και το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος. Μέσω του ελέγχου αυτού ρυθμίζεται ο αεροδυναμικός

συντελεστής έτσι ώστε η μηχανική ισχύς στον δρομέα της Α/Γ να διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή. Όπως έχει παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό επιτυγχάνεται, εφόσον ο έλεγχος γωνίας βήματος έχει ως σήμα εισόδου την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και με την σειρά της, η τιμή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, διαμορφώνει την τιμή αναφοράς για την ηλεκτρική ισχύ (ενεργό) στον μετατροπέα ισχύος. Κάθε ταχύτητα ανέμου, αντιστοιχίζεται σε μία δεδομένη τιμή του λόγου λ . Παράλληλα, προκειμένου η ισχύς να παραμένει σταθερή στο 1αμ, προκύπτει μια τιμή για το συντελεστή C_p σε κάθε ταχύτητα ανέμου, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (16). Από τα δύο αυτά δεδομένα προκύπτει και μια μοναδική τιμή για την γωνία βήματος β , προκειμένου να επιτευχθεί το κατάλληλο C_p και τελικά η ονομαστική ισχύς. Τέλος σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της Α/Γ εφόσον η ταχύτητα αποκοπής είναι τα 25m/s, αυτό θα αποτελεί και το άνω όριο της περιοχής αυτής, όπου για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμων, η Α/Γ θα διακόπτει τη λειτουργία της.

Για τις ανάγκες του μοντέλου, η συνεχής καμπύλη μέγιστης απολαβής ισχύος τροποποιήθηκε στα άνω και κάτω όρια της περιοχής βέλτιστου συντελεστή ισχύος όπως φαίνεται στα διακεκομμένα τμήματα του Σχήματος 4.1 (περιοχή 3α). Αυτό έγινε προκειμένου να αποφευχθεί η μεταβολή του σήματος αναφοράς για την ενεργό ηλεκτρική ισχύ για πολύ μικρές μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (κάθετα τμήματα καμπύλης). Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν στην συνέχεια εξετάζεται η δυναμική απόκριση της Α/Γ θεωρώντας ότι συνδέεται σε άπειρο ζυγό.

4.2 Απόκριση μοντέλου σε βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

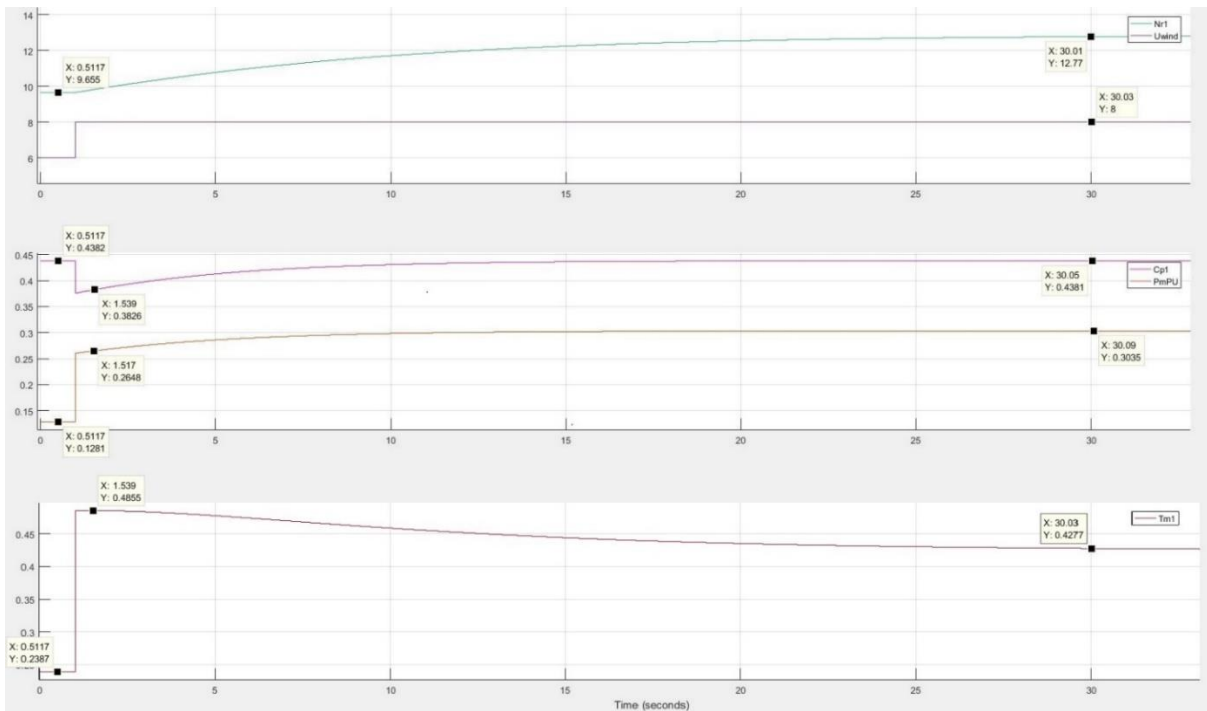
Στη παράγραφο αυτή, εξετάζεται η δυναμική απόκριση του μοντέλου τις Α/Γ σε βηματική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου για διαφορετικές περιοχές λειτουργίας της Α/Γ. Για τον σκοπό αυτό στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η τιμή της ταχύτητας του ανέμου U_w , η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ N_r , η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p και της μηχανικής ισχύος και ροπής, P_m και T_m αντίστοιχα.

4.2.1 Αύξηση ανέμου σε αρχική συνθήκη λειτουργίας στην περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή (Περιοχή 2).

Τη χρονική στιγμή $t=1s$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 , εμφανίζεται βηματική αύξηση στην τιμή της ταχύτητα του ανέμου από 6 σε 8 m/s. Η αύξηση αυτή οδηγεί σε ακαριαία αύξηση της μηχανικής ροπής που αναπτύσσεται από τον άνεμο στα πτερύγια, από το 0.23αμ σε 0.48αμ. Ωστόσο, η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει ακαριαία την μηχανική ροπή, χωρίς την ταυτόχρονη μεταβολή της περιστροφικής ταχύτητας του δρομέα η οποία αυξάνεται σταδιακά. Αυτό γίνεται εμφανές και από τη σχέση (19) που συνδέει τα δύο μεγέθη. Επίσης, εφόσον τροποποιείται η τιμή της ταχύτητας ανέμου, τροποποιείται και η τιμή του λόγου λ και συνεπώς η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος.

Στον χρόνο μετά την διαταραχή, η διαφορά μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ροπής που προκύπτει αρχικά, προκαλεί επιτάχυνση του δρομέα, μεταβολή του λ και συνεπώς του C_p και τελικά μεταβολή της μηχανικής ισχύος της Α/Γ.

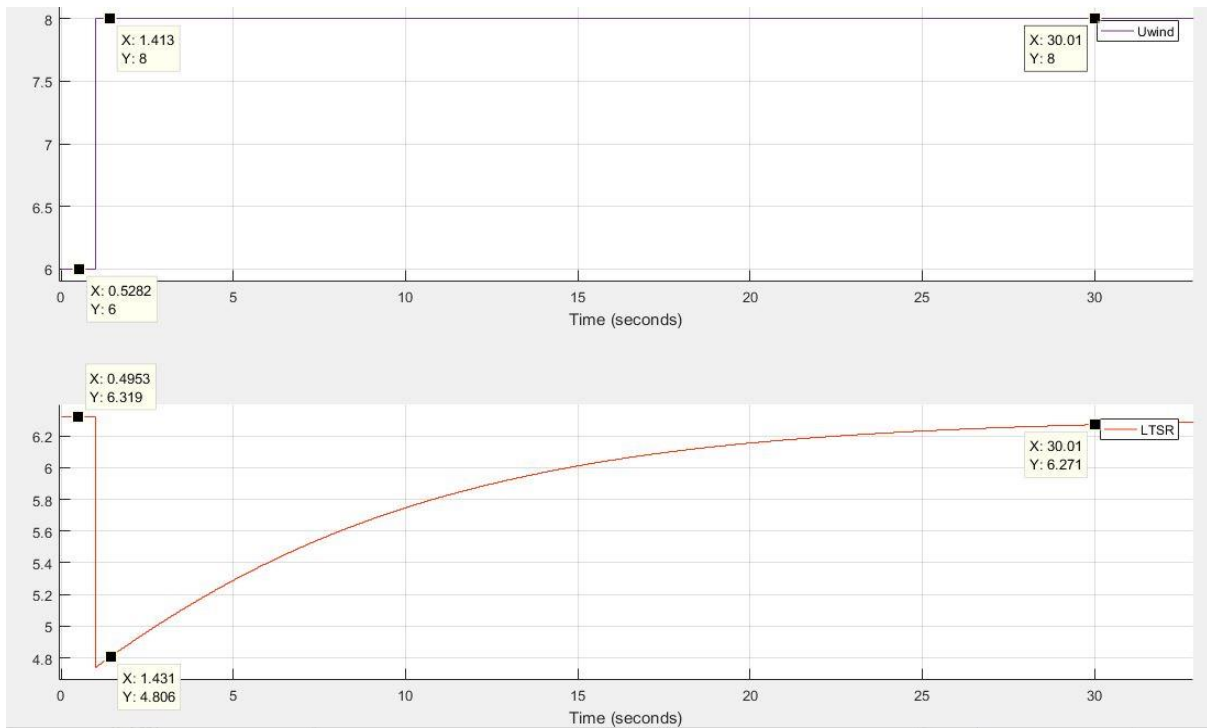
Η επιτάχυνση της Α/Γ προκαλεί αύξηση του της ενεργού ηλεκτρικής ισχύος που εγχύει ο μετατροπέας στο δίκτυο, η οποία καθορίζεται με βάση την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Η διαφορά μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ροπής μειώνεται, με συνέπεια να μειώνεται ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ. Περίπου 29 δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή, η ηλεκτρική και μηχανική ροπή εξισώνονται με αποτέλεσμα να σταθεροποιείται η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ στη νέα τιμή.



Σχήμα 4.2: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο στη περιοχή 2, βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή

Το Σχήμα 4.3 , αναφέρεται στην ίδια χρονική περίοδο με το προηγούμενο και παρουσιάζει την τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ ή $ltsr$. Αρχικά εμφανίζεται μία απότομη μείωση, ταυτόχρονη με τη βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Καθώς η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα δεν μεταβάλλεται ακαριαία, η τιμή του λ θα μειωθεί λόγω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου. Όπως φαίνεται και μέσω της εξίσωσης (15), η αρχική μείωση της τιμής του λ λόγω της αύξησης του παρονομαστή του κλάσματος της σχέσης, μετριάζεται από την αύξηση της ταχύτητας του δρομέα. Δηλαδή, η ταχύτητα του ανέμου θα παραμένει σταθερή, αλλά πλέον η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα θα αυξάνεται και αντίστοιχη θα είναι και η αύξηση του λ.

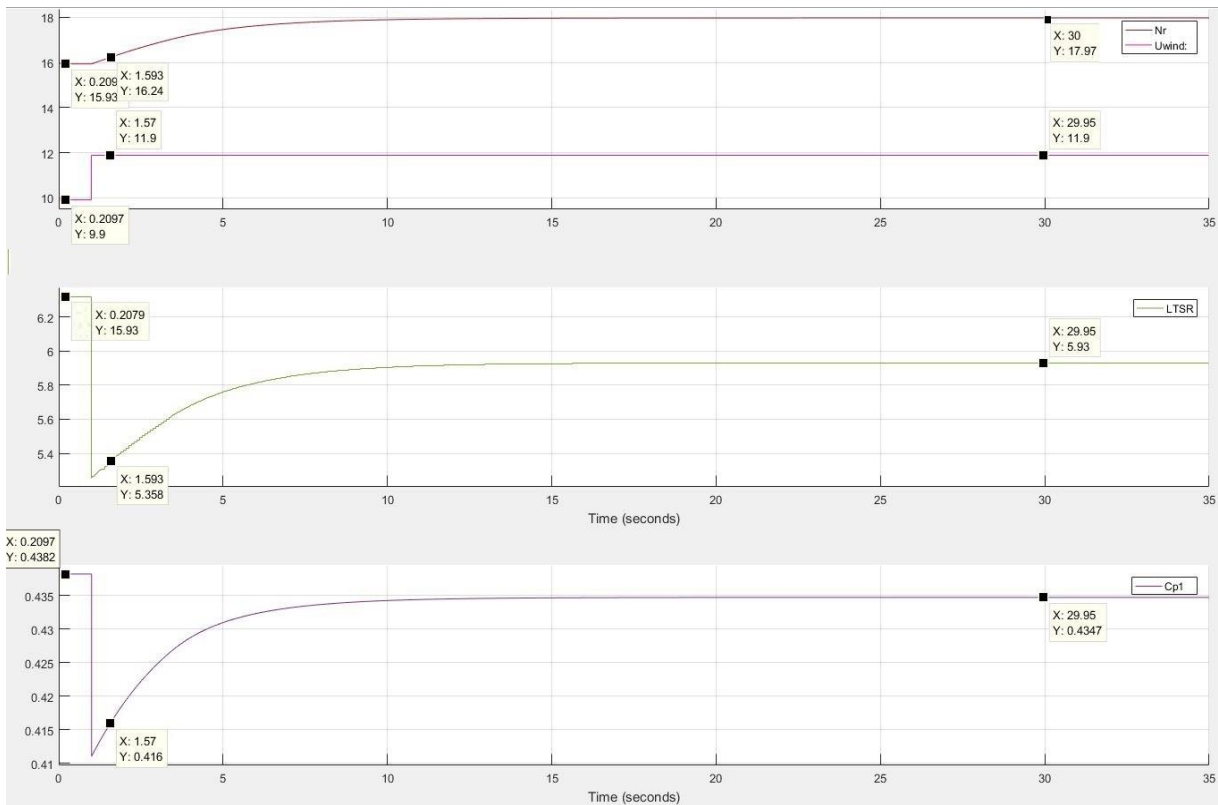
Με βάση την εξίσωση (15) είναι εμφανής η σύνδεση των δύο μεγεθών. Είναι επίσης σημαντικό το γεγονός ότι η τιμή του λόγου λ αποκτά τελικά την αρχική της τιμή, που σημαίνει ότι η Α/Γ θα λειτουργεί εκ νέου με το βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή (περιοχή 2) και η τιμή της παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ ισορροπεί σε νέα αυξημένη τιμή.



Σχήμα 4.3: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο στη περιοχή 2, βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή

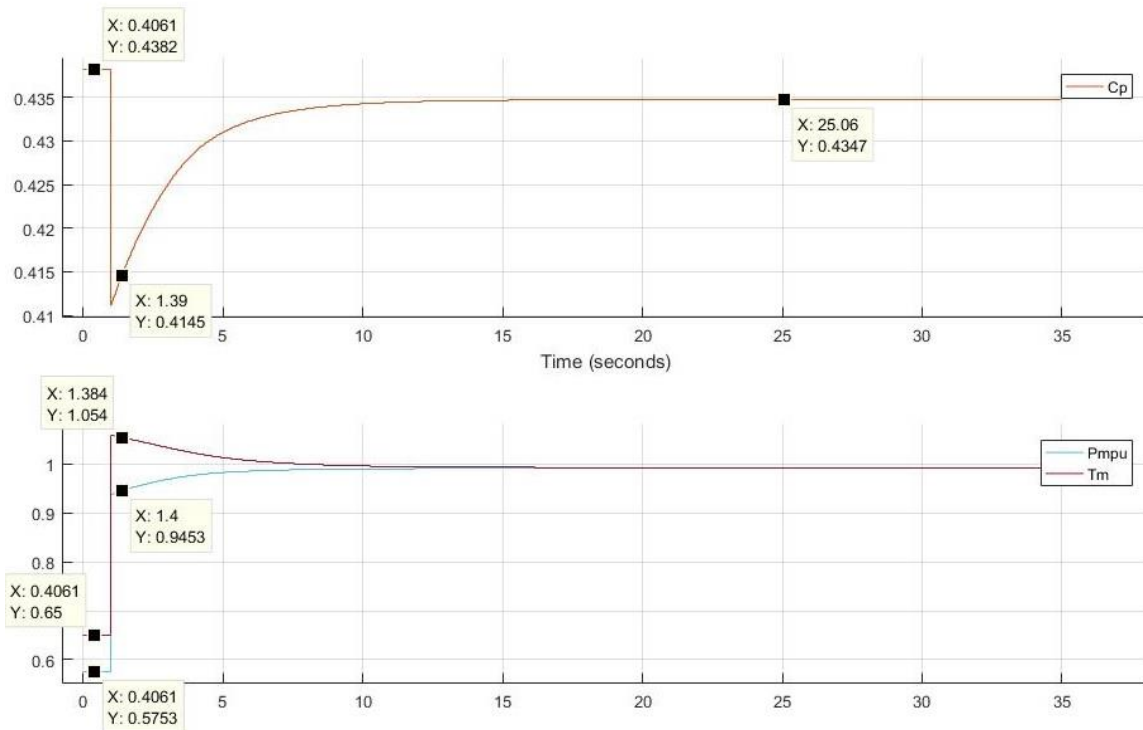
4.2.2 Αύξηση ταχύτητας ανέμου με μετάβαση από την περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή στην περιοχή μέγιστης ταχύτητας λειτουργίας.

Στην περίπτωση αυτή η Α/Γ λειτουργεί αρχικά σε βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή, ωστόσο μετά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου λειτουργεί σε μέγιστη ταχύτητα δρομέα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται βηματικά τη χρονική στιγμή $t=1s$ από τα 10m/s στα 12m/s που αποτελεί το όριο μεταξύ των περιοχών 3 και 4.



Σχήμα 4.4: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο.

Η τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ έχει παρόμοια απόκριση με τη προηγούμενη περίπτωση στη περιοχή 2 (βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής). Αρχικά εφόσον η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται στη περιοχή 2, ο λόγος λ έχει στη βέλτιστη τιμή του (6.32) και μειώνεται εξίσου απότομα με την άνοδο της ταχύτητας του ανέμου, εφόσον οι μεταβλητές αυτές συνδέονται με αλγεβρική σχέση. Στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά καθώς ο δρομέας της Α/Γ επιταχύνεται και σταθεροποιείται σε μια τιμή μικρότερη της βέλτιστης, εφόσον η ταχύτητα περιστροφής δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 18ΣΑΛ. Παρόμοια δυναμική εμφανίζει και ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, επειδή καθορίζεται άμεσα από το λόγο λ σύμφωνα με την εξίσωση (16). Τέλος η γωνία βήματος β της Α/Γ είναι ίση με το μηδέν και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας, εφόσον η παραγόμενη ισχύς δεν έχει ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή και για αυτό δεν έχει ενεργοποιηθεί ο έλεγχος γωνίας βήματος.



Σχήμα 4.5: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο.

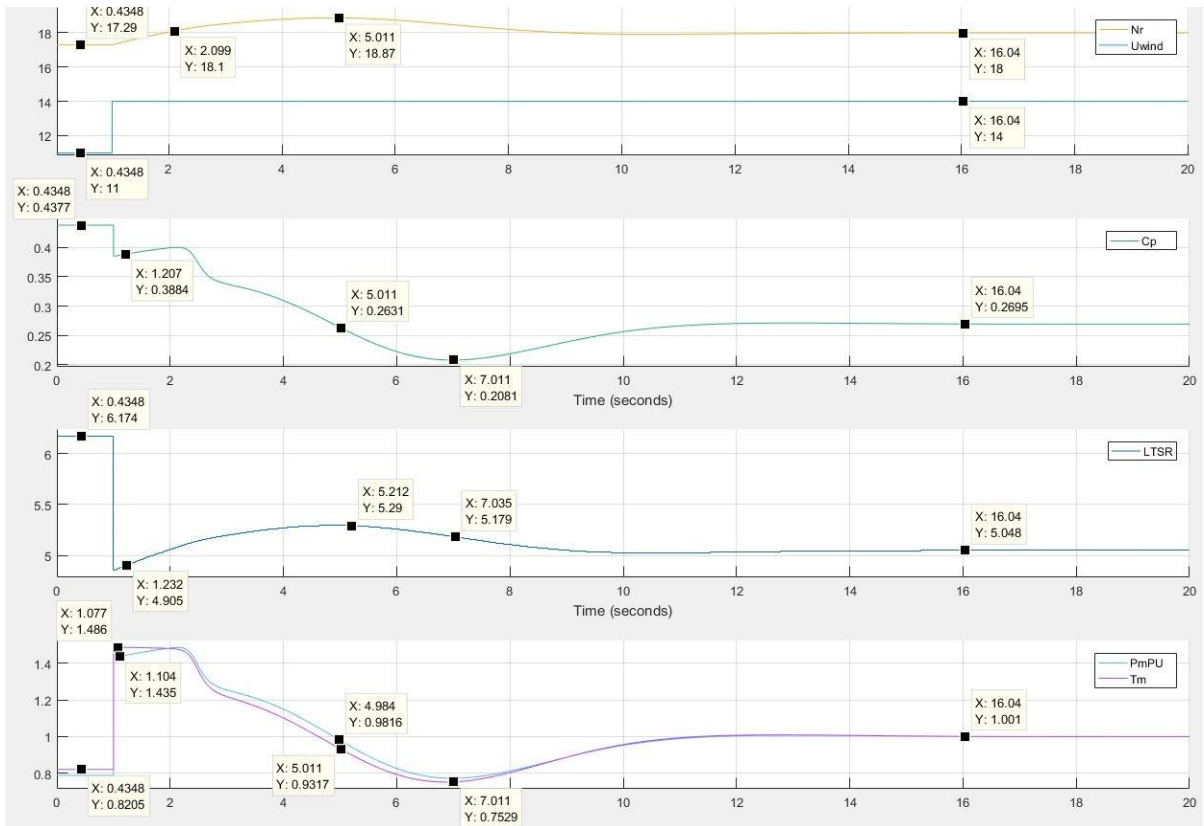
4.2.3 Αύξηση ανέμου σε λειτουργία της Α/Γ σε μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας.

Στη διαταραχή αυτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 εφαρμόζεται βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τη χρονική στιγμή $t=1s$ από τα $11m/s$ στα $14m/s$. Ο δρομέας αρχικά περιστρέφεται με ταχύτητα μικρότερη της μέγιστης ($17.3\Sigma\Lambda\Lambda$) και μετά την διαταραχή επιταχύνεται λόγω της διαφοράς ηλεκτρικής και μηχανικής ροπής. Φτάνει μέγιστη τιμή $18.9\Sigma\Lambda\Lambda$, 3.5 δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή. Τη χρονική στιγμή $t=2s$, η περιστροφική ταχύτητα του δρομέα αρχίζει και γίνεται μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπτή του τιμή ($18\Sigma\Lambda\Lambda$) και τίθεται σε λειτουργία ο μηχανισμός ελέγχου της γωνίας βήματος με σκοπό να διατηρηθεί η ταχύτητα και η ισχύς στα επιτρεπτά επίπεδα. Η μεταβολή της γωνίας βήματος τροποποιεί τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p . Αρχικά η τιμή του συντελεστή μειώνεται, καθώς αυξάνεται η τιμή του β , έως την χρονική στιγμή $t=7s$ όπου αρχίζει να μειώνεται η γωνία β και να αυξάνεται

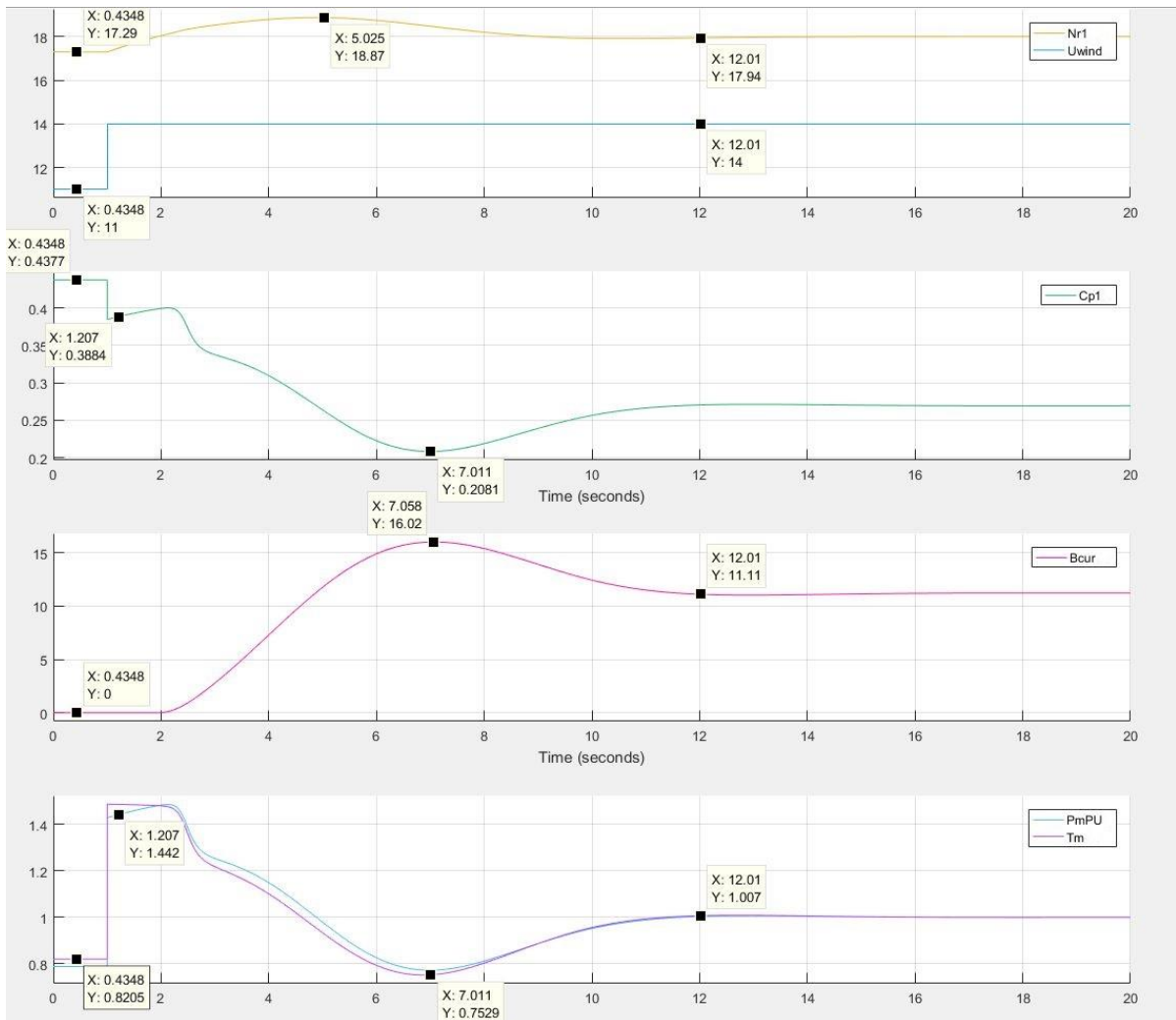
ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης. Η μείωση γίνεται μέχρι και τη χρονική στιγμή $t=7s$, όπου αρχίζει δημιουργώντας μια αποσβενούμενη ταλάντωση. Τελικά η τιμή του συντελεστή σταθεροποιείται σε τιμή χαμηλότερη της βέλτιστης προκειμένου να διατηρηθεί η τιμή της ισχύος στα ονομαστικά επίπεδα.

Από τα παρακάτω διαγράμματα γίνεται εμφανής χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η λειτουργία του ελέγχου γωνίας βήματος προκειμένου να διατηρήσει την ταχύτητα του δρομέα στα επιτρεπτά επίπεδα. Η γωνία βήματος ισορροπεί 11 δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή, σε μια τιμή τέτοια ώστε να προκύπτει η ονομαστική τιμή για την μηχανική ισχύ της Α/Γ. Την χρονική στιγμή αυτή σταθεροποιείται η ταχύτητα του δρομέα και συνεπώς, ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και ο αεροδυναμικός συντελεστής.

Αντίστοιχη απόκριση έχει και η τιμή του λόγου λ , η οποία ξεκινάει από μία τιμή κοντά στην βέλτιστη (περιοχή 3α) πριν τη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και μειώνεται ακαριαία στη τιμή 4.9. Στη συνέχεια, κατά την επιτάχυνση του δρομέα, ο λόγος λ αυξάνεται και ισορροπεί σε μια νέα τιμή (5.3). Αυτή η τιμή σε αντίθεση με την διαταραχή που εξετάστηκε στην παράγραφο 4.2.1 δεν αποτελεί τη βέλτιστη. Όσον αφορά την τιμή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος, η μεταβολή του εμφανίζεται στο Σχήμα 4.7. Η αρχική μείωση στην τιμή του προκαλείται από την ακαριαία μεταβολή της παραμέτρου λ . Στην συνέχεια η επιτάχυνση του άξονα προκαλεί την μικρή αύξηση της τιμής έως περίπου 1.2 δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή. Από αυτή την χρονική στιγμή και έπειτα, η ενεργοποίηση του ελέγχου γωνίας βήματος επηρεάζει σημαντικά την τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή.



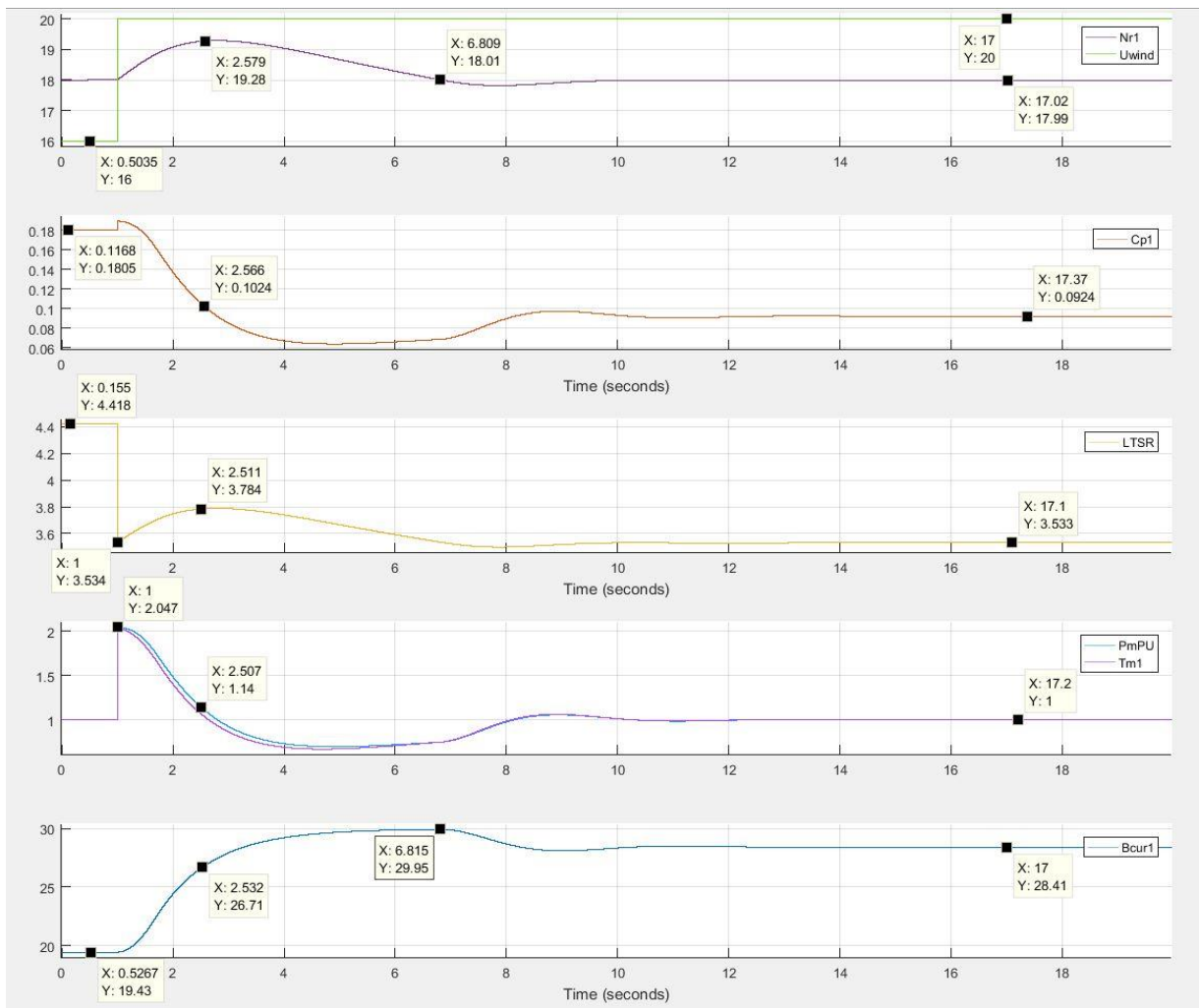
Σχήμα 4.6: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο για την περιοχή 4.



Σχήμα 4.7: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο για την περιοχή 4.

4.2.4 Αύξηση ανέμου σε συνθήκες λειτουργίας της Α/Γ σε πλήρη ισχύ.

Στο σενάριο αυτό η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται βηματικά τη χρονική στιγμή $t=1s$ από τα 16m/s στα 20m/s και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8. Ο δρομέας της Α/Γ ο οποίος περιστρέφεται ήδη τη χρονική στιγμή 1 στην ονομαστική του ταχύτητα στις 18 ΣΑΛ, επιταχύνεται σταδιακά μέχρι και τις 19.3 ΣΑΛ, περίπου 1.5 δευτερόλεπτο αργότερα και τέλος σταθεροποιείται στην αρχική τιμή, η οποία είναι και η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 4.8: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο για τη περιοχή 4.

Την χρονική στιγμή $t=1s$, η τιμή της ισχύος αυξάνεται βηματικά από το 1αμ στα 2 αμ, ενώ στη συνέχεια ταλαντώνεται και επιστρέφει στο 1αμ σε περίπου 8 δευτερόλεπτα. Η σταθεροποίηση της ισχύος στο 1αμ επιτυγχάνεται ακολουθώντας τη στρατηγική της μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT), η οποία έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3. Με την απότομη αύξηση ισχύος σε τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής, ο δρομέας επιταχύνεται και αρχίζει σταδιακά να αυξάνεται η τιμή της γωνίας βήματος από τις 19.4 μοίρες στις 30 μοίρες. Η αύξηση της

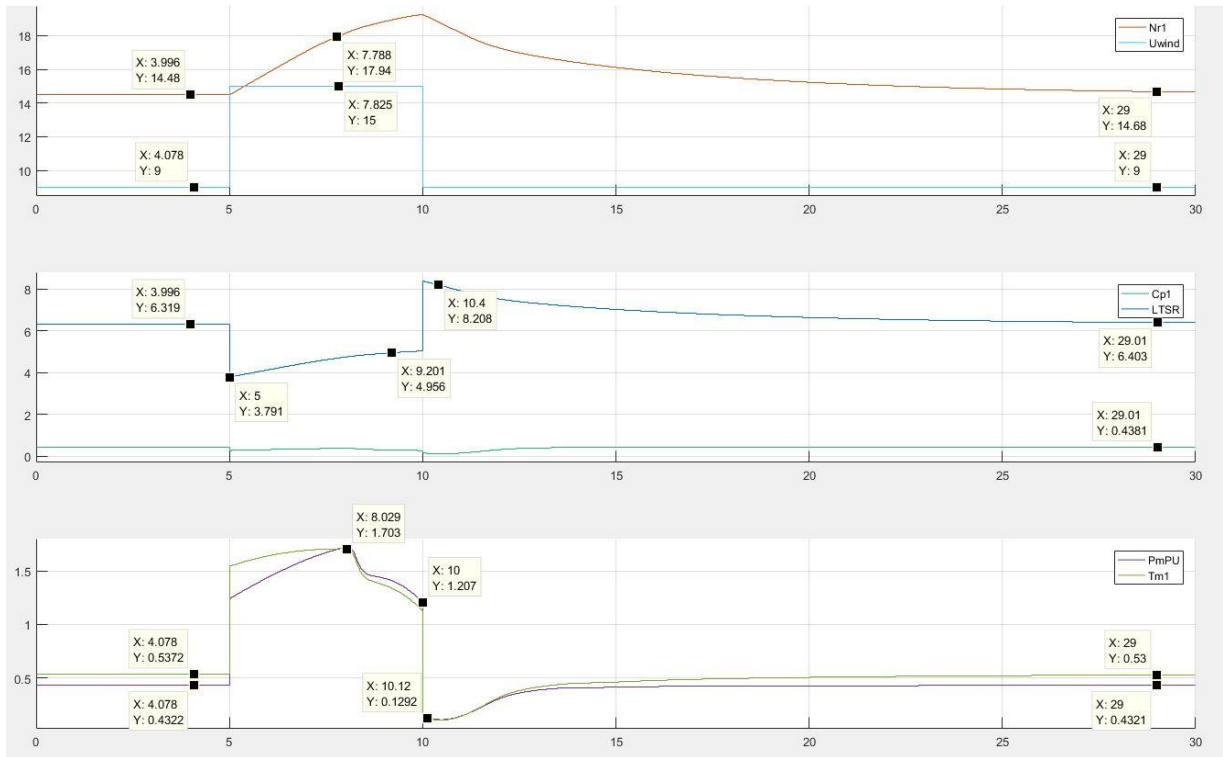
γωνίας βήματος διαρκεί περίπου 6 δευτερόλεπτα, και τελικά ισορροπεί στις 28.4 μοίρες. Όσον αφορά στο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ , αυτός μειώνεται βηματικά τη χρονική στιγμή $t=1s$ από τη τιμή 4.4 σε 3.5 και στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά μέχρι και 3.78. Η αρχική μείωση συμβαίνει διότι και σύμφωνα με την εξίσωση (15), η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου είναι ακαριαία σε αντίθεση με την επιτάχυνση του δρομέα η οποία γίνεται σταδιακά. Συνεπώς αμέσως μετά την διαταραχή η ταχύτητα του ανέμου είναι αυξημένη, ενώ η ταχύτητα του δρομέα σταθερή. Έπειτα, εφόσον η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή στην νέα τιμή, ο λόγος λ αυξάνει αναλογικά με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα (Nr). Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p , πριν τη χρονική στιγμή $t=1s$ παραμένει σταθερός με τιμή 0.18 και την χρονική στιγμή της διαταραχής αυξάνεται βηματικά λόγω της απότομης πτώσης του λόγου λ . Στη συνέχεια μειώνεται καθώς αυξάνεται το λ , σύμφωνα και με την εξίσωση (15) και λόγω της μεταβολής της γωνίας βήματος, ώσπου τελικά ισορροπεί στο 0.092, αρκετά κάτω από τη βέλτιστη τιμή των 0.43.

4.3 Απόκριση μοντέλου σε αυξομείωση της ταχύτητας του ανέμου

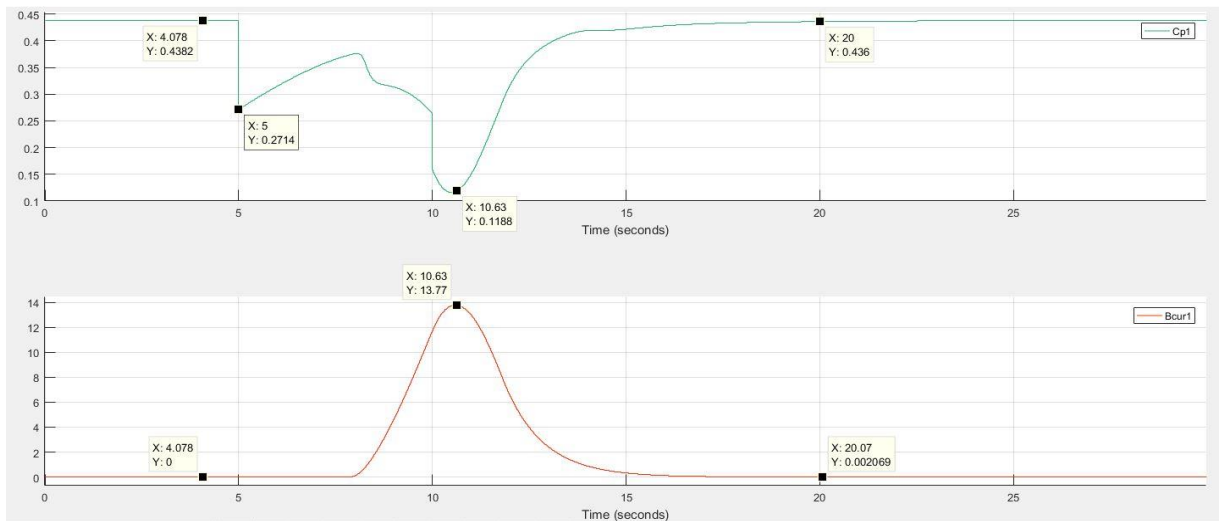
Όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 4.9 και Σχήμα 4.10, κατά τη διαταραχή αυτή, εφαρμόζεται μία παλμική μεταβολή στη ταχύτητα του ανέμου. Δηλαδή αρχικά η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με 9m/s, τη χρονική στιγμή $t=5s$ αυξάνεται στα 15m/s μέχρι και τη χρονική στιγμή $t=10s$, όπου ξαναεπιστρέφει στην αρχική τιμή. Ο δρομέας αρχικά περιστρέφεται με ταχύτητα (14.5 ΣΑΛ), ταχύτητα μικρότερη της μέγιστης (18 ΣΑΛ) και μετά την διαταραχή αρχίζει να επιταχύνεται. Φτάνει μέγιστη τιμή των 18 ΣΑΛ, περίπου 3 δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή, ωστόσο συνεχίζει να επιταχύνεται εφόσον η μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη της ηλεκτρικής. Ωστόσο, τη χρονική στιγμή $t=8s$, εφόσον η ταχύτητα του δρομέα έχει ξεπεράσει την ονομαστική τιμή, ενεργοποιείται ο έλεγχος γωνίας βήματος, αυξάνοντας την τιμή του β , μειώνοντας την τιμή του C_p , και τη μηχανική ροπή στον άξονα της Α/Γ. Πριν όμως την μετάβαση της Α/Γ στο νέο σημείο ισορροπίας, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται στην αρχική της τιμή τη χρονική στιγμή $t=10s$. Η μεταβολή αυτή μειώνει την μηχανική ροπή στον άξονα

της Α/Γ και οδηγεί στην σταδιακή επιβράδυνσή του. Αντίστοιχη απόκριση έχει και η τιμή του λόγου λ, η οποία ξεκινάει από μία τιμή ίση με την βέλτιστη, πριν τη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και στη συνέχεια μειώνεται ακαριαία στη τιμή 3.8 τη χρονική στιγμή $t=5s$. Από εκεί, μέχρι και τη χρονική στιγμή $t=10s$, αυξάνεται ομαλά και λόγω της εξίσου ομαλής αύξησης στις στροφές του δρομέα. Στη συνέχεια με την απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου αμέσως μετά τη χρονική στιγμή $t=10s$, ο λόγος λ αυξάνεται ακαριαία, φτάνοντας μία τιμή ίση με 8, όπου από εκεί και πέρα ακολουθεί μία σταθερή μείωση, παράλληλη με τη μείωση των στροφών του δρομέα.

Για το συντελεστή της αεροδυναμικής ισχύος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 , η απότομη αύξηση στη ταχύτητα του ανέμου τη χρονική στιγμή $t=5s$, προκαλεί μία αντίστοιχα απότομη μείωση στη τιμή του, περίπου στο μισό της βέλτιστης τιμής του (0,27). Στη συνέχεια μέχρι και τη χρονική στιγμή ενεργοποίησης του ελέγχου γωνίας βήματος, η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή αυξάνει καθώς αυξάνει και η ταχύτητα του δρομέα. Η ενεργοποίηση του ελέγχου γωνίας βήματος προκαλεί την μείωση της τιμής του συντελεστή προκειμένου να μειωθεί η μηχανική ισχύς στον άξονα της Α/Γ. Την χρονική στιγμή $t=10s$ η ταχύτητα του ανέμου επαναφέρεται στην αρχική τιμή με συνέπεια την μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος. Η ταχύτητα του δρομέα αρχίζει και μειώνεται ενώ παράλληλα η γωνία βήματος επανέρχεται στην αρχική τιμή (μηδενική), με αποτέλεσμα ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος να επανακτή την αρχική του τιμή. Αντίστοιχη δυναμική συμπεριφορά εμφανίζει και η καμπύλη της μηχανικής ισχύος για το χρονικό διάστημα $t=5s$ έως $t=10s$ όπως φαίνεται και στο σχήμα δεδομένου ότι εξαρτάται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και την ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 4.9: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο κατά την αυξομείωση της ταχύτητας του ανέμου.

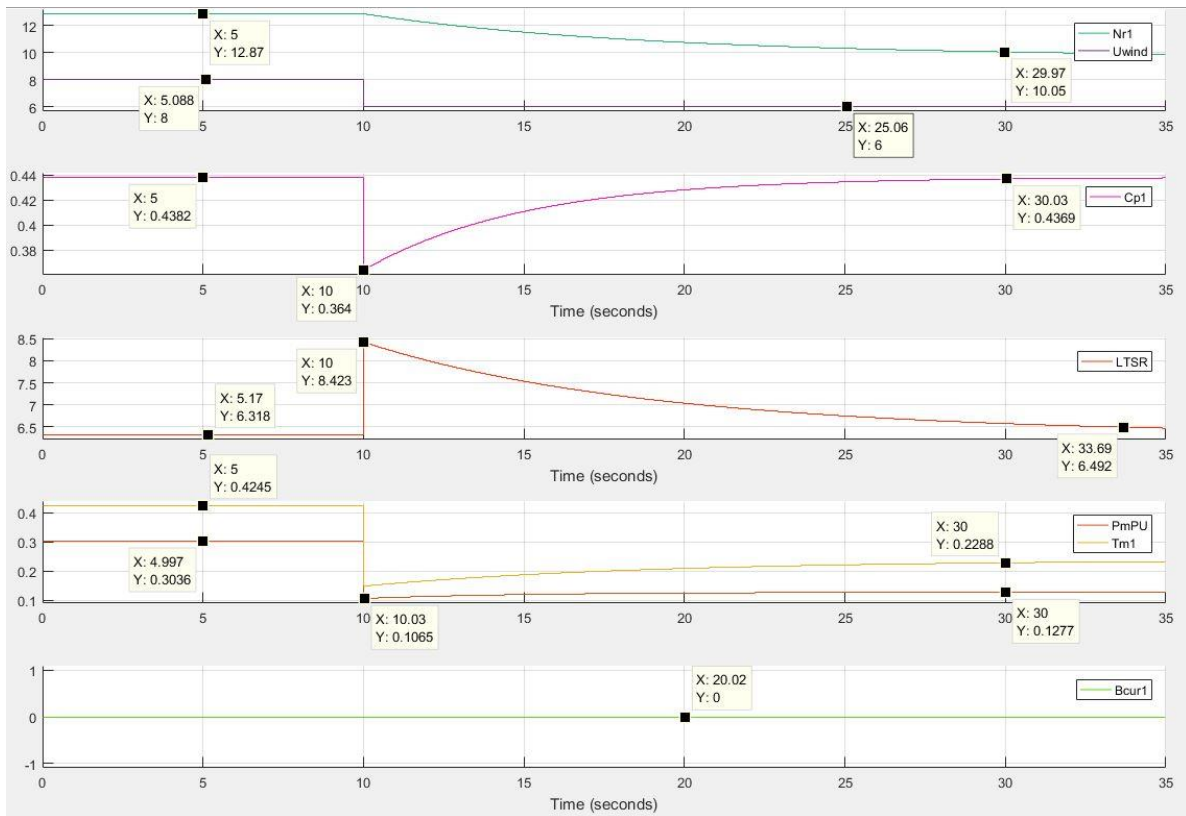


Σχήμα 4.10: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο κατά την αυξομείωση της ταχύτητας του ανέμου.

4.4 Απόκριση μοντέλου σε βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου

4.4.1 Περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή.

Όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 4.11 κατά τη διαταραχή αυτή, εφαρμόζεται μία βηματική μείωση στη ταχύτητα του ανέμου. Δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου ξεκινάει από τα 8m/s, και τη χρονική στιγμή $t=10s$ μειώνεται στα 6m/s. Ο δρομέας αρχικά περιστρέφεται με ταχύτητα (12.8ΣΑΛ) και μετά την διαταραχή, ξεκινάει να επιβραδύνεται μέχρι και τη χρονική στιγμή $t=30s$, όπου φτάνει και ισορροπεί στη τιμή των 10ΣΑΛ. Παράλληλα με τη διαταραχή, τη χρονική στιγμή $t=10s$, μειώνεται βηματικά και ο αεροδυναμικός συντελεστής από τη βέλτιστη τιμή στην οποία λειτουργούσε (0.43) στη τιμή 0.36 σύμφωνα και με τη σχέση (16). Στην συνέχεια, για περίπου 20s αυξάνεται σταδιακά και φτάνει πάλι έως τη βέλτιστη τιμή του. Αντίστοιχη δυναμική συμπεριφορά με τον αεροδυναμικό συντελεστή έχουν και οι καμπύλες ισχύος και ροπής. Πιο συγκεκριμένα η μηχανική ισχύς έχει ως αρχική τιμή 0.3αμ, και μετά τη διαταραχή μειώνεται βηματικά στα 0.1αμ. Στην συνέχεια αυξάνεται και ισορροπεί στην τιμή 0.12αμ. Τέλος, όσον αφορά τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου ($Ltsr$), αυτός ξεκινάει με μία τιμή στα 6.3. Τη χρονική στιγμή της διαταραχής $t=10s$, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται βηματικά οπότε και σύμφωνα και με τη σχέση (15) ο λόγος λ αυξάνεται αντίστοιχα από τη βέλτιστη τιμή του, σε μία νέα (8.42). Από εκείνη τη στιγμή και μετά, αντίστοιχα με τη μείωση της ταχύτητας του δρομέα μειώνεται και η τιμή του λόγου λ ανακτώντας την αρχική της τιμή.

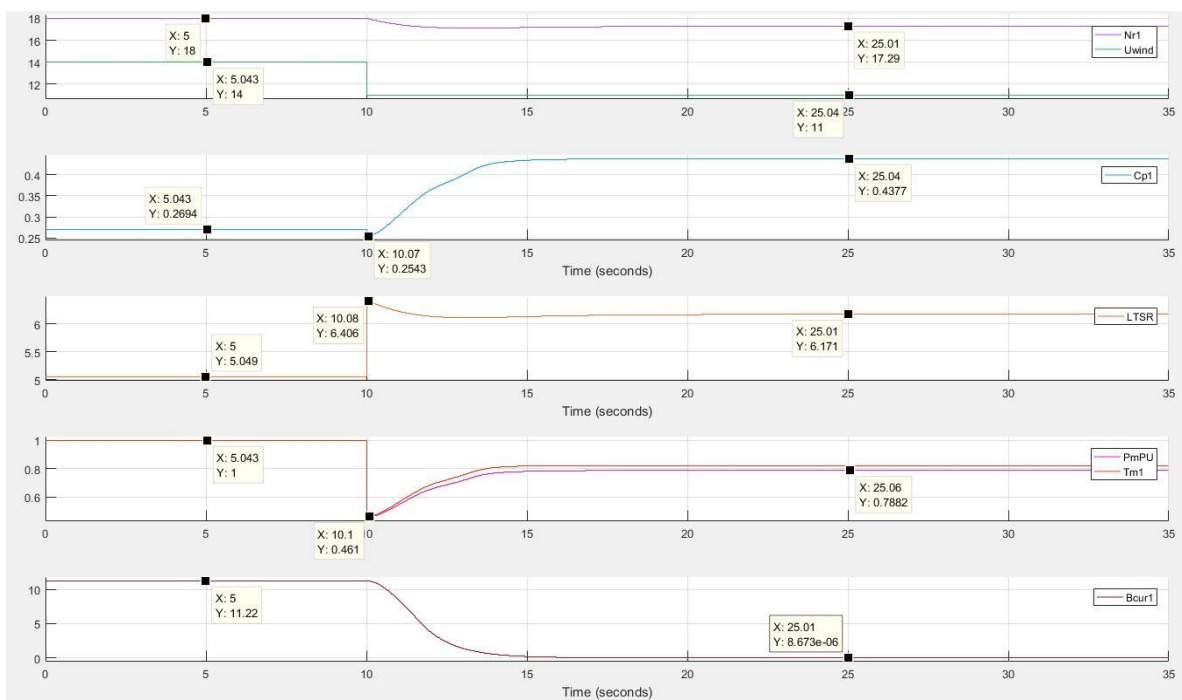


Σχήμα 4.11: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο κατά την μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

4.4.2 Βηματική μείωση ανέμου από την περιοχή ονομαστικής ισχύος

Στο σενάριο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 εφαρμόζεται βηματική μείωση στη ταχύτητα του ανέμου. Δηλαδή τη χρονική στιγμή $t=10s$ η ταχύτητα του ανέμου ξεκινάει από τα $14m/s$, και τη χρονική στιγμή $t=10s$ μειώνεται στα $11m/s$. Ο δρομέας αρχικά περιστρέφεται με ταχύτητα (18ΣΑΛ) και μετά την διαταραχή, ξεκινάει να επιβραδύνεται μέχρι και τη χρονική στιγμή $t=30s$, όπου ισορροπεί στη τιμή των $17.3ΣΑΛ$. Δηλαδή ξεκινάει από τη περιοχή λειτουργίας 4 και καταλήγει στη περιοχή λειτουργίας 3α (διακεκομμένη γραμμή). Όσον αφορά τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου (Ltsr), αυτός ξεκινάει με μία τιμή κοντά στο 5. Τη χρονική στιγμή της διαταραχής $t=10s$, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται βηματικά με συνέπεια η τιμή του λόγου λ να αυξάνεται από τη τιμή 5 σε 6.4 σύμφωνα και με τη σχέση (15). Από εκείνη τη στιγμή και μετά, αντίστοιχα με τη μείωση της ταχύτητας του δρομέα μειώνεται

και η τιμή του λόγου λ . Τη χρονική στιγμή $t=30s$ η τιμή του ισορροπεί σε μία τιμή κοντά στο 6.1. Κατά τη διαταραχή, τη χρονική στιγμή $t=10s$, μειώνεται βηματικά ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p εφόσον αλλάζει η ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς ο λόγος λ . Η μείωση της ταχύτητας σε τιμές χαμηλότερες της ονομαστικής τιμής οδηγεί σε μεταβολή της γωνίας βήματος μέσω του αντίστοιχου ελεγκτή. Συνεπώς η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε σταδιακή μείωση της γωνίας βήματος πτερυγίων το οποίο σύμφωνα με τις σχέσεις (16), (17) επηρεάζει τον συντελεστή C_p , οδηγώντας τον σε μία αντίστοιχα σταδιακή αύξηση, αντί μείωση όπως στη προηγούμενη ενότητα με αποτέλεσμα την βελτίωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος μέχρι την τιμή του 0.43 περίπου. Ισχύει από τη σχέση (18) ότι η ταχύτητα του ανέμου επιδρά σημαντικά στην μηχανική ισχύ και την ροπή που ασκείται στον άξονα. Τα μεγέθη αυτά μειώνονται βηματικά με τη μείωση του ανέμου τη χρονική στιγμή $t=10s$. Από εκείνη τη στιγμή και έπειτα, καθώς η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή ακολουθούν αντίστοιχη αύξηση με αυτή του αεροδυναμικού συντελεστή απόδοσης.



Σχήμα 4.12: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο κατά την μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

4.4.3 Βηματική μείωση ανέμου στην περιοχή λειτουργίας ονομαστικής ισχύος.

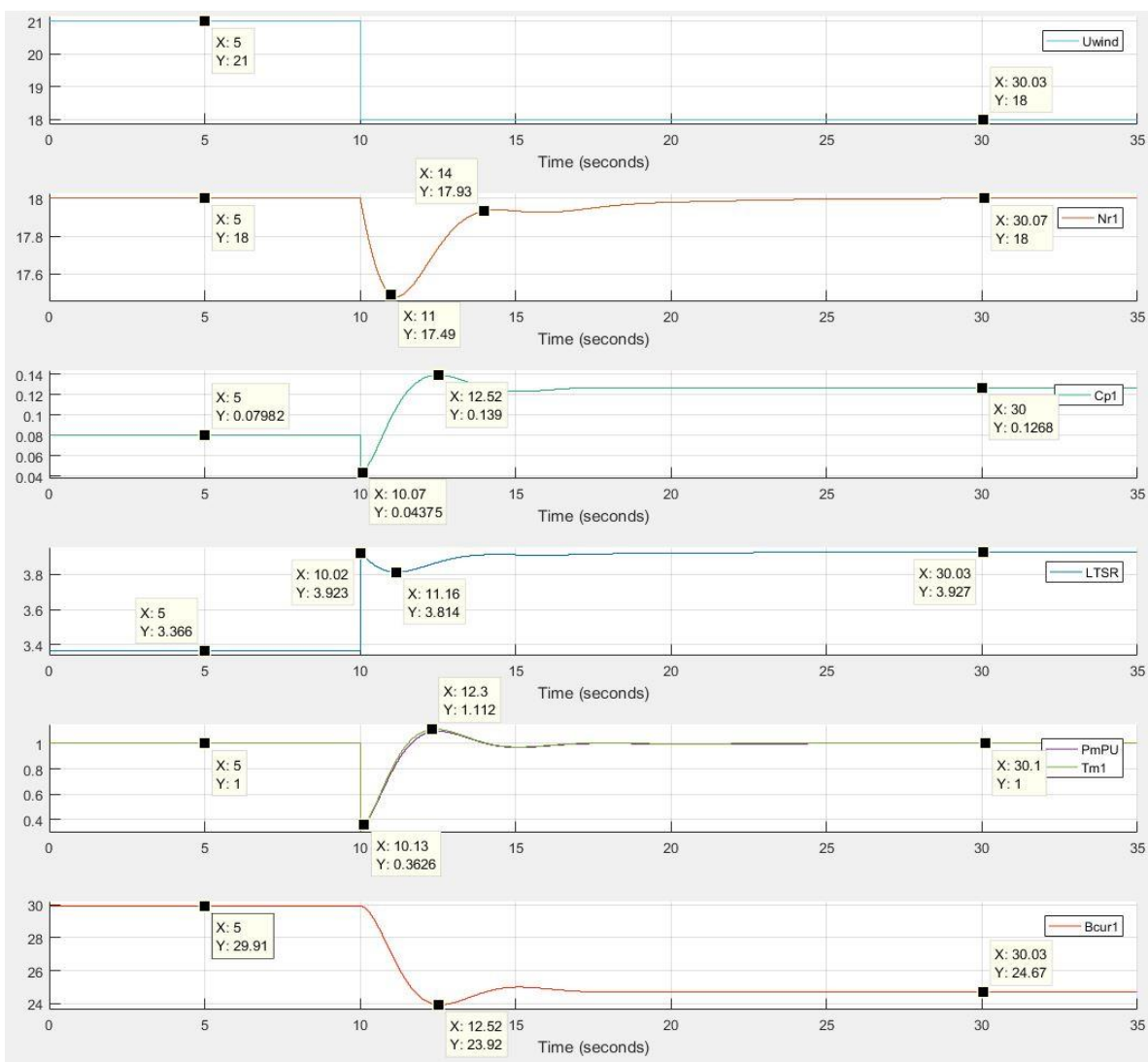
Όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 4.13 κατά τη διαταραχή αυτή, εφαρμόζεται μία βηματική μείωση στη ταχύτητα του ανέμου. Η αρχική τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι 21m/s και η τελική 18m/s. Η μείωση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της Α/Γ και συνεπώς στην επιβράδυνσή του. Η επιβράδυνση επιδρά στον έλεγχο γωνίας βήματος, προκαλώντας μείωση της γωνίας β και βελτίωση του αεροδυναμικού συντελεστή απόδοσης. Επίσης, η επιβράδυνση του άξονα της Α/Γ επιδρά μειώνοντας την ηλεκτρική ισχύ που εγχύει ο μετατροπέας ισχύος, περιορίζοντας την επιβράδυνση του. Η μείωση είναι τέτοια που μετά τα 11s ο άξονας επιταχύνεται έως την μέγιστη ταχύτητα. Στην νέα συνθήκη η τιμή της γωνίας βήματος είναι τέτοια ώστε στην μέγιστη ταχύτητα του άξονα, η μηχανική ισχύς να είναι ίση με την ονομαστική και η Α/Γ να σταθεροποιείται στο νέο σημείο λειτουργίας.

Πιο συγκεκριμένα, ο δρομέας αρχικά περιστρέφεται με ταχύτητα (18ΣΑΛ) και μετά την διαταραχή, ξεκινάει να επιβραδύνεται μέχρι και τη χρονική στιγμή $t=11s$, στη τιμή των 17.5ΣΑΛ. Στην συνέχεια επιταχύνεται ξανά και τελικά ισορροπεί στην αρχική του τιμή (18ΣΑΛ). Όσον αφορά τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου ($Ltsr$), αυτός ξεκινάει με μία τιμή κοντά στο 3.3. Τη χρονική στιγμή της διαταραχής $t=10s$, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται βηματικά όπου σύμφωνα και με τη σχέση (15) ο λόγος λ αυξάνεται από τη τιμή 3.3 σε 3.9. Από εκείνη τη στιγμή και μετά καθώς η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή, η τιμή του λόγου λ ακολουθεί την μεταβολή της τιμής του δρομέα Nr . Τη χρονική στιγμή $t=30s$ η τιμή του ισορροπεί σε μία τιμή κοντά στο 3.9.

Την χρονική στιγμή $t=10s$, μειώνεται βηματικά και η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p λόγω της αύξησης του λ . Από την αρχική τιμή στην οποία είχε ισορροπήσει (0.08) μειώνεται στο 0.04. Μετά τη χρονική στιγμή της διαταραχής $t=10s$, η κλίση των ακροπερυγίων β μειώνεται σταδιακά. Σύμφωνα με τις σχέσεις (16), (17) το γεγονός αυτό επηρεάζει επίσης την τιμή του συντελεστή C_p , οδηγώντας τον σε μία αντίστοιχα σταδιακή αύξηση. Τη χρονική

στιγμή $t=30s$, ισορροπεί σε τιμή υψηλότερη από την αρχική στα (0.12) έτσι ώστε η μηχανική ισχύς να επανέλθει στην ονομαστική τιμή.

Ισχύει από τη σχέση (18) ότι η ταχύτητα του ανέμου επιδρά σημαντικά στην μηχανική ισχύ και την ροπή που ασκείται στον άξονα. Συνεπώς, η μείωση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί βηματική μείωση της τιμής της μηχανικής ισχύος και ροπής τη χρονική στιγμή $t=10s$. Από εκείνη τη στιγμή και έπειτα, καθώς η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή, ακολουθούν αντίστοιχη δυναμική με αυτή του αεροδυναμικού συντελεστή.



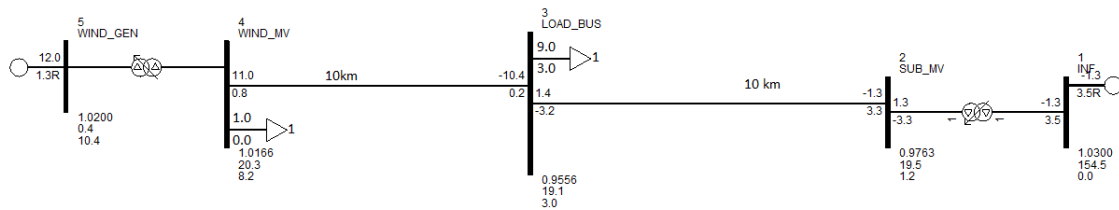
Σχήμα 4.13: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο κατά την μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ Α/Γ ΣΥΝΔΕΟΜΕΝΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

5.1 Περιγραφή αιολικού πάρκου και γραμμής διανομής.

Προκειμένου να εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση του δικτύου, με βάση το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 διαμορφώθηκε ένα αιολικό πάρκο το οποίο θεωρήθηκε ότι συνδέεται στην μέση τάση σε δίκτυο διανομής. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ένα αιολικό πάρκο (Α/Π) έξι ανεμογεννητριών, με ονομαστική ισχύ 2MW έκαστη, συνολικής ονομαστικής ισχύος 12MW. Το Α/Π συνδέεται μέσω μιας γραμμής μέσης τάσης (ΜΤ) μήκους 20km, ισχύος 20kV, αποτελούμενη από αγωγούς αλουμινίου (ACSR) διατομής 95mm². Όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 5.1 ο ζυγός 5 θεωρείται ζυγός παραγωγής και ο ζυγός 1 άπειρος ζυγός. Οι υπόλοιποι ζυγοί θεωρούνται ως ζυγοί φορτίου. Στο μέσο της (ζυγός 3), συνδέεται φορτίο με ενεργό και άεργο ισχύ 9MW και 3 Mvar αντίστοιχα, ενώ στην έξοδο του πάρκου (ζυγός 4), συνδέεται φορτίο ισχύος 1 MW. Η πλευρά υψηλής τάσης του υποσταθμού υψηλής τάσης/μέσης τάσης θεωρείται άπειρος ζυγός σταθερής τάσης 1.03 ανά μονάδα ή 154.5kV. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε έτοιμο μοντέλο Δικτύου το οποίο είχε αναπτυχθεί σε Matlab/Simulink στο εργαστήριο ΣΗΕ της σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ για ερευνητικούς σκοπούς. Το μοντέλο αυτό προσαρμόστηκε κατάλληλα ώστε να περιγράφει το συγκεκριμένο δίκτυο του αιολικού πάρκου και να είναι συμβατό με το μοντέλο της Α/Γ όπως αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας [17],[18].



Σχήμα 5.1: Μονογραμμικό σχέδιο του Α/Π, με τα φορτία των ζυγών και τις γραμμές διανομής του[17],[18].

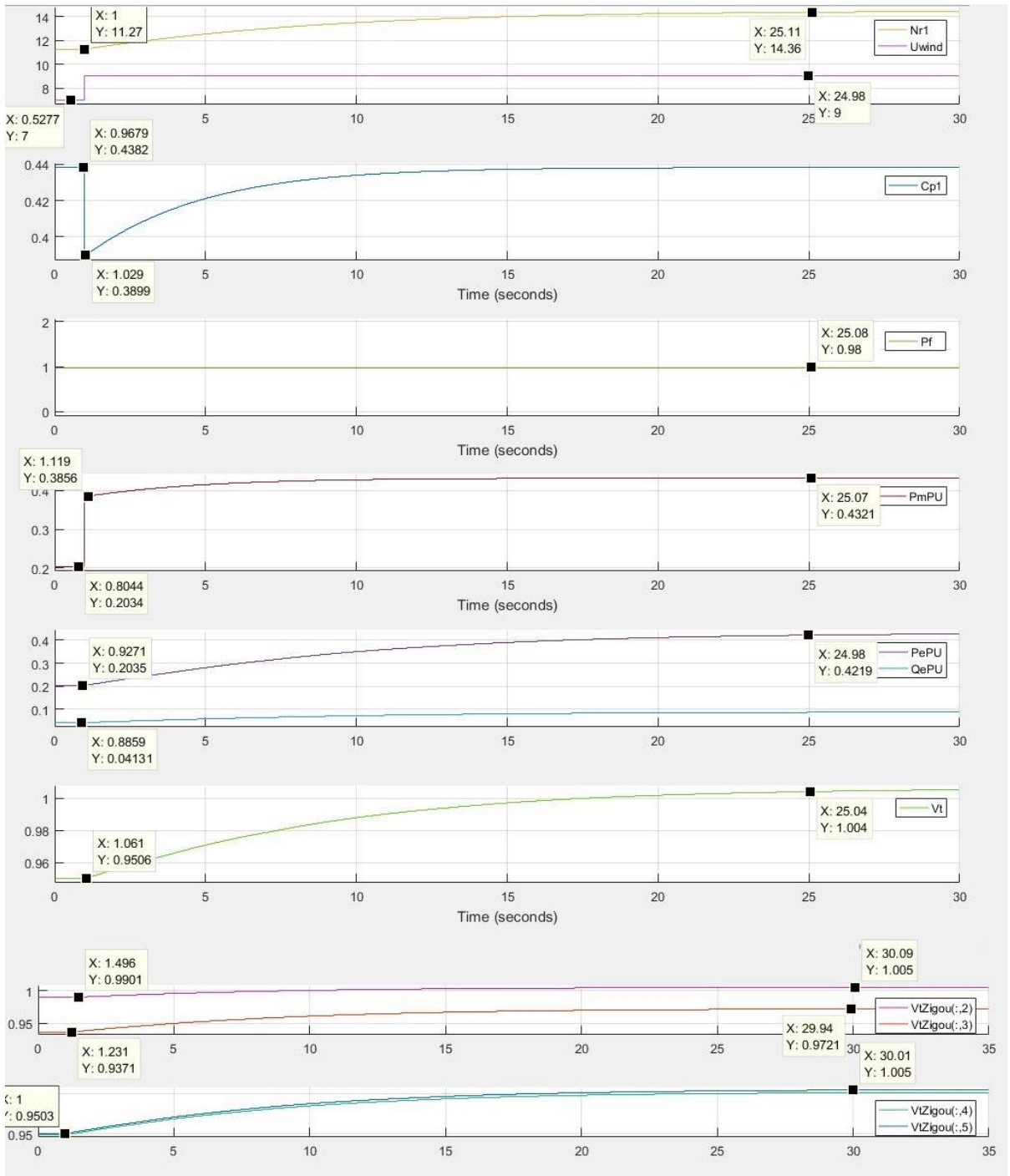
5.2 Βηματική αύξηση του ανέμου στην περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή.

Στα σενάρια που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή, θεωρείται ότι η Α/Γ λειτουργεί στον βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5.2 , Σχήμα 5.3 και στο Σχήμα 5.4 στα σενάρια αυτά θεωρείται ότι τη χρονική στιγμή $t=1\text{sec}$ συμβαίνει μία βηματική αύξηση στη ταχύτητα του ανέμου από τα 7m/s στα 9m/s . Σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, γίνεται έλεγχος της εγχεόμενης αέργου ισχύος στο δίκτυο, με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος και της τάσης σε συγκεκριμένες τιμές. Οι τιμές που έχουν επιλεγεί για τις διαταραχές που εξετάζονται είναι 0.98 και 1 για το συντελεστή ισχύος και 1.02pu για τη τιμή της τάσης. Όπως περιγράφηκε στις προσομοιώσεις στο Κεφάλαιο 4 , η βηματική αύξηση του ανέμου οδηγεί στην απότομη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή λόγω της εξίσωσης (14). Την ίδια χρονική στιγμή αυξάνεται βηματικά και η μηχανική ισχύς που αποδίδεται στον άξονα της Α/Γ από τα 0.2 ανά μονάδα σε 0.4 , όπως φαίνεται και από την εξίσωση (15).

5.2.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98 .

Για τη πρώτη περίπτωση, η ρύθμιση της αέργου ισχύος που εγχύει ο μετατροπέας γίνεται έτσι ώστε ο συντελεστής ισχύος να διατηρεί μια προκαθορισμένη τιμή. Η επιθυμητή τιμή του συντελεστή ισχύος (P_f) ρυθμίζεται στο 0.98 . Η βηματική αύξηση ισχύος προκαλεί τα φαινόμενα που περιγράφησαν στην αντίστοιχη ενότητα στο κεφάλαιο 4. Μετά τη βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος τη χρονική στιγμή 1sec , ο δρομέας της Α/Γ επιταχύνεται με

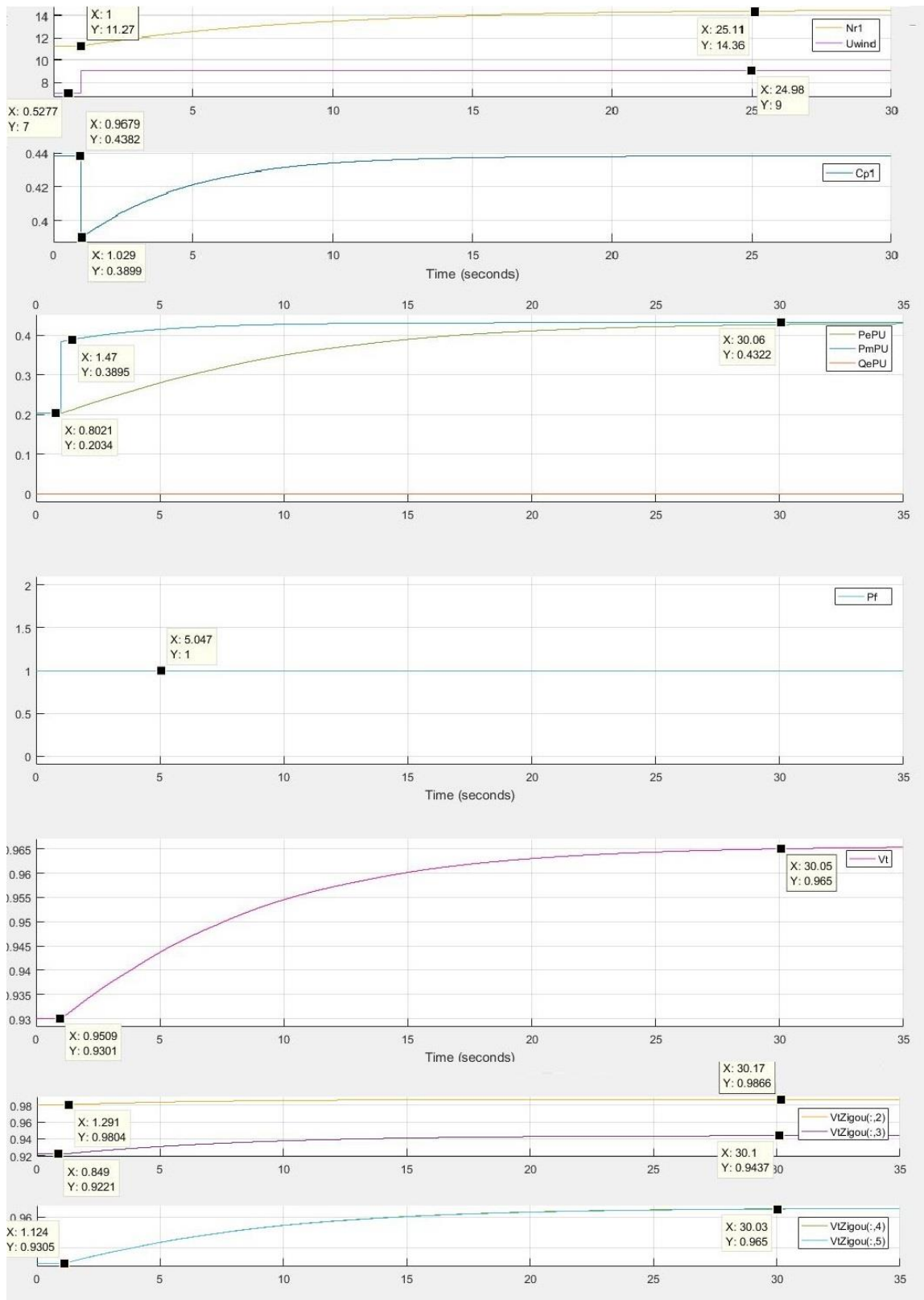
αποτέλεσμα να αυξάνεται το σημείο ρύθμισης για την ενεργό ισχύ, όπως υποδηλώνει η αύξηση της έγχυσης ηλεκτρικής ισχύος που φαίνεται στα διαγράμματα. Δεδομένου ότι ο ελεγκτής αέργου ισχύος διατηρεί σταθερό τον συντελεστή ισχύος, παράλληλα με την ενεργό ισχύ αυξάνεται και η έγχυση αέργου ισχύος. Η αύξηση της εγχυόμενης ισχύος στο σημείο σύνδεσης του Α/Π προκαλεί αύξηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα, από 0.95 σε επίπεδα μεγαλύτερα της ονομαστικής. Στα σχήματα επίσης φαίνεται ότι αυξάνεται η τάση σε όλους τους κόμβους του δικτύου ως αποτέλεσμα της αύξησης της έγχυσης ισχύος από το Α/Π. Η δυνατότητα ανεξάρτητης ρύθμισης της έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος του μετατροπέα, δίνει την δυνατότητα ελέγχου και περιορισμού του ρυθμού αύξησης της έγχυσης ισχύος στο δίκτυο διανομής. Η αύξηση της έγχυσης ενεργού ισχύος γίνεται πιο ομαλά σε σχέση με την μεταβολή που θα προκαλούσε μια αύξηση της ταχύτητας του ανέμου σε μια Α/Γ που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Ο περιορισμός του ρυθμού της μεταβολής έγχυσης ισχύος δίνει την δυνατότητα αντίδρασης σε άλλες διατάξεις (π.χ. μπαταρίες ή άλλες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής) προκειμένου να περιοριστεί η επίπτωση της μεταβολής του ανέμου στην λειτουργία του ΣΗΕ.



Σχήμα 5.2: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 0.98.

5.2.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.

Για τη περίπτωση όπου ο συντελεστής ισχύος (P_f) ρυθμίζεται στη τιμή 1, η έγχυση αέργου ισχύος είναι μηδενική πριν και μετά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, εφόσον το Α/Π δεν εγχύει άεργο ισχύ, η τάση πριν και μετά την διαταραχή είναι μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Η αρχική τιμή της τάσης είναι 0.93 και η τελική 0.965 pu. Κατά τα λοιπά η δυναμική απόκριση των Α/Γ του Α/Π είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση.



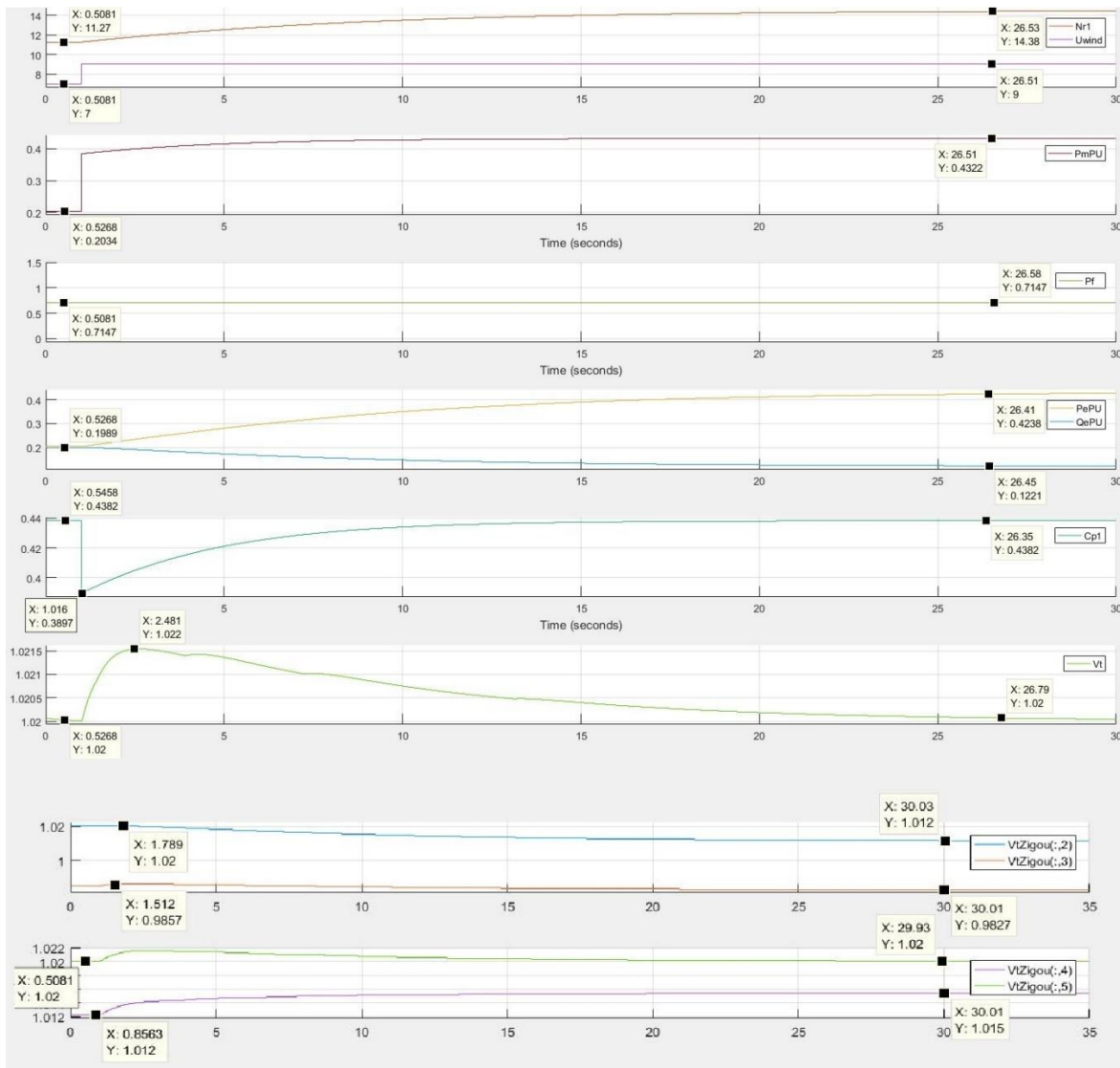
Σχήμα 5.3: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 1.

5.2.3. Ρύθμιση τάσεως

Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται η περίπτωση όπου ο έλεγχος της έγχυσης αέργου ισχύος από τον μετατροπέα γίνεται ώστε να διατηρείται σταθερή η τιμή της τάσης στο σημείο σύνδεσης (1.02pu). Η δυναμική συμπεριφορά του μηχανικού μέρους των Α/Γ του Α/Π δεν διαφοροποιείται σημαντικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αρχικά ο δρομέας των Α/Γ επιταχύνεται με αποτέλεσμα την σταδιακή αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει την μηχανική ισχύ ακαριαία, ενώ μειώνει την τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή απόδοσης. Η επιτάχυνση του δρομέα βελτιώνει την τιμή του συντελεστή αυτού επαναφέροντας τον στην αρχική τιμή, εφόσον η τελική τιμή της ταχύτητας του ανέμου διατηρείται εντός της περιοχής βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος.

Σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, προκειμένου να επιτευχθεί η αρχική τιμή της τερματικής τάσης στο 1.02pu, εφόσον η ενεργός ισχύς η οποία καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου είναι ίδια με τις περιπτώσεις των παραγράφων 5.2.1, 5.2.2, απαιτείται διαφοροποίηση της έγχυσης αέργου ισχύος. Στην περίπτωση της παραγράφου 5.2.2 (μηδενική έγχυση αέργου ισχύος) η τάση προ της διαταραχής είναι 0.93, στην περίπτωση της παραγράφου 5.2.1 ($Q_e=0.04$ pu) η τάση είναι 0.95. Σε αυτή τη περίπτωση για να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση στο 1.02, όπως φαίνεται και στο σχήμα απαιτείται έγχυση αέργου ισχύος 0.2pu. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η δυναμική του μηχανικού μέρους της Α/Γ δεν τροποποιείται σημαντικά, όπως και η δυναμική της έγχυσης ενεργού ισχύος από τον μετατροπέα. Ωστόσο, η αλλαγή της στρατηγικής ελέγχου αέργου ισχύος τροποποιεί την ροή ισχύος στην γραμμή διανομής. Στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της έγχυσης ενεργού ισχύος προκαλεί όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις αύξηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης. Η αύξηση της τάσης σε τιμή μεγαλύτερη της τάσης αναφοράς οδηγεί τον έλεγχο αέργου ισχύος σε μείωση της τιμής αναφοράς αέργου ισχύος και συνεπώς της πραγματικής έγχυσης αέργου ισχύος, προκειμένου να ανακοπεί η αύξηση της τιμής της τάσης και να επανέλθει στην αρχική της τιμή. Η ενεργός ηλεκτρική ισχύς που εγχύεται στο δίκτυο αυξάνεται λόγω της αύξησης της μηχανικής ισχύος από τη βηματική αύξηση του ανέμου, από μία αρχική τιμή 0.19

σε 0.42 ανά μονάδα. Η άεργος ισχύς στο ίδιο διάστημα μειώνεται από τα 0.20 σε 0.12 ανά μονάδα.



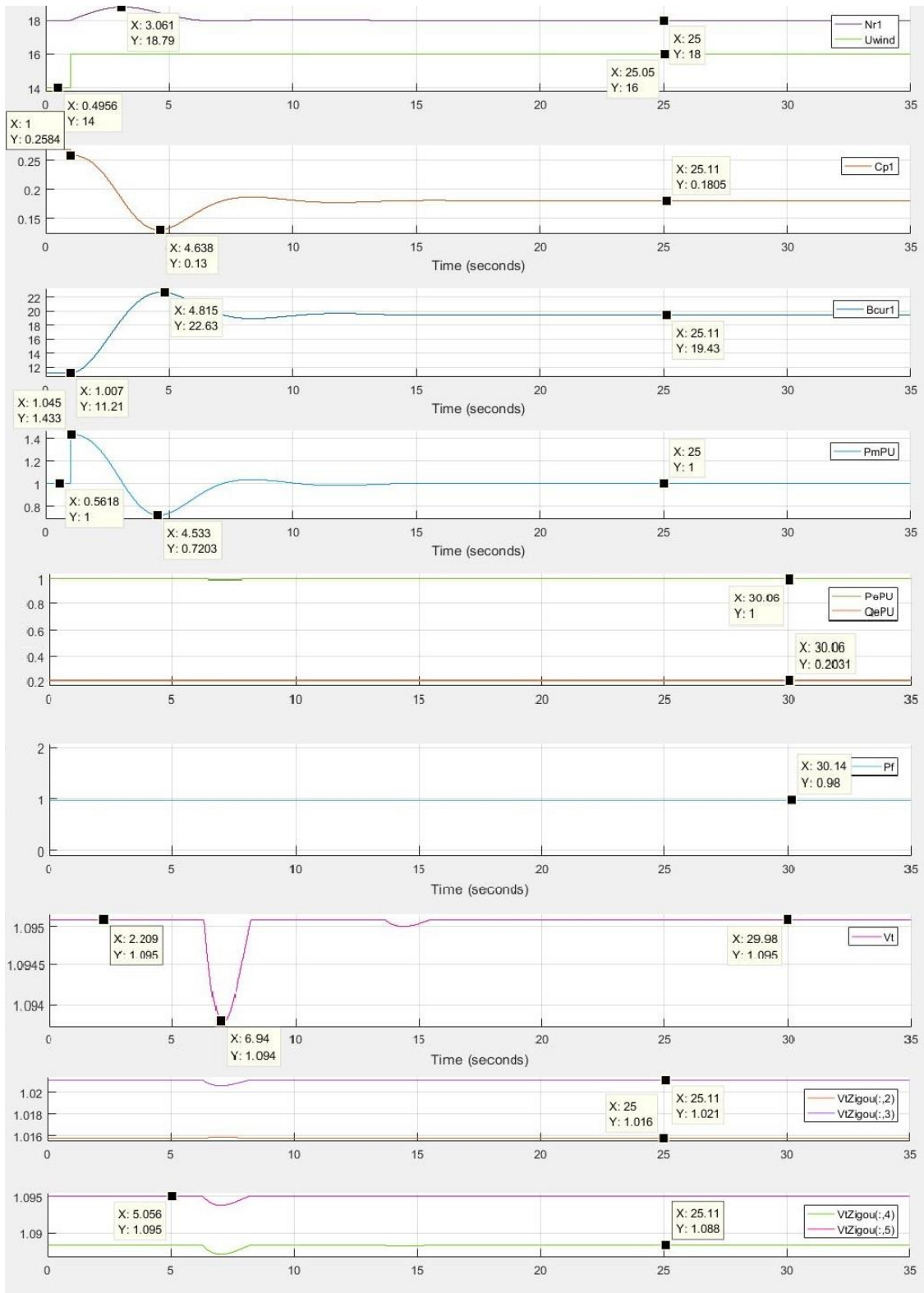
Σχήμα 5.4: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με έλεγχο τάσης στο 1.02.

5.3 Βηματική αύξηση του ανέμου στην περιοχή ονομαστικής ισχύος.

Όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5.5 , Σχήμα 5.6 και στο Σχήμα 5.7 κατά τις διαταραχές αυτές, εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή $t=1\text{sec}$ βηματική αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου από τα 14m/s στα 16m/s. Σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, γίνεται έλεγχος της εγχεόμενης αέργου ισχύος στο δίκτυο, με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος και της τάσης σε συγκεκριμένες τιμές. Οι τιμές που έχουν επιλεγεί για τις διαταραχές που εξετάζουμε είναι 0.98 και 1 για το συντελεστή ισχύος, και 1.02 για τη τιμή της τάσης.

5.3.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.

Όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη παράγραφο στο Κεφάλαιο 4, η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί στην αύξηση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της Α/Γ με αποτέλεσμα την σταδιακή επιτάχυνση του δρομέα της Α/Γ και στην στην απότομη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή λόγω της εξίσωσης (14). Σε αντίθεση με τις διαταραχές που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.2, στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα αυξάνεται σε τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής της τιμής (18ΣΑΛ). Η αύξηση αυτή οδηγεί στην ενεργοποίηση του ελέγχου γωνίας βήματος. Ταυτόχρονα με την υπέρβαση της μέγιστης ταχύτητας ξεκινά η αλλαγή της γωνίας βήματος των πτερυγίων προκειμένου να επιβραδυνθεί ο δρομέας της Α/Γ και να σταθεροποιηθεί η ισχύς εξόδου στα ονομαστικά επίπεδα.



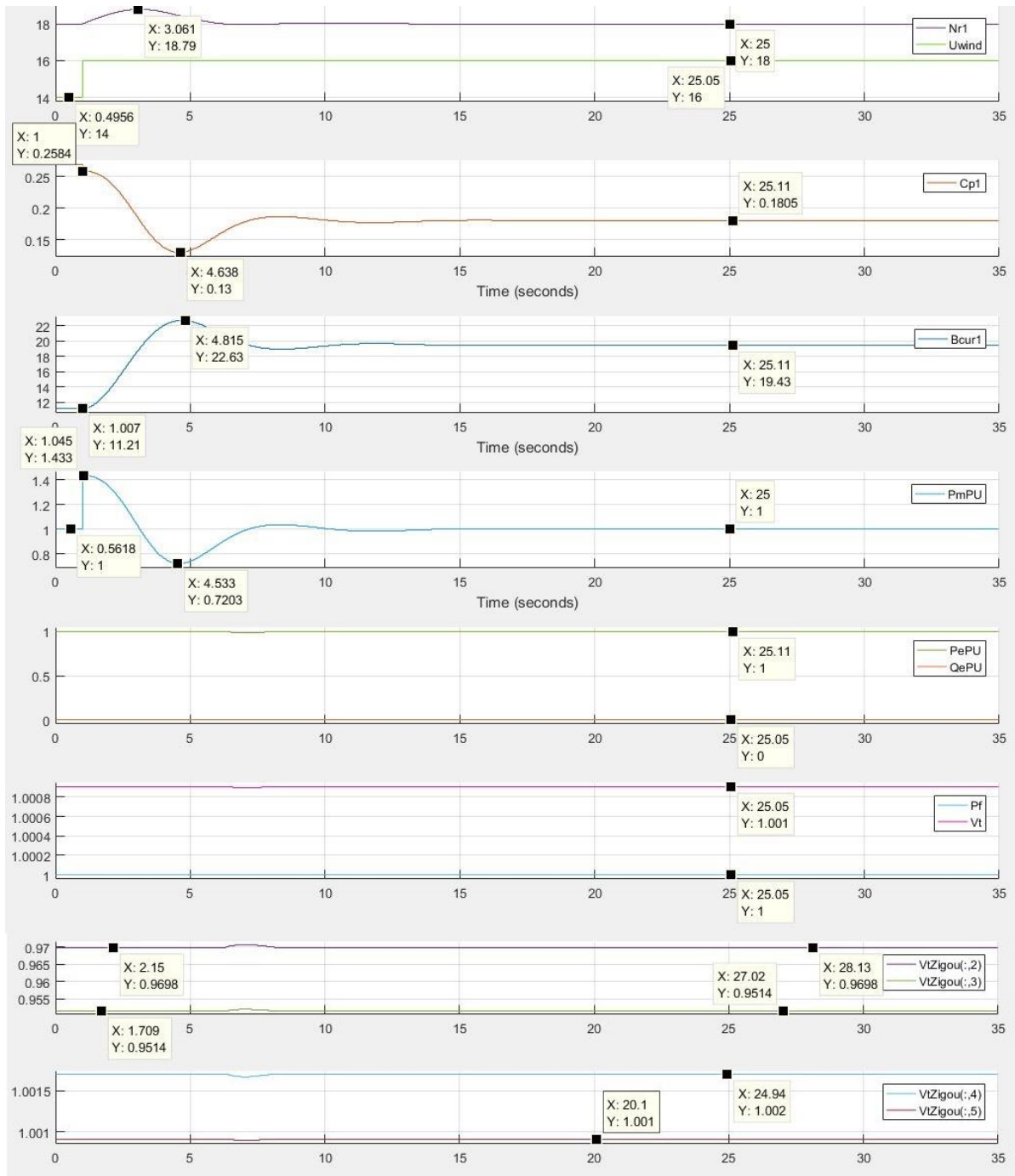
Σχήμα 5.5: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 0.98

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η αρχική και τελική τιμή της ενεργού ισχύος του Α/Π είναι ταυτόσημη. Εφόσον λοιπόν η ρύθμιση αέργου ισχύος γίνεται σε σταθερό συντελεστή ισχύος η τιμή της έγχυσης αέργου ισχύος δεν θα αλλάζει. Όπως φαίνεται και στην προσομοίωση, η λειτουργία των ελεγκτών και του μετατροπέα ισχύος στην περίπτωση αυτή περιορίζει στο ελάχιστο την επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου στο δίκτυο διανομής. Η αυξημένη μηχανική ενέργεια που προκύπτει από την αύξηση της τιμής του ανέμου δεν αποδίδεται στο δίκτυο αλλά «αποθηκεύεται» ως κινητική ενέργεια στον άξονα της Α/Γ, προκαλώντας παροδικά την επιτάχυνσή του, έως ότου ο έλεγχος γωνίας βήματος περιορίσει την μηχανική ισχύ που αποδίδεται στον άξονα. Μάλιστα η μηχανική ισχύς παίρνει μεταβατικά τιμές χαμηλότερες της ονομαστικής προκειμένου να επιβραδυνθεί ο άξονας στα 18ΣΑΛ, να απορροφηθεί δηλαδή η κινητική ενέργεια που αποθηκεύτηκε σε αυτόν τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή. Καθόλη την διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από τον μετατροπέα στο δίκτυο παραμένει πρακτικά σταθερή, δηλαδή το δίκτυο διανομής δεν ανταλλάσσει την διαταραχή ως μεταβολή της έγχυσης ενεργού ή αέργου ισχύος ή μεταβολή της τάσεως. Αυτό είναι και ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των Α/Γ μεταβλητών στροφών.

5.3.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.

Για τη περίπτωση όπου ο συντελεστής ισχύος (Pf) ρυθμίζεται στη τιμή 1, η έγχυση αέργου ισχύος από τον μετατροπέα ισχύος είναι μηδενική πριν και μετά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα. 5.6 εφόσον το Α/Π δεν εγχύει αέργο ισχύ, η τάση προ και μετά την διαταραχή είναι μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (περίπου κατά 0.1pu). Κατά τη βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος τη χρονική στιγμή $t=1\text{sec}$, ο μετατροπέας ισχύος απομονώνει την διαταραχή εντός της Α/Γ. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η Α/Γ λειτουργεί καθόλη τη διάρκεια της διαταραχής εγχέοντας την ονομαστική ισχύ, δηλαδή η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ο μετατροπέας στο δίκτυο παραμένει πρακτικά αμετάβλητη στη μέγιστη τιμή της (1pu). Αντίστοιχα και η τάση δεν

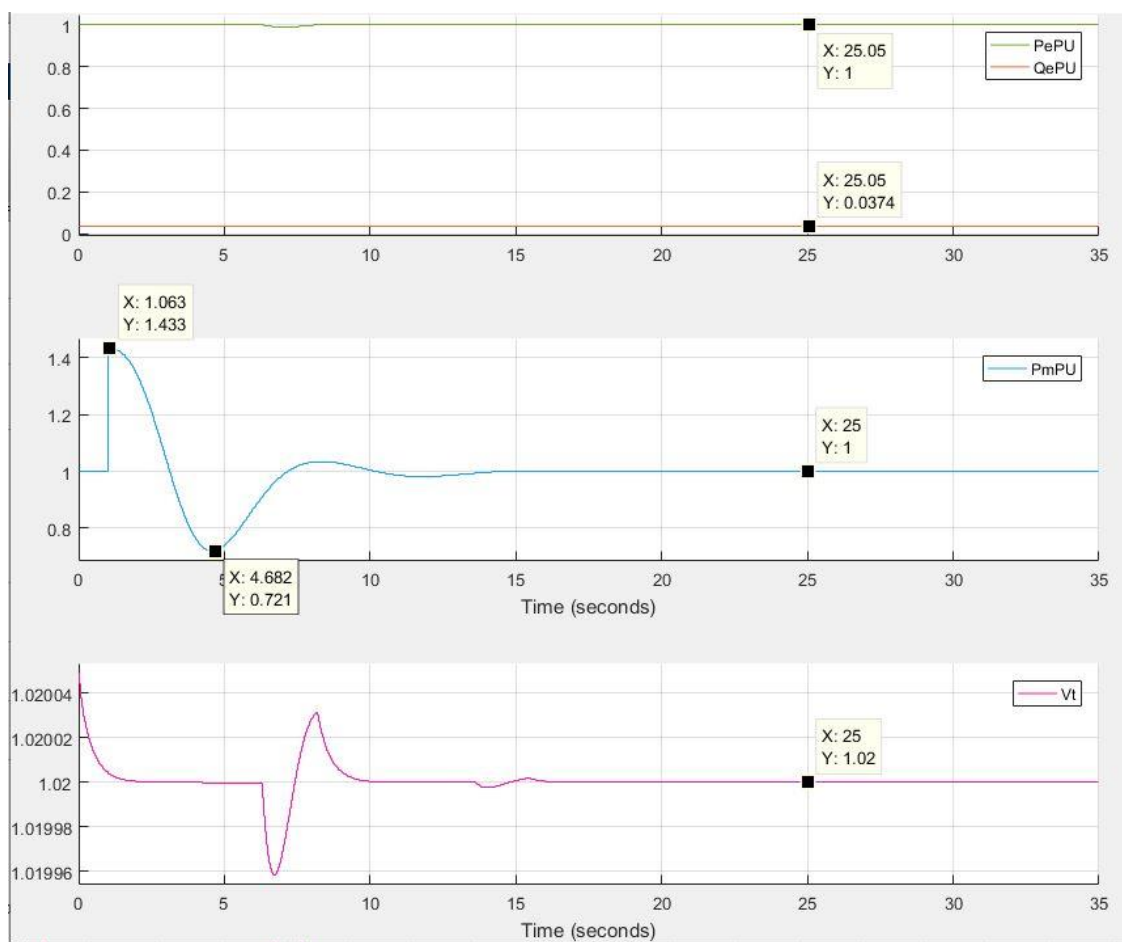
εμφανίζει μεταβολές στο σημείο σύνδεσης. Η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή μειώνεται και φτάνει στην ελάχιστη τιμή του (0.13) τη χρονική στιγμή $t=4.6\text{sec}$. Η επιτάχυνση του δρομέα σε τιμές μεγαλύτερες των 18 ΣΑΛ προκαλεί ενεργοποίηση του βρόχου ρύθμισης γωνίας βήματος. Έπειτα από την αρχική αύξηση, η γωνία βήματος μειώνεται και σταθεροποιείται στις 19.4 μοίρες, εφόσον η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα έχει επιστρέψει στην ονομαστική της τιμή.



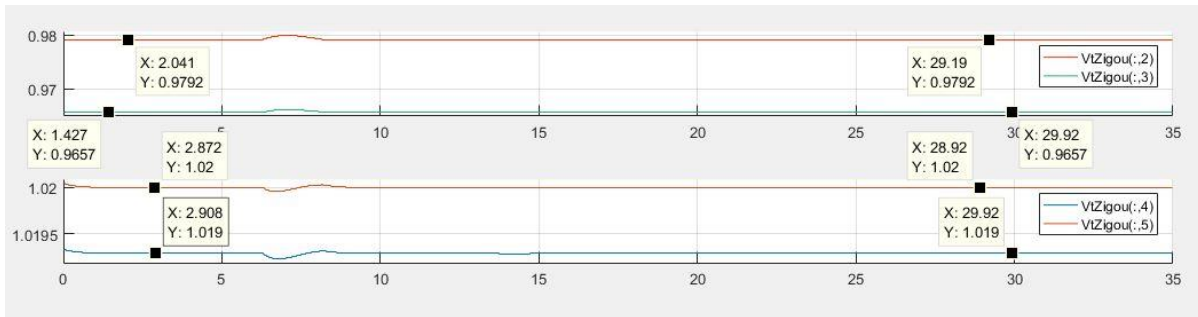
Σχήμα 5.6: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 1.

5.3.3. Ρύθμιση τάσεως.

Στην περίπτωση που η Α/Γ βρίσκεται σε λειτουργία ρύθμισης τάσεως προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Δηλαδή, ο μετατροπέας δεν αφήνει τη μεταβολή της μηχανικής ισχύος να επηρεάσει την έγχυση της ενεργού και άεργου ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο. Έτσι η ενεργός και άεργος ισχύς παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες καθώς και οι τάσεις επί του δικτύου διανομής.



Σχήμα 5.7: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με έλεγχο τάσης στο 1.02.



Σχήμα 5.7 (συνέχεια): Διαγράμματα αλλαγής της τάσης των ζυγών του δικτύου του Α/Π ως προς το χρόνο με βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με έλεγχο τάσης στο 1.02.

5.4 Βηματική μείωση του ανέμου στην περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή.

Στις διαταραχές αυτές, εφαρμόζεται μία βηματική μείωση στη ταχύτητα του ανέμου από τα 9m/s στα 7m/s τη χρονική στιγμή $t=1\text{sec}$. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8 , Σχήμα 5.9 και Σχήμα 5.10 . Σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, γίνεται έλεγχος της εγχεόμενης αέργου ισχύος στο δίκτυο, με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος και της τάσης σε συγκεκριμένες τιμές. Οι τιμές που έχουν επιλεγεί για τις διαταραχές που εξετάζονται είναι 0.98 και 1 για το συντελεστή ισχύος και 1.02pu για τη τιμή της τάσης. Η διαταραχή οδηγεί στην απότομη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή βάση της εξίσωσης (14) και στην βηματική μείωση της μηχανικής ισχύος που αποδίδεται στον άξονα της Α/Γ από τα 0.43 ανά μονάδα σε 0.17, όπως προκύπτει και από την εξίσωση (15).

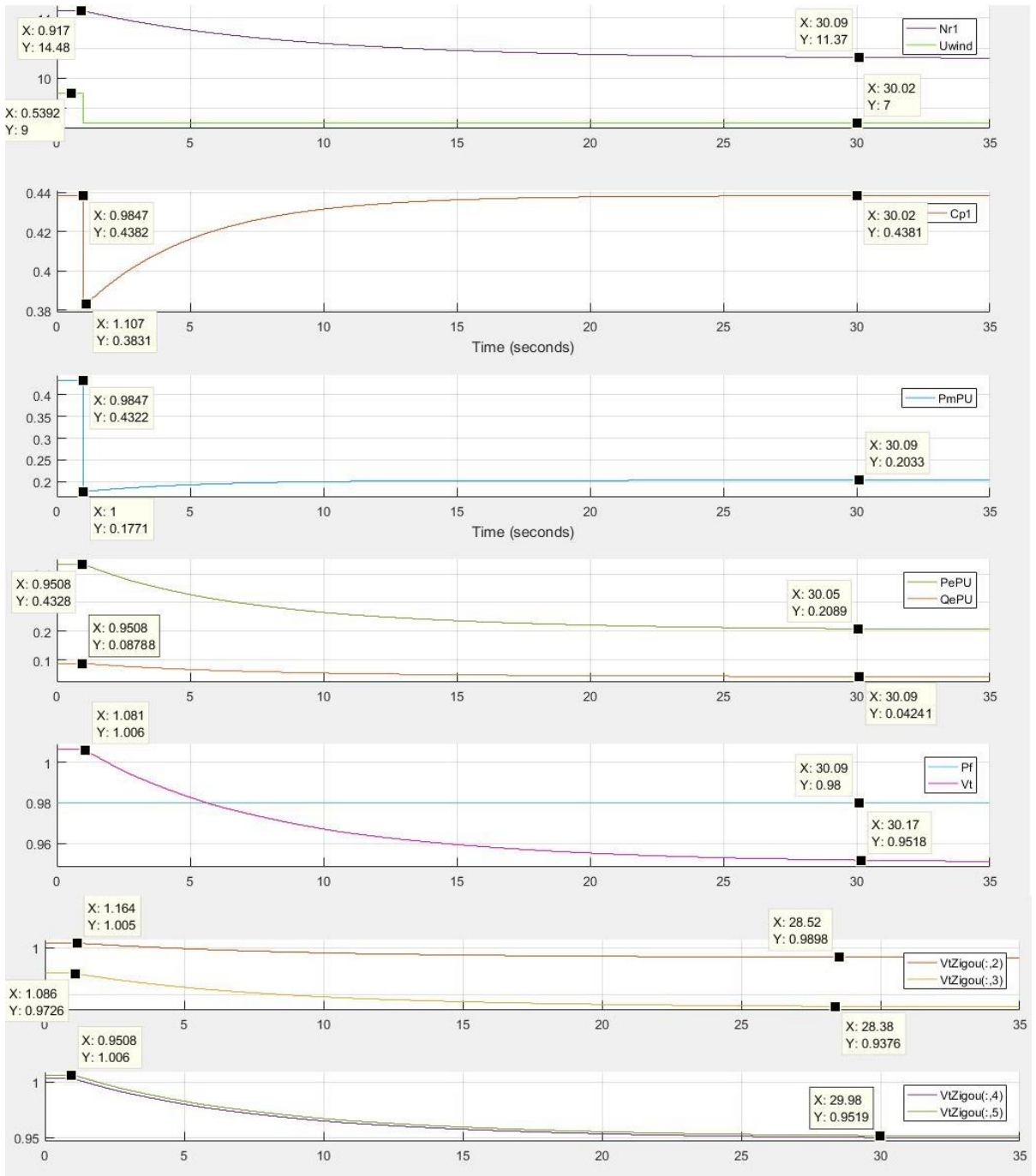
5.4.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.

Για τη πρώτη περίπτωση, η ρύθμιση της αέργου ισχύος που εγχύει ο μετατροπέας γίνεται έτσι ώστε ο συντελεστής ισχύος να διατηρεί μια προκαθορισμένη τιμή. Η επιθυμητή τιμή του συντελεστή ισχύος (Pf) ρυθμίζεται στο 0.98. Η βηματική μείωση ισχύος προκαλεί στο μηχανικό μέρος της Α/Γ παρόμοια απόκριση με αυτή που περιγράφηκε στην αντίστοιχη ενότητα του κεφαλαίου 4.

Μετά τη βηματική μείωση της μηχανικής ισχύος τη χρονική στιγμή 1sec, ο δρομέας της Α/Γ επιβραδύνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή ρύθμισης για την έγχυση ενεργού ισχύος, όπως υποδηλώνει η μείωση της ηλεκτρικής ισχύος που εγχύει ο μετατροπέας ισχύος όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5.8 . Η μείωση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί μείωση στην τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή απόδοσης. Στη συνέχεια, η επιβράδυνση του δρομέα βελτιώνει την τιμή του συντελεστή αυτού επαναφέροντας τον στην αρχική τιμή, εφόσον η τελική τιμή της ταχύτητας του ανέμου διατηρείται εντός της περιοχής βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος.

Δεδομένου ότι ο ελεγκτής αέργου ισχύος διατηρεί σταθερό τον συντελεστή ισχύος, η άεργος ισχύς μειώνεται παράλληλα με την ενεργό. Η μείωση της εγχυόμενης ισχύος στο σημείο σύνδεσης του Α/Π προκαλεί μείωση της τάσης στο σημείο σύνδεσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα, από 1 pu σε 0.95 pu και γενικότερα οι τάσεις μειώνονται σε όλο το δίκτυο διανομής.

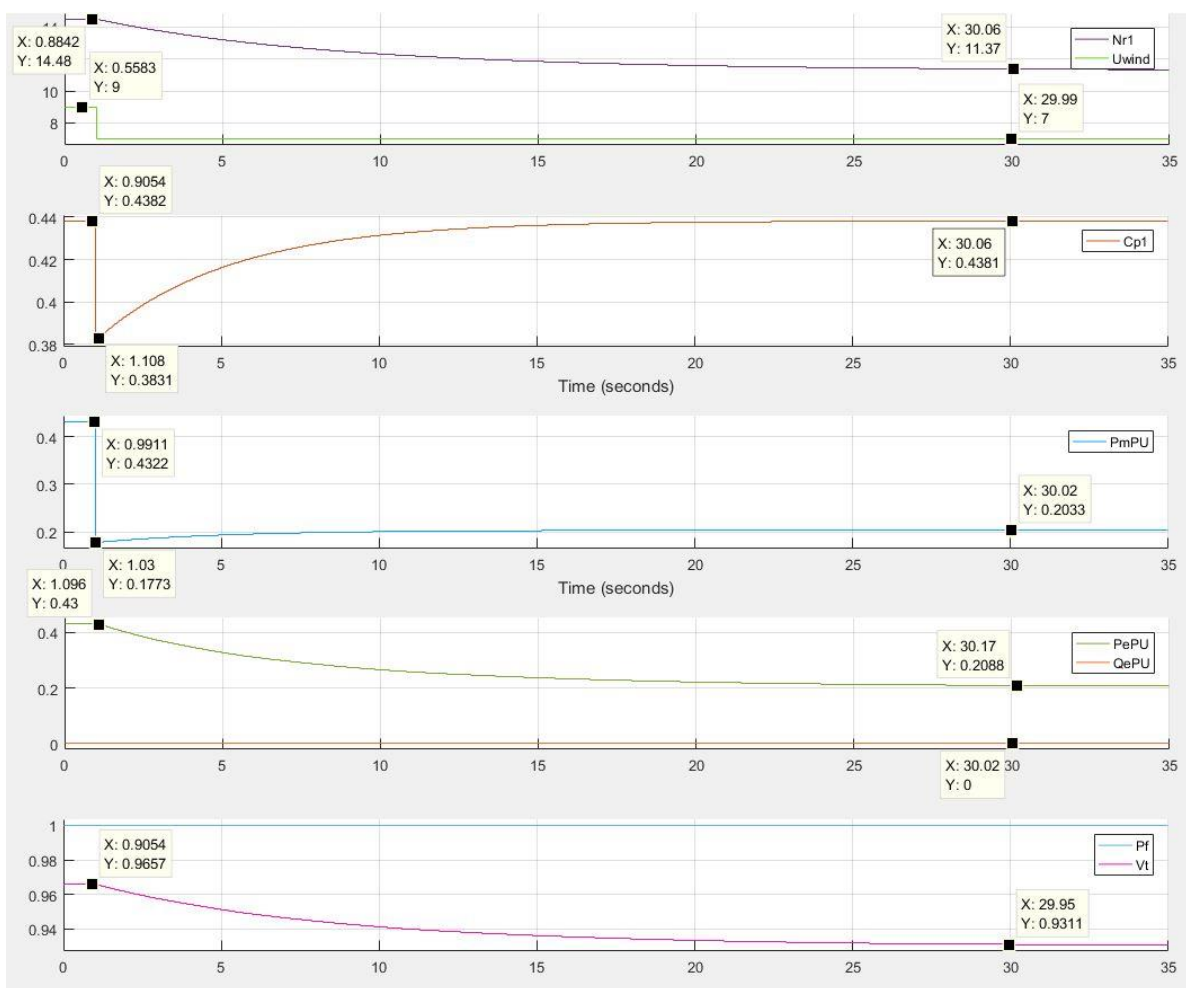
Η δυνατότητα ανεξάρτητης ρύθμισης της έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος του μετατροπέα δίνει την δυνατότητα ελέγχου και περιορισμού του ρυθμού μείωσης της έγχυσης ισχύος στο δίκτυο διανομής. Η μείωση της έγχυσης ενεργού ισχύος γίνεται πιο ομαλά σε σχέση με την μεταβολή που θα προκαλούσε μια μείωση της ταχύτητας του ανέμου σε μια Α/Γ που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο.



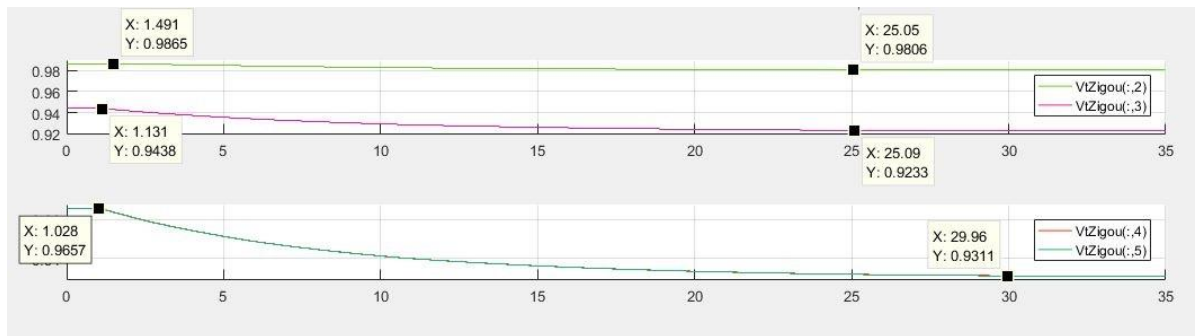
Σχήμα 5.8: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 0.98.

5.4.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.

Για τη περίπτωση όπου ο συντελεστής ισχύος (Pf) ρυθμίζεται στη τιμή 1, η έγχυση αέργου ισχύος από τον μετατροπέα ισχύος είναι μηδενική πριν και μετά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.9, εφόσον το Α/Π δεν εγχύει άεργο ισχύ, η τάση προ και μετά την διαταραχή είναι μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Η αρχική τιμή της τάσης είναι 0.965 και η τελική 0.93 pu. Κατά τα λοιπά η δυναμική απόκριση των Α/Γ του Α/Π είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση.



Σχήμα 5.9: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 1.



Σχήμα 5.9(Συνέχεια): Διαγράμματα αλλαγής των τάσεων των ζυγών του Α/Π ως προς το χρόνο, με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 1.

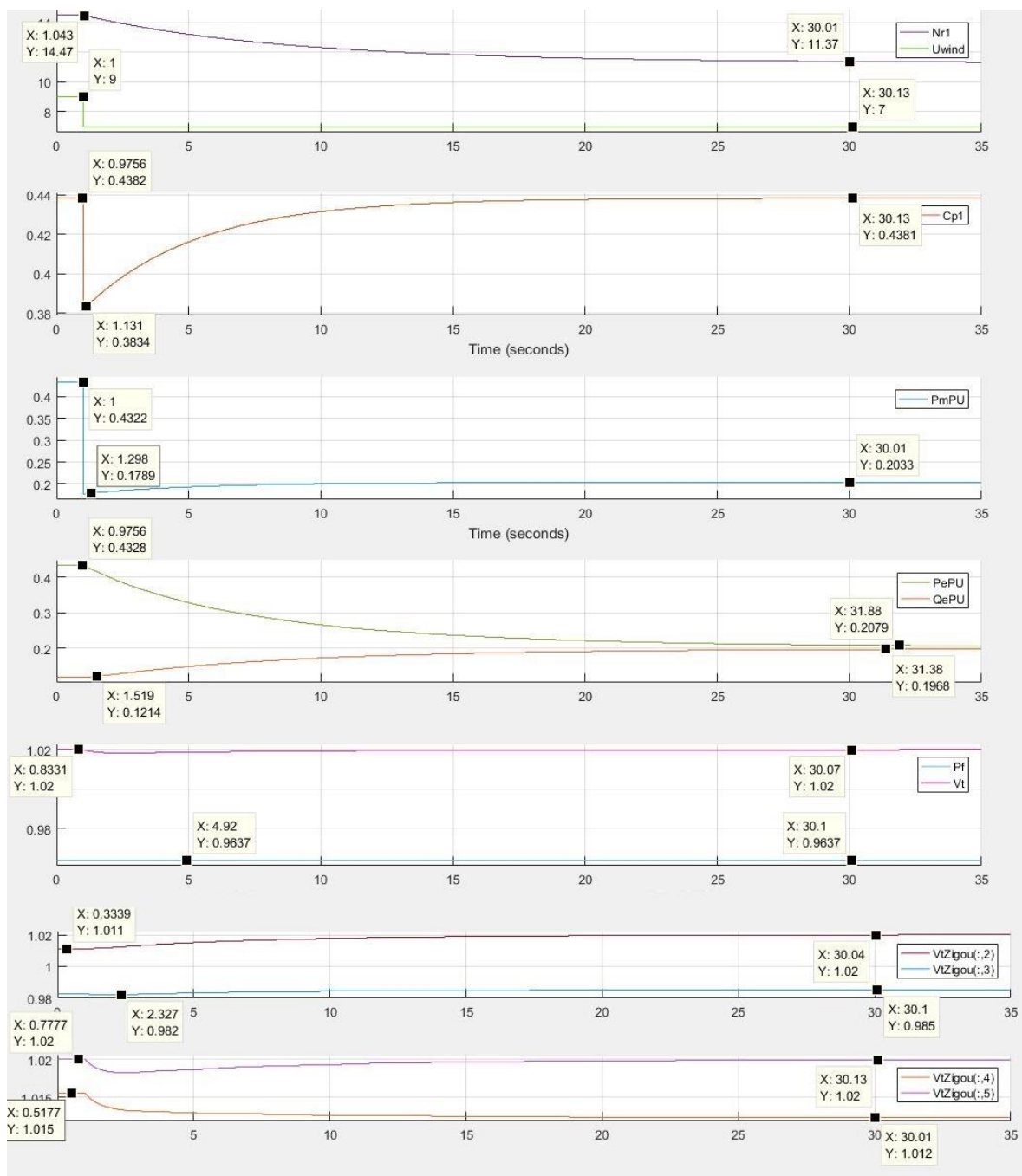
5.4.3. Ρύθμιση τάσεως.

Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται η περίπτωση όπου ο έλεγχος της έγχυσης αέργου ισχύος από τον μετατροπέα ισχύος γίνεται ώστε να διατηρείται σταθερή η τιμή της τάσης στο σημείο σύνδεσης (1.02pu).

Αρχικά ο δρομέας των Α/Γ επιβραδύνεται με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο. Η μείωση της ταχύτητας του ανέμου μειώνει την μηχανική ισχύ ακαριαία και ταυτόχρονα με την τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή απόδοσης. Στη συνέχεια, η επιβράδυνση του δρομέα βελτιώνει την τιμή του συντελεστή αυτού επαναφέροντας τον στην αρχική τιμή, εφόσον η τελική τιμή της ταχύτητας του ανέμου διατηρείται εντός της περιοχής βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος.

Η δυναμική του μηχανικού μέρους της Α/Γ δεν τροποποιείται σημαντικά, όπως και η δυναμική της έγχυσης ενεργού ισχύος από τον μετατροπέα. Ωστόσο, η αλλαγή της στρατηγικής ελέγχου αέργου ισχύος τροποποιεί την ροή ισχύος στην γραμμή διανομής. Στην περίπτωση αυτή η μείωση της έγχυσης ενεργού ισχύος προκαλεί όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις μείωση της τάσης στο σημείο σύνδεσης. Η μείωση της τάσης σε τιμή μικρότερη της τάσης αναφοράς οδηγεί τον έλεγχο αέργου ισχύος σε αύξηση της τιμής αναφοράς αέργου ισχύος και συνεπώς και της πραγματικής έγχυσης, προκειμένου να ανακοπεί η μείωση της τιμής της τάσης και να επανέλθει στην αρχική της τιμή. Η ενεργός ισχύς που εγχύεται στο δίκτυο

μειώνεται λόγω της βηματικής μείωσης της ταχύτητας του ανέμου, από μία αρχική τιμή 0.43 σε 0.17 ανά μονάδα. Η άεργος ισχύς στο ίδιο διάστημα αυξάνεται από τα 0.12 σε 0.19 ανά μονάδα. Οι τάσεις στο δίκτυο σύνδεσης μεταβάλλονται εφόσον μεταβάλλεται η ροή ισχύος επί της γραμμής, ωστόσο οι μεταβολές αυτές είναι πιο περιορισμένες.

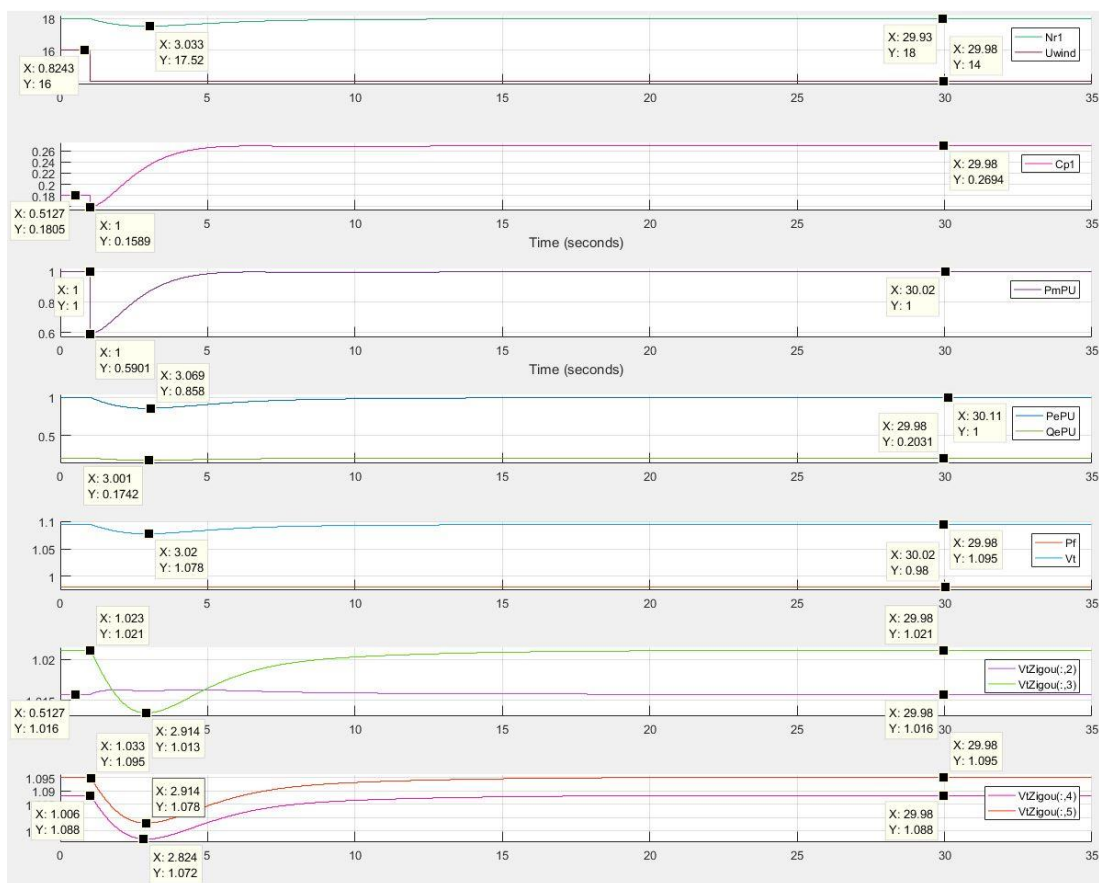


Σχήμα 5.10: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου με έλεγχο τάσης στο 1.02.

5.5 Βηματική μείωση του ανέμου στην περιοχή ονομαστικής ισχύος.

5.5.1. Σταθερός συντελεστής ισχύος 0.98.

Όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη παράγραφο στο Κεφάλαιο 4, η αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μεταβολή της μηχανικής ισχύος στον άξονα της Α/Γ και στην απότομη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή βάσει της εξίσωσης (14). Στη προκειμένη περίπτωση, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5.11 η μείωση της ταχύτητας του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ. Σε αντίθεση με τις διαταραχές που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.4 σε αυτή τη περίπτωση, πριν και μετά την εξεταζόμενη διαταραχή, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα διατηρείται στην ίδια τιμή λόγω της λειτουργίας του ρυθμιστή ελέγχου γωνίας βήματος.



Σχήμα 5.11: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 0.98

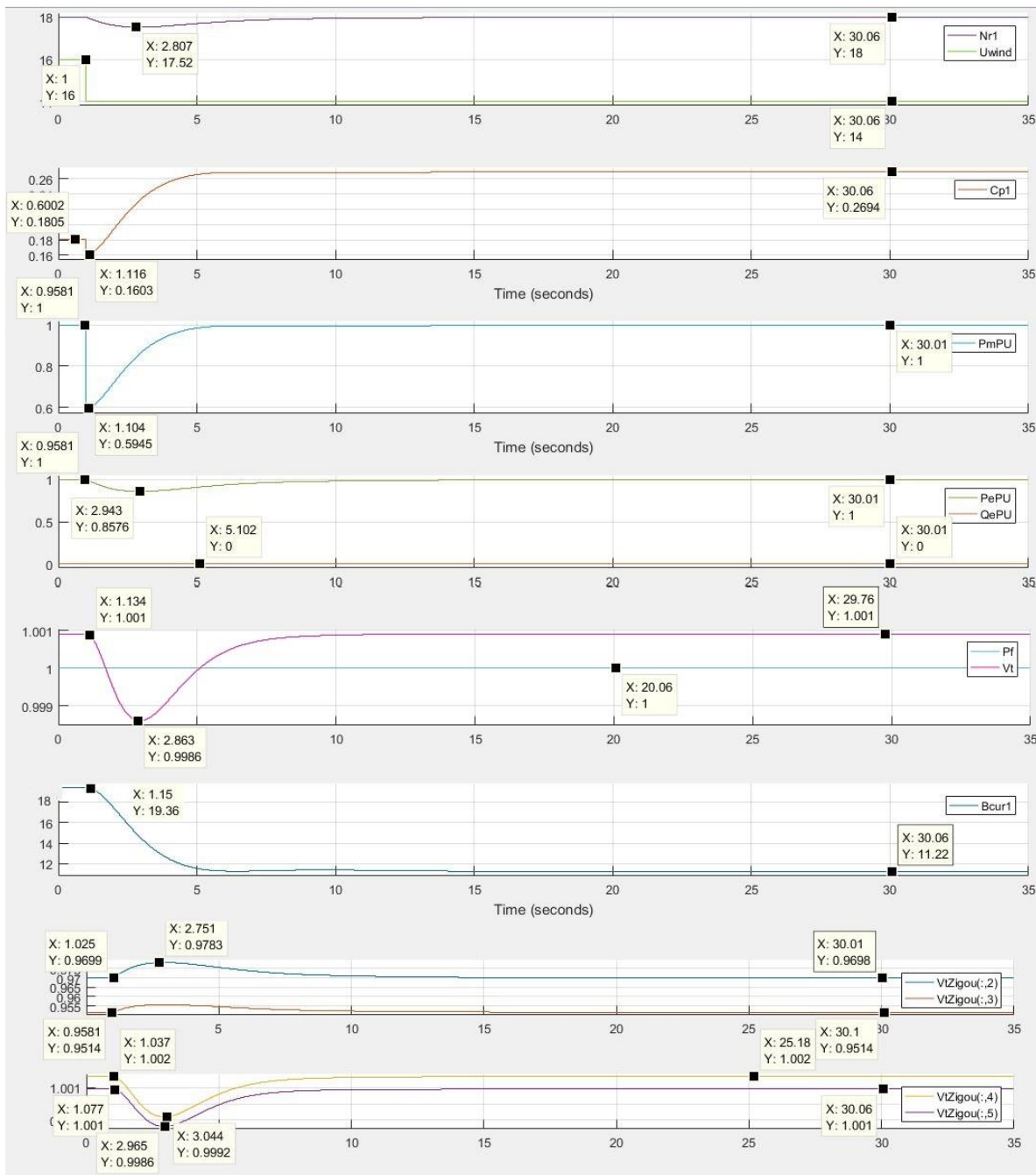
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η αρχική και τελική τιμή της ενεργού ισχύος του Α/Π είναι ταυτόσημη. Εφόσον λοιπόν η ρύθμιση αέργου ισχύος γίνεται σε σταθερό συντελεστή ισχύος, η τιμή της έγχυσης αέργου ισχύος δεν θα αλλάζει πριν και μετά τη διαταραχή. Όπως φαίνεται και στην προσομοίωση, η λειτουργία των ελεγκτών και του μετατροπέα ισχύος στην περίπτωση αυτή περιορίζει στο ελάχιστο την επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου στο δίκτυο διανομής. Η μειωμένη μηχανική ενέργεια που προκύπτει από την μείωση της τιμής του ανέμου δεν αποδίδεται εξ'ολοκλήρου στο δίκτυο. Η μείωση της μηχανικής ισχύος από το 1 pu σε 0.59 pu αμέσως μετά την διαταραχή αποδίδεται από τον μετατροπέα ως μία μεταβατική μείωση ενεργού ισχύος από 1 pu σε 0.85 pu.

5.5.2. Σταθερός συντελεστής ισχύος 1.

Για τη περίπτωση όπου ο συντελεστής ισχύος (Pf) ρυθμίζεται στη τιμή 1, η έγχυση αέργου ισχύος από τον μετατροπέα ισχύος είναι μηδενική πριν και μετά την μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 εφόσον το Α/Π δεν εγχύει άεργο ισχύ, η τάση προ και μετά την διαταραχή είναι μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (περίπου 0.1 pu).

Η μείωση της μηχανικής ισχύος προκαλεί την επιβράδυνση του δρομέα της Α/Γ με αποτέλεσμα την τροποποίηση της γωνίας βήματος από τον αντίστοιχο ελεγκτή, καθώς και την μεταβολή της έγχυσης ενεργού ισχύος προς το δίκτυο. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι ο μετατροπέας ισχύος απομονώνει τη διαταραχή εντός της Α/Γ, όσο το δυνατόν καλύτερα. Ενώ η μηχανική ισχύς μειώνεται μεταβατικά από το 1 pu σε 0.59 pu, η μεταβατική μείωση έγχυσης ενεργού ισχύος από τον μετατροπέα είναι από το 1 pu σε 0.85 pu. Μετά τη διαταραχή, η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή αυξάνεται και φτάνει στην μέγιστη τιμή (0.269) τη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$, λόγω της λειτουργίας του ελέγχου γωνίας βήματος (η κλίση των πτερυγίων μειώνεται από τις 19.36 μοίρες στις 11.2 μοίρες). Έπειτα, μετά τη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$,

εφόσον η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα έχει επιστρέψει στην ονομαστική της τιμή και η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή, η γωνία βήματος ισορροπεί.



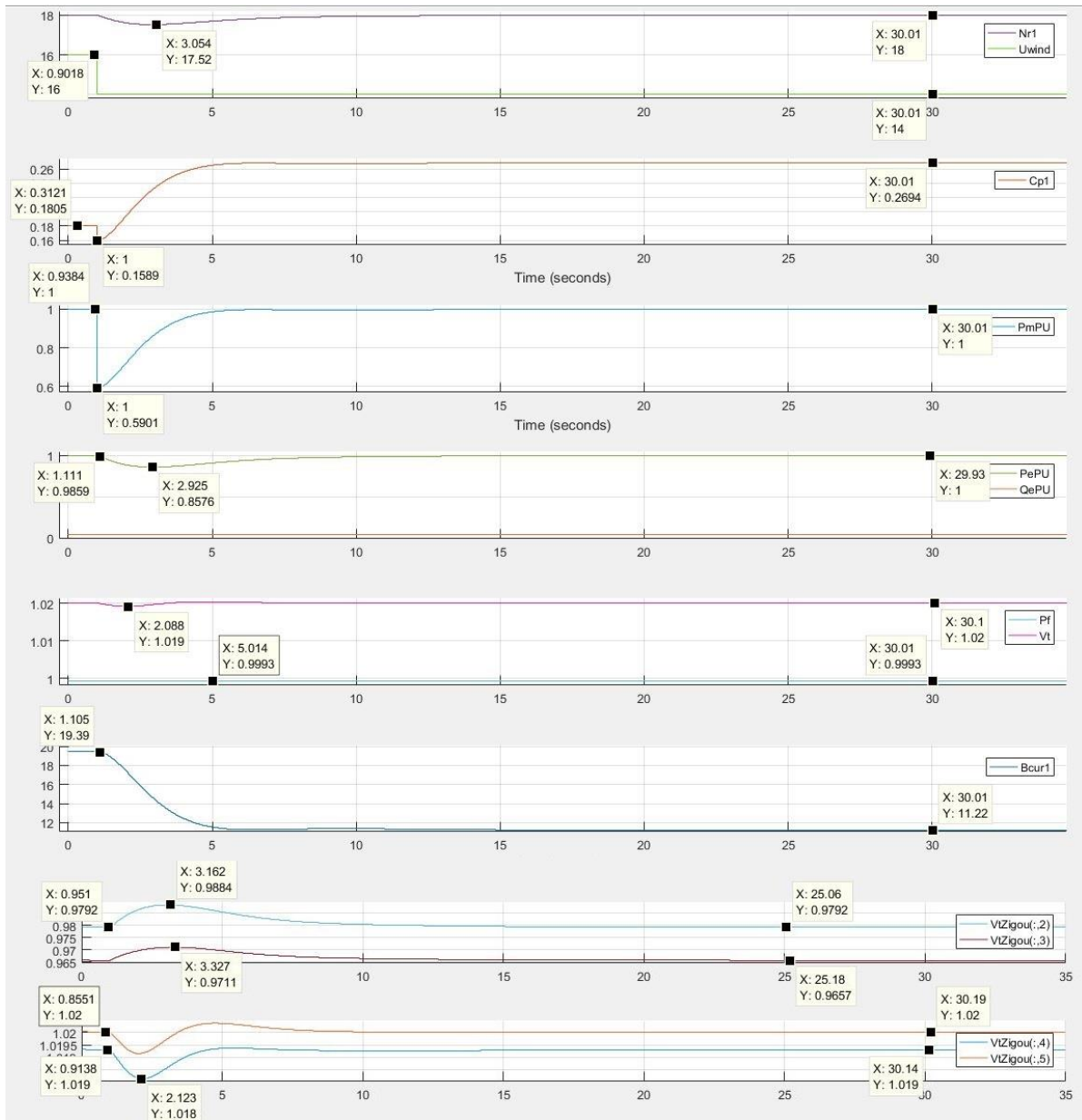
Σχήμα 5.12: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου και συντελεστή ισχύος 1.

5.5.3. Ρύθμιση τάσεως.

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η διαταραχή βηματικής μείωσης της τιμής της ταχύτητας του ανέμου με τον ελεγκτή αέργου ισχύος σε ρύθμιση τάσεως. Όπως και προηγουμένως, η μείωση της μηχανικής ισχύος προκαλεί επιβράδυνση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της Α/Γ με αποτέλεσμα την μεταβολή τόσο της έγχυσης ηλεκτρικής ισχύος όσο και της γωνίας βήματος πτερυγίων.

Ο έλεγχος αέργου ισχύος ρυθμίζει την τιμή της τερματικής τάσης. Ωστόσο, επειδή η αρχική και τελική τιμή έγχυσης ενεργού ισχύος από τις Α/Γ δεν μεταβάλλεται (1αμ), δεν μεταβάλλεται και η ροή ισχύος επί της γραμμής. Συνεπώς και η αρχική και τελική τιμή της έγχυσης αέργου ισχύος είναι ίδια, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα.

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις (5.5.1, 5.5.1), η λειτουργία των ελεγκτών και του μετατροπέα ισχύος περιορίζουν στο ελάχιστο την επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου στο δίκτυο διανομής. Η μείωση της μηχανικής ενέργειας που προκύπτει από την μείωση της τιμής του ανέμου δεν αποδίδεται εξ' ολοκλήρου στο δίκτυο. Η μεταβατική μείωση της μηχανικής ισχύος από το 1 pu σε 0.59 pu όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5.13 αποδίδεται από τον μετατροπέα ως μία μεταβατική μείωση ενεργού ισχύος από το 1 pu σε 0.85 pu.



Σχήμα 5.13: Διαγράμματα αλλαγής μεταβλητών της Α/Γ ως προς το χρόνο με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου και σταθερή τάση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν οι βασικότερες κατηγορίες των ΑΠΕ ενώ συγκρίθηκαν με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας. Παρατέθηκαν στοιχεία που αναδεικνύουν την αιολική ως τη ταχύτερα αναδύομενη στη παγκόσμια ενεργειακή αγορά και έγινε μία αναφορά στο ενεργειακό δυναμικό της χώρας μας καθώς και τα προβλήματα που προκύπτουν από την εισαγωγή αυτών των νέων πηγών ενέργειας σε ένα ΣΗΕ. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση της λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας ως προς το μηχανικό αλλά και το ηλεκτρικό τμήμα της. Περιγράφηκαν τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται και έγινε μία εισαγωγή σε έννοιες και μεγέθη που αφορούν την αεροδυναμική καθώς και στις διάφορες τεχνικές αεροδυναμικού ελέγχου. Αναλύθηκε το ηλεκτρικό τμήμα τόσο ως προς τις γεννήτριες όσο και σχετικά με τα ηλεκτρονικά ισχύος, ενώ παράλληλα έγινε αναφορά στις πιο ευρέως διαδεδομένες κατηγορίες ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα, αναλόγως τις ανάγκες που υφίστανται. Στο πλαίσιο της διπλωματικής αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την δυναμική προσομοίωση ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα στο περιβάλλον του Matlab/Simulink. Στο μοντέλο αυτό συμπεριλήφθηκε τόσο το μηχανικό τμήμα της ανεμογεννήτριας (πτερύγια, άξονας), ο μετατροπέας ισχύος καθώς και οι βρόχοι ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκε ο έλεγχος γωνίας βήματος, ο βρόχος του ελέγχου ενεργού ισχύος, και ο έλεγχος έγχυσης αέργου ισχύος. Για κάθε ένα τμήμα έγινε αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του. Με αυτό το τρόπο παρουσιάζεται η πολυπλοκότητα των συστημάτων που αποτελούν μία σύγχρονη Α/Γ, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εξαρτώνται τα επιμέρους υποσυστήματα μεταξύ τους για την όσο το δυνατόν καλύτερη λειτουργία της Α/Γ.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε παραμετροποιήθηκε με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου και χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση διαταραχών μεταβολής του ανέμου. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των βρόχων ελέγχου, έγινε ανάλυση των περιοχών λειτουργίας της Α/Γ σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

Εκτελέστηκε μια σειρά προσομοιώσεων θεωρώντας ότι η γεννήτρια συνδέεται σε άπειρο σύστημα προκειμένου να εξεταστεί απομονωμένα το αεροδυναμικό τμήμα. Εξετάστηκαν διαταραχές αύξησης και μείωσης της ταχύτητας του ανέμου. Έγινε περιγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καλύπτοντας όλο το εύρος των ταχυτήτων ανέμου, από τη ταχύτητα εκκίνησης, μέχρι τη ταχύτητα διακοπής της λειτουργίας της. Αναλύθηκε η δυναμική απόκριση, για κάθε περιοχή λειτουργίας, και οι μεταβολές όλων των βασικών μεγεθών της Α/Γ που αποτυπώνουν τον τρόπο λειτουργίας της. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στους χρόνους αντίδρασης των ελεγκτών της και τους χρόνους επαναφοράς της Α/Γ στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, μετά τη διαταραχή. Παρόλο που οι χρόνοι απόκρισης των βρόχων ελέγχου της Α/Γ στις εκάστοτε διαταραχές ήταν μικροί, οι χρόνοι εξισορρόπησης της στο νέο σημείο λειτουργίας της μετά το πέρας της διαταραχής, ήταν μεγαλύτεροι.

Οι προσομοιώσεις αυτές ανέδειξαν την κρισιμότητα του ελέγχου γωνίας βήματος εφόσον με βάση τον έλεγχο αυτό γίνεται δυνατή η ρύθμιση της ισχύος εξόδου της Α/Γ για τιμές ταχύτητας ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής. Η λειτουργία του βρόχου ελέγχου ενεργού ισχύος ρυθμίζει την έγχυση ενεργού ισχύος από τον μετατροπέα στο δίκτυο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση του ανέμου σε ένα αρκετά διευρυμένο εύρος ταχυτήτων ανέμου. Σε περιπτώσεις που ο δρομέας υπερταχύνεται η επιβράδυνσή του επιτυγχάνεται διαμέσου του ελέγχου γωνίας βήματος.

Τέλος, για την εξέταση της δυναμικής απόκρισης της Α/Γ σε πραγματικές συνθήκες έγινε μοντελοποίηση ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενου από έξι Α/Γ, το οποίο συνδέεται σε ένα δίκτυο διανομής. Οι εξεταζόμενες διαταραχές ήταν κοινές με τις διαταραχές που μελετήθηκαν κατά την εξέταση της απόκρισης του αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ. Το αιολικό πάρκο θεωρήθηκε ότι συμβάλει στην ρύθμιση των τάσεων είτε ρυθμίζοντας τον συντελεστή ισχύος στην έξοδό του, είτε ρυθμίζοντας την τερματική τάση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανέδειξαν ότι ο συνδυασμός των βρόχων ελέγχου ενεργού ισχύος και του βρόχου ελέγχου γωνίας βήματος δίνουν την δυνατότητα μερικής ή πλήρους απομόνωσης της διαταραχής. Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί μεταβατικές μεταβολές στην μηχανική ισχύ που αποδίδεται στον άξονα της ανεμογεννήτριας, ωστόσο η λειτουργία των βρόχων ελέγχου επιτρέπει την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του άξονα, καθιστώντας δυνατή την

ελαχιστοποίηση της μεταβολής της έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Στην περίπτωση όπου η διαταραχή μεταβάλει στην τελική κατάσταση την έγχυση ενεργού ισχύος, η λειτουργία των βρόχων ελέγχου καθιστά την μεταβολή πιο αργή, ενώ στην περίπτωση όπου η τελική έγχυση ενεργού ισχύος ταυτίζεται με την αρχική (λειτουργία σε ονομαστική ισχύ) είναι δυνατός ο περιορισμός των μεταβατικών μεταβολών.

Με αυτό το τρόπο διαφαίνεται και η καθοριστική λειτουργία του πλήρη μετατροπέα ο οποίος αντισταθμίζει σε κάθε περίπτωση την έγχυση ισχύος στο δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση αποδεδειγμένα χρονικά και ποσοτικά, μέσα σε εύλογα περιθώρια, τις όποιες διαταραχές που προκύπτουν στη μηχανική ισχύ από την ισχύ που εγχύεται στο δίκτυο. Από τις προσομοιώσεις επίσης αναδείχθηκε και η σημασία της ρύθμισης αέργου ισχύος. Κάθε σενάριο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, εξετάστηκε με διαφορετικές συνθήκες ρύθμισης αέργου ισχύος. Φάνηκε ότι η ρύθμιση αέργου ισχύος μπορεί να επιδρά σημαντικά στις τιμές των τάσεων του δικτύου, και συνεπώς η σωστή ρύθμιση της Α/Γ μπορεί να αντισταθμίσει τις μεταβολές των τάσεων που προκαλούνται από την λειτουργία της. Φάνηκε ότι ο έλεγχος ρύθμισης τάσης μπορεί να συμβάλει στην σταθεροποίηση των τάσεων στο δίκτυο σύνδεσης σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα. Η παρούσα εργασία εξέτασε την δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ σε συνθήκες μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο κατά την λειτουργία της Α/Γ είναι δυνατόν να συμβούν σειρά διαταραχών. Η πιο βασική διαταραχή, είναι η εκδήλωση βραχυκυκλώματος σε κάποιο σημείο του δικτύου διανομής. Η εξέταση της απόκρισης της Α/Γ για την περίπτωση αυτή είναι σημαντική προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργία της μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Με αυτή την έννοια και με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε, θα μπορούσαν στο μέλλον να εξεταστούν και άλλες διαταραχές επί του δικτύου διανομής, με κυριότερη αυτή του βραχυκυκλώματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency IEA, *World Energy Balances, 2019*, Paris: OECD Publishing, 2019.
- [2] EWEA, *Wind Energy - The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind*, London, UK: Earthscan, 2009.
- [3] Global Wind Energy Council (GWEC). *Global Wind Report 2018*; Technical Report; Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2018.
- [4] Komusanac, I., Fraile, D., Brindley, G., *Wind energy in Europe in 2018: Trends and statistics*, Wind Report; Windeurope, 2019.
- [5] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [6] Shuckla R. D., “Maximum Power Extraction Schemes & Power Control in Wind Energy Conversion System”, in *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, no.6, pp. 1-6, 2012.
- [7] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, «Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα», Αθήνα: Έκδοση του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2019.
- [8] ΕΛΕΤΑΕΝ, *Η Στατιστική της Αιολικής ενέργειας τον Ιούνιο 2019/ HWEA Wind Statistics, June 2019*, Ελληνική Εταιρία Αιολικής Ενέργειας- ΕΛΕΤΑΕΝ: Αθήνα, 2019.
- [9] Ackerman, T., *Wind Power in Power Systems*, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [10] Deicke, M., Doncker, R. W., and Muller, S., “Doubly Fed Induction Generation Systems”, in *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 8, no.1, pp. 26-33, 2002.
- [11] Warner, E., *Global Wind Report 2015*; Technical Report; Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2015.
- [12] Wilson, R.E., Lissaman, P.B.S., and Walker, S.N., *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*, Report by Oregon State University, 1976.

- [13] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L., *Wind Energy Explained- Theory, Design and Application*, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [14] Χάρτης του Αιολικού δυναμικού της Ελλάδας, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας-ΚΑΠΕ, <http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>
- [15] ΑΔΜΗΕ, *Προκαταρκτικό Σχέδιο: Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς Περιόδου 2012-2030*, ΑΔΜΗΕ: Αθήνα, 2019.
- [16] Πανουργιάς Κ., «Αποκεντρωμένη Διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων για την αποδοτική ενσωμάτωσή τους σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ», Μεταπτυχιακή Εργασία του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
- [17] Vournas, C. D., and Mantzaris, J. C., "Application of QSS Modeling to Stabilizer Design for Interarea Oscillations," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1910-1917, 2010.
- [18] Μάντζαρης Ι., «Απλοποίηση Μοντέλων ΣΗΕ για την Ανάλυση Ταλαντώσεων Ισχύος σε μεγάλες Διασυνδέσεις και Σχεδίαση Σταθεροποιητών», Διδακτορική Διατριβή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1990.
- [19] Nanou, S., Tsourakis G., and Vournas, C.D., "Full-converter wind generator modelling for transient stability studies," in *IEEE Trondheim PowerTech*, Trondheim, pp. 1-7, 2011.
- [20] Νάνου Σ., «Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με πλήρη Μετατροπέα για μελέτες ευστάθειας», Διπλωματική Εργασία του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- [21] Schubel, P. J., Crossley, R. J., "Wind Turbine Blade Design", in *Energies*, vol. 5, no.9, pp. 3425-3449, 2012.
- [22] Mahmoodilari, M., "The effect of turbulent flow on wind turbine loading and performance". Thesis, Mechanical Eng., U-Manchester, Manchester, 2012.

- [23] Van Hulle F., *Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: analysis, issues and recommendations*, Report by EWEA, 2005.
- [24] Ragheb, M., "History of Harnessing Wind Power. In *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*", in Elsevier Inc., p. 127-143, 2017.
- [25] Μάργαρης, Ι., «Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης», Διδακτορική Διατριβή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.