



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

***“Ρύθμιση συχνότητας μέσω Υβριδικού Αντλησιοταμιευτικού  
Σταθμού”***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Γρ. Λακιώτης

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010





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

***“Ρύθμιση συχνότητας μέσω Υβριδικού Αντλησιοταμιευτικού  
Σταθμού “***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Γρ. Λακιώτης

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2 Φεβρουαρίου

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

.....

Βασίλειος Γρ. Λακιώτης

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

Copyright © Βασίλειος Λακιώτης 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## **Περίληψη**

Στα πλαίσια της παγκόσμιας ανάγκης για περισσότερη καθαρή ενέργεια, η βασική επιδίωξη στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα είναι η ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η συνακόλουθη μικρότερη εξάρτηση από τις θερμικές μονάδες Diesel. Υπό το πρίσμα αυτής της λογικής, και καθώς το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην αιολική ενέργεια, την πλέον διαδεδομένη μορφή ΑΠΕ, προωθείται η κατασκευή υβριδικών αντλησιοταμιευτικών σταθμών που αποτελούν συνδυασμό σταθμού παραγωγής από ΑΠΕ και διατάξεων αποθήκευσης. Το σκεπτικό κατασκευής τέτοιων υβριδικών σταθμών είναι η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, η οποία θα απορριπτόταν λόγω τεχνικών και δυναμικών περιορισμών των συμβατικών μονάδων, μέσω άντλησης νερού για την πλήρωση των ταμιευτήρων των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών (ΜΥΗΣ), επιτυγχάνοντας έτσι την αποθήκευσή της. Στη συνέχεια, οι υδροστροβίλοι των ΜΥΗΣ θα μετατρέπουν την υδροδυναμική ενέργεια σε ηλεκτρική με ελεγχόμενο τρόπο. Ιδιαίτερης σημασίας στην συνεργασία παραπάνω από μίας πηγής ενέργειας και στην αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος είναι η εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς των διαφόρων συνιστωσών και η τήρηση των ορίων της συχνότητας λειτουργίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ρύθμιση συχνότητας αυτόνομου συστήματος μέσω υβριδικών αντλησιοταμιευτικών σταθμών. Έτσι, αναπτύσσονται κατάλληλα δυναμικά μοντέλα μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών, ικανά να περιγράψουν την πραγματική τους συμπεριφορά, τα στοιχεία των οποίων αντλούνται από τον ΜΥΗΣ που πρόκειται να κατασκευαστεί στην Ικαρία, ως τμήμα υβριδικού σταθμού. Αναπτύσσονται μη γραμμικά μοντέλα του υδραυλικού μέρους, είτε με την θεώρηση της ασυμπίεστης στήλης ύδατος, είτε πλήρως αναλυτικά, λαμβάνοντας υπόψη τα κυματικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στους αγωγούς. Επίσης, γίνεται λεπτομερής εξέταση των ρυθμιστών στροφών των υδροστροβίλων και του τρόπου με τον οποίο οι διάφοροι παράμετροι επηρεάζουν την ταχύτητα απόκρισης ενός ΜΥΗΣ και την ικανότητά του να ρυθμίζει την συχνότητα ενός απομονωμένου συστήματος.

Εκτός από την ανάπτυξη δυναμικών μη γραμμικών μοντέλων ΜΥΗΣ, αναπτύσσονται δυναμικά μη γραμμικά μοντέλα μηχανής Diesel και ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών και προσομοιώνεται η λειτουργία ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος. Εξετάζεται η δυναμική συνεργασία μεταξύ των πηγών ενέργειας με βάση το κριτήριο της διατήρησης της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος εντός των ορίων των κανονισμών. Γι’ αυτές τις συνθήκες λειτουργίας προτείνονται βέλτιστοι συνδυασμοί πηγών ενέργειας καθώς και συγκεκριμένες λειτουργικές τεχνικές που θα πρέπει να τηρούνται.

## **Λέξεις κλειδιά**

Υβριδικός αντλησιοταμιευτικός σταθμός, ρύθμιση συχνότητας, μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός (ΜΥΗΣ), αυτόνομο νησιωτικό σύστημα, υδραυλική σύζευξη, δυναμικά μοντέλα υδροστροβίλων, μοντέλο ανελαστικής στήλης ύδατος, κυματικό μοντέλο, ρυθμιστής στροφών, μεταβατικός στατισμός, ταχύτητα απόκρισης ΜΥΗΣ.



**Abstract**

The global need for cleaner energy has led the autonomous island systems to set as their primary aim the increasing penetration of the renewable power sources to the electrical energy generation while the dependence on the thermal power plants such as Diesel engines becomes less and less. Defining this aim as the leader and focusing on wind power, one of the most widespread renewable power sources in Greece and in the world, in general, the development of pumped storage hybrid power stations is promoted. Pumped storage hybrid power stations represent the cooperation of a renewable power source station and energy storage devices and are constructed in order to utilize the wind power, which would be discarded otherwise due to conventional units' technical and dynamic restrictions, and, via pumps, to replenish the small hydro-electric power plants' (SHPP) reservoirs with water, succeeding that way its power storage. Therefore, the SHPP's hydro turbines convert the hydrodynamic energy to electrical in a controlled way. One factor, which has a very important role in the cooperation of more than one power sources and in the trustworthy system operation, is the dynamic behavior study of all the components and the maintenance of the operating frequency within limits.

This thesis treats the frequency regulation of an autonomous system via pumped storage hybrid power stations. Thus, appropriate dynamic models of small hydro-electric power plants (SHPP) are developed. These models are able to describe the actual behavior of a SHPP and their parameters' values are taken from the SHPP which is being constructed in Ikaria island as part of a pumped storage hybrid power station. Therefore, hydraulic non-linear models are developed, either considering the water column as inelastic, or they are thoroughly analytical, regarding the travelling wave effects taking place in the penstock. There is, also, a study on the hydro turbine's speed governors and on how the different parameters affect the SHPP's response speed and its ability to control the frequency of an autonomous isolated system.

Apart from developing dynamic non-linear models of SHPP, this thesis works on dynamic non-linear models of Diesel engines and of constant-speed wind turbines as well. Using these studies, the simulation of an autonomous island system is achieved. The dynamic cooperation between the different power sources is studied too, setting as its main basis the maintenance of the system operating frequency within the restrictions' limits. So, for these operating conditions, optimal combinations of power sources are recommended as well as certain functional techniques which should be followed.

**Key words**

Pumped storage hybrid power station, frequency regulation, small hydro-electric power plants (SHPP), autonomous island system, hydraulic coupling, hydro turbine's dynamic models, solid mass model, travelling wave model, speed governor, transient droop, SHPP's response speed.





## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Στ. Παπαθανασίου για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, για την καθοδήγηση και βοήθειά του αλλά και για το σπουδαίο διδακτικό του έργο καθ'όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών το οποίο και αποτέλεσε για εμένα οδηγό στην προσπάθειά μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Στ. Παπαευθυμίου για την πολύτιμη βοήθειά του στην συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την Όλγα για τη συμπαράσταση τους στην προσπάθειά μου και τη διαρκή τους υποστήριξη.

**I. Πίνακας περιεχομένων**

---

1	Εισαγωγή .....	20
1.1	Συστήματα Ηλεκτρικής ενέργειας .....	20
1.1.1	Γενικά .....	20
1.1.2	Αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα.....	20
1.1.3	Ρύθμιση συχνότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας .....	21
1.2	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).....	22
1.3	Υβριδικά συστήματα .....	26
1.4	Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΗΣ) .....	27
1.4.1	Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των ΜΥΗΣ.....	27
1.4.2	Διαφορές μεταξύ ΥΗΣ και ΜΥΗΣ.....	28
1.4.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΜΥΗΣ.....	29
1.4.4	Υδροστρόβιλοι.....	30
1.4.4.1	Γενικά για τους υδροστρόβιλους.....	30
1.4.4.2	Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως.....	31
1.4.4.3	Οι υδροστρόβιλοι δράσεως .....	32
1.5	Αντικείμενο της εργασίας.....	35
2	Μοντελοποίηση υδραυλικού μέρους .....	37
2.1	Η διαμόρφωση ενός ΥΗΕ .....	37
2.2	Γραμμικό μοντέλο στροβίλου θεωρώντας την υδάτινη στήλη ανελαστική.....	39
2.3	Μη γραμμικό μοντέλο στροβίλου θεωρώντας την υδάτινη στήλη ανελαστική ..	44
2.3.1	Γενικά .....	44
2.3.2	Μοντελοποίηση ενός αγωγού/ενός στροβίλου .....	45
2.3.3	Μοντελοποίηση πολλαπλών αγωγών/πολλαπλών στροβίλων τροφοδοτούμενοι από κοινό αγωγό .....	49
2.4	Μη γραμμικό μοντέλο στροβίλου θεωρώντας την υδάτινη στήλη ελαστική .....	53
2.4.1	Γενικά .....	53
2.4.2	Μοντελοποίηση ενός αγωγού/ενός στροβίλου .....	53
2.4.3	Μοντελοποίηση πολλαπλών αγωγών/πολλαπλών στροβίλων τροφοδοτούμενοι από κοινό αγωγό .....	58
2.5	Εκτίμηση των παραμέτρων του υδραυλικού μέρους του ΜΥΗΣ της Ικαρίας ....	59
2.5.1	Γενικά .....	59
2.5.2	Συνιστώσες του υπό μελέτη ΜΥΗΣ της Ικαρίας.....	60
2.5.2.1	Αγωγοί.....	60
2.5.2.2	Γεωμετρία αγωγού .....	60
2.5.2.3	Υδραυλικό ύψος.....	60

2.5.2.4	Παροχή .....	60
2.5.2.5	Χρόνος εκκίνησης ύδατος $T_w$ .....	61
2.5.2.6	Κυματική σταθερά χρόνου $T_e$ - κυματική αντίσταση $Z_0$ .....	61
2.5.2.7	Υδραυλικές απώλειες - συντελεστές απωλειών υδραυλικού ύψους (απωλειών τριβών στους αγωγούς).....	63
2.5.2.8	Απώλειες σε ειδικές διαμορφώσεις και εξαρτήματα σωλήνων.....	64
2.5.2.9	Απόδοση υδροστροβίλου .....	65
2.5.2.10	Κέρδος υδροστροβίλου (turbine gain) .....	66
2.5.2.11	Κανονικοποίηση.....	66
3	Ρυθμιστές στροφών Υδροστροβίλων .....	67
3.1	Γενικά .....	67
3.1.1	Ορισμός συστήματος ελέγχου -ρυθμιστής στροφών .....	68
3.1.2	Δομή.....	68
3.1.2.1	Γενικά.....	68
3.1.2.2	Δομή ρυθμιστή στροφών Υδροστροβίλου Pelton.....	70
3.1.3	Χρήση ρυθμιστών σε ΜΥΗΣ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου	70
3.2	Βασικά χαρακτηριστικά της ρύθμισης φορτίου-συχνότητας.....	71
3.2.1	Ευστάθεια .....	71
3.2.2	Πρωτεύουσα-δευτερεύουσα ρύθμιση .....	72
3.2.3	Στατισμός.....	72
3.2.4	Παράλληλη λειτουργία γεννητριών.....	73
3.3	Σχεδίαση ρυθμιστών στροφών.....	74
3.3.1	Ισόχρονη ρύθμιση.....	74
3.3.2	Ρυθμιστές με μόνιμο στατισμό ταχύτητας και ρύθμιση ταχύτητας .....	76
3.3.2.1	Γενικά.....	76
3.3.2.2	Ρυθμιστές με στατισμό.....	76
3.3.2.3	Ρύθμιση ταχύτητας (στατισμός ισχύος) .....	78
3.3.3	Μεταβατικός στατισμός.....	79
3.4	Διάφοροι τύποι ρυθμιστών στροφών.....	80
3.4.1	Ο μηχανικο-υδραυλικός ρυθμιστής στροφών.....	80
3.4.2	Ο PID.....	82
3.4.3	Άλλοι τύποι.....	84
3.4.3.1	Ο ηλεκτρο-υδραυλικός Ρυθμιστής.....	84
3.4.3.2	Ο Ρυθμιστής διπλού-διαφορικού ελέγχου (Double Derivative Controllers) .....	84
3.4.3.3	Ρυθμιστής με πρόσθια τροφοδότηση (Feedforward Controller).....	85
3.4.3.4	Ρυθμιστής με λογική κατάστασης χώρου (State Space Controller) .....	86
3.4.3.5	Ρυθμιστής Φορτίου (Load Governor) .....	86

3.5	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών υδροστροβίλων Pelton .....	87
3.5.1	Η περίπτωση ελέγχου με εκτροπέα (deflector) με λειτουργία εξοικονόμησης νερού (Water-saving control mode).....	87
3.5.2	Η περίπτωση ελέγχου με εκτροπέα με λειτουργία σπατάλης νερού (Water-easting control mode).....	88
3.5.3	Η περίπτωση ελέγχου με χρησιμοποίηση παραπάνω από μίας βελόνης (Needle sequencing) .....	89
3.6	Ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση .....	89
3.6.1	Μοντέλο ρυθμιστή.....	89
3.6.2	Εκτίμηση των παραμέτρων του ρυθμιστή στροφών (governor tuning).....	90
3.6.2.1	Γενικά.....	90
3.6.2.2	Μέθοδοι υπολογισμού παραμέτρων.....	90
4	Μοντελοποίηση ηλεκτρικού μέρους.....	93
4.1	Απλοποιημένο αδρανειακό μοντέλο .....	93
4.1.1	Εξίσωση ταλάντωσης του ζεύγους στροβίλου - γεννήτριας.....	93
4.1.2	Μηχανικός χρόνος εκκίνησης $T_M$ .....	94
4.1.3	Απόκριση του φορτίου σε μεταβολές της συχνότητας .....	94
4.2	Σύγχρονη γεννήτρια.....	95
4.2.1	Γενικά .....	95
4.2.1.1	Περιγραφή σύγχρονων γεννητριών .....	95
4.2.1.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας .....	95
4.2.1.3	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής.....	96
4.3	Γραμμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας.....	96
4.3.1	Γραμμικό μοντέλο μίας γεννήτριας .....	96
4.3.2	Γραμμικό μοντέλο πολλών γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα .....	98
4.4	Μη γραμμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας.....	99
4.4.1	Σύγχρονη γεννήτρια.....	99
4.4.2	Σύστημα διέγερσης .....	103
4.4.2.1	Περιγραφή συστήματος διέγερσης.....	103
4.4.2.2	Μοντελοποίηση συστήματος διέγερσης.....	103
4.5	Ασύγχρονη Γεννήτρια.....	104
4.5.1	Γενικά .....	104
4.5.2	Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας.....	105
4.6	Μοντελοποίηση φορτίου .....	106
5	Ενσωμάτωση μοντέλων – βρόχος ελέγχου ταχύτητας.....	107
5.1	Γενικά .....	107
5.2	Βρόχος ελέγχου ταχύτητας .....	107
5.2.1	Γενικά .....	107
5.2.2	Γραμμικό μοντέλο ελέγχου στροφών .....	107

5.2.3	Μη γραμμικό μοντέλο ελέγχου στροφών .....	108
5.2.3.1	Γενικά.....	108
5.2.3.2	Με την θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού.....	109
5.2.3.3	Αναλυτικό μοντέλο ελέγχου στροφών .....	112
5.3	Πως διάφοροι παράμετροι ενός ΥΗΕ επηρεάζουν την απόκριση ταχύτητας του υδροστροβίλου.....	114
5.4	Συνοπτική παρουσίαση αποκρίσεων συχνότητας, σε μεταβολές του φορτίου, Υδροηλεκτρικών Σταθμών και ΜΥΗΣ ειδικότερα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία.....	118
5.4.1	Γενικά .....	118
5.4.2	ΜΥΗΣ.....	119
5.4.2.1	Περίπτωση 1.....	119
5.4.2.2	Περίπτωση 2.....	121
5.4.2.3	Περίπτωση 3.....	122
5.4.3	ΥΗΣ μεγάλης ισχύος .....	124
5.4.3.1	Περίπτωση 1.....	124
6	Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ΜΥΗΣ.....	127
6.1	Γενικά .....	127
6.2	Επιβεβαίωση μοντέλων με χρήση του γραμμικού.....	128
6.3	Δυναμική συμπεριφορά υδροστροβίλου.....	129
6.4	Σύγκριση μοντέλων και διερεύνηση τιμών για τις παραμέτρους των ρυθμιστών στροφών .....	131
6.4.1	Γενικά .....	131
6.4.2	Λειτουργία ενός υδροστροβίλου.....	132
6.4.3	Παράλληλη λειτουργία δύο υδροστροβίλων .....	136
6.4.3.1	Γενικά.....	136
6.4.3.2	Εξέταση της σύζευξης μεταξύ των δύο υδροστροβίλων.....	137
6.4.3.3	Αποκρίσεις των υδροστροβίλων σε μεταβολές του φορτίου .....	138
6.5	Τρόποι βελτίωσης της ταχύτητας απόκρισης του υπό μελέτη ΜΥΗΣ .....	144
6.5.1	Γενικά .....	144
6.5.2	Η χρονική καθυστέρηση του μηχανισμού κίνησης της βελόνης .....	144
6.5.3	Η σταθερά αδράνειας $H$ .....	144
6.5.4	Μείωση του χρόνου εκκίνησης ύδατος $T_w$ και του κυματικού χρόνου $T_e$ .....	146
7	Μηχανή Diesel.....	149
7.1	Γενικά .....	149
7.2	Λειτουργία μηχανής.....	149
7.3	Μοντελοποίηση μηχανής Diesel.....	150
8	Ανεμογεννήτρια.....	152
8.1	Γενικά .....	152
8.2	Ταχύτητα ανέμου.....	153

8.2.1	Χαρακτηριστικά του ανέμου .....	153
8.2.2	Χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.....	154
8.3	Μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους Α/Γ.....	155
9	Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίων λειτουργίας αυτόνομου νησιωτικού συστήματος.....	157
9.1	Γενικά .....	157
9.2	Υδροστρόβιλοι παράλληλα με ανεμογεννήτριες .....	158
9.2.1	Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών .....	158
9.2.2	Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών .....	162
9.3	Diesel με ανεμογεννήτριες.....	164
9.3.1	Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών .....	164
9.3.2	Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών .....	167
9.4	Diesel, υδροστρόβιλοι και ανεμογεννήτριες μαζί.....	170
9.4.1	Γενικά .....	170
9.4.2	Σενάριο 1 <sup>ο</sup> .....	171
9.4.2.1	Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών .....	171
9.4.2.2	Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών .....	176
9.4.3	Σενάριο 2 <sup>ο</sup> .....	178
9.4.3.1	Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών .....	178
9.4.3.2	Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών .....	183
9.4.4	Σενάριο 3 <sup>ο</sup> .....	185
9.4.4.1	Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών .....	185
9.4.4.2	Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών .....	188
10	Συμπεράσματα .....	189
10.1	Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας.....	189
10.2	Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.....	191

## II. Πίνακες

---

Πίνακας 1 : Συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο [35].....	22
Πίνακας 2 : Εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [35].....	23
Πίνακας 3 : Ανάλυση ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (MW) το 2006 [7].....	24
Πίνακας 4 : Μέτρα επίτευξης στόχων νέας ευρωπαϊκής πολιτικής στον τομέα παραγωγής ενέργειας [7].....	25
Πίνακας 5 : Πίνακας εγκατεστημένης ισχύος ΜΥΗΣ στον Ελλαδικό χώρο [37].....	28
Πίνακας 6 : Μεγέθη αγωγών .....	60
Πίνακας 7 : Πίνακας υπολογισμού των $T_w$ σε sec κάθε τμήματος αγωγού. ....	61
Πίνακας 8 : Τιμές σταθερών και μεταβλητών για τα διάφορα τμήματα των αγωγών και ταχύτητα κύματος.....	62
Πίνακας 9 : Κυματική σταθερά.....	62
Πίνακας 10 : Καμπύλη απόδοσης του υδροστροβίλου .....	65
Πίνακας 11: Βασικές παράμετροι ανά σενάριο.....	119
Πίνακας 12 : Στοιχεία του μοντέλου .....	121
Πίνακας 13 : Αποτελέσματα των υπολογισμών, οι βαθμολογίες ανάλογα με την ταχύτητα απόκρισης καθώς και τα χαρακτηριστικά των μικρών ΥΗΕ που εξετάζονται ( $\alpha$ ) [30].....	123
Πίνακας 14 : Αποτελέσματα των υπολογισμών, οι βαθμολογίες ανάλογα με την ταχύτητα απόκρισης καθώς και τα χαρακτηριστικά των μικρών ΥΗΕ που εξετάζονται ( $\beta$ ) [30].....	123
Πίνακας 15: Σενάριο 1 .....	171
Πίνακας 16: Σενάριο 2 .....	178
Πίνακας 17 : Σενάριο 3 .....	185

### III. Σχήματα

Σχήμα 1 : Εγκατεστημένη ισχύς σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [37] .....	24
Σχήμα 2 : Νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο είναι εγκατεστημένος υβριδικός σταθμός .....	27
Σχήμα 3 : Υδροστρόβιλος τύπου Francis.....	31
Σχήμα 4 : Υδροστρόβιλος τύπου Kaplan .....	32
Σχήμα 5: Υδροστρόβιλος τύπου Pelton.....	32
Σχήμα 6: Διαμόρφωση ΥΗΕ με υδροστρόβιλο τύπου Pelton .....	33
Σχήμα 7 : Διάταξη υδροστρόβιλου Pelton οριζόντιου άξονα με δύο δέσμες .....	34
Σχήμα 8 : Διάταξη υδροστρόβιλου Pelton κατακόρυφου άξονα με περισσότερες δέσμες.....	34
Σχήμα 9 : Αξιοποίηση της υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου α) αντιδράσεως και β) δράσεως [5] .....	37
Σχήμα 10 : Μεταβολή της ισχύος μετά από βηματική μεταβολή της θέσης των υδατοθυρίδων [4]... ..	43
Σχήμα 11 : Βηματική μεταβολή -0,1 α.μ. των υδατοθυρίδων [4].....	44
Σχήμα 12 : Μεταβολή ράμπας -0,1 α.μ. των υδατοθυρίδων [4] .....	44
Σχήμα 13 : Χαρακτηριστική του ανοίγματος των υδατοθυρίδων [15] .....	47
Σχήμα 14 : Μοντέλο ανελαστικής στήλης ύδατος .....	48
Σχήμα 15 : Τροφοδότηση τριών υδροστρόβιλων από κοινό αγωγό μέσω τριών [9].....	49
Σχήμα 16 : Κοινός αγωγός που διακλαδίζεται σε τρεις μεμονωμένους [11].....	51
Σχήμα 17 : Μοντέλο δύο αγωγών / δύο στρόβιλων με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού .....	52
Σχήμα 18 : Αναπαράσταση του οδεύοντος κύματος στον αγωγό (Πηγή : ESHA) .....	54
Σχήμα 19 : Απεικόνιση κύματος πίεσεως στις υδατοθυρίδες σε απότομο “κλείσιμο” τους [15].....	56
Σχήμα 20 : Κυματικό μοντέλο ενός αγωγού ενός στρόβιλου.....	57
Σχήμα 21 : Κυματικό μοντέλο δύο αγωγών / δύο στρόβιλων.....	59
Σχήμα 22 : Γενική μορφή ενός ρυθμιστή [14].....	68
Σχήμα 23: Σχηματικό διάγραμμα ρυθμιστού υδροστρόβιλου [5] .....	69
Σχήμα 24 : Σχηματική παρουσίαση ελέγχου παροχής σε υδροστρόβιλο Pelton .....	70
Σχήμα 25 : Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας [3] .....	72
Σχήμα 26 : Κατανομή φορτίου δύο γεννητριών εφοδιασμένες με διαφορετικό μόνιμο στατισμό [4] 74	
Σχήμα 27 : Ισόχρονος ρυθμιστής [4].....	75
Σχήμα 28 : Απόκριση μίας μονάδας με ισόχρονο ρυθμιστή [4].....	75
Σχήμα 29 : Ρυθμιστής με ανάδραση μόνιμου στατισμού [4].....	76
Σχήμα 30 : Μπλοκ διάγραμμα με ανάδραση μόνιμου στατισμού [4] .....	77
Σχήμα 31 : Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα [4].....	77
Σχήμα 32 : Επίδραση διαφορετικών τιμών αναφοράς στον ρυθμιστή μίας μονάδας σε ονομαστική συχνότητα και με μόνιμο στατισμό 5% [14]. .....	77
Σχήμα 33 : Απόκριση μονάδας με ρυθμιστή με μόνιμο στατισμό [4].....	78
Σχήμα 34 : Μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού ρυθμιστή με λογική ρύθμισης ταχύτητας [14].....	79
Σχήμα 35 : Ρυθμιστής με πρόσθετη βαθμίδα μεταβατικού στατισμού [4] .....	79
Σχήμα 36 : Πλήρης μηχανικο-υδραυλικός ρυθμιστής [4] .....	81
Σχήμα 37 : PID ρυθμιστής [14].....	83
Σχήμα 38 : Ρυθμιστής διπλού-διαφορικού ελέγχου [14].....	85
Σχήμα 39 : Ρυθμιστής με πρόσθια τροφοδότηση [14].....	86
Σχήμα 40 : Ρυθμιστής με λογική κατάστασης χώρου [14].....	86
Σχήμα 41 : Ρυθμιστής Φορτίου [14] .....	87
Σχήμα 42 : Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή με εκτροπέα και λειτουργία εξοικονόμησης νερού [14] .....	88
Σχήμα 43 : Ρυθμιστής στρόφων υδροστρόβιλων που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.....	90
Σχήμα 44 : Μπλοκ διάγραμμα του αδρανειακού μοντέλου [4].....	93
Σχήμα 45: Μπλοκ διάγραμμα που περιλαμβάνει την επίδραση του φαινομένου της απόσβεσης του φορτίου [4] .....	94
Σχήμα 46 : Σχηματική διάταξη τριφασικής σύγχρονης μηχανής [22] .....	95



Σχήμα 47: Καμπύλη γωνίας – ισχύος α) Κυλινδρικός δρομέας β) Γεννήτρια με έκτυπους πόλους [23]	97
Σχήμα 48 : Γραμμικό μοντέλο πολλών γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα.....	99
Σχήμα 49: Αξονας q .....	100
Σχήμα 50: Αξονας d .....	100
Σχήμα 51: Μοντέλο μηχανικού μέρους .....	102
Σχήμα 52: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος διέγερσης του SIMULINK/MATLAB.....	103
Σχήμα 53: Ασύγχρονη μηχανή: α)ισοδύναμο κύκλωμα β)χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας μίας επαγωγικής μηχανής .....	104
Σχήμα 54: Αξονας q .....	105
Σχήμα 55: Αξονας d .....	105
Σχήμα 56: Γραμμικό μοντέλο θρόγχου ελέγχου ταχύτητας.....	107
Σχήμα 57: Μοντέλο θρόγχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση ανελαστικής στήλης ύδατος....	109
Σχήμα 58 : τελικό μοντέλο θρόγχου ελέγχου ταχύτητας με το μοντέλο ανελαστικής στήλης ύδατος για την περίπτωση της παράλληλης λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων .....	111
Σχήμα 59 : Μοντέλο θρόγχου ελέγχου ταχύτητας με το κυματικό μοντέλο για το υδραυλικό μέρος .	112
Σχήμα 60: Τελικό μοντέλο θρόγχου ελέγχου ταχύτητας με το κυματικό μοντέλο για το υδραυλικό μέρος, για την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων.....	113
Σχήμα 61 : Βασικό σενάριο: απόκριση συχνότητας σε μεταβολή βήματος 5% του φορτίου [14].....	114
Σχήμα 62 : Απόκριση συχνότητας μεταβάλλοντας την σταθερά αδράνειας H [14] .....	115
Σχήμα 63 : Απόκριση συχνότητας της μονάδας με διαφορετικά $T_w$ [14].....	116
Σχήμα 64 : Απόκριση της συχνότητας με διαφορετικό μεταβατικό στατισμό, όπου bt συμβολίζεται ο μεταβατικός στατισμός [14] .....	117
Σχήμα 65: Απόκριση της συχνότητας με διαφορετικούς χρόνους επαναφοράς [14].....	117
Σχήμα 66: Απόκριση συχνότητας με διαφορετικό μόνιμο στατισμό [14].....	118
Σχήμα 67 : Γραφική παράσταση $\Delta F(\text{Time})$ για $\Delta PL=0,0125$ α.μ. [28].....	119
Σχήμα 68 : Γραφική παράσταση $\Delta F(\text{Time})$ για $\Delta PL=0,0175$ α.μ. [28].....	120
Σχήμα 69 : Γραφική παράσταση $\Delta F(\text{Time})$ για $\Delta PL=0,0175$ α.μ. για τις τρεις περιπτώσεις $T_w$ [28]...	120
Σχήμα 70 : Γραφική παράσταση $\Delta F(\text{Time})$ για $\Delta PL=0,0125, 0,0175$ ή $0,02$ α.μ [28].....	121
Σχήμα 71 : $\Delta F(\text{Hz}) / \text{χρόνος}$ [29].....	122
Σχήμα 72 : $\Delta P(\alpha.\mu.) / \text{χρόνος}$ [29].....	122
Σχήμα 73 : Απόκριση ισχύος για λειτουργία ενός υδροστροβίλου [15].....	125
Σχήμα 74 : Μεταβολή της συχνότητας για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας [15].....	125
Σχήμα 75 : Η μεταβολή του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση της λειτουργίας ενός υδροστροβίλου .....	128
Σχήμα 76 : Απόκρισεις του γραμμικού μοντέλου και του κυματικού.....	129
Σχήμα 77 : Αποκρίσεις μηχανικής ισχύος του γραμμικού μοντέλου και του μη γραμμικού με τη θεώρηση της στέρεας υδάτινης στήλης .....	129
Σχήμα 78 : Απόκριση πίεσης στον υδροστρόβιλο για τις τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων .....	130
Σχήμα 79 : Απόκριση παροχής στον υδροστρόβιλο για τις τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων ...	130
Σχήμα 80 : Απόκριση μηχανικής ισχύος υδροστροβίλου για τις τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων .....	131
Σχήμα 81 : Αποκρίσεις μηχανικής ισχύος για τα μη γραμμικά μοντέλα με παραμέτρους: $\delta=0,833$ και $TR=11,76$ .....	132
Σχήμα 82 : Αποκρίσεις της μηχανικής ισχύος για $\delta=0,32821$ και $T_R=4,63353$ sec.....	133
Σχήμα 83 : Απόκριση της συχνότητας για $\delta=0,32821$ και $TR=4,63353$ sec.....	133
Σχήμα 84 : Απόκριση μηχανικής ισχύος για τα δύο μοντέλα $\delta=0,58$ και $T_R=8,2$ sec.....	134
Σχήμα 85 : Απόκριση συχνότητας για τα δύο μοντέλα με $\delta=0,58$ και $T_R=8,2$ sec .....	135
Σχήμα 86 : Απόκριση πίεσης στο στρόβιλο για τα δύο μοντέλα.....	135
Σχήμα 87 : Απόκριση παροχής για τα δύο μοντέλα .....	136
Σχήμα 88 : Απόκριση παροχής στο σενάριο μελέτης της υδραυλικής σύζευξης.....	137
Σχήμα 89 : Απόκριση πίεσης στους υδροστροβίλους στο σενάριο μελέτης της υδραυλικής σύζευξης .....	138
Σχήμα 90 : Απόκριση ισχύος υδροστροβίλων στο σενάριο μελέτης της υδραυλικής σύζευξης.....	138
Σχήμα 91 : Η μεταβολή του φορτίου PL.....	139
Σχήμα 92 : Απόκριση μηχανικής ισχύος ενός υδροστροβίλου για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα $\delta=0,641$ και $T_R=9,0458$ sec.....	139

Σχήμα 93 : Απόκριση συχνότητας για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα για $\delta=0,641$ και $T_R=9,0458$ sec	140
Σχήμα 94 : Απόκριση μηχανικής ισχύος ενός υδροστροβίλου για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα $\delta=0,688$ και $TR=9,7$ sec	140
Σχήμα 95 : Απόκριση συχνότητας ενός υδροστροβίλου για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα $\delta=0,688$ και $TR=9,7$ sec	141
Σχήμα 96 : Μεταβολή του φορτίου από 1,6 α.μ. σε 1 α.μ.	142
Σχήμα 97 : Απόκριση ισχύος σε μείωση του φορτίου	142
Σχήμα 98 : Απόκριση συχνότητας για μείωση του φορτίου	143
Σχήμα 99 : Απόκριση πίεσης για μείωση του φορτίου	143
Σχήμα 100 : Απόκριση παροχής για μείωση του φορτίου	143
Σχήμα 101 : Απόκριση της μηχανικής ισχύος για $H=4$ και $H=3$	145
Σχήμα 102 : Απόκριση της συχνότητας για $H=4$ και $H=3$	145
Σχήμα 103 : Απόκριση μηχανικής ισχύος για το σενάριο με πύργο ανάπαλσης και με διπλάσιες διατομής κοινό αγωγό	147
Σχήμα 104 : Απόκριση συχνότητας για το σενάριο με πύργο ανάπαλσης και με διπλάσιες διατομής κοινό αγωγό	147
Σχήμα 105 : Μοντέλο μηχανής Diesel, που περιλαμβάνει έναν PI ρυθμιστή στροφών, μία χρονική καθυστέρηση του σεβομηχανισμού και μία χρονική καθυστέρηση της μηχανής	150
Σχήμα 106 : Μοντέλο εξωτερικού θρόγχου ελέγχου της μηχανής Diesel	151
Σχήμα 107 : Επικατέστερες διαμορφώσεις ανεμογεννητριών	153
Σχήμα 108 : Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου $V_{w1}$	154
Σχήμα 109 : Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου $V_{w2}$	155
Σχήμα 110 : Το μοντέλο του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας	155
Σχήμα 111 : Οι χαρακτηριστικές της ανεμογεννήτριας	156
Σχήμα 112 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Φορτίο συστήματος, 3 MW	158
Σχήμα 113 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με $V_{w1}$	159
Σχήμα 114 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς του ενός Υδροστροβίλου, με $V_{w1}$	159
Σχήμα 115 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Μηχανική ισχύς του ενός υδροστροβίλου, με $V_{w1}$	160
Σχήμα 116 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με $V_{w1}$	160
Σχήμα 117 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με $V_{w2}$	161
Σχήμα 118 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς του ενός υδροστροβίλου, με $V_{w2}$	161
Σχήμα 119 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- μηχανική ισχύς του ενός υδροστροβίλου, με $V_{w2}$	162
Σχήμα 120 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία ΜΥΗΣ - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Μηχανική ισχύς του ενός υδροστροβίλου	163
Σχήμα 121 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με $V_{w1}$	164
Σχήμα 122: Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς Diesel, με $V_{w1}$	165
Σχήμα 123 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Μηχανική ισχύς Diesel, με $V_{w1}$	165
Σχήμα 124 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με $V_{w1}$	165
Σχήμα 125 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με $V_{w2}$	166
Σχήμα 126 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς Diesel, με $V_{w2}$	166
Σχήμα 127 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Μηχανική ισχύς Diesel, με $V_{w2}$	167
Σχήμα 128 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με $V_{w2}$	167
Σχήμα 129 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,6 MW του φορτίου – Μηχανική ισχύς του Diesel	168
Σχήμα 130 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,6 MW του φορτίου – Συχνότητα συστήματος	168
Σχήμα 131 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Μηχανική ισχύς του Diesel	169

Σχήμα 132 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Συχνότητα συστήματος.....	169
Σχήμα 133 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Φορτίο $P_L=2,5$ MW .....	172
Σχήμα 134 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	172
Σχήμα 135 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Ηλεκτρική ισχύς (Phydro) για τον έναν υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	172
Σχήμα 136 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	173
Σχήμα 137 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	173
Σχήμα 138 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	174
Σχήμα 139 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Ηλεκτρική ισχύς (Pehydro) για τον ΜΥΗΣ (Pediesel) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	174
Σχήμα 140 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	175
Σχήμα 141 : Προσομοίωση - Σενάριο 1 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	175
Σχήμα 142 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,2 MW.....	176
Σχήμα 143 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Συχνότητα του συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,2 MW .....	176
Σχήμα 144 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1 MW.....	177
Σχήμα 145 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Συχνότητα του συστήματος σε βηματική μεταβολή 1 MW.....	178
Σχήμα 146 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	179
Σχήμα 147 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς (Pehydro) για τον ΜΥΗΣ (Pediesel) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	179
Σχήμα 148 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	180
Σχήμα 149 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου $V_{W1}$ .....	180
Σχήμα 150 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	181
Σχήμα 151 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς (Pehydro) για τον ΜΥΗΣ (Pediesel) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	181
Σχήμα 152 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	182
Σχήμα 153 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	182
Σχήμα 154 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,4 MW .....	183
Σχήμα 155 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 - Συχνότητα συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,4 MW ...	183
Σχήμα 156 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,2 MW .....	184
Σχήμα 157 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 - Συχνότητα συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,2 MW ...	184
Σχήμα 158 : Προσομοίωση - Σενάριο 3- Φορτίο $P_L=4,5$ MW.....	185
Σχήμα 159 : Προσομοίωση - Σενάριο 3- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	186
Σχήμα 160 : Προσομοίωση - Σενάριο 3- Ηλεκτρική ισχύς (Pehydro) για τον ΜΥΗΣ (Pediesel) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	186
Σχήμα 161 : Προσομοίωση – Σενάριο 3 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	187
Σχήμα 162 : Προσομοίωση - Σενάριο 3 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου $V_{W2}$ .....	187
Σχήμα 163 : Προσομοίωση – Σενάριο 3 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,4 MW .....	188
Σχήμα 164 : Προσομοίωση - Σενάριο 3 - Συχνότητα συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,4 MW ...	188

## **1 Εισαγωγή**

---

### **1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας**

---

#### **1.1.1 Γενικά**

---

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις αποδοκτής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μία συνεχή ροή κι επειδή δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της.[1]

Ένα ΣΗΕ από άποψη έκτασης, μπορεί να είναι εθνικό, περιφερειακό ή ιδιωτικό και αναλόγως αν υπάρχει δυνατότητα διασύνδεσής του σε μεγαλύτερο δίκτυο, το σύστημα αυτό μπορεί να είναι είτε διασυνδεδεμένο είτε αυτόνομο. Ο λόγος που επιδιώκεται όπου είναι εφικτό από τεχνοοικονομικής απόψεως να υπάρχει διασύνδεση είναι γιατί αυτό εξασφαλίζει σταθερότητα στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου.

#### **1.1.2 Αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα**

---

Σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η διασύνδεση, το δίκτυο καλείται να λειτουργεί αυτόνομα. Τέτοια συστήματα συναντώνται ευρέως σε ελληνικά νησιά, όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης στο Εθνικό δίκτυο. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα λειτουργούν 38 αυτόνομα ενεργειακά συστήματα που καλύπτουν τις ανάγκες 50 νησιών. Οι κύριες διαφορές των αυτόνομων ενεργειακά συστημάτων σε σχέση με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ενέργειας είναι οι εξής:

- Τα αυτόνομα συστήματα είναι πιο επιρρεπή σε απότομες μεταβολές του φορτίου και οι επιμέρους διατάξεις του πρέπει να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά σε αυτές.
- Δεν υπάρχει η δυνατότητα κατανομής του φορτίου που συναντάται στο διασυνδεδεμένο σύστημα, και έτσι, κάθε σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση αυτόνομα να αντιμετωπίζει τις όποιες δυσκολίες κάλυψης αναγκών.

- Ο συντελεστής φορτίου είναι συνήθως, σχετικά με το μέγεθος του συστήματος, αρκετά χαμηλός. Αυτό οφείλεται στην υψηλή ζήτηση που παρουσιάζεται κάποιες μέρες τον χρόνο και χαμηλής ζήτησης τον υπόλοιπο. Ο χαμηλός συντελεστής φορτίου προϋποθέτει και αυξημένο ενεργειακό απόθεμα, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε υψηλό επενδυτικό κόστος [22].
- Εξαιτίας του συγκεντρωτικού χαρακτήρα της παραγωγής, μειώνεται η αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

### 1.1.3 Ρύθμιση συχνότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συνήθως (εκτός από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν μηχανές επαγωγής ή συνεχούς ρεύματος) από σύγχρονες γεννήτριες που μετατρέπουν σε ηλεκτρική τη μηχανική ισχύ, την οποία απορροφούν από την κινητήρια μηχανή. Για την ομαλή λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητο όλες οι διασυνδεδεμένες γεννήτριες να βρίσκονται σε συγχρονισμό, να περιστρέφονται δηλαδή οι δρομείς τους με την ίδια γωνιακή ταχύτητα σε ηλεκτρικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο.

Κάθε σύγχρονη γεννήτρια διαθέτει μία διάταξη ελέγχου των στροφών της, ώστε α παραμένει πάντα πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, στην ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα του συστήματος (50 Hz). Η συχνότητα των ρευμάτων και τάσεων που παράγει μία σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της με τη σχέση:

$$f = \frac{n}{60} \frac{P}{2} \quad (1.1)$$

όπου  $P$  ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας  
 $n$  η ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ)

Σε ένα αυτόνομο σύστημα που τροφοδοτείται από μία και μόνο γεννήτρια η συχνότητα εξαρτάται αποκλειστικά από την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και άρα από το ρυθμιστή στροφών της. Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει περισσότερες από μία γεννήτριες οι ρόλοι των ρυθμιστών στροφών διαφοροποιούνται: κάποιες γεννήτριες αναλαμβάνουν να διατηρούν σταθερή τη συχνότητα, η οποία είναι κοινή για ολόκληρο το σύστημα. Αυτές είναι οι ρυθμιζουσες μονάδες. Στις υπόλοιπες ο ρυθμιστής χρησιμοποιείται κυρίως για να κρατά σταθερή την παραγωγή της γεννήτριας στην επιθυμητή τιμή, η οποία έχει προκύψει σύμφωνα με κάποια λογική κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος. Συνεπώς, ο έλεγχος της συχνότητας και ο έλεγχος του φορτίου κάθε γεννήτριας αποτελούν ένα ενιαίο πρόβλημα ελέγχου.[3]

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία τάση για ολοένα και περισσότερη και αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των πηγών ενέργειας και ειδικά των ανανεώσιμων πηγών (ΑΠΕ). Αυτό οφείλεται όχι μόνο γιατί το καύσιμο των συμβατικών σταθμών αντιμετωπίζει τον ορατό κίνδυνο εξάντλησης και ελαττώνεται η αξιοπιστία εφοδιασμού καυσίμων των κρατών αλλά, κυρίως, γιατί οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις είναι σοβαρές λόγω των επικίνδυνων καταλοίπων και αποβλήτων τους (π.χ. φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω CO<sub>2</sub>, τρύπα του όζοντος κ.α.). Έτσι, οι τεχνολογικά ανεπτυγμένες, κυρίως, χώρες στρέφονται στην ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η αξιοποίηση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος παραγωγής, ώστε αυτές να μπορούν να ανταγωνίζονται τις συμβατικές πηγές. Στην Ελλάδα, η συνεισφορά των ΑΠΕ στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο είναι της τάξης του 5%, σε επίπεδο συνολικής διάθεσης πρωτογενούς ενέργειας στη χώρα και της τάξης του 15%, σε επίπεδο εγχώριας παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας (πίνακας 1) [35] [2].

Πίνακας 4: Συμμετοχή των ΑΠΕ στο Ενεργειακό Ισοζύγιο																		
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Πρωτογενής Παραγωγή από ΑΠΕ (κτοε)	1.127	1.237	1.180	1.209	1.233	1.314	1.389	1.361	1.343	1.443	1.439	1.373	1.451	1.592	1.606	1.684	1.814	1.744
Παραγωγή από ΑΠΕ χωρίς μεγάλα Υ/Η, αντλητικά, και Βιομάζα στον Οικιακό Τομέα (κτοε)	256	268	274	287	287	292	309	317	320	338	397	448	463	452	482	527	603	724
Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση (κτοε)	22.338	22.512	23.174	22.746	23.709	24.228	25.476	25.688	26.987	26.867	28.217	29.061	29.856	30.307	30.773	31.352	31.509	33.488
Συμμετοχή των ΑΠΕ στην Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση (κτοε)	5,0%	5,5%	5,1%	5,3%	5,2%	5,4%	5,5%	5,3%	5,0%	5,4%	5,1%	4,7%	4,9%	5,3%	5,2%	5,2%	5,8%	5,2%
Σύνολο ΑΠΕ, εκτός μεγάλων Υ/Η, αντλητικών και Βιομάζας στον Οικιακό Τομέα (κτοε)	1,1%	1,2%	1,2%	1,3%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,3%	1,4%	1,5%	1,6%	1,49%	1,57%	1,68%	1,91%	2,16%

Πίνακας 1 : Συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο [35]

Στον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) περιλαμβάνονται οι παρακάτω:

- ❖ Η αιολική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.
- ❖ Η ηλιακή ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω των φωτοβολταϊκών γεννητριών μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και μέσω

των ηλιακών συλλεκτών με τη συγκέντρωση υψηλών θερμοκρασιών και εν τέλει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

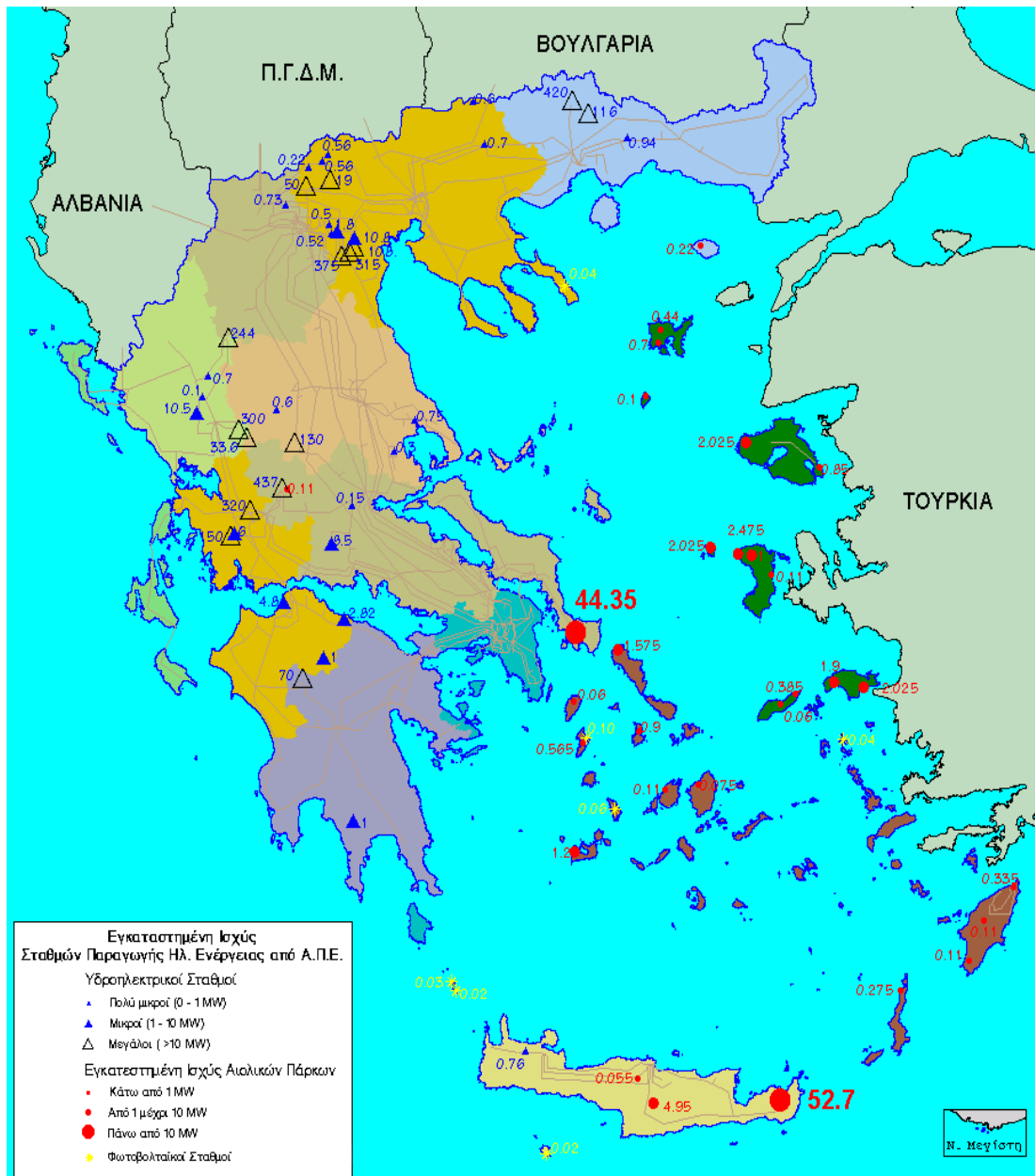
- ❖ Τα μικρά υδροηλεκτρικά, τα οποία εκμεταλλεύονται τα υδάτινα ρεύματα και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.
- ❖ Η γεωθερμική ενέργεια η οποία αναφέρεται στην θερμότητα του εδάφους της γης και αξιοποιείται με κατάλληλες διατάξεις, όταν υπάρχουν συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες.
- ❖ Η βιομάζα, η οποία αναφέρεται σε γεωργικά αλλά και δασικά υπολείμματα, από τα οποία μπορεί με ειδική κατεργασία να εξαχθούν καύσιμα.
- ❖ Οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες με τη χρήση ηλεκτρολυτών και διάφορων διατάξεων μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική.
- ❖ Η ενέργεια των θαλασσιών κυμάτων, της οποίας η αξιοποίηση βρίσκεται, ακόμη, σε φάση έρευνας ώστε να μετατρέπεται η κινητική τους ενέργεια σε ηλεκτρική [2].

Η εγκατεστημένη ισχύς της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στον Ελλαδικό χώρο φαίνεται στον παρακάτω πίνακα και στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 1: Ισχύς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (MW), Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών και Βιοκαύσιμα																		
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Σύνολο	2.411	2.515	2.541	2.552	2.552	2.552	2.551	2.757	2.896	3.068	3.299	3.369	3.388	3.473	3.597	3.621	3.902	4.044
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	2.408	2.512	2.523	2.523	2.523	2.523	2.522	2.728	2.856	2.959	3.072	3.076	3.078	3.079	3.099	3.105	3.124	3.150
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	315	315	315	315	315	315	315	520	615	615	699	699	699	699	699	699	699	699
Υ/Η -1 MW*	2	2	2	2	3	3	3	4	5	8	14	15	17	19	23	25	31	37
Υ/Η 1-10 MW*	28	28	39	39	39	39	39	39	40	42	42	45	45	50	59	64	77	95
Υ/Η 10+MW*	2.063	2.167	2.167	2.167	2.166	2.166	2.165	2.165	2.197	2.294	2.317	2.317	2.317	2.311	2.317	2.317	2.317	2.319
Γεωθερμία	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Φωτοβολταϊκά	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	9
Αιολική Ενέργεια	1	1	16	27	27	27	27	27	38	109	225	270	287	371	472	491	749	845
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22	22	24	24	24	39
Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών (1000 m <sup>2</sup> )	1.448	1.610	1.759	1.878	1.991	2.101	2.168	2.228	2.381	2.440	2.941	2.992	3.050	3.140	3.246	3.047	3.296	3.573
Βιοκαύσιμα (τόνους)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	395.000	575.000

\* δεν συμπεριλαμβάνεται η ισχύς των αντλητικών

**Πίνακας 2 : Εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [35]**



Σχήμα 1 : Εγκατεστημένη ισχύς σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [37]

Η ανάλυση ισχύος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Καύσιμο	Σύνολο Εγκατεστημένης Ισχύος	Σύνολο Αποιδόμενης Ισχύος(net)	Διασυνδεδεμένο Σύστημα(net)	Κρήτη (net)	Ρόδος (net)	ΑΣΠ (net)
Αιολικά	751,5	751,5	549,2	136	15,3	51
Βιομάζα	30,7	30,7	30,3	0,4		
Υδροηλεκτρικά	3135	3135	3134,4	0,6		
Φυσικό Αέριο	2518	2454	2454	-		-
Πετρέλαιο	2317	2131,7	718	693,4	199	521,3
Λιγνίτης	5288	4808	4808	-		-
ΣΗΘ	243	243	243	-		-
<b>Σύνολο</b>	<b>14.283,2</b>	<b>13.553,9</b>	<b>11.936,9</b>	<b>830,4</b>	<b>214,3</b>	<b>572,3</b>

Πίνακας 3 : Ανάλυση ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (MW) το 2006 [7]



Οι ραγδαίες κλιματικές αλλαγές, που αποτελούν τις βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συνεχούς κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, ώθησαν τις ανεπτυγμένες τεχνολογικά και οικονομικά χώρες στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτεί ότι το 2020 θα έχει μειώσει κατά 20% τις εκπομπές του αερίου του θερμοκηπίου, ότι θα έχει βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα κατά 20%, ότι θα έχει αυξήσει τη συμμετοχή των βιοκαυσίμων στις μεταφορές κατά 10% και όσον αφορά στις ΑΠΕ, θα έχει αυξήσει τη συμμετοχή τους στο 20%. Για την Ελλάδα, η αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ανέρχεται στο 18%. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι στόχοι για τον τομέα της παραγωγής ενέργειας [7].

**Διασυνδεδεμένο Σύστημα ΗΕ 2020**

Τεχνολογία	GW
Λιγνιτικοί ΑΗΣ	4,0
Συνδυασμένοι Κύκλοι ΦΑ	5,4
Αεριοστρόβιλοι ΦΑ	0,75
Μεγάλοι ΥΗΣ	3,7
	13,85
Αιολικά Πάρκα	5,5
Μικρά Υδροηλεκτρικά	0,2
Φωτοβολταϊκά	0,6
Βιαέριο	0,2
Βιομάζα	0,2
Γεωθερμία Υψηλής Ενθαλπίας	0,1
	6,8
<b>Σύνολο</b>	<b>20,65</b>

**Νησιωτικό Σύστημα ΗΕ 2020**

Τεχνολογία	GW
Πετρελαιοί	1,3
Φυσικού Αερίου	0,8
	2,1
Αιολικά Πάρκα	0,8
Άλλες ΑΠΕ	0,2
	1,0
<b>Σύνολο</b>	<b>3,1</b>

**Πίνακας 4 : Μέτρα επίτευξης στόχων νέας ευρωπαϊκής πολιτικής στον τομέα παραγωγής ενέργειας [7]**

### 1.3 Υβριδικά συστήματα

---

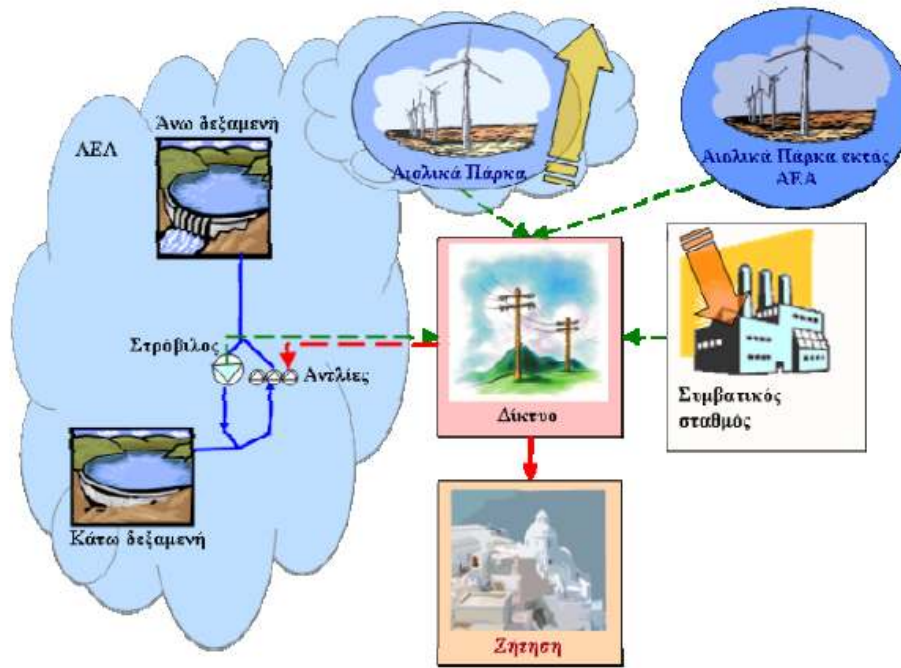
Τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης στα ελληνικά νησιά παραμένουν ακόμη χαμηλά, παρά το υψηλό αιολικό τους δυναμικό, λόγω των περιορισμών ισχύος που επιβάλλονται στα αιολικά πάρκα (Α/Π) εξαιτίας των συμβατικών μονάδων παραγωγής [41]. Ένας αποτελεσματικός τρόπος αύξησης της αιολικής διείσδυσης είναι μέσω της τεχνολογίας των υβριδικών συστημάτων, τα οποία αποτελούν συνδυασμό σταθμού παραγωγής από ΑΠΕ και διατάξεων αποθήκευσης της ενέργειας που μέχρι τώρα απορριπτόταν.

Ένας τυπικός υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αντλιοσταμείευσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Το Αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελεί τη μη ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ
- Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή το αντλιοστάσιο, δύο αγωγούς αναρρόφησης και προσαγωγής, και τους ταμιευτήρες με τις κατάλληλες υψομετρικές διαφορές μεταξύ τους
- Το σύστημα των υδροστροβίλων που αποτελεί την ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής από ΑΠΕ
- Το αντλιοστάσιο, με μία ή με ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων αντλιών
- Τα συστήματα ελέγχου
- Τα συστήματα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας

Η φιλοσοφία των υβριδικών συστημάτων στηρίζεται στην αξιοποίηση της περίσσειας αιολικής ενέργειας που δεν καταναλώνεται από το δίκτυο η οποία επιτυγχάνεται μέσω άντλησης νερού από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω. Με δεδομένη τη ζήτηση του δικτύου και σε περιόδους άπνοιας ή μειωμένης αιολικής παραγωγής, και σε περιπτώσεις χαμηλού φορτίου (όπου ζητούμενο είναι η ολοένα και μικρότερη συμμετοχή των συμβατικών θερμικών σταθμών), η αποθηκευμένη υδροδυναμική ενέργεια του νερού αξιοποιείται αντιστρέφοντας την παραπάνω διαδικασία. Έτσι, το νερό μέσω του υδροστροβίλου παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια και συγκεντρώνεται στον κάτω ταμιευτήρα. Με τα υβριδικά συστήματα εκτός της εκμετάλλευσης μεγαλύτερης ποσότητας αιολικής ισχύος, επιπλέον μετατρέπεται σε πλεονέκτημα το βασικό μειονέκτημα αυτής της μορφής ενέργειας, της στοχαστικής εμφάνισης του ανέμου καθώς, τώρα, παρέχεται εγγυημένη ισχύς στο σύστημα [40].

Παρακάτω, απεικονίζεται ένα νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο εκτός από τον συμβατικό σταθμό παραγωγής (συνήθως Diesel) και των αιολικών πάρκων, εγκαθίσταται επιπλέον, υβριδικός σταθμός παραγωγής:



**Σχήμα 2 : Νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο είναι εγκατεστημένος υβριδικός σταθμός**

#### 1.4 Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΗΣ)

##### 1.4.1 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των ΜΥΗΣ

Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας μέσω μετατροπής της σε μηχανική ήταν γνωστή από τους αρχαίους χρόνους με τους γνωστούς νερόμυλους. Σημαντικός σταθμός όμως, διατέλεσε η ανάπτυξη των εφαρμογών του ηλεκτρισμού. Έκτοτε το έργο αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας γίνεται Υδροηλεκτρικό, δηλαδή η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική από τον υδροστρόβιλο και στην συνέχεια σε ηλεκτρική από την ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συζευγμένη με αυτόν.

Αν και οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) άρχισαν να κατασκευάζονται μαζικά στην Ευρώπη δύο-τρεις δεκαετίες μετά τον Β παγκόσμιο πόλεμο, οι ΜΥΗΣ, λόγω χαμηλού βαθμού απόδοσης και υψηλού κόστους παραγόμενης KWh, είχαν αποδειχθεί αντιοικονομικοί και αρχικά εγκαταλείφθηκαν. Παρόλα αυτά, από τη δεκαετία του 1980, άρχισε να εκδηλώνεται έντονο ενδιαφέρον για την κατασκευή και ανάπτυξη των ΜΥΗΣ που εκδηλώνεται είτε με την αξιοποίηση νέων μικρών υδατοπτώσεων είτε με την επανασχεδίαση και επανεξοπλισμό των ΜΥΗΣ που είχαν απομείνει ή εγκαταλειφθεί. [5]

<b>ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ</b>	<b>ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ</b>	<b>ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)</b>
<b>ΒΕΡΜΙΟ Ι (ΒΕΡΟΙΑ)</b>	ΔΕΗ	1,8
<b>ΓΚΙΩΝΑ, ΦΩΚΙΔΑ</b>	ΔΕΗ	8,5
<b>ΠΑΤΡΑ, ΓΛΑΥΚΟΣ</b>	ΔΕΗ	4,8

<b>ΣΤΡΑΤΟΣ ΙΙ, ΑΙΤ/ΝΙΑ</b>	ΔΕΗ	6
<b>ΤΣΙΒΛΟΣ, ΑΚΡΑΤΑ ΑΧΑΙΑ</b>	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΣΙΒΛΟΥ	2,82
<b>ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ, ΛΑΚΩΝΙΑ</b>	ΥΔΡΟΒΑΤ Α.Ε.Β.Ε. ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	1
<b>ΚΛΕΙΤΟΡΙΑ, ΑΧΑΙΑ</b>	ΥΔΡΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	1
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		<b>25,9</b>

Πίνακας 5 : Πίνακας εγκατεστημένης ισχύος ΜΥΗΣ στον Ελλαδικό χώρο [37]

#### 1.4.2 Διαφορές μεταξύ ΥΗΣ και ΜΥΗΣ

Ένας ΜΥΗΣ χαρακτηρίζεται ως «μικρός», όχι γιατί αποτελεί μικρογραφία ενός μεγάλου ΥΗΣ, ούτε γιατί η εγκατεστημένη ισχύς ή οι διαστάσεις των μονάδων είναι συγκεκριμένου μεγέθους αλλά γιατί διαθέτει ένα σύνολο από χαρακτηριστικά είτε ποσοτικά είτε ποιοτικά που τον διακρίνουν από έναν (μεγάλο) ΥΗΣ.

Το ποσοτικό όριο διάκρισης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΣ για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί το αν η ονομαστική ισχύς του σταθμού είναι μικρότερη των 10 MW ή όχι. Αυτός ο περιορισμός στην ονομαστική ισχύ υπάρχει κυρίως γιατί η τυποποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τους ΜΥΗΣ φτάνει συνήθως μέχρι την ισχύ των 10 MW, οπότε θεωρείται το πλέον αποδεκτό κριτήριο για τη διάκρισή τους. Έτσι, ως ΜΥΗΣ χαρακτηρίζονται αυτοί η ισχύς των οποίων δεν ξεπερνά τα 10 MW. Υπάρχουν, βεβαίως, και άλλες υποκατηγορίες όπως μίνι ΥΗΣ( με ισχύ <1 MW), μικρο ΥΗΣ( με ισχύ <100 KW) και πίκου ΥΗΣ (με ισχύ <1 KW).

Σε σύγκριση με τις αξιοποιήσιμες θέσεις για μεγάλους ΥΗΣ, οι ΜΥΗΣ πλεονεκτούν καθώς υπάρχει μεγάλο πλήθος διαθέσιμων θέσεων και έτσι, η κατασκευή τους ευνοείται. Με την αξιοποίηση των μικρών υδατοπτώσεων, γίνεται ολοένα και πιο αξιόλογη η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της κάθε χώρας. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΜΥΗΣ είναι πολύ μικρότερες από τους ΥΗΣ, καθώς η βασική περιβαλλοντική επιβάρυνσή τους οφείλεται στην κατασκευή μεγάλου ανάντι ταμιευτήρα ενώ τα μεγάλα φράγματα των ΥΗΣ θεωρείται ότι μεταβάλλουν το οικοσύστημα, αφού εγκαθίστανται σε περιοχές φυσικών ρευμάτων, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το οξυγόνο του νερού. Επομένως, λόγω των δυσμενών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν για το περιβάλλον, οι ΥΗΣ δεν θεωρούνται, εν γένει, ως συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ [8] [38] [39].

Επιπροσθέτως, οι ΜΥΗΣ συμβάλλουν, ήδη, στην μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> και έχουν βοηθήσει να μειωθούν οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του θείου. Ένα τυπικό μικρό υδροηλεκτρικό του 1 MW, παράγει περίπου 6 εκατ. KWh ετησίως και αποσοβεί την έκλυση 6000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα.(με βάση το μέσο ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα). [39] Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μεγάλη ειδική ισχύ τους(ισχύς ανά βάρος εξοπλισμού) και τη δυνατότητα συνδυασμού τους με άλλες χρήσεις του νερού, κάνουν τους ΜΥΗΣ αδιαμφισβήτητα μια αξιόλογη και υπολογίσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [5].

### 1.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΜΥΗΣ

---

Τα πλεονεκτήματα από την κατασκευή και αξιοποίηση ενός ΜΥΗΣ είναι αρκετά, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Σε σύγκριση με συμβατικούς σταθμούς, το «καύσιμο», δηλαδή οι υδατοπτώσεις, είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και δεν αντιμετωπίζει τον κίνδυνο εξάντλησης.
- Οι ΜΥΗΣ δεν μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα και κατά συνέπεια και το περιβάλλον, με επικίνδυνα γι’ αυτό κατάλοιπα ή απόβλητα.
- Η κατασκευή τους μπορεί να συνδυαστεί επωφελώς με άλλες διευθετήσεις όπως πχ. άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση πλημμύρας κλπ.
- Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου. Επιπροσθέτως, το κόστος λειτουργίας του σταθμού είναι μικρό.
- Οι υδροστρόβιλοι είναι αξιόπιστες μηχανές και απαιτούν πολύ μικρή συντήρηση και επίβλεψη (ο προληπτικός έλεγχος γίνεται ανά 5000 ώρες λειτουργίας περίπου και αρκεί ένας τεχνίτης για την επίβλεψη).
- Βοηθά στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών καθώς για τις ανάγκες κατασκευής του, κατασκευάζονται έργα υποδομής όπως πχ. δρόμοι, γέφυρες κ.α.
- Η διάρκεια ζωής του είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 20-30 έτη και μπορεί να γίνει μεγαλύτερη με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Ένα σημαντικό πλεονέκτημα, γενικά, των ΥΗΣ είναι η δυνατότητα πολύ γρήγορης παραλαβής και απόρριψης φορτίου έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η κάλυψη των αιχμών ζήτησης του διασυνδεδεμένου δικτύου [5].
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των ΜΥΗΣ παρουσιάζει η χρήση τους ως αντλησιοταμιευτήρες (ΥΗΣ αναστρέψιμης λειτουργίας), ιδίως στα νησιωτικά δίκτυα, όπου από κοινού με άλλες ΑΠΕ και υβριδικά συστήματα θα μπορούσαν να προσφέρουν μία αξιόπιστη και καθαρή λύση στα προβλήματα ηλεκτροδότησης των νησιών. Οι ΜΥΗΣ αναστρέψιμης λειτουργίας αντλούν νερό από ένα ταμιευτήρα που βρίσκεται χαμηλά και το στέλνουν σ’ ένα δεύτερο ταμιευτήρα που βρίσκεται ψηλότερα τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Το νερό αυτό διοχετεύεται σε υδροστρόβιλους τις ώρες της αιχμής ζήτησης και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι, εξομαλύνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις στη ζήτηση και διευκολύνονται οι θερμικές μονάδες να λειτουργούν με περίπου σταθερό φορτίο όπως επιβάλλεται. Το ρόλο του χαμηλού ταμιευτήρα μπορεί να παίξει και η θάλασσα εφόσον το επιτρέπει η γεωμορφολογία μιας περιοχής [39].

Κάποια μειονεκτήματα ενός ΜΥΗΣ παρουσιάζονται παρακάτω:

- Έχει μεγάλη διάρκεια κατασκευής, περίπου 1-2 χρόνια, ενώ μεγάλη είναι και η διάρκεια των μελετών και της επεξεργασίας υδρολογικών και γεωλογικών στοιχείων στον τόπο κατασκευής.
- Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται διακυμάνσεις που έχουν σχέση με την ποσότητα των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων.
- Απαιτεί την διάθεση μεγάλων κεφαλαίων καθώς το κόστος του είναι πολύ υψηλό.(περίπου 2000-4000 €/KW)
- Τέλος, στον τόπο κατασκευής, θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες υδατοπτώσεις και μεγάλες παροχές, ενώ σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται έργα υποδομής για τη μεταφορά και εγκατάσταση του συνόλου του εξοπλισμού. [5].

#### 1.4.4 Υδροστρόβιλοι

---

##### 1.4.4.1 Γενικά για τους υδροστρόβιλους

---

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται κατ' αρχή με κριτήριο τον βαθμό αντιδράσεως : οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλ. ολόκληρη η πτερωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστρόβιλοι δράσεως (βαθμός αντιδράσεως  $re=0$ ) είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο της πτερωτής συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Ο μόνος τύπος υδροστρόβιλου δράσεως που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστρόβιλος Pelton, ενώ η παραλλαγή του, δηλαδή οι υδροστρόβιλοι Turgo έχουν σχεδόν εκλείψει. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως που έχουν επικρατήσει είναι ο τύπος Francis για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H = 50 - 500$  m περίπου), ο υδροστρόβιλος τύπου Descies διαγώνιας ροής και διάφορες διαμορφώσεις υδροστρόβιλων αξονικής ροής, για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H < 50$  m περίπου), όπως: Kaplan, βολβοειδής (bulb), σωληνωτός (tube), δακτυλίου (Straflo) κλπ. Ο υδροστρόβιλος τύπου Cross-Flow ή Banki έχει σχεδόν μηδενικό βαθμό αντιδράσεως στην περιοχή του κανονικού σημείου λειτουργίας και κατασκευάζεται για μικρές ισχύεις (μικρότερες των 2 MW) και σχετικά μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H < 100$  m).

Από την προηγούμενη κατάταξη γίνεται φανερό η διαφοροποίηση που σχετίζεται με την μεσημβρινή ροή και την διαθέσιμη υδραυλική πτώση: οι υδροστρόβιλοι Francis είναι ακτινικής και μικτής ροής κατάλληλοι για μέσες τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H = 50 - 500$  m περίπου), ενώ οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής (Kaplan κλπ) είναι κατάλληλοι για την αξιοποίηση μικρών υδραυλικών πτώσεων ( $H < 50$  m περίπου) [42].

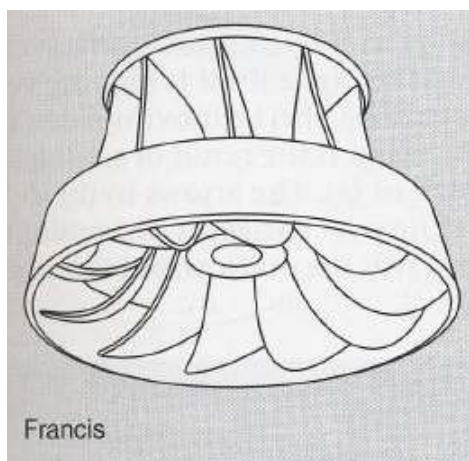
**1.4.4.2 Οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως**

Οι κύριοι τύποι υδροστροβίλων αντιδράσεως είναι ο υδροστροβίλος Francis ακτινικής και μικτής ροής, ο υδροστροβίλος διαγώνιας ροής τύπου Deriaz και οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής όπως ο τύπος Kaplan, ο βολβοειδής (bulb), δακτυλίου (Straflo) και ο σωληνωτός (tube). Όλοι αυτοί οι υδροστροβίλοι έχουν βαθμό αντιδράσεως διαφορετικό του μηδενός, δηλαδή η ροή μέσω της πτερωτής γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης και γι' αυτό οι πτερωτές τους είναι ολικής προσβολής, δηλ. λειτουργούν ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση.

Για μικρές υδραυλικές πτώσεις ( $H < 10$  mΣΥ περίπου) αντί της κλασικής διαμόρφωσης αξονικής ροής υδροστροβίλοι Kaplan συναντώνται δύο παραλλαγές : ο βολβοειδής (bulb) και ο σωληνωτός (tube) υδροστροβίλος. Στους υδροστροβίλους αυτούς η ροή στο τμήμα εισόδου γίνεται κατά την αξονική (και όχι ακτινική) διεύθυνση έτσι ώστε να μειώνεται ο συνολικός όγκος και οι υδραυλικές απώλειες.

Ιστορικά οι υδροστροβίλοι τύπου Francis και τύπου Kaplan φέρουν το όνομα του μηχανικού από τον οποίο σχεδιάστηκαν.

Ο μηχανικός James B. Francis (1815-1892) πειραματιζόταν αρχικά με υδροστροβίλο φυγόκεντρης ροής τύπου Fourneyron στην Μασαχουσέτη (ΗΠΑ) και στην συνέχεια με έναν τύπο υδρο/λου κεντρομόλου ροής (τύπος Dowd) τον οποίο βελτίωσε το 1850 τοποθετώντας την στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η ρύθμιση της παροχής. Πολύ γρήγορα ο υδροστροβίλος τύπου Francis καθιερώθηκε ως η καταλληλότερη σχεδίαση για μεσαίες υδραυλικές πτώσεις ( $H=50-500$  mΣΥ περίπου).

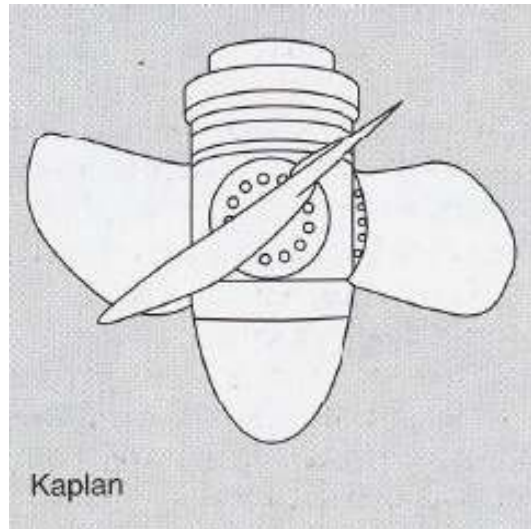


**Σχήμα 3 : Υδροστροβίλος τύπου Francis**

Ο Τσέχος Victor Kaplan (1876-1934), καθηγητής στην Αν. Σχολή Μηχανικής του Βno, βελτίωσε τον υδροστροβίλο αξονικής ροής με πτερωτή τύπου έλικας δίνοντας στα πτερύγια της πτερωτής την δυνατότητα μεταβολής της κλίσης τους ώστε να βελτιώνεται η απόδοση για λειτουργία σε μερικά φορτία. Το 1913 παρουσίασε το πρώτο μοντέλο, που πήρε αργότερα το όνομα του, και από τότε μέχρι το 1926 δεν σταμάτησε να πειραματίζεται και να προσπαθεί να λύσει τα διάφορα τεχνολογικά κυρίως προβλήματα. Ο υδροστροβίλος τύπου Kaplan είναι κατάλληλος για την αξιοποίηση μικρών υδατοπτώσεων. Διαδόθηκε πολύ γρήγορα εκτοπίζοντας



ουσιαστικά τους άλλους αντίστοιχους τύπους υδροστροβίλων, όπως τον υδροστρόβιλο Deriaz που έχει κωνική πλήμνη και στεφάνη [42].

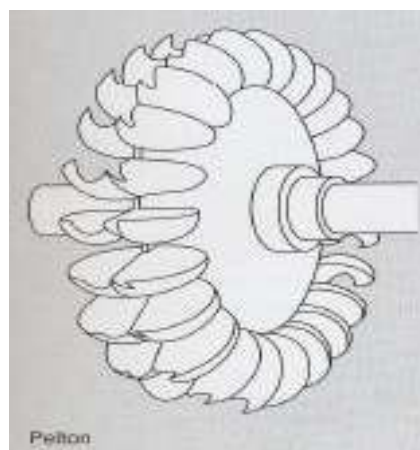


**Σχήμα 4 : Υδροστρόβιλος τύπου Kaplan**

#### 1.4.4.3 Οι υδροστρόβιλοι δράσεως

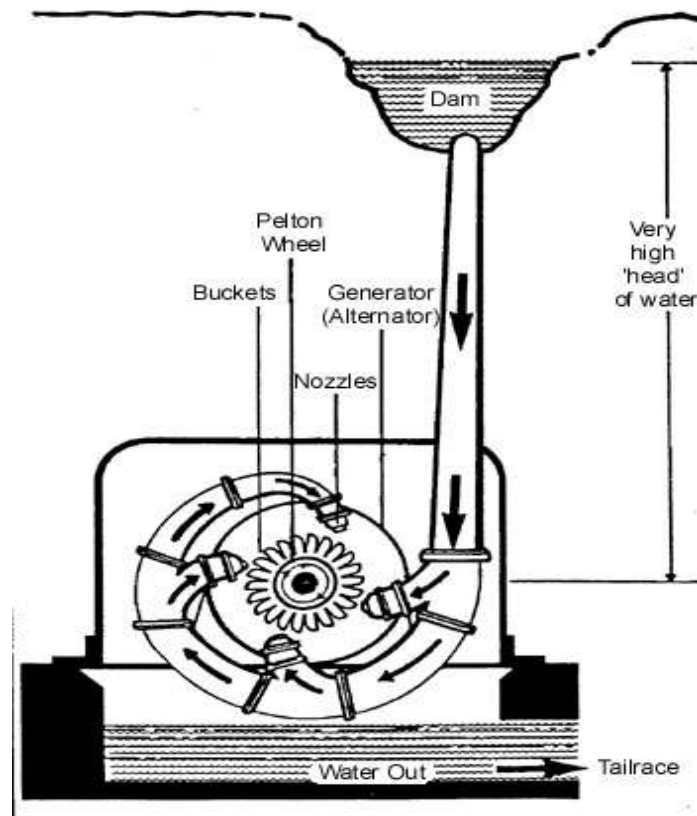
##### 1.4.4.3.1 Ιστορικά

Ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μία εξέλιξη του αρχαίου υδραυλικού τροχού. Αναπτύχθηκε το 1880 από τον Αμερικανό μηχανικό Lester Pelton (1829-1908) στην Καλιφόρνια όπου τα χρυσορυχεία είχαν σημαντικές ενεργειακές ανάγκες σε περιοχές με σημαντικές τιμές της υδραυλικής πτώσης. Η συνεισφορά του Lester Pelton έγκειται στην βελτίωση ενός στοιχειώδους τύπου υδροστροβίλου δράσεως και συγκεκριμένα στην σχεδίαση του διπλού σκαφιδίου μέσω του οποίου επιτυγχάνεται σταδιακή μεταβολή της διεύθυνση της ροής κατά 180° περίπου και στην σχεδίαση του ακροφυσίου τροφοδοσίας με την ρυθμιστική βελόνη. [42]



**Σχήμα 5: Υδροστρόβιλος τύπου Pelton**





**Σχήμα 6: Διαμόρφωση ΥΗΕ με υδροστροβίλο τύπου Pelton**

#### 1.4.4.3.2 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά υδροστροβίλου Pelton

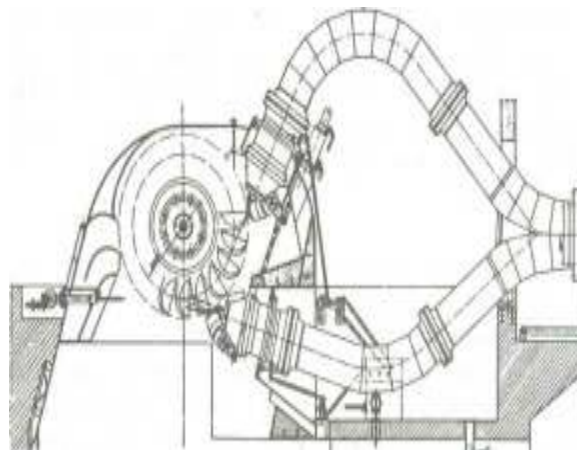
Η διαμόρφωση υδροστροβίλου Pelton επιλέγεται στις περιπτώσεις πολύ υψηλής ενέργειας ανά μονάδα μάζας υγρού, δηλαδή για υψηλές τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ . Οι κύριοι λόγοι για αυτήν την επιλογή είναι οι παρακάτω:

- Η ταχύτητα ροής είναι πολύ υψηλή το οποίο σε συνδυασμό με τις μικρές παροχές, άρα τις μικρές διατομές, έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των υδραυλικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής, άρα τη μείωση του βαθμού απόδοσης.
- Η τιμή της στατικής πίεσης είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα να γίνεται προβληματική η μηχανική αντοχή του τμήματος εισόδου εάν αυτό ήταν της μορφής σπειροειδούς κελύφους (περίπτωση υδροστροβίλου Francis) το οποίο αποτελεί το ογκοδέστερο τμήμα της μηχανής. Στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton μόνο το τμήμα του ακροφυσίου τροφοδοσίας (που είναι μικρό σε μέγεθος) υπόκειται σε σημαντική τιμή της στατικής πίεσης.
- Η σημαντική διαφορά της στατικής πίεσης ανάντι και κατάντι του δρομέα θα είχε ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των ογκομετρικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής εάν αυτός ήταν ολικής προσβολής ή θα απαιτούσε την κατασκευή πολύπλοκων και δαπανηρών λαβύρινθων για την διατήρηση των ογκομετρικών απωλειών σε αποδεκτό επίπεδο.

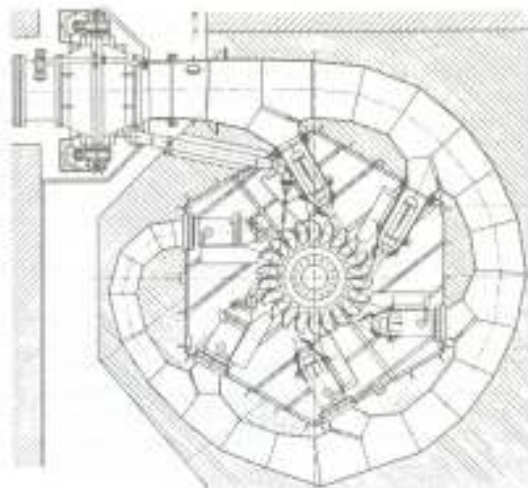
Στα σχήματα 5, 6, 7, 8 δίνεται η διάταξη υδροστροβίλου μερικής προσβολής τύπου Pelton. Το τμήμα εισόδου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της ενέργειας εντατικής καταστάσεως του υγρού σε κινητική, διαμορφώνοντας δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στον δρομέα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ώθησης σε αυτόν (σύμφωνα με το θεώρημα της ορμής) κατά την περιφερειακή διεύθυνση και η οποία δημιουργεί την κινητήρια ροπή. Ο δρομέας, είναι τοποθετημένος πάνω από την ελεύθερη στάθμη της διώρυγας απαγωγής έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία σε όλες τις περιπτώσεις. Η υψομετρική διαφορά από το σημείο προσβολής της δέσμης μέχρι την ελεύθερη στάθμη της διώρυγας απαγωγής αντιπροσωπεύει ενέργεια που δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί.

Ο άξονας του δρομέα μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην κατακόρυφη διάταξη το βάρος της γεννήτριας και του στροφείου της γεννήτριας παραλαμβάνεται από ωστικό έδρανο. Στους υδροστροβίλους Pelton με περισσότερες δέσμες προτιμότερη είναι η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε όλα τα ακροφύσια να βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο και να μην παρενοχλείται η λειτουργία τους από τα απόνερα των σκαφιδίων [5].

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι διατάξεις υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα με περισσότερες δέσμες:



**Σχήμα 7 : Διάταξη υδροστροβίλου Pelton οριζόντιου άξονα με δύο δέσμες**



**Σχήμα 8 : Διάταξη υδροστροβίλου Pelton κατακόρυφου άξονα με περισσότερες δέσμες**

### 1.5 Αντικείμενο της εργασίας

---

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της ρύθμισης συχνότητας μέσω υβριδικού αντλησιοταμιευτικού σταθμού. Στη μελέτη αυτή, η ρύθμιση συχνότητας γίνεται από τον ΜΥΗΣ, ενώ δεν συμμετέχουν σε αυτήν ενεργά οι ανεμογεννήτριες του υβριδικού σταθμού. Έτσι, η διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων ΜΥΗΣ για την προσομοίωση της δυναμικής τους συμπεριφοράς και της εξέτασης της ικανότητάς τους να ρυθμίζουν την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσονται δυναμικά μη γραμμικά μοντέλα, που προσομοιώνουν τη λειτουργία του σταθμού και αναλύονται οι επιμέρους συνιστώσες του υδραυλικού μέρους. Επίσης, μελετώνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να πληρούν οι ρυθμιστές στροφών υδροστροβίλων, ώστε αυτοί να είναι ικανοί να ρυθμίζουν τη συχνότητα αυτόνομου νησιωτικού συστήματος και εξετάζεται συστηματικά η ταχύτητα απόκρισης του ΜΥΗΣ. Στην συνέχεια, αναπτύσσονται δυναμικά μοντέλα για μηχανές Diesel και για ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και μελετάται η δυναμική συμπεριφορά ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος στο οποίο λειτουργούν ο ΜΥΗΣ, μηχανές Diesel και ανεμογεννήτριες, και εξετάζεται η δυνατότητα του συστήματος να διατηρεί την συχνότητα λειτουργίας εντός αποδεκτών ορίων.

Στο πρώτο κεφάλαιο, ορίστηκε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και η λειτουργία της ρύθμισης της συχνότητας που πρέπει να επιτελείται διαρκώς σε αυτό, ενώ στην συνέχεια, τα παραπάνω, εξειδικεύτηκαν στην περίπτωση αυτόνομων συστημάτων, όπως είναι τα νησιωτικά. Πραγματοποιήθηκε μία επισκόπηση των τεχνολογιών ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται σήμερα και ιδιαίτερη αναφορά έγινε στην τεχνολογία των υβριδικών σταθμών, που αποτελούν συνδυασμό σταθμού παραγωγής από ΑΠΕ και διατάξεων αποθήκευσης, ενώ, αναφέρθηκε ο ρόλος των ΜΥΗΣ σε αυτούς. Τέλος, περιγράφηκαν τα στοιχεία εκείνα που διαφοροποιούν τους ΜΥΗΣ από τους (μεγάλους) ΥΗΣ, αναφέρθηκαν κάποια βασικά στοιχεία που τους διέπουν και έγινε παρουσίαση των τεχνολογιών των υδροστροβίλων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση του ΜΥΗΣ. Γίνεται περιγραφή της διαμόρφωσης του υδραυλικού μέρους και αναπτύσσονται δυναμικά μοντέλα που να προσομοιώνουν την λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά αναπτύσσεται το ευρέως διαδεδομένο γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου. Στην συνέχεια, αναπτύσσονται μη γραμμικά, δυναμικά μοντέλα, ικανά να περιγράψουν την δυναμική των πραγματικών υδροστροβίλων σε μεγάλες διαταραχές. Τα μοντέλα αυτά, είναι είτε με τη θεώρηση της ανελαστικής (ασυμπιέστης) στήλης ύδατος είτε πλήρως αναλυτικά, στα οποία οι αγωγοί συμπεριφέρονται ως μέσο διάδοσης κυμάτων νερού. Επίσης, για την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας υδροστροβίλων, συμπεριλαμβάνεται στα μοντέλα το φαινόμενο της υδραυλικής σύζευξης μεταξύ τους. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή της πορείας εκτίμησης τιμών των διαφόρων παραμέτρων του υδροδυναμικού μέρους που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση - προσομοίωση. Η εκτίμηση αυτή έγινε με τα στοιχεία του υπό κατασκευή ΜΥΗΣ που είναι μέρος αντλησιοταμιευτικού υβριδικού σταθμού, ο οποίος πρόκειται να εγκατασταθεί στην Ικαρία.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διάφοροι τύποι ρυθμιστών στροφών που χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν την ισχύ των υδροστροβίλων. Γίνεται λεπτομερής εξέταση των συνιστωσών των ρυθμιστών, ενώ επιλέγεται και

περιγράφεται ο ρυθμιστής στροφών που πληροί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για τον έλεγχο του υπό μελέτη ΜΥΗΣ. Επίσης, αναφέρονται μέθοδοι υπολογισμού των παραμέτρων του ρυθμιστή στροφών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανάλογη βιβλιογραφία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφονται τα μοντέλα του ηλεκτρικού μέρους που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Ξεκινώντας, από την εξίσωση ταλάντωσης και το γραμμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας, το κεφάλαιο συνεχίζεται με το γραμμικό μοντέλο δύο σύγχρονων γεννητριών ηλεκτρικά συζευγμένων και καταλήγει στα πλήρως μη γραμμικά μοντέλα σύγχρονης και ασύγχρονης γεννήτριας, όπως αυτά είναι ανεπτυγμένα στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, ενσωματώνονται οι παραπάνω συνιστώσες για την εξαγωγή των τελικών μοντέλων του βρόχου ελέγχου ταχύτητας του ΜΥΗΣ για τις διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας και για τα δύο μοντέλα (ανελαστικό, κυματικό). Στην συνέχεια, εξετάζεται το πως οι διάφοροι παράμετροι επηρεάζουν την ταχύτητα απόκρισης υδροστροβίλων σε μεταβολές του φορτίου. Τέλος, αναφέρονται κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων που εξετάζουν την ταχύτητα απόκρισης ΥΗΣ, από δημοσιεύσεις που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία έτσι ώστε να εξαχθεί μία πλήρης εικόνα για το υπό εξέταση ζήτημα.

Στο έκτο κεφάλαιο, μελετάται η δυναμική συμπεριφορά του ΜΥΗΣ, μέσω αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται από προσομοιώσεις στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις μη γραμμικών μοντέλων και γίνεται διερεύνηση για την εξαγωγή των καταλληλότερων τιμών για τις παραμέτρους του ρυθμιστή στροφών των υδροστροβίλων του υπό μελέτη ΜΥΗΣ. Μετά την οριστικοποίηση του ρυθμιστή στροφών, εξετάζεται η ικανότητα του ΜΥΗΣ να ρυθμίζει την συχνότητα. Τέλος, μελετώνται τρόποι που να βελτιώνουν την απόκριση ισχύος και συχνότητας του ΜΥΗΣ.

Στο έβδομο κεφάλαιο, αναπτύσσεται μη γραμμικό μοντέλο μηχανής Diesel με τον ρυθμιστή στροφών του, ικανό να περιγράφει την δυναμική συμπεριφορά των πραγματικών μονάδων και να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση του κεφαλαίου εννιά. Επίσης, περιγράφεται η τεχνική και το μοντέλο του δευτερογενούς ελέγχου της μηχανής Diesel, σύμφωνα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις λειτουργίας, όπως διαμορφώνονται σε ένα νησιωτικό αυτόνομο σύστημα.

Στο όγδοο κεφάλαιο, αναπτύσσεται ένα απλουστευμένο μη γραμμικό μοντέλο ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Επίσης, παρουσιάζονται οι δύο χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση.

Στο ένατο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω των μη γραμμικών μοντέλων που έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, όπως εξήχθησαν από το λογισμικό SIMULINK/MATLAB και αφορούν διάφορες περιπτώσεις δυναμικής λειτουργίας ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος. Εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου λειτουργούν οι υδροστρόβιλοι μαζί με ανεμογεννήτριες, οι μηχανές Diesel μαζί με ανεμογεννήτριες και συνδυασμοί όλων των παραπάνω, και μελετάται η δυνατότητα του συστήματος να διατηρεί την συχνότητα λειτουργίας εντός αποδεκτών ορίων.

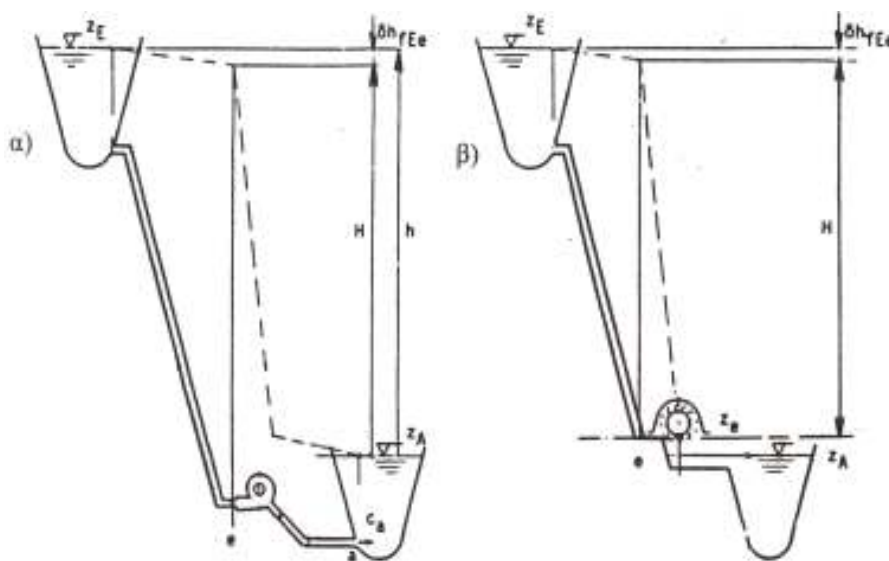
## 2 Μοντελοποίηση υδραυλικού μέρους

### 2.1 Η διαμόρφωση ενός ΥΗΕ

Ένας υδροστρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια του υγρού (φυσικό νερό στην μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων) σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Σε ένα ΥΗΕ η ενέργεια του νερού ανά μονάδα μάζας του είναι η δυναμική ενέργεια, ίση προς την υδραυλική πτώση ή αλλιώς στατικό ύψος (gross/static head):

$$h = z_E - z_A \quad (2.1)$$

όπου  $z_E$  η στάθμη του νερού στον άνω ταμιευτήρα που σχηματίζεται από το φράγμα και  
 $z_A$  η στάθμη του νερού κατάντι του έργου όπου η παροχή οδηγείται στη φυσική της ροή έχοντας ουσιαστικά μηδενική κινητική ενέργεια



Σχήμα 9 : Αξιοποίηση της υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου α) αντιδράσεως και β) δράσεως [5]

Για υδροστρόβιλο αντιδράσεως (Francis ή Kaplan) η γεωμετρία ενός ενδεικτικού σταθμού φαίνεται στην περίπτωση (α) του σχήματος 9.

Στην περίπτωση ΥΗΕ με υδροστρόβιλο δράσεως, όπως είναι ο Pelton (περίπτωση β σχήματος 9), η στάθμη του ακροφυσίου τροφοδοσίας είναι  $z_e > z_A$  (όπου  $z_A$  η στάθμη του νερού στη διώρυγα απαγωγής) ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή και δεδομένου ότι η ενέργεια που αντιστοιχεί στην υψομετρική διαφορά ( $z_e - z_A$ ) δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί, η διαθέσιμη στον υδροστρόβιλο υδραυλική πτώση  $H$  ή αλλιώς το καθαρό ή ωφέλιμο ύψος (net head), εκφρασμένη σε mΣΥ, είναι ίση προς:

$$H = h - H_f - (z_e - z_A) = z_E - z_e - H_f \quad (2.2)$$

όπου  $H_f$  είναι οι απώλειες της ροής στο σύστημα προσαγωγής (σήραγγα, αγωγός προσαγωγής)

Για τις απώλειες  $H_f$  ισχύει ότι είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής  $Q$  (για ροή στην πλήρως τυρβώδη περιοχή) :

$$H_f = kQ^2 \quad (2.3)$$

όπου το  $Q$  εκφράζει την παροχή όγκου που διέρχεται από τον υδροστροβίλο σε  $m^3 / s$  και

το  $k$  είναι η σταθερά απωλειών σε  $m / (m^3 / s)^2$ .

Λόγω του μεγάλου μεγέθους του ταμιευτήρα, η κινητική ενέργεια του νερού σε αυτόν είναι αμελητέα. Άρα η υδραυλική ισχύς που διατίθεται για μετατροπή σε μηχανική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένης και της μείωσης λόγω των απωλειών στο σύστημα προσαγωγής, είναι ίση προς :

$$P_{hydr} = \rho g H Q = \gamma H Q \quad (2.4)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού (σε  $Kg / m^3$ )

$\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού (σε  $Nt / m^3$ )

Η ροή διαμέσου του υδροστροβίλου και η λειτουργία της μηχανής δεν είναι απαλλαγμένη απωλειών που έχουν ως τελικό αποτέλεσμα τη μειωμένη αξιοποίηση της διαθέσιμης στη μηχανή υδραυλικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό η παραγόμενη μηχανική ισχύς  $P_{mech}$  είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη υδραυλική ισχύ  $P_{hydr}$ , οπότε η διαφορά τους είναι ίση με το άθροισμα των διαφόρων απωλειών του στροβίλου, οι οποίες διακρίνονται σε υδραυλικές, ογκομετρικές και μηχανικές.

Ως ολικός βαθμός απόδοσης ορίζεται το γινόμενο

$$\eta = \eta_h \eta_Q \eta_m \quad (2.5)$$

όπου  $\eta_h$  ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης που εκφράζει τις υδραυλικές απώλειες του στροβίλου, οι οποίες διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες τριβής (γραμμικές και εντοπισμένες) και σε υδραυλικές απώλειες κρούσεως.

$\eta_Q$  ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης που εκφράζει τις ογκομετρικές απώλειες του στροβίλου  $\delta Q$  κατά τις οποίες είναι μειωμένη η παροχή  $Q$  που διέρχεται από τη διατομή εισόδου και εξόδου της μηχανής.

$\eta_m$  ο μηχανικός βαθμός απόδοσης που εκφράζει τις απώλειες υπό μορφή μηχανικής ισχύος, οι οποίες διακρίνονται στις απώλειες

των εδράνων και στις απώλειες στρεφόμενου δίσκου και ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής μηχανικής ισχύος που αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα προς τη θεωρητική ισχύ που αναπτύσσεται στο δρομέα. Στην περίπτωση δρομέα στροβίλου δράσεως πχ. Pelton δεν υπάρχουν απώλειες στρεφόμενου δίσκου, όμως αντ'αυτών αναπτύσσονται απώλειες αερισμού που οφείλονται στην κίνηση που προκαλείται στον περιβάλλοντα αέρα από την περιστροφή του δρομέα.

Από τους τρεις αυτούς βαθμούς απόδοσης τη μικρότερη τιμή έχει ο υδραυλικός  $\eta_h$ , ο οποίος καθορίζει και την τάξη μεγέθους του ολικού βαθμού απόδοσης.

Επομένως, η μηχανική ισχύς είναι ίση προς [5]:

$$P_{mech} = \eta \gamma H Q \quad (2.6)$$

## 2.2 Γραμμικό μοντέλο στροβίλου θεωρώντας την υδάτινη στήλη ανελαστική

Η αναπαράσταση του υδροστροβίλου και της υδάτινης στήλης σε αναφορές ευστάθειας συνήθως βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

1. Η υδραυλική αντίσταση αγνοείται.
2. Ο σωλήνας του αγωγού πτώσης είναι ανελαστικός και το νερό είναι ασυμπίεστο.
3. Η ταχύτητα του νερού ποικίλει ανάλογα με το άνοιγμα της δικλείδας και με την τετραγωνική ρίζα του ωφέλιμου ύψους.
4. Η ισχύς εξόδου του στροβίλου είναι ανάλογη του γινομένου της πίεσης και της παροχής.

Οι χαρακτηριστικές του υδροστροβίλου και του αγωγού προσαγωγής καθορίζονται από τρεις βασικές εξισώσεις, οι οποίες αναφέρονται:

1. Στην ταχύτητα του νερού στον αγωγό προσαγωγής
2. Στην ισχύ του υδροστροβίλου
3. Στην επιτάχυνση της υδάτινης στήλης

Οι υδατοθυρίδες που κατευθύνουν το νερό στον στρόβιλο έχουν ένα ρυθμιζόμενο άνοιγμα που συμβολίζεται με  $G$ . Οι υδατοθυρίδες λέγονται πολλές φορές και «πύλες» (gates).

Η ταχύτητα του νερού στον αγωγό προσαγωγής δίνεται από την εξίσωση:

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (2.7)$$

όπου  $U$  η ταχύτητα του νερού  
 $H$  το καθαρό υδραυλικό ύψος που μετρείται σε mΣΥ (ή η πίεση στις θυρίδες)

$K_u$  μία σταθερά αναλογίας

Για μικρές μεταβολές σε ένα σημείο λειτουργίας, είναι:

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G$$

Αντικαθιστώντας την κατάλληλη έκφραση των μερικών παραγώγων και διαιρώντας με  $U_0 = K_u G_0 \sqrt{H_0}$  (όπου με τον δείκτη 0 γίνεται αναφορά στις αρχικές συνθήκες) λαμβάνεται:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0}$$

Ή ισοδύναμα:

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (2.8)$$

όπου το  $\Delta$  εκφράζει μικρές μεταβολές και η παύλα “-” κανονικοποιημένες τιμές με βάση τις αρχικές συνθήκες.

Η ισχύς του στροβίλου είναι ανάλογη του γινομένου της πίεσης με την παροχή, είναι δηλαδή:

$$P_m = K_p H U \quad (2.9)$$

Γραμμικοποιώντας, θεωρώντας μικρές μεταβολές και κάνοντας κανονικοποίηση διαιρώντας και τις δύο πλευρές με  $P_{m0} = K_p H_0 U_0$ , λαμβάνεται:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0}$$

Ή ισοδύναμα:

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (2.10)$$

Αντικαθιστώντας το  $\Delta \bar{U}$  από την εξίσωση (2.8), προκύπτει:

$$\Delta \bar{P}_m = 1,5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (2.11\alpha)$$

Εναλλακτικά, αντικαθιστώντας την έκφραση για το  $\Delta H$  από την εξίσωση (2.8), προκύπτει :

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (2.11\beta)$$



Η επιτάχυνση της υδάτινης στήλης σε μία μεταβολή της πίεσης στην είσοδο του στροβίλου, χαρακτηρίζεται από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα της κίνησης, και εκφράζεται ως:

$$(\rho LA) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho \alpha_g) \Delta H \quad (2.12)$$

όπου  $L$  : το μήκος του αγωγού

$A$  : η διατομή του αγωγού

$\rho$  : η πυκνότητα

$\alpha_g$  : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$\rho LA$  : η μάζα του νερού στον αγωγό

$\rho \alpha_g \Delta H$  : η αύξηση της πίεσης στην είσοδο του στροβίλου

$t$  : ο χρόνος σε sec

Διαιρώντας και τις δύο πλευρές με  $A\rho\alpha_g H_0 U_0$ , η εξίσωση της επιτάχυνσης σε κανονικοποιημένη μορφή, είναι:

$$\frac{LU_0}{\alpha_g H_0} \frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta U}{U_0} \right) = -\frac{\Delta H}{H_0}$$

ή

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = -\Delta\bar{H} \quad (2.13)$$

$$\text{όπου } T_w = \frac{LU_0}{\alpha_g H_0} \quad (2.14)$$

Το  $T_w$  είναι η χρονική σταθερά αδράνειας του νερού και είναι γνωστή ως χρόνος εκκίνησης ύδατος (water starting time). Εκφράζει τη διάρκεια επιτάχυνσης της μάζας του νερού στον αγωγό προσαγωγής από μηδενική παροχή μέχρι την ονομαστική παροχή, υπό πίεση  $H_0$  (υδραυλικό ύψος).

Από τις εξισώσεις 2.8 και 2.13, εξάγεται η σχέση μεταξύ της ταχύτητας και του ανοίγματος των υδατοθυρίδων, ως:

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (2.15)$$

Αντικαθιστώντας το  $\frac{d}{dt}$  με τον τελεστή Laplace  $s$ , η εξίσωση ξαναγράφεται:

$$T_w s \Delta\bar{U} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U})$$

ή

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \Delta \bar{G} \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας το  $\Delta \bar{U}$  από την εξίσωση 2.11β και αναδιατάσσοντας, εξάγεται η ‘κλασική’ συνάρτηση μεταφορά του υδροστροβίλου:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (2.17)$$

Η εξίσωση αυτή είναι μία πρώτη τάξεως δείχνει πώς αποκρίνεται η ισχύς εξόδου για μικρές μεταβολές στο άνοιγμα των υδατοθυρίδων.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το  $T_w$  αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας και όχι στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Για την σωστή μοντελοποίηση σε προσομοιώσεις ευστάθειας το  $T_w$  θα πρέπει να προσαρμόζεται κάθε φορά που οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν.

Η συνάρτηση μεταφοράς παρουσιάζει ένα μηδενικό στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, στο σημείο  $s = -\frac{1}{T_w}$ , και άρα αποτελεί συνάρτηση μεταφοράς μη-ελάχιστης φάσης (non-minimum phase transfer function). Σε αυτήν την περίπτωση δεν παρατηρείται μεταβολή στην αντίστοιχη συνάρτηση μέτρου και η μόνη διαφορά που προκύπτει εντοπίζεται στα χαρακτηριστικά μετάθεσης της φάσης [17]. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς διακρίνονται παρατηρώντας της απόκριση του συστήματος σε μία βηματική μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων.

Για μια βηματική μεταβολή του  $\bar{G}$ , για την περίπτωση ιδανικού υδροστροβίλου, η αρχική τιμή της μεταβολής της ισχύος, είναι:

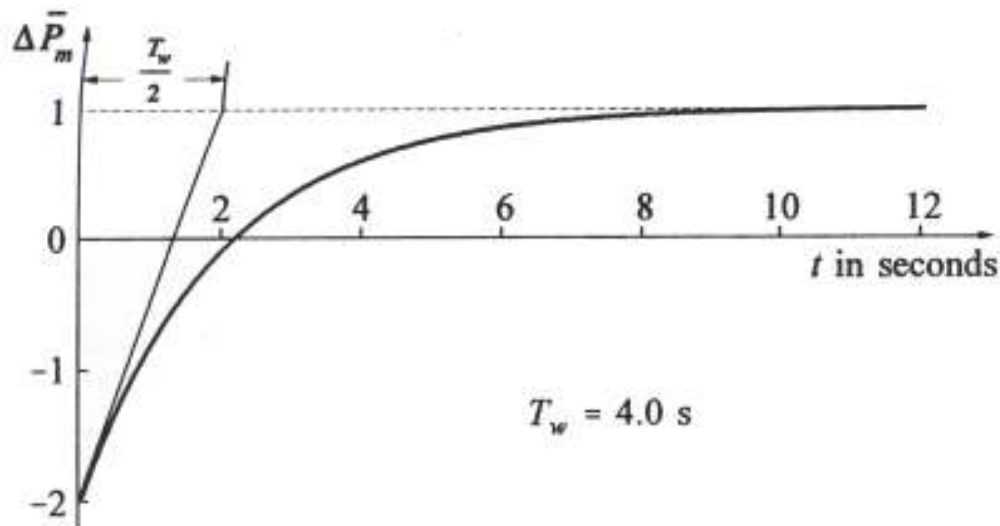
$$\Delta \bar{P}_m(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \frac{1 - T_w s}{s + 0.5 T_w s} = -2$$

Και η τελική τιμή:

$$\Delta \bar{P}_m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1 - T_w s}{s + 0.5 T_w s} = 1$$

Στο πεδίο του χρόνου η απόκριση της μηχανικής ισχύος δίνεται από την σχέση:

$$\Delta \bar{P}_m(t) = [1 - 3e^{-(2/T_w)t}] \Delta \bar{G} \quad (2.18)$$

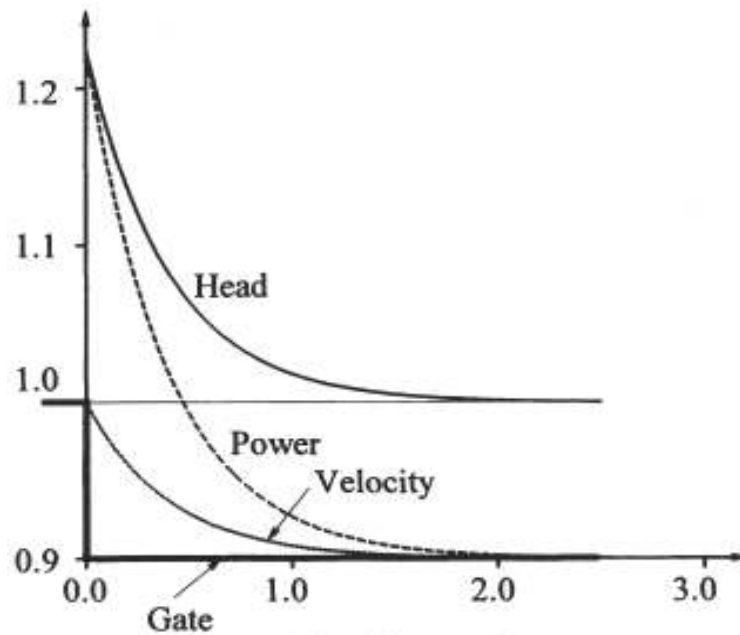


Σχήμα 10 : Μεταβολή της ισχύος μετά από βηματική μεταβολή της θέσης των υδατοθυρίδων [4]

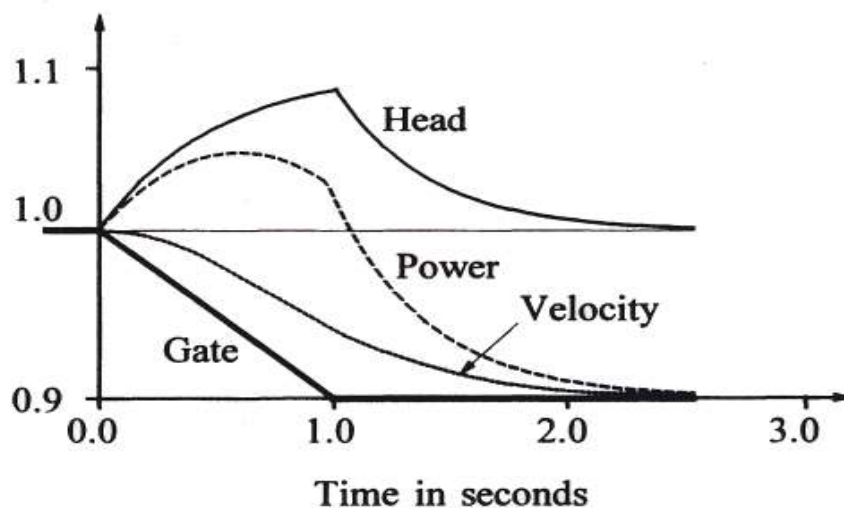
Στο σχήμα 10 φαίνεται το διάγραμμα της απόκρισης ενός ιδανικού υδροστροβίλου με  $T_w = 4 \text{ sec}$ . Μετά από βηματική μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων, η μηχανική ισχύς μειώνεται κατά 2 α.μ. Μετά η ισχύς αυξάνεται εκθετικά με μία σταθερά χρόνου  $\frac{T_w}{2}$ , μέχρις ότου τελικά σταθεροποιηθεί στην τιμή 1 α.μ. πάνω από την αρχική τιμή της ισχύος πριν από την μεταβολή.

Η αρχική τιμή που λαμβάνει η μηχανική ισχύς είναι αντίθετη από την κατεύθυνση της μεταβολής. Αυτό συμβαίνει καθώς με το ακαριαίο άνοιγμα των υδατοθυρίδων, η παροχή δεν μεταβάλλεται εξίσου γρήγορα εξαιτίας της αδράνειας του νερού. Όμως η πίεση στον στρόβιλο μειώνεται προκαλώντας μείωση και στην ισχύ του. Με μία απόκριση που καθορίζεται από τη σταθερά χρόνου  $T_w$ , το ρευστό(νερό) επιταχύνεται μέχρι η παροχή να φτάσει την νέα τιμή (μετά το μεταβατικό) η οποία θα αποτελεί και τιμή μονίμου καταστάσεως.

Στο σχήμα 11 δείχνονται οι αποκρίσεις της ισχύος, της πίεσεως και της ταχύτητας του νερού ενός ιδανικού υδροστροβίλου με  $T_w = 1 \text{ sec}$  όταν οι υδατοθυρίδες ‘κλείνουν’ κατά 0,1 α.μ. με βηματική μεταβολή και στο σχήμα 12 με μεταβολή ράμπας [4]:



Σχήμα 11 : Βηματική μεταβολή -0,1 α.μ. των υδατοθυρίδων [4]



Σχήμα 12 : Μεταβολή ράμπας -0,1 α.μ. των υδατοθυρίδων [4]

### 2.3 Μη γραμμικό μοντέλο στροβίλου θεωρώντας την υδάτινη στήλη ανελαστική

#### 2.3.1 Γενικά

Στην συνέχεια θα αναπτυχθούν μη γραμμικά μοντέλα υδροστροβίλων, για τις περιπτώσεις ενός μονού αγωγού που τροφοδοτεί έναν στρόβιλο και πολλαπλών αγωγών που τροφοδοτούν ισάριθμους στροβίλους. Τα μοντέλα βασίζονται στην απλοποιητική παραδοχή ότι το νερό θεωρείται εντελώς ασυμπίεστο. Πιο συγκεκριμένα η υδάτινη στήλη που βρίσκεται στον αγωγό προσαγωγής θεωρείται ότι είναι ‘στερεά’.

### 2.3.2 Μοντελοποίηση ενός αγωγού/ενός στροβίλου

---

Η πιο απλή περίπτωση υδροηλεκτρικού σταθμού είναι αυτή όπου ένας μόνο αγωγός τροφοδοτεί μία μονάδα στροβίλου. Τα χαρακτηριστικά του αγωγού και του στροβίλου καθορίζονται από τέσσερις βασικές εξισώσεις που σχετίζονται με την ταχύτητα του νερού στον αγωγό, με την επιτάχυνση της υδάτινης στήλης υπό την επίδραση της βαρύτητας και με την παραγωγή μηχανικής ισχύος από το στρόβιλο.

Παρακάτω αναπτύσσεται μία μη γραμμική προσέγγιση, η οποία είναι κατάλληλη για μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας και της ισχύος, όπως και για μελέτες νησιδοποίησης (islanding), απομονωμένης λειτουργίας συστήματος (isolated system operation), απόρριψης φορτίου (Load rejection) και αποκατάστασης συστήματος (system restoration).

Θεωρώντας ότι το νερό ενεργεί ως ασυμπίεστο ρευστό, οι βασικές υδροδυναμικές εξισώσεις που διέπουν το μη γραμμικό μοντέλο του αγωγού-στροβίλου είναι οι ακόλουθες:

$$Q = K_u G \sqrt{H} \quad (2.19)$$

$$P_{mech} = \eta \gamma H Q \quad (2.20)$$

$$Q = AU \quad (2.21)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{a_g A}{L} (H - H_o + H_f) \quad (2.22)$$

- όπου  $Q$  η παροχή στον στρόβιλο (σε  $m^3 / s$ )  
 $K_u$  σταθερά αναλογίας  
 $G$  το άνοιγμα των υδατοθυρίδων που κατευθύνουν το νερό στο στρόβιλο  
 $H$  η πίεση στην είσοδο του στροβίλου/ υδραυλικό ύψος (εκφρασμένη σε μέτρα στήλης ύδατος)  
 $H_o$  η στατική πίεση του αγωγού (αρχική τιμή μόνιμης κατάστασης του υδραυλικού ύψους εκφρασμένη σε μέτρα στήλης ύδατος)  
 $H_f$  η πίεση λόγω τριβής στον αγωγό (εκφρασμένη σε μέτρα στήλης ύδατος)  
 $P_{mech}$  η μηχανική ισχύς που παράγει ο στρόβιλος (σε Watt)  
 $\eta$  ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου  
 $\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού (σε  $Nt / m^3$ )  
 $A$  η μέση διατομή του αγωγού προσαγωγής (σε  $m^2$ )  
 $U$  η ταχύτητα του νερού στον αγωγό  
 $a_g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας (σε  $m / s^2$ )  
 $L$  το μήκος του αγωγού (σε  $m$ )

Στο μη γραμμικό μοντέλο του στροβίλου που περιγράφεται, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε μεγάλες μεταβολές και έτσι κανονικοποιούμε τις παραπάνω εξισώσεις με βάση το κανονικό σημείο λειτουργίας  $r$ .

Από την εξίσωση (2.19) θα προκύψει η εξής σχέση :

$$\frac{Q}{Q_r} = \frac{K_u}{K_u} \frac{G}{G_r} \sqrt{\frac{H}{H_r}}$$

Στο α.μ. σύστημα θα έχουμε :

$$\bar{q} = \bar{G}\sqrt{\bar{h}} \quad (2.23)$$

Από την εξίσωση (2.20) με κανονικοποίηση θα έχουμε:

$$\frac{P_{mech}}{P_{mech,r}} = \frac{\eta\gamma HQ}{\eta_r\gamma H_r Q_r}$$

και σε α.μ. προκύπτει η σχέση:

$$\bar{P}_{mech} = \eta\bar{h}\bar{q} \quad (2.24)$$

Η πίεση λόγω τριβής στον αγωγό  $H_f$  δίνεται από τον τύπο:

$$H_f = kQ^2 \quad (2.25)$$

όπου  $k$  η σταθερά απωλειών (σε  $m / (m^3 / s)^2$ ).

Επομένως, κανονικοποιώντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η εξής σχέση:

$$\frac{H_f}{H_r} = \frac{kQ^2}{k_r Q_r^2}$$

και σε α.μ. μεγέθη, λύνοντας ως προς  $\bar{k}$ , θα έχει τη μορφή:

$$\bar{k} = \frac{\frac{H_f}{H_r}}{\frac{Q^2}{Q_r^2}} = \frac{\frac{H_f}{H_r}}{\frac{H_r}{H_r} \frac{Q^2}{Q_r^2}} = \frac{k}{Q_r^2} \quad (2.26)$$

Από την εξίσωση (2.22) θα προκύψει :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{Q}{Q_r} \right) = -\frac{a_g A H_r}{L Q_r} \left( \frac{H}{H_r} - \frac{H_o}{H_r} + \frac{H_f}{H_r} \right) \Leftrightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{Q}{Q_r} \right) = \frac{a_g A H_r}{L Q_r} \left( \frac{H_o}{H_r} - \frac{H}{H_r} - \frac{H_f}{H_r} \right)$$

Επομένως η εξίσωση μας α.μ. θα είναι:

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = \frac{1}{T_w} (\bar{h}_o - \bar{h} - \bar{h}_f) \quad (2.27)$$

όπου αντικαταστήσαμε  $T_w = \frac{LQ_r}{a_g AH_r}$  (2.28)

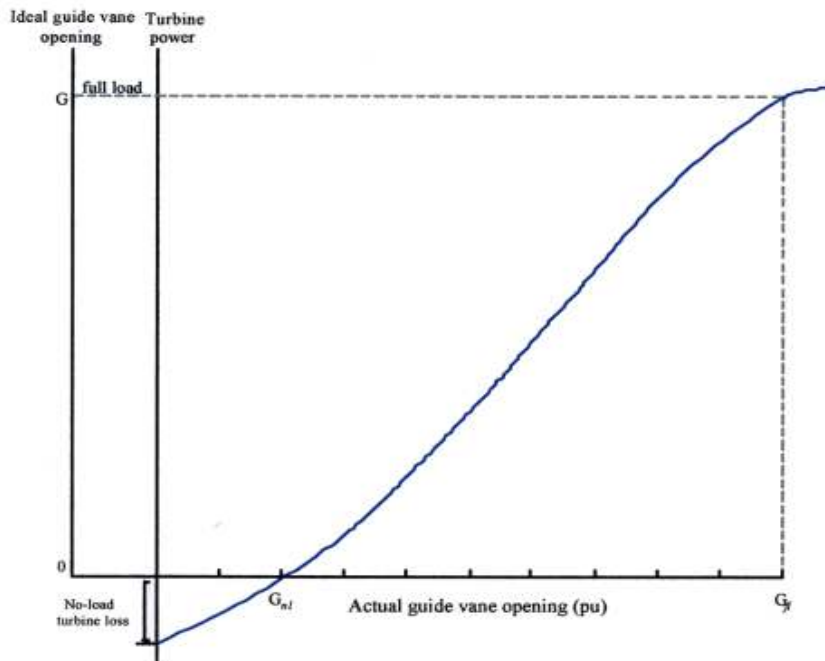
Η τιμή του  $T_w$  είναι ανάλογη του μήκους του αγωγού προσαγωγής και στη μη γραμμική ανάλυση, εξαρτάται από την ταχύτητα του νερού στο κανονικό σημείο λειτουργίας.

Η τιμή του  $T_w$  κυμαίνεται γενικά από 0.5 ως 4 sec [4]. Στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα κατά κανόνα είναι της τάξεως των 1-2 sec [5].

Για μία μικρή μεταβολή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων  $\Delta\bar{G} > 0$ , η εξίσωση (2.27) λαμβάνει τη μορφή σε α.μ μεγέθη:

$$T_w \frac{d\Delta\bar{q}}{dt} = -\Delta(\bar{h} + \bar{h}_f) \quad (2.29)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, το  $G$  είναι το ιδανικό άνοιγμα των υδατοθυρίδων που βασίζεται στην μετατροπή στο α.μ σύστημα από το κενό φορτίο στο πλήρες (ίσο με 1 α.μ.). Αυτό σχετίζεται με το πραγματικό άνοιγμα των υδατοθυρίδων  $g$  όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 13). Το πραγματικό άνοιγμα των υδατοθυρίδων στηρίζεται στην μετατροπή της πλήρους κλειστής θέσης στην πλήρως ανοιχτή θέση, που ισούται με 1 α.μ.



**Σχήμα 13 : Χαρακτηριστική του ανοίγματος των υδατοθυρίδων [15]**

Το ιδανικό άνοιγμα των υδατοθυρίδων σχετίζεται με το πραγματικό άνοιγμα των υδατοθυρίδων με την παρακάτω σχέση:

$$\bar{G} = A_i \bar{g} \quad (2.30)$$

όπου  $A_i$  το κέρδος του στροβίλου το οποίο μας δίνεται από τη σχέση

$$A_i = \frac{1}{\bar{g}_{FL} - \bar{g}_{NL}} \quad (2.31)$$

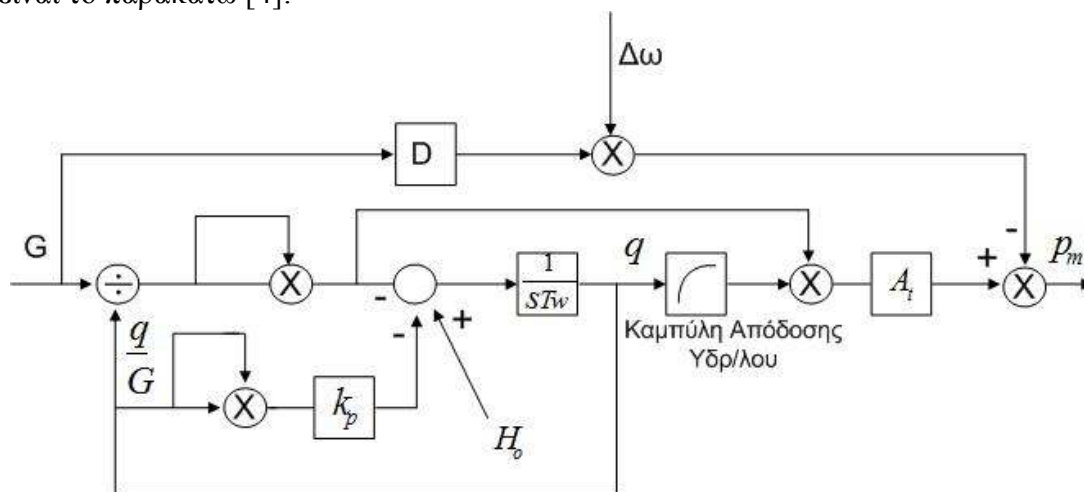
Επιπροσθέτως, για να εξαχθεί η τελική εξίσωση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου εκφρασμένη σε α.μ. τιμές πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο συντελεστής απόσβεσης  $D$ . Αυτή η παράμετρος συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο και δηλώνει την επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας  $\Delta\omega$  στην απόδοση του υδροστροβίλου. Οι τιμές του  $D$  κυμαίνονται στο διάστημα  $0.5 \leq D \leq 2.0$  [15].

Επομένως, η εξίσωση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο θα είναι:

$$\bar{P}_{mech} = A_i \eta \bar{h} \bar{q} - D \bar{G} \Delta \bar{\omega} \quad (2.32)$$

Το υδραυλικό σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.23), (2.24), (2.26), (2.27), (2.31), (2.32). Το διάγραμμα του σχήματος 14 είναι μία μη γραμμική αναπαράσταση, η οποία απεικονίζει πως η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη θέση των υδατοθυρίδων κατά κύριο λόγο αλλά και από τις πρόσθετες εισόδους  $\Delta\bar{\omega}, \bar{h}_o$ . Η τιμή του χρόνου εκκίνησης ύδατος του αγωγού  $T_w$  λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τις τιμές του κανονικού σημείου λειτουργίας, έχοντας δηλαδή ως βάση τις τιμές του υδραυλικού ύψους/πίεσης  $H_r$  και της παροχής στο στρόβιλο  $Q_r$ .

Τελικά το μοντέλο το οποίο υλοποιήθηκε στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB είναι το παρακάτω [4]:



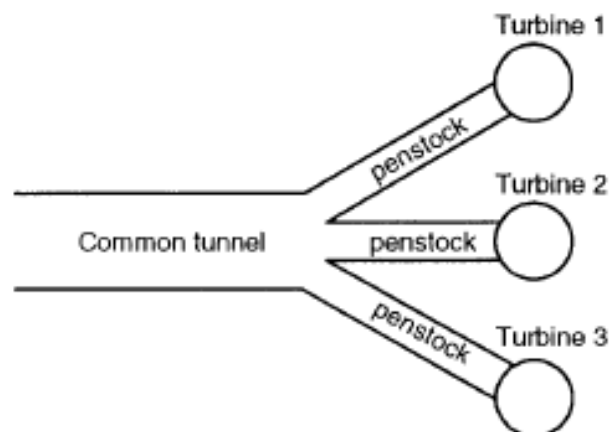
**Σχήμα 14 : Μοντέλο ανελαστικής στήλης ύδατος**



**2.3.3 Μοντελοποίηση πολλαπλών αγωγών/πολλαπλών στρόβιλων τροφοδοτούμενοι από κοινό αγωγό**

Τα μοντέλα των υδροστροβίλων που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής βασίζονται στην ανάλυση ενός μονού αγωγού που τροφοδοτεί έναν στρόβιλο. Υπάρχουν περιπτώσεις, ωστόσο, όπου παραπάνω από ένας στρόβιλοι ενός υδροηλεκτρικού σταθμού μοιράζονται έναν κοινό αγωγό, ή μια κοινή σήραγγα η οποία εν συνεχεία διακλαδίζεται ώστε να δημιουργήσει τους αγωγούς που οδηγούν σε αυτούς. Εξαιτίας του κοινού αγωγού, δημιουργείται υδραυλική σύζευξη μεταξύ των διαφορετικών μονάδων και η δυναμική του κάθε στρόβιλου εξαρτάται και από τον έλεγχο της λειτουργίας των υπολοίπων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι και οι γεννήτριες του σταθμού είναι ηλεκτρικά συζευγμένες, αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος και άρα απαιτείται λεπτομερέστερη εξέταση της δυναμικής των συζευγμένων υδροστροβίλων [15].

Το μοντέλο που έχει παρουσιαστεί, λοιπόν, παραπάνω (για έναν αγωγό/έναν στρόβιλο) πρέπει να βελτιωθεί ώστε να ληφθεί υπόψη η επίπτωση της σύζευξης των διακυμάνσεων της πίεσης, που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των στρόβιλων που τροφοδοτούνται από ένα κοινό αγωγό, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 15 : Τροφοδότηση τριών υδροστροβίλων από κοινό αγωγό μέσω τριών [9]**

Στην ανωτέρω εικόνα δίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα μιας διάταξης όπου ένας κοινός αγωγός(ή σήραγγα) παρέχει νερό σε τρεις αγωγούς που ο καθένας τροφοδοτεί έναν υδροστρόβιλο [9].

Στις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να περιγραφεί το μοντέλο των πολλαπλών αγωγών/πολλαπλών στρόβιλων που τροφοδοτούνται από κοινό αγωγό, υπάρχουν οι εξής μεταβλητές:

- $T_{wc}$  ο χρόνος εκκίνησης ύδατος του κοινού αγωγού(επάνω αγωγός)
- $T_{wi}$  ο χρόνος εκκίνησης ύδατος του μεμονωμένου αγωγού που σχετίζεται με τη μηχανή  $i$  ( $i = 1, 2$  ή  $3$ )
- $k_c$  ο συντελεστής τριβής του κοινού αγωγού
- $k_i$  ο συντελεστής τριβής του μεμονωμένου αγωγού που τροφοδοτεί τη μηχανή  $i$  ( $i = 1, 2$  ή  $3$ )

- $h_c$  η πίεση στη διακλάδωση μεταξύ του κοινού αγωγού και των μεμονωμένων αγωγών
- $h_{oc}$  στατική πίεση της υδάτινης στήλης στη διακλάδωση
- $h_{oi}$  στατική πίεση στην υποδοχή του στροβίλου  $i$  ( $i = 1, 2$  ή  $3$ )
- $h_i$  η πίεση στην υποδοχή του στροβίλου  $i$  ( $i = 1, 2$  ή  $3$ )
- $q_i$  η παροχή στον μεμονωμένο αγωγό και στον στρόβιλο  $i$  ( $i = 1, 2$  ή  $3$ )
- $q_c$  η παροχή στον κοινό αγωγό (η οποία τείνει να γίνει ίση με το άθροισμα των παροχών των μεμονωμένων αγωγών, από την εξίσωση συνέχειας)

Η δυναμική της παροχής στον κοινό αγωγό έχει οριστεί από την (2.27) :

$$T_{wc} \frac{d\bar{q}_c}{dt} = (\bar{h}_{oc} - \bar{h}_c - \bar{k}_c \bar{q}_c^2) \quad (2.33)$$

Όμως, για κάθε μεμονωμένο αγωγό η προηγούμενη εξίσωση λαμβάνει την μορφή:

$$T_{wi} \frac{d\bar{q}_i}{dt} = (\bar{h}_{oi} - \bar{h}_{oc}) - (\bar{h}_i - \bar{h}_c) - \bar{k}_c \bar{q}_i^2, (i = 1, 2, 3) \quad (2.34)$$

Λύνοντας ως προς  $(\bar{h}_{oc} - \bar{h})$  την (2.33) και αντικαθιστώντας στην (2.34), προκύπτει:

$$T_{wi} \frac{d\bar{q}_i}{dt} = (\bar{h}_{oi} - \bar{h}_i) - T_{wc} \frac{d\bar{q}_c}{dt} - \bar{k}_i \bar{q}_i^2 - \bar{k}_c \bar{q}_c^2, (i = 1, 2) \quad (2.35)$$

Γνωρίζοντας ότι η παροχή στον κοινό αγωγό είναι ίση με το άθροισμα των παροχών των μεμονωμένων αγωγών, τελικά λαμβάνεται η παρακάτω σχέση:

$$(T_{wi} + T_{wc}) \frac{d\bar{q}_i}{dt} = (\bar{h}_{oi} - \bar{h}_i) - T_{wc} \frac{d(\bar{q}_j + \bar{q}_k)}{dt} - \bar{k}_i \bar{q}_i^2 - \bar{k}_c \bar{q}_c^2, \text{ όπου } (i, j) = \text{κυκλική} \\ \text{εναλλαγή των } (1, 2, 3) \quad (2.36)$$

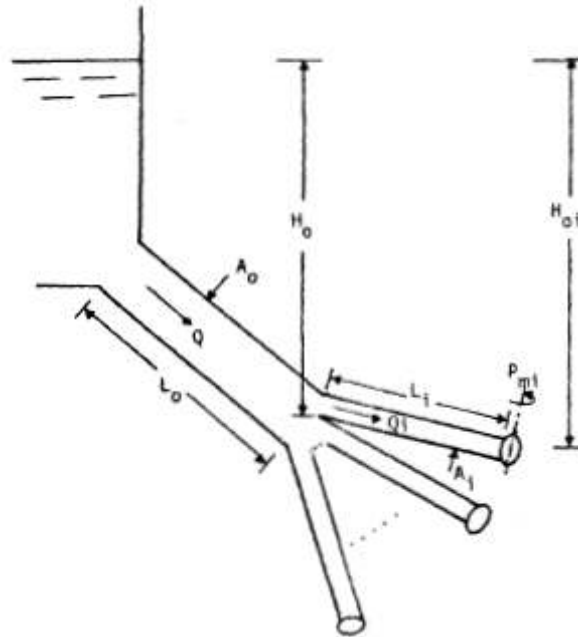
Αυτή η εξίσωση περιγράφει τη δυναμική της παροχής σε κάθε μεμονωμένο αγωγό, περιλαμβάνοντας το φαινόμενο της υδραυλικής αλληλεπίδρασης (coupling effect) μεταξύ των πολλαπλών αγωγών/στροβίλων.

Ο υπολογισμός του  $T_w$  καθίσταται πολυπλοκότερος από την απλή περίπτωση του ενός στροβίλου που τροφοδοτείται από έναν μόνο αγωγό. Εν προκειμένω, ο υπολογισμός του  $T_w$  μεταβάλλεται σε συνάρτηση του αριθμού των στροβίλων που είναι σε λειτουργία και των αντίστοιχων μεμονωμένων αγωγών που τους τροφοδοτούν.

Σύμφωνα με το [10], το πρόβλημα προσεγγίζεται με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος, ο οποίος αναφέρεται για λόγους πληρότητας, αφορά την χρησιμοποίηση ενός πίνακα που περιλαμβάνει τις χρονικές σταθερές  $T_w$  των διαφόρων τμημάτων για την μοντελοποίηση των πολλαπλών αγωγών [8].

Ο δεύτερος, και ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά στην χρησιμοποίηση διαφορετικών μοντέλων για τους αγωγούς, στα οποία κάθε φορά ο χρόνος εκκίνησης ύδατος  $T_w$  υπολογίζεται για τις εκάστοτε τιμές των μεταβλητών των σημείων κανονικής λειτουργίας ανάλογα με τον αριθμό των στρόβιλων που είναι ανά περίπτωση σε λειτουργία.



**Σχήμα 16 : Κοινός αγωγός που διακλαδίζεται σε τρεις μεμονωμένους [11]**

Πιο αναλυτικά και όπως παρουσιάζεται σχήμα 16 και στο [11] για την περίπτωση ενός κοινού αγωγού που διακλαδίζεται σε  $n$  μεμονωμένους αγωγούς που τροφοδοτούν ισάριθμους υδροστρόβιλους το  $T_w$  υπολογίζεται ως εξής:

Υποθέτουμε ότι όλοι οι στρόβιλοι έχουν την ίδια αρχική τιμή υδραυλικού ύψους  $H_{0i}$  και την ίδια ονομαστική ισχύ  $P_B$ , από τις οποίες η βασική τιμή παροχής υπολογίζεται ως η απαιτούμενη παροχή για την παραγωγή της ονομαστικής ισχύος υπό το υδραυλικό ύψος  $H_{0i}$ . Επίσης, άνοιγμα των υδατοθυρίδων 1 α.μ. ή 100% αντιστοιχεί στην βασική παροχή, που είναι υπολογισμένη για τα ονομαστικά μεγέθη.

Τελικά για τον κοινό αγωγό ή την κοινή σήραγγα ο χρόνος εκκίνησης ύδατος είναι :

$$T_{w0} = \frac{L_0 Q}{a_g A_0 H_0} \quad (2.37)$$

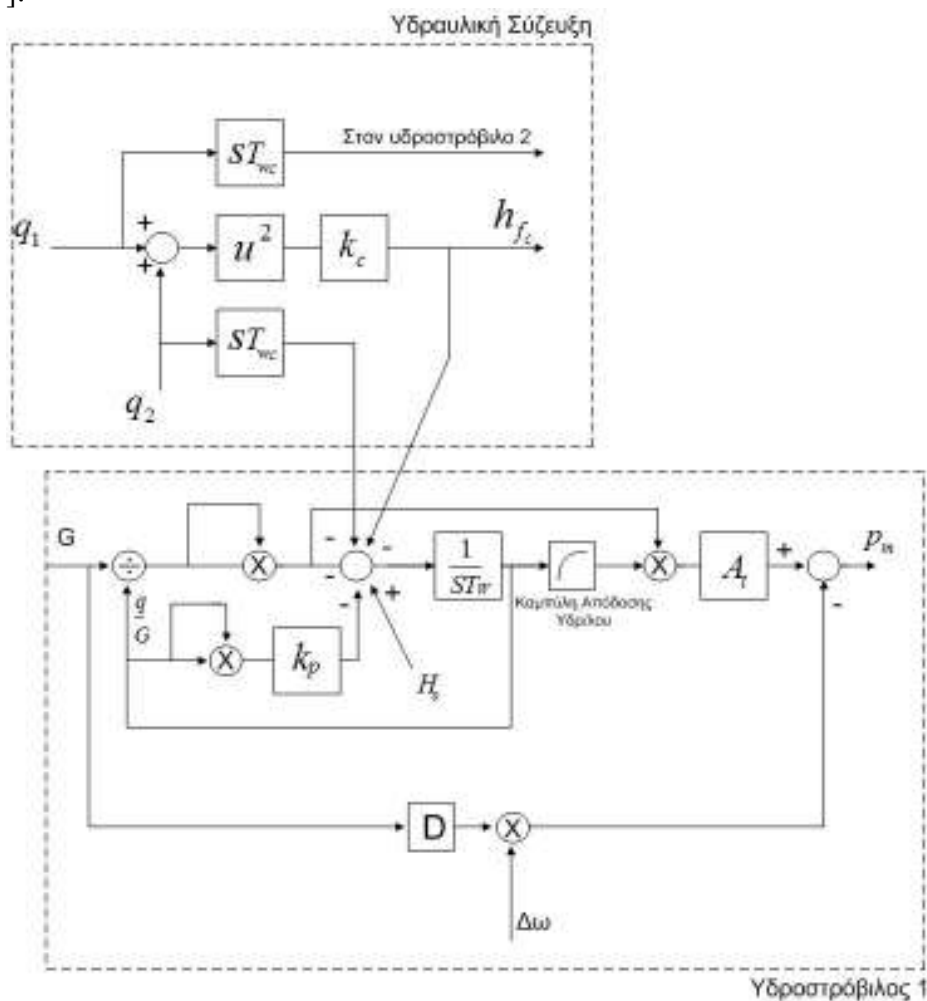
Και για τους μεμονωμένους αγωγούς :

$$T_{wi} = \frac{L_i Q_i}{a_g A_i H_{0i}}, \text{ όπου } (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.38)$$

και

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.39)$$

Επομένως, το μοντέλο για δύο αγωγούς/δύο στροβίλους που τροφοδοτούνται από κοινό αγωγό, το οποίο υλοποιήθηκε στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB, είναι το εξής [9]:



Σχήμα 17 : Μοντέλο δύο αγωγών / δύο στροβίλων με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού

## 2.4 Μη γραμμικό μοντέλο στροβίλου θεωρώντας την υδάτινη στήλη ελαστική

---

### 2.4.1 Γενικά

---

Το προηγούμενο μοντέλο για το υδραυλικό μέρος καθώς και η ανάλυση του στηρίχθηκαν στην παραδοχή της ανελαστικής, ‘στερεας’ υδάτινης στήλης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να περιγράψει μόνο σε γενικές γραμμές τη δυναμική του υδροστροβίλου, ωστόσο για πλειάδα εφαρμογών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα αποτελέσματά του είναι ικανοποιητικά. Για τους περισσότερους, όμως, αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς όπου απαιτείται λεπτομερέστερη ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του υδραυλικού μέρους, για εφαρμογές όπου αναλύονται ταχέα μεταβατικά φαινόμενα καθώς επίσης για μικρά ΥΗΕ με στροβίλους Pelton, οι οποίοι λειτουργούν κατά κανόνα με αγωγό προσαγωγής μεγάλου μήκους και μεγάλου υδραυλικού ύψους, πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο η συμπιεστότητα του ρευστού και η ελαστικότητα του αγωγού. Στην ανάλυση αυτήν η υδάτινη στήλη δεν αντιμετωπίζεται σαν στερεό, δηλαδή ως ανελαστική, αλλά ως μέσο μετάδοσης κυμάτων πίεσεως.

### 2.4.2 Μοντελοποίηση ενός αγωγού/ενός στροβίλου

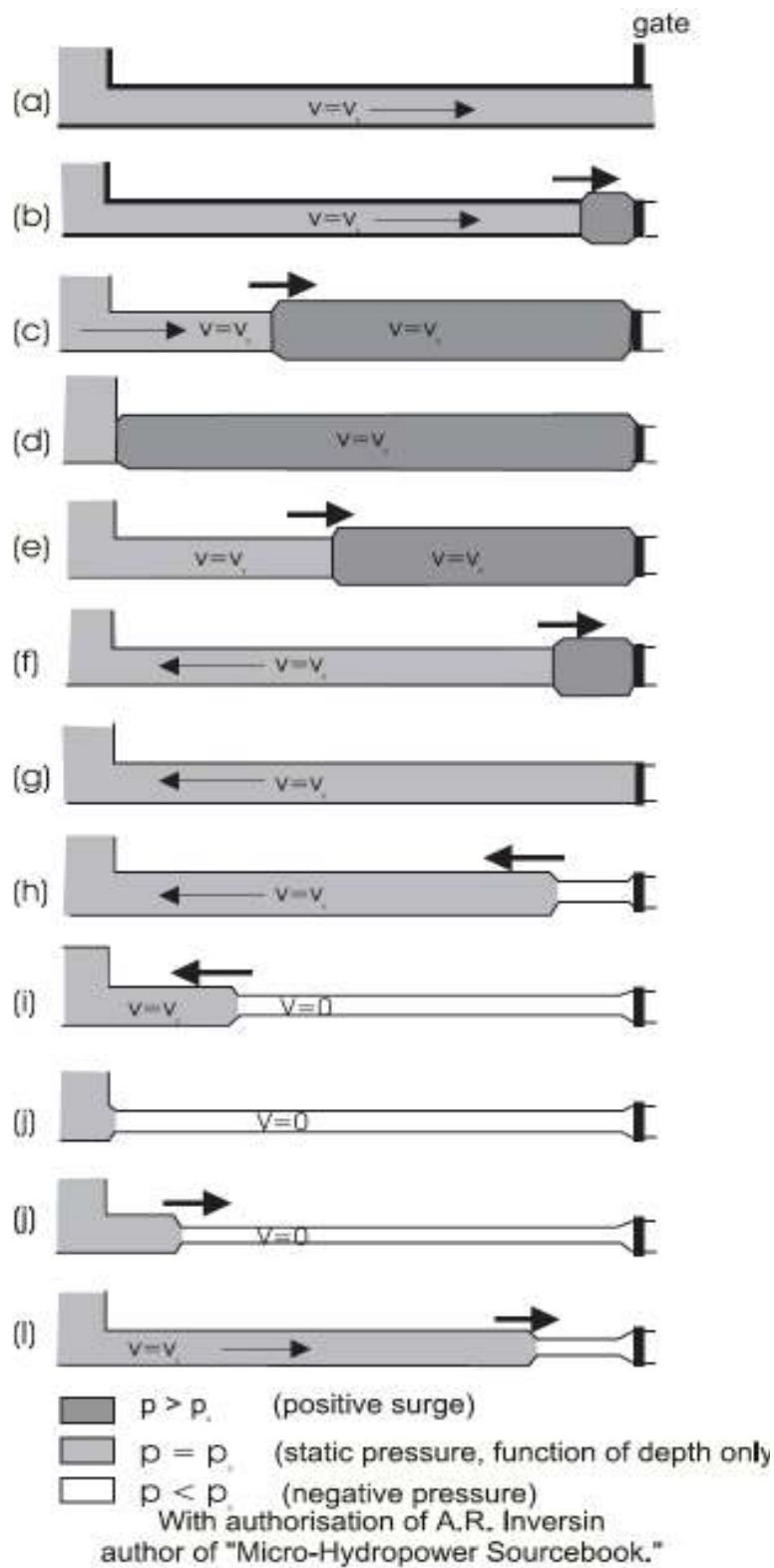
---

Οι διακυμάνσεις της πίεσης προκαλούνται όταν επιβραδύνεται ή επιταχύνεται το ρευστό (νερό) μετά από μεταβολές όπως αυτές του ελέγχου της βελόνης των ακροφυσίων (για στροβίλους Pelton). Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται από μία σειρά από θετικά και αρνητικά κύματα πίεσης, τα οποία ταξιδεύουν εμπρός-και-πίσω στον αγωγό προσαγωγής μέχρι ότου να αποσβεστούν λόγω της τριβής.

Η φύση αυτών των κυματικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον αγωγό προσαγωγής του νερού του υδροστροβίλου μπορεί να γίνει πιο κατανοητή με ένα παράδειγμα. Ας υποθεθεί ότι νερό ρέει σε όλον τον αγωγό με συγκεκριμένη ταχύτητα  $V_0$  και για λόγους απλότητας της ανάλυσης αμελούνται οι απώλειες, ο παράγοντας απόσβεσης των κυμάτων. Στο παράδειγμα ξαφνικά κλείνουν οι υδατοθυρίδες (μετακίνηση της βελόνης σε Pelton) που οδηγούν στο στρόβιλο. Αν το νερό ήταν εντελώς ασυμπίεστο και τα τοιχώματα του αγωγού ήταν τελείως άκαμπτα, τότε τα σωματίδια ολόκληρης της υδάτινης στήλης θα έπρεπε να επιβραδυνθούν ταυτόχρονα. Από το 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα, όσο πιο γρήγορη είναι η επιβράδυνση τόσο πιο μεγάλη η αντίδραση και με ένα ακαριαίο κλείσιμο των υδατοθυρίδων όλο το νερό θα σταματούσε αμέσως και η δύναμη θα ήταν άπειρη, κάτι που στη φύση είναι αδύνατο.

Στην πραγματικότητα, λόγω της συμπιεστότητάς του, το νερό δεν επιβραδύνεται όλο ταυτόχρονα αλλά μόνο το άκρο που είναι σε επαφή με τις υδατοθυρίδες, ενώ το υπόλοιπο αργότερα. Δεδομένου ότι οι υδατοθυρίδες έκλεισαν εντελώς, η ταχύτητα του νερού που έχει φτάσει στο άκρο του αγωγού αναγκαστικά μηδενίζεται. Το νερό όμως εξακολουθεί να έρχεται από τη δεξαμενή με την προηγούμενη ταχύτητα  $V_0$ . Δημιουργείται έτσι ένα μέτωπο κύματος: Αριστερά από το μέτωπο κύματος το νερό κινείται ομοιόμορφα με ταχύτητα  $V_0$ . Δεξιά από το μέτωπο του κύματος η ταχύτητα του νερού είναι μηδενική. Το νερό που περνάει το μέτωπο του κύματος

ακινητοποιείται και συγχρόνως συμβάλλει στην αύξηση της πίεσης δεξιά από το μέτωπο του κύματος. Αυτή η αύξηση της πίεσης που προκαλείται από την περίσσεια του νερού δεξιά από το μέτωπο του κύματος προκαλεί και τη διαστολή του αγωγού.



**Σχήμα 18 : Αναπαράσταση του οδεύοντος κύματος στον αγωγό (Πηγή : ΕΣΗΑ)**

Το μέτωπο του κύματος τώρα ταξιδεύει προς τα αριστερά με την ταχύτητα του ήχου στο συγκεκριμένο μέσο, με τις συγκεκριμένες συνθήκες του αγωγού(διατομή, υλικό, πάχος). Μόλις το κύμα πίεσεως φτάσει στο προς τη δεξαμενή άκρο του αγωγού συμβαίνουν δυο πράγματα: Το επιπλέον νερό που είχε εγκλωβιστεί στον αγωγό εκτονώνεται και επιστρέφει στη δεξαμενή με την ίδια ταχύτητα με την οποία κατέβαινε προς τον στρόβιλο ενώ η πίεση επιστρέφει στην αρχική της τιμή(υδροστατική πίεση). Δημιουργείται έτσι ένα νέο μέτωπο κύματος που τώρα κινείται προς τα δεξιά. Ανακλάται δηλαδή και αλλάζει πρόσημο.

Το μέτωπο κύματος κινείται τώρα προς το στρόβιλο με την ταχύτητα του ήχου. Δεξιά έχουμε όπως και πριν υπερπίεση και μηδενική ταχύτητα νερού, ενώ αριστερά από το μέτωπο κύματος το νερό κινείται με ταχύτητα  $V_0$ .

Μόλις το μέτωπο κύματος φτάσει ξανά στις κλειστές πύλες του υδροστροβίλου η πίεση έχει επανέλθει στην κανονική της τιμή, αλλά το νερό εξακολουθεί λόγω αδράνειας να φεύγει προς τη δεξαμενή με ταχύτητα  $V_0$ . Δημιουργείται έτσι ένα κύμα υποπίεσεως αφού δεξιά από το μέτωπο του κύματος απομένει τώρα λιγότερη μάζα νερού. Η υποπίεση αυτή προκαλεί μία μικρή συστολή του αγωγού. Δηλαδή το κύμα πίεσεως ανακλάται και διπλασιάζεται. Τώρα, δεξιά από το μέτωπο του κύματος η ταχύτητα του νερού είναι μηδενική ενώ εμφανίζεται υποπίεση, και αριστερά από το μέτωπο του κύματος το νερό ρέει προς τη δεξαμενή υπό κανονική πίεση.

Όταν το κύμα υποπίεσεως φτάσει στο άκρο του αγωγού προς τη δεξαμενή θα ανακλαστεί για μία ακόμα φορά αλλάζοντας πρόσημο. Λόγω της υποπίεσης, δηλαδή, ο αγωγός θα ‘αναρροφήσει’ νερό από τη δεξαμενή. Δημιουργείται έτσι ένα νέο μέτωπο κύματος που οδεύει με την ταχύτητα του ήχου προς τον στρόβιλο, δεξιά από το οποίο εξακολουθεί να υπάρχει υποπίεση και ακινητοποιημένο νερό, ενώ αριστερά του η πίεση έχει επανέλθει στην κανονική τιμή της και το νερό ρέει προς το στρόβιλο με ταχύτητα  $V_0$ .

Τελικά, όταν το μέτωπο κύματος φτάσει ξανά στο κλειστό άκρο του αγωγού προς το στρόβιλο έχουμε ακριβή επανάληψη των συνθηκών που προκάλεσαν το όλο φαινόμενο. Προσθέτοντας όμως τις απώλειες, όπως είναι και σε ένα πραγματικό σύστημα ΥΗΣ, το κυματικό φαινόμενο επαναλαμβάνεται μέχρι ότου να αποσβεστεί εντελώς [3].

Εδώ θα πρέπει να οριστεί η σταθερά  $T_e$ , η οποία ονομάζεται κυματική σταθερά χρόνου και είναι ίση με τον χρόνο που απαιτείται για να διατρέξει το κύμα πίεσεως το μήκος  $L$  του αγωγού, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$T_e = \frac{L}{a} \quad (2.40)$$

όπου  $a$  η ταχύτητα του ήχου στο νερό

Η ταχύτητα του κύματος, ή η ταχύτητα του ήχου στο νερό είναι περίπου  $1420m/s$ . Παρ’ όλα αυτά η ταχύτητα του κύματος σε έναν υδροσωλήνα είναι συνάρτηση των ελαστικών χαρακτηριστικών του νερού και του υλικού του σωλήνα.

Τυπικές τιμές της ταχύτητας του ήχου στο νερό στα ΥΗΕ κυμαίνονται από 1000 έως 1500 m/sec [4].

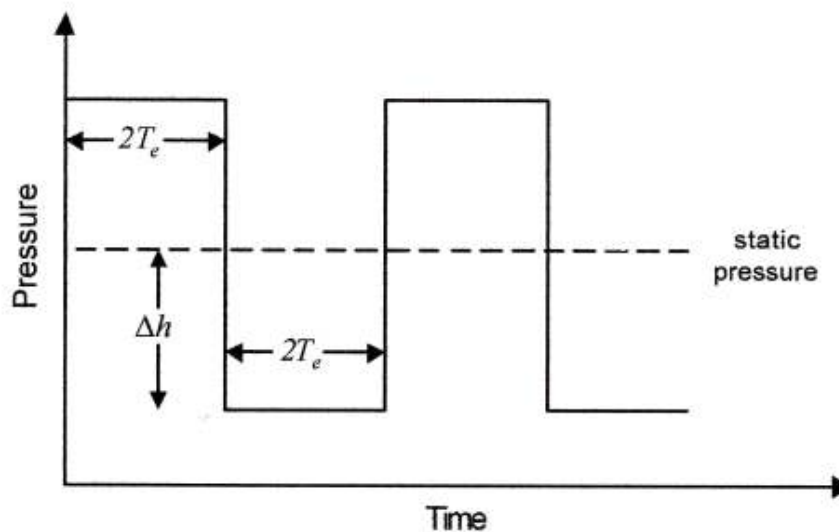
Η έκφραση της ταχύτητας του ήχου είναι:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{k} + \frac{d}{eE} \right)}} \quad (2.41)$$

- όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού  
 $k$  η σταθερά του Bulk στο νερό  
 $d$  η διάμετρος του αγωγού  
 $e$  το πάχος του κελύφους του αγωγού  
 $E$  η ελαστική σταθερά του υλικού του αγωγού(εδώ χάλυβας)

Το κυματικό φαινόμενο επαναλαμβάνεται μόλις το κύμα επιστρέψει στις υδατοθυρίδες και σύμφωνα με τον ορισμό του  $T_e$ , σε χρόνο  $t = 2T_e$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το κύμα πίεσης στις υδατοθυρίδες σε απότομο ‘κλείσιμό’ τους:



**Σχήμα 19 :** Απεικόνιση κύματος πίεσης στις υδατοθυρίδες σε απότομο “κλείσιμό” τους [15]

Τα κύματα πίεσης στον αγωγό μοντελοποιούνται με την υπόθεση ότι αυτός συμπεριφέρεται σαν μία υδραυλική γραμμή, η οποία τερματίζεται από ένα ανοιχτοκύκλωμα (στη μεριά του στροβίλου) και από ένα βραχυκύκλωμα στον άνω ταμιευτήρα [18].

Η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της πίεσης και της παροχής στο κυματικό μοντέλο είναι [8]:



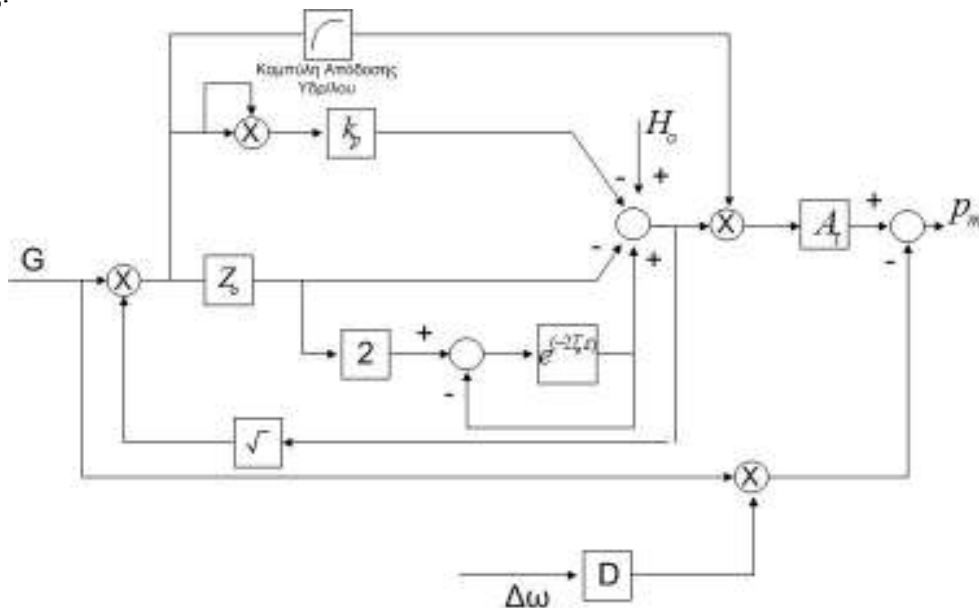
$$\frac{\bar{h}(s)}{\bar{q}(s)} = -Z_0 \tanh(T_e s) = \frac{-Z_0(1 - e^{-2T_e s})}{(1 + e^{-2T_e s})} \quad (2.42)$$

όπου  $Z_0$  η υδραυλική αντίσταση του αγωγού εκφρασμένη σε α.μ. με

$$Z_0 = \frac{T_w}{T_e} \quad (2.43)$$

Για μικρές τιμές του  $T_e$ , δηλαδή για μικρούς αγωγούς, και για χαμηλές συχνότητες η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική σχέση  $\tanh(x) \approx x$ , η οποία ισχύει για μικρές τιμές του  $x$ . Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει είναι αυτή η οποία είχε εξαχθεί αμελώντας τα κυματικά φαινόμενα, με τη θεώρηση του ασυμπέστου του υγρού. Από την παρατήρηση αυτή εξάγεται το συμπέρασμα ότι για ταχέα μεταβατικά φαινόμενα καθώς και για μεγάλους μήκους αγωγούς όπου τα  $T_w$  και  $T_e$  είναι συγκρίσιμα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται η κυματική συνάρτηση μεταφοράς [3].

Τελικά με τις εξισώσεις (2.27) και (2.42) πραγματοποιείται το κυματικό μοντέλο το οποίο υλοποιείται στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB και είναι ως εξής:



**Σχήμα 20 : Κυματικό μοντέλο ενός αγωγού ενός στροβίλου**

**2.4.3 Μοντελοποίηση πολλαπλών αγωγών/πολλαπλών στροβίλων τροφοδοτούμενοι από κοινό αγωγό**

Στην περίπτωση ενός ΥΗΕ όπου ένας κοινός αγωγός(ή σήραγγα) τροφοδοτεί παραπάνω από έναν στροβίλους, θα πρέπει κατά την μοντελοποίηση να ληφθεί υπόψη η υδραυλική αλληλεπίδραση των μεμονωμένων αγωγών και των στροβίλων τους με τον κοινό αγωγό αλλά και αναμεταξύ τους (coupling effect).

Για την μοντελοποίηση του κοινού αγωγού(ή σήραγγας) χρησιμοποιείται η ίδια λογική με αυτή της μοντελοποίησης ενός αγωγού, ενός στροβίλου. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ του υδραυλικού ύψους(ή πίεσης) και της παροχής για τον κοινό αγωγό θα είναι :

$$\frac{\bar{h}_c(s)}{\bar{q}_c(s)} = -Z_{0c} \tanh(T_{ec}s) = \frac{-Z_{0c}(1 - e^{-2T_{ec}s})}{(1 + e^{-2T_{ec}s})} \quad (2.44)$$

όπου το ‘c’ αναφέρεται στον κοινό αγωγό

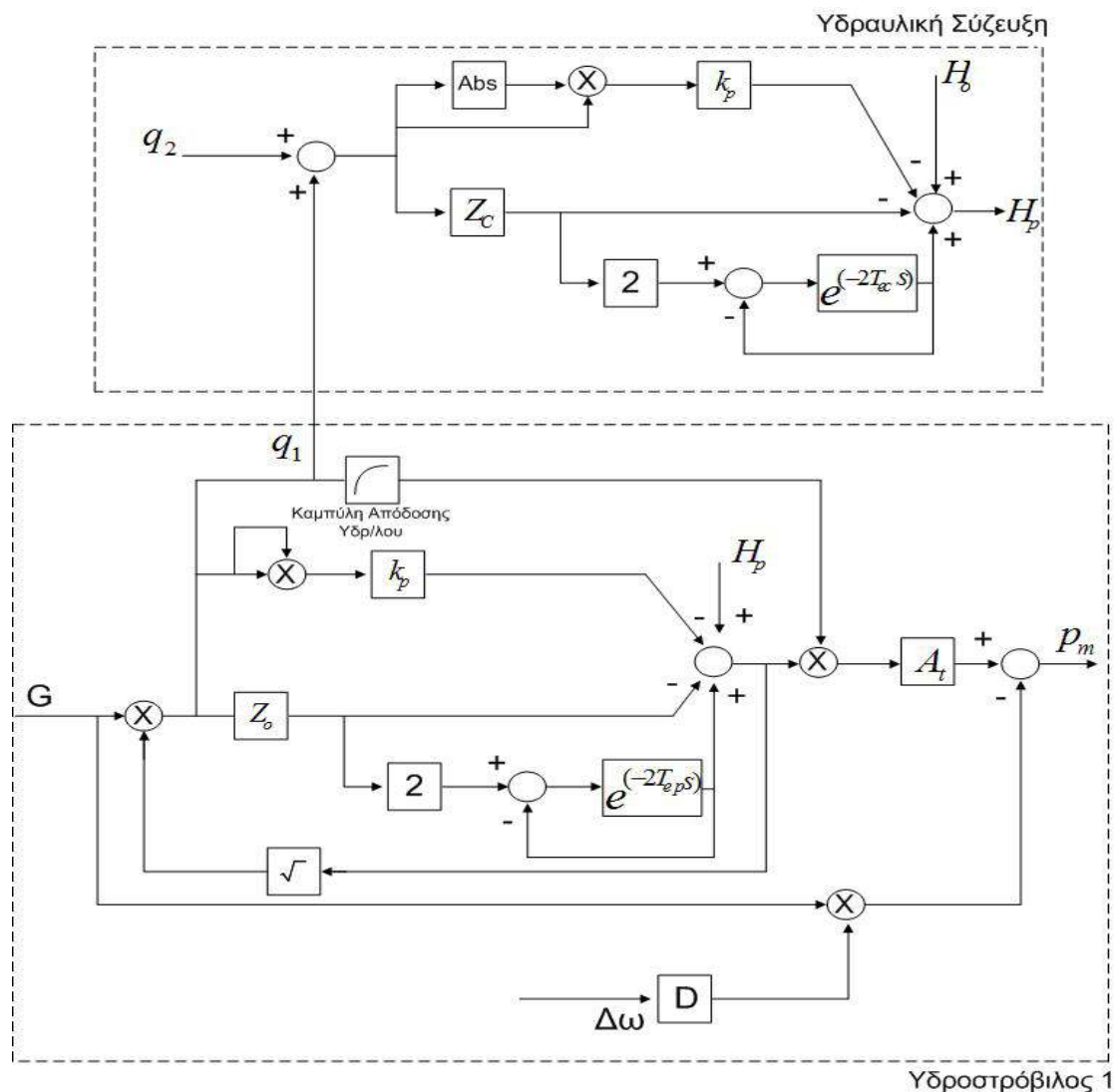
Επίσης, όπως και στο μοντέλο με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού για την περίπτωση υδραυλικής αλληλεπίδρασης, έτσι και εδώ, ισχύει ότι η παροχή του κοινού αγωγού είναι ίση με το άθροισμα των παροχών στους μεμονωμένους αγωγούς:

$$\bar{q}_c = \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \quad (2.45)$$

Οι απώλειες πίεσης στον κοινό αγωγό  $h_{jc}$  είναι ανάλογες του συντελεστή  $K_c$  επί την παροχή επί την απόλυτη τιμή της παροχής έτσι ώστε να διατηρείται το πρόσημο των απωλειών της πίεσης στην περίπτωση που η παροχή αντιστραφεί.

Στην περίπτωση πολλαπλών αγωγών/πολλαπλών στροβίλων τον ρόλο της στατικής πίεσης σε καθέναν από τους μεμονωμένους αγωγούς λαμβάνει η πίεση στην έξοδο του κοινού αγωγού. Η στατική πίεση  $H_0$  (ή σε κανονικοποιημένο μέγεθος  $\bar{h}_0 = 1\alpha.\mu.$ ) τροφοδοτεί τον κοινό αγωγό [15].

Τελικά το μοντέλο όπως πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB είναι το παρακάτω:



**Σχήμα 21 : Κυματικό μοντέλο δύο αγωγών / δύο στροβίλων**

**2.5 Εκτίμηση των παραμέτρων του υδραυλικού μέρους του ΜΥΗΣ της Ικαρίας**

**2.5.1 Γενικά**

Ο υπό μελέτη σταθμός είναι ένας ΜΥΗΣ (Small Hydro-electric Power Plant) και είναι μέρος αντλιοσταμειευτικού υβριδικού σταθμού, ο οποίος πρόκειται να εγκατασταθεί την Ικαρία.

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός που μοντελοποιείται και εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από :

- δύο ταμειυτήρες: τον άνω, και τον κάτω
- έναν κοινό αγωγό που αποτελείται από τέσσερα τμήματα συνολικού μήκους 3.046 m και ο οποίος διακλαδίζεται σε δύο δρόμους

- δύο αγωγούς ο καθένας συνολικού μήκους 68 m που τροφοδοτούν δύο υδροστροβίλους

- δύο υδροστροβίλους δράσεως (Pelton) δύο ακροφυσίων, που στρέφονται με ταχύτητα 1500 rpm, ονομαστικής ισχύος 1550 kW οι οποίοι είναι ευθέως συζευγμένοι στις γεννήτριες

- δύο σύγχρονες γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 1900 kVA με Συντελεστή Ισχύος 0,8

## 2.5.2 Συνιστώσες του υπό μελέτη ΜΥΗΣ της Ικαρίας

---

### 2.5.2.1 Αγωγοί

---

Τα στοιχεία και τα μεγέθη των αγωγών είναι συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα

αγωγός	μήκος	διάμετρος	πάχος	διατομή	υλικό
1	792	0,6	0,01031	0,2826	χάλυβας (steel)
2	598	0,6	0,01191	0,2826	χάλυβας (steel)
3	924	0,6	0,0143	0,2826	χάλυβας (steel)
4	732	0,6	0,018	0,2826	χάλυβας (steel)
5	8	0,4	0,0127	0,1256	χάλυβας (steel)
6	60	0,4	0,0127	0,1256	χάλυβας (steel)

**Πίνακας 6 : Μεγέθη αγωγών**

### 2.5.2.2 Γεωμετρία αγωγού

---

Ο αγωγός προσαγωγής (ή πτώσης) αποτελείται από τμήματα (τέσσερις αγωγούς). Κάθε τμήμα αγωγού έχει διαφορετική κλίση. Το συνολικό μήκος του αγωγού (από τον άνω ταμιευτήρα μέχρι την διακλάδωση) είναι 3,046 Km. Μετά την διακλάδωση, οι δύο αγωγοί αποτελούνται από δύο τμήματα ενώ το συνολικό μήκος του καθενός είναι 68m. Εδώ σημειώνεται ότι οι εν λόγω αγωγοί είναι οριζόντιοι.

### 2.5.2.3 Υδραυλικό ύψος

---

Το καθαρό υδραυλικό ύψος (το στατικό υδραυλικό ύψος μείον τις απώλειες στο ονομαστικό φορτίο) για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας λαμβάνεται ως  $H=503,4$  m συνεπώς το στατικό ύψος υπολογίστηκε (το καθαρό συν τις απώλειες στο ονομαστικό φορτίο)  $h=512,7$  m.

### 2.5.2.4 Παροχή

---

Η ονομαστική (ή maximum) παροχή του ενός στροβίλου είναι  $q = 0,35m^3 / s$ . Συνεπώς η ονομαστική παροχή στον κοινό αγωγό είναι  $Q = 0.7m^3 / s$ .

Η ελάχιστη παροχή, κάτω από την οποία ο υδροστρόβιλος τίθεται εκτός λειτουργίας (για οικονομοτεχνικούς λόγους) είναι  $q_{\min} = 0,035m^3 / s$

#### 2.5.2.5 Χρόνος εκκίνησης ύδατος $T_w$

Ο χρόνος εκκίνησης ύδατος για τις ονομαστικές συνθήκες υπολογίζεται από τα δεδομένα του υδροηλεκτρικού σταθμού και από την μετρούμενη παροχή στον κοινό αγωγό. Συνεπώς, το  $T_w$  είναι συνάρτηση του αριθμού των στροβίλων που είναι σε λειτουργία. Ξεκινώντας από τον άνω ταμιευτήρα το νερό παρέχεται στον στρόβιλο διαμέσου του κοινού αγωγού ενώ μετά διαπερνά τους ξεχωριστούς αγωγούς. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται το στατικό υδραυλικό ύψος  $H_0 = 512,7m$ . Για ταυτόχρονη λειτουργία των δύο στροβίλων στο πλήρες φορτίο η παροχή στον κοινό αγωγό είναι  $Q = 0.7m^3 / s$  ενώ για λειτουργία ενός στροβίλου είναι  $Q = 0.35m^3 / s$ .

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι υπολογισμοί του  $T_w$  σε sec κάθε τμήματος αγωγού. Το άθροισμα των  $T_w$  των τμημάτων 1-4 αποτελεί το  $T_w$  του κοινού αγωγού και των 5-6 του ξεχωριστού αγωγού για λειτουργία είτε ενός στροβίλου, είτε για παράλληλη λειτουργία των δύο.

Τμήμα αγωγού	ένας στρόβιλος	δύο στρόβιλοι
1	0,195024307	0,390048614
2	0,147253202	0,294506403
3	0,227528358	0,455056717
4	0,180249738	0,360499477
<b>κοινός αγωγός</b>	<b>0,750055605</b>	<b>1,500111211</b>
	<b>ένας στρόβιλος</b>	<b>δύο στρόβιλοι</b>
5	0,004432371	0,004432371
6	0,03324278	0,03324278
<b>ξεχωριστός αγωγός</b>	<b>0,03767515</b>	<b>0,03767515</b>

**Πίνακας 7 : Πίνακας υπολογισμού των  $T_w$  σε sec κάθε τμήματος αγωγού.**

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα ,τελικά η τιμή του  $T_w$  διαμορφώνεται ως εξής:  $T_{w1} = 0,788sec$  και  $T_{w2} = 1,538sec$  για λειτουργία ενός στροβίλου και για λειτουργία δύο στροβίλων αντίστοιχα.

#### 2.5.2.6 Κυματική σταθερά χρόνου $T_e$ - κυματική αντίσταση $Z_0$

Η κυματική σταθερά χρόνου (ή χρόνος διάδοσης του οδεύοντος κύματος) εξαρτάται από το μήκος του αγωγού και από την ταχύτητα του ήχου στο νερό, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σύμφωνα με τον τύπο

$$T_e = \frac{L}{a} \quad (2.46)$$

όπου  $a$  η ταχύτητα του ήχου στο νερό [15]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{k} + \frac{d}{eE} \right)}} \quad (2.47)$$

Οι τιμές των σταθερών και των μεταβλητών για τα διάφορα τμήματα των αγωγών όπως και η ταχύτητα του κύματος (wave velocity) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	<b>K(N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>ρ(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>D(m)</b>	<b>E(N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>t(mm)</b>	<b>wave velocity</b>
1	2,2*10 <sup>9</sup>	1000	0,6	2*10 <sup>11</sup>	10,31	1482,765173
2	2,2*10 <sup>9</sup>	1000	0,6	2*10 <sup>11</sup>	11,91	1482,828895
3	2,2*10 <sup>9</sup>	1000	0,6	2*10 <sup>11</sup>	14,3	1482,89753
4	2,2*10 <sup>9</sup>	1000	0,6	2*10 <sup>11</sup>	18	1482,967845
5	2,2*10 <sup>9</sup>	1000	0,4	2*10 <sup>11</sup>	12,7	1482,982825
6	2,2*10 <sup>9</sup>	1000	0,4	2*10 <sup>11</sup>	12,7	1482,982825

**Πίνακας 8 : Τιμές σταθερών και μεταβλητών για τα διάφορα τμήματα των αγωγών και ταχύτητα κύματος**

Τελικά η κυματική σταθερά χρόνου υπολογίστηκε:

<b>Τμήμα αγωγού</b>	<b>Te(sec)</b>
1	0,534137
2	0,403283
3	0,623104
4	0,493605
<b>Tec</b>	<b>2,05413</b>
5	0,005395
6	0,040459
<b>Ter</b>	<b>0,045854</b>

**Πίνακας 9 : Κυματική σταθερά**

Συνεπώς η κυματική σταθερά χρόνου από τον άνω ταμιευτήρα μέχρι την διακλάδωση (κοινός αγωγός) είναι:  $T_{ec} = 2,05\text{sec}$  και από την διακλάδωση μέχρι τον εκάστοτε στρόβιλο:  $T_{er} = 0,05\text{sec}$ . Παρατηρούμε ότι οι κυματικοί χρόνοι είναι συγκρίσιμοι με τους αντίστοιχους χρόνους εκκίνησης ύδατος  $T_w$  και μάλιστα

μεγαλύτεροι, γεγονός που καθιστά ως αναγκαία την υιοθέτηση της λεπτομερούς εξέτασης του υδραυλικού μέρους.

Η κυματική αντίσταση  $Z_0 = \frac{T_w}{T_e}$ , για τις περιπτώσεις λειτουργίας ενός στροβίλου και την παράλληλη λειτουργία στροβίλων υπολογίστηκε:

- Για την περίπτωση λειτουργίας ενός στροβίλου:  $Z_0=0,38$
- Για την περίπτωση λειτουργίας δύο στροβίλων:  $Z_{0c}=0,73$  και  $Z_{0p}=0,82$

#### 2.5.2.7 Υδραυλικές απώλειες - συντελεστές απωλειών υδραυλικού ύψους (απωλειών τριβών στους αγωγούς)

##### 2.5.2.7.1 Γενικά

Η ροή του νερού(ρευστό) στον αγωγό προκαλεί μείωση της πίεσης στην κατεύθυνση της ροής(πτώση της πίεσης εκφρασμένη σε μέτρα στήλης του διακινούμενου υγρού). Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται στις γραμμικές και τις εντοπισμένες οι οποίες αναπτύσσονται στις διάφορες διαμορφώσεις, εξαρτήματα και όργανα των σωληνώσεων.

##### 2.5.2.7.2 Γραμμικές απώλειες

Σε σωλήνα ευθύ, κυκλικής διατομής, ο οποίος πληρούται από το διακινούμενο υγρό οι υδραυλικές απώλειες που αναπτύσσονται σε μήκος  $L$  υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο των Darcy-Weisbach, ως εξής:

$$H_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{fL}{2g \left(\frac{\pi}{4}\right)^4 D^5} Q^2 = kQ^2 \quad (2.48)$$

όπου  $f$  αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών, ο οποίος εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds και από την σχετική τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα. Ο υπολογισμός του γίνεται γραφικά, όμως μία πιο απλή εκτίμησή του είναι :  
 $f = 0,02$  [19]

$L$  το μήκος του σωλήνα

$D$  η διάμετρος του αγωγού

$V$  η ταχύτητα του ρευστού στον αγωγό

$Q$  η παροχή

Οι απώλειες αυτές ονομάζονται γραμμικές δεδομένου ότι είναι ανάλογες του μήκους  $L$  στο οποίο αναπτύσσονται και ισοκατανέμονται σε αυτό [5].

**2.5.2.8 Απώλειες σε ειδικές διαμορφώσεις και εξαρτήματα σωλήνων**

Οι υδραυλικές απώλειες που προκαλούνται από ειδικές διαμορφώσεις σε σωλήνες ή από τα εξαρτήματα (βάννες, σύνδεσμοι κλπ) ονομάζονται εντοπισμένες αντιστάσεις και εκφράζονται σε mΣΥ από τη γενική σχέση:

$$H_f = \zeta \frac{c^2}{2g} \quad (2.49)$$

όπου  $c$  η μέση ταχύτητα της ροής στον σωλήνα στον οποίο αναφέρεται το εξάρτημα ( $m/s^2$ ) και  
 $\zeta$  ο συντελεστής της εντοπισμένης αντίστασης.

Η τιμή του συντελεστού  $\zeta$  διαφέρει ανάλογα με τις διαμορφώσεις. Οι κυριότερες διαμορφώσεις είναι: διακλάδωση κυκλικής διατομής, καμπύλη γωνίας  $\alpha$ , στόμιο εισόδου, συστολή, διεύρυνση της διατομής [5].

**2.5.2.8.1 Εκτίμηση του συντελεστή απωλειών  $k$  του μικρού ΥΗΕ της Ικαρίας**

Σύμφωνα με τα στοιχεία του τεχνικού εγχειριδίου του υπό μελέτη σταθμού ο συντελεστής έχει υπολογισθεί από τους αρμόδιους μηχανικούς ως:  
 $k = 79,18 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας (επειδή στην μοντελοποίηση ενδιαφέρει ο συντελεστής για τον κοινό αγωγό αλλά και για τον κάθε ξεχωριστό) υπολογίστηκε ο συντελεστής απωλειών, σύμφωνα με τον τύπο των Darcy-Weisbach, για τις γραμμικές απώλειες στον κοινό αγωγό και στους ξεχωριστούς και βρέθηκε:

$$k_{c1} = 64,96874236 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2 \text{ για τον κοινό αγωγό, και}$$

$$k_{p1} = 9,69265989 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2 \text{ για καθέναν από τους ξεχωριστούς αγωγούς}$$

Οπότε ο συντελεστής γραμμικών απωλειών για το σύνολο του σταθμού, είναι:

$$k_l = 74,66140225 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$$

Εδώ, εκτιμήθηκε ότι η διαφορά του αριθμού του συντελεστή (όπως αυτός αναφέρεται στα τεχνικά στοιχεία του σταθμού) με τον υπολογισμένο για τις γραμμικές ( $k - k_l = 4,51859775 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$ ) οφείλεται στις εντοπισμένες απώλειες σε ειδικές διαμορφώσεις και εξαρτήματα των σωλήνων.

Ο ακριβής, όμως, υπολογισμός του συντελεστή των εντοπισμένων απωλειών απαιτεί εξειδικευμένη γνώση της γεωμετρίας και των επιμέρους στοιχείων του σταθμού(για την εκτίμηση του συντελεστή  $\zeta$ ) κάτι που ξεφεύγει από τα όρια της



παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συνεπώς, για τις ανάγκες της μοντελοποίησης οι εντοπισμένες απώλειες συνεκτιμήθηκαν θεωρώντας τις ως γραμμικές και άρα ανάλογες του μήκους των σωλήνων.

Άρα ο συντελεστής “γραμμικοποιημένων” εντοπισμένων απωλειών είναι:

για τον κοινό αγωγό:

$$k_{c2} = 4,51859775 \frac{3046}{3114} = 4,419925737 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$$

για καθέναν από τους ξεχωριστούς αγωγούς:

$$k_{p2} = 4,51859775 \frac{68}{3114} = 0,098672012 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$$

Τελικά ο συνολικός συντελεστής απωλειών  $k$  είναι :

για τον κοινό αγωγό:

$$k_c = k_{c1} + k_{c2} = 69,3886681 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$$

για καθέναν από τους ξεχωριστούς αγωγούς:

$$k_p = k_{p1} + k_{p2} = 9,791331902 \text{ m} / (\text{m}^3 / \text{s})^2$$

#### 2.5.2.9 Απόδοση υδροστροβίλου

---

Το γεγονός ότι ο υδροστρόβιλος δεν είναι 100% αποδοτικός περιλαμβάνεται στην μοντελοποίηση ως μία συνάρτηση που έχει ως είσοδο την παροχή και ως έξοδο την ωφέλιμη παροχή.

Η εξαγωγή αυτής της συνάρτησης έγινε με γραμμική παρεμβολή των σημείων της καμπύλης λειτουργίας των στροβίλων, όπως αυτή είναι χαραγμένη στα τεχνικά στοιχεία του σταθμού.

Η καμπύλη λειτουργίας του στροβίλου, με ονομαστικό ωφέλιμο ύψος 503,4m και ονομαστικής ισχύος 1550 KW λήφθηκε ως εξής:

<b>q(παροχή)%</b>	10	20	40	50	60	70	80	90	100
<b>η(απόδοση)%</b>	82	87	90	90,1	89,6	90,2	90,5	90,6	90,4

**Πίνακας 10 : Καμπύλη απόδοσης του υδροστροβίλου**

Με χρησιμοποίηση του λογισμικού TableCurve 2D τα σημεία αυτά προσομοιάστηκαν με γραμμική συνάρτηση της μορφής  $y=a+bx$  , και το αποτέλεσμα ήταν:

$a=-0,00814$  και  $b=0,9139$ .

Η προσομοίωση με αυτήν την συνάρτηση παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης  $r^2 = 0,99996$

#### 2.5.2.10 Κέρδος υδροστροβίλου (turbine gain)

---

Το κέρδος του υδροστροβίλου, όπως έχει ήδη οριστεί, πολλαπλασιάζεται με το πραγματικό άνοιγμα των υδατοθυρίδων  $\bar{g}$  (ή των ακροφυσίων, στην περίπτωση στροβίλου Pelton) έτσι ώστε το πλήρες φορτίο να αντιστοιχεί σε ιδανικό άνοιγμα  $\bar{G} = 1\alpha.μ.$ , σύμφωνα με την σχέση:

$$\bar{G} = A_t \bar{g} \quad (2.50)$$

Στην μοντελοποίηση του υδροστροβίλου, λαμβάνεται ότι η μετακίνηση της βελόνης του ακροφυσίου μετακινείται μεταξύ των θέσεων :

$$0,1 < \bar{g} < 0,93$$

τιμές οι οποίες δεν αποκλίνουν από αυτές της χρησιμοποιούμενης βιβλιογραφίας.

Έτσι, το κέρδος του υδροστροβίλου λαμβάνεται ίσο με:

$$A_t = \frac{1}{\bar{g}_{FL} - \bar{g}_{NL}} = \frac{1}{0,93 - 0,1} \approx 1,2$$

#### 2.5.2.11 Κανονικοποίηση

---

Για την κανονικοποίηση, την μετατροπή δηλαδή των τιμών του μοντέλου σε ανά μονάδα τιμές, λαμβάνονται τα εξής μεγέθη, ως βάσεις:

$$H_0 = 512,7, \text{ όπου } H_0 \text{ το στατικό ύψος}$$

$$Q_0 = 0,35 \frac{m^3}{s}, \text{ η ονομαστική παροχή του στροβίλου}$$

$$P_0 = 1550KW, \text{ η ονομαστική ισχύς του στροβίλου}$$

$$k_0 = \frac{H_0}{Q_0^2} = \frac{512,7}{0,35^2} = 4185,306122, \text{ η βασική τιμή του συντελεστή}$$

Άρα οι συντελεστές απωλειών σε α.μ. θα είναι

$$\bar{k}_c = 0,016579114\alpha.μ., \text{ για τον κοινό αγωγό}$$

$$\bar{k}_p = 0,00233945418\alpha.μ., \text{ για καθέναν από τους ξεχωριστούς αγωγούς.}$$

### **3 Ρυθμιστές στροφών Υδροστροβίλων**

---

#### **3.1 Γενικά**

---

Έχοντας περιγράψει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του υδραυλικού και του ηλεκτρικού μέρους, σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί ένας ελεγκτής ταχύτητας ή φορτίου ή όπως είναι ευρέως διαδεδομένος, ένας ρυθμιστής στροφών.

Για την σωστή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η συχνότητα θα πρέπει να παραμένει σταθερή. Η ρύθμιση της συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί συνεχώς την κανονικής της τιμή. Αν δεν γινόταν αυτό, οι γεννήτριες δεν θα ήταν σε θέση να παραλάβουν μία αύξηση του φορτίου γιατί το άνοιγμα των υδατοθυρίδων (για περίπτωση ΥΗΕ) των στροβίλων θα έμενε σταθερό και θα επέτρεπε μόνο μία ορισμένη ισχύ εισόδου στη μονάδα. Το αποτέλεσμα θα ήταν επιβράδυνση των μηχανών ( για δεδομένη αύξηση φορτίου), μείωση της συχνότητας του συστήματος και ισορροπία αυτού σε συχνότητα μικρότερη από την επιθυμητή(50 HZ). Επίσης σημειώνεται ότι πτώση της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλών ρευμάτων μαγνήτισης στις μηχανές επαγωγής και τους Μετασχηματιστές

Η αύξηση του φορτίου τροφοδοτείται αρχικά από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων γεννητριών (και στροβίλων). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των στροφών των μηχανών η οποία αντιστοιχεί στο ρυθμό παροχής της κινητικής ενέργειας προς το φορτίο. Έτσι, ο σκοπός του ρυθμιστή στροφών ενός υδροστροβίλου είναι να επενεργεί στο όργανο ρύθμισης του υδροστροβίλου δηλ. στην στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων και στην κλίση των πτερυγίων του δρομέα (για υδροστρόβιλο διπλής ρύθμισης) ή στην μετατόπιση της βελόνης του ακροφυσίου για υδροστρόβιλο δράσεως, ώστε να ελέγχει τη μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές(στροβίλους) και έτσι να εξισορροπείται η παραγόμενη ισχύς με το φορτίο και να διατηρείται η συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της ισχύος στην επιθυμητή της τιμή (50 HZ).

Κάθε διαφορά μεταξύ της κινητήριας και της ανθιστάμενης ροπής, που αντιστοιχεί σε διαφορά της παραγόμενης και της απορροφούμενης μηχανικής ισχύος, θα προκαλέσει επιτάχυνση ή επιβράδυνση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Άρα σε περίπτωση επιτάχυνσης ( $d\omega/dt > 0$ ) θα πρέπει ο ρυθμιστής να δώσει εντολή κλεισίματος των ρυθμιστικών πτερυγίων ώστε η παραγόμενη μηχανική ισχύς από τον υδροστρόβιλο να μειωθεί και να γίνει ίση προς την απορροφούμενη από την γεννήτρια. Το αντίθετο θα πρέπει να συμβεί στην περίπτωση που το στρεφόμενο σύστημα παρουσιάσει τάση γωνιακής επιβράδυνσης. Επίσης ο ρυθμιστής στροφών επεμβαίνει κατά τις φάσεις εκκίνησης ή κράτησης (προγραμματισμένης ή απρόοπτης ως αποτέλεσμα ενός σφάλματος).

Ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  του συστήματος γεννήτριας-υδροστροβίλου εκφράζεται από την θεμελιώδη εξίσωση της μηχανικής

$$M_T - M_G = I \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1)$$

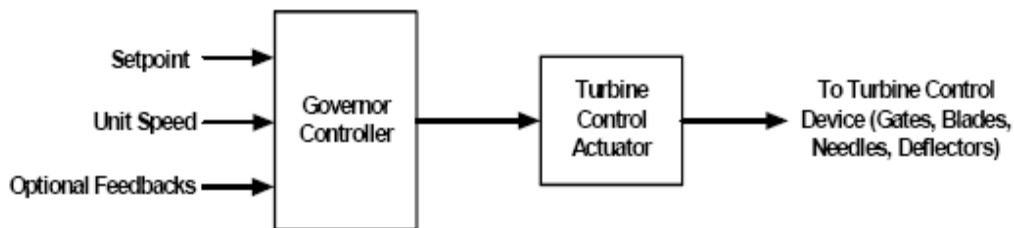
στην οποία με  $M_T$  παριστάνεται η κινητήρια ροπή, δηλ. η ροπή του υδροστροβίλου, με  $M_G$  η ανθιστάμενη ροπή, δηλ. η ροπή της γεννήτριας, με  $I$  η ροπή αδρανείας των στρεφομένων μαζών (ρότορας γεννήτριας, άτρακτος, δρομέας υδροστροβίλου) ενώ ο όρος  $d\omega/dt$  παριστάνει την γωνιακή επιτάχυνση. Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι για την ίδια διαφορά ( $M_T - M_G$ ) η γωνιακή επιτάχυνση είναι τόσο πιο μικρή όσο η ροπή αδρανείας  $I$  είναι υψηλή. Άρα, όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή αδρανείας  $I$  τόσο περισσότερο ευσταθές είναι το σύστημα, δηλ. τόσο πιο αργά μεταβάλλει την ταχύτητα περιστροφής του. Στο μόνιμο σημείο λειτουργίας θα είναι:

$$(M_T - M_G) = 0$$

οπότε το σύστημα περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής [5].

### 3.1.1 Ορισμός συστήματος ελέγχου -ρυθμιστής στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών είναι ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση που ελέγχει την ταχύτητα και την ισχύ εξόδου ενός συστήματος παραγωγής, όπως ενός υδροστροβίλου. Ο ρυθμιστής στροφών αποτελείται από μία είσοδο αναφοράς, ανάδραση της ταχύτητας περιστροφής της μονάδος παραγωγής, άλλες πιθανές αναδράσεις παραμέτρων ανάλογα με την εφαρμογή, από συνάρτηση μεταφοράς ενός ελεγκτή, και από ένα ή περισσότερους μηχανισμούς κίνησης (actuator). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η βασική λογική ενός ρυθμιστή στροφών [14]:



Σχήμα 22 : Γενική μορφή ενός ρυθμιστή [14]

### 3.1.2 Δομή

#### 3.1.2.1 Γενικά

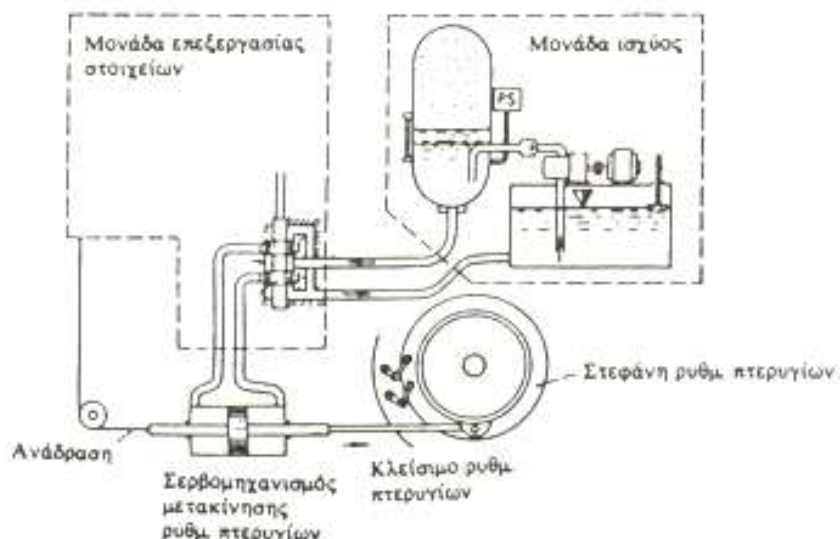
Σύμφωνα με τα προηγούμενα ο ρυθμιστής του υδροστροβίλου θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα τμήμα ισχύος το οποίο επενεργεί στα ρυθμιστικά πτερύγια ή γενικότερα στο σύστημα μεταβολής του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου (βελόνη του ακροφυσίου). Δεδομένου ότι οι δυνάμεις που πρέπει να εξασκηθούν για την περιστροφή των ρυθμιστικών πτερυγίων (ή στην μετατόπιση της βελόνης) είναι σημαντικές η περιστροφή επιτυγχάνεται μέσω υδραυλικού εμβόλου (ή εμβόλων)

διπλής διαδρομής το οποίο τροφοδοτείται μέσω βαλβίδας. Η μετατόπιση του εμβόλου της βαλβίδας οδηγεί την υψηλή πίεση στην μία ή την άλλη πλευρά του εμβόλου με αποτέλεσμα την μετατόπιση του εμβόλου και την περιστροφή των πτερυγίων (ή τη μετατόπιση της βελόνης), δηλ. πρόκειται για ένα σύστημα υδραυλικού σερβομηχανισμού.

Το τμήμα ισχύος του ρυθμιστή, εκτός από το υδραυλικό έμβολο και την βαλβίδα τροφοδοσίας του, αποτελείται από δεξαμενή υδραυλικού ελαίου (με δείκτη στάθμης, βαλβίδα αποστράγγισης), φυγόκεντρη αντλία (ενδεχόμενα και χειροκίνητη αντλία), βαλβίδα ελέγχου, ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα διακοπής και πιεστικό δοχείο (accumulator) με επιτήρηση μέγιστης και ελάχιστης πίεσης, έτσι ώστε σε περίπτωση ανάγκης να υπάρχει αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια για το κλείσιμο των ρυθμιστικών πτερυγίων και της βάννας εισόδου.

Επιπλέον ο ρυθμιστής θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα τμήμα επεξεργασίας των λειτουργικών παραμέτρων έτσι ώστε ανάλογα με την τιμή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής  $\omega$  και της γωνιακής επιτάχυνσης  $d\omega/dt$  να καθορίζει την θέση της βαλβίδας και μέσω αυτής την διαδρομή του εμβόλου και άρα την κλίση των ρυθμιστικών πτερυγίων. Στους παλαιού τύπου ρυθμιστές, τους λεγόμενους μηχανικούς, το τμήμα επεξεργασίας των δεδομένων λειτουργίας ήταν μηχανικό και περιλάμβανε ρυθμιστή του Watt, μοχλούς, υδραυλικές αντιστάσεις, ελατήρια κλπ. Σήμερα το τμήμα επεξεργασίας είναι πλήρως ηλεκτρονικό (ψηφιακό) με μεγάλες δυνατότητες μεταβολής των χαρακτηριστικών του μέσω προγραμματισμού: πρόκειται για τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς ρυθμιστές, αφού πλέον, και οι χρονικά ενδιάμεσοι ηλεκτρικοί (αναλογικοί) ρυθμιστές, η λειτουργία των οποίων βασίζεται σε αναλογικά κυκλώματα, είναι και αυτοί τεχνολογικά ξεπερασμένοι.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η όλη διάταξη και τα μέρη που απαρτίζουν έναν ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου(αντιδράσεως) με ρυθμιστικά πτερύγια [5].



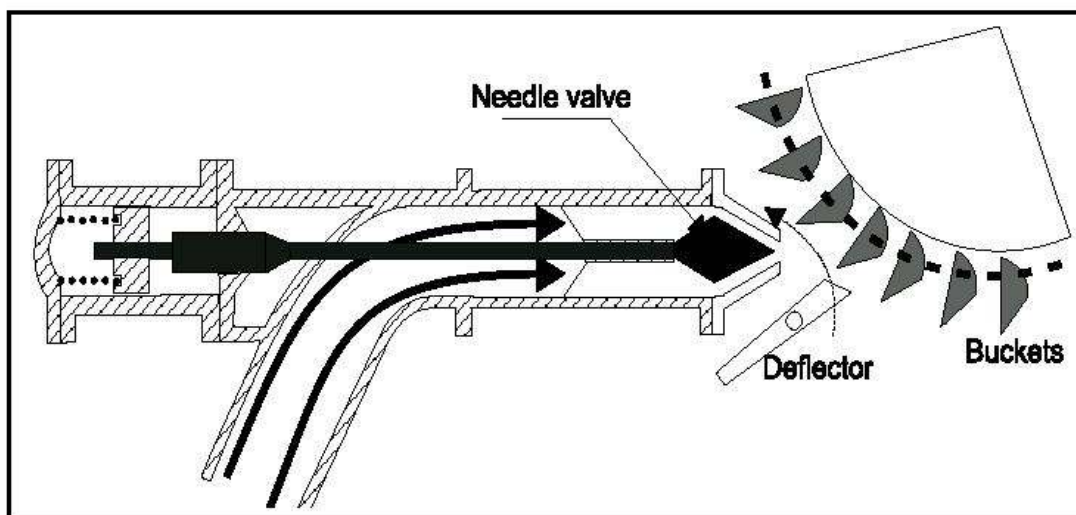
**Σχήμα 23: Σχηματικό διάγραμμα ρυθμιστού υδροστροβίλου [5]**

### 3.1.2.2 Δομή ρυθμιστή στροφών Υδροστροβίλου Pelton

Στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton, ο σερβομηχανισμός μετατοπίζει την βελόνη (needle valve) διαμέσου του ακροφυσίου μεταβάλλοντας έτσι την διάμετρό του, και άρα το ενεργό άνοιγμα (effective orifice area) του ακροφυσίου. Έτσι, ελέγχεται η παροχή στον υδροστροβίλο, ακολουθώντας τις μεταβολές του φορτίου χωρίς να δημιουργούνται αναταράξεις (turbulence). Η μετατόπιση της βελόνης έχει μια αρκετά γρήγορη σταθερά χρόνου η οποία όμως, όπως αναλύεται παρακάτω, περιορίζεται προς αποφυγή ισχυρών υπερπιέσεων/υποπιέσεων στον αγωγό προσαγωγής. Το σύστημα της βαλβίδος-βελόνης είναι ένα σύνθετο μηχανολογικό εξάρτημα με υψηλό κόστος [20].

Τα ΥΗΕ με υδροστροβίλους δράσεως (Pelton) έχουν μεγάλη υδραυλική πτώση και κατά κανόνα μεγάλο μήκος του αγωγού προσαγωγής και για τον λόγο αυτόν αναμένεται να είναι σημαντική η ένταση των μεταβατικών φαινομένων. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την λειτουργία του όνυχα εκτροπής (deflector) ο οποίος παρεμβαίνει αυτόματα μέσω μηχανισμού και εκτρέπει την δέσμη από το δρομέα (μηδενίζοντας ή μειώνοντας σχεδόν ακαριαία την παραγόμενη μηχανική ισχύ) οπότε στη συνέχεια η βελόνη του ακροφυσίου κλείνει σταδιακά με αργό ρυθμό ώστε να μην προκαλούνται σημαντικές υπερπίεσεις ως αποτέλεσμα του μηδενισμού της παροχής στον αγωγό. Ο όνυχας εκτροπής δεν χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας αλλά σε έκτακτες λειτουργικές απαιτήσεις (πχ. απόρριψης φορτίου) [5].

Σχηματικά η λειτουργία της βελόνης στο ακροφύσιο και του όνυχα εκτροπής φαίνονται στην παρακάτω εικόνα :



**Σχήμα 24 : Σχηματική παρουσίαση ελέγχου παροχής σε υδροστροβίλο Pelton**

### 3.1.3 Χρήση ρυθμιστών σε ΜΥΗΣ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου

Οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να θεωρηθούν σαν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας, είτε της ισχύος.

Αν μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο (isolated operation), ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα. Αν η γεννήτρια συνδέεται σε ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής της είναι δεσμευμένη από τη

συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει στην ουσία την παραγόμενη ισχύ.

Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των ΜΥΗΣ, τα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών διαφοροποιούνται ανάλογα αν ο σταθμός συνδέεται στο διασυνδεδεμένο φορτίο ή αν τροφοδοτεί αυτόνομο δίκτυο. Έτσι διακρίνονται οι ακόλουθες ιδιαιτερότητες:

#### 1. Διασυνδεδεμένο δίκτυο

Στην περίπτωση ΜΥΗΣ που τροφοδοτούν ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο(δηλ. δίκτυο στο οποίο η ισχύς του στροβίλου είναι υποπολλαπλάσιο της ισχύος του δικτύου) η συχνότητα και η τάση του δικτύου διατηρούνται σε πολύ στενά όρια από τις άλλες μονάδες παραγωγής που τροφοδοτούν το δίκτυο. Για τον λόγο αυτό ο ρυθμιστής κάθε μικρού υδροστροβίλου είναι απλοποιημένος και το κύριο έργο του είναι η επιτήρηση ενός μεγέθους, συνήθως της στάθμης του νερού στην είσοδο του αγωγού προσαγωγής ή της στάθμης της δεξαμενής φόρτισης: όταν η στάθμη εμφανίζει τάση ανύψωσης δίνει εντολή ανοίγματος των ρυθμιστικών περυγίων(ή μετατόπιση της βελόνης) ώστε να αυξηθεί η παροχή μέσω του υδροστροβίλου και αντίστροφα. Επίσης ο ρυθμιστής του υδροστροβίλου επεμβαίνει στο ξεκίνημα ή το σταμάτημα της μονάδας(ηθελημένο ή απρόοπτο ως αποτέλεσμα εντολής ενός οργάνου προστασίας, όπως για παράδειγμα υπερθέρμανσης εδράνου ή υπερτάχυνσης της μονάδας μετά από πλήρη απόρριψη φορτίου) ανοίγοντας ή κλείνοντας τις υδατοθυρίδες.

#### 2. Αυτόνομο δίκτυο

Στην περίπτωση κατά την οποία το ΜΥΗΣ τροφοδοτεί ένα αυτόνομο δίκτυο θα πρέπει ο ρυθμιστής υδροστροβίλων να είναι πλήρης, δηλ. η μονάδα επεξεργασίας να είναι εξοπλισμένη με αναλογικό, ολοκληρωτικό έλεγχο και ανάδραση της ταχύτητας περιστροφής. Σκοπός είναι η διατήρηση της διακύμανσης της συχνότητας και της τάσεως του ηλεκτρικού δικτύου μέσα σε ορισμένα όρια επεμβαίνοντας στο όργανο ρύθμισης της παροχής και άρα της ισχύος εξόδου [5].

### 3.2 Βασικά χαρακτηριστικά της ρύθμισης φορτίου-συχνότητας

---

#### 3.2.1 Ευστάθεια

---

Ως ευστάθεια του συστήματος χαρακτηρίζεται η ικανότητα του συστήματος να επαναφέρει το σύστημα στην αρχική κατάσταση ισορροπίας του(δηλ. στην σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής) ύστερα από μία διαταραχή ή μεταβολή της ισχύος εξόδου και εκφράζεται από τον λόγο:

$$\frac{df / f}{dP / P} \quad (3.2)$$

όπου  $f$  η συχνότητα  
 $P$  η ισχύς εξόδου

Η επιτρεπόμενη τιμή της απόκλισης περιγράφεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου(π.χ. Η απόκλιση της συχνότητας δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2 Hz για μια στιγμιαία μεταβολή του φορτίου ίση προς 10%). Συνήθως, όσο μικρότερο είναι το δίκτυο τόσο μικρότερες είναι και οι απαιτήσεις στην ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [5].

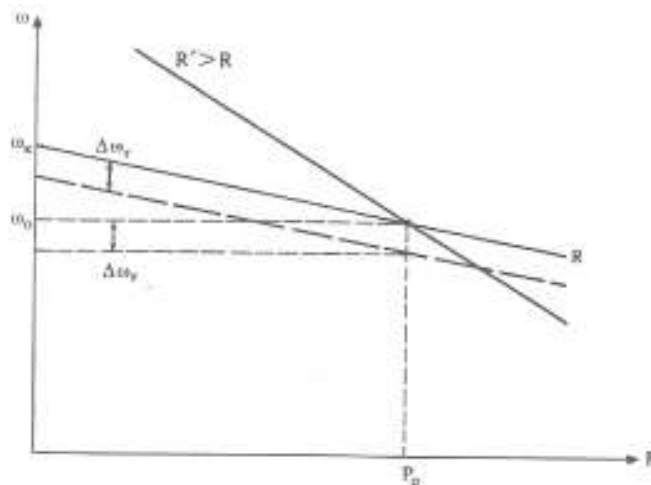
### 3.2.2 Πρωτεύουσα-δευτερεύουσα ρύθμιση

Ο ρυθμιστής στροφών διαθέτει δύο τρόπους ρυθμίσεως

1. Μία μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από το φυγοκεντρικό ρυθμιστή που είναι συνδεδεμένος με τον άξονά της(ή άλλη συσκευή μετρήσεως της ταχύτητας). Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε σήμα εντολή για την μετακίνηση των υδατοθυρίδων, ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την πρωτεύουσα ρύθμιση.
2. Συμπληρωματικά μπορεί να ενεργοποιηθεί (μέσω π.χ. μίας κεντρικής διάταξης ελέγχου σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα) ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Μετρίεται δηλαδή το σφάλμα συχνότητας του συστήματος μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση, καθώς και οι τυχόν διαφορές στην διακινούμενη ισχύ των εξωτερικών διασυνδέσεων, και με κατάλληλη στρατηγική ελέγχου αποστέλλονται σήματα που αντιστοιχούν σε μια νέα ταχύτητα αναφοράς κάθε γεννήτριας. Αυτή είναι η δευτερεύουσα ρύθμιση και μπορεί να γίνει και χειροκίνητα χωρίς κεντρικό έλεγχο [3].

### 3.2.3 Στατισμός

Μία ορισμένη θέση του μηχανισμού αλλαγής στροφών(δηλαδή μία δεδομένη ταχύτητα αναφοράς) αντιστοιχεί σε μία ευθύγραμμη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας(σχήμα 25), η κλίση της οποίας ονομάζεται στατισμός της μονάδας(ή του ρυθμιστή στροφών).



Σχήμα 25 : Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας [3]



Ο στατισμός ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = -\frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (3.3)$$

όπου  $\Delta\omega$  η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας (ίση με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας) που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης.  
 $\Delta P$  η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου, η οποία προκάλεσε τη μεταβολή  $\Delta\omega$ .

Ο στατισμός μετριέται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό. Έτσι, στατισμός 4% ( $R = 0,04$ ) αντιστοιχεί σε μόνιμη μεταβολή της συχνότητας 4% (2 Hz σε σύστημα ονομαστικής συχνότητας 50 Hz) μετά από μεταβολή φορτίου ίση με την ονομαστική της γεννήτριας.

Στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 25) φαίνεται η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μιας μονάδας παραγωγής. Όπως παρατηρείται και στο σχήμα, η κλίση της χαρακτηριστικής είναι αρνητική, δηλαδή ο στατισμός είναι θετικός σύμφωνα με την εξίσωση (3.3). Αυτό συμβαίνει καθώς παρά τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, κάθε μεταβολή φορτίου αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Έτσι, αν η μεταβολή του φορτίου  $\Delta P_e$  είναι θετική (έχουμε αύξηση του φορτίου), η συχνότητα θα μειωθεί, η μεταβολή  $\Delta\omega$  θα είναι δηλαδή αρνητική.

Η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μίας μονάδας μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους:

1. Αν μεταβληθεί ο στατισμός  $R$ , η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας  $\omega_0, P_0$ .
2. Αν μεταβληθεί η ταχύτητα (συχνότητα) αναφοράς μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα διατηρώντας την κλίση της.

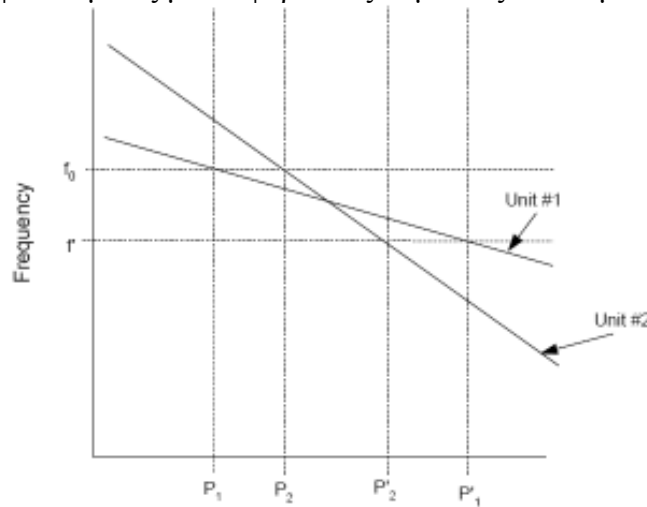
Αν μία μονάδα έχει μικρό στατισμό, τότε, για σχετικά μικρή μεταβολή της συχνότητας, μεταβάλλεται σημαντικά το φορτίο της. Μία τέτοια μονάδα λέγεται ρυθμίζουσα γιατί συμβάλλει καθοριστικά με τη μεταβολή της παραγωγής της στη ρύθμιση της συχνότητας. Αν, αντίθετα, μία μονάδα έχει μεγάλο στατισμό, τότε μεταβάλλει ελάχιστα το φορτίο της όταν αλλάζει συχνότητα και λέγεται μονάδα βάσεως [3].

### 3.2.4 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών

---

Αν δύο ή περισσότερες γεννήτριες με ρυθμιστές που περιλαμβάνουν διαφορετικές καμπύλες στατισμού είναι συνδεδεμένες σε κοινό φορτίο, θα μοιράζονται μεταβολές του φορτίου ανάλογα με τον στατισμό τους, επειδή οι ταχύτητες περιστροφής τους θα υπαγορεύονται από την συχνότητα του συστήματος, η οποία είναι κοινή για τις γεννήτριες.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατανομή του φορτίου που παραλαμβάνει κάθε γεννήτρια εφοδιασμένες με διαφορετικές καμπύλες στατισμού.



**Σχήμα 26 : Κατανομή φορτίου δύο γεννητριών εφοδιασμένες με διαφορετικό μόνιμο στατισμό [4]**

Έστω δύο γεννήτριες με χαρακτηριστικές στατισμού, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αρχικά, έχουν ισχύ  $P_1$  και  $P_2$  αντίστοιχα, και ονομαστική συχνότητα λειτουργίας  $f_0$ . Σε μία αύξηση του φορτίου  $\Delta P_L$ , οι γεννήτριες επιβραδύνονται και οι ρυθμιστές επενεργούν ώστε αυτές να αυξήσουν την παραγωγή τους μέχρι να φτάσουν σε μια νέα συχνότητα λειτουργίας  $f'$ . Η ποσότητα που η κάθε γεννήτρια παραλαμβάνει εξαρτάται από τις χαρακτηριστικές στατισμού τους:

$$\Delta P_1 = P'_1 - P_1 = \frac{\Delta f}{R_1}$$

$$\Delta P_2 = P'_2 - P_2 = \frac{\Delta f}{R_2}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις θα προκύψει:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

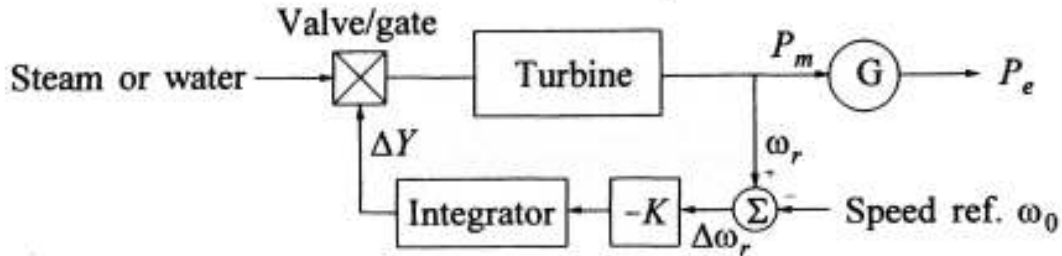
Αν τα ποσοστά της ρύθμισης των μονάδων είναι περίπου ίσα, η μεταβολή της ισχύος της κάθε μίας θα είναι ανάλογη της ονομαστικής της ισχύος [4].

### 3.3 Σχεδίαση ρυθμιστών στροφών

#### 3.3.1 Ισόχρονη ρύθμιση

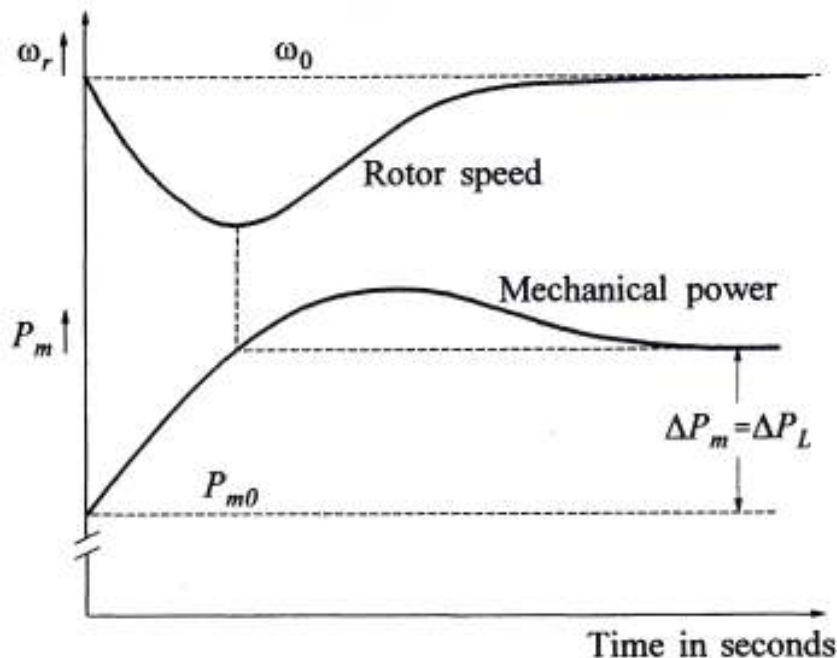
Ο προσδιορισμός ως ισόχρονη ρύθμιση, σημαίνει σταθερή ταχύτητα. Ένας ισόχρονος ρυθμιστής προσαρμόζει τις υδατοθυρίδες έτσι ώστε να επαναφέρει την

συχνότητα στην ονομαστικής της (ή προσχεδιασμένης της) τιμή. Στο σχήμα 27 φαίνεται ένας ισόχρονος ρυθμιστής. Η μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$  συγκρίνεται με την ταχύτητα αναφοράς  $\omega_0$ . Το σήμα σφάλματος (ίσο με την μεταβολή της ταχύτητας) ενισχύεται και ολοκληρώνεται ώστε να παραχθεί το σήμα ελέγχου  $\Delta Y$  το οποίο επενεργεί στις υδατοθυρίδες. Εξαιτίας της συμπεριφοράς επαναφοράς(reset action) αυτού του ολοκληρωτικού ελέγχου, το  $\Delta Y$  θα μεταβεί στη νέα κατάσταση ισορροπίας μόνο όταν μηδενιστεί το σφάλμα  $\Delta\omega_r$ .



**Σχήμα 27 : Ισόχρονος ρυθμιστής [4]**

Στο σχήμα 28 φαίνεται η απόκριση χρόνου μίας μονάδας παραγωγής, που ελέγχεται με λογική ισόχρονου ρυθμιστή, όταν υποβάλλεται σε αύξηση του φορτίου που τροφοδοτεί. Η αύξηση της  $P_e$  προκαλεί μείωση της συχνότητας με ρυθμό που καθορίζεται από την αδράνεια του δρομέα. Όπως η ταχύτητα πέφτει, η μηχανική ισχύς του στροβίλου αρχίζει να αυξάνεται. Αυτό με την σειρά του θα προκαλέσει μείωση στον ρυθμό πτώσης της ταχύτητας, και ακολούθως αύξηση στην ταχύτητα όταν η μηχανική ισχύς υπερβεί την ζητούμενη ισχύ του φορτίου. Η ταχύτητα θα επιστρέψει αυτόματα στην τιμή αναφοράς της ενώ η μηχανική ισχύς θα ισορροπήσει σε μία τιμή ίση με αυτή του φορτίου.



**Σχήμα 28 : Απόκριση μίας μονάδας με ισόχρονο ρυθμιστή [4]**

Η ισόχρονη ρύθμιση λειτουργεί ικανοποιητικά στην περίπτωση που μία γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο και στην περίπτωση που μόνο μία γεννήτρια, σε ένα σύστημα πολλών γεννητριών, είναι επιφορτισμένη να ακολουθεί τις μεταβολές

του φορτίου. Στην περίπτωση που το φορτίο μοιράζεται μεταξύ γεννητριών συνδεδεμένων σε ένα σύστημα, είναι επιβεβλημένο να συμπεριληφθεί ρύθμιση ταχύτητας ή η λογική της χαρακτηριστικής του στατισμού.

Οι ισόχρονοι ρυθμιστές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν υπάρχουν στο ίδιο σύστημα δύο ή παραπάνω γεννήτριες, καθώς κάθε γεννήτρια θα έπρεπε να έχει ακριβώς την ίδια ρύθμιση ταχύτητας. Ειδικά, θα αναιρούσε η μία την άλλη, καθώς η κάθε μία θα προσπαθούσε να ελέγξει τη συχνότητα του συστήματος με τις δικές της ρυθμίσεις. Για ευσταθή καταμερισμό ισχύος μεταξύ δύο ή περισσότερων μονάδων που λειτουργούν παράλληλα, οι ρυθμιστές είναι εφοδιασμένοι με μία χαρακτηριστική στατισμού, έτσι ώστε να πέφτει η ταχύτητα όσο το φορτίο αυξάνεται [4].

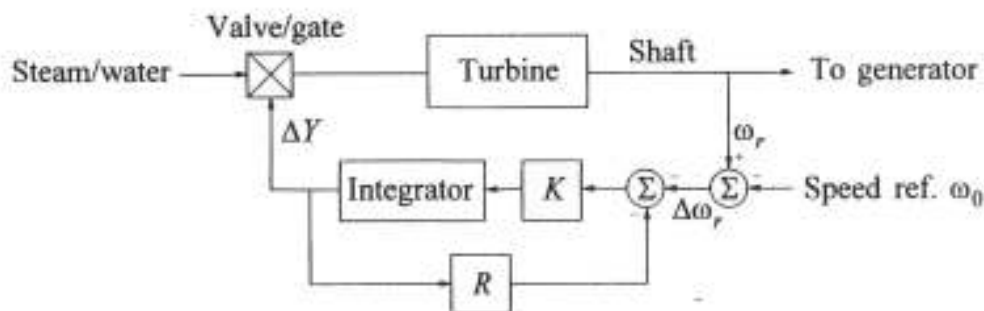
### 3.3.2 Ρυθμιστές με μόνιμο στατισμό ταχύτητας και ρύθμιση ταχύτητας

#### 3.3.2.1 Γενικά

Ο μόνιμος στατισμός ταχύτητας (permanent speed droop) και η ρύθμιση ταχύτητας, ή αλλιώς στατισμός ισχύος (power droop) χρησιμοποιούνται ώστε να συνεργάζονται οι αποκρίσεις συνδεδεμένων μονάδων σε μεταβολές της συχνότητας του συστήματος. Ο μόνιμος στατισμός ταχύτητας αναπτύσσεται είτε χρησιμοποιώντας ως ανάδραση την θέση των υδατοθυρίδων είτε χρησιμοποιώντας ως ανάδραση την ισχύ εξόδου της μονάδας παραγωγής. Εάν χρησιμοποιείται η ισχύς εξόδου ώστε να αναπτυχθεί η χαρακτηριστική του μόνιμου στατισμού, τότε ο όρος του μόνιμου στατισμού ταχύτητας ονομάζεται ‘ρύθμιση ταχύτητας’ ή ‘στατισμός ισχύος’ [14].

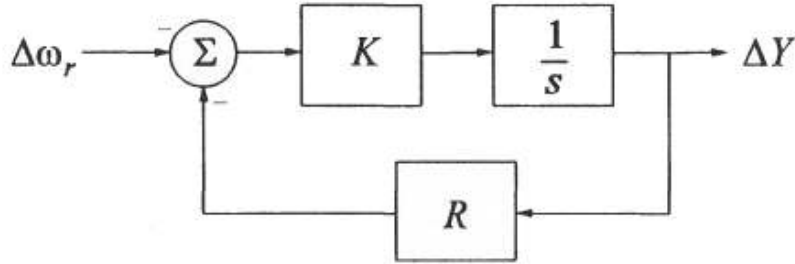
#### 3.3.2.2 Ρυθμιστές με στατισμό

Η χαρακτηριστική στατισμού συμπεριλαμβάνεται στο ρυθμιστή προσθέτοντας ένα βρόχο με ανάδραση της μόνιμης κατάστασης γύρω από τον ολοκληρωτή, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

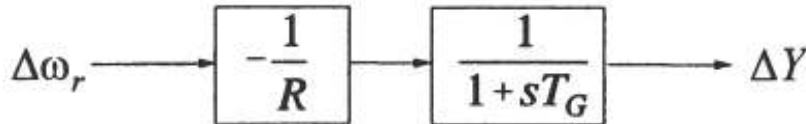


Σχήμα 29 : Ρυθμιστής με ανάδραση μόνιμου στατισμού [4]

Η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή της παραπάνω εικόνας απλοποιείται σε αυτή του σχήματος 31. Αυτός ο τύπος ρυθμιστή χαρακτηρίζεται ως αναλογικός ελεγκτής με κέρδος  $\frac{1}{R}$ .



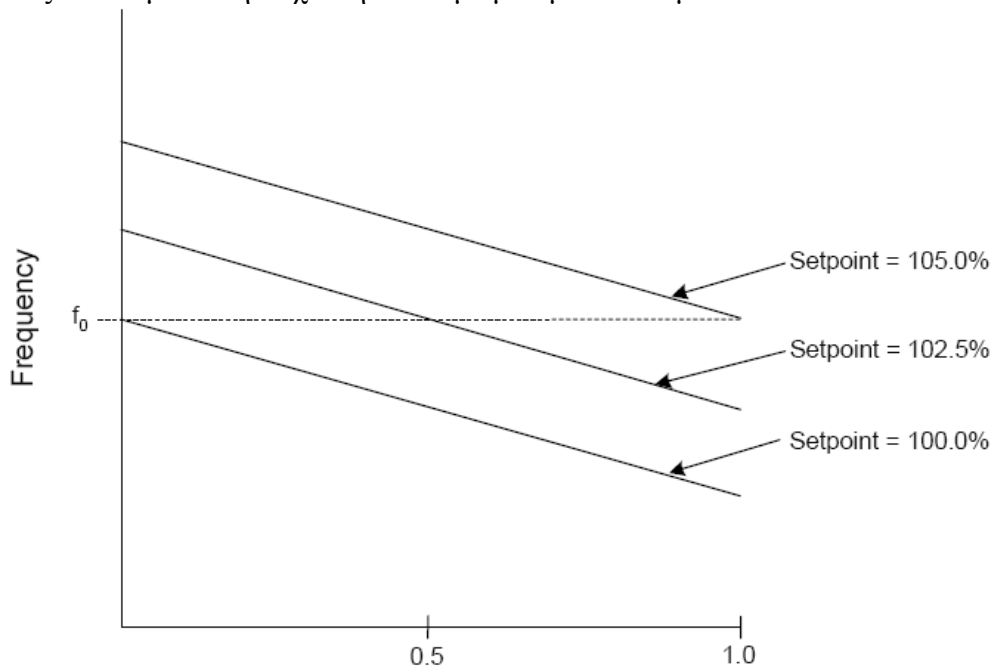
**Σχήμα 30 : Μπλοκ διάγραμμα με ανάδραση μόνιμου στατισμού [4]**



**Σχήμα 31 : Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα [4]**

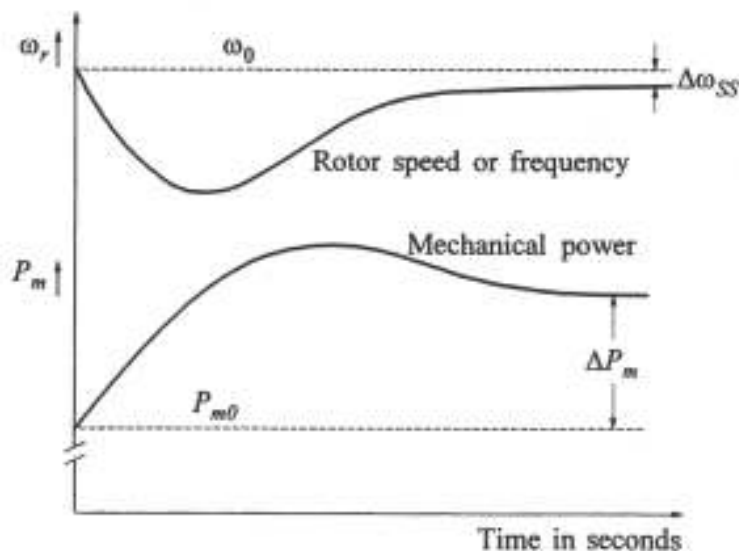
$$\text{όπου } T_G = \frac{1}{KR} \quad (3.5)$$

Η παράμετρος του ρυθμιστή που χρησιμοποιείται πρωταρχικά για τον έλεγχο της λειτουργίας της μονάδος είναι η ταχύτητα αναφοράς (ή συχνότητα αναφοράς). Αλλάζοντας την ταχύτητα αναφοράς, ο ρυθμιστής καλείται να λειτουργήσει στη συχνότητα του συστήματος σε οποιαδήποτε επιθυμητή ισχύ εξόδου. Στο διασυνδεδεμένο σύστημα, η συχνότητα αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε η μονάδα να εγγείει την επιθυμητή κάθε φορά τιμή ισχύος στο δίκτυο σε λειτουργία στην ονομαστική συχνότητα του συστήματος. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται στη μόνιμη κατάσταση η επίδραση διαφορετικών τιμών αναφοράς στον ρυθμιστή μίας μονάδας σε ονομαστική συχνότητα και με μόνιμο στατισμό 5% :



**Σχήμα 32 : Επίδραση διαφορετικών τιμών αναφοράς στον ρυθμιστή μίας μονάδας σε ονομαστική συχνότητα και με μόνιμο στατισμό 5% [14].**

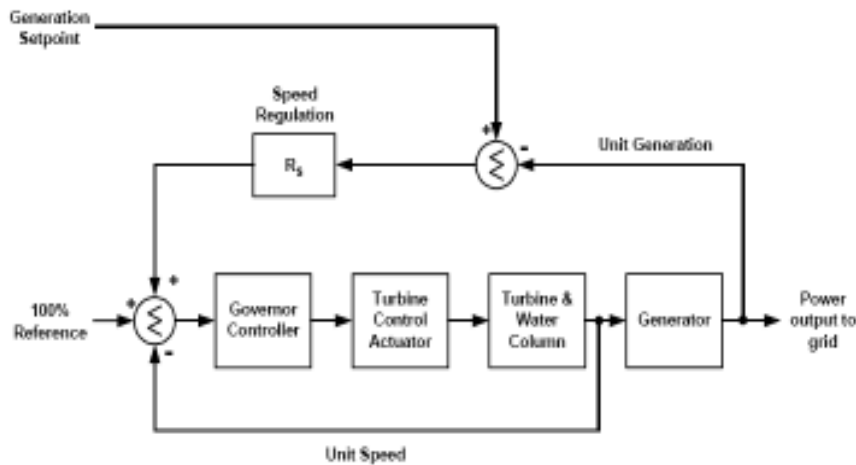
Στο παραπάνω σχήμα, απεικονίζεται η απόκριση της ισχύος μίας μονάδας παραγωγής στο πεδίο του χρόνου, με ρυθμιστή συχνότητας που περιλαμβάνει στατισμό, σε μία αύξηση του φορτίου. Εξαιτίας της χαρακτηριστικής του στατισμού, η αύξηση της ισχύος συνοδεύεται από μία μεταβολή μόνιμης κατάστασης της συχνότητας ( $\Delta\omega_{ss}$ ) [14].



**Σχήμα 33 : Απόκριση μονάδος με ρυθμιστή με μόνιμο στατισμό [4]**

### 3.3.2.3 Ρύθμιση ταχύτητας (στατισμός ισχύος)

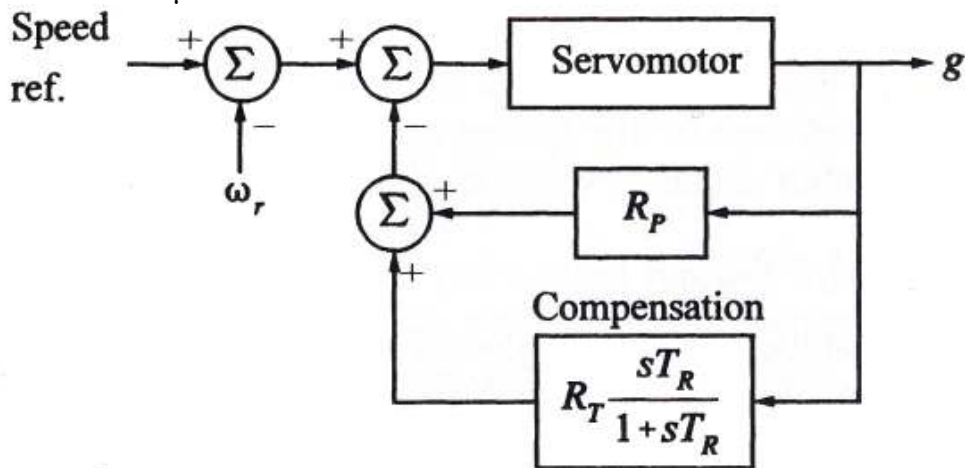
Η περίπτωση ρυθμιστή στροφών με σύστημα ρύθμισης ταχύτητας είναι παρόμοια με αυτή του μόνιμου στατισμού ταχύτητας, όμως τώρα χρησιμοποιείται η ισχύς εξόδου της γεννήτριας ως ενδιάμεση ανάδραση και όχι η θέση του μηχανισμού κίνησης. Η ρύθμιση ταχύτητας αναπτύσσεται προσθέτοντας ένα ποσοστό της παραγόμενης ισχύος της γεννήτριας στο σφάλμα της ταχύτητας. Στο σχήμα παρουσιάζεται ένα μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού ρυθμιστή με λογική ρύθμισης ταχύτητας. Το μέγεθος αναφοράς καθορίζεται με βάση την επιθυμητή ισχύ εξόδου της μονάδας. Η χαρακτηριστική απόκρισης για τον εν λόγω ρυθμιστή είναι η ίδια με του ρυθμιστή με μόνιμο στατισμό με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ο άξονας της παραγόμενης ισχύος και όχι της θέσης του μηχανισμού κίνησης. Γενικά τέτοιος ρυθμιστής επιλέγεται σε σταθμούς όπου η λειτουργία τους συνίσταται στην παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας παραγωγής, ανεξαρτήτως άλλων παραγόντων, ή όταν είναι επιθυμητός ο έλεγχος της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο. Γίνεται, όμως, αντιληπτό ότι η λειτουργία μονάδος παραγωγής ελεγχόμενη με ρυθμιστή της παρούσας λογικής τείνει να οδηγηθεί σε αστάθεια σε περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας της μονάδας, ή σε περίπτωση νησιδοποίησης [14].



**Σχήμα 34 :** Μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού ρυθμιστή με λογική ρύθμισης ταχύτητας [14]

**3.3.3 Μεταβατικός στατισμός**

Εξ’αιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του υδραυλικού μέρους, όπως αυτά παρουσιάστηκαν κεφάλαιο 2, οι ρυθμιστές στροφών που είναι εφοδιασμένοι μόνο με την βαθμίδα του μόνιμου στατισμού κρίνονται ως μη ικανοποιητικοί και οδηγούν το σύστημα σε αστάθεια. Η αντίθετης κατεύθυνσης αρχική απόκριση της μηχανικής ισχύος του υδροστροβίλου σε μία απότομη μεταβολή των υδατοθυρίδων, απαιτεί την ενσωμάτωση στον ρυθμιστή βαθμίδας μεγάλου μεταβατικού στατισμού, με μεγάλο χρόνο επαναφοράς, για ευσταθή λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται με μία ρυθμιζόμενη ανάδραση. Αυτή επιβραδύνει ή περιορίζει την κίνηση των υδατοθυρίδων μέχρις ότου να ‘ευθυγραμμιστούν’ οι αποκρίσεις της παροχής και της μηχανικής ισχύος. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ρυθμιστή που να παρουσιάζει μεγάλο στατισμό (χαμηλό κέρδος) για γρήγορες μεταβολές, και τον συνήθη μικρότερο στατισμό (μεγάλο κέρδος) για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στο παρακάτω διάγραμμα βαθμίδων δείχνεται ένας ρυθμιστής στροφών με πρόσθετη αντιστάθμιση του μεταβατικού στατισμού:



**Σχήμα 35 :** Ρυθμιστής με πρόσθετη βαθμίδα μεταβατικού στατισμού [4]

- όπου  $R_p$  ο μόνιμος στατισμός (σ για την ελληνική βιβλιογραφία)
- $R_T$  ο μεταβατικός στατισμός (δ για την ελληνική βιβλιογραφία)
- $T_R$  ο χρόνος επαναφοράς (reset time)

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι αν το  $R_T$  μηδενιστεί, προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή με μόνιμο στατισμό. Το ίδιο συμβαίνει και στη μόνιμη κατάσταση, όπου ο τελεστής  $s$  παίρνει την τιμή μηδέν. Σε μία απότομη μεταβολή όμως ο τελεστής  $s$  τείνει στο άπειρο, οπότε ο μεταβατικός στατισμός κυριαρχεί και μειώνει σημαντικά το μεταβατικό κέρδος του ρυθμιστή στροφών περιορίζοντας την κίνηση των υδατοθυρίδων και το συνακόλουθο υδραυλικό πλήγμα [4].

### 3.4 Διάφοροι τύποι ρυθμιστών στροφών

---

#### 3.4.1 Ο μηχανικο-υδραυλικός ρυθμιστής στροφών

---

Ο πιο ευρέως διαδεδομένος ρυθμιστής υδροστροβίλου είναι ο μηχανικο-υδραυλικός ρυθμιστής. Ο αισθητήρας της ταχύτητας, η ανάδραση μόνιμου στατισμού, και οι υπολογιστικές λειτουργίες υλοποιούνται διαμέσου μηχανολογικών στοιχείων, ενώ λειτουργίες που έχουν απαιτήσεις μεγαλύτερης ισχύος, υλοποιούνται διαμέσου υδραυλικών στοιχείων. Ένας αποσβεστήρας ταλαντώσεων (dashpot) χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του μεταβατικού στατισμού, ενώ για την απενεργοποίησή του χρησιμοποιείται μία ρύθμιση by-pass.

Η συνάρτηση μεταφοράς της βαλβίδας αναμετάδοσης (relay valve) και του σερβομηχανισμού των υδατοθυρίδων είναι:

$$\frac{g}{a} = \frac{K_1}{s} \quad (3.6)$$

όπου  $K_1$  το κέρδος

Η συνάρτηση μεταφοράς της βαλβίδας οδηγού (pilot valve) είναι:

$$\frac{a}{b} = \frac{K_2}{1 + sT_p} \quad (3.7)$$

όπου  $K_2$  ο λόγος ανάδρασης του μοχλού (feedback lever ratio)

$T_p$  χρονική σταθερά της βαλβίδας οδηγού και του σερβο-μηχανισμού

Από τις εξισώσεις (3.6) και (3.7) εξάγεται η σχέση:

$$\frac{g}{b} = \frac{K_1 K_2}{s(1 + sT_p)} = \frac{K_s}{s(1 + sT_p)} \quad (3.8)$$

Όπου  $K_s$  το κέρδος του σερβομηχανισμού, το οποίο καθορίζεται από τον λόγο ανάδρασης του μοχλού της βαλβίδας οδηγού (pilot valve feedback lever ratio)

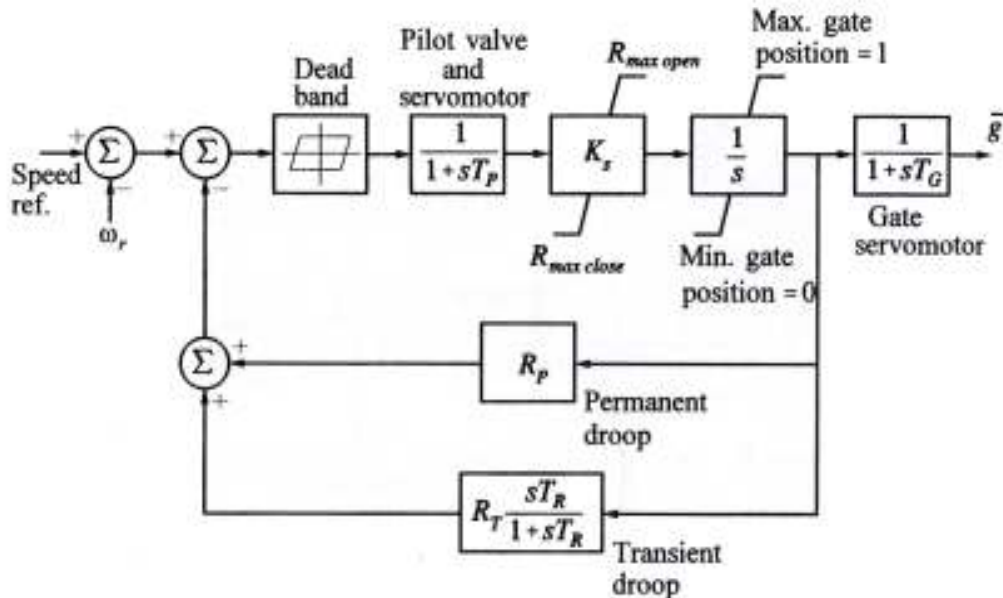


Θεωρώντας ότι ο αποσβεστήρας ταλαντώσεων της παροχής διαμέσου της βαλβίδας της βελόνης (needle valve) είναι ανάλογος της πίεσης του αποσβεστήρα ταλαντώσεων, η συνάρτηση μεταφοράς είναι του αποσβεστήρα είναι:

$$\frac{d}{g} = R_T \frac{sT_R}{1+sT_R} \quad (3.9)$$

Ο μεταβατικός στατισμός  $R_T$  καθορίζεται από τον λόγο του μοχλού, και ο χρόνος επαναφοράς  $T_R$  καθορίζεται από την ρύθμιση της βαλβίδας της βελόνης. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο ρυθμός της μετατόπισης περιορίζεται, εξ' αιτίας των υπερπιέσεων και των υποπιέσεων που παράγονται και μπορεί να είναι καταστροφικές για τον αγωγό.

Έχοντας περιγράψει όλες τις συνιστώσες, το μπλοκ διάγραμμα του μηχανικο-υδραυλικού ρυθμιστή είναι [4]:



**Σχήμα 36 : Πλήρης μηχανικο-υδραυλικός ρυθμιστής [4]**

- όπου  $T_P$  χρονική σταθερά της βαλβίδας οδηγού και του σερβο-μηχανισμού (pilot valve and servomotor time constant)
- $K_s$  το κέρδος του σερβομηχανισμού (servo gain)
- $T_G$  συνολική σταθερά χρόνου του σερβομηχανισμού
- $R_p$  μόνιμος στατισμός
- $R_T$  μεταβατικός στατισμός
- $T_R$  χρόνος επαναφοράς
- $R_{max\ open}$  μέγιστος ρυθμός ανοίγματος υδατοθυρίδων
- $R_{max\ close}$  μέγιστος ρυθμός κλεισίματος υδατοθυρίδων

### 3.4.2 Ο PID

---

Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα ελέγχου, και ειδικά για ρύθμιση σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς είναι ο PID ελεγκτής (όπου τα αρχικά PID σημαίνουν Αναλογικός – Ολοκληρωτικός – Διαφορικός (Proportional – Integral – Derivative). Ο PID χρησιμοποιεί αναλογικούς, ολοκληρωτικούς και διαφορικούς όρους για να επεξεργαστεί το σφάλμα που έχει ως είσοδο και να το μετατρέψει σε σήμα που δίνεται ως εντολή στο μηχανισμό κίνησης του στροβίλου.

Ο αναλογικός όρος παράγει σήμα ελέγχου ανάλογο του σφάλματος του συστήματος, έτσι ώστε :

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.10)$$

όπου  $K_p$  το αναλογικό κέρδος σε α.μ.

$u(t)$  το σήμα εισόδου

$e(t)$  το σήμα εξόδου

Σε μία βηματική είσοδο, χαμηλές τιμές του  $K_p$  προσδίδουν ευστάθεια στο σύστημα αλλά αφήνουν μεγάλο σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Υψηλότερες τιμές του  $K_p$ , έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερο σφάλμα μόνιμης κατάστασης, αλλά χειρότερη μεταβατική απόκριση. Άρα, ο αναλογικός όρος χρησιμοποιείται ώστε να μειώσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μειώνοντας όμως την χρονική σταθερά του συστήματος και τον συντελεστή απόσβεσης. Σημειώνεται ότι το  $K_p$  δε μπορεί ποτέ να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης διότι έστω και μικρό σφάλμα θα πρέπει να υπάρχει ώστε να παράγεται το σήμα ελέγχου.

Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μειώνεται από τον ολοκληρωτικό όρο του ελεγκτή. Εδώ, το παραγόμενο σήμα είναι ανάλογο του ολοκληρώματος του σφάλματος, άρα :

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (3.11)$$

όπου  $K_i$  το ολοκληρωτικό κέρδος  $\text{sec}^{-1}$

Όταν δημιουργείται το σφάλμα, ο ολοκληρωτής τείνει να ενισχύσει την δράση του ελεγκτή, οδηγώντας τον σταθμό στη ζητούμενη έξοδο. Όταν το σφάλμα μηδενιστεί, ο ολοκληρωτικός έλεγχος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των συνθηκών μόνιμης κατάστασης. Παρόλο που το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μπορεί έτσι να μηδενιστεί, η συμπεριφορά αυτή λειτουργεί σε βάρος της ευστάθειας, αφού ο ολοκληρωτικός όρος αυξάνει την ταλάντωση του πλάτους και τον χρόνο αποκατάστασης εισάγοντας πρόσθετες  $90^\circ$  στην καθυστέρηση φάσης σε όλες τις συχνότητες, και έτσι μειώνει το κέρδος και τα περιθώρια φάσης. Για να μειωθεί η ταλάντωση μπορεί να προστεθεί και ο τρίτος όρος του PID, ο διαφορικός, ο οποίος δίνει σήμα ελέγχου ανάλογο του διαφορικού του χρόνου (του ρυθμού αλλαγής) του σήματος σφάλματος :

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.12)$$

όπου  $K_d$  το διαφορικό κέρδος σε sec

Εφ’ όσον το σήμα ελέγχου είναι ανάλογο μόνο του ρυθμού αλλαγής, ο διαφορικός όρος δεν έχει επίδραση στην μόνιμη κατάσταση (μηδενικός ρυθμός αλλαγής). Επίσης, η ύπαρξη μόνο διαφορικής ανάδρασης δεν είναι εφαρμόσιμη αλλά χρησιμοποιείται μόνο σε συνδυασμό με τον αναλογικό και/ή τον ολοκληρωτικό όρο. Κατά τη διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου, η προπορεία φάσης κατά  $90^\circ$  που εισάγεται εξαιτίας του μηδενικού στην αρχή των αξόνων στο πεδίο της συχνότητας προσδίδει στο σύστημα επιπλέον απόσβεση. Και η επιπλέον απόσβεση επιτρέπει υψηλότερες τιμές για τα κέρδη  $K_p$  και  $K_i$ . Τελικά, η συνάρτηση μεταφοράς του PID ελεγκτή είναι :

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.13)$$

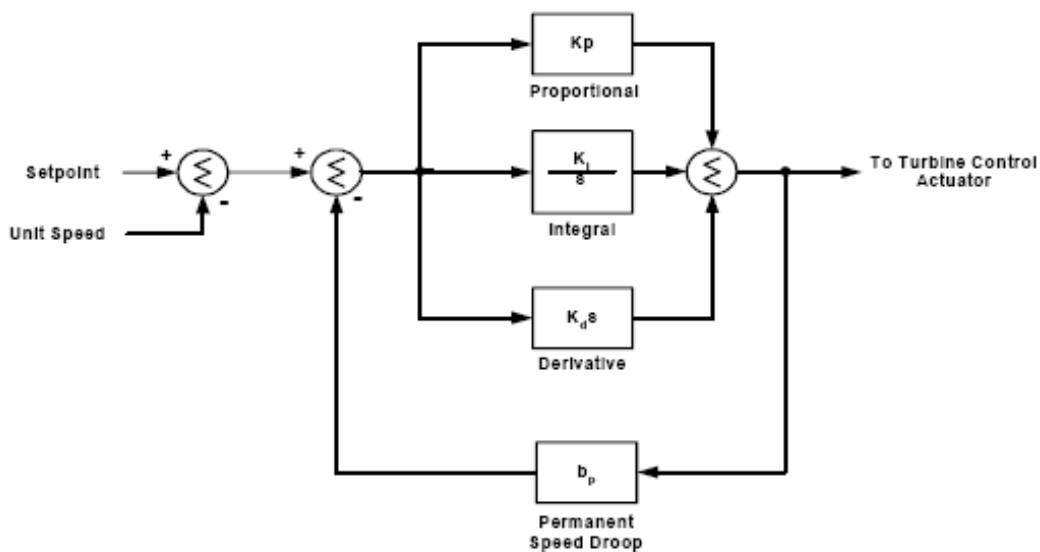
Συχνά, η συνάρτηση μεταφοράς παρουσιάζεται και ως εξής:

$$G_c(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right] \quad (3.14)$$

όπου  $T_i = \frac{K_p}{K_i}$  ο ολοκληρωτικός χρόνος ή χρόνος επαναφοράς (reset time)

$T_d = \frac{K_d}{K_p}$  ο διαφορικός χρόνος (rate time)

Το λειτουργικό διάγραμμα του ρυθμιστή PID φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [14][15]:



**Σχήμα 37 : PID ρυθμιστής [14]**

Ο PID ελεγκτής μπορεί να εφαρμοστεί μηχανικά, πνευματικά, ηλεκτρικά ή αλλιώς ως συσκευή που βασίζεται σε υπολογιστικά κυκλώματα. Οι τελευταίοι είναι συσκευές εύκολες σε προσαρμογές και διαμορφώσεις και στο να παρέχουν δυνατότητες βελτίωσης στην λειτουργία και στον έλεγχο. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης ψηφιακού ελεγκτή είναι ότι επιτρέπει στο σύστημα ρύθμισης να είναι πιο ευαίσθητο σε μικρά σφάλματα και ότι έχει γρήγορη απόκριση σε μεταβολές. Επιπλέον, οι ψηφιακοί ελεγκτές μπορούν να αναπαραχθούν με μεγάλη ακρίβεια και να παράγουν μία πανομοιότυπη έξοδο από όλες τις μονάδες που είναι συνδεδεμένες σε αντίθεση με τη μεταβλητότητα των ηλεκτρικών και των μηχανικών ρυθμιστών. Από τη στιγμή που οι τρεις παράμετροι του PID ελεγκτή μπορούν να προσαρμοστούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη, ο PID μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του εκάστοτε σταθμού [14].

### 3.4.3 Άλλοι τύποι

---

#### 3.4.3.1 Ο ηλεκτρο-υδραυλικός Ρυθμιστής

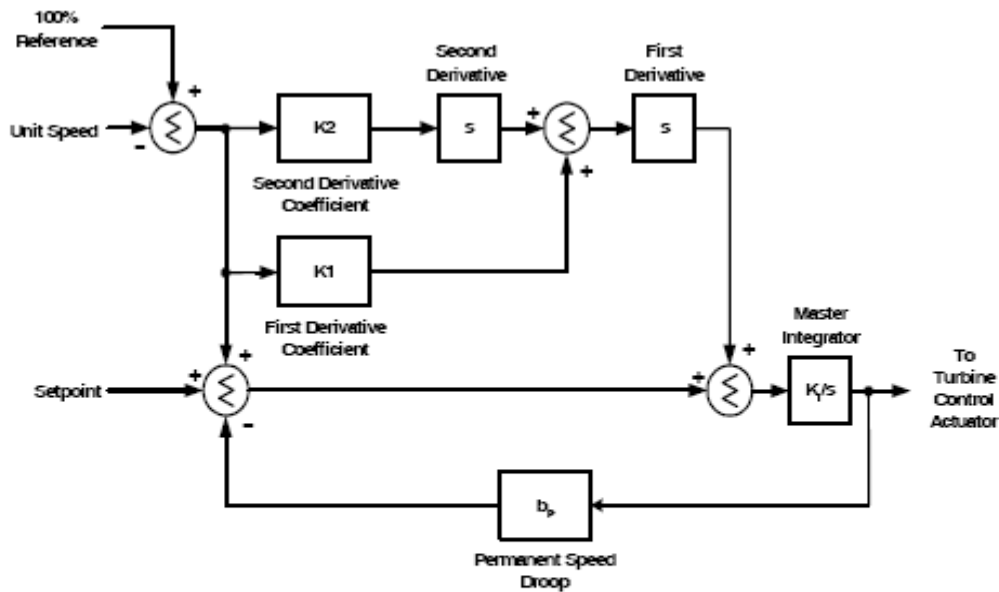
---

Οι σύγχρονοι ρυθμιστές στροφών υδροστροβίλων χρησιμοποιούν ηλεκτρο-υδραυλικά συστήματα. Λειτουργικά, είναι πανομοιότυποι με τους μηχανικο-υδραυλικούς ρυθμιστές. Οι αισθητήρες ταχύτητας, ο μεταβατικός στατισμός, ο μόνιμος στατισμός και άλλες λειτουργίες μέτρησης και υπολογισμού είναι υλοποιημένες ηλεκτρικά. Οι ηλεκτρικές συνιστώσες είναι πιο ευέλικτες και έχουν βελτιωμένη συμπεριφορά όσον αφορά στους χρόνους απόκρισης. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρο-υδραυλικών ρυθμιστών είναι συνήθως προσαρμοσμένα ώστε να είναι πανομοιότυπα με αυτά των μηχανικο-υδραυλικών ρυθμιστών.[4]

#### 3.4.3.2 Ο Ρυθμιστής διπλού-διαφορικού ελέγχου (Double Derivative Controllers)

---

Ο ρυθμιστής διπλού-διαφορικού ελέγχου είναι μία παραλλαγή του ρυθμιστή PID. Σε αυτόν τον ρυθμιστή το σήμα εισόδου επεξεργάζεται από έναν αναλογικό όρο, έναν πρώτο διαφορικό όρο και έναν δεύτερο διαφορικό όρο. Το άθροισμα αυτών των τριών όρων ολοκληρώνεται από την βαθμίδα εξόδου του ελεγκτή του ρυθμιστή. Η βαθμίδα του ολοκληρωτή μπορεί να είναι υλοποιημένη είτε ηλεκτρονικά, είτε υδραυλικά. Ο ρυθμιστής διπλού-διαφορικού ελέγχου, σε σχέση με τον PID, μπορεί να έχει αποτέλεσμα σε χαμηλότερο ακρότατο υπερτάχυνσης κατά τη διάρκεια της εκκίνησης της μονάδας, ενώ μειώνεται η επιρροή του αναλογικού και του διαφορικού όρου σε αλλαγές του σήματος αναφοράς. Τυπικά σταθεροποιητικά στοιχεία αυτού του ρυθμιστή είναι το κέρδος του πρώτου διαφορικού όρου (παρόμοιο με τον αναλογικό όρο του PID), το κέρδος του δεύτερου διαφορικού όρου (παρόμοιο με τον διαφορικό όρο του PID) και το γενικό ολοκληρωτικό κέρδος. Το λειτουργικό διάγραμμα ενός τυπικού διπλού διαφορικού ρυθμιστή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [14]:



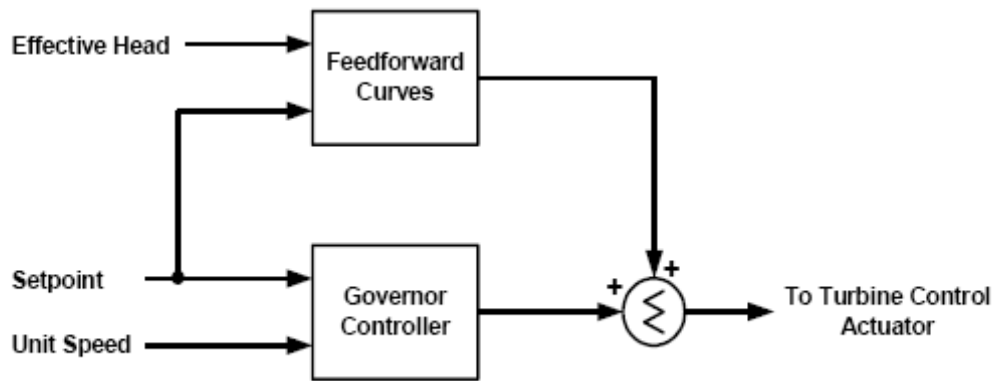
where

- $x_1$  is the first derivative gain coefficient,  $s$ ,
- $x_2$  is the second derivative gain coefficient,  $s^2$ ,
- $x_I$  is the overall integral gain,  $s^{-1}$ ,
- $b_p$  is the permanent speed droop, p.u.,
- $s$  is the Laplace operator.

**Σχήμα 38 : Ρυθμιστής διπλού-διαφορικού ελέγχου [14]**

### 3.4.3.3 Ρυθμιστής με πρόσθια τροφοδότηση (Feedforward Controller)

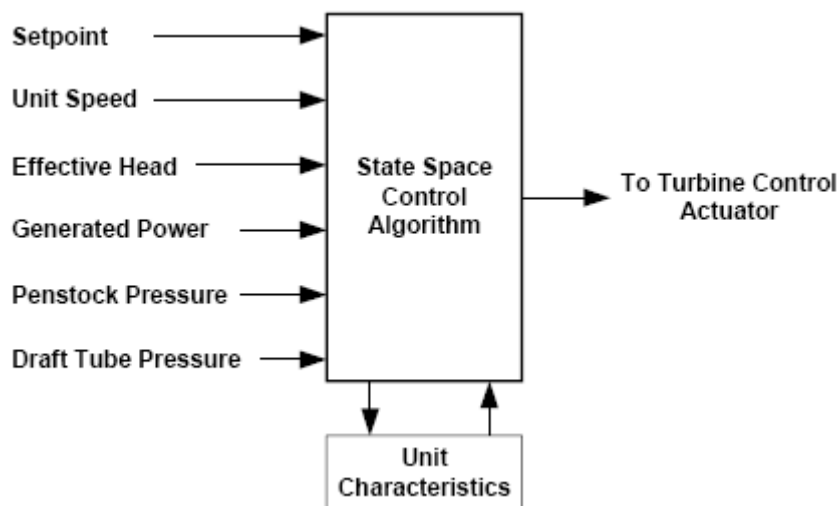
Η πρόσθια τροφοδότηση είναι στρατηγική ελέγχου πρόβλεψης η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με οποιονδήποτε ρυθμιστή για την επίτευξη γρηγορότερης απόκρισης σε αλλαγές του ζητούμενου σήματος χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία του ρυθμιστή στροφών με σκοπό την ευστάθεια του συστήματος. Ιστορικά, πολλές μονάδες ρυθμιστών στροφών είχαν ξεχωριστή ρύθμιση άμεσης επικοινωνίας με παραμέτρους απόσβεσης όταν συγχρονίζονταν σε μεγάλο διασυνδεδεμένο σύστημα. Αυτές οι παράμετροι επιτρέπουν στην μονάδα να αποκρίνεται ακαριαία σε εντολές εγχύσεως φορτίου, ενώ το δίκτυο επιβάλλει την ευστάθεια της ταχύτητας περιστροφής. Παρόλα αυτά, τα υψηλά κέρδη από την ταχύτητα στις υδατοθυρίδες προκαλούν αστάθεια στο σύστημα αν το η μονάδα αυτονομηθεί από το δίκτυο (islanded). Συνεπώς, η στρατηγική πρόσθιας τροφοδότησης είναι σχεδιασμένη μόνο για λειτουργία της μονάδας παράλληλα με το διασυνδεδεμένο δίκτυο και τυπικά απενεργοποιείται σε περίπτωση νησιδοποίησης. Η στρατηγική ελέγχου ενός ρυθμιστή πρόσθιας τροφοδότησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [14]:



Σχήμα 39 : Ρυθμιστής με πρόσθια τροφοδότηση [14]

#### 3.4.3.4 Ρυθμιστής με λογική κατάστασης χώρου (State Space Controller)

Ο Ρυθμιστής με λογική κατάστασης χώρου είναι ένας ελεγκτής με δυνατότητα πρόγνωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να εκτιμά την απόκριση ενός καλά ορισμένου συστήματος, μοντελοποιώντας τις χαρακτηριστικές του συστήματος και παρέχοντας την λογική ελέγχου για την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης. Το σύστημα ελέγχου με λογική κατάστασης χώρου χρησιμοποιείται σε συνεργασία με σύστημα ελέγχου με λογική ανάδρασης. Ο σκοπός του συστήματος ελέγχου με ανάδραση είναι η απαλοιφή σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν ως αποτέλεσμα ανακρίβειών στο μοντέλο του ελεγκτή με λογική διάταξης κατάστασης. Το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού ρυθμιστή με λογική κατάστασης χώρου με έλεγχο ανάδρασης του σφάλματος, είναι [14]:

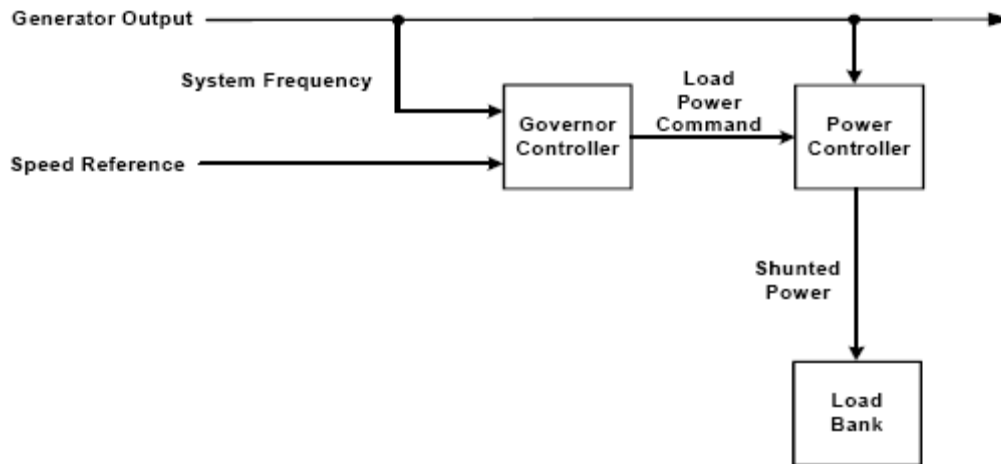


Σχήμα 40 : Ρυθμιστής με λογική κατάστασης χώρου [14]

#### 3.4.3.5 Ρυθμιστής Φορτίου (Load Governor)

Στην περίπτωση του αυτόνομου δικτύου μικρής ισχύος η ευστάθεια του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί εάν παράλληλα με το κύριο φορτίο συνδεθεί ένα ρυθμιζόμενο φορτίο το οποίο να μπορεί να απορροφά τις διακυμάνσεις του φορτίου έτσι ώστε οι υδροστρόβιλοι να λειτουργούν ουσιαστικά με σταθερή ισχύ, χωρίς απότομες μεταβολές [5]. Το ρυθμιζόμενο αυτό φορτίο μπορεί να είναι μία συστοιχία

ωμικών αντιστάσεων ή μία ηλεκτρομαγνητική πέδη δινορρευμάτων και ελέγχεται από τον ρυθμιστή φορτίου του υδροστροβίλου ως εξής : το σήμα αναφοράς είναι η επιθυμητή συχνότητα (‘ταχύτητα αναφοράς’) και οι αναδράσεις είναι η συχνότητα του συστήματος και το σήμα επιθυμητής ισχύος. Η έξοδος του συστήματος είναι η συχνότητα του συστήματος. Το μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή φορτίου φαίνεται παρακάτω το οποίο περιλαμβάνει τον στρόβιλο, τη γεννήτρια και το ρυθμιζόμενο φορτίο [14].

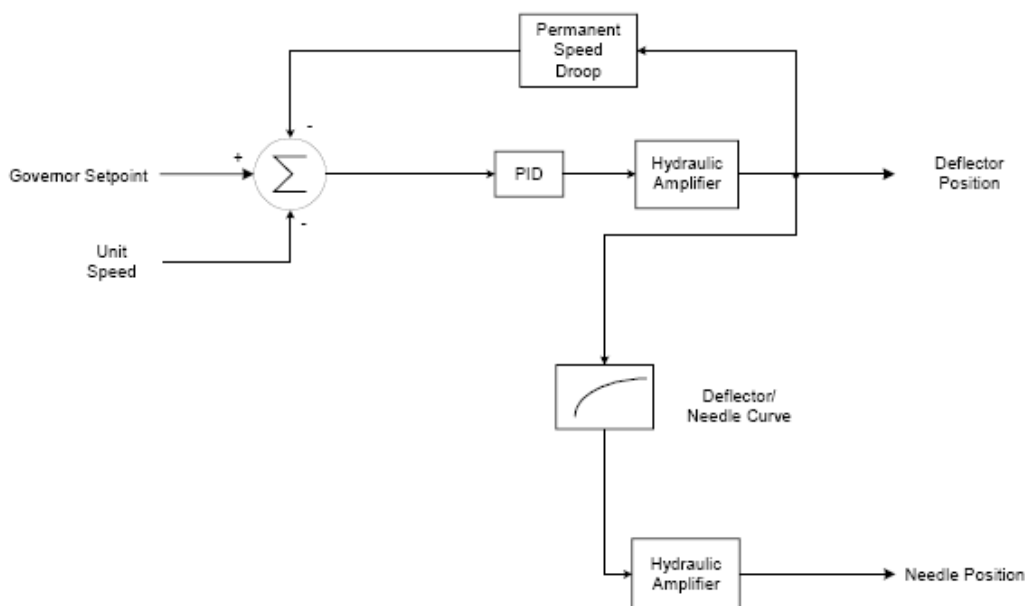


**Σχήμα 41 : Ρυθμιστής Φορτίου [14]**

### 3.5 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών υδροστροβίλων Pelton

#### 3.5.1 Η περίπτωση ελέγχου με εκτροπέα (deflector) με λειτουργία εξοικονόμησης νερού (Water-saving control mode)

Στην περίπτωση ελέγχου με λειτουργία εξοικονόμησης νερού για έναν υδροστροβίλο δράσεως (Pelton) επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση του υδροστροβίλου εγκαθιστώντας τον όνυχα εκτροπής εκτός της ροής του νερού, και έτσι όλο το νερό παρέχεται από το ακροφύσιο στον στρόβιλο. Για να μειωθεί ο νεκρός χρόνος εφαρμογής του εκτροπέα εντός της δέσμης του νερού όταν χρειάζεται, αυτός τοποθετείτε όσο κοντύτερα γίνεται στο χείλος της δέσης ενώ για την μοντελοποίησή του χρησιμοποιείται είτε μία δυσδιάστατη συνάρτηση βασισμένη στην θέση του σερβομηχανισμού της βελόνης είτε μία τρισδιάστατη συνάρτηση βασισμένη στην θέση του σερβομηχανισμού της βελόνης και στο λειτουργικό ύψος του υδροστροβίλου. Το παρακάτω σχήμα είναι ένα μπλοκ διάγραμμα που παρουσιάζει τον ρυθμιστή εφοδιασμένο με λογική ελέγχου του εκτροπέα με λειτουργία εξοικονόμησης νερού [14].



**Σχήμα 42 : Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή με εκτροπέα και λειτουργία εξοικονόμησης νερού [14]**

### 3.5.2 Η περίπτωση ελέγχου με εκτροπέα με λειτουργία σπατάλης νερού (Water-easting control mode)

Ο όνυχας εκτροπής παρεμβαίνει αυτόματα και εκτρέπει την δέσμη από τον δρομέα. Παρόλα αυτά, εάν ο εκτροπέας είναι εκτός της δέσμης, δεν μπορεί η εκτροπή να είναι ακαριαία. Εάν ο υδροστρόβιλος Pelton χρησιμοποιείται για να ελέγχει την συχνότητα ενός απομονωμένου συστήματος, ο εκτροπέας μπορεί να τοποθετηθεί ελαφρώς εντός της δέσμης, ώστε να επιτρέπει την ταχεία αύξηση της ροής νερού στο δρομέα μετά από αύξηση του φορτίου του συστήματος. Σημειώνεται ότι όταν ο εκτροπέας είναι εντός της δέσμης, η δράση του επιβάλλει τον έλεγχο της ταχύτητας του υδροστροβίλου, αντίθετα με την περίπτωση που ο εκτροπέας είναι εκτός της δέσμης και δεν έχει καμία επίδραση στη λειτουργία του υδροστροβίλου οπότε ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται από τη βελόνη του ακροφυσίου. Επειδή η κίνηση του εκτροπέα δεν επιδρά στο φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, ο ρυθμιστής στροφών ρυθμίζεται ώστε να αποκρίνεται ακαριαία.

Στην περίπτωση ελέγχου με εκτροπέα με λειτουργία σπατάλης νερού, πρέπει να οριστεί μία μέθοδος καθορισμού της παροχής που εκτρέπεται από τον δρομέα και έτσι, να καθορίζεται το φορτίο που παραλαμβάνει ο υδροστρόβιλος ενώ ο εκτροπέας είναι εντός της δέσμης. Οποιαδήποτε περίπτωση λειτουργίας με αυτόν τον έλεγχο απαιτεί την ύπαρξη μεθόδου συνεργασίας της δυναμικής της απόκρισης του ρυθμιστή στροφών όταν ο εκτροπέας είναι εντός της δέσμης νερού και όταν ο εκτροπέας είναι εκτός. Σε λειτουργία σπατάλης νερού, ο εκτροπέας συνεχώς εκτρέπει νερό εκτός του δρομέα, το οποίο αποτελεί σπατάλη (επιπλέον κατανάλωση) ενέργειας. Τέλος, ο εκτροπέας πρέπει να είναι σχεδιασμένος ώστε να αντέχει τα φαινόμενα διάβρωσης αφού η λειτουργία του είναι συνεχής και άρα η καταπόνησή του μεγαλύτερη [14].



### 3.5.3 Η περίπτωση ελέγχου με χρησιμοποίηση παραπάνω από μίας βελόνης (Needle sequencing)

---

Για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος, ένας υδροστροβίλος Pelton (δράσεως γενικότερα) χρησιμοποιεί διαφορετικό αριθμό βελόνων. Οι βελόνες που χρησιμοποιούνται είναι σε ζευγάρια, συμμετρικά τοποθετημένα, προς αποφυγή ακτινικής συνιστώσας φόρτισης του στροβίλου. Η ρύθμιση των διακοπών για λειτουργία με 2, 4, ή 6 βελόνες (για παράδειγμα) καθορίζεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες της απόδοσης του εκάστοτε υδροστροβίλου [14].

## 3.6 Ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση

---

### 3.6.1 Μοντέλο ρυθμιστή

---

Ο ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση περιλαμβάνει αναλογικό όρο, τον μεταβατικό στατισμό και τον ισόχρονο όρο. Ο αναλογικός όρος περιέχει την χαρακτηριστική στατισμού και σχετίζεται με το πόσο γρήγορα αποκρίνεται ο ρυθμιστής σε σφάλμα της ταχύτητας περιστροφής. Η απαίτηση για χαμηλό μεταβατικό κέρδος, εξαιτίας της δυναμικής του υδραυλικού μέρους (υδραυλικό πλήγμα), οδηγεί στην υπέρθεση βαθμίδας μεταβατικού στατισμού. Τέλος, λόγω του ότι οι υδροστροβίλοι για τους οποίους σχεδιάζεται ο ρυθμιστής απαιτείται να κάνουν ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα θα πρέπει να συμπεριληφθεί και ο ισόχρονος όρος με τον οποίο η συχνότητα επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή. Πιο αναλυτικά οι τρεις όροι είναι:

- Ο αναλογικός όρος, ο οποίος περιλαμβάνει το κέρδος στατισμού  $K_p = \frac{1}{R}$
- Η βαθμίδα μεταβατικού στατισμού:  $R_T \frac{sT_R}{1 + sT_R}$
- Ο ισόχρονος όρος:  $K_i \frac{1}{s}$

Επίσης, στο μοντέλο του ρυθμιστή συμπεριλαμβάνεται και η δυναμική του σερβομηχανισμού και της βελόνης μέσω χαρακτηριστικής καθυστέρησης δύο βαθμίδων, με χρόνους  $T_P$  και  $T_G$ .

Τελικά, το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση για τον έλεγχο των υδροστροβίλων είναι το παρακάτω:



- Από το [16] για τη διασφάλιση της ευστάθειας σε συνθήκες απομονωμένης λειτουργίας στο μέγιστο φορτίο τα  $R_T$  και  $T_R$  υπολογίζονται:

$$R_T = [2, 3 - (T_W - 1)0,15] \frac{T_W}{T_M} \quad (3.15)$$

$$T_R = [5 - (T_W - 1)0,5] T_W \quad (3.16)$$

Το κέρδος του σερβομηχανισμού  $K_s$  τίθεται όσο υψηλότερο μπορεί.

- Στο [3] οι τιμές των  $R_T$  και  $T_R$  υπολογίζονται:

$$R_T = \frac{2,5T_W}{2H} \quad (3.17)$$

$$T_R = 5T_W \quad (3.18)$$

- Στο [12] ο Hovey προτείνει τις εξής τιμές για τις παραμέτρους  $R_T$  και  $T_R$ :

$$R_T = \frac{T_W}{H} \quad (3.19)$$

$$T_R = 4T_W \quad (3.20)$$

- Στο [13] ο Paynter προτείνει τις εξής τιμές για τις παραμέτρους  $R_T$  και  $T_R$ :

$$R_T = \frac{T_W}{0,8H} \quad (3.21)$$

$$T_R = \frac{T_W}{0,17} \quad (3.22)$$

- Στο [21] ο υπολογισμός των  $R_T$  και  $T_R$  αλλά και των  $K_P$ ,  $K_I$  και  $K_D$  προτείνεται ως εξής:

$$R_T = \frac{1}{K_P} = 0,625 \frac{T_W}{H} \quad (3.23)$$

$$T_R = \frac{K_P}{K_I} = 3,33T_W \quad (3.24)$$

$$\frac{K_P}{K_D} > \frac{3}{T_W} \quad (3.25)$$

όπου  $R_T = \frac{1}{K_P}$  και  $T_R = \frac{K_P}{K_I}$  οι σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων των ρυθμιστών υλοποιημένων με την λογική του κλασικού μηχανικο-υδραυλικού ελεγκτή και το PI ελεγκτή.

Τέλος ο μόνιμος στατισμός  $R_p$  εκλέγεται μεταξύ των τιμών 0,01 και 0,06. Σε απομονωμένη λειτουργία ο μόνιμος στατισμός είναι μικρότερος απ’ ότι σε λειτουργία παράλληλη με το άπειρο σύστημα.

## 4 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού μέρους

### 4.1 Απλοποιημένο αδρανειακό μοντέλο

#### 4.1.1 Εξίσωση ταλάντωσης του ζεύγους στροβίλου - γεννήτριας

Μία μεταβολή του φορτίου επιφέρει άμεση μεταβολή στην ηλεκτρική ροπή  $T_e$  της γεννήτριας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ισορροπία ηλεκτρικής και μηχανικής ροπής με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής. Αυτό φαίνεται από την εξίσωση της κίνησης, η οποία είναι:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (4.1)$$

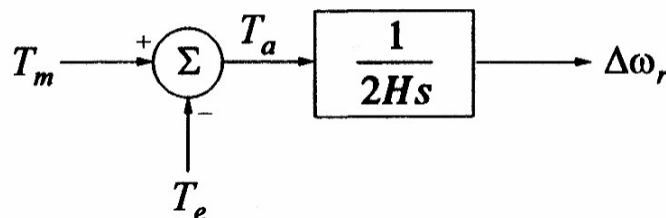
όπου  $H$  η σταθερά αδράνειας σε α.μ. και εκφράζει την κινητική ενέργεια της μηχανής σε ονομαστική ταχύτητα προς την βάση σε VA.

και

$$H = \frac{1}{2} \frac{j\omega^2}{VA_{a.\mu.}} \quad (4.2)$$

όπου  $J$  η συνδυασμένη στιγμιαία αδράνεια της γεννήτριας και του στροβίλου σε  $kg \cdot m^2$

Έτσι, η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του δρομέα σαν συνάρτηση της ηλεκτρικής και της μηχανικής ροπής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [4]:



Σχήμα 44 : Μπλοκ διάγραμμα του αδρανειακού μοντέλου [4]

#### 4.1.2 Μηχανικός χρόνος εκκίνησης $T_M$

---

Ο μηχανικός χρόνος εκκίνησης της μηχανής  $T_m$  μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e}{2H} \quad (4.3)$$

Ο χρόνος  $T_M$  εκφράζει την διάρκεια εκκίνησης της μονάδας, από την ταχύτητα περιστροφής  $\omega=0$  μέχρι την ονομαστική  $\omega=1$  α.μ.

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση λαμβάνουμε :

$$1 = \frac{1}{2H} \int_0^{T_M} 1 dt$$

Οπότε ο μηχανικός χρόνος εκκίνησης είναι  $T_M=2H$  [4].

#### 4.1.3 Απόκριση του φορτίου σε μεταβολές της συχνότητας

---

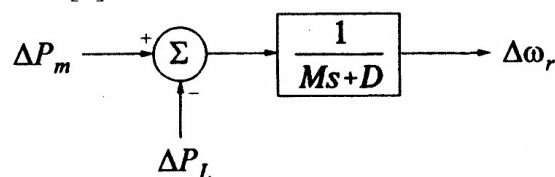
Γενικά, το φορτίο είναι συνδυασμός παθητικών φορτίων και ηλεκτρικών συσκευών. Για παθητικά φορτία, όπως ο φωτισμός και η θέρμανση, η ηλεκτρική ισχύς είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Σε περίπτωση που το φορτίο αποτελείται από ηλεκτρικές συσκευές (κινητήρες) , όπως είναι οι αντλίες, η ηλεκτρική ισχύς μεταβάλλεται μαζί με τη συχνότητα σε μεταβολές της ταχύτητας της μηχανής. Η γενική χαρακτηριστική εξάρτησης του φορτίου με τη συχνότητα εκφράζεται με την σχέση:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \quad (4.4)$$

όπου  $D$  η σταθερά απόσβεσης φορτίου

Η σταθερά απόσβεσης εκφράζεται ως η επί τοις εκατό μεταβολή του φορτίου για 1% μεταβολή της συχνότητας. Τυπικές τιμές του  $D$  είναι από 1 έως 2 %.

Το μπλοκ διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος συμπεριλαμβάνοντας και το φαινόμενο της απόσβεσης του φορτίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου εδώ το  $M$  συμβολίζει τον χρόνο  $T_M$  [4]:



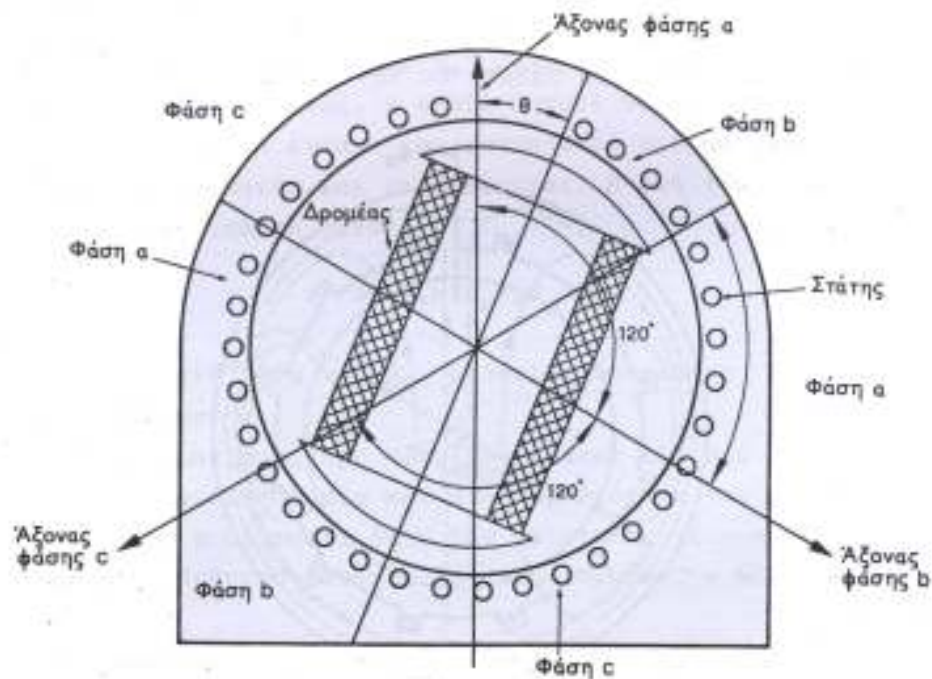
**Σχήμα 45: Μπλοκ διάγραμμα που περιλαμβάνει την επίδραση του φαινομένου της απόσβεσης του φορτίου [4]**

## 4.2 Σύγχρονη γεννήτρια

### 4.2.1 Γενικά

#### 4.2.1.1 Περιγραφή σύγχρονων γεννητριών

Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος ονομάζονται και εναλλακτικές. Από άποψη διάταξης των μαγνητικών πόλων που δημιουργούν την διέγερση οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται σε αυτές με εξωτερικούς πόλους και σε αυτές με εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται για μικρές ισχείς και χαμηλές τάσεις ενώ για μεγαλύτερες ισχείς και σχετικά χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (όπως στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών έργων) χρησιμοποιούνται οι γεννήτριες με εσωτερικούς πόλους, δηλ. με τους μαγνητικούς πόλους στον δρομέα της μηχανής. Η σχηματική διάταξη μίας τριφασικής σύγχρονης μηχανής δίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 46 : Σχηματική διάταξη τριφασικής σύγχρονης μηχανής [22]

#### 4.2.1.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Ο δρομέας της σύγχρονης γεννήτριας στρέφεται από μία κινητήρια μηχανή (ατμοστρόβιλο, υδροστρόβιλο, αεριοστρόβιλο κλπ). Το τυλίγμα του στάτη διατάσσεται συμμετρικά στην περιφέρειά του εγκατεστημένο μέσα σε διαμήκη αυλάκια. Το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας ελέγχεται από το συνεχές ρεύμα του τυλίγματος διεγέρσεως ή τυλίγματος δρομέα. Μία γεννήτρια μπορεί να λειτουργεί μόνη της τροφοδοτώντας ένα μεμονωμένο φορτίο, ή να λειτουργεί παράλληλα με άλλες γεννήτριες, συνδεδεμένη σε ένα μεγάλο δίκτυο. Η γεννήτρια τροφοδοτεί το

σύστημα με ενεργό και άεργο ισχύ. Ο ζυγός της έχει ορισμένη τάση και η γεννήτρια λειτουργεί σε συγχρονισμό με το σύστημα το οποίο έχει ορισμένη συχνότητα.

Κάθε γεννήτρια μπορεί να ελεγχθεί με δύο δυνάμεις ελέγχου, το ρεύμα διεγέρσεως και το μηχανικό ζεύγος του κινητήριου άξονα. Η μεταβολή οποιασδήποτε από τις δύο αυτές δυνάμεις αλλάζει γενικά την ισχύ, την τάση και τη συχνότητα της μηχανής.

#### 4.2.1.3 Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής

##### 4.2.1.3.1 Γενικά

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα περιστροφής σχετίζεται με την αντοχή της γεννήτριας στις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται στον ρότορα και τα περιστρεφόμενα πηνία. Συνήθως οι σύγχρονες τυποποιημένες γεννήτριες γενικής χρήσεως είναι σχεδιασμένες για υπερτάχυνση της τάξεως του 1,25 καθώς στις κοινές εφαρμογές οι γεννήτριες στρέφονται από πετρελαιοκινητήρες οπότε δεν αντιμετωπίζεται έντονο πρόβλημα υπερτάχυνσης του συστήματος.

##### 4.2.1.3.2 Στα ΥΗΕ

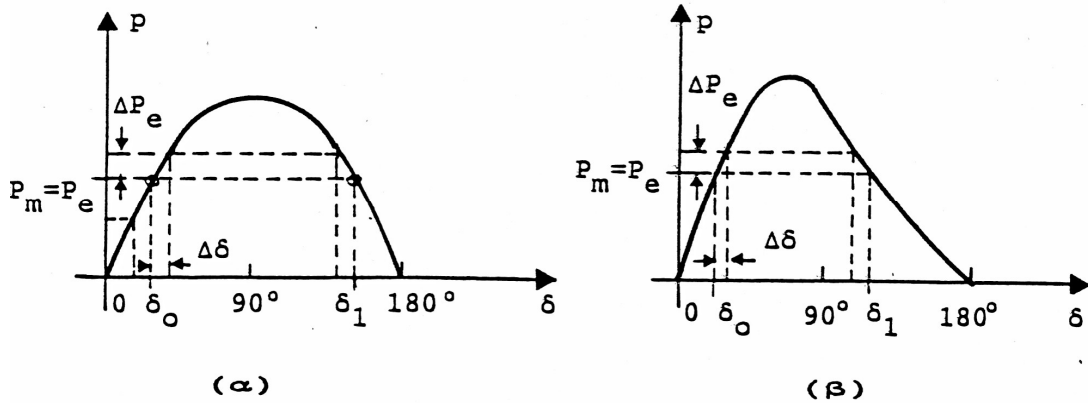
Στα ΥΗΕ, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του συστήματος (άρα και της γεννήτριας) μπορεί να είναι η ταχύτητα φυγής του υδροστροβίλου, η οποία όπως αναφέρθηκε είναι της τάξεως του 1,7 έως 2,2 της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής. Άρα η γεννήτρια θα πρέπει να είναι ικανή να λειτουργήσει σε αυτή την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής επί μικρό χρονικό διάστημα, δηλ. να είναι περισσότερο στιβαρή από τις τυποποιημένες γεννήτριες γενικής χρήσεως. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να περιορισθεί στο 1,6 της ονομαστικής εάν παρέμβει έγκαιρα ο μηχανισμός ρύθμισης του υδροστροβίλου με κλείσιμο των ρυθμιστικών πτερυγίων. Όμως και στην περίπτωση αυτή η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη από αυτή των τυποποιημένων γεννητριών γενικής χρήσεως [5][22].

### 4.3 Γραμμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας

#### 4.3.1 Γραμμικό μοντέλο μίας γεννήτριας

Μία σύγχρονη γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη σ’ έναν άπειρο ζυγό για τις περιπτώσεις κυλινδρικού δρομέα και εκτύπων πόλων έχει καμπύλη γωνίας-ισχύος η οποία είναι [23]:





**Σχήμα 47: Καμπύλη γωνίας – ισχύος α) Κυλινδρικός δρομέας β) Γεννήτρια με έκτυπους πόλους [23]**

Για να διατηρηθεί σταθερή ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση, η ηλεκτρική ισχύς  $P_e$  θα πρέπει να είναι ίση με την καθαρή μηχανική ισχύ  $P_m$  που παρέχει στη μηχανή η κινητήρια μηχανή (ατμοστρόβιλος, υδροστρόβιλος, κλπ). Ο δρομέας της γεννήτριας σχηματίζει σε αυτές τις συνθήκες μία σταθερή γωνία  $\delta_0$  ως προς την τάση  $V$  του άπειρου ζυγού. Η τελευταία θεωρείται ότι παραμένει σταθερή κατά μέτρο και γωνία καθώς ο άπειρος ζυγός παριστάνει ένα σύστημα σταθερής συχνότητας και τάσεως.

Με την παραδοχή ότι η γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με έναν ιδανικό ρυθμιστή τάσεως, η πραγματική ισχύς που η γεννήτρια παρέχει στο σύστημα δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = \frac{VV_0}{X} \sin \delta \quad (4.5)$$

όπου  $\delta$  η γωνία μεταξύ της τερματικής τάσεως της γεννήτριας και του άπειρου ζυγού

Η γραμμικοποιημένη σχέση γωνίας – ισχύος είναι η παρακάτω:

$$\Delta P_e = K_s \Delta \delta \quad (4.6)$$

όπου  $K_s$  ο συντελεστής συγχρονισμού ο οποίος συμπίπτει με την κλίση της καμπύλης γωνίας ισχύος

Αμελώντας τις απώλειες και θεωρώντας ότι η γεννήτρια δεν απομακρύνεται σημαντικά από τη σύγχρονη ταχύτητα θα είναι:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2H \Delta \dot{\omega} \quad (4.7)$$

Με την παραδοχή ότι η γωνία της τερματικής τάσεως της μηχανής μεταβάλλεται μαζί με τη γωνία του δρομέα, είναι δηλαδή στέρα συνδεδεμένη στο πλαίσιο των αξόνων  $dq$  του δρομέα της μηχανής, η μεταβολή  $\Delta \delta$  της γωνίας του δρομέα (σε ακτίνια) δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (4.8)$$

Όπου  $\omega_0$  η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής σε ηλεκτρικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο

Αντικαθιστώντας την  $\Delta \omega$  την στην παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση δευτέρου βαθμού, η οποία ονομάζεται εξίσωση ταλάντωσης της σύγχρονης μηχανής με μηδενική απόσβεση:

$$\frac{2H}{\omega_0} \Delta \ddot{\delta} + \Delta P_e = \Delta P_m \quad (4.9)$$

Αν στην (4.7) συμπεριληφθεί και ο βρόγχος απόσβεσης, τότε λαμβάνει την μορφή:

$$2H \Delta \dot{\omega} + K_d \Delta \omega = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (4.10)$$

Ο συντελεστής απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων  $K_d$  εκφράζει την απόσβεση που συμπεριλαμβάνει τις τριβές στα έδρανα του άξονα της μηχανής, τις απώλειες ανεμισμού, τις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και τις απώλειες που οφείλονται στα δινορρέυματα που κυκλοφορούν στο σιδερένιο μέρος του δρομέα της μηχανής.

#### 4.3.2 Γραμμικό μοντέλο πολλών γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα

---

Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη παράγραφο, η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta P_G = K_s \Delta \delta + K_D (\Delta \omega_G - \Delta \omega_e) \quad (4.11)$$

Εάν  $N$  σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα, τότε για μία μεταβολή  $\Delta P_L$  του φορτίου θα είναι:

$$\Delta P_L = \sum_{i=1}^N \Delta P_{G,i} \quad (4.12)$$

Αντικαθιστώντας στην (4.12) την (4.11) και την (4.8) και λύνοντας ως προς την συχνότητα του κοινού ζυγού, εξάγεται η γενικευμένη σχέση:

$$\Delta \omega_e = \sum_{i=1}^N \left( \frac{sK_{D,i} + K_{S,i}}{\sum K} \right) \Delta \omega_{G,i} - \frac{s \Delta P_L}{\sum K} \quad (4.13)$$

όπου

$$\sum K = s \sum_{i=1}^N K_{D,i} + \sum_{i=1}^N K_{S,i} \quad (4.14)$$

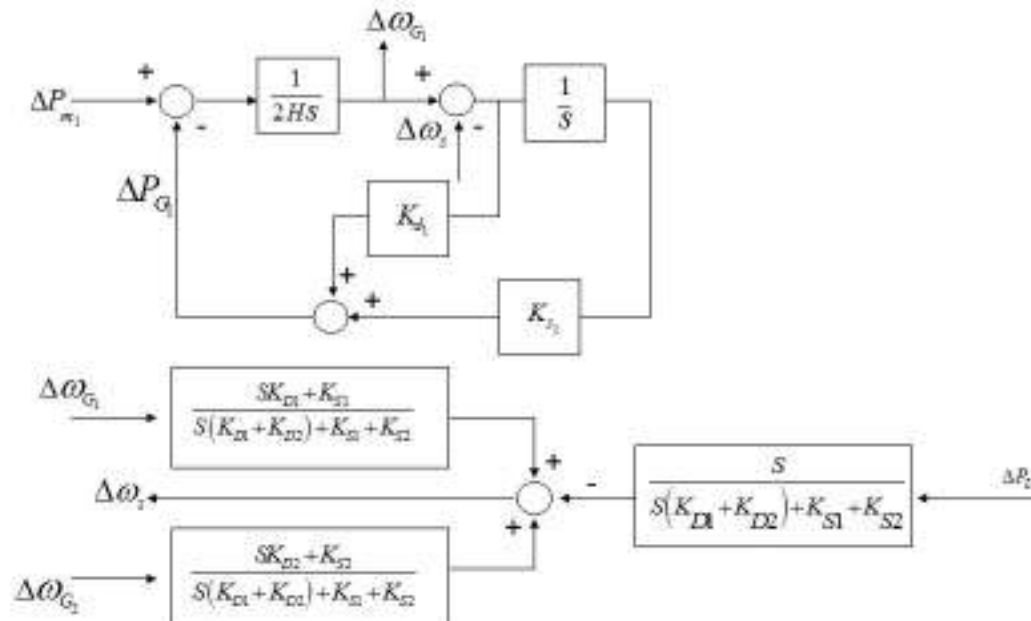
Η σχέση για δύο γεννήτριες, όπως χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση της παράλληλης λειτουργίας δύο υδροστροβίλων, εξειδικεύεται σε [36]:

$$\Delta\omega_e = \frac{(sK_{D1} + K_{S1})}{\sum K_2} \Delta\omega_{G1} + \frac{(sK_{D2} + K_{S2})}{\sum K_2} \Delta\omega_{G2} - \frac{s\Delta P_L}{\sum K_2} \quad (4.15)$$

όπου

$$\sum K_2 = s(K_{D1} + K_{D2}) + K_{S1} + K_{S2} \quad (4.16)$$

Το μοντέλο που περιγράφεται από τις παραπάνω εξισώσεις, είναι το εξής:



**Σχήμα 48 : Γραμμικό μοντέλο πολλών γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα**

#### 4.4 Μη γραμμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας

##### 4.4.1 Σύγχρονη γεννήτρια

Η σύγχρονη γεννήτρια μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας του SIMULINK/MATLAB. Το ηλεκτρικό μέρος της μηχανής προσομοιώνεται από ένα έκτης τάξεως μοντέλο [25] [26].

Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει την δυναμική του στάτη, την δυναμική του πεδίου και την δυναμική των τυλιγμάτων απόσβεσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου εκφράζεται με αναφορά στους άξονες του δρομέα (d, q). Όλες οι παράμετροι του στάτη και οι ηλεκτρικές ποσότητες αναφέρονται στον στάτη.

Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται ορίζονται ως εξής:

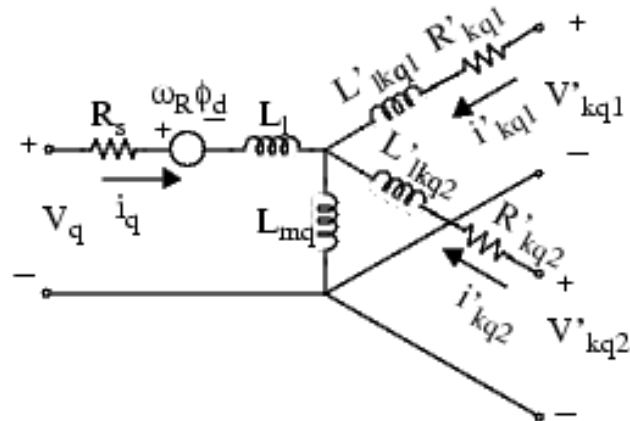
q, d αναφέρονται στους άξονες q, d αντίστοιχα

$R, s$  αναφέρονται σε μεγέθη του δρομέα και του στάτη αντίστοιχα

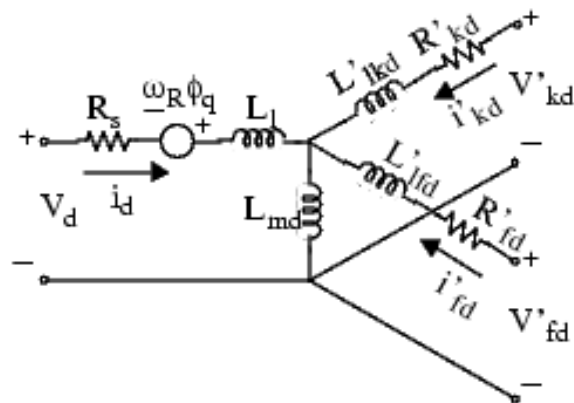
$L, m$  αναφέρονται στη ροή και την αντίδραση μαγνητίσεως αντίστοιχα

$f, k$  αναφέρονται στο τύλιγμα πεδίου και στα τύλιγματα απόσβεσης αντίστοιχα

Το ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 49: Άξονας q



Σχήμα 50: Άξονας d

Και χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d + \omega_R \varphi_q \quad (4.17)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega_R \varphi_d \quad (4.18)$$

Όπου  $\varphi_d$  και  $\varphi_q$  είναι οι d και q πυκνότητες της μαγνητικής ροής και δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \quad (4.19)$$

$$\varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq} \quad (4.20)$$

Επίσης, είναι:

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd} \quad (4.21)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd} \quad (4.22)$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \quad (4.23)$$

$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}) \quad (4.24)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1} \quad (4.25)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2} \quad (4.26)$$

$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q \quad (4.27)$$

$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q \quad (4.28)$$

Το μηχανικό σύστημα της μηχανής περιγράφεται από τις σχέσεις των μηχανικών ταλαντώσεων των δύο μαζών :

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - Kd\Delta\omega(t) \quad (4.29)$$

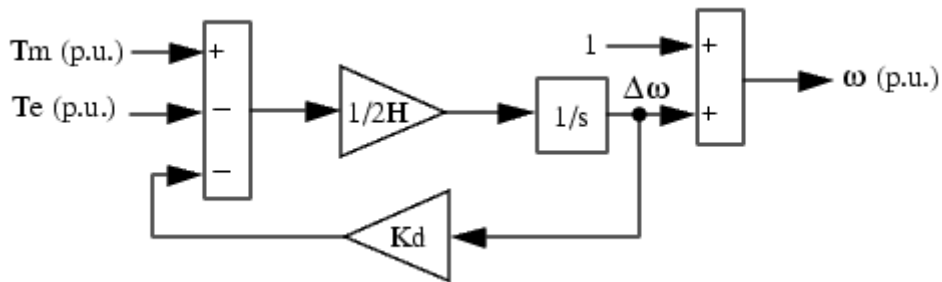
$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0 \quad (4.30)$$

όπου  $\Delta\omega$  η μεταβολή της ταχύτητας από την ταχύτητα λειτουργίας

$T_e$  η ηλεκτρομαγνητική ροπή

- $T_m$  η μηχανική ροπή του στροβίλου
- $H$  η σταθερά αδράνειας των στρεφόμενων μαζών
- $K_d$  συντελεστής απόσβεσης που αναπαριστά την επίδραση των τυλιγμάτων απόσβεσης (ροπή σε α.μ./ταχύτητα σε α.μ.)
- $\omega(t)$  η μηχανική ταχύτητα του δρομέα
- $\omega_0$  ταχύτητα λειτουργίας (1 α.μ.)

Το μοντέλο του μηχανικού μέρους παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 51: Μοντέλο μηχανικού μέρους**

Η μεταβολή γωνίας μηχανικής ισχύος  $\delta$  ως αποτέλεσμα της μεταβολής της μηχανικής ισχύος προσεγγίζεται από την δεύτερου βαθμού συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{\delta}{P_m} = \left( \frac{\omega_s}{2H} \right) / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (4.31)$$

όπου  $\delta$  η γωνία ισχύος: γωνία της εσωτερικής τάσης  $E$  με αναφορά την τερματική τάση σε rad

$P_m$  η μηχανική ισχύς σε α.μ.

$\omega$  η συχνότητα των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

$\zeta$  ο λόγος απόσβεσης

$\omega_s$  η ηλεκτρική συχνότητα σε rad/s

Η συχνότητα των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων σε rad/s είναι:

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_s P_{\max}}{2H}} \quad (4.32)$$

Ο συντελεστής απόσβεσης υπολογίζεται:

$$\zeta = (K_d / 4) \sqrt{\frac{2}{(\omega_s HP_{\max})}} \quad (4.33)$$

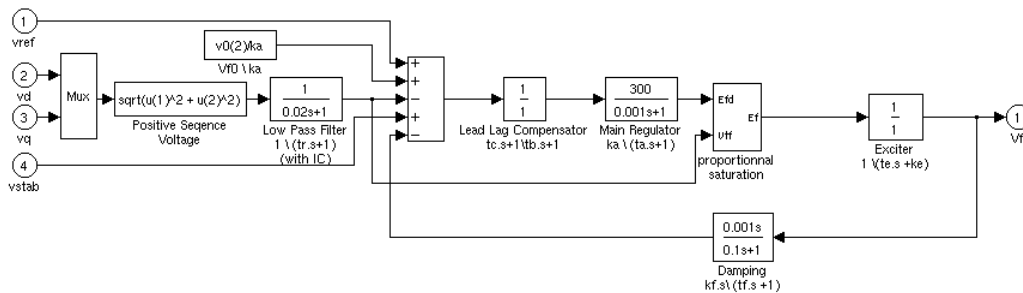
#### 4.4.2 Σύστημα διέγερσης

##### 4.4.2.1 Περιγραφή συστήματος διέγερσης

Σε μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται διεγέρτριες μηχανές χωρίς ψήκτρες (brushless exciters) για να τροφοδοτήσουν με συνεχές ρεύμα το δρομέα της γεννήτριας. Αυτές οι διεγέρτριες μηχανές είναι μικρές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος των οποίων το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από το στάτη της κύριας γεννήτριας, ενώ το κύκλωμα οπλισμού τους τοποθετείται στον άξονα του δρομέα. Η τριφασική έξοδος ης γεννήτριας ανορθώνεται από έναν τριφασικό ανορθωτή, που βρίσκεται πάνω στον άξονα της μηχανής και το συνεχές ρεύμα εξόδου του ανορθωτή οδηγείται στο τύλιγμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ρυθμιστεί το ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλοντας απλά το συνεχές ρεύμα διέγερσης της διεγέρτριας, που βρίσκεται πάνω στο στάτη και έχει πολύ μικρότερη τιμή [24].

##### 4.4.2.2 Μοντελοποίηση συστήματος διέγερσης

Το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος διέγερσης του SIMULINK/MATLAB αναπαριστά μία DC διέγερση και χωρίς την συνάρτηση του περιοριστή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



**Σχήμα 52: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος διέγερσης του SIMULINK/MATLAB**

όπου  $V_{ref}$  η επιθυμητή τιμή, σε α.μ., της τερματικής τάσης του στάτη

$V_f$  η τάση του πεδίου, σε α.μ.

Η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της τάσης διέγερσης  $V_{fd}$  και της εξόδου του ρυθμιστή τάσης  $E_f$  είναι [27]:

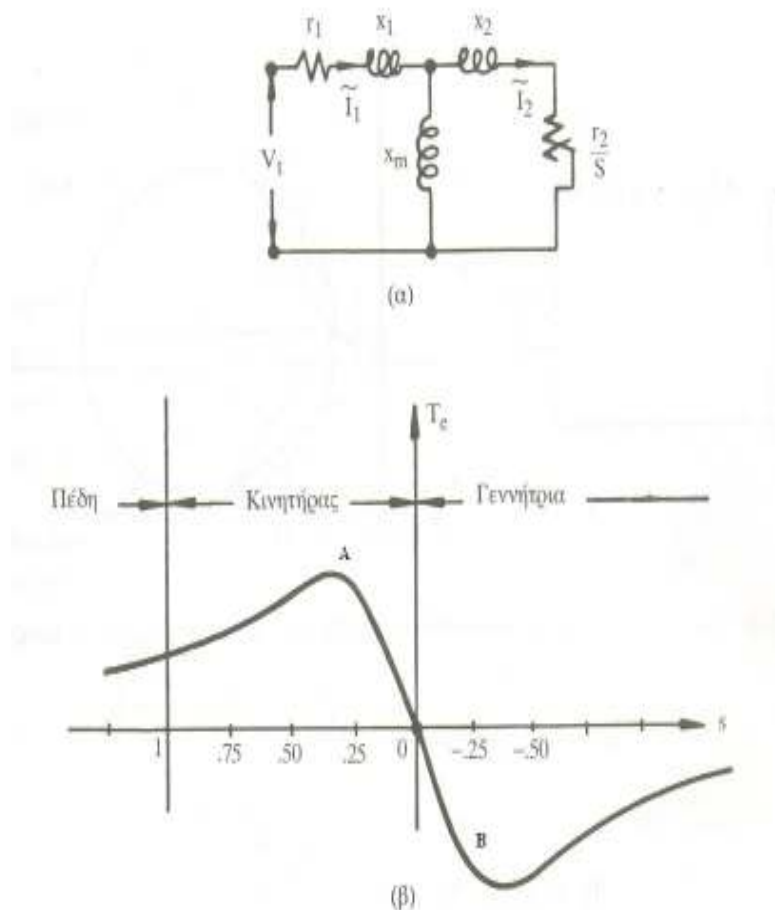
$$\frac{V_{fd}}{E_f} = \frac{1}{Ke + sT_e} \quad (4.34)$$

## 4.5 Ασύγχρονη Γεννήτρια

### 4.5.1 Γενικά

Αν μία επαγωγική μηχανή οδηγείται από μία κινητήρια μηχανή σε μία ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη, τότε η μηχανή λειτουργεί ως επαγωγική γεννήτρια. Καθώς αυξάνεται η ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανή στον άξονα της επαγωγικής μηχανής, αυξάνεται η ισχύς που παράγει η γεννήτρια. Υπάρχει κάποια μέγιστη επαγόμενη ροπή κατά τη λειτουργία της μηχανής, η οποία ονομάζεται ροπή αναστροφής (pushover torque), που αν ξεπεραστεί η γεννήτρια θα επιταχυνθεί επικίνδυνα.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μία ασύγχρονης μηχανής(α) καθώς και η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας(β), όπου φαίνεται η περιοχή λειτουργίας της γεννήτριας:



Σχήμα 53: Ασύγχρονη μηχανή: α)ισοδύναμο κύκλωμα β)χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας μίας επαγωγικής μηχανής

Επειδή η γεννήτρια επαγωγής στερείται ενός ξεχωριστού κυκλώματος διέγερσης, δεν μπορεί να παράγει άεργο ισχύ, συνεπώς θα πρέπει να συνδέεται σε μία εξωτερική πηγή άεργης ισχύος, ώστε να διατηρείται το μαγνητικό πεδίο του στάτη της. Αυτή η πηγή άεργης ισχύος θα πρέπει επίσης να ρυθμίζει την τάση στα άκρα της γεννήτριας.



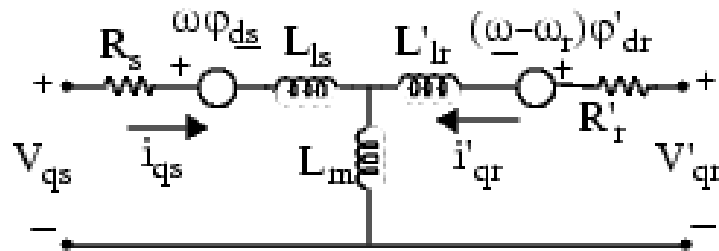
Κάτω από κανονικές συνθήκες η τάση της γεννήτριας διατηρείται από το εξωτερικό σύστημα ισχύος στο οποίο είναι συνδεδεμένη.

Σημαντικό πλεονέκτημα της ασύγχρονης γεννήτριας, έναντι της σύγχρονης, είναι η απλότητά της. Με τέτοια γεννήτρια δεν χρειάζεται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και δεν είναι απαραίτητο να κινείται συνεχώς σε μία σταθερή ταχύτητα: σε όσο διάστημα η ταχύτητα της μηχανής έχει τιμή μεγαλύτερη της σύγχρονης, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και όσο αυξάνεται η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονά της (μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο), τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς εξόδου της. Το γεγονός ότι μία τέτοια γεννήτρια δεν απαιτεί κάποια περίπλοκη ρύθμιση, την αναδεικνύει σε καλή επιλογή για λειτουργία της ως ανεμογεννήτρια [24].

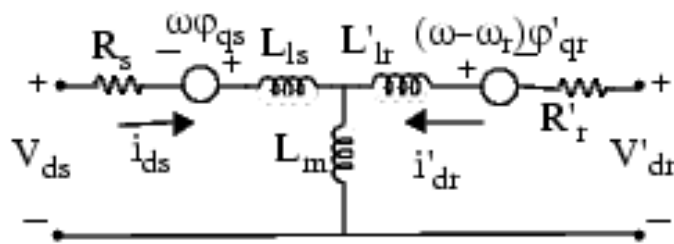
#### 4.5.2 Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της ασύγχρονης γεννήτριας του SIMULINK/MATLAB. Το ηλεκτρικό μέρος αναπαρίσταται από ένα τετάρτης τάξεως σύστημα και το μηχανικό μέρος από ένα δευτέρας τάξεως.

Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό σύστημα μοντελοποιείται με ανάλυση στους άξονες q, d όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα και σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις [25]:



Σχήμα 54: Άξονας q



Σχήμα 55: Άξονας d

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (4.35)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (4.36)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (4.37)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (4.38)$$

$$T_e = 1.5 p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (4.39)$$

$$\text{όπου} \quad \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (4.40)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (4.41)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (4.42)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (4.43)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (4.44)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (4.45)$$

Το μηχανικό σύστημα μοντελοποιείται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \quad (4.46)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (4.47)$$

#### 4.6 Μοντελοποίηση φορτίου

---

Για την προσομοίωση του φορτίου, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό του SIMULINK/MATLAB. Αυτό είναι ένα τριφασικό RLC φορτίο σειράς. Σε συγκεκριμένη συχνότητα, το φορτίο αναπαριστά μία σταθερή σύνθετη αντίσταση. Η ενεργός και άεργος ισχύς που καταναλώνονται από το φορτίο είναι ανάλογες του τετραγώνου της εφαρμοζόμενης τάσης. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει τεθεί  $L = 0$  και  $C = 0$ , συνεπώς το φορτίο είναι καθαρά ωμικό.

## 5 Ενσωμάτωση μοντέλων – βρόχος ελέγχου ταχύτητας

### 5.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο, ενσωματώνονται όλα τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί, στον βρόχο ελέγχου ταχύτητας υδροστροβίλου και παρουσιάζονται οι διάφορες περιπτώσεις, ανάλογα με το μοντέλο του υδραυλικού μέρους (ανελαστικό, κυματικό) και ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας (ένας υδροστρόβιλος, δύο υδροστρόβιλοι). Στη συνέχεια, αναλύονται οι τρόποι που επηρεάζουν την απόκριση ταχύτητας ενός ΥΗΣ. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση διαφόρων περιπτώσεων αποκρίσεων ταχύτητας όπως αυτές αναφέρονται στην τρέχουσα βιβλιογραφία.

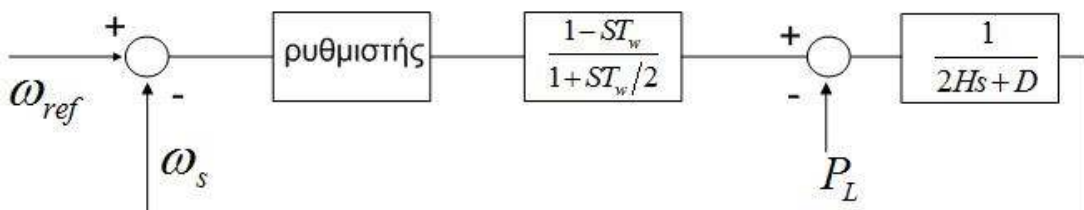
### 5.2 Βρόχος ελέγχου ταχύτητας

#### 5.2.1 Γενικά

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται συστηματικά η ενσωμάτωση των μοντέλων, που έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, στον βρόχο ελέγχου ταχύτητας. Το μοντέλο του υδραυλικού μέρους, το μοντέλο της γεννήτριας και ο ρυθμιστής στροφών συμπεριλαμβάνονται για την εξαγωγή του τελικού μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο SIMULINK/MATLAB για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του υδροστροβίλου σε μεταβατικά φαινόμενα, όπως σε μεταβολές του φορτίου. Επίσης, παρουσιάζεται το πώς επηρεάζεται η απόκριση συχνότητας του υδροστροβίλου ανάλογα με την επιλογή των παραμέτρων.

#### 5.2.2 Γραμμικό μοντέλο ελέγχου στροφών

Ιστορικά, στην μελέτη συμπεριφοράς υδροστροβίλων που τροφοδοτούν ένα απομονωμένο φορτίο, χρησιμοποιούνται σχετικά απλοποιημένες αναπαραστάσεις των υδραυλικών και των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων ενσωματωμένων σε βρόχο ελέγχου ταχύτητας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 56: Γραμμικό μοντέλο βρόχου ελέγχου ταχύτητας

Ο ρυθμιστής στροφών μπορεί να είναι είτε ο κλασικός μηχανικοδραυλικός είτε ένας PI είτε ένας PID ελεγκτής όπως αυτού έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 3. Η διαφορά της μηχανικής ισχύος και του φορτίου μετατρέπονται σε μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής σύμφωνα με την ταλαντωτική εξίσωση που σχετίζει την στρεφόμενη μηχανική αδράνεια ( $T_M$ ) με την ροπή επιτάχυνσης. Το φορτίο είναι η είσοδος του συστήματος, ενώ η φόρτιση επηρεάζεται από την σταθερά απόσβεσης φορτίου D.

Το μοντέλο αυτό είναι χρήσιμο για εκτίμηση παραμέτρων του ρυθμιστή στροφών, με την χρησιμοποίηση τεχνικών γραμμικής ανάλυσης ( απόκριση συχνότητας, γεωμετρικός τόπος ριζών κλπ). Εξ’ αιτίας των παραδοχών του και της γραμμικότητάς του το πεδίο εφαρμογής του πρέπει να περιορίζεται σε συνθήκες μικρού και μεσαίου υδραυλικού ύψους και μικρού μήκους αγωγού προσαγωγής. Επίσης, δεν είναι κατάλληλο για μελέτες που περιλαμβάνουν μεγάλες μεταβολές στην ισχύ εξόδου και τη συχνότητα.

Τέλος, αναφέρεται ότι ο χρόνος εκκίνησης ύδατος  $T_w$  υπολογίζεται από την αρχική τιμή της παροχής. Άρα, για μελέτες προσομοίωσης, το μοντέλο απαιτεί διαφορετικές τιμές του  $T_w$  προσαρμοσμένες στο εκάστοτε επίπεδο παροχής, συνεπώς το γραμμικό μοντέλο είναι κατάλληλο μόνο όταν το φορτίο δεν διαφέρει πολύ από το αρχικό.

### 5.2.3 Μη γραμμικό μοντέλο ελέγχου στροφών

---

#### 5.2.3.1 Γενικά

---

Η μοντελοποίηση όλου του συστήματος, δηλαδή του βρόχου ελέγχου ταχύτητας, απαιτεί την διάσπαση του προβλήματος σε άλλα μικρότερα, τα οποία μελετώνται ξεχωριστά. Έτσι, το υδραυλικό μέρος, το σύστημα ελέγχου και το ηλεκτρικό μέρος μοντελοποιήθηκαν ως ξεχωριστά υποσυστήματα στα κεφάλαια 2, 3 και 4. Στην συνέχεια, τα ξεχωριστά υποσυστήματα ενσωματώνονται στο τελικό σύστημα δημιουργώντας έτσι το μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας με το οποίο έγινε η προσομοίωση. Το τελικό μοντέλο διαφοροποιείται για τις περιπτώσεις που υιοθετείται η απλοποιητική παραδοχή του ασυμπίεστου του υγρού και όπου υιοθετείται το αναλυτικό κυματικό μοντέλο για το υδραυλικό μέρος. Επίσης, διαφοροποιείται για τις περιπτώσεις που λειτουργεί ένας στρόβιλος και δύο στρόβιλοι.

Η λογική ελέγχου παραμένει η ίδια για όλες τις περιπτώσεις: κάθε υδροστρόβιλος (είτε λειτουργεί αυτόνομα, είτε παράλληλα με άλλον) περιλαμβάνει τον δικό του ρυθμιστή, για τον έλεγχο των στροφών του και άρα τον έλεγχο της ηλεκτρικής συχνότητας. Στην περίπτωση της παράλληλης λειτουργίας δύο υδροστρόβιλων οι ρυθμιστές είναι εφοδιασμένοι με τις ίδιες παραμέτρους ώστε να εξασφαλίζεται η ταυτόχρονη και σωστή λειτουργία τους.

Στην περίπτωση λειτουργίας ενός στρόβιλου χρησιμοποιείται το απλουστευμένο μοντέλο με την εξίσωση ταλάντωσης των δύο μαζών χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η

δυναμική συμπεριφορά των γεννητριών. Στην περίπτωση λειτουργίας δύο υδροστροβίλων, για το ηλεκτρικό μέρος χρησιμοποιείται το γραμμικό μοντέλο της παράλληλης λειτουργίας δύο γεννητριών. Ο λόγος για την επιλογή αυτή, και όχι την υιοθέτηση μη γραμμικών μοντέλων για το ηλεκτρικό μέρος έχει να κάνει με το γεγονός ότι το ενδιαφέρον εστιάζεται στην δυναμική συμπεριφορά του υδροστροβίλου και όχι σε αυτή των γεννητριών. Επίσης, σε αυτό το απλουστευμένο μοντέλο παρέχεται η δυνατότητα πιο εύκολης και λεπτομερούς εξέτασης του τρόπου με τον οποίο οι διάφορες παράμετροι του υδραυλικού μέρους επηρεάζουν την απόκριση ταχύτητας. Ακόμα, με την χρήση αυτών των μοντέλων προσδιορίζονται οι πιο κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους των ρυθμιστών στροφών. Η προσομοίωση του ΜΥΗΣ με πλήρως μη γραμμικά μοντέλα για όλες τις συνιστώσες παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 9.

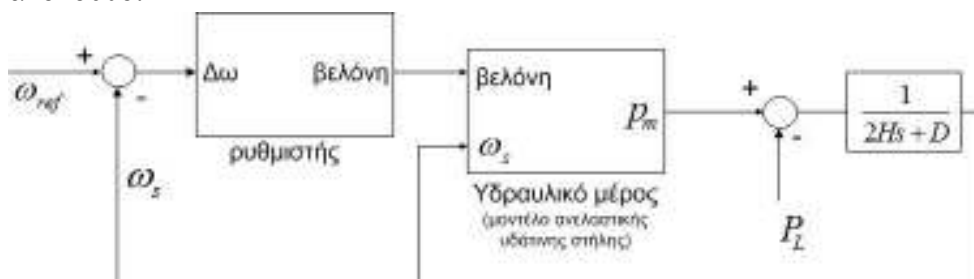
### 5.2.3.2 Με την θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού

#### 5.2.3.2.1 Λειτουργία ενός στροβίλου

Θεωρώντας ότι το νερό λειτουργεί ως ασυμπίεστη στήλη ρευστού και δεν εξελίσσονται κυματικά φαινόμενα στον αγωγό κατά την μεταβολή της ταχύτητας του υγρού, το υδραυλικό μέρος μοντελοποιείται όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Οι συνιστώσες που συναποτελούν το τελικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση λειτουργίας ενός στροβίλου είναι:

- Το μοντέλο του υδραυλικού μέρους με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού ενός αγωγού/ενός στροβίλου. Ο αγωγός ξεκινάει από τον άνω ταμιευτήρα και καταλήγει στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου.
- Την εξίσωση ταλάντωσης των δύο μαζών
- Τον ρυθμιστή στροφών του υδροστροβίλου
- Το απομονωμένο φορτίο (η είσοδος του συστήματος)

Το τελικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση λειτουργίας ενός στροβίλου και με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του νερού είναι το ακόλουθο:



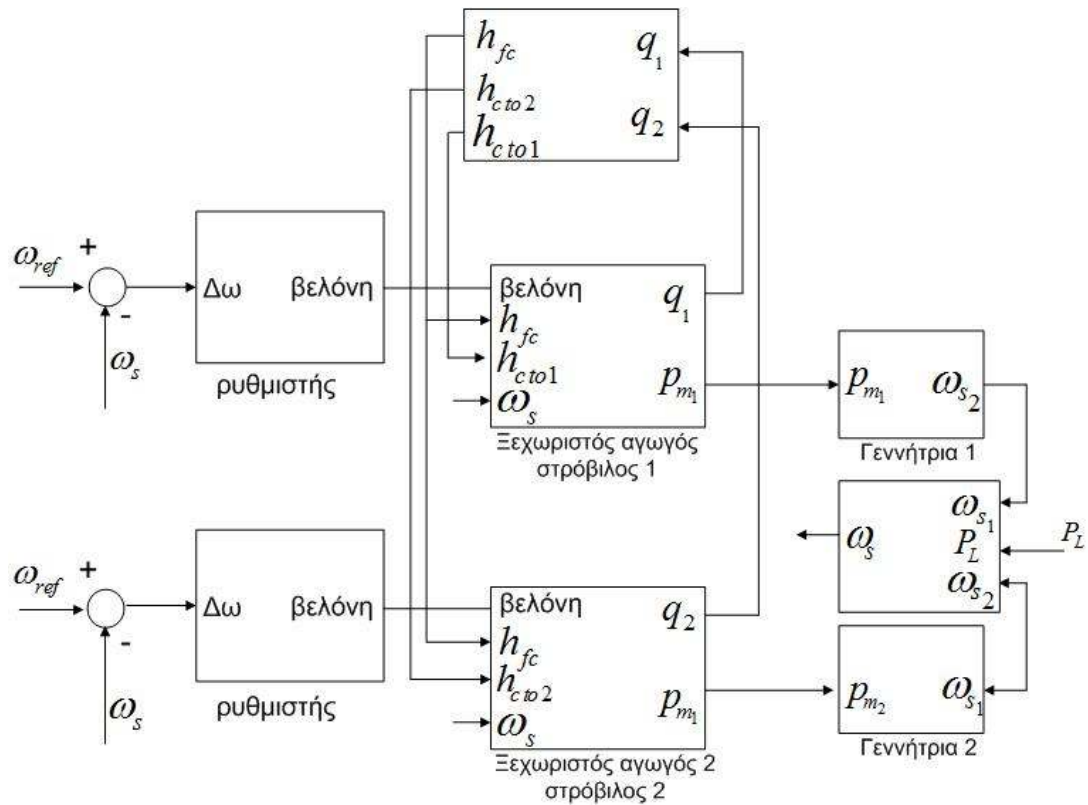
Σχήμα 57: Μοντέλο βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση ανελαστικής στήλης ύδατος

#### 5.2.3.2.2 Παράλληλη λειτουργία δύο υδροστροβίλων

Στην περίπτωση που ο υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από δύο υδροστρόβιλους, οι οποίοι είναι απευθείας συνδεδεμένοι με ηλεκτρικά συζευγμένες γεννήτριες το τελικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση του ασυμπίεστου του νερού, περιλαμβάνει τις συνιστώσες:

- Το μοντέλο με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού του ενός αγωγού/του ενός στρόβιλου. Ο αγωγός ξεκινάει από την διακλάδωση του κοινού αγωγού και καταλήγει στο ακροφύσιο του ενός υδροστρόβιλου
- Το μοντέλο με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του υγρού του δεύτερου αγωγού που τροφοδοτεί τον δεύτερο υδροστρόβιλο. Ο αγωγός ξεκινάει από την διακλάδωση του κοινού αγωγού και καταλήγει στο ακροφύσιο του δεύτερου υδροστρόβιλου
- Το μοντέλο της υδραυλικής σύζευξης μεταξύ των δύο υδροστρόβιλων
- Το γραμμικό μοντέλο της μίας γεννήτριας που συνδέεται απευθείας στον έναν υδροστρόβιλο (κεφ. 4.3.1)
- Το γραμμικό μοντέλο της δεύτερης γεννήτριας που συνδέεται απευθείας στον δεύτερο υδροστρόβιλο
- Το μοντέλο της ηλεκτρικής σύζευξης μεταξύ των δύο γεννητριών (κεφ. 4.3.2)
- Τον ρυθμιστή στροφών του ενός υδροστρόβιλου
- Τον ρυθμιστή στροφών του δεύτερου υδροστρόβιλου
- Το απομονωμένο φορτίο (η είσοδος του συστήματος)

Το τελικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας των δύο υδροστρόβιλων και με τη θεώρηση της ανελαστικής στήλης ύδατος είναι το ακόλουθο:



**Σχήμα 58 : τελικό μοντέλο βρόχου ελέγχου ταχύτητας με το μοντέλο ανελαστικής στήλης ύδατος για την περίπτωση της παράλληλης λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων**

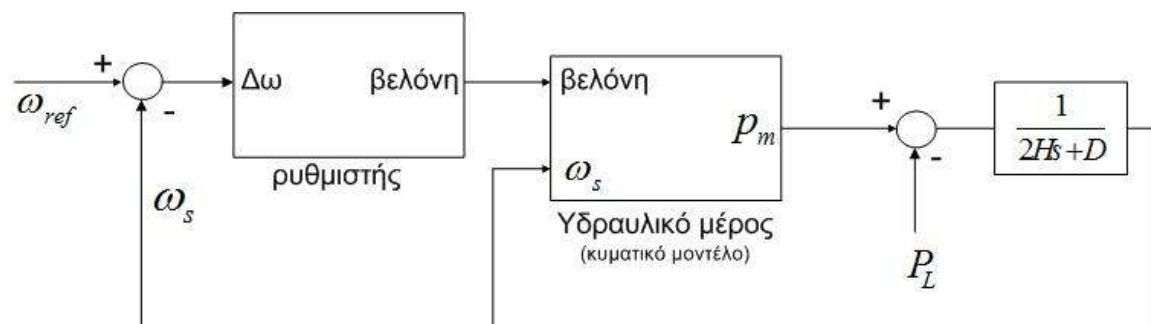
5.2.3.3 Αναλυτικό μοντέλο ελέγχου στροφών

5.2.3.3.1 Λειτουργία ενός στροβίλου

Στο υποκεφάλαιο 2.4 περιγράφηκαν τα πλήρως αναλυτικά κυματικά μοντέλα του υδραυλικού μέρους ενός υδροηλεκτρικού σταθμού. Για την περίπτωση λειτουργίας ενός υδροστροβίλου, οι συνιστώσες που συναποτελούν το τελικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας είναι:

- Το κυματικό μοντέλο του υδραυλικού μέρους. Ο αγωγός ξεκινάει από τον άνω ταμιευτήρα και καταλήγει στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου.
- Την εξίσωση ταλάντωσης των δύο μαζών
- Τον ρυθμιστή στροφών του υδροστροβίλου
- Το απομονωμένο φορτίο (η είσοδος του συστήματος)

Το μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση αυτή, είναι το ακόλουθο:



**Σχήμα 59 : Μοντέλο βρόχου ελέγχου ταχύτητας με το κυματικό μοντέλο για το υδραυλικό μέρος**

5.2.3.3.2 Παράλληλη λειτουργία δύο υδροστροβίλων

Στην περίπτωση που ο υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από δύο υδροστροβίλους, οι οποίοι είναι απευθείας συνδεδεμένοι με ηλεκτρικά συζευγμένες γεννήτριες το τελικό κυματικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας περιλαμβάνει τις συνιστώσες:

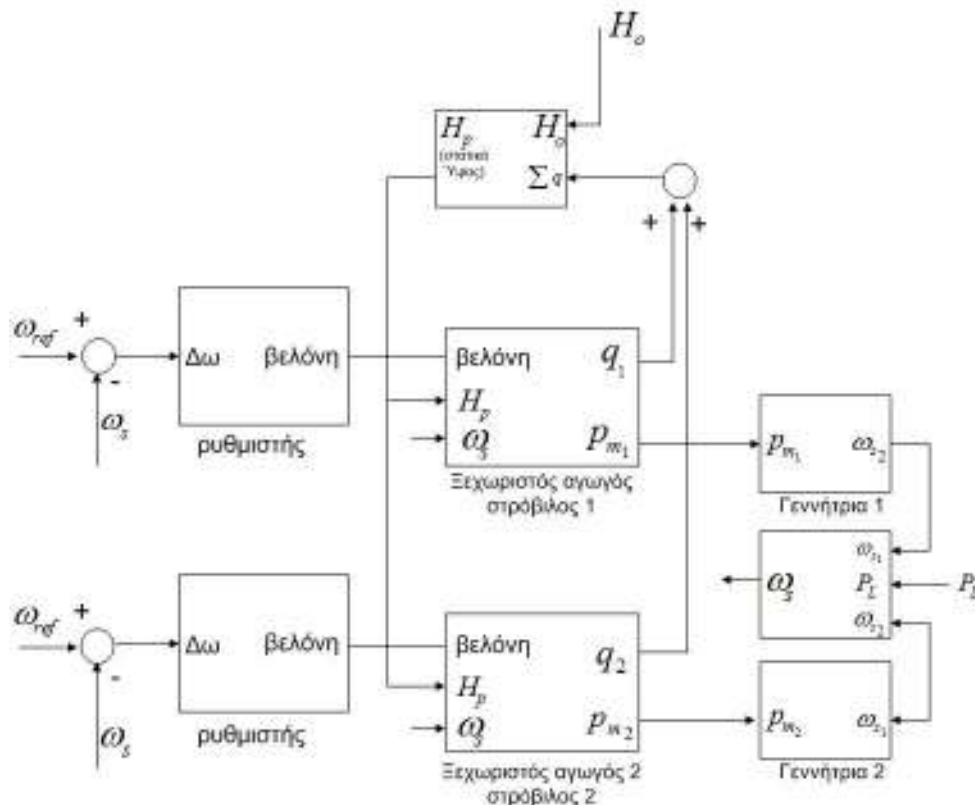
- Το κυματικό μοντέλο του υδροστροβίλου και του ξεχωριστού αγωγού που τον τροφοδοτεί. Ο αγωγός ξεκινάει από την διακλάδωση του κοινού αγωγού και καταλήγει στο ακροφύσιο του ενός υδροστροβίλου.
- Το κυματικό μοντέλο του δεύτερου υδροστροβίλου με τον δικό του αγωγό που τον τροφοδοτεί. Ο αγωγός ξεκινάει από την διακλάδωση του



κοινού αγωγού και καταλήγει στο ακροφύσιο του δεύτερου υδροστροβίλου.

- Το κυματικό μοντέλο του κοινού αγωγού που τροφοδοτεί τους δύο ξεχωριστούς αγωγούς. Ξεκινά από τον άνω ταμιευτήρα και καταλήγει στην διακλάδωση.
- Το μοντέλο της υδραυλικής σύζευξης μεταξύ των δύο υδροστροβίλων
- Το μοντέλο της μίας γεννήτριας που συνδέεται απευθείας στον έναν υδροστρόβιλο
- Το μοντέλο της δεύτερης γεννήτριας που συνδέεται απευθείας στον δεύτερο υδροστρόβιλο
- Το μοντέλο της ηλεκτρικής σύζευξης μεταξύ των δύο γεννητριών
- Τον ρυθμιστή στροφών του ενός υδροστροβίλου
- Τον ρυθμιστή στροφών του δεύτερου υδροστροβίλου
- Το απομονωμένο φορτίο (η είσοδος του συστήματος)

Το τελικό κυματικό μοντέλο του βρόχου ελέγχου ταχύτητας για την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων είναι το ακόλουθο:



**Σχήμα 60: Τελικό μοντέλο βρόχου ελέγχου ταχύτητας με το κυματικό μοντέλο για το υδραυλικό μέρος, για την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων**

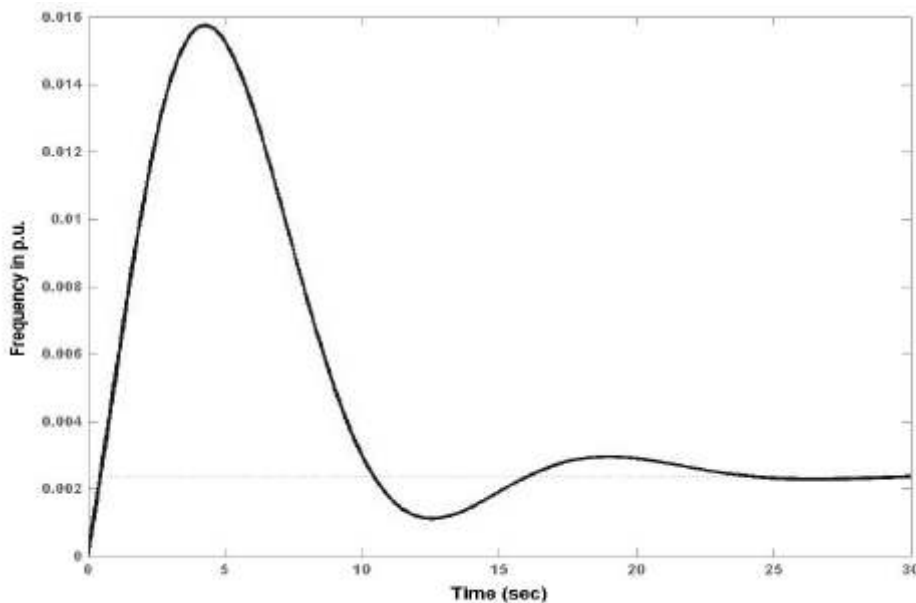
**5.3 Πως διάφοροι παράμετροι ενός ΥΗΕ επηρεάζουν την απόκριση ταχύτητας του υδροστροβίλου**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται πως οι βασικές παράμετροι ενός ΥΗΕ επηρεάζουν την απόκριση ταχύτητας του υδροστροβίλου σε μεταβολές του φορτίου. Οι βασικές παράμετροι είναι η σταθερά αδράνειας  $H$  του ζεύγους υδροστροβίλου-γεννήτριας, ο χρόνος εκκίνησης ύδατος  $T_w$ , ο μεταβατικός και ο μόνιμος στατισμός και ο χρόνος επαναφοράς.

Το σύστημα που μελετάται είναι ένας υδροηλεκτρικός σταθμός που τροφοδοτεί απομονωμένο φορτίο και ελέγχεται από έναν μηχανικό-υδραυλικό ρυθμιστή στροφών. Στο βασικό σενάριο τα χαρακτηριστικά του σταθμού είναι τα ακόλουθα:

- Μόνιμος στατισμός  $\sigma = 0,05(5\%)$
- Σταθερά αδράνειας  $H = 4,75$
- Μηχανικός χρόνος εκκίνησης  $T_M = 2H = 9,5 \text{ sec}$
- Χρόνος εκκίνησης ύδατος  $T_w = 1,24$
- Χρόνος επαναφοράς  $T_R = 5 \text{ sec}$
- Μεταβατικός στατισμός  $\delta = 0,27(27\%)$

Με τα παραπάνω χαρακτηριστικά που αποτελούν και το βασικό σενάριο η απόκριση συχνότητας σε μεταβολή βήματος του φορτίου 5% φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

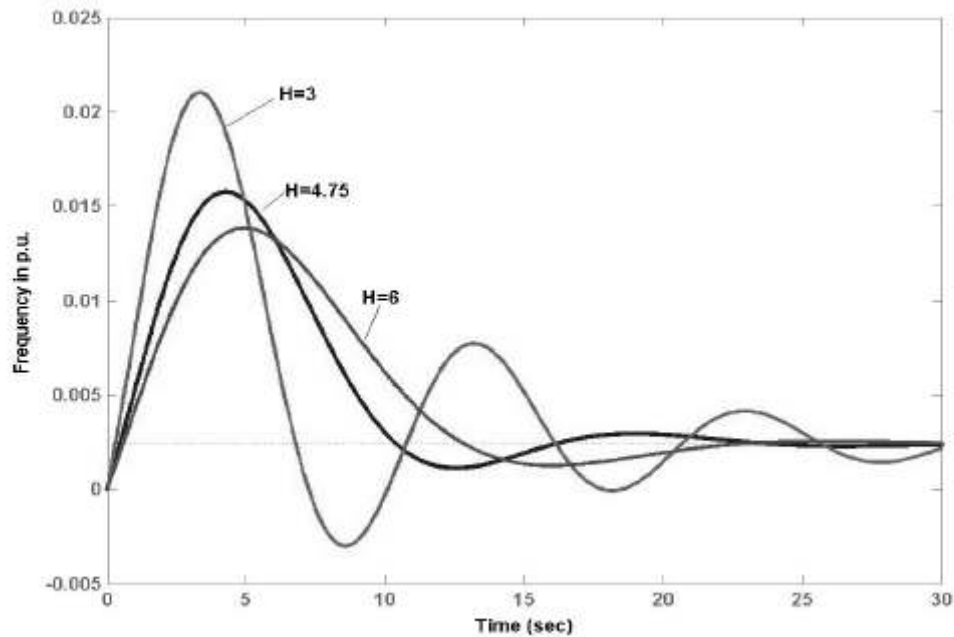


**Σχήμα 61 : Βασικό σενάριο: απόκριση συχνότητας σε μεταβολή βήματος 5% του φορτίου [14]**

Παρακάτω μελετώνται οι μεταβολές:

- Μεταβολή της σταθεράς αδράνειας  $H$  :

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι αποκρίσεις συχνότητας σε ΥΗΕ με  $H=3, 4,75$  και  $6$ :

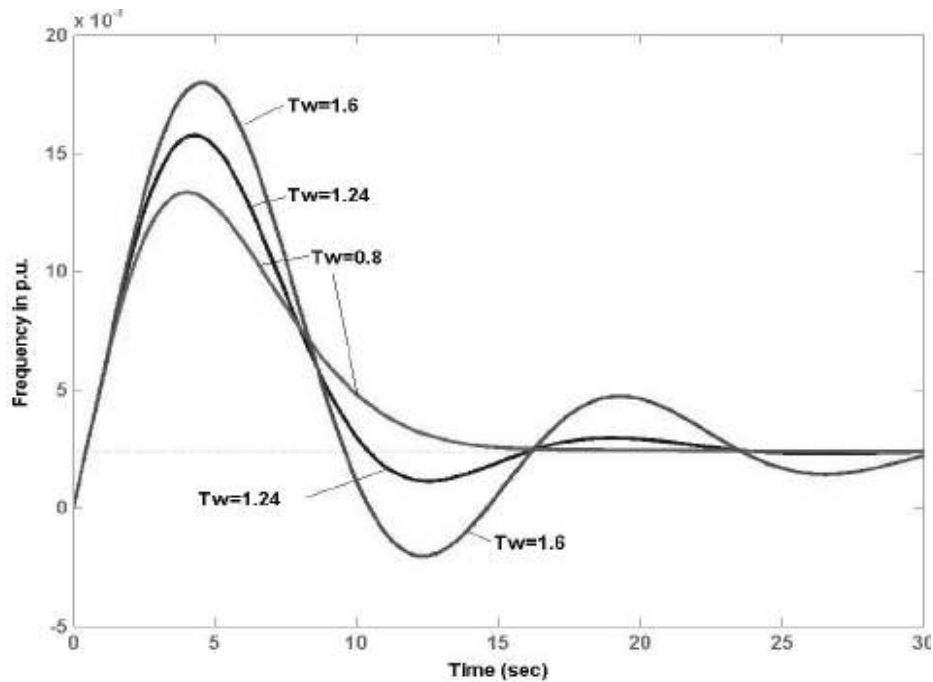


Σχήμα 62 : Απόκριση συχνότητας μεταβάλλοντας την σταθερά αδράνειας H [14]

Παρατηρείται ότι όταν η σταθερά αδράνειας αυξάνεται από 4,75 σε 6 η κλίση της απόκρισης συχνότητας γίνεται λιγότερο απότομη και η απόσβεση αυξάνεται. Επίσης, μειώνεται και η μέγιστη τιμή της μεταβολής της συχνότητας. Άρα, με την αύξηση της σταθεράς αδράνειας H το σύστημα είναι πιο ισχυρό και επηρεάζεται λιγότερο από τις μεταβολές του φορτίου.

- Μεταβολή του χρόνου εκκίνησης ύδατος  $T_w$

Καθώς ο χρόνος εκκίνησης ύδατος αυξάνεται από 1,24 sec σε 0,8 μειώνεται και το πλάτος της μεταβολής της συχνότητας. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το  $T_w$  αυξάνεται από 1,24 sec σε 1,6 sec. Άρα, το  $T_w$ , το οποίο υπολογίζεται από την παροχή και την γεωμετρία του σταθμού, καθυστερεί την απόκριση του συστήματος με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης να επιτυγχάνεται με όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο εκκίνησης ύδατος. Το αποτέλεσμα της μεταβολής του  $T_w$  στην απόκριση συχνότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



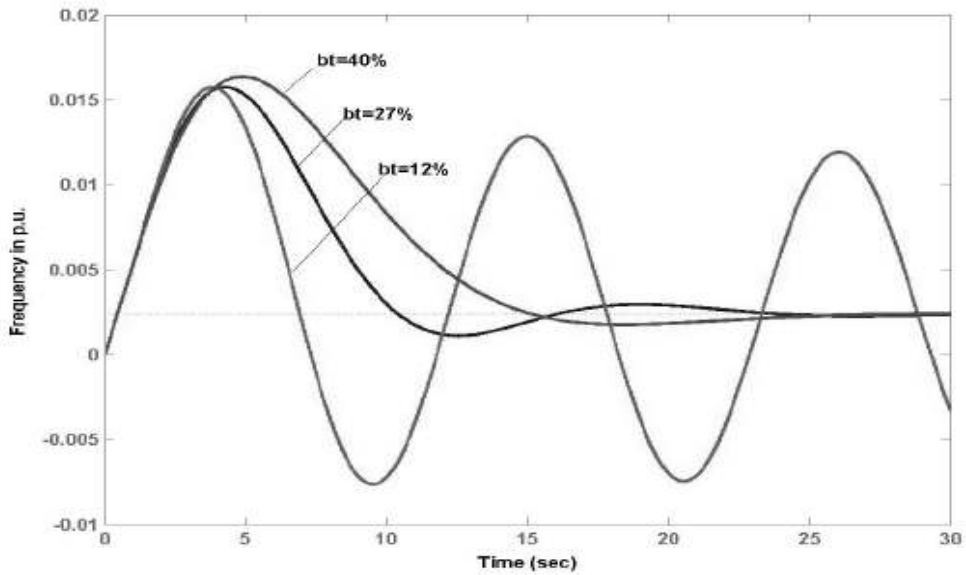
Σχήμα 63 : Απόκριση συχνότητας της μονάδας με διαφορετικά  $T_w$  [14]

- Μεταβολή της κυματικής σταθεράς χρόνου  $T_e$

Η κυματική σταθερά χρόνου είναι παράμετρος που επηρεάζει το σύστημα όταν η τιμή της είναι συγκρίσιμη ή μεγαλύτερη από το  $T_w$ . Όσο αυξάνεται το  $T_e$  τόσο αυξάνεται και η ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος και άρα μειώνεται η ευστάθεια. Αυτό καθιστά το  $T_e$  ως αποτρεπτικό παράγοντα για τη μείωση των χρόνων των υπολοίπων παραμέτρων και άρα βελτίωσης της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή μικρότερου μεταβατικού στατισμού και χρόνου επαναφοράς μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια, σε περίπτωση ΥΗΕ με μεγάλη σταθερά κυματικού χρόνου  $T_e$ .

- Μεταβολή του μεταβατικού στατισμού  $\delta$

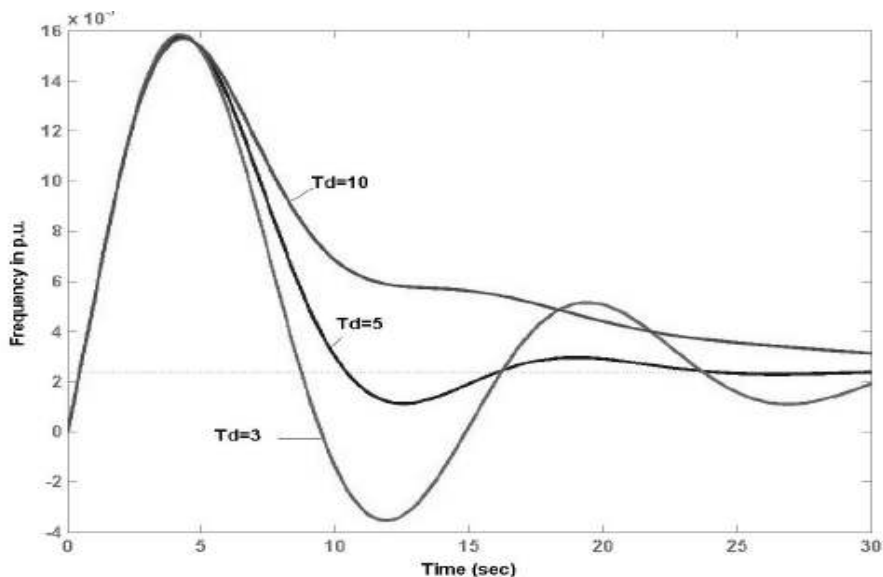
Αυξάνοντας τον μεταβατικό στατισμό μειώνονται η ταχύτητα απόκρισης και οι ταλαντώσεις. Αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει το σύστημα με μείωση του μεταβατικού στατισμού. Η συμπεριφορά του υδροστροβίλου για τρεις διαφορετικές τιμές για τον μεταβατικό στατισμό, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 64 : Απόκριση της συχνότητας με διαφορετικό μεταβατικό στατισμό, όπου bt συμβολίζεται ο μεταβατικός στατισμός [14]

- Μεταβολή του χρόνου επαναφοράς  $T_R$

Η αύξηση του  $T_R$  επιφέρει μείωση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς του συστήματος και η μείωση του  $T_R$  επιφέρει μείωση της απόσβεσης. Παρατηρείται ότι το πλάτος της μεταβολής της συχνότητας δεν επηρεάζεται από την μεταβολή του  $T_R$ . Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τρία  $T_R$  φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

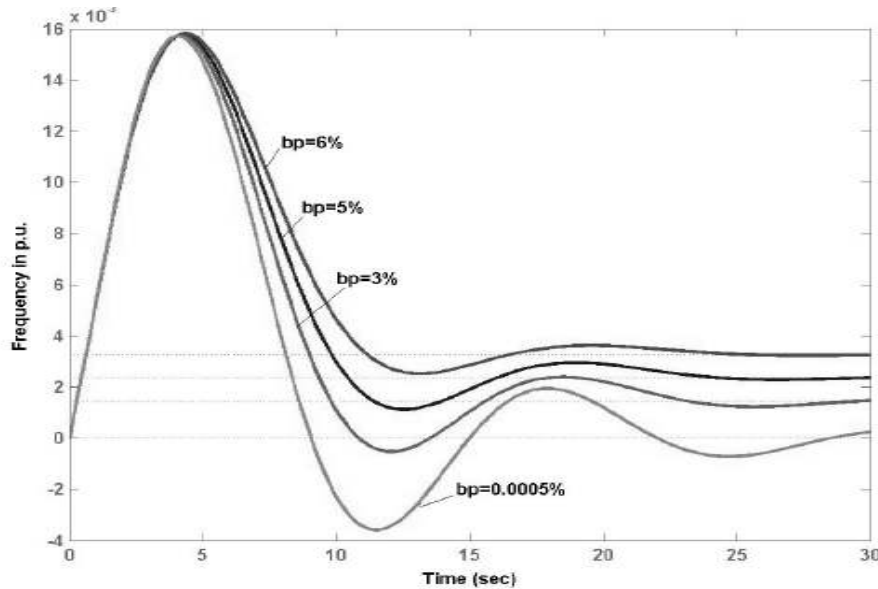


Σχήμα 65: Απόκριση της συχνότητας με διαφορετικούς χρόνους επαναφοράς [14]

- Μεταβολή του μόνιμου στατισμού  $\sigma$

Το μόνιμο σφάλμα μετά από την εξαφάνιση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος είναι το γινόμενο του μόνιμου στατισμού και της μεταβολής του φορτίου. Έτσι, για μία μεταβολή 5% του φορτίου, η μετακίνηση της συχνότητας

μόνιμης κατάστασης είναι 0,15% για μόνιμο στατισμό 3% , 0,25% για 5% μόνιμο στατισμό και 0,3% για 6% μόνιμο στατισμό. Άρα, με την μείωση του μόνιμου στατισμού μειώνεται το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας. Το αντίθετο συμβαίνει με την αύξηση του μόνιμου στατισμού. Επίσης, η μείωση του μόνιμου στατισμού επιφέρει παραπάνω ταλαντώσεις. Το αποτέλεσμα της μεταβολής του μόνιμου στατισμού στην απόκριση συχνότητας , φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 66: Απόκριση συχνότητας με διαφορετικό μόνιμο στατισμό [14]**

Σημειώνεται, ότι η καμπύλη για μόνιμο στατισμό 0,0005% αφορά, στην ουσία, ισόχρονη λειτουργία δίνοντας μία σχεδόν μηδενική τελική μεταβολή στην συχνότητα (0,0025%).

#### 5.4 Συνοπτική παρουσίαση αποκρίσεων συχνότητας, σε μεταβολές του φορτίου, Υδροηλεκτρικών Σταθμών και ΜΥΗΣ ειδικότερα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία

##### 5.4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται χρονικές αποκρίσεις (αποκλίσεις της συχνότητας) διαφόρων ΥΗΕ όπως αυτές παρουσιάζονται στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην απόκριση ταχύτητας (συχνότητας) μετά από μεταβολές του φορτίου σε περιπτώσεις ΥΗΕ που τροφοδοτούν ένα αυτόνομο δίκτυο. Συνεπώς, δεν δίνεται βαρύτητα στα χαρακτηριστικά των τεχνικών και των ιδιοτήτων των εξεταζόμενων ανά περίπτωση ΥΗΕ αλλά μόνο σε εκείνα που θα επιτρέψουν την εξαγωγή μίας εικόνας για το υπό εξέταση ζήτημα.

5.4.2 ΜΥΗΣ

5.4.2.1 Περίπτωση 1

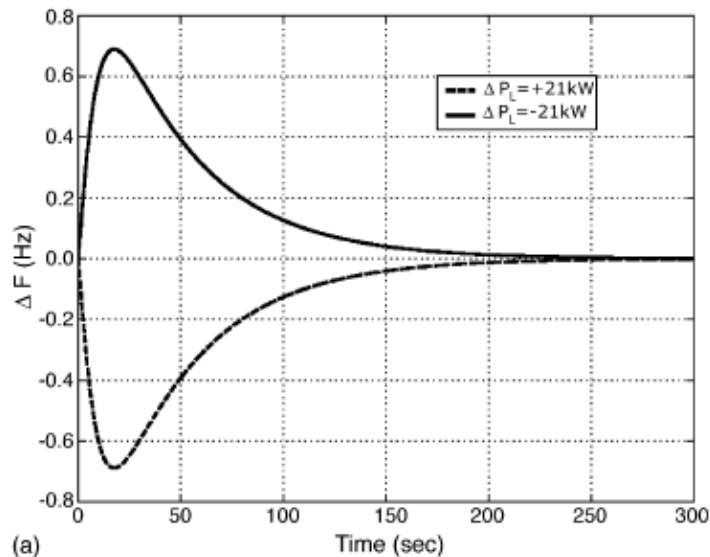
Στο [28] παρουσιάζονται τεχνικές αυτοματισμών ΜΥΗΣ που τροφοδοτούν αυτόνομο δίκτυο με σκοπό την βέλτιστη εκμετάλλευση της απορριπτόμενης, λόγω της λειτουργίας του εκτροπέα, ισχύος. Στην μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το γραμμικό μοντέλο του υδροστροβίλου. Μελετώνται τρία σενάρια ΜΥΗΣ, για τις περιπτώσεις  $T_w1=1$  sec,  $T_w2=2,2$  sec και  $T_w3=4$  sec με  $H=5$  sec όπου οι τιμές των βασικών παραμέτρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	<b>σενάριο Α</b>	<b>σενάριο Β</b>	<b>σενάριο Γ</b>
<b>Ονομαστική ισχύς (P<sub>nom</sub>)</b>	1200 KW	1200 KW	1200 KW
<b>Ονομαστικό φορτίο(PL)</b>	900 KW	520 KW	480 KW
<b>Συντελεστής απόσβεσης (D)</b>	0,015	0,008667	0,008
<b>Αρχική θέση Υδατοθυρίδων</b>	0,3333	0,01667	0,4

**Πίνακας 11: Βασικές παράμετροι ανά σενάριο**

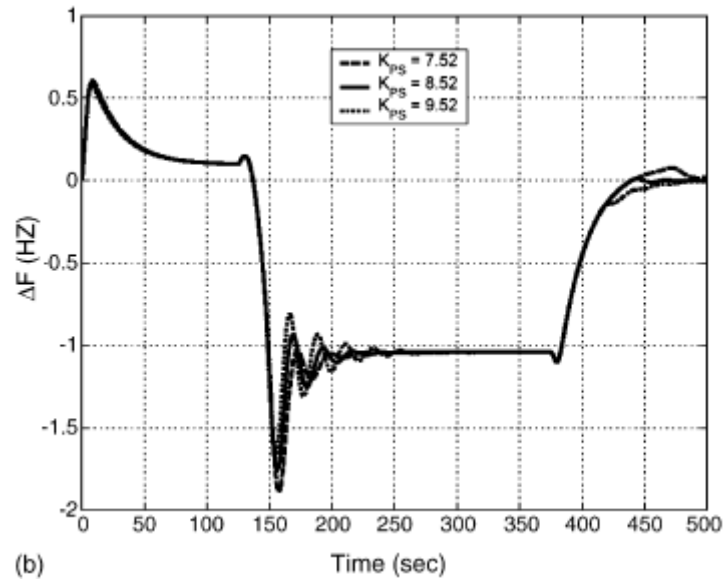
Οι γραφικές παραστάσεις των αποκλίσεων της συχνότητας για μικρές μεταβολές του φορτίου φαίνονται παρακάτω:

- Σενάριο Α,  $\Delta PL=15$  KW ή 0,0125 α.μ. και  $T_w=4$  sec



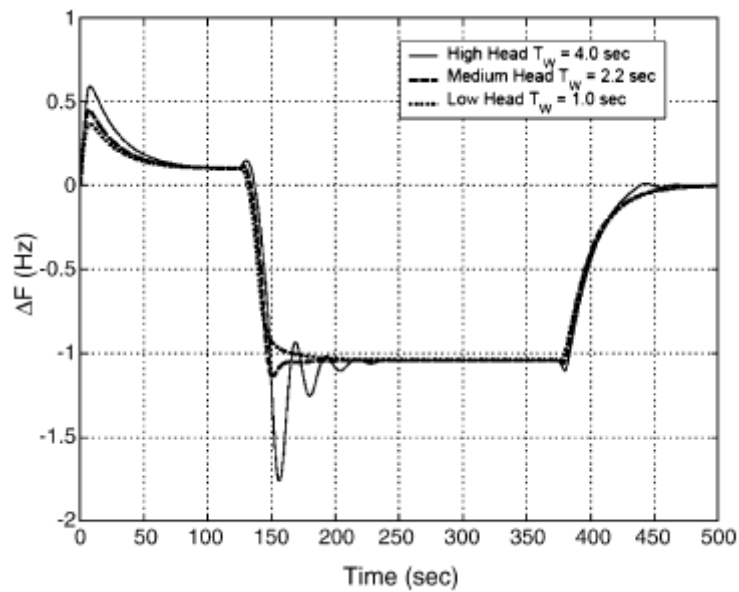
**Σχήμα 67 : Γραφική παράσταση  $\Delta F(\text{Time})$  για  $\Delta PL=0,0125$  α.μ. [28]**

- Σενάριο Β,  $\Delta PL=21$  KW ή 0,0175 α.μ. και  $T_w= 4$  sec



Σχήμα 68 : Γραφική παράσταση  $\Delta F(\text{Time})$  για  $\Delta PL=0,0175$  α.μ. [28]

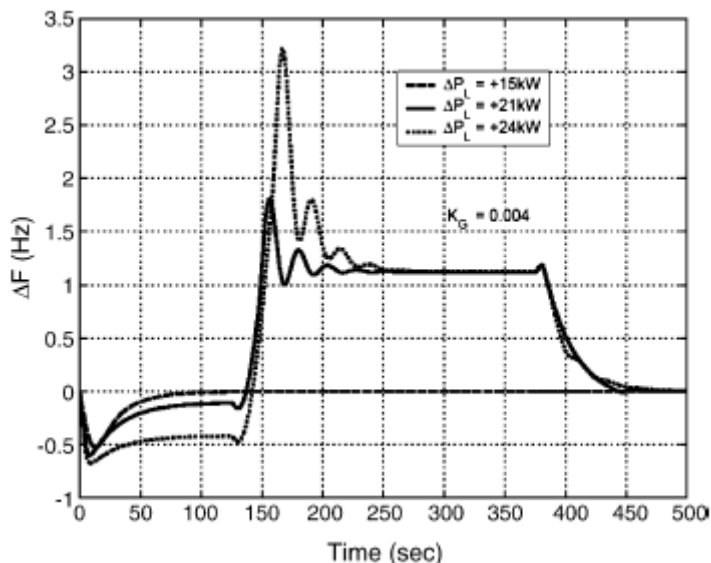
- Σενάριο Β,  $\Delta PL=21$  KW ή  $0,0175$  α.μ. για τις τρεις περιπτώσεις  $T_w$



Σχήμα 69 : Γραφική παράσταση  $\Delta F(\text{Time})$  για  $\Delta PL=0,0175$  α.μ. για τις τρεις περιπτώσεις  $T_w$  [28]

- Σενάριο Γ,  $\Delta PL=15, 21, 24$  KW ή  $0,0125, 0,0175, 0,02$  α.μ.  $T_w=4$  sec





**Σχήμα 70 : Γραφική παράσταση  $\Delta F(\text{Time})$  για  $\Delta P_L=0,0125, 0,0175$  ή  $0,02\alpha.μ$  [28]**

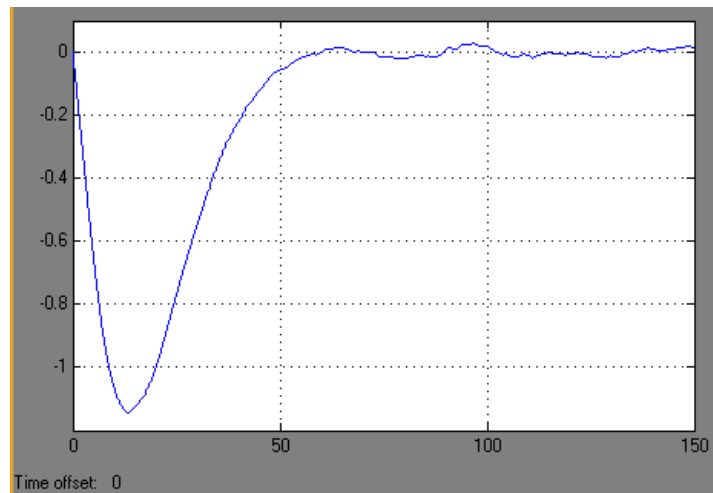
**5.4.2.2 Περίπτωση 2**

Στο [29] εξετάζονται τεχνικές ελέγχου ενός ΜΥΗΣ με σκοπό τη διατήρηση (ελαχιστοποίηση της απόκλισης) της συχνότητας λειτουργίας σε σταθερή τιμή(την ονομαστική). Οι διαταραχές του φορτίου προσομοιάζονται από την σύνθεση μίας βηματικής μεταβολής του φορτίου  $\Delta P_L=0,03$  α.μ. και μια γκαουσιανής στοχαστικής διαταραχής με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση  $1e^{-6}$ . Ο ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιείται είναι ένας PI ελεγκτής ο οποίος οδηγεί έναν σερβομηχανισμό. Ο χρόνος εκκίνησης ύδατος λαμβάνεται ίσος με  $T_w=4$  sec ενώ για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιούνται τα παρακάτω στοιχεία:

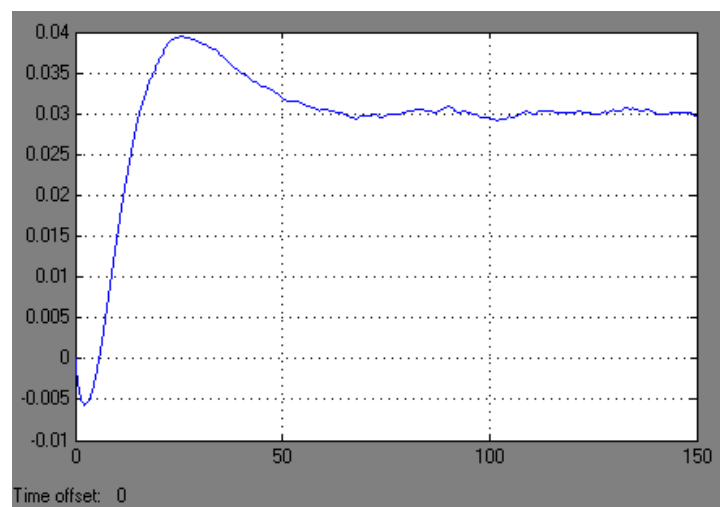
<b>Ονομαστική Ισχύς ΥΗΕ (Pnom)</b>	20 MW
<b>Ονομαστικό Φορτίο (PL)</b>	10 MW
<b>Σταθερά Αδράνειας (H)</b>	7,75 s
<b>Συντελεστής απόσβεσης (D)</b>	0,004

**Πίνακας 12 : Στοιχεία του μοντέλου**

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



Σχήμα 71 :  $\Delta F(\text{Hz})$  / χρόνος [29]



Σχήμα 72 :  $\Delta P(\text{α.μ.})$  / χρόνος [29]

### 5.4.2.3 Περίπτωση 3

Στο [30] προσεγγίζεται το αντικείμενο της ικανότητας ρύθμισης στροφών από ΜΥΗΣ. Αρχικά, παρουσιάζεται ένας τρόπος υπολογισμού της απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής από την σύγχρονη σε αύξηση του φορτίου κατά 10% όταν ο σταθμός είναι φορτισμένος κατά 50%. Ο υπολογισμός γίνεται με την εφαρμογή τύπων, που χρησιμοποιούν ως μεταβλητές τον μηχανικό χρόνο εκκίνησης ( $T_M$ ), τον χρόνο εκκίνησης ύδατος ( $T_W$ ), τον χρόνο μετατόπισης της βελόνης (needle valve opening time) και τον λόγο του υδραυλικού πλήγματος (water hammer ratio) ως συνάρτηση του υδραυλικού ύψους. Στην συνέχεια, ελέγχονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών από πραγματικούς σταθμούς που είναι ήδη σε λειτουργία και τροφοδοτούν αυτόνομα συστήματα. Κριτήριο για τον αρθογράφο είναι η απόκλιση από την σύγχρονη ταχύτητα στην παραπάνω μεταβολή να μην ξεπερνά το 1% για περίπτωση βιομηχανικού φορτίου, το 2% για περίπτωση φορτίου φωτισμού και βιομηχανικού φορτίου και το 4% για περίπτωση φορτίου φωτισμού χωρίς βιομηχανικό φορτίο.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών, οι βαθμολογίες ανάλογα με την ταχύτητα απόκρισης καθώς και τα χαρακτηριστικά των ΜΥΗΣ που εξετάζονται φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

**Table 1: Selected impulse unit characteristics.**

Unit	Net Head (m)	Power (kW)	Speed (rpm)	Mechanical, time, secs	Water, time, secs	$T_m/T_g$	$T_w/T_e$	Rank
Achachicala	414.5	895	429	5.04	1.59	0.425	0.227	6
Angostura	502.9	2,536	1,000	3.78	1.60	0.319	0.229	7
Botijlaca	370.3	2,238	750	3.11	0.72	0.184	0.072	9
Cat Arm	380.5	63,500	327	9.59	1.77	0.808	0.253	1
Corani	585.2	13,800	600	4.86	0.77	0.476	0.128	3
Cuticucho	650.7	2,425	1,000	3.09	0.93	0.450	0.232	4
Miguilla	457.2	1,492	1,000	6.45	1.33	0.714	0.251	2
Santa Rosa #1	198.1	4,500	429	3.00	0.69	0.437	0.173	5
Santa Rosa #2	792.5	6,714	750	3.77	0.59	0.187	0.049	8
Zongo #1	381.0	821	429	5.49	2.71	0.172	0.143	10

Rank based on largest  $T_m/T_g$  ratio.

**Πίνακας 13 : Αποτελέσματα των υπολογισμών, οι βαθμολογίες ανάλογα με την ταχύτητα απόκρισης καθώς και τα χαρακτηριστικά των μικρών ΥΗΕ που εξετάζονται (α) [30]**

**Table 2: Selected impulse unit speed drop characteristics**

Unit	Penstock length (m)	Max sound wave a m/s	J ratio	Waterham ratio	10% Jettime, Te	Speed Drop %	Regulation rank	
							New	Old
Achachicala	1,532	1,352	2.50	0.134 I	0.90	2.83	5	6
Angostura	1,070	1,252	1.30	0.193 I	0.90	4.91	8	7
Botijlaca	406	1,216	1.14	0.141 N	1.20	6.48	9	9
Cat Arm	2,900	1,100	1.54	0.067 I	0.90	0.99	1	1
Corani	1,158	1,052	1.15	0.080 I	0.80	1.91	3	3
Cuticucho	1,207	1,270	1.08	0.098 I	0.60	2.53	4	4
Miguilla	1,323	1,243	2.54	0.130 I	0.73	1.76	2	2
Santa Rosa #1	330	1,070	1.07	0.225 I	0.60	4.60	7	5
Santa Rosa #2	1,274	1,224	1.05	0.060 I	1.40	3.73	6	8
Zongo #1	1,117	1,292	2.79	0.249 N	2.10	9.74	10	10

N = normal waterhammer, I = instantaneous waterhammer.  
New regulation rank based on speed drop, old from Table 1.

**Πίνακας 14 : Αποτελέσματα των υπολογισμών, οι βαθμολογίες ανάλογα με την ταχύτητα απόκρισης καθώς και τα χαρακτηριστικά των μικρών ΥΗΕ που εξετάζονται (β) [30]**

Στο άρθρο παρουσιάζονται, επίσης, στοιχεία που αφορούν την εγκατάσταση και τα δεδομένα της περιόδου των υπό εξέταση ΜΥΗΣ:

Ο πρώτος ΜΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton στη Βολιβία ήταν στη La Paz όπου ένας υδροστρόβιλος Pelton 1200 HP ( 895 KW) το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 1909 στην πόλη Achachcala. Την εποχή εκείνη δεν υπήρχε βιομηχανικό φορτίο.

Την ίδια περίοδο κατασκευάστηκε σταθμός στο Zongo αλλά εξ' αιτίας της υψηλής ταχύτητας στον αγωγό, των  $9,08m/s$ , ο σταθμός κατέληξε να εξυπηρετεί φορτίο βάσης.

Στο Botijlaca, ο μικρός υδροστρόβιλος που κατασκευάστηκε λίγο αργότερα, ελεγχόταν χειροκίνητα εξ' αιτίας ισχυρών διαταραχών στη συχνότητα.

Επιπλέον σταθμοί κατασκευάστηκαν στο Cuticuecho και στη Santa Rosa(2) αλλά η ρύθμιση ταχύτητας ήταν δύσκολη, καθώς είχαν αργούς χρόνους στη μετακίνηση της βελόνης του ακροφυσίου (ο χρόνος μετατόπισης της βελόνης ήταν 9,2sec). Στον 2<sup>ο</sup> υδροστρόβιλο της Santa Rosa χρησιμοποιήθηκε ο εκτροπέας για τον έλεγχο σε περιπτώσεις σφαλμάτων ή ταχείας απόρριψης φορτίου.

Το 1931 δύο σταθμοί των 2000 HP (1491,4 KW) εγκαταστάθηκαν στη Miguilla και η ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας ήταν βελτιωμένη σε σχέση με όλων των προηγούμενων.

Εξ' αιτίας της αύξησης του φορτίου των ορυχείων στην περιοχή, εγκαταστάθηκε και νέος σταθμός στην Angostura, του οποίου ο χειρισμός κατέληξε να είναι χειροκίνητος λόγω των απαράδεκτων μεταβολών της ταχύτητας κατά τη διάρκεια εκκίνησης των μηχανών του ορυχείου.

Το 1968 δύο μονάδες των 18.500 HP (13.795 KW) εγκαταστάθηκαν στο Corani για να εξυπηρετήσουν το φορτίο φωτισμού. Η ρύθμιση ταχύτητας βρέθηκε ικανοποιητική.

#### 5.4.3 ΥΗΣ μεγάλης ισχύος

---

##### 5.4.3.1 Περίπτωση 1

---

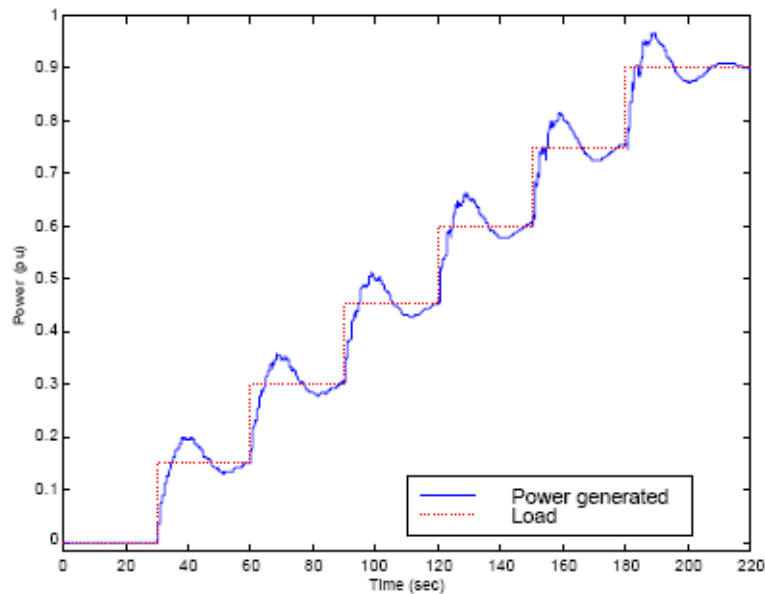
Στην περιοχή του Dinorwig της Ουαλίας είναι εγκατεστημένος αντλησιοταμιευτικός σταθμός ο οποίος λειτουργεί ελέγχοντας την συχνότητα του συστήματος ενώ σε έκτακτες περιπτώσεις αντικαθιστά μονάδες βάσης. Το σύστημα ελέγχου του σταθμού περιλαμβάνει PID ρυθμιστές για καθέναν από τους έξι υδροστρόβιλους των 300 MW. Ο συνολικός αγωγός έχει μήκος 2899 m και αποτελείται από έναν κοινό αγωγό μήκους 2689 m και από έξι ξεχωριστούς των 210 m. Στα 1695 m είναι τοποθετημένος ο πύργος αναπάλσεως. Ο χρόνος εκκίνησης ύδατος  $T_w$  διαφέρει ανάλογα με τους υδροστρόβιλους που είναι σε λειτουργία και κυμαίνεται από 0,69 sec, όταν είναι μόνο ένας υδροστρόβιλος σε λειτουργία, έως 2,72 sec όταν είναι και οι έξι. Ο κυματικός χρόνος είναι υπολογισμένος από τον πύργο αναπάλσεως μέχρι τον εκάστοτε στρόβιλο και βρέθηκε :  $T_e = 0,788\text{sec}$ .

Η περίπτωση που εξετάζεται είναι αυτή της επαναφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά από ολική απώλεια ισχύος, αποκλειστικά από τον ΥΗΣ στο Dinorwig (black-start operation), από έναν υδροστρόβιλο ή από δύο υδροστρόβιλους που λειτουργούν παράλληλα. Μελετάται το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο σταθμός χωρίς να ξεπερνά η μεταβολή της συχνότητας το  $\pm 1,5\text{HZ}$ .

Για την αναπαράσταση του υδραυλικού μέρους, χρησιμοποιείται το μη γραμμικό μοντέλο συμπεριλαμβάνοντας την συμπίεστικότητα του νερού, ενώ για την περίπτωση των δύο υδροστρόβιλων λαμβάνεται υπόψη και το φαινόμενο της σύζευξης (coupling effect) μεταξύ των υδροστρόβιλων. Το ηλεκτρικό μέρος μοντελοποιείται σύμφωνα με

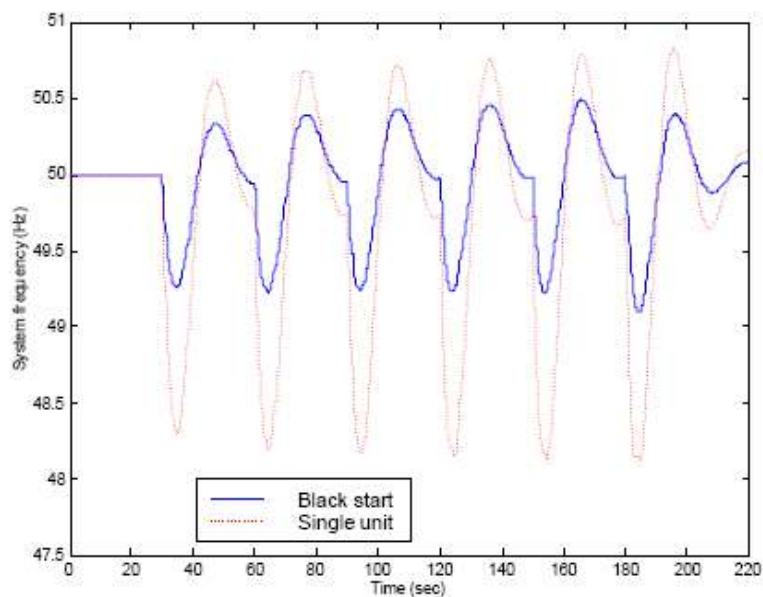
το αδρανειακό γραμμικό μοντέλο της γεννήτριας (ή παράλληλων γεννητριών) ενώ συμπεριλαμβάνεται και ο συντελεστής απόσβεσης  $D=1$ .

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η απόκριση ισχύος ενός υδροστροβίλου σε βηματικές μεταβολές του φορτίου 0,15 α.μ. (με βάση την ονομαστική ισχύ του υδροστροβίλου) με διαφορά 30 sec μεταξύ τους.



**Σχήμα 73 : Απόκριση ισχύος για λειτουργία ενός υδροστροβίλου [15]**

Η μεταβολή της συχνότητας για την περίπτωση λειτουργίας ενός υδροστροβίλου και για την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας στην ίδια μεταβολή του φορτίου, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 74 : Μεταβολή της συχνότητας για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας [15]**

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η παράλληλη λειτουργία δύο υδροστροβίλων δεν επιφέρει πτώση της συχνότητας κάτω από 49 HZ κάτι που την καθιστά ευσταθή. Στην περίπτωση λειτουργίας, όμως, ενός υδροστροβίλου η συχνότητα πέφτει στα 48 HZ , εκτός των τιθέμενων ορίων. Οπότε, σύμφωνα με τον αρθογράφο η βηματική αύξηση του φορτίου που αναλαμβάνει ο υδροστροβίλος θα πρέπει να περιοριστεί σε λιγότερο από το 5% (0,05 α.μ.) της ονομαστικής ισχύος, ώστε να επιτευχθεί ευσταθής λειτουργία.[15]

## **6 Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ΜΥΗΣ**

---

### **6.1 Γενικά**

---

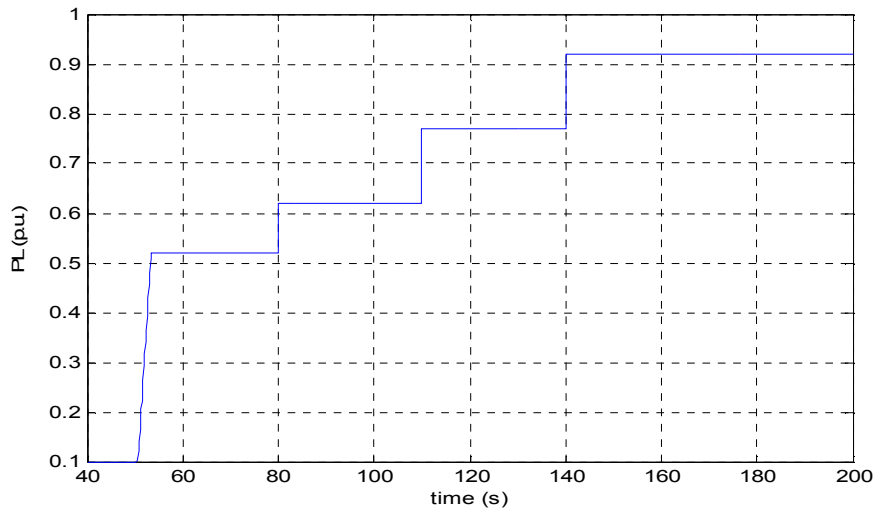
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ΜΥΗΣ. Αρχικά, επιβεβαιώνονται τα μη γραμμικά μοντέλα μέσω σύγκρισής τους με το γραμμικό. Στην συνέχεια, μελετάται η συμπεριφορά του υδροστροβίλου σε μεταβολή της βελόνης, χειροκίνητα, με σκοπό την εξέταση της δυναμικής της πρωτογενούς πηγής ενέργειας χωρίς να συμπεριλαμβάνεται λογική ελέγχου από τον ρυθμιστή στροφών. Αφού, μελετηθεί η υδροδυναμική του συστήματος και αναλυθεί ο τρόπος που ο κυματικός χρόνος επηρεάζει την απόκριση του υδροστροβίλου, στην συνέχεια, παρουσιάζονται αποτελέσματα αποκρίσεων του υπό μελέτη ΜΥΗΣ. Μέσω των αποτελεσμάτων αυτών, εξετάζονται οι διαφορές των δύο μη γραμμικών μοντέλων και, ακολούθως, γίνεται διερεύνηση τιμών για τις παραμέτρους του ρυθμιστή στροφών. Αφού, επιλεγθούν οι κατάλληλες τιμές, παρουσιάζεται η απόκριση του ΜΥΗΣ και ελέγχεται η δυνατότητά του να ρυθμίζει ικανοποιητικά την συχνότητα. Τέλος, αναπτύσσονται και εξετάζονται τρόποι βελτίωσης της απόκρισης συχνότητας για τον υπό μελέτη ΜΥΗΣ.

Η μοντελοποίηση του ΜΥΗΣ περιγράφηκε στα κεφάλαια 2, 3, 4 και 5 και οι αποκρίσεις που παρουσιάζονται αφορούν τα δύο μη γραμμικά μοντέλα για το υδραυλικό μέρος: με τη θεώρηση του ασυμπιέστου του νερού και το πλήρως αναλυτικό-κυματικό μοντέλο.

Στην λειτουργία ενός στροβίλου χρησιμοποιείται το απλουστευμένο μοντέλο με την εξίσωση ταλάντωσης, ενώ στην λειτουργία δύο στροβίλων το ηλεκτρικό μέρος μοντελοποιείται με τις γραμμικές σχέσεις παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών. Αυτό επιλέχτηκε για λόγους απλότητας καθώς στο παρόν κεφάλαιο το ενδιαφέρον περιορίζεται στην δυναμική των υδροστροβίλων και στην διερεύνηση των πιο κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους των ρυθμιστών στροφών.

Ο ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει χαρακτηριστική στατισμού, ισόχρονη ρύθμιση και βαθμίδα μεταβατικού στατισμού. Οι ρυθμιστές στροφών των δύο υδροστροβίλων, όπως γίνεται αντιληπτό, είναι ίδιοι ώστε να μοιράζεται εξίσου η ρύθμιση συχνότητας.

Η μεταβολή του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στις παρακάτω προσομοιώσεις είναι η ακόλουθη:



**Σχήμα 75 : Η μεταβολή του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομίωση της λειτουργίας ενός υδροστροβίλου**

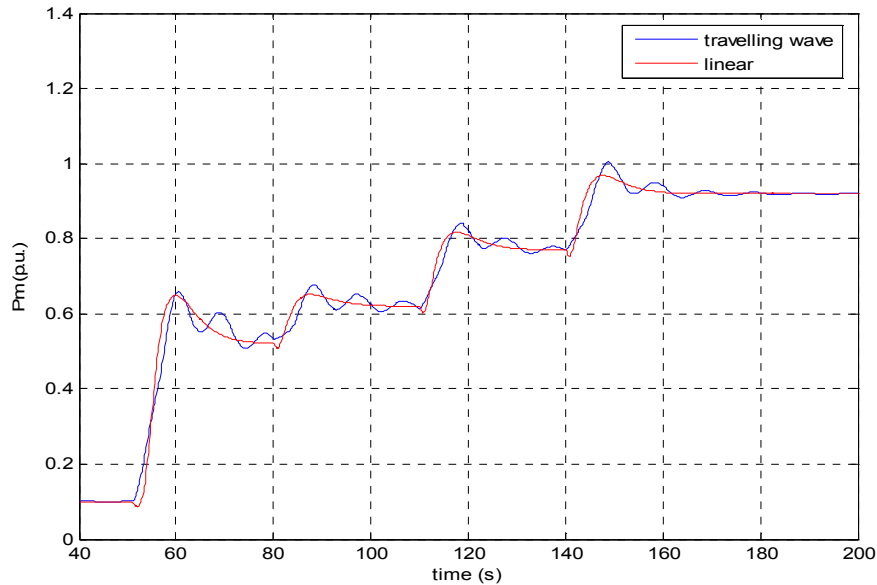
Η παραπάνω μεταβολή επιλέχθηκε για τους εξής λόγους :

- Εξετάζει την απόκριση του υδροστροβίλου σε όλη περίπου την περιοχή λειτουργίας (από 0,1 ως 0,92 α.μ.), ελέγχοντας έτσι την ευστάθεια του συστήματος.
- Για  $t = 80 \text{ sec}$ , στο 50% περίπου της φόρτισης, υφίσταται βηματική μεταβολή του φορτίου κατά 10%, η ταχύτητα απόκρισης της οποίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για την εξέταση της ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας από τη μονάδα.

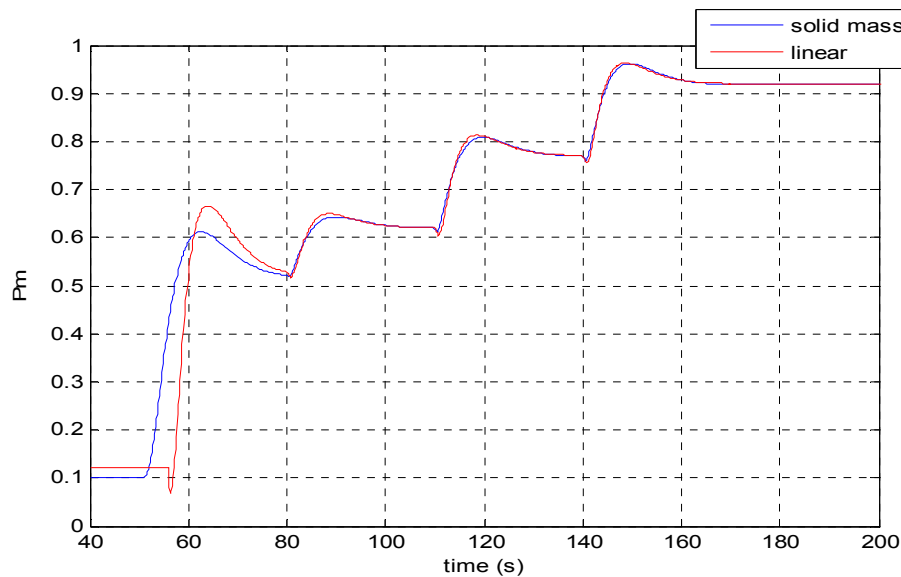
## 6.2 Επιβεβαίωση μοντέλων με χρήση του γραμμικού

Για την επιβεβαίωση της ορθότητας των μοντέλων συγκρίνονται, αρχικά, οι αποκρίσεις των μη γραμμικών μοντέλων με αυτές του γραμμικού. Στα μη γραμμικά μοντέλα τέθηκε ο συντελεστής απόσβεσης υδροστροβίλου  $D=0$  ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι για τους ρυθμιστές στροφών. Στον ρυθμιστή στροφών επιλέχθηκαν μεγάλες τιμές για τον μεταβατικό στατισμό και τον χρόνο επαναφοράς και στατισμός,  $\sigma=0,03$ . Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων των μη γραμμικών μοντέλων με το γραμμικό φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.





Σχήμα 76 : Απόκρισεις του γραμμικού μοντέλου και του κυματικού



Σχήμα 77 : Αποκρίσεις μηχανικής ισχύος του γραμμικού μοντέλου και του μη γραμμικού με τη θεώρηση της στέρας υδάτινης στήλης

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται η ομοιότητα μεταξύ των μοντέλων που σε γενικές γραμμές επιβεβαιώνει την ορθότητά τους.

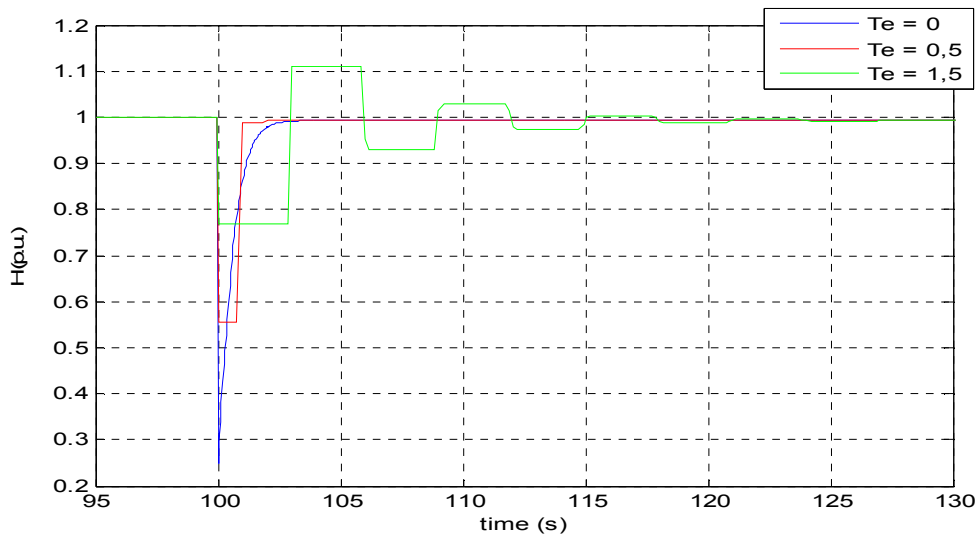
### 6.3 Δυναμική συμπεριφορά υδροστροβίλου

Αφού επιβεβαιώθηκε η ορθότητα των δύο μοντέλων, στο παρόν υποκεφάλαιο μελετάται η δυναμική συμπεριφορά του υδροστροβίλου. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υδροδυναμικού μέρους, όπως αυτά περιγράφονται από τα δύο μοντέλα, και κυρίως στο πως επηρεάζεται η απόκριση του υδροστροβίλου με την αύξηση του κυματικού χρόνου  $T_e$ . Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, οι μεταβολές της ισχύος γίνονται χειροκίνητα, και όχι από τον

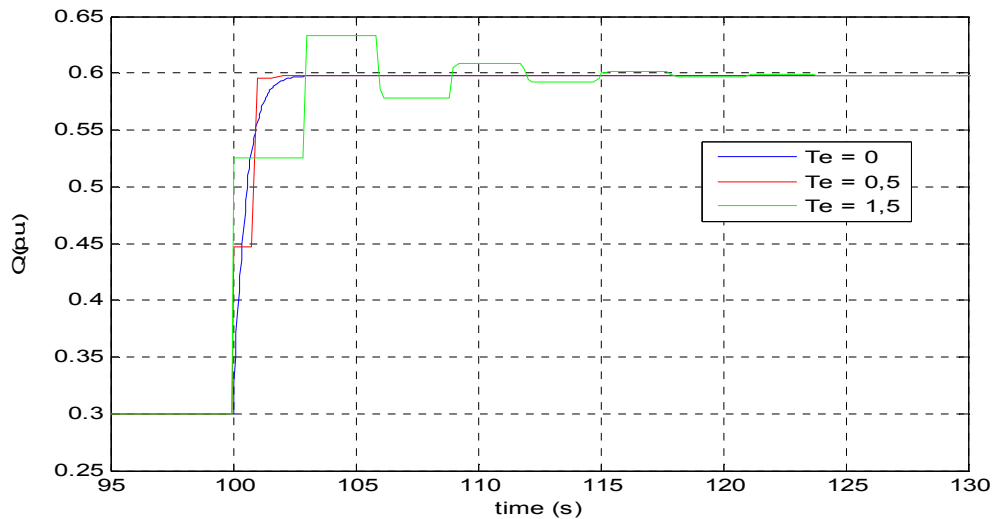
ρυθμιστή στροφών. Επίσης, μηδενίζεται ο συντελεστής απόσβεσης υδροστροβίλου D. Για τις ανάγκες της μελέτης, ο χρόνος εκκίνησης ύδατος επιλέχθηκε να είναι  $T_w=1,5$  sec (μία μέση τιμή για ΜΥΗΣ), ενώ οι προσομοιώσεις έγιναν για τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων:

- $T_e=0$
- $T_e=0,5$  sec
- $T_e=1,5$  sec

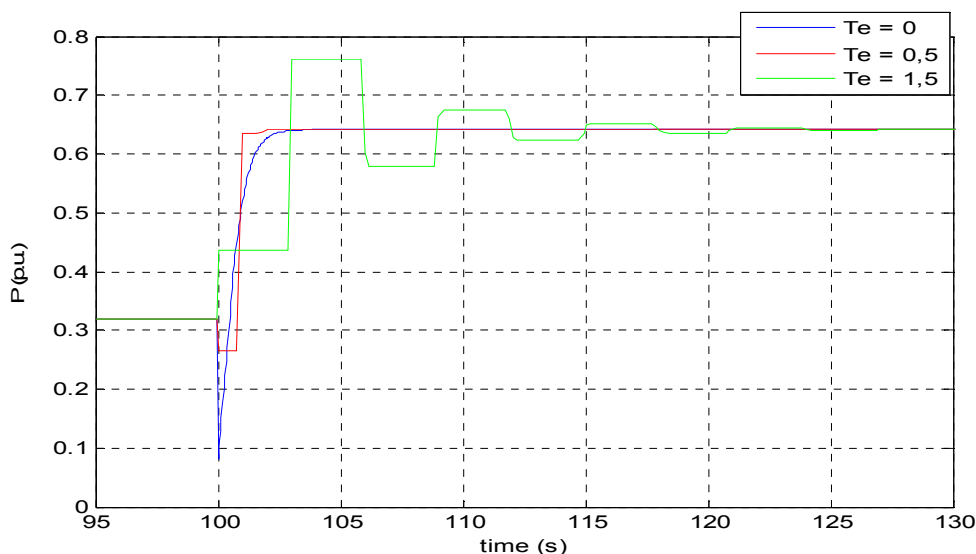
Οι αποκρίσεις της πίεσης, της παροχής και της μηχανικής ισχύος, για τις παραπάνω χρονικές σταθερές, είναι οι παρακάτω:



Σχήμα 78 : Απόκριση πίεσης στον υδροστρόβιλο για τις τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων



Σχήμα 79 : Απόκριση παροχής στον υδροστρόβιλο για τις τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων



Σχήμα 80 : Απόκριση μηχανικής ισχύος υδροστροβίλου για τις τρεις περιπτώσεις κυματικών χρόνων

Από την μελέτη των παραπάνω αποκρίσεων συμπεραίνεται ότι η αύξηση του κυματικού χρόνου επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του υδροστροβίλου. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το  $T_e$ , μειώνεται η αιχμή του πλήγματος, αλλά αυξάνεται η χρονική διάρκεια της υποπίεσης (ή υπερπίεσης αν πρόκειται για μείωση της ισχύος). Έτσι, για  $T_e=0$  η ισχύς του υδροστροβίλου πέφτει μέχρι το 0,1 α.μ. και φτάνει στην επιθυμητή ισχύ περίπου για  $t=3$  sec. Για  $T_e=0,5$  sec η ισχύς πέφτει μέχρι το 0,28 α.μ., παραμένει εκεί για χρόνο διπλάσιο του κυματικού (1 sec) και φτάνει την επιθυμητή ισχύ για  $t=3$  sec. Στην περίπτωση που  $T_e=1,5$  sec η ισχύς ανεβαίνει μέχρι το 0,42 α.μ., παραμένει εκεί για 3 sec και μετά ταλαντώνεται γύρω από το επιθυμητό σημείο, μέχρι να ισορροπήσει, μετά από περίπου 20 sec.

Κοινό χαρακτηριστικό και των τριών αποκρίσεων είναι η χρονική καθυστέρηση της ισχύος να φτάσει για πρώτη φορά την επιθυμητή, χρόνος που σχετίζεται με το  $T_w$ . Η ταλαντωτική συμπεριφορά, ενισχύεται όσο αυξάνεται η τιμή του κυματικού χρόνου, αλλά μειώνονται οι αιχμές των αντίθετης κατεύθυνσης παλμών πίεσεως, παραμένοντας όμως σταθερές οι χρονικές καθυστερήσεις.

#### 6.4 Σύγκριση μοντέλων και διερεύνηση τιμών για τις παραμέτρους των ρυθμιστών στροφών

##### 6.4.1 Γενικά

Τα μη γραμμικά μοντέλα με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του νερού και το κυματικό μοντέλο για την περίπτωση λειτουργίας ενός υδροστροβίλου και δύο υδροστροβίλων παράλληλα, περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Οι τιμές των παραμέτρων είναι αυτές όπως εκτιμήθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.5 και αντλήθηκαν από τον υπό κατασκευή ΜΥΗΣ της Ικαρίας. Ως προς την επιλογή των επιπλέον παραμέτρων, είναι :

- Η σταθερά αδράνειας :  $H=3$  ( $T_M=6$  sec)
- Ο συντελεστής απόσβεσης υδροστροβίλου :  $D=0,5$
- Οι χρονικές καθυστερήσεις του μηχανισμού της βελόνης :  $T_P=0,05$  sec,  $T_G=0,2$  sec

#### 6.4.2 Λειτουργία ενός υδροστροβίλου

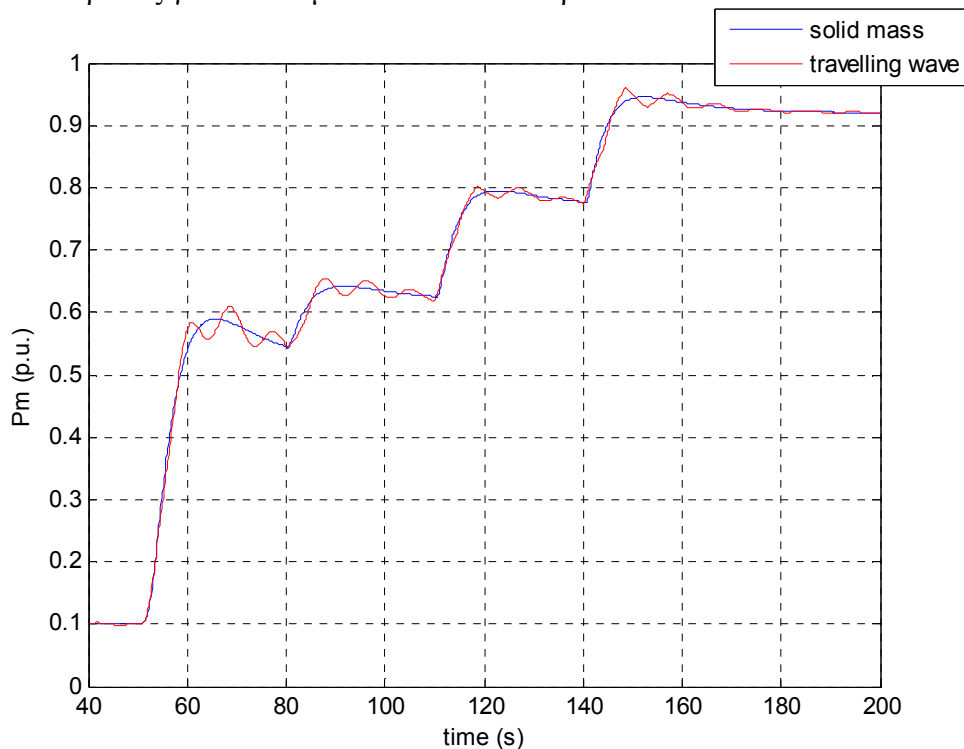
Στην περίπτωση λειτουργίας ενός υδροστροβίλου ο χρόνος εκκίνησης ύδατος είναι  $T_W=0,788$  sec όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 2.5.

Για την επιλογή των παραμέτρων του ρυθμιστή, αρχικά, εφαρμόστηκαν οι ευρέως διαδεδομένες σχέσεις των Paynter και Hovey. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρήθηκε ότι αυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο κυματικό μοντέλο καθώς οδηγούν το σύστημα σε οριακή ευστάθεια και με έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά. Συνεπώς για την εύρεση κατάλληλων  $\delta$  και  $T_R$  χρησιμοποιήθηκαν  $T_W$  στις σχέσεις μεγαλύτερα από αυτό του πραγματικού σταθμού, για μεγαλύτερες τιμές  $\delta$  και  $T_R$ . Επίσης από τις δύο ομάδες σχέσεων, προτιμήθηκε αυτή του Paynter ως εκκίνηση για την αναζήτηση των καταλληλότερων τιμών.

Αρχικά, επιλέχθηκαν μεγάλες τιμές για τον μεταβατικό στατισμό και τον χρόνο επαναφοράς για την επιβεβαίωση της ορθότητας των δύο μη γραμμικών μοντέλων και είναι οι παρακάτω:

$$\delta=0,833 \text{ και } T_R=11,76 \text{ sec}$$

Οι αποκρίσεις για τα δύο μοντέλα είναι οι παρακάτω:



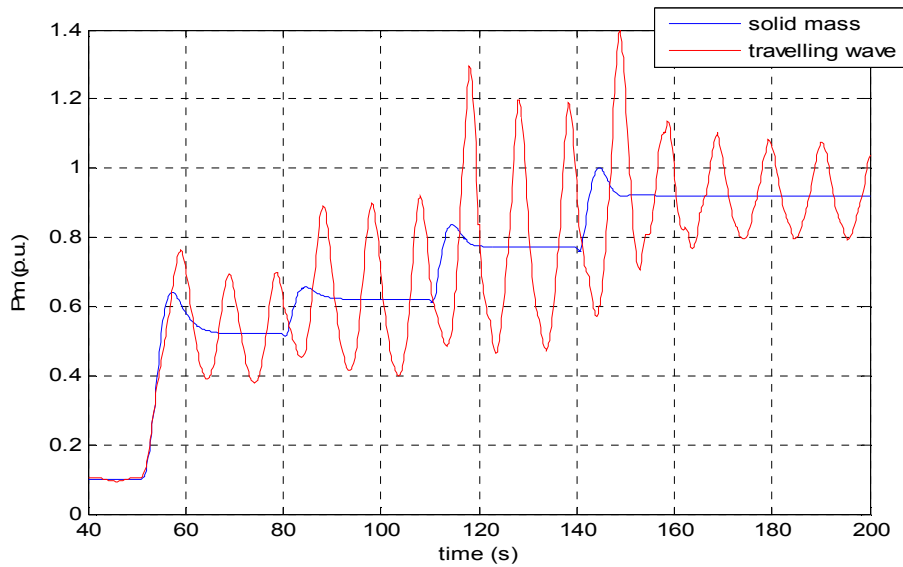
**Σχήμα 81 : Αποκρίσεις μηχανικής ισχύος για τα μη γραμμικά μοντέλα με παραμέτρους:  $\delta=0,833$  και  $T_R=11,76$**

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η συμπεριφορά του υδροστροβίλου είναι παρόμοια για τα δύο μοντέλα, με ίδιες τιμές μόνιμης κατάστασης, παρόμοιες χρονικές αποκρίσεις και με μοναδική διαφορά τις υψίσυχνες ταλαντώσεις που εμφανίζονται στο κυματικό μοντέλο.

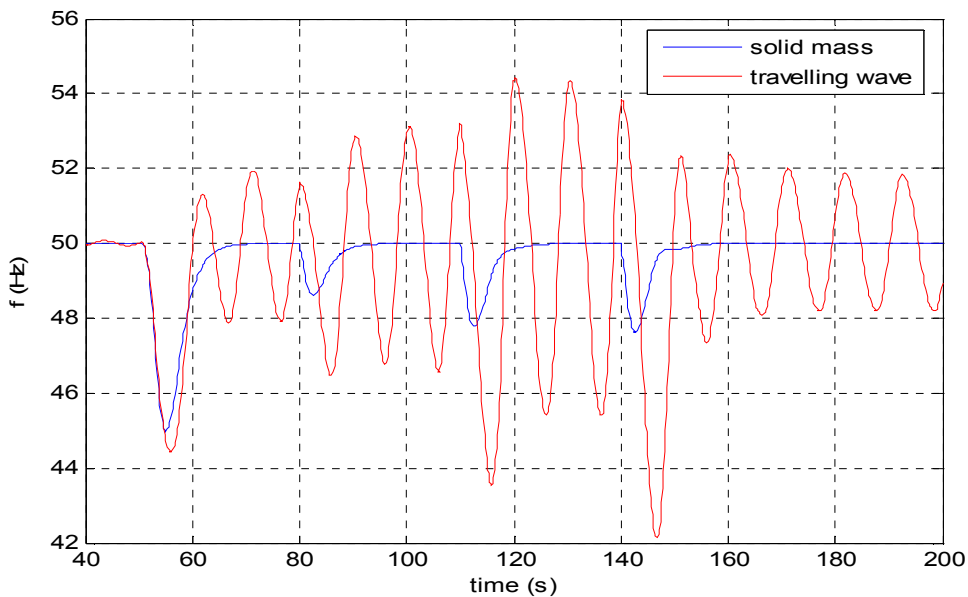
Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν τιμές για τον μεταβατικό στατισμό και τον χρόνο επαναφοράς, σύμφωνα με τις σχέσεις του Paynter για  $T_w = 0,788$  sec. Οι τιμές αυτές είναι:

$$\delta=0,32821 \text{ και } T_R=4,63353 \text{ sec}$$

Οι αποκρίσεις της μηχανικής ισχύος και της συχνότητας για αυτήν την περίπτωση φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



**Σχήμα 82 : Αποκρίσεις της μηχανικής ισχύος για  $\delta=0,32821$  και  $T_R=4,63353$  sec**



**Σχήμα 83 : Απόκριση της συχνότητας για  $\delta=0,32821$  και  $T_R=4,63353$  sec**

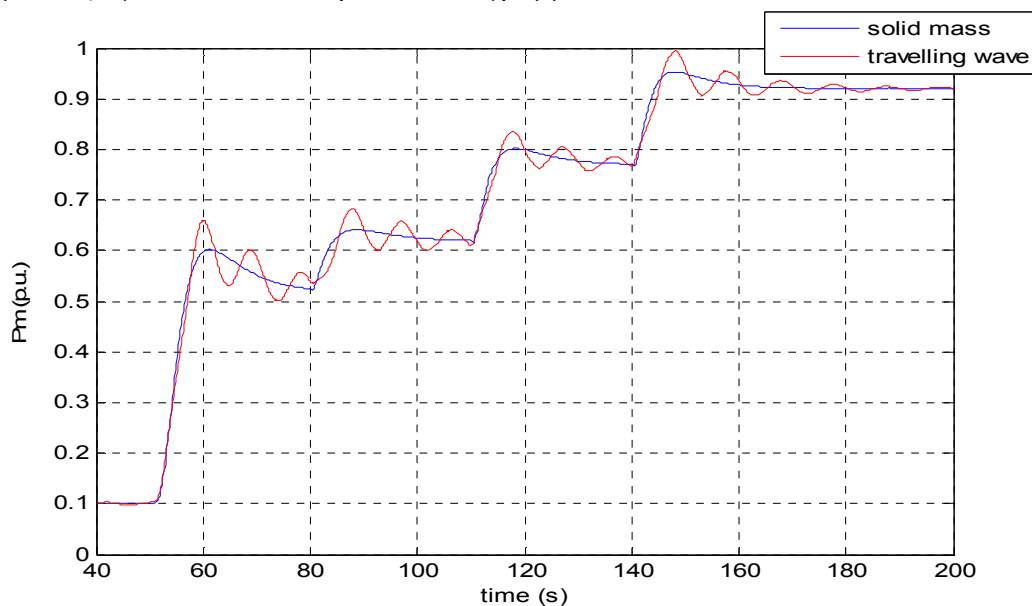
Από τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται ευθέως αντιληπτό ότι για τη συγκεκριμένη ρύθμιση, το μοντέλο με τη θεώρηση του ασυμπίεστου του νερού αδυνατεί να περιγράψει τη δυναμική του πραγματικού συστήματος. Η δυναμική του πραγματικού συστήματος, όπως φαίνεται από το πλήρως αναλυτικό κυματικό μοντέλο, εμφανίζει έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά, μη αποδεκτής λειτουργίας και απαιτεί μεγαλύτερες τιμές για το μεταβατικό στατισμό και το χρόνο επαναφοράς, γεγονός που κάνει έτσι την απόκριση του υδροστροβίλου ακόμα πιο αργή. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, καθώς το μη κυματικό μοντέλο δε συμπεριλαμβάνει την επίδραση των οδοντών κυμάτων, η οποία θα πρέπει απαραίτητως να λαμβάνεται υπόψη σε ΥΗΕ με μεγάλους αγωγούς προσαγωγής και με  $T_e > T_w$  (στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι περίπου τριπλάσιο).

Για την εύρεση των βέλτιστων τιμών του μεταβατικού στατισμού και χρόνου επαναφοράς για τον ρυθμιστή στοφών, δοκιμάστηκαν ζευγάρια τιμών τα οποία εξήχθησαν από την σχέση του Paynter για μεγαλύτερες τιμές του  $T_w$ .

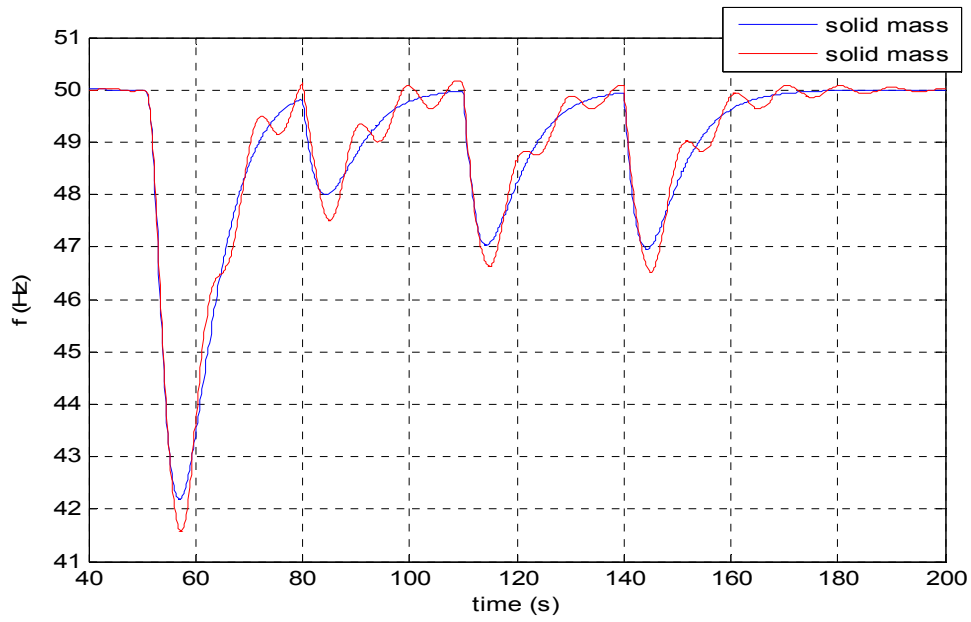
Μετά από δοκιμές βρέθηκε ότι η απόκριση του υδροστροβίλου έχει αποδεκτή συμπεριφορά και ταλαντώσεις για το ζευγάρι τιμών:

$$\delta=0,58 \text{ και } T_R=8,2 \text{ sec}$$

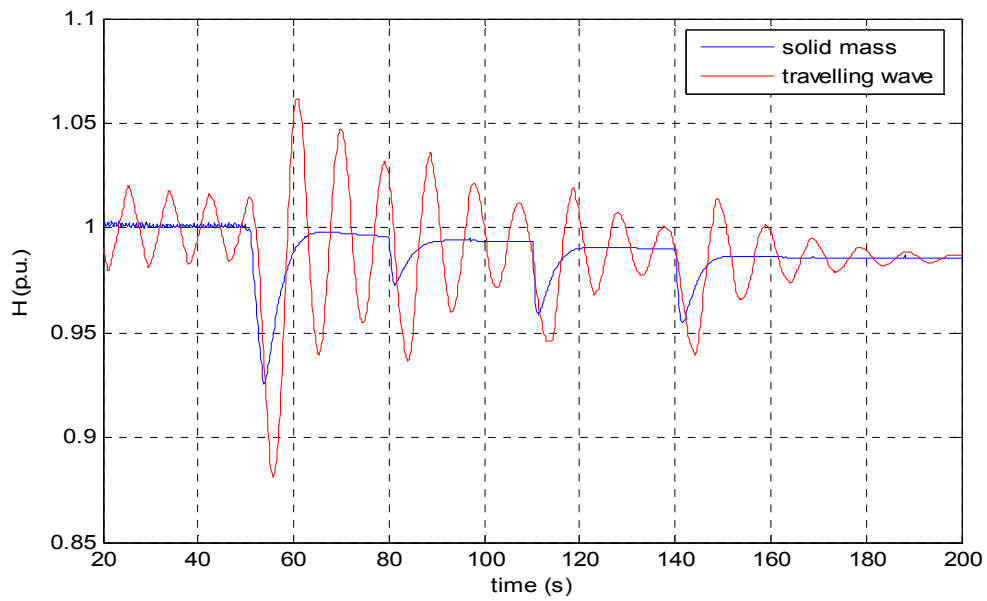
οι αποκρίσεις της μηχανικής ισχύος, της συχνότητας, της παροχής και της πίεσης (εκφρασμένη σε mΣΥ) του υδροστροβίλου για τα δύο μοντέλα (κυματικό και μη κυματικό), φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



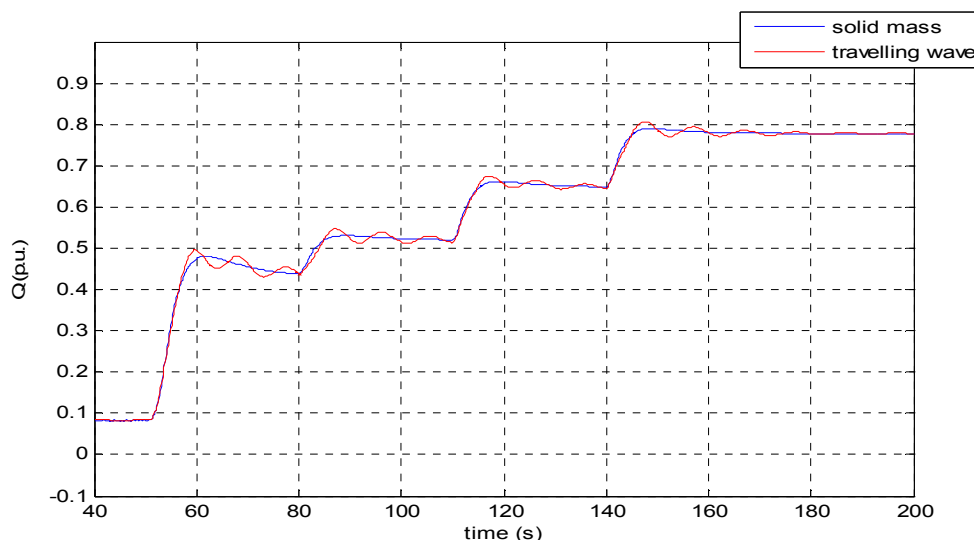
Σχήμα 84 : Απόκριση μηχανικής ισχύος για τα δύο μοντέλα  $\delta=0,58$  και  $T_R=8,2 \text{ sec}$



Σχήμα 85 : Απόκριση συχνότητας για τα δύο μοντέλα με  $\delta=0,58$  και  $T_R=8,2$  sec



Σχήμα 86 : Απόκριση πίεσης στο στρόβιλο για τα δύο μοντέλα



Σχήμα 87 : Απόκριση παροχής για τα δύο μοντέλα

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για τις συγκεκριμένες τιμές του μεταβατικού στατισμού και του χρόνου επαναφοράς οι αποκρίσεις για το κυματικό μοντέλο και το μη κυματικό είναι παρόμοιες: στις αποκρίσεις του κυματικού μοντέλου είναι λίγο μεγαλύτερο το πλάτος ενώ εμφανίζονται υψίσυχνες ταλαντώσεις οι οποίες όμως σταδιακά αποσβένονται. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι μεγαλώνοντας τους χρόνους απόκρισης (εις βάρος της ταχύτητας) οι κυματικές διαταραχές είναι λιγότερο έντονες με αποτέλεσμα οι αποκρίσεις να τείνουν προς αυτών του μη κυματικού μοντέλου.
- Από την απόκριση συχνότητας γίνεται εμφανής η αδυναμία του υδροστροβίλου να ρυθμίζει ικανοποιητικά τη συχνότητα. Η ταχύτητα απόκρισής του δεν είναι αρκετά γρήγορη ώστε βηματικές μεταβολές 10% της ισχύος του να προκαλούν πτώση της συχνότητας κάτω από το επιθυμητό 49 Hz. Συγκεκριμένα σε μία βηματική μεταβολή του φορτίου 10% για  $t=60$  sec ο υδροστροβίλος αποκρίθηκε με αύξηση της ισχύος του από το 53% στο 63% σε περίπου 10 sec ενώ η συχνότητα έφτασε λίγο κάτω από τα 47 Hz.

### 6.4.3 Παράλληλη λειτουργία δύο υδροστροβίλων

#### 6.4.3.1 Γενικά

Στην περίπτωση δύο υδροστροβίλων που λειτουργούν υδραυλικά συζευγμένοι, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα όπως αυτά περιγράφηκαν στα κεφάλαια 2, 3, 5 για το υδραυλικό μέρος και τον ρυθμιστή στροφών ενώ το ηλεκτρικό μέρος μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με τις σχέσεις της παραγράφου 4.3.2 για παράλληλη λειτουργία δύο γεννητριών. Ως ρυθμιστής στροφών χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος με τη λειτουργία ενός υδροστροβίλου, ο οποίος περιλαμβάνει ισόχρονη ρύθμιση, στατισμό



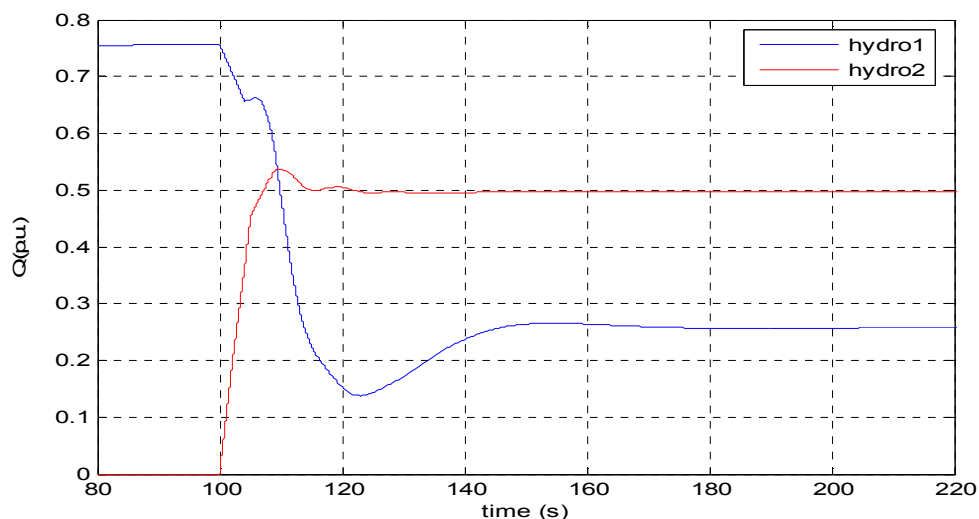
3%, ενώ ο μεταβατικός στατισμός και ο χρόνος επαναφοράς είναι υπολογισμένοι από τις σχέσεις του Paynter. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ως εξής:

- Η σταθερά αδράνειας :  $H=3$  ( $T_M=6$  sec)
- Ο συντελεστής απόσβεσης υδροστροβίλου :  $D=0,5$
- Οι χρονικές καθυστερήσεις του μηχανισμού της βελόνης :  $T_P=0,05$  sec,  $T_G=0,2$  sec
- Οι συντελεστές συγχρονισμού και απόσβεσης για το γραμμικό μοντέλο των γεννητριών είναι  $K_S=8$  και  $K_D=0,075$  αντίστοιχα

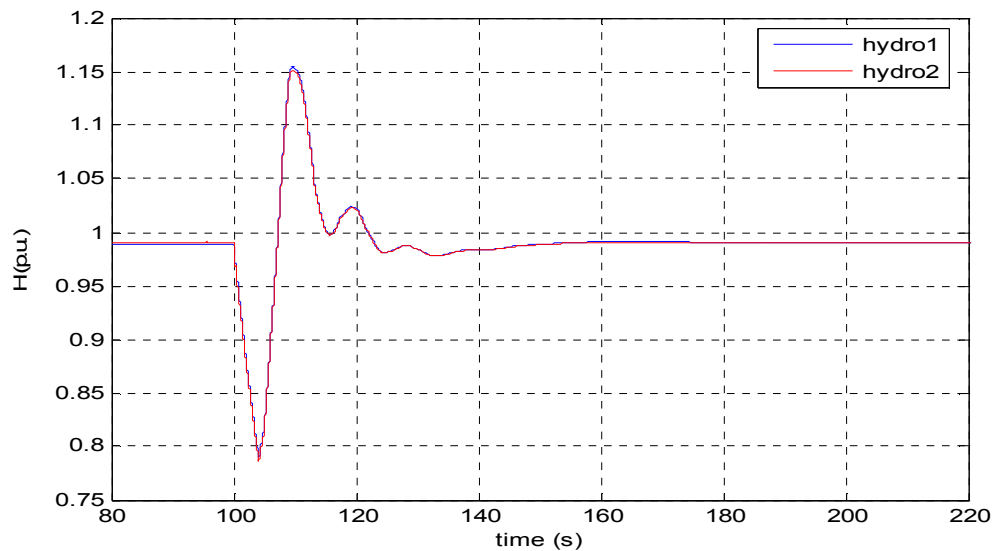
Για την περίπτωση λειτουργίας δύο υδροστροβίλων ο χρόνος εκκίνησης ύδατος για κάθε υδροστρόβιλο είναι περίπου:  $T_W=1,54$  sec ενώ ο κυματικός χρόνος είναι περίπου  $T_{ec}=2,05$  sec για τον κοινό αγωγό (από τον ταμιευτήρα μέχρι την διακλάδωση) και  $T_P=0,05$  sec για τον κάθε ξεχωριστό αγωγό.

#### 6.4.3.2 Εξέταση της σύζευξης μεταξύ των δύο υδροστροβίλων

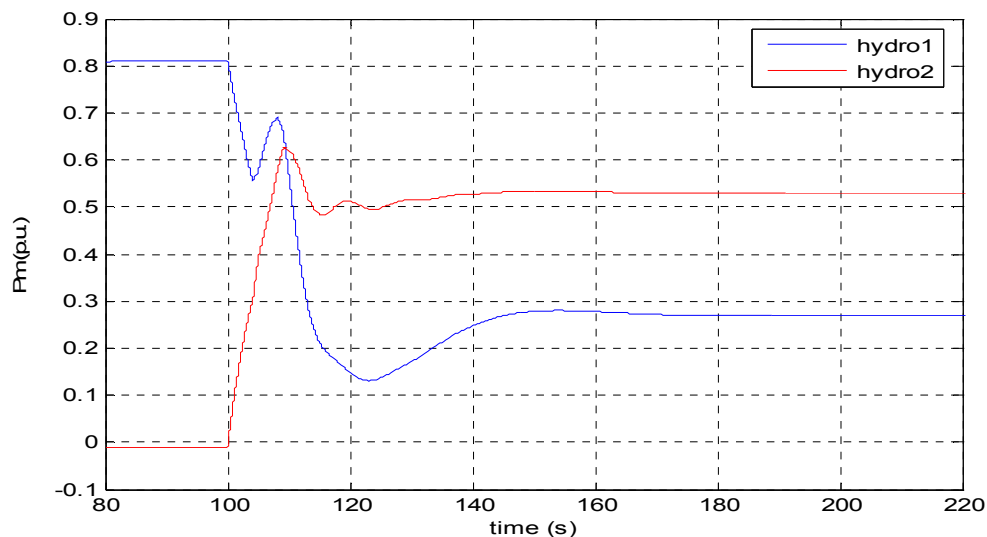
Αρχικά εξετάζεται η υδραυλική σύζευξη μεταξύ των υδροστροβίλων. Για την κατανόηση του φαινομένου, πραγματοποιείται η εξής μεταβολή: Το φορτίο τίθεται ίσο 0,8 α.μ. Ο πρώτος υδροστρόβιλος είναι εφοδιασμένος με ρυθμιστή στροφών, ενώ ο δεύτερος ελέγχεται χειροκίνητα και για  $t=100$  sec του δίνεται η εντολή να ανεβάσει την ισχύ του στο 0,5 α.μ. Τα αποτελέσματα αυτής της μεταβολής φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 88 : Απόκριση παροχής στο σενάριο μελέτης της υδραυλικής σύζευξης



Σχήμα 89 : Απόκριση πίεσης στους υδροστροβίλους στο σενάριο μελέτης της υδραυλικής σύζευξης



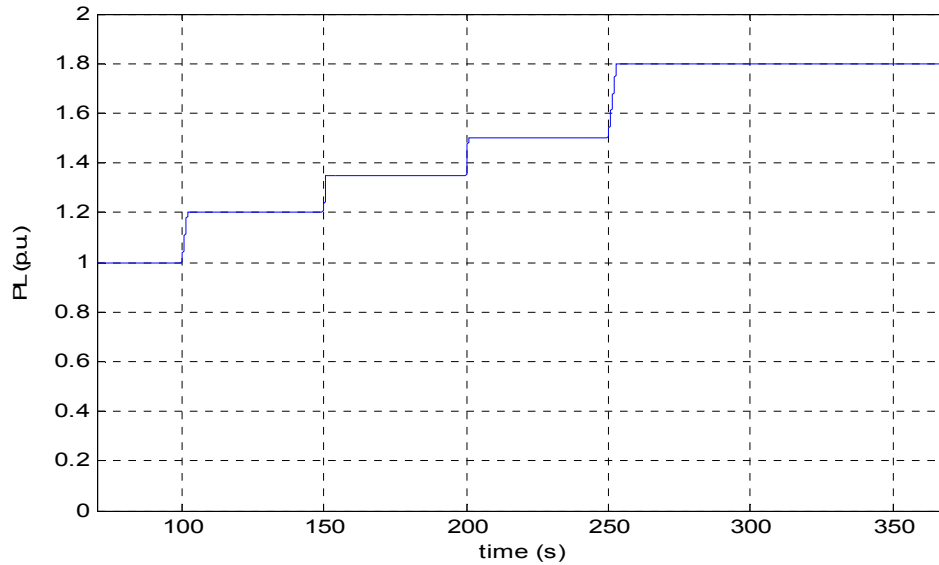
Σχήμα 90 : Απόκριση ισχύος υδροστροβίλων στο σενάριο μελέτης της υδραυλικής σύζευξης

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούνται τα εξής:

- Ο πρώτος υδροστροβίλος, που είναι εφοδιασμένος με ρυθμιστή στροφών, αντιλαμβάνεται την πτώση της συχνότητας (αφού αυξήθηκε το φορτίο) και ανεβάζει την ισχύ του στο 0,8 α.μ. Για  $t=100$  sec , που μπαίνει χειροκίνητα και ο δεύτερος υδροστροβίλος, ο πρώτος ρίχνει την ισχύ του μέχρι τελικά να ισορροπήσουν σε μία νέα τιμή.
- Η πίεση στους δύο υδροστροβίλους έχει την ίδια τιμή.

#### 6.4.3.3 Αποκρίσεις των υδροστροβίλων σε μεταβολές του φορτίου

Η μεταβολή του φορτίου που χρησιμοποιείται, αρχικά, στις παρακάτω προσομοιώσεις είναι η ακόλουθη, όπου 1 α.μ. είναι η  $P_{ov}$  του ενός υδροστροβίλου:



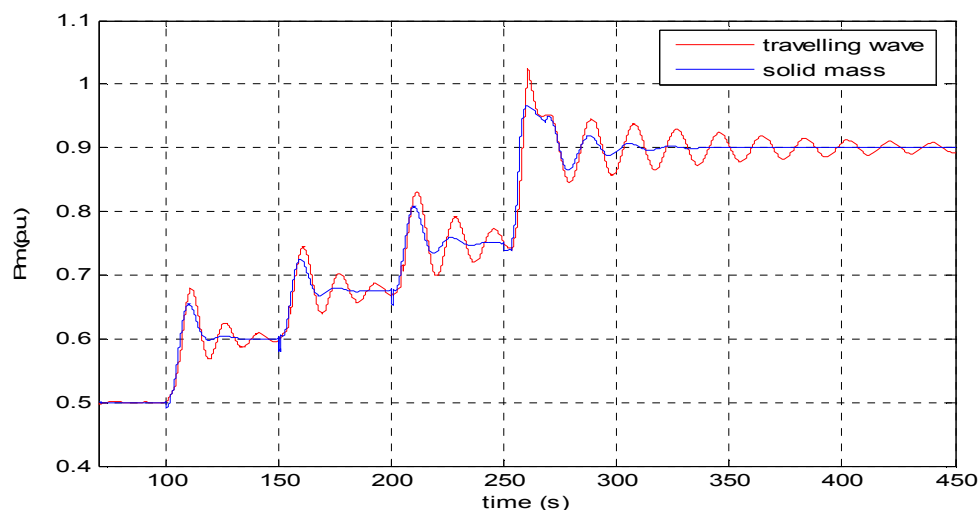
Σχήμα 91 : Η μεταβολή του φορτίου PL

Οι τιμές του μεταβατικού στατισμού  $\delta$  και του χρόνου επαναφοράς  $T_R$  επιλέχτηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις του Raynter, για τον χρόνο εκκίνησης ύδατος του προς μελέτη μικρού ΥΗΕ για παράλληλη λειτουργία δύο υδροστροβίλων :  $T_W=1,54$  sec.

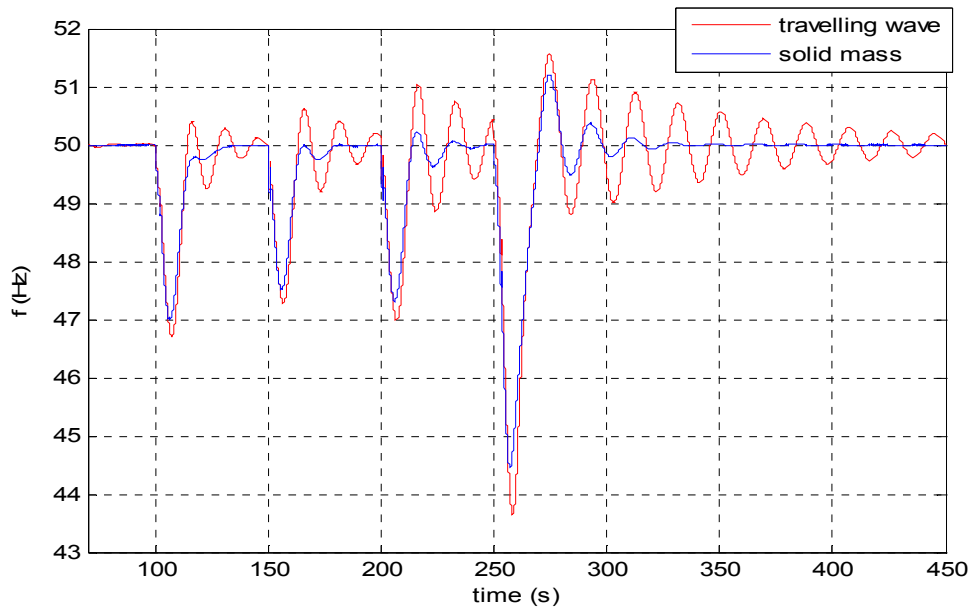
Οι τιμές είναι:

$\delta=0,641$  και  $T_R=9,0458$  sec

Οι αποκρίσεις μηχανικής ισχύος και συχνότητας του ενός υδροστροβίλου για την παραπάνω μεταβολή, με χρήση των δύο μη γραμμικών μοντέλων, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 92 : Απόκριση μηχανικής ισχύος ενός υδροστροβίλου για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα  $\delta=0,641$  και  $T_R=9,0458$  sec

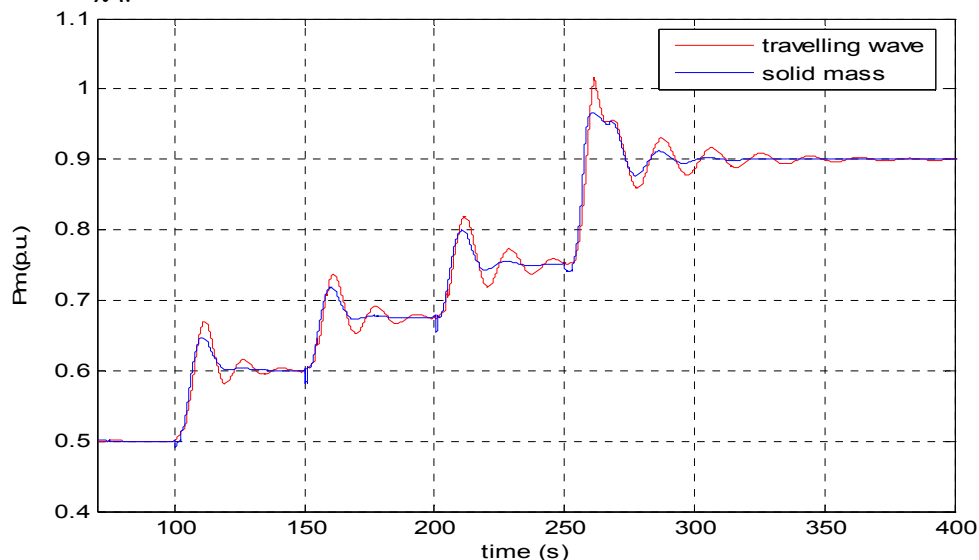


Σχήμα 93 : Απόκριση συχνότητας για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα για  $\delta=0,641$  και  $T_R=9,0458$  sec

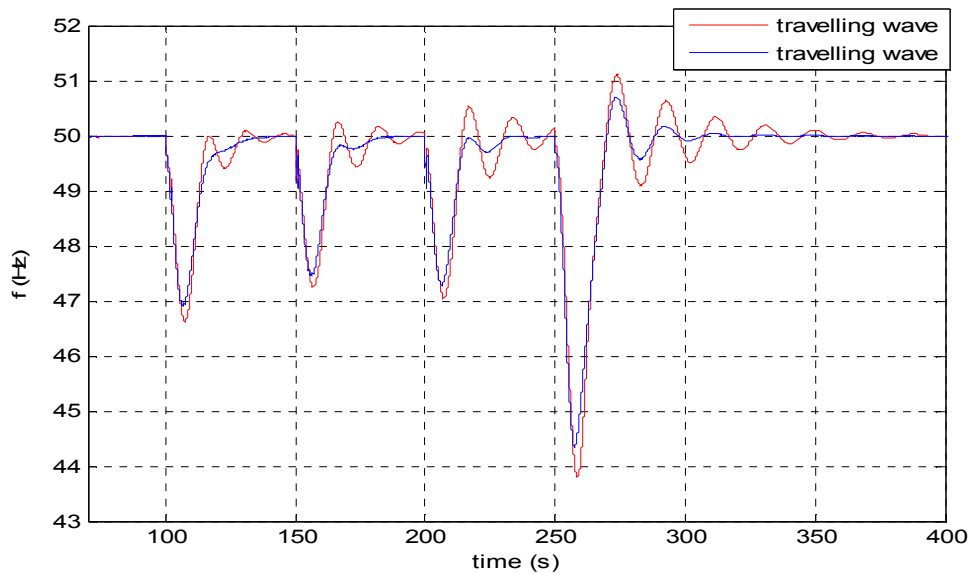
Λόγω της ισχυρής ταλαντωτικής συμπεριφοράς των αποκρίσεων του υδροστροβίλου δοκιμάστηκαν πιο μεγάλες τιμές για τον μεταβατικό στατισμό και τον χρόνο επαναφοράς και τα αποτελέσματα κρίθηκαν αποδεκτά (ως προς την ευστάθεια και την ταλαντωτική συμπεριφορά) για το ζευγάρι τιμών:

$$\delta=0,688 \text{ και } T_R=9,7 \text{ sec}$$

Οι αποκρίσεις μηχανικής ισχύος και συχνότητας του ενός υδροστροβίλου για την παραπάνω μεταβολή, με χρήση των δύο μη γραμμικών μοντέλων, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 94 : Απόκριση μηχανικής ισχύος ενός υδροστροβίλου για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα  $\delta=0,688$  και  $T_R=9,7$  sec



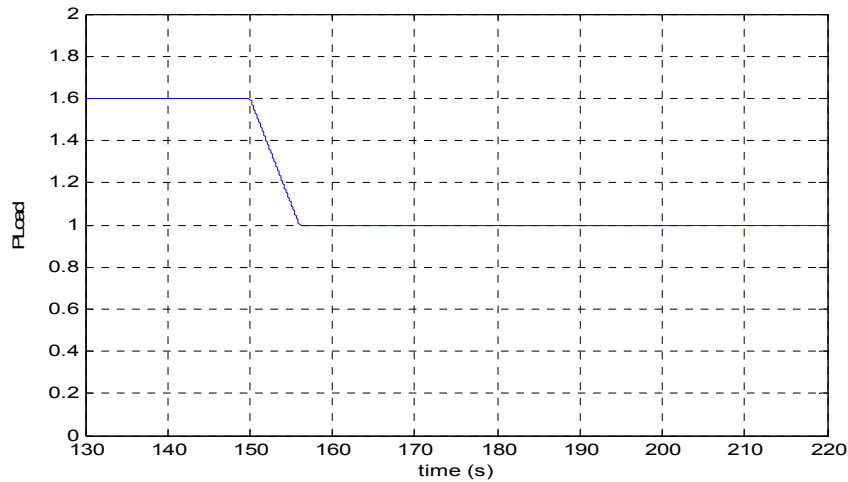
Σχήμα 95 : Απόκριση συχνότητας ενός υδροστροβίλου για τα δύο μη γραμμικά μοντέλα  $\delta=0,688$  και  $T_R=9,7$  sec

Από τις παραπάνω αποκρίσεις εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

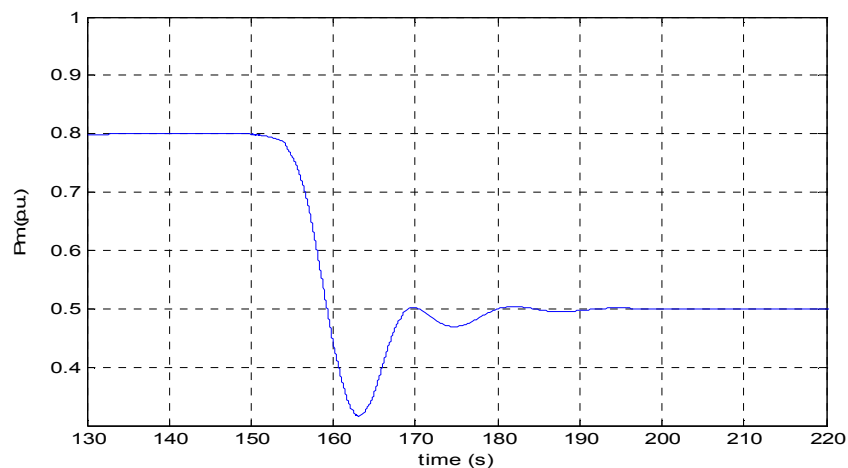
- Το κυματικό μοντέλο και το μη κυματικό έχουν παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με τον χρόνο απόκρισης, αλλά διαφέρουν στα εξής: στο κυματικό μοντέλο υπάρχουν υψίσυχνες αρμονικές οι οποίες αποσβένονται σε περίπου 80 sec. Επίσης το πλάτος των αποκρίσεων είναι ελαφρώς μεγαλύτερο στο κυματικό μοντέλο, όμως στην απόκριση μηχανικής ισχύος δεν εμφανίζεται συμπεριφορά πλήγματος στις μεταβολές της βελόνης.
- Σε σχέση με την λειτουργία ενός μόνου υδροστροβίλου η παράλληλη λειτουργία επιβαρύνει την απόκριση του ενός με επιπλέον ταλαντώσεις. Όμως, το γεγονός ότι ίδια μεταβολή φορτίου κατανέμεται σε δύο υδροστροβίλους, καθιστά την απόκριση του ΜΥΗΣ ταχύτερη.
- Παρατηρείται ότι, στο κυματικό μοντέλο, ο πολλαπλασιασμός των κυματομορφών της παροχής και της πίεσης (εκφρασμένη σε mΣΥ) οδηγεί σε αυτήν της ισχύος όπου δε διακρίνεται το υδραυλικό πλήγμα τελικά. Σημειώνεται ότι όσο αυξάνεται ο κυματικός χρόνος οι αποκρίσεις είναι λιγότερο απότομες.
- Οι τιμές των παραμέτρων του ρυθμιστή φαίνονται ως οι πιο κατάλληλες για τον έλεγχο των υδροστροβίλων σε συνθήκες παράλληλης λειτουργίας τους. Τιμές που θα έκαναν πιο γρήγορο τον ρυθμιστή θα δημιουργούσαν μη αποδεκτές ταλαντώσεις στο σύστημα μέχρι ακόμα και αστάθεια. Το ζευγάρι τιμών για τις παραμέτρους ( $\delta=0,688$  και  $T_R=9,7$  sec) είναι αυτό που χρησιμοποιείται, τελικά, στους ρυθμιστές στροφών του ΜΥΗΣ είτε σε αυτόν λειτουργεί ένας μόνος υδροστροβίλος, είτε και οι δύο.

- Όπως γίνεται αντιληπτό από την απόκριση συχνότητας ο υδροστροβίλος αδυνατεί να ρυθμίσει τη συχνότητα εντός του ορίου των 49 Hz για τις παραπάνω μεταβολές.

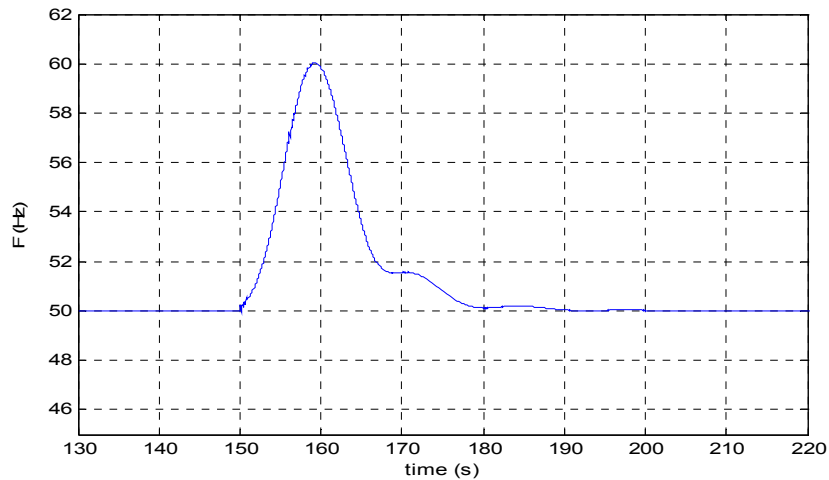
Στη συνέχεια εξετάζονται οι αποκρίσεις των υδροστροβίλων όταν η μεταβολή που επιβάλλεται είναι μείωση του φορτίου. Τα αποτελέσματα αυτής της μεταβολής φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



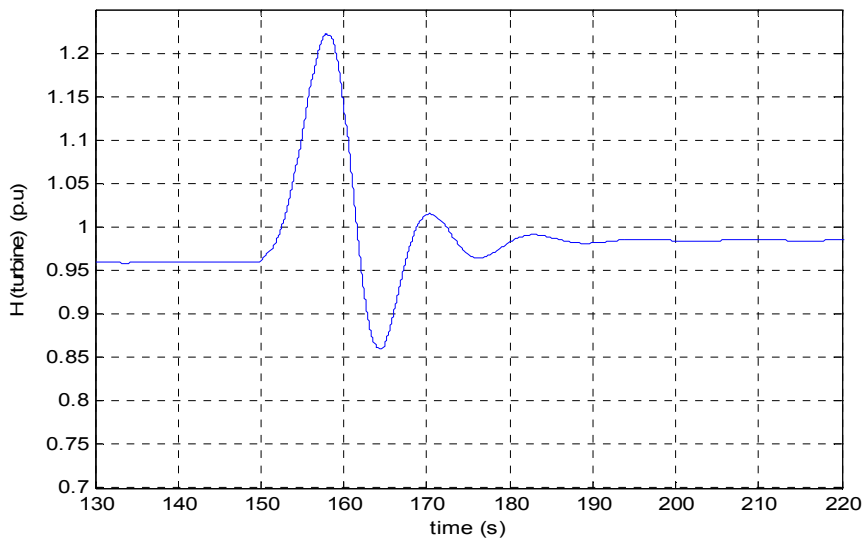
**Σχήμα 96 : Μεταβολή του φορτίου από 1,6 α.μ. σε 1 α.μ.**



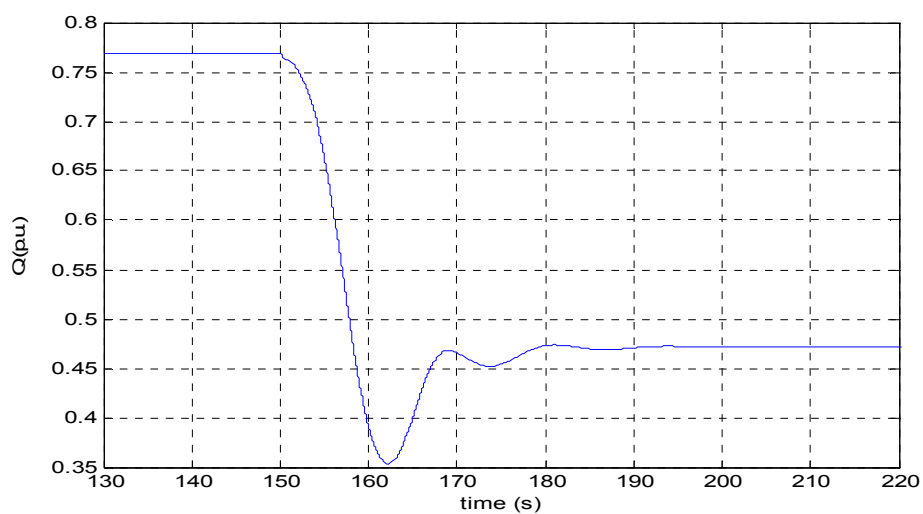
**Σχήμα 97 : Απόκριση ισχύος σε μείωση του φορτίου**



Σχήμα 98 : Απόκριση συχνότητας για μείωση του φορτίου



Σχήμα 99 : Απόκριση πίεσης για μείωση του φορτίου



Σχήμα 100 : Απόκριση παροχής για μείωση του φορτίου

Στα παραπάνω σχήματα φαίνονται οι αποκρίσεις του ενός υδροστροβίλου για την περίπτωση μείωσης του φορτίου. Αυτές είναι ανάλογες για την περίπτωση αύξησης

του φορτίου αλλά αντίθετες. Συγκεκριμένα, η πίεση στον στρόβιλο, αρχικά, αυξάνεται προκαλώντας μείωση της πτώσης της μηχανικής ισχύος ενώ στη συνέχεια η ισχύς πέφτει ταχύτερα. Η συχνότητα, για την παραπάνω μεταβολή, έφτασε την τιμή  $f=60$  Hz.

## 6.5 Τρόποι βελτίωσης της ταχύτητας απόκρισης του υπό μελέτη ΜΥΗΣ

---

### 6.5.1 Γενικά

---

Στο υποκεφάλαιο 5.2 έχει αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο βασικές παράμετροι επηρεάζουν την ταχύτητα απόκρισης του υπό μελέτη ΜΥΗΣ. Αντικείμενο του παρόντος υποκεφαλαίου είναι η εύρεση τρόπων για τη βελτίωση της ταχύτητας απόκρισης. Γενικά, οι πιθανές λύσεις είναι οι εξής :

1. Επιλογή των παραμέτρων του ρυθμιστή τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη απόκριση.
2. Μείωση της χρονικής καθυστέρησης του μηχανισμού κίνησης της βελόνης.
3. Αύξηση της σταθεράς αδράνειας  $H$
4. Μείωση του χρόνου εκκίνησης ύδατος  $T_w$  με αύξηση της διατομής του αγωγού προσαγωγής.
5. Μείωση των κυματικών φαινομένων (μείωση του κυματικού χρόνου  $T_e$ ) και του  $T_w$  με την τοποθέτηση πύργου αναπάλσεως.

Από τις παραπάνω πιθανές λύσεις, η πρώτη εξετάστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο και, όπως αναλύθηκε, σχετίζεται άμεσα με το  $T_w$  και το  $T_e$  και περιορίζεται από την ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος. Οι υπόλοιπες πιθανές λύσεις εξετάζονται παρακάτω.

### 6.5.2 Η χρονική καθυστέρηση του μηχανισμού κίνησης της βελόνης

---

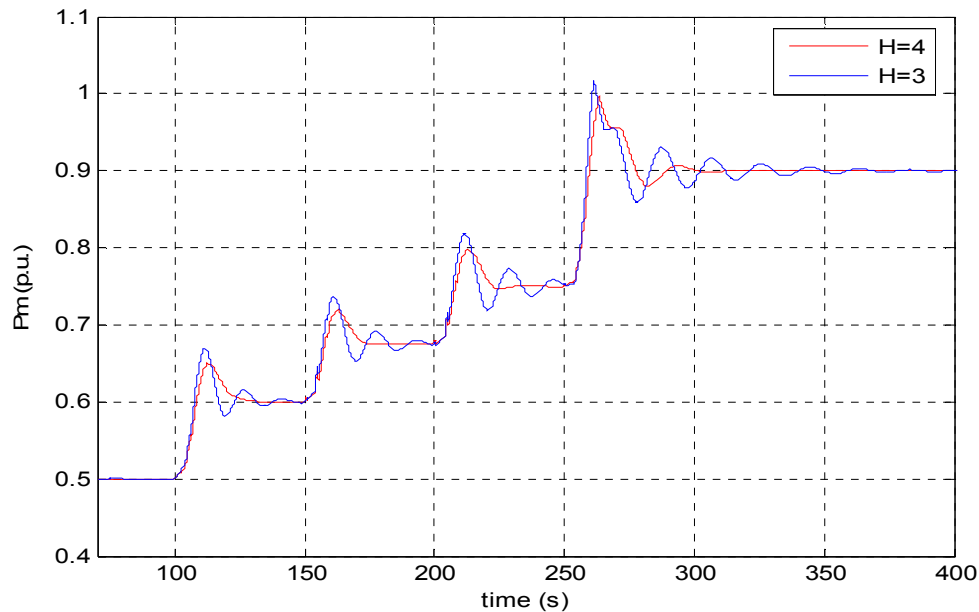
Για τον υπό μελέτη ΜΥΗΣ, οι χρονικές καθυστερήσεις του μηχανισμού της βελόνης λήφθηκαν :  $T_p=0,05$  sec,  $T_G=0,2$  sec, ενώ δεν συμπεριλήφθη στην μοντελοποίηση περιορισμός του ρυθμού μετακίνησης της βελόνης. Επομένως, κρίνεται μη σκόπιμη η μελέτη αυτής της πιθανής λύσης για περαιτέρω μείωση των καθυστερήσεων και αύξηση της ταχύτητας απόκρισης.

### 6.5.3 Η σταθερά αδράνειας $H$

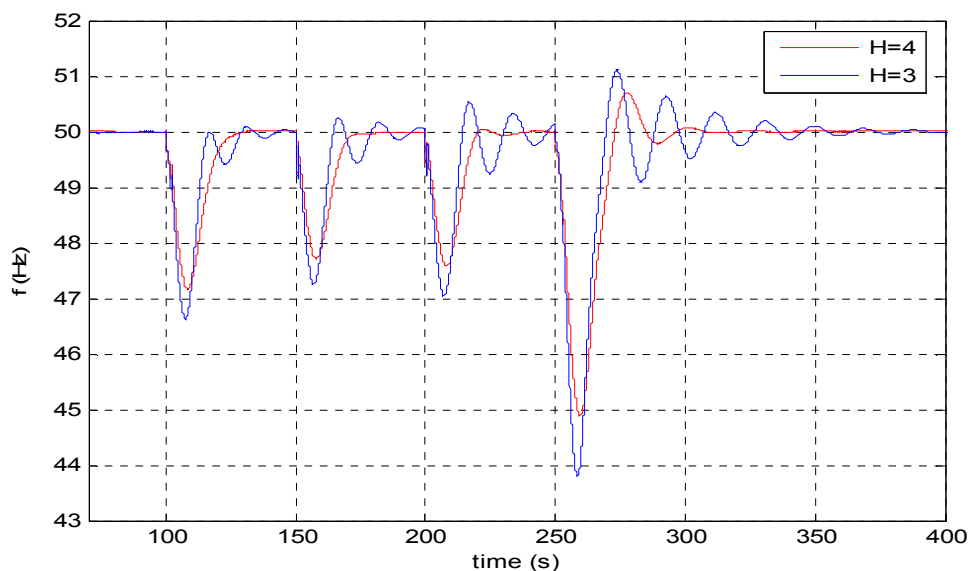
---

Η σταθερά αδράνειας για το ζεύγος υδροστροβίλου γεννήτριας όπου μελετάται έχει ληφθεί ίση με  $H=3$ . Παρακάτω παρουσιάζεται πώς μεταβάλλεται η απόκριση των υδροστροβίλων αν μεταβληθεί η σταθερά αδράνειας σε  $H=4$ :





Σχήμα 101 : Απόκριση της μηχανικής ισχύος για  $H=4$  και  $H=3$



Σχήμα 102 : Απόκριση της συχνότητας για  $H=4$  και  $H=3$

Από τα παραπάνω γραφήματα συμπεραίνεται ότι η αύξηση της σταθεράς αδράνειας βελτιώνει την απόκριση του συστήματος και, πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η απόσβεση των ταλαντώσεων και η ευστάθεια του συστήματος ενώ, επιπροσθέτως, μειώνεται η μεταβολή της συχνότητας. Αυτό συμβαίνει, καθώς το σύστημα είναι πιο στιβαρό και αδρανές σε μεταβολές του φορτίου. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα επιλογής μικρότερων τιμών για τον μεταβατικό στατισμό και τον χρόνο επαναφοράς.

Η αύξηση της σταθεράς αδράνειας επιτυγχάνεται με την αύξηση της ροπής αδράνειας  $I$  των στρεφόμενων μαζών και η οποία μπορεί να γίνει από τον κατασκευαστή της ηλεκτρικής γεννήτριας, προδιαγράφοντας την απαιτούμενη τιμή της ροπής αδράνειας, είτε με την τοποθέτηση σφονδύλου μεταξύ της ατράκτου του υδροστροβίλου και της ατράκτου της γεννήτριας [5]. Η ροπή αδράνειας του σφονδύλου μπορεί να είναι έως και διπλάσια αυτής της γεννήτριας. Όπως όμως

γίνεται αντιληπτό, η αύξηση της ροπής αδράνειας( και άρα της σταθεράς αδράνειας H) αποτελεί λύση που απαιτεί μεγάλο κόστος.

#### 6.5.4 Μείωση του χρόνου εκκίνησης ύδατος $T_w$ και του κυματικού χρόνου $T_e$

---

Η μείωση του χρόνου εκκίνησης  $T_w$  επιτυγχάνεται, για τον ήδη υπάρχοντα ΥΗΣ, με αναπροσαρμογή της διαμέτρου (αύξηση) ή της διάταξης του αγωγού προσαγωγής. Πρόκειται για μία ακριβή λύση που συνήθως δεν επιλέγεται σε ΜΥΗΣ με  $T_w > 2,5$  sec [5].

Η μείωση του κυματικού χρόνου  $T_e$  επιτυγχάνεται με την κατασκευή πύργου αναπόσβεως, όσο το δυνατόν πιο κοντά στον υδροστρόβιλο. Ο πύργος αναπόσβεως (ή ηρεμήσεως) είναι ένα ανοιχτό δοχείο συνδεδεμένο στο άκρο του αγωγού κατά την είσοδό του στο σταθμό. Τα υδροδοχεία αυτά χρησιμεύουν για την απορρόφηση της ενέργειας του αγωγού στις απότομες μεταβολές της βελόνης (τις υποπιέσεις και τις υπερπιέσεις) και την διατήρηση της παροχής κατά τις απότομες μεταβολές του φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κυματικός χρόνος υπολογίζεται για τον αγωγό από τον υδροστρόβιλο μέχρι τον πύργο καθώς, τις υποπιέσεις και υπερπιέσεις από τον πύργο μέχρι τον ταμιευτήρα, της απορροφά. Επίσης, μειώνεται ο χαρακτηριστικός χρόνος  $T_w$ . Η λύση αυτή, κατά κανόνα, αποφεύγεται στους ΜΥΗΣ καθώς είναι πολύ δαπανηρή [3][5][15].

Εδώ, θα πρέπει να τονιστεί ότι, για να βελτιωθεί ο χρόνος απόκρισης του ΜΥΗΣ, θα πρέπει να γίνει συνδυασμός των δύο παραπάνω λύσεων καθώς, αν μειωθεί ο κυματικός χρόνος χωρίς παράλληλη μείωση του  $T_w$ , θα μειωθούν οι ταλαντώσεις που οφείλονται στα οδεύοντα κύματα αλλά η ταχύτητα απόκρισης δε θα μεταβληθεί, ενώ, αν μειωθεί το  $T_w$  χωρίς μείωση των κυματισμών, δεν θα είναι εφικτή η βελτίωση της ταχύτητας απόκρισης. Τα αποτελέσματα των μεταβολών μίας εκ των δύο παραμέτρων έχουν γίνει κατανοητά και από τα αποτελέσματα των αποκρίσεων των υποκεφαλαίων 6.3 και 6.4

Εάν υποθεθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής πύργου αναπόσβεως κοντά στους υδροστρόβιλους και αύξησης της διαμέτρου του κοινού αγωγού στο διπλάσιο της διατομής, τότε:

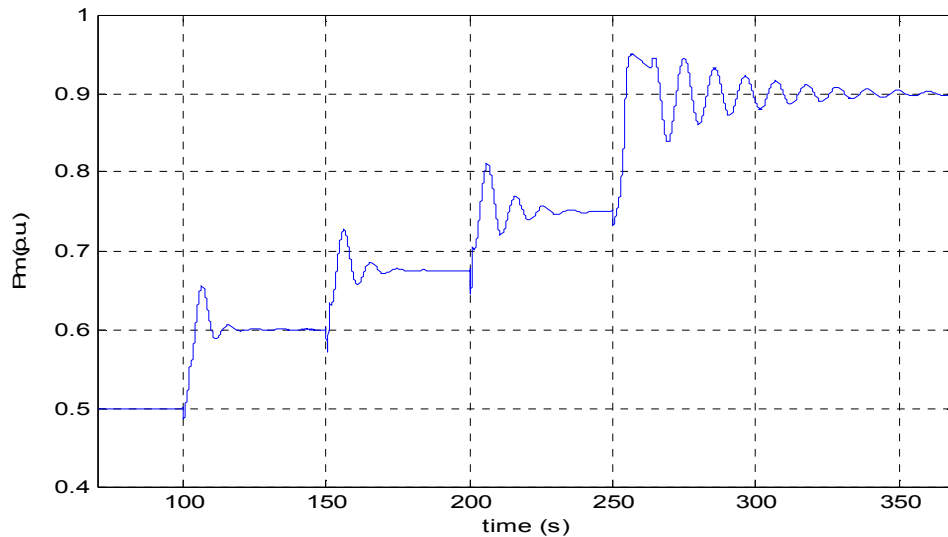
- Ο κυματικός χρόνος είναι αμελητέος, συνεπώς η δυναμική του υδραυλικού μέρους, περιγράφεται με ακρίβεια από το μη κυματικό μοντέλο, οπότε δεν υφίστανται στο σύστημα οι ταλαντώσεις. Η παρουσία πύργου εισάγει κάποια αργά μεταβατικά φαινόμενα τα οποία δεν συμπεριλήφθησαν στην προκείμενη ανάλυση.
- Το  $T_w$  μειώνεται στο μισό, λόγω του διπλασιασμού της διατομής, ενώ με την κατασκευή του πύργου μειώνεται περισσότερο το υδραυλικό πλήγμα. Η μείωση του  $T_w$  του κοινού αγωγού σε συνδυασμό με μείωση του κυματικού χρόνου δίνει τη δυνατότητα επιλογής παραμέτρων για γρηγορότερο ρυθμιστή.

Άρα, έστω ότι με τις παραπάνω κατασκευαστικές διαφορές, στη λειτουργία δύο υδροστρόβιλων υδραυλικά συζευγμένων, οι χρόνοι εκκίνησης ύδατος είναι:  $T_w=0,75$  sec για τον κοινό αγωγό και  $T_w=0,038$  sec (παραμένει) για κάθε ξεχωριστό αγωγό.

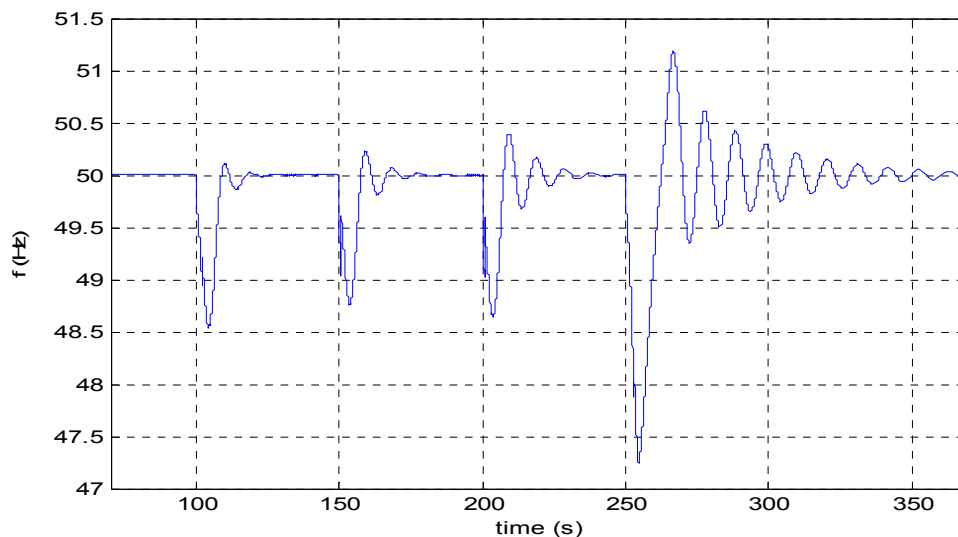
σύμφωνα με τις σχέσεις του Paynter, εξάγονται οι παρακάτω τιμές:

$$\delta=0,33 \text{ και } T_R=4,63$$

Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



**Σχήμα 103 :** Απόκριση μηχανικής ισχύος για το σενάριο με πύργο ανάπαλσης και με διπλάσιες διατομής κοινό αγωγό



**Σχήμα 104 :** Απόκριση συχνότητας για το σενάριο με πύργο ανάπαλσης και με διπλάσιες διατομής κοινό αγωγό

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι, για 10% αύξηση του φορτίου, όταν οι υδροστρόβιλοι είναι στο 50% της φόρτισής τους, η συχνότητα πέφτει περίπου στα 48,6 Hz (περίπου 1,7 Hz πάνω από την αντίστοιχη της προσομοίωσης του κανονικού σταθμού). Γίνεται, έτσι, προφανής η σημασία της συμβολής των δύο αυτών χρόνων ( $T_w$  ,  $T_e$ ) στην ταχύτητα απόκρισης των

υδροτροβίλων και στο πώς η μεταβολή τους επηρεάζει την ικανότητα του ΜΥΗΣ να ρυθμίζει την συχνότητα σε μεταβολές του φορτίου.

Συνεπώς, για ικανοποιητική ταχύτητα απόκρισης ενός ΜΥΗΣ θα πρέπει να τηρούνται τα παρακάτω:

- Τα κυματικά φαινόμενα στον αγωγό να είναι αμελητέα, το οποίο σε περίπτωση μεγάλου αγωγού προσαγωγής (όπως είναι σε ΜΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton) επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πύργου αναπάλσεως πλησίον του υδροστροβίλου.
- Ο χρόνος εκκίνησης ύδατος  $T_w$  να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Εάν είναι μεγαλύτερος της μονάδας, θα πρέπει ο αγωγός προσαγωγής να αναπροσαρμόζεται σε άλλον μεγαλύτερης διατομής, ενώ και εδώ, τα αποτελέσματα βελτιώνονται με την κατασκευή πύργου ανάπαλσης.

Όμως, τα παραπάνω κριτήρια απαιτούν υψηλό κόστος, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις ενδέχεται να είναι τεχνικώς ανεφάρμοστα (έργα πολιτικού μηχανικού κ.α.). Συνεπώς θα πρέπει να προηγείται τεχνοοικονομική μελέτη που να συνδυάζει όλα τα παραπάνω βέλτιστα και εν προκειμένω να γίνεται συμβιβασμός μεταξύ υψηλού κόστους, υψηλών τεχνικών απαιτήσεων (από ηλεκτρομηχανολογικής απόψεως) και εφαρμόσιμων τρόπων κατασκευής.

## **7 Μηχανή Diesel**

---

### **7.1 Γενικά**

---

Η μηχανή Diesel είναι μηχανή εσωτερικής καύσης και χρησιμοποιεί τη θερμότητα που παράγεται από το τελικό στάδιο της συμπίεσης για να ξεκινήσει η διαδικασία ανάφλεξης του καυσίμου στον θάλαμο καύσης.

Η λειτουργία της μηχανής βασίζεται στον κύκλο Diesel (η ονομασία προέρχεται από τον Rudolf Diesel). Οι μηχανές Diesel έχουν τον υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης από οποιαδήποτε άλλη μηχανή εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης, εξαιτίας του λόγου συμπίεσης. Συγκεκριμένα, οι μηχανές Diesel χαμηλής ταχύτητας έχουν θερμικό βαθμό απόδοσης υψηλότερο από 50%.

Αρχικά οι μηχανές Diesel χρησιμοποιήθηκαν ως η πιο αποδοτική αντικατάσταση των αμμοστροβίλων. Από το 1910 χρησιμοποιήθηκαν σε υποβρύχια και σε πλοία. Σε συστήματα κίνησης και σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν αργότερα. Το 1930 ξεκίνησε η χρήση τους σε αυτοκίνητα, ενώ μέχρι το 2007 το 50% των πωλήσεων αυτοκινήτων στην Ευρώπη ήταν με κινητήρια μηχανή Diesel.

### **7.2 Λειτουργία μηχανής**

---

Οι γεννήτριες Diesel χρησιμοποιούνται είτε σε αυτόνομα δίκτυα είτε παράλληλα με το διασυνδεδεμένο δίκτυο αναλαμβάνοντας φορτία σε επείγουσες συνθήκες. Σε ένα συμβατικό αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η συνήθης πρακτική είναι η λειτουργία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνεργασία με μία σύγχρονη γεννήτρια Diesel ή περισσότερες που να λειτουργούν παράλληλα. Η ύπαρξη της γεννήτριας Diesel συνεισφέρει στην διασφάλιση της αποδεκτής ποιότητας ισχύος ως υπηρεσίας στους καταναλωτές. Βασικές λειτουργίες της είναι η ρύθμιση της συχνότητας και της αέργου ισχύος του δικτύου. Στο διασυνδεδεμένο σύστημα, οι γεννήτριες Diesel χρησιμοποιούνται για επείγουσες καταστάσεις (πχ σε σφάλματα), για την κάλυψη των αιχμών και ως γεννήτριες σε αναμονή (standby) για περιπτώσεις νοσοκομείων, υδροηλεκτρικών σταθμών κλπ.

Οι μηχανές Diesel συνδέονται απευθείας με σύγχρονες γεννήτριες. Κάθε μηχανή Diesel ελέγχεται από ένα ρυθμιστή στροφών, με τη λειτουργία του οποίου διατηρείται η συχνότητα στην ονομαστική της τιμή. Η λειτουργία του ρυθμιστή συνίσταται στην προσαρμογή της παροχής του καυσίμου σε τιμή κατάλληλη, ώστε να διατηρούνται η ταχύτητα της μηχανής, η ταχύτητα της γεννήτριας και άρα, η ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου σε επιθυμητές τιμές. Τέλος, η ρύθμιση της αέργου ισχύος γίνεται από το ρυθμιστή τάσεως, ο οποίος ελέγχει τη σύγχρονη γεννήτρια.

Μικρές γεννήτριες Diesel κυμαίνονται σε τιμές ισχύος από 1 KVA μέχρι 10 KVA και χρησιμοποιούνται ως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη σε υπό κατασκευή περιοχές. Για τροφοδότηση σπιτιών, μικρών μαγαζιών και γραφείων οι γεννήτριες κυμαίνονται από 8 ως 30 kVA, ενώ για μεγάλα συγκροτήματα γραφείων φτάνουν μέχρι τα 2000 KVA.

Γεννήτριες Diesel πάνω από 5 MW χρησιμοποιούνται σε μικρούς σταθμούς παραγωγής ενώ μπορούν να λειτουργούν παράλληλα μέχρι και 20 γεννήτριες [33].

### 7.3 Μοντελοποίηση μηχανής Diesel

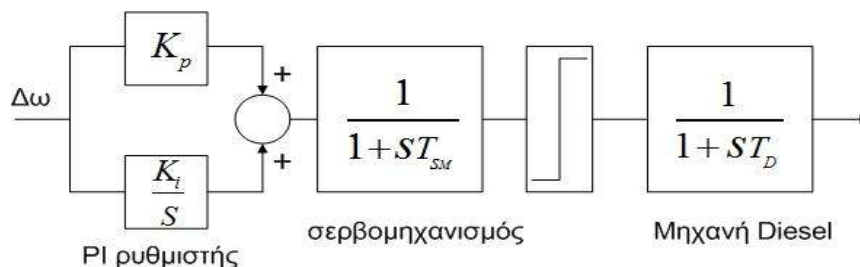
Η μηχανή Diesel έχει έντονα χαρακτηριστικά μη γραμμικής και μεταβαλλόμενου χρόνου λειτουργίας εξ’ αιτίας κυρίως των πολλαπλών κυλίνδρων από τους οποίους αποτελείται και της λειτουργίας του στροβιλοπληρωτή (turbocharger). Η συμπίεση-αποσυμπίεση των κυλίνδρων επιφέρει χαρακτηριστικό νεκρό χρόνο στο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ενώ η λειτουργία του στροβιλοπληρωτή επιφέρει επιπλέον δυναμική μη γραμμική συμπεριφορά. Συνεπώς, η μηχανή Diesel μοντελοποιείται με διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε προσομοίωσης.

Το μοντέλο της μηχανής Diesel που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται εκτός από τη ίδια τη μηχανή, από τον ρυθμιστή στροφών της και από τον σερβομηχανισμό. Η μηχανή Diesel αποτελείται από μία πρώτη τάξεως καθυστέρηση χρόνου που αναπαριστά την καθυστέρηση στην απόκριση της μηχανικής ροπής. Επιπλέον καθυστέρηση πρώτης τάξεως εισάγεται στην λειτουργία του σερβομηχανισμού. Ο ρυθμιστής στροφών αποτελείται από τον ολοκληρωτικό όρο και από το κέρδος στατισμού. Ο ολοκληρωτικός όρος περιλαμβάνει τον ολοκληρωτή και το ολοκληρωτικό κέρδος και η λειτουργία του είναι να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης στην συχνότητα. Ο όρος στατισμού περιλαμβάνει το κέρδος ρύθμισης. Τέλος στο μοντέλο περιλαμβάνεται και ένας περιοριστής της κίνησης του σερβομηχανισμού [31].

Πιο αναλυτικά οι παράμετροι του μοντέλου της μηχανής Diesel είναι:

- $T_d$  η χρονική καθυστέρηση της μηχανής Diesel
- $T_{SM}$  η χρονική καθυστέρηση του σερβομηχανισμού
- $K_i$  το ολοκληρωτικό κέρδος
- $K_p$  το αναλογικό κέρδος

Τελικά το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση για την μηχανή Diesel είναι το παρακάτω:



**Σχήμα 105 :** Μοντέλο μηχανής Diesel, που περιλαμβάνει έναν PI ρυθμιστή στροφών, μία χρονική καθυστέρηση του σεβομηχανισμού και μία χρονική καθυστέρηση της μηχανής

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου λήφθηκαν σύμφωνα με τα στοιχεία μηχανών Diesel που χρησιμοποιούνται ευρέως στα ελληνικά νησιωτικά συστήματα και είναι ως εξής :

$$T_d = 0,7 \text{ sec}$$

$$T_{SM} = 0,1 \text{ sec}$$

$$K_i = 2$$

$$K_p = 10$$

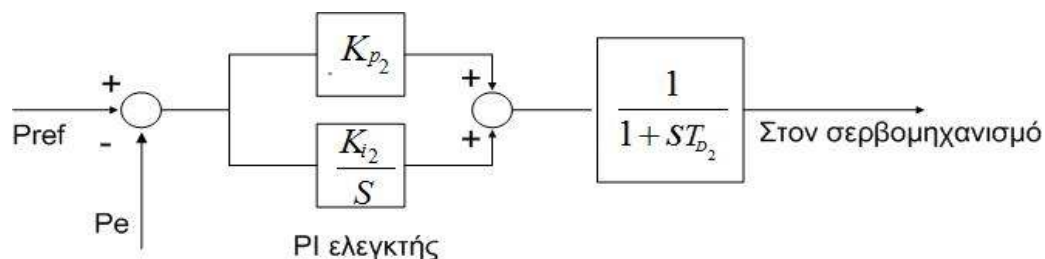
$$H = 2 \text{ sec}$$

$$T_{\max} = 1,1$$

$$T_{\min} = 0$$

Με τον αναλογικό όρο επιτυγχάνεται ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος ενώ με τον ισόχρονο (ολοκληρωτικό) επιτυγχάνεται επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική. Λόγω, όμως, των ειδικών απαιτήσεων ρύθμισης στροφών από την μηχανή Diesel και της ανάγκης να περιορίζεται η ισχύς της, δευτερογενώς, ο έλεγχος της ισχύος της θα γίνεται και από έναν εξωτερικό βοηθητικό βρόγχο. Με τον εξωτερικό βρόγχο, το σήμα σφάλματος της ισχύος εξόδου ενισχύεται και ολοκληρώνεται από έναν δεύτερο PI ελεγκτή και υπερτίθεται στο σήμα εντολής κίνησης στον σερβομηχανισμό, με μία αρκετά μεγάλη χρονική καθυστέρηση. Η λειτουργία αυτή θα αναλυθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο 9.

Το μοντέλο του εξωτερικού βρόγχου ελέγχου της ισχύος της μηχανής Diesel είναι το παρακάτω :



**Σχήμα 106 : Μοντέλο εξωτερικού βρόγχου ελέγχου της μηχανής Diesel**

Όπου, οι τιμές για τον αναλογικό όρο ( $K_{p2}$ ), για τον ολοκληρωτικό όρο ( $K_{i2}$ ) και την χρονική καθυστέρηση  $T_{D2}$ , μετά από δοκιμές βρέθηκαν:

$$K_{p2} = 0,5$$

$$K_{i2} = 0,4$$

$$T_{D2} = 25 \text{ sec}$$

## **8 Ανεμογεννήτρια**

---

### **8.1 Γενικά**

---

Η ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω των ανεμογεννητριών αν επιτραπεί η διέλευσή του από κινούμενα πτερύγια τα οποία κατά την περιστροφή τους εξασκούν ροπή σε έναν δρομέα και μέσω των γεννητριών παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

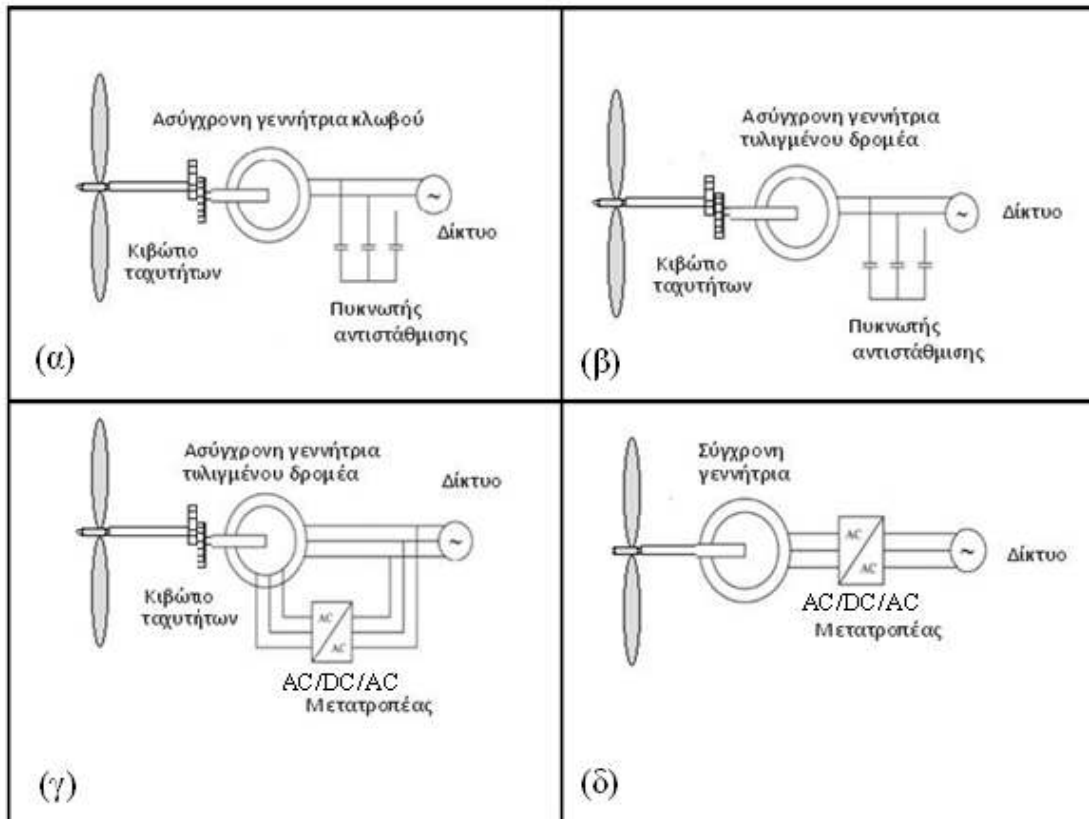
Τα βασικά υποσυστήματα μίας ανεμογεννήτριας είναι :

- Το αεροδυναμικό (δρομέας)
- Το μηχανικό (σύστημα μετάδοσης κίνησης)
- Το ηλεκτρικό (γεννήτρια, μετατροπείς ισχύος)
- Οι διατάξεις αντιστάθμισης και τα φίλτρα
- Οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας (διακόπτης ισχύος, ηλεκτρονόμοι προστασίας, σύστημα ομαλής εκκίνησης – soft starter κλπ)
- Ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης
- Τα συστήματα ελέγχου ( το συνολικό σύστημα εποπτείας και τα επιμέρους συστήματα ελέγχου : pitch control, yaw control και μετατροπέων ισχύος και γεννήτριας)

Οι ανεμογεννήτριες ανάλογα με την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους διακρίνονται σε διάφορους τύπους, από τους οποίους οι συνηθέστεροι είναι:

1. Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, απ’ ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (σχήμα 105.α)
2. Περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη λειτουργία τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης, απ’ ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (σχήμα 105.β)
3. Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (σχήμα 105.γ)
4. Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη (σχήμα 105.δ)





**Σχήμα 107 : Επικατέστερες διαμορφώσεις ανεμογεννητριών**

Στις Α/Γ σταθερών στροφών τύπου κλωβού δεν υπάρχει δυνατότητα της ρύθμισης των στροφών της ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου οπότε οι διακυμάνσεις του ανέμου μεταφέρονται αντίστοιχα στην μηχανική ροπή του δρομέα και άρα στην ισχύ εξόδου. Επίσης δεν υπάρχει η δυνατότητα της ρύθμισης της αέργου ισχύος που ανταλλάσσει με το δίκτυο. Τα πλεονεκτήματα των Α/Γ σταθερών στροφών είναι η απλότητα στην κατασκευή (άρα και μειωμένες ανάγκες συντήρησης) το μικρότερο κόστος λόγω της γεννήτριας τύπου κλωβού και της απουσίας μετατροπέων ισχύων.

Σχετικά με τις υπόλοιπες διαμορφώσεις, στις Α/Γ τυλιγμένου δρομέα παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου της ηλεκτρικής ροπής μέσω μεταβαλλόμενης αντίστασης του δρομέα ενώ οι Α/Γ μεταβλητών στροφών (οι πιο διαδεδομένες) αξιοποιούν βέλτιστα την αιολική ενέργεια με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αυξημένο βαθμό απόδοσης [6].

## 8.2 Ταχύτητα ανέμου

### 8.2.1 Χαρακτηριστικά του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μέγεθος κατά μέτρο και κατεύθυνση. Αποτελείται από την μέση ταχύτητα και μία τυρβώδη συνιστώσα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_w(t) = \bar{V}_w + v(t) \quad (8.1)$$

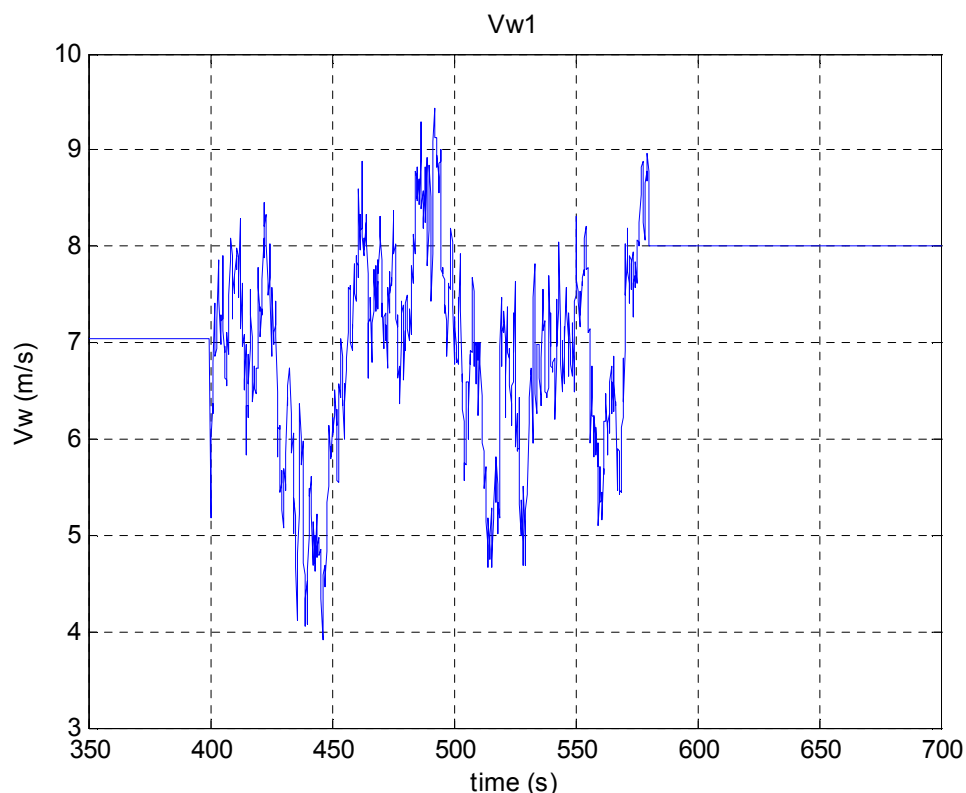
όπου  $V_w(t)$  η ταχύτητα του ανέμου  
 $\bar{V}_w$  η μέση ταχύτητα  
 $v(t)$  η τυρβώδης συνιστώσα

Η μέση ταχύτητα, σύμφωνα με την οποία καθορίζεται και η ενεργειακή απόδοση, είναι συνήθως η μέση ωριαία τιμή. Επίσης ακολουθεί την κατανομή Weibull.

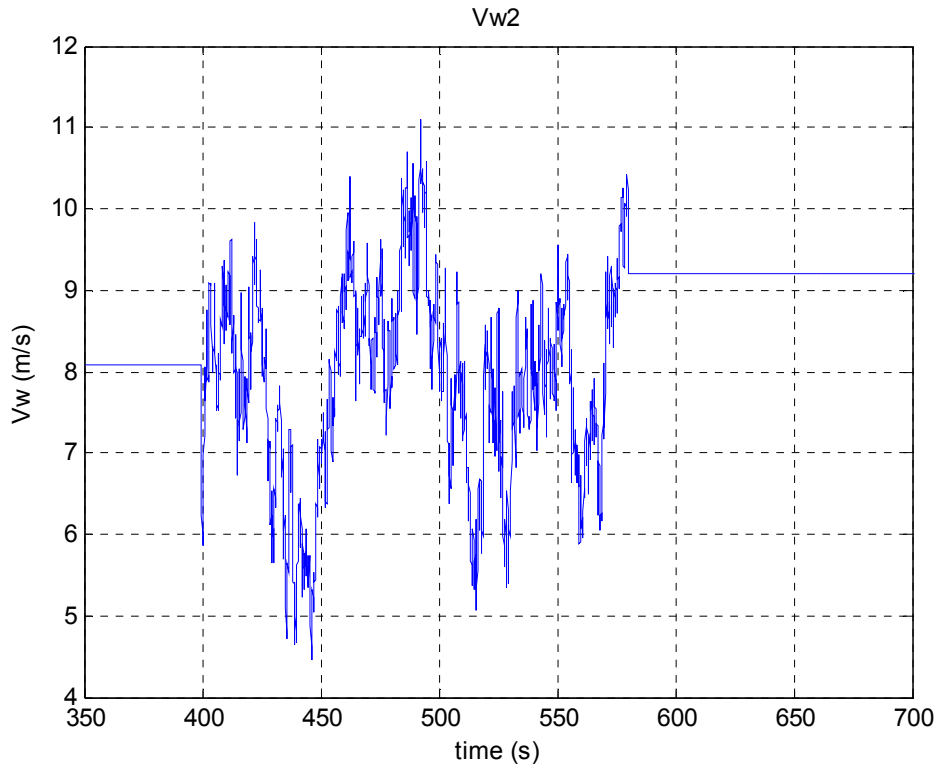
Η τυρβώδης συνιστώσα οφείλεται στις ταχείες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και επηρεάζει την ποιότητα ισχύος και τα κοπωτικά φορτία. Αναφέρεται ότι η τυρβώδης συνιστώσα περιγράφεται από το φάσμα τύπου von Karman [2] [6].

### 8.2.2 Χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο χρονοσειρές ανέμου, οι  $V_{w1}$  και  $V_{w2}$  :



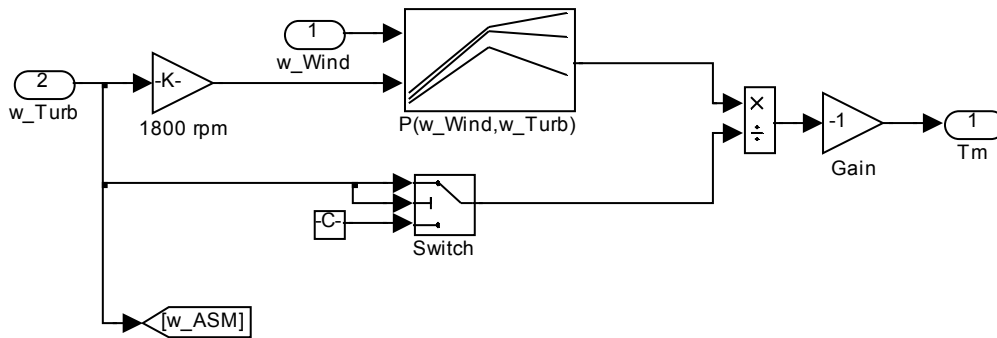
**Σχήμα 108 : Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου Vw1**



**Σχήμα 109 : Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου Vw2**

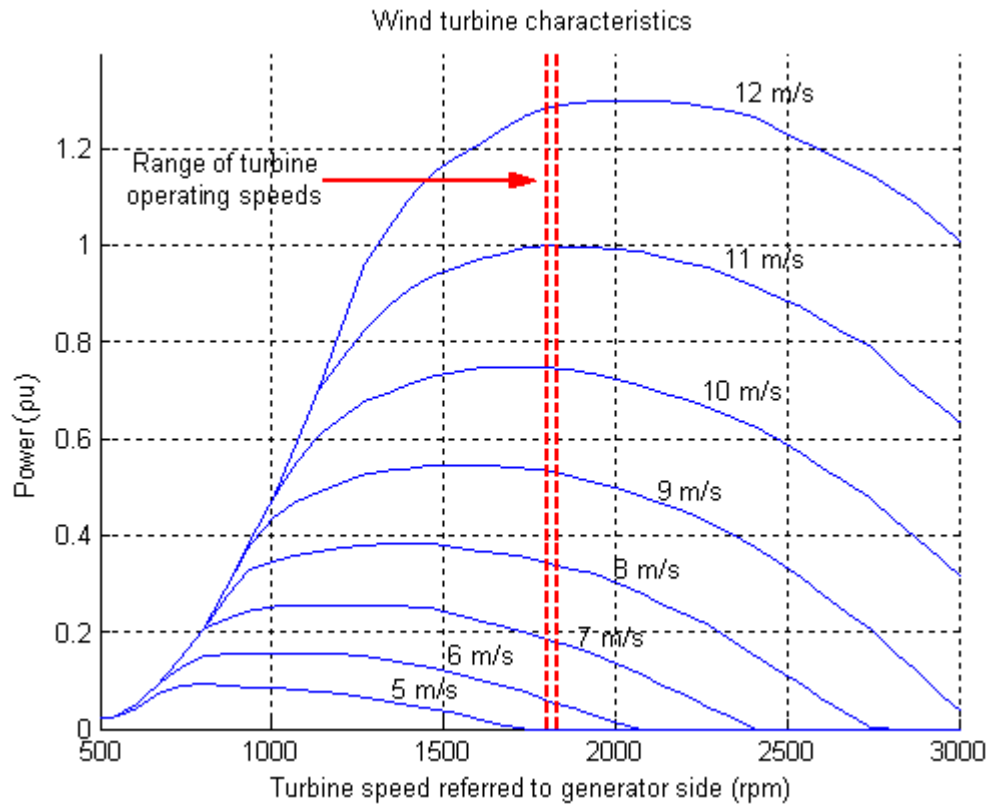
### 8.3 Μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους Α/Γ

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε Α/Γ τύπου κλωβού σταθερών στροφών. Το μοντέλο του αεροδυναμικού και του μηχανικού μέρους της ανεμογεννήτριας είναι το παρακάτω:



**Σχήμα 110 : Το μοντέλο του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας**

Χρησιμοποιείται μία καμπύλη δύο διαστάσεων η οποία υπολογίζει την μηχανική ροπή ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου και της ταχύτητας περιστροφής. Οι χαρακτηριστικές της ανεμογεννήτριας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



**Σχήμα 111 : Οι χαρακτηριστικές της ανεμογεννήτριας**

Η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε είναι ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού και ο συντελεστής αδράνειας είναι  $H=2$  s [34].

## **9 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίων λειτουργίας αυτόνομου νησιωτικού συστήματος**

---

### **9.1 Γενικά**

---

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο εξετάστηκε η δυναμική συμπεριφορά των υδροστροβίλων, με χρήση μη γραμμικών μοντέλων (κυματικό και μη κυματικό) για το υδραυλικό μέρος και απλουστευμένων μοντέλων για το ηλεκτρικό μέρος, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν τα μεταβατικά φαινόμενα των γεννητριών. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω του λογισμικού SIMULINK/MATLAB, διαφόρων σεναρίων δυναμικής λειτουργίας ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος και εξετάζεται η συνεργασία των υδροστροβίλων με άλλες πηγές ενέργειας και η ικανότητά τους να διατηρούν την συχνότητα του συστήματος εντός αποδεκτών ορίων. Για την προσομοίωση, χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά μοντέλα για όλες τις συνιστώσες. Συγκεκριμένα, για το υδραυλικό μέρος χρησιμοποιήθηκε το κυματικό μοντέλο. Τα μοντέλα της μηχανής Diesel και των ανεμογεννητριών είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 7 και 8. Για το ηλεκτρικό μέρος, χρησιμοποιήθηκαν: τα μη γραμμικά μοντέλα 6<sup>ης</sup> τάξεως για τις σύγχρονες γεννήτριες (των Diesel και των υδροστροβίλων) και τις ασύγχρονες (ανεμογεννήτριες), το σύστημα διέγερσης και το φορτίο, όπως περιγράφησαν στο κεφάλαιο 4. Οι τιμές για τις παραμέτρους και η διαστασιολόγηση των διαφόρων συνιστωσών έχουν ληφθεί από το νησιωτικό αυτόνομο σύστημα της Ικαρίας όπως αυτό διαμορφώνεται από τον υπό κατασκευή υβριδικό σταθμό παραγωγής – αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεταβλητότητα του ανέμου μεταφέρεται στο ηλεκτρικό μέρος μέσω των ανεμογεννητριών γεγονός που σε σταθερό φορτίο απαιτεί ανάλογη συμπεριφορά (αντίθετης κατεύθυνσης) από κάποια ελεγχόμενη πηγή ενέργειας. Επίσης, οι ελεγχόμενες πηγές ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν βηματικά την αιολική ισχύ, σε περίπτωση που αυτή χαθεί αν ανοίξουν οι διακόπτες των ανεμογεννητριών (σε πολύ υψηλή ταχύτητα ανέμου, σφάλμα, κλπ). Συνεπώς, η εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος, συνίσταται στην προσομοίωση δύο περιπτώσεων δυναμικής λειτουργίας:

- Το Α/Π παράγει ηλεκτρική ισχύς με μεγάλη μεταβλητότητα, και οι ελεγχόμενες πηγές ενέργειας ρυθμίζουν την συχνότητα
- Το Α/Π τίθεται ακαριαία εκτός (μέσω ανοίγματος των διακοπών) και οι ελεγχόμενες πηγές ενέργειας καλούνται να παραλάβουν το φορτίο του διατηρώντας την συχνότητα το δυνατό κοντά στην ονομαστική τιμή

Αρχικά, προσομοιώνεται η δυναμική συμπεριφορά των υδροστροβίλων όταν αυτοί λειτουργούν παράλληλα με Αιολικό πάρκο. Τόσο για το υδραυλικό μέρος όσο και για το ηλεκτρικό χρησιμοποιούνται πλήρως μη γραμμικά μοντέλα όπως αυτά έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, τα οποία περιγράφουν και προσομοιώνουν την δυναμική συμπεριφορά των πραγματικών συστημάτων. Τα παραπάνω

αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της λειτουργίας μονάδων Diesel παράλληλα με αιολικό πάρκο. Τέλος, οι παραπάνω συνιστώσες παραγωγής (ΜΥΣ, Diesel, Ανεμογεννήτριες) συνδυάζονται σε τρία σενάρια λειτουργίας και εξετάζεται η δυναμική τους συνεργασία και η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί την συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.

## 9.2 Υδροστρόβιλοι παράλληλα με ανεμογεννήτριες

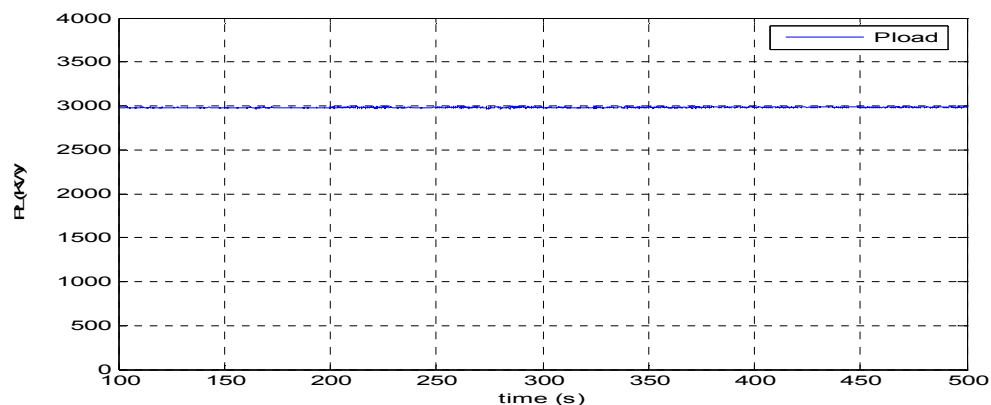
### 9.2.1 Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών

Καταρχήν, εξετάζεται η δυνατότητα των υδροστροβίλων να ρυθμίζουν τη συχνότητα του αυτόνομου συστήματος όταν σε αυτό λειτουργεί αιολικό πάρκο. Το σενάριο το οποίο προσομοιώθηκε με το λογισμικό SIMULINK/MATLAB αποτελείται από τα παρακάτω:

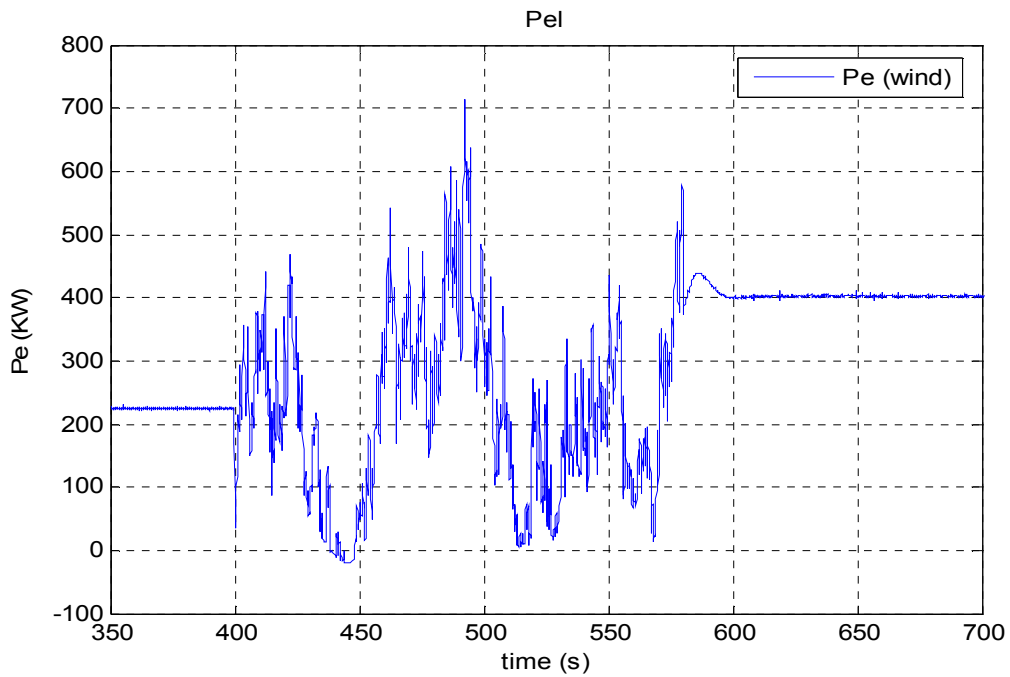
- Δύο υδροστρόβιλους των  $P_H=1,55$  MW ο καθένας. Οι υδροστρόβιλοι είναι μεταξύ τους υδραυλικά συζευγμένοι και απευθείας συνδεδεμένοι στους άξονες γεννητριών έκτυπων πόλων ισχύος 1,9 MVA η κάθε μία
- Α/Γ συνολικής ισχύος  $P_W=1,2$  MW με ασύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο, και με χρονοσειρές ανέμου την  $V_{w1}$  και την  $V_{w2}$
- Φορτίο  $P_L=3$  MW

Οι υδροστρόβιλοι κάνουν ρύθμιση συχνότητας μέσω των ρυθμιστών στροφών τους, οι οποίοι περιλαμβάνουν: αναλογικό όρο, μεταβατικό στατισμό και ισόχρονη ρύθμιση, ώστε να επαναφέρουν την συχνότητα στα 50 Hz. Οι ρυθμιστές αυτοί παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 3.6 και είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 6.

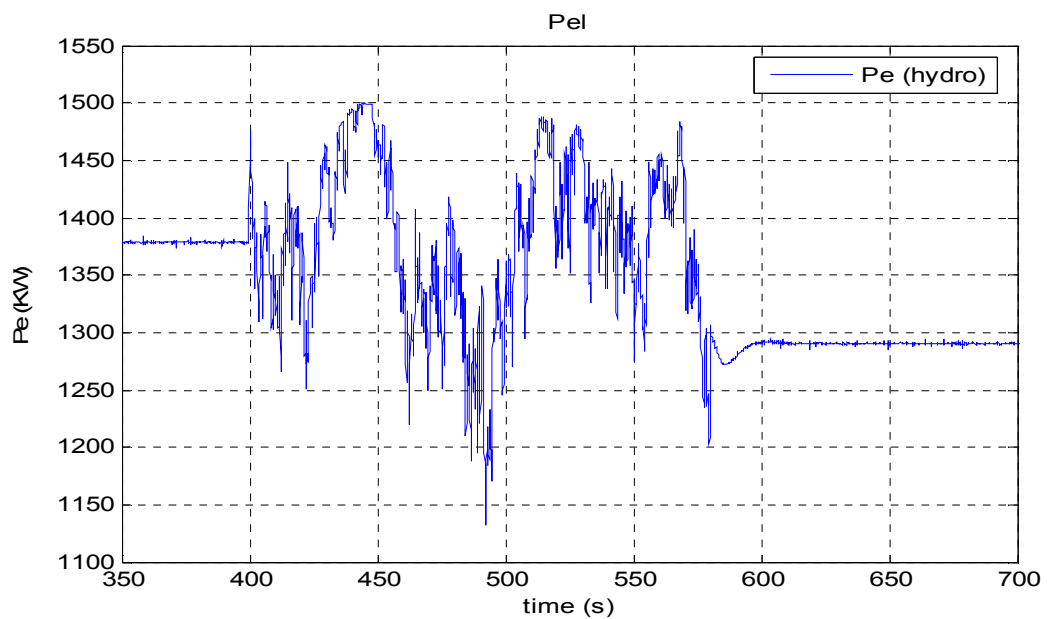
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρονοσειρά ανέμου την  $V_{w1}$  φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



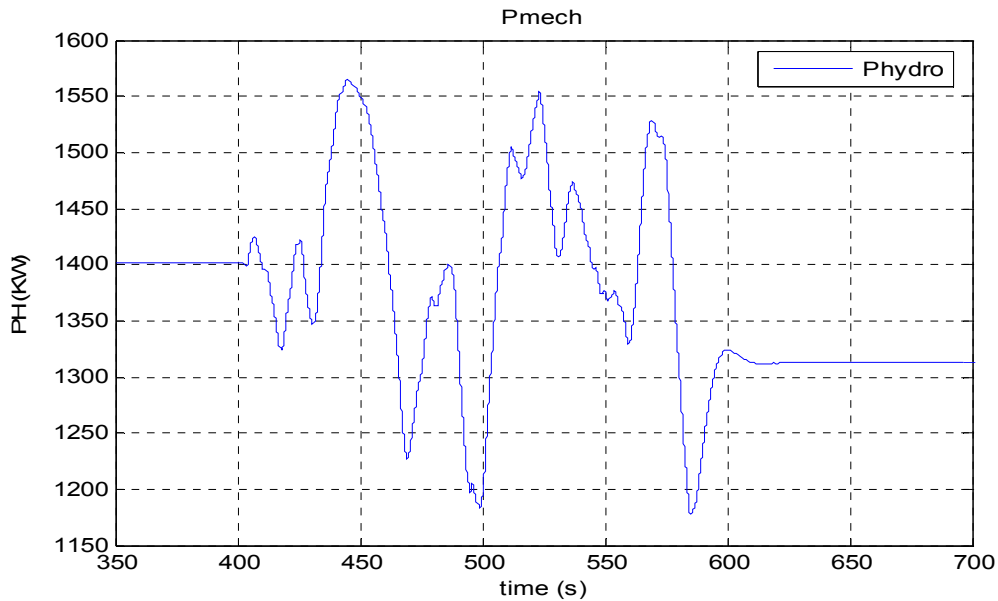
Σχήμα 112 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Φορτίο συστήματος, 3 MW



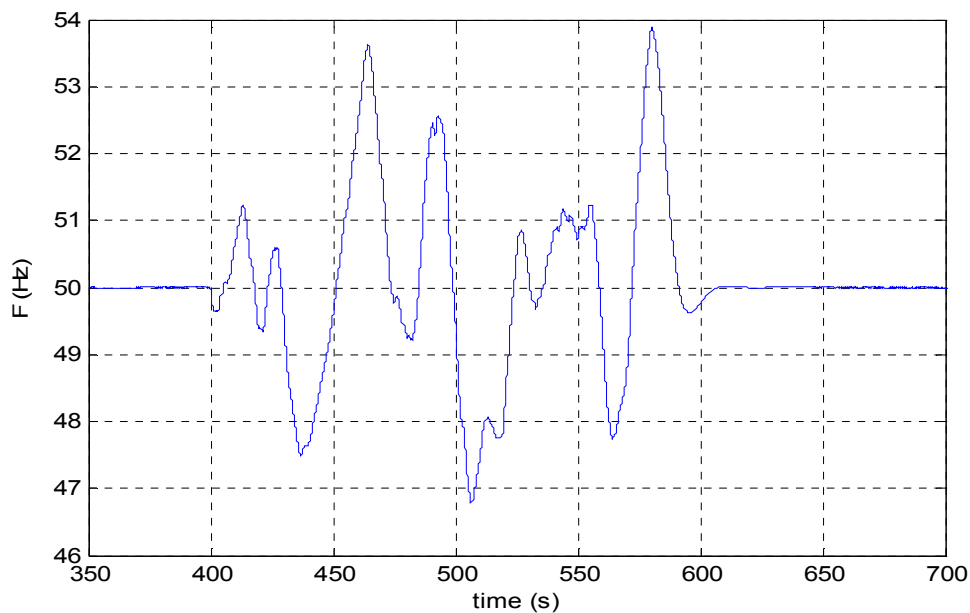
Σχήμα 113 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με  $V_{w1}$



Σχήμα 114 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς του ενός Υδροστροβίλου, με  $V_{w1}$



Σχήμα 115 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Μηχανική ισχύς του ενός υδροτροβίλου, με  $V_{w1}$

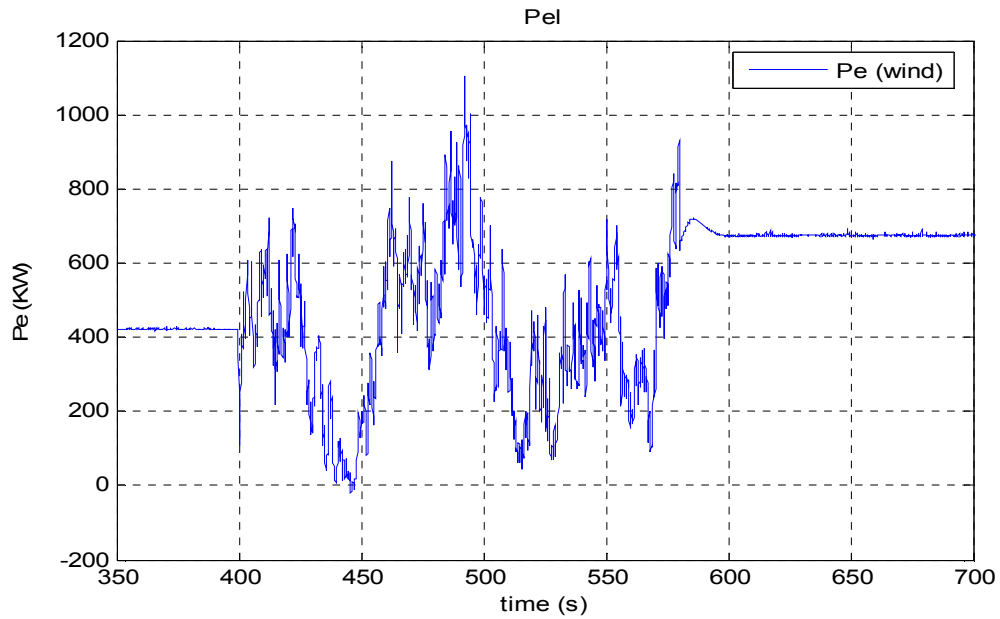


Σχήμα 116 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με  $V_{w1}$

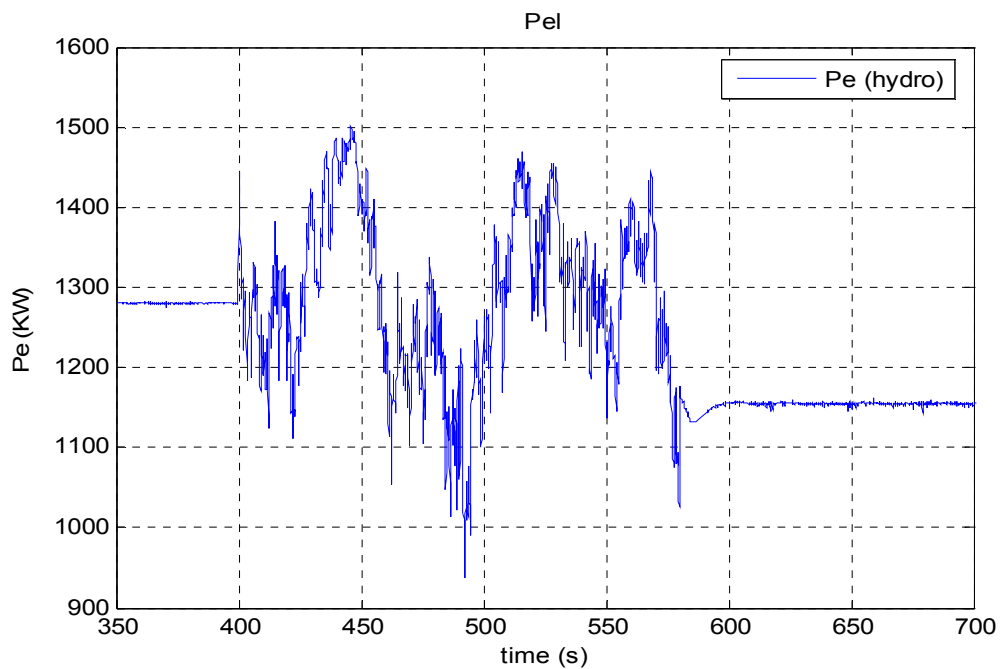
Από τα παραπάνω αποτελέσματα της προσομοίωσης γίνεται σαφές ότι ο ΜΥΗΣ αδυνατεί να αποκρίνεται γρήγορα στις μεταβολές της ισχύος των ανεμογεννητριών και να διατηρείται η συχνότητα εντός των ορίων:  $49 < f < 51$  Hz. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της χρονοσειράς ανέμου  $V_{w1}$ , η συχνότητα κυμαίνεται από 47 μέχρι 54 Hz, λειτουργία που δεν είναι αποδεκτή.

Για την περίπτωση της χρονοσειράς ανέμου  $V_{w2}$ , η προσομοίωση είχε τα εξής αποτελέσματα:

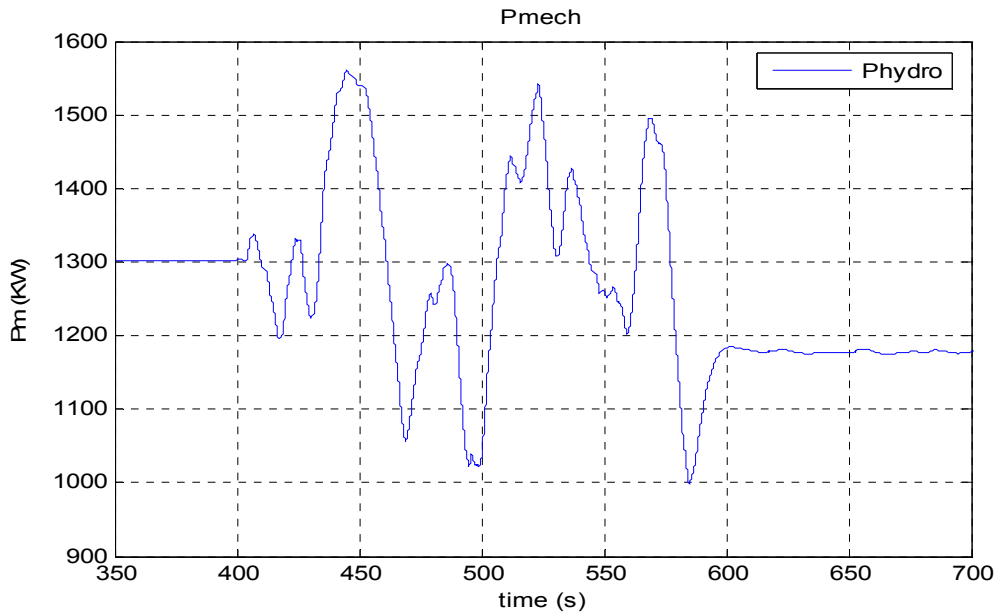




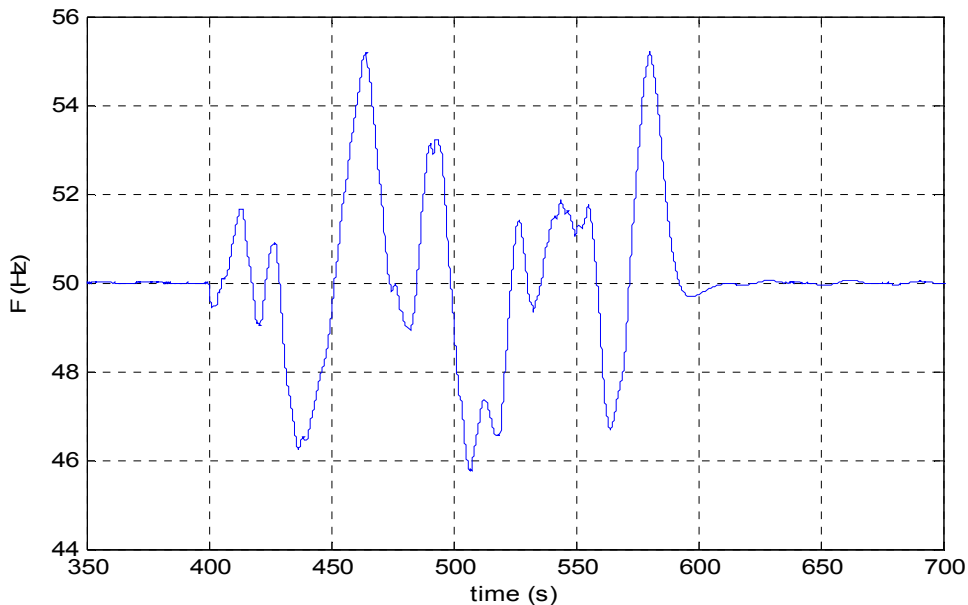
Σχήμα 117 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με  $V_{w2}$



Σχήμα 118 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς του ενός υδροτροβίλου, με  $V_{w2}$



Σχήμα 119 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- μηχανική ισχύς του ενός υδροστροβίλου, με  $V_{w2}$

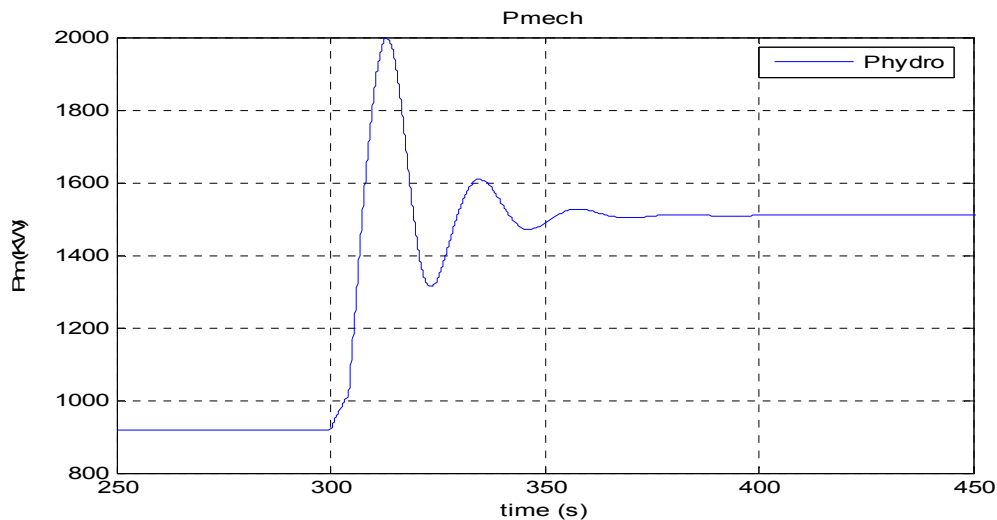


Γράφημα 1 : Προσομοίωση - ΜΥΗΣ μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με  $V_{w2}$

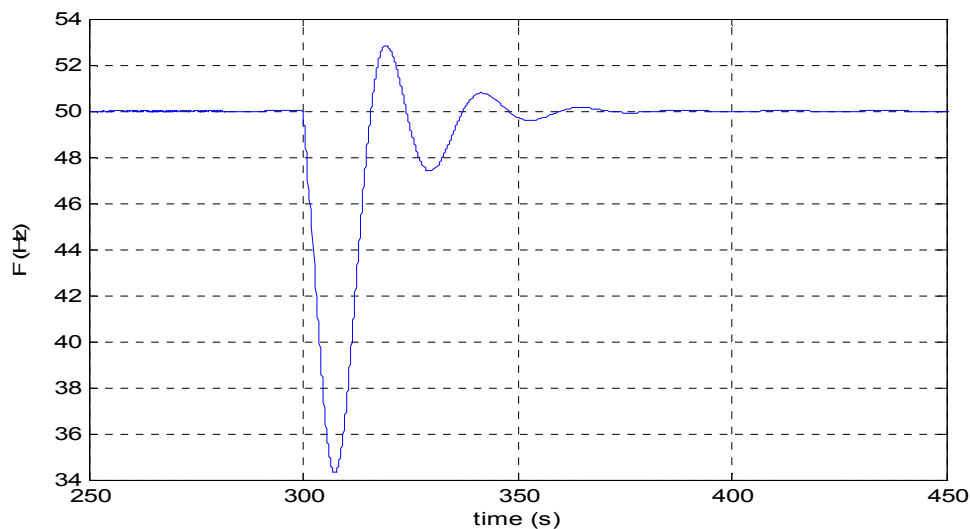
Όπως και για την περίπτωση ανέμου  $V_{w1}$ , ο ΜΥΗΣ αδυνατεί να ρυθμίζει την συχνότητα εντός των αποδεκτών ορίων. Με την χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$  τα αποτελέσματα είναι λίγο χειρότερα και συγκεκριμένα περίπου κατά 1 Hz.

### 9.2.2 Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε το άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών με βηματική μεταβολή του φορτίου κατά 1,2 MW. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την παραπάνω περίπτωση φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα:



Σχήμα 120 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία ΜΥΗΣ - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Μηχανική ισχύς του ενός υδροστροβίλου



Γράφημα 2 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία ΜΥΗΣ - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Συχνότητα του συστήματος

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι η συχνότητα του συστήματος, για την βηματική μεταβολή, έπεσε στα 34 Hz, συχνότητα πολύ χαμηλή. Συμπεραίνεται, ότι ο ΜΥΗΣ είναι χαρακτηριστικά αργός για να ακολουθεί τέτοιας ισχύος βήματα, σε αποδεκτούς χρόνους. Συγκεκριμένα, από την απόκριση ισχύος φαίνεται ότι για να αυξήσει την ισχύ του ο ΜΥΗΣ κατά το μέγεθος του βήματος απαιτούνται περίπου 15 sec, χρόνος αρκετά μεγάλος. Συνεπώς, οι ΜΥΗΣ δεν είναι αρκετά γρήγοροι στο να παραλαμβάνουν ταχείες μεταβολές του φορτίου τέτοιων μεγεθών.

### 9.3 Diesel με ανεμογεννήτριες

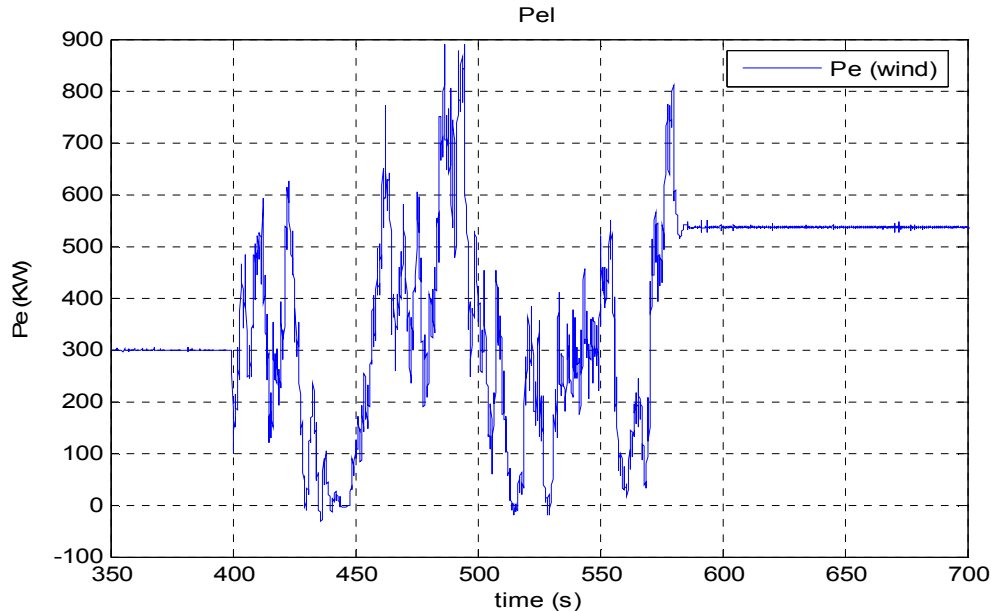
#### 9.3.1 Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών

Στη συνέχεια εξετάζεται η δυνατότητα μηχανών Diesel να κάνουν ρύθμιση συχνότητας όταν στο αυτόνομο σύστημα είναι συνδεδεμένο Α/Π. Το μοντέλο της μηχανής Diesel και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες της προσομοίωσης είναι αυτά όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6.

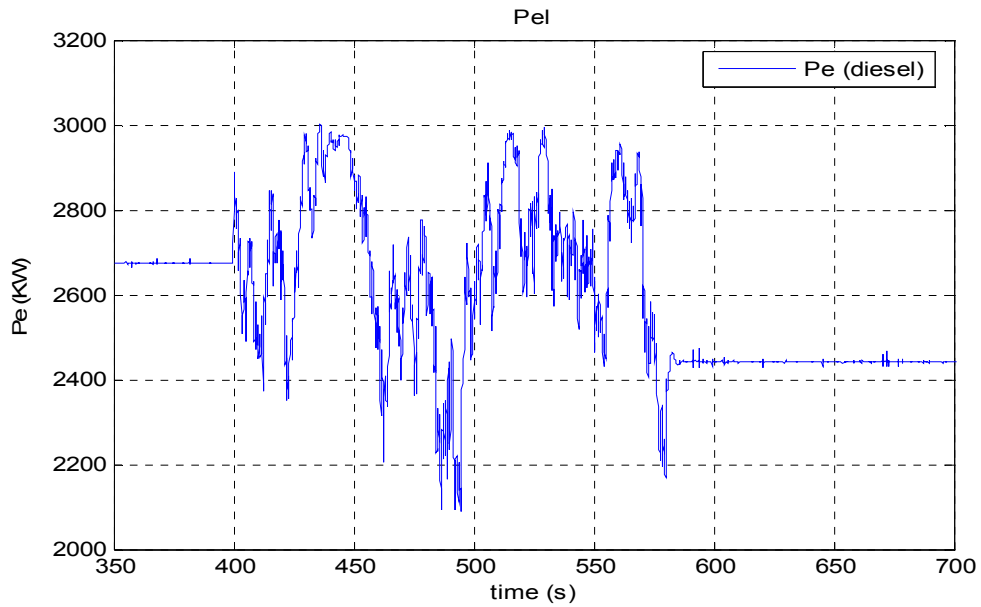
Το σενάριο το οποίο προσομοιώθηκε στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB αποτελείται από τα παρακάτω:

- Μηχανή Diesel ισχύος  $P_D=3$  MW η οποία είναι συνδεδεμένη σε σύγχρονη γεννήτρια.
- Α/Γ συνολικής ισχύος  $P_W=1,6$  MW με ασύγχρονη γεννήτρια και με χρονοσειρές ανέμου την  $V_{w1}$  και την  $V_{w2}$ .
- Φορτίο  $P_L=3$  MW

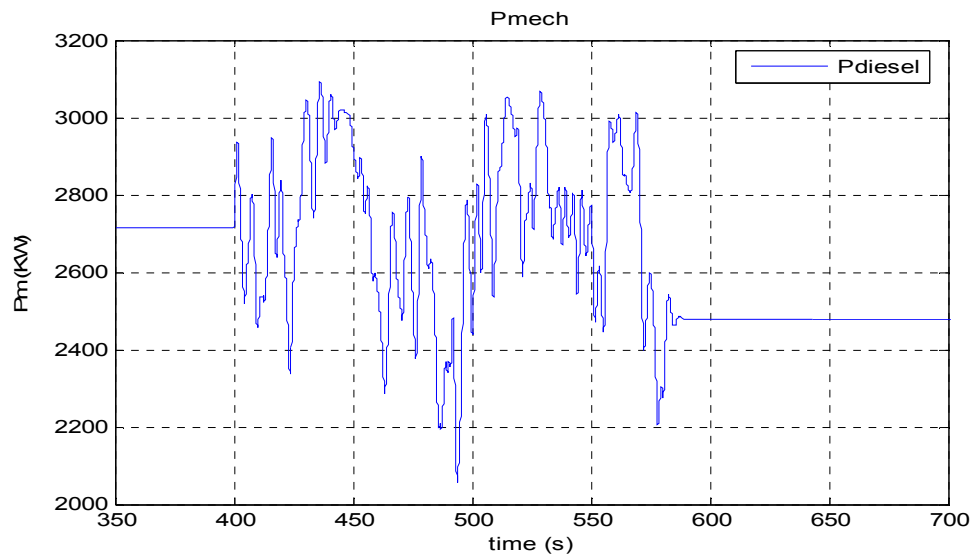
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το σενάριο αυτό και με χρονοσειρά ανέμου την  $V_{w1}$ , είναι τα παρακάτω:



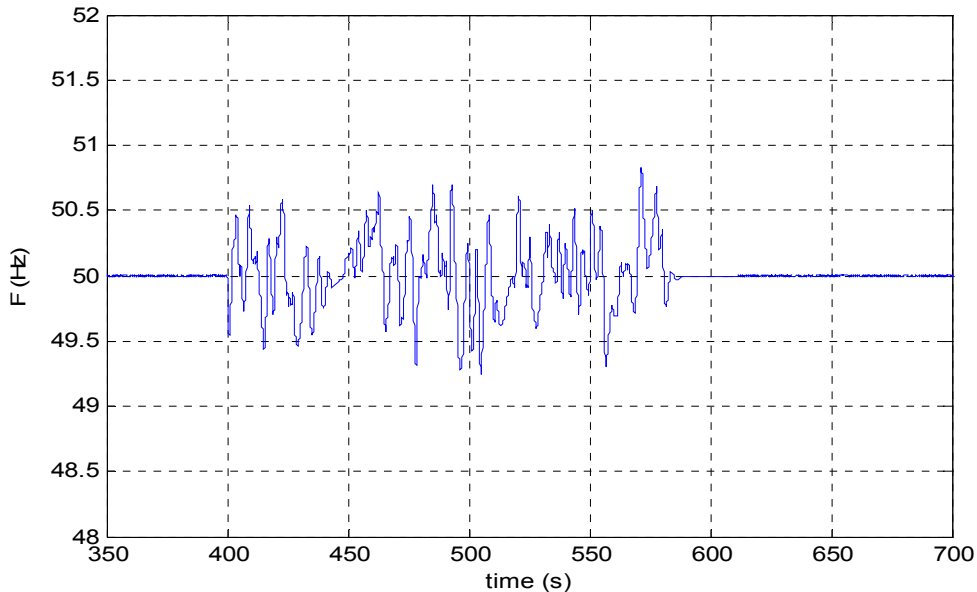
Σχήμα 121 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με  $V_{w1}$



Σχήμα 122: Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς Diesel, με  $V_{W1}$



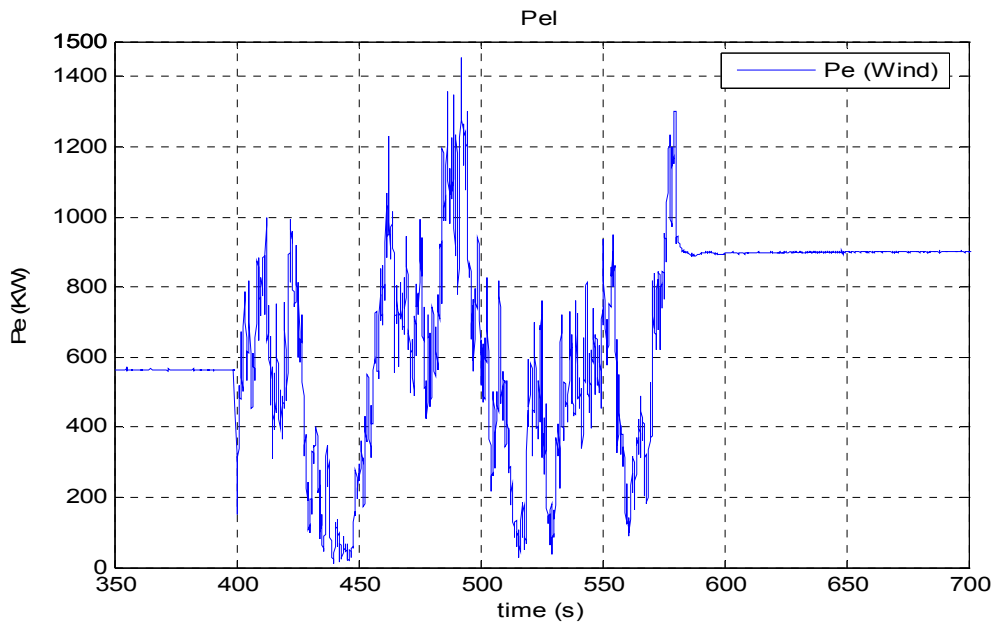
Σχήμα 123 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Μηχανική ισχύς Diesel, με  $V_{W1}$



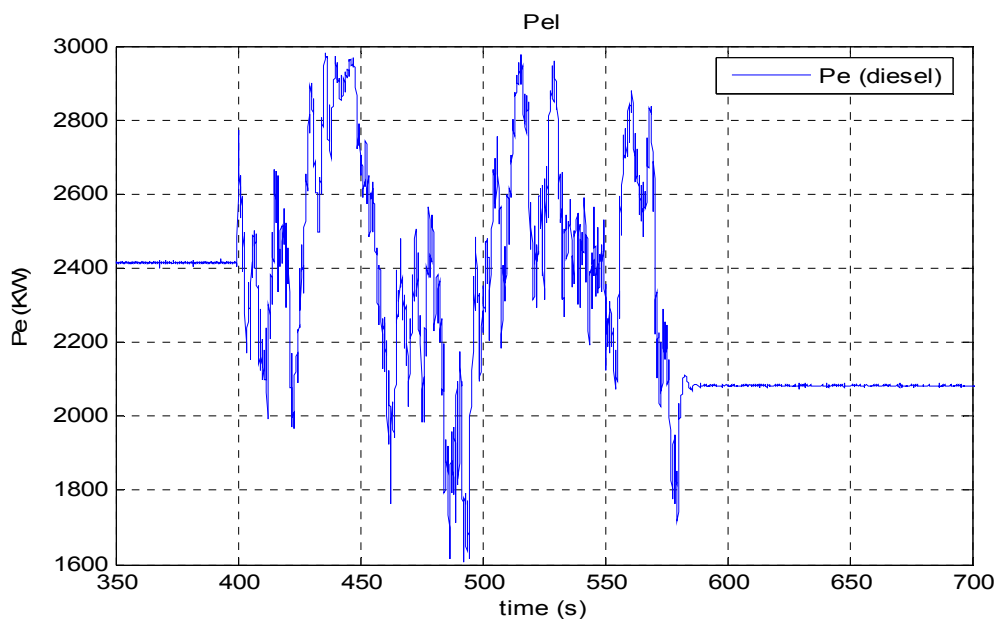
Σχήμα 124 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με  $V_{W1}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, οι μονάδες Diesel ισχύος 3 MW αποκρίνονται ταχύτατα, και ακολουθούν τις διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος διατηρώντας την συχνότητα μεταξύ των τιμών 49,5 Hz και 50,5 Hz.

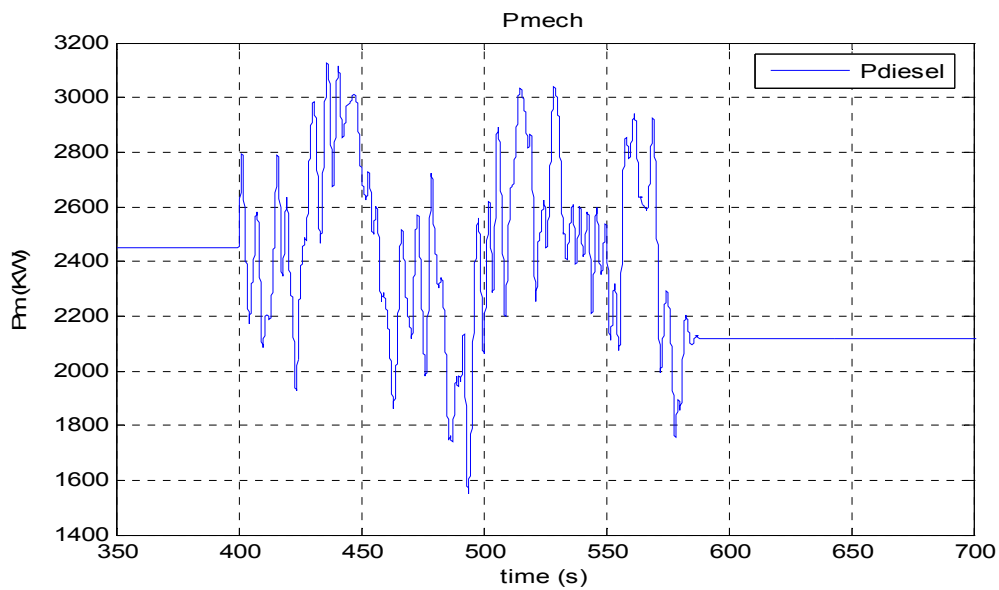
Στη συνέχεια εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά της μηχανής Diesel όταν αυτή λειτουργεί παράλληλα με Α/Π ισχύος 1,6 MW και με χρονοσειρά ανέμου την  $V_{w2}$ . Τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω:



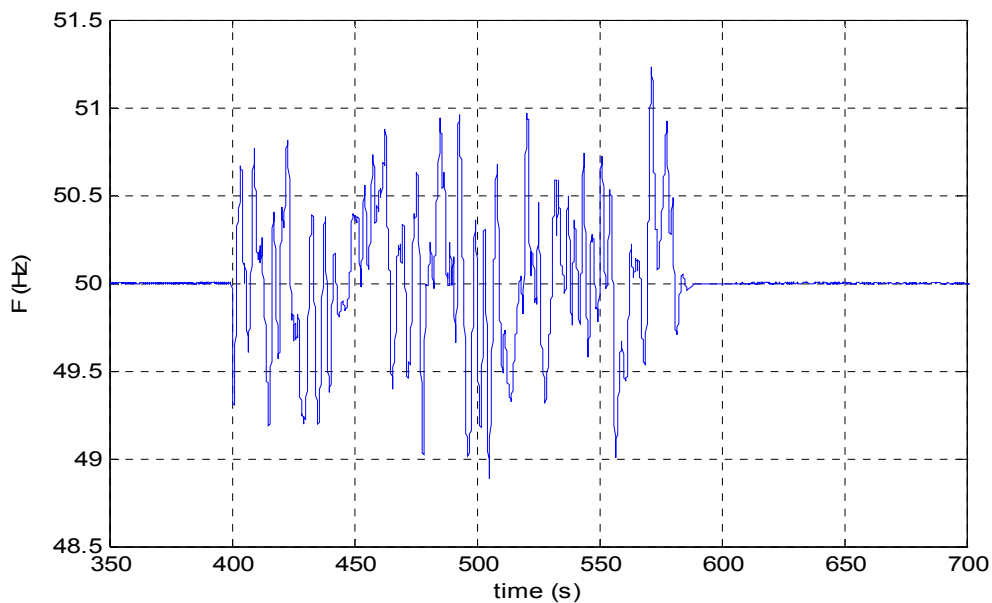
**Σχήμα 125 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας, με  $V_{w2}$**



**Σχήμα 126 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Ηλεκτρική ισχύς Diesel, με  $V_{w2}$**



Σχήμα 127 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Μηχανική ισχύς Diesel, με  $V_{w2}$



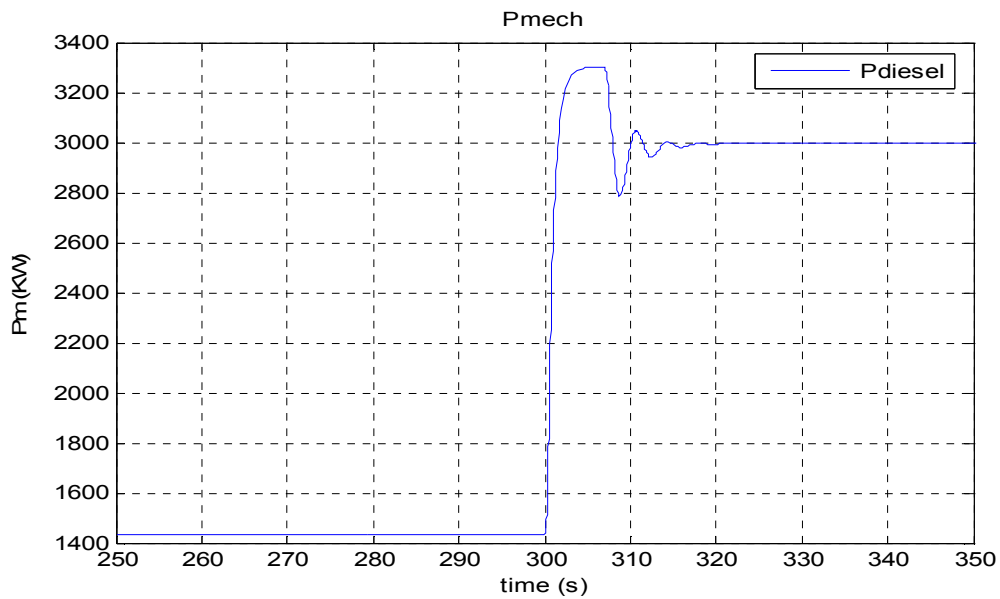
Σχήμα 128 : Προσομοίωση - Diesel μαζί με ανεμογεννήτρια- Συχνότητα συστήματος, με  $V_{w2}$

Με αυτές τις διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος (μεγαλύτερης ισχύος από την προηγούμενη περίπτωση) η συχνότητα του συστήματος κυμαίνεται από τα 49 Hz μέχρι τα 51 Hz. Παρατηρείται ότι η ρύθμιση της συχνότητας είναι πιο οριακή, πράγμα λογικό δεδομένης της μεγάλης ισχύος του αιολικού πάρκου και της συγκεκριμένης μεταβλητότητας του ανέμου.

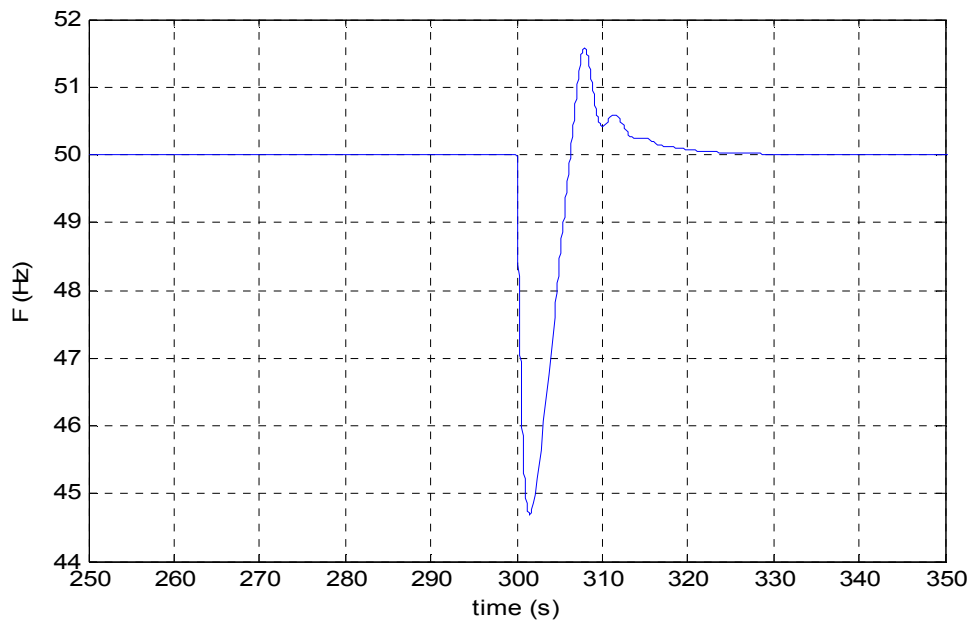
### 9.3.2 Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών

Παρακάτω, η μηχανή Diesel εξετάστηκε ως προς την συμπεριφορά της μετά από βηματικές μεταβολές του φορτίου κατά 1,6 και 1,2 MW. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής:

**Βηματική αύξηση του φορτίου από P=1,4 MW σε P=3 MW για t=300 sec**



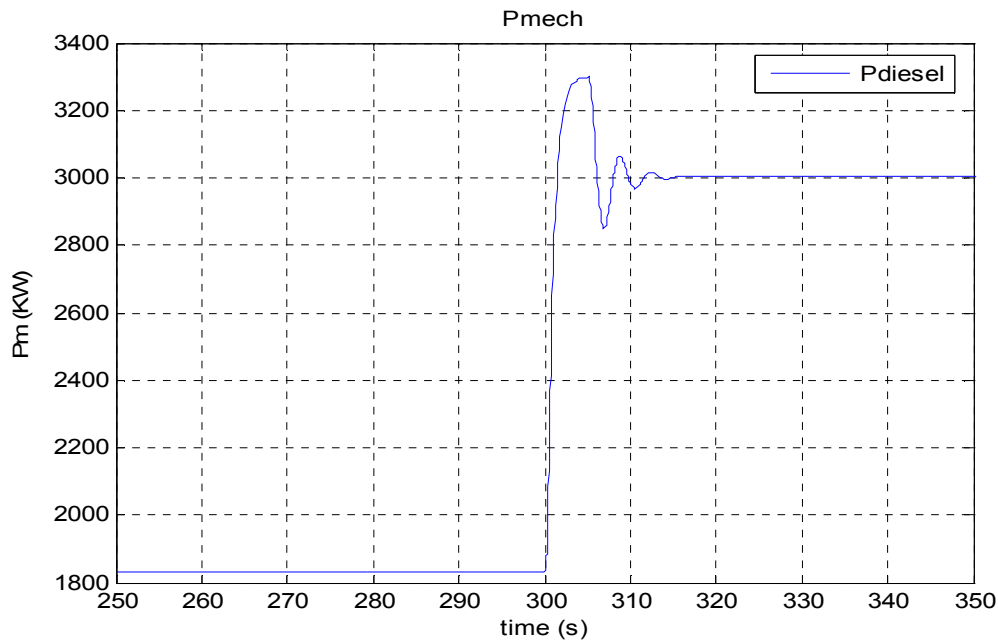
Σχήμα 129 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,6 MW του φορτίου – Μηχανική ισχύς του Diesel



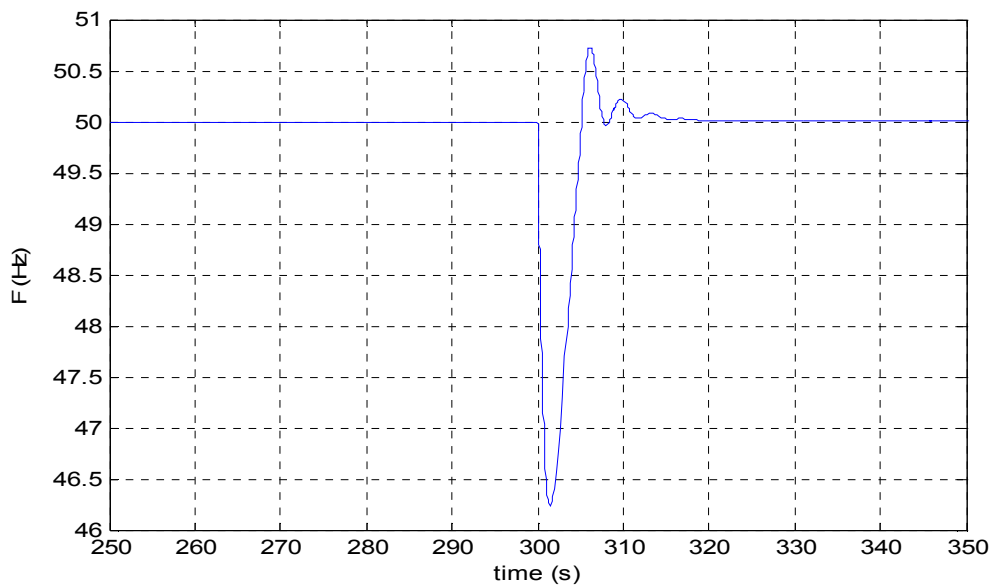
Σχήμα 130 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,6 MW του φορτίου – Συχνότητα συστήματος



**Βηματική αύξηση του φορτίου από P=1,8 MW σε P=3 MW για t=300 sec**



**Σχήμα 131 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Μηχανική ισχύς του Diesel**



**Σχήμα 132 : Προσομοίωση - Αυτόνομη λειτουργία Diesel - Βηματική αύξηση 1,2 MW του φορτίου – Συχνότητα συστήματος**

Για τις παραπάνω βηματικές μεταβολές (που προσομοιώνουν το άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου) η συχνότητα του συστήματος έπεσε στα 45 Hz για βήμα 1,6 MW και στα 46,3 Hz για βήμα ισχύος 1,2 MW.

## 9.4 Diesel, υδροστρόβιλοι και ανεμογεννήτριες μαζί

---

### 9.4.1 Γενικά

---

Από την εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς του ΜΥΗΣ και του Diesel γίνεται αντιληπτό ότι οι υδροστρόβιλοι αδυνατούν να ρυθμίζουν την συχνότητα του δικτύου, πράγμα που κάνουν οι Diesel. Συνεπώς, καθίσταται υποχρεωτική η παρουσία μονάδας ή μονάδων Diesel που μαζί με τον ΜΥΗΣ να διασφαλίζουν την ρύθμιση της συχνότητας του αυτόνομου συστήματος εντός του τιθέμενου ορίου των 49 HZ για κανονική λειτουργία.

Οι κανόνες που θα διέπουν την λειτουργία του αυτόνομου συστήματος, ορίζονται σύμφωνα με τις προτεραιότητες:

1. Αποδεκτή συχνότητα δικτύου
2. Το δυνατό μεγαλύτερη διείσδυση Α/Γ
3. Το δυνατό μεγαλύτερη συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ΜΥΗΣ

Λόγω της πρώτης προτεραιότητας, την ρύθμιση της συχνότητας θα πρέπει να την αναλαμβάνουν, πρωταρχικώς, οι μονάδες Diesel ως οι πιο ταχείες μονάδες. Όμως, εξαιτίας της ταχείας απόκρισής τους σε μεταβολές του φορτίου, τείνουν να φορτιστούν στο 100% της ισχύος τους γεγονός που θα τους περιορίζει την δυνατότητα να κάνουν ρύθμιση σε περεταίρω αύξηση του φορτίου ενώ δεν θα δίνεται η δυνατότητα στους ΜΥΗΣ να παραγάγουν το δυνατό περισσότερη ενέργεια. Συνεπώς, θα πρέπει δευτερογενώς να ρυθμίζονται οι μονάδες Diesel ώστε να περιορίζουν την ισχύ τους περίπου στο 0,6 α.μ. της φόρτισής τους, ώστε να έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν την συχνότητα και σε αύξηση και σε μείωση του φορτίου και να επιτρέπουν στον ΜΥΗΣ να παρακολουθεί σε μόνιμη κατάσταση την αύξηση του φορτίου.

Σχετικά με τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου της μηχανικής ισχύος του Diesel (κεφ.7), θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην κλίση με την οποία η μηχανή Diesel θα ‘μεταβιβάζει’ ισχύ στον ΜΥΗΣ. Αν η κλίση είναι αρκετά μεγάλη, δε θα προλαβαίνει ο ΜΥΗΣ να φορτίζεται και θα πέφτει η συχνότητα. Επίσης, όπως είναι αυτονόητο, η δευτερογενής ρύθμιση δεν θα πρέπει να επηρεάζει την ταχύτητα απόκρισης του Diesel πρωτογενώς, χαρακτηριστικό που επέβαλε, εν προκειμένω, την παρουσία του στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Αντίθετη λειτουργία θα έχει ο ΜΥΗΣ ο οποίος πρωτογενώς, λόγω της βραδύτερης απόκρισής του, θα ρυθμίζει την συχνότητα συμπληρωτικά των μονάδων Diesel και δευτερογενώς θα επαναφέρει την συχνότητα του αυτόνομου συστήματος στα 50 HZ. Άρα, εξετάζοντας το σύστημα δυναμικά, πρόκειται για μονάδα βάσης με μικρή συμμετοχή στην ρύθμιση της συχνότητας ενώ εξετάζοντάς το στατικά πρόκειται για μονάδα αιχμής. Επίσης, με την λειτουργία αυτή, πετυχαίνεται και η 3<sup>η</sup> προτεραιότητα, για μεγαλύτερη συνεισφορά του ΜΥΗΣ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την παραπάνω χαρακτηριστικά λειτουργίας, ο ΜΥΗΣ θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος, και εδώ, με ισόχρονη ρύθμιση καθώς είναι αυτός που θα επαναφέρει την συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.

Η αιολική διείσδυση, για δεδομένη συμμετοχή στην παραγωγή του ΜΥΗΣ (με 1,55 ή 3,1 MW ονομαστικής ισχύος) εξαρτάται από την ισχύ των μονάδων Diesel που είναι σε λειτουργία και από τα τεχνικά τους ελάχιστα. Το τεχνικό ελάχιστο του ΜΥΗΣ είναι στο 10% της ονομαστικής του ισχύος ενώ του Diesel λήφθηκε στο 50% για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αλλά με δυνατότητα να κατεβαίνει μέχρι το 30% σε μεταβατικές καταστάσεις.

Εκτός από την ικανότητα των μονάδων παραγωγής να διατηρούν τη συχνότητα λειτουργίας εντός των ορίων (49 έως 51 HZ), εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος σε απότομες απώλειες αιολικής ισχύος. Οι απώλειες αυτές προσομοιώθηκαν με βηματική αύξηση του φορτίου κατά την ονομαστική ισχύ του Α/Π. Σε αυτές τις βηματικές μεταβολές, το όριο της υποσυχνότητας είναι στα 45 Hz, αρκετά κάτω από τα 49 Hz, καθώς πρόκειται για επείγουσες μεταβατικές καταστάσεις.

Το φορτίο θα πρέπει να είναι περίπου κατά 20% τουλάχιστον μικρότερο από το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων του ΜΥΗΣ και του Diesel. Ο περιορισμός αυτός είναι απαραίτητος εφόσον η μονάδα Diesel είναι ρυθμισμένη να επανέρχεται μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση στο 0,6 α.μ. της ονομαστικής της ισχύος (για να μπορεί να κάνει ρύθμιση και να ακολουθεί τις βηματικές μεταβολές). Είναι απαραίτητο και για έναν λόγο ακόμα: οι υδροστρόβιλοι δεν θα πρέπει να λειτουργούν σε πλήρες φορτίο γιατί έτσι δεν θα έχουν τη δυνατότητα να ακολουθούνε την αύξηση του φορτίου (ή μείωση της αιολικής ισχύος) σε δεύτερο χρόνο (μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση).

#### 9.4.2 Σενάριο 1<sup>ο</sup>

##### 9.4.2.1 Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών

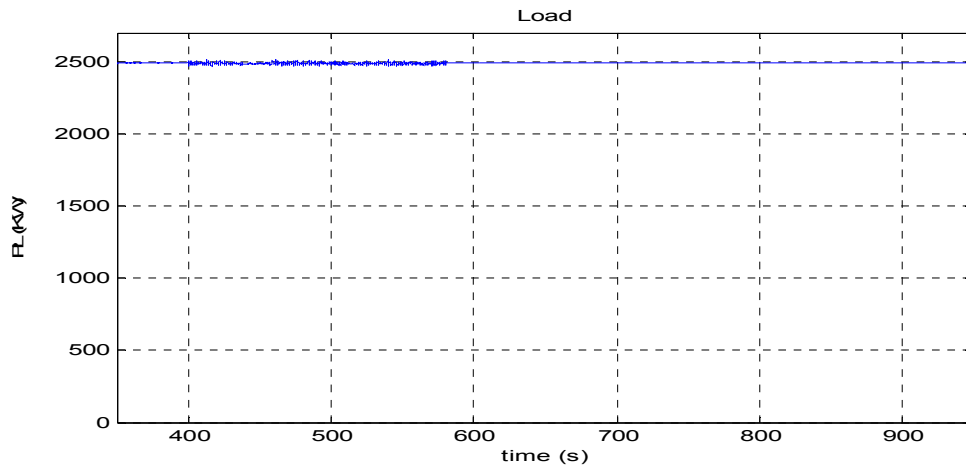
Το πρώτο σενάριο που εξετάστηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Σενάριο 1	Ισχύς (MW)
Phydro	1,55
Pwind	1,2
Pdiesel	1,5
Pload	2,5

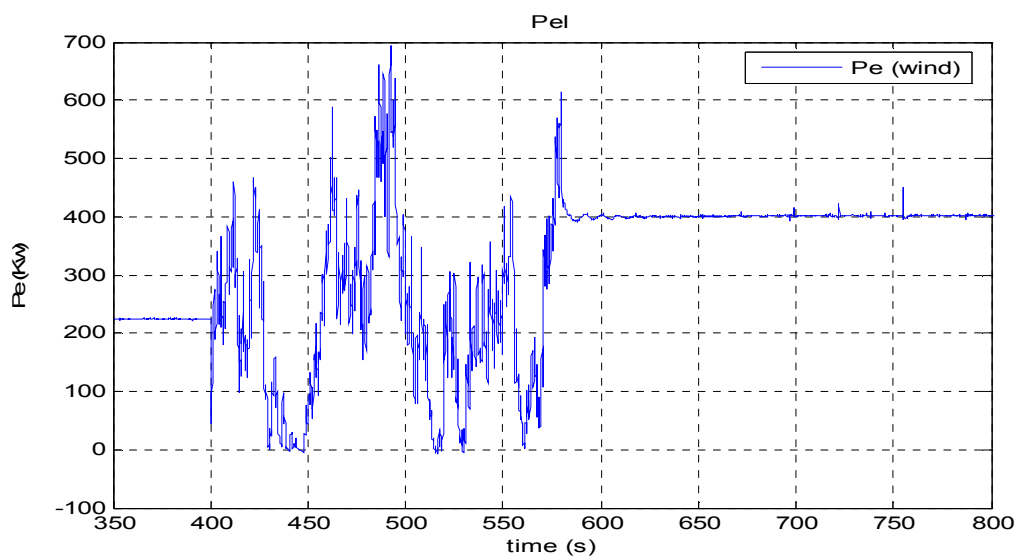
Πίνακας 15: Σενάριο 1

Αφορά τη λειτουργία ενός εκ των δύο υδροστρόβιλων (1,55 MW), μαζί με μία μονάδα Diesel ισχύος 1,5 MW και το Α/Π ισχύος 1,2 MW.

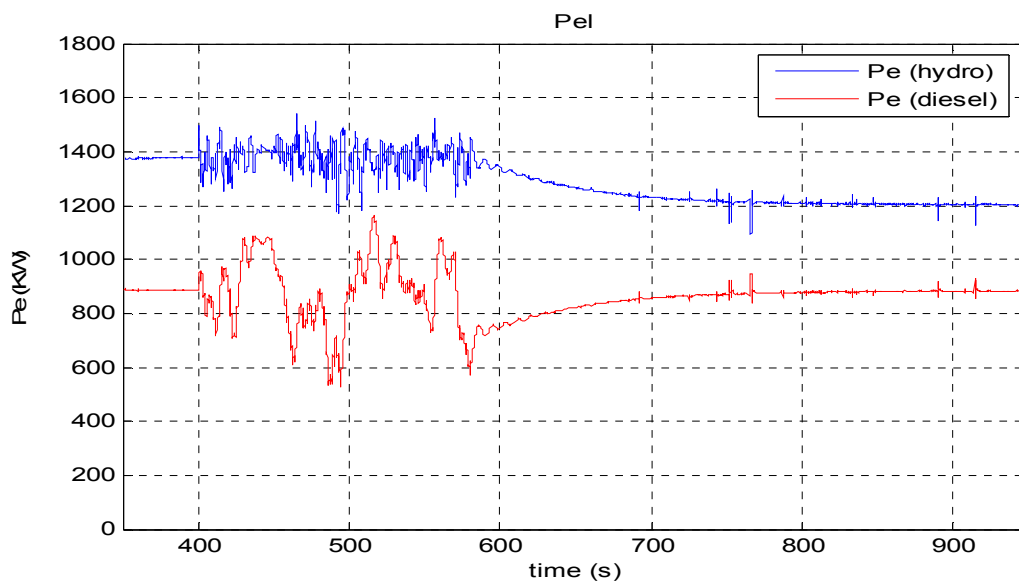
Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά ανέμου  $V_w1$ , και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα:



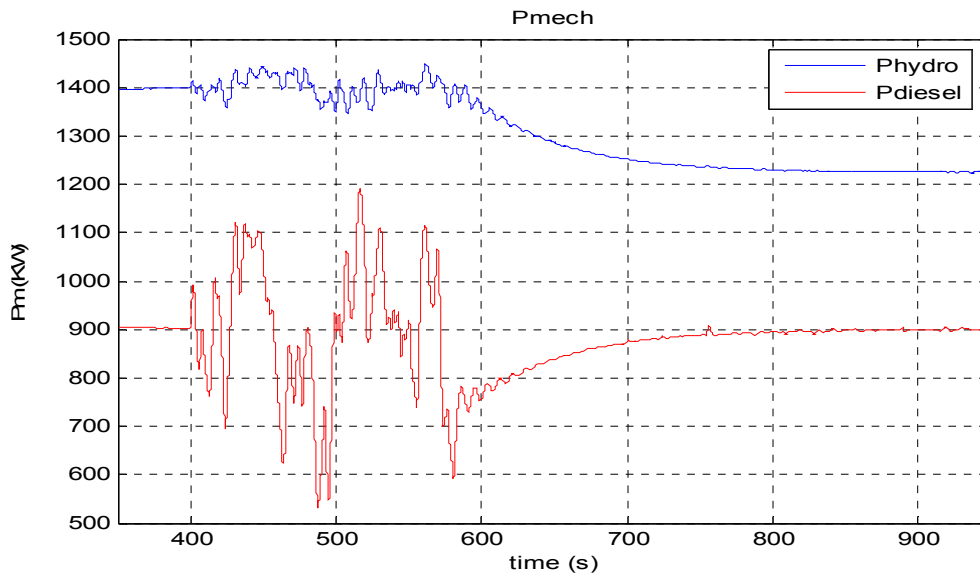
Σχήμα 133 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Φορτίο  $P_L=2,5$  MW



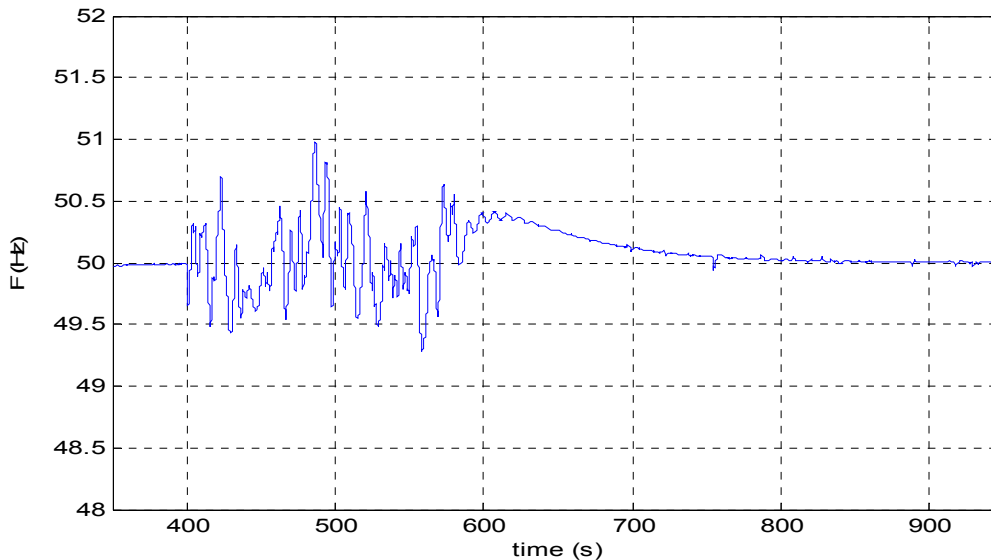
Σχήμα 134 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου  $V_{W1}$



Σχήμα 135 : Προσομοίωση- Σενάριο 1- Ηλεκτρική ισχύς ( $P_{hydro}$ ) για τον έναν υδροστρόβιλο ( $P_{diesel}$ ) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{W1}$



Σχήμα 136 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$



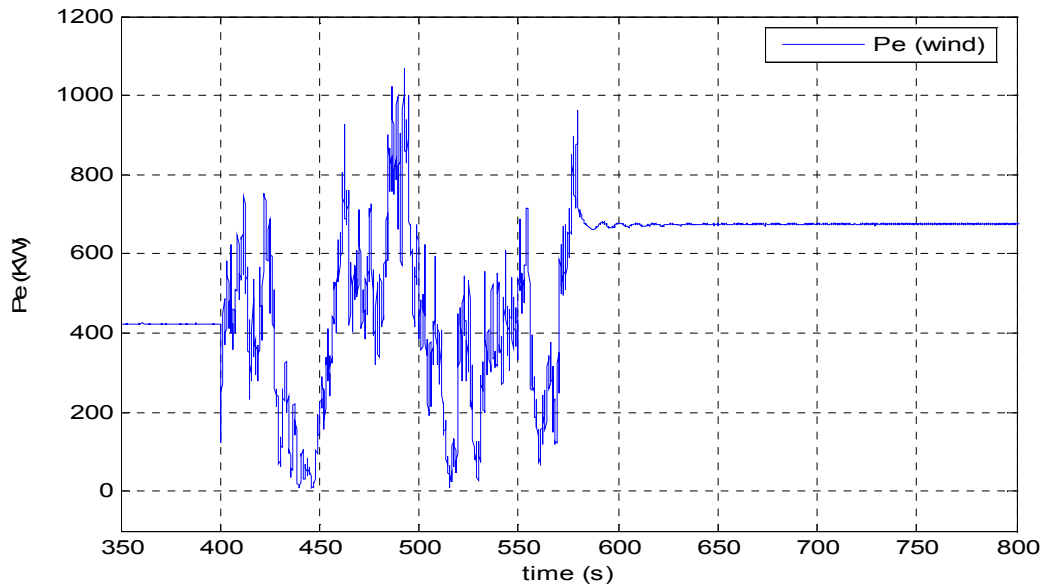
Σχήμα 137 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης η ρύθμιση της συχνότητας είναι ικανοποιητική. Η μόνη εξαίρεση είναι η συχνότητα που εμφανίζεται πριν τα 500 sec και είναι σχεδόν 51 Hz. Η ριπή ανέμου προκαλεί αύξηση της ισχύος των ανεμογεννητριών γύρω στα 800 KW και προκαλεί αντίθετη κίνηση από τις υπόλοιπες μονάδες: συγκεκριμένα η μηχανή Diesel πέφτει στα 550 KW, ισχύς που αντιστοιχεί στο 0,37 α.μ. Η μικρότερη συχνότητα παρατηρείται γύρω στα  $t=560$  sec όπου η συχνότητα πέφτει στα 49,3 Hz, τιμή, όμως, που είναι αποδεκτή.

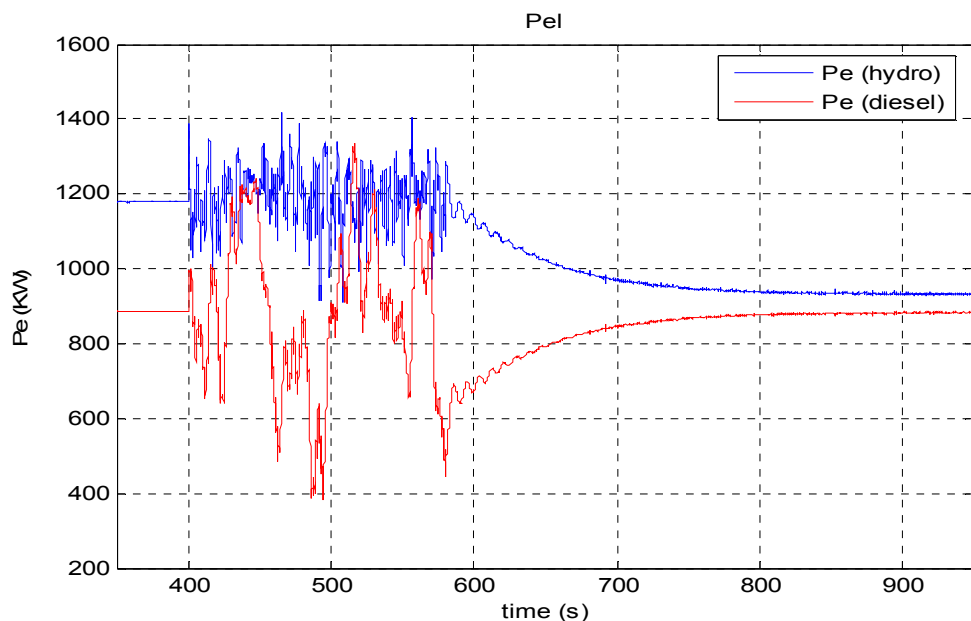
Επίσης, εφαρμόστηκε με επιτυχία η λογική της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ρύθμισης. Η μηχανή Diesel, πρωτογενώς, ρυθμίζει με μεγάλη ταχύτητα την συχνότητα, ενώ στη συνέχεια η ισχύς του κατεβαίνει στο 60% της ισχύος του. Ο ΜΥΗΣ, συμμετέχει με μικρότερη ταχύτητα στην πρωτεύουσα ρύθμιση, και δευτερογενώς, μέσω της ισόχρονης ρύθμισης, αναλαμβάνει την ισχύ που

απορρίπτει η μηχανή Diesel, ανεβάζοντας ξανά την συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.

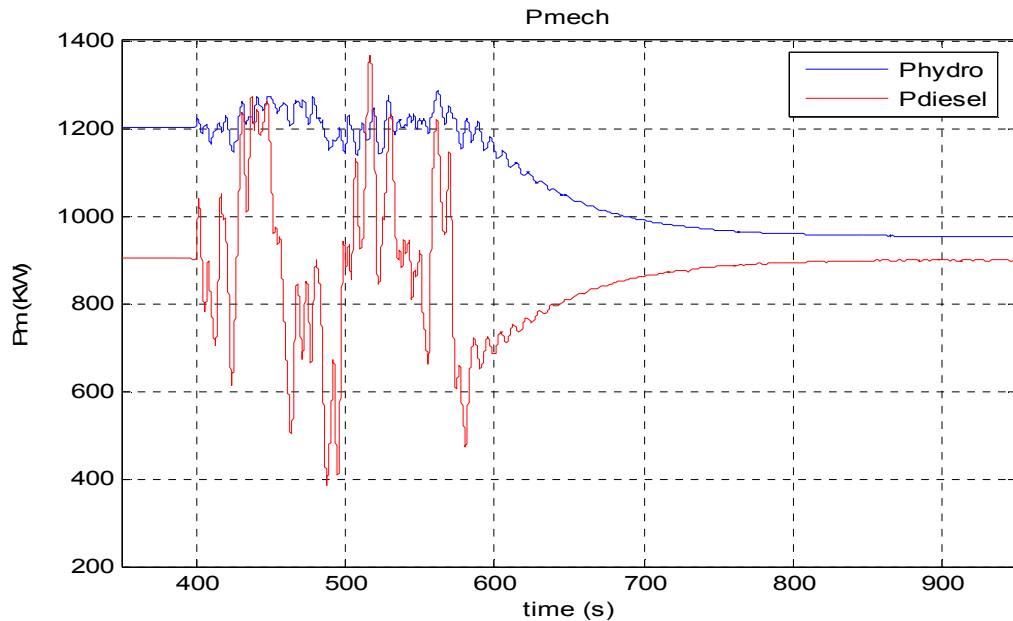
Στη συνέχεια επιλέχθηκε ως χρονοσειρά ανέμου η  $V_{w2}$  και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής της περίπτωσης φαίνονται παρακάτω:



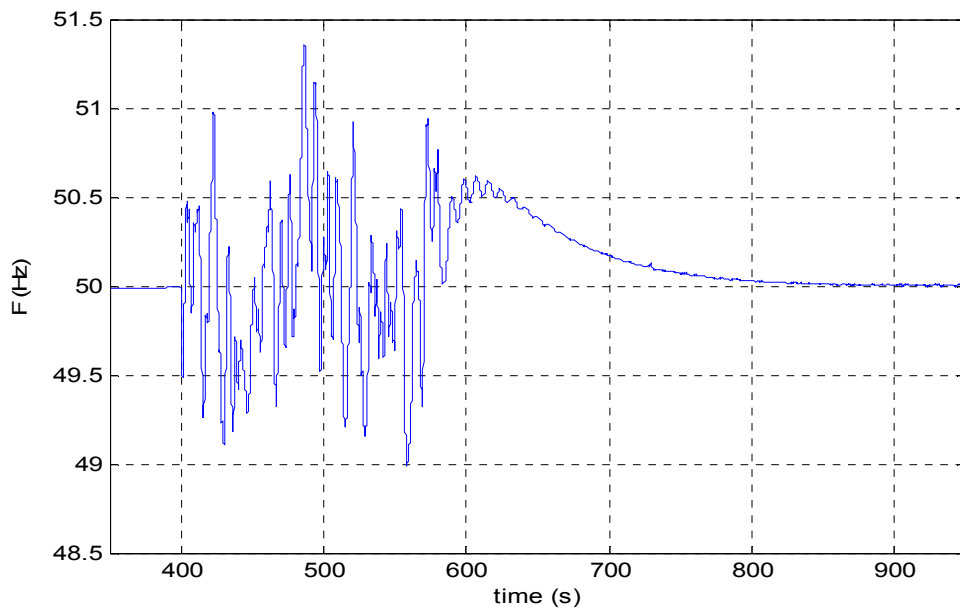
**Σχήμα 138 :** Προσομοίωση- Σενάριο 1- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



**Σχήμα 139 :** Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Ηλεκτρική ισχύς ( $P_{ehydro}$ ) για τον ΜΥΗΣ ( $P_{ediesel}$ ) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



Σχήμα 140 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



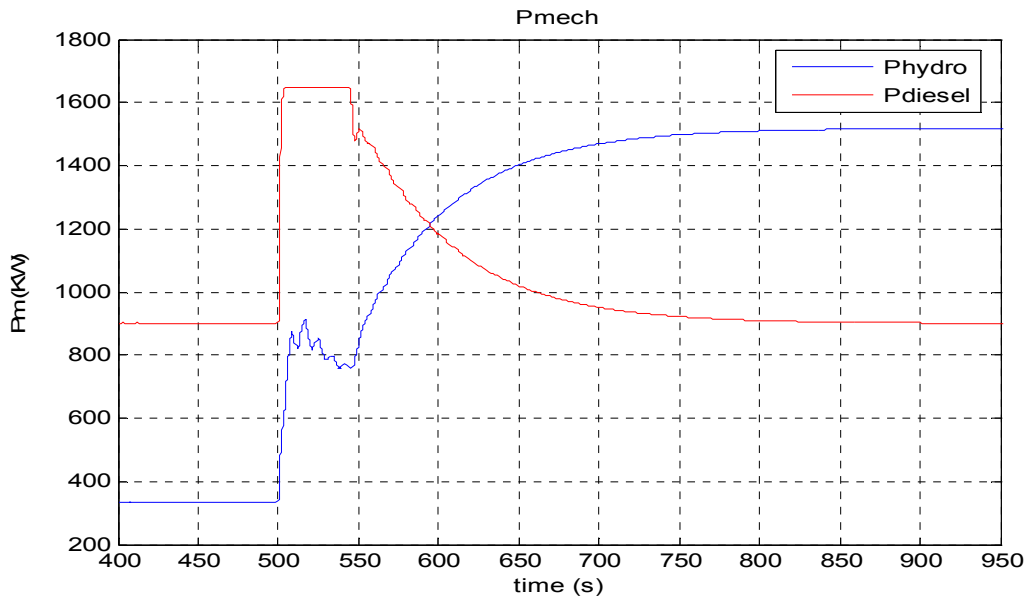
Σχήμα 141 : Προσομοίωση - Σενάριο 1 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$

Εδώ, όπως ήταν αναμενόμενο, η ρύθμιση της συχνότητας είναι λιγότερο ικανοποιητική από την προηγούμενη προσομοίωση και ο λόγος είναι, προφανώς, οι μεγαλύτερες ισχύος διακυμάνσεις των ανεμογεννητριών, αφού ο άνεμος τώρα αυξήθηκε. Αντίστοιχα με πριν, οι μέγιστες αποκλίσεις από την σύγχρονη ταχύτητα συνέβησαν λίγο πριν τα 500 sec και γύρω στα 560 sec. Συγκεκριμένα, η μέγιστη συχνότητα εμφανίστηκε στα  $f=51,4$  Hz, λίγο πάνω από το όριο των 51 Hz και ενώ η μηχανή Diesel έφτασε στο 0,27 α.μ. τιμή αρκετά κάτω από το τεχνικό ελάχιστο λειτουργίας που είναι για την Diesel στο 0,5 α.μ. Η ελάχιστη συχνότητα είναι ακριβώς στο όριο των 49 Hz.

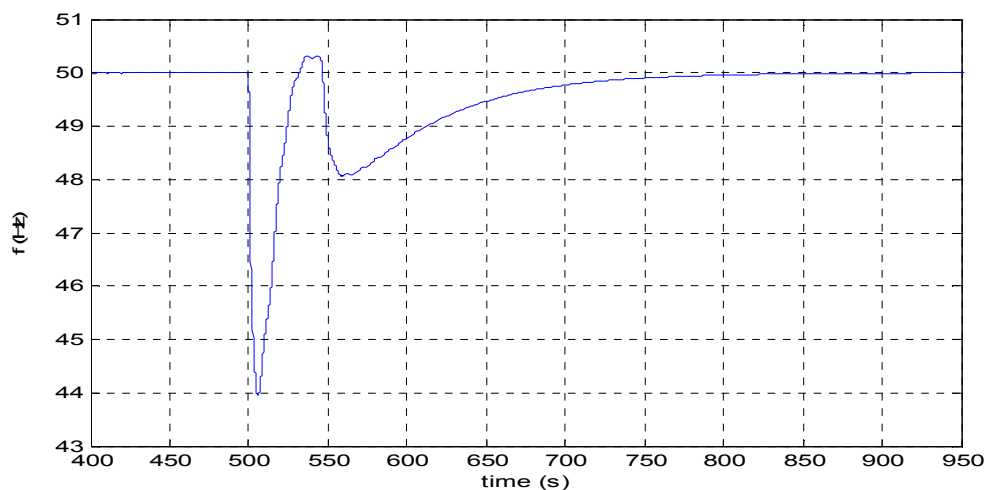
9.4.2.2 Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε το άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών με βηματική μεταβολή του φορτίου κατά 1,2 MW και 1 MW. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο περιπτώσεις φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα

**Βηματική αύξηση του φορτίου από P=1,2 MW για t=400 sec σε P=2,4 MW για t=500 sec**



Σχήμα 142 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,2 MW



Σχήμα 143 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Συχνότητα του συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,2 MW

Σε σχέση με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αποκρίσεων, συμπεραίνονται τα εξής:

- Η λειτουργίες τόσο της πρωτεύουσας ρύθμισης όσο και της δευτερεύουσας είναι ικανοποιητικές

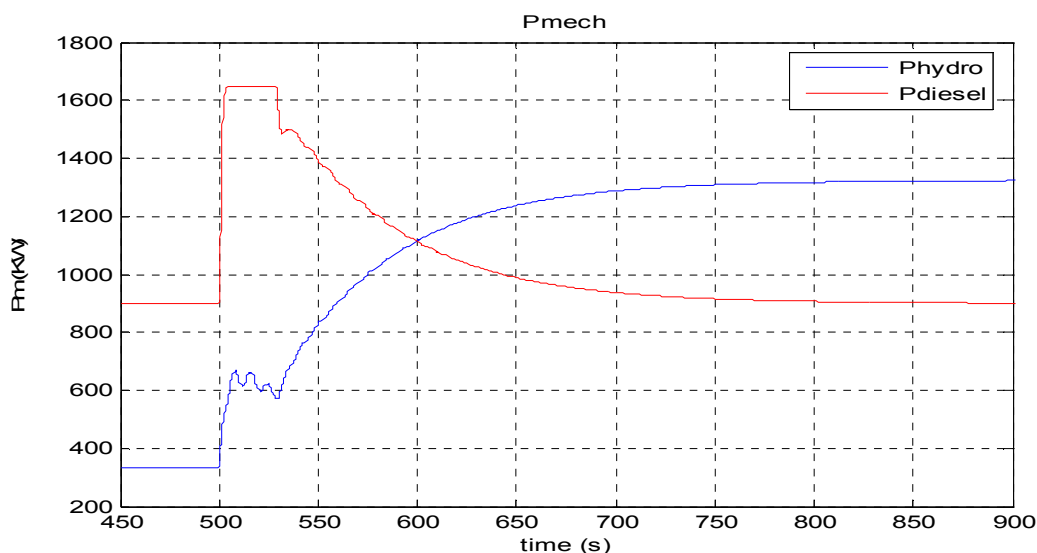


- Ως προς την πρωτεύουσα, η μηχανή Diesel ακολουθεί με μεγάλη ταχύτητα την αύξηση του φορτίου πηγαίνοντας στο 100% της φόρτισής του, ενώ σε αυτήν συμμετέχει και ο υδροστρόβιλος. Ο υδροστρόβιλος ανεβάζει ισχύ κατά την διαφορά της μεταβολής του φορτίου και της ισχύος που μπόρεσε επιπλέον να δώσει η μηχανή Diesel.
- Σε σχέση με τη δευτερεύουσα ρύθμιση, η μηχανή Diesel κατεβαίνει με μικρή κλίση στην ισχύ αναφοράς (60% της ονομαστικής του) δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον υδροστρόβιλο να αυξήσει την ισχύ του και να επαναφέρει τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.
- Παρατηρείται μία δεύτερη πτώση συχνότητας λίγο μετά τα 550 sec. Η πτώση αυτή έχει να κάνει με την απόκριση της μηχανής Diesel και του γεγονότος ότι αρχικά πέφτει απότομα, για περίπου 100 KW, η ισχύς του.

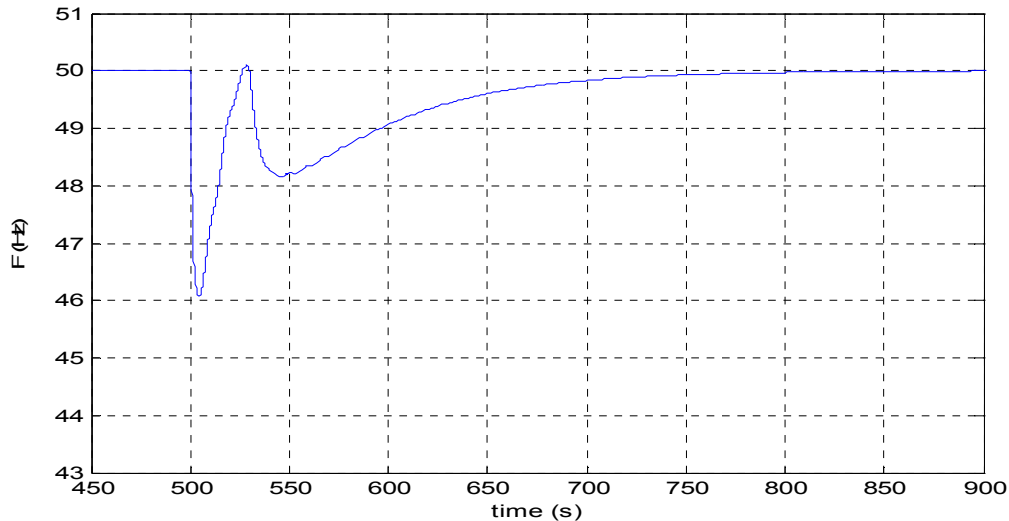
Σε βηματική μεταβολή 1,2 MW για  $t=500$  sec η συχνότητα του συστήματος έπεσε στα 44 Hz μετά από μερικά δευτερόλεπτα. Η πτώση αυτή, της συχνότητας, είναι ίσως καθοριστική για την επιλογή της ισχύος των ανεμογεννητριών που υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν, με ασφάλεια, στο δίκτυο.

Για το παραπάνω αποτέλεσμα και το γεγονός ότι για κανονική λειτουργία με την χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$  η συχνότητα ξεπερνά τα τιθέμενα όρια, μειώνεται η ισχύς των ανεμογεννητριών, για το παραπάνω σενάριο λειτουργίας, κατά 200 KW. Η πτώση της συχνότητας για βηματική μεταβολή 1 MW, φαίνεται παρακάτω:

**Βηματική αύξηση του φορτίου από  $P_L=1,2$  MW για  $t=400$  sec σε  $P_L=2,2$  MW για  $t=500$  sec**



**Σχήμα 144 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1 MW**



**Σχήμα 145 : Προσομοίωση – Σενάριο 1 - Συχνότητα του συστήματος σε βηματική μεταβολή 1 MW**

Η πτώση της συχνότητας είναι κατά 2 Hz περίπου μικρότερη από αυτήν που παρατηρήθηκε στην βηματική 1,2 MW. Συγκεκριμένα, είναι στα 46 Hz.

Από όλα τα προηγούμενα, συνάγεται το συμπέρασμα, ότι για φορτίο 2,5 MW, ισχύ ΜΥΗΣ 1,55 MW και ισχύ Diesel 1,5 MW, μπορούν να είναι συνδεδεμένες ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος μικρότερης από 1 MW, για ομαλή και αποδεκτή λειτουργία.

### 9.4.3 Σενάριο 2<sup>ο</sup>

#### 9.4.3.1 Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών

Το δεύτερο σενάριο που εξετάστηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

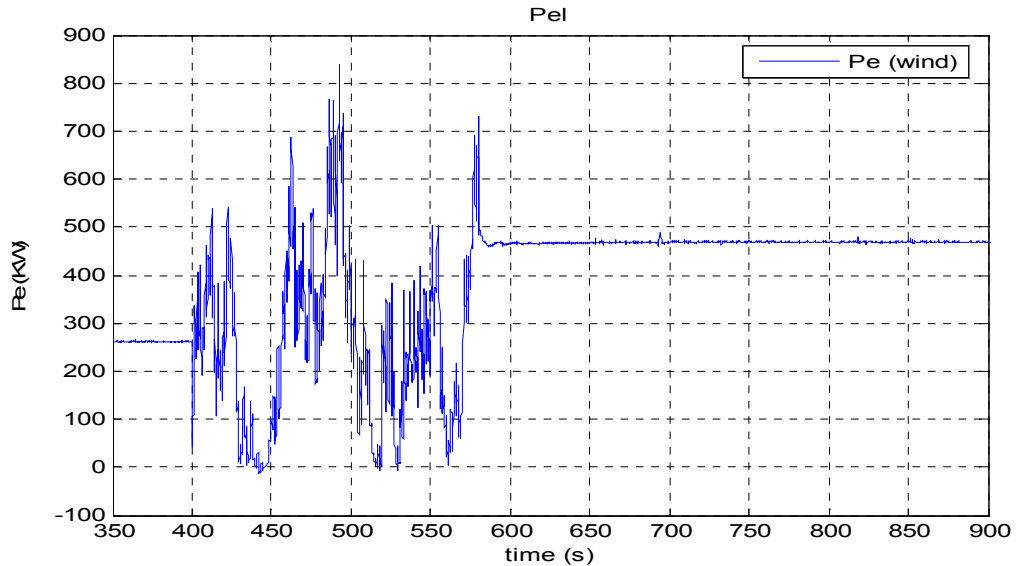
Σενάριο 2	Ισχύς (MW)
Phydro	3,1
Pwind	1,4
Pdiesel	1,5
Pload	3

**Πίνακας 16: Σενάριο 2**

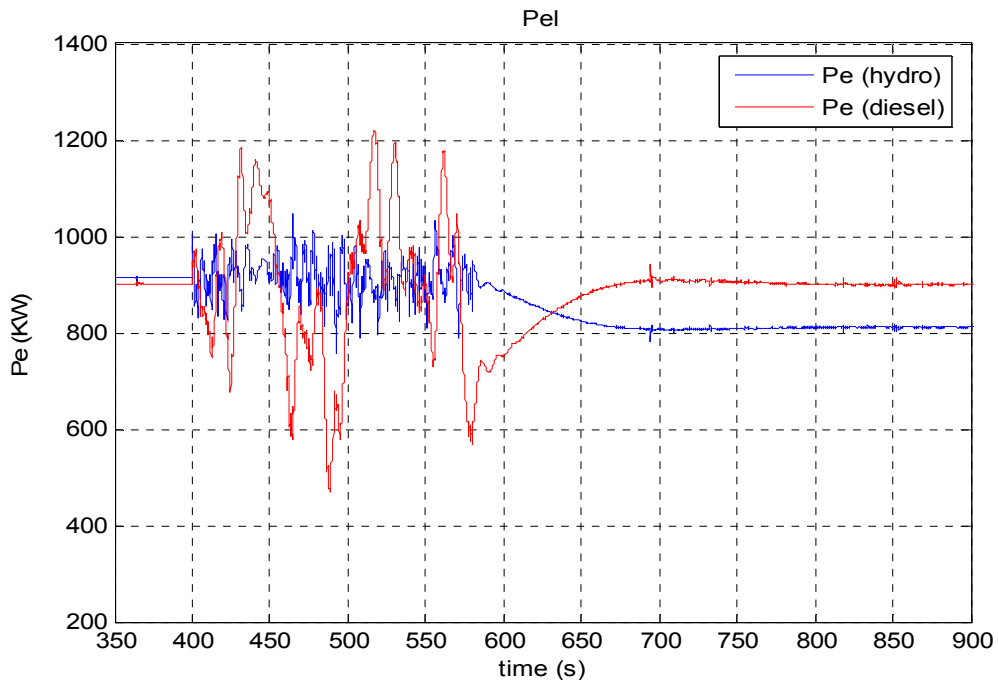
Τώρα είναι σε λειτουργία και οι δύο υδροστρόβιλοι (2 X 1,55 MW), ενώ παραμένει η μονάδα Diesel των 1,5 MW. Το φορτίο είναι και εδώ 3 MW. Οι υδροστρόβιλοι αναμένεται να μοιραστούν την ισχύ που είχε ο ένας στο προηγούμενο σενάριο. Το κέρδος για αυτήν την λειτουργία είναι ότι υπάρχουν μεγαλύτερα περιθώρια εφεδρείας (ενώ πριν τόσο η μηχανή Diesel όσο και ο υδροστρόβιλος ήταν κοντά στην πλήρη φόρτιση) ενώ τις μεταβολές του φορτίου που αναλογούν στον ΜΥΗΣ τις μοιράζονται τώρα δύο υδροστρόβιλοι (αντί για έναν) και άρα αναμένεται

να είναι πιο γρήγορη η απόκριση. Έτσι, δοκιμάστηκε ισχύς ανεμογεννητριών :  $P_W=1,4 \text{ MW}$

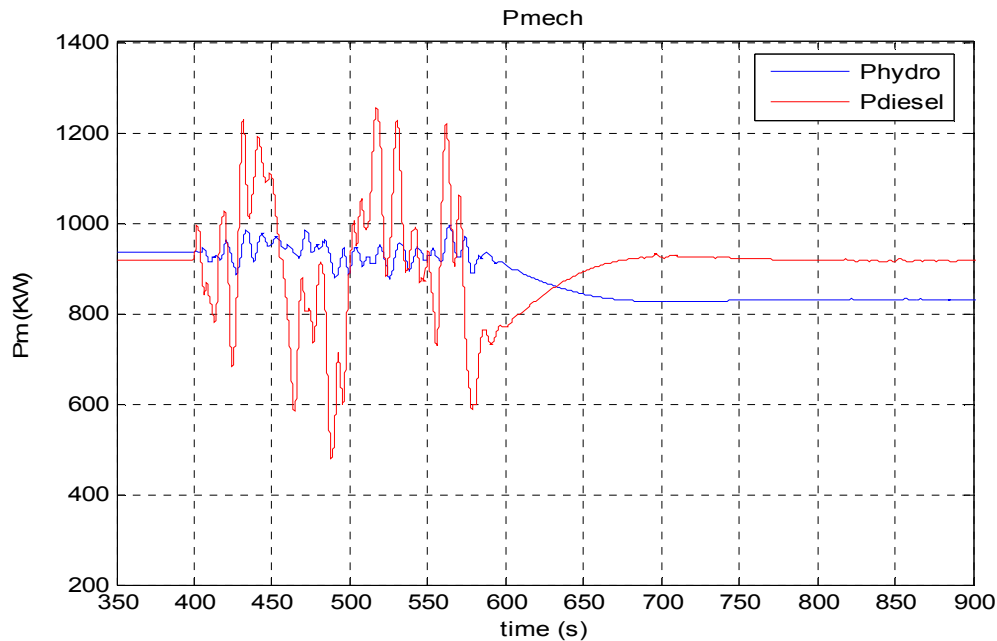
Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$ , και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα:



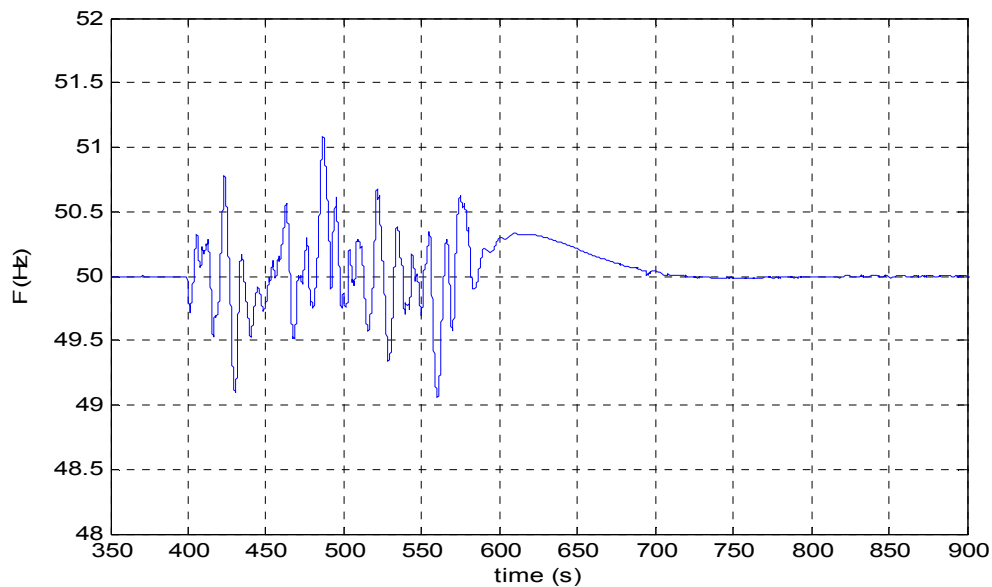
**Σχήμα 146 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$**



**Σχήμα 147 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς ( $P_{hydro}$ ) για τον ΜΥΗΣ ( $P_{diesel}$ ) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$**



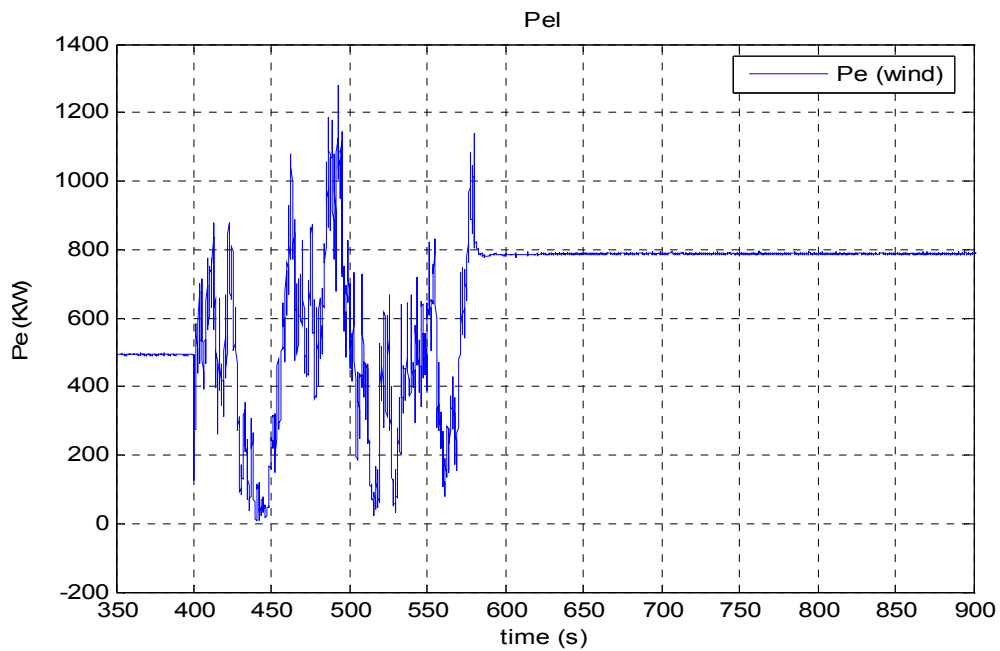
Σχήμα 148 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdieisel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$



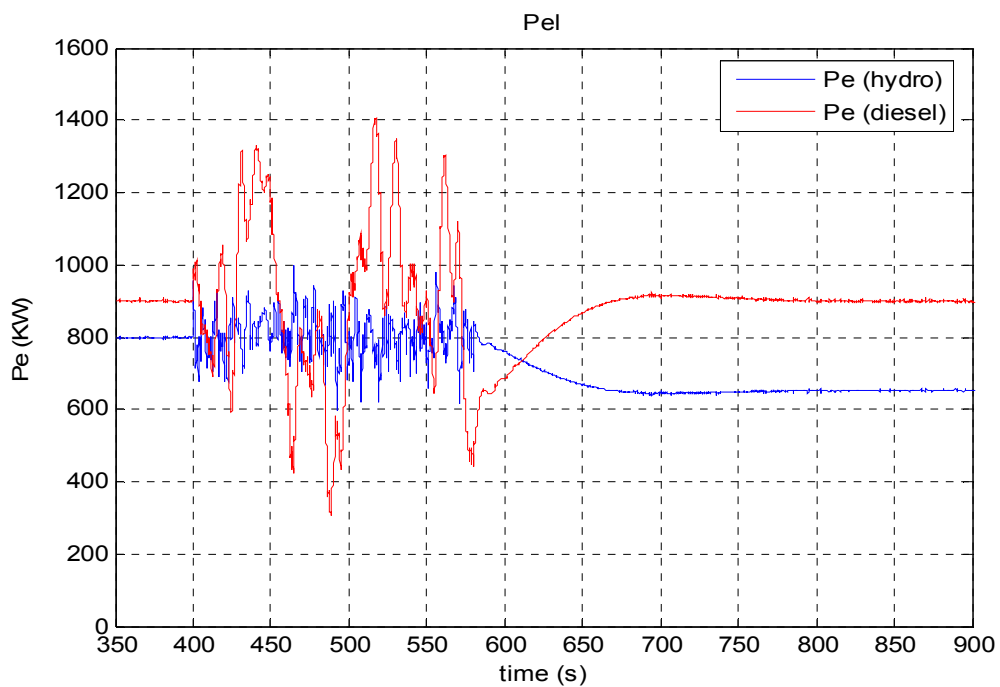
Σχήμα 149 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w1}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η ρύθμιση της συχνότητας για αυτήν την λειτουργία είναι σχετικά καλή. Η μόνη περίπτωση που η συχνότητα έφυγε εκτός ορίων είναι στην ριπή ανέμου λίγο πριν τα 500 sec όπου έφτασε την τιμή,  $f=51,08\text{Hz}$ .

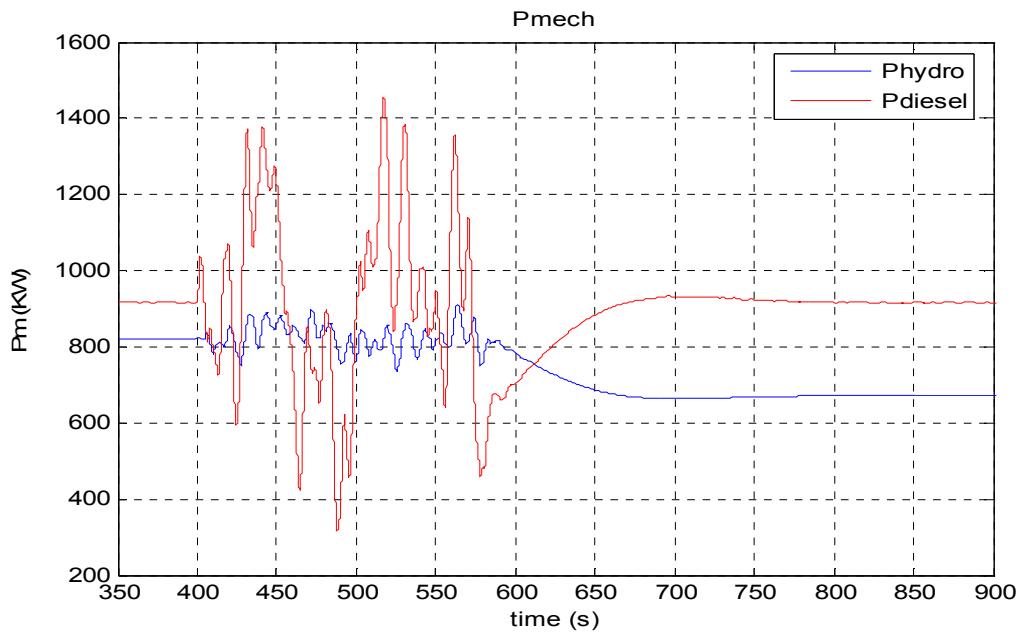
Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$ , και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα:



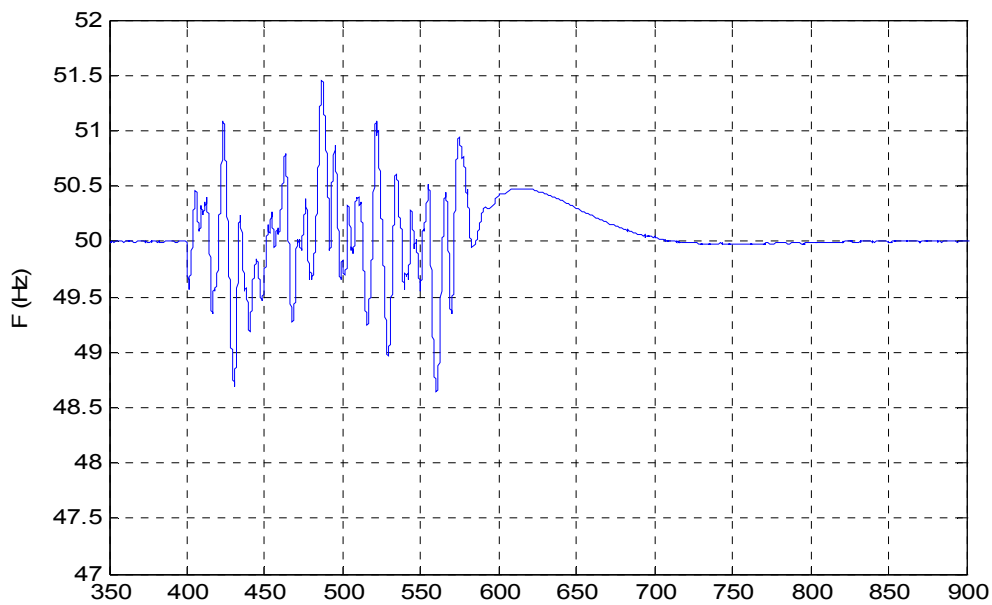
Σχήμα 150 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



Σχήμα 151 : Προσομοίωση - Σενάριο 2- Ηλεκτρική ισχύς ( $P_{ehydro}$ ) για τον ΜΥΗΣ ( $P_{ediesel}$ ) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



Σχήμα 152 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



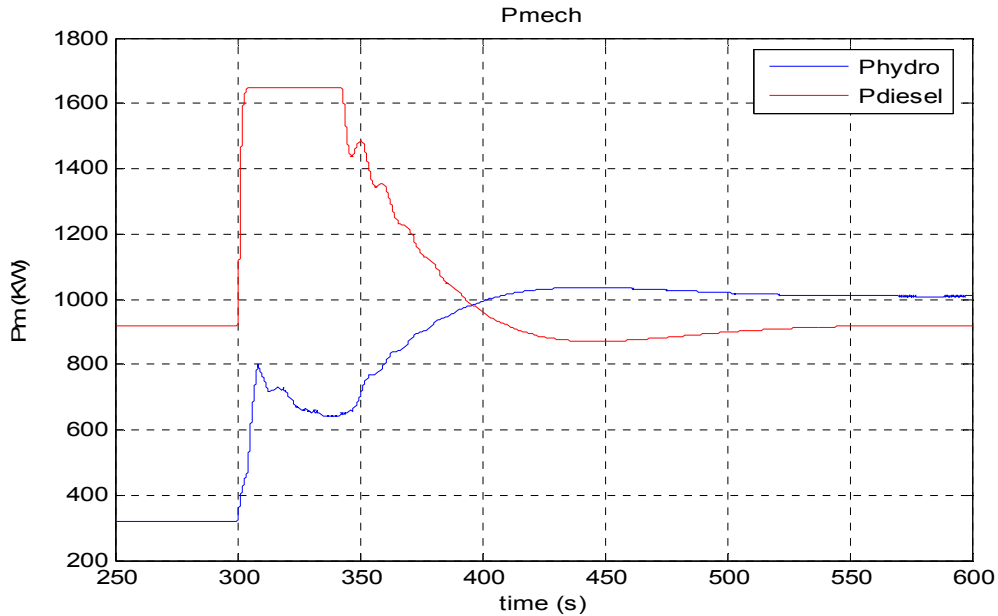
Σχήμα 153 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται μη αποδεκτή ρύθμιση συχνότητας από τον ΜΥΗΣ και τη μηχανή Diesel για τις συγκεκριμένες μεταβολές της αιολικής ισχύος. Συγκεκριμένα, η συχνότητα κυμαίνεται από τα 51,45 Hz μέχρι τα 48,7 Hz. Συνεπώς, ως προς την κανονική λειτουργία, προτείνεται μείωση κατά 200 KW της αιολικής ισχύος, για τον ίδιο συνδυασμό ΜΥΗΣ και Diesel.

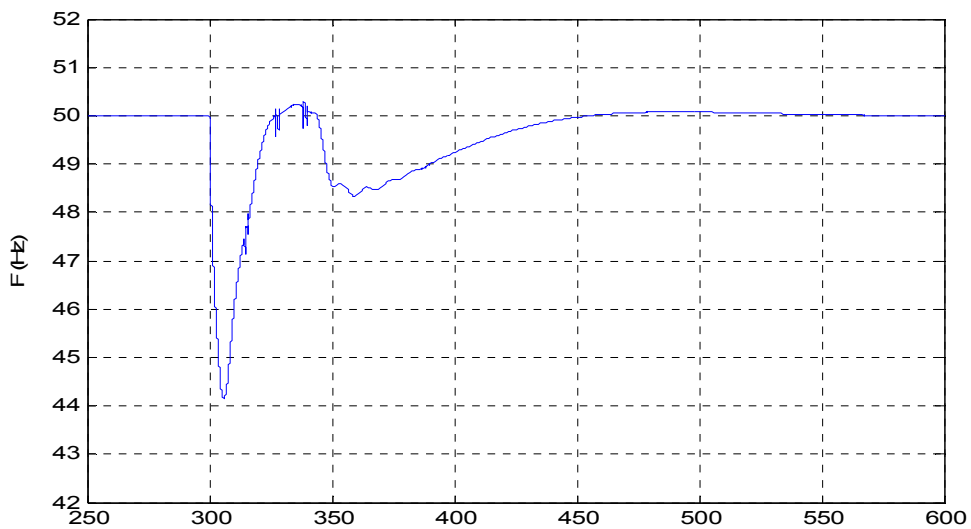
Παρακάτω εξετάζεται το σύστημα, σε απορρίψεις αιολικής ισχύος (βηματικές αυξήσεις του φορτίου που βλέπουν ο ΜΥΗΣ και η Diesel) 1,4MW και 1,2 MW.

9.4.3.2 Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών

**Βηματική αύξηση του φορτίου από  $P_L=1,5$  MW για  $t=400$  sec σε  $P_L=2,9$  MW για  $t=300$  sec**



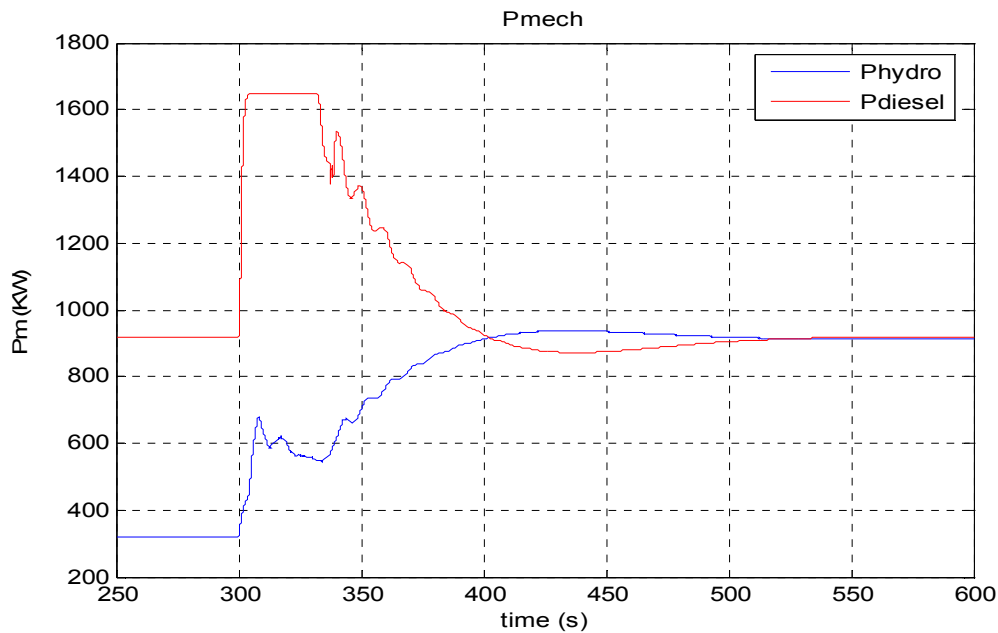
Σχήμα 154 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdieisel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,4 MW



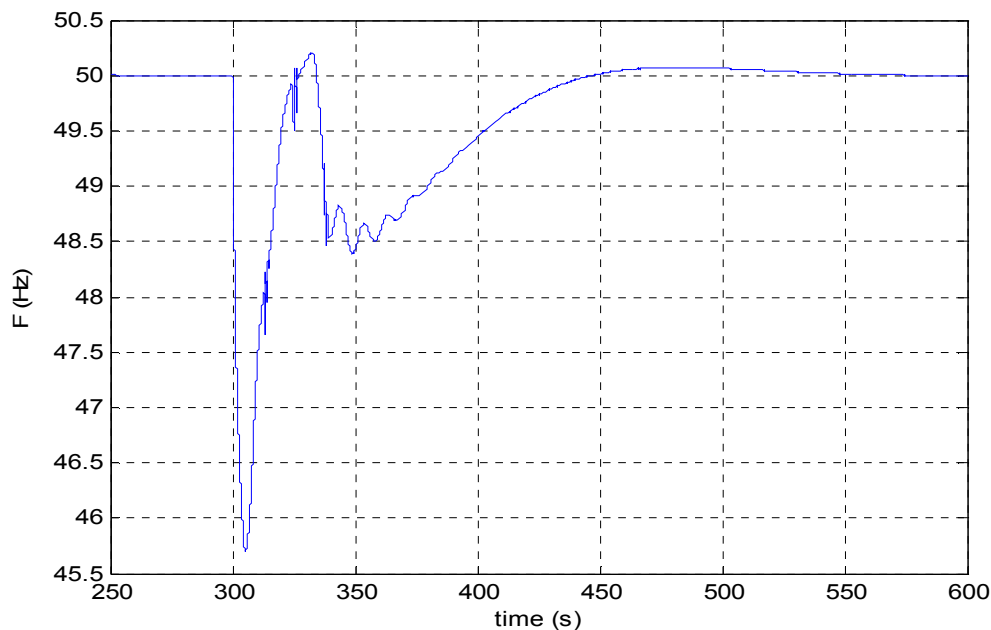
Σχήμα 155 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 - Συχνότητα συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,4 MW

Εδώ, η συχνότητα φτάνει τα 44 Hz, τιμή μη αποδεκτή, οπότε σε συνδυασμό με το γεγονός ότι για 1,4 MW αιολικής ισχύος δεν ρυθμίζεται αποδεκτά η συχνότητα, απορρίπτεται αυτό το σενάριο και εξετάζεται η βηματική μεταβολή κατά 1,2 MW.

**Βηματική αύξηση του φορτίου από  $P_L=1,5$  MW για  $t=400$  sec σε  $P_L=2,7$  MW για  $t=300$  sec**



Σχήμα 156 : Προσομοίωση – Σενάριο 2 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,2 MW



Σχήμα 157 : Προσομοίωση - Σενάριο 2 - Συχνότητα συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,2 MW

Εδώ η συχνότητα του συστήματος έπεσε στα 45,7 Hz, ενώ η δεύτερη πτώση εμφανίστηκε στα 48,5 Hz τιμές που είναι οριακά αποδεκτές.

Συνεπώς, για λειτουργία ΜΥΗΣ 3,1 MW και μηχανής Diesel 1,5 MW με φορτίο κοντά στα 3 MW η βέλτιστη ποσότητα αιολικής διείσδυσης (σε σχέση με την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος) είναι 1,2 MW.



9.4.4 Σενάριο 3<sup>ο</sup>

9.4.4.1 Σε κανονική λειτουργία ανεμογεννητριών

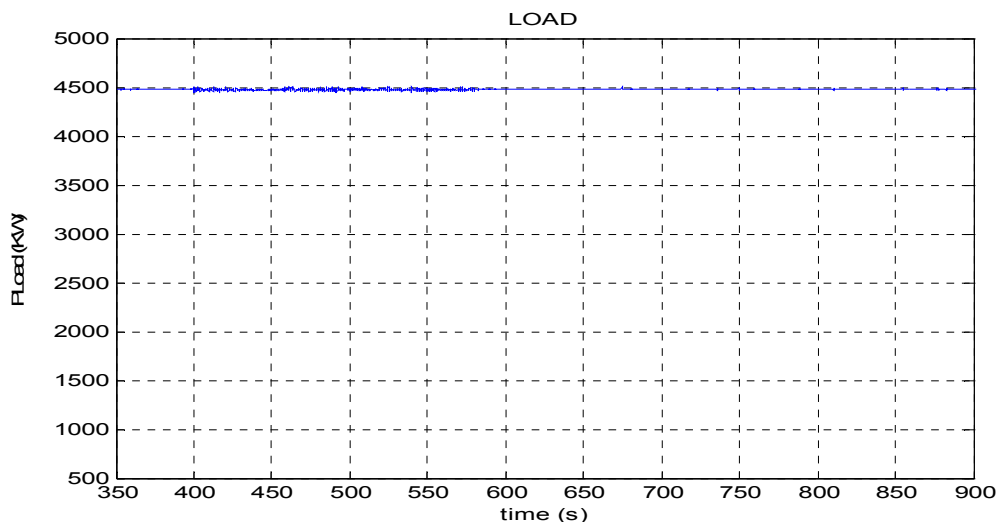
Το τρίτο σενάριο που εξετάστηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Σενάριο 3	Ισχύς (MW)
Phydro	3,1
Pwind	1,4
Pdiesel	2
Pload	4,5

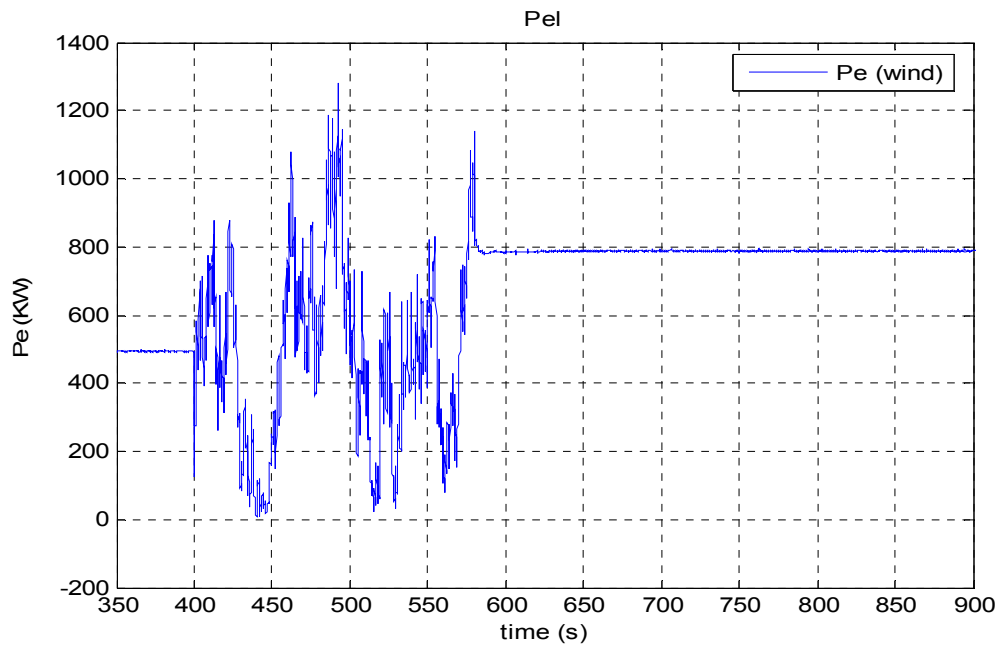
Πίνακας 17 : Σενάριο 3

Η ισχύς των Diesel αυξήθηκε στα 2 MW ενώ παραμένουν οι δύο υδροστρόβιλοι (ΜΥΗΣ) συνολικής ισχύος 3,1 MW. Το φορτίο θεωρήθηκε λογικό να αυξηθεί στα 4,5 MW, εφόσον το άθροισμα της ισχύος του ΜΥΗΣ και της μηχανής Diesel είναι λίγο πάνω από 5 MW. Αρχικά, εξετάζεται η ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας σε μεταβολές της αιολικής ισχύος που προκαλείται λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου. Η ισχύς των ανεμογεννητριών τέθηκε ίση με 1,4 MW , η ισχύς που οριακά αδυνατούσε να ρυθμίζει η μηχανή Diesel των 1,5 MW μαζί με τον ΜΥΗΣ (σενάριο 2, Vw2). Ως χρονοσειρά ανέμου χρησιμοποιήθηκε η V<sub>w2</sub>, καθώς θεωρήθηκε αυτονόητη η ικανότητα του συστήματος να ρυθμίζει τη συχνότητα σε χαμηλές τιμές ταχύτητας ανέμου.

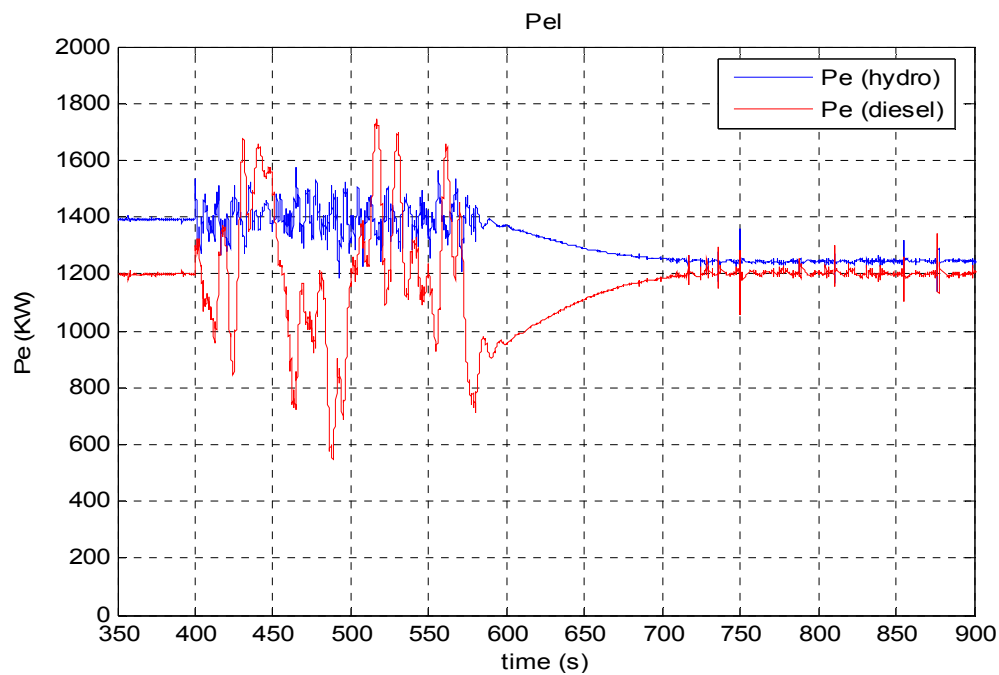
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου αυτού με χρονοσειρά ανέμου την V<sub>w2</sub>, φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα:



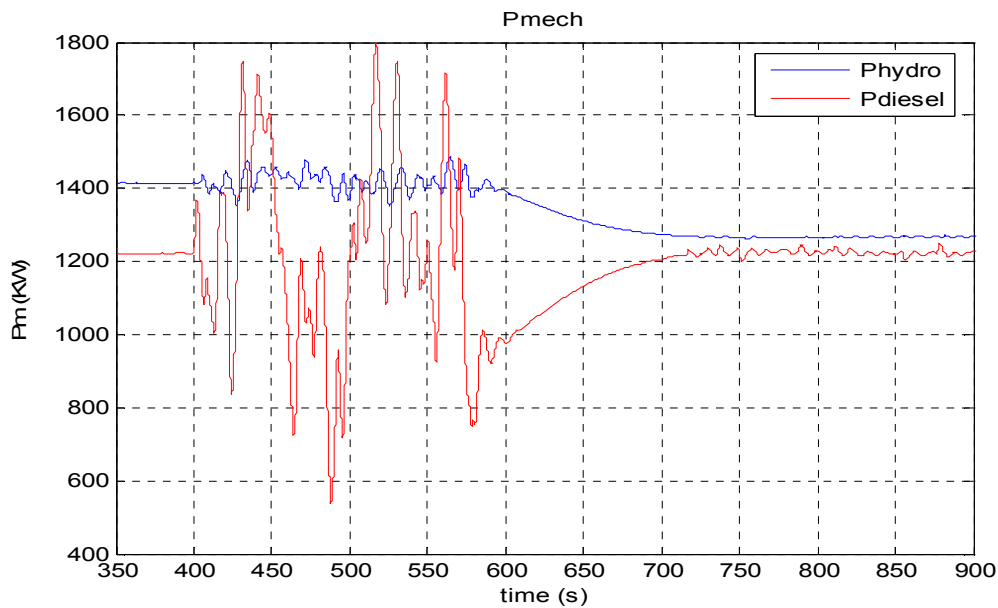
Σχήμα 158 : Προσομοίωση - Σενάριο 3- Φορτίο PL=4,5 MW



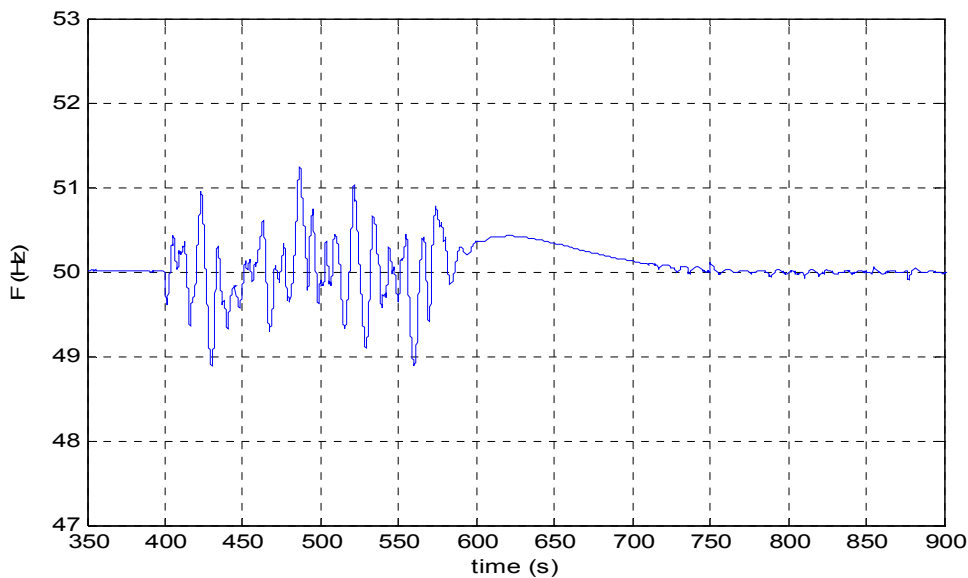
Σχήμα 159 : Προσομοίωση - Σενάριο 3- Ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



Σχήμα 160 : Προσομοίωση - Σενάριο 3- Ηλεκτρική ισχύς ( $P_{hydro}$ ) για τον ΜΥΗΣ ( $P_{diesel}$ ) για τη γεννήτρια Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$



Σχήμα 161 : Προσομοίωση – Σενάριο 3 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$

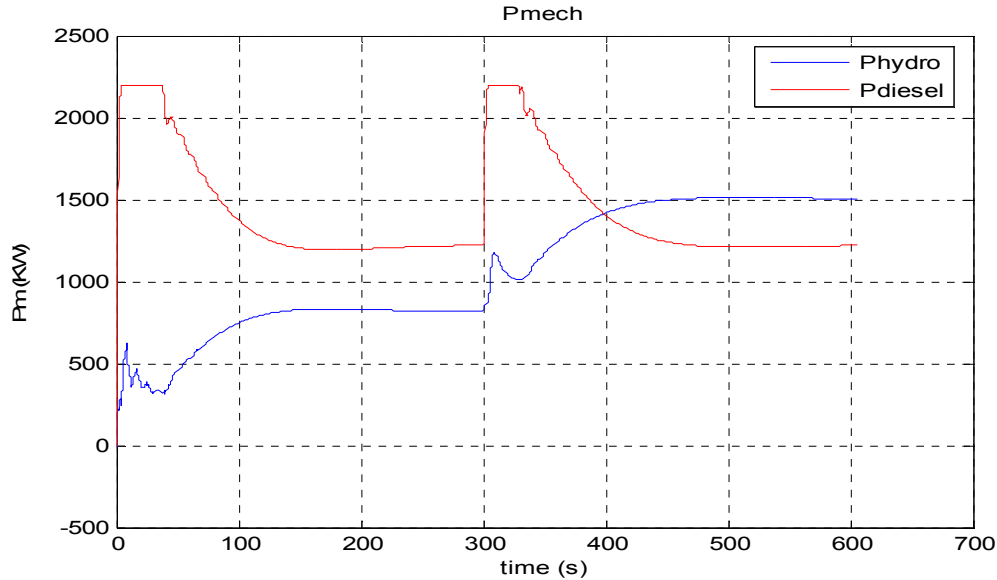


Σχήμα 162 : Προσομοίωση - Σενάριο 3 – Συχνότητα συστήματος με χρονοσειρά ανέμου  $V_{w2}$

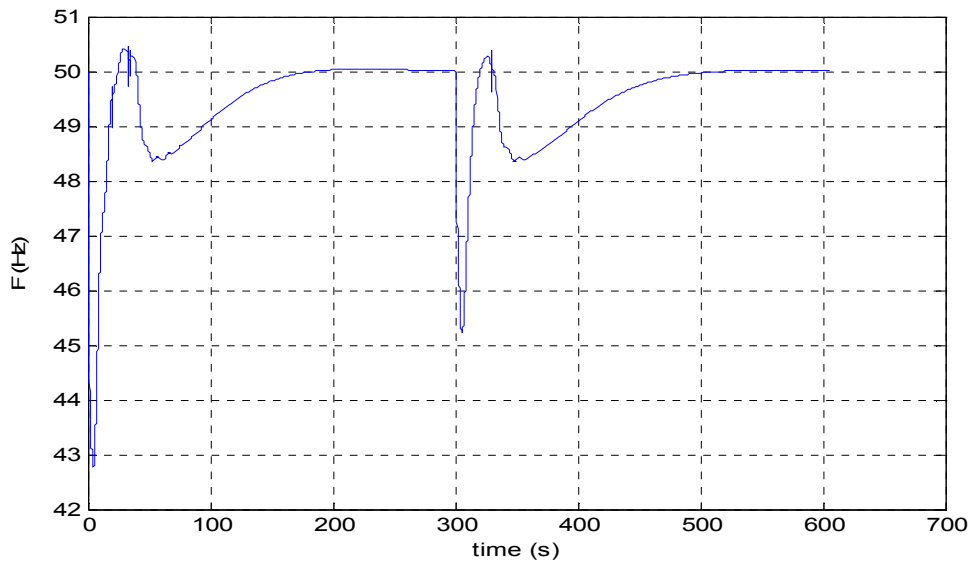
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, γίνεται αντιληπτή η ικανότητα του συστήματος (ΜΥΗΣ μαζί με Diesel ισχύος 2 MW) να ρυθμίζει τη συχνότητα, μετά από έντονες διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος. Επειδή, η συχνότητα σε τρία λεπτά προσομοίωσης φτάνει πέντε φορές τα όρια (μεταβολή 1 HZ) κρίθηκε μη σκόπιμη η εξέταση σεναρίου με περαιτέρω αύξηση της αιολικής ισχύος.

9.4.4.2 Σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών

**Βήμα από  $P_L=0$  MW σε  $P_L=2,8$  MW για  $t=0$  sec και από  $P_L=2,8$  MW σε  $P_L=4,2$  MW για  $t=300$  sec**



Σχήμα 163 : Προσομοίωση – Σενάριο 3 - Μηχανική ισχύς (Phydro) για τον υδροστρόβιλο (Pdiesel) για τη μηχανή Diesel σε βηματική μεταβολή 1,4 MW



Σχήμα 164 : Προσομοίωση - Σενάριο 3 - Συχνότητα συστήματος σε βηματική μεταβολή 1,4 MW

Στα παραπάνω σχήματα προσομοιώνονται 10 λεπτά λειτουργίας του ΜΥΗΣ (3,1 MW) μαζί με τη μηχανή Diesel (2 MW). Αρχικά, για  $t=0$  έγινε ζεύξη φορτίου ισχύος 2,8 MW, ενώ για  $t=300$  sec το φορτίο αυξήθηκε βηματικά κατά 1,4 MW φτάνοντας έτσι τα 4,2 MW.

Από την πρώτη μεταβολή η συχνότητα του συστήματος έπεσε περίπου στα 43 Hz ενώ στην δεύτερη μεταβολή η συχνότητα του συστήματος έπεσε στα 45, 2 Hz.

## **10 Συμπεράσματα**

---

### **10.1 Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας**

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η ρύθμιση συχνότητας αυτόνομου συστήματος μέσω υβριδικού αντλησιοταμιευτικού σταθμού και συγκεκριμένα μέσω του ΜΥΗΣ. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκαν κατάλληλα μοντέλα στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά ενός ΜΥΗΣ και εξετάστηκε η ικανότητά του να ρυθμίζει την συχνότητα σε ένα αυτόνομο σύστημα. Επίσης, προσομοιώθηκε η δυναμική συνεργασία του ΜΥΗΣ με μηχανές Diesel και με ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Ο ΜΥΗΣ που μελετήθηκε αποτελείται από δύο υδροστροβίλους δράσεως (Pelton) ισχύος 1,55 MW, τα στοιχεία του οποίου αντλήθηκαν από τον ΜΥΗΣ του υπό κατασκευή υβριδικού σταθμού της Ικαρίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο, αφού ορίστηκε το αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και η ρύθμιση συχνότητας, έγινε μία παρουσίαση των τεχνολογιών ΑΠΕ και των υβριδικών συστημάτων. Περιγράφηκαν τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός ΜΥΗΣ ενώ αναφέρθηκαν οι διάφοροι τύποι υδροστροβίλων με έμφαση στους Pelton. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε η διαμόρφωση του υδραυλικού μέρους ΥΗΣ και αναπτύχθηκαν μη γραμμικά δυναμικά μοντέλα, είτε με τη θεώρηση της ανελαστικής στήλης ύδατος είτε πλήρως αναλυτικά, συμπεριλαμβάνοντας τα κυματικά φαινόμενα στους αγωγούς. Για την περίπτωση λειτουργίας δύο υδροστροβίλων, συμπεριλήφθηκε στα μοντέλα το φαινόμενο της υδραυλικής σύζευξης μεταξύ τους. Στο τρίτο κεφάλαιο, έγινε εκτενής ανάλυση των ρυθμιστών στροφών υδροστροβίλων και των ιδιοτεροτήτων των επιμέρους συνιστωσών που τους αποτελούν. Αναφέρθηκαν οι πιο γνωστοί μέθοδοι υπολογισμού των παραμέτρων των ρυθμιστών ενώ παρουσιάστηκε ο ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά από τα οποία αποτελείται. Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναπτύχθηκαν μοντέλα για το ηλεκτρικό μέρος όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν τα πλήρη μοντέλα ελέγχου στροφών ΜΥΗΣ και αναλύθηκε ο τρόπος που διάφορες παράμετροι επηρεάζουν την απόκριση συχνότητας ενός υδροστροβίλου, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάστηκαν αποτελέσματα αποκρίσεων από δημοσιεύσεις, της τρέχουσας βιβλιογραφίας, πάνω στο ίδιο θέμα. Στο έκτο κεφάλαιο, μελετήθηκε η δυναμική συμπεριφορά του ΜΥΗΣ, συγκρίθηκαν τα μοντέλα μεταξύ τους και έγινε διερεύνηση κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους των ρυθμιστών στροφών. Στο έβδομο και στο όγδοο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν δυναμικά μοντέλα μηχανών Diesel και ανεμογεννητριών σταθερών στροφών. Τέλος, αφού αναπτύχθηκε πλήρως το μοντέλο ενός ΜΥΗΣ (υδραυλικό μέρος, ρυθμιστής στροφών, σύγχρονες γεννήτριες), στο κεφάλαιο εννέα, προσομοιώθηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB η δυναμική λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος και έγινε έλεγχος της ικανότητας του ΜΥΗΣ να ρυθμίζει την συχνότητα σε μεταβολές της αιολικής ισχύος είτε μόνος του είτε σε συνεργασία με μονάδες Diesel.

Από τα αποτελέσματα του έκτου κεφαλαίου, συμπεραίνεται ότι, το μη κυματικό μοντέλο με τη θεώρηση της ανελαστικής στήλης ύδατος αδυνατεί να προσομοιώσει ακριβώς το πραγματικό σύστημα, όπως αυτό περιγράφεται από το κυματικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας της μεγάλης τιμής του κυματικού χρόνου  $T_e$  (συγκεκριμένα είναι, περίπου 1,5 φορά του χρόνου  $T_w$  για λειτουργία δύο στροβίλων και 2,5 φορές για λειτουργία ενός), που οφείλεται στο μεγάλο μήκος του αγωγού προσαγωγής, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ταλαντώσεων στις αποκρίσεις, σε μεταβολές της βελόνης. Λόγω αυτών των ταλαντώσεων, απαιτούνται υψηλές τιμές για τον μεταβατικό στατισμό και τον χρόνο επαναφοράς, μεγαλύτερες από αυτές που θα υπολογίζονταν αν στην μοντελοποίηση δεν συμπεριλαμβάνονταν τα κυματικά φαινόμενα. Το γεγονός αυτό, μειώνει περισσότερο την ταχύτητα απόκρισης των υδροστροβίλων.

Η απόκριση συχνότητας, φαίνεται καταρχήν, μη ικανοποιητική με βάση το κριτήριο να μην ξεπερνά η μεταβολή της συχνότητας το 1 Hz. Συγκεκριμένα, για μεταβολή της ισχύος του από το 50% στο 60%, ο υπό μελέτη ΜΥΗΣ αποκρίνεται, ρίχνοντας την συχνότητα αρκετά κάτω από τα 49 Hz, στα 47 Hz. Επίσης, για μεταβολή ράμπας 465 KW (από το 75% έως το 90% του κάθε υδροστροβίλου), η συχνότητα έπεσε περίπου στα 44 Hz. Έτσι, στο τέλος του κεφαλαίου, αναπτύχθηκαν τρόποι βελτίωσης της απόκρισης συχνότητας και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν δείχνουν πως αυτό επιτυγχάνεται με μείωση των χαρακτηριστικών χρόνων  $T_w$  και  $T_e$ , μέσω αύξησης της διατομής του αγωγού προσαγωγής και της κατασκευής πύργου αναπάσεως πλησίον των υδροστροβίλων, ή με αύξηση της αδράνειας των στρεφόμενων μαζών. Συγκεκριμένα, με εξάλειψη των κυματικών φαινομένων στους αγωγούς και μείωση του  $T_w$  στο μισό οι παραπάνω μεταβολές προκαλούν πτώση της συχνότητας στα 48,5 και 47,3 Hz, αποκρίσεις αρκετά καλύτερες από αυτές του υπό μελέτη ΜΥΗΣ.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του κεφαλαίου εννιά, και όπως είχε ήδη φανεί, συμπεραίνεται ότι ο ΜΥΗΣ (ισχύος 3,1 MW) δεν δύναται μόνος του να ρυθμίζει ικανοποιητικά την συχνότητα αυτόνομου συστήματος όταν σε αυτό είναι συνδεδεμένο αιολικό πάρκο (ισχύος μικρότερης ακόμα και από αυτή που επιτρέπεται, όπως υπολογίζεται από το ποσοστό διείσδυσης με συντελεστές συμβατικών μονάδων). Συγκεκριμένα, όταν στο σύστημα είναι συνδεδεμένο αιολικό πάρκο ισχύος 1,2 MW, ο ΜΥΗΣ, αποκρινόμενος στην μεταβλητότητα του ανέμου, ρυθμίζει τη συχνότητα, οι τιμές της οποίας όμως κυμαίνονται μεταξύ 46 και 55 Hz. Επίσης, σε βηματικές μεταβολές της ισχύος του ΜΥΗΣ τιμής ίσης με την ονομαστική του αιολικού πάρκου, η συχνότητα του συστήματος πέφτει σε τιμή κάτω των 40 Hz.

Γι' αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμη η συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας, εκτός του ΜΥΗΣ, μίας μονάδας Diesel, με τη μικρότερη δυνατή ισχύ. Έτσι, στην συνέχεια του κεφαλαίου, εξετάστηκαν σενάρια δυναμικής συνεργασίας του ΜΥΗΣ μαζί με μονάδες Diesel και αιολικού πάρκου, σε φορτία 2,5 , 3 και 4,5 MW. Επίσης, προσομοιώθηκε η δυναμική συμπεριφορά του ΜΥΗΣ και των μονάδων Diesel σε άνοιγμα των διακοπών των ανεμογεννητριών όταν αυτές λειτουργούν στο πλήρες φορτίο. Παρατηρήθηκε ότι, λόγω της ταχείας απόκρισης των Diesel σε μεταβολές της αιολικής ισχύος, αυτές τείνουν να φορτιστούν πλήρως ακυρώνοντας, έτσι, την ικανότητά τους να ρυθμίζουν την συχνότητα σε αύξηση του φορτίου και ιδιαίτερα όταν αυτό απαιτείται να γίνεται βηματικά. Έτσι, ενσωματώθηκε στους ρυθμιστές

τους λογική περιορισμού της ισχύος τους στο 60% σε δεύτερο χρόνο, με αποτέλεσμα να ρυθμίζουν την συχνότητα πρωτογενώς, λειτουργία που δευτερογενώς θα γίνεται από τον ΜΥΗΣ, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με ισόχρονη ρύθμιση. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αποδεκτή ρύθμιση της συχνότητας, ενώ την αύξηση του φορτίου θα την αναλαμβάνει δευτερογενώς ο ΜΥΗΣ συμμετέχοντας έτσι με μεγάλο ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανακεφαλαιώνοντας, η εργασία ασχολήθηκε με τη ρύθμιση συχνότητας μέσω υβριδικού αντλησιοταμιευτικού σταθμού και συγκεκριμένα μέσω του ΜΥΗΣ. Παρουσιάστηκε συστηματικά τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιείται ένας ΥΗΣ, και ειδικά ένας ΜΥΗΣ, είτε με την θεώρηση της ανελαστικής στήλης ύδατος είτε πλήρως αναλυτικά. Εξετάστηκε εκτενώς ο ρόλος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών στροφών υδροστροβίλων, και μελετήθηκε η ικανότητα του ΜΥΗΣ να ρυθμίζει την συχνότητα αυτόνομου συστήματος. Προσεγγίστηκαν οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να βελτιωθεί η απόκριση συχνότητας ενώ, τέλος, προσομοιώθηκε και εξετάστηκε δυναμικά η λειτουργία του ΜΥΗΣ σε συνεργασία με μονάδες Diesel και ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Αναλύθηκαν συγκεκριμένες τεχνικές ελέγχου των μονάδων με σκοπό την διατήρηση της συχνότητας αυτόνομου συστήματος εντός αποδεκτών ορίων.

## 10.2 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

---

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία, τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική επιβεβαίωση των μοντέλων που προσομοιώνουν τη δυναμική συμπεριφορά του ΜΥΗΣ και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του.
- Περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων του ρυθμιστή στροφών, ώστε να ανταποκρίνεται βέλτιστα στην δυναμική του υδροστροβίλου.
- Διερεύνηση της ενεργούς συμμετοχής των ανεμογεννητριών στην ρύθμιση της συχνότητας μέσω του υβριδικού αντλησιοταμιευτικού σταθμού.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, “Εισαγωγή στα ΣΗΕ”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2001.
- [2] Μιχ. Π. Παπαδόπουλου, “Παραγωγή Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [3] Κ. Βουρνά, Β.Κ. Παπαδιά, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [4] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [5] Δ. Ε. Παπαντώνης, “Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα”, Εκδόσεις Συμμετών, Αθήνα 2001.
- [6] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [7] Υπουργείο Ανάπτυξης, “Το Ελληνικό Ενεργειακό Σύστημα”, Φεβρουάριος 2009.
- [8] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, “Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies”, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 7, pp. 167 - 179, 1992.
- [9] E. De Jaeger, N. Janssens, B. Malfliet, F. Van De Meulebroeke, “Hydro Turbine Model for System Dynamic Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [10] Louis N. Hannett, B. Fardanesh, “Field Tests to Validate Hydro-Governor Model Structure and Parameters”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [11] C. Vournas and A. Zaharakis, “Hydro Turbine Transfer Functions with Hydraulic Coupling”, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 8, pp. 527-532, 1993.
- [12] L. M. Hovey, “Optimum Adjustment of Hydro Governors on Manitoba Hydro System”, AJEE Trans., Vol. 81 , Part 3, pp. 581-587. Dec. 1962.
- [13] H. M. Paynter, “The Analogue in Governor Design, I, a restricted problem Governor A Palimpsest on Electronic Analogue Art”, Printed by A. Philbrick Researches, Inc., Boston, MA., pp. 224-227, 1960.
- [14] “IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units”, IEEE Power Engineering Society, November 2004.
- [15] S.P. Mansoor, Thesis “Behaviour and operation of Pumped Storage Hydro Plants” University of Wales, Bangor, School of Informatics, July 2000.



- [16] P.L. Dandeno, P. Kundur, and J.P. Bayne, “Hydraulic Unit Dynamic Performance under Normal and Islanding Conditions – Analysis and Validation”, IEEE Trans., Vol. PAS-97, pp. 2134-2143, Nov/Dec. 1978.
- [17] R. C. Dorf, R. H. Bishop, “Σύγχρονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [18] L. Wozniak, G.H. Fett, “Conduit Representation in Closed loop Simulation of Hydraulic Systems”, ASME Publication, vol. 71- WA/FE-26, pp. 1-5, 1971.
- [19] S. Papaefthimiou, S. Karamanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, “Operating Policies for Wind-Pumped Storage Hybrid Power Stations in Island Grids”, Renewable Power Generation, IET, Vol. 3, Issue 3, Page(s) :293-307, Sept.2009.
- [20] “Basic Design of Pelton Wheel Turbine”, Government Technological College, Meiktila, Department of Mechanical Engineering, Nov. 2006.
- [21] S. Hagihara, H. Yokota, K. Goda, K. Isobe, “Stability of a Hydraulic Turbine Generating Unit Controlled by P.I.D.”, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol: PAS 98, Issue 6, Pages: 2294-2298, Nov. 1979.
- [22] Β. Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”, τόμος 1, “Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1985.
- [23] Κ. Βουρνάς, “Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως”, σημειώσεις για το μάθημα: “Αυτόματος Έλεγχος και Ευστάθεια ΣΗΕ”, Αθήνα 2004.
- [24] S. J. Charman, “Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC”, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2000.
- [25] Krause, P.C., “Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill, 1986, Section 12.5.
- [26] Kamwa, I., et al., “Experience with Computer-Aided Graphical Analysis of Sudden-Short-Circuit Oscillograms of Large Synchronous Machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- [27] "Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE Standard 421.5-1992, August, 1992.
- [28] S. Doolla, T. S. Bhatti, “Automatic Generation Control of an Isolated Small Hydro Power Plant”, Science Direct, Electric Power Systems Research 76 (2006), New Delhi, India, 2006.
- [29] H. Goryal, M. Hanmandlu, D.P. Kothari, “An artificial Intelligence based Approach for Control of Small Hydro Power Plants”, Centre of Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi.

- [30] “Hydro impulse turbine speed regulation” Internat. Water Power and Dam Construction, Vol. 61, #10, Oct. 2009.
- [31] M. Papadopoulos, S. Papathanassiou, N. Boulaxis, S. Tentzerakis, “Modelling of the diesel engine and the step voltage regulator”, 2<sup>nd</sup> Intermediate Report, “Integration of Wind Turbines into Electricity Supply Networks with Limited Power Transportation Capacity” (WIRING), Athens, November 1999.
- [32] Zouros N., Contaxis G.C., Kabouris J., 2005. Decision support tool to evaluate alternative policies regulating wind integration into autonomous energy systems. Energy Policy 33, 1541-1555.
- [33] Ιστοσελίδα : [Wikipedia.org/wiki/Diesel\\_engine](http://Wikipedia.org/wiki/Diesel_engine).
- [34] R. Gagnon, B. Saulnier, G. Sybille, P. Giroux; "Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using Matlab/Power System Blockset" 2002 Global Windpower Conference, April 2002, Paris, France.
- [35] “Ετήσια έκθεση 2008”, ΚΑΠΕ.
- [36] S. A. Papathanassiou, M. P. Papadopoulos, “Dynamic Characteristics of Autonomous Wind- Diesel Systems”, Renewable Energy, Vol 23, No. 2, June 2001, Pages 293-311.
- [37] “Ετήσια έκθεση 2000”, ΚΑΠΕ.
- [38] “Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για δυνητικούς χρήστες”, ΚΑΠΕ, 2006.
- [39] “Ενέργεια, περιβάλλον και επιχειρηματικότητα”, Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης, Νοέμβριος 2003.
- [40] Ζ. Μαντάς, Π. Θεοδωρόπουλος, Γ. Μπέτζιος, Α. Ζερβός, “Υβριδικό σύστημα με χρήση αντλησιοταμίευσης για μέγιστη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στη νήσο Σέριφο”.
- [41] S. A. Papathanassiou, N.G. Boulaxis, “Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems”, Renewable Energy, Vol. 31, No. 4, pp. 457-479, Apr. 2006.
- [42] Γερογιάννης, “Δυναμική ανάλυση υβριδικών συστημάτων”, Μεταπτυχιακή εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. "Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας", Αθήνα 2005