



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

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ
ΜΕΛΕΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Λ. ΚΑΤΣΟΥΛΑΚΟΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



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

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ
ΜΕΛΕΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΚΑΤΣΟΥΛΑΚΟΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Μαρτίου 2013.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παύλος Γεωργιλιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

(Υπογραφή)

.....

Νικόλαος Λ. Κατσουλάκος

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

Copyright © Νικόλαος Λ. Κατσουλάκος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο, υπό την επίβλεψη του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Μουτή για τις πολύτιμες συμβουλές στο πρώτο σκέλος της εργασίας. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Βασίλη Κλεφτάκη, ερευνητή στο εργαστήριο ΣΗΕ, για την πολύτιμη βοήθειά του, όπως επίσης και όλα τα παιδιά στο εργαστήριο. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια και λόγω της όλο και μεγαλύτερης διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.) και κυρίως στα αυτόνομα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, έχει γίνει πιο επιτακτική η ανάγκη της συμμετοχής των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου - συχνότητας.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε αυτό το φαινόμενο και αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα. Το πρώτο μοντέλο, το οποίο ήταν ένα δίκτυο, προσομοιώθηκε στο matlab-simulink και αναπαραστήθηκε ως ισοδύναμο μοντέλο μεταβολών ισχύος - ροπής ενός ζυγού και περιλαμβάνει ένα υδροηλεκτρικό, μια ανεμογεννήτρια και ένα φορτίο. Το δεύτερο μοντέλο, αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Σ.Η.Ε. στο RSCAD και εκτελέστηκε στο RTDS και αναφέρεται σ' ένα μικρό και αυτόνομο δίκτυο μιας σύγχρονης γεννήτριας μαζί με μια ανεμογεννήτρια και ένα φορτίο. Τέλος το τρίτο μοντέλο αναπτύχθηκε και αυτό στο RSCAD και αναφέρεται στο δίκτυο Μέσης Τάσης του μικρού ελληνικού νησιού Αγίου Ευστρατίου (Άη Στράτης).

Ελήφθησαν αποτελέσματα για τέσσερις περιπτώσεις στρατηγικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας: Για την κλασική λειτουργία, όπου η ανεμογεννήτρια δε συμμετέχει καθόλου στη ρύθμιση, για τη συμμετοχή στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου, για την αποφόρτιση της ανεμογεννήτριας μέσω του ελέγχου της γωνίας του βήματος της έλικας καθώς και για το συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων. Για όλα αυτά τα μοντέλα και για όλες αυτές τις περιπτώσεις στρατηγικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια ταχύτητας ανέμου και μεταβολών του φορτίου.

Τέλος, η πραγματική ταχύτητα ανέμου μετρήθηκε και χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας στο RTDS και μελετήθηκε η επίδραση της στη συχνότητα του δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου - συχνότητας, ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών - μεταβλητού βήματος, σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) , στρατηγική ποσοστιαίας αποφόρτισης, έλεγχος γωνίας βήματος, αδρανειακή απόκριση ανεμογεννήτριας, συνδυασμένος έλεγχος, υδροηλεκτρικό, Άη – Στράτης.

ABSTRACT

In recent years, the participation of wind generator in primary load - frequency control of power systems has become imperative, especially in autonomous electric systems, due to the increased integration of the wind energy in the grid.

In this diploma thesis, this phenomenon was studied and three models were developed. The first model which was a network represented by a single bus system and consisting of a hydro station, a wind generator and a load, was simulated in Matlab-Simulink. The second model was a small electric system, consisting of a synchronous generator, a wind generator and a load. This was developed in the lab of power systems with RSCAD and was implemented in Real Time Digital Simulator (RTDS). Finally, the last model, which was also developed in RSCAD and implemented in RTDS, was the medium voltage network of a small Greek island, "Agios Eustratios (Ai Stratis)".

The results concern four different operation strategies for the wind generator. The classic method that does not allow wind generator to contribute to frequency control, the contribution to the inertial response of the system, the pitch control deloading strategy and the combination of the two previous methods. Different scenarios concerning wind speed and load were examined for the above models as well as for all strategies.

Finally, the effect of wind speed on the system frequency was studied, by using real time wind speed.

Key words: primary load – frequency control, variable speed – variable pitch wind turbine, permanent magnet synchronous generator (PMSG), Real Time Digital Simulator (RTDS), deloading strategy, pitch control, inertial response, combined control , hydro station, Ai Stratis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	15
1.1.1 Αιολική ενέργεια.....	17
1.2 Προσομοιωτής RTDS.....	19
1.2.1 Γενική ανάλυση του προσομοιωτή RTDS	19
1.2.2 RTDS υλικό (Hardware).....	20
1.2.3 RTDS λογισμικό (Software)	22
1.3 Τεχνικές Hardware in loop.....	24
1.3.1 Τεχνική Hardware in loop (HIL).....	24
1.3.2 Power Hardware In Loop	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	31
2.1 Ρύθμιση φορτίου- συχνότητας.....	31
2.1.1 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας.....	32
2.1.3 Αυτορρύθμιση φορτίου	35
2.2 Πρότυπα.....	35
2.2.1 Κώδικες δικτύου	35
2.2.2 Ζητήματα εναρμόνισης.....	41
2.3 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί.....	42
2.3.1 Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί	42
2.3.2 Τύποι Υδροστροβίλων.....	43
2.3.3 Ισχύς και ενέργεια υδροηλεκτρικού σταθμού.....	44
2.3.4 Υδροηλεκτρικός σταθμός χωρίς πύργο αναπάλσεως	45
2.3.5 Υδραυλικό πλήγμα.....	50
2.3.6 Ηλεκτρικό ανάλογο υδραυλικού πλήγματος.....	51
2.3.7 Ρυθμιστής στροφών.....	52
2.3.8 Κυματικά φαινόμενα στον αγωγό προσαγωγής.....	53
2.4 Ανεμογεννήτρια	54
2.4.1 Κατηγορίες και μέρη ανεμογεννήτριας.....	56
2.4.2 Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 –ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΗΣ Α/Γ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	76
3.1 Εισαγωγή.....	76
3.2 Ποσοστιαία αποφόρτιση Α/Γ.....	77
3.2.1 Αποφόρτιση Α/Γ μέσω της γωνίας βήματος (pitch deloading)	77

3.3 Αδρανειακή συμμετοχή	81
3.4 Σχετικές εργασίες.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ SIMULINK	86
4.1 Αποτελέσματα υποσυχνότητας	86
4.1.1 Παρατηρήσεις-σχόλια.....	118
4.2 Υπερσυχνότητα	120
4.2.1 Αποτελέσματα	120
4.2.2 Παρατηρήσεις- σχόλια.....	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 –ΜΙΚΡΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΔΙΚΤΥΟ	126
5.1 Αποτελέσματα	130
5.2 Παρατηρήσεις- σχόλια.....	152
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΑΗ ΣΤΡΑΤΗ.....	154
6.1. Εισαγωγή.....	154
6.2 Αποτελέσματα	159
6.3 Παρατηρήσεις – σχόλια	174
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟΥ.....	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	182

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

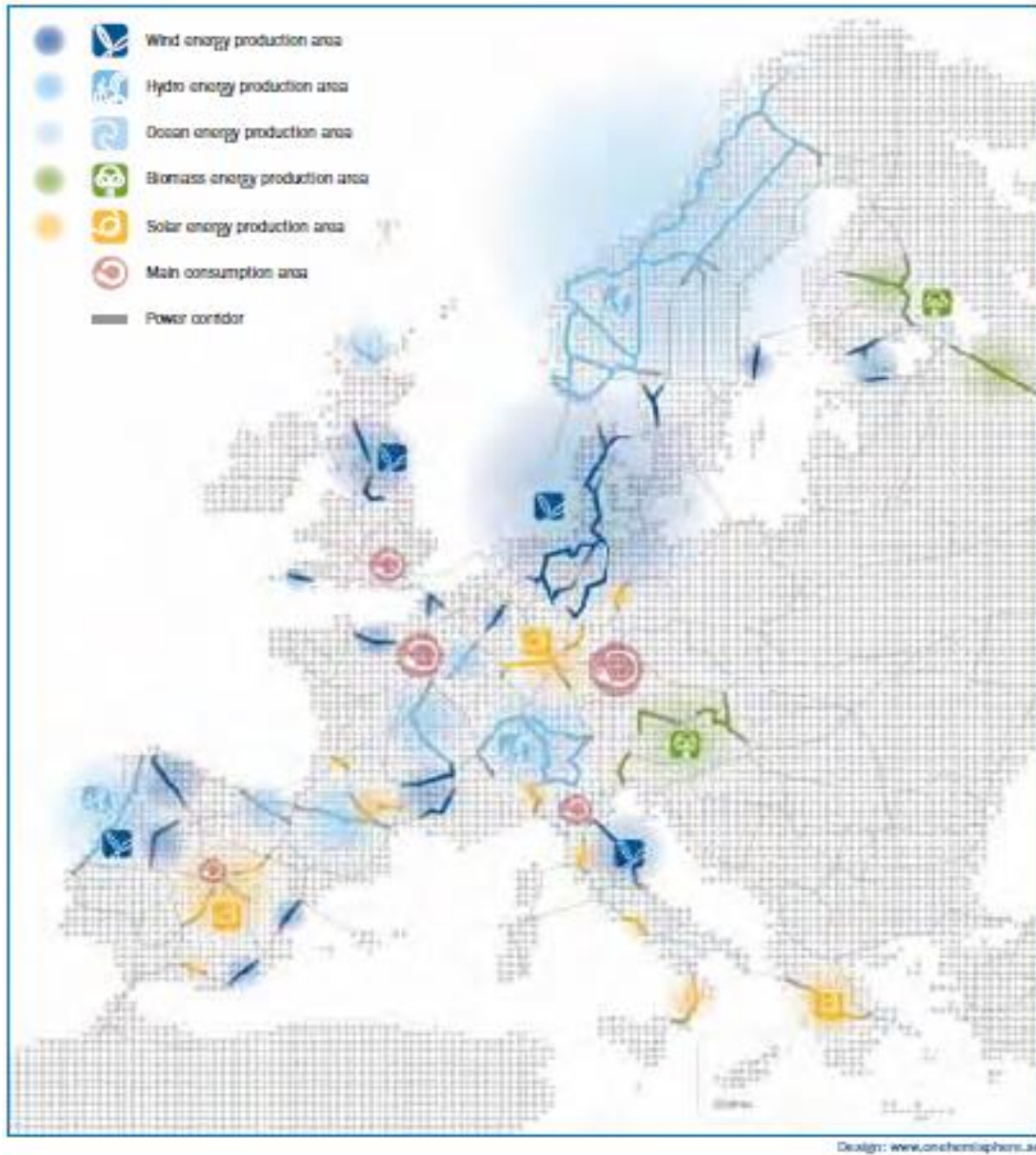
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στη φύση. Παρ' όλη την ιδιαίτερη εκμετάλλευση των τις τελευταίες δεκαετίες, υπήρξαν οι πρώτες πηγές ενέργειας που εκμεταλλεύτηκε ο άνθρωπος. Η στροφή των ανθρώπων στην αξιοποίηση αυτών των πηγών ενέργειας, δρομολογήθηκε εξαιτίας πολλών παραμέτρων. Για παράδειγμα η πετρελαϊκή κρίση του 1979 έδωσε ένα έναυσμα για την ανάπτυξη και αξιοποίηση αυτών. Λόγω του έντονου περιβαλλοντικού προβληματισμού έγιναν ενέργειες και λήφθηκαν πρωτοβουλίες, με σταθμό στην πορεία όλων αυτών το πρωτόκολλο του Κιότο. Το πρωτόκολλο αυτό συνυπογράφει από 55 χώρες, οι οποίες δεσμεύτηκαν με βραχυπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους στόχους. Οι στόχοι αυτοί έχουν να κάνουν με τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και τη μεγαλύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ στη μερίδα της καταναλισκόμενης ενέργειας ανά τον κόσμο. Ανάμεσα σε άλλα οι δεσμεύσεις της Ελλάδας είναι οι εξής:

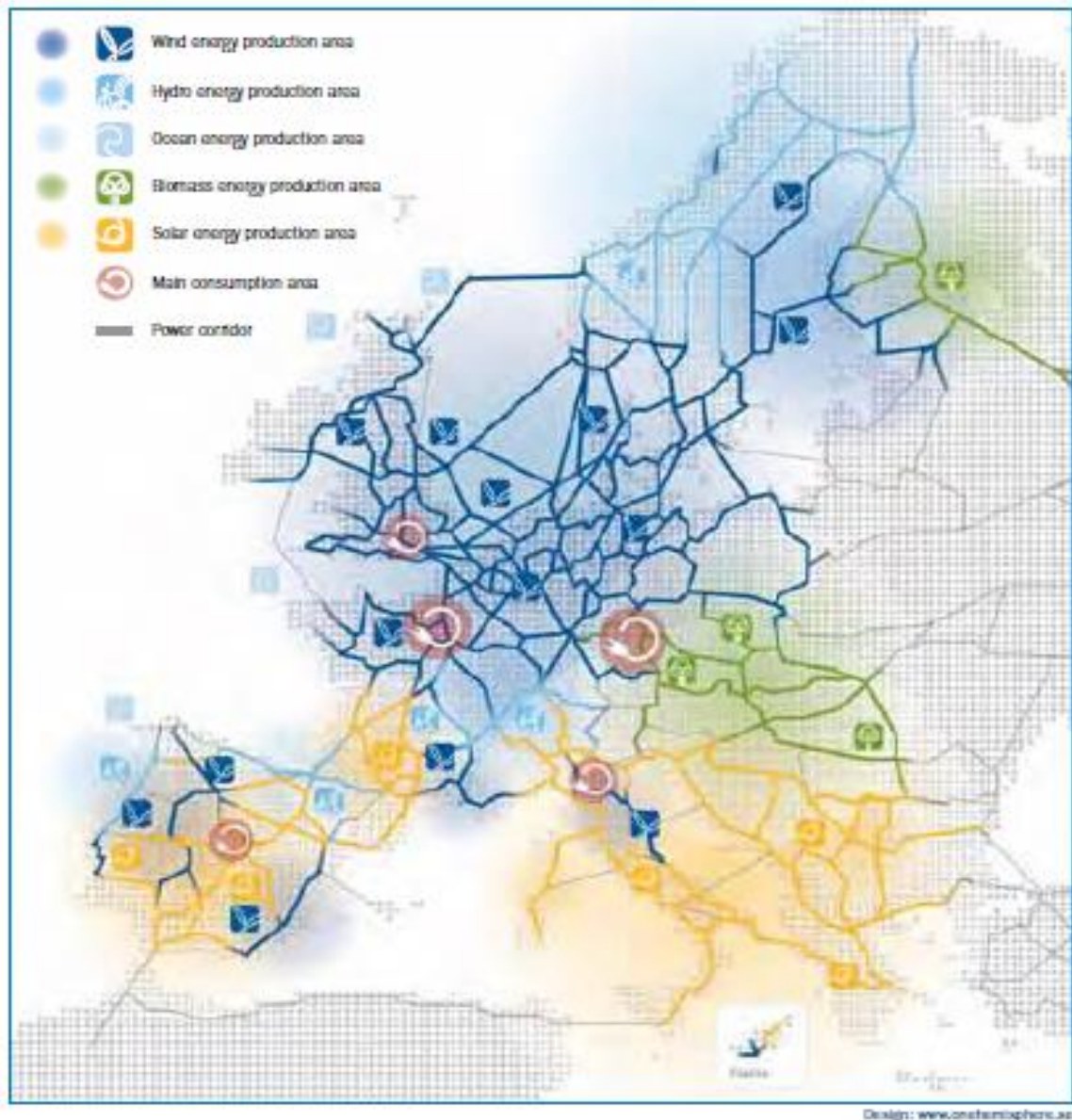
- Μείωση των εκπομπών, μέσα από το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, κατά 21% έως το 2020 σε σχέση με τα επίπεδα του 2005.
- Μείωση εκπομπών 4% στους τομείς εκτός εμπορίας ρύπων.
- Συμμετοχή ΑΠΕ κατά 18% στην τελική κατανάλωση ενέργειας.
- Πλήρης δημοπράτηση εκπομπών αερίου θερμοκηπίου από την ηλεκτροπαραγωγή. [1].

Λόγω της γήρανσης πολλών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο και της μεγαλύτερης ζήτησης, απαιτούνται περισσότερες επενδύσεις σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Στα επόμενα 12 χρόνια 360 GW νέας παραγωγικής ικανότητας σε ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται να δημιουργηθούν, προς αντικατάσταση των γηρασμένων σταθμών παραγωγής, αλλά και για την κάλυψη της ζήτησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χάρτες. Και οι δύο χάρτες αφορούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορες μορφές ενέργειας σ' όλη την επικράτεια της Ευρώπης. Ο πρώτος αφορά στο 2010 και ο δεύτερο στις προβλέψεις για το 2050. Στους δύο χάρτες φαίνονται οι κύριες περιοχές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάθε μορφής, οι κύριες περιοχές κατανάλωσης, καθώς και οι κύριοι διάδρομοι, δηλαδή οι κυριότερες γραμμές μεταφοράς, που διασυνδέουν όλο το ευρωπαϊκό σύστημα.



Σχήμα 1.1 Ευρωπαϊκός χάρτης για ηλεκτρική ενέργεια το 2010.



Σχήμα 1.2 Ευρωπαϊκός χάρτης για ηλεκτρική ενέργεια το 2050.

1.1.1 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι από τις πλέον γνωστές και από τις παλαιότερες χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας. Ο άνεμος, όμως είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής Α/Γ δεν είναι εύκολη δουλειά. Η πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια, γνωστή ως Smith -Putman σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε στις ΗΠΑ. Η σχεδίαση της άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1930 και

οι δοκιμές της έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του 1940. Η ισχύς της ήταν 1250 KW και είχε δύο πτερύγια από χάλυβα με διάμετρο περιστροφής 53 μέτρα, τοποθετημένα σε έναν πύργο ύψους 33,5 μέτρων.

Όπως όμως σημειώθηκε και παραπάνω, το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες. Τριάντα χρόνια τεχνολογικής ανάπτυξης των Α/Γ λοιπόν έχουν οδηγήσει σε αποτελεσματικότερες κατασκευές. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια παράγει ετησίως 200 φορές περισσότερη ηλεκτρική ισχύ και με λιγότερο κατά το ήμισυ κόστος ανά KWh σε σχέση με πριν 25 χρόνια. Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στον τομέα της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή, αφού στις μέρες μας η αιολική ενέργεια αποτελεί κάτι περισσότερο από το 5% της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. Λόγω του ότι αυτή η μορφή ενέργειας είναι η φθηνότερη σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ αναμένεται ότι το 2020 θα αποτελεί το 34% της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρώπη.

Μετριοπαθές σενάριο της EWEA προβλέπει ότι η παραγωγή αιολικής ενέργειας θα αυξηθεί από 123 MWh το 2009 σε 580 MWh 2020 και η αιολική ενέργεια σε σχέση με τη συνολική ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια θα αποτελεί το 14,2% το 2020 από το 4,2% το 2009.

Τον Οκτώβριο του 2009 η Ευρωπαϊκή επιτροπή δημοσιοποίησε ένα πλάνο σύμφωνα με το οποίο η αιολική ενέργεια από το 2020 θα αποτελεί το 20% της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη και το 33% από το 2030, καθώς και το 50% από το 2050.



Source: EWEA

Σχήμα 1.3 Αναμενόμενη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στην συνολική ηλεκτρική ενέργεια στην Ευρώπη.

Η περαιτέρω διεύδυση όμως της αιολικής ενέργειας θέτει κάποιες προκλήσεις και κάποια ζητήματα που πρέπει να ξεπεραστούν. Στα μέσα του 2010 80GW αιολικής ισχύος είχαν εγκατασταθεί στην Ευρώπη και περιοχές υψηλής, μέτριας και χαμηλής διεύδυσης μπορούν να μελετηθούν, με στόχο την ανάδειξη των προβλημάτων και των προκλήσεων που τίθενται. Με στόχο την επιτυχή διασύνδεση των αιολικών πάρκων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την επιτυχή ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο σύστημα, ένας αριθμός θεμάτων θα πρέπει να διευθετηθούν στους ακόλουθους τομείς:

- Στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος (διαθεσιμότητα αποθεμάτων, βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη αιολικής ενέργειας, διαχείριση της ζήτησης, αποθήκευση, συμβολή της αιολικής ενέργειας στην επάρκεια του δικτύου).
- Σύνδεση στο δίκτυο σταθμών παραγωγής αιολικής ενέργειας, θέμα που αφορά ζητήματα ποιότητας ισχύος.
- Θέματα υποδομής δικτύου (διαχείριση συμφόρησης, επεκτάσεις και ενισχύσεις του υπάρχοντος δικτύου, ειδικά θέματα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων-offshore parks-, έξυπνα δίκτυα).
- Θέματα σχεδιασμού της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης της αιολικής παραγωγής. [2]

1.2 Προσομοιωτής RTDS

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (real time digital simulator) ξεκίνησε να αναπτύσσεται στα τέλη της δεκαετίας του 80 στο ερευνητικό κέντρο του Manitoba HVDC στον Καναδά. Το 1994 η ευθύνη για τον προσομοιωτή RTDS μεταβιβάστηκε στο RTDS Technologies όπου έχει υποστεί από τότε πολλές εξελίξεις υλικού και λογισμικού. Ο προσομοιωτής πια χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας, από κατασκευαστές εξοπλισμού και ερευνητικές οργανώσεις.



Σχήμα 1.4 Φωτογραφία RTDS.

1.2.1 Γενική ανάλυση του προσομοιωτή RTDS

Ο προσομοιωτής

Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) είναι μια συσκευή που έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων μοντέλων, ακόμα και ολόκληρου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο προσομοιωτής χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή δοκιμών κλειστού βρόγχου, σε πραγματικό χρόνο, διαφόρων συσκευών, όπως συσκευών προστασίας και συσκευών αυτόματου ελέγχου. Είναι λοιπόν ένα χρήσιμο μηχάνημα, το

οποίο χρησιμοποιείται σε τομείς της βιομηχανίας, όπως στη δοκιμή και στον έλεγχο των ηλεκτρικών συσκευών, για παράδειγμα ηλεκτρονόμους, αλλά και σε τομείς εκπαίδευσης νέων μηχανικών στα πλαίσια πανεπιστημιακών διδακτικών εφαρμογών. Μέσω του προσομοιωτή ο χρήστης μπορεί να διερευνήσει τις επιπτώσεις διαταραχών στον εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων ή και καταστροφών.

Ο προσομοιωτής είναι ένας συνδυασμός εξελιγμένου υπολογιστικού υλικού και εξειζητημένου λογισμικού. Μέσω ενός υπολογιστή και χρησιμοποιώντας το απαραίτητο πρόγραμμα για την επικοινωνία του RTDS με το χρήστη, μπορούμε να προσομοιώσουμε διάφορα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να εξάγουμε τα κατάλληλα αποτελέσματα. Ο προσομοιωτής είναι πλήρως επεκτάσιμος, δίνοντας τη δυνατότητα έτσι να δουλέψουμε ακόμα και με τα πιο πολύπλοκα και ακριβή μοντέλα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός που καθιστά το RTDS ξεχωριστό από τους άλλους ψηφιακούς προσομοιωτές είναι ότι επιλύει τα προβλήματα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι εφικτό, επειδή ο προσομοιωτής μπορεί να επιλύσει τις εξισώσεις του συστήματος αρκετά γρήγορα, ώστε η έξοδος του να αντιπροσωπεύει συνεχώς και ρεαλιστικά τις συνθήκες στο πραγματικό δίκτυο.

Στις μέρες μας ο προσομοιωτής χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, όπως για παράδειγμα στην ανάπτυξη, δοκιμή και μελέτη μεθόδων προστασίας με ηλεκτρονόμους, ενσωματωμένης προστασίας και συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Επίσης, χρησιμοποιείται για συστήματα ελέγχου για HVDC, SVC, σύγχρονες μηχανές και συσκευές FACTS, για γενικές λειτουργίες συστημάτων AC και DC και για την αλληλεπίδραση διάφορων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Επίσης ο εξομοιωτής έχει πολύτιμη συνεισφορά στην εκπαίδευση και στις επιδείξεις.

1.2.2 RTDS υλικό (Hardware)

Ένας ψηφιακός προσομοιωτής διαφέρει από έναν αναλογικό, καθώς ο υπολογισμός της κατάστασης του μοντέλου που αναπαριστά το Σ.Η.Ε. γίνεται σε διακριτές χρονικά στιγμές. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών διακριτών στιγμών καλείται βήμα της προσομοίωσης (Δt). Οι συνηθισμένες μελέτες μεταβατικών φαινομένων, για τις οποίες χρησιμοποιείται το RTDS, απαιτούν ένα χρονικό βήμα Δt της τάξης των 50 έως 100μsec. Ο προσομοιωτής εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιώντας πολλαπλούς επεξεργαστές που βρίσκονται σε ανεξάρτητες μονάδες που ονομάζονται racks. Κάθε rack αποτελείται από διάφορες κάρτες. Ένα backbone συνδέει όλες τις κάρτες ενός rack και διεκπεραιώνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους.

Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές διαφορετικές κάρτες. Κάποιες από αυτές είναι και οι παρακάτω: GPC(Giga Processor Card), 3PC (Triple Processor Card), IRC (Workstation Inter Rack Communications Card), WIF (Workstation InterFace Card), TPC (Tandem Processor Card).



Σχήμα 1.5 GPC κάρτα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούμε εκτενέστερα στους 3 βασικούς τύπους καρτών:

- Tandem Processor Cards (TPC): πρόκειται για τις κύριες κάρτες επεξεργασίας. Κάθε TPC κάρτα φέρει δύο ανεξάρτητους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος NEC77240. Ο συνολικός αριθμός καρτών επεξεργασίας που βρίσκονται σε κάθε βάση είναι δεκαοκτώ(18). Κάθε κάρτα TPC περιλαμβάνει τις ακόλουθες θύρες εισόδου/εξόδου:
 - 1) 8 αναλογικά κανάλια εξόδου (12 bit +/- 10 volt εύρος)
 - 2) 4 ψηφιακούς επιλογείς (16 θέσεις)
 - 3) 2 αναλογικές θύρες εισόδου (12 bit +/- 5 volt εύρος)
 - 4) 2 ψηφιακές θύρες εισόδου (16 bit η καθεμία)
 - 5) 2 ψηφιακές θύρες εξόδου (16 bit η καθεμία). Οι θύρες εισόδου/εξόδου διαμοιράζονται μεταξύ των δύο επεξεργαστών (A & B) που υπάρχουν στην κάρτα TPC.
- Workstation Interface Card (WIC): Πρόκειται για την κάρτα επικοινωνίας μεταξύ της γραφικής διεπιφάνειας (graphical interface) του λογισμικού που είναι εγκατεστημένο σε ένα σταθμό εργασίας (PC) και τη βάση (rack) του RTDS. Η κάρτα WIC διαθέτει έναν ελεγκτή Ethernet που είναι σε θέση να διαβιβάζει πακέτα δεδομένων μεταξύ του σταθμού εργασίας και του RTDS. Έτσι η κάρτα WIC παρέχει

τη δυνατότητα στο χρήστη να φορτώνει, να ξεκινά, να σταματά και να ελέγχει τις εξομοιώσεις στο RTDS.

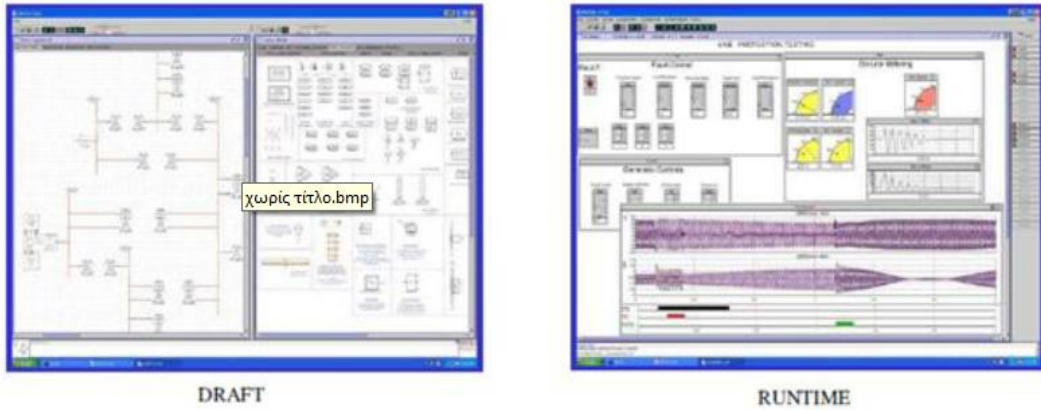
- Inter-Rack Communication Card (IRC): πρόκειται για την κάρτα που ανταλλάσσει δεδομένα μεταξύ επεξεργαστών που βρίσκονται σε διαφορετικές βάσεις (racks). Κάθε κάρτα IRC περιλαμβάνει έναν αριθμό από κανάλια εκπομπού/δέκτη (transmitter/receiver) επιτρέποντας έτσι την απευθείας επικοινωνία μεταξύ πολλών βάσεων (racks).

Επειδή μια από τις βασικές χρήσεις του RTDS είναι ο έλεγχος φυσικού εξοπλισμού, τα ψηφιακά σήματα πραγματικού χρόνου που παράγονται μετατρέπονται σε αναλογικά χρησιμοποιώντας μια 16 bit D/A κάρτα.

1.2.3 RTDS λογισμικό (Software)

Το λογισμικό του RTDS αποτελείται από δύο διακριτά επίπεδα: τη γραφική διεπιφάνεια χρήστη (Graphical User Interface-GUI) και το μεταγλωττιστή (compiler).

Η γραφική διεπιφάνεια χρήστη είναι αρμόδια για τη σωστή επικοινωνία του RTDS με το χρήστη. Το εργαλείο και το μέσο της επικοινωνίας είναι το RSCAD, ένα γραφικό περιβάλλον υψηλού επιπέδου. Το πρόγραμμα RSCAD αποτελείται από πολλά τμήματα. Τα δύο πιο κύρια για έναν χρήστη του, είναι το draft και το run time. Στο στάδιο Draft γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Με τη βοήθεια των βιβλιοθηκών του προγράμματος μπορούμε να προσομοιώσουμε μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών και καταστάσεων λειτουργίας. Στο στάδιο Run time γίνεται η προσομοίωση του δικτύου που έχει δημιουργηθεί στο Draft και λαμβάνονται τα αποτελέσματά της. Σ' αυτό το στάδιο μπορούμε να επέμβουμε δυναμικά στην εξομοίωση, όπως για παράδειγμα κάνοντας χειρισμούς ελέγχου των διακοπών, αυξομειώνοντας άλλες παραμέτρους της εξομοίωσης. Επίσης στο περιβάλλον Run Time ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τα μετρούμενα μεγέθη που έχει ορίσει, χρησιμοποιώντας γραφικά εικονίδια μετρητών, γραφήματα με κυματομορφές από μεγέθη της εξομοίωσης.

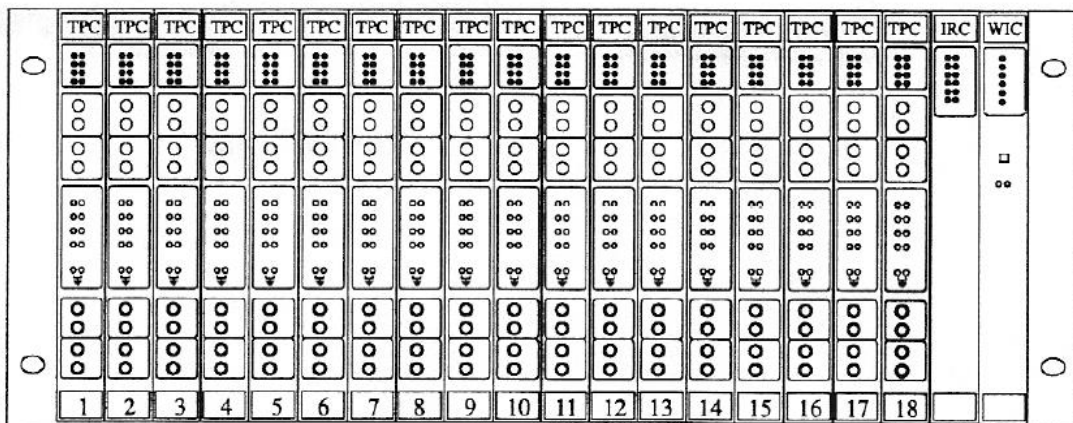


Σχήμα 1.6 RSCAD Draft και Runtime οθόνες

Ο μεταγλωττιστής (compiler) του RTDS δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα του ηλεκτρικού δικτύου που εισάγει ο χρήστης. Ως έξοδο, ο μεταγλωττιστής παράγει τον εκτελέσιμο κώδικα παράλληλης επεξεργασίας που είναι απαιτητό για τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Ο μεταγλωττιστής δημιουργεί ταυτόχρονα ένα αρχείο κειμένου (.MAP file) που δείχνει τι έχει κατοχυρωθεί σε κάθε επεξεργαστή, ώστε ο χρήστης να μπορεί να έχει πρόσβαση στις εξόδους του.

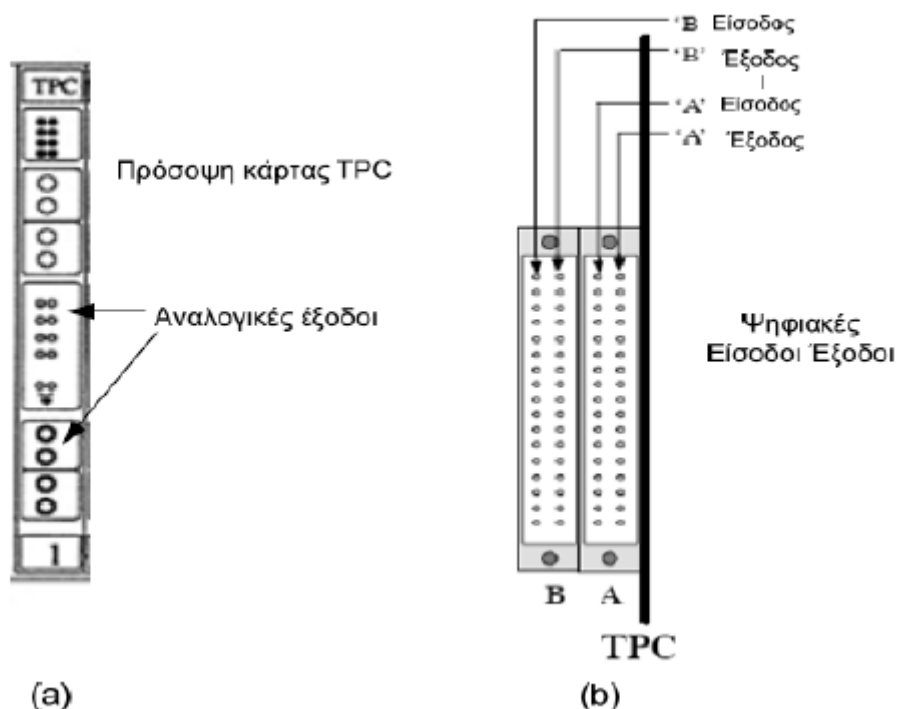
Ο προσομοιωτής RTDS στο εργαστήριο Σ.Η.Ε.

Η μονάδα προσομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αποτελείται από ένα rack με 18 κάρτες επεξεργασίας TPC (Tandem Processor Cards) και μια κάρτα WIC (Workstation Interface Card).



Σχήμα 1.7 Τυπικό rack του εξομοιωτή.

Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο επεξεργαστές καθώς και αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους. Οι αναλογικές εξόδοι βρίσκονται στην πρόσοψη του προσομοιωτή και μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικό υλικό είτε με ακροδέκτες τύπου «μπανάνα», είτε με ομοαξονικά καλώδια. Κάθε επεξεργαστής διαθέτει 4 τέτοιες εξόδους, οι οποίες φαίνονται στην παραπάνω εικόνα. Οι ψηφιακές εισοδοί-εξοδοί βρίσκονται στην πίσω όψη του προσομοιωτή. Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο ψηφιακές υποδοχές σύνδεσης, μία για κάθε επεξεργαστή, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα(b). Οι υποδοχές είναι θυρίδες των 34 ακροδεκτών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικές συσκευές με τη χρήση καλωδίου κορδέλας. Κάθε υποδοχή αποτελείται από 2 στήλες 17 ακροδεκτών, μια για τις εισόδους και μια για τις εξόδους του κάθε επεξεργαστή. Η κάθε στήλη μπορεί να φέρει μέχρι 16 ψηφιακά σήματα με τον 17^ο ακροδέκτη, ο οποίος βρίσκεται στη βάση της υποδοχής, να είναι ο ακροδέκτης αναφοράς(γης).



Σχήμα 1.8 Είσοδοι και Έξοδοι.

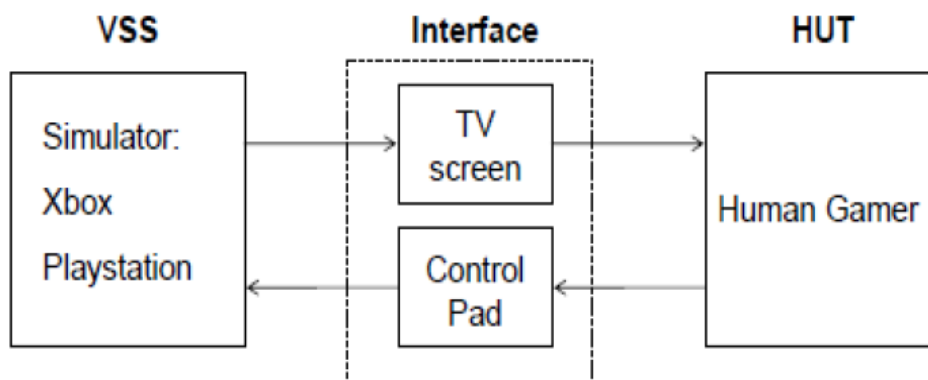
1.3 Τεχνικές Hardware in loop

1.3.1 Τεχνική Hardware in loop (HIL)

Η Hardware in loop προσομοίωση είναι μια τεχνική στην οποία ένα κομμάτι εξοπλισμού έχει ενσωματωθεί στην προσομοίωση ενός μεγάλου συστήματος. Αυτό μας προσφέρει

πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία και δεν τα έχουμε σε περιπτώσεις άλλων αναλύσεων και μεθόδων. Επιτρέπει να διερευνήσουμε μια συσκευή κατ' επανάληψη και ενδελεχώς σε πραγματικές συνθήκες δοκιμής, ακόμη και πολύ πριν την κατασκευή του πραγματικού συστήματος. Αυτό ελαχιστοποιεί το κόστος και τον κίνδυνο, με στόχο να εξεταστούν διάφορες ακραίες συνθήκες και παράλληλα μεγιστοποιεί την πιθανότητα να εντοπιστούν κρυφά ελαττώματα της συσκευής πριν προκαλέσει την οποιαδήποτε βλάβη. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα να αποκαλύψει την πλήρη έκταση των αλληλεπιδράσεων του συστήματος, οι οποίες πρέπει να αναμένονται στο τελικό σχέδιο. Παραδείγματα προσομοίωσης HIL περιλαμβάνουν τη δοκιμή του συστήματος ανάρτησης ενός πρωτότυπου αυτοκινήτου σε προσομοιωμένες συνθήκες ανώμαλου.

Ένα σύστημα HIL αποτελείται από τρία απαραίτητα μέρη: ένα κομμάτι υλικού υπό δοκιμή (Hardware Under Test-HUT), ένα προσομοιωμένο σύστημα (Virtually Simulated System-VSS), καθώς και μια συσκευή (interface) που συνδέει το HUT με το VSS. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα του HIL. Στην περίπτωση αυτή ο προσομοιωτής, για παράδειγμα ένα XBOX360 μιμείται μια εικονική πολεμική σκηνή που αλλάζει συνεχώς ανάλογα με την αντίδραση του υλικού, δηλαδή του ανθρώπινου χρήστη. Όταν ο χρήστης λάβει την εικόνα μέσω της οθόνης της τηλεόρασης, λαμβάνει αποφάσεις πραγματικού χρόνου και στέλνει εντολές πίσω στον προσομοιωτή μέσω του χειριστήριου. Η οθόνη, τα μάτια του ανθρώπου, και το χειριστήριο περιλαμβάνονται στο περιβάλλον HIL.



Σχήμα 1.9 Τα τρία στοιχεία μιας προσομοίωσης HIL.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωμένα μερικοί από τους λόγους που μπορεί να επιβάλουν τη χρήση της τεχνικής HIL.

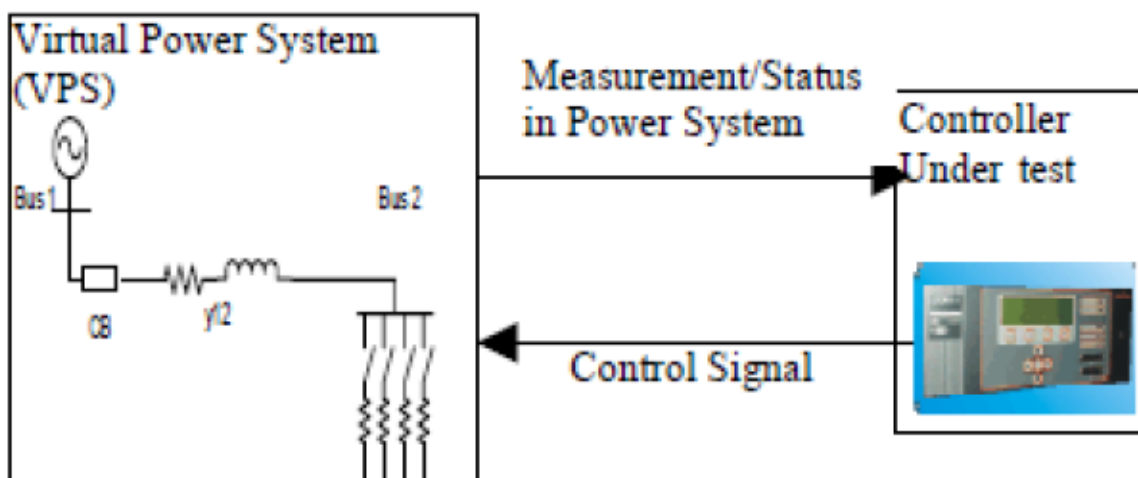
- Το σύστημα είναι δυσπρόσιτο. Για παράδειγμα, ένας δορυφόρος που έχει σχεδιαστεί, για να λειτουργεί στο περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας του διαστήματος, δεν μπορεί να δοκιμαστεί κάτω από τις συνθήκες που επικρατούν στη Γη. Ο μόνος τρόπος είναι να μοντελοποιηθεί η δυναμική του δορυφόρου και να ασκηθεί ο έλεγχος με κατάλληλο hardware.
- Η δοκιμή ενδέχεται να βλάψει το σύστημα.
- Η δοκιμή με το φυσικό σύστημα μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.

- Άλλοι οικονομικοί λόγοι.

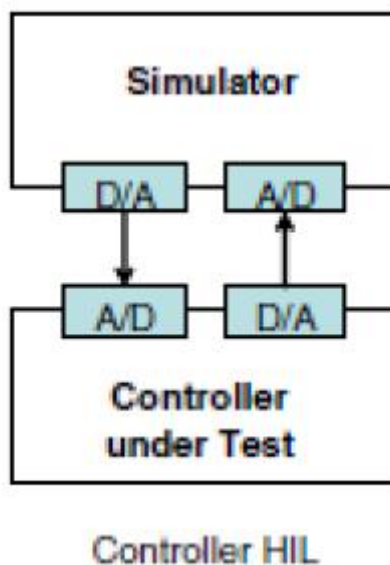
Διακρίνουμε δύο κατηγορίες της τεχνικής hardware-in-loop. Την τεχνική Control Hardware In Loop και την Power Hardware In Loop. Οι δύο αυτές τεχνικές αναπτύσσονται παρακάτω.

Control Hardware In Loop

Σε περιπτώσεις που δεν έχουμε μεταφορά ενέργειας από ή προς το υλικό υπό δοκιμή, τότε η δοκιμή είναι μια Control Hardware In Loop προσομοίωση. Σε μια τέτοια περίπτωση, όλες οι συσκευές ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απεικονισμένες σε μια προσομοίωση ως Virtual Power System(VPS) και το εξωτερικό υλικό δίνει σήματα ελέγχου στον υπολογιστή. Έτσι, το πλήρες σύστημα προσομοίωσης και η συσκευή είναι συνδεδεμένα σε χαμηλό επίπεδο τάσης της τάξης των $\pm 10\text{Volt}$ και γίνεται ανταλλαγή ψηφιακών/αναλογικών σημάτων. Με αυτό τον τρόπο, ο ελεγκτής θα μπορούσε να δοκιμαστεί με τη λήψη σήματος εξόδου από την προσομοίωση και τη χρησιμοποίηση του ως είσοδο σε μια συσκευή υπό δοκιμή. Έπειτα η έξοδος της συσκευής υπό δοκιμή ανατροφοδοτεί την προσομοίωση, με αποτέλεσμα την αλληλεπίδρασή της με το προσομοιωμένο σύστημα. Η δομή αυτού του τύπου δοκιμής φαίνεται στην εικόνα, ενώ στην επόμενη εικόνα βλέπουμε τη γενική τοπολογία του CHIL.



Σχήμα 1.10 Δομή μιας CHIL προσομοίωσης.



Σχήμα 1.11 Γενική τοπολογία μιας CHIL προσομοίωσης.

Μέσω αυτού του τύπου ελέγχου δίνεται η δυνατότητα βασικής αξιολόγησης της απόδοσης μιας συσκευής πριν αυτή πραγματικά συνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εξοπλισμός προστασίας, έλεγχος κινητήρα και PWM ελεγκτές είναι κατάλληλοι για μια δοκιμή CHIL. Τέλος, η χρήση της τεχνικής CHIL επιτρέπει πολλαπλά σενάρια δοκιμής, χωρίς να γίνει μεγάλη επένδυση.

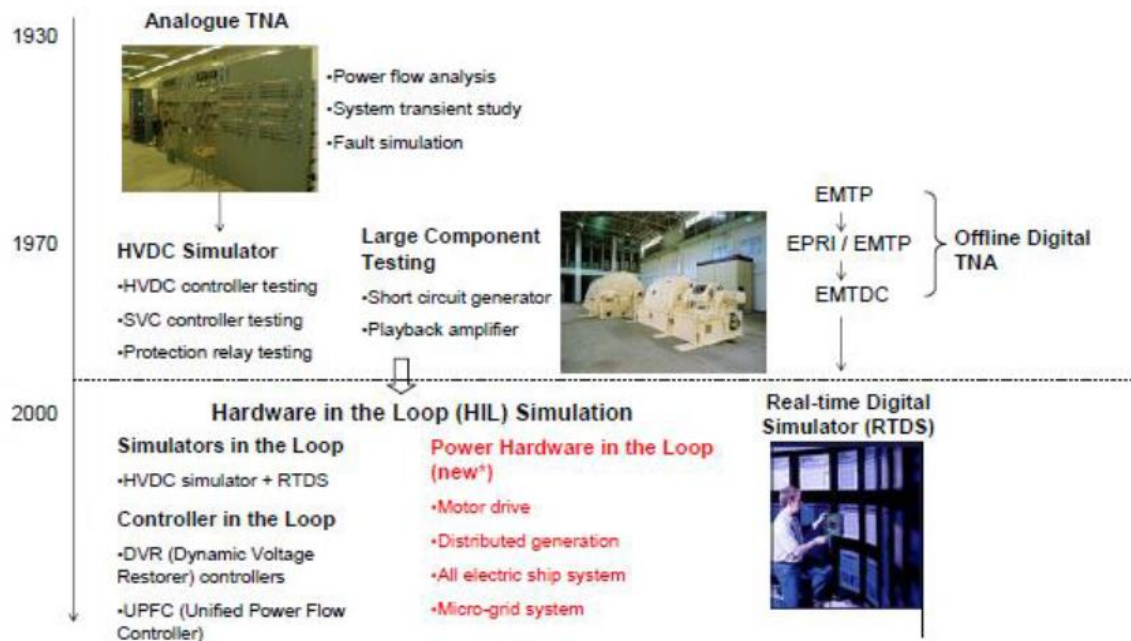
1.3.2 Power Hardware In Loop

Εισαγωγή

Η Power Hardware In Loop είναι η δεύτερη τεχνική HIL. Αναφέρεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το δοκίμιο (Hardware Under Test – HUT) είναι μια συσκευή ισχύος, για παράδειγμα ένας κινητήρας ή ένας αντιστροφέας ισχύος. Απαραίτητη είναι σ' αυτήν την περίπτωση η χρήση μιας συσκευής (interface) για τη διακίνηση της ισχύος ανάμεσα στο δοκίμιο και την προσομοίωση.

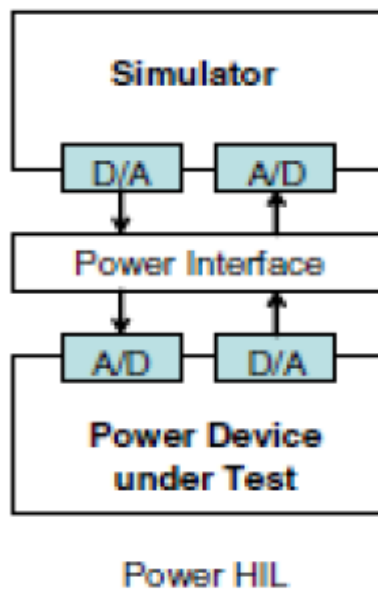
Ανάλυση PHIL

Η πρώτη προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στη δεκαετία του '30. Από τότε έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αλλαγές, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.12 Η ιστορική εξέλιξη της PHIL προσομοίωσης.

Η PHIL τεχνική εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που υπάρχει μεταφορά ισχύος από ή προς το υπό εξέταση υλικό. Με αυτό τον τρόπο, μέρος του συστήματος ισχύος προσομοιώνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέρος του συστήματος βρίσκεται συνδεδεμένο εξωτερικά. Η τοπολογία αυτή είναι ικανή για μεταφορά ισχύος μεταξύ του εικονικού συστήματος και του δοκιμαζόμενου υλικού. Οι PHIL τεχνικές είναι διαφορετικές από ότι οι CHIL τεχνικές, οι οποίες περιορίζονται σε εφαρμογές ελέγχου. Μια γενική τοπολογία για την τεχνική PHIL παρουσιάζεται ακολούθως.



Σχήμα 1.13 Γενική τοπολογία της PHIL τεχνικής.

Είναι φανερό ότι χρησιμοποιείται μια ενδιάμεση συσκευή (interface) για τη διασύνδεση της προσομοίωσης με το υπό εξέταση δοκίμιο (HUT). Αυτή η ενδιάμεση συσκευή θα πρέπει είτε να παράγει είτε να απορροφά ισχύ, ώστε να μπορεί να ανταλλαχτεί πραγματική ισχύ μεταξύ της προσομοίωσης και της υπό εξέταση συσκευής. Η ύπαρξη επομένως αυτού του interface επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του. Η επιλογή λοιπόν θα πρέπει να γίνει με προσοχή, μελετώντας πάντα το είδος των φαινομένων που θα εξεταστούν, αν πρόκειται εν ολίγοις για μεταβατικά φαινόμενα ή φαινόμενα μόνιμης κατάστασης.

Στην ιδανική περίπτωση το Interface μεταξύ του HUT και του προσομοιωμένου δικτύου θα πρέπει να έχει μοναδιαίο κέρδος, άπειρο bandwidth και να μην προσθέτει χρονική καθυστέρηση στην προσομοίωση, ούτως ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη αναπαράσταση του ιδανικού δικτύου. Στην πραγματικότητα όμως, αυτό δε μπορεί να πραγματοποιηθεί, με αποτέλεσμα όλες οι PHIL προσομοιώσεις να περιέχουν σφάλματα, τα οποία προέρχονται από τις επιδράσεις του interface. Η μη ιδανικότητα του interface μπορεί να προκαλέσει επομένως εσφαλμένα αποτελέσματα ή και ακόμα αστάθεια στην προσομοίωση της ιδανικής τοπολογίας. Επομένως υπεισέρχονται ζητήματα ευστάθειας και ακρίβειας μιας προσομοίωσης PHIL. [3]

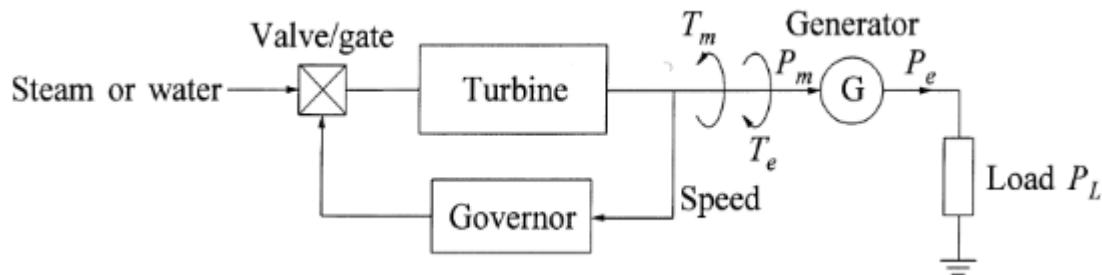
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Ρύθμιση φορτίου- συχνότητας

Η διατήρηση μίας σταθερής συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα είναι καθοριστικής σημασίας για την ομαλή και ευσταθή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οποιαδήποτε διαταραχή ισχύος είτε στην παραγωγή είτε στην κατανάλωση έχει άμεση επίδραση στη συχνότητα του δικτύου. Η ρύθμιση συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί την κανονική της τιμή. Η συχνότητα βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με την ενεργό ισχύ που διακινείται στο σύστημα και για αυτό το λόγο η ρύθμισή της καθιστά την εξίσωση της παραγόμενης ισχύος με τη ζητούμενη θεμελιώδες ζήτημα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η ευστάθεια και η ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων απαιτούν διατάξεις οι οποίες να ρυθμίζουν τη συχνότητα, ώστε να διατηρείται σε επιθυμητές τιμές. Βασικός λόγος, για τον οποίο επιβάλλεται η λειτουργία των δικτύων με σταθερή συχνότητα είναι η διασφάλιση της ευστάθειας και της σταθερότητας της ταχύτητας περιστροφής των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών των δικτύων. Χωρίς ρύθμιση, οι γεννήτριες δεν θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν μια αύξηση του φορτίου, καθώς το άνοιγμα των βαλβίδων των στροβίλων θα παρέμενε σταθερό και θα επέτρεπε μια ορισμένη μόνο τιμή της μηχανικής ισχύος, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση των μηχανών. Επίσης η μείωση της συχνότητας μπορεί να επιφέρει μεγάλη αύξηση των ρευμάτων μαγνήτισης των ασύγχρονων μηχανών και των μετασχηματιστών. Ένα θέμα άξιο αναφοράς είναι ότι η χρήση της συχνότητας του δικτύου για λόγους μέτρησης χρόνου και η εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών ρολογιών δεν επιτρέπουν μεγάλες αποκλίσεις της συχνότητας από την ονομαστική τιμή της. Επιπρόσθετα, η λειτουργία συστημάτων με μικρότερες τιμές συχνότητας έχει να κάνει με αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις από τις δονήσεις των πτερυγίων των θερμικών σταθμών παραγωγής και υπολειτουργία των αντλιών τροφοδότησης στους λέβητες και των ανεμιστήρων που παρέχουν αέρα απαραίτητο για την ανάφλεξη του καυσίμου. Σε περίπτωση πυρηνικού σταθμού παραγωγής, τα προβλήματα υποσυχνότητας μπορεί να αντανakλώνται σε υπερθέρμανση των αντιδραστήρων λόγω χαμηλής ροής των ψυκτικών υγρών. Τέλος, η λειτουργία με συχνότητα μικρότερης της ονομαστικής δύναται να επηρεάσει την απόδοση των βοηθητικών συστημάτων των ασύγχρονων γεννητριών και προφανώς, τέτοια προβλήματα είναι ικανά να οδηγήσουν σε αποκοπή των μονάδων παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, η λειτουργία με συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, που μπορεί να οφείλεται είτε σε περίσσεια παραγόμενης ισχύος είτε σε απώλεια φορτίου προκαλεί επίσης αρκετά προβλήματα. Οι υψηλές στροφές απαιτούν αυξημένη ψύξη των μονάδων παραγωγής και επειδή οι τάσεις του συστήματος έχουν αρκετά μεγάλες τιμές υπάρχει περίπτωση να ενεργοποιηθούν οι ρυθμιστές τάσεως, με σκοπό να επαναφέρουν τις τάσεις των μονάδων στις επιθυμητές τιμές. Σε αυτή την περίπτωση, η αποκοπή μίας μονάδας παραγωγής μπορεί από την μία πλευρά να συμβάλλει θετικά στη γρηγορότερη αποκατάσταση του ισοζυγίου παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος, αλλά από την άλλη υπάρχει και η πιθανότητα κάτω από ορισμένες συνθήκες να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια, να μειωθεί η αδράνειά του, οι μονάδες παραγωγής να απομονωθούν σε ομάδες και να αποσυγχρονιστούν μεταξύ τους. [4]

Σε ένα σύστημα γεννήτριας-φορτίου, μία αύξηση του φορτίου, εφόσον δε συμβαδίζει με αντίστοιχη αύξηση της τροφοδότησης της μηχανής, τροφοδοτείται από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μερών της και μεταβάλλει την ταχύτητα της γεννήτριας. Η μείωση των στροφών της μηχανής αντιστοιχεί στο ρυθμό παροχής της ενέργειας, η οποία ισούται με την αύξηση του φορτίου. Συνεπώς, χωρίς ρύθμιση, το ισοζύγιο παραγωγής-καταναλώσεως θα επιτυγχανόταν σε συχνότητα και τάση μικρότερες από τις κανονικές τιμές. Αυτή η διαδικασία μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 2.1 Γεννήτρια που τροφοδοτεί απομακρυσμένο φορτίο.

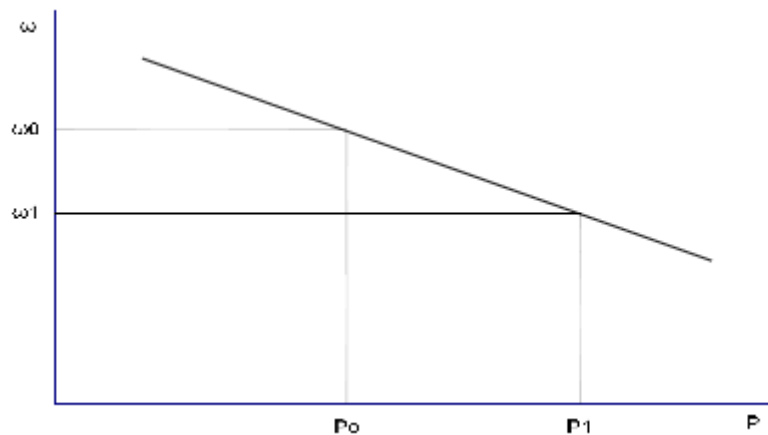
Στο παραπάνω σχήμα T_m , P_m είναι η μηχανική ροπή και ισχύς αντίστοιχα, T_e , P_e είναι η ηλεκτρική ροπή και ισχύς αντίστοιχα και P_L η ισχύς του φορτίου.

Μία μεταβολή στο φορτίο αντανακλάται αυτόματα ως αλλαγή στην ηλεκτρική ροπή εξόδου της γεννήτριας T_e . Αυτή η αλλαγή προκαλεί μία διαφορά ανάμεσα στην μηχανική T_m και την ηλεκτρική ροπή T_e , η οποία καταλήγει με τη σειρά σε μεταβολές της ταχύτητας-συχνότητας σύμφωνα με τη σχέση $T_m - T_e = 2H\Delta\omega$ σε ανά μονάδα τιμές, όπου H η χρονική σταθερά αδρανείας της γεννήτριας. Η μείωση της συχνότητας για μία συγκεκριμένη αύξηση του φορτίου καθορίζεται από την αντίστοιχη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της γεννήτριας. [5]

2.1.1 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Η εξισορρόπηση και η ομαλή αποκατάσταση του ισοζυγίου παραγόμενης ισχύος και φορτίου, καθώς και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι και ελέγχουν τη μηχανική ισχύ, η οποία παράγεται από τις κινητήριες μηχανές. Οι ρυθμιστές στροφών θεωρούνται μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας, είτε της ισχύος. Σε περίπτωση δηλαδή, κατά την οποία μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο, ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα. Σε περίπτωση που η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής είναι δεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει την παραγόμενη ισχύ. Κάθε μονάδα παραγωγής χαρακτηρίζεται από μία ρυθμιζόμενη χαρακτηριστική φορτίου- συχνότητας (ή στροφών-παραγόμενης ισχύος). Η χαρακτηριστική αυτή είναι ευθεία και η κλίση της ονομάζεται στατισμός της μηχανής. Ο

στατισμός μίας μονάδας εκφράζει την ευαισθησία της ισχύος στις μεταβολές της συχνότητας. Μία τέτοια χαρακτηριστική παριστάνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.2 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μονάδας παραγωγής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο στατισμός μίας μονάδας ορίζεται ως εξής:

$$R = - \frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (2.1)$$

Σε αυτήν τη σχέση ως $\Delta\omega$ ορίζεται η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας, η οποία είναι ίση με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης και ως ΔP ορίζεται η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου που προκάλεσε τη μεταβολή $\Delta\omega$.

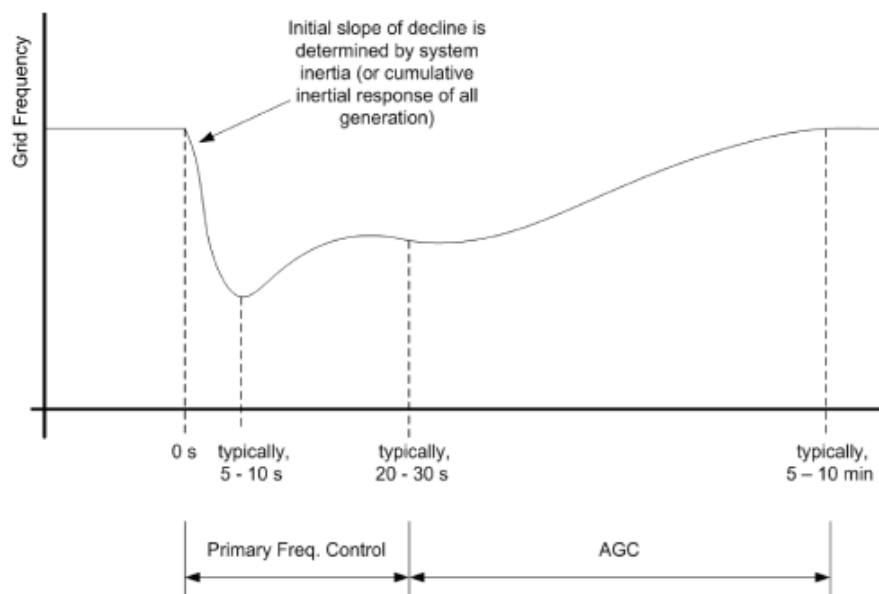
Όπως προκύπτει και από το παραπάνω σχήμα, αλλά και από την παραπάνω σχέση του στατισμού αν αυξηθεί η ζήτηση του φορτίου, προκαλείται πτώση της συχνότητας του δικτύου από την αρχική τιμή ω_0 στην τελική τιμή νέας ισορροπίας ω_1 του συστήματος. Αυτό το γεγονός επομένως, μετά το τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης, θα έχει οδηγήσει στην αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος από την αρχική τιμή P_0 στη νέα τιμή P_1 .

Ο στατισμός μετριέται συχνά σε ποσοστό επί τοις εκατό. Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας είναι αρνητική με συνέπεια ο στατισμός να είναι θετικό μέγεθος. Είναι πολύ σημαντικό να παρατηρηθεί ότι όταν μια μονάδα έχει μικρή τιμή στατισμού, τότε με δεδομένο μια μικρή μεταβολή της συχνότητας, μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της και αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο ονομάζεται ρυθμίζουσα μονάδα, καθώς συμμετέχει καθοριστικά με τη μεταβολή της παραγωγής της στη ρύθμιση της συχνότητας. Αντιθέτως, αν μια μονάδα έχει μεγάλο στατισμό ονομάζεται μονάδα βάσης, καθώς σε μια μεταβολή της συχνότητας μεταβάλλει ελάχιστα το φορτίο της. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μιας μονάδας μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους:

- Σε περίπτωση μεταβολής του στατισμού R , η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας ω_0, P_0 .
- Σε περίπτωση μεταβολής της ταχύτητας (συχνότητας) αναφοράς μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα διατηρώντας την κλίση της. [4]

Η Ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας των συστημάτων πραγματοποιείται κυρίως με τη βοήθεια των ρυθμιστών στροφών των μονάδων παραγωγής, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις και μέσω ειδικών μετασχηματιστών ρυθμίσεως της φασικής γωνίας της τάσεως. Στα σύγχρονα διασυνδεδεμένα συστήματα εκατοντάδες μονάδες παραγωγών λειτουργούν παράλληλα και κάθε μία μονάδα εξυπηρετεί μέρος του φορτίου και ως εκ τούτου μπορεί να ρυθμίζεται έτσι ώστε να μεταβάλλει την παραγωγή της ανάλογα με τη ζήτηση. Οι ρυθμιστές στροφών κάθε μονάδας είναι αυτοί που επιτυγχάνουν ουσιαστικά τη ρύθμιση της συχνότητας του συνολικού συστήματος μέσω της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ρύθμισης, οι οποίες αναφέρονται αμέσως παρακάτω. Αμέσως μετά από μία ενδεχόμενη μεταβολή της ζήτησης του φορτίου, οι μονάδες μοιράζονται μεταξύ τους τις μεταβολές του φορτίου μεταβάλλοντας την παραγωγή τους κατά ποσοτήτες αντιστρόφως ανάλογες του στατισμού των ρυθμιστών τους. Αυτό που συμβαίνει ουσιαστικά σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι ο ρυθμιστής στροφών αντιλαμβάνεται μία αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας (η οποία οφείλεται στη μεταβολή του φορτίου) και μετασχηματίζει αυτήν την αλλαγή σε σήμα για την αντίστοιχη αναπροσαρμογή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος από τον αντίστοιχο στρόβιλο. Η ρύθμιση αυτή, που αναφέρεται ως πρωτεύουσα ρύθμιση αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας, το οποίο είναι το ερέθισμα και το αντικείμενο της δευτερεύουσας ρύθμισης, καθώς η δευτερεύουσα ρύθμιση καλείται να το εξαλείψει. Έτσι, στη συνέχεια, το φορτίο ανακατανέμεται μετακινώντας παράλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου-συχνότητας των μονάδων, αλλάζοντας δηλαδή την ταχύτητα αναφοράς τους, μέσω των ρυθμιστών στροφών τους. Σε αυτήν την περίπτωση ενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή, μετριέται δηλαδή το σφάλμα συχνότητας του συστήματος μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση, καθώς και οι τυχούσες διαφορές στη διακινούμενη ισχύ των εξωτερικών διασυνδέσεων, και με μία κατάλληλη στρατηγική ελέγχου αποστέλλονται σήματα που καθορίζουν μία νέα ταχύτητα αναφοράς κάθε γεννήτριας. Αυτή η διαδικασία αποτελεί τη δευτερεύουσα ρύθμιση και επαναφέρει πλήρως τη συχνότητα στην επιθυμητή τιμή. [6]

Εν ολίγοις, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η πρωτεύουσα ρύθμιση περιλαμβάνει τη σταθεροποίηση της τιμής της συχνότητας, ενώ η δευτερεύουσα ρύθμιση περιλαμβάνει την ολική αποκατάσταση και την επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική τιμή της. Επιγραμματικά στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την πτώση της συχνότητας του συστήματος ύστερα από μια τυχούσα αύξηση του φορτίου ή από μια αποκοπή μιας μονάδας παραγωγής. Στα πρώτα δευτερόλεπτα που ακολουθούν λαμβάνει χώρα η πρωτεύουσα ρύθμιση που οδηγεί στην σταθεροποίηση της συχνότητας στην τιμή του μόνιμου σφάλματος και ύστερα επέρχεται η δευτερεύουσα ρύθμιση όπου επιτυγχάνεται η επαναφορά της συχνότητας.



Σχήμα 2.3 Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. [7]

2.1.3 Αυτορρύθμιση φορτίου

Εκτός από τη ρύθμιση της συχνότητας από τους ρυθμιστές στροφών των μονάδων υπάρχει και μία πρόσθετη συνιστώσα αυτορρύθμισης του φορτίου, η οποία συμβάλλει στην αποκατάσταση της επιθυμητής τιμής της συχνότητας μετά από μία μεταβολή της ζήτησης ισχύος. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το συνολικό φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της επαγωγικής του συνιστώσας (κινητήρες επαγωγής) εξαρτάται από τη συχνότητα και αυξάνεται όταν αυτή αυξάνει, αλλά και αντίστροφα. Η εξάρτηση αυτή εκφράζεται από την ευαισθησία του φορτίου ως προς τη συχνότητα, η οποία για συνήθη φορτία είναι περίπου ίση με τη μονάδα, όταν οι όροι εκφράζονται σε κανονικοποιημένη μορφή. Για αυτό το λόγο εισάγεται μια συνιστώσα αυτορρυθμίσεως στο σύστημα, αφού όταν αυξάνεται το φορτίο προκαλείται μείωση της συχνότητας, η οποία μείωση οδηγεί σε μια αντίστοιχη ελάττωση του φορτίου, οδηγώντας με τη σειρά της στη μείωση της ανάγκης για πρόσθετη παραγωγή ισχύος. [4]

2.2 Πρότυπα

2.2.1 Κώδικες δικτύου

Έχουν καθοριστεί διάφοροι κώδικες δικτύου που καθορίζουν τις απαιτήσεις των διαφόρων μονάδων, οι οποίες πρέπει να πληρούνται, με σκοπό τη δόκιμη και ασφαλή σύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα υπάρχει ο κώδικας ENTSO – E [8], ο οποίος είναι από το διαχειριστή του ευρωπαϊκού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρική ενέργειας, και καθορίζει ένα κοινό πλαίσιο απαιτήσεων για τις μονάδες παραγωγής ισχύος, συμπεριλαμβανομένων και τις σύγχρονες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα πάρκα παραγωγή ισχύος, και τα υπεράκτια πάρκα (offshore generation facilities). Ορίζει

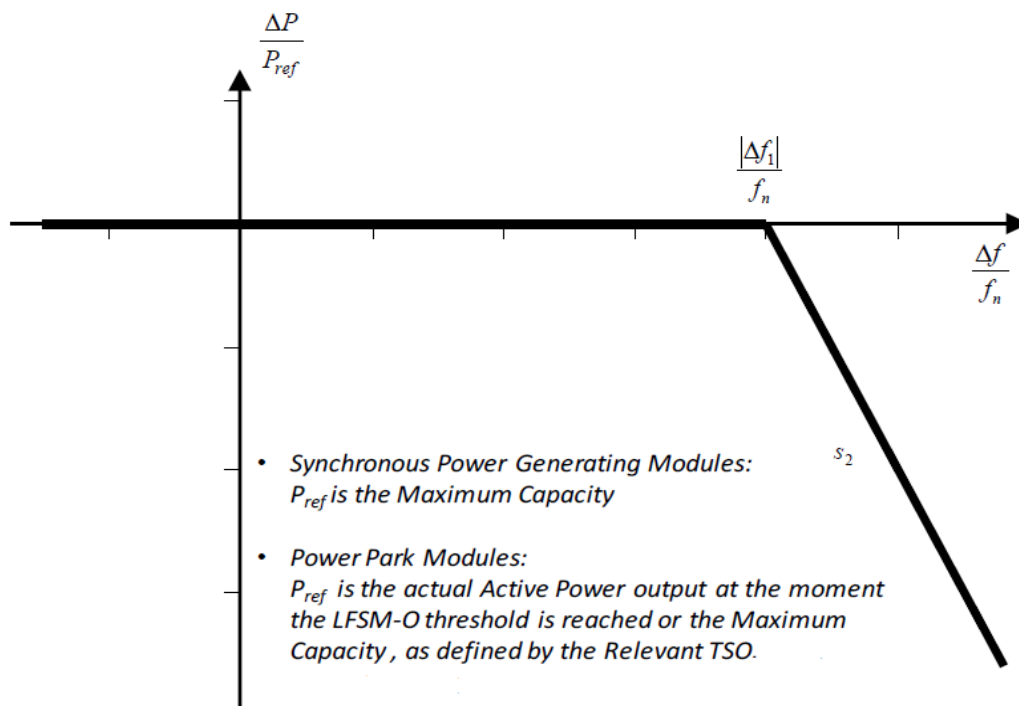
επίσης ένα κοινό πλαίσιο υποχρεώσεων για τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να κάνουν την καταλληλότερη χρήση των μονάδων ισχύος κατά τρόπο διαφανή και αμερόληπτο και ο οποίος να μπορεί να εξασφαλίζει συνθήκες υγιούς ανταγωνισμού σε όλη την επικράτεια της Ευρώπης. Οι δαπάνες, οι οποίες εκπορεύονται από αυτές τις υποχρεώσεις και οι οποίες βαρύνουν την αρμόδια υπηρεσία διαχείρισης των δικτύων, αξιολογούνται από τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές. Σύμφωνα με τον προαναφερθέντα κώδικα οι απαιτήσεις σχετικά με τα ζητήματα συχνότητας είναι οι εξής:

- Μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο εντός των διακυμάνσεων της συχνότητας και των χρονικών ορίων που ορίζονται στον παρακάτω πίνακα.

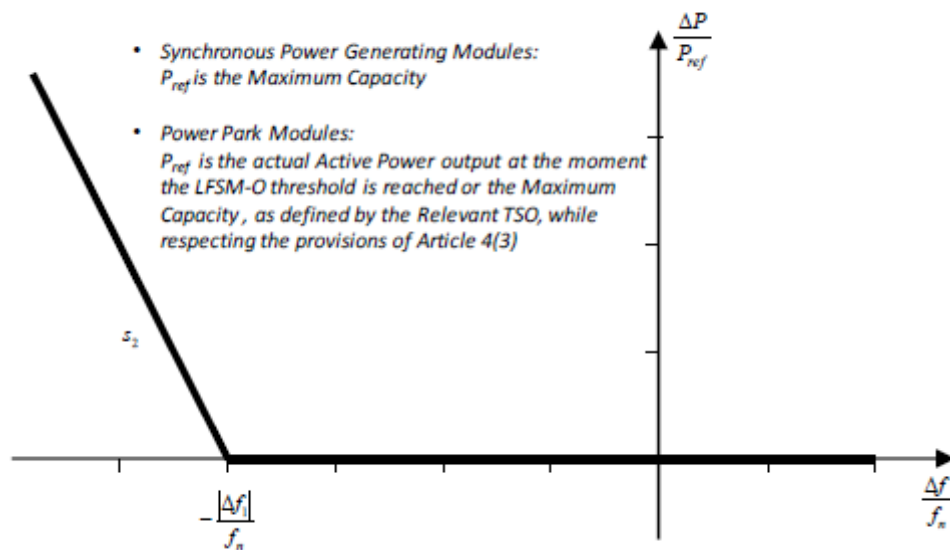
Synchronous Area	Frequency Range	Time period for operation
Continental Europe	47.5 Hz – 48.5 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than 30 minutes
	48.5 Hz – 49.0 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than the period for 47.5 Hz – 48.5 Hz
	49.0 Hz – 51.0 Hz	Unlimited
	51.0 Hz – 51.5 Hz	30 minutes
Nordic	47.5 Hz – 48.5 Hz	30 minutes
	48.5 Hz – 49.0 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than 30 minutes
	49.0 Hz – 51.0 Hz	Unlimited
	51.0 Hz – 51.5 Hz	30 minutes
Great Britain	47.0 Hz – 47.5 Hz	20 seconds
	47.5 Hz – 48.5 Hz	90 minutes
	48.5 Hz – 49.0 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than 90 minutes
	49.0 Hz – 51.0 Hz	Unlimited
	51.0 Hz – 51.5 Hz	90 minutes
	51.5 Hz – 52.0 Hz	15 minutes
Ireland	47.5 Hz – 48.5 Hz	90 minutes
	48.5 Hz – 49.0 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than 90 minutes
	49.0 Hz – 51.0 Hz	Unlimited
	51.0 Hz – 51.5 Hz	90 minutes
Baltic	47.5 Hz – 48.5 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than 30 minutes
	48.5 Hz – 49.0 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than the period for 47.5 Hz – 48.5 Hz
	49.0 Hz – 51.0 Hz	Unlimited
	51.0 Hz – 51.5 Hz	To be defined by each TSO while respecting the provisions of Article 4(3), but not less than 30 minutes

Σχήμα 2.4 Ελάχιστα χρονικά διαστήματα για τα οποία οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να λειτουργούν, χωρίς να αποσυνδεθούν από το δίκτυο σύμφωνα με το πρότυπο ENTSO-E του 2012.

- Ευρύτερα φάσματα συχνοτήτων ή μεγαλύτερα χρονικά ελάχιστα μπορούν να συμφωνηθούν μεταξύ της ιδιοκτησίας της μονάδας παραγωγής και του αρμόδιου διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς, με στόχο τη διασφάλιση της βέλτιστης χρήσης των τεχνικών δυνατοτήτων της μονάδας παραγωγής, αν αυτές απαιτούνται για τη διατήρηση ή την αποκατάσταση της σταθερότητας του συστήματος.
- Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να αποσυνδέονται αυτόματα σε συγκεκριμένες συχνότητες, αν αυτό απαιτείται από τη διαχειριστή του συστήματος.
- Μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο και να είναι σε θέση να λειτουργεί σε ρυθμούς μεταβολής της συχνότητας μέχρι μια τιμή, η οποία ορίζεται από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς.
- Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μπορούν να ενεργοποιήσουν τη δυνατότητα ρύθμισης φορτίου- συχνότητας σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα. Αυτό συμβαίνει όταν η συχνότητα του δικτύου ξεπεράσει ένα κατώφλι μεταξύ των τιμών 50.2 Hz και 50.5 Hz και η ρύθμιση αυτή συμβαίνει με τιμή στατισμού μεταξύ 2-12%. Το κατώφλι, καθώς και οι τιμές του στατισμού καθορίζονται από τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να ενεργοποιούν το μηχανισμό, το γρηγορότερα δυνατό.



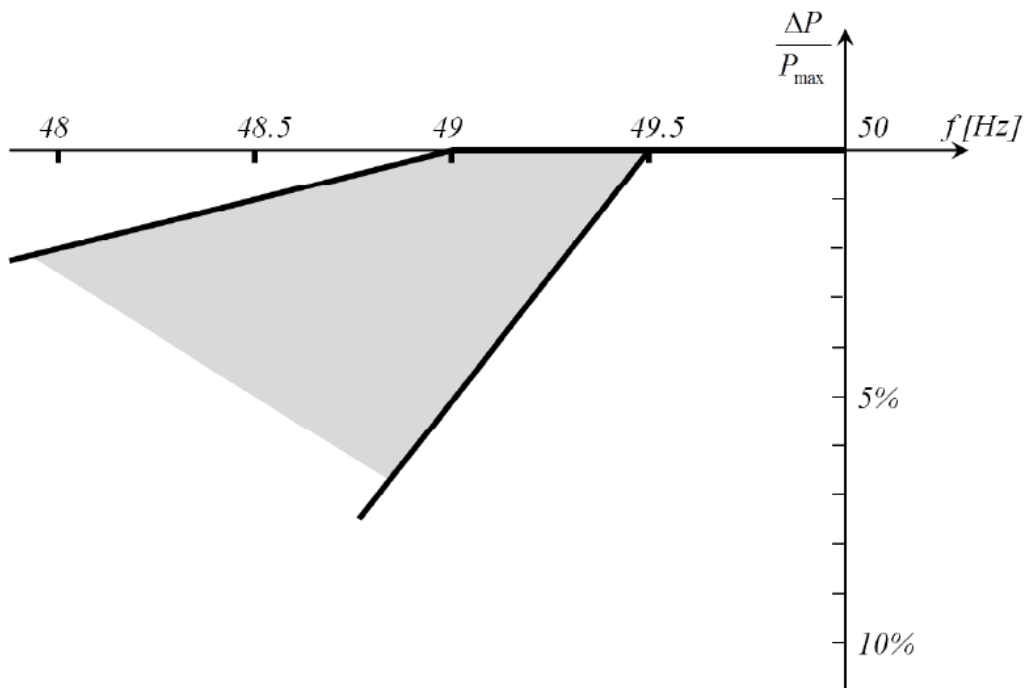
Σχήμα 2.5α



Σχήμα 2.5β

Σχήμα 2.5 P_{ref} είναι η ισχύς αναφοράς ενεργού ισχύος, με την οποία σχετίζεται η μεταβολή της ισχύος ΔP και μπορεί να ορίζεται διαφορετικά κάθε όπως φαίνεται και στην εικόνα. f_n είναι η ονομαστική συχνότητα του δικτύου (50 Hz) και Δf η μεταβολή της συχνότητας που συμβαίνει στο δίκτυο. [8]

- Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς μπορεί να καθορίσει αποδεκτή μείωση της ενεργού ισχύος από την μέγιστη ισχύ εξόδου, λόγω της πτώσης της συχνότητας.
 - Κάτω από 49 Hz με ρυθμό μείωσης ισχύος 2% ανά 1 Hz πτώσης της συχνότητας, σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ στα 50 Hz.
 - Κάτω από 49.5 Hz με ρυθμό μείωσης ισχύος 10% ανά 1 Hz πτώση της συχνότητα, σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ στα 50 Hz.



Σχήμα 2.6 Η μέγιστη μείωση της ισχύος, λόγω πτώσης της συχνότητας. Στο διάγραμμα αναπαρίστανται τα όρια που τίθενται από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς.

- Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να καθορίζει τις συνθήκες, κάτω από τις οποίες είναι δυνατή η αυτόματη επανασύνδεση των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι συνθήκες θα πρέπει να περιλαμβάνουν:
 - Το εύρος της μεταβολής της συχνότητας, εντός του οποίου η αυτόματη σύνδεση των μονάδων είναι αποδεκτή, καθώς επίσης και μια αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση.
 - Μέγιστος αποδεκτός ρυθμός της αύξησης της ενεργού ισχύος εξόδου.
- Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μπορούν να ενεργοποιήσουν τη δυνατότητα ρύθμισης φορτίου- συχνότητας σύμφωνα με το **σχήμα 2.5 β**. Αυτό συμβαίνει όταν η συχνότητα του δικτύου πέσει κάτω από ένα κατώφλι μεταξύ των τιμών 49.8 Hz και 49.5 Hz και η ρύθμιση αυτή συμβαίνει με τιμή στατισμού μεταξύ 2-12%. Το κατώφλι, καθώς και οι τιμές του στατισμού καθορίζονται από τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να ενεργοποιούν το μηχανισμό, το γρηγορότερα δυνατό. Η υποχρέωση αυτή ισχύει για μεγάλες μονάδες παραγωγής, δηλαδή μονάδες που η ονομαστική τους ισχύς ξεπερνάει τα 50MW. [8]

Σύμφωνα με το πρότυπο του BDEW, “Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network”, οι απαιτήσεις όσον αφορά στα θέματα συχνότητας είναι οι εξής:

- Οι μονάδες παραγωγής πρέπει να είναι ικανές να μειώσουν την ενεργό τους ισχύ με βήματα 10% της συμφωνημένης ισχύος σύνδεσης.
- Αυτή η μείωση πρέπει να είναι δυνατή, χωρίς την αυτόματη αποσύνδεση της μονάδας παραγωγής από το δίκτυο.
- Όλες οι μονάδες παραγωγής θα πρέπει να μειώσουν την ενεργό ισχύ τους, ενώ βρίσκονται σε λειτουργία, όταν η συχνότητα του δικτύου υπερβεί τα 50.2 Hz με ρυθμό 40% ανά Hz σε σχέση με τη μέγιστη διαθέσιμη στιγμιαία ισχύ.

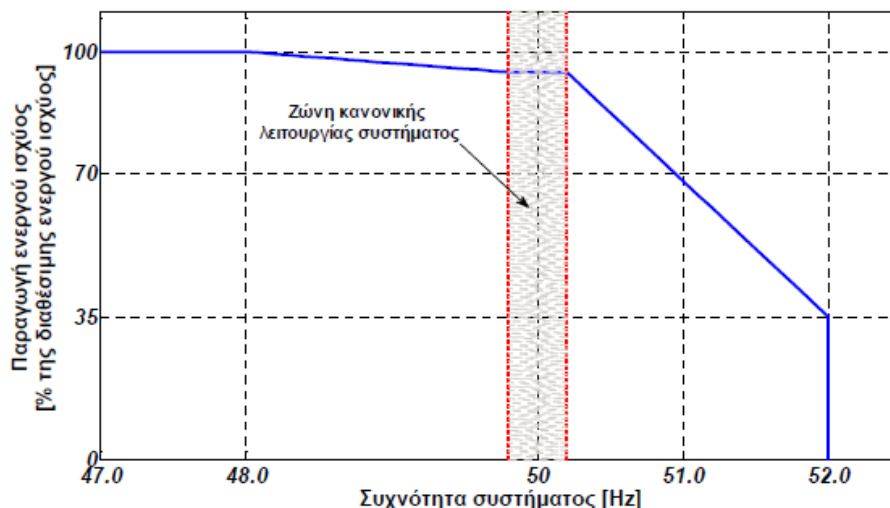


$$\Delta P = 20 P_M \frac{50,2 \text{ Hz} - f_{\text{Netz}}}{50 \text{ Hz}} \quad \text{bei } 50,2 \text{ Hz} \leq f_{\text{Netz}} \leq 51,5 \text{ Hz}$$

Σχήμα 2.7 Η μείωση της ενεργού ισχύος σε περίπτωση υπερσυχνότητας. P_M : η μέγιστη διαθέσιμη στιγμιαία ισχύς και f_{Netz} : η συχνότητα του δικτύου.

- Η ενεργός ισχύς μπορεί να αυξηθεί και πάλι, αν και μόνο η συχνότητα του δικτύου αποκτήσει τιμή $f \leq 50.05$ Hz. Προβλέπεται και εύρος ευαισθησίας, το οποίο πρέπει να είναι κάτω από 10 mHz. [9]

Σύμφωνα με τον Ιρλανδικό Κώδικα η μεταβολή της ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων σύμφωνα με τη συχνότητα προκύπτει από την παρακάτω καμπύλη.



Σχήμα 2.8 Μεταβολή ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας. [38]

Σύμφωνα με την καμπύλη, σε συνθήκες κανονικής συχνότητας, δηλαδή μεταξύ κάποιων καθορισμένων τιμών γύρω από τα 50 Hz, το αιολικό πάρκο παράγει λιγότερη ενεργό ισχύ από τη διαθέσιμη με βάση τον άνεμο. Αυτό γίνεται, ούτως ώστε να μπορεί να προσφέρει έγχυση πρόσθετης ενεργού ισχύος σε περίπτωση υποσυχνότητας. Όταν η συχνότητα του

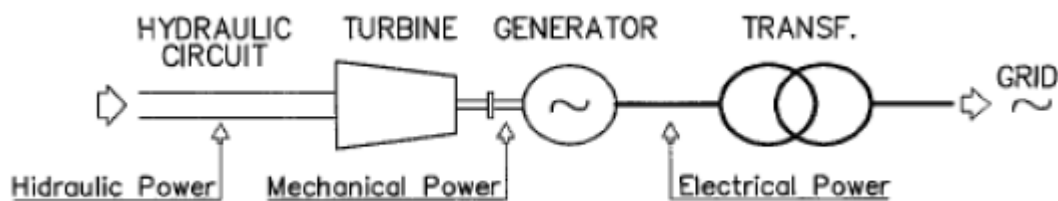
συστήματος υπερβαίνει τη ζώνη κανονικής λειτουργίας, άρα και η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση το αιολικό πάρκο πρέπει να μειώσει την ενεργό ισχύ που εγχύει στο δίκτυο, ώστε να συμβάλλει στην αποκατάσταση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος. Από την άλλη πλευρά, σε χαμηλές συχνότητες, όταν δηλαδή η παραγωγή είναι μικρότερη της κατανάλωσης, η αιολική παραγωγή πρέπει να ισούται με τη μέγιστη διαθέσιμη. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικές ελέγχου προσομοιάζουν στις καμπύλες στατισμού των συμβατικών μονάδων. Επιπρόσθετα, οι αυξομειώσεις στην παραγωγή των αιολικών μονάδων αρκετές φορές έχουν όρια ρυθμού μεταβολής, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις το αιολικό πάρκο μπορεί να δέχεται εντολή από το σύστημα ελέγχου του διαχειριστή του δικτύου να τροποποιήσει την παραγωγή του με βάση σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ εξόδου του.

2.2.2 Ζητήματα εναρμόνισης

Η ολοένα και μεγαλύτερη διείδυση της αιολικής ενέργειας έχει καταστήσει αναγκαία σε παγκόσμιο επίπεδο την εναρμόνιση των κωδίκων δικτύων των διαφόρων διαχειριστών. Συγκεκριμένα, δυνατότητες εναρμόνισης των κωδίκων υπάρχουν σε θέματα, όπως η συμπεριφορά του αιολικού πάρκου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η απόκριση κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τις διαταραχές στο δίκτυο, η απόκριση συχνότητας – έλεγχος ενεργού ισχύος και ο έλεγχος τάσης- αέργου ισχύος. Μια εναρμόνιση των κωδίκων σε διεθνές επίπεδο έχει ως στόχο τον ορισμό αρτιότερων κανονισμών, την υποστήριξη διεθνών προτύπων για τα προϊόντα και τις υπηρεσίες της αιολικής βιομηχανίας και την επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους διαχειριστών σε θέματα λειτουργίας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσπάθεια των διαχειριστών προς μια τέτοια εναρμόνιση είναι σαφής. Παρ' όλα αυτά εμπόδια, όπως τα ειδικά χαρακτηριστικά των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, ο τρόπος ανάπτυξης τους, αλλά και τα άνισα επίπεδα διείδυσης της αιολικής ενέργειας δυσκολεύουν την επίτευξη αυτού του στόχου και γι' αυτό το λόγο παρατηρούνται ακόμα και έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ κωδίκων διαφορετικών εθνικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. [10]

2.3 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Η βάση της λειτουργίας ενός υδροηλεκτρικού σταθμού έγκειται στην εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των υδάτων, με μετατροπή της ενέργειας αυτής σε κινητική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας αρχικά σε μηχανική (περιστροφική κίνηση) στο στρόβιλο και έπειτα σε ηλεκτρική στη γεννήτρια.



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα μετατροπής ενέργειας.

2.3.1 Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Από πλευράς αρχής λειτουργίας, τόσο στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική όσο και στη μετατροπή της τελευταίας σε ηλεκτρική, ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) δεν διαφέρει από ένα μεγάλο. Ο χαρακτηρισμός ενός Υδροηλεκτρικού Έργου ως «μικρού» δεν αναφέρεται αποκλειστικά στην εγκατεστημένη ισχύ ή στις διαστάσεις των μονάδων αλλά σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών, πολλά από τα οποία δεν είναι μετρήσιμα. Επομένως οι διαφορές μεταξύ μεγάλων και μικρών υδροηλεκτρικών έργων δεν είναι μόνο ποσοτικές αλλά κυρίως ποιοτικές. Μικρό χαρακτηρίζεται ένα υδροηλεκτρικό έργο όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη από 10 MW, χωρίς η τιμή αυτή να αποτελεί ένα γενικά αποδεκτό όριο. Σε ορισμένες χώρες το όριο διάκρισης μεταξύ μεγάλων και μικρών ΥΗΕ ορίζεται στα 5 MW. Το γεγονός ότι το όριο διάκρισης δεν είναι ιδιαίτερα σαφές οφείλεται στο ότι οι διαφορές τους δεν είναι τόσο ποσοτικές όσο ποιοτικές και αφορούν την επιλογή του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, την διαμόρφωση και εκμετάλλευση του ΥΗΕ. Μία κύρια διαφοροποίηση μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ οφείλεται στην επιλογή και εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στην περίπτωση των μικρών ΥΗΕ. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η τυποποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τον εξοπλισμό μικρών ΥΗΕ φθάνει συνήθως μέχρι την ισχύ των 10 MW (αν και ορισμένες εταιρίες προσφέρουν τυποποιημένους υδροστρόβιλους ονομαστικής ισχύος μέχρι 15 MW), φαίνεται ότι η τιμή αυτή αποτελεί το πλέον αποδεκτό όριο διάκρισης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ. Το όριο διάκρισης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ έχει σημασία και από πλευράς διαδικασιών και αδειοδοτήσεων καθώς για τα μικρά ΥΗΕ προβλέπονται διαδικασίες απλούστερες ενώ σε ορισμένες χώρες, όπως στην Ελλάδα, ένα μεγάλο ΥΗΕ δεν μπορεί να κατασκευασθεί παρά μόνο από τη ΔΕΗ. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν κι άλλες διακρίσεις: ως micro χαρακτηρίζεται ένα ΥΗΕ όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη των 100 KW, ως mini όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη από 1 MW και ως small-μικρό όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μεταξύ του 1 MW και 10 MW. Τα όρια αυτά μεταξύ micro, mini και small ή μικρού δεν είναι απόλυτα και υπάρχουν αποκλίσεις σε διάφορες χώρες, καθόσον σχετίζονται κυρίως με τις διαδικασίες αδειοδότησης και τις προδιαγραφές σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο

ηλεκτρικό δίκτυο. Μία άλλη διάκριση των ΥΗΕ αναφέρεται στο μέγεθος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H , η τιμή της οποίας εκφράζει την ανά μονάδα μάζας υδραυλική ενέργεια του νερού και την τάξη μεγέθους της στατικής πίεσης στον αγωγό προσαγωγής και το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου, ενώ από αυτή κυρίως εξαρτάται η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου. Οι τρεις κατηγορίες που διακρίνονται είναι οι εξής:

- Μικρού ύψους όταν H είναι μικρότερο των 20 m
- Μέσου ύψους όταν ισχύει: $20 < H < 150$ m
- Μεγάλου ύψους όταν $H > 150$ m

Με γνώμονα το ότι η υδραυλική ισχύς είναι γινόμενο της παροχής του νερού και της υδραυλικής πτώσης, γίνεται φανερό ότι το κόστος κατασκευής ενός μικρού ΥΗΕ είναι τόσο μικρότερο και άρα η επένδυση τόσο πιο αποδοτική, όσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική πτώση H . Όμως, κατά κανόνα οι μεγάλες υδραυλικές πτώσεις αναπτύσσονται σε ορεινές και απομακρυσμένες περιοχές οπότε ενδέχεται το κόστος των γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι τόσο υψηλό ώστε να αντισταθμίζει το πλεονέκτημα του σχετικά χαμηλού κόστους του μικρού ΥΗΕ. Το αντίθετο συμβαίνει με τα μικρά ΥΗΕ μικρής υδραυλικής πτώσης: το ύψος της επένδυσης είναι αυξημένο, όμως, κατά κανόνα είναι εγκατεστημένα κοντά σε πεδινές και κατοικήσιμες περιοχές οπότε το κόστος των έργων σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο είναι μικρό.

2.3.2 Τύποι Υδροστροβίλων

Οι δυο κυρίαρχοι τύποι υδροστροβίλων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς είναι οι υδροστρόβιλοι δράσεως και οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως. Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι γνωστοί ως τύπου Pelton και οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως ως τύπου Francis. Στους υδροστρόβιλους αντιδράσεως υπάγονται και οι υδροστρόβιλοι προώσεως ή τύπου Karlan. Οι υδροστρόβιλοι Pelton έχουν συνήθως έναν οριζόντιο άξονα. Χρησιμοποιούνται για μεγάλες υψομετρικές διαφορές, από 300 μέτρα και περισσότερο και κατασκευάζονται για πολύ μικρές (της τάξεως των δεκάδων KW) έως πολύ μεγάλες ισχύες (της τάξεως των εκατοντάδων MW). Η λειτουργία τους βασίζεται στη μεγάλη κινητική ενέργεια του ύδατος, το οποίο μεταφέρεται μέσω ακροφυσίων στα πτερύγια τύπου κουβά, τα οποία απορροφούν την κινητική ενέργεια του νερού και περιστρέφονται. Η θεωρητική ταχύτητα του ύδατος στο ακροφύσιο είναι $u = \sqrt{2 * g * H}$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και $H = h - h_f$ το ωφέλιμο ύψος της υδατοπτώσεως.

Στους υδροστρόβιλους αντιδράσεως το νερό κατευθύνεται στα πτερύγια με εφαπτομενική κατεύθυνση, με τέτοιο τρόπο ώστε να γλιστράει στην εσωτερική επιφάνεια του πτερυγίου αλλάζοντας κατεύθυνση και δίνοντας εξ' αντιδράσεως ώθηση στο πτερύγιο του στροβίλου. Η ενέργεια που παρέχεται και κινεί έναν υδροστρόβιλο αντιδράσεως είναι σε αυτή την περίπτωση και κινητική και δυναμική. Όλος ο χώρος γύρω από το στρόβιλο είναι γεμάτος νερό, όπου η πίεση είναι γενικά μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχουν δύο υποκατηγορίες υδροστροβίλων αντιδράσεως, οι τύπου Francis και οι προώσεως.

Στον υδροστρόβιλο Francis συνήθως ο άξονας είναι κατακόρυφος. Το νερό οδηγείται στην περιφέρεια του στροβίλου με έναν περιφερειακό αγωγό. Ο υδροστρόβιλος τύπου Francis

χρησιμοποιείται για υψομετρικές διαφορές από 100 μέχρι 360 m και έχει είτε σταθερά κινητά είτε ρυθμιζόμενα ακίνητα πτερύγια. Οι υδροστροβίλοι προώσεως χρησιμοποιούνται γενικά για χαμηλά ύψη, μέχρι 45 μέτρα, επειδή έχουν μεγάλη ειδική ταχύτητα.

Υπάρχουν δύο τύποι υδροστροβίλων προώσεως, ένας με σταθερά κινητά πτερύγια και ο άλλος με ρυθμιζόμενα. Η μορφή των πτερυγίων των υδροστροβίλων προώσεως ή Kaplan είναι τέτοια ώστε να διατηρείται όσο είναι δυνατόν η αξονική ροή του νερού σε αντίθεση με τον τύπου Francis, όπου η κίνηση του νερού είναι περιστροφική. Ο ρυθμιζόμενος υδροστροβίλος προώσεως, που είναι γνωστός ως τύπου Kaplan επιτυγχάνει τη διατήρηση των πιο αποδοτικών συνθηκών ροής σε κάθε περίπτωση, αλλάζοντας τη γωνία των κινητών πτερυγίων του με το ανοιγοκλείσιμο των οδηγών θυρίδων. Η λειτουργία αυτή συνεπάγεται υψηλή απόδοση σε όλα τα φορτία, σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους με σταθερά πτερύγια.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η απόδοση του Francis είναι πολύ καλή σε πλήρες φορτίο (συχνά μεγαλύτερη ακόμα και από 93%), αλλά χειροτερεύει σε μικρότερα φορτία. Ο Pelton έχει χειρότερη από τον Francis απόδοση στο πλήρες φορτίο, αλλά γενικά καλύτερη απόδοση στα μικρά φορτία. Τέλος, οι υδροστροβίλοι προώσεως με ρυθμιζόμενα κινητά πτερύγια έχουν γενικά πολύ καλή απόδοση σε όλα τα φορτία.

2.3.3 Ισχύς και ενέργεια υδροηλεκτρικού σταθμού

Η παραγόμενη ενέργεια από έναν υδροηλεκτρικό σταθμό είναι:

$$E = \gamma \cdot V \cdot (h - h_f) \cdot \eta \quad (2.2)$$

Όπου

h : η εκμεταλλεύσιμη υψομετρική διαφορά (m)

h_f : οι υδραυλικές απώλειες (m στήλης ύδατος)

$h-h_f$: το ωφέλιμο ύψος (m)

$V=q \cdot T$: ο διατιθέμενος όγκος ύδατος (m^3)

q : η παροχή ύδατος (m^3 ανά ώρα)

T : ο χρόνος λειτουργίας (σε ώρες)

γ : το ειδικό βάρος του ύδατος ($9,81 \cdot 10^3 \text{ Nt/m}^3$)

η : ο βαθμός απόδοσης της μονάδας

Στην σχέση (2.2) δεχόμαστε ότι ποσοστό ίσο με τον ολικό βαθμό απόδοσης η της δυναμικής ενέργειας του νερού έχει μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, η σχέση (2.2) ισχύει για σταθερή παροχή q . Εάν η παροχή δεν είναι σταθερή, τότε στον τύπο (2.2)

συμπεριλαμβάνεται η μέση τιμή της παροχής Q στο χρονικό διάστημα T και οι απώλειες h_f' που είναι οι ισοδύναμες υδραυλικές απώλειες και εξαρτώνται από την κατανομή της παροχής στη διάρκεια του χρόνου T . Επομένως, η ενέργεια προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$E = \gamma \cdot Q \cdot (h - h_f') \cdot \eta \quad (2.3)$$

Η μέση ισχύς της μονάδας θα δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{E}{T} \quad (2.4)$$

Όταν μεταβάλλεται η παροχή q στη διάρκεια του χρόνου T μεταβάλλονται και οι απώλειες h_f , οι οποίες δίνονται ως εξής:

$$h_f' = C \cdot h_{f\mu} \quad (2.5)$$

Όπου

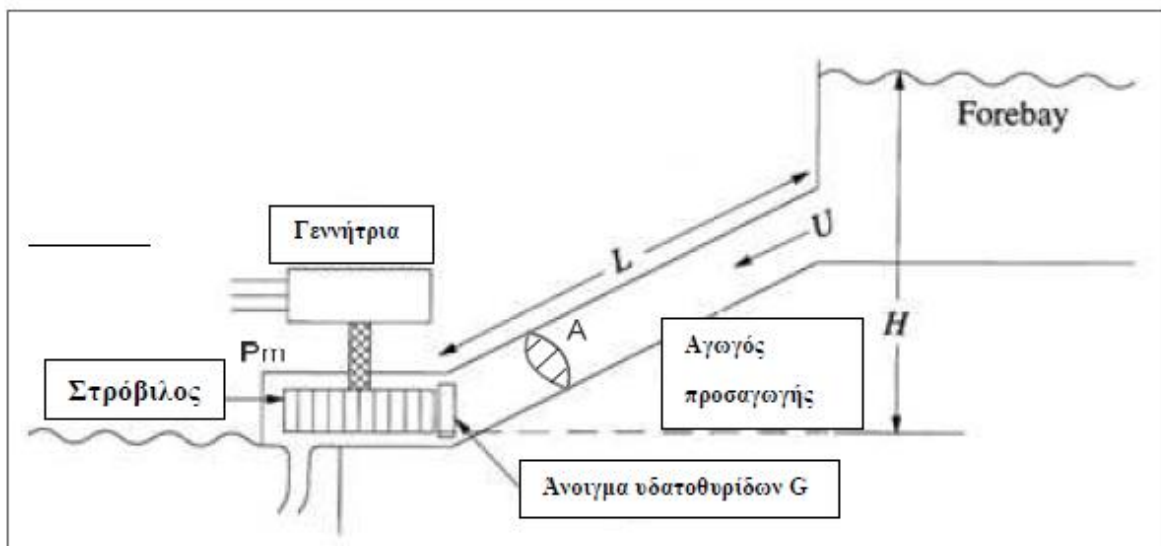
$h_{f\mu}$: οι απώλειες που αντιστοιχούν στη μέση παροχή Q .

C : ο συντελεστής C καθορίζεται από την καμπύλη της παροχής q συναρτήσει του χρόνου.

Οι υδραυλικές απώλειες είναι γενικά ανάλογες με το τετράγωνο της παροχής ύδατος ή ισοδύναμα το τετράγωνο της ταχύτητας του νερού στον αγωγό.

2.3.4 Υδροηλεκτρικός σταθμός χωρίς πύργο αναπάλσεως

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη και η δομή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής, ο οποίος δεν διαθέτει πύργο αναπάλσεως:



Σχήμα 2.10 Σχηματική παράσταση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού.

Τα βασικότερα μεγέθη, τα οποία παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα είναι:

- Το καθαρό υδραυλικό ύψος H που μετρείται σε μέτρα (m)
- Η μέση διατομή A του αγωγού προσαγωγής (m^2)
- Το μήκος L του αγωγού (m)
- Η ταχύτητα U του νερού στον αγωγό (m/sec)

- Το άνοιγμα G των υδατοθυρίδων που κατευθύνουν το νερό στο στρόβιλο
- Η μηχανική ισχύς P_m που παράγει ο στρόβιλος (W)

Προκειμένου να αναπτυχθεί το κλασικό μοντέλο του υδροστροβίλου που παρουσιάζεται παρακάτω είναι αναγκαίο να αναφερθούν δύο βασικές παραδοχές:

- Το νερό θεωρείται τελείως ασυμπίεστο, δηλαδή η υδάτινη στήλη που βρίσκεται στον αγωγό προσαγωγής λαμβάνεται υπ' όψιν ως «στερεά μάζα».
- Ο υδροστρόβιλος θεωρείται ιδανικός. Κάθε μορφή και είδος απωλειών, συμπεριλαμβανομένων και των υδραυλικών, αμελούνται.

Έχοντας ως δεδομένο τις δύο παραπάνω παραδοχές η μηχανική ισχύς που παράγει ένας υδροστρόβιλος χωρίς απώλειες, θεωρώντας πως η συνολική δυναμική ενέργεια του νερού που περνάει από τον στρόβιλο μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια του στροβίλου, είναι:

$$P_M = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (2.6)$$

όπου

γ : το ειδικό βάρος του νερού σε Nt/m^3 .

Η παροχή Q που εμφανίζεται στον τύπο (2.6) εκφράζεται συναρτήσει της ταχύτητας του νερού U και της διατομής A του αγωγού και η σχέση (2.6) γίνεται:

$$P_M = \gamma \cdot A \cdot U \cdot H \quad (2.7)$$

Γραμμικοποιώντας την παραπάνω σχέση γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας:

$$\Delta P_M = \gamma \cdot A \cdot (U_0 \cdot \Delta H + H_0 \cdot \Delta U) \quad (2.8)$$

Στη σχέση (2.8) η μεταβολή ΔH δεν αφορά σε μεταβολή της στάθμης της τεχνητής λίμνης, αλλά σε μεταβολή της πίεσεως μετρημένη σε μέτρα στήλης ύδατος.

Εν συνεχεία με στόχο την κανονικοποίηση των μεγεθών, διαιρούμε τα δύο μέλη της σχέσης (2.8) με τις τιμές μονίμου καταστάσεως και προκύπτει η παρακάτω κανονικοποιημένη σχέση, στην οποία όλα τα μεγέθη εκφράζονται ανά μονάδα:

$$\Delta P_m = \Delta h + \Delta u \quad (2.9)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει πως αν αυξηθεί για παράδειγμα κατά 1% η παροχή ή η πίεση, θα αυξηθεί αντίστοιχα κατά 1% και η μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου.

Οι υδατοθυρίδες (ή πύλες ή βαλβίδες) που οδηγούν το νερό στο στρόβιλο χαρακτηρίζονται από ένα ρυθμιζόμενο άνοιγμα, που συμβολίζεται με G . Η επιφάνεια ελεύθερης ροής προς το στρόβιλο υποτίθεται πως είναι ανάλογη με το άνοιγμα των υδατοθυρίδων:

$$A_\sigma = KG \quad (2.10)$$

Επιπρόσθετα, η ταχύτητα εκροής εξαρτάται από το άνοιγμα των υδατοθυρίδων και από το μενομετρικό ύψος και έτσι ισχύει η σχέση:

$$U_\sigma = \sqrt{2 \cdot g r \cdot H}, \quad (2.11)$$

όπου

g_r : Η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec.

Λόγω της συνέχειας της ροής, η παροχή στο στρόβιλο είναι ίση με την παροχή εκροής:

$$AU = A\sigma \cdot U\sigma, \quad (2.12)$$

και αντικαθιστώντας από τις σχέσεις (2.10) και (2.11) και γραμμικοποιώντας καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση μεταξύ ταχύτητας, μανομετρικού ύψους και ανοίγματος της πύλης:

$$\Delta u = \Delta g + \frac{\Delta h}{2} \quad (2.13)$$

Μία από τις παραδοχές για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου υδροστροβίλου αναφέρεται στη στήλη ύδατος στον αγωγό προσαγωγής, η οποία θεωρείται προσεγγιστικά «στερεά» και έχει την ίδια ταχύτητα U σε όλο το μήκος της. Η ταχύτητα U μπορεί να μεταβληθεί αν ασκηθεί πάνω στη μάζα m της υδάτινης στήλης μια δύναμη ΔF :

$$\Delta F = -m \frac{du}{dt} \quad (2.14)$$

Η δύναμη αυτή ΔF προέρχεται από την τοπική μεταβολή πιέσεως ΔH στο άκρο του στροβίλου:

$$\Delta F = A \cdot \rho \cdot g_r \cdot \Delta H, \quad (2.15)$$

όπου

ρ : Η πυκνότητα του νερού. Αν αντικατασταθεί το ΔF από την (2.15) στην (2.14) και εκφραστεί η μάζα m συναρτήσει της πυκνότητας $m = \rho AL$ έχουμε την εξής σχέση:

$$\frac{L}{g_r} \cdot \frac{dU}{dt} = -\Delta H \quad (2.16)$$

Όπου

L : Το μήκος του αγωγού προσαγωγής.

Αν εκφραστεί η (2.16) σε ανά μονάδα μεγέθη και χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός Laplace για μεταφορά στο πεδίο της συχνότητας προκύπτει:

$$T_w s \Delta u = -\Delta h \quad (2.17)$$

Όπου:

$$T_w = \frac{L \cdot U_0}{g_r H_0} \quad (2.18)$$

Η ποσότητα T_w ονομάζεται χρονική σταθερά αδρανείας του νερού ή χρόνος έναρξης νερού. Η ποσότητα αυτή είναι ανάλογη του μήκους του αγωγού προσαγωγής και εξαρτάται επίσης

από την ταχύτητα του νερού στο σημείο λειτουργίας. Τυπικές τιμές του T_w σε πλήρες φορτίο είναι από 0,5 έως 4 δευτερόλεπτα.

Από τις (2.9) και (2.13) απαλείφοντας το Δh και λύνοντας στη συνέχεια ως προς Δu :

$$\Delta u = \frac{\Delta g}{1+s \cdot T_w/2} \quad (2.19)$$

Η παραπάνω σχέση δηλώνει πως μία μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων ακολουθείται από αντίστοιχη ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας του νερού με βάση τη χρονική σταθερά $T_w/2$. Αντικαθιστώντας το Δh από την (2.17) στην (2.9) προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου χωρίς πύργο αναπάσεως και η οποία είναι η εξής:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g} = \frac{1-s \cdot T_w}{1+s \cdot T_w/2} \quad (2.20)$$

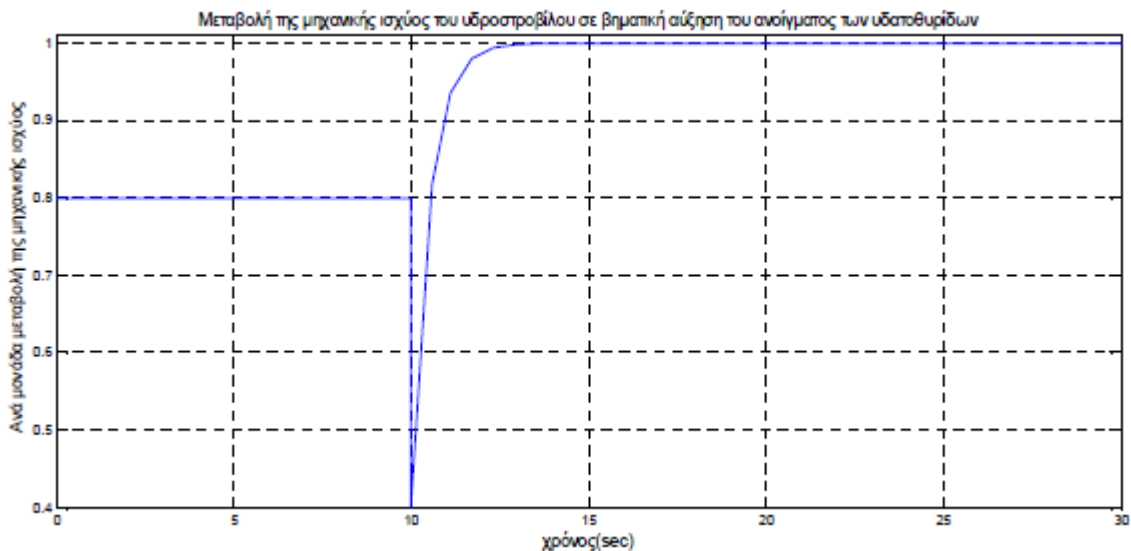
Η συνάρτηση μεταφοράς (2.20) είναι μία συνάρτηση «μη ελαχίστης φάσης», εφόσον έχει έναν πόλο στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο στο σημείο $(-\frac{2}{T_w}, 0)$, αλλά και ένα μηδενικό στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο στο σημείο $(\frac{1}{T_w}, 0)$. Τα συστήματα αυτά προσθέτουν μια πρόσθετη καθυστέρηση φάσης, η οποία ενισχύει την καθυστέρηση φάσης που εισάγεται από τους πόλους του αριστερού μιγαδικού ημιεπιπέδου. Θεωρώντας ότι συμβαίνει μία βηματική μεταβολή πλάτους A του ανοίγματος των υδατοθυρίδων, το θεώρημα αρχικής τιμής για τη συνάρτηση (2.20) υποδεικνύει ότι:

$$\lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ s \rightarrow \infty}} \Delta P_m = s \cdot \left(\frac{A}{s} \cdot \frac{1-s \cdot T_w}{1+s \cdot T_w/2} \right) = -2A \quad (2.21)$$

ενώ το θεώρημα τελικής τιμής:

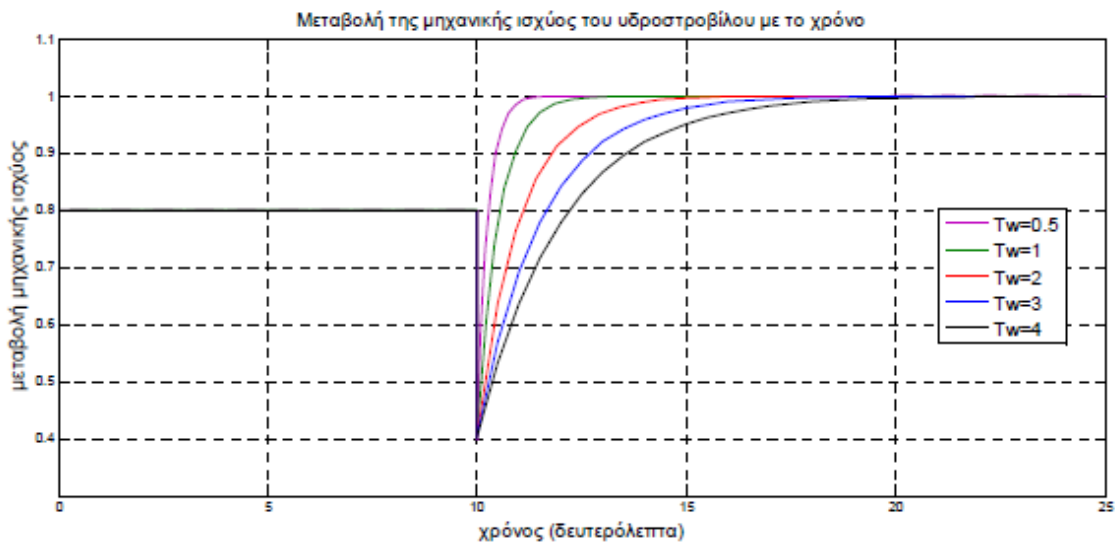
$$\lim_{\substack{t \rightarrow \infty \\ s \rightarrow 0}} \Delta P_m = s \cdot \left(\frac{A}{s} \cdot \frac{1-s \cdot T_w}{1+s \cdot T_w/2} \right) = A \quad (2.22)$$

Άρα, η συνάρτηση μεταφοράς (2.20) φανερώνει πως σε μία απότομη μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων η μεταβατική συμπεριφορά του υδροστροβίλου είναι ακριβώς αντίθετη από την επιδιωκόμενη. Αν για παράδειγμα κλείσουν απότομα οι θυρίδες, η ισχύς του στροβίλου αυξάνεται μεταβατικά λόγω υπερπίεσης, όπως φαίνεται από την σχέση (2.9) και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται και να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αντίθετα, αν ανοίξουν οι θυρίδες, η ισχύς του στροβίλου μεταβατικά μειώνεται. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ονομάζεται υδραυλικό πλήγμα ή φαινόμενο κριού και οφείλεται στην αδράνεια του νερού που βρίσκεται στον αγωγό προσαγωγής. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς (2.20) σε μία βηματική μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων τη χρονική στιγμή 10 sec:



Σχήμα 2.11 Μεταβολή της μηχανικής ισχύος υδροστροβίλου σε βηματική αύξηση του ανοίγματος των υδατοθυρίδων από 0.8 σε 1 α.μ.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού προσαγωγής, τόσο μεγαλύτερη είναι η χρονική σταθερά T_w από τη σχέση (2.18) και τόσο εντονότερη γίνεται η ανεπιθύμητη μεταβατική συμπεριφορά του υδροστροβίλου εξ' αιτίας του υδραυλικού πλήγματος. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



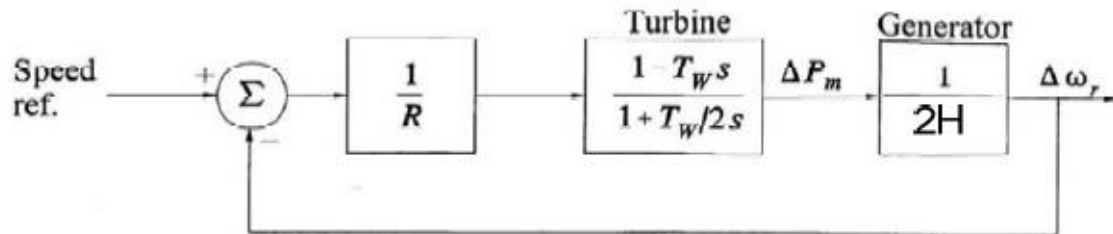
Σχήμα 2.12 Μεταβολή της μηχανικής ισχύος υδροστροβίλου σε βηματική αύξησης του ανοίγματος των υδατοθυρίδων και για διάφορες τιμές του συντελεστή T_w .

Στο σχήμα 2.12 γίνεται εμφανές πως το πλάτος του υδραυλικού πλήγματος δε μεταβάλλεται, αφού καθορίζεται από το θεώρημα αρχικής τιμής (2.21), αυξάνει όμως η διάρκεια του με την αύξηση του συντελεστή T_w .

Ένας τρόπος αποφυγής ή περιορισμού του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος είναι οι μηχανισμοί που περιορίζουν την ταχύτητα κίνησης των υδατοθυρίδων έτσι ώστε να αποφεύγονται απότομες μεταβολές του ανοίγματός τους και να πραγματοποιούνται βαθμιαίες και σταδιακές μεταβολές. Ένας πιο άλλος τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η κατασκευή πύργου αναπάλσεως ή ηρεμίσσεως. Αυτό ο τρόπος είναι και πιο αποτελεσματικός. Η αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων του υδραυλικού πλήγματος μπορεί να επιτευχθεί και με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού

προσαγωγής, μέθοδος η οποία μπορεί να είναι γενικά αντιοικονομική, αλλά αξίζει προσοχής και εφαρμογής, καθώς σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει στην αποφυγή άλλων περισσότερο δαπανηρών λύσεων.

Η τυπική διάταξη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού με απλό ρυθμιστή στροφών κέρδους $1/R$ παριστάνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.13 Υδροστρόβιλος με ρυθμιστή στροφών.

Ο υδροστρόβιλος παριστάνεται με τη συνάρτηση μεταφοράς (2.104) και η γεννήτρια με τη σταθερά αδρανείας της H .

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του κλειστού βρόχου του συστήματος είναι:

$$1 + \frac{1}{R} \cdot \frac{1 - s \cdot T_w}{1 + \frac{s \cdot T_w}{2}} \cdot \frac{1}{2 \cdot H \cdot s}$$

ή αλλιώς

$$T_w \cdot H \cdot R \cdot s^2 + (2 \cdot H \cdot R - T_w) \cdot s + 1 = 0$$

Επομένως, για να είναι ευσταθές το σύστημα και να βρίσκονται όλοι οι πόλοι του συστήματος στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες:

$$T_w \cdot H \cdot R > 0, \text{ το οποίο ισχύει πάντοτε.}$$

Αλλά και

$$2 \cdot H \cdot R - T_w > 0$$

2.3.5 Υδραυλικό πλήγμα

Τα μη μόνιμα υδραυλικά φαινόμενα, όπως το υδραυλικό πλήγμα, είναι αποτέλεσμα της μεταβολής των συνθηκών της ροής από μία αρχική μόνιμη κατάσταση σε μία άλλη μόνιμη κατάσταση και εκδηλώνονται ως χρονική μεταβολή της ταχύτητας και της στατικής πίεσης (ή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας) σε κάθε σημείο του συστήματος. Για τη μελέτη των φαινομένων αυτών υπεισέρχεται και η διάσταση του χρόνου με αποτέλεσμα οι εξισώσεις που τα περιγράφουν να είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις και όχι κανονικές διαφορικές μέσω των οποίων περιγράφονται τα μόνιμα φαινόμενα. Η ανάπτυξη τέτοιων μεταβατικών φαινομένων οφείλεται ουσιαστικά στην αδράνεια της μάζας του ρευστού που βρίσκεται εν κινήσει στο εσωτερικό της εγκατάστασης έχοντας αποθηκεύσει κινητική

ενέργεια. Για αυτό τον λόγο τα φαινόμενα αυτά είναι πολύ πιο έντονα στην περίπτωση της ροής ενός υγρού παρά ενός αερίου.

Μη μόνιμα μεταβατικά φαινόμενα εμφανίζονται σε υδραυλικά συστήματα με κλειστούς ή ανοιχτούς αγωγούς, όπου η πίεση αντικαθίσταται από την στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

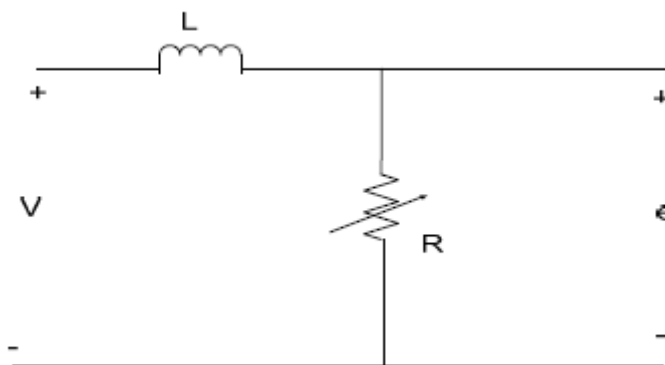
Τα μη μόνιμα φαινόμενα σε υδραυλικά συστήματα διακρίνονται σε δύο τύπους:

- Αυτά στα οποία η μεταβολή από τη μία μόνιμη κατάσταση στην άλλη γίνεται με αργό ρυθμό, οπότε δεν είναι ανάγκη να ληφθεί υπ' όψιν η συμπίεστικότητα του ρευστού ή η ελαστικότητα του αγωγού. Τυπικό παράδειγμα αυτού είναι οι ταλαντώσεις μάζας του υγρού σε νοειδή σωλήνα.
- Αυτά στα οποία η μεταβολή γίνεται με γρήγορο ρυθμό, οπότε για την περιγραφή τους πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η συμπίεστικότητα του ρευστού και η ελαστικότητα του αγωγού. Σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο ονομάζεται υδραυλικό πλήγμα (water hammer).

Τα μη μόνιμα φαινόμενα στα υδραυλικά συστήματα έχουν πολύ μεγάλο τεχνικό ενδιαφέρον καθώς συνοδεύονται από σημαντικές μεταβολές της στατικής πίεσης υπό μορφή υποπίεσεων ή υπερπίεσεων συχνά πολύ μεγαλύτερης τάξεως από τη στατική πίεση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο την αντοχή του συστήματος, ενώ επίσης είναι δυνατόν να προκαλέσουν θόρυβο, κόπωση ή σπηλαίωση.

2.3.6 Ηλεκτρικό ανάλογο υδραυλικού πλήγματος

Προκειμένου να κατασκευαστεί το ηλεκτρικό ανάλογο ενός υδραυλικού συστήματος χρειάζεται να οριστεί η αντιστοιχία ανάμεσα στα υδραυλικά και τα ηλεκτρικά μεγέθη. Έτσι, η υψομετρική διαφορά ή η διαφορά πίεσεως Δh αντιστοιχεί στη διαφορά δυναμικού ΔV και η παροχή Q στην ένταση ρεύματος I . Το μοντέλο του υδροστροβίλου που παρουσιάστηκε παραπάνω στηρίζεται στην υπόθεση πως η μάζα του νερού μέσα στον αγωγό προσαγωγής είναι συγκεντρωμένη, όπως η μάζα ενός στερεού σώματος. Συνεπώς, η αδράνεια που εμφανίζει αυτή η μάζα αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό ανάλογο με την αυτεπαγωγή μιας γραμμής, η οποία δεν επιτρέπει απότομες μεταβολές στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που τη διαρρέει. Επιπλέον, μία δεξαμενή αποθήκευσης νερού αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό ανάλογο με ένα πυκνωτή, ενώ η μεταβολή της ροής που προκαλείται από τα ρυθμιστικά πτερύγια μπορεί να παρασταθεί στο ηλεκτρικό ανάλογο με μία ρυθμιζόμενη ωμική αντίσταση. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το ηλεκτρικό ανάλογο ενός υδροστροβίλου (με συγκεντρωμένες παραμέτρους) είναι το εξής κύκλωμα:



Σχήμα 2.14 Ηλεκτρικό ανάλογο υδροστροβίλου.

Είσοδος θεωρείται η μεταβολή της ρυθμιζόμενης αντίστασης ΔR (αντίστοιχη με τη μεταβολή των υδατοθυρίδων Δg), ενώ έξοδος η μεταβολή της στιγμιαίας ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται πάνω στην μεταβλητή αντίσταση R (αντίστοιχη της μεταβολής της μηχανικής ισχύος ΔP_m του υδροστροβίλου). Στο παραπάνω σχήμα, η τάση V θεωρείται σταθερή και αντιστοιχεί στη σταθερή πίεση που επικρατεί στο προς τη δεξαμενή άκρο του αγωγού, ενώ η τάση e είναι μεταβλητή και αντιστοιχεί στην πίεση που επικρατεί στο προς το στρόβιλο άκρο του αγωγού.

Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει για το ηλεκτρικό ανάλογο του υδροστροβίλου έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με την αντίστοιχη του υδροστροβίλου. Αυξάνοντας λοιπόν, την αντίσταση-φορτίο με σκοπό τη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος P , το αρχικό-μεταβατικό αποτέλεσμα θα είναι ακριβώς αντίθετο (αύξηση της ισχύος).

2.3.7 Ρυθμιστής στροφών

Ο ρόλος του ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό στον υδροστροβίλο είναι ο περιορισμός της κίνησης των υδατοθυρίδων και συνεπώς του υδραυλικού πλήγματος.

Επιτυγχάνει επί της ουσίας την εξισορρόπηση της παραγόμενης με τη ζητούμενη ισχύ και τη διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρυθμιστής αντιλαμβάνεται οποιαδήποτε μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας, δηλαδή της συχνότητας του δικτύου και η μεταβολή αυτή μετασχηματίζεται σε σήμα-εντολή για τη μετακίνηση των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου, προκειμένου να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από αυτόν.

Η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή στροφών είναι η:

$$\frac{\Delta g}{\Delta \omega_r - \Delta \omega} = \frac{1 + T_R \cdot s}{\sigma + \delta \cdot T_R \cdot s} \quad (2.23)$$

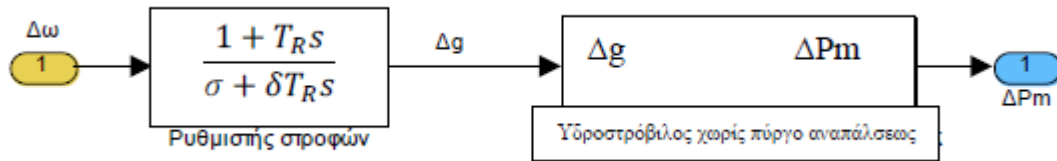
Όπου

δ : ο μεταβατικός στατισμός της γεννήτριας

σ : ο μόνιμος στατισμός της γεννήτριας

T_R : η χρονική σταθερά επαναφοράς του μηχανισμού μεταβατικού στατισμού

Από τη παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς (2.23) επειδή $\delta \cdot T_R \gg \sigma$ προκύπτει πως η μικρή τιμή του μόνιμου στατισμού σ προσεγγίζεται σχετικά αργά και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές της υδατοθυρίδας που προκαλούν το υδραυλικό πλήγμα. Σε μία απότομη μεταβολή των υδατοθυρίδων για $t \rightarrow 0$ και $s \rightarrow \infty$, κυριαρχεί η μεγάλη τιμή του μεταβατικού στατισμού στη συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή στροφών (2.23). Στη συνέχεια, ο στατισμός μειώνεται προς την τιμή της μόνιμης κατάστασης σ με ρυθμό που καθορίζεται από το χρόνο T_R εμποδίζοντας τελικά την απότομη μετακίνηση του ανοίγματος Δg . Το μοντέλο που περιλαμβάνει τον υδροστροβίλο και τον ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.15 Μοντέλο προσομοίωσης υδροστροβίλου με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό.

Οι τιμές του μόνιμου στατισμού σ κυμαίνονται από 0,03 έως 0,06, οι τιμές της χρονικής σταθεράς T_R επιλέγονται συνήθως ώστε $T_R = 5 \cdot T_w$ και οι τιμές του μεταβατικού στατισμού δ ώστε $\delta \approx 2,5 \cdot T_w / (2 \cdot H)$.

2.3.8 Κυματικά φαινόμενα στον αγωγό προσαγωγής

Η προηγούμενη ανάλυση του υδροστροβίλου βασίστηκε στην παραδοχή της «στερεάς» υδάτινης στήλης και ομολογουμένως στην ανάλυση των περισσότερων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η συνάρτηση μεταφοράς (2.20) περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τη δυναμική συμπεριφορά του υδροστροβίλου. Παρ' όλα αυτά, για μια πιο αναλυτική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του, χρειάζεται να ληφθεί υπ' όψιν και η συμπίεστικότητα του νερού. Έτσι θα πρέπει να θεωρηθεί η υδάτινη στήλη στον αγωγό προσαγωγής όχι σαν στερεό αλλά σαν μέσο μετάδοσης κυμάτων πίεσης.

Με αυτήν την προϋπόθεση, η κυματική συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου στηρίζεται στην παρακάτω σχέση μεταξύ των κανονικοποιημένων μεταβολών πίεσης Δh και ροής Δq :

$$\frac{\Delta h}{\Delta q}(s) = -\frac{T_w}{T_e} \cdot \tan h(T_e \cdot s) \quad (2.24)$$

όπου

T_e : Η σταθερά χρόνου και είναι ίση με το χρόνο που απαιτείται για να διατρέξει το κύμα πίεσης

L : το μήκος του αγωγού και

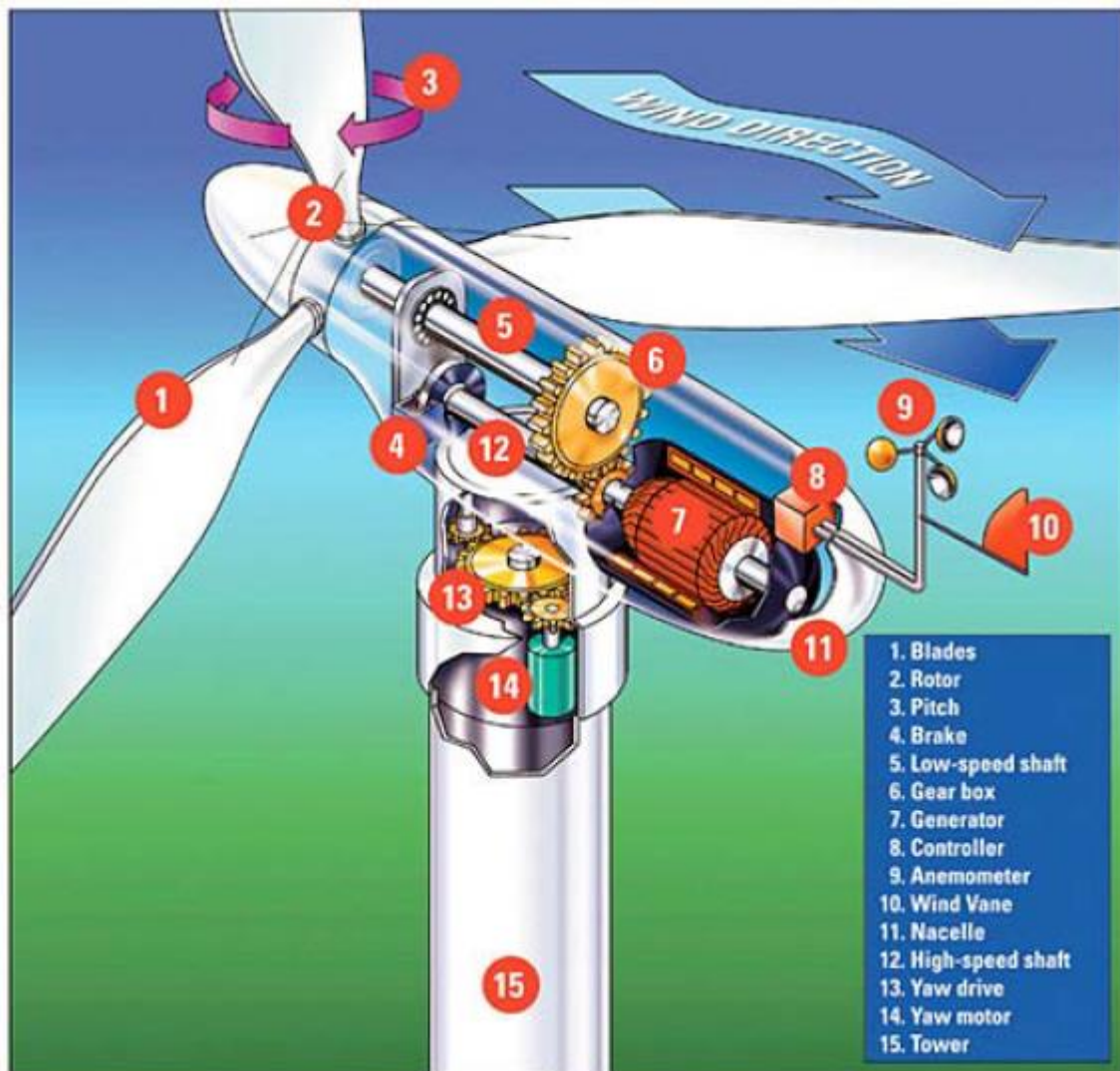
T_w : Η σταθερά αδρανείας του νερού, που έχει ήδη οριστεί στη σχέση (2.18).

Με βάση την (2.24) η κυματική συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g}(s) = \frac{1 - \frac{T_w}{T_e} \cdot \tan h(T_e \cdot s)}{1 + \frac{T_w}{2 \cdot T_e} \cdot \tan h(T_e \cdot s)} \quad (2.25)$$

Για περιπτώσεις όπου έχουμε μικρούς αγωγούς και για χαμηλές συχνότητες, όπου το T_e είναι μικρό, η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να απλοποιηθεί με βάση τη σχέση $\tanh(x) \approx x$, η οποία ισχύει μόνο για μικρές τιμές του x . Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση (2.25) καταλήγει στην (2.20), στην οποία αμελούνται τα κυματικά φαινόμενα. Συνεπώς, η (2.20) μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις σχετικά αργών μεταβατικών φαινομένων (μικρών συχνοτήτων) και για μικρού ή μεσαίου μήκους αγωγούς. Για τη μελέτη ταχέων μεταβατικών φαινομένων, καθώς και για μεγάλου μήκους αγωγούς είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται η κυματική συνάρτηση μεταφοράς (2.20). [4], [6]

2.4 Ανεμογεννήτρια



Σχήμα 2.16 Βασικά υποσυστήματα ανεμογεννήτριας.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας. Παρουσιάζονται τα εξής βασικά σημεία:

- Η νασσέλλα, που περικλείει τα στοιχεία της Α/Γ.
- Ο δρομέας, το κινούμενο μέρος της Α/Γ, που αποτελείται από τα πτερύγια, την πλήμνη και τον άξονα.
- Το κιβώτιο ταχυτήτων, για τον πολλαπλασιασμό των στροφών του άξονα.
- Η ηλεκτρική γεννήτρια.
- Ο έλεγχος της κλίσης των πτερυγίων (pitch control).
- Ο μηχανισμός περιστροφής της ατράκτου (yaw control).
- Το σύστημα πέδησης.
- Το ανεμόμετρο.
- Τα ηλεκτρονικά ισχύος με τα συστήματα ελέγχου.

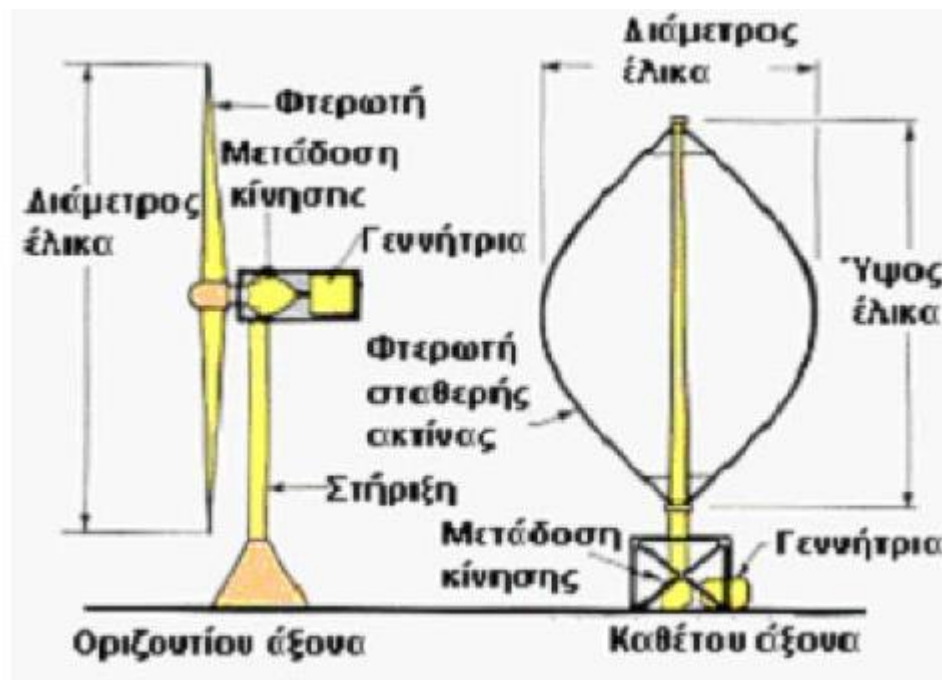
- Οι διατάξεις αντιστάθμισης και τα φίλτρα.
- Οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας (ηλεκτρονόμοι προστασίας, σύστημα ομαλής εκκίνησης κ.λ.π.).
- Ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης, όποτε υπάρχει.

Η λειτουργία μιας Α/Γ έχει ως εξής: Αρχικά η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται από το δρομέα σε στρεφόμενη μηχανική ενέργεια και η οποία στη συνέχεια διοχετεύεται μέσω του άξονα στο ρότορα της γεννήτριας. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μεταξύ του δρομέα και της γεννήτριας, παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων, που πολλαπλασιάζει τις στροφές του άξονα χαμηλών στροφών. Στο ρότορα της ηλεκτρικής γεννήτριας, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αποδίδεται στο δίκτυο, ενώ σύνηθες είναι η παρεμβολή και ενός μετασχηματιστή ανύψωσης για την προσαρμογή της τάσης σε αυτή του δικτύου. Προκειμένου να επιτυγχάνεται καλύτερη λειτουργία της Α/Γ, χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ελέγχου τόσο του μηχανικού όσο και του ηλεκτρικού τμήματός της. Ένας από αυτούς είναι ο μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού (yaw control), ο οποίος περιστρέφει την άτρακτο και την έλικα, με στόχο να διατηρείται το επίπεδο περιστροφής του δρομέα συνεχώς κάθετο προς την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε ο δρομέας να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την ενέργεια του. Βέβαια, τα στρεφόμενα πτερύγια, έχοντας μεγάλες σταθερές αδράνειας, παράγουν υψηλές γυροσκοπικές ροπές κατά τη διάρκεια του προσανατολισμού και συχνά έχουν ως αποτέλεσμα υψηλό θόρυβο, ο οποίος υπερβαίνει τα τοπικά αποδεκτά όρια. Επίσης, ο έλεγχος της γωνίας βήματος πραγματοποιείται μέσω ενός σερβομηχανισμού, που αλλάζει τη γωνία των πτερυγίων, με σκοπό την ελεγχόμενη εκμετάλλευση ισχύος σε διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Στις περισσότερες συνδεσμολογίες Α/Γ χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου. Μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος ελέγχεται η ισχύς που ανταλλάσσει η γεννήτρια με το δίκτυο.

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

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



Σχήμα 2.17 Α/Γ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.

2.4.1 Κατηγορίες και μέρη ανεμογεννήτριας

Κατακόρυφου άξονα Α/Γ

Στις Α/Γ κατακόρυφου άξονα, ο δρομέας είναι τοποθετημένος κατακόρυφα. Υπάρχουν τρεις τύποι Α/Γ κατακόρυφου άξονα. Ο ευρέως χρησιμοποιούμενος είναι ο τύπου Darrieus. Οι άλλοι δύο είναι η Α/Γ τύπου Savonius και η «μεταβαλλόμενης γεωμετρίας» Α/Γ, που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα πλεονεκτούν στο ότι δεν απαιτούν σύστημα προσανατολισμού του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου (yaw mechanism) για να είναι αποτελεσματικές, γεγονός σημαντικό κυρίως σε περιοχές όπου η κατεύθυνση του ανέμου έχει υψηλή μεταβλητότητα. Ακόμη, η τοποθέτηση του συστήματος μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια (πολλαπλασιαστής στροφών, γεννήτρια) γίνεται στο έδαφος, οπότε δεν απαιτείται πυλώνας. Γενικά, η δομή Α/Γ κατακόρυφου άξονα είναι απλούστερη κατασκευαστικά, αλλά παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα. Το κατώτερο μέρος του δρομέα είναι πολύ κοντά στο έδαφος, οπότε λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου έχει μέτρια συνολική απόδοση. Επίσης η αεροδυναμική της ισχύς ταλαντώνεται έντονα λόγω της συνεχούς αλλαγής του βήματος των πτερυγίων. Επιπλέον, δεν εκκινούν μόνες τους, αλλά πρέπει αρχικά να λειτουργήσουν σαν κινητήρες, παίρνοντας ρεύμα απ' το δίκτυο.

Οριζόντιου άξονα Α/Γ

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα διαθέτουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα και γι' αυτό είναι οι πλέον διαδεδομένες. Έχουν τον άξονα περιστροφής του δρομέα τοποθετημένο οριζόντια και σχεδόν παράλληλα με την κατεύθυνση ροής του ανέμου. Γενικά, έχουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή. Το μειονέκτημά τους είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να τοποθετηθούν στην κορυφή του πύργου, γεγονός που κάνει το

σχεδιασμό τους πιο σύνθετο και ακριβό. Άλλο μειονέκτημά τους είναι η ανάγκη ύπαρξης σερβομηχανισμού, για τον προσανατολισμό της έλικας προς τον άνεμο.

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

Τον πύργο

Πάνω στον πύργο τοποθετείται η έλικα και η άτρακτος. Το ύψος του κυμαίνεται μεταξύ των 50-120 μέτρων. Για Α/Γ μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, ο πύργος είναι ελαφρώς υψηλότερος από τη διάμετρο της έλικας. Για Α/Γ μικρού μεγέθους, ο πύργος είναι συνήθως λίγες φορές μεγαλύτερος από τη διάμετρο της έλικας για να αποφεύγεται το φτωχό αιολικό περιεχόμενο σε μικρά ύψη πάνω από το έδαφος. Οι σύγχρονοι πύργοι κατασκευάζονται είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε από μέταλλο (δικτυωτοί ή συνηθέστερα σωληνωτοί). Κατά την κατασκευή του πύργου, κύριος στόχος είναι η αποφυγή συνθηκών συντονισμού. Οι ταλαντώσεις του και οι περιοδικές καταπονήσεις του που προέρχονται από τις διακυμάνσεις του ανέμου, πρέπει όσο το δυνατό να ελαχιστοποιούνται. Τέλος ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του, σε συνδυασμό με την συνολική συναρμολόγηση της Α/Γ είναι βασικής σημασίας για την επιλογή του πύργου.

Το δρομέα

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

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

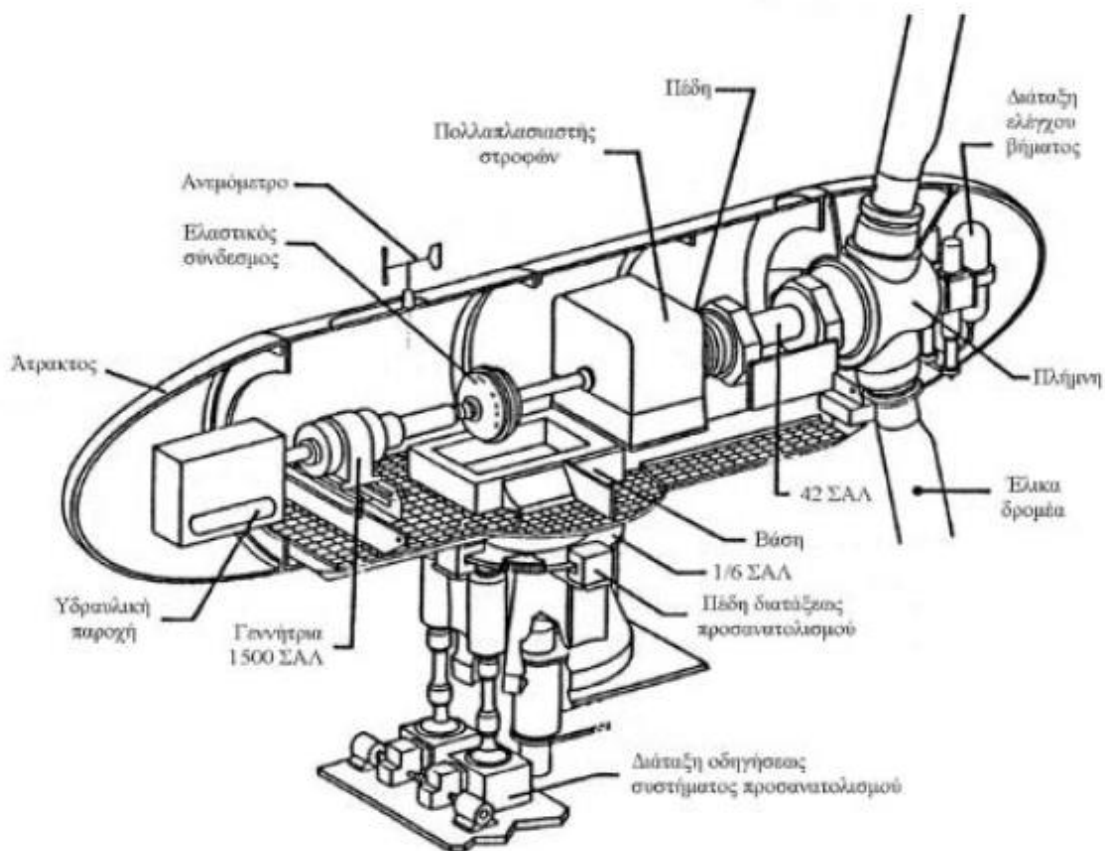
Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα, ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους, χωρίζονται σε μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες ή πολύπτερες. Οι μονόπτερες είναι φτηνότερες, αλλά απαιτείται η τοποθέτηση αντίβαρου στην πλήμνη για εξισορρόπηση, ενώ ανάλογο πρόβλημα προκύπτει σε μικρότερη έκταση και στις δίπτερες Α/Γ.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

πολύπτερους, αν και οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως στην άντληση υδάτων.

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

Την άτρακτο (ή νασσέλλα)

Η άτρακτος, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, αποτελείται από το σύστημα έδρασης του δρομέα στον πύργο, τον πολλαπλασιαστή στροφών, τη γεννήτρια, το μηχανισμό ελέγχου του βήματος των πτερυγίων, το σύστημα περιστροφής και προσανατολισμού καθώς και το μηχανικό φρένο.



Σχήμα 2.18 Σχηματική αναπαράσταση της ατράκτου.

[11], [12], [13]

Επιπλέον οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους σε:

- Σταθερών στροφών (fixed speed)
- Μεταβλητών στροφών (variable speed)

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

Παρότι αποτελούν την πρώτη κατηγορία ανεμογεννητριών που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε, συνεχίζουν ακόμα και σήμερα να αποτελούν ένα σημαντικό μερίδιο των εν λειτουργία Α/Γ. Δύναται να λειτουργούν είτε σε συνδυασμό με γεννήτριες επαγωγής είτε με σύγχρονες γεννήτριες, όμως επιλέγεται πάντα η χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, κυρίως τύπου κλωβού, επειδή οι σύγχρονες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαίτερα έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά της απόκρισής τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου, καθώς και το αυξημένο κόστος και βάρος τους.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των Α/Γ σταθερών στροφών είναι:

- Το μικρό κόστος, καθώς για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δε χρειάζεται η ύπαρξη των ηλεκτρονικών μετατροπών, των οποίων το κόστος είναι σημαντικό.
- Απλή κατασκευή και σχετικά μικρό βάρος.
- Εξαιρετική αξιοπιστία και περιορισμένη ανάγκη συντήρησης.

Παρ' όλα αυτά, οι Α/Γ σταθερών στροφών συγκεντρώνουν και πληθώρα μειονεκτημάτων, όπως τα εξής:

- Λόγω των σταθερών στροφών, αδυνατούν να λειτουργούν υπό βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και επειδή η ταχύτητα τους είναι πρακτικά ίση με την συχνότητα του δικτύου, δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τις ριπές του ανέμου υπό μορφή μηχανικής ενέργειας, με αποτέλεσμα αυτές να εκφράζονται ως διακυμάνσεις ροπής και να προκαλούν με τη σειρά τους διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος του δικτύου.
- Η ασύγχρονη γεννήτρια, η οποία χρησιμοποιείται συνηθέστερα απαιτεί την απορρόφηση αέργου ισχύος.
- Κατά την εκκίνηση και τη ζεύξη-απόζευξη των γεννητριών σταθερών στροφών, λαμβάνουν χώρα έντονα μεταβατικά φαινόμενα.

Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών λοιπόν αποτελούν σήμερα την κυρίαρχη επιλογή για τις νέες εγκαταστάσεις Α/Γ. Ένας από τους κύριους λόγους για τον οποίο επιλέγονται, είναι η ύπαρξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, που προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο και δυνατότητα επίβλεψης της λειτουργίας στους διαχειριστές του δικτύου.

Εξαιτίας της ύπαρξης του μετατροπέα, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών μπορούν και λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Η ταχύτητα περιστροφής τους μεταβάλλεται με τη βοήθεια του μετατροπέα με βάση την τιμή του εισερχόμενου ανέμου, έχοντας ως στόχο την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι μεταβολές του ανέμου σταματούν να υφίστανται ως πρόβλημα και οι διακυμάνσεις ισχύος απορροφώνται μέσω των αλλαγών στην ταχύτητα της Α/Γ. Ορισμένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι:

- Μειωμένες μηχανικές καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και αυξημένη διάρκεια ζωής.
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και προσαρμογή της Α/Γ στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες, αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εξαιτίας της λειτουργίας με μεταβλητή ταχύτητα, είναι δυνατή η συνεχής προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας της Α/Γ στην ταχύτητα του ανέμου, προκειμένου να εξασφαλίζεται μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής.
- Μειωμένος ακουστικός θόρυβος, αφού είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, σε περίπτωση ασθενούς ανέμου.
- Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων.

Ακόμα, η ύπαρξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα παρέχει πρόσθετα πλεονεκτήματα στη λειτουργία των Α/Γ μεταβλητών στροφών, όπως τα εξής:

- Δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης ενεργού και αέργου ισχύος.
- Καλύτερη ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος εξόδου (μείωση διακυμάνσεων ισχύος, βελτιωμένο επίπεδο flicker, περιορισμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης) και γενικότερα καλύτερη δυναμική συμπεριφορά.
- Γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα.

Από την άλλη πλευρά, ορισμένα μειονεκτήματα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι τα εξής:

- Αυξημένο κόστος εξαιτίας των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονικών ισχύος.
- Απώλειες στον μετατροπέα ισχύος.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα.
- Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο και η εξ' αυτών ανάγκη εγκατάστασης φίλτρων στο δίκτυο.

Ένα διαφορετικό, αλλά εξίσου σημαντικό κριτήριο κατηγοριοποίησης των Α/Γ είναι ο τρόπος ελέγχου του περιορισμού υψηλών αεροδυναμικών ροπών. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, οι ανεμογεννήτριες κατηγοριοποιούνται στις εξής δύο κατηγορίες:

- Α/Γ με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control).
- Α/Γ με έλεγχο της αεροδυναμικής ανυψώσεως ή αεροδυναμικό έλεγχο (stall control).

Οι Α/Γ με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control) εξασφαλίζουν την διατήρηση σταθερής παραγόμενης ισχύος στην ονομαστική τιμή για λειτουργία της Α/Γ πάνω από την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου. Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από την ονομαστική, η γωνία βήματος της έλικας ρυθμίζεται σε μια ελάχιστη τιμή, με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιείται μέγιστη εκμετάλλευση της αεροδυναμικής ισχύος. Πρόκειται επί της ουσίας για Α/Γ με πτερύγια, τα οποία μπορούν να περιστρέφονται κατά το διαμήκη άξονα

τους. Με τη μεταβολή του βήματος της έλικας, δηλαδή της γωνίας β που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση της κίνησης (pitch angle), ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η ασκούμενη ροπή. Έτσι, όταν η Α/Γ λειτουργεί με άνεμο μεγαλύτερο του ονομαστικού, τα πτερύγια στρέφονται κατά κατάλληλη γωνία μέσα από ένα σύστημα ελέγχου και εξασφαλίζεται με αυτόν τον τρόπο ότι δε θα αναπτυχθεί ροπή μεγαλύτερη της ονομαστικής. Για να σταματήσει η περιστροφή της Α/Γ όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της έλικας σε μηχανική καταπόνηση, τα πτερύγια στρέφονται στις 90° , ώστε να παρουσιάζουν την ελάχιστη αντίσταση.

Κάποια από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των Α/Γ με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control) είναι:

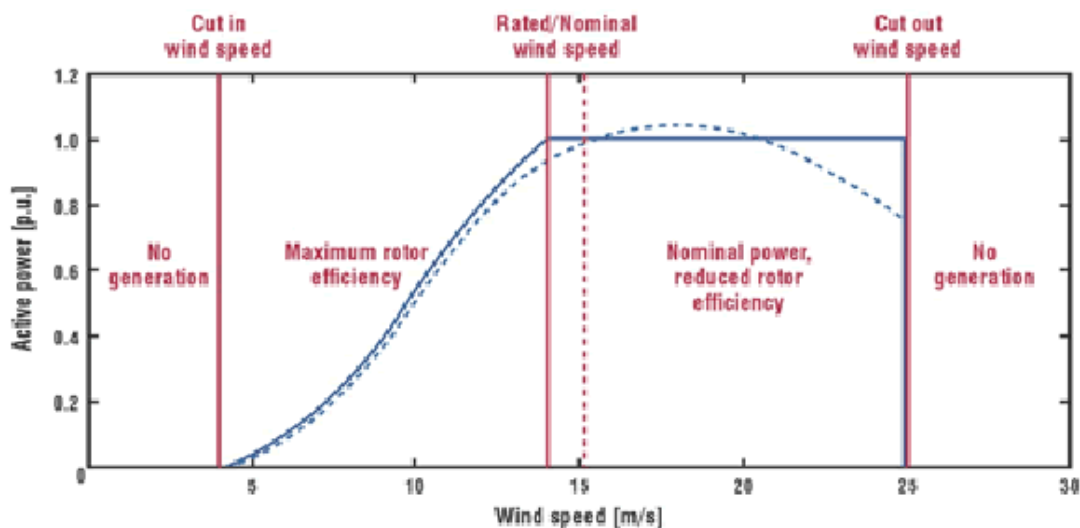
- Η ανάπτυξη χαμηλότερων φορτίων στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της Α/Γ.
- Ο περιορισμός της αεροδυναμικής ισχύος, χωρίς διακοπή της λειτουργίας.
- Η δυνατότητα επίτευξης καλύτερης απόδοσης σε χαμηλό άνεμο.

Από την άλλη πλευρά τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του τύπου Α/Γ είναι:

- Η αυξημένη πολυπλοκότητα, λόγω του συστήματος ελέγχου των πτερυγίων
- Η καταπόνηση τους λόγω αδρανειακής φόρτισης.

Όσον αφορά στις Α/Γ με αεροδυναμικό έλεγχο (stall control) πρέπει να σημειωθεί ότι διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης, τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Κυρίαρχο πλεονέκτημά των Α/Γ αυτών αποτελεί το γεγονός ότι δεν χρειάζονται μηχανισμό μεταβολής του βήματος της έλικας και συνεπώς αποτελούν απλούστερες και στιβαρότερες κατασκευές. Μειονεκτήματα αυτού του τύπου Α/Γ είναι το γεγονός ότι τα πτερύγια της υφίστανται μεγαλύτερες μηχανικές καταπονήσεις και ότι σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζεται μείωση της παραγόμενης ισχύος, όπως επίσης και η αδυναμία ελέγχου της εξαγόμενης ισχύος.

Για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου, η λειτουργία μίας Α/Γ με pitch control και μίας Α/Γ με stall control φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.19 Τυπικές καμπύλες ισχύος για διάφορες περιοχές λειτουργίας Α/Γ τύπου Stall (διακεκομμένη γραμμή) και Α/Γ τύπου Pitch-Controlled (συνεχής γραμμή).

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο, βάσει του οποίου κατηγοριοποιούνται οι ανεμογεννήτριες, είναι η διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους. Η κατηγοριοποίηση αυτή φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	Τύπος γεννήτριας	Σταθερών στροφών	Μεταβλητών στροφών
ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	Κλωβού	Απ' ευθείας σύνδεση	Σύνδεση με AC/DC/AC
			Σύνδεση με κυκλομετατροπέα AC/AC
	Με δακτυλίου		Με έλεγχο ολίσθησης (optislip)
			Διπλή τροφοδότηση με AC/DC/AC
ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	Με ηλεκτρική διέγερση	Απευθείας Σύνδεση	Σύνδεση με AC/DC/AC
	Με μόνιμους μαγνήτες		Σύνδεση με AC/DC/AC
			Σύνδεση με κυκλομετατροπέα AC/AC
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ		Απευθείας σύνδεση σε δίκτυο DC	
		Με αντιστροφή DC/AC δίκτυο AC	

Σχήμα 2.20 Τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους μιας Α/Γ.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τύποι στην αγορά είναι:

- Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο. Διακρίνεται για το μικρό βάρος, την απλότητα στην κατασκευή, την αξιοπιστία και το μειωμένο κόστος, λόγω έλλειψης μετατροπέα. Απαιτεί σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών για αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.
- Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι η ανάγκη τακτικής συντήρησης και η ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων. Η Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης αποτελείται από την γεννήτρια και έναν μετατροπέα back-to-back, από τον οποίο διέρχεται μόνο ένα ποσοστό της ισχύος, συνήθως το 1/3, γεγονός που μειώνει το κόστος.

- Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Η γεννήτρια είναι ικανή να παράγει το πεδίο της, είτε με ηλεκτρική διέγερση, είτε με μόνιμους μαγνήτες, με αποτέλεσμα από την πλευρά της γεννήτριας να χρειάζεται ένας απλός ανορθωτής διόδων. Μειονέκτημα όμως της τοπολογίας αυτής είναι ότι η γεννήτρια είναι μεγάλη, βαριά και πολύπλοκη, ενώ από τον μετατροπέα διέρχεται το 100% της ισχύος. [6]

2.4.2 Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μοντελοποιείται ανεμογεννήτρια που διαθέτει Σύγχρονη Μηχανή Μόνιμων Μαγνητών (PMSG). Πέραν τούτου, δηλαδή του ηλεκτρικού μέρους, η μοντελοποίηση περιλαμβάνει και το αεροδυναμικό μέρος, το μηχανικό μέρος, όπως επίσης και διάφορους ελεγκτές, όπως ο pitch controller, αφού μιλάμε για ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών και μεταβλητού βήματος. Η λογική του συνολικού μοντέλου είναι η εξής:

Μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου διαβιβάζεται στο αεροδυναμικό μοντέλο, το οποίο έχει επίσης ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων του δρομέα, αλλά και τη γωνία του βήματος της έλικας. Η έξοδος του αεροδυναμικού μοντέλου είναι η διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύς και αυτή διαβιβάζεται σαν είσοδος στο μηχανικό μοντέλο. Το μηχανικό μοντέλο όμως διαθέτει και δεύτερη είσοδο και αυτή είναι η ηλεκτρομαγνητική ισχύς που προέρχεται από το ηλεκτρικό μέρος της γεννήτριας. Η έξοδος του μηχανικού μοντέλου είναι η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων. Η γωνιακή ταχύτητα και η τάση είναι οι είσοδοι του ηλεκτρικού μέρους, από το οποίο όπως αναφέρθηκε προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ισχύς. Η γωνία βήματος που αναφέρθηκε παραπάνω προκύπτει ως έξοδος του pitch controller. Όλα τα υποσυστήματα παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Αεροδυναμικό μέρος

Η ισχύς ενός ομοιόμορφου ρεύματος αέρα που κινείται με ταχύτητα V_w προκύπτει από την παρακάτω σχέση

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3$$

Όπου

ρ : η πυκνότητα του αέρα που σε κανονικές συνθήκες ισούται με 1.25 kg/m^3

$R(\text{m})$: η ακτίνα ενός θεωρητικού κυλίνδρου μέσα στον οποίο κινείται το ρεύμα αέρα

$V_w (\text{m/sec})$: η ταχύτητα του ανέμου

Η παραπάνω σχέση ισχύει ιδανικά, όταν η ροή ανέμου είναι σταθερή, κατάσταση που δεν υφίσταται στην πράξη. Παρ' όλα αυτά στα πλαίσια της εργασίας η σχέση κρίνεται επαρκής. Η ανεμογεννήτρια προφανώς δεν απορροφά το σύνολο της κινητικής ενέργειας του ανέμου, καθώς αν συνέβαινε κάτι τέτοιο θα έπρεπε η ταχύτητα του ανέμου μετά την ανεμογεννήτρια να είναι μηδενική. Επομένως η Α/Γ απορροφά ένα ποσοστό της κινητικής ενέργειας. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p . Το θεωρητικό άνω όριο αυτού του συντελεστή είναι το όριο του Betz ισούται με 0,593. Συνεπώς σε οποιαδήποτε περίπτωση και κάτω υπό οποιοσδήποτε συνθήκες το μέγιστο

ποσοστό που μπορεί να απορροφηθεί από την Α/Γ δεν μπορεί να υπερβαίνει το 59,3% της διαθέσιμης αιολικής ισχύς. Άρα η μηχανική ισχύς που μπορεί να απορροφήσει μια Α/Γ δίνεται από τον τύπο:

$$Pt = CpP_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V_w^3$$

Όπου

λ : ο λόγος ταχύτητας των ακροπτερυγίων.

β : η γωνία βήματος της έλικας σε μοίρες.

Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων προκύπτει από την σχέση

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{V_w}$$

Όπου

ω_t : (rad/sec) η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων

Η τιμή του C_p είναι συνάρτηση της γωνίας βήματος(β) και του λόγου ακροπτερυγίων (λ). Πρόκειται για μια μη γραμμική σχέση, όπου έχουν διατυπωθεί πολλές προτάσεις για τον προσδιορισμό της και άρα και της τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η εξής:

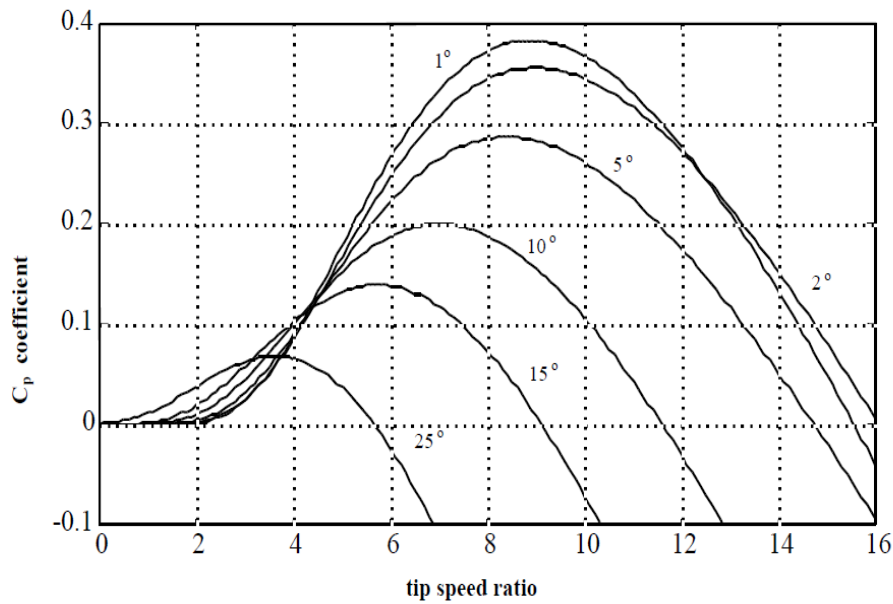
$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_6}{\lambda_i}}$$

$$\text{Όπου ισχύει } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$

Οι τιμές των παραμέτρων είναι

$$C_1 = 0,22, C_2 = 116, C_3 = 0,4, C_4 = 5, C_6 = 12,5$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος β οι καμπύλες του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει του λόγου ακροπτερυγίων λ .



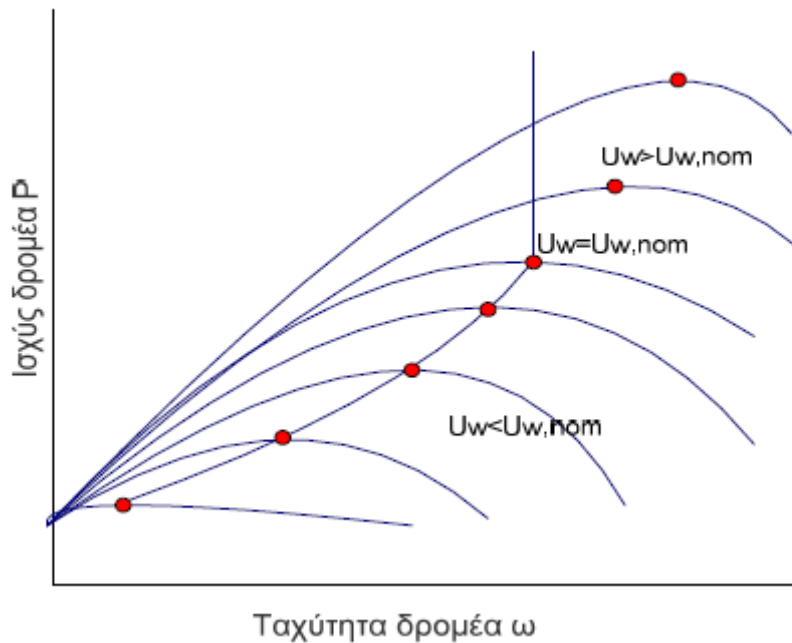
Σχήμα 2.21 Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος συναρτήσει του λόγου ακροπτερυγίων για διάφορες γωνίες βήματος $\beta=0^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ [14]

Είναι φανερό ότι η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p επιτυγχάνεται για τιμές του λόγου ακροπτερυγίων λ μεταξύ 6 με 9, όταν δηλαδή το άκρο των πτερυγίων κινείται 6 έως 9 φορές γρηγορότερα από το εισερχόμενο ρεύμα αέρα. Επίσης εύκολα προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος προκύπτει για γωνία βήματος $\beta=0^\circ$. Ας σημειωθεί τέλος ότι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων λ , καθώς επίσης και ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος είναι αδιάστατα μεγέθη.

Στην παρούσα εργασία έχουμε να κάνουμε με μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών και μεταβλητού βήματος, η οποία λειτουργεί ως εξής:

- Η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στη λογική της μέγιστης δυνατής απορρόφησης ηλεκτρικής ισχύος για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής και μεγαλύτερες της ταχύτητας ένταξης. Εν ολίγοις για κάθε ταχύτητα ανέμου μέχρι την ονομαστική η ανεμογεννήτρια παράγει την ισχύ υπό το βέλτιστο συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος, δηλαδή $C_p=C_{p,max}$. Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας τη γωνία βήματος της έλικας ίση με την ελάχιστη τιμή, καθώς και με μια αντίστοιχη βέλτιστη τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου, δηλαδή $\lambda=\lambda_{opt}$. Σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας, η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας ανέμου.
- Όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής, περιορίζει με κάποιο σύστημα ελέγχου την παραγόμενη ισχύ στην ονομαστική τιμή της. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της τιμής του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος C_p . Επομένως, σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, υπάρχει ένα μέρος της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου το οποίο απορρίπτεται, με στόχο τη διατήρηση της ισχύος στη μέγιστη, ονομαστική της τιμή.

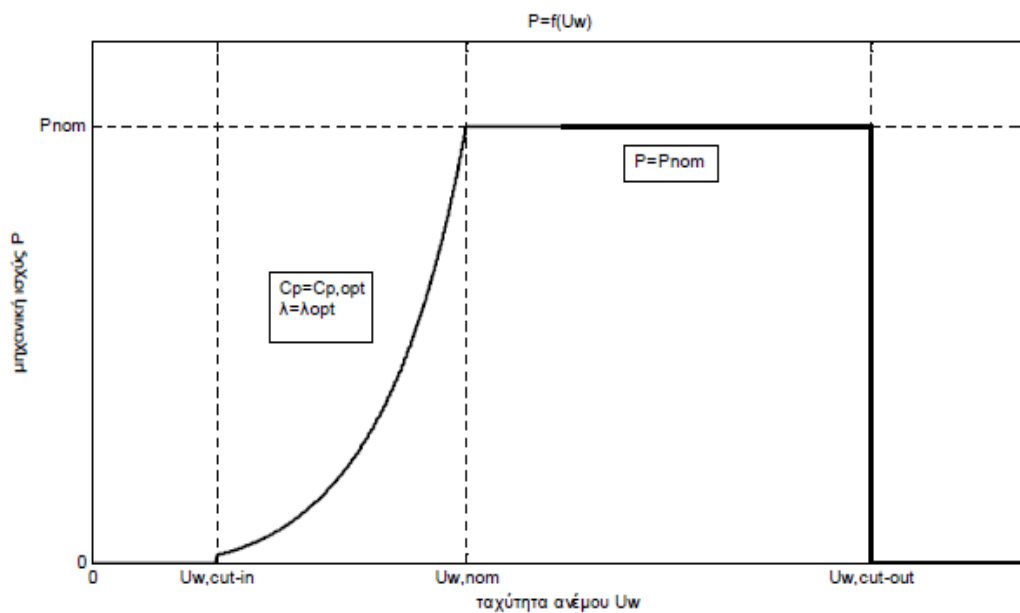
Οι δύο αυτές περιοχές λειτουργίας απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.22 Σημεία λειτουργίας της Α/Γ για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου.

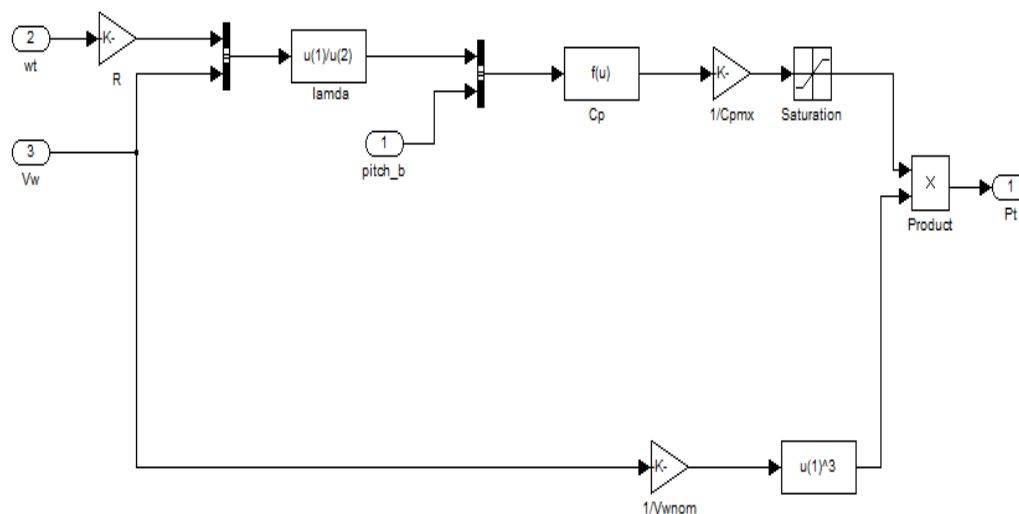
Μέχρι να φθάσουμε στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η Α/Γ λειτουργεί στα σημεία μέγιστης απολαβής ισχύος ακολουθεί δηλαδή η Α/Γ την καμπύλη MPPT (maximum power point tracking). Αντίθετα σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται σταθερή και η ισχύς είναι μικρότερη από τη μέγιστη προσφερόμενη από τον άνεμο.

Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη ταχύτητας ανέμου-μηχανικής ισχύος που επίσης εξηγεί τις δύο προαναφερθείσες περιοχές λειτουργίας



Σχήμα 2.23 Η παραγόμενη μηχανική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

Η βασική δομή του μοντέλου, που υλοποιήθηκε στο Simulink είναι η παρακάτω:



Σχήμα 2.24 Αεροδυναμική ισχύς.

Η αεροδυναμική ισχύς, η οποία προκύπτει ως έξοδος από το παραπάνω μοντέλο είναι εκφρασμένη σε ανά μονάδες τιμές.

$$Pt = \frac{\frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 V_w^3}{\frac{1}{2} \rho C_{p_max} \pi R^2 V_{w,nom}^3} = \frac{C_p V_w^3}{C_{p_max} V_{w,nom}^3} = \frac{C_p}{C_{p_max}} \left(\frac{V_w}{V_{w,nom}} \right)^3$$

Όπου

C_{p_max} : Η μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος
 $V_{w,nom}$: Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου.

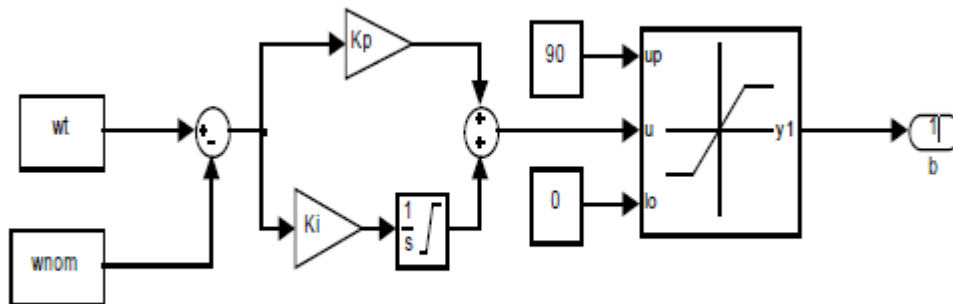
Pitch controller

Η Α/Γ που μελετάται στην παρούσα εργασία διαθέτει ελεγκτή του βήματος πτερυγίου (pitch controller). Τα πτερύγια της Α/Γ έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους.

Ο λόγος ύπαρξης του pitch controller είναι η διατήρηση της αεροδυναμικής ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα στις ονομαστικές τιμές, για λειτουργία της Α/Γ άνω της ονομαστικής ταχύτητας ανέμου. Συγκεκριμένα, για τιμές της ταχύτητας του ανέμου κάτω της ονομαστικής, η αεροδυναμική ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο έχει μικρότερη τιμή από την ονομαστική. Επομένως, ο ελεγκτής της γωνίας πτερυγίου, δεν χρειάζεται να παρέμβει και είναι ανενεργός. Η γωνία πτερυγίου παίρνει την ελάχιστη τιμή της, συνήθως $\beta = 0^\circ$. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η γωνία β αυξάνεται έτσι ώστε η αεροδυναμική ισχύς να παραμείνει ίση με την ονομαστική.

Ο ελεγκτής της γωνίας πτερυγίου χρησιμοποιεί έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI), ο οποίος λαμβάνει στην είσοδο τη διαφορά της πραγματικής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της Α/Γ με την ονομαστική. Όταν το σήμα εισόδου του PI ελεγκτή είναι αρνητικό,

δηλαδή όταν $\omega_t < \omega_{t,nom}$, ο ελεγκτής ρυθμίζει την γωνία έλικας στην ελάχιστη τιμή της $\beta = 0^\circ$ όπως αναλύεται και παραπάνω. Όταν το σήμα εισόδου είναι θετικό, δηλαδή όταν $\omega_t > \omega_{t,nom}$, ο ελεγκτής βήματος πτερυγίου ρυθμίζει την γωνία β έτσι ώστε η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ να γίνει ίση με την ονομαστική, με αποτέλεσμα να παραμένει στην ονομαστική τιμή της και η αεροδυναμική ισχύς. Η μέγιστη τιμή που τίθεται για τη γωνία pitch είναι $\beta = 90^\circ$. Η υλοποίηση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.25 Pitch controller.

Μηχανικό Μέρος

Η διαφορική εξίσωση της ταχύτητας του δρομέα της ανεμογεννήτριας σε ηλεκτρικά ακτίνια γράφεται σε ολοκληρωτική μορφή και με όλες τις παραμέτρους εκφρασμένες σε φυσικά μεγέθη

$$\omega_t = \frac{1}{J} \int (T_M - T_E) dt$$

Όπου

J: Η ροπή αδράνειας του δρομέα

Η κινητική ενέργεια στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής ω_s μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος P_o ως εξής:

$$\frac{1}{2} J \omega_s^2 = H P_o$$

Όπου H η ανηγμένη σταθερά αδρανείας η οποία έχει διαστάσεις χρόνου.

Αν αντικαταστήσουμε στην παραπάνω σχέση την δεύτερη προκύπτει στο ανά μονάδα σύστημα

$$\omega_t = \frac{1}{2H} \int (T_m - T_e) dt$$

Έτσι το μηχανικό μοντέλο έχει ως εισόδους τη μηχανική ροπή που σε ανά μονάδα μεγέθη ισούται με τη μηχανική ισχύ και την ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία αντίστοιχα σε ανά μονάδα μεγέθη ισούται με την ηλεκτρομαγνητική ισχύ. Ας σημειωθεί ότι η έξοδος του μηχανικού μοντέλου είναι η γωνιακή ταχύτητα πτερυγίων του δρομέα. [15]

Ηλεκτρικό Μέρος

Για τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους της Α/Γ έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς διάφορα μοντέλα και διάφορες τοπολογίες. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μοντελοποιείται μια PMSG μηχανή, δηλαδή μια σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Οι PMSG γεννήτριες χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο στον τομέα της κατασκευής Α/Γ. Η βασική διαφορά μιας τέτοιας μηχανής από μια οποιαδήποτε σύγχρονη μηχανή είναι η απουσία τυλίγματος διέγερσης, αφού το πεδίο διέγερσης της μηχανής δημιουργείται από τη συστοιχία των μονίμων μαγνητών, οι οποίοι τοποθετούνται περιμετρικά στην επιφάνεια του δρομέα, ούτως ώστε να δημιουργείται ακτινικό μαγνητικό πεδίο.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας μηχανής είναι:

- Η αυξημένη σε σημαντικό βαθμό απόδοση, καθώς το σύστημα του πεδίου διεγέρσεως δεν απορροφά ηλεκτρική ενέργεια και συνεπώς δεν υφίστανται απώλειες διέγερσης.
- Μεγαλύτερη ροπή και παραγόμενη ισχύς από ότι όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική διέγερση.
- Η δυναμική συμπεριφορά είναι καλύτερη από τις μηχανές με ηλεκτρομαγνητική διέγερση (υψηλότερη πυκνότητα ροής στο διάκενο αέρα).
- Αποφυγή του κιβώτιου ταχυτήτων, λόγω της δυνατότητας κατασκευής μηχανής με πολλούς πόλους.

Η PMSG συγκεντρώνει και μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- Η PMSG είναι πιο ακριβή και πιο πολύπλοκη μηχανικά από μία μηχανή επαγωγής του ίδιου μεγέθους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των μονίμων μαγνητών είναι ακριβά, παρόλο που σημειώνεται σημαντική και συνεχιζόμενη μείωση της τιμής τους, και δύσκολα στην επεξεργασία τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
- Η διέγερση με μόνιμους μαγνήτες απαιτεί τη χρήση μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας ώστε να προσαρμόζει την τάση και τη συχνότητα της παραγωγής στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου, αντίστοιχα. Αυτό συντελεί επομένως και σε αύξηση του κόστους.

Μια PMSG μηχανή παρέχει συνεχή ροή μόνο όταν η ταχύτητα περιστροφής συσχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα αναφοράς, η οποία μπορεί να προέρχεται είτε από μια τριφασική ελεγχόμενη τάση είτε από ελεγχόμενο ρεύμα. Τα ρεύματα στάτη παράγουν μια περιστρεφόμενη μαγνητική ροή. Από την άλλη πλευρά, η μαγνητική ροή που οφείλεται στους μόνιμους μαγνήτες είναι σταθερή όσον αφορά τον δρομέα. Για να παραχθεί ροπή οι δύο αυτές μαγνητικές ροές δεν μπορούν να κινηθούν όσον αφορά η μία την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας πρέπει να περιστραφεί με την ίδια ταχύτητα με αυτήν της περιστρεφόμενης ροής που παράγεται από το στάτη.

Μετασχηματισμός Park

Με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας κατά την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το ηλεκτρικό μέρος μιας μηχανής, έχουν προταθεί διάφοροι μετασχηματισμοί. Αυτοί οι μετασχηματισμοί αλλάζουν τις μεταβλητές, μειώνοντας την πολυπλοκότητα, μέσω της επίτευξης χρονικά αμετάβλητων συντελεστών. Συνήθως ένας τέτοιος μετασχηματισμός ανοίγει τις μεταβλητές της μηχανής σ' ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι τέτοιοι μετασχηματισμοί. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα αναπτυχθεί ο μετασχηματισμός Park. Αυτός ο μετασχηματισμός είναι ένας διανυσματικός μετασχηματισμός, ο οποίος μετατρέπει τις a-b-c τριφασικές ποσότητες σε ένα νέο σύνολο αντίστοιχων ποσοτήτων που ονομάζονται συνιστώσες. Αυτές είναι οι συνιστώσες ευθέως άξονα, εγκάρσιου άξονα και μηδενικής ακολουθίας και συμβολίζονται με τους δείκτες d, q, ο. Ωστόσο στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν και άρα το σύστημα που προκύπτει από το μετασχηματισμό Park αποτελείται από τις άλλες δύο συνιστώσες. Έτσι η συνιστώσα εγκάρσιου άξονα αποτελεί τον κάθετο άξονα q, ο οποίος προηγείται της συνιστώσας ευθέως άξονα, που αποτελεί τον ευθύ άξονα d, κατά 90° και περιστρέφεται με γωνιακή συχνότητα ω_s . Η μήτρα μετασχηματισμού Park δίνεται από την εξής σχέση:

$$[T_{dq0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \omega_s t & \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 2.26 Μήτρα μετασχηματισμού κατά Park.

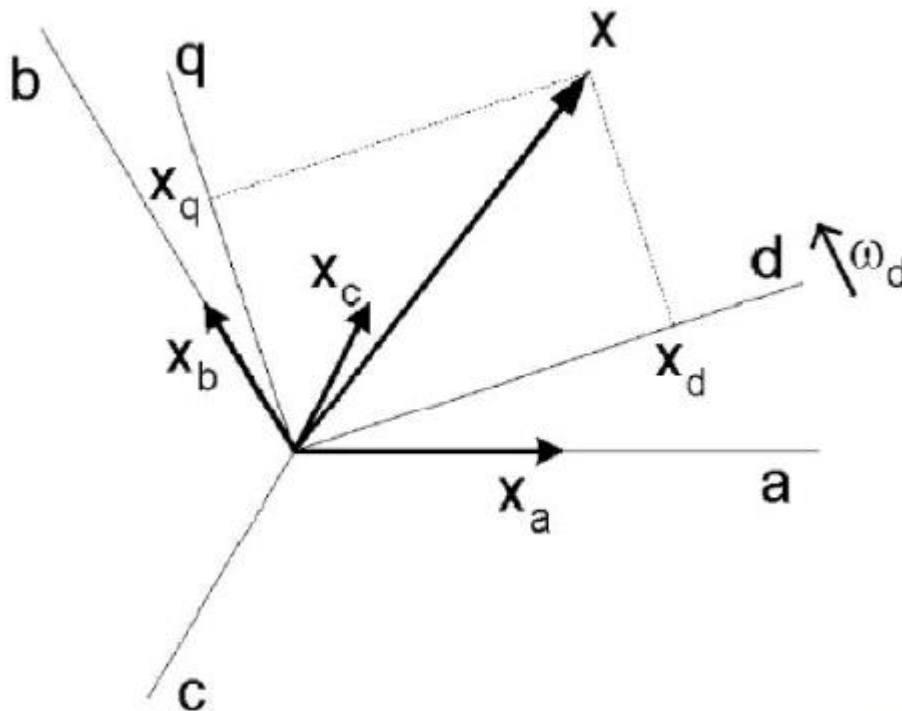
Ο μετασχηματισμός Park μεταφέρει κάποιο σύνολο μεταβλητών από το τριφασικό σύστημα στο σύστημα κάθετων αξόνων, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$[x_{dq0}] = [T_{dq0}] [x_{abc}]$$

Η μήτρα του αντίστροφου μετασχηματισμού Park με την οποία το σύστημα κάθετων αξόνων μετασχηματίζεται στο τριφασικό σύστημα, δίνεται από την εξής σχέση:

$$[T_{dq0}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & \sin \omega_s t & 1 \\ \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 2.27 Μήτρα αντίστροφου μετασχηματισμού κατά Park.



Σχήμα 2.28 Διάγραμμα των abc και dq πλαισίων αναφοράς.

Ο μετασχηματισμός Park είναι εξαιρετικά χρήσιμος διότι στη μόνιμη κατάσταση μετατρέπει όλα τα εναλλασσόμενα μεγέθη σε συνεχή. Έτσι έχουμε ανεξαρτησία των επαγωγιοτήτων από την ημιτονοειδή συχνότητα και μετατροπή του συστήματος εξισώσεων της μηχανής από μη γραμμικό σε γραμμικό και από συζευγμένο σε ανεξάρτητο κάτω από κατάλληλες προϋποθέσεις, στις οποίες καθοριστικό ρόλο σε αυτές έχει ο προσανατολισμός του πλαισίου αναφοράς. [16]

Εξισώσεις τάσεων και πεπλεγμένων ροών

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας προκύπτουν χρησιμοποιώντας στρεφόμενο πλαίσιο δύο αξόνων με εφαρμογή της γενικευμένης θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών. Η γεννήτρια δεν διαθέτει τυλίγματα απόσβεσης. Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε ανά μονάδα σύστημα.

$$\tilde{u}_s = -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_s + j \cdot \omega_g \cdot \tilde{\lambda}_s + \frac{1}{\omega_b} \cdot p \tilde{\lambda}_s$$

$$\begin{cases} \lambda_{d,s} = -L_{d,s} \cdot i_{d,s} + \lambda_f \\ \lambda_{q,s} = -L_{q,s} \cdot i_{q,s} \end{cases}$$

$$p_e = u_{d,s} \cdot i_{d,s} + u_{q,s} \cdot i_{q,s}$$

Δηλαδή

$$\tilde{u}_{d,s} = -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_{d,s} - \omega \cdot \tilde{\lambda}_{q,s} + \frac{1}{\omega_b} \cdot p \tilde{\lambda}_{d,s}$$

$$\tilde{u}_{q,s} = -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_{q,s} + \omega \cdot \tilde{\lambda}_{d,s} + \frac{1}{\omega_b} \cdot p \tilde{\lambda}_{q,s}$$

$$\begin{cases} \lambda_{d,s} = -L_{d,s} \cdot i_{d,s} + \lambda_f \\ \lambda_{q,s} = -L_{q,s} \cdot i_{q,s} \end{cases}$$

$$p_e = u_{d,s} \cdot i_{d,s} + u_{q,s} \cdot i_{q,s}$$

Όπου

r_s : η ωμική αντίσταση του στάτη.

$L_{d,s}, L_{q,s}$: οι αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη στον d και τον άξονα αντίστοιχα.

λ_f : η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη.

$V_{d,s}, V_{q,s}$: η τάση στο στάτη στο qd πλαίσιο.

$\lambda_{d,s}, \lambda_{q,s}$: η μαγνητική ροή στο διάκενο στο d και q άξονα.

ω : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

$\omega_b = \omega_e = 2 \cdot \pi \cdot f$.

[15], [18]

Έλεγχος Ενεργού και Αέργου ισχύος

Οι αρχές του διανυσματικού ελέγχου, με τη βοήθεια του οποίου γίνεται και ο έλεγχος, έχουν τις ρίζες τους στον τρόπο λειτουργίας των DC ηλεκτρικών μηχανών. Οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις που εγκαθίστανται από τα ρεύματα των τυλιγμάτων του δρομέα και του στάτη είναι κάθετες μεταξύ τους. Επομένως οι άξονες του πεδίου του στάτη και του δρομέα θα είναι επίσης κάθετοι. Τα δύο ορθογώνια μεταξύ τους πεδία δεν παρουσιάζουν καμία αλληλεπίδραση λοιπόν, επιτρέποντας έτσι τον αποζευγμένο έλεγχο. Γενικότερα η επιλογή του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς στοχεύει πρώτον στη διατήρηση της ροής του διακένου κατά μέτρο και δεύτερον στο να γίνεται εφικτός ο έλεγχος. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν τρεις τύποι διανυσματικού ελέγχου:

- Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του στάτη.

- Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του δρομέα.
- Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του διακένου.

Ο έλεγχος στον μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας στηρίζεται στην αρχή του διανυσματικού ελέγχου στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα. Ο μετατροπέας είναι απευθείας συνδεδεμένος στην PMSG και η συνιστώσα q του ρεύματος είναι ανάλογη της ενεργού ισχύος ή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Άρα ο έλεγχος της ενεργού ισχύος γίνεται μέσω της συνιστώσας q του ρεύματος. Επίσης, η άεργος ισχύς είναι ανάλογη της συνιστώσας d του ρεύματος. Η τιμή αναφοράς της άεργου ισχύος τίθεται ίση με 0. Σε μία Α/Γ μεταβλητών στροφών, η μέγιστη ισχύς είναι κυβική συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα (λειτουργία MPPT). Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, οι απώλειες για ένα δεδομένο φορτίο πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Η συνιστώσα q του ρεύματος του στάτη χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και μένει ένας βαθμός ελευθερίας για τη d συνιστώσα του ρεύματος. Η συνιστώσα αυτή του ρεύματος τίθεται ίση με μηδέν, με στόχο την ελαχιστοποίηση του ρεύματος για μία δεδομένη ροπή και άρα την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Επιπλέον, η τιμή της d συνιστώσας του ρεύματος μπορεί να καταστεί εκμεταλλεύσιμη, προκειμένου να μειωθεί η ροή του στάτη και να μειωθούν οι απώλειες πυρήνα.

Ο έλεγχος ισχύος της σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών γίνεται από το μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από έναν ac/dc μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας, έναν πυκνωτή συνεχούς σύνδεσης και ένα dc/ac αντιστροφέα από την πλευρά του δικτύου. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας είναι συνήθως ένας απλός ανορθωτής γέφυρας, ενώ ο αντιστροφέας dc/ac είναι μετατροπέας πηγής τάσης με έλεγχο PWM. Η DC πλευρά περιλαμβάνει και μετατροπέα DC/DC για τον έλεγχο του ρεύματος και άρα της ροπής της γεννήτριας και την προσαρμογή της μεταβαλλόμενης DC τάσης εξόδου του ανορθωτή στην σταθερή DC τάση εισόδου του αντιστροφέα. Με δεδομένο ότι ο αντιστροφέας έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την τιμή κάθε συνιστώσας του ρεύματος, θεωρείται ότι στην παρούσα περίπτωση η d συνιστώσα του ρεύματος του στάτη λαμβάνει μηδενική τιμή και έτσι η ηλεκτρομαγνητική ισχύς της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί μέσω της q συνιστώσας του ρεύματος του στάτη.

Ο έλεγχος βασίζεται σε μια στρατηγική κλειστού βρόχου, η οποία αποτελείται από δύο ελεγκτές ρεύματος. Οι ελεγκτές είναι PI εξαιτίας των σχεδόν μηδενικών σφαλμάτων στη μόνιμη κατάσταση. Ο έλεγχος βασίζεται στο συνεχή έλεγχο γωνίας ροπής. Όπως αναφέρεται και παραπάνω σε αυτή τη στρατηγική ελέγχου η d συνιστώσα ρεύματος διατηρείται στο μηδέν, ενώ το ρεύμα του στάτη ευθυγραμμίζεται με τον q άξονα, προκειμένου να διατηρηθεί η γωνία ροπής ίση με 90° . Εν τέλει λοιπόν η ηλεκτρομαγνητική ροπή θα δοθεί από τη σχέση:

$$T_e = \lambda m i_q$$

Όπου λm : η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη.

Για την περαιτέρω ανάλυση πρέπει να άρουμε κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι έχουν να κάνουν σχέση με τις μη γραμμικές σχέσεις που υπάρχουν στις διαφορικές εξισώσεις. Οι διαφορικές εξισώσεις όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι οι εξής:

$$\tilde{u}_{d,s} = -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_{d,s} - \omega \cdot \tilde{\lambda}_{q,s} + \frac{1}{\omega_b} \cdot p \tilde{\lambda}_{d,s}$$

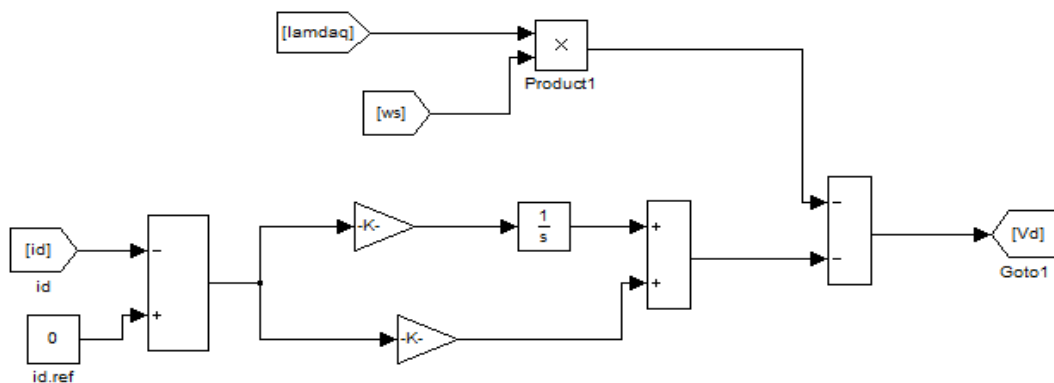
$$\tilde{u}_{q,s} = -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_{q,s} + \omega \cdot \tilde{\lambda}_{q,s} + \frac{1}{\omega_b} \cdot p \tilde{\lambda}_{q,s}$$

Θα εφαρμόσουμε την τεχνική μετασχηματισμού της εισόδου, με στόχο την επίτευξη γραμμικών σχέσεων. Οι μετασχηματισμοί των V_d και V_q είναι οι εξής:

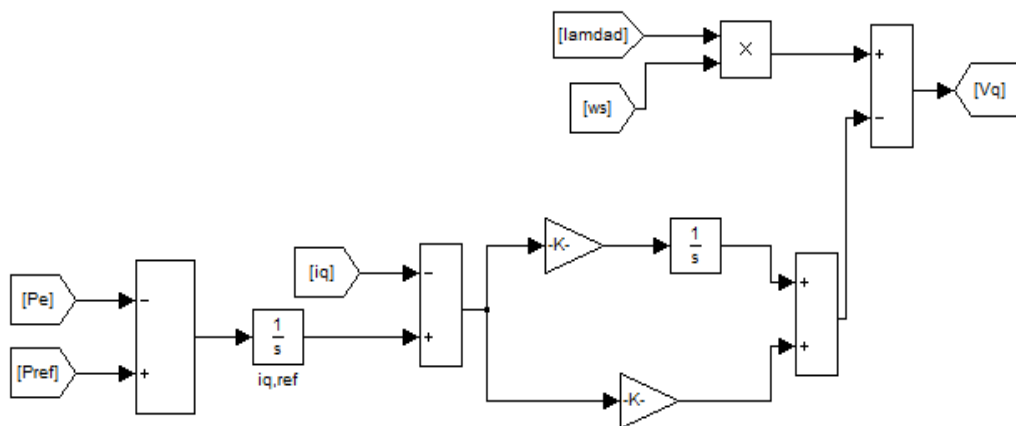
$$V_{d,s} = -\tilde{u}_{d,s} - \omega \cdot \tilde{\lambda}_{q,s}$$

$$V_{q,s} = -\tilde{u}_{q,s} + \omega \cdot \tilde{\lambda}_{d,s}$$

Έτσι καταλήγουμε σε δύο διαφορετικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν δύο απολύτως αποσυνδεδεμένα συστήματα, τα οποία είναι και γραμμικά. Μέσω μετασχηματισμού Laplace προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς και τελικά καταλήγουμε στον εξής έλεγχο:



Σχήμα 2.29 Έλεγχος τάσης V_d .



Σχήμα 2.30 Ο έλεγχος τάσης V_q .

Ας σημειωθεί ότι το $i_{q,ref}$ προκύπτει από έναν I ελεγκτή που παίρνει τη διαφορά της μετρούμενης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος, η οποία προκύπτει από το ηλεκτρικό μοντέλο της γεννήτριας, από την ισχύ αναφοράς. Η ενεργός ισχύς αναφοράς της p_{msg} καθορίζεται από το look-up table που έχει κατασκευαστεί με το σκεπτικό λειτουργίας της Α/Γ υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος (maximum power point tracking-MPPT), το οποίο παρέχει τη μέγιστη ισχύ στο δίκτυο για κάθε ταχύτητα δρομέα και αναλύεται παρακάτω. [16] , [17]

Προσδιορισμός ισχύος αναφοράς για λειτουργία υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος

Ανά πάσα στιγμή είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μιας τιμής ισχύος, ως ισχύς αναφοράς, ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος. Ο υπολογισμός της ισχύος αναφοράς γίνεται με βάση τη λογική λειτουργίας υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος. Άρα ο στόχος είναι η απορρόφηση από τη γεννήτρια όλης της διαθέσιμης ισχύος από το μηχανικό σύστημα. Σύμφωνα και με την ανάλυση, η οποία έχει προηγηθεί είναι σαφές ότι για ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής, η διαθέσιμη ισχύς από το μηχανικό σύστημα της Α/Γ προκύπτει από την σχέση:

$$P_t = C_p P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V_w^3 \Rightarrow$$

$$P_t = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 \left(\frac{\lambda_{opt} \omega_t}{R} \right)^3$$

Επίσης για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής ταχύτητας η διαθέσιμη ισχύς παραμένει συνεχώς σταθερή και ίση με την ονομαστική ισχύ της Α/Γ. Επομένως για την αδιάλειπτη παροχή της ισχύος αναφοράς κατασκευάζεται κατάλληλο look-up table, το οποίο έχει ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και υπολογίζει στην έξοδο τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Ας σημειωθεί, προς χάριν αποσαφήνισης ότι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα περιορίζεται, με σκοπό να μην ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή σε περίπτωση που έχουμε ταχύτητες ανέμου πάνω της ονομαστικής. Έτσι και η ισχύς περιορίζεται στην ονομαστική της τιμή. Αυτή η ανάλυση γίνεται για περιπτώσεις λειτουργίας υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος (MPPT). Σε περιπτώσεις λειτουργίας υπό διαφορετική στρατηγική, όπως για παράδειγμα λειτουργία υπό αποφόρτιση, απαιτείται άλλη μέθοδος εξαγωγής της ισχύος αναφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 –ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΗΣ Α/Γ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

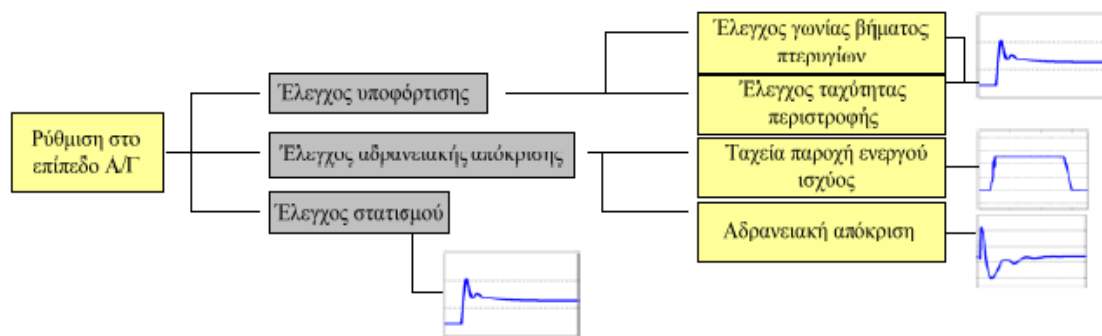
3.1 Εισαγωγή

Η συμβολή των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας είχε μέχρι τις μέρες μας περιορισμένη εφαρμογή. Αυτό συνέβαινε, επειδή η αρχική επιδίωξη ήταν η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύς και δεν δινόταν σημασία στη συμβολή των Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας. Ολοένα και περισσότερο όμως υπάρχει η ανάγκη για συμβολή των Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι, για τους οποίους οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να συμμετέχουν στη ρύθμιση. Ο κύριος λόγος είναι ότι η ρύθμιση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συχνότητας του δικτύου και δεδομένου ότι η αιολική διείδυση θα αυξηθεί περαιτέρω, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να αποτελέσουν βασικό παράγοντα στη διατήρηση της απαιτούμενης ισορροπίας. Μια μελέτη του FERC / LBNL (Federal Energy Regulatory Commission/Lawrence Berkeley National Laboratory) ασχολείται με μια πρόσφατη μείωση της απόκρισης της συχνότητας του δικτύου και μολονότι η αύξηση της αιολικής ενέργειας δεν είναι η αιτία γι' αυτό το φαινόμενο, η απόκριση της συχνότητας θα μπορούσε να βελτιωθεί με την εκτεταμένη χρήση του ελέγχου της συχνότητας από τις ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, μια πρόσφατη μελέτη από την IPCC (Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή) διαπίστωσε ότι, αν και η χαμηλή έως και μέτρια διείδυση αιολικής ενέργειας (έως 20% της ετήσιας ζήτησης) δεν δημιουργεί κανένα ανυπέβλητο τεχνικό εμπόδιο, υψηλότερα επίπεδα διείδυσης απαιτούν πρόσθετες επιλογές στη χρήση της αιολικής ενέργειας(περιοχή αιολικής ενέργειας, έλεγχος εξόδου). [7]

Στα πολύ υψηλά επίπεδα διείδυσης αιολικής ενέργειας καθίσταται αναγκαίο για τις ανεμογεννήτριες η συμμετοχή στη ρύθμιση της συχνότητας και αυτό αντικατοπτρίζεται και στις απαιτήσεις των διαχειριστών των δικτύων, οι οποίοι επιβάλλουν τη συμμετοχή των Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας.

Κάποιες από τις τεχνικές που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για τη συμμετοχή αυτή είναι η συμβολή στη ρύθμιση μέσω της αδρανειακής απόκρισης ή μέσω της ποσοστιαίας αποφόρτισης, η οποία ανάμεσα στα άλλα μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια της γωνίας pitch (pitch deloading) ή με τη βοήθεια της γωνιακής ταχύτητας (overspeeding ή underspeeding). Με τον τρόπο της ποσοστιαίας αποφόρτισης υπάρχει περιθώριο ισχύος, ίσο με την αποφόρτιση αυτή, για εκμετάλλευση και συνεισφορά στην ρύθμιση συχνότητας. Όπως είπαμε υπάρχουν διάφοροι τρόποι συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας, αλλά και διάφοροι τρόποι ποσοστιαίας αποφόρτισης.

Συνολικά οι μέθοδοι συμμετοχής της Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας συνοψίζονται στα εξής:



Σχήμα 3.1 Μέθοδοι συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας. [10]

Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε τη συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας μέσω της συνεισφοράς στην αδρανειακή απόκριση και μέσω της ποσοστιαίας αποφόρτισης με τη βοήθεια της γωνίας βήματος της έλικας (pitch deloading), καθώς και το συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων.

3.2 Ποσοστιαία αποφόρτιση Α/Γ

3.2.1 Αποφόρτιση Α/Γ μέσω της γωνίας βήματος (pitch deloading)

Η λογική αυτής της τεχνικής είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή αποφόρτιση μέσω του ελέγχου της γωνίας βήματος της ανεμογεννήτριας. Όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος, ο έλεγχος της γωνίας βήματος ενεργοποιείται για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής, αφού για ταχύτητες ανέμου κάτω από την ονομαστική η γωνία βήματος τίθεται ίση με μια ελάχιστη τιμή, ώστε να προκύπτει βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής. Για ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής ο λόγος ακροπτερυγίων παραμένει ο βέλτιστος. Σε περίπτωση που η ταχύτητα ανέμου είναι άνω της ονομαστικής ο αεροδυναμικός συντελεστής παύει να είναι ο βέλτιστος, με στόχο την διατήρηση της παραγωγής στα ονομαστικά επίπεδα. Γι' αυτό τον σκοπό ο λόγος ακροπτερυγίων σταματάει να είναι ο βέλτιστος, όπως επίσης και η γωνία βήματος μέσω του pitch ελεγκτή. Στη μέθοδο που εξετάζεται στην παρούσα παράγραφο, η γωνία βήματος θα είναι διαφορετική από την ελάχιστη ακόμα και για ταχύτητες κάτω της ονομαστικής και η τιμή αυτή της γωνίας β θα καθορίζει ουσιαστικά το ποσοστό αποφόρτισης, «χαλώνοντας» την αεροδυναμική των πτερυγίων. Επομένως όταν επιθυμούμε να λειτουργεί η Α/Γ υπό ένα ποσοστό αποφόρτισης x , ο έλεγχος της γωνίας βήματος θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου η ισχύς που θα παρέχεται να είναι ίση με:

$$P_{del} = P_{avail} (1 - x)$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τη σχέση

$$P_{avail} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V w^3$$

προκύπτει η σχέση

$$P_{del} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V w^3 (1-x) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p,del}(\lambda_{del}, \beta_{del}) V w^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V w^3 (1-x)$$

Από όπου εύκολα βγαίνει το συμπέρασμα ότι ισχύει η σχέση:

$$C_{p,del}(\lambda_{del}, \beta_{del}) = C_p(\lambda, \beta)(1-x)$$

όπου $C_{p,del}$ είναι ο νέος συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος, όπως αυτός προκύπτει από την εφαρμοζόμενη αποφόρτιση. Για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής, ο pitch controller λειτουργεί όπως περιεγράφηκε και παραπάνω, καθώς στην περιοχή αυτή, στόχος είναι η διατήρηση ισχύος σε μια σταθερή τιμή, όπως συμβαίνει και κατά τη λειτουργία της Α/Γ υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης.

Όσον αφορά στις ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής και για λειτουργία υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος παραμένει σταθερός και ίσος με τη μέγιστη τιμή, ενώ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων παραμένει και αυτός σταθερός και ίσος με τη βέλτιστη τιμή και η γωνία βήματος παραμένει σταθερή και ίση με 0° . Άρα σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας προκύπτει:

$$C_{p,del}(\lambda_{del}, \beta_{del}) = C_{p_max} \cdot (1-x)$$

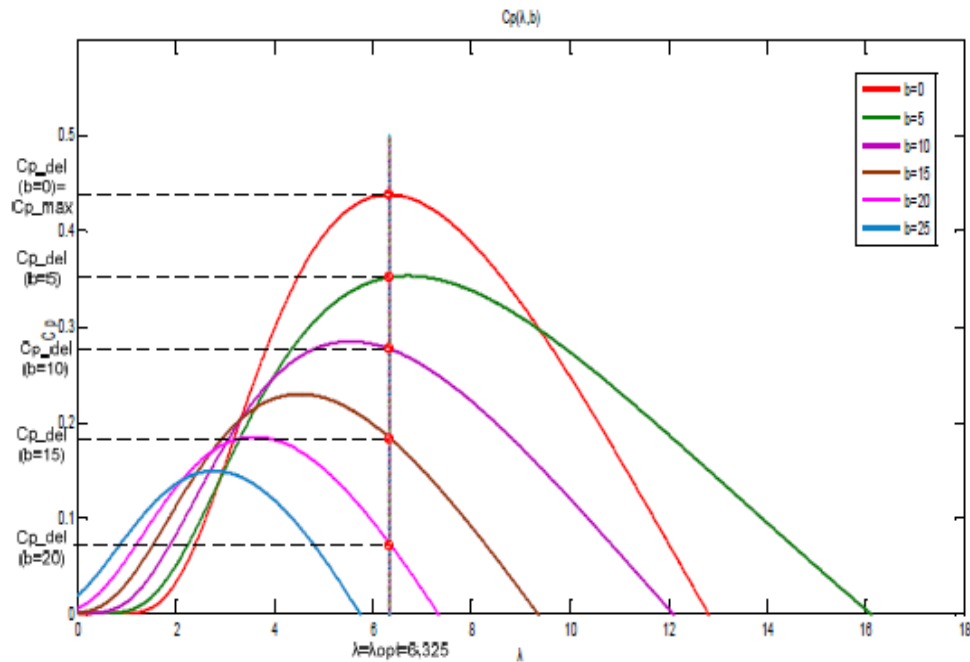
Με δεδομένο την περίπτωση που εξετάζουμε, κατά την οποία η αποφόρτιση γίνεται μέσω της γωνίας βήματος και άρα ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων παραμένει σταθερός και ίσος με τη βέλτιστη τιμή καταλήγουμε στη σχέση

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

Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή αποφόρτιση μέσω της κατάλληλης επιλογής της γωνίας βήματος.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό κατασκευάστηκε στο matlab αλγόριθμος που αντιστοιχίζει κάθε ποσοστό αποφόρτισης στην κατάλληλη γωνία βήματος β_{del} και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε look-up table.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται ορισμένες καμπύλες του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος, που αντιστοιχούν σε διάφορα ποσοστά αποφόρτισης, ενώ φαίνονται και οι αντίστοιχες γωνίες βήματος.



Σχήμα 3.2 Τεχνική αποφόρτισης με έλεγχο της γωνίας βήματος της έλικας: Αναζήτηση της κατάλληλης καμπύλης $C_p(\lambda, \beta)$, που αναφέρεται σε συγκεκριμένη γωνία β , ανάλογα με το επιδιωκόμενο ποσοστό αποφόρτισης x .

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό και από το σχήμα ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε με βάση τη σχέση που μας δίνει το συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος και εκμεταλλευόμενοι την σχέση $C_{p,del}(\lambda_{opt}, \beta_{del}) = C_{p_max} \cdot (1 - x)$, όπου ο $C_{p,max}$ είναι γνωστός, όπως επίσης και το επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης και με δεδομένο ότι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων παραμένει σταθερός και ίσος με τη βέλτιστη τιμή, προκύπτει η ζητούμενη γωνία βήματος β_{del} .

Για να εφαρμοστεί η παραπάνω τεχνική πρέπει να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις όσον αφορά στις μοντελοποιήσεις των συστημάτων ελέγχου της Α/Γ και πιο συγκεκριμένα στο σύστημα ελέγχου ισχύος της γεννήτριας και στο σύστημα ελέγχου της γωνίας του βήματος β . Στο κομμάτι του ελέγχου ισχύος, η ισχύς αναφοράς που διαβιβαζόταν στο μοντέλο ελέγχου της γεννήτριας υπαγόταν στη λογική λειτουργίας υπό τη στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος. Άρα είχε κατασκευαστεί ένα look-up table με είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων και έξοδο την αντίστοιχη ισχύ. Στην περίπτωση όμως που εξετάζουμε τώρα κάτι τέτοιο δεν επαρκεί. Χρειάζεται να λαμβάνεται υπ' όψιν η μεταβολή της γωνίας του βήματος της έλικας ώστε να προσαρμόζεται αντίστοιχα και το επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης, στο οποίο ζητείται να λειτουργεί η Α/Γ. Χρειαζόμαστε λοιπόν ένα νέο look-up table.

Αναλυτικότερα για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής ω , η ισχύς αναφοράς παραμένει σταθερή και ίση με $(1-x)$ p.u., όπου το x το ποσοστό αποφόρτισης της Α/Γ. Για ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής όμως ισχύει η σχέση:

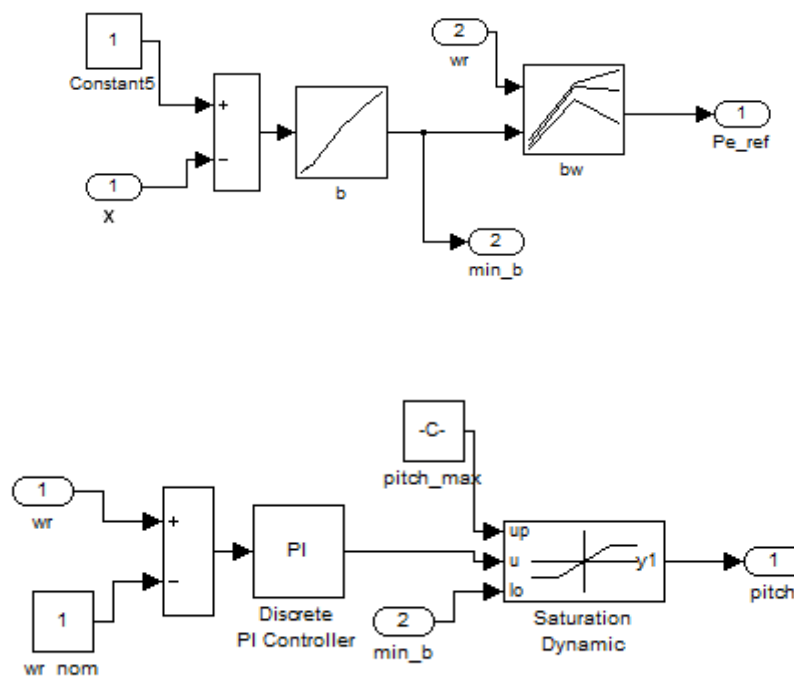
$$P_{p.u.} = \frac{P_{del}}{P_{nom}} = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p,del}(\lambda_{opt}, \beta_{del}) V_w^3}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p_max} V_w^3} = \frac{C_{p,del}(\lambda_{opt}, \beta_{del}) \left(\frac{\omega_t R}{\lambda_{opt}} \right)^3}{C_{p_max} \left(\frac{\omega_{t,nom} R}{\lambda_{opt}} \right)^3} \Rightarrow$$

$$P_{p.u.} = \frac{C_{p,del}(\lambda_{opt}, \beta_{del})\omega_t^3}{C_{p_max}\omega_{t,nom}^3}$$

Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι η ισχύς αναφοράς που πρέπει να διαβιβαστεί στον έλεγχο ισχύος της γεννήτριας δύναται να υπολογιστεί με δεδομένα τη γωνιακή ταχύτητα και τη γωνία βήματος β . Επομένως κατασκευάζεται και πάλι αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει την ισχύ για κάθε ζεύγος γωνιακής ταχύτητας και γωνίας βήματος. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα δισδιάστατο look-up table και η έξοδος που προκύπτει είναι η ισχύς αναφοράς που διαβιβάζεται στο μοντέλο ελέγχου. Η τιμή της γωνίας βήματος, την οποία έχει ως είσοδο το δισδιάστατο look-up table, είναι η έξοδος του προηγούμενου look-up table που αντιστοιχίζει το επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης με την κατάλληλη γωνία βήματος.

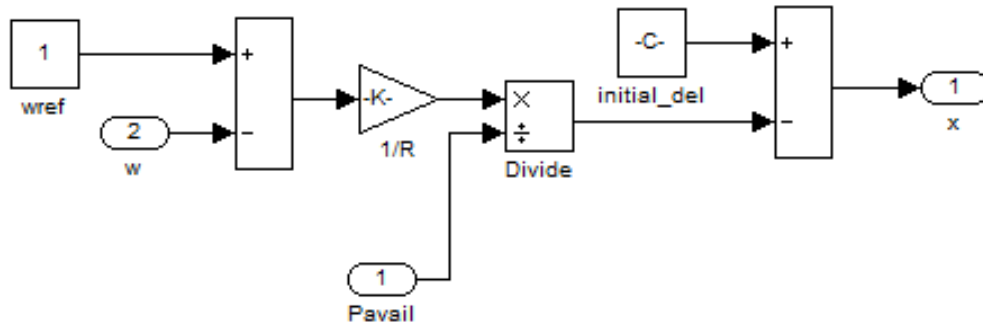
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω πέραν του μοντέλου του ελέγχου της ισχύος πρέπει να μεταβληθεί αντίστοιχα και το σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος. Αυτό που επιθυμούμε να επιτύχουμε είναι για ταχύτητες ανέμου κάτω τις ονομαστικής η ελάχιστη γωνία να μην τίθεται πια ίση με 0° όπως συνέβαινε με τη λειτουργία υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης, αλλά ίση με την τιμή εκείνη που εξασφαλίζει το επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης. Κατά τα λοιπά το μοντέλο διατηρείται ίδιο.

Οδηγούμαστε λοιπόν με αυτόν τον τρόπο στη δημιουργία των δύο νέων μοντέλων τα οποία φαίνονται και παρακάτω:



Σχήμα 3.3 Στο πρώτο κομμάτι παρουσιάζεται ο τρόπος παραγωγής της τιμής αναφοράς της ισχύος για το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας. Η μεταβλητή x αντιπροσωπεύει το ποσοστό αποφόρτισης. Στο δεύτερο κομμάτι παρουσιάζεται ο ανανεωμένος έλεγχος γωνίας βήματος.

Έτσι λοιπόν, υπάρχει δυνατότητα συμμετοχής της ανεμογεννήτριας στη ρύθμιση της συχνότητας, αφού πια υιοθετεί καμπύλη στατισμού και ανάλογα με τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου, μπορεί να αναπροσαρμόζει και την αποφόρτισή της, επομένως και την ισχύ που εγχέει στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του επόμενου σχήματος.



Σχήμα 3.4 Ο πρόσθετος κλάδος της καμπύλης στατισμού της Α/Γ, μέσω του οποίου ελέγχεται η αποφόρτιση, άρα και η ισχύς που εγχέει η Α/Γ.

3.3 Αδρανειακή συμμετοχή

Οι Α/Γ σταθερών στροφών, είτε αυτές διαθέτουν σύγχρονη γεννήτρια είτε διαθέτουν γεννήτρια επαγωγής, συμμετέχουν στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου, απελευθερώνοντας μέρος της κινητικής ενέργειας του δρομέα, με στόχο τη συγκράτηση της συχνότητας του δικτύου, αλλά και την ταχύτερη αποκατάσταση στην τιμή της μόνιμης κατάστασης. Από την άλλη, όταν μιλάμε για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, όπως η ανεμογεννήτρια που μοντελοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία, το σύστημα ελέγχου τους δεν επιτρέπει μία αντίστοιχη συμπεριφορά, καθώς η λειτουργία τους βασίζεται στην εφαρμογή μίας κατάλληλης ηλεκτρικής αντιρροπής στο δρομέα με βάση την προκαθορισμένη καμπύλη ισχύος της Α/Γ και την αντίστοιχη ταχύτητα δρομέα. Εν ολίγοις, στις Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουμε απόξευξη του μηχανικού από το ηλεκτρικό σύστημα και επομένως ο έλεγχος ισχύος δεν βασίζεται στη συχνότητα του δικτύου. Άρα δεν επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο απόκριση της γεννήτριας σε μεταβολές της συχνότητας του συστήματος. Η λειτουργία επομένως ενός μεγάλου αριθμού τέτοιων γεννητριών με το υπάρχον σύστημα ελέγχου τους είναι ανεπιθύμητη, ειδικά σε περιόδους χαμηλού φορτίου και σε μικρά ηλεκτρικά συστήματα, καθώς μειώνει την αδράνεια του συνολικού συστήματος και άρα επιδεινώνεται η δυνατότητα σταθεροποίησης ή αποκατάστασης της συχνότητας λειτουργίας στην τιμή της μόνιμης κατάστασης. Κάποια από τα βασικά μειονεκτήματα που οφείλονται στη μη συμμετοχή των Α/Γ μεταβλητών στροφών στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου είναι τα παρακάτω:

- Ο διαχειριστής του συστήματος είναι υποχρεωμένος να εξασφαλίσει την άμεση απόκριση του συστήματος σε κάθε περίπτωση. Άρα θα υπάρξει αύξηση της ζήτησης στρεφόμενης εφεδρείας ή και λειτουργία συμβατικών σταθμών παραγωγής, οι οποίοι θα δουλεύουν στο τεχνικό ελάχιστο, με σκοπό τη διατήρηση της συνολικής αδράνειας του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα. Το γεγονός αυτό πιθανώς να προκαλέσει αύξηση στο κόστος λειτουργίας του δικτύου.

- Συσκευές προστασίας του δικτύου όπως διακόπτες υποσυχνότητας ή υπερσυχνότητας έχουν σχεδιαστεί για συστήματα με σημαντικό αριθμό συμβατικών σταθμών παραγωγής. Σε κάποιες χώρες υπάρχουν και διακόπτες που ελέγχουν το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας και οι οποίοι έχουν ρυθμιστεί με την υπόθεση της συμμετοχής όλων των μονάδων παραγωγής στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου. Επομένως η έντονη συμμετοχή Α/Γ μεταβλητών στροφών στην παραγωγή πιθανώς να οδηγήσει σε εσφαλμένη ενεργοποίηση τέτοιων συστημάτων προστασίας.

Για όλα τα παραπάνω έχει προταθεί η συμμετοχή των Α/Γ μεταβλητών στροφών στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου. Στην εργασία αυτή, αυτό πραγματοποιείται με την προσθήκη ενός όρου στην ισχύ αναφοράς στο μοντέλου ελέγχου της ισχύος, όπως αυτή προκύπτει με λειτουργία της Α/Γ υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος. Αυτό συμβαίνει για να αυξηθεί μεταβατικά το σήμα αναφοράς της ισχύος και έτσι να αυξηθεί η ενέργεια που αποδίδεται από την Α/Γ στο σύστημα.

Η δημιουργία αυτού του επιπλέον όρου βασίζεται στα εξής:

Η αποδιδόμενη ισχύς σε κάθε γωνιακή ταχύτητα με βάση την παράγωγο της κινητικής ενέργειας του δρομέα που περιστρέφεται με ταχύτητα ω_m δίδεται από την παρακάτω σχέση

$$P = \frac{dE_k}{dt} = J \omega_m \frac{d\omega}{dt}$$

Όπου

J: Η αδράνεια του δρομέα.

Για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο συνήθης όρος της σταθεράς αδρανείας H , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$H = \frac{J \omega_m^2}{2S}$$

Όπου

S: Η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας. Άρα η αποδιδόμενη ισχύς μπορεί να γραφεί ως

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega_m}{\omega_s} \frac{d\left(\frac{\omega_m}{\omega_s}\right)}{dt}$$

Άρα σε ανά μονάδα τιμές έχουμε

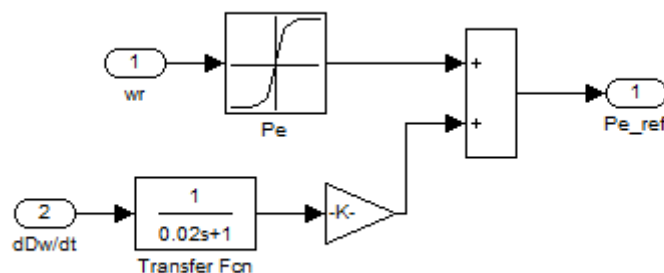
$$P_{p.u.} = 2H \omega_{p.u.} \frac{d(\omega_{p.u.})}{dt}$$

Όπως επίσης και η ανά μονάδα ροπή προκύπτει

$$T_{p.u.} = 2H \frac{d(\omega_{p.u.})}{dt}$$

Επομένως με αυτή τη μέθοδο γίνεται κατανοητό το πως προκύπτει ο παραπάνω όρος που προστίθεται στην ισχύ αναφοράς, η οποία προκύπτει με τη λογική της λειτουργίας υπό τη στρατηγική μέγιστης απομάστευσης ισχύος. Αυτός ο επιπλέον όρος επηρεάζεται από το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας του δικτύου. Συνεπώς όταν υπάρχει μια πτώση στη συχνότητα του δικτύου, αυτό θα μεταφραστεί μεταβατικά σαν αύξηση της ισχύος αναφοράς, άρα θα αποδοθεί περισσότερη ενέργεια που θα προέλθει από τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, γεγονός που θα οδηγήσει στην απελευθέρωση κινητικής ενέργειας με στόχο την συγκράτηση της βύθισης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή του επιπλέον αυτού όρου. Άξιο αναφοράς είναι ότι αμέσως μετά την είσοδο τοποθετείται ένα φίλτρο πρώτης τάξεως, με στόχο τον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της ισχύος και την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του συμπληρωματικού ελέγχου στο μηχανικό φορτίο του άξονα της Α/Γ.



Σχήμα 3.5 Μοντέλο προσομοίωσης της γεννήτριας με λειτουργία αδρανειακής απόκρισης. Το μέρος του συστήματος που προστέθηκε στο ήδη αναπτυχθέν μοντέλο εμφανίζεται με ροζ χρώμα.

3.4 Σχετικές εργασίες

Για τη μελέτη της συμβολής των ανεμογεννητριών στη ρύθμιση συχνότητας έχουν υπάρξει πολλές εργασίες και μελέτες. Στην εργασία [19] παρουσιάζεται στρατηγική αποφόρτισης μέσω μεταβολής της γωνίας του βήματος της έλικας του δρομέα της Α/Γ. Σε αυτήν την εργασία, η απόκριση συχνότητας μετασχηματίζεται σε μεταβολή της γωνίας βήματος και όχι της ισχύος, όπως γνωρίζουμε ότι γίνεται με την κλασική συνάρτηση στατισμού.

Στις εργασίες [20] και [21] μελετάται η συμμετοχή της Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας μέσω της αδρανειακής απόκρισης, δηλαδή μέσω της εκμετάλλευσης της αδράνειας της Α/Γ. Στην [20] γίνεται σύγκριση μεταξύ Α/Γ σταθερών στροφών και Α/Γ μεταβλητών στροφών, συγκεκριμένα μεταξύ fixed speed induction generator και doubly fed induction generator, οι οποίες συμμετέχουν στη ρύθμιση μέσω της αδρανειακής απόκρισης.

Στην [22] παρουσιάζεται η συμμετοχή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας μέσω της εκμετάλλευσης της ταχύτητας του δρομέα. Επί της ουσίας μιλάμε για την τεχνική του overspeeding, η οποία επιτυγχάνεται μέσω ικανής τιμής αναφοράς της ηλεκτρικής ισχύος. Η Α/Γ λειτουργεί σε προκαθορισμένη καμπύλη αποφόρτισης με τιμή

αναφοράς ηλεκτρικής ισχύος μικρότερης της διαθέσιμης, ενώ όταν συμβεί κάποια διαταραχή στην τιμή της συχνότητας, η τιμή αναφοράς μεταβάλλεται κατάλληλα, με σκοπό την απόδοση της περίσσειας ισχύος. Απαραίτητη προϋπόθεση της υλοποίησης του ελέγχου είναι η δυνατότητα ύπαρξης βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου.

Στην εργασία [23] παρουσιάζονται δύο τρόποι συμμετοχής της Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας. Ο ένας τρόπος είναι το inertial control και ο άλλος το droop control. Συγκεκριμένα σε αυτή την εργασία εξετάζονται και οι δύο τρόποι, με την ενεργοποίηση του δεύτερου σε περίπτωση που η μεταβολή της συχνότητας ξεπεράσει ορισμένα όρια.

Στην εργασία [24] μελετάται η συμμετοχή στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας από Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος υπό στρατηγική αποφόρτισης μέσω μεταβολής της γωνίας του βήματος της έλικας για ταχύτητες ανέμου μόνο άνω της ονομαστικής.

Στην [25] και [26] μελετάται η επίδραση της αιολικής διείσδυσης στη ρύθμιση της συχνότητας ενός απομονωμένου δικτύου και για διάφορα επίπεδα της διείσδυσης αυτής.

Στην [27] αναπτύσσεται ο συνδυασμός της αδρανειακής απόκρισης και στατισμού μονίμου καταστάσεως για τις Α/Γ, χωρίς να γίνεται ανάλυση της επίδρασης στη λειτουργία της Α/Γ ή στην απόκριση του συστήματος, ενώ η επαναφορά σε κανονική λειτουργία γίνεται απότομα με έντονη μεταβατική αλλαγή στην ενεργό ισχύ της Α/Γ. Στην εργασία [28] αναπτύσσεται ομοίως η εισαγωγή στατισμού στο σύστημα ελέγχου της Α/Γ, ενώ η επαναφορά σε κανονική λειτουργία δεν προβλέπεται, αλλά αντίθετα επαφίεται στην αποκατάσταση της ονομαστικής συχνότητας του συστήματος με τη βοήθεια της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης των συμβατικών γεννητριών που υπάρχουν στο δίκτυο.

Στην [29] παρουσιάζονται βελτιωμένες οι δύο τεχνικές αποφόρτισης, δηλαδή η over-speeding και η pitch deloading, καθώς και ο συνδυασμός αυτών των δύο και συγκρίνονται με παλιότερες προταθείσες μεθόδους.

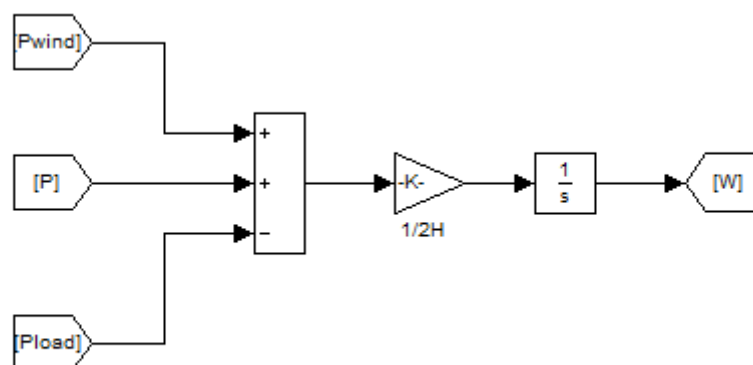
Άλλες σχετικές εργασίες που κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση και εξετάζουν τη συμβολή της Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας είναι οι [30] και [31].

Στις εργασίες [32], [33] αναπτύσσεται μεθοδολογία και εκτιμάται η συνολική αδράνεια του συστήματος μέσω της απόκρισης της συχνότητας df/dt κατά τα πρώτα sec μιας μεταβολής, στα οποία παίζει καθοριστικό ρόλο η αδράνεια του συστήματος στην απόκριση της συχνότητας. Ομοίως και στο [34] και στο [35]. Στην εργασία [36] υπολογίζεται η αδράνεια των Α/Γ μελετώντας τις αποκρίσεις των αιολικών πάρκων κατά τη διάρκεια μεταβατικών για περιπτώσεις υποσυχνότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ SIMULINK

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται η μοντελοποίηση του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της ρύθμισης φορτίου-συχνότητας στο πρώτο κομμάτι, δηλαδή αφορά στη μελέτη στο προγραμματιστικό περιβάλλον του matlab/simulink. Η μελέτη, σε αυτό το κεφάλαιο, αναφέρεται σε ένα σύστημα που αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια, ένα υδροηλεκτρικό σταθμό και ένα φορτίο.

Το συνολικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προσομοιώθηκε στη βάση του μοντέλου μεταβολής ισχύος - ροπής ενός ζυγού. Σύμφωνα με αυτή τη λογική, το μοντέλο αναπαρίσταται ως μια στρεφόμενη μάζα. Αυτή η μάζα δύναται να θεωρηθεί ότι έχει μια ισοδύναμη ροπή αδράνειας. Επομένως, μπορεί να αγνοηθεί η τοπολογία του δικτύου και να θεωρηθεί ότι η ροπή αδράνειας του συναθροίζεται με τις ροπές αδράνειας όλων των γεννητριών σε μία. Αντίστοιχα, το φορτίο μπορεί να αναπαρασταθεί συγκεντρωμένο και ως μια ηλεκτρική αντιρροπή. Άρα σχηματικά το σύστημα, το οποίο μελετάται είναι το εξής:



Σχήμα 4.1 Μοντέλο μεταβολής ισχύος-ροπής ενός ζυγού.

Το P αντιπροσωπεύει στη περίπτωση, που μελετάται, την ισχύ του υδροηλεκτρικού. Το H αναπαριστά τη συνολική αδράνεια του συστήματος ως μια μηχανή με μια ισοδύναμη σταθερά H. Τέλος το w είναι η συχνότητα του δικτύου.

4.1 Αποτελέσματα υποσυχνότητας

Μελετάται η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και για όλες τις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ που μας απασχόλησαν παραπάνω. Συγκεκριμένα για χαμηλή ταχύτητα ανέμου - κάτω της ονομαστικής, υψηλή ταχύτητα ανέμου-κάτω της ονομαστικής και υψηλή ταχύτητα ανέμου-άνω της ονομαστικής, μελετάται η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος, όταν η Α/Γ δε συμμετέχει καθόλου στη ρύθμιση της συχνότητας, όταν συμμετέχει με αδρανειακή απόκριση, όταν συμμετέχει με pitch deloading και όταν έχουμε συνδυασμό των δύο μεθόδων. Επίσης, όσον αφορά στη λειτουργία pitch deloading γίνονται συγκρίσεις για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού της ανεμογεννήτριας και για δύο διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας. Τέλος και πάλι για τη λειτουργία του pitch deloading γίνεται σύγκριση για τους δύο τρόπους ορισμού της ισχύος αναφοράς, όπως προκύπτουν από τα πρότυπα που αναλύθηκαν παραπάνω. Δηλαδή, με

δεδομένο ότι στα πρότυπα ορίζεται η τιμή στατισμού ως $R = - \frac{\Delta f/f_n}{\Delta P/P_{ref}}$, θεωρείται στην πρώτη περίπτωση ότι η ισχύς αναφοράς είναι η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι είναι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς της ανεμογεννήτριας, με βάση την τρέχουσα τιμή του ανέμου. Οι εκτελέσεις έγιναν σε ανά μονάδα μεγέθη με ισχύ αναφοράς 10 MW. Τα αποτελέσματα για την ισχύ της ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται με βασική ισχύ την ονομαστική ισχύ της Α/Γ. Το όριο μεταβολής της συχνότητας για τον υπολογισμό του χρόνου αποκατάστασης τέθηκε στα 0.01 Hz. Ακολουθεί η επεξήγηση των συμβόλων και τα αποτελέσματα των σεναρίων.

Μέγεθος	Σύμβολα
Μεταβολή φορτίου	ΔL (p.u.)
Τιμή της συχνότητας στη μέγιστη βύθιση	f_{min} (Hz)
Μέγιστη βύθιση συχνότητας	Δf (Hz)
Τιμή της συχνότητας στη νέα κατάσταση ισορροπίας	f_f (Hz)
Μόνιμο σφάλμα της συχνότητας στη νέα κατάσταση ισορροπίας	Δf_f (Hz)
Χρόνος αποκατάστασης της συχνότητας στη νέα κατάσταση ισορροπίας	T (sec)

Πίνακας 4.1 Μεγέθη και Σύμβολα

Στοιχεία υδροηλεκτρικού:

Χρονική σταθερά $T_R = 8$ sec.
 Μεταβατικός στατισμός $\delta = 0.35$.
 Μόνιμος στατισμός $\sigma = 0.02$.
 Σταθερά Αδράνειας $H = 4.5$ sec.
 Ονομαστική ισχύς: 10 MW.

Στοιχεία Ανεμογεννήτριας

Ακτίνα έλικας (m)	45
Βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής (C_p, max)	0,438209
Βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων λ_{opt}	6,325
Ονομαστική ισχύς (MW)	2,457184766
Ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (r/sec)	1,5762138
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/sec)	11,21417
ταχύτητα ένταξης (m/sec)	5
ταχύτητα αποκοπής (m/sec)	25

Στοιχεία ηλεκτρικού μέρους της PMSG

αντίσταση στάτη (p.u.)	0,01
αυτεπαγωγή σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη στο d άξονα (p.u.)	1
αυτεπαγωγή σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη στο q άξονα (p.u.)	0,7
Μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη (p.u.)	1,4
Αντίδραση σκέδασης (p.u.)	1,22

[6]

Σενάριο 1

- Ταχύτητα ανέμου $V_w=8\text{m/sec}$.
- Φορτίο $L= 0,357$ p.u., $\cos\phi = 1$.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L=5\%$.
- Η ισχύς της Α/Γ καλύπτει το 25% του φορτίου του συστήματος.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R= 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ προκύπτει από υπολογισμούς πως είναι $H = 4$ sec.

Σενάριο 2

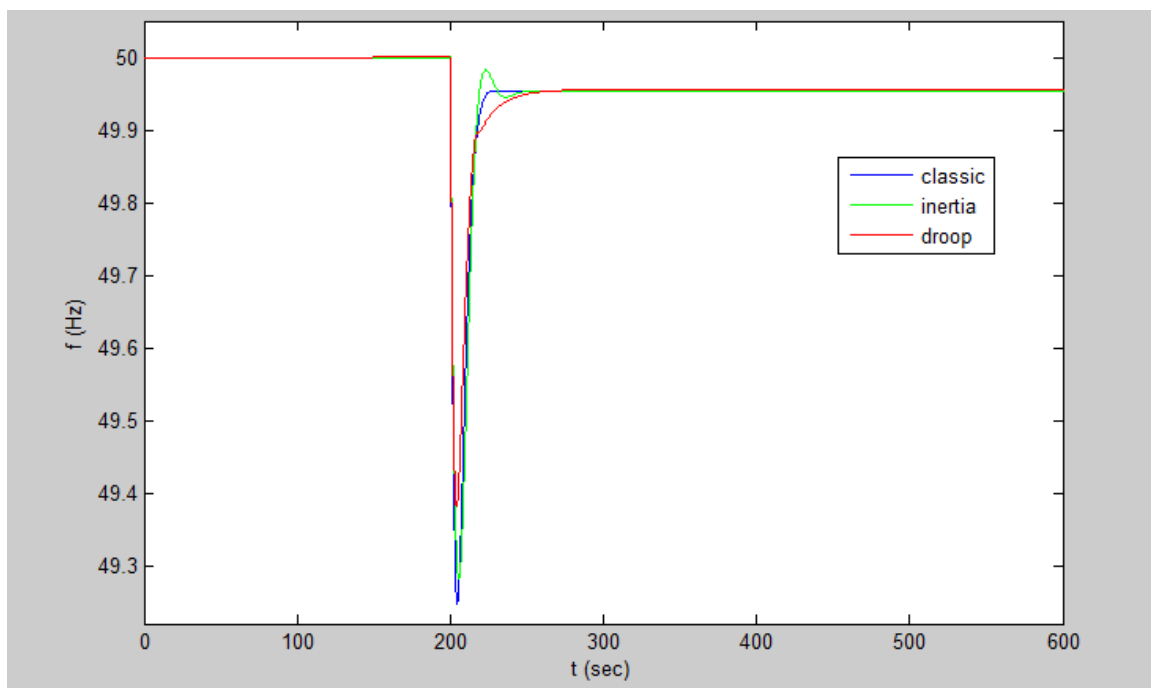
- Ταχύτητα ανέμου $V_w=10\text{m/sec}$.
- Φορτίο $L= 0,697$ p.u., $\cos\phi = 1$.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L=5\%$.
- Η ισχύς της Α/Γ καλύπτει το 25% του φορτίου του συστήματος.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R= 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ προκύπτει από υπολογισμούς πως είναι $H = 4$ sec.

Σενάριο 3

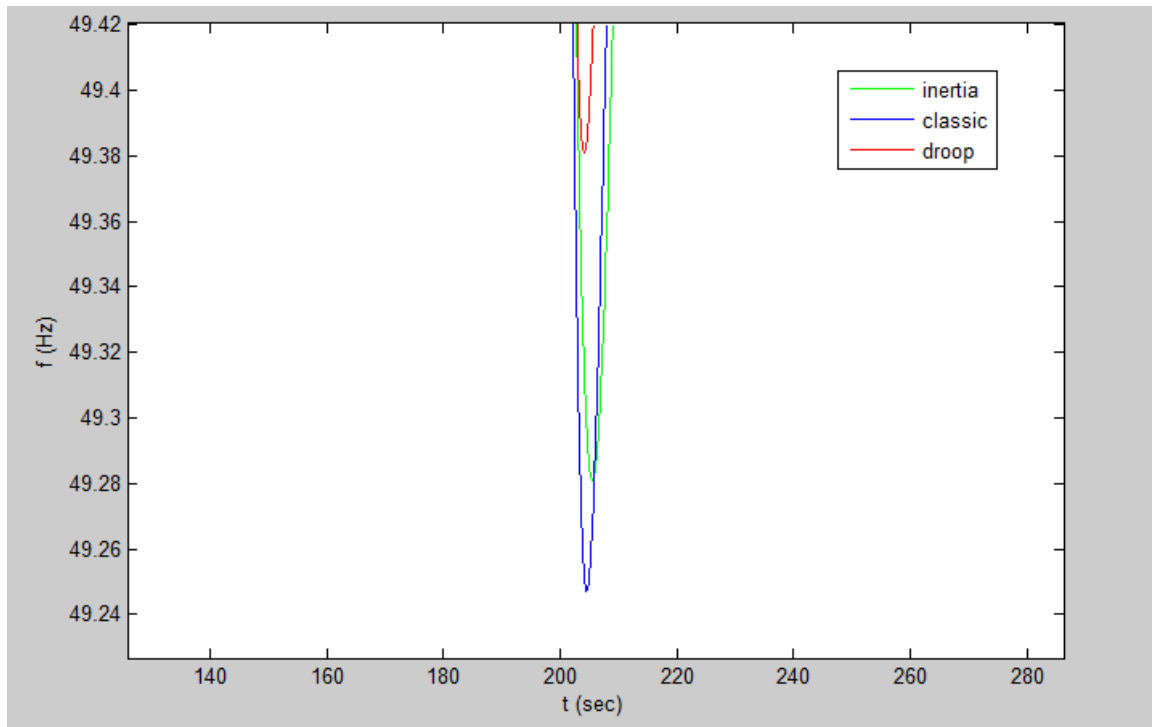
- Ταχύτητα ανέμου $V_w=12\text{m/sec}$.
- Φορτίο $L= 0,983$ p.u., $\cos\phi = 1$.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L=5\%$.
- Η ισχύς της Α/Γ καλύπτει το 25% του φορτίου του συστήματος.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R= 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ προκύπτει από υπολογισμούς πως είναι $H = 4$ sec.

Σενάριο 1

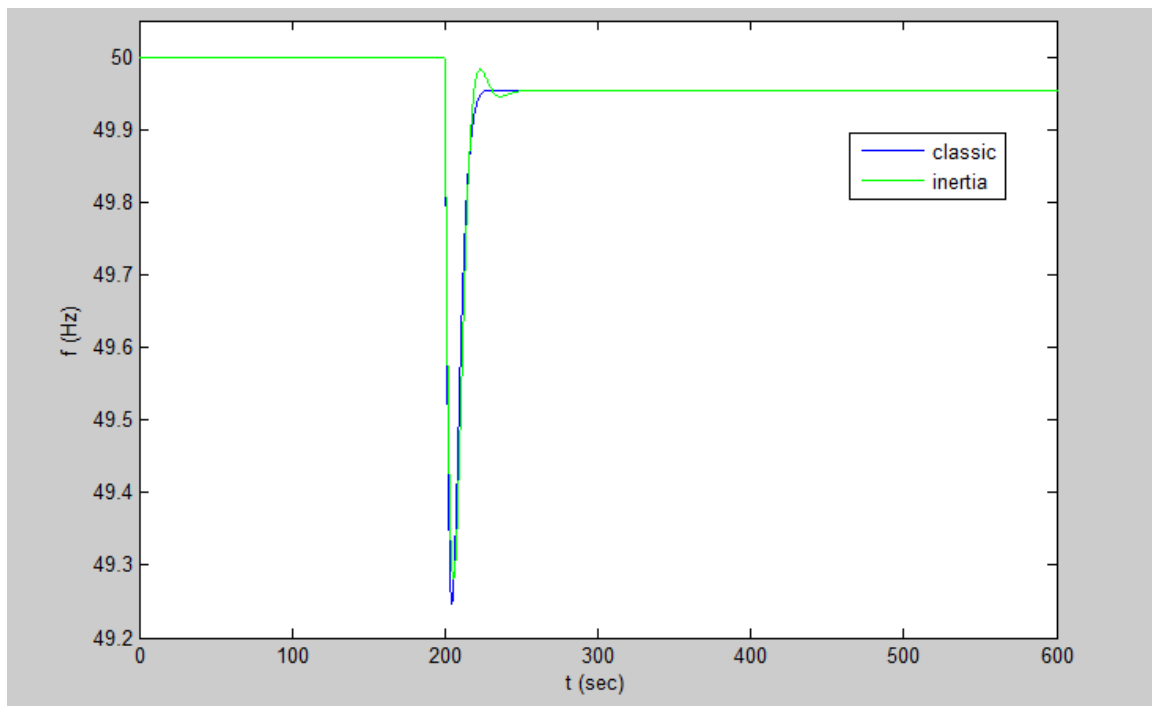
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για την περίπτωση, όπου η ταχύτητα ανέμου είναι $V_w = 8$ m/sec.



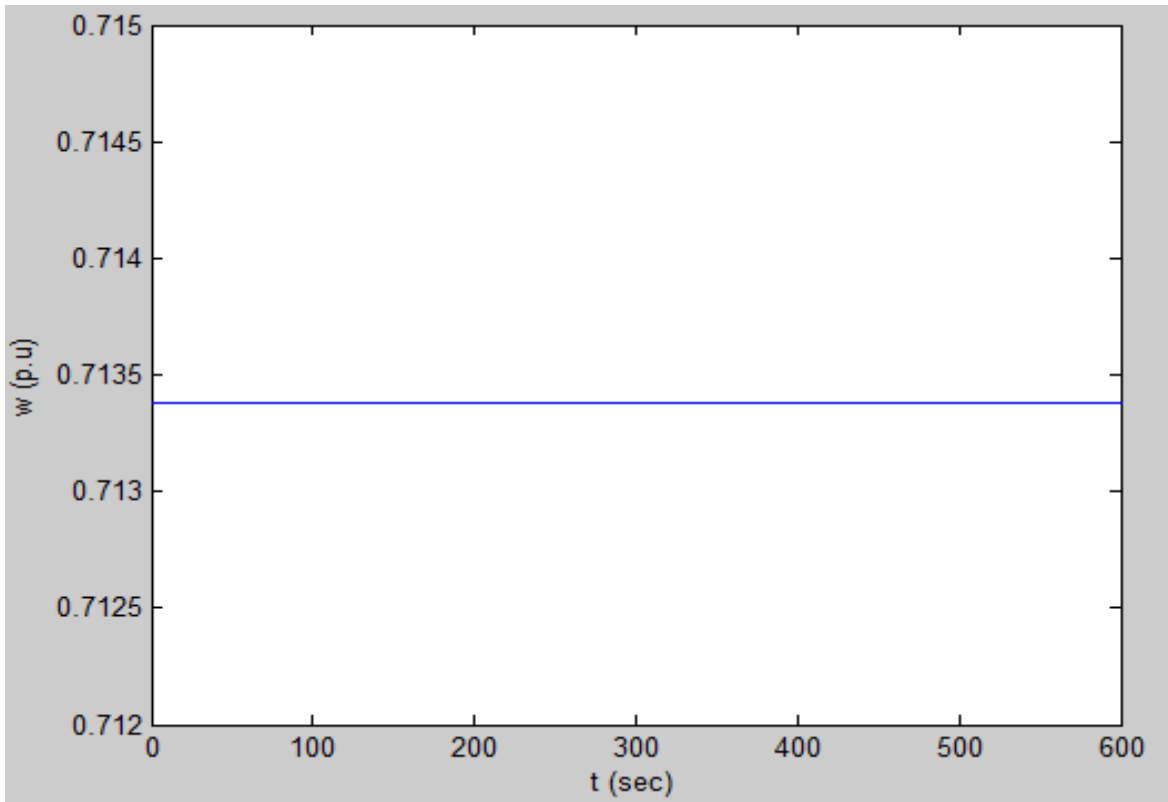
Σχήμα 4.2 Μεταβολή συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για τις τρεις μεθόδους στρατηγικής λειτουργίας της Α/Γ.



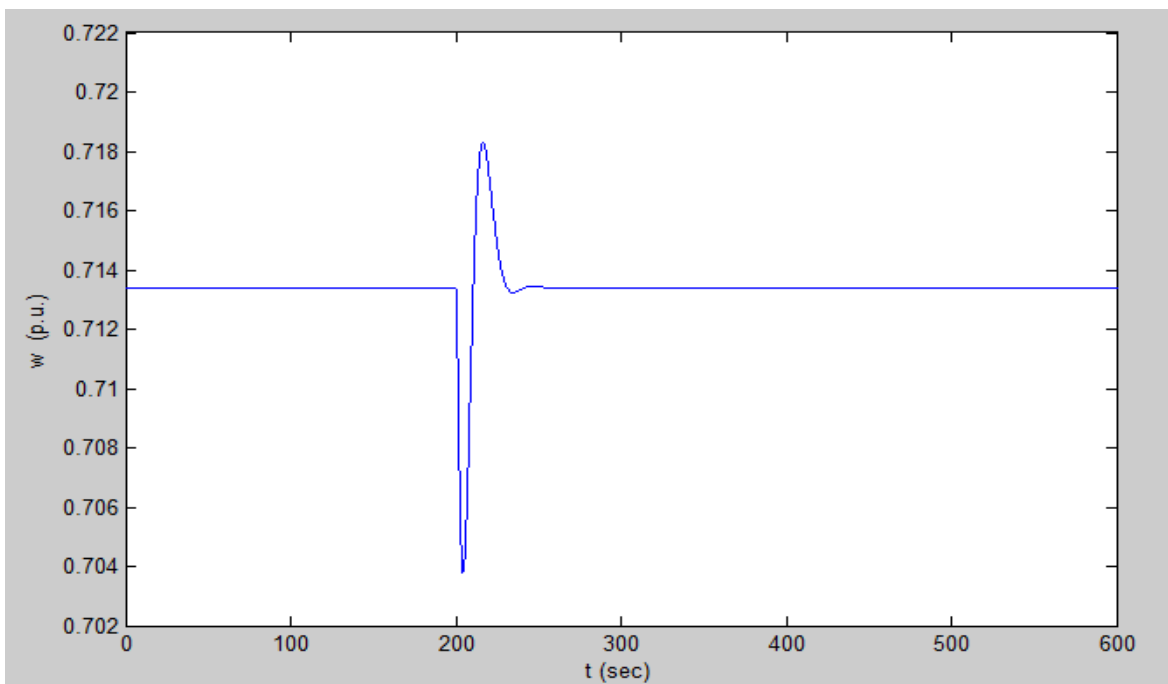
Σχήμα 4.3 Μέγιστη βύθιση της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για τις τρεις μεθόδους στρατηγικής λειτουργίας.



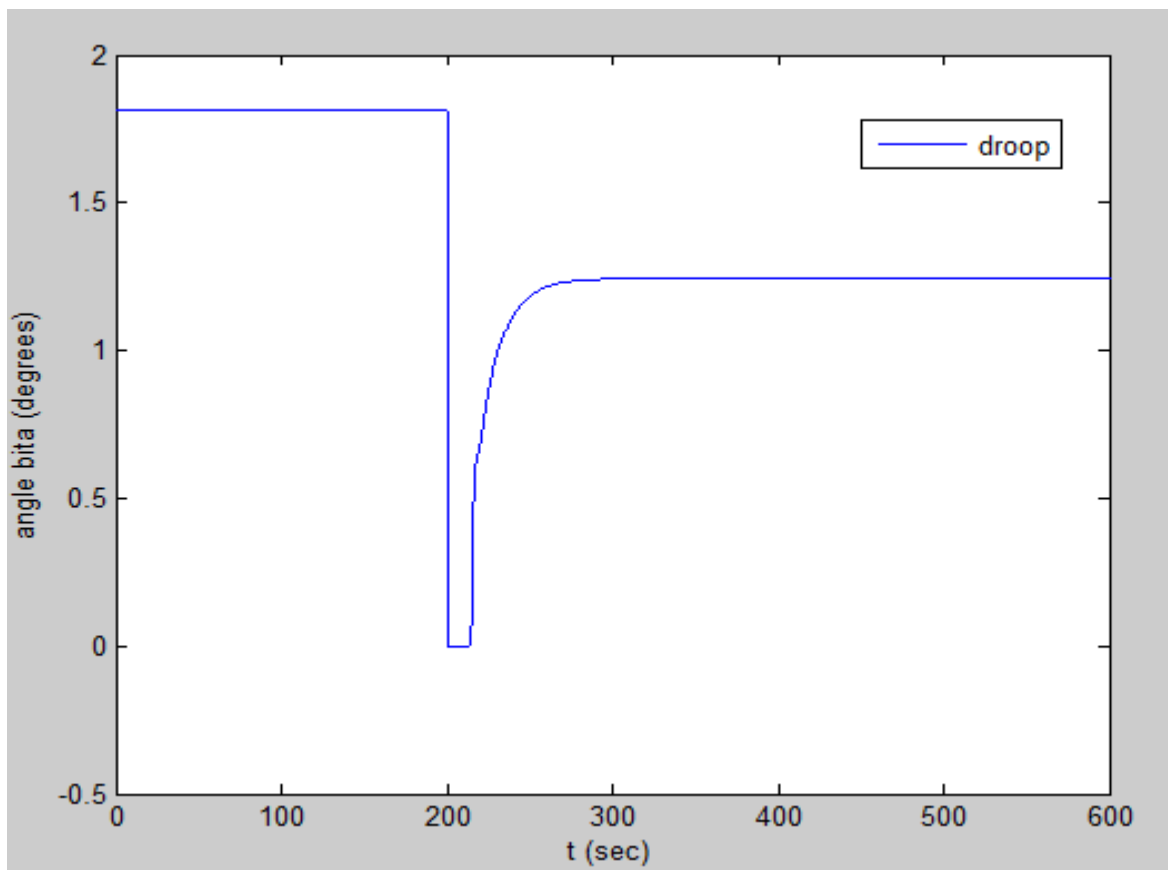
Σχήμα 4.4 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για την κλασική λειτουργία και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



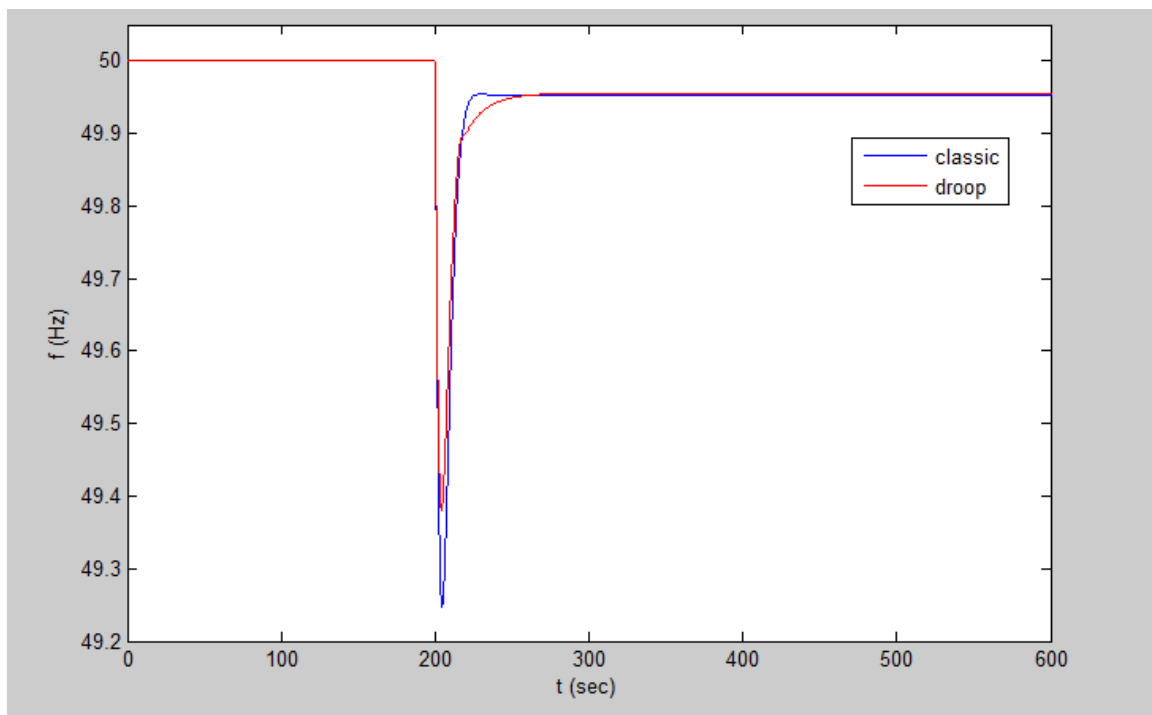
Σχήμα 4.5 Γωνιακής ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



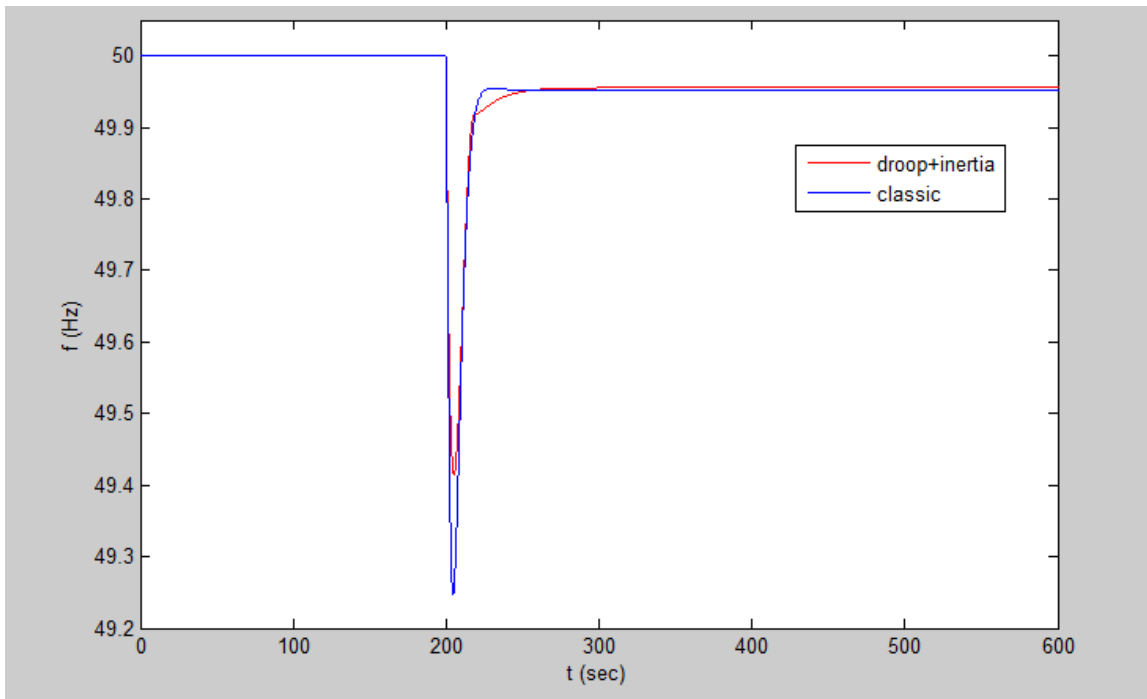
Σχήμα 4.6 Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



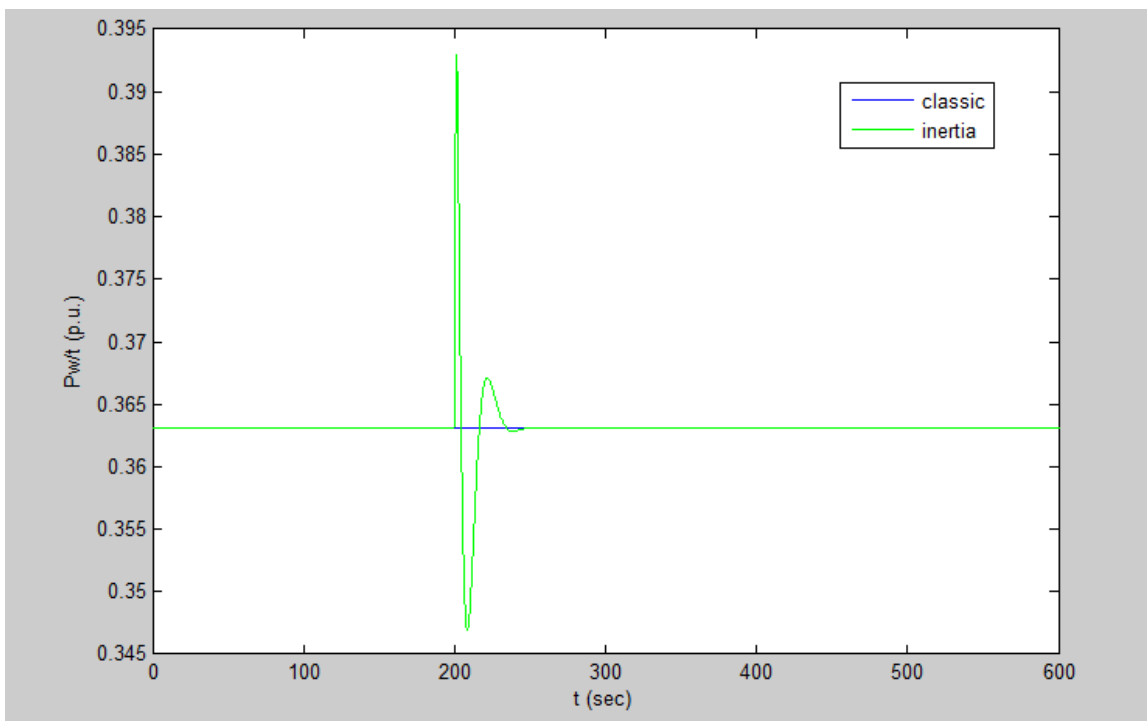
Σχήμα 4.7 Μεταβολή της γωνίας βήματος της έλικας του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ και για λειτουργία pitch deloading.



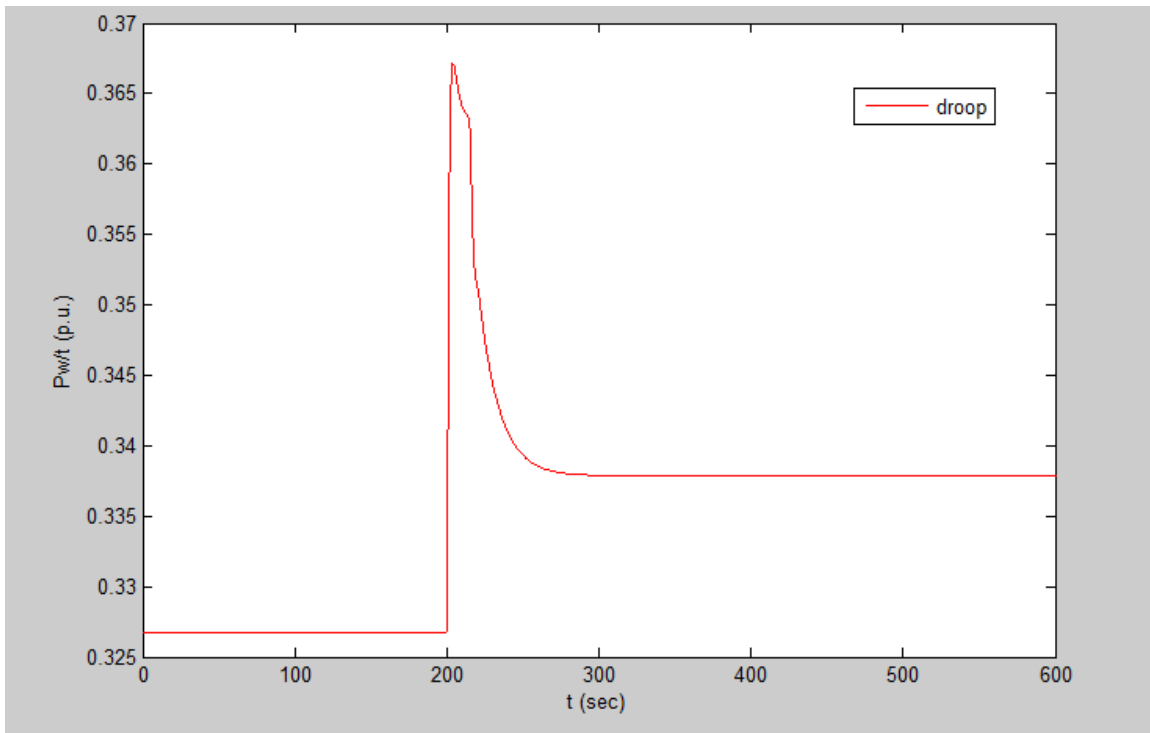
Σχήμα 4.8 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ για την κλασική λειτουργία και για λειτουργία pitch deloading.



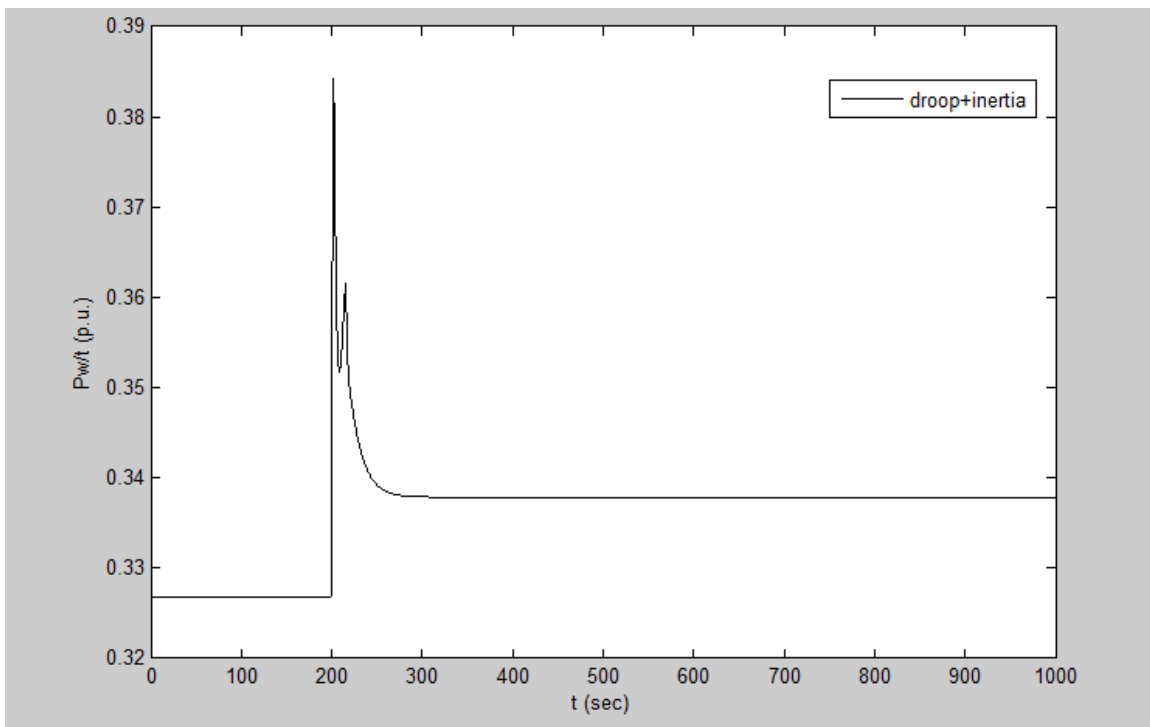
Σχήμα 4.9 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για την κλασική λειτουργία και για τον συνδυασμό των λειτουργιών pitch deloading και της αδρανειακής απόκρισης.



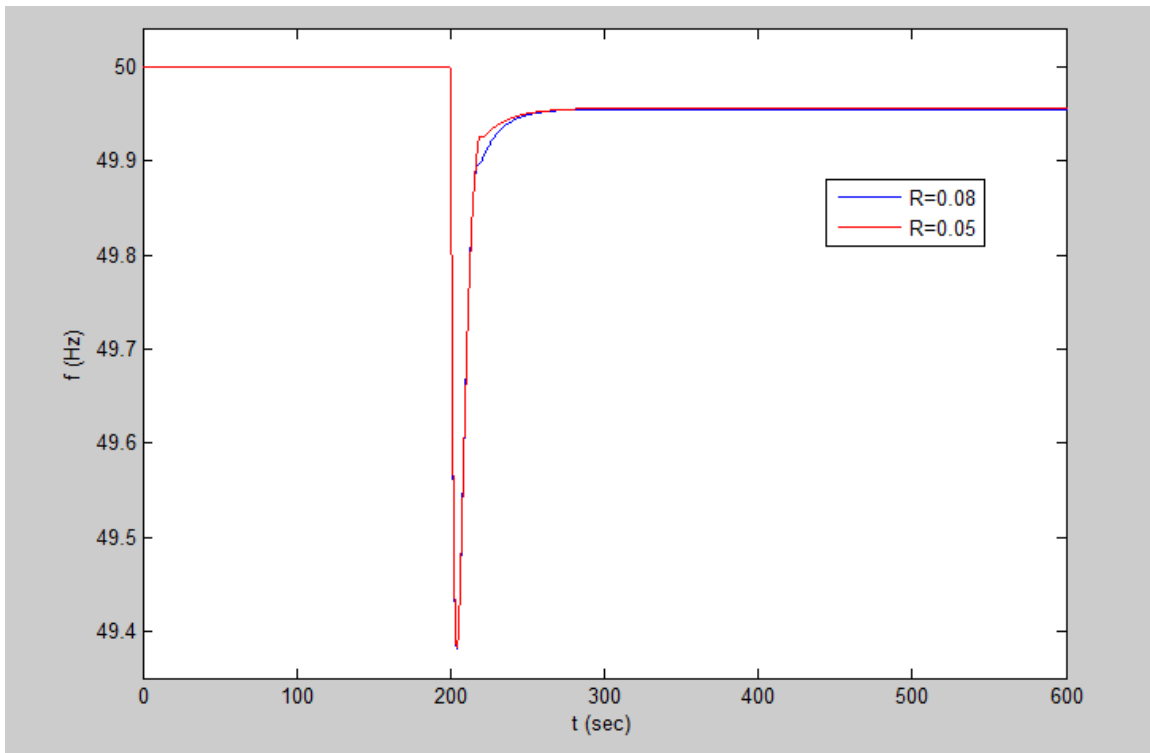
Σχήμα 4.10 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για την κλασική περίπτωση και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



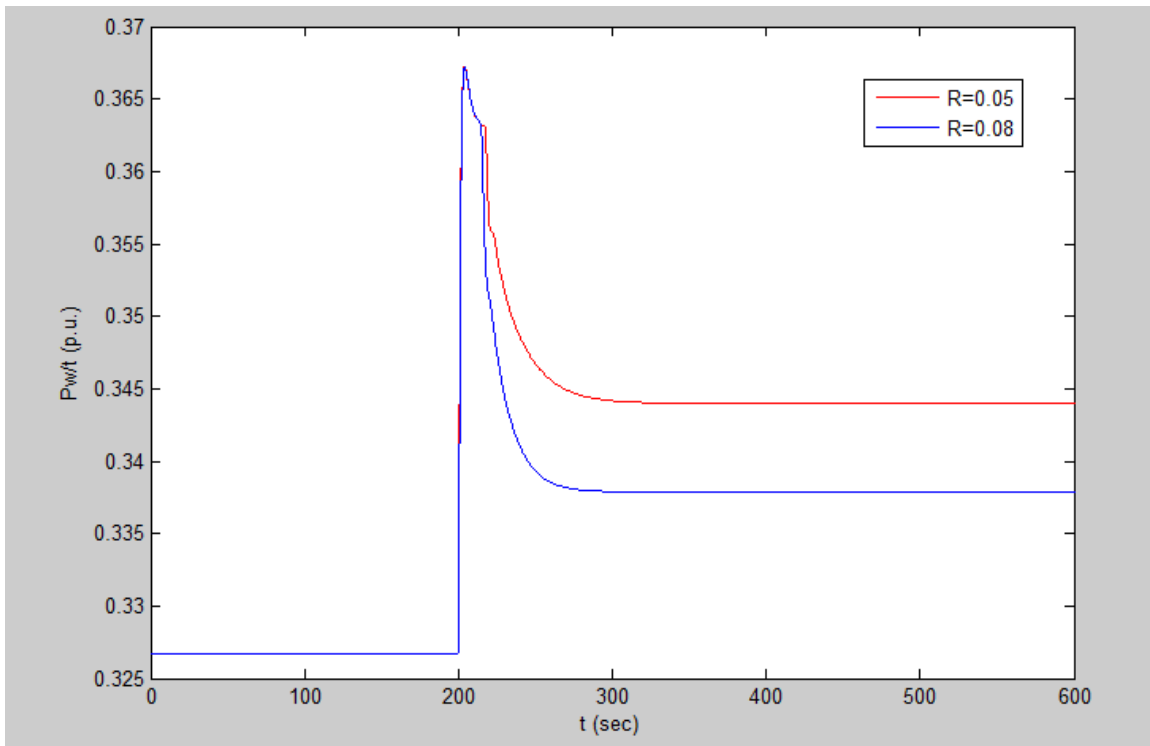
Σχήμα 4.11 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



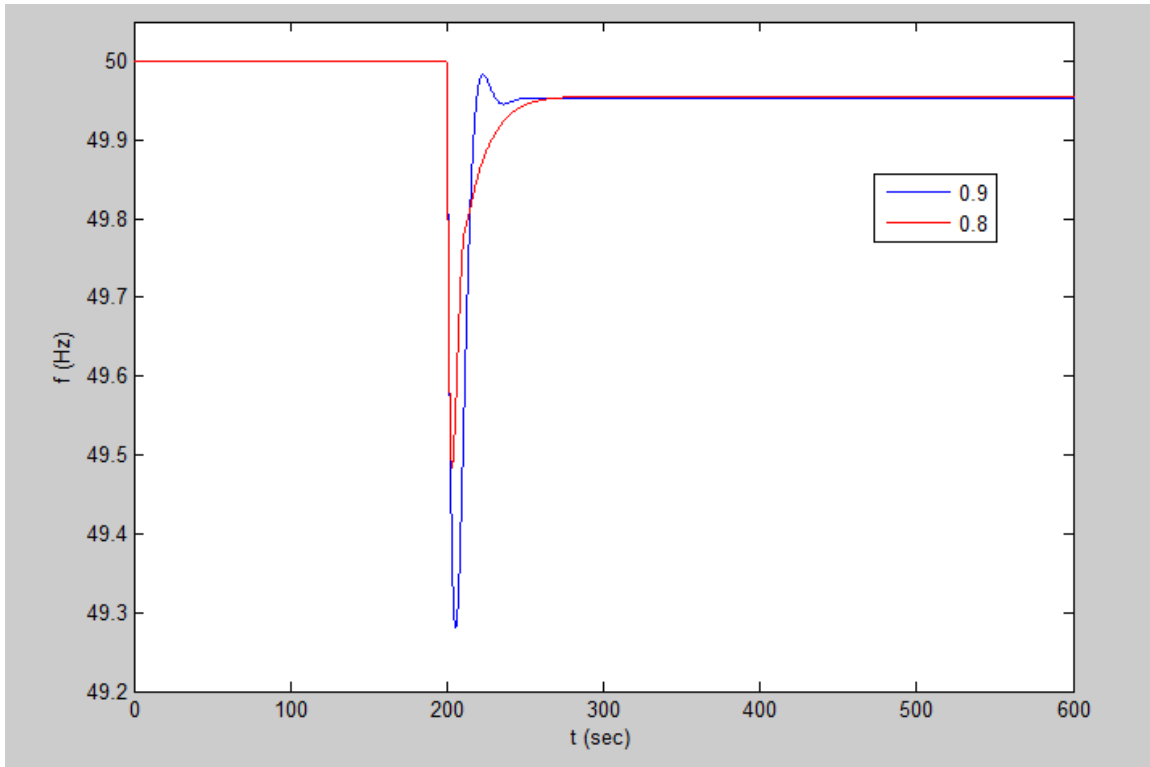
Σχήμα 4.12 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για το συνδυασμό των λειτουργιών pitch deloading και αδρανειακή απόκριση.



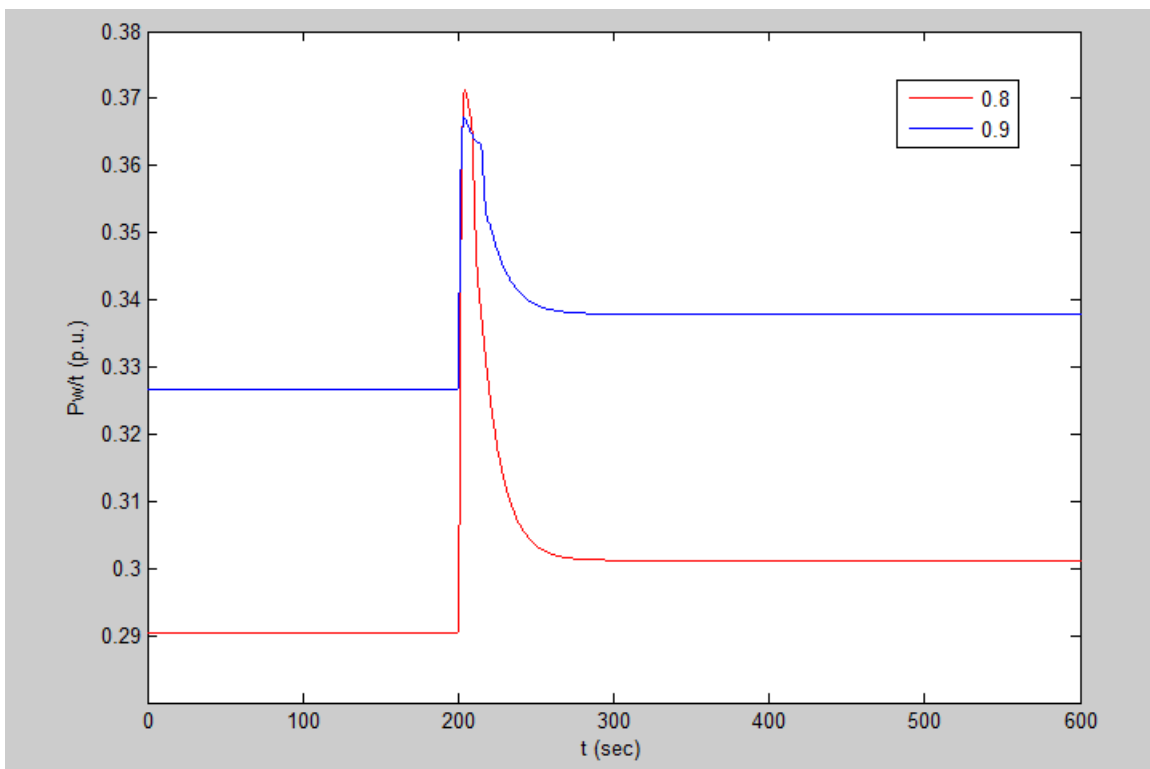
Σχήμα 4.13 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού για την Α/Γ.



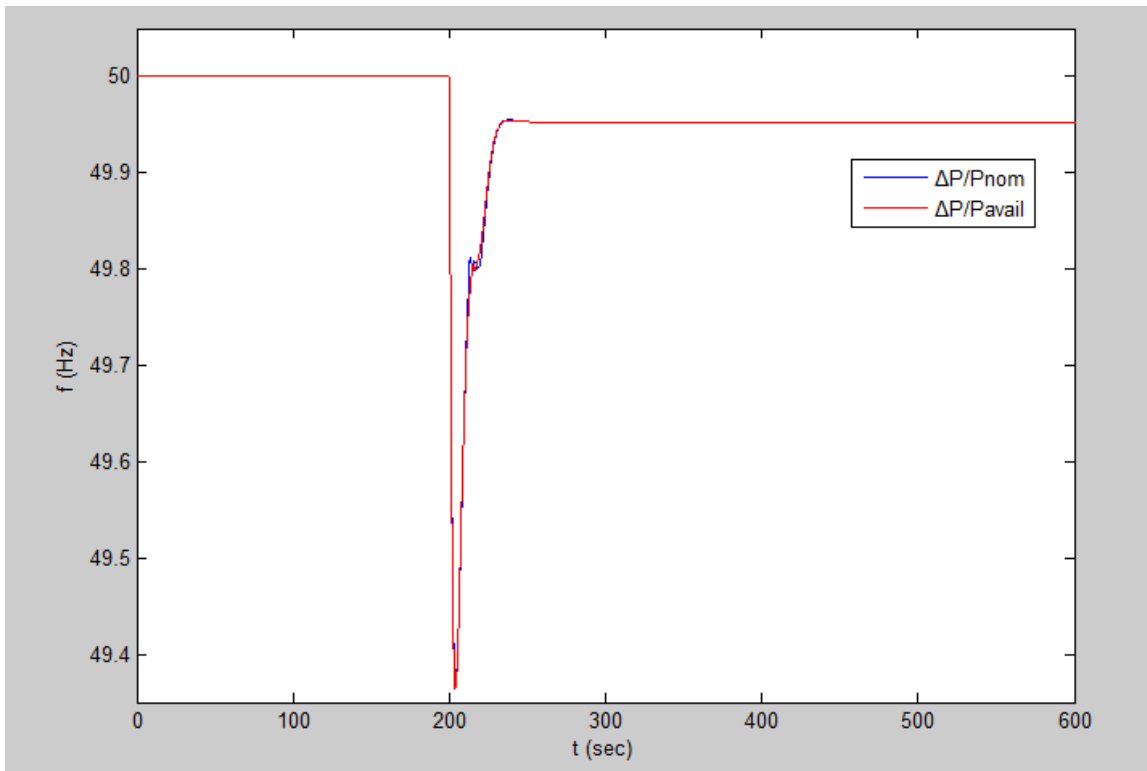
Σχήμα 4.14 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού για την Α/Γ.



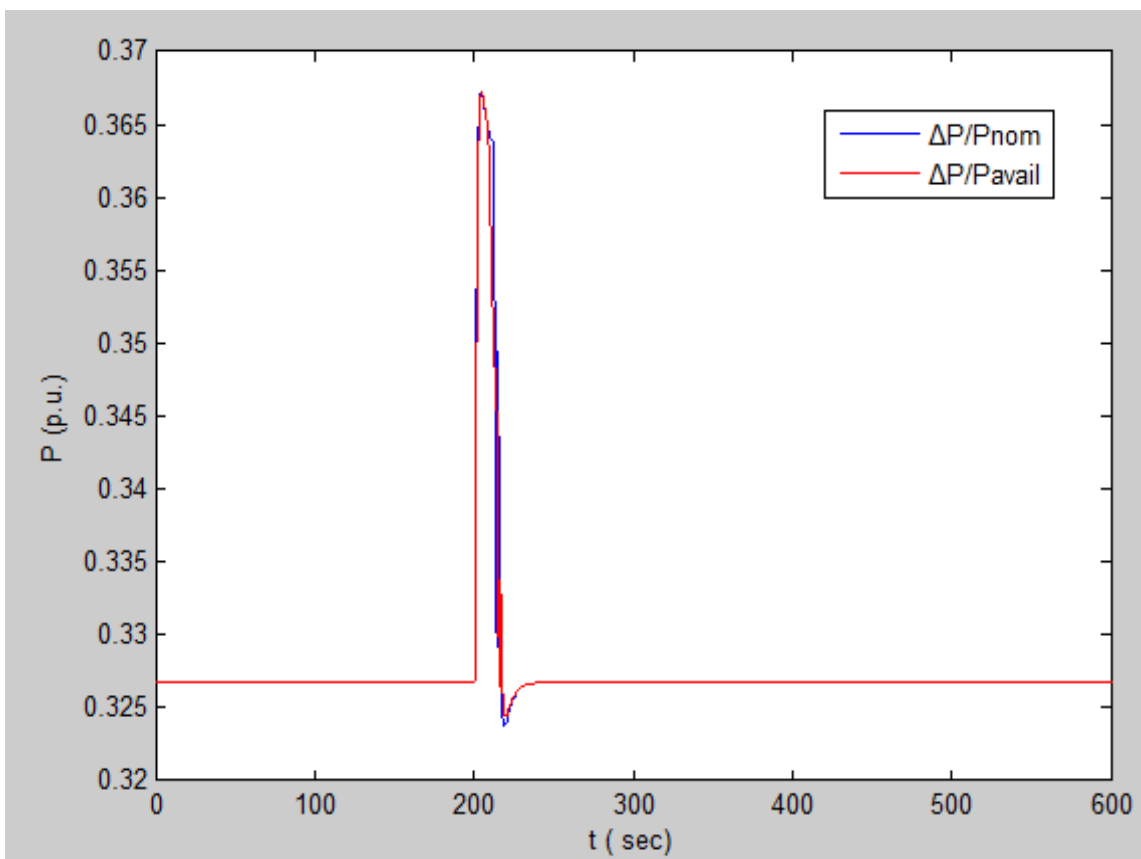
Σχήμα 4.15 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για pitch deloading για δύο διαφορετικές εφεδρείες για την Α/Γ.



Σχήμα 4.16 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading για δύο διαφορετικές εφεδρείες για την Α/Γ.



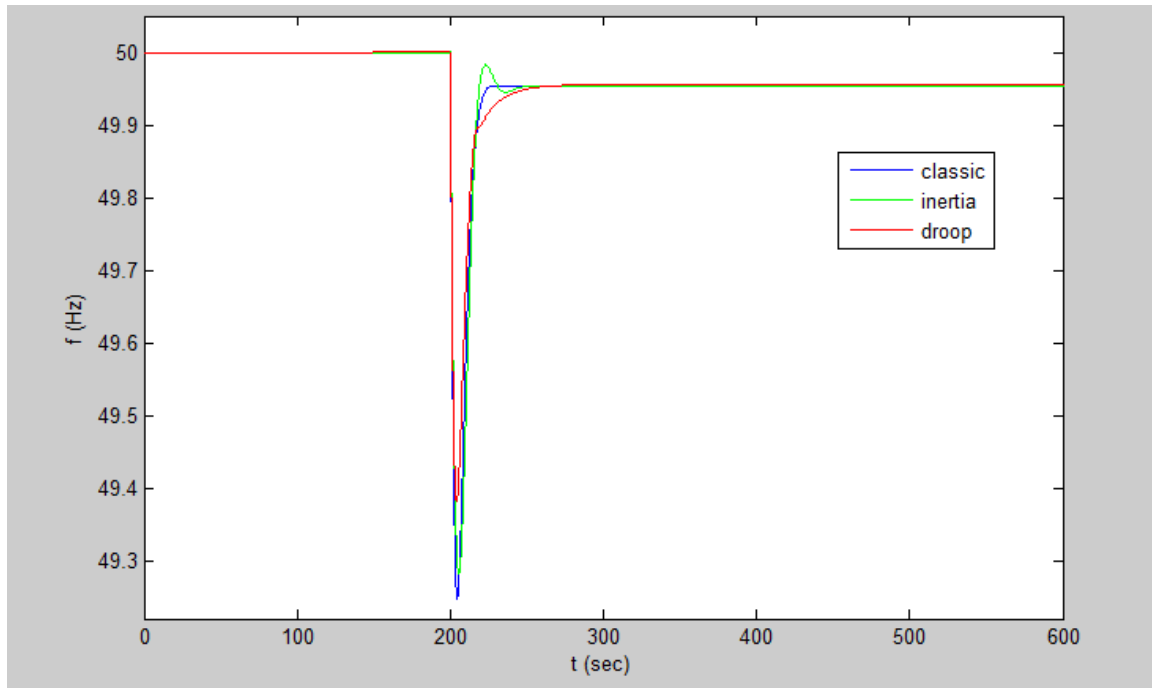
Σχήμα 4.17 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για τους δύο ορισμούς του ΔP .



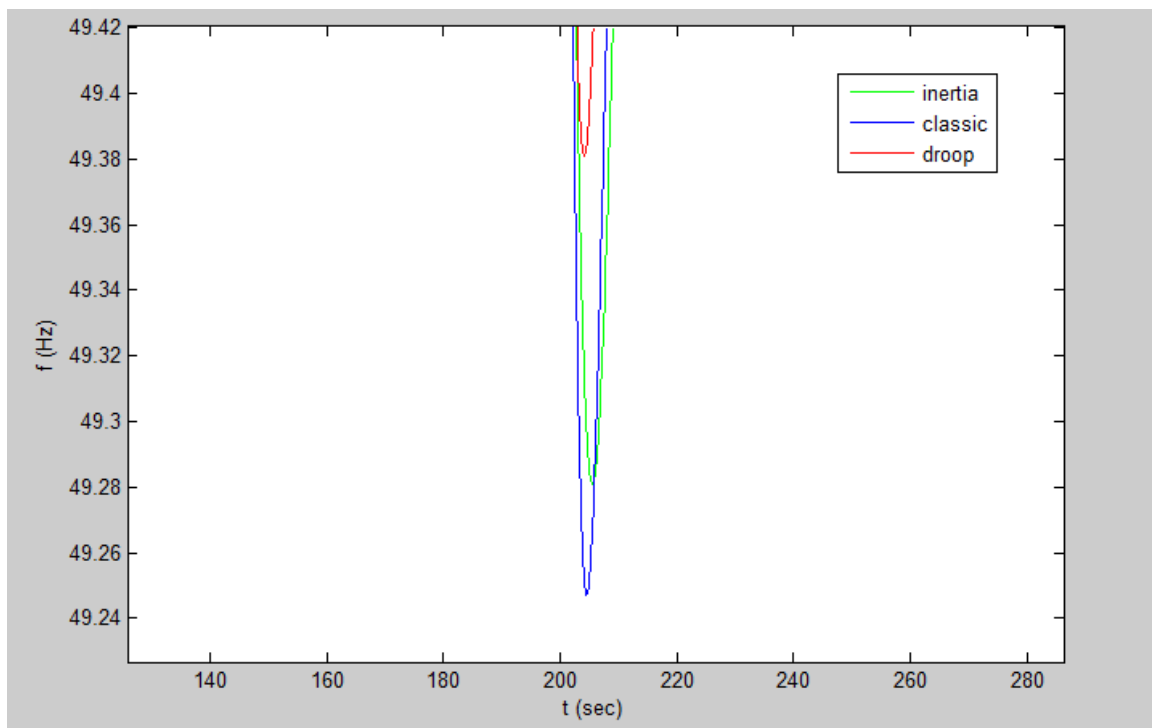
Σχήμα 4.18 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για τους δύο ορισμούς του ΔP .

Σενάριο 2

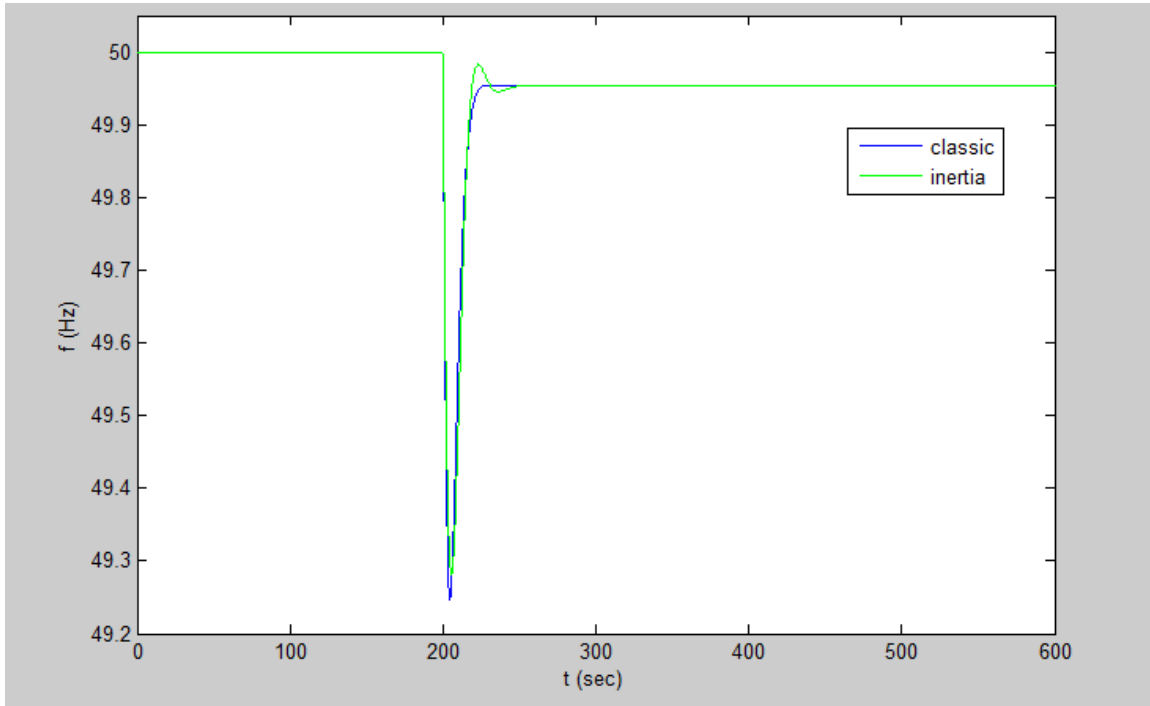
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για την περίπτωση, όπου η ταχύτητα ανέμου είναι $V_w = 10 \text{ m/sec}$ – κάτω της ονομαστικής.



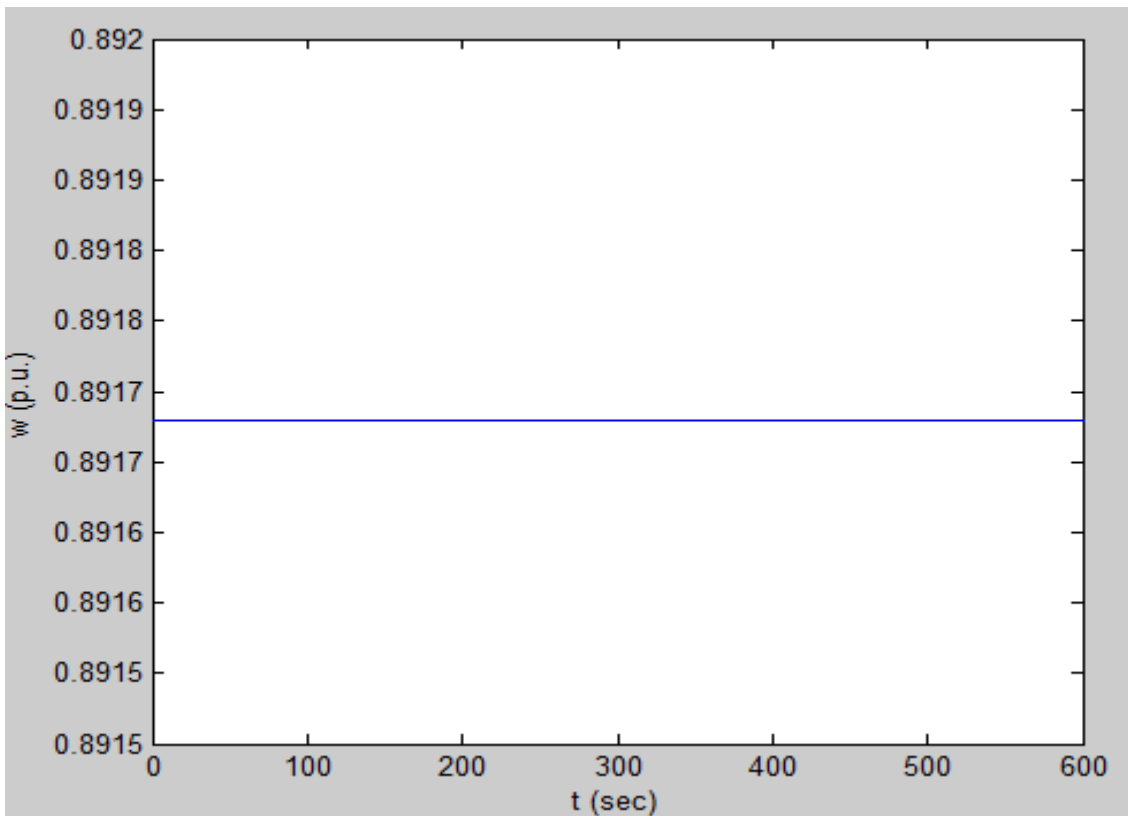
Σχήμα 4.19 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10 \text{ m/sec}$ και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.



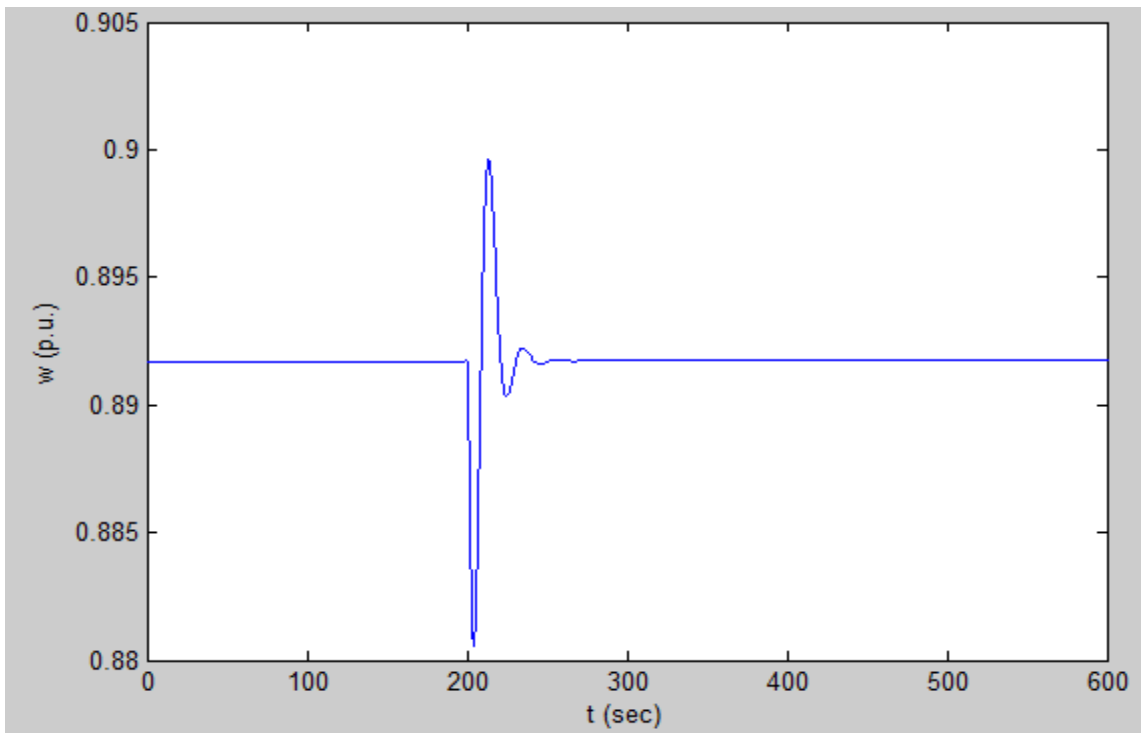
Σχήμα 4.20 Μέγιστη βύθιση της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10 \text{ m/sec}$ και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.



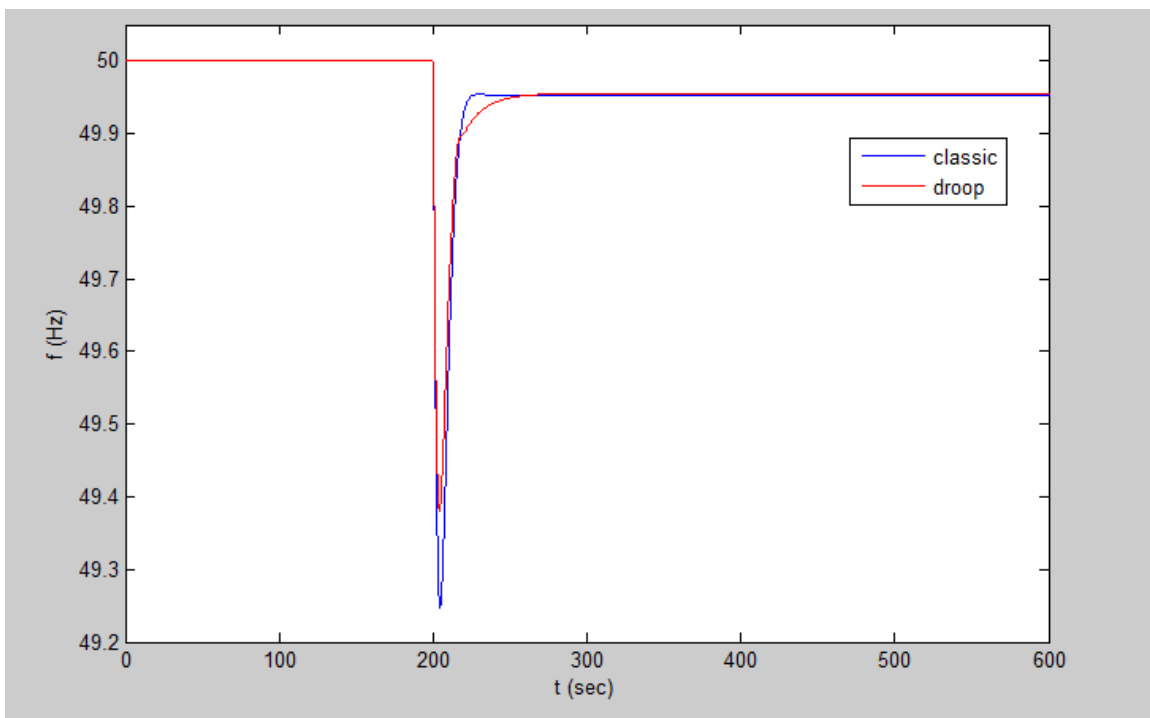
Σχήμα 4.21 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για την κλασική λειτουργία και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



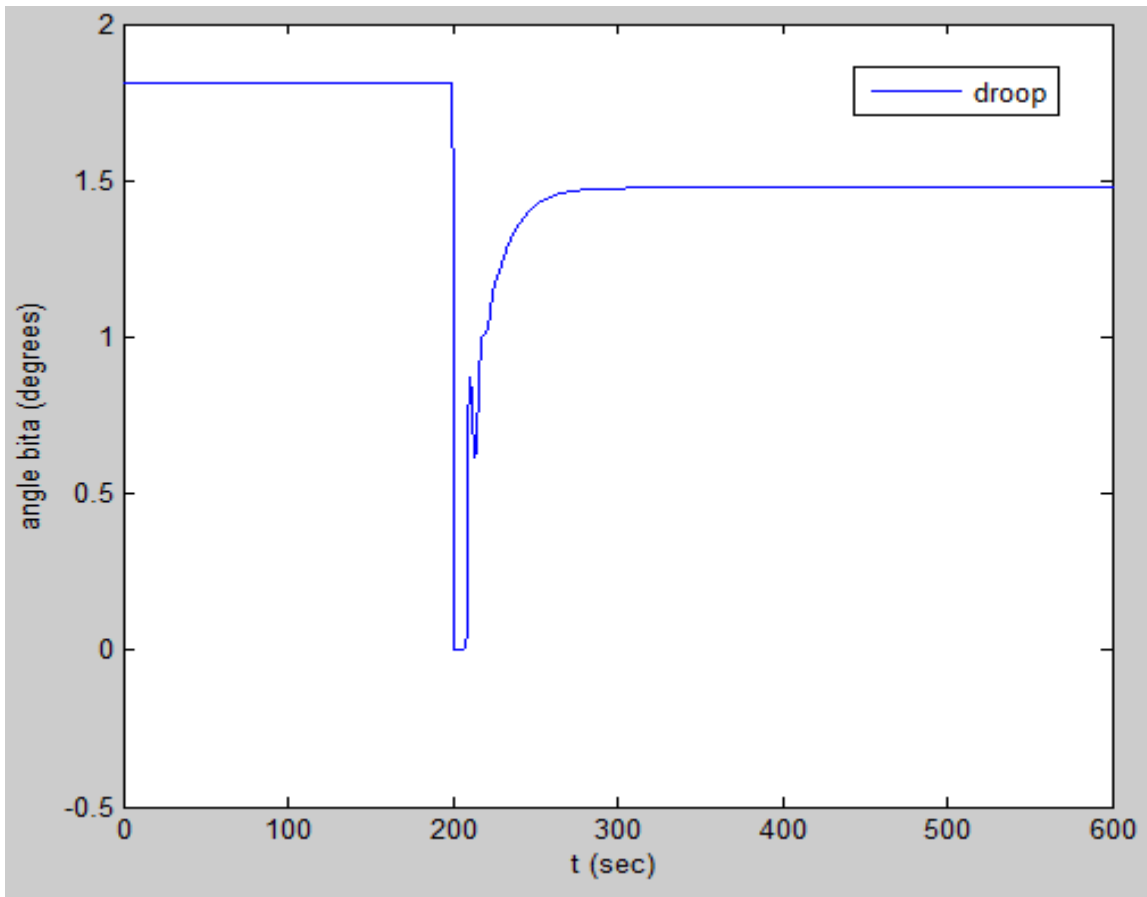
Σχήμα 4.22 Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



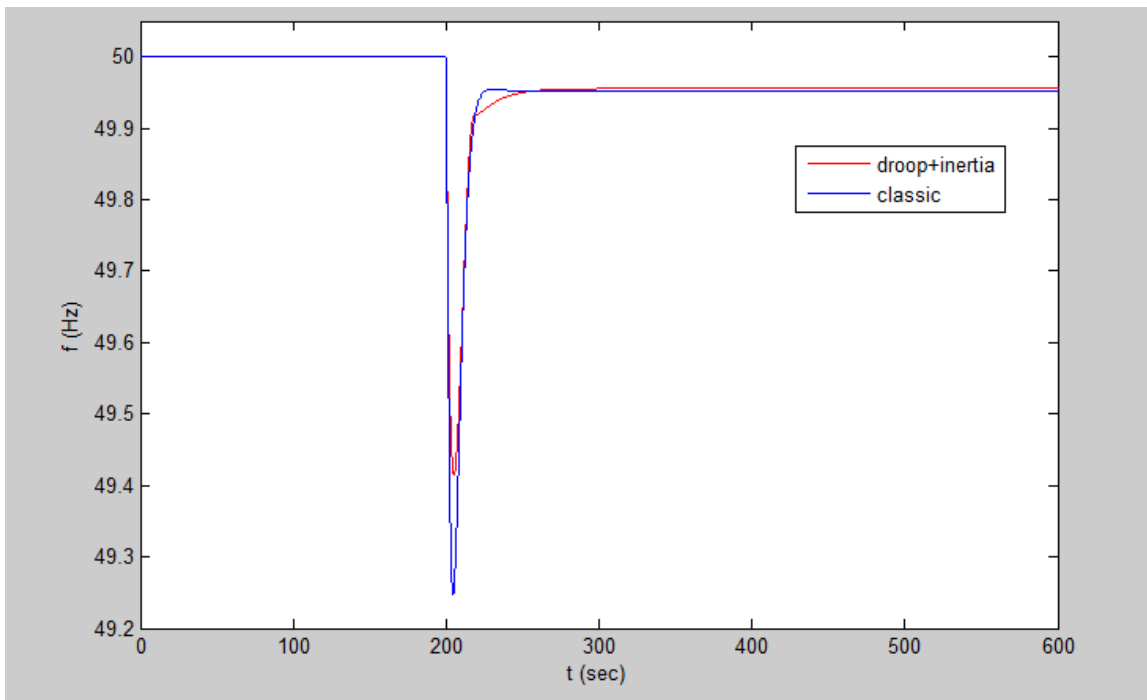
Σχήμα 4.23 Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακή απόκριση.



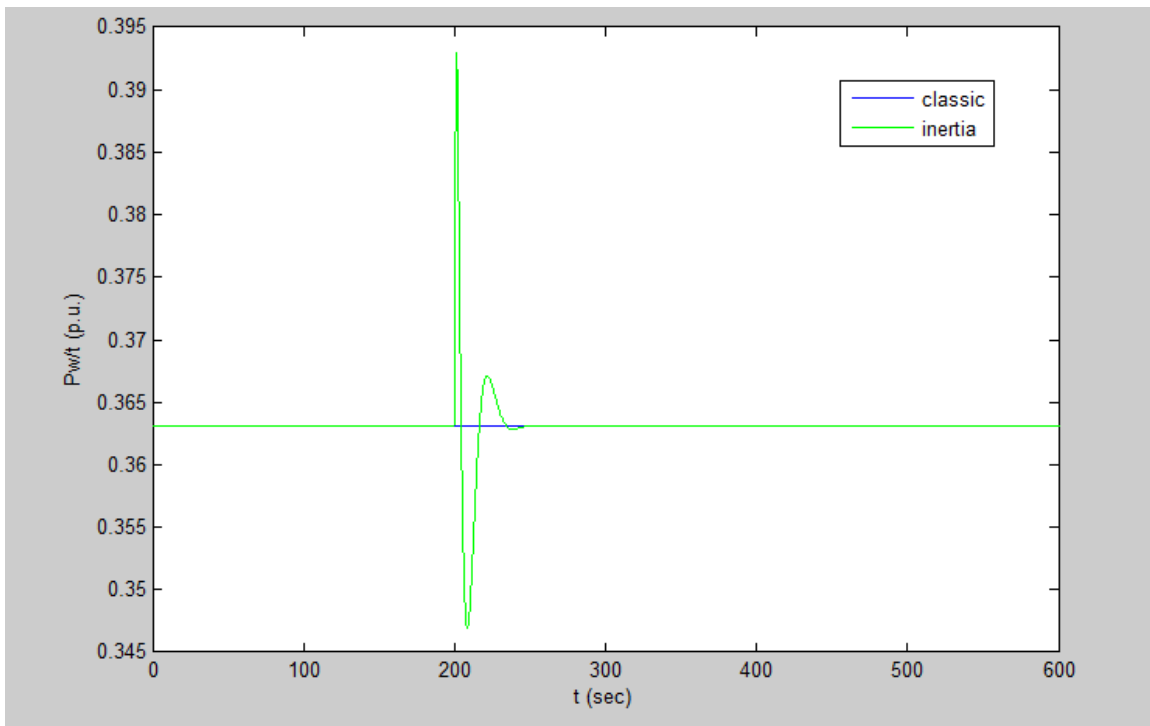
Σχήμα 4.24 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για την κλασική λειτουργία και για λειτουργία pitch deloading.



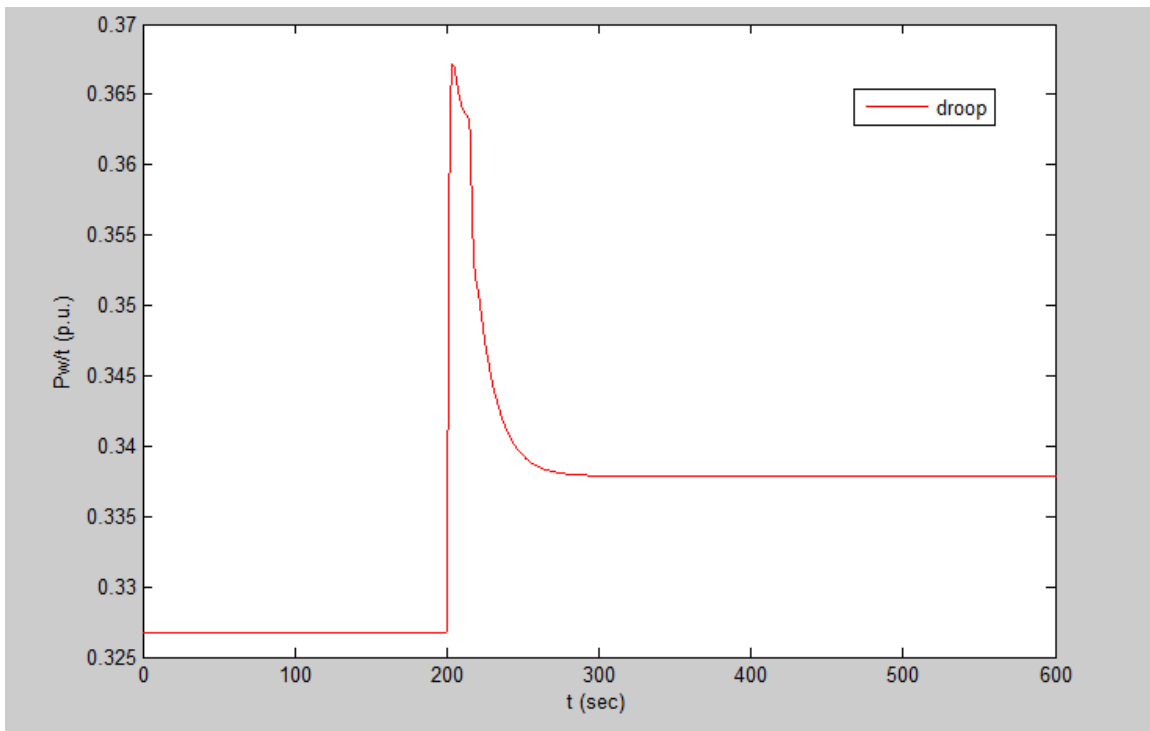
Σχήμα 4.25 Μεταβολή της γωνίας του βήματος της έλικας του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



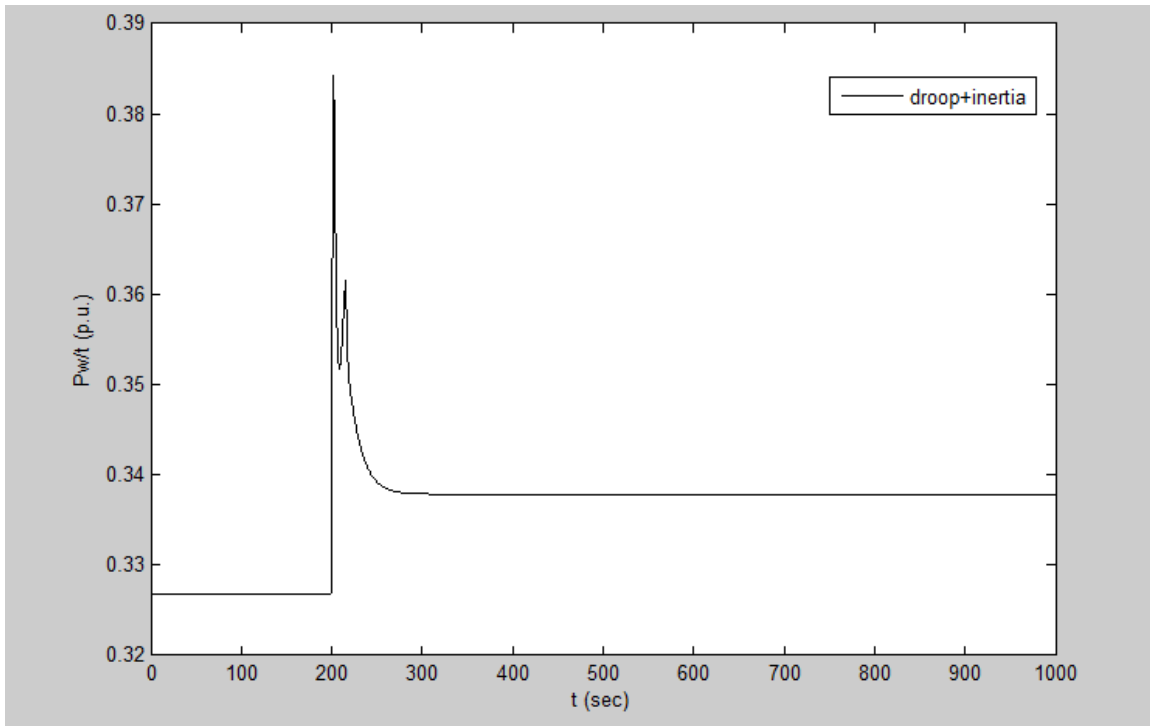
Σχήμα 4.26 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για την κλασική λειτουργία και για το συνδυασμό των λειτουργιών pitch deloading και της αδρανειακής απόκρισης.



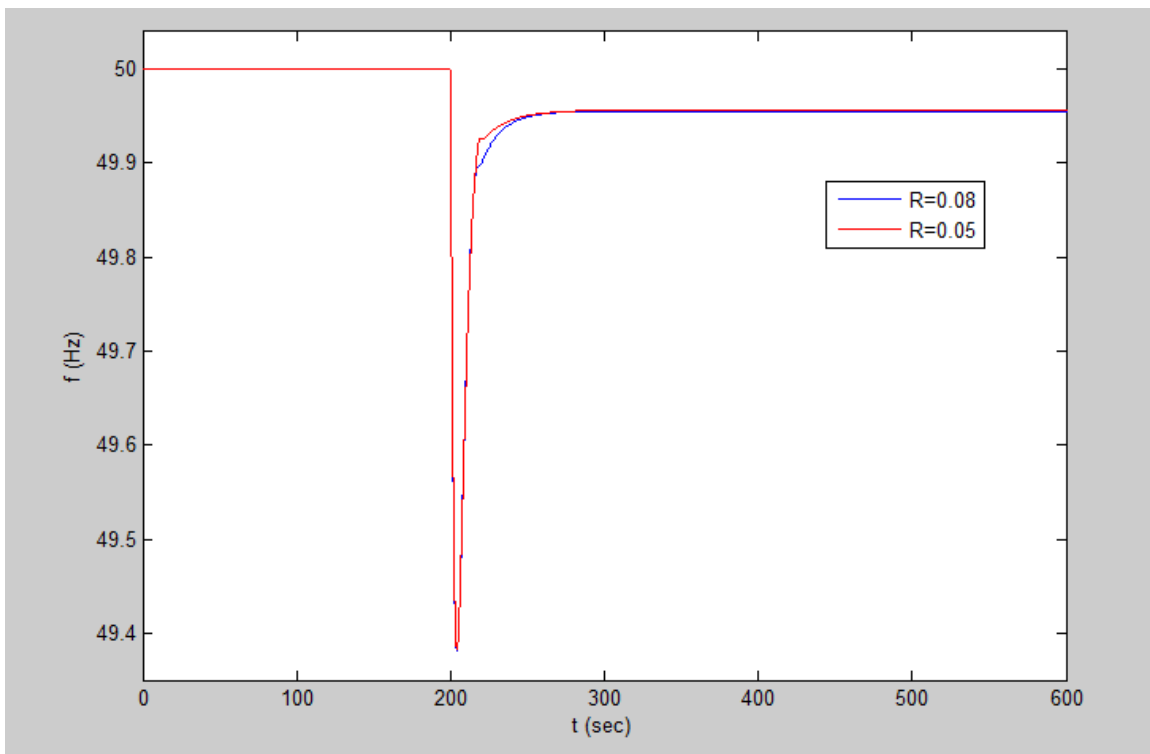
Σχήμα 4.27 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για την κλασική λειτουργία και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



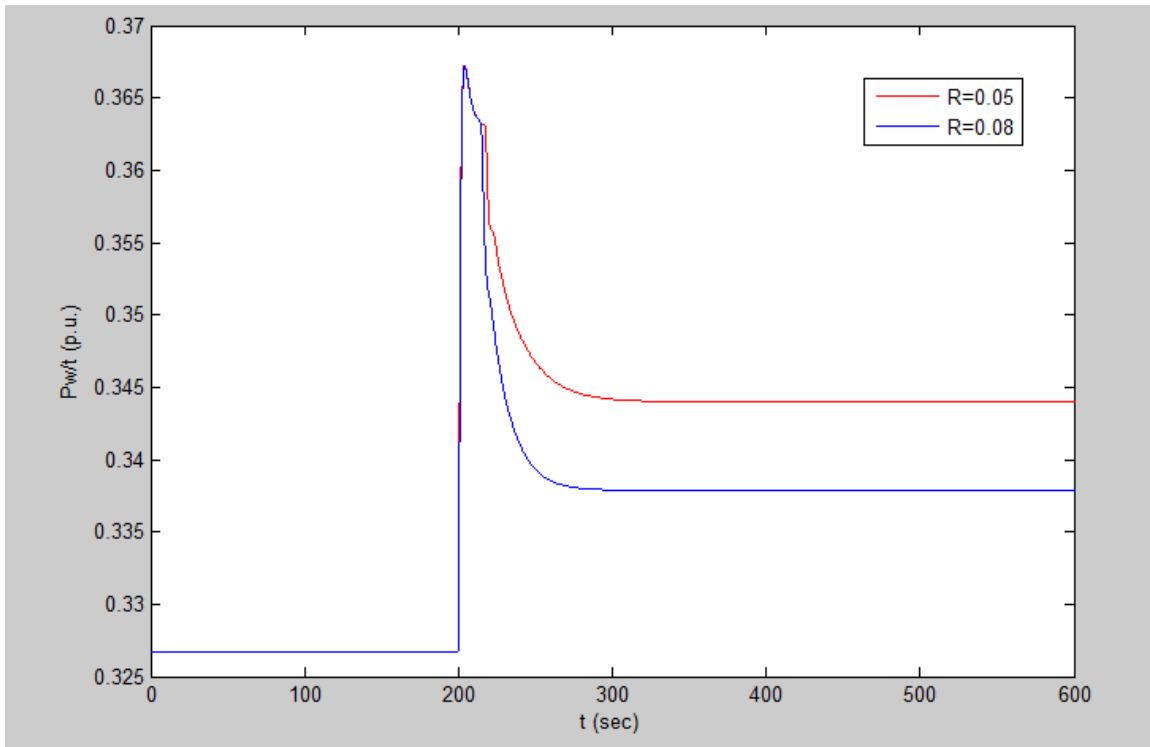
Σχήμα 4.28 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading.



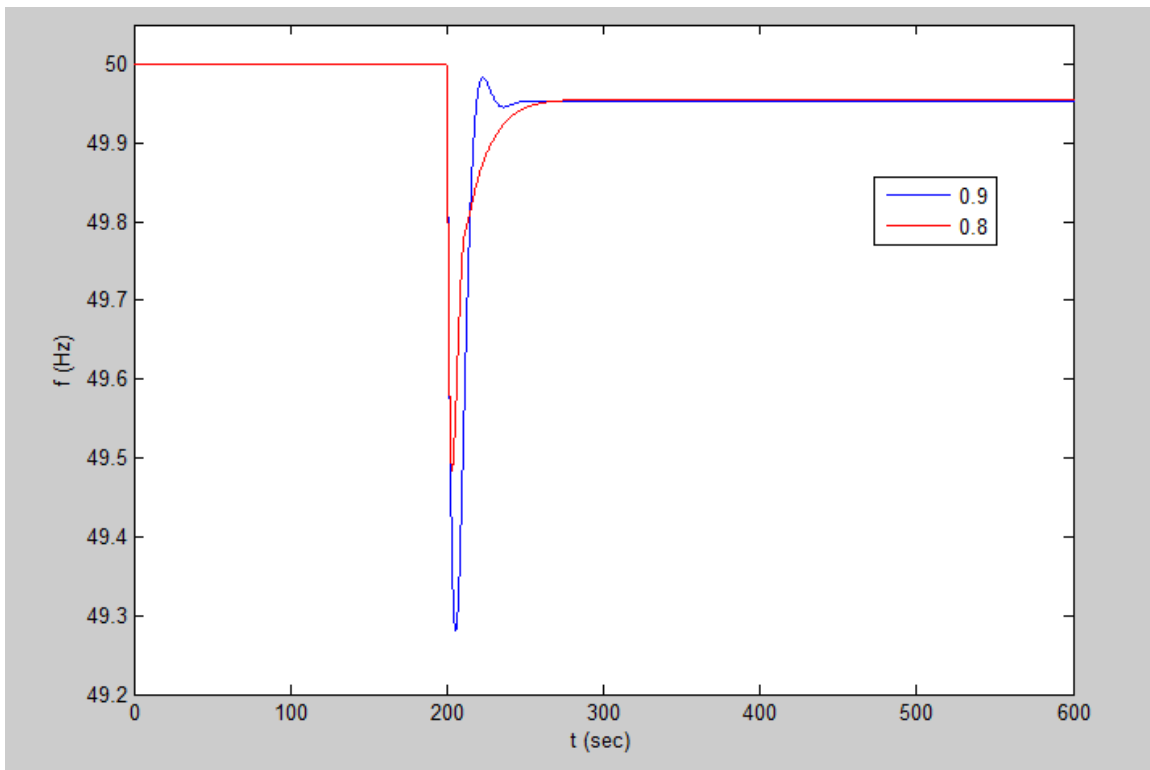
Σχήμα 4.29 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών pitch deloading και αδρανειακής απόκρισης.



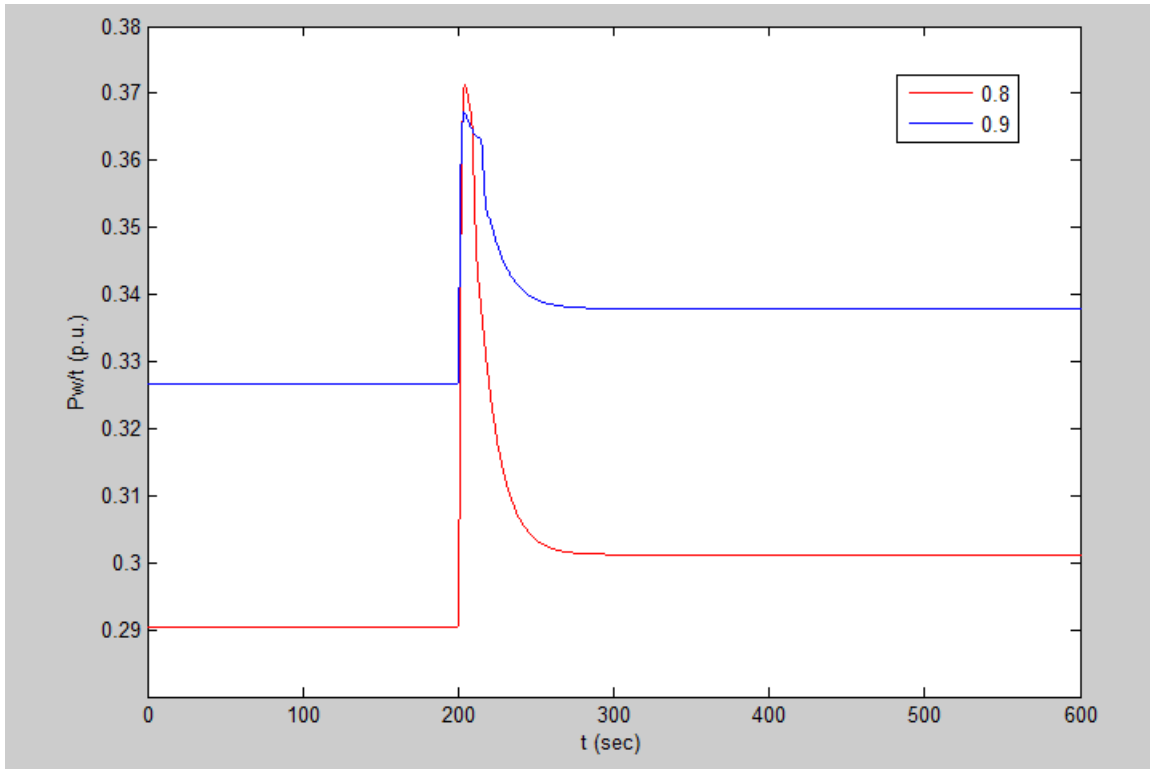
Σχήμα 4.30 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού για την Α/Γ.



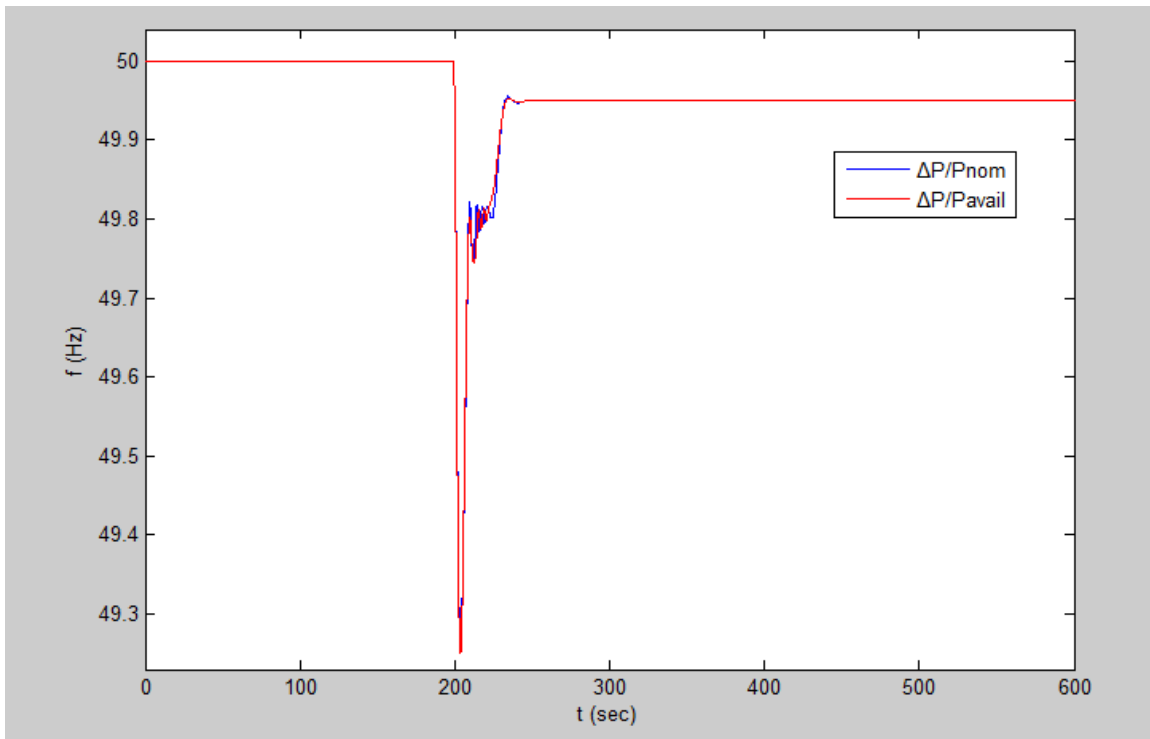
Σχήμα 4.31 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού για την Α/Γ.



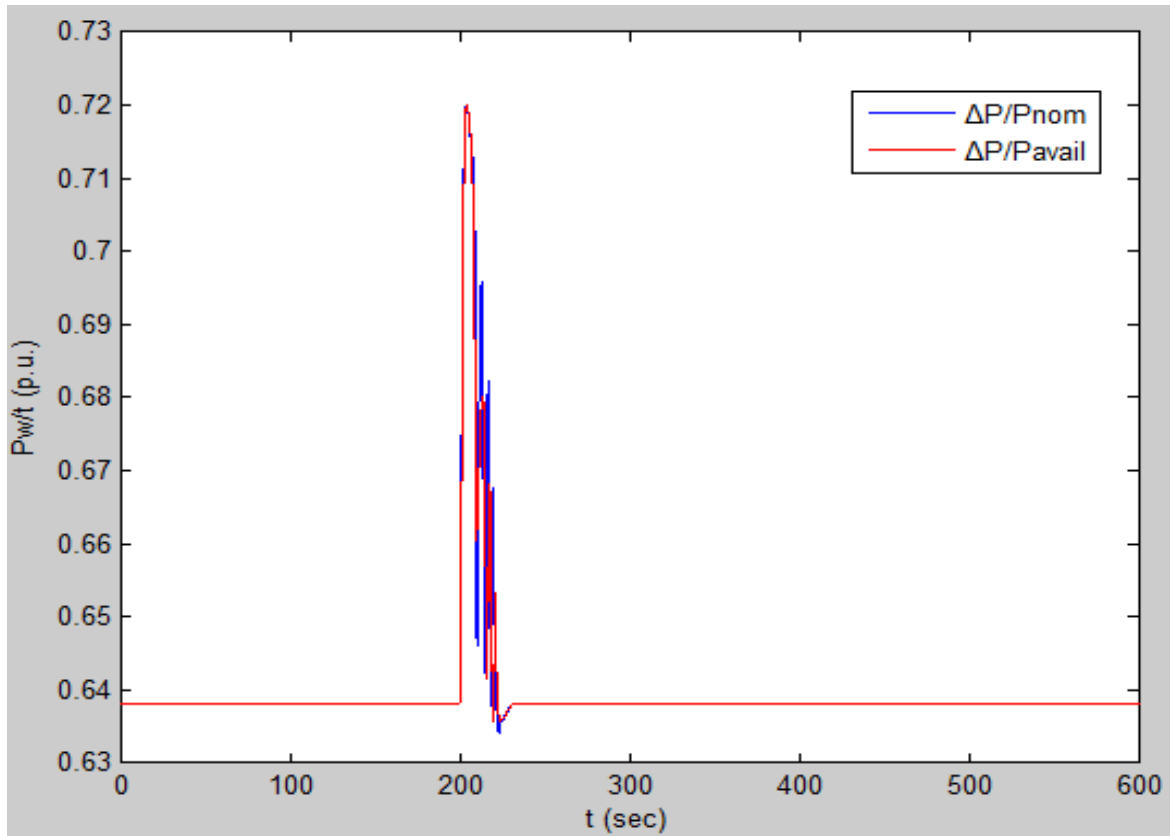
Σχήμα 4.32 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές εφεδρείες για την Α/Γ.



Σχήμα 4.33 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές εφεδρείες για την Α/Γ.



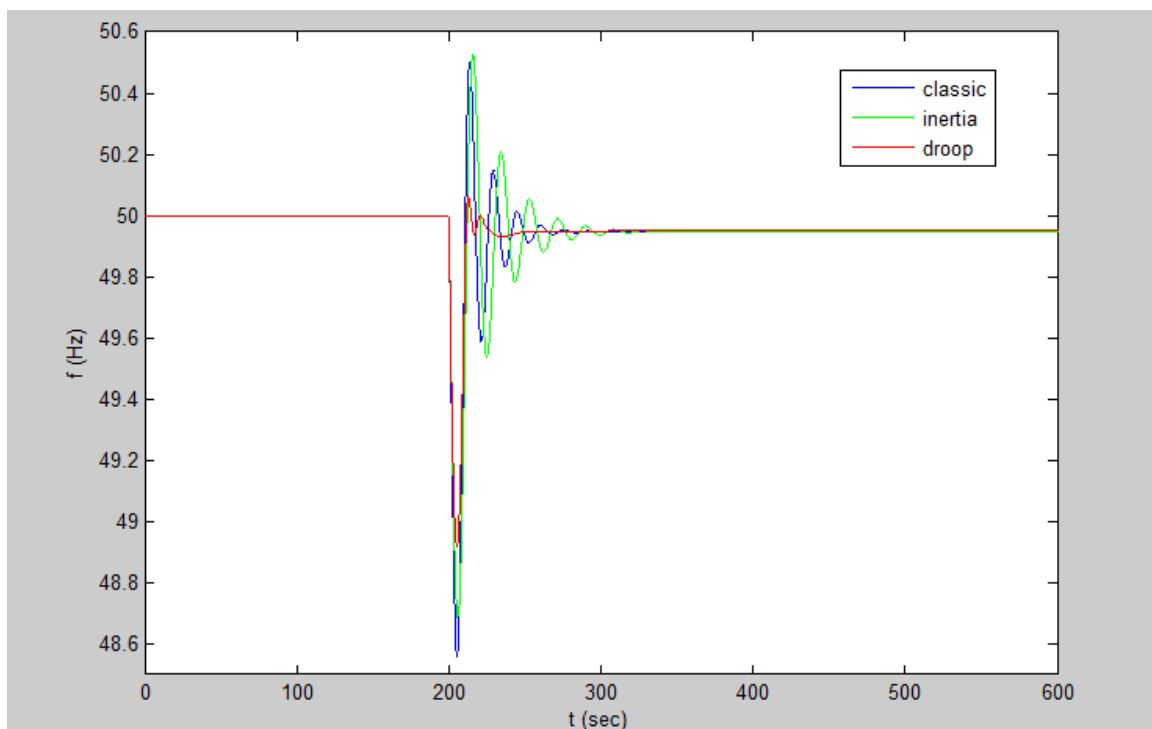
Σχήμα 4.34 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για τους δύο ορισμούς του ΔΡ.



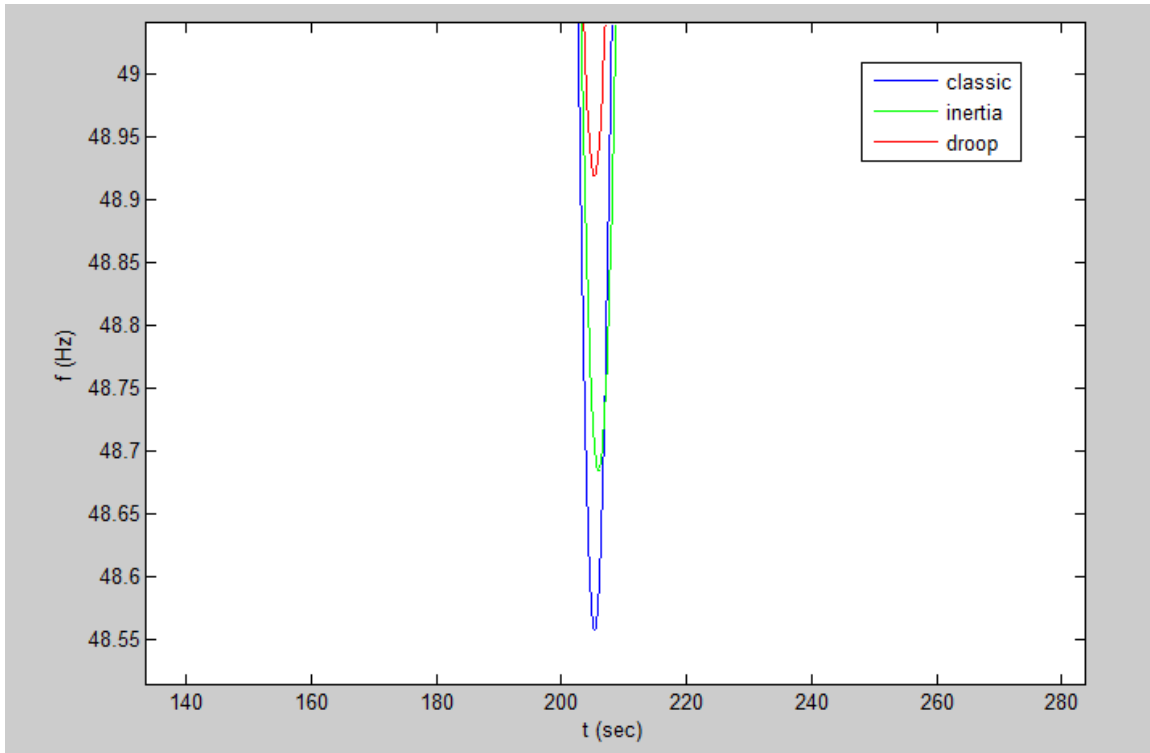
Σχήμα 4.35 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για τους δύο ορισμούς του ΔP .

Σενάριο 3

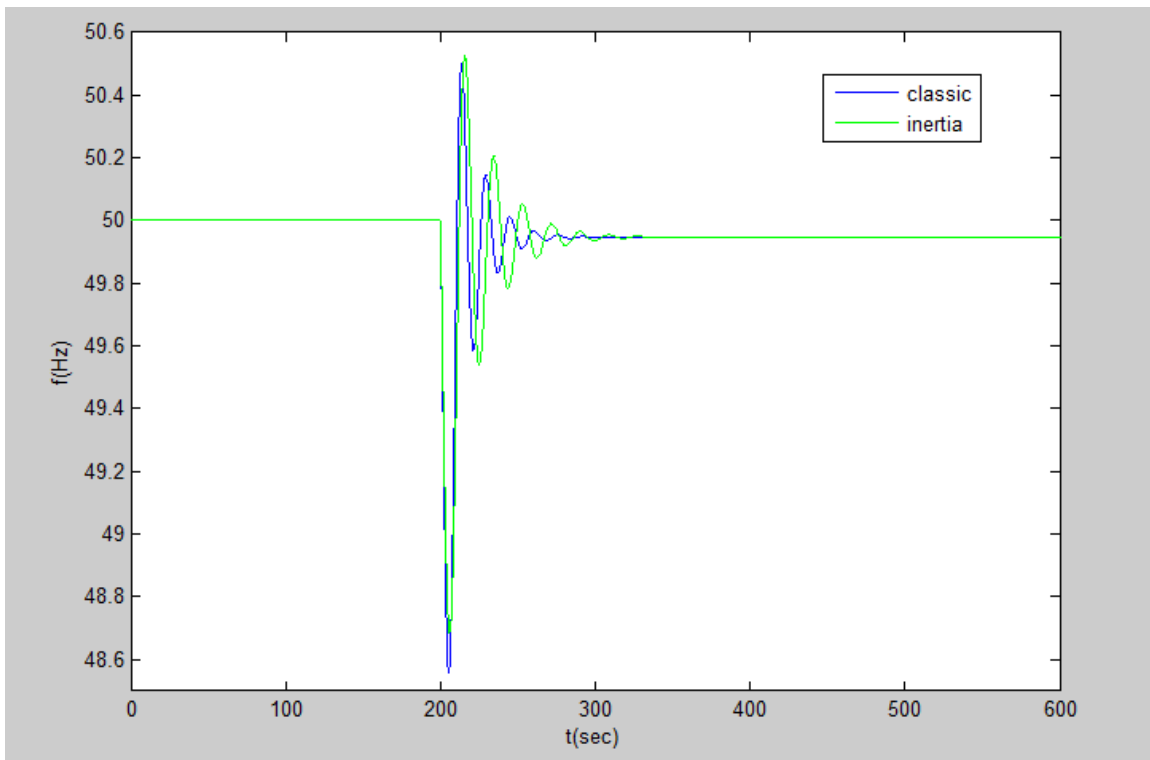
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για την περίπτωση, όπου η ταχύτητα ανέμου είναι $V_w = 12$ m/sec.



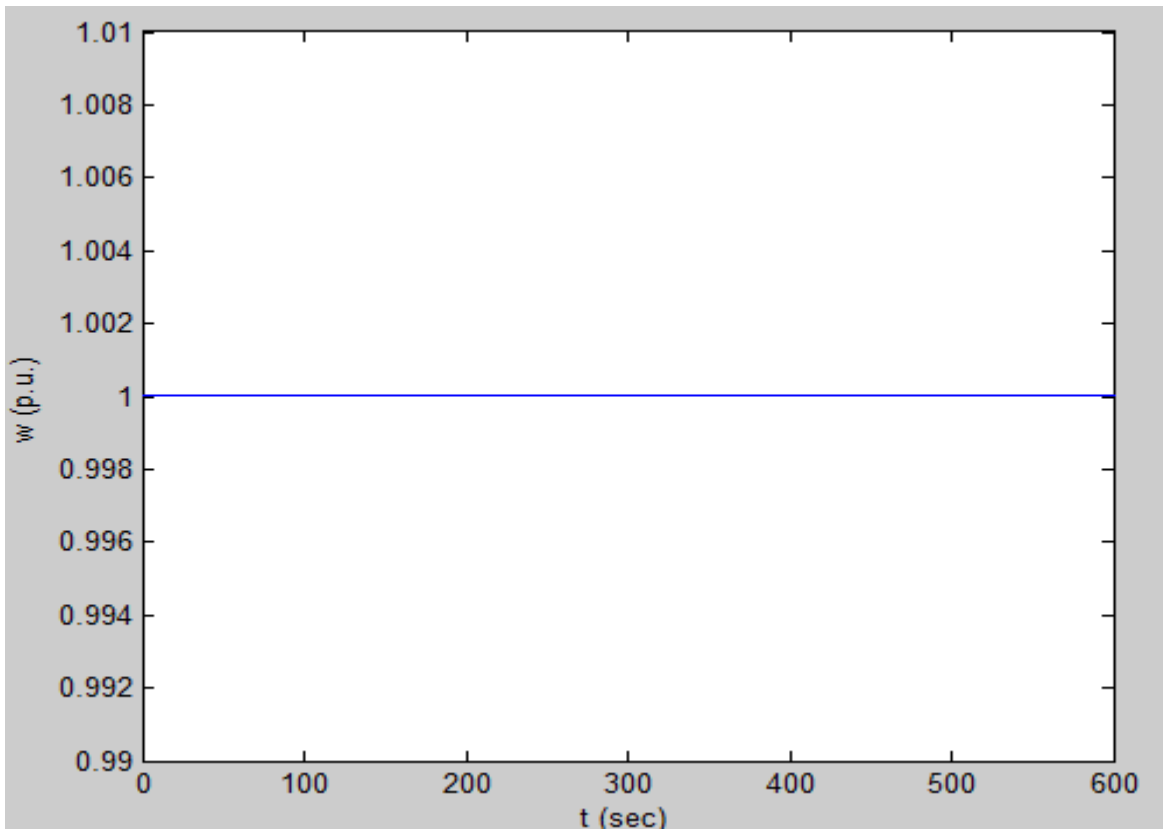
Σχήμα 4.36 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.



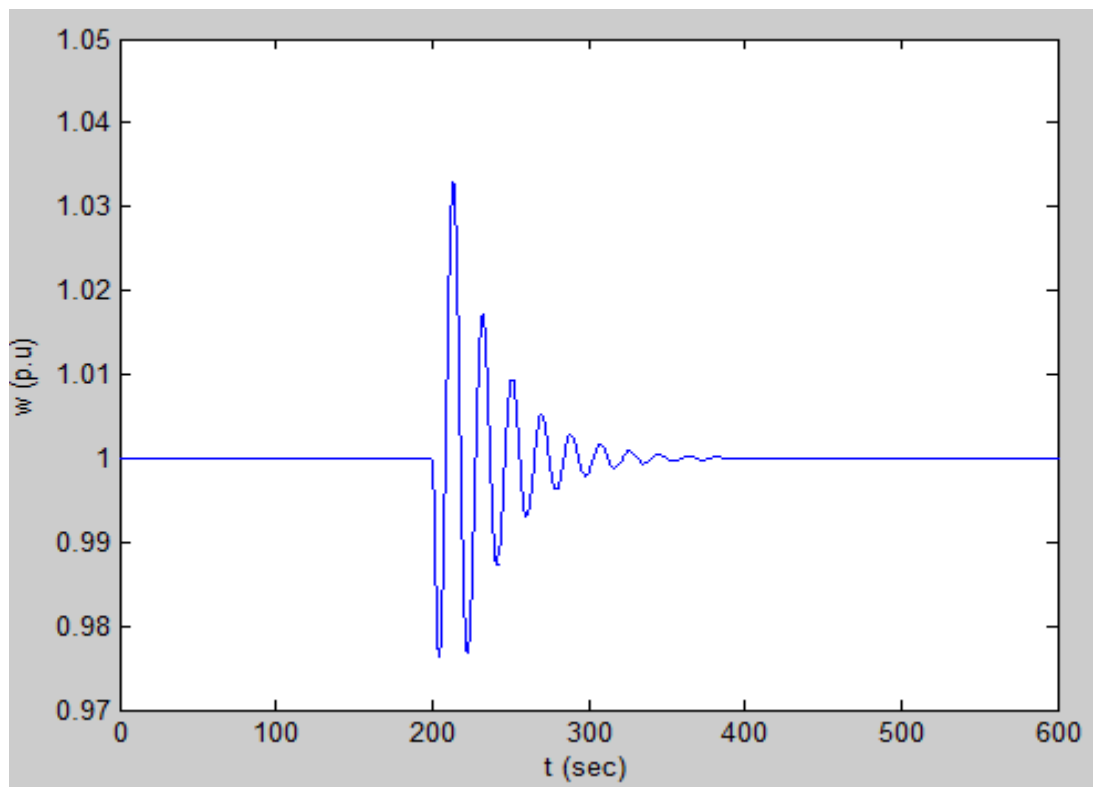
Σχήμα 4.37 Μέγιστη βύθιση της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.



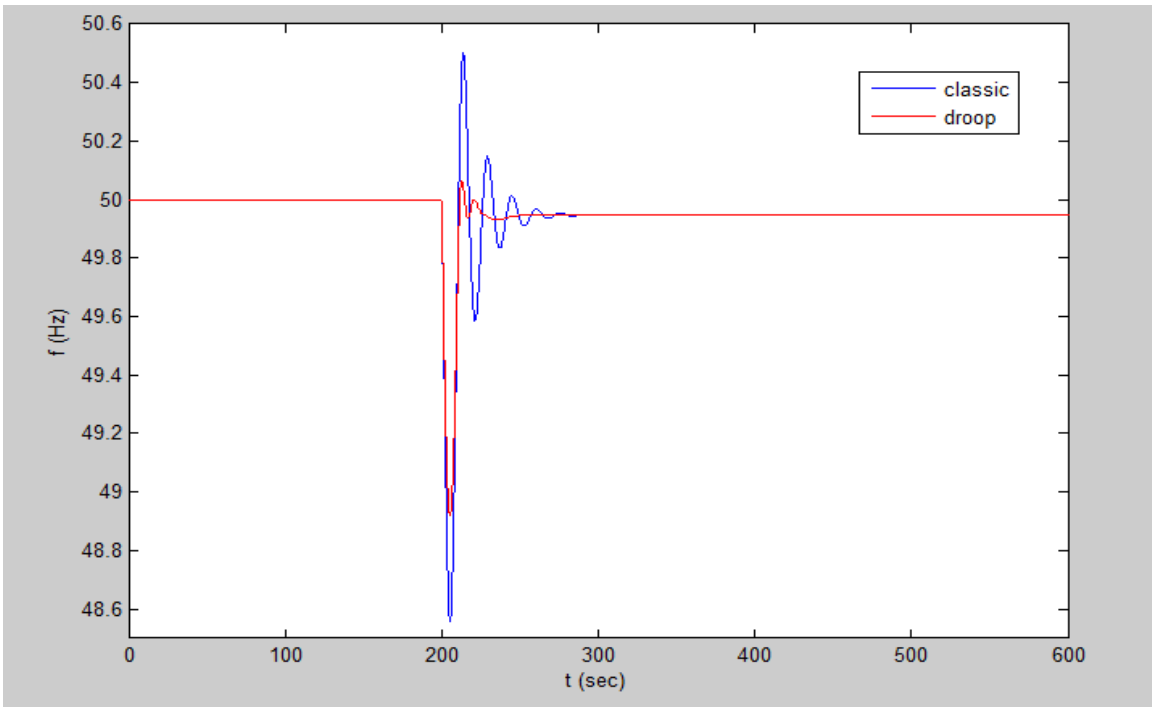
Σχήμα 4.38 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για κλασική λειτουργία και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



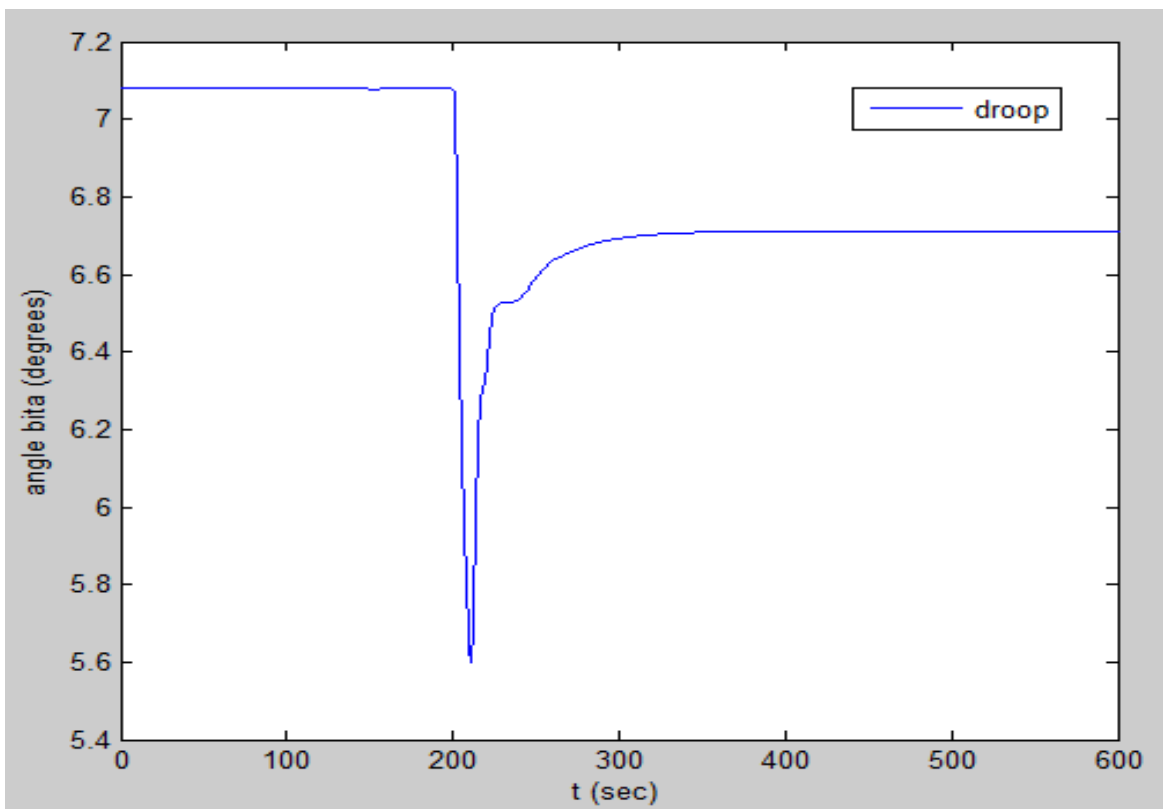
Σχήμα 4.39 Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



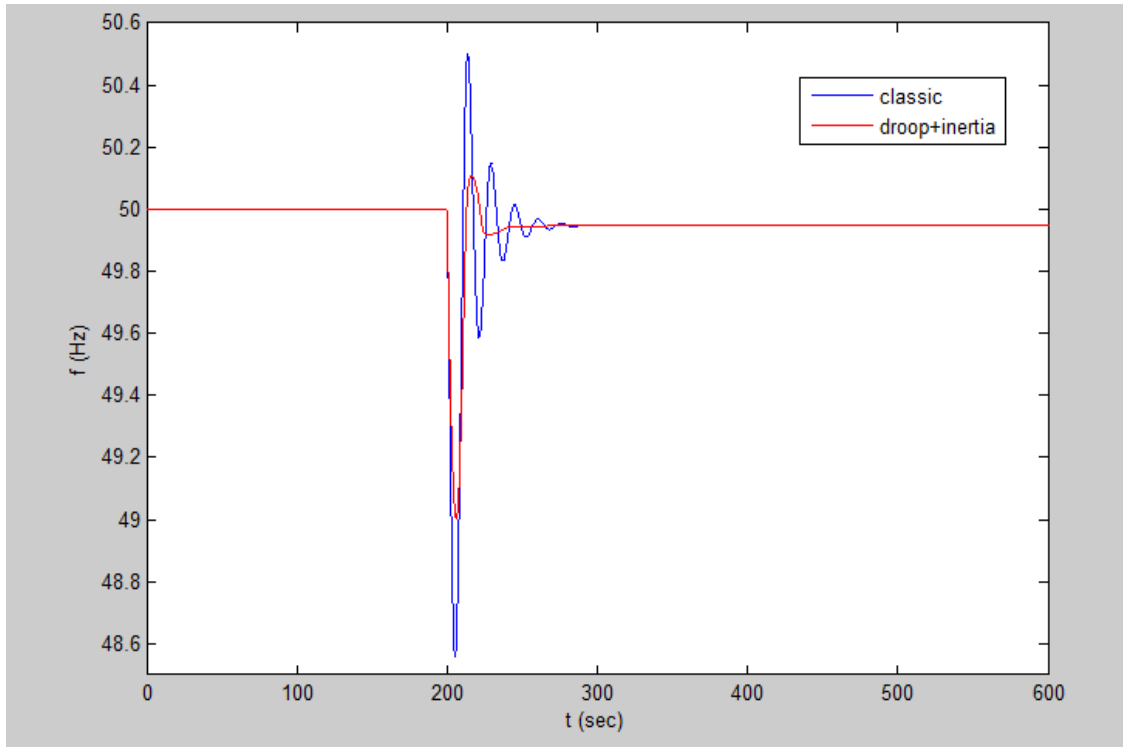
Σχήμα 4.40 Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



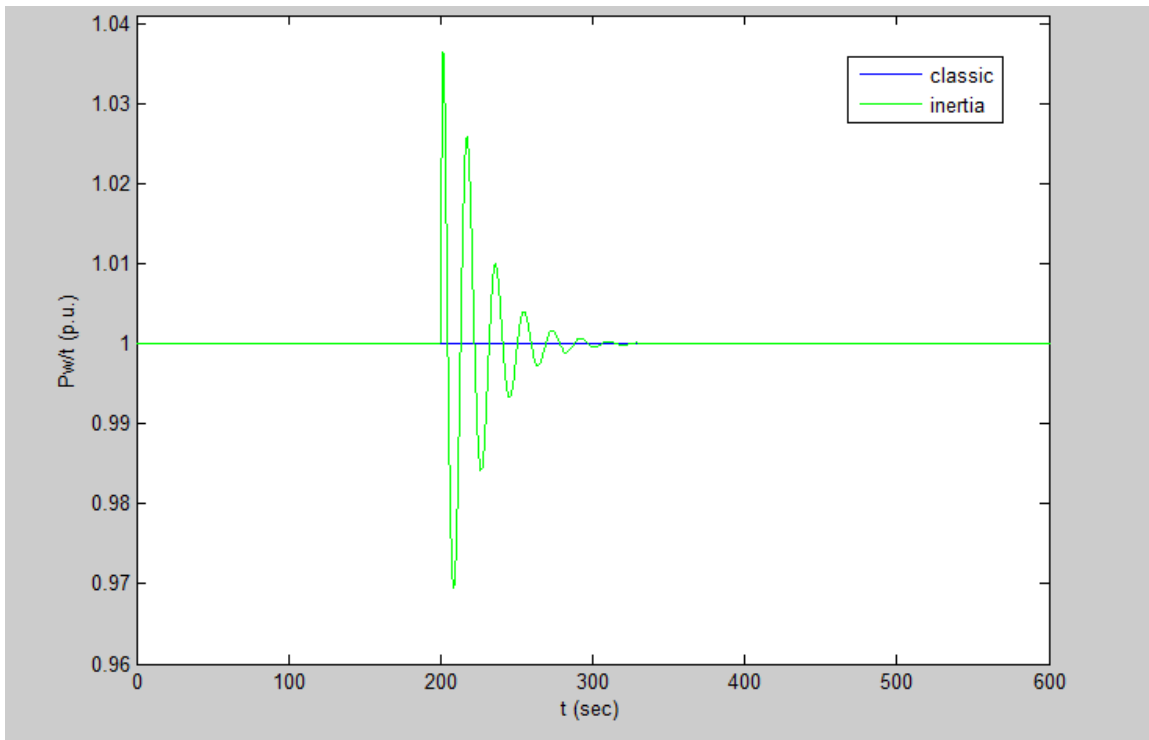
Σχήμα 4.41 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για κλασική λειτουργία και για λειτουργία pitch deloading.



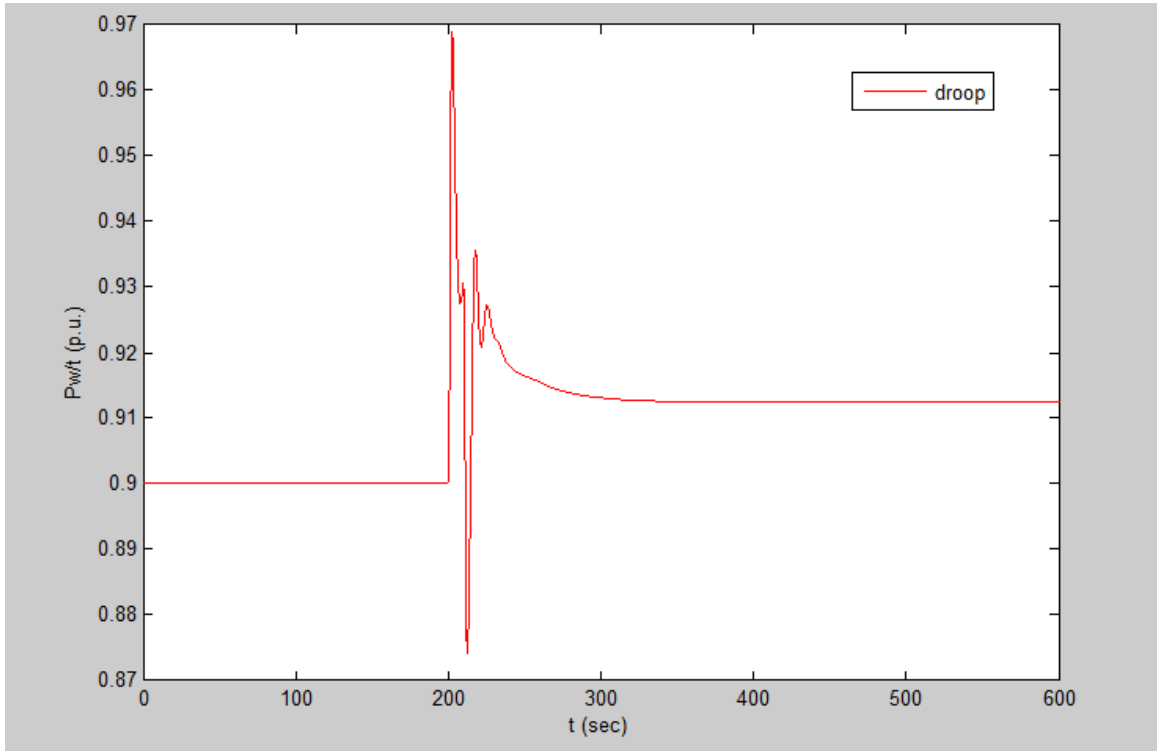
Σχήμα 4.42 Μεταβολή της γωνίας βήματος της έλικας του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading.



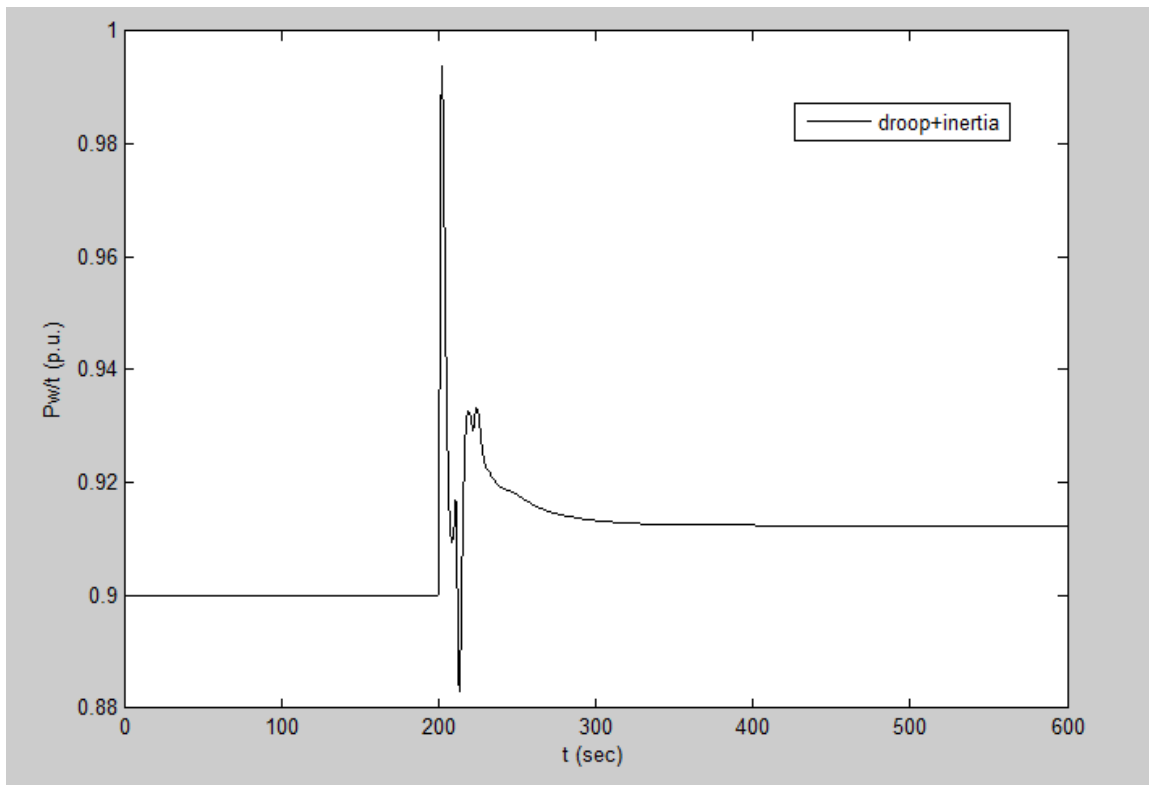
Σχήμα 4.43 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για κλασική λειτουργία και για το συνδυασμό των λειτουργιών pitch deloading και αδρανειακής απόκρισης.



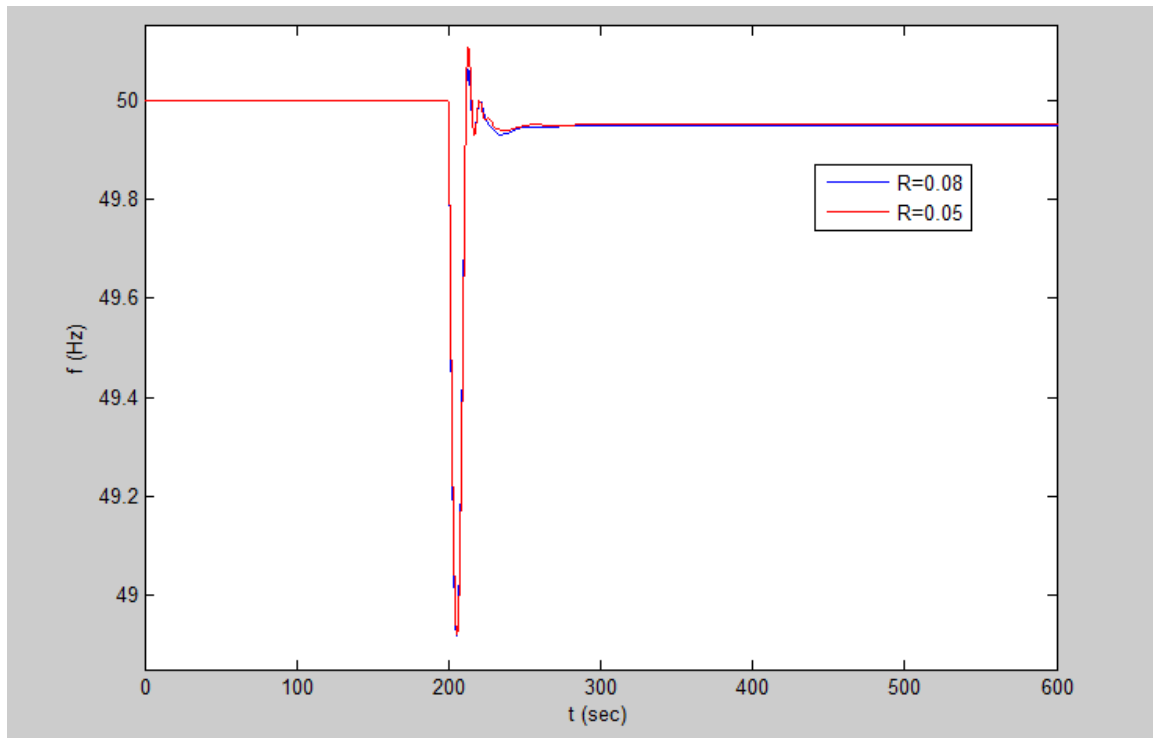
Σχήμα 4.44 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για κλασική λειτουργία και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



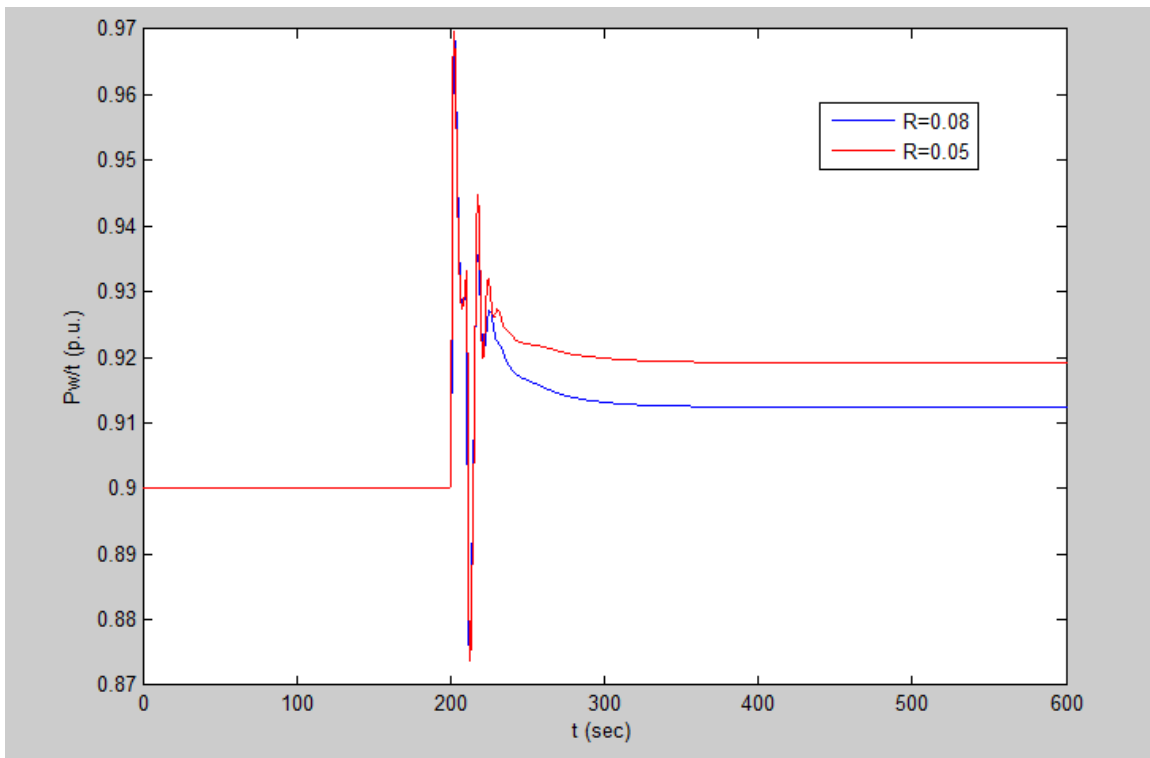
Σχήμα 4.45 Μεταβολή ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



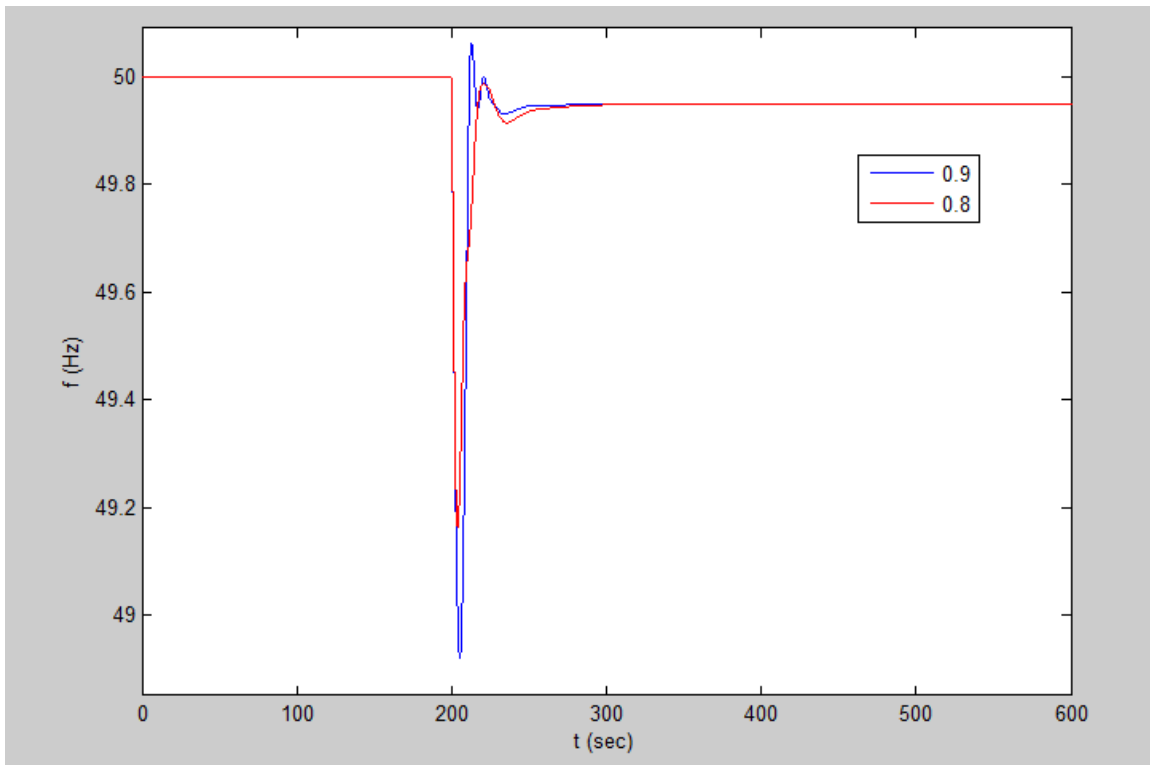
Σχήμα 4.46 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για συνδυασμό των λειτουργιών pitch deloading και αδρανειακής απόκρισης.



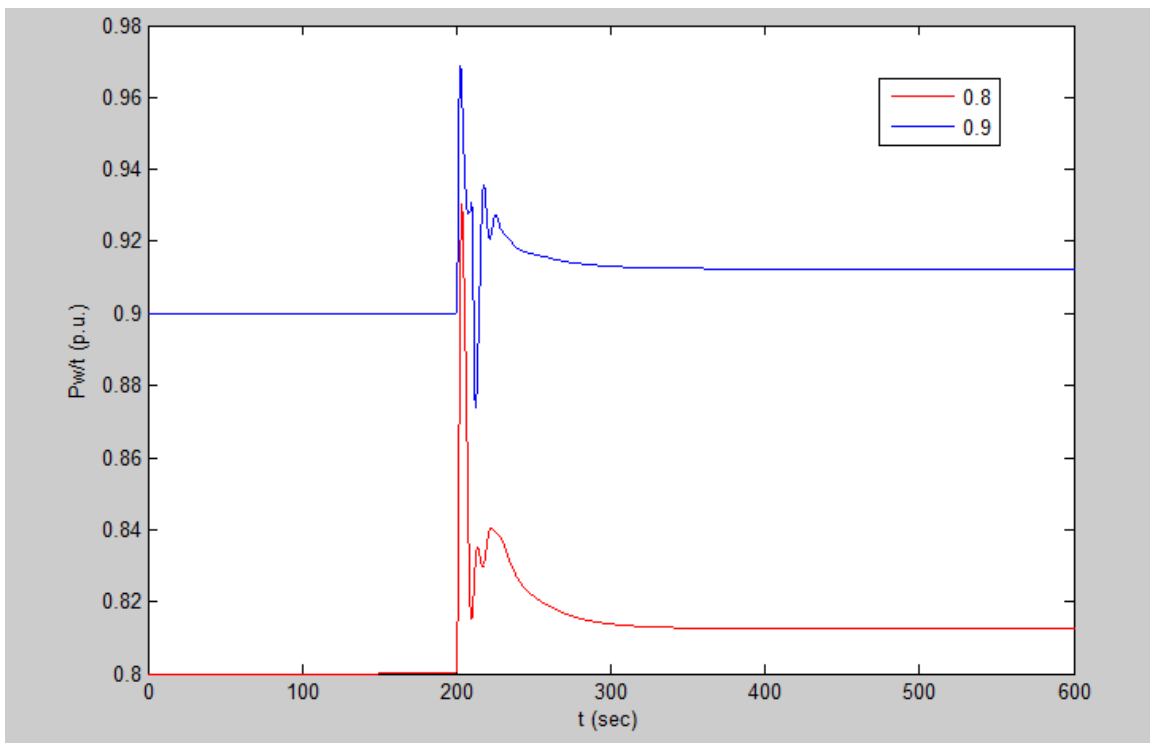
Σχήμα 4.47 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού για την Α/Γ.



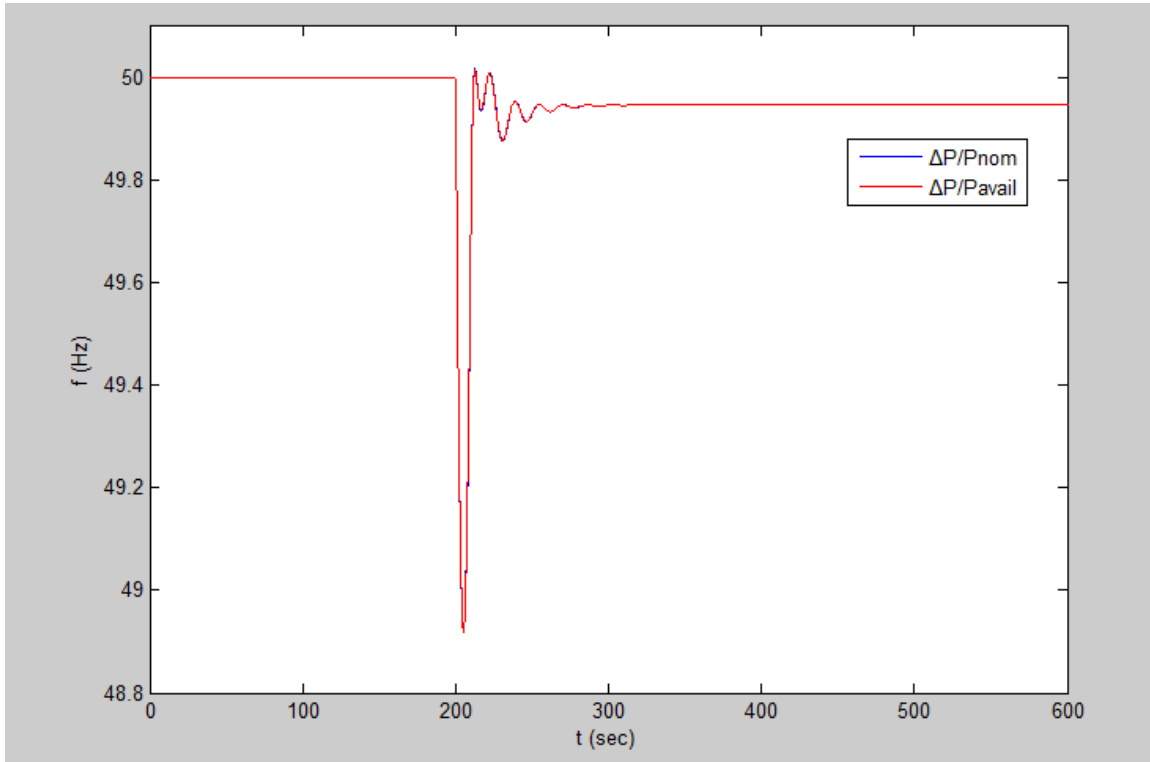
Σχήμα 4.48 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού για την Α/Γ.



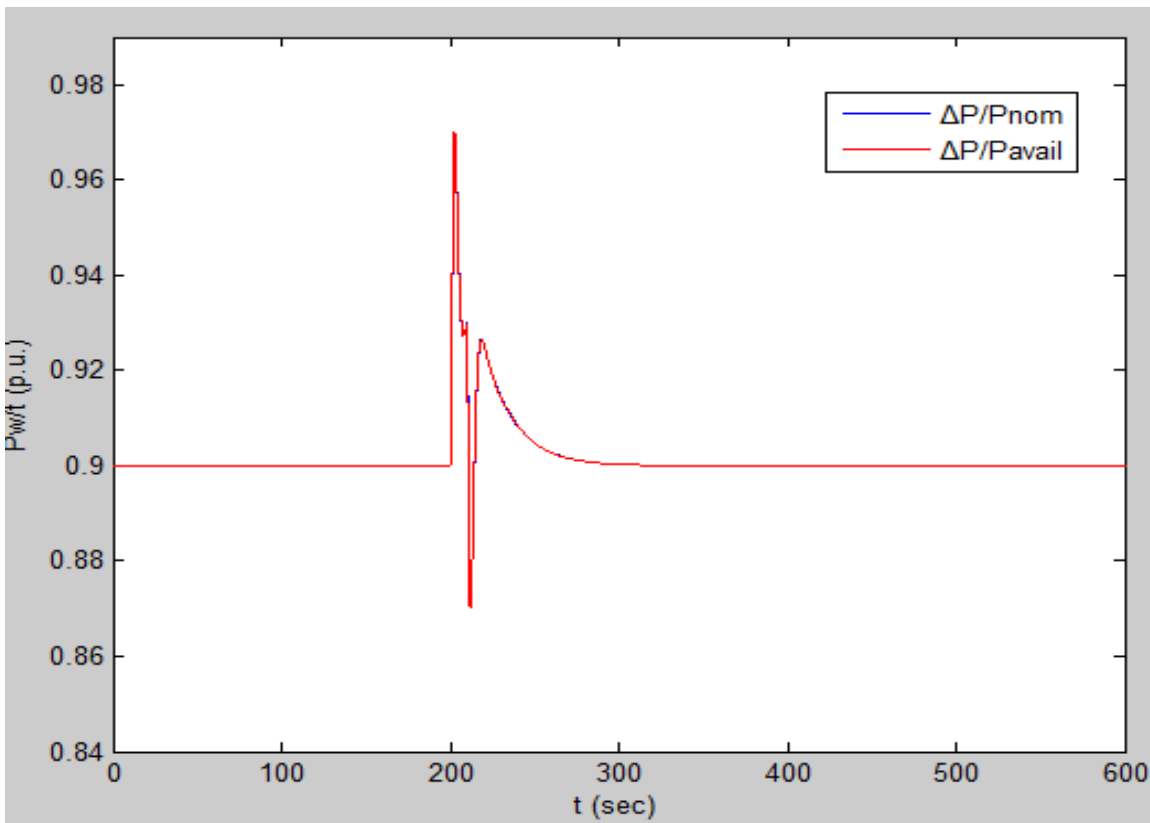
Σχήμα 4.49 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για δύο διαφορετικές εφεδρείες για την Α/Γ.



Σχήμα 4.50 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading για δύο διαφορετικές εφεδρείες για την Α/Γ.



Σχήμα 4.51 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για τους δύο ορισμούς του ΔP .



Σχήμα 4.52 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για τους δύο ορισμούς του ΔP .

Σενάριο 1

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 1, δηλαδή για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	49,24690	0,75310	49,95280	0,04720	22,08680
Inertia	49,28100	0,71900	49,95280	0,04720	18,54580
Pitch	49,38090	0,61910	49,95550	0,04450	43,50700
Pitch+inertia	49,41500	0,58500	49,95500	0,04450	41,80500

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,38290	0,61710	49,95690	0,04310	41,41000
R=0.08	49,38090	0,61910	49,95550	0,04450	43,50700
Εφεδρεία= 0.2	49,48430	0,51557	49,95550	0,04450	51,10000
Εφεδρεία= 0.1	49,38090	0,61910	49,95500	0,04500	43,50700

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
$\Delta P/P_{nom}$	49,37032	0,62968	49,95290	0,04710	31,10000
$\Delta P/P_{avail}$	49,36417	0,63583	49,95290	0,04710	30,95000

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$.

Σενάριο 2

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 2, δηλαδή για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	48,95720	1,04500	49,95060	0,04940	24,96000
Inertia	49,03250	0,9675	49,95060	0,04940	33,16500
Pitch	49,28440	0,71560	49,95320	0,04680	48,54500
Pitch+inertia	49,36150	0,63850	49,95320	0,04680	48,28000

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,30090	0,69910	49,95480	0,04520	55,04000
R=0.08	49,28440	0,71560	49,95320	0,04680	48,54500
Εφεδρεία= 0.2	49,39400	0,60600	49,95320	0,04680	51,30000
Εφεδρεία= 0.1	49,28440	0,71560	49,95310	0,04690	48,54500

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
$\Delta P/P_{nom}$	49,26454	0,73546	49,95000	0,05000	31,44000
$\Delta P/P_{avail}$	49,25127	0,74873	49,95000	0,05000	31,68000

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec.

Σενάριο 3

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 3, δηλαδή για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{min} (Hz)	Δf_{min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	48,55810	1,44190	49,94740	0,05260	69,95000
Inertia	48,68440	1,31560	49,94740	0,05260	84,75000
Pitch	48,91910	1,08090	49,95030	0,04970	43,68000
Pitch+inertia	49,00450	0,99550	49,95030	0,04970	40,36000

pitch	f_{min} (Hz)	Δf_{min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	48,92050	1,07950	49,95210	0,04790	42,50000
R=0.08	48,91910	1,08090	49,95030	0,04970	43,68000
Εφεδρεία= 0.2	49,16430	0,83570	49,95030	0,04970	58,40000
Εφεδρεία= 0.1	48,91910	1,08090	49,95030	0,04970	43,68000

	f_{min} (Hz)	Δf_{min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
$\Delta P/P_{nom}$	48,9198	1,0802	49,9471	0,0529	63,75
$\Delta P/P_{avail}$	48,9198	1,0802	49,9471	0,0529	63,50

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec.

4.1.1 Παρατηρήσεις-σχόλια

Παρακάτω παρουσιάζονται παρατηρήσεις και σχόλια σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων που εκτελέστηκαν στο Simulink.

Και στα τρία σενάρια παρατηρούμε παρόμοιες αποκρίσεις. Συγκεκριμένα στο πρώτο σενάριο είχαμε χαμηλή ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ - κάτω της ονομαστικής και εκτελέστηκε μια αύξηση στο φορτίο $\Delta L = 5 \%$. Στο δεύτερο σενάριο είχαμε υψηλή ταχύτητα ανέμου - κάτω της ονομαστικής και εκτελέστηκε ομοίως μια αύξηση στο φορτίο $\Delta L = 5 \%$. Τέλος στο τρίτο σενάριο είχαμε ταχύτητα ανέμου $V_w = 12 \text{ m/sec}$ - άνω της ονομαστικής και εκτελέστηκε και εδώ μια αύξηση στο φορτίο $\Delta L = 5 \%$. Η ανεμογεννήτρια συμμετείχε με τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας. Με την κλασική λειτουργία, όπου δε συμμετέχει καθόλου στη ρύθμιση, με την αδρανειακή απόκριση, με τη μέθοδο pitch deloading και με το συνδυασμό της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading. Όπως διαπιστώνεται και από τα γραφήματα, αλλά και από τα αποτελέσματα στους πίνακες, επιβεβαιώνεται ότι στις περιπτώσεις της αδρανειακής απόκρισης η ανεμογεννήτρια αντιλαμβάνεται τη μεταβολή του ρυθμού της συχνότητας μέσω του επιπρόσθετου κλάδου που ρυθμίζει την ισχύ αναφοράς, και έτσι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα μειώνεται. Μέσω αυτής της επιβράδυνσης, παραπάνω ενεργός ισχύς εγχέεται μεταβατικά. Στη λειτουργία του pitch deloading, η ανεμογεννήτρια αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της συχνότητας και μέσω του στατισμού καθορίζει την ισχύ αναφοράς, αλλά και μέσω της γωνίας του βήματος της έλικας, αναπροσαρμόζει τη μηχανική ισχύ. Όσον αφορά στα αποτελέσματα, αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτό το κεφάλαιο παρατηρούνται σχετικά αργοί χρόνοι αποκατάστασης, καθώς το υδροηλεκτρικό που ευθύνεται κυρίως για τη ρύθμιση της συχνότητας, δεν αποκρίνεται γρήγορα. Παρ' όλα αυτά για όλες τις μεθόδους συμμετοχής τα αποτελέσματα είναι καλύτερα. Όσον αφορά στη μέγιστη βύθιση μπορούμε να διαπιστώσουμε και από τα τρία σενάρια ότι μειώνεται αισθητά στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης, αλλά και στην περίπτωση του pitch deloading. Και από τα τρία σενάρια διαπιστώνεται ότι ο συνδυασμός της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά στη μέγιστη βύθιση της συχνότητας. Συγκεκριμένα έχουμε βελτίωση στο πρώτο δεκαδικό της συχνότητας, η οποία στο σενάριο 2 και 3 είναι γύρω στο 0.5 Hz, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό. Ακόμα, οι τιμές της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας (που οφείλεται στο μόνιμο σφάλμα) βελτιώνονται στις περιπτώσεις του pitch deloading και της συνδυασμένης λειτουργίας. Αυτό είναι φυσιολογικό, αφού πια η ανεμογεννήτρια διαθέτει τιμή στατισμού και άρα συμμετέχει επί της ουσίας στη ρύθμιση της συχνότητας. Εδώ έγκειται και η μεγάλη διαφορά της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading. Δηλαδή η αδρανειακή απόκριση δεν επενεργεί στην αποκατάσταση της μόνιμης τιμής της συχνότητας. Λαμβάνει χώρα μόνο κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της απόκρισης και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, για να ελαχιστοποιήσει την τιμή της μέγιστης βύθισης. Ακόμα, υλοποιήθηκε η συμμετοχή της ανεμογεννήτριας με διαφορετικές τιμές στατισμού. Συγκεκριμένα με τιμή στατισμού $R = 0.08$ και $R = 0.05$. Στη δεύτερη περίπτωση η ανεμογεννήτρια συμμετέχει πιο ενεργά στη ρύθμιση της συχνότητας, καθώς έχει μικρότερη τιμή στατισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα

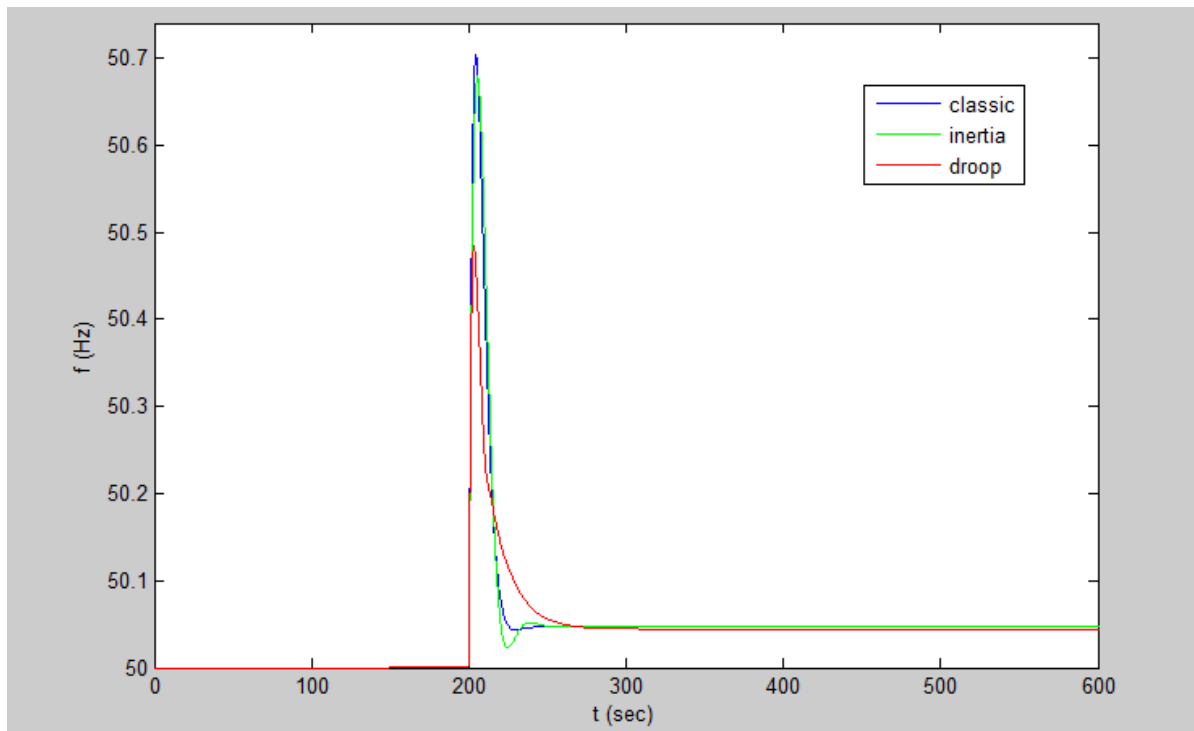
τη βελτίωση της μέγιστης τιμής βύθισης της συχνότητας στα σενάρια 1 και 2 και 3. Έχει όμως θετικά αποτελέσματα και στη τιμή της μόνιμη κατάστασης της συχνότητας, όπως φαίνεται από τα γραφήματα και από τα αποτελέσματα, καθώς η ανεμογεννήτρια αναλαμβάνει να προσφέρει περισσότερη ενεργό ισχύ στο σύστημα. Επίσης μελετήθηκε η περίπτωση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με pitch deloading με διαφορετικές τιμές εφεδρείας. Δηλαδή η ανεμογεννήτρια στην πρώτη περίπτωση και σύμφωνα με την οποία μοντελοποιήθηκαν όλες οι περιπτώσεις λειτουργίας της ανεμογεννήτρια με στρατηγική λειτουργίας pitch deloading, δίνει το 90% της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος της. Στη δεύτερη περίπτωση, η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος της. Όπως είναι λογικό, μεγαλύτερο περιθώριο απόδοσης ισχύος έχει θετικότερα αποτελέσματα στη μέγιστη βύθιση της συχνότητας, αλλά και στην τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας. Πράγματι, αυτό επιβεβαιώνεται και από τα γραφήματα, όπου βλέπουμε πως η τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας, αλλά και η μέγιστη βύθιση είναι ελαφρώς βελτιωμένη στην περίπτωση μεγαλύτερης εφεδρείας. Τέλος, εξετάστηκε και η περίπτωση διαφορετικού ορισμού της μεταβολής της ισχύος της ανεμογεννήτριας, η οποία προκύπτει από το στατισμό της ανεμογεννήτριας, όπως δίδεται από τα πρότυπα. Δηλαδή, είτε θεωρώντας ισχύ αναφοράς την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, είτε τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ της ανεμογεννήτριας. Όπως προκύπτει, έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στην περίπτωση που θεωρήσουμε ισχύ αναφοράς την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, καθώς η μεταβολή της ισχύος καθορίζεται με βάση την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας και όπως είναι λογικό $P_{nom} \geq P_{avail}$, άρα θα έχουμε και μεγαλύτερη έγχυση ισχύος στην πρώτη περίπτωση.

4.2 Υπερσυχνότητα

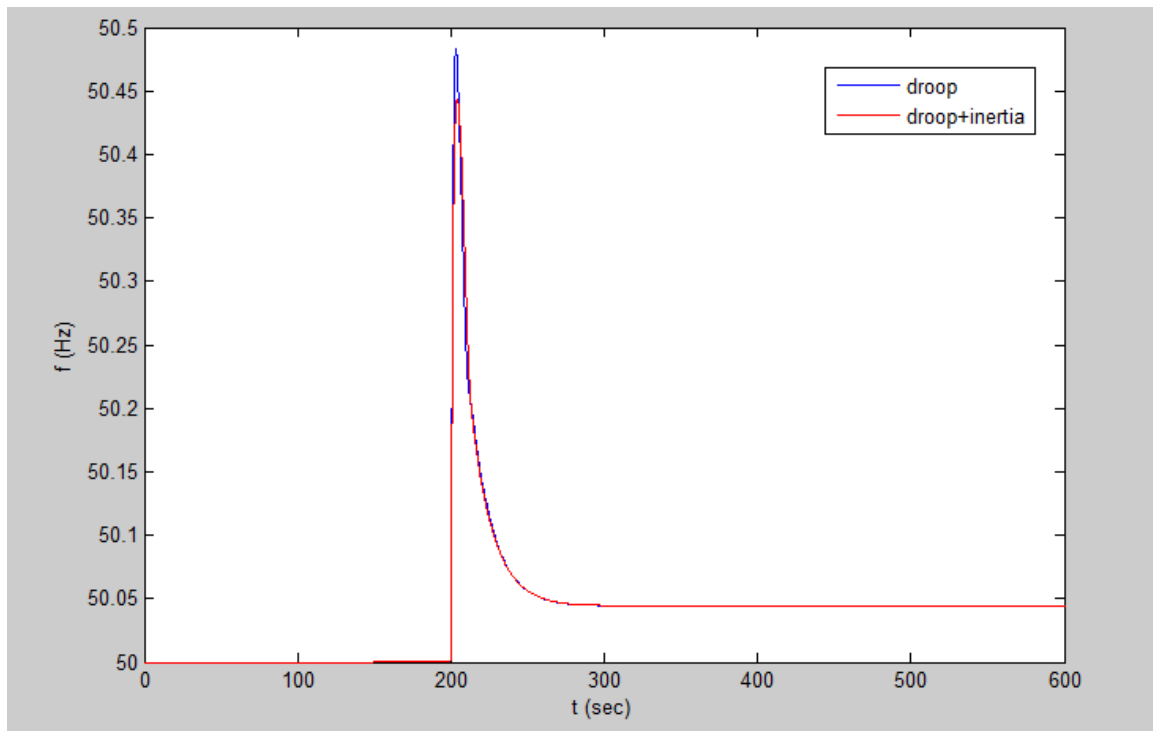
4.2.1 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται περιπτώσεις υπερσυχνότητας, με τη βοήθεια του ίδιου μοντέλου που αναπτύχθηκε και παραπάνω για τις περιπτώσεις υποσυχνότητας. Σε αυτή την περίπτωση δεν τηρείται κάποια εφεδρεία από την πλευρά των Α/Γ. Άρα δε μπορούν να συμβάλλουν σε περίπτωση αύξησης του φορτίου ή μείωσης της παραγωγής. Η συμβολή τους περιορίζεται καθαρά σε περιπτώσεις μείωσης του φορτίου ή αύξησης της παραγωγής. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν σε βηματική μείωση του φορτίου $\Delta L=5\%$ και ακολουθεί η ίδια λογική με παραπάνω. Δηλαδή παρουσιάζονται τρία σενάρια για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

Σενάριο 1



Σχήμα 4.53 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w=8\text{m/sec}$ και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.



Σχήμα 4.54 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ και για λειτουργία με στατισμό και συνδυασμό στατισμού και αδρανειακής απόκρισης της Α/Γ.

Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση, όπου συγκρίνεται ο τρόπος που καθορίζεται από τα πρότυπα, όπως ορίζεται στο σχήμα 2.5. Δηλαδή τίθεται και στις δύο περιπτώσεις μια νεκρή ζώνη, όπου το όριο είναι τα 50.2 Hz. Από αυτό το σημείο και πάνω, η Α/Γ οφείλει να μειώσει την ισχύ της κατά

$$\Delta P = \frac{1}{R} * \frac{(50.2 - f_{net})}{f_n} * Pref.$$

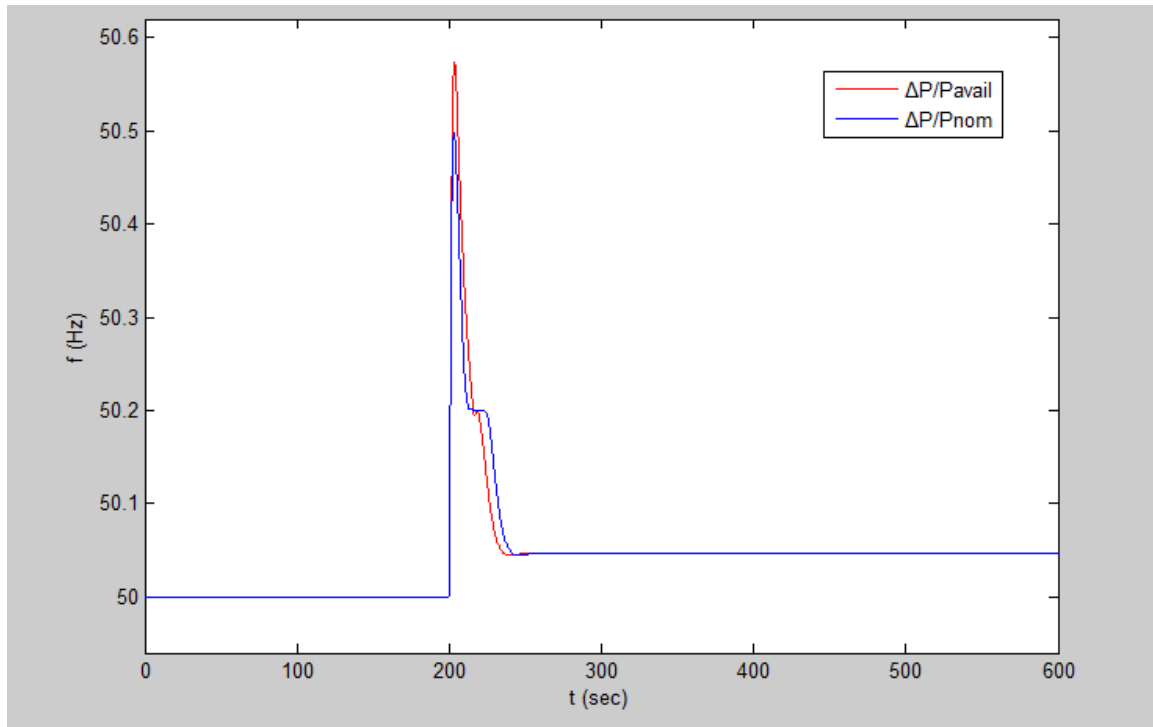
Όπου

R: η τιμή του στατισμού και εν προκειμένω $R = 0.08$.

f_n : η ονομαστική συχνότητα του δικτύου.

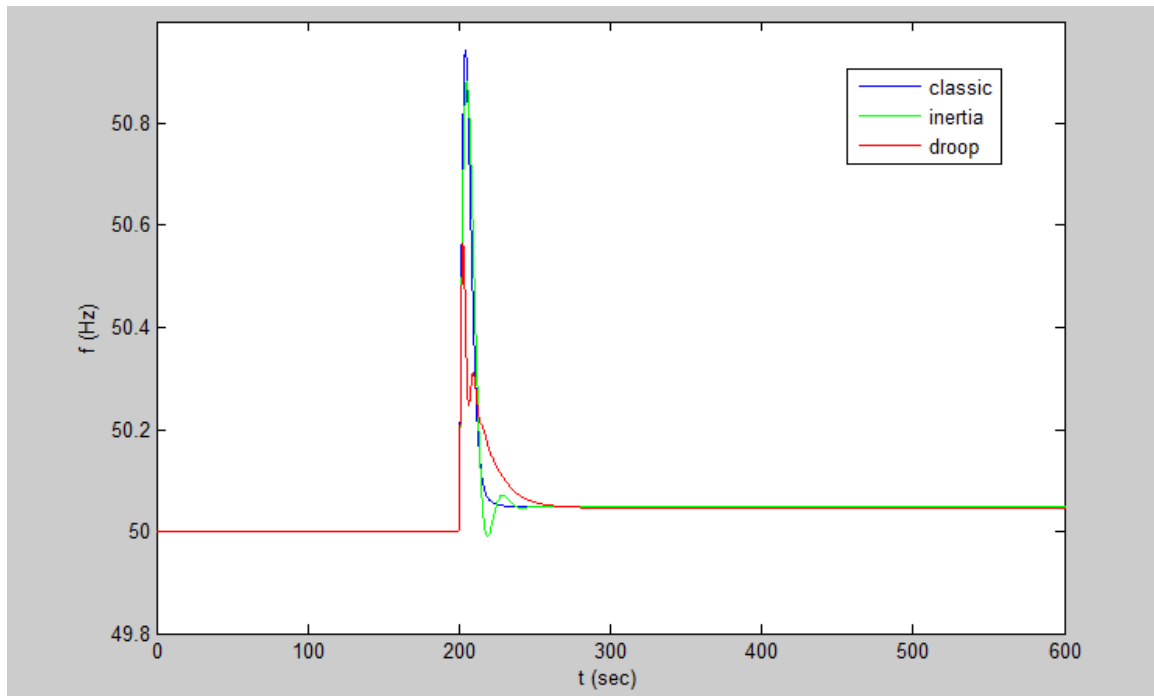
f_{net} : η συχνότητα δικτύου.

P_{ref} : η ισχύς αναφοράς η οποία είναι είτε η ονομαστική ισχύς είτε η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς της Α/Γ.

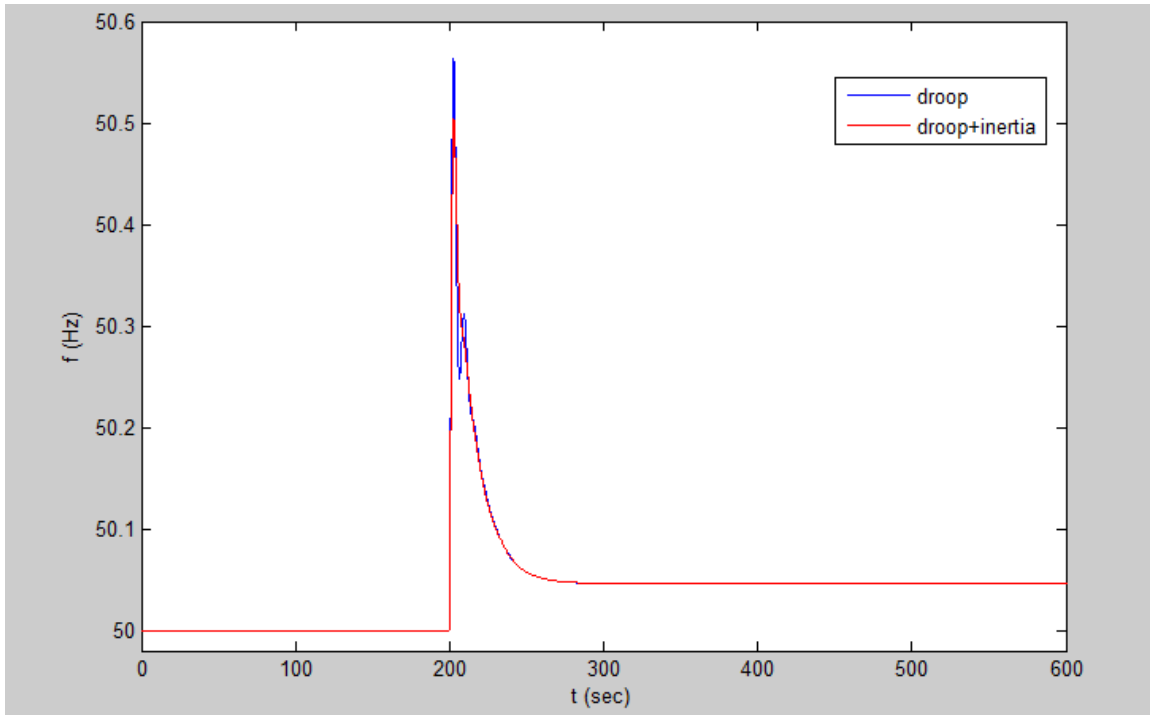


Σχήμα 4.55 Μεταβολή συχνότητας δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ και για διαφορετικό τρόπο ορισμού του ΔP .

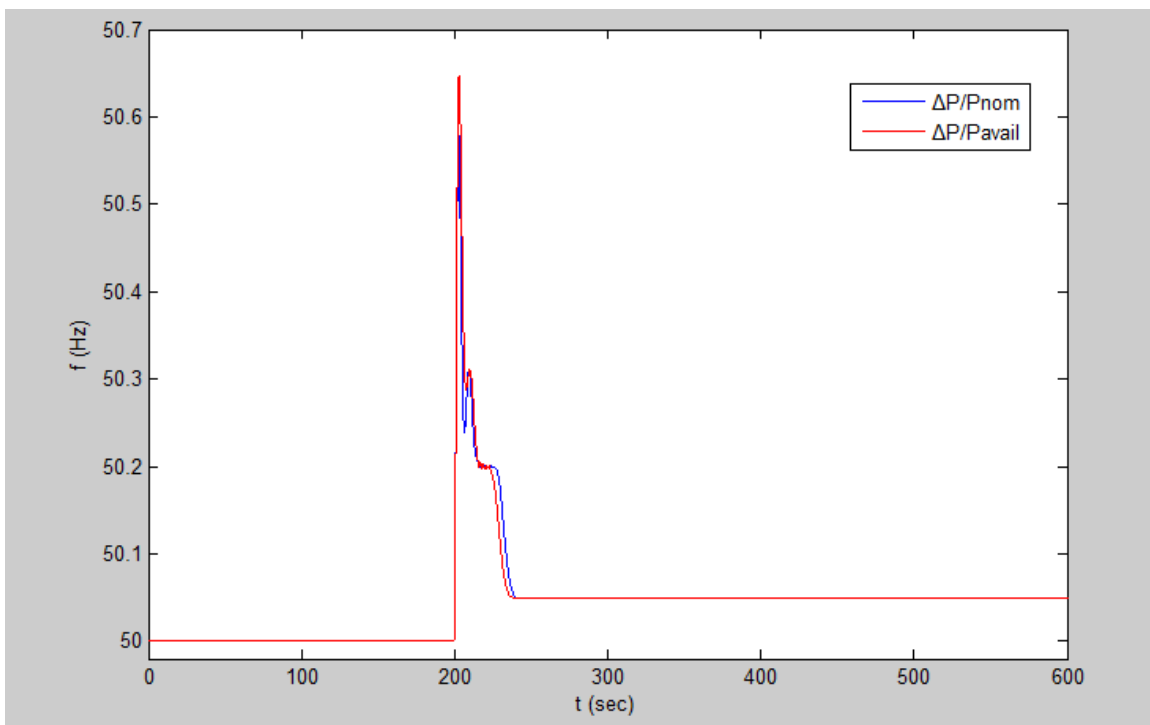
Σενάριο 2



Σχήμα 4.56 Μεταβολή συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10 \text{ m/sec}$ και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.

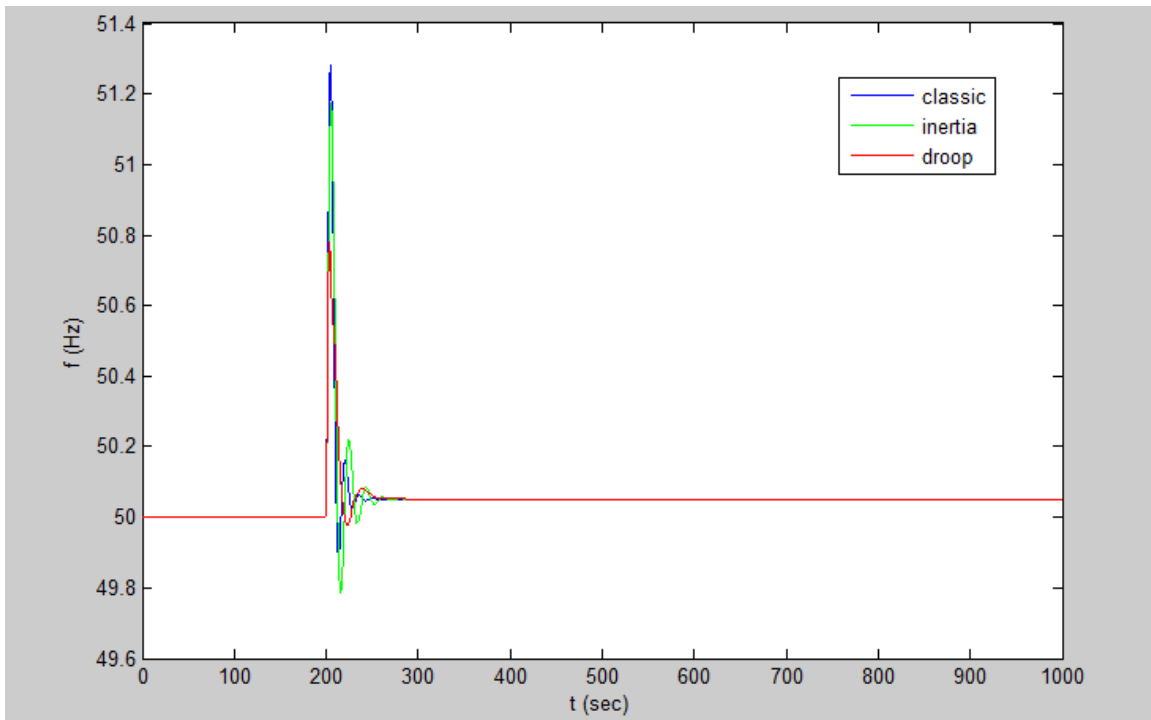


Σχήμα 4.57 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία με στατισμό και για συνδυασμό στατισμού και αδρανειακής απόκρισης της Α/Γ.

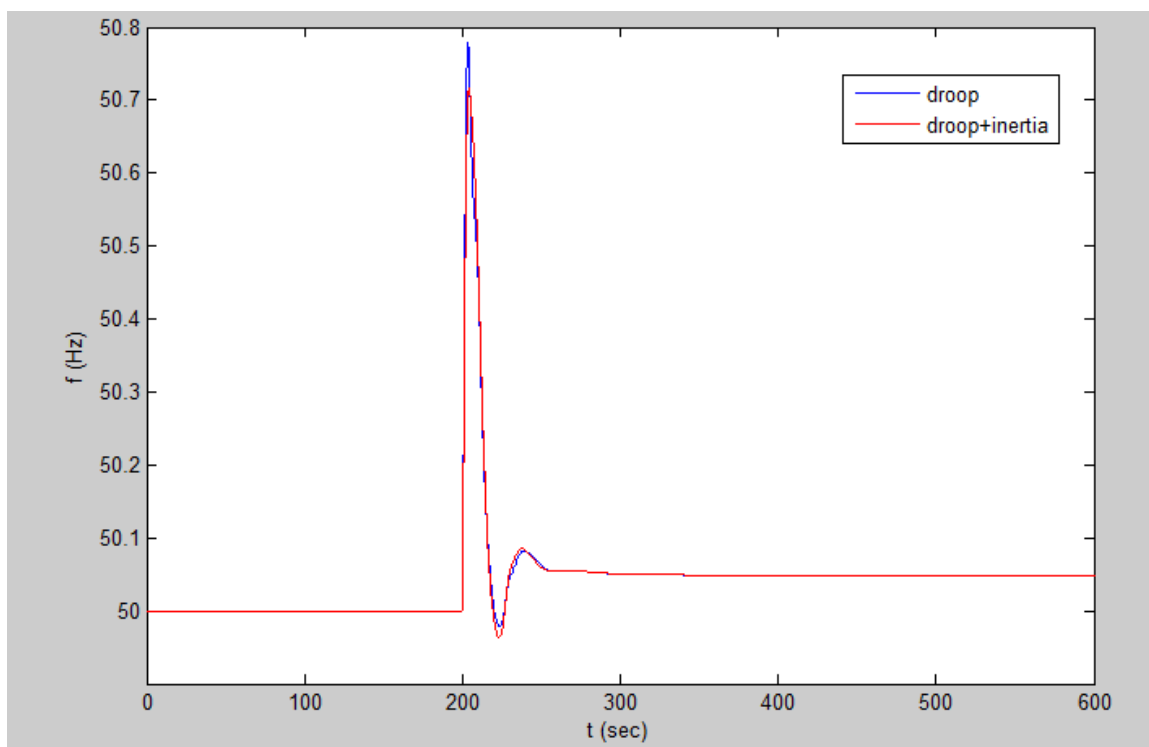


Σχήμα 4.58 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για διαφορετικό τρόπο ορισμού ΔP .

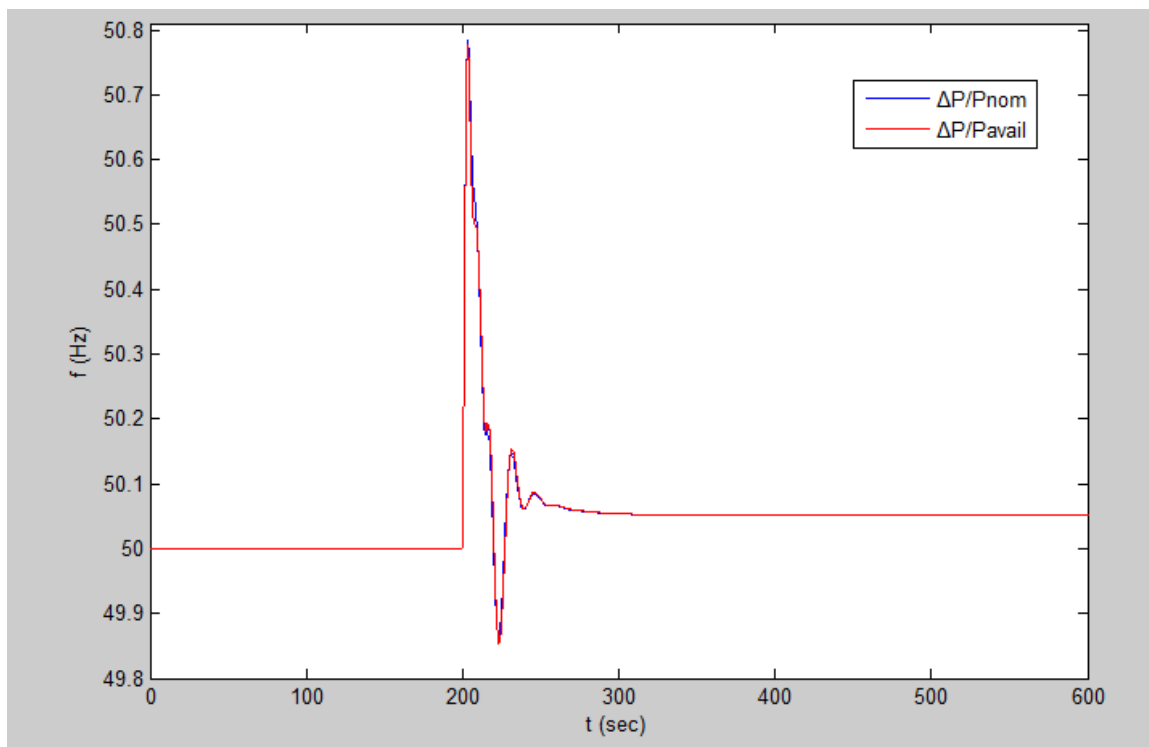
Σενάριο 3



Σχήμα 4.59 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για τις τρεις στρατηγικές λειτουργίας της Α/Γ.



Σχήμα 4.60 Μεταβολή συχνότητας δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία με στατισμό και για συνδυασμό στατισμού και αδρανειακής απόκρισης της Α/Γ.



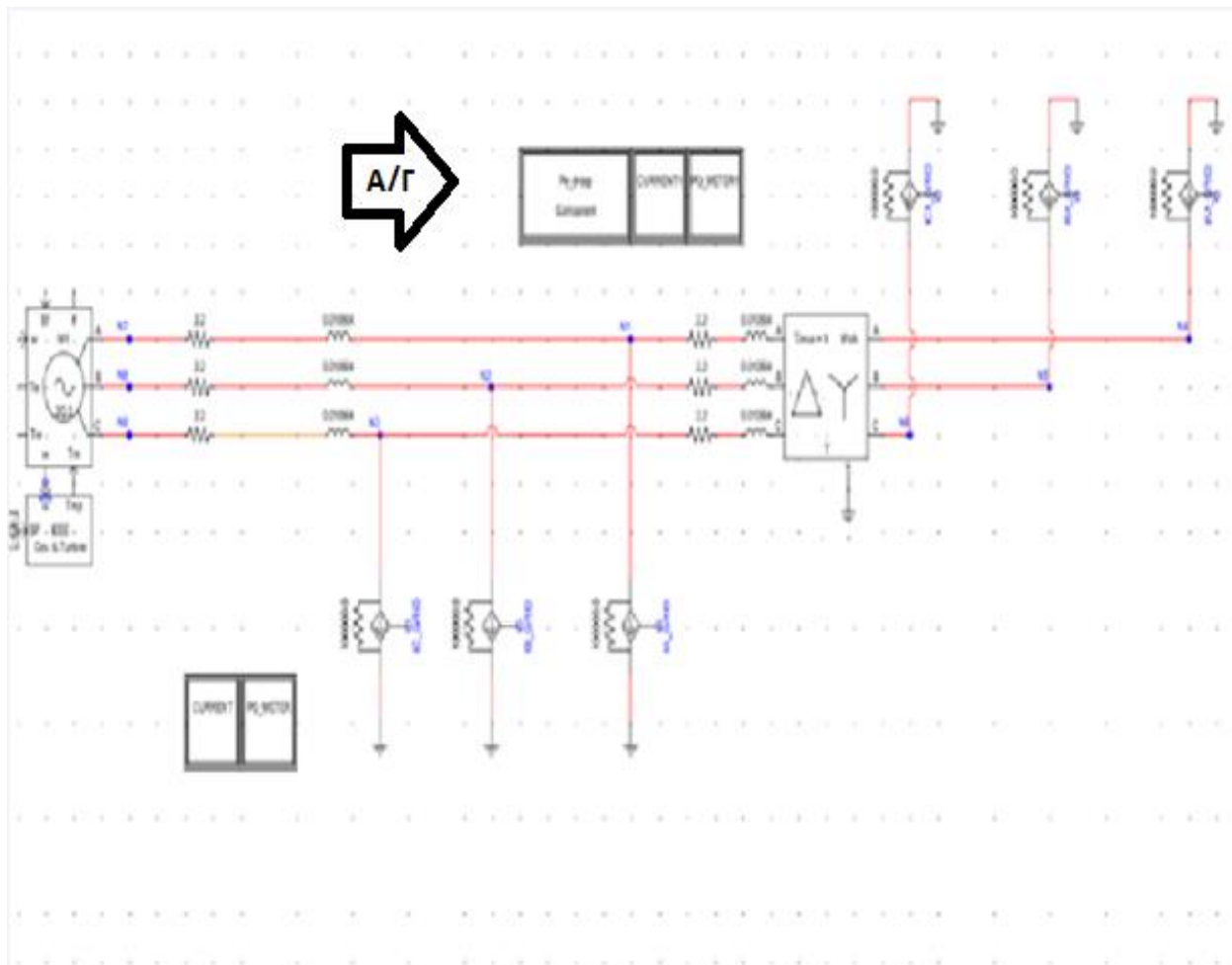
Σχήμα 4.61 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για διαφορετικό ορισμό του ΔP .

4.2.2 Παρατηρήσεις- σχόλια

Με παρόμοια λογική μπορούν να εξηγηθούν και τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις υπερσυχνότητας. Όταν έχουμε δηλαδή μια μείωση του φορτίου ή αύξηση της παραγωγής. Εν προκειμένω μιλάμε για μια μείωση του φορτίου της τάξης του $\Delta L = 5\%$. Ομοίως λοιπόν στις περιπτώσεις, όπου η Α/Γ συμμετέχει είτε μέσω της αδρανειακής απόκρισης, είτε μέσω της καμπύλης στατισμού, προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα. Δηλαδή έχουμε μικρότερη αύξηση μεταβατικά της συχνότητας στις περιπτώσεις της αδρανειακής απόκρισης και της καμπύλης στατισμού, αλλά και καλύτερα αποτελέσματα στην περίπτωση στατισμού για την τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας. Τέλος, υλοποιήθηκε και ο τρόπος που ορίζουν τα πρότυπα, δηλαδή είτε θεωρώντας ως ισχύ αναφοράς την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, είτε θεωρώντας ως ισχύ αναφοράς τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Και πάλι παρατηρούνται, όπως είναι λογικό καλύτερα αποτελέσματα στις περιπτώσεις, όπου ισχύς αναφοράς θεωρείται η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΙΚΡΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΔΙΚΤΥΟ

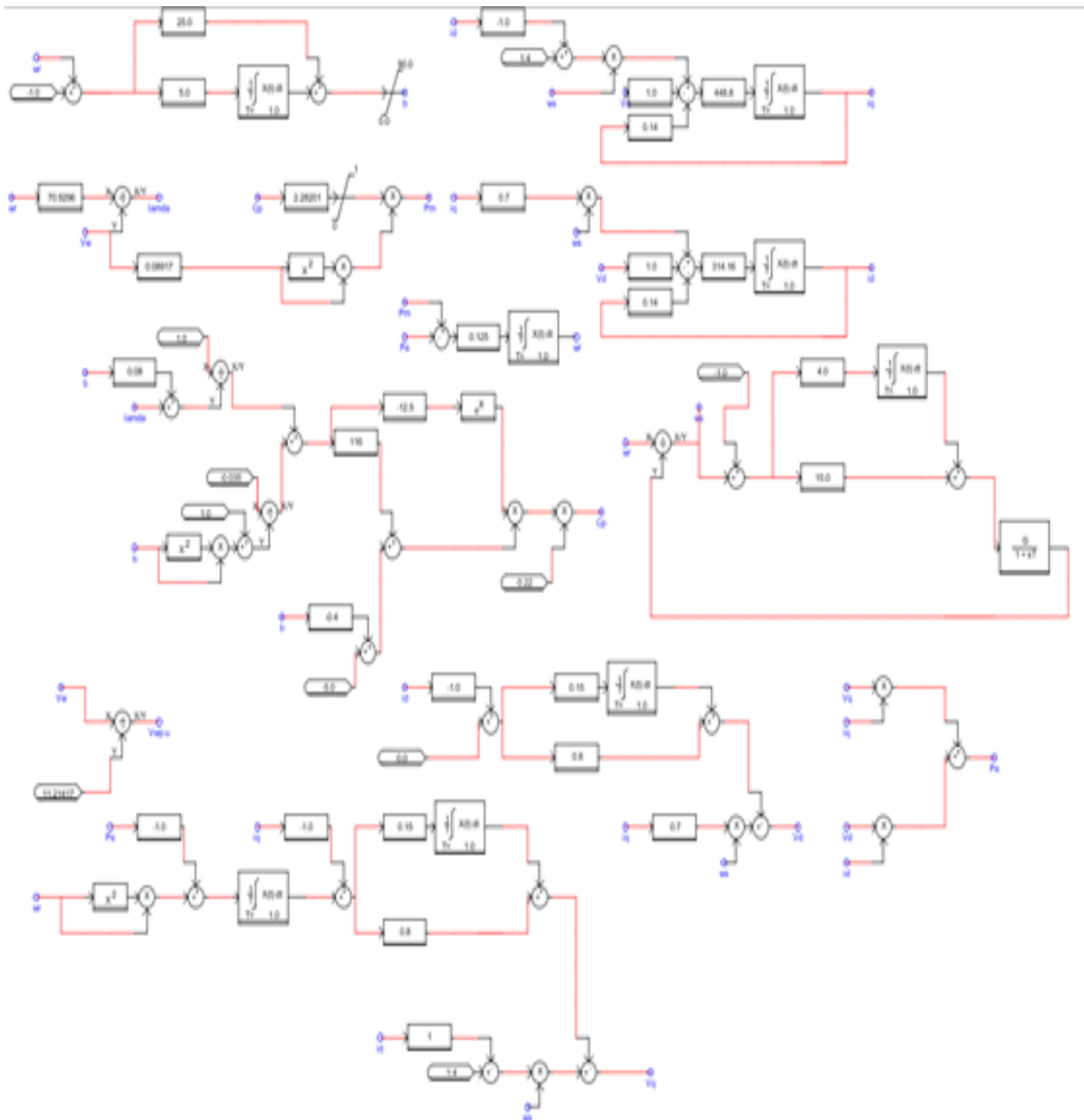
Παρακάτω μελετώνται τα ίδια σενάρια σ' ένα μικρό αυτόνομο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια, από μια ανεμογεννήτρια και ένα φορτίο. Μιλάμε δηλαδή για ένα σύστημα με τρεις ζυγούς, το οποίο έχει υλοποιηθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον του RSCAD και έχει εκτελεστεί στον προσομοιωτή του RTDS. Το δίκτυο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1 Αυτόνομο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από μια σύγχρονη γεννήτρια, μια A/Γ και ένα ωμικό, επαγωγικό φορτίο.

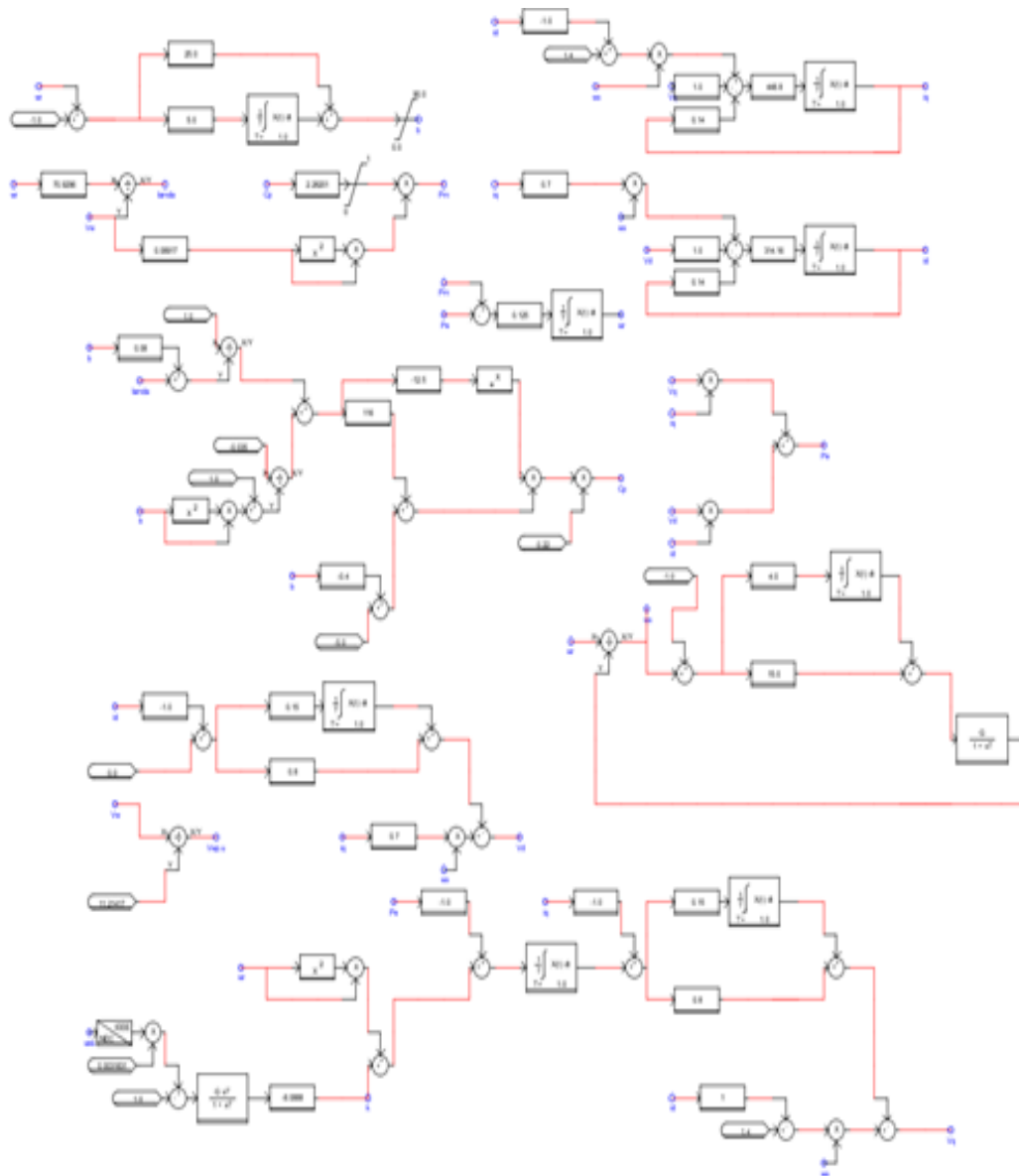
Η σύγχρονη γεννήτρια είναι των 10 MVA και η Ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 900KW. Οι γραμμές μεταφοράς είναι ACSR 3 × 95 και τα στοιχεία της γραμμής είναι: $R = 0.215 \Omega/\text{Km}$, $X = 0.334 \Omega/\text{Km}$. Οι αποστάσεις μεταξύ των ζυγών είναι 10 Km. Το δίκτυο είναι ένα δίκτυο Μέσης Τάσης ονομαστικής ισχύος 15 KV.

Η μοντελοποίηση της Α/Γ στο προγραμματιστικό περιβάλλον RSCAD έγινε με παρόμοιο τρόπο με αυτή του matlab/Simulink. Το πλήρες μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω.



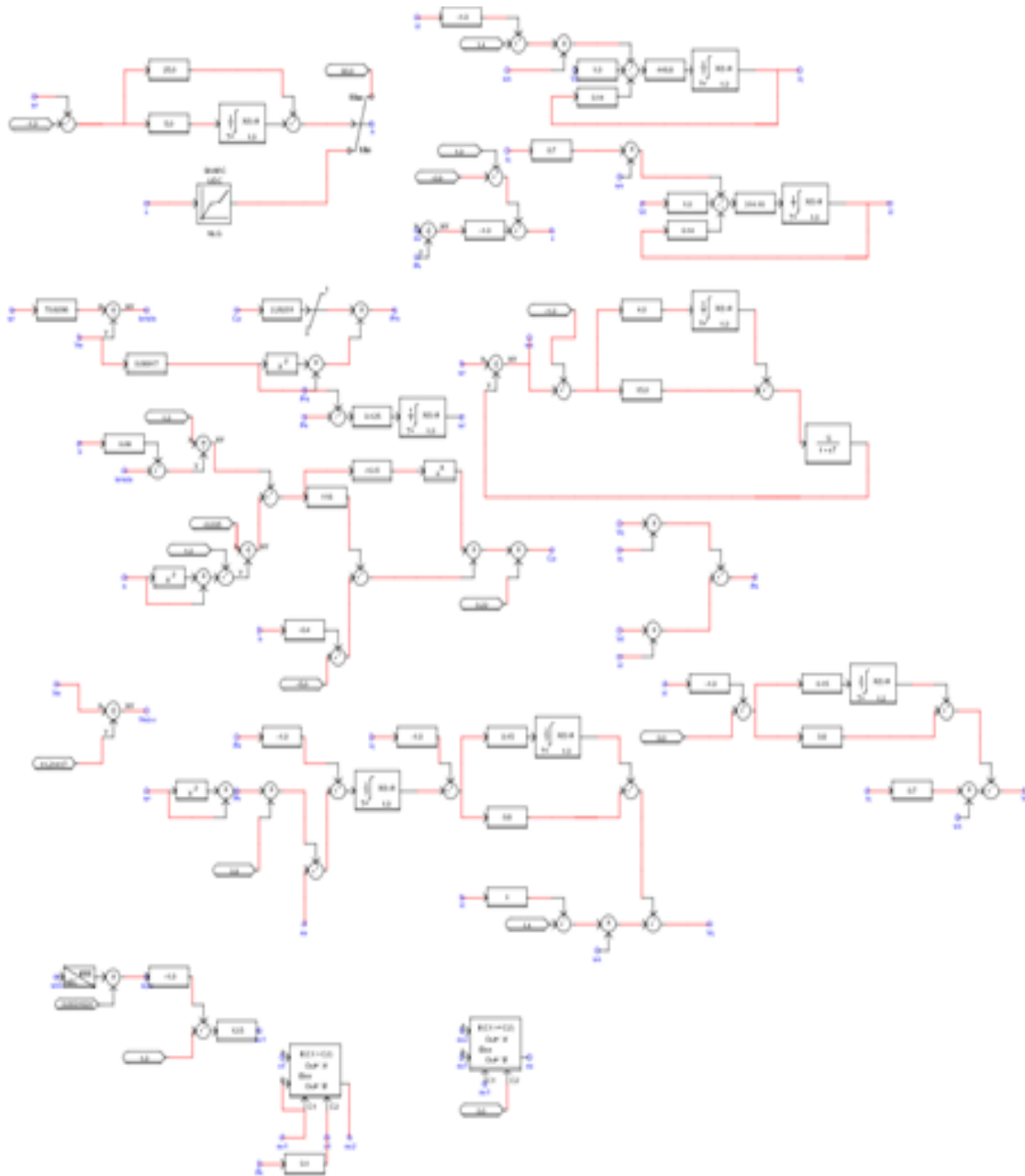
Σχήμα 5.2 Μοντελοποίηση της Α/Γ σε κλασική λειτουργία στο RSCAD.

Η μοντελοποίηση της Α/Γ σε περίπτωση αδρανειακής απόκρισης, γίνεται με την πρόσθεση ενός κλάδου στον έλεγχο της Α/Γ. Το πλήρες μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.3 Μοντελοποίηση της Α/Γ σε λειτουργία αδρανειακής απόκρισης στο RSCAD.

Η μοντελοποίηση της Α/Γ για στρατηγική λειτουργίας Pitch deloading γίνεται με την πρόσθεση ενός κλάδου στον έλεγχο και κατάλληλης προσαρμογής του pitch control, ώστε να επιτυγχάνεται και η κατάλληλη αποφόρτιση. Το πλήρες μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.4 Μοντελοποίηση της Α/Γ σε λειτουργία pitch deloading στο RSCAD.

5.1 Αποτελέσματα

Τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο είναι όμοια με τα σενάρια του προηγούμενου κεφαλαίου, δηλαδή αφορούν σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (κάτω της ονομαστικής-χαμηλής, κάτω της ονομαστικής-υψηλής, άνω της ονομαστικής). Σε κάθε ένα τέτοιο σενάριο παρουσιάζονται οι περιπτώσεις της μη συμμετοχής της Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας, της συμμετοχής στην αδρανειακή απόκριση, της συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας μέσω του pitch deloading και του συνδυασμού των δύο τελευταίων μεθόδων. Στις περιπτώσεις του pitch deloading η τιμή στατισμού της Α/Γ είναι $R = 0.08$ και η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος.

Σενάριο 1

- Ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec.
- Φορτίο $L = 1089$ KW, $\cos\phi = 1$.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L = 500$ KW.
- Η ισχύς της Α/Γ καλύπτει το 25% του φορτίου του συστήματος.
- Στατισμός σύγχρονης γεννήτριας $R = 0.05$.
- Σταθερά αδρανείας σύγχρονης γεννήτριας $H = 3.2$ sec.
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου ανεμογεννήτριας $V_w = 11.21417$ m/sec.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R = 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ είναι $H = 4$ sec.

Σενάριο 2

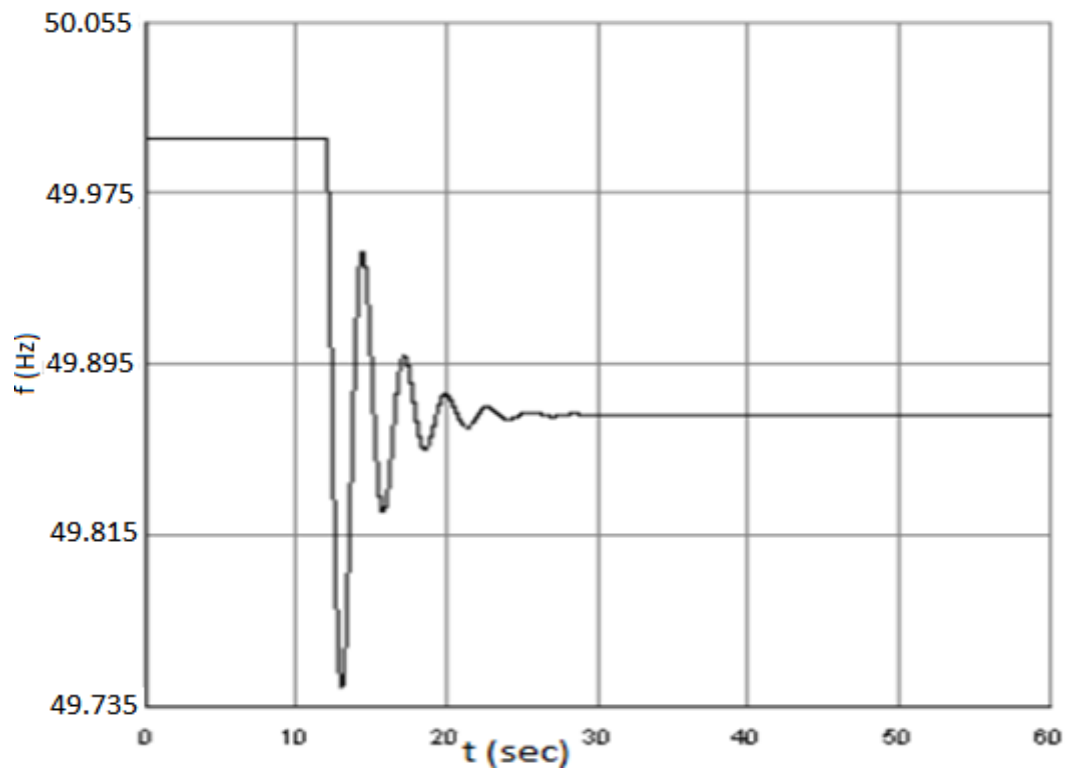
- Ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec.
- Φορτίο $L = 2127$ KW, $\cos\phi = 1$.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L = 500$ KW.
- Η ισχύς της Α/Γ καλύπτει το 25% του φορτίου του συστήματος.
- Στατισμός σύγχρονης γεννήτριας $R = 0.05$.
- Σταθερά αδρανείας σύγχρονης γεννήτριας $H = 3.2$ sec.
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου ανεμογεννήτριας $V_w = 11.21417$ m/sec.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R = 0.08$.

- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ είναι $H = 4 \text{ sec}$.

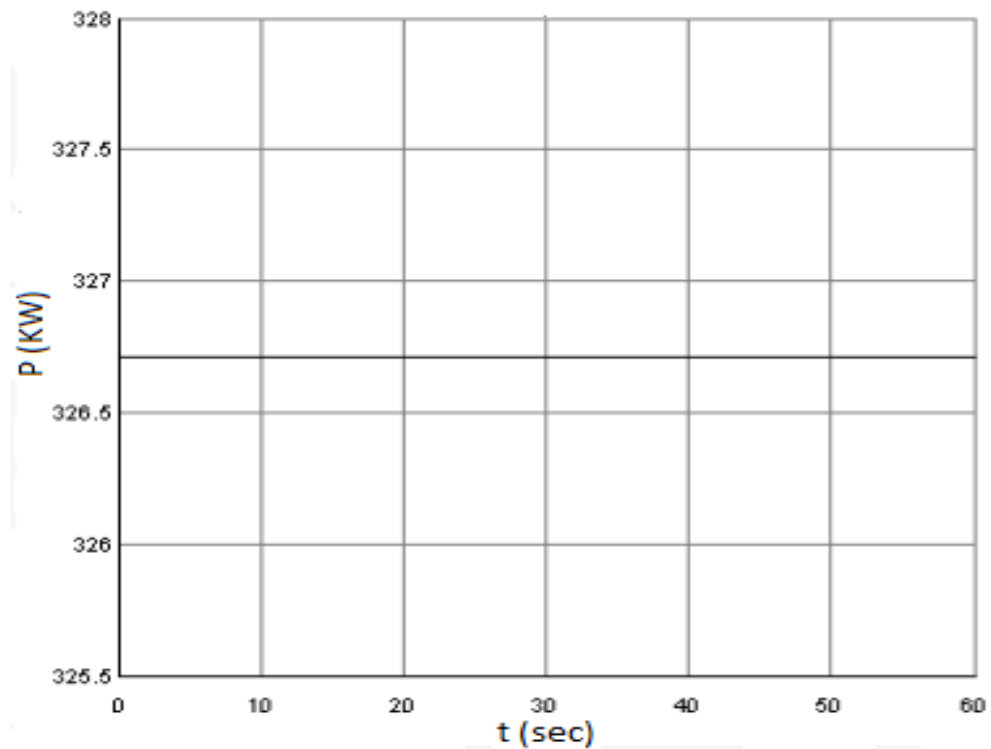
Σενάριο 3

- Ταχύτητα ανέμου $V_w = 12 \text{ m/sec}$.
- Φορτίο $L = 2571 \text{ KW}$, $\cos\phi = 1$.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L = 500 \text{ KW}$.
- Η ισχύς της Α/Γ καλύπτει το 35% του φορτίου του συστήματος.
- Στατισμός σύγχρονης γεννήτριας $R = 0.05$.
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου ανεμογεννήτριας $V_w = 11.21417 \text{ m/sec}$.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R = 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ είναι $H = 4 \text{ sec}$.

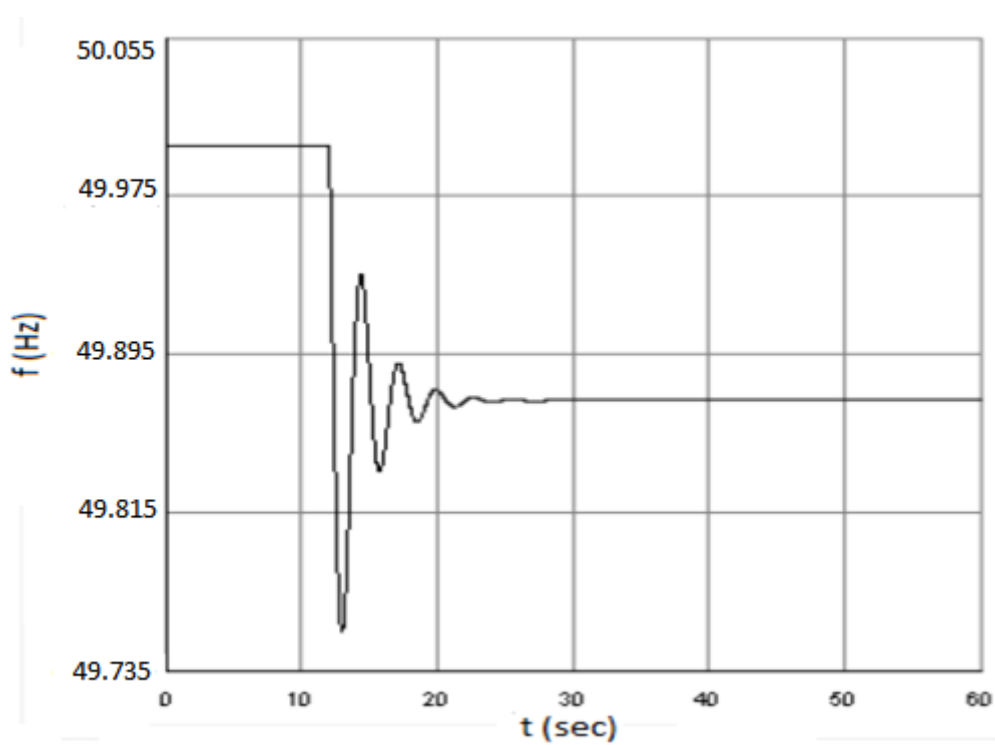
Σενάριο 1



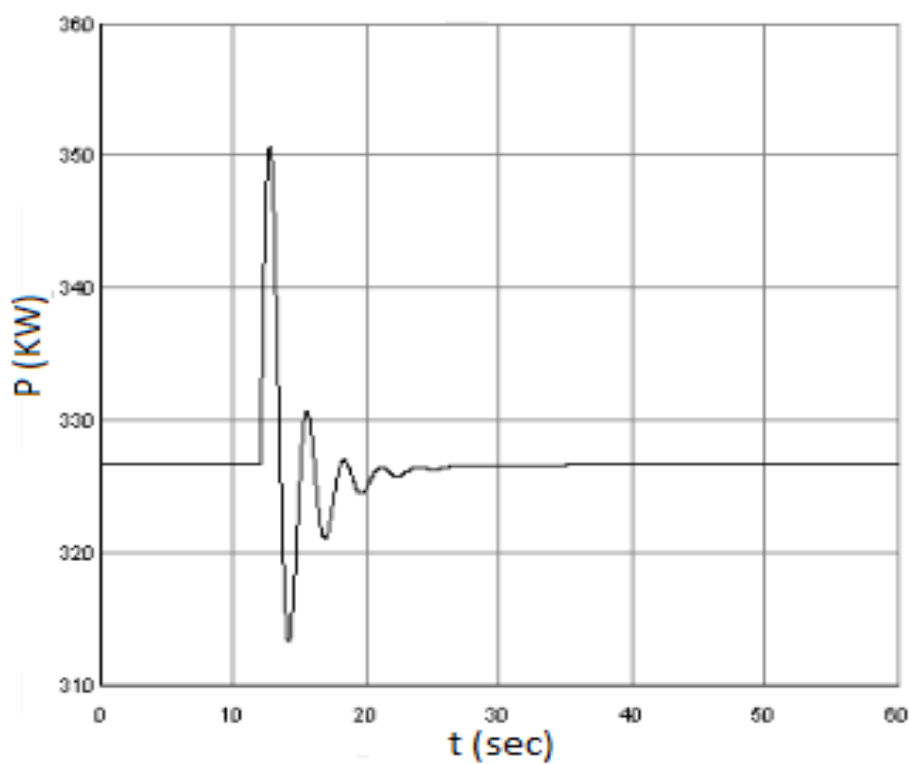
Σχήμα 5.5 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



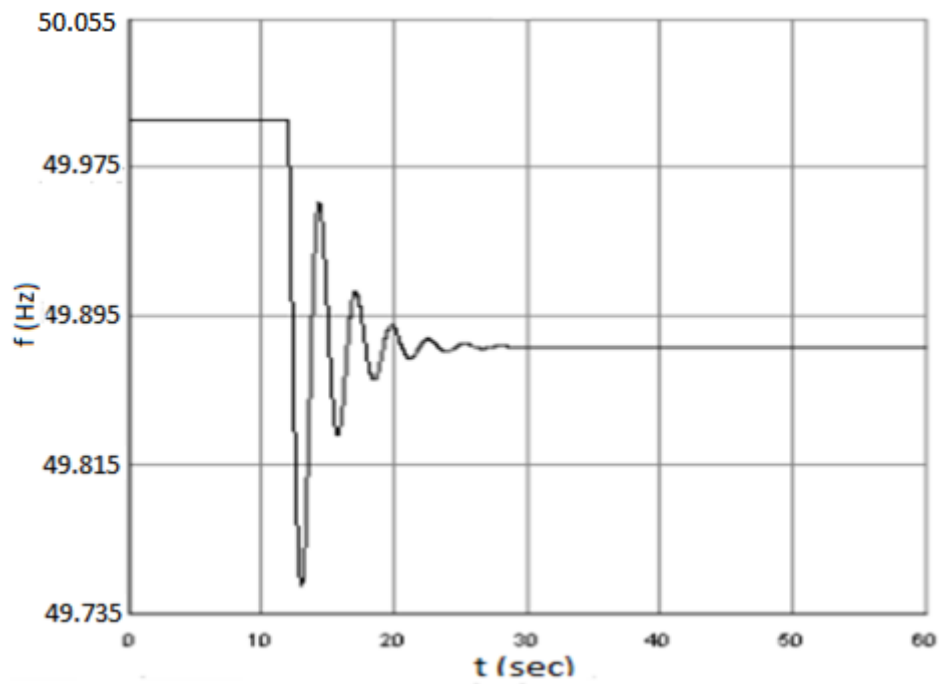
Σχήμα 5.6 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



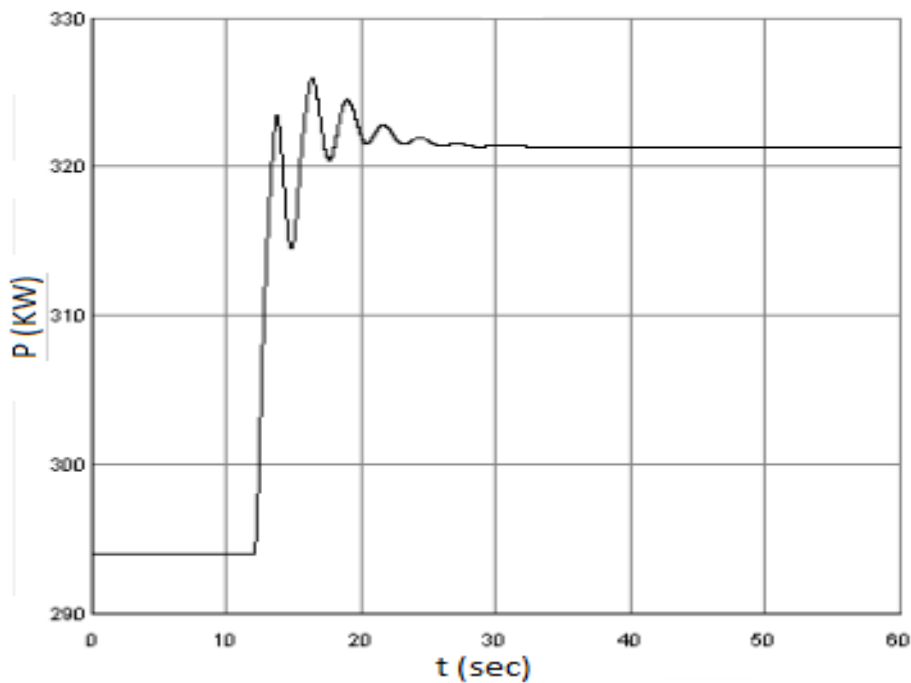
Σχήμα 5.7 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



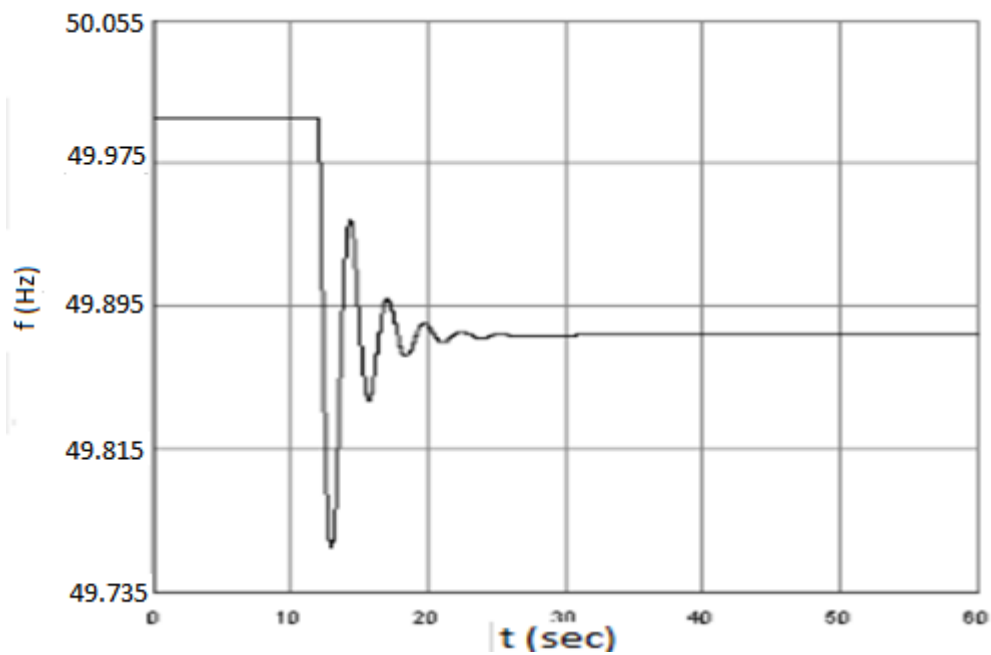
Σχήμα 5.8 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



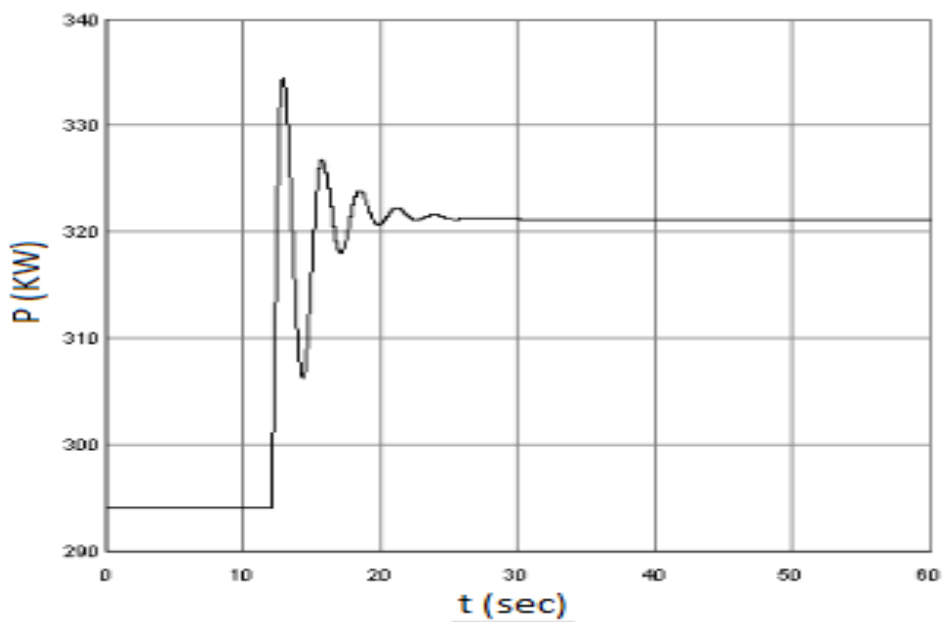
Σχήμα 5.9 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



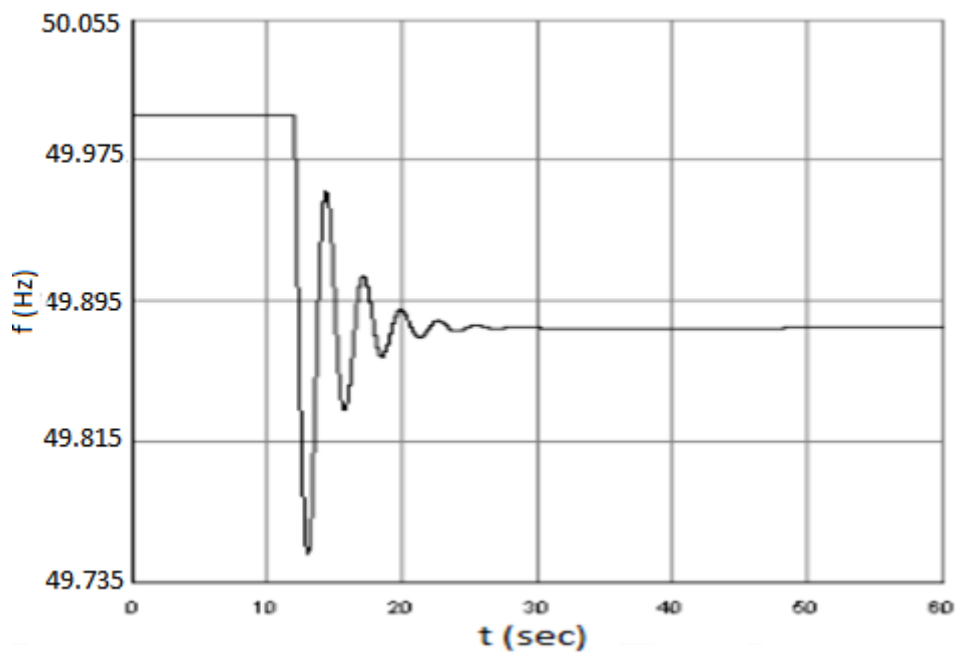
Σχήμα 5.10 Μεταβολή ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



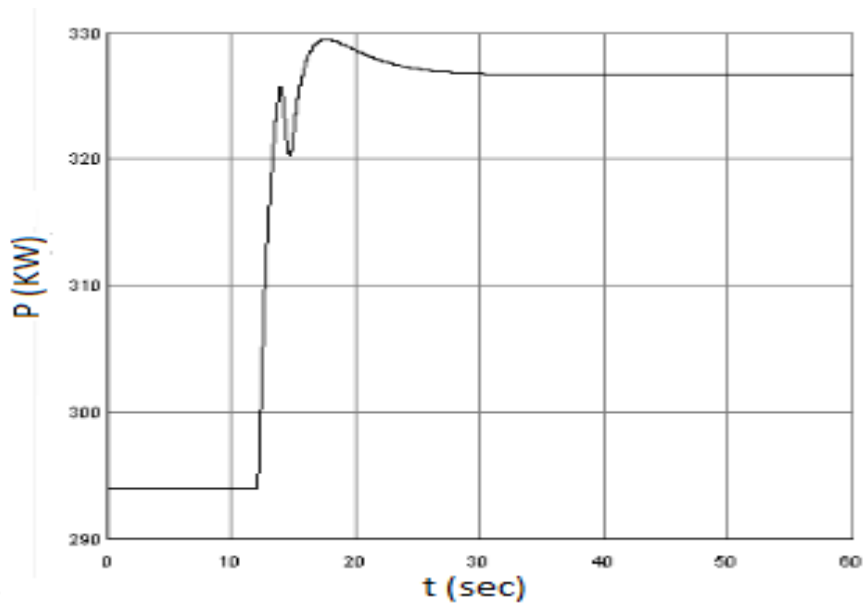
Σχήμα 5.11 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading.



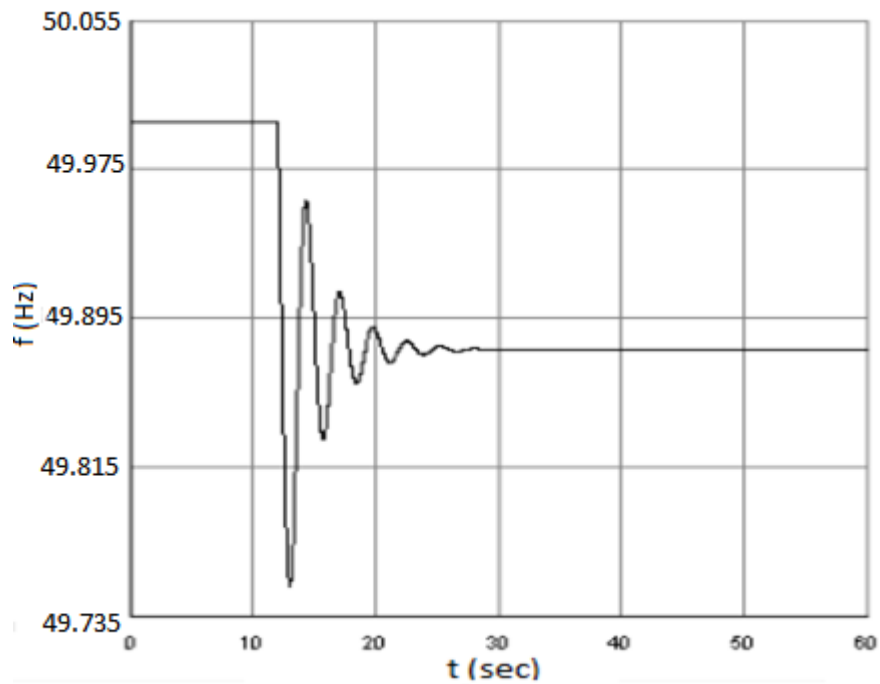
Σχήμα 5.12 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading.



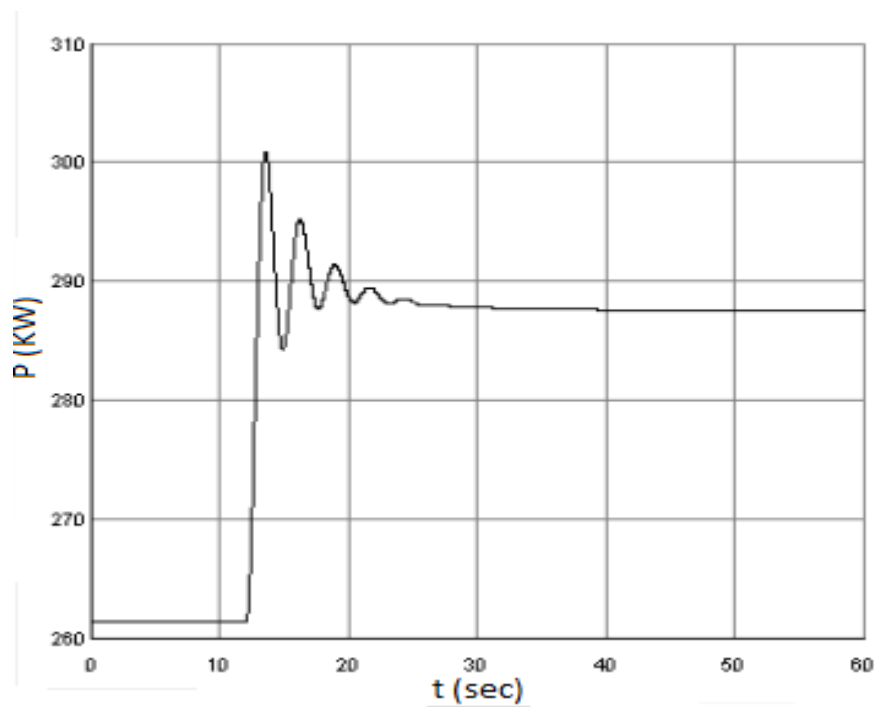
Σχήμα 5.13 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετικό στατισμό ($R = 0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 5.14 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.

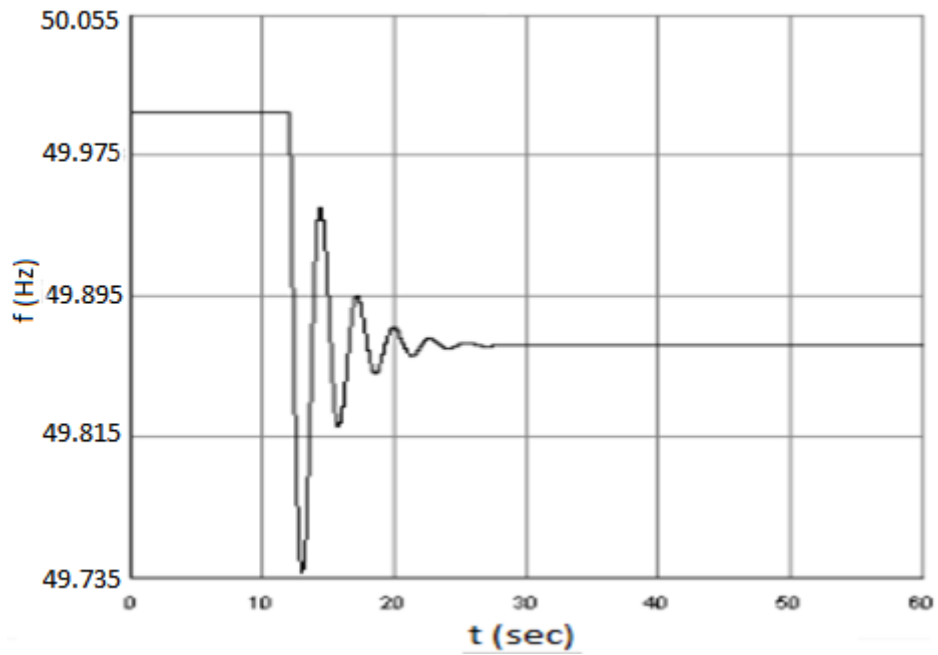


Σχήμα 5.15 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

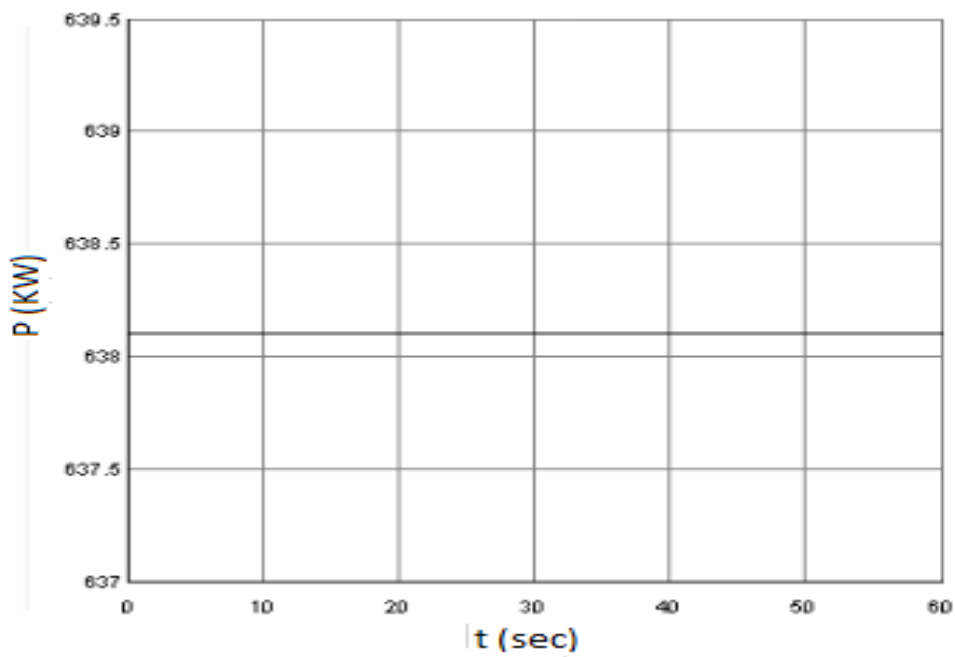


Σχήμα 5.16 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

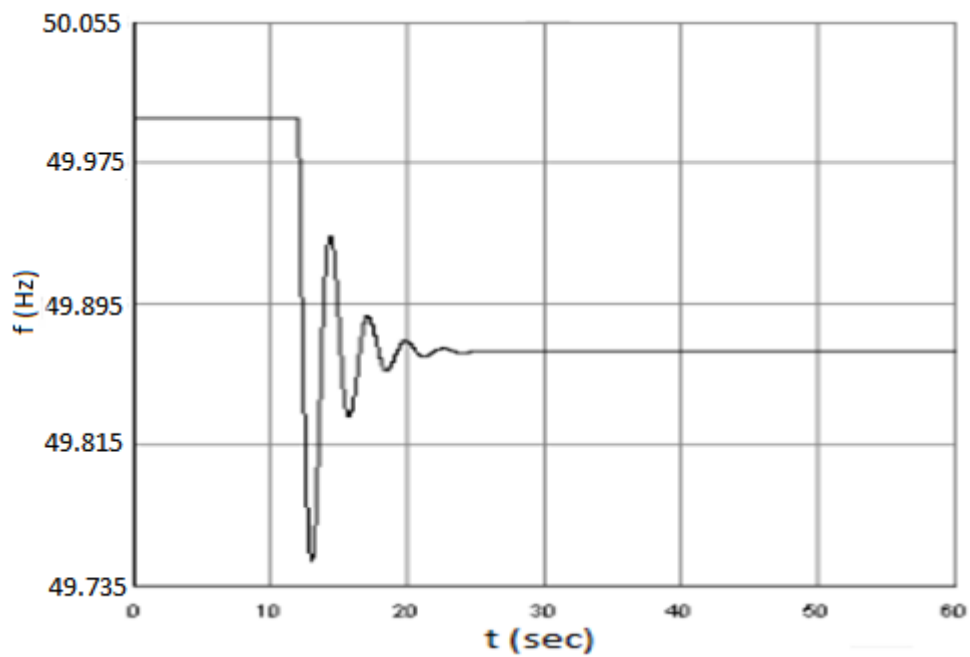
Σενάριο 2



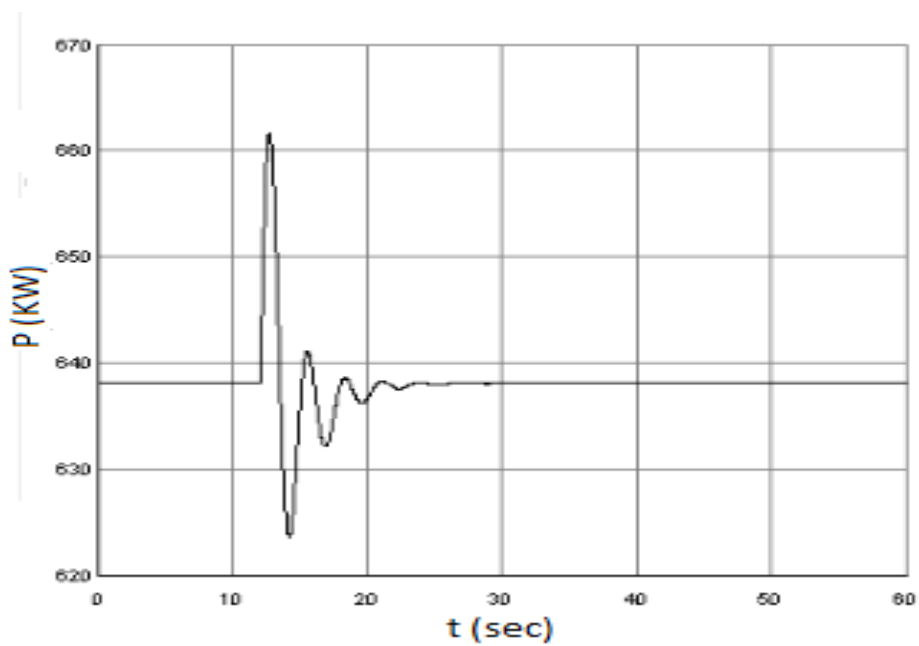
Σχήμα 5.17 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



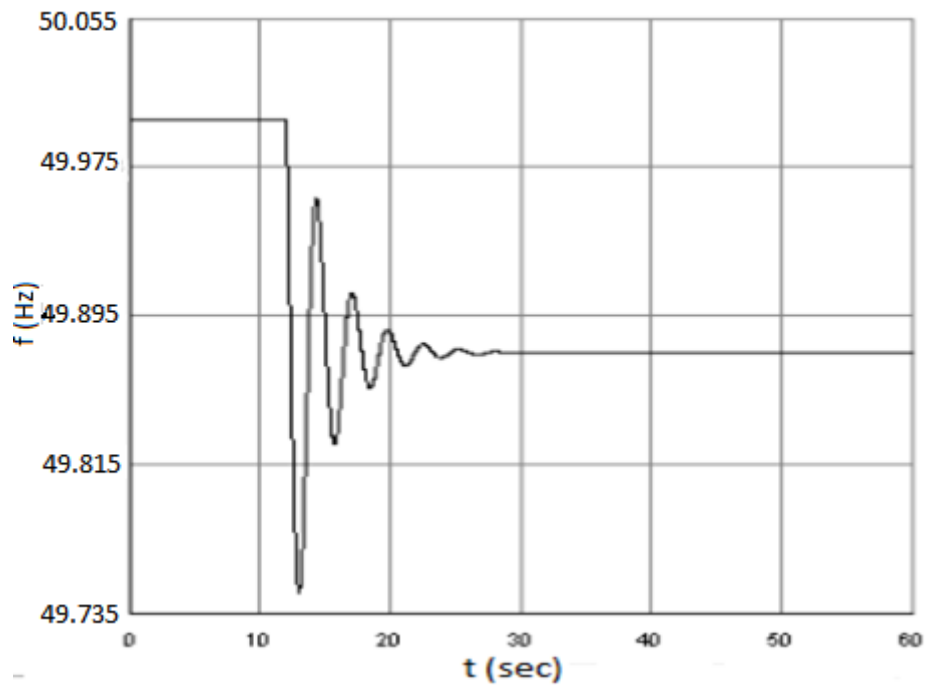
Σχήμα 5.18 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



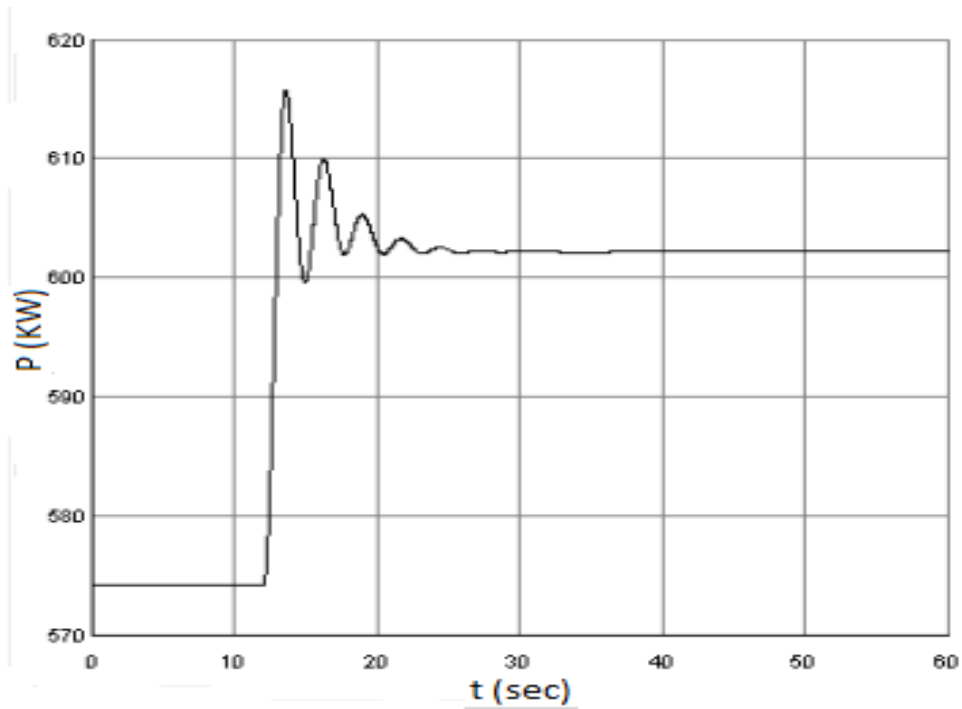
Σχήμα 5.19 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



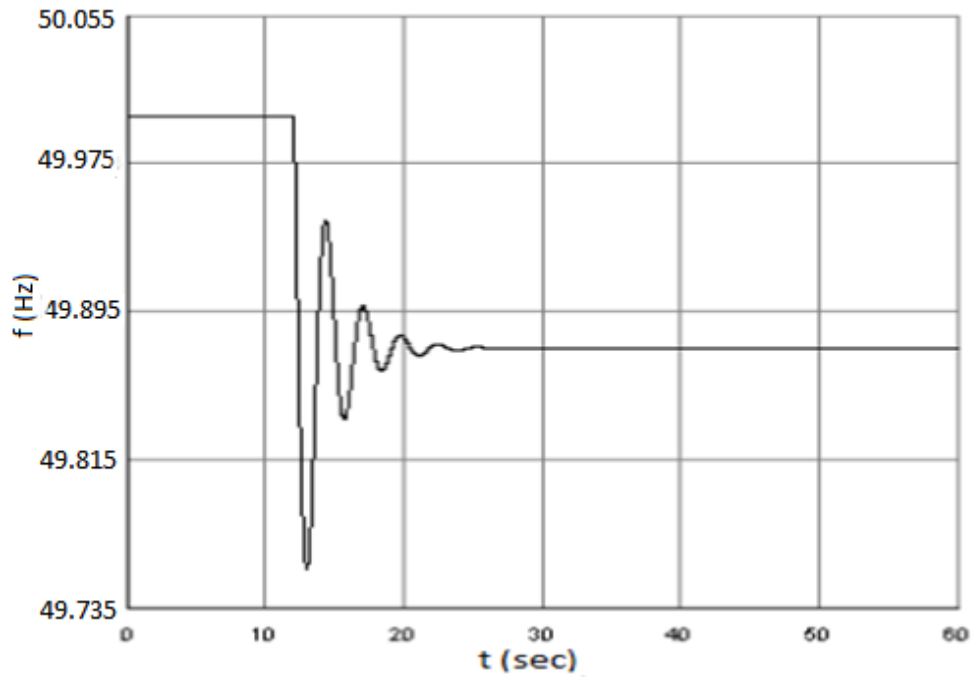
Σχήμα 5.20 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



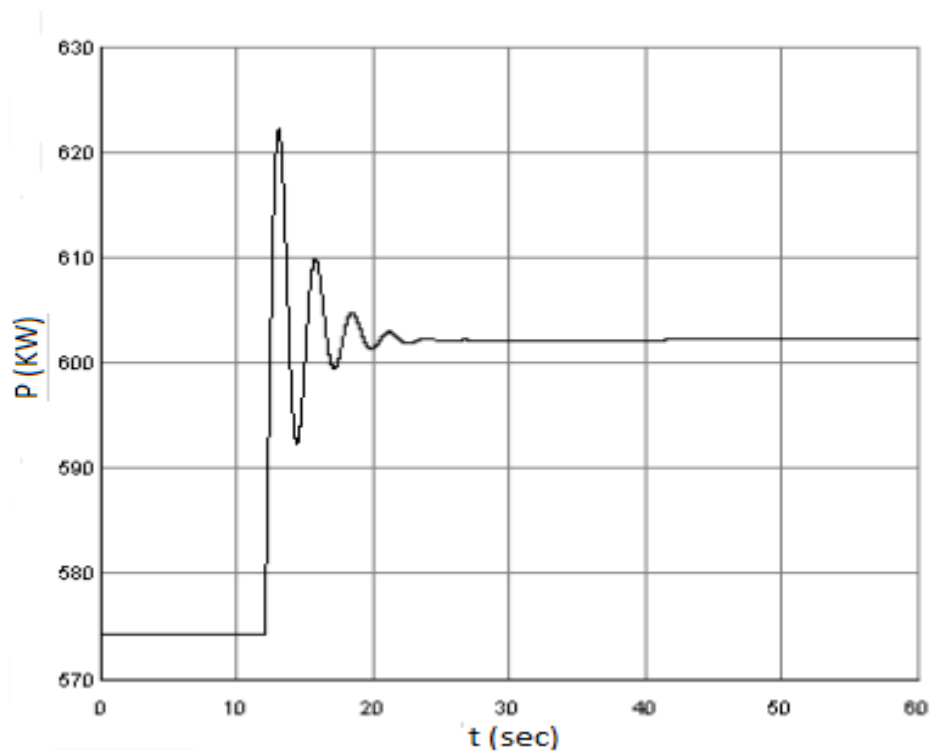
Σχήμα 5.21 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



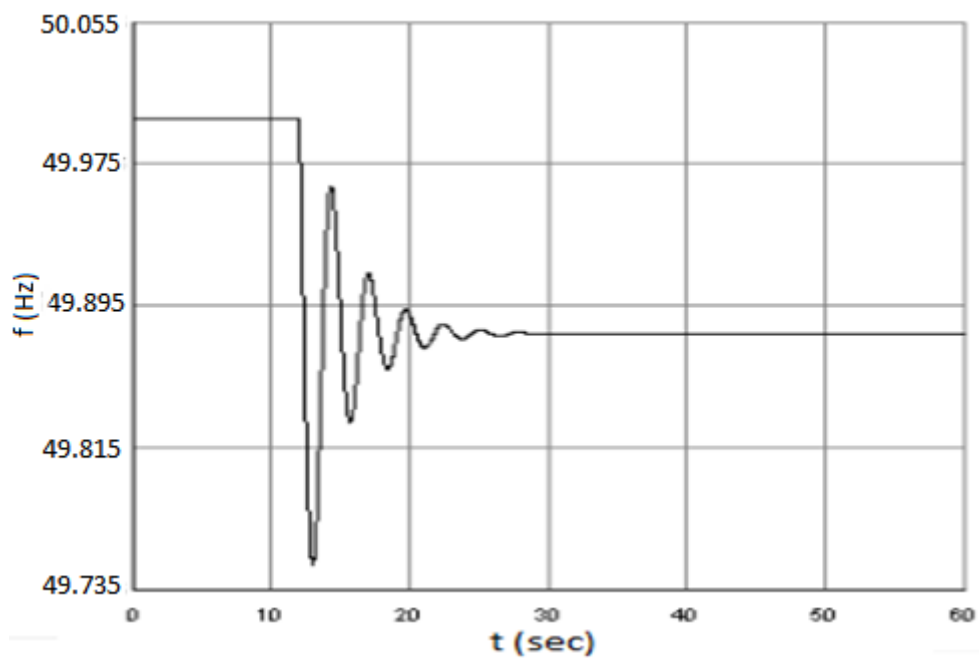
Σχήμα 5.22 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



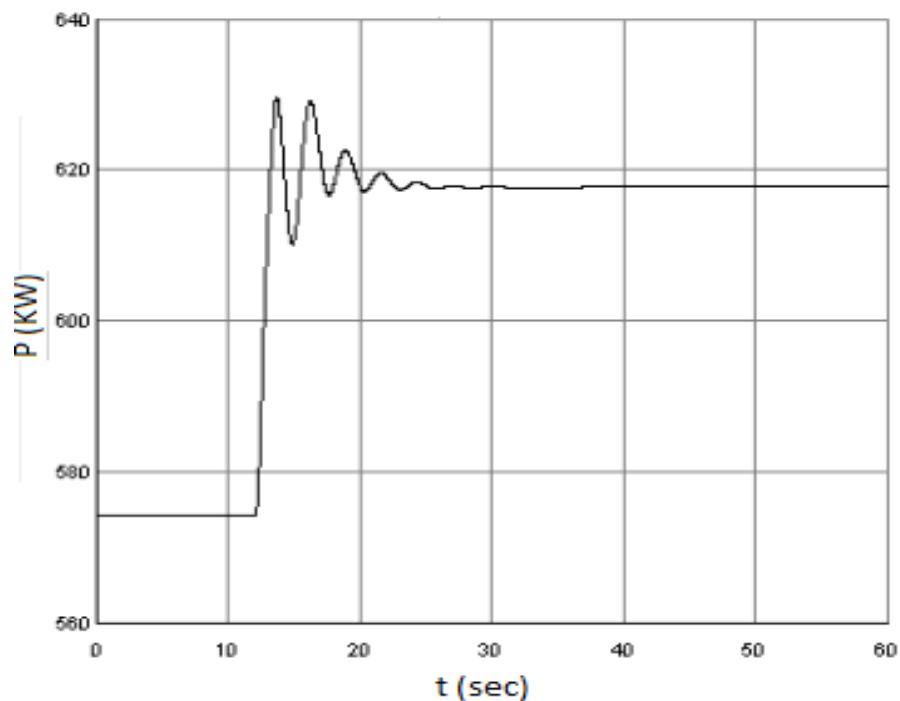
Σχήμα 5.23 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading.



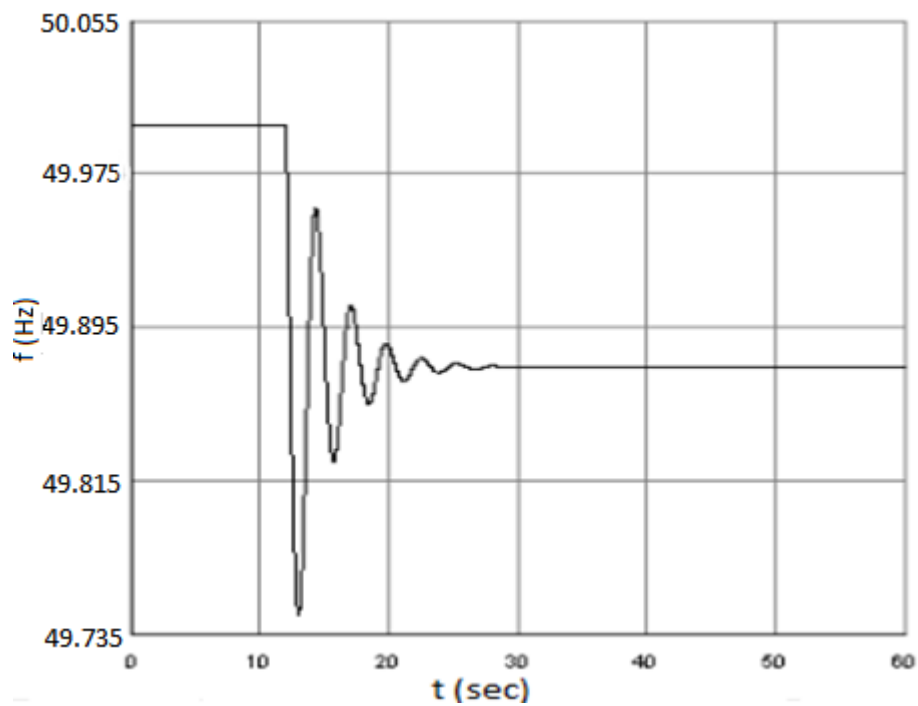
Σχήμα 5.24 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία της Α/Γ με συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και του pitch deloading.



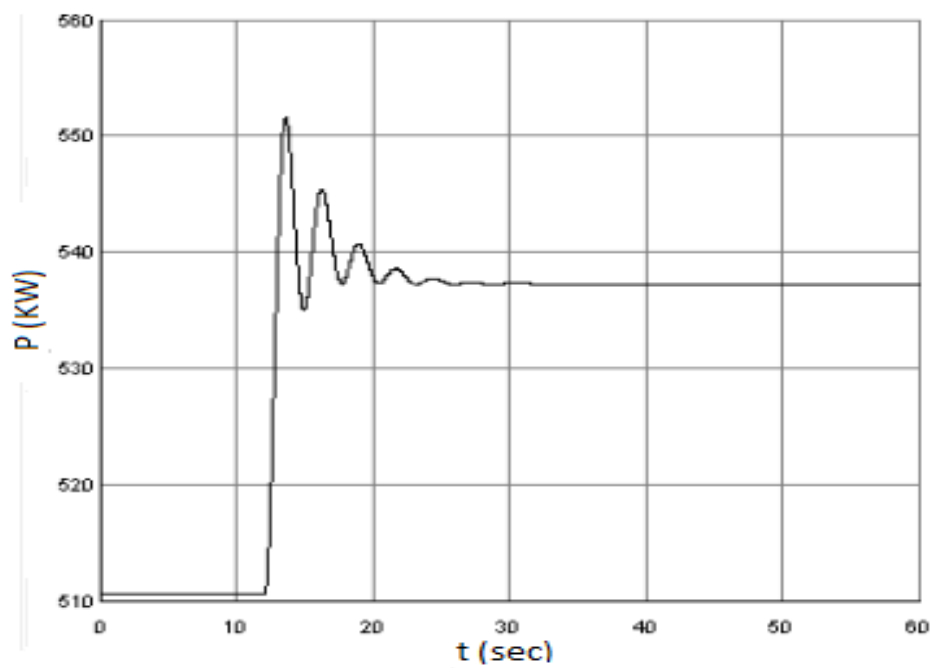
Σχήμα 5.25 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R=0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 5.26 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.

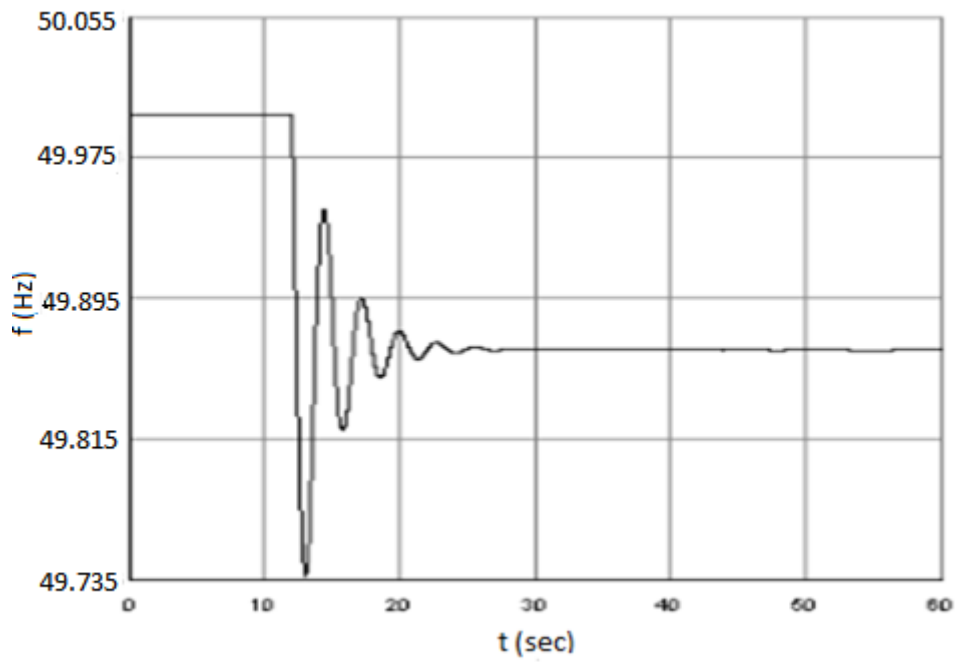


Σχήμα 5.27 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

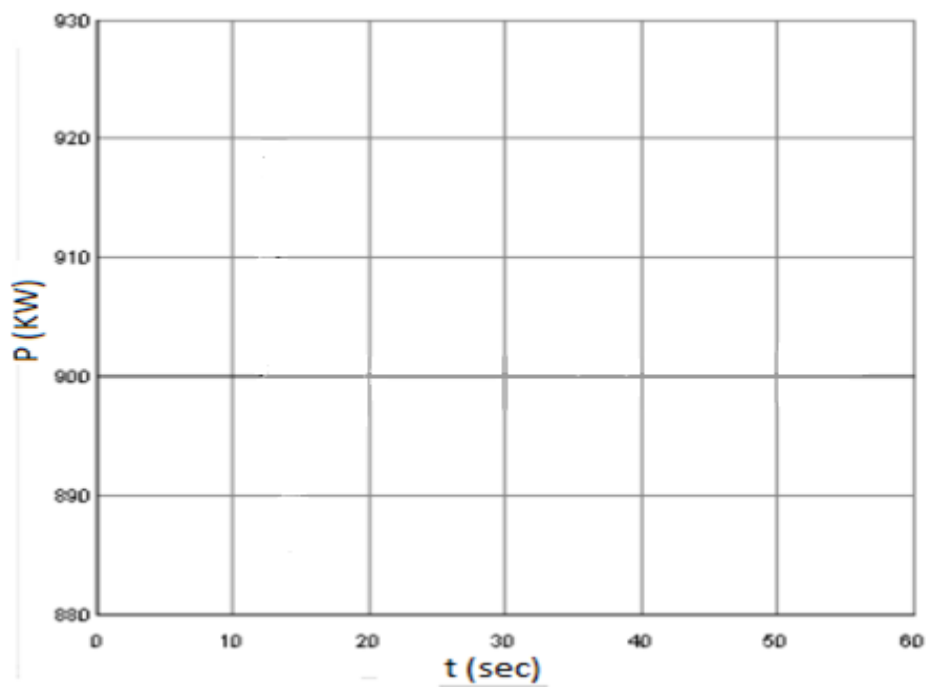


Σχήμα 5.28 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

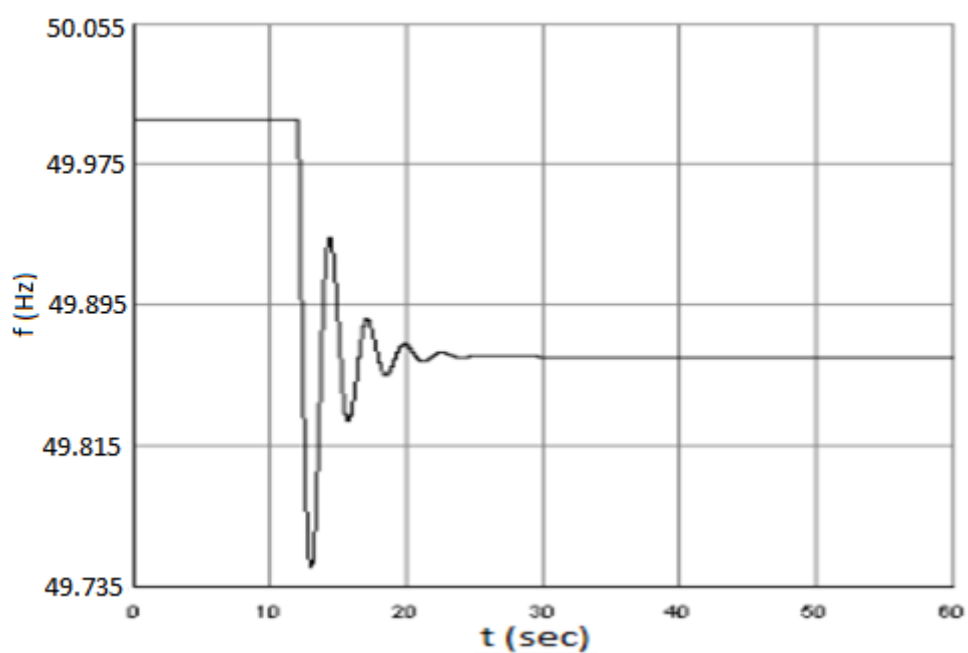
Σενάριο 3



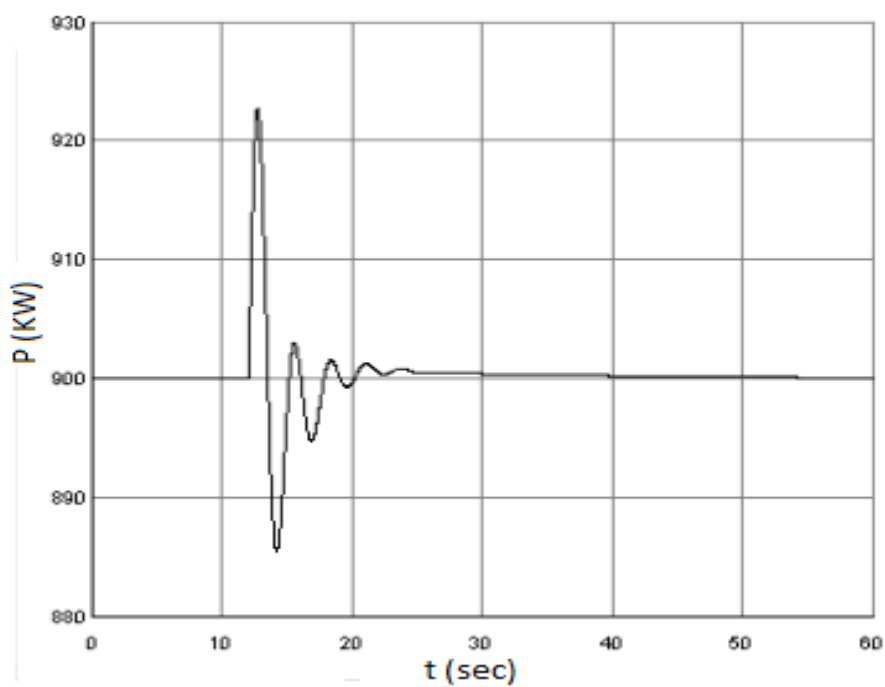
Σχήμα 5.29 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



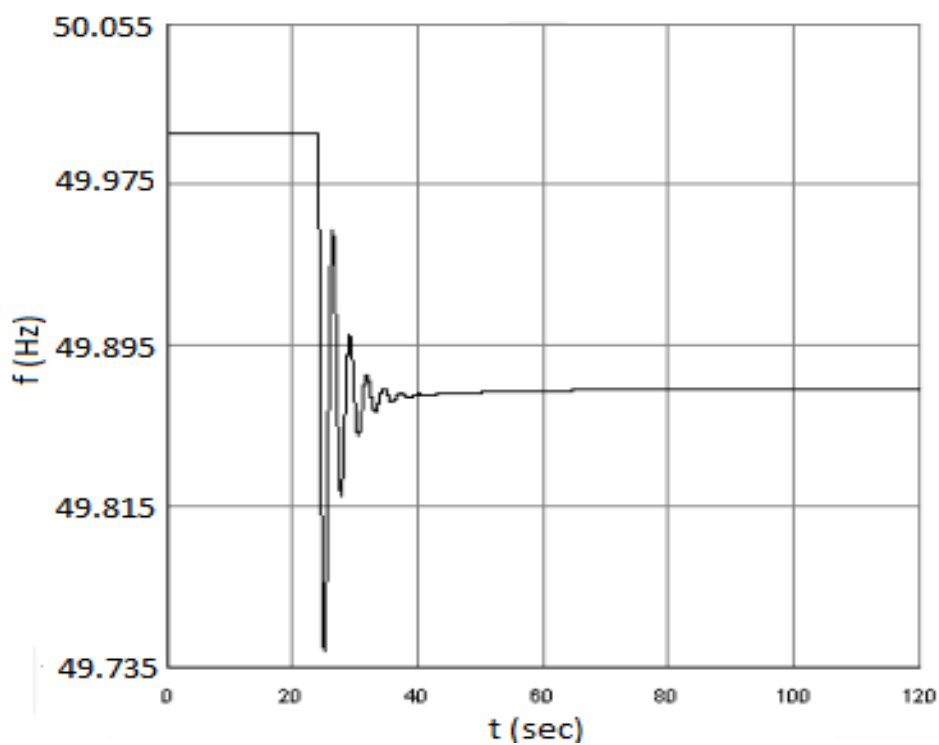
Σχήμα 5.30 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



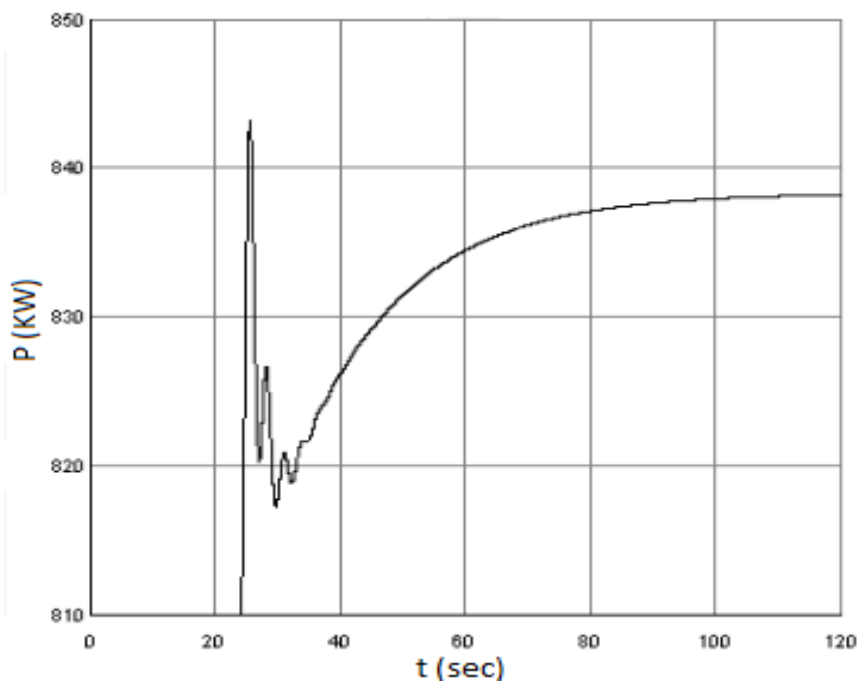
Σχήμα 5.31 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



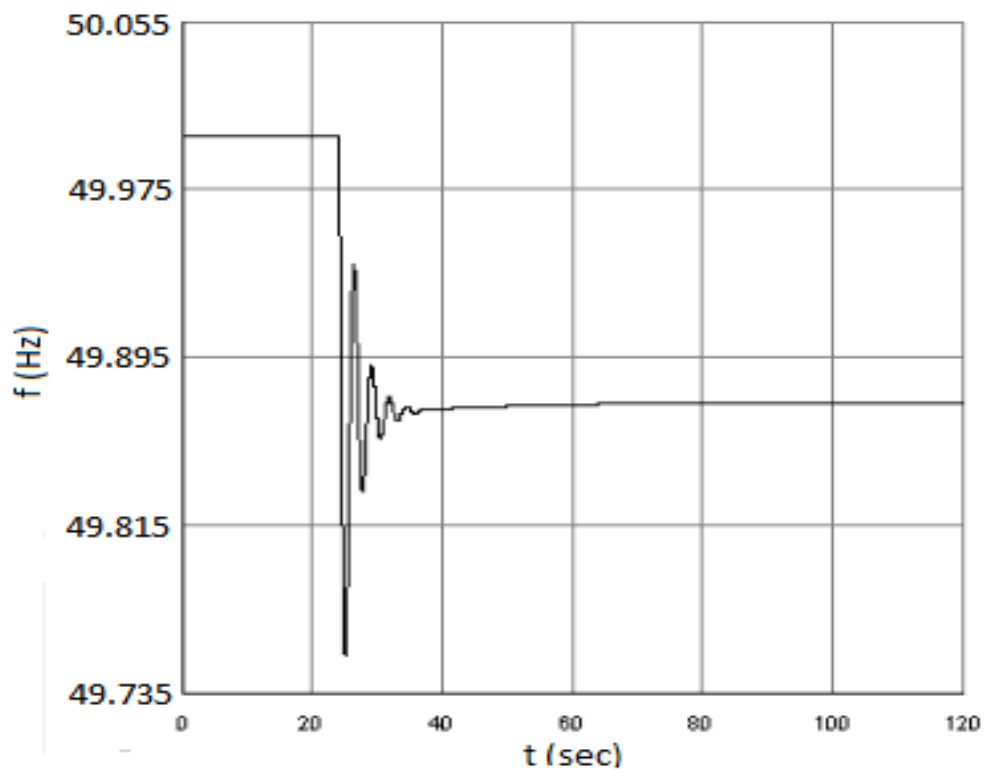
Σχήμα 5.32 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



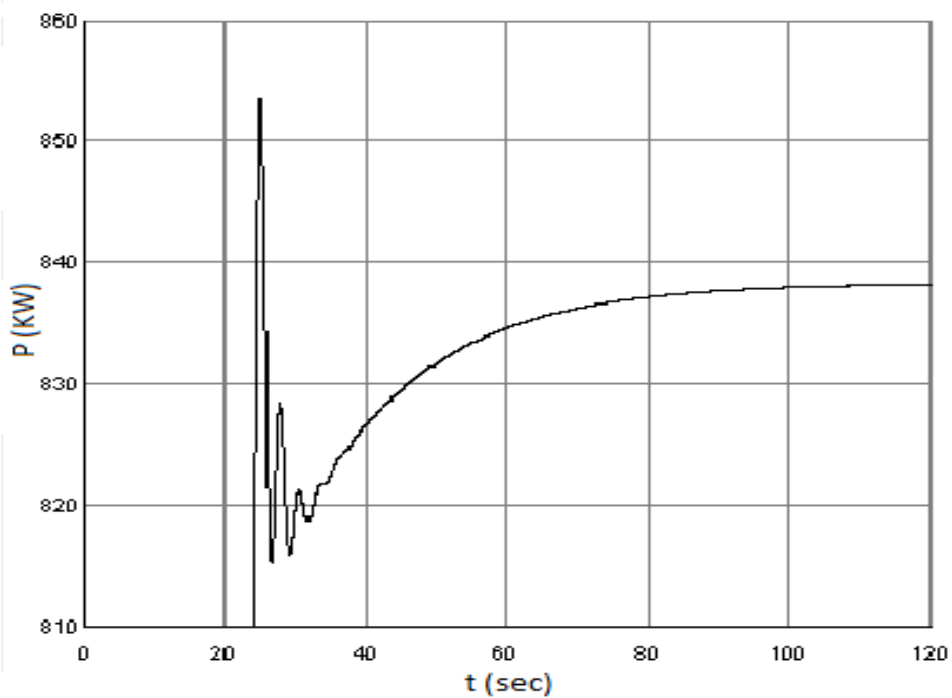
Σχήμα 5.33 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



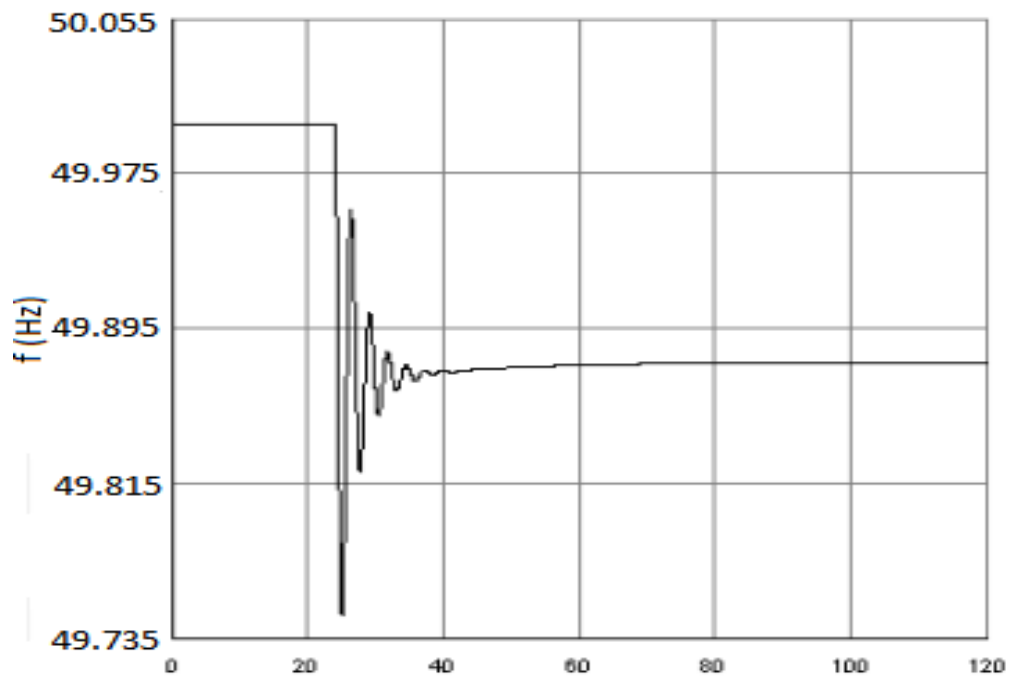
Σχήμα 5.34 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



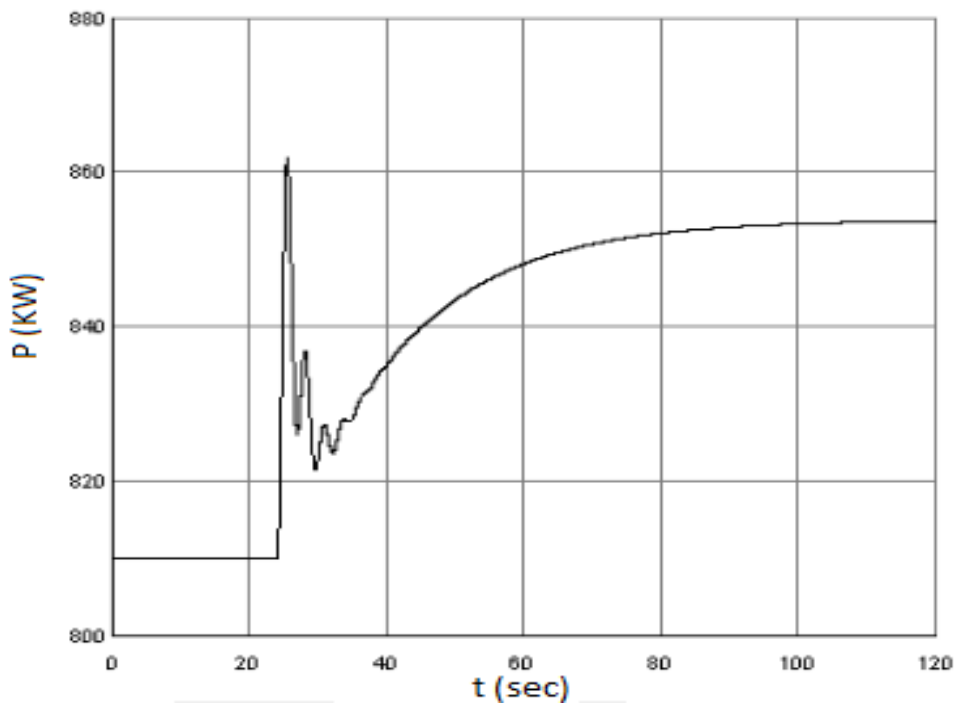
Σχήμα 5.35 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία με συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και pitch deloading.



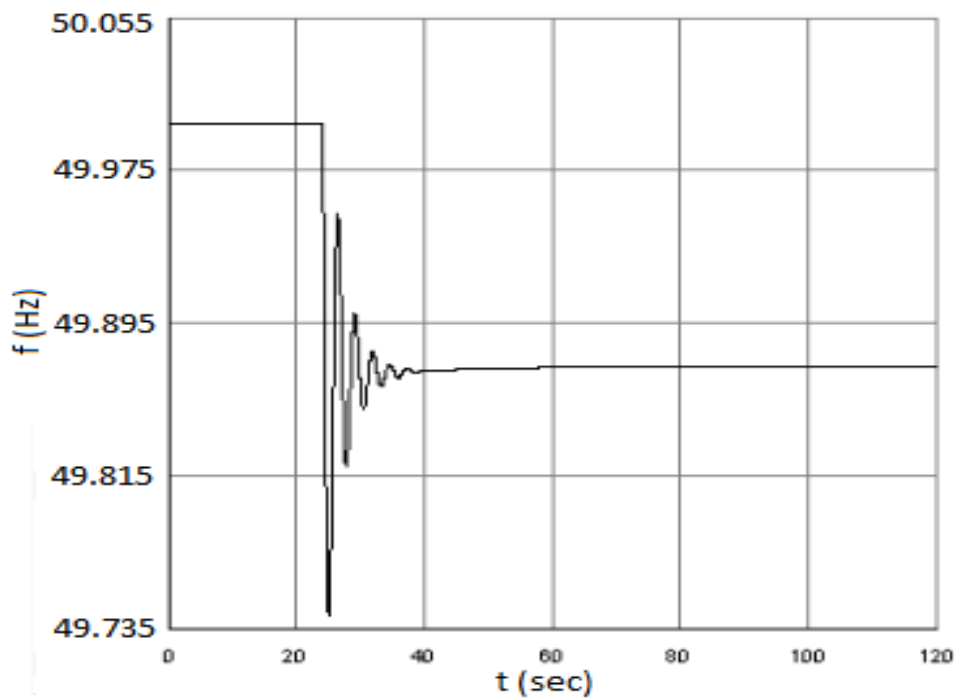
Σχήμα 5.36 Μεταβολή της ενεργού ισχύος για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και pitch deloading.



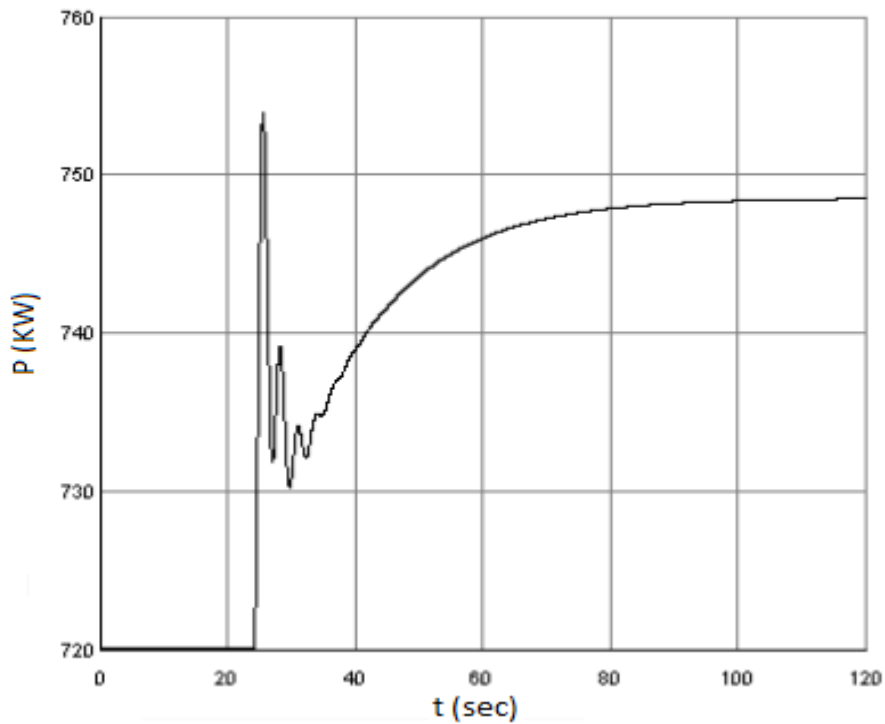
Σχήμα 5.37 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 5.38 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 5.39 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.



Σχήμα 5.40 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

Σενάριο 1

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 1, δηλαδή με ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	49,74365	0,25635	49,86572	0,13428	7,04100
Inertia	49,74366	0,25634	49,86572	0,13428	6,86420
Pitch	49,74365	0,25635	49,87793	0,12207	12,37260
Pitch+inertia	49,75586	0,24414	49,87793	0,12207	12,05700

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,74366	0,25634	49,87794	0,12206	9,76050
R=0.08	49,74365	0,25635	49,87793	0,12207	12,37260
Εφεδρεία= 0.2	49,74366	0,25634	49,87793	0,12207	14,875
Εφεδρεία= 0.1	49,74365	0,25635	49,87793	0,12207	12,37260

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$.

Σενάριο 2

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 1, δηλαδή με ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	49,73144	0,26856	49,86573	0,13427	9,78310
Inertia	49,74411	0,25589	49,86573	0,13427	9,47545
Pitch	49,74365	0,25635	49,86574	0,13426	6,81290
Pitch+inertia	49,75586	0,24414	49,86574	0,13426	6,59530

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,74365	0,25635	49,87793	0,12207	12,13320
R=0.08	49,74365	0,25635	49,86574	0,13426	6,81290
Εφεδρεία= 0.2	49,74365	0,25635	49,86574	0,13426	6,83460
Εφεδρεία= 0.1	49,74365	0,25635	49,86574	0,13426	6,81290

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec.

Σενάριο 3

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 1, δηλαδή με ταχύτητα ανέμου $V_w = 12 \text{ m/sec}$ άνω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	49,73366	0,26634	49,86572	0,13428	12,49280
Inertia	49,74411	0,25589	49,86572	0,13428	12,36310
Pitch	49,74366	0,25634	49,86573	0.13427	9,54380
Pitch+inertia	49,74369	0,25631	49,86573	0.13427	6,91080

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,74367	0,25633	49,86793	0,13207	9,35030
R=0.08	49,74366	0,25634	49,86573	0.13427	9,54380
Εφεδρεία= 0.2	49,73146	0,26854	49,86573	0,13427	9,56550
Εφεδρεία= 0.1	49,74366	0,25634	49,86573	0,13427	9,54380

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12 \text{ m/sec}$.

5.2 Παρατηρήσεις- σχόλια

Παρακάτω παρουσιάζονται παρατηρήσεις και σχόλια σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων που πραγματοποιήθηκαν στο RSCAD και εκτελέστηκαν στο RTDS.

Τα σενάρια είναι παρόμοια με το κεφάλαιο του Simulink. Συγκεκριμένα στο πρώτο σενάριο έχουμε χαμηλή ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ - κάτω της ονομαστικής και συμβαίνει μια αύξηση στο φορτίο κατά 500 KW. Στο δεύτερο σενάριο έχουμε υψηλή ταχύτητα ανέμου - κάτω της ονομαστικής και λαμβάνει χώρα ομοίως μια αύξηση στο φορτίο κατά 500 KW. Τέλος στο τρίτο σενάριο είχαμε ταχύτητα ανέμου $V_w = 12 \text{ m/sec}$ - άνω της ονομαστικής και εκτελέστηκε και εδώ μια αύξηση στο φορτίο κατά 500KW. Η ανεμογεννήτρια και στα τρία σενάρια λειτουργεί με τις τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές. Αναλυτικός σχολιασμός ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

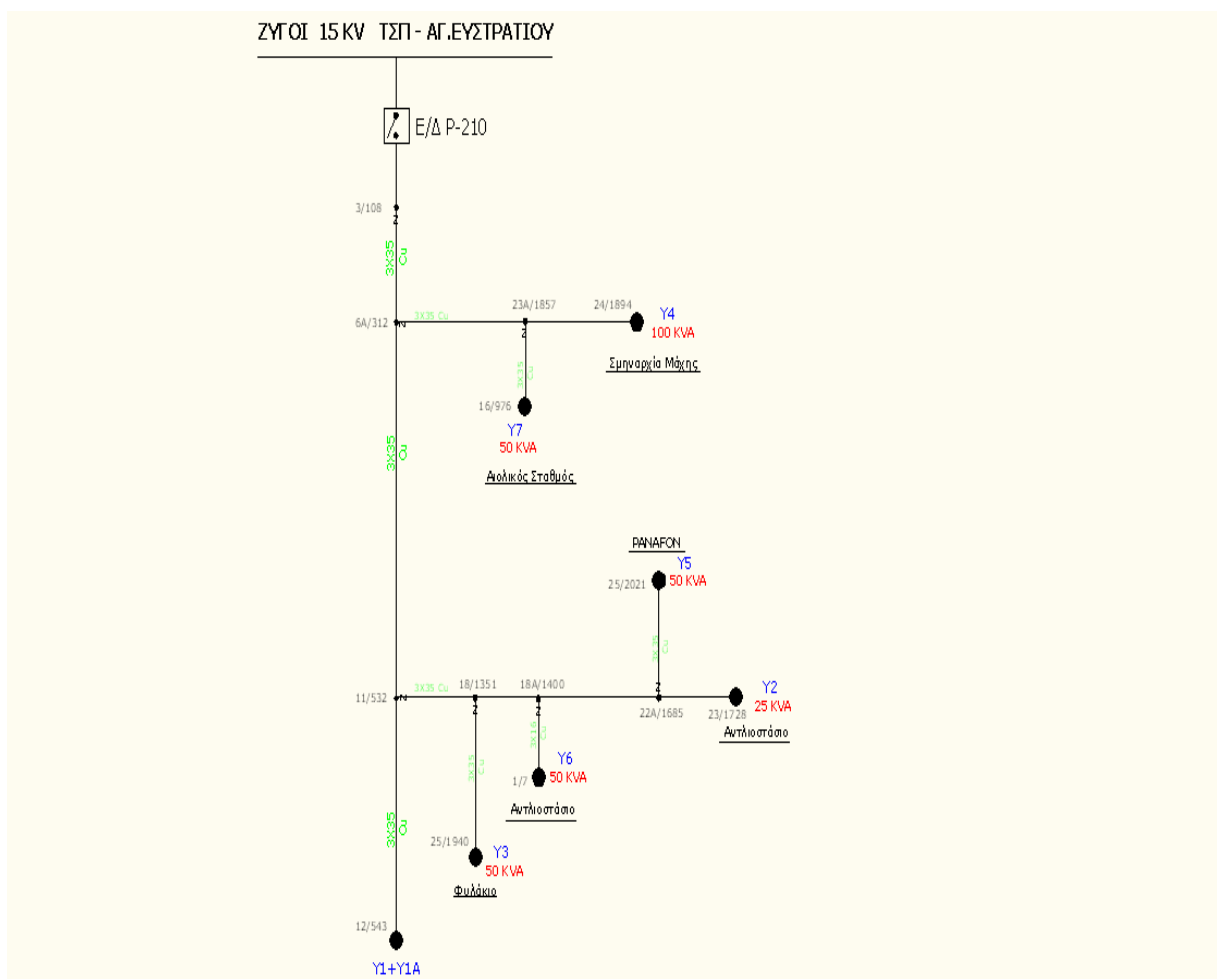
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΑΗ ΣΤΡΑΤΗ

6.1. Εισαγωγή

Τα ίδια σενάρια μελετώνται και στο μικρό και αυτόνομο δίκτυο του Άη Στράτη. Ο Άη Στράτης είναι ένα μικρό ελληνικό νησί, το οποίο διαθέτει ένα μικρό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

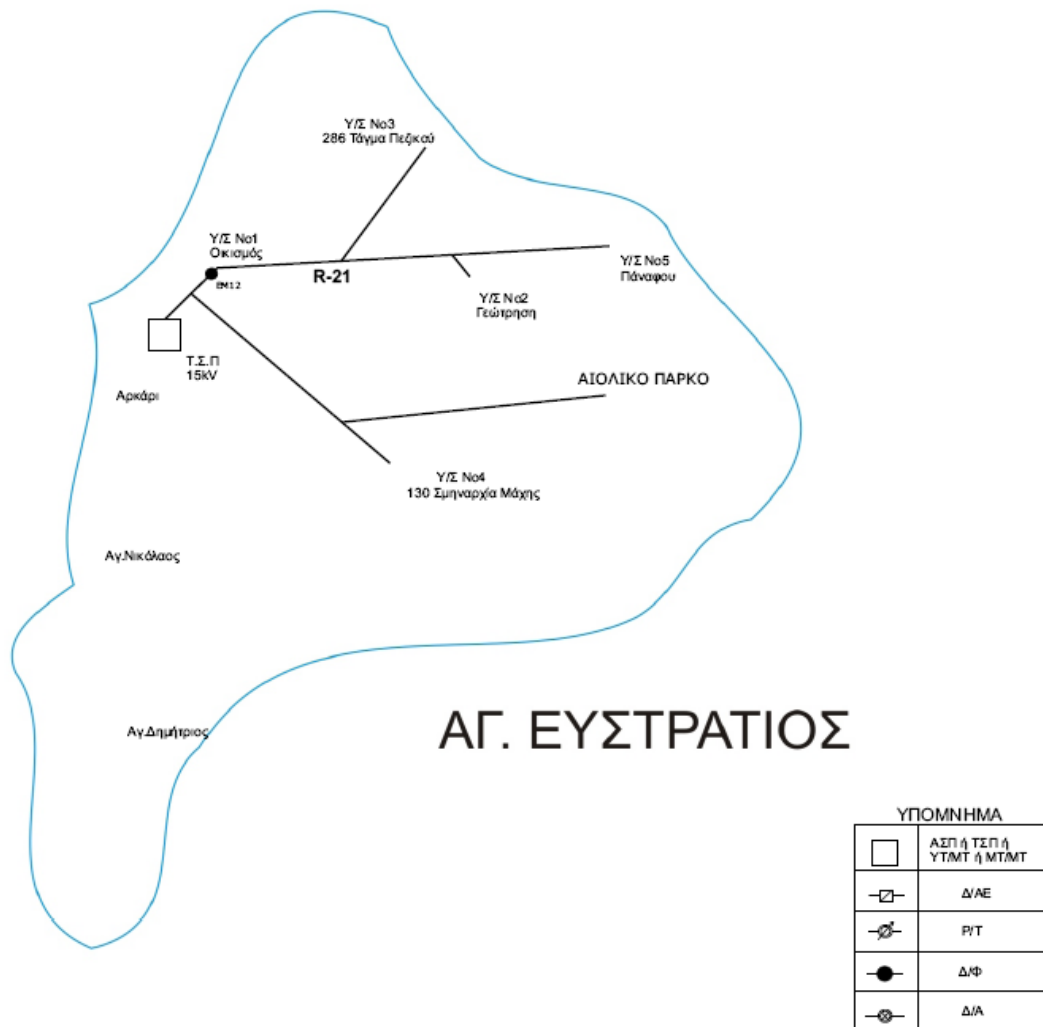
Δίκτυο Άη Στράτη

Το δίκτυο ΜΤ του νησιού είναι αγείωτο. Αποτελείται από μία αναχώρηση των 15 kV από το ζυγό του τοπικού σταθμού παραγωγής(ΤΣΠ). Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου Μέσης Τάσης εικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.1 Μονογραμμικό διάγραμμα της γραμμής των 15kV του Άη Στράτη. [37]

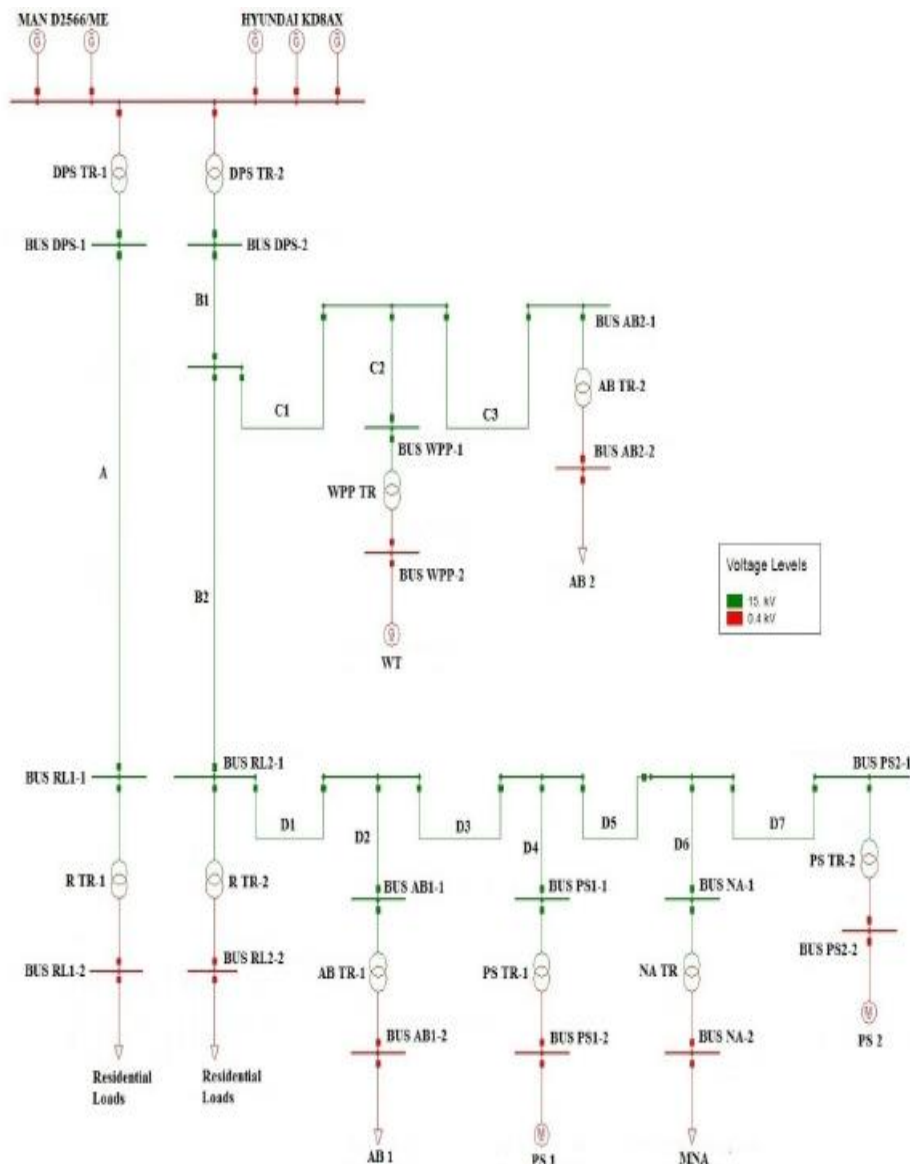
Το τοπογραφικό της σκαρίφημα, το οποίο και είναι ενδεικτικό και προκύπτει από τα στοιχεία της Δ.Ε.Η. φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.2 Τοπογραφικό σκαρίφημα του δικτύου Μέσης Τάσης του Άη Στράτη.

Η γραμμή των 15 KV, πρόκειται για μια εναέρια γραμμή 3x35 Cu, το συνολικό μήκος της οποίας περιλαμβανομένων των διακλαδώσεών της, ανέρχεται σε περίπου 9 km. Η εγκατεστημένη ισχύς Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ του δικτύου είναι 825 kVA και οι μεγαλύτεροι Μ/Σ Διανομής είναι ισχύος 250 kVA. Από πλευράς προστασιών, η γραμμή ΜΤ διαθέτει στην αναχώρηση από τον ΤΣΠ αυτόματο διακόπτη ισχύος με ηλεκτρονόμους υπερέντασης και σύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων γης για αγείωτα συστήματα ΜΤ. Σε όλες τις διακλαδώσεις χρησιμοποιούνται ασφάλειες βραδείας τήξεως. [37]

Πιο αναλυτικά το δίκτυο Μέσης Τάσης του νησιού παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.3 Δίκτυο Μέσης Τάσης του Αη Στράτη.[39]

Τα φορτία συνδέονται στη Χαμηλή Τάση μέσω μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ. Εξαιτίας περιορισμών στο RTDS, όσον αφορά στη μοντελοποίηση του δικτύου, λόγω του μεγέθους του, οι μετασχηματιστές αμελούνται και θεωρείται απευθείας σύνδεση των φορτίων στη Μέση Τάση. Οι συντελεστές ισχύος είναι 0.95 επαγωγικοί, πέρα των δύο αντλιών PS1, PS2, όπου ο συντελεστής ισχύος είναι 0.85 επαγωγικός. Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών που συνδέονται στο ζυγό του τοπικού σταθμού παραγωγής παρουσιάζονται παρακάτω.

Unit	Installation year	Nominal power (kW)	Minimum operation point (kW)	Fuel consumption rate (g/kWh)		
				50%	75%	100%
MAN D2566/ME	1988	90	45	291.9	265.8	263.3
HYUNDAI KD8AX	2008	220	110	250.7	240.3	242.8

Πίνακας 6.1 Χαρακτηριστικά των diesel γεννητριών του Άη Στράτη.

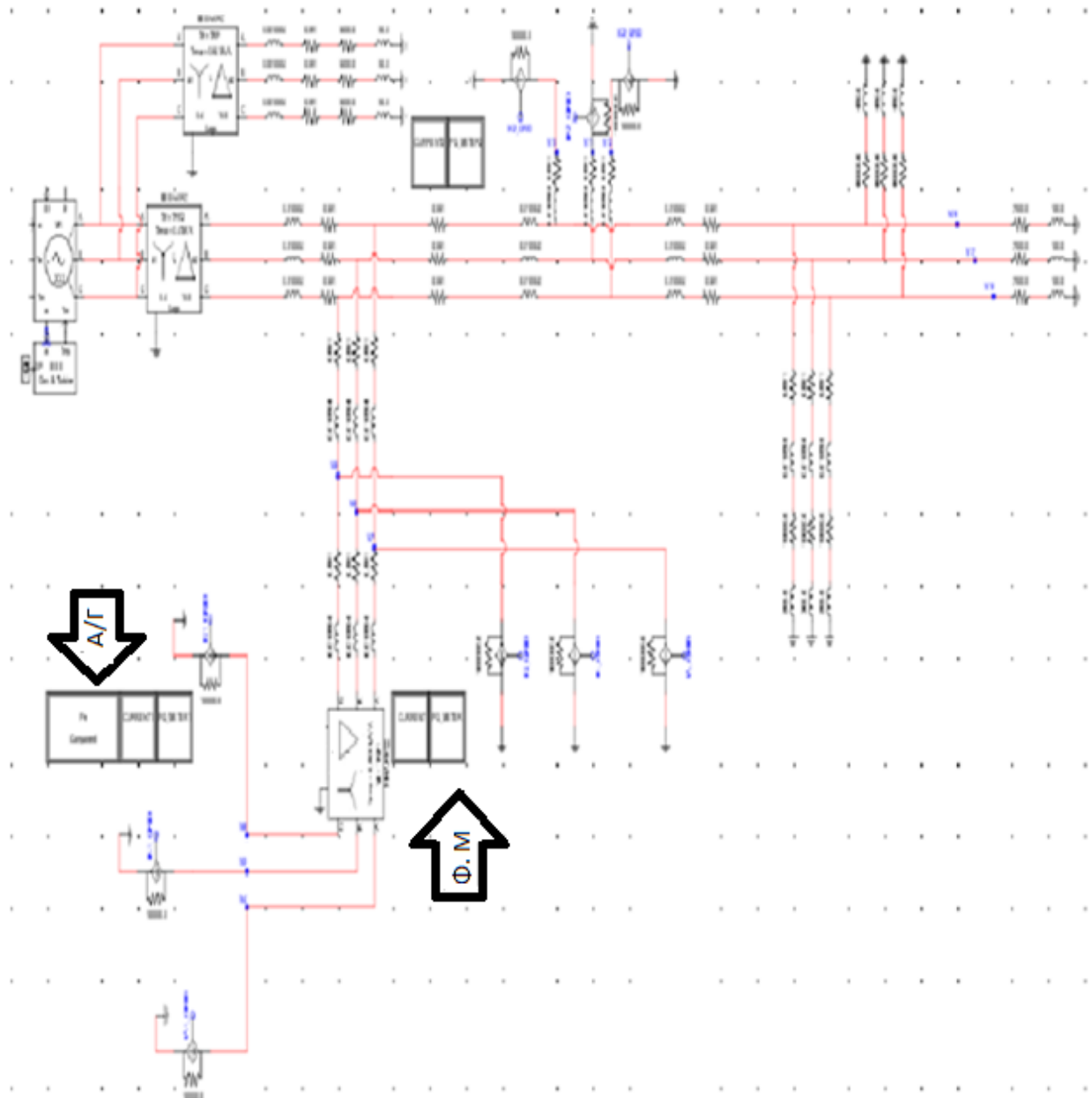
Δηλαδή χρησιμοποιούνται 2 γεννήτριες τύπου MAN D2566/ME με ονομαστική ισχύ 90KW και 3 γεννήτριες τύπου HYUNDAI KD8AX με ονομαστική ισχύ 220KW. Προς χάριν απλούστευσης και λόγω τεχνικών δυσκολιών κατά τη διάρκεια της επίλυσης στο προγραμματιστικό περιβάλλον του RSCAD, δεν μοντελοποιήθηκαν και οι πέντε διαφορετικές γεννήτριες, αλλά θεωρήθηκε μια σύγχρονη γεννήτρια με ονομαστική ισχύ ίση με την συνολική ισχύ των πέντε διαφορετικών γεννητριών, δηλαδή με μια σύγχρονη γεννήτρια με ονομαστική ισχύ 840KW. Η ανεμογεννήτρια θεωρήθηκε ότι είναι ονομαστικής ισχύος 200 KW. Από τον τοπικό σταθμό παραγωγής αναχωρούν δύο γραμμές Μέσης Τάσης μέσω δύο μετασχηματιστών. Ο ένας είναι ονομαστικής ισχύος 630 KVA και ο άλλος 400 KVA.

Τα χαρακτηριστικά της γραμμής της Μέσης Τάσης είναι $R= 0.591 \Omega/\text{Km}$ και $X = 0.393 \Omega/\text{Km}$, καθώς μιλάμε για γραμμή Cu 3 x35. Οι τιμές των φορτίων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Load type	August High demand (kW)	August Average demand (kW)	August Low demand (kW)	January Average demand (kW)	January Low demand (kW)
Load 1	40	23	13	8	4
Load 2	30	17	10	6	3
Load 3	35	20	11	7	3.5
Load 4	25	14.4	8	5	2.5
Load 5	20	11.5	7	4	2
Load 6	25	14.5	8	5	2.5
Load 7	25	14.5	8	5	2.5
Load 8	20	9.7	5	3	1.6
Load 9	12.5	6	4	2	1
Load 10	25	12.1	7	4	2
Load 11	25	12.1	7	4	2
PS1	15	15	15	15	15
PS2	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
AB1	20	17.5	15	12.5	12.5
AB2	30	25	20	17.5	17.5
MNA	5	5	5	5	5

Πίνακας 6.2 Χαρακτηριστικά φορτίων του δικτύου του Άη Στράτη. [39]

Η μοντελοποίηση του δικτύου στο RSCAD παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 6.4 Μοντελοποίηση στο RSCAD του δικτύου Μέσης Τάσης του Άη Στράτη.

6.2 Αποτελέσματα

Τα σενάρια που μελετήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω

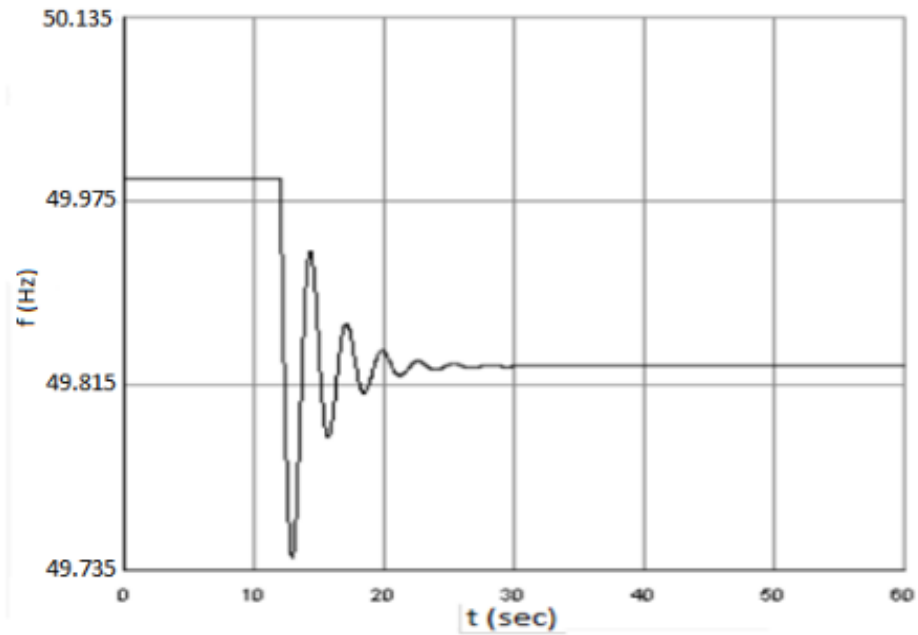
Σενάριο 1

- Ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec.
- Φορτίο Μεταβολής = 55 KW.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L = 55$ KW.
- Στατισμός σύγχρονης γεννήτριας $R = 0.05$.
- Σταθερά αδρανείας σύγχρονης γεννήτριας $H = 3.2$ sec.
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου ανεμογεννήτριας $V_w = 11.21417$ m/sec.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R = 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ είναι $H = 4$ sec.

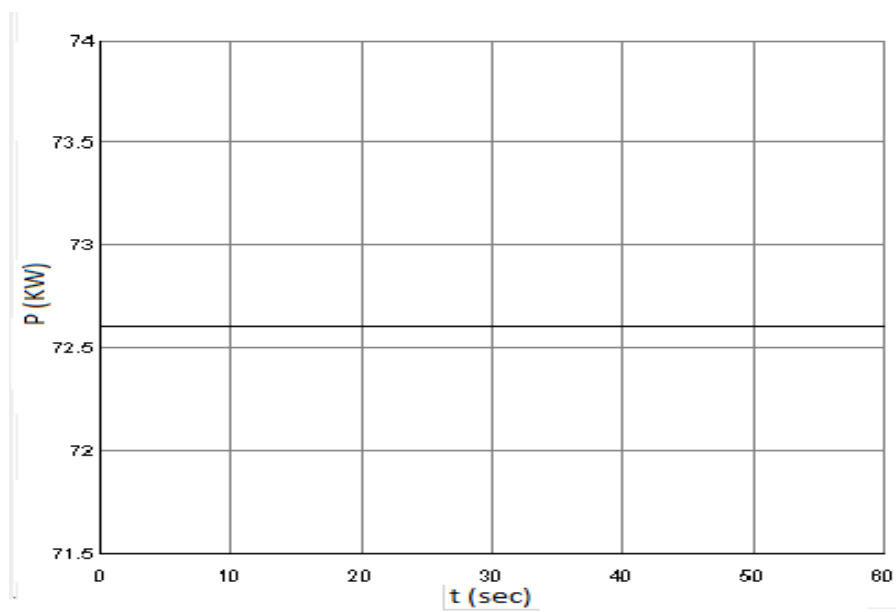
Σενάριο 2

- Ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec.
- Φορτίο Μεταβολής = 150 KW.
- Αύξηση φορτίου $\Delta L = 55$ KW.
- Στατισμός σύγχρονης γεννήτριας $R = 0.05$.
- Σταθερά αδρανείας σύγχρονης γεννήτριας $H = 3.2$ sec.
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου ανεμογεννήτριας $V_w = 11.21417$ m/sec.
- Στατισμός ανεμογεννήτριας στη λειτουργία pitch deloading $R = 0.08$.
- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 90% της διαθέσιμης ισχύος της στη λειτουργία pitch deloading.
- Στην περίπτωση του pitch deloading εξετάζονται και οι περιπτώσεις, όπου η τιμή του στατισμού είναι $R = 0.05$ και η περίπτωση που η ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της διαθέσιμης ισχύος.
- Στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης η σταθερά αδρανείας της Α/Γ είναι $H = 4$ sec.

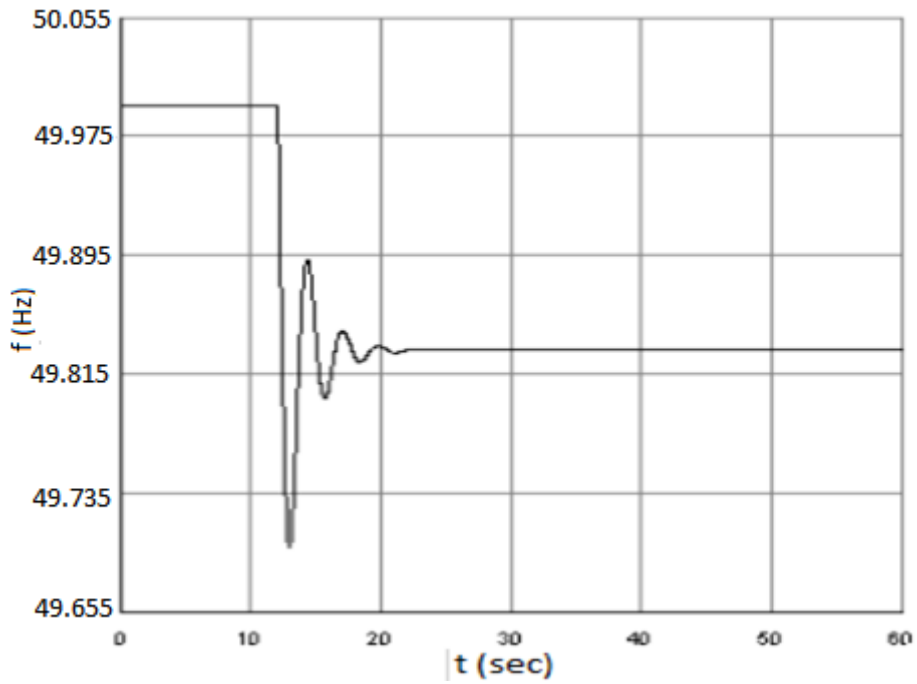
Σενάριο 1



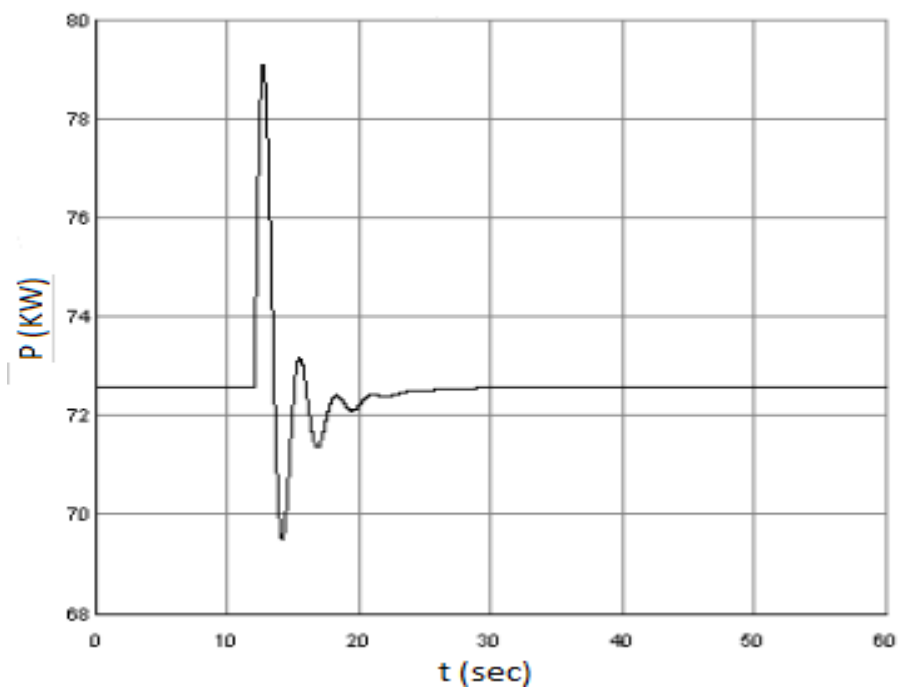
Σχήμα 6.5 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



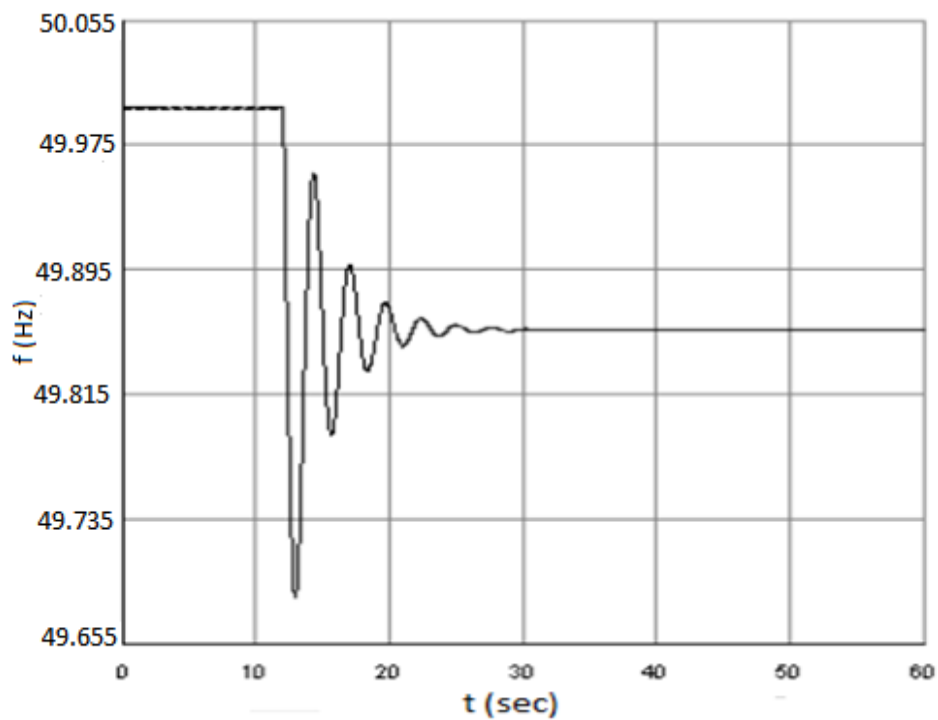
Σχήμα 6.6 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



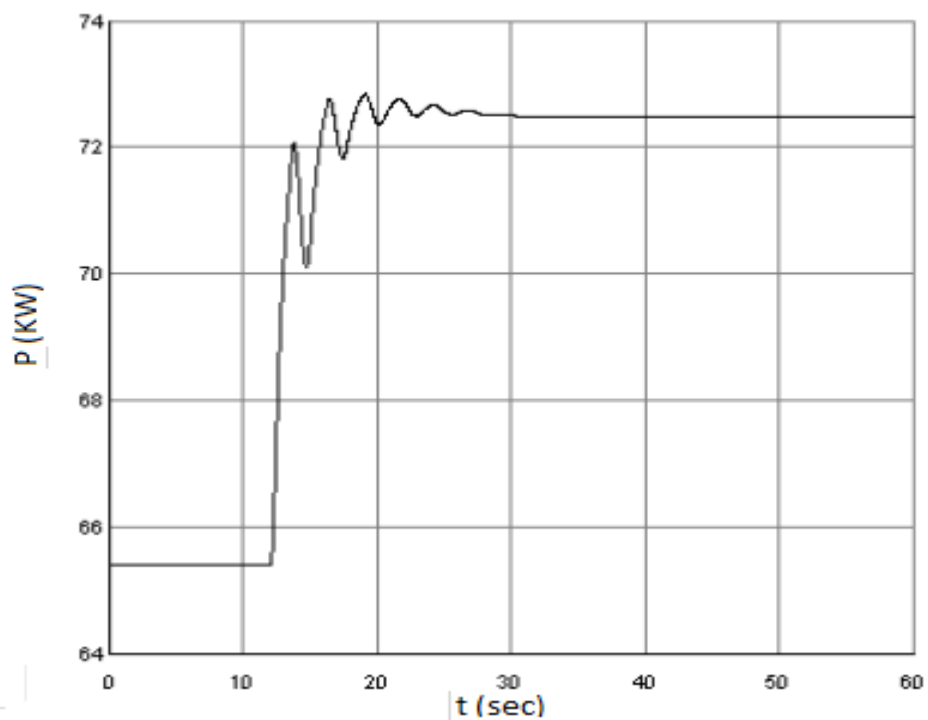
Σχήμα 6.7 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



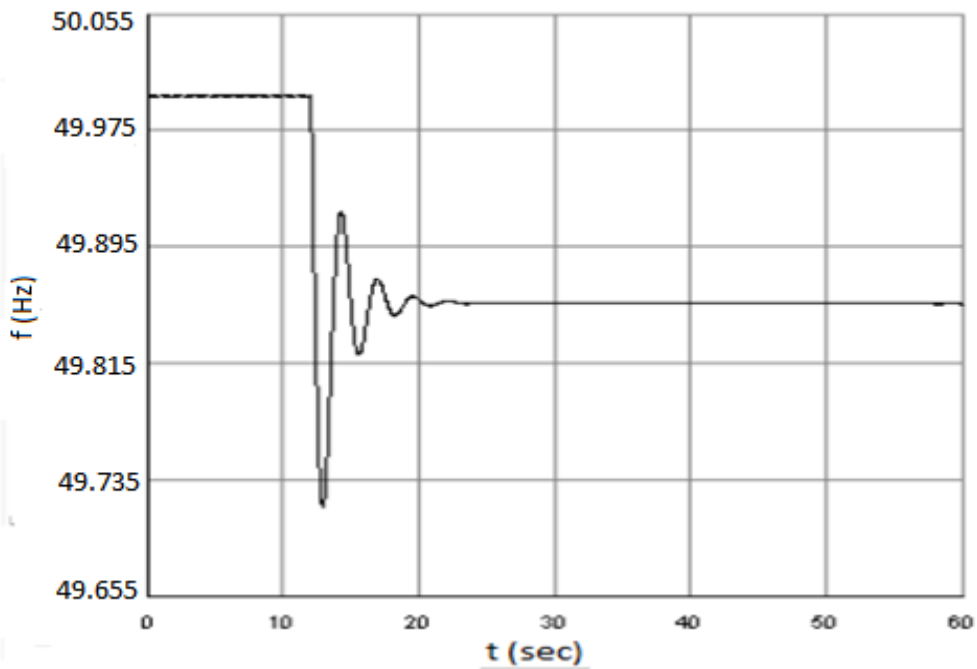
Σχήμα 6.8 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



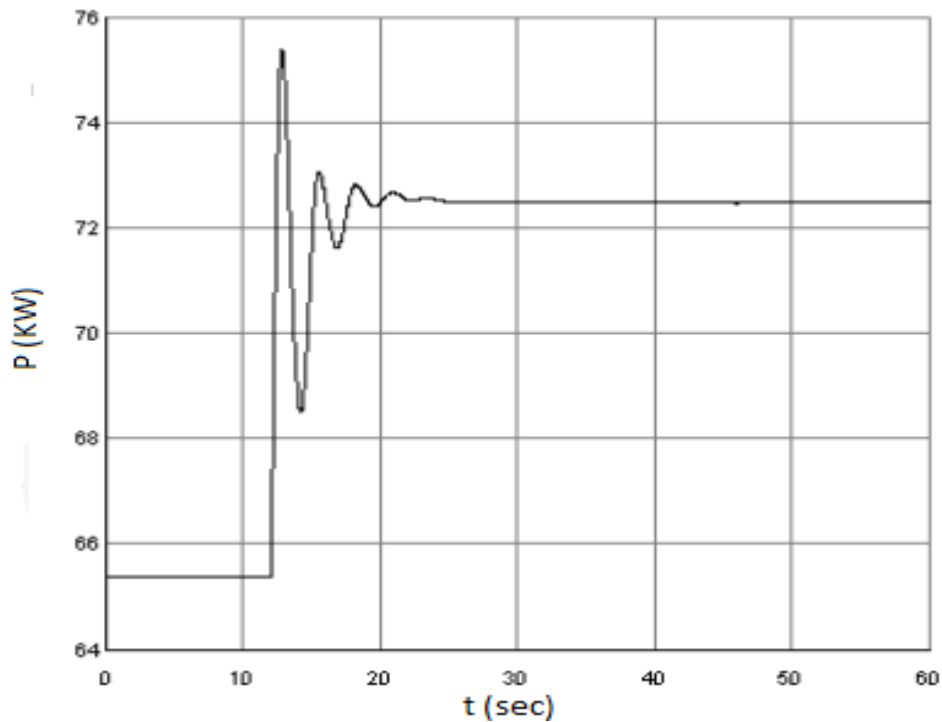
Σχήμα 6.9 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



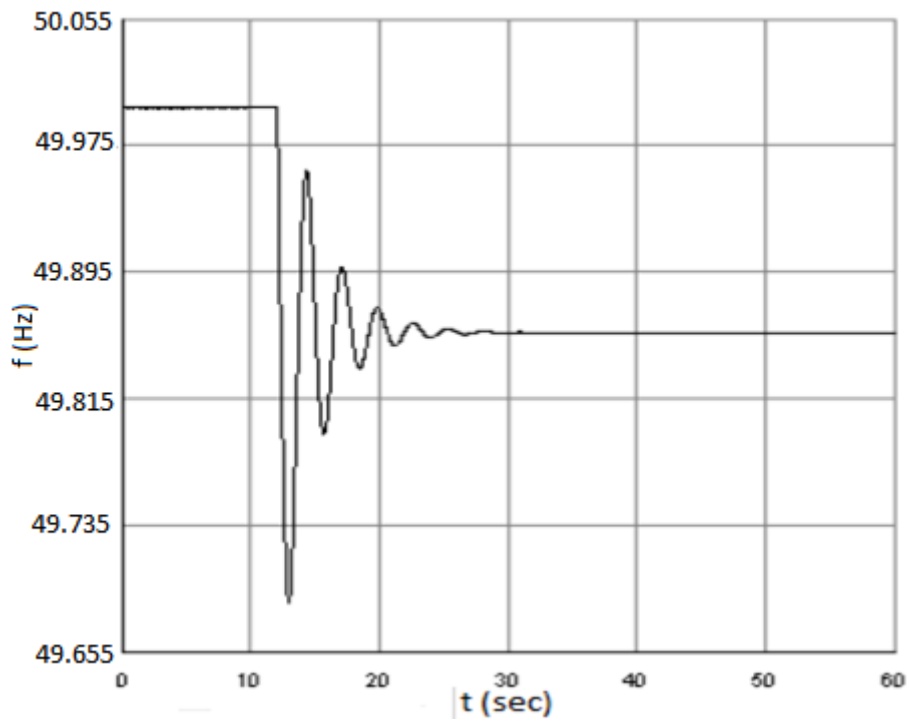
Σχήμα 6.10 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



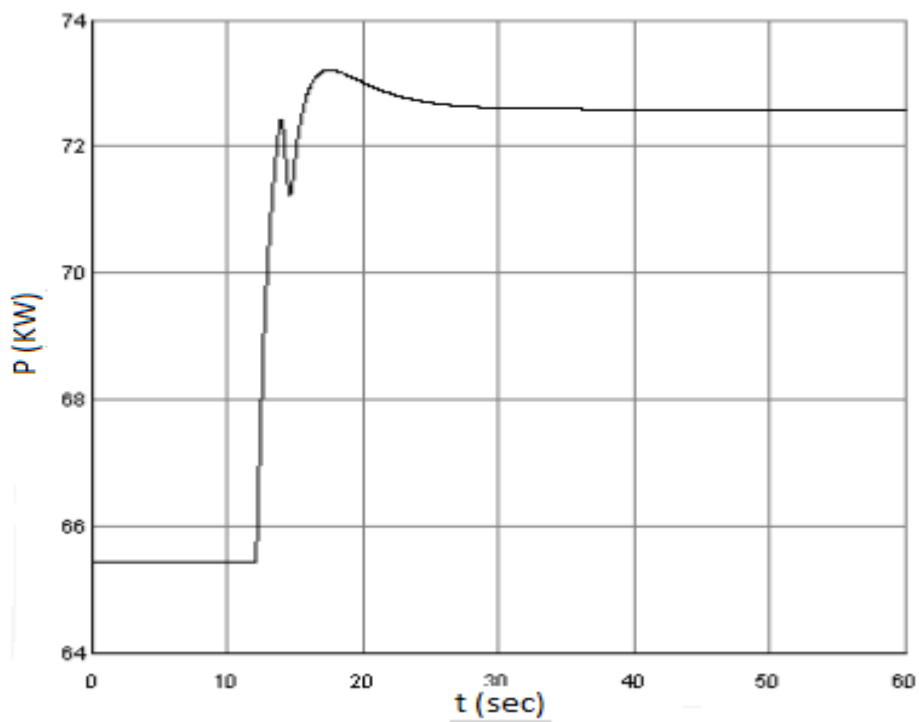
Σχήμα 6.11 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και pitch deloading.



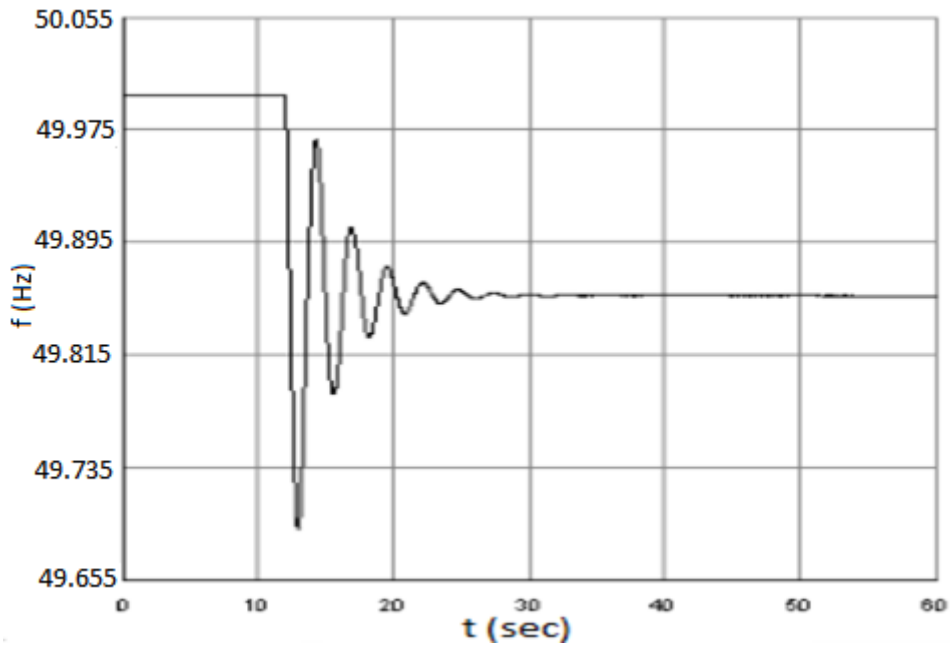
Σχήμα 6.12 Μεταβολή της ενεργού ισχύος για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και συνδυασμό των λειτουργιών της αδρανειακής απόκρισης και pitch deloading.



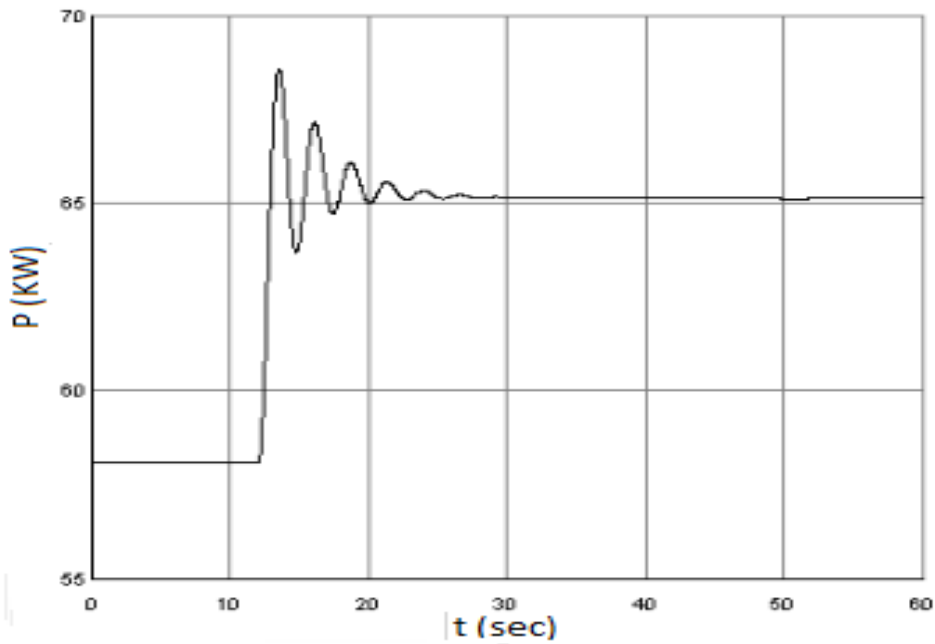
Σχήμα 6.13 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 6.14 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.

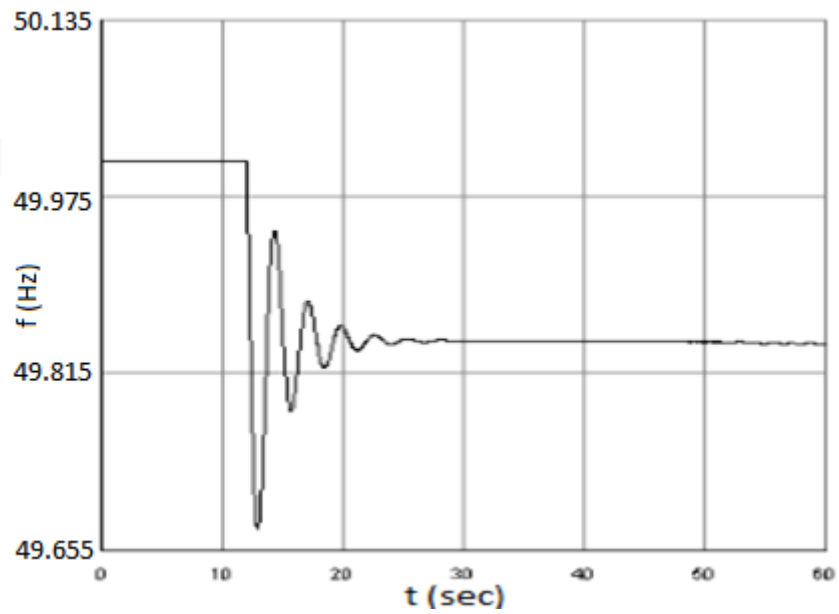


Σχήμα 6.15 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

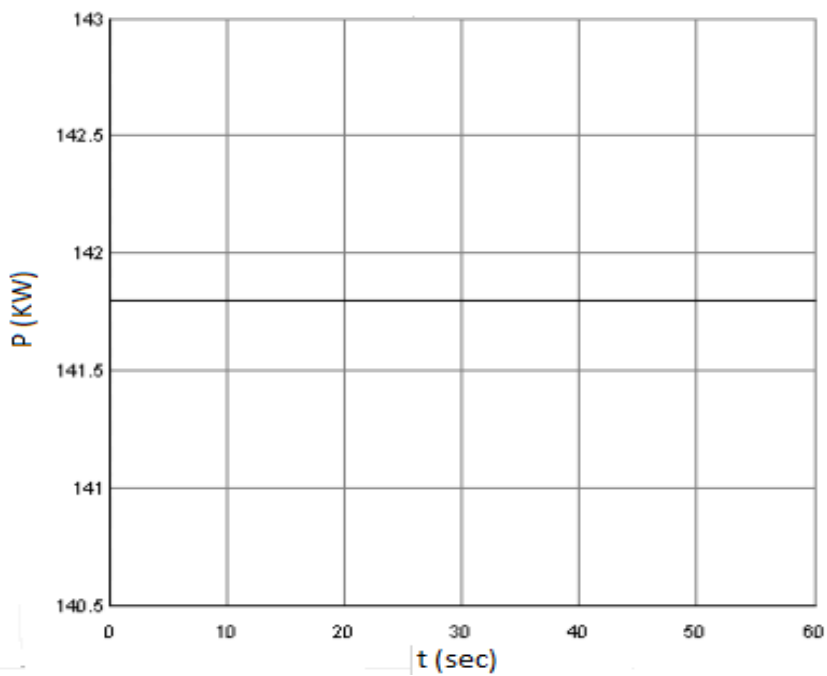


Σχήμα 6.16 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

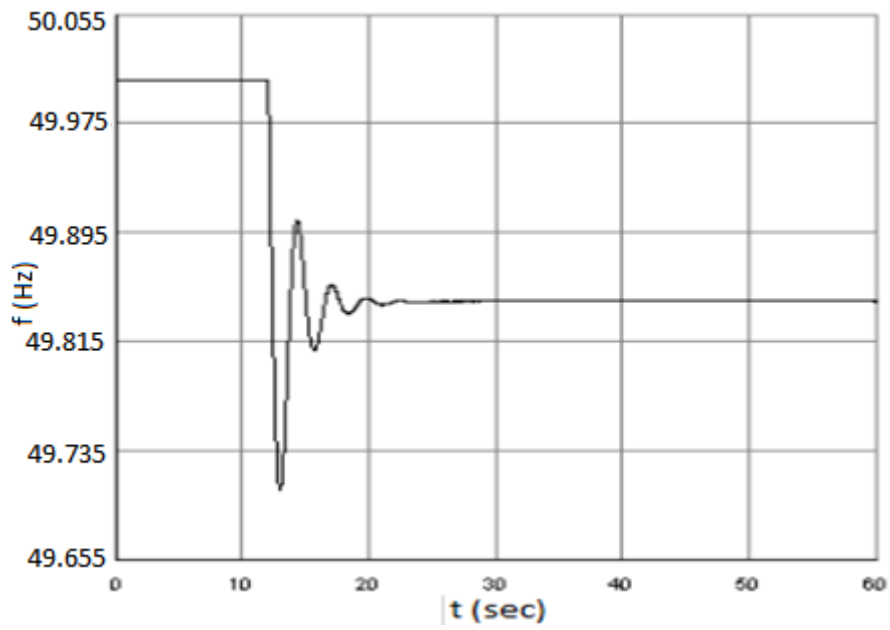
Σενάριο 2



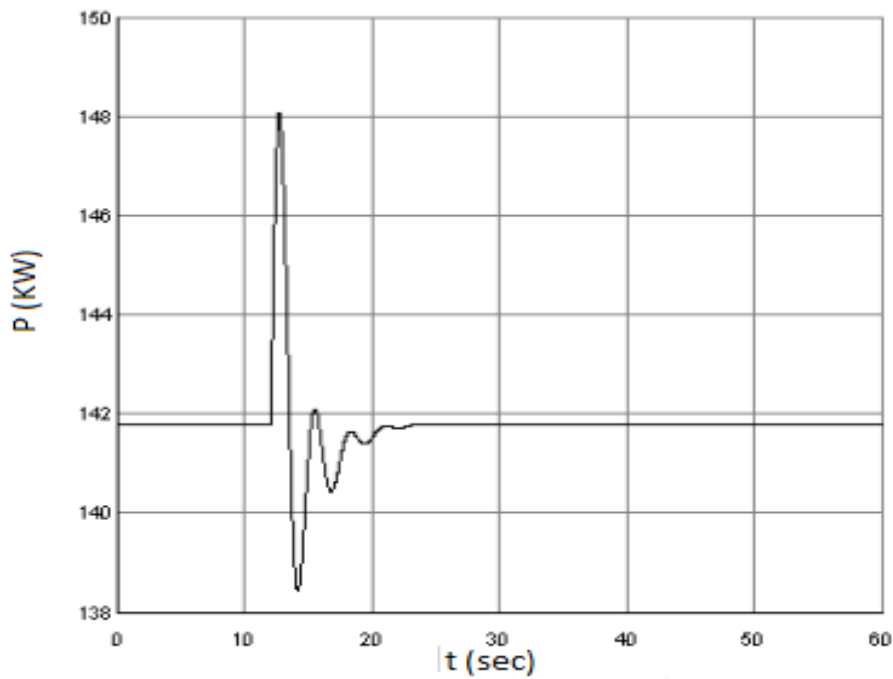
Σχήμα 6.17 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



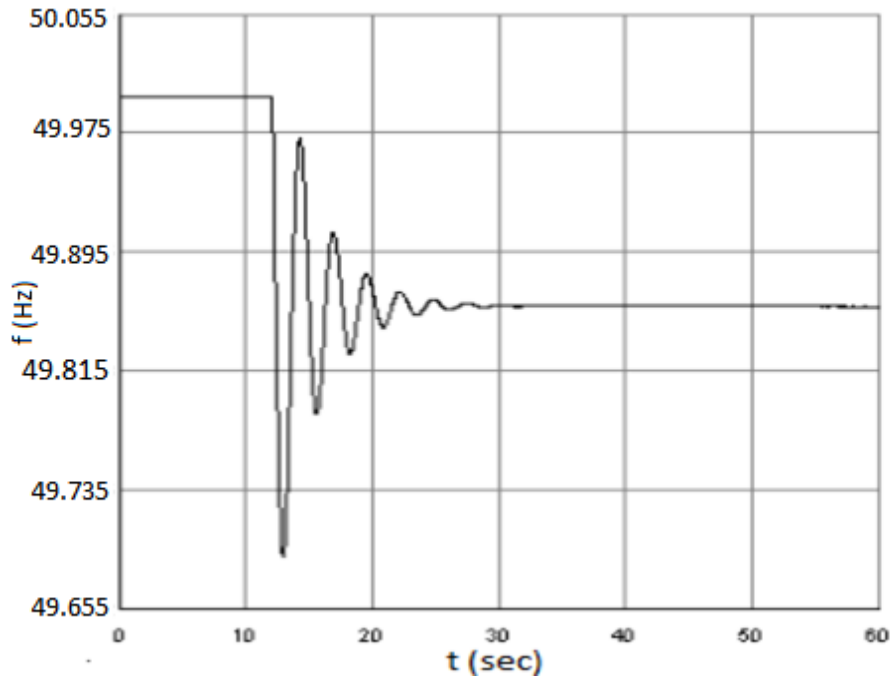
Σχήμα 6.18 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για κλασική λειτουργία.



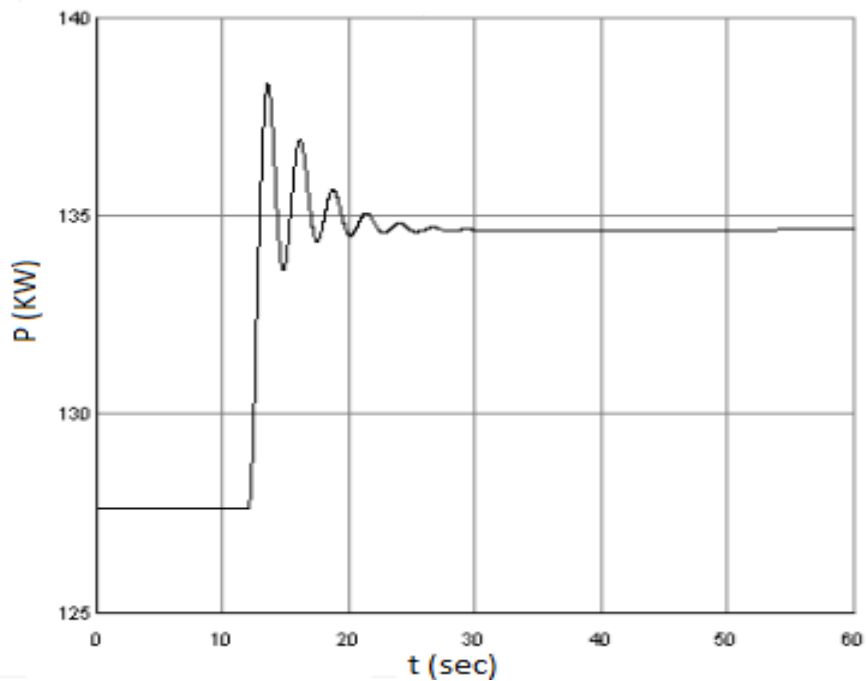
Σχήμα 6.19 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



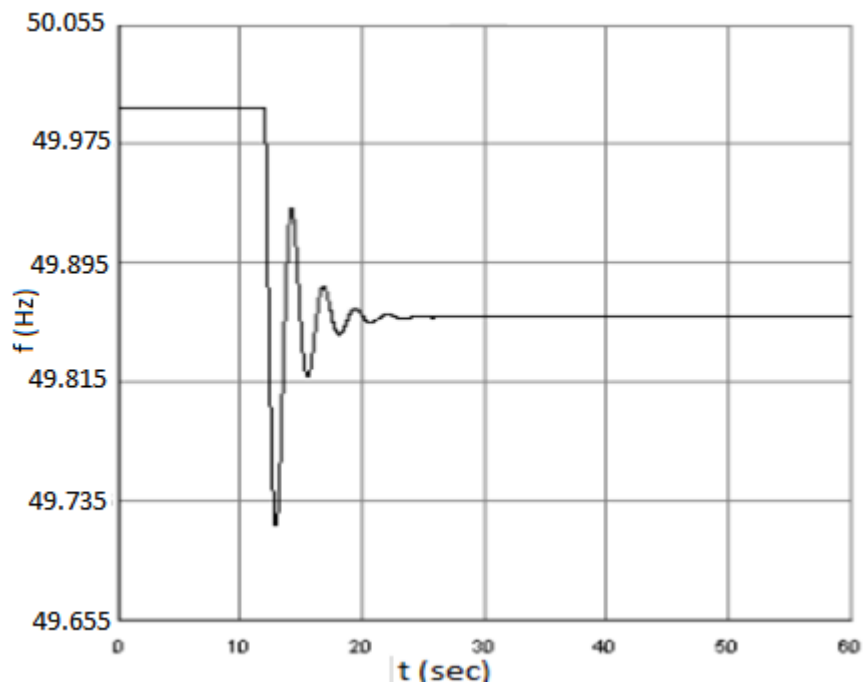
Σχήμα 6.20 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία αδρανειακής απόκρισης.



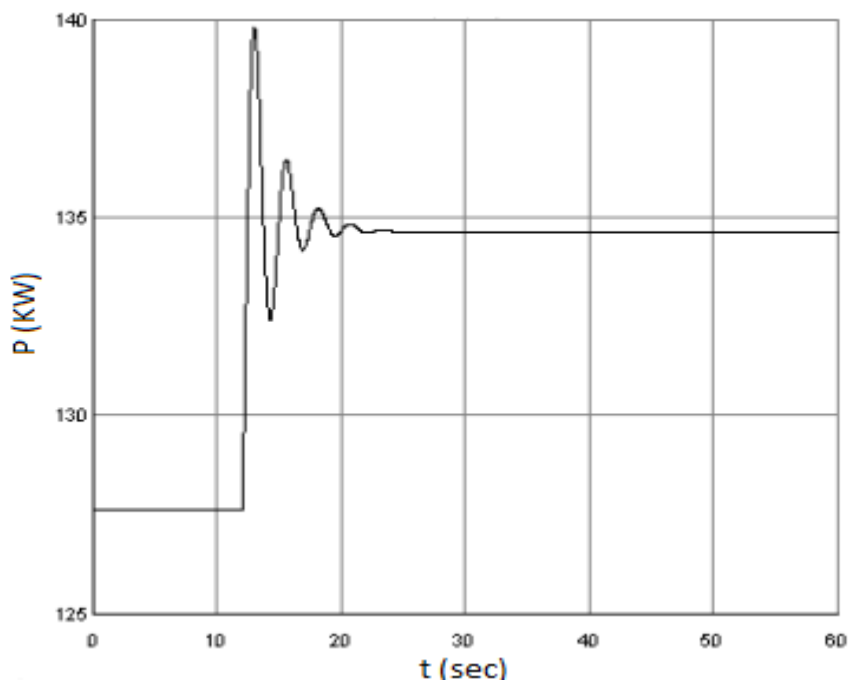
Σχήμα 6.21 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



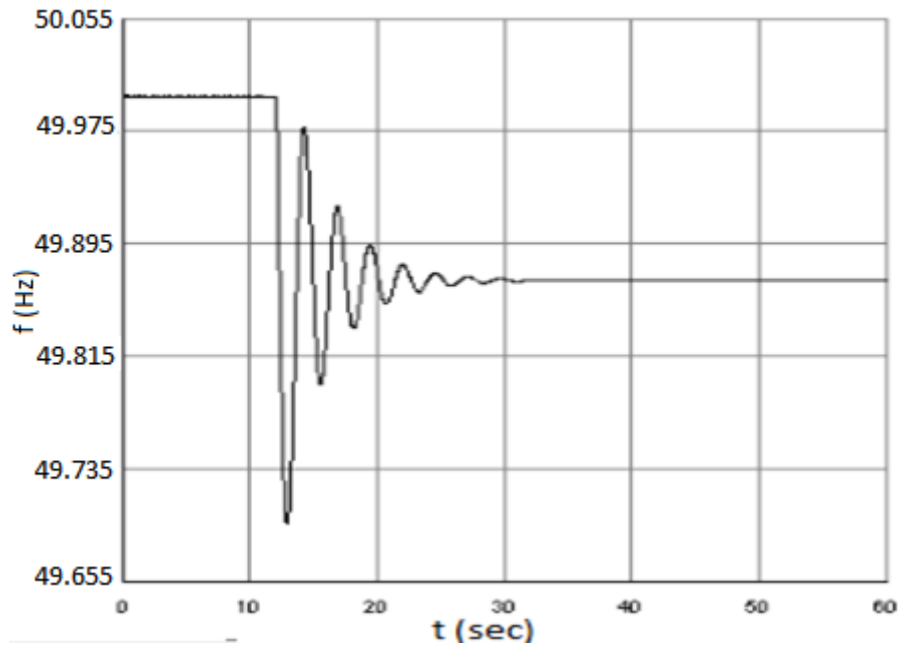
Σχήμα 6.22 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading.



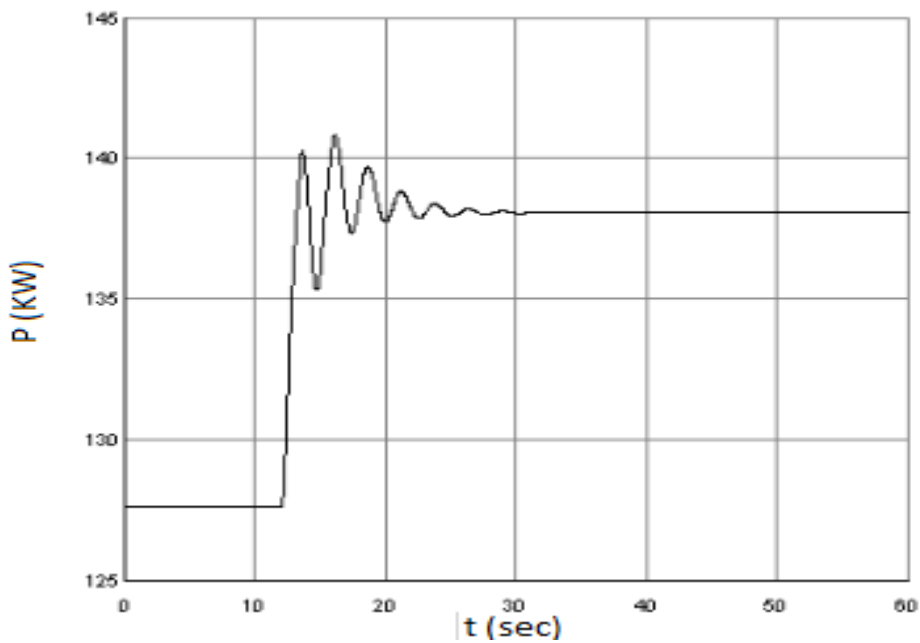
Σχήμα 6.23 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών αδρανειακής απόκρισης και pitch deloading.



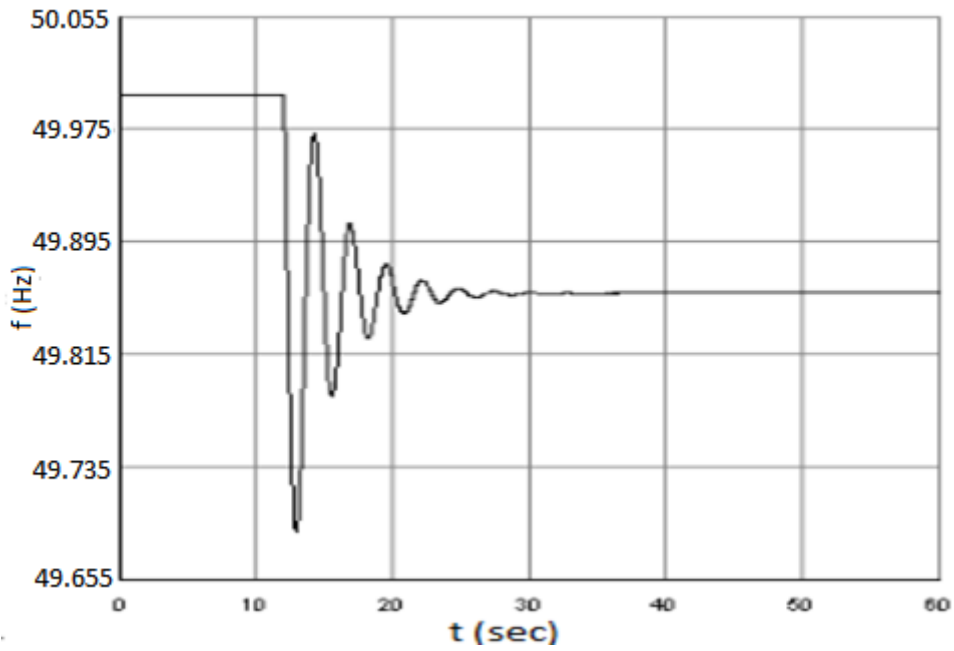
Σχήμα 6.24 Μεταβολή της ενεργού ισχύος για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για συνδυασμό των λειτουργιών αδρανειακής απόκρισης και pitch deloading.



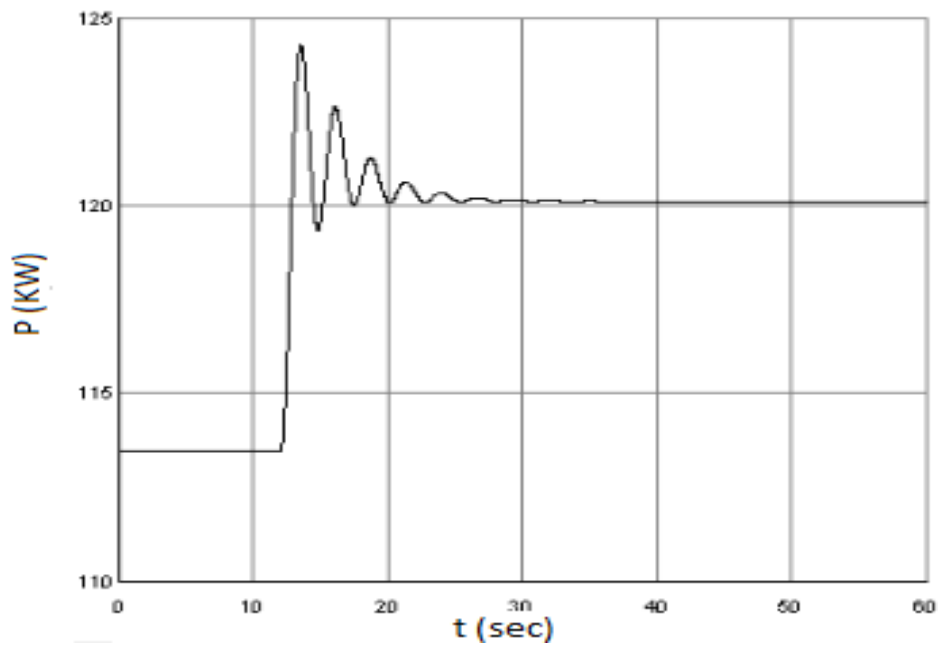
Σχήμα 6.25 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 6.26 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για διαφορετική τιμή στατισμού ($R = 0.05$) για την Α/Γ.



Σχήμα 6.27 Μεταβολή της συχνότητας του δικτύου για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.



Σχήμα 6.28 Μεταβολή της ενεργού ισχύος της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec και για λειτουργία pitch deloading και για εφεδρεία 0.2 για την Α/Γ.

Σενάριο 1

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 1, δηλαδή με ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$ - κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	49,68265	0,31735	49,84133	0,15867	9,29630
Inertia	49,70706	0,29294	49,84133	0,15867	6,43490
Pitch	49,69482	0,30518	49,86572	0,13428	9,43010
Pitch+inertia	49,70704	0,29296	49,86572	0,13428	6,60770

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,69484	0,30516	49,86574	0,13426	9,50750
R=0.08	49,69482	0,30518	49,86572	0,13428	9,43010
Εφεδρεία= 0.2	49,69483	0.26857	49,86573	0,13427	11,59970
Εφεδρεία= 0.1	49,69482	0,30518	49,86572	0,13428	9,43010

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8 \text{ m/sec}$

Σενάριο 2

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο σενάριο 2, δηλαδή με ταχύτητα ανέμου $V_w = 10 \text{ m/sec}$ - κάτω της ονομαστικής, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
Classic	49,65815	0,34185	49,82908	0,17092	6,99170
Inertia	49,70700	0,29300	49,82908	0,17092	4,05380
Pitch	49,69482	0,30518	49,86571	0,13429	11,58050
Pitch+inertia	49,71925	0,28075	49,86571	0,13427	6,51170

pitch	f_{\min} (Hz)	Δf_{\min} (Hz)	f_f (Hz)	Δf_f (Hz)	T(sec)
R=0.05	49,70704	0,29296	49,87793	0,12207	11,64410
R=0.08	49,69482	0,30518	49,86571	0,13429	11,58050
Εφεδρεία= 0.2	49,69483	0.26857	49,86571	0,13429	11,59970
Εφεδρεία= 0.1	49,69482	0,30518	49,86571	0,13429	11,58050

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα περιπτώσεων για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10 \text{ m/sec}$.

6.3 Παρατηρήσεις – σχόλια

Παρακάτω παρουσιάζονται παρατηρήσεις και σχόλια σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων που εκτελέστηκαν στο μικρό αυτόνομο δίκτυο και στο δίκτυο M/T του Άη Στράτη. Στο μικρό αυτόνομο δίκτυο εκτελέστηκαν τρία σενάκια. Ένα για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec - κάτω της ονομαστικής, ένα για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec – κάτω της ονομαστικής και ένα για ταχύτητα ανέμου $V_w = 12$ m/sec – άνω της ονομαστικής. Η μεταβολή του φορτίου ήταν μια αύξηση των 500 KW. Στο δίκτυο του Άη Στράτη εκτελέστηκαν δύο σενάκια. Ένα για ταχύτητα ανέμου $V_w = 8$ m/sec και ένα δεύτερο για ταχύτητα ανέμου $V_w = 10$ m/sec. Η μεταβολή του φορτίου που έγινε ήταν μια αύξηση 55 KW. Η ανεμογεννήτρια συμμετείχε και εδώ και με τις τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας που είδαμε.

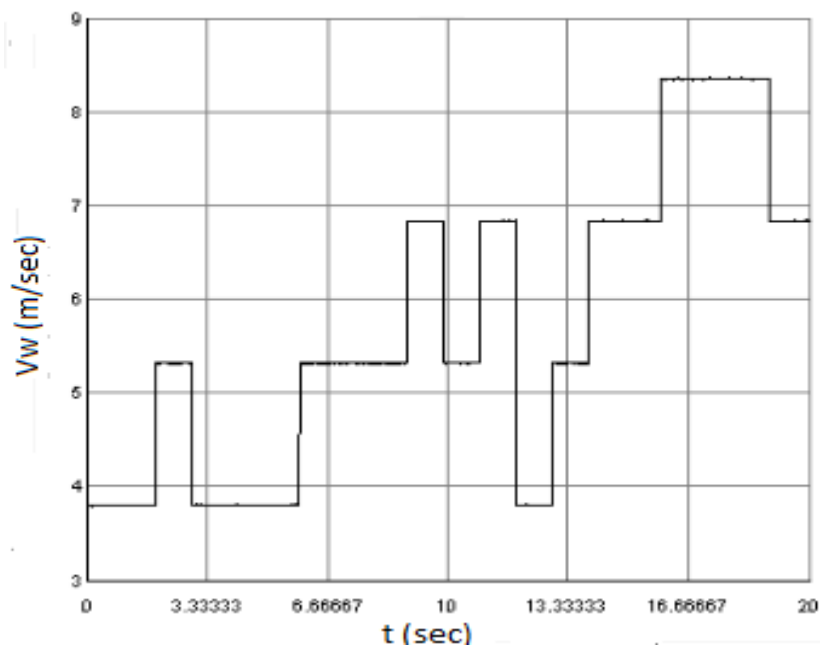
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια και στα δύο δίκτυα. Συγκεκριμένα, παρατηρώντας τα αποτελέσματα για τον Άη Στράτη παρατηρούμε ότι η μέγιστη βύθιση βελτιώνεται αισθητά στην περίπτωση της αδρανειακής απόκρισης. Συγκεκριμένα υπάρχει στο σενάριο 1 μια μείωση της βύθισης της τάξης του 7.7% και στο δεύτερο σενάριο μια μείωση της βύθισης της τάξης του 14,2%. Η τιμή της μόνιμης κατάστασης όπως ήταν αναμενόμενο παραμένει η ίδια με την κλασική λειτουργία, αφού όπως περιεγράφηκε η αδρανειακή απόκριση συμμετέχει μεταβατικά. Στην περίπτωση της λειτουργίας με pitch deloading παρατηρούμε, ότι η βελτίωση της τιμής της μέγιστης βύθισης της συχνότητας είναι ελαφρώς καλύτερη σε σχέση με την κλασική λειτουργία, αλλά χειρότερη σε σχέση με την αδρανειακή απόκριση. Παρ' όλα αυτά η τιμή της μόνιμης κατάστασης είναι σαφώς βελτιωμένη σε σχέση με τη κλασική λειτουργία. Έτσι έχουμε μια μείωση του μόνιμου σφάλματος κατά 15,4% στο πρώτο σενάριο και μια μείωση του μόνιμου σφάλματος κατά 21,4% στο δεύτερο σενάριο. Αυτό είναι φυσιολογικό, αφού πια η ανεμογεννήτρια διαθέτει τιμή στατισμού και άρα συμμετέχει επί της ουσίας στη ρύθμιση της συχνότητας. Στην περίπτωση της συνδυασμένης λειτουργίας παρατηρούμε ότι η τιμή της μέγιστης βύθισης είναι καλύτερη σε σχέση με όλες τις περιπτώσεις, όπως και αναμενόταν. Η τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας, όπως είναι φυσιολογικό παραμένει η ίδια με την περίπτωση στρατηγικής λειτουργίας pitch deloading. Ακόμα υλοποιήθηκε η συμμετοχή της ανεμογεννήτριας με διαφορετικές τιμές στατισμού. Συγκεκριμένα με τιμή στατισμού $R = 0.08$ και $R = 0.05$. Στη δεύτερη περίπτωση η ανεμογεννήτρια συμμετέχει πιο ενεργά στη ρύθμιση της συχνότητας, καθώς έχει μικρότερη τιμή στατισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρή βελτίωση της μέγιστης τιμής βύθισης της συχνότητας καθώς και τη βελτίωση της τιμής της μόνιμης κατάστασης, καθώς η ανεμογεννήτρια αναλαμβάνει να προσφέρει περισσότερη ενεργό ισχύ στο σύστημα. Επίσης μελετήθηκε η περίπτωση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με pitch deloading με διαφορετικές τιμές εφεδρείας. Δηλαδή η ανεμογεννήτρια στην πρώτη περίπτωση και σύμφωνα με την οποία μοντελοποιήθηκαν όλες οι περιπτώσεις λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με στρατηγική λειτουργίας pitch deloading, αποδίδει το 90% της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος της. Στη δεύτερη περίπτωση, η

ανεμογεννήτρια αποδίδει το 80% της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος της. Όπως είναι λογικό, μεγαλύτερο περιθώριο απόδοσης ισχύος έχει θετικότερα αποτελέσματα στη μέγιστη βύθιση της συχνότητας, αλλά και στη τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας. Πράγματι αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα, όπου βλέπουμε πως η τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας είναι ελαφρώς βελτιωμένη στην περίπτωση μεγαλύτερης εφεδρείας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟΥ

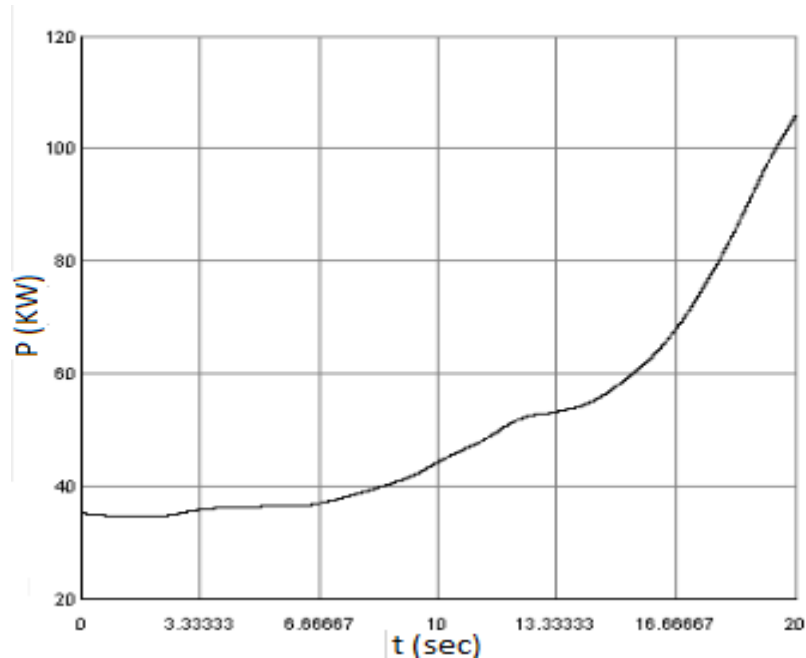
Κρίθηκε ωφέλιμη η χρησιμοποίηση ενός ανεμομέτρου, ώστε με τη βοήθεια του RTDS να υπάρξει πραγματική ταχύτητα ανέμου, η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στα μοντέλα που υλοποιήθηκαν. Στην παρούσα εργασία περιοριστήκαμε απλά, να πραγματοποιήσουμε τη διαδικασία και ενδεικτικά θεωρήσαμε μια περίπτωση στο μικρό δίκτυο, που μελετήθηκε σε παραπάνω κεφάλαιο, όπου η Α/Γ λειτουργεί με τον κλασικό τρόπο, δηλαδή δε συμμετέχει καθόλου στη ρύθμιση της συχνότητας. Περιοριστήκαμε δηλαδή στο να παρατηρήσουμε τη διακύμανση που προκαλούν στη συχνότητα του δικτύου, οι μεταβολές της ταχύτητας ανέμου.

Παρακάτω φαίνεται χαρακτηριστικά ένα στιγμιότυπο της ταχύτητας ανέμου, όπως αυτή προέκυπτε από το ανεμόμετρο, το οποίο ήταν συνδεδεμένο και άρα κατέγραφε πραγματική ταχύτητα ανέμου.



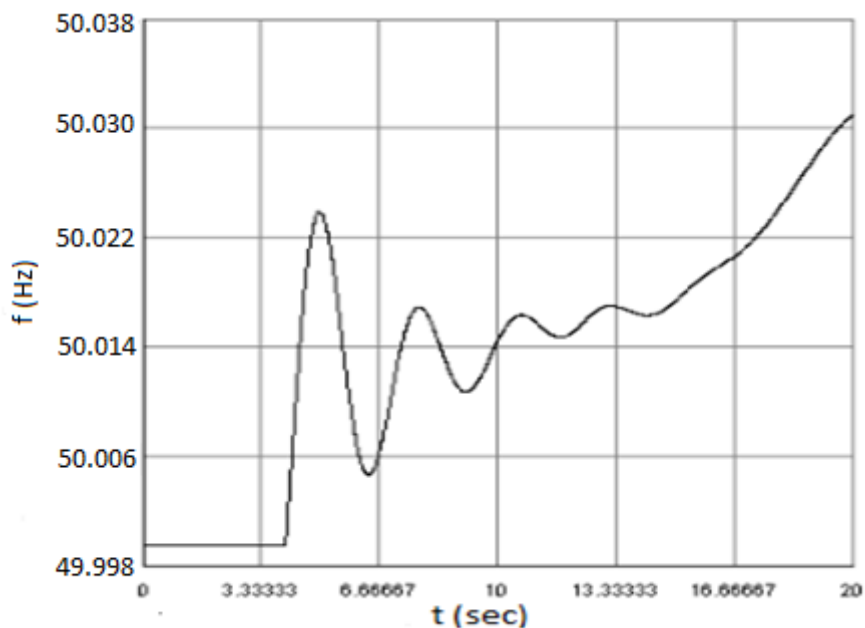
Σχήμα 7.1 Ταχύτητα ανέμου V_w , όπως καταγράφηκε σε πραγματικό χρόνο από το ανεμόμετρο του εργαστηρίου.

Παρακάτω φαίνεται η ενεργός ισχύς της ανεμογεννήτριας, όταν έχει ως είσοδο για ταχύτητα ανέμου, ένα άλλο στιγμιότυπο, όπως αυτό προέκυπτε από το ανεμόμετρο σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 7.2 Η ενεργός ισχύς εξόδου της Α/Γ όταν έχει σαν είσοδο την πραγματική ταχύτητα ανέμου, η οποία καταγράφεται με τη βοήθεια του ανεμόμετρου.

Παρακάτω φαίνεται η μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου, η οποία προκαλείται από τη μεταβολή της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας, την στιγμή που έχει σαν είσοδο πραγματική ταχύτητα ανέμου και η οποία ταχύτητα υπόκειται σε διακυμάνσεις.



Σχήμα 7.3 Η συχνότητα του δικτύου, η οποία και μεταβάλλεται λόγω της μεταβολής της ενεργού ισχύος εξόδου της Α/Γ.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, χρησιμοποιήθηκε το ανεμόμετρο, το οποίο έχει ως έξοδο ημιτονοειδές σήμα ανάλογο της συχνότητας περιστροφής του. Για τη μετατροπή του σε αναγνώσιμο σήμα κι επειδή δε συνδέεται απευθείας με τροφοδοσία, συνδέθηκε με μετατροπέα τετραγωνικού παλμού, ο οποίος παράγει ψηφιακό σήμα σε Volt. Το ανεμόμετρο έχει εύρος μετρήσεων 0.78-96 m/sec και το εύρος του σήματος εξόδου είναι 0 -125 Hz.

Για τη συλλογή και καταγραφή των σημάτων χρησιμοποιήθηκε η κάρτα USB 6225 της National Instruments, η οποία διαθέτει 80 κανάλια αναλογικών εισόδων, 24 ψηφιακών και 2 για αναλογικές εξόδους. Τα μέγιστα αναλογικά σήματα που δέχεται είναι πλάτους 12 Volt, ενώ τα μέγιστα ψηφιακά μέχρι πλάτος 5 Volt. Η κάρτα αυτή συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή στο εργαστήριο ΣΗΕ κι είναι συμβατή με το πρόγραμμα Labview, μέσω του οποίου γίνεται κι η αποθήκευση και επεξεργασία των σημάτων εισόδου. [40]

Μέσω κατάλληλης επεξεργασίας το σήμα οδηγήθηκε σε μία από τις αναλογικές εξόδους της κάρτας και έπειτα συνδέθηκε με τον προσομοιωτή RTDS του εργαστηρίου. Έτσι δόθηκε η δυνατότητα της μελέτης σεναρίων με την ύπαρξη πραγματικής ταχύτητας ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στο πλαίσιο της εργασίας μελετήθηκε η συμβολή της Α/Γ στη ρύθμιση της συχνότητας ενός δικτύου. Αρχικά αναπτύχθηκε ένα δίκτυο, το οποίο περιείχε υδροηλεκτρικό, ανεμογεννήτρια και φορτίο και το οποίο επιλύθηκε ως μοντέλο μεταβολών ισχύος – ροπής ενός ζυγού στο Simulink. Έπειτα υλοποιήθηκε στο RSCAD ένα μικρό αυτόνομο δίκτυο και το δίκτυο Μέσης Τάσης του Άη Στράτη. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις της κλασικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, της συμμετοχής στην αδρανειακή απόκριση, της λειτουργίας με pitch deloading καθώς και ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων. Συμπερασματικά προκύπτει:

- Η αδρανειακή απόκριση συμβάλει στη μείωση της μέγιστης βύθισης της συχνότητας και αφορά στα πρώτα δευτερόλεπτα. Δηλαδή η ανεμογεννήτρια μεταβατικά αναπροσαρμόζει την αποδιδόμενη ισχύ της, μέσω της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα και έπειτα από τα πρώτα δευτερόλεπτα επανέρχεται στην αρχική κατάσταση. Επίσης ο ρυθμός μείωσης της συχνότητας μειώνεται και επιπρόσθετα προκύπτει μια καθυστέρηση στην επαναφορά της συχνότητας στην τιμή της μόνιμης κατάστασης.
- Η λειτουργία pitch deloading είναι μια στρατηγική λειτουργίας, η οποία δίνει δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να συμβάλει ουσιαστικά στη ρύθμιση της συχνότητας. Μέσω αυτής της τεχνικής, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σύμφωνα με μια καμπύλη στατισμού. Η τεχνική αυτή ρυθμίζει, μέσω της γωνίας βήματος της έλικας του δρομέα, την αποδιδόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας. Έτσι, η ανεμογεννήτρια δύναται να αποδίδει στο δίκτυο μικρότερη ισχύ από τη μέγιστη διαθέσιμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την προσαρμογή της ισχύος, μέσω της καμπύλης στατισμού, σε κάθε μεταβολή της συχνότητας. Όσον αφορά στις τιμές του στατισμού, παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η τιμή, άρα αυξάνεται το κέρδος, τόσο καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας. Οι υψηλές τιμές του κέρδους, παρ' όλα αυτά δεν βελτιώνουν αισθητά τη μέγιστη βύθιση της συχνότητας. Ακόμα μεγαλύτερες τιμές κέρδους, είναι επιθυμητές σε περιπτώσεις ανυπαρξίας μεγάλης εφεδρείας ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη μεγάλων περιθωρίων εφεδρείας δεν είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, παρ' όλο που έχει θετική επίδραση και στη μέγιστη βύθιση της συχνότητας, αλλά και στη τιμή της μόνιμης κατάστασης, καθώς συνδέεται με την απώλεια αρκετής διαθέσιμης ισχύος, άρα υπεισέρχεται και ο οικονομικός παράγοντας.
- Τέλος η συνδυασμένη λειτουργία, δηλαδή ο συνδυασμός της αδρανειακής απόκρισης και μιας μεθόδου εφαρμογής της λειτουργίας του στατισμού επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα στην τιμή της μέγιστης βύθισης, αλλά και στην τιμή της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας.

Ακόμα, μελετήθηκε και η περίπτωση, όπου έχουμε πραγματική ταχύτητα ανέμου και η οποία λαμβανόταν σε πραγματικό χρόνο, από το ανεμόμετρο και μεταβιβαζόταν το σήμα στο προσομοιωτή RTDS. Με αυτόν τον τρόπο διαπιστώθηκε το πως επιδρά η διακύμανση του ανέμου στη συχνότητα του δικτύου.

Περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους συμμετοχής μιας ανεμογεννήτριας στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου. Για παράδειγμα στη παρούσα διπλωματική δεν αναπτύχθηκε η στρατηγική του overspreading. Επίσης θα μπορούσε να υλοποιηθεί πιο σύνθετο μοντέλο του ηλεκτρικού και του μηχανικού μέρους της ανεμογεννήτριας, καθώς και να εξεταστούν πολύ περισσότερες περιπτώσεις διαφορετικών τιμών στατισμού ή εφεδρείας, για παράδειγμα εφεδρεία τύπου delta ή balance [10]. Επόμενο βήμα, εκμεταλλευόμενοι και τις δυνατότητες του εργαστηρίου, θα ήταν η χρησιμοποίηση της ταχύτητας του ανέμου, η οποία λαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο, ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις των περιπτώσεων διαφορετικής στρατηγικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Ακόμα θα μπορούσε να εξεταστεί το θέμα και από οικονομοτεχνικής πλευράς. Τέλος θα μπορούσε να μελετηθούν τα ζητήματα της συμμετοχής στη ρύθμιση της συχνότητας ενός δικτύου, όχι μόνο από την πλευρά της ανεμογεννήτριας, αλλά και σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά ή και μπαταρίες. Αυτό θα μπορούσε να γίνει και με τη βοήθεια της τεχνικής Power Hardware in Loop (PHIL), συνδέοντας τους εργαστηριακούς αντιστροφείς φωτοβολταϊκών ή/ και μπαταριών σε προσομοιούμενα δίκτυα στο RTDS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αχιλλέας Πληθάρας –WWF, “Αιολική Ενέργεια” , 2012.
- [2] European Wind Energy Association, “Powering Europe: wind energy and the electricity grid”, Νοέμβριος 2010.
- [3] Βασίλειος Κλεφτάκης: “ Μελέτη προσομοίωσης Power Hardware In the Loop και διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2010.
- [4] Β. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, “ Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως” , Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [5] P. Kundur, “Power Systems stability and control”, New York 1994.
- [6] Μαρίνα Κατσαμπάνη, “ Υβριδική υποστήριξη ρύθμισης φορτίου – συχνότητας από ανεμογεννήτρια και υδροηλεκτρικό σταθμό”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2011.
- [7] Jacob Aho, Andrew Buckspan, Jason Laks, Paul Fleming, Yunho Jeong, Fiona Dunne, Matthew Churchfield, Lucy Pao, Kathryn Johnson, “A Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control”, Montreal 2012.
- [8] ENTSO – E, “Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators”, Brussels 2011.
- [9] BDEW, “Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network “, technical guideline, Berlin 2008.
- [10] Γιάννης Μάργαρης, “ Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείσδυσης”, διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π. 2011.
- [11] Σ. Παπαθανασίου, “ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Σημειώσεις Παραδόσεων, Ε.Μ.Π. Αθήνα 2008.
- [12] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “ Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1997.
- [13] Ελένη Παυλίδου, “ Συμμετοχή ανεμογεννήτριας αιολικού πάρκου υπό αποκοπή στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας”, διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2010.
- [14] N. Hatziaargyriou, M. Donnelly, S. Papathanassiou, J.A. Pecas Lopes, M. Takasaki, H. Chao, J. Usaola, R. Lasseter, A.Efthymiadis, K. Karoui, S. Arabi , “ MODELING NEW FORMS OF GENERATION AND STORAGE”, Cirge technical brochure, Brochure 6.2, 2010.

- [15] DERri project, Deliverable D3.3.2, “CRM of Permanent Magnet Synchronous Generator based Wind Turbine”, 2012.
- [16] Ιωάννης Κωνσταντακόπουλος, “ Ανάλυση, έλεγχος και προσομοίωση συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη”, Πάτρα, 2012.
- [17] Ευστράτιος Ταξείδης, “Υβριδική πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας από Α/Γ και συστοιχία συσσωρευτών σε μικρό αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας”, διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2010.
- [18] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, “ Analysis of electrical machinery and drive systems”, second edition, John Wiley and Sons, 2002.
- [19] L. Holdsworth, J. B. Ekanayake, N. Jenkins, “Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed Induction Generator based Wind Turbines”, Wind Energy, 2004.
- [20] Janaka Ekanayake and Nick Jenkins, “Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 19, NO. 4, DECEMBER 2004.
- [21] Johan Morren, Jan Pierik, Sjoerd W.H. de Haana, “Inertial response of variable speed wind turbines”, Electric Power Systems Research 76, 2006.
- [22] Rogério G. de Almeida, J. A. Peças Lopes, “PRIMARY FREQUENCY CONTROL PARTICIPATION PROVIDED BY DOUBLY FED INDUCTION WIND GENERATORS” , 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
- [23] Johan Morren, Sjoerd W. H. de Haan, Wil L. Kling, J. A. Ferreira, “Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control” , IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 1, FEBRUARY 2006.
- [24] James F. Conroy, Rick Watson, “Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 23, NO. 2, MAY 2008.
- [25] H. Klempe, C. B. McCulloch, A. Wong, M. Piekutowski, M. Negnevitsky, “Impact of High Wind Generation Penetration on Frequency Control”.
- [26] Panayiotis Moutis, Stavros A. Papathanassiou, Nikos D. Hatziargyriou, “Improved load-frequency control contribution of variable speed variable pitch wind generators”, Renewable Energy 48, 2012.
- [27] J. Morren, S.W.H. de Haan, W.L. Kling and J.A. Ferreira, “Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control”, IEEE Trans. on Power Systems J., vol. 21, no.1, pp. 433- 434, 2006.

- [28] P. Bhatt, R. Roy and S.P. Ghoshal, "Dynamic Active Power Support by Doubly Fed Induction Generator for Frequency Control, PMAPS 2010.
- [29] German Claudio Tarnowski, Philip CarneKjaer, Jacob Ostergaard, Poul E. Soresen, "Frequency control in power systems with high wind power penetration", Technical University of Denmark and Vestas Wind Systems A/S.
- [30] Rogério G. de Almeida, J. A. Peças Lopes, "Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation ", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, NO. 3, AUGUST 2007.
- [31] E. Muljadi, V. Gevorgian, M. Singh, S. Santoso, "Understanding Inertial and Frequency Response of Wind Power Plants", IEEE Symposium on Power Electronics and Machines in Wind Applications Denver, Colorado, 2012.
- [32] Toshio Inoue, Haruhito Taniguchi, Yasuyuki Ikeguchi, Kiyoshi Yoshida, "Estimation of Power System Inertia Constant and Capacity of Spinning- reserve Support Generators Using Measured Frequency Transients", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997
- [33] Peter Wall, Francisco González-Longatt, Vladimir Terzija, "Demonstration of an Inertia Constant Estimation Method Through Simulation", UPEC2010 31st Aug - 3rd Sept 2010.
- [34] Sandip Sharma, Shun-Hsien Huang, NDR Sarma, "System Inertial Frequency Response Estimation and Impact of Renewable Resources in ERCOT Interconnection".
- [35] D. P. Chassin, Z. Huang, M. K. Donnelly, C. Hassler, E. Ramirez, C. Ray, "Estimation of WECC System Inertia Using Observed Frequency Transients", performed at U.S. Department of Energy Pacific Northwest National Laboratory.
- [36] Littler, Timothy B, "Measurement- based estimation of wind farm inertia", Power Tech, IEEE Russia, 2005.
- [37] Συνεισφορά Ε.Μ.Π., "Πράσινο νησί- Άγιος Ευστράτιος", Ε.Μ.Π. 2009.
- [38] Χ. Πατσιούρας, Τεχνικές απαιτήσεις κωδίκων για τη σύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων στο σύστημα, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., 2007.
- [39] Ioannis Kyriakidis, "Optimal Sizing and Operation of Battery Storages in Stand- Alone Hybrid Power Systems", master thesis, Aalborg University, Denmark 2012.
- [40] Αθανάσιος Γκράβας, " Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών και βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές χαμηλού κόστους", διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2011.