



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

**Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή μικρού
υδροηλεκτρικού συστήματος με υδρογεννήτρια 350W
για αγροτικές εφαρμογές χαμηλού κόστους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταματία Ι. Γκιάλα – Φήκαρη

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....

Σταματία Ι. Γκιάλα – Φήκαρη

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

Copyright © Σταματία Γκιάλα – Φήκαρη, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός πολύ μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος 350W με σύγχρονη γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα για αγροτικές εφαρμογές χαμηλού κόστους και σύνδεση σε μικροδίκτυο.

Γίνεται μία εισαγωγή στην έννοια της ενδιάμεσης τεχνολογίας και στα υδροηλεκτρικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Παρουσιάζονται οι κατηγορίες στις οποίες αυτά διακρίνονται, η βασική δομή των micro-υδροηλεκτρικών συστημάτων, τα χαρακτηριστικά τους και τα βασικά στάδια του τεχνοοικονομικού σχεδιασμού τους.

Μελετώνται χωριστά τα επιμέρους τμήματα ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος, ο σχεδιασμός και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Παρουσιάζονται τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είδη υδροστροβίλων, τα χαρακτηριστικά τους, ο τρόπος διαστασιολόγησης και ελέγχου τους, καθώς και τα διάφορα συστήματα μετάδοσης της κίνησης από τον στρόβιλο στη γεννήτρια.

Γίνεται αναφορά στις γεννήτριες που χρησιμοποιούνται συχνότερα στα υδροηλεκτρικά συστήματα, τα βασικά δομικά και λειτουργικά τους χαρακτηριστικά και τους πιο απλούς τρόπους ελέγχου τους. Ακόμα, γίνεται μία συνοπτική αναφορά στον διακοπτικό εξοπλισμό και τον εξοπλισμό προστασίας ενός micro-υδροηλεκτρικού σταθμού.

Διακρίνονται τρεις κατηγορίες σύνδεσης ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος σε αυτόνομο ή διασυνδεδεμένο δίκτυο, με ac ή dc σύστημα και παρουσιάζονται οι διάφοροι τρόποι υλοποίησής τους ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη γεννήτρια.

Γίνεται μία προσπάθεια μετά από βιβλιογραφική έρευνα για τον καθορισμό κριτηρίων με βάση τα οποία να μπορεί να γίνει η επιλογή του καταλληλότερου εξοπλισμού, δηλ., σωλήνων, υδροστροβίλου, γεννήτριας, αλλά και τρόπου σύνδεσης ανάλογα με τις συνθήκες στον τόπο εγκατάστασης του micro-υδροηλεκτρικού συστήματος και τις απαιτήσεις των χρηστών.

Το pico-υδροηλεκτρικό σύστημα της παρούσας εργασίας σχεδιάζεται με στόχο τη λειτουργία του στα πλαίσια ενός μικροδικτύου. Έτσι, γίνεται μία μελέτη για τη δυνατότητα τροφοδότησης μίας μικρής κλινικής σε κάποια αναπτυσσόμενη χώρα από ένα αυτόνομο μικροδίκτυο που θα περιλαμβάνει το υδροηλεκτρικό, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και κάποιο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

Ο υδροστρόβιλος και η γεννήτρια σχεδιάζονται, η γεννήτρια κατασκευάζεται και αφού γίνει η συναρμολόγηση του συστήματος διεξάγονται δοκιμές για να αξιολογηθεί η λειτουργία της γεννήτριας μόνη της αλλά και στα πλαίσια του υδροηλεκτρικού συστήματος, να διαπιστωθούν τυχόν παραλείψεις και να διατυπωθούν συμπεράσματα και βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά:

ενδιάμεση τεχνολογία, χαμηλό κόστος, αγροτικές εφαρμογές, μικρο-υδροηλεκτρικά συστήματα, υδροστρόβιλοι, γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών, μικροδίκτυο

Abstract

Subject of the present work is the study, design and construction of a pico-hydroelectric system of 350W that has an axial flux core less generator with permanent magnets for grid connected applications.

An introduction is made on the principles of appropriate technology and the hydro-electric systems, while there are also presented the characteristics of pico-hydroelectric systems, their structure and the process of their techno-economic design.

Each part of the micro-hydro scheme (like the intake, the channel, the forabay tank, the penstock or the powerhouse) is studied, as well as its design and special characteristics.

The different kind of hydro -turbines are presented along with their characteristics, design, sizing process and way of control. Description of different drive systems is included.

Most frequently used generators (induction machines, synchronous generators with permanent magnets or wound field) along with their main topologies, basic equations and the simplest ways of their control are mentioned. There is also a brief description of the required switchgear and protection equipment.

The different ways of connecting the pico-hydro-generator are divided into three categories (connection to an ac bus of the utility grid or of an autonomous microgrid and connection to a dc bus of an autonomous system with batteries) and studied. The ways of establishing these connections are presented depended on the kind of the used generator.

After some bibliographic survey, the author tries to establish some criteria, which may later lead to a simple method of choosing the appropriate equipment (like penstock, hydro-turbine, generator) and kind of connection for a special micro hydro-scheme.

A case study of electrifying a rural health clinic is presented. The clinic is supposed to be at a rural region of the developing world and its electricity needs are satisfied by a microgrid, which includes the pico-hydroelectric system of 350W, a photovoltaic generator, batteries and a genset.

The penstock, hydro- turbine and permanent magnet generator are designed, the generator is constructed and tested in the laboratory. Also, after the assembly of the generator with the hydro-turbine, the hydroelectric system is tested and measured in the laboratory in order to estimate its efficient function or the problems that might occur.

Finally, conclusion are drawn and proposals for improvement and further work are presented.

Key words:

appropriate technology, low cost, rural electrification, micro-hydroelectric system, hydroturbines, axial flux permanent magnet generators, microgrids

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη για τις υποδείξεις του, την καθοδήγηση και την ενθάρρυνσή του κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής και τις υποδείξεις του. Τον κ. Δημήτριο Παπαντώνη, καθηγητή Ε.Μ.Π., για τη σημαντική και πάντα πρόθυμα προσφερόμενη βοήθεια του κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στο εργαστήριο Υδροδυναμικής. Τους συναδέλφους που βοήθησαν στην κατασκευή της γεννήτριας. Και τέλος, να ευχαριστήσω τον συνάδελφο και φίλο Αλέξανδρο Αρταβάνη για τις συμβουλές και την υπομονή του, και την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη που μου προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΠΕ.....	17
1.2 Υδροηλεκτρικό Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας.....	17
1.2.1 Micro – υδροηλεκτρικό και ενδιάμεση τεχνολογία.....	20
1.3 Διαμόρφωση micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής.....	22
1.4 Σχεδιασμός και μελέτη micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής.....	24

2. ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΑΣ MICRO/PICO –ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.1 Σύστημα εισόδου του νερού.....	31
2.1.1 Σύστημα εισόδου του νερού χωρίς υδατοφράκτη.....	31
2.1.2. Σύστημα εισόδου του νερού με μικρό υδατοφράκτη.....	33
2.1.2.1 Μικρός υδατοφράκτης και εκτροπή του νερού σε ανοιχτόκανάλι.....	33
2.1.2.2 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν απλό σωλήνα.....	36
2.1.2.3 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και ένα κουτί με φίλτρα (Screen box).....	37
2.1.2.4 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν κυλινδρικό διάτρητο κάδο (Pond bucket).....	38
2.1.2.5 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν υπερχειλιστή με φίλτρο προς αξιοποίηση του φαινομένου Coanda (Spillway with Coanda-Effect Screen).....	39
2.2 Διώρυγα προσαγωγής	40

2.2.1 Σχεδίαση της διώρυγας προσαγωγής.....	44
2.3 Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων και δεξαμενή φόρτισης.....	48
2.3.1 Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων.....	49
2.3.2 Δεξαμενή φόρτισης.....	52
2.4 Αγωγός πτώσεως.....	55
2.4.1 Γενικά στοιχεία.....	56
2.4.2 Διαστασιολόγηση του αγωγού πτώσεως.....	65
2.5 Σταθμός παραγωγής.....	71

3. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

3.1 Γενικά στοιχεία – Τύποι υδροστροβίλων.....	73
3.2 Υδροστροβίλοι δράσεως.....	76
3.2.1 Υδροστρόβιλος Pelton.....	77
3.2.1.1 Έλεγχος της ροής σε έναν υδροστρόβιλο Pelton.....	80
3.2.1.2 Διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Pelton.....	83
3.2.2 Υδροστρόβιλος Turgo.....	85
3.2.3 Υδροστρόβιλος Εγκάρσιας Ροής.....	88
3.2.3.1 Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου Εγκάρσιας Ροής.....	90
3.3 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως.....	90
3.3.1 Υδροστρόβιλος Francis.....	92
3.3.2 Υδροστρόβιλος τύπου προπέλας και Kaplan.....	94
3.4 Χρήση φυγοκεντρικής αντλίας ως υδροστρόβιλο (PAT).....	97
3.5 Σύστημα μετάδοσης κίνησης.....	101

4. ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

4.1	Εισαγωγή στις γεννήτριες.....	107
4.2	Σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης.....	108
4.2.1	Περιγραφή λειτουργίας.....	108
4.2.2	Γενικά θεωρητικά στοιχεία.....	112
4.2.2.1	Χαρακτηριστική φορτίου	116
4.2.3	Έλεγχος της σύγχρονης γεννήτριας κατά τη χρήση της σε ένα micro/rico-υδροηλεκτρικό σύστημα.....	116
4.2.3.1	Ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου (ELC).....	117
4.2.3.2	Αυτόματος ρυθμιστής τάσης (AVR).....	120
4.2.3.3	Απορριπτικά φορτία.....	122
4.2.3.3.1	Απορριπτικό φορτίο που ψύχεται με νερό.....	122
4.2.3.3.2	Απορριπτικό φορτίο που ψύχεται με αέρα.....	123
4.3	Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.....	123
4.3.1	Μαγνήτες.....	125
4.3.2	Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής.....	126
4.3.2.1	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και δυνατές τοπολογίες.....	126
4.3.2.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη σχεδίασης.....	130
4.3.2.3	Θεωρητική ανάλυση.....	132
4.3.2.4	Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	136
4.4	Γεννήτρια επαγωγής.....	137
4.4.1	Περιγραφή λειτουργίας.....	137
4.4.1.1	Πυκνωτές διέγερσης.....	140

4.4.1.2 Απώλειες και ισοδύναμο κύκλωμα	143
4.4.2 Χρήση κινητήρα επαγωγής ως γεννήτρια.....	144
4.4.3 Μονοφασική έξοδος από τριφασική γεννήτρια	146
4.4.4 Έλεγχος της γεννήτριας επαγωγής κατά τη χρήση της σε ένα micro/rico-υδροηλεκτρικό σύστημα.....	147
4.5 Διακοπτικός εξοπλισμός και εξοπλισμός προστασίας ενός micro/rico- υδροηλεκτρικού σταθμού.....	149

5. ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΝΟΣ MICRO-ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

5.1 Λειτουργία μεταβλητών στροφών ενός micro-υδροηλεκτρικού.....	155
5.2 Εισαγωγή στους δυνατούς τρόπους σύνδεσης ενός micro -υδροηλεκτρικού συστήματος.....	156
5.3 DC σύνδεση- Σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες.....	156
5.4 AC σύνδεση.....	160
5.4.1 Διασυνδεδεμένο σύστημα.....	160
5.4.2 AC Αυτόνομο σύστημα.....	169
5.4.2.1 Αυτόνομο σύστημα με μοναδική πηγή παραγωγής ενέργειας το υδροηλεκτρικό.....	169
5.4.2.2 Αυτόνομο μικροδίκτυο.....	172

6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

6.1 Εισαγωγή.....	179
6.2 Επιλογή Υδροστροβίλου.....	180
6.3 Επιλογή Γεννήτριας.....	184

6.4	Επιλογή συστήματος μετάδοσης κίνησης.....	187
6.5	Επιλογή τύπου σύνδεσης για αυτόνομο σύστημα.....	188
7. ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΝΙΚΗΣ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ		
7.1	Μικρή κλινική σε αγροτική περιοχή του αναπτυσσόμενου κόσμου...193	
7.1.1	Τα φορτία μίας τυπικής εγκατάστασης μικρής κλινικής.....	193
7.2	Δυνατοί τρόποι ηλεκτροδότησης μικρής κλινικής.....	196
7.3	Μελέτη τροφοδότησης μικρής κλινικής	199
8. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ		
8.1	Σχεδιασμός pico-υδροηλεκτρικού συστήματος.....	205
8.1.1	Διαστασιολόγηση αγωγού πτώσης.....	206
8.1.2	Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου Turgo.....	208
8.1.3	Σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής.....	212
8.1.4	Σχεδίαση του περιβλήματος.....	215
8.2	Κατασκευή υδρογεννήτριας.....	219
8.2.1	Κατασκευή του στάτη	219
8.2.2	Κατασκευή του δρομέα.....	224
8.2.3	Κατασκευή της στήριξης και συναρμολόγηση της υδρογεννήτριας.....	227
8.2.4	Εγκατάσταση του υδροηλεκτρικού συστήματος.....	231
8.3	Μέτρηση της υδρογεννήτριας.....	232
8.3.1	Μέτρηση της γεννήτριας μονίμων μαγνητών.....	232

8.3.1.1 Η πειραματική διάταξη.....	233
8.3.1.2 Μέτρηση της ΗΕΔ της γεννήτριας.....	234
8.3.1.3 Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.....	236
8.3.1.4 Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος.....	240
8.3.1.5 Μέτρηση της γεννήτριας κατά την τροφοδότηση ωμικού φορτίου μέσω ανορθωτή.....	241
8.3.1.6 Μέτρηση της γεννήτριας όταν συνδεθεί στο δίκτυο μέσω μονοφασικού αντιστροφέα.....	244
8.3.1.7 Συμπεράσματα: πιθανή εφαρμογή μίας εναλλακτικής σχεδίασης.....	250
8.3.2 Μέτρηση της συνολικής απόδοσης του υδροηλεκτρικού.....	255
8.3.2.1 Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα μεγέθη.....	255
8.3.2.2 Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος.....	258
8.3.2.3 Δοκιμή σύνδεσης του υδροηλεκτρικού συστήματος στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα	266
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	270
Βιβλιογραφία.....	272

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΠΕ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ονομάζονται οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες και φαινόμενα που δεν υπόκεινται σε κάποιο είδος εξάντλησης ή απομείωσης. Στην κατηγορία των ΑΠΕ ανήκουν η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από υδατοπτώσεις και θαλάσσια κύματα, καθώς και οι κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο.

Στην αρχή οι ΑΠΕ ήταν πολυδάπανες και παρουσίαζαν τεχνικές αδυναμίες, γι' αυτό ξεκίνησαν ως πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως, το κόστος των εφαρμογών τους μειώνεται διαρκώς, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η απόδοσή τους με αποτέλεσμα να ανταγωνίζονται τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Η ανάγκη εξέλιξης και ορθολογικής επέκτασης της χρήσης των τεχνολογιών των ΑΠΕ είναι πλέον πιο άμεση και επιτακτική, αλλά και ευκολότερα υλοποιήσιμη από ποτέ για διάφορους λόγους. Ο πρώτος από αυτούς εντοπίζεται στην προσπάθεια αναστολής των κλιματικών αλλαγών και προστασίας του περιβάλλοντος, το οποίο υποβαθμίζεται όλο και περισσότερο με τη χρήση ορυκτών καυσίμων και πυρηνικής ενέργειας, καθώς οι ΑΠΕ μπορούν να εξασφαλίσουν την παραγωγή ενέργειας χωρίς επιβλαβή κατάλοιπα και απόβλητα. Ένας δεύτερος λόγος έγκειται στην ανάγκη κάθε χώρας για μείωση των εξαρτήσεων της οικονομίας της από εξωγενείς παράγοντες και για ενεργειακή αυτονομία, η οποία συνοδεύεται από ανάπτυξη, υλοποίηση έργων και απόκτηση τεχνογνωσίας. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό αυτών των μορφών ενέργειας, το οποίο τις καθιστά ελκυστικές λύσεις είναι το ότι οι φυσικοί τους πόροι δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένους γεωγραφικούς χώρους, με αποτέλεσμα την αποκέντρωση και χωρική διασπορά της ενεργειακής παραγωγής. Αυτό συμβάλει αφενός στην ύπαρξη μεγαλύτερης σταθερότητας στη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και αφετέρου στη μείωση των απωλειών ενέργειας κατά τη μεταφορά, λόγω της καλύτερης κατανομής των σταθμών παραγωγής σε σχέση με τους πόλους κατανάλωσης.^[1]

1.2 Υδροηλεκτρικό Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας

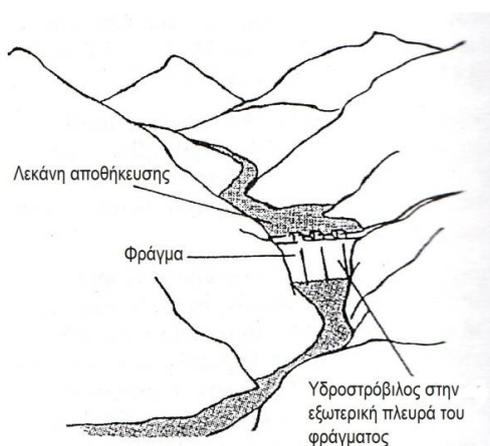
Η υδραυλική ενέργεια αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως είναι και η ηλιακή ενέργεια, η οποία με την εξάτμιση του νερού κινεί τον υδρολογικό κύκλο. Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική μέσω του υδροστροβίλου και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Αυτό γίνεται με την εκμετάλλευση της ροής του νερού σε υδάτινο αγωγό με φυσική κλίση, ενώ μπορεί για την αποθήκευση του νερού να δημιουργηθεί τεχνητή λίμνη ώστε να αυξηθεί το υδραυλικό ύψος.^[2]

Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι με βάση το μέγεθος της παραγόμενης ισχύος. Αν και τα όρια μεταξύ των κατηγοριών δεν είναι σαφώς καθορισμένα και ίδια για όλες τις χώρες, εδώ αναφέρονται αυτά που συναντώνται συχνότερα στη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και αυτά που χρησιμοποιούνται για την τυποποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού των υδροηλεκτρικών. Οι κύριες κατηγορίες που προκύπτουν κατά αυτόν τρόπο είναι τρεις: τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα και τα micro-υδροηλεκτρικά έργα.

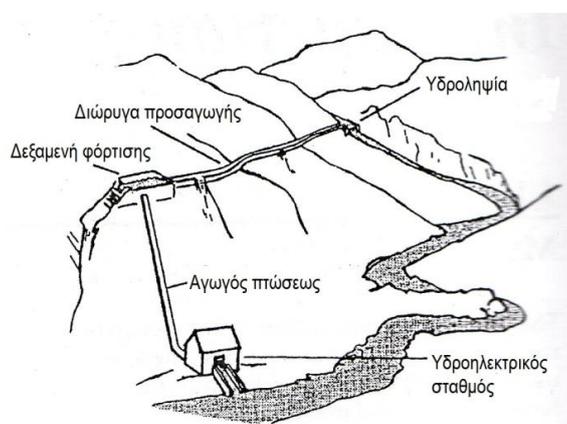
Η ονομαστική ισχύς των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών είναι μεγαλύτερη των 10MW ώστε να παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδότηση μεγάλων πόλεων μέσω εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων. Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί τροφοδοτούν εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα με ισχύ μικρότερη από 10MW, αλλά μεγαλύτερη από 1MW. Εν συνεχεία, έρχονται οι mini-υδροηλεκτρικοί σταθμοί που καλύπτουν ένα μικρό φάσμα ισχύος: από 100kW έως 1MW και ακολουθούν οι micro-υδροηλεκτρικοί σταθμοί με ονομαστικές ισχύεις μικρότερες των 100kW. Μια υποκατηγορία των micro-υδροηλεκτρικών σταθμών αποτελούν οι pico-υδροηλεκτρικοί σταθμοί με παραγόμενη ισχύ μικρότερη από 5kW. Οι μικρότεροι υδροηλεκτρικοί σταθμοί που ανήκουν στις τρεις τελευταίες κατηγορίες δε συνδέονται στο κύριο εθνικό δίκτυο, αλλά εγκαθίστανται συνήθως σε απομακρυσμένες και απομονωμένες επαρχιακές περιοχές για να τροφοδοτήσουν μικρές κοινότητες ή βιοτεχνίες.^[3] Η Ελληνική Νομοθεσία (Ν.1559/85 και Ν.2244/95) ορίζει ως μικρούς τους σταθμούς με ισχύ μικρότερη των 10MW, με τον όρο ότι μόνο τα έργα εγκατεστημένης ισχύος έως και 2MW μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο ελεύθερης δράσης.

Η κατηγοριοποίηση των υδροηλεκτρικών σταθμών δεν είναι μόνο θέμα αριθμών ή μεγέθους · δηλαδή οι διαφορές που υπάρχουν δεν είναι μόνο ποσοτικές, αλλά κυρίως ποιοτικές, που σχετίζονται παραδείγματος χάριν με τη διαμόρφωση ή τον εξοπλισμό, τον τόπο εγκατάστασης, την χρήση της παραγόμενης ισχύος και άλλους παράγοντες. Μία πολύ χαρακτηριστική διαφορά των μικρότερων υδροηλεκτρικών έργων (ιδίως αυτών με ισχύεις μικρότερες του 1MW) εντοπίζεται στην υδροληψία. Σε αυτήν την κατηγορία υδροηλεκτρικών σταθμών, ένα μέρος της ροής του ποταμού εκτρέπεται και χρησιμοποιείται

για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπώς δεν είναι απαραίτητη η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων για αποθήκευση του νερού. Λόγω της ιδιότητάς τους αυτής, οι συγκεκριμένοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ονομάζονται σταθμοί εκτροπής ή ροής ποταμού (run of the river schemes) σε αντίθεση με αυτούς που χρησιμοποιούν μεγάλα φράγματα και ονομάζονται σταθμοί αποθήκευσης (storage schemes). Για τον λόγο αυτό, δε χρησιμοποιούνται εύκολα σε εφαρμογές αντλιοσταμείωσης με αποτέλεσμα η ενέργεια που παράγουν να απορροφάται κατά προτεραιότητα από το δίκτυο, ενώ οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί καλύπτουν συνήθως φορτία αιχμής.



(α)



(β)

Σχήμα 1.1 (α) Υδροηλεκτρικό έργο με λεκάνη αποθήκευσης και φράγμα, (β) Υδροηλεκτρικό έργο με εκτροπή μέρους της ροής του ποταμού (run of the river) και ανοιχτή διώρυγα προσαγωγής του νερού

Ανεξάρτητα από το μέγεθός τους τα υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν σημαντικά θετικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, οι υδατοπτώσεις αποτελούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας κι έτσι δεν αντιμετωπίζουν ορατό κίνδυνο εξαντλήσεώς τους, όπως τα συμβατικά καύσιμα, ενώ για τον ίδιο λόγο, συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα.

Επιπλέον, σε σχέση με τις υπόλοιπες Α.Π.Ε., τα υδροηλεκτρικά παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό ενεργειακής απόδοσης και η παραγόμενη ενέργεια στη διάρκεια της ζωής τους είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία τους. Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου, καθώς και το λειτουργικό κόστος του υδροηλεκτρικού είναι μικρό. Ακόμα, η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη, της τάξης των 50 ετών για τα μεγάλα και 20 με 30 ετών για τα μικρά και μπορεί να αυξηθεί με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, ενώ παράλληλα οι υδροστρόβιλοι είναι στιβαρές και αξιόπιστες μηχανές που απαιτούν μικρή συντήρηση και επίβλεψη. Τέλος, πολύ σημαντική ιδιότητα των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η γρήγορη απόκρισή τους είτε στην περίπτωση ανάληψης είτε απόρριψης φορτίου, έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, υφίστανται και κάποιοι ανασταλτικοί παράγοντες για την πιο εκτεταμένη χρήση τους, όπως είναι το σημαντικό κόστος και η σχετικά μεγάλη διάρκεια κατασκευής τους, η οποία οφείλεται στη χρονοβόρα διαδικασία της μελέτης και συλλογής και επεξεργασίας υδρολογικών και γεωλογικών στοιχείων, των οποίων η απαιτούμενη ακρίβεια αυξάνει αναλογικά με το μέγεθος του υπό κατασκευή υδροηλεκτρικού σταθμού. Επιπλέον, η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται διακυμάνσεις, που σχετίζονται με την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και τέλος η κατασκευή τους προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων υδατοπτώσεων και μεγάλων παροχών, με αποτέλεσμα την εγκατάστασή τους μακριά από την κατανάλωση και την οικονομική επιβάρυνση με πιο εκτεταμένα έργα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.^{[4],[5]}

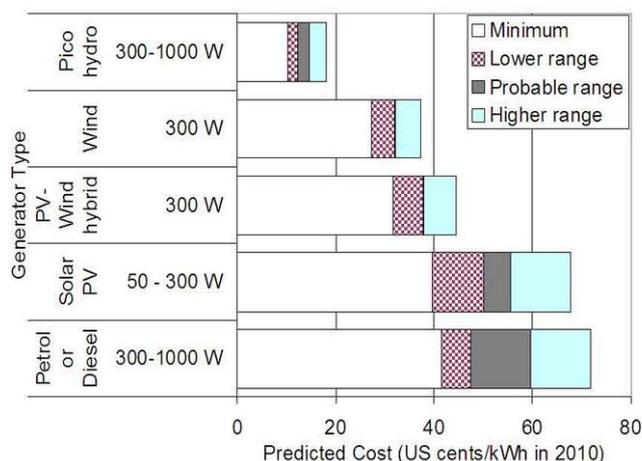
1.2.1 Micro – υδροηλεκτρικό και ενδιάμεση τεχνολογία

Τα μικρά και micro υδροηλεκτρικά έργα δεν εμφανίζουν τα αρνητικά χαρακτηριστικά των μεγάλων, ενώ έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα έναντι αυτών, τα οποία μάλιστα γίνονται πολύ πιο αισθητά όταν για την κατασκευή του υδροηλεκτρικού σταθμού και της γεννήτριας χρησιμοποιείται η ενδιάμεση τεχνολογία. Η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology) ή κατάλληλη τεχνολογία (appropriate technology), είναι ένας τρόπος αντίληψης της τεχνολογίας ως μία ενεργή συνιστώσα στην καθημερινή διαμόρφωση των κοινωνικών σχέσεων. Εμπεριέχει την αντίληψη πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές τους και πως η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να τις ενδυναμώσει προς αυτήν την κατεύθυνση.^[6]

Η χρήση της ενδιάμεσης τεχνολογίας είναι σχεδόν αλληλένδετη με τη χρήση Α.Π.Ε. για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως είναι τα micro-υδροηλεκτρικά έργα που μελετώνται στην

παρούσα εργασία. Ο συνδυασμός αυτών των δύο έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα:

- Τα micro-υδροηλεκτρικά έργα είναι "συνεχούς ροής", δεν απαιτούν σημαντική περισυλλογή νερού και κατά συνέπεια δεν είναι αναγκαία η κατασκευή φράγματος και μεγάλου ταμιευτήρα, που θα μετέβαλλαν το οικοσύστημα εγκαθιστάμενα σε περιοχές φυσικών ρευμάτων, μειώνοντας το οξυγόνο του νερού και δημιουργώντας λίμνες αδρανούς ύδατος αφιλόξενες για τα ενδημικά είδη ψαριών. Η κατασκευή ενός micro-υδροηλεκτρικού επιβαρύνει ελάχιστα το εγγύς φυσικό οικοσύστημα, ενώ παράλληλα η ποιότητα των υδάτων δεν υποβαθμίζεται με τη διέλευση τους από τον στρόβιλο και είναι δυνατόν μέσω κατάλληλης επεξεργασίας τους στις εγκαταστάσεις του υδροηλεκτρικού να αποδοθούν ακόμα πιο καθαρά στο υδατόρευμα, στην περίπτωση που δεν περιείχαν χημικούς ρύπους.
- Η κατασκευή των micro-υδροηλεκτρικών συνδυάζεται συχνά και με άλλες δραστηριότητες ή διευθετήσεις, όπως άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση πλημμύρας, αλιεία κ.τ.λ., συμβάλλοντας στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων.
- Είναι μικρά σε κλίμακα και απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο με αποτέλεσμα να είναι οικονομικά προσιτά σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο.
- Τα micro και pico υδροηλεκτρικά συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της μέρας, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που τα καθιστά από τις πιο αποδοτικές και φθηνές ενεργειακές λύσεις όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.



Adapted from: "Technical and Economic Assessment of Off-Grid, Mini-Grid and Grid Electrification Technologies – Summary Report", World Bank Energy Unit, September 2006.

Σχήμα 1.2 Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά kW από διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

- Μπορούν εκτός από τα ηλεκτρικά φορτία, να χρησιμοποιηθούν και για την εξυπηρέτηση μηχανικών φορτίων (όπως μύλοι κ.τ.λ.)
- Δίνουν έμφαση στη χρήση τοπικών πρώτων υλών και τεχνικών με αποτέλεσμα η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία να είναι περισσότερο εναρμονισμένη με τις τοπικές παραδόσεις και αξίες, και ταυτόχρονα να μειώνεται το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού.
- Η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να παραχθεί σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών ή κοινοτήτων και είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας, της συντήρησης και του ελέγχου της από τους ανθρώπους που τη χρησιμοποιούν χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση.
- Η δημιουργία ενός micro-υδροηλεκτρικού προϋποθέτει τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης, ενώ παράλληλα προσφέρει ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της.

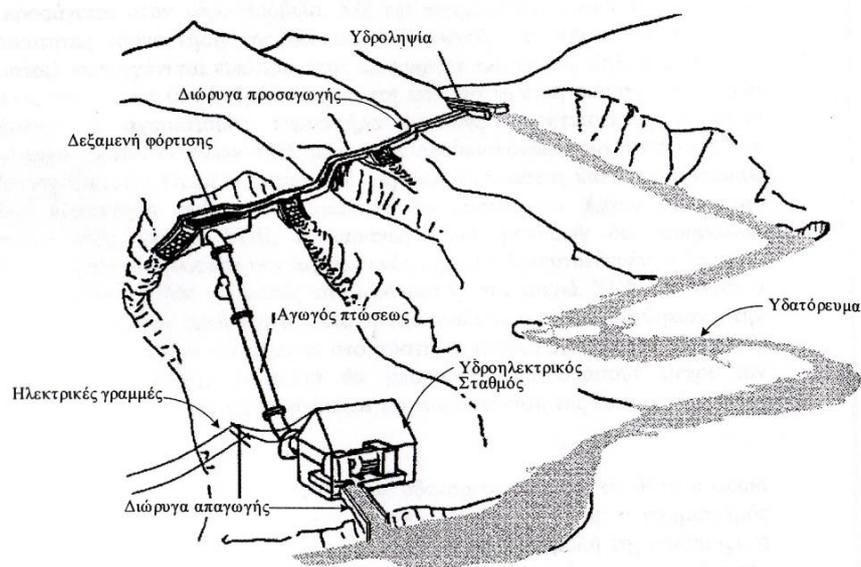
Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα τα micro-υδροηλεκτρικά έργα σε συνδυασμό με την ενδιάμεση τεχνολογία να αποτελούν μία πολύ καλή επιλογή για τη δημιουργία μικρών ηλεκτρικών δικτύων σε φτωχές χώρες και σε περιοχές απομονωμένες όπου είναι δύσκολη και ακριβή η σύνδεση στο κύριο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, σήμερα λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που αυτά χρησιμοποιούν, ενδιαφέρουν πολύ και τις αναπτυγμένες χώρες, ως μία εναλλακτική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3 Διαμόρφωση micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής

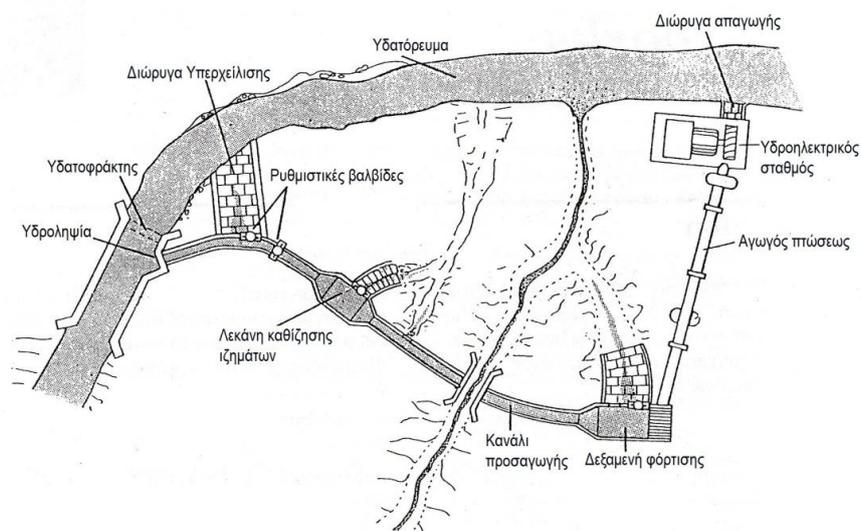
Τα υδροηλεκτρικά έργα μπορούν να έχουν διάφορες μορφές, ανάλογα με την θέση εγκατάστασής τους, την κλίση του εδάφους, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά κ.τ.λ. Έτσι, μπορεί είναι υψηλής ή χαμηλής υδατόπτωσης, με μικρό ή μεγαλύτερο αγωγό πτώσεως, με ή χωρίς ανοιχτή ή κλειστή διάρρυγα προσαγωγής του νερού στη δεξαμενή φόρτισης. Τα βασικότερα στοιχεία που απαρτίζουν ένα τυπικό micro-υδροηλεκτρικό σύστημα απεικονίζονται στο σχήμα 1.3(α), ενώ μία πιο λεπτομερής παρουσίασή τους φαίνεται στο σχήμα 1.3(β).

Αρχικά, κατασκευάζεται ένας μικρός υδατοφράκτης/φράγμα κάθετα στη ροή του ποταμού ώστε να επιβραδυνθεί το υδατόρευμα και να μπορέσει ένα μέρος του να εκτραπεί και να εισέλθει στο κανάλι προσαγωγής, το οποίο θα οδηγήσει το νερό στην δεξαμενή φόρτισης. Κατά μήκος του καναλιού, είναι πιθανό να υπάρχει μία λεκάνη καθίζησης των ιζημάτων (τα οποία μπορεί να μεταφέρει το νερό), καθώς και κάποιοι υπερχειλιστές για προστασία της

εγκατάστασης, στην περίπτωση επικίνδυνης αύξησης της ροής. Στα πολύ μικρά υδροηλεκτρικά μπορεί να μην υπάρχει λεκάνη καθίζησης και το κανάλι προσαγωγής να είναι αρκετά μικρό σε μήκος. Εν συνεχεία, το νερό συγκεντρώνεται στη δεξαμενή φόρτισης από την οποία μέσω ενός φίλτρου εισέρχεται στον αγωγό πτώσεως ή προσαγωγής. Αυτός μεταφέρει το νερό υπό πίεση στον χώρο του υδροηλεκτρικού σταθμού, ο οποίος αποτελείται από τον υδροστρόβιλο, τη γεννήτρια και τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό του σταθμού. Τέλος, το νερό μετά τη διέλευσή του από τον στρόβιλο, οδηγείται μέσω της διώρυγας απαγωγής πίσω στον ποταμό.



(α)



(β)

Σχήμα 1.3. Διαμόρφωση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου (α)^[8], (β)^[3]

Οι κύριες συνιστώσες ενός micro-υδροηλεκτρικού παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο, ενώ οι υδροστρόβιλοι και οι γεννήτριες είναι αντικείμενα του τρίτου και τέταρτου κεφαλαίου αντίστοιχα.

1.4 Σχεδιασμός και μελέτη micro-υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής

Κατά τον σχεδιασμό των μικρών υδροηλεκτρικών απαιτούνται πολλά στάδια τεχνικών και οικονομικών μελετών για τη εύρεση της κατάλληλης θέσης για την εγκατάστασή του. Η βιωσιμότητα του κάθε έργου είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη θέση του, καθώς η παραγωγή ισχύος εξαρτάται από την παροχή και το ύψος της πτώσης του διαθέσιμου νερού και το ποσό της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται από την ποσότητα του νερού και τη μεταβλητότητα της ροής κατά τη διάρκεια του έτους. Για την ακρίβεια, η ισχύς P στην έξοδο ενός υδροηλεκτρικού σταθμού δίνεται από τον τύπο:

$$P = \eta_t \rho Q g H \quad (1.1)$$

όπου η_t : η συνολική απόδοση του υδροηλεκτρικού σταθμού (ισούται με το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επιμέρους τμημάτων του υδροηλεκτρικού σταθμού)

$\rho = 1000 \text{kg/m}^3$: η πυκνότητα του νερού

$Q [\text{m}^3/\text{sec}]$: η παροχή νερού στον υδροστρόβιλο

$g = 9,8 \text{m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

$H [\text{m}]$: το ύψος υδατόπτωσης ή υδραυλικό ύψος, που είναι ίσο με την κάθετη υψομετρική διαφορά της δεξαμενής φόρτισης με τον υδροστρόβιλο.

Η μελέτη σχεδιασμού είναι ουσιαστικά μία επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία συγκρίνονται συνεχώς τα κέρδη και τα κόστη του έργου, καθώς επίσης περιλαμβάνει διάφορες φάσεις, η έκταση και η εμβάθυνση των οποίων εξαρτώνται σημαντικά από τον χαρακτήρα και το μέγεθος της εγκατάστασης. Αρχικός σκοπός της μελέτης είναι η διαπίστωση του εάν η εξεταζόμενη θέση αξίζει περισσότερης διερεύνησης και εν συνεχεία η διαμόρφωση και η διαστασιολόγηση, όπως αυτές προκύπτουν από την εξέταση και ανάλυση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Το τελευταίο στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει σύνταξη των σχεδίων, των υπολογισμών, των αποτελεσμάτων οικονομικής ανάλυσης και των προδιαγραφών του απαραίτητου εξοπλισμού.

Ακολουθώς παρατίθενται συνοπτικά τα στάδια της διαδικασίας μελέτης μιας μικρο-υδροηλεκτρικής εγκατάστασης:

1^ο) Αναγνώριση της περιοχής και της ζήτησης

Στο στάδιο αυτό, καθορίζεται το κατά πόσο υπάρχει ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος στην περιοχή, τι ανάγκες θα πρέπει να ικανοποιηθούν, πιθανοί καταναλωτές /αγοραστές και το αν είναι διαθέσιμο ή όχι κάποιο εξωτερικό δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης, περιλαμβάνει έρευνα και προσδιορισμό των οργανωτικών και τεχνικών ικανοτήτων των κατοίκων, καθώς και της υποδομής και των τοπικών παραδοσιακών τεχνικών, ώστε να συμπεριληφθούν όσες μπορούν στον τρόπο υλοποίησης του έργου, αλλά και να ανιχνευθούν οι πιθανές δυσκολίες και τα κενά που πρέπει να καλυφθούν με εκπαίδευση των κατοίκων που θα εργαστούν για την κατασκευή και λειτουργία του.

Παράλληλα, στο πρώτο στάδιο σχεδιάζεται η αρχική διάταξη και χωροθέτηση του έργου, η καταγραφή των τοπικών συνθηκών, των άλλων ανταγωνιστικών χρήσεων νερού και η μελέτη των γεωλογικών συνθηκών. Επίσης, προσδιορίζεται και το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης (η υδραυλικό ύψος) με χρήση και χαρτών, αλλά κυρίως με μετρήσεις στο σημείο πιθανής εγκατάστασης του έργου. Είναι σημαντικό να υπάρχει ακρίβεια στη μέτρηση του υδραυλικού ύψους και για τον λόγο αυτό συνδυάζονται συνήθως διαφορετικές μέθοδοι μετρήσεων, ώστε το αποτέλεσμα να είναι πιο αξιόπιστο. Τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών φαίνονται στον πίνακα 1.4.1.

Μέθοδος	Κόστος	Ακρίβεια	Δυσκολία	Απαιτούμενος χρόνος	Απαραίτητος εξοπλισμός	Ελάχιστα άτομα
Μέθοδος σωλήνα	Χαμηλό	Υψηλή	Όχι δύσκολη	3 έως 6 ώρες	Πλαστικός σωλήνας, ταινία μεζούρας, ξύλινες τάπες	2
Μετρητής υψομέτρου	Μεσαίο έως υψηλό	Απόκλιση ±1m έως ±5m	Όχι δύσκολη	Έως 1 ώρα	Ψηφιακό όργανο μέτρησης ύψους	1
Κλισιόμετρο	Αρκετά χαμηλό	Υψηλή	Απαιτείται εμπειρία	Έως και 2 ώρες	Κλισιόμετρο Abney, μακριά ταινία μεζούρας, 2 ράβδους ίσου δεδομένου ύψους	2

Πίνακας 1.4.1 Μέθοδοι μέτρησης του διαθέσιμου ύψους υδατόπτωσης^[10]

2^ο) Υδρολογική μελέτη

Στο στάδιο αυτό, προσδιορίζεται το υδραυλικό δυναμικό της περιοχής με λήψη μετρήσεων της ροής του ποταμού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά και με τη συλλογή και αξιολόγηση υπαρχόντων υδρολογικών στοιχείων και συγκεκριμένων χρονοσειρών παροχής. Όταν δεν υπάρχουν επαρκή υδρολογικά στοιχεία, γίνεται προσεγγιστική εκτίμηση αυτών, συνεκτιμώντας στοιχεία από τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, από γειτονικές λεκάνες και από σχόλια και παρατηρήσεις των κατοίκων της περιοχής. Η ακρίβεια με την οποία πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της παροχής εξαρτάται από τη θέση της εγκατάστασης.

Η μέτρηση της ροής του ποταμού από τον μελετητή πρέπει να επαναληφθεί κάποιες φορές στη διάρκεια του έτους, ώστε να προσδιορίζονται αξιόπιστα οι διακυμάνσεις της κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Για τη μέτρηση της παροχής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις μέθοδοι, τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μέθοδος	Κόστος	Ακρίβεια	Δυσκολία	Απαιτούμενος χρόνος	Απαραίτητος εξοπλισμός	Ελάχιστα άτομα
Μέθοδος δοχείου (κατάλληλη μόνο για $Q < 10$ l/sec)	αμελητέο	μεσαία	όχι δύσκολη	10 λεπτά	δοχείο και χρονόμετρο	2
Μέθοδος float	αμελητέο	χαμηλή, μεσαία για ομαλή ροή ποταμού παράλληλη στην όχθη	όχι δύσκολη	30 λεπτά	ξύλινο κομμάτι, μεζούρα, χρονόμετρο	2
Μέθοδος ανάλυσης αλατιού	σχετικά υψηλό	μεσαία έως υψηλή	απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή	10 λεπτά	μετρητής αγωγιμότητας, δοχείο, υπολογιστής, ζυγισμένες ποσότητες αλατιού	1

Πίνακας 1.4.2 Μέθοδοι μέτρησης της ροής του ποταμού¹¹⁰⁾

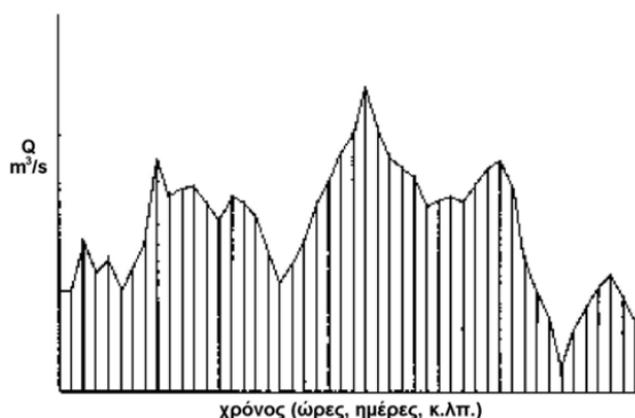
Για να μετρηθεί η ροή σύμφωνα με τη μέθοδο του δοχείου, το δοχείο τοποθετείται σε τέτοιο σημείο ώστε η παροχή του νερού να κατευθύνεται μέσα σε αυτό και χρονομετρείται το πόσο γρήγορα θα γεμίσει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον τρεις φορές και βρίσκεται η μέση τιμή των αποτελεσμάτων. Η διαίρεση του όγκου του δοχείου με τον μέσο χρόνο γεμίσεώς του δίνει την τιμή της παροχής.

Για τον υπολογισμό της παροχής με τη μέθοδο float, είναι απαραίτητη η γνώση της ταχύτητας και της διατομής της ροής, η οποία είναι ίση με το γινόμενο του πλάτους του ρεύματος του νερού επί το βάθος του. Η ταχύτητα υπολογίζεται μετρώντας τον χρόνο που απαιτείται για να διανύσει ένα ξύλινο κομμάτι που επιπλέει μία γνωστή απόσταση, και διαιρώντας την απόσταση αυτή με τον αντίστοιχο χρόνο. Πάλι η διαδικασία μέτρησης και

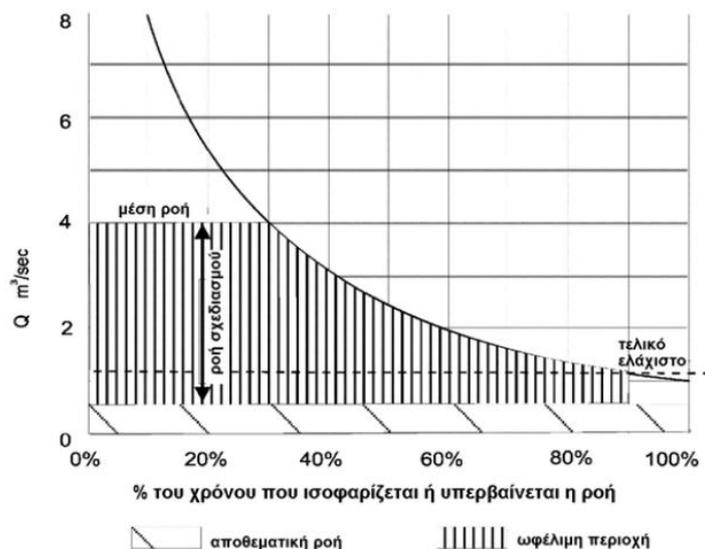
των διαστάσεων της ροής και της ταχύτητας επαναλαμβάνεται και βρίσκεται η μέση τιμή κάθε μεγέθους. Τελικά η παροχή δίνεται από το γινόμενο της μέσης ταχύτητας επί τη μέση διατομή επί ένα διορθωτικό συντελεστή που έχει σχέση με την ταχύτητα.

Για την υλοποίηση της τελευταίας μεθόδου, μία γνωστή ποσότητα αλατιού ρίχνεται σε ένα δοχείο με νερό μέχρι να διαλυθεί πλήρως και στη συνέχεια το δοχείο αδειάζει μέσα στο κανάλι του ποταμού. Σε απόσταση 20 -30 μέτρων κατάντι της ροής τοποθετείται ο ψηφιακός μετρητής αγωγιμότητας με τον δέκτη του βυθιζόμενο στο μισό περίπου βάθος του ποταμού, και αφού πρώτα έχει μετρηθεί η αγωγιμότητα του νερού χωρίς την παρουσία του αλατιού. Το αλμυρό νερό όσο κινείται κατά μήκος του ποταμού διασπείρεται καθ' όλο το βάθος και το πλάτος του ποταμού. Έτσι σχηματίζει ένα «σύννεφο» αλμυρού νερού με ασθενές σε περιεκτικότητα αλατιού αρχικό και τελευταίο μέρος κι ένα υψηλής περιεκτικότητας μεσαίο μέρος. Η περιεκτικότητα σε αλάτι μπορεί να προσδιοριστεί μέσω μέτρησης της αγωγιμότητας του νερού. Αν η ροή του ποταμού είναι χαμηλή, τότε το αλμυρό νερό θα αργήσει να ανιχνευθεί και η μετρούμενη τιμή αγωγιμότητας θα είναι υψηλή, αφού αυτό δεν θα έχει διαλυθεί αρκετά κατά τη ροή του στον ποταμό.

Με το τέλος της υδρολογικής μελέτη έχουν συγκεντρωθεί αρκετά στοιχεία, ώστε να μπορεί να σχεδιαστεί ένα υδατογράφημα και μία καμπύλη διάρκειας ροής, όπως αυτά που φαίνονται στα σχήματα 1.4.1 και 1.4.2. Η καμπύλη διάρκειας ροής παρουσιάζει το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η απορροή γίνεται ίση ή μεγαλύτερη κάποιας τιμής. Πρέπει να σημειωθεί ότι δε μπορεί να αξιοποιηθεί όλη αυτή η ροή του ποταμού παρά μόνο η ωφέλιμη, η οποία προκύπτει μετά από αφαίρεση της αποθεματικής ροής από τη συνολική ώστε να επιτρέπεται η συνέχιση της φυσικής ροής ανά πάσα στιγμή.^[9]



Σχήμα 1.4.1 Τοπικό υδατογράφημα^[9]



Σχήμα 1.4.2 Τυπική καμπύλη διάρκειας της ροής^[9]

3°) Έρευνα αγοράς και διαθεσιμότητα

Στο στάδιο αυτό δεν είναι δυνατόν να γίνει ακόμα μια πλήρης τεχνοοικονομική ανάλυση της εγκατάστασης. Γίνεται ωστόσο μία έρευνα αγοράς ως προς το κόστος των σωλήνων της εγκατάστασης, του υδροστροβίλου, της γεννήτριας και του ελεγκτή της, τα οποία αποτελούν συνήθως τα πιο ακριβά στοιχεία της εγκατάστασης.

4°) Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος

Ανάλογα με τους συνδυασμούς υδραυλικών υψών και παροχών, που είναι δυνατό να επιτευχθούν, υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς της εγκατάστασης και κρίνεται αν είναι επαρκής ή όχι για τη λειτουργία μίας micro ή pico υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Για να γίνει αυτό, πρέπει παράλληλα να υπολογιστούν οι απαιτήσεις της εγκατάστασης, δηλαδή η ελάχιστη ηλεκτρική ισχύς που πρέπει να παράγεται από τη γεννήτρια της εγκατάστασης, ώστε να λειτουργούν στο επιθυμητό επίπεδο όλες οι συσκευές που θα συνδεθούν και θα τροφοδοτηθούν από αυτήν.

5°) Μέγεθος και κόστος γεννήτριας

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης που υπολογίστηκαν στο τέταρτο στάδιο υπολογίζεται το μέγεθος της γεννήτριας και στη συνέχεια, με χρήση των στοιχείων που συγκεντρώθηκαν στο τρίτο στάδιο, το κόστος της.

6°) Προκαταρκτικός έλεγχος οικονομικής βιωσιμότητας

Ανάλογα με την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος και των απαιτήσεων της εγκατάστασης επιλέγεται ο βέλτιστος σχεδιασμός και συγκρίνονται τα ετήσια έσοδα με το κόστος του κεφαλαίου της επένδυσης. Εάν οι ετήσιες αποδοχές είναι λιγότερες από το 10% του κόστους του αρχικού κεφαλαίου, τότε η επένδυση κρίνεται ως μη βιώσιμη. Εάν τα έσοδα κυμαίνονται από το 10 ως το 25% του αρχικού κεφαλαίου, τότε η επένδυση είναι μάλλον εφικτή. Τέλος, αν οι ετήσιες αποδοχές ξεπερνούν το 25% του αρχικού κεφαλαίου, η επένδυση κρίνεται ανεπιφύλακτα ως βιώσιμη.

Στο στάδιο αυτό, ο μελετητής θα πρέπει να αναζητήσει και άλλους εναλλακτικούς τρόπους κάλυψης των αναγκών των κατοίκων σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως μία πιθανή επέκταση του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου και σύνδεση σε αυτό ή η χρήση κάποιας ντιζελογεννήτριας και να τις συγκρίνει με τη λύση εγκατάστασης του υδροηλεκτρικού, ώστε να είναι σίγουρος ότι αυτή είναι η πιο επικερδής.

7°) Υδραυλικό ύψος και παροχή

Στο στάδιο αυτό επιλέγεται ο κατάλληλος συνδυασμός παροχής και ύψους υδατόπτωσης, ώστε να παράγεται η απαιτούμενη ισχύς από το σύστημα υδροτροβίλου-γεννήτριας. Επίσης, πρέπει να προσδιοριστεί προσεγγιστικά ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Εάν υπάρχουν αμφιβολίες τίθεται ολικός βαθμός απόδοσης (για τη συνολική μετατροπή ισχύος από υδραυλική σε ηλεκτρική) ίσος με 50%.

8°) Επιλογή τελικής τιμής ισχύος εξόδου

Εκτιμάται το οριστικό μέγεθος της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί, βάσει των δεδομένων για το υδραυλικό δυναμικό της εγκατάστασης που έχει υπολογιστεί κατά τα πρώτα στάδια. Πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι μερικές φορές είναι προτιμότερο να διατηρηθεί το μέγεθος της γεννήτριας μικρότερο, όπως είχε εκτιμηθεί αρχικά, ακόμα κι αν οι δυνατότητες της εγκατάστασης φαίνονται μεγαλύτερες. Αυτό γίνεται επειδή το κόστος της μικρότερης εγκατάστασης είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό κάποιας μεγαλύτερης κι επειδή στην περίπτωση που έχει γίνει κάποιο λάθος στους υπολογισμούς μέχρι αυτό το σημείο είναι έτσι ευκολότερο να διορθωθεί.

9°) Σχεδιασμός της εγκατάστασης

Κατασκευάζονται τα σχέδια και ο χάρτης της εγκατάστασης, όπου συμπεριλαμβάνονται όλα τα στοιχεία της, οι διαστάσεις και η διάταξή τους, όπως τα μήκη των αγωγών, τα κανάλια νερού με τις θέσεις τους, το κτίριο της μονάδας κ.τ.λ.

10°) Εναλλακτικές λύσεις

Στο στάδιο αυτό, διερευνάται η ύπαρξη εναλλακτικών λύσεων ως προς τη σχεδίαση του έργου, όπως η αλλαγή θέσης ενός αγωγού, και το κατά πόσο αυτές θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο κόστος ή ευνοϊκότερη λειτουργία της εγκατάστασης.

11^ο) Λεπτομερής υπολογισμός κόστους

Υπολογίζεται αναλυτικά το κόστος κάθε στοιχείου του micro-υδροηλεκτρικού σταθμού και προσδιορίζεται το συνολικό κόστος κατασκευής και εγκατάστασής του, κάνοντας και μία μικρή προσαύξησή του, ώστε να συνυπολογιστούν και κάποιο απρόβλεπτα έξοδα που είναι πιθανό να προκύψουν. Επίσης, θα πρέπει να έχει συμπεριληφθεί στο αρχικό η προμήθεια ανταλλακτικών για εξαρτήματα και εξοπλισμό με τη μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης.

12^ο) Έλεγχος οικονομικής βιωσιμότητας

Βάση της τελικής ακριβέστερης τιμής του κόστους εγκατάστασης, διερευνάται αν η επένδυση εξακολουθεί να είναι οικονομικά βιώσιμη. Αν όχι, θα πρέπει να επανεξεταστούν τα στοιχεία που προκάλεσαν την παραπάνω οικονομική επιβάρυνση και να γίνουν βελτιώσεις.

13^ο) Εκπαίδευση του προσωπικού

Στο στάδιο αυτό είναι σημαντικό να προετοιμαστούν και να εκπαιδευθούν τα μέλη της κοινότητας που θα απασχοληθούν για τη λειτουργία και τη διαχείριση του έργου. Πρέπει αφενός να εξοικειωθούν με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και τον εξοπλισμό ώστε να μπορούν αν επιδιορθώσουν πιθανές βλάβες αλλά και να συντηρήσουν σωστά τη εγκατάσταση και αφετέρου, αν αποκτήσουν οργανωτικές και διαχειριστικές ως προς τα οικονομικά μεγέθη ιδιότητες, ώστε το έργο αυτό να αποτελέσει την αρχική πηγή εξέλιξης και ανάπτυξης της κοινωνίας.

14^ο) Παραγγελία υλικών, απαραίτητου εξοπλισμού και εγκατάσταση

Στο σημείο αυτό, μπορεί πλέον να γίνει η αγορά των υλικών και του απαραίτητου εξοπλισμού για τη λειτουργία και να γίνει η εγκατάστασή τους σύμφωνα με τον αναλυτικό σχεδιασμό, που έχει γίνει στο 9^ο στάδιο. Αφού ελεγχθεί η θέση και η σωστή τοποθέτηση όλων των επιμέρους στοιχείων, ο micro-υδροηλεκτρικός σταθμός τίθεται σε λειτουργία. ^{[3],[4]}

Η επιλογή και διαστασιολόγηση του αγωγού προσαγωγής, του υδροστροβίλου και της γεννήτριας, καθώς και η διερεύνηση του καταλληλότερου τρόπου σύνδεσης της μονάδας παρουσιάζονται εκτενέστερα στα κεφάλαια 2,3,4,5 και 6 της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΑΣ MICRO /RICO – ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

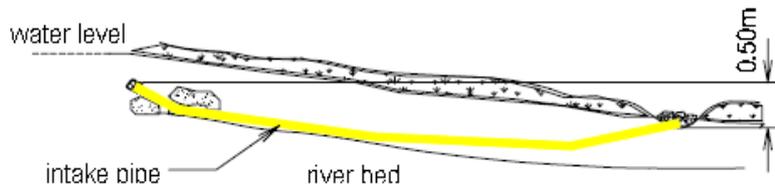
2.1 Σύστημα εισόδου του νερού

Στόχος του συστήματος εισόδου του νερού είναι η εκτροπή του απαιτούμενου μέρους της ροής του νερού και η ελεγχόμενη είσοδος του στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Το σύστημα εισόδου του νερού μπορεί ανάλογα με τις συνθήκες να υλοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα μπορεί να αποτελείται από έναν σωλήνα βυθισμένο στον πάτο του ποταμού με έξοδο στο κανάλι προσαγωγής ή τον αγωγό πτώσεως, ή από έναν μικρό υδατοφράκτη και το στόμιο του καναλιού προσαγωγής σε μία πλευρά του ποταμού. Ανεξάρτητα όμως από τον τρόπο υλοποίησής του, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό λειτουργίας του πρέπει να είναι ο αξιόπιστος έλεγχος της ροής που εισέρχεται στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Πρέπει να εξασφαλίζει ότι η εισερχόμενη ροή θα βρίσκεται εντός ενός αποδεκτού εύρους τιμών, είτε ο ποταμός εμφανίζει υψηλή είτε χαμηλή ροή. Ακόμη, το σύστημα εισόδου πρέπει να είναι ανθεκτικό και να μπορεί να αντέξει την υπερπίεση που μπορεί να εμφανιστεί στην περίπτωση πλημμύρας, ώστε να προστατέψει και το υπόλοιπο κομμάτι της εγκατάστασης, που μπορεί να υποστεί σοβαρή ζημιά στην περίπτωση ανεξέλεγκτης ροής του νερού σε αυτό. Παράλληλα, πρέπει να είναι σωστά τοποθετημένο ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ροή για τη λειτουργία του υδροηλεκτρικού σταθμού ακόμα και τη θερινή περίοδο, κατά την οποία η ροή του νερού στον ποταμό είναι πιθανότατα ελάχιστη. Επίσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυνατότητας αρχικού φιλτραρίσματος του νερού ώστε να εμποδίζεται η είσοδος πετρών και γενικότερων φερτών υλών του νερού που μπορούν αργότερα να μπλοκάρουν τους σωλήνες και να προκαλέσουν ζημιά.^[3] Τέλος, το σύστημα εισόδου του νερού θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο ώστε να είναι φιλικό προς το περιβάλλον, δηλαδή να μην εμποδίζει την πιθανή πορεία ψαριών στο ποτάμι και γενικότερα να αλλοιώνει το τοπικό οικοσύστημα.

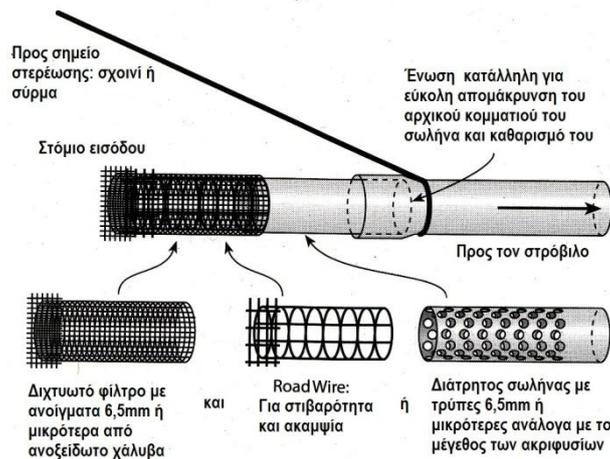
2.1.1 Σύστημα εισόδου του νερού χωρίς υδατοφράκτη

Στην περίπτωση που υπάρχει άφθονη ροή σε μικρό ποτάμι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, το σύστημα εισόδου του νερού κυρίως σε μία pico-υδροηλεκτρική εγκατάσταση μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα και φθηνά με την τοποθέτηση ενός εύκαμπτου σωλήνα εντός του ποταμού

αντίθετα στη ροή. Το στόμιο εισόδου μπορεί να είναι τοποθετημένο είτε στον βυθό του ποταμού ελαφρώς ανυψωμένο και σταθεροποιημένο με πέτρες όπως στο σχήμα 2.1, είτε να βρίσκεται 30 με 50 εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του νερού στερεωμένο με ένα γερό σχοινί ή σύρμα όπως στο σχήμα 2.2. Το στόμιο εξόδου του σωλήνα μπορεί να συνδέεται είτε με τον κανάλι προσαγωγής του νερού στη δεξαμενή φόρτισης είτε κατευθείαν με τον αγωγό προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο.



Σχήμα 2.1 Σύστημα εισόδου νερού με σωλήνα εισόδου τοποθετημένο στον πάτο του ποταμού. Το μήκος του σωλήνα ίσως χρειαστεί να είναι μεγάλο για να διασφαλιστεί ότι η είσοδος του θα βρίσκεται ψηλότερα από την έξοδό του στο κανάλι. ^[10]



Σχήμα 2.2 Σύστημα εισόδου νερού με σωλήνα εισόδου, ο οποίος συνδέεται απευθείας με τον σωλήνα προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο ^[11]

Η λύση αυτή είναι φθηνή και απλή και οποιαδήποτε φθορά προκληθεί από πλημμύρα είναι εύκολο να αποκατασταθεί. Ο σωλήνας είναι κατά κανόνα εφοδιασμένος με φίλτρο στη είσοδό του, ώστε να μην εισέρχονται πέτρες, λάσπη και γενικότερα στοιχεία που μπορούν να μπλοκάρουν τη λειτουργία του στροβίλου. Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος υδροληψίας είναι η ανάγκη για συχνό καθαρισμό του φίλτρου, ιδίως κατά την εποχή των πρώτων βροχοπτώσεων για την απομάκρυνση φύλλων και φερτών υλών. Μπορεί η διαδικασία καθαρισμού του να είναι εξαιρετικά δυσάρεστη για τον ιδιοκτήτη, κυρίως όταν η ροή του νερού είναι αυξημένη. Χρησιμοποιείται συχνά σε μικρά ποτάμια λόγω του μικρού κόστους των απαιτούμενων υλικών και της απλότητας της κατασκευής. ^{[10],[11]}

2.1.2. Σύστημα εισόδου του νερού με μικρό υδατοφράκτη

Μία ακριβότερη αλλά αποδοτική λύση είναι η κατασκευή ενός μικρού υδατοφράκτη, ο οποίος θα επιβραδύνει λίγο τη ροή του νερού του ποταμού και θα αυξάνει τη συγκέντρωσή του στο σημείο υδροληψίας, διευκολύνοντας την εκτροπή του και επιτρέποντας την αξιοποίηση και των πιο χαμηλών τιμών ροής. Είναι σημαντικό το φράγμα που κατασκευάζεται να έχει μικρές διαστάσεις, ώστε να μην παρεμποδίζει σημαντικά τη συνέχεια της ροής του νερού στο ποτάμι και να μην αλλοιώνει το περιβάλλον γύρω από αυτό. Ο υδατοφράκτης μπορεί να κατασκευαστεί από συρματοκιβώτιο ή σκυρόδεμα ή με βράχους και κονίαμα και να συνδυαστεί είτε με την κατασκευή ενός ανοιχτού καναλιού που θα οδηγεί το νερό στη λεκάνη καθίζησης ιζημάτων, είτε με έναν σωλήνα που θα συνδέεται με τον αγωγό προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατασκευής ενός συστήματος εισόδου νερού με υδατοφράκτη, οι περισσότεροι από τους οποίους παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

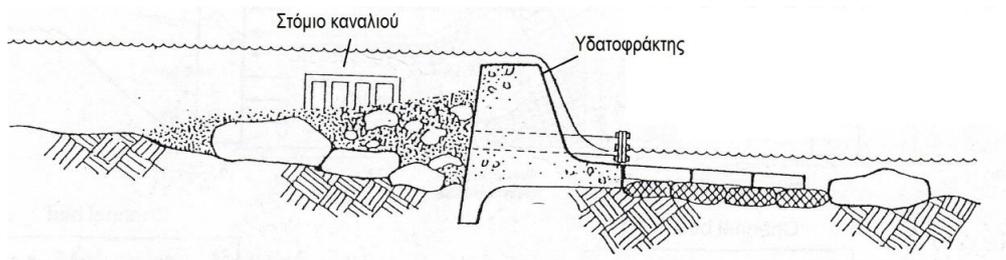


Σχήμα 2.3 Μικρός υδατοφράκτης

2.1.2.1 Μικρός υδατοφράκτης και εκτροπή του νερού σε ανοιχτό κανάλι

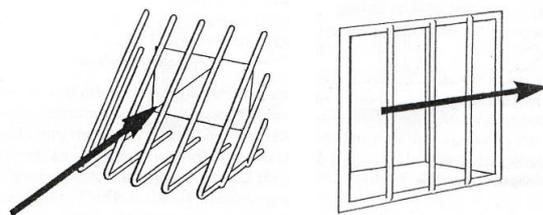
Το κανάλι στο οποίο εισέρχεται το εκτρεπόμενο νερό είναι ουσιαστικά το πρώτο μέρος της διώρυγας προσαγωγής (πριν τη λεκάνη καθίζησης) το οποίο χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα γρήγορη ροή του νερού. Ο σχεδιασμός και η επιλογή της θέσης του στομίου του καναλιού και του υδατοφράκτη καθορίζουν τη σωστή λειτουργία και την ασφάλεια της εγκατάστασης. Κατά τον σχεδιασμό τους, πρέπει να διασφαλίζεται η αντοχή τους σε συνθήκες υψηλής ροής, ιδιαίτερα τη χειμερινή περίοδο που συχνά προκαλούνται πλημμύρες, γιατί αν προκληθεί τότε ζημιά, η επιδιόρθωσή της πρώτον είναι εξαιρετικά δύσκολη, αφού η πρόσβαση στο σημείο υδροληψίας είναι επικίνδυνη, και δεύτερον έχει υψηλό κόστος, ιδίως αν η ζημιά έχει γίνει στο κανάλι ή τον υδατοφράκτη. Επίσης, η θέση του στομίου του καναλιού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να διασφαλίζεται η απαιτούμενη παροχή στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση, ακόμα κι όταν η ροή του ποταμού είναι πολύ μικρή και για να συμβεί αυτό, είναι απαραίτητο κανείς να

λάβει υπόψη και την αλλαγή ύψους στον πυθμένα του ποταμού μακροπρόθεσμα, λόγω μετακίνησης των στοιχείων του πυθμένα μέσω της τριβής από το ορμητικό νερό. Ένα άλλο ζήτημα που προκύπτει κατά τον σχεδιασμό του συστήματος υδροληψίας είναι αυτό της μεταφοράς ιζημάτων, πετρών, ξύλων και διάφορων άλλων σωματιδίων από τα νερά του ποταμού. Ένας κίνδυνος είναι η καθίζηση ιζημάτων και λάσπης πριν τον υδατοφράκτη και μπροστά από το στόμιο του καναλιού λόγω μείωσης της ταχύτητας του νερού και στροβιλισμού του, η οποία αυξανόμενη μπορεί να μπλοκάρει την είσοδο του συστήματος υδροληψίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί, με την τοποθέτηση του υδατοφράκτη σε μεγαλύτερη απόσταση από το στόμιο του καναλιού, αλλά και με την τοποθέτηση του στομίου σ' ένα σημείο όπου δεν θα ευνοείται ο στροβιλισμός του νερού. Είναι προτιμότερη η υψηλή ταχύτητα ροής και η άμεση αναρρόφηση των μικρών φερτών υλών, όπως η λάσπη, από το στόμιο του καναλιού, καθώς αυτά θα κατακαθίσουν αργότερα στη λεκάνη καθίζησης. Μία άλλη λύση είναι η τοποθέτηση κατά το πλάτος του υδατοφράκτη μικρών σωλήνων καθαρισμού, που θα αποτελούν μία δίοδο διαφυγής για τη λάσπη, ώστε αυτή να συμπαρασύρεται από το νερό και να μη συσσωρεύεται στην πλευρά του φράγματος που είναι κοντά στο στόμιο του καναλιού.



Σχήμα 2.4 Σύστημα υδροληψίας, όπου το στόμιο του καναλιού έχει καλυφθεί από τις φερτές ύλες του νερού του ποταμού ^[3]

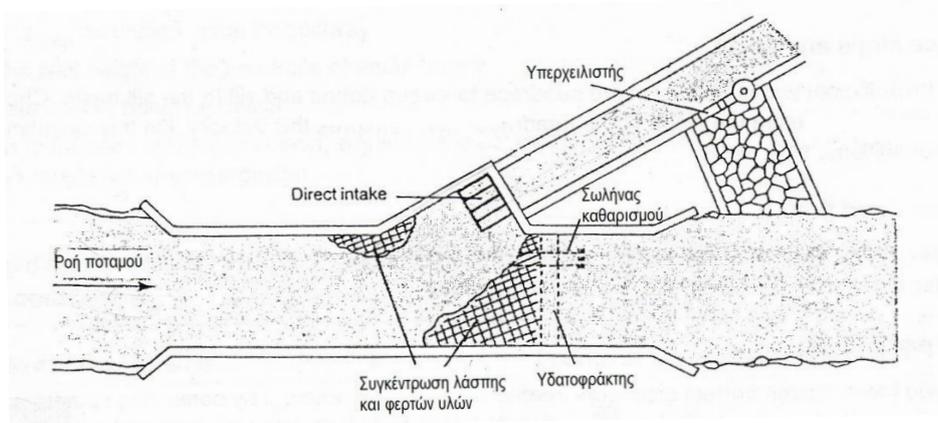
Το στόμιο του καναλιού μπορεί να τοποθετηθεί είτε πλευρικά κατά τη διεύθυνση της ροής (πλευρική υδροληψία, side intake) είτε κάθετα σε αυτή (άμεση υδροληψία, direct intake), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Στην περίπτωση αυτή που το νερό εκτρέπεται στο κανάλι, το στόμιο του είναι εξοπλισμένο με μία σχάρα αποτελούμενη από κατακόρυφες μπάρες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με το ένα τέταρτο του πλάτους του καναλιού και η οποία εμποδίζει την είσοδο των μεγάλων φερτών υλών του ποταμού, όπως πέτρες και ξύλα.



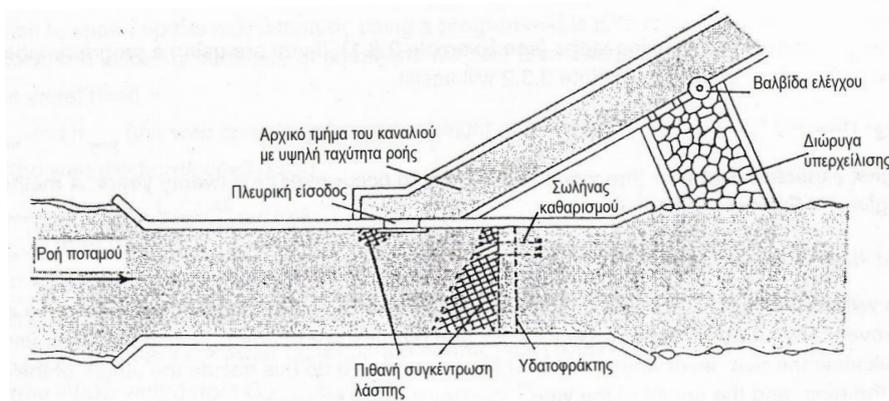
(α)

(β)

Σχήμα 2.5 (α) Άμεση είσοδος νερού (direct intake), (β) Πλευρική είσοδος νερού (side intake) ^[3]



(α)



(β)

Σχήμα 2.6 (α) Σύστημα υδροληψίας με υδατοφράκτη και άμεση είσοδο νερού, (β) Σύστημα υδροληψίας με υδατοφράκτη και πλευρική είσοδο νερού ^[3]

Σε γενικές γραμμές, τα στάδια για τον σχεδιασμό του συστήματος υδροληψίας είναι τα εξής:

1^ο) Υπολογισμός της μέγιστης ροής, που είναι πιθανό να παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια πλημμύρας τα επόμενα είκοσι χρόνια

2^ο) Υπολογισμός του ύψους των πλευρικών τοιχίων, που θα προστατέψουν το κανάλι από την είσοδο ορμητικού νερού κατά τη διάρκεια πλημμύρας

3^ο) Υπολογισμός των διαστάσεων του στομίου του καναλιού, ώστε υπό κανονικές συνθήκες να διοχετεύεται η κατάλληλη ροή στο κανάλι.

4^ο) Υπολογισμός του πλάτους και εν συνεχεία της κλίσης του αρχικού μέρους του καναλιού, ώστε το νερό να κυλάει με τέτοια ταχύτητα που να συμπαρασύρει τη λάσπη και τις υπόλοιπες φερτές ύλες στη λεκάνη καθίζησης, αλλά να μην προκαλεί σημαντική διάβρωση στο κανάλι.

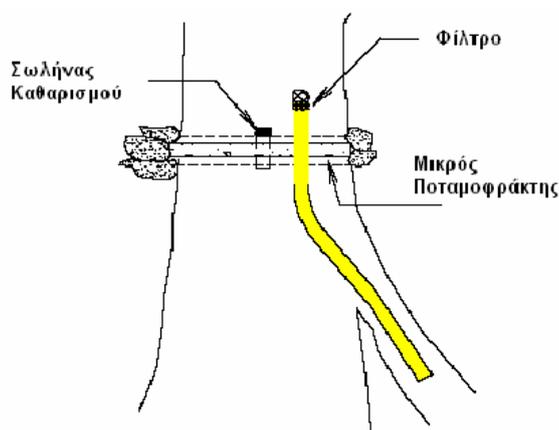
5^ο) Υπολογισμός της μέγιστης ροής που μπορεί να διοχετευθεί στο κανάλι και της ροής που θα διέλθει από αυτό σε περίπτωση πλημμύρας, ώστε να μπορούν μετά να διαστασιολογηθούν και τα πλευρικά του τοιχώματα

6^ο) Κοστολόγηση του έργου για το σύστημα υδροληψίας και επανάληψη της διαδικασίας με αλλαγές μεγεθών, όπως το μήκος του υδατοφράκτη με σκοπό την εύρεση οικονομικότερα βέλτιστης λύσης. ^[3]

Για περισσότερα στοιχεία για την κατασκευή ενός υδατοφράκτη, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [3].

2.1.2.2 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν απλό σωλήνα

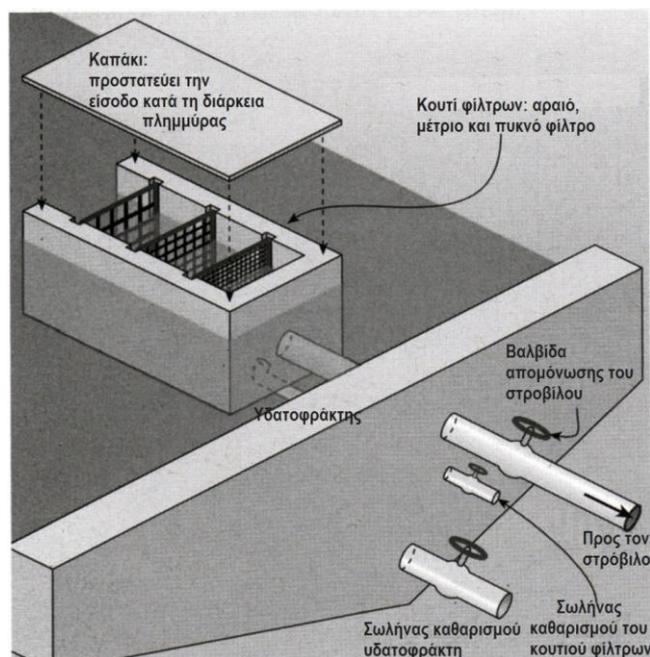
Κάποιες φορές στα ριζο-υδροηλεκτρικά έργα, το κανάλι προσαγωγής και η λεκάνη καθίζησης παραλείπονται και αντ' αυτών υπάρχει ένας εύκαμπτος σωλήνας ο οποίος ξεκινάει από τον υδατοφράκτη και είτε καταλήγει στη δεξαμενή φόρτισης, είτε αποτελεί ο ίδιος τον σωλήνα πτώσεως. Η υλοποίηση του συστήματος υδροληψίας σε μία τέτοια περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 2.7. Το στόμιο εισόδου του σωλήνα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένο με ένα καλό και ανθεκτικό φίλτρο του οποίου οι τρύπες θα έχουν διάμετρο ίση με το ένα τέταρτο περίπου της διαμέτρου των ακροφυσίων, ώστε τα στοιχεία που θα το διαπεράσουν να μη μπορούν να μπλοκάρουν την έξοδο των ακροφυσίων και τη λειτουργία του στροβίλου. Παράλληλα, πρέπει η συνολική επιφάνεια όλων των οπών του φίλτρου να είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διατομή του σωλήνα, ώστε αυτός να μπορεί να διαρρέεται από την απαιτούμενη ποσότητα νερού.



Σχήμα 2.7 Σύστημα υδροληψίας με ποταμοφράκτη και σωλήνα αντί για κανάλι ^[10]

2.1.2.3 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και ένα κουτί με φίλτρα (Screen box)

Αυτό το σύστημα υδροληψίας συνδυάζει την κατασκευή ενός μικρού υδατοφράκτη με ένα κουτί εφοδιασμένο με φίλτρα μέσω του οποίου εισέρχεται το νερό στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Το κουτί μπορεί να κατασκευαστεί από μπετόν, χάλυβα ή πλαστικό και έχει τρεις κάθετες πλευρές – τοιχώματα, καθώς από την τέταρτη η οποία «βλέπει» αντίθετα στη ροή γίνεται η είσοδος του νερού. Διαθέτει καπάκι που το προστατεύει από την είσοδο υπερβολικής ποσότητας νερού κατά τη διάρκεια πλημμύρας και είναι εφοδιασμένο με τρία φίλτρα διαδοχικά μειούμενης διαπερατότητας από φερτές ύλες, δηλαδή το πρώτο είναι αραιό, το δεύτερο μέτριο και το τρίτο πυκνό. Επίσης, υπάρχουν σωλήνες για την απομάκρυνση των ιζημάτων που συγκεντρώνονται στον πάτο του κουτιού και μπροστά από τον υδατοφράκτη. Η βαλβίδα απομόνωσης του υδροστροβίλου τον προφυλάσσει από τη ροή αφιλτράριστου νερού, κατά την απομάκρυνση των φίλτρων του κουτιού για τον καθαρισμό τους.



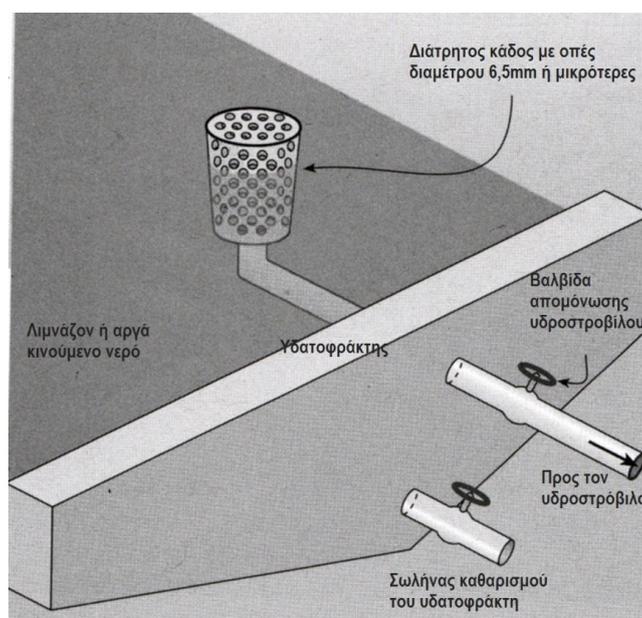
Σχήμα 2.8 Σύστημα υδροληψίας με υδατοφράκτη και κουτί φίλτρων^[11]

Ο υδατοφράκτης μπορεί να παραλειφθεί, αν η ταχύτητα ροής του νερού είναι χαμηλή χωρίς όμως το βάθος να είναι πολύ μικρό. Αυτό το σύστημα υδροληψίας εξασφαλίζει καλύτερο φιλτράρισμα του νερού με το οποίο τροφοδοτείται ο υδροστρόβιλος και το κόστος του είναι μέτριο έως υψηλό (συνήθως πάνω από 100€). Τέλος, το βασικό του μειονέκτημα είναι η

δυσκολία καθαρισμού του, ιδίως κατά την περίοδο αύξησης της ροής του ποταμού, καθώς τα φίλτρα πρέπει να αφαιρεθούν.

2.1.2.4 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν κυλινδρικό διάτρητο κάδο (Pond bucket)

Σε αυτό το σύστημα υδροληψίας, το νερό εισέρχεται στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση μέσω ενός διάτρητου κυλινδρικού κάδου (χωρητικότητας εξαρτώμενης από την επιθυμητή παροχή) με οπές διαμέτρου 6,5mm ή και μικρότερες ανάλογα με τη διάμετρο της εξόδου του ακροφυσίου. Ο σωλήνας προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο είτε περνάει κάτω από τον υδατοφράκτη, είτε περνάει μέσα από αυτόν και ενώνεται με τον κάδο μέσω ενός φίλτρου που υπάρχει στο κάτω μέρος του τελευταίου. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει σωλήνας για την απομάκρυνση των ιζημάτων που συγκεντρώνονται μπροστά από τον υδατοφράκτη καθώς και βαλβίδα απομόνωσης του υδροστρόβιλου.



Σχήμα 2.9 Σύστημα υδροληψίας με υδατοφράκτη και κυλινδρικό διάτρητο κάδο^[11]

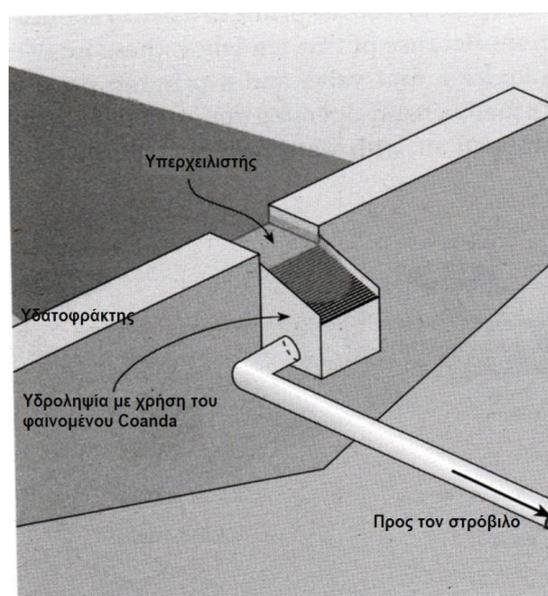
Το συγκεκριμένο σύστημα υδροληψίας είναι απλό στην κατασκευή και χαμηλό σε κόστος, αλλά απαιτεί την ύπαρξη είτε κάποιας μικρής λίμνης είτε ποταμού με χαμηλή ταχύτητα ροής και σχεδόν σταθερό ύψος νερού. Το φιλτράρισμα του νερού δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό και προτιμάται η τοποθέτηση του κάδου κοντά σε κάποια όχθη, λόγω της δυσκολίας καθαρισμού και της συγκριτικά υψηλότερης πιθανότητας φθοράς και καταστροφής του από μεγάλες φερτές ύλες. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συστήματος αυτού είναι ότι χρησιμοποιείται συχνά σε περιοχές που υπάρχουν κάστορες, λόγω των

πολλών μικρών ξύλινων φραγμάτων που φτιάχνουν και φιλτράρεται λίγο και επιβραδύνεται κατά αυτόν τον φυσικό τρόπο το νερό.

2.1.2.5 Σύστημα υδροληψίας με μικρό υδατοφράκτη και έναν υπερχειλιστή με φίλτρο προς αξιοποίηση του φαινομένου Coanda (Spillway with Coanda-Effect Screen)

Το συγκεκριμένο σύστημα υδροληψίας περιλαμβάνει την κατασκευή ενός υδατοφράκτη με υπερχειλιστή με φίλτρο με τριγωνικές σχισμές που αξιοποιεί το φαινόμενο Coanda. Το φαινόμενο Coanda αποτελεί την τάση ενός ρεύματος ρευστού να μένει σε επαφή κατά την πορεία του σε μία κυρτή επιφάνεια, από το να ακολουθήσει μία πορεία σε ευθεία γραμμή όπως η αρχική του. Ένα μέρος του νερού που ρέει μέσω του υπερχειλιστή διοχετεύεται στον σωλήνα προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει τη ροή του στον ποταμό συμπαρασύροντας τις φερτές ύλες που έχουν κατακάσει στο φίλτρο και καθαρίζοντάς το. Σε περιοχές που έχουν θερμά νερά και ευνοείται η ανάπτυξη φυκιών πρέπει το φίλτρο να καθαρίζεται τακτικά.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι η ευκολία κατασκευής και εγκατάστασής του, καθώς και το γεγονός ότι είναι αυτοκαθαριζόμενο και έχει ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον. Ακόμα, παρά το σχετικά υψηλό του κόστος (από 700€ και άνω), η ανοξειδωτή κατασκευή του συμβάλει στη διασφάλιση ενός μεγάλου χρόνου ζωής χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα κατά τη λειτουργία του. ^[11]



Σχήμα 2.10 Σύστημα υδροληψίας με υδατοφράκτη και με υπερχειλιστή με φίλτρο που αξιοποιεί το φαινόμενο Coanda ^[11]

Για περισσότερες πληροφορίες για τα διάφορα συστήματα υδροληψίας που χρησιμοποιούνται στα micro-υδροηλεκτρικά έργα, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [11].

2.2 Διώρυγα προσαγωγής

Η διώρυγα ή κανάλι προσαγωγής οδηγεί το νερό από το σύστημα υδροληψίας στην λεκάνη καθίζησης και εν συνεχεία στη δεξαμενή φόρτισης. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, ένα κανάλι μπορεί να αποτελέσει μία φθηνή λύση για τη μεταφορά του νερού σε ένα καλύτερο σημείο εγκατάστασης της δεξαμενής φόρτισης, αφού έτσι θα μειωθεί και το απαιτούμενο μήκος του σωλήνα πτώσεως. Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις και αν δεν κατασκευαστεί σωστά, μπορεί να αποδειχθεί ως ένα σημαντικό επιπλέον κόστος και να χρειάζεται συχνά επισκευές λόγω διαρροής του και διάβρωσης ή ολίσθησης του εδάφους.



Σχήμα 2.11 Κανάλι προσαγωγής

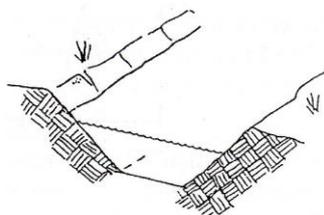
Σχεδιάζοντας ένα κανάλι προσαγωγής και τη διαδρομή του, υπάρχουν πολλά σημεία στα οποία θα πρέπει να δοθεί προσοχή και ποικίλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Είναι απαραίτητο να γίνουν γεωλογικές μελέτες και τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή των χαρακτηριστικών του καναλιού αποτελούν ο τύπος εδάφους, η απαιτούμενη ενίσχυση για τη στήριξη του καναλιού, το κόστος των μεταφερόμενων υλικών (όπως το τσιμέντο), η απαιτούμενη ροή νερού, καθώς και οι παράλληλες χρήσεις του. Η τοπική εμπειρία στην κατασκευή συστημάτων διαχείρισης νερού, όπως για το πότισμα καλλιεργειών, μπορεί να συμβάλλει και να διευκολύνει τη διαδικασία μελέτης και κατασκευής του καναλιού, ενώ θα πρέπει να διερευνηθεί και η ύπαρξη παλιών καναλιών που ίσως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να μη χρειαστεί η κατασκευή νέου. Τέλος, θα πρέπει να μελετηθούν και άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως η εγκατάσταση ενός σωλήνα χαμηλής πίεσης που θα μεταφέρει το νερό στη δεξαμενή φόρτισης ή ενός μακρύτερου σωλήνα πτώσεως, και μετά από σύγκριση όλων αυτών να καταλήξει στην οικονομικά αποδοτικότερη λύση.

Το κανάλι που θα κατασκευαστεί πρέπει να είναι ανθεκτικό, να μπορεί να υποστηρίξει ροή λίγο μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για κανονική λειτουργία, ώστε να αντέχει σε

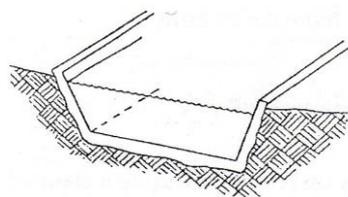
περιόδους βροχοπτώσεων, να μην παρουσιάζει διαρροή, μεγάλη τριβή και σημαντικές απώλειες. Επίσης, πρέπει η κλίση του να είναι τέτοια ώστε η ταχύτητα της ροής του νερού να μην είναι τόσο μεγάλη που να προκαλεί διάβρωση, αλλά ούτε και τόσο μικρή που να επιτρέπει την κατακρήνη ιζημάτων και φερτών υλών.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι καναλιών, οι οποίοι μπορούν να συνδυαστούν για την κατασκευή ενός ανάλογα με τη μορφολογία της περιοχής και το πώς αυτή μεταβάλλεται κατά μήκος του καναλιού. Μπορεί να έχει την πιο απλή μορφή, που προκύπτει από μία μόνο εκσκαφή και το νερό να έρχεται σε επαφή με το χώμα, όπως στο σχήμα 2.12.α. Επειδή όμως με αυτόν τρόπο οι απώλειες είναι μεγαλύτερες και η αντοχή μικρότερη (ειδικά αν το έδαφος είναι αμμώδες), συνηθίζεται η ενίσχυση των τοιχωμάτων του καναλιού με διάφορους τρόπους: (α) εφαρμογή περιμετρικά ενός φύλλου πολυαιθυλενίου ή ενός λεπτού στρώματος υδαρούς τσιμέντου ή αργιλώδους πηλού, υλικών δηλαδή που δεν έχουν μηχανική αντοχή, αλλά συμβάλλουν στη μείωση των τριβών και στην καλύτερη στεγάνωση, όπως στο σχήμα 2.12.β ή (β) εσωτερική περιμετρική επένδυση του καναλιού με υλικά που έχουν μηχανική αντοχή (λιθοδομή, μπετόν), όπως στα σχήματα 2.12.γ, δ και ε. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου είναι πολύ σημαντική για την ανθεκτικότητα και τη σωστή λειτουργία του και καθορίζει τη σχεδίασή του καναλιού και την απαιτούμενη κλίση του.

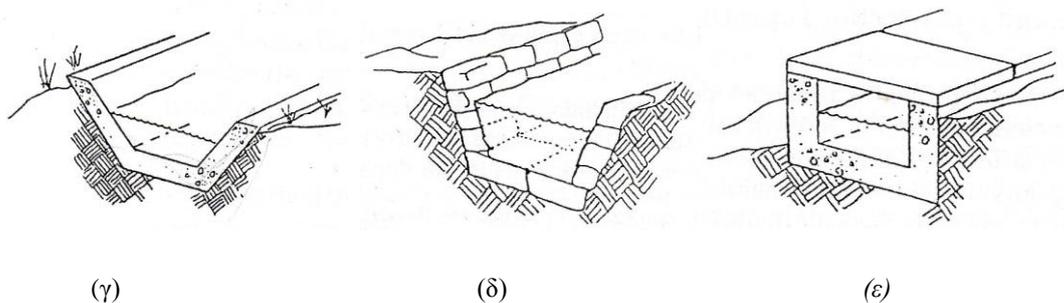
Όταν το έδαφος είναι αμμώδες, πορώδες ή ασταθές, όταν είναι πετρώδες και δε μπορεί να γίνει εκσκαφή ή ακόμα όταν η κλίση του είναι απότομη, προτιμάται η κατασκευή καναλιών με ανθεκτικά υλικά ή τουλάχιστον η κατά το δυνατόν στεγάνωση του καναλιού. Αν όμως επιθυμεί κανείς να χρησιμοποιήσει ένα απλό κανάλι σκαμμένο στο έδαφος, τότε θα πρέπει να λάβει σοβαρά υπόψη του τις απώλειες λόγω διαρροής σε κάθε σημείο της προτεινόμενης διαδρομής. Ο βαθμός διαρροής σε ένα πορώδες έδαφος μπορεί να μετρηθεί με σχετική ακρίβεια μέσω συγκεκριμένη διαδικασίας ελέγχου (περιγράφεται στο [3]) αλλιώς προσεγγιστικά μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι για κάθε 100m θα έχει 5% απώλεια ροής. Για τον λόγο αυτό, συστήνεται η αύξηση κατά 10-20% της εισερχόμενης στο κανάλι ροής, ώστε τελικά (μετά την απορρόφηση ενός μέρους του νερού από το έδαφος) να τροφοδοτείται ο υδροστρόβιλος με την απαιτούμενη παροχή. ^{[3],[10]}



(α)

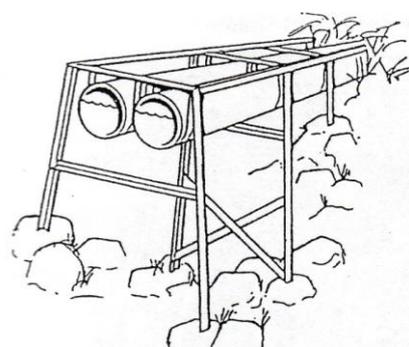


(β)

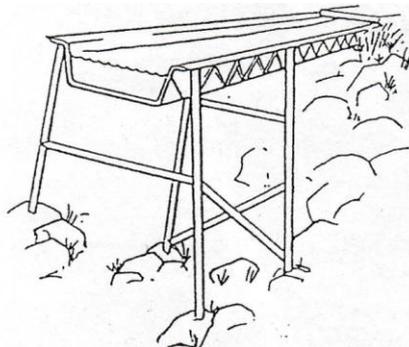


Σχήμα 2.12 Τύποι καναλιών προσαγωγής (α) Απλό κανάλι – αυλάκι στο έδαφος, (β) Κανάλι επικαλυμμένο με φύλλο πολυαιθυλενίου ή με λεπτό στρώμα από άργιλο ή υδαρές τσιμέντο για καλύτερη στεγάνωση, (γ) Κανάλι ενισχυμένο με μπετόν, (δ) Κανάλι ενισχυμένο με πέτρες, (ε) Κανάλι ενισχυμένο με μπετόν και καλυμμένο από την πάνω πλευρά για μεγαλύτερη προστασία.^[3]

Κατά μήκος της διαδρομής του καναλιού μπορεί να παρουσιαστούν εμπόδια και για να παρακαμφθούν θα πρέπει αυτό να διέλθει πάνω, γύρω ή κάτω από αυτά. Η διάβαση ενός ρεύματος ή φαραγγιού απαιτεί τη χρήση ενός τεχνητού καναλιού, δηλαδή κάποιου είδους επέκταση του καναλιού, με την ίδια όμως κλίση και υποστηριζόμενο από στύλους από σκυρόδεμα ή χάλυβα ή σχηματίζοντας κάποιου είδους γεφύρωση. Οι αναρτώμενοι σωλήνες από χάλυβα αποτελούν συχνά την καλύτερη λύση, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χορδή της κατασκευαζόμενης επιτόπου γεφύρωσης, αν και δε μπορεί κανείς να αποκλείσει τη χρήση και πλαστικών σωλήνων. Ένας πλαστικός ή χαλύβδινος σωλήνας έχει μεγαλύτερο κόστος αγοράς και στην περίπτωση που το νερό μεταφέρει πολλές φερτές ύλες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μπλοκάρει, αλλά τα ανοιχτά από την άνω πλευρά κανάλια είναι ευαίσθητα σε κατακρημνίσεις και μπορεί τελικά να δημιουργήσουν πολύ μεγαλύτερο κόστος αν κατασκευαστούν σε λάθος σημεία. Το πρόβλημα μπορεί επίσης να λυθεί με τη χρήση ανεστραμμένων σιφωνίων, τα οποία απαρτίζονται από μία διάταξη εισαγωγής και μία εξαγωγής που συνδέονται με έναν καμπύλο σωλήνα. Αρκετοί από αυτούς τους τρόπους επέκτασης του καναλιού στα σημεία ύπαρξης εμποδίων φαίνονται στις εικόνες 2.13 και 2.14.^[12]



(α)



(β)

Σχήμα 2.13 Συνέχιση καναλιού προσαγωγής με χρήση (α) αναρτώμενων κλειστών σωλήνων και (β) με ανοιχτό τραπεζοειδούς διατομής σωλήνα (υδραγωγό) από γαλβανισμένο σίδηρο ή ξύλο^[3]



Σχήμα 2.14 Ένα κομμάτι σωλήνα που χρησιμοποιείται ως γεφύρωση του καναλιού κατά μήκος ενός χαντακιού. Ο σωλήνας σταθεροποιείται με χρήση μεγάλων πετρών και στις δύο πλευρές του. Η τοποθέτησή του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην κινδυνεύει από τα νερά αποστράγγισης του βουνού μετά από μία βροχόπτωση^[10]



Σχήμα 2.15 Ξύλινος υδραγωγός που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού στο κανάλι κατά μήκος μίας απότομης πλαγιάς^[10]

Ακόμα, για να διασφαλιστεί ότι το κανάλι δεν θα πλημμυρίσει με κίνδυνο να καταστραφεί και να μειωθεί η σταθερότητα του εδάφους εξοπλίζεται με πλευρικό υπερχειλιστή όπως αυτόν που φαίνεται στο σχήμα 2.2.5.



Σχήμα 2.16 Πλευρικός υπερχειλιστής^[12]

2.2.1 Σχεδίαση της διώρυγας προσαγωγής

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης της διώρυγας σύμφωνα με το [3], η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της εγκάρσιας διατομής, των διαστάσεων, και της κλίσης της και γίνεται συναρτήσεως της προβλεπόμενης ροής, της απαιτούμενης ταχύτητας του νερού και της τραχύτητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη.

Η ροή του νερού Q σε ένα κανάλι σχετίζεται με την ταχύτητα v του νερού και την εγκάρσια διατομή του ρεύματος του νερού A που το διαρρέει, σύμφωνα με τον τύπο (2.1):

$$Q = v \cdot A \quad (2.1)$$

Η ταχύτητα του νερού που διαρρέει το κανάλι εξαρτάται από την κλίση του s και από την τραχύτητα της επιφάνειάς του (η οποία προσδιορίζεται από τον συντελεστή τραχύτητας n χαρακτηριστικό για κάθε υλικό). Επίσης, όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, η τιμή της πρέπει να διατηρείται πάνω από μία ελάχιστη τιμή για να αποτραπεί η ιζηματοπόθεση και η ανάπτυξη υδρόβιων φυτών, αλλά κάτω από μία μέγιστη τιμή ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση, ειδικά στα μη επενδεδυμένα κανάλια. Με χρήση ανθεκτικού και στιβαρού υλικού για ενίσχυση των τοιχωμάτων, η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα μπορεί να πάρει μεγαλύτερες τιμές. Στον πίνακα 2.1 δίδονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της ταχύτητας του νερού σε ρηγά κανάλια micro-υδροηλεκτρικών συστημάτων ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Το κάτω όριο της ταχύτητας για τη διατήρηση των ιζημάτων σε αιώρηση μετά την είσοδό τους στο κανάλι είναι 0,3m/sec. Αν το νερό είναι καθαρό, το όριο αυτό δεν έχει σημασία. Μικρή ταχύτητα νερού συνεπάγεται μικρή κλίση της

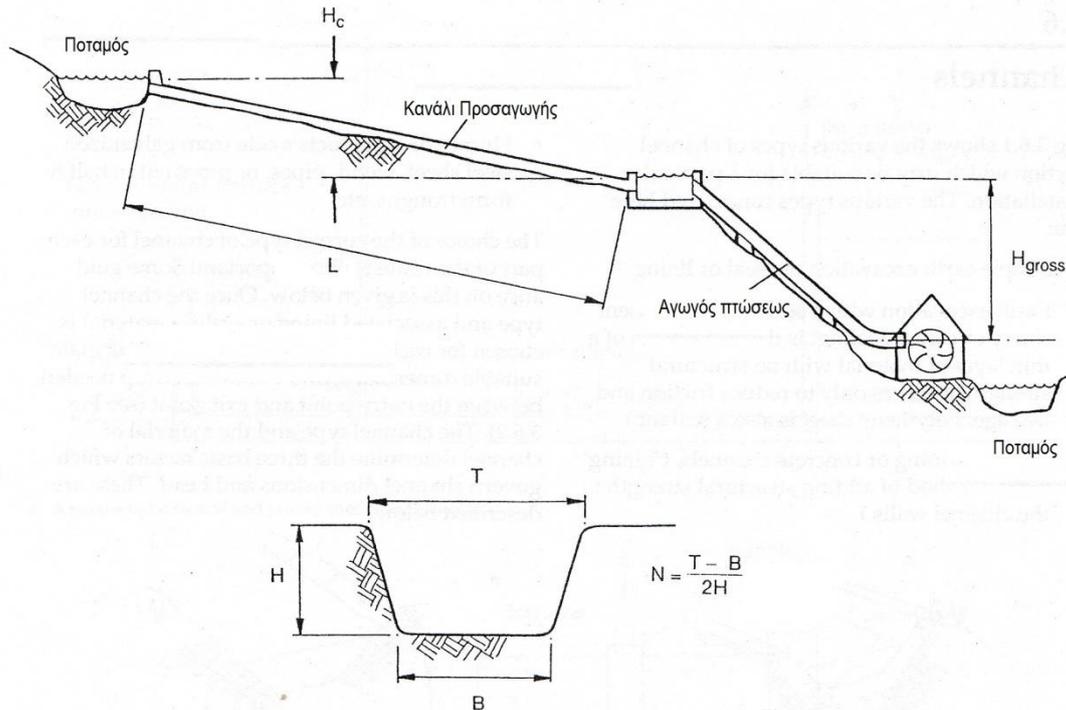
ευθείας του καναλιού, μικρή υψομετρική διαφορά μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του καναλιού κι επομένως εξασφάλιση του μέγιστου δυνατού ύψους υδατόπτωσης για τον αγωγό πτώσεως.

	Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα	
	(βάθος καναλιού) < 0,3m	(βάθος καναλιού) < 1m
Υλικό		
Αμμώδες έδαφος	0,4m/sec	0,5m/sec
Κανάλι με εσωτερικό περίβλημα αργιλώδους πηλού	0,6m/sec	0,7m/sec
Κανάλι ενισχυμένο με λίθους	1,5m/sec	2,0m/sec
Κανάλι ενισχυμένο με τσιμέντο	1,5m/sec	2,0m/sec

Πίνακας 2.1 Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα νερού προς αποφυγή διάβρωσης του καναλιού ^[3]

Η εγκάρσια διατομή του καναλιού, η οποία είναι συνήθως τραπεζοειδής, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την εγκάρσια διατομή του ρεύματος του νερού που αντιστοιχεί στην σχεδιαζόμενη για τον υδροστρόβιλο παροχή. Το επιπλέον ύψος που δίνεται στο κανάλι ως περιθώριο ασφαλείας F αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό 30% του αρχικού και μειώνει τον κίνδυνο καταστροφής των τοιχωμάτων του από κάποια υπερχειλίση. Το πλάτος του καναλιού πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το βάθος του και τα πλευρικά του τοιχώματα πρέπει να έχουν κλίση προς τα έξω, ώστε να αποφεύγεται η διάβρωσή και τελικά η κατάρρευσή τους. Αν όμως επικαλυφθεί το κανάλι με ένα ανθεκτικό υλικό, τότε τα τοιχώματα μπορούν να κατασκευαστούν με μικρότερη κλίση και το βάθος του καναλιού να αυξηθεί. Για παράδειγμα, αν επικαλυφθεί με τσιμέντο μπορεί να κατασκευασθεί σε ορθογωνικό σχήμα.

Όταν το νερό ρέει μέσα στο κανάλι, υπάρχουν απώλειες ενέργειας λόγω της επαφής του με τα τοιχώματα και τον πάτο του καναλιού. Όσο πιο τραχύ είναι το υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η κλίση του καναλιού για μία δεδομένη ταχύτητα. Η τραχύτητα είναι ενδεικτική των υδραυλικών απωλειών οι οποίες αντιστοιχούν σε μείωση του τελικού διαθέσιμου υδραυλικού ύψους. Επομένως, είναι καλό να χρησιμοποιούνται υλικά με όσο το δυνατόν πιο ομαλή και λεία επιφάνεια για την επικάλυψη του καναλιού. ^{[3],[10]}



Σχήμα 2.17 Κανάλι προσαγωγής με τις διαστάσεις του ^[3]

Τα απαραίτητα μεγέθη για την εκκίνηση της διαδικασίας διαστασιολόγησης ενός καναλιού (όπως αυτό του σχήματος 2.17) είναι το μήκος του και το υλικό κατασκευής του, το οποίο το επιλέγει ο μελετητής. Εν συνεχεία, πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη ταχύτητα ροής του νερού, σύμφωνα με τους προαναφερόμενους περιορισμούς και η κλίση των πλευρικών τοιχωμάτων N σε συνάρτηση με το υλικό που χρησιμοποιείται καθώς και να γίνει μία εκτίμηση της τραχύτητας n του υλικού αυτού. Η τιμή της κλίσης μπορεί να επιλεγεί με τη βοήθεια του πίνακα 2.2, ενώ ο συντελεστής τραχύτητας n των διαφόρων υλικών μπορεί να βρεθεί με τον ίδιο τρόπο σε πίνακες από σχετική βιβλιογραφία.

Υλικό	Πλευρική κλίση N
Τραπεζοειδής διατομή	
Αμμώδες έδαφος	2
Κανάλι ενισχυμένο με αργιλώδη πηλό	1
Κανάλι ενισχυμένο με τσιμέντο	0,58
Ορθογωνική διατομή	0

Πίνακας 2.2 Κλίση πλευρικών τοιχωμάτων καναλιού ^[3]

Ακολούθως, επιλέγεται το περιθώριο δυνατής αύξησης της παροχής F χωρίς την ύπαρξη κινδύνου για το κανάλι. Συνήθως θεωρείται $F=1,3$ και τελικά υπολογίζεται η εγκάρσια διατομή A_c του καναλιού από τον τύπο (2.2):

$$A_c = Q \frac{F}{v} \quad (2.2)$$

Υπολογίζεται το ύψος του καναλιού H , το πλάτος του πυθμένα του B και το πλάτος της κορυφής του T μέσω των τύπων (2.3), (2.4) και (2.5):

$$H = \sqrt{\frac{A}{X \cdot N}} \quad (2.3)$$

$$B = H \cdot X \quad (2.4)$$

$$T = B + (2H \cdot N) \quad (2.5)$$

όπου X : δείκτης που εκφράζει την κλίση N ανηγμένη σε ημικύκλιο και δίνεται από τον τύπο (2.6)

$$X = 2\sqrt{(1 + N^2)} - 2N \quad (2.6)$$

Εν συνεχεία, πρέπει να υπολογιστεί η κρίσιμη τιμή ταχύτητας v_c και να διασφαλιστεί ότι η ταχύτητα v που έχει επιλεγεί είναι μικρότερη από τον 90% αυτής, ώστε η ροή του νερού να είναι στρωτή κατά μήκος του καναλιού.

$$v_c = \sqrt{\left(A \cdot \frac{g}{T}\right)} \quad (2.7)$$

Πρέπει να υπολογιστεί η μέση υδραυλική ακτίνα από τον τύπο (2.8):

$$R = \frac{A}{P} \quad (2.8)$$

όπου P : η βρεχόμενη περίμετρος (δίδονται έτοιμοι τύποι υπολογισμού της ανάλογα με το σχήμα του καναλιού σε πίνακες σε σχετική βιβλιογραφία)

Τέλος, υπολογίζεται η κλίση S του καναλιού από την εξίσωση του Manning (2.9):

$$S = \left(n \frac{v}{R^{0.667}}\right)^2 \quad (2.9)$$

Το ύψος H_1 που χάνεται κατά την κατασκευή του καναλιού είναι ίσο με την κατακόρυφη υψομετρική διαφορά μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του και ισχύει ότι:

$$H_1 = L \cdot S \quad (2.10)$$

Αν το κανάλι αποτελείται από τμήματα με διαφορετικό υλικό ή σχήμα, η παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να γίνει για κάθε τμήμα χωριστά και μετά να αθροιστούν τα αποτελέσματα. Αν η συνολική απώλεια υδραυλικού ύψους από την κατασκευή της διώρυγας

προσαγωγής είναι μεγάλη θα πρέπει να γίνουν διορθωτικές κινήσεις (όπως αλλαγή της ταχύτητας ή κάποιων υλικών) με στόχο τη μείωσή της. Η διαστασιολόγηση αυτή είναι μία επαναληπτική διαδικασία με στόχο τη σχεδίαση ενός ασφαλούς, αξιόπιστου, αποδοτικού και χαμηλού σε κόστος καναλιού και πρέπει να γίνεται με προσοχή.^[3]

2.3 Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων και δεξαμενή φόρτισης

Σε ένα micro-υδροηλεκτρικό έργο χρησιμοποιούνται δύο είδη δεξαμενών: η λεκάνη καθίζησης ιζημάτων (silt basin) και η δεξαμενή φόρτισης (forebay tank). Η λεκάνη καθίζησης ιζημάτων προηγείται της δεξαμενής φόρτισης, καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο υδροληψίας αν και δεν χρησιμοποιείται πάντα (σε έργα που δεν υπάρχει κανάλι προσαγωγής, δεν κατασκευάζεται λεκάνη καθίζησης).

Η σχεδίαση των δεξαμενών αυτών ποικίλει και εξαρτάται από την προσβασιμότητα της θέσης εγκατάστασή τους, τη διαθεσιμότητα υλικών για την κατασκευή τους, τον τύπο του εδάφους, την τοπική τεχνική εμπειρία και το οικονομικό κόστος. Ένας φθηνός τρόπος κατασκευής μίας μικρής δεξαμενής φόρτισης είναι με λίθους και αργιλώδη πηλό για στεγάνωση. Αν όμως η υπερχειλίση είναι τακτικό φαινόμενο, ο αργιλώδης πηλός θα διαβρωθεί γρήγορα και η δεξαμενή θα χρειαστεί επισκευή. Για κατασκευή με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και αντοχή στη διάβρωση, προτιμάται η χρήση τσιμέντου και λίθων ή σκυροδέματος.

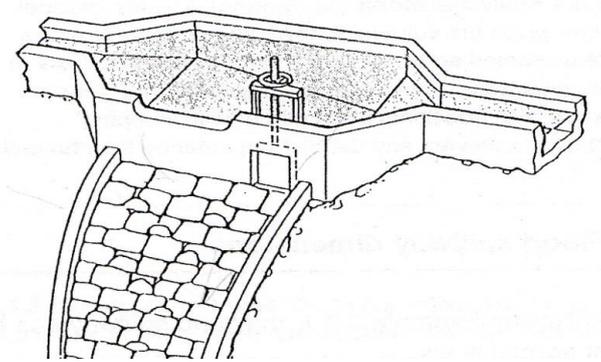
Επίσης, οι δεξαμενές πρέπει να πληρούν τις εξής προδιαγραφές:

- i. Το μήκος και το πλάτος τους πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλα ώστε να επιτρέπουν την επιβράδυνση του νερού και να βοηθούν στην κατακάθιση των ιζημάτων και των φερτών υλών του, χωρίς όμως να καταλήγουν σε μία πολύ ακριβή και ογκώδη κατασκευή.
- ii. Πρέπει να επιτρέπουν τον εύκολο καθαρισμό και απομάκρυνση των ιζημάτων ανά επαρκή χρονικά διαστήματα.
- iii. Το νερό που εξέρχεται από τις δεξαμενές μέσω της πύλης καθαρισμού τους πρέπει να απομακρύνεται με ασφάλεια μακριά από την εγκατάσταση, ώστε να μην προκαλείται διάβρωση του εδάφους στο οποίο στηρίζονται ουσιαστικά οι δεξαμενές, το κανάλι προσαγωγής και ο σωλήνας πτώσεως.
- iv. Δεν πρέπει να προκαλούν στροβιλισμό του νερού ή διαχωρισμό της ροής του, τα οποία οφείλονται στην ύπαρξη αιχμηρών γωνιών και απότομων αλλαγών κλίσης και έχουν ως αποτέλεσμα τη συνέχιση της πορείας των ιζημάτων.
- v. Πρέπει να έχουν επαρκή χωρητικότητα ώστε να επιτρέπουν τη συγκέντρωση της μεταφερόμενης ποσότητας ιζημάτων.

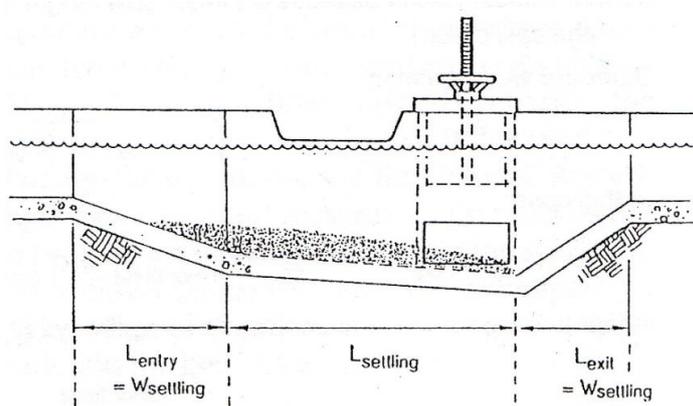
- vi. Πρέπει να είναι προστατευμένες από μεγάλες αυξήσεις της ροής και να διαθέτουν υπερχειλιστές.

2.3.1 Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων

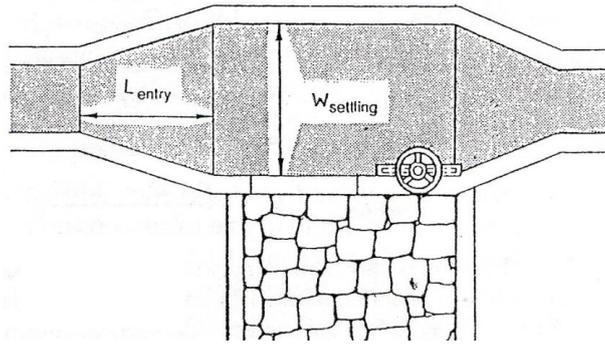
Η λεκάνη καθίζησης ιζημάτων έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.18. Για τη σχεδίασή της, είναι απαραίτητη η γνώση της ροής του νερού και μία εκτίμηση της ποσότητας των μεταφερόμενων ιζημάτων. Η ποσότητα αυτή μεταβάλλεται πολλές φορές κατά τη διάρκεια του έτους και μπορεί κανείς να τη μετρήσει γεμίζοντας δοχεία με νερό, φιλτράροντάς τα και βρίσκοντας τη μάζα ιζήματος που εμπεριέχεται σε δεδομένο όγκο νερού. Ωστόσο, ο τρόπος αυτός δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστος και προτιμάται η αξιοποίηση της εμπειρίας και των εκτιμήσεων των κατοίκων της περιοχής ή προσώπων που έχουν κατασκευάσει ήδη κάποιο άλλο υδροηλεκτρικό σε κοντινή τοποθεσία.



(α)



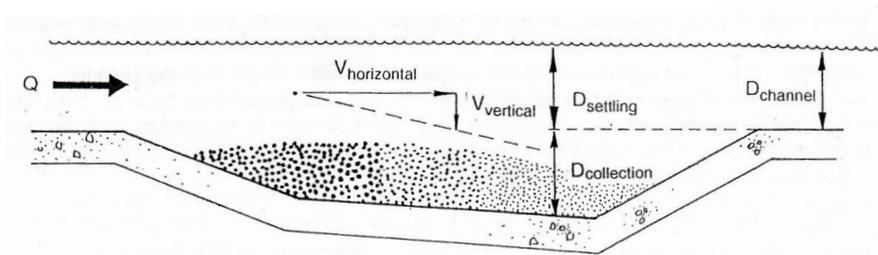
(β)



(γ)

Σχήμα 2.18 (α) Απεικόνιση μιας λεκάνης καθίζησης με βαλβίδα καθαρισμού και υπερχειλιστή, (β) πλάγια όψη και (γ) κάτοψη της λεκάνης καθίζησης^[3]

Η λεκάνη διαχωρίζεται κατά το μήκος της σε τρία κομμάτια: το πρώτο κομμάτι εισόδου με μήκος L_{entry} , το δεύτερο κομμάτι καθίζησης με μήκος $L_{settling}$ και πλάτος $W_{settling}=L_{entry}=L_{exit}$ και το τελευταίο κομμάτι εξόδου L_{exit} . Κατά το βάθος της χωρίζεται σε δύο τμήματα: το τμήμα κατακάθισης με βάθος $D_{settling}$ και το τμήμα συγκέντρωσης με βάθος $D_{collection}$. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.19, η ταχύτητα των σωματιδίων που εισέρχονται στη λεκάνη αποτελείται από δύο συνιστώσες μία κατακόρυφη $v_{vertical}$ και μία οριζόντια $v_{horizontal}$. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των εναποτιθέμενων σωματιδίων στον πυθμένα της λεκάνης, η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας αυξάνεται και παράλληλα το βάθος στο οποίο «πέφτουν» τα σωματίδια γίνεται μικρότερο. Η κατακόρυφη συνιστώσα εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα τους, την πυκνότητα και τον βαθμό στροβιλισμού του νερού. Το μέγεθος των σωματιδίων που πρέπει οπωσδήποτε να κατακάθονται (και κατ' επέκταση η απαιτούμενη ταχύτητα $v_{vertical}$) εξαρτάται από τον χρησιμοποιούμενο υδροστρόβιλο και δίνεται από τον κατασκευαστή του.



Σχήμα 2.19 Απεικόνιση μιας λεκάνης καθίζησης καθώς συγκεντρώνονται ιζήματα στον πυθμένα της^[3]

Για τη σχεδίαση της δεξαμενής αυτής σύμφωνα με το [3], πρέπει αρχικά να επιλεγεί μία κατάλληλη τιμή πλάτους τέτοιο για να είναι εύκολη η κατασκευή της με την προϋπόθεση να είναι πέντε έως δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο από το πλάτος του καναλιού. Το βάθος $D_{settling}$

μπορεί να επιλεγεί ίσο με το βάθος του ρεύματος του νερού που ρέει στο κανάλι. Το μήκος του μεσαίου τμήματος της δεξαμενής προκύπτει από τον τύπο (2.11) :

$$L_{\text{settling}} = \frac{Q}{W_{\text{settling}} \cdot v_{\text{vertical}}} \quad (2.11)$$

Αν το μήκος που προκύπτει κρίνεται ακατάλληλο λόγω δυσκολίας κατασκευής, μπορεί να γίνει αναπροσαρμογή του πλάτους W_{settling} και μετά να υπολογιστεί το νέο μήκος. Για τον προσδιορισμό του βάθους $D_{\text{collection}}$ πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το φορτίο των ιζημάτων (Silt load) σε kg μέσω του τύπου (2.12):

$$\text{Silt load} = Q \cdot T \cdot S \quad (2.12)$$

όπου Q : η αρχική ροή του νερού χωρίς να συμπεριληφθούν οι πιθανές απώλειες διαρροής στο κανάλι

T : η μέση συχνότητα καθαρισμού της λεκάνης κατά τη διάρκεια του έτους σε ώρες

και S : το μεταφερόμενο φορτίο ιζημάτων που έχει εκτιμηθεί σε kg/m^3

Επίσης, με γνωστή την πυκνότητα της άμμου και των ιζημάτων ρ_s , υπολογίζεται ο συνολικός τους όγκος V_s και η απαιτούμενη χωρητικότητα C συγκέντρωσης ιζημάτων της λεκάνης:

$$V_s = \frac{1}{\rho_s \cdot S} \quad [\text{m}^3] \quad (2.13)$$

$$C = V_s \cdot (\text{silt load}) \quad [\text{m}^3] \quad (2.14)$$

Τελικά, το βάθος $D_{\text{collection}}$ προκύπτει από τον τύπο (2.15):

$$D_{\text{collection}} = \frac{C}{W_{\text{settling}} \cdot L_{\text{settling}}} \quad (2.15)$$

Πρακτική αύξηση του βάθους της λεκάνης μπορεί να επιτευχθεί με τακτικό άδειασμα και καθαρισμό αυτής. ^[3]

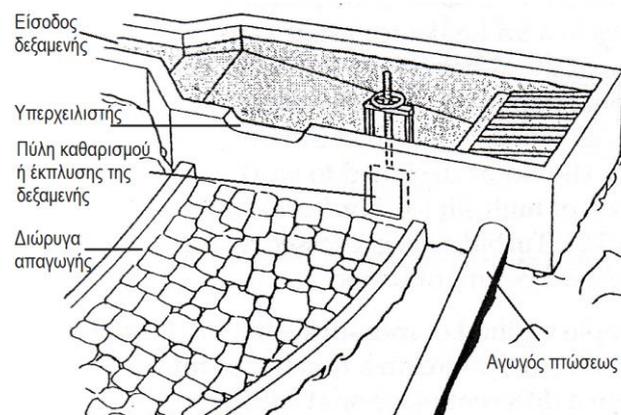


Σχήμα 2.20 Λεκάνη καθίζησης ιζημάτων

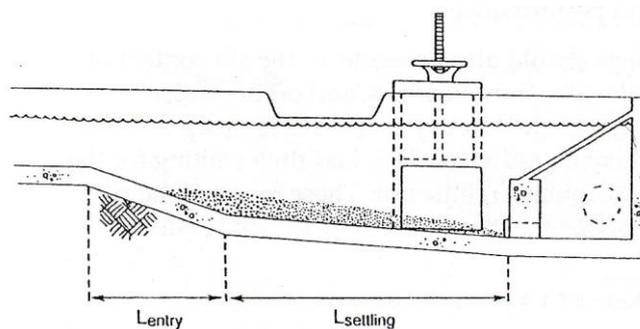
[http://www.desitechno.com/bodamanjari_micro-hydro_report.html]]

2.3.2 Δεξαμενή φόρτισης

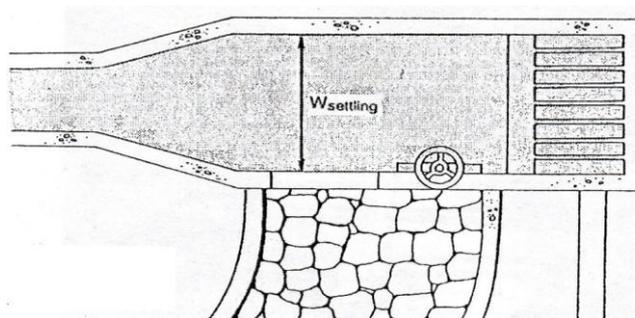
Η δεξαμενή φόρτισης παρέχει επαρκές βάθος νερού ώστε το στόμιο εισόδου του σωλήνα πτώσεως να είναι ανά πάσα στιγμή πλήρως καλυμμένο από νερό. Η σχεδίασή της ακολουθεί την ίδια διαδικασία με τη λεκάνη καθίζησης ιζημάτων με τη διαφορά ότι το τμήμα εξόδου της τελευταίας έχει αντικατασταθεί από μία σχάρα και την είσοδο στον σωλήνα. Η μορφή μίας δεξαμενής φόρτισης σε διαφορετικές όψεις φαίνεται στο σχήμα 2.21. Στην περίπτωση που ο σωλήνας προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο ξεκινάει από το σημείο υδροληψίας, τότε προφανώς η δεξαμενή αυτή παραλείπεται.



(α)



(β)

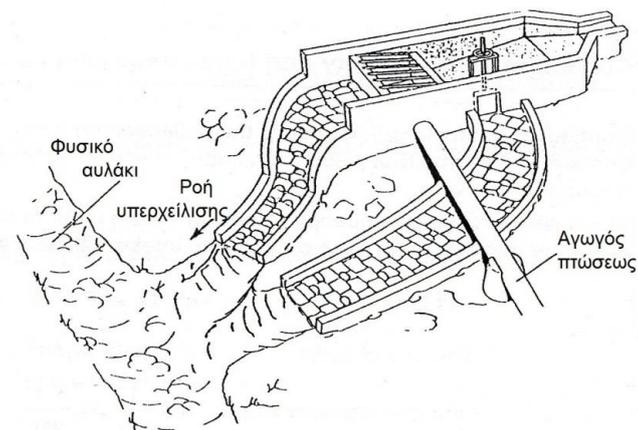


(γ)

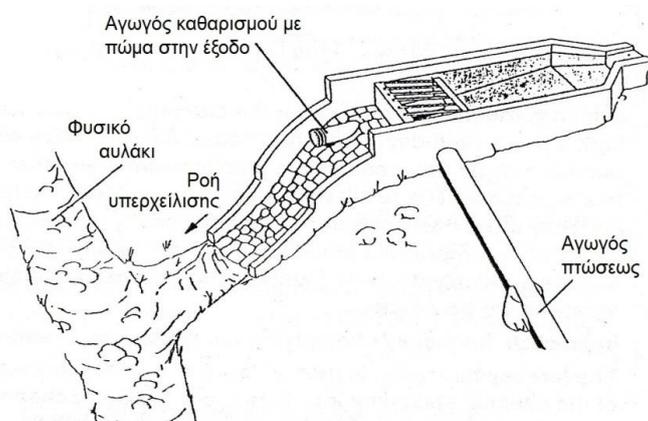
Σχήμα 2.21 (α) Απεικόνιση μιας δεξαμενής φόρτισης με βαλβίδα καθαρισμού και υπερχειλιστή, (β) πλάγια όψη και (γ) κάτοψη της λεκάνης καθίζησης^[3]

Το ιδιαίτερο στοιχείο που πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του όταν σχεδιάζει τη δεξαμενή φόρτισης είναι καταρχήν ότι η επιφάνεια του νερού που συγκεντρώνεται στη δεξαμενή θα πρέπει να απέχει από το πάνω μέρος του στομίου εισόδου του σωλήνα απόσταση ίση με τέσσερις φορές τη διάμετρό του. Αν η απόσταση είναι μικρότερη, μπορεί να δημιουργηθεί δίνη στην επιφάνεια του νερού και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την είσοδο αέρα στον σωλήνα · γεγονός που είναι ανεπιθύμητο, καθώς διαταράσσει τη ροή. Επίσης, το κάτω μέρος του στομίου εισόδου του σωλήνα θα πρέπει να απέχει από τον πυθμένα της δεξαμενής απόσταση ίση με τη διάμετρό του. Ακόμα, ο διαχωριστικός τοίχος του τμήματος εισόδου στον σωλήνα πρέπει να είναι περίπου 20cm υψηλότερος από το βάθος $D_{collection}$ και η σχάρα που προφυλάσσει την είσοδό του πρέπει να καθαρίζεται τακτικά και να έχει μπάρες με ενδιάμεση απόσταση μικρότερη από το ένα τέταρτο της διαμέτρου των ακροφυσίων. Αυτό γίνεται προς αποφυγή μπλοκαρίσματος των ακροφυσίων από σωματίδια που μπορεί να διαπεράσουν τη σχάρα. Ένα άλλο απαραίτητο κομμάτι του εξοπλισμού της δεξαμενής είναι ένας μικρός αεραγωγός στο σημείο που συνδέεται ο σωλήνας στη δεξαμενή. Ο αεραγωγός αυτός μπορεί να μειώσει τη σφοδρότητα ενός υδραυλικού πλήγματος στην περίπτωση μπλοκαρίσματος του σωλήνα ή των ακροφυσίων, ή απότομου χειρισμού κάποιας βαλβίδας. Επίσης, μπορεί να βοηθήσει στην απομάκρυνση του αέρα από το εσωτερικό του σωλήνα κατά τη διαδικασία εκκίνησης του υδροηλεκτρικού.

Απαραίτητη είναι και η ύπαρξη κάποιου μηχανισμού για γρήγορο και αποτελεσματικό καθαρισμό της δεξαμενής από τα συγκεντρωμένα στον πυθμένα ιζήματα, ώστε να μην αυξηθεί τόσο το στρώμα τους και φράξουν την είσοδο του σωλήνα. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η τοποθέτηση μίας βαλβίδας/πύλης καθαρισμού ή έκπλυσης, η οποία όταν ανοίγει θα επιτρέπει την έξοδο των συμπαρασυρόμενων από το νερό ιζημάτων και την ασφαλή απομάκρυνσή τους από την εγκατάσταση μέσω μίας διώρυγας απαγωγής, όπως στο σχήμα 2.22.α. Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση σωλήνα καθαρισμού, του οποίου το στόμιο εξόδου θα είναι σφραγισμένο κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας, ενώ θα ανοίγει όταν χρειάζεται να γίνει καθαρισμός, όπως στο σχήμα 2.22.β.



(α)



(β)

Σχήμα 2.22 Απεικόνιση μιας δεξαμενής φόρτισης με υπερχείλιση και (α) βαλβίδα καθαρισμού, (β) σωλήνα καθαρισμού ^[3]

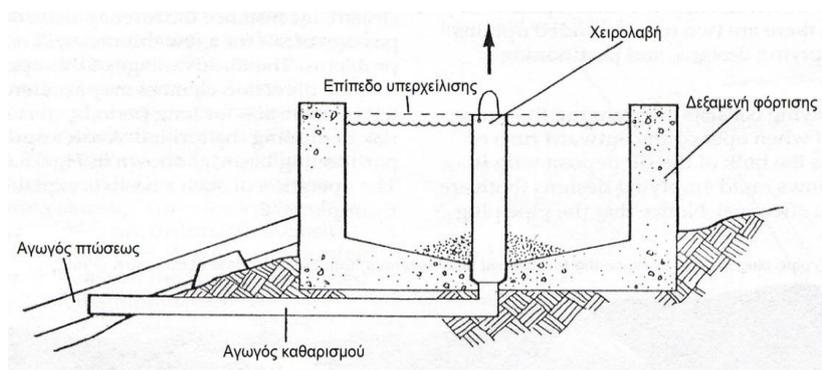
Τέλος, πολύ σημαντικό στοιχείο κάθε δεξαμενής είναι η προστασία της από την υπερχείλιση λόγω απότομης μεγάλης αύξησης της στάθμης του νερού. Κάθε δεξαμενή πρέπει να διαθέτει υπερχείλιση, ο οποίος έχει συνήθως τη μορφή μίας εγκοπής στον χαμηλότερο τοίχο, η οποία συνδέεται με ένα κανάλι απαγωγής του νερού και επιστροφής του ελεγχόμενα σε κάποιο ρυάκι ή ρέμα μακριά από την εγκατάσταση. Περισσότερα στοιχεία για την κατασκευή υπερχείλιστών μπορεί κανείς να βρει στην αναφορά [3]. Μία πέτρινη δεξαμενή φόρτισης με υπερχείλιση φαίνεται στο σχήμα 2.23, ενώ στο σχήμα 2.25 απεικονίζεται ένα άλλο σύστημα καθαρισμού της δεξαμενής και προστασίας της από υπερχείλιση. ^{[3],[10]}



Σχήμα 2.23 Δεξαμενή φόρτισης από λίθους και τσιμέντο με μικρό θυρόφραγμα για έλεγχο της ροής του νερού σε αυτή και εγκοπή σε έναν τοίχο της από την οποία θα απομακρυνθεί το νερό σε περίπτωση υπερχειλίσης ^[10]



Σχήμα 2.24 Δεξαμενή φόρτισης. Ο σωλήνας που φαίνεται ψηλά στην αριστερή φωτογραφία είναι για την απομάκρυνση του νερού σε περίπτωση που ανέβει πολύ η στάθμη του [\[http://www.asme.org/kb/newsletters/me-today/me-today---march-2012/asme-marua-student-project-pico-hydro-electric\]](http://www.asme.org/kb/newsletters/me-today/me-today---march-2012/asme-marua-student-project-pico-hydro-electric)



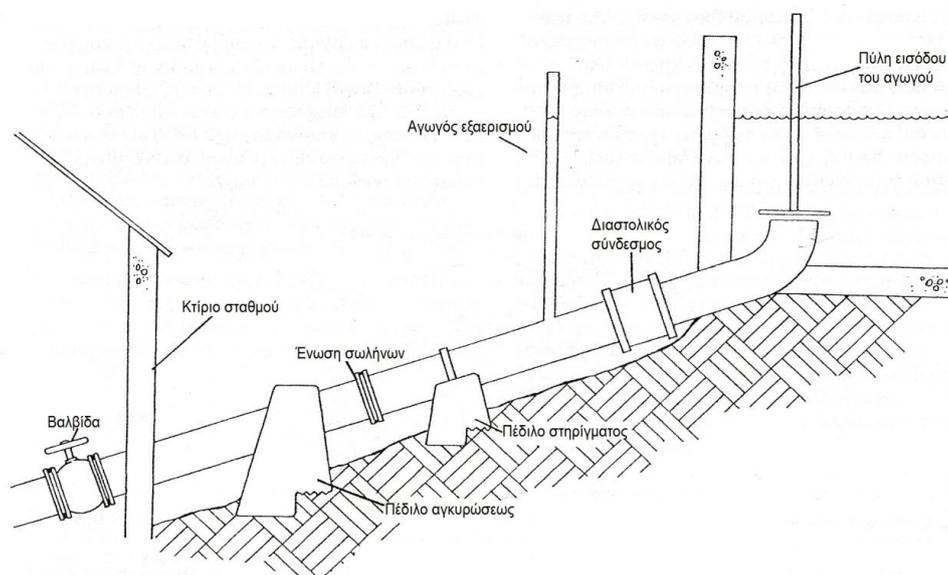
Σχήμα 2.25 Δεξαμενή φόρτισης που χρησιμοποιεί το ίδιο σύστημα για καθαρισμό της δεξαμενής και προστασία της από υπερχειλίση. Για να γίνει η έκπλυση των ιζημάτων από τον πυθμένα της, αφαιρείται ο κατακόρυφος αγωγός με τη βοήθεια της χειρολαβής ^[3]

2.4 Αγωγός πτώσεως

2.4.1 Γενικά στοιχεία

Ο αγωγός πτώσεως ή αγωγός νερού ή σωλήνας καταθλίψεως (penstock) είναι ο σωλήνας που μεταφέρει το νερό υπό πίεση στον υδροστρόβιλο. Μπορεί να ξεκινάει κατευθείαν από το σημείο υδροληψίας, αν και συνήθως ξεκινάει από τη δεξαμενή φόρτισης, αφού έτσι έχει μικρότερο μήκος και χαμηλότερο κόστος.^[10] Ο αγωγός πτώσεως αποτελεί μία σημαντική συνιστώσα του συνολικού κόστους κατασκευής του micro-υδροηλεκτρικού έργου και για τον λόγο αυτό η σχεδιάσή και η εγκατάστασή του πρέπει να γίνονται με εξαιρετική προσοχή, ώστε να διασφαλίζεται μεγάλος χρόνος ζωής και ασφαλής και αποδοτική λειτουργία.^[3]

Η τυπική μορφή ενός επιφανειακού σωλήνα καταθλίψεως με τα βασικότερα συστατικά του στοιχεία φαίνεται στο σχήμα 2.26. Στην αρχή του αγωγού τοποθετείται φίλτρο, ώστε να εξασφαλιστεί ικανοποιητική καθαρότητα του νερού και επίσης τοποθετείται μία βαλβίδα εξαέρωσης. Κατά μήκος του αγωγού υπάρχει εξοπλισμός στήριξής του, ενώ στο σημείο που καταλήγει ο αγωγός στον υδροστρόβιλο τοποθετείται μία βαλβίδα που χρησιμεύει στο να ανοίγει ή να κλείνει η παροχή και μετά από αυτήν βρίσκεται το ακροφύσιο που συγκεντρώνει το νερό σε μία υψηλής πίεσης δέσμη.^[4]



Σχήμα 2.26 Τα βασικά στοιχεία ενός αγωγού πτώσεως^[3]

Η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου αγωγού συνίσταται στην επιλογή υλικού, διαμέτρου και πάχους τοιχωμάτων του σωλήνα, καθώς και της καλύτερης όδευσης του αγωγού. Αρχικά, επιλέγεται η όδυσή του, η οποία εξαρτάται από τις θέσεις της δεξαμενής φόρτισης και του σταθμού παραγωγής, την υφιστάμενη τοπογραφία και τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής.

Το υλικό και οι διαστάσεις του αγωγού επιλέγονται με τεχνοοικονομικά κριτήρια, επιδιώκεται δηλαδή η βέλτιστη οικονομικά λύση που πληρεί συγκεκριμένα τεχνικά κριτήρια σχεδιασμού.^[1] Προηγείται η επιλογή του υλικού και ακολουθεί η επιλογή της διαμέτρου του σωλήνα, με βάση τις προκύπτουσες υδραυλικές απώλειες, και του πάχους των τοιχωμάτων του, με βάση την υδραυλική πίεση κανονικής και μεταβατικής λειτουργίας. Τέλος, υπολογίζεται το συνολικό κόστος χωρίς να αγνοείται ο εξοπλισμός και τα διάφορα εξαρτήματα που απαιτούνται για την κατασκευή, την εγκατάσταση και τη σύνδεση των διαφόρων κομματιών σωλήνα.^[3]

Κατά τη διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου υλικού για τον σωλήνα, τα βασικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι η υδραυλική πίεση που θα πρέπει να αντέχει ο σωλήνας, η τραχύτητά του υλικού (καθώς σχετίζεται με τις υδραυλικές απώλειες λόγω τριβής στα τοιχώματα), η διαθεσιμότητα και το κόστος του, η διάρκεια ζωής του, ο βαθμός διάβρωσής του, οι πιθανές απαιτήσεις συντήρησής του, η μέθοδος συγκόλλησης των τμημάτων του σωλήνα, το βάρος και η ευκολία χειρισμού και μεταφοράς του, η προσβασιμότητα του σημείου τοποθέτησης του σωλήνα, η μορφολογία και ο τύπος του εδάφους στο σημείο και τέλος, οι καιρικές συνθήκες. Τα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι ο χάλυβας, συνθετικά υλικά όπως το PVC, το πολυαιθυλένιο (PE) και το ενισχυμένο με υαλονήματα πλαστικό (GRP), ο ελατός χυτοσίδηρος, το ξύλο και το σκυρόδεμα (για σήραγγες). Αυτά, όμως, που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε αυτής της κλίμακας τα υδροηλεκτρικά έργα είναι ο χάλυβας, το PVC και το πολυαιθυλένιο. Ο πίνακας 2.3 παρουσιάζει συγκριτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά των τυπικών υλικών για έναν αγωγό πτώσεως.

• = Κακό ••••• = Πολύ καλό

Υλικό	Απώλειες τριβής	Βάρος	Διάβρωση	Κόστος	Ένωση κομματιών	Πίεση
Ελατός χυτοσίδηρος	••••	•	••••	••	•••••	••••
Ξύλο	•••	•••	••••	••	••••	•••
Σκυρόδεμα	•	•	•••••	•••	•••	•
Χάλυβας	•••	•••	•••	••••	••••	•••••
GRP	•••••	•••••	•••	•••	••••	•••••
PVC	•••••	•••••	••••	••••	••••	••••
HDPE	•••••	•••••	•••••	•••	••	••••
MDPE	•••••	•••••	•••••	•••	••	•••••

Πίνακας 2.3 Σύγκριση των βασικότερων χαρακτηριστικών των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του αγωγού πτώσεως^[3]

Οι χαλύβδινοι σωλήνες χρησιμοποιούνται κυρίως για τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά της μελετώμενης κατηγορίας με μεγαλύτερα ύψη υδατόπτωσης και μεγάλες διαμέτρους σωλήνα. Είναι αρκετά φθηνοί και μπορούν να κατασκευαστούν τοπικά, λόγω του απλού εξοπλισμού που χρειάζεται για την κατασκευή και συγκόλλησή τους. Έχουν μεγάλο βάρος, που τους καθιστά δύσχρηστους, αλλά μπορούν να κοπούν σε μικρότερα κομμάτια και να μεταφερθούν ευκολότερα. Ωστόσο, υφίστανται αρκετή διάβρωση που αυξάνει και την τραχύτητά τους, η οποία στην αρχή της χρήσης τους είναι σχετικά μικρή. Είναι ανθεκτικοί και με κατάλληλη προστασία, όπως βάνιμο ή κάλυψη της επιφάνειάς τους ο χρόνος ζωής τους μπορεί να ανέλθει στα είκοσι χρόνια.

Οι σωλήνες από PVC έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και διατίθενται σε μία πλειάδα διαφορετικών διαμέτρων. Έχουν πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής και είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, ιδιαίτερα ελαφροί, εύκολοι στη μεταφορά και την εγκατάσταση. Ωστόσο, είναι αρκετά εύθραυστοι (ειδικά στις χαμηλές θερμοκρασίες), και καταστρέφονται από την υπεριώδη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να πρέπει να θάβονται (τουλάχιστον ένα μέτρο κάτω από το έδαφος). Τέλος, η αντοχή τους στις μεγάλες πιέσεις αμφισβητείται με συνέπεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε υδροηλεκτρικά έργα με μικρές παροχές.

Οι σωλήνες από πολυαιθυλένιο (Medium Density PE ή High Density PE) χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στα micro-υδροηλεκτρικά συστήματα. Είναι λίγο πιο ακριβοί από τους σωλήνες από PVC, αλλά είναι πολύ πιο ανθεκτικοί από αυτούς. Έχουν μικρό βάρος που διευκολύνει τη μεταφορά τους, μικρό συντελεστή τριβής και παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε φαινόμενα διάβρωσης. Το αρνητικό τους είναι η δύσκολη μέθοδος συγκόλλησης των κομματιών του σωλήνα, που απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, αρκετή ώρα και προσοχή. Οι σωλήνες από HDPE 3^{ης} γενιάς κατασκευάζονται τυποποιημένοι για ονομαστική πίεση, 6, 10, 12,5, 16, 20, 25 και 32bar και σε διαμέτρους από 25 έως 630mm. Οι σωλήνες ονομαστικής διαμέτρου μέχρι και 125mm διατίθενται συνήθως σε κουλούρα των 100m, ενώ οι μεγαλύτερες διαμέτροι σε ευθύγραμμα τμήματα μήκους μέχρι 12m.^{[1],[3],[8],[10]}

Η διάμετρος επιλέγεται ως αποτέλεσμα μιας αντιστάθμισης μεταξύ του κόστους του αγωγού και των απωλειών ισχύος. Οι απώλειες ισχύος προκύπτουν από τις υδραυλικές απώλειες λόγω τριβής στα τοιχώματα του σωλήνα, οι οποίες εκφράζονται σε μέτρα και αντιστοιχούν σε απώλειες του ύψους υδατόπτωσης. Οι απώλειες λόγω τριβής εξαρτώνται από την τραχύτητα του υλικού, η οποία εκφράζεται μέσω του συντελεστή τραχύτητας k , και από την ταχύτητα με την οποία ρέει το νερό μέσα στον αγωγό. Ο συντελεστής k μετράται σε mm και περιγράφει τη διάμετρο των κόκκων της άμμου, που αν κολληθούν στην εσωτερική επιφάνεια ενός λείου σωλήνα ίδιων διαστάσεων θα παράγουν τις ίδιες απώλειες τριβής με τον μελετώμενο σωλήνα. Είναι σημαντική η σωστή εκτίμηση του συντελεστή αυτού, αφού

συνήθως δίνεται η τιμή του για έναν καινούριο σωλήνα, ενώ πρέπει να θεωρείται η τιμή του μετά από 5 με 10 χρόνια χρήσης. Η ταχύτητα με την οποία ρέει το νερό στον αγωγό εξαρτάται από την τιμή της ροής Q και την εσωτερική διάμετρο του αγωγού d , σύμφωνα με τον τύπο (2.16):

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (2.16)$$

Η ταχύτητα του νερού και επομένως οι απώλειες τριβής αυξάνονται με την αύξηση της διατομής του ακροφυσίου, λόγω επακόλουθης αύξησης της παροχής, και με τη μείωση της διαμέτρου του σωλήνα. Επίσης, οι απώλειες τριβής αυξάνονται αναλογικά με το μήκος του αγωγού. Αν είναι πολύ μεγάλες, τότε το καθαρό υδραυλικό ύψος H_{net} και κατ' επέκταση η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου μειώνονται σημαντικά. Η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου είναι ίση με σχεδόν το μισό της ταχύτητας της δέσμης v_{jet} , η οποία εξαρτάται άμεσα από το ύψος υδατόπτωσης και δίνεται από τον τύπο (2.17):

$$v_{jet} = c_v \sqrt{2gH_{net}} \quad (2.17)$$

όπου c_v : συντελεστής ταχύτητας (coefficient of velocity) του ακροφυσίου, μικρότερος της μονάδας

Στην περίπτωση που οι απώλειες τριβής είναι υψηλές, η εποχιακή μεταβολή της ροής θα επιφέρει ανεπιθύμητη αλλαγή στην ταχύτητα του υδροστροβίλου με αποτέλεσμα να μη λειτουργούν αποδοτικά ούτε αυτός, ούτε η γεννήτρια που κινεί. Ωστόσο, καθώς ο αγωγός πτώσεως είναι το μοναδικό στοιχείο του υδροηλεκτρικού συστήματος που λειτουργεί καλύτερα σε συνθήκες μερικής ροής και επειδή είναι σημαντικότερη η σωστή αξιοποίηση της χαμηλής ροής κατά τους θερινούς μήνες, συνιστάται η σχεδίαση και επιλογή του υδροστροβίλου ώστε να μπορεί να λειτουργεί πιο αποδοτικά με την ταχύτητα που προκύπτει σε συνθήκες χαμηλής ροής. Συνήθως, προτείνεται η διατήρηση των συνολικών υδραυλικών απωλειών σε ένα ποσοστό 5-15% του διαθέσιμου ύψους υδατόπτωσης, αλλά αυτός δεν είναι ένας κανόνας που ακολουθείται σε κάθε περίπτωση καθώς μπορεί το διαθέσιμο ύψος να είναι παραπάνω από αρκετό ή η διατήρηση σταθερής ταχύτητας να μη θεωρείται απαραίτητη και να γίνονται αποδεκτές μεγαλύτερες απώλειες ή αντίθετα, το διαθέσιμο ύψος να είναι μικρό και να πρέπει να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του με αποτέλεσμα απώλειες ίσες ακόμα και με το 5% του να κρίνονται μεγάλες. Παράλληλα, πρέπει να έχει κανείς υπόψη του ότι με την αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα, αυξάνεται σημαντικά και το κόστος αγοράς του. ^{[3],[9],[10]}

Το πάχος του τοιχώματος του αγωγού εξαρτάται από το όριο θραύσης και λυγισμού του υλικού, τη διάμετρο του σωλήνα και τις πιέσεις λειτουργίας. Όταν αυξάνεται η πίεση,

αυξάνεται και το απαιτούμενο πάχος τοιχώματος και συνεπώς το κόστος του αγωγού. Επειδή η πίεση λειτουργίας εξαρτάται από το ύψος υδατόπτωσης, συνεπάγεται ότι στο αρχικό κομμάτι του αγωγού πτώσεως η αναπτυσσόμενη πίεση είναι μικρότερη από αυτή στο κάτω μέρος του. Για τον λόγο αυτό, μπορεί να γίνει συνδυασμός σωλήνων με διαφορετικά πάχη (μικρότερο υψηλότερα και μεγαλύτερο στο τέλος), ώστε να μειωθεί το κόστος. Κατά την εκτίμηση του απαραίτητου πάχους πρέπει να συνυπολογίζονται οι μεταβατικές πιέσεις κυματισμού. Σε συνθήκες απότομης εκκίνησης ή παύσης της λειτουργίας (απόρριψη φορτίου, μπλοκάρισμα των ακροφυσίων) μπορεί να αναπτυχθούν στον αγωγό υποπίεσεις ή υπερπίεσεις πολλαπλάσιες της στατικής, λόγω μεταβατικών δυναμικών φαινομένων που συνοψίζονται στον όρο υδραυλικό πλήγμα (surge, water hammer effect). Η ένταση του πλήγματος, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι καταστρεπτικό, εξαρτάται από τον τύπο του υδροστροβίλου, το μήκος, τη διάμετρο και το υλικό του αγωγού και τις συνθήκες εκκίνησης και παύσης. Για να μειωθεί η πιθανότητα εκδήλωσης και η ένταση του υδραυλικού πλήγματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότερα ακροφύσια, αν αυτό είναι δυνατό, με βαλβίδα σε κάθε ένα από αυτά. Με αυτόν τον τρόπο αν μπλοκαριστεί ένα από αυτά ενώ τα υπόλοιπα λειτουργούν, το μεταβατικό φαινόμενο θα είναι μετριασμένο καθώς θα εκτονώνεται μέσω της εξόδου του νερού από τα υπόλοιπα ακροφύσια. Βέβαια, η χειρότερη περίπτωση υδραυλικού πλήγματος που μπορεί να παρουσιαστεί είναι όταν λειτουργεί μόνο το ένα από τα πολλά ακροφύσια και αυτό μπλοκαριστεί, γιατί τότε οι απώλειες τριβής στον σωλήνα θα είναι μικρότερες (λόγω μικρής ροής) και το μεταβατικό κύμα πίεσης δεν θα εξασθενεί. Ένας άλλος τρόπος να μειωθεί η ένταση του υδραυλικού πλήγματος είναι η χρήση βαλβίδων που έχουν μεγάλο χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος. Οι συνήθεις κατασκευές περιορισμού του πλήγματος είναι οι βαλβίδες ανακούφισης και σε λίγο μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα ο πύργος αναπάλσεως. Η απότομη μεταβολή της πίεσης P_{surge} κατά το μεταβατικό φαινόμενο αντιστοιχεί σε ένα μανομετρικό ύψος H_{surge} , με αποτέλεσμα το συνολικό υδραυλικό ύψος που πρέπει να υποστηρίξει ο αγωγός να είναι ίσο με $H_{total}=H_{gross}+H_{surge}$, όπου H_{gross} είναι ίσο με την κάθετη υψομετρική διαφορά της δεξαμενής φόρτισης με τον υδροστροβίλο. (Πιο αναλυτική περιγραφή του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος στον αγωγό πτώσεως μπορεί κανείς να βρει [12]). Για να είναι πιο σίγουρη η ασφαλής λειτουργία του αγωγού πτώσεως και η αντοχή του σε τέτοια μεταβατικά φαινόμενα, συνιστάται η διεξαγωγή μίας δοκιμής ελέγχου της αντοχής του αμέσως μετά την εγκατάστασή του με χρήση χειραντλίας και ενός μετρητή που θα αναπαράγουν τις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας. Αν κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρατηρηθεί διαρροή σε οποιοδήποτε σημείο του σωλήνα, τότε ο αγωγός δεν είναι ασφαλής. ^{[1],[3],[9],[12]}

Ο αγωγός νερού είναι καλό να τοποθετείται σε σταθερές πλαγιές που δεν κινδυνεύουν από διάβρωση και σε σημεία με εύκολη προσβασιμότητα για να μπορούν να γίνουν εργασίες

επισκευής ή συντήρησης του. Η εγκατάσταση του αγωγού πτώσεως μπορεί να είναι υπόγεια ή επιφανειακή, ανάλογα με παράγοντες όπως είναι η φύση του εδάφους, το υλικό του αγωγού, οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Η υπόγεια εγκατάσταση του αγωγού είναι πιο συνηθισμένη, καθώς τότε ο σωλήνας τοποθετείται σε σκάμμα και επανεπιχώνεται, και η άμμος και τα χαλίκια που τον περιβάλλουν, παρέχουν καλή μόνωση ενώ παράλληλα εξαλείφουν την ανάγκη για αγκυρώσεις και αρμούς διαστολής. Οι θαμμένοι αγωγοί πτώσεως πρέπει να βάζονται και να καλύπτονται με προσοχή για να προστατευθεί η εξωτερική τους επιφάνεια από τη διάβρωση, αλλά εφόσον δεν φθαρεί η προστατευτική επίστρωση κατά την εγκατάσταση, θα είναι ελάχιστη η περαιτέρω συντήρησή τους.



(α)



(β)

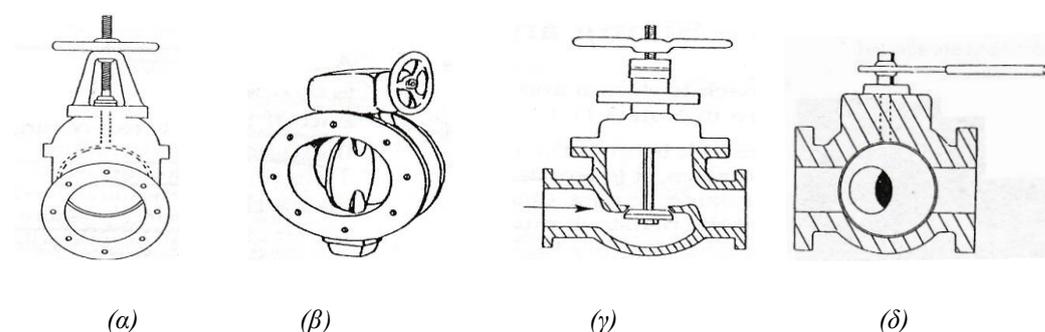
Σχήμα 2.27 Υπόγειοι αγωγοί πτώσεως (α) [<http://ludens.cl/paradise/turbine/turbine.html>], (β) [<http://watersystemsz.com/68-hydro-intake-system-water.html>]



Σχήμα 2.28 Επιφανειακός αγωγός πτώσεως (στην εικόνα φαίνεται και ο αγωγός εξαερισμού στην αρχή του σωλήνα) [http://www.ashden.org/international_2012]

Απαραίτητα εξαρτήματα σε έναν αγωγό προσαγωγής είναι τα όργανα διακοπής της ροής, η εξαερωτική βαλβίδα (ή βάνα ανακούφισης), οι στεγανωτικοί δακτύλιοι για τα σημεία ένωσης

δύο διαφορετικών κομματιών σωλήνα, οι διαστολικοί σύνδεσμοι καθώς και τα στηρίγματα και οι αρμοί αγκύρωσης στα σημεία που ο σωλήνας δεν είναι υπόγειος. Ως όργανα διακοπής της ροής εννοούνται τα θυροφράγματα στην περίπτωση διώρυγας με ελεύθερη επιφάνεια ή δεξαμενής, όπως στο σχήμα 2.23, και οι βάνες ή βαλβίδες στην περίπτωση κλειστών αγωγών. Συνήθως τοποθετείται μία βαλβίδα κοντά στον υδροστρόβιλο πριν το ακροφύσιο, αλλά μπορεί κανείς να τοποθετήσει βαλβίδα και στην είσοδο του αγωγού πτώσεως. Το κόστος μίας βαλβίδας αυξάνεται με το μέγεθός της και αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που προτιμάται η ύπαρξη περισσότερων ακροφυσίων, γιατί τότε χρησιμοποιούνται λίγες μικρές βαλβίδες αντί για μία μεγάλη μειώνοντας το κόστος. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη βαλβίδων, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 2.29, αλλά προτιμώνται βαλβίδες με μεγάλο χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος, όπως η συρταρωτή βαλβίδα (gate valve) που κλείνει με στρόφιγγα.



Σχήμα 2.29 (α) Συρταρωτή βαλβίδα (gate valve), (β) βαλβίδα πεταλούδα (butterfly valve), (γ) δισκοβαλβίδα (globe valve), (δ) σφαιρική βαλβίδα (ball valve) ^[31]

Τα στηρίγματα είναι συνήθως κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και έχουν σκοπό να παραλάβουν τα φορτία που αναπτύσσονται στον σωλήνα από το βάρος του ίδιου και του περιεχομένου υγρού, την εσωτερική πίεση κ.λ.π. Υπάρχουν τα απλά στηρίγματα, που επιτρέπουν στον αγωγό να αλλάξει κλίση και περιορίζουν τις κάθετες στον άξονά του μετατοπίσεις, και οι αγκυρώσεις, οι οποίες εκτός των δυνάμεων παραλαμβάνουν και ροπές μην επιτρέποντας καμία περιστροφή ή μετακίνηση του αγωγού. Ακόμα, αν ο στρόβιλος δεν λειτουργεί αδιάκοπα, και επομένως στον σωλήνα δεν υπάρχει συνεχής ροή νερού, παρουσιάζονται πάνω στον αγωγό σημαντικές μεταβολές της θερμοκρασίας, οι οποίες προκαλούν θερμικές διαστολές και συστολές. Η μετατόπιση μπορεί να διευθετηθεί με χρήση διαστολικών συνδέσμων ή σχεδιάζοντας τη διάταξη του σωλήνα με ελεύθερα κινούμενες καμπύλες. ^{[11],[31],[8],[9]}



Σχήμα 2.30 Αγωγός πτώσεως με αρμούς αγκύρωσης [<http://news.mindanao.com/2008/11/tapping-renewable-energy-micro-hydro-power-sparks-hope-in-the-war-zone-village-in-southern-philippines/>]

Για την εγκατάσταση ενός αγωγού σε κάποια τοποθεσία ακολουθούνται συγκεκριμένα στάδια. Αρχικά, αφού καθαριστεί η περιοχή κατά μήκος της πορείας που σχεδιάζεται να ακολουθήσει ο αγωγός, απλώνεται ο σωλήνας κατά μήκος αυτής χωρίς να θαφτεί για να ελεγχθεί αν έχει παραδοθεί επαρκής ποσότητα υλικού και το σωστό μήκος. Εν συνεχεία, σκάβεται το αυλάκι στο σημείο που θα τοποθετηθεί ή θα θαφτεί ο αγωγός, με προσοχή ώστε κάθε σημείο του να βρίσκεται χαμηλότερα από το προηγούμενο. Σε κάποια σημεία της όδυσής του είναι πιθανό να υπάρχουν εμπόδια και να απαιτείται ξεχωριστή στήριξη του σωλήνα, όπως στις εικόνες του σχήματος 2.31. Ο τρόπος στήριξης εξαρτάται από το είδος και μέγεθος του εμποδίου και το υλικό και μέγεθος του σωλήνα. Η στήριξη και στερέωση του σε όλο του το μήκος πρέπει να είναι πολύ σταθερή προς αποφυγή επικίνδυνων και δαπανηρών ατυχημάτων. Ακολούθως, ενώνονται τα κομμάτια του σωλήνα μεταξύ τους (η μέθοδος συγκόλλησης εξαρτάται από το υλικό) και ο αγωγός τροφοδοτείται με νερό ώστε να γίνει η δοκιμή σωστής λειτουργίας του και αντοχής στην αναπτυσσόμενη πίεση. Τέλος, γίνεται η σύνδεση του αγωγού πτώσεως με το ακροφύσιο, μέσω ενός μειωτήρα δέσμης, ο οποίος ενώνεται με τον σωλήνα μέσω μίας φλάντζας και με το ακροφύσιο μέσω μίας βαλβίδας, όπως στο σχήμα 2.32. Η τελική αυτή σύνδεση υφίσταται τη μεγαλύτερη πίεση, αφού είναι στο κάτω μέρος του σωλήνα, και για τον λόγο αυτό πρέπει να είναι ιδιαίτερα ανθεκτική.^[10]



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2.31 Διάφοροι τρόποι στήριξης του αγωγού πτώσεως (α) [<https://nirmaljoshi.wordpress.com/2011/05/28/civil-structures-ghunsa-microhydro-project-qmp/>], (β) [<http://palanqthai.org/en/microhydro/krekhi>], (γ) [10]



(α)



(β)

Σχήμα 2.32 (α) Ένωση αγωγού πτώσεως με το ακροφύσιο μέσω ενός μειωτήρα δέσμης και μίας βαλβίδας, (β) Ο μειωτήρας δέσμης, η βαλβίδα και το ακροφύσιο^[10]

2.4.1 Διαστασιολόγηση του αγωγού πτώσεως

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι διαστασιολόγησης ενός αγωγού πτώσεως. Με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, στην παρούσα εργασία επιλέγεται να παρουσιαστεί η μέθοδος της αναφοράς [3], καθώς τα υπόλοιπα μοντέλα διαστασιολόγησης αναφέρονται σε μικρές υδροηλεκτρικές εφαρμογές, που είναι μεγαλύτερης κλίμακας έργα από αυτά που μελετώνται εδώ. Υπενθυμίζεται ότι οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν παραγόμενη ισχύ μεταξύ 1MW και 100MW, ενώ οι micro και pico υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ μικρότερη των 100kW. Εναλλακτικές μεθόδους σχεδίασης του αγωγού πτώσεως μπορεί κανείς να βρει στα [8] και [12], που αφορούν μικρά υδροηλεκτρικά έργα.

Κάθε μέθοδος διαστασιολόγησής του, όμως, είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Επιλέγεται αρχικά το υλικό, η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα και ένα πάχος τοιχώματος (ανάλογα με την πίεση λειτουργίας) και εν συνεχεία υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες, το καθαρό ύψος υδατόπτωσης και γίνεται εκτίμηση του μεγέθους ενός πιθανού υδραυλικού πλήγματος. Αν τα μεγέθη που προκύπτουν δεν είναι ικανοποιητικά πρέπει να αλλάξουν οι αρχικές επιλογές και να επαναληφθεί η διαδικασία από την αρχή.

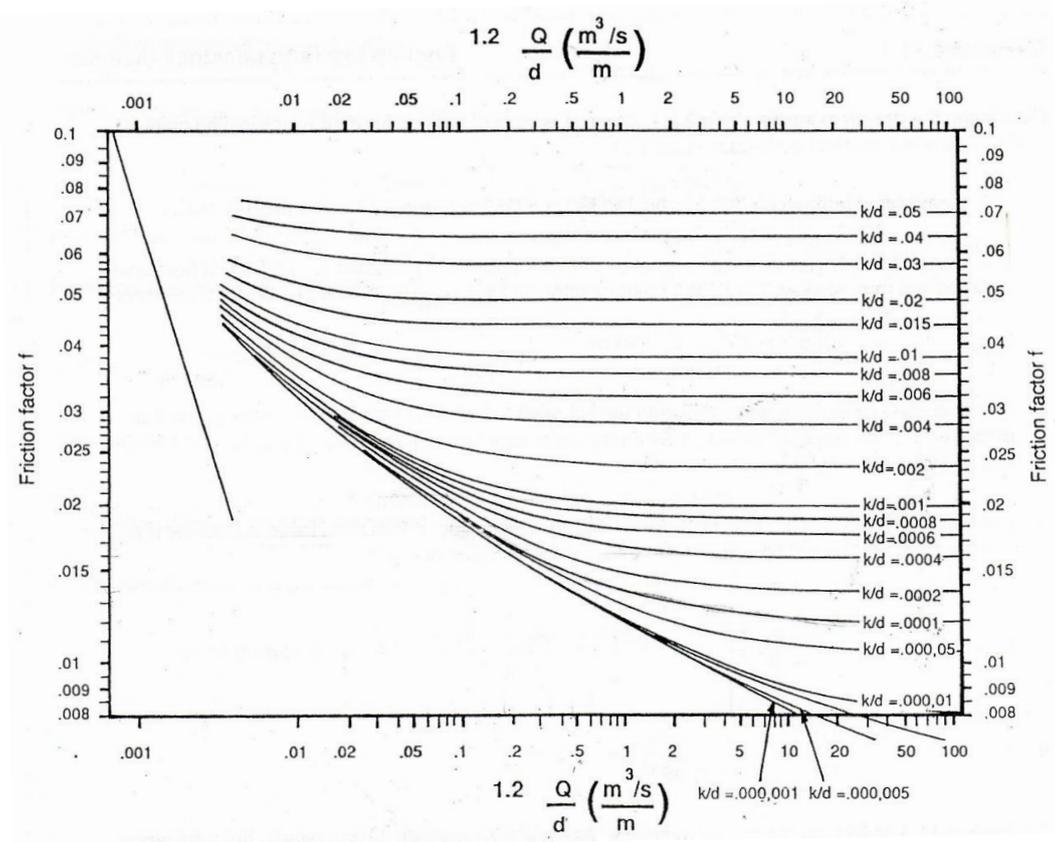
Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί η καθαρή ροή του νερού Q_{net} στον σωλήνα, η οποία προκύπτει αν αφαιρεθούν από την αρχική ροή οι απώλειες λόγω διαρροής κατά τη μεταφορά του νερού στη δεξαμενή φόρτισης και λόγω ανταγωνιστικών χρήσεων του νερού. Επίσης, απαραίτητη είναι η γνώση του μήκους L_{pipe} του σωλήνα, που προκύπτει με χρήση του Πυθαγόρειου Θεωρήματος όπως φαίνεται στον τύπο (2.18):

$$L_{pipe} = \sqrt{L_{horizontal}^2 + H_{gross}^2} \quad (2.18)$$

όπου $L_{horizontal}$: η οριζόντια απόσταση μεταξύ της εισόδου του σωλήνα στη δεξαμενή φόρτισης και της εξόδου του στο κτίριο του σταθμού.

Εν συνεχεία, επιλέγεται μία εσωτερική διάμετρος d για τον σωλήνα και υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες. Οι υδραυλικές απώλειες H_{loss} σε έναν σωλήνα είναι δύο ειδών: οι απώλειες λόγω τριβής στα τοιχώματα του σωλήνα $H_{wall-loss}$ και οι απώλειες λόγω στροβιλισμού $H_{turb-loss}$ σε ειδικές διαμορφώσεις και εξαρτήματα του σωλήνα, όπως είναι το στόμιο εισόδου του, βαλβίδες, διακλαδώσεις, σημεία κάμψης του σωλήνα καθώς και σημεία συστολής ή διεύρυνσης της ροής του νερού σε αυτόν. Σε κάποιες μεθόδους, στον υπολογισμό συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες στη σχάρα ή το φίλτρο που προστατεύει το στόμιο εισόδου του αγωγού, αλλά σε κάθε περίπτωση οι απώλειες λόγω στροβιλισμών είναι πολύ μικρότερες από τις απώλειες τριβών.

Για να υπολογιστεί η πρώτη συνιστώσα των υδραυλικών απωλειών, πρέπει να γίνει εκτίμηση του συντελεστή τριβής f του σωλήνα. Αυτή μπορεί να γίνει είτε αριθμητικά είτε διαγραμματικά, όπως εδώ, με χρήση του διαγράμματος Moody (ένα παράδειγμα τέτοιου διαγράμματος φαίνεται στο σχήμα 2.33) και εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και τον συντελεστή τραχύτητάς του k . Έτσι, πρέπει να υπολογιστούν οι λόγοι k/d (ο οποίος αντιστοιχεί στις καμπύλες του διαγράμματος) και $1.2Q/d$ που αντιστοιχεί στα σημεία του οριζόντιου άξονα με λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 2.33 Διάγραμμα Moody [3]

Αφού έχει υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής, μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες τριβής μέσω του τύπου (2.19):

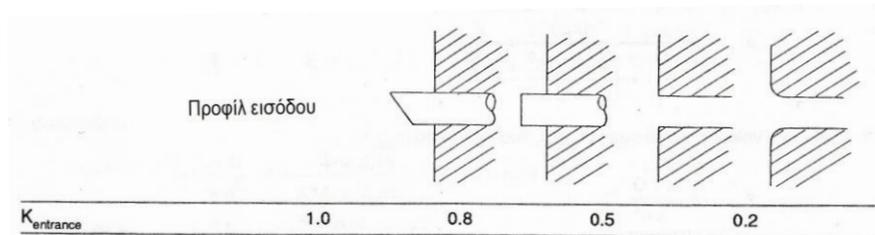
$$H_{wall-loss} = \frac{f \cdot L_{pipe} \cdot 0,08Q^2}{d^5} \quad (2.19)$$

και η ταχύτητα v με την οποία ρέει το νερό στο εσωτερικό του σωλήνα:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (\text{τύπος 2.16})$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω στροβιλισμού πρέπει κανείς να γνωρίζει ακριβώς τα σημεία στα οποία αυτές θα δημιουργηθούν και το είδος τους. Οι απώλειες σε καθένα από αυτά εκφράζεται μέσω του συντελεστή απωλειών k (εναλλακτικός συμβολισμός: ζ).

Για το στόμιο εισόδου του σωλήνα, υπάρχει ο συντελεστής k_{entrance} που εξαρτάται από τη διαμόρφωση της εισόδου και ενδεικτικές τιμές του φαίνονται στον πίνακα 2.4:



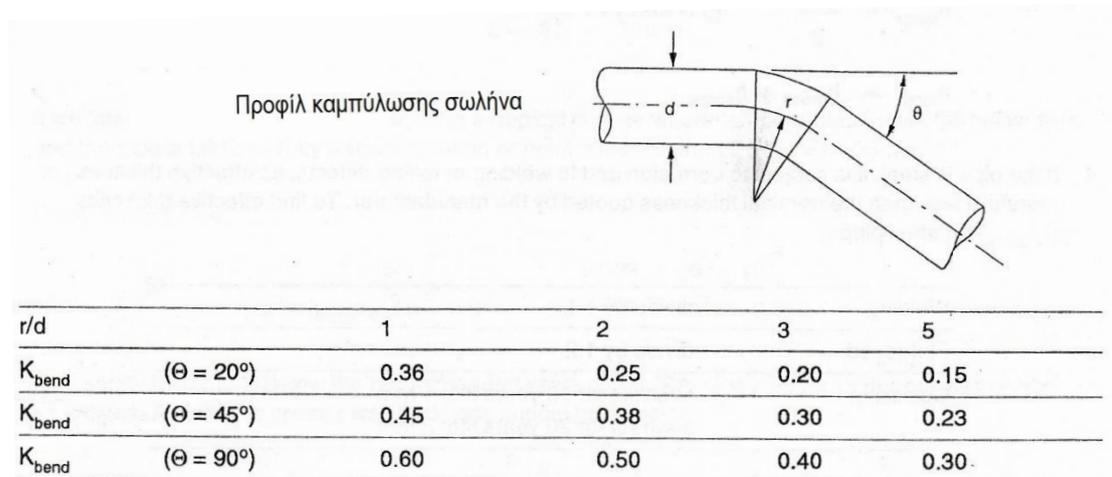
Πίνακας 2.4 Συντελεστής απωλειών στην είσοδο του αγωγού πτώσεως (k_{entrance})^[3]

Για τις βαλβίδες υπάρχει ο συντελεστής k_{valve} που εξαρτάται από το είδος της βαλβίδας και ενδεικτικές τιμές του φαίνονται στον πίνακα 2.5:

Τύπος βαλβίδας	Σφαιρική	Διαφράγματος	Πεταλούδα
K_{valve}	0	0.1	0.3

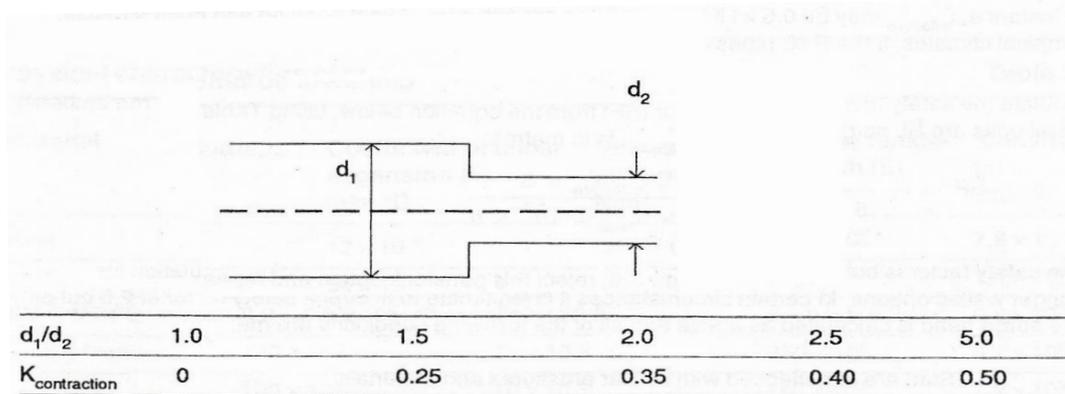
Πίνακας 2.5 Συντελεστής απωλειών στη βαλβίδα (k_{valve})^[3]

Για τα σημεία καμπύλωσης του σωλήνα, υπάρχει ο συντελεστής k_{bend} που εξαρτάται από τον λόγο της ακτίνας καμπυλότητας προς την εσωτερική διάμετρο r/d και τη γωνία κάμψης του σωλήνα θ με ενδεικτικές τιμές που φαίνονται στον πίνακα 2.6:

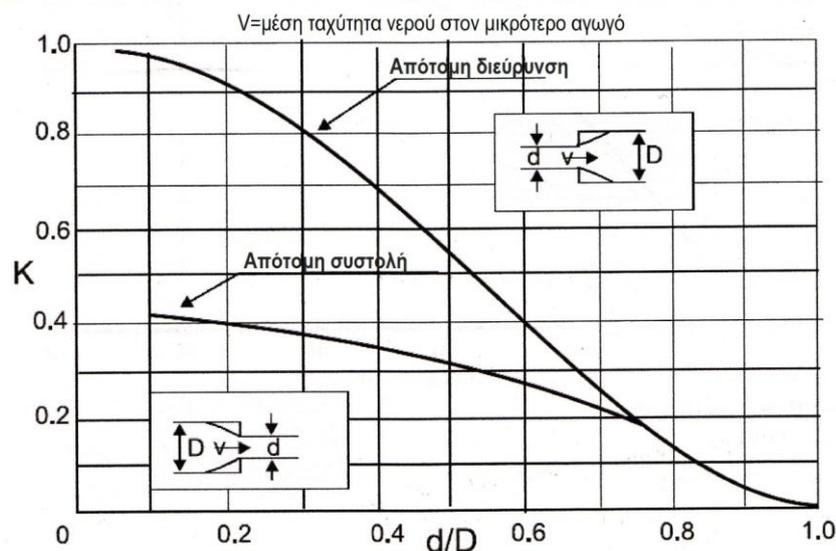


Πίνακας 2.6 Συντελεστής απωλειών στα σημεία κάμψης του αγωγού πτώσεως (k_{bend})^[3]

Για τα σημεία στα οποία μεταβάλλεται η διάμετρος του σωλήνα είτε με συστολή είτε με διεύρυνση της ροής, υπάρχουν οι συντελεστές k_c και k_{ex} αντίστοιχα που εξαρτώνται από τον λόγο των δύο διαμέτρων. Όσο πιο ομαλή είναι η μετάβαση, τόσο λιγότερες είναι και οι απώλειες. Ενδεικτικές τιμές του k_c για συστολή της ροής φαίνονται στον πίνακα 2.7 σε σχέση με το λόγο της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάμετρο d_1/d_2 , ενώ στο σχήμα 2.34 φαίνονται τιμές και των δύο συντελεστών σε σχέση με τον λόγο της μικρότερης προς τη μεγαλύτερη διάμετρο d/D :



Πίνακας 2.7 Συντελεστής απωλειών στα σημεία συστολής της ροής του αγωγού πτώσεως (k_c)^[3]



Σχήμα 2.34 Συντελεστές απωλειών στα σημεία συστολής k_c και διεύρυνσης k_{ex} της ροής σε έναν αγωγό πτώσεως^[12]

Για τις διακλαδώσεις, ο υπολογισμός είναι λίγο πιο περίπλοκος καθώς υπάρχουν δύο συντελεστές για τις δύο διαφορετικές πορείες του νερού και εξαρτώνται από την κατεύθυνση της ροής του νερού, τη γωνία της διακλάδωσης και το ποσοστό του νερού που εκτρέπεται

προς τη διαφορετική κατεύθυνση. Ενδεικτικές τιμές των δύο συντελεστών για διάφορες περιπτώσεις φαίνονται στον πίνακα 2.8:

Διαμόρφωση	Q_z/Q	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	k_z	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
	k	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
	k_z	-1,04	-0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
	k	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	k_z	0,98	0,79	0,64	0,57	0,60	0,75
	k	0,05	-0,05	-0,02	0,07	0,20	0,34
	k_z	-0,92	-0,30	0,13	0,40	0,57	0,66
	k	0,04	0,24	0,30	0,25	0,10	-0,19
	k_z	0,90	0,68	0,50	0,38	0,35	0,48
	k	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
	k_z	-0,90	-0,73	0,00	0,22	0,37	0,38
	k	0,05	0,18	0,19	0,06	-0,18	-0,54

Πίνακας 2.8 Συντελεστής απωλειών σε διακλάδωση κυκλικής διατομής (k_{bend})^[8]

Με άθροιση όλων αυτών των συντελεστών k ανάλογα με τα εμπόδια, τις φορές εμφάνισής τους και τη μορφή τους προκύπτει ένας συνολικός συντελεστής k_{turb} , ο οποίος χρησιμοποιείται στον τύπο (2.20) για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω στροβιλισμού στις τοπικές αντιστάσεις:

$$H_{turb-loss} = \frac{v^2}{2g} k_{turb} \quad (2.20)$$

Για παράδειγμα, αν σε ένα σύστημα υπάρχουν δύο σημεία κάμψης του σωλήνα, ένα σημείο συστολής της ροής και μία βαλβίδα, ο συντελεστής k_{turb} θα είναι: $k_{turb} = k_{entrance} + k_{bend1} + k_{bend2} + k_c + k_{valve}$. Συχνά, οι απώλειες διακλάδωσης, λόγω του δυσκολότερου υπολογισμού τους και των κλάδων του σωλήνα με διαφορετική ροή, υπολογίζονται ξεχωριστά και προστίθενται στις υπόλοιπες απώλειες λόγω στροβιλισμού.

Στο σημείο αυτό, μπορεί να υπολογιστεί το σύνολο των απωλειών H_{loss} και το καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net} :

$$H_{net} = H_{gross} - H_{loss} = H_{gross} - H_{wall-loss} - H_{turb-loss}$$

Αν το υδραυλικό ύψος που προκύπτει δεν αρκεί για την περιστροφή του υδροστροβίλου στην επιθυμητή ταχύτητα, πρέπει να επιλεγεί μεγαλύτερη διάμετρος ώστε να μειωθούν οι απώλειες, με ταυτόχρονη όμως αύξηση του κόστους.

Εν συνεχεία ακολουθεί ο προσδιορισμός του απαραίτητου πάχους t του τοιχώματος του σωλήνα. Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας και σε κάθε σημείο του σωλήνα, η πίεση P σε bar που αυτός υφίσταται είναι πρακτικά ίση με $0,0981 \cdot H$, όπου το H είναι σε m και αποτελεί την υψομετρική διαφορά του σημείου αυτού με τη δεξαμενή φόρτισης. Έτσι, στο τέλος του αγωγού πτώσεως η πίεση θα είναι ίση με $0,0981 \cdot H_{net}$. Ωστόσο, το επιλεγόμενο πάχος πρέπει να αντέχει και στα υδραυλικά πλήγματα που μπορεί να εμφανιστούν. Επομένως, πρέπει να υπολογιστεί η ένταση του υδραυλικού πλήγματος και η αύξηση της πίεσης που αυτό θα επιφέρει.

Πρώτα πρέπει να υπολογιστεί η ταχύτητα του μεταβατικού «κύματος» πίεσης a με χρήση του τύπου (2.21):

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,1 \cdot 10^9 d}{E \cdot t} \right)^2}} \quad (2.21)$$

όπου E [N/m²]: ο συντελεστής του Young και είναι χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε υλικού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η αύξηση της πίεσης κατά την εκδήλωση του μεταβατικού φαινομένου αντιστοιχεί σε μία αύξηση του μανομετρικού ύψους, η οποία είναι ίση με H_{surge} :

$$H_{surge} = \frac{av}{g} \quad (2.22)$$

Άρα, το συνολικό μανομετρικό ύψος H_{total} και η πίεση P_{total} στον αγωγό λόγω υδραυλικού πλήγματος είναι:

$$H_{total} = H_{gross} + H_{surge} \quad (2.23)$$

$$P_{total} = \frac{\rho g H_{total}}{10^5} = 0,0981 H_{total} \quad [\text{bar}] \quad (2.24)$$

όπου $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του νερού

$g = 9,8 \text{ m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

2.5 Σταθμός παραγωγής

Ο σταθμός παραγωγής του micro-υδροηλεκτρικού συστήματος είναι ο χώρος που τερματίζει το σύστημα προσαγωγής και στον οποίο εγκαθίσταται ο ηλεκτρομηχανολογικός (H/M) εξοπλισμός, δηλαδή οι στρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, ο εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου κ.ο.κ. Η κατασκευή και διάταξη του σταθμού παραγωγής εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των υλικών, το κλίμα της περιοχής, την υφιστάμενη τοπογραφία, τις συνθήκες ροής του φυσικού υδατορεύματος και τον τύπο του H/M εξοπλισμού. Μια καλή σχεδίαση του σταθμού εξασφαλίζει την προστασία του H/M εξοπλισμού και την ύπαρξη αρκετού χώρου για τη διεξαγωγή εργασιών επισκευής και συντήρησης αυτού, κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, η οποία πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπέντε χρόνια.



(α)



(β)

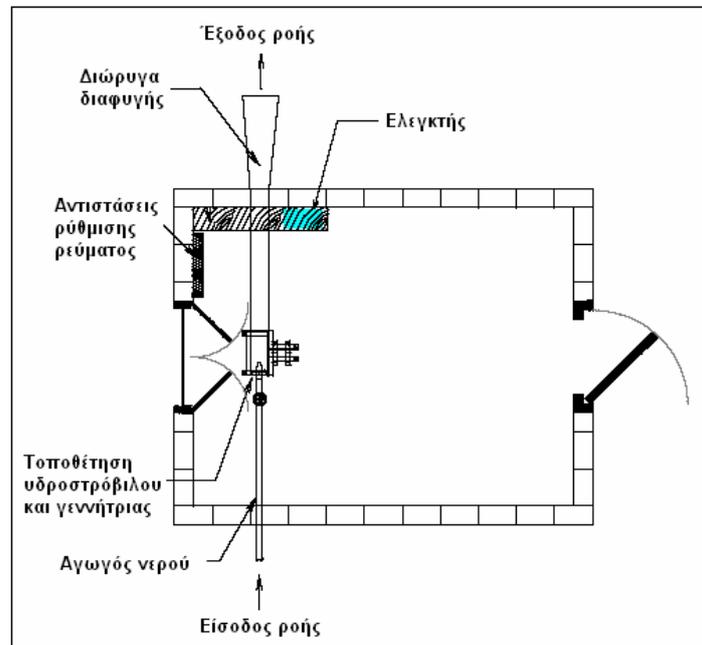
Σχήμα 2.35 (α) Μικρός πέτρινος σταθμός παραγωγής στο Νεπάλ [10], (β) Ένα μικρός σταθμός παραγωγής με το αυλάκι διαφυγής του νερού [<http://practicalaction.org/energy-poverty-the-hidden-crisis-1>]

Το δάπεδο του κτιρίου της μονάδας θα πρέπει να ανυψώνεται πάνω από το επίπεδο του εδάφους για να αποφεύγεται η πλημμύρα σε περίοδο έντονων βροχοπτώσεων και να είναι κατασκευασμένο από μπετόν για καλύτερη προστασία του υδροστροβίλου και της γεννήτριας. Επίσης, το πάτωμα του σταθμού πρέπει να έχει μία μικρή κλίση προς την πλευρά της διώρυγας απαγωγής, ώστε στην περίπτωση εισόδου νερού στο εσωτερικό του, αυτό να κατευθυνθεί προς την έξοδο. Επιπλέον, για λόγους προστασίας του εξοπλισμού, καλό είναι οι τοίχοι να έχουν ύψος τουλάχιστον 2m και αρκετά μεγάλο πάχος, και οροφή να είναι κατασκευασμένη από πυρασφαλές υλικό.

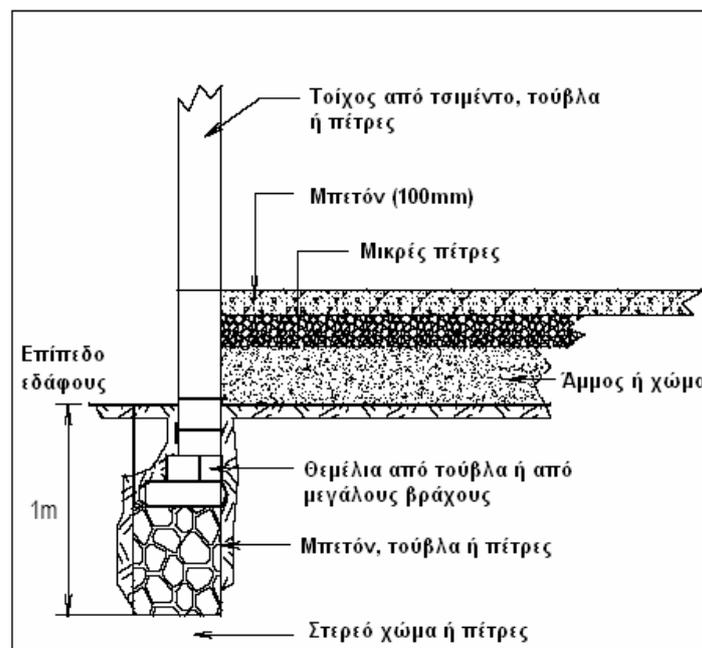
Ένα ακόμα σημαντικό κομμάτι του σταθμού παραγωγής είναι η διώρυγα διαφυγής ή απαγωγής του νερού, την οποία διαρρέει όταν εξέρχεται από τον υδροστρόβιλο. Το νερό κατά την έξοδό του μπορεί να αναπτύξει αρκετά μεγάλες ταχύτητες και γι' αυτό το αυλάκι πρέπει να είναι κατασκευασμένο κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλισθεί ότι δεν θα

υποσκαφθεί το κτίριο ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, για να μειωθεί η πιθανότητα διαρροής του, καλό είναι να έχει εσωτερική επίστρωση με τσιμέντο πάχους περίπου 100mm, η οποία θα διατηρείται και σε ένα μήκος περίπου 1m από την έξοδο του σταθμού. Τέλος, η σχεδίαση του αυλακιού πρέπει να εξασφαλίζει ότι κατά τη διάρκεια σχετικά υψηλών παροχών, το νερό που το διαρρέει δεν θα ανέλθει τόσο ώστε να παρεμποδίσει τον δρομέα του υδροστροβίλου.

[1],[4],[9],[10]



Σχήμα 2.36 Πιθανή διάταξη εξοπλισμού σε έναν σταθμό παραγωγής [4]



Σχήμα 2.37 Προτεινόμενος τρόπος κατασκευής του δαπέδου του σταθμού παραγωγής [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

3.1 Γενικά στοιχεία – Τύποι υδροστροβίλων

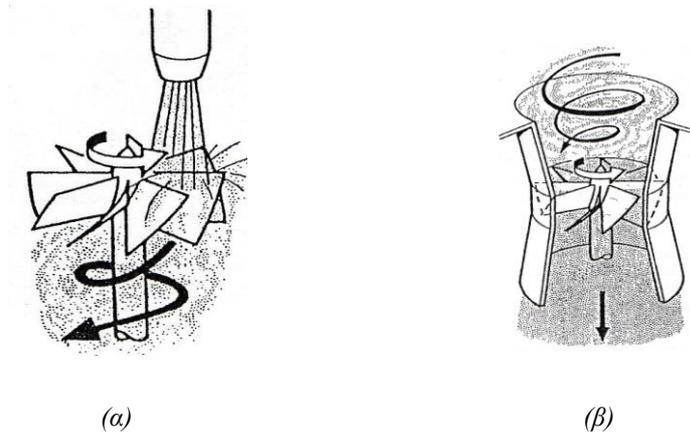
Υδροστρόβιλος ονομάζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια του υγρού (νερού) σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του υγρού και σταθερής περιστροφικής κίνησης του άξονα του στροβίλου. Η μετατροπή (μέρους) της ενέργειας του διερχόμενου υγρού σε μηχανική ενέργεια λαμβάνει χώρα στο στρεφόμενο μέρος της μηχανής, το οποίο καλείται δρομέας, μέσω της ανάπτυξης της κινητήριας ροπής σε αυτό. Η άτρακτος του δρομέα είναι συζευγμένη με την άτρακτο της ηλεκτρικής γεννήτριας μέσω της οποίας μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, δηλ. σε μία μορφή ενέργειας η οποία είναι εύκολο να μεταφερθεί στον τόπο κατανάλωσής της.^[8]

Η επιλογή του καταλληλότερου υδροστροβίλου για μία συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η απαιτούμενη παροχή Q , το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος H , η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας ω_e που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και η αναγκαιότητα διατήρησης υψηλής απόδοσης του υδροστροβίλου σε συνθήκες μερικής ροής. Η λειτουργία κάθε υδροστροβίλου περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές ισχύος – ταχύτητας και απόδοσης – ταχύτητας. Για ένα δεδομένο ύψος υδατόπτωσης, ο στρόβιλος λειτουργεί αποδοτικότερα σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής και για συγκεκριμένο εύρος παροχής.

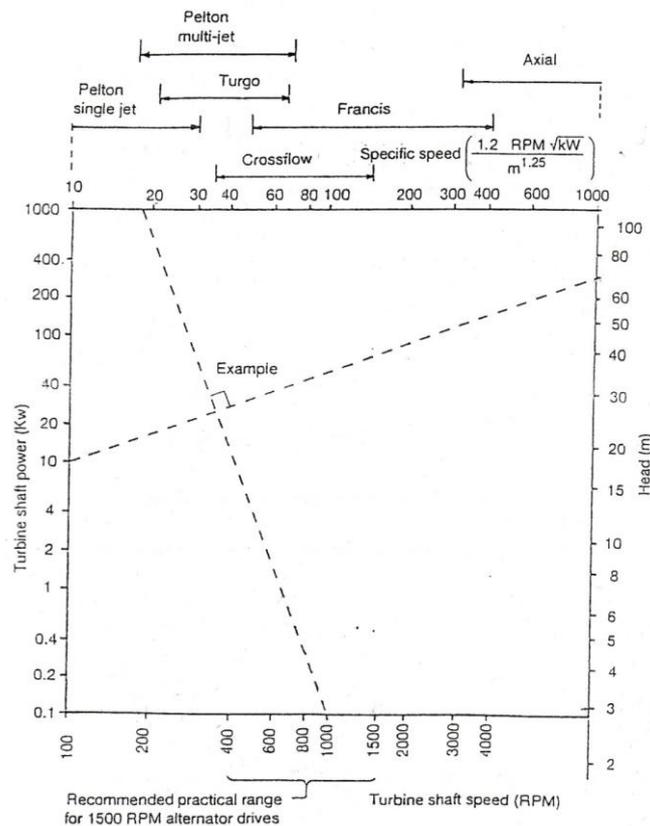
Οι υδροστρόβιλοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το υδραυλικό ύψος στο οποίο λειτουργούν πιο αποδοτικά (χαμηλό, μεσαίο, υψηλό). Επίσης, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες με βάση την αρχή λειτουργίας τους: τους υδροστροβίλους δράσεως (impulse turbines) και υδροστροβίλους αντιδράσεως (reaction turbines). Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι μερικής προσβολής, και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή, ενώ οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Μία τελευταία κατηγοριοποίηση των υδροστροβίλων γίνεται με κριτήριο την καθοδήγηση του νερού. Έτσι, οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε: αξονικούς, ακτινωτούς και μικτούς. Στους αξονικούς υδροστροβίλους το νερό οδηγείται κατά τέτοιο τρόπο στην κινητή στεφάνη, ώστε η κυκλοφορία του να γίνεται με κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του στροβίλου. Στους ακτινωτούς υδροστροβίλους, η προσαγωγή του νερού γίνεται κατά διεύθυνση ακτινωτή, δηλαδή κάθετη προς τον άξονά τους. Στους υδροστρόβιλους αυτού του τύπου η απαγωγή του νερού από την κινητή στεφάνη γίνεται κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ειδικότερα οι ακτινωτοί στρόβιλοι χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τον κεντρομόλο και

τον φυγοκεντρικό. Όταν τα μόρια του νερού κατά την εντός του στρόβιλου κυκλοφορία κατευθύνονται προς τον άξονα, ο στρόβιλος καλείται κεντρομόλος, ενώ, όταν αυτά απομακρύνονται, φυγοκεντρικός. Τέλος, στους μικτούς υδροστρόβιλους, η κυκλοφορία του νερού μέσα στον υδροστρόβιλο γίνεται εν μέρει παράλληλα προς τον άξονά του και εν μέρει κάθετα. ^[1]



Σχήμα 3.1 Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση ενός (α) υδροστρόβιλου δράσεως, (β) υδροστρόβιλου αντιδράσεως ^[3]



Σχήμα 3.2 Νομόγραμμα για την επιλογή του κατάλληλου υδροστρόβιλου ^[3]

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου μπορεί να γίνει γραφικά από το νομόγραμμα του Σχ. 3.2 ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Με δεδομένη την παροχή και το ύψος υδατόπτωσης μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς στην έξοδο του υδροστροβίλου $P_{turbout}$ με χρήση του τύπου (3.1):

$$P_{turbout} = 10Q H e_{turbine} \quad [\text{kW}] \quad (3.1)$$

όπου $e_{turbine} = 65-80\%$: η απόδοση του υδροστροβίλου

$Q [\text{m}^3/\text{sec}]$: η παροχή

και $H [\text{m}]$: το υδραυλικό ύψος

- Ενώνεται με μία ευθεία γραμμή το σημείο στον αριστερό κατακόρυφο άξονα της ισχύος εξόδου του στροβίλου με το σημείο στον δεξιό κατακόρυφο άξονα που αντιστοιχεί στο ύψος υδατόπτωσης του συστήματος.
- Η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου επιλέγεται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας και χαράσσεται μία ευθεία γραμμή κάθετη στην προηγούμενη με αφετηρία το σημείο στον κάτω οριζόντιο άξονα της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου. Ο υδροστρόβιλος είτε θα είναι άμεσα συζευγμένος με τη γεννήτρια, οπότε οι δύο ταχύτητες περιστροφής ταυτίζονται, είτε θα παρεμβάλλεται ανάμεσα σε αυτόν και τη γεννήτρια ένα κιβώτιο ταχυτήτων ή ιμάντες. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος επιτάχυνσης {(ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας)/(ταχύτητα περιστροφής υδροστροβίλου)} είναι 3:1.
- Έτσι, προσδιορίζεται η απαραίτητη ειδική ταχύτητα περιστροφής στον πάνω οριζόντιο άξονα, η οποία είναι αντιπροσωπευτική για κάθε τύπο και κατασκευή υδροστροβίλου.

Η ειδική ταχύτητα (ή ειδικός αριθμός στροφών) N_s είναι μία σταθερά, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή και περιγράφει τον υδροστρόβιλο, όταν αυτός περιστρέφεται και λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση σχεδίασης. Ανεξάρτητα από το μέγεθος, υδροστρόβιλοι ίδιου σχήματος έχουν την ίδια ειδική ταχύτητα, η οποία δίνεται από τον τύπο (3.2)

$$N_s = 1,2 N_{turb} \frac{P_{turbout}^{0,5}}{H^{1,25}} \quad (3.2)$$

όπου $N_{turb} [\text{rpm}]$: πραγματική ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου.

3.2 Υδροστρόβιλοι Δράσεως

Ο υδροστρόβιλος δράσεως (ή υδροστρόβιλος πρόσπτωσης, impulse turbine) αξιοποιεί τη μετατροπή μέσω του ακροφυσίου της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική ενέργεια μίας δέσμης νερού, η οποία εκρέει και προσπίπτει πάνω στους κάδους ή τα πτερύγια του δρομέα.^[9]

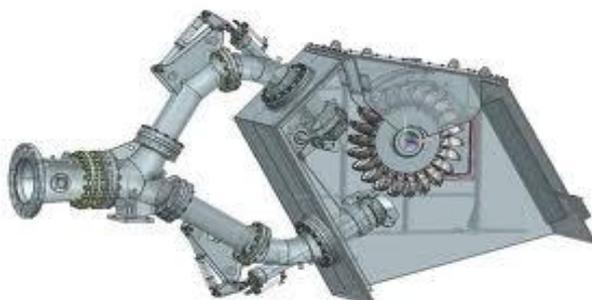
Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι οι παλαιότεροι τύποι υδραυλικών μηχανών που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανικό έργο, ενώ παράλληλα είναι και οι απλούστεροι από πλευράς σχεδιασμού, ευκολίας συντήρησης και ελέγχου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς με μεγάλα υδραυλικά ύψη και χαμηλές παροχές, καθώς η μεγάλη ταχύτητα του νερού (λόγω μεγάλου υδραυλικού ύψους), επικεντρώνει τη διαθέσιμη υδραυλική ισχύ σε μια μικρή περιοχή ροής με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη μετατροπή ισχύος. Είναι ανθεκτικοί σε άμμο και λοιπά σωματίδια που μπορεί να μεταφέρει το νερό. Επιπλέον, καθώς έχουν χαμηλή ειδική ταχύτητα ροής, ο σχεδιασμός τους δεν απαιτεί ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και βαριά κατασκευή. Σε περίπτωση ανάγκης όμως, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ειδική ταχύτητα ροής με την προσθήκη περισσοτέρων ακροφυσίων. Παράλληλα, επειδή λειτουργούν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και δεν κινδυνεύουν ιδιαίτερα από το φαινόμενο σπηλαίωσης, δεν απαιτείται ιδιαίτερος σχεδιασμός όσον αφορά την συναρμογή και ερμητικότητα του κελύφους. Το φαινόμενο της σπηλαίωσης παρουσιάζεται σε κάποιο μέρος του υδροστρόβιλου όταν η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση των ατμών του υγρού, καθώς τότε σχηματίζονται μικρές φυσαλίδες ατμού, οι οποίες συντρίβονται όταν αυξάνεται η πίεση απελευθερώνοντας κρουστικά κύματα που φθείρουν τις πτερωτές και τα περιβλήματα των στρόβιλων.^[15] Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημά τους έναντι των υδροστρόβιλων αντιδράσεως, είναι η διατήρηση ενός αρκετά ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης σε συνθήκες μερικής ροής.

Βασικό μειονέκτημα των υδροστρόβιλων δράσεως είναι η ακαταλληλότητά τους για συστήματα χαμηλού λόγου ύψους προς ισχύ. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα με χαμηλό ύψος υδατόπτωσης, αν η μεταφερόμενη ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής είναι επίσης χαμηλές.

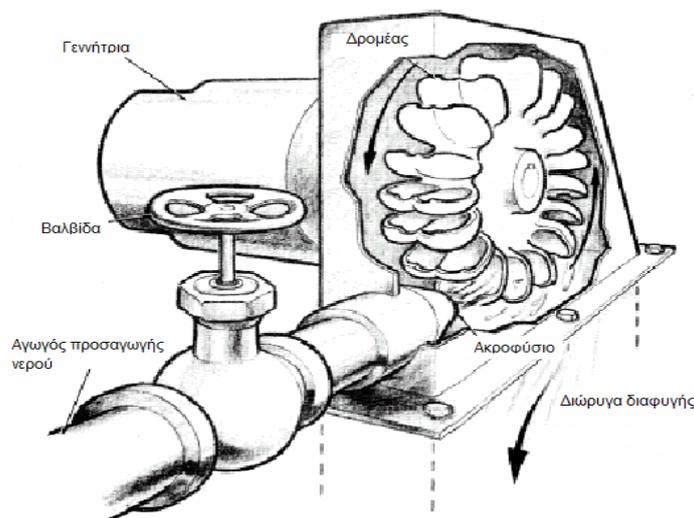
Στην κατηγορία των υδροστρόβιλων δράσεως ανήκουν οι υδροστρόβιλοι Pelton, οι υδροστρόβιλοι Turgo και οι υδροστρόβιλοι εγκάρσιας ροής (crossflow).

3.2.1 Υδροστρόβιλος Pelton

Ο υδροστρόβιλος Pelton πήρε το όνομά του από έναν εκ των δημιουργών του και είναι ο πιο παλιός και γνωστός υδροστρόβιλος δράσεως. Χρησιμοποιείται κυρίως για μεσαία και μεγάλα ύψη υδατόπτωσης (20-200m) και για μεγάλο εύρος ισχύων.



Σχήμα 3.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός υδροστρόβιλου Pelton



Σχήμα 3.4 Υδροστρόβιλος Pelton οριζόντιου άξονα ^[3]

Το τμήμα εισόδου του υδροστρόβιλου Pelton αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε μηχανική, σχηματίζοντας το καθένα μία δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στην περωτή, δίνοντας σε αυτή μία ώθηση κατά την περιφερειακή διεύθυνση, που δημιουργεί την κινητήρια ροπή. Η περωτή είναι τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η δέσμη του νερού, μετά την πρόσπτωσή της σε αυτήν, να πέφτει υπό την επίδραση της βαρύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας διαφυγής.

Ο άξονας της περωτής μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων δεσμών είναι προτιμότερη η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε να μην παρενοχλείται η λειτουργία των ακροφυσίων από τα απόνερα των σκαφιδίων.

Τα σκαφίδια του υδροστροβίλου Pelton έχουν το σχήμα δύο κυπέλων ενωμένων στη μία πλευρά, δημιουργώντας εκεί μία αιχμηρή ευθύγραμμη προεξοχή, στην οποία προσπίπτει η δέσμη του νερού και διαχωρίζεται σε δύο ίσες δέσμες που ρέουν στο εσωτερικό των δύο πλευρών του σκαφιδίου. Το σκαφίδιο του Pelton είναι σχεδιασμένο ώστε να εκτρέπει τη δέσμη κατά 165° , η οποία είναι η μέγιστη δυνατή γωνία ώστε να μην επηρεάζεται το επόμενο σε σειρά σκαφίδιο από τα απόνερα του προπορευόμενου.

Το μέγεθος των σκαφιδίων που θα χρησιμοποιηθούν καθορίζεται από τη διάμετρο της δέσμης του νερού και ο αριθμός τους καθορίζει το μέγεθος και τη διάμετρο του δρομέα (runner pitch diameter pcd, η οποία είναι η διάμετρος μιας νοητής κυκλικής περιφέρειας που περνάει από τα μέσα των σκαφιδίων).

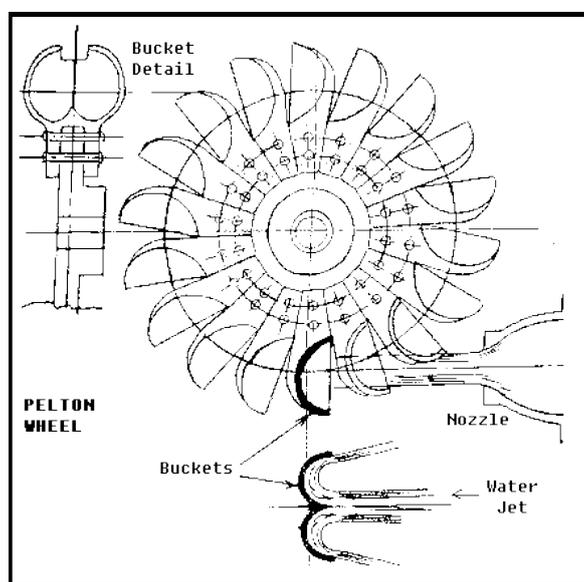


(α)



(β)

Σχήμα 3.5 (α) Δρομέας υδροστροβίλου Pelton, (β) πλαστικό σκαφίδιο υδροστροβίλου Pelton

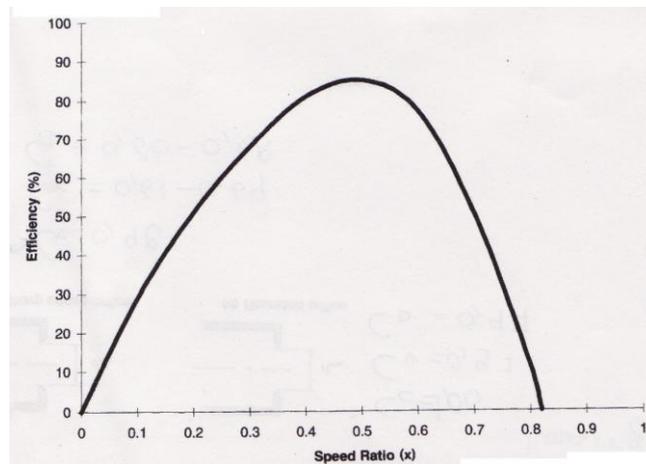


Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση του δρομέα του Pelton και των σκαφιδίων του { <http://permaculturewest.org.au/ipc6/ch08/shannon/index.html> }

Για λειτουργία μέγιστης απόδοσης του υδροστροβίλου, πρέπει η ταχύτητα της δέσμης του νερού να είναι περίπου διπλάσια της ταχύτητας των σκαφιδίων. Πρακτικά, προτιμάται

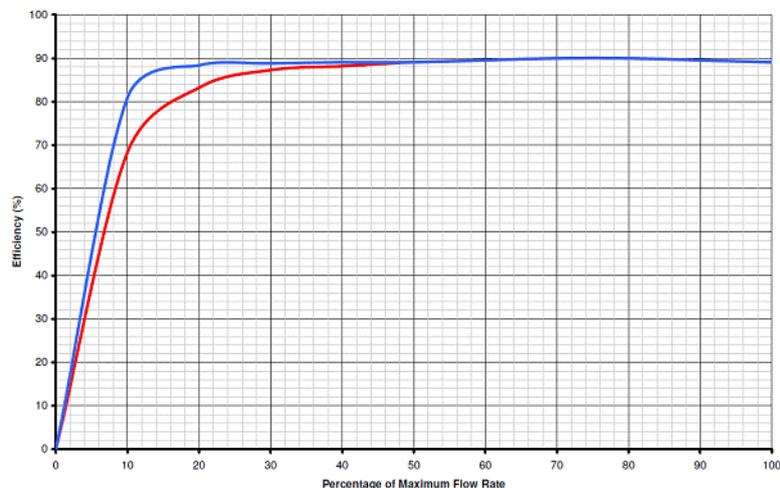
$$\text{λόγος ταχυτήτων} = x = \text{speed ratio} = \frac{\text{ταχύτητα σκαφιδίου}}{\text{ταχύτητα δέσμης}} \in [0,46 \dots 0,48] \quad (3.3)$$

Η διαφορά των τιμών των δύο ταχυτήτων οφείλεται στις τριβές και τις απώλειες ανεμισμού, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση του λόγου x , μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου καθορίζεται από το φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτόν, δηλαδή το φορτίο που βλέπει μέσω της γεννήτριας. Η ρύθμιση της ταχύτητας μπορεί να γίνει με ρύθμιση είτε της παροχής, είτε του φορτίου. Στην πραγματικότητα, παρά την ύπαρξη συγκεκριμένης τιμής του x για τη βέλτιστη λειτουργία του υδροστροβίλου, η απόκλιση από αυτήν κατά $\pm 15\%$ (δηλαδή, $0,39 \leq x \leq 0,52$) δε δημιουργεί κάποιο πρόβλημα, αν και πάντα προτιμάται η μείωση της ταχύτητας των σκαφιδίων και όχι η αύξησή της (για να μην υπάρχει παρεμπόδιση της περιστροφής του στροβίλου από τα απόνερα των σκαφιδίων). [6]



Σχήμα 3.7 Καμπύλη της απόδοσης ενός τυπικού δρομέα Pelton σε συνάρτηση με τον λόγο ταχύτητας x [13]

Σημαντικό θετικό στοιχείο του υδροστροβίλου Pelton είναι η διατήρηση ενός αρκετά καλού βαθμού απόδοσης ακόμα και σε λειτουργία μερικής ροής.



Σχήμα 3.8 Καμπύλη της απόδοσης συναρτήσει της ροής για τυπικούς εμπορικούς υδροστροβίλους Pelton με ένα (κόκκινη καμπύλη) και με δύο ακροφύσια (μπλε καμπύλη) { Renewables First, <http://www.renewablesfirst.co.uk/pelton-and-turgo-turbines.html> }

Αν απαιτείται υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής και μικρότερος δρομέας, τότε υπάρχουν δύο επιλογές σχεδίασης που μπορεί να δώσουν αυτό το αποτέλεσμα. Η πρώτη επιλογή είναι η αύξηση του αριθμού των ακροφυσίων, η οποία επιτρέπει τη χρήση ενός μικρότερου δρομέα για μία δεδομένη ροή νερού, και κατά συνέπεια τη λειτουργία του με μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η χρήση περισσότερων του ενός ακροφυσίων παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια και αξιοπιστία του στροβίλου, μία περιορισμένη αλλά υπαρκτή δυνατότητα ρύθμισης της ροής, καθώς και καλύτερη απόδοση υπό μερική ροή, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μειωμένος αριθμός δεσμών. Η δεύτερη επιλογή, που όμως δεν συνηθίζεται στα μικρά συστήματα λόγω κόστους και δυσκολίας, είναι η χρήση δύο στροβίλων πάνω στον ίδιο άξονα. ^[3]

3.2.1.1 Έλεγχος της ροής σε έναν υδροστρόβιλο Pelton

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ρύθμισης της ροής σε έναν υδροστρόβιλο και συνήθως γίνεται επιλογή και συνδυασμός κάποιων από αυτούς με βασικά κριτήρια το οικονομικό κόστος, την πολυπλοκότητα και το επίπεδο ακρίβειας ελέγχου που απαιτείται.

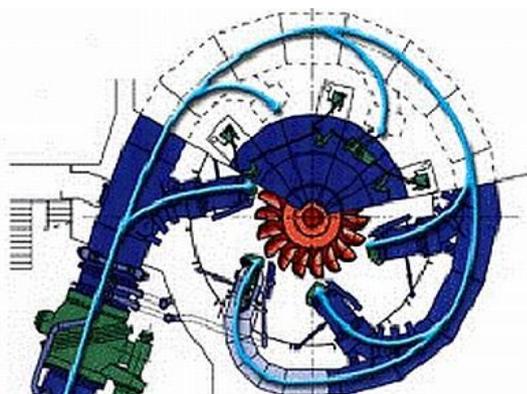
Ένας αρκετά φθηνός τρόπος ρύθμισης της ροής είναι η εποχική αντικατάσταση των ακροφυσίων από άλλα διαφορετικής διαμέτρου. Για παράδειγμα, τον χειμώνα που η ροή του ποταμού είναι συνήθως αυξημένη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερης διατομής ακροφύσια, ενώ το καλοκαίρι μικρότερης. Πρέπει, ωστόσο, κανείς να γνωρίζει ότι η μέγιστη ροή σε ένα ακροφύσιο για δεδομένο ύψος υδατόπτωσης είναι περιορισμένη. Η διάμετρος του ακροφυσίου είναι λίγο μεγαλύτερη της διαμέτρου της δέσμης, η οποία πρέπει να είναι ίση με το 12% περίπου της διαμέτρου του δρομέα (pcd).

Ένας δεύτερος τρόπος να ελέγξει κανείς τη ροή είναι η μεταβολή του αριθμού των δεσμών του νερού. Στην περίπτωση αυτή, κατά την περίοδο όπου η παροχή στον υδροστρόβιλο είναι αυξημένη χρησιμοποιούνται όλα τα ακροφύσια, ενώ την περίοδο που η ροή είναι μειωμένη μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μισά από αυτά ή όσα χρειάζονται. Επίσης, μπορούν είτε να είναι όλα ίδιας διατομής, είτε διαφορετικής ώστε συνδυαστικά να δημιουργούνται περισσότερα διαφορετικά επίπεδα παροχής. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των δεσμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η μικρότερη γωνία που μπορεί να δημιουργείται μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών είναι 60°, που αντιστοιχεί στην ύπαρξη έξι δεσμών, αλλά και σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες είναι αυξημένες, καθώς υπάρχει

παρεμβολή μεταξύ των απόνερων και των δεσμών. Οι περισσότεροι κατασκευαστές θέτουν ως ελάχιστη γωνία τις 70-75°, που αντιστοιχεί στην ύπαρξη πέντε δεσμών.



(α)



(β)

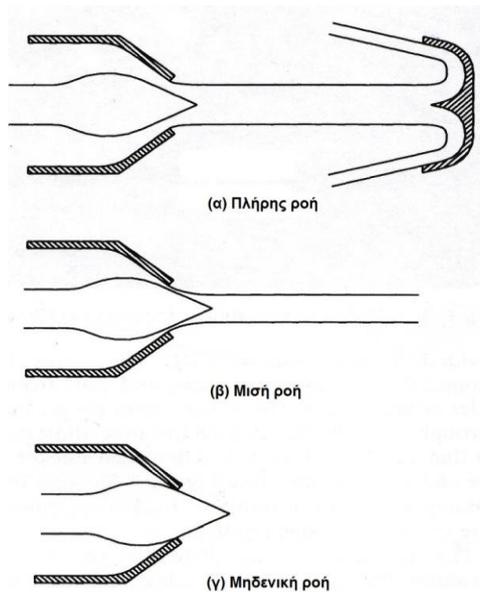
Σχήμα 3.9 (α) Υδροστρόβιλος Pelton με 4 δέσμες {“The Harris Hydro Turbine”, <http://lifeattheendoftheroad.wordpress.com/2008/02/07/the-harris-hydro-turbine/>}, (β) Υδροστρόβιλος Pelton με 6 δέσμες {Renew Hydro, <http://www.renewhydro.com/index3B.html>}

Ένας άλλος τρόπος όχι ρύθμισης, αλλά οριστικής μεταβολής της ροής είναι με τη συνήθη τοποθέτηση μίας απλής βαλβίδας πριν από κάθε ακροφύσιο, η οποία θα πρέπει να κλείνει και να ανοίγει σταδιακά και πολύ σιγά προς αποφυγή δημιουργίας υδραυλικού πλήγματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν ενδείκνυται η χρήση μίας βαλβίδας για ρύθμιση των επιπέδων παροχής, κρατώντας την παραδείγματος χάριν μερικώς ανοιχτή, γιατί έτσι φθείρεται με τον χρόνο υπό την επίδραση των αυξημένων πιέσεων και του φαινομένου σπηλαιώσης. Η φθορά αυτή μπορεί τελικά να οδηγήσει στην καταστροφή της.

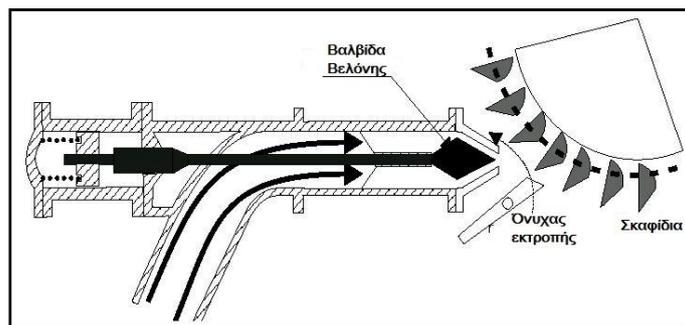
Η καλύτερη αλλά και πιο ακριβή λύση για τη ρύθμιση της παροχής στον υδροστρόβιλο είναι η χρήση ακροφυσίων με βαλβίδα βελόνης. Μεταβάλλοντας τη θέση της βελόνης στο εσωτερικό της βαλβίδας, μεταβάλλεται και η διατομή της δέσμης που εξέρχεται από το ακροφύσιο κι επομένως η παροχή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.11. Με το συγκεκριμένο ακροφύσιο, είναι δυνατή η συνεχής και σταδιακή ρύθμιση της παροχής, είτε με μία είτε με περισσότερες δέσμες. Η ρύθμιση της βαλβίδας μπορεί να γίνει χειροκίνητα, αλλά και αυτόματα μέσω ενός μηχανικού ελεγκτή, ο οποίος όμως είναι μία αρκετά ακριβή και πολύπλοκη συσκευή.



Σχήμα 3.10 Υδροστρόβιλος Pelton με 5 ακροφύσια με βαλβίδα βελόνης



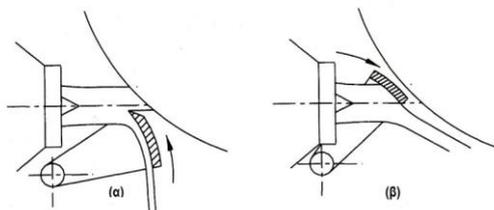
Σχήμα 3.11 Στάδια ελέγχου της ροής στον υδροστρόβιλο από μία βαλβίδα βελόνης (α) Λειτουργία με πλήρη ροή, (β) Λειτουργία με κλειστή βαλβίδα κατά το ήμισυ και μισή ροή, (γ) Τελείως κλειστή βαλβίδα και η λειτουργία του υδροστρόβιλου έχει διακοπή ^[13]



Σχήμα 3.12 Έλεγχος παροχής ενός υδροστρόβιλου Pelton με όνυχα εκτροπής δέσμης και ακροφύσιο με βαλβίδα βελόνης { Hydro Power, <http://www.inforse.org/europe/dieret/Hydro/hydro.html> }

Τέλος, ο όνυχας εκτροπής (deflector plate), που φαίνεται στο σχήμα 3.12, σε συνδυασμό με μία βαλβίδα βελόνης, αποτελεί μία αποτελεσματική λύση για προστασία από υπερτάχυνση και ασφαλή και άμεση διακοπή της λειτουργίας του στρόβιλου, καθώς ανυψώνεται και εκτρέπει τη δέσμη από τον δρομέα με αποτέλεσμα τη σχεδόν ακαριαία μείωση και τον

μηδενισμό της παραγόμενης μηχανικής ισχύος, χωρίς την απότομη διακοπή της ροής και την εκδήλωση μεταβατικού φαινομένου λόγω αύξησης της πίεσης. Αφού ο όνυχας εκτροπής έχει σταματήσει τη λειτουργία του στροβίλου, κλείνει σταδιακά και η βαλβίδα βελόνης διακόπτοντας την παροχή. Η λειτουργία του όνυχα εκτροπής φαίνεται στα σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 Τρόποι λειτουργίας όνυχα εκτροπής (α) Διαχωρισμός της δέσμης, ώστε να προσπίπτει στο δρομέα ένα μέρος αυτής, (β) Πλήρης εκτροπή της δέσμης^[13]

3.2.1.2 Διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Pelton

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα διαστασιολόγησης ενός υδροστροβίλου Pelton, που μπορεί ο καθένας να χρησιμοποιήσει ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Όποια μέθοδο και να ακολουθήσει κανείς όμως θα πρέπει να κάνει διορθωτικές κινήσεις ανάλογα με τον εξοπλισμό που υπάρχει στο εμπόριο · γι' αυτό μάλιστα τον λόγο οι περισσότερες μέθοδοι διαστασιολόγησης είναι επαναληπτικές. Στην παρούσα εργασία ακολουθείται το μοντέλο διαστασιολόγησης που παρατίθεται στο [3].

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή του υδροστροβίλου είναι να γνωρίζει κανείς τη ροή του ποταμού (κι επομένως την παροχή στον στρόβιλο) και το καθαρό ύψος υδατόπτωσης. Αν το τελευταίο δεν είναι γνωστό, μπορεί να υποθεθεί ίσο με το 95% της υψομετρικής διαφοράς. Το κύριο μέρος της διαδικασίας διαστασιολόγησης συνίσταται στην επιλογή ενός ή περισσοτέρων ακροφυσίων, τον υπολογισμό του μεγέθους της δέσμης και εν συνεχεία της διαμέτρου του δρομέα του στροβίλου και της ταχύτητας περιστροφής του.

Για έναν υδροστροβίλο οριζοντίου άξονα ο μέγιστος δυνατός αριθμός δεσμών είναι δύο, ενώ για έναν κατακόρυφου άξονα σε μικρο-υδροηλεκτρικά συστήματα ο συνήθης μέγιστος αριθμός δεσμών είναι τέσσερις. Σε κάθε δυνατό αριθμό δεσμών (π.χ. για στρόβιλο κατακόρυφου άξονα 1, 2, 3, 4) αντιστοιχεί και μία περίπτωση. Η διαδικασία διαστασιολόγησης του υδροστροβίλου ξεκινάει με τον υπολογισμό της διαμέτρου της δέσμης d_{jet} στη μέγιστη ροή για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, σύμφωνα με τον τύπο:

$$d_{jet} = 0,54c_d \frac{1}{H_{net}^{0,25}} \sqrt{\frac{Q}{n_{jet}}} \quad [\text{mm}] \quad (3.4)$$

όπου H_{net} [m]: καθαρό ύψος υδατόπτωσης

- Q [l/sec] : παροχή στον υδροστροβίλο
- n_{jet} : αριθμός δεσμών [1...4]
- c_d : σταθερά εκφόρτισης (discharge coefficient) του ακροφυσίου, εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις του, είναι μικρότερη της μονάδας και ορίζεται ως εξής:

$$c_d = \frac{Q_{jet}}{Q_{nozzle}} \quad (3.5)$$

- όπου Q_{jet} : η τιμή της ροής στη δέσμη
- Q_{nozzle} : η τιμή της ροής στο ακροφύσιο

Η δέσμη με διάμετρο d_{jet} εξέρχεται ενός ακροφυσίου με διάμετρο d_{nozzle} , η οποία δίδεται από τη σχέση (3.6)

$$d_{nozzle} = \frac{d_{jet}}{c_c} \quad (3.6)$$

- όπου c_c : σταθερά συστολής (contraction coefficient) του ακροφυσίου, εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις του, είναι μικρότερη της μονάδας και εκφράζει τη μείωση της διαμέτρου της δέσμης του νερού λίγο μετά από την έξοδο της από το ακροφύσιο.

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η ενδεικνυόμενη διάμετρος δρομέα $D_{runnerideal}$. Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού της είναι μέσω ενός περιορισμού που αναφέρεται στο [13], σύμφωνα με τον οποίο η διάμετρος της δέσμης πρέπει να είναι ίση με το 11% της διαμέτρου του δρομέα D_{runner} :

$$D_{runnerideal} \leq \frac{d_{jet}}{0,11} \quad (3.7)$$

Ένας δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της διαμέτρου του δρομέα δίδεται στο [3] και στην περίπτωση αυτή η τιμή της διαμέτρου εξαρτάται από την απαιτούμενη λόγω της γεννήτριας ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου. Έτσι, προκύπτει ο τύπος (3.8):

$$D_{runnerideal} = \frac{38\sqrt{H_{net}}}{n_{pelton}} = \frac{38G\sqrt{H_{net}}}{n_{gen}} \quad (3.8)$$

- όπου n_{pelton} [rpm] : η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου
- n_{gen} [rpm] : η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας

$G = n_{gen}/n_{pelton}$: ο λόγος επιτάχυνσης στην περίπτωση που δεν έχουμε άμεση σύζευξη του υδροστροβίλου με τη γεννήτρια

Ακολουθώντας, πρέπει να γίνει επιλογή μίας τιμής διαμέτρου δρομέα που διατίθεται στο εμπόριο και είναι πλησιέστερη στην τιμή $D_{runnerideal}$, που έχει υπολογιστεί. Επειδή το πιθανότερο είναι ότι δεν θα υπάρχει στην αγορά δρομέας με διάμετρο $D_{runnerideal}$ θα πρέπει να υπολογιστούν και πάλι με χρήση πλέον της υπαρκτής διαμέτρου D_{runner} , η διάμετρος της δέσμης d_{jet} και ο λόγος επιτάχυνσης G για κάθε αριθμό ακροφυσίων, μέσω των σχέσεων (3.4) και (3.8).

Επίσης, αφού έχει καθοριστεί η τιμή της D_{runner} πρέπει να προσδιοριστεί η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου μέσω του τύπου (3.9):

$$n_{pelton} = \frac{60xv_{jet}}{\pi D} \quad [rpm] \quad (3.9)$$

όπου x : ο λόγος ταχυτήτων (speed ratio), που έχει οριστεί στην (3.3)

και v_{jet} : η ταχύτητα της δέσμης, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$v_{jet} = c_v \sqrt{2gH_{net}} \quad [m/sec] \quad (3.10)$$

όπου c_v : συντελεστής ταχύτητας (coefficient of velocity) του ακροφυσίου, εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις του, είναι μικρότερος της μονάδας με συνήθεις τιμές [0,95...0,99] και εκφράζει τη μείωση της ταχύτητας της δέσμης του νερού λόγω στροβιλισμών και υδραυλικών απωλειών στο ακροφύσιο (Οι τρεις συντελεστές του ακροφυσίου συνδέονται με τη σχέση $c_d = c_c * c_v$.)

και g [m/sec²] : η επιτάχυνση της βαρύτητας

Αφού έχει ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, τα αποτελέσματα συνοψίζονται συνήθως σε έναν πίνακα με την παρακάτω μορφή:

n_{jet}	1	2	3	4
d_{jet}				
$D_{runnerideal}$				
D_{runner}				
d_{jet}				
n_{pelton}				
G				

Έτσι, με όλα τα δεδομένα συγκεντρωμένα, μπορεί κανείς να επιλέξει και τον κατάλληλο αριθμό δεσμών στοχεύοντας στην καλύτερη διαχείριση της υπάρχουσας ροής και των διακυμάνσεών της, και στην οικονομικότερη, απλούστερη και αποδοτικότερη δυνατή

κατασκευή, με την προϋπόθεση ότι για την επιλεχθείσα διαστασιολόγηση θα ικανοποιείται ο περιορισμός $G < 3$ για τον λόγο επιτάχυνσης.

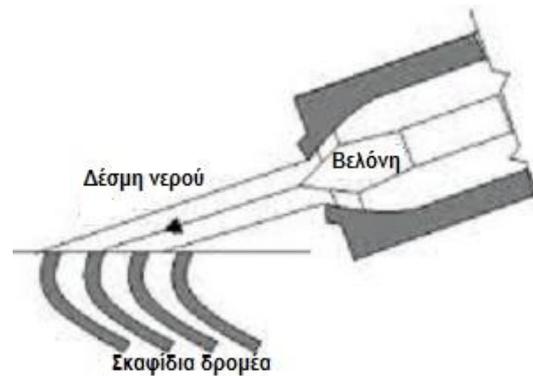
Η ισχύς στην έξοδο του στροβίλου θα είναι:

$$P_{turbout} = \rho_{water} g Q H_{net} e_{turbine} \quad (3.11)$$

όπου ρ_{water} [kg/m^3] : η πυκνότητα του νερού

3.2.2 Υδροστρόβιλος Turgo

Ο υδροστρόβιλος Turgo είναι ένας υδροστρόβιλος δράσεως παρόμοιος με τον Pelton. Ωστόσο, στον Turgo η δέσμη προσπίπτει στο σκαφίδιο υπό γωνία (συνήθως 20°) ως προς το επίπεδο του δρομέα.



Σχήμα 3.14 Τα περύγια του δρομέα και η δέσμη του νερού σε έναν στρόβιλο Turgo

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14 το νερό προσπίπτει στον δρομέα από τη μία πλευρά του σκαφιδίου και εξέρχεται από την άλλη, οπότε δεν υπάρχει κίνδυνος παρεμβολής των απόνερων του σκαφιδίου με τη δέσμη, όπως στον στρόβιλο Pelton. Για τον λόγο αυτό, ο Turgo μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερες παροχές και κατά συνέπεια να παράγει την ίδια ισχύ με δρομέα μικρότερης διαμέτρου, καθώς και να αναπτύξει μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η ειδική ταχύτητα περιστροφής N_s τυποποιημένων υδροστροβίλων της κατηγορίας αυτής είναι της τάξεως των 50-60 ανά δέσμη τροφοδοσίας. Οι στρόβιλοι Turgo έχουν αρκετά καλή απόδοση σε συνθήκες μερικού φορτίου και ουσιαστικά, καλύπτουν μία περιοχή ανάμεσα στους υδροστρόβιλος Pelton με πολλά ακροφύσια και τους υδροστροβίλους Francis με υψηλή τιμή υδραυλικής πτώσης, όταν είναι αναγκαία η αποδοτικότερη λειτουργία σε μερικά φορτία.

Παρά τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματά τους, όμως, οι υδροστρόβιλοι αυτού του τύπου είναι δυσκολότεροι στην κατασκευή, υφίστανται σημαντικά αξονικά φορτία κατά τη

λειτουργία τους (που σημαίνει ότι χρειάζονται κατάλληλα ρουλεμάν στην άκρη του άξονα) και τα σκαφίδια τους είναι πιο ευαίσθητα από αυτά του Pelton.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3.15 (α) Δρομέας υδροστροβίλου Turgo με εξωτερική στεφάνη, (β) και (γ) Δρομέας υδροστροβίλου Turgo χωρίς εξωτερική στεφάνη

Ο υδροστρόβιλος Turgo μπορεί να είναι από την αρχή εξολοκλήρου κατασκευασμένος και να έχει τη μορφή του σχήματος 3.15 (α) ή να αποτελείται από χωριστά κατασκευασμένους δρομέα και σκαφίδια που μετά συναρμολογούνται μεταξύ τους και να έχει τη μορφή των εικόνων 3.15 (β) και (γ) (η δεύτερη μορφή συναντάται συχνότερα στα pico-υδροηλεκτρικά συστήματα).

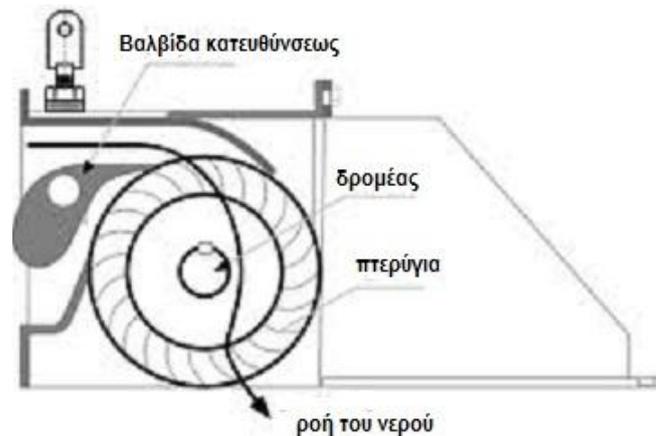
Οι υδροστρόβιλοι Turgo μπορούν να τροφοδοτούνται από περισσότερα του ενός ακροφύσια, όπως και οι Pelton, αλλά όχι με περισσότερα από 4. Τέλος, για τη ρύθμιση της παροχής, χρησιμοποιούνται οι ίδιοι τρόποι με αυτούς που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 3.2.1.1 της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 3.16 Υδροστρόβιλος Turgo με τέσσερα ακροφύσια

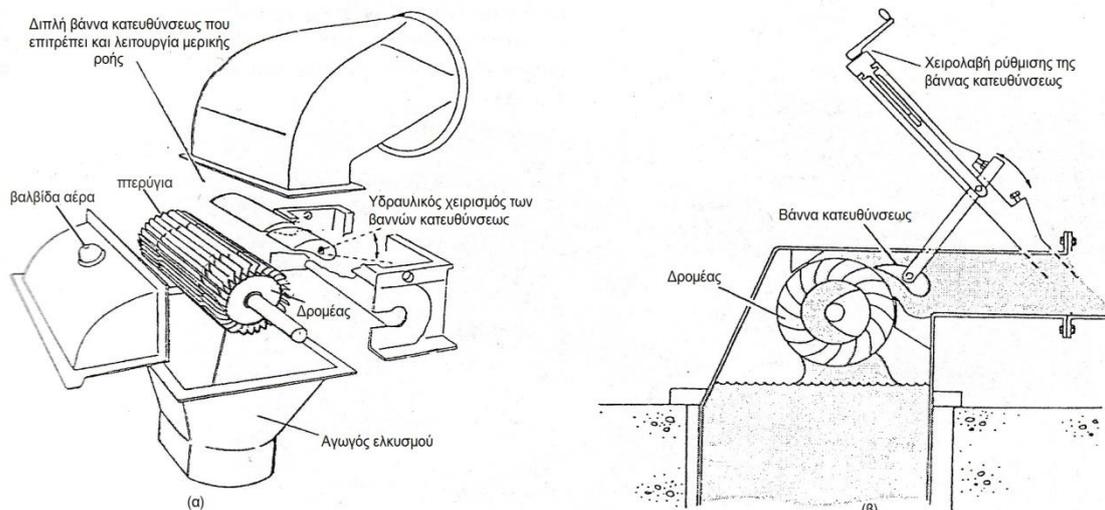
3.2.3 Υδροστρόβιλος Εγκάρσιας Ροής

Ο υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής (ή αλλιώς Crossflow ή Banki ή Mitchell) είναι ένας υδροστρόβιλος δράσεως, που μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερες παροχές νερού και χρησιμοποιείται σε υδροηλεκτρικά έργα μικρότερου υδραυλικού ύψους από τον υδροστρόβιλο Pelton.



Σχήμα 3.17 Υδροστρόβιλος Crossflow

Σε γενικές γραμμές, όσο αφορά τη δομή του, ο υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής χρησιμοποιεί ένα ορθογωνικής διατομής ακροφύσιο μεγαλύτερου μήκους, που οδηγεί το νερό καμπυλωτά σε ένα κυλινδρικού σχήματος δρομέα. Το νερό επιβραδύνεται σε δύο στάδια, συναντώντας τα πτερύγια του δρομέα δύο φορές, καθώς διέρχεται σε αυτόν οριζόντια. Η σχεδίαση μεγαλύτερου μήκους, όσο αφορά τον δρομέα και το ακροφύσιο εισόδου, αυξάνει τη χωρητικότητα για παροχή του υδροστρόβιλου, επιτρέποντας έτσι την αξιοποίηση μικρότερων υψών υδατόπτωσης.



Σχήμα 3.18 (α) Λίγο πιο εξελιγμένη διάταξη υδροστροβίλου Crossflow με απόδοση μέχρι και 80%, (β) Πιο απλή διάταξη υδροστροβίλου Crossflow με λίγο χαμηλότερη απόδοση^[3]

Η κατασκευή ενός υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής μπορεί να είναι πιο εξεζητημένη και να καλύπτει μεγαλύτερο εύρος ροής με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, αλλά και πιο απλή και φθηνή αν συμβιβαστεί κανείς με έναν βαθμό απόδοσης γύρω στο 65% -70%. Στην πρώτη περίπτωση, έχουμε καλύτερη διαχείριση των διακυμάνσεων της ροής και διατήρηση σταθεράς πίεσης με τη βαλβίδα αέρος. Πιο αναλυτικά, η διάταξη του υδροστροβίλου Crossflow του σχήματος 3.18(α) έχει ως εξής:

Το ακροφύσιο για τον υδροστροβίλο εγκάρσιας ροής είναι ορθογώνιο και το πλάτος του ταιριάζει με το πλάτος του δρομέα. Η βάνα κατευθύνσεως (control vane) που τοποθετείται στο ακροφύσιο, οδηγεί την απαιτούμενη ποσότητα ροής στον δρομέα, επιτυγχάνει την απαραίτητη αυξομείωση της διατομής ανάλογα με τη μεταβολή της ροής και μπορεί να ελεγχθεί είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα με οδηγό. Ο δρομέας είναι το κεντρικό στέλεχος του συστήματος, έχει σχήμα κυλινδρικό και τα κύρια εξαρτήματά του είναι ο άξονας, τα πτερύγια και τα έδρανα περιστροφής. Τα πτερύγια τοποθετούνται στην περιφέρεια του τροχού και η λειτουργία τους είναι να μεταβάλλουν με ομαλό τρόπο την κατεύθυνση της εισερχόμενης από το ακροφύσιο ροής. Αύξηση του ενεργού υδραυλικού ύψους μπορεί να επιτευχθεί με τον αγωγό απαγωγής (ή ελκυσμού ή διέλευσης, draught tube), ο οποίος και πρέπει να είναι πάντα γεμάτος με νερό. Τέλος, η βαλβίδα αέρα μπορεί να λειτουργεί με πλωτήρα ή ελατήριο και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της στάθμης του νερού μέσα στο κέλυφος του στροβίλου. Όταν ο υδροστροβίλος περιστρέφεται, ο αέρας μέσα στο κέλυφος παρασύρεται έξω, έτσι ώστε να αναπτυχθεί κενό, και μία στήλη αναρρόφησης (suction head) ανέρχεται μέσα στον αγωγό ελκυσμού.^[14]

Ο υδροστροβίλος εγκάρσιας ροής χρησιμοποιείται σε πολλά micro-υδροηλεκτρικά συστήματα, λόγω των εύκολων τεχνικών κατασκευής του και της δυνατότητάς του να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος υψών υδατόπτωσης και παροχών. Η περιοχή βέλτιστης απόδοσής του είναι σε μεσαία υδραυλικά ύψη, όπου δεν αναπτύσσει μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και ο δρομέας δεν είναι πολύ μικρός. Ωστόσο, για τα μεγέθη ισχύος των pico-υδροηλεκτρικών, οι υδροστροβίλοι αυτοί τείνουν να έχουν μεγάλα μεγέθη και να στέφονται σε σχετικά μικρές ταχύτητες. Ακόμα και για υδροστροβίλους ισχύος 10kW, αποδόσεις υψηλότερες του 70% είναι δύσκολο να επιτευχθούν, αν και έχουν αναφερθεί στην περίπτωση βελτιστοποιημένων σε εργαστήρια υδροστροβίλων Crossflow.^[16]

3.2.3.1 Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής

Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν περισσότερο κατά τη διαστασιολόγηση ενός υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής είναι το μήκος (L_{runner}) και η διάμετρος (D_{runner}) του δρομέα και το πάχος της δέσμης (t_{jet}), η οποία σχεδιάζεται για τη μέγιστη απόδοση. Το πλάτος της δέσμης νερού (b_o) (ορθογωνικής διατομής) είναι ίσο με το μήκος του δρομέα.

Αρχικά, καθορίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου $n_{crossflow}$ (σύμφωνα και με τη γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί) και εν συνεχεία υπολογίζεται προσεγγιστικά η διάμετρος του δρομέα D_{runner} μέσω του τύπου (3.12):

$$D_{runner} = 40 \frac{\sqrt{H_{net}}}{n_{crossflow}} \quad (3.12)$$

Το πάχος της δέσμης t_{jet} κυμαίνεται συνήθως από το ένα δέκατο ως το ένα πέμπτο της διαμέτρου του δρομέα. Ο λόγος αυτός εξαρτάται και από την τοποθέτηση ή όχι βάνας ελέγχου της ροής και πρέπει να επιβεβαιώνεται από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, συνήθως ισχύει ότι:

$$t_{jet} = (0,1 \rightarrow 0,2)D_{runner}$$

Αφού έχει καθοριστεί το πάχος της δέσμης, υπολογίζεται το μήκος του δρομέα μέσω του πλάτους της δέσμης και της εξίσωσης εκφόρτισης του ακροφυσίου μέσω του τύπου (3.13):

$$Q = A_{nozzle} c_d \sqrt{2gH_{net}} \quad (3.13)$$

όπου $A_{nozzle} = b_o * t_{jet} = L_{runner} * t_{jet}$: η διατομή του ακροφυσίου
 c_d : συντελεστής εκφόρτισης του ακροφυσίου

Επομένως, το μήκος του δρομέα δίνεται από τον τύπο (3.14):

$$L_{runner} = \frac{Q}{c_d t_{jet} \sqrt{2gH_{net}}} = \frac{0,23Q}{c_d t_{jet} \sqrt{H_{net}}} \quad (3.14)$$

3.3 Υδροστρόβιλοι Αντιδράσεως

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης χρησιμοποιούν την πίεση και την ταχύτητα του νερού για να αναπτύξουν μηχανική ισχύ. Το ρεύμα του νερού «περνάει συνεχώς» μέσα από ολόκληρη την περιφέρεια του υδροστροβίλου και εξέρχεται αξονικά. Με τον τρόπο αυτό, το νερό παρέχει σταθερή ώθηση στον δρομέα (αντίθετα με τους υδροστροβίλους δράσεως όπου υπάρχει μια σειρά από διαδοχικές κρούσεις επάνω στους κάδους του δρομέα) και η ροή διαμέσου της

περωτής γίνεται με παράλληλη μεταβολή της πίεσης του νερού. Με σκοπό την επίτευξη της ομοιόμορφης τροφοδοσίας και λειτουργίας της περωτής, το τμήμα εισόδου περιβάλλει την περωτή και έχει τη μορφή σπειροειδούς κελύφους. Επίσης, οι υδροστρόβιλοι αυτής της κατηγορίας είναι εφοδιασμένοι στην έξοδό τους με έναν αγωγό απαγωγής, καθώς δημιουργεί ένα «ύψος αναρρόφησης», που συμβάλλει μαζί με το υδραυλικό ύψος στην παραγωγή ενέργειας πάνω στον στρόβιλο.



Σχήμα 3.19 Παραδείγματα υδροηλεκτρικών συστημάτων με υδροστρόβιλους αντίδρασης που συνδέονται στον ίδιο άξονα με τη γεννήτρια

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης είναι καταλληλότεροι για συστήματα με μικρά έως μεσαία υδραυλικά ύψη και μεγαλύτερες τιμές παροχής. Ειδικά, για εφαρμογές μικρού υδραυλικού ύψους, οι υδροστρόβιλοι αυτοί προσφέρουν μικρότερες διαμέτρους στρόβιλου και μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής, αν και πρέπει να διαχειριστούν μεγάλες τιμές παροχής. Λόγω των μεγάλων ταχυτήτων στις οποίες μπορούν να περιστραφούν, οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης προσφέρουν τη δυνατότητα για άμεση σύζευξή τους με τη γεννήτρια χωρίς την παρεμβολή κάποιου κιβωτίου ταχυτήτων, που θα αύξανε το κόστος και τις απώλειες του συστήματος. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημά τους είναι ότι η λειτουργία τους μπορεί να αντιστραφεί και να χρησιμοποιηθούν και ως αντλίες όταν αυτό απαιτείται, για λόγους ενεργειακής αποθήκευσης. Επίσης, μπορούν να επιτύχουν μεγάλες τιμές βαθμού απόδοσης.

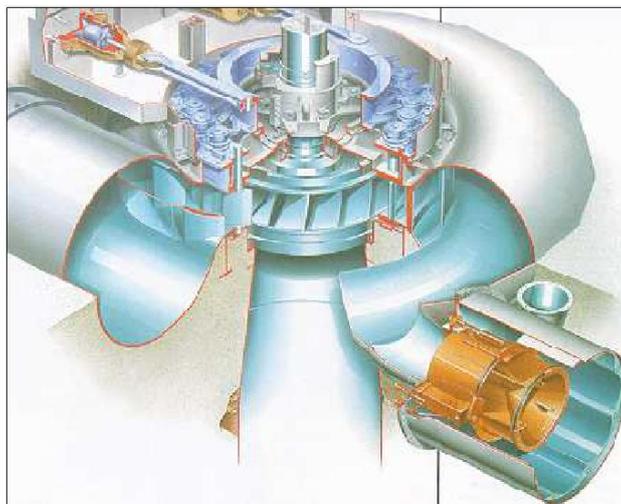
Ωστόσο, ο βαθμός απόδοσής τους μειώνεται πολύ σε συνθήκες μερικής ροής και χρειάζεται πιο πολύπλοκος και ακριβός μηχανισμός ελέγχου των αλλαγών της διεύθυνσης των περυνγίων, ώστε η ροή να είναι πάντα κάθετη σε αυτά. Παράλληλα, οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης παρουσιάζουν προβλήματα λόγω του φαινομένου σπηλαιώσης, των μεγάλων αυξομειώσεων της πίεσης του νερού, το οποίο προκαλεί ζημιές στα περύγια. Τέλος, επιβάλλεται σε αυτούς η ύπαρξη πολύ καλής στεγανοποίησης του περιβλήματος του

στροβίλου, διότι λόγω διαρροής μπορεί να δημιουργηθεί μεγάλη απώλεια ισχύος. Έτσι, μπορεί οι επιδόσεις τους να υποβαθμιστούν, καθώς η άμμος και τα κατακάθια λάσπης (που μπορεί να μεταφέρει το νερό) προκαλούν μεγαλύτερη τριβή στη στεγάνωση, σε σχέση με τους υδροστροβίλους δράσεως.^[3]

Στην κατηγορία των υδροστροβίλων αντιδράσεως ανήκουν ο υδροστρόβιλος Francis, ακτινικής και μικτής ροής, οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, όπως ο Kaplan (τύπου προπέλας) και ο υδροστρόβιλος διαγώνιας ροής τύπου Deriaz. Αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο στα μικρο-υδροηλεκτρικά συστήματα είναι ο στρόβιλος Francis και ο Kaplan και η λειτουργία τους περιγράφεται αναλυτικότερα στα επόμενα δύο υποκεφάλαια.

3.3.1 Υδροστρόβιλος Francis

Ο υδροστρόβιλος Francis είναι ένας μικτού τύπου στρόβιλος αντιδράσεως με ακτινική εισαγωγή νερού και αξονική εκροή, ο οποίος κατασκευάστηκε για πρώτη φορά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και χρησιμοποιείται για μεγαλύτερα υδραυλικά ύψη από τους υπόλοιπους υδροστροβίλους της ίδιας κατηγορίας.

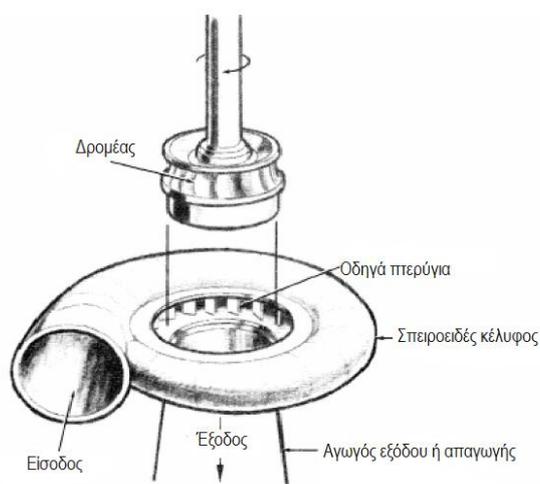


Σχήμα 3.20 Υδροστρόβιλος Francis

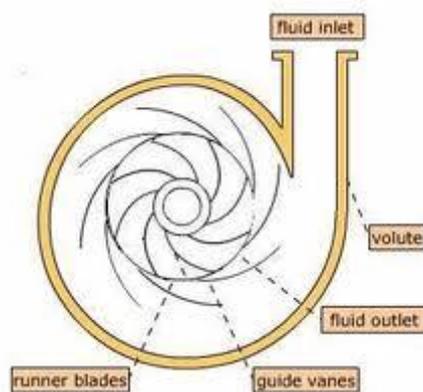
Αρχικά το νερό εισέρχεται στη σπείρα, που είναι ένα δακτυλιοειδές κανάλι με διαρκώς ελαττούμενη διατομή που περιβάλλει τον δρομέα, και στη συνέχεια ρέει μεταξύ των κατευθυντηρίων βανών, οι οποίες προσδίδουν στο νερό τη βέλτιστη διεύθυνση ροής. Ακολούθως, το νερό ρέει ακτινικά προς το κέντρο, προσπίπτει στον δρομέα, στρέφεται κατά γωνία 90° μέσα σε αυτόν και τέλος, βγαίνει αξονικά διαμέσου μίας εξόδου από το κέντρο του στροβίλου.

Η ροή συνήθως ελέγχεται από 12 ως 24 πύλες φράγματος, οι οποίες ρυθμίζουν την τιμή της παροχής, αλλά και αλλάζουν τη γωνία ροής. Τα πτερύγια της πτερωτής του υδροστροβίλου αυτού εκτείνονται μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης, στην οποία είναι πακτωμένα. Αυξάνεται έτσι η μηχανική στιβαρότητα της κατασκευής και η αντοχή στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια από τη διερχόμενη ροή.

Στα συστήματα που χρησιμοποιούν υδροστροβίλους Francis μπορούν να αναπτυχθούν ευκολότερα υδραυλικά πλήγματα και γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να λαμβάνονται ειδικά προληπτικά μέτρα. Για την αντιμετώπιση, λοιπόν, του υδραυλικού πλήγματος εξαιτίας της απότομης αλλαγής της ροής τοποθετούνται βαλβίδες ανακούφισης της πίεσης, οι οποίες παράλληλα, μειώνοντας την αύξηση της πίεσης, αποτρέπουν τη συσσώρευση φερτών υλών στους σωλήνες εξαιτίας του υδραυλικού πλήγματος.



Σχήμα 3. 21 Σχηματική απεικόνιση υδροστροβίλου Francis (1) ^[3]



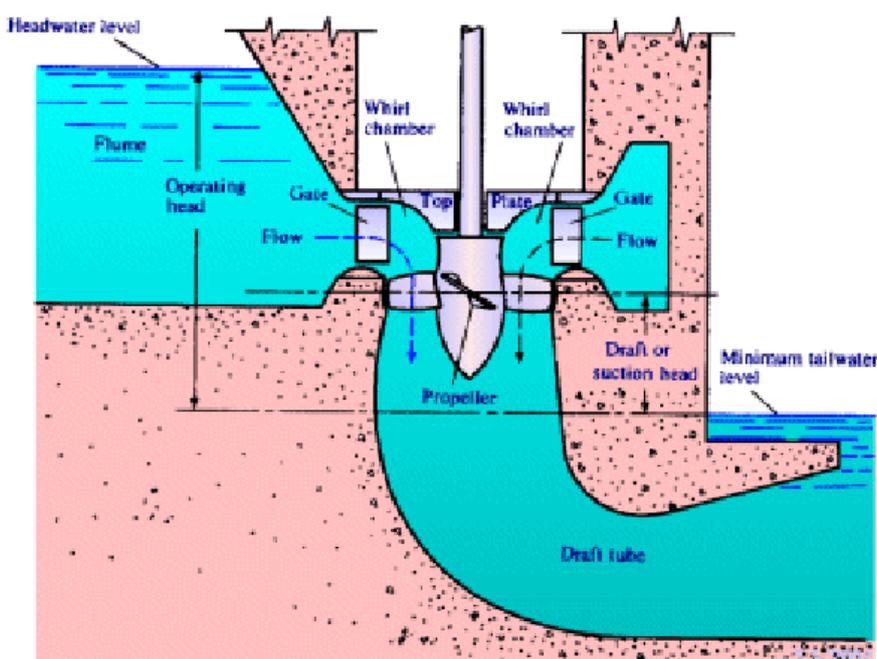
Σχήμα 3.22 Σχηματική απεικόνιση υδροστροβίλου Francis (2) ^[1]

Οι υδροστροβίλοι Francis μπορούν να τοποθετηθούν είτε οριζόντια είτε κάθετα και να επιτύχουν αρκετά καλό βαθμό απόδοσης, ο οποίος όμως μειώνεται κατά πολύ όταν η τιμή της παροχής πέσει κάτω από το ήμισυ της τιμής σχεδίασης του υδροστροβίλου. Λόγω του

οικονομικού κόστους, της πολυπλοκότητας της κατασκευής και του σχετικά χαμηλού βαθμού απόδοσης σε συνθήκες μερικής παροχής οι υδροστρόβιλοι Francis δε χρησιμοποιούνται συχνά σε micro/rico- υδροηλεκτρικά συστήματα, αν και συνεχίζονται οι προσπάθειες για βελτίωση και απλοποίηση της κατασκευής τους.

3.3.2 Υδροστρόβιλος τύπου προπέλας και Kaplan

Οι υδροστρόβιλοι Kaplan και τύπου προπέλας είναι αξονικής ροής υδροστρόβιλοι αντίδρασης, που χρησιμοποιούνται γενικά για χαμηλά ύψη υδατόπτωσης. Τα δύο αυτά είδη στρόβιλων είναι πανομοιότυπα, καθώς ο δρομέας τους έχει τη μορφή προπέλας (παρόμοιας με αυτή ενός πλοίου, χωρίς όμως την καμπύλωση στα άκρα), η οποία λειτουργεί μέσα σε ένα κέλυφος υπό πίεση. Βασική τους διαφορά είναι ότι στον υδροστρόβιλο τύπου προπέλας η γωνία των πτερυγίων του δρομέα παραμένει σταθερή, σε αντίθεση με τον υδροστρόβιλο Kaplan, στον οποίο η γωνία αλλάζει ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ροής. Λόγω αυτής της έλλειψής τους, οι υδροστρόβιλοι τύπου προπέλας έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης (λίγο πάνω από 50%) και δε μπορούν να ανταποκριθούν σε μεταβολές της ροής. Ωστόσο, στα micro/rico-υδροηλεκτρικά συστήματα χαμηλού υδραυλικού ύψους όπου το χαμηλό κόστος και η ευκολία και απλότητα της κατασκευής αποτελούν βασικές προτεραιότητες, οι υδροστρόβιλοι αυτοί προτιμώνται, ιδίως μάλιστα όταν η παροχή δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις.

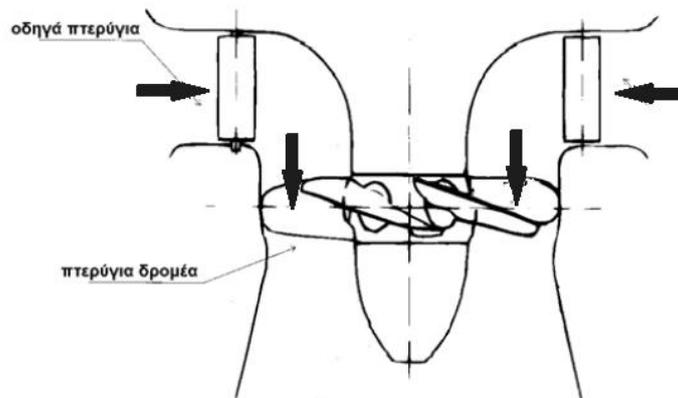


Σχήμα 3.23 Διάταξη υδροηλεκτρικού έργου με υδροστρόβιλο τύπου προπέλας

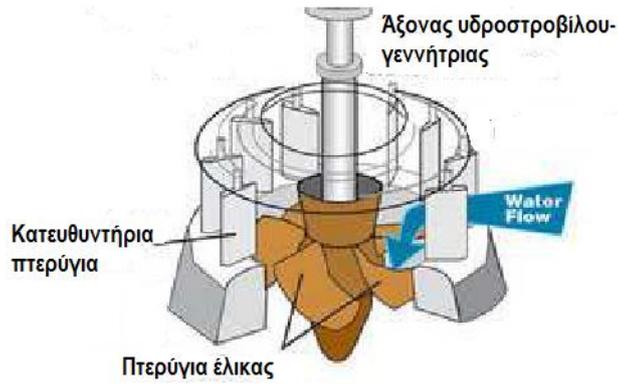


Σχήμα 3.24 Υδροστρόβιλος τύπου προπέλας {<http://fuchunind.en.ecplaza.net/trade-leads/axial-flow-turbine-unit-model--172059-6517210.html>}

Το κενό που δημιουργείται από την περιορισμένου εύρους παροχής λειτουργία των υδροστρόβιλων τύπου προπέλας, έρχεται να καλύψει ο "διπλής ρύθμισης" υδροστρόβιλος Kaplan. Στη συμβατική του εκδοχή διαθέτει ένα σπειροειδές περίβλημα είτε από χάλυβα είτε από σιδηροπαγές σκυρόδεμα. Το νερό εισέρχεται ακτινικά στον στρόβιλο, εκτρέπεται από τα κατευθυντήρια πτερύγια και ρέει αξονικά μέσω της προπέλας. Η ποσότητα του νερού που ρέει διαμέσου του στρόβιλου μπορεί να ελεγχθεί μέσω της απόστασης μεταξύ των κατευθυντήριων πτερυγίων. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα και ο αριθμός των πτερυγίων της προπέλας, ο οποίος κυμαίνεται από τρία έως έξι (τρία χρησιμοποιούνται για πολύ μικρά ύψη υδατόπτωσης). Κάθε ρύθμιση των κατευθυντηρίων βανών αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη ρύθμιση των πτερυγίων της προπέλας με σκοπό να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του στοιχείο είναι ότι η ταχύτητα του πτερυγίου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του νερού.



(α)



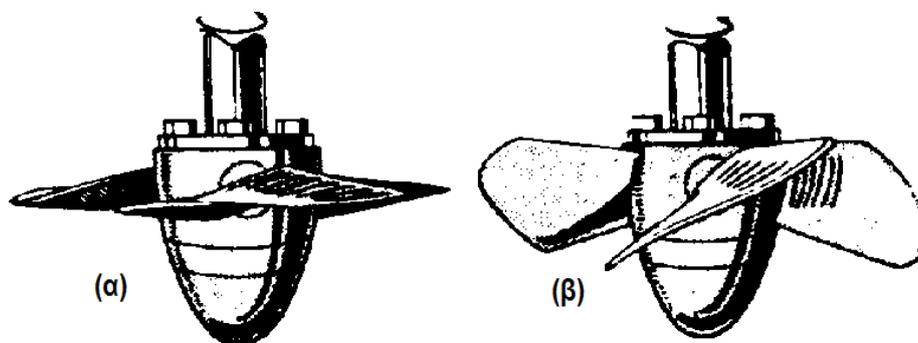
(β)

Σχήμα 3.25 Διαμόρφωση υδροστροβίλου Kaplan (α)^[9], (β)^[11]

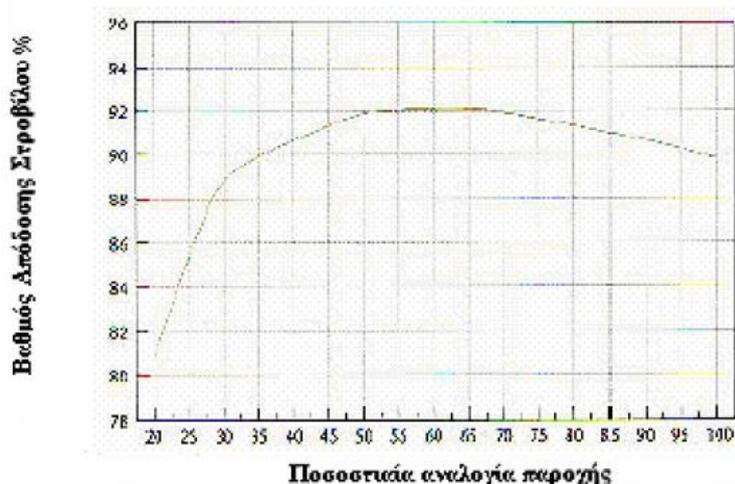
Λόγω της μεγάλης ειδικής ταχύτητας του υδροστροβίλου Kaplan είναι δυνατή η απευθείας σύνδεσή του με τη γεννήτρια για μεσαία υδραυλικά ύψη και μικρότερες τιμές παροχής. Επίσης, λόγω της δυνατότητας ρύθμισης της κλίσης των πτερυγίων της έλικας, παρέχεται η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου εύρους τιμών παροχής νερού, με ταυτόχρονη επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 3.26 Προπέλα υδροστροβίλου Kaplan



Σχήμα 3.27 Σχηματική απεικόνιση προπέλας υδροστροβίλου Kaplan (α) κλίση πτερυγίων για χαμηλή ισχύ, (β) κλίση πτερυγίων για μεγάλη ισχύ



Σχήμα 3.28 Καμπύλη απόδοσης ενός τυπικού υδροστροβίλου Kaplan^[4]

Παρ' όλα αυτά, οι υδροστροβίλοι Kaplan χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά συστήματα (και όχι σε micro-εφαρμογές) λόγω του μεγάλου κόστους και της πολύπλοκης κατασκευής τους. Ακόμα και σε αυτά όμως, απαιτούνται πολύ μεγάλες τιμές παροχής για να επιτευχθεί η αναμενόμενη απόδοση, λόγω των μικρών υδραυλικών υψών που μπορούν να διαχειριστούν · γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή έλικας μεγάλου μεγέθους. Γίνονται προσπάθειες όμως από οργανισμούς και πανεπιστήμια, για τη βελτιστοποίηση της κατασκευής του ώστε διευρυνθεί η χρήση του.

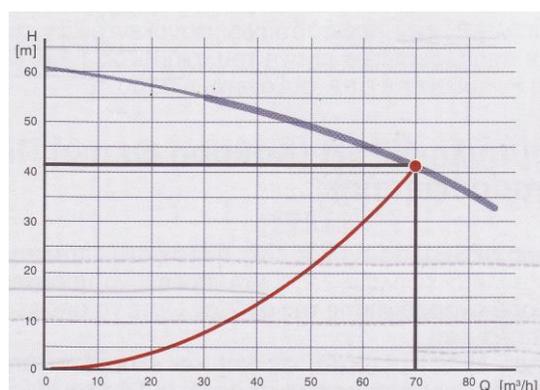
3.4 Χρήση φυγοκεντρικής αντλίας ως υδροστρόβιλο (PAT)

Μία φυγοκεντρική αντλία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υδροστρόβιλος (pump as turbine, PAT), αν αντιστραφεί η ροή σε αυτήν και το στόμιο καταθλίψεως χρησιμοποιηθεί ως στόμιο εισόδου. Η χρήση της συνηθίζεται σε μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα με μεσαία υδραυλικά ύψη και σχετικά σταθερές τιμές παροχής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

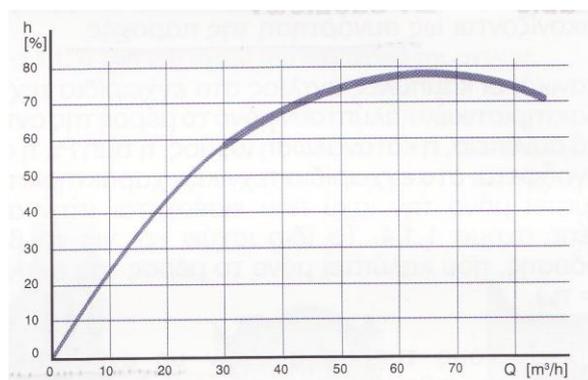
Η διευρυμένη χρήση των αντλιών ως υδροστροβίλων οφείλεται στην τυποποίηση, την ευρεία κατασκευή και εγκατάστασή τους σε πολλές αγροτικές περιοχές, η οποία συμβάλλει στην ύπαρξη τεχνογνωσίας, στη δυνατότητα επισκευής βλαβών και συντήρησης από τοπικούς μηχανικούς, στη χαμηλή τιμή και στην ευκολία εύρεσης πλειάδας ανταλλακτικών. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των PAT είναι η άμεση σύζευξη του δρομέα και της γεννήτριας αποφεύγοντας έτσι την παρεμβολή κάποιου πολλαπλασιαστή ταχυτήτων. Για συστήματα με ισχύ εξόδου μικρότερη από 10kW και υδραυλικά ύψη χαμηλότερα από 30m, η χρήση αντλίας είναι πολύ οικονομικότερη επιλογή από την αγορά ενός υδροστροβίλου Pelton με πολλές δέσμες ή Crossflow. Ο βασικός περιοριστικός παράγοντας στη χρησιμοποίηση αντλιών ως υδροστροβίλων, είναι η χαμηλή τους απόδοση, η οποία μειώνεται κατά πολύ ακόμα και με

σχετικά μικρή μείωση της τιμής της παροχής, καθώς επίσης και η απουσία ενός μοντέλου ακριβούς υπολογισμού των δεδομένων λειτουργίας της αντλίας ως υδροστρόβιλου.

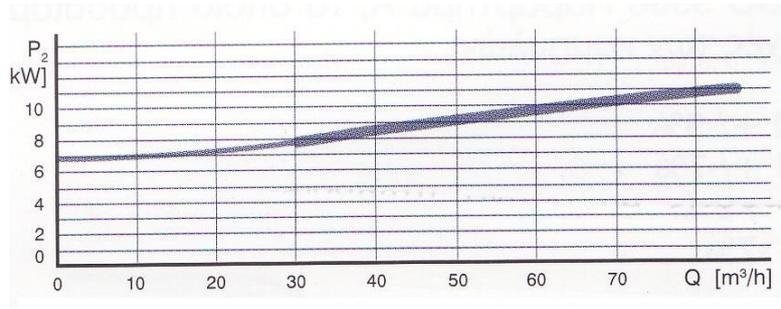
Η φυγοκεντρική αντλία εφευρέθηκε το 1689 από τον φυσικό Denis Papin και η λειτουργία της βασίζεται σε μία απλή αρχή: το υγρό οδηγείται στον άξονα κίνησης της περωτής και μέσω της φυγόκεντρης δύναμης εκτινάσσεται προς την περιφέρεια της περωτής. Η λειτουργία μίας αντλίας περιγράφεται από μία ομάδα χαρακτηριστικών καμπυλών, στις οποίες το μανομετρικό ύψος H , η ισχύς κατανάλωσης P_2 , η απόδοση $h(\%)$ και η καθαρή θετική πίεση αναρρόφησης (net positive suction head, NPSH) απεικονίζονται ως συνάρτηση της παροχής. Η καθαρή θετική πίεση αναρρόφησης είναι η ελάχιστη απόλυτη πίεση που πρέπει να υπάρχει στην πλευρά αναρρόφησης της αντλίας ώστε να αποφεύγεται η σπηλαιώση.^[15] Η επιλογή της καταλληλότερης για ένα σύστημα αντλίας γίνεται με συνδυαστική χρήση των καμπυλών των σχημάτων 3.29 και 3.30. Στόχος είναι η εύρεση κάποιας αντλίας με σημείο βέλτιστης λειτουργίας (H_{bep} , Q_{bep}) πιο κοντά στα στοιχεία (μανομετρικό ύψος H_{sp} και ροή Q_{sp}) του προς μελέτη συστήματος.



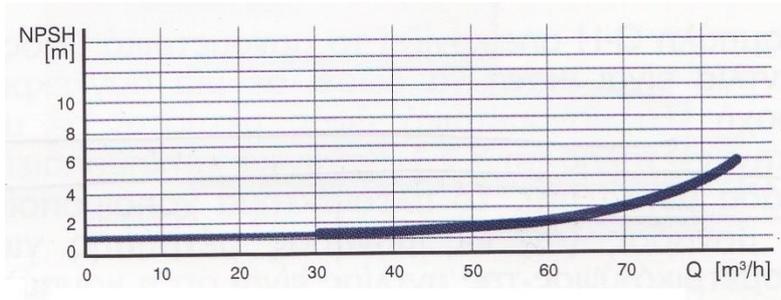
Σχήμα 3.29 Τυπική καμπύλη $H-Q$ (η μπλε καμπύλη) μιας φυγοκεντρικής αντλίας, στην οποία η χαμηλή παροχή έχει ως αποτέλεσμα υψηλό μανομετρικό ύψος και η υψηλή παροχή έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό μανομετρικό ύψος. Η κόκκινη καμπύλη είναι η χαρακτηριστική του συστήματος, όπου αυξάνοντας την παροχή αυξάνονται και οι υδραυλικές απώλειες και το μανομετρικό ύψος. Το σημείο τομής τους είναι το σημείο λειτουργίας της αντλίας για το συγκεκριμένο σύστημα.^[15]



Σχήμα 3.30 Η καμπύλη απόδοσης μίας τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας^[15]



Σχήμα 3.31 Η καμπύλη κατανάλωσης ισχύος μίας τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας ^[15]

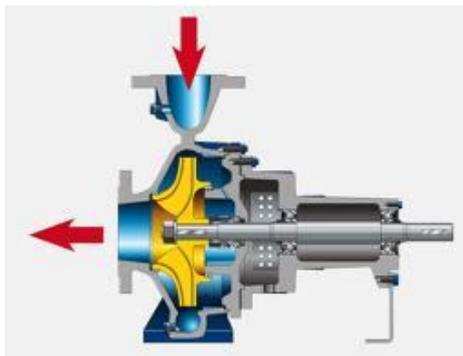


Σχήμα 3.32 Η καμπύλη NPSH μίας τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας ^[15]

Υπάρχουν πολλά είδη φυγοκεντρικών αντλιών. Αυτές όμως που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευκολότερα και αποδοτικότερα ως υδροστρόβιλοι με αντιστροφή της ροής τους είναι οι μονοβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες μονής αναρρόφησης, όπως αυτή του σχήματος 3.33.

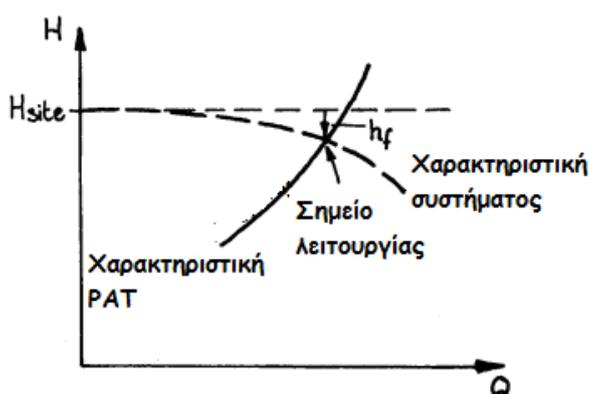


Σχήμα 3.33 Φυγοκεντρική αντλία monoblock. Στις αντλίες monoblock το υγρό ρέει απευθείας μέσα στην πτερωτή και η είσοδος με την έξοδο σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90°

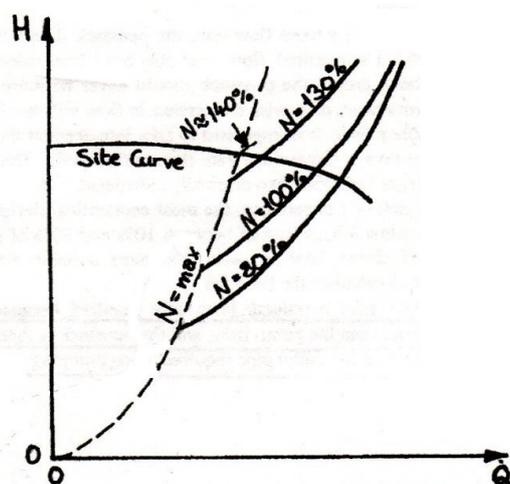


Σχήμα 3.34 Φυγοκεντρική αντλία monoblock που χρησιμοποιείται ως υδροστρόβιλος

Η χαρακτηριστική καμπύλη H-Q λειτουργίας μίας αντλίας κατά τη χρήση της ως υδροστρόβιλο (PAT), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.35, έχει τελείως διαφορετική μορφή από αυτή του σχήματος 3.29 και μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της. Επίσης στην περίπτωση αυτή, και η χαρακτηριστική του συστήματος έχει πολύ διαφορετική μορφή. Με μηδενική παροχή, οι υδραυλικές απώλειες είναι μηδενικές και το καθαρό ύψος υδατόπτωσης ταυτίζεται με την κατακόρυφη μετρηθείσα υψομετρική διαφορά. Όσο όμως αυξάνεται η παροχή, αυξάνονται και οι απώλειες με αποτέλεσμα να μειώνεται το καθαρό υδραυλικό ή μανομετρικό ύψος που έχει να διαχειριστεί η αντλία.



Σχήμα 3.35 Χαρακτηριστικές καμπύλες PAT και συστήματος ^[16]



Σχήμα 3.36 Χαρακτηριστικές καμπύλες H-Q μίας PAT για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, που προκύπτουν από αυξομειώσεις φορτίων ^[16]

Για την επιλογή της κατάλληλης PAT, πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος στο οποίο αυτή θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή η ροή Q_{site} (όπου στην περίπτωση αυτή θεωρούμε την ελάχιστη ροή που είναι διαθέσιμη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους) και το καθαρό υδραυλικό ύψος $H_{site\ net}$, να πλησιάζουν το σημείο λειτουργίας της PAT με τη μέγιστη απόδοση H_{tbep} , Q_{tbep} . Κατά την αντίστροφη λειτουργία μίας αντλίας, το μανομετρικό ύψος και η παροχή για τον μέγιστο βαθμό απόδοσης (H_{tbep} , Q_{tbep}) είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της κανονικής

λειτουργίας της αντλίας (H_{pbep} , Q_{pbep}), αν και οι βαθμοί απόδοσης η_{tmax} και η_{pmax} δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή. Καθώς δεν υπάρχει ακριβής μέθοδος προσδιορισμού των H_{tbeep} , Q_{tbeep} , ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω των τύπων (3.15) και (3.16) με εύρος σφάλματος $\pm 20\%$.

$$Q_{tbeep} = \frac{n_t Q_{pbep}}{n_p \eta_{max}^{0,8}} \quad (3.15)$$

$$H_{tbeep} = \left(\frac{n_t}{n_p}\right)^2 \frac{H_{pbep}}{\eta_{max}^{1,2}} \quad (3.16)$$

όπου n_t : η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας κατά τη λειτουργία της ως υδροστρόβιλος

n_p : η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας

και η_{max} : ο μέγιστος βαθμός απόδοσης και για τους δύο τρόπους λειτουργίας της αντλίας

Έπειτα από τους υπολογισμούς, πραγματοποιείται έλεγχος της αντλίας σε συνθήκες όμοιες με αυτές του συστήματος για να διαπιστωθεί η σωστή και επιθυμητή λειτουργία της.^[16]

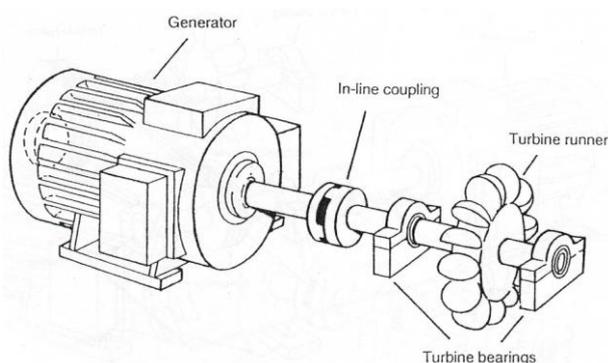
Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι αντλίες δε σχεδιάζονται για αντεστραμμένη ροή, ούτε για να ταιριάζουν με γεννήτριες. Οπότε, θα πρέπει να καθορίζεται το αν η αντλία και η γεννήτρια αντέχουν τα αντεστραμμένα φορτία. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών, αφού σε αυτές μεταφέρεται το βάρος του άξονα και το φορτίο λόγω υδραυλικής πίεσης σε ένα ωστικό έδρανο που βρίσκεται στην κινητήρια μηχανή. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει οπωσδήποτε η γεννήτρια να έχει κατασκευασθεί για κάθετη τοποθέτηση και σίγουρα να έχει ένα ωστικό έδρανο ικανό να αντεπεξέλθει σε τέτοιων τάξεων φορτία.^[4] Τέλος, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε ο κινητήρα επαγωγής, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια να μην υπερφορτιστεί ούτε μηχανικά ούτε ηλεκτρικά. Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας επαγωγής θα πρέπει να περιοριστεί στο 80% της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.^[16] Το θέμα αυτό αναλύεται περισσότερο στο τέταρτο κεφάλαιο.

3.5 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης (drive system) μεταφέρει τη μηχανική ισχύ από τον στρόβιλο στη γεννήτρια εξασφαλίζοντας σωστή ταχύτητα περιστροφής για την τελευταία, και αποτελείται από τον άξονα της γεννήτριας και του υδροστρόβιλου, τα έδρανα, τα ρουλεμάν, τις συνδέσεις μεταξύ των αξόνων, καθώς και μάντες ή κιβώτια ταχυτήτων που μπορεί να

χρειαστούν. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από τον λόγο των ταχυτήτων περιστροφής. Ανεξάρτητα όμως από αυτό, θα πρέπει να αντέχει το απαιτούμενο μηχανικό φορτίο και αντίστοιχα η γεννήτρια και ο στρόβιλος να αντέχουν το φορτίο που επιβάλλεται από τον άξονα και το σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου συμπίπτει με την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, είναι δυνατή η άμεση σύζευξή τους είτε με στερέωση πάνω στον ίδιο άξονα είτε σε δύο άξονες συνδεδεμένους μεταξύ τους. Στην τελευταία περίπτωση, η οποία παριστάνεται στο σχήμα 3.37, οι άξονες πρέπει να είναι σωστά ευθυγραμμισμένοι και ζυγισμένοι, ώστε να αποφευχθεί καταστροφή των ρουλεμάν, των εδράνων και της σύνδεσης των αξόνων. Η σύνδεση μπορεί να είναι είτε άκαμπτη είτε εύκαμπτη, αν και προτιμάται η δεύτερη καθώς η ευθυγράμμιση δεν είναι ποτέ τέλεια. Με την άμεση σύζευξη στροβίλου και γεννήτριας επιτυγχάνεται μία πιο απλή, συμπαγής, στιβαρή, φθηνή και αποδοτική κατασκευή.

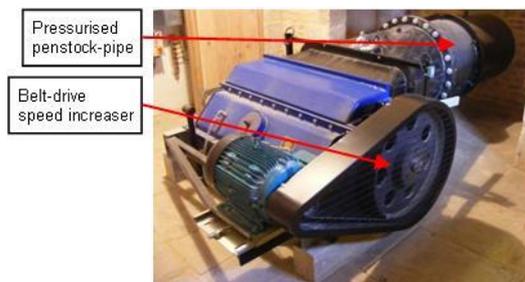


Σχήμα 3.5.1 Άμεση σύζευξη υδροστροβίλου γεννήτριας (Direct drive system) ^[3]

Αν, ωστόσο, οι δύο ταχύτητες περιστροφής διαφέρουν, τότε επιβάλλεται η χρήση ενός πολλαπλασιαστή στροφών, ο οποίος θα αποτελείται είτε από ιμάντες, είτε από ένα κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox). Στην πρώτη περίπτωση, ο λόγος της ταχύτητας της γεννήτριας προς την ταχύτητα του στροβίλου (n_g/n_t) καθορίζεται από τις διαμέτρους των τροχαλιών στους άξονες του στροβίλου και της γεννήτριας και δεν επιτρέπεται να πάρει τιμή μεγαλύτερη από 3:1. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη ιμάντων, ο πλατύς ιμάντας και ο ιμάντας τύπου V, και διάφορες τοπολογίες, οι οποίες αναπαριστώνται στα σχήματα 3.38 έως 3.41.

Οι παραδοσιακοί πλατείς ιμάντες κατασκευάζονται από δέρμα, βαμβάκι ή μουσαμά · υλικά σχετικά ασθενή, με λίγο μεταβαλλόμενες διαστάσεις στις αλλαγές του καιρού και με χαμηλό συντελεστή τριβής με τις τροχαλίες · ιδιότητες που τα καθιστούν ακατάλληλα για χρήση σε υδροηλεκτρικές εφαρμογές. Αντ' αυτών χρησιμοποιούνται πλατείς ιμάντες από νάιλον ή τερυλίνη, πιο είναι πιο ανθεκτικά υλικά και με υψηλότερους συντελεστές τριβής. Οι πλατείς ιμάντες δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε τροχαλίες με επίπεδες φλάντζες, καθώς μπορεί να

γλιστρήσουν προς τη μία πλευρά, με αποτέλεσμα να τρίβονται πάνω στη φλάντζα και τελικά να φθαρούν πολύ γρήγορα.



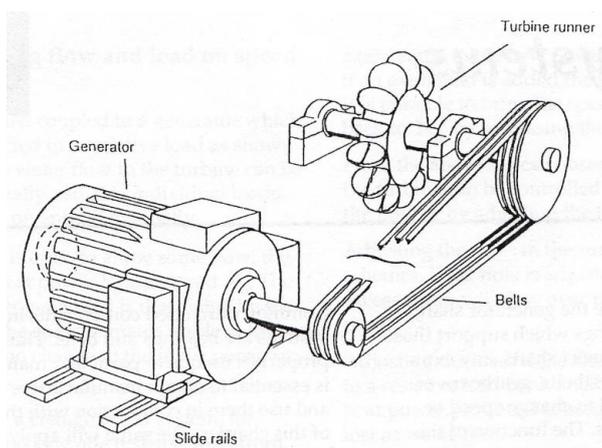
(α)



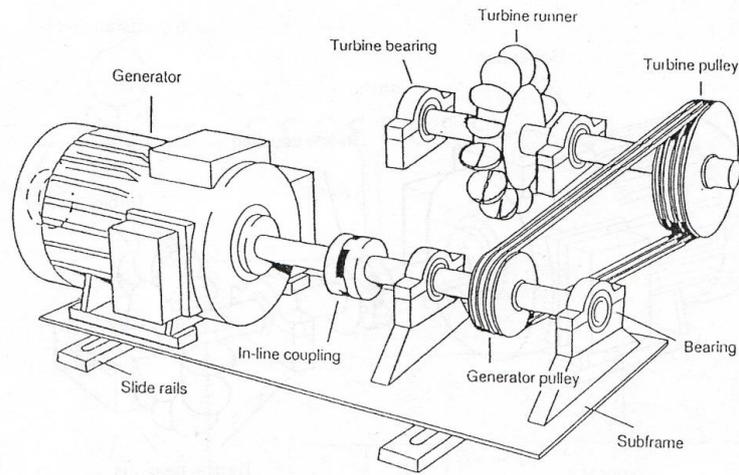
(β)

Σχήμα 3.38 (α) Σύστημα μετάδοσης κίνησης με έναν επίπεδο ιμάντα σε έναν υδροστρόβιλο Crossflow, (β) Σύστημα μετάδοσης κίνησης με έναν τύπου V ιμάντα

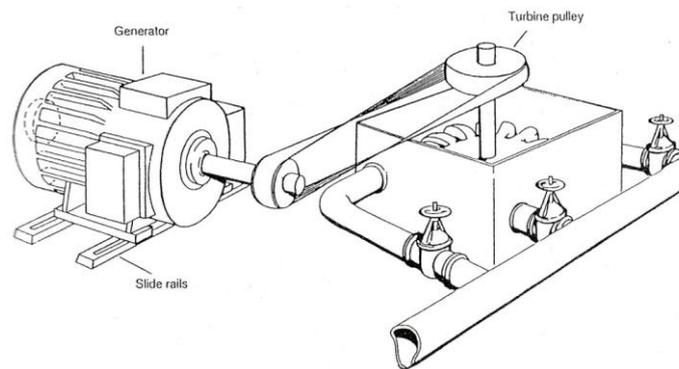
Οι τύπου V και οι “wedge” ιμάντες είναι πιο ανθεκτικοί και χρησιμοποιούνται στα περισσότερα συστήματα μετάδοσης κίνησης αυτού του είδους. Τοποθετούνται σε τροχαλίες με αυλακώσεις, οι οποίες αυξάνουν τον συντελεστή τριβής. Επίσης, σε κάθε εφαρμογή χρησιμοποιούνται πολλοί ιμάντες παράλληλα ο ένας με τον άλλο και είναι καλό να αγοράζονται ως σετ και αν κάποιος καταστραφεί να αντικαθιστάται ολόκληρη η ομάδα των ιμάντων. Οι τροχαλίες πρέπει να διαθέτουν αυλακώσεις κατάλληλου σχήματος και μεγέθους, και να είναι σωστά ευθυγραμμισμένες, ώστε οι ιμάντες να μη γλιστρούν στα άκρα τους για να μη φθείρονται.



Σχήμα 3.39 Σύστημα μετάδοσης κίνησης με έναν wedge ιμάντα. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και επίπεδος ιμάντας. Οι άξονες της γεννήτριας και του υδροστρόβιλου θα μπορούσαν να είναι κατακόρυφοι, αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι παράλληλοι και οι τροχαλίες ευθυγραμμισμένες^[3]

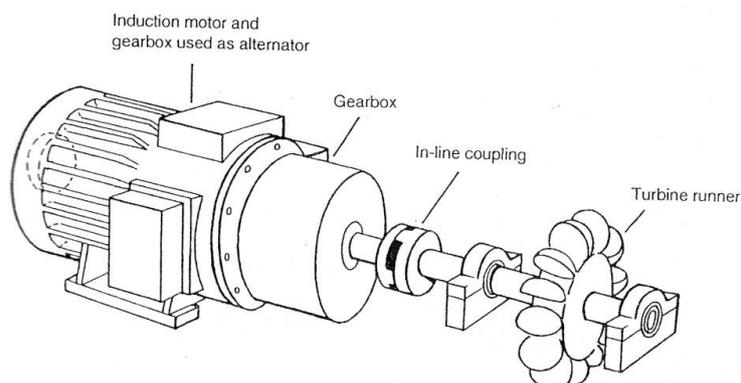


Σχήμα 3.40 Σύστημα μετάδοσης κίνησης με έναν wedge μιάντα, περισσότερα έδρανα και με επέκταση του άξονα της γεννήτριας με εύκαμπτη σύνδεση. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και επίπεδος μιάντας [3]



Σχήμα 3.41 Σύστημα μετάδοσης κίνησης με έναν πλατό μιάντα που στρέφεται κατά 90°. Θα μπορούσε αντί για επίπεδος να χρησιμοποιηθεί και wedge μιάντας. Πρέπει οι τροχαλίες να είναι πολύ καλά ευθυγραμμισμένες [3]

Εκτός από τους μιάντες, για μετάδοση της κίνησης με διαφορετική ταχύτητα περιστροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κιβώτιο ταχυτήτων. Η λύση αυτή, ωστόσο, αυξάνει το κόστος, την πολυπλοκότητα, τις απώλειες και τα επίπεδα θορύβου του συστήματος.





Σχήμα 3.42 Σύστημα μετάδοσης κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων

Η διαδικασία σχεδίασης του συστήματος μετάδοσης κίνησης ξεκινάει με τον υπολογισμό της μεταφερόμενης μέσω αυτού ισχύος, η οποία ισούται με το γινόμενο της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας επί τον βαθμό απόδοσής της. Ακολούθως, υπολογίζεται ο λόγος ταχυτήτων n_g/n_t και επιλέγεται το πιο κατάλληλο, οικονομικό και αξιόπιστο σύστημα από αυτά που προαναφέρονται. Αν επιλεγεί η χρήση ιμάντων, πρέπει να προσδιοριστεί το είδος που θα χρησιμοποιηθεί με κριτήριο τις τοπικές συνθήκες, τη διαθεσιμότητα, το κόστος κ.ο.κ. Εν συνεχεία, υπολογίζεται ο αριθμός των ιμάντων που θα χρησιμοποιηθούν και το πλάτος τους, καθώς και τα φορτία που υποβάλλονται πάνω στον άξονα όταν το υδροηλεκτρικό λειτουργεί με φορτίο. Πρέπει να ελεγχθεί αν τα έδρανα και τα ρουλεμάν της γεννήτριας και του υδροστροβίλου μπορούν να αντέξουν αυτά τα φορτία διατηρώντας μία αξιοπρεπή διάρκεια ζωής κι αν όχι, να ελεγχθεί μήπως μπορούν να τροποποιηθούν ή να αυξηθεί ο αριθμός τους ώστε να μπορέσουν να ανταποκριθούν. Επίσης, πρέπει να υπολογισθεί η τάνυση του ιμάντα και να επιλεγεί ένας τρόπος εφαρμογής, ελέγχου και διατήρησής της κατά τη λειτουργία του. Τέλος, πρέπει να αποφασισθεί με ποιον τρόπο θα συντηρούνται και διατηρούνται καθαροί και στεγνοί (έναντι λαδιού και υγρασίας) οι ιμάντες, καθώς και ποιος εξοπλισμός θα πρέπει να υπάρχει σε μεγαλύτερο αριθμό ώστε να είναι άμεσα διαθέσιμος σε περίπτωση βλάβης. Η διαδικασία διαστασιολόγησης του συστήματος μετάδοσης κίνησης με ιμάντες επίπεδους αλλά και τύπου V παρουσιάζεται με προσεγγιστικό τρόπο και χρήση των καταλόγων των κατασκευαστών πιο αναλυτικά στο [3].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

4.1 Εισαγωγή στις γεννήτριες

Σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα, η ηλεκτρική γεννήτρια αναλαμβάνει τη μετατροπή της παραγόμενης από τον υδροστρόβιλο μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, η οποία μεταφέρεται και καταναλώνεται εύκολα. Μια ηλεκτρική γεννήτρια αποτελείται από ένα σταθερό μέρος, που ονομάζεται στάτης και ένα κινητό μέρος που ονομάζεται δρομέας. Σε γενικές γραμμές, η λειτουργία μίας γεννήτριας έχει ως εξής: η άτρακτός της κινείται με γωνιακή ταχύτητα ίδιας φοράς με την εξωτερικά επιβαλλόμενη ροπή και αντίθετης φοράς προς την ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται μέσω της αλληλεπίδρασης των πεδίων του δρομέα και του στάτη. Η αντιρροπή αυτή επιτρέπει στη μηχανή να απορροφά μηχανική ενέργεια και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική. Έτσι, στο τύλιγμα τυμπάνου (το κύριο τύλιγμα της γεννήτριας) αναπτύσσεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), η οποία προκαλεί ένα ρεύμα που με τη σειρά του τροφοδοτεί ένα εξωτερικό φορτίο με συγκεκριμένη τάση ακροδεκτών.^[17]

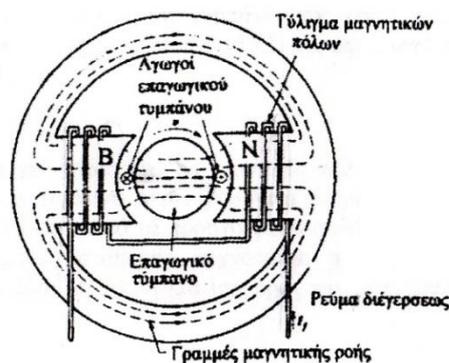
Παρά το γεγονός ότι τα παλαιότερα micro-υδροηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιούσαν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος για τη φόρτιση μπαταριών ή την τροφοδότηση μικρών dc συσκευών, έχει καθιερωθεί πλέον η χρήση γεννητριών εναλλασσομένου ρεύματος. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί, τη θέση που θα κατέχει σε αυτό και τα φορτία που θα κληθεί να τροφοδοτήσει, η γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, επαγωγής ή ακόμα σύγχρονη γεννήτρια με υβριδική διέγερση.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, πρέπει να είναι στιβαρή, να μπορεί να αντέχει υπερταχύνσεις της τάξης τουλάχιστον 60%, να μπορεί να συνδυαστεί με ένα σύστημα ελέγχου που να παρέχει τη δυνατότητα απλού και ταυτόχρονα αξιόπιστου ελέγχου της τάσης και της συχνότητας λειτουργίας της, να έχει καλή μόνωση και αερισμό και να έχει όσο γίνεται χαμηλότερο κόστος.

4.2 Σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης

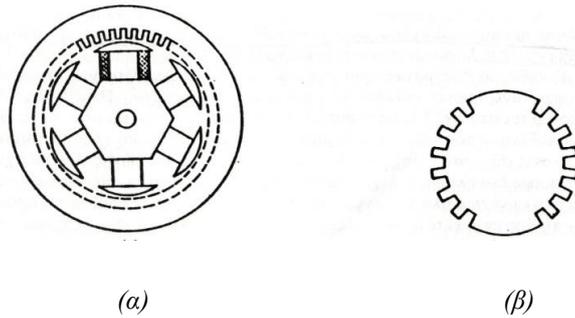
4.2.1 Περιγραφή λειτουργίας

Όπως όλες οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν δύο μέρη: ένα σταθερό που ονομάζεται στάτης και ένα στρεφόμενο που ονομάζεται δρομέας. Οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων με στόχο την ελάττωση των απωλειών διανορθωμάτων, και της μαγνητικής αντίστασης των δρόμων της μαγνητικής ροής. Εφόσον η γεννήτρια είναι ακτινικής ροής, ο δρομέας είναι ένας κύλινδρος και ο στάτης ένας κούφιος κύλινδρος που χωρίζονται μεταξύ τους από ένα μικρό διάκενο αέρα. Το τύλιγμα τυμπάνου μπορεί να βρίσκεται είτε στον στάτη είτε στον δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα συμπληρώνεται μέσα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του άλλου κυρίου μέρους της μηχανής, στο οποίο τοποθετείται το τύλιγμα διεγέρσεως ή πεδίου, που παράγει το μαγνητικό πεδίο, όταν δεν διεγείρεται το τύλιγμα τυμπάνου.

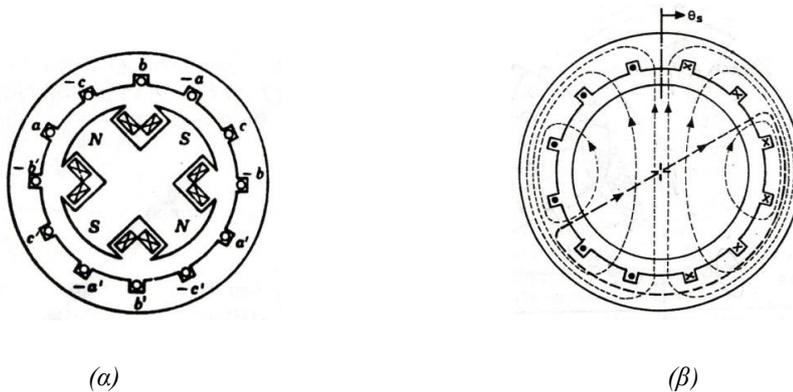


Σχήμα 4.1 Σύγχρονη γεννήτρια με το τύλιγμα τυμπάνου στον δρομέα ^[8]

Συνήθως, το τύλιγμα τυμπάνου τοποθετείται στον στάτη και το τύλιγμα διέγερσης στον δρομέα. Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στα άκρα της σπείρας αναπτύσσεται σε ένα ακίνητο σύστημα και κατά συνέπεια για την παραλαβή και μεταφορά της δεν είναι αναγκαία η παρεμβολή δακτυλιδιών και ψηκτρών. Η τοποθέτηση του τυλίγματος τυμπάνου γίνεται σε ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες στον στάτη και για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα, τοποθετούνται όμοια πηνία σε απέναντι αύλακες και στη συνέχεια όλα τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Όταν το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στον δρομέα, αυτός μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός (με τοποθέτηση τυλίγματος όμοια με αυτή που περιγράφηκε πριν) είτε να έχει έκτυπους πόλους γύρω από τους οποίους τυλίγονται συγκεντρωμένα πηνία.



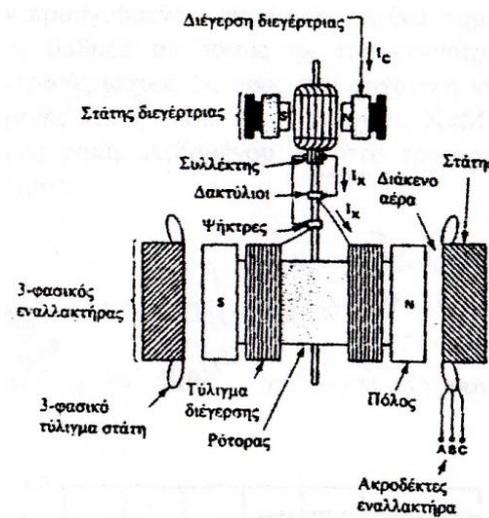
Σχήμα 4.2 (α) Δρομέας με έκτυπους πόλους, (β) Κυλινδρικός δρομέας ^[17]



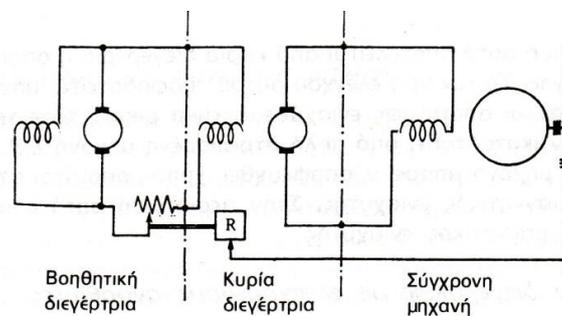
Σχήμα 4.3 (α) Τριφασική τετραπολική σύγχρονη γεννήτρια με έκτυπους πόλους ^[17], (β) Τριφασική γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα ^[19]

Το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας που θα τροφοδοτήσει το τύλιγμα πεδίου με συνεχές ρεύμα μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο παλιός από αυτούς είναι μέσω μίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος η οποία είναι συνδεδεμένη απευθείας στον άξονα της μηχανής από τον οποίο παίρνει κίνηση και στην περίπτωση αυτή για τη σύνδεση της διεγέρτριας με τα τυλίγματα των μαγνητικών πόλων χρησιμοποιούνται δακτυλίδια και ψήκτρες στερεωμένα στον άξονα του δρομέα. Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μπορεί να είναι αυτοδιεγείρομενη και ο έλεγχος της διέγερσής της να γίνεται μέσω ενός ηλεκτρομηχανικού ρυθμιστή. Αυτό το σύστημα διέγερσης όμως έχει πολύ βραδεία απόκριση. Το σύστημα διέγερσης με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μπορεί να έχει γρηγορότερες αποκρίσεις, αν χρησιμοποιηθεί και μία αυτοδιεγείρομενη βοηθητική διεγέρτρια στον ίδιο άξονα με την κύρια, ενώ ένας ηλεκτρομηχανικός ρυθμιστής καθορίζει τη διέγερση της κύριας διεγέρτριας.^[18] Ένας τρόπος να αποφευχθούν τα δακτυλίδια και οι ψήκτρες είναι με τη χρήση μίας μικρής γεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος συνδεδεμένη στον ίδιο άξονα, η οποία να έχει το τύλιγμα πεδίου στον στάτη και το τύλιγμα τυμπάνου στον δρομέα. Τότε η έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται μέσω ενός ανορθωτή ημιαγωγού που είναι και αυτός στερεωμένος στον ίδιο άξονα και περιστρέφεται με αυτόν. Η διεγέρτρια είναι συνήθως μία αξονική πολυφασική σύγχρονη γεννήτρια. Αν οι ανορθωτές είναι ελεγχόμενοι, ο έλεγχος της

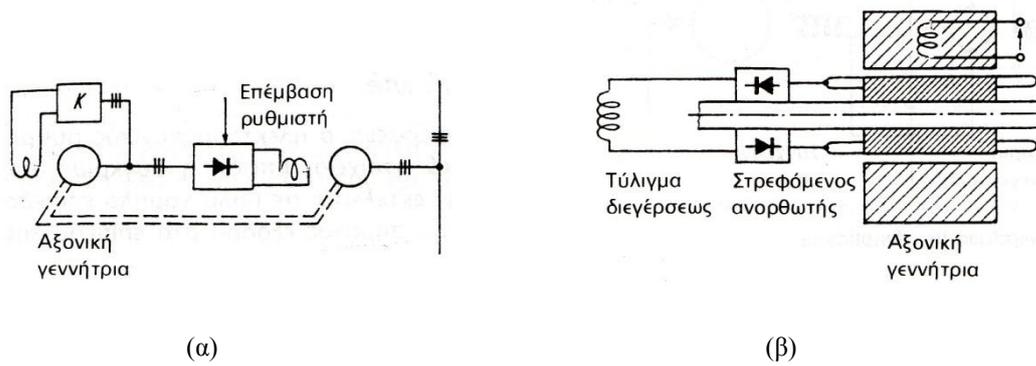
σύγχρονης γεννήτριας γίνεται με παρέμβαση στους ανορθωτές, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο έλεγχος της τάσης γίνεται μεταβάλλοντας τη διέγερση της μικρής μηχανής (της διεγέρτριας).^[18] Μία άλλη λύση είναι αντί της χρήσης ενός περιστρεφόμενου διεγέρτη να χρησιμοποιηθεί ένας στατικός ανορθωτής που τροφοδοτείται από το δίκτυο και παρέχει το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα πεδίου της σύγχρονης γεννήτριας. Ο έλεγχος της τάσης και του συντελεστή ισχύος γίνεται όπως στην περίπτωση του περιστρεφόμενου διεγέρτη, με παρέμβαση στους ανορθωτές. Οι στατικοί διεγέρτες είναι ανθεκτικοί, εύκολοι στη συντήρηση, με υψηλή απόδοση και καλή απόκριση στις ταλαντώσεις της τάσης της γεννήτριας. Τέλος, μία εναλλακτική λύση είναι η αυτοδιέγερση της γεννήτριας με χρήση ενός μέρους του ρεύματος εξόδου της που ανορθώνεται. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι η ικανότητα μίας αυτοδιεγερόμενης σύγχρονης γεννήτριας να εξασφαλίσει το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης κατά την εκκίνησή της εξαρτάται από την απομένουσα μαγνήτισή της. Το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας είναι πολύ μικρό και αντιστοιχεί γύρω στο 0,5-1% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.^[12]



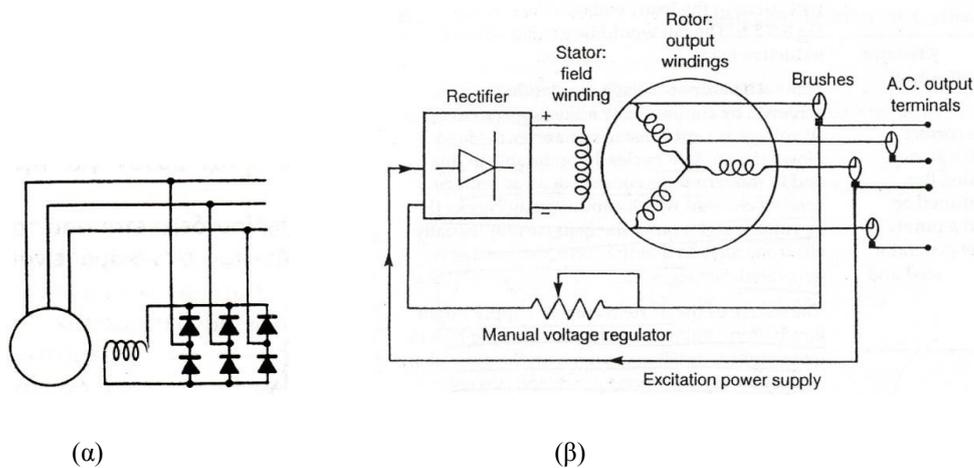
Σχήμα 4.4 Σχηματική διάταξη σύγχρονης γεννήτριας με τη διεγέρτριά της [8]



Σχήμα 4.5 Σύστημα διεγέρσεως με διεγέρτρια διεγερόμενη από βοηθητική γεννήτρια και ηλεκτρομηχανικό ρυθμιστή [18]



Σχήμα 4.6 (α) Αρχή συστήματος διεγέρσεως με ελεγχόμενους ανορθωτές και αξονική γεννήτρια. Η αξονική γεννήτρια αντισταθμίζεται με την διάταξη Κ, (β) Αρχή συστήματος διεγέρσεως με μη ελεγχόμενους ανορθωτές ^[18]



Σχήμα 4.7 Αυτοδιεγείρομενη σύγχρονη μηχανή (α) ^[18], (β) ^[3]

Όσο αφορά τους μαγνητικούς πόλους της γεννήτριας, είναι πάντοτε άρτιοι σε αριθμό, καθώς σχηματίζουν ζεύγη, και τα συγκεντρωμένα τυλίγματα των πηνίων διεγείρονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δίνουν σε διαδοχικούς πόλους εναλλάξ βόρεια και νότια πολικότητα. Το τύλιγμα διεγέρσεως τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, η πεπλεγμένη μαγνητική ροή με κάθε πηνίο μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Έτσι, επάγεται στο πηνίο του τυλίγματος τυμπάνου μία ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία έχει την ίδια μορφή με την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής μέσα στο διάκενο αέρα. Στις σύγχρονες γεννήτριες, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το συνεχές ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα του δρομέα, περιστρέφεται μαζί του με την ίδια ταχύτητα και η έντασή του είναι ανάλογη του αριθμού των σπειρών και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που τις διαρρέει. Για να αναπτυχθεί σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή, το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα και για μία σύγχρονη γεννήτρια με p πόλους που συνδέεται σε δίκτυο σταθερής συχνότητας f δίνεται από τον τύπο (4.1):

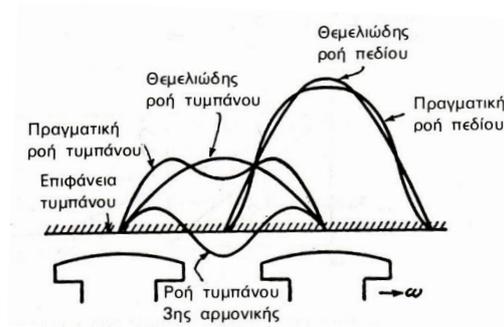
$$n = \frac{120f}{p} [\text{rpm}] \quad (4.1)$$

Η σύγχρονη γεννήτρια περιστρέφεται στη μόνιμη κατάσταση με τη σύγχρονη ταχύτητα ανεξάρτητα από το φορτίο μέχρι μία ορισμένη μέγιστη τιμή φορτίου, που αντιστοιχεί σε μία μέγιστη τιμή ροπής, τη ροπή αποσυγχρονισμού. Αν οι απαιτήσεις του φορτίου υπερβούν την τιμή αποσυγχρονισμού, η γεννήτρια δεν μπορεί να περιστραφεί με τη σύγχρονη ταχύτητα και η λειτουργία της διακόπτεται. ^[17]

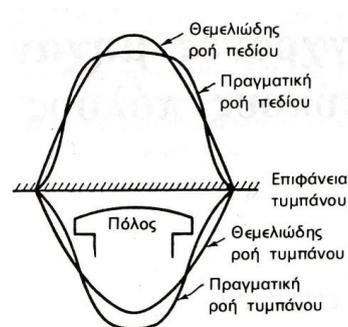
Τέλος, η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο τύλιγμα κάθε φάσης είναι ανάλογη του πλήθους των ζευγών των πόλων, της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, του αριθμού των αγωγών τυλίγματος κάθε φάσεως και της μαγνητικής ροής κάθε πόλου. Άρα, για να μεταβληθεί η ΗΕΔ υπάρχουν δύο δυνατότητες: είτε μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, είτε μεταβολή της μαγνητικής ροής κάθε πόλου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συχνότητα f είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και πρέπει να διατηρείται σταθερή, προκύπτει ότι τελικά η μόνη δυνατότητα ρύθμισης της ΗΕΔ είναι μέσω της μεταβολής της μαγνητικής ροής των πόλων, δηλαδή μέσω της μεταβολής της έντασης του ρεύματος διέγερσης. ^[18]

4.2.2 Γενικά θεωρητικά στοιχεία

Οι σύγχρονες γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα υδροηλεκτρικά συστήματα χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και συνήθως έχουν δρομέα έκτυπων πόλων. Σε μία τέτοια γεννήτρια το διάκενο δεν είναι ομοιόμορφο, αλλά μεταβάλλεται με την περιστροφή του δρομέα μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής. Τα ρεύματα του τυμπάνου μπορούν να αναλυθούν σε συνιστώσες με διαφορά φάσεως 90° , οι οποίες παράγουν δύο συγχρόνως στρεφόμενες συνιστώσες αντιδράσεως τυμπάνου, μία σε ευθυγράμμιση με τους άξονες των πόλων (ορθούς άξονες) και μία κάθετη σε αυτούς (εγκάρσιοι άξονες).



(α)



(β)

Σχήμα 4.8 (α) Ροές διακένου επί των καθέτων αξόνων και (β) ροές ορθού άξονα σε σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους^[18]

Λόγω της υψηλής μαγνητικής αντιστάσεως του διακένου μεταξύ των πόλων, η θεμελιώδης ροή της αντιδράσεως τυμπάνου στον χώρο, όταν η αντίδραση τυμπάνου είναι κάθετη με τους πόλους του πεδίου (σχήμα 4.8(α)), είναι μικρότερη από την θεμελιώδη ροή της αντιδράσεως τυμπάνου στον χώρο, η οποία θα δημιουργούνταν από το ίδιο ρεύμα τυμπάνου αν το κύμα της ροής του ήταν ακριβώς έναντι των πόλων του πεδίου (σχήμα 4.8(β)). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ρεύμα τυμπάνου I_d αναλύεται σε δύο συνιστώσες, η μία I_q σε φάση με την τάση διεγέρσεως E_f (ή E_i) και η άλλη I_d σε φάση 90° χρόνου με την E_f . Η συνιστώσα I_q παράγει μία συνιστώσα θεμελιώδους ροής της αντιδράσεως τυμπάνου Φ_{aq} κάθετα προς τον άξονα των πόλων του πεδίου, ενώ η I_d παράγει συνιστώσα θεμελιώδους ροής της αντιδράσεως τυμπάνου Φ_{ad} κατά μήκος των αξόνων των πόλων του πεδίου. Με κάθε ένα από τα συνιστώντα ρεύματα I_d και I_q σχετίζεται μία συνιστώσα πτώση τάσεως συγχρόνου αντιδράσεως $jI_d x_d$ και $jI_q x_q$ αντίστοιχα. Οι σύγχρονες αντιδράσεις x_d και x_q αποτελούν τα αθροίσματα της αντίδρασης σκέδασης του τυμπάνου x_σ και της αντίδρασης μαγνήτισης τυμπάνου ορθού x_{ad} και εγκάρσιου άξονα x_{aq} αντίστοιχα.^[18]

Στο σχήμα 4.9 φαίνονται τα διανυσματικά διαγράμματα της σύγχρονης γεννήτριας με έκτυπους πόλους στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας με έκτυπους πόλους μπορεί να περιγραφεί με τους εξής δύο τύπους:

$$\tilde{E}_a = jE_q - (R_s + jX_q)\tilde{I}_a \quad (4.2)$$

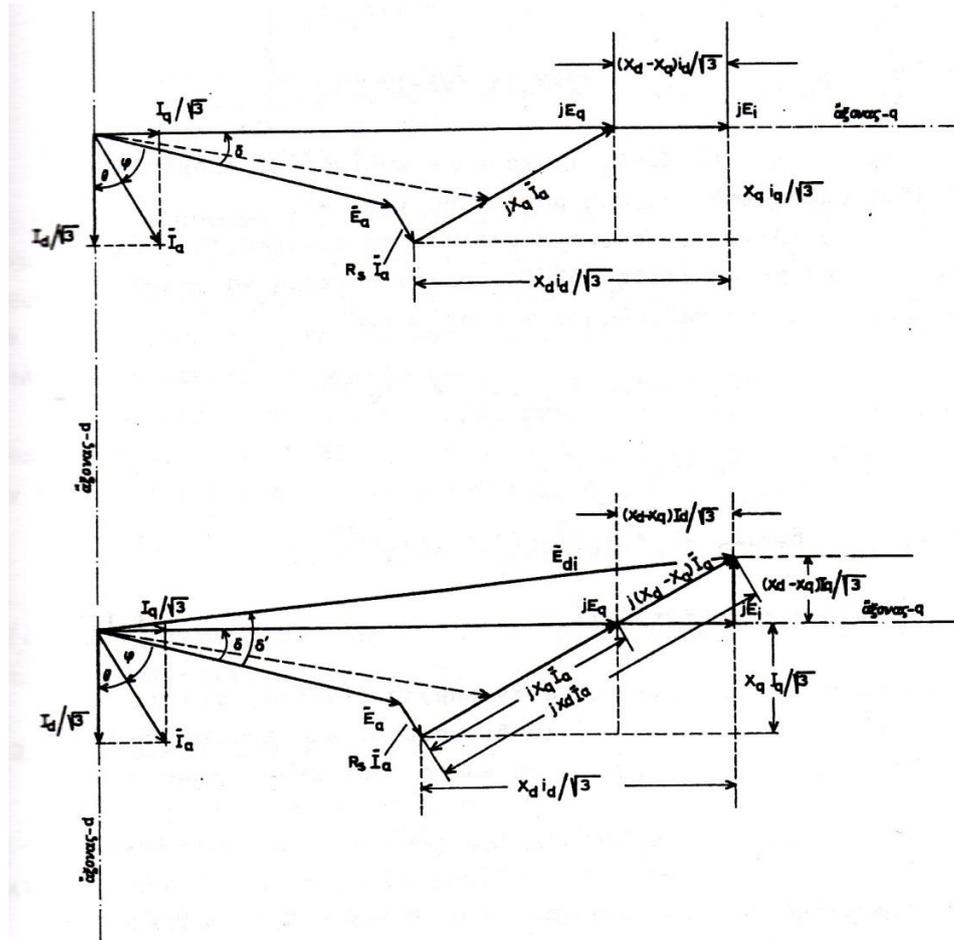
$$\tilde{E}_a = \tilde{E}_i - (R_s + jX_d)\tilde{I}_a \quad (4.3)$$

όπου \tilde{E}_a : φασικό διάνυσμα της τάσης της φάσης α

\tilde{E}_i : τάση διεγέρσεως της μηχανής

E_q : τάση πίσω από τη σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα

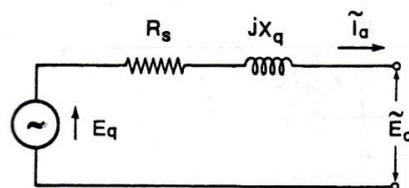
R_s : αντίσταση τυμπάνου



Σχήμα 4.9 Διανυσματικά διαγράμματα σύγχρονης γεννήτριας με έκτυπους πόλους στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας^[19]

Η τάση E_q του τύπου (4.2) χρησιμοποιείται στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.10 και δίνεται από τον τύπο (4.4):

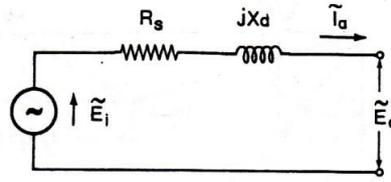
$$E_q = E_i - (X_d - X_q) \frac{I_d}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.10 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους με ΗΕΔ E_q πίσω από την X_q ^[19]

Ο τύπος (4.3) αντιπροσωπεύει το δεύτερο ισοδύναμο κύκλωμα για τη σύγχρονη γεννήτρια με έκτυπους πόλους που φαίνεται στο σχήμα 4.11 και για αυτό το μοντέλο θεωρείται μία άλλη εσωτερική τάση της γεννήτριας, που είναι η ΗΕΔ E_{di} πίσω από τη σύγχρονη αντίδραση ευθέως άξονα X_d και δίνεται από τον τύπο (4.5):

$$\tilde{E}_{di} = -(X_d - X_q) \frac{I_q}{\sqrt{3}} + jE_i \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.11 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους με ΗΕΔ E_i πίσω από την X_d [19]

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου της γεννήτριας ανά φάση είναι:

$$\tilde{S}_\gamma = \tilde{E}_a \tilde{I}_a^* = E_a I_a \cos\varphi + jE_a I_a \sin\varphi \quad (4.6)$$

Η παραγόμενη ενεργός ισχύς ανά φάση δίνεται από τον τύπο (4.7):

$$P_\gamma = \frac{E_i E_a \sin\delta}{X_d} + \frac{E_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (4.7)$$

όπου δ : η γωνία ισχύος που σχηματίζεται μεταξύ E_i και E_a και θεωρείται θετική όταν η τάση E_i προηγείται της E_a .

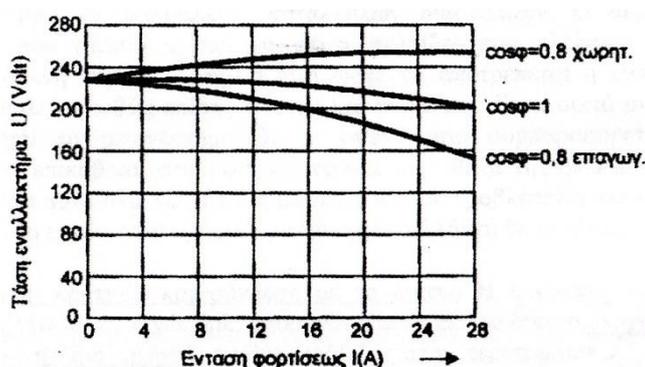
Η παραγόμενη άεργος ισχύς ανά φάση δίνεται από τον τύπο (4.8)

$$Q_\gamma = \frac{E_a (E_i \cos\delta - E_a)}{X_d} - \frac{E_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) (1 - \cos 2\delta) \quad (4.8) \quad [19]$$

Κατά τη λειτουργία μίας γεννήτριας υπάρχουν απώλειες, οι οποίες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: (α) στις ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου και τους μαγνητικούς πόλους, (β) στις μηχανικές απώλειες και (γ) στις απώλειες πυρήνα. Οι ωμικές απώλειες αυξάνονται παραβολικά με τη αύξηση του φορτίου. Ως μηχανικές απώλειες εννοούνται οι απώλειες των εδράνων και οι απώλειες ανεμισμού, δηλαδή οι απώλειες λόγω της ενέργειας που απορροφά ο αέρας συμπαρασυρόμενος κατά την περιστροφή του δρομέα. Οι απώλειες πυρήνα οφείλονται στην υστέρηση και τα δινορρεύματα που αναπτύσσονται στον πυρήνα και τα μεταλλικά μέρη της μηχανής. Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας ισούται με τον λόγο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη μηχανική ισχύ (ισχύ εισόδου) που προσδίδεται στην άτρακτο της μηχανής και η οποία είναι ίση με $P_{mec} = T_{mec} \omega$, όπου με T_{mec} συμβολίζεται η μηχανική ροπή. Ο βαθμός απόδοσης των σύγχρονων γεννητριών αυξάνεται με το μέγεθός τους. [8]

4.2.2.1 Χαρακτηριστική φορτίου

Εάν η σύγχρονη γεννήτρια συνδεθεί με το φορτίο στρεφόμενη στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της και με σταθερό το ρεύμα διέγερσης, η πολική τάση μεταξύ των ακροδεκτών της εξαρτάται από το ρεύμα φορτίσεως και τον συντελεστή ισχύος του φορτίου. Η χαρακτηριστική φορτίου μίας σύγχρονης γεννήτριας, όπως αυτή του σχήματος 4.12, δείχνει τη μεταβολή της τάσης εξόδου της σε συνάρτηση με την ένταση φόρτισης, δηλαδή το ρεύμα της γραμμής, για σταθερή τιμή του συντελεστή ισχύος, για σταθερή ένταση διεγέρσεως και για λειτουργία στη σύγχρονη ταχύτητα. Η μεταβολή της τάσης με τη μεταβολή του φορτίου οφείλεται στην ωμική πτώση τάσεως στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου, στην παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου των πόλων της μηχανής και σε φαινόμενα αυτεπαγωγής. Στην περίπτωση ωμικής και επαγωγικής φόρτισης η τάση μειώνεται όσο αυξάνεται η ένταση φορτίσεως, ενώ στη χωρητική φόρτιση παρατηρείται αύξηση.



Σχήμα 4.12 Χαρακτηριστικές φορτίου μίας σύγχρονης γεννήτριας ^[8]

Με παρατήρηση των καμπυλών του σχήματος 4.12, γίνεται αντιληπτό ότι για να διατηρηθεί σταθερή η τάση στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας πρέπει να αυξηθεί η διέγερση στην περίπτωση επαγωγικής ή ωμικής φόρτισης, ενώ στην περίπτωση χωρητικής φόρτισης η ένταση της διέγερσης πρέπει να μειωθεί. ^[8]

4.2.3 Έλεγχος της σύγχρονης γεννήτριας κατά τη χρήση της σε ένα micro/pico-υδροηλεκτρικό σύστημα

Ένα micro/pico – υδροηλεκτρικό σύστημα συνήθως τροφοδοτεί κάποιο μικρό αυτόνομο δίκτυο ή αποτελεί μέρος των μονάδων παραγωγής ενός μικροδικτύου. Στην τελευταία περίπτωση, η απαίτηση για διατήρηση σταθερής τάσης και συχνότητας στα άκρα της γεννήτριας δεν είναι τόσο αυστηρή, καθώς ο αντιστροφείας μέσω του οποίου θα συνδεθεί η υδρογεννήτρια στο μικροδίκτυο (αφού πρώτα έχει ανορθωθεί η έξοδός της) έχει τη δυνατότητα διόρθωσης κάποιων αποκλίσεων. Στην πρώτη περίπτωση, όμως, που η

υδρογεννήτρια τροφοδοτεί ένα ac αυτόνομο δίκτυο, πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε η τάση εξόδου και η συχνότητα να παραμένουν αναλλοίωτες, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού ελεγκτή φορτίου (ELC), ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης (AVR) και απορριπτικών φορτίων (ballast load).

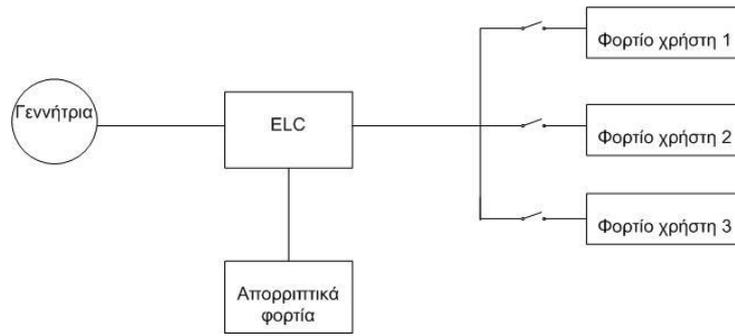
4.2.3.1 Ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου (ELC)

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου διατηρεί σταθερό το φορτίο που «βλέπει» η γεννήτρια και κατ' αυτόν τον τρόπο διατηρεί σταθερή τη συχνότητα και κατ' επέκταση την ταχύτητα περιστροφής τόσο της γεννήτριας, όσο και του υδροστροβίλου. Αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο ελέγχου των στροφών του υδροστροβίλου, πέραν της μεταβολής της παροχής σε αυτόν. Αυτός ο τρόπος ελέγχου είναι αξιόπιστος, τις περισσότερες φορές ευκολότερος, απλούστερος και προτιμάται στα micro-υδροηλεκτρικά συστήματα.

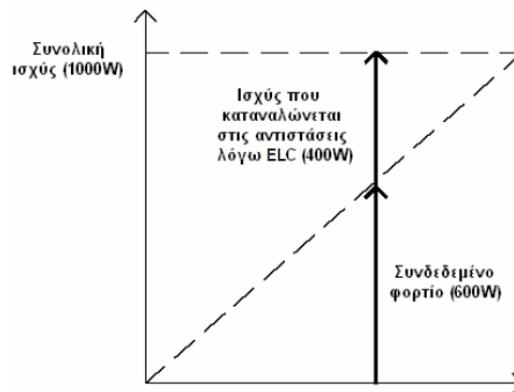
Όταν το φορτίο που τροφοδοτεί μία σύγχρονη γεννήτρια αυξάνεται, αυτόματα πέφτουν οι στροφές της και η τάση στην έξοδό της, ενώ όταν αποκόπτεται ένα φορτίο η γεννήτρια επιταχύνεται και η τάση εξόδου της αυξάνεται. Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου χρησιμοποιώντας, δηλαδή συνδέοντας ή αποκόπτοντας, απορριπτικά φορτία, επιτυγχάνει να διατηρεί σταθερή την ζητούμενη από τη γεννήτρια ισχύ, ανεξάρτητα από τις πραγματικές μεταβολές της ζήτησης. Για παράδειγμα, αν κάποιος καταναλωτής απενεργοποιήσει κάποιες ηλεκτρικές συσκευές, θα μειωθεί η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, ενώ την ίδια στιγμή η παροχή του νερού στον υδροστρόβιλο παραμένει η ίδια. Τότε, ο στρόβιλος και η γεννήτρια θα επιταχυνθούν και η τάση εξόδου και η συχνότητα θα αυξηθούν. Ο ελεγκτής θα αντιληφθεί την αύξηση της συχνότητας, θα συνδέσει κάποια απορριπτικά φορτία και θα διοχετεύσει ισόποσο μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε αυτά. Έτσι, το συνολικό φορτίο που τροφοδοτείται από το υδροηλεκτρικό σύστημα θα παραμείνει σταθερό.

Οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές φορτίου είναι αρκετά αξιόπιστοι, φθινοί και δεν χρειάζονται συντήρηση, καθώς δεν έχουν κινούμενα μέρη. Το αρνητικό στοιχείο της χρήσης αυτών των ελεγκτών είναι η συνεχής και κάποιες φορές άσκοπη χρήση του νερού, η οποία δεν είναι αποδεκτή στην περίπτωση πολύ μικρής διατιθέμενης ροής νερού. Ωστόσο, αν αξιοποιηθεί σωστά η απορριπτόμενη ισχύς μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του υδροηλεκτρικού συστήματος, όπως για παράδειγμα με τη διοχέτευσή της σε φορτία θερμικά για τη θέρμανση νερού ή κάποιου χώρου.^[3]

Σε συνδυασμό με τη σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιούνται κυρίως δύο είδη ηλεκτρονικών ελεγκτών φορτίου: (α) ELC με έλεγχο της γωνίας φάσεως (phase angle control), που χρησιμοποιείται και πιο συχνά, και (β) ELC με φορτία μεγέθους που αυξάνονται διαδοχικά πολλαπλασιαζόμενα επί δύο (binary weighted loads).



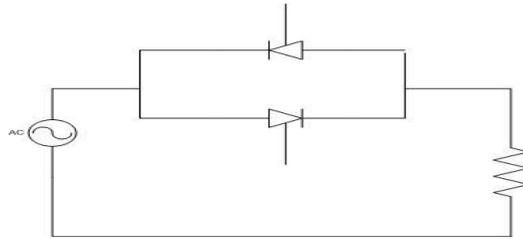
(α)



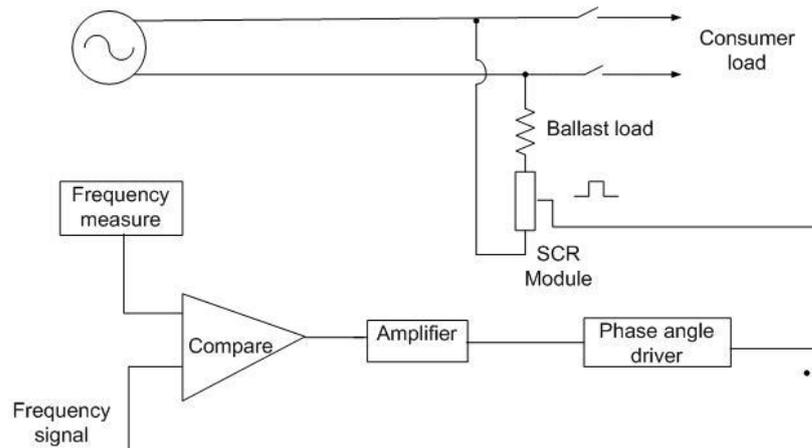
(β)

Σχήμα 4.13 (α) Σχηματικό διάγραμμα ενός απλού συστήματος με ELC ^[20] (β) Καταμερισμός ισχύος με χρήση ELC

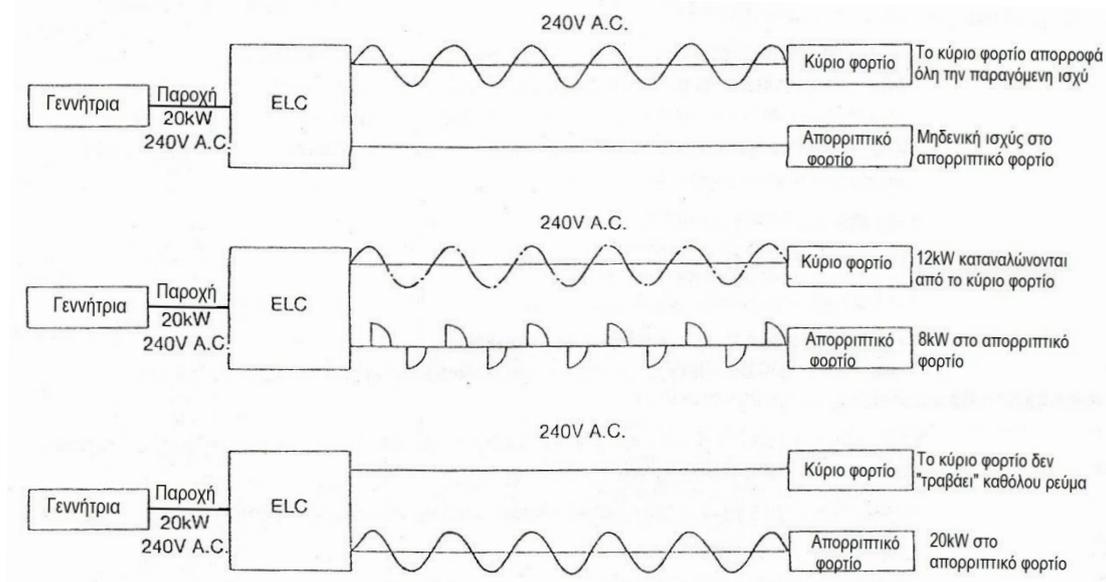
Στην πρώτη περίπτωση, η μεταβολή του απορριπτικού φορτίου επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τη στιγμή αγωγής μίας διόδου ή αντιπαράλληλων θυρίστορ, που συνδέονται σε σειρά με τα φορτία. Σε κάθε μισό κύκλο, η σύνδεση και τροφοδότηση του απορριπτικού φορτίου καθυστερεί κατά μία φασική γωνία α , η οποία κυμαίνεται μεταξύ $0^\circ \dots 180^\circ$.^[20] Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος ελέγχου, υπάρχει ανάγκη υπερδιαστασιολόγησης της σύγχρονης γεννήτριας κατά 60%, για να μπορέσει να ανταποκριθεί στην χειρότερη περίπτωση φόρτισης, η οποία προκύπτει όταν η γωνία αγωγής α γίνει ίση με 90° , ενώ ταυτόχρονα η γεννήτρια πρέπει να τροφοδοτήσει φορτίο καταναλωτή με χαμηλό συντελεστή ισχύος. Τότε και το απορριπτικό φορτίο θα συμπεριφέρεται σαν επαγωγικό με συντελεστή ισχύος γύρω στο 0,75 και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να ζητείται από τη γεννήτρια πολύ μεγάλη άεργος ισχύς, με συνέπεια να αναπτύσσονται υψηλά ρεύματα, επικίνδυνα για τα τυλίγματα της γεννήτριας και για τον ρυθμιστή τάσης.^[3]



Σχήμα 4.14 Απλό κύκλωμα ενός ELC με έλεγχο φασικής γωνίας συνδεδεμένου με ωμικό απορριπτικό φορτίο



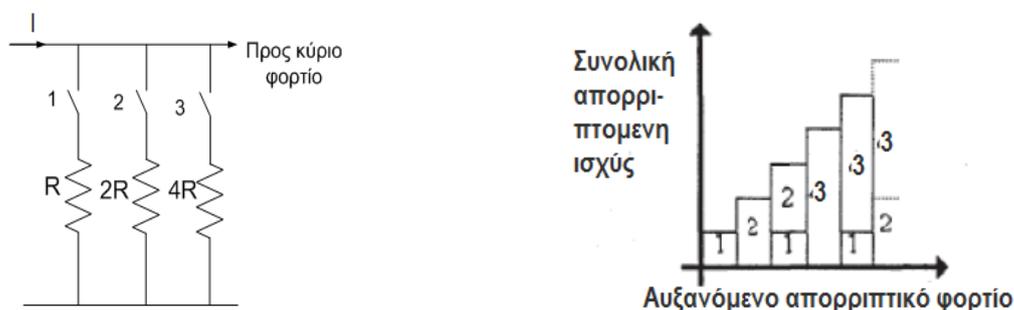
Σχήμα 4.15 Μπλοκ διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού ελεγκτή φορτίου με έλεγχο φασικής γωνίας^[20]



Σχήμα 4.16 Παράδειγμα χρήσης ενός ηλεκτρονικού ελεγκτή φορτίου με έλεγχο της φασικής γωνίας^[31]

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου με τη δεύτερη μέθοδο ελέγχου χρησιμοποιεί ωμικό απορριπτικό φορτίο που παράγεται από συνδυασμούς συγκεκριμένων αντιστάσεων. Το μέγεθος της κάθε αντίστασης που χρησιμοποιείται ισούται με το διπλάσιο της προηγούμενης, για παράδειγμα R, 2R, 4R, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.18. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο μέγιστος αριθμός διαβαθμίσεων απορριπτικού φορτίου με τον μικρότερο

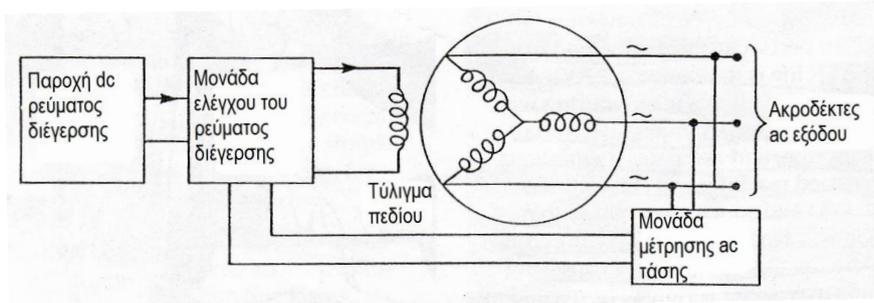
δυνατό αριθμό αντιστάσεων και διακοπών. Ο ελεγκτής αυτός δεν προκαλεί παραμόρφωση της τάσης, καθώς το φορτίο είναι καθαρά ωμικό, αλλά είναι πολύπλοκος (περιλαμβάνει πολλές αντιστάσεις, καλώδια, διακόπτες) και έχει μικρό εύρος ρύθμισης της τάσης, λόγω των περιορισμένων δυνατών συνδυασμών.^[20]



Σχήμα 4.17 Παράδειγμα διαμόρφωσης απορριπτικού φορτίου με αντιστάσεις διαδοχικών μεγεθών

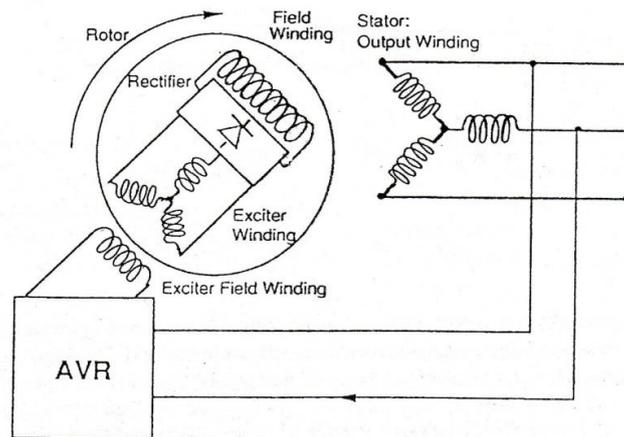
4.2.3.2 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης (AVR)

Όπως φαίνεται και στην παράγραφο 4.2.2.1, η τάση εξόδου μίας σύγχρονης γεννήτριας είναι ευαίσθητη στις διακυμάνσεις του τροφοδοτούμενου φορτίου, κυρίως λόγω του φαινομένου της αντίδρασης οπλισμού. Αντίδραση οπλισμού ονομάζεται το φαινόμενο όπου το τύλιγμα του στάτη παραμορφώνει την τάση στα άκρα της γεννήτριας, καθώς όταν διαρρέεται από ρεύμα, παράγει ένα νέο πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Ωστόσο, σε ένα αυτόνομο δίκτυο που θα τροφοδοτεί το micro-υδροηλεκτρικό σύστημα με αυτή τη γεννήτρια, είναι απαραίτητη η διατήρηση της τάσης εντός των αποδεκτών ορίων διακύμανσης αν όχι τελείως σταθερή. Κατά συνέπεια, είναι βασική η προσαρμογή του ρεύματος διέγερσης κατά τη μεταβολή του φορτίου, ώστε η τάση να παραμένει αναλλοίωτη. Κανείς ίσως σκεφτόταν, ότι ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου αρκεί, αλλά αυτό δεν ισχύει, διότι ο ελεγκτής αυτός ελέγχει μόνο τη συχνότητα και στην περίπτωση που αλλάξει μόνο ο συντελεστής ισχύος του φορτίου, αν για παράδειγμα μειωθεί, τότε το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης θα αυξηθεί παρά το γεγονός ότι ο ELC θα διατηρήσει σταθερή την ταχύτητα περιστροφής. Έτσι, εκτός από την περίπτωση που τροφοδοτούνται αποκλειστικά καθαρά ωμικά φορτία, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης (AVR), ο οποίος θα αντιλαμβάνεται κάθε αλλαγή της τάσης εξόδου της γεννήτριας και θα προσαρμόζει ανάλογα το dc ρεύμα διέγερσής της. Ένας καλός AVR θα μπορεί να διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου, ακόμα κι όταν η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται. Ο AVR είναι ακόμα πιο απαραίτητος στην περίπτωση της αυτοδιεγερόμενης σύγχρονης γεννήτριας, όπου το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται άμεσα από την τάση εξόδου της.



Σχήμα 4.18 Σύστημα μίας σύγχρονης γεννήτριας με έναν AVR, όπου φαίνονται τα κύρια συστατικά του στοιχείου ^[3]

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης είναι πιο δυσχερείς κατά τη χρήση του σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα από ότι σε μία ντιζελογεννήτρια. Σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα, ο AVR λειτουργεί συνεχώς με μεταβολές φορτίου και ταχύτητας άξονα, αλλά ακόμα και η χρήση ELC με θυρίστορ επιβάλλει στον ρυθμιστή τάσης συνεχείς αλλαγές μηχανικού και ηλεκτρικού φορτίου, που μειώνουν τη διάρκεια ζωής του. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή του AVR πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και εφόσον υπάρχει ικανοποιητικό απόθεμα ανταλλακτικών. Πέραν του καλού αερισμού του σταθμού παραγωγής, ένας τρόπος επιμήκυνσης του χρόνου ζωής του AVR είναι η απομάκρυνσή του από τη γεννήτρια και η στερέωσή του στον πλησιέστερο σε αυτήν τοίχο, ώστε να προστατεύεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, τα φαινόμενα συμπύκνωσης υδρατμών και τις μηχανικές ταλαντώσεις. Ρυθμιστές τάσης που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες εξοπλισμένες με ηλεκτρονικό ελεγκτή φορτίου, δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της συμπύκνωσης, καθώς η γεννήτρια λειτουργεί πάντα σε πλήρες φορτίο και παραμένει στην ίδια υψηλή θερμοκρασία. Το πιο βασικό, όμως, πρόβλημα που αντιμετωπίζει ένας AVR σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα είναι η παρατεταμένη λειτουργία της γεννήτριας σε στροφές αρκετά χαμηλότερες των ονομαστικών. Στην περίπτωση αυτή, ο AVR αντιδρά αυξάνοντας τη διέγερση με στόχο να αυξηθεί η τάση εξόδου, αλλά ουσιαστικά υπερθερμαίνεται χωρίς κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα και με κίνδυνο φθοράς και της ίδιας της γεννήτριας. Κατά την εγκατάσταση του συστήματος πρέπει να ληφθούν μέτρα προστασίας του AVR έναντι της παρατεταμένης λειτουργίας σε χαμηλές στροφές. Μία άλλη λύση είναι η αγορά ενός "έξυπνου" αυτόματου ρυθμιστή τάσης, ο οποίος μειώνει τη διέγερση αν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα πέσει κάτω από μία επιτρεπτή τιμή για κάποιο χρονικό διάστημα. Σε κάποιες σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβάνεται ο AVR. Σε κάθε περίπτωση πάντως, κατά την αγορά ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης πρέπει να εξασφαλίζεται ότι φέρει πλήρη προστασία έναντι υπερτάχυνσης, λειτουργίας σε πολύ χαμηλές στροφές, υπό/υπέρτασης, υπό/υπερφόρτισης και υπερθέρμανσης.



Σχήμα 4.19 Παράδειγμα χρήσης ενός AVR σε μία σύγχρονη γεννήτρια χωρίς ψήκτρες^[3]

4.2.3.3 Απορριπτικά φορτία

Τα απορριπτικά φορτία είναι συνήθως θερμικά φορτία, τα οποία μπορεί να ψύχονται είτε με νερό (water-cooled ballast load) είτε με αέρα (air-cooled ballast load).

4.2.3.3.1 Απορριπτικό φορτίο που ψύγεται με νερό

Το υδρόψυκτο απορριπτικό φορτίο είναι αυτό που χρησιμοποιείται συνηθέστερα στα micro-υδροηλεκτρικά συστήματα, λόγω του μικρού του μεγέθους και της δυνατότητας που παρέχει για θέρμανση του νερού. Πρακτικά, το φορτίο αυτό είναι ένας σωστά μονωμένος θερμαντήρας νερού βυθισμένος στο νερό που ρέει μέσα από την περιβάλλουσα μικρή δεξαμενή. Το νερό που χρησιμοποιείται μπορεί να προέρχεται είτε από την κύρια παροχή του υδροηλεκτρικού (μέσω μιας μικρής εξόδου στον αγωγό πτώσεως), είτε από μία δευτερεύουσα πηγή νερού, στην περίπτωση που αυτή υπάρχει κοντά στην εγκατάσταση.

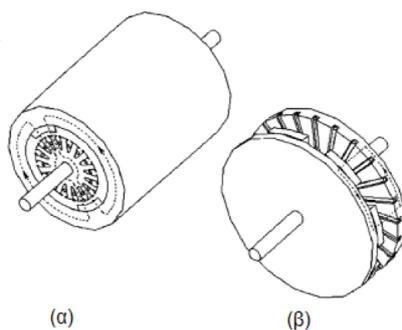
Αν το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη του νερού προέρχεται από τον αγωγό πτώσεως, τότε η ροή του ελέγχεται μέσω μιας βάνας που τροφοδοτεί έναν μικρό σωλήνα, ο οποίος οδηγεί στη δεξαμενή με το φορτίο. Καθώς το νερό στον αγωγό πτώσεως ρέει υπό σημαντική πίεση και αυτό δεν είναι επιθυμητό για το νερό που χρησιμοποιείται στο απορριπτικό φορτίο, η βάνα αυτή παραμένει εν μέρει ανοικτή. Επίσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη θερμοστάτη, ο οποίος σε περίπτωση ανόδου της θερμοκρασίας πάνω από τους 50°C, θα ενεργοποιεί ένα συναγερμό υπερθέρμανσης και αν χρειάζεται θα ενεργοποιεί τον όνυχα εκτροπής, που μπορεί να διαθέτει ο υδροστρόβιλος, ώστε να διακόπτεται η λειτουργία του. Ακόμα, πρέπει να υπάρχει και ένας αισθητήρας της στάθμης του νερού, ο οποίος θα ενεργοποιεί έναν άλλο συναγερμό αν αυτή πέσει πολύ χαμηλά. Εννοείται ότι στην περίπτωση που το περίβλημα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της δεξαμενής είναι μεταλλικό, πρέπει να γειώνεται. Τέλος, συνιστάται η χρήση πολλών μικρότερων θερμαντικών στοιχείων συνδεδεμένων παράλληλα αντί για ένα μεγάλο για μεγαλύτερη αξιοπιστία και ασφάλεια του συστήματος.^[3]

4.2.3.3.2 Απορριπτικό φορτίο που ψύγεται με αέρα

Συμβατικά οικιακά ή βιομηχανικά θερμαντικά σώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν απορριπτικά φορτία. Και εδώ συνιστάται η χρήση περισσότερων μικρών θερμαντικών στοιχείων συνδεδεμένων παράλληλα, καθώς και η τοποθέτησή τους σε έναν χώρο χωρίς υγρασία και με καλό αερισμό. Επίσης, σε κάθε κλάδο των παράλληλα συνδεδεμένων φορτίων πρέπει να υπάρχει ένας διακόπτης για προστασία έναντι υπερθέρμανσης (οπότε θα πρέπει να ενεργοποιηθεί και ο αντίστοιχος συναγερμός), καθώς και μία ασφάλεια από την πλευρά της υψηλής τάσης για μεγαλύτερη ασφάλεια. Τέλος, σπανιότερα χρησιμοποιούνται τα θερμαντικά σώματα με προσαρμοζόμενο θερμοστάτη λόγω μεγαλύτερου οικονομικού κόστους και λόγω του κινδύνου ακούσιας μεταβολής του θερμοστάτη που θα προκαλέσει ανεπιθύμητη επιβράδυνση ή πιθανότερα επιτάχυνση του υδροστροβίλου.^[3]

4.3 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών

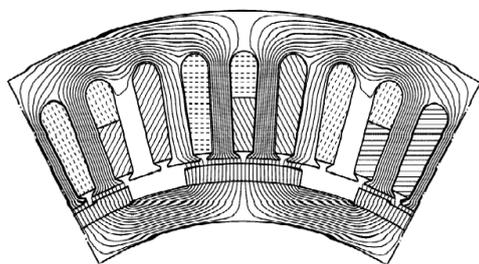
Σε μία σύγχρονη γεννήτρια, η διέγερση μπορεί να προέρχεται από το τροφοδοτούμενο με συνεχές ρεύμα τύλιγμα διέγερσης ή από μόνιμους μαγνήτες. Μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών μπορεί να διαθέτει περισσότερους πόλους και επομένως μπορεί να λειτουργήσει σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής. Με τη βελτίωση των μαγνητικών υλικών, αυτές οι γεννήτριες χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος και καλή απόδοση, μικρό όγκο και χαμηλό κόστος, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια σε αρκετά micro-υδροηλεκτρικά συστήματα. Το αρνητικό τους στοιχείο είναι ο δυσκολότερος έλεγχός τους, όταν καλούνται να τροφοδοτήσουν ένα αυτόνομο δίκτυο. Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών διακρίνονται σε γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής, ανάλογα με τη διεύθυνση του δρόμου της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής. Οι δύο μηχανές μοιράζονται την ίδια βασική αρχή λειτουργίας, αλλά διαφέρουν πολύ στη σχεδίαση, την κατασκευή και τη διαχείριση των θερμικών απωλειών. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.20, η γεννήτρια ακτινικής ροής έχει κυλινδρική δομή, ενώ η γεννήτρια αξονικής ροής έχει δισκοειδή δομή.



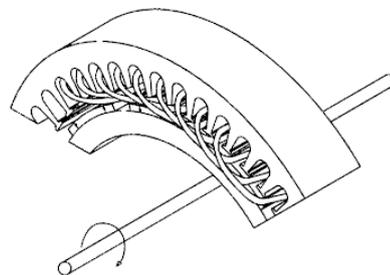
Σχήμα 4.20 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (α) ακτινικής ροής και (β) αξονικής ροής

Κάθε είδος γεννήτριας παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα:

- Η κατασκευή μίας γεννήτριας αξονικής ροής είναι πιο απλή και φθηνή από αυτήν μίας γεννήτριας ακτινικής ροής.
- Σε αντίθεση με τις γεννήτριες ακτινικής ροής, οι αντίστοιχες αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται εύκολα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εξωτερικού μηχανισμού, καθώς ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος.
- Λόγω της δισκοειδούς δομής της γεννήτριας αξονικής ροής, η ρύθμιση του διακένου γίνεται ευκολότερα απ' ό τι στην κυλινδρική γεννήτρια ακτινικής ροής.
- Στην περίπτωση της αξονικής ροής, μπορούν να συνδυαστούν πολλοί δίσκοι για την επίτευξη υψηλής ισχύος και ροπής.
- Από ένα σημείο και μετά (όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μίας ακτινικής), η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματά της που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί να προσφέρει. Ή αντίστροφα, ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο μηχανής αξονικής ροής απ' ό τι ακτινικής.
- Η μηχανή αξονικής ροής είναι συνήθως ελαφρύτερη.
- Η γεννήτρια ακτινικής ροής επιτυγχάνει υψηλή απόδοση κυρίως στις ονομαστικές συνθήκες, ενώ η γεννήτρια αξονικής ροής διατηρεί μία καλή απόδοση για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων περιστροφής.
- Σε μία μηχανή ακτινικής ροής αύξηση της ροπής έχει μικρότερο κόστος απ' ό τι σε μία μηχανή αξονικής ροής με αύλακες.
- Μία αύξηση του όγκου στις μηχανές αξονικής ροής θα δώσει μεγαλύτερη αύξηση της ροπής απ' ό τι στις μηχανές ακτινικής ροής. ^[6]



(α)



(β)



(γ)

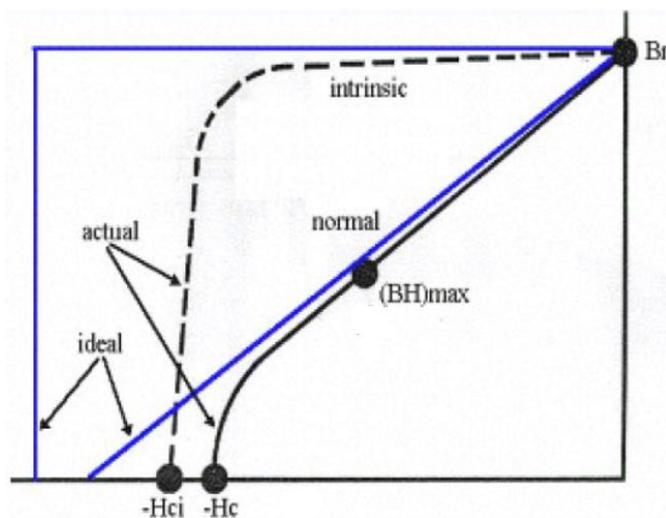
Σχήμα 4.21 Γεννήτρια μόνιμων μαγνητών ακτινικής ροής με αύλακες

4.3.1 Μαγνήτες

Βασικό και πιο ακριβό χαρακτηριστικό μίας τέτοιας σύγχρονης γεννήτριας είναι οι μόνιμοι μαγνήτες που περιλαμβάνει, οι οποίοι της εξασφαλίζουν διέγερση χωρίς επιπλέον τυλίγματα αλλά και εύκολη κατασκευή. Υπάρχουν διάφορα είδη μαγνητών. Ένα από αυτά είναι οι μαγνήτες Alnico, που αν και πολύ ισχυροί και ανθεκτικοί στη θερμοκρασία, απομαγνητίζονται εύκολα. Ένα άλλο είδος είναι οι μαγνήτες από φερρίτη, οι οποίοι αν και λιγότερο ισχυροί, είναι φθηνότεροι, έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία και απομαγνητίζονται δυσκολότερα, καθώς επίσης έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση εμποδίζοντας την ανάπτυξη δινορρευμάτων. Το πιο σύγχρονο είδος μαγνητών είναι οι σπάνιες γαίες και κυρίως οι μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB). Οι μαγνήτες αυτοί είναι πολύ ισχυροί, αλλά δεν αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 250°C) και διαβρώνονται εύκολα. Η διάβρωση αντιμετωπίζεται με ειδικά βερνίκια. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές με χαμηλό κόστος και μεγάλη απόδοση.

Επίσης, οι μαγνήτες κατασκευάζονται σε διάφορους βαθμούς, οι οποίοι εκφράζουν πόσο ισχυρός είναι ένας μαγνήτης ανάλογα με την παραμένουσα μαγνήτισή του. Όσο πιο ισχυρός ο μαγνήτης, τόσο πιο ακριβός. Η επιλογή του βαθμού του χρησιμοποιούμενου μαγνήτη είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή και επηρεάζει διάφορους παράγοντες όπως την πυκνότητα ισχύος, τον όγκο, το βάρος και το κόστος της μηχανής. Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του, που φαίνεται στο σχήμα 4.21. Στην καμπύλη αυτή, τα μεγέθη που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι η παραμένουσα μαγνήτιση B_r (Tesla) και η συνεχούσα δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης

πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο που θα αποδώσει τη μέγιστη ενέργεια $(BH)_{max}$. Το σημείο αυτό είναι στο γόνατο της καμπύλης απομαγνήτισης και το πεδίο μπορεί να υπολογιστεί εκεί ίσο με $B = B_r/2$.^[6]



Σχήμα 4.22 Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης^[6]

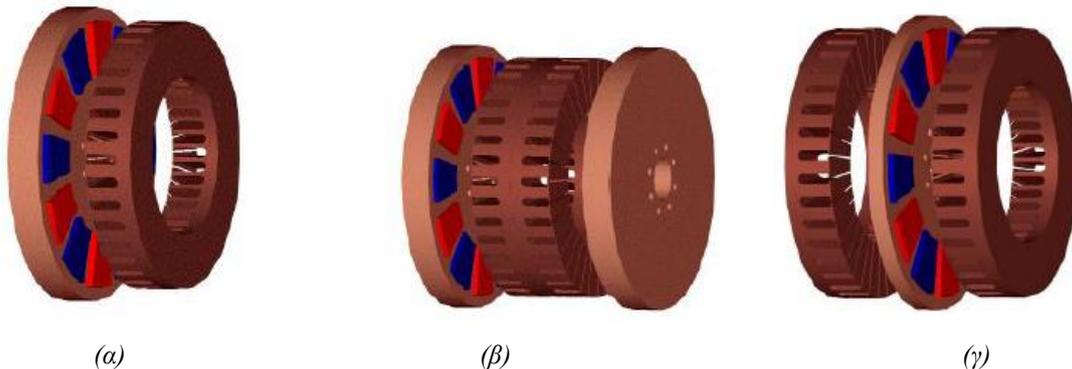
Οι μαγνήτες μπορούν να τοποθετηθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους πάνω στον δρομέα και για κάθε έναν από αυτούς επιλέγεται διαφορετικό είδος μαγνήτη. Μπορούν να στερεωθούν στην επιφάνεια του δρομέα (surface mounted magnets), οπότε και χρειάζεται επιπλέον προστασία έναντι μηχανικής φθοράς και διάβρωσης και χρησιμοποιούνται συνήθως μαγνήτες NdFeB. Ο δεύτερος τρόπος τοποθέτησής τους είναι να βρίσκονται ενσωματωμένοι ή «θαμμένοι» (embedded magnets) στο εσωτερικό του δρομέα, στην οποία περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μαγνήτες φερρίτη.^[21]

4.3.2 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής

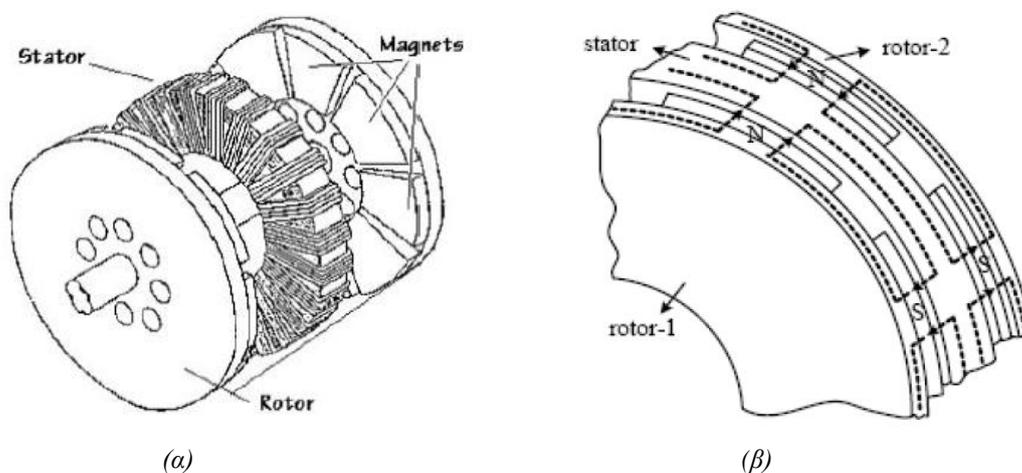
4.3.2.1 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και δυνατές τοπολογίες

Υπάρχουν αρκετά είδη και διατάξεις μηχανών αξονικής ροής, οι οποίες έχουν να κάνουν κυρίως με τον αριθμό και την θέση των δίσκων του δρομέα και του στάτη, μεταξύ των οποίων είναι η μηχανή μονού στάτη - μονού δρομέα, η μηχανή διπλού στάτη - μονού εσωτερικού δρομέα, η μηχανή διπλού δρομέα - μονού εσωτερικού στάτη και πολλαπλών δίσκων. Οι πολλοί δίσκοι συνδυάζονται συνήθως για την αύξηση της ροπής και της ισχύος. Η διάταξη μονού στάτη - μονού δρομέα χρησιμοποιείται κυρίως σε γεννήτριες μικρής ονομαστικής ισχύος, καθώς έχει μεγαλύτερες απώλειες λόγω σκέδασης της ροής. Βελτίωση αυτής της

μηχανής είναι αυτή που έχει δρομέα (δίσκο με μαγνήτες) – στάτη – δίσκο χωρίς μαγνήτες. Μέσω του δίσκου χωρίς μαγνήτες που τοποθετείται πίσω από τον στάτη «κλείνει ο δρόμος μαγνητικής ροής», μειώνονται οι απώλειες σκέδασης και αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος. Κάθε μία από τις προαναφερόμενες τοπολογίες μπορεί να διαφοροποιηθεί με την ύπαρξη ή όχι πυρήνα στον στάτη, και στην περίπτωση που υπάρχει πυρήνας με την ύπαρξη ή όχι αυλάκων σε αυτόν. Μία άλλη δυνατή τοπολογία είναι αυτή που προκύπτει με τη συνδεσμολογία Torus και μπορεί επίσης να πάρει διάφορες μορφές με τον δρομέα στο εσωτερικό ή το εξωτερικό, με αυλάκες ή χωρίς, με πυρήνα ή χωρίς.

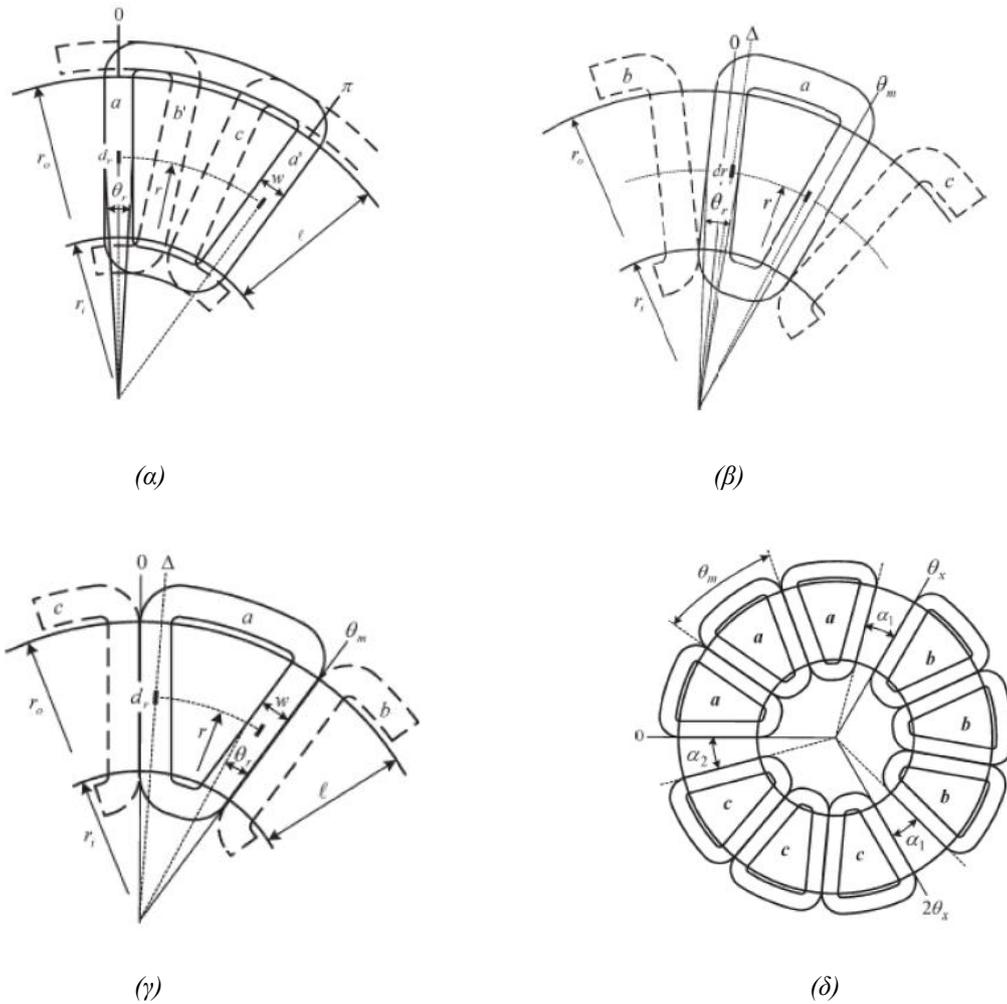


Σχήμα 4.23 Γεννήτρια αξονικής ροής με (α) μονό δρομέα – μονό στάτη με αυλάκες, (β) διπλό δρομέα – μονό στάτη με αυλάκες, (γ) μονό δρομέα – διπλό στάτη με αυλάκες^[6]



Σχήμα 4.24 (α) Μηχανή διπλού δρομέα - μονού στάτη με τύλιγμα Torus, (β) Η ροή μιας μηχανής με τύλιγμα Torus σε τρισδιάστατη απεικόνιση^[6]

Το πλεονέκτημα των αυλάκων είναι ότι μειώνουν το διάκενο και ενισχύουν το μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής με τους ίδιους μαγνήτες. Οι αυλάκες δηλαδή δίνουν τη δυνατότητα μείωσης του όγκου των μαγνητών και άρα και του κόστους της μηχανής, αφού το κόστος των μαγνητών είναι αρκετά υψηλό. Το μειονέκτημα της ύπαρξης αυλάκων είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης και η ελκτική δύναμη μεταξύ δρομέα και στάτη που μπορεί να παραμορφώσει τους δίσκους της γεννήτριας.



Σχήμα 4.26 (α)Επικαλυπτόμενο τύλιγμα, (β) Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης, (γ) Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης, (δ) Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων^[6]

Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα υπερέχουν έναντι των επικαλυπτόμενων στα εξής σημεία: έχουν μικρότερα άκρα τυλίγματος με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερη εξωτερική διάμετρος και λιγότερες απώλειες χαλκού και καταλήγουν σε κατασκευή πιο απλή και μικρότερου κόστους (λόγω του μικρότερου αριθμού πηνίων). Ανάμεσα στα συγκεντρωμένα τυλίγματα, αυτό της διπλής στρώσης αναπτύσσει υψηλότερη ροπή και χρησιμοποιείται συνηθέστερα (τα θεωρητικά στοιχεία και χαρακτηριστικά σχεδίασης αυτού του κεφαλαίου αφορούν γεννήτριες με το συγκεκριμένο τύλιγμα). Το μειονέκτημα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι η ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής λόγω του χαμηλού συντελεστή τυλίγματος. Αυτή η δυσκολία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και μπορεί να ξεπεραστεί με κατάλληλη σχεδίαση όπως είναι η αύξηση του αριθμού των πόλων και η εύρεση του βέλτιστου αριθμητικού συνδυασμού πόλων και πηνίων. Με τη χρήση

επικαλυπτόμενου τυλίγματος, η μηχανή έχει περισσότερο χαλκό, δηλαδή περισσότερα πηνία και άρα δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερης ισχύος για τον ίδιο όγκο γεννήτριας.

4.3.2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη σχεδίασης

Κατά τη σχεδίαση μίας γεννήτριας αξονικής ροής, υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη που καθορίζουν τη μορφή, τη λειτουργία και την απόδοσή της ανάλογα και με την επιλεγόμενη τοπολογία.

Ένα από αυτά είναι η σχέση που υφίσταται μεταξύ του αριθμού των πόλων και των πηνίων σε σχέση και με τη συχνότητα. Ο αριθμός των πόλων μίας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής δίνεται από τον τύπο (4.1) $p = 120f/n$. Για να προκύψει ένα

συμμετρικό τριφασικό σύστημα ο αριθμός των πόλων p πρέπει να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των πηνίων Q . Το p πρέπει να είναι ζυγός αριθμός, ενώ το Q πρέπει να διαιρείται με το τρία αφού η γεννήτρια είναι τριφασική. Μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης [23] βρέθηκε ότι για να μεγιστοποιηθεί η ροπή, πρέπει ο αριθμός των πόλων και των πηνίων να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0,5 \quad (4.9)$$

Δηλαδή πρέπει ο αριθμός των πόλων να διαιρείται με το 4 και ο αριθμός των πηνίων με το 3, με αποτέλεσμα να προκύπτουν οι παρακάτω συνδυασμοί αριθμού πόλων-πηνίων: 8-6, 12-9, 16-12 κ.ο.κ. Μικρή ονομαστική συχνότητα σημαίνει λιγότερους πόλους και άρα λιγότερους μαγνήτες (το πιο ακριβό συστατικό) και μικρότερο κόστος. Μια υψηλή ονομαστική συχνότητα όμως, αν και οδηγεί σε περισσότερους μαγνήτες και μεγαλύτερο κόστος, οδηγεί και στην ανάπτυξη καλύτερης ροπής για το συγκεκριμένο τύλιγμα και ταυτόχρονα τα πηνία που θα απαιτούνται αν και θα είναι περισσότερα, θα έχουν λιγότερες σπείρες και θα είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν με το χέρι.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι το σχήμα και οι διαστάσεις των μαγνητών. Στις γεννήτριες αξονικής ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν δισκοειδείς, ορθογώνιοι ή τραπεζοειδείς μαγνήτες. Οι δισκοειδείς μαγνήτες, σύμφωνα με την αναφορά [24], έχουν τα πιο υποδεέστερα χαρακτηριστικά, καθώς χωράει λιγότερο μαγνητικό υλικό στο δρομέα και ταιριάζουν μόνο με κυκλικά πηνία. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε γεννήτριες μικρής ισχύος. Η σύγκριση των ορθογώνιων με τους τραπεζοειδείς μαγνήτες δίνει αρκετά κοντινά αποτελέσματα. Οι ορθογώνιοι μαγνήτες είναι πιο δημοφιλείς και μπορεί κανείς να τους βρει ευκολότερα στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία διαστάσεων και καλύτερες τιμές. Οι τραπεζοειδείς μαγνήτες όμως, έχουν το πλεονέκτημα του σταθερού λόγου πλάτους μαγνήτη

προς πολικό βήμα a_i που συμβάλει στη δημιουργία μιας κυματομορφής της τάσης, η οποία προσεγγίζει καλύτερα το ημίτονο, ενώ παράλληλα επιτυγχάνουν καλύτερη αξιοποίηση της διατιθέμενης επιφάνειας του δρομέα με αποτέλεσμα τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μαγνητών μεγαλύτερου μεγέθους και κατά συνέπεια την ανάπτυξη μεγαλύτερης μαγνητικής ροής.

Το πάχος του μαγνήτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει αρκετά τη σχεδίαση, αλλά μπορεί να αποφασιστεί σχετικά αυθαίρετα πριν από τη διαστασιολόγηση. Το πρώτο βασικό θέμα που προκύπτει από αυτό είναι το πάχος του δίσκου σιδήρου που συγκρατεί τους μαγνήτες, κυρίως όσο αφορά την εμφάνιση μαγνητικού κορεσμού στον σίδηρο. Το πάχος του σιδήρου πρέπει να είναι περίπου ίσο με το πάχος του μαγνήτη ώστε να μην υπάρχει κορεσμός. Επίσης το πάχος του μαγνήτη επηρεάζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, αλλά και το πάχος του πηνίου (άρα και την κατασκευασιμότητά του που δίνεται από τον λόγο αξονικού πάχους t_w προς πάχος πλευράς w_c).

Ένα άλλο πολύ σημαντικό μέγεθος είναι ο λόγος a_i πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος. Πολύ συχνά στη βιβλιογραφία συναντάται η βέλτιστη τιμή του λόγου αυτού ως $2/\pi$, αλλά αυτό συμβαίνει μόνο επειδή έτσι παράγεται ημιτονοειδής τάση, η οποία χρειάζεται ώστε να μην υπάρχουν στη γεννήτρια αρμονικές που θα προκαλούσαν θόρυβο και ανεπιθύμητες ροπές. Αύξηση του a_i σε μία γεννήτρια δεδομένης εξωτερικής ακτίνας οδηγεί στην αύξηση του μεγέθους των μαγνητών και της ισχύος εξόδου. Αντίστροφα, δεδομένης της ισχύος της γεννήτριας, μεγάλο a_i καταλήγει σε μικρότερο όγκο (αλλά όχι κατ' ανάγκη μικρότερο βάρος) γεννήτριας. Υψηλή τιμή του συντελεστή αυτού οδηγεί σε μαγνήτες μεγαλύτερης επιφάνειας, άρα και σε μεγαλύτερη ελκτική δύναμη μεταξύ των δίσκων του δρομέα -στην περίπτωση που η τοπολογία είναι διπλού δρομέα- που σημαίνει σίδηρο μεγαλύτερου πάχους και πιο βαριά κατασκευή. Ο λόγος αυτός επιδρά στο κόστος, το βάρος, τον όγκο και την απόδοση της γεννήτριας, καθώς και στην κυματομορφή της τάσης.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος που επηρεάζει τον συνολικό όγκο της γεννήτριας και το σχήμα του μαγνήτη (αφού καθορίζει το ενεργό του μήκος) είναι ο λόγος k_d της εσωτερικής προς την εξωτερική ακτίνα. Μικρή τιμή του k_d οδηγεί σε μαγνήτες μεγάλου ενεργού μήκους, άρα μεγάλης επιφάνειας και μεγαλύτερου κόστους αλλά και σε μεγαλύτερη ελκτική δύναμη, η οποία οδηγεί σε ανάγκη για μεγαλύτερο πάχος σιδήρου. Με λίγα λόγια, χαμηλό k_d είναι πολύ πιθανό να καταλήξει σε πιο ακριβή και βαριά κατασκευή, αλλά η γεννήτρια θα έχει καλύτερη απόδοση, ροπή και πυκνότητα ισχύος. Γενικά πάντως, μεγάλες τιμές (0,7-0,8) συναντώνται στις εφαρμογές χαμηλού κόστους και δε δημιουργούν προβλήματα.

Επίσης, υπάρχει ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου k_f που εκφράζει τη δυνατότητα να γεμίσει η ιδεατή αύλακα με χαλκό. Συνήθως, ο συντελεστής αυτός αυξάνεται όσο αυξάνονται

οι σπείρες, αν και ο αυξημένος αριθμός σπειρών σημαίνει μεγαλύτερη πιθανότητα λάθους κατά το τύλιγμα των πηνίων. Ο συντελεστής πλήρωσης έχει να κάνει με τη σωστή αξιοποίηση του χώρου, ώστε τα πηνία να εφάπτονται μεταξύ τους (θέλουμε συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης) και να μην επικαλύπτονται. Για διαφορετικές γεωμετρίες πηνίων ο συντελεστής μεταβάλλεται διαφορετικά σε σχέση με τον αριθμό των σπειρών. Γενικά πάντως, υψηλό k_f οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση του χώρου και μικρότερα πηνία με μικρότερα άκρα τυλίγματος με αποτέλεσμα μία πιο αποδοτική γεννήτρια με ευκολότερη, πιο ελαφριά και φθηνή κατασκευή.

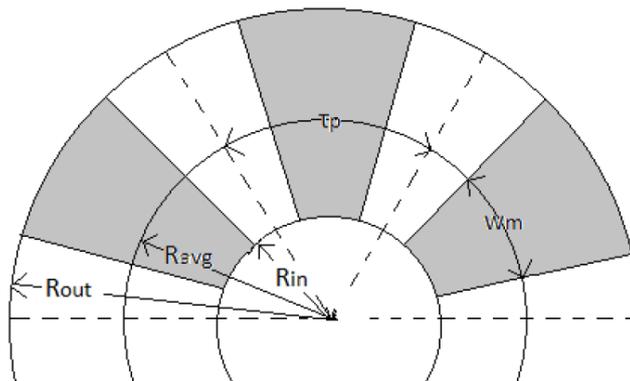
Τέλος, μία πολύ σημαντική μεταβλητή της γεννήτριας είναι το πάχος σιδήρου, το οποίο καθορίζει άμεσα το βάρος της και συμβάλλει στην μηχανική της αντοχή. Το πάχος του σιδήρου θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μη λυγίσουν οι δίσκοι από την ελκτική δύναμη των μαγνητών και να μην υπάρχει κορεσμός. ^[6]

4.3.2.3 Θεωρητική ανάλυση

Έστω γεννήτρια αξονικής ροής με τραπεζοειδείς μαγνήτες και πηνία και συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Το πολικό βήμα τ_p και το πλάτος του μαγνήτη w_m δεν είναι σταθερά μεγέθη, αλλά εξαρτώνται από την ακτίνα r . Για το πολικό βήμα ισχύει ο τύπος (4.10):

$$\tau_p(r) = \frac{2\pi r}{p} \quad (4.10)$$

όπου p είναι ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας.



Σχήμα 4.27 Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη μίας γεννήτριας αξονικής ροής ^[6]

Σύμφωνα με το σχήμα και όσα έχουν αναφερθεί στην παραπάνω παράγραφο ο συντελεστής α_i δίνεται από τον τύπο (4.11):

$$\alpha_i = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)} \quad (4.11)$$

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r \sqrt{\frac{1,5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}} r_{out}^2 B_p \quad (4.17)$$

όπου k_r : ο συντελεστής ακτίνας, για τον οποίο ισχύει ότι $k_r = \sqrt{(1 - k_d)(1 + k_d)^3}$,
όπου χρησιμοποιείται ο λόγος της εσωτερικής προς την εξωτερική ακτίνα k_d

k_f : ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου

t_w : το αξονικό πάχος του πηνίου

ρ_t : η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία t

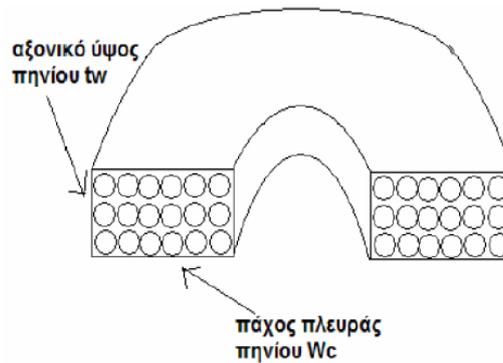
k_{sc} : ένας συντελεστής τυλίγματος για τον οποίον ισχύει ότι

$$k_{sc} = k_{wc} \sqrt{\theta_{re} \frac{q}{p}} \quad ,$$

όπου $k_{wc} = k_p k_d$, με k_p να είναι ο συντελεστής βήματος και k_d να είναι ο συντελεστής πλάτους (ίσος με 1 για το συγκεκριμένο τύλιγμα)

και θ_{re} : η γωνία πάχους πλευράς πηνίου

και k_{ec} : ο συντελεστής άκρων τυλίγματος



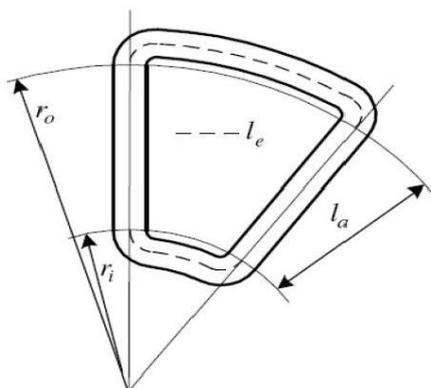
Σχήμα 4.29 Το αξονικό πάχος και το πάχος πλευράς ενός πηνίου ^[6]

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για το τύλιγμα είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος J_{max} που μπορεί αυτό να υποστεί και η οποία παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 4 και 5 A/mm². Στην περίπτωση όμως μιας μηχανής αξονικής ροής που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτρια, η τιμή αυτή μπορεί να φθάσει και τα 6 A/mm², καθώς αυτή η μηχανή έχει πολύ καλύτερο αερισμό σε σχέση με τις άλλες. Πιο συγκεκριμένα και για τη διατομή πηνίου που φαίνεται στο σχήμα 4.28, ισχύει για το J_{max} ότι:

$$J_{max} = \frac{N_c I_a}{t_w W_c k_f} \quad (4.18)$$

όπου I_a : το ρεύμα της γεννήτριας

και w_c : το πάχος της πλευράς του πηνίου.



Σχήμα 4.30 Κάτοψη του πηνίου όπου φαίνονται και τα άκρα του τυλίγματος ^[6]

Το μέσο μήκος ελίσματος l_{avg} ενός πηνίου όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.30 είναι ίσο με:

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec} \quad (4.19)$$

Στο σημείο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση R_c ενός πηνίου με N_c τυλίγματα, ως εξής:

$$R_c = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{sc} \quad (4.20)$$

όπου sc : το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου.

Για την ειδική αντίσταση ρ_t χαλκού, όταν η γεννήτρια λειτουργεί υπό θερμοκρασία T_c ισχύει: $\rho_t = \rho_{20} (1 + 0,0039(T_c - 20))$, όπου $\rho_{20} = 1,68 \cdot 10^{-8}$.

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος L_s όπως έχει υπολογιστεί στο [26] δίνεται από τον τύπο (4.21):

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 N_c^2}{t_w} 10^{-7} \cdot K_n \quad (4.21)$$

όπου K_n : η σταθερά του Nagaoka για την οποία ισχύει ότι $K_n = \frac{1}{1 + 0,9 \frac{l_{avg}}{2\pi t_w} + 0,32 \frac{2\pi w_c}{l_{avg}} + 0,84 \frac{w_c}{t_w}}$

Πρόκειται ουσιαστικά για έναν συντελεστή διόρθωσης καθώς κατά τη λειτουργία της γεννήτριας τα πηνία μαγνητίζονται καθιστώντας το πηνίο μη ομοιόμορφο.

4.3.2.4 Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα

Οι απώλειες σε μία γεννήτρια μπορούν να χωριστούν σε απώλειες στον στάτη, απώλειες στον δρομέα και απώλειες περιστροφής.

Οι απώλειες στον στάτη χωρίζονται σε δύο συνιστώσες: τις απώλειες χαλκού και τις απώλειες δινορρευμάτων. Οι απώλειες χαλκού αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα απωλειών και είναι οι ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη:

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (4.22)$$

Στην παρούσα εργασία το επιδερμικό φαινόμενο έχει αγνοηθεί. Η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες δινορρευμάτων, αλλά κάποιες απώλειες εξακολουθούν να υπάρχουν στο τύλιγμα με αποτέλεσμα να πρέπει να υπολογιστούν (σύμφωνα με το [26]) :

$$P_{eddy} = \frac{\pi I_a^2 s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_t} \quad (4.23)$$

όπου $N_p=1$: ο αριθμός των παράλληλων κλώνων.

Στον δρομέα οι απώλειες οφείλονται στους μόνιμους μαγνήτες και τις αρμονικές υψηλής τάξης της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Δίχως πυρήνα οι απώλειες αυτές είναι πολύ μικρές και γι' αυτό δε λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία. Επίσης, ο δρομέας έχει απώλειες που οφείλονται στον σίδηρο που συγκρατεί τους μαγνήτες, αλλά κι αυτές είναι πολύ μικρές και αμελούνται.

Οι απώλειες περιστροφής αποτελούνται από δύο συνιστώσες: τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού. Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών μπορούν να υπολογιστούν μέσω του τύπου (4.24):

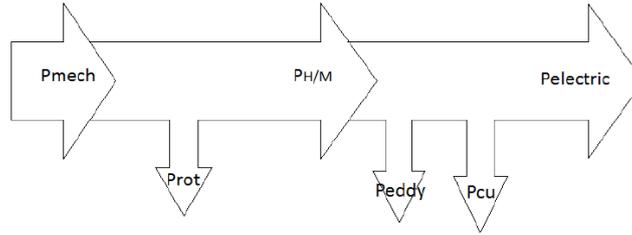
$$P_{rot} = 0,06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n \quad (4.24)$$

όπου k_{fb} : συντελεστής τριβών με τιμές 1-3 m^2/s^2

m_r : η μάζα του δρομέα

και m_{sh} : η μάζα του άξονα.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, μπορεί να σχηματισθεί το ισοζύγιο ενέργειας που φαίνεται στο σχήμα 4.32, όπου P_{mech} είναι η (παραγόμενη από τον υδροστρόβιλο) μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας και $P_{electric}$ η παραγόμενη από τη γεννήτρια ηλεκτρική ισχύς.

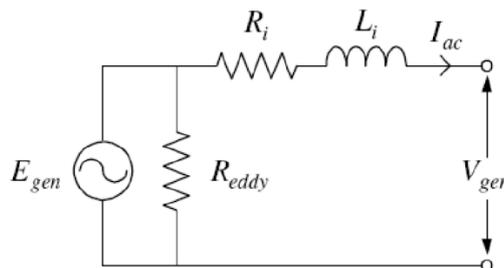


Σχήμα 4.32 Ισοζύγιο ενέργειας μίας γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής χωρίς πυρήνα [6]

Η απόδοση της γεννήτριας είναι ίση με

$$\eta = \frac{P_{electric}}{P_{rot} + P_{eddy} + P_{Cu} + P_{electric}} \quad (4.25)$$

Τα παραπάνω φαίνονται γραφικά στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.33, όπου η R_{eddy} έχει τοποθετηθεί για να παρουσιάσει τις απώλειες δινορρευμάτων και δεν είναι μία πραγματική αντίσταση.



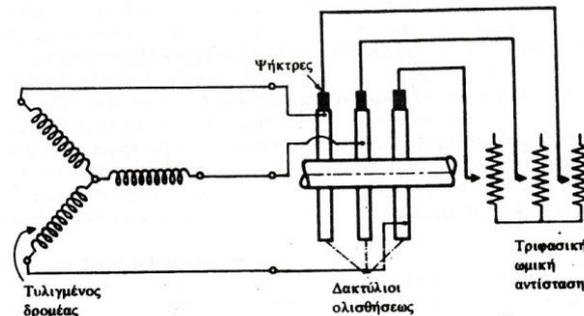
Σχήμα 4.33 Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας [6]

4.4 Γεννήτρια επαγωγής

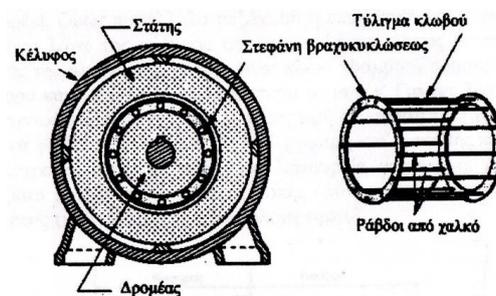
Οι ασύγχρονες γεννήτριες δεν διαφέρουν σε τίποτα από τους ασύγχρονους κινητήρες και χαρακτηρίζονται ως μηχανές επαγωγής λόγω του φαινομένου μέσω του οποίου επάγεται στον δρομέα εναλλασσόμενο ρεύμα. Επειδή οι μηχανές επαγωγής δεν έχουν ανεξάρτητη διέγερση, για να λειτουργήσουν σαν γεννήτριες πρέπει να συνδεθούν με ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης, από το οποίο θα απορροφήσουν άεργο ισχύ. Οι γεννήτριες επαγωγής από κατασκευαστικής πλευράς έχουν τα πλεονεκτήματα που έχουν οι ασύγχρονοι κινητήρες, δηλαδή απλότητα κατασκευής και συντήρησης λόγω της έλλειψης δακτυλιδιών και ψηκτρών, τουλάχιστον στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα τύπου κλωβού. Όμως τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά για λειτουργία ως γεννήτριες δεν είναι εξίσου ικανοποιητικά όπως των σύγχρονων γεννητριών. Για τους λόγους αυτούς, οι ασύγχρονες γεννήτριες εξοπλίζουν τα μικρά κυρίως υδροηλεκτρικά συστήματα.

4.4.1 Περιγραφή λειτουργίας

Στη μηχανή επαγωγής ο στάτης είναι ουσιαστικά ο ίδιος με αυτόν μίας σύγχρονης μηχανής με εσωτερικούς πόλους: ο πυρήνας του στάτη τοποθετείται μέσα στο κέλυφος και αποτελείται από λεπτά μαγνητικά ελάσματα με οδοντώσεις. Στα αυλάκια που σχηματίζονται τοποθετείται το τριφασικό τύλιγμα, τα έξι άκρα του οποίου καταλήγουν στους ακροδέκτες της μηχανής έτσι ώστε οι τρεις φάσεις να μπορούν να συνδεθούν σε διάταξη αστέρα ή τριγώνου.^[8] Ο δρομέας μίας μηχανής επαγωγής μπορεί να κατασκευαστεί σε δύο τύπους: τον τυλιγμένο δρομέα και τον βραχυκυκλωμένο δρομέα τύπου κλωβού, που φαίνονται στο σχήμα 4.34 (α) και (β) αντίστοιχα. Ο τυλιγμένος δρομέας φέρει πολυφασικό τύλιγμα όμοιο με του στάτη και με τον ίδιο αριθμό πόλων. Οι ακροδέκτες του δρομέα συνδέονται μέσω δακτυλιδιών και ψηκτρών με εξωτερικές μεταβαλλόμενες αντιστάσεις που χρησιμεύουν για την αύξηση της αντίστασης του δρομέα κατά την εκκίνηση. Ο βραχυκυκλωμένος δρομέας τύπου κλωβού φέρει τύλιγμα το οποίο αποτελείται από χάλκινες αγωγίμες ράβδους, τοποθετημένες σε αυλάκες στον σιδερένιο πυρήνα του δρομέα. Οι ράβδοι συγκολλούνται στις άκρες τους με δύο στεφάνια βραχυκυκλώσεως κι έτσι σχηματίζεται ο κλωβός.^[17] Ο δρομέας των γεννητριών επαγωγής που χρησιμοποιούνται σε micro-υδροηλεκτρικά συστήματα είναι συνήθως τύπου κλωβού, λόγω απλότητας και μεγαλύτερης αντοχής.



(α)



(β)

Σχήμα 4.34 (α) Συνδεσμολογία κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα ^[17], (β) Βραχυκυκλωμένος δρομέα τύπου κλωβού ^[8]

Όταν το τύλιγμα του στάτη συνδεθεί με συμμετρική τριφασική πηγή εναλλασσομένου ρεύματος, θα αναπτυχθεί στο διάκενο μαγνητικό πεδίο περιστρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα και με φορά περιστροφής που καθορίζεται από τη διαδοχή των φάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τελικά, στο τύλιγμα του δρομέα να επάγονται εναλλασσόμενα ρεύματα, που όμως έχουν συχνότητα διαφορετική από εκείνη του στάτη, επειδή ο δρομέας κινείται. Αν f είναι η συχνότητα των συμμετρικών τριφασικών ρευμάτων που τροφοδοτούν το τύλιγμα του στάτη, τότε το παραγόμενο από τα ρεύματα αυτά μαγνητικό πεδίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα n_s , που αντιστοιχεί στον αριθμό των πόλων του τυλίγματος και δίνεται από τη σχέση (4.1) $n_s = \frac{120f}{p}$. Τα αναπτυσσόμενα εξ επαγωγής ρεύματα στο τύλιγμα του δρομέα έχουν συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα n_s και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα n .^[17] Η σχέση μεταξύ των δύο ταχυτήτων χαρακτηρίζεται από την τιμή του συντελεστή ολίσθησης s , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.26)$$

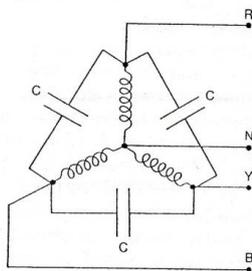
Εάν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, τότε η ολίσθηση s είναι θετική, η φορά ηλεκτρικού ρεύματος στους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα αντιστοιχεί στην ανάπτυξη κινητήριας ροπής και η μηχανή θα λειτουργήσει ως επαγωγικός κινητήρας. Εάν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα γίνει μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, τότε η ολίσθηση και η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη ως προς τους αγωγούς του δρομέα είναι αρνητική με αποτέλεσμα να αντιστρέφεται η φορά της ΗΕΔ και του ηλεκτρικού ρεύματος στους αγωγούς και η αναπτυσσόμενη ροπή γίνεται πλέον ανθιστάμενη. Τότε, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Μια ασύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί σε υπερσύγχρονες στροφές. Στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, η ταχύτητα περιστροφής της ασύγχρονης γεννήτριας δεν είναι μεγαλύτερη του 5% της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής. Για μηδενική τιμή ολίσθησης, ο ρότορας περιστρέφεται χωρίς να αναπτύσσεται σε αυτόν ροπή, δηλαδή αντιστοιχεί σε λειτουργία χωρίς φορτίο.

Για μικρές τιμές του συντελεστή ολίσθησης η σχέση μεταξύ ολίσθησης και ροπής είναι σχεδόν γραμμική. Καθώς αυξάνει η ολίσθηση σε απόλυτη τιμή αυξάνεται η επαγόμενη ΗΕΔ στον δρομέα και κατά συνέπεια το ρεύμα που τον διαρρέει. Παράλληλα όμως, αυξάνεται και η επαγωγική και σύνθετη αντίσταση του δρομέα λόγω αύξησης της επαγωγής σκεδάσεως με αποτέλεσμα πέραν μίας μέγιστης τιμής της ολίσθησης, να μην είναι πλέον γραμμική η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και η ροπή που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η χρήσιμη και ευσταθής περιοχή λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής είναι μεταξύ της μηδενικής ροπής (σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής) και της μέγιστης τιμής της ροπής (σε απόλυτη τιμή).

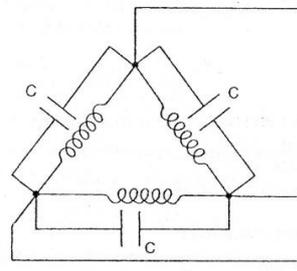
Το ρεύμα μαγνήτισης στις φάσεις του στάτη έπεται της ΗΕΔ κατά γωνία μικρότερης των 90° (επαγωγική) και αποτελείται από δύο συνιστώσες: την καθαρά επαγωγική που προκαλεί τη μαγνήτιση και αυτή που είναι σε φάση με την τάση του στάτη και αντιστοιχεί στις απώλειες μαγνητίσεως, μικρότερη της πρώτης. Όταν η μηχανή επαγωγής στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής δεν επάγεται ρεύμα στον ρότορα και άρα, το ρεύμα του στάτη είναι ουσιαστικά ίσο με το ρεύμα μαγνητίσεως, δηλαδή επαγωγικό με γωνία φ που πλησιάζει τις 90° . Όσο η ολίσθηση αυξάνει σε απόλυτη τιμή, αυξάνεται και η συνιστώσα του ρεύματος που είναι σε φάση με την τάση ακροδεκτών με αποτέλεσμα τη μείωση της γωνίας φ και την αύξηση του συντελεστή ισχύος με φόρτιση όμως επαγωγική. Άρα, μία μηχανή επαγωγής απορροφά πάντοτε άεργο ισχύ από το δίκτυο στο οποίο συνδέεται για τις ανάγκες μαγνήτισης. Η ανάγκη αυτή αποτελεί ένα μειονέκτημα των ασύγχρονων γεννητριών, το οποίο όμως μπορεί να διορθωθεί με την παράλληλη σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών.^[8]

4.4.1.1 Πυκνωτές διέγερσης

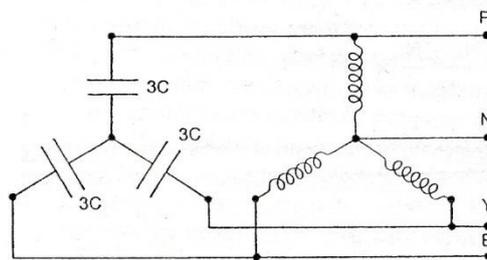
Εκτός από τους πυκνωτές που συνδέονται στην έξοδο μίας μηχανής επαγωγής για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, υπάρχει και η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές για να παράσχουν σε μία γεννήτρια επαγωγής ένα μέρος ή και ολόκληρο (στην περίπτωση που αυτή τροφοδοτεί αυτόνομο δίκτυο) το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσής της.



(α)



(β)



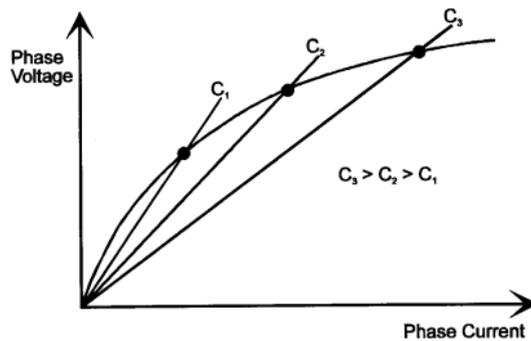
(γ)

Σχήμα 4.35 (α) Γεννήτρια σε συνδεσμολογία αστέρα και πυκνωτές σε συνδεσμολογία τριγώνου, (β) Γεννήτρια και πυκνωτές διέγερσης σε συνδεσμολογία τριγώνου, (γ) Γεννήτρια και πυκνωτές διέγερσης σε συνδεσμολογία αστέρα ^[3]

Οι δυνατοί τρόποι σύνδεσης των πυκνωτών διέγερσης με τη γεννήτρια φαίνονται στο σχήμα 4.35. Αν η γεννήτρια έχει συνδεσμολογία αστέρα, τότε οι πυκνωτές μπορεί και αυτοί να είναι συνδεδεμένοι σε αστέρα αλλά και σε τρίγωνο. Στην πρώτη περίπτωση, ο ουδέτερος του αστέρα των πυκνωτών δεν πρέπει να συνδέεται με τον ουδέτερο της γεννήτριας, γιατί αυτό θα προκαλέσει παραμόρφωση της κυματομορφής της τάσης και αυξημένες απώλειες. Αν η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε τρίγωνο, τότε θα υπάρχει ροή τρίτης αρμονικής του ρεύματος στα τυλίγματα της μηχανής που σχηματίζουν τρίγωνο και επιπλέον δε θα μπορεί να συνδεθεί σε τριφασικό με 4 καλώδια σύστημα, δηλαδή και με ουδέτερο, και γι' αυτό δε συνιστάται η χρήση της σε τριφασικό σύστημα. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί για να δώσει μονοφασική έξοδο με κατάλληλη συνδεσμολογία πυκνωτών, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.4.3 της παρούσας εργασίας.

Όταν οι πυκνωτές συνδέονται σε αστέρα, απαιτείται τρεις φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα απ' ότι στη συνδεσμολογία τριγώνου, αν και η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα τους είναι μικρότερη και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο φθηνοί πυκνωτές. Αν οι πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι σε τρίγωνο, τότε η απαιτούμενη χωρητικότητα είναι μικρότερη και επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα μεγέθη που υπάρχουν στην αγορά, το κόστος ανά μF μπορεί να μην είναι μεγαλύτερο από αυτό των πυκνωτών σε συνδεσμολογία τριγώνου. Συνήθως, η σύνδεση των πυκνωτών διέγερσης σε τρίγωνο είναι πιο φθηνή και προτιμάται.

Γενικά, οι καταλληλότεροι πυκνωτές για την χρήση αυτή είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται στη μόνιμη λειτουργία των κινητήρων (motor run capacitors). Διατίθενται σε μεγάλο εύρος τιμών χωρητικότητας, για τάσεις 380-515V και 220-240V και είναι αρκετά φθηνοί. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές που είναι για διόρθωση του συντελεστή ισχύος των λαμπτήρων φθορισμού αν και αυτοί σπάνια φθάνουν χωρητικότητα μεγαλύτερη του 10 μF . Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται πυκνωτές που είναι για εκκίνηση κινητήρα, καθώς δεν είναι σχεδιασμένοι για συνεχή λειτουργία. Ο χρόνος ζωής των πυκνωτών εξαρτάται από την ποιότητα της κατασκευής, καθώς και από την τάση, τη συχνότητα και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Ο χρόνος ζωής τους αυξάνεται όταν λειτουργούν υπό τάση και συχνότητα μικρότερη της ονομαστικής τους. Αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται αύξηση του ρεύματος, επιπλέον απώλειες και αύξηση της θερμοκρασίας. Ακόμα, καθώς η διάρκεια ζωής των πυκνωτών εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, πρέπει να τοποθετούνται σε ένα κουτί με οπές που θα έχει καλό αερισμό και χωρίς απευθείας έκθεση στο φως του ήλιου, ώστε να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο η αύξηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.36 Χαρακτηριστική διέγερσης μίας γεννήτριας επαγωγής για λειτουργία εν κενώ σε σταθερές στροφές για τρεις διαφορετικές τιμές χωρητικότητας διέγερσης ^[27]

Στο σχήμα 4.36 φαίνεται η χαρακτηριστική διέγερσης μίας γεννήτριας επαγωγής χωρίς φορτίο για λειτουργία σε σταθερές στροφές και για τρεις διαφορετικές τιμές χωρητικότητας διέγερσης. Η αύξηση της χωρητικότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης λειτουργίας και καθώς ρέει μεγαλύτερο ρεύμα στη γεννήτρια, αυξάνονται οι θερμικές απώλειες στα τυλίγματα του στάτη. Ένας ακριβής υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας διέγερσης μπορεί να γίνει με γνώση των ηλεκτρικών παραμέτρων της μηχανής επαγωγής και της μεταβολής τους σε συνάρτηση με την τάση. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω συγκεκριμένων δοκιμών στις οποίες όμως χρειάζεται ακριβής εξοπλισμός. Στην πράξη, αρκεί ο υπολογισμός μίας προσεγγιστικής τιμής της χωρητικότητας διέγερσης και προσαρμογή της ταχύτητας του τροβίλου ώστε στην έξοδο της γεννήτριας να αναπτύσσεται η απαιτούμενη τάση. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα λειτουργίας μπορεί να διαφέρει από την ονομαστική συχνότητα της μηχανής επαγωγής, αλλά κάτι τέτοιο είναι αποδεκτό αν η απόκλιση βρίσκεται εντός κάποιων λογικών ορίων (μικρού εύρους διακύμανσης). Υπάρχουν δύο τρόποι προσδιορισμού της χωρητικότητας διέγερσης: με δοκιμή λειτουργίας εν κενώ (χωρίς φορτίο) είτε ως κινητήρα είτε ως γεννήτρια (αν και ως κινητήρα είναι πιο εύκολο) και από τα δεδομένα του κατασκευαστή.

Η δοκιμή εν κενώ χρησιμεύει καθώς η φαινόμενη ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο στην περίπτωση αυτή πλησιάζει την άεργο ισχύ που απαιτείται όταν η γεννήτρια λειτουργεί κοντά στην πλήρη φόρτιση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για παλιές μηχανές και χρειάζεται προσοχή γιατί αν και είναι ακριβής για μηχανές ισχύος μικρότερης των 5kW, τείνει να καταλήγει σε υποτίμηση της απαιτούμενης χωρητικότητας. Αν δηλαδή, γίνεται δοκιμή με λειτουργία ως κινητήρα και $S_{no-load}$ είναι η φαινόμενη ισχύς κατά τη λειτουργία εν κενώ, τότε αυτή είναι ίση με $S_{no-load} = \sqrt{3}V_{line} \cdot I_{line}^*$, όπου V_{line} και I_{line} είναι η πολική τάση και το ρεύμα γραμμής αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι η συνολική άεργος ισχύς ισούται με την φαινόμενη ισχύ για λειτουργία εν κενώ ($Q = S_{no-load}$), η άεργος ισχύς ανά φάση θα είναι

$Q_{phase} = Q/3$. Άρα, για πυκνωτές συνδεδεμένους σε αστέρα, όπου η τάση στα άκρα τους V_c είναι ίση με την φασική, το αντίστοιχο ρεύμα I_c θα είναι $V_c = V_{line}/\sqrt{3}$ και $I_c = Q_{phase}/V_c$

. Τελικά, η απαιτούμενη χωρητικότητα δίνεται από τον τύπο (4.27):

$$C = \frac{I_c}{2\pi f V_c} \quad (4.27)$$

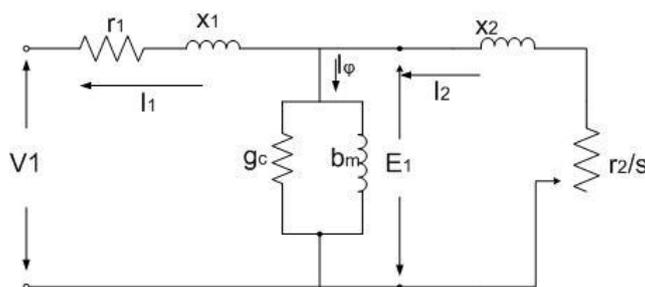
Αν πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι σε τρίγωνο, τότε η τάση στα άκρα τους είναι ίση με την πολική τάση $V_c = V_{line}$, το αντίστοιχο ρεύμα είναι $I_c = Q_{phase}/V_c$ και η απαιτούμενη χωρητικότητα δίνεται πάλι από τον τύπο (4.27).

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί τα δεδομένα του κατασκευαστή για την εκτίμηση της απαιτούμενης αέργου ισχύος μέσω του ρεύματος πλήρους φορτίου, του συντελεστή ισχύος και της ονομαστικής τάσης. Είναι πιθανό αφού έχει χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους προσδιορισμού της χωρητικότητας διέγερσης, η γεννήτρια να έχει τάση εξόδου μικρότερη της ονομαστικής για λειτουργία στην ονομαστική συχνότητα, επειδή δε λαμβάνουν υπόψη τους τον αυξημένο κορεσμό κατά τη λειτουργία της μηχανής επαγωγής ως γεννήτρια υπό φορτίο. Ωστόσο, δεν συνιστάται η αύξηση της χωρητικότητας διέγερσης.^[27]

4.4.1.2 Απώλειες και ισοδύναμο κύκλωμα

Και στη γεννήτρια επαγωγής, κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική αναπτύσσονται απώλειες, οι οποίες διακρίνονται σε μηχανικές (απώλειες εδράνων και αερισμού), απώλειες σιδήρου (δινορρευμάτων) και χαλκού. Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες σιδήρου είναι πολύ μικρότερες των απωλειών χαλκού, οι οποίες μεταβάλλονται με το τετράγωνο του διαρρεόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Η απόδοση της γεννήτριας αυξάνεται συνήθως με το μέγεθος, δηλαδή με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας, αλλά μειώνεται όταν η γεννήτρια λειτουργεί υπό μερική φόρτιση ή όταν η ολίσθηση αυξάνεται.^[18]

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας επαγωγής φαίνεται στο σχήμα 4.37, όπου V_1 είναι η τάση στην έξοδο της γεννήτριας, E_1 η επαγόμενη στον στάτη ΗΕΔ από το συνισταμένο κύμα μαγνητικής ροής, I_1 και I_2 είναι το ρεύμα στον στάτη και το ρεύμα του δρομέα ανηγμένο στον στάτη, I_ϕ είναι το ρεύμα διέγερσης, r_1 , x_1 και x_2 , r_2/s είναι οι συνιστώσες της σύνθετης αντίστασης του στάτη και της σύνθετης αντίστασης του δρομέα ανηγμένης στον στάτη, και ο εγκάρσιος κλάδος με τις αγωγιμότητες g_c και b_m αντιστοιχεί στις απώλειες μαγνήτισης.^[17]



Σχήμα 4.37 Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας επαγωγής

4.4.2 Χρήση κινητήρα επαγωγής ως γεννήτρια

Κάποιες φορές είναι δύσκολο να βρεθεί γεννήτρια επαγωγής σε τόσο μικρό μέγεθος όσο αυτό που χρησιμοποιείται σε micro και pico-υδροηλεκτρικά συστήματα. Έτσι, πολλές φορές προτιμάται η χρήση κινητήρα επαγωγής ως γεννήτρια, καθώς είναι φθηνός και ανθεκτικός. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα για κάθε εφαρμογή πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή. Αρχικά, ο κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί κατά τον τρόπο αυτόν πρέπει να έχει βραχυκυκλωμένο δρομέα τύπου κλωβού. Επίσης, αν πρόκειται να είναι άμεσα συζευγμένος με τον υδροστρόβιλο, πρέπει να έχει επίπεδο προστασίας IP55. Σε άλλη περίπτωση, αν είναι σε επιβαρυμένο περιβάλλον πρέπει να έχει IP54 και αν είναι σε καθαρό περιβάλλον και έχει ισχύ μικρότερη των 10kW, μπορεί να έχει IP21, IP22, IP23. Όσο αφορά τη μόνωση των τυλιγμάτων του κινητήρα και την αντοχή της στη θερμοκρασία, πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία της μηχανής σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες κοντά στα όρια αντοχής της μόνωσης, καθώς έτσι μειώνεται ο χρόνος ζωής της.

Οι κινητήρες επαγωγής έχουν λίγο χαμηλότερη απόδοση όταν χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες. Συχνά, ο μόνος τρόπος βελτίωσης της απόδοσης είναι η αλλαγή της τάσης και συχνότητας λειτουργίας. Ωστόσο, κάποιοι κατασκευαστές φτιάχνουν κινητήρες υψηλής απόδοσης αυξάνοντας την ποσότητα του χαλκού και του σιδήρου του πυρήνα. Οι κινητήρες αυτοί είναι ακριβότεροι, αλλά το αυξημένο κόστος τους μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μεγαλύτερη ισχύ εξόδου. Επίσης, μία άλλη λύση είναι η χρήση ενεργειακά αποδοτικών κινητήρων, οι οποίοι έχουν υψηλότερη απόδοση, αλλά χαμηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση που είναι απαραίτητη για την εκκίνηση της μηχανής σε ένα αυτόνομο δίκτυο.

Με προσεκτική επιλογή των συνθηκών λειτουργίας, ονομαστικής τάσης και συχνότητας, μπορεί να επιτευχθεί λειτουργία γεννήτριας σε επίπεδα ισχύος όμοια με αυτά του κινητήρα με μία αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως η διατήρηση συμμετρικής φόρτισης και βέλτιστης λειτουργίας ιδίως στα μικρά συστήματα είναι δύσκολη και σπάνια, οι μηχανές επαγωγής πρέπει να υποτιμώνται ως προς την ονομαστική τους ισχύ όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Ένας συντελεστής υποβάθμισης ίσος με 0,8 συστήνεται και

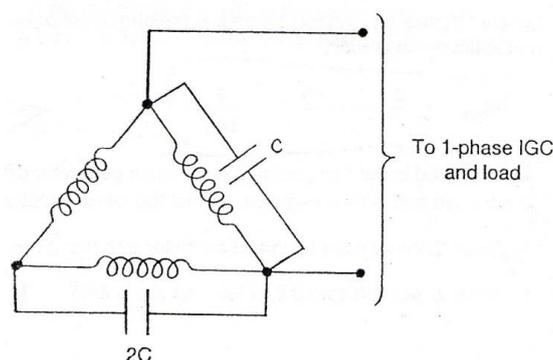
μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση μονοφασικής παραγωγής από τριφασική μηχανή. Δηλαδή, αν απαιτείται η παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας επαγωγής να είναι 10kW, επιλέγεται ένας κινητήρας επαγωγής ονομαστικής ισχύος $\frac{10}{0,8} = 12,5kW$. Δεν πρέπει όμως κανείς να παρασυρθεί και να χρησιμοποιήσει γεννήτρια μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται, καθώς οι μηχανές επαγωγής (και κυρίως οι μικρότερες) έχουν χαμηλή απόδοση σε συνθήκες μερικής φόρτισης.^[27]

Ακόμα, όταν ένας κινητήρας επαγωγής λειτουργεί ως γεννήτρια εμφανίζει μικρότερη τάση εξόδου κατά 10% περίπου, σε σχέση με αυτή που θα είχε αν λειτουργούσε κανονικά ως κινητήρας στην ίδια συχνότητα και με το ίδιο ρεύμα μαγνήτισης. Έτσι, κατά τη σχεδίαση ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος με μηχανή επαγωγής, πρέπει κανείς να αποδεχθεί την παροχή ηλεκτρικής ισχύος με τάση μικρότερη της ονομαστικής του κινητήρα. Εναλλακτικά, μπορεί κανείς να παραγγείλει με επιπλέον κόστος στον κατασκευαστή έναν κινητήρα για λειτουργία στην επιθυμητή τάση. Στην περίπτωση που δεν τροφοδοτούνται από το υδροηλεκτρικό κινητήρες, αντλίες και γενικότερα φορτία τόσο ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της συχνότητας και με την προϋπόθεση ότι η μηχανή επαγωγής είναι εξοπλισμένη με ελεγκτή, μία λύση είναι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, ώστε η τάση να αυξηθεί και να φθάσει την ονομαστική της τιμή. Ενδεικτικά, μία αύξηση της συχνότητας κατά 10% θα προκαλέσει αύξηση της τάσης κατά περίπου 15%.

Κατά την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα για χρήση ως γεννήτρια υπάρχουν και μηχανικοί περιορισμοί. Δεν πρέπει κανείς να ξεχνάει ότι η ονομαστική ισχύς του κινητήρα αντιστοιχεί στην μηχανική ισχύ εξόδου του (υπό πλήρες φορτίο), η οποία είναι μικρότερη και διαφέρει από την ηλεκτρική ισχύ εισόδου του κατά ένα ποσό ίσο με τις απώλειες στο εσωτερικό του. Αντίθετα, σε μία γεννήτρια η ονομαστική της ισχύς αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου της, η οποία είναι σαφώς μικρότερη της μηχανικής ισχύος εισόδου της. Πρέπει λοιπόν, κανείς να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός, καθώς δεν πρέπει σε καμία περίπτωση η μηχανική ισχύς εισόδου κατά τη λειτουργία ως γεννήτρια να είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα. Τα ρουλεμάν και ο άξονάς του είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν τη συγκεκριμένη μηχανική ισχύ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, εκ των πραγμάτων, η ηλεκτρική ισχύς εξόδου κατά τη λειτουργία γεννήτριας να είναι αρκετά μικρότερη της ισχύος του κινητήρα. Το περιθώριο ασφαλείας έναντι μηχανικής υπερφόρτισης του κινητήρα εξασφαλίζεται συνήθως μέσω του προαναφερόμενου συντελεστή υποβάθμισης 0,8. Επίσης, επειδή ενδέχεται να χρειαστούν ιμάντες για τη μετάδοση της κίνησης από τον υδροστρόβιλο στη μηχανή επαγωγής, θα πρέπει η τελευταία να είναι εξοπλισμένη με ανθεκτικό άξονα και ρουλεμάν που θα μπορούν να αντέξουν το μηχανικό φορτίο της τροχαλίας και του ιμάντα.^[3]

4.4.2 Μονοφασική έξοδος από τριφασική γεννήτρια

Στην περίπτωση πολύ μικρών υδροηλεκτρικών συστημάτων, με ισχύ μικρότερη των 10kW, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονοφασικό σύστημα. Ωστόσο, οι μονοφασικές μηχανές επαγωγής κατασκευάζονται κυρίως σε μεγέθη μικρότερα των 2kW, κάποιες φορές είναι ακριβότερες από τις τριφασικές, αντιμετωπίζουν προβλήματα με τη διέγερσή τους και είναι δύσκολη η επιλογή κατάλληλων πυκνωτών για αυτές. Η λύση σε αυτό δίνεται με τη χρήση τριφασικής μηχανής επαγωγής (είτε γεννήτριας, είτε κινητήρα ως γεννήτρια) που μέσω της κατάλληλης συνδεσμολογίας "C-2C", που φαίνεται στο σχήμα 4.38, δίνει μονοφασική έξοδο.



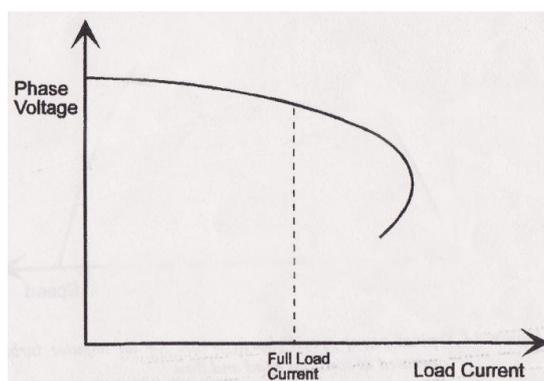
Σχήμα 4.38 Συνδεσμολογία "C-2C" για μονοφασική έξοδο από τριφασική μηχανή επαγωγής^[3]

Για να συμβεί αυτό, χρησιμοποιείται μία μηχανή επαγωγής με συνδεσμολογία τριγώνου και για αυτήν, υπολογίζεται η χωρητικότητα C που απαιτείται για κανονική τριφασική λειτουργία. Εν συνεχεία, αντί να συνδεθεί ένας πυκνωτής C παράλληλα σε κάθε φάση, συνδέεται ένας πυκνωτής C σε μία φάση και ένας διπλάσιας χωρητικότητας $2C$ σε μία δεύτερη φάση, αλλά κανένας στην τρίτη φάση. Το φορτίο συνδέεται στη φάση με τον πυκνωτή C . Η ασύμμετρη σύνδεση των χωρητικότητων βοηθάει στην αντιστάθμιση της ασύμμετρης φόρτισης της γεννήτριας και έτσι η γεννήτρια μπορεί να τροφοδοτήσει το μονοφασικό σύστημα με ισχύ ίση με το 80% της ονομαστικής ισχύος της τριφασικής μηχανής επαγωγής.

Κατά τη χρήση της συνδεσμολογίας "C-2C" είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί η σωστή σύνδεση των πυκνωτών σε σχέση με τη φορά περιστροφής της μηχανής και τη διαδοχή των φάσεων. Αν είναι σωστά συνδεδεμένοι, η φάση με τον πυκνωτή C θα εμφανίζει κορυφή στην κυματομορφή της τάσης πριν τη φάση "2C". Αν συμβεί το αντίθετο, η γεννήτρια δε θα λειτουργεί αποδοτικά και θα υπερθερμανθεί. Η σωστή σύνδεση επιτυγχάνεται εύκολα μέσω δοκιμών και ελέγχων και για τις δύο διαφορετικές ακολουθίες φάσεων.^[27] Οι δοκιμές αυτές περιγράφονται αναλυτικά στο βιβλίο "Motors as generators for micro-hydro power", Nigel Smith.

4.4.4 Έλεγχος της γεννήτριας επαγωγής κατά τη χρήση της σε ένα micro/pico-υδροηλεκτρικό σύστημα

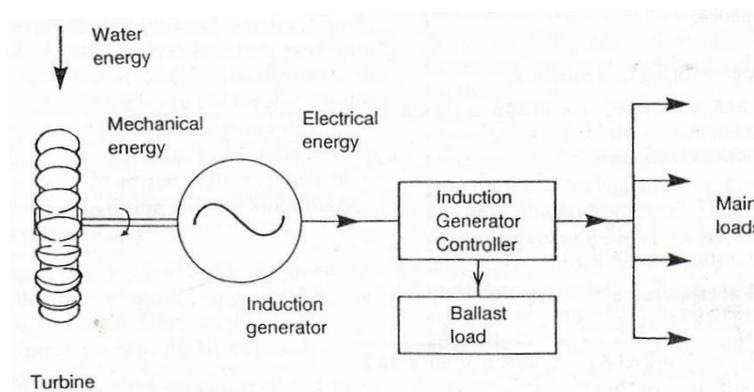
Ένα σημαντικό μειονέκτημα της γεννήτριας επαγωγής, ειδικά όταν είναι αυτοδιεγερόμενη και χρησιμοποιείται σε αυτόνομο σύστημα, είναι η πολύ κακή ρύθμιση της τάσης της. Ακόμα κι όταν οδηγείται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, η τάση εξόδου της μειώνεται γρήγορα με την αύξηση του φορτίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.39. Η σύνδεση ενός επαγωγικού φορτίου έχει ως αποτέλεσμα παροδική αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, ενώ η σύνδεση ενός χωρητικού φορτίου θα επιφέρει μείωση της συχνότητας λειτουργίας. Η τάση εξόδου της γεννήτριας επαγωγής εξαρτάται πολύ περισσότερο από την ταχύτητα περιστροφής της απ' ό,τι στην σύγχρονη γεννήτρια. Για τους λόγους αυτούς, παλιότερα οι γεννήτριες επαγωγής χρησιμοποιούνταν μόνο σε πολύ μικρά συστήματα για ωμικά φορτία και γενικά μικρά φορτία χαμηλών απαιτήσεων. Πλέον, όμως, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχει δοθεί λύση στο πρόβλημα αυτό με τη μορφή ενός ηλεκτρονικού ελεγκτή IGC (αντίστοιχου με τον ELC) για γεννήτριες επαγωγής.



Σχήμα 4.39 Χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης εξόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα για μία γεννήτρια επαγωγή με σταθερή χωρητικότητα διέγερσης και σταθερή ταχύτητα περιστροφής ^[27]

Στόχος του ελεγκτή της γεννήτριας επαγωγής είναι εξασφάλιση σταθερής τάσης μέσω της διατήρησης σταθερού τροφοδοτούμενου φορτίου. Ο ελεγκτής αντιλαμβάνεται τη μεταβολή στην τάση εξόδου της γεννήτριας και αντιδρά διοχετεύοντας ένα μέρος της παραγόμενης ισχύος σε απορριπτικά φορτία, όπως φαίνεται στο πολύ απλό σχήμα 4.40. Μέσω του IGC ελέγχεται ταυτόχρονα και η συχνότητα και η τάση εξόδου της γεννήτριας. Η διαφορά του IGC με τον ELC είναι ότι ο πρώτος ανιχνεύει μεταβολή της τάσης και όχι της συχνότητας (όπως ο δεύτερος), με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται και άλλος ελεγκτής (στη σύγχρονη γεννήτρια χρειαζόταν AVR και ELC). Ο IGC επιτρέπει και την τροφοδότηση επαγωγικών φορτίων με συντελεστή ισχύος μεγαλύτερο ή ίσο με 0,8. Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας μία περιορισμένη αύξηση της συχνότητας και επομένως αύξηση της χωρητικής αντίδρασης

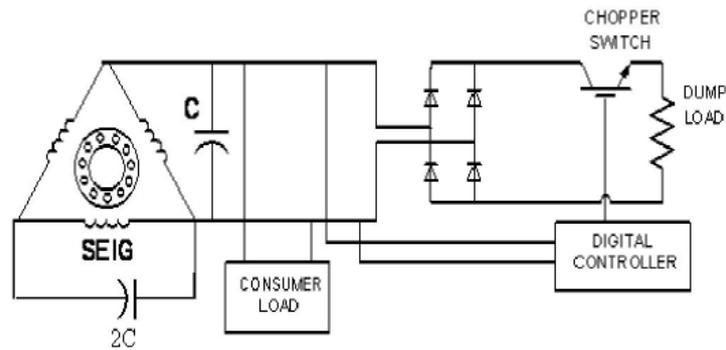
των πυκνωτών διέγερσης, η οποία εξυπηρετεί ταυτόχρονα τις ανάγκες μαγνήτισης της γεννήτριας αλλά και την ανάγκη για άεργο ισχύ του επαγωγικού φορτίου. Η αύξηση της συχνότητας μπορεί να είναι της τάξης 5% ή το πολύ 10%.^[3] Αυτό που δε μπορεί να κάνει ο IGC είναι να προστατεύσει τη γεννήτρια επαγωγής από υπερφόρτιση λόγω πολύ υψηλού κυρίως φορτίου και γι' αυτό πρέπει να ληφθεί ξεχωριστή μέριμνα.^[10]



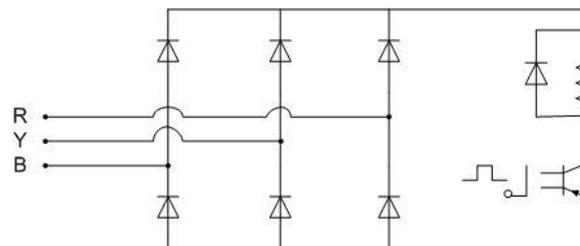
Σχήμα 4.40 Γεννήτρια επαγωγής με IGC^[3]

Σε συνδυασμό με την γεννήτρια επαγωγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρία είδη ελεγκτών IGC εκ των οποίων τα δύο χρησιμοποιούνται και στον ELC: (α) IGC με έλεγχο της γωνίας φάσεως (phase angle control), (β) IGC με φορτία μεγέθους που αυξάνονται διαδοχικά πολλαπλασιαζόμενα επί δύο (binary weighted loads) και (γ) IGC με ελεγκτή του λόγου του χρόνου αγωγής προς τον χρόνο αποκοπής (mark-space ratio controller).

Ο τελευταίος ελεγκτής της γεννήτριας επαγωγής με έλεγχο του λόγου του χρόνου αγωγής προς τον χρόνο αποκοπής χρησιμοποιεί ένα απορριπτικό ωμικό φορτίο που συνδέεται μετά την ανορθωμένη έξοδο της γεννήτριας και η σύνδεση ή η αποκοπή του ελέγχεται μέσω ενός τρανζίστορ IGBT. Με αυτόν τρόπο δε δημιουργείται επαγωγικό απορριπτικό φορτίο και ο έλεγχος της διοχετευόμενης σε αυτό ισχύος γίνεται μέσω μεταβολής του χρόνου αγωγής και του χρόνου αποκοπής. Ο χρόνος αγωγής του φορτίου μπορεί να μεταβληθεί από 0% μέχρι 100% ανάλογα με την απαιτούμενη ρύθμιση. Το κύκλωμα ενός τέτοιου μονοφασικού ελεγκτή φαίνεται στο σχήμα 4.41(α) και του τριφασικού στο σχήμα 4.41(β). Ο μονοφασικός ελεγκτής επιτυγχάνει καλή ρύθμιση της τάσης και απλή και αποδοτική σύνδεση των ωμικών απορριπτικών φορτίων. Ο τριφασικός ελεγκτής αυτού του είδους δεν εξασφαλίζει συμμετρία στις φάσεις και προκαλεί παραμόρφωση της κυματομορφής της τάσης, αλλά υπερέχει σε σχέση με τον δεύτερο ελεγκτή στην απλότητα της σχεδίασης.^[27]

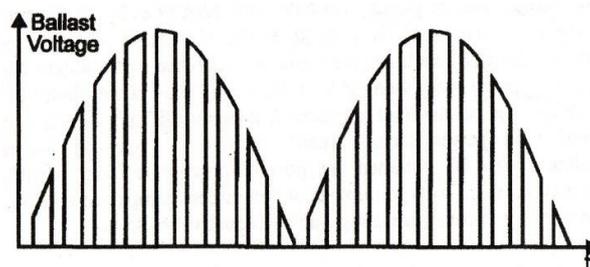


(α)



(β)

Σχήμα 4.41(α) Αυτοδιεγερόμενη γεννήτρια επαγωγής με συνδεσμολογία “C-2C” για μονοφασική έξοδο και IGC με έλεγχο του λόγου του χρόνου αγωγής προς τον χρόνο αποκοπής (β)Κύκλωμα ενός τριφασικού IGC με έλεγχο του λόγου του χρόνου αγωγής προς τον χρόνο αποκοπής



Σχήμα 4.42 Η κυματομορφή της τάσης στο απορριπτικό φορτίο όταν χρησιμοποιείται IGC με λόγο χρόνου αγωγής προς αποκοπή ίσο με 60% [27]

4.5 Διακοπτικός εξοπλισμός και εξοπλισμός προστασίας ενός micro/pico-υδροηλεκτρικού σταθμού

Για την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία του micro/pico-υδροηλεκτρικού συστήματος απαιτείται η χρήση κάποιου διακοπτικού εξοπλισμού (ο οποίος θα απομονώνει την παροχή από τις καταναλώσεις και παραδείγματος χάριν θα επιτρέπει την ασφαλή πραγματοποίηση εργασιών συντήρησης ή θα δίνει τη δυνατότητα επιλογής του δικτύου παροχής), εξοπλισμού

προστασίας τόσο των μηχανών και των ηλεκτρονικών ισχύος όσο και των ανθρώπων που εργάζονται στον χώρο αυτόν, καθώς και μετρητικών οργάνων για ευκολότερη παρακολούθηση και έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος.

Όσο αφορά τον διακοπτικό εξοπλισμό οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι εξής: ο διακόπτης απομονώσεως, ο ασφαλειοαποξεύκτης (που είναι όπως ο διακόπτης απομονώσεως αλλά μαζί με μία ασφάλεια για προστασία από υπερένταση), ο μικροαυτόματος διακόπτης (που είναι όπως ο ασφαλειοαποξεύκτης, αλλά είναι πιο φθηνός και η διακοπή ρεύματος σε περίπτωση υπερέντασης γίνεται με άνοιγμα των διμεταλλικών ελασμάτων του) και ο μεταγωγικός διακόπτης (στην περίπτωση που εκτός από το δίκτυο του υδροηλεκτρικού υπάρχει και σύνδεση με το κύριο δίκτυο ή με οποιοδήποτε άλλο). Υπάρχει ακόμα και ο αυτόματος διακόπτης που χρησιμοποιείται ως μέσο χειρισμού της εγκατάστασης και περιορίζει την εκδήλωση του ηλεκτρικού τόξου χωρίς κίνδυνο για τον χειριστή και την εγκατάσταση. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ηλεκτρονόμος σε συνδυασμό με διακόπτες που χρησιμοποιούνται για προστασία.

Όσο αφορά τον εξοπλισμό προστασίας, αυτός αποτελείται από πολλά στοιχεία : διακόπτες, γείωση, αντικεραυνική προστασία. Πολύ σημαντικός είναι ο διακόπτης διαφυγής έντασης, ο οποίος διακόπτει την παροχή τάσης σε χρόνο περίπου 30ms για τιμή του ρεύματος διαρροής της τάξης των 30mA και τοποθετείται στην έξοδο της γεννήτριας. Για να είναι ακόμα πιο καλή και αξιόπιστη η λειτουργία του διακόπτη διαφυγής έντασης, πρέπει η γεννήτρια και όλη η εγκατάσταση να είναι εξοπλισμένη με σωστό σύστημα γείωσης. Πρέπει να γειωθούν όλες οι συσκευές, τα μεταλλικά μέρη και περιβλήματα και να υπάρχουν ισοδυναμικές συνδέσεις. Απαραίτητη είναι και η ύπαρξη αλεξικέραυνου καθώς και η αντικεραυνική προστασία της γραμμής μεταφοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακόμα, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι διακόπτες σε συνδυασμό με μικροαυτόματο ή ηλεκτρονόμο για ηλεκτρική απομόνωση του δικτύου : διακόπτης υπέρτασης, διακόπτης υπότασης, διακόπτης υπερέντασης, διακόπτης συχνότητας και διακόπτης θερμοκρασίας. Όλοι οι διακόπτες ενεργοποιούνται μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα αφ' ότου έχει εντοπισθεί το σφάλμα, ώστε να μην ενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια σύντομων μεταβατικών φαινομένων.

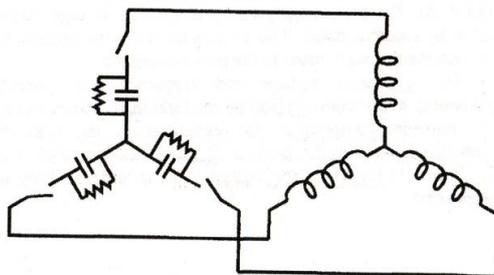
Ο διακόπτης υπότασης ενεργοποιείται όταν η τάση παρουσιάσει πτώση κατά 15% της ονομαστικής, καθώς αν αυτή διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να καταστρέψει τους ηλεκτρικούς κινητήρες και τη γεννήτρια. Η πτώση τάσης μπορεί να οφείλεται σε αναποτελεσματική λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, σε υπερφόρτιση της μηχανής ή σε κακό συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Ο διακόπτης υπέρτασης ενεργοποιείται όταν η τάση ξεπεράσει μία προκαθορισμένη τιμή, η οποία μπορεί να καταστρέψει φορτία και να φθείρει μονωτικά υλικά του συστήματος. Αυτό μπορεί να προκληθεί από αναποτελεσματικό αυτόματο ρυθμιστή φορτίου, χωρητικό συντελεστή ισχύος φορτίου ή υπερτάχυνση της γεννήτριας.

Ο διακόπτης υπερέντασης είναι η πιο κοινή προστασία σε μία εγκατάσταση, καθώς ένα ρεύμα πολύ μεγάλης έντασης μπορεί να καταστρέψει τα τυλίγματα της γεννήτριας, τους διακόπτες, τα καλώδια και γενικότερα όλον τον εξοπλισμό λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που θα αναπτυχθεί. Ως διακόπτες προστασίας έναντι υπερέντασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ασφαλειοαποζεύκτες καθώς και οι διακόπτες τύπου μικροαυτόματου. Είναι σημαντικό σε ένα τριφασικό σύστημα να προστατεύονται και οι τρεις φάσεις έναντι υπερέντασης. Αυξημένο ρεύμα μπορεί να προκύψει λόγω σύνδεσης πολύ μεγάλου φορτίου στο σύστημα, λόγω σύνδεσης λανθασμένου εξοπλισμού στη γεννήτρια, μικρού επαγωγικού συντελεστή ισχύος, βραχυκύκλωσης και λανθασμένης συχνότητας.

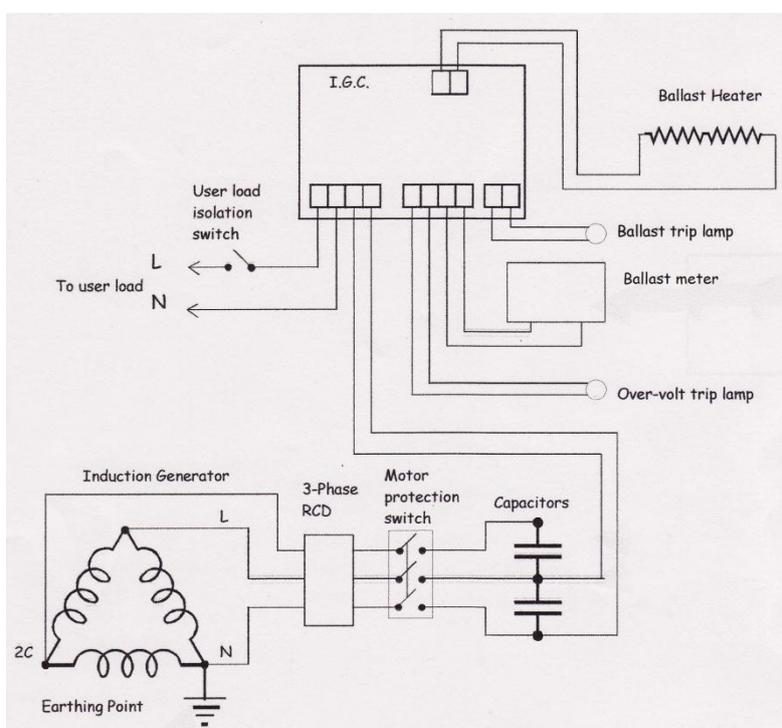
Ο διακόπτης προστασίας έναντι των μεταβολών της συχνότητας ενεργοποιείται όταν η συχνότητα βγει εκτός των αποδεκτών ορίων για να μην προκαλέσει προβλήματα σε κινητήρες και την ίδια τη γεννήτρια. Η μείωση της συχνότητας μπορεί να οφείλεται σε υπερφόρτιση της γεννήτριας, μη επαρκή παροχή νερού στον υδροστρόβιλο, αναποτελεσματικό έλεγχο στροφών και ολίσθηση του ιμάντα από τη σωστή του θέση. Αντίθετα, αύξηση της συχνότητας μπορεί να προκύψει αν αυξηθεί υπερβολικά η παροχή του νερού ή δε λειτουργήσουν σωστά ο ελεγκτής και ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης.

Ο διακόπτης προστασίας έναντι υπερθέρμανσης χρησιμοποιεί βοηθητικά καλώδια ανίχνευσης θερμοκρασίας που μπορεί να είναι συνδεδεμένα στα τυλίγματα της γεννήτριας. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί πολύ, ο διακόπτης ανοίγει και ενεργοποιείται ένας συναγερμός. Η υπερθέρμανση των τυλιγμάτων μπορεί να οφείλεται σε υπερφόρτιση της γεννήτριας, μεταβολή της συχνότητας, υψηλό ρεύμα λόγω κακού συντελεστή ισχύος, φθαρμένα ρουλεμάν, κακό αερισμό ή πολύ υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος.^{[3].^[10]}



Σχήμα 4.43 Προστασία έναντι υποφόρτισης σε μία γεννήτρια επαγωγής^[27]

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται γεννήτρια επαγωγής ή κινητήρας επαγωγής ως γεννήτρια, είναι σημαντική η προστασία της από ενδεχόμενη υποφόρτιση, καθώς αυτή θα έχει ως αποτέλεσμα να επιταχυνθεί η γεννήτρια, να αυξηθούν η τάση και η συχνότητα και τελικά να αυξηθεί το ρεύμα που ρέει από τους πυκνωτές στη γεννήτρια και επομένως το ρεύμα στα τυλίγματά της. Για τον λόγο αυτό πρέπει να προστατευθούν και οι πυκνωτές και τα τυλίγματα της γεννήτριας, πράγμα που επιτυγχάνεται με τοποθέτηση μικροαυτόματων διακοπών σε κάθε φάση σε σειρά με τον πυκνωτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.43. Η τιμή του διακόπτη πρέπει να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την τιμή του ρεύματος στην κανονική λειτουργία και είναι καλό όλοι οι διακόπτες να ανοίγουν ταυτόχρονα. Έτσι, σε τριφασικό σύστημα προτιμάται ένας τριπολικός διακόπτης, ενώ σε μονοφασικό σύστημα με σύνδεση πυκνωτών σε διάταξη "C-2C" προτιμάται διπολικός με τιμή που να αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα της φάσης 2C σε κανονική λειτουργία. Η σωστή λειτουργία των διακοπών πρέπει να ελέγχεται με μία δοκιμή στην ταχύτητα φυγής, όταν η γεννήτρια εγκαθίσταται. Οι αντιστάσεις χρησιμεύουν για την εκφόρτιση των πυκνωτών όταν αυτοί έχουν αποσυνδεθεί με το άνοιγμα του διακόπτη και για λόγους αξιοπιστίας πρέπει να διασφαλιστεί ότι κατά την κανονική λειτουργία η κατανάλωση ισχύος σε αυτές είναι λιγότερη από το 25% της ονομαστικής τους. Επίσης, για προστασία από τις υπερεντάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας διακόπτης προστασίας κινητήρα, καθώς σε αυτόν το ρεύμα διακοπής μπορεί να ρυθμιστεί και να αποκτήσει την ακριβή τιμή, που απαιτείται.^[27]



Σχήμα 4.44 Ενδεικτικό πλήρες κύκλωμα μηχανής επαγωγής με IGC. Υπάρχει διακόπτης απομόνωσης του φορτίου (user load isolation trip), εξοπλισμός σχετικός με το απορριπτικό φορτίο (διακόπτης προστασίας

του, μετρητής της ισχύος που διοχετεύεται σε αυτό), διακόπτης υπέρτασης, γειωμένος τριφασικός κινητήρας επαγωγής που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια με μονοφασική έξοδο, διακόπτης προστασίας κινητήρα για την υπέρταση και διακόπτης διαφυγής έντασης^[10]

Όσο αφορά τον μετρητικό εξοπλισμό, θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα βολτόμετρο για μέτρηση και παρακολούθηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας καθώς και ένα αμπερόμετρο. Επίσης, μπορεί να υπάρχει μετρητής συχνότητας, μετρητής της παραγόμενης ισχύος, μετρητής της ισχύος που κατευθύνεται στο απορριπτικό φορτίο, όπως και μετρητής του συντελεστή ισχύος.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον εξοπλισμό προστασίας σε micro-υδροηλεκτρικά σύστημα μπορεί κανείς να ανατρέξει στο "Motors as generators for micro-hydro power"^[27], στο "Pico hydro for village power"^[10] αλλά και στο "Guide on how to develop a small hydropower plant"^[12].

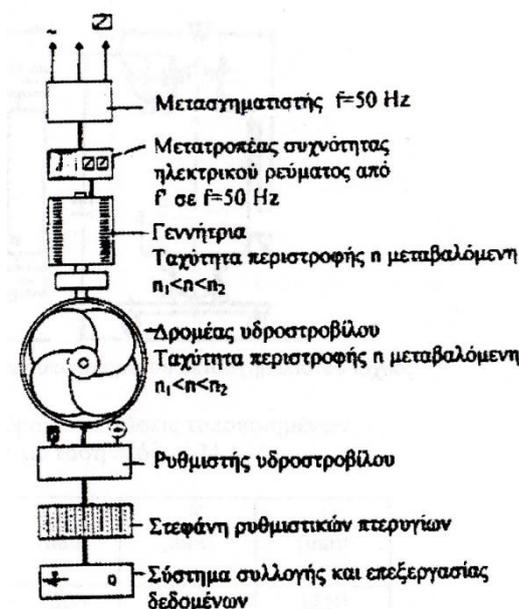
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΝΟΣ MICRO-ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

5.1 Λειτουργία μεταβλητών στροφών ενός micro-υδροηλεκτρικού

Μέχρι τώρα μελετήθηκε η λειτουργία των υδροστροβίλων υπό σταθερές στροφές, και στις ενότητες 4.2.3.1 και 4.4.4 του προηγούμενου κεφαλαίου διερευνήθηκαν οι τρόποι ελέγχου του στροβίλου και της γεννήτριας μέσω του φορτίου ώστε οι στροφές τους να παραμένουν σταθερές. Μία άλλη λειτουργία, όμως, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα πλέον λόγω της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η λειτουργία μικρών υδροστροβίλων υπό μεταβλητές στροφές, ενώ τροφοδοτούν δίκτυο σταθερής συχνότητας. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον στην περίπτωση των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων (όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αντλησιοταμίευσης) όπου και εφαρμόστηκε πρώτα. Το ενδιαφέρον λειτουργίας μικρών υδροστροβίλων με μεταβλητές στροφές συνήθως περιορίζεται στην περίπτωση υδροστροβίλων αξονικής ροής (αν και αυτό δεν είναι απόλυτο) όταν ο δρομέας έχει σταθερά πτερύγια ή όταν η διαθέσιμη υδραυλική πτώση παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται το εύρος λειτουργίας του υδροστροβίλου, ο οποίος είναι απλούστερος και μικρότερου κόστους λόγω της απλής ρύθμισης που διαθέτει. Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία η διαθέσιμη υδραυλική πτώση παρουσιάζει έντονη διακύμανση (όπως συμβαίνει σε τεχνητές δεξαμενές ρύθμισης της πλημμυρικής παροχής) ο αξονικής ροής υδροστροβίλος, θα λειτουργεί υπό μεγάλα χρονικά διαστήματα σε περιοχές μικρού βαθμού απόδοσης, άρα με μειωμένη παραγωγή ενέργειας. Με την υιοθέτηση της τεχνικής λειτουργίας με μεταβλητές στροφές (μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για μεγαλύτερες τιμές της υδραυλικής πτώσης) η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου συνεχώς προσαρμόζεται στην τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, ώστε να λειτουργεί υπό την μέγιστη κάθε φορά τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο, μπορεί η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας να υπερκαλύπτεται από την αύξηση του κόστους του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και γι' αυτό πρέπει πάντα να ελέγχεται η οικονομική βιωσιμότητα της εφαρμογής αυτής.

Για την επίτευξη μεταβλητών στροφών του υδροστροβίλου και τροφοδοσία του δικτύου με σταθερή συχνότητα, η πλέον συνηθισμένη διάταξη είναι αυτή που περιλαμβάνει γεννήτρια άμεσα συζευγμένη με τον υδροστροβίλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Άρα, η συχνότητα f

του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει η γεννήτρια είναι μεταβαλλόμενη και ουσιαστικά ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας AC-DC και DC-AC μέσω του οποίου το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα συχνότητας f' μετατρέπεται σε συνεχές και στη συνέχεια σε εναλλασσόμενο συχνότητας σταθερής και ίσης προς τη συχνότητα f του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού δικτύου. ^[8]



Σχήμα 5.1 Σχηματική διάταξη για τη λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές ^[8]

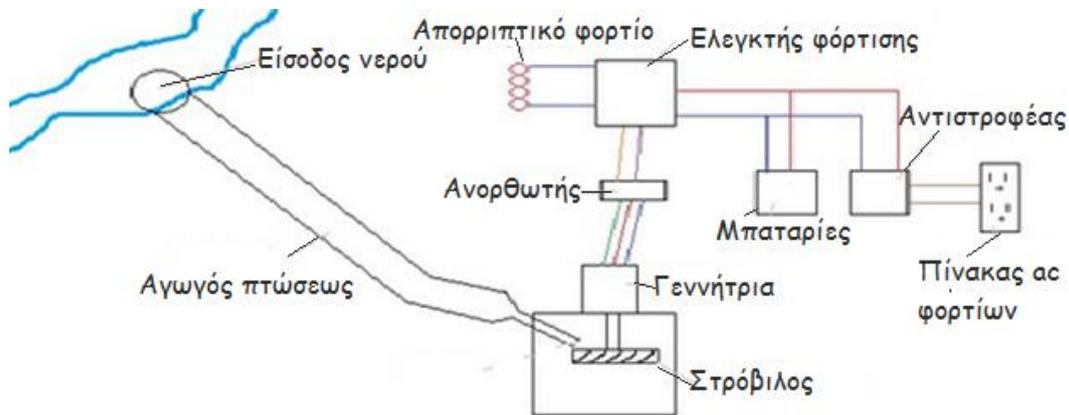
5.2 Εισαγωγή στους δυνατούς τρόπους σύνδεσης ενός micro - υδροηλεκτρικού συστήματος

Ανάλογα με τις συνθήκες υλοποίησης του συστήματος αλλά και τις απαιτήσεις τροφοδότησης, μία υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής μπορεί να τροφοδοτήσει ένα dc σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες, είτε ένα ac σύστημα με ή χωρίς τη συμβολή μπαταριών. Το dc σύστημα είναι αυτόνομο, ενώ στην περίπτωση του ac συστήματος, η υδρογεννήτρια μπορεί να συνδεθεί στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο ή σε περίπτωση που αυτό δεν είναι οικονομικά ωφέλιμο (όπως όταν βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από αυτό) μπορεί να τροφοδοτήσει μόνη της ή σε συνδυασμό με άλλες πηγές ένα αυτόνομο δίκτυο. Το είδος της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης αλλά και από το είδος και το μέγεθος των φορτίων.

5.3 DC σύνδεση – Σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες

Στην περίπτωση μίας απομονωμένης εγκατάστασης που αφορά κυρίως τα φορτία μίας οικίας προτιμάται η χρήση ενός αυτόνομου dc συστήματος με μπαταρίες. Η διάταξη είναι απλή και

φθινή και το υδροηλεκτρικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να λειτουργήσει σε συνδυασμό και με άλλες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες αλλά και εφεδρική νηξελογεννήτρια. Η τυπική διάταξη ενός αυτόνομου dc συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Τυπική διάταξη ενός dc αυτόνομου συστήματος που τροφοδοτείται από ένα micro-υδροηλεκτρικό

Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, γεννήτρια επαγωγής αλλά και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Στην τελευταία περίπτωση, που εφαρμόζοταν κυρίως τα προηγούμενα χρόνια, ο ανορθωτής δεν χρειάζεται. Η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και η γεννήτρια επαγωγής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι αυτοδιεγερόμενες. Στην περίπτωση της γεννήτριας επαγωγής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συστοιχία πυκνωτών για τη διέγερσή της. Επίσης, η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης σπάνια χρησιμοποιείται σε αυτόν τον τύπο σύνδεσης γιατί τα συστήματα αυτά είναι συνήθως πολύ μικρά και η γεννήτρια είναι οικονομικά ασύμφορη.

Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται από έναν τριφασικό ανορθωτή γέφυρας και γίνεται ίση με την τάση της συστοιχίας των μπαταριών. Μεταξύ όμως του ανορθωτή και των συσσωρευτών παρεμβάλλεται ο ελεγκτής φόρτισης προκειμένου να ελέγξει τη φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών. Οι μπαταρίες πέραν του ότι δεν πρέπει να φορτίζονται όταν είναι ήδη φορτισμένες μέχρι ενός σημείου και αντίστοιχα να εκφορτίζονται όταν δεν είναι φορτισμένες, πρέπει να ακολουθούν ιδιαίτερους αλγορίθμους για τη φόρτιση και την εκφόρτισή τους. Αυτή τη λειτουργία εκτελεί ο ρυθμιστής φόρτισης, ο οποίος όταν παρατηρήσει ότι οι μπαταρίες είναι φορτισμένες θα διοχετεύσει την περισσευούμενη ισχύ σε ένα απορριπτικό φορτίο (όπου η ισχύς θα μετατραπεί σε θερμότητα), ενώ όταν παρατηρήσει ότι η φόρτισή τους έχει πέσει κάτω από ένα επίπεδο θα διοχετεύσει την παραγόμενη ισχύ και πάλι σε αυτές. Ο ελεγκτής φόρτισης δεν αποσυνδέει τον υδροστρόβιλο από τις μπαταρίες, καθώς αυτό μπορεί να προκαλέσει υπερβολική αύξηση της τάσης ή ανεπιθύμητη υπερτάχυνση της γεννήτριας. Στη συνέχεια, η τάση των συσσωρευτών αντιστρέφεται και

λαμβάνει κατάλληλη τιμή (μέτρου και συχνότητας) με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα πηγής τάσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, σε μία εγκατάσταση υπάρχουν dc και ac φορτία. Αν συμβαίνει αυτό, τα dc φορτία (όπως φώτα) μπορούν να τροφοδοτηθούν κατευθείαν από τις μπαταρίες. Συσκευές που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα υπάρχουν και είναι διαθέσιμες, αλλά συνήθως είναι ακριβές, δυσεύρετες και κάποιες φορές όχι πολύ καλής ποιότητας. ^{[6],[11]}

Ένα ακόμα στοιχείο που χρησιμοποιείται σε αυτά τα συστήματα αλλά δε φαίνεται στο σχήμα 5.2, είναι ο dc διακόπτης με ασφάλεια που τοποθετείται ανάμεσα στις μπαταρίες και τον αντιστροφέα και επιτρέπει την αποσύνδεση του αντιστροφέα από τις μπαταρίες για πιθανή επισκευή, ενώ παράλληλα προστατεύει την καλωδίωση μεταξύ αντιστροφέα και μπαταριών έναντι ηλεκτρικών σφαλμάτων. ^[28]

Η τάση στην είσοδο της συστοιχίας μπαταριών κυμαίνεται συνήθως από 12V έως 48V. Αν η απόσταση μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος δεν είναι μεγάλη, μία τάση εισόδου ίση με 12V αρκεί, αλλά αν η απόσταση είναι μεγαλύτερη και το επίπεδο ισχύος υψηλότερο, προτιμάται συστοιχία μπαταριών με τάση εισόδου 24V. ^[11]

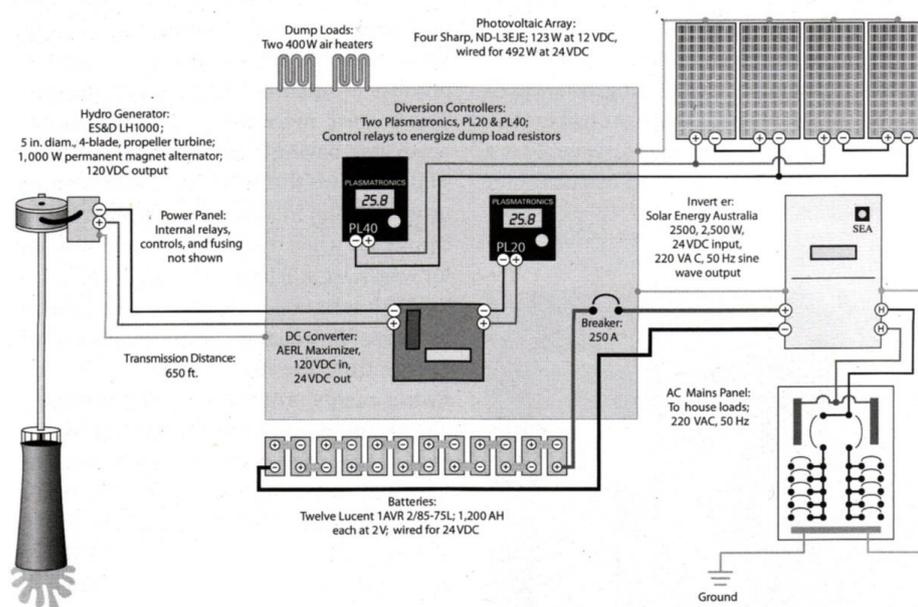
Η σύνδεση της υδρογεννήτριας απευθείας σε συσσωρευτές έχει ως αποτέλεσμα η τάση στην έξοδο της να παραμένει σταθερή και ίση περίπου με την τάση των συσσωρευτών και να λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Αν κριθεί απαραίτητη η λειτουργία του υδροστρόβιλου υπό μεταβλητές στροφές για μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος, πρέπει να παρεμβληθεί ένας dc/dc μετατροπέας ανάμεσα στον ανορθωτή και τις μπαταρίες. Ο μετατροπέας αυτός θα διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου του (ίση με την τάση στους ακροδέκτες των συσσωρευτών), ενώ η τάση στην είσοδό του, που είναι ίση με την τάση εξόδου της γεννήτριας, θα μεταβάλλεται και θα μπορεί να προσαρμόζεται με κατάλληλο έλεγχο από το μετατροπέα, ώστε να λειτουργεί ο υδροστρόβιλος στις στροφές που αντιστοιχούν στην μέγιστη απόδοση κάθε χρονική στιγμή.

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοια συστήματα είναι μολύβδου-οξέος (lead-acid batteries) με μεγάλο κύκλο εκφόρτισης (deep-cycle), ώστε να έχουν τη δυνατότητα να εκφορτιστούν τουλάχιστον σε ποσοστό 50% της χωρητικότητας αποθήκευσής τους επαναλαμβανόμενα. Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ κατασκευάζονται σε μεγάλους αριθμούς για πολλές χρήσεις και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και η τεχνολογία τους είναι πολύ οικεία στους κατασκευαστές. Υπάρχουν, όμως, κάποιοι περιορισμοί στη χρήση τους, όπως είναι το βάρος τους, η δυσκολία στη μεταφορά και η απαίτηση για συχνή συντήρηση και αναπλήρωση του νερού που χάνεται κατά τη λειτουργία. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματά τους υπερέχουν και είναι η ανθεκτικότητα, η σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής τους, καθώς και η εμπορική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας. Επίσης, υπάρχουν και οι μπαταρίες VRLA που χρησιμοποιούν την ίδια βασική ηλεκτροχημική τεχνολογία με τις

μπαταρίες μολύβδου-οξέος, αλλά αυτές φράσσονται με μία βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης, ώστε ουσιαστικά είναι φραγμένες και δεν απαιτούν την προσθήκη νερού στις κυψέλες. Αυτή η κατηγορία μπαταριών έχει λίγο μικρότερο χρόνο ζωής και είναι πιο ακριβή και λιγότερο ανθεκτική, αλλά χρειάζεται λιγότερη συντήρηση και οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να συσσωματώνονται πιο στενά λόγω της ερμητικά κλειστής κατασκευής και του ακινητοποιημένου ηλεκτρολύτη.^[9]

Σημαντική είναι η επιλογή σωστού μεγέθους της συστοιχίας των μπαταριών, ώστε να εξασφαλίζει την ύπαρξη του απαιτούμενου χρόνου αυτονομίας, ανάλογα και με τις άλλες πηγές που μπορεί να χρησιμοποιούνται ή την ύπαρξη εφεδρικής γεννήτριας για τη φόρτισή τους. Επίσης, καλό είναι να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα αύξησης των αναγκών τροφοδότησης στο κοντινό μέλλον, καθώς είναι καλύτερο και αποδοτικότερο να αγοράζονται όλες οι μπαταρίες της συστοιχίας μαζί. Βέβαια, όταν συμβαίνει αυτό και δημιουργείται μία μεγάλη αποθηκευτική διάταξη, πρέπει να υπάρχει και η αντίστοιχη δυνατότητα πλήρους φόρτισής της από τις μονάδες παραγωγής. Τέλος, ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τη λειτουργία του συστήματος για τη διατήρηση του μεγάλου χρόνου ζωής και της σωστής λειτουργίας των μπαταριών είναι η σωστή φόρτισή τους. Ιδανικά πρέπει να φορτίζονται πλήρως (100%) μία φορά τη βδομάδα ή και πιο συχνά. Είναι σημαντικό να μη φορτίζονται μερικώς πολλές φορές και να μένουν σε αυτήν την κατάσταση, γιατί έτσι φθείρονται.^[29]

Ένα παράδειγμα πρακτικής εφαρμογής της dc σύνδεσης περιγράφεται στο [30] και το σύστημα παραγωγής φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 DC υβριδικό αυτόνομο σύστημα με υδροηλεκτρικό και φωτοβολταϊκά^[30]

Στην περίπτωση αυτή, έχει δημιουργηθεί ένα αυτόνομο dc σύστημα με πηγές τροφοδοσίας φωτοβολταϊκά πάνελ και ένα micro-υδροηλεκτρικό με υδροστρόβιλο τύπου προπέλας άμεσα συζευγμένο με μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών για να τροφοδοτήσει μία κατοικία στην Αυστραλία, η οποία απέχει 9,3 μίλια από το κοντινότερο σημείο σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο. Ο πίνακας ισχύος (power panel) απαρτίζεται από διακόπτες και ασφάλειες που δεν φαίνονται στο σχήμα, από έναν DC/DC μετατροπέα που υποβιβάζει την ανορθωμένη τάση εξόδου της υδρογεννήτριας από 120V σε 24V και δύο ελεγκτές φόρτισης, οι οποίοι ρυθμίζουν την κατεύθυνση της παραγόμενης ισχύος είτε προς τις μπαταρίες είτε προς τα απορριπτικά φορτία. Κάθε πηγή παραγωγής καταλήγει στον δικό της ελεγκτή. Η έξοδος από τη συστοιχία των μπαταριών με τάση 24Vdc αντιστρέφεται και καταλήγει στον κεντρικό πίνακα της εγκατάστασης.

5.4 AC σύνδεση

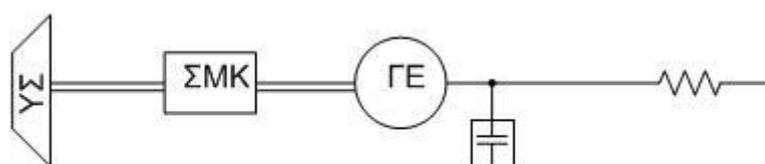
Μία άλλη επιλογή, και ιδίως για συστήματα στο μέγεθος παραδείγματος χάριν ενός οικισμού, είναι η ac σύνδεση, που χρησιμοποιείται και από τα δίκτυα ηλεκτροδότησης. Στην περίπτωση της ac σύνδεσης το υδροηλεκτρικό μπορεί να τροφοδοτεί το κύριο δίκτυο, να είναι δηλαδή διασυνδεδεμένο, ή να τροφοδοτεί ένα αυτόνομο δίκτυο είτε ως μοναδική πηγή, είτε στα πλαίσια ενός μικροδικτύου. Συνηθέστερη είναι η περίπτωση σχηματισμού ενός αυτόνομου δικτύου, καθώς τα τροφοδοτούμενα φορτία βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε απομονωμένες περιοχές. Το βασικό πλεονέκτημα της ac σύνδεσης είναι ότι στον ίδιο ζυγό μπορούν να συνδεθούν πολλές διαφορετικές πηγές, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές · γεγονός που καθιστά την ac σύνδεση κατάλληλη για ένα μεγάλο μικροδίκτυο. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα τάσης οδηγούν σε χαμηλότερες απώλειες. Στην περίπτωση της ac σύνδεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, γεννήτρια επαγωγής και γεννήτρια επαγωγής με διπλή τροφοδότηση. Η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης χρησιμοποιείται πιο σπάνια στα πλαίσια ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος και κυρίως σε συνδυασμό με κάποια άλλη πηγή. Παράδειγμα σύνδεσης μίας τέτοιας γεννήτριας σε αυτόνομο και διασυνδεδεμένο σύστημα σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκή γεννήτρια αναλύεται στο [31], ενώ στο [32] περιγράφεται η σύνδεσή της σε ένα αυτόνομο σύστημα σε συνδυασμό με μία ανεμογεννήτρια.

5.4.1 Διασυνδεδεμένο σύστημα

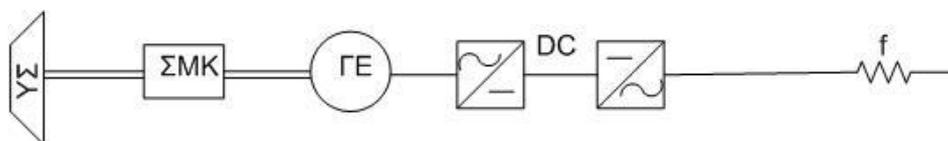
Όταν ένα micro-υδροηλεκτρικό σύστημα συνδέεται στο υπάρχον κύριο δίκτυο ηλεκτροδότησης συνδέεται στη χαμηλή τάση, καθώς η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη ή ίση των 100kW. Το υδροηλεκτρικό μπορεί να συνδεθεί είτε μόνο του στο δίκτυο είτε στα πλαίσια ενός διασυνδεδεμένου μικροδικτύου. Τότε, ρυθμίζεται με βάση το κεντρικό δίκτυο

ηλεκτροδότησης και πρέπει να εξασφαλίζεται η συγχρονισμένη με αυτό λειτουργία διατηρώντας την ανταλλαγή ισχύος στα συμφωνημένα. Το υδροηλεκτρικό (ή το μικροδίκτυο στο οποίο συνδέεται) θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τις απαιτήσεις που θέτει το κεντρικό δίκτυο και να αποσυνδέεται από αυτό σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο παρατεταμένο σφάλμα. Επίσης, πρέπει να αποσυνδέεται από το κεντρικό δίκτυο όταν συμβεί στο τελευταίο κάποια βλάβη και σταματήσει η λειτουργία του, ώστε να πραγματοποιηθούν με ασφάλεια οι εργασίες επισκευής του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης ή μόνιμων μαγνητών, καθώς και γεννήτρια επαγωγής, αρκεί να λαμβάνονται μέτρα για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος της.

Για τη γεννήτρια επαγωγής:



(α)

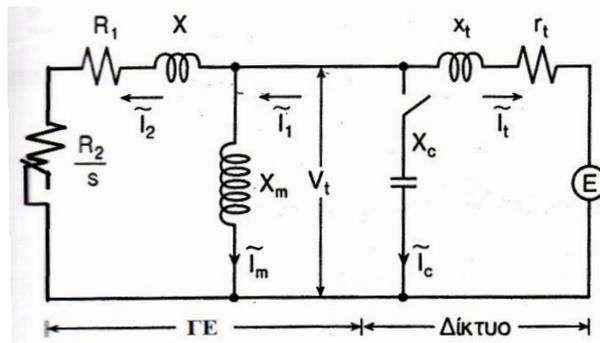


(β)

Σχήμα 5.4 Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους γεννήτριας επαγωγής (α) με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο, (β) με σύνδεση μέσω AC/DC/AC μετατροπέα (ΥΣ: υδροστρόβιλος, ΣΜΚ: σύστημα μετάδοσης κίνησης)

Μία ασύγχρονη γεννήτρια ενός micro-υδροηλεκτρικού σταθμού μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο είτε απευθείας, είτε μέσω μετατροπέα AC/DC/AC, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Η απευθείας σύνδεση είναι η απλούστερη λύση και χαρακτηρίζεται από το ότι η γεννήτρια επαγωγής απορροφά την απαιτούμενη άεργο ισχύ από το δίκτυο, πλήρως ή μερικώς αν εγκατασταθούν παράλληλα πυκνωτές. Μετά τη συστοιχία πυκνωτών, στην έξοδο της γεννήτριας μπορεί να υπάρχει ένας απλός ελεγκτής, ο οποίος κατά την εκκίνησή της την αφήνει να λειτουργεί εν κενώ, ενώ παράλληλα την συγχρονίζει με το δίκτυο και αφού γίνει ο συγχρονισμός τη συνδέει στο δίκτυο. Οι στροφές της υδρογεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μένουν περίπου σταθερές. Το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της γεννήτριας επαγωγής που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 5.5. Το δίκτυο παριστάνεται με μία πηγή σταθερής τάσεως E και μία σύνθετη αντίσταση $Z_t = r_t + jx_t$. Ο

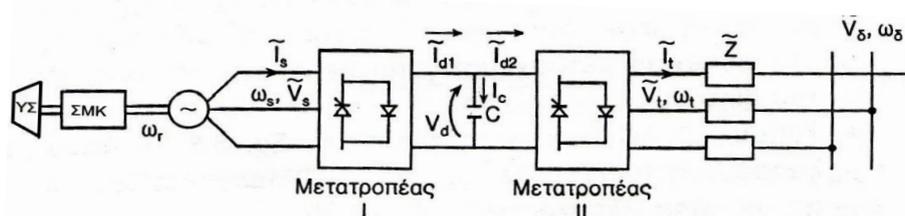
παράλληλος πυκνωτής X_c μπορεί να συνδεθεί στα άκρα της υδρογεννήτριας, ώστε να περιορίζεται η άεργος ισχύς που αυτή απορροφά από το δίκτυο. Η τάση V_t στην έξοδο της γεννήτριας παραμένει περίπου αμετάβλητη ($V_t \approx E$) δεδομένου ότι το μέγεθος των r_t και x_t είναι συγκριτικά με τις αντιστάσεις της γεννήτριας πολύ μικρότερο. Δηλαδή, το δίκτυο αναλαμβάνει ρυθμιστικά τις μεταβολές αέργου ισχύος ώστε η V_t να τηρείται εντός ορισμένων ορίων. Ωστόσο, ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας δεν επιτρέπεται να αφήνεται να παίρνει χαμηλές τιμές.



Σχήμα 5.5 Σύνδεση υδροηλεκτρικού με γεννήτρια επαγωγής απευθείας στο δίκτυο ^[33]

Στην περίπτωση της λειτουργίας υδροστροβίλου υπό μεταβλητές στροφές η σύνδεση της γεννήτριας επαγωγής στο δίκτυο γίνεται μέσω μετατροπέα AC/DC/AC, όπου η τάση εξόδου της γεννήτριας αρχικά ανορθώνεται σε dc και στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε εναλλασσόμενη των 50Hz του δικτύου. Οι μετατροπείς μπορεί να είναι "πηγής τάσης" (voltage source converter) ή "πηγής ρεύματος" (current source converter). Στο σχήμα 5.6 φαίνεται η διάταξη της σύνδεσης της γεννήτριας επαγωγής ενός υδροηλεκτρικού συστήματος μεταβλητών στροφών με μετατροπέα AC/DC/AC τύπου πηγής τάσης. Βασικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων πηγής τάσης είναι ότι απαιτούν στην πλευρά dc την ύπαρξη πηγής σταθερής σχετικά συνεχούς τάσης και για τον λόγο αυτό τοποθετείται στο σημείο αυτό ένας πυκνωτής. Στην πλευρά ac οι μετατροπείς παράγουν εναλλασσόμενη τάση ρυθμιζόμενης συχνότητας και μέτρου. Οι σύγχρονοι μετατροπείς πηγής τάσης χρησιμοποιούν τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM, που επιτρέπουν την παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης με χαμηλή αρμονική παραμόρφωση. Επίσης, μπορούν να λειτουργήσουν με οποιοδήποτε συντελεστή ισχύος και επομένως να παράγουν ή να καταναλώνουν άεργο ισχύ, ενώ παράλληλα επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ισχύος. Κατά συνέπεια, δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστοιχίας πυκνωτών στους ακροδέκτες της γεννήτριας για την παραγωγή της αέργου ισχύος διέγερσης, αφού αυτή μπορεί να προέρχεται από τον μετατροπέα I, μερικώς ή και στο σύνολο. Ακόμα, ο μετατροπέας II από την πλευρά του δικτύου, μπορεί να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα ή και ακόμα να παρέχει άεργο ισχύ στο δίκτυο. Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα I έχει ως στόχο τη

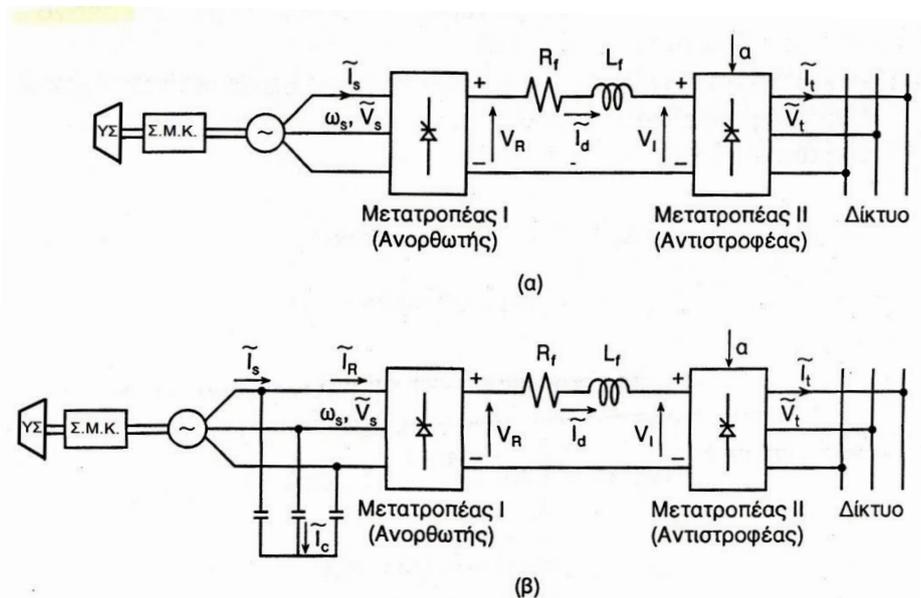
ρύθμιση της ταχύτητας ω_r της υδρογεννήτριας ώστε να λειτουργεί στη μέγιστη απόδοση, καθώς επίσης και τη διατήρηση του λόγου της τάσης προς τη συχνότητα της γεννήτριας (V_s/ω_s) σταθερού στην ονομαστική του τιμή, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στη γεννήτρια διατηρείται στην ονομαστική της τιμή. Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα II ρυθμίζει τη συχνότητα ω_i του μετατροπέα με αναφορά την τάση V_d του πυκνωτή, ώστε να προκαλείται μεταβολή της γωνίας δ (γωνία μεταξύ των διανυσμάτων των τάσεων V_t και V_δ , όπου V_δ είναι η τάση του δικτύου). Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι η ροή ενεργού ισχύος προς τον ζυγό καθορίζεται από τη γωνία ισχύος δ , και συγκεκριμένα από το ημίτονό της. Επίσης, ρυθμίζει την άεργο ισχύ στην έξοδο της υδρογεννήτριας μεταβάλλοντας κατάλληλα το μέτρο της τάσης V_t του μετατροπέα. [33]



Σχήμα 5.6 Σύνδεση στο δίκτυο γεννήτριας επαγωγής ενός υδροηλεκτρικού συστήματος μεταβλητών στροφών μέσω μετατροπέα AC/DC/AC τύπου πηγής τάσης [33]

Στο σχήμα 5.7 απεικονίζονται οι τυπικές διατάξεις μίας γεννήτριας επαγωγής ενός υδροηλεκτρικού συστήματος μεταβλητών στροφών με μετατροπείς AC/DC/AC ρεύματος. Η σύνδεση αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, των οποίων η διαφορά εντοπίζεται στον πρώτο μετατροπέα. Ο μετατροπέας I του σχήματος 5.7(α) είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής/αντιστροφέας πηγής ρεύματος με εξαναγκασμένη μεταγωγή των ημιαγωγικών του στοιχείων. Επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ενεργού ισχύος και μπορεί να παράγει άεργο ισχύ καλύπτοντας τις ανάγκες διέγερσης της ασύγχρονης γεννήτριας, χωρίς την εγκατάσταση συστοιχίας πυκνωτών. Ο μετατροπέας I του σχήματος 5.7(β) είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής/ αντιστροφέας με μεταγωγή από το φορτίο, δηλ. από την ΗΕΔ της μηχανής επαγωγής. Αυτός επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ενεργού ισχύος, αλλά πάντοτε καταναλώνει άεργο ισχύ με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση συστοιχίας πυκνωτών, οι οποίοι θα πρέπει να καλύπτουν όχι μόνο τις ανάγκες της γεννήτριας σε άεργο ισχύ αλλά και του μετατροπέα. Ο μετατροπέας II και των δύο διατάξεων είναι ο ίδιος και είναι ένας ελεγχόμενος αντιστροφέας γέφυρας με μεταγωγή που ρυθμίζεται από την τάση του δικτύου και έλεγχο της γωνίας εναύσεως για ρύθμιση της dc τάσης V_t . Βασικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων πηγής ρεύματος είναι ότι απαιτούν στη dc πλευρά τους σχεδόν σταθερό συνεχές ρεύμα, το οποίο εξασφαλίζεται με την αυτεπαγωγή L_f , ενώ στην ac

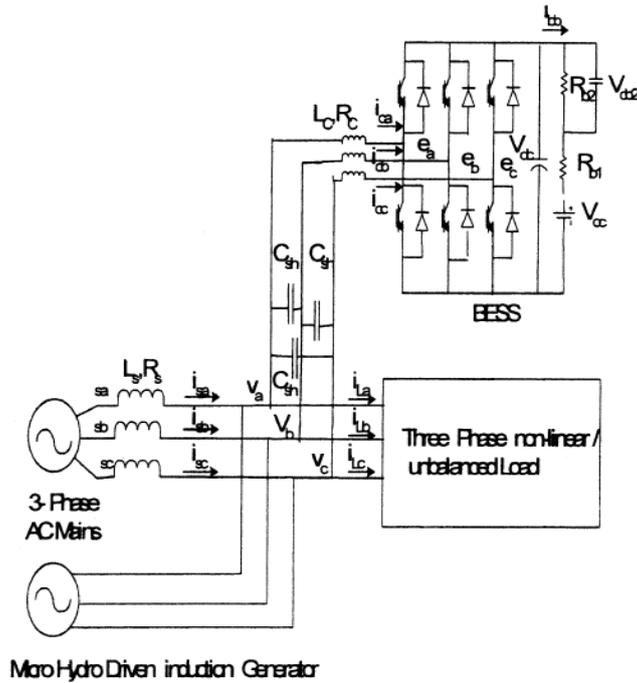
πλευρά τους ελέγχεται απευθείας η συχνότητα του ρεύματος. Βασικά μειονεκτήματα της διάταξης αυτής με μετατροπείς πηγής ρεύματος έναντι των μετατροπέων πηγής τάσης είναι η εμφάνιση σημαντικών αρμονικών χαμηλής τάξεως, η απορρόφηση σημαντικής αέργου ισχύος και ο χαμηλός συντελεστής ισχύος. Το σύστημα ελέγχου του συστήματος αυτού χρησιμοποιεί το σφάλμα της ταχύτητας για να ελέγξει τη συχνότητα ω_s της γεννήτριας και συνεπώς την ολίσθηση και την αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η τάση της γεννήτριας ελέγχεται και εδώ με στόχο να διατηρείται η ονομαστική μαγνητική ροή. Επειδή ο μετατροπέας πηγής ρεύματος μπορεί να ελέγχει μόνο τη συχνότητα του ρεύματος εξόδου, το μέτρο του ρεύματος ρυθμίζεται μεταβάλλοντας τη dc τάση V_I του αντιστροφέα από την πλευρά του δικτύου. Έτσι, προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση της γεννήτριας, ελέγχεται το ρεύμα της με κατάλληλη μεταβολή της γωνίας εναύσεως του αντιστροφέα.^[33]



Σχήμα 5.7 Τυπικές διατάξεις σύνδεσης στο δίκτυο της γεννήτριας επαγωγής ενός υδροηλεκτρικού συστήματος μεταβλητών στροφών μέσω μετατροπέα AC/DC/AC τύπου πηγής ρεύματος^[33]

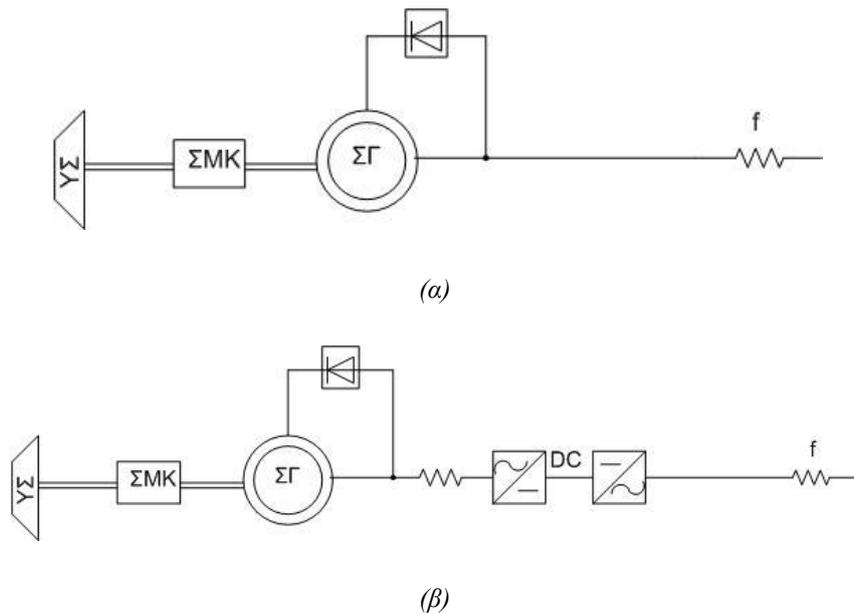
Στο [34] μελετάται η σύνδεση ενός υδροηλεκτρικού συστήματος με γεννήτρια επαγωγής στο δίκτυο, όταν στο σημείο κοινής σύνδεσής τους συνδέεται παράλληλα ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες (battery energy storage system), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Στόχος είναι η ρύθμιση της τάσης, η ελαχιστοποίηση των αρμονικών και η διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Η διάταξη αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από έναν τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης με IGBT ελεγχόμενα μέσω του ρεύματος, έναν επαγωγέα στην είσοδο (L_c, R_c) και έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή (C_{dc}) παράλληλα με τη μπαταρία στην dc πλευρά. Η διάταξη αυτή λειτουργεί ως πηγή χωρητικού ή επαγωγικού αέργου ρεύματος για την ρύθμιση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης με τις μεταβολές των φορτίων και παράλληλα μπορεί να παράσχει ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Τέλος,

χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος, έχει γρήγορη απόκριση και βοηθάει κατά την εκκίνηση της γεννήτριας επαγωγής παρέχοντάς της άεργο ισχύ και μειώνοντας τα μεταβατικά φαινόμενα.



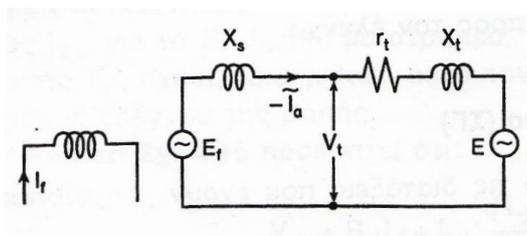
Σχήμα 5.8 Micro-υδροηλεκτρικό με γεννήτριας επαγωγής που συνδέεται στο δίκτυο και στο σημείο κοινής σύνδεσής τους υπάρχει σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες ^[34]

Για τη σύγχρονη γεννήτρια με ηλεκτρική διέγερση:



Σχήμα 5.9 Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους σύγχρονης γεννήτριας με ηλεκτρική διέγερση (α) με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο, (β) με σύνδεση μέσω AC/DC/AC μετατροπέα

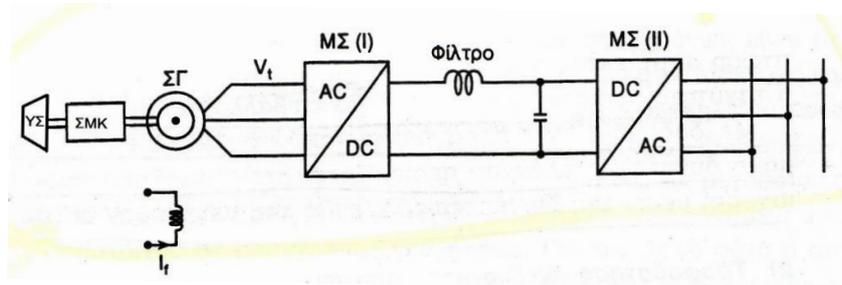
Μία σύγχρονη γεννήτρια με ηλεκτρική διέγερση μπορεί να συνδεθεί στο κεντρικό δίκτυο είτε απευθείας είτε μέσω AC/DC/AC μετατροπέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9. Το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα για την απευθείας σύνδεση της σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 5.10. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παρασταθεί με μία σταθερή ΗΕΔ E και αντίσταση $Z_t = r_t + jx_t$ και με εξαίρεση την περίπτωση παράλληλης λειτουργίας με μικρής ισχύος ηλεκτρικό σύστημα, η τάση ακροδεκτών V_t της γεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί με ικανοποιητική προσέγγιση σταθερή. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση εκτός της τάσεως και η συχνότητα και συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής της υδρογεννήτριας θα επιβάλλονται από το δίκτυο. Με δεδομένη την παραγόμενη ενεργό ισχύ, η δυνατότητα ελέγχου περιορίζεται στη μεταβολή της αέργου ισχύος, μέσω της διέγερσης δηλαδή του μεγέθους E_f .



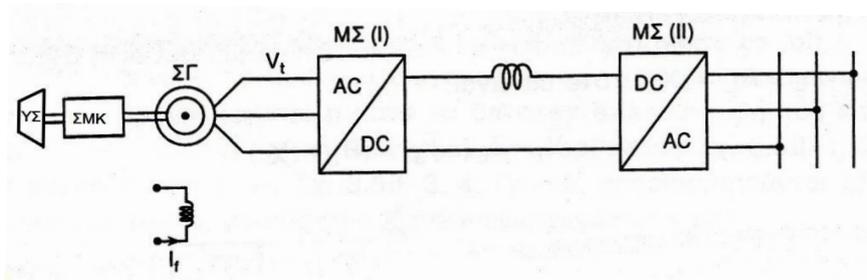
Σχήμα 5.10 Ισοδύναμο κύκλωμα για την περίπτωση απευθείας σύνδεσης της σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο ^[33]

Η σύνδεση, όμως, της σύγχρονης γεννήτριας με τύλιγμα διέγερσης στο δίκτυο μπορεί να γίνει και μέσω μετατροπέων πηγής τάσης ή πηγής ρεύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11. Στην απλούστερη περίπτωση, ο μετατροπέας συχνότητας I μπορεί να είναι ένας απλός ανορθωτής και ο II αντιστροφέας πηγής τάσεως με μεταγωγή από τη γραμμή. Καλύτερος έλεγχος όμως, μπορεί να επιτευχθεί αν ο μετατροπέας I είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής, ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας υπό σταθερό λόγο V/f . Αν συμβαίνει αυτό, η ροπή T θα είναι ανάλογη της έντασης διέγερσης και του ημιτόνου της γωνίας δ (που σχηματίζεται μεταξύ των διανυσμάτων των τάσεων E_f και V_t). Η διάταξη όμως αυτή, που χρησιμοποιεί μετατροπείς πηγής τάσης, παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα ευστάθειας ή και ταλαντώσεων σε απότομες μεταβολές. Αντίθετα, ικανοποιητικότερη συμπεριφορά επιτυγχάνεται με τη διάταξη του σχήματος 5.11(β) στην οποία χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι ελεγχόμενοι ανορθωτές. Η μεταγωγή των θυρίστορ μπορεί να γίνει για τον μετατροπέα I από τη γεννήτρια ενώ για τον μετατροπέα II απ' το δίκτυο. Το σύστημα ελέγχου μπορεί να απαρτίζεται από δύο ανεξάρτητους βρόχους. Με τον πρώτο βρόχο ελέγχεται η συχνότητα εναύσεως των θυρίστορ του μετατροπέα I, ώστε απότομες μεταβολές των στροφών του

δρομέα να προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές της συχνότητας και να αποφεύγεται ο αποσυγχρονισμός. Με τον δεύτερο βρόχο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της εντάσεως I_d του dc συνδέσμου, η οποία είναι ανάλογη της έντασης I_d του στάτη της μηχανής και μέσω αυτού ελέγχεται η ροή ισχύος δια μέσω του μετατροπέα II.



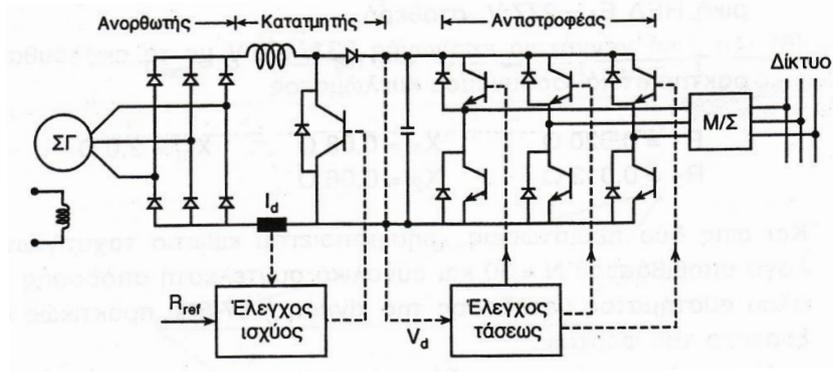
(α)



(β)

Σχήμα 5.11 Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης ενός υδροηλεκτρικού συστήματος μεταβλητών στροφών με το δίκτυο (α) μέσω μετατροπέα AC/DC/AC πηγής τάσης, (β) μέσω μετατροπέα AC/DC/AC πηγής ρεύματος^[33]

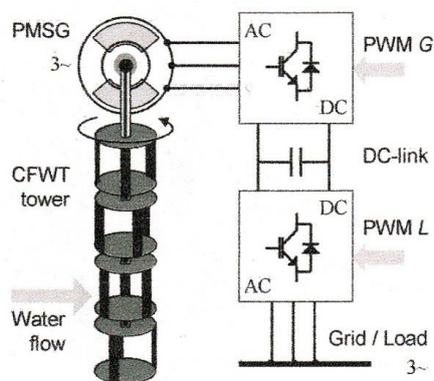
Μία άλλη διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης στο δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 5.12 και πλεονεκτεί έναντι της προηγούμενης, περιλαμβάνει έναν τριφασικό ανορθωτή, έναν καταταμητή ανυψώσεως, έναν dc σύνδεσμο με πυκνωτή, έναν τριφασικό αντιστροφέα με IGBT και έναν μετασχηματιστή ανυψώσεως. Με τις διατάξεις ελέγχου του συστήματος επιτυγχάνεται ο έλεγχος της μηχανικής ισχύος της υδρογεννήτριας ώστε να λειτουργεί στις στροφές για τη βέλτιστη απόδοση, καθώς και ο έλεγχος της μορφής του κύματος και της φασικής γωνίας του ρεύματος του δικτύου, δηλαδή της αέργου ισχύος.



Σχήμα 5.12 Διάταξη υδροηλεκτρικού μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης και πλήρη έλεγχο ισχύος και τάσεως^[33]

Για τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών:

Η σύνδεση μίας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών στο δίκτυο γίνεται μέσω AC/DC/AC μετατροπέα. Στο [35] μελετάται η σύνδεση και ο έλεγχος ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής με υδροστρόβιλο Crossflow και σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών που συνδέεται στο κύριο δίκτυο μέσω δύο back-to-back τριφασικών μετατροπέων. Η δομή του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13 Δομή micro-υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής με υδροστρόβιλο Crossflow και σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών που συνδέεται στο κύριο δίκτυο^[34]

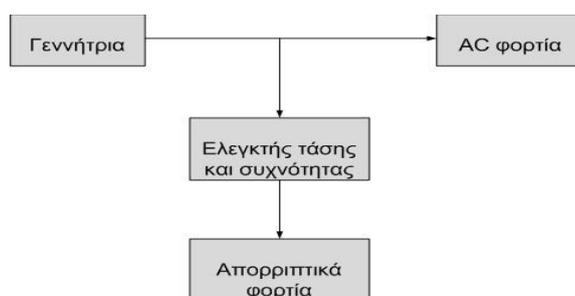
Η μελέτη γίνεται για λειτουργία υδροστρόβιλου υπό μεταβλητές στροφές με στόχο την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης. Ο μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά της γεννήτριας είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του συστήματος στο σημείο βέλτιστης απόδοσης, με συντελεστή ισχύος όσο γίνεται κοντά στη μονάδα και για την ελαχιστοποίηση των αρμονικών παραμορφώσεων της τάσης. Η ρύθμιση του σημείου λειτουργίας γίνεται με τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής, η οποία ελέγχεται μέσω του ρεύματος. Ο μετατροπέας που βρίσκεται από την πλευρά του δικτύου είναι υπεύθυνος για τη μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο, ελέγχοντας την τάση στο dc σημείο σύνδεσης, και για την καλή ποιότητα των

ρευμάτων που εγχέονται στο δίκτυο. Υπάρχει δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο, αν αυτό απαιτείται.

5.4.2 AC Αυτόνομο σύστημα

5.4.2.1 Αυτόνομο σύστημα με μοναδική πηγή παραγωγής ενέργειας το υδροηλεκτρικό

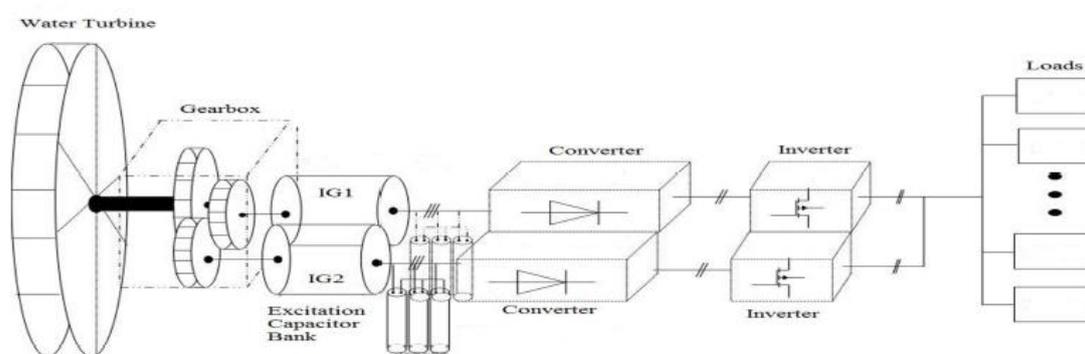
Στην περίπτωση που το micro-υδροηλεκτρικό σύστημα είναι η μόνη πηγή που τροφοδοτεί το ac αυτόνομο σύστημα πρέπει να εξασφαλίζει την εξυπηρέτηση των αναγκών των φορτίων ανά πάσα στιγμή και να διατηρεί σταθερή την τάση και τη συχνότητα λειτουργίας των φορτίων. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να διαθέτει μπαταρίες, μπορεί και όχι. Στη δεύτερη περίπτωση, πρέπει να μπορεί να παραγάγει ισχύ ίση με τη μέγιστη ζητούμενη, ενώ τον χρόνο που η ζήτηση είναι μικρότερη, η παραγόμενη ισχύς διοχετεύεται στο απορριπτικό φορτίο. Αντίθετα στην πρώτη περίπτωση υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας όταν η παραγόμενη ισχύς είναι περισσότερη από την ζητούμενη, ενώ στις στιγμές αιχμής μπορούν οι μπαταρίες να συμμετάσχουν στην τροφοδότηση κάποιων φορτίων. Ο υδροστρόβιλος μπορεί να λειτουργεί είτε υπό σταθερές είτε υπό μεταβλητές στροφές, αρκεί να υπάρχει ο ανάλογος μετατροπέας ώστε η συχνότητα και η τάση στην έξοδο της υδρογεννήτριας να διατηρούνται σταθερές. Οι γεννήτριες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα τέτοιο σύστημα είναι η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης, λίγο πιο δύσκολα η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και υπό προϋποθέσεις η γεννήτρια επαγωγής. Η τυπική μορφή ενός ac αυτόνομου συστήματος χωρίς μπαταρίες φαίνεται στο σχήμα 5.14. Ο ελεγκτής τάσης και συχνότητας είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση των βασικών αυτών μεγεθών σταθερών διοχετεύοντας την περισσευούμενη ισχύ στα απορριπτικά φορτία. Κάποιες φορές που η απόσταση μεταξύ του υδροηλεκτρικού σταθμού και της κατανάλωσης είναι μεγάλη, χρειάζεται η τοποθέτηση μετασχηματιστών στην έξοδο της γεννήτριας και πριν τα φορτία. Ακόμα, μπορεί να παρεμβληθούν μεταξύ της γεννήτριας και των φορτίων ένας ανορθωτής και ένας αντιστροφέας.



Σχήμα 5.14 Τυπική διάταξη σύνδεσης υδρογεννήτριας σε ένα ac αυτόνομο σύστημα χωρίς μπαταρίες

Όταν χρησιμοποιείται μία γεννήτρια επαγωγής (ή κινητήρας επαγωγής που λειτουργεί ως γεννήτρια) για την τροφοδότηση ενός αυτόνομου δικτύου, όλη η απαιτούμενη για τη διέγερσή της ισχύς πρέπει να δοθεί από μία συστοιχία πυκνωτών, πρέπει επομένως να είναι αυτοδιεγερσίσιμη. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4, για τον έλεγχο της και λειτουργία σταθερών στροφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής που θα παρεμβάλλεται ανάμεσα σε αυτήν και το δίκτυο και θα διατηρεί σταθερή την τάση και τη συχνότητα της γεννήτριας χρησιμοποιώντας απορριπτικά φορτία ή και μπαταρίες.

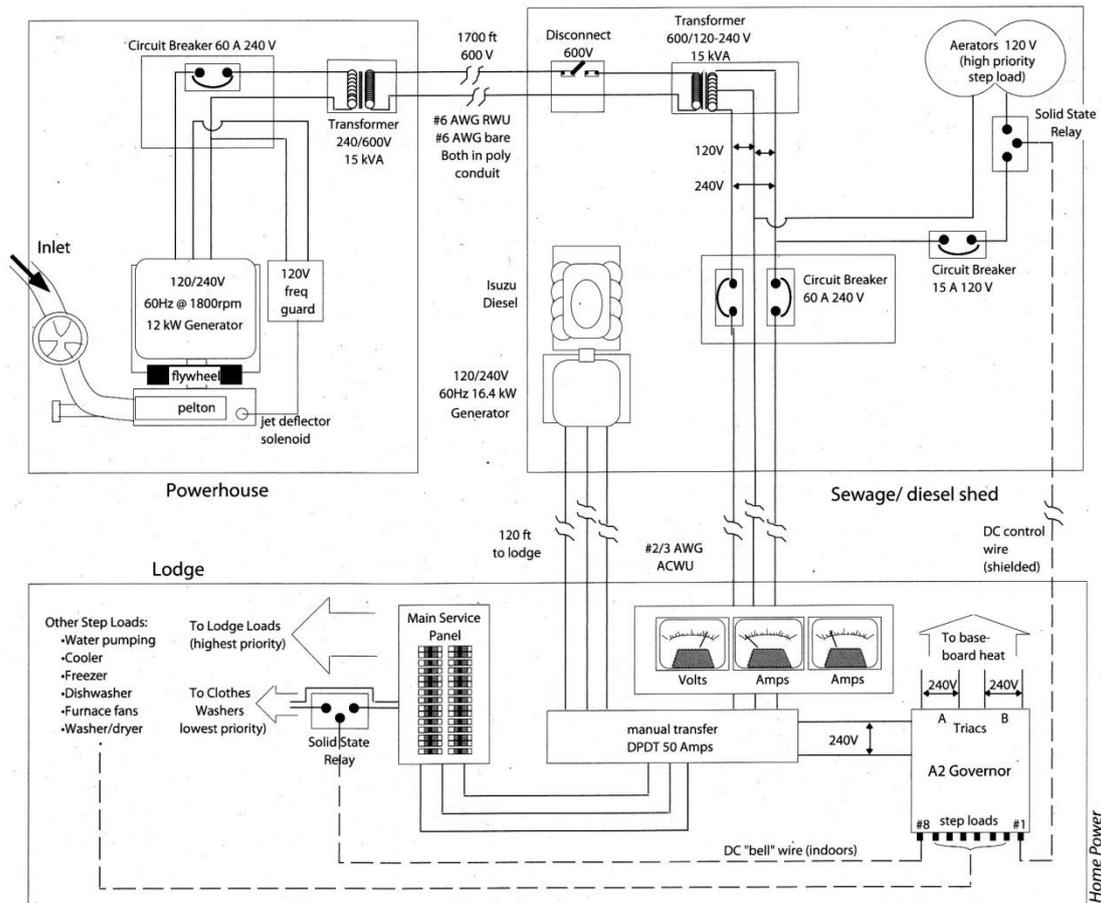
Στο [36] περιγράφεται η σχεδίαση και η υλοποίηση ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος που τροφοδοτεί ένα μικρό αυτόνομο δίκτυο στην Αφρική και η διάταξη σύνδεσης απεικονίζεται στο σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15 Micro-υδροηλεκτρικό σύστημα με δύο παράλληλες αυτοδιεγερσίσιμες γεννήτριες επαγωγής που τροφοδοτεί ένα αυτόνομο μικρό δίκτυο στην Αφρική [36]

Το micro-υδροηλεκτρικό αποτελείται από έναν υδροστρόβιλο εγκάρσιας ροής που κινεί δύο ίδιες γεννήτριες επαγωγής μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Οι γεννήτριες είναι κινητήρες επαγωγής που λειτουργούν ως αυτοδιεγερσίσιμες γεννήτριες επαγωγής με τη συμβολή και των πυκνωτών διέγερσης που συνδέονται στην έξοδό τους. Μεταξύ των γεννητριών και των μονοφασικών φορτίων παρεμβάλλονται ένας ανορθωτής και ένας αντιστροφέας σε κάθε έναν από τους δύο κλάδους, ενώ το σύστημα διαθέτει και μπαταρίες (οι οποίες όμως δε φαίνονται στο σχήμα). Ο πρώτος μετατροπέας συνδέεται ανάμεσα στην έξοδο της γεννήτριας και τις μπαταρίες και καθώς το σύστημα είναι μεταβλητών στροφών, είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του στο σημείο βέλτιστης απόδοσης.

Στο [38] περιγράφεται η κατασκευή, η λειτουργία και η σύνδεση ενός micro-υδροηλεκτρικού συστήματος με σύγχρονη γεννήτρια χωρίς ψήκτρες που τροφοδοτεί ένα ac αυτόνομο μικρό δίκτυο και το διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16 Micro-υδροηλεκτρικό με σύγχρονη γεννήτρια που τροφοδοτεί αυτόνομο ac σύστημα με φορτία διαφορετικής προτεραιότητας και διαθέτει και εφεδρική ντιζελογεννήτρια ^[38]

Η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη στον ίδιο άξονα με τον υδροστρόβιλο Pelton, ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται και ένας σφόνδυλος που συμβάλει στη γενικότερη σταθερότητα του συστήματος και στη διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής κατά την εκκίνηση φορτίων κινητήρων. Η μονοφασική έξοδος της γεννήτριας ανυψώνεται μέσω μετασχηματιστών και εν συνεχεία υποβιβάζεται πάλι, καθώς η απόσταση μεταξύ του υδροηλεκτρικού σταθμού και της εγκατάστασης κατανάλωσης είναι σχετικά μεγάλη. Το σύστημα αυτό δεν διαθέτει μπαταρίες και τα τροφοδοτούμενα ac φορτία χωρίζονται σε ομάδες διαφορετικής προτεραιότητας. Μέσω του ελέγχου των φορτίων από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή φορτίου (Electronic Load Control Governor – ELCG) επιτυγχάνεται και ο έλεγχος της γεννήτριας και του υδροστροβίλου, ώστε να λειτουργούν με σταθερές στροφές. Το κύκλωμα υψηλότερης προτεραιότητας (όπως τα φορτία που είναι σχετικά με την ασφάλεια) συνδέονται στον κεντρικό πίνακα και δεν υπόκεινται σε έλεγχο από τον ELCG. Τα φορτία χαμηλότερης προτεραιότητας χωρίζονται σε 8 ομάδες/κυκλώματα και ελέγχονται από τον ELCG. Αν η ζήτηση ισχύος αυξηθεί υπερβολικά, ο ελεγκτής ανοίγει τον διακόπτη και αποσυνδέει τα φορτία χαμηλότερης προτεραιότητας μέχρι να αποκατασταθεί η τάση και

συχνότητα. Αφού αυτές λάβουν πάλι αποδεκτές τιμές, επανασυνδέονται τα φορτία με την υψηλότερη προτεραιότητα από αυτά που είχαν αποκοπεί. Ο ELCG διαθέτει ρυθμιστές με διόδους, οι οποίοι μεταβάλλουν την ισχύ που διοχετεύεται στα ωμικά απορριπτικά φορτία (που χρησιμοποιούνται για θέρμανση νερού ή και κάποιου χώρου). Η γεννήτρια προστατεύεται έναντι υπερτάχυνσης στην περίπτωση αποτυχίας του συστήματος ελέγχου με έναν όνυχα εκτροπής, ο οποίος ελέγχεται από έναν αισθητήρα συχνότητας. Τέλος, το σύστημα διαθέτει και μία εφεδρική ντιζελογεννήτρια για εξυπηρέτηση των φορτίων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, βλάβης της υδρογεννήτριας κ.τ.λ.

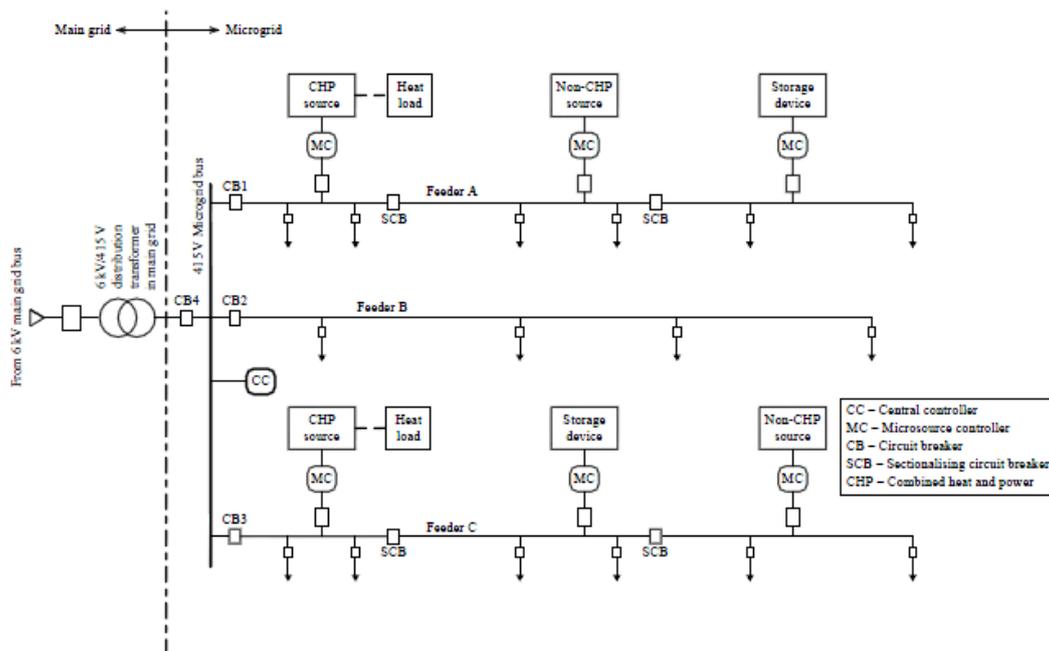
5.4.2.2 Αυτόνομο μικροδίκτυο

Τα μικροδίκτυα συνήθως αποτελούνται από κάποιο συνδυασμό ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών ενέργειας κάνοντάς τα εξαιρετικά φιλικά προς το περιβάλλον. Η παραγωγή οργανώνεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πρωταρχικών πηγών σε κάθε περιοχή και περιλαμβάνει και τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Γενικά, τα μικροδίκτυα μπορούν να επικοινωνούν με το κεντρικό δίκτυο ή και να λειτουργούν αυτόνομα. Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί μόνο η αυτόνομη λειτουργία τους. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μικρά υδροηλεκτρικά, γεννήτριες-Diesel, κυψέλες καυσίμου κ.ά. αλλά και μονάδες αποθήκευσης όπως συσσωρευτές ή σφονδύλους. Όταν λειτουργεί αυτόνομα, πρέπει να ρυθμίζονται διαρκώς τα επίπεδα τάσης και συχνότητας, καθώς και να γίνεται σωστή διαχείριση της ισχύος. ^[6]

Ένα τυπικό μικροδίκτυο φαίνεται στο σχήμα 5.17 και αναλύεται στο [39]. Αποτελείται από φορτία και μικροπηγές που συνδέονται μέσω ενός δικτύου χαμηλής τάσης. Τα φορτία (ιδιαίτερα τα θερμικά) τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους προκειμένου να μειωθούν οι θερμικές απώλειες κατά τη διανομή. Το συγκεκριμένο μικροδίκτυο αποτελείται από τρεις κλάδους A, B και C για την τροφοδοσία. Έχει δύο μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CPH) καθώς και δύο μονάδες στις οποίες δε συμβαίνει συμπαραγωγή (non-CPH). Από τα φορτία κάποια θεωρούνται προτεραιότητας και κάποια όχι. Το μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο μέσω του διακόπτη CB4 στο σημείο κοινής ζεύξης, αλλά όπως έχει προαναφερθεί εδώ θα μελετηθεί μόνο η λειτουργία του ως αυτόνομο. Οι πηγές δεν είναι συνδεδεμένες στον ζυγό του μικροδικτύου, αλλά είναι απομακρυσμένες προκειμένου να μειωθούν οι θερμικές απώλειες, να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης και να χρησιμοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο η αποβολή θερμότητας.

Η λειτουργία και διαχείριση του μικροδικτύου γίνεται μέσω των ελεγκτών μικροπηγών MCs καθώς και του κεντρικού ελεγκτή (Central Controller-CC) που περιγράφονται παρακάτω:

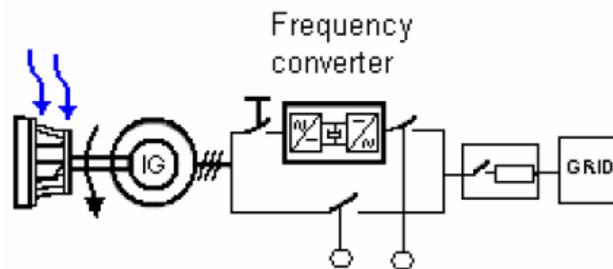
- Ελεγκτής Μικροπηγών (Microsource Controller-MC): Κεντρική του λειτουργία είναι να ελέγχει αυτόνομα τη ροή ισχύος όπως επίσης και την τάση στην έξοδο των πηγών σε κάθε ανωμαλία ή μεταβολή φορτίου στο μικροδίκτυο. Αυτόνομος έλεγχος σημαίνει έλεγχος χωρίς την επικοινωνία με τον κεντρικό ελεγκτή CC. Επίσης, ο ελεγκτής αυτός συμμετέχει στον οικονομικότερο προγραμματισμό της παραγωγής, τον έλεγχο των φορτίων και των μέσων αποθήκευσης, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ότι κάθε πηγή αμέσως θα παράγει την ισχύ εκείνη που απαιτείται. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των ελεγκτών αυτών είναι η ταχύτητα αντίδρασης στην αλλαγή ρευμάτων και τάσεων ανεξάρτητα των δεδομένων άλλων τέτοιων ελεγκτών. Έτσι, νέες μικροπηγές μπορούν να τοποθετηθούν στο μικροδίκτυο χωρίς να επηρεάζεται ο έλεγχος και η προστασία των άλλων μικροπηγών.



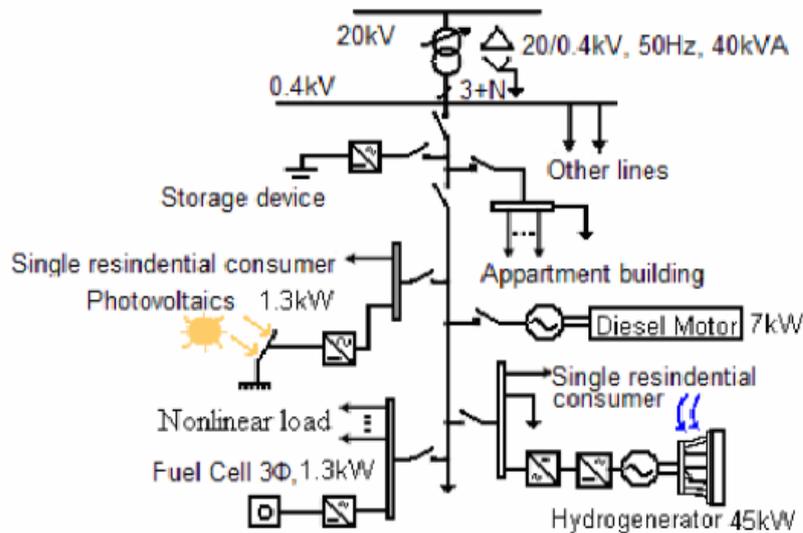
Σχήμα 5.17 : Διάταξη ενός τυπικού μικροδικτύου [39]

- Κεντρικός ελεγκτής (CC): Είναι υπεύθυνος για τον συνολικό έλεγχο και την προστασία του μικροδικτύου (ελέγχοντας και τους MCs). Στόχοι του είναι: (α) η διατήρηση των επιπέδων της τάσης και της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα μέσω ελέγχου ισχύος – συχνότητας (Power-Frequency, P-F) και τάσης και (β) η βέλτιστη ενεργειακή λειτουργία του μικροδικτύου. Επιπλέον, είναι υπεύθυνος για την προστασία μέσω συντονισμού των MCs και ορίζει τα σημεία λειτουργίας τους (ισχύς και τάση). Οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή για απομονωμένη σύνδεση είναι οι εξής: έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος των μικροπηγών προκειμένου να εξασφαλιστεί σταθερή τάση και συχνότητα στα φορτία, καθώς επίσης να υιοθετεί στρατηγικές διακοπής και διαχείρισης φορτίων.

Στο [40] φαίνεται ένα ακόμα παράδειγμα μικροδικτύου το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε συνδεδεμένο στη μέση τάση ενός δικτύου ηλεκτροδότησης είτε ως αυτόνομο μικροδίκτυο με όλες τις πηγές και τα φορτία να συνδέονται στη χαμηλή τάση. Το μικροδίκτυο αυτό περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά ισχύος 1,3kW, κυψέλες καυσίμου ισχύος 1,3kW, ντιζελογεννήτρια ισχύος 7kW και υδροηλεκτρικό με γεννήτρια επαγωγής ονομαστικής ισχύος 45kW, διατάξεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και φορτία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19. Το υδροηλεκτρικό αποτελείται από έναν υδροστρόβιλο Francis άμεσα συζευγμένο με μία γεννήτρια επαγωγής που λειτουργεί με μεταβλητές στροφές και συνδέεται στο μικροδίκτυο μέσω AC/DC/AC μετατροπών συχνότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.18.



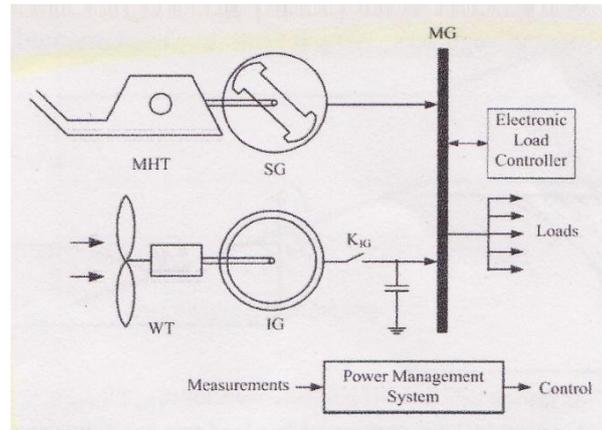
Σχήμα 5.18 Σύνδεση της γεννήτριας επαγωγής του υδροηλεκτρικού στο μικροδίκτυο ^[40]



Σχήμα 5.19 Διάγραμμα μικροδικτύου ^[40]

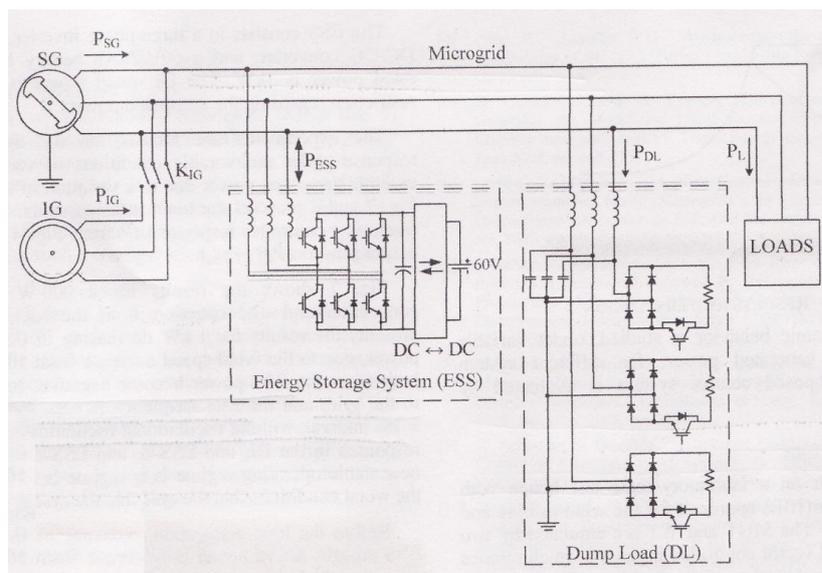
Στο [41] περιγράφεται η λειτουργία και ο έλεγχος των πηγών ενός μικρού αυτόνομου δικτύου με στόχο την σταθεροποίηση της τάσης. Το μικροδίκτυο φαίνεται στο σχήμα 5.20 και περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια με γεννήτρια επαγωγής (που στην έξοδό της είναι συνδεδεμένη συστοιχία πυκνωτών για κάλυψη των αναγκών της γεννήτριας σε άεργο ισχύ

κατά την εκκίνηση και βελτίωση του συντελεστή ισχύος της) και ένα υδροηλεκτρικό με υδροστρόβιλο Pelton, ο οποίος κινεί μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων μία σύγχρονη γεννήτρια.



Σχήμα 5.20 Αυτόνομο μικροδίκτυο με Α/Γ με γεννήτρια επαγωγής και υδροηλεκτρικό με σύγχρονη γεννήτρια ^[41]

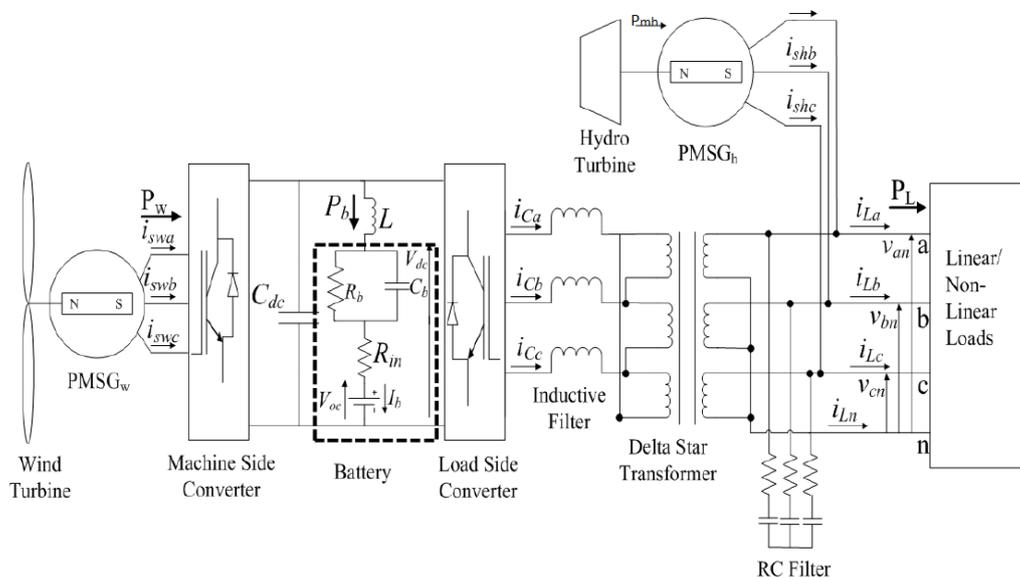
Ο έλεγχος της τάσης του δικτύου γίνεται μέσω της σύγχρονης γεννήτριας και του αυτόματου ρυθμιστή τάσης που αυτή διαθέτει (αν και δε φαίνεται στο σχήμα). Η υδρογεννήτρια λειτουργεί συνεχώς σε σταθερές στροφές, ενώ η Α/Γ λειτουργεί όταν έχει αρκετό αέρα και όταν απαιτείται από το σύστημα διαχείρισης της ισχύος (Power Management System). Η διατήρηση της συχνότητας σταθερής εξασφαλίζεται μέσω της διατήρησης του ισοζυγίου ενεργού ισχύος στο μικροδίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του ηλεκτρονικού ελεγκτή φορτίου (ELC), που περιλαμβάνει απορριπτικά φορτία (Dump Load -DL) αλλά και διάταξη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Storage System – ESS), όπως φαίνεται αναλυτικότερα στο σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21 Διάταξη ελέγχου της συχνότητας του μικροδικτύου μέσω του DL και του ESS ^[41]

Η διάταξη αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από έναν αντιστροφέα πηγής τάσης με IGBT παράλληλα με στοιχεία αποθήκευσης (μπαταρίες) που συνδέονται στην dc πλευρά του μέσω ενός dc-dc μετατροπέα με αμφίδρομη ροή ισχύος. Το απορριπτικό φορτίο αποτελείται από τρεις μονοφασικούς ανορθωτές γέφυρας με IGBT σε λειτουργία με PWM. Η αποθηκευτική διάταξη χαρακτηρίζεται από δύο βασικές παραμέτρους: την ονομαστική ισχύ και την χωρητικότητα των μπαταριών. Το κόστος αύξησης της ονομαστικής ισχύος της είναι γενικά υψηλότερο από το κόστος αύξησης της χωρητικότητάς της. Η παράλληλη χρήση, όμως, απορριπτικού φορτίου μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος καθώς και να μειώσει το συνολικό κόστος του, αν η παραγόμενη θερμότητα λόγω απωλειών στο απορριπτικό φορτίο χρησιμοποιείται. Όταν παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ισχύς από αυτήν που ζητείται, αν οι μπαταρίες δεν είναι πλήρως φορτισμένες, αποθηκεύουν την περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια, αλλιώς χρησιμοποιούνται τα απορριπτικά φορτία. Ενώ όταν υπάρχει ανάγκη για περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, αυτή παρέχεται από την αποθηκευτική διάταξη.

Τέλος, στο [42] μελετάται μία άλλη περίπτωση αυτόνομου μικροδικτύου που αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια και ένα υδροηλεκτρικό σύστημα, τροφοδοτεί τριφασικά φορτία και η διάταξή του φαίνεται στο σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.22 Αυτόνομο μικροδίκτυο με A/G μεταβλητών στροφών με ΣΓΜΜ και υδροηλεκτρικό σταθερών στροφών με ΣΓΜΜ [42]

Η ανεμογεννήτρια διαθέτει σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (ΣΓΜΜ) και είναι μεταβλητών στροφών, ενώ το υδροηλεκτρικό λειτουργεί σε σταθερές στροφές και διαθέτει και αυτό σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Η A/G ελέγχεται ώστε να λειτουργεί στο σημείο βέλτιστης απόδοσης (MPPT –Maximum Power Point Tracking), ενώ η τάση και η

συχνότητα του συστήματος ελέγχονται μέσω του ισοζυγίου ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς υπάρχει δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος. Μεταξύ της A/Γ και του σημείου σύνδεσής της με το Y/H υπάρχουν ένας ac/dc κι ένας dc/ac μετατροπέας με μπαταρίες στο dc σημείο σύνδεσης και ένας μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία τριγώνου-αστέρα. Ο μετατροπέας από την πλευρά της A/Γ είναι υπεύθυνος για τον MPPT έλεγχο, οι μπαταρίες συμβάλλουν στη διατήρηση σταθερής dc τάσης και ο δεύτερος μετατροπέας είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, διατηρώντας το ισοζύγιο ενεργού ισχύος στο σύστημα και παρέχοντας στα φορτία την απαιτούμενη άεργο ισχύ. Υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας του συστήματος αυτού: κατά τον πρώτο τρόπο λειτουργίας, η ενεργός ισχύς των φορτίων P_L είναι μικρότερη από αυτή που παράγει το Y/H P_H και τότε ολόκληρη η παραγόμενη από την A/Γ ισχύς P_w και η περισσευούμενη από αυτή του Y/H κατευθύνεται στις μπαταρίες. Κατά τον δεύτερο τρόπο λειτουργίας $P_H < P_L < P_H + P_w$, οπότε στο φορτίο διοχετεύεται ολόκληρη η P_H και ένα μέρος από την P_w , ενώ η περισσευούμενη ισχύς της A/Γ διοχετεύεται στις μπαταρίες. Κατά τον τρίτο και τελευταίο τρόπο λειτουργίας $P_L > P_H + P_w$, οπότε ολόκληρη η παραγόμενη (και από τις δύο μονάδες) ισχύς διοχετεύεται στα φορτία και η υπόλοιπη παρέχεται από τις μπαταρίες. Όπως φαίνεται η παραγόμενη από το Y/H ισχύς απορροφάται κατά προτεραιότητα, ενώ τα φασικά ρεύματά του χρησιμοποιούνται για τον PWM έλεγχο του δεύτερου μετατροπέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

6.1 Εισαγωγή

Τα micro (<100kW) και pico (<10kW) υδροηλεκτρικά συστήματα εγκαθίστανται συνήθως σε μικρούς οικισμούς και δυσπρόσιτες περιοχές, απομακρυσμένες από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Έτσι, συνήθως προτιμάται η ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων έναντι της δυσκολότερης και δαπανηρής λύσης της σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο, η οποία για τον λόγο αυτόν δεν συμπεριλαμβάνεται στη σύγκριση που γίνεται στο παρόν κεφάλαιο. Ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας με υδροηλεκτρικό σύστημα και τις απαιτήσεις σε τροφοδοσία των καταναλωτών, αλλά και με πολύ βασικό κριτήριο αυτό του οικονομικού κόστους γίνεται επιλογή μεταξύ των παρακάτω τριών συνδέσεων:

- περίπτωση 1^η: DC σύνδεση – Αυτόνομο σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες
- περίπτωση 2^η: AC σύνδεση , όπου το Υ/Η είναι η κύρια και μοναδική πηγή και ρυθμίζει πλήρως τις παραμέτρους του αυτόνομου δικτύου
- περίπτωση 3^η: AC σύνδεση σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο

Η επιλογή του καταλληλότερου εξοπλισμού και σύνδεσης γίνεται αφού έχει κανείς αποκτήσει και χρησιμοποιώντας ως κριτήρια τα εξής δεδομένα:

- το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης
- τη διαθέσιμη παροχή νερού και πώς αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους (πρέπει να γνωρίζει πόσο μειώνεται η παροχή κατά τη θερινή περίοδο)
- το μήκος του σωλήνα πτώσεως
- το ημερήσιο και εποχιακό προφίλ (καμπύλη φορτίου), καθώς και το είδος των φορτίων που πρέπει να τροφοδοτηθούν
- την ύπαρξη κάποιας άλλης ηλεκτροπαραγωγικής διάταξης (π.χ. ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, νηζελογεννήτρια)
- την τεχνογνωσία που υπάρχει στην περιοχή, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η δυνατότητα κατασκευής, εγκατάστασης, συντήρησης και πιθανής απαιτούμενης επισκευής από τοπικά συνεργεία

Η προτεινόμενη λύση, βέβαια, δεν αφορά μόνο τον τρόπο σύνδεσης του υδροηλεκτρικού σταθμού, αλλά και τη γεννήτρια, τον στρόβιλο και τον σωλήνα (για την προσαγωγή του νερού) που θα χρησιμοποιηθούν. Ένα ακόμα βασικό κριτήριο για την επιλογή είναι η απόδοσή τους σε συνθήκες χαμηλής ροής (για τους στροβίλους) και μερικού φορτίου (για τις γεννήτριες).

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια κατηγοριοποίησης ουσιαστικά των συνδυασμών αυτών, ώστε τελικά να μπορεί να προταθεί ο πιο κατάλληλος και απλός από αυτούς για μία οποιαδήποτε εφαρμογή. Για να επιτευχθεί αυτό εξετάζονται χωριστά τα εξής:

- Διαστασιολόγηση του αγωγού προσαγωγής του νερού στον υδροστρόβιλο και επιλογή του υλικού του (παρατίθεται στο δεύτερο κεφάλαιο και εξαρτάται από την τιμή του υδραυλικού ύψους, την παροχή και τη μεταβολή της, και το μήκος του σωλήνα)
- Επιλογή του στροβίλου
- Επιλογή γεννήτριας και μονοφασικής ή τριφασικής εγκατάστασης
- Επιλογή συστήματος μετάδοσης κίνησης (παίζει σημαντικό ρόλο και στην επιλογή του υδροστροβίλου, αν είναι γνωστή η γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί)
- Επιλογή τρόπου ελέγχου υδροστροβίλου και γεννήτριας
- Επιλογή τύπου σύνδεσης

6.2 Επιλογή Υδροστροβίλου

Η επιλογή υδροστροβίλου σχετίζεται με τον τύπο και το μέγεθός του. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου προηγείται της διαστασιολόγησής του και γίνεται με βάση το ύψος της υδατόπτωσης, την ισχύ που απαιτείται (και συνδέεται άμεσα με την παροχή όπως φαίνεται από τον τύπο (1.1) $P = \eta_t \rho Q g H$) και την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (μέγιστος αποδεκτός λόγος επιτάχυνσης 3:1).

Τα είδη των υδροστροβίλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν έχουν παρουσιαστεί και στο τρίτο κεφάλαιο και είναι τα εξής:

- Υδροστρόβιλοι Πρόσπτωσης (Impulse)
 - ✓ Pelton
 - ✓ Turgo
 - ✓ Crossflow
- Υδροστρόβιλοι Αντίδρασης (Reaction)

- ✓ Francis
- ✓ Kaplan
- ✓ Propeller
- ✓ Αντλία που χρησιμοποιείται ως στρόβιλος - PAT

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου μπορεί να γίνει γραφικά μέσω του νομογράματος του σχήματος 3.1, αλλά σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται πίνακες κατηγοριοποίησης των υδροστροβίλων για ευκολότερη αρχική επιλογή. Μία πρώτη κατηγοριοποίηση των υδροστροβίλων ανάλογα με τα ύψη υδατόπτωσης (head) για τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότερα φαίνεται στον πίνακα 6.1, ενώ μία δεύτερη προσεγγιστική κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με την παροχή νερού φαίνεται στον πίνακα 6.2.

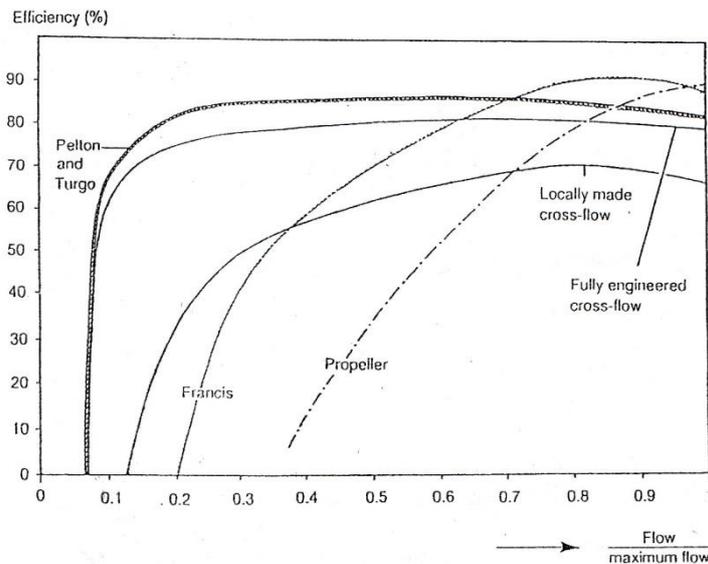
HIGH HEAD (>150m)	MEDIUM HEAD (20-150m)	LOW HEAD (<20m)
Turgo	Crossflow	Crossflow
Pelton	Turgo	Propeller
	Multi-jet Pelton	Kaplan
	Francis	PAT
	PAT	

Πίνακας 6.1 Κατηγοριοποίηση υδροστροβίλων ανάλογα με το υδραυλικό ύψος για το οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότερα

HIGH FLOW (20-60m ³ /sec)	MEDIUM FLOW (5-20m ³ /sec)	LOW FLOW (<5m ³ /sec)
Kaplan	Crossflow	Pelton
	Turgo	Turgo
	Kaplan	Crossflow
	Francis	

Πίνακας 6.2 Κατηγοριοποίηση υδροστροβίλων ανάλογα με την παροχή νερού για την οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότερα

Όσο αφορά την απόδοσή τους σε συνθήκες μερικής ροής, οι Pelton και Turgo υπερέχουν, ενώ ακολουθεί ο υδροστρόβιλος Crossflow και μετά ο Francis, ο Propeller και τέλος η PAT. Ένα ενδεικτικό γράφημα σχετικό με την απόδοση κάποιων από αυτούς για διάφορα ποσοστά ροής λειτουργίας (ως προς την ονομαστική τους) φαίνεται στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 Η απόδοση υπό μερική ροή διαφόρων τύπων υδροστροβίλων^[3]

Πρέπει κανείς να έχει υπόψη του πως καμία από τις παραπάνω κατηγοριοποιήσεις δεν είναι απόλυτη και για κάποιες περιοχές λειτουργίας η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου δεν είναι μονοσήμαντη. Κάθε κατηγορία, αλλά και κάθε στρόβιλος της ίδιας κατηγορίας έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που πρέπει να εξετάζονται στο σύνολό τους για να γίνει μία σωστή επιλογή. Σε γενικές γραμμές, οι υδροστρόβιλοι πρόσπτωσης είναι πιο ανθεκτικοί, απλούστεροι στην κατασκευή, τη συντήρηση και τον έλεγχο και δίνουν τη δυνατότητα ρύθμισης της ειδικής ταχύτητας ροής με την προσθήκη περισσότερων ακροφυσίων ή με τη χρήση ακροφυσίων με βελόνη. Μεταξύ αυτών, οι υδροστρόβιλοι Crossflow έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας (με τη δυνατότητα μεταβολής του πλάτους του δρομέα και του ακροφυσίου) και ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου τα νερά είναι λιγότερα καθαρά, καθώς η ροή του νερού μέσω αυτών είναι τέτοια που αυτοκαθαρίζονται. Οι υδροστρόβιλοι Pelton και Turgo μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλα ύψη υδατόπτωσης αλλά μικρές παροχές. Αν, όμως, η απαιτούμενη ισχύς είναι μικρή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Pelton και για μικρότερα υδραυλικά ύψη και να περιστρέφεται με χαμηλότερη ταχύτητα.^[3]

Από την άλλη πλευρά, οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης μπορούν να αξιοποιήσουν πολύ μικρά υδραυλικά ύψη (από 1m και πάνω) αλλά με μεγαλύτερη απαιτούμενη παροχή. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε υδροηλεκτρικά συστήματα μεταβλητών στροφών και η λειτουργία τους μπορεί να αντιστραφεί, ώστε να λειτουργήσουν ως αντλίες μεταφέροντας το νερό σε μεγαλύτερη στάθμη. Επιπλέον, λόγω και της ύπαρξης του αγωγού αναρρόφησης (ή απαγωγής) αξιοποιούν ολόκληρο το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης (μέχρι το επίπεδο του δρομέα), σε αντίθεση με τους πρώτους που μπορούν να αξιοποιήσουν μόνο το ύψος που διαμορφώνεται από το επίπεδο των ακροφυσίων και πάνω. Ο λόγος που δε χρησιμοποιούνται

πολύ συχνά είναι το αυξημένο κόστος, η δύσκολη κατασκευή και συντήρησή τους και η ευαισθησία τους στο φαινόμενο της σπηλαιώσης.

Η PAT είναι μία φθηνή και συνήθης επιλογή, καθώς είναι ανθεκτική, πολύ εύκολα προμηθεύσιμη και επειδή ακόμα, λόγω της ευρείας χρήσης της στις αγροτικές περιοχές, τα τοπικά συνεργεία και οι μηχανουργοί είναι εξοικειωμένοι με αυτή, την επισκευή και τη συντήρησή της. Αρνητικά της στοιχεία αποτελούν η δυσκολία εύρεσης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας ως υδροστροβίλου, η δυσκολία ελέγχου της και η μεγάλη πτώση της απόδοσής της όταν απομακρυνθεί λίγο από την "ονομαστική" της παροχή.

Δύο παραδείγματα συνδυαστικής σκέψης για επιλογή υδροστροβίλου παρουσιάζονται στο [8] και είναι τα εξής: Για μία υδραυλική πτώση ίση με 20m είναι δυνατή η επιλογή στροβίλου τύπου Francis ή Kaplan. Ένα πρώτο στοιχείο στη σύγκριση μεταξύ των δύο είναι ότι ο υδροστρόβιλος Francis έχει σημαντικά μικρότερες διαστάσεις και κόστος, καθώς και καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη σπηλαιώση και γι' αυτό η στάθμη τοποθέτησής τους είναι υψηλότερη από αυτή του Kaplan. Κατά συνέπεια ο υδροηλεκτρικός σταθμός με υδροστρόβιλο Francis θα έχει μικρότερες διαστάσεις και κόστος. Ωστόσο, ο υδροστρόβιλος Kaplan έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας και με υψηλότερες τιμές βαθμού απόδοσης με αποτέλεσμα να είναι καταλληλότερος αν προβλέπεται λειτουργία του με έντονα μεταβαλλόμενη παροχή. Σε ένα δεύτερο παράδειγμα, το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης είναι 150m και μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδροστρόβιλος Pelton ή Francis. Για την ίδια ονομαστική ισχύ, οι διαστάσεις και ο όγκος του Pelton είναι μεγαλύτερα από του Francis. Η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου Francis είναι μεγαλύτερη και μπορεί να επιτρέπει την άμεση σύζευξη του με τη γεννήτρια. Έτσι, δεν θα χρειάζεται σύστημα μεταβολής των στροφών και ο υδροηλεκτρικός σταθμός θα είναι μικρότερος και με μικρότερο κόστος. Παρ' όλα αυτά, όμως, η καμπύλη του βαθμού απόδοσης του Pelton είναι πολύ επίπεδη με αποτέλεσμα να έχει πολύ μεγάλο εύρος λειτουργίας και να αξιοποιεί καλύτερα παροχές με έντονες διακυμάνσεις. Επιπλέον, ο υδροστρόβιλος Pelton είναι πιο στιβαρός, δεν αναπτύσσονται σε αυτόν αξονικά φορτία και άρα δε φέρνει ωστικό έδρανο, ενώ επίσης η συντήρησή του και η πρόσβαση σε αυτόν είναι ευκολότερη.

Αφού επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος υδροστροβίλου, γίνεται η διαστασιολόγησή του με τη χρήση είτε επαναληπτικών μοντέλων υπολογισμού που υπάρχουν σε βιβλία, είτε με βάση υπολογιστικού μοντέλου που ίσως δίνει ο κατασκευαστής, ο οποίος θα προμηθεύσει την κοινότητα με τα υλικά για τη συναρμολόγηση του υδροστροβίλου ή και τον ίδιο τον υδροστρόβιλο. Αν όμως έχει αποφασιστεί η χρήση αντλίας με ανάστροφη λειτουργία (δηλ. ως στρόβιλος), πρέπει να επιλεγεί αυτή με σημείο βέλτιστης λειτουργίας (Q_{bep} , H_{bep}) κοντά

στις συνθήκες λειτουργίας του δημιουργούμενου συστήματος, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.4 της παρούσας διπλωματικής.

Επιλογή τρόπου ελέγχου του υδροστροβίλου

Τέλος, θα πρέπει να επιλεγεί και κάποιος ρυθμιστής στροφών για τον υδροστρόβιλο. Αυτός μπορεί να είναι είτε μηχανικός (αισθητήρας ταχύτητας με μηχανισμό βαριδίων σφονδύλου, που ελέγχει την παροχή ή την κλίση των πτερυγίων του δρομέα), είτε ηλεκτρονικός (ηλεκτρονικός ελεγκτής φορτίου, που διατηρεί σταθερό το φορτίο που εφαρμόζεται στον στρόβιλο ανεξάρτητα από τη μεταβολή στα φορτία του καταναλωτή). Ενώ ακόμα μπορούν να μη χρησιμοποιηθούν απλά ακροφύσια, αλλά ακροφύσια εφοδιασμένα με βελόνα ρύθμισης της παροχής, καθώς και όνυχας εκτροπής της δέσμης (που τοποθετείται μετά το ακροφύσιο και μπορεί να εκτρέψει σταδιακά τη δέσμη νερού ώστε ο στρόβιλος να ακινητοποιηθεί).

6.3 Επιλογή Γεννήτριας

Η επιλογή της γεννήτριας γίνεται με βάση το είδος και το ημερήσιο προφίλ των τροφοδοτούμενων φορτίων, το επίπεδο δυσκολίας στον έλεγχο της ανάλογα και με τον επιλεγόμενο τύπο σύνδεσης, το κόστος, την αξιοπιστία και την αντοχή. Στην πλειοψηφία των micro-υδροηλεκτρικών συστημάτων μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται γεννήτριες επαγωγής, σύγχρονες γεννήτριες ηλεκτρικής διέγερσης ή μονίμων μαγνητών. Ένα micro-υδροηλεκτρικό σύστημα παράγει ισχύ μέχρι 100kW, ενώ ένα pico-υδροηλεκτρικό έχει παραγωγή της τάξης των 5kW. Η παρούσα μελέτη περιορίζεται στην κλίμακα των 10kW και για να γίνει πιο εύκολη η σύγκριση μεταξύ των γεννητριών αλλά και η επιλογή της βέλτιστης λύσης, διακρίνονται τα φορτία ως προς το μέγεθος σε τρεις κατηγορίες ως εξής:

LOW LOAD	MEDIUM LOAD	HIGH LOAD
≤2kW	2-5kW	5-10kW

Για παραγόμενη ισχύ έως 2kW χρησιμοποιείται συνήθως μονοφασική εγκατάσταση.

Επίσης, τα φορτία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ως προς το είδος:

- i. ωμικά φορτία, μικρά επαγωγικά (λαμπτήρες φθορισμού)
- ii. επαγωγικά φορτία (ψυγεία, πλυντήρια)
- iii. μεγάλα επαγωγικά φορτία (μεγάλοι κινητήρες και αντλίες)

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Η σύγχρονη γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική, η οποία έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και συνήθως συμφέρει οικονομικά. Είναι καλύτερο η σύγχρονη γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί για ένα τέτοιο έργο να είναι κατασκευασμένη για χρήση σε υδροηλεκτρικό, αλλιώς θα είναι μεν πιο οικονομική, αλλά θα χρειαστεί ενίσχυση των τυλιγμάτων της (ώστε να αντέξουν περισσότερο σε περίπτωση υπερτάχυνσης) και αλλαγή ρουλεμάν (για μεγαλύτερη μηχανική αντοχή) σε κάποιο τοπικό συνεργείο. Έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερη δυνατότητα εκκίνησης. Βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι παράγει η ίδια την άεργο ισχύ που απαιτείται για τη διέγερσή της και τα τροφοδοτούμενα φορτία κατά τρόπο ελεγχόμενο μέσω του συστήματος διέγερσής της. Γι' αυτό, όταν επιθυμείται να υπάρχει ανεξαρτησία της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης από το εξωτερικό ηλεκτρικό δίκτυο ή όταν αυτό δεν υπάρχει, είναι ευκολότερη η χρήση μίας αυτοδιεγειρόμενης σύγχρονης γεννήτριας χωρίς ψήκτρες.

Ωστόσο, από οικονομικής απόψεως, συμφέρει κυρίως για μεγαλύτερα φορτία (άνω των 25kW). Επιπλέον, είναι λιγότερο στιβαρή και δεν αντέχει σε μεγάλες υπερταχύσεις (πρέπει να μπορεί να αντέξει αύξηση της ταχύτητας κατά 60%), ενώ ακόμα είναι δύσκολη και αρκετά πιο ακριβή η αγορά μιας σύγχρονης γεννήτριας με περισσότερους από 4 πόλους και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής · γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση ιμάντα ή κάποιου πολλαπλασιαστή στροφών, με αποτέλεσμα να ανεβαίνει το κόστος και να αυξάνονται οι απώλειες. Τέλος, στην ac σύνδεση, λόγω της χρήσης αυτόματου ρυθμιστή τάσης (AVR) και ηλεκτρονικού ελεγκτή φορτίου (ELC) πρέπει να υπερδιαστασιολογηθεί κατά 60% με αποτέλεσμα να έχει πιθανότατα χαμηλή απόδοση σε συνθήκες μερικού φορτίου.

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Μπορεί και αυτή να είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική, όπως επίσης μπορεί να αγοραστεί έτοιμη, αλλά και να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί σε τοπικό μηχανουργείο με μικρότερο κόστος και αρκετά καλή απόδοση ακολουθώντας συγκεκριμένα βήματα (όπως παραδείγματος χάριν περιγράφεται στο [43]). Μπορεί να κατασκευαστεί και με περισσότερους από 4 πόλους, άρα να έχει μικρή ταχύτητα περιστροφής, και επομένως επιτρέπει την απευθείας σύζευξή της με τον υδροστρόβιλο, αποφεύγοντας έτσι τα πιο δαπανηρά συστήματα πολλαπλασιαστών στροφών. Ακόμα έχει φυσικό αερισμό (και επομένως δε χρειάζεται εξωτερική ψύξη), ενώ παράλληλα λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος της μπορεί να κατασκευαστεί σε μικρότερο μέγεθος από τις άλλες γεννήτριες για την ίδια ονομαστική ισχύ.

Είναι πιο δύσκολη η χρήση της σε ένα ac σύστημα όπου αυτή είναι η μοναδική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς ενώ υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της συχνότητας λειτουργίας της μέσω του ELC, η ρύθμιση της τάσης εξόδου της είναι πιο δύσκολη έναντι αυτής των άλλων γεννητριών.

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η γεννήτρια επαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία τριφασική ή μία μονοφασική εγκατάσταση, καθώς η ίδια τριφασική γεννήτρια μπορεί με κατάλληλη σύνδεση πυκνωτών C-2C να δώσει μονοφασική έξοδο. Παράλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας επαγωγής ως γεννήτρια, όπως στην περίπτωση της PAT. Είναι πιο απλή, φθηνή, αξιόπιστη, αντέχει μεγαλύτερες επιταχύνσεις από τη σύγχρονη και είναι ευκολότερο να βρεθεί κάποια με μικρότερες ταχύτητες περιστροφής.

Ωστόσο, είναι η απαραίτητη η χορήγηση αέργου ισχύος από το δίκτυο και στα αυτόνομα συστήματα απαιτείται η σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών όχι μόνο για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος αλλά και για την χορήγηση του απαιτούμενου επαγωγικού ρεύματος μαγνήτισης κατά την εκκίνηση. Οι πυκνωτές αυτοί θα παρέχουν την άεργο ισχύ που απαιτείται από τη γεννήτρια αλλά και τα τροφοδοτούμενα φορτία, εκτός αν χρησιμοποιηθούν AC/DC/AC μετατροπείς με αμφίδρομη ροή ενεργού και αέργου ισχύος. Μεγάλα επαγωγικά φορτία δύσκολα τροφοδοτούνται σε ένα αυτόνομο σύστημα με μοναδική πηγή τη γεννήτρια επαγωγής (πρέπει να έχουν συντελεστή ισχύος πάνω από 0.8, άρα περιορίζεται στις κατηγορίες φορτίων (i) και (ii)). Χρησιμοποιείται κυρίως όταν η ποιότητα ισχύος επιτρέπεται να μην είναι πολύ καλή και μπορεί να τροφοδοτήσει φορτία κινητήρων ονομαστικής ισχύος μικρότερης του 15% της δικής της ονομαστικής ισχύος (όταν λαμβάνονται μέτρα για την ομαλή εκκίνησή τους). Τέλος, έχει χαμηλή απόδοση σε συνθήκες μερικού φορτίου.

Χρήση κινητήρα επαγωγής ως γεννήτρια

Όταν ο κινητήρας επαγωγής χρησιμοποιείται ως γεννήτρια έχει μικρότερη απόδοση κατά 2% περίπου και δίνει στην έξοδό του 10% μικρότερη τάση, αφήνοντας τις εξής δύο επιλογές: λειτουργία με μικρότερη τάση εξόδου ή λειτουργία στην ονομαστική τάση με αυξημένη συχνότητα όμως. Η δεύτερη επιλογή δεν είναι δυνατή όταν τροφοδοτούνται αντλίες ή κινητήρες, γιατί θα αυξηθεί πολύ η ροπή τους και θα υπερθερμανθούν. Ωστόσο, πολλές φορές βρίσκει κανείς ευκολότερα έναν κινητήρα επαγωγής για τα μεγέθη ισχύος ενός pico/micro-υδροηλεκτρικού συστήματος.

Μία συνοπτική σύγκριση μεταξύ των βασικότερων στοιχείων των σύγχρονων με τις ασύγχρονες γεννήτριες γίνεται στο [8] και φαίνεται στον πίνακα 6.3.

Χαρακτηριστικά	Σύγχρονη	Ασύγχρονη
Συντελεστής ισχύος. Αεργος ισχύς	Καθορίζεται από την ρύθμιση διέγερσης	Αεργη ισχύς από το δίκτυο είναι απαραίτητη. Ο συντελεστής ισχύος ενός δικτύου μειώνεται λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς. Συνήθως απαιτείται διόρθωση του συντελεστού ισχύος με συστοιχία πυκνωτών
Βαθμός απόδοσης	Καμμία διαφορά	Καμμία διαφορά
Ρύθμιση τάσεως	Ρυθμιζόμενη μέσω ρύθμισης της διέγερσης	Μη ρυθμιζόμενη. Καθορίζεται από το διασυνδεδεμένο δίκτυο
Παραλληλισμός με το δίκτυο	Απαιτείται εξοπλισμός παραλληλισμού τάσεως, συχνότητας και διαδοχής φάσεως με προς σύνδεση δίκτυο	Δεν απαιτείται διαδικασία παραλληλισμού (μόνο σωστή διαδοχή των φάσεων για την φορά της ταχύτητας περιστροφής)
Μεταβατικά φαινόμενα κατά την σύνδεση με το δίκτυο	Δεν αναπτύσσονται	Κατά την εν κενώ σύνδεση με το δίκτυο με την σχεδόν σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής αναπτύσσονται έντονες διακυμάνσεις του ρεύματος. Συχνά απαιτείται έλεγχος ευστάθειας του δικτύου
Κατασκευή	Πολύπλοκη κατασκευή κυρίως λόγω της ανάγκης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων των στρεφόμενων πόλων (δακτυλίδια, ψήκτρες, διεγέρτρια)	Απλή και συμπαγής κατασκευή στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου ρότορα τύπου κλωβού
Διαστάσεις και βάρος	Μεγαλύτερες διαστάσεις και βάρος λόγω του εξοπλισμού διέγερσης	Συμπαγής κατασκευή μικρότερου βάρους από την σύγχρονη γεννήτρια
Επέμβαση ρυθμιστού υδροστροβίλου	Είναι απαραίτητη στην περίπτωση τροφοδοσίας ανεξάρτητου (αυτόνομου) δικτύου	Δεν απαιτείται καθώς η ταχύτητα περιστροφής, η συχνότητα και η τάση εξαρτώνται από το διασυνδεδεμένο δίκτυο
Συντήρηση	Αυξημένη λόγω του συστήματος διέγερσης, των ψυκτρών και της διάταξης παραλληλισμού	Εύκολη
Κόστος	Αυξημένο σε σύγκριση με τις ασύγχρονες	Μικρότερο

Πίνακας 6.3 Σύγκριση σύγχρονων και ασύγχρονων γεννητριών ^[8]

6.4 Επιλογή συστήματος μετάδοσης κίνησης

Είναι δυνατή η άμεση ζεύξη υδροστροβίλου και γεννήτριας, όταν έχουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής και στην περίπτωση αυτή, αν υπάρχει σύνδεση στον άξονα, μπορεί να είναι είτε εύκαμπτη, είτε άκαμπτη.

Σε άλλη περίπτωση χρησιμοποιείται πολλαπλασιαστής ταχύτητας, ο οποίος μπορεί να είναι είτε κάποιος μάντας είτε ένα κιβώτιο ταχυτήτων. Η πρώτη είναι η πιο απλή και φθηνή λύση, αν και επιβαρύνει τον υδροστροβίλο και τη γεννήτρια με πλευρικό μηχανικό φορτίο, που πρέπει από πριν να έχει εξασφαλιστεί ότι μπορούν να αντέξουν αυτοί, τα ρουλεμάν και τα έδρανα που χρησιμοποιούνται. Ο μέγιστος επιτρεπτός λόγος επιτάχυνσης είναι 3:1. Σπάνια προτιμάται το κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς απαιτεί μεγαλύτερη συντήρηση και έχει υψηλότερα επίπεδα θορύβου.

6.5 Επιλογή τύπου σύνδεσης για αυτόνομο σύστημα

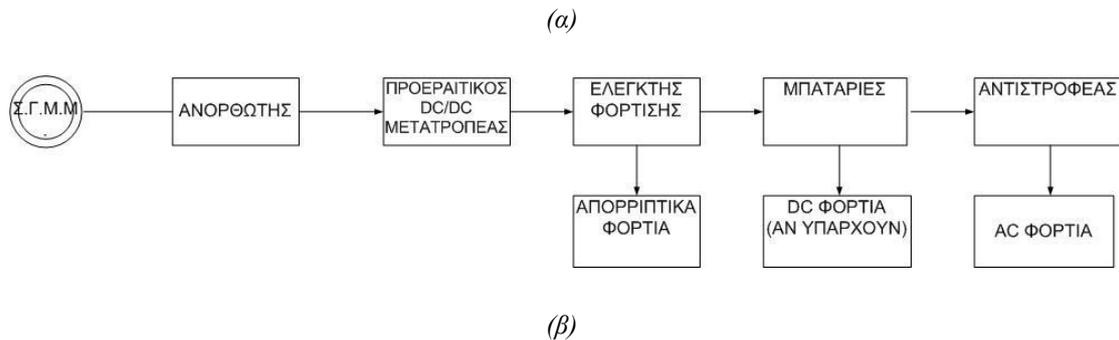
Περίπτωση 1^η: DC σύνδεση – Αυτόνομο σύστημα βασισμένο σε μπαταρίες

Χρησιμοποιείται κυρίως όταν η παραγόμενη κάθε στιγμή ισχύς δεν αρκεί για να καλύψει την αντίστοιχη ζήτηση και για μικρά δίκτυα, περίπου στο μέγεθος μιας οικίας ή μιας μικρής κλινικής. Στο σύστημα αυτό, κάθε στιγμή παράγεται ισχύς που αντιστοιχεί στη μέση ζήτηση και η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες. Οι μπαταρίες μπορούν εν συνεχεία μέσω ενός μεγαλύτερου αντιστροφέα να τροφοδοτήσουν φορτία ισχύος μεγαλύτερης της παραγόμενης, δίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα για σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού συστήματος με μικρότερη απαιτούμενη παροχή νερού, μικρότερη εγκατάσταση και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Για τον λόγο αυτό, ένα τέτοιο σύστημα είναι και πιο φθηνό, καθώς και πιο απλό στην εγκατάσταση και τη λειτουργία του. Επιπλέον, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται (συνήθως μολύβδου-οξέως μεγάλου κύκλου εκφόρτισης ή νικελίου-καδμίου) έχουν 1 με 2 μέρες αυτονομίας (μικρότερος απαιτούμενος χρόνος αυτονομίας σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας), οπότε είναι η δυνατή η διακοπή της λειτουργίας του στροβίλου για συντήρηση χωρίς διακοπή της τροφοδοσίας των φορτίων.

Στην περίπτωση της dc σύνδεσης και όσο αφορά το ηλεκτρολογικό κομμάτι έχουμε να επιλέξουμε το επίπεδο dc τάσης 12, 24 ή 48V καθώς και τη γεννήτρια που θα χρησιμοποιήσουμε (αν θα είναι γεννήτρια συνεχούς ρεύματος – οπότε και δεν χρειαζόμαστε ανορθωτή –, σύγχρονη γεννήτρια, σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών ή γεννήτρια επαγωγής). Επιπλέον, θα χρειαστούμε έναν ανορθωτή, έναν ελεγκτή φόρτισης μπαταριών, έναν αντιστροφέα, απορριπτικά φορτία καθώς και μία προστασία από κάποια υπερτάχυνση του υδροστροβίλου. Σε περίπτωση λειτουργίας του υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές θα πρέπει μετά τον ανορθωτή να χρησιμοποιηθεί ένας DC/DC μετατροπέας, ο οποίος θα κάνει τον έλεγχο συχνότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μέγεθος αυτών των συστημάτων, η χρήση σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης κρίνεται ασύμφορη και επομένως οι πιο πιθανές συνδεσμολογίες είναι οι παρακάτω:





Σχήμα 6.2 Τυπικές διατάξεις σύνδεσης ενός υδροηλεκτρικού συστήματος σε ένα dc αυτόνομο σύστημα, όταν χρησιμοποιεί (α) γεννήτρια επαγωγής και (β) σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Στην περίπτωση της γεννήτριας επαγωγής, για εκκίνησή της μετά από κάποια διακοπή της λειτουργίας του υδροηλεκτρικού, οι πυκνωτές μπορούν να φορτιστούν μέσω των μπαταριών κι ενός dc/dc μετατροπέα.

Περίπτωση 2^η: AC σύνδεση , όπου το Υ/Η είναι η κύρια πηγή

Επιλέγουμε την ac σύνδεση σε αυτόνομο δίκτυο με μοναδική πηγή το Υ/Η για μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος (> 2 με 3kW) και με την προϋπόθεση ότι η στιγμιαία παραγόμενη ισχύς μπορεί να καλύψει την αντίστοιχη ζήτηση. Αν κάτι τέτοιο δε συμβαίνει πάντα, μπορεί το σύστημα να ενισχυθεί με την ύπαρξη μπαταριών, που θα αποθηκεύουν την περισσευούμενη ενέργεια και θα την παράσχουν στο δίκτυο της ώρες αιχμής.

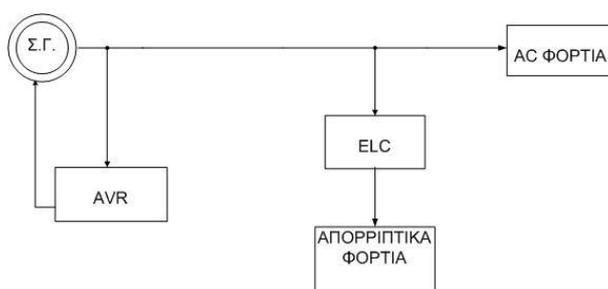
Σε αυτή την περίπτωση σύνδεσης, οι γεννήτριες που μπορούν πιο εύκολα να χρησιμοποιηθούν είναι η γεννήτρια επαγωγής και η σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης και ο επιπλέον εξοπλισμός που χρειάζεται είναι ένας ελεγκτής φορτίου, ρυθμιστής τάσης (ELC και AVR για τη σύγχρονη, IGC για τη γεννήτρια επαγωγής) και τα απορριπτικά φορτία, συν κάποιοι διακόπτες προστασίας.

Οι πιο απλές πιθανές συνδεσμολογίες φαίνονται στα σχήματα 6.2 και 6.3. (Στις εικόνες των διατάξεων σύνδεσης δεν απεικονίζονται οι διακόπτες και ο εξοπλισμός προστασίας. Αναφέρονται όμως στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου 4).



Σχήμα 6.2 Τυπική διάταξη σύνδεσης υδροηλεκτρικού με γεννήτρια επαγωγής σε ένα αυτόνομο ac σύστημα χωρίς μπαταρίες

Η παραπάνω συνδεσμολογία είναι για λειτουργία υδροστροβίλου υπό σταθερές στροφές. Αν επιθυμείται λειτουργία μεταβλητών στροφών, πρέπει να χρησιμοποιηθεί AC/DC/AC μετατροπέας. Με τη σύνδεση του σχήματος 6.2, τα επαγωγικά φορτία που μπορούν να τροφοδοτηθούν δεν είναι μεγάλα και πρέπει να έχουν συντελεστή ισχύος μεγαλύτερο από 0.8. Επίσης, ο IGC που χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτή την περίπτωση λειτουργεί ελέγχοντας τον λόγο του χρόνου αγωγής προς τον χρόνο αποκοπής του χρησιμοποιούμενου IGBT (mark-space ratio controller).



Σχήμα 6.3 Τυπική διάταξη σύνδεσης υδροηλεκτρικού με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης σε ένα αυτόνομο ac σύστημα χωρίς μπαταρίες

Όπως και πριν, η σύνδεση του σχήματος 6.3 αφορά διατήρηση σταθερών στροφών υδροστροβίλου. Ο AVR συνδέεται με το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας για έλεγχο της τάσης εξόδου και μπορεί να έχει ενσωματωμένο τον ανορθωτή (το ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας είναι συνεχές). Επίσης, πρέπει να διαθέτει πλήρη προστασία έναντι υπο/υπέρτασης, υπο/υπερφόρτισης, αύξησης της θερμοκρασίας και έναντι παρατεταμένης λειτουργίας σε πολύ χαμηλές στροφές. Ο πιο φθηνός ELC που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι ελεγκτής φάσης-γωνίας (phase-angle controller) και γι' αυτό, για να μπορεί να ανταποκριθεί σε κάθε περίπτωση και για κάθε συντελεστή ισχύος η γεννήτρια πρέπει να έχει υπερδιαστασιολογηθεί ως εξής:

$$\text{Γεννήτρια } kVA = \left(\frac{\text{μέγιστα } kW \text{ φορτίου}}{\Sigma I} \right) * 1.6$$

Τα απορριπτικά φορτία συστήνεται, σύμφωνα με το [3] να μπορούν να δεχτούν ισχύ κατά 5-15% μεγαλύτερη από την συνήθως αναμενόμενη ισχύ εξόδου της γεννήτριας.

Περίπτωση 3^η: AC σύνδεση σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο

Η ac σύνδεση σε μικροδίκτυο επιλέγεται όταν ήδη υπάρχουν κάποιες άλλες πηγές παραγωγής ή όταν η δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το υδροηλεκτρικό παρουσιάζει έντονες

εποχιακές διακυμάνσεις, οπότε η παράλληλη λειτουργία του με ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά ή και άλλες πηγές αυξάνει την αξιοπιστία του δικτύου, εξασφαλίζει τη σωστή τροφοδοσία των φορτίων και παρέχει τη δυνατότητα ευκολότερης μελλοντικής επέκτασης του δικτύου. Οι γεννήτριες που μπορούν ευκολότερα να χρησιμοποιηθούν είναι η σύγχρονη γεννήτρια, η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και η γεννήτρια επαγωγής. Ο έλεγχός τους για τη σύνδεση αυτή δεν είναι τόσο αυστηρός και δύσκολος όσο στον δεύτερο τύπο σύνδεσης. Όλες οι πηγές, αφού η έξοδος τους ανορθωθεί, μπορούν να συνδεθούν στον κεντρικό πίνακα ελέγχου, που περιλαμβάνει ελεγκτές, ίσως dc/dc μετατροπείς και συνδέεται με τα απορριπτικά φορτία και τις μπαταρίες, και μέσω του κεντρικού αντιστροφέα να τροφοδοτήσουν τις καταναλώσεις. Μία άλλη εκδοχή είναι η έξοδος του υδροηλεκτρικού να συνδέεται με δικό του ανορθωτή και αντιστροφέα και μετά να συνδέεται στον κεντρικό ac ζυγό του μικροδικτύου και στον κεντρικό αντιστροφέα του, που «διαχειρίζεται» την παραγόμενη ισχύ και διοχετεύει κάποια από αυτή στα απορριπτικά φορτία και στις μπαταρίες. Όταν χρησιμοποιείται γεννήτρια επαγωγής πρέπει να εξοπλίζεται με συστοιχία πυκνωτών στην έξοδό της για να τροφοδοτείται με την απαιτούμενη άεργο ισχύ κατά την εκκίνηση και να μην επιβαρύνεται το μικροδίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΝΙΚΗΣ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

7.1 Κλινική σε αγροτική περιοχή του αναπτυσσόμενου κόσμου

Η παροχή υπηρεσιών υγείας σε αγροτικές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου αποτελεί ζήτημα υψίστης σημασίας για τις κυβερνήσεις των χωρών αυτών και ζήτημα ηθικό για ολόκληρη την ανθρωπότητα. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για τη σωστή στήριξη των υπηρεσιών υγείας σε πολλές χώρες είναι ανεπαρκής και η διανομή ενέργειας με συμβατικούς τρόπους έχει αποτύχει στο να ικανοποιήσει αξιόπιστα τις πιο βασικές ανάγκες μίας μικρής κλινικής. Η παροχή αερίου και κηροζίνης είναι ακριβή και αναξιόπιστη.

Τα τελευταία χρόνια ένας αριθμός διεθνών και εθνικών σωματείων, μη κυβερνητικών οργανώσεων και ιδιωτικών εταιρειών αναπτύσσουν συστήματα παροχής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που μπορούν να καλύπτουν τις ανάγκες μίας μικρής κλινικής. Οι ανανεώσιμες πηγές επιτρέπουν την αξιόπιστη τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση ψυγείων για τη διατήρηση των εμβολίων, για τον φωτισμό, για τις συσκευές επικοινωνίας, τις ιατρικές συσκευές, για την παροχή καθαρού νερού και για την κάλυψη αναγκών υγιεινής. Επίσης, συμβάλλουν στη βελτίωση της οικονομικής διαχείρισης και την ανάπτυξη της περιοχής και τη δημιουργία καλύτερων συνθηκών εκπαίδευσης. Στις απομονωμένες αγροτικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών δύσκολα παραμένει καλά εκπαιδευμένο ιατρικό προσωπικό, αν δεν εξασφαλίζει κάποιες στοιχειώδεις ανέσεις.^{[44]. [45]}

7.1.1 Τα φορτία μίας τυπικής εγκατάστασης μικρής κλινικής

Μία μικρή κλινική συνήθως έχει μια ή δύο πλήρως απασχολούμενες νοσοκόμες, αλλά όχι μόνιμο γιατρό. Διαθέτει ένα με δύο κρεβάτια για τους πιο βαριά αρρώστους ή τραυματισμένους, ψυγείο για τη συντήρηση των εμβολίων, βασικό εργαστηριακό εξοπλισμό, ενώ μπορεί επίσης να διαθέτει φωτισμό, συσκευές επικοινωνίας και τηλεόραση για το προσωπικό.

Μερικά από τα συνήθη φορτία που συναντώνται σε μία μικρή κλινική είναι τα εξής:

- **Ψυγείο**

Τα προγράμματα ανοσοποίησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ψύξη και τη διατήρηση των εμβολίων για την πρόληψη ή την εξάλειψη επικίνδυνων ασθενειών συμπεριλαμβανομένων της πολιομυελίτιδας, της διφθερίτιδας, του τετάνου, του κοκίτη, της φυματίωσης, της ιλαράς, του κίτρινου πυρετού και της ηπατίτιδας Β. Στα κέντρα υγείας των αγροτικών περιοχών τα εμβόλια αποθηκεύονται για διάστημα μέχρι και ένα μήνα και χρειάζονται σταθερό εύρος θερμοκρασιών από 0°C έως 8°C. Μόλις τα εμβόλια εκτεθούν σε θερμοκρασίες έξω από αυτό το εύρος χάνουν για πάντα τη δραστηριότητά τους. Υπάρχει διεθνής οργανισμός που φροντίζει για τη σωστή διατήρηση των εμβολίων από το σημείο παραγωγής μέχρι το τελικό σημείο χρήσης τους. Πολλές φορές ο τρόπος χρήσης τους είναι μακριά και από την κλινική, με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαία η παραγωγή πάγου από το ψυγείο για τη διατήρηση των εμβολίων κατά τη μεταφορά τους. Μέχρι πρότινος χρησιμοποιούνταν η ψυκτική μέθοδος με απορρόφηση που χρειαζόταν προπάνιο ή κηροζίνη. Με τον τρόπο αυτό όμως, οποιαδήποτε διακοπή στην παροχή καυσίμου κατέληγε σε καταστροφή των εμβολίων. Επίσης, στα ψυγεία που χρησιμοποιούν κηροζίνη, είναι απαραίτητη η χειροκίνητη ρύθμιση της θερμοκρασίας, καθώς το ψυγείο από μόνο του δε μπορεί να ελέγξει τη θερμοκρασία του και να τη διατηρήσει εντός του απαιτούμενου εύρους. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με χρήση ψύξης με συμπύεση, η οποία όμως απαιτεί την ύπαρξη ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοια αποδοτικά ψυγεία μπορούν να τροφοδοτηθούν και από μπαταρίες με τάση εξόδου 12 ή 24V. ^[44], ^[45]

- **Φωτισμός**

Η ποιότητα του φωτός που προσφέρει η ηλεκτρική ενέργεια δε μπορεί να συγκριθεί με αυτή του αερίου ή της κηροζίνης. Ο φωτισμός μέσω κηροζίνης είναι πιο διαδεδομένος σε μη ηλεκτροδοτημένες περιοχές, ενώ είναι γνωστοί οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την ασφάλεια, αλλά και η κακή ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Η συμβολή του ηλεκτρικού φωτός είναι μεγάλη κατά τη διάρκεια χειρουργικών επεμβάσεων, επιτρέπει τη χρήση της κλινικής και για άλλες δραστηριότητες ανοιχτές στην κοινότητα, ενώ ο εξωτερικός φωτισμός καθιστά την κλινική πιο εύκολα προσβάσιμη τη νύχτα. ^[44] Προτιμάται η χρήση λαμπτήρων φθορισμού, λόγω της καλύτερης απόδοσής τους και της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής.

- **Συσκευή επικοινωνίας**

Οι ραδιοτηλεφωνικές επικοινωνίες βελτιώνουν σημαντικά τις υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης σε αγροτικές κλινικές. Μία επείγουσα ιατρική περίθαλψη ή ακόμα καμιά φορά και η διάγνωση κάποιας ασθένειας διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό από ένα αξιόπιστο σύστημα επικοινωνίας με άλλες κλινικές ή εγκαταστάσεις της περιοχής. Συχνά οι γιατροί και το νοσηλευτικό προσωπικό πρέπει να καλύπτουν πολλές κοινότητες σε μία περιοχή κι έτσι προγραμματίζουν ποιες ημέρες θα επισκέπτονται κάθε μία από αυτές. Οι υπηρεσίες επικοινωνίας είναι επίσης σημαντικές και για την τροφοδότηση των κλινικών με προμήθειες.

- **Ιατρικός εργαστηριακός εξοπλισμός**

Συσκευές όπως είναι το μικροσκόπιο, ο φυγοκεντρητής, ο ψεκαστήρας και ο συμπτυκνωτής O₂ είναι απαραίτητες για την όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη λειτουργία της κλινικής.

- **Παροχή νερού**

Το νερό από τις τοπικές λίμνες και τα ποτάμια είναι πιο επιρρεπές στις μολύνσεις. Αντίθετα το νερό από πηγάδια μεγάλου βάθους είναι πολύ καλύτερης ποιότητας και με την κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της κλινικής. Για τον σκοπό αυτό μία κλινική θα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με μία αντλία, οι απαιτήσεις ισχύος της οποίας αυξάνονται όσο μεγαλώνει το βάθος και ο όγκος άντλησης.^[44] Παρά τη χρήση της αντλίας όμως σημαντική είναι η δυνατότητα καθαρισμού του νερού έναντι μολύνσεων χημικών, μικροβιολογικών ή παρασιτικών. Οι συνήθεις τρόποι απολύμανσης του νερού με χλώριο και ιώδιο δίνουν στο νερό μία πολύ άσχημη γεύση και απωθητική μυρωδιά. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι καθαρισμού του νερού, που μπορούν να παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες καθαρού νερού και είναι αποδοτικές για μεγαλύτερο εύρος μολύνσεών του. Αυτές οι διαδικασίες απαιτούν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση όζοντος, αντίστροφης όσμωσης, φίλτρων άνθρακα ή να είναι φωτοχημικές (με UV ακτινοβολία).^[45]

- **Κλίβανος**

Η διαδικασία της αποστείρωσης απαιτεί αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, περίπου 120°C. Παρόλο που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ικανές να τροφοδοτήσουν με ισχύ αυτή τη συσκευή, η κατανάλωση είναι αρκετά υψηλή. Έτσι, συνήθως πιο κατάλληλη κρίνεται η χρήση θερμικής ενέργειας απ' ότι ηλεκτρικής. Θερμοκρασίες αυτής της τάξης μπορούν να επιτευχθούν από ηλιακά θερμικά συστήματα συλλογής.

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα βασικότερα φορτία της κλινικής και υπολογίζεται η ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε kWh.

Συσκευές	Ισχύς (W)	Ώρες λειτουργίας	Ενέργεια (Wh)
Ψυγείο εμβολίων	60	5	300
Λάμπες	100	6	600
VHF (stand by)	2	12	24
VHF (On)	30	1	30
Μικροσκόπιο	15	1	15
Φυγοκεντρητής	150	0,3	45
Ψεκαστήρας	40	1	40
Συμπυκνωτής O ₂	300	1	300
Ανεμιστήρας	40	4	160
Αντλία νερού	100	6	600
Κλίβανος	1500	1	1500
Άθροισμα:			3614

Πίνακας 7.1 Πίνακας υπολογισμού της ημερήσιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια των φορτίων της κλινικής

7.2 Δυνατοί τρόποι ηλεκτροδότησης μικρής κλινικής

- **Φωτοβολταϊκά**

Ένας δυνατός τρόπος ηλεκτροδότησης από ανανεώσιμες πηγές μίας μικρής κλινικής είναι αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών. Τα φωτοβολταϊκά έχουν καθόλου ή πολύ λίγα κινούμενα μέρη κι επομένως χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση, η οποία συνίσταται στο ξεσκόνισμα και καθάρισμα του πίνακα φωτοβολταϊκών συστοιχιών και στον έλεγχο των ηλεκτρικών συνδέσεων. Επίσης, είναι αξιόπιστες κατασκευές, με μεγάλη διάρκεια ζωής (20-40 χρόνια) και μεγάλη διάρκεια εγγύησης (10-20 χρόνια). Μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν στο απαραίτητο μέγεθος ώστε να τροφοδοτούν το απαιτούμενο φορτίο, και να λειτουργήσουν είτε μόνα τους, είτε σε συνδυασμό με κάποια άλλη πηγή. Παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ή και χωρίς τη συνδρομή μπαταριών. Βασικό αρνητικό τους στοιχείο είναι το υψηλό αρχικό κόστος, αν και για μικρές εφαρμογές το κόστος αυτό δεν είναι απαγορευτικό, και το μεγάλο μέγεθος της αποθηκευτικής

διάταξης που χρειάζεται αν χρησιμοποιηθούν μόνο τους. Η συστοιχία μπαταριών θα είναι μεγάλη, βαριά και θα χρειάζεται περιοδική συντήρηση, ενώ η χρήση ακατάλληλου νερού για το γέμισμα των μπαταριών (στο είδος μπαταριών που αυτό χρειάζεται) μπορεί να τις καταστρέψει. Σε πολλές περιοχές με τροπικό κλίμα όπου υπάρχουν μικρές κλινικές, όπως στην Ασία και τη νότια Αμερική, σημειώνονται έντονες βροχοπτώσεις, αλλά η ηλιοφάνεια είναι χαμηλή ως μέτρια. ^{[45],[46]}

- **Ανεμογεννήτριες**

Οι ανεμογεννήτριες, αν και απαιτούν περισσότερη συντήρηση από τα φωτοβολταϊκά, με μέσους ανέμους μεγαλύτερους από 4,5m/sec παράγουν περισσότερη ενέργεια από φωτοβολταϊκά ίδιους κόστους. Ωστόσο, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολλές, γρήγορες και μεγάλες μεταβολές, που καθιστούν δύσκολη την αξιόπιστη πρόβλεψη της απόδοσης και της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, αλλά και της τελικά παραγόμενης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, συνηθίζεται να συνδυάζονται με κάποια άλλη πηγή, όπως φωτοβολταϊκά, υδροηλεκτρικό ή με κάποια γεννήτρια, ώστε να διασφαλίζεται η ικανοποίηση των φορτίων ακόμα και σε περιόδους χαμηλών ανέμων. Τα έξοδα συντήρησης είναι κι αυτά μεταβλητά. Συνήθως, στις μικρές ανεμογεννήτριες αρκεί ένας περιοδικός έλεγχος, ενώ σημαντικό κόστος μπορεί να προκύψει μόνο στην περίπτωση κάποιας βλάβης. Τέλος, το κόστος αγοράς τους ακολουθεί οικονομίες κλίμακας, με τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες να είναι φθηνότερες ανά kW από τις μικρότερες. ^[45]

- **Ντηζελογεννήτριες**

Γεννήτριες που χρησιμοποιούν ντίζελ ή βενζίνη μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να παράσχουν ενέργεια ακριβώς τη στιγμή που ζητείται χωρίς καμία καθυστέρηση. Ωστόσο, παρά το μικρό κόστος αγοράς και εγκατάστασής τους, έχουν υψηλό κόστος συντήρησης · πρόβλημα που γίνεται εντονότερο με τη δύσκολη και ακριβή προμήθεια καυσίμων σε απομονωμένες και δυσπρόσιτες περιοχές. Επίσης, βασικό χαρακτηριστικό των γεννητριών αυτών είναι η μεγάλη πτώση της απόδοσής τους, και επομένως αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, όταν λειτουργούν υπό μερικό φορτίο. Αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, καθώς αυτές οι γεννήτριες όταν εγκαθίστανται σε απομονωμένα, αυτόνομα συστήματα διαστασιολογούνται έτσι ώστε να μπορούν καλύψουν το μέγιστο δυνατό φορτίο, με αποτέλεσμα να λειτουργούν συχνά με χαμηλό βαθμό απόδοσης. Οι ντηζελογεννήτριες είναι ο πιο κοινός τύπος και διατίθεται κυρίως σε μεγέθη από 2,5 kW έως 1MW. Συνήθως, ο χρόνος ζωής τους είναι περίπου 25000 ώρες λειτουργίας, ενώ το κόστος συντήρησης μπορεί να φθάσει και το 100 με 150% του αρχικού κόστους τους στη διάρκεια αυτή. Η συνήθης απόδοση μίας ντηζελογεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί υπό

πλήρες φορτίο είναι γύρω στις 2,5-3kWh/liter. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούν βενζίνη (gasoline generators) διατίθενται σε μικρότερα μεγέθη και είναι πιο φθηνές, αλλά όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους είναι χειρότερα από αυτά των νηζελογεννητριών. ^{[45],[46]}

- **Micro-υδροηλεκτρικό σύστημα**

Μέχρι πρόσφατα, τα περισσότερα micro-υδροηλεκτρικά συστήματα ήταν ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 2kW και είχαν τάση εξόδου ίση με αυτή ενός τυπικού δικτύου χαμηλής τάσης. Ωστόσο, δεν συνάδουν με την τροφοδότηση μόνο μίας μικρής κλινικής, καθώς για τα έργα αυτά απαιτούνται σωλήνες λίγο μεγαλύτερων διαμέτρων (για τον αγωγό πτώσεως) με αποτέλεσμα να είναι πιο ακριβοί και δύσκολοι στη μεταφορά και την εγκατάσταση, ενώ αν στο σύστημα δε συμπεριλαμβάνονται μπαταρίες θα πρέπει η υδρογεννήτρια να διαστασιολογηθεί για το μέγιστο φορτίο, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει το ίδιο πρόβλημα απόδοσης με τις προηγούμενες γεννήτριες.

Για την τροφοδότηση μία κλινικής, προτιμάται ένα ακόμα μικρότερο υδροηλεκτρικό σύστημα με ισχύ 200-500W που είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί σε συνδυασμό με συστοιχία μπαταριών. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ευκολότερο στην εγκατάσταση και τη συντήρηση από το μεγαλύτερο και μπορεί να συνδυαστεί εύκολα με οποιαδήποτε άλλη διαθέσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Χρειάζεται βέβαια κι αυτό μπαταρίες, που απαιτούν προσεκτική χρήση, και έναν αντιστροφέα, αλλά ο χρόνος αυτονομίας για τον οποίο διαστασιολογούνται οι μπαταρίες σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης κάποιων ωρών έως μίας μέρας, δηλαδή πολύ μικρότερος από αυτόν που χρειάζεται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Έτσι, οι συστοιχίες μπαταριών είναι σημαντικά μικρότερες και πιο φθηνές. ^[46]

Σύμφωνα με το [46] αν υποθεθεί ότι υπάρχει μία καλή τοποθεσία, ένα micro-υδροηλεκτρικό μπορεί να παράγει 15A στα 12V ή 360amp hours/μέρα, που αντιστοιχεί στην παραγωγή 15-20 60W πινάκων φωτοβολταϊκών συστοιχιών ανάλογα με την εποχή και την ηλιοφάνεια. Το micro-υδροηλεκτρικό σύστημα της εγκατάστασης αυτής μπορεί να τροφοδοτήσει 10 λαμπτήρες φθορισμού, ψυγείο για διατήρηση εμβολίων, τηλεόραση, ραδιόφωνο, αντλία και αποστειρωτή νερού με UV. Μία σύντομη κοστολόγηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού σε δολάρια Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής είναι: υδροστρόβιλος και γεννήτρια 1475\$US, 300W αντιστροφέας ημιτονοειδούς κύματος 470\$US, 230amp hours μπαταρίες (12V) 215\$US. Άρα, το συνολικό κόστος (χωρίς τους σωλήνες και την εσωτερική καλωδίωση) είναι 2160\$US. Αν για την τροφοδότηση του ίδιου συστήματος χρησιμοποιούνταν φωτοβολταϊκά, τότε το κόστος θα κατανεμόταν ως εξής: 20x60W φωτοβολταϊκά πάνελ 6700\$US, 1100amp hours μπαταρίες (24V) 2680\$US, ρυθμιστής και πίνακας ελέγχου 470\$US, αντιστροφέας 470\$US. Άρα, το συνολικό κόστος με χρήση φωτοβολταϊκών ανέρχεται στα 10320\$US.

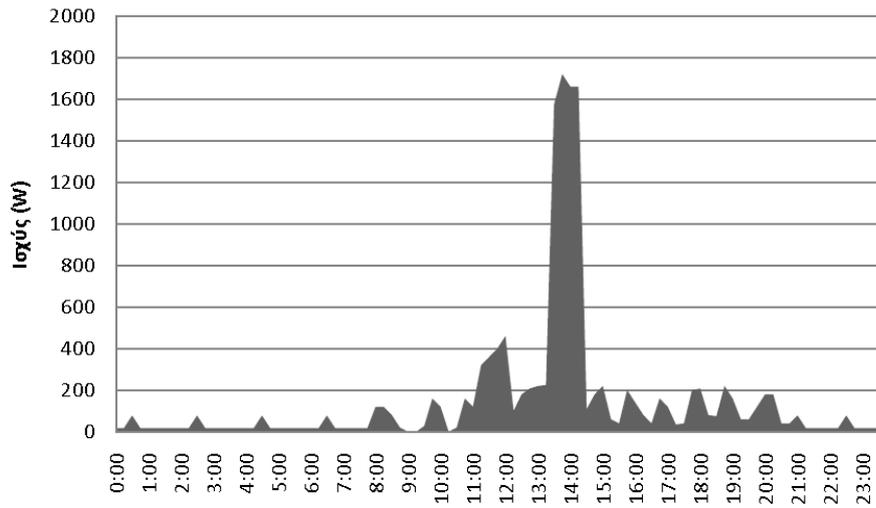
7.4 Μελέτη τροφοδότησης μικρής κλινικής

Στο σημείο αυτό μελετάται πώς μπορεί να τροφοδοτηθεί μία μικρή κλινική καθώς και κάποια βασικά φορτία του γύρω οικισμού με ένα pico-υδροηλεκτρικό σύστημα και κάποια φωτοβολταϊκά πάνελ.

Έστω ότι αυτή η αγροτική περιοχή διασχίζεται από ένα μικρό ποτάμι, το οποίο περνάει και κοντά από την κλινική και διαθέτει επαρκή υδραυλική πτώση και παροχή για να αποτελέσει τη βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση της κλινικής. Συγκεκριμένα, η διαθέσιμη υδραυλική πτώση (από την είσοδο του αγωγού πτώσης μέχρι την έξοδο του ακροφυσίου) είναι $H=11,25\text{m}$, ενώ η ροή του νερού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά από τον Οκτώβριο μέχρι τον Απρίλιο είναι $Q=5\text{l/sec}$, ενώ από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο η ροή μειώνεται στο μισό, δηλαδή $Q_{\theta}=2,5\text{l/sec}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υποδιπλασιασμό της δυνατής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος κατά τους θερινούς μήνες. Επίσης, το καθαρό ύψος υδατόπτωσης (όπως προκύπτει μετά την αφαίρεση των υδραυλικών απωλειών στον αγωγό πτώσεως) είναι $H_{\text{net}}=10,6\text{m}$. Το pico-υδροηλεκτρικό αποτελείται από έναν υδροστρόβιλο Turgo στον ίδιο άξονα με μία σύγχρονη γεννήτρια αξονικής ροής ονομαστικής ισχύος 350W . Η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του υδροηλεκτρικού κατά τους μήνες με παροχή Q είναι $P_e=330-350\text{W}$. Καθώς το υδροηλεκτρικό μπορεί να λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτό κατά το χρονικό διάστημα Οκτώβριος – Απρίλιος θα είναι $E_e=(7920-8400)\text{Wh}$, ενώ κατά τους θερινούς μήνες θα είναι $E_{e\theta}=(3960-4200)\text{Wh}$.

Τα βασικά φορτία της μικρής κλινικής που πρέπει να τροφοδοτηθούν έχουν παρατεθεί στον πίνακα 7.1 της ενότητας 7.1, ενώ η ημερήσια καμπύλη φορτίου ακολουθεί στο σχήμα 7.1.

Ημερήσια καμπύλη φορτίου



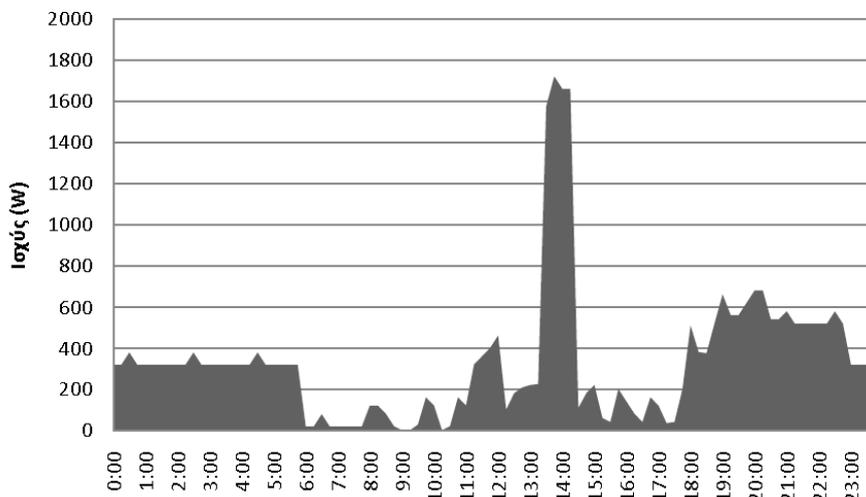
Σχήμα 7.1 Ημερήσια καμπύλη φορτίου κλινικής

Ωστόσο, εκτός από την κλινική υπάρχει ανάγκη για τροφοδότηση και κάποιων επιπλέον φορτίων φωτισμού στον γύρω οικισμό, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 7.2 και η τελικά προκύπτουσα καμπύλη φορτίου παρατίθεται στο σχήμα 7.2.

Συσκευές	Ισχύς (W)	Ώρες λειτουργίας	Ενέργεια (Wh)
Φώτα οικιών	200	5	1000
Φώτα δρόμου	300	12	3600
Άθροισμα:			4600

Πίνακας 7.2 Τα επιπλέον φορτία του οικισμού που προστίθενται στην ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση

Ημερήσια καμπύλη φορτίου



Σχήμα 7.2 Ημερήσια καμπύλη φορτίου κλινικής και γύρω οικισμού

Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς, η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τα φορτία της κλινικής (σε μία μέρα) είναι $E_k=3614\text{Wh}$ και η ενέργεια που απαιτείται για τα φορτία του οικισμού (σε μία μέρα) είναι $E_{οικ}=4600\text{Wh}$. Άρα, η ενέργεια που απαιτείται συνολικά (σε μία μέρα) είναι $E_k=8214\text{Wh}$, ενώ η μέγιστη συνολική ζητούμενη ισχύς είναι $P_{\max}=1722\text{W}$.

Για το υδροηλεκτρικό (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως) ισχύουν τα παρακάτω:

Ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του Υ/Η:

Οκτώβριος -Απρίλιος: $P_e=(330-350)\text{W}$

Μάϊος- Σεπτέμβριος: $P_{e\theta}=(165-175)\text{W}$

Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (σε μία μέρα):

Οκτώβριος -Απρίλιος: $E_e=(7920-8400)\text{Wh}$

Μάϊος- Σεπτέμβριος: $E_{e\theta}=(3960-4200)\text{Wh}$

Είναι φανερό ότι κατά το διάστημα Οκτώβριος-Απρίλιος η παραγόμενη από το Υ/Η ενέργεια αρκεί για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των συνολικών αναγκών κλινικής και οικισμού. Ωστόσο, κατά το διάστημα Μάϊος-Σεπτέμβριος, είναι απαραίτητη η ύπαρξη και χρήση κάποιας ακόμα πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία θα καλύπτει τα φορτία του οικισμού, δηλαδή θα παράγει τις απαιτούμενες 4600Wh . Τον ρόλο αυτό θα αναλάβουν τα φωτοβολταϊκά, τα οποία θα διαστασιοποιηθούν ώστε να μπορούν να δίνουν τις απαιτούμενες 4600Wh κατά τους θερινούς μήνες. Η κλινική με το μικροδίκτυο που την τροφοδοτεί θα βρίσκεται σε κάποια αναπτυσσόμενη χώρα, αλλά για τη διευκόλυνση της μελέτης θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχούν στην περιοχή της Ραφήνας. Η μελέτη έγινε με χρήση δεδομένων για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την ιστοσελίδα Photovoltaic Geographical Information System (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>) και τους διαδραστικούς της χάρτες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7.3, όπου παρουσιάζεται η μέση ημερήσια ακτινοβολία H_d και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά μέρα E_d για κάθε μήνα και για την περιοχή της Αρτέμιδας (όπου βρίσκεται και η κατασκήνωση «Μελέμι»). Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί για κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ κατά 20° , για ονομαστική ισχύ $1,1\text{kWp}$ των φωτοβολταϊκών και για συνολικές απώλειες γύρω στο $24,9\%$ (για απώλειες λόγω θερμοκρασίας γύρω στο $10,3\%$, για απώλειες λόγω του angular reflectance effect περίπου $2,7\%$ και απώλειες στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και στα καλώδια περίπου 14%).

Μήνας	H_d (kWh/m ²)	E_d (kWh)
Ιανουάριος	2,81	2,47
Φεβρουάριος	3,30	2,87
Μάρτιος	4,45	3,81
Απρίλιος	5,61	4,69
Μάιος	6,27	5,11
Ιούνιος	6,93	5,51
Ιούλιος	6,90	5,44
Αύγουστος	6,45	5,10
Σεπτέμβριος	5,66	4,59
Οκτώβριος	4,26	3,55
Νοέμβριος	2,89	2,47
Δεκέμβριος	2,46	2,15
Μέση ετήσια	4,84	3,98
Συνολική ετήσια	1770	1450

Πίνακας 7.3 Η μέση ημερήσια ακτινοβολία και η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια για κλίση 20° του συλλέκτη για κάθε μήνα ^[47]

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η μικρότερη παραγωγή κατά το διάστημα Μάιος – Σεπτέμβριος σημειώνεται κατά τον Σεπτέμβριο και ανέρχεται στις 4,50kWh, που σημαίνει ότι μπορεί οριακά να τροφοδοτήσει τα φορτία φωτισμού του οικισμού 4,6kWh. Έτσι, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν 5 σε σειρά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά Silcio SE220, ονομαστικής ισχύος 220W (5*220W=1,1kW), που έχουν τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{oc}=36,94V$ και τάση στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας $V_{MPP}=29,12V$. Ο αντιστροφέας που θα χρησιμοποιηθεί στην έξοδο των φωτοβολταϊκών θα πρέπει να έχει εύρος τάσης λειτουργίας που να εμπεριέχει τις τάσεις $5V_{MPP}=5\cdot 29,12V=145,6V$ και $5V_{oc}=5\cdot 36,94V= 184,7V$. Για τον λόγο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αντιστροφέας Sunny Boy 1200 με ονομαστική ισχύ 1,2kW, ελάχιστη τάση εισόδου 100-120V και τάση MPP 100-320V

Η παραγωγή ισχύος κάθε στιγμή δε συμπίπτει με τη ζητούμενη, ειδικά τη στιγμή που ζητείται η μέγιστη ισχύς λόγω του κλίβανου, με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη κάποιας αποθηκευτικής διάταξης που θα επιτρέπει την εξυπηρέτηση των φορτίων ανά πάσα στιγμή χωρίς την ανάγκη ύπαρξης μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Η επιλογή των μπαταριών και η διαστασιολόγηση του απαιτούμενου μεγέθους της χρησιμοποιούμενης συστοιχίας γίνεται με στόχο την επίτευξη δύο ημερών αυτονομίας. Άρα, η απαιτούμενη ωφέλιμη ενέργεια που πρέπει να μπορεί να αντληθεί από τις μπαταρίες είναι 16428Wh. Οι μπαταρίες θα είναι μολύβδου-οξέως ανοιχτού τύπου και βαθιάς εκφόρτισης με ένα αποδεκτό βάθος εκφόρτισης

γύρω στο 40%. Επομένως, οι μπαταρίες που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν χωρητικότητα $\frac{16428 \cdot 100}{60} = 27380 \text{Wh}$. Ο αντιστροφέας που θα χρησιμοποιηθεί στην έξοδο της συστοιχίας των μπαταριών θα είναι ο SMA SUNNY ISLAND 2224 με dc τάση εισόδου τα 24V. Επομένως, οι μπαταρίες που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν $\frac{27380}{24} = 1140,83 \text{Ah}$. Έτσι, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν 8 μπαταρίες Rolls 6 CS 21PS C10 (δηλ, με χρόνο εκφόρτισης 10 ώρες) με στοιχεία λειτουργίας 581Ah και 6V. Η σύνδεσή τους θα περιλαμβάνει δύο παράλληλους κλάδους των τεσσάρων μπαταριών και θα έχεις συνολική τάση 24V και 1162Ah.

Τέλος, για τη μεγαλύτερη αξιοπιστία του συστήματος κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη μιας βοηθητικής πηγής ενέργειας, η οποία θα μπορεί να τροφοδοτήσει όλα τα φορτία αλλά και να φορτίσει τις μπαταρίες μέσα σε ένα χρονικό διάστημα περίπου 48ωρών στην περίπτωση βλάβης ή διεξαγωγής εργασιών συντήρησης. Ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) που καίει βενζίνη ή ντήζελ πρέπει να υπάρχει. Η ονομαστική ισχύς του H/Z $P_{H/Z}$ δίνεται από τον τύπο (7.1):

$$P_{H/Z} = 1722 + P_b \quad (7.1)$$

όπου P_b : η ισχύς που απαιτείται για να φορτίσει το H/Z τις μπαταρίες εντός 48ωρών και δίνεται από τον τύπο (7.2):

$$P_b = \frac{\beta C_N V}{t} \quad (7.2)$$

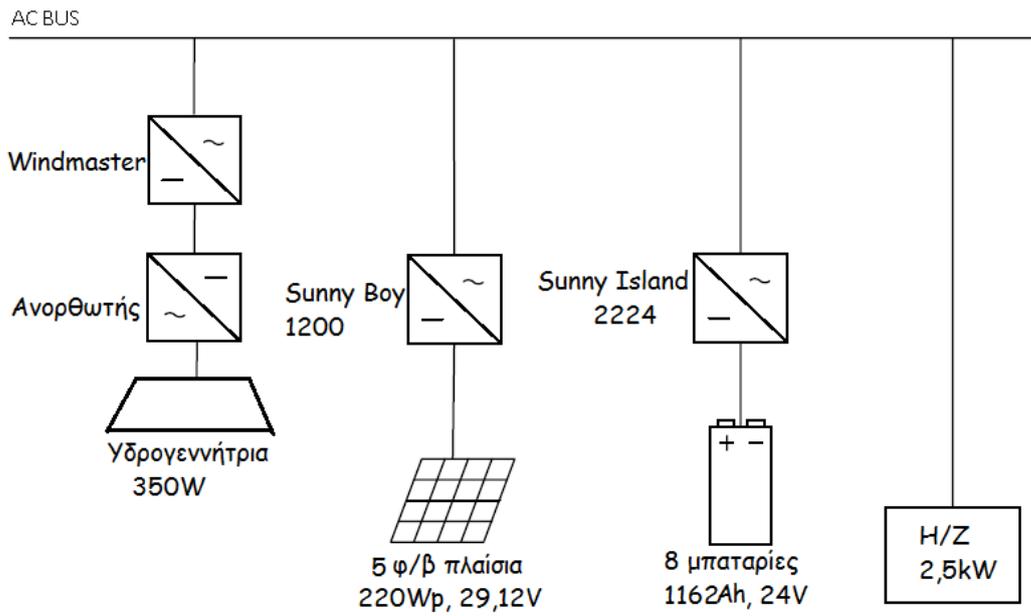
όπου β : βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών σε δεκαδική μορφή

C_N : η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών

και t : η χρονική διάρκεια (σε ώρες) για την πλήρη φόρτιση των συσσωρευτών

$$\text{Άρα, } P_b = \frac{0,6 \cdot 1162 \cdot 24}{48} = 348,6 \text{W και } P_{H/Z} = 1722 + 348,6 = 2070,6 \text{W} \rightarrow 2,5 \text{kW}$$

Τελικά, η κλινική και ο γύρω οικισμός θα εξυπηρετούνται μέσω ενός μικροδικτύου που θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 7.3:



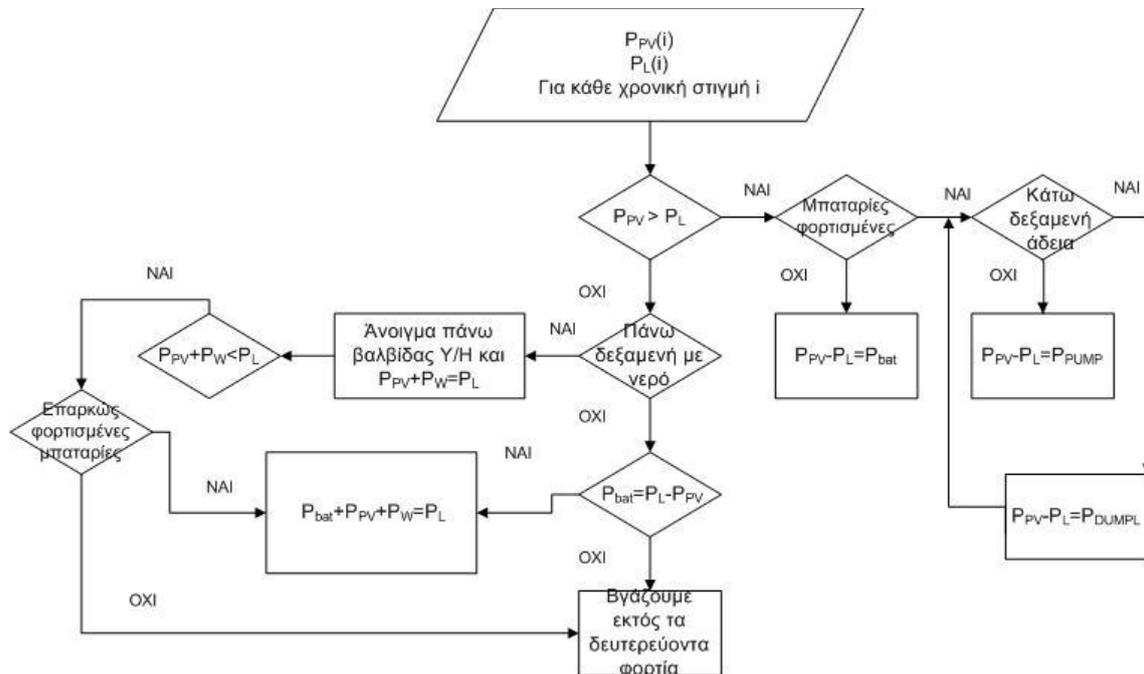
Σχήμα 7.3 Μικροδίκτυο για την τροφοδότηση της μικρής κλινικής και του γύρω οικισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

8.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ PICO - ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η πρακτική εφαρμογή στην παρούσα εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός pico-υδροηλεκτρικού συστήματος ονομαστικής ισχύος 350W, που αποτελείται από έναν υδροστρόβιλο Turgo άμεσα συζευγμένο με μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής. Η μελέτη έγινε με στόχο την πειραματική χρήση του υδροηλεκτρικού στα πλαίσια ενός μικροδικτύου το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί στην κατασκήνωση «Μελτέμι» στη Ραφήνα και να περιλαμβάνει εκτός από το υδροηλεκτρικό, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και να τροφοδοτεί κάποια φορτία φωτισμού της κατασκήνωσης, καθώς και κάποια απορριπτικά φορτία (τα οποία θα βοηθούν στον έλεγχο του συστήματος). Το υδροηλεκτρικό θα λειτουργεί κυρίως πειραματικά, καθώς εκεί δεν υπάρχει κάποιο ποτάμι και για τον λόγο αυτό θα δημιουργηθεί ένα πειραματικό κλειστό σύστημα όπου το νερό θα ανακυκλώνεται με τη βοήθεια αντλίας και δύο δεξαμενών (μία στην κορυφή του αγωγού πτώσης και μία κάτω από

τον υδροστρόβιλο). Το διάγραμμα ροής που περιγράφει τη λειτουργία αυτού του μικροδικτύου φαίνεται στο σχήμα 8.1



Σχήμα 8.1 Διάγραμμα ροής του μικροδικτύου στο οποίο μπορεί να συμπεριληφθεί το υδροηλεκτρικό

8.1.1 Διαστασιολόγηση αγωγού πτώσης

Για τη διαστασιολόγηση του αγωγού πτώσης ακολουθήθηκε η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [3] και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα κατά την έναρξη της διαδικασίας ήταν:

- το υλικό του σωλήνα: πολυαιθυλένιο (PE), λόγω του μικρού κόστους και της λείας εσωτερικής επιφάνειάς του
- το ύψος υδατόπτωσης: $H=11,25\text{m}$
- η παροχή νερού: $Q=51/\text{sec}= 18\text{m}^3/\text{sec}$ και
- το μήκος του αγωγού: $L=38,5\text{m}$

Για την επαναληπτική διαδικασία της διαστασιολόγησης του αγωγού χρησιμοποιούνται δείγματα και διαστάσεις εμπορικών σωλήνων PE άδρευσης από την ιστοσελίδα της εταιρείας Karina. Έτσι, επιλέγεται αρχικά ένα σωλήνας με εξωτερική διάμετρο $D=90\text{mm}$, πάχος τοιχώματος $e=5,4\text{mm}$ και πίεση κανονικής λειτουργίας 6bar . Επομένως, η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι $d=79,2\text{mm}$. Η διαδικασία διαστασιολόγησής του ξεκινάει με προσδιορισμό του συντελεστή τριβής f του σωλήνα μέσω του διαγράμματος Moody, όταν

θεωρείται συντελεστής τραχύτητας του σωλήνα PE ίσος με $k=0,001$. Τότε, $(k/d)=0,000126$ και $(1.2Q/d)=0,075758$. Άρα, προκύπτει ένας συντελεστής τριβής $f=0,02$.

Η ταχύτητα v με την οποία ρέει το νερό στο εσωτερικό του σωλήνα προκύπτει από τον τύπο 2.16:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 1000}{\pi \cdot 79,2^2} = 1,02 \text{ m/sec}$$

Οι υδραυλικές απώλειες $H_{\text{wall-loss}}$ λόγω τριβής των τοιχωμάτων υπολογίζονται μέσω του τύπου (2.19):

$$H_{\text{wall-loss}} = \frac{f \cdot L_{\text{pipe}} \cdot 0,08Q^2}{d^5} = \frac{0,02 \cdot 38,5 \cdot 0,08 \cdot \left(\frac{5}{1000}\right)^2}{\left(\frac{79,2}{1000}\right)^5} = 0,49 \text{ m}$$

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών απωλειών λόγω $H_{\text{turb-loss}}$ οι τοπικές αντιστάσεις από τις οποίες διέρχεται το νερό είναι οι εξής: το στόμιο εισόδου του σωλήνα, 3 σημεία κάμψης γωνίας 90° και δύο συρταρωτές βαλβίδες με συντελεστές απωλειών $k_{\text{entrance}}=0,5$, $k_{\text{bend}}=0,6$ και $k_{\text{valve}}=0,1$ αντίστοιχα. Επίσης, θα υπάρχει και μία διακλάδωση του σωλήνα, όπου η ροή θα διαχωρίζεται σε δύο ίσα μέρη για να τροφοδοτήσει τα δύο αντιδιαμετρικά ακροφύσια του στροβίλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διακλάδωση έχει τη μορφή ενός ανάποδου T και η ροή συνεχίζεται συμμετρικά στους δύο τελικούς σωλήνες με αποτέλεσμα οι απώλειες διακλάδωσης να υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο (8.1) με συντελεστή απωλειών $k_{\text{junction}}=0,6$:

$$\delta h = k_{\text{junction}} \frac{v^2}{2g} = 0,6 \cdot \frac{1,02^2}{2 \cdot 9,81} = 0,032 \text{ m} \quad (8.1)$$

Άρα, το σύνολο των απωλειών λόγω στροβιλισμού είναι:

$$H_{\text{turb-loss}} = \frac{v^2}{2g} k_{\text{turb}} + \delta h_{\text{junction}} = \frac{1,02^2}{2 \cdot 9,81} \cdot (0,5 + 3 \cdot 0,6 + 2 \cdot 0,1) + 0,032$$

$$\Rightarrow H_{\text{turb-loss}} = 0,16 \text{ m}$$

Στο σημείο αυτό, μπορεί να υπολογιστεί το σύνολο των απωλειών H_{loss} και το καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net} :

$$H_{\text{net}} = H_{\text{gross}} - H_{\text{loss}} = H_{\text{gross}} - H_{\text{wall-loss}} - H_{\text{turb-loss}} = 11,25 - 0,49 - 0,16$$

$$\Rightarrow H_{\text{net}} = 10,59 \text{ m}$$

Αυτό το ύψος υδατόπτωσης αντιστοιχεί σε πίεση $P_{net} = 0,0981H_{net} = 0,0981 \cdot 10,59 = 1,04bar$

Άρα, το ποσοστό απωλειών που προκύπτει από τη χρήση του σωλήνα με εσωτερική διάμετρο $d=79,2mm$ είναι $\frac{H_{gross}-H_{net}}{H_{gross}} 100\% = \frac{11,25-10,59}{11,25} 100\% = 5,84\%$

Στη συνέχεια, εκτιμάται η καταλληλότητα του πάχους των τοιχωμάτων του επιλεγμένου σωλήνα και προσδιορίζεται η πίεση που θα αναπτυχθεί στην περίπτωση εκδήλωσης υδραυλικού πλήγματος, αν και στη μελετούμενη περίπτωση αυτό είναι δυσκολότερο να συμβεί καθώς το νερό θα είναι πλήρως καθαρό και οι συρταρωτές βαλβίδες που θα χρησιμοποιηθούν έχουν μεγάλο χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος.

Υπολογίζεται η ταχύτητα του μεταβατικού «κύματος» πίεσης a με χρήση του τύπου (2.21), όπου ο συντελεστής του Young για το PE είναι $E= 6 \cdot 10^8 N/m^2$:

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,1 \cdot 10^9 d}{E \cdot t}\right)}} = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,1 \cdot 10^9 \cdot 79,2}{6 \cdot 10^8 \cdot 5,4}\right)}} = 193,526$$

Η αύξηση του μανομετρικού ύψους H_{surge} λόγω της αύξησης της πίεσης κατά την εκδήλωση του μεταβατικού φαινομένου υπολογίζεται από τον τύπο (2.22):

$$H_{surge} = \frac{av}{g} = \frac{193,526 \cdot 1,02}{9,8} = 20,05m$$

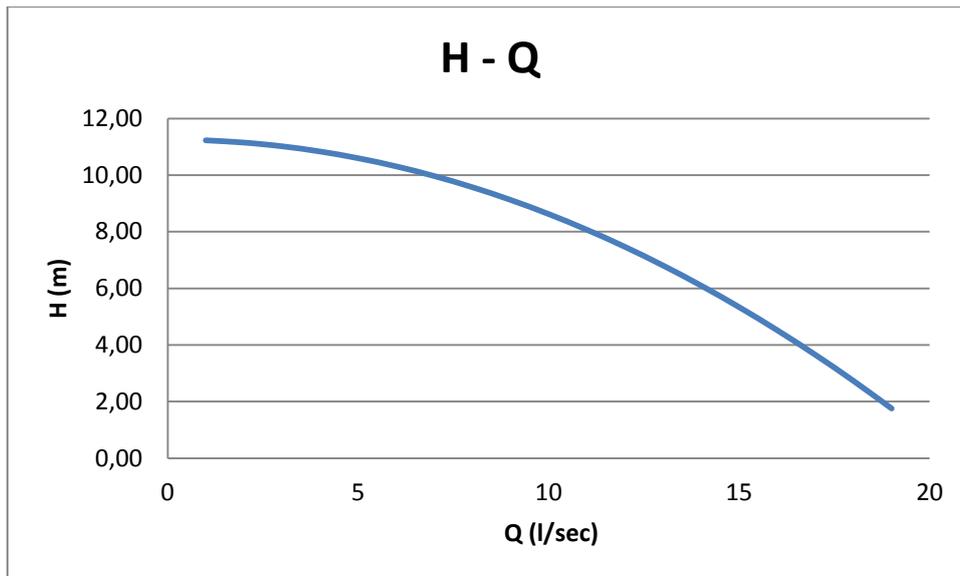
Άρα, το συνολικό μανομετρικό ύψος H_{total} και η πίεση P_{total} στον αγωγό λόγω υδραυλικού πλήγματος είναι:

$$H_{total} = H_{gross} + H_{surge} = 11,25 + 20,05 = 31,3m$$

$$P_{total} = 0,0981H_{total} = 0,0981 \cdot 31,3 = 3,07bar \ll 6bar$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό των υδραυλικών απωλειών αλλά και από τον υπολογισμό της έντασης ενός υδραυλικού πλήγματος επιτρέπουν τη χρήση του συγκεκριμένου σωλήνα. Στο μικρό κομμάτι του αγωγού μετά τη διακλάδωση και μέχρι το ακροφύσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σωλήνας μικρότερης διαμέτρου, καθώς μειώνεται κατά το ήμισυ η παροχή που θα διαρρέει τον κάθε έναν από τους δύο σωλήνες και επιπλέον το μήκος τους είναι πολύ μικρό.

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς για τις υδραυλικές απώλειες, προκύπτει η χαρακτηριστική $H - Q$ του συστήματος, που φαίνεται στο σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2 Η χαρακτηριστική H-Q του σχεδιαζόμενου υδροηλεκτρικού συστήματος

8.1.2 Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου Turgo

Ο υδροστροβίλος Turgo που χρησιμοποιήθηκε είναι κατασκευασμένος από τον Joseph Hartvigsen στη Αμερική και για τη διαστασιολόγησή του χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αλλά και υπολογιστικά φύλλα (στο πρόγραμμα excel) που παρατίθενται στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή <http://h-hydro.com/> [48]. Στόχος ήταν η εύρεση του κατάλληλου υδροστροβίλου Turgo (σε μέγεθος και αριθμό κουταλιών, καθώς και αριθμό και διατομή ακροφυσίων) ώστε με καθαρό ύψος υδατόπτωσης $H=10,59\text{m}$ και παροχή $Q=5\text{l/sec}$ να μπορεί να κινεί μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής ονομαστικής ισχύος 350W και ονομαστικών στροφών 750rpm όταν αυτά τοποθετούνται στον ίδιο άξονα.

Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Turgo του συγκεκριμένου κατασκευαστή ακολουθούν. Η ταχύτητα της δέσμης δίδεται από τον τύπο (8.2) (όπως φαίνεται και στον τύπο (3.10) του 3^{ου} κεφαλαίου):

$$v_{jet} = c_v \sqrt{2gH_{net}} \quad [\text{m/sec}] \quad (8.2)$$

όπου $c_v = 0,98$: ο συντελεστής ταχύτητας (coefficient of velocity) του ακροφυσίου

και $g=9,81 \text{ m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

Η περιφερειακή ταχύτητα v_{runner} του στροβίλου υπολογίζεται μέσω του λόγου ταχυτήτων $x=48,5\%$ (όπως δίδεται από τον κατασκευαστή) :

$$v_{runner} = xv_{jet} \quad [\text{m/sec}]$$

και η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου n_{runner} δίδεται από τον τύπο (8.3) (είναι ίδιος με τον (3.9)):

$$n_{runner} = \frac{60 \cdot 100 \cdot xv_{jet}}{\pi rcd} \quad [\text{rpm}]$$

όπου rcd [cm] : η διάμετρος του δρομέα (όπως αυτή ορίζεται από τα κέντρα των σκαφιδίων) και εξαρτάται από το είδος και τον αριθμό N_{sp} των σκαφιδίων του στροβίλου (στο σχήμα 8.3 φαίνονται δύο από τους τύπους σκαφιδίων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν), για παράδειγμα για τα πορτοκαλί σκαφίδια που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση αυτή, ο τύπος που δίνει τη διάμετρο του δρομέα είναι ο (8.4):

$$rcd = (0,242N_{sp} + 2)2,54 \quad [\text{cm}] \quad (8.4)$$



Σχήμα 8.3 Ένα πορτοκαλί και ένα πράσινο σκαφίδιο (κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιείται για διαφορετικό εύρος διαμέτρων δέσμης)

Η απαιτούμενη διατομή του ή των ακροφυσίων A_{nozzle} δίδεται σε σχέση με τη διαθέσιμη παροχή Q [l/sec] από τον τύπο (8.5):

$$A_{nozzle} = \frac{10Q}{C_c v_{jet}} \quad [\text{cm}^2] \quad (8.5)$$

όπου $C_c=0,97$: ο συντελεστής συστολής της δέσμης του ακροφυσίου όπως δίδεται από τον κατασκευαστή

Αν είναι γνωστός ο αριθμός των ακροφυσίων N_{nozzle} , η διάμετρος τους d_{nozzle} υπολογίζεται μέσω του τύπου (8.6) :

$$d_{nozzle} = 10 \sqrt{\frac{N_{nozzle} \cdot \pi}{4A_{nozzle}}} \quad [\text{mm}] \quad (8.6)$$

Η παραγόμενη μηχανική ισχύς στην έξοδο του υδροστροβίλου δίδεται από τον τύπο (8.7) και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας από τον τύπο (8.8), αν η_t και η_g είναι ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου και της γεννήτριας αντίστοιχα:

$$P_t = \frac{H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_t}{1000} \text{ [kW]} \quad (8.7)$$

$$P_e = \eta_g P_t \text{ [kW]} \quad (8.8)$$

όπου $\rho=0,98\text{kg/l}$

Μία εικόνα αυτού του υπολογιστικού φύλλου με τις τιμές που προκύπτουν για τη διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου για τη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 8.6. Τελικά, προκύπτει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υδροστρόβιλος Turgo ο οποίος θα έχει 20 πορτοκαλί σκαφίδια και διάμετρο $p_{cd}=17,37\text{cm}$ και θα είναι εξοπλισμένος με δύο ακροφύσια με διάμετρο $d_{nozzle}=15,1\text{mm}$, τα οποία φαίνονται στα σχήματα 8.4 και 8.5.



Σχήμα 8.4 Ο χρησιμοποιούμενος υδροστρόβιλος Turgo



Σχήμα 8.5 Τα χρησιμοποιούμενα ακροφύσια

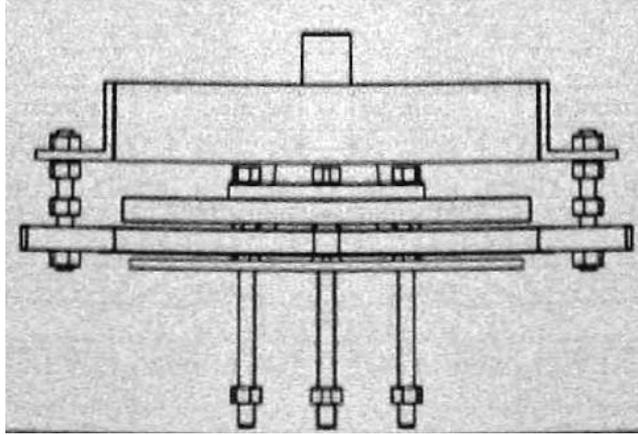
Τότε, με παροχή $Q=4,9\text{l/sec}$ και αν θεωρηθεί απόδοση στροβίλου και γεννήτριας $\eta_t=78\%$ και $\eta_g=85\%$ αντίστοιχα, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς θα είναι $P_e=337\text{W}$. Επειδή, όμως, η απόδοση μίας γεννήτριας όμοιας με αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή αυτή μπορεί να φθάσει και το 90%, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να φθάσει τα 350W (που είναι και η επιθυμητή ισχύς).

Head (m)	Vjet (m/s)	Runner V (m/s)	RPM	Flow (liter/sec)	Turbine Power (kW)	Electric Power (kW)	Head (ft)	Turbine (hp)	Flow (gpm)	Flow (CFS)	psi
10,5	14,1	6,8	751	4,9	0,4	0,334	34,6	0,53	77,4	0,17	15,0
10,4	14,0	6,8	748	4,9	0,4	0,329	34,3	0,5	77,1	0,17	14,8
10,3	14,0	6,8	744	4,8	0,4	0,325	33,9	0,5	76,7	0,17	14,7
10,2	13,9	6,7	741	4,8	0,4	0,320	33,6	0,5	76,3	0,17	14,5
10,1	13,8	6,7	737	4,8	0,4	0,315	33,3	0,5	75,9	0,17	14,4
10,0	13,8	6,7	733	4,8	0,4	0,311	32,9	0,5	75,6	0,17	14,3

Σχήμα 8.6 Υπολογιστικό φύλλο για τη διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Turgo από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή του

8.1.3 Σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής

Για τη σχεδίαση της γεννήτριας αξονικής ροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναφέρεται στο [43]. Η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής που έχει επιλεγεί φαίνεται στο σχήμα 8.7 και αποτελείται από έναν εσωτερικό στάτη χωρίς πυρήνα και δύο δρομείς εκ των οποίων μόνο ο ένας φέρει μαγνήτες. Η γεννήτρια αυτή στο [43] παρουσιάζεται ως η γεννήτρια 1800 (από τη διάμετρο της περωτής κατά τη χρήση της σε ανεμογεννήτρια), έχει οχτώ πόλους και επομένως ονομαστική ταχύτητα περιστροφής $n=750\text{rpm}$ για ηλεκτρική συχνότητα 50Hz και σχεδιάζεται για να δίνει ονομαστική ισχύ 350W στα 90V dc τάση (αντιστοιχία που προκύπτει από τη χαρακτηριστική λειτουργίας του αντιστροφέα Windmaster 500 που θα χρησιμοποιηθεί), αλλά να μπορεί να αντέξει και μεγαλύτερες ισχύεις που αντιστοιχούν σε 95V dc τάση για λόγους ασφαλείας.



Σχήμα 8.7 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής με έναν εσωτερικό στάτη χωρίς πυρήνα και δύο δρομείς εκ των οποίων μόνο ο ένας φέρει μαγνήτες [43]

Οι τιμές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα στο [43] κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας 1800 είναι η πυκνότητα ροής $B=0,44T$, η συνολική επιφάνεια των μαγνητών $A=0,011m^2$, οι διαστάσεις του μαγνήτη: $46 \times 30mm$, η διάμετρος του δρομέα της γεννήτριας $250mm$, το αξονικό πάχος του πηνίου $t_w=13mm$, το πάχος πλευράς πηνίου $w=28mm$ και η διατομή του πηνίου $364mm^2$.

Η μέση τάση V_{av} που αναπτύσσεται στο τύλιγμα μίας φάσης της γεννήτριας σύμφωνα με το [43] δίνεται από τον τύπο (8.9):

$$V_{av} = 2\Phi_{ολ}N_{ελ}\frac{n}{60} \quad (8.9)$$

όπου $\Phi_{ολ}$: η ολική ροή για την οποία ισχύει: $\Phi_{ολ} = A \cdot B$

και $N_{ελ}$: ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση για τον οποίον ισχύει:

$$N_{ελ} = (\text{ελίγματα ανά πηνίο}) \cdot (\text{πηνία στη σειρά})$$

Η συνεχής τάση στην έξοδο του ανορθωτή V_{dc} δίνεται σύμφωνα με το [43] από τον τύπο (8.10):

$$V_{dc} = \left(A \cdot B \cdot N_{ελ} \cdot n \cdot \frac{2,72}{30} \right) - 1,4 \quad (8.10)$$

όπου η μείωση κατά τον όρο 1,4 οφείλεται στην πτώση τάσης εντός του ανορθωτή και ο συντελεστής $2,72=1,73 \cdot 1,57$, όπου $1,73 \approx \sqrt{3}$ για τον συνδυασμό των τάσεων των τριών φάσεων και 1,57 είναι ο συντελεστής κατά τον οποίον η μέγιστη τιμή μίας ημιτονοειδούς τάσης υπερέρχει της μέσης τιμής της.

Άρα, ο απαιτούμενος συνολικός αριθμός ελιγμάτων $N_{ελ}$ θα δίνεται από τον τύπο (8.11):

$$N_{\varepsilon\lambda} = \frac{V_{dc}+1,4}{A \cdot B \cdot n} \cdot 11 = \frac{95+1,4}{0,011 \cdot 0,44 \cdot 750} \cdot 11 = 291,7 \Rightarrow N_{\varepsilon\lambda} \cong 292$$

Υπάρχουν δύο πηνία συνδεδεμένα σε σειρά σε κάθε φάση, άρα σε κάθε πηνίο υπάρχουν $N_{\varepsilon\lambda}=146$ ελίγματα.

Η διατομή του χαλκού στο πηνίο S_{Cu} σύμφωνα με το [43] υπολογίζεται από τον τύπο (8.12), όπου το 0,55 χρησιμοποιείται ως μία τυπική τιμή συντελεστή πλήρωσης:

$$S_{Cu} = \frac{t_w \cdot w \cdot 0,55}{N_{\varepsilon\lambda}} = \frac{28 \cdot 13 \cdot 0,55}{146} = 1,37 \text{ mm}^2$$

Η υπολογισμένη διατομή χαλκού διατίθεται στο εμπόριο και αντιστοιχεί σε διάμετρο χαλκού 1,32mm.

Το μέσο μήκος ενός τυλίγματος του καλωδίου $L_{1\varepsilon\lambda}$ δίνεται από τον τύπο (8.13), όπου l_m και w_m είναι το μήκος και το πάχος του μαγνήτη αντίστοιχα:

$$L_{1\varepsilon\lambda} = 2(l_m + w_m) + 3,14w = 2(46 + 30) + 3,14 \cdot 28 = 240 \text{ mm} \quad (8.13)$$

Το μήκος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός πηνίου $L_{Cu1\pi}$ είναι ίσο με: $L_{Cu1\pi} = N_{1\varepsilon\lambda} \cdot L_{1\varepsilon\lambda} = 146 \cdot 240 = 35040 \text{ mm} = 35,04 \text{ m}$

Άρα, η μάζα του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί για ένα πηνίο $m_{Cu1\pi}$ είναι:

$$m_{Cu1\pi} = L_{Cu1\pi} \cdot S_{Cu} \cdot 0,009 = 35040 \cdot 1,37 \cdot 0,009 = 432 \text{ gr}$$

Η ωμική αντίσταση του ενός πηνίου R_{π} στους 20°C δίδεται από τον τύπο (8.14):

$$R_{\pi} = \frac{L_{Cu1\pi}}{S_{Cu} \cdot 56000} = \frac{35040}{1,37 \cdot 56000} = 0,46 \Omega \quad (8.14)$$

Στους 60°C η αντίσταση αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 1,25 και γίνεται ίση με:

$$R_{\pi 60^\circ\text{C}} = 1,25 R_{\pi} = 1,25 \cdot 0,46 = 0,58 \Omega$$

Η συνολική ωμική αντίσταση του στάτη της γεννήτριας $R_{\text{στάτη}}$ εκτιμάται σύμφωνα με το [43] ότι θα δίδεται από τον τύπο (8.15):

$$R_{\text{στάτη}} = 2 \cdot (A_{\rho} \cdot \text{πηνίων ανά φάση}) \cdot R_{\pi} = 2 \cdot 2 \cdot 0,46 = 1,84 \Omega \quad (8.15)$$

Το dc ρεύμα I_{dc} (όπως προκύπτει μετά την ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος της γεννήτριας) υπολογίζεται στο [43] από τον τύπο (8.16) :

$$I_{dc} = \frac{P_n}{V_{dc}} = \frac{350 \text{ W}}{95 \text{ V}} = 3,68 \text{ A} \quad (8.16)$$

Οι απώλειες ισχύος στα τυλίγματα της γεννήτριας P_{loss} θα είναι :

$$P_{loss} = R_{στάτη} \cdot I^2 = 1,84 \cdot 3,68^2 = 24,9W$$

Οι απώλειες ισχύος στον ανορθωτή θα είναι:

$$P_{rectloss} = 1,4 \cdot I = 1,4 \cdot 3,68 = 5,15W$$

Άρα, συνολικά, η απόδοση (από την είσοδο της γεννήτριας ως την έξοδο του ανορθωτή) προκύπτει από τον τύπο (8.17):

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{loss} + P_{rectloss}} = \frac{350}{350 + 24,9 + 5,15} = 92\% \quad (8.17)$$

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να γίνει μία εκτίμηση για τον αερισμό του στάτη μέσω του συντελεστή αποβολής θερμότητας c_q [W/cm^2] για τον οποίο όμως πρέπει να υπολογιστεί πρώτα η επιφάνεια S του πηνίου και οι $P_{loss\pi}$ ωμικές απώλειες σε ένα πηνίο, όπως φαίνεται στους τύπους (8.18)-(8.20):

$$S = 2wL_{1ελ} = 2 \cdot 28 \cdot 240mm^2 = 134,4cm^2 \quad (8.18)$$

$$P_{loss\pi} = \frac{2}{3} R_{\pi} I^2 = \frac{2}{3} \cdot 0,46 \cdot 3,68^2 = 4,15W \quad (8.19)$$

$$c_q = \frac{P_{loss\pi}}{S} = \frac{4,15W}{134,4cm^2} = 0,031 W/cm^2 \quad (8.20)$$

Ο συντελεστής c_q πρέπει να είναι μικρότερος από $0,3W/cm^2$, περιορισμός που ικανοποιείται πλήρως με βάση τη σχεδίαση της γεννήτριας. Επίσης, το διάκενο της γεννήτριας (δηλαδή η απόσταση από την επιφάνεια του μαγνήτη μέχρι τον απέναντι δίσκο) είναι 17mm (13mm+2·2mm). Οι χαλύβδινοι δίσκοι που χρησιμοποιούνται ως δρομείς της γεννήτριας έχουν διάμετρο 25mm και πάχος 6mm.

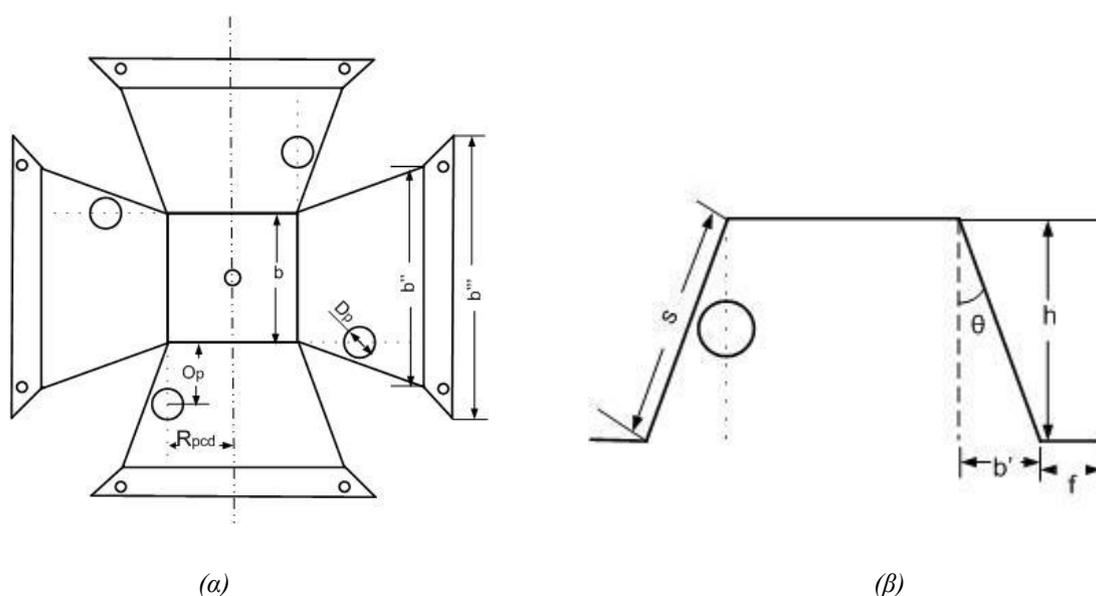
Η σχεδίαση αυτή ακολουθεί απλά βήματα, αλλά είναι προσεγγιστική και όπως φαίνεται αμελεί τις απώλειες σκέδασης και την αντίδραση της γεννήτριας με αποτέλεσμα να εμφανίζεται απόκλιση ανάμεσα στην αναμενόμενη και την πραγματική λειτουργία της γεννήτριας.

8.1.4 Σχεδίαση του περιβλήματος

Το περίβλημα του υδροστροβίλου χρησιμεύει εκτός από την κάλυψη του υδροστροβίλου και στην προστασία της γεννήτριας, καθώς δεν επιτρέπει στα απόνερα του στροβίλου να βγουν έξω από αυτό και να φθείρουν τον γύρω εξοπλισμό. Τα σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του έγιναν με βάση στοιχεία που δόθηκαν από τον κατασκευαστή του

υδροστροβίλου Joseph Hartvigsen. Η σωστή σχεδίαση του περιβλήματος είναι απαραίτητη για την αποδοτική λειτουργία του υδροστροβίλου, καθώς καθορίζει τη γωνία υπό την οποία θα προσπίπτει η δέσμη του νερού στα σκαφίδια του στροβίλου, αλλά και την απόσταση που θα διανύει η δέσμη μέχρι να φθάσει το σκαφίδιο. Η διατομή της δέσμης του νερού, όταν αυτό εξέρχεται από το ακροφύσιο, μειώνεται μέχρι ένα σημείο και μετά η δέσμη αρχίζει να αποκλίνει. Στόχος είναι η δέσμη να προσπίπτει στο σκαφίδιο πριν αρχίσει να αποκλίνει.

Το περίβλημα θα είναι από ανοξείδωτο υλικό και θα έχει πάχος 4mm. Με βάση τα σχέδια του κατασκευαστή το περίβλημα αποτελείται από εννιά κομμάτια: μία τετραγωνική βάση, τέσσερα τραπεζοειδή φύλλα (τα οποία φέρουν τρύπες για να προσαρμοστούν σε αυτές τα απαιτούμενα ακροφύσια) και τέσσερα μικρά ορθογώνια κομμάτια που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση του περιβλήματος. Τα κομμάτια αυτά φαίνονται στο σχήμα 8.8(α), όπου παρουσιάζονται όπως θα ήταν αν κόβονταν ως ένα κομμάτι, ενώ στο σχήμα 8.8(β) απεικονίζεται ένα τραπεζοειδές φύλλο. Στο σχήμα φαίνονται και οι συμβολισμοί των υπολογιζόμενων μεγεθών/διαστάσεων.



Σχήμα 8.8 (α) Όλα τα φύλλα του περιβλήματος, (β) Πλάγιο τραπεζοειδές φύλλο περιβλήματος με τρύπα για προσαρμογή του ακροφυσίου

Η μέθοδος σχεδίασης του περιβλήματος που προτείνει ο Hartvigsen περιλαμβάνει τη θεώρηση κάποιων σταθερών αρχικών παραμέτρων και εν συνεχεία των υπολογισμών των υπόλοιπων διαστάσεων. Τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στην παρούσα εφαρμογή είναι:

- το ύψος του περιβλήματος: $h=25\text{cm}$ (ή $h=9,84''$)
- η γωνία της δέσμης, η οποία είναι ίση με τη γωνία θ που σχηματίζει το πλάγιο φύλλο με την πάνω βάση: $\theta=20^\circ$
- το μήκος f (που φαίνεται στο σχήμα 8.4(β)): $f=3\text{cm}$ (ή $f=1.181''$)

- ένας συντελεστής σχετικός με το είδος των σκαφιδίων xf (όπως τον δίνει ο κατασκευαστής και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της διαμέτρου του υδροστροβίλου – όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 8.1.2), για τα πορτοκαλί σκαφίδια που χρησιμοποιούνται εδώ: $xf=1,0$
- ο αριθμός των σκαφιδίων: 20
- η διάμετρος του ακροφυσίου στο σημείο που ενώνεται με τον σωλήνα D_{pipe} (για τον προσδιορισμό της διαμέτρου της τρύπας στο πλάγιο φύλλο): $D_{pipe}=6.1cm$ (ή $D_{pipe}=2.4''$)
- επιθυμητή απόσταση του ακροφυσίου από την πάνω βάση: $d_{nb}=5cm$ (ή $d_{nb}=1.9''$)

Από τις παραμέτρους αυτές υπολογίζονται όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις του περιβλήματος και δίνονται σε ίντσες και εκατοστά. Αρχικά, προσδιορίζεται η διάμετρος pcd του στροβίλου (όπως προσδιορίζεται στην ενότητα 8.1.2)

$$pcd = xf(0.242 * sproons + 2) = 6.84'' = 17.37cm$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η εξωτερική διάμετρος od του υδροστροβίλου σύμφωνα με τον τύπο (8.21):

$$od = pcd + 2 * xf = 8.84'' = 22.45cm \quad (8.21)$$

Το μήκος s της πλάγιας πλευράς του τραπεζοειδούς φύλλου υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο (8.22):

$$s = \frac{h}{\cos\theta} = 10.47'' = 26.59cm \quad (8.22)$$

Το μήκος b της πάνω βάσης δίνεται από τον τύπο (8.23):

$$b = \frac{INT[2(od+4*xf+0.5)]}{2} = 13'' = 33.02cm \quad (8.23)$$

Ωστόσο, λόγω ενός λάθους στην πρώτη σχεδίαση το μήκος b τέθηκε ίσο με 34,29cm με αποτέλεσμα τη δημιουργία λίγο μεγαλύτερης βάσης και η σχεδίαση τελικά έγινε με βάση την τιμή αυτή. Άρα, $b=34,29cm$ (ή $b=13,5''$).

Επίσης, υπολογίζονται τα επιμέρους μεγέθη b' και b'' που φαίνονται στο σχήμα 8.7, καθώς και το μήκος της μεγάλης βάσης του τραπεζοειδούς φύλλου, από τους τύπους (8.24)-(8.26):

$$b' = s * \sin\theta = 3.58'' = 9.09cm \quad (8.24)$$

$$b'' = b + 2b' = 20.66'' = 54.48cm \quad (8.25)$$

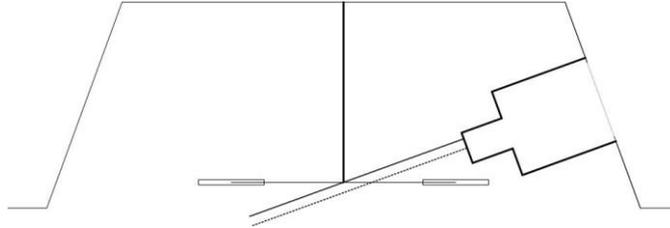
$$b''' = 2f + b'' = 23'' = 58.42cm \quad (8.26)$$

Ακολούθως, υπολογίζεται η απόσταση O_p (κατά μήκος της πλάγιας πλευράς του περιβλήματος) του κέντρου της τρύπας για το ακροφύσιο από την πάνω βάση:

$$O_p = d_{nb} + \frac{D_{pipe}}{2} = 3.1'' = 7.87cm \quad (8.27)$$

Το μήκος του άξονα, δηλαδή η απόσταση του πάνω μέρους του υδροστροβίλου από την πάνω βάση του περιβλήματος, υπολογίζεται από τον τύπο (8.28) έτσι ώστε το πάνω μέρος της δέσμης να προσπίπτει στο πάνω μέρος κάποιου κεντρικού σκαφιδίου, όπως στο σχήμα 8.9.

$$l_a = \frac{O_p + \frac{b}{2} \sin \theta}{\cos \theta} = 5.76'' = 14.63 \text{ cm} \quad (8.28)$$



Σχήμα 8.9 Όψη περιβλήματος όπου φαίνεται ο άξονας του στροβίλου και το σημείο που το πάνω μέρος τη δέσμης (συνεχής γραμμή) τέμνει τον υδροστρόβιλο. (Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το μέσο της δέσμης)

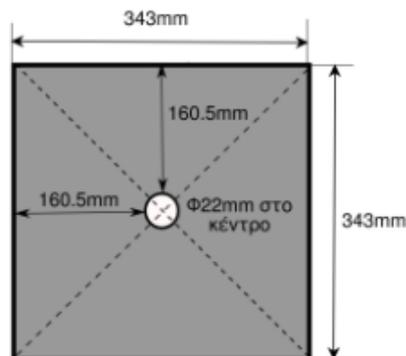
Η οριζόντια απόσταση του κέντρου της τρύπας από τον κεντρικό άξονα της πλάγιας πλευράς (στην οποία αυτή βρίσκεται) είναι ίση με την ακτίνα του στροβίλου (από το κέντρο του μέχρι το κέντρο του σκαφιδίου) και είναι ίση με:

$$R_{pcd} = \frac{pcd}{2} = 3.42'' = 8.68 \text{ cm}$$

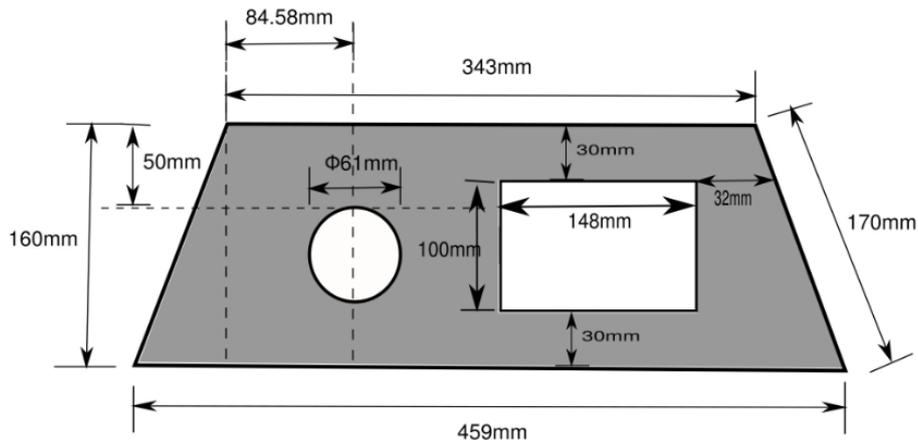
Η απόσταση d_{nc} από την πάνω βάση του περιβλήματος μέχρι την πάνω άκρη της τρύπας είναι ίση με:

$$d_{nc} = \frac{b}{2} - \left(R_{pcd} + \frac{D_{pipe}}{2} \right) = 2.13'' = 5.41 \text{ cm}$$

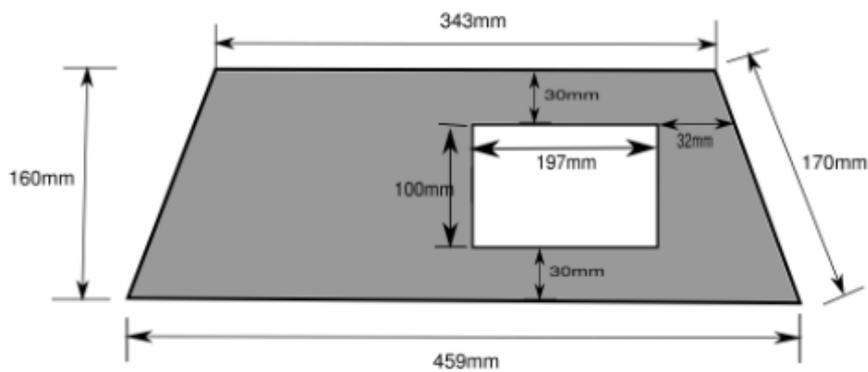
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα χρησιμοποιηθούν δύο ακροφύσια, αλλά επειδή υπάρχει η προοπτική δοκιμής λειτουργίας με τρία ακροφύσια θα υπάρχουν τρία τραπεζοειδή φύλλα με οπές. Επίσης, όλες οι πλάγιες πλευρές του περιβλήματος θα έχουν ορθογώνια παράθυρα, ώστε να μπορεί κανείς να παρακολουθεί τι συμβαίνει στο εσωτερικό του. Άρα, προκύπτουν πέντε διαφορετικά σχέδια μεταλλικών ανοξείδωτων φύλλων για κοπή, τα οποία φαίνονται πλήρως διαστασιολογημένα στο σχήμα 8.10.



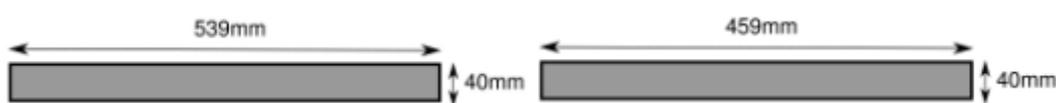
(α)



(β)



(γ)



(δ)

(ε)

Σχήμα 8.10 (α) Πάνω τετραγωνική βάση περιβλήματος, (β) Πλάγια πλευρά περιβλήματος με σπή για το ακροφύσιο και παραθυράκι, (γ) Πλάγια πλευρά περιβλήματος, (δ) Ορθογωνικό κομμάτι που προσαρμόζεται οριζόντια και χρησιμεύει στη στήριξη του περιβλήματος, (ε) Ορθογωνικό κομμάτι που προσαρμόζεται κατακόρυφα και χρησιμεύει στην καλύτερη στερέωση του περιβλήματος

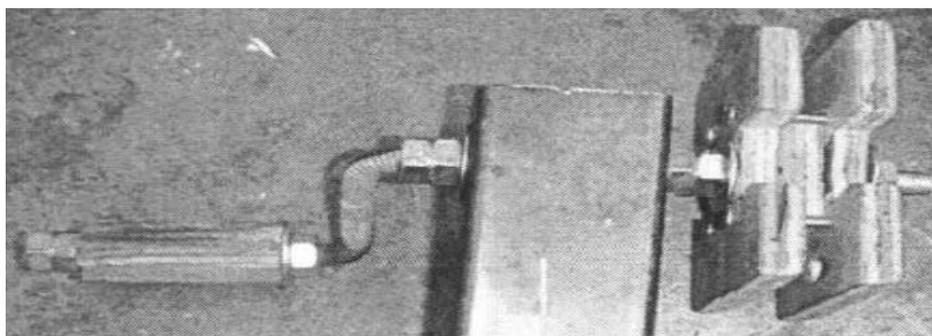
8.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΔΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ένα πλεονέκτημα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής είναι η απλότητα κατασκευής. Η κατασκευή της γεννήτριας βασίστηκε στις οδηγίες που δίνονται στο [43] και πραγματοποιήθηκε χωρίς να χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία ούτε κάποια σημαντική

κατασκευαστική εμπειρία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι η ηλεκτρική σέγα, πριόνια, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος, κ.α..

8.2.1 Κατασκευή του στάτη

Το πρώτο στάδιο για την κατασκευή του στάτη είναι η κατασκευή των πηνίων. Η συγκεκριμένη γεννήτρια θα έχει 6 πηνία, με 146 ελίγματα το κάθε ένα από χαλκό διαμέτρου 1,32mm. Τα πηνία, των οποίων οι επιθυμητές διαστάσεις δίνονται στην ενότητα 8.1.3, κατασκευάζονται με χρήση μία μηχανής χειρός από ξύλο για το τύλιγμα, που φαίνεται στο σχήμα 8.11. Για την εργασία αυτή απαιτούνται 3 άτομα, ο πρώτος εκ των οποίων τυλίγει τον χαλκό, ενώ ο δεύτερος τον κρατάει τεντωμένο και ο τρίτος μετράει τις περιελίξεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.12. Αφού τυλιχτούν τα πηνία μετράται το βάρος τους. Το βάρος του χαλκού στο ένα πηνίο όπως είχε υπολογιστεί κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας ήταν 432gr. Τα πηνία που κατασκευάστηκαν είχαν μέση τιμή βάρους 436gr με ακραίες τιμές τα 414gr και 458gr. Τα δύο αυτά πηνία συνδέθηκαν σε σειρά στην ίδια φάση για να αντισταθμιστεί κάπως η απόκλιση που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν στην αντίσταση της κάθε φάσης.

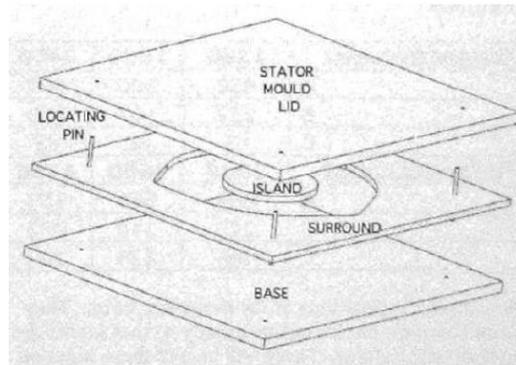


Σχήμα 8.11 Μία απλή μηχανή χειρός για την περιέλιξη πηνίων^[43]



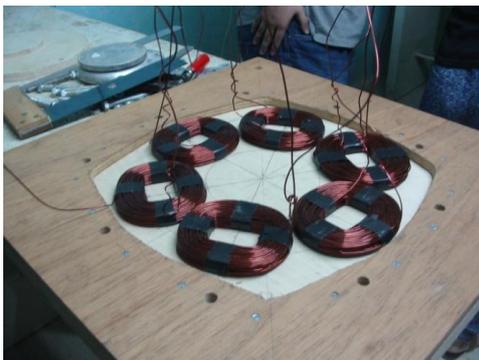
Σχήμα 8.12 Φωτογραφία από τη διαδικασία περιέλιξης ενός πηνίου. Ένας κρατάει τεντωμένο τον χαλκό, ένας άλλος τυλίγει και ο τελευταίος μετράει τις περιελίξεις

Επειδή η γεννήτρια αυτή δεν διαθέτει πυρήνα, δεν υπάρχει μηχανική στήριξη για τα πηνία. Η στήριξη αυτή επιτυγχάνεται δημιουργώντας μία πλάκα από βινιλεστερική ρητίνη που θα τα κρατά στη θέση τους και θα εξασφαλίζει μηχανική αντοχή. Η βινιλεστερική ρητίνη αντέχει σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την πολυεστερική και είναι αδιάβροχη. Για να δημιουργηθεί αυτή η πλάκα, πρέπει να κατασκευαστεί πρώτα ένα καλούπι στο οποίο θα γίνει στη συνέχεια έγχυση της ρητίνης. Το καλούπι κατασκευάζεται από τρία τετράγωνα ξύλα τύπου κόντρα πλακέ: τη βάση, το εσωτερικό και το καπάκι, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.13. Το πάχος της βάσης και του καπακιού (χοντρή βάση, λεπτό καπάκι) είναι σχετικά αυθαίρετα, ενώ το πάχος του εσωτερικού ξύλου είναι ίσο με το αξονικό πάχος των πηνίων. Δεν πειράζει αν είναι λίγο μικρότερο, αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο. Το μεσαίο ξύλο κόβεται εσωτερικά σε κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να δημιουργηθεί ο χώρος στον οποίο θα τοποθετηθούν τα πηνία. Ακόμα, κόβεται ένας μικρός δίσκος ίδιου πάχους που τοποθετείται στο κέντρο του εσωτερικού ξύλου, ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι κενή στο κέντρο της για να μπορεί να περιστρέφεται ο άξονας της γεννήτριας.



Σχήμα 8.13 Καλούπι στάτη^[43]

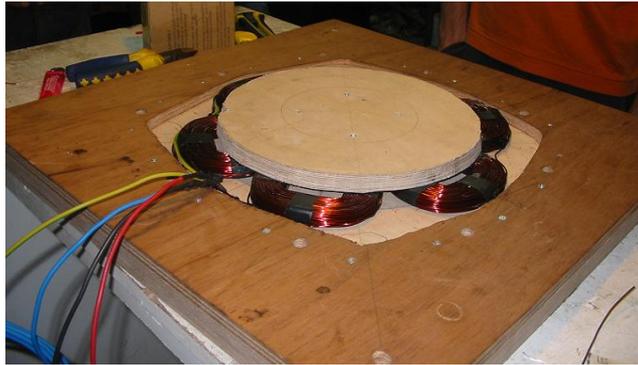
Ακολούθως, αφού σηματοδοτούν οι θέσεις των πηνίων, αυτά τοποθετούνται στο καλούπι χωρίς το καπάκι του και σταθεροποιούνται. Στόχος είναι η δημιουργία του τριφασικού τυλίγματος της γεννήτριας σε συνδεσμολογία αστέρα. Κάθε φάση αποτελείται από δύο πηνία συνδεδεμένα σε σειρά, όπου το τέλος του ενός συνδέεται με την αρχή του άλλου, αφού απογυμνωθούν τα άκρα τους και κολληθούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κολλητήρι και καλάι. Ο ουδέτερος κόμβος προκύπτει συνδέοντας τη μία άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων και η άλλη άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων καταλήγει στην έξοδο. Ο ουδέτερος δεν αφήνεται στη γεννήτρια όπως συνηθίζεται, αλλά βγαίνει έξω από αυτή μαζί με τις φάσεις για πειραματικούς σκοπούς.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 8.14 (α) Τα πηνία έχουν τοποθετηθεί στο καλούπι αλλά τα άκρα τους δεν ακόμα συνδεθεί, (β) Απογύμνωση των άκρων των καλωδίων των πηνίων για να γίνει η κόλληση. Το κεντρικό κυκλικό κομμάτι ξύλου έχει βιδωθεί στο καλούπι για να πιέζει και να σταθεροποιεί τα πηνία στις θέσεις τους κατά τη διαδικασία σύνδεσης τους, (γ) Το τύλιγμα του στάτη είναι έτοιμο. Φαίνονται τα καλώδια των 3 φάσεων και του ουδέτερου που βγαίνουν έξω από το καλούπι

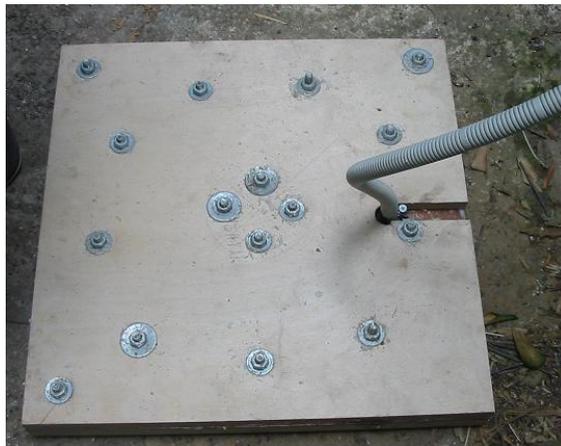
Αφού το τύλιγμα έχει σταθεροποιηθεί και κολληθεί, έρχεται η ώρα για την έγχυση της ρητίνης. Πρώτα, τοποθετείται κερί στα σημεία που δεν πρέπει να κολλήσουν με την πλάκα ρητίνης, όπως είναι ο κεντρικός δίσκος, τα τοιχώματα και οι βίδες που θα χρησιμοποιηθούν για να συγκρατήσουν τα 3 κόντρα πλακέ. Η βινιλεστερική ρητίνη είναι σε υγρή μορφή και στερεοποιείται με την ανάμειξή της με έναν καταλύτη κι έναν επιταχυντή κατά τη διάρκεια μιας εξώθερμης χημικής αντίδρασης. Επίσης, τοποθετούνται και δύο λεπτά φύλλα υαλονήματος στις δύο εξωτερικές πλευρές του στάτη για μεγαλύτερη αντοχή στις καταπονήσεις. Κατά την έγχυση της ρητίνης δημιουργούνται τρία μείγματα, εκ των οποίων το πρώτο και το τρίτο τοποθετούνται μαζί με το υαλόνημα και αποτελούνται από τη ρητίνη, τον καταλύτη και τον επιταχυντή, ενώ το δεύτερο (το μεσαίο) διαθέτει και ταλκ που του προσθέτει όγκο. Οι αναλογίες των χημικών ουσιών, οι οποίες εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, πρέπει να τηρηθούν αυστηρά ώστε να αποφευχθεί αδυναμία στερεοποίησης ή πρόωρη στερεοποίηση του μείγματος. Τέλος, το καπάκι βιδώνεται, το πλεόνασμα ρητίνης εξέρχεται του καλουπιού και ο στάτης αφήνεται ένα εικοσιτετράωρο να στεγνώσει. Το καλούπι αποσυναρμολογείται προσεκτικά και ο στάτης μετά από λίγο λιμάρισμα στις άκρες του είναι έτοιμος.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 8.15 (α) Οι βίδες που θα χρησιμοποιηθούν για να συγκρατήσουν τα 3 κόντρα πλακέ αλειμμένες με κερί, (β) Φωτογραφία κατά τη διαδικασία έγχυσης της ρητίνης. Έχει μπει το πρώτο μείγμα, έχει τοποθετηθεί το πρώτο φύλλο ναλονήματος και τα πηνία, ενώ φαίνεται και το κερί με το οποίο έχει αλειφθεί το καλούπι, (γ) Το τύλιγμα μέσα στο καλούπι με τη ρητίνη



Σχήμα 8.16 Ο στάτης, αφού έχει βγει από το καλούπι και λιμαριστεί, είναι έτοιμος για χρήση

8.2.2 Κατασκευή του δρομέα

Ο δρομέας της συγκεκριμένης γεννήτριας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους, εκ των οποίων στον ένα θα τοποθετηθούν μαγνήτες, ενώ στον άλλο όχι. Από το κέντρο των δίσκων αφαιρείται μικρός κυκλικός δίσκος ώστε να μπορεί να συνδεθεί το ρουλεμάν. Σε κάθε δίσκο ανοίγονται 4 τρύπες με το επιτραπέζιο δρέπανο, από τις οποίες θα περάσουν οι ντίζες που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας. Επίσης, στον δίσκο που δε θα έχει μαγνήτες ανοίγονται άλλες 4 τρύπες με σπείρωμα (με τη βοήθεια βιδολόγου) ώστε να διευκολυνθεί η συναρμολόγηση της γεννήτριας. Επειδή η γεννήτρια αυτή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα, κρίνεται σκόπιμο το γαλβάνισμα των δίσκων του δρομέα για επιπλέον προστασία τους από τα νερά που μπορεί να εξέρχονται από το περίβλημα του υδροστροβίλου. Κατά το γαλβάνισμα, όμως, γίνεται επικάθιση υλικού εντός των τρυπών με σπείρωμα με αποτέλεσμα να πρέπει να χρησιμοποιηθεί και πάλι βιδολόγος για να δημιουργηθεί το επιθυμητό σπείρωμα.



(α)



(β)

Σχήμα 8.17 Ο χαλύβδινος δίσκος που δεν θα έχει μαγνήτες (α) πριν το γαλβάνισμα, κατά τη δημιουργία σπειρωμάτων με τον βιδολόγο, (β) μετά το γαλβάνισμά του

Ακολούθως, τοποθετούνται οι 8 μαγνήτες στον ένα δίσκο του δρομέα. Η σωστή τοποθέτηση τους γίνεται με τη χρήση ενός ξύλινου οδηγού που σχεδιάζεται και κόβεται με το χέρι, και αφού κεντραριστεί και βιδωθεί πάνω στον δίσκο, δείχνει πού ακριβώς πρέπει να τοποθετηθούν οι μαγνήτες, ώστε να δημιουργήσουν μία όσο το δυνατόν συμμετρική διάταξη. Οι μαγνήτες τοποθετούνται με προσοχή στον δίσκο κατά τέτοιο τρόπο ώστε διπλανοί μαγνήτες να έχουν αντίθετη πολικότητα και κολλιούνται σε αυτόν με τη χρήση ισχυρής κόλλας.



(α)



(β)

Σχήμα 8.18 (α) Ο ξύλινος δίσκος έχει βιδωθεί πάνω στον χαλύβδινο δίσκο και μπορεί να αρχίσει η τοποθέτηση των μαγνητών, (β) Ο δίσκος με τους μαγνήτες κολλημένους πάνω του πριν να τοποθετηθεί στο καλούπι του

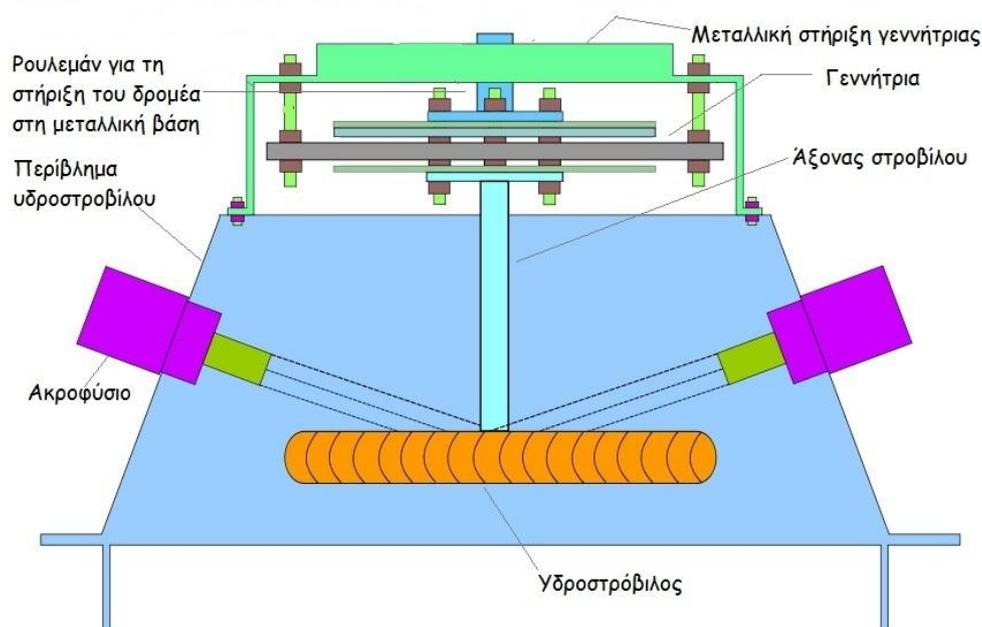
Για επιπλέον μηχανική αντοχή, σταθεροποίηση και προστασία των μαγνητών, ο δίσκος θα τοποθετηθεί μέσα σε ρητίνη. Για να γίνει αυτό, πρέπει πάλι να κατασκευαστεί ένα καλούπι που αποτελείται από 3 κόντρα πλακέ, όπως και στην περίπτωση του καλουπιού του στάτη. Στο εσωτερικό τμήμα του καλουπιού, κόβεται ένας δίσκος λίγο μεγαλύτερος από τη γεννήτρια όπου θα τοποθετηθεί ο δίσκος με τους μαγνήτες, ώστε η ρητίνη να καλύψει και να προστατεύσει και την εξωτερική πλευρά των μαγνητών. Τα σημεία στα οποία δεν πρέπει να κολλήσει η ρητίνη αλείφονται με κερί. Η βινιλεστερική ρητίνη αναμειγνύεται με καταλύτη, επιταχυντή και ταλκ, και αφού γίνει η έγχυση του μείγματος, τοποθετείται και ένα φύλλο από υαλονήματα για αντοχή στις καταπονήσεις και τη φυσική φθορά. Το καπάκι δε χρειάζεται βίδωμα, καθώς πάνω του τοποθετούνται εργαλεία, που έλκουν οι μαγνήτες κι έτσι παραμένει κλειστό ασκώντας την απαιτούμενη πίεση προκειμένου να διαφύγει η παραπάνω ρητίνη. Το καλούπι αφήνεται στην κατάσταση αυτή μέχρι να στερεοποιηθεί η ρητίνη και στη συνέχεια αποσυναρμολογείται προσεκτικά για να βγει ο δίσκος με τους μαγνήτες και τη ρητίνη που τους συγκρατεί. Αφού απομακρυνθεί με προσοχή η ρητίνη από όλα τα ανεπιθύμητα σημεία με τη βοήθεια μίας λίμας, ο δίσκος με τους μαγνήτες είναι έτοιμος να χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 8.19 Ο δίσκος με τους μαγνήτες, αμέσως αφού βγήκε από το καλούπι με τη ρητίνη πριν καθαριστούν και λιμαριστούν οι άκρες του

8.2.3 Κατασκευή της στήριξης και συναρμολόγηση της υδρογεννήτριας

Αφού συναρμολογηθεί η γεννήτρια με τον υδροστρόβιλο, η υδροηλεκτρική κατασκευή θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 8.20.



Σχήμα 8.20 Η γεννήτρια και ο υδροστρόβιλος, όπως θα είναι μετά τη συναρμολόγησή τους

Η γεννήτρια θα στηρίζεται μέσω του ρουλεμάν της σε μία μεταλλική (χαλύβδινη) βάση που έχει τη μορφή δύο παράλληλων Π ενωμένων με μία κάθετη σε αυτά ράβδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.21. Τα διάφορα τμήματα της βάσης αυτής κολλάνε μεταξύ τους με ηλεκτροσυγκόλληση και μετά τη συναρμολόγηση της γεννήτριας, η βάση τοποθετείται και βιδώνεται πάνω στο ανοξειδωτο περίβλημα του υδροστροβίλου. Πάνω στην βάση έχει κολληθεί με ηλεκτροσυγκόλληση κεντρικά ο άξονας της φλάντζας στην οποία θα στηριχτεί ο δρομέας της γεννήτριας, και συγκεκριμένα ο δίσκος με τους μαγνήτες, μέσω 4 ντιζών, που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας.



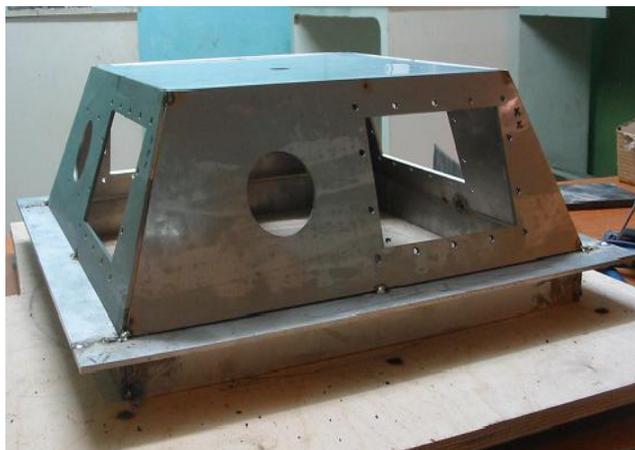
Σχήμα 8.21 Η κατασκευή στήριξης της γεννήτριας αμέσως μετά το τέλος της ηλεκτροσυγκόλλησης

Σειρά έχει η συναρμολόγηση της γεννήτριας. Οι τέσσερις ντίζες έχουν προσαρμοστεί πάνω στη φλάντζα και τοποθετείται ο δίσκος με τους μαγνήτες μέχρι να ακουμπήσει σε αυτήν. Για να διατηρείται σταθερή η απόσταση μεταξύ των δίσκων τοποθετούνται διαδοχικά παξιμάδια στις ντίζες. Στη συνέχεια, τοποθετείται η πλάκα του στάτη και μετά με ιδιαίτερη προσοχή ο δεύτερος δίσκος του δρομέα χωρίς τους μαγνήτες. Για να μη δημιουργηθούν προβλήματα κατά τη συναρμολόγηση λόγω των ελκτικών δυνάμεων που ασκούν οι μαγνήτες στον δίσκο, χρησιμοποιούνται 4 βίδες που τοποθετούνται στις τρύπες με σπείρωμα που είχαν ανοιχτεί στον συγκεκριμένο δίσκο του δρομέα. Ο δίσκος σπρώχνεται μέχρι οι βίδες να ακουμπήσουν τον άλλο χαλύβδινο δίσκο (με τους μαγνήτες) και ακολούθως, οι βίδες ξεβιδώνονται αργά ώστε να γίνει ομαλά η τοποθέτηση του δίσκου (χωρίς τους μαγνήτες). Ο στάτης στερεώνεται πάνω στη μεταλλική κατασκευή στήριξης μέσω τεσσάρων ντιζών και η θέση του ρυθμίζεται από τα παξιμάδια που τοποθετούνται σε αυτές. Τέλος, τοποθετείται η δεύτερη φλάντζα η οποία φέρει και τον άξονα που συνδέει τη γεννήτρια με τον υδροστρόβιλο.



Σχήμα 8.22 Η γεννήτρια μονίμων μαγνητών μετά τη συναρμολόγησή της

Το ανοξείδωτο περίβλημα του υδροστροβίλου κατασκευάζεται σύμφωνα με τα σχέδια της ενότητας 8.1.4 και τα κομμάτια του κολλάνε μεταξύ τους με ηλεκτροσυγκόλληση.



Σχήμα 8.23 Το περίβλημα του υδροστροβίλου. Στις κυκλικές τομές του περιβλήματος θα τοποθετηθούν τα ακροφύσια, ενώ οι ορθογώνιες θα χρησιμοποιηθούν ως παραθυράκια ώστε να μπορεί κανείς να παρακολουθεί τι γίνεται με τον υδροστρόβιλο

Αυτό που έχει σειρά είναι η συναρμολόγηση της γεννήτριας με τον υδροστρόβιλο και το περίβλημά του, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.24. Το δύσκολο κομμάτι στο στάδιο αυτό είναι η ακριβής ρύθμιση του ύψους στο οποίο θα βρίσκεται ο υδροστρόβιλος ώστε η δέσμη του νερού να προσκρούει στο σωστό σημείο του σκαφιδίου, χωρίς όμως να έχει διανύσει μεγάλη απόσταση και να έχει αρχίσει να αποκλίνει. Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.24, χρησιμοποιήθηκαν παξιμάδια για επιπλέον ανύψωση του υδροστροβίλου (μέσω ανύψωσης ολόκληρης της γεννήτριας, επειδή ο άξονας ενώνεται με την κάτω φλάντζα της), καθώς το μήκος του άξονα όπως είχε υπολογιστεί αποδείχθηκε μεγαλύτερο από αυτό που χρειαζόταν με αποτέλεσμα ο στρόβιλος να βρίσκεται χαμηλότερα απ' ότι έπρεπε.



(α)



(β)

Σχήμα 8.24 Δύο διαφορετικές όψεις του υδροηλεκτρικού, πριν τη διασωλήνωσή του και την τοποθέτηση των παραθύρων

Όσο αφορά το κόστος της κατασκευής, αυτό επιμερίζεται ως εξής:

- Υδροστρόβιλος:184€
- Ακροφύσια:51€
- Μεταφορικά υδροστροβίλου: 38€
- Άξονας (που συνδέει τον στρόβιλο με τη γεννήτρια):150€
- Περίβλημα:200€
- Γεννήτρια:350€

ΣΥΝΟΛΟ: 973€

Στο παραπάνω κόστος, δεν έχουν συμπεριληφθεί τα εργατικά έξοδα, τα έξοδα για τον απαιτούμενο εξοπλισμό, τις βαλβίδες και τους σωλήνες, οι οποίοι σε μία κανονική υδροηλεκτρική εγκατάσταση θα αποτελούσαν σημαντικό κομμάτι του κόστους κατασκευής. Ενδεικτικά, η τιμή ενός σωλήνα PE εξωτερικής διαμέτρου 90mm είναι 4,59€/m, που σημαίνει αύξηση του παραπάνω οικονομικού μεγέθους για την περίπτωση της συγκεκριμένης εφαρμογής κατά περίπου $4,59 \cdot 38,5m = 176€$.

8.2.4 Εγκατάσταση του υδροηλεκτρικού συστήματος

Το υδροηλεκτρικό σύστημα μεταφέρθηκε και εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., όπου υπήρχε η δυνατότητα τροφοδότησης του με τη απαιτούμενη ποσότητα νερού, καθώς και ο σωστός εξοπλισμός για την τοποθέτησή του.

Το περίβλημα του υδροστροβίλου τοποθετήθηκε πάνω σε ένα από τα "αυλάκια" που υπάρχουν στο εργαστήριο για την απομάκρυνση των νερών κατά τη λειτουργία των διαφόρων υδροστροβίλων που υπάρχουν εκεί. Το νερό που διοχετευόταν στον υδροστρόβιλο περνούσε από έναν από τους κεντρικούς αγωγούς του εργαστηρίου, ο οποίος τρυπήθηκε κι ενώθηκε με έναν άλλο μικρότερης διαμέτρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.25. Στο σημείο σύνδεσης τοποθετήθηκε μία συρταρωτή βάνα (gate valve) για τον κεντρικό έλεγχο της ροής. Στο τέλος του μικρότερου αυτού σωλήνα, συνδέθηκε πάλι μέσω φλάντζας ένας πλαστικός σπιράλ σωλήνας ακόμα μικρότερης διαμέτρου, που ακολούθως χωριζόταν μέσω ενός T σε δύο ίδιους σωλήνες (ώστε να μοιράζεται η ροή του νερού στα δύο και να τροφοδοτούνται τα δύο ακροφύσια). Πριν από κάθε ακροφύσιο τοποθετείται μία βάνα πεταλούδα.



Σχήμα 8.25 Ο καινούριος χαλύβδινος σωλήνας που τοποθετήθηκε για την τροφοδότηση του υδροηλεκτρικού από τον κεντρικό αγωγό



(α)



(β)

Σχήμα 8.26 Το υδροηλεκτρικό σύστημα αφού εγκαταστάθηκε, έτοιμο για τις δοκιμές λειτουργίας του

8.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η εκτίμηση της λειτουργίας της υδρογεννήτριας και η μέτρησή της πραγματοποιούνται με δύο διαφορετικές δοκιμές: η πρώτη αφορά μόνο τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και τη μέτρηση των βασικών μεγεθών της. Η δεύτερη δοκιμή εξετάζει συνολικά την απόδοση και τη λειτουργία του υδροηλεκτρικού συστήματος (δηλαδή του υδροστροβίλου και της γεννήτριας μαζί) υπό συγκεκριμένη παροχή και πίεση, αλλά με μεταβαλλόμενο φορτίο. Όλα τα πειράματα γίνονται στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής των Μηχανολόγων Μηχανικών.

8.3.1 Μέτρηση της γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Οι μετρήσεις στη γεννήτριας γίνονται στο εργαστήριο Υδροδυναμικής με τη βοήθεια ενός DC κινητήρα (που έχει παραχωρηθεί στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών) με ονομαστική ισχύ 50hp και ονομαστικές στροφές 1150rpm. Ο DC κινητήρας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, γιατί έχει πολύ καλό έλεγχο των στροφών. Η γεννήτρια που θα μετρηθεί έχει ονομαστική ισχύ 350W και ονομαστικές στροφές 750rpm. Η σύνδεση της γεννήτριας με τον κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 8.27.



Σχήμα 8.27 Η γεννήτρια τοποθετημένη στη βάση της και συνδεδεμένη στον κινητήρα

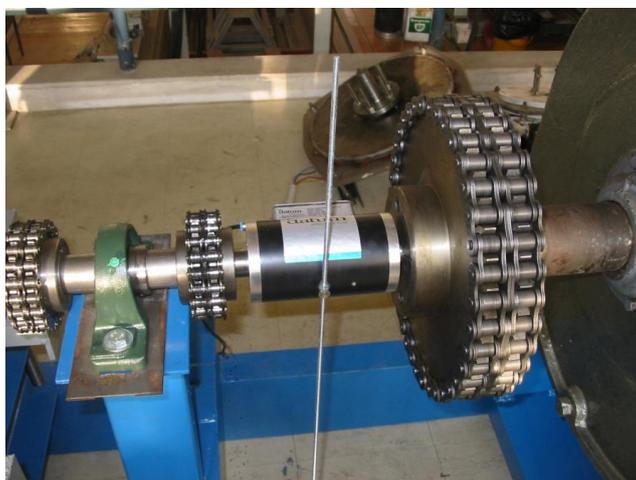
8.3.1.1 Η πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 8.28.



Σχήμα 8.28 Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε

Τα ρεύματα και οι τάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου, ενώ οι στροφές μετρώνται με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω της συχνότητας από τον παλμογράφο. Μεταξύ του κινητήρα και της γεννήτριας έχει τοποθετηθεί ροπόμετρο με εύρος 5Nm – 5kNm, το οποίο μετράει τις στροφές, τη ροπή και τη μηχανική ισχύ και φαίνεται στην εικόνα 8.29.



Σχήμα 8.29 Η σύνδεση του ροπομέτρου στη διάταξη

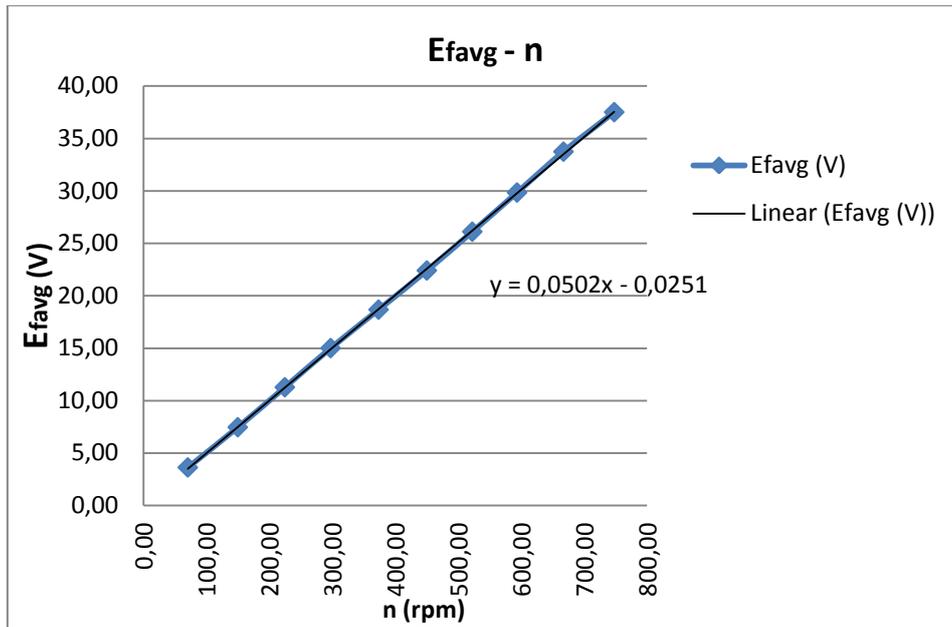
8.3.1.2 Μέτρηση της ΗΕΔ της γεννήτριας

Αρχικά, μετράται η ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας σε συνάρτηση με τις στροφές. Η γεννήτρια ανοιχτοκυκλώνεται και μετράται η φασική τάση στα άκρα της ενώ παράλληλα μεταβάλλονται οι στροφές του DC κινητήρα από τον πίνακα ελέγχου του. Η ΗΕΔ μετράται στον παλμογράφο (όπως και οι στροφές με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω της συχνότητας) μέχρι τις ονομαστικές στροφές.

Στον πίνακα 8.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των στροφών n , των φασικών τάσεων E_{fa} , E_{fb} , E_{fc} καθώς και η μέση τιμή της φασικής τάσης E_{favg} . Η μέση τιμή χρειάζεται να υπολογιστεί λόγω της απόκλισης που παρουσιάζεται μεταξύ των επιμέρους τάσεων, εξαιτίας ασυμμετρίας στην κατασκευή του τυλίγματος (πηνία με περισσότερα ή λιγότερα ελίγματα) αλλά και στην τοποθέτησή του στον χώρο. Επίσης, η σχέση της ΗΕΔ με τις στροφές αναπαρίσταται γραφικά στο σχήμα 8.30.

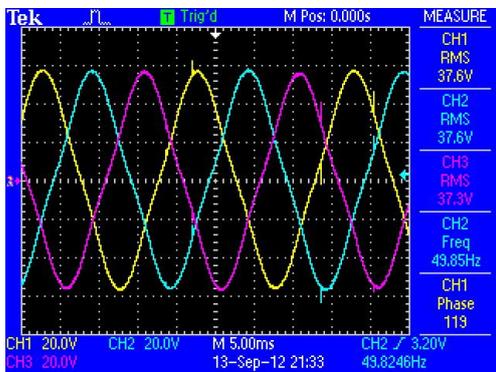
n (rpm)	E_{fa} (V)	E_{fb} (V)	E_{fc} (V)	E_{favg}(V)
70,47	3,70	3,60	3,56	3,62
149,85	7,54	7,47	7,36	7,46
224,55	11,30	11,30	11,20	11,27
297,30	15,10	15,00	14,90	15,00
373,50	18,80	18,60	18,60	18,67
450,15	22,50	22,50	22,20	22,40
522,30	26,20	26,00	26,10	26,10
593,40	29,90	30,10	29,50	29,83
667,20	34,00	33,70	33,50	33,73
747,75	37,60	37,60	37,30	37,50

Πίνακας 8.1 Η φασική ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής

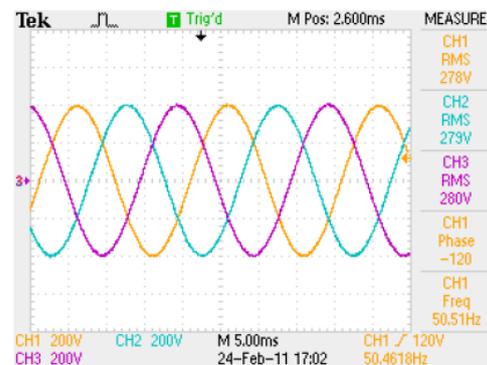


Σχήμα 8.30 Η φασική ΗΕΔ σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής

Η κυματομορφή της ΗΕΔ για συχνότητα 50Hz (όπως παρουσιάστηκε στον παλμογράφο) φαίνεται στο σχήμα 8.31(α), ενώ στο σχήμα 8.32(α) απεικονίζεται η αντίστοιχη ανάλυση Fourier. Όπως φαίνεται η κυματομορφή της ΗΕΔ δεν αποτελεί ένα καλό ημίτονο (πλησιάζει την τριγωνική κυματομορφή) και περιέχει σημαντικές αρμονικές τρίτης και πέμπτης τάξης. Αυτό εν μέρει οφείλεται στην ύπαρξη ενός μόνο δρομέα με μαγνήτες (ο δεύτερος δρομέας δε φέρει μαγνήτες) με αποτέλεσμα η μαγνητική επαγωγή που αναπτύσσεται στο διάκενο να μην είναι τελείως ημιτονοειδής. Στην κλασική περίπτωση της γεννήτριας διπλού δρομέα - μονού στάτη που αναφέρεται στο [6] η διάταξη είναι πιο συμμετρική, η μαγνητική επαγωγή είναι ημιτονοειδής όπως και η ΗΕΔ που προκύπτει. Στο σχήμα 8.31(β) απεικονίζεται η κυματομορφή της ΗΕΔ της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών των 3kW του [6] και στο σχήμα 8.32 (β) ανάλυση Fourier της κατά την αντίστοιχη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.

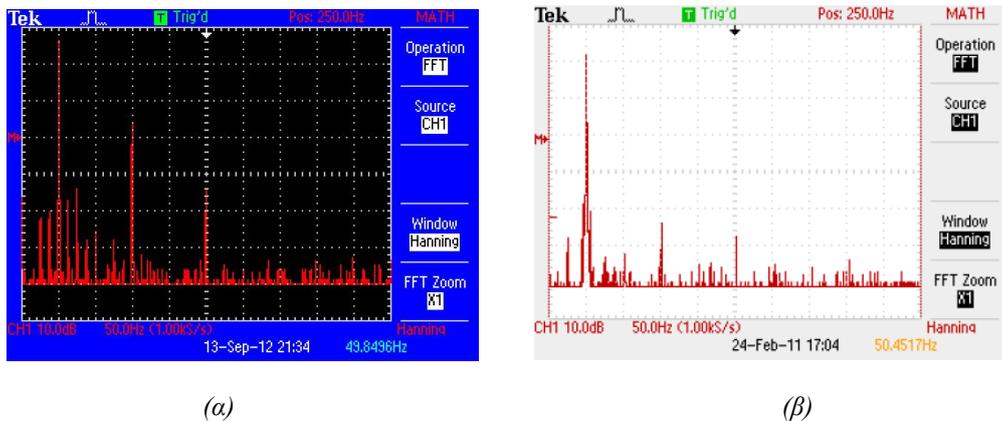


(α)



(β)

Σχήμα 8.31 Κυματομορφή της ΗΕΔ στις τρεις φάσεις όταν η γεννήτρια στρέφεται στις ονομαστικές στροφές (α) για τη γεννήτρια των 350W με ονομαστικές στροφές 750rpm, (β) για τη γεννήτρια των 3kW του [6] με ονομαστικές στροφές 300rpm



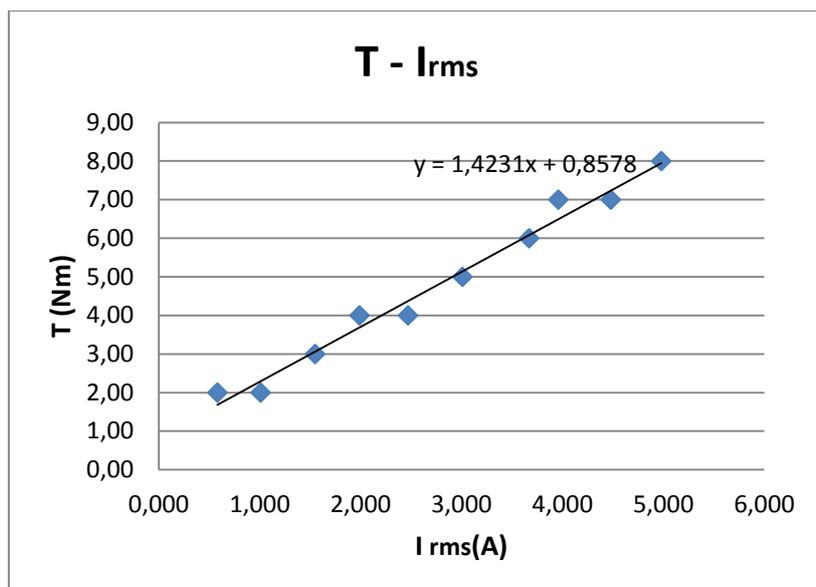
Σχήμα 8.32 Η ανάλυση Fourier της τάσης στη φάση Α (α) για τη γεννήτρια των 350W που φέρει μαγνήτες μόνο στον ένα δρομέα, (β) για τη γεννήτρια των 3kW του [6] η οποία έχει μαγνήτες και στους δύο δρομείς

8.3.1.3 Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο

Για τη διεξαγωγή της δοκιμής αυτής συνδέουμε στα άκρα της γεννήτριας ένα τριφασικό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο. Οι στροφές παραμένουν σταθερές στην ονομαστική τους τιμή $n=750\text{rpm}$, ενώ το ωμικό φορτίο ρυθμίζεται έως ότου μετρηθεί το κατάλληλο ρεύμα. Το ρεύμα I_{rms} μεταβάλλεται από την τιμή 0,5 A μέχρι την ονομαστική του τιμή και λίγο παραπάνω, με βήμα 0,5 A και μετράται μέσω της αμπεροτσιμπίδας που συνδέεται στον παλμογράφο. Για κάθε τιμή ρεύματος λαμβάνεται μέτρηση της ροπής T μέσω του ροπομέτρου, το οποίο όμως έχει πολύ μεγάλο εύρος (5Nm – 5kNm) κι έτσι μπορεί να υπεισέρχονται σφάλματα σε μετρήσεις κοντά στο κάτω όριο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ροπής σε σχέση με το ρεύμα φαίνονται στον πίνακα 8.2 και παρίστανται γραφικά στο σχήμα 8.33.

T(Nm)	Irms(A)
2,00	0,582
2,00	1,010
3,00	1,550
4,00	1,990
4,00	2,470
5,00	3,010
6,00	3,670
7,00	3,960
7,00	4,480
8,00	4,980

Πίνακας 8.2 Οι τιμές της ροπής σε σχέση με το ρεύμα για σταθερές στροφές

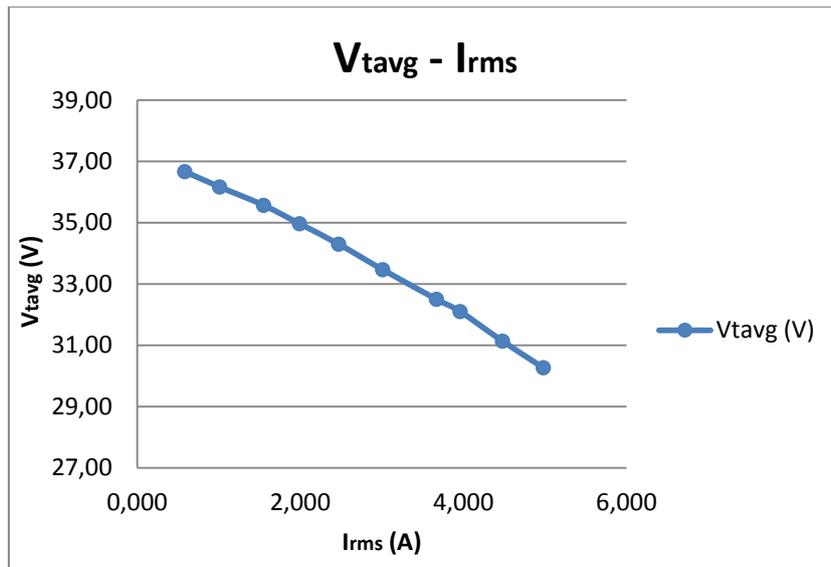


Σχήμα 8.33 Γραφική παράσταση της μηχανικής ροπής σε συνάρτηση με το ρεύμα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας

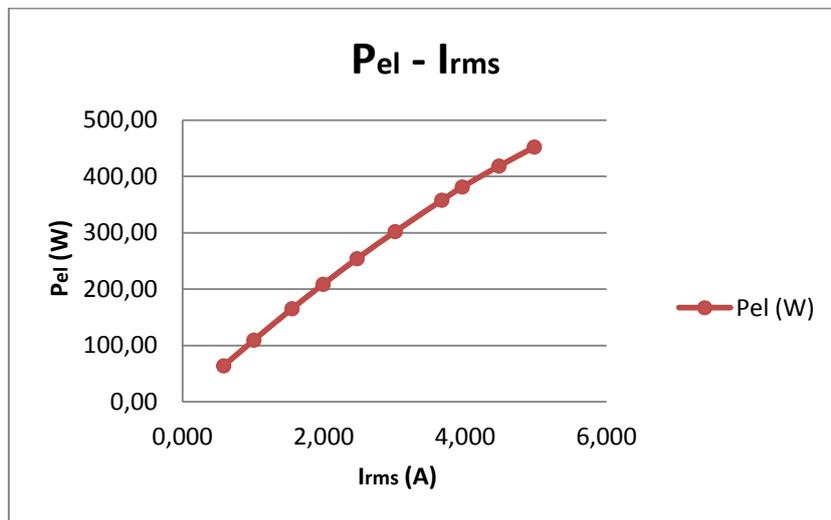
Παράλληλα με την παραπάνω διαδικασία για κάθε τιμή φορτίου (που αντιστοιχεί σε κάποια τιμή ρεύματος) μετράται και η τερματική τάση V_{ta} , V_{tb} , V_{tc} στις τρεις φάσεις της γεννήτριας για τις ονομαστικές στροφές με τη βοήθεια του παλμογράφου. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η μέση τιμή της φασικής τάσης V_{tavg} και υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς P_{el} στην έξοδό της. Στον πίνακα 8.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα μέτρησης του ρεύματος και της τάσης και οι προκύπτουσα ηλεκτρική ισχύς, ενώ στο σχήμα 8.34 δίνεται η γραφική παράσταση της τερματικής τάσης με το ρεύμα και στο σχήμα 8.35 η γραφική παράσταση της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα.

$I (A)$	$V_{ta} (V)$	$V_{tb} (V)$	$V_{tc} (V)$	$V_{tavg}(V)$
0,582	36,80	36,90	36,30	36,67
1,010	36,50	36,30	35,70	36,17
1,550	35,90	35,70	35,10	35,57
1,990	35,30	35,10	34,50	34,97
2,470	34,70	34,40	33,80	34,30
3,010	33,70	33,60	33,10	33,47
3,670	32,80	32,70	32,00	32,50
3,960	32,40	32,30	31,60	32,10
4,480	31,30	31,50	30,60	31,13
4,980	30,50	30,80	29,50	30,27

Πίνακας 8.3 Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας

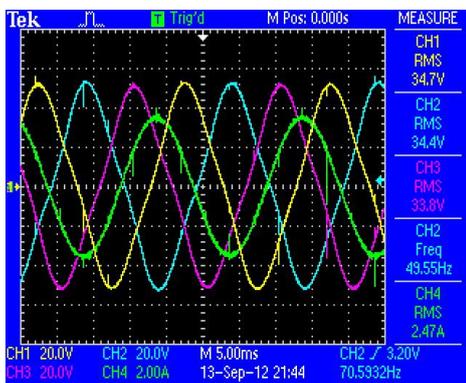


Σχήμα 8.34 Γραφική παράσταση της τερματικής τάσης της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα

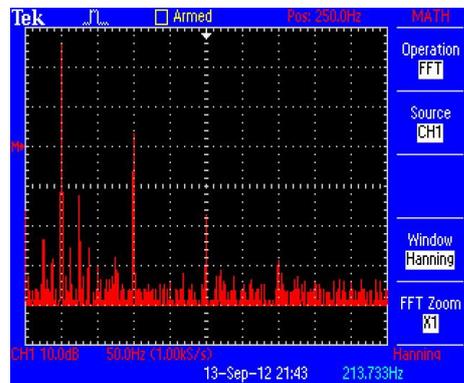


Σχήμα 8.35 Γραφική παράσταση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα

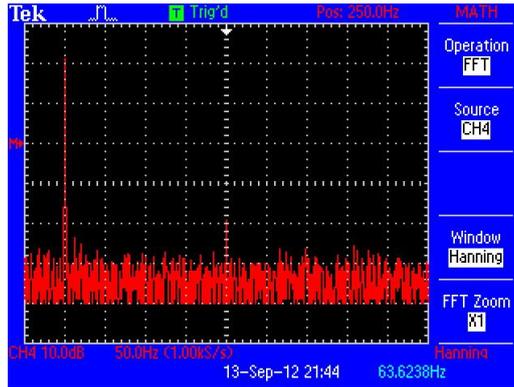
Μία από τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος που προέκυψαν (όπως απεικονίζεται στον παλμογράφο) φαίνεται στο σχήμα 8.36 (α), ενώ στο σχήμα 8.36(β) φαίνεται η ανάλυση Fourier της τάσης της φάσης A και στο 8.36(γ) η ανάλυση Fourier του ρεύματος.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 8.36 (α) Οι κυματομορφές της τάσης στις τρεις φάσεις και του ρεύματος της γεννήτριας όταν αυτή τροφοδοτεί κάποιο τριφασικό ωμικό φορτίο, (β) η αντίστοιχη ανάλυση Fourier της τάσης της φάσης A, (γ) ανάλυση Fourier του ρεύματος όπως φαίνονται στον παλμογράφο

Ακολουθώντας, με τη βοήθεια της μηχανικής ροπής που μετρήθηκε προηγουμένως και δεδομένων των στροφών της γεννήτριας, υπολογίζεται η μηχανική ισχύς P_{mech} στην είσοδο της γεννήτριας και η απόδοσή της η_{eff} υπό τριφασικό ωμικό μεταβαλλόμενο φορτίο. Στον πίνακα 8.4 παρατίθενται οι τιμές της μηχανικής ροπής, του ρεύματος, της μέσης τάσης στα άκρα της γεννήτριας, της ηλεκτρικής ισχύος, της μηχανικής ισχύος και της απόδοσης.

T(Nm)	I _{rms} (A)	V _{tavg} (V)	P _{el} (W)	P _{mech} (W)	η_{eff}
2,00	0,582	36,67	64,02	157,39	0,407
2,00	1,010	36,17	109,59	155,82	0,703
3,00	1,550	35,57	165,39	233,07	0,710
4,00	1,990	34,97	208,75	311,02	0,671
4,00	2,470	34,30	254,16	311,33	0,816
5,00	3,010	33,47	302,20	389,16	0,777
6,00	3,670	32,50	357,83	470,77	0,760
7,00	3,960	32,10	381,35	551,43	0,692
7,00	4,480	31,13	418,43	543,84	0,769
8,00	4,980	30,27	452,18	623,92	0,725

Πίνακας 8.4 Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 750rpm

Η σχέση μεταξύ της ροπής και του ρεύματος είναι θεωρητικά γραμμική. Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής τα σημεία των μετρήσεων δεν βρίσκονται πάνω ακριβώς στην ίδια ευθεία όπως φαίνεται στο σχήμα 8.33, αλλά παρ' όλα αυτά προσεγγίζονται μέσω της εξίσωσης:

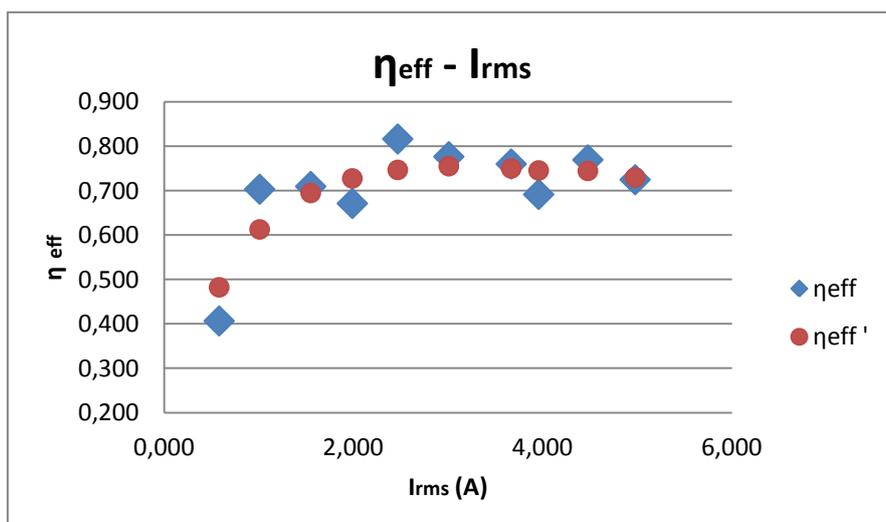
$$y = 1,4231x + 0,8578 \quad (8.29)$$

(με y και x να είναι ροπή και το ρεύμα αντίστοιχα) που αναπαριστά τη μαύρη ευθεία που φαίνεται στο ίδιο σχήμα. Αν υπολογιστεί η ροπή T' που θα προέκυπτε μέσω της εξίσωσης αυτής για τις μετρούμενες τιμές ρεύματος, τότε θα προέκυπταν οι τιμές μηχανικής ισχύος P_{mech}' και απόδοσης η_{eff}' που φαίνονται στον πίνακα 8.5.

T' (Nm)	I_{rms} (A)	V_{tavg} (V)	P_{el} (W)	P_{mech} (W)	η_{eff}
1,69	0,582	36,67	64,02	132,69	0,48
2,30	1,010	36,17	109,59	178,82	0,61
3,06	1,550	35,57	165,39	238,02	0,69
3,69	1,990	34,97	208,75	286,90	0,73
4,37	2,470	34,30	254,16	340,35	0,75
5,14	3,010	33,47	302,20	400,16	0,76
6,08	3,670	32,50	357,83	477,09	0,75
6,49	3,960	32,10	381,35	511,51	0,75
7,23	4,480	31,13	418,43	561,97	0,74
7,94	4,980	30,27	452,18	619,62	0,73

Πίνακας 8.5 Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 750rpm, αν η ροπή και το ρεύμα ικανοποιούσαν την εξίσωση $y = 1,4231x + 0,8578$ και είχαν γραμμική σχέση όπως έπρεπε

Στο σχήμα 8.37 δίδεται η γραφική παράσταση της απόδοσης της γεννήτριας σε συνάρτηση με το ρεύμα που τη διαρρέει και για τις μετρηθείσες τιμές ρεύματος και ροπής (μπλε σημεία), αλλά και για τις υπολογιζόμενες (κόκκινα σημεία) με βάση την εξίσωση (8.29).



Σχήμα 8.37 Η μεταβολή της απόδοσης για μεταβαλλόμενο ρεύμα στις ονομαστικές στροφές

8.3.1.4 Μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος

Μετά το πέρας των παραπάνω μετρήσεων και όσο η γεννήτρια ήταν ακόμα ζεστή γύρω στους 30 -35°C , θεωρήθηκε σκόπιμο να μετρηθεί η αντίσταση των τυλιγμάτων της. Αποσυνδέεται τελείως η γεννήτρια και με ένα τροφοδοτικό δίδονται κάποια ρεύματα σε κάθε φάση και παρατηρείται η τάση που αναπτύσσει το τροφοδοτικό. Στη συνέχεια, με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης κάθε φάσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 8.6.

ΦΑΣΗ Α			
V (V)	I (A)	RA (Ω)	RAavg(Ω)
1,2	1,17	1,026	1,026
2,3	2,23	1,031	
3,2	3,1	1,032	
3,9	3,81	1,024	
4,8	4,72	1,017	
ΦΑΣΗ Β			
V (V)	I (A)	RB (Ω)	RBavg(Ω)
4,7	4,72	0,996	1,004
3,6	3,6	1,000	
3	2,99	1,003	
2	2	1,000	
1,4	1,37	1,022	
ΦΑΣΗ C			
V (V)	I (A)	RC (Ω)	RCavg(Ω)
1,4	1,36	1,029	1,009
2,5	2,5	1,000	
4	3,96	1,010	
4,7	4,71	0,998	
R_{AVG}			1,013

Πίνακας 8.6 Μέτρηση της αντίστασης κάθε φάσης της γεννήτριας

Οι τιμές της αντίστασης που μετρήθηκαν είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές που είχαν υπολογιστεί κατά τη σχεδίαση (0,92Ω) λόγω αυξημένης θερμοκρασίας. (Κατά τη σχεδίαση η αντίσταση υπολογίστηκε για θερμοκρασία 20°C.)

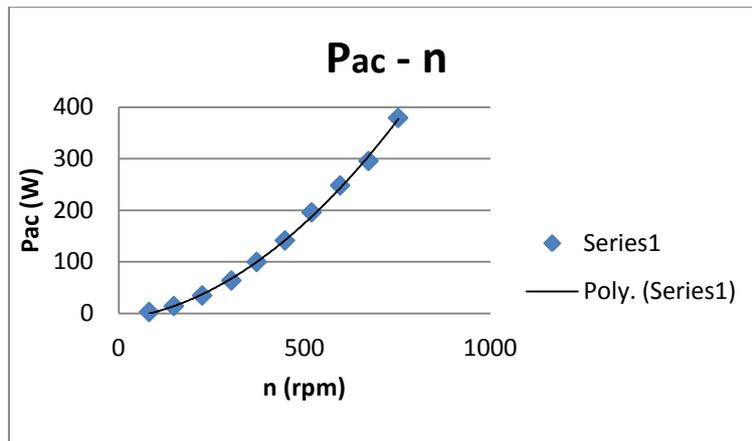
8.3.1.5 Μέτρηση της γεννήτριας κατά την τροφοδότηση ωμικού φορτίου μέσω ανορθωτή

Για τη δοκιμή αυτή στην πειραματική διάταξη στην έξοδο της γεννήτριας προστίθεται ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής μέσω του οποίου τροφοδοτείται το ωμικό φορτίο με dc ρεύμα. Αρχικά, η γεννήτρια στρέφεται στις ονομαστικές της στροφές και το φορτίο μεταβάλλεται μέχρι να προκύψει το ονομαστικό ρεύμα. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε με τη βοήθεια παλμογεννήτριας και η τιμή του βρέθηκε ίση με 14,4Ω. Η διαδικασία της δοκιμής αυτής περιλαμβάνει τη μεταβολή των στροφών της γεννήτριας n και μέτρηση της ροπής, των τριών τερματικών φασικών τάσεων V_{ia} , V_{ib} , V_{ic} , του εναλλασσόμενου ρεύματος I_{ac} , της συνεχούς τάσης V_{dc} και του συνεχούς ρεύματος I_{dc} μέσω του παλμογράφου για το σταθερό μονοφασικό ωμικό φορτίο που αναφέρεται παραπάνω. Στον πίνακα 8.7 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και οι υπολογιζόμενες τιμές ηλεκτρικής ισχύος στην ac (P_{ac}) και την dc (P_{dc}) πλευρά της διάταξης. Κατά την τελευταία μέτρηση, η θερμοκρασία του

στάτη της γεννήτριας είχε φθάσει τους 36°C και η απόδοση που είχε στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας υπολογίστηκε ίση με 82%.

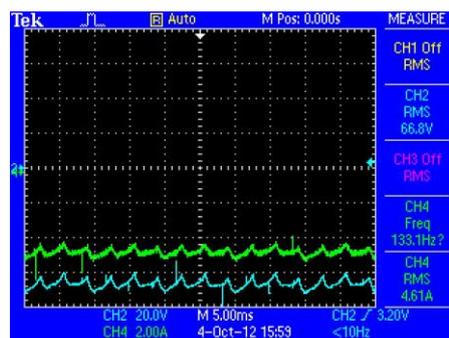
n(rpm)	f(Hz)	V _{ta} (V)	V _{tb} (V)	V _{tc} (V)	V _{tavg} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{ac} (W)	P _{dc} (W)
82,2	5,478	3,34	3,34	3,33	3,34	0,25	6,23	0,16	2,50	1,00
148,8	9,921	6,88	6,62	6,85	6,78	0,688	13,8	0,708	14,00	9,77
225,0	15	10,1	10,2	10,6	10,3	1,12	21,4	1,24	34,61	26,54
303,6	20,24	13,5	13	13,5	13,33	1,59	28,2	1,75	63,60	49,35
371,7	24,78	16,8	16,1	16,9	16,60	2	35	2,26	99,60	79,10
447,8	29,85	19,7	19,3	20,1	19,70	2,39	41,9	2,74	141,25	114,81
519,5	34,63	24,2	22,3	23,4	23,30	2,8	48,5	3,17	195,72	153,75
596,3	39,75	26,4	25,5	26,3	26,07	3,17	54,6	3,71	247,89	202,57
672,6	44,84	28,6	27,3	30,2	28,70	3,43	60,8	4,17	295,32	253,54
752,3	50,15	32,4	31,4	32,6	32,13	3,93	66,8	4,61	378,85	307,95

Πίνακας 8.7 Η τάση, το ρεύμα και η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές για σταθερό ωμικό φορτίο 14,4Ω

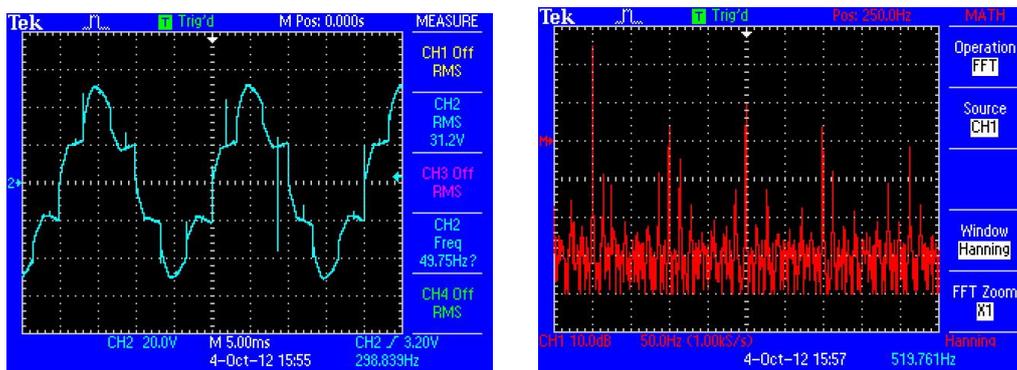


Σχήμα 8.38 Η ισχύς της γεννήτριας σε σχέση με τις στροφές για σταθερό ωμικό φορτίο

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι κυματομορφές της εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης, του εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος και η ανάλυση Fourier της τερματικής τάσης της φάσης A και του ρεύματος όπως αυτά φαίνονται στον παλμογράφο. Όπως φαίνεται, οι αρμονικές της τάσης και του ρεύματος έχουν πληθύνει σε σχέση με τις άλλες δοκιμές λόγω και της παρουσίας του ανορθωτή.



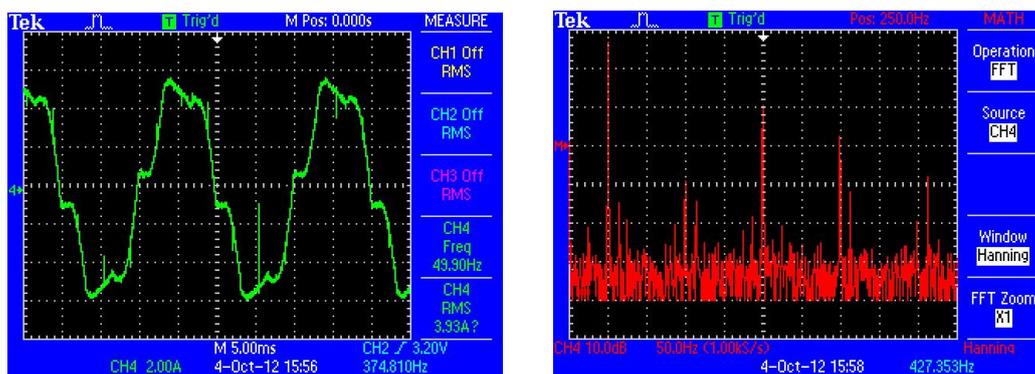
Σχήμα 8.49 Οι κυματομορφές της συνεχούς τάσης και του συνεχούς ρεύματος στην έξοδο του ανορθωτή όταν η γεννήτρια στρέφεται στις ονομαστικές στροφές και τροφοδοτεί φορτίο 14Ω



(α)

(β)

Σχήμα 8.39 (α) Η κυματομορφή της τερματικής τάσης της φάσης A της γεννήτριας στις ονομαστικές στροφές για φορτίο 14Ω , (β) Η ανάλυση Fourier της τάσης αυτής



(α)

(β)

Σχήμα 8.40 (α) Η κυματομορφή του ρεύματος της γεννήτριας στις ονομαστικές στροφές για φορτίο 14Ω , (β) Η ανάλυση Fourier του ρεύματος αυτού

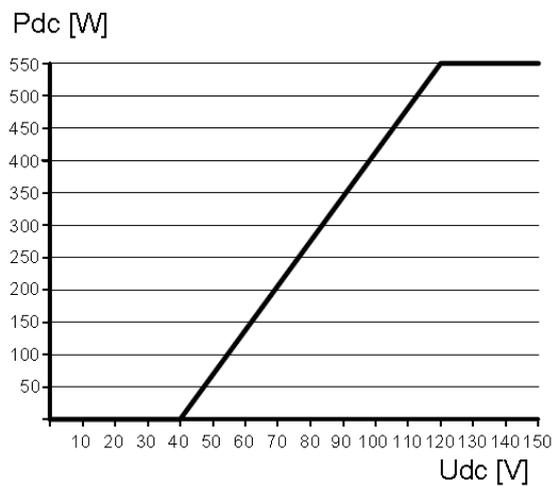
8.3.1.6 Μέτρηση της γεννήτριας όταν συνδεθεί στο δίκτυο μέσω μονοφασικού αντιστροφέα

Η συγκεκριμένη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί στα πλαίσια ενός μικροδικτύου, στο οποίο θα συνδέεται μέσω ενός ανορθωτή και ενός αντιστροφέα. Ως εκ τούτου, προτιμήθηκε και η διεξαγωγή μίας δοκιμής της γεννήτριας κατά τη σύνδεσή της με τον τρόπο αυτόν στο ηλεκτρικό δίκτυο του εργαστηρίου Υδροδυναμικής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αντιστροφέας Windmaster 500, ο οποίος συνδέθηκε στην έξοδο του μη ελεγχόμενου ανορθωτή της προηγούμενης δοκιμής και ακολούθως στο δίκτυο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.41. Η χαρακτηριστική καμπύλη

λειτουργίας του αντιστροφέα όπως αυτή παρατίθεται στο τεχνικό του εγχειρίδιο φαίνεται στο σχήμα 8.42.



Σχήμα 8.41 Ο ανορθωτής συνδεδεμένος στην έξοδο της γεννήτριας και ο αντιστροφέας μέσω του οποίου αυτή συνδέεται στο δίκτυο



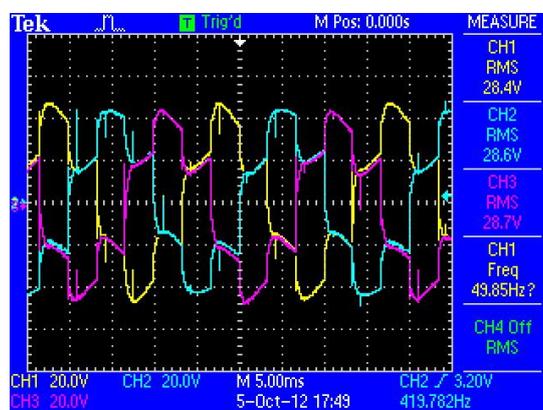
Σχήμα 8.42 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του αντιστροφέα όπως αυτή παρατίθεται στο τεχνικό του εγχειρίδιο

Οι στροφές της γεννήτριας ρυθμίζονταν μέσω του dc κινητήρα και καθώς μεταβάλλονταν, μετρούνταν η ροπή, η συχνότητα, οι τερματικές τάσεις της γεννήτριας και το ρεύμα στην έξοδό της, η συνεχής τάση και το συνεχές ρεύμα στην έξοδο του ανορθωτή, καθώς και η

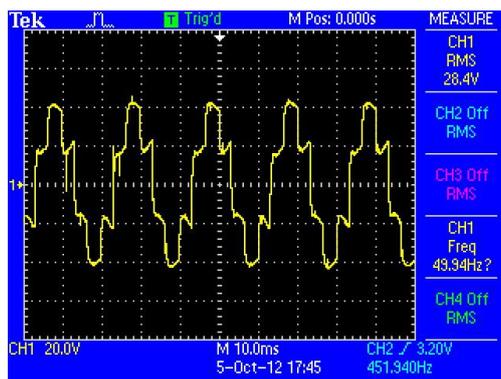
τάση και το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα μέσω του ροπομέτρου, του παλμογράφου και του πολυμέτρου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 8.8, ενώ στα σχήματα 8.43 με 8.47 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης, του εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος και η ανάλυση Fourier της τερματικής τάσης της φάσης A και του ρεύματος όπως αυτά φαίνονται στον παλμογράφο. Επίσης, στα σχήματα 8.44 (γ) και 8.45 (γ) παρατίθενται και οι κυματομορφές από την ανάλυση Fourier της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο της γεννήτριας όταν αυτή τροφοδοτούσε φορτίο (με συνεχές ρεύμα) μέσω του μη ελεγχόμενου ανορθωτή για σύγκριση. Απ' ότι φαίνεται οι αρμονικές της τάσης δεν έχουν μειωθεί κατά τη σύνδεση με τον αντιστροφέα, ενώ αυτές του ρεύματος έχουν υποχωρήσει λίγο. Σημαντική διαφορά, όμως, παρουσιάζεται στην dc τάση στην έξοδο του ανορθωτή, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι πολύ πιο ομαλή και δεν παρουσιάζει τόσες αιχμές στην κυματομορφή της σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή.

n (rpm)	f (Hz)	V _{ta} (V)	V _{tb} (V)	V _{tc} (V)	V _{tavg} (V)	I _{acg} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	V _{aci} (V)	I _{aci} (A)
217,95	14,53	10,5	10,6	10,9	10,67	0,136	24,6	0,298	229	0,071
243,9	16,26	12	12	12,4	12,13	0,127	28,2	0,324	229	0,292
291,45	19,43	13,4	13,4	14,4	13,73	0,853	29,9	0,725	229	0,316
339,3	22,62	15	15,5	15,1	15,20	1,84	32	2,04	229	0,406
393,6	26,24	15,8	16,6	16,7	16,37	3,06	34,3	3,44	229	0,57
438,9	29,26	17,2	17,8	18	17,67	3,64	37,1	4,39	229	0,73
487,35	32,49	18,6	19	19,8	19,13	4,08	41	4,94	229	0,863
538,05	35,87	20,8	21,4	21,9	21,37	4,47	44,9	5,42	229	1,01
589,95	39,33	22,7	23,3	23,8	23,27	4,9	48,4	5,85	229	1,16
634,05	42,27	24,7	24,6	25,9	25,07	5,33	51,9	6,35	230	1,32
690,6	46,04	25,9	27	27,2	26,70	5,49	55,6	6,72	230	1,49
745,35	49,69	27,6	28,6	29,7	28,63	5,6	59,3	7,21	230	1,7

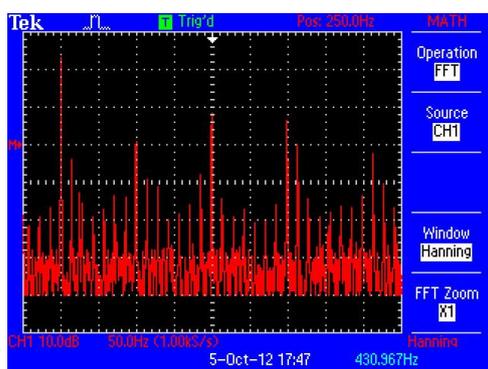
Πίνακας 8.8 Η τάση και το ρεύμα στην έξοδο της γεννήτριας, του ανορθωτή και του αντιστροφέα σε σχέση με τις στροφές για σύνδεση στο δίκτυο



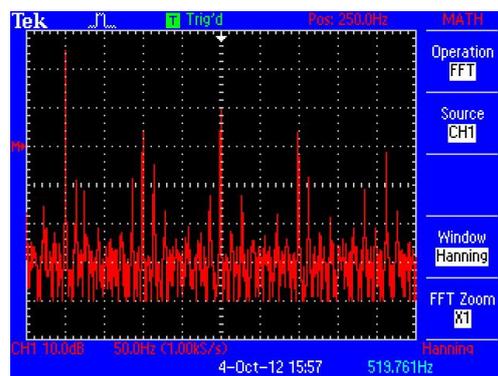
Σχήμα 8.43 Οι κυματομορφές των φασικών τερματικών τάσεων της γεννήτριας για σύνδεση στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα στις ονομαστικές της στροφές



(α)

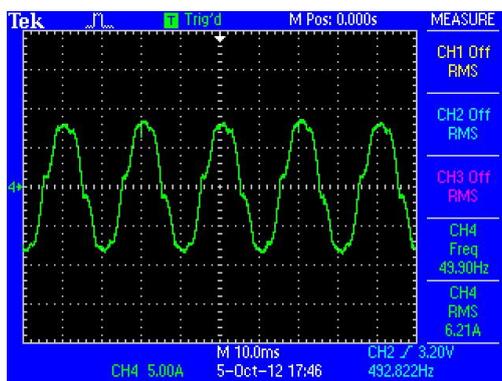


(β)

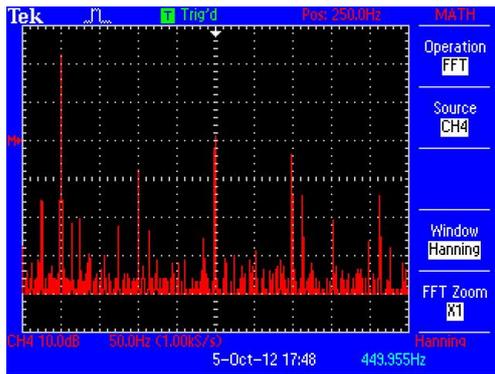


(γ)

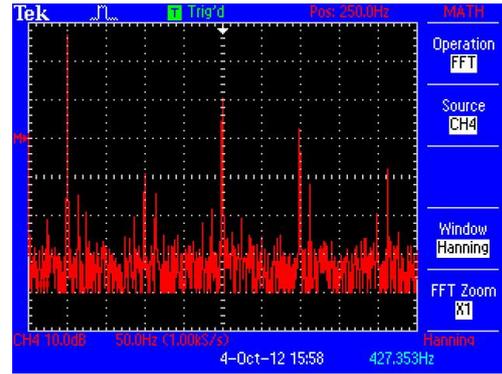
Σχήμα 8.44 (α) Η κυματομορφή της τερματικής τάσης της φάσης A της γεννήτριας, (β) Η ανάλυση Fourier της τάσης της γεννήτριας κατά τη σύνδεσή της στο δίκτυο μέσω του αντιστροφέα, (γ) Η ανάλυση Fourier της τάσης της γεννήτριας όταν αυτή τροφοδοτεί φορτίο με dc ρεύμα μέσω του ανορθωτή (προηγούμενη δοκιμή)



(α)

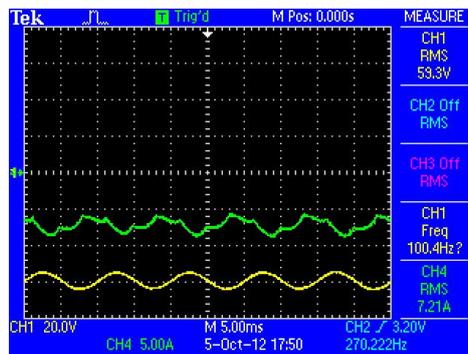


(β)

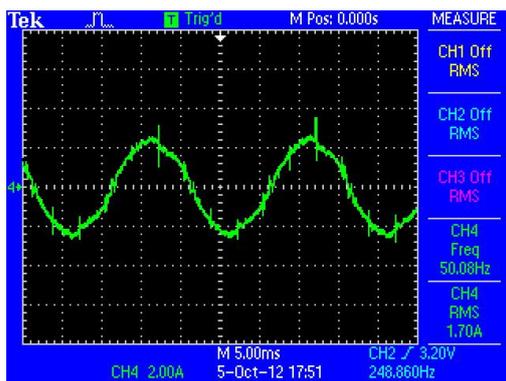


(γ)

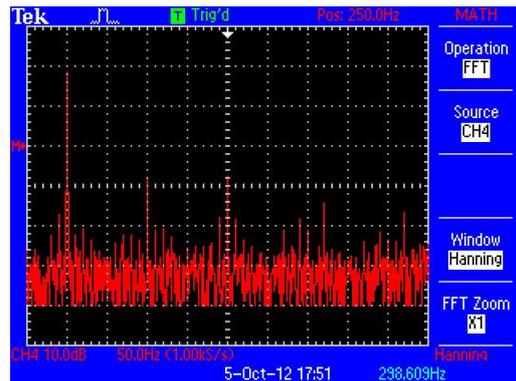
Σχήμα 8.45 (α) Η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου της γεννήτριας, (β) Η ανάλυση Fourier του ρεύματος της γεννήτριας κατά τη σύνδεσή της στο δίκτυο μέσω του αντιστροφέα, (γ) Η ανάλυση Fourier του ρεύματος της γεννήτριας όταν αυτή τροφοδοτεί φορτίο με dc ρεύμα μέσω του ανορθωτή (προηγούμενη δοκιμή)



Σχήμα 8.46 Οι κυματομορφές της συνεχούς τάσης και του συνεχούς ρεύματος στην έξοδο του ανορθωτή



(α)



(β)

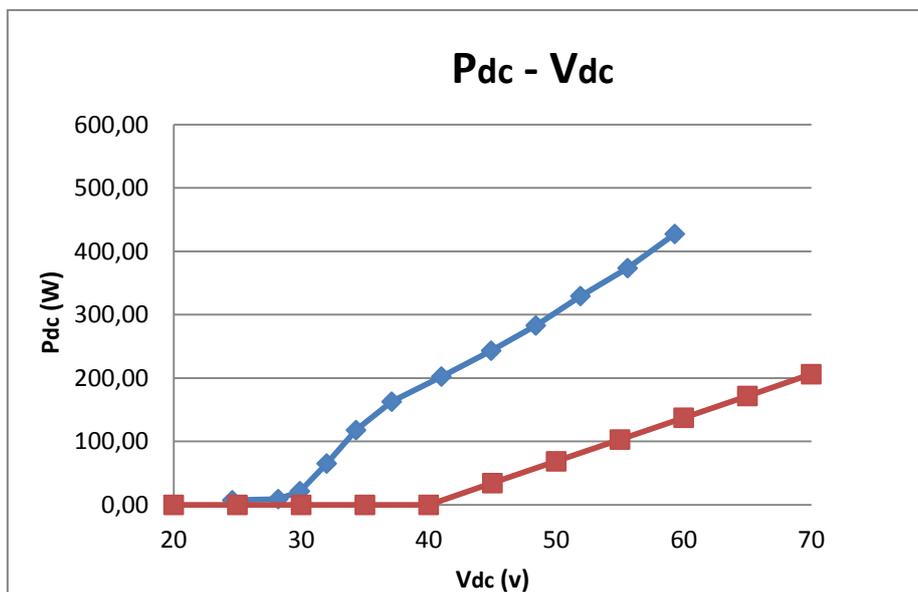
Σχήμα 8.47 (α) Η κυματομορφή του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα, (β) Η ανάλυση Fourier του ρεύματος αυτού

Μέσω των μετρήσεων του πίνακα 8.8 μπορεί να υπολογιστεί και η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του ανορθωτή, με αποτελέσματα που παρατίθενται στον πίνακα 8.9, να σχεδιαστεί η

καμπύλη λειτουργίας του αντιστροφέα και να συγκριθεί με αυτή που δίδεται στο τεχνικό εγχειρίδιό του, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.48. Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής παρατηρήθηκε ότι ο αντιστροφέας ξεκινάει να άγει για τάση εισόδου μικρότερη από αυτήν που δίδεται στις προδιαγραφές του, στις οποίες δεν φάνηκε να ανταποκρίνεται καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του.

V_{dc} (V)	I_{dc} (A)	P_{dc} (W)
24,6	0,298	7,33
28,2	0,324	9,14
29,9	0,725	21,68
32	2,04	65,28
34,3	3,44	117,99
37,1	4,39	162,87
41	4,94	202,54
44,9	5,42	243,36
48,4	5,85	283,14
51,9	6,35	329,57
55,6	6,72	373,63
59,3	7,21	427,55

Πίνακας 8.9 Η dc τάση, το dc ρεύμα και η ισχύς στην έξοδο του ανορθωτή



Σχήμα 8.48 Καμπύλη λειτουργίας του αντιστροφέα Windmaster 500 σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις (μπλε καμπύλη) και σύμφωνα με το τεχνικό του εγχειρίδιο (κόκκινη καμπύλη)

Στον πίνακα 8.10 φαίνονται οι τιμές της μηχανικής ισχύος P_{mech} και της ηλεκτρικής ισχύος σε διάφορα σημεία της διάταξης (στην έξοδο της γεννήτριας P_{acg} , του ανορθωτή P_{dc} και του αντιστροφέα P_{aci}) και η απόδοση της γεννήτριας η_g , του ανορθωτή η_{rec} και του αντιστροφέα η_{inv} για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Κατά τη διεξαγωγή των τελευταίων δοκιμών μέτρησης της γεννήτριας παρουσιάστηκαν κάποιες πιθανόν εσφαλμένες μετρήσεις της ροπής (ίσως λόγω σφαλμάτων του ροπομέτρου), οι οποίες οδήγησαν και σε λανθασμένες τιμές

μηχανικής ισχύος. Συγκεκριμένα, σημειώθηκαν μετρήσεις χαμηλότερης ροπής ως προς τα αντίστοιχα ρεύματα σε σχέση με την καμπύλη T-I του σχήματος 8.33 με αποτέλεσμα να προκύπτουν οι τόσο υψηλές τιμές απόδοσης της γεννήτριας.

n (rpm)	T (Nm)	P _{mech} (W)	P _{acg} (W)	P _{dc} (W)	P _{aci} (W)	η_g	η_{rec}	η_{inv}
487,35	5,7	290,90	234,19	202,54	197,63	0,805	0,865	0,976
538,05	6,1	343,70	286,53	243,36	231,29	0,834	0,849	0,950
589,95	6,6	407,74	342,02	283,14	265,64	0,839	0,828	0,938
634,05	6,9	458,14	400,82	329,57	303,60	0,875	0,822	0,921
690,6	7,4	535,16	439,75	373,63	342,70	0,822	0,850	0,917
745,35	7,9	616,62	481,04	427,55	391,00	0,780	0,889	0,915

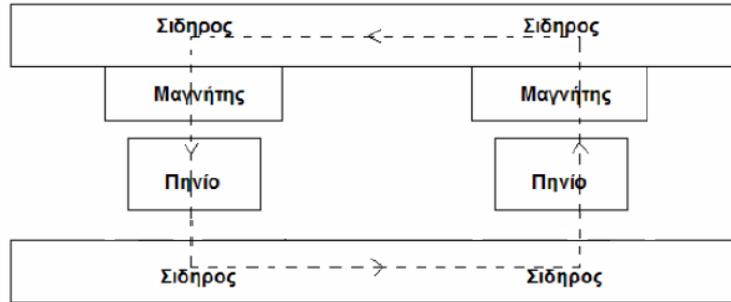
Πίνακας 8.10 Τιμές της μηχανικής ισχύος και της ηλεκτρικής ισχύος σε διάφορα σημεία της διάταξης και η απόδοση της γεννήτριας, του ανορθωτή και του αντιστροφέα για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής

8.3.1.7 Συμπεράσματα: πιθανή εφαρμογή μίας εναλλακτικής σχεδίασης

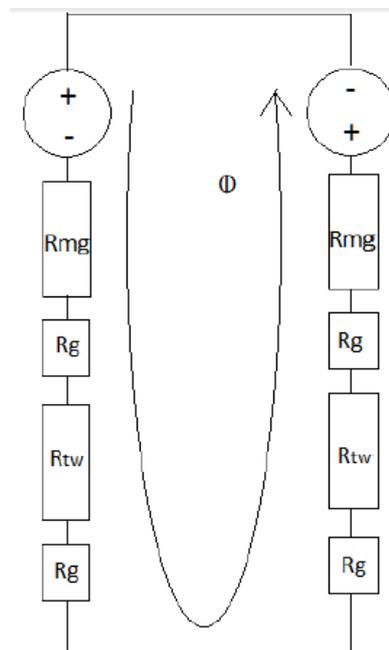
Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει παρατηρώντας τους πίνακες των ενοτήτων 8.3.1.2 έως 8.3.1.6, τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών αποκλίνουν αρκετά από αυτά που αναμένονταν με βάση τη σχεδίαση. Η ΗΕΔ της γεννήτριας προκύπτει μικρότερη στις ονομαστικές στροφές, το ρεύμα φόρτισης της γεννήτριας μεγαλύτερο από το αναμενόμενο για την ονομαστική ισχύ και η απόδοσή της μικρότερη. Αυτό επηρεάζει (όπως θα φανεί και κατά τη δοκιμή της ενότητας 8.3.2.3) τη λειτουργία του υδροηλεκτρικού συστήματος όταν συνδέεται στο δίκτυο μέσω του αντιστροφέα, αφού δεν αποδίδει τα 350W στα 90V dc, αλλά περίπου στα 85V.

Ένας τρόπος αύξησης της τάσης θα ήταν η αύξηση των ονομαστικών στροφών, αλλά τότε θα μεταβαλλόταν και η συχνότητα (θα ξεπερνούσε τα 50Hz) · γεγονός που δεν είναι αποδεκτό. Ένας άλλος τρόπος θα ήταν η αύξηση της μαγνητικής ροής στο διάκενο είτε με αύξηση των περιελίξεων είτε με μείωση του διακένου. Η τελευταία αλλαγή, όμως, δοκιμάστηκε και δεν οδήγησε σε δραστική μεταβολή των αποτελεσμάτων. Ενδέχεται η καλύτερη λύση να είναι μία διαφορετική σχεδίαση της γεννήτριας που θα βασίζεται στο μαγνητικό της κύκλωμα και δεν θα ακολουθεί την προσεγγιστική διαδικασία που παρουσιάζεται στο [43], σύμφωνα με το οποίο κατασκευάστηκε η γεννήτρια της παρούσας διπλωματικής. Και με τη διαφορετική σχεδίαση όμως, η οποία παρουσιάζεται στο [44], η χαμηλή τιμή της απόδοσης δεν αναμένεται να αλλάξει, καθώς μάλλον αποτελεί χαρακτηριστικό των μικρότερων γεννητριών που φτιάχνονται με τον συγκεκριμένο τρόπο, ίσως και λόγω των αυξημένων απωλειών σκέδασης.

Μια πλάγια όψη της γεννήτριας καθώς και το αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα που προκύπτει από αυτή φαίνονται στα σχήματα 8.49 και 8.50.



Σχήμα 8.49 Η πλάγια όψη της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του μαγνητικού κυκλώματος



Σχήμα 8.50 Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος με την παραδοχή ότι η μαγνητική επαγωγή διατηρείται σταθερή στο διάκενο δίνει την σχέση (8.29) μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής B_{mg} και του αξονικού πάχους του στάτη t_w :

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \frac{(2g+t_w)}{h_m} \mu_{rrec}} \quad (8.29)$$

όπου $\mu_{rrec}=1,0958$: η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη

$h_m=10\text{mm}$: το αξονικό πάχος των μαγνητών

$g=3\text{mm}$: το αξονικό ύψος του διακένου

και καθώς δεν υπάρχει πυρήνας θεωρείται ότι $k_{sat}=1$.

Μία επίσης καλή προσέγγιση με βάση το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας, θα μπορούσε να γίνει αν θεωρηθεί ότι το πεδίο εξασθενεί σε κάποιο σημείο του διακένου της γεννήτριας και ότι στο διάκενο πλησίον του μαγνήτη υπάρχει πεδίο B_{mg} , ενώ στο πηνίο και στο επόμενο διάκενο υπάρχει πεδίο B_{max} . Το B_{max} θεωρείται η μέγιστη τιμή που παίρνει η μαγνητική επαγωγή εντός του διακένου της γεννήτριας. Από την προσέγγιση αυτή προκύπτει ο τύπος (8.30):

$$t_w = \frac{1}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - g B_{mg} \right\} - g \quad (8.30)$$

Για το μαγνητικό κύκλωμα οι μαγνήτες θεωρούνται πηγές τάσης με τάση:

$$V = \frac{h_m B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}}$$

Η μαγνητική ροή Φ θεωρείται ρεύμα με μέτρο:

$$I = B * S$$

Τα υλικά στα οποία ταξιδεύει η μαγνητική ροή (αέρας, μαγνήτες, πηνία) θεωρούνται αντιστάσεις με τιμές:

$$R_{mg} = \frac{h_m}{S \mu_0 \mu_{rrec}}$$

$$R_g = \frac{g}{S \mu_0}$$

$$R_{tw} = \frac{t_w}{S \mu_0}$$

Η ονομαστική ηλεκτρεγερτική δύναμη E_f της γεννήτριας υπολογίζεται μέσω της απαιτούμενης dc τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα $V_{dc}=90V$ όταν αυτή παράγει την ονομαστική της ισχύ $350W$ αν θεωρηθεί ότι η πτώση τάσης στον ανορθωτή είναι $1,4V$, σύμφωνα με τον τύπο (8.30):

$$E_f = \frac{V_{dc} + 1,4}{\sqrt{3} \cdot 1,35} = 39,1V \quad (8.30)$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο (8.29) και θεωρώντας ότι η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο είναι $B_{mg}=0,44T$, σύμφωνα με μία προσομοίωση στο πρόγραμμα FEMM η οποία παρατίθεται στο σχήμα 8.51, το απαιτούμενο αξονικό πάχος του στάτη προκύπτει ίσο με :

$$t_w = \frac{h_m}{\mu_{rrec}} \left(\frac{B_r}{B_{mg}} - 1 \right) - 2g \Rightarrow t_w = 11mm$$

Η μαγνητική ροή ανά πόλο δίδεται υπολογίζεται μέσω της σχέσης (8.31):

$$\Phi = B_{mg} \cdot w_m \cdot l_a = 0,44T \cdot 0,03m \cdot 0,046m = 0,607mWb \quad (8.31)$$

όπου w_m και l_a είναι το πάχος και το ενεργό μήκος του μαγνήτη αντίστοιχα.

Με συντελεστή τυλίγματος k_w ίσο με 0,95 και με $q=2$ πηνία ανά φάση, ο απαιτούμενος αριθμός τυλιγμάτων ανά πηνίο N_c δίδεται από τον τύπο (8.32):

$$N_c = \frac{\sqrt{2}E_f}{q \cdot 2\pi \cdot k_w \cdot \Phi \cdot n \cdot p / 120} = 152,5 \Rightarrow N_c = 153 \quad (8.32)$$

Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρέει τη γεννήτρια δίδεται από τον τύπο (8.33), όπου για λόγους ασφαλείας πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή 1,1 και ως τιμή της απόδοσης η έχει χρησιμοποιηθεί αυτή που έχει βρεθεί από τις πειραματικές δοκιμές, δηλ. 75%:

$$I_{acmax} = \frac{1,1 \cdot P_{nom}}{3 \cdot E_{fnom} \cdot \eta} \Rightarrow I_{acmax} = 4,38A \quad (8.33)$$

Το πλάτος πλευράς πηνίου w_c υπολογίζεται μέσω του τύπου (8.34), όπου ως κατάλληλη τιμή για τον συντελεστή θερμότητας έχει θεωρηθεί η $c_q=0,3W/cm^2$, ο συντελεστής πλήρωσης έχει τεθεί ίσος με $k_f=0,55$ και η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι $\rho=1,68 \cdot 10^{-8}\Omega/m$.

$$w_c = \frac{I_{acmax} N_c}{\sqrt{\frac{2c_q k_f t_w}{\rho}}} \Rightarrow w_c = 15mm \quad (8.34)$$

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η απαιτούμενη διατομή του χαλκού sc μέσω του τύπου (8.35) και η μέγιστη πυκνότητα του ρεύματος J_{max} μέσω της σχέσης (8.36).

$$sc = \frac{k_f w_c t_w}{N_c} \Rightarrow sc = 0,59mm^2 \quad (8.35)$$

$$J_{max} = \frac{I_{acmax}}{sc} \Rightarrow J_{max} = 7,38A/mm^2 \gg 4A/mm^2 \quad (8.36)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί μία σημαντική διαφορά της σχεδίασης της υδρογεννήτριας με τη σχεδίαση της αναφοράς [44] που προορίζεται για ανεμογεννήτρια με γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας, οι συνθήκες αερισμού της είναι πολύ καλύτερες λόγω και του μεγαλύτερου ύψους εγκατάστασης της σε σχέση με την υδρογεννήτρια. Για τον λόγο αυτόν, γίνονται δεκτές τιμές πυκνότητας ρεύματος μέχρι 6 A/mm². Στην περίπτωση της υδρογεννήτριας όμως, που τοποθετείται χαμηλά και λειτουργεί στο ονομαστικό σημείο καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας, η πυκνότητα ρεύματος πρέπει να περιορίζεται στα 4 A/mm², που είναι και η αποδεκτή τιμή για τις γεννήτριες μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής κλειστού τύπου. Για να συμβεί αυτό με

μέγιστη τιμή ρεύματος αυτή που έχει υπολογιστεί από τον τύπο (8.33), πρέπει να χρησιμοποιηθεί χαλκός διατομής $sc=1,09\text{mm}^2$ και διαμέτρου $d=1,18\text{mm}$. Τότε, η πυκνότητα ρεύματος είναι $J=4\text{A/mm}^2$.

Ωστόσο, όταν συμβεί αυτό θα αλλάξει και το πάχος πλευράς πηνίου σύμφωνα με τον τύπο (8.35) και θα γίνει ίσο με: $w_c = 28\text{mm}$. Ακόμα, θα μεταβληθεί και ο συντελεστής αποβολής θερμότητας μέσω του τύπου (8.34) και θα πάρει την τιμή $c_q=0,082\text{W/cm}^2$, που είναι μία χαμηλή τιμή και συνεπάγεται την ύπαρξη ικανοποιητικού φυσικού αερισμού της γεννήτριας.

Το μέσο μήκος ελίγματος l_{avg} δίδεται από τον τύπο (8.38) και η αντίσταση R_c του ενός πηνίου από τον τύπο (8.39):

$$l_{avg} = 2(l_a + w_m) + \pi w_c \Rightarrow l_{avg} = 238\text{mm} \quad (8.38)$$

$$R_c = \rho \frac{N_c l_{avg}}{sc} \Rightarrow R_c = 0.58\Omega \quad (8.39)$$

Άρα, η αντίσταση της μιας φάσης θα είναι $R_\phi=1,16\Omega$.

Με την αλλαγή των διαστάσεων των πηνίων, αλλάζουν και οι διαστάσεις του στάτη και των δίσκων της γεννήτριας. Η εσωτερική ακτίνα του στάτη R_{in} δίδεται σύμφωνα με το [45] από τον τύπο (8.40) και η εξωτερική του διάμετρος D_{out} από τον τύπο (8.41):

$$R_{in} = \frac{2Qw_c + pw_m}{2\pi} = 90,84\text{mm} \quad (8.40)$$

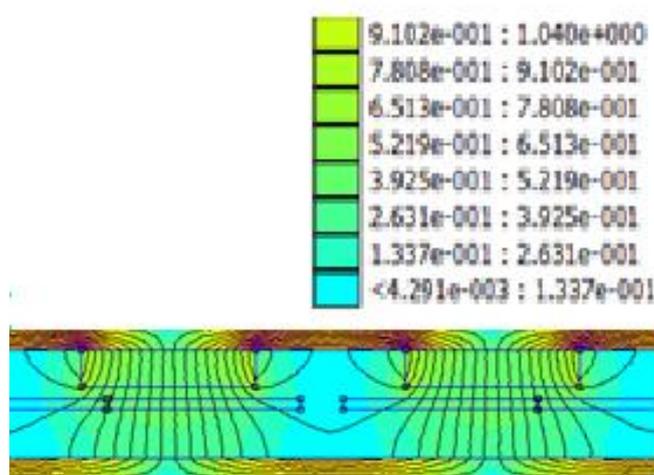
$$D_{out} = D_{in} + 2l_a = 273,7\text{mm} \quad (8.41)$$

Στον πίνακα 8.11 φαίνονται τα βασικότερα μεγέθη για τη σχεδίαση της γεννήτριας όπως προέκυψαν από τους δύο τρόπου σχεδίασης:

μέγεθος	αρχική σχεδίαση	εναλλακτική σχεδίαση
N_c (αρ.ελιγμάτων)	146	153
t_w (mm)	13	11
w_c (mm)	28	28
sc (mm²)	1,37	1,09
c_q (W/cm²)	0,031	0.082
l_{avg} (mm)	240	238
J (A/mm²)	2,2	4
R_ϕ (Ω)	0,46	0,58

Πίνακας 8.11 Κάποια από τα βασικά μεγέθη σχεδίασης της γεννήτριας για τις δύο διαφορετικές μεθόδους

Η βασική διαφορά είναι ο αριθμός των ελιγμάτων και ο ανακριβής υπολογισμός της ηλεκτρεγερτικής δύναμης με βάση το [43]. Στη γεννήτρια που κατασκευάστηκε υπάρχουν 146 ελίγματα ανά πηνίο, τα οποία σύμφωνα με τον τύπο (8.32) (που προέρχεται από την αναφορά [44]) μπορούν να επάγουν ΗΕΔ ίση με 37,5V με τιμή μαγνητικής επαγωγής $B_{mg}=0,44T$ · γεγονός που επαληθεύει τα αποτελέσματα της δοκιμής ανοιχτοκύκλωσης. Μία άλλη διαφορά είναι η προτεινόμενη χρήση χαλκού μικρότερης διατομής, η οποία αυξάνει την αντίσταση χωρίς όμως να οδηγεί σε μεγάλες τιμές του συντελεστή αποβολής θερμότητας.



Σχήμα 8.51 Εικόνα από την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας στο πρόγραμμα FEMM

Όπως μπορεί κανείς να αντιληφθεί παρατηρώντας το σχήμα 8.51, η μαγνητική επαγωγή δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του διακένου, αλλά μειώνεται όσο απομακρύνεται από τους μαγνήτες, ενώ παράλληλα υπάρχει και σημαντική ροή σκέδασης. Συνεπώς, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την εύρεση ενός πιο αξιόπιστου μοντέλου σχεδίασης της γεννήτριας συγκεκριμένης τοπολογίας, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη το ανομοιόμορφο μαγνητικό της πεδίο.

8.3.2 Μέτρηση της συνολικής απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος

8.3.2.1 Πειραματική διάταξη

Το υδροηλεκτρικό σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε με παροχή $Q=5l/sec$ και καθαρό υδραυλικό ύψος $H=10,59m$ (που αντιστοιχεί σε πίεση $P=1,04bar$) να περιστρέφεται με ταχύτητα $n=750rpm$ και να δίνει ισχύ εξόδου $P=350W$. Κατά τη δοκιμή αυτή, θα χρησιμοποιηθεί η φυγοκεντρική αντλία DP NORMA 80-200 (του Εργαστηρίου

Υδροδυναμικής, που φαίνεται στο σχήμα 8.52) για να τροφοδοτήσει τον υδροστρόβιλο με την απαιτούμενη παροχή και τη σωστή πίεση νερού.



Σχήμα 8.26 Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση του υδροηλεκτρικού

Κατά τη διενέργεια του πειράματος υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της λειτουργίας της αντλίας, μέσω του πίνακα ελέγχου του κινητήρα της και συγκεκριμένα ελέγχοντας τις στροφές του κινητήρα, όπως στο σχήμα 8.53.



Σχήμα 8.53 Πίνακας ελέγχου του κινητήρα που στρέφει την αντλία

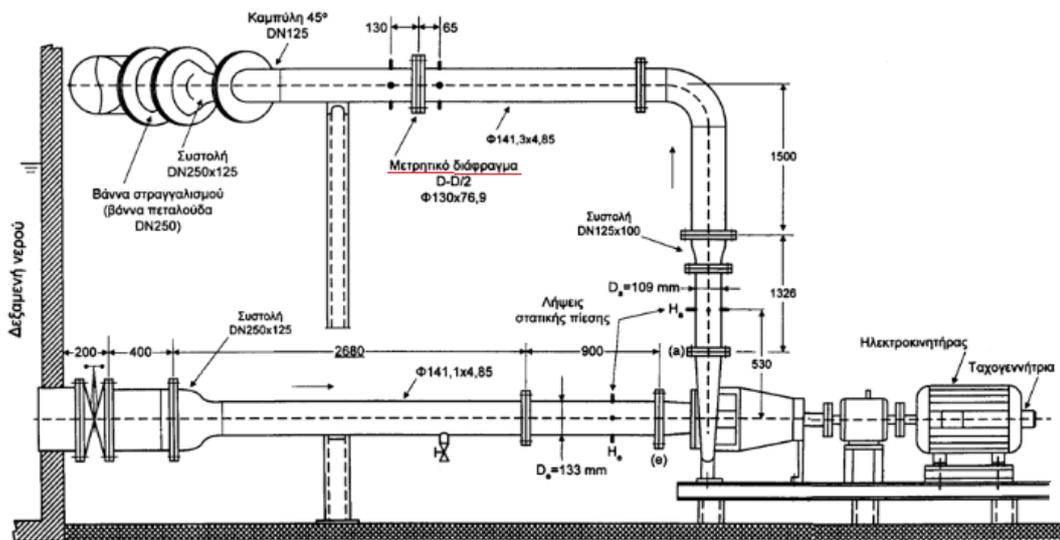
Παράλληλα, μπορεί να μετρηθεί η παροχή στον κεντρικό σωλήνα με τη μέθοδο του μετρητικού διαφράγματος, που απεικονίζεται στο σχήμα 8.54. Η μέτρηση της παροχής με μετρητικό διάφραγμα ανάγεται στη μέτρηση της διαφοράς της στατικής πίεσης μεταξύ των δύο λήψεων ανάντι και κατόντι του διαφράγματος, δη σε mmΣΥ. Η διαφορά αυτή της στατικής πίεσης μετράται μέσω διαφορικού υοειδούς ανεστραμμένου μανόμετρου ύδατος και η παροχή δίνεται από τον τύπο (8.42):

$$Q = k \cdot \sqrt{\delta h} \text{ [m}^3\text{/h]} \quad (8.42)$$

όπου $k=1,54847$: η σταθερά του συγκεκριμένου διαφράγματος για dh σε mmΣΥ και Q σε m³/h.

Ωστόσο, το όργανο που μετράει τη διαφορά στατικής πίεσης την απεικονίζει σε bar και όχι σε mmΣΥ. Πρέπει λοιπόν να γίνει μετατροπή των μονάδων σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$1\text{bar} = 10193,7 \text{ mmΣΥ} \quad (8.43).$$



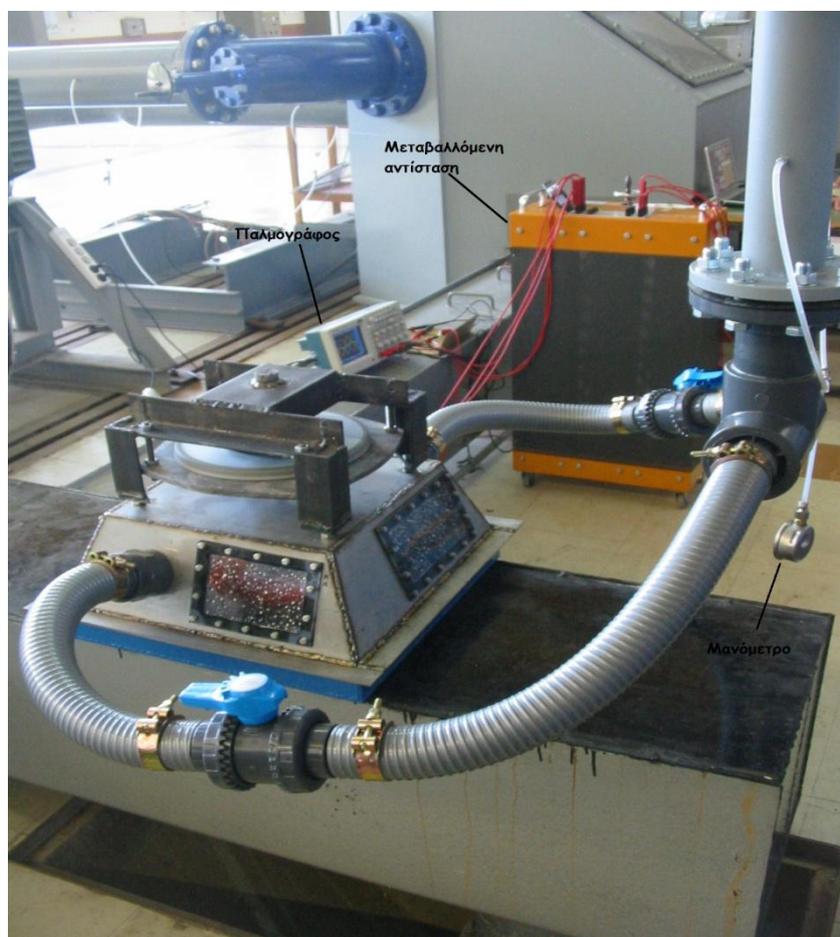
(α)



(β)

Σχήμα 8.54 (α) Απεικόνιση του αντλητικού εξοπλισμού που τροφοδοτεί το υδροηλεκτρικό και του μετρητικού διαφράγματος για τη μέτρηση της παροχής, (β) Το όργανο που μετράει τη διαφορά στατικής πίεσης [bar] στα δύο άκρα του διαφράγματος

Από την πλευρά του υδροηλεκτρικού συστήματος, η πειραματική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 8.55.



Σχήμα 8.55 Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης από την πλευρά του υδροηλεκτρικού

Η πίεση του νερού στο ύψος των ακροφυσίων μετράται μέσω του μανομέτρου και κατ' αυτόν τον τρόπο ελέγχεται ότι το υδροηλεκτρικό λειτουργεί για το σχεδιαζόμενο υδραυλικό ύψος. Το φορτίο που βλέπει η γεννήτρια μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης που έχει συνδεθεί στην έξοδό της. Με τον τρόπο αυτό αλλάζουν και οι στροφές της υδρογεννήτριας, αφού η παροχή Q και το ύψος υδατόπτωσης H διατηρούνται σταθερά. Τα ρεύματα και οι τάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου.

8.3.2.2 Μέτρηση της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος

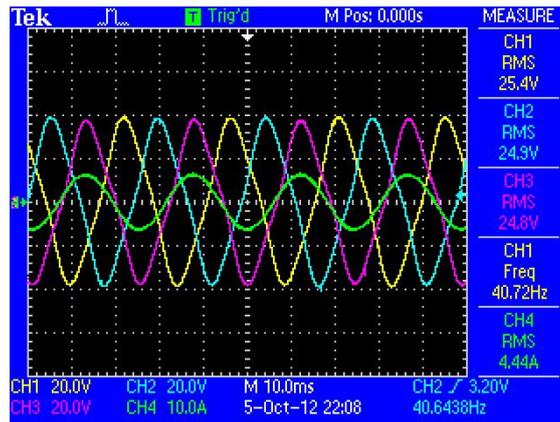
Κατά τη δοκιμή αυτή, το υδροηλεκτρικό σύστημα καλείται να λειτουργήσει υπό σταθερά H και Q , τα οποία ελέγχονται μέσω της αντλίας (και του μανομέτρου και του μετρητικού διαφράγματος αντίστοιχα), αλλά με μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής n , η οποία προκύπτει από τις αλλαγές στο τριφασικό ωμικό φορτίο που έχει συνδεθεί στη γεννήτρια.

Αρχικά, μπαίνει σε λειτουργία η αντλία και αυξάνονται αργά οι στροφές της, ενώ παράλληλα ανοίγει σταδιακά και πολύ αργά η κεντρική βαλβίδα (για την αποφυγή μεταβατικών φαινομένων, αλλά και για την ομαλή απομάκρυνση του αέρα που μπορεί να έχει εγκλωβιστεί στον σωλήνα). Για να επιτευχθεί λειτουργία του υδροηλεκτρικού στις επιθυμητές συνθήκες (παροχής και ύψους υδατόπτωσης) πρέπει σύμφωνα με τους τύπους (8.429) και (8.43) το όργανο για τη μέτρηση της παροχής να δείχνει διαφορά στατικής πίεσης στα άκρα του διαφράγματος ίση με $\delta p=0,013\text{bar}$ και η ένδειξη του μανομέτρου κοντά στην είσοδο του υδροηλεκτρικού να είναι $1,04\text{bar}$. Εντωμεταξύ, η υδρογεννήτρια έχει ξεκινήσει να περιστρέφεται και το φορτίο ρυθμίζεται ώστε να φθάσει την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής της (750rpm στα 50Hz), η οποία μετράται μέσω της συχνότητας στον παλμογράφο. Όταν συμβαίνει τελικά αυτό, η παροχή που φαίνεται να δίνει η αντλία είναι $Q=6,44\text{l/sec}$ (με ένδειξη μετρητικού διαφράγματος $\delta p=0,022\text{bar}$) ενώ περιστρέφεται με ταχύτητα 1222rpm. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η καμπύλη λειτουργίας της συγκεκριμένη αντλίας δεν ταιριάζει απόλυτα με τις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες έχει σχεδιαστεί το υδροηλεκτρικό σύστημα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να φθάσουμε σε μεγαλύτερη παροχή για να εξασφαλίσουμε την πίεση που αντιστοιχεί στο σωστό υδραυλικό ύψος.

Η ταχύτητα περιστροφής n της γεννήτριας μεταβάλλεται και για κάθε τιμή αυτής μετρώνται οι φασικές τάσεις V_{ta} , V_{tb} , V_{tc} και το ρεύμα I στην έξοδο της γεννήτριας. Στον πίνακα 8.12 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συχνότητας λειτουργίας, των τερματικών φασικών τάσεων, της μέσης φασικής τάσης V_{tavg} και του ρεύματος της γεννήτριας. Στο σχήμα 8.56 φαίνονται οι κυματομορφές των τερματικών τάσεων και του ρεύματος στην έξοδο της γεννήτριας.

n (rpm)	f (Hz)	I (A)	V_{ta} (V)	V_{tb} (V)	V_{tc} (V)	V_{tavg} (V)
471,15	31,41	4,97	17,90	17,00	18,20	17,70
498	33,20	4,91	19,60	18,50	19,30	19,13
532,65	35,51	4,64	21,20	20,10	20,40	20,57
560,55	37,37	4,50	22,90	22,80	21,50	22,40
610,8	40,72	4,44	25,40	24,90	24,80	25,03
639,9	42,66	4,19	27,20	26,10	27,00	26,77
666	44,40	4,04	28,70	27,80	28,00	28,17
729,6	48,64	3,70	32,40	32,10	30,80	31,77
753	50,20	3,52	33,90	33,20	33,20	33,43
811,65	54,11	3,12	37,30	36,30	36,30	36,63
849,45	56,63	2,96	38,80	39,30	36,70	38,27
870	58,00	2,77	40,20	40,20	37,90	39,43
901,5	60,10	2,62	42,00	41,50	40,70	41,40

Πίνακας 8.12 Οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα του στην έξοδο του υδροηλεκτρικού συστήματος όταν αυτό λειτουργεί υπό σταθερά H και Q αλλά για διαφορετικές στροφές

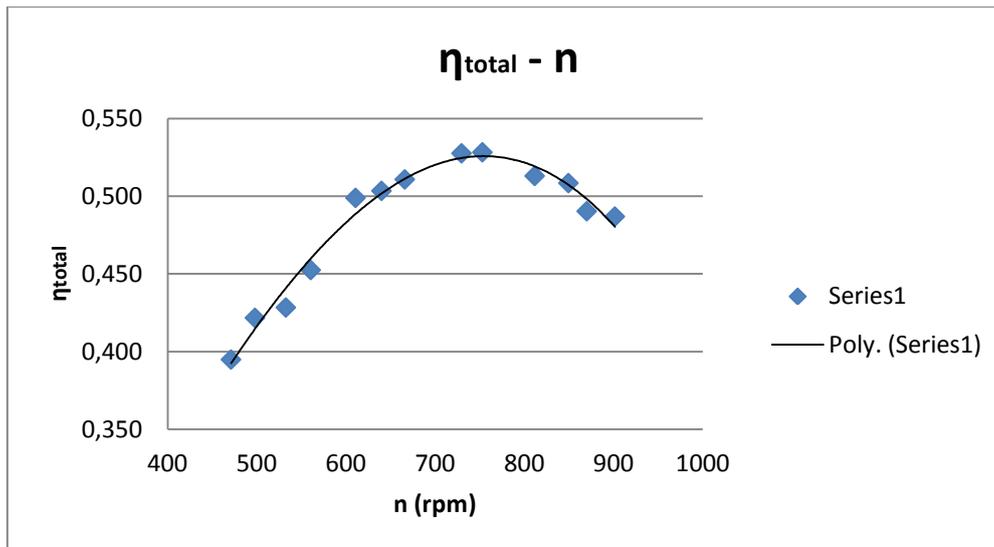


Σχήμα 8.56 Οι κυματομορφές των φασικών τάσεων και του ρεύματος της υδρογεννήτριας

Κατόπιν, υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς P_{el} , η ισχύς εισόδου P_{in} μέσω των H και Q , η ταχύτητα περιστροφής n και η απόδοση του συστήματος η_{total} και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 8.13. Στο σχήμα 8.57 φαίνεται η μεταβολή της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. Όπως φαίνεται, το υδροηλεκτρικό σύστημα παρουσιάζει μέγιστη απόδοση 52,8% στις ονομαστικές του στροφές και λίγο παρακάτω.

n (rpm)	f (Hz)	I (A)	V_{ta} (V)	V_{tb} (V)	V_{tc} (V)	V_{tavg} (V)	P_{el} (W)	P_{in} (W)	η_{total}
471,15	31,41	4,97	17,90	17,00	18,20	17,70	263,91	668,33	0,395
498	33,20	4,91	19,60	18,50	19,30	19,13	281,83	668,33	0,422
532,65	35,51	4,64	21,20	20,10	20,40	20,57	286,29	668,33	0,428
560,55	37,37	4,50	22,90	22,80	21,50	22,40	302,40	668,33	0,452
610,8	40,72	4,44	25,40	24,90	24,80	25,03	333,44	668,33	0,499
639,9	42,66	4,19	27,20	26,10	27,00	26,77	336,46	668,33	0,503
666	44,40	4,04	28,70	27,80	28,00	28,17	341,38	668,33	0,511
729,6	48,64	3,70	32,40	32,10	30,80	31,77	352,61	668,33	0,528
753	50,20	3,52	33,90	33,20	33,20	33,43	353,06	668,33	0,528
811,65	54,11	3,12	37,30	36,30	36,30	36,63	342,89	668,33	0,513
849,45	56,63	2,96	38,80	39,30	36,70	38,27	339,81	668,33	0,508
870	58,00	2,77	40,20	40,20	37,90	39,43	327,69	668,33	0,490
901,5	60,10	2,62	42,00	41,50	40,70	41,40	325,40	668,33	0,487

Πίνακας 8.13 Η ισχύς στην είσοδο και την έξοδο του υδροηλεκτρικού συστήματος, καθώς και η απόδοσή του όταν αυτό λειτουργεί υπό σταθερά H και Q αλλά για διαφορετικές στροφές



Σχήμα 8.57 Μεταβολή της απόδοσης του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για σταθερές τιμές υδραυλικού ύψους και παροχής

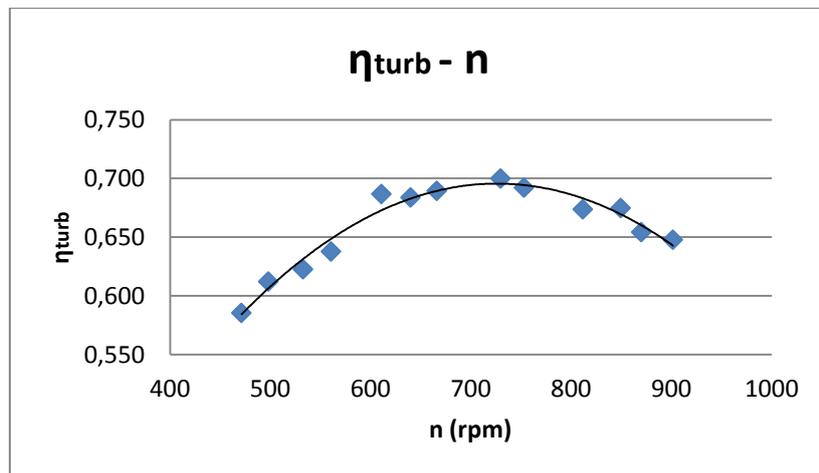
Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της απόδοσης του υδροστροβίλου χρησιμοποιώντας και την γραφική παράσταση της ροπής T σε σχέση με τον ρεύμα I της γεννήτριας (σχήμα 8.33) κατά τη δοκιμή τροφοδότησης τριφασικού φορτίου. Η εξίσωση που συσχετίζει τη ροπή με το ρεύμα έχει βρεθεί μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων προσεγγιστικά να δίδεται από τον τύπο (8.44):

$$T = 1,4231 \cdot I + 0,8578 \quad (8.44)$$

Όταν η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου είναι 753rpm (κοντά στην ονομαστική), το ρεύμα που διαρρέει τη γεννήτρια είναι $I=3,52$ A (από τον πίνακα 8.13). Άρα, σύμφωνα με τον τύπο (8.44), η μηχανική ροπή της γεννήτριας θα είναι ίση με $T=5,87$ Nm. Επομένως, η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας θα είναι ίση με $P_{mech} = T \cdot \omega = T \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} = 462,87$ W. Άρα, η απόδοση του υδροστροβίλου σε αυτή την ταχύτητα περιστροφής και τις συνθήκες φόρτισης, θα είναι ίση με $\eta_{turb} = \frac{P_{mech}}{P_{in}} = \frac{462,87}{668,33} = 69,26\%$. Κατά τον ίδιο τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση του υδροστροβίλου για όλες τις ταχύτητες περιστροφής, όπως στον πίνακα 8.14 και να σχεδιαστεί η καμπύλη της απόδοσης σε σχέση με τις στροφές, όπως στο σχήμα 8.58. Η καμπύλη της απόδοσης έχει την αναμενόμενη μορφή, αν και η υπολογιζόμενη απόδοση του υδροστροβίλου είναι μικρότερη από την απόδοση που είχε δοθεί από τον κατασκευαστή και είχε χρησιμοποιηθεί κατά τη σχεδίαση, λόγω της όχι απόλυτα σωστής τοποθέτησης του στροβίλου από άποψη κεντραρίσματος του άξονά του και ευθυγράμμισης του ώστε η δέσμη να προσπίπτει στο κέντρο του σκαφιδίου. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν και η ταλάντωση του άξονα κατά την περιστροφή του ειδικά στις μεγαλύτερες ταχύτητες · γεγονός που οδήγησε σε μείωση της απόδοσης του στροβίλου. Στο ίδιο γεγονός οφείλεται και η μετατόπιση του σημείου μέγιστης απόδοσης σε λίγο χαμηλότερες στροφές από τις ονομαστικές, αν και η διαφορά στην απόδοση (70% στις 729rpm και 69,26% στις 753rpm) είναι πολύ μικρή.

n (rpm)	I (A)	T'(Nm)	P _{in} (W)	P _{mech} (W)	η _{turb}
471,15	4,97	7,93	668,33	391,29	0,585
498	4,91	7,85	668,33	409,13	0,612
532,65	4,64	7,46	668,33	416,17	0,623
560,55	4,50	7,26	668,33	426,27	0,638
610,8	4,44	7,18	668,33	459,02	0,687
639,9	4,19	6,82	668,33	457,05	0,684
666	4,04	6,61	668,33	460,80	0,689
729,6	3,70	6,12	668,33	467,84	0,700
753	3,52	5,87	668,33	462,65	0,692
811,65	3,12	5,30	668,33	450,30	0,674
849,45	2,96	5,07	668,33	451,01	0,675
870	2,77	4,80	668,33	437,29	0,654
901,5	2,62	4,59	668,33	432,97	0,648

Πίνακας 8.14 Μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας και απόδοση του υδροστροβίλου για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, όταν το σύστημα λειτουργεί υπό σταθερά H και Q



Σχήμα 8.58 Η καμπύλη μεταβολής της απόδοσης του υδροστροβίλου σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του

Ακολούθως, υπολογίζονται οι αδιάστατες παράμετροι ύψους και παροχής Ψ και Φ, οι οποίες σχετίζονται με το H και το Q αντίστοιχα, σύμφωνα με τους τύπους (8.45) και (8.46) και σχεδιάζεται η γραφική παράσταση Φ-Ψ, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.59. Στον πίνακα 8.15 παρατίθενται οι υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων Φ και Ψ για Q=6,44l/sec =23,19m³/h H=10,6m.

$$\Psi = \frac{2gH}{u^2} \quad (8.45)$$

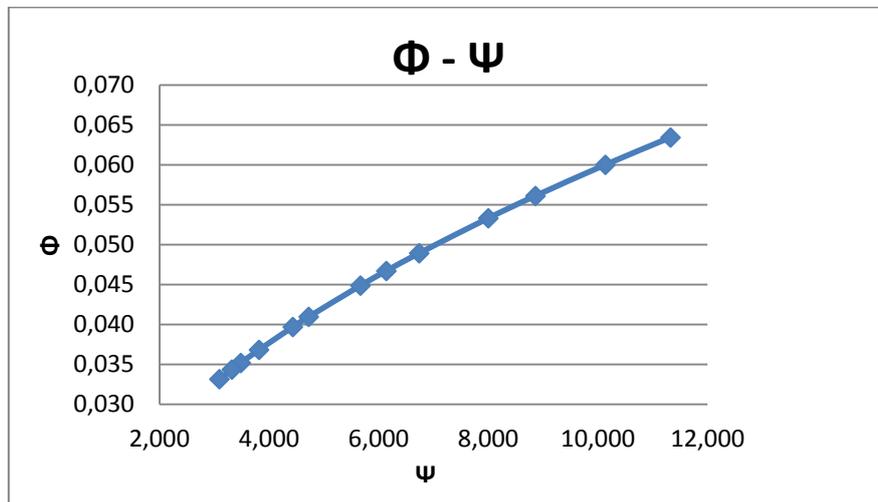
$$\Phi = \frac{Q/\pi}{R^2 \cdot u} \quad (8.46)$$

όπου $R = (pcd)/2$: η ακτίνα του υδροστροβίλου (από τον άξονά του μέχρι το κέντρο του σκαφιδίου)

και $u = \omega \cdot R$: η γραμμική ταχύτητα ενός σκαφιδίου του υδροστροβίλου

n (rpm)	u (m/s)	Ψ	Φ
471,15	4,29	11,326	0,063
498	4,53	10,138	0,060
532,65	4,84	8,862	0,056
560,55	5,10	8,002	0,053
610,8	5,56	6,739	0,049
639,9	5,82	6,140	0,047
666	6,06	5,668	0,045
729,6	6,64	4,723	0,041
753	6,85	4,434	0,040
811,65	7,38	3,817	0,037
849,45	7,73	3,484	0,035
870	7,91	3,322	0,034
901,5	8,20	3,094	0,033

Πίνακας 8.15 Οι αδιάστατες παράμετροι ύψους και παροχής Ψ και Φ για $H=10,6m$ και $Q=6,44l/sec$.

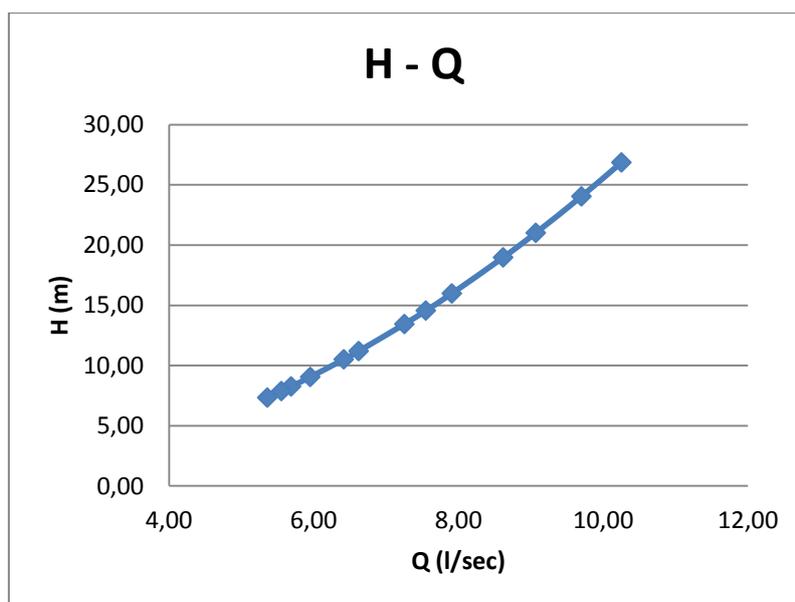


Σχήμα 8.59 Χαρακτηριστική λειτουργίας του υδροηλεκτρικού συστήματος μέσω των αδιάστατων παραμέτρων $\Phi - \Psi$

Με χρήση των αδιάστατων αυτών παραμέτρων μπορεί να γίνει αναγωγή και να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική λειτουργίας $H - Q$ του υδροηλεκτρικού συστήματος για μία οποιαδήποτε σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Για παράδειγμα στον πίνακα 8.16 φαίνονται οι τιμές των H' και Q' σε l/sec και m^3/sec για τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι 750rpm (που αντιστοιχεί σε γραμμική ταχύτητα $u=6,82m/sec$), και στο σχήμα 8.60 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση $H - Q$ για την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του. Στον πίνακα 8.16 δε φαίνεται το σημείο σχεδίασης να ανήκει στην χαρακτηριστική λειτουργίας του υδροστροβίλου. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι από την αρχή της δοκιμής δεν έχουμε λειτουργία στο «ονομαστικό» σημείο λειτουργίας λόγω της αντλίας, αλλά και στα προαναφερόμενα προβλήματα κατά την τοποθέτηση και τη συναρμολόγησή του στροβίλου.

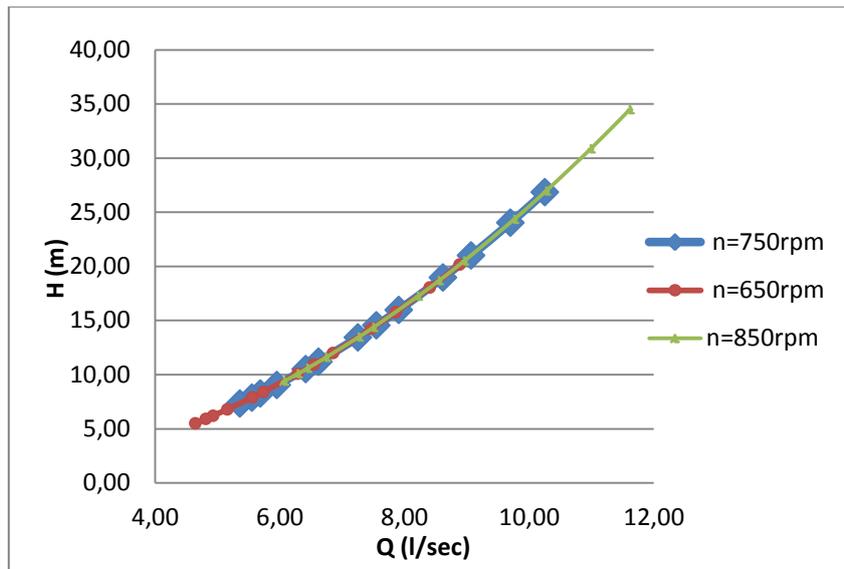
Ψ	Φ	H' (m)	Q'(m ³ /s)	Q' (l/s)
11,326	0,063	26,86	0,0103	10,25
10,138	0,060	24,04	0,0097	9,70
8,862	0,056	21,02	0,0091	9,07
8,002	0,053	18,98	0,0086	8,62
6,739	0,049	15,98	0,0079	7,91
6,140	0,047	14,56	0,0075	7,55
5,668	0,045	13,44	0,0073	7,25
4,723	0,041	11,20	0,0066	6,62
4,434	0,040	10,52	0,0064	6,41
3,817	0,037	9,05	0,0060	5,95
3,484	0,035	8,26	0,0057	5,69
3,322	0,034	7,88	0,0056	5,55
3,094	0,033	7,34	0,0054	5,36

Πίνακας 8.16 Τα σημεία H – Q λειτουργίας του υδροηλεκτρικού συστήματος για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής 750rpm

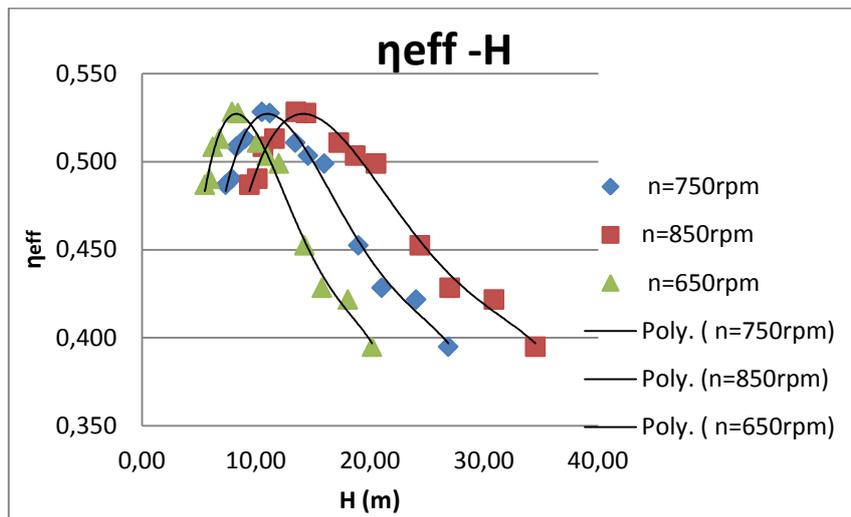


Σχήμα 8.60 Η χαρακτηριστική H – Q καμπύλη λειτουργίας του υδροηλεκτρικού συστήματος για την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής

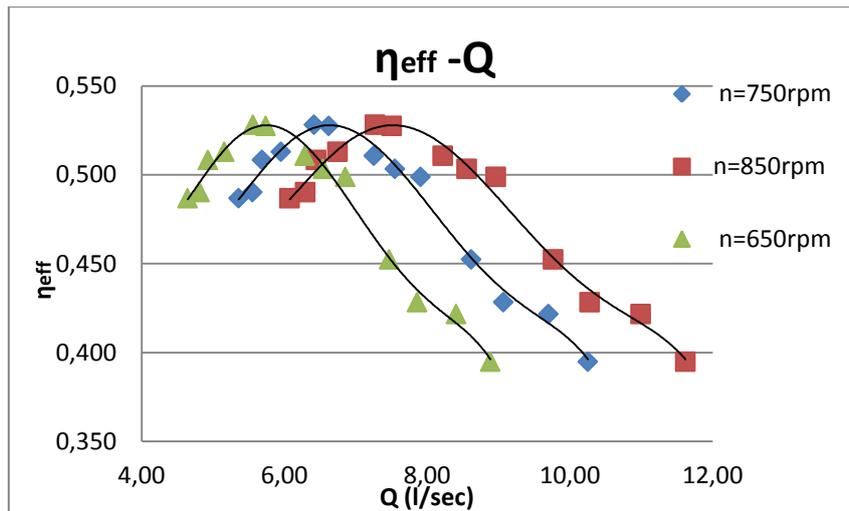
Παράλληλα, μέσω των αδιάστατων σταθερών Φ και Ψ μπορούν να σχεδιαστούν οι καμπύλες H – Q για πολλές διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, όπως στο σχήμα 8.61. Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς, όσο αυξάνεται η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο στρόβιλος, η χαρακτηριστική καμπύλη μετατοπίζεται προς τα δεξιά και πάνω κι επομένως για το ίδιο υδραυλικό ύψος πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη παροχή. Στα σχήματα 8.62 και 8.63 φαίνονται οι καμπύλες της απόδοσης σε σχέση με το ύψος υδατόπτωσης και της απόδοσης σε σχέση με την παροχή. Κάθε μία από τις τρεις καμπύλες αντιστοιχεί σε διαφορετική ταχύτητα περιστροφής, αλλά για κάθε μία από αυτές ο υδροστρόβιλος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής η καμπύλη της απόδοσης μετατοπίζεται προς τα δεξιά.



Σχήμα 8.61 Χαρακτηριστική $H - Q$ καμπύλη λειτουργίας υδροηλεκτρικού συστήματος για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής



Σχήμα 8.62 Απόδοση του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με το ύψος υδατόπτωσης για τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής



Σχήμα 8.63 Απόδοση του υδροηλεκτρικού συστήματος σε σχέση με την παροχή για τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής

8.3.2.3 Δοκιμή σύνδεσης του υδροηλεκτρικού συστήματος στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα

Στο σημείο αυτό στην έξοδο της υδρογεννήτριας συνδέεται ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής και εν συνεχεία ο αντιστροφέας Windmaster (που είχε χρησιμοποιηθεί και στη δοκιμή της ενότητας 8.3.1.6), ο οποίος συνδέεται με το δίκτυο του εργαστηρίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.64.



Σχήμα 8.64 Η πειραματική διάταξη για τη δοκιμή σύνδεσης του υδροηλεκτρικού στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα

Το υδροηλεκτρικό τροφοδοτείται από τη φυγοκεντρική αντλία με παροχή $Q=6,44\text{l/sec}$ και πίεση στην έξοδο του ακροφυσίου $1,04\text{bar}$ όπως και στις προηγούμενες δοκιμές, τροφοδοτεί το δίκτυο και μετρώνται οι τερματικές τάσεις της γεννήτριας V_{ta} , V_{tb} , V_{tc} , το ρεύμα στην έξοδο της I_{acg} , το συνεχές ρεύμα I_{dc} και η συνεχής τάση V_{dc} και η εναλλασσόμενη τάση V_{aci}

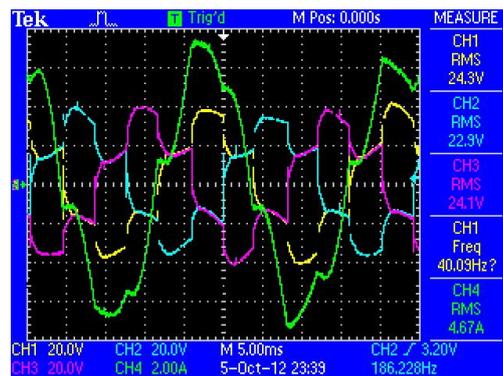
και το εναλλασσόμενο ρεύμα I_{aci} στην έξοδο του αντιστροφέα με τη βοήθεια του παλμογράφου και του πολυμέτρου. Στον πίνακα 8.17 φαίνονται οι τιμές της συχνότητας στην οποία λειτουργεί η υδρογεννήτρια και οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών, ενώ στον πίνακα 8.18 δίδονται οι υπολογισμένες τιμές της ισχύος στην είσοδο του υδροηλεκτρικού συστήματος P_{in} , η ροπή του άξονα T , η μηχανική ισχύς στην έξοδο του στρόβιλου P_{mech} , η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας P_{acg} , του ανορθωτή P_{dc} και του αντιστροφέα P_{acinv} και οι αποδόσεις τους η_{turb} , η_g , η_{rec} , η_{inv} . Για τον υπολογισμό της ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας έχει χρησιμοποιηθεί η μέγιστη φασική τάση, που αντιστοιχεί στην φάση Α. Στα σχήματα 8.65 – 8.67 φαίνονται οι κυματομορφές των μεγεθών αυτών στην οθόνη του παλμογράφου. Ένα πρόβλημα που παρατηρήθηκε κατά τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης δοκιμής ήταν οι διακυμάνσεις των τιμών των τερματικών φασικών τάσεων της γεννήτριας, με συνέπεια το αποτέλεσμα της μέτρησης να εξαρτάται από το στιγμιότυπο της απεικόνισης και να μην είναι απόλυτα ακριβές. Αυτό είτε οφείλεται σε σφάλμα του οργάνου, είτε (ίσως λιγότερο πιθανό) στην ταλάντωση του άξονα που συνδέει τον στρόβιλο με τη γεννήτρια, επειδή εξαιτίας της μπορεί να κουνιέται λίγο ο δίσκος – δρομέας της γεννήτριας και να αλλάζει στιγμιαία το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της. Καλό θα ήταν αυτό να διερευνηθεί περαιτέρω. Επίσης, η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα μετρήταν με πολύμετρο, που δεν έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια και εισάγει ένα σφάλμα μέτρησης, στο οποίο μπορεί εν μέρει να οφείλεται η σχετικά χαμηλή απόδοση του αντιστροφέα.

n (rpm)	f (Hz)	V _{ta} (V)	V _{tb} (V)	V _{tc} (V)	V _{tavg} (V)	I _{acg} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	V _{aci} (V)	I _{aci} (A)
600,45	40,03	24,3	22,9	24,1	23,77	4,67	50,2	6,78	236	1,14

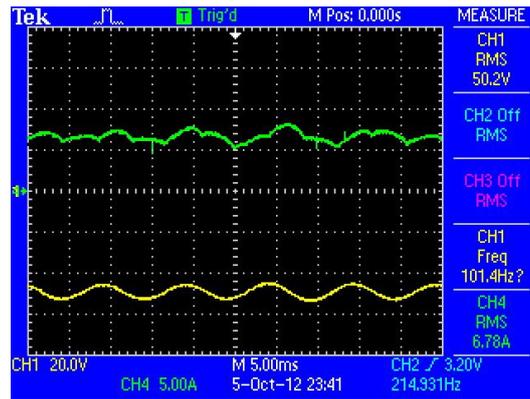
Πίνακας 8.17 Οι τάσεις και τα ρεύματα του υδροηλεκτρικού συστήματος σε κάθε κομμάτι της διάταξης όταν αυτό συνδέθηκε μέσω του αντιστροφέα στο δίκτυο

T	P _{in} (W)	P _{mech} (W)	P _{ac} (W)	P _{dc} (W)	P _{aci} (W)	η_{turb}	η_{gen}	η_{rec}	η_{inv}
7,50	668,33	471,82	340,44	340	269,04	0,706	0,722	0,999	0,790

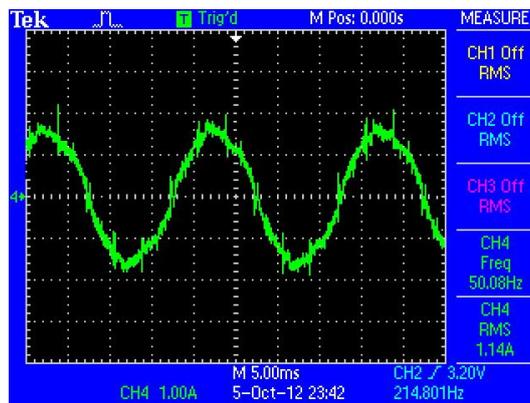
Πίνακας 8.18 Οι ισχύεις στην είσοδο του συστήματος και στην έξοδο της γεννήτριας, του ανορθωτή και του αντιστροφέα



Σχήμα 8.65 Οι κυματομορφές των τερματικών τάσεων της υδρογεννήτριας και του ρεύματος στη έξοδο της



Σχήμα 8.66 Οι κυματομορφές της συνεχούς τάσης και του συνεχούς ρεύματος στην έξοδο του ανορθωτή



Σχήμα 8.67 Η κυματομορφή του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα

Το πραγματικό πρόβλημα κατά τη σύνδεση αυτή είναι η λειτουργία του υδροηλεκτρικού σε συχνότητα μικρότερη της ονομαστικής, δηλ. στα 40Hz ή στα 600rpm, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη χαμηλότερων τάσεων και υψηλότερου ρεύματος, ενώ στην έξοδο δίνει ισχύ 340W, η οποία είναι πολύ κοντά στην ονομαστική του. Αυτό οφείλεται την προβληματική λειτουργία του αντιστροφέα και κυρίως στην αναντιστοιχία της πραγματικής με τη δοσμένη από τον κατασκευαστή καμπύλη λειτουργίας του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δοκιμής της ενότητας 8.3.1.6, ο αντιστροφέας μπορεί να μεταφέρει dc ισχύ 340W, όταν βλέπει στην είσοδο του dc τάση ίση με 52,6V και όχι γύρω στα 80V όπως αναμενόταν. Επομένως, προσπαθώντας ο αντιστροφέας να κρατήσει χαμηλά την τάση δεν επιτρέπει στη γεννήτρια να περιστραφεί με την ονομαστική της ταχύτητα. Αυτό θα μπορούσε να αποτελεί πρόβλημα για την αποδοτική λειτουργία του υδροστροβίλου, αλλά στην περίπτωση αυτή κάτι τέτοιο δεν ισχύει αφού απ' ότι φαίνεται λειτουργεί στο μέγιστο βαθμό απόδοσής του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα μικρο-υδροηλεκτρικά συστήματα αποτελούν μία αξιόλογη λύση για την κάλυψη των βασικών ενεργειακών αναγκών σε αγροτικές ή απομονωμένες περιοχές. Η δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια της μέρας τα καθιστά πιο επικερδή σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ, με τις οποίες μπορούν ούτως ή άλλως εύκολα να συνδυαστούν στα πλαίσια μικροδικτύων. Οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών αξονικής ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε αυτά τα συστήματα. Το χαμηλό τους κόστος και η απλότητα κατασκευής τους τις καθιστούν κατάλληλες για αγροτικές εφαρμογές στον αναπτυσσόμενο κόσμο.

Ασφαλώς, ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών, αλλά και τις δυνατότητες του σημείου τοποθέτησης θα πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος εξοπλισμός και τρόπος σύνδεσης. Στην παρούσα διπλωματική, επιχειρήθηκε να δημιουργηθεί μία εικόνα για το πώς μπορεί να στηθεί ένα μικρο-υδροηλεκτρικό σύστημα και κατασκευάστηκε ένα με ισχύ εξόδου 350W.

Σαν σύνολο, το υδροηλεκτρικό σύστημα που κατασκευάστηκε αντιμετώπισε προβλήματα στη λειτουργία του λόγω της αυξημένης δυσκολίας στην ακρίβεια της συναρμολόγησής του, στη μη δυνατή τροφοδότησή του με την παροχή και την πίεση νερού για τα οποία είχε σχεδιαστεί και στην προσεγγιστική αλλά όχι πολύ αντιπροσωπευτική σχεδίαση που επιλέχθηκε για τη γεννήτρια. Παράλληλα, υπήρξε πρόβλημα κατά τη χρήση του αντιστροφέα, λόγω της μη έγκυρης καμπύλης λειτουργίας που παρουσιαζόταν στο τεχνικό του εγχειρίδιο και με βάση την οποία έγινε και ο σχεδιασμός της γεννήτριας.

Ωστόσο, οι αποκλίσεις αυτές δεν είναι απαγορευτικές για τη μελλοντική χρήση αυτής ή κάποιας παρόμοιας γεννήτριας στα πλαίσια ενός απλού μικρο-υδροηλεκτρικού για σύνδεση σε ένα αυτόνομο ή και διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο. Θα την ευνοούσε η ανάπτυξη ενός καλύτερου μοντέλου σχεδίασης και εκτίμησης του μαγνητικού της πεδίου, όπως και η διεξαγωγή κάποιας προσομοίωσης στο FEMM ακόμα, για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η εναλλακτική σχεδίαση που δοκιμάστηκε να χρησιμοποιηθεί δίνει αποτελέσματα που είναι πιο αντιπροσωπευτικά, αλλά θα πρέπει κανείς να προσέξει τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα ρεύματος ώστε να μην ξεπεράσει τα 4 A/mm^2 , γιατί ως υδρογεννήτρια δεν διαθέτει τον καλό φυσικό αερισμό μιας ανεμογεννήτριας. Ένας τρόπος βελτίωσης του αερισμού της θα ήταν με το άνοιγμα τρυπών στον δρομέα της γεννήτριας. Επίσης, θα μπορούσε να διερευνηθεί και η δυνατότητα χρήσης γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής με πυρήνα στον στάτη, καθώς αυτό θα μείωνε τις απώλειες σκέδασης και θα αύξανε την απόδοσή της. Στις ανεμογεννήτριες, η ύπαρξη πυρήνα αποτελεί πρόβλημα λόγω της ροπής ευθυγράμμισης, αλλά στα υδροηλεκτρικά αυτή δεν αποτελεί πρόβλημα. Τέλος, θα είχε ενδιαφέρον να αναπτυχθεί μία πιο ακριβής και λεπτομερής μέθοδος για την επιλογή του καταλληλότερου εξοπλισμού και σύνδεσης (μαζί με τις συσκευές ελέγχου) για ένα οποιοδήποτε μικρο-υδροηλεκτρικό σύστημα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον κάθε ενδιαφερόμενο για μία τέτοια εγκατάσταση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μαρίνα Νικ. Μέγα, "Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα Σε Ορεινές Περιοχές Και Οι Επιπτώσεις Τους Στο Περιβάλλον", Αθήνα, 2009
- [2] "Υδραυλική ενέργεια" http://imarinakiss.webs.com/notes_hydraulic_energy.pdf
- [3] Adam Harvey, Andy Brown, Priyantha Hettiarachi, Allen Inversin, "Micro – Hydro Design Manual", Intermediate Technology Publications, 2006
- [4] Κατερινόπουλος Φίλιππος, "Μικροϋδροηλεκτρικά Έργα: Τεχνολογία, Διαδικασία Μελέτης και Εφαρμογές", Αθήνα 2007
- [5] "Μικρά Υδροηλεκτρικά" http://imarinakiss.webs.com/small_hydraulic_work.pdf
- [6] Μεσσήνης Γεώργιος, "Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης", Αθήνα 2011
- [7] Consortium for Sustainable Village-Based Development
- [8] Παπαντώνης Δ.Ε., "Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2001
- [9] Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής Από ΑΠΕ, ΚΑΠΕ, ECOLE DES MINES DE PARIS, ZREU, Αθήνα 2001
- [10] Philip Maher, Nigel Smith, "Pico hydro for village power", 2001
- [11] Scott Davis, "Serious Microhydro _ Water power solutions from the experts", New Society Publishers, Canada 2010
- [12] European Small Hydropower Association, "Guide on how to develop a small hydropower plant", 2006
- [13] Jeremy Thake, "The Micro-Hydro Pelton Turbine Manual", Practical Action Publishing, 2000
- [14] "Υδραυλική ενέργεια" http://imarinakiss.webs.com/notes_hydraulic_energy.pdf
- [15] Grundfos "Αντλίες-Τεχνικό Εγχειρίδιο" 2004
- [16] Arthur Williams, "PUMPS AS TURBINES – A user's guide", Intermediate Technology Publications, 1997
- [17] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής, "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας", Αθήνα 2001
- [18] Ι.Α.Τεγόπουλος, "Ηλεκτρικές μηχανές – Μόνιμη Κατάσταση", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [19] Βασίλειος Κ.Παπαδιάς, "Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας", Αθήνα 1985

- [20] Surendra Mathema, "Governing of the generator", Power Tech Nepal P.Ltd.
- [21] Petri Lampola, "Directly driven, low-speed permanent-magnet generators for wind power applications ", Helsinki University of Technology, 2000
- [22] Yicheng C., Pragusen P., Azeem K., "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies", Industry Applications Conference, 2004
- [23] Kamper M., Wang R., Rossouw F., "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air- Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils", Electric Machines & Drives Conference, 2007
- [24] Bumby J., Stannard N., Dominy J., McLeod M., "A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines", Electrical Machines 2008, 18th International Conference
- [25] Jacek F.Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, "Axial-Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Kluwer Academic Publishers, 2004
- [26] Rossouw F., "Analysis and design of axial flux permanent magnet wind generator system for direct battery charging applications", thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009
- [27] Nigel Smith, "Motors as generators for micro-hydro power", Intermediate Technology Development Group, 1994
- [28] Paul Cunningham & Ian Woofenden, "Micro-hydro Electricity Basics", Homepower Magazine (<http://homepower.com/basics/hydro/>)
- [29] Windy Dankoff, "Top ten battery blunders and how to avoid them", Home Power 114, August & September 2006
- [30] Jeffe Aronson, "Water Rites - A Microhydro Evolution", Home Power Issue #122, December 2007/January 2008
- [31] M.B.Camara, B.Dakyo, C.Nichita, G.Barakat, "Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator with Hydro Turbine for Electrical Energy Production", ELECTROMOTION 2009, EPE Chapter "Electric Drives" Goint Symposium, Lille France
- [32] M.Nasser, S. Breban, V. Courtecuisse, A.Vergnol, B.Robyns, M.Radulescu, "Experimental results of a hybrid wind/hydro power system connected to isolated loads"
- [33] Μιχ. Π.Παπαδόπουλος, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές", Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [34] M.Andreica, S.Bacha, D.Roye, I.Exteberria-Otadui, I.Munteanu, "Micro-Hydro Water Current Turbine Control for Grid Connected or Islanding Operation", 2008 IEEE
- [35] M.Andreica, S.Bacha, D.Roye, I.Exteberria-Otadui, I.Munteanu, "Micro-Hydro Water Current Turbine Control for Grid Connected or Islanding Operation", 2008 IEEE
- [36] Li Wang, Dong-Jing Lee, Long-Yi Chen, Jyun-Ying Yu, Shen-Rong Jan, Su-Jen Lee, Ming-Hua Tsai, Wei-Taw Lin, Yuan-Chung Li, Bai K. Blyden, "A Micro-Hydro Power

Generation System for Sustainable Microgrid Development in Rural Electrification of Africa", 2009 IEEE

[37] M.Singh, A. Chandra, "Modeling and Control of Isolated Micro-Hydro Power Plant with Battery Storage System"

[38] P. Craig, R.Mathews, "Hydro Power High in the Canadian Rockies", Home Power Issue #33, February/March 1993

[39] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley, "Microgrids and Active Distribution Network", IET Renewable Energy Series 6, Institution of Engineering and Technology 2009

[40] R. Magureanu, M. Albu, V. Bostan, A.M. Dumitrescu, G.\dim, F. Popa, M. Rotaru, "Smart AC Grid Integrating Dispersed Small Hydropower Sources"

[41] C. Marinescu, I. Serban, "Analysis of Frequency Stability in a Residential Autonomous Microgrid Based on a Wind Turbine and a Microhydro Power Plant", 2009 IEEE

[42] P.K.Goel, B.Singh, S.S. Murthy, N.Kishore, "Autonomous Hybrid System Using PMSGs for Hydro and Wind Power Generation", 2009 IEEE

[43] Hugh Piggot, "A Wind Turbine Recipe Book-The axial flux windmill plans", Metric Edition, January 2009

[44] K.C. Latoufis, G.M. Messinis, P.C. Kotsampopoulos, N.D. Hatziargyriou, "Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines", Athens

[45] Κοτσαμπόπουλος Παναγιώτης, "Μελέτη, Κατασκευή και Προσομοίωση της Λειτουργίας Μικρής Ανεμογεννήτριας Αξονικής Ροής", Αθήνα 2010