

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

# Υβριδική Υποστήριξη Ρύθμισης Φορτίου-Συχνότητας από Ανεμογεννήτρια και Υδροηλεκτρικό Σταθμό

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

## ΚΑΤΣΑΜΠΑΝΗ ΜΑΡΙΝΑΣ

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010



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

# Υβριδική Υποστήριξη Ρύθμισης Φορτίου-Συχνότητας από Ανεμογεννήτρια και Υδροηλεκτρικό Σταθμό

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

## ΚΑΤΣΑΜΠΑΝΗ ΜΑΡΙΝΑΣ

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη<br/>ν $13^{\eta}$ Ιουλίου 2010.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π. Σταύρος Παπαθανασίου Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Παύλος Γεωργιλάκης Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

(Υπογραφή)

•••••

## ΚΑΤΣΑΜΠΑΝΗ ΜΑΡΙΝΑ

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

Copyright© Μαρίνα Κατσαμπάνη 2010 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για 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 το 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 ενασχόλησης με το ενδιαφέρον θέμα της παρούσας διπλωματικής, καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Επίσης, ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Μουτή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τη συνεχή παρουσία του στην πορεία της έρευνας, την καθοδήγησή του και γενικότερα την άριστη συνεργασία που είχαμε. Στάθηκε πολύτιμος αρωγός καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας με τις επιστημονικές συμβουλές και τη διαρκή ενθάρρυνσή του.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω θερμά το μεταπτυχιακό φοιτητή Στρατή Ταξείδη για την άψογη συνεργασία μας σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την καθοριστικής σημασίας συμπαράσταση και την ανοχή που έδειξε, προκειμένου να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία, καθώς και σε όλη τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο.

Κατσαμπάνη Μαρίνα

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα συμβολής ενός υβριδικού συστήματος, αποτελούμενου από ανεμογεννήτρια και μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό, στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το εξεταζόμενο σύστημα αναπαριστάται με το ισοδύναμο μοντέλο μεταβολών ισχύος-ροπής ενός ζυγού και περιλαμβάνει τα μοντέλα ανεμογεννήτριας, ντηζελογεννήτριας, μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού και φορτίου.

Μελετάται και αναπτύσσεται το μοντέλο ανεμογεννήτριας μεταβλητού βήματοςμεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και εναλλακτικά με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές τεχνικές, οι οποίες επιδιώκουν τη συμμετοχή των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας και συγκρίνονται μεταξύ τους. Οι τρεις αυτές τεχνικές περιλαμβάνουν την αποφόρτιση της ανεμογεννήτριας μέσω του ελέγχου του βήματος της έλικας, την αποφόρτιση μέσω της επιτάχυνσης του δρομέα της ανεμογεννήτριας, καθώς και τη συμμετοχή της Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου. Η συμμετοχή του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού εξετάζεται επίσης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Μελετάται η περίπτωση ο σταθμός να διαθέτει ρυθμιστή στροφών με απλό κέρδος, ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό, καθώς και η περίπτωση να διαθέτει πύργο αναπάλσεως και ρυθμιστή στροφών με απλό κέρδος.

Η μελέτη, η εφαρμογή, η σύγκριση καθώς και η παρουσίαση των εφαρμοζόμενων τεχνικών συμμετοχής του υβριδικού συστήματος στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink.

**Λέξεις Κλειδιά:** πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός, ρυθμιστής στροφών υδροστροβίλου, στρατηγική ποσοστιαίας αποφόρτισης ανεμογεννήτριας, αδρανειακή απόκριση ανεμογεννήτριας.

### Abstract

This thesis examines the possibility of a hybrid system, consisting of  $\alpha$  wind generator and a small hydro station to contribute to the primary load-frequency control of an electric power system. The system under examination is represented by the single-bus system and involves the models of a wind generator, a diesel generator, a small hydro station and a load.

The model of a variable speed-variable pitch wind generator with a doubly-fed induction generator or alternatively a permanent magnet synchronous generator is studied and developed. Three different methods that allow the participation of the wind generator to the primary load-frequency control are implemented and compared. These three techniques involve a pitch-controlled deloading strategy, a deloading control method via the acceleration of the wind generator rotor (overspeeding) and the contribution of the wind generator to the inertial response of the electric system. The participation of the small hydro station to the primary load-frequency control is examined for three different cases, as well. A hydro station with speed governor with a simple gain, with speed governor with a simple gain are studied and compared.

The study, the implementation, the comparison and the presentation of the results of the applied strategies for the participation of the hybrid system to the primary load-frequency control are conducted with the computer program Simulink.

**Keywords:** primary load-frequency control, variable speed-variable pitch wind generator, doubly-fed induction generator, permanent magnet synchronous generator, small hydro station, speed governor of a hydro turbine, deloading strategy, inertial response.

# Πίνακας περιεχομένων

1	Ε	ισαγωγή	.29
	1.1 Avo	ινεώσιμες Πηγές Ενέργειας	.29
1.1.1 1.1.2		Η αιολική ενέργεια	.30
	1.1.2	Η υδροηλεκτρική ενέργεια	.33
	1.2 To 8	ζήτημα της ρύθμισης φορτίου-συχνότητας (ΡΦΣ)	.35
	1.2.1	Ρύθωση φορτίου-συγνότητας	.35
	1.2.2	Χαρακτηριστική φορτίου-συγνότητας	.37
	1.2.3	Συμμετογή των ανεμονεννητριών στην πρωτεύουσα ΡΦΣ	.39
	13 Avt	ικείμενο διπλωματικής	40
	131	Συνεισφορά και σνετικές ερνασίες	41
	1.5.1 1.4 Пео		71 12
	1.4 Hep	ייזףמעיון נווב טטעווב נווב בף אמטומב	.42
2	Θ	εωρητικό υπόβαθρο	.45
	2.1 Ave	μογεννήτριες	.45
	2.1.1	Κατηγοριοποίηση ανεμογεννητριών (Α/Γ)	45
	2.1.2	Συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής και ελέγχου των ανεμογεννητριών	50
	2.1.2.1	Το αεροδυναμικό σύστημα της Α/Γ	. 51
	2.1.2.2	Το αεροελαστικό μοντέλο της Α/Γ	. 55
	2.1.2.3	Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ ή DFIG)	. 57
	2.1.2.4	Ανάλυση των εξισώσεων λειτουργίας της ΓΕΔΤ	. 60
	2.1.2.5	Μοντελοποίηση της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης	. 67
	2.1.2.6	Έλεγχος γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης	. 68
	2.1.2.7	Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (PMSG)	. 72
	2.1.2.8	Έλεγχος και μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών	. 73
	2.2 Υδρ	οηλεκτρικοί σταθμοί	.75
	2.2.1	Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΗΣ)	.76
	2.2.2	Τύποι υδροστροβίλων	.77
	2.2.3	Ισχύς και ενέργεια υδροηλεκτρικού σταθμού	.78
	2.2.4	Υδροηλεκτρικός σταθμός χωρίς πύργο αναπάλσεως	.79
	2.2.5	Υδραυλικό πλήγμα	.84

	2.2.6	Ηλεκτρικό ανάλογο υδραυλικού πλήγματος	35						
2.2.7		Ρυθμιστής στροφών υδροστροβίλου με μεταβατικό στατισμό	36						
2.2.8		Κυματικά φαινόμενα στον αγωγό προσαγωγής							
2.2.9		Υδροστρόβιλος με πύργο ηρεμήσεως (ή αναπάλσεως ή εκτονώσεως)							
2.2.10		Υπολογισμός διαστάσεων πύργου αναπάλσεως9	94						
2.2.11		Τύποι πύργων αναπάλσεως9	<b>ə</b> 5						
2.2.12 Yan		Υλικά κατασκευής αγωγού προσαγωγής9	<del>)</del> 8						
2	2.3 Nτr	ζελογεννήτρια (diesel engine)	<del>)</del> 9						
3	Σ	ωμβολή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας(ΡΦΣ)1(	01						
3 (j	3.1 Τεχ pitch cont	ινική αποφόρτισης της ανεμογεννήτριας μέσω της γωνίας βήματος πτερυγίου trol-pitch deloading)10	)2						
3	8.2 Τεχ	νική αποφόρτισης της Α/Γ με συνδυασμό επιτάχυνσης της ταχύτητας του δρομέ	έa						
(	overspeed	ling) και μεταβολή της γωνίας βήματος (pitch control)10	)6						
	3.2.1	Τεχνική αποφόρτισης της Α/Γ μέσω της επιτάχυνσης της ταχύτητας του δρομέα							
	(overspe	reding)10	)7						
	3.2.2	Στρατηγική αποφόρτισης της Α/Γ μέσω του ελέγχου του βήματος της έλικας							
	(pitch co	ontrol)	10						
	3.2.3	Περιοχές λειτουργίας της Α/Γ όταν εφαρμόζεται η τεχνική αποφόρτισης του							
	συνδυασ	μού overspeeding-pitch control11	13						
3	8.3 Συμ	ιμετοχή Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου (inertial response)11	4						
4	e	<b>Σεμελίωση του προβλήματος1</b> 1	17						
4	.1 Αρ <u>γ</u>	<b>μιτεκτονική1</b> 1	17						
4	.2 Σεν	άρια προσομοιώσεων11	18						
4	.3 Пар	ράμετροι συστημάτων12	20						
5	Π	Ιροσομοιώσεις και αποτελέσματα12	23						
5	5.1 Απά	όκριση συστήματος σε αύξηση του φορτίου με Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια							
Γ	DFIG και	ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής12	23						
	5.1.1	Η Α/Γ είναι σε ΜΡΡΤ λειτουργία12	24						
	5.1.2	Η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική αποφόρτισης12	26						
	5.1.3	Η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική αποφόρτισης	30						
	5.1.4	Η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική13	32						

	5.1.3	5 Παρουσίαση συγκριτικών αποτελεσμάτων για ταχύτητα ανέμου μικρότερης της			
	ovoµ	<i>ιαστικής</i>			
	5.1.0	δ Σύγκριση της απόκρισης συχνότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αν			
	αντι	κατασταθεί η γεννήτρια της Α/Γ με pmsg για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής			
		142			
5	.2	Απόκριση συστήματος σε αύξηση του φορτίου με Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια			
Ι	OFIG	και ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής150			
	5.2.	1 Η Α/Γ είναι σε MPPT λειτουργία151			
	5.2.2	2 Η Α/Γ σε overspeeding λειτουργία153			
	5.2.	3 Η Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία157			
	5.2.4	4 Η Α/Γ με inertial response λειτουργία160			
	5.2.3	5 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερης της			
	<i>ιαστικής</i>				
	5.2.0	6 Παρουσίαση συγκριτικών αποτελεσμάτων απόκρισης της συχνότητας για ταχύτητα			
ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής (συγκεκριμένα 12,5m/s) χρησιμοποιώντας dfi					
	pms	g γεννήτρια			
6		Σχολιασμός και παρατηρήσεις αποτελεσμάτων179			
$\epsilon$	5.1	Ταχύτητα ανέμου 8m/sec μικρότερη της ονομαστικής179			
6	.2	Ταχύτητα ανέμου 12,5m/s μεγαλύτερη της ονομαστικής182			
6	5.3	Γενικά συμπεράσματα			
7		Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη			
8		Βιβλιογραφία187			

# $EYPETHPIO \Sigma XHMAT\Omega N$

Σχήμα 1.1: Γεννήτρια που τροφοδοτεί απομονωμένο φορτίο [15]37
Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μονάδας παραγωγής
Σχήμα 2.1: Τυπικές καμπύλες ισχύος για διάφορες περιοχές λειτουργίας Α/Γ τύπου Stall
(διακεκομμένη γραμμή) και Α/Γ τύπου Pitch-Controlled (συνεχής γραμμή) [18]48
Σχήμα 2.2: Τα συστήματα μίας ανεμογεννήτριας
Σχήμα 2.3: Τα κύρια τμήματα μίας ανεμογεννήτριας
Σχήμα 2.4: Ο αεροδυναμικός συντελεστής Cp συναρτήσει του λόγου ταχύτητας
ακροπτερυγίου λ για γωνίες βήματος πτερυγίων 0, 5, 10, 15, 20, 25 και 30 μοίρες52
Σχήμα 2.5: Σημεία λειτουργίας της Α/Γ για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου53
Σχήμα 2.6: Η παραγόμενη μηχανική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου54
Σχήμα 2.7: Αεροδυναμικό μοντέλο Α/Γ μεταβλητού στροφών-μεταβλητών βήματος54
Σχήμα 2.8: Μηχανικό σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών55
Σχήμα 2.9: Αεροελαστικό μοντέλο προσομοίωσης της Α/Γ57
Σχήμα 2.10: Σύνδεση του μηχανικού μέρους της Α/Γ με γεννήτρια επαγωγής διπλής
τροφοδότησης [25]
Σχήμα 2.11: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα ΓΕΔΤ στη μόνιμη κατάσταση60
Σχήμα 2.12: Συμμετρική, διπολική, τριφασική μηχανή επαγωγής wye-connected61
Σχήμα 2.13: Τα συστήματα αξόνων dq0 και abc. Ο μηδενικός άξονας (zero axis) είναι
κάθετος στη σελίδα63
Σχήμα 2.14: Ισοδύναμα κυκλώματα στο σύγχρονο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς για μια
τριφασική, συμμετρική ασύγχρονη μηχανή [25]65
Σχήμα 2.15: Μοντέλο προσομοίωσης των εξισώσεων τάσεων, ροών, ροπής και ισχύος της
ΓΕΔΤ68
Σχήμα 2.16: Σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο και έλεγχος της ΓΕΔΤ μέσω μετατροπέα back-to-
back
Σχήμα 2.17: Στροφή των αξόνων dq σε νέο σύστημα αξόνων d'q'70
Σχήμα 2.18: Μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος ελέγχου της ΓΕΔΤ72
Σχήμα 2.19: Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο. Η
διακεκομμένη γραμμή γύρω από το κιβώτιο ταχυτήτων δηλώνει ότι δεν είναι απαραίτητη η
χρήση του [24]
Σχήμα 2.20: Μοντέλο προσομοίωσης της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών75
Σχήμα 2.21: Διάγραμμα μετατροπής ενέργειας των ΜΥΗΕ [34]75
Σχήμα 2.22: Σχηματική παράσταση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού [15]
Σχήμα 2.23: Μεταβολή της μηχανικής ισχύος υδροστροβίλου σε βηματική αύξηση του
ανοίγματος των υδατοθυρίδων από 0,8 σε 1αμ82

Σχήμα 2.24: Ανά μονάδα μεταβολή της μηχανικής ισχύος του υδροστροβίλου σε βηματική αύξηση του ανοίγματος των υδατοθυρίδων από 0,8 σε 1 αμ για διάφορες τιμές του συντελεστή Σχήμα 2.25: Υδροστρόβιλος με ρυθμιστή στροφών 1/R [15]......83 Σχήμα 2.27: Μοντέλο προσομοίωσης υδροστροβίλου με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό Σχήμα 2.28: Σχηματική διάταξη υδροστροβίλου με πύργο ηρεμήσεως [8]......88 Σχήμα 2.29: Βηματική απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς του υδροστροβίλου με πύργο αναπάλσεως για Tw=4,5sec και ωn=1rad/sec. Υπερκρίσιμη ταλάντωση. Το πλάτος της Σχήμα 2.30: Υπερκρίσιμες ταλαντώσεις για διάφορες τιμές των Τw και ωn. Μειώνοντας το Σχήμα 2.31: Βηματική απόκριση-κρίσιμη ταλάντωση της συνάρτησης μεταφοράς του Σχήμα 2.32: Διάγραμμα της καμπύλης πάνω στην οποία κινούνται οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης καθώς μεταβάλλεται ο ζ με σταθερή συχνότητα ωn. Εφόσον  $0 < \zeta < 1$ , οι πόλοι του συστήματος μπορούν να κινούνται στο αριστερό ημικύκλιο με ακτίνα Σχήμα 2.33: Επίδραση του συντελεστή Τω και της φυσικής συχνότητας ωη στην υποκρίσιμη Σχήμα 2.35: Διάφοροι τύποι ανοιχτών πύργων ανάπαλσης [21]......96 Σχήμα 2.36: Σχέδιο πύργου ανάπαλσης α) απλής κατεύθυνσης, β) διπλής κατεύθυνσης [20]97 Σχήμα 2.37: Σχηματική παράσταση υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με πύργο αναπάλσεως Σχήμα 2.39: Μοντέλο προσομοίωσης ντηζελογεννήτριας......100 Σχήμα 3.1: Οι περιοχές λειτουργίας της Α/Γ σε μηδενική και σε μη μηδενική αποφόρτιση.103 Σχήμα 3.2: Τεχνική αποφόρτισης με έλεγχο της γωνίας βήματος της έλικας: Αναζήτηση της κατάλληλης καμπύλης Cp( $\lambda$ , $\beta$ ), που αναφέρεται σε συγκεκριμένη γωνία  $\beta$ , ανάλογα με το επιδιωκόμενο ποσοστό αποφόρτισης χ.....104 Σχήμα 3.3: Στο σχήμα (α) παρουσιάζεται ο τρόπος παραγωγής της τιμής αναφοράς της ισχύος για το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας. Η μεταβλητή Del αντιπροσωπεύει τη ανά μονάδα ζητούμενη ισχύ σε λειτουργία αποφόρτισης. Στο σχήμα (β) παρουσιάζεται ο ανανεωμένος έλεγχος γωνίας βήματος......106 Σχήμα 3.4: Λειτουργία με την τεχνική αποφόρτισης overspeeding......107

Σχήμα 3.5: Κατασκευή του LUT3, που δίνει την τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ισχύος στο σύστημα ελέγχου της γεννήτριας στην τεχνική αποφόρτισης overspeeding......109 Σχήμα 3.6: Καμπύλες ισχύος της Α/Γ για ποσοστά αποφόρτισης 3%, 6% και 9%. Σημειώνονται οι ταχύτητες εξάντλησης της τεχνικής overspeeding για τα αντίστοιχα Σχήμα 3.7: Εξεταζόμενη περιοχή για δεδομένο ποσοστό αποφόρτισης από Uw, max έως Uw, nom στην τεχνική ελέγχου βήματος της έλικας.....110 Σχήμα 3.8: Μοντέλο προσομοίωσης lookup table με εισόδους τη γωνία βήματος β και το ποσοστό αποφόρτισης x και έξοδο την ισχύ αναφοράς Pe,ref pu......112 Σχήμα 3.9: Καμπύλες αποφόρτισης Pe, ref  $pu(\beta)$  για διάφορα ποσοστά αποφόρτισης x.....112 Σχήμα 3.11: Μοντέλο προσομοίωσης της γεννήτριας με λειτουργία αδρανειακής απόκρισης. Το μέρος του συστήματος που προστέθηκε στο ήδη αναπτυχθέν μοντέλο εμφανίζεται με ροζ χρώμα......115 Σχήμα 4.1: Μοντέλο μεταβολών ισχύος-ροπής ενός ζυγού......118 Σχήμα 5.1: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η Α/Γ σε ΜΡΡΤ. .....124 Σχήμα 5.2: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Tr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ και η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT......124 Σχήμα 5.3: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Οι εφαρμοζόμενες συχνότητες ωn αντιστοιχούν σε πύργο αναπάλσεως πενταπλάσιας διατομής του αγωγού προσαγωγής (0,024011rad/sec) και σε 28 φορές μεγαλύτερη διατομή (0,010147rad/sec). Η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ.....125 Σχήμα 5.4: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η A/ $\Gamma$  με overspeeding τεχνική. ......126 Σχήμα 5.5: Μεταβολή ισχύος ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,45 και η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding. Βάση ισχύος η ισχύς του ΜΥΗΣ. .....126 Σχήμα 5.6: Μεταβολή ισχύος diesel για συμμετοχή στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν η Α/Γ Σχήμα 5.7: Μεταβολή ισχύος Α/Γ για συμμετοχή στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν λειτουργεί με Σχήμα 5.8: Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ σε λειτουργία Σχήμα 5.9: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig.....128 Σχήμα 5.10: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Τr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ. Η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική......129 Σχήμα 5.11: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Οι εφαρμοζόμενες συχνότητες ωn αντιστοιχούν σε πύργο αναπάλσεως πενταπλάσιας διατομής του αγωγού

προσαγωγής (0,024011rad/sec) και σε 28 φορές μεγαλύτερη διατομή (0,010147 rad/sec). Η Σχήμα 5.12: Ο MYHΣ λειτουργεί με στατισμό R και η A/Γ με pitch deloading τεχνική.....130 Σχήμα 5.13: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Τr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ. Η Α/Γ λειτουργεί με τεχνική Σχήμα 5.14: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Η Α/Γ είναι σε pitch Σχήμα 5.15: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response. Σχήμα 5.16: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Τr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ. Η Α/Γ λειτουργεί με τεχνική inertial Σχήμα 5.17: Μεταβολή ισχύος της Α/Γ όταν λειτουργεί με inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=4 δ=0,55 σ=0,03......133 Σχήμα 5.18: Μεταβολή γωνιακής ταχύτητας δρομέα Α/Γ όταν λειτουργεί με inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=4 δ=0,55 σ=0,03......134 Σχήμα 5.19: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=4  $\delta$ =0,55 σ=0,03.....134 Σχήμα 5.20: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Η Α/Γ λειτουργεί με Σχήμα 5.21: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,45. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση......136 Σχήμα 5.22: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,8. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση......136 Σχήμα 5.23: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με το ρυθμιστή στροφών του παραμέτρων Tr=7,5, δ=0,5 και σ=0,04. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση. Σχήμα 5.24: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με το ρυθμιστή στροφών του παραμέτρων Tr=4, δ=0,55 και σ=0,03. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση. 

Σχήμα 5.25: Το ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως που προκαλεί ταλάντωση με συχνότητα ωn=0,010147rad/sec και στατισμό R=0,10. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση......138 Σχήμα 5.26: Το ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως που προκαλεί ταλάντωση με συχνότητα ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση......139 Σχήμα 5.27: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT......140 Σχήμα 5.28: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ χρησιμοποιεί overspeeeding τεχνική αποφόρτισης......140 Σχήμα 5.29: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ χρησιμοποιεί pitch deloading τεχνική αποφόρτισης.....141 Σχήμα 5.30: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ χρησιμοποιεί inertial response λειτουργία......142 Σχήμα 5.31:Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ και ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια......143 Σχήμα 5.32: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg Σχήμα 5.33: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig Σχήμα 5.34: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια......144 Σχήμα 5.35: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα overspeeding και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9 και σ=0.03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig Σχήμα 5.36: Λεπτομερέστερη παρουσίαση της μεταβατικής απόκρισης της συχνότητας του σχήματος 5.37......146 Σχήμα 5.37: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η Σχήμα 5.38: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα pitch deloading και ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια......147 Σχήμα 5.39: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα pitch deloading και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig 

Σχήμα 5.40: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα pitch deloading και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.....148 Σχήμα 5.41: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα inertial response και ο MYHΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια......149 Σχήμα 5.42: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα inertial response και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig Σχήμα 5.43: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.....150 Σχήμα 5.44: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί σε Σχήμα 5.45: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με παραμέτρους Tr=7,5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,04 ή Tr=7,5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03, ενώ η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT. ....151 Σχήμα 5.46: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με συχνότητα ωη και στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ......152 Σχήμα 5.47: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding......153 Σχήμα 5.48: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding......153 Σχήμα 5.49: Μεταβολή ισχύος του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.....154 Σχήμα 5.50: Μεταβολή ισχύος της diesel γεννήτριας όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03.....154 Σχήμα 5.51: Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ όταν λειτουργεί σε overspeeding τεχνική.....155 Σχήμα 5.52: Μεταβολή ισχύος της Α/Γ όταν λειτουργεί με overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.....155 Σχήμα 5.53: Μεταβολή γωνίας βήματος όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03......155 Σχήμα 5.54: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03.....156 Σχήμα 5.55: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding......157 Σχήμα 5.56: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ χωρίς ρυθμιστή στροφών ούτε πύργο αναπάλσεως έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική......157

Σχήμα 5.57: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών, ενώ η Α/Γ λειτουργεί
με pitch deloading τεχνική158
Σχήμα 5.58: Μεταβολή ισχύος Α/Γ όταν αυτή λειτουργεί με pitch deloading τεχνική και ο
MYHΣ με με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03158
Σχήμα 5.59: Μεταβολή γωνίας βήματος όταν η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική και
ο ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03159
Σχήμα 5.60: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε
pitch deloading λειτουργία159
Σχήμα 5.61: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με
inertial response
Σχήμα 5.62: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών, ενώ η Α/Γ λειτουργεί
με inertial response161
Σχήμα 5.63: Μεταβολή ισχύος Α/Γ με inertial response και ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών
Tr=5sec, $\delta$ =0,6, $\sigma$ =0,03161
Σχήμα 5.64: Μεταβολή γωνιακής ταχύτητας δρομέα Α/Γ με inertial response και ΜΥΗΣ με
ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03162
Σχήμα 5.65: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig με inertial response και ΜΥΗΣ με
ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03162
Σχήμα 5.66: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως, ενώ η Α/Γ λειτουργεί
με inertial response
Σχήμα 5.67: Ο ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,5. Η
Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή
της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ164
Σχήμα 5.68: Ο ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,4. Η
Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή
της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ164
Σχήμα 5.69: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με παραμέτρους Tr=7,5sec, δ=0,6 σ=0,04. Η
Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή
της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ165
Σχήμα 5.70: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με παραμέτρους Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03. Η
Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή
της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ166
Σχήμα 5.71: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,010147rad/sec και στατισμό R=0,10.
Η Α/Γ λειτουργεί με ΜΡΡΤ, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη
συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ166

Σχήμα 5.72: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05.
Η Α/Γ λειτουργεί με ΜΡΡΤ, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη
συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ167
Σχήμα 5.73: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ
λειτουργεί σε ΜΡΡΤ
Σχήμα 5.74: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ
λειτουργεί με overspeeding169
Σχήμα 5.75: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ
λειτουργεί με pitch deloading τεχνική169
Σχήμα 5.76: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ
λειτουργεί με inertial response τεχνική170
Σχήμα 5.77: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με
MPPT τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας171
Σχήμα 5.78: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9,
σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με MPPT τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή
dfig γεννήτριας
Σχήμα 5.79: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με
wn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με MPPT τεχνική.
Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας173
Σχήμα 5.80: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με
overspeeding τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας173
Σχήμα 5.81: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9,
σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση
pmsg ή dfig γεννήτριας174
Σχήμα 5.82: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με
ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική.
Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας174
Σχήμα 5.83: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με
pitch deloading τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας175
Σχήμα 5.84: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9,
σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση
pmsg ή dfig γεννήτριας175
Σχήμα 5.85: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με
ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική.
Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας176
Σχήμα 5.86: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με
inertial response τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας177

Σχήμα 5.87: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9,										
σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση										
pmsg ή dfig γεννήτριας										
Σχήμα 5.88: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με										
ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική.										
Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας178										

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Η αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης
στα έτη 1998-2009,σε MW [5]31
Πίνακας 2: Τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους μιας Α/Γ49
Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων αεροδυναμικού μοντέλου Α/Γ
Πίνακας 4: Τιμές παραμέτρων μοντέλου δύο στρεφόμενων μαζών
Πίνακας 5:Τιμές παραμέτρων dfig γεννήτριας
Πίνακας 6:Τιμές παραμέτρων pmsg γεννήτριας121
Πίνακας 7: Τιμές παραμέτρων diesel γεννήτριας121
Πίνακας 8: Δεδομένα ΜΥΗΣ122
Πίνακας 9: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε ΜΡΡΤ124
Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικά
στατισμό και Α/Γ σε MPPT125
Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε
MPPT
Πίνακας 12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ με
overspeeding τεχνική αποφόρτισης126
Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ με
λειτουργία overspeeding
Πίνακας 14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ με
overspeeding λειτουργία
Πίνακας 15:Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ με pitch
deloading τεχνική αποφόρτισης130
Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ με
λειτουργία pitch deloading
Πίνακας 17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ με
pitch deloading λειτουργία132
Πίνακας 18: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ με inertia
response
Πίνακας 19: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ με
λειτουργία inertial response133
Πίνακας 20: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ με
inertial response
Πίνακας 21: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην
πρωτεύουσα PΦΣ όταν ο MYHΣ λειτουργεί με στατισμό R=0,45136

Πίνακας 22: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην
πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R=0,8137
Πίνακας 23: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην
πρωτεύουσα PPS όταν ο MYHS διαθέτει ρυθμιστή στροφών με Tr=7,5sec, δ=0,5 και σ=0,04.
Πίνακας 24: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην
πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με Tr=4sec, δ=0,55 και σ=0,03.
Πίνακας 25: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην
πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,010147rad/sec και
στατισμό R=0,10
Πίνακας 26: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην
πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και
στατισμό R=0,05
Πίνακας 27: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ
όταν η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ140
Πίνακας 28: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ
όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική141
Πίνακας 29: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ
όταν η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική141
Πίνακας 30: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ
όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response
Πίνακας 31: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε
MPPT leitouryía th ς A/ $\Gamma$ kai me statismó R=0,8 tou MYHS143
Πίνακας 32: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε
MPPT leitoupyía th ς A/ $\Gamma$ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03 tou MYHS.
Πίνακας 33: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε
MPPT λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό
R=0,05 του ΜΥΗΣ144
Πίνακας 34: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε
overspeeding λειτουργία της A/Γ και με στατισμό R=0,8 του MYHS145
Πίνακας 35: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε
overspeeding λειτουργία της A/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03 του
ΜΥΗΣ145

Πίνακας 36: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του ΜΥΗΣ......146 Πίνακας 37: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε pitch deloading λειτουργία της A/Γ και με στατισμό R=0.8 του MYHΣ.....147 Πίνακας 38: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε pitch deloading λειτουργία της A/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9 και σ=0,03 του ΜΥΗΣ......148 Πίνακας 39: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του ΜΥΗΣ......148 Πίνακας 40: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε inertial response λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,8 του ΜΥΗΣ.....149 Πίνακας 41: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε inertial response leitoupyía the A/ $\Gamma$  kai me rubmisth strogán me Tr=10,  $\delta$ =0,9 kai s=0,03 του ΜΥΗΣ......149 Πίνακας 42: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε inertial response λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του ΜΥΗΣ......150 Πίνακας 43: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε ΜΡΡΤ. Πίνακας 44: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε Πίνακας 45: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε ΜΡΡΤ λειτουργία.....152 Πίνακας 46: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε overspeeeding λειτουργία......153 Πίνακας 47: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε overspeeding λειτουργία.....154 Πίνακας 48: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε overspeeding λειτουργία......157 Πίνακας 49: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία......158 Πίνακας 50: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία......158 Πίνακας 51: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία......160

Πίνακας 52: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε inertial Πίνακας 53: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε Πίνακας 54: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε Πίνακας 55: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,5, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα PΦΣ, καθώς και με MPPT.....164 Πίνακας 56: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,4, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα PΦΣ, καθώς και με MPPT.....165 Πίνακας 57: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=7,5sec, δ=0,6 σ=0,04, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με ΜΡΡΤ.....165 Πίνακας 58: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6 σ=0,03, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.....166 Πίνακας 59: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ πύργο αναπάλσεως με ωn=0,010147 rad/sec και στατισμό R=0,10, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.....167 Πίνακας 60: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.....167 Πίνακας 61:Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ......168 Πίνακας 62: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding......169 Πίνακας 63: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική......170 Πίνακας 64: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική....171 Πίνακας 65: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με MPPT λειτουργία Α/Γ και με R=0,5 στατισμό του MYHS για dfig και pmsg γεννήτρια.....172 Πίνακας 66: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με MPPT λειτουργία Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9, σ=0,03 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια......172

Πίνακας 67: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με MPPT λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ για dfig και Πίνακας 68: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,5 του ΜΥΗΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.....174 Πίνακας 69: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9, σ=0,03 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια...174 Πίνακας 70: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0.024011 rad/sec και στατισμό R=0.05 του MYHΣ για dfig και Πίνακας 71: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,5 του MYH $\Sigma$  για dfig και pmsg γεννήτρια.....175 Πίνακας 72: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9, σ=0,03 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια. Πίνακας 73: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ για dfig Πίνακας 74: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με inertial response λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,5 του MYH $\Sigma$  για dfig και pmsg γεννήτρια.....177 Πίνακας 75: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με inertial response λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0.9,  $\sigma$ =0.03 για dfig και pmsg γεννήτρια.....177 Πίνακας 76: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με inertial response λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0.024011 rad/sec και στατισμό R=0.05 για dfig και pmsg 

# 1

# Εισαγωγή

## 1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η αναγκαιότητα αποδοτικότερης χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας του πλανήτη και ειδικότερα η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Οι λόγοι που επιβάλλουν την στροφή αυτή προς τις επονομαζόμενες «πράσινες» πηγές ενέργειας είναι όχι μόνο το πεπερασμένο των συμβατικών πηγών, αλλά και η ανάγκη περιορισμού των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εκτεταμένη χρήση μη ΑΠΕ [1].

Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης των χωρών από τα συμβατικά καύσιμα και η ενεργειακή βιωσιμότητα των κοινωνιών μέσω της εκμετάλλευσης των εγχώριων φυσικών πόρων είναι καθοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη μιας ισχυρής, ανταγωνιστικής και κατά το δυνατόν αποδεσμευμένης από τις διεθνείς πολιτικοοικονομικές αλλαγές οικονομίας. Εξίσου καθοριστικοί παράγοντες για την προώθηση των ΑΠΕ αποτελούν η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου, οι κλιματικές αλλαγές και η γενικότερη διαταραχή του φυσικού περιβάλλοντος, φαινόμενα τα οποία, όπως υποστηρίζεται, πηγάζουν από την ανεξέλεγκτη χρήση ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, η αξιοποίηση των ΑΠΕ ειδικά σε αναπτυσσόμενες χώρες μπορεί να συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, την προσέλκυση επενδύσεων και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας [3].

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια οι τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες καταβάλλουν σημαντικές προσπάθειες προσαρμογής προς τις νέες αυτές ανάγκες με τη λήψη κατάλληλων νομοθετικών μέτρων, καθώς και την ευρύτερη ενημέρωση των πολιτών [1]. Μια από τις σημαντικότερες ενέργειες εξ' αυτών αποτελεί το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο μέχρι τον Οκτώβριο του 2009 είχαν υπογράψει και επικυρώσει 187 χώρες και σύμφωνα με το οποίο δεσμεύτηκαν με βραχυπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων και γενικότερα την ελάττωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Η Ελλάδα δεν κατάφερε να εκπληρώσει τους τιθέμενους στόχους για την επιτρεπόμενη αύξηση των εκπεμπόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μόνο κατά 25% από το 1990 έως το 2010 και υπόκειται σε κυρώσεις εξ αιτίας ασυμφωνίας με τις οδηγίες του Πρωτοκόλλου του Κιότο [2,4].

Επίσης, σύμφωνα με την πιο πρόσφατη οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου της 23 Απριλίου 2009 μέχρι το 2020 το 20% της καταναλισκόμενης ενέργειας από όλα τα κράτη-μέλη της ΕΕ πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ.

#### 1.1.1 Η αιολική ενέργεια

Η αιολική είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ. Σύμφωνα με στοιχεία που δημοσίευσαν το Φεβρουάριο του 2010 η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA) και η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΝ), το 2009 οι νέες εγκαταστάσεις Αιολικής Ενέργειας στην Ευρώπη, ξεπέρασαν κάθε άλλη ενεργειακή τεχνολογία. Συνολικά στην Ευρώπη εγκαταστάθηκαν 10.163 MW αιολικών πάρκων, ισχύς που αντιστοιχεί σε αύξηση 23% σε σχέση με το 2008, εκ των οποίων τα 9.581 MW σε ηπειρωτικά αιολικά πάρκα και τα 582 MW σε παράκτια (αύξηση κατά 56% σε σχέση με το 2008). Οι χώρες με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη για το 2009 ήταν κατά σειρά η Ισπανία (24% -2459 MW), η Γερμανία (19% - 1917 MW), η Ιταλία (11% - 1114 MW), η Γαλλία (11% -1088 MW) και το Ην. Βασίλειο (10% - 1077 MW). Στην Ευρώπη στο τέλος του 2009, η εγκατεστημένη αιολική ισχύς έφτασε τα 74.767 MW, από 64.719 MW στο τέλος του 2008, με τη Γερμανία να προηγείται και να ακολουθείται από τις Ισπανία, Ιταλία, Γαλλία και Ην. Βασίλειο. Η εγκατεστημένη αυτή ισχύς σε ένα χρόνο παράγει κατά μέσο όρο 163TWh ηλεκτρικής ενέργειας που αντιστοιχεί στο 4.8% της συνολικής ζήτησης της ΕΕ. Στον αντίποδα, στην Ελλάδα προστέθηκαν μόλις 102 MW αιολικών έργων το 2009, δηλαδή λιγότερα από το 2008 (114 MW), και ακόμη πιο λίγα από το 2007 (125 MW) [5]. Συγκεντρωτικά, η αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς (MW) ανά μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα έτη 1998-2009 φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Χώρα	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Αυστρία	30	34	77	94	140	415	606	819	965	982	995	995
Βέλγιο	6	6	13	32	35	68	96	167	194	287	415	563
Βουλγαρία	0	0	0	0	0	0	10	10	36	57	120	177
Κύπρος	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Δημοκρατία												
της Τσεχίας	0	0	0	0	3	9	17	28	54	116	150	192
Δανία	1443	1771	2417	2489	2889	3116	3118	3128	3136	3125	3163	3465
Εσθονία	0	0	0	0	2	2	6	32	32	59	78	142
Φινλανδία	17	39	39	39	43	52	82	82	86	110	143	146
Γαλλία	19	25	66	93	148	257	390	757	1567	2454	3404	4492
Γερμανία	2875	4442	6113	8754	11994	14609	16629	18415	20622	22247	23897	25777
Ελλάδα	39	112	189	272	297	383	473	573	746	871	985	1087
Ουγγαρία	0	0	0	0	3	3	3	17	61	65	127	201
Ιρλανδία	73	74	118	124	137	190	339	496	746	795	1027	1260
Ιταλία	180	277	427	682	788	905	1266	1718	2123	2726	3736	4850
Λετονία	0	0	0	0	24	27	27	27	27	27	27	28
Λιθουανία	0	0	0	0	0	0	6	6	48	51	54	91
Λουξεμβούρ-												
γο	9	10	10	15	17	22	35	35	35	35	35	35
Μάλτα	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
Ολλανδία	361	433	446	486	693	910	1079	1219	1558	1747	2225	2229
Πολωνία	0	0	0	0	27	63	63	83	153	276	544	725
Πορτογαλία	60	61	100	131	195	296	522	1022	1716	2150	2862	3535
Ρουμανία	0	0	0	0	0	1	1	2	3	8	11	14
Σλοβακία	0	0	0	0	0	3	5	5	5	5	3	3
Σλοβενία	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ισπανία	834	1812	2235	3337	4825	6203	8264	10028	11623	15131	16689	19149
Σουηδία	174	220	231	293	345	399	442	509	571	788	1048	1560
Ην.Βασίλειο	333	362	406	474	552	667	904	1332	1962	2406	2974	4051

Πίνακας 1: Η αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα έτη 1998-2009,σε MW [5].

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας, που συνδυάζονται και με το σχετικό χαμηλό κόστος της, η αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εγείρει πολλά σημαντικά ζητήματα. Όταν ένα αιολικό πάρκο συνδεθεί στο ηλεκτρικό σύστημα, τότε το ίδιο το σύστημα και πιο συγκεκριμένα οι συμβατικές μονάδες παραγωγής εισάγουν σημαντικούς περιορισμούς στη λειτουργία των Α/Γ, οι οποίοι σχετίζονται με τα τεχνικά ελάχιστα και τη δυναμική συμπεριφορά των συμβατικών σταθμών. Οι περιορισμοί αυτοί είναι ακόμα πιο καθοριστικής σημασίας σε περιπτώσεις αιολικών πάρκων σε μη διασυνδεδεμένα νησιά ή αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. ντηζελογεννήτριες) δεν είναι αποδεκτό να υποφορτίζονται κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος (τεχνικό ελάχιστο), κυρίως λόγω φθορών, αυξημένων αναγκών συντήρησης και αντιοικονομικής λειτουργίας. Για αυτό το λόγο, σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας απαιτείται να λειτουργούν με ισχύεις πάνω από το τεχνικό τους ελάγιστο, το οποίο έχει τυπικές τιμές από 40-60%. Επίσης, κατά τη λειτουργία των συμβατικών σταθμών σε συνεργασία με αιολική παραγωγή είναι απαραίτητο να τηρείται πάντα κάποια στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή η παραγόμενη ισχύς να είναι μικρότερη από την ονομαστική, ώστε να είναι σε θέση να αναλάβουν πρόσθετη ισχύ σε περιπτώσεις μερικής ή ολικής απώλειας της αιολικής ισχύος. Στην πράξη τηρείται συνήθως πλήρης εφεδρεία, όσον αφορά την αιολική παραγωγή, με συνέπεια οι συμβατικές μονάδες που λειτουργούν να επαρκούν για την κάλυψη της ζητούμενης ισχύος ακόμα και σε περίπτωση πλήρους απώλειας της αιολικής παραγωγής.

Το γεγονός ότι η έντονη διακύμανση της ισχύος εξόδου των Α/Γ προκαλεί αντίστοιχα έντονες μεταβολές και στη λειτουργία των συμβατικών σταθμών, δεδομένου ότι η ζήτηση του φορτίου είναι περίπου σταθερή, οδηγεί στην ανάγκη τήρησης και δυναμικών περιορισμών διείσδυσης για την αιολική ισχύ. Βασικός λόγος είναι πως οι μεταβολές αυτές, όταν είναι αρκετά έντονες, προκαλούν μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου και τίθενται συνεπώς προβληματισμοί σχετικά με την ευστάθεια του συστήματος. Τελικώς, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τους περιορισμούς από τα τεχνικά ελάχιστα όσο και τους δυναμικούς περιορισμούς, προσδιορίζεται ο συνολικός περιορισμός διείσδυσης της αιολικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος σε αρκετές περιπτώσεις είναι πολύ μικρός, σε αντίθεση με το ενδεχόμενο πολύ υψηλό αιολικό δυναμικό της περιορής [6]. Ένας αποτελεσματικός τρόπος αύξησης της αιολικής διείσδυσης είναι μέσω της τεχνολογίας των υβριδικών συστημάτων, τα οποία αποτελούν συνδυασμό σταθμού παραγωγής από ΑΠΕ και διατάξεων-αποθηκών της ενέργειας, όπως για παράδειγμα ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός (ισχύς μικρότερη από 10 MW) [7].

#### 1.1.2 Η υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδραυλική ενέργεια παρέχεται δωρεάν από τη φύση, η εκμετάλλευσή της όμως προϋποθέτει σημαντικές δαπάνες και έργα. Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός έχει μηδενικό κόστος καυσίμου και επίσης απαιτεί λιγότερο προσωπικό και μικρότερα έξοδα συντήρησης από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό ιδίου μεγέθους. Αντιθέτως, οι ετήσιες δαπάνες εξυπηρετήσεως κεφαλαίου ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι μεγαλύτερες από του θερμοηλεκτρικού, εξ αιτίας των μεγάλων δομικών έργων που απαιτεί η διαμόρφωση της συνολικής υδραυλικής εγκαταστάσεως. Εκτός όμως από το κόστος της εγκατεστημένης ισχύος ή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να λαμβάνονται και άλλοι παράγοντες υπόψιν για την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου, όπως είναι η ενεργειακή πολιτική της χώρας, ο συνδυασμός της υδροηλεκτρικής εγκαταστάσεως με άλλες κοινωφελείς εργασίες, όπως άρδευση κ.α.

Το κόστος της εγκατεστημένης ισχύος ποικίλλει για τους διάφορους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς μέρος του κόστους αυτού είναι ανεξάρτητο από την ισχύ του σταθμού και σχετίζεται με αγορές εκτάσεων, απαλλοτριώσεις, έργα διαμορφώσεως, έργα στεγανοποιήσεως, σήραγγες εκτροπής, κατασκευή φράγματος και δρόμων προσπελάσεως και άλλα απαραίτητα έργα για τη λειτουργία τους. Το ποσοστό αυτό του συνολικού κόστους μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του σταθμού και εξαρτάται από τη θέση και τις ιδιομορφίες της περιοχής του σταθμού.

Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει συνεχή παροχή νερού, αλλά παρουσιάζονται εποχιακές διακυμάνσεις, όπως σε ένα μεγάλο ποτάμι στο οποίο η παροχή ύδατος αυξάνεται σε περιόδους με χιόνια ή βροχοπτώσεις, το νερό δεσμεύεται και αποθηκεύεται σε τεχνητές λίμνες ή δεξαμενές για να χρησιμοποιηθεί όταν χρειαστεί. Η ποσότητα του αποθηκευμένου ύδατος και η θέση της δεξαμενής καθορίζουν αν ο σταθμός θα εγκατασταθεί στη βάση του φράγματος ή σε άλλη θέση χαμηλότερα από τη δεξαμενή ώστε να αξιοποιείται η υψομετρική διαφορά.

Το μέγεθος ενός υδροηλεκτρικού σταθμού εξαρτάται κυρίως από:

- τη διαθέσιμη ετήσια ποσότητα ύδατος και το ρυθμό παροχής της και
- την «ευαισθησία» του κόστους εγκατεστημένης ισχύος στη μεταβολή της ισχύος του σταθμού.

Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος του σταθμού είναι η καμπύλη φορτίου του συστήματος. Οποιαδήποτε ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην ελάχιστη παροχή ύδατος δεν μπορεί να θεωρεί ασφαλής. Αυτή η ισχύς ή ενέργεια, που ονομάζεται πρωτεύουσα είναι πάντα διαθέσιμη και αποτελεί την ασφαλή συμμετοχή του σταθμού στο πρόγραμμα του συστήματος κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Κάθε ισχύς ή ενέργεια πάνω από αυτή την τιμή ονομάζεται δευτερεύουσα και η χρησιμοποίησή της γίνεται με ένα βαθμό βεβαιότητας μικρότερο της μονάδας.

Η υδραυλική ενέργεια δε χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί μόνη της κάποιο σύστημα. Συνήθως υπάρχει συνεργασία θερμοηλεκτρικής ή άλλης μορφής ενέργειας και υδραυλικής παραγωγής, ώστε η συνολική υδραυλική ενέργεια να διατίθεται με βάση τη μέγιστη οικονομία καυσίμου. Έτσι, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου για την άντληση ύδατος από μία χαμηλότερη στάθμη στη δεξαμενή, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής του φορτίου. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι χαμηλός, αλλά η ενέργεια άντλησης κατά τις εκτός αιχμής ώρες είναι πολύ φθηνότερη από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες υψηλού φορτίου.

Όσον αφορά στη θέση εγκατάστασης του σταθμού, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο τύπος της υδραυλικής ενέργειας (π.χ. ροή ποταμού, υδατόπτωση), από τον οποίο εξαρτάται και το είδος της εγκατάστασης. Στην περίπτωση κατασκευής τεχνητής λίμνης χρειάζεται κατάλληλη επιλογή της θέσεως του φράγματος και του υδροηλεκτρικού σταθμού, ενώ απαιτείται ταυτόχρονα και η πραγματοποίηση υδρολογικών μελετών και η μελέτη στατιστικών στοιχείων συλλογής ύδατος στη λεκάνη απορροής από διάφορες προελεύσεις (χείμαρροι, χιονοπτώσεις κλπ). Επιπλέον, βασική παράμετρο του υδροηλεκτρικού σταθμού αποτελεί η στεγανότητα του εδάφους της λεκάνης υπό συνθήκες πλήρους φόρτισης της δεξαμενής, η οποία οφείλει να βασίζεται σε κατάλληλες εδαφολογικές και βραχομηχανικές μελέτες [8].

Η συμβολή της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αντιπροσωπεύει περίπου το 20% της πλανητικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, σε αρκετές χώρες η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί τη βασική πηγή ηλεκτροπαραγωγής, συντελώντας στην εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων και περιορίζοντας την ατμοσφαιρική ρύπανση. Στην Ελλάδα η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό περίπου 25% της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα, αν και η ποσοστιαία συμμετοχή της στην κάλυψη των εγχώριων ενεργειακών αναγκών περιορίζεται σε μονοψήφια μεγέθη [9,10]. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της σταδιακής αλλαγής του νομοθετικού πλαισίου ηλεκτροπαραγωγής και της αντίθεσης των τοπικών κοινωνικών στη δημιουργία μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων (π.χ. Μεσοχώρα) η δημιουργία μεγάλων εγκαταστάσεων έχει πρακτικά μηδενισθεί, αφήνοντας ανεκμετάλλευτο σημαντικό ποσοστό του εγχώριου υδάτινου δυναμικού. Αντιθέτως, αξιόλογη δραστηριότητα καταγράφεται στον τομέα των μικρών υδροηλεκτρικών έργων [11]. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα αποτελούν κατά κανόνα έργα μικρής κλίμακας, ενταγμένα στο τοπικό φυσικό περιβάλλον, ενώ απουσιάζουν τα μεγάλα φράγματα και τα εκτεταμένα έργα διαμόρφωσης, με στόχο τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Σε αντίθεση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, τα οποία στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κυρίως για ρύθμιση ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (MYE) λειτουργούν με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής τους παραγωγής [12].

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ισχύον καθεστώς οικονομικής επιδότησης των MYE, είτε στα πλαίσια του υπουργείου ανάπτυξης (ΥΠΑΝ) με τα επιχειρησιακά προγράμματα ανταγωνιστικότητας και επιχειρηματικότητας (ΕΠΑΝ), είτε στα πλαίσια του εκάστοτε Αναπτυξιακού Νόμου (π.χ. 3299/2004), στηρίζεται στην επιδότηση της εγκατεστημένης ισχύος (π.χ. με 600 έως 800€/kW). Με τον τρόπο αυτό επικροτείται η υπερδιαστασιολόγηση των υποψήφιων εγκαταστάσεων, αγνοώντας στην ουσία την ανάγκη για υψηλή και μακροχρόνια ενεργειακή παραγωγή [13,14].

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι η δυνατότητα άμεσης σύνδεσης - απόζευξης στο δίκτυο, ή η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας τους, η αξιοπιστία τους, η παραγωγή ενέργειας αρίστης ποιότητας χωρίς διακυμάνσεις, η άριστη διαχρονική συμπεριφορά τους, η μεγάλη διάρκεια ζωής, ο προβλέψιμος χρόνος απόσβεσης των αναγκαίων επενδύσεων που οφείλεται στο πολύ χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας και στην ανυπαρξία κόστους πρώτης ύλης, η φιλικότητα προς το περιβάλλον με τις μηδενικές εκπομπές ρύπων και τις περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η ταυτόχρονη ικανοποίηση και άλλων αναγκών χρήσης νερού (ύδρευσης, άρδευσης, κλπ.), η δυνατότητα παρεμβολής τους σε υπάρχουσες υδραυλικές εγκαταστάσεις, κ.α. Επιπλέον, οι πολύ υψηλοί βαθμοί απόδοσης των υδροστροβίλων, που μερικές φορές υπερβαίνουν και το 90%, και η πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής των υδροηλεκτρικών έργων, που μπορεί να υπερβαίνει και τα 100 έτη, αποτελούν δύο χαρακτηριστικούς δείκτες για την αποτελεσματικότητα και την τεχνολογική ενεργειακή ωριμότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.

## 1.2 Το ζήτημα της ρύθμισης φορτίου-συχνότητας (ΡΦΣ)

## 1.2.1 Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας

Η διατήρηση μίας σταθερής επιθυμητής συχνότητας 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 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. Συνεπώς, η ευστάθεια και η ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων απαιτούν διατάξεις οι οποίες να ρυθμίζουν τη συχνότητα, ώστε να διατηρείται σε επιθυμητές τιμές. Η ρύθμιση της συχνότητας επιτυγχάνεται μέσω του ισοζυγίου της ενεργού ισχύος.

Βασικός λόγος που επιβάλλει τη λειτουργία των δικτύων με σταθερή συχνότητα είναι η διασφάλιση της ευστάθειας και της σταθερότητας της ταχύτητας περιστροφής των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών των δικτύων. Η μείωση της συχνότητας μπορεί να επιφέρει μεγάλη αύξηση των ρευμάτων μαγνήτισης των ασύγχρονων μηχανών και των μετασχηματιστών. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί πως 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. Επιπλέον, η λειτουργία συστημάτων με μικρότερες τιμές συχνότητας σχετίζεται με αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις από τις δονήσεις των πτερυγίων των θερμικών σταθμών παραγωγής, 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 υποσυγνότητας μπορεί να αντανακλώνται σε υπερθέρμανση των αντιδραστήρων λόγω χαμηλής ροής των ψυκτικών υγρών. Επίσης, είναι δυνατόν η λειτουργία με συχνότητα μικρότερης της ονομαστικής να επηρεάσει την απόδοση των βοηθητικών συστημάτων των ασύγχρονων γεννητριών και προφανώς, τέτοια προβλήματα είναι ικανά να οδηγήσουν σε αποκοπή των μονάδων παραγωγής [15].

Στον αντίποδα, η λειτουργία με συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, η οποία πηγάζει από περίσσεια παραγόμενης ισχύος ή απώλεια φορτίου προκαλεί επίσης αρκετά προβλήματα. Οι υψηλές στροφές προκαλούν 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 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 [17].

Όσον αφορά στη ΡΦΣ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται η συνεχής προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί συνεχώς την ονομαστική της τιμή. Αν δεν υπήρχε κάποια ρύθμιση οι γεννήτριες δεν θα μπορούσαν να ανταποκριθούν σε μια ενδεχόμενη αύξηση του φορτίου, με αποτέλεσμα να επιβραδυνθούν και επομένως να μειωθεί η συχνότητα του συστήματος [8].

Σε ένα σύστημα γεννήτριας-φορτίου, μία αύξηση του φορτίου, εφόσον δε συμβαδίζει με αντίστοιχη αύξηση της τροφοδοτήσεως της μηχανής, τροφοδοτείται από την κινητική
ενέργεια των στρεφόμενων μερών της και μεταβάλλει τη 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 1.1: Γεννήτρια που τροφοδοτεί απομονωμένο φορτίο [15].

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  $\Delta T_m - \Delta T_e = 2H\Delta\dot{\omega}$  σε ανά μονάδα τιμές, όπου Η η χρονική σταθερά αδρανείας της γεννήτριας [15]. Η μείωση της συχνότητας για μία συγκεκριμένη αύξηση του φορτίου καθορίζεται από την αντίστοιχη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της γεννήτριας.

#### 1.2.2 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Κάθε μονάδα παραγωγής χαρακτηρίζεται από μία ρυθμιζόμενη χαρακτηριστική φορτίουσυχνότητας (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 1.2: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μονάδας παραγωγής.

Η ΡΦΣ 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 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 ποσότητες 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 μεταφράζει την αλλαγή αυτή σε σήμα για την αντίστοιχη αναπροσαρμογή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος από τον αντίστοιχο στρόβιλο. Η ρύθμιση αυτή, που αναφέρεται ως πρωτεύουσα αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας, το οποίο καλείται να εξαλείψει η δευτερεύουσα ρύθμιση. 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.

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 πηγάζει από το γεγονός ότι το συνολικό φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της επαγωγικής του συνιστώσας εξαρτάται από τη συχνότητα και αυξάνεται όταν αυτή αυξάνει, αλλά και αντίστροφα. Για αυτό το λόγο εισάγεται μια συνιστώσα αυτορρυθμίσεως στο σύστημα, καθώς μία ενδεχόμενη αύξηση του φορτίου προκαλεί μείωση της συχνότητας, η οποία συνεπάγεται αντίστοιχη ελάττωση του φορτίου, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ανάγκη για πρόσθετη παραγωγή ισχύος [8,16].

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

$$\mathbf{R} = -\frac{\Delta\omega}{\Delta \mathbf{P}} \tag{1.1}$$

Στην παραπάνω σχέση,  $\Delta \omega$  είναι η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας, η οποία ισούται με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης και  $\Delta P$  η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου που προκάλεσε τη μεταβολή  $\Delta \omega$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 αν αυξηθεί η ζήτηση του φορτίου, προκαλείται πτώση της συχνότητας του δικτύου από την αρχική τιμή  $\omega_o$  στην τελική τιμή νέας ισορροπίας  $\omega_1$ του συστήματος. Αυτό το γεγονός, μετά το τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης, θα έχει οδηγήσει στην αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος από την αρχική τιμή  $P_o$ στη νέα τιμή  $P_1$ .

Ο στατισμός μετριέται συχνά σε ποσοστό επί τοις εκατό. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.2, η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας είναι αρνητική με συνέπεια ο στατισμός να είναι θετικό μέγεθος. Αν μία μονάδα έχει μικρή τιμή στατισμού, τότε για μικρή μεταβολή της συχνότητας, μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της και για αυτό το λόγο ονομάζεται ρυθμίζουσα μονάδα, καθώς συμμετέχει καθοριστικά με τη μεταβολή της παραγωγής της στη ρύθμιση της συχνότητας. Αντιθέτως, μία μονάδα με μεγάλο στατισμό ονομάζεται μονάδα βάσεως και μεταβάλλει ελάχιστα το φορτίο της στις μεταβολές της συχνότητας.

#### 1.2.3 Συμμετοχή των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα ΡΦΣ

Η αύξηση της συμμετοχής των ανεμογεννητριών (Α/Γ) στο ενεργειακό portfolio συνεπάγεται γενικά και ανάληψη ευθυνών από την πλευρά των Α/Γ που μέχρι τώρα είχαν μόνο οι συμβατικοί σταθμοί. Η παρουσία Α/Γ δε συμβάλει εν γένει στην αδράνεια του δικτύου. Επίσης, η λειτουργία των ανεμογεννητριών απαιτεί τη διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας που να καλύπτει τη στοχαστικότητά τους. Παρ' όλα αυτά, αυξημένη ζήτηση στρεφόμενης εφεδρείας λόγω υψηλής διείσδυσης Α/Γ μπορεί να σημάνει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τη

λειτουργία των συμβατικών θερμικών σταθμών στα τεχνικά τους ελάχιστα και ίσως οδηγήσει σε σβέση σταθμών ελαττώνοντας περαιτέρω την αδράνεια του συστήματος.

Στην περίπτωση που οι Α/Γ συμμετέχουν στη ΡΦΣ μέσω αποφόρτισης ελαττώνεται η αντίστοιχη απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία και είναι πιθανόν να αποτρέπεται η σβέση γεννητριών και κατά συνέπεια η απώλεια αδράνειας του συστήματος. Με την επιπλέον πιθανή αδρανειακή συμμετοχή των Α/Γ περιορίζονται οι βυθίσεις συχνότητας που θα εκδηλώνονταν απουσία τους. Αυτές είναι ουσιαστικά και οι τρεις τεχνικές λειτουργίας των Α/Γ που εξετάζονται στην παρούσα εργασία ως προς τη συμπεριφορά τους σε μία απότομη αύξηση του φορτίου και διερευνάται η δυνατότητα και τα αποτελέσματα συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με καθεμία από τις μεθόδους αυτές.

### 1.3 Αντικείμενο διπλωματικής

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα συμμετοχής ενός υβριδικού συστήματος, αποτελούμενου από Α/Γ και μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό στην πρωτεύουσα ΡΦΣ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Διερευνάται η δυνατότητα αντιμετώπισης της βύθισης της συχνότητας του συστήματος, η οποία μπορεί να συμβεί από είσοδο φορτίου ή απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής.

Οι Α/Γ επιτυγχάνουν τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ΡΦΣ μέσω τριών διαφορετικών τεχνικών. Η πρώτη, που αναφέρεται ως pitch deloading, επιτυγχάνει λειτουργία της Α/Γ με ποσοστιαία αποφόρτιση, της τάξεως του 10%, μέσω μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας, και εξασφαλίζει τη δυνατότητα αύξησης της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ σε περίπτωση βύθισης της συχνότητας στο δίκτυο. Η επόμενη τεχνική, που αναφέρεται ως overspeeding, εκμεταλλεύεται την επιτάχυνση του δρομέα για την επίτευξη αποφορτισμένης λειτουργίας, ενώ η τελευταία εφαρμοζόμενη τεχνική, η inertial response, επιτυγχάνει τη συμμετοχή της ανεμογεννήτριας στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου, έτσι ώστε να συγκρατεί μία ενδεχόμενη βύθιση της συχνότητας προσφέροντας την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον άξονά της.

Όσον αφορά στον υδροηλεκτρικό σταθμό, εξετάζονται οι περιπτώσεις που διαθέτει ρυθμιστή στροφών με ένα απλό κέρδος, διαθέτει ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό ή τέλος έχει πύργο αναπάλσεως και ρυθμιστή στροφών με απλό κέρδος. Εξετάζονται οι συνθήκες ευστάθειας κάθε περίπτωσης και συνδυάζονται με όλες τις τεχνικές λειτουργίας των Α/Γ για τη διερεύνηση της δυνατότητας συνεργασίας τους στην πρωτεύουσα ΡΦΣ. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται επίσης δύο διαφορετικοί τύποι γεννήτριας των ανεμογεννητριών, η

γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, και πραγματοποιούνται συγκριτικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς τους.

#### 1.3.1 Συνεισφορά και σχετικές εργασίες

Στην μελέτη [45] αξιοποιείται η μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα, μέσω κατάλληλου ελεγκτή, προκειμένου να επιτευχθεί συμμετοχή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ. Εξετάζεται η τεχνική επιτάχυνσης του δρομέα (overspeeding), κατά την οποία η Α/Γ λειτουργεί σε προκαθορισμένη καμπύλη αποφόρτισης, ενώ όταν συμβεί κάποια διαταραχή στην τιμή της συχνότητας, η τιμή αναφοράς μεταβάλλεται κατάλληλα, με σκοπό την απόδοση της περίσσειας ισχύος. Προκειμένου να είναι δυνατόν να υλοποιηθεί ο συγκεκριμένος έλεγχος, απαιτείται η δυνατότητα ύπαρξης βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου.

Στην [46] αναπτύσσεται στρατηγική αποφόρτισης μέσω μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας. Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος και πιο συγκεκριμένα μία ενδεχόμενη μεταβολή της τιμής της δίνει σήμα για μεταβολή της γωνίας βήματος της ανεμογεννήτριας.

Στην [36] εξετάζεται το σύστημα ελέγχου μίας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών μεταβλητών στροφών που συνεργάζεται με ανεμογεννήτρια και συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων. Η γεννήτρια ελέγχεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη ισχύς από τον εκάστοτε άνεμο με μέγιστη απόδοση κάτω από διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Η εργασία παρουσιάζει τη δυναμική συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος.

Στην [47] μελετάται η συμμετοχή στη ΡΦΣ από Α/Γ μεταβλητών στροφών-μεταβλητού βήματος υπό στρατηγική αποφόρτισης μέσω μεταβολής του βήματος για ταχύτητες ανέμου συγκεκριμένα άνω της ονομαστικής.

Στην [32] εφαρμόζεται κατάλληλη τεχνική επέκτασης του ήδη υπάρχοντος συστήματος ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, προκειμένου να συμμετέχει στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου σε περίπτωση μεταβολής της συχνότητάς του.

Στην [39] αναφέρεται η λειτουργία αντλησιοαποταμιευτικού σταθμού σε συνεργασία με ανεμογεννήτριες σε ένα μικρό αυτόνομο σύστημα νησιού με σκοπό της αύξησης της αιολικής διείσδυσης στο σύστημα.

Στην παρούσα εργασία δεν υπάρχει η ανάγκη πρόβλεψης ή μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου για καμία από τις αναπτυχθείσες τεχνικές αποφόρτισης, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο προβλήματα που σχετίζονται με τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη του ανέμου. Επιπλέον, όσον αφορά στην τεχνική αποφόρτισης pitch deloading αναπτύσσεται σύστημα κατάλληλο για όλες τις ταχύτητες ανέμου, άνω και κάτω της ονομαστικής, προκειμένου η πρωτεύουσα ΡΦΣ να εφαρμόζεται σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου. Επίσης, στην παρούσα εργασία, όσον αφορά στην τεχνική αποφόρτισης του overspeeding, στην περιοχή όταν η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα φτάσει την ονομαστική της τιμή, εφαρμόζεται συνδυασμός της τεχνικής του overspeeding με την τεχνική του pitch control. Συνεπώς, η αναπτυχθείσα στρατηγική ελέγχου δεν επιτρέπει την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε ταχύτητες άνω της ονομαστικής, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μικρότερες μηχανικές καταπονήσεις του μηχανικού μέρους της Α/Γ, ενώ τα ηλεκτρονικά ισχύος της Α/Γ δεν απαιτείται να διαχειριστούν μεγαλύτερα ποσοστά ισχύος από τα προδιαστασιολογημένα.

Στη συγκεκριμένη εργασία, εξετάζεται η συνδυασμένη συμμετοχή των Α/Γ και ενός ΜΥΗΣ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και συγκρίνονται όλες οι περιπτώσεις συμμετοχής των Α/Γ και του ΜΥΗΣ. Οι Α/Γ λειτουργούν με τρεις αναπτυχθείσες τεχνικές για την συμμετοχή τους στη ΡΦΣ, μέσω της επιτάχυνσης της ταχύτητας του δρομέα, του ελέγχου της γωνίας βήματος και της συμμετοχής της ανεμογεννήτριας στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου. Ο ΜΥΗΣ έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει χρησιμοποιώντας ρυθμιστή στροφών με απλό κέρδος, ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό ή διαθέτοντας πύργο αναπάλσεως ρυθμιστή στροφών με απλό κέρδος. Επιπλέον, συγκρίνεται και η συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών, όταν συμμετέχει στην πρωτεύουσα ΡΦΣ και με τις τρεις προαναφερθείσες τεχνικές, με την αντίστοιχη συμπεριφορά που επιτυγχάνεται από τη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

## 1.4 Περιγραφή της δομής της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από 8 κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται εκτενώς οι διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών και υδροστροβίλων, η μοντελοποίηση των βασικών υποσυστημάτων τους, καθώς και τα χρησιμοποιούμενα συστήματα ελέγχου τους.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου της αποφόρτισης των Α/Γ οι οποίες εξασφαλίζουν τη δυνατότητα συμμετοχής των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα ΡΦΣ.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται πλήρως το πρόβλημα και οι παράμετροι των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, καθώς και τα βασικά σενάρια υλοποίησης των προσομοιώσεων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων με βάση τα οποία υλοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις.

Στο Κεφάλαιο 6 σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται συνολικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

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

# 2

# Θεωρητικό υπόβαθρο

# 2.1 Ανεμογεννήτριες

#### 2.1.1 Κατηγοριοποίηση ανεμογεννητριών (Α/Γ)

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους σε:

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

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

Παρά το γεγονός πως αποτελούν την πρώτη κατηγορία ανεμογεννητριών που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε, συνεχίζουν ακόμα και σήμερα να αποτελούν ένα σημαντικό μερίδιο των εν λειτουργία Α/Γ. Μπορούν να λειτουργούν είτε σε συνδυασμό με γεννήτριες επαγωγής είτε με σύγχρονες γεννήτριες, όμως επιλέγεται πάντα η χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, κυρίως τύπου κλωβού, καθώς οι σύγχρονες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαίτερα 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, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι σημαντικό.
- Απλή κατασκευή και σχετικά μικρό βάρος.
- Εξαιρετική αξιοπιστία και περιορισμένη ανάγκη συντήρησης.

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

- Λειτουργώντας υπό μη 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 συνεπώς διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος του δικτύου.
- Η ασύγχρονη γεννήτρια που συνήθως χρησιμοποιείται απαιτεί την απορρόφηση αέργου ισχύος
- Κατά την εκκίνηση και τη ζεύξη-απόζευξη των γεννητριών σταθερών στροφών, παρατηρούνται έντονα μεταβατικά φαινόμενα.

Από την άλλη πλευρά, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών αποτελούν σήμερα την κυρίαρχη επιλογή για τις νέες εγκαταστάσεις Α/Γ. Ένας από τους βασικότερους λόγους για τον οποίο προτιμώνται είναι η ύπαρξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, που επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να αποκτούν μεγαλύτερο έλεγχο και επίβλεψη της λειτουργίας τους. Χάρη στην παρουσία 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, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι μεταβολές του ανέμου παύουν να αποτελούν πρόβλημα και οι διακυμάνσεις ισχύος απορροφώνται μέσω των αλλαγών στην ταχύτητα της Α/Γ. Ορισμένα από τα σημαντικότερα 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, καθώς, χάρη στη δυνατότητα 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, καθώς είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, σε περίπτωση ασθενούς ανέμου.
- Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων.

Επίσης, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας προσφέρει πρόσθετα πλεονεκτήματα στη λειτουργία των Α/Γ μεταβλητών στροφών, όπως τα εξής:

- Έλεγχος της παραγόμενης ενεργού και αέργου ισχύος.
- Καλύτερης ποιότητας παρεχόμενη ισχύς εξόδου (μείωση διακυμάνσεων ισχύος, βελτιωμένο επίπεδο flicker, περιορισμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης) και γενικότερα καλύτερη δυναμική συμπεριφορά.
- Γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα.

Παρ' όλα αυτά, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως:

- Αυξημένο κόστος λόγω των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονικών ισχύος.
- Απώλειες στον μετατροπέα ισχύος.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα.
- Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο και ανάγκη εγκατάστασης φίλτρων στο δίκτυο [1,6,18].

Άλλο κριτήριο κατηγοριοποίησης των Α/Γ είναι ο τρόπος ελέγχου του περιορισμού υψηλών αεροδυναμικών ροπών. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, διακρίνονται οι εξής δύο κατηγορίες ανεμογεννητριών:

- 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 του, η γωνία βήματος της έλικας ρυθμίζεται σε μια ελάχιστη τιμή, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη εκμετάλλευση της αεροδυναμικής ισχύος. Πρόκειται ουσιαστικά για Α/Γ με πτερύγια, τα οποία μπορούν να περιστρέφονται κατά το διαμήκη άξονά τους. Με τη μεταβολή του βήματος της έλικας, δηλαδή της γωνίας β που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση της κίνησης (pitch angle), ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η ασκούμενη ροπή. Έτσι, όταν η Α/Γ λειτουργεί με άνεμο πάνω από τον ονομαστικό, τα πτερύγια στρέφονται κατά κατάλληλη γωνία μέσα από ένα σύστημα ελέγχου και εξασφαλίζεται 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 στην ελαχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της έλικας στην την ελάχιστη αντίσταση.

Από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των Α/Γ με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control) αποτελεί το γεγονός ότι αναπτύσσονται χαμηλότερα φορτία στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της Α/Γ, περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς χωρίς διακοπή της λειτουργίας και

επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε χαμηλό άνεμο. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του τύπου Α/Γ είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του συστήματος ελέγχου των πτερυγίων καθώς και η καταπόνηση τους λόγω αδρανειακής φόρτισης.

Από την άλλη πλευρά, οι Α/Γ με αεροδυναμικό έλεγχο (stall control) διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης, τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Βασικό πλεονέκτημά των Α/Γ αυτών αποτελεί το γεγονός πως δεν απαιτούν μηχανισμό μεταβολής του βήματος της έλικας και συνεπώς συνιστούν απλούστερες και στιβαρότερες κατασκευές. Μειονεκτήματα μίας Α/Γ τέτοιου τύπου είναι το γεγονός ότι τα πτερύγια της υφίστανται μεγαλύτερες μηχανικές καταπονήσεις, ότι σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζεται μείωση της παραγόμενης ισχύος, καθώς και η αδυναμία ελέγχου της εξαγόμενης ισχύος [1].

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 2.1: Τυπικές καμπύλες ισχύος για διάφορες περιοχές λειτουργίας Α/Γ τύπου Stall (διακεκομμένη γραμμή) και Α/Γ τύπου Pitch-Controlled (συνεχής γραμμή) [18].

Τρίτο κριτήριο, σύμφωνα με το οποίο 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 δακτυλίους		Με έλεγχο
			ολίσθησης (optislip)
			Διπλή τροφοδότηση
			με AC/DC/AC
			Διπλή τροφοδότηση
			με κυκλομετατροπέα
			AC/DC/AC
ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	Με ηλεκτρική	Απευθείας Σύνδεση	Σύνδεση με
	διέγερση		AC/DC/AC
	Με μόνιμους μαγνήτες		Σύνδεση με
			AC/DC/AC
			Σύνδεση με
			κυκλομετατροπέα
			AC/AC
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ		Απευθείας σύνδεση σε δίκτυο DC	
ΣΥΝΕΧΟΥΣ		Με αντιστροφέα DC/AC δίκτυο AC	
ΡΕΥΜΑΤΟΣ			
	1	1	

Πίνακας 2: Τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους μιας Α/Γ.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι στην αγορά είναι:

- Α/Γ σταθερών στροφών ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο: χαρακτηρίζεται από 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 [18].

#### 2.1.2 Συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής και ελέγχου των

#### ανεμογεννητριών

Τα συστήματα από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Τα συστήματα μίας ανεμογεννήτριας.

Ουσιαστικά μία Α/Γ αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, το μηχανικό και το ηλεκτρικό μέρος. Περιλαμβάνει, όμως, επίσης και συστήματα ελέγχου των τμημάτων αυτών. Το μηχανικό μέρος αναλαμβάνει τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ροπή στον δρομέα, ενώ το ηλεκτρικό σύστημα με τη σειρά του μετατρέπει τη μηχανική αυτή

ροπή σε ηλεκτρική ισχύ. Ένα γενικό διάγραμμα των κύριων τμημάτων μίας Α/Γ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3: Τα κύρια τμήματα μίας ανεμογεννήτριας.

#### 2.1.2.1 Το αεροδυναμικό σύστημα της Α/Γ

Η ισχύς μιας ποσότητας ανέμου η οποία κινείται με ταχύτητα U<sub>w</sub> ισούται με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται στην ποσότητα αυτή. Δηλαδή:

$$P_{a} = \frac{1}{2} \cdot (p \cdot A \cdot U_{w}) \cdot U_{w}^{2} = \frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot U_{w}^{3}$$
(2.1)

όπου Α:η επιφάνεια της κινούμενης μάζας ανέμου  $(m^2)$ 

p:η πυκνότητα του ανέμου ( kg/ $m^3$ )

 $pAU_w$ :η μάζα του κινούμενου αέρα (kg)

Από την ισχύ αυτή  $P_a$  ένα μέρος μετατρέπεται σε «μηχανική ισχύ»  $P_m$ :

$$P_{\rm m} = C_{\rm p} \cdot P_{\rm a} = \frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot C_{\rm p}(\lambda, \beta) \cdot U_{\rm w}^3$$
(2.2)

ópou  $C_p:$ o aerodunamikóς suntelestác iscúoc

λ: ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

 $\beta$ : η γωνία βήματος έλικας (σε μοίρες)

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C<sub>p</sub> εκφράζει το ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου που μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ από τον ανεμοκινητήρα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκμεταλλεύσιμη αεροδυναμική ισχύς. Η τιμή του C<sub>p</sub> είναι συνάρτηση της γωνίας β του βήματος της έλικας και του λόγου λ της ταχύτητας του ακροπτερυγίου R· $\omega_t$  (όπου R η ακτίνα της έλικας και  $\omega_t$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα) και της ταχύτητας ανέμου  $U_w$ :

$$\lambda = \frac{\omega_{t} \cdot R}{U_{w}}$$
(2.3)

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής C<sub>p</sub>ονομάζεται «όριο του Betz», δίνει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να ληφθεί από τον άνεμο μέσω μιας ιδανικής έλικας και ισούται με  $C_{pmax} = 0,593$ . Τυπικές πρακτικές τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή είναι 0.4 έως 0.5. Μεγάλος αριθμός μαθηματικών εκφράσεων έχει αναπτυχθεί για την αναλυτική προσέγγιση και προσδιορισμό του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C<sub>p</sub>(λ, β),αλλά αυτή που επιλέγεται στην συγκεκριμένη εργασία είναι η εξής:

$$C_{p} = c_{1} \left( c_{2} \frac{1}{\lambda_{i}} - c_{3}\beta - c_{4}\beta^{x} - c_{5} \right) e^{-c_{6} \frac{1}{\lambda_{i}}},$$

$$(2.4)$$

$$\delta \pi o \psi \quad \frac{1}{\lambda_{i}} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^{3} + 1}$$

με παραμέτρους

 $c_1=0.22, c_2=116, c_3=0.4, c_4=0, c_5=5, c_6=12,5, x=0.$ 

Σύμφωνα με τη σχέση (2.4), παρουσιάζονται παρακάτω οι καμπύλες  $C_p$  συναρτήσει του λ για διάφορες γωνίες β:



Σχήμα 2.4: Ο αεροδυναμικός συντελεστής Cp συναρτήσει του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ για γωνίες βήματος πτερυγίων 0, 5, 10, 15, 20, 25 και 30 μοίρες.

Η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_{pmax}$  επιτυγχάνεται για β=0° και  $\lambda_{opt}$ , όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα και η τιμή αυτή εξασφαλίζει μέγιστη απολαβή αεροδυναμικής ισχύος.

Η μηχανική ροπή που ασκείται στην πλευρά χαμηλών στροφών του δρομέα της Α/Γ προκύπτει από την αεροδυναμική ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ως εξής:

$$T_M = \frac{P_m}{\omega_t}$$
(2.5)

Μία ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών – μεταβλητού βήματος, όπως αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία λειτουργεί στις διάφορες ταχύτητες ανέμου ως εξής:

► Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής και μεγαλύτερες της ταχύτητας ένταξης (U<sub>cut-in</sub>) η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με βάση την αρχή της μέγιστης δυνατής απορρόφησης αιολικής ισχύος από τη προσφερόμενη ισχύ του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε ταχύτητα ανέμου μέχρι την ονομαστική η ανεμογεννήτρια παράγει ισχύ υπό το βέλτιστο  $C_p = C_{pmax}$  το οποίο εξασφαλίζεται από την ελάχιστη δυνατή γωνία βήματος έλικας που μπορεί να τεθεί και μία αντίστοιχη βέλτιστη τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ=λ<sub>opt</sub>. Σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας, η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας ανέμου, όπως δηλώνεται και από την σχέση (2.2).

Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής η ανεμογεννήτρια λειτουργεί περιορίζοντας με κάποιο σύστημα ελέγχου την παραγόμενη ισχύ στην ονομαστική τιμή της, το οποίο επιτυγχάνεται με μείωση της τιμής του  $C_p$ . Συνεπώς, σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, υπάρχει ένα μέρος της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου το οποίο «απορρίπτεται», προκειμένου η ισχύς να παραμένει στην μέγιστη, ονομαστική τιμή της.

Οι δύο αυτές περιοχές λειτουργίας απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Ταχύτητα δρομέα ω

Σχήμα 2.5: Σημεία λειτουργίας της Α/Γ για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Μέχρι την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η Α/Γ λειτουργεί στα σημεία μέγιστης απολαβής ισχύος (τα κόκκινα σημεία στο παραπάνω σχήμα), ακολουθεί δηλαδή η Α/Γ την καμπύλη MPPT (maximum power point tracking), ενώ 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 2.6: Η παραγόμενη μηχανική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

Συνεπώς, το αεροδυναμικό μοντέλο της Α/Γ μεταβλητού στροφών-μεταβλητών βήματος μοντελοποιήθηκε στο Simulink, ως εξής:



Σχήμα 2.7: Αεροδυναμικό μοντέλο Α/Γ μεταβλητού στροφών-μεταβλητών βήματος.

Στο παραπάνω μοντέλο η μηχανική ισχύς ανά μονάδα στο δρομέα της ανεμογεννήτριας Pt\_pu υπολογίζεται ως εξής:

$$Pt_pu = \frac{Pt}{Pt,nom} = \frac{\frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot C_p \cdot U_w^3}{\frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot C_{p,opt} \cdot U_{w,nom}^3} = \frac{C_p \cdot U_w^3}{C_{p,opt} \cdot U_{w,nom}^3}$$
(2.6)

Η γωνία pitch angle που εμφανίζεται στο παραπάνω μοντέλο προέρχεται από ένα PI ελεγκτή, ο οποίος έχει ως είσοδο το σφάλμα που προκύπτει ως η διαφορά της ονομαστικής ταχύτητας του δρομέα από την στιγμιαία πραγματική ταχύτητα δρομέα ( $\omega_t - \omega_{t,nom}$ ) και συνεπώς

παράγει μία θετική γωνία βήματος πτερυγίου για ταχύτητες  $\omega_t > \omega_{t,nom}$ . Η παραγόμενη αυτή γωνία «χαλάει» την αεροδυναμική των πτερυγίων, προκειμένου η Α/Γ να μπορεί να απορρίψει μέρος της ισχύος του ανέμου και να μην ξεπεράσει τα ονομαστικά της μεγέθη για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική.

#### 2.1.2.2 Το αεροελαστικό μοντέλο της Α/Γ

Τα βασικά στρεφόμενα μέρη του μηχανικού συστήματος μιας ανεμογεννήτριας είναι:

- Η έλικα (περιλαμβάνει τα πτερύγια και την πλήμνη)
- Το κιβώτιο ταχυτήτων με τους εκατέρωθεν άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας και τους συνδέσμους τους και
- Ο δρομέας της γεννήτριας.

Κάθε στρεφόμενη μάζα χαρακτηρίζεται από την αδράνειά της J και από ένα συντελεστή τριβών D, που εκφράζει τις απώλειες ροπής κατά την περιστροφική κίνηση και ονομάζεται εξωτερικός συντελεστής απόσβεσης. Ειδικά, το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελείται από δύο στρεφόμενα τμήματα με διαφορετικές ταχύτητες, που συνδέουν την έλικα και τη γεννήτρια μέσω των αξόνων χαμηλών και υψηλών στροφών, αντίστοιχα. Κάθε σύνδεσμος περιγράφεται μέσω ενός στοιχείου ελαστικότητας/απόσβεσης, με σταθερά δυσκαμψίας K και συντελεστή εσωτερικής απόσβεσης d.

Στην συγκεκριμένη εργασία, όπως και στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, έχει θωρηθεί ένα απλό μηχανικό σύστημα δύο μαζών, όπως ακριβώς φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.8: Μηχανικό σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών.

Στο παραπάνω μηχανικό σύστημα των δύο μαζών το ένα τμήμα που θα μοντελοποιηθεί είναι η έλικα, ενώ το άλλο είναι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια μαζί, καθώς ο άξονας υψηλών στροφών είναι συνήθως σημαντικά άκαμπτος.

Οι εξισώσεις κίνησης των στρεφόμενων μαζών, όπως προκύπτουν από τον πίνακα καταστάσεως του συστήματος δίνονται παρακάτω:

$$\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}\mathrm{t}} = \frac{1}{J_{\mathrm{t}}} (T_{\mathrm{t}} - T_{\mathrm{wg}} - D_{\mathrm{t}} \cdot \omega_{\mathrm{t}})$$
(2.7)

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{J_g} \left( -T_g + T_{wg} - D_g \cdot \omega_g \right)$$
(2.8)

$$T_{wg} = K_{wg} \cdot \theta + D_{wg} \frac{d\theta}{dt}$$
(2.9)

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega_{\mathrm{t}} - \omega_{\mathrm{g}} \tag{2.10}$$

όπου με θ και ω συμβολίζονται η γωνία και η γωνιακή ταχύτητα κάθε μάζας αντίστοιχα. Με δείκτη t συμβολίζονται τα μεγέθη της έλικας ή αλλιώς της τουρμπίνας, με δείκτη g τα μεγέθη της γεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων, που έχουν θεωρηθεί ως μια ενιαία μάζα, και με τον δείκτη wg τα μεγέθη του συνδέσμου μεταξύ του δρομέα της έλικας και του δρομέα της γεννήτριας.

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Laplace στις σχέσεις (2.7)-(2.10), θεωρώντας μηδενικές τις τριβές στην έλικα και τη γεννήτρια  $D_t = D_g = 0$  και αντικαθιστώντας την (2.10) στην (2.9) προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\omega_{\rm t} = \frac{1}{s} \frac{1}{J_{\rm t}} (T_{\rm t} - T_{\rm wg}) \tag{2.11}$$

$$\omega_{\rm g} = \frac{1}{\rm s} \frac{1}{\rm J_g} \left( -{\rm T_g} + {\rm T_{wg}} \right) \tag{2.12}$$

$$T_{wg} = K_{wg} \cdot \frac{1}{s} \cdot (\omega_t - \omega_g) + D_{wg} \cdot (\omega_t - \omega_g)$$
(2.13)

Με βάση τις σχέσεις αυτές κατασκευάστηκε το παρακάτω μοντέλο δύο μαζών της Α/Γ:



Σχήμα 2.9: Αεροελαστικό μοντέλο προσομοίωσης της Α/Γ.

Το μοντέλο έχει εισόδους την ισχύ στο δρομέα της  $A/\Gamma$  Pt και την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας Pg. Από αυτές τις δύο εισόδους υπολογίζεται η ροπή στον δρομέα της  $A/\Gamma$  Tt από τη σχέση:

$$T_{t} = \frac{P_{t}}{\omega_{t}}$$
(2.14)

και η αντιρροπή στο δρομέα της γεννήτριας:

$$T_{g} = \frac{P_{g}}{\omega_{g}}$$
(2.15)

Οι έξοδοι του μοντέλου είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της γεννήτριας wg και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της τουρμπίνας wt [1].

#### 2.1.2.3 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ ή DFIG)

Η σύνδεση του μηχανικού μέρους της Α/Γ με το ηλεκτρικό όταν το τελευταίο περιλαμβάνει γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.10: Σύνδεση του μηχανικού μέρους της Α/Γ με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης [25].

Στο σχήμα 2.10 τα αρχικά VSC αναφέρονται στον μετατροπέα πηγής τάσης, το i αναφέρεται στα ρεύματα, είτε του δρομέα r είτε του στάτη s, ενώ όπου εμφανίζονται τα a,b,c υποδηλώνουν τις φάσεις a,b,c των αξόνων των τυλιγμάτων. Το N υποδηλώνει την πλευρά του δικτύου.

Τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα των Α/Γ σήμερα χρησιμοποιούν ΓΕΔΤ και αποτελούνται από μια γεννήτρια επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα και έναν back-to-back AC/DC/AC μετατροπέα πηγής τάσης με IGBTs. Ο στάτης είναι απ' ευθείας συνδεδεμένος στο ηλεκτρικό δίκτυο (π.χ. 50Hz), ενώ ο δρομέας συνδέεται με τον AC/DC/AC μετατροπέα. Ο μετατροπέας δε διαχειρίζεται πάνω από το 30% της συνολικής ισχύος, γεγονός που συνεπάγεται μείωση των απωλειών του, καθώς και μειωμένο κόστος κατασκευής του μετατροπέα.

Η τεχνολογία των ΓΕΔΤ επιτρέπει την μέγιστη εκμετάλλευση της προσφερόμενης ισχύος από τον άνεμο, ακόμα και σε μικρές ταχύτητες ανέμου, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί την μηχανική καταπόνηση στην τουρμπίνα από απότομες αυξομειώσεις του ανέμου. Ο όρος «διπλής τροφοδοσίας» αναφέρεται στο γεγονός πως η τάση στον στάτη επιβάλλεται από το δίκτυο, ενώ η τάση στο δρομέα επιβάλλεται από τον μετατροπέα ισχύος. Επομένως, η ενέργεια στην ΓΕΔΤ μπορεί να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις, από τον δρομέα στην τροφοδοσία ή από τον στάτη προς την τροφοδοσία. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητών στροφών σε ένα μεγάλο, αλλά παρ' όλα αυτά συγκεκριμένο εύρος, συνήθως ±30% της σύγχρονης ταχύτητας.

Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από δύο μετατροπείς, έναν από τη πλευρά της γεννήτριας και έναν από την πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο.

Η κύρια ιδέα είναι πως ο «από την πλευρά της γεννήτριας» μετατροπέας ελέγχει την ενεργό και την άεργο ισχύ, ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος δρομέα, ενώ ο «από την πλευρά του δικτύου» μετατροπέας ελέγχει τη τάση της DC σύνδεσης και διασφαλίζει τη λειτουργία του μετατροπέα με συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος. Τόσο στη κανονική λειτουργία όσο και σε κατάσταση σφάλματος, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του.

Όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση της μηχανής, μπορεί να ρέει ισχύς προς ή από τον δρομέα. Σε υπερσύγχρονη λειτουργία, η ισχύς ρέει από τον δρομέα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ σε υποσύγχρονη λειτουργία ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Η χρήση των ΓΕΔΤ χαρακτηρίζεται από αρκετά πλεονεκτήματα. Σημαντικό πλεονέκτημα της ΓΕΔΤ είναι η ικανότητα των ηλεκτρονικών μετατροπέων να ελέγχουν την άεργο ισχύ και να διαχωρίζουν τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος, ελέγχοντας ανεξάρτητα το ρεύμα διέγερσης του δρομέα. Η ΓΕΔΤ δεν είναι απαραίτητο να μαγνητίζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά μπορεί να μαγνητιστεί και από το κύκλωμα του δρομέα. Έχει, επίσης, τη δυνατότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία μπορεί να διανέμεται στον στάτη μέσω του μετατροπέα «από την πλευρά του δικτύου». Παρ' όλ' αυτά, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου λειτουργεί κανονικά με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται στην ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ της τουρμπίνας και του δικτύου. Σε ένα «ασθενές» δίκτυο, όμως, όπου η τάση μπορεί να αυξομειώνεται, η ΓΕΔΤ μπορεί να λειτουργεί έτσι ώστε να παράγει ή να απορροφά κάποια συγκεκριμένη ποσότητα αέργου ισχύος προς ή από το δίκτυο με στόχο τον έλεγχο της τάσης.

Χρησιμοποιώντας συμβατικές ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου δρομέα, μετά από ένα κοντινό σφάλμα στο ηλεκτρικό σύστημα απορροφώνται μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης από το ηλεκτρικό δίκτυο. Αν το ηλεκτρικό σύστημα είναι «ασθενές» και δεν μπορεί να προσφέρει ένα επαρκές ρεύμα μαγνήτισης στο μετά-σφάλματος μεταβατικό στάδιο, η ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα θα συνεχίσει να επιταχύνεται. Η ασύγχρονη μηχανή τραβάει όσο ρεύμα μαγνήτισης είναι δυνατόν από το δίκτυο, και προκαλείται επομένως μια σημαντική πτώση τάσης. Η πτώση αυτή της τάσης θα σταματήσει μόνο όταν το σύστημα ελέγχου αποκόψει την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο. Μία λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα προσφέρεται με τη χρήση ΓΕΔΤ, καθώς σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα ελέγχου καθορίζει την τάση που ο μετατροπέας επιβάλλει στο δρομέα της ασύγχρονης μηχανής. Ελέγχοντας την τάση του δρομέα, μπορεί ο μετατροπέας να ελέγχει το ρεύμα που απορροφάται από το δίκτυο. Η τάση που επιβάλλεται στο δρομέα καθορίζεται από την ταχύτητα, την ροπή και την τάση και αυτοί είναι και οι ελεγκτές από τους οποίους αποτελείται ουσιαστικά το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα.

Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας, αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων. Συνεπώς, το κόστος του μετατροπέα αυξάνεται όταν το εύρος ταχυτήτων γύρω από την σύγχρονη ταχύτητα γίνεται μεγαλύτερο. Επομένως, η επιλογή του εύρους ταχυτήτων βασίζεται στην οικονομική βελτιστοποίηση του επενδυτικού κόστους και στην αυξημένη αποδοτικότητα [23,24].

#### 2.1.2.4 Ανάλυση των εξισώσεων λειτουργίας της ΓΕΔΤ

Οι μεταβολές και οι διακυμάνσεις του ανέμου είναι συνεχείς και συχνά αρκετά απότομες και προκαλούν τη λειτουργία των Α/Γ σε μεταβατική κατάσταση. Παρ' όλ' αυτά, η μεγάλη αδράνεια του ανεμοκινητήρα επιτρέπει μόνο αργές μεταβολές στις στροφές, το οποίο σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι σταθερές χρόνου του μηχανικού μέρους των Α/Γ είναι σημαντικά μεγαλύτερες των χρονικών σταθερών του ηλεκτρικού μέρους επιτρέπει να αγνοούνται τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα ακόμα και κατά την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς των Α/Γ και να προσομοιώνονται οι γεννήτριες με το ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης. Η απλούστευση αυτή φαίνεται ακριβής όταν η ΓΕΔΤ λειτουργεί κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, διότι η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα είναι κοντά στο μηδέν και το σημείο λειτουργίας της ΓΕΔΤ είναι παρόμοιο με αυτό μιας σύγχρονης γεννήτριας. Παρ' όλα αυτά, σε περιπτώσεις που οι μεταβατικού μοντέλου κρίνεται αναγκαία [1]. Το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα μιας ΓΕΔΤ στη μόνιμη κατάσταση είτε σε συνδεσμολογία αστέρα είτε τριγώνου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.11: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα ΓΕΔΤ στη μόνιμη κατάσταση.

#### Στο παραπάνω σχήμα συμβολίζονται με

 $R_s, R_r:$ η ωμική αντίσταση του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα,

 $L_{ls}$ ,  $L_{lr}$ : οι αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα (stator leakage inductance, rotor leakage inductance),

 $L_m$ ,  $R_m$ : η αυτεπαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance) ή αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων στάτη-δρομέα και η αντίσταση του κλάδου μαγνήτισης αντίστοιχα,

s: η ολίσθηση,

 $V_s$ : η τάση στο στάτη,

 $V_r$ : η τάση στο δρομέα,

 $I_s$ : to reúma sto státh,

 $I_r$ : το ρεύμα στο δρομέα,

 $I_{Rm}$ : το ρεύμα μαγνήτισης,

 $ω_s$ : η γωνιακή ταχύτητα του στάτη.

Στην ανάλυση της ΓΕΔΤ που ακολουθεί θεωρείται ότι τα τυλίγματα του στάτη είναι πανομοιότυπα, έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου, είναι τοποθετημένα σε απόσταση  $120^o$  το ένα από το άλλο, έχουν  $N_s$  αριθμό αμπερελιγμάτων και αντίσταση  $R_s$ . Οι ίδιες παραδοχές ισχύουν και για τα τυλίγματα του δρομέα με  $N_r$  αριθμό αμπερελιγμάτων και αντίσταση  $R_r$ . Το διάκενο θεωρείται ομοιόμορφο.

Η θετική κατεύθυνση του μαγνητικού άξονα κάθε τυλίγματος φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.12: Συμμετρική, διπολική, τριφασική μηχανή επαγωγής wye-connected.

Οι εξισώσεις τάσεως της γεννήτριας στο abc πλαίσιο και σε μητρική μορφή είναι οι εξής:

$$\left[V_{abc,s}\right] = -\left[R_s\right] \cdot \left[I_{abc,s}\right] - p\left[\lambda_{abc,s}\right]$$
(2.16)

$$\left[V_{abc,r}\right] = -\left[R_r\right] \cdot \left[I_{abc,r}\right] - p\left[\lambda_{abc,r}\right]$$
(2.17)

Οι μήτρες [R<sub>s</sub>] και [R<sub>r</sub>] είναι διαγώνιες με ίσα μη μηδενικά στοιχεία. Στις παραπάνω εξισώσεις, ο δείκτης s δηλώνει μεγέθη που σχετίζονται με το κύκλωμα του στάτη και ο δείκτης r με το κύκλωμα του δρομέα. Οι μήτρες [V] και [I] αναφέρονται στις τάσεις και στα ρεύματα αντίστοιχα των αντίστοιχων κυκλωμάτων. Ο συντελεστής p αναφέρεται στη χρονική παράγωγο  $\frac{d}{dt}$  Για ένα μαγνητικά γραμμικό σύστημα, οι πεπλεγμένες ροές λ μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc,s} \\ \lambda_{abc,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{abc,s} \\ I_{abc,r} \end{bmatrix}$$
(2.18)

Οι επαγωγές των τυλιγμάτων εκφράζονται ως εξής:

$$[L_{s}] = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$
(2.19)

$$[L_{r}] = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}$$
(2.20)

$$[L_{\rm sr}] = L_{\rm sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_{\rm r} & \cos(\theta_{\rm r} + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{\rm r} - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_{\rm r} - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_{\rm r} & \cos(\theta_{\rm r} + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_{\rm r} + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{\rm r} - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_{\rm r} \end{bmatrix}$$
(2.21)

Στις παραπάνω εξισώσεις  $L_{ms}$  και  $L_{mr}$  είναι η αυτεπαγωγή μαγνήτισης των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα και  $L_{sr}$  το μέγεθος της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα.

Οι παραπάνω εξισώσεις τάσεως (2.16)-(2.17), που περιγράφουν τη λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών μηχανών, είναι διαφορικές εξισώσεις με χρονομεταβλητούς συντελεστές. Προκειμένου να μετατραπούν οι παραπάνω εξισώσεις σε άλλες με χρονοανεξάρτητες μεταβλητές και να διευκολυνθεί η επίλυσή τους και ο έλεγχος της μηχανής πραγματοποιείται μετασχηματισμός σε ένα αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, εκφράζονται τα μεγέθη του στάτη και του δρομέα στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς το οποίο μπορεί να περιστρέφεται με οποιαδήποτε γωνιακή ταχύτητα ή να μένει ακίνητο, να είναι δηλαδή προσαρμοσμένο πάνω στο στάτη της μηχανής, και εξαλείφονται έτσι όλα τα χρονομεταβλητά στοιχεία στις διαφορικές εξισώσεις. Για αυτό τον σκοπό, ορίζονται δύο ορθογώνιοι άξονες, ο d και ο q, ο οποίος βρίσκεται σε 90<sup>o</sup> προπορεία σε σχέση με τον d. Οι εξισώσεις μετασχηματίζονται στο dq0 σύστημα αναφοράς, το οποίο επιλέγεται να στρέφεται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_e$  του ηλεκτρικού συστήματος και σε αυτή την περίπτωση το πλαίσιο αναφέρεται ως σύγχρονο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Η σχέση των αξόνων d,q με το τριφασικό σύστημα abc απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.13: Τα συστήματα αξόνων dq0 και abc. Ο μηδενικός άξονας (zero axis) είναι κάθετος στη σελίδα.

Η αλλαγή των μεταβλητών f από το τριφασικό σύστημα abc στο νέο πλαίσιο αναφοράς dq0 εκφράζεται ως εξής:

$$\left[\mathbf{f}_{dq0}\right] = \left[\mathbf{K}\right] \cdot \left[\mathbf{f}_{abc}\right],\tag{2.22}$$

$$\delta\pi\sigma\upsilon\left[\mathbf{f}_{dq0}\right]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{d} \ \mathbf{f}_{q} \ \mathbf{f}_{0} \end{bmatrix}$$
(2.23)

$$\kappa \alpha \left[ f_{abc} \right]^{\mathrm{T}} = \left[ f_{a} \ f_{b} \ f_{c} \right]. \tag{2.24}$$

Η μεταβλητή f μπορεί να είναι ρεύμα, τάση ή πεπλεγμένη ροή.

Για το μετασχηματισμό των μεγεθών του στάτη ο πίνακας Κ εκφράζεται ως εξής:

$$[K] = [K_s] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$
(2.25)

Η γωνία θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα q και του άξονα της φάσης a και ισχύει :  $\theta = \int_0^t \omega_e(t) dt + \theta(0)$ , όπου  $\theta(0)$  είναι η αρχική γωνία.

Για το μετασχηματισμό των μεγεθών του δρομέα ο πίνακας Κ εκφράζεται:

$$[K] = [K_r] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\beta & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\beta & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$
(2.26)

ópou  $\beta = \theta - \theta_r \;$  me  $\theta_r$  us eínai  $\eta$  gwnia tou droméa we proc to státh sto abc-plaísio.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς στη σχέση (2.16):

$$\left[V_{abc,s}\right] = -\left[R_{s}\right] \cdot \left[I_{abc,s}\right] - p\left[\lambda_{abc,s}\right]$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της σχέσης (2.16) με τον πίνακα του μετασχηματισμού  $[K_s]$ , προκύπτει:

$$[K_{s}] \cdot [V_{abc,s}] = -[K_{s}] \cdot [R_{s}] \cdot [I_{abc,s}] - [K_{s}] \cdot p[\lambda_{abc,s}]$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.22) για τα ρεύματα και τις τάσεις στην εξίσωση (2.17) προκύπτει:

$$[V_{dq0,s}] = -[K_s] \cdot [R_s] \cdot [K_s]^{-1} \cdot [I_{dq0,s}] - [K_s] \cdot p([K_s]^{-1} \cdot [\lambda_{dq0,s}])$$

Καταλήγοντας ισχύει ότι:

$$\begin{bmatrix} V_{dq0,s} \end{bmatrix} = -[R_s] \cdot [I_{dq0,s}] - [K_s] \cdot p([K_s]^{-1}) \cdot [\lambda_{dq0,s}] - p[\lambda_{dq0,s}]$$
(2.27)  

$$\delta \pi ov [K_s] \cdot p([K_s]^{-1}) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός στις εξισώσεις τάσεως του δρομέα και προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} V_{dq0,r} \end{bmatrix} = -[R_r] \cdot [I_{dq0,r}] - [K_r] \cdot p([K_r]^{-1}) \cdot [\lambda_{dq0,r}] - p[\lambda_{dq0,r}]$$
(2.28)

Συνεπώς, οι σχέσεις (2.27) και (2.28) δίνουν τις επόμενες εξισώσεις τάσεων για τα μεγέθη του στάτη και του δρομέα μετασχηματισμένα στο πλαίσιο dq0:

Για τον στάτη:

$$V_{d,s} = -\mathbf{r}_{s} \cdot i_{d,s} + \omega_{e} \cdot \lambda_{q,s} - p\lambda_{d,s}$$

$$V_{q,s} = -\mathbf{r}_{s} \cdot i_{q,s} - \omega_{e} \cdot \lambda_{d,s} - p\lambda_{q,s}$$

$$V_{0,s} = -\mathbf{r}_{s} \cdot i_{0,s} - p\lambda_{0,s}$$
(2.29)

Για τον δρομέα:

$$V_{d,r} = -r_{r} \cdot i_{d,r} + (\omega_{e} - \omega_{r}) \cdot \lambda_{q,r} - p\lambda_{d,r}$$

$$V_{q,r} = -r_{r} \cdot i_{q,r} - (\omega_{e} - \omega_{r}) \cdot \lambda_{d,r} - p\lambda_{q,r}$$

$$V_{0,r} = -r_{r} \cdot i_{0,r} - p\lambda_{0,r}$$
(2.30)

Οι (2.29) και (2.30) γράφονται επίσης ως εξής:

$$V_{dq,s} = -r_s \cdot i_{dq,s} - j\omega_e \cdot \lambda_{dq,s} - p\lambda_{dq,s}$$
(2.31)

$$V_{dq,r} = -r_r \cdot i_{dq,r} - j(\omega_e - \omega_r) \cdot \lambda_{dq,r} - p\lambda_{dq,r}$$
(2.32)

Αντίστοιχα από τη σχέση (2.18) εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό στο νέο πλαίσιο αναφοράς για τις πεπλεγμένες ροές του στάτη και του δρομέα προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$\lambda_{dq,s} = L_{ls} \cdot i_{dqs} + L_{M}(i_{dqs} + i_{dqr})$$
(2.33)

$$\lambda_{dq,r} = L_{lr} \cdot i_{dqr} + L_{M}(i_{dqs} + i_{dqr}), \qquad (2.34)$$

$$όπου \frac{3}{2}L_{\rm ms} = L_{\rm M} = \frac{3}{2}L_{\rm mr}$$
(2.35)

Ο άξονας μηδενικής συνιστώσας δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς στο σύστημα δε μελετώνται ασύμμετρα σφάλματα [25].

Με τον μετασχηματισμό στο σύγχρονο σύστημα αναφοράς dq0, τα ισοδύναμα κυκλώματα της ΓΕΔΤ προκύπτουν ως εξής:



Σχήμα 2.14: Ισοδύναμα κυκλώματα στο σύγχρονο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς για μια τριφασική, συμμετρική ασύγχρονη μηχανή [25].

Συχνά, οι εξισώσεις (2.31)-(2.34) γράφονται ως εξής:

$$V_{dq,s} = -\mathbf{r}_{s} \cdot i_{dq,s} - \mathbf{j}\frac{\omega_{e}}{\omega_{b}} \cdot \psi_{dq,s} - \frac{\mathbf{p}}{\omega_{b}}\psi_{dq,s}$$
(2.36)

$$V_{dq,r} = -r_r \cdot i_{dq,r} - j \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \cdot \psi_{dq,r} - \frac{p}{\omega_b} \psi_{dq,r}$$
(2.37)

$$\psi_{dq,s} = X_{ls} \cdot i_{dqs} + X_{m}(i_{dqs} + i_{dqr})$$
(2.38)

$$\psi_{dq,r} = X_{lr} \cdot i_{dqr} + X_{m}(i_{dqs} + i_{dqr})$$
(2.39)

Οι ροές ψ αναφέρονται ως πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο με μονάδα μέτρησης Volt, ενώ τα μεγέθη X αναφέρονται σε επαγωγικές αντιδράσεις, προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των αυτεπαγωγών με τη βασική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_{\rm b}=2\pi f_e$  και έχουν μονάδα μέτρησης τα Ohm.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή στο νέο πλαίσιο λαμβάνεται, επίσης, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό ως εξής:

$$T_{\rm e} = \frac{P}{2} \left[ K_s^{-1} i_{dq0,s} \right]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_{sr}] [K_r]^{-1} i_{dq0,r}$$
(2.40)

Οπότε, προκύπτει η παρακάτω σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της ΓΕΔΤ:

$$T_{e} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_{M} (i_{q,s} \cdot i_{d,r} - i_{d,s} \cdot i_{q,r})$$
(2.41)

Η σχέση (2.40) που δίνει γενικά την ηλεκτρομαγνητική ροπή μίας ασύγχρονης μηχανής είναι θετική για λειτουργία κινητήρα και αρνητική για λειτουργία γεννήτριας, όπως προφανώς και στην περίπτωση της ΓΕΔΤ που εξετάζεται.

Εναλλακτικές εκφράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μιας ασύγχρονης μηχανής είναι:

$$T_{e} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{q,r} \cdot i_{d,r} - \lambda_{d,r} \cdot i_{q,r})$$
(2.42)

και

$$T_{e} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{d,s} \cdot i_{q,s} - \lambda_{q,s} \cdot i_{d,s})$$
(2.43)

Αντίστοιχα με τις σχέσεις (2.42), (2.43) θα ισχύουν και οι εξής εκφράσεις για την ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$T_{e} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_{b}} (\psi_{q,r} \cdot i_{d,r} - \psi_{d,r} \cdot i_{q,r})$$
(2.44)  
$$T_{e} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_{b}} (\psi_{d,s} \cdot i_{q,s} - \psi_{q,s} \cdot i_{d,s})$$
(2.45)

Οι παράμετροι και οι μεταβλητές της μηχανής είναι συχνά βολικό να εκφράζονται σε ανά μονάδα ποσότητες. Για αυτό το λόγο, επιλέγονται οι βασικές τιμές της ισχύος και της τάσεως για τη ΓΕΔΤ και σύμφωνα με αυτές κανονικοποιούνται όλα τα υπόλοιπα μεγέθη.

Για τις τάσεις στο abc πλαίσιο επιλέγεται ως βασική τάση  $V_{B,abc}$  η ενεργός τιμή (rms) της φασικής τάσης, ενώ για dq0 τάσεις επιλέγεται η μέγιστη τιμή ή αλλιώς το πλάτος της φασικής τάσης  $V_{B,da0}$ . Συνεπώς, θα ισχύει:

$$V_{B,dq0} = \sqrt{2} V_{B,abc} \tag{2.46}$$

Η ισχύς βάσης θα είναι:

$$P_B = 3V_{B,abc} I_{B,abc} \tag{2.47}$$

ή:

$$P_B = \frac{3}{2} V_{B,dq0} I_{B,dq0}$$
(2.48)

Η βασική τιμή της αντίστασης θα είναι

$$Z_B = \frac{V_{B,abc}}{I_{B,abc}} = 3 \frac{V_{B,abc}^2}{P_B},$$
(2.49)

όπως προκύπτει αντικαθιστώντας το  $I_{B,abc}$  από τη σχέση (2.48). Επίσης, ισχύει:

$$Z_B = \frac{V_{B,dq0}}{I_{B,dq0}} = \frac{3}{2} \frac{V_{B,dq0}^2}{P_B}$$
(2.50)

Με τα παραπάνω βασικά μεγέθη και επιπλέον βασική τιμή της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_{\rm b} = 2\pi f_e$  ανάγονται οι σχέσεις (2.36), (2.37) σε αντίστοιχες εκφρασμένες σε ανά μονάδα τιμές των μεγεθών:

$$V_{dq,s} = -r_s \cdot i_{dq,s} - j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot \psi_{dq,s} - \frac{p}{\omega_b} \psi_{dq,s}$$
(2.51)

$$V_{dq,r} = -r_r \cdot i_{dq,r} - j \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \cdot \psi_{dq,r} - \frac{p}{\omega_b} \psi_{dq,r}$$
(2.52)

Αντίστοιχα για τις πεπλεγμένες ροές από τις σχέσεις (2.38), (2.39) προκύπτουν:

$$\psi_{dq,s} = X_{ls} \cdot i_{dqs} + X_{m}(i_{dqs} + i_{dqr})$$
(2.53)

$$\psi_{dq,r} = X_{lr} \cdot i_{dqr} + X_{m}(i_{dqs} + i_{dqr})$$
(2.54)

Όπως είναι εμφανές, οι εξισώσεις τάσεων και ροών δεν αλλάζουν μορφή όταν μετατρέπονται στο ανά μονάδα σύστημα. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει, όμως, με την εξίσωση της ροπής. Η βασική τιμή της ροπής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T_{\rm B} = \frac{P_{\rm B}}{\frac{2}{\bar{p}}\omega_{\rm b}} \tag{2.55}$$

Διαιρώντας τώρα τη σχέση (2.45) με τη βασική τιμή  $T_{\rm B}$  και αντικαθιστώντας το  $P_{\rm B}$  από τη σχέση (2.48) προκύπτει η ανά μονάδα τιμή της ροπής μιας ασύγχρονης μηχανής ως ακολούθως:

$$T_{e} = (\psi_{d,s} \cdot i_{q,s} - \psi_{q,s} \cdot i_{d,s})$$

$$(2.56)$$

Όσον αφορά στην ισχύ της ασύγχρονης γεννήτριας, η ολική ενεργός και άεργος ισχύς της ΓΕΔΤ στο ανά μονάδα σύστημα είναι:

$$P = \operatorname{Re}\{V_{s}I_{s}^{*} + V_{r}I_{r}^{*}\} = V_{d,s} \cdot i_{q,s} + V_{q,s} \cdot i_{q,s} + V_{d,r} \cdot i_{d,r} + V_{q,r} \cdot i_{q,r}$$
(2.57)

$$Q=Im\{V_{s}I_{s}^{*}+V_{r}I_{r}^{*}\}=V_{q,s}\cdot i_{d,s}-V_{d,s}\cdot i_{q,s}+V_{q,r}\cdot i_{d,r}-V_{d,r}\cdot i_{q,r}$$
(2.58)

#### 2.1.2.5 Μοντελοποίηση της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Προκειμένου να διευκολυνθεί η μοντελοποίηση της ΓΕΔΤ με βάση τις παραπάνω εξισώσεις εφαρμόζεται ο παρακάτω μετασχηματισμός:

$$\begin{split} V_{R} &= \gamma V_{r} \\ I_{R} &= \frac{I_{r}}{\gamma} \\ \psi_{R} &= \gamma \psi_{r} \\ R_{R} &= \gamma^{2} R_{r} \\ X_{s} &= \gamma L_{ls} + \gamma^{2} L_{lr} \\ X_{M} &= \gamma X_{m} \\ \mu \epsilon \gamma &= \frac{X_{ls} + X_{M}}{X_{M}} \end{split}$$
 (2.59)

Με αυτόν τον τρόπο οι τελικές εξισώσεις για τη μοντελοποίηση της  $\Gamma E \Delta T$ είναι οι:

$$V_{s} = -r_{s} \cdot i_{s} - j \frac{\omega_{e}}{\omega_{b}} \cdot \psi_{s} - \frac{p}{\omega_{b}} \psi_{s}$$
(2.60)

$$V_{r} = -r_{r} \cdot i_{r} - j \frac{(\omega_{e} - \omega_{r})}{\omega_{b}} \cdot \psi_{r} - \frac{p}{\omega_{b}} \psi_{r}$$
(2.61)

$$\psi_{\rm s} = X_{\rm M}(i_{\rm s} + i_{\rm r}) \tag{2.62}$$

$$\psi_{\mathbf{r}} = \psi_{\mathbf{s}} + \mathbf{X}_{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{i}_{\mathbf{r}} \tag{2.63}$$



Το μοντέλο που αναπτύχθηκε με βάση τις παραπάνω εξισώσεις είναι το εξής:

Σχήμα 2.15: Μοντέλο προσομοίωσης των εξισώσεων τάσεων, ροών, ροπής και ισχύος της ΓΕΔΤ.

Στο παραπάνω μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης περιλαμβάνονται οι εξισώσεις του στάτη, για τον υπολογισμό των οποίων είσοδος είναι η τάση  $v_s$  και η ηλεκτρική συχνότητα  $\omega_e$  του δικτύου, στο οποίο συνδέεται απευθείας ο στάτης, καθώς και το ρεύμα του στάτη  $i_s$ . Αντίστοιχα, για τις εξισώσεις του δρομέα δίνονται ως είσοδοι η σύγχρονη ταχύτητα του δικτύου  $\omega_e$ , η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας όπως υπολογίζεται από το μηχανικό μοντέλο δύο μαζών  $\omega_g$ , το ρεύμα του δρομέα  $i_r$  καθώς και η ελεγχόμενη τάση του δρομέα  $v_r$ . Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο έχουν συμβολιστεί με  $f_s$  και  $f_r$ , όπως προκύπτουν από τις παραπάνω εξισώσεις, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ρευμάτων στάτη και δρομέα  $i_s$  και  $i_r$ .

#### 2.1.2.6 Ελεγχος γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Ο έλεγχος της λειτουργίας μιας ΓΕΔΤ επιτυγχάνεται μέσω του μετατροπέα back-to-back AC/DC/AC μετατροπέα πηγής τάσης, που έχει ήδη αναφερθεί στη προηγούμενη παράγραφο και φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.16: Σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο και έλεγχος της ΓΕΔΤ μέσω μετατροπέα back-to-back.

Ο μετατροπέας back-to-back παρέχει τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος και αποτελείται από δυο υποσυστήματα, τον μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας (machine-side converter) και τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου (grid-side converter), ανάμεσα στα οποία παρεμβάλλεται η dc σύνδεση. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας λειτουργεί ως ανορθωτής και ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ως αντιστροφέας. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται πυκνωτής, ο οποίος λειτουργεί ως αποθήκη ενέργειας και εξομαλύνει την τάση της συνεχούς σύνδεσης.

Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας (machine-side) είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της ροπής ή της ταχύτητας της γεννήτριας και τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος. Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου (grid-side) λειτουργεί έτσι ώστε τάση του πυκνωτή να διατηρείται σταθερή.

Ο έλεγχος της ΓΕΔΤ στηρίζεται στη θεωρία του διανυσματικού ελέγχου και επιτυγχάνει τον αποζευγμένο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος. Οι αρχές του διανυσματικού ελέγχου πηγάζουν από τον τρόπο λειτουργίας των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Σε μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος οι άξονες του πεδίου του στάτη και του δρομέα είναι κάθετοι μεταξύ τους, γεγονός που επιτρέπει τον αποζευγμένο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος. Η μηχανή επαγωγής εκφράζεται από ένα μαθηματικό ισοδύναμο μεγαλύτερης πολυπλοκότητας από την μηχανή DC ρεύματος, με αποτέλεσμα οι συμβατικές τεχνικές διανυσματικού ελέγχου, να μην είναι άμεσα εφαρμόσιμες. Ο μετασχηματισμός σε ένα αυθαίρετο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, όμως, επιτυγχάνει την απλοποίηση του μοντέλου των εξισώσεων της μηχανής επαγωγής. Στόχος του διανυσματικού ελέγχου είναι η διατήρηση της γωνίας των 90° μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα, ώστε η ροή διακένου να διατηρείται σταθερή κατά μέτρο και να υπάρχει η δυνατότητα του αποζευγμένου ελέγχου της ισχύος της μηχανής.

Στη συγκεκριμένη εργασία το πλαίσιο αναφοράς στρέφεται ώστε ο άξονας q του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς να ταυτίζεται κάθε χρονική στιγμή με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη. Συνεπώς, η νέα συνιστώσα  $\psi_{d,s}$ ' της μαγνητικής ροής του στάτη

μηδενίζεται και απλοποιούνται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της ΓΕΔΤ σε αυτό το νέο πλέον πλαίσιο αναφοράς. Τα τονούμενα μεγέθη αναφέρονται στο νέο σύστημα αναφοράς:



Σχήμα 2.17: Στροφή των αξόνων dq σε νέο σύστημα αξόνων d'q'.

Με αυτόν τον τρόπο ισχύει:

$$\psi_{q,s} = '|\psi_s| \tag{2.64}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.62):

$$\psi_{q,s}{}' = X_{M} (i_{q,s}{}' + i_{q,r}{}')$$
(2.65)

Aúnontas ws pros to reúma tou droméa  $i_{q,r}'$ :

$$i_{q,r}' = \frac{\psi_{q,s'}}{x_{M}} - i_{q,s}'$$
(2.66)

Επίσης, στο νέο στραμμένο πλαίσιο θα ισχύει:

$$\psi_{d,s}'=0,$$
 (2.67)

από την οποία αντικαθιστώντας από την (2.62) προκύπτει ότι:

$$i_{d,s}{}' = -i_{d,r}{}' \tag{2.68}$$

και

$$i_{q,s}{}' = -i_{q,r}{}' \tag{2.69}$$

Όπως έχει προαναφερθεί, η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας δίνεται από τον τύπο (2.56):

$$T_{e} = (\psi_{d,s} \cdot i_{q,s} - \psi_{q,s} \cdot i_{d,s})$$
  

$$\Sigma \text{to véo strammévo plaisio, y ropý tyc FEDT ba eívai:}$$
  

$$T'_{e} = -\psi'_{q,s} \cdot i'_{d,s}$$
(2.70)

Χρησιμοποιώντας την (2.68) προκύπτει:

$$T_{e}' = \psi_{q,s}' \cdot i'_{d,r}$$
 (2.71)

Εφόσον η τάση  $V_{d,s}$  και η συχνότητα  $\omega_e$  είναι σταθερές και επιβάλλονται από το δίκτυο, από τη σχέση  $V_s = -r_s \cdot i_s - j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot \psi_s - \frac{p}{\omega_b} \psi_s$  και από την υπόθεση ότι η αντίσταση του στάτη  $r_s$  είναι πολύ μικρό μέγεθος προκύπτει ότι το μέγεθος  $\psi'_{q,s}$  είναι επίσης σταθερό. Συνεπώς,

προκύπτει ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή και άρα η ενεργός ισχύς της ΓΕΔΤ είναι ανάλογη της συνιστώσα d του ρεύματος δρομέα  $i'_{d,r}$  και μπορεί να ελεγχθεί μέσω αυτού.

$$T_{\rm e}' \propto i_{d,r}' \tag{2.72}$$

Για τη μοντελοποίηση αυτού του ελέγχου, η τιμή αναφοράς του ρεύματος i<sub>d,r,ref</sub> προκύπτει από το σφάλμα της ενεργού ισχύος, το οποίο προκύπτει από τη διαφορά της πραγματικής ενεργού ισχύος με βάση την ταχύτητα του δρομέα από την τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ισχύος. Το ρεύμα αυτό συγκρίνεται με το πραγματικό i<sub>d,r</sub> και μέσω ενός PI ελεγκτή παράγεται το αντίστοιχο σήμα τάσης δρομέα V<sub>d,r</sub>.

Επιπλέον, οι εξισώσεις τάσης (2.60), (2.61) αγνοώντας τα μεταβατικά φαινόμενα γίνονται:

$$V_{d,s} = -r_s \cdot i_{d,s} + \omega_e \cdot \psi_{q,s}$$
(2.73)

$$V_{q,s} = -r_s \cdot i_{q,s} - \omega_e \cdot \psi_{d,s} \tag{2.74}$$

Και στο νέο πλαίσιο αναφοράς:

$$V_{d,s}' = \omega_e \cdot \psi_{q,s}' \tag{2.75}$$

$$V_{q,s}' = 0$$
 (2.76)

Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου διαχειρίζεται μόνο ενεργό ισχύ, αποδίδοντας στο δίκτυο μηδενική άεργο, συνεπάγεται ότι η άεργος ισχύς της ΓΕΔΤ ισούται με την άεργο ισχύ που διαχειρίζεται ο στάτης:

$$Q = V'_{q,s} \cdot i'_{d,s} - V'_{d,s} \cdot i_{q,s}$$
(2.77)

Χρησιμοποιώντας την (2.76) στη σχέση (2.77) λαμβάνεται:

$$Q = -V'_{d,s} \cdot i'_{q,s}$$
(2.78)

An antikatastabeí kai to mégebo<br/>ς $V_{d,s}^\prime$  apó th scésh (2.75) sthn (2.78) prokúptei:

$$\mathbf{Q} = -\omega_{\mathbf{e}} \cdot \boldsymbol{\psi}_{q,s}' \cdot \boldsymbol{i}_{q,s}' \tag{2.79}$$

Από τη σχέση (2.69) προκύπτει ότι

$$Q \propto i_{q,r}'$$
 (2.80)

δηλαδή η άεργος ισχύς της ΓΕΔΤ μπορεί να ελεγχθεί μέσω της συνιστώσας q του ρεύματος δρομέα [31]. Η μοντελοποίηση του ελέγχου της αέργου ισχύος γίνεται με αντίστοιχο τρόπο όπως για την ενεργό και ο έλεγχος της συνολικής ισχύος φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.18: Μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος ελέγχου της ΓΕΔΤ.

Οποιαδήποτε μεταβολή στη ταχύτητα του δρομέα της Α/Γ προκαλεί ουσιαστικά μία μεταβολή στη ροπή αναφοράς ή ισοδύναμα την ισχύ αναφοράς Pe,ref. Η ζητούμενη ισχύς μεταφράζεται σε ζήτηση ρεύματος δρομέα το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό ρεύμα δρομέα για να παραχθεί το απαιτούμενο σήμα για την τάση δρομέα [32].

#### 2.1.2.7 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (PMSG)

Η βασική διαφορά της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών από μια κοινή σύγχρονη γεννήτρια είναι η απουσία του τυλίγματος διέγερσης. Το πεδίο διέγερσης της μηχανής δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι περιμετρικά στην επιφάνεια του δρομέα, ώστε να δημιουργούν ακτινικό μαγνητικό πεδίο.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών είναι τα εξής:

- Σημαντικά αυξημένη απόδοση, καθώς δεν απορροφάται ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα του πεδίου διεγέρσεως και συνεπώς δεν υφίστανται απώλειες διέγερσης.
- Μεγαλύτερη ροπή και παραγόμενη ισχύς από ότι όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική διέγερση.
- Καλύτερη δυναμική συμπεριφορά από τις μηχανές με ηλεκτρομαγνητική διέγερση (υψηλότερη πυκνότητα ροής στο διάκενο αέρα).

Από την άλλη πλευρά, η pmsg είναι πιο ακριβή και πιο πολύπλοκη μηχανικά σε σχέση με μία μηχανή επαγωγής ιδίου μεγέθους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των μονίμων μαγνητών είναι ακριβά, αν και παρατηρείται σημαντική και συνεχιζόμενη μείωση της τιμής τους, και δύσκολα στην επεξεργασία τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Επιπλέον, 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 μεταφοράς, αντίστοιχα. Αυτό αποτελεί ένα επιπλέον κόστος [24,27,28].

Το κυριότερο μειονέκτημα είναι ο κίνδυνος απομαγνήτισης της μηχανής εξ αιτίας εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών ή μεγάλων ρευμάτων, σε περίπτωση ενός σφάλματος για παράδειγμα. Για αυτό το λόγο, η θερμοκρασία του δρομέα μιας pmsg χρειάζεται να επιβλέπεται διαρκώς και απαιτείται σύστημα ψύξεως. Η σύγχρονη φύση της pmsg είναι δυνατόν να προκαλέσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, το συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσεως. Η σύγχρονη λειτουργία της προκαλεί επίσης κακή συμπεριφορά σε περιπτώσεις εξωτερικών βραχυκυκλωμάτων ή όταν επικρατεί άνεμος με έντονες διακυμάνσεις.

Η χρήση μιας pmsg σε Α/Γ και η σύνδεσή της στο δίκτυο φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.19: Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο. Η διακεκομμένη γραμμή γύρω από το κιβώτιο ταχυτήτων δηλώνει ότι δεν είναι απαραίτητη η χρήση του [24].

Όπως είναι εμφανές από το παραπάνω σχήμα, το σύστημα αποτελείται από μία pmsg γεννήτρια με ένα μετατροπέα συχνότητας πλήρους κλίμακας, ο οποίος επιτρέπει λειτουργία μεταβλητών στροφών. Γενικά, η παραγωγή της ενέργειας με λειτουργία μεταβλητών στροφών επιτρέπει τη λειτουργία της τουρμπίνας με μέγιστο συντελεστή ισχύος σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη δέσμευση αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, ένα από τα προβλήματα που σχετίζονται με τα αιολικά συστήματα μεταβλητών στροφών είναι η παρουσία του κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο συνδέει την τουρμπίνα με τη γεννήτρια. Αυτό το μηχανικό στοιχείο υπόκειται σε σημαντικές καταπονήσεις και σύμφωνα με μελέτες αποτελεί την κυριότερη αιολικού συστήματος και να μειωθούν τα έξοδα συντήρησης το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να παραληφθεί [36].

#### 2.1.2.8 Ελεγχος και μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική λειτουργία μιας pmsg με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες και χωρίς τυλίγματα απόσβεσης στο ανά μονάδα σύστημα, στο πεδίο του χρόνου και στο στρεφόμενο με τη ταχύτητα ω του δρομέα dq πλαίσιο είναι:

$$V_{d,s} = -r_s \cdot i_{d,s} - \omega \cdot \lambda_{q,s} + \frac{d\lambda_{d,s}}{dt} \cdot \frac{1}{\omega_b}$$
(2.81)

$$V_{q,s} = -r_s \cdot i_{q,s} + \omega \cdot \lambda_{d,s} + \frac{d\lambda_{q,s}}{dt} \cdot \frac{1}{\omega_b}$$
(2.82)

$$\lambda_{d,s} = -L_{d,s} \cdot i_{d,s} + \lambda_m \tag{2.83}$$

$$\lambda_{q,s} = -L_{q,s} \cdot i_{q,s} \tag{2.84}$$

όπου

 $r_s$  :η ωμική αντίσταση του στάτη

 $L_{d,s},\ L_{q,s}$ :<br/>οι αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη στον d και τον q άξον<br/>α αντίστοιχα

λ<sub>m</sub>: η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη

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

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

ω :η γωνιακή ταχύτητα με την οποία στρέφεται ο δρομέας της γεννήτριας

Ο έλεγχος της pmsg αναλαμβάνεται από τον μετατροπέα συχνότητας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από έναν ac/dc μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας, έναν πυκνωτή συνεχούς (dc) σύνδεσης και έναν dc/ac αντιστροφέα από την πλευρά του δικτύου.

Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας που είναι συνδεδεμένος στον στάτη της μηχανής απομονώνει αποτελεσματικά τη γεννήτρια από το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, ο δρομέας της γεννήτριας και η τουρμπίνα της ανεμογεννήτριας μπορούν να στρέφονται ελεύθερα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του ανέμου.

Ο έλεγχος στον μετατροπέα από την πλευρά της γεννήτριας στηρίζεται στην αρχή του διανυσματικού ελέγχου στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα και για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται οι μετασχηματισμένες κατά Park εξισώσεις λειτουργίας της γεννήτριας (2.81)-(2.84). Ο μετατροπέας είναι απ' ευθείας συνδεδεμένος στην pmsg και η συνιστώσα q του ρεύματος είναι ανάλογη της ενεργού ισχύος ή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής:

$$T_e = \lambda_{d,s} \cdot i_{q,s}$$

(2.85)

Είναι εμφανές από τη (2.85) πως η ηλεκτρομαγνητική ροπή και συνεπώς η ενεργός ισχύς της pmsg ελέγχεται από το ρεύμα του στάτη  $i_{q,s}$ . Η ενεργός ισχύς αναφοράς της pmsg καθορίζεται από τον δισδιάστατο πίνακα (look-up table ή LUT) που έχει υλοποιηθεί για λειτουργία maximum power point tracking (MPPT), το οποίο παρέχει τη μέγιστη ισχύ στο δίκτυο για κάθε ταχύτητα δρομέα. Από την άλλη πλευρά, η άεργος ισχύς είναι ανάλογη της συνιστώσας d του ρεύματος. Η τιμή αναφοράς της αέργου ισχύος τίθεται ίση με 0 [37].

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, όπως αναφέρεται στην

(2.85) και μένει ένας βαθμός ελευθερίας για τη d συνιστώσα του ρεύματος. Η συνιστώσα αυτή του ρεύματος μπορεί να τεθεί από τον αντίστοιχο ελεγκτή στο 0 για να ελαχιστοποιηθεί το ρεύμα για μία δεδομένη ροπή και επομένως να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Επιπλέον, η τιμή της d συνιστώσας του ρεύματος μπορεί να εκμεταλλευτεί, προκειμένου να μειωθεί η ροή του στάτη και να μειωθούν οι απώλειες πυρήνα [36].

Συνεπώς, για τη διαδικασία του ελέγχου της pmsg ο μετατροπέας ισχύος ρυθμίζει το ρεύμα i<sub>d,s</sub> ώστε να είναι μηδενικό [29,33,36].

Το μοντέλο της pmsg μαζί με τον έλεγχο της ενεργού ισχύος παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.20: Μοντέλο προσομοίωσης της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών.

## 2.2 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Η λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού βασίζεται στην εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των υδάτων, με μετατροπή της ενέργειας αυτής αρχικά σε κινητική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η διαδικασία μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας αρχικά σε μηχανική (περιστροφική κίνηση) στο στρόβιλο και έπειτα σε ηλεκτρική στη γεννήτρια.



Σχήμα 2.21: Διάγραμμα μετατροπής ενέργειας των MYHE [34].

#### 2.2.1 Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΗΣ)

Καταρχάς, από πλευράς αρχής λειτουργίας, τόσο στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική όσο και στη μετατροπή της τελευταίας σε ηλεκτρική, ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο (YHE) 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, δηλαδή οι διαφορές μεταξύ μεγάλων και μικρών υδροηλεκτρικών έργων δεν είναι μόνο ποσοτικές αλλά κυρίως ποιοτικές. Ως 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 βασική διαφοροποίηση μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ έγκειται στην επιλογή και εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στην περίπτωση των μικρών ΥΗΕ. Λαμβάνοντας υπόψη 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, όπως άλλωστε δέχονται όλες οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. 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 μικρό (small στα αγγλικά, petit στα γαλλικά) όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μεταξύ του 1 MW και 10 MW. Τα όρια αυτά μεταξύ micro, mini και 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 Η, 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 Η είναι μικρότερο των 20 m
- Μέσου ύψους όταν 20 < H < 150 m
- Μεγάλου ύψους όταν Η> 150m

Δεδομένου 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 Η. 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.

#### 2.2.2 Τύποι υδροστροβίλων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι υδροστροβίλων που χρησιμοποιούνται στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, οι υδροστρόβιλοι δράσεως και οι αντιδράσεως. Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι γνωστοί ως τύπου Pelton και οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως ως τύπου Francis. Στους υδροστρόβιλους αντιδράσεως ανήκουν και οι υδροστρόβιλοι προώσεως ή τύπου Kaplan.

Οι υδροστρόβιλοι Pelton έχουν συνήθως έναν οριζόντιο άξονα και ένα μόνο ακροφύσιο. Χρησιμοποιούνται για μεγάλες υψομετρικές διαφορές, από 300 μέτρα και περισσότερο και κατασκευάζονται για πολύ μικρές (της τάξεως των δεκάδων KW) έως πολύ μεγάλες ισχύεις (της τάξεως των εκατοντάδων MW). Η λειτουργία τους βασίζεται στη μεγάλη κινητική ενέργεια του ύδατος, το οποίο κατευθύνεται μέσω ακροφυσίου στα πτερύγια τύπου κουβά, τα οποία κινούνται απορροφώντας την κινητική ενέργεια του νερού. Η θεωρητική ταχύτητα στο ακροφύσιο είναι  $u=\sqrt{2gH}$ , όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $H=h-h_f$  το ωφέλιμο ύψος της υδατοπτώσεως.

Στους υδροστρόβιλους αντιδράσεως το νερό οδηγείται στα πτερύγια με εφαπτομενική κατεύθυνση, ώστε να γλιστράει στην εσωτερική επιφάνεια του πτερυγίου αλλάζοντας κατεύθυνση και δίνοντας ώθηση εξ αντιδράσεως στο πτερύγιο του στροβίλου. Η ενέργεια που παρέχεται από το νερό 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. Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες υδροστροβίλων αντιδράσεως, οι τύπου Francis και οι προώσεως.

Ο υδροστρόβιλος Francis χρησιμοποιείται για υψομετρικές διαφορές από 100 μέχρι 360 μέτρα και έχει σταθερά κινητά και ρυθμιζόμενα ακίνητα πτερύγια.

Οι υδροστρόβιλοι προώσεως χρησιμοποιούνται γενικά για χαμηλά ύψη, μέχρι 45 μέτρα, γιατί 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 είναι τέτοια ώστε να διατηρείται όσο είναι δυνατόν η αξονική ροή του νερού σε αντίθετη με τον τύπου Francis, όπου η κίνηση του νερού είναι περιστροφική.

Ο ρυθμιζόμενος υδροστρόβιλος 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.

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 υδροστρόβιλοι προώσεως με ρυθμιζόμενα κινητά πτερύγια έχουν γενικά πολύ καλή απόδοση σε όλα τα φορτία [8,15].

#### 2.2.3 Ισχύς και ενέργεια υδροηλεκτρικού σταθμού

Η παραγόμενη ενέργεια από έναν υδροηλεκτρικό σταθμό είναι:

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{V} \cdot (\mathbf{h} - \mathbf{h}_{\mathrm{f}} \cdot \mathbf{n}) \tag{2.86}$$

όπου

h: η εκμεταλλεύσιμη υψομετρική διαφορά (m)

 $h_f$ : οι υδραυλικές απώλειες (m στήλης ύδατος)

h-h<sub>f</sub>: το ωφέλιμο ύψος (m)

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

q: η παροχή ύδατος ( $m^3$  ανά ώρα)

Τ: ο χρόνος λειτουργίας (σε ώρες)

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

n: ο βαθμός απόδοσης της μονάδας

Στην σχέση (2.86) υποτίθεται ότι ποσοστό ίσο με τον ολικό βαθμό απόδοσης n της δυναμικής ενέργειας του νερού έχει μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, η σχέση (2.86) ισχύει για σταθερή παροχή q. Εάν η παροχή δεν είναι σταθερή, τότε στον τύπο (2.86) συμπεριλαμβάνεται η μέση τιμή της παροχής Q στο χρονικό διάστημα T και οι απώλειες h<sub>f</sub>'

που είναι οι ισοδύναμες υδραυλικές απώλειες που εξαρτώνται από την κατανομή της παροχής στη διάρκεια του χρόνου Τ. Συνεπώς, η ενέργεια δίνεται σε αυτή την περίπτωση από τη σχέση:

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{Q} \cdot (\mathbf{h} - \mathbf{h_f}') \cdot \mathbf{n} \tag{2.87}$$

Η μέση ισχύς της μονάδας θα δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{E}{T} \tag{2.88}$$

Όταν μεταβάλλεται η παροχή q στη διάρκεια του χρόνου Τ μεταβάλλονται και οι απώλειες h<sub>f</sub>, οι οποίες μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\mathbf{h_f}' = \mathbf{C} \cdot \mathbf{h_{fu}} \tag{2.89}$$

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

#### 2.2.4 Υδροηλεκτρικός σταθμός χωρίς πύργο αναπάλσεως

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται με σχηματικό τρόπο η διάταξη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής χωρίς πύργο αναπάλσεως:



Σχήμα 2.22: Σχηματική παράσταση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού [15].

Τα βασικότερα μεγέθη που εμφανίζονται στο παραπάνω σχήμα είναι:

- Το καθαρό υδραυλικό ύψος Η που μετριέται σε μέτρα (m)
- Η μέση διατομή Α 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 απαραίτητο να αναφερθούν δύο βασικές παραδοχές:

- Το νερό θεωρείται τελείως ασυμπίεστο, η υδάτινη στήλη που βρίσκεται στον αγωγό προσαγωγής θεωρείται δηλαδή ότι είναι «στερεά».
- Ο υδροστρόβιλος θεωρείται ιδανικός. Κάθε είδους απώλειες, συμπεριλαμβανομένων και των υδραυλικών, αμελούνται.

Με βάση 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:

$$P_M = \gamma \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{H} \tag{2.90}$$

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

Η παροχή Q που εμφανίζεται στον τύπο (2.90) εκφράζεται συναρτήσει της ταχύτητας του νερού U και της διατομής A του αγωγού και η σχέση (2.90) γίνεται:

$$P_M = \gamma \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{H} \tag{2.91}$$

Γραμμικοποιώντας την παραπάνω σχέση γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας:

$$\Delta P_M = \gamma \cdot \mathbf{A} \cdot (U_o \cdot \Delta H + H_o \cdot \Delta U) \tag{2.92}$$

Στη σχέση (2.92) η μεταβολή ΔΗ δεν αναφέρεται σε μεταβολή της στάθμης της τεχνητής λίμνης, αλλά σε μεταβολή της πιέσεως μετρημένη σε μέτρα στήλης ύδατος.

Διαιρώντας στη συνέχεια και τα δύο μέλη της σχέσης (2.92) με τις τιμές μονίμου καταστάσεως και προκύπτει η παρακάτω κανονικοποιημένη σχέση, όπου όλα τα μεγέθη εκφράζονται ανά μονάδα:

$$\Delta P_m = \Delta h + \Delta v \tag{2.93}$$

Η σχέση αυτή δηλώνει πως αν αυξηθεί π.χ. 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:

$$A_{\sigma} = \mathrm{KG} \tag{2.94}$$

Επιπλέον, η ταχύτητα εκροής εξαρτάται εκτός από το άνοιγμα των υδατοθυρίδων και από το μανομετρικό ύψος και ισχύει:

$$U_{\sigma} = \sqrt{2g_{\rm r}H},\tag{2.95}$$

όπου  $g_r$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec.

Λόγω της συνέχειας της ροής, η παροχή στο στρόβιλο είναι ίση με την παροχή εκροής: AU= $A_{\sigma}U_{\sigma}$ , (2.96)

από όπου αντικαθιστώντας από τις σχέσεις (2.94) και (2.95) και γραμμικοποιώντας προκύπτει
η παρακάτω σχέση μεταξύ ταχύτητας, μανομετρικού ύψους και ανοίγματος της πύλης:

$$\Delta \upsilon = \Delta g + \frac{\Delta h}{2} \tag{2.97}$$

Μία από τις παραδοχές για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου υδροστροβίλου αναφέρεται στη στήλη ύδατος στον αγωγό προσαγωγής, η οποία θεωρείται κατά προσέγγιση «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:

$$\Delta F = -m \, \frac{dU}{dt} \tag{2.98}$$

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

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{A} \rho g_r \Delta \mathbf{H}, \tag{2.99}$$

όπου ρείναι η πυκνότητα του νερού. Αν αντικατασταθεί το  $\Delta F$  από την (2.99) στην (2.98) και εκφραστεί η μάζα m συναρτήσει της πυκνότητας m=pAL προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{L}{g_r}\frac{dU}{dt} = -\Delta H,\tag{2.100}$$

όπου L είναι το μήκος του αγωγού προσαγωγής.

Αν εκφραστεί η (2.100) σε ανά μονάδα μεγέθη και χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός Laplace για μεταφορά στο πεδίο της συχνότητας προκύπτει:

$$T_{\rm w}s\Delta\upsilon = -\Delta h \tag{2.101}$$

όπου:

$$T_{\rm w} = \frac{LU_{\rm o}}{g_r H_{\rm o}} \tag{2.102}$$

Η ποσότητα  $T_w$  ονομάζεται χρονική σταθερά αδρανείας του νερού ή χρόνος έναρξης νερού, 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 (2.93) και (2.97) απαλείφοντας το Δh και λύνοντας στη συνέχεια ως προς Δυ:

$$\Delta v = \frac{\Delta g}{1 + s T_{\rm W}/2} \tag{2.103}$$

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<sub>w</sub>/2. Αντικαθιστώντας το Δh από την (2.101) στην (2.93) προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου χωρίς πύργο αναπάλσεως [8,15]:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g} = \frac{1 - sT_w}{1 + sT_w/2}.$$
(2.104)

Η συνάρτηση μεταφοράς (2.104) είναι μία συνάρτηση «μη ελαχίστης φάσης», εφόσον έχει έναν πόλο στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο στο σημείο  $\left(-\frac{2}{T_w},0\right)$ , αλλά και ένα μηδενικό

στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο στο σημείο  $(\frac{1}{T_w}, 0)$ . Τα συστήματα αυτά εισάγουν μια πρόσθετη καθυστέρηση φάσης, η οποία ενισχύει την καθυστέρηση φάσης που εισάγεται από τους πόλους του αριστερού μιγαδικού ημιεπιπέδου [19].

Θεωρώντας ότι συμβαίνει μία βηματική μεταβολή πλάτους Α του ανοίγματος των υδατοθυρίδων, το θεώρημα αρχικής τιμής για τη συνάρτηση (2.104) υποδεικνύει ότι:

$$\Delta P_{m} \mathop{}_{s \to \infty}^{t \to 0} = \mathbf{s} \cdot \frac{A}{s} \frac{1 - s \mathrm{T}_{\mathrm{W}}}{1 + s \mathrm{T}_{\mathrm{W}}/2} = -2\mathrm{A}, \qquad (2.105)$$

ενώ το θεώρημα τελικής τιμής:

$$\Delta P_m \underset{s \to 0}{t \to \infty} = s \cdot \frac{A}{s} \cdot \frac{1 - s T_w}{1 + s T_w/2} = A$$
(2.106)

Συνεπώς, η συνάρτηση μεταφοράς (2.104) υποδηλώνει 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 (2.93), 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 συνάρτηση μεταφοράς (2.104) σε μία βηματική μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων τη χρονική στιγμή 10 sec:



Σχήμα 2.23: Μεταβολή της μηχανικής ισχύος υδροστροβίλου σε βηματική αύξηση του ανοίγματος των υδατοθυρίδων από 0,8 σε 1 αμ.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού προσαγωγής, τόσο μεγαλύτερη είναι η χρονική σταθερά T<sub>w</sub> από τη σχέση (2.102) και τόσο εντονότερη γίνεται η ανεπιθύμητη μεταβατική

συμπεριφορά του υδροστροβίλου εξ αιτίας του υδραυλικού πλήγματος. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.24: Ανά μονάδα μεταβολή της μηχανικής ισχύος του υδροστροβίλου σε βηματική αύξηση του ανοίγματος των υδατοθυρίδων από 0,8 σε 1 αμ για διάφορες τιμές του συντελεστή Tw.

Στο σχήμα 2.24 είναι εμφανές πως το πλάτος του υδραυλικού πλήγματος δε μεταβάλλεται, αφού καθορίζεται από το θεώρημα αρχικής τιμής (2.105), αυξάνει όμως η διάρκειά του με την αύξηση του συντελεστή T<sub>w</sub>.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του ανεπιθύμητου φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος είναι μηχανισμοί που περιορίζουν την ταχύτητα κίνησης των υδατοθυρίδων έτσι ώστε να αποφεύγονται απότομες μεταβολές του ανοίγματός τους και να πραγματοποιούνται βαθμιαίες μεταβολές. Ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος εξάλειψης του φαινομένου είναι η κατασκευή πύργου αναπάλσεως ή ηρεμήσεως, που θα αναφερθεί παρακάτω εκτενέστερα. Ο περιορισμός 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 να εξετάζεται 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:

![](_page_82_Figure_6.jpeg)

Σχήμα 2.25: Υδροστρόβιλος με ρυθμιστή στροφών 1/R [15].

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

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του κλειστού βρόχου του συστήματος είναι:

$$1 + \frac{1}{R} \frac{1 - sT_{w}}{1 + sT_{w}/2} \frac{1}{2Hs} = 0$$

ή αλλιώς

 $T_{w}HRs^{2} + (2HR - T_{w})s + 1 = 0$ 

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

 $T_wHR\!\!>\!\!0,$  to opoio iscúel pántote kai

 $2HR-T_w > 0$ 

#### 2.2.5 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 των 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:

α) σε αυτά όπου η μεταβολή από τη μία μόνιμη κατάσταση στην άλλη γίνεται με αργό ρυθμό οπότε δεν είναι ανάγκη να ληφθεί υπόψιν η συμπιεστότητα του ρευστού ή η ελαστικότητα του αγωγού. Τυπικό παράδειγμα αυτού είναι οι ταλαντώσεις μάζας του υγρού σε νοειδή σωλήνα β) σε αυτά όπου η μεταβολή γίνεται με γρήγορο ρυθμό οπότε για την περιγραφή τους πρέπει να ληφθεί υπόψιν η συμπιεστότητα 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 υποπιέσεων ή υπερπιέσεων 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 [22].

#### 2.2.6 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 πιέσεως Δh αντιστοιχεί στη διαφορά δυναμικού ΔV και η παροχή Q στην ένταση ρεύματος I. Το μοντέλο του υδροστροβίλου που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο 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 μίας 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:

![](_page_84_Figure_5.jpeg)

Σχήμα 2.26: 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  $\Delta P_m$  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 στον 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, δηλαδή, την αντίσταση-φορτίο με σκοπό τη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος P, το αρχικόμεταβατικό αποτέλεσμα θα είναι ακριβώς αντίθετο (αύξηση της ισχύος) [8,15].

#### 2.2.7 Ρυθμιστής στροφών υδροστροβίλου με μεταβατικό στατισμό

Ο ρόλος του ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό στον υδροστρόβιλο είναι ο περιορισμός της κίνησης των υδατοθυρίδων και συνεπώς του υδραυλικού πλήγματος. Επιτυγχάνει ουσιαστικά 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 μετατρέπεται σε σήμα-εντολή για τη μετακίνηση των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου, προκειμένου να προσαρμόζεται ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από αυτόν.

Η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή στροφών είναι η:

$$\frac{\Delta g}{\Delta \omega_r - \Delta \omega} = \frac{1 + T_R s}{\sigma + \delta T_R s} \tag{2.107}$$

όπου

δ: ο μεταβατικός στατισμός της γεννήτριας

σ: ο μόνιμος στατισμός της γεννήτριας

T<sub>R</sub>:η χρονική σταθερά επαναφοράς του μηχανισμού μεταβατικού στατισμού

Από τη παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς (2.107) επειδή  $\delta T_R$ >>σ 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→0 και s→∞, κυριαρχεί η μεγάλη τιμή του μεταβατικού στατισμού στη συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή στροφών (2.107). Στη συνέχεια, ο στατισμός μειώνεται προς την τιμή της μόνιμης κατάστασης σ (για s→0) με ρυθμό που καθορίζεται από το χρόνο  $T_R$  εμποδίζοντας τελικά την απότομη μετακίνηση του

ανοίγματος  $\Delta g$ . Το μοντέλο προσομοίωσης που περιλαμβάνει τον υδροστρόβιλο και τον ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό παρουσιάζεται παρακάτω:

![](_page_86_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 2.27: 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  $T_R = 5T_w$  και οι τιμές του μεταβατικού στατισμού δ ώστε δ≈2,5 $T_w$ /2H [8,15].

#### 2.2.8 Κυματικά φαινόμενα στον αγωγό προσαγωγής

Στην μέχρι τώρα ανάλυση του υδροστροβίλου στηριχτήκαμε στην απλοποιητική παραδοχή της «στερεάς» υδάτινης στήλης και πράγματι στην ανάλυση των περισσότερων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η συνάρτηση μεταφοράς (2.104) περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τη δυναμική συμπεριφορά του υδροστροβίλου. Παρ' όλα αυτά, επιδιώκεται μία λεπτομερέστερη ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του, χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν και η συμπιεστότητα του νερού, να θεωρηθεί δηλαδή η υδάτινη στήλη στον αγωγό προσαγωγής όχι σαν στερεό αλλά σαν μέσο μετάδοσης κυμάτων πίεσης.

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

$$\frac{\Delta h}{\Delta q}(s) = -\frac{T_w}{T_e} \tanh(T_e s) \tag{2.108}$$

όπου η σταθερά  $T_e$  ονομάζεται σταθερά χρόνου και είναι ίση με το χρόνο που απαιτείται για να διατρέξει το κύμα πιέσεως το μήκος L του αγωγού και  $T_w$  είναι η σταθερά αδρανείας του νερού, που έχει ήδη οριστεί στη σχέση (2.102).

Με βάση την (2.108) η κυματική συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g}(s) = \frac{1 - \left(\frac{T_w}{T_e}\right) \tanh\left(T_e s\right)}{1 + \left(\frac{T_w}{2T_e}\right) \tanh\left(T_e s\right)}$$
(2.109)

Για περιπτώσεις όπου το  $T_e$  είναι μικρό, δηλαδή σε μικρούς αγωγούς, και για χαμηλές συχνότητες η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να απλοποιηθεί σύμφωνα με την προσεγγιστική σχέση tanh(x)~x, η οποία ισχύει μόνο για μικρές τιμές του x. Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση (2.109) καταλήγει στην (2.104), στην οποία αμελούνται τα κυματικά φαινόμενα. Συνεπώς, η (2.104) 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 (2.104).

#### 2.2.9 Υδροστρόβιλος με πύργο ηρεμήσεως (ή αναπάλσεως ή εκτονώσεως)

Ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης της δυσμενούς μεταβατικής συμπεριφοράς του υδροστροβίλου εξ αιτίας του υδραυλικού πλήγματος είναι η κατασκευή ενός πύργου αναπάλσεως ή ηρεμήσεως κοντά στον υδροστρόβιλο, ώστε να απορροφά τις υπερπιέσεις και τις υποπιέσεις που προκαλούν οι μεταβολές του ανοίγματος των υδατοθυρίδων του υδροστροβίλου και συνεπώς να συμβάλλει στην εξασθένιση του υδραυλικού πλήγματος. Το δοχείο ή ο πύργος αναπάλσεως τοποθετείται στο άκρο κλειστού αγωγού προσαγωγής και απέναντι από τη βαλβίδα ελέγχου-ρύθμισης της παροχής. Σκοπός του είναι η αποφυγή σημαντικών υποπιέσεων ή υπερπιέσεων στον αγωγό μετατρέποντας την κινητική ενέργεια της μάζας του υγρού του αγωγού σε δυναμική ενέργεια της μάζας του υγρού στο εσωτερικό του πύργου, δηλαδή σε ταλάντωση της μάζας. Στο τμήμα του αγωγού μεταξύ του πύργου αναπάλσεως και της βαλβίδας δεν είναι δυνατή η αποφυγή της ανάπτυξης του υδραυλικού πλήγματος μεταβολής της παροχής [22].

Σχηματικά η διάταξη υδροστροβίλου με πύργο ηρεμήσεως φαίνεται παρακάτω:

![](_page_87_Figure_4.jpeg)

Σχήμα 2.28: Σχηματική διάταξη υδροστροβίλου με πύργο ηρεμήσεως [8].

Στο παραπάνω σχήμα,  $A_{\pi}$  είναι η διατομή του πύργου ηρεμήσεως $(m^2)$ ,  $U_{\pi}$  η ταχύτητα του νερού που εισέρχεται στον πύργο ηρεμήσεως (m/sec),  $A_1$  η διατομή του αγωγού μεταξύ του πύργου ηρεμήσεως και του στροβίλου, το μήκος του οποίου θεωρείται αμελητέο για λόγους απλότητας και  $U_1$  η ταχύτητα του νερού μετά τον πύργο αναπάλσεως.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου του υδροστροβίλου με πύργο ηρεμήσεως χρειάζεται να επανέλθει και πάλι η παραδοχή πως το νερό στον αγωγό προσαγωγής είναι ασυμπίεστο. Από

την μοντελοποίηση του υδροστροβίλου χωρίς πύργο αναπάλσεως έχουν προκύψει οι επόμενες σχέσεις, οι οποίες αναφέρονται σε κανονικοποιημένα μεγέθη:

$$\Delta P_m = \Delta h + \Delta u_1$$
  

$$\Delta u_1 = \Delta g + \frac{\Delta h}{2}$$
  

$$T_w s \Delta v = -\Delta h$$
  
(2.110)

Δεδομένου πως σε αυτές τις σχέσεις εμφανίζεται μία νέα μεταβλητή, η  $\Delta u_1$ , οι παραπάνω εξισώσεις δεν επαρκούν για την ανάπτυξη του μοντέλο με πύργο αναπάλσεως. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται η εξίσωση συνέχειας της ροής στη διακλάδωση του πύργου και η εξίσωση μεταβολής της στάθμης του πύργου.

Στο σημείο όπου διακλαδώνεται ο πύργος αναπάλσεως με τον αγωγό προσαγωγής η ροή εισόδου σε  $m^3$ /sec πρέπει να είναι ίση με τη ροή εξόδου (εξίσωση συνέχειας της ροής):

$$A \cdot U = A_{\pi} \cdot U_{\pi} + A_1 \cdot U_1 \tag{2.111}$$

Ή σε κανονικοποιημένες μεταβολές ταχυτήτων:

$$\Delta u = (A_{\pi}/A)\Delta u_{\pi} + \Delta u_1 \tag{2.112}$$

Η ταχύτητα εισόδου του νερού στον πύργο ηρεμήσεως  $U_{\pi}$  μπορεί να κανονικοποιηθεί διαιρώντας με την ταχύτητα  $U_{o}$  μονίμου καταστάσεως στον αγωγό προσαγωγής:

$$\Delta u_{\pi} = \Delta U_{\pi} / U_{0}, \qquad (2.113)$$

καθώς στη μόνιμη κατάσταση δεν υπάρχει ροή προς τον πύργο και η συνέχεια της ροής δίνει: AU<sub>0</sub>=A<sub>1</sub>U<sub>1</sub>. (2.114)

Επιπλέον, όταν εισέρχεται μία ποσότητα νερού στον πύργο ηρεμήσεως προκαλεί μεταβολή της στάθμης του νερού μέσα σε αυτόν. Η στιγμιαία τιμή της στάθμης του πύργου ηρεμήσεως ταυτίζεται με την πίεση σε μέτρα στήλης ύδατος που επικρατεί στο στρόβιλο. Συνεπώς, υποτίθεται πως δεν είναι δυνατόν να μεταβληθεί η πίεση αν δεν αυξηθεί η στάθμη του πύργου, ενώ η ταχύτητα εισόδου στον πύργο ισούται με το ρυθμό μεταβολής της πιέσεως:

$$U_{\pi} = \frac{dH}{dt}$$
(2.115)

Και κανονικοποιώντας:

$$\Delta u_{\pi} = (H_0/U_0)s\Delta h \tag{2.116}$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g} = \frac{1 - T_w s + s^2 / \omega_n^2}{1 + s T_w / 2 + s^2 / \omega_n^2}$$
(2.117)

Όπου  $\omega_n$  είναι η φυσική συχνότητα του συνδυασμού πύργου ηρεμήσεως-αγωγού προσαγωγής και ορίζεται ως εξής:

$$\omega_{\rm n} = \sqrt{\frac{\rm Ag_r}{\rm A_{\pi}L}} \tag{2.118}$$

89

όπου  $g_r$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η συνάρτηση μεταφοράς (2.117) είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά του αγωγού μεταξύ του πύργου ηρεμήσεως και του στροβίλου, ο οποίος έχει θεωρηθεί μηδενικού μήκους. Η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς (2.118) εξασφαλίζει πως ο πύργος αναπάλσεως εξαλείφει το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος. Οι κινήσεις των υδατοθυρίδων δεν μπορούν να προκαλούν πλέον υπερπιέσεις ή υποπιέσεις, καθώς η ύπαρξη του πύργου διασφαλίζει ότι η πίεση στο στρόβιλο θα διατηρείται στιγμιαία σταθερή. Σε αντίθεση με την υπερπίεση που θα δημιουργούνταν σε ένα σύστημα υδροστροβίλου χωρίς πύργο, σε αυτή την περίπτωση με πύργο, ένα ενδεχόμενο απότομο κλείσιμο των υδατοθυρίδων θα προκαλέσει τη ροή μιας μάζας νερού στον πύργο ηρεμήσεως. Η πρόσθετη αυτή μάζα προκαλεί βαθμιαία αύξηση της στάθμης του πύργου και κατά συνέπεια της πιέσεως στο στρόβιλο. Στη συνέχεια, η μάζα αυτή επιστρέφει στη δεξαμενή και ακολουθεί μία ταλαντωτική συμπεριφορά με σχετικά μικρή απόσβεση. Ουσιαστικά, σε περίπτωση διακοπής της ροής στη βαλβίδα η ροή στον αγωγό προσαγωγής δε μηδενίζεται αμέσως. Εξ αιτίας της ορμής της μάζας του υγρού στον αγωγό η παροχή διοχετεύεται αρχικά στο δοχείο εκτονώσεως του οποίου η στάθμη ανέρχεται, μετατρέποντας ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο την κινητική ενέργεια του νερού στον αγωγό σε δυναμική ενέργεια μέσα στον πύργο. Κατά τη φάση αυτή η ελεύθερη στάθμη στο δοχείο ανεβαίνει μέχρι μία μέγιστη τιμή και στη συνέχεια προκαλείται αντιστροφή της φοράς της ροής από τον πύργο προς τον αγωγό. Αναπτύσσεται συνεπώς μία ταλάντωση η οποία αποσβένεται λόγω των αναπτυσσόμενων υδραυλικών απωλειών στον αγωγό και στο στόμιο του δοχείου οι οποίες είναι πάντοτε αντίθετης φοράς από την εκάστοτε διεύθυνση της ροής [8,15,22,30].

Η συνάρτηση μεταφοράς (2.117) μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g} = \frac{s^2 - \omega_n^2 \cdot T_w s + \omega_n^2}{s^2 + \omega_n^2 \cdot \frac{T_w}{2} s + \omega_n^2}$$
(2.119)

Η ταλαντωτική συμπεριφορά που παρουσιάζει η (2.117) καθορίζεται από το χαρακτηριστικό της πολυώνυμο, δηλαδή τον παρονομαστή της (2.119). Πιο συγκεκριμένα, ο παρονομαστής  $s^2 + \frac{T_w}{2}\omega_n^2$ s+ $\omega_n^2$  είναι της μορφής  $s^2 + 2\zeta\omega_n$ s+ $\omega_n^2$ . Συνεπώς, η ευστάθεια και η μορφή της απόκρισης του συστήματος καθορίζεται από το χαρακτηριστικό πολυώνυμο:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0,$$

όπου  $\zeta = \frac{T_w}{4} \omega_n$  και  $\omega_n$  η φυσική συχνότητα του συστήματος.

Η διακρίνουσα του πολυωνύμου είναι:

$$\Delta = 4\zeta^2 \omega_n^2 - 4\omega_n^2 = 4\omega_n^2(\zeta^2 - 1)$$

και επομένως διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

Σε αυτήν την περίπτωση ζ<sup>2</sup> – 1 > 0 => ζ > 1 =>  $T_w \omega_n > 4$ 

Το σύστημα έχει δύο διακριτούς πραγματικούς πόλους:

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n + \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} = -\frac{T_w}{4} \omega_n^2 + \omega_n \sqrt{(\frac{T_w}{4} \omega_n)^2 - 1},$$

οι οποίοι βρίσκονται πάντοτε στο αρνητικό ημιεπίπεδο και επομένως καθιστούν το σύστημα ευσταθές. Η απόκριση του συστήματος σε αυτήν την περίπτωση αναφέρεται ως υπερκρίσιμη ταλάντωση (overdamping) και δεν παρουσιάζει υπερύψωση (overshoot). Ένα παράδειγμα τέτοιας απόκρισης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

![](_page_90_Figure_3.jpeg)

Σχήμα 2.29: Βηματική απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς του υδροστροβίλου με πύργο αναπάλσεως για Tw=4,5sec και ωn=1rad/sec. Υπερκρίσιμη ταλάντωση. Το πλάτος της βηματικής μεταβολής της εισόδου (Δg) είναι 0.2αμ και συμβαίνει για t=10sec.

![](_page_90_Figure_5.jpeg)

Σχήμα 2.30: Υπερκρίσιμες ταλαντώσεις για διάφορες τιμές των Τw και ωn. Μειώνοντας το συντελεστή Tw, μειώνεται η διάρκεια της μεταβατικής απόκρισης του συστήματος.

Σε αυτήν την περίπτωση  $\zeta^2 - 1 = 0 => \zeta = 1 => T_w \omega_n = 4$  και το σύστημα έχει δύο μη διακριτούς αρνητικούς πραγματικούς πόλους. Επομένως, το σύστημα είναι και πάλι ευσταθές και η απόκρισή του αναφέρεται ως κρίσιμη απόσβεση (critical damping).

![](_page_91_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 2.31: Βηματική απόκριση-κρίσιμη ταλάντωση της συνάρτησης μεταφοράς του υδροστροβίλου με πύργο αναπάλσεως.

Se authy the peription  $\zeta^2 - 1 < 0 \Longrightarrow 0 < \zeta < 1 \Longrightarrow 0 < T_w \omega_n < 4.$ 

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο έχει δύο συζυγείς μιγαδικές λύσεις:  $s_{1,2} = -\zeta \omega_n + j\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} = -\frac{T_w}{4} \omega_n^2 + j\omega_n \sqrt{(\frac{T_w}{4} \omega_n)^2 - 1}, \text{ or οποίες βρίσκονται προφανώς}$ στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Εξασφαλίζεται συνεπώς η ευστάθεια του συστήματος, η απόκρισή του, όμως, εμφανίζει ταλαντώσεις με συντελεστή απόσβεσης ζ ή ισοδύναμα  $\frac{T_w \omega_n}{4}$  και αναφέρεται ως υποκρίσιμη ταλάντωση (underdamping).

Καθώς μεταβάλλονται οι τιμές του συντελεστή ζ (ή αλλιώς του  $\frac{T_w}{4}\omega_n$ ), οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης ή αλλιώς οι πόλοι του συστήματος κινούνται πάνω στην περιφέρεια ενός κύκλου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

![](_page_91_Figure_6.jpeg)

Σχήμα 2.32: Διάγραμμα της καμπύλης πάνω στην οποία κινούνται οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης καθώς μεταβάλλεται ο ζ με σταθερή συχνότητα ωπ. Εφόσον 0<ζ<1, οι πόλοι του συστήματος μπορούν να κινούνται στο αριστερό ημικύκλιο με ακτίνα ωπ.

Η μεταβατική απόκριση του συστήματος παρουσιάζει ολοένα και πιο ισχυρές ταλαντώσεις, όσο οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης προσεγγίζουν τον φανταστικό άξονα, πάνω στον οποίο μηδενίζεται ο συντελεστής απόσβεσης. Καθώς μειώνεται επομένως ο συντελεστής  $T_w$  οι ταλαντώσεις του συστήματος θα είναι πιο έντονες (και ως προς το πλάτος και ως προς τη διάρκειά τους).

Για Δ<0 και σταθερή συχνότητα  $\omega_n$  η επίδραση του συντελεστή απόσβεσης  $T_w$  στην βηματική απόκριση του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επιπλέον, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται και η επίδραση από την μεταβολή της φυσικής συχνότητας με σταθερό  $T_w$ :

![](_page_92_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 2.33: Επίδραση του συντελεστή Tw και της φυσικής συχνότητας ωn στην υποκρίσιμη ταλάντωση της συνάρτησης μεταφοράς του υδροστροβίλου με πύργο αναπάλσεως.

Από το παραπάνω σχήμα είναι εμφανές πως με σταθερή φυσική συχνότητα  $\omega_n$  η μείωση του συντελεστή  $T_w$  επιφέρει πιο ισχυρή ταλαντωτική συμπεριφορά της απόκρισης του συστήματος με μεγαλύτερα πλάτη (εκτός από την πρώτη βύθιση) και προφανώς μεγαλύτερη διάρκεια των αποσβεννύμενων ταλαντώσεων, εφόσον μειώνεται ο συντελεστής απόσβεσης ζ. Παρ' όλα αυτά, το πλάτος της πρώτης βύθισης είναι μικρότερο για μικρότερη τιμή του  $T_w$ . Η μείωση της  $\omega_n$  για σταθερή τιμή του  $T_w$  επιφέρει μείωση του συντελεστή απόσβεσης και αύξηση της περιόδου των ταλαντώσεων.

Σε αντίθεση με τη συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου χωρίς πύργο που ήταν «μη ελαχίστης φάσης», από τη συνάρτηση (2.113) είναι εμφανές πως η παραγόμενη μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου ακολουθεί τη μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων τόσο μεταβατικά (t $\rightarrow$ 0,s $\rightarrow\infty$ ) όσο και στη μόνιμη κατάσταση (t $\rightarrow\infty$ ,s $\rightarrow$ 0) [8,15].

Σύμφωνα με τη συνάρτηση μεταφοράς (2.111) και τα όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα παράγραφο το μοντέλο του υδροστροβίλου με πύργο αναπάλσεως είναι το εξής:

![](_page_93_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 2.34: Μοντέλο προσομοίωσης υδροστροβίλου με πύργο αναπάλσεως.

Στο σχήμα 2.34 είσοδος είναι η μεταβολή των υδατοθυρίδων Delta\_g, η οποία σε ανά μονάδα τιμή ταυτίζεται με τη ζητούμενη ισχύ από τον υδροστρόβιλο και έξοδος η μεταβολή της μηχανικής ισχύος του υδροστροβίλου Delta\_Pm.

Γενικά, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς γίνεται από τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των υδάτων μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια τόσο του ίδιου του στροβίλου όσο και του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας που είναι στερεά συνδεδεμένος πάνω στον ίδιο άξονα.

Η υδραυλική ενέργεια του ύδατος μετατρέπεται εν μέρει σε μηχανική ενέργεια στο στρόβιλο. Αυτό συνεπάγεται την επιτάχυνση των πτερυγίων του υδροστροβίλου, η οποία προκαλεί την αύξηση της συσσωρευμένης κινητικής ενέργειας του κοινού άξονα στροβίλου-γεννήτριας. Από την αποθηκευμένη αυτή κινητική ενέργεια αντλεί ενέργεια η γεννήτρια μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που ασκείται στο δρομέα από το συνδυασμό των μαγνητικών της πεδίων. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική και οδηγείται στην κατανάλωση.

#### 2.2.10 Υπολογισμός διαστάσεων πύργου αναπάλσεως

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων του πύργου χρειάζεται να υπολογιστούν οι ακραίες δυνατές τιμές της στάθμης h, ώστε να αποφευχθεί η υπερχείλιση στην ανώτερη στάθμη εάν αυτή δεν είναι επιθυμητή ή η είσοδος αέρα στον αγωγό στην κατώτατη δυνατή στάθμη μετά από κάποιο χειρισμό στην υδατοθυρίδα. Η χρονική μεταβολή της στάθμης h του πύργου αναπάλσεως περιγράφεται ως εξής [22]:

$$h = \left(U_{\alpha} - U_{\beta}\right) \sqrt{\frac{L}{g} \frac{A}{A_{\pi}}} \sin(\omega_n t)$$
(2.120)

όπου:

 $U_{\alpha}$ : η ταχύτητα στον αγωγό στην αρχική μόνιμη κατάσταση πριν τον χειρισμό της υδατοθυρίδας  $Q_{\alpha} = U_{\alpha} \cdot A$  και

 $\mathit{U}_{\beta}$ : η ταχύτητα που θα αποκατασταθεί μετά τον χειρισμό $\mathit{Q}_{\beta} = \mathit{U}_{\beta} \cdot \mathit{A}.$ 

Το πλάτος της ταλάντωσης είναι δηλαδή ανάλογο της διαφοράς  $U_{\alpha} - U_{\beta}$  που χαρακτηρίζει την αρχική και την τελική κατάσταση λειτουργίας του αγωγού.

Συνεπώς για στιγμιαίο χειρισμό στη βαλβίδα (ακραία περίπτωση), το μέγιστο πλάτος θα αντιστοιχεί στο πλήρες άνοιγμα ή κλείσιμο της βαλβίδας, δηλαδή  $U_{\beta} = 0$ .

Για την αρχική μέγιστη παροχή  $Q_o$  θα ισχύει  $Q_o = A_{\pi} \cdot U_{\pi,o} = \mathbf{A} \cdot U_o$  και:

$$h = h^* \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$
  

$$\delta\pi ov \ h^* = U_{\pi,o} \sqrt{\frac{L}{g}} \frac{A_{\pi}}{A} = U_o \sqrt{\frac{L}{g}} \frac{A}{A_{\pi}}$$
(2.121)

Από την τελευταία σχέση είναι εμφανές ότι το μέγιστο πλάτος  $h^*$  είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της διατομής Α του πύργου και ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του γινομένου  $L \cdot A_{\pi}$  που εκφράζει τον όγκο του υγρού που περιέχεται στον αγωγό. Ο ωφέλιμος όγκος του πύργου είναι τόσο μικρότερος όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του μέγιστου πλάτους  $h^*$ . Κατά αντίστοιχο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης στον πύργο αναπάλσεως όταν συμβαίνει γραμμική μεταβολή της παροχής [22].

#### 2.2.11 Τύποι πύργων αναπάλσεως

Το πρώτο είδος πύργων που αναφέρεται είναι οι απλοί ανοιχτοί πύργοι αναπάλσεως (open surge tanks ή surge shafts ή standpipes). Ο ανοιχτός πύργος αναπάλσεως, μπορεί να αποτελέσει εξαιρετική λύση για την αντιμετώπιση των υποπιέσεων αλλά και των υπερπιέσεων που τροφοδοτούν την ανάπτυξη του υδραυλικού πλήγματος. Μετά από ένα αιφνίδιο άνοιγμα των υδατοθυρίδων, το νερό στον ανοιχτό πύργο ηρεμήσεως παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την μείωση της αλλαγής της κινηματικής κατάστασης στον αγωγό και την αντιμετώπιση του αναπτυσσόμενου υδραυλικού πλήγματος. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε υδροηλεκτρικά έργα όπου υπάρχει και η κατάλληλη τοπογραφία. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται διάφορες μορφές ανοιχτών πύργων ανάπαλσης.

![](_page_95_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 2.35: Διάφοροι τύποι ανοιχτών πύργων ανάπαλσης [21].

Ο λόγος που αναπτύχθηκαν διαφορετικοί ανοιχτοί πύργοι ήταν ουσιαστικά η ανάγκη για την αντιμετώπιση δύο βασικών προβλημάτων της συγκεκριμένης διάταξης. Το ένα από αυτά είναι η ανάγκη να αποσβεστούν οι ταλαντώσεις της υγρής στήλης μεταξύ του πύργου και της δεξαμενής εντός ενός ικανοποιητικού σύντομου χρονικού διαστήματος και το άλλο η αποφυγή του ανεπιθύμητου συντονισμού της ταλάντωσης. Οι ανοιχτοί πύργοι ανάπαλσης πρακτικά δεν χρειάζονται συντήρηση αφού δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη και παρουσιάζουν άμεση απόκριση. Ένα μειονέκτημα των ανοιχτών πύργων ανάπαλσης είναι το μεγάλο ύψος τους, αφού πρέπει να ξεπερνούν την πιεζομετρική γραμμή της εγκατάστασης, αλλά και ο κίνδυνος υπερχείλισης που προκύπτει. Για αυτό το λόγο, συναντώνται σπάνια σε αντλητικές εγκαταστάσεις εξαιτίας της έλλειψης μεγάλου υψομέτρου κοντά στις εγκαταστάσεις. Επιπλέον, σε μεγάλες εγκαταστάσεις το μεγάλο ύψος τους ενδέχεται να οδηγήσει σε απαγορευτικό κόστος. Μία προσπάθεια μείωσης του μεγέθους της διάταξης μπορεί να επιτευχθεί με τοποθέτηση ειδικά διαμορφωμένων στομίων εισόδου και εξόδου στη βάση της. Είναι, επίσης, πιθανό να απαιτείται προσθήκη διάταξης που θα αποσβένει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις της υγρής στήλης. Επίσης, οι ανοιχτοί πύργοι ανάπαλσης πρέπει να είναι θερμικά μονωμένοι, καθώς υπάρχει η πιθανότητα το στάσιμο νερό που περιέχουν να παγώσει. Το βασικότερο μειονέκτημα, όμως, των ανοιχτών πύργων ανάπαλσης είναι το υψηλό κόστος τους [20,21].

Μία άλλη κατηγορία πύργων αναφέρεται στους πύργους αναπάλσεως απλής ή διπλής κατεύθυνσης (oneway, two-way surge tank).Ο πύργος αναπάλσεως απλής κατεύθυνσης, ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 2.36α, χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις των οποίων η πιεζομετρική γραμμή είναι αρκετά υψηλή για να τοποθετηθεί ανοιχτός πύργος αναπάλσεως.

![](_page_96_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 2.36: Σχέδιο πύργου ανάπαλσης α) απλής κατεύθυνσης, β) διπλής κατεύθυνσης [20]

Ο πύργος αναπάλσεως απλής κατεύθυνσης έχει παρόμοια λειτουργία με τον ανοιχτό πύργο αναπάλσεως με τη διαφορά ότι δεν επιτρέπει την επιστροφή του νερού στον πύργο. Χρησιμοποιείται σε μικρές εγκαταστάσεις (μεγέθους περίπου 15m στήλης ύδατος), αλλά η κατασκευή του είναι πολυπλοκότερη από τον ανοιχτό πύργο αναπάλσεως. Στο επόμενο σχήμα παριστάνεται μία υδροηλεκτρική εγκατάσταση με πύργο αναπάλσεως απλής κατεύθυνσης:

![](_page_96_Figure_3.jpeg)

Σχήμα 2.37: Σχηματική παράσταση υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με πύργο αναπάλσεως απλής κατεύθυνσης για περιορισμό του υδραυλικού πλήγματος [22].

Όπως φαίνεται από το σχήμα, ο πύργος αναπάλσεως είναι απομονωμένος από τον αγωγό και συνδέεται με αυτόν μέσω βαλβίδας αντεπιστροφής στο σημείο όπου σε περίπτωση υποπίεσης η στατική πίεση ενδέχεται να πέσει κάτω από την πίεση ατμοποίησης του υγρού (δηλαδή στο τμήμα του αγωγού που βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο). Κατά την φάση υποπίεσης, όταν η στατική πίεση στον αγωγό στο σημείο σύνδεσής του με τον πύργο πέσει κάτω από την τιμή που αντιστοιχεί στην στάθμη του νερού μέσα σε αυτόν, η βαλβίδα αντεπιστροφής ανοίγει και επιτρέπει τη τροφοδοσία του αγωγού αντιμετωπίζοντας έτσι τις υποπιέσεις και αποκλείοντας τον κίνδυνο ατμοποίησης. Η στάθμη του νερού στον πύργο απλής κατεύθυνσης διατηρείται στην αρχική της τιμή μέσω τροφοδοτικής αντλίας και αυτόματων διακοπτών στάθμης.

Το πλεονέκτημα του πύργου αναπάλσεως απλής κατεύθυνσης έναντι του απλού πύργου αναπάλσεως είναι ότι δεν χρειάζεται να είναι τοποθετημένος στο ύψος της πιεζομετρικής γραμμής και για αυτό τον λόγο τοποθετείται συνήθως πολύ χαμηλότερα αυτής. Το βασικό μειονέκτημα του όμως είναι ότι δεν αντιμετωπίζει τις αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις παρά μόνο τις υποπιέσεις.

Ο πύργος αναπάλσεως διπλής κατεύθυνσης είναι παρόμοιος με τον πύργο αναπάλσεως μονής κατεύθυνσης με τη διαφορά ότι δεν διαθέτει βαλβίδα αντεπιστροφής. Συνήθως η διάταξη είναι γεμάτη με νερό, γεγονός που αποτελεί ίσως πρόβλημα για τη περίπτωση υπερπιέσεων αλλά είναι πολύ αποτελεσματικό σε περίπτωση υποπιέσεων. Ο πύργος αναπάλσεως διπλής κατεύθυνσης χρησιμοποιείται συνήθως σε δίκτυα αγωγών στα οποία η πιεζομετρική γραμμή απέχει λίγο από τον αγωγό.

#### 2.2.12 Υλικά κατασκευής αγωγού προσαγωγής

Για την κατασκευή του αγωγού προσαγωγής ΜΥΗΣ μπορεί να χρησιμοποιηθούν σωλήνες διαφόρων τύπων ανάλογα με την παροχή και την υδραυλική πτώση, όπως χαλυβοσωλήνες, αμιαντοσωλήνες και πλαστικοί σωλήνες.

Πλαστικοί σωλήνες από εύκαμπτο πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο ή PVC χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές παροχές, μέχρι 0,03 m/sec και υδραυλική πτώση μικρότερη των 100 έως 150 m. Έχουν το πλεονέκτημα του μικρού βάρους, μικρού κόστους και ευκολία στην κατασκευή του αγωγού ακόμη και σε απόκρημνο έδαφος. Το βασικό μειονέκτημα είναι η γήρανση του υλικού όταν εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου οπότε και γίνεται εύθραυστο. Για το λόγο αυτό οι πλαστικοί σωλήνες συνήθως τοποθετούνται υπόγειοι, εκτός εάν προβλεφθεί επιφανειακή προστασία έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αμιαντοσωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παροχή μέχρι 0,2 m/sec και υδραυλική πτώση μικρότερη των 160 m. Τα διάφορα τμήματα συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς συνδέσμους. Δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα και για τον λόγο αυτό είναι ακατάλληλοι για εγκατάστασή τους σε ασταθές ή έντονα επικλινές έδαφος.

Είναι επίσης δυνατή η διαμόρφωση του αγωγού προσαγωγής από οπλισμένο σκυρόδεμα (ολόσωμος και όχι από προκατασκευασμένα τμήματα) για υδραυλική πτώση μικρότερη των 33m περίπου.

Στην μεγάλη πλειονότητα των περιπτώσεων ο αγωγός προσαγωγής κατασκευάζεται από χαλυβοσωλήνες λόγω της δυνατότητας συγκόλλησης των διαφόρων τμημάτων, της υψηλής αντοχής και ελαστικότητας που τους καθιστούν κατάλληλους σε ένα πολύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών (από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες πιέσεις), τόσο στα μικρά όσο και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα [40].

### 2.3 Ντηζελογεννήτρια (diesel engine)

Η ντηζελογεννήτρια είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσεως, η οποία εκμεταλλεύεται τη θερμότητα της συμπίεσης του αέρα για την επίτευξη της ανάφλεξης του καυσίμου, το οποίο εγχέεται στο θάλαμο καύσης. Η ντηζελογεννήτρια μπορεί να είναι εμβολοφόρος ή παλινδρομική μηχανή. Αναλυτικότερα, η αρχή λειτουργίας της μηχανής diesel παρουσιάζεται παρακάτω.

![](_page_98_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 2.38: Βασικά δομικά στοιχεία μιας diesel μηχανής.

Αρχικά εισάγεται μόνο αέρας στον θάλαμο καύσης. Ο αέρας στη συνέχεια συμπιέζεται με ένα λόγο συμπίεσης με τυπικές τιμές 15:1 και 22:1 καταλήγοντας συνήθως σε μία πίεση των 40 bar περίπου. Αυτή η έντονη συμπίεση θερμαίνει τον αέρα στους 550°C. Έπειτα, εισάγεται το καύσιμο κατευθείαν μέσα στον συμπιεσμένο αέρα στο θάλαμο καύσης. Η βαλβίδα έγχυσης του καυσίμου (fuel injector) εξασφαλίζει ότι το καύσιμο πέφτει σε μικρές σταγόνες και ομοιόμορφα. Η θερμότητα του συμπιεσμένου αέρα προκαλεί την εξάτμιση του καυσίμου από την επιφάνεια των σταγόνων αυτών. Ο ατμός που εξατμίζεται αναφλέγεται στη συνέχεια λόγω της θερμότητας του συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης, οι σταγόνες συνεχίζουν να εξατμίζονται και να αναφλέγονται, γίνονται ολοένα και μικρότερες, μέχρι που όλη η ποσότητα του καυσίμου έχει καεί. Η έναρξη της εξάτμισης προκαλεί μία καθυστέρηση κατά την ανάφλεξη και έναν χαρακτηριστικό ήχο καθώς ο ατμός φτάνει το σημείο ανάφλεξης και προκαλεί απότομη αύξηση στην πίεση του εμβόλου (piston). Η απότομη εκτόνωση των αερίων της συμπίεσης οδηγούν το έμβολο προς τα κάτω, παρέχοντας ενέργεια στον στροφαλοφόρο άξονα (crankshaft). Όπως μία πολύ έντονη συμπίεση που επιτρέπει την καύση χωρίς ξεχωριστό σύστημα ανάφλεξης, έτσι και ένας υψηλός λόγος συμπίεσης αυξάνει έντονα την απόδοση της μηχανής. Η αύξηση του λόγου αυτού σε μία μηχανή με ξεχωριστό σύστημα ανάφλεξης με σπινθήρα (π.χ. μηχανή που χρησιμοποιεί βενζίνη), όπου το καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται πριν την είσοδο στον κύλινδρο είναι περιορισμένη εξ αιτίας της καταστροφικής περίπτωσης της πρόωρης ανάφλεξης. Σε μία μηχανή diesel, όπου ο αέρας συμπιέζεται και το καύσιμο δεν εισέρχεται στον κύλινδρο παρά μόνο ελάχιστα πριν το έμβολο φτάσει στη μακρύτερη δυνατή θέση (top dead centre) από τον στροφαλοφόρο άξονα, δεν ελλοχεύει ο κίνδυνος πρόωρης ανάφλεξης και επομένως οι λόγοι ανάφλεξης μπορούν να είναι σαφώς μεγαλύτεροι. Για αυτό το λόγο, καθώς και λόγω της αυξημένης αξιοπιστίας τους, οι γεννήτριες diesel χρησιμοποιούνται ευρέως. Ωστόσο, οι εκπομπές αερίων, όπως μαύρου καπνού και οξειδίων αζώτου είναι επιβλαβείς και ανεπιθύμητες. Για αυτό γίνεται παγκοσμίως προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών αυτών από τις μηχανές diesel και η κυριότερη δυσκολία που παρουσιάζεται αφορά στην ταυτόχρονη μείωση των δύο ρυπαντών.

Το μοντέλο προσομοίωσης της ντηζελογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε είναι το εξής:

![](_page_99_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 2.39: Μοντέλο προσομοίωσης ντηζελογεννήτριας.

Στο παραπάνω μοντέλο η μηχανή ντήζελ και ο σερβομηχανισμός του ρυθμιστή της βαλβίδας του καυσίμου παριστάνονται με συναρτήσεις καθυστερήσεως πρώτης τάξης. Ο ρυθμιστής στροφών της ντηζελογεννήτριας έχει τιμή στατισμού Dd και το μοντέλο έχει ως είσοδο τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου και ως έξοδο την ηλεκτρική ισχύ που θα αποδώσει η ντήζελ στην αντίστοιχη μεταβολή συχνότητας [38].

# 3

# Συμβολή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας(ΡΦΣ)

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η συμβολή των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας (PΦΣ) ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Δύο από τις δημοφιλέστερες τεχνικές που έχουν εξεταστεί ως προς τη δυνατότητα εφαρμογής των ανεμογεννητριών για τη PΦΣ είναι η συνεισφορά των ανεμογεννητριών στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου [32], καθώς και η λειτουργία τους σε ποσοστιαία αποφόρτιση, έτσι ώστε σε περίπτωση ξαφνικής πτώσης της συχνότητας να είναι σε θέση να διοχετεύσουν το περιθώριο της ισχύος, που οφείλεται στην αποφόρτισή τους, στο δίκτυο και να επιτύχουν αύξηση της συχνότητας στην επιθυμητή τιμή της.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τρεις ξεχωριστές τεχνικές για τη συμμετοχή των Α/Γ στη ΡΦΣ, από τις οποίες οι δύο πρώτες αφορούν στον έλεγχο της αποφόρτισης μιας ανεμογεννήτριας, ενώ η τρίτη τεχνική αφορά την αδρανειακή απόκριση της Α/Γ. Η μία από τις δύο τεχνικές αποφόρτισης στηρίζεται στην δυνατότητα μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων της έλικας (pitch control), ενώ η δεύτερη αποτελεί συνδυασμό αποφόρτισης μέσω της επιτάχυνσης του δρομέα (overspeeding) καθώς και της μεταβολής της γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control). Η τρίτη τεχνική αφορά στη μεταβολή του ήδη αναπτυχθέντος ηλεκτρικού μοντέλου της ανεμογεννήτριας με στόχο τη συμμετοχή της Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου.

## 3.1 Τεχνική αποφόρτισης της ανεμογεννήτριας μέσω της γωνίας βήματος πτερυγίου (pitch control-pitch deloading)

Με τη βοήθεια της συγκεκριμένης τεχνικής μεταβάλλεται η γωνία βήματος των πτερυγίων, προκειμένου να επιτευχθεί το εκάστοτε επιδιωκόμενο ποσοστό αποφόρτισης της ανεμογεννήτριας. Η κλασική στρατηγική λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στηρίζεται στην λειτουργία υπό μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, ο οποίος αντιστοιχεί στην ελάχιστη γωνία βήματος πτερυγίων και στο βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου για ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες μεταβάλλεται η γωνία βήματος και η Α/Γ λειτουργεί υπό μικρότερο από το βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος. Στη μέθοδο που εξετάζεται στην παρούσα παράγραφο, η γωνία βήματος  $β_{del}$  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, «χαλώντας» την αεροδυναμική των πτερυγίων.

Η μέγιστη διαθέσιμη μηχανική ισχύς στο δρομέα της ανεμογεννήτριας για ταχύτητα ανέμου  $U_w < U_{w,nom}$  σε συνέπεια με τη (2.2) θα είναι:

$$P_{\text{available}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{\text{p,max}}(\lambda_{\text{opt}}, 0^{\circ}) \cdot U_{\text{w}}^{3}$$
(3.1)

Όταν είναι επιθυμητό να αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια ισχύς  $P_{del} < P_{available}$  με ταχύτητα ανέμου  $U_w$  θα ισχύει ότι:

$$P_{del} = (1 - x)P_{available}$$
(3.2)

Στην παραπάνω σχέση το x είναι το επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης, το οποίο καθορίζει την ισχύ την οποία η Α/Γ θα διατηρεί ως εφεδρεία και θα μπορεί να αποδώσει για τη ρύθμιση της συχνότητας σε ενδεχόμενη απότομη αύξηση της ζήτησης του φορτίου.

Από την σχέση (3.2) θα ισχύει:

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

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,del} (\lambda_{del}, \beta_{del}) \cdot U_w^3 = (1 - x) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,max} (\lambda_{opt}, 0^o) \cdot U_w^3$$

$$C_{p,del} = (1 - x) \cdot C_{p,max}$$
(3.3)

όπου  $C_{p,del}$ είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος όταν η Α/Γ λειτουργεί σε ποσοστό αποφόρτισης x και παράγει ισχύ  $P_{del}$ .

Συνεπώς, ουσιαστικός στόχος της τεχνικής αποφόρτισης της Α/Γ είναι η επίτευξη της λειτουργίας με αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C<sub>p,del</sub>. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο

αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  εξαρτάται από τη γωνία βήματος της έλικας β και το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ. Σε αυτές τις δύο παραμέτρους βασίζονται οι δύο διαφορετικές τεχνικές αποφόρτισης που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο.

Στην πρώτη τεχνική, στην οποία αναφέρεται η παρούσα παράγραφος, διατηρείται σταθερή η παράμετρος του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ για ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής στην τιμή που αντιστοιχεί σε μέγιστη απομάστευση ισχύος  $\lambda = \lambda_{opt}$ . Συνεπώς, ο επιδιωκόμενος αεροδυναμικός συντελεστής μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας τη άλλη παράμετρο, δηλαδή τη γωνία βήματος των πτερυγίων. Η κλασική λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε σχέση με την λειτουργία σε τυχούσα αποφόρτιση x παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

![](_page_102_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 3.1: Οι περιοχές λειτουργίας της Α/Γ σε μηδενική και σε μη μηδενική αποφόρτιση.

Η σχέση η οποία δίνει τη ζητούμενη γωνία β για επιθυμητό ποσοστό αποφόρτισης x σύμφωνα με τη σχέση (3.3) είναι η εξής:

$$C_{p,del}(\lambda_{opt},\beta_{del}) = (1-x) \cdot C_{p,max}(\lambda_{opt},0^{\circ})$$
(3.4)

και ο υπολογισμός του  $\beta_{del}$  για κάθε ποσοστό αποφόρτισης επιτυγχάνεται με τον εξής αλγόριθμο:

1.Υπολογισμός του  $C_{p,max}$  και  $\lambda = \lambda_{opt}$  για  $\beta = 0^{o}$ 

2. Για κάθε ποσοστό αποφόρτισης x από 0% έως 10% εκτελούνται τα εξής:

- 2.1. Υπολογίζεται το επιθυμητό  $C_{p,del}$  με βάση τη σχέση  $C_{p,del} = (1-x) \cdot C_{p,\max}$
- 2.2. Για κάθε γωνία β από  $0^{o}$  έως  $90^{o}$ :

2.2.1.Υπολογίζεται η τιμή του  $C_p$  με  $\lambda = \lambda_{opt}$ 

2.2.2. Συγκρίνεται το κάθε  $C_p$  με το  $C_{p,del}$ . Όταν είναι ίσα αποθηκεύονται σε έναν πίνακα το ποσοστό αποφόρτισης x και στην αντίστοιχη θέση ενός άλλου πίνακα τη γωνία β.

Συνεπώς, με δεδομένα το  $\lambda = \lambda_{opt}$  και το  $C_{p,del}$ , το οποίο αλλάζει ανάλογα με το επιδιωκόμενο ποσοστό αποφόρτισης x, αναζητάμε σε ποια καμπύλη Cp( $\lambda$ , $\beta$ ), δηλαδή σε ποια γωνία, βρίσκεται αυτό το σημείο ( $\lambda_{opt}, C_{p,del}$ ). Σχηματικά, η λογική αυτή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές παριστούν τα  $C_{p,del}$  για ποσοστά αποφόρτισης, τα οποία επιτυγχάνονται με γωνία βήματος 0°, 5°, 10°, 15°, 20° και 25°:

![](_page_103_Figure_3.jpeg)

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

Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ποσοστό αποφόρτισης x είναι αντιστοιχισμένο στην κατάλληλη γωνία βήματος β με την οποία επιτυγχάνεται η αποφόρτιση αυτή, καθώς η Α/Γ λειτουργεί με βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda_{opt}$ .

Για την επίτευξη της λειτουργίας σε αποφόρτιση κατασκευάζονται δύο ξεχωριστά lookup tables (LUTs). Το LUT1 δέχεται ως είσοδο τη ζητούμενη ισχύ, που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο μηδενικό ή μη ποσοστό αποφόρτισης x, και δίνει ως έξοδο την απαραίτητη γωνία πτερυγίων β. Το LUT2 έχει ως εισόδους τη γωνία βήματος β, που προκύπτει από το LUT1, και τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας ω και παράγει ως έξοδο την τιμή που λαμβάνεται ως ισχύς αναφοράς στον έλεγχο της γεννήτριας.

Στο μοντέλο της Α/Γ που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτείται η αλλαγή του συστήματος ελέγχου της γωνίας β (pitch controller), προκειμένου να λαμβάνεται υπόψιν η ζητούμενη αποφόρτιση και να μεταβάλλεται η γωνία β και για ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής. Σε περίπτωση που απαιτείται λειτουργία της Α/Γ με αποφόρτιση, η ελάχιστη γωνία με την οποία μπορεί να λειτουργεί η Α/Γ δεν είναι τώρα πια η μηδενική, αλλά η γωνία  $\beta_{del}$ , η οποία βγαίνει ως έξοδος από το LUT1 και ανταποκρίνεται σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής. Απαιτείται, επίσης, να συνεχιστεί ο έλεγχος της Α/Γ σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής με υπολογισμό της κατάλληλης γωνίας βήματος για περιορισμό της ισχύος στην ονομαστική της τιμή μέσω ενός ΡΙ ελεγκτή. Σε κάθε περίπτωση η γωνία βήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την  $\beta_{del}$  και μικρότερη από 90°.

Μία εξίσου απαραίτητη αλλαγή που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί, προκειμένου να λειτουργεί το σύστημα της ανεμογεννήτριας σωστά λαμβάνοντας υπόψιν την εκάστοτε αποφόρτιση είναι η αλλαγή του τρόπου υπολογισμού της ισχύος αναφοράς της γεννήτριας. Στο μοντέλο που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2 η ισχύς αναφοράς της γεννήτριας λαμβάνεται ουσιαστικά από την καμπύλη ισχύος Ρ-ω, η οποία έχει ενσωματωθεί σε ένα lookup table. Αυτό το lookup table έχει ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα ω της Α/Γ και ως έξοδο δίνει την κατάλληλη ισχύ Ρ. Σε περίπτωση αποφόρτισης η ανά μονάδα τιμή της ισχύος που πρέπει να δοθεί ως αναφορά στη γεννήτρια είναι η εξής:

$$P_{pu} = \frac{P_{del}}{P_{nom}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,del}(\lambda_{opt}, \beta_{del}) \cdot U_w^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,max}(\lambda_{opt}, 0^\circ) \cdot U_w^3}$$
(3.5)

$$P_{pu} = \frac{C_{p,del}(\lambda_{opt},\beta_{del}) \cdot (\frac{\omega_R}{\lambda_{opt}})^3}{C_{p,max} \cdot (\frac{\omega_{nom}R}{\lambda_{opt}})^3}$$
(3.6)

$$P_{pu} = \frac{C_{p,del}(\lambda_{opt},\beta_{del})\cdot\omega^3}{C_{p,max}\cdot\omega_{nom}^3}$$
(3.7)

Για αυτό το λόγο, κατασκευάζεται το δεύτερο δισδιάστατο lookup table LUT2, το οποίο ανάλογα με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας ω και τη γωνία βήματος πτερυγίων β, που θα δέχεται ως είσοδο, θα δίνει ως έξοδο την κατάλληλη ισχύ αναφοράς για τη γεννήτρια.

Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε αποτελείται από τα εξής βήματα:

1.Για κάθε γωνία β από 0 έως  $23^{o}$ :

1.1.Υπολογίζω το  $C_p = C_{p,del}$  για  $\lambda = \lambda_{opt}$ 

1.2.Για κάθε γωνία ω από ελάχιστη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα έως την ονομαστική:

1.2.1.Υπολογίζω την ισχύ με βάση τη σχέση (3.7) για  $C_{p,del}$  και ω.

1.2.2Αποθηκεύω τα στοιχεία της ισχύος στην αντίστοιχη θέση ενός πίνακα.

Οι απαραίτητες τροποποιήσεις των συστημάτων ελέγχου της γωνίας βήματος και της παραγωγής της ισχύος αναφοράς της γεννήτριας για ενσωμάτωση της λειτουργίας αποφόρτισης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

![](_page_105_Figure_1.jpeg)

(β)

Σχήμα 3.3: Στο σχήμα (α) παρουσιάζεται ο τρόπος παραγωγής της τιμής αναφοράς της ισχύος για το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας. Η μεταβλητή Del αντιπροσωπεύει τη ανά μονάδα ζητούμενη ισχύ σε λειτουργία αποφόρτισης. Στο σχήμα (β) παρουσιάζεται ο ανανεωμένος έλεγχος γωνίας βήματος.

Όσον αφορά την ευστάθεια αυτής της μεθόδου, αποδεικνύεται πως δεν υπάρχει ενδεχόμενο αστάθειας του μηχανικού συστήματος της Α/Γ. Σε κάθε ταχύτητα ανέμου η επιβραδύνουσαηλεκτρική αντιρροπή αντιμετωπίζει άμεσα μία ενδεχόμενη αύξηση της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα. Επίσης, η επιταχύνουσα-αεροδυναμική ροπή είναι σε θέση να καταστείλει σε κάθε περίπτωση την ενδεχόμενη επιβράδυνση του δρομέα [35].

# 3.2 Τεχνική αποφόρτισης της Α/Γ με συνδυασμό επιτάχυνσης της ταχύτητας του δρομέα (overspeeding) και μεταβολή της γωνίας βήματος (pitch control)

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στη προηγούμενη τεχνική αποφόρτισης και με βάση την (3.3), στόχος της διαδικασίας της αποφόρτισης είναι η επίτευξη της λειτουργίας της Α/Γ με αεροδυναμικό συντελεστή:

$$C_{p,del}(\lambda_{del}, \beta_{del}) = (1 - x) \cdot C_{p,max}(\lambda_{opt}, 0^{o})$$
(3.8)

## 3.2.1 Τεχνική αποφόρτισης της Α/Γ μέσω της επιτάχυνσης της ταχύτητας του δρομέα (overspeeding)

Η συγκεκριμένη τιμή του  $C_p$  θα επιτευχθεί στη τεχνική του overspeeding με τον έλεγχο του  $\lambda_{del}$ . Η γωνία  $\beta_{del}$  θα κρατηθεί σταθερή και ίση με την ελάχιστη-μηδενική τιμή της και συνεπώς η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί είναι τώρα η:

$$C_{p,del}(\lambda_{del}, 0^{\circ}) = (1 - x) \cdot C_{p,max}(\lambda_{opt}, 0^{\circ})$$
(3.9)

Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται η καμπύλη του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_p$  συναρτήσει του λ για μηδενική βηματική γωνία και επεξηγείται η τεχνική αποφόρτισης μέσω επιτάχυνσης του δρομέα (overspeeding).

![](_page_106_Figure_4.jpeg)

Σχήμα 3.4: Λειτουργία με την τεχνική αποφόρτισης overspeeding.

Όταν είναι επιθυμητό η Α/Γ να λειτουργεί με κάποιο ποσοστό αποφόρτισης, το οποίο επιβάλλει μία συγκεκριμένη τιμή  $C_{p,del} < C_{p,max}$ , είναι εφικτό να λειτουργήσει είτε με  $\lambda_1$ είτε με  $\lambda_2$ , όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα. Τα δύο αυτά σημεία λειτουργίας  $(\lambda_1, C_{p,del})$  και  $(\lambda_2, C_{p,del})$  αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές ταχύτητες δρομέα  $\omega_1$  και  $\omega_2$ αντίστοιχα με  $\omega_1 < \omega_2$  εφόσον  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Γενικά, η περιοχή αριστερά του βέλτιστου λόγου  $\lambda_{opt}$  αντιστοιχεί σε μικρότερες ταχύτητες δρομέα (τεχνική underspeeding), ενώ η περιοχή δεξιά του αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες (τεχνική overspeeding). Στην παρούσα παράγραφο επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η τεχνική του overspeeding, δηλαδή λειτουργία στο σημείο ( $\lambda_2$ ,  $C_{p,del}$ ). Το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να επιτευχθεί λειτουργώντας στο σημείο ( $\lambda_1$ ,  $C_{p,del}$ ), μειώνοντας δηλαδή τη ταχύτητα του δρομέα, η μέθοδος αυτή όμως είναι πιθανό να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια υπό ορισμένες συνθήκες. Για μια δεδομένη ισχύ, η μηχανική ροπή Τ στον δρομέα της Α/Γ είναι μικρότερη χρησιμοποιώντας την τεχνική του overspeeding, παρά όταν επιδιώκεται να μειωθεί η ταχύτητα του δρομέα. Συνεπώς, η τεχνική overspeeding παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς δεν προκαλεί υπερφορτίσεις ή υπερταχύνσεις ειδικά σε μεγάλες ισχείς [42,43,44].

Η τεχνική αποφόρτισης με overspeeding επιβάλλει λειτουργία με σταθερό  $\lambda_{del}$ . Συνεπώς, ισχύει:

$$λ_{del} = σταθερό$$
  
 $\frac{ω_t \cdot R}{U_w} = σταθερό$   
 $\frac{ω_t}{U_w} = σταθερό$  (3.10)

Η ανά μονάδα ισχύς όταν η Α/Γ λειτουργεί σε ποσοστό αποφόρτισης x θα είναι:

$$P_{del}(pu) = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,del} \cdot U_{w}^{3}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,max} \cdot U_{w,nom}^{3}}$$

$$P_{del}(pu) = \frac{(1-x) \cdot C_{p,max} \cdot U_{w}^{3}}{C_{p,max} \cdot U_{w,nom}^{3}}$$

$$P_{del}(pu) = (1-x) \frac{(\frac{\omega_{t} \cdot R}{\lambda_{del}})^{3}}{U_{w,nom}^{3}}$$

$$P_{del}(pu) = (1-x) (\frac{\omega_{t} \cdot R}{\lambda_{del} \cdot U_{w,nom}})^{3}$$
(3.11)

Συνεπώς, ο υπολογισμός της ισχύος αναφοράς της γεννήτριας θα γίνεται με συνδυασμό του επιθυμητού ποσοστού αποφόρτισης x και της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα  $\omega_t$ . Αυτές οι δύο παράμετροι θα αποτελούν τις εισόδους ενός δισδιάστατου πίνακα τιμών LUT3, ο οποίος θα δίνει ως έξοδο την ισχύ αναφοράς για τον έλεγχο της ενεργού ισχύος της γεννήτριας. Εφόσον η Α/Γ λειτουργεί με ένα συγκεκριμένο ποσοστό αποφόρτισης, η τιμή της ισχύος που θα δίνεται ως αναφορά στη γεννήτρια θα είναι προφανώς μικρότερη από τη μέγιστη ισχύ που θα έδινε η Α/Γ, αν λειτουργούσε με την κλασική στρατηγική του MPPT (maximum point power tracking). Η διαφορά αυτή επιβάλλει την επιτάχυνση του δρομέα της Α/Γ, ώσπου να ισορροπήσει σε κάποια ταχύτητα μικρότερης της ονομαστικής, η οποία θα εξασφαλίσει τη ζητούμενη αποφόρτιση.


Σχήμα 3.5: Κατασκευή του LUT3, που δίνει την τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ισχύος στο σύστημα ελέγχου της γεννήτριας στην τεχνική αποφόρτισης overspeeding.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνική του overspeeding εφαρμόζεται για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής. Παρ' όλα αυτά, εισέρχεται στους υπολογισμούς και ένας επιπλέον περιορισμός, ο οποίος προέρχεται από το γεγονός ότι δεν είναι αποδεκτό η ταχύτητα του δρομέα να περάσει την ονομαστική της. Επειδή το  $\lambda_{del}$  στο οποίο δουλεύει η Α/Γ για δεδομένο ποσοστό αποφόρτισης είναι μεγαλύτερο από αυτό με οποίο θα λειτουργούσε με τη τεχνική της μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT), από τη σχέση (2.3) προκύπτει ότι με ονομαστική ταχύτητα δρομέα ω, η μέγιστη ταχύτητα ανέμου για την οποία μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική οverspeeding είναι μικρότερη της ονομαστικής. Πιο συγκεκριμένα για δεδομένο ποσοστό αποφόρτισης χισχύει:





Σχήμα 3.6: Καμπύλες ισχύος της Α/Γ για ποσοστά αποφόρτισης 3%, 6% και 9%. Σημειώνονται οι ταχύτητες εξάντλησης της τεχνικής overspeeding για τα αντίστοιχα ποσοστά.

Ουσιαστικά εφαρμόζεται ο έλεγχος της αποφόρτισης της Α/Γ με την τεχνική overspeeding για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της  $U_{w,max}$ , μέχρι να φτάσει ουσιαστικά η Α/Γ στην ονομαστική ταχύτητα δρομέα και να μην μπορεί να επιταχυνθεί περαιτέρω, και στη συνέχεια

για μεγαλύτερες ταχύτητες εφαρμόζεται η τεχνική ελέγχου βήματος της έλικας (pitch control).

#### 3.2.2 Στρατηγική αποφόρτισης της Α/Γ μέσω του ελέγχου του βήματος της

#### έλικας (pitch control)

Σε ένα ορισμένο ποσοστό αποφόρτισης x, για μία δεδομένη ταχύτητα ανέμου U<sub>w,max</sub> η Α/Γ έχει φτάσει στην ονομαστική ταχύτητα δρομέα  $\omega_{t,nom}$  και δεν μπορεί να εφαρμοστεί περαιτέρω η τεχνική του overspeeding. Από αυτή την ταχύτητα ανέμου μέχρι την ονομαστική, η Α/Γ επιτυγχάνει την επιθυμητή ισχύ μεταβάλλοντας τη γωνία βήματος πτερυγίων με σταθερή ταχύτητα δρομέα  $\omega_t = \omega_{t,nom}$ . Για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας δημιουργείται ένα lookup table LUT4, το οποίο για εισόδους το ποσοστό αποφόρτισης (το οποίο αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος) και τη γωνία βήματος β (που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο πάνω στην καμπύλη) θα δίνει ως έξοδο την ισχύ αναφοράς της γεννήτριας  $P_{e,ref}$ . Η περιοχή που εξετάζεται στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.7: Εξεταζόμενη περιοχή για δεδομένο ποσοστό αποφόρτισης από Uw,max έως Uw,nom στην τεχνική ελέγχου βήματος της έλικας.

Στην περιοχή λειτουργίας που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η ανά μονάδα μηχανική ισχύς όταν η Α/Γ λειτουργεί με αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος  $C_p$  είναι:

$$P_{m,pu} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p}(\lambda,\beta) \cdot U_{w}^{3}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{p,max} \cdot U_{w,nom}^{3}} = \left(\frac{U_{w}}{U_{w,nom}}\right)^{3} \cdot \frac{C_{p}(\lambda,\beta)}{C_{p,max}}$$
(3.13)

Αντικαθιστώντας τις ταχύτητες ανέμου από την σχέση  $U_w = \frac{\omega_t \cdot R}{\lambda}$ προκύπτει:

$$P_{m,pu} = \left(\frac{\lambda_{opt}}{\lambda}\right)^3 \cdot \frac{C_p(\lambda,\beta)}{C_{p,max}}$$
(3.14)

Αν η Α/Γ λειτουργεί με ποσοστό αποφόρτισης x η αποδιδόμενη μηχανική ισχύς πρέπει να είναι:

$$P_{del,pu} = \left(\frac{U_w}{U_{w,nom}}\right)^3 \cdot \frac{C_{p,del}(\lambda,\beta)}{C_{p,max}} = \left(\frac{U_w}{U_{w,nom}}\right)^3 \cdot (1-x)$$
(3.15)

Συνεπώς, στόχο της λειτουργίας στην συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί η λύση της εξίσωσης:  $P_{m,pu} = P_{del,pu}$ 

$$\left(\frac{\lambda_{opt}}{\lambda}\right)^3 \cdot \frac{C_p(\lambda,\beta)}{C_{p,max}} = \left(\frac{U_w}{U_{w,nom}}\right)^3 \cdot (1-x)$$

Αντικαθιστώντας  $U_w = \frac{\omega_{t,nom} \cdot R}{\lambda}$  και  $U_{w,nom} = \frac{\omega_{t,nom} \cdot R}{\lambda_{opt}}$  στην παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$\left(\frac{\lambda_{opt}}{\lambda}\right)^3 \cdot \frac{C_p(\lambda,\beta)}{C_{p,max}} = \left(\frac{\omega_{t,nom} \cdot R}{\lambda \cdot U_{w,nom}}\right)^3 \cdot (1-x)$$
(3.16)

$$C_p(\lambda,\beta) = (1-x)C_{p,max} \tag{3.17}$$

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης με βάση την τεχνική αποφόρτισης ελέγχου της γωνίας βήματος στηρίζεται στον εξής αλγόριθμο:

1. Για κάθε ποσοστό αποφόρτισης x από 0 έως 10%:

1.1. Για κάθε γωνία β από  $0^o$  έως  $90^o$ :

1.2. Για όλα τα λ από την τιμή  $\lambda_{del} = \frac{\omega_{t,nom} \cdot R}{U_{w,max}}$  μέχρι την μέγιστη τιμή  $\lambda_{opt}$ :

1.2.1. Υπολογίζεται η ταχύτητα ανέμου στην οποία αντιστοιχεί η συγκεκριμένη τιμή του λ,

$$U_w = \frac{\omega_{t,nom} \cdot R}{\lambda}$$

Εξετάζεται αν ισχύει η σχέση (3.17). Ακόμα κι όταν ισχύει όμως η σχέση (3.17) δεν σημαίνει ότι έχει βρεθεί το σωστό σημείο λειτουργίας. Για ένα δεδομένο ποσοστό αποφόρτισης x και δεδομένη γωνία β η εξίσωση (3.17) έχει δύο λύσεις (β, λ<sub>1</sub>) και (β,λ<sub>2</sub>), όπως έχει παρουσιαστεί και στο σχήμα 3.7. Εφόσον τα λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub> είναι διακριτά και μάλιστα λ<sub>1</sub> < λ<sub>2</sub>, αντιστοιχούν σε δύο διακριτές ταχύτητες ανέμου  $U_{w,1}>U_{w,2}$  και συνεπώς σε διαφορετικές τιμές ισχύος  $P_1>P_2$ . Επομένως, χρειάζεται να εξεταστεί και η ισχύς της σχέσης (3.16), όπως επίσης και η  $U_{w,max} < U_w < U_{w,nom}$ . Τέλος, η τιμή της ισχύος που προκύπτει για την συγκεκριμένη τιμή του λ από την  $P_{del,pu} = \left(\frac{\omega_{t,nom}\cdot R}{\lambda \cdot U_{w,nom}}\right)^3 \cdot (1-x)$  χρειάζεται να είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή που

αποθηκεύτηκε στο LUT για το ίδιο ποσοστό αποφόρτισης και αντιστοιχεί σε μικρότερη ταχύτητα ανέμου.

Με αυτόν τον αλγόριθμο αντιστοιχίζεται σε κάθε τιμή x και β μία ηλεκτρική ισχύς αναφοράς για την γεννήτρια  $P_{e,ref(pu)}$  και οι τιμές αυτές ενσωματώνονται στο παρακάτω LUT4:



Σχήμα 3.8: Μοντέλο προσομοίωσης lookup table με εισόδους τη γωνία βήματος β και το ποσοστό αποφόρτισης x και έξοδο την ισχύ αναφοράς Pe,ref pu.

Οι καμπύλες της ισχύος αναφοράς συναρτήσει της γωνίας βήματος για διάφορα ποσοστά αποφόρτισης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.9: Καμπύλες αποφόρτισης Pe, ref pu(β) για διάφορα ποσοστά αποφόρτισης x.

Όπως διαπιστώθηκε, η μεταβολή της γωνίας βήματος της έλικας β μπορεί να μεταβάλλει με μη ομαλό τρόπο τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος  $C_p$  και κατά συνέπεια την ισχύ της Α/Γ.

### 3.2.3 Περιοχές λειτουργίας της Α/Γ όταν εφαρμόζεται η τεχνική αποφόρτισης του συνδυασμού overspeeding-pitch control

Οι περιοχές λειτουργίας της Α/Γ παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.10: Περιοχές λειτουργίας της Α/Γ.

- Στην περιοχή (Ι) εφαρμόζεται η τεχνική overspeeding και ισχύουν: U<sub>w</sub> ≤ U<sub>w,max</sub> < U<sub>w,nom</sub>, ω<sub>t</sub> < ω<sub>t,nom</sub>, β=0°. Η λειτουργία σε αυτή την περιοχή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του LUT3 και συνεχίζεται μέχρι το σημείο Α. Στο σημείο Α ισχύουν ότι U<sub>w</sub> = U<sub>w,max</sub> = <sup>ω<sub>t,nom</sub>·R</sup>/<sub>λdel</sub>, β=0° και ω<sub>t</sub> = ω<sub>t,nom</sub>.
- Στην περιοχή (ΙΙ) η Α/Γ λειτουργεί με βάση το LUT4 με τη βοήθεια του οποίου εφαρμόζεται έλεγχος γωνίας βήματος β. Η περιοχή αυτή εκτείνεται από το σημείο Α μέχρι το σημείο Β και ο δρομέας στρέφεται σταθερά με την ονομαστική του ταχύτητα, δηλαδή ω<sub>t</sub> = ω<sub>t,nom</sub>, ενώ η ταχύτητα ανέμου παραμένει μικρότερη της ονομαστικής U<sub>w</sub>  $\leq$  U<sub>w,nom</sub>. Η γωνία βήματος μεταβάλλεται μέχρι μία μέγιστη γωνία β<sub>max</sub>, η οποία αντιστοιχεί στην ονομαστική λειτουργία της Α/Γ, και καθορίζει μαζί με ένα δεδομένο ποσοστό αποφόρτισης την ισχύ αναφοράς της ηλεκτρικής ισχύος.
- Η περιοχή (III) αφορά στις ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής U<sub>w</sub> > U<sub>w,nom</sub>. Με κατάλληλη μεταβολή του βήματος β όπως και στην κλασική λειτουργία της Α/Γ επιτυγχάνεται λειτουργία με σταθερή ισχύ εξόδου, ανάλογη με το ποσοστό αποφόρτισης x. Η λειτουργία σε αυτήν την περιοχή επιτυγχάνεται επίσης με το LUT4, το οποίο για μεταβολές της γωνίας β πάνω από την τιμή β<sub>max</sub> δίνει ως έξοδο την σταθερή ισχύ Ρ<sub>del</sub> που αντιστοιχεί στην ονομαστική λειτουργία, αποφόρτιση x%

δηλαδή από τη διαθέσιμη μηχανική ισχύ. Σε ανά μονάδα τιμή η ισχύς σε αυτή την περιοχή λειτουργίας θα είναι σταθερή και ίση με  $P_{del,pu} = 1 - x$ .

## 3.3 Συμμετοχή Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου (inertial response)

Σε αυτήν την παράγραφο αναπτύσσεται κατάλληλη τεχνική, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συμμετοχή της A/Γ με dfig ή pmsg γεννήτρια στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου.

Οι Α/Γ σταθερών στροφών, είτε αυτές διαθέτουν σύγχρονη γεννήτρια είτε διαθέτουν γεννήτρια επαγωγής, απελευθερώνουν την κινητική ενέργεια της στρεφόμενης μάζας τους σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας του δικτύου σε μία προσπάθεια να συμβάλλουν στην αποκατάσταση της τιμής της, συμμετέχουν δηλαδή στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου. Στην περίπτωση, όμως, των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, όπως η dfig και η pmsg 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. Ουσιαστικά το σύστημα ελέγχου μίας Α/Γ μεταβλητών στροφών επιτυγχάνει την απόζευξη του μηγανικού και του ηλεκτρικού συστήματος της Α/Γ με αποτέλεσμα να αποτρέπει την 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. Η συχνότητα σε ένα τέτοιο σύστημα με μικρή αδράνεια θα μεταβάλλεται γρήγορα σε απότομες μεταβολές της παραγωγής ή του φορτίου. Για αυτό το λόγο, σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί η άμεση απόκριση του συστήματος σε κάθε διαταραχή, καταλήγοντας με αυτόν τον τρόπο σε αύξηση της ζήτησης στρεφόμενης εφεδρείας και λειτουργία ίσως των συμβατικών σταθμών στο τεχνικό τους ελάχιστο, προκειμένου να διατηρηθεί η συνολική αδράνεια του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να προκαλέσει αύξηση στο κόστος λειτουργίας του δικτύου.

Προκειμένου να μεταβληθεί το ήδη αναπτυχθέν σύστημα ελέγχου της dfig και της pmsg, ώστε να καταστεί δυνατό να συμμετέχουν οι Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο ένα συμπληρωματικό σύστημα ελέγχου, στόχος του οποίου είναι η προσθήκη ενός επιπλέον σήματος στη ισχύ αναφοράς, που προκύπτει από τον

κλασσικό έλεγχο της Α/Γ, σε περίπτωση μεταβολής της συχνότητας του δικτύου. Η λογική με την οποία παράγεται αυτός ο επιπλέον όρος περιγράφεται παρακάτω:

Η διαθέσιμη κινητική ενέργεια της μηχανής με ροπή αδράνειας άξονα J σε οποιαδήποτε γωνιακή ταχύτητα ω είναι:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega}^2 \tag{3.18}$$

Λαμβάνοντας την παράγωγο της παραπάνω κινητικής ενέργειας, η ισχύς που μπορεί να αποδοθεί από τη στρεφόμενη μάζα του δρομέα με ταχύτητα ω είναι:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$$
(3.19)

Η χρονική σταθερά αδρανείας Η της γεννήτριας ορίζεται ως:

$$H = \frac{J \cdot \omega_{s}^{2}}{2 \cdot s}$$
(3.20)

όπου  $\omega_s$  η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και S η ονομαστική ισχύς της μηχανής. Αντικαθιστώντας το J από τη σχέση (3.20) στη σχέση (3.19) προκύπτει:

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega}{\omega_s} \frac{d\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)}{dt}$$
(3.21)

Συνεπώς, σε ανά μονάδα τιμές ισχύει:

$$P_{pu} = 2H\omega_{pu}\frac{d\omega_{pu}}{dt}$$
(3.22)

Και η ανά μονάδα ροπή είναι:

$$T_{pu} = 2H \frac{d\omega_{pu}}{dt} \tag{3.23}$$

Συνεπώς, προκειμένου να ενσωματωθεί στην γεννήτρια η λειτουργία της αδρανειακής απόκρισης τροποποιείται το σύστημα που παράγει το σήμα αναφοράς της ισχύος του συστήματος ελέγχου της γεννήτριας:



Σχήμα 3.11: Μοντέλο προσομοίωσης της γεννήτριας με λειτουργία αδρανειακής απόκρισης. Το μέρος του συστήματος που προστέθηκε στο ήδη αναπτυχθέν μοντέλο εμφανίζεται με ροζ χρώμα.

Από το παραπάνω μοντέλο είναι εμφανές πως προστίθεται στο σύστημα ελέγχου, που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 2, ένα επιπλέον σήμα το οποίο επηρεάζει την ισχύ αναφοράς της γεννήτριας. Αν η συχνότητα του δικτύου μειώνεται, η ισχύς αναφοράς της γεννήτριας

αυξάνεται, μειώνοντας τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και αποδίδοντας την περίσσεια της κινητικής ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρυθμός μεταβολής της έγχυσης ισχύος εξ αιτίας της μεταβολής της συχνότητας του δικτύου περιορίζεται προσθέτοντας ένα φίλτρο πρώτης τάξεως αμέσως μετά την είσοδο της μεταβολής  $\frac{d\omega}{dt}$ . Η καθυστέρηση σε αυτό το φίλτρο έχει αποδειχθεί πως δεν μειώνει μόνο το ρυθμό αύξησης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, αλλά μειώνει επίσης και το πλάτος της μέγιστης τιμής της ροπής, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την επίδραση του συμπληρωματικού ελέγχου στο μηχανικό φορτίο του άξονα της Α/Γ [32].

# 4

## Θεμελίωση του προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην εργασία, προκειμένου να εξεταστεί το ζήτημα της ΡΦΣ σε συστήματα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες, γεννήτρια ντήζελ, μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό και φορτίο.

### 4.1 Αρχιτεκτονική

Στην παρούσα εργασία το συνολικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε μοντελοποιήθηκε με βάση το μοντέλο μεταβολών ισχύος-ροπής ενός ζυγού single-bus system). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το σύστημα μπορεί να αναπαριστάται ως μια στρεφόμενη μηχανή, που έχει μια ισοδύναμη συνολική ροπή. Μπορεί, λοιπόν, να αγνοηθεί η τοπολογία του δικτύου και να θεωρηθεί ότι η ροπή αδρανείας του συναθροίζεται με τις ροπές αδράνειας όλων των γεννητριών σε μία. Η παραγωγή αναπαρίσταται ως μια ισοδύναμη γεννήτρια ροπή, ενώ το φορτίο μπορεί να παρασταθεί συγκεντρωμένο ως μια αντιρροπή [15]. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το συνολικό σύστημα που χρησιμοποιείται φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.1: Μοντέλο μεταβολών ισχύος-ροπής ενός ζυγού.

Συνεπώς, στο σχήμα 4.1, η χρονική σταθερά αδρανείας Η αναπαριστά τη συνολική αδράνεια του συστήματος ως μία μηχανή με ισοδύναμη χρονική σταθερά Η και ω είναι η συχνότητα του δικτύου.

#### 4.2 Σενάρια προσομοιώσεων

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παραγράφο χρησιμοποιείται για να προσομοιωθούν και να εξεταστούν διάφορα σενάρια συμμετοχής του ΜΥΗΣ και της Α/Γ στη πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν συμβεί μία απότομη αύξηση 20% του φορτίου στο σύστημα τη χρονική στιγμή 220 sec, η οποία οδηγεί σε πτώση της συχνότητας.

Οι προσομοιώσεις έγιναν στο πρόγραμμα Matlab/Simulink, έκδοσης 7.10.0 (R2010a) και για τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προσομοίωσης ode23t (Mod. Stiff/Trapezoidal).

Η γεννήτρια diesel συμμετέχει στη PPS σε όλες τις προσομοιώσεις με στατισμό R=0,05.

Οι βασικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν για γεννήτρια dfig είναι οι εξής:

- Λειτουργία Α/Γ με MPPT τεχνική και προφανώς μη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ
- Λειτουργία Α/Γ με overspeeding τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με στατισμό R=0,05
- Λειτουργία Α/Γ με pitch deloading τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με στατισμό R=0,05
- Λειτουργία Α/Γ με inertial response τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με στατισμό R=0,05

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις εξετάζονται οι επιπλέον παρακάτω περιπτώσεις που αναφέρονται στη συμμετοχή του ΜΥΗΣ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ:

- Για ταχύτητα ανέμου 8m/sec κάτω της ονομαστικής:
  - 1) Η συμμετοχή του ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,20, 0,45 και 0,80.
  - Η συμμετοχή του ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό παραμέτρων Tr=7,5sec, δ=0,5, σ=0,04 και Tr=4sec, δ=0,55, σ=0,03
  - 3) Η συμμετοχή του ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως με διατομή 28 φορές μεγαλύτερη από τη διατομή του αγωγού προσαγωγής οπότε προκύπτει η φυσική συχνότητα του συστήματος αγωγού-πύργου ω<sub>n</sub> = 0,010147rad/sec και με στατισμό R=0,05 και R=0,10. Επίσης, εξετάζεται η ύπαρξη πύργου αναπάλσεως με διατομή 5 φορές μεγαλύτερη από του αγωγού προσαγωγής, οπότε προκύπτει ω<sub>n</sub> = 0,024011rad/sec και στατισμός του ΜΥΗΣ R=0,05. Η τιμή της ω<sub>n</sub> προκύπτει από τη σχέση (2.118) για τα δεδομένα του συγκεκριμένου προβλήματος, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.
- Για ταχύτητα ανέμου 12,5m/sec άνω της ονομαστικής:

1) Η συμμετοχή του ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,4 και 0,5

2) Η συμμετοχή του ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό παραμέτρων Tr=7,5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,04 και Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03

3)Η συμμετοχή του ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως με διατομή 28 φορές μεγαλύτερη από τη διατομή του αγωγού προσαγωγής οπότε προκύπτει η φυσική συχνότητα του συστήματος  $\omega_n = 0,010147$ rad/sec και με στατισμό R=0,10. Επίσης, εξετάζεται η ύπαρξη πύργου αναπάλσεως με διατομή 5 φορές μεγαλύτερη από του αγωγού προσαγωγής, οπότε προκύπτει  $\omega_n = 0,024011$ rad/sec και στατισμός του ΜΥΗΣ R=0,05 και 0,10.

Επιπλέον, επιλέγονται οι βέλτιστες περιπτώσεις των προαναφερθέντων και συγκρίνονται με την αντίστοιχη απόκριση της συχνότητας του συστήματος, όταν η Α/Γ διαθέτει pmsg γεννήτρια. Επειδή σε κάποιες περιπτώσεις, η βύθιση που επέφερε η χρήση της pmsg ήταν μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια ορισμένες από τις παραπάνω περιπτώσεις αντικαταστάθηκαν με άλλες. Συνεπώς, οι προσομοιώσεις που έγιναν και παρουσιάζονται σε συγκριτικά διαγράμματα με την αντίστοιχη απόκριση της dfig παρουσιάζονται παρακάτω:

- Για ταχύτητα ανέμου 8m/sec κάτω της ονομαστικής:
  - 1) Λειτουργία Α/Γ με ΜΡΡΤ τεχνική και:

i) MYHS me statismó R=0,80

ii) ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό παραμέτρων Tr=10sec, δ=0,9 και σ=0,03

iii) ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως με  $\omega_n = 0.024011$ rad/sec και στατισμό R=0.05

2) Λειτουργία Α/Γ με overspeeding τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα PΦΣ με στατισμό R=0,05 και ακριβώς ίδιες περιπτώσεις όπως τα i, ii, iii
3) Λειτουργία Α/Γ με pitch deloading τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα PΦΣ με στατισμό R=0,05 και ακριβώς ίδιες περιπτώσεις όπως τα i, ii, iii
4) Λειτουργία Α/Γ με inertial response τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα PΦΣ με στατισμό R=0,05 και ακριβώς ίδιες περιπτώσεις όπως τα i, ii, iii

• Για ταχύτητα ανέμου 12,5m/sec άνω της ονομαστικής:

1) Λειτουργία Α/Γ με ΜΡΡΤ τεχνική και:

i) MYHS me statismó R=0,50

 ii)ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό παραμέτρων Tr=10sec, δ=0,9 και σ=0,03

iii) ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως με  $\omega_n = 0,024011$ rad/sec και στατισμό R=0,05

2) Λειτουργία Α/Γ με overspeeding τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με στατισμό R=0.05 και ακριβώς ίδιες περιπτώσεις όπως τα i, ii, iii

3) Λειτουργία Α/Γ με pitch deloading τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα
PΦΣ με στατισμό R=0,05 και ακριβώς ίδιες περιπτώσεις όπως τα i, ii, iii

4) Λειτουργία Α/Γ με inertial response τεχνική και συμμετοχή της στην πρωτεύουσα  $P\Phi\Sigma$  με στατισμό R=0,05 και ακριβώς ίδιες περιπτώσεις όπως τα i, ii, iii

#### 4.3 Παράμετροι συστημάτων

• Αεροδυναμικό μοντέλο Α/Γ

Χαρακτηριστικό μέγεθος Α/Γ	Τιμή
Ακτίνα της έλικας (m)	45
Βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_{p,max}$	0,438209
Βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου $\lambda_{opt}$	6,325
Ονομαστική ισχύς Α/Γ (W)	2457184,7661W
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)	11,21417
Ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (rad/sec)	1,5762138
Ταχύτητα ένταξης (m/s)	5
Ταχύτητα αποκοπής (m/s)	25

Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων αεροδυναμικού μοντέλου Α/Γ.

• Αεροελαστικό μοντέλο Α/Γ

J <sub>t</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	8·10 <sup>6</sup>
$J_g (kg/m^2)$	100
$K_{wg}(N \cdot m/rad)$	15·10 <sup>6</sup>
D <sub>wg</sub> (N·m·sec)	5·10 <sup>6</sup>

\_\_\_\_\_\_ Πίνακας 4: Τιμές παραμέτρων μοντέλου δύο στρεφόμενων μαζών.

#### • Γεννήτρια DFIG

Αντίσταση στάτη $r_s$ (pu)	4,62e-3
Αντίσταση δρομέα r <sub>r</sub> (pu)	3,8e-3
Αντίδραση μαγνήτισης $X_m$ (pu)	1,99
Αντίδραση σκέδασης Χ <sub>s</sub> (pu)	118,18e-3

Πίνακας 5:Τιμές παραμέτρων dfig γεννήτριας.

• Γεννήτρια PMSG

Αντίσταση στάτη $R_s$ (pu)	0.01
Αυτεπαγωγή σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη στο d άξον α $L_{d,s} \ (pu)$	1
Αυτεπαγωγή σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη στο q άξονα $L_{q,s} \ (pu)$	0,7
Μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη $\lambda_m$ (pu)	1,4
Αντίδραση σκέδασης L <sub>s</sub> (pu)	1,22

Πίνακας 6:Τιμές παραμέτρων pmsg γεννήτριας.

#### • Γεννήτρια ντήζελ

Χρονική σταθερά $T_d$ γεννήτριας (sec)	0,15
Ονομαστική ισχύς (MW)	4

Πίνακας 7: Τιμές παραμέτρων diesel γεννήτριας.

• Μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός

Το Μ.ΥΗ.Σ. συγκαταλέγεται στον τύπο «Run of River», χωρίς δηλαδή να αλλάζει τη φυσιολογική πορεία ροής του ποταμού και χωρίς να δημιουργούνται τεχνητοί ταμιευτήρες ύδατος ή μεγάλης κλίμακας φράγματα. Η ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγει θα τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσης τάσης της Δ.Ε.Η. Τα κυριότερα μεγέθη που ουσιαστικά αποτυπώνουν το χαρακτήρα του Μ.ΥΗ.Σ. παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Μέγιστη ονομαστική ισχύς (MW)	2,2
Ελάχιστη ονομαστική ισχύς (MW)	1,7
Μέγιστη ονομαστική παροχή ( $m^3$ /sec )	0,53
Ελάχιστη ονομαστική παροχή ( $m^3$ /sec )	0,41
Γεωδαιτική υψομετρική διαφορά (m)	423,56
Ακτίνα αγωγού προσαγωγής (m)	0,30
Μήκος αγωγού προσαγωγής (m)	3403
Υδροστρόβιλος	Τύπου Pelton 2,2 MW
Χρονική σταθερά αδρανείας γεννήτριας H(sec)	4
Χρονική σταθερά αδρανείας νερού Tw (sec)	1,5

Πίνακας 8: Δεδομένα ΜΥΗΣ.

- Η χρονική σταθερά Τω υπολογίζεται από τη σχέση (2.102) για τα δεδομένα του συγκεκριμένου προβλήματος.
- Η χρονική σταθερά του δικτύου ορίστηκε ως: H = 6 sec.
- Οι τιμές του αναλογικού κέρδους Kp και του ολοκληρωτικού κέρδους Ki του pitch controller είναι: Kp=25 και Ki=5.
- Η τιμή της τάσης του στάτη της dfig τίθεται στην τιμή 0,8+0,6i.

# 5

## Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

## 5.1 Απόκριση συστήματος σε αύζηση του φορτίου με Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια DFIG και ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής

Η Α/Γ λειτουργεί με ταχύτητα ανέμου 8m/sec, μικρότερη της ονομαστικής:



Σχήμα 5.1: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η Α/Γ σε ΜΡΡΤ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος αποκατάστασης
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	(sec)
R=0,20	49,5999	49,4615	2,5
R=0,45	49,5501	49,5020	2,7
R=0,80	49,5295	49,5095	2,65

Πίνακας 9: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε ΜΡΡΤ.



Σχήμα 5.2: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Tr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ και η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.

	Μόνιμο σφάλμ	α Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης
			(sec)
Tr=7,5 δ=0,5 σ=0,04	49,7774	49,5011	140,9
Tr=4 δ=0,55 σ=0,03	49,8125	49,5003	96,5

Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό και Α/Γ σε MPPT.



Σχήμα 5.3: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Οι εφαρμοζόμενες συχνότητες ωη αντιστοιχούν σε πύργο αναπάλσεως πενταπλάσιας διατομής του αγωγού προσαγωγής (0,024011rad/sec) και σε 28 φορές μεγαλύτερη διατομή (0,010147rad/sec). Η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης(sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,6657	49,6643	0,94
$\omega_n = 0,010147, R=0,05$	49,7501	49,747	0,55
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,7456	49,7436	0,55

Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε ΜΡΡΤ.

#### 5.1.2 Η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική αποφόρτισης



Σχήμα 5.4: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η Α/Γ με overspeeding τεχνική.

	Μόνιμο σφά	λμα Μέγιστη	βύθιση	Χρόνος αποκατάστασης
	συχνότητας (Hz)	συχνότητα	ς (Hz)	(sec)
R=0,20	49,6313	49,5542		13,7
R=0,45	49,5855	49,5855		13,5
R=0,80	49,5663	49,5663		14,2

Πίνακας 12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ με overspeeding τεχνική αποφόρτισης.



Σχήμα 5.5: Μεταβολή ισχύος ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,45 και η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding. Βάση ισχύος η ισχύς του ΜΥΗΣ.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή ισχύος diesel για συμμετοχή στην πρωτεύουσα PΦΣ όταν η A/Γ λειτουργεί με overspeeding. Βάση ισχύος η ισχύς της diesel.



Σχήμα 5.7: Μεταβολή ισχύος Α/Γ για συμμετοχή στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν λειτουργεί με overspeeding. Βάση ισχύος η ισχύς της Α/Γ.

Η βύθιση της συχνότητας που προκαλείται από την αύξηση του φορτίου επιφέρει αύξηση στη ισχύ που αποδίδουν και οι 3 μονάδες παραγωγής, εφόσον και οι 3 συμμετέχουν στη ΡΦΣ. Ο ΜΥΗΣ και η ντήζελ αυξάνουν αρχικά απότομα την ισχύ τους, η ντήζελ κατά πολύ μεγαλύτερο μέρος καθώς συμμετέχει πολύ πιο ενεργά στη ΡΦΣ από ότι ο ΜΥΗΣ (ο ΜΥΗΣ έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή στατισμού), και στη συνέχεια προτού επιτύχουν τη μέγιστη τιμή τους παρατηρείται μία ελαφριά βύθιση της αποδιδόμενης ισχύος. Η Α/Γ αυξάνει αρχικά πολύ την ισχύ της και στη συνέχεια συνεχίζει να λειτουργεί δίνοντας στο σύστημα την ισχύ της ΜΡΡΤ λειτουργίας για τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Από το σχήμα 5.7 φαίνεται πως προτού συμβεί η διαταραχή η Α/Γ λειτουργεί αποδίδοντας μικρότερη ισχύ από σύστημα.



Σχήμα 5.8: Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ σε λειτουργία overspeeding.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, ο δρομέας της Α/Γ στρέφεται με μία συγκεκριμένη αυξημένη γωνιακή ταχύτητα κάτω της ονομαστικής και την χρονική στιγμή που συμβαίνει η διαταραχή η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται σταδιακά αποδίδοντας στο σύστημα ενέργεια για την ΡΦΣ, μέχρι να ισορροπήσει στην ταχύτητα που δίνει τη μέγιστη ισχύ (MPPT).



Σχήμα 5.9: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig.

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα ο μετατροπέας ισχύος δεν αναγκάζεται να διαχειριστεί πάνω από 30% της ισχύος.



Σχήμα 5.10: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Tr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ. Η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική.

	Μόνιμο	σφάλμα	Μέγιστη	βύθιση	Χρόνος
	συχνότητα	ς (Hz)	συχνότητα	ς (Hz)	αποκατάστασης
					(sec)
Tr=7,5 δ=0,5 σ=0,04	49,7948		49,5998		139,5
Tr=4 δ=0,55 σ=0,03	49,8272		49,6012		87,9

Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ με λειτουργία overspeeding.



Σχήμα 5.11: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Οι εφαρμοζόμενες συχνότητες ωη αντιστοιχούν σε πύργο αναπάλσεως πενταπλάσιας διατομής του αγωγού προσαγωγής (0,024011rad/sec) και σε 28 φορές μεγαλύτερη διατομή (0,010147 rad/sec). Η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης(sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,6907	49,6907	11,8
$\omega_n = 0,010147, R=0,05$	49,7673	49,7673	10,5
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,7671	49,7671	11,1

Πίνακας 14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ με overspeeding λειτουργία.

#### 5.1.3 Η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική αποφόρτισης



Σχήμα 5.12: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η Α/Γ με pitch deloading τεχνική.

.

	Μόνιμο	σφάλμα	Μέγιστη	βύθιση	Χρόνος αποκατάστασης
	συχνότητας	; (Hz)	συχνότητας (	Hz)	(sec)
R=0,20	49,6378		49,4834		3,0
R=0,45	49,5925		49,5274		2,3
R=0,80	49,5738		49,5386		2,1

Πίνακας 15:Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ με pitch deloading τεχνική αποφόρτισης.



Σχήμα 5.13: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Tr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ. Η Α/Γ λειτουργεί με τεχνική αποφόρτισης pitch deloading.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης
			(sec)
Tr=7,5 δ=0,5 σ=0,04	49,7983	49,5274	136,56
Tr=4 δ=0,55 σ=0,03	49,8301	49,5275	93,3

Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ με λειτουργία pitch deloading.



Σχήμα 5.14: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Η Α/Γ είναι σε pitch deloading λειτουργία.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,6970	49,6875	0,57
$\omega_n = 0,010147, R=0,05$	49,7721	49,7594	0,92
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,7701	49,7595	0,8

Πίνακας 17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ με pitch deloading λειτουργία.

#### 5.1.4 Η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική



Σχήμα 5.15: Ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response.

	Μόνιμο	σφάλμα	Μέγιστη	βύθιση	Χρόνος αποκατάστασης
	συχνότητας	(Hz)	συχνότητας (	Hz)	(sec)
R=0,20	49,5996		49,5369		5,6
R=0,45	49,5495		49,5269		7,48
R=0,80	49,5295		49,5092		8,45

Πίνακας 18: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ με inertial response.



Σχήμα 5.16: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με χρονική σταθερά επαναφοράς Tr σε sec, μεταβατικό στατισμό δ και μόνιμο στατισμό σ. Η Α/Γ λειτουργεί με τεχνική inertial response.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Tr=7,5 δ=0,5 σ=0,04	49,7774	49,5262	140,8
Tr=4 δ=0,55 σ=0,03	49,8125	49,5251	96,5

Πίνακας 19: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ με λειτουργία inertial response.



Σχήμα 5.17: Μεταβολή ισχύος της Α/Γ όταν λειτουργεί με inertial response και ο MYHS έχει ρυθμιστή στροφών Tr=4  $\delta$ =0,55 σ=0,03.



Σχήμα 5.18: Μεταβολή γωνιακής ταχύτητας δρομέα Α/Γ όταν λειτουργεί με inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=4 δ=0,55 σ=0,03.



Σχήμα 5.19: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=4 δ=0,55 σ=0,03.

Αντιλαμβάνοντας την αύξηση του φορτίου και κατά συνέπεια την αρνητική μεταβολή της συχνότητας του δικτύου, η Α/Γ επιδιώκει να αυξήσει την παρεχόμενη ισχύ της μειώνοντας την ταχύτητα του δρομέα της. Αμέσως μετά την απότομη αύξηση της ισχύος παρατηρείται μία βύθιση της τιμής της κάτω από αυτή που θα έδινε σε κανονική λειτουργία (MPPT). Η Α/Γ αντιδρά στην απότομη μείωση της γωνιακής της ταχύτητας, η οποία τώρα αυξάνεται, για να ισορροπήσει τελικά στην τιμή που έδινε πριν τη διαταραχή. Στην τιμή που είχε πριν τη διαταραχή ισορροπεί και η ισχύς της Α/Γ καθώς η Α/Γ με inertial response τεχνική δεν εγχέει συνολικά επιπλέον ισχύ στο σύστημα.

Η ισχύς που διαχειρίζεται ο δρομέα της dfig γεννήτριας παραμένει μέσα στα αποδεκτά όρια του 30% της συνολικής ισχύος.



Σχήμα 5.20: Ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως και στατισμό R. Η Α/Γ λειτουργεί με inertial response.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,6657	49,6571	2,34
$\omega_n = 0,010147, R=0,05$	49,7499	49,7439	1,99
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,7455	49,7436	2,16

Πίνακας 20: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ με inertial response.

#### 5.1.5 Παρουσίαση συγκριτικών αποτελεσμάτων για ταχύτητα ανέμου μικρότερης

#### της ονομαστικής

• Η Α/Γ είναι εξοπλισμένη με γεννήτρια dfig



Σχήμα 5.21: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,45. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,5501	49,5020	2,7
Overspeeding	49,5855	49,5855	13,5
Pitch deloading	49,5925	49,5274	2,3
Inertial response	49,5500	49,5269	7,48

Πίνακας 21: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R=0,45.



Σχήμα 5.22: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,8. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,5295	49,5095	2,65
Overspeeding	49,5663	49,5663	14,2
Pitch deloading	49,5738	49,5386	2,1
Inertial response	49,5295	49,5092	8,45

Πίνακας 22: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με στατισμό R=0,8.



Σχήμα 5.23: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με το ρυθμιστή στροφών του παραμέτρων Tr=7,5, δ=0,5 και σ=0,04. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,7774	49,5011	140,9
Overspeeding	49,7948	49,5998	139,5
Pitch deloading	49,7983	49,5274	136,56
Inertial response	49,7774	49,5262	140,8

Πίνακας 23: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με Tr=7,5sec, δ=0,5 και σ=0,04.



Σχήμα 5.24: Το ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με το ρυθμιστή στροφών του παραμέτρων Tr=4, δ=0,55 και σ=0,03. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,8125	49,5003	96,5
Overspeeding	49,8272	49,6012	87,9
Pitch deloading	49,8301	49,5275	93,3
Inertial response	49,8125	49,5251	96,5

Πίνακας 24: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει ρυθμιστή στροφών με Tr=4sec, δ=0,55 και σ=0,03.



Σχήμα 5.25: Το ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως που προκαλεί ταλάντωση με συχνότητα ωn=0,010147rad/sec και στατισμό R=0,10. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,6657	49,6643	0,94
Overspeeding	49,6907	49,6907	11,8
Pitch deloading	49,6970	49,6875	0,57
Inertial response	49,6657	49,6571	2,34

Πίνακας 25: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην α	πρωτεύουσα
ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,010147rad/sec και στατισμό R=0	,10.



Σχήμα 5.26: Το ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως που προκαλεί ταλάντωση με συχνότητα ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Οι Α/Γ λειτουργούν με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,7456	49,7436	0,55
Overspeeding	49,7671	49,7671	11,1
Pitch deloading	49,7701	49,7595	0,8
Inertial response	49,7455	49,7436	2,16

Πίνακας 26: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05.



Σχήμα 5.27: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,8	49,5295	49,5095	2,65
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=4sec, δ=0,55 και	49,8125	49,5003	96,5
σ=0,03)			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,7456	49,7436	0,55
και στατισμό R=0,05)			

Πίνακας 27: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.



Σχήμα 5.28: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ χρησιμοποιεί overspeeeding τεχνική αποφόρτισης.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,8	49,5663	49,5663	14,2
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=4sec, δ=0,55 και	49,8272	49,6012	87,9
σ=0,03)			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,7671	49,7671	11,1
και στατισμό R=0,05			

Πίνακας 28: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική.



Σχήμα 5.29: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ χρησιμοποιεί pitch deloading τεχνική αποφόρτισης.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,8	49,5738	49,5386	2,1
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=4sec, δ=0,55 και	49,8301	49,5275	93,3
σ=0,03)			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,7701	49,7595	0,8
και στατισμό R=0,05			

Πίνακας 29: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική.



Σχήμα 5.30: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ χρησιμοποιεί inertial response λειτουργία.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,8	49,5295	49,5092	8,45
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=4sec, δ=0,55 και	49,8125	49,5251	96,5
σ=0,03)			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,7455	49,7436	2,16
και στατισμό R=0,05			

Πίνακας 30: Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής των διαφόρων τύπων ΜΥΗΣ στην ΡΦΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response.

## 5.1.6 Σύγκριση της απόκρισης συχνότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αν αντικατασταθεί η γεννήτρια της Α/Γ με pmsg για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε MPPT λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.31:Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ και ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,5294	49,5013	2,38
dfig	49,5295	49,5095	2,65

Πίνακας 31: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε MPPT λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,8 του ΜΥΗΣ.



Σχήμα 5.32: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8123	49,5008	390,06
dfig	49,8121	49,5081	390,05

Πίνακας 32: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε MPPT λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03του MYHΣ.



Σχήμα 5.33: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,7457	49,7435	0,54
dfig	49,7456	49,7436	0,55

Πίνακας 33: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε MPPT λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ.

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε overspeeding λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.34: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα overspeeding και ο MYHΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.
	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,5663	49,5663	10,31
dfig	49,5663	49,5663	14,2

Πίνακας 34: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,8 του ΜΥΗΣ.



Σχήμα 5.35: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8272	49,5074	373,8
dfig	49,8271	49,5083	373,9

Πίνακας 35: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε overspeeding λειτουργία της A/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9 και σ=0,03 του MYHΣ.

Η παραπάνω μεταβατική απόκριση συχνότητας του σχήματος 5.37 φαίνεται λεπτομερέστερα στο επόμενο διάγραμμα:



Σχήμα 5.36: Λεπτομερέστερη παρουσίαση της μεταβατικής απόκρισης της συχνότητας του σχήματος 5.37.



Σχήμα 5.37: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,7690	49,7661	9,5
dfig	49,7671	49,7671	11,1

Πίνακας 36: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ.

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε pitch deloading λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.38: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα pitch deloading και ο MYHΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,5740	49,5318	2,37
dfig	49,5738	49,5386	2,1

Πίνακας 37: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε pitch deloading λειτουργία της A/Γ και με στατισμό R=0.8 του MYHΣ



Σχήμα 5.39: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα pitch deloading και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8286	49,531	364,19
dfig	49,8286	49,5386	364,20

Πίνακας 38: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε pitch deloading λειτουργία της A/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta=0.9$  και σ=0.03 του MYHΣ.



Σχήμα 5.40: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα pitch deloading και ο MYHΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,7700	49,7583	0,88
dfig	49,7701	49,7595	0,80

Πίνακας 39: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε pitch deloading λειτουργία της  $A/\Gamma$  και με ρυθμιστή στροφών με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ.

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε inertial response λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.41: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,8. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,5295	49,5081	9,01
dfig	49,5295	49,5092	8,45

Πίνακας 40: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε inertial response λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,8 του ΜΥΗΣ.



Σχήμα 5.42: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8123	49,5074	390,06
dfig	49,8121	49,5083	390,05

Πίνακας 41: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε inertial response λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9 και σ=0,03 του ΜΥΗΣ.



Σχήμα 5.43: Απόκριση συχνότητας: Η Α/Γ λειτουργεί με δυνατότητα inertial response και ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Συγκρίνεται η απόκριση με dfig και με pmsg γεννήτρια.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,7458	49,7431	3,2
dfig	49,7455	49,7436	3,04

Πίνακας 42: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χρήσης dfig και pmsg γεννήτριας σε inertial response λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του ΜΥΗΣ.

## 5.2 Απόκριση συστήματος σε αύξηση του φορτίου με Α/Γ

## εφοδιασμένη με γεννήτρια DFIG και ταχύτητα ανέμου

## μεγαλύτερη της ονομαστικής

Η Α/Γ λειτουργεί με 12,5m/sec, που είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής ταχύτητας ανέμου:



Σχήμα 5.44: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί σε ΜΡΡΤ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
R=0,4	49,5553	49,5053	2,92
R=0,5	49,5451	49,5092	2,96

Πίνακας 43: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε ΜΡΡΤ.



Σχήμα 5.45: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με παραμέτρους Tr=7,5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,04 ή Tr=7,5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03, ενώ η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας(Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$T_r = 7,5sec, \delta = 0,6, \sigma = 0,04$	49,7765	49,5087	164,2
$T_r = 5sec, \delta = 0, 6, \sigma = 0, 03$	49,8122	49,5069	130,8



Σχήμα 5.46: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με συχνότητα ωη και στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,6649	49,6643	1,08
$\omega_n = 0,024011, R=0,10$	49,6652	49,6595	0,99
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,7498	49,7419	0,57

Πίνακας 45: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε ΜΡΡΤ λειτουργία.

#### 5.2.2 Η Α/Γ σε overspeeding λειτουργία



Σχήμα 5.47: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
R=0,4	49,6560	49,5552	4,082
R=0,5	49,6479	49,5619	4,27

Πίνακας 46: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε overspeeeding λειτουργία.



Σχήμα 5.48: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας(Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$T_r = 7,5sec, \delta = 0,6, \sigma = 0,04$	49,8268	49,564	152
$T_r = 5sec, \delta = 0, 6, \sigma = 0, 03$	49,8545	49,5629	120,9

Πίνακας 47: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε overspeeeding λειτουργία.



Σχήμα 5.49: Μεταβολή ισχύος του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.



Σχήμα 5.50: Μεταβολή ισχύος της diesel γεννήτριας όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.



Σχήμα 5.51: Μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της Α/Γ όταν λειτουργεί σε overspeeding τεχνική.



Σχήμα 5.52: Μεταβολή ισχύος της Α/Γ όταν λειτουργεί με overspeeding και ο MYHΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03.



Σχήμα 5.53: Μεταβολή γωνίας βήματος όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.

Εφόσον η ταχύτητα ανέμου είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής η τεχνική του overspeeding έχει εξαντληθεί και εφαρμόζεται τώρα έλεγχος μέσω της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Για αυτό το λόγο αμέσως μετά τη διαταραχή του φορτίου η ισχύς της Α/Γ αυξάνεται από την τιμή

0,9 (10% αποφόρτιση) σε τιμή πολύ κοντά της ονομαστικής (0,99). Η αδυναμία να φτάσει η Α/Γ την ονομαστική ισχύ οφείλεται σε αστοχία του αντίστοιχου LUT4 να φτάσει στην τιμή 1. Η γωνία βήματος μειώνεται προκειμένου να μπορέσει η Α/Γ να δώσει επιπλέον ισχύ στο σύστημα και αυξομειώνεται ώστε να επιτύχει την τελική τιμή για την οποία η Α/Γ έχει φτάσει σε MPPT λειτουργία. Ο MYHΣ αυξάνει αργά με το χρόνο τη συμβολή του στην πρωτεύουσα ΡΦΣ ακριβώς όπως επιβάλλεται από τον ρυθμιστή με μεταβατικό στατισμό. Τέλος, η diesel έχει άμεση απόκριση στη βύθιση της συχνότητας, επειδή όμως ο MYHΣ αυξάνει συνεχώς την αποδιδόμενη ισχύ του η diesel μειώνει την παραγωγή της, καθώς «βλέπει» την συχνότητα να αυξάνεται.



Σχήμα 5.54: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding και ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.56 η ενεργός ισχύς που διαχειρίζεται ο δρομέας της dfig γεννήτριας όταν η Α/Γ εφαρμόζει τεχνική αποφόρτισης overspeeding-pitch control είναι μέσα στα αποδεκτά όρια.



Σχήμα 5.55: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,7411	49,7046	2,29
$\omega_n = 0,024011, R=0,10$	49,7428	49,704	4,29
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,8076	49,7685	2,26

Πίνακας 48: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε overspeeeding λειτουργία.

#### 5.2.3 H A/ $\Gamma$ $\sigma\varepsilon$ pitch deloading $\lambda\varepsilon$ itovpyía



Σχήμα 5.56: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ χωρίς ρυθμιστή στροφών ούτε πύργο αναπάλσεως έχει στατισμό R, ενώ η A/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
R=0,4	49,6640	49,5525	28,3
R=0,5	49,6563	49,5591	28,7

Πίνακας 49: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία.



Σχήμα 5.57: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας(Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$T_{\rm r} = 7,5 {\rm sec},  \delta = 0,6  \sigma = 0,04$	49,8311	49,5612	146,64
$T_r = 5 \sec, \delta = 0.6, \sigma = 0.03$	49,858	49,5600	115,1

Πίνακας 50: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία.



Σχήμα 5.58: Μεταβολή ισχύος Α/Γ όταν αυτή λειτουργεί με pitch deloading τεχνική και ο MYHΣ με με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03.



Σχήμα 5.59: Μεταβολή γωνίας βήματος όταν η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική και ο ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03.

Από τα δύο προηγούμενα διαγράμματα είναι εμφανές πως η διαταραχή του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα τη μετάβαση της Α/Γ από την αποφορτισμένη λειτουργία στην MPPT, η οποία για ταχύτητα ανέμου άνω της ονομαστικής έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Επίσης, η γωνία βήματος μειώνεται αμέσως μετά την αύξηση του φορτίου για να επιτρέψει την μείωση του ποσοστού αποφόρτισης της Α/Γ και σταθεροποιείται τελικώς σε μία τιμή έπειτα από ταλαντώσεις γύρω από αυτή όταν η Α/Γ φτάσει στην MPPT λειτουργία.



Σχήμα 5.60: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,7496	49,7036	28,2
$\omega_n = 0,024011, R=0,10$	49,7486	49,7029	30,5
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,8109	49,7679	28,8

Πίνακας 51: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε pitch deloading λειτουργία.

#### 5.2.4 Η Α/Γμε inertial response λειτουργία



Σχήμα 5.61: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με inertial response.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
R=0,4	49,5552	49,5334	5,03
R=0,5	49,5449	49,5257	4,91

Πίνακας 52: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R και Α/Γ σε inertial response.



Σχήμα 5.62: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με inertial response.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας(Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$T_r = 7,5sec, \delta = 0,6 \sigma = 0,04$	49,7766	49,5217	164,25
$T_r = 5sec, \ \delta = 0.6, \ \sigma = 0.03$	49,8123	49,522	130,81

Πίνακας 53: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών και Α/Γ σε inertial response.



Σχήμα 5.63: Μεταβολή ισχύος Α/Γ με inertial response και MYHΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.



Σχήμα 5.64: Μεταβολή γωνιακής ταχύτητας δρομέα Α/Γ με inertial response και MYHΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=5sec,  $\delta$ =0,6, σ=0,03.



Σχήμα 5.65: Μεταβολή ενεργού ισχύος δρομέα dfig με inertial response και ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές πως η Α/Γ παρ' όλο που λειτουργεί με τα ονομαστικά μεγέθη της πριν τη διαταραχή, η πτώση της συχνότητας του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την άμεση αύξηση της ισχύος της Α/Γ και τη μείωση της ταχύτητας του δρομέα της. Στη συνέχεια, η Α/Γ αντιδρώντας στην προηγούμενη μεταβολή της αυξάνει την ταχύτητά της και μειώνει την αποδιδόμενη ισχύ της μέχρι να ισορροπήσει τελικώς στις τιμές που είχε πριν τη διαταραχή.



Σχήμα 5.66: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με inertial response.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
$\omega_n = 0,010147, R=0,10$	49,6650	49,6598	2,14
$\omega_n = 0,024011, R=0,10$	49,6665	49,6584	2,08
$\omega_n = 0,024011, R=0,05$	49,7499	49,742	1,7

Πίνακας 54: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως και Α/Γ σε inertial response.

#### 5.2.5 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερης

#### της ονομαστικής

• Η Α/Γ είναι εξοπλισμένη με dfig γεννήτρια



Σχήμα 5.67: Ο ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,5. Η Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα PΦΣ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,5451	49,5092	2,96
Overspeeding	49,6479	49,5619	4,27
Pitch deloading	49,6563	49,5591	28,7
Inertial response	49,5449	49,5257	4,91

Πίνακας 55: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,5, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.



Σχήμα 5.68: Ο ΜΥΗΣ συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με στατισμό R=0,4. Η Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα  $P\Phi\Sigma$ .

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,5553	49,5053	2,92
Overspeeding	49,6560	49,5552	4,082
Pitch deloading	49,6640	49,5525	28,3
Inertial response	49,5552	49,5334	5,03

Πίνακας 56: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με στατισμό R=0,4, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.



Σχήμα 5.69: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με παραμέτρους Tr=7,5sec, δ=0,6 σ=0,04. Η Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,7765	49,5087	164,2
Overspeeding	49,8268	49,564	152
Pitch deloading	49,8311	49,5612	146,64
Inertial response	49,7766	49,5217	164,25

Πίνακας 57: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=7,5sec, δ=0,6 σ=0,04, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.



Σχήμα 5.70: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με παραμέτρους Tr=5sec, δ=0,6, σ=0,03. Η Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα  $P\Phi\Sigma$ .

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,8122	49,5069	130,8
Overspeeding	49,8545	49,5629	120,9
Pitch deloading	49,858	49,5600	115,1
Inertial response	49,8123	49,522	130,81

Πίνακας 58: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών Tr=5sec, δ=0,6 σ=0,03, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.



Σχήμα 5.71: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,010147rad/sec και στατισμό R=0,10. Η Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,6649	49,6643	1,08
Overspeeding	49,7411	49,7046	2,29
Pitch deloading	49,7496	49,7036	28,2
Inertial response	49,6650	49,6598	2,14

Πίνακας 59: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ πύργο αναπάλσεως με ωn=0,010147rad/sec και στατισμό R=0,10, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.



Σχήμα 5.72: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05. Η Α/Γ λειτουργεί με MPPT, καθώς και με τις τρεις αναπτυχθείσες μεθόδους για τη συμμετοχή της στην πρωτεύουσα ΡΦΣ.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
MPPT	49,7498	49,7419	0,57
Overspeeding	49,8076	49,7685	2,26
Pitch deloading	49,8109	49,7679	28,8
Inertial response	49,7499	49,742	1,7

Πίνακας 60: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ΜΥΗΣ πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05, ενώ η Α/Γ λειτουργεί με 3 διαφορετικές τεχνικές συμμετοχής στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, καθώς και με MPPT.



Σχήμα 5.73: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,4	49,5553	49,5053	2,92
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=5sec, δ=0,6 και	49,8122	49,5069	130,8
σ=0,03)			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,7498	49,7419	0,57
και στατισμό R=0,05			

Πίνακας 61: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT.



Σχήμα 5.74: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,4	49,6560	49,5552	4,082
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=5sec, δ=0,6 και	49,8545	49,5629	120,9
σ=0,03 )			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,8076	49,7685	2,26
και στατισμό R=0,05)			

Πίνακας 62: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding.



Σχήμα 5.75: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων MYHS, όταν η A/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,4	49,6640	49,5525	28,3
Με ρυθμιστή στροφών (Tr=5sec, δ=0,6 και σ=0,03 )	49,858	49,5600	115,1
Με πύργο αναπάλσεως (ω <sub>n</sub> = 0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05)	49,8109	49,7679	28,8

Πίνακας 63: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του MYHΣ όταν η A/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική.



Σχήμα 5.76: Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων ΜΥΗΣ, όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
Με στατισμό R=0,4	49,5552	49,5334	5,03
Με ρυθμιστή στροφών			
(Tr=5sec, δ=0,6 και	49,8123	49,522	130,81
σ=0,03)			
Με πύργο αναπάλσεως			
$(\omega_n = 0.024011 \text{ rad/sec})$	49,7499	49,742	1,7
και στατισμό R=0,05)			

Πίνακας 64: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του MYHΣ όταν η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική.

#### 5.2.6 Παρουσίαση συγκριτικών αποτελεσμάτων απόκρισης της συχνότητας για

ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής (συγκεκριμένα 12,5m/s)

#### χρησιμοποιώντας dfig ή pmsg γεννήτρια

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε MPPT λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.77: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με MPPT τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,5454	49,4946	2,5
dfig	49,5451	49,5092	2,96

Πίνακας 65: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με MPPT λειτουργία Α/Γ και με R=0,5 στατισμό του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.78: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9, σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με MPPT τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8011	49,5012	306,5
dfig	49,8011	49, 512	306,2

Πίνακας 66: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με MPPT λειτουργία Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9, σ=0,03 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.79: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με MPPT τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,7499	49,7426	0,52
dfig	49,7498	49,7419	0,57

Πίνακας 67: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με MPPT λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε overspeeding λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.80: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η  $A/\Gamma$  λειτουργεί με overspeeding τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)

pmsg	49,6478	49,5546	2,61
dfig	49,6479	49,5619	4,27

Πίνακας 68: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,5 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.81: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9, σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8481	49,5649	306,7
dfig	49,8491	49, 5722	315,65

Πίνακας 69: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9, σ=0,03 του ΜΥΗΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.82: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με overspeeding τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8059	49,7689	1,77
dfig	49,8076	49,7685	2,26

Πίνακας 70: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με overspeeding λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε pitch deloading λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.83: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,6563	49,5511	29,27
dfig	49,6563	49,5591	28,7

Πίνακας 71: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,5 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.84: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9, σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8567	49,5611	342,5
dfig	49,8567	49, 5697	341,9

Πίνακας 72: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9,  $\sigma$ =0,03 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.85: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8109	49,7685	26,8
dfig	49,8109	49,7679	28,8

Πίνακας 73: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με pitch deloading λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 του MYHΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.

Οι επόμενες προσομοιώσεις αναφέρονται σε inertial response λειτουργία της Α/Γ:



Σχήμα 5.86: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει στατισμό R=0,5 και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,5454	49,5296	5,29
dfig	49,5449	49,5257	4,91

Πίνακας 74: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με inertial response λειτουργία της Α/Γ και με στατισμό R=0,5 του ΜΥΗΣ για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.87: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει ρυθμιστή στροφών με Tr=10, δ=0,9, σ=0,03 και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,8011	49,5149	306,4
dfig	49,8012	49,5140	305,9

Πίνακας 75: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με inertial response λειτουργία της Α/Γ και με ρυθμιστή στροφών με Tr=10,  $\delta$ =0,9,  $\sigma$ =0,03 για dfig και pmsg γεννήτρια.



Σχήμα 5.88: Απόκριση συχνότητας: Ο ΜΥΗΣ έχει πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 και η Α/Γ λειτουργεί με inertial response τεχνική. Συγκρίνεται η απόκριση για χρήση pmsg ή dfig γεννήτριας.

	Μόνιμο σφάλμα	Μέγιστη βύθιση	Χρόνος
	συχνότητας (Hz)	συχνότητας (Hz)	αποκατάστασης (sec)
pmsg	49,7499	49,7453	1,61
dfig	49,7499	49,742	1,7

Πίνακας 76: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με inertial response λειτουργία της Α/Γ και με πύργο αναπάλσεως με ωn=0,024011rad/sec και στατισμό R=0,05 για dfig και pmsg γεννήτρια.

# 6

## Σχολιασμός και παρατηρήσεις αποτελεσμάτων

Όσες προσομοιώσεις περιλαμβάνουν βύθιση της συχνότητας σε τιμή μικρότερη των 49,5 Hz δεν είναι αποδεκτές, καθώς τα όρια λειτουργίας του διασυνδεδεμένου συστήματος είναι <sup>±</sup>0,5Hz από την ονομαστική συχνότητα (50Hz), και παρουσιάζονται μόνο για λόγους σύγκρισης.

### 6.1 Ταχύτητα ανέμου 8m/sec μικρότερη της ονομαστικής

• Η Α/Γ σε ΜΡΡΤ λειτουργία

Σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία, όταν ο ΜΥΗΣ διαθέτει μόνο στατισμό R, όσο η τιμή του στατισμού αυξάνεται, το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας, είναι μεγαλύτερο, μειώνεται, όμως, η μεταβατική βύθιση της συχνότητας, που εγκυμονεί τον κίνδυνο να πέσει η τιμή της κάτω από τα 49,5 Hz. Απαιτείται ο ΜΥΗΣ να έχει μεγάλες τιμές στατισμού (0,3 με 0,4), δηλαδή να συμμετέχει πολύ λίγο στη πρωτεύουσα ΡΦΣ, προκειμένου να κινείται η συχνότητα σε αποδεκτά για το σύστημα επίπεδα.

Στην περίπτωση του ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό, το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας είναι σαφώς μικρότερο από την προηγούμενη περίπτωση (ρυθμιστής στροφών μόνο με κέρδος 1/R), καθώς οι τιμές του μονίμου στατισμού του ΜΥΗΣ μπορούν να είναι σε αυτήν την περίπτωση πολύ μικρότερες από την αντίστοιχη τιμή του R, χωρίς προβλήματα βύθισης της συχνότητας σε μη αποδεκτά επίπεδα. Ο χρόνος αποκατάστασης της

μόνιμης τιμής της συχνότητας πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση είναι εμφανώς μεγαλύτερος από την προηγούμενη περίπτωση, αν και η συχνότητα κινείται σε τιμές μεγαλύτερες από το μόνιμο σφάλμα της βέλτιστης περίπτωσης με ρυθμιστή με απλό κέρδος σε πολύ μικρό χρόνο μετά την αύξηση του φορτίου. Η απόκριση σε αυτή την περίπτωση μπορεί να επιταχυνθεί αυξάνοντας τη χρονική σταθερά Tr, ελλοχεύει όμως σε αυτήν την περίπτωση η βύθιση της συχνότητας σε μη αποδεκτές τιμές.

Όσον αφορά στην περίπτωση με πύργο αναπάλσεως, η μείωση της τιμής του στατισμού του ΜΥΗΣ επιφέρει μείωση του μόνιμου σφάλματος χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος βύθισης της συχνότητας σε μη αποδεκτά επίπεδα. Οι χρόνοι αποκατάστασης σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ μικρότεροι συγκριτικά με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Επίσης, η μικρή αύξηση της φυσικής συχνότητας (μείωση διατομής πύργου αναπάλσεως) οδηγεί σε μικρή αύξηση του πλάτους των ταλαντώσεων του συστήματος αγωγού-πύργου.

#### • H A/ $\Gamma$ σε overspeeding λειτουργία

Πριν τη διαταραχή του φορτίου η Α/Γ λειτουργεί με ταχύτητα δρομέα μεγαλύτερη από αυτή που θα έδινε τη μέγιστη δυνατή ισχύ, με αποτέλεσμα να τροφοδοτεί το σύστημα με μικρότερη ισχύ από αυτή που θα μπορούσε να δώσει, αν λειτουργούσε με MPPT. Η Α/Γ αντιλαμβάνεται την αύξηση του φορτίου, μέσω της πτώσης της συχνότητας του συστήματος, η οποία μέσω του στατισμού της Α/Γ καθορίζει την επιπλέον ισχύ που πρέπει να δώσει η Α/Γ. Αυτή η επιπλέον ισχύς μειώνει το ποσοστό αποφόρτισης με το οποίο λειτουργεί η Α/Γ και αυξάνει κατά συνέπεια την τιμή της ηλεκτρικής ισχύος αναφοράς της γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η επιβραδύνουσα ηλεκτρική αντιρροπή της γεννήτριας και έτσι επιβραδύνεται ο δρομέας της Α/Γ. Σταδιακά η Α/Γ δίνει την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια του άξονά της που είχε λόγω της overspeeding τεχνικής και για αυτό το λόγο σε όλες τις περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται το overspeeding παρουσιάζεται μία απότομη αύξηση της συχνότητας λόγω της απόδοσης της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας της Α/Γ αμέσως μετά την αρχική βύθιση λόγω της αύξησης του φορτίου. Καθώς μειώνεται όμως η ταχύτητα του δρομέα προκαλείται νέα μείωση της ηλεκτρικής ισχύος αναφοράς. Η συχνότητα του συστήματος θα ισορροπήσει όταν η αποδιδόμενη ισχύς της Α/Γ, της ντήζελ και του ΜΥΗΣ εξισορροπήσουν τη νέα ζήτηση του φορτίου.

Στην περίπτωση του ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό, όπως προαναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η πρωτεύουσα ΡΦΣ καθυστερεί αρκετά. Αρχικά, ο ΜΥΗΣ έχει μικρή συμμετοχή λόγω της μεγάλης τιμής του μεταβατικού στατισμού, ενώ στη συνέχεια συμμετέχει πιο αποτελεσματικά μέσω της πολύ μικρότερης τιμής του μόνιμου στατισμού. Για αυτό τον λόγο κι ενώ η Α/Γ έχει αποδώσει όλη την αποθηκευμένη
κινητική της ενέργεια, επέρχεται νέα αύξηση της τιμής της συχνότητας του συστήματος εξ αιτίας της συμμετοχής του ρυθμιστή στροφών του ΜΥΗΣ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ.

• H A/ $\Gamma$  σε pitch deloading λειτουργία

Η Α/Γ συμμετέχει στη ΡΦΣ μέσω της pitch deloading τεχνικής. Η Α/Γ αντιλαμβάνεται την επιπλέον ισχύ που πρέπει να αποδώσει όπως αυτή καθορίζεται από τον στατισμό της και μεταβάλλει αντίστοιχα το ποσοστό αποφόρτισής της. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της κλίσης της γωνίας β των πτερυγίων έτσι ώστε η Α/Γ να αυξήσει την αποδιδόμενη ισχύ της. Η αρχική βύθιση της συχνότητας όταν η Α/Γ λειτουργεί με pitch deloading είναι μεγαλύτερη από όταν λειτουργεί με overspeeding, αλλά μικρότερη από όταν δε συμμετέχει καθόλου η Α/Γ στη ΡΦΣ και λειτουργεί με MPPT. Η μέθοδος αυτή όπως και η overspeeding επιτυγχάνουν σχεδόν το ίδιο μόνιμο σφάλμα με την pitch deloading να είναι ταχύτερη.

Η Α/Γ με inertial response λειτουργία

Στην μείωση της συχνότητας του δικτύου λόγω αύξησης του φορτίου η Α/Γ απαντά με αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος αναφοράς της γεννήτριάς της. Η επιβραδύνουσα ηλεκτρική αντιρροπή αυξάνεται και επιβραδύνει το άζονα της μηχανής αποδίδοντας την κινητική ενέργειά του στο σύστημα, η οποία συγκρατεί την αρχική βύθιση της συχνότητας. Στη συνέχεια η γεννήτρια αντιδράει στη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα της και η ισχύς αναφοράς της γεννήτριας μειώνεται. Αυτή η τεχνική έχει ως αποτέλεσμα να συγκρατείται για λίγο η βύθιση της συχνότητας αμέσως μετά την αύξηση του φορτίου, καθώς η Α/Γ αποδίδει την αποθηκευμένη στον άξονά της ενέργεια και στη συνέχεια η συχνότητα συνεχίζει να μειώνεται μέχρι ότου φτάσει στο μόνιμο σφάλμα. Η τιμή αυτή του σφάλματος είναι ίδια όπως είναι αναμενόμενο με την τιμή του αντίστοιχου σφάλματος όταν η Α/Γ λειτουργεί με MPPT τεχνική. Γενικά, ο χρόνος αποκατάστασης είναι αρκετά μεγαλύτερος από ότι στην αντίστοιχη περίπτωση με MPPT, το πλεονέκτημα όμως που προσφέρει η inertial response είναι η αρχική συγκράτηση της βύθισης. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση όπου ο MYHΣ έχει πύργο αναπάλσεως η τεχνική αυτή προκαλεί μετά την συγκράτηση της αρχικής βύθισης μία πτώση της συχνότητας που είναι μικρότερη από την ελάχιστη τιμή με την MPPT τεχνική.

Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων

Η overspeeding τεχνική και η pitch deloading επιτυγχάνουν πολύ κοντινές τιμές του σφάλματος μονίμου καταστάσεως αρκετά βελτιωμένες σε σχέση με την MPPT. Η overspeeding συγκρατεί σε σημαντικό βαθμό τη βύθιση της συχνότητας και ενώ αυξάνεται ο χρόνος αποκατάστασης της μόνιμης τιμής, η τιμή της συχνότητας κινείται σε μεγαλύτερες

τιμές από όλες τις άλλες μεθόδους για όλο το χρόνο αποκατάστασης της συχνότητας του συστήματος. Η inertial response συγκρατεί σε ικανοποιητικό βαθμό την αρχική βύθιση της συχνότητας. Τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην inertial response τεχνική επιτυγχάνονται για την περίπτωση του ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό όπου μετά τη συγκράτηση της αρχικής μέγιστης βύθισης επιδρά η ΡΦΣ από τον ΜΥΗΣ και συνεχίζεται η αύξηση της τιμής της συχνότητας.

• Σύγκριση αποκρίσεων με dfig και pmsg γεννήτρια

Γενικά, η pmsg σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, έχει πολύ όμοια συμπεριφορά με την dfig, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει ίδια αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί πως σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ και για όλες τις τεχνικές συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ, εκτός από την τεχνική overspeeding, η pmsg προκαλεί ελάχιστα μεγαλύτερη αρχική-μέγιστη βύθιση από ότι η dfig. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η dfig έχει από τη δομή της μία αδρανειακή απόκριση όπως αναφέρεται και στο άρθρο: "Mullane A., O'Malley M., "The Inertial Response of Induction-Machine-Based Wind Turbines," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.20, no.3, pp. 1496- 1503, Aug. 2005".

#### 6.2 Ταχύτητα ανέμου 12,5m/s μεγαλύτερη της ονομαστικής

• Η Α/Γ σε ΜΡΡΤ λειτουργία

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, όταν η Α/Γ λειτουργεί σε MPPT η απόκριση της συχνότητας του συστήματος για όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας του MYHΣ είναι αντίστοιχη με αυτή για λειτουργία Α/Γ σε ταχύτητα ανέμου μικρότερης της ονομαστικής.

• H A/ $\Gamma$  se overspeeding leitoupyía

Για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής, η Α/Γ λειτουργεί με βάση το LUT4, εφαρμόζοντας δηλαδή pitch control, όπως και στην περίπτωση της MPPT λειτουργίας, αλλά για αρχικό ποσοστό αποφόρτισης 10%. Όταν συμβεί η διαταραχή και η Α/Γ αντιληφθεί τη βύθιση της συχνότητας θα μειώσει το ποσοστό αποφόρτισής της, προκειμένου να δώσει περισσότερη ισχύ στο σύστημα. Μειώνοντας το ποσοστό αποφόρτισης και για δεδομένη ταχύτητα ανέμου θα μειωθεί η γωνία βήματος και η Α/Γ θα δώσει επιπλέον ισχύ με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τιμή της συχνότητας.

#### • H A/ $\Gamma$ se pitch deloading leitoupyía

Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερης της ονομαστικής και για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ΜΥΗΣ η μεταβατική απόκριση της συχνότητας είναι ίδια. Αμέσως μετά τη διαταραχή του φορτίου παρατηρείται μία πολύ γρήγορη αύξηση στη τιμή της συχνότητας, η οποία οφείλεται στην μεταβολή της γωνίας βήματος της Α/Γ μέσω της τεχνικής του pitch deloading, προκειμένου να αποδώσει περισσότερη ισχύ η Α/Γ στο σύστημα.

• H A/ $\Gamma$  σε inertial response λειτουργία

Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις με το αντίστοιχο για MPPT λειτουργία της Α/Γ, καθώς η Α/Γ δεν εγχέει επιπλέον ισχύ στο σύστημα, αλλά αντιδρά στη μεταβολή της συχνότητας και συγκρατεί την αρχική μεγάλη βύθιση που επιφέρει η απότομη αύξηση του φορτίου. Η ίδια επίδραση της inertial response λειτουργίας της Α/Γ είναι εμφανής σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ.

• Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων

Αν ο ΜΥΗΣ λειτουργεί με απλό στατισμό R τότε η λύση της overspeeding λειτουργίας της Α/Γ παρουσιάζει σφάλμα μικρότερο σε σχέση με την MPPT και σε πολύ μικρό χρόνο αποκατάστασης. Όταν χρησιμοποιείται ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό οι δύο τεχνικές pitch deloading και overspeeding μειώνουν το μόνιμο σφάλμα με το pitch deloading να έχει λίγο μικρότερο χρόνο αποκατάστασης. Όσον αφορά στη λειτουργία ΜΥΗΣ με πύργο αναπάλσεως, η Α/Γ με overspeeding τεχνική παρέχει πολύ γρήγορη αποκατάσταση μονίμου σφάλματος.

• Σύγκριση αποκρίσεων pmsg και dfig γεννήτριας

Ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής

#### 6.3 Γενικά συμπεράσματα

 Οι μέθοδοι overspeeding και pitch deloading εξασφαλίζουν τη συμμετοχή της Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ και επιτυγχάνουν βελτίωση του μόνιμου σφάλματος της συχνότητας του συστήματος. Επιπλέον, η αρχική βύθιση της συχνότητας που προκαλείται από την απότομη αύξηση του φορτίου βελτιώνεται σημαντικά σε σχέση με την περίπτωση MPPT λειτουργίας της Α/Γ σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας του MYHΣ. Μικρότερη βύθιση μεταξύ των δύο τεχνικών επιτυγχάνει η overspeeding η οποία επιτυγχάνει και μεγαλύτερη τιμή της συχνότητας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου αποκατάστασης του μονίμου σφάλματος.

- Η inertial response τεχνική δε βελτιώνει το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας, επιδιώκει όμως να συγκρατήσει την αρχική απότομη βύθιση της με απόδοση της κινητικής ενέργειας του άξονα της. Πολύ καλά αποτελέσματα επιτυγχάνει η inertial response τεχνική στις περιπτώσεις ΜΥΗΣ με ρυθμιστή με μεταβατικό στατισμό και με απλό στατισμό.
- Συγκρίνοντας την απόκριση της συχνότητας για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις λειτουργίας του ΜΥΗΣ, προκύπτει πως ο πύργος αναπάλσεως προσφέρει την ταχύτερη ΡΦΣ σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας της Α/Γ και για τις δύο ταχύτητες ανέμου που μελετήθηκαν, άνω και κάτω της ονομαστικής. Μειώνοντας την τιμή του στατισμού του μειώνεται και το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας χωρίς να υπάρχει ενδεχόμενο βύθισης της συχνότητας σε μη αποδεκτά επίπεδα.
- Πολύ καλά αποτελέσματα στη ΡΦΣ επιτυγχάνει σύμφωνα με τις πραγματοποιούμενες προσομοιώσεις και ο ρυθμιστής στροφών με μεταβατικό στατισμό, αν και ο χρόνος αποκατάστασης αυξάνει πολύ σε σχέση με την περίπτωση του πύργου αναπάλσεως αλλά και του απλού στατισμού του ΜΥΗΣ. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να επιτευχθεί λειτουργία με πολύ μικρό μόνιμο στατισμό ώστε το σφάλμα στη μόνιμη συχνότητα να μειωθεί εξίσου πολύ. Επιπλέον, οι τιμές της συχνότητας σε αυτή την περίπτωση αυξάνονται πολύ γρήγορα σε μεγαλύτερες από ότι το μόνιμο σφάλμα του ΜΥΗΣ με απλό στατισμό.
- Στην περίπτωση λειτουργίας του ΜΥΗΣ με ρυθμιστή στροφών με κέρδος 1/R, απαιτούνται μεγάλες τιμές στατισμού, προκειμένου να βρίσκεται το σύστημα σε αποδεκτά όρια συχνότητας ακόμα κι όταν η Α/Γ δε συμμετέχει καθόλου στη ΡΦΣ.
   Όταν η Α/Γ συμμετέχει στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με κάποια από τις προαναφερθείσες τεχνικές τότε η τιμή του στατισμού μπορεί να μειωθεί περαιτέρω και να αυξηθεί και η συμμετοχή του ΜΥΗΣ στη ρύθμιση.

## 7

## Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω

### μελέτη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών- μεταβλητού βήματος έλικας κατάλληλο για την συμμετοχή της Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέσω τριών διαφορετικών τεχνικών, της επιτάχυνσης της ταχύτητας του δρομέα, του ελέγχου της γωνίας βήματος και της συμμετοχής της Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του δικτύου. Για αυτό το σκοπό, υλοποιήθηκε Α/Γ εφοδιασμένη με dfig γεννήτρια και Α/Γ με pmsg και μοντελοποιήθηκε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με το ισοδύναμο μοντέλο ενός ζυγού. Εκτός από το μοντέλο της Α/Γ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συμμετέχει μία ντήζελ γεννήτρια, καθώς και ένας ΜΥΗΣ. Το μοντέλο του ΜΥΗΣ υλοποιείται έτσι ώστε να παρέχει τη δυνατότητα να συμμετέχει ο ΜΥΗΣ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ με ρυθμιστή στροφών απλού κέρδους, με ρυθμιστή στροφών με μεταβατικό στατισμό και εναλλακτικά να έχει πύργο αναπάλσεως και ρυθμιστή στροφών απλού κέρδους.

Στις προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν διαπιστώθηκε η βελτίωση της μεταβατικής απόκρισης της συχνότητας για όλες τις τεχνικές συμμετοχής των Α/Γ στην πρωτεύουσα ΡΦΣ του συστήματος, καθώς και ο σημαντικός περιορισμός του ανεπιθύμητου μεταβατικού φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος του ΜΥΗΣ, κυρίως όταν η Α/Γ συμμετέχει με την τεχνική overspeeding στην πρωτεύουσα ΡΦΣ.

Στις προτάσεις για περαιτέρω μελέτη συγκαταλέγονται η διερεύνηση διαφόρων στατισμών των Α/Γ για συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ΡΦΣ και η αλληλεπίδρασή τους με διάφορες τιμές στατισμών του ΜΥΗΣ, καθώς και η επέκταση των τιμών του προτεινόμενου ελέγγου της αποφόρτισης των Α/Γ για ακόμα μεγαλύτερα επίπεδα αποφόρτισης από το 10%, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειας των κατασκευασμένων LUTs με πιο επιτακτική την αναγκαιότητα για βελτίωση της συμπεριφοράς του LUT4, το οποίο αναφέρεται στην περιοχή εξάντλησης της τεχνικής overspeeding μέχρι την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, όπου εφαρμόζεται έλεγχος γωνίας βήματος. Συνίσταται, ακόμα, η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος ως προς τη συμμετοχή του στη πρωτεύουσα ΡΦΣ σε μικρές η μεγαλύτερες διαδοχικές διαταραχές του ανέμου, καθώς στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά σε μία δεδομένη σταθερή ταχύτητα ανέμου για περιπτώσεις άνω και κάτω της ονομαστικής. Επιπλέον, συνίσταται η οικονομοτεχνική μελέτη του ΜΥΗΣ, προκειμένου να διερευνηθεί εάν η βελτίωση στην πρωτεύουσα ΡΦΣ που επιφέρει η χρήση του πύργου αναπάλσεως είναι οικονομικά συμφέρουσα ή αν δεν αξίζει από οικονομικής πλευράς. Στους ΜΥΗΣ είναι σύνηθες να μην χρησιμοποιείται πύργος αναπάλσεως. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί εάν η δυνατότητα της σημαντικής συμβολής του ΜΥΗΣ με πύργο στην πρωτεύουσα ΡΦΣ και η εξάλειψη του ανεπιθύμητου φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος αξίζει την επένδυση. Στην οικονομοτεχνική μελέτη είναι απαραίτητο επίσης να συμπεριληφθεί και η οικονομική ζημία για τον εκάστοτε επενδυτή από τη μη αξιοποίηση του συνόλου της προσφερόμενης αιολικής ενέργειας εξ' αιτίας των χρησιμοποιούμενων στρατηγικών αποφόρτισης.

# 8

## Βιβλιογραφία

[1]	Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές», 1997.
[2]	Ηνωμένα Έθνη, «Πρωτόκολλο του Κιότο στα πλαίσια της Συνδιάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Αλλαγές», Συνδιάσκεψη Ηνωμένων Εθνών, Δεκέμβριος 1997.
[3]	<ul> <li>Δ. Ραχιώτης, Μέλος Δ.Σ. Ελληνικού Συνδέσμου Ηλεκτροπαραγωγών ΑΠΕ,</li> <li>«Αιολική Ενέργεια: Μια σημαντική συμβολή για τη βιώσιμη ανάπτυξη και</li> <li>απασγόληση στη γώρα μας», Χαλκίδα 2009</li> </ul>
[4]	Enforcement branch of the compliance committee, CC-2007-1- 8/Greece/EB, 17 Απριλίου 2008.
[5]	EWEA,TheEuropeanWindEnergyAssociation,http://www.ewea.org/index.php, 30 Μαρτίου 2010.
[6]	Σ. Παπαθανασίου, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σημειώσεις Παραδόσεων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.
[7]	Ζ. Μαντάς, Π. Θεοδωρόπουλος, Γ. Μπέτζιος, Α. Ζερβός, «Υβριδικό σύστημα με χρήση αντλησιοταμίευσης για μέγιστη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στη νήσο Σέριφο», Μάιος 2010.
[8]	<ul> <li>Β. Παπαδιά, Κ. Βουρνάς, «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος</li> <li>Συχνότητας και τάσεως, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.</li> </ul>
[9]	European Commission, "Current Situation and Perspectives of Small Hydro in Greece", Workshop Proceedings on "New and Improved Small Hydropower Technologies for the Balkan Peninsula Market", Athens, 1999.
[10]	Κορμπάκης Γ., Καλδέλλης Ι., «Παρούσα Κατάσταση-Προοπτικές Μικρών

Υδροηλεκτρικών στη Χώρα μας», Περιοδικό "Τεχνικά", Τεύχος 171, σελ.57-62, 2001.

- [11] Καλδέλλης Ι.Κ, Βλάχου Δ., «Ενεργειακή Αξιοποίηση Εγχώριων Υδάτινων Πόρων Παρούσα Κατάσταση, Δυνατότητες, Προοπτικές Βιωσιμότητας», 7ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ, Τόμος Α', σελ.109-116, Νοέμβριος-2002, Πάτρα, 2002.
- [12] Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., «Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων
   Μορφών Ενέργειας: Αιολική Ενέργεια-Μικρά Υδροηλεκτρικά», Εκδόσεις
   Αθ. Σταμούλη, Αθήνα, 2005.
- [13] Γεωργακέλλος Δ., «Χρηματοοικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση
   Οικονομικής Απόδοσης Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού», 7ο Εθνικό
   Συνέδριο ΙΗΤ, Τόμος Β', σελ.135-143, Νοέμβριος-2002, Πάτρα, 2002.
- Kaldellis J.K., Vlachou D.S., Korbakis G., "Techno-Economic Evaluation of Small Hydro Power Plants in Greece: A Complete Sensitivity Analysis", Energy Policy Journal, Vol.33/15, pp.1969-1985, 2005.
- [15] P. Kundur, "Power System Stability and Control", New York, McGraw-Hill, 1994.
- [16] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, «Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας», Τόμος 1, 1985.
- [17] IEEE Generating Plant Abnormal Frequency Working Group, "Summary of the Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants", IEEE Transactions on Power Delivery, VOL.3, NO.1, 1998.
- [18] H. Slootweg, E. de Vries, "Fixed Vs Variable", Renewable Energy World, Jan-Feb 2003
- [19] Richard C.Dorf, Robert H.Bishop, «Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου», Εκδόσεις Τζιόλα, 9η Έκδοση.
- [20] Sanks R.L., Tchobanoglous G., Bosserman B.E., Jones G.M. (1998), "Pumping station design", Butterworth Heinemann, 2nd edition.
- [21] Thorley A.R.D., "Fluid transients in pipeline systems", D. & L. George Ltd, 1991
- [22] Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, «Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις», εκδόσεις Αθήνα, 1990.
- [23] J. L. Rodriguez-Amenedo, "Automatic Generation Control of a Wind Farm With Variable Speed Wind Turbines," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 17, No. 2, June 2002.

- [24] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [25] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, "Analysis of electric machinery and Drive Systems, Second Edition", IEEE Press, Willey Inter-science, 2002.
- [26] D.C. Aliprantis, S.A. Papathanassiou, M.P. Papadopoulos, A.G. Kladas, "Modeling and control of a variable-speed wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator", Proceedings of ICEM 2000, Helsinki, August 2000.
- [27] Jacek F. Gieras, Mitchell Wing, "Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications", Second Edition, Revised and Expanded.
- [28] Αντώνιος Ε.Χανιώτης, Διδακτορική Διατριβή: «Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μονίμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία», Ιανουάριος 2007.
- [29] Weera Kaewjinda, Mongkol Konghirun, "Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Resolver Sensor", Ecti Transactions on electrical eng., electronics and communications VOL.5, NO.1 February 2007.
- [30] P. W. France, "Finite element solution for mass oscillations in a surge tank on sudden valve opening", Elsevier Science, 1996.
- [31] A. Petersson, L. Harnefors, T. Thiringer, "Evaluation of Current Control Methods for Wind Turbines Using Doubly-Fed Induction Machines", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 1, January 2005.
- [32] Janaka Ekanayake, 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, December 2004.
- [33] T. M.Jahns, "Motion control with permanent magnet AC machines", IEEE Proceedings, Vol. 82, No 8 pp. 1241-1252, 1994
- [34] Χρήστος Π.Δουρίδας, «Ανάπτυξη συστήματος πληροφοριών για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα στην ελληνική επικράτεια», Αθήνα, Οκτώβριος 2006.
- [35] Ελένη Παυλίδου, Διπλωματική εργασία: «Συμμετοχή ανεμογεννήτριας αιολικού πάρκου υπό αποκοπή στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας», Αθήνα, Μάρτιος 2010.
- [36] Monica Chinchilla, Santiago Arnaltes, Juan Carlos Burgos, "Control of

Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, NO 1, March 2006.

- [37] S.M Muyeen, Rion Takahashi, Toshiaki Murat, Junji Tamura, "A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.25, NO 1, February 2010.
- [38] Stavros A. Papathanassiou, Michael P. Papadopoulos, "Dynamic characteristics of autonomous wind- diesel systems", Elsevier, Renewable Energy 23, 2001.
- [39] K. Protopapas, S. Papathanassiou, "Operation of Hybrid Wind Pumped Storage Systems in Isolated Island Grids". Proc. MedPower 2004, Nov. 2004, Lemessos.
- [40] Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα», Αθήνα 2001.
- [41] Λουκάς Γ. Δαούτης, Διπλωματική εργασία: «Επίδραση των Ανανεώσιμων
   Πηγών Ενέργειας στην Αξιοπιστία Λειτουργίας των Συστημάτων
   Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Αθήνα, 31<sup>η</sup> Μαρτίου 2004.
- [42] N. A. Janssens, G. Lambin, N. Bragard, "Active Power Control Strategies of DFIG Wind Turbines", IEEE Power Tech 2007, Lausanne (Switzerland), 1-5 July 2007
- [43] G. Tsourakis, C. Vournas, "Modeling, Control and Stability of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator" Proceedings of CIGRE Symposium "Power Systems with Dispersed Generation", Athens, Greece, 13-16 April 2005.
- [44] CIGRE, Technical Brochure on "Modeling and Dynamic Behaviour of Wind Generation as it relates to Power System Control and Dynamic Performance", SC C4, WG 601, January 2007.
- [45] R.G. de Almeida, J.A.P. Lopes, "Primary Frequency Control Participation Provided by Doubly Fed Induction Wind Generators", 15 th. PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
- [46] L. Holdsworth, J. B. Ekanayake, N. Jenkins, "Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed Induction Generator-based Wind Turbines", John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [47] J.F. Conroy, R. Watson, "Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation", IEEE Transactions on Power Systems, VOL.23, NO.2, May 2008.

[48] Αντώνη Μ., Διπλωματική εργασία: «Λειτουργία Α/Γ υπό Αυξημένη
 Γωνιακή Ταχύτητα Δρομέα προς συμμετοχή της σε Ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας», Αθήνα, Μάρτιος 2010.