



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

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ
ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΙΚΡΟΥ
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΒΟΥΛΑΡΙΝΟΥ

Επιβλέπων : Στ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



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

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΒΟΥΛΑΡΙΝΟΥ

Επιβλέπων : Στ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.

(Υπογραφή)

.....

Στ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Α. Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

(Υπογραφή)

.....

ΙΩΑΝΝΗΣ ΒΟΥΛΑΡΙΝΟΣ

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

© 2018 – All rights reserved

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι το πώς μοντελοποιείται, παραμετροποιείται και τελικά, προσομοιώνεται η λειτουργία ενός Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου με την βοήθεια του λογισμικού MATLAB/ Simulink. Η παραμετροποίηση βασίζεται σε ένα υπαρκτό και εν λειτουργία ΜΥΗΕ. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιείται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τα διαθέσιμα έγγραφα του πραγματικού ΜΥΗΕ ένα πλήρες μοντέλο μίας υδροηλεκτρικής μονάδας, το οποίο περιλαμβάνει σύγχρονη γεννήτρια, υδροστρόβιλο, ρυθμιστή στροφών υδροστρόβιλου και ρυθμιστή τάσης διέγερσης. Στην συνέχεια, το εν λόγω μοντέλο παραμετροποιείται με βάση τα χαρακτηριστικά του πραγματικού έργου. Ύστερα παρουσιάζονται οι διαθέσιμες αποκρίσεις πραγματικών δοκιμών του ΜΥΗΕ και τέλος, προσομοιώνεται η λειτουργία του. Οι κυματομορφές των κρίσιμότερων μεγεθών παρουσιάζονται τόσο κατά τη μεταβατική, όσο και κατά τη μόνιμη κατάσταση. Εκτός της απομονωμένης παρουσίασης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων πραγματοποιείται και σύγκριση των αποκρίσεων του μοντέλου με τις πραγματικές αποκρίσεις οι οποίες καταγράφηκαν στον Υδροηλεκτρικό Σταθμό κατά την εκτέλεση των Site Acceptance Tests (SATs).

Λέξεις Κλειδιά: ΜΥΗΕ, Μοντελοποίηση, Παραμετροποίηση, Υδροστρόβιλος, Σύγχρονη Γεννήτρια, Δοκιμές Πεδίου, SATs, Ευστάθεια, Μεταβατική Συμπεριφορά, MATLAB/Simulink

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The subject of this Diploma Thesis is how the operation of a Small Hydroelectric Power Plant (SHPP) is modeled, parameterized and simulated, using the MATLAB / Simulink software. The parameterization is based on an actual operating SHPP. Firstly, a full order model of a hydroelectric unit is carried out, while considering the relevant bibliography and the available SHPP's documents. This model includes a synchronous generator, a hydro turbine, a turbine governor and a voltage regulator. In addition, this model is parameterized based on the available data of the particular project. Afterwards, the most critical waveforms of several variables of the model are presented both in the transient and steady state. In conclusion, the available Site Acceptance Test's (SATs) measurements of the actual SHPP are presented and compared with the simulation results of the full order model running on MATLAB / Simulink software.

Keywords: SHPP, Modeling, Parameterizing, Hydro Turbine, Synchronous Generator, SATs, Stability state, Transition state, MATLAB/Simulink

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Μελέτη Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων	1
1.1.1	Ιστορική Αναδρομή.....	1
1.1.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικρών ΥΗΕ.....	2
1.1.3	Διαφορές μεταξύ μεγάλων και μικρών ΥΗΕ.....	3
1.2	Ανάλυση της Διπλωματικής Εργασίας	5
2	Μοντελοποίηση του ΜΥΗΕ.....	6
2.1	Μοντελοποίηση Σύγχρονης Γεννήτριας	7
2.1.1	Αρχή Λειτουργίας Σύγχρονης Γεννήτριας (Σ.Γ.).....	7
2.1.2	Τύποι Σύγχρονης Γεννήτριας.....	7
2.1.3	Μοντέλο Σύγχρονης Γεννήτριας	9
2.2	Μοντελοποίηση Υδροστρόβιλου	15
2.2.1	Αρχή Λειτουργίας Υδροστρόβιλου	15
2.2.2	Τύποι Υδροστρόβιλων	17
2.2.3	Μοντέλο Υδροστρόβιλου.....	20
2.3	Μοντελοποίηση Συστήματος Διέγερσης της Γεννήτριας	24
2.3.1	Εισαγωγή στο Σύστημα Διέγερσης των Σύγχρονων Γεννητριών	24
2.3.2	Τύποι Συστημάτων Διέγερσης	25
2.3.3	Μοντέλο του Συστήματος Διέγερσης.....	26
2.4	Μοντελοποίηση Ρυθμιστή Στροφών του Υδροστρόβιλου.....	30
2.4.1	Εισαγωγή στο Σύστημα Ρύθμισης Στροφών του Υδροστροβίλου	30
2.4.2	Μοντέλο Ρυθμιστή Στροφών	32
3	Παραμετροποίηση του Μοντέλου ΜΥΗΕ	35
3.1	Παραμετροποίηση του Μοντέλου Σύγχρονης Γεννήτριας	35
3.2	Παραμετροποίηση του Μοντέλου του Υδροστροβίλου.....	38
3.3	Παραμετροποίηση του Μοντέλου του Ρυθμιστή Στροφών	41
3.4	Παραμετροποίηση του Συστήματος Διέγερσης της Γεννήτριας.....	43
4	Αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου	45
4.1	Δοκιμές Πεδίου πραγματικού ΜΥΗΕ (SATs).....	46
4.1.1	Θεωρητικά στοιχεία επί των Δοκιμών Πεδίου (SATs) ενός ΜΥΗΕ	46

4.1.2	Αποτελέσματα Δοκιμών Πεδίου κατά την λειτουργία του ΜΥΗΕ.....	49
4.2	Προσομοιώσεις και σύγκριση με τις Δοκιμές.....	56
4.2.1	Παρατηρήσεις επί των προσομοιώσεων στο MATLAB/Simulink.....	56
4.2.2	Προσομοιώσεις σε MATLAB/Simulink για το 50% της ονομαστικής Ενεργού Ισχύος.....	58
4.3	Προσομοιώσεις διαταραχών στο μοντέλο και παρατήρηση μεταβατικής ευστάθειας 63	
5	Επίλογος	66
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	66
5.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	67
6	Βιβλιογραφία.....	69

1

Εισαγωγή

1.1 Μελέτη Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων [1]

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Από τους αρχαίους κίβλας πολιτισμούς, παρατηρείται εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας και μετατροπής της σε μηχανική, μέσω χρήσης νερόμυλων, οι οποίοι είχαν μεγάλο μέγεθος, αλλά ήταν έργα μικρής ισχύος.

Στη μετέπειτα εξέλιξη των κοινωνιών, παρατηρούνται αυξημένες ενεργειακές ανάγκες που οδηγούν στην αναζήτηση μεγαλύτερης τεχνολογικής προόδου και άρα, εξέλιξη των διαθέσιμων μέσων και κατασκευή όλο και μεγαλύτερων έργων μετατροπής υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Σημαντικός σταθμός στην αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας ήταν η ανάπτυξη των εφαρμογών του ηλεκτρισμού, μία μορφή ενέργειας της οποίας η μεταφορά από τη θέση παραγωγής στη θέση της κατανάλωσης είναι σχετικά εύκολη. Έκτοτε το έργο αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας γίνεται «Υδροηλεκτρικό», δηλαδή, πλέον η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική από τον υδροστρόβιλο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική από την ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συζευγμένη με αυτόν. Με τον τρόπο αυτό αποδεσμεύθηκε ο τόπος παραγωγής της μηχανικής ενέργειας από τον τόπο κατανάλωσης της ενέργειας, γεγονός που επέτρεψε την αύξηση της ισχύος των ΥΗΕ.

Η μορφολογία της Ελλάδας ευνοεί τη διαμόρφωση ταμιευτήρων με υψηλή ρυθμιστική ικανότητα, δηλαδή, χώρους αποθήκευσης νερού, με μεγάλη ωφέλιμη χωρητικότητα, που εξασφαλίζει υπερετήσια ή εποχιακή ρύθμιση των εισροών του νερού στο ΥΗΕ. Παράλληλα, θετικό στοιχείο είναι ότι λόγω ορεινής επιφανειακής διαμόρφωσης της χώρας υπάρχουν πολλές διαθέσιμες υδραυλικές υδατοπτώσεις. Από άλλη σκοπιά, όμως, η έλλειψη μεγάλων ποταμών με κατά το δυνατόν συνεχή και ομοιόμορφη παροχή δεν επιτρέπει

την κατασκευή μεγάλων ΥΗΕ βάσεως. Για τον λόγο αυτό τα μεγάλα ΥΗΕ στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται για την κάλυψη φορτίων αιχμής του συστήματος.

Από επίσημα στοιχεία του Διαχειριστή ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης και του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας (πρώην ΛΑΓΗΕ), στην Ελλάδα έως και τον Μάιο του 2018, η ισχύς των λειτουργούντων ΜΥΗΕ ανέρχεται σε 232,39MW.[2] Επιπρόσθετα, στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) είναι εγκατεστημένα μεγάλα ΥΗΕ συνολικής ισχύς 3170,7MW.[3]

1.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικρών ΥΗΕ

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός μικρού ΥΗΕ, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Ως κυριότερα πλεονεκτήματα αναφέρονται τα εξής:

- Οι υδατοπτώσεις συγκαταλέγονται στις Α.Π.Ε.. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος εξαντλήσεώς τους.
- Τα ΥΗΕ δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με απόβλητα ή κατάλοιπα και δεν αυξάνουν τη θερμοκρασία του νερού των ποταμών.
- Η κατασκευή ενός ΥΗΕ συνδυάζεται συχνά και με άλλες διευθετήσεις, όπως άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση πλημμύρας, αλιεία ,κ.λπ.
- Οι υδροστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στα ΥΗΕ για μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική, είναι στιβαρές και αξιόπιστες μηχανές. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούν μικρή συντήρηση και επίβλεψη. Ο προληπτικός έλεγχος για την ορθότητα της λειτουργίας τους γίνεται μετά τις 5.000 ώρες λειτουργίας και για τον λόγο αυτό το προσωπικό που απασχολείται σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό είναι το κατά το δυνατόν λιγότερο.
- Η διάρκεια ζωής ενός μεγάλου ΥΗΕ είναι περίπου 50 έτη, ενώ για ένα μικρό ΥΗΕ περίπου 20-30 έτη. Η διάρκεια ζωής τους μπορεί να γίνει ακόμα μεγαλύτερη, σε περίπτωση ανανέωσης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Το πλέον σημαντικό πλεονέκτημα των ΥΗΕ 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. Τον ρόλο αυτόν αναλαμβάνουν τα ΥΗΕ μεγάλης ισχύος, δηλαδή, αυτά των οποίων το φράγμα δημιουργεί ταμιευτήρα μεγάλης χωρητικότητας. Η δυνατότητα αποθεματοποίησης των υδάτινων πόρων, ώστε τα

ΥΗΕ να τα εκμεταλλευτούν τις ώρες αιχμής του συστήματος είναι σημαντική τόσο για την επάρκεια ισχύος, όσο και από οικονομικής άποψης, καθώς, η αξία της ενέργειας τις ώρες αιχμής είναι συχνά αρκετά υψηλότερη από αυτή της βάσεως. Τα μικρά ΥΗΕ, λόγω ακριβώς της μικρής ισχύος τους, δεν μπορούν να συνεισφέρουν στην κάλυψη των αιχμών ενός διασυνδεδεμένου δικτύου και για τον λόγο αυτό δεν υπάρχει λόγος κατασκευής ταμειυτήρα.

Ως κυριότερα μειονεκτήματα αναφέρονται τα παρακάτω:

- Έχουν μεγάλη διάρκεια κατασκευής. Τα μεγάλα ΥΗΕ έχουν χρόνο κατασκευής της τάξης των 5-10 ετών και τα μικρά ΥΗΕ της τάξης των 1-2 ετών. Επίσης, μεγάλη είναι και η χρονική διάρκεια των μελετών και επεξεργασίας των υδρολογικών και γεωλογικών στοιχείων, οι οποίες πρέπει να είναι ιδιαίτερα αξιόπιστες.
- Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται διακυμάνσεις που σχετίζονται με την υδραυλικότητα της χρονιάς, δηλαδή, την ποσότητα βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων.
- Έχουν πολύ υψηλό κόστος κατασκευής.
- Η κατασκευή τους προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων υδατοπτώσεων και μεγάλων παροχών. Για τον λόγο αυτό η θέση τους είναι πολλές φορές πολύ μακριά από το τελικό σημείο κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ιδιαίτερα το κόστος κατασκευής του δικτύου μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1.3 Διαφορές μεταξύ μεγάλων και μικρών ΥΗΕ

Ο χαρακτηρισμός ενός ΥΗΕ ως μικρό ή μεγάλο δεν αναφέρεται αποκλειστικά στην εγκατεστημένη ισχύ ή το μέγεθος των μονάδων, αλλά σε ένα σύνολο ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών του.

Αρχικά, διευκρινίζεται ότι από πλευράς αρχής λειτουργίας τόσο στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική, όσο και στη μετατροπή της τελευταίας σε ηλεκτρική, δεν υπάρχουν διαφορές ανάμεσα σε μικρά και μεγάλα ΥΗΕ. Επίσης, δεν εμφανίζουν διαφορές στη διάρθρωση των τμημάτων από τα οποία απαρτίζονται.

Συνηθίζεται ως κριτήριο διάκρισης μεγάλων και μικρών ΥΗΕ να υπερτερεί το όριο εγκατεστημένης ισχύος τους, καθώς ένα ΥΗΕ χαρακτηρίζεται μικρό όταν η ονομαστική του ισχύς δεν ξεπερνά τα 5MW ή 10MW ή 15MW, ανάλογα με το ρυθμιστικό πλαίσιο της εκάστοτε χώρας. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι το ποσοτικό αυτό κριτήριο είναι ρευστό, γεγονός που δεν αναιρεί, όμως, ότι είναι το επικρατέστερο.

Σε καμιά περίπτωση, το μικρό ΥΗΕ δεν μπορεί να συσχετιστεί με το μεγάλο ως έργο μικρότερης κλίμακας. Οι κύριες διαφορές εντοπίζονται στον εγκατεστημένο εξοπλισμό που απαρτίζουν το έργο και αυτός επιλέγεται με βάση το πρόγραμμα αξιοποίησης του εκάστοτε έργου. Για παράδειγμα, τα μεγάλα ΥΗΕ έχουν δυνατότητα αποτελεσματικής κάλυψης των αιχμών ζήτησης του Συστήματος. Από την άλλη πολλά μικρά ΥΗΕ μπορούν να αξιοποιήσουν σε πολλά σημεία μιας χώρας τις υδατοπτώσεις και να συμβάλλουν με μία αξιόλογη διεσπαρμένη παραγωγή.

Μια άλλη διάκριση των ΥΗΕ αναφέρεται στο διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης H , η τιμή του οποίου εκφράζει την ανά μονάδα μάζα υδραυλική ενέργεια του νερού και την τάξη μεγέθους της στατικής πίεσης στον αγωγό προσαγωγής και το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου. Τονίζεται ότι από την τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης εξαρτάται κυρίως η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες:

- Μικρού ύψους: $H < 20\text{m}$
- Μεσαίου ύψους: $20\text{m} < H < 150\text{m}$
- Μεγάλου ύψους: $H > 150\text{m}$

Τέλος, ένα κριτήριο διάκρισης αποτελεί και το εάν το φράγμα σχηματίζει ταμιευτήρα μεγάλου όγκου ή αν ο σταθμός λειτουργεί κατά το ρου του ποταμού.

1.2 Ανάλυση της Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία μοντελοποιείται Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο (ΜΥΗΕ), με αξιοποίηση πραγματικών στοιχείων και μετρήσεων υπαρκτού ΜΥΗΕ. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η σύγκριση αποκρίσεων του μοντέλου που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια με το υπαρκτό έργο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο, καθώς και η παρατήρηση της μεταβατικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους που αναφέρεται το κάθε ένα από τα υπόλοιπα κεφάλαια της παρούσας Διπλωματικής.

Στο παρόν κεφάλαιο και πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται εισαγωγή σε κάποια γενικότερα στοιχεία ενδιαφέροντος πάνω στα ΥΗΕ. Γίνεται μία ιστορική αναδρομή στην παραγωγή ενέργειας από ΥΗΕ, στα κριτήρια διάκρισης τους σε μικρά και μεγάλα, καθώς αναφέρονται και κάποια στοιχεία που αφορούν την παραγωγή ισχύος από ΥΗΕ στην Ελλάδα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τμηματικά όλες οι μοντελοποιήσεις των διάφορων υποσυστημάτων του τελικού μοντέλου της υδροηλεκτρικής μονάδας. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB/Simulink. Αναφέρονται οι πηγές από τις οποίες επιλέχθηκαν οι εκάστοτε μαθηματικές εξισώσεις και η λογική της μοντελοποίησης του κάθε υποσυστήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα για τα οποία παρουσιάζεται η μοντελοποίηση τους είναι η σύγχρονη γεννήτρια, ο υδροστρόβιλος, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης για τη διέγερση της γεννήτριας και ο ρυθμιστής στροφών του υδροστροβίλου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η απόδοση τιμών στις διάφορες μεταβλητές των μαθηματικών εξισώσεων των μοντέλων του δευτέρου κεφαλαίου. Τα στοιχεία που τελικά δεν ήταν εφικτό να βρεθούν, αντικαταστάθηκαν με τιμές από τη Διεθνή Βιβλιογραφία, ώστε τελικά να καταστεί το μοντέλο λειτουργικό, γεγονός που εισάγει αποκλίσεις στην όσο το δυνατόν πιο πιστή αποτύπωση των αποκρίσεων του πρότυπου έργου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, πραγματοποιούνται οι δοκιμές για το μοντέλο της Διπλωματικής Εργασίας και οι συγκρίσεις τους με τις αποκρίσεις Δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο Πεδίο για το πρότυπο ΜΥΗΕ. Επίσης, πραγματοποιούνται δοκιμές για τη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Οι δοκιμές αυτές επίσης πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού MATLAB/Simulink. Περαιτέρω συμπεράσματα παρουσιάζονται και στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μία περίληψη των συμπερασμάτων που εξάγονται από τη Διπλωματική Εργασία και προτείνονται περαιτέρω κλάδοι της Διπλωματικής, για τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί μελλοντικά ενδελεχή έρευνα.

2

Μοντελοποίηση του

ΜΥΗΕ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί το κάθε επιμέρους σύστημα που μοντελοποιήθηκε, έτσι ώστε να επιτευχθεί η πλήρης μοντελοποίηση του ΜΥΗΕ. Γενικότερα, θα γίνει επεξήγηση για το κάθε σύστημα επί των αρχών λειτουργίας του, καθώς και περιγραφή των υποσυστημάτων από τα οποία απαρτίζεται. Κυριότερα, όμως, θα αναλυθούν το σκεπτικό, οι εξισώσεις και η μελέτη που οδήγησε στα υπάρχοντα μοντέλα. Το τελικό μοντέλο του ΜΥΗΕ προσεγγίζει, στο πλαίσιο του εφικτού και με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, υπαρκτό και εν λειτουργία έργο.

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο έργο, το οποίο και αποτελεί το πρότυπο της μοντελοποίησης, περιλαμβάνει τρεις υδροηλεκτρικές μονάδες, οι οποίες αποτελούνται από τρεις σύγχρονες γεννήτριες και τρεις υδροστροβίλους, με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους φυσικά συστήματα. Στην Διπλωματική εργασία θα υλοποιηθεί μοντελοποίηση μόνο μίας εκ των τριών υδροηλεκτρικών μονάδων, καθώς υπάρχουν επαρκή στοιχεία και για την μεμονωμένη λειτουργία τους και κρίνεται πως η πρόσθετη υπολογιστική πολυπλοκότητα της διερεύνησης της παράλληλης λειτουργίας των τριών μονάδων είναι υπέρμετρα μεγαλύτερη από την προστιθέμενη αξία της επιπλέον αυτής μοντελοποίησης. Όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 5.2, η παράλληλη λειτουργία των τριών μονάδων θα μπορούσε να υλοποιηθεί στο πλαίσιο μελλοντικής εργασίας με τα στοιχεία του συγκεκριμένου έργου.

2.1 Μοντελοποίηση Σύγχρονης Γεννήτριας

2.1.1 Αρχή Λειτουργίας Σύγχρονης Γεννήτριας (Σ.Γ.)

Ο βασικός ρόλος της γεννήτριας ως συστήματος είναι η μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, η οποία στην περίπτωση της παρούσας εργασίας παρέχεται από ένα υδροστρόβιλο. Ο όρος σύγχρονη, ως προσδιορισμός γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος, αναφέρεται στην περιστροφή του δρομέα της γεννήτριας με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, διατηρώντας την τάση και την ηλεκτρική συχνότητα του Δικτύου σταθερή.

Η σύγχρονη ταχύτητα ορίζεται συναρτήσει της ηλεκτρικής συχνότητας του Δικτύου ως εξής:

$$n = (120 \cdot f)/P \quad (2.1-1)$$

όπου n η σύγχρονη ταχύτητα σε rpm, f η ηλεκτρική συχνότητα του Δικτύου σε Hz και P οι πόλοι της γεννήτριας.

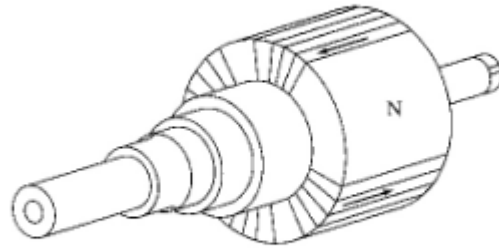
Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών βασίζεται στον νόμο του Faraday, σύμφωνα με τον οποίο, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή σε κινούμενο αγωγό που τέμνει σταθερό μαγνητικό πεδίο. Το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι ανάλογο του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου, καθώς και της ταχύτητας και του μήκους του αγωγού.

Με βάση, την αρχή αυτή λειτουργούν οι γεννήτριες, στις οποίες, το μαγνητικό πεδίο δεν δημιουργείται από μόνιμο μαγνήτη (εκτός των γεννητριών μόνιμων μαγνητών), αλλά από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από την περιστροφή του δρομέα, τα τυλίγματα του οποίου διαρρέονται από ρεύμα σταθερής τιμής. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται διέγερση της μηχανής και το ρεύμα, που είναι υπαίτιο για αυτή, ρεύμα διέγερσης.

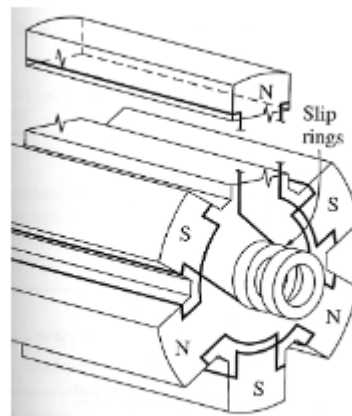
2.1.2 Τύποι Σύγχρονης Γεννήτριας

Κατασκευαστικά οι γεννήτριες χωρίζονται σε δύο μέρη, τον στάτη, που αποτελεί το σταθερό μέρος και το δρομέα, που αποτελεί το κινητό μέρος της γεννήτριας.

Ένας διαχωρισμός των Σ.Γ. που αφορά την κατασκευαστική διαμόρφωση του δρομέα είναι η κατηγοριοποίηση τους σε κυλινδρικού δρομέα και δρομέα έκτυπων πόλων, όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα.



Κυλινδρικός δρομέας



Δρομέας εκτύπων πόλων

Σχήμα 2.1 Διαμόρφωση Κυλινδρικού Δρομέα και Δρομέα Εκτύπων Πόλων [4]

Σε γεννήτριες δύο ή τεσσάρων πόλων επιλέγεται η διαμόρφωση κυλινδρικού δρομέα, ενώ όταν οι πόλοι είναι περισσότεροι επιλέγεται δρομέα έκτυπων πόλων.

Οι Σ.Γ. κυλινδρικού δρομέα χρησιμοποιούνται για παραγωγή μικρής ισχύος, με χαμηλή τάση, ενώ για μεγαλύτερη ισχύς με σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, όπως συμβαίνει σε ένα ΥΗΕ, χρησιμοποιούνται οι Σ.Γ. εκτύπων πόλων. Η Σ.Γ του πρότυπου έργου είναι έκτυπων πόλων και για το λόγο αυτό και στο μοντέλο της στο MATLAB/Simulink επιλέγεται η μοντελοποίηση Σ.Γ. έκτυπων πόλων [1].

2.1.3 Μοντέλο Σύγχρονης Γεννήτριας

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η μαθηματική μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας που υλοποιήθηκε στις προσομοιώσεις της υδροηλεκτρικής μονάδας, με χρήση του Λογισμικού MATLAB /Simulink. Δίνοντας τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου μας και πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση, αναφέρεται ότι το μοντέλο είναι τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων στον δρομέα, με τα τυλίγματα του στάτη συνδεδεμένα σε Αστέρα.

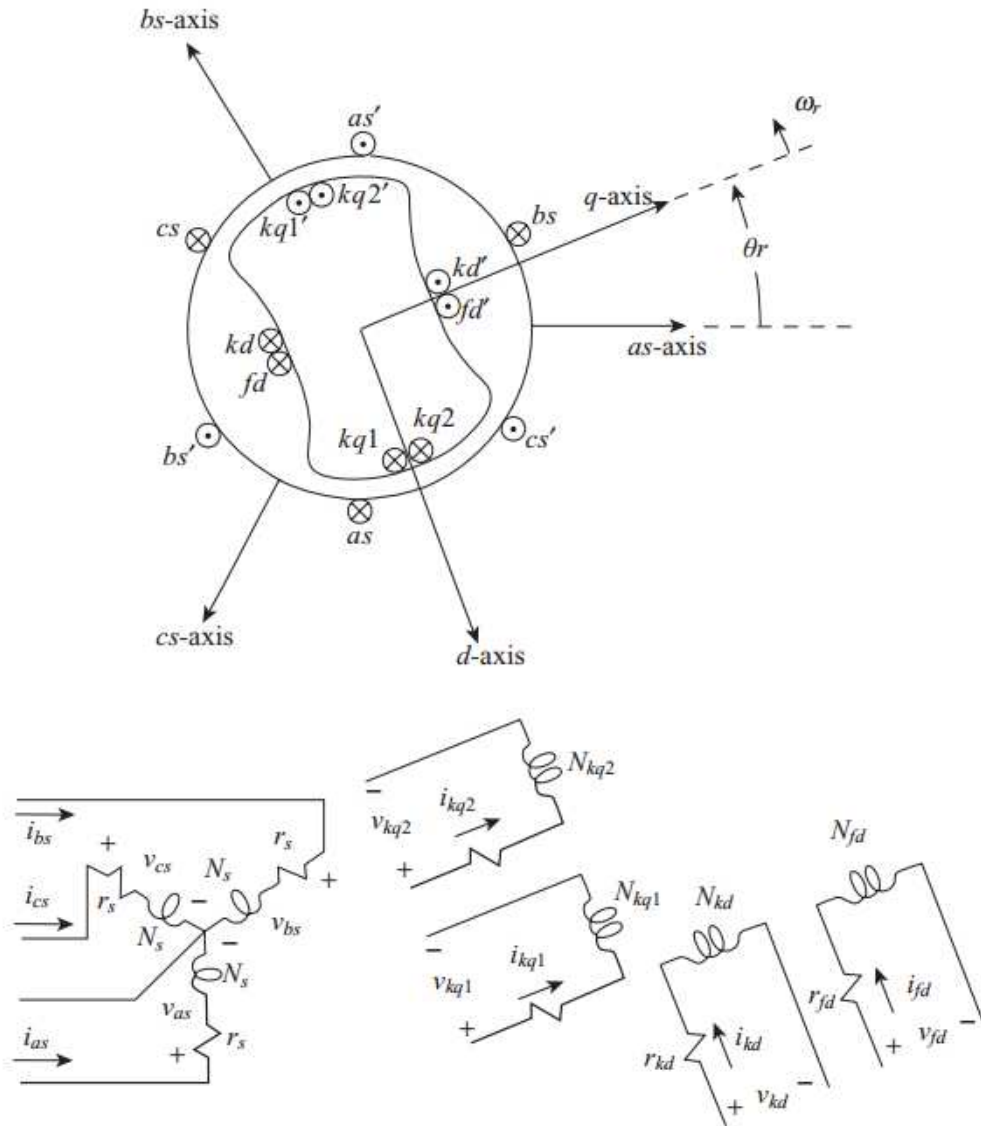
Για να γίνει κατανοητό το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής που χρησιμοποιήθηκε, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στον **Μετασχηματισμό Park [5]**.

Κατά την μαθηματική ανάλυση της σύγχρονης γεννήτριας είναι γεγονός ότι υπεισέρχονται πολλοί χρονομεταβλητοί όροι, οι οποίοι δυσκολεύουν το έργο της μοντελοποίησης. Ένας από τους μετασχηματισμούς που μπορούν να τους απαλείψουν και να διευκολύνουν τη μαθηματική μοντελοποίηση είναι και αυτός του Park , ο οποίος είναι και ο πιο ευρέως διαδεδομένος. Ο Μετασχηματισμός αυτός επιτυγχάνει να ορίσει ένα νέο σύνολο μεταβλητών στον στάτη, οι οποίες είναι οι προϋπάρχουσες, όπως ρεύματα, τάσεις, μαγνητικές ζεύξεις, που όμως πλέον αποτελούν τις προβολές των φυσικών αυτών μεγεθών πάνω σε τρεις νέους άξονες:

- Στον άξονα του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα(direct axis – d)
- Στον άξονα, ο οποίος είναι κάθετος στον προηγούμενο(quadrature axis – q)
- Στον άξονα μηδενικής ακολουθίας(stationary axis – 0)

Το Σχήμα 2.2 απεικονίζει σχηματικά την Σ.Γ. με τα στοιχεία και τους θεωρητικούς τις άξονες.

Ο ρόλος, συνεπώς, του Μετασχηματισμού Park είναι να μετατρέψει όλες τις μεταβλητές που χρειάζονται από το σύστημα αναφοράς των τριών φάσεων του στάτη, σε ένα καινούριο σύστημα αναφοράς, το οποίο θα περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα μαζί με τον δρομέα. Σημειώνεται εδώ ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μόνο οι συνιστώσες στους άξονες d και q, εφόσον κατά την μόνιμη συμμετρική λειτουργία η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας είναι μηδενική και τα μεγέθη αποτυπώνονται πλήρως από τις άλλες δύο συνιστώσες.



Σχήμα 2.2 Απεικόνιση Στοιχείων Σ.Γ. επί των θεωρητικών της αξόνων [6]

Παρακάτω, παρατίθεται ο πίνακας του μετασχηματισμού από το σύστημα αναφοράς του στάτη σε αυτό των αξόνων d,q και 0.

$$K_s = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.1-2)$$

Και αντίστοιχα, παρατίθεται και ο αντίστροφος μετασχηματισμός:

$$K_S^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1-3)$$

Όπου $d\theta/dt=\omega$, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου αναφοράς, που στην προκειμένη περίπτωση είναι η σύγχρονη.

Στη μοντελοποίηση της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν οι δύο παραπάνω πίνακες για τον μετασχηματισμό των τριφασικών μεγεθών στο στρεφόμενο dq0 πλαίσιο και αντίστροφα.

Το μοντέλο της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει στον δρομέα του ένα τυλίγμα διέγερσης και δύο τυλίγματα απόσβεσης, ένα στον άξονα q και το άλλο άξονα d. Σημειώνεται, ότι στις εξισώσεις χρησιμοποιούνται μόνο τα χαρακτηριστικά ενός τυλίγματος απόσβεσης στον άξονα q διότι, όπως αναφέρεται και στην αναφορά [6], επαρκεί σε μία μοντελοποίηση Σ.Γ. δρομέα έκτυπων πόλων να χρησιμοποιηθούν τα χαρακτηριστικά ενός τυλίγματος στον άξονα q, για την μελέτη της συμπεριφοράς και της απόδοσης της. Εκτενής ανάλυση του μοντέλου αυτού μπορεί να αναζητηθεί στην αναφορά [6].

Στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής λήφθηκαν ως είσοδοι η τριφασική τάση των τυλιγμάτων του στάτη και ως έξοδοι τα ρεύματα του στάτη, επομένως η Σ.Γ. μοντελοποιήθηκε ως μία πηγή τριφασικού ρεύματος. Επιπροσθέτως, οι μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα είναι υπολογισμένες και εκφρασμένες στο dq σύστημα αξόνων. Τα ρεύματα των δύο τυλιγμάτων απόσβεσης και το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης στον δρομέα είναι και αυτά εκφρασμένα στο σύστημα αναφοράς αξόνων του δρομέα και υπολογίζονται από τις εξισώσεις των μαγνητικών ροών και των αντιδράσεων των αντίστοιχων τυλιγμάτων. Τέλος, τα ρεύματα του στάτη, που αποτελούν και τις εξόδους του μοντέλου, υπολογίζονται ως προς το dq σύστημα αναφοράς με χρήση του πίνακα ανάστροφου μετασχηματισμού (βλ. εξίσωση 2.1-3). Ως τελική παρατήρηση για το μοντέλο πρέπει να αναφερθεί ότι τα ρεύματα του στάτη που εμφανίζονται στις εξισώσεις, υπολογίζονται με φορά προς τον στάτη και όχι προς το Σύστημα Μεταφοράς και επομένως, υλοποιείται μοντέλο σύγχρονου κινητήρα, στο πρώτο στάδιο. Σε επόμενο στάδιο, αλλάζοντας πρόσημο στην εξίσωση για την ηλεκτρική και μηχανική ροπή του μοντέλου, υπολογίζεται ως αρνητική η ηλεκτρική ροπή και ως θετική η μηχανική ροπή. Τέλος, αλλάζοντας το πρόσημο των ρευμάτων του στάτη, που προκύπτουν από τις υλοποιημένες εξισώσεις, μοντελοποιείται

η σύγχρονη γεννήτρια. Θα τονιστούν και θα αποσαφηνιστούν οι συγκεκριμένες αλλαγές και στις αντίστοιχες εξισώσεις.

Στην παρούσα υποενοότητα παρατίθενται οι εξισώσεις όλων των υποσυστημάτων της Σ.Γ., με βάση τις οποίες υλοποιήθηκε το μοντέλο.

Στην πρώτη εξίσωση παρατίθεται ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ροπής της Γεννήτριας από τις τιμές των ροών των τυλιγμάτων και των αντίστοιχων τιμών των ρευμάτων του στάτη εκφρασμένες ως προς το σύστημα αναφοράς αξόνων του δρομέα.

Ηλεκτρική Ροπή Γεννήτριας

$$\bullet \quad T_{em} = \psi_{ds}^r \cdot i_{qs}^r - \psi_{qs}^r \cdot i_{ds}^r \quad (2.1-4)$$

Λόγω του ότι τελικά υλοποιείται μοντελοποίηση Σ.Γ., η παρακάτω εξίσωση είναι αυτή με βάση την οποία υπολογίζεται η τιμή της ηλεκτρικής γωνιακής ταχύτητας του δρομέα. Στον υπολογισμό συμμετέχουν η ηλεκτρική ροπή της Γεννήτριας (T_{em}), η μηχανική ροπή του άξονα του δρομέα (T_{mech}), καθώς και η βασική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (ω_b) και η σταθερά αδρανείας (H).

Ταχύτητα Δρομέα

$$\bullet \quad \omega_r = - \int \left[\left(\frac{\omega_b}{2 \cdot H} \right) \cdot (T_{em} - T_{mech}) \right] dt \quad (2.1-5)$$

Σύγχρονη Γεννήτρια

Οι εξισώσεις που αφορούν το ηλεκτρικό σκέλος της Σ.Γ. συσχετίζονται μεταξύ τους. Στην συνέχεια παρατίθενται με τη σειρά που δίνονται και στην αντίστοιχη βιβλιογραφία [6].

Οι παρακάτω συμβολισμοί ερμηνεύονται ως ακολούθως:

- Ψ_{qs} , η ροή τυλίγματος στάτη στον q άξονα
- Ψ_{ds} , η ροή τυλίγματος στάτη στον d άξονα
- Ψ_{0s} , η ροή τυλίγματος στάτη στον 0 άξονα
- Ψ_{mq} , η ροή τυλίγματος μαγνήτισης q άξονα
- Ψ_{md} , η ροή τυλίγματος μαγνήτισης d άξονα
- Ψ_{fd} , η ροή τυλίγματος διέγερσης
- Ψ_{kd} , η ροή τυλίγματος απόσβεσης στον d άξονα
- Ψ_{kq} , η ροή τυλίγματος απόσβεσης στον q άξονα

Παρατηρείται ότι οι παραπάνω συμβολισμοί και ερμηνείες ισχύουν επίσης και για τα ρεύματα, τις τάσεις, τις αντιδράσεις και τις αντιστάσεις, τα οποία συμβολίζονται με i, v, X και

r , αντίστοιχα. Επίσης, ο εκθέτης r συμβολίζει ότι το συγκεκριμένο μέγεθος είναι εκφρασμένο ως προς το σύστημα του δρομέα.

Αρχικά, δίνονται οι εκφράσεις των εκάστοτε ρευμάτων των τυλιγμάτων, ως προς τις μαγνητικές ροές:

$$\bullet \quad i_{qs}^r = \left(\frac{1}{X_{ls}}\right) \cdot (\psi_{qs}^r - \psi_{mq}^r) \quad (2.1-6)$$

$$\bullet \quad i_{ds}^r = \left(\frac{1}{X_{ls}}\right) \cdot (\psi_{ds}^r - \psi_{md}^r) \quad (2.1-7)$$

$$\bullet \quad i_{0s}^r = \left(\frac{1}{X_{ls}}\right) \cdot \psi_{0s}^r \quad (2.1-8)$$

$$\bullet \quad i_{kq2}^{r'} = \left(\frac{1}{X_{lkq2}'}\right) \cdot (\psi_{kq2}^{r'} - \psi_{mq}^r) \quad (2.1-9)$$

$$\bullet \quad i_{fd}^{r'} = \left(\frac{1}{X_{lfd}'}\right) \cdot (\psi_{fd}^{r'} - \psi_{md}^r) \quad (2.1-10)$$

$$\bullet \quad i_{kd}^{r'} = \left(\frac{1}{X_{lkd}'}\right) \cdot (\psi_{kd}^{r'} - \psi_{md}^r) \quad (2.1-11)$$

Παρακάτω, δίνονται οι εξισώσεις που μοντελοποιούν τις μαγνητικές ροές:

$$\bullet \quad \psi_{qs}^r = \omega_b \cdot \int [v_{qs}^r - \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right) \cdot \psi_{ds}^r + \left(\frac{r_s}{X_{ls}}\right) \cdot (\psi_{mq}^r - \psi_{qs}^r)] dt \quad (2.1-12)$$

$$\bullet \quad \psi_{ds}^r = \omega_b \cdot \int [v_{ds}^r + \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right) \cdot \psi_{qs}^r + \left(\frac{r_s}{X_{ls}}\right) \cdot (\psi_{md}^r - \psi_{ds}^r)] dt \quad (2.1-13)$$

$$\bullet \quad \psi_{0s}^r = \omega_b \cdot \int [v_{0s}^r + \left(\frac{r_s}{X_{ls}}\right) \cdot \psi_{0s}^r] dt \quad (2.1-14)$$

$$\bullet \quad \psi_{kq2}^{r'} = \omega_b \cdot \int [v_{kq2}^{r'} + \left(\frac{r_{kq2}'}{X_{lkq2}'}\right) \cdot (\psi_{mq}^r - \psi_{kq2}^{r'})] dt \quad (2.1-15)$$

$$\bullet \quad \psi_{fd}^{r'} = \omega_b \cdot \int \left[\left(\frac{r_{fd}'}{X_{lfd}'}\right) \cdot e_{xfd}^{r'} + \left(\frac{r_{fd}'}{X_{lfd}'}\right) \cdot (\psi_{md}^r - \psi_{fd}^{r'}) \right] dt \quad (2.1-16)$$

$$\bullet \quad \psi_{kd}^{r'} = \omega_b \cdot \int [v_{kd}^{r'} + \left(\frac{r_{kd}'}{X_{lkd}'}\right) \cdot (\psi_{md}^r - \psi_{kd}^{r'})] dt \quad (2.1-17)$$

$$\bullet \quad \psi_{mq}^r = X_{aq} \cdot \left[\left(\frac{\psi_{qs}^r}{X_{ls}}\right) + \left(\frac{\psi_{kq2}^{r'}}{X_{lkq2}'}\right) \right] \quad (2.1-18)$$

$$\bullet \quad \psi_{md}^r = X_{ad} \cdot \left[\left(\frac{\psi_{ds}^r}{X_{ls}}\right) + \left(\frac{\psi_{fd}^{r'}}{X_{lfd}'}\right) + \left(\frac{\psi_{kd}^{r'}}{X_{lkd}'}\right) \right] \quad (2.1-19)$$

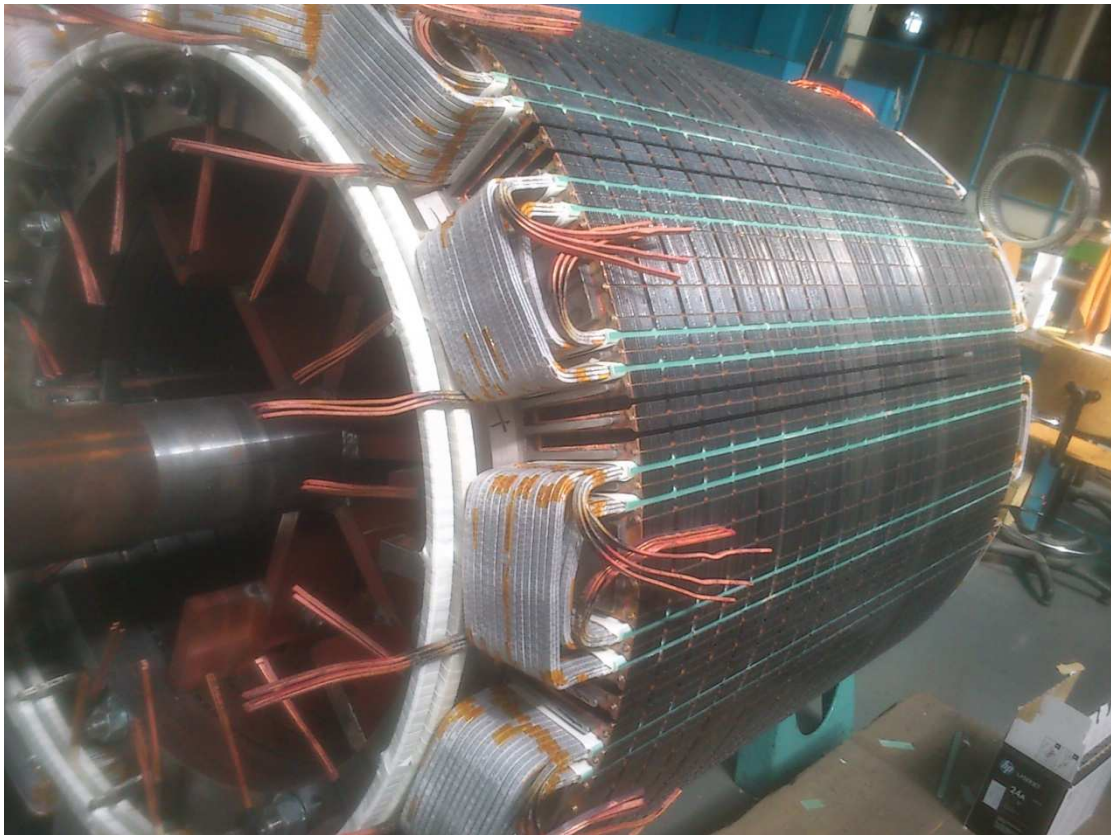
Τέλος, παρατίθενται οι εξισώσεις για τις αντιδράσεις X_{aq} και X_{ad} :

$$\bullet \quad X_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lkq2}'}} \quad (2.1-20)$$

- $$X_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lfd}} + \frac{1}{X_{lkd}}} \quad (2.1-21)$$

Παρατηρείται ότι οι τάσεις v'_{kq2} και v'_{kd} έχουν μηδενικές τιμές, εφόσον τα τυλίγματα απόσβεσης είναι πάντα βραχυκυκλωμένα.

Τέλος, στην *Εικόνα 2.1* παρουσιάζεται μία φωτογραφία της πραγματικής Σ.Γ. της υδροηλεκτρικής μονάδας που εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στην φωτογραφία διακρίνονται τα τυλίγματα του στάτη, ο άξονας του δρομέα, καθώς και οι πόλοι του.



Εικόνα 2.1 Φωτογραφία μίας εκ των τριών Σ.Γ. του πρότυπου έργου

2.2 Μοντελοποίηση Υδροστροβίλου

2.2.1 Αρχή Λειτουργίας Υδροστροβίλου [1],[7]

Ως υδροστροβίλος ορίζεται ο στροβίλος στον οποίο πραγματοποιείται μετατροπή της κινητικής και δυναμικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια, η οποία μεταδίδεται μέσω του κοινού άξονα στροβίλου-γεννήτριας στην τελευταία. Με άλλα λόγια, καθώς το νερό περιστρέφει τον υδροστροβίλο, ανάλογα με την ενέργεια του, στον άξονα της Σ.Γ. λαμβάνει χώρα μηχανική ενέργεια μέσω της ανάπτυξης κινητήριας ροπής T σε αυτόν. Συμβολίζοντας με ω την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η αντίστοιχη μηχανική ισχύς θα είναι ίση προς:

$$P = T \cdot \omega \quad (2.2-1)$$

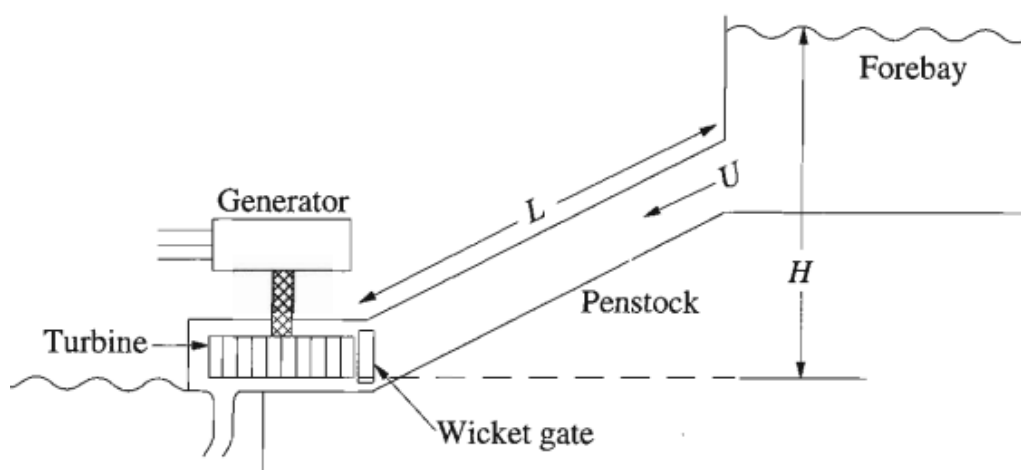
Η άτρακτος του στροβίλου είναι κοινή με την άτρακτο της ηλεκτρικής γεννήτριας μέσω της οποίας μετατρέπεται η μηχανική ισχύς P σε ηλεκτρική P_e , δηλαδή, σε μία μορφή ενέργειας η οποία είναι εύκολο να μεταφερθεί στον τόπο κατανάλωσής της.

Αναλύοντας περαιτέρω την ανάπτυξη ροπής, ο δρομέας του υδροστροβίλου αποτελείται από κάποια πτερύγια, δηλαδή, κάποιες φέρουσες επιφάνειες καθώς και από τον δίσκο της πλήμνης πάνω στον οποίο βρίσκονται τα πτερύγια αυτά. Οι διάφορες δυνάμεις και ροπές στρέψεως που λαμβάνουν χώρα λόγω της δύναμης του νερού, αναπτύσσονται στα πτερύγια και μεταφέρονται στην πλήμνη, καταλήγοντας στην άτρακτο της μηχανής. Για λόγους ζυγοστάθμισης θα πρέπει ο δρομέας να έχει τη μορφή αξονοσυμμετρικού σώματος ως προς τον άξονα της ατράκτου. Κατά τη διέλευση του νερού μεταξύ των πτερυγίων εγκαθίσταται ένα πεδίο ταχυτήτων και μία κατανομή στατικών πιέσεων στις επιφάνειες των πτερυγίων. Μέσω των στατικών αυτών πιέσεων, αναπτύσσονται δυνάμεις στις επιφάνειες των πτερυγίων και άρα ροπές ως προς τον άξονα περιστροφής της ατράκτου, η ολοκλήρωση των οποίων δίνει και την κινητήρια ροπή. Σημειώνεται ότι η ροπή που εξασκεί το νερό στον δρομέα είναι ίση με την μεταβολή της συστροφής που ο ίδιος ο δρομέας επιτυγχάνει μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης των πτερυγίων του, δηλαδή, μέσω των κατάλληλα διαμορφωμένων διόδων που σχηματίζονται μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τους υδροστροβίλους αντιδράσεως που θα αναλυθούν και στην συνέχεια, με την περιστροφή των ρυθμιστικών πτερυγίων τους επιτυγχάνεται η μεταβολή της διατομής μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της παροχής και άρα της ισχύος εξόδου του υδροστροβίλου, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Επομένως, η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων αποτελεί το όργανο ρύθμισης του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου αντιδράσεως. Όταν τα ρυθμιστικά πτερύγια εφάπτονται εξολοκλήρου το ένα με το άλλο,

τυπικά η διέλευση του υγρού πρέπει να μηδενίζεται και να επιτυγχάνεται η κράτηση της μονάδας.

Παρακάτω, παρουσιάζεται ένα απλό σχηματικό διάγραμμα ενός Υδροηλεκτρικού σταθμού, που απεικονίζει το πως φτάνει το νερό μέχρι τον στρόβιλο και με την σειρά του αυτός κινεί τη γεννήτρια, παρουσιάζοντας και τα διάφορα μέρη που οδηγούν το νερό στο στρόβιλο.



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση Συστήματος Υδροληψίας και Υδροστροβίλου [7]

Στο παραπάνω Σχήμα εκτός της γεννήτριας και του στροβίλου φαίνονται και τα παρακάτω μέρη:

- **Forebay (Φράγμα):** Είναι το φράγμα που επιτρέπει τη συγκράτηση της φυσικής ροής του νερού και την οδήγηση του στον αγωγό Penstock.
- **Αγωγός Penstock:** Είναι η σωλήνα που οδηγεί το νερό μέχρι τον Υδροηλεκτρικό Σταθμό και την είσοδο του στον υδροστρόβιλο.
- **Wicket gates (Ρυθμιστικά πτερύγια):** Είναι χειριζόμενα από σερβοκινητήρα πτερύγια πάνω στην περιφέρεια του υδροστροβίλου. Τα ρυθμιστικά πτερύγια καθορίζουν μέσω του ανοίγματος και της κλίσης τους ως προς τον άξονα του υδροστροβίλου, την κλίση με την οποία προσκρούει το νερό στην επιφάνειά τους. Η κλίση της πρόσκρουσης του νερού σε αυτά καθορίζει εν συνεχεία και την μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου.

Τα περαιτέρω σύμβολα μεγεθών που εμφανίζονται στο Σχήμα θα εξηγηθούν και σε επόμενη ενότητα, όπου αυτά εμφανίζονται στις εξισώσεις για τη μοντελοποίηση του υδροστροβίλου.

2.2.2 Τύποι Υδροστροβίλων [7]

Οι υδροστροβίλοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Υδροστροβίλοι ολικής προσβολής ή αντιδράσεως (reaction turbine)
- Υδροστροβίλοι μερικής προσβολής ή δράσεως (impulse-type turbine)

Οι υδροστροβίλοι ολικής προσβολής χαρακτηρίζονται έτσι, εφόσον η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική και για τον λόγο αυτό το τμήμα εισόδου πρέπει να περιβάλλει τον δρομέα εξασφαλίζοντας αξονοσυμμετρικές συνθήκες της ροής στη διατομή εισόδου του. Ο χαρακτηρισμός «αντιδράσεως» προέρχεται από το γεγονός ότι η ροή του νερού μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού.

Οι υδροστροβίλοι μερικής προσβολής χαρακτηρίζονται έτσι, εφόσον αντίθετα με τους προηγούμενους, σε κάθε χρονική στιγμή, μόνο ένα τμήμα του δρομέα τροφοδοτείται και συμβάλλει στη μετατροπή της ενέργειας. Δεδομένου, επίσης, ότι λειτουργούν σε χώρο ομοιόμορφης στατικής πίεσης, οπότε ο βαθμός αντιδράσεως είναι μηδενικός, έχουν και τον χαρακτηρισμό ως υδροστροβίλοι «δράσεως».

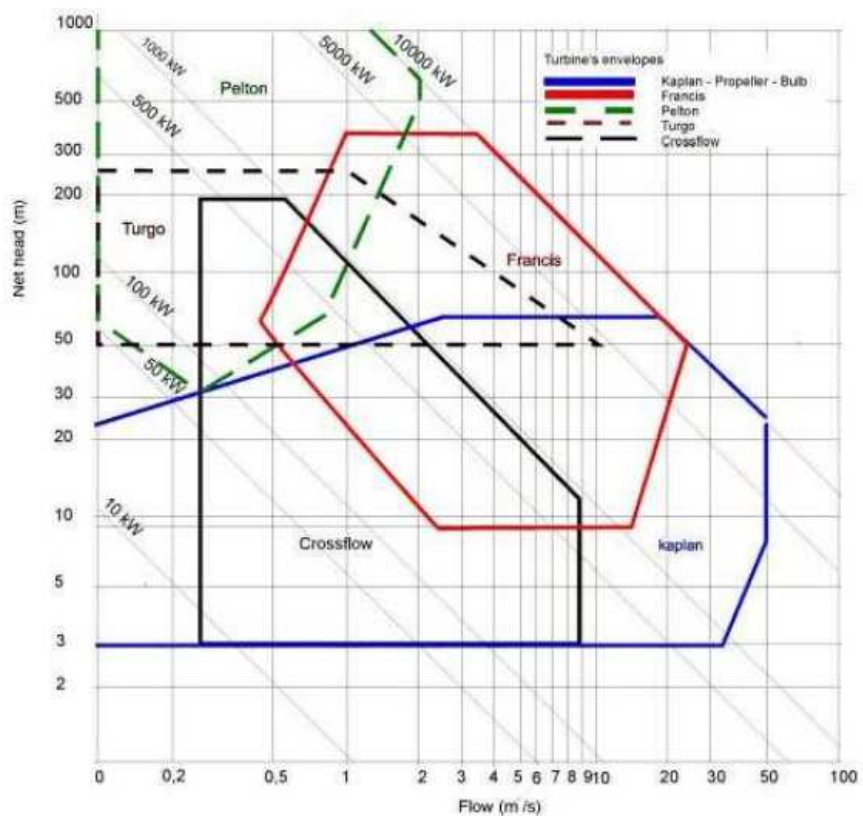
Οι υδροστροβίλοι δράσεως ή αλλιώς γνωστοί ως υδροστροβίλοι Pelton, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το ύψος υδατοπτώσεως είναι άνω των 300m. Αντίστοιχα, οι Υδροστροβίλοι αντιδράσεως χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το ύψος υδατοπτώσεως είναι το πολύ μέχρι 360m.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται διάγραμμα με τη βοήθεια του οποίου γίνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής, η επιλογή του είδους του υδροστροβίλου.

Οι τύποι των υδροστροβίλων δεν είναι μόνο οι δύο προαναφερόμενοι, αλλά πολλοί ακόμα που όμως υπάγονται στις δύο προαναφερόμενες βασικές κατηγορίες. Επίσης, η επιλογή του υδροστροβίλου δεν σχετίζεται μόνο με το ύψος υδατόπτωσης, αλλά όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, βασικό ρόλο παίζει και η ταχύτητα ροής του νερού. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με τον τύπο του στροβίλου καθορίζουν τελικά και την ισχύ του.

Ο πραγματικός υδροστροβίλος που εξετάζεται στην παρούσα Διπλωματική εργασία είναι τύπου Francis, συνεπώς, τέτοιος μοντελοποιήθηκε και στο MATLAB/Simulink.

Στις δύο παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται δύο φωτογραφίες του υδροστροβίλου Francis της πραγματικής υδροηλεκτρικής μονάδας που εξετάζεται στην παρούσα Διπλωματική εργασία. Στην εικόνα 2.2 παρατηρούνται τα ρυθμιστικά πτερύγια του υδροστροβίλου και το σύνολο του άξονα του. Ενώ, στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η τελική μεταλλική κατασκευή εγκατάστασης του υδροστροβίλου εντός του ΜΥΗΕ, που αποτελείται από ένα μεταλλικό «σαλιγκάρι» μέσω του οποίου το νερό φτάνει αξονοσυμμετρικά στα πτερύγια του στροβίλου και ενός μεταλλικού σωλήνα μέσω του οποίου το νερό βρίσκει διέξοδο.



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα επιλογής τύπου Υδροστροβίλου [8]



Εικόνα 2.2 Φωτογραφία ενός εκ των τριών Υδροστροβίλων του πρότυπου έργου



Εικόνα 2.3 Φωτογραφία μίας εκ των τριών ολοκληρωμένων Υδροηλεκτρικών μονάδων του πρότυπου έργου

Ο υδροστρόβιλος αντιδράσεως έχει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Ο ολικός βαθμός απόδοσης του είναι μεγαλύτερος από ότι του Pelton στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του.
- Η ταχύτητα περιστροφής του είναι μεγαλύτερη από αυτή του Pelton και άρα οι ολικές διαστάσεις και το κόστος του είναι μικρότερα.
- Η ρύθμιση της λειτουργίας του Francis μέσω της στεφάνης των ρυθμιστικών περυγίων είναι ακριβέστερη και πιο ικανοποιητική, ιδιαίτερα όσον αφορά τη ρύθμιση της συχνότητας της τάσης σε αυτόνομο ηλεκτρικό Δίκτυο.

2.2.3 Μοντέλο Υδροστρόβιλου

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει η επεξήγηση της μαθηματικής μοντελοποίησης του υδροστροβίλου, σε συνέχεια και σε αντιστοιχία με τη μαθηματική μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.1.3.

Αρχικά, αναφέρεται ότι το μοντέλο που υλοποιείται στην παρούσα Διπλωματική εργασία έχει βασιστεί στην αναφορά [7].

Αν και ο υδροστρόβιλος που εξετάζεται είναι τύπου Francis, το στοιχείο αυτό δεν είναι καθοριστικό για την μοντελοποίηση του, έτσι όλες οι εξισώσεις των μη γραμμικών μοντέλων που υλοποιούνται είναι ίδιες για όλους τους τύπους. Από την άλλη, κυρίαρχα κατά την μοντελοποίηση ενός υδροστροβίλου για την σωστή απόδοση του, είναι τα χαρακτηριστικά της υδατοστήλης του.

Τα φαινόμενα που λαμβάνονται ,επίσης, υπόψη για την μοντελοποίηση είναι:

- Το φαινόμενο της αδράνειας του νερού (water inertia).
- Το φαινόμενο της συμπιεστότητας του νερού (water compressibility).
- Η ελαστικότητα των τοιχωμάτων του σωλήνα Penstock.

Το φαινόμενο της αδράνειας του νερού είναι αυτό που συμβάλλει στο να αντιστέκεται για μικρό χρονικό διάστημα η ροή του νερού προς τον στρόβιλο, σε συνάρτηση με τις αλλαγές στο άνοιγμα ή το κλείσιμο εισόδου του νερού προς τον Στρόβιλο και τα ρυθμιστικά πτερύγια (wicket gates). Δηλαδή, καθώς μειώνεται η ενεργός διατομή της πύλης διέλευσης του νερού προς τον στρόβιλο δημιουργείται θετική πίεση προς αυτό, με αποτέλεσμα μεταβατικά αυτό να επιβραδύνεται. Αντίστοιχα, όταν αυξηθεί η ενεργός διατομή της πύλης διέλευσης και μειωθεί η πίεση προς το νερό, αυτό να επιταχύνεται μεταβατικά.

Άλλο ένα φαινόμενο που παρατηρείται κατά την υδροληψία είναι αυτό της εμφάνισης κυμάτων πίεσης και παροχής εντός του σωλήνα υδροληψίας, τα οποία οφείλονται στην ελαστικότητα των τοιχωμάτων του, γνωστό και ως φαινόμενο “water hammer”.

Με βάση τα τρία παραπάνω φαινόμενα και το κατά πόσο λαμβάνονται υπόψη στην εκάστοτε μοντελοποίηση επιλέγεται και το ανάλογο είδος μη γραμμικού μοντέλου. Στο παρόν μοντέλο παρ' όλο του σχετικά μεγάλου μήκους του Penstock, δεν λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα της ελαστικότητας των τοιχωμάτων και των κυμάτων πίεσης. Ο αγωγός υδροληψίας από το φράγμα μέχρι και τον Σταθμό Παραγωγής έχει μήκος 3737.4m και ένα κύμα πίεσης έχει ταχύτητα κοντά στα 1200m/s, το οποίο σημαίνει ότι πιθανώς ο χρόνος που θα κάνει να κλείσει μία βαλβίδα στο τέλος του αγωγού και να προκαλέσει φραγμό στο νερό είναι μεγαλύτερος από αυτόν που κάνει το κύμα πίεσης του νερού να διανύσει όλο τον αγωγό. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα παρουσιαστούν τα προαναφερόμενα φαινόμενα και ενδεικτικό αυτού είναι ότι και στο πραγματικό ΜΥΗΕ που έχει κατασκευαστεί, εμπεριέχεται

στην κατασκευή δεξαμενή υπερχειλίσης, πιθανότατα και για αποφυγή τέτοιων φαινομένων. Στην παρούσα εργασία, όμως, δεν αποτελεί στόχο η αναλυτική υδρολογική μελέτη συγκεκριμένων στοιχείων και επιλέχθηκε να μην μοντελοποιηθούν τα παραπάνω φαινόμενα ούτε η δεξαμενή υπερχειλίσης, λόγω της εισαγωγής επιπλέον υπολογιστικής πολυπλοκότητας μοντέλο.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία μοντελοποιείται ένα μη γραμμικό μοντέλο το οποίο είναι καταλληλότερο για προσομοίωση σημάτων μεγάλης χρονικής διάρκειας. Υλοποιείται απλό υδραυλικό μοντέλο, που θεωρείται ότι δεν έχει δεξαμενή υπερχειλίσης. Υποθέτοντας άκαμπτο αγωγό Penstock, καθώς και ασυμπίεστο νερό, έχουμε τις εξής εξισώσεις σε ανά μονάδα σύστημα:

$$\bullet \quad U = G \cdot \sqrt{H} \quad (2.2-2)$$

$$\bullet \quad P = U \cdot H \quad (2.2-3)$$

$$\bullet \quad \frac{dU}{dt} = -\frac{a_g \cdot (H - H_0)}{L} \quad (2.2-4)$$

$$\bullet \quad T_w = \frac{L \cdot U_r}{a_g \cdot H_0} = \frac{L \cdot Q_r}{a_g \cdot H_0 \cdot A} \quad (2.2-5)$$

$$\bullet \quad U_r = \frac{Q_r}{A} \quad (2.2-6)$$

$$\bullet \quad \frac{dU}{dt} = -\frac{(H - H_0)}{T_w} \quad (2.2-7)$$

$$\bullet \quad P_m = P - P_L \quad (2.2-8)$$

$$\bullet \quad P_L = U_{NL} \cdot H \quad (2.2-9)$$

$$\bullet \quad P_m = (U - U_{NL}) \cdot H \quad (2.2-10)$$

$$\bullet \quad G = A_t \cdot g \quad (2.2-11)$$

$$\bullet \quad A_t = \frac{1}{g_{FL} - g_{NL}} \quad (2.2-12)$$

$$\bullet \quad U_{NL} = A_t \cdot g_{NL} \cdot \sqrt{H_0} \quad (2.2-13)$$

$$\bullet \quad T_m = \frac{P_m}{\omega_b} \quad (2.2-14)$$

Όπου οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ορίζονται ως εξής:

- U , η ταχύτητα του νερού
- U_{NL} , η ταχύτητα του νερού χωρίς φορτίο
- G , το ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου σε ιδανικές συνθήκες
- g , το ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου σε μη ιδανικές συνθήκες

- $\mathbf{g_{FL}}$, το μέγιστο ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων σε μη ιδανικές συνθήκες
- $\mathbf{g_{NL}}$, το μηδενικό ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων σε μη ιδανικές συνθήκες
- \mathbf{H} , το ύψος υδατόπτωσης την εκάστοτε χρονική στιγμή
- $\mathbf{H_0}$, η αρχική, σταθερή τιμή του H
- \mathbf{P} , η αρχική μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου
- $\mathbf{P_m}$, η καθαρή μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου, χωρίς απώλειες
- $\mathbf{P_L}$, οι απώλειες μηχανικής ισχύς του υδροστροβίλου
- $\mathbf{T_m}$, η μηχανική ροπή του υδροστροβίλου
- \mathbf{Q} , η παροχή νερού
- \mathbf{A} , η επιφάνεια διατομής αγωγού
- \mathbf{L} , το μήκος αγωγού
- $\mathbf{a_g}$, η επιτάχυνση της βαρύτητας $9.81m/s^2$
- \mathbf{t} , ο χρόνος
- $\mathbf{T_w}$, ο χρόνος εκκίνησης του νερού (*water starting time*), δηλαδή, το χρονικό διάστημα το οποίο χρειάζεται το νερό ξεκινώντας από το ονομαστικό ύψος υδατόπτωσης H_0 , να φτάσει την ονομαστική ταχύτητα U_0 . Τυπικά, η τιμή της μεταβλητής αυτής κυμαίνεται ανάμεσα στα $0.5sec$ και $4sec$. [7]

Σημειώνεται ότι ο δείκτης “i” αναφέρεται στην βάση που έχει επιλεγεί για την εκάστοτε μεταβλητή στο ανά μονάδα σύστημα και ταυτίζεται με την ονομαστική της τιμή. [7]

Στις παραπάνω εξισώσεις για τον υπολογισμό του χρόνου εκκίνησης του νερού T_w είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί ότι τα έργα υδροληψίας που πραγματοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο ΜΥΗΕ που μοντελοποιείται, έχουν την ιδιαιτερότητα ότι ο αγωγός υδροληψίας χωρίζεται σε μέρη διαφορετικών διατομών, κατά την διαδρομή του από το φράγμα μέχρι να καταλήξει στον Υδροηλεκτρικό Σταθμό. Συνεπώς, με βάση την αναφορά [9], το μήκος του αγωγού Penstock L , καθώς και η διατομή του A , υπολογίζονται ως το άθροισμα των λόγων του μήκους προς τη διατομή των επιμέρους αυτών τμημάτων του αγωγού. Δηλαδή:

$$\bullet \sum_{i=1}^4 \frac{L_i}{A_i} \quad (2.2-15)$$

Η παραπάνω παρατήρηση χρησιμεύει κατά κύριο λόγο στον υπολογισμό της τιμής της μεταβλητής T_w , που επίσης για τον υπολογισμό της διευκρινίζεται ότι ως H_f εισάγεται στον τύπο της το μέγιστο ύψος υδατόπτωσης, καθώς και ως Q_f η τιμή της μέγιστης παροχής νερού.

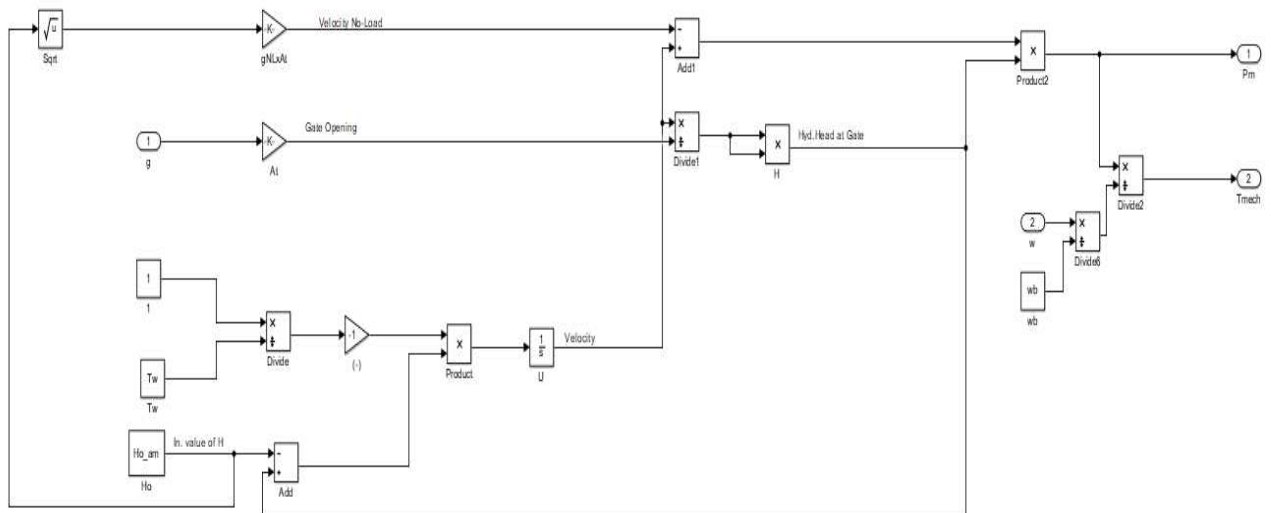
Σημειώνεται επίσης, ότι η μεταβλητή T_w είναι ανάλογη και με το ονομαστικό σημείο ανοίγματος των ρυθμιστικών περυγίων στο οποίο λειτουργεί ο Υδροστροβίλος. [7]

- $T'_w = G_0 \cdot T_w \quad (2.2-16)$

Ανατρέχοντας στις παραπάνω εξισώσεις, επίσης, πρέπει να αναλυθεί ο ορισμός της μεταβλητής G και η έννοια των ιδανικών συνθηκών για το ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών περυγίων. Η έννοια των ιδανικών συνθηκών αναφέρεται στο γεγονός ότι το πλήρες ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών περυγίων κατά την μετάβασή τους από την πλήρως ανοιχτή θέση στην πλήρως κλειστή, θεωρητικά πρέπει να αντιστοιχεί σε τιμή 1 α.μ., κάτι που όμως, δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Για αυτόν τον λόγο όπως παρατηρείται και στις παραπάνω εξισώσεις το πραγματικό ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών περυγίων g , μετατρέπεται σε αυτό των ιδανικών συνθηκών μέσω του συντελεστή A_i .

Τέλος, σημειώνεται ότι η μεταβλητή T_m , η μηχανική ροπή του υδροστροβίλου, όπως αναφέρεται, αποτελεί και την τελική έξοδο του συστήματος αυτού, αλλά και την είσοδο στο σύστημα της Σ.Γ. ως η μηχανική της ροπή. [7]

Το συνολικό μοντέλο του Υδροστροβίλου απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.5 Συνάρτηση Μεταφοράς Υδροστροβίλου σε MATLAB/Simulink

2.3 Μοντελοποίηση Συστήματος Διέγερσης της Γεννήτριας

2.3.1 Εισαγωγή στο Σύστημα Διέγερσης των Σύγχρονων Γεννητριών [7]

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος διέγερσης, όποιο είδος διέγερσης και να χρησιμοποιείται στην κατασκευή της γεννήτριας, είναι να παρέχεται συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα της σύγχρονης μηχανής. Εκτός, όμως, από τη βασική λειτουργία του, τα διάφορα συστήματα διέγερσης επιτελούν και μία σειρά από λειτουργίες προστασίας και ελέγχου, για την ικανοποιητικότερη λειτουργία της γεννήτριας.

Μέσω των συναρτήσεων ελέγχου του συστήματος διέγερσης ελέγχεται το ρεύμα και η τάση διέγερσης και κατ' επέκταση η τάση εξόδου της γεννήτριας, καθώς και η ροή άεργου ισχύος προς το σύστημα, με σκοπό τη συμβολή της γεννήτριας στη ρύθμιση της τάσης του Συστήματος. Επιπροσθέτως, τα συστήματα προστασίας, μεριμνούν ώστε να μην παραβιάζονται τα προκαθορισμένα όρια λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής, αναφορικά με την διέγερσή της.

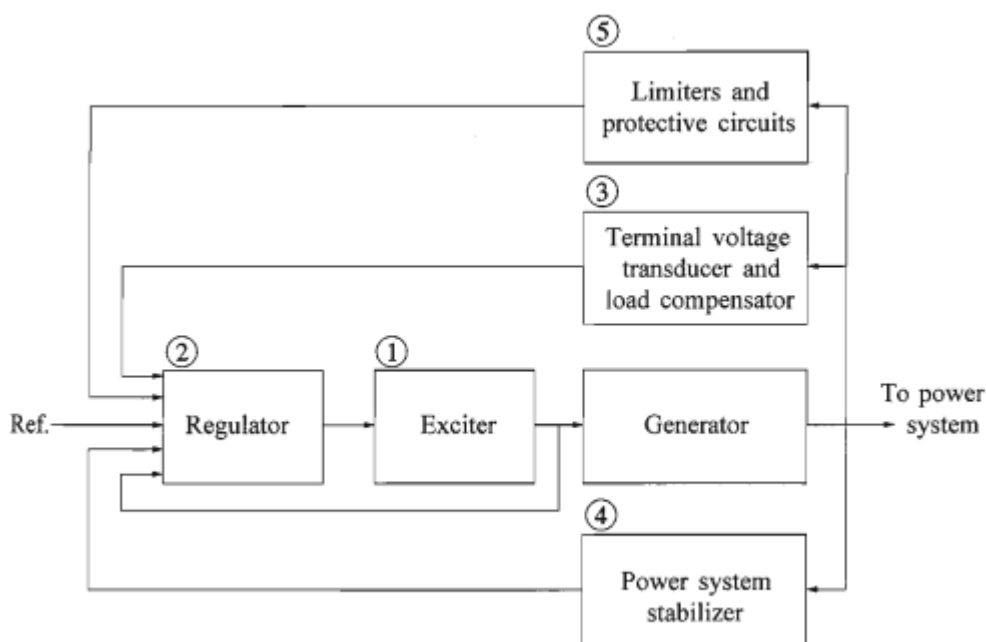
Η βασική απαίτηση από το σύστημα διέγερσης είναι να ρυθμίζεται αυτόματα το τροφοδοτούμενο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης, έτσι ώστε είτε η τερματική τάση είτε η άεργος ισχύς της Σ.Γ. να παρακολουθεί κάθε χρονική στιγμή την επιθυμητή της τιμή.[7]

Παρακάτω, γίνεται μία σύντομη θεωρητική παρουσίαση των στοιχείων που περιλαμβάνει ένα σύστημα διέγερσης παρ' όλο που δεν περιλαμβάνονται όλα ως υποσυστήματα ή ως λειτουργίες στο μοντέλο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία :

- **Διέγερση (Exciter):** Παρέχει DC ισχύς στο τύλιγμα διέγερσης, αποτελώντας συνεπώς το επίπεδο ισχύος του συστήματος διέγερσης.
- **Ρυθμιστής (Regulator):** Παρέχει ενισχυμένα σήματα ελέγχου στο σύστημα διέγερσης, έτσι ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα ο έλεγχος, που προαναφέρθηκε, για την διέγερση.
- **Αισθητήρας τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας και αντιστάθμιση φορτίου (Terminal voltage transducer and load compensator):** Διαμέσου του συστήματος αυτού, η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας ανορθώνεται, φιλτράρεται και ως DC μέγεθος πια συγκρίνεται με την επιθυμητή τάση εξόδου της γεννήτριας.
- **Σύστημα σταθεροποίησης Ισχύος (Power System Stabilizer):** Μέσω σημάτων ελέγχου συμβάλλει στην ενίσχυση της ευστάθειας της λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής, χειριζόμενο το ρυθμιστή τάσης διέγερσης, ώστε να αποσβένονται ταλαντώσεις στην ισχύ της Σ.Γ..

- **Κυκλώματα προστασίας και ελέγχου ορίων (Limiters and protective circuits):**
Ευρύ πεδίο συναρτήσεων και κυκλωμάτων που φροντίζουν, όπως προαναφέρθηκε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία όλου του Συστήματος της σύγχρονης γεννήτριας προστατεύοντας από διάφορα σφάλματα. Παραδείγματα τέτοιων συναρτήσεων και κυκλωμάτων ελέγχου είναι ο περιορισμός του ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης, η προστασία από υπερκάλυψη των ορίων τερματικής της Σ.Γ. ή και προστασίες για την υπερδιέγερση ή υποδιέγερση.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει το μπλοκ διάγραμμα όλων των προαναφερόμενων υποσυστημάτων του Συστήματος της Διέγερσης:



Σχήμα 2.6 Μπλοκ Διάγραμμα των υποσυστημάτων διέγερσης [7]

2.3.2 Τύποι Συστημάτων Διέγερσης [7]

Οι τρεις βασικοί τύποι συστημάτων διέγερσης έχουν κατηγοριοποιηθεί με το πέρασμα των χρόνων σε τρεις ομάδες και η κατηγοριοποίησή τους βασίζεται στο τι είδους πηγή ενέργειας τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης. Οι τρεις κατηγορίες είναι οι εξής:

- *DC Σύστημα Διέγερσης (DC Excitation System)*
- *AC Σύστημα Διέγερσης (AC Excitation System)*
- *Στατικό Σύστημα Διέγερσης (Static Excitation System)*

Το κείμενο δεν μπαίνει στην διαδικασία να αναλύσει τι ακριβώς είναι η κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες συστημάτων διέγερσης και ακολούθως γίνεται μία σύντομη αναφορά στο AC σύστημα διέγερσης της πραγματικής υδροηλεκτρικής μονάδας που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Το AC σύστημα διέγερσης χρησιμοποιεί AC γεννήτριες για την τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Επί τω πλείστον, η διεγέρτρια γεννήτρια είναι πάνω στον ίδιο άξονα περιστροφής που είναι και η γεννήτρια που γυρίζει από τον υδροστρόβιλο. Η AC τάση που παράγεται από την διεγέρτρια ανορθώνεται είτε ελεγχόμενα είτε μη ελεγχόμενα (με thyristor ή διόδους) και έτσι παράγει το DC ρεύμα το οποίο τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Η γέφυρα ανόρθωσης μπορεί επίσης να είναι στατική ή να περιστρέφεται και αυτή ως μέρος του συστήματος.

2.3.3 Μοντέλο του Συστήματος Διέγερσης

Για τη μοντελοποίηση του συστήματος διέγερσης πάρθηκε αυτούσια η Συνάρτηση Μεταφοράς που παρουσιάζεται για το σύνολο του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (APT), καθώς και του συστήματος της διέγερσης στα τεχνικά έγγραφα του έργου. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ως Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) και επιτελεί μία σειρά ενέργειες για τη ρύθμιση της διέγερσης της Σ.Γ., καθώς και την διασφάλιση της ορθότερης και βέλτιστης λειτουργίας της, είναι το *DECS -250* της *Basler Electric*.

Λειτουργίες του APT [10]

Ο εν λόγω ρυθμιστής τάσης δίνει την δυνατότητα λειτουργίας σε τρία διαφορετικά επίπεδα λειτουργίας:

➤ *AVR (Automatic Voltage Regulation)*

Ρυθμίζεται αυτόματα η τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας στην επιθυμητή τιμή, χωρίς παρέμβαση χειριστή, με ακρίβεια $\pm 0.25\%$, υπό ονομαστικό συντελεστής ισχύος και συχνότητα.

➤ *FVR ή FCR (Field Voltage or Current Regulation)*

Στο επίπεδο λειτουργίας αυτό, δίνεται η δυνατότητα να παράγεται τάση ή ρεύμα προς το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας, όχι αυτόματα σύμφωνα με το πως πρέπει να ρυθμιστεί η τάση εξόδου, αλλά σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο χειροκίνητα σημείο αναφοράς για την τάση ή το ρεύμα που θέλει ο χειριστής να παραχθεί στο τύλιγμα διέγερσης. Το επίπεδο λειτουργίας αυτό χρησιμοποιείται όταν για οποιοδήποτε λόγο ο APT δεν έχει την

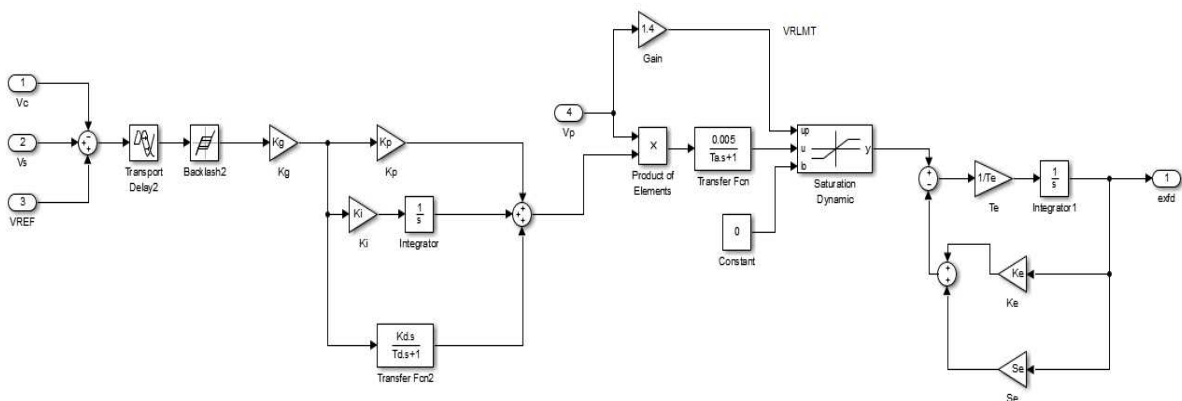
δυνατότητα μέτρησης της τερματικής τάσης της Σ.Γ., ώστε να ρυθμίζει κατάλληλα και την τάση διέγερσης.

➤ *Var/Pf Mode (Reactive Power Regulation)*

Στο τρίτο αυτό επίπεδο λειτουργίας δίνεται η δυνατότητα από τον APT, να ρυθμίζεται απευθείας η παραγωγή έργου ισχύος της ή εναλλακτικά ο συντελεστής ισχύος. Η ακρίβεια ρύθμισης του συντελεστή ισχύος κυμαίνεται στο $\pm 0.02\%$.

Μοντέλο του APT

Στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται η Συνάρτηση Μεταφοράς του APT μαζί με το μοντέλο της διέγερσης.



Σχήμα 2.7 Συνάρτηση Μεταφοράς APT σε MATLAB/Simulink

Παρατηρείται ότι το πρώτο μέρος της Συνάρτησης Μεταφοράς είναι ένας PID Ελεγκτής, ο οποίος παίζει το ρόλο του ρυθμιστή τάσης και το δεύτερο μέρος αποτελεί την μοντελοποίηση της διέγερσης.

Ένας PID Ελεγκτής αποτελείται από τρεις όρους, τον όρο του Αναλογικού ελέγχου του σφάλματος (P), τον όρο του Ολοκληρωτικού ελέγχου (I) και τον όρο του Διαφορικού ελέγχου (D). Πρακτικά, ο αναλογικός όρος αφορά το σφάλμα που παρουσιάζεται στο παρόν, ο ολοκληρωτικός όρος στο παρελθόν και ο διαφορικός το μέγεθος που θα έχει το σφάλμα στο μέλλον. Ο κάθε ένας από αυτούς τους όρους είναι υπεύθυνος για την μείωση του σφάλματος, επιτελώντας συγκεκριμένη λειτουργία. Αύξηση του αναλογικού όρου μειώνει τον χρόνο ανύψωσης, δηλαδή, του χρόνου που απαιτείται ώστε το πλάτος της εξόδου του συστήματος

να ανέλθει από το 10% στο 90% της τελικής του τιμής, σε περίπτωση βηματικής απόκρισης και έχει επίδραση στην μείωση του μόνιμου σφάλματος, όμως αυξάνει την υπερύψωση. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής ως κύριο χαρακτηριστικό έχει ότι εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα, καθώς επίσης μειώνει και τον χρόνο ανύψωσης. Τέλος, ο διαφορικός ελεγκτής μειώνει την υπερύψωση, που δημιουργεί ο αναλογικός, καθώς επίσης, μειώνει και τον χρόνο αποκατάστασης, δηλαδή, το χρονικό διάστημα που χρειάζεται έτσι ώστε η έξοδος του συστήματος να ισοροπήσει γύρω από μία τιμή, η οποία διαφέρει κατά ένα ποσοστό σε σχέση με το πλάτος του σήματος εισόδου.

Το μοντέλο και πιο συγκεκριμένα το κομμάτι του PID Ελεγκτή έχει τρεις εισόδους:

- **V_{REF} (Voltage Reference)**: ορίζει την επιθυμητή σταθερή τιμή τάσης ανά μονάδα, που αποτελεί την φασική τάση της γεννήτριας στον στάτη.
- **V_c**: ορίζεται ως η τερματική τάση της γεννήτριας την τρέχουσα χρονική στιγμή.
- **V_s**: ορίζεται ως η έξοδος από την λειτουργία που παρέχει ο ίδιος ο ρυθμιστής τάσης για σταθεροποίηση της ισχύς της εξόδου του Συστήματος (Power System Stabilizer) και υπό συνθήκες ηρεμίας είναι μηδέν. Στο μοντέλο της παρούσας εργασίας λόγω απουσίας PSS, η τιμή του V_s είναι μηδενική.

Η διαφορά μεταξύ των V_{REF} και V_c, αποτελεί το σφάλμα εισόδου του ελεγκτή. Αν η διαφορά των δύο αυτών τιμών είναι διάφορη του μηδενός, δηλαδή εντοπίζεται η ύπαρξη σφάλματος, ο PID Ελεγκτής ρυθμίζει κατάλληλα τη διεγέρτρια με σκοπό την εξίσωση της τερματικής τάσης με την τάση αναφοράς. Εν προκειμένω, η V_c είναι η RMS τιμή της φασικής τάσης εξόδου, ενός εκ των τριών φάσεων, της Σ.Γ. που σε μόνιμη κατάσταση έχει επιθυμητή τάση ίση με 1 α.μ.. Με βάση τα παραπάνω είναι λογικό ότι με την εκάστοτε αλλαγή που πραγματοποιείται στην έξοδο του PID Ελεγκτή, μεταβάλλεται και η τάση διέγερσης **exfd**, και κατ' επέκταση και η τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας, V_c.

Ως δεύτερο μέρος του μοντέλου ακολουθεί ένας ηλεκτρονικός ενισχυτής (electronic amplifier), ο οποίος ρυθμίζει και ταυτόχρονα περιορίζει σε συγκεκριμένα όρια που καθορίζονται από τον κατασκευαστή (0 έως V_{RLMT}), την τάση διέγερσης προς την κύρια AC γεννήτρια διέγερσης (Main Exciter), η οποία με την σειρά της θα παράξει και την τελική τάση που θα ανορθωθεί και θα καταλήξει στο τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.

Ως τελευταίο μέρος του μοντέλου αναφέρεται η μοντελοποίηση ουσιαστικά της κύριας διεγέρτριας AC Γεννήτριας, καθώς και η συστοιχία της πλήρους ανόρθωσης, η οποία είναι μη ελεγχόμενη στην προκειμένη περίπτωση. Η έξοδος του τελευταίου μέρους είναι και η τελική ανορθωμένη DC τάση διέγερσης προς το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.

Για τις υπόλοιπες επιμέρους μεταβλητές που εντοπίζονται στη Συνάρτηση Μεταφοράς που απεικονίζεται παραπάνω, παρατηρούνται τα εξής:

- K_g : ορίζεται ως κέρδος για την αντιστάθμιση εισόδων όπως αυτή της εισόδου ισχύος V_p και είναι ρύθμιση του κατασκευαστή.
- V_p : είσοδος τάσης ισχύος, η οποία ορίζεται ως το κατάλληλο επίπεδο τάσης AC ή DC, με το οποίο πρέπει να τροφοδοτηθεί ο APT, για να παράγει και το επιθυμητό επίπεδο τάσης DC προς το σύστημα διέγερσης.
- V_{RLMT} : ορίζεται ως το άνω επιτρεπτό όριο που μπορεί να προσεγγίσει η τάση του οργάνου προς το Σύστημα Διέγερσης και υπολογίζεται ως $V_{RLMT} = 1.4 \cdot V_p$.
- S_E : ορίζεται ως κέρδος ανάδρασης για τον κορεσμό της τάσης προς το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.
- T_E : ορίζεται ως η σταθερά χρόνου για το σύστημα διέγερσης.
- K_E : ορίζεται ως το κέρδος του συστήματος διέγερσης.

Τέλος, είναι ωφέλιμο να αναφερθεί ότι μετά τις εισόδους του μοντέλου υπάρχουν άλλα δύο block. Ένα που αποτελεί προσομοίωση της καθυστέρησης επικοινωνίας του οργάνου με το PLC, μέσω Modbus (χρονική καθυστέρηση) και ένα δεύτερο block το οποίο εισάγει στην αρχή του μοντέλου ένα Deadband για την σύγκριση των εισόδων στο 0,1%, σύμφωνα και με τα έγγραφα του κατασκευαστή για την λειτουργία του *DECS – 250*.**[10]**

Αναλυτικότερα στοιχεία σχετικά με την παραμετροποίηση του συστήματος διέγερσης παρουσιάζονται στην Ενότητα 3.4.

2.4 Μοντελοποίηση Ρυθμιστή Στροφών του Υδροστροβίλου

2.4.1 Εισαγωγή στο Σύστημα Ρύθμισης Στροφών του Υδροστροβίλου [11]

Στην Ενότητα 2.2 έγινε αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας και μοντελοποίησης του υδροστροβίλου. Στην παρούσα Ενότητα γίνεται αναφορά στον έλεγχο του υδροστροβίλου, μέσω άλλου διακριτού και αλληλένδετου με αυτόν συστήματος, του ρυθμιστή στροφών.

Το σύστημα του ρυθμιστή στροφών (Turbine Governor) είναι ο βασικός ελεγκτής της ταχύτητας του υδροστροβίλου. Η λειτουργία του βασίζεται στον έλεγχο της ροής του νερού διαμέσου του υδροστροβίλου και των πτερυγίων του.

Σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο της *IEEE std. -75*, ο ρυθμιστής στροφών πρέπει να περιλαμβάνει τα παρακάτω υποσυστήματα:

- 1) Αναλογικούς Αισθητήρες Ταχύτητας
- 2) Ενεργοποιητές ελέγχου ρύθμισης στροφών
- 3) Υδραυλικά συστήματα πίεσης λαδιών
- 4) Σερβοκινητήρες ελέγχου του Υδροστροβίλου

Μέσω των αισθητήρων ταχύτητας, ο ρυθμιστής στροφών κάνει ανάγνωση της ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται ο άξονας του υδροστροβίλου και κατ' επέκταση περιστρέφεται και ο δρομέας της Σ.Γ.. Στην συνέχεια η ταχύτητα αυτή συγκρίνεται με την επιθυμητή και τέλος, ενεργοποιώντας το υδραυλικό σύστημα ρυθμίζεται κατάλληλα το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων, ώστε να επιστρέψει η ταχύτητα στην επιθυμητή της τιμή. Η ρύθμιση της ταχύτητας του υδροστροβίλου επιτυγχάνει τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου της Σ.Γ.. Αυτό συμβαίνει όταν η μηχανική και η ηλεκτρική ροπή διαφέρουν, προκύπτοντας έτσι, επιταχύνουσα ή επιβραδύνουσα ροπή, η οποία με τη σειρά της επιταχύνει ή επιβραδύνει τον άξονα της γεννήτριας. Για να επανέλθει η ταχύτητα στην επιθυμητή τιμή ρυθμίζεται κατάλληλα η μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου και για να συμβεί αυτό, μεταβάλλεται η ενεργός επιφάνεια των ρυθμιστικών πτερυγίων, μέσω των οποίων ρέει το νερό κατά την λειτουργία της υδροηλεκτρικής μονάδας.

Οι λειτουργίες που επιτελούνται από το σύστημα αυτό κατά κύριο λόγο είναι οι εξής:

- Εκκίνηση του υδροστροβίλου, διατηρώντας στο τέλος αυτής την επιθυμητή ταχύτητα, έτσι ώστε η γεννήτρια να διατηρήσει τη σύγχρονη ταχύτητα της.
- Διατήρηση της σύγχρονης ταχύτητας της Σ.Γ., διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα του Υδροστροβίλου, σε πιθανές αυξομειώσεις του φορτίου του Συστήματος Μεταφοράς, ικανές να προκαλέσουν αλλαγές στην συχνότητα της Σ.Γ..

- Ρύθμιση και διαμοιρασμός τυχόν αλλαγών του φορτίου με άλλες γεννήτριες, σε περίπτωση απόκλισης στην συχνότητα του Συστήματος Μεταφοράς .
- Ρύθμιση της παροχής ισχύος της γεννήτριας κατόπιν συγκεκριμένης εντολής του χειριστή ή άλλου παράγοντα επίβλεψης του Συστήματος.
- Πραγματοποίηση ομαλού σταματήματος του υδροστροβίλου ή και σταματήματος του υδροστροβίλου για λόγους προστασίας, αν ξεπεραστεί η επιτρεπόμενη μηχανική ταχύτητα.

Οι ρυθμιστές στροφών χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μηχανολογικός-Υδραυλικός Ρυθμιστής Στροφών (Mechanical Governor)
- Ηλεκτρολο-Υδραυλικός Ρυθμιστής Στροφών (Electro Hydraulic Governor – Analogue Electronics)
- Ψηφιακός Ρυθμιστής Στροφών (Electro Hydraulic Governor – Digital Electronics)

Στην υπό εξέταση υδροηλεκτρική μονάδα χρησιμοποιείται ψηφιακός ρυθμιστής στροφών, ο οποίος περιγράφεται εν συντομία ακολούθως.

Ψηφιακός Ρυθμιστής Στροφών

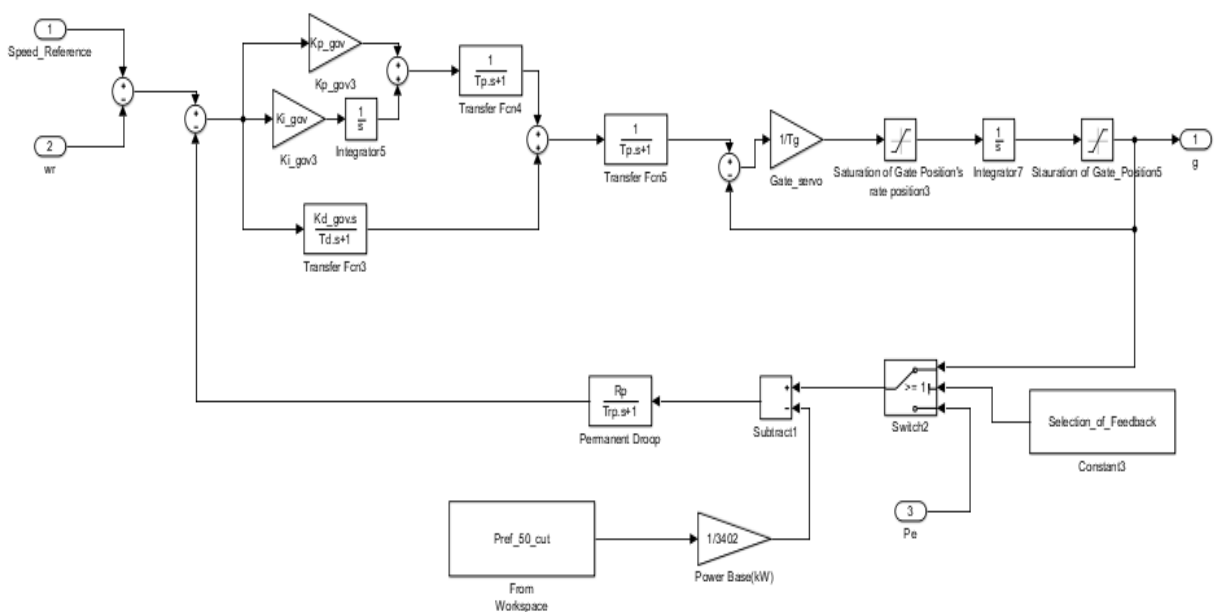
Ο ψηφιακός ρυθμιστής στροφών είναι η πιο σύγχρονη εκδοχή αυτού του συστήματος. Όλη η διαδικασία βασίζεται σε συναρτήσεις τις οποίες εκτελούν μικροεπεξεργαστές, με σήματα ψηφιακά και αναλογικά ως εισόδους, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε κατάλληλα όργανα πάνω στα συστήματα γεννήτριας και υδροστροβίλου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συνάρτησης που εκτελείται στους μικροεπεξεργαστές είναι ο – στην γενική περίπτωση - PID Ελεγκτής, ο οποίος δέχεται στην είσοδό του το σφάλμα ταχύτητας. Ομοίως, οι έξοδοι αποτελούνται από ψηφιακά και αναλογικά σήματα, τα οποία οδηγούν σε εκτέλεση ενεργειών, όπως για παράδειγμα την ρύθμιση της κλίσης των ρυθμιστικών περυγίων του υδροστροβίλου ή ψηφιακές έξοδοι, που σε περίπτωση σφάλματος θα σταματήσουν τη λειτουργία της υδροηλεκτρικής μονάδας, κλείνοντας τα ρυθμιστικά περύγια. Στην Ενότητα 2.4.2, αναφέρονται οι συγκεκριμένες εισοδοι και έξοδοι του μοντέλου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Αυτός ο τύπος ρυθμιστή στροφών αποτελεί την πιο σταθερή και ευέλικτη λύση, αφού οι συναρτήσεις μπορούν να δοκιμαστούν και να τροποποιηθούν εύκολα μέσω λογισμικού, χωρίς ανακαλωδιώσεις. Επίσης, αποτελεί την λύση με τις λιγότερες καλωδιώσεις και μηχανολογικές διατάξεις.

2.4.2 Μοντέλο Ρυθμιστή Στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών στο ΥΗΕ που υπάρχει ως πρότυπο για τη μοντελοποίηση, έχει υλοποιηθεί ως ψηφιακός ρυθμιστής στροφών, μέσω συνάρτησης σε PLC. Λόγω αδυναμίας όμως, πρόσβασης στο πρόγραμμα που εκτελεί τις συγκεκριμένες λειτουργίες, αποφασίστηκε να υλοποιηθεί μοντέλο που προσομοιώνει το ρυθμιστή στροφών με χρήση PID Ελεγκτή, με μοντέλο από την βιβλιογραφία, το οποίο αναλύεται στην αναφορά [7]. Στο μοντέλο αυτό έγιναν οι απαραίτητες προσαρμογές, ώστε να λειτουργήσει ορθά και να συνταιριάξει με τα υπόλοιπα υποσυστήματα του συνολικού μοντέλου. Οι προσαρμογές που έγιναν στο μοντέλο βασίστηκαν στην αναφορά [12].

Η μοντελοποίηση του ρυθμιστή στροφών που υλοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα:



Σχήμα 2.8 Συνάρτηση Μεταφοράς Ρυθμιστή Στροφών σε MATLAB/Simulink

Παρατηρώντας, αρχικά, τις μεταβλητές του παραπάνω μοντέλου, γίνεται αντιληπτό ότι ως είσοδοι έχουν οριστεί τα εξής:

- **Speed_Reference**: ισούται με 1 και ορίζεται ως η επιθυμητή ανά μονάδα γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας.
- w_r : αποτελεί την πραγματική γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας στο ανά μονάδα σύστημα.
- **P_{ref} (Ισχύς αναφοράς)**: Η είσοδος της ισχύος αναφοράς ορίζει την επιθυμητή τιμή της ενεργούς ισχύος, όταν η μετρούμενη γωνιακή ταχύτητα ισούται με τη γωνιακή ταχύτητα αναφοράς.
- **P_e (Ισχύς εξόδου Γεννήτριας)** : Η είσοδος αυτή αποτελεί την μετρούμενη ενεργό ισχύ στην έξοδο της Σ.Γ. και καθιστά εφικτό τον υπολογισμό της απόκλισης της ενεργού ισχύος εξόδου της Σ.Γ. από την ισχύ αναφοράς, ώστε να προσαρμόσει κατάλληλα στην συνέχεια το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων.

Η έξοδος του μοντέλου είναι το εξής μέγεθος:

- **g**: ορίζεται ως το ποσοστό ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων, που εισάγεται στο μοντέλο του υδροστροβίλου.

Όσον αφορά το πρώτο κομμάτι της Συνάρτησης Μεταφοράς παρατηρείται ένας PID Ελεγκτής, όπως έχει περιγραφεί και στην Ενότητα 2.3.3.

Τα υπόλοιπα υποσυστήματα του ρυθμιστή στροφών απαρτίζονται από:

- α) Τις επιμέρους συναρτήσεις για την ρυθμιστική βαλβίδα (Pilot Valve) και τον αντίστοιχο σερβοκινητήρα που την ρυθμίζει.
- β) Την συνάρτηση μεταφοράς που καθορίζει το ποσοστό, τα όρια και τον ρυθμό ανοίγματος ή κλεισίματος των ρυθμιστικών πτερυγίων.
- γ) Το κομμάτι μέτρησης και ρύθμισης της ταχύτητας από το όργανο του ρυθμιστή ταχύτητας.

Αναλυτικότερα, η συνάρτηση μεταφοράς που αναφέρεται συνοπτικά ως αυτή για την ρυθμιστική βαλβίδα (Pilot Valve) προκύπτει ως η σε σειρά σύνδεση του συστήματος της βαλβίδας ρελέ (Relay Valve) με αυτό της ρυθμιστικής βαλβίδας (Pilot Valve). Διευκρινίζεται ότι οι δύο προαναφερόμενες βαλβίδες είναι αναγκαίες ώστε να επιτρέπουν ή όχι την κίνηση λαδιού μηχανής με σκοπό την κατάλληλη ρύθμιση της εξόδου του ρυθμιστή στροφών. Οι βαλβίδες αυτές ελέγχονται από το αντίστοιχο σήμα εξόδου του ψηφιακού ρυθμιστή στροφών.

Η συνάρτηση μεταφοράς της βαλβίδας ρελέ ορίζεται ως:

$$\frac{g}{a} = \frac{K_1}{s} \quad (2.4-1)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς της ρυθμιστικής βαλβίδας ορίζεται ως:

$$\frac{a}{b} = \frac{K_2}{1+sT_p} \quad (2.4-2)$$

Συνεπώς, το γινόμενο τους δίνει την τελική συνάρτηση μεταφορά του μοντέλου:

$$\frac{g}{b} = \frac{K_1 \cdot K_2}{s(1+sT_p)} \quad (2.4-3)$$

όπου $K_s = K_1 \cdot K_2$. [7]

Ακολούθως επεξηγούνται κάποιες παράμετροι του μοντέλου του ρυθμιστή στροφών:

- T_p , η χρονική σταθερά της pilot valve και του σεβροκινητήρα που ελέγχει.
- K_s , το κέρδος του σεβροκινητήρα αυτού.
- T_g , η χρονική σταθερά του σεβροκινητήρα που ελέγχει τα ρυθμιστικά πτερύγια.
- R_p , ο στατισμός μόνιμης κατάστασης (permanent droop).

Σχετικά με τον στατισμό αναφέρεται εδώ εν συντομία ότι εφόσον η Σ.Γ. συνδεθεί παράλληλα με άλλες γεννήτριες, όπως π.χ. σε ένα υφιστάμενο Σύστημα Μεταφοράς, τότε μέσω του στατισμού επιτυγχάνεται η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, μέσω του επιμερισμού των μεταβολών του φορτίου στις ενταγμένες μονάδες. Το ποσοστό ανάληψης φορτίου κάθε μονάδας είναι αντιστρόφως ανάλογο του στατισμού, δηλαδή, όσο μικρότερος είναι ο στατισμός τόσο μεγαλύτερο φορτίο (αναλογικά με το μέγεθος της) αναλαμβάνει η μονάδα.

Τέλος, αναφέρεται ότι στην Ενότητα 3.3 παρουσιάζεται αναλυτικά η ρύθμιση παραμέτρων του μοντέλου του ρυθμιστή στροφών.

3

Παραμετροποίηση του Μοντέλου ΜΥΗΕ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται και υλοποιείται η παραμετροποίηση των διαφόρων υποσυστημάτων, τα οποία συνθέτουν μία υδροηλεκτρική μονάδα ενός ΜΥΗΕ. Σε αυτό το Κεφάλαιο της εργασίας παραμετροποιούνται διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου, με βάση στοιχεία που υπάρχουν από Έγγραφα του πραγματικού έργου, καθώς και σύμφωνα με ενδεικτικές τιμές της Διεθνούς Βιβλιογραφίας για μη διαθέσιμα στοιχεία. Από τις τιμές των ανεξάρτητων αυτών μεταβλητών υπολογίζονται και οι τιμές διαφόρων εξαρτημένων μεταβλητών. Με την προαναφερόμενη ρύθμιση των παραμέτρων του, το μοντέλο καθίσταται έτοιμο να προσομοιώσει το πραγματικό ΜΥΗΕ.

3.1 Παραμετροποίηση του Μοντέλου Σύγχρονης Γεννήτριας

Ανατρέχοντας στην Ενότητα 2.1.3 παρατηρείται ότι απαραίτητες είναι οι τιμές όλων των αντιδράσεων και αντιστάσεων σε στάτη και δρομέα, καθώς και άλλα μεγέθη, όπως οι χρονικές σταθερές μεταβατικής και υπομεταβατικής κατάστασης, έτσι ώστε να υπολογιστούν από το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας οι τιμές για των μαγνητικών ροών και των ρευμάτων των τυλιγμάτων.

Αρχικά, διευκρινίζεται ότι όλες οι τιμές είναι υπολογισμένες στο ανά μονάδα σύστημα, αφού κατά αυτόν τον τρόπο είναι υλοποιημένες και οι εξισώσεις του μοντέλου στο MATLAB/Simulink. Το ανά μονάδα σύστημα υλοποιείται ως εξής:

- $V_b=3641V$, η ονομαστική RMS τιμή της φασικής τάσης που παράγει η γεννήτρια.
- $S_b=3.78 MVA$, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας.

Από τα δύο παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- $I_b = S_b / (3 \cdot V_b)$, το ονομαστικό φασικό ρεύμα που παράγει η γεννήτρια.
- $Z_b = V_b / I_b$, η βασική αντίσταση.

Μεγέθη που αποτελούν σταθερές του μοντέλου και καθορίζονται εξ αρχής είναι:

- $P=14$, οι πόλοι της σύγχρονης γεννήτριας.
- $f=50\text{Hz}$, η ονομαστική συχνότητα της γεννήτριας και του συστήματος στο οποίο αυτή συνδέεται, εφόσον αναφερόμαστε σε ΜΥΗΕ που υλοποιείται στο Ευρωπαϊκό Ηλεκτρικό Σύστημα.

Από τα δύο μεγέθη αυτά προκύπτουν οι τιμές για την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας, καθώς και για τη σύγχρονη ταχύτητα του δρομέα, οι οποίες επιβεβαιώνονται και από τα Έγγραφα του εξοπλισμού του πραγματικού έργου. Με βάση και προαναφερόμενους τύπους στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίζονται ως εξής:

- $\omega_b = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$
- $n = (120 \cdot f) / P = 428.57 \text{ rpm}$

Παρακάτω, παρατίθενται τιμές για τις αντιδράσεις, αντιστάσεις και χρονικές σταθερές υπομεταβατικής, μεταβατικής και μόνιμης κατάστασης σε στάτη και δρομέα, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των αντιστάσεων και αντιδράσεων των τυλιγμάτων του στάτη, καθώς και των τυλιγμάτων απόσβεσης και διέγερσης. Τονίζεται ότι οι τιμές που παρατίθενται είναι ανά μονάδα ανηγμένες στις προαναφερόμενες τιμές βάσεις για τάση, ρεύμα και σύνθετη αντίσταση.

- $X_d' = 0.26 \text{ α.μ.}$
- $X_d'' = 0.22 \text{ α.μ.}$
- $X_q'' = 0.2 \text{ α.μ.}$
- $T'_{do} = 1.5 \text{ s}$
- $T''_d = 0.0075 \text{ s}$
- $R_s = 0.0063 \text{ α.μ.}$
- $X_{ls} = 0.110 \text{ α.μ.}$, όπου στα έγγραφα αναφέρεται ως $x0$
- $X_d = 1.49 \text{ α.μ.}$
- $X_q = 1.46 \text{ α.μ.}$

Οι εξισώσεις που ακολουθούν υλοποιούνται προκειμένου να δοθούν τιμές και στις υπόλοιπες εξαρτώμενες μεταβλητές που χρειάζονται για την μοντελοποίηση των εξισώσεων της σύγχρονης γεννήτριας. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις έχουν ληφθεί από την αναφορά [6], με βάση την οποία έχει υλοποιηθεί και η μοντελοποίηση της γεννήτριας.

- $X_{md} = X_d - X_{ls} \quad (3.1-1)$

- $X_{mq} = X_q - X_{ls} \quad (3.1-2)$

- $X_{lkq2} = \frac{(X_{ls} \cdot X_{mq} - X_{mq} \cdot X_q'')}{(X_q'' - X_{mq} - X_{ls})} \quad (3.1-3)$, όπου δεν λαμβάνεται υπόψη το X_{lkq1} , για λόγο που έχει αναφερθεί στην Ενότητα 2.1.3.

- $X_{lfd} = \frac{(X_{ls} \cdot X_{md} - X_{md} \cdot X_d')}{(X_d' - X_{md} - X_{ls})} \quad (3.1-4)$

- $R_{fd} = \frac{(X_{lfd} + X_{md})}{(\omega_b \cdot T_{d0}') } \quad (3.1-5)$

- $X_{lkd} = \frac{X_{md} \cdot X_{lfd} \cdot (X_{ls} - X_d'')}{(X_d'' \cdot X_{md} + X_d'' \cdot X_{lfd} - X_{ls} \cdot X_{md} - X_{ls} \cdot X_{lfd} - X_{md} \cdot X_{lfd})} \quad (3.1-6)$

- $R_{kd} = \frac{X_{lkd} + (X_{md} \cdot X_{ls} \cdot X_{lfd})}{(X_{md} \cdot X_{ls} + X_{md} \cdot X_{lfd} + X_{ls} \cdot X_{lfd})} \quad (3.1-7)$

Τέλος, λόγω έλλειψης στοιχείων στην μεταβλητή R_{kq2} , λήφθηκε μία τυπική τιμή που βρέθηκε στην αναφορά [6].

3.2 Παραμετροποίηση του Μοντέλου του Υδροστροβίλου

Το μοντέλο του Υδροστροβίλου διαθέτει λιγότερες μεταβλητές και οι τιμές που πρέπει να αρχικοποιηθούν δεν αφορούν τον ίδιο τον Υδροστροβίλο, αλλά το υπόλοιπο Σύστημα Υδροληψίας που συμπεριλαμβάνεται στη συνολική μοντελοποίηση του συγκεκριμένου υποσυστήματος, όπως το ονομαστικό ύψος υδατόπτωσης, οι διαστάσεις του Penstock και η ονομαστική παροχή του νερού.

Οι παραπάνω τιμές θα εισαχθούν σε εξισώσεις που έχουν αναφερθεί στην Ενότητα 2.2. για να παραχθεί η πλησιέστερη κατά το δυνατόν απόκριση του μοντέλου με τις μετρήσεις του πραγματικού έργου. Οι τιμές που δίνονται σε αντίστοιχα Έγγραφα για τα Υδρολογικά Στοιχεία του Έργου έχουν ως εξής:

- $\sum \frac{L}{A} = \frac{363}{3.5 \cdot 2.5} + \frac{1044.4}{2 \cdot 3.5 \cdot 2} + \frac{2302.5}{4.8 \cdot 4.95} + \frac{80}{\pi \cdot 2.8 \cdot 2.8} = 216.24$
- $H_r = 41.53 \text{ m}$, το ονομαστικό ύψος Υδατόπτωσης.
- $Q_r = 9 \text{ m}^3/\text{s}$, η ονομαστική παροχή νερού.

Σημειώνεται ότι για την τιμή του μήκους και της επιφάνειας του σωλήνα υδροληψίας, λαμβάνεται υπόψη η υλοποίηση που λαμβάνει χώρα στην Ενότητα 2.2.3, για σωλήνα με διαφοροποιήσεις στην επιφάνεια του, ανά τμήμα. Έτσι κι εδώ, προστίθενται τα κλάσματα με αριθμητή το μήκος του κάθε τμήματος του σωλήνα και παρονομαστή την εκάστοτε επιφάνεια.

Στη συνέχεια καθορίζονται οι τιμές των ορίων για άνοιγμα ή κλείσιμο των ρυθμιστικών πτερυγίων σε πλήρες και μηδενικό φορτίο, δηλαδή, οι τιμές των μεταβλητών g_{FL} και g_{NL} , αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές καθορίστηκαν με βάση Πίνακα Δοκιμών που είναι διαθέσιμος από τον κατασκευαστή του Υδροστροβίλου, ο οποίος δίνει τις εξής τιμές:

- $g_{FL} = 0.7721$
- $g_{NL} = 0$

Η ορθότητα των τιμών επαληθεύτηκε και με προσομοιώσεις του μοντέλου στο MATLAB/Simulink. Έχοντας διαθέσιμο τον Πίνακα 3.1, έπρεπε να επαληθευτεί ότι για τις τιμές ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων του εν λόγω Πίνακα, προέκυπτε πράγματι η αντίστοιχη μηχανική ισχύς ανά μονάδα:

	H	Q unit	Eta	Pm	gate open.	actu. stroke	gate open.	Q total	Pm total
	[m]	[m ³ /s]	[%]	[kW]	[degrees]	[mm]	[%]		[kW]
switchover	41,39	9,89	91,00	3644	35,8	14,18	87,75	9,89	3644
rat. Q-1Unit	41,53	9,00	93,13	3406	31,5		77,21	9,00	3406
	41,79	8,00	94,41	3088	27,2		66,67	8,00	3088
	42,02	7,00	91,55	2635	23,9		58,58	7,00	2635
	42,22	6,00	90,07	2233	20,4		50,00	6,00	2233
	42,40	5,00	84,02	1743	17,4		42,65	5,00	1743
informative	42,54	4,00	74,24	1236	14,5		35,54	4,00	1236
informative	42,58	3,60	70,66	1060	13,2		32,35	3,60	1060
informative	42,63	3,00	63,54	795	10,9		26,72	3,00	795

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών για τον Υδροστρόβιλο

Οι δοκιμές με το μοντέλο του MATLAB/Simulink διεξήχθησαν ως εξής:

- Οι πρώτες δοκιμές έγιναν, με βάση τον Πίνακα 3.1, αλλάζοντας ταυτόχρονα ως εισόδους το ύψος υδατόπτωσης (H) και το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων (g). Ως έξοδοι παρατηρούνταν η ροή του νερού (Q) και η μηχανική ισχύς (Pm).
- Σε επόμενη φάση, έγιναν πάλι δοκιμές, με βάση τον Πίνακα 3.1, μεταβάλλοντας βηματικά μόνο το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων παρακολουθώντας τις ίδιες εξόδους.
- Στον Πίνακα 3.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πρώτες δοκιμές, ενώ στον Πίνακα 3.3, παρουσιάζονται των επόμενων δοκιμών.

Αποτελέσματα Pm από δοκιμές πεδίου (kW)	Αποτελέσματα Pm από δοκιμές μοντέλου (kW)	Αποτελέσματα Q από δοκιμές πεδίου (m ³ /s)	Αποτελέσματα Q από δοκιμές μοντέλου (m ³ /s)
3406	3406	9,00	9,00
3088	2956	8,00	7,79
2635	2630	7,00	6,86
2233	2261	6,00	5,87
1743	1941	5,00	5,02
1236	1625	4,00	4,19
1060	1482	3,60	3,81
795	1226	3,00	3,15

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα πρώτων Δοκιμών Μοντέλου για τον Υδροστρόβιλο

Αποτελέσματα Pm από δοκιμές πεδίου (kW)	Αποτελέσματα Pm από δοκιμές μοντέλου (kW)	Αποτελέσματα Q από δοκιμές πεδίου (m ³ /s)	Αποτελέσματα Q από δοκιμές μοντέλου (m ³ /s)
3406	3406	9,00	9,00
3088	2941	8,00	7,78
2635	2584	7,00	6,83
2233	2206	6,00	5,83
1743	1881	5,00	4,96
1236	1568	4,00	4,14
1060	1427	3,60	3,77
795	1179	3,00	3,11

Πίνακας 3.3 Αποτελέσματα επόμενων Δοκιμών Μοντέλου για τον Υδροστρόβιλο

Τα παραπάνω αποτελέσματα με εξαίρεση, τις τρεις τελευταίες τιμές της μηχανικής ισχύς και στους δύο πίνακες, δείχνουν πολύ μικρή απόκλιση από τις πραγματικές τιμές, με σφάλμα που κρίνεται ανεκτό για μία μοντελοποίηση και προσομοίωση στο MATLAB/Simulink, οπότε αποδεκτές γίνονται και οι τιμές της παραμετροποίησης.

3.3 Παραμετροποίηση του Μοντέλου του Ρυθμιστή Στροφών

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.4.3, ελλείπει στοιχείων για το ρυθμιστή στροφών, ο ελεγκτής του μοντελοποιήθηκε ως ένας PID, με βάση τη Διεθνή Βιβλιογραφία και όχι πραγματικά στοιχεία από το ΜΥΗΕ. Αντίστοιχα, και η απόδοση τιμών στις παραμέτρους του, βασίστηκε στη σχετική Διεθνή Βιβλιογραφία.

Οι παράμετροι του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω και λήφθηκαν από την αναφορά [7] :

- $T_p = 0.05$ s
- $K_s = 5$
- $T_g = 0.2$ s
- $R_p = 0.04$ s
- **Max_gate_position** = 1 α.μ.
- **Min_gate_position** = 0 α.μ.
- **Rmax_open** = 0.16 α.μ.
- **Rmax_close** = -0.16 α.μ.

Η επεξήγηση των παραμέτρων έχει πραγματοποιηθεί στην Ενότητα 2.4.3.

Εκτός όμως από τα παραπάνω μεγέθη, κρίσιμη για την εύρυθμη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών είναι η επιλογή των κερδών K_p , K_i και K_d του PID Ελεγκτή. Η απόδοση τιμών στους όρους του PID Ελεγκτή υλοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο Hagihara, σύμφωνα με την οποία τα κέρδη υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις [13]:

- $K_{p_gov} = \frac{t_m}{2 \cdot T_w} \quad (3.3-1)$

- $K_{i_gov} = \frac{t_m}{8 \cdot T_w^2} \quad (3.3-2)$

- $K_{d_gov} = 0 \quad (3.3-3)$

,όπου

- T_w , ο χρόνος εκκίνησης του νερού (*water starting time*)
- $t_m = 2 \cdot H_c \quad (3.3-4)$, ο μηχανικός χρόνος εκκίνησης (*mechanical starting time*) και υποδεικνύει σύμφωνα με την ονομαστική μηχανική ροπή, ποιος είναι ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να επιταχυνθεί ο άξονας του υδροστροβίλου από την ακινησία έως την ονομαστική ταχύτητά του.
- $H_c = \frac{5.48 \cdot 10^{-9} \cdot J \cdot n^2}{MVA_{rating}} \quad (3.3-5)$, η ανηγμένη σταθερά αδρανείας, η οποία υπολογίζεται με βάση την αδράνεια J του ζεύγους Υδροστροβίλου – Γεννήτριας. Στην προκειμένη περίπτωση, $MVA_{rating} = 3.78$ MVA. [7]

Λόγω απουσίας στοιχείων για την τιμή της αδράνειας και γνωρίζοντας ότι οι τυπικές τιμές για το **H_c** – Υδροστροβίλου, κυμαίνονται από 2sec έως 4sec, επιλέχθηκε η τιμή 2sec, και με βάση αυτή η τιμή της αδράνειας υπολογίζεται ίση με:

- **J** = 7510.99 kg·m²

Τέλος, όσον αφορά τη σταθερά χρόνου T_p , του μπλοκ χρονικής καθυστέρησης του μοντέλου, αυτή τέθηκε ίση με $T_p = 1/3000$ sec, εφόσον το όργανο που έχει τοποθετηθεί στο έργο για μέτρηση της ταχύτητας έχει ρυθμό δειγματοληψίας 3kHz, με βάση τα τεχνικά του στοιχεία.

3.4 Παραμετροποίηση του Συστήματος Διέγερσης της

Γεννήτριας

Το τελευταίο προς παραμετροποίηση υποσύστημα του συνολικού μοντέλου είναι αυτό του συστήματος διέγερσης. Η μοντελοποίηση του υποσυστήματος αυτού και άρα και η παραμετροποίηση του, χωρίζεται σε δύο επιμέρους σκέλη, αυτό του ελεγκτή και αυτό της διέγερσης.

Αρχικά, αναφέρεται ότι οι μετρήσεις της τάσης στην έξοδο της γεννήτριας πραγματοποιούνται με χρήση μετασχηματιστή τάσης, ο οποίος έχει λόγο $a=6300/110=57.27$ και μοντελοποιείται ως ένα κέρδος που διαιρεί την τερματική τάση με τον λόγο του μετασχηματιστή.

Με τα παραπάνω στοιχεία γίνεται αντιληπτό ότι το υποσύστημα του APT είναι ανηγμένο σε άλλη τάση βάσης από αυτή της γεννήτριας. Εφόσον, στο σύστημα της γεννήτριας ορίζεται ως τάση βάσης $V_b=3641$ V, επιλέγεται ως νέα βάση για το υποσύστημα της διέγερσης:

- $V_{b_διεγ}=3641 / 57.27 = 63.57$ V

Ως τάση αναφοράς τίθεται:

- $V_{REF}=1$ α.μ., έχοντας ως νέα τάση βάσης είναι $V_{b_διεγ}=63.57$ V, επομένως και η τάση αναφοράς είναι $V_{REF} = (3641/57.27) / 63.57 = 1$ α.μ.. Αυτό ισχύει γιατί η φασική τάση στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας ανάγεται στο καινούριο ανά μονάδα σύστημα της διέγερσης, αφού έχει υποβιβαστεί μέσω του Μετασχηματιστή.

Τέλος, όσον αφορά την τιμή εισόδου του PSS, τίθεται:

- $V_s= 0$, εφόσον δεν υφίσταται ως σύστημα στο υπαρκτό έργο και συνεπώς, ούτε στη μοντελοποίησή του.

Για την περαιτέρω ρύθμιση των παραμέτρων του APT γίνεται αναφορά στα έγγραφα των Factory Acceptance Tests, τα οποία πραγματοποιήθηκαν για τη σύγχρονη γεννήτρια και τα συστήματα, τα οποία σχετίζονται με αυτήν. Μέσω των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών, προτείνονται από τον κατασκευαστή συγκεκριμένες ρυθμίσεις για τον APT, στις οποίες περιλαμβάνονται και οι τιμές για το αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό κέρδος του PID Ελεγκτή του, τιμές για τις χρονικές σταθερές των συναρτήσεων του APT, καθώς και τιμές που καθορίζουν τα όρια της τάσης διέγερσης, που παράγεται από τον APT. Οι διαθέσιμες τιμές αυτές αποδίδονται αυτούσια και στην παραμετροποίηση του μοντέλου και είναι οι εξής:

- $K_p= 80$
- $K_i= 20$

- $K_d = 10$
- $K_g = 1$
- $T_d = 0.0001s$
- $T_a = 0 s$
- $V_p = 3.77$ α.μ.

Σημειώνεται ότι για την τιμή της μεταβλητής T_d λήφθηκε μία αμελητέα τιμή, ώστε να καταστεί εφικτή η προσομοίωση του διαφορικού όρου στον PID Ελεγκτή. Επίσης, η ανά μονάδα τιμή της τάσης ισχύος V_p , η οποία καθορίζει το ανώτατο όριο για την έξοδο της τάσης διέγερσης προς την κύρια διεγέρτρια, όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 2.3.3, προκύπτει ανάγοντας την τιμή της στην $V_{b_διεγ}$, η οποία δίνεται ίση με 240V.

Όσον αφορά το κομμάτι της διέγερσης, αυτό περιλαμβάνει τις μεταβλητές T_E , K_E και S_E . Από τις τρεις αυτές μεταβλητές διαθέσιμες πληροφορίες υπάρχουν μόνο για τη σταθερά χρόνου:

- $T_E = 0.25s$

Η παραπάνω τιμή προκύπτει από το εγχειρίδιο του APT του *DECS- 250 της Basler Electric*[13], όπου αποδίδεται η συγκεκριμένη τιμή στην μεταβλητή T_E , με βάση ότι ισχύει για τη σύγχρονη γεννήτρια, $T'_{d0} = 1.5 s$.

Για τις άλλες δύο μεταβλητές, για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, δίνονται τυπικές τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε AC συστήματα διέγερσης, όπως το συγκεκριμένο. Οι τιμές οι οποίες τέθηκαν βρέθηκαν στην αναφορά [14] και είναι οι ακόλουθες:

- $S_E = 0.1$
- $K_E = 1$

4

Αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου

Στο παρόν κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται οι πραγματικές αποκρίσεις των δοκιμών του πρότυπου έργου, οι οποίες συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου του ΜΥΗΕ. Επιπλέον της συγκριτικής αυτής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, παρουσιάζονται και επιπρόσθετες προσομοιώσεις του μοντέλου για να παρατηρηθεί η μεταβατική του συμπεριφορά σε δοκιμές, όπως το τριφασικό βραχυκύκλωμα. Σε όλες τις προσομοιώσεις το ΜΥΗΕ είναι διασυνδεδεμένο σε Σύστημα Μεταφοράς, το οποίο προσομοιώνεται ως άπειρος ζυγός.

4.1 Δοκιμές Πεδίου πραγματικού ΜΥΗΕ (SATs)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι διαθέσιμες πραγματικές αποκρίσεις του πραγματικού ΜΥΗΕ σε δοκιμές κατά την παραλαβή του (SATs – Site Acceptance Tests).

Τα γραφήματα που θα παρουσιαστούν περιλαμβάνουν τα σημαντικότερα μεγέθη, τα οποία κρίθηκε πως αξίζει να παρουσιαστούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μέρος των οποίων συγκρίνεται και με τις αποκρίσεις του μοντέλου που υλοποιήθηκε στο MATLAB/Simulink.

4.1.1 Θεωρητικά στοιχεία επί των Δοκιμών Πεδίου (SATs) ενός ΜΥΗΕ [15]

Σε αυτήν την Ενότητα γίνεται μία σύντομη αναφορά στα SATs και στις κατηγορίες τους. Κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής και την παράδοση ενός ΥΗΕ παραδίδονται μαζί με το έργο και τα αντίστοιχα, έγγραφα των αποτελεσμάτων Δοκιμών Πεδίου (SATs), όπως ακριβώς κατά την παραλαβή του Μηχανολογικού και Ηλεκτρολογικού εξοπλισμού παραδίδονται τα έγγραφα των Δοκιμών Εργαστηρίου (Factory Acceptance Tests - FATs). Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για να διασφαλιστεί η σωστή και ασφαλής λειτουργία ενός ΥΗΕ καθ όλη τη διάρκεια της ζωής του. Οι Δοκιμές Πεδίου οι οποίες διεξάγονται, καθορίζονται από τον Πρότυπο Κώδικα Κανόνων για το Σύστημα Παραγωγής και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας που εφαρμόζεται στη χώρα, στην οποία εγκαθίσταται το εκάστοτε ΥΗΕ.

Τα SATs χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τα Pre-Commissioning και τα Commissioning Tests. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τον εποπτικό έλεγχο της κατασκευής του ΥΗΕ, του Μηχανολογικού και Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού πριν να τεθούν σε λειτουργία, ώστε να διαπιστωθεί ότι το έργο εκτελέστηκε σύμφωνα με την μελέτη, τις απαιτήσεις και το συμβόλαιο που υπογράφηκε για την κατασκευή του. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις δοκιμές που διεξάγονται με και χωρίς ροή νερού στον αγωγό υδροληψίας, ώστε να διαπιστωθεί και στην πράξη η ορθή λειτουργία του Μηχανολογικού και Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού και να γίνουν οι τελικές απαραίτητες ρυθμίσεις.

Στα Pre-Commissioning Tests, ο έλεγχος του ΥΗΕ επικεντρώνεται ιδιαίτερα στις εργασίες του δομικού σκέλους του έργου. Σε αυτά διασφαλίζεται ότι τα κατασκευαστικά κομμάτια του ΥΗΕ, όπως το φράγμα, ο αγωγός υδροληψίας, η δεξαμενή υπερχειλίσσης, αν υπάρχει, είναι σε θέση να λειτουργήσουν με αξιοπιστία και ασφάλεια. Κατόπιν, ελέγχεται η αξιοπιστία και ορθότητα της εγκατάστασης του μηχανολογικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται έλεγχος της κατασκευής του υδροστροβίλου, των βαλβίδων και της εγκατάστασης όλων των απαιτούμενων στο συμβόλαιο του έργου εξαρτημάτων του Ηλεκτρολογικού και Μηχανολογικού εξοπλισμού. Εφόσον, η εταιρία που είναι υπεύθυνη για

την επίβλεψη του έργου εξετάσει τα παραπάνω, μαζί με τους υπεύθυνους Πολιτικούς, Ηλεκτρολόγους και Μηχανολόγους Μηχανικούς για την κατασκευή του έργου, υπογράφεται η συνέχιση των Pre-Commissioning Tests. Σε επόμενο στάδιο, επιτρέπεται η ελάχιστη ροή νερού εντός της κατασκευής του ΥΗΕ, ώστε να ελεγχθεί και στην πράξη η σωστή κατασκευή και εγκατάσταση του ΥΗΕ.

Έπειτα, αρχίζει η διαδικασία των Commissioning Tests, που αφορούν τον Ηλεκτρολογικό και Μηχανολογικό εξοπλισμό κατά κύριο λόγο και χωρίζονται σε δοκιμές χωρίς νερό και με πλήρη ροή νερού, εφόσον πλέον έχει προηγηθεί και έχει τελειώσει η διαδικασία πλήρωσης του ταμιευτήρα και της κοίτης του φράγματος. Ενδεικτικά για τις δοκιμές χωρίς ροή νερού αναφέρεται ότι διεξάγονται:

- Έλεγχος των σωστών διαστάσεων και εγκατάστασης του εξοπλισμού.
- Έλεγχος του άξονα του υδροτροβίλου.
- Έλεγχος και ρύθμιση όλων των βαλβίδων, των οργάνων μέτρησης πίεσης, μέτρησης θερμοκρασίας και λοιπών αναλογικών οργάνων στον χώρο του ΥΗΕ.
- Έλεγχος της σωστής εγκατάστασης και καλωδίωσης των Ηλεκτρολογικών Πινάκων Μέσης και Χαμηλής Τάσης.
- Έλεγχος της σωστής λειτουργίας όλων των ηλεκτρονικών συσκευών.
- Έλεγχος της σωστής εγκατάστασης και καλωδίωσης του συστήματος αυτοματισμού (PLC σύστημα), καθώς και του συστήματος επικοινωνιών, όπως για παράδειγμα μεταξύ των PLC και των PLC με το σύστημα SCADA.
- Έλεγχος της σωστής λειτουργίας των συναρτήσεων οι οποίες έχουν προγραμματιστεί στα PLC.
- Έλεγχος της σωστής καλωδίωσης μεταξύ πινάκων και εξοπλισμού στο Πεδίο.
- Έλεγχος της συνέχειας και της μόνωσης των καλωδίων Χαμηλής και Μέσης Τάσης.
- Έλεγχος της γείωσης σε όλη την κατασκευή του ΥΗΕ.
- Έλεγχος της σωστής λειτουργίας των διακοπών Μέσης Τάσης.
- Έλεγχος της μόνωσης και γείωσης του εξοπλισμού της γεννήτριας, καθώς και σωστή ρύθμιση όλων των προστασιών της.
- Έλεγχος των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροτροβίλου και του APT. Αναλυτικότερα, αναφέρεται ότι χωρίς τη ροή νερού ελέγχεται η σωστή μηχανολογική λειτουργία και απόκριση των ρυθμιστικών πτερυγίων σε εντολές, καθώς αντίστοιχα και η φυσική λειτουργία του APT μεμονωμένα ως συσκευή και όχι σαν μέρος του όλου συστήματος.

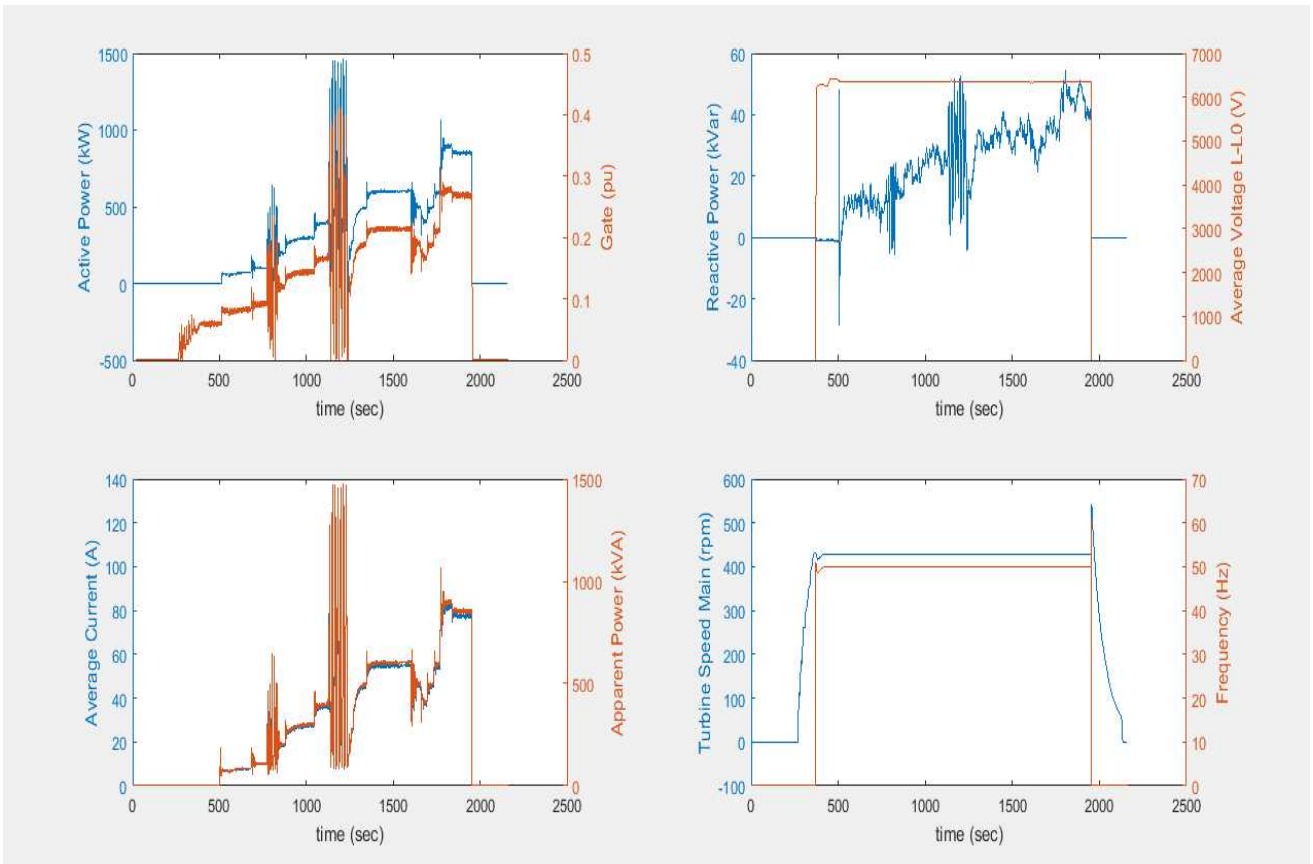
Εφόσον, διεξαχθούν οι παραπάνω έλεγχοι συγγράφονται τα έγγραφα που τους πιστοποιούν και υπογράφονται από τους μηχανικούς που ήταν υπεύθυνοι για τις δοκιμές, τους επιβλέποντες μηχανικούς της κατασκευής και τον παραλήπτη του ΥΗΕ. Εν συνεχεία οι δοκιμές φτάνουν στο τελικό τους στάδιο, το οποίο είναι η πλήρης λειτουργία του ΥΗΕ με ροή νερού υπό κανονικές συνθήκες.

Το τελευταίο αυτό στάδιο δοκιμών χωρίζεται επίσης, σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι δοκιμές με συνδεδεμένες και μη τις γεννήτριες σε φορτίο. Είναι απαραίτητο πριν συνδεθεί η γεννήτρια σε κάποιο φορτίο να ελεγχθεί η σωστή αλληλουχία των φάσεων της, να ελεγχθούν ξανά και με ροή νερού το σύνολο των προστασιών της, ο APT και η ομαλή λειτουργία του, να γίνει δοκιμή ανοιχτοκυκλώματος και βραχυκυκλώματος και να διασφαλιστεί πάλι η σωστή λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού. Έπειτα, συνδέονται οι γεννήτριες του ΥΗΕ σε φορτίο, όπου διεξάγονται δοκιμές όπως αυτές της απόρριψης φορτίου (Load Rejection Tests), που παρουσιάζονται στη συνέχεια, ή δοκιμές για την ταχύτητα με την οποία σταματάει η υδροηλεκτρική μονάδα την λειτουργία της σε περίπτωση σφάλματος, ή ακόμα μετρούνται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει ο εξοπλισμός, το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης της γεννήτριας, καθώς και η τάση και το ρεύμα τυλιγμάτων του στάτη και άλλα ηλεκτρικά μεγέθη.

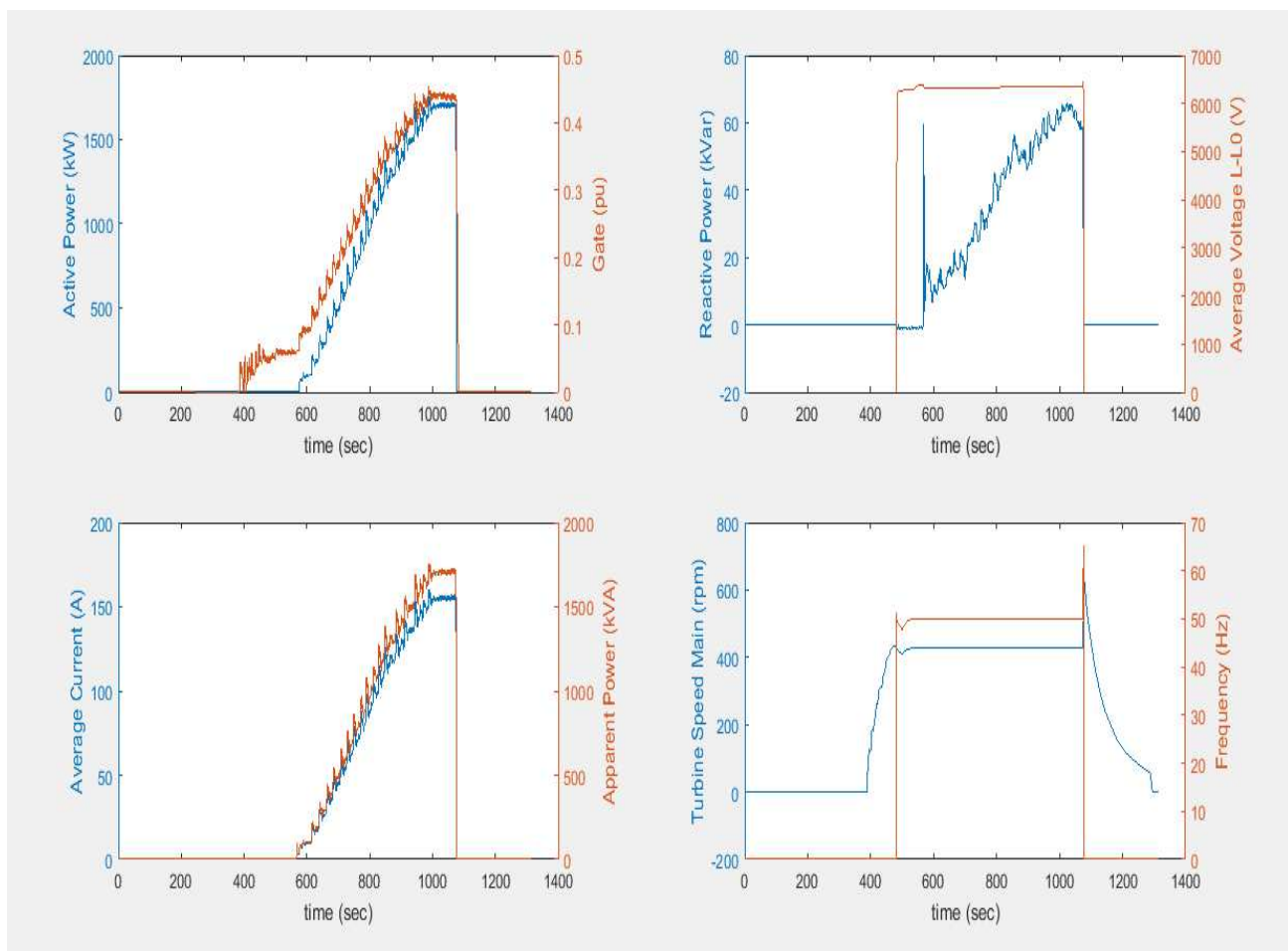
Για την ολοκλήρωση και πλήρη παράδοση του έργου, οι υπεύθυνοι μηχανικοί των δοκιμών και οι υπεύθυνοι για την επίβλεψη του έργου συντάσσουν εκ νέου τα έγγραφα για την ολοκλήρωση των δοκιμών και τις μετρήσεις που καταγράφηκαν και τα καταθέτουν στον Υπεύθυνο Κρατικό Φορέα, ο οποίος ήδη είναι ενήμερος και έχει παρακολουθήσει τις δοκιμές, καθώς και έχει ελέγξει ότι το ΥΗΕ κατασκευάστηκε και λειτουργεί με βάση τον Πρότυπο Κώδικα Κανόνων για το Σύστημα Παραγωγής και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας που εφαρμόζεται στη χώρα, στην οποία εγκαθίσταται το εκάστοτε ΥΗΕ. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η όλη διαδικασία των δοκιμών μέχρι και την επίσημη παράδοση του συγκεκριμένου έργου διήρκησε περίπου έξι (6) μήνες.

4.1.2 Αποτελέσματα Δοκιμών Πεδίου κατά την λειτουργία του ΜΥΗΕ

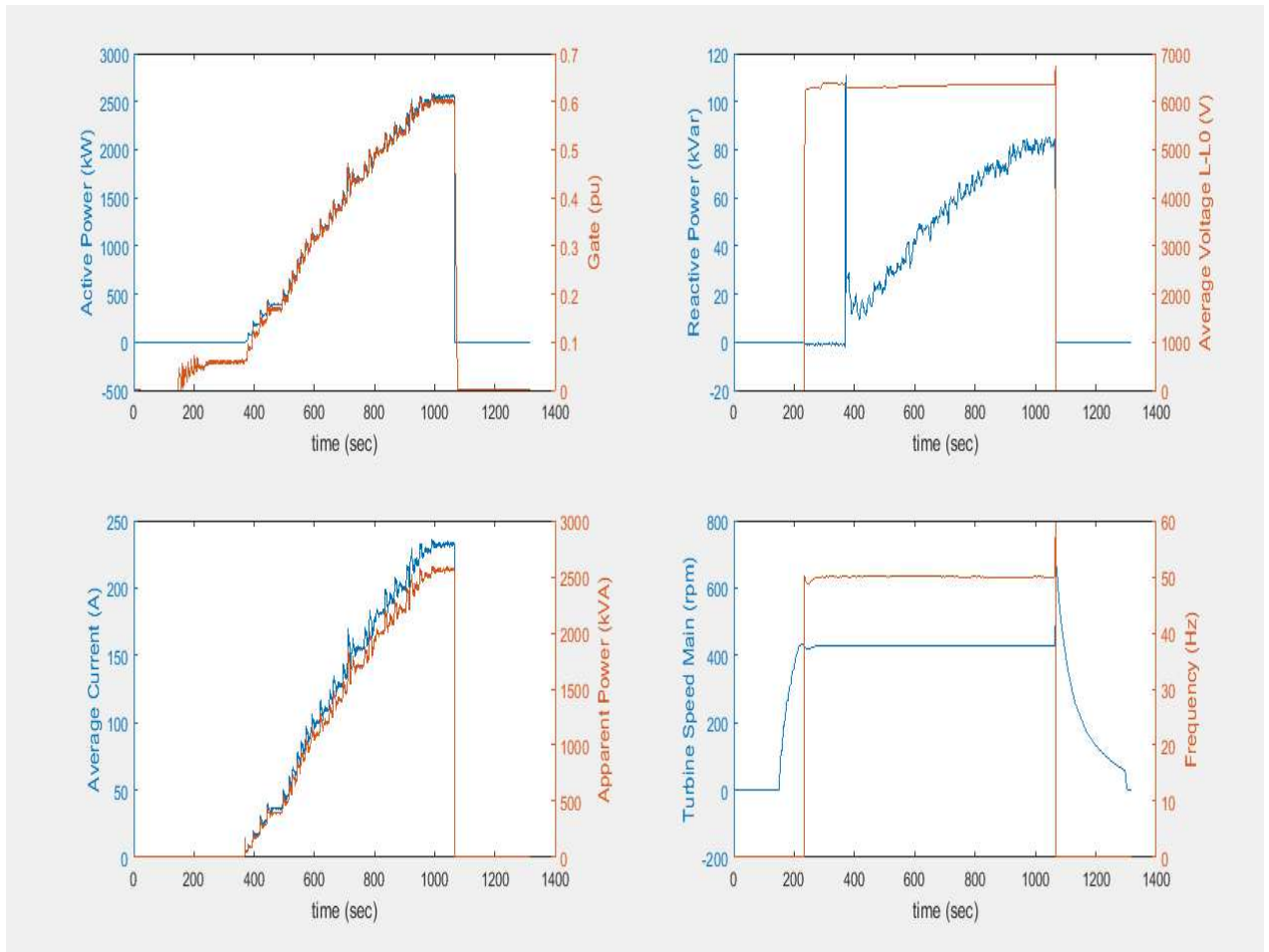
Σε αυτό το σημείο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι δοκιμές στο Πεδίο. Υπενθυμίζεται εδώ ότι θα παρουσιαστούν τα γραφήματα για τη λειτουργία μίας εκ των τριών υδροηλεκτρικών μονάδων του έργου. Επιπλέον, αναφέρεται ότι όλες οι δοκιμές που παρουσιάζονται διεξάγονται με τη γεννήτρια να είναι συνδεδεμένη στο Σύστημα Μεταφοράς της περιοχής, την οποία τροφοδοτεί το πραγματικό ΜΥΗΕ. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω γραφήματα, η μονάδα αναλάμβανε σταδιακά φορτίο, φτάνοντας τελικά να παράγει την επιθυμητή ενεργό ισχύ, σύμφωνα με τις εντολές του χειριστή. Ύστερα από περίπου 30' της ώρας, άνοιγε κατόπιν εντολής ο Διακόπτης Ισχύος Μέσης Τάσης του αντίστοιχου Πεδίου Μέσης Τάσης, αποσυνδέοντας τη γεννήτρια από το Σύστημα Μεταφοράς και καταγραφόταν η απόκρισή της σε μία σειρά μεγεθών, ώστε να διαπιστωθούν τυχόν ανεπιθύμητες υπερτάσεις ή υπερταχύνσεις. Τα βασικά επίπεδα φόρτισης της μονάδας για τα οποία λήφθηκαν μετρήσεις ήταν τα 25%, 50%, 75% και 100% επί της ονομαστικής ενεργού ισχύος μίας υδροηλεκτρικής μονάδας του ΜΥΗΕ.



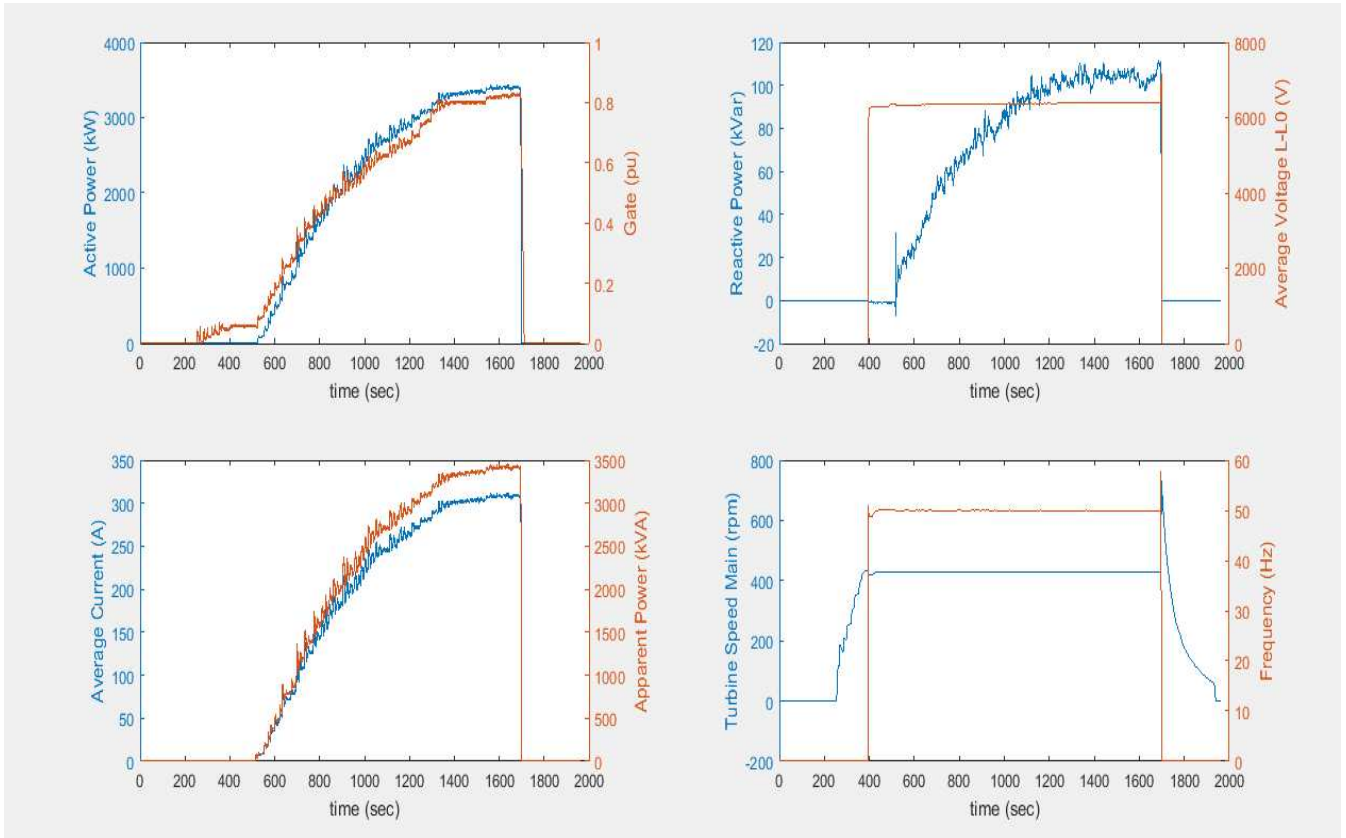
Σχήμα 4.1 Δοκιμές για το 25% της Ενεργού Ισχύος



Σχήμα 4.2 Δοκιμές για το 50% της Ενεργού Ισχύος



Σχήμα 4.3 Δοκιμές για το 75% της Ενεργού Ισχύος



Σχήμα 4.4 Δοκιμές για το 100% της Ενεργού Ισχύος

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούνται τα εξής:

- Αρχικά, αναφέρεται ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι μία μέτρηση ανά δευτερόλεπτο, κάτι που δεν επιτρέπει την ακριβή σύγκριση και μελέτη μεταβατικών φαινομένων, ανάμεσα στις Δοκιμές Πεδίου και τις προσομοιώσεις του μοντέλου.
- Παρατηρώντας τα παραπάνω γραφήματα, είναι εμφανής η διαδικασία εκκίνησης της υδροηλεκτρικής μονάδας. Αρχικά ανοίγουν σταδιακά τα ρυθμιστικά περύγια (Gate(ru)) έως μία σχετικά μικρή τιμή (της τάξης του 0.05 α.μ.), επιτρέποντας τη διέλευση του νερού από τον υδροστρόβιλο, οδηγώντας έτσι σε σταδιακή επιτάχυνση του άξονά του (Turbine Speed Main (rpm)). Όσο πραγματοποιείται η παραπάνω διαδικασία, ο Διακόπτης Ισχύος στην πλευρά της MT είναι ανοικτός, ενώ ο Διακόπτης στην πλευρά της YT είναι κλειστός. Όταν η ταχύτητα φτάσει στην ονομαστική της τιμή και τηρούνται όλες οι συνθήκες συγχρονισμού της Σ.Γ. στο Σύστημα Μεταφοράς, κλείνει ο Διακόπτης Ισχύος MT. Η στιγμή αυτή παρουσιάζεται στα παραπάνω γραφήματα ως αυτή στην οποία η πολική τάση (Average Voltage L - L0 (V)) από την πλευρά του Μ/Σ (μετά τον διακόπτη) και η συχνότητα (Frequency (Hz)) λαμβάνουν μη μηδενικές τιμές. Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται πως υπάρχει ένα χρονικό διάστημα (1-2 λεπτών), στο οποίο το άνοιγμα των ρυθμιστικών περυνγίων είναι ιδιαίτερα μικρό (0.05 α.μ.), η Σ.Γ. είναι συγχρονισμένη στο Σύστημα Μεταφοράς, αλλά δεν παρατηρείται ροή ρεύματος (Average Current (A)), άρα και ισχύος (Apparent Power(kVA)). Ροή ρεύματος παρατηρείται αφού το άνοιγμα των ρυθμιστικών περυνγίων αυξηθεί σε τιμή κοντά στο 0.1 α.μ.. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο το άνοιγμα των ρυθμιστικών περυνγίων είναι μικρό, η παραγωγή μηχανικής ισχύος σχεδόν αντισταθμίζει τις απώλειες του υδροστρόβιλου και της Σ.Γ.. Η επ' ακριβώς μηδενική τιμή του ρεύματος στην κατάσταση αυτή, εξηγείται από τη ρύθμιση που έχουν οι μετρητές ρεύματος συνήθως σε τέτοιες εγκαταστάσεις, ώστε να μετράνε άνω ενός προεπιλεγμένου ορίου το ρεύμα (π.χ. άνω του 1% του I_n), δίνοντας μηδενική τιμή για οποιοδήποτε ρεύμα μικρότερο αυτού του ορίου.
- Μία άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει καθολικά για όλα τα γραφήματα των δοκιμών, εκτός της δοκιμής στο 25%, είναι η κλιμακωτή αύξηση ενεργού, φαινομένης, άεργου ισχύος και ρεύματος, σε συμπίεση με το άνοιγμα των ρυθμιστικών περυνγίων. Η κλιμακωτή αύξηση του ρεύματος και της ενεργού ισχύος είναι ένα φαινόμενο απολύτως λογικό, εφόσον υπάρχει αύξηση στο άνοιγμα των

ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου και επομένως, μεταφορά μεγαλύτερης μηχανικής ροπής στον κοινό άξονα υδροστροβίλου και δρομέα της Σ.Γ.. Παρατηρώντας τις μετρήσεις των δοκιμών εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ισχύος στην έξοδο της Σ.Γ. είναι ρυθμισμένος ώστε να διατηρεί σταθερή τιμή, εντός του εύρους 0.99 - 1. Η παρατήρηση αυτή εξηγεί ότι η αύξηση της Ενεργού Ισχύος, ακολουθείται από αύξηση της άεργου ισχύος, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της φαινόμενης ισχύος και του ρεύματος.

- Σημειώνεται επίσης, ότι το προαναφερόμενο εύρος των τιμών του ΣΙ (0.99-1) σχετίζεται με την προσπάθεια του APT να παρακολουθεί την επιθυμητή τιμή, προκαλώντας τις παρατηρούμενες διακυμάνσεις της άεργου ισχύος στις αποκρίσεις των δοκιμών. Ενδεικτικά, παρατηρείται σε όλες τις κυματομορφές της άεργου ισχύος ότι τις πρώτες στιγμές παραγωγής του ρεύματος παρουσιάζουν μία απότομη αύξηση της τιμής τους, που οφείλεται στο ότι ο ΣΙ έχει πολύ χαμηλή τιμή (κάτω από 0.1) και αμέσως μετά, ξεκινάει η διόρθωσή του από το υποσύστημα του APT.
- Επίσης, από τα γραφήματα γίνονται αντιληπτοί και οι χειρισμοί που πραγματοποιήθηκαν και οδήγησαν σε αυτές τις αποκρίσεις. Φαίνεται ότι δίνονται κλιμακωτά εντολές για αύξηση της ενεργού ισχύος μέχρι αυτή να καταλήξει στην επιθυμητή τελική τιμή. Ακόμα και στη δοκιμή που καταλήγει σε φόρτιση ίση με το 25% της ονομαστικής ενεργού ισχύος φαίνεται ότι ο χειρισμός από τον χειριστή και η αυξομειώσεις των επιθυμητών επιπέδων της ισχύος δημιουργεί αυτές τις έντονες αυξομειώσεις στα διάφορα μεγέθη της γεννήτριας.
- Τέλος, παρατηρείται ότι σε όλες τις δοκιμές η γεννήτρια εγχέει ρεύμα στο Σύστημα Μεταφοράς μόνο για τιμές ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων μεγαλύτερες από 0.1α.μ.. Αυτό παρατηρείται στα γραφήματα από το ότι παρ' όλο που τα ρυθμιστικά πτερύγια του υδροστροβίλου είναι ελάχιστα ανοιχτά και δεν εφάπτονται εξ ολοκλήρου το ένα με το άλλο, στην έξοδο της Σ.Γ. υπάρχει σχεδόν μηδενική παραγωγή ρεύματος, ενώ αυτή είναι συγχρονισμένη στο Σύστημα Μεταφοράς έως ότου το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων ξεπερνάει την προαναφερόμενη τιμή.

4.2 Προσομοιώσεις και σύγκριση με τις Δοκιμές

4.2.1 Παρατηρήσεις επί των προσομοιώσεων στο MATLAB/Simulink

Σε συνέχεια της παρουσίασης των Δοκιμών Πεδίου που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και των σχετικών παρατηρήσεων που αναφέρθηκαν στην παραπάνω ενότητα, στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου στο MATLAB/Simulink και συγκρίνονται σε κοινά διαγράμματα με αυτά των Δοκιμών Πεδίου. Όπως είναι αναμενόμενο, προαναφερόμενη σύγκριση μετρήσεων και προσομοιώσεων παρουσιάζει αποκλίσεις, διότι υπάρχουν παράγοντες που δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη στις προσομοιώσεις, όπως διάφορες συναρτήσεις και συστήματα αυτοματισμού που επηρεάζουν την παραγωγή και την συμπεριφορά της υδροηλεκτρικής μονάδας σε μεταβατικά φαινόμενα, είτε και ακριβείς μηχανολογικές λεπτομέρειες για τον υδροστρόβιλο και το σύστημα υδροληψίας. Συνεπώς, συμβολή στις αποκλίσεις έχει το γεγονός της έλλειψης γνώσης παραμέτρων του ΜΥΗΕ, που οδήγησε σε απλουστεύσεις κατά τη μοντελοποίηση και απόδοση τιμών στις παραμέτρους από τη Διεθνή Βιβλιογραφία.

Αρχικά αναφέρεται ότι η τοπολογία της προσομοίωσης είναι μία Σ.Γ. του ΜΥΗΕ συνδεδεμένη απευθείας σε ένα άπειρο σύστημα ανηγμένο στα 6.3kV, δοσμένης τόσο της απουσίας στοιχείων για τους Μ/Σ του ΜΥΗΕ, όσο και του ότι οι διαθέσιμες μετρήσεις των δοκιμών αφορούν το πεδίο Μέσης Τάσης του ΜΥΗΕ.

Σχετικά με τη διαδικασία πραγματοποίησης των προσομοιώσεων, αναφέρεται ότι δεν είναι διαθέσιμα τα κλιμακωτά επίπεδα ενεργού ισχύος που δίνονταν ως αναφορά από τους χειριστές. Η απουσία γνώσης του σήματος εισόδου στο ρυθμιστή στροφών κατά τις δοκιμές, προκαλεί σημαντική αιτία αποκλίσεων των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων από των πραγματικών δοκιμών. Στις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν με το μοντέλο, το ρόλο των επιπέδων αναφοράς αυτών τον διαδραματίζει η κυματομορφή εξόδου της ενεργού ισχύος, που παράγεται ως αποτέλεσμα των Δοκιμών Πεδίου, με χρονική ολίσθηση (προς τα πίσω) κατά 5 δευτερόλεπτα. Δηλαδή, θεωρήθηκε ότι:

$$P_{ref,MATLAB}(t) = P_{e,SAT}(t + 5) \quad (4.2-1)$$

Η συγκεκριμένη χρονική τιμή για την ολίσθηση επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:

- Σύμφωνα με την αναφορά [7], ο υπολογισμός της χρονικής σταθεράς της απόκρισης ενός ΥΗΕ προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{const} = T_w/2 \quad (4.2-2)$$

- Ένα σύστημα πρώτης τάξης φτάνει στο 95% της τελικής τιμής του ύστερα από χρονική διάρκεια ίση με $3 \cdot T_{const}$.

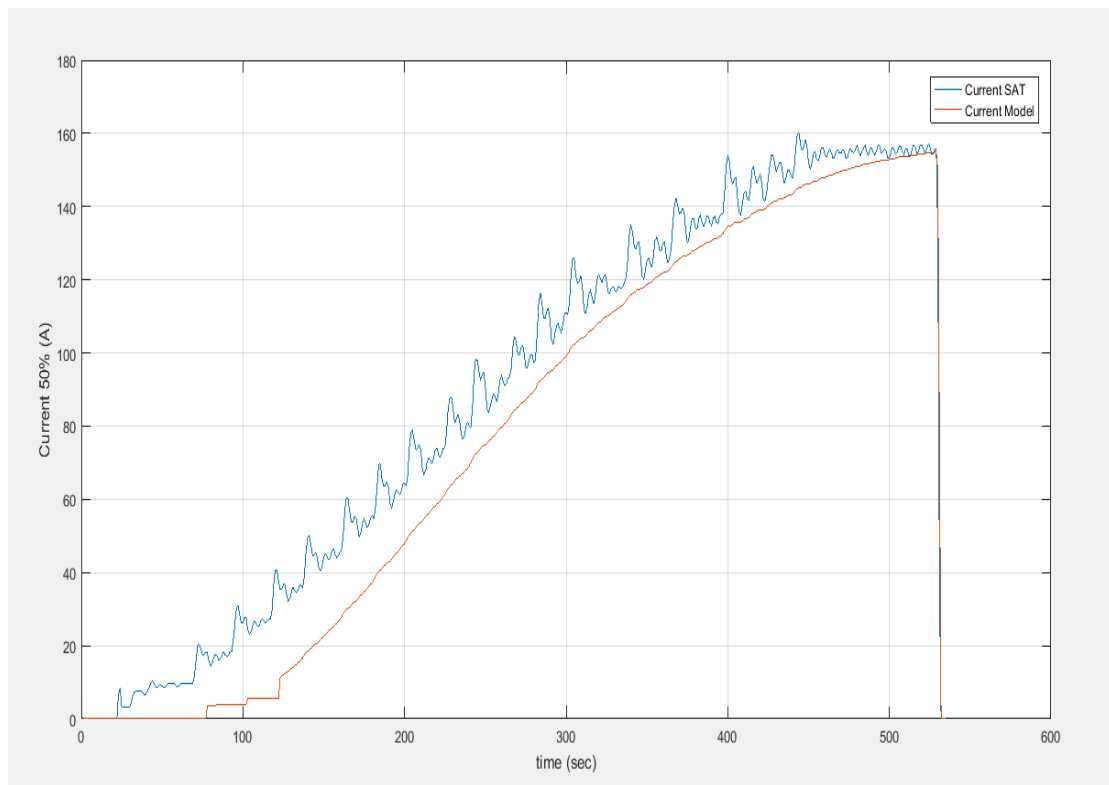
- Παρατηρώντας την απόκριση της Ενεργού Ισχύος στο *Σχήμα 4.1*, γίνεται εμφανές ότι κάθε νέα τιμή της Ενεργού Ισχύος προσεγγίζεται από το ΜΥΗΕ σε χρόνο 5-7 δευτερολέπτων. Αυτό αντιστοιχίζεται με βάση και τα παραπάνω με τη χρονική σταθερά μεταβολής για $0.95 \cdot P_{\text{final}}$, δηλαδή:

$$T_{\text{const}} = \frac{3 \cdot T_w}{2} \approx 5 \text{sec} \quad (4.2-3)$$

Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου, συγκρινόμενα με τις κυματομορφές, οι οποίες είχαν προκύψει από τα SATs. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η προαναφερόμενη σύγκριση δεν αφορά τη μεταβατική συμπεριφορά του ΜΥΗΕ, καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας του ενός δευτερολέπτου στις Δοκιμές Πεδίου, δεν επιτρέπει την παρατήρηση αυτής της χρονικής κλίμακας. Η προσομοίωση που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μόνο για τη δοκιμή όπου γινόταν απόρριψη φορτίου στο 50% της ονομαστικής ενεργού ισχύος, λόγω της υψηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας των προσομοιώσεων, της μεγάλης χρονικής διάρκειας που προσομοιώνεται (530 sec), καθώς και του γεγονότος ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 1 sec, συνεπώς δεν έχουν αξία οι επιπλέον προσομοιώσεις για τη διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς του ΜΥΗΕ.

4.2.2 Προσομοιώσεις σε MATLAB/Simulink για το 50% της ονομαστικής Ενεργού Ισχύος

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη δοκιμή, όπου η Σ.Γ. του ΜΥΗΕ καταλήγει στο 50% της ονομαστικής ενεργού ισχύος της. Αρχικά, παρουσιάζονται οι συγκρινόμενες κυματομορφές των RMS τιμών των ρευμάτων του στάτη, για το μοντέλο και για το πραγματικό ΜΥΗΕ:



Σχήμα 4.5 Σύγκριση αποκρίσεων ρεύματος στο 50% της Ενεργού Ισχύος

Για τις αποκρίσεις του ρεύματος μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Βασική, διαφορά των παραπάνω κυματομορφών αποτελεί ο χρόνος εκκίνησης παραγωγής ρεύματος στη δοκιμή (22 sec) και την προσομοίωση (78 sec). Παρατηρείται μια εμφανής διαφορά στην χρονική στιγμή κατά την οποία αρχίζει να αυξάνει η τιμή του ρεύματος του μοντέλου, σε σχέση με αυτή των δοκιμών. Η χρονική απόκλιση αυτή οφείλεται στο ότι ως είσοδο στο κομμάτι της αναφοράς της ενεργού ισχύος του μοντέλου, δεν δίνεται η ίδια κυματομορφή που δόθηκε κατά τις Δοκιμές Πεδίου, αλλά δίνεται η ενεργός ισχύς που αποτέλεσε την απόκριση των δοκιμών, με τη μετατροπή που αναφέρεται στην παραπάνω Ενότητα. Αυτό σημαίνει ότι στην ήδη θεμιτή καθυστέρηση που θα είχε το μοντέλο στην απόκρισή του, κατά την ανάγκη αλλαγής της εξόδου του, έρχεται να προστεθεί και η καθυστέρηση που υπήρξε στην απόκριση στις Δοκιμές του Πεδίου. Επιπλέον, καθυστέρηση στην απόκριση του μοντέλου προστίθεται, εφόσον, πριν ξεκινήσει η παραγωγή ρεύματος, το μοντέλο επιδιώκει πρώτα να μηδενίσει την τιμή του ρεύματος η οποία έρχεται έπειτα από την απότομη αύξηση του κατά την υπομεταβατική και μεταβατική περίοδο, ακολουθώντας έτσι τη μηδενική τιμή αναφοράς Ενεργού Ισχύος που έχει αρχικά εισαχθεί στο μοντέλο.
- Επίσης, παρατηρείται απόκλιση των τιμών του ρεύματος που παράγονται από το μοντέλο σε σχέση με την πραγματική απόκριση και μετά από την περίοδο της έναρξης παραγωγής ισχύος στην προσομοίωση. Αυτό σχετίζεται κυρίως με την εσφαλμένη εν γένει παραδοχή ότι ως ισχύς αναφοράς τέθηκε η μετρούμενη ισχύς μετατοπισμένη χρονικά κατά 5 sec. Σημειώνεται ότι παρόλο που υπάρχει ανά δευτερόλεπτο διαφορά στις τιμές των αποκρίσεων, οι κλίσεις των δύο κυματομορφών φαίνεται ότι προσεγγίζουν η μία την άλλη, με μικρή αύξηση της κλίσης της απόκρισης του μοντέλου, διότι το μοντέλο του ΜΥΗΕ προσπαθεί να καλύψει τη διαφορά που έχει δημιουργηθεί.

Ως δείκτης ποσοτικοποίησης της σύγκλισης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τις πραγματικές μετρήσεις, υπολογίζεται η Μέση τιμή της διαφοράς τους καθώς και η τυπική τους απόκλιση, ως εξής:

$$\overline{\Delta I} = \frac{\sum(I_{SAT,i} - I_{MATLAB,i})}{n} = 11.38 \text{ A} \quad (4.2-2)$$

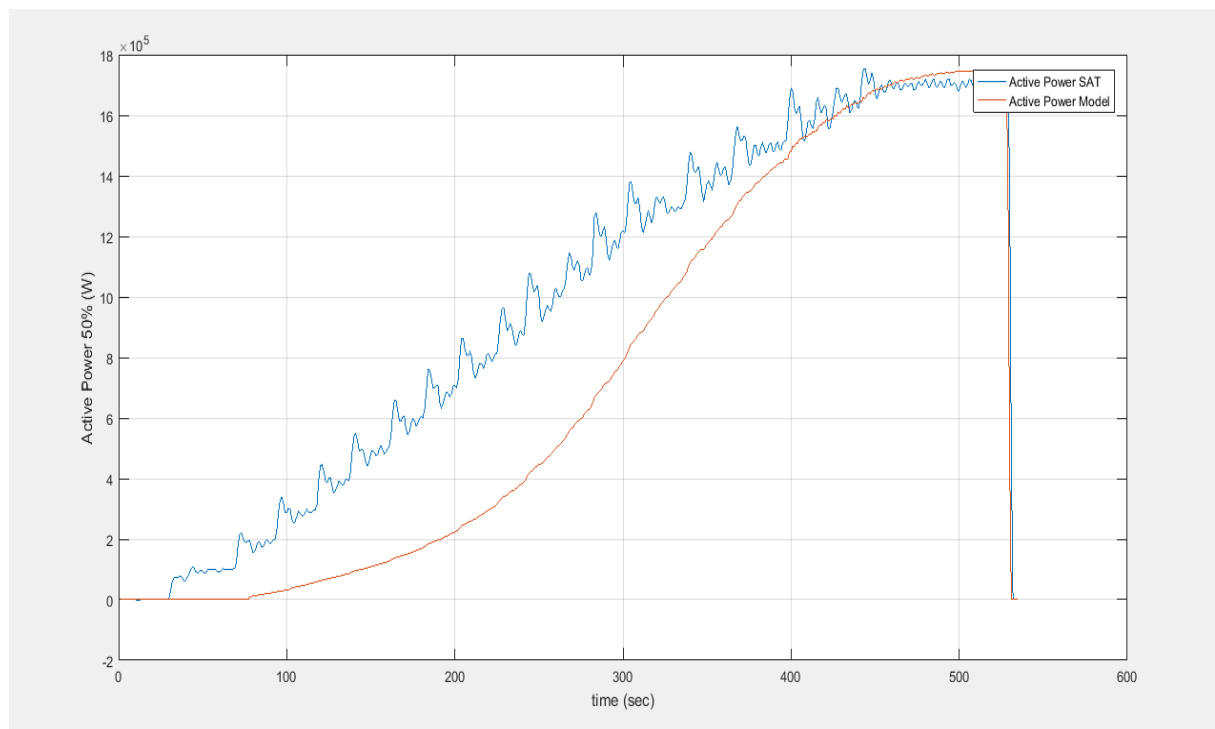
$$\sigma_{\Delta I} = \sqrt{\frac{\sum(I_{SAT,i} - I_{MATLAB,i} - \overline{\Delta I})^2}{n-1}} = 13.92 \quad (4.2-3)$$

Όπου,

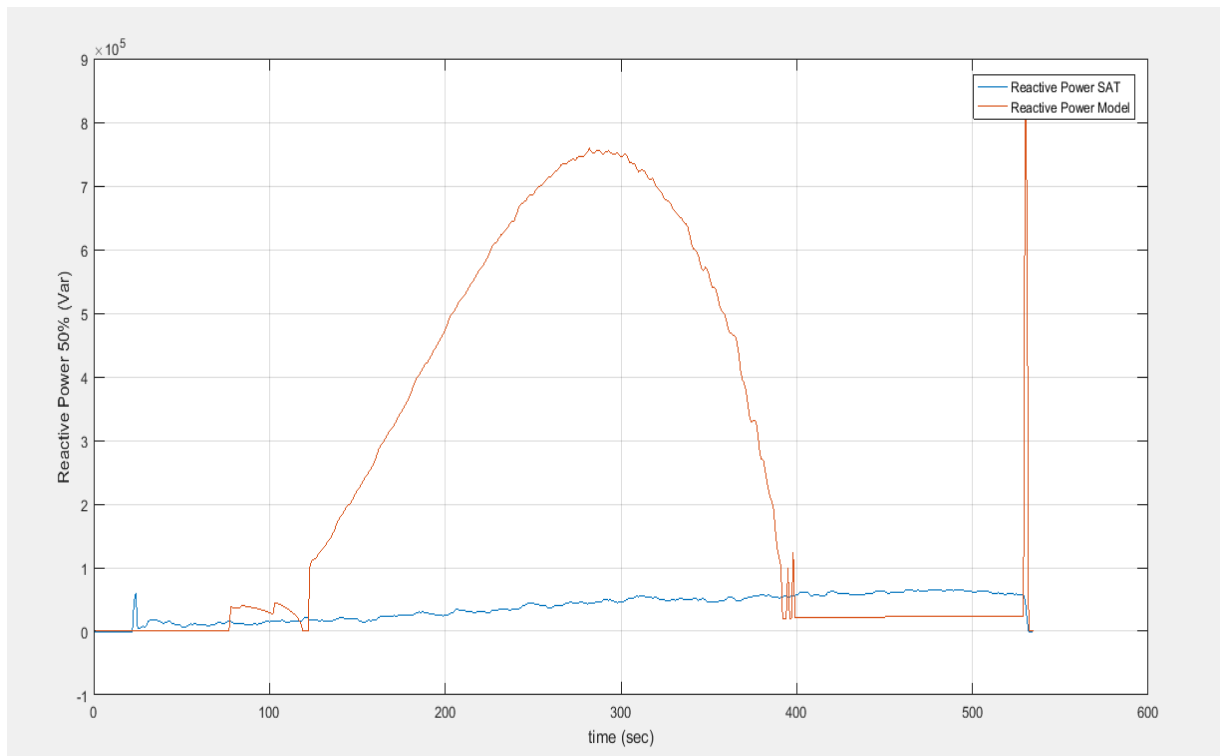
- $I_{SAT,i}$, οι τιμές Δοκιμών Πεδίου ανά δευτερόλεπτο
- $I_{MATLAB,i}$, οι τιμές Δοκιμών Μοντέλου ανά δευτερόλεπτο
- n , ο πληθυσμός των διαφορών

Από τους παραπάνω υπολογισμούς, προκύπτει ότι οι δύο αποκρίσεις έχουν κάποια απόκλιση μεταξύ τους, η οποία έχει αξιοσημείωτη απόκλιση, λόγω του ότι στην αρχή η απόκλιση είναι μεγάλη (χρονική διαφορά εκκίνησης), αλλά στη συνέχεια η προσομοίωση προσεγγίζει περισσότερο τις μετρήσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυματομορφές για την τιμή της Ενεργού και της Άεργου Ισχύος.



Σχήμα 4.6 Σύγκριση αποκρίσεων Ενεργού Ισχύος στο 50% της Ενεργού Ισχύος



Σχήμα 4.7 Σύγκριση αποκρίσεων Αέργου Ισχύος στο 50% της Ενεργού Ισχύος

Αξιοσημειώτες θεωρούνται κάποιες επισημάνσεις για τη σύγκριση των παραπάνω κυματομορφών του μοντέλου και των Δοκιμών Πεδίου, όσον αφορά την απόκριση της άεργου και της ενεργού ισχύος:

- Αρχικά, όσον αφορά την ενεργό ισχύ, παρατηρείται ότι η απόκριση του μοντέλου καθυστερεί σε σχέση με αυτή του ΜΥΗΕ, σε αντιστοιχία με το ρεύμα της Σ.Γ.. Καθώς, η τάση διατηρείται σταθερή και το μεγαλύτερο σκέλος της φαινόμενης ισχύος είναι η ενεργός, η συσχέτιση μεταξύ αποκλίσεων ρεύματος και αποκλίσεων ενεργού ισχύος, είναι αναμενόμενη. Η Μέση τιμή των αποκλίσεων των δύο κυματομορφών των ενεργών ισχύων δίνεται παρακάτω:

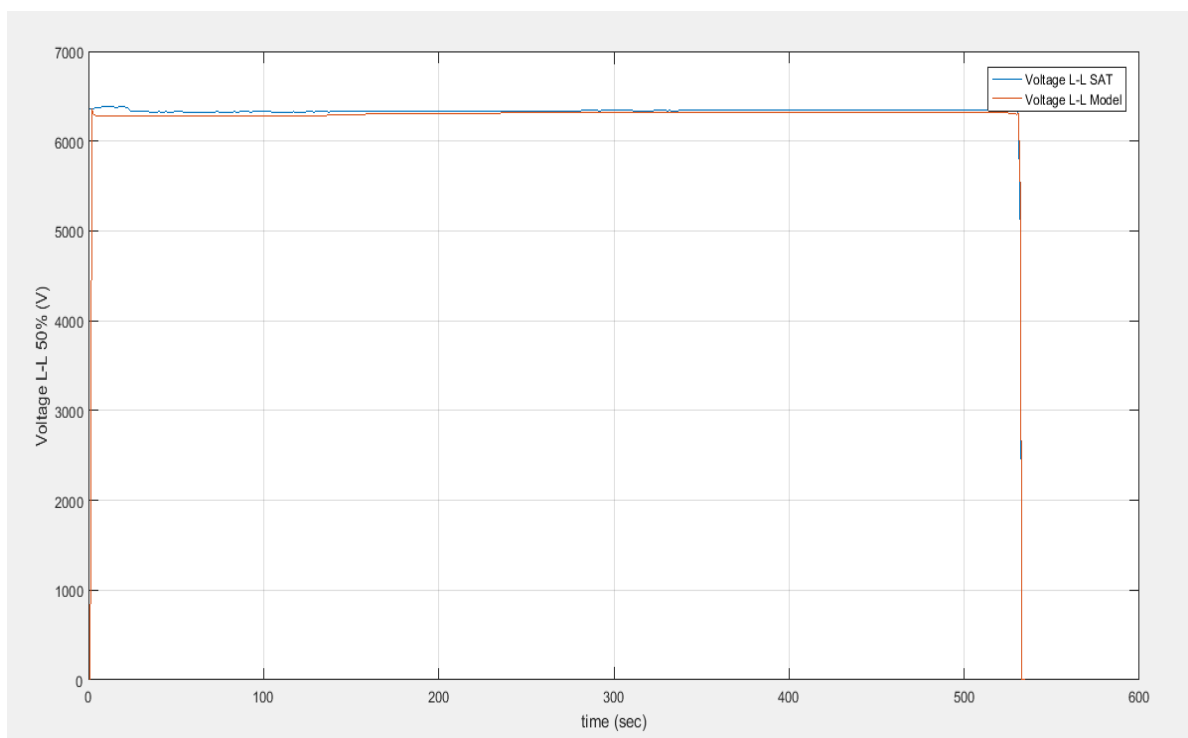
$$\overline{\Delta P} = \frac{\sum(P_{SAT,i} - P_{MATLAB,i})}{n} = 232kW \quad (4.2-4)$$

- Παρατηρείται, επίσης, παρακάτω η εμφανής απόκλιση στην παραγωγή της άεργου ισχύος του μοντέλου, σε σχέση με αυτή του πραγματικού ΜΥΗΕ. Όπως αναφέρεται και στο σκέλος των παρατηρήσεων στην Ενότητα 4.1.2, η παραγωγή άεργου ισχύος σχετίζεται κατά κύριο λόγο από τη λειτουργία του APT για ρύθμιση αυτού. Συγκεκριμένα, η δοκιμή φαίνεται πως πραγματοποιήθηκε υπό σταθερό ΣΙ (0.99-1), ενώ για τη μοντελοποίηση του APT, όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 2.3.3,

υλοποιήθηκε ο αυτόματος έλεγχος τερματικής τάσης σε σταθερή τιμή. Αυτό επιλέχθηκε διότι μόνο αυτή η λειτουργία ήταν διαθέσιμη από τα έγγραφα του κατασκευαστή του APT της υδροηλεκτρικής μονάδας.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω επισήμανση κρίνεται αναμενόμενη η απόκλιση των δύο κυματομορφών της άεργου ισχύος, έστω και σε τόσο μεγάλα επίπεδα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τέλος, παρουσιάζονται οι συγκρινόμενες κυματομορφές των RMS τιμών των τάσεων του στάτη, για το μοντέλο και για το πραγματικό ΥΗΕ:



Σχήμα 4.8 Σύγκριση αποκρίσεων πολικής τάσης στο 50% της Ενεργού Ισχύος

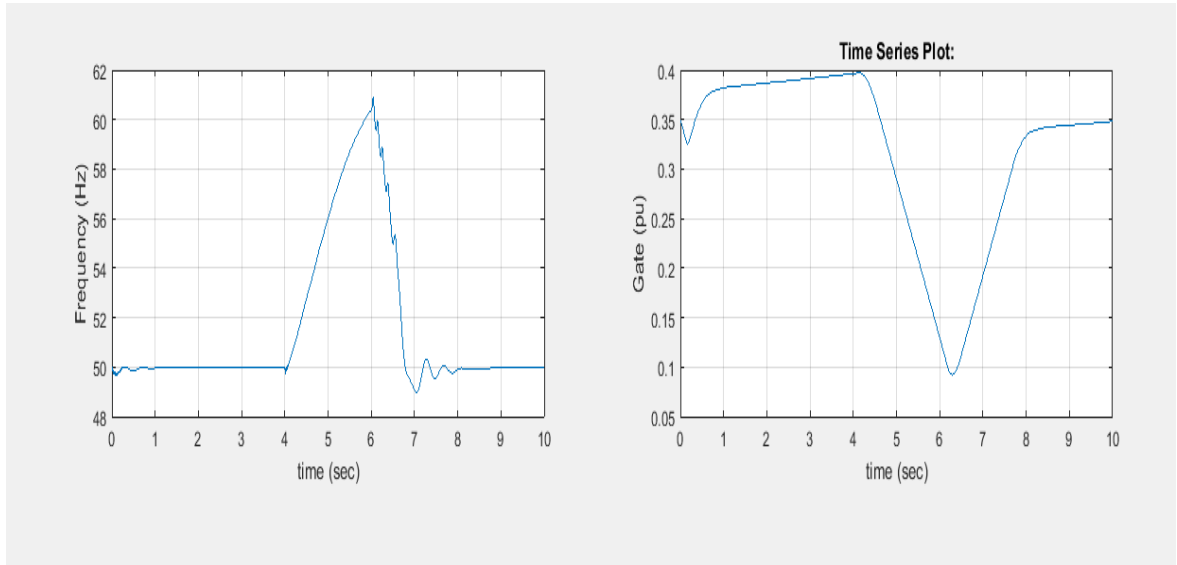
Όσον αφορά τις κυματομορφές των τάσεων δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αποκλίσεις, γεγονός αναμενόμενο, εφόσον και οι δύο συγκρινόμενες περιπτώσεις αναφέρονται σε σύγχρονες γεννήτριες συνδεδεμένες σε άπειρο ζυγό. Συνεπώς, η τάση τους καθορίζεται από την RMS τιμή της τάσης του ζυγού, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι στα 6.3kV. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη τοπολογία της προσομοίωσης (άπειρος ζυγός στα 6.3kV), ο APT, ο οποίος περιγράφεται και στην Ενότητα 3.4, δεν επηρεάζει παρά μόνο σε πολύ μικρό βαθμό την τερματική τάση της Σ.Γ., παρ' όλο που είναι παραμετροποιημένος σε ένα βαθμό σύμφωνα με τις ρυθμίσεις του πραγματικού ΜΥΗΕ.

4.3 Προσομοιώσεις διαταραχών στο μοντέλο και παρατήρηση μεταβατικής ευστάθειας

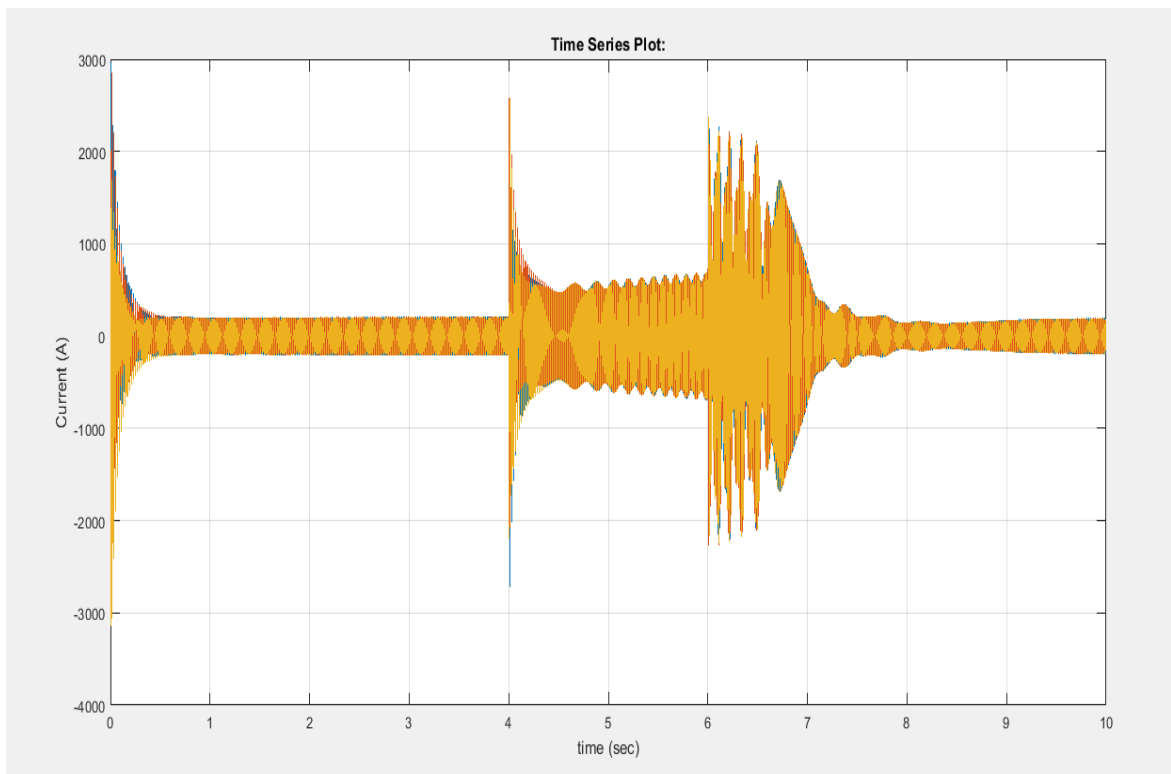
Στην τελευταία αυτή ενότητα του κεφαλαίου σκοπός είναι να υποβληθεί το μοντέλο σε δοκιμές οι οποίες θα αποδείξουν τη λογική συμπεριφορά του σε διαταραχές και την ικανότητά του να επανέρχεται σε κατάσταση ευστάθειας, μετά από κάποια μεταβατική περίοδο. Οι δοκιμές αυτές είναι ανεξάρτητες από αυτές που πραγματοποιήθηκαν στο Πεδίο και παρουσιάζονται παραπάνω, εφόσον, δεν υπάρχει κάτι αντίστοιχο.

Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε στο μοντέλο (στην ίδια τοπολογία με την Ενότητα 4.2), προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος προς γη των ακροδεκτών του στάτη στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτό που εξετάζεται στην παρούσα προσομοίωση είναι η δυνατότητα της Σ.Γ. να διατηρηθεί σε συγχρονισμό με τον άπειρο ζυγό. Παράλληλα, παρατηρείται πώς το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων ρυθμίζεται από το ρυθμιστή στροφών σε τέτοιες καταστάσεις, όπως επίσης και η απόκριση του ρεύματος των τριών φάσεων. Τέλος, μέσω των δοκιμών αυτών υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος, κατά τον οποίο είναι οριακά ικανή η υδροηλεκτρική μονάδα του μοντέλου να επανέρθει σε ευσταθή κατάσταση.

Για την υλοποίηση των δοκιμών αυτών, εφαρμόζεται βραχυκύκλωμα στο στάτη της Σ.Γ., σε ένα εύρος χρονικών διαστημάτων, ώστε να διαπιστωθεί ποιο είναι τελικά και το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν θα αποσυγχρονιστεί η Σ.Γ.. Μετά από τη διεξαγωγή προσομοιώσεων, ο κρίσιμος αυτός χρόνος βρέθηκε γύρω στα 2 sec. Παρακάτω, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες κυματομορφές για το ρεύμα, τη συχνότητα και το άνοιγμα των υδατοθυρίδων:



Σχήμα 4.9 Απόκριση Συχνότητας και ανοίγματος υδατοθυρίδων σε τριφασικό βραχυκύκλωμα Στάτη ως προς τη Γη για 2sec



Σχήμα 4.10 Απόκριση Ρεύματος τριών φάσεων σε τριφασικό βραχυκύκλωμα Στάτη ως προς τη Γη για 2sec

Ο κρίσιμος χρόνος των 2 sec είναι οριακά η διάρκεια κατά την οποία η συχνότητα της Σ.Γ. δεν ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια, ώστε να ενεργοποιηθεί προστασία υπερτάχυνσης και ο ρυθμιστής στροφών να σταματήσει την διέλευση νερού προς τον υδροστρόβιλο. Παρατηρείται ότι εντός 2 sec η ταχύτητα (ίση με τη συχνότητα σε αμ) έχει φτάσει την οριακή τιμή ενεργοποίησης της προστασίας υπερτάχυνσης της υδροηλεκτρικής μονάδας, δεδομένου ότι αυτή ενεργοποιείται στα 60 Hz. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος των 2sec του βραχυκυκλώματος, το σύστημα της υδροηλεκτρικής μονάδας επανέρχεται στην πρότερη ευσταθή του κατάσταση.

Στη συνέχεια, παρατηρώντας από το Σχήμα 4.10 την απόκριση της κυματομορφής του ρεύματος, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι χρόνοι υπομεταβατικής και μεταβατικής περιόδου είναι αντίστοιχα της τάξης των $T''=0.01\text{sec}$ και $T'=0.3\text{sec}$, κοντά, δηλαδή, στις τιμές των χρόνων που δίνονται και στα έγγραφα εργαστηριακών δοκιμών της Σ.Γ. του πραγματικού ΜΥΗΕ.

5

Επίλογος

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε η διαδικασία μοντελοποίησης, παραμετροποίησης και δοκιμών ενός ΜΥΗΕ και επίσης, παρουσιάστηκαν πραγματικές μετρήσεις από δοκιμές ενός υπαρκτού ΜΥΗΕ .

Πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των αποκρίσεων του μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις των δοκιμών και πραγματοποιήθηκαν επιπλέον προσομοιώσεις για να εξεταστεί η μεταβατική συμπεριφορά του μοντέλου του ΜΥΗΕ. Σημαντικό στοιχείο της παρούσας εργασίας αποτελεί η παράλληλη παρουσίαση της θεωρίας σχετικά με τα ΜΥΗΕ και των πραγματικών δεδομένων του εξεταζόμενου ΜΥΗΕ, η οποία συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας και της ερμηνείας των αποκρίσεων ενός τέτοιου έργου.

Βασικά συμπεράσματα για την τελική λειτουργία του μοντέλου του ΜΥΗΕ συνοψίζονται ακολούθως:

- Κρίνοντας από την παρούσα εργασία συμπεραίνεται ότι ακόμα και εάν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία και έγγραφα από ένα υπαρκτό ΜΥΗΕ, κατά τη διαδικασία απόδοσης τιμών στις παραμέτρους του μοντέλου πρέπει να γίνονται εύλογες παραδοχές βασιζόμενοι στη Διεθνή Βιβλιογραφία για τις τιμές αυτές οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στα διαθέσιμα στοιχεία.
- Η παραμετροποίηση του μοντέλου, ακόμα και ύστερα από την επιλογή των άγνωστων παραμέτρων από τη Διεθνή Βιβλιογραφία, συνεχίζει και κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των προσομοιώσεων, ώστε αλλάζοντας μερικές από αυτές να προσεγγιστεί περισσότερο η διαθέσιμη απόκριση του πραγματικού συστήματος.
- Τροποποιώντας τις τιμές παραμέτρων του μοντέλου του ΜΥΗΕ είναι εφικτό να γίνει πρόβλεψη των αποκρίσεων μιας υδροηλεκτρικής μονάδας, τόσο σε μεταβατικά

φαινόμενα, όσο και σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, σε ανεκτά όρια, πριν την κατασκευή της. Αυτή η δυνατότητα του μοντέλου αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο για την κατασκευή της εγκατάστασης.

- Η απόκριση του μοντέλου συγκρινόμενη με αυτή του πραγματικού ΜΥΗΕ, αποδεικνύει ότι η παραπάνω διαδικασία μοντελοποίησης και παραμετροποίησης στο MATLAB/Simulink προσεγγίζει σε κάποιο βαθμό τις μετρήσεις, αν και παρουσιάζονται σφάλματα, που οφείλονται στην έλλειψη στοιχείων για το πραγματικό ΜΥΗΕ, αλλά και σημάτων κατά τη διάρκεια των δοκιμών (Ενεργός Ισχύς αναφοράς). Σημειώνεται ότι δεν κατέστη εφικτό να συγκριθεί η μεταβατική συμπεριφορά του μοντέλου με αυτή του πραγματικού ΜΥΗΕ, λόγω της συχνότητας δειγματοληψίας των διαθέσιμων μετρήσεων (1 sec).
- Το μοντέλο του ΜΥΗΕ έχει την αναμενόμενη μεταβατική συμπεριφορά, σύμφωνα με τη Διεθνή Βιβλιογραφία.

5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην τελευταία αυτή ενότητα παρατίθενται κάποιες σκέψεις για την εξέλιξη αυτής της Διπλωματικής εργασίας, προς την κατεύθυνση της ακόμα βαθύτερης μελέτης του θέματος της μοντελοποίησης και την αποκόμιση πλησιέστερων στη πραγματικότητα αποτελεσμάτων. Οι μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας θα μπορούσαν να κινηθούν στα εξής πλαίσια:

- Χρήση αναλυτικότερων μοντέλων για διάφορα υποσυστήματα του ΜΥΗΕ. Κρίνεται ότι υπάρχουν αρκετά περιθώρια προς την κατεύθυνση της λεπτομερέστερης μοντελοποίησης του υδροστροβίλου και του συστήματος υδροληψίας, ώστε να περιλαμβάνει για παράδειγμα, δεξαμενή υπερχειλίσσης ή να λαμβάνει υπόψη φαινόμενα όπως αυτό των κυμάτων πίεσης. Επίσης, βελτιώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και στη μοντελοποίηση της συνάρτησης του APT, ώστε να διεκπεραιώνει και λειτουργίες που τώρα δεν ήταν δυνατό να μοντελοποιηθούν, όπως αυτή της ρύθμισης του ΣΙ ή/και της άεργου ισχύος σε προκαθορισμένη τιμή.
- Εύρεση περισσότερων πραγματικών δεδομένων για την παραμετροποίηση του μοντέλου και αποκρίσεων από δοκιμές με συχνότερη δειγματοληψία, ώστε να επιτευχθεί και σύγκριση των μεταβατικών αποκρίσεων του μοντέλου και πραγματικού συστήματος. Μέσω αυτού του ακριβέστερου μοντέλου θα ήταν εφικτή η εύρεση βελτιώσεων που θα μπορούσαν να γίνουν στον πραγματικό εξοπλισμό του ΜΥΗΕ.

- Μοντελοποίηση του ΜΥΗΕ με τις τρεις υδροηλεκτρικές μονάδες του, όπως και το πραγματικό. Μία τέτοια εκ νέου μοντελοποίηση θα καθιστούσε εφικτή και την εξέταση της παράλληλης λειτουργίας των τριών μονάδων σε κοινό ζυγό.
- Πραγματοποίηση προσομοιώσεων και για επιπλέον δοκιμές, όπως για παράδειγμα αυτή που πραγματοποιούταν απόρριψη φορτίου στο 25% της ονομαστικής ενεργού ισχύος, ώστε η παραμετροποίηση να βασίζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων σε παραπάνω από μία δοκιμή.

6

Βιβλιογραφία

- [1] Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*, 2^η Έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών, 2008.
- [2] «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας & ΣΗΘΥΑ: Συνοπτικό Πληροφοριακό Δελτίο – Μάιος 2013», ΛΑΓΗΕ (2018) [Ηλεκτρονικό].
Διαθέσιμο:
<http://www.lagie.gr/systima-eggyimenon-timon/ape-sithya/miniaia-statistika-deltia-ape-sithya/deltio-ape/document/167314/doccat/detail/Document/>
- [3] «Μηνιαίο Δελτίο Συστήματος Συναλλαγών ΗΕΠ - Ιούνιος 2018», Enexgroup (2018) [Ηλεκτρονικό].
Διαθέσιμο:
<http://www.enexgroup.gr/agora/analysisi-agoras/miniaia-deltia-iep/min-deltia-iep/document/166471/doccat/detail/Document/>
- [4] «Σημειώσεις Ηλεκτρικών Μηχανών», ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας Open eClass (2018), [Ηλεκτρονικό].
Διαθέσιμο:
http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA112/mix_hm_07_SYGXRONES_GENNHTRIES.pdf
- [5] Πλατσάκης Οδυσσέας, «Μείωση Πολυπλοκότητας Δυναμικών Εξισώσεων Σύγχρονης Γεννήτριας», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Πάτρας, 2016.
- [6] Paul Krause, “Synchronous Machines”, in *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Vol.3, Hoes Lane 445 Piscataway: IEEE PRESS, 2013.

- [7] Prabha Kundur, “Excitation Systems” and “Prime Movers and Energy Supply Systems”, in *Power System Stability and Control*, Electric Power Research Institute, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] «Σημειώσεις Υδροδυναμικής», ΤΕΙ Κρήτης (2018) [Ηλεκτρονικό].
 Διαθέσιμο:
http://cyrus.tcdn.teicrete.gr/Portals/23/Shmeioseis/udrodunamiki/12_%CE%A4%CF%8D%CF%80%CE%BF%CE%B9%20%CF%85%CE%B4%CF%81%CE%BF%CF%83%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%B2%CE%AF%CE%BB%CF%89%CE%BD.pdf
- [9] Amir Mehrtash(2018), *Development Of Models For Hydro Power Plants With Shared Penstock For Grid Compliance Study* [Ηλεκτρονικό].
 Διαθέσιμο: www.globalism.com
- [10] *INSTRUCTION MANUAL FOR DECS-250 Digital Excitation Control System*, Basler Electric, September 2017.
- [11] Dr. R. Thapar(2018), *Hydro–Turbine Governing System*, [Ηλεκτρονικό].
 Διαθέσιμο:
http://ahec.org.in/publ/Modern_Hydroelectric_Engineering_Practice_Prof_OD_Thapar/Volume_I/Chapter-6_Hydro-Turbine_Governing_System.pdf
- [12] *TURBINE-GOVERNOR MODELS Standard Dynamic Turbine-Governor Systems in NEPLAN Power System Analysis Tool*, NEPLAN, Switzerland, 2018.
- [13] R. A. Naghizadeh, S. Jazebi, B. Vahidi, *Modeling Hydro Power Plants and Tuning Hydro Governors as an Educational Guideline*, Vol.5, International Review on Modeling and Simulations(I.RE.MO.S.), August 2012.
- [14] Nicolau Nuno, *Brushless excitation of synchronous generators: study of models and control optimization*, IST.
- [15] Catherine Ridu, *Guideline for Testing and Commissioning of Small Hydro Power Plant for Feed-in-Tarff (FiT) Projects in Malaysia*, Malaysia: Sustainable Energy Development Authority(SEDA), 2015
- [16] William D.Stevenson Jr., *Elements of Power System Analysis Third Edition*, New York: McGraw Hill, 1975.
- [17] Peining Wu, “*Stability of Hydro Power Plants in Island Operation*”, M.S. thesis, Department of Electric Power Engineering, NTNU, Norway, July 2016.