



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

**Συμβολή στην Ανάλυση Υβριδικών Αιολικών -
Αντλησιοταμιευτικών Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής
Ενέργειας**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Στέφανος Β. Παπαευθυμίου

Αθήνα, Νοέμβριος 2012



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

**Συμβολή στην Ανάλυση Υβριδικών Αιολικών -
Αντλησιοταμιευτικών Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής
Ενέργειας**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Στέφανος Β. Παπαευθυμίου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Στέφανος Ν. Μανιάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Διαλυνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δ. Παπαντώνης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2012

.....
Στέφανος Β. Παπαευθυμίου

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

Copyright © Στέφανος Β. Παπαευθυμίου, 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διατριβή αναλύονται ζητήματα που σχετίζονται με τη λειτουργία και τις επιπτώσεις από την ένταξη υβριδικών αιολικών-αντλησιοταμιευτικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΒΣ) σε μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΔΝ). Ουσιαστικά η ανάλυση επικεντρώνεται σε τρία επιμέρους θέματα: α) Διερεύνηση των επιπτώσεων των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας ενός ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος ενός ΜΔΝ. β) Προσδιορισμός κατάλληλης πολιτικής διαχείρισης ΜΔΝ με ΥΒΣ, λαμβάνοντας υπόψη το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα, καθώς και διερεύνηση των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του ΥΒΣ. γ) Διερεύνηση θεμάτων βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ.

Αναλυτικότερα, αρχικά παρουσιάζονται τα δυναμικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος ενός ΜΔΝ με ΥΒΣ και εν συνεχεία παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για πιθανές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος, χωρίς και με τον ΥΒΣ. Στόχος της μελέτης είναι να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις που προκαλούνται στη μεταβατική απόκριση του συστήματος από την ένταξη του ΥΒΣ, να εντοπιστούν οι πιθανοί λειτουργικοί περιορισμοί του ΥΒΣ και να προταθούν τεχνικές λύσεις για την αντιμετώπιση των όποιων προβλημάτων διαπιστωθούν.

Ακολούθως και λαμβάνοντας υπόψη το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, προτείνεται συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης για αυτόνομα νησιωτικά συστήματα με ΥΒΣ, με κριτήρια την εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας των ΥΒΣ και την αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των υφιστάμενων Α/Π των νησιών. Προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης και να διαπιστωθούν οι ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις των ΥΒΣ στα νησιωτικά συστήματα, προσομοιώνεται και αναλύεται η λειτουργία τριών ΜΔΝ (Κρήτη, Λέσβος, Κάρπαθος), διαφορετικού μεγέθους και χαρακτηριστικών, θεωρώντας ΥΒΣ διαφόρων μεγεθών. Επιπλέον εξετάζεται και μια πραγματική εφαρμογή, αυτή του ΥΒΣ της Ικαρίας, και παρουσιάζονται τα αναμενόμενα οφέλη από τη λειτουργία του σύμφωνα με την προτεινόμενη πολιτική.

Τέλος αναλύεται το θέμα της βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης εξετάζεται τόσο από την οπτική του επενδυτή όσο και του συστήματος, για πληθώρα σεναρίων, προς εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων επί του ζητήματος.

Λέξεις Κλειδιά

Υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αιολική ενέργεια, αντλησιοταμίευση, μη διασυνδεδεμένα νησιά, δυναμική ανάλυση, μεταβατική συμπεριφορά, πολιτική διαχείρισης, βέλτιστη διαστασιολόγηση, γενετικοί αλγόριθμοι, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Abstract

This PhD thesis deals with topics related with the operation of wind-pumped-storage hybrid power stations (HPS) and the repercussions from their introduction in non-interconnected island grids. The analysis focuses on three subjects: a) Investigation of the effect of the various HPS operating modes on the dynamic behavior of the island power system. b) Determination of a suitable operating policy for island systems with HPS, taking into account the existing regulatory framework in Greece. c) Investigation of the optimum sizing of HPS.

First, the models developed for the dynamic simulation of an island power system with an indicative HPS are presented. Then results from the analysis of the dynamic behavior of the island system with and without a HPS, for various HPS operating modes, are presented and discussed, to show the effect on system dynamics, identify possible constraints regarding the operation of the HPS and investigate potential solutions.

Then, taking into consideration the regulatory framework introduced in Greece, a specific operating policy is formulated for island systems with HPS. This policy ensures the viability of HPS investments and the increase of renewable energy penetration levels, without disturbing the operation of conventional generating units and the existing wind farms of the island. The proposed operating policy and the expected energy and economic effects from its application are evaluated for three study case island systems (Crete, Lesbos, Karpathos) of different size and characteristics. In addition, the realistic study case of the HPS in Ikaria island is also examined and the expected benefits from its operation according to the proposed policy are presented.

Finally, the subject of optimum sizing of pumped-storage HPS is analyzed with the help of genetic algorithms. The optimization problem is examined both from the investor's and the system perspective, for various scenarios, to derive generic conclusions regarding HPS optimum sizing.

Keywords

Hybrid power stations, wind power, pumped storage, non-interconnected islands, dynamic analysis, transient behavior, operating policy, optimum sizing, genetic algorithms, multi-objective optimization

Ευχαριστίες

Η διατριβή αυτή αποτελεί επιστέγασμα μιας προσπάθειας πέντε χρόνων, από το Νοέμβριο του 2007 έως σήμερα, που διατελέστηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του κ. Σταύρου Παπαθανασίου, Επίκουρου Καθηγητή του ΕΜΠ.

Οι θερμές ευχαριστίες και η ευγνωμοσύνη μου είναι δεδομένες προς τον καθηγητή μου και επιβλέποντα κ. Σταύρο Παπαθανασίου, για την άποψη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια και την καθοριστική συμβολή του στην περάτωση της παρούσας διατριβής, με τη συνεχή επιστημονική καθοδήγησή του, τις καίριες επισημάνσεις του και τις πολύτιμες συμβουλές του. Πέραν όμως τούτων, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω και για το ανθρώπινο ενδιαφέρον του και την ηθική στήριξη που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα, αλλά και νωρίτερα κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής και Μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, τους Καθηγητές ΕΜΠ κ. Αντώνιο Κλαδά και κ. Στέφανο Μανιά, για την ενθάρρυνση, το ενδιαφέρον τους και την προθυμία τους να με βοηθήσουν σε ό,τι κι αν χρειάστηκα. Επιθυμώ επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον κ. Μιχάλη Παπαδόπουλο, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ, καθώς και τους κ.κ. Δημήτριο Παπαντώνη και Ιωάννη Αναγνωστόπουλο, Καθηγητή και Επίκουρο Καθηγητή αντίστοιχα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την άριστη συνεργασία που είχαμε σε διάφορα στάδια της ερευνητικής μου δραστηριότητας τα τελευταία πέντε έτη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στη συνάδελφο κα. Ελένη Καραμάνου και το Δρ. Μηχανικό ΕΜΠ Ιωάννη Μάργαρη για την ιδιαίτερος γόνιμη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια ερευνητικών έργων που υλοποιήθηκαν τα πέντε αυτά έτη, συμβάλλοντας σημαντικά στην εξέλιξη και την περάτωση της διδακτορικής μου διατριβής. Ακόμη, οφείλω να αναγνωρίσω τη σημαντική συνεισφορά των συναδέλφων Βασιλείου Λακιάτη και Ισίδωρου Κοκού, καθώς μέσω της συνεργασίας που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης των Μεταπτυχιακών τους εργασιών, τέθηκαν οι βάσεις για τη συνέχιση της ερευνητικής μου δραστηριότητας σε ορισμένα από τα θέματα της παρούσας διατριβής.

Στην επιτυχή περάτωση της διατριβής συντέλεσε επίσης αποφασιστικά η συμπαράσταση και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας με τους υποψήφιους διδάκτορες, Ευαγγελία Παρασκευαδάκη, Ιάσων Ρουτσολιά, Βασιλική Φωτάκη, Ευάγγελο Βρεττό, Σωτήρη Νάνου, Γεώργιο Καμπίτση, Σωκράτη Τεντζεράκη, καθώς και τις συναδέλφους Ελένη Καπόλου και Σοφία Κορκίζογλου.

Τέλος θέλω να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου αλλά και τους φίλους μου εκτός ΕΜΠ, που μπορεί να μην ενεπλάκησαν ενεργά στην εκπόνηση της διατριβής μου, ωστόσο ο ρόλος τους ήταν πολύ σημαντικός για την επιτυχή περάτωσή της, μέσω της διαρκούς ηθικής και ψυχολογικής στήριξής τους.

Στέφανος Παπαευθυμίου

Νοέμβριος 2012

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Η κατάσταση των ΑΠΕ στην Ελλάδα.....	13
1.2 Αποθήκευση ενέργειας για αύξηση της αιολικής διείσδυσης στα ΜΔΝ.....	15
1.3 Σύντομη περιγραφή αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με ΥΒΣ.....	16
1.4 Επισκόπηση βιβλιογραφίας.....	18
1.5 Αντικείμενο – Δομή διατριβής.....	20
2. ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΔΝ ΜΕ ΥΒΣ.....	22
2.1 Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας και αυτόματου ρυθμιστή τάσης.....	22
2.2 Μοντέλο προσομοίωσης μηχανής diesel.....	23
2.3 Μοντέλο προσομοίωσης του ΥΗΣ του ΥΒΣ.....	24
2.3.1 Μοντέλο του συστήματος αγωγών προσαγωγής - υδροστρόβιλου.....	25
2.3.2 Μοντέλο ρυθμιστή στροφών.....	31
2.4 Μοντέλα προσομοίωσης Α/Γ.....	35
2.4.1 Μοντέλο Α/Γ σταθερών στροφών.....	36
2.4.2 Μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.....	36
2.4.3 Μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια.....	38
2.4.4 Ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ.....	39
2.5 Μοντέλο προσομοίωσης του αντλιοστάσιου του ΥΒΣ.....	41
2.5.1 Μοντελοποίηση υδραυλικού μέρους.....	41
2.5.2 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού μέρους.....	47
2.5.3 Έλεγχος της ισχύος των αντλιών μεταβλητών στροφών.....	49
3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΥΒΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	51
3.1 Περιγραφή του υπό εξέταση συστήματος.....	51
3.2 Συγκριτική διερεύνηση της ικανότητας ρύθμισης συχνότητας των μονάδων diesel και των υδροστρόβιλων.....	53
3.3 Διερεύνηση των επιπτώσεων της λειτουργίας των υδροστρόβιλων του ΥΒΣ.....	56
3.3.1 Διακυμάνσεις αιολικής παραγωγής.....	56
3.3.2 Απώλεια μονάδας.....	58
3.3.3 Στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς.....	60
3.3.4 Απώλεια φορτίου.....	61
3.4 Διερεύνηση των επιπτώσεων της υποκατάστασης υδραυλικής παραγωγής από αιολική εντός του ΥΒΣ.....	63
3.4.1 Τροποποιήσεις στους ρυθμιστές στροφών των υδροστρόβιλων για την επίτευξη της υδροαιολικής συνεργασίας.....	63
3.4.2 Επιπτώσεις της υδροαιολικής συνεργασίας στο σύστημα του ΜΔΝ.....	68
3.4.2.1 Κανονική λειτουργία συστήματος χωρίς αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ.....	68
3.4.2.2 Κανονική λειτουργία συστήματος με αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ.....	69
3.4.2.3 Ισχυρά βραχυκυκλώματα.....	71
3.5 Διερεύνηση των επιπτώσεων της συνεργασίας Α/Π και αντλιών του ΥΒΣ.....	75
3.5.1 Πιθανές διαμορφώσεις του αντλιοστάσιου για την επίτευξη της αντλιοαιολικής συνεργασίας.....	76
3.5.2 Επιπτώσεις της αντλιοαιολικής συνεργασίας στο σύστημα του ΜΔΝ.....	77
3.5.2.1 Κανονική λειτουργία συστήματος χωρίς αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ.....	78
3.5.2.2 Κανονική λειτουργία συστήματος με αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ.....	83
3.5.2.3 Ισχυρά βραχυκυκλώματα.....	91

3.6 Συμπεράσματα	93
4. ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΔΝ ΜΕ ΥΒΣ.....	99
4.1 Σύντομη περιγραφή του νομοθετικού πλαισίου για ΥΒΣ σε ΜΔΝ	99
4.2 Διερευνητική επισκόπηση εναλλακτικών πολιτικών λειτουργίας	100
4.3 Προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης ΜΔΝ με ΥΒΣ	103
4.4 Εσωτερική διαχείριση του ΥΒΣ.....	107
4.4.1 Προσφορά ενέργειας.....	107
4.4.2 Δήλωση φορτίου	109
4.4.3 Αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος του ΥΒΣ.....	109
4.4.4 Ισοζύγιο ισχύος του ΥΒΣ.....	110
5. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΥΒΣ.....	114
5.1 Λογιστικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος	114
5.2 Καθορισμός ορίου εγγυημένης ισχύος ΥΒΣ – Απαίτηση παροχής εγγυημένης ισχύος	116
5.2.1 Καθορισμός ορίου εγγυημένης ισχύος.....	116
5.2.2 Απαίτηση παροχής εγγυημένης ισχύος.....	119
5.3 Τιμολόγηση ισχύος και ενέργειας ΥΒΣ	120
5.4 Ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για συστήματα ΜΔΝ με ΥΒΣ	124
5.5 Αξιολόγηση της βιωσιμότητας των επενδύσεων για ΥΒΣ.....	133
5.6 Πραγματική εφαρμογή: ΥΒΣ Ικαρίας.....	135
5.6.1 Περιγραφή του συστήματος της Ικαρίας με τον ΥΒΣ	136
5.6.2 Προτεινόμενη πολιτική εσωτερικής λειτουργίας του ΥΒΣ Ικαρίας	137
5.6.3 Αποτελέσματα από τη λειτουργία του ΥΒΣ Ικαρίας	138
5.7 Συμπεράσματα	147
6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΥΒΣ.....	150
6.1 Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	150
6.1.1 Οπτική επενδυτή	152
6.1.2 Οπτική συστήματος.....	155
6.2 Περιγραφή των αλγόριθμων βελτιστοποίησης	157
6.2.1 Αλγόριθμος μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης.....	157
6.2.2 Αλγόριθμος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.....	161
6.3 Αποτελέσματα.....	164
6.3.1 Οπτική επενδυτή	164
6.3.2 Οπτική συστήματος.....	175
6.4 Συμπεράσματα	180
7. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	184
7.1 Ανακεφαλαίωση.....	184
7.2 Τελικά συμπεράσματα	185
7.3 Σημεία καινοτομίας και προαγωγής της επιστήμης	188
7.4 Προοπτικές συνέχισης της εργασίας.....	188
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΔΝ.....	190
Π1.1 Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης	190
Π1.1.1 Χαρακτηριστικά των συμβατικών σταθμών παραγωγής	190
Π1.1.2 Χαρακτηριστικά φορτίου	193
Π1.1.3 Αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ.....	193
Π1.2 Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Λέσβου.....	194

Π1.2.1	Χαρακτηριστικά του συμβατικού σταθμού παραγωγής	194
Π1.2.2	Χαρακτηριστικά φορτίου	196
Π1.2.3	Αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ.....	197
Π1.3	Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Καρπάθου	198
Π1.3.1	Χαρακτηριστικά του συμβατικού σταθμού παραγωγής	198
Π1.3.2	Χαρακτηριστικά φορτίου	199
Π1.3.3	Αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ.....	200
Π1.4	Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Ικαρίας	200
Π1.4.1	Χαρακτηριστικά του συμβατικού σταθμού παραγωγής	200
Π1.4.2	Χαρακτηριστικά φορτίου	201
Π1.4.3	Αιολικά πάρκα και Φ/Β σταθμοί.....	202
Π1.4.4	Τεχνικά στοιχεία για τον ΥΒΣ	202
Π1.4.4.1	Δεξαμενές.....	203
Π1.4.4.2	ΥΗΣ	203
Π1.4.4.3	Αντλιοστάσιο	204
Π1.4.4.4	Αιολικό πάρκο	204
Π1.4.4.5	Συντελεστής απόδοσης του συνολικού κύκλου άντλησης-παραγωγής	204
Π1.4.5	Ανεμολογικά δεδομένα	204
Π1.4.6	Υδρολογικά δεδομένα.....	206
Π1.4.7	Ηλιακά δεδομένα	208
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ		209
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....		212
Π3.1	Ιστορική αναδρομή	212
Π3.2	Βασικές έννοιες και ορισμοί γενετικών αλγορίθμων	213
Π3.3	Γενική περιγραφή γενετικών αλγορίθμων	214
Π3.4	Κωδικοποίηση.....	215
Π3.5	Αναπαραγωγή – Γενετικοί Τελεστές.....	216
Π3.5.1	Επιλογή	216
Π3.5.2	Διασταύρωση	221
Π3.5.3	Μετάλλαξη.....	222
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		225
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ.....		232

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η κατάσταση των ΑΠΕ στην Ελλάδα

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται παγκοσμίως μια τάση για ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο, όπου με τον όρο ΑΠΕ νοούνται βασικά η αιολική, η υδραυλική, η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμία. Οι λόγοι εστιάζονται στην επάρκεια συμβατικών πηγών, στην ασφάλεια εφοδιασμού και στην περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Για την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) οι ΑΠΕ αποτελούν βασική προτεραιότητα, όπως μαρτυράται από το θεσμικό πλαίσιο που έχει διαμορφωθεί τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, η αρχή έγινε το 1997 με τη Λευκή Βίβλο «Ενέργεια για το Μέλλον» για την προστασία του περιβάλλοντος και ακολούθησε το 2000 το Green Paper «Στρατηγική για την Ασφάλεια της παροχής Ενέργειας» για την ανεξαρτησία του ενεργειακού εφοδιασμού. Στα πλαίσια αυτά εντάσσεται και το Πρωτόκολλο του Κιότο που υπογράφηκε το Δεκέμβριο του 1997 από τα Ηνωμένα Έθνη για την Κλιματική Αλλαγή, όπου ορίστηκε ο στόχος της μείωσης των εκπομπών των Αερίων του Θερμοκηπίου (ΑτΘ) στην ΕΕ κατά 8% το 2008-12 από τα επίπεδα του 1990. Τέλος, πρόσφατη είναι η ψήφιση της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ, [1], σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπου θεσπίστηκε ο δεσμευτικός στόχος του 20-20-20 για το έτος 2020, δηλαδή συμμετοχή των ΑΠΕ κατά 20% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, εξοικονόμηση ενέργειας κατά 20% και μείωση των εκπομπών ΑτΘ επίσης κατά 20%.

Η Ελλάδα ως κράτος-μέλος της ΕΕ, εντάσσεται στη συνολική προσπάθεια της ΕΕ για αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ, [2], προβλεπόταν για την Ελλάδα ενδεικτικός στόχος συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιλαμβανομένης της υδραυλικής ενέργειας των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, σε ποσοστό 20.1% της εγχώριας ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας κατά το έτος 2010. Ο στόχος αυτός ήταν συμβατός με τις διεθνείς δεσμεύσεις της χώρας που απορρέουν από το Πρωτόκολλο του Κιότο. Το Πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπει για την Ελλάδα συγκράτηση του ποσοστού αύξησης, κατά την περίοδο 2008-2012, του CO₂ και άλλων αερίων που επιτείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 25%, σε σχέση με το έτος-βάση 1990. Επιπλέον, με τη ψήφιση της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ, [1], ο νέος στόχος για τη χώρα μας ως προς τη συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, ανέρχεται στο 18%. Στα πλαίσια αυτά ψηφίστηκε και ο Νόμος 3851/4.6.2010, [3], όπου συγκεκριμενοποιούνται οι στόχοι της Ελλάδας για το 2020, σύμφωνα με τους οποίους η συμμετοχή των ΑΠΕ θα πρέπει να αυξηθεί κατά 20% στην τελική κατανάλωση ενέργειας και κατά 40% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτή τη στιγμή η συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα κυμαίνεται περί το 12%, εκ των οποίων το 4% από αιολικά και το 6% από μεγάλα υδροηλεκτρικά. Στον Πίνακα 1.1 δίνεται η σύνθεση της ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας τα τελευταία χρόνια, ενώ στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η συμβολή των επιμέρους τεχνολογιών ΑΠΕ στη συνολική ηλεκτροπαραγωγή της χώρας για το έτος 2007.

Με τα σημερινά δεδομένα και βάσει εκτιμήσεων της ΡΑΕ, τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα και οι λοιπές ΑΠΕ πλην αιολικών (μικρά υδροηλεκτρικά, Φ/Β, γεωθερμία, βιομάζα, κλπ.) δεν αναμένεται να συνεισφέρουν πέραν του 10%. Τις μεγαλύτερες προοπτικές ανάπτυξης και συνεισφοράς στην επίτευξη των εθνικών στόχων παρουσιάζει η αιολική ενέργεια, εξαιτίας της διαθεσιμότητας της πρωτογενούς πηγής, αλλά κυρίως λόγω της τεχνολογικής ωριμότητας και του χαμηλού κόστους αξιοποίησής της συγκριτικά με άλλες μορφές ΑΠΕ.

Πίνακας 1.1. Σύνθεση της ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας τα τελευταία χρόνια (στοιχεία από ΔΕΣΜΗΕ και ΔΕΗ/ΔΔΝ)

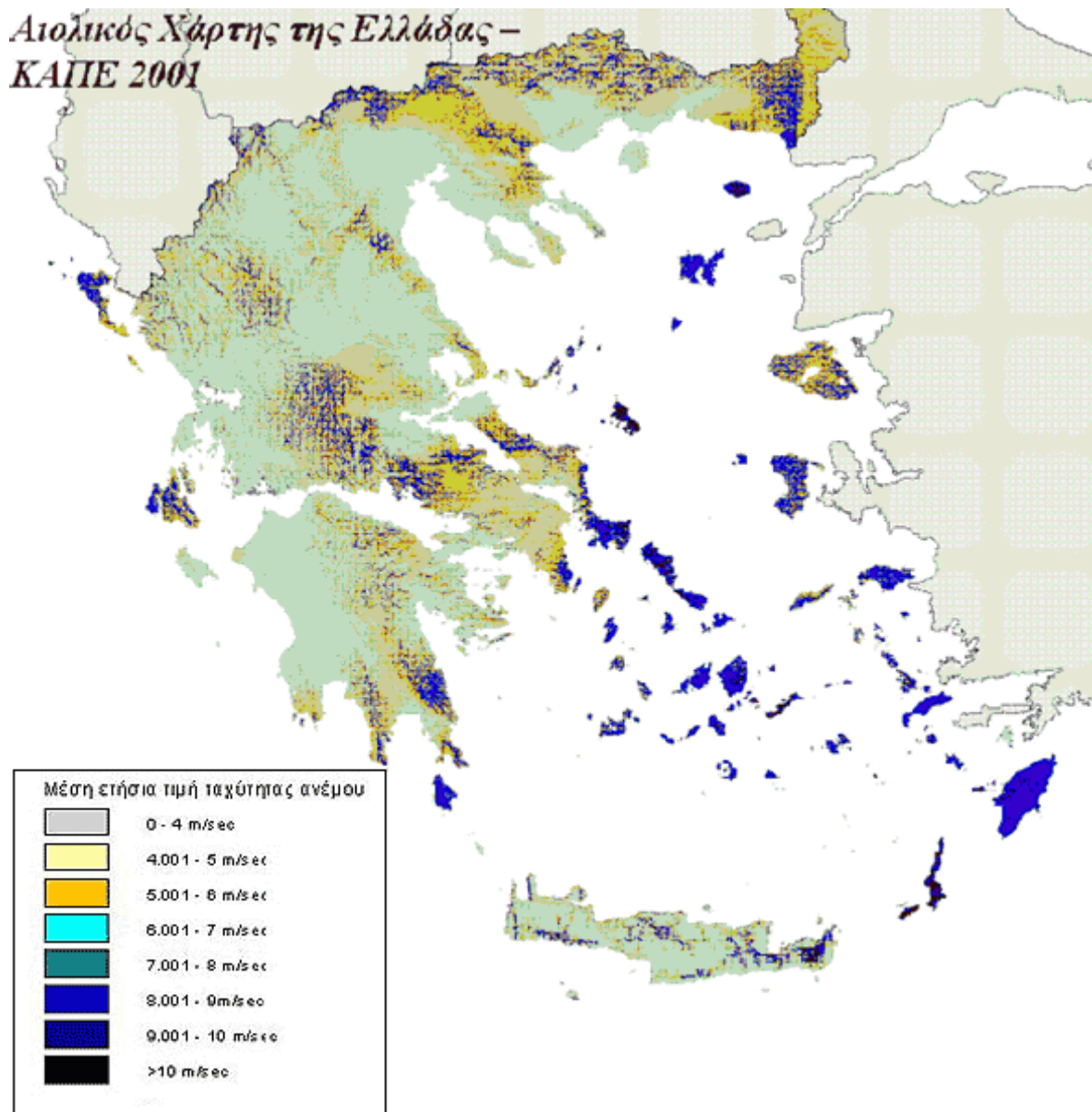
ΠΑΡΑΓΩΓΗ	2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΜWh)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΜWh)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΜWh)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΜWh)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΜWh)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΜWh)	(%)
ΛΙΓΝΙΤΙΚΗ	32.491.449	58,01	32.056.619	55,39	29.165.171	49,20	31.092.884	50,78	29.870.292	48,20	30.541.596	51,71
Φ.Α	8.037.615	14,35	7.944.623	13,73	10.169.096	17,16	13.211.449	21,58	13.331.748	21,51	9.377.185	15,88
ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ	7.134.965	12,74	7.915.036	13,68	8.104.041	13,67	8.266.934	13,50	8.598.394	13,87	6.629.516	11,22
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	4.158.925	7,43	4.573.747	7,90	5.619.663	9,48	2.020.771	3,30	1.777.256	2,87	4.568.730	7,74
ΣΗΘ/ΣΗΘΥΑ	10.317	0,02	14.395	0,02	9.114	0,02	34.028	0,06	34.792	0,06	144.122	0,24
ΕΙΣΑΓΩΓΕΣ-ΕΞΑΓΩΓΕΣ	2.820.579	5,04	3.780.910	6,53	4.202.388	7,09	4.354.191	7,11	5.613.967	9,06	4.367.697	7,40
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΕ	1.355.913	2,42	1.586.758	2,74	2.003.573	3,38	2.251.488	3,68	2.749.563	4,44	3.433.510	5,81
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΕ-ΥΗΕ	5.514.838	9,85	6.160.505	10,65	7.623.236	12,86	4.272.259	6,98	4.526.819	7,30	8.002.240	13,55
ΣΥΝΟΛΟ	56.009.763		57.872.088		59.273.046		61.231.745		61.976.012		59.062.356	

Πίνακας 1.2. Συμβολή των επιμέρους τεχνολογιών ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδας για το έτος 2007 (στοιχεία ΡΑΕ)

	Παραγωγή από ΑΠΕ το 2007 (GWh)						Συνολική Κατα- νάλωση το 2007 (MWh)	Συμμετοχή ΑΠΕ (%)
	Μεγάλα Υδρ/κά	Μικρά Υδρ/κά	Αιολικά	Βιομάζα/ Βιοαέριο	Φ/Β	Συνολικά		
Διασυνδεδεμένο	2021	223	1333	156	0	3733	55253	6.76%
ΜΔΝ	0	0	541	0	0	541	5535	9.77%
Σύνολο	2021	223	1874	156	0	4274	60789	7.03%

Στο Σχήμα 1.1 παρατίθεται ο χάρτης αιολικού δυναμικού της Ελλάδας (ΚΑΠΕ 2001), όπου διαπιστώνεται το υψηλό αιολικό δυναμικό των νησιών του Αιγαίου. Ωστόσο τα νησιά του Αιγαίου δεν μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο, καθ' ότι δε διασυνδέονται με το ηπειρωτικό σύστημα, ενώ η τοπική ζήτηση ενέργειας είναι σχετικά μικρή. Επιπλέον η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα νησιά περιορίζεται περαιτέρω εξαιτίας των τεχνικών περιορισμών των συμβατικών μονάδων (περιορισμός τεχνικού ελάχιστου και δυναμικός περιορισμός), [4], που είναι σε λειτουργία στα νησιά. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την περιορισμένη συμβολή των νησιών του Αιγαίου στην αύξηση της αιολικής διείσδυσης στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, παρά το υψηλό αιολικό δυναμικό τους.

Πρόσθετοι παράγοντες που καθιστούν επιτακτική την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού των νησιών του Αιγαίου είναι το υψηλό κόστος παραγωγής των αυτόνομων σταθμών παραγωγής (ΑΣΠ) των νησιών, η εξάρτηση από το πετρέλαιο (με τις απρόβλεπτες διακυμάνσεις της τιμής του, τα ζητήματα ασφάλειας εφοδιασμού, αλλά και τον κίνδυνο εξάντλησής του σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα), η προκαλούμενη τοπική ρύπανσή από την καύση των συμβατικών καυσίμων, καθώς και η έλλειψη χώρου για την επέκταση των ΑΣΠ για την κάλυψη της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης φορτίου των νησιών. Και όσο τα νησιά αυτά παραμένουν μη διασυνδεδεμένα, ως μόνη άμεση και πρακτική λύση για την επίτευξη υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ παρουσιάζεται η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας (που αλλιώς θα απορριπτόταν λόγω των τεχνικών περιορισμών των συμβατικών μονάδων) και η εν συνεχεία αξιοποίησή της μέσω ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής.



Σχήμα 1.1. Ο χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα (ΚΑΠΕ 2001)

1.2 Αποθήκευση ενέργειας για αύξηση της αιολικής διείσδυσης στα ΜΑΝ

Στο Αιγαίο υφίστανται σήμερα περισσότερα από 50 νησιά, μη διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό σύστημα. Αυτά τα νησιωτικά συστήματα, απομονωμένα ή διασυνδεδεμένα μεταξύ τους σε ομάδες, παρουσιάζουν αιχμή φορτίου από μερικές εκατοντάδες kW μέχρι περίπου 700 MW στην περίπτωση της Κρήτης και ηλεκτροδοτούνται από πετρελαϊκούς αυτόνομους σταθμούς παραγωγής (ΑΣΠ). Όπως είδαμε στα προηγούμενα, το υψηλό κόστος παραγωγής των ΑΣΠ, η εξάρτηση από το πετρέλαιο και οι περιβαλλοντικοί προβληματισμοί έχουν αποτελέσει ισχυρά κίνητρα για την αυξανόμενη αξιοποίηση του δυναμικού των ΑΠΕ των νησιών τις τελευταίες δεκαετίες, [5-7], με την αιολική ενέργεια να αποτελεί τη «ναυαρχίδα». Ωστόσο, παρά το υψηλό αιολικό δυναμικό των νησιών του Αιγαίου, τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα είναι αυτή τη στιγμή περιορισμένα, εξαιτίας των περιορισμών στην ισχύ εξόδου που επιβάλλονται στα

εγκατεστημένα αιολικά πάρκα (Α/Π), [4, 8]. Αυτές οι περικοπές αιολικής ισχύος σχετίζονται με τους τεχνικούς περιορισμούς των συμβατικών μονάδων παραγωγής (συνήθως νηζελογεννήτριες) και συγκεκριμένα με τα τεχνικά τους ελάχιστα και με τη δυναμική τους απόκριση. Βάσει των υφιστάμενων πρακτικών διαχείρισης των νησιωτικών συστημάτων, ένα ρεαλιστικό άνω όριο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας εκτιμάται γύρω στο 15-20% της ετήσιας ζήτησης φορτίου.

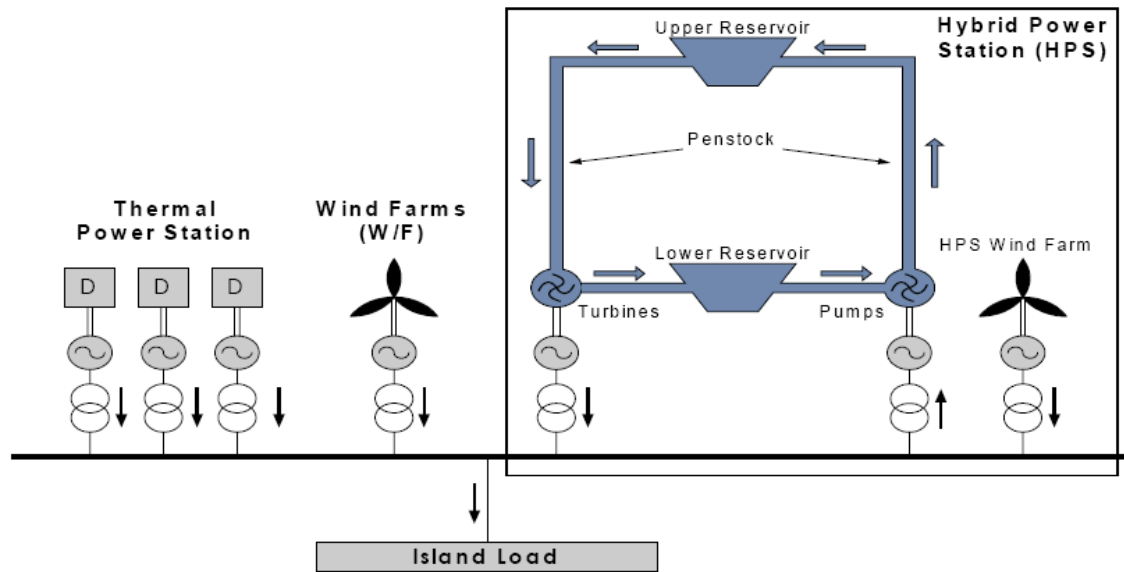
Η επίδραση της υψηλής αιολικής διείσδυσης στη λειτουργία και τον έλεγχο των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος αποτέλεσε θέμα πολλών δημοσιεύσεων, π.χ. [9-11], όπου διερευνήθηκαν οι τεχνικές, λειτουργικές και οικονομικές επιπτώσεις, απορρέουσες κυρίως από τη μεταβλητότητα και την περιορισμένη προβλεψιμότητα της αιολικής παραγωγής. Η χρησιμοποίηση της αποθήκευσης ενέργειας θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ώστε να αναιρεθούν οι παραπάνω αρνητικές επιπτώσεις και να επιτευχθεί υψηλή αιολική διείσδυση στα ηλεκτρικά συστήματα ισχύος, κυρίως στην περίπτωση των αυτόνομων νησιωτικών δικτύων, [12-28]. Για συστήματα ισχύος μερικών MW και άνω, η αποθήκευση μέσω μπαταριών, σφονδύλων (flywheels) και άλλων παρόμοιων μέσων αποτελούν μη ελκυστικές μέθοδοι, αφήνοντας την αντλησιοταμίευση ως την πιο ώριμη και οικονομικά βιώσιμη εναλλακτική λύση. Τέτοια αντλησιοταμιευτικά συστήματα απαιτούν βασικά έναν υδροηλεκτρικό σταθμό (ΥΗΣ), ένα αντλιοστάσιο και δύο δεξαμενές με επαρκή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους (συνήθως μερικές εκατοντάδες μέτρα), όπως σχηματικά απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Η βασική ιδέα χρησιμοποίησης της αντλησιοταμίευσης είναι η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας, που αλλιώς θα απορριπτόταν λόγω των περιορισμών διείσδυσης που θα τους επιβάλλονταν (π.χ. κατά τις περιόδους χαμηλού φορτίου και υψηλού ανέμου), μέσω άντλησης νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Αυτή η υδραυλική ενέργεια στη συνέχεια ανακτάται μέσω των υδροστρόβιλων, με πλήρως ελεγχόμενο τρόπο, επιτρέποντας συνεπώς την υποκατάσταση συμβατικής ενέργειας αλλά και ισχύος. Σημειωτέον ότι ο συνδυασμός της αιολικής και υδραυλικής παραγωγής, ακόμη και εν τη απουσία των διατάξεων αποθήκευσης, μπορούν να συνεισφέρουν στη μείωση της μεταβλητότητας και αβεβαιότητας της αιολικής παραγωγής. Το γεγονός αυτό καθιστά πιθανή την παροχή εγγυημένης ισχύος από το συνδυασμό ΥΗΣ και Α/Π, με επακόλουθο σημαντικά οικονομικά οφέλη στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, [29, 30].

Μικρά απομονωμένα συστήματα που συνδυάζουν ανανεώσιμη και συμβατική παραγωγή και αρκετά συχνά διατάξεις αποθήκευσης, αποκαλούνται υβριδικά συστήματα. Στην παρούσα διατριβή ο όρος Υβριδικός Σταθμός (ΥΒΣ) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα συνδυασμένο σταθμό, που αποτελείται από ένα Α/Π και διατάξεις αντλησιοταμίευσης και ανήκουν όλες σε έναν παραγωγό, ο οποίος και τις διαχειρίζεται. Ο ορισμός αυτός ανταποκρίνεται στο υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα, [31, 32], που οριοθετεί το νομικό πλαίσιο και παρέχει ορισμένες γενικές αρχές για τέτοιου είδους επενδύσεις στην εγχώρια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι με αυτόν τον ορισμό υποδηλώνεται ότι οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης γίνονται αντιληπτές από το νομοθέτη ως εργαλείο ένταξης σημαντικής επιπλέον αιολικής ισχύος στα κορεσμένα νησιωτικά συστήματα, παρά ως τρόπος αύξησης της αιολικής παραγωγής των υφιστάμενων Α/Π.

1.3 Σύντομη περιγραφή αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με ΥΒΣ

Μια εννοιολογική αναπαράσταση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με ΥΒΣ παρατίθεται στο Σχήμα 1.2. Τα μεγέθη των αυτόνομων ηλεκτρικών συστημάτων στα ελληνικά νησιά ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες kW μέχρι εκατοντάδες MW. Στο Σχήμα 1.2, το σύστημα τροφοδοτείται από ένα συμβατικό ΑΣΠ, ο οποίος αποτελείται συνήθως από διάφορες μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Μεγαλύτερα νησιωτικά συστήματα, όπως αυτά της Κρήτης και της Ρόδου, περιλαμβάνουν επίσης αμμοστρόβιλους, μονάδες συνδυασμένου κύκλου (ΣΚ), καθώς και αεριοστρόβιλους για λειτουργία στην αιχμή. Τα κύρια καύσιμα που καταναλώνονται στους ΑΣΠ των νησιών είναι είτε μαζούτ είτε diesel. Διάφορα Α/Π είναι ήδη εγκατεστημένα στα ελληνικά νησιά από ανεξάρτητους παραγωγούς. Αυτή τη στιγμή η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στα διάφορα νησιά κυμαίνεται

προσεγγιστικά μέχρι 30% της ετήσιας αιχμής του φορτίου του εκάστοτε νησιού, ενώ τα επίπεδα διείσδυσης αιολικής ενέργειας φτάνουν το 15% της ετήσιας ζήτησης φορτίου.



Σχήμα 1.2. Σχηματική αναπαράσταση ενός ΥΒΣ σε απομονωμένο νησιωτικό σύστημα, [33, 34]

Ο ΥΒΣ περιλαμβάνει ένα (ή πιθανώς και περισσότερα) Α/Π, έναν ΥΗΣ, ένα αντλιοστάσιο και δύο δεξαμενές, με το Α/Π να μην είναι εγκατεστημένο απαραίτητως στην ίδια ή παρακείμενη τοποθεσία με τα υπόλοιπα. Οι διάφορες υπομονάδες του ΥΒΣ (Α/Π, ΥΗΣ, αντλιοστάσιο) συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο με ανεξάρτητους μετρητές ενέργειας. Η κάτω και άνω δεξαμενή του ΥΒΣ τοποθετούνται σε επαρκή υψομετρική διαφορά που εξασφαλίζει υδραυλικό ύψος μερικών εκατοντάδων μέτρων (συνήθως περισσότερα από 300 m), και η χωρητικότητά τους εξαρτάται από το διαθέσιμο αυτό ύψος και τις απαιτήσεις αποθήκευσης ενέργειας του ΥΒΣ¹. Ένας ΥΒΣ μπορεί να διαθέτει ανεξάρτητο αγωγό προσαγωγής και κατάθλιψης μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής και ξεχωριστές εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής παραγωγής και άντλησης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2, κάτι που του εξασφαλίζει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης, χαρακτηριστικό σημαντικό για τη λειτουργία του, όπως θα εξηγηθεί στα επόμενα κεφάλαια. Σημειωτέον ότι για την εξασφάλιση της συγκεκριμένης δυνατότητας έχει προταθεί και μια οικονομικότερη διαμόρφωση ΥΒΣ, εξοπλισμένου με μονό αγωγό, ο οποίος στο κάτω άκρο του διακλαδίζεται σε δύο αγωγούς για την εξυπηρέτηση των δύο ξεχωριστών αντλητικών και υδροηλεκτρικών σταθμών. Επίσης έχει προταθεί και η παραλλαγή στην οποία η αντλία και ο υδροστρόβιλος βρίσκονται σε κοινό άξονα εκατέρωθεν μιας κοινής ηλεκτρικής μηχανής, δηλαδή υφίστανται και πάλι δύο υδραυλικές μηχανές αλλά μόνο μία ηλεκτρική. Ωστόσο η πρακτική εμπειρία πάνω σε τέτοιου είδους εναλλακτικές εγκαταστάσεις είναι ακόμα περιορισμένη. Από την άλλη, αν ένας ΥΒΣ είναι εξοπλισμένος με μονό αγωγό και αναστρέψιμες μηχανές, που θα μπορούν να λειτουργούν είτε ως στρόβιλοι είτε ως αντλίες, τότε μειώνεται το επενδυτικό του κόστος αλλά χάνεται το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης.

Οι κύριες καταστάσεις λειτουργίας ενός ΥΒΣ είναι οι εξής τρεις:

¹ Η αποθηκευτική ικανότητα του ΥΒΣ συνήθως μετριέται σε ισοδύναμες ώρες λειτουργίας στην ονομαστική ισχύ των υδροστρόβιλων. Στην περίπτωση σχετικά μεγάλων ΥΒΣ, εγγυημένης ισχύος μεγαλύτερης των 10 MW, φυσικοί περιορισμοί και θέματα κόστους μειώνουν την αποθηκευτική ικανότητα σε λιγότερο από μία μέρα. Τιμές γύρω στις 20 ώρες συναντώνται σε πολλές μελέτες σχεδίασης ΥΒΣ στην πράξη. Σε κάθε περίπτωση το μέγεθος της αποθηκευτικής ικανότητας ενός ΥΒΣ εξαρτάται κατά πολύ από την τοπογραφία της τοποθεσίας εγκατάστασης του και την πιθανή χρησιμοποίηση δεξαμενών νερού, ήδη υφιστάμενων για αρδευτικούς λόγους.

- *Λειτουργία υδροστροβίλων*: Η αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια στην άνω δεξαμενή μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των υδροστροβίλων. Α/Π και αντλίες είναι εκτός λειτουργίας.
- *Αντλησιοαιολική συνεργασία*: Η παραγόμενη αιολική ισχύς αξιοποιείται πλήρως για άντληση και αποθήκευση ενέργειας στην άνω δεξαμενή. Οι υδροστροβίλοι είναι εκτός λειτουργίας.
- *Άντληση από το δίκτυο*: Λειτουργία και πάλι των αντλιών, οι οποίες όμως τώρα απορροφούν ενέργεια από το δίκτυο αντί για την αιολική του ΥΒΣ.
Επίσης είναι δυνατές και οι ακόλουθες καταστάσεις λειτουργίας:
 - *Λειτουργία μόνο του Α/Π*: Το Α/Π του ΥΒΣ εγγχεί ενέργεια απ' ευθείας στο δίκτυο, χωρίς ταυτόχρονη άντληση. Είναι μια κατάσταση λειτουργίας που αναμένεται να συμβαίνει ελάχιστες φορές σε κορεσμένα νησιά.
 - *Υδροαιολική συνεργασία*: Η ισχύς του Α/Π του ΥΒΣ υποκαθιστά ισχύ υδροστροβίλων στην παροχή της κατανεμόμενης ισχύος του ΥΒΣ, όπως αυτή καθορίζεται από το αυτόματο σύστημα ρύθμισης της παραγωγής (AGC) των μονάδων του νησιού. Οι υδροστροβίλοι παρέχουν την πρωτεύουσα εφεδρεία για αντιστάθμιση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής, μια ιδέα που έχει ήδη διερευνηθεί στη βιβλιογραφία, [29, 30]. Με αυτόν τον τρόπο η αιολική ισχύς διατίθεται απ' ευθείας στο δίκτυο, αποφεύγοντας έτσι τις απώλειες στα συστήματα αποθήκευσης. Επίσης, αυτή η λειτουργική κατάσταση θα είναι αρκετά πιθανή σε ΥΒΣ μονού αγωγού όταν θα λειτουργούν οι υδροστροβίλοι, καθώς τότε η άντληση δεν είναι δυνατή.
 - *Ταυτόχρονη παραγωγή και άντληση*: Ένας συνδυασμός των δύο πρώτων καταστάσεων λειτουργίας. Παράλληλα με τους υδροστροβίλους (των οποίων η ισχύς μπορεί να υποκαθίσταται από αιολική, στο πλαίσιο της υδροαιολικής συνεργασίας), λειτουργούν και οι αντλίες που αξιοποιούν την αιολική ισχύ του ΥΒΣ για αποθήκευση νερού στην άνω δεξαμενή. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας προϋποθέτει την ύπαρξη ξεχωριστών υδραυλικών μηχανών για παραγωγή και άντληση και έχει το πλεονέκτημα της αξιοποίησης της αιολικής ισχύος ακόμη και όταν παράγουν οι υδροστροβίλοι, κάτι που είναι αρκετά σημαντικό δεδομένου ότι οι υδροστροβίλοι μπορεί να είναι σε λειτουργία αρκετές ώρες την ημέρα (συνήθως 4-8 ώρες, αλλά ορισμένες φορές πολύ περισσότερες).

1.4 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή της αντλησιοταμίευσης για την ομαλή ενσωμάτωση υψηλής αιολικής παραγωγής στα ηλεκτρικά συστήματα, έχει αναλυθεί από διάφορες οπτικές στη βιβλιογραφία.

Ένα δημοφιλές θέμα στη βιβλιογραφία αποτελεί η εκτίμηση των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων των αντλησιοταμιευτικών συστημάτων στα ηλεκτρικά συστήματα. Αναλυτικότερα, η επίδραση της αιολικής διείσδυσης στα ηλεκτρικά δίκτυα από οικονομικής απόψεως αναλύθηκε στη [12], όπου η υδραυλική αποθήκευση παρουσιάζεται ως η βέλτιστη λύση για να περιοριστεί η αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος λόγω των υψηλών επιπέδων αιολικής διείσδυσης, καθώς αποφεύγεται η ανάγκη για εγκατάσταση επιπλέον μονάδων αιχμής. Επίσης στη [19], χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα την Κρήτη, δείχνεται ότι με την αντλησιοταμίευση μπορεί να επιτευχθεί υψηλή αιολική διείσδυση χωρίς αρνητικές επιπτώσεις για την ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος, ενώ στο [20] αξιολογείται ως προς τις επιπτώσεις η συμβολή αντλησιοταμιευτικών ΥΒΣ στην αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ στα νησιωτικά συστήματα. Επίσης στην [21], η λειτουργία υδροαιολικών αντλησιοταμιευτικών ΥΒΣ φαίνεται ότι μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της αιολικής διείσδυσης σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα. Ωστόσο, το υψηλό επενδυτικό κόστος των εγκαταστάσεων αντλησιοταμίευσης θέτει ζήτημα βιωσιμότητας και απαίτησης ιδιαίτερης τιμολόγησης για την ενέργεια και την εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ. Στην [22] συμπεραίνεται ότι οι αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί μπορούν να μειώσουν το κόστος η-

λεκτροπαραγωγής σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα. Ομοίως, στην [23], εξετάζεται η λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος (που συνδυάζει Α/Π, ΥΗΣ και αντλησιοταμίευση) στο νησί της Ικαρίας, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν οι συμβατικές θερμικές μονάδες υποκατασταθούν από τον ΥΒΣ. Στην [24] προτείνεται η εγκατάσταση αντλησιοταμιευτικού ΥΒΣ για μεγιστοποίηση της αιολικής διείσδυσης στο νησί της Σερίφου. Στην [25] αξιολογείται η οικονομική βιωσιμότητα για μια επένδυση ενός τυπικού ΥΒΣ (είτε με μονό είτε με διπλό αγωγό) και αναλύονται οι ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις στο σύστημα της Κρήτης. Αξίζει να σημειωθεί πάντως ότι οι οικονομικές και ενεργειακές επιπτώσεις από τη λειτουργία ενός ΥΒΣ συσχετίζονται άμεσα με τη θεωρούμενη πολιτική διαχείρισης και σε όλες τις παραπάνω αναλύσεις έχουν υιοθετηθεί ποικίλες στρατηγικές διαχείρισης των υπό εξέταση συστημάτων, οι οποίες στερούνται σαφούς συσχέτισης με συγκεκριμένα θεσμικά πλαίσια, εκτός ίσως από την [25].

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης τόσο του ΥΒΣ όσο και ολόκληρου του ηλεκτρικού συστήματος έχει αποτελέσει θέμα πολλών δημοσιεύσεων. Συγκεκριμένα στην [26], διερευνάται η βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης ενός υδροαιολικού αντλησιοταμιευτικού ΥΒΣ σε μια πλήρως ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτή της Ισπανίας, όπου ο υβριδικός παραγωγός θα υποβάλλει προσφορές ισχύος στα πρότυπα των συμβατικών παραγωγών, ενώ στην [27] διερευνάται η στρατηγική μεγιστοποίησης των εσόδων ενός αντίστοιχου ΥΒΣ λαμβάνοντας υπόψη το θεσμικό πλαίσιο της Πορτογαλίας, όπου όλη η ενέργεια του ΥΒΣ αποζημιώνεται στην καθορισμένη βάσει νόμου τιμή της αιολικής ενέργειας. Στην [28], διερευνάται η κατάλληλη πολιτική διαχείρισης ενός ΥΒΣ στα Κανάρια νησιά για τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδραυλικού και αιολικού δυναμικού, χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις στην αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος. Ελλιπής παρουσιάζεται ωστόσο η διερεύνηση ως προς τον προσδιορισμό της βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης των ελληνικών νησιωτικών συστημάτων με ΥΒΣ, που θα λαμβάνει υπόψη το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, [31, 32]. Μόνο στην [25] παρουσιάζεται μια απλουστευμένη στρατηγική διαχείρισης που συσχετίζεται με το νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, σύμφωνα με την οποία ο ΥΒΣ οφείλει να παρέχει σταθερή ισχύ κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων της ημέρας, ενώ μπορεί να παράγει και τις υπόλοιπες ώρες εφόσον η αποθηκευμένη υδραυλική ενέργειά του επαρκεί.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που έχει απασχολήσει τη βιβλιογραφία αποτελεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός ΥΒΣ. Συγκεκριμένα στην [28], εκτός από τον προσδιορισμό κατάλληλης πολιτικής διαχείρισης διερευνάται και η κατάλληλη διαστασιολόγηση ενός ΥΒΣ στα Κανάρια νησιά για τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδραυλικού και αιολικού δυναμικού. Επίσης, στις [35, 36] πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση της βέλτιστης διαστασιολόγησης των διαφόρων μονάδων ενός ΥΒΣ με αντλησιοταμίευση, χρησιμοποιώντας κατάλληλο εργαλείο βελτιστοποίησης που στηρίζεται στους εξελικτικούς αλγορίθμους. Στην [37] διερευνάται το βέλτιστο μέγεθος αντλιών και δεξαμενών που ενδείκνυται για εγκατάσταση σε ένα νησιωτικό σύστημα με υψηλό αιολικό δυναμικό, χρησιμοποιώντας ως μέθοδο βελτιστοποίησης αυτή του γραμμικού προγραμματισμού. Στην [38] προσδιορίζεται η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός ΥΒΣ στη Λέσβο, με αντλησιοταμίευση όχι μόνο αιολικής αλλά και φωτοβολταϊκής παραγωγής. Τα κριτήρια βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι βελτιστοποιήσεις είναι τόσο ενεργειακά (μεγιστοποίηση ενεργειακού βαθμού απόδοσης του ΥΒΣ, ελαχιστοποίηση απωλειών ενέργειας ΑΠΕ του ΥΒΣ) όσο και οικονομικά (μεγιστοποίηση εσωτερικού βαθμού απόδοσης). Στην [39] διερευνάται επίσης ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός ΥΒΣ στη Λέσβο, με δύο όμως παράλληλα συστήματα αποθήκευσης: α) αντλησιοταμίευση και β) παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση. Και στις δύο παραπάνω εργασίες η βελτιστοποίηση βασίστηκε στους εξελικτικούς αλγορίθμους κάνοντας χρήση του λογισμικού βελτιστοποίησης EASY (Evolutionary Algorithm System) που αναπτύχθηκε από τη μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Αξίζει και πάλι να σημειωθεί ότι η επιλογή της βέλτιστης διαστασιολόγησης συναρτάται στενά με τη θεωρούμενη πολιτική διαχείρισης και στις παραπάνω εργασίες έχει θεωρηθεί πληθώρα πολιτικών,

απλοϊκών ή πιο λεπτομερών, σχετικών ή μη με το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο για ΥΒΣ στα ελληνικά νησιά.

Ενδιαφέρον θέμα αποτελεί και η διερεύνηση των αναμενόμενων επιπτώσεων της λειτουργίας ενός ΥΒΣ στη μεταβατική συμπεριφορά και ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος. Η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί πάνω στη δυναμική συμπεριφορά του ΥΒΣ ως μια ενιαία οντότητα, παρουσιάζεται ελλιπής στη βιβλιογραφία. Έχει διερευνηθεί όμως η δυναμική συμπεριφορά των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, εκτενής έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων δυναμικής προσομοίωσης υδροστρόβιλων και γενικότερα ΥΗΣ, ώστε να μελετηθεί η δυναμική τους απόκριση και οι επιπτώσεις τους στην ευστάθεια των ηλεκτρικών συστημάτων, [40-45]. Αντίστοιχα δυναμικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί και για τις Α/Γ, όλων των τύπων που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά, [46-49]. Επίσης, εξετάστηκε και η προοπτική της αντλησιοταμίευσης να εξομαλύνει τα προβλήματα ρύθμισης συχνότητας που μπορεί να προκύψουν σε συστήματα με υψηλή αιολική διείσδυση. Αναλυτικότερα, διερευνήθηκε τόσο το σενάριο οι αντλίες να αποσυνδέονται σε περίπτωση σημαντικής πτώσης της συχνότητας του συστήματος λόγω απώλειας μονάδων παραγωγής (συμβατικών και ανανεώσιμων), [50], όσο και το σενάριο οι αντλίες να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την εκάστοτε αιολική παραγωγή ή ακόμη και να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, [51], και αναλύθηκαν οι θετικές επιπτώσεις τους στην ευστάθεια του συστήματος. Ωστόσο, ελλιπής είναι η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί σχετικά με τη συνδυασμένη λειτουργία των επιμέρους μονάδων ενός ΥΒΣ και των επιπτώσεών της στα ηλεκτρικά συστήματα.

1.5 Αντικείμενο – Δομή διατριβής

Με την παρούσα διατριβή πραγματοποιείται ανάλυση ζητημάτων που σχετίζονται με τη λειτουργία και τις επιπτώσεις υβριδικών αιολικών-αντλησιοταμιευτικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΔΝ). Η ανάλυση επικεντρώνεται σε τρία επιμέρους θέματα:

1. Διερεύνηση των επιπτώσεων των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας ενός ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος ενός ΜΔΝ.
2. Προσδιορισμός κατάλληλης πολιτικής διαχείρισης ΜΔΝ με αντλησιοταμιευτικούς ΥΒΣ, λαμβάνοντας υπόψη το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα, καθώς και διερεύνηση των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του ΥΒΣ.
3. Διερεύνηση θεμάτων βέλτιστης διαστασιολόγησης ενός αντλησιοταμιευτικού ΥΒΣ.

Αναλυτικότερα, η δομή της παρούσας διατριβής είναι η εξής:

Αρχικά και προκειμένου να απαντηθούν τα ερωτήματα τεχνικής και δυναμικής φύσεως γύρω από τη λειτουργία ενός ΥΒΣ και τα οποία σχετίζονται με το κατά πόσο οι διάφορες πιθανές λειτουργικές καταστάσεις των ΥΒΣ είναι τεχνικά εφικτές, καθώς και με τις επιπτώσεις τους στην ευστάθεια ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος, πραγματοποιείται δυναμική προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος ενός τυπικού ΜΔΝ με έναν ενδεικτικό ΥΒΣ, με χρήση του προγράμματος DigSilent/PowerFactory. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα δυναμικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες των προσομοιώσεων και στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται εκτενώς η δυναμική συμπεριφορά του νησιωτικού συστήματος χωρίς και με τον ΥΒΣ, για τις πλέον κρίσιμες από τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος. Στόχος της μελέτης είναι να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις που προκαλούνται στη μεταβατική απόκριση του συστήματος από την ένταξη του ΥΒΣ, να εντοπιστούν οι πιθανοί λειτουργικοί περιορισμοί του ΥΒΣ και να προταθούν λύσεις για την αντιμετώπιση των όποιων προβλημάτων διαπιστωθούν.

Ακολούθως προτείνεται συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης για αυτόνομα νησιωτικά συστήματα με ΥΒΣ, η οποία κρίνεται κατάλληλη για την εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας των ΥΒΣ και την αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα, χωρίς αρνητικές

επιπτώσεις στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των υφιστάμενων Α/Π των νησιών. Η συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης συσχετίζεται άμεσα με το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, [31, 32], και αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση του ρυθμιστικού πλαισίου για τους ΥΒΣ σήμερα, καθώς συμπεριλήφθη στο σχετικό κείμενο Δημόσιας Διαβούλευσης του 2008 της ΡΑΕ, [53], ενώ αναμένεται να ενσωματωθεί και στον υπό έκδοση Κώδικα Διαχείρισης ΜΔΝ (ΚΔΜΔΝ). Η λογική και οι λεπτομέρειες της πολιτικής διαχείρισης του συνολικού συστήματος παραγωγής ενός νησιού με ΥΒΣ, καθώς και η εσωτερική διαχείριση του ΥΒΣ για τη μεγιστοποίηση των εσόδων του, περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Στη συνέχεια, η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του Κεφαλαίου 4 εφαρμόζεται σε τρία νησιά (Κρήτη, Λέσβος, Κάρπαθος) διαφορετικού μεγέθους και χαρακτηριστικών, και λαμβάνοντας υπόψη τους όποιους λειτουργικούς περιορισμούς προκύπτουν από το Κεφάλαιο 3, πραγματοποιείται προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας των συστημάτων αυτών με ΥΒΣ διαφόρων μεγεθών, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και το οποίο βασίζεται σε ισοζύγια ενέργειας και ισχύος των συστημάτων. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων παρουσιάζονται και αναλύονται στο Κεφάλαιο 5, προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης και να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις της ένταξης των ΥΒΣ στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των υφιστάμενων Α/Π, καθώς και στο συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος. Επίσης αξιολογείται η βιωσιμότητα των επενδύσεων για ΥΒΣ υπό το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο. Στα πλαίσια αυτά παρατίθενται αποτελέσματα και από την ανάλυση μιας πραγματικής εφαρμογής, αυτής του ΥΒΣ της Ικαρίας, που αποτελεί έναν από τους πρώτους ΥΒΣ υπό κατασκευή στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύεται και διερευνάται το θέμα της βέλτιστης διαστασιολόγησης αντλησιοταμιευτικών ΥΒΣ από δύο οπτικές: α) Οπτική επενδυτή, όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης της επένδυσης. β) Οπτική συστήματος, με αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης ΑΠΕ με το ελάχιστο δυνατό κόστος παραγωγής για το σύστημα. Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων, με εφαρμογή στο σύστημα της Λέσβου. Πληθώρα σεναρίων εξετάζεται προκειμένου να εξαχθούν ορισμένα γενικευμένα συμπεράσματα επί του ζητήματος.

Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της παρούσας διατριβής, επισημαίνονται τα σημεία καινοτομίας και προαγωγής της επιστήμης και περιγράφονται μερικές από τις προοπτικές συνέχισης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, στα Παραρτήματα παρατίθενται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην παρούσα ανάλυση.

2. ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΔΝ ΜΕ ΥΒΣ

Παρά το γεγονός ότι πολλοί ΥΒΣ έχουν αδειοδοτηθεί και αναμένεται να εγκατασταθούν στα ΜΔΝ τα επόμενα χρόνια, δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί και διευκρινιστεί θέματα τεχνικής και δυναμικής φύσεως που ανακύπτουν από την ενδεχόμενη ενσωμάτωση ΥΒΣ στα ηλεκτρικά συστήματα των νησιών. Τα θέματα αυτά εστιάζονται στις επιπτώσεις των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας των ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά και ευστάθεια των ηλεκτρικών συστημάτων στα οποία θα εγκατασταθούν. Από τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, αυτές που κυρίως ενδιαφέρουν είναι η λειτουργία των υδροστρόβιλων με υποκατάσταση συμβατικών μονάδων αντίστοιχης ισχύος και οι καταστάσεις της αντλησιοαιολικής και υδροαιολικής συνεργασίας εντός του ΥΒΣ.

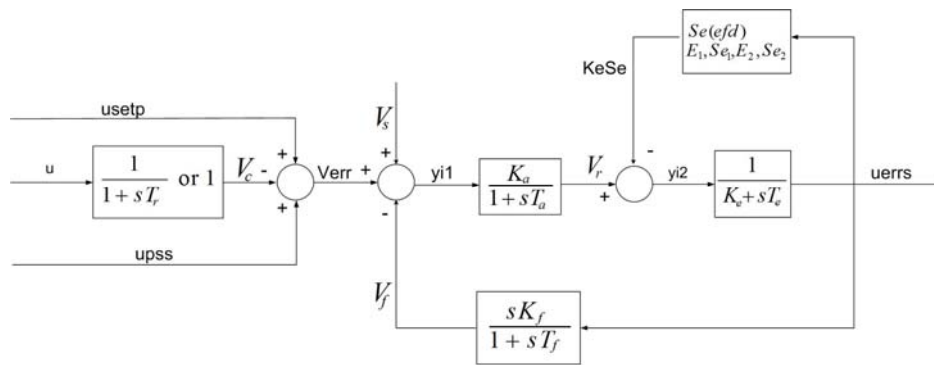
Πιο συγκεκριμένα ένα από τα κύρια ζητήματα που ανακύπτουν σχετίζεται με τη δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων και τον προσδιορισμό της ικανότητας ρύθμισης συχνότητας του ΥΗΣ συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες των νησιών που αναμένεται να υποκαθίστανται σε ημερήσια βάση όταν θα τεθεί σε λειτουργία ο ΥΒΣ. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός των ενδεχόμενων αρνητικών επιπτώσεων της υδροαιολικής συνεργασίας στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος εξαιτίας των μη ελεγχόμενων διακυμάνσεων της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ και ο ενδεχόμενος καθορισμός των τεχνικών προϋποθέσεων για αντιστάθμιση των επιπτώσεων αυτών. Γενικότερα να διερευνηθεί κατά πόσο είναι τεχνικά εφικτή ώστε να γίνει αποδεκτή από το ΔΜΔΝ, όπως ρητά αναφέρεται στις άδειες παραγωγής των ΥΒΣ. Σημαντικό είναι τέλος να εξεταστούν και οι επιπτώσεις της αντλησιοαιολικής συνεργασίας στην ευστάθεια και την εν γένει δυναμική συμπεριφορά των συστημάτων ισχύος, καθώς αποτελεί την κύρια κατάσταση λειτουργίας ενός ΥΒΣ και άρα αναμένεται να συμβαίνει σε μεγάλη κλίμακα στα ΜΔΝ όπου θα εγκατασταθούν ΥΒΣ.

Για τη διευκρίνιση των παραπάνω ζητημάτων, απαιτείται μοντελοποίηση και προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του ηλεκτρικού συστήματος ενός τυπικού ΜΔΝ με έναν ενδεικτικό ΥΒΣ. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μοντέλα προσομοίωσης όλων των επιμέρους μονάδων του συστήματος, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης DigSilent/PowerFactory.

2.1 Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας και αυτόματου ρυθμιστή τάσης

Οι σύγχρονες γεννήτριες όλων των μονάδων παραγωγής μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας του DigSilent/PowerFactory, που αποτελεί το γνωστό έκτης τάξης μοντέλο γεννήτριας, όπως περιγράφεται στις [53, 54].

Σχετικά με τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (AVR) των γεννητριών, ανάλογα με το σύστημα διέγερσης έχει προταθεί πληθώρα μοντέλων ποικίλης μεταβλητότητας και ακρίβειας για χρήση σε μελέτες ευστάθειας συστημάτων ισχύος, [55-58]. Στη παρούσα διατριβή θεωρήθηκε το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο IEEE Type 1, κοινό για όλες τις γεννήτριες του συστήματος, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Ως τιμές των παραμέτρων του AVR για όλες τις μονάδες παραγωγής του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές βάσει του IEEE Std. 421.5, [58], όπως δίνονται στον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.1. Το μοντέλο IEEE Type 1 που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αυτόματου ρυθμιστή τάσης (AVR) των σύγχρονων γεννητριών.

Πίνακας 2.1. Τιμές παραμέτρων του AVR

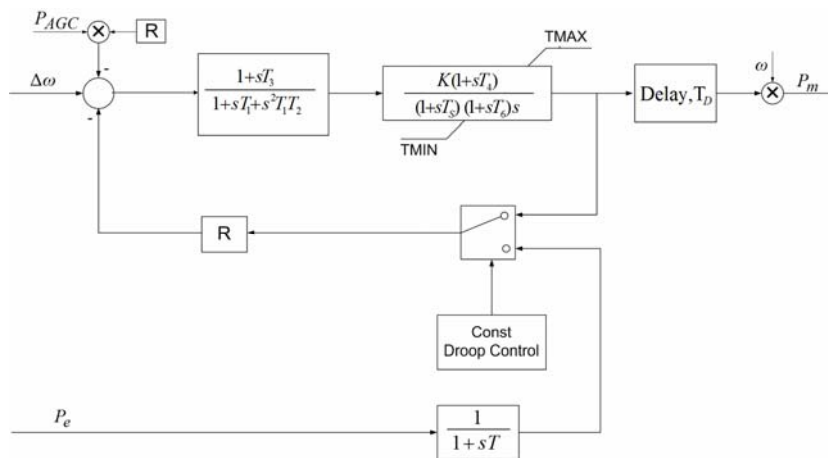
Σύμβολο	Παράμετροι Επεξήγηση	Μονάδα	Τιμές
T_r	Measurement delay	s	0.01
K_a	Controller gain	p.u.	400
T_a	Controller time constant	s	0.02
K_e	Exciter constant	p.u.	1
T_e	Exciter time constant	s	0.8
K_f	Stabilisation path gain	p.u.	0.03
T_f	Stabilisation path time constant	s	1
E_1	Saturation factor 1	p.u.	0
Se_1	Saturation factor 2	p.u.	0
E_2	Saturation factor 3	p.u.	0
Se_2	Saturation factor 4	p.u.	0
V_{rmin}	Controller output minimum	p.u.	-7.3
V_{rmax}	Controller output maximum	p.u.	7.3

2.2 Μοντέλο προσομοίωσης μηχανής diesel

Οι μονάδες diesel θεωρήθηκε ότι διαθέτουν ρυθμιστή στροφών Woodward, που αναπαρίσταται στο DigSilent/PowerFactory με το μοντέλο DEGOV1 (Σχήμα 2.2). Είσοδος του ρυθμιστή αποτελεί το σφάλμα στροφών της μονάδας diesel ($\Delta\omega$). Ο ρυθμιστής προβλέπεται να παίρνει set-point (P_{AGC}) από το αυτόματο σύστημα ρύθμισης της παραγωγής (AGC) των μονάδων του νησιού για τις ανάγκες δευτερεύουσας και τριτεύουσας ρύθμισης του συστήματος, που θα αφορά την εκάστοτε επιθυμητή φόρτιση των μονάδων παραγωγής και την απαλοιφή του σφάλματος συχνότητας, και το οποίο σήμα, αφού πολλαπλασιαστεί με το μόνιμο στατισμό (R) του ρυθμιστή, προστίθεται στο σφάλμα $\Delta\omega$. Ο μόνιμος στατισμός του ρυθμιστή μπορεί να υλοποιηθεί με ανάδραση είτε από το άνοιγμα της βαλβίδας είτε από την ηλεκτρική ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Στις προσομοιώσεις έχει θεωρηθεί ότι η ανάδραση λαμβάνεται από την ηλεκτρική ισχύ. Η τιμή του μόνιμου στατισμού καθορίζεται από τις ανάγκες λειτουργίας του συστήματος. Στην παρούσα ανάλυση ελήφθη ίδιος για όλες τις μονάδες και ίσος με 5%. Τέλος, η μηχανή diesel προσομοιώνεται με βαθμίδα καθυστέρησης 1^{ης} τάξεως, που αναπαριστά την καθυστέρηση στην απόκριση της μηχανικής ροπής.

Στον Πίνακα 2.2 δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος ρυθμιστή στροφών – μηχανής diesel, βασισμένοι σε πραγματικά δεδομένα από υφιστάμενες μηχανές diesel στα ΜΔΝ, [59].

Όσον αφορά την αδράνεια των στρεφόμενων μαζών των μονάδων diesel, θεωρήθηκε ότι η χρονική σταθερά αδράνειας ισούται με $H_D=2.45$ s, η οποία βασίστηκε σε διαθέσιμες τιμές από υφιστάμενες μονάδες στα ΜΑΝ, αντίστοιχης ισχύος με τις θεωρούμενες στην ανάλυση του επόμενου κεφαλαίου.



Σχήμα 2.2. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση του συστήματος μηχανή diesel – ρυθμιστής στροφών.

Πίνακας 2.2. Τιμές παραμέτρων του συστήματος μηχανή diesel-ρυθμιστής στροφών

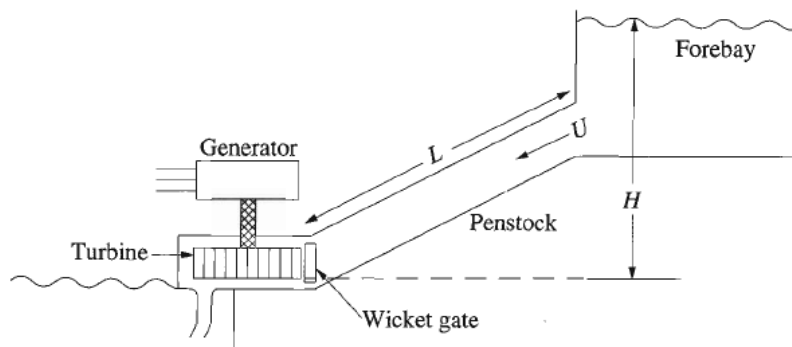
Σύμβολο	Παράμετροι Επεξήγηση	Μονάδα	Τιμές
K	Actuator gain	p.u.	3
$T4$	Time constant	s	0.1
$T5$	Time constant	s	0.1
$T6$	Time constant	s	0.01
TD	Combustion delay	s	0.043
R	Droop	p.u.	0.05
TE	Time constant power feedback	s	0.2
$T1$	Time constant	s	0.01
$T2$	Time constant	s	0
$T3$	Time constant	s	2
$Const\ Droop_Control$	= 0 → Throttle feedback, = 1 → Electric Power feedback	-	1
$TMIN$	Minimum throttle	p.u.	-0.08
$TMAX$	Maximum throttle	p.u.	1.14

2.3 Μοντέλο προσομοίωσης του ΥΗΣ του ΥΒΣ

Η μοντελοποίηση ενός ΥΗΣ, η σχηματική αναπαράσταση του οποίου δίνεται στο Σχήμα 2.3, συνίσταται στην ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων για το σύστημα αγωγών προσαγωγής-υδροστρόβιλων καθώς και για τους ρυθμιστές στροφών των υδροστρόβιλων. Τονίζεται ότι τα μοντέλα που παρουσιάζονται στη συνέχεια ισχύουν ανεξαρτήτως του τύπου των υδροστρόβιλων, αν είναι δηλ. δράσεως (τύπου Pelton) ή αντιδράσεως (τύπου Francis)². Κι αυτό γιατί η δυναμική απόκριση και των δύο τύπων είναι παρόμοια σε αυξήσεις φορτίου και άρα μείωσης της συχνότητας. Η

² Οι πιο διαδεδομένοι τύποι υδροστρόβιλων είναι οι Pelton (δράσεως) και Francis (αντιδράσεως). Οι τύπου Pelton είναι καταλληλότεροι σε ΥΗΣ με μεγάλες υψομετρικές διαφορές (άνω των 300 m) και μικρές σχετικά παροχές ενώ οι τύπου Francis χρησιμοποιούνται για ύψη μέχρι 360 m και μεγαλύτερες παροχές, [60, 62].

απόκρισή τους διαφοροποιείται μόνο στις έκτακτες περιπτώσεις των μεγάλων απορρίψεων φορτίου, όπου στους υδροστρόβιλους τύπου Pelton ενεργοποιείται η λειτουργία των ονύχων εκτροπής (deflectors), για την εκτροπή του νερού και τη γρήγορη αποφόρτιση των υδροστρόβιλων χωρίς προβλήματα αστάθειας. Ωστόσο, επειδή το ενδιαφέρον της μελέτης του παρόντος κεφαλαίου δεν εστιάζεται στην ανάλυση τέτοιων περιπτώσεων, το μοντέλο των ονύχων εκτροπής δεν ενσωματώθηκε στο συνολικό μοντέλο του ΥΗΣ, [61].



Σχήμα 2.3. Σχηματική αναπαράσταση ενός ΥΗΣ, [62]

2.3.1 Μοντέλο του συστήματος αγωγών προσαγωγής - υδροστρόβιλου

Για τη μοντελοποίηση του συστήματος αγωγών προσαγωγής-υδροστρόβιλου έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, τόσο γραμμικά όσο και μη γραμμικά, [40, 62], ανάλογα με το είδος και το σκοπό της μελέτης για την οποία προορίζονται. Συγκεκριμένα, τα γραμμικά μοντέλα είναι χρήσιμα σε μελέτες ρύθμισης των παραμέτρων των ρυθμιστών στροφών, χρησιμοποιώντας τα εργαλεία της γραμμικής ανάλυσης (συναρτήσεις μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας, ιδιοτιμές, γεωμετρικός τύπος ριζών, κλπ.). Δεν ενδείκνυται όμως η χρήση τους σε δυναμικές προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου καθώς επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια μόνο για μικρές διαταραχές, ενώ δεν προσφέρουν καμιά περαιτέρω απλούστευση στους υπολογισμούς συγκριτικά με τα μη γραμμικά μοντέλα. Όσον αφορά τα μη γραμμικά μοντέλα, συναντώνται δύο τύποι στη βιβλιογραφία, ανάλογα με τη θεώρηση που γίνεται για τη συμπεριφορά του νερού και την ελαστικότητα των αγωγών προσαγωγής. Έτσι υφίστανται το μη γραμμικό μοντέλο για ανελαστική στήλη ύδατος που θεωρεί ασυμπίεστο νερό και ανελαστικούς αγωγούς προσαγωγής και το κυματικό μοντέλο που θεωρεί ελαστική τη στήλη ύδατος και άρα λαμβάνει υπόψη την ανάπτυξη των κυμάτων πίεσης και παροχής (υδραυλικό πλήγμα) εντός αυτής (όπως ακριβώς συμβαίνει με τα κύματα τάσης και ρεύματος στις ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς) που προκαλούνται από την κίνηση των υδατοθυρίδων των υδροστρόβιλων. Η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι της τάξης των 1200m/s, οπότε σε ΥΗΣ με αγωγούς προσαγωγής μεγάλου μήκους, ο χρόνος μετάδοσής τους μπορεί να είναι σημαντικός. Για ΥΗΣ όμως με μικρούς ή μεσαίους μήκους αγωγούς όπου ο χρόνος μετάδοσης των κυμάτων είναι αμελητέος, η χρήση του μοντέλου της ανελαστικής στήλης για τη δυναμική προσομοίωσή τους παρουσιάζεται εξίσου ακριβής. Γενικότερα σε εφαρμογές όπου απαιτείται λεπτομερής ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς ΥΗΣ με αγωγούς προσαγωγής μεγάλου μήκους (όπως συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις ΥΒΣ που αναμένεται να ενταχθούν στα ΜΔΝ), καθώς και σε μελέτες της ευστάθειας μικρών αυτόνομων συστημάτων ισχύος με ΥΗΣ όπου προσομοιώνονται ισχυρές διαταραχές, τότε ενδείκνυται η χρήση του ακριβούς κυματικού μοντέλου.

Στις παραπάνω εφαρμογές εντάσσεται και η παρούσα ανάλυση, γι' αυτό και στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε το αναλυτικό κυματικό μοντέλο. Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε από την επιτροπή της IEEE, Power System Dynamic Performance Committee, δημοσιεύτηκε στο σχετικό IEEE Working Group Report, [40], και χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες παρόμοιες με-

λέτες της δυναμικής συμπεριφοράς συστημάτων ισχύος με ΥΗΣ, [45, 63]. Στη συνέχεια παρατίθενται οι εξισώσεις που υλοποιούνται στο συγκεκριμένο μοντέλο, αναλυτική επεξήγηση των οποίων μπορεί να βρεθεί και στην [62]. Σημειώνεται ότι όλα τα μεγέθη των παρακάτω εξισώσεων δίνονται σε α.μ. τιμές, κανονικοποιημένα ως προς τα ονομαστικά μεγέθη των υδροστρόβιλων. Συγκεκριμένα, η παροχή, q , κανονικοποιείται ως προς την ονομαστική παροχή του κάθε υδροστρόβιλου, η πίεση, h , ως προς το στατικό ύψος του ΥΗΣ, η ισχύς του στροβίλου, P_m , ως προς την ονομαστική του, η γωνιακή συχνότητά του, ω , ως προς την ονομαστική του δικτύου και το άνοιγμα, G , της βελόνης του ακροφυσίου του υδροστρόβιλου Pelton ή της υδατοθυρίδας του υδροστρόβιλου Francis ως προς το άνοιγμα που αντιστοιχεί σε ονομαστική ισχύ στροβίλου.

Για τη **μοντελοποίηση των στροβίλων** χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (2.1) και (2.2), οι οποίες είναι κοινές σε όλα τα μη γραμμικά μοντέλα. Συγκεκριμένα, η παροχή στον υδροστρόβιλο, q , είναι ανάλογη του ανοίγματος της βελόνης, G , και της τετραγωνικής ρίζας της πίεσης, h , στην είσοδο του στροβίλου και σε α.μ. τιμές είναι ίση με το γινόμενο τους. Από την άλλη, η μηχανική ισχύς, P_m , ενός στροβίλου χωρίς απώλειες είναι ίση με το γινόμενο της πίεσης επί την παροχή επί έναν κατάλληλο συντελεστή μετατροπής. Επειδή όμως ο στρόβιλος δεν είναι 100% αποδοτικός, αφαιρείται από την παροχή στο στρόβιλο, q , η παροχή χωρίς φορτίο, q_{nl} , (η οποία αντισταθμίζει τις απώλειες περιστροφής του στροβίλου) και η διάφορά τους είναι αυτή που πολλαπλασιάζεται με την πίεση h . Δηλαδή οι απώλειες των στροβίλων θεωρούνται προσεγγιστικά σταθερές για όλα τα φορτία. Επίσης, στην εξίσωση (2.2) έχει ληφθεί υπόψη και η επίδραση της απόκλισης της ταχύτητας των υδροστρόβιλων, $\Delta\omega$, στην απόδοση του υδροστρόβιλου, η οποία είναι συνάρτηση του ανοίγματος της βελόνης, G , [64].

$$\bar{q} = \bar{G} \sqrt{\bar{h}} \quad (2.1)$$

$$\bar{P}_m = A_t \cdot \bar{h} \cdot (\bar{q} - \bar{q}_{nl}) - D \cdot \bar{G} \cdot \Delta\bar{\omega} \quad (2.2)$$

όπου,

- \bar{q} : η παροχή στον υδροστρόβιλο
- \bar{G} : το άνοιγμα των βελόνων των ακροφυσίων του στροβίλου
- \bar{h} : η πίεση στην είσοδο του στροβίλου, ίση με $\bar{h} = \bar{h}_0 - \bar{h}_{loss} - \bar{h}_w$, όπου \bar{h}_0 είναι η στατική πίεση, $\bar{h}_{loss} = \bar{k} \cdot \bar{q}^2$ (\bar{k} ο κανονικοποιημένος συντελεστής γραμμικών απωλειών) είναι οι γραμμικές απώλειες στον αγωγό³ και \bar{h}_w είναι η μεταβολή της πίεσης του κύματος της εξίσωσης (2.4) που έχει προκληθεί από τη μετακίνηση της βελόνης
- \bar{P}_m : η μηχανική ισχύς του στροβίλου
- A_t : το κέρδος του υδροστρόβιλου έτσι ώστε για $G=1$ α.μ. να προκύπτει $\bar{P}_m=1$ α.μ. και δίνεται από τη σχέση $A_t = \frac{1}{\bar{h}_r \cdot (\bar{q}_r - \bar{q}_{nl})}$, με \bar{h}_r και \bar{q}_r να αποτελούν την πίεση και την παροχή στην είσοδο του υδροστρόβιλου υπό ονομαστικό φορτίο
- \bar{q}_{nl} : η παροχή χωρίς φορτίο, για τον υπολογισμό των σταθερών (προσεγγιστικά) απωλειών του στροβίλου
- D : ο συντελεστής απόσβεσης, ο οποίος εκφράζει την επίδραση της απόκλισης της ταχύτητας, $\Delta\omega$, στην απόδοση του υδροστρόβιλου - οι τιμές του D κυμαίνονται στο διάστημα $0.5 \leq D \leq 2$
- $\Delta\bar{\omega}$: η απόκλιση της ταχύτητας του υδροστρόβιλου από την ονομαστική

Όσον αφορά το συντελεστή γραμμικών απωλειών, k , αυτός δίνεται από τον τύπο των Darcy-Weisbach:

$$k = \frac{f \cdot L}{2 \cdot g \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot D^5} \quad (2.3)$$

όπου,

- f : ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών, ο οποίος εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds και από την σχετική τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα. Ο υπολογισμός του γίνεται γραφικά, όμως μία πιο απλή εκτίμησή του είναι: $f=0.02$
- L : το μήκος του αγωγού προσαγωγής
- D : η διάμετρος του αγωγού
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

Για την κανονικοποίηση του συντελεστή k , ως βάση θεωρείται η τιμή που υπολογίζεται από τη σχέση $k_b = \frac{H_0}{Q_0^2}$, όπου H_0 είναι το στατικό ύψος του ΥΗΣ και Q_0 η ονομαστική παροχή του υδροστρόβιλου.

Για τη **μοντελοποίηση των κυματικών φαινομένων εντός των αγωγών προσαγωγής**, που προκαλούνται από τη μετακίνηση της βελόνης ή των υδατοθυρίδων, χρησιμοποιείται η συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (2.4) που δίνει τις μεταβολές πίεσης, \bar{h}_w , συναρτήσει των μεταβολών παροχής, \bar{q}_w .

$$\frac{\bar{h}_w(s)}{\bar{q}_w(s)} = -z_0 \cdot \tanh(T_e \cdot s) = -z_0 \frac{1 - e^{-2T_e s}}{1 + e^{-2T_e s}} \quad (2.4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, z_0 είναι η κυματική αντίσταση του αγωγού και T_e η κυματική σταθερά χρόνου. Η κυματική αντίσταση του αγωγού δίνεται από την εξίσωση (2.5):

$$z_0 = \frac{T_w}{T_e} \quad (2.5)$$

όπου T_w είναι ο χρόνος εκκίνησης ύδατος και δίνεται από τη σχέση:

$$T_w = \frac{L \cdot Q_0}{g \cdot A \cdot H_0} \quad (2.6)$$

όπου,

- L : το μήκος του αγωγού προσαγωγής
- Q_0 : η ονομαστική παροχή του ενός υδροστρόβιλου
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
- A : η διατομή του αγωγού προσαγωγής
- H_0 : το στατικό ύψος

Η κυματική σταθερά χρόνου δίνεται από τη σχέση (2.7):

$$T_e = \frac{L}{a} \quad (2.7)$$

Το σύμβολο a της παραπάνω εξίσωσης αποτελεί την ταχύτητα του ήχου στο νερό και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

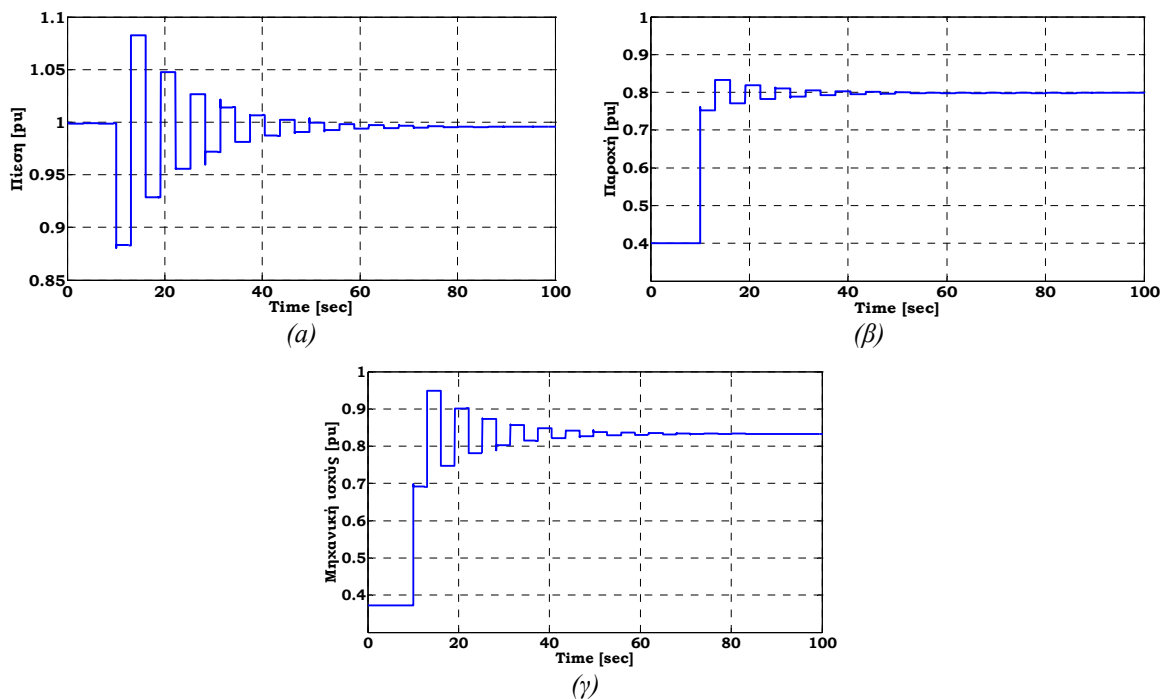
³ Οι απώλειες στις εντοπισμένες αντιστάσεις αμελούνται.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{k} + \frac{d}{eE} \right)}} \quad (2.8)$$

όπου,

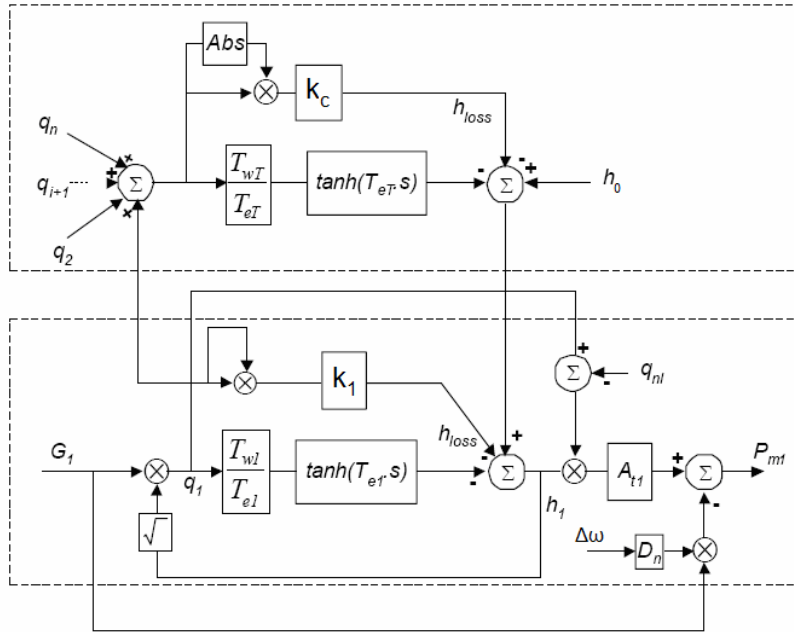
- ρ : η πυκνότητα του νερού
- k : η σταθερά του Bulk στο νερό
- d : η διάμετρος του αγωγού
- e : το πάχος του κελύφους του αγωγού
- E : η ελαστική σταθερά του υλικού του αγωγού

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ενδεικτικά η παροχή και η πίεση στην είσοδο του υδροστρόβιλου μετά από ακαριαία μεταβολή του ανοίγματος της βελόνης (από 0.4 α.μ. σε 0.8 α.μ.) του υδροστρόβιλου, όπου αναδεικνύεται το κυματικό φαινόμενο που περιγράφεται με την εξίσωση (2.4). Διαπιστώνεται ότι τα κύματα έχουν περίοδο $2T_e$, ενώ με την πάροδο του χρόνου αποσβένονται λόγω των γραμμικών απωλειών των αγωγών προσαγωγής. Βεβαίως ακαριαίες μεταβολές του ανοίγματος της βελόνης δεν είναι εφικτές στην πραγματικότητα, λόγω του περιοριστή ρυθμού του σερβομηχανισμού του ρυθμιστή στροφών, αλλά και του μεταβατικού στατισμού του PID ελεγκτή, όπως θα φανεί στα επόμενα.

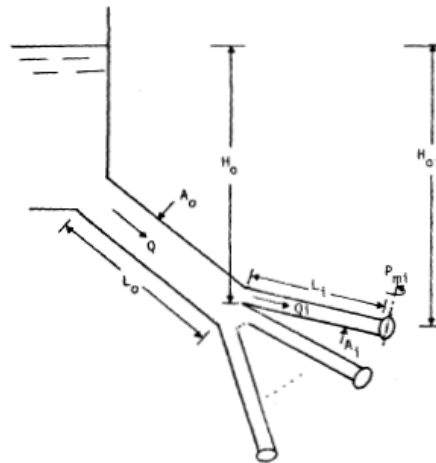


Σχήμα 2.4. Κυματικά φαινόμενα λόγω υποθετικού ακαριαίου ανοίγματος της βελόνης του υδροστρόβιλου. α) Πίεση στην είσοδο του υδροστρόβιλου, β) Παροχή στον υδροστρόβιλο, γ) Μηχανική ισχύς υδροστρόβιλου.

Από το συνδυασμό των εξισώσεων (2.1), (2.2) και (2.4) προκύπτει το block διάγραμμα του Σχήματος 2.5, το οποίο αναπαριστά το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο DigSilent/PowerFactory για την προσομοίωση του συστήματος αγωγών προσαγωγής-υδροστρόβιλου. Στο συγκεκριμένο σχήμα έχει μοντελοποιηθεί και η υδραυλική σύζευξη στον κοινό αγωγό. Συγκεκριμένα, από τη στιγμή που ο ΥΗΣ του ΥΒΣ αποτελείται από τρεις υδροστρόβιλους που τροφοδοτούνται από έναν κοινό αγωγό (Σχήμα 2.6), θα πρέπει κατά τη μοντελοποίηση να ληφθεί υπόψη η υδραυλική αλληλεπίδραση των μεμονωμένων αγωγών και των στρόβιλων τους με τον κοινό αγωγό αλλά και αναμεταξύ τους (coupling effect).



Σχήμα 2.5. Μοντέλο αγωγών προσαγωγής – υδροστρόβιλου με υδραυλική σύζευξη, [45]



Σχήμα 2.6. Ο κοινός αγωγός που διακλαδίζεται στους τρεις μεμονωμένους των υδροστρόβιλων, [44]

Για τη μοντελοποίηση του κοινού αγωγού χρησιμοποιείται η ίδια λογική με αυτή της μοντελοποίησης των μεμονωμένων αγωγών των υδροστρόβιλων. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ του υδραυλικού ύψους (ή πίεσης) και της παροχής για τον κοινό αγωγό θα είναι:

$$\frac{\bar{h}_{w,c}(s)}{\bar{q}_{w,c}(s)} = -z_{0,c} \cdot \tanh(T_e \cdot s) = -z_{0,c} \frac{1 - e^{-2T_e s}}{1 + e^{-2T_e s}} \quad (2.9)$$

όπου το ‘c’ αναφέρεται στον κοινό αγωγό. Η κυματική αντίσταση $z_{0,c}$ δίνεται και πάλι από την εξίσωση (2.5), όπου όμως για τον υπολογισμό του χρόνου εκκίνησης ύδατος, $T_{w,c}$ μέσω της εξίσωσης (2.6) θα χρησιμοποιηθεί η ονομαστική παροχή του ενός υδροστρόβιλου και όχι η συνολική παροχή όλων μαζί, καθώς οι α.μ. τιμές των παροχών έχουν υπολογιστεί με βάση την παροχή του ενός.

Επίσης έχει θεωρηθεί ότι η παροχή του κοινού αγωγού είναι ίση με το άθροισμα των παροχών στους μεμονωμένους αγωγούς, κάτι που είναι ακριβές για μεμονωμένους αγωγούς πολύ μικρού μήκους (όποτε ο χρόνος μετάδοσης του κύματος είναι αμελητέος) όπως στην παρούσα εφαρμογή. Αν οι μεμονωμένοι αγωγοί ήταν μεγαλύτερου μήκους οπότε ο χρόνος μετάδοσης του

κύματος αρχίζει να γίνεται σημαντικός, τότε θα απαιτούνταν η ακριβέστερη μοντελοποίηση που προτείνεται στο [65].

$$\bar{q}_c = \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \quad (2.10)$$

Οι απώλειες πίεσης στον κοινό αγωγό, $\bar{h}_{loss,c}$, είναι ανάλογες του συντελεστή k_c επί την παροχή επί την απόλυτη τιμή της παροχής, έτσι ώστε να διατηρείται το πρόσημο των απωλειών της πίεσης στην περίπτωση που η παροχή αντιστραφεί.

Τέλος, η στατική πίεση H_0 (ή σε κανονικοποιημένο μέγεθος $\bar{h}_0 = 1 \text{ a.μ.}$) τροφοδοτεί το σύστημα κοινού-μεμονωμένων αγωγών και το ρόλο της στατικής πίεσης για τους μεμονωμένους αγωγούς επιτελεί η πίεση στην έξοδο του κοινού αγωγού.

Για τον υπολογισμό τώρα των παραμέτρων του συνολικού μοντέλου, θεωρήθηκε μια τυπική διαμόρφωση ΥΗΣ (βλ. επόμενο κεφάλαιο), βασιζόμενη σε διαθέσιμα κατασκευαστικά στοιχεία ΥΒΣ υπό σχεδίαση.

Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ΥΗΣ αποτελούμενος από τρεις υδροστρόβιλους των 5 MW, με στατικό ύψος της τάξης των 400 m. Συνεπώς η ονομαστική παροχή κάθε υδροστρόβιλου λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές απώλειες, υπολογίζεται γύρω στο $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, και άρα η συνολική παροχή στον κοινό αγωγό όταν θα λειτουργούν και οι τρεις υδροστρόβιλοι, θα είναι ίση με $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Για αυτές τις παροχές και προκειμένου να προκύπτουν αποδεκτές ταχύτητες του ρευστού, προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες διαμέτρους για τους αγωγούς προσαγωγής. Αναλυτικά, το σύστημα αγωγών προσαγωγής συνίσταται από έναν κοινό αγωγό $\Phi 1300$ από χάλυβα, μήκους $L_c=1700\text{m}$ και πάχους $e_c=19\text{mm}$, ο οποίος λίγο πριν την είσοδο των υδροστρόβιλων διακλαδίζεται σε τρεις ξεχωριστούς αγωγούς $\Phi 800$ από χάλυβα, μήκους $L_i=10\text{m}$ και πάχους $e_i=15\text{mm}$ ο καθένας.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και από τις εξισώσεις που παρατέθηκαν προηγουμένως στην παρούσα παράγραφο, υπολογίστηκαν τα εξής: Ο χρόνος εκκίνησης ύδατος του κοινού αγωγού είναι $T_{w,c}=1.447\text{s}$ (για παροχή $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$)⁴, ενώ των ξεχωριστών αγωγών είναι $T_{w,i}=0.0075\text{s}$ (για παροχή $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Ομοίως, ο κυματικός χρόνος του κοινού αγωγού είναι $T_{e,c}=1.517\text{s}$ και των ξεχωριστών αγωγών $T_{e,i}=0.0085\text{s}$. Συγκεντρωτικά όλες οι παράμετροι του μοντέλου των υδροστρόβιλων δίνονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3. Τιμές παραμέτρων του μοντέλου αγωγών προσαγωγής-υδροστρόβιλου

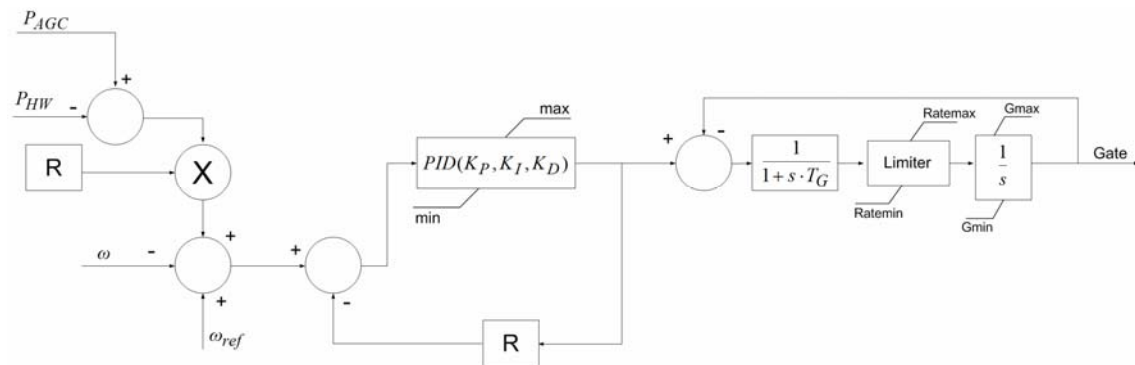
Σύμβολο	Παράμετροι Επεξήγηση	Μονάδα	Τιμές
$T_{e,c}$	Wave time constant of common tunnel	s	1.5173
$T_{e,i}$	Wave time constant of individual penstock	s	0.0085
$T_{w,c}$	Water starting time of common tunnel	s	0.4824
$T_{w,i}$	Water starting time of individual penstock	s	0.0075
$Z_{o,c}$	Traveling impedance of common tunnel	p.u.	0.3179
$Z_{o,i}$	Traveling impedance of individual penstock	p.u.	0.8824
k_c	Friction losses factor of common tunnel	p.u.	0.0068
k_i	Friction losses factor of individual penstock	p.u.	0.00045
q_{nl}	No load flow	p.u.	0.08
D	Damping coefficient	p.u.	0.5
A_t	Turbine gain	-	1.165

⁴ Σημειώνεται ότι στο μοντέλο προσομοίωσης της υδραυλικής σύζευξης χρησιμοποιήθηκε ως χρόνος εκκίνησης ύδατος ο $T_{w,c}=0.4824\text{s}$, που αντιστοιχεί στην ονομαστική παροχή $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ του ενός υδροστρόβιλου, καθώς οι α.μ. τιμές των παροχών έχουν υπολογιστεί με βάση αυτήν την παροχή και βάσει αυτής της τιμής υπολογίστηκε η τιμή της κυματικής αντίστασης $Z_{o,c}$ του κοινού αγωγού.

Όσον αφορά την αδράνεια των στρεφόμενων μαζών του συστήματος υδροστρόβιλου-γεννήτριας, θεωρήθηκε ότι η χρονική σταθερά αδράνειας ισούται με $H_H=4$ s, η οποία αποτελεί υψηλή σχετικά τιμή, που είναι όμως τεχνικά εφικτή, ώστε να βελτιωθεί κατά το δυνατόν η παρεχόμενη ρύθμιση συχνότητας από τον ΥΗΣ (βλ. επόμενο κεφάλαιο).

2.3.2 Μοντέλο ρυθμιστή στροφών

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για το ρυθμιστή στροφών του υδροστρόβιλου βασίστηκε σε στοιχεία υφιστάμενων ρυθμιστών σε ανάλογες εφαρμογές και σε σχετικό οδηγό της IEEE, [61]. Το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών του υδροστρόβιλου

Αποτελείται από έναν κλασικό PID ελεγκτή με μόνιμο στατισμό, που οδηγεί το σερβομηχανισμό μετακίνησης της βελόνης στο ακροφύσιο νερού του υδροστρόβιλου. Ο μόνιμος στατισμός ($R=5\%$) του ρυθμιστή υλοποιείται με ανάδραση από την έξοδο του ελεγκτή PID. Είσοδος του ρυθμιστή αποτελεί το σφάλμα στροφών του υδροστρόβιλου ($\Delta\omega$). Όπως και στην περίπτωση των μονάδων diesel, ο ρυθμιστής προβλέπεται να δέχεται set-point φόρτισης (P_{AGC}) από το σύστημα AGC του νησιού για τις ανάγκες της δευτερεύουσας ρύθμισης. Επίσης υπάρχει η πρόβλεψη από το σήμα αυτό να αφαιρείται η ισχύς του Α/Π του ΥΒΣ ώστε οι υδροστρόβιλοι να παρακολουθούν την αιολική ισχύ του ΥΒΣ στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στα επόμενα. Η διαφορά των δύο αυτών σημάτων (συνολικό set-point φόρτισης), αφού πολλαπλασιαστεί με το μόνιμο στατισμό (R) του ρυθμιστή, προστίθεται στο σφάλμα $\Delta\omega$. Δεδομένου ότι ο στατισμός του ρυθμιστή υλοποιείται με ανάδραση από την έξοδο του PID και όχι από την ισχύ εξόδου (για την επίτευξη ταχύτερης απόκρισης του ρυθμιστή, [61]), το set-point φόρτισης που λαμβάνει ο ρυθμιστής αντιστοιχεί στην α.μ. τιμή του ανοίγματος της βελόνης και όχι της ισχύος. Επειδή όμως το συνολικό set-point φόρτισης αφορά την επιθυμητή ισχύ, παρεμβάλλεται μετασχηματισμός της επιθυμητής ισχύος σε ισοδύναμο άνοιγμα βελόνης, λαμβάνοντας υπόψη προκαθορισμένες καμπύλες που συσχετίζουν την ισχύ με το άνοιγμα βελόνης για διάφορες υψομετρικές διαφορές, φορτίσεις των υδροστρόβιλων κλπ.. Στην παρούσα ανάλυση έχει γίνει η προσεγγιστική θεώρηση ότι οι α.μ. τιμές ισχύος και ανοίγματος βελόνης συμπίπτουν, καθώς ο μετασχηματισμός αυτός επηρεάζει αμελητέα τη μεταβατική απόκριση.

Ο σερβομηχανισμός προσομοιώνεται με χρονική καθυστέρηση (βαθμίδα $1^{η}$ ς τάξης με χρονική σταθερά 0.2 s, [62]) και περιοριστή ρυθμού. Ο μέγιστος ρυθμός μετακίνησης της βελόνης του υδροστρόβιλου που επιτρέπει ο περιοριστής ρυθμού σχετίζεται με τις μέγιστες προκαλούμενες υπερπίεσεις ή υποπίεσεις που μπορεί να αντέξει ο εξοπλισμός του ΥΗΣ του ΥΒΣ. Στη συνέχεια εξετάζεται ενδεικτικά η επίδραση του περιοριστή ρυθμού στην απόκριση των υδροστρόβιλων σε διάφορες διαταραχές, θεωρώντας εναλλακτικές τιμές περιορισμού ρυθμού: α) Χωρίς περιοριστή ρυθμού, β) Με περιοριστή ρυθμού 0.15 pu/s, γ) Με περιοριστή ρυθμού 0.25 pu/s.

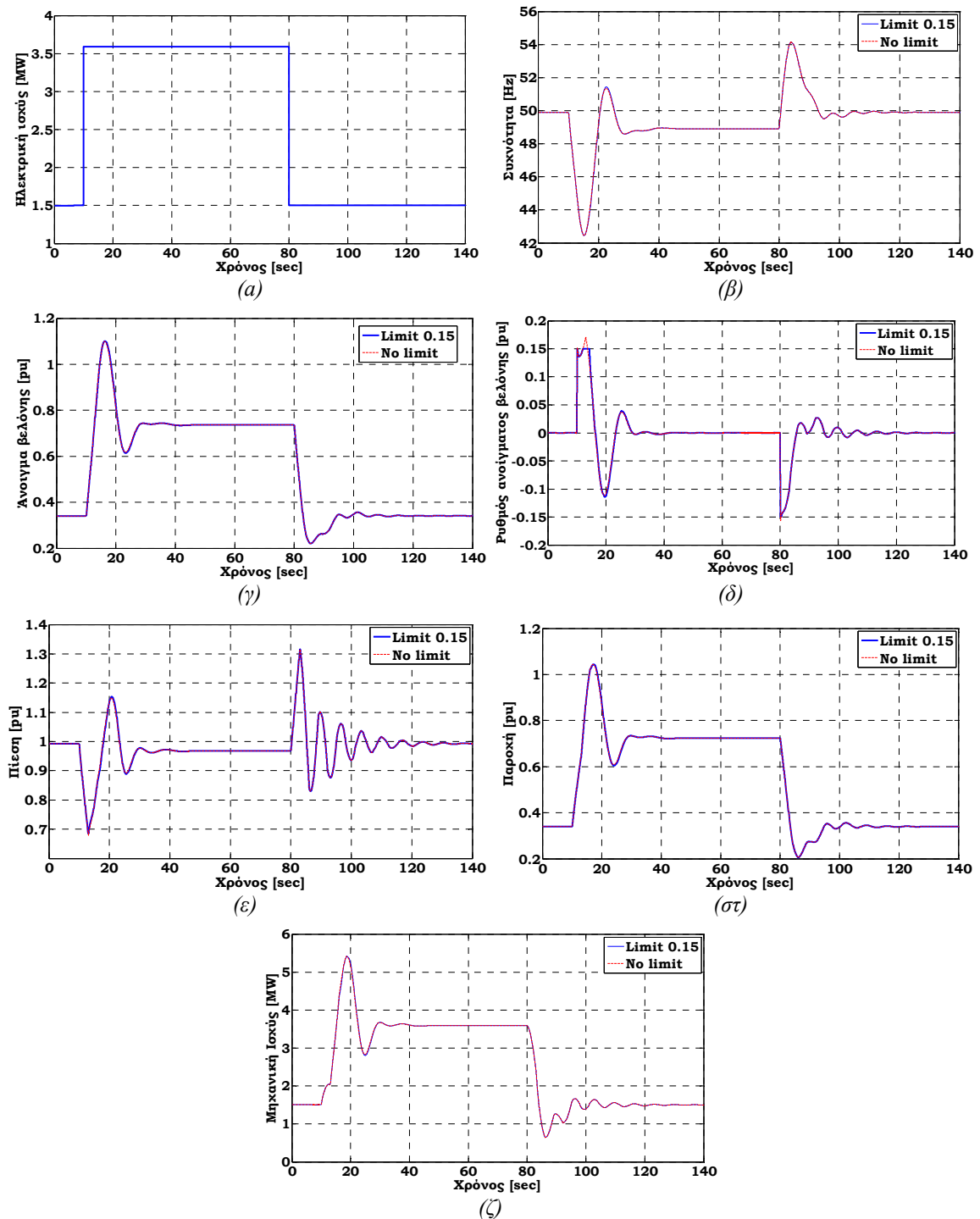
Η πρώτη διαταραχή που εξετάστηκε είναι η βηματική αύξηση και μείωση του φορτίου των υδροστρόβιλων (της τάξης του 40% της ονομαστικής τους ισχύος ώστε να προκληθούν σημαντικοί ρυθμοί μεταβολής) σε αυτόνομη λειτουργία, που αποτέλεσε και τη βασική δοκιμή για τη ρύθμιση του ελεγκτή PID. Συγκεκριμένα, για τη ρύθμιση του ελεγκτή επιβλήθηκαν βηματικές μεταβολές φορτίου στους υδροστρόβιλους χωρίς περιοριστή ρυθμού στο ρυθμιστή τους και επιλέχθηκαν εκείνες οι ρυθμίσεις που οδηγούν στην ταχύτερη και πιο ευσταθή ρύθμιση συχνότητας. Με βάση αυτό το κριτήριο, επιλέχθηκαν τελικά οι ρυθμίσεις $K_P=4$, $K_I=0.8$, $K_D=1$. Το φορτίο θεωρήθηκε σταθερής ισχύος, ανεξάρτητο της τάσης και της συχνότητας, που αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση καθώς οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό μεταβολής των στροφών των υδροστρόβιλων⁵. Στη συνέχεια, επαναλήφθηκε η ίδια δοκιμή για τις ίδιες ρυθμίσεις του ελεγκτή PID, θεωρώντας περιοριστή ρυθμού 0.15 pu/s στο σερβομηχανισμό ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση του περιοριστή ρυθμού στη δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων και στην ευστάθειά του και να προκύψει αν απαιτείται, εκ νέου ρύθμιση του PID για πιο αργή απόκριση. Δεν είχε νόημα να πραγματοποιηθεί δοκιμή για περιοριστή ρυθμού 0.25 pu/s, καθώς ο ρυθμός μετακίνησης της βελόνης στην περίπτωση χωρίς περιοριστή προέκυψε μικρότερος από 0.25. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 2.8. Διαπιστώνεται ότι περιορισμός στο ρυθμό μετακίνησης της βελόνης προκύπτει μόνο κατά τις πρώτες χρονικές στιγμές μετά την επιβολή της διαταραχής, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός είναι αρκετά μικρότερος από τα όρια του σερβομηχανισμού λόγω του μεταβατικού στατισμού που επιδεικνύει ο PID ελεγκτής και ο οποίος είναι απαραίτητος για την ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Παρατηρώντας την έξοδο του ρυθμιστή στροφών (άνοιγμα βελόνης) καθώς και τις προκαλούμενες μεταβολές στα μεγέθη της πίεσης, της παροχής και της μηχανικής ισχύος των υδροστρόβιλων, διαπιστώνεται ότι η επίδραση του περιοριστή είναι ουσιαστικά αμελητέα για τη συγκεκριμένη διαταραχή. Όσον αφορά τη συχνότητα, αυτή δεν ισορροπεί στα 50 Hz μετά τη βηματική αύξηση φορτίου αλλά σε μικρότερη τιμή, λόγω του μόνιμου στατισμού του ρυθμιστή. Η νέα συχνότητα διαφέρει από τα 50 Hz κατά το γινόμενο του μόνιμου στατισμού (R) επί τη μεταβολή φορτίου. Μετά όμως τη βηματική μείωση φορτίου κατά ίσο ακριβώς ποσό με την αύξηση, η συχνότητα ισορροπεί εκ νέου στα 50 Hz. Η διαφορά των αρχικών συνθηκών κατά την επιβολή των δύο βηματικών μεταβολών, καθώς και ο όρος απόσβεσης $D \cdot G \cdot \Delta\omega$ που διαφοροποιείται λόγω του διαφορετικού ανοίγματος βελόνης (G) στις δύο περιπτώσεις, εξηγούν γιατί οι μεταβολές στα μεγέθη πίεσης, παροχής και ισχύος δεν είναι αντισυμμετρικές. Τέλος, σημειώνεται ότι στις έκτακτες περιπτώσεις μεγάλων μειώσεων φορτίου των υδροστρόβιλων που προκαλούν μεγάλη αύξηση των στροφών τους και σημαντικές υπερπίεσεις, κανονικά θα προκαλούνταν λειτουργία των όνυχων εκτροπής (deflectors) στην περίπτωση υδροστρόβιλων Pelton, που θα περιόριζε σημαντικά την αύξηση των στροφών καθώς και τις υπερπίεσεις.

Παρόμοιες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και για βηματική μεταβολή στο set-point της συχνότητας του ρυθμιστή (π.χ. μεταβολή του P_{AGC}) για σταθερό φορτίο, σε αυτόνομη λειτουργία (Σχήμα 2.9). Η μεταβολή αυτή επιβαρύνει αρχικά το ρυθμιστή περισσότερο από τη βηματική μεταβολή φορτίου, καθώς επιβάλλεται κατ' ευθείαν στην είσοδο του PID. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο ρυθμό μετακίνησης της βελόνης κατά τις πρώτες χρονικές στιγμές, προκαλώντας τη λειτουργία του περιοριστή ρυθμού. Στη συνέχεια όμως ο ρυθμός επανέρχεται σε χαμηλές τιμές λόγω του μεταβατικού στατισμού του ρυθμιστή. Πάντως σε όλες τις περιπτώσεις, με και χωρίς περιοριστή, η απόκριση του ρυθμιστή είναι ευσταθής και η δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων δε φαίνεται να διαφοροποιείται ιδιαίτερα.

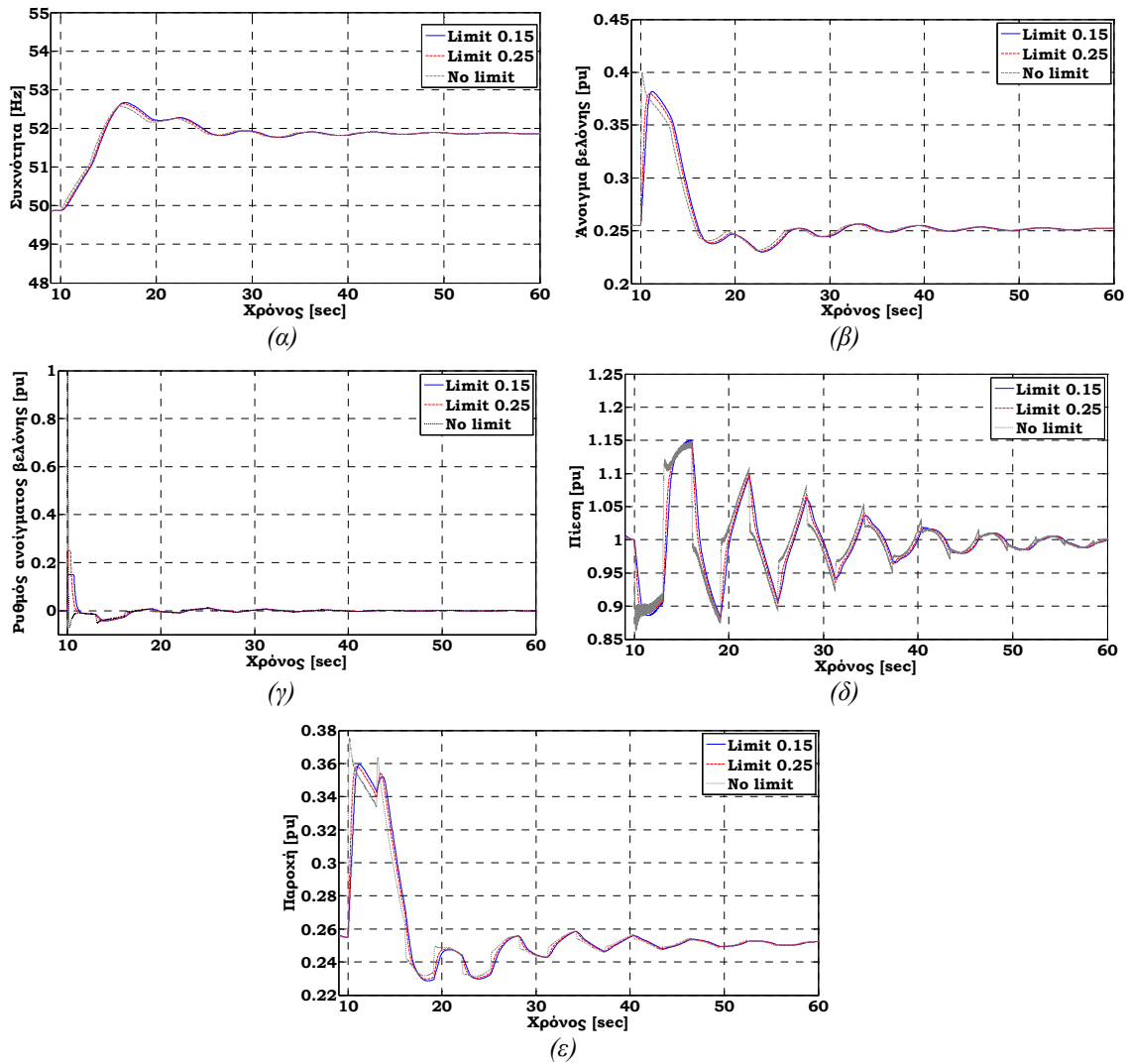
Τα αποτελέσματα των Σχημάτων 2.8 και 2.9 δείχνουν ότι οι αναμενόμενοι ρυθμοί μετακίνησης της βελόνης δεν είναι ιδιαίτερα υψηλοί (λόγω του μεταβατικού στατισμού του ρυθμιστή) για να προκαλέσουν τη λειτουργία του περιοριστή ρυθμού, εκτός ίσως κατά τις πρώτες χρονικές στιγμές επιβολής ισχυρών διαταραχών, όπου και πάλι όμως η απόκριση του ρυθμιστή παρουσιάζεται ευσταθής. Επομένως η ύπαρξη ή μη του περιοριστή δεν αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας για την

⁵ Σε τέτοιες διαταραχές, όπου το φορτίο είναι σταθερής ισχύος, δεν έχει καμία επίδραση η λειτουργία του AVR ή του πιθανώς υφιστάμενου PSS (Power System Stabilizer).

παρούσα ανάλυση. Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα παρουσιαστούν στα επόμενα υιοθετείται περιοριστής ρυθμού 0.15 pu/s, που προσεγγίζει τις τιμές που δίνονται στη βιβλιογραφία, [61, 62]. Οι τιμές των παραμέτρων του ρυθμιστή στροφών δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.4.



Σχήμα 2.8. Απόκριση των υδροστροφίλων σε βηματικές μεταβολές φορτίου $\pm 40\%$ της ονομαστικής ισχύος τους, υπό συνθήκες αυτόνομης λειτουργίας. α) Ηλεκτρική ισχύς υδροστροφίλων, β) Συχνότητα, γ) Άνοιγμα βελόνης, δ) Ρυθμός μετακίνησης βελόνης, ε) Πίεση, στ) Παροχή, ζ) Μηχανική ισχύς.



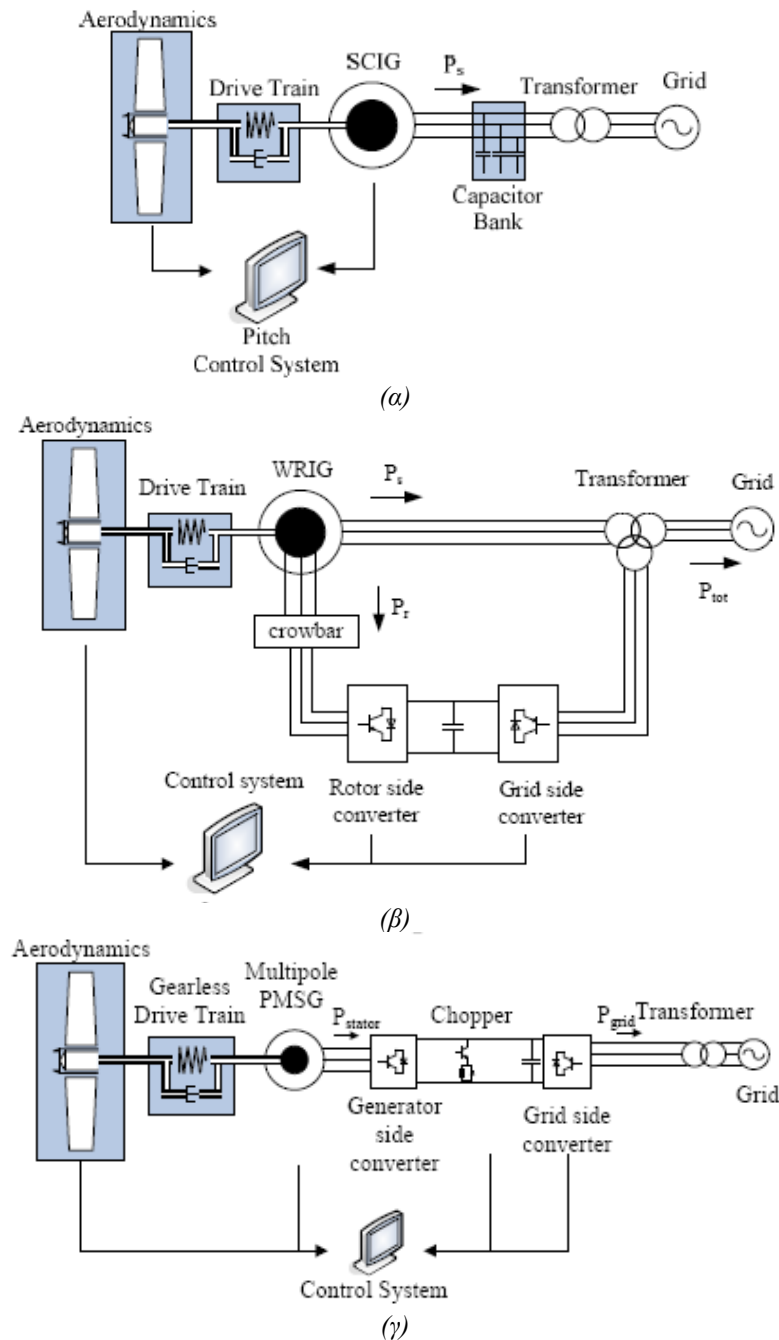
Σχήμα 2.9. Απόκριση των υδροστρόβιλων σε βηματική μεταβολή στο set-point της συχνότητας κατά 2Hz, υπό συνθήκες αυτόνομης λειτουργίας. α) Συχνότητα, β) Άνοιγμα βελόνης, γ) Ρυθμός μετακίνησης βελόνης, δ) Πίεση, ε) Παροχή.

Πίνακας 2.4. Τιμές παραμέτρων του ρυθμιστή στροφών των υδροστρόβιλων

Σύμβολο	Παράμετροι Επεξήγηση	Μονάδα	Τιμές
K_P	Proportional gain of PID	p.u.	4
K_I	Integral gain of PID	p.u.	0.8
K_D	Derivative gain of PID	p.u.	1
R	Permanent droop	p.u.	0.05
T_G	Main servo time constant	s	0.2
$Ratemax$	Maximum gate opening rate	p.u./s	0.15
$Ratemin$	Maximum gate closing rate	p.u./s	-0.15
G_{max}	Upper limit of governor output	p.u.	1.1
G_{min}	Minimum limit of governor output	p.u.	0

2.4 Μοντέλα προσομοίωσης Α/Γ

Τα θεωρούμενα εγκατεστημένα Α/Π του υπό εξέταση συστήματος διαθέτουν Α/Γ σταθερών στροφών, μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια, οι τοπολογίες των οποίων δίνονται στο Σχήμα 2.10. Αναλυτική περιγραφή των μοντέλων που υλοποιήθηκαν για την προσομοίωση αυτών των Α/Γ, έχει πραγματοποιηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία [46-48, 66-72]. Για λόγους πληρότητας, παρατίθεται στη συνέχεια μια σύντομη περιγραφή αυτών των μοντέλων. Σημειωτέον ότι για την προσομοίωση των Α/Π εφαρμόστηκε η μέθοδος της ομαδοποίησης (aggregation method) που περιγράφεται στις [73, 74].



Σχήμα 2.10. Τοπολογίες εγκατεστημένων Α/Γ. α) Α/Γ σταθερών στροφών, β) Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, γ) Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια, [66].

2.4.1 Μοντέλο A/G σταθερών στροφών

Το μοντέλο της A/G σταθερών στροφών αποτελείται από τα υπομοντέλα του αεροδυναμικού μέρους, του συστήματος μετάδοσης της κίνησης και του ηλεκτρικού μέρους, [46]. Μοναδικός ελεγκτής της συγκεκριμένης A/G αποτελεί ο ελεγκτής του βήματος της έλικας (active stall controller) για τον περιορισμό της εισερχόμενης ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου (άνω της ονομαστικής) με σκοπό την αποφυγή της υπερφόρτισης και άρα καταπόνησης της A/G.

Για το αεροδυναμικό μέρος της A/G που είναι κοινό σε όλους τους τύπους των A/G, χρησιμοποιήθηκε ένα απλουστευμένο μοντέλο που βασίζεται στο συντελεστή αεροδυναμικής ροπής $c_q(\lambda, \theta)$, [67, 68] και υλοποιεί τη γνωστή στατική σχέση που συνδέει την αεροδυναμική ροπή με την ταχύτητα ανέμου.

Για τη μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης, που επίσης συμπίπτει για όλους τους τύπους των A/G, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο δύο μαζών, όπου η μία μάζα αντιστοιχεί στο δρομέα της A/G και η άλλη στη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων, συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω ενός ελαστικού άξονα χαμηλής ταχύτητας.

Όσον αφορά το ηλεκτρικό μέρος, το οποίο συνίσταται από την ασύγχρονη γεννήτρια, το φίλτρο και το Μ/Σ ανύψωσης για τη σύνδεση στο δίκτυο, χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα μοντέλα από τη βιβλιοθήκη του DigSilent/PowerFactory. Ιδιαίτερα για την ασύγχρονη γεννήτρια, χρησιμοποιήθηκε το γνωστό μοντέλο ασύγχρονης μηχανής 4^{ης} τάξης που περιγράφεται στην [53].

Το μοντέλο του active stall controller είναι ουσιαστικά αυτό του Σχήματος 2.11, όπου παρουσιάζεται ο ελεγκτής βήματος της έλικας (pitch controller) των A/G μεταβλητών στροφών, όπου όμως είσοδοί του δεν είναι οι ταχύτητες περιστροφής του δρομέα αλλά οι ηλεκτρικές ισχύεις εξόδου (ονομαστική και μετρούμενη). Ο συγκεκριμένος ελεγκτής κρατάει σταθερή την ισχύ εξόδου της A/G στην ονομαστική της τιμή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής μέσω ενός PI-ελεγκτή με χαρακτηριστικά anti-windup. Ο σερβομηχανισμός αλλαγής του βήματος της έλικας μοντελοποιείται με μια βαθμίδα χρονικής καθυστέρησης πρώτης τάξης και έναν περιοριστή ρυθμού.

2.4.2 Μοντέλο A/G μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

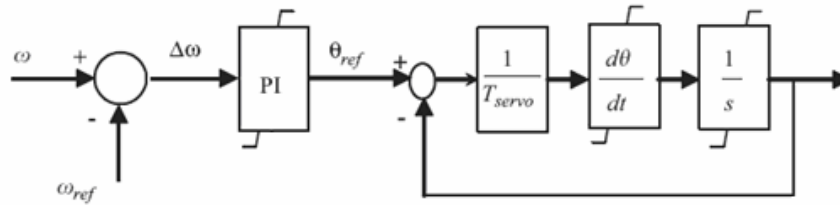
Το μοντέλο της A/G μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στις [47, 48, 68, 69], αποτελείται από τα αεροδυναμικά και μηχανικά υπομοντέλα που είναι όμοια με της A/G σταθερών στροφών, καθώς και τα υπομοντέλα του ηλεκτρικού μέρους και των ελεγκτών.

Το ηλεκτρικό τμήμα περιλαμβάνει την ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας και τους μετατροπείς. Για την ασύγχρονη γεννήτρια της οποίας ο στάτης είναι άμεσα συνδεδεμένος στο δίκτυο ενώ ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω του συστήματος των μετατροπέων, διατίθεται έτοιμο ένα 4^{ης} τάξης dq μοντέλο ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης στη βιβλιοθήκη του DigSilent/PowerFactory. Το σύστημα των μετατροπέων αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς πηγής τάσης που συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή ως back-to-back. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται ένας πυκνωτής σαν αποθήκη ενέργειας, με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στη dc-τάση.

Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας (Rotor Side Converter) πραγματοποιεί έλεγχο της παραγόμενης ενεργού και άεργου ισχύος του δικτύου ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (Grid Side Converter) διατηρεί τη dc-τάση σταθερή και ελέγχει την άεργο ισχύ του μετατροπέα. Οι μετατροπείς υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας έτοιμα μοντέλα από τη βιβλιοθήκη του DigSilent/PowerFactory. Τα μοντέλα αυτά, [67], είναι θεμελιώδους συχνότητας (fundamental frequency model), κατάλληλα για μελέτη ηλεκτρομηχανικών φαινομένων, που επιτρέπουν τη δυναμι-

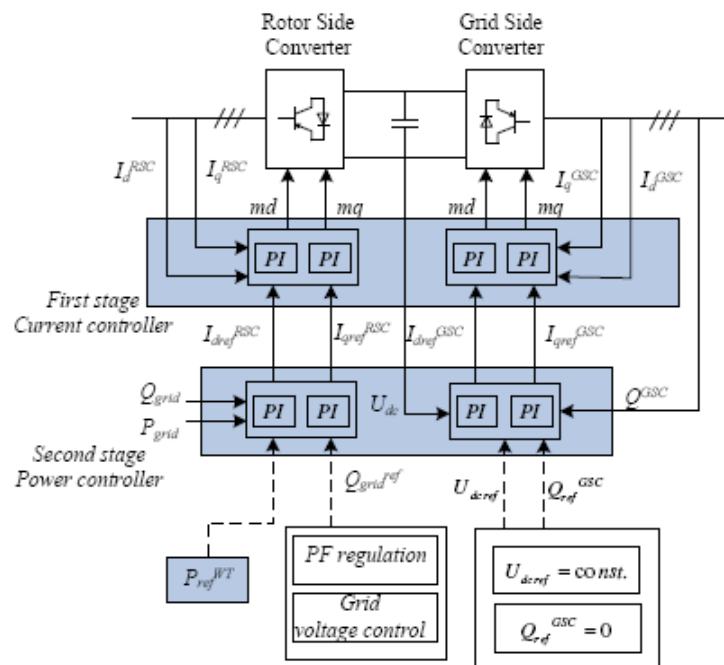
κή προσομοίωση συστημάτων ισχύος για μεγάλες χρονικές περιόδους (από δεκάδες δευτερόλεπτα μέχρι αρκετά λεπτά).

Όσον αφορά τους ελεγκτές της Α/Γ, διακρίνουμε τον ελεγκτή του βήματος της έλικας (pitch controller) και τους ελεγκτές των μετατροπέων. Το μοντέλο του pitch controller παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11. Ενεργοποιείται μόλις η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ξεπεράσει την ονομαστική τιμή και μέσω ενός PI-ελεγκτή προσπαθεί να διατηρήσει αυτή την ταχύτητα στην ονομαστική της τιμή, [48, 68, 71].



Σχήμα 2.11. Το μοντέλο του pitch controller των Α/Γ μεταβλητών στροφών

Το σχήμα ελέγχου των μετατροπέων της Α/Γ διπλής τροφοδότησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12. Τα ηλεκτρονικά ισχύος ελέγχονται με τεχνικές διανυσματικού ελέγχου, που επιτρέπουν την απόζευξη ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι να ρυθμίζει ανεξάρτητα την παραγόμενη ενεργό και άεργο ισχύ ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου πρέπει να διατηρεί τη dc-τάση σταθερή και να εξασφαλίζει λειτουργία μετατροπέα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12, οι δυο μετατροπείς ελέγχονται σε 2 στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από τους γρήγορους ελεγκτές ρεύματος που ρυθμίζουν τα ρεύματα του δρομέα στις τιμές αναφοράς, οι οποίες προσδιορίζονται από τους ελεγκτές ισχύος (δεύτερο στάδιο).



Σχήμα 2.12. Το σχήμα ελέγχου των μετατροπέων της Α/Γ διπλής τροφοδότησης, [66, 68]

Για την υλοποίηση της ικανότητας fault-ride-through (FRT) της Α/Γ, υφίσταται στην έξοδο των κυκλωμάτων του δρομέα μια διάταξη προστασίας των μετατροπέων από υπερτάσεις και υπερρεντάσεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, η οποία είναι γνωστή ως “crowbar”. Η διάταξη παρακολουθεί το ρεύμα του δρομέα και τη dc-τάση και όταν έστω και ένα

από αυτά ξεπεράσει την αποδεκτή τιμή του, βραχυκυκλώνει τους ακροδέκτες του δρομέα προστατεύοντας έτσι τους μετατροπείς από τις αυξημένες τιμές μεταβατικών εντάσεων και τάσεων που εμφανίζονται σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο δρομέας βραχυκυκλώνεται πάνω στη σύνθετη αυτή αντίσταση, ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα καθίσταται ανενεργός και έτσι η Α/Γ συμπεριφέρεται σαν συμβατική ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα με αυξημένη αντίσταση δρομέα, χωρίς δυνατότητα ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος της. Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται σαν STATCOM για την παραγωγή άεργου ισχύος (περιορισμένη εντούτοις από την βαθμονόμησή του).

2.4.3 Μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια

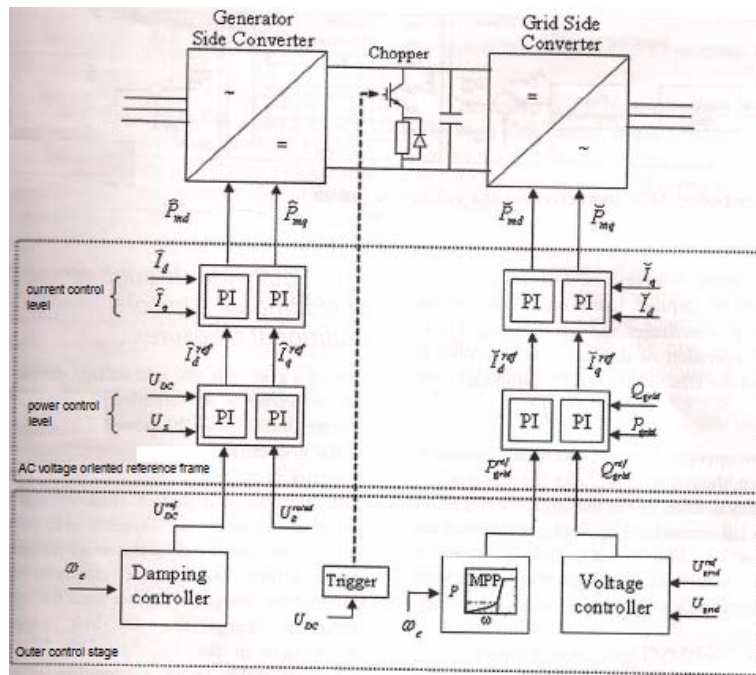
Το μοντέλο της Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση, περιγράφεται αναλυτικά στις [71, 72] και αποτελείται ομοίως από τα αεροδυναμικά και μηχανικά υπομοντέλα, καθώς και τα υπομοντέλα του ηλεκτρικού μέρους και των ελεγκτών.

Τα μοντέλα για το αεροδυναμικό μέρος, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και τον pitch controller είναι όμοια με αυτά που περιγράφηκαν προηγουμένως για την περίπτωση της Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Το ηλεκτρικό τμήμα περιλαμβάνει τη σύγχρονη γεννήτρια και τους μετατροπείς. Για τη σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιήθηκε το 6^{ης} τάξης dq μοντέλο που διατίθεται στη βιβλιοθήκη του DigSilent/PowerFactory. Το σύστημα των μετατροπέων αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς πηγής τάσης που συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Μεταξύ των δύο μετατροπέων υφίσταται ένας DC chopper ο οποίος ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και συμβάλλει στην επίτευξη της FRT ικανότητας της Α/Γ. Οι μετατροπείς υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας επίσης τα έτοιμα μοντέλα θεμελιώδους συχνότητας από τη βιβλιοθήκη του DigSilent/PowerFactory.

Η λογική ελέγχου των μετατροπέων της Α/Γ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13. Οι μετατροπείς ελέγχονται με τεχνικές διανυσματικού ελέγχου που επιτρέπουν την απόζευξη ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος. Σκοπός του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας (Generator Side Converter) είναι να διατηρεί την dc-link τάση (U_{dc}) σταθερή και να επιβάλλει ονομαστική τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας (U_s). Από την άλλη ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (Grid Side Converter) ελέγχει ανεξάρτητα την ενεργό και άεργο ισχύ που εγχύεται στο δίκτυο. Επίσης υφίσταται και ένας ελεγκτής απόσβεσης (damping controller) με σκοπό την εξασθένηση των ταλαντώσεων ροπής που διεγείρονται στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης και αντανακλώνονται στην ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (ω_{gen}).

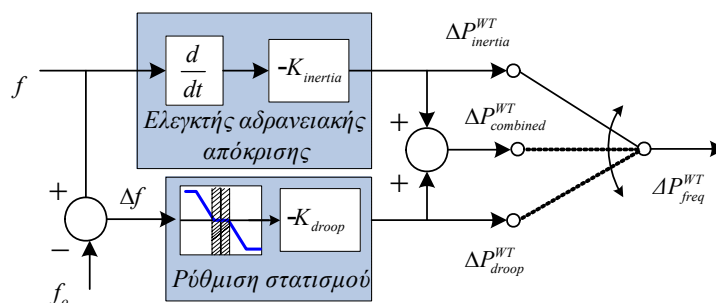
Για την υλοποίηση της FRT ικανότητας της Α/Γ δε χρειάζονται περαιτέρω μέτρα, καθώς είναι ήδη ενσωματωμένη στο σχήμα ελέγχου της. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και συνεπώς βυθίσεων τάσης, ο μετατροπέας από τη πλευρά του δικτύου παρέχει λιγότερη ισχύ στο δίκτυο απ' ό,τι σε κανονικές συνθήκες. Για τον περιορισμό της αύξησης της dc-τάσης, ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας μειώνει την ηλεκτρική ισχύ της. Επειδή όμως η μηχανική ροπή είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρική της γεννήτριας, ο δρομέας επιταχύνεται. Οι υπερταχύσεις αυτές περιορίζονται από τη δράση του pitch controller. Παράλληλα για την ενδυνάμωση της FRT ικανότητας της Α/Γ, χρησιμοποιείται και ένα chopper στην πλευρά της dc-τάσης, το οποίο ενεργοποιείται όταν η dc-τάση του πυκνωτή ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή και συμβάλλει στον περιορισμό των ταλαντώσεων του μηχανικού συστήματος της Α/Γ και της υπερτάχυνσης του δρομέα της και άρα στη μείωση των καταπονήσεων συνολικά της Α/Γ, [72].



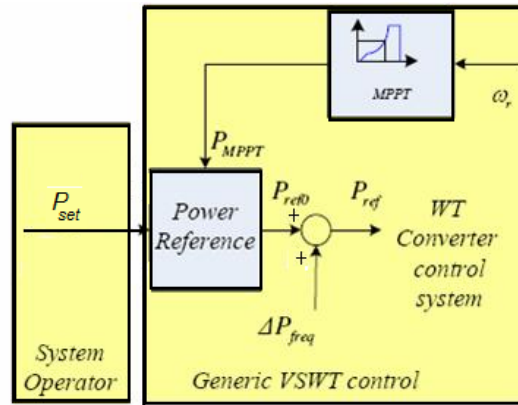
Σχήμα 2.13. Το σχήμα ελέγχου των μετατροπέων της Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια, [72]

2.4.4 Ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ

Σε ορισμένες προσομοιώσεις του επόμενου κεφαλαίου, έχει θεωρηθεί για τις Α/Γ του Α/Π του ΥΒΣ ότι παρέχουν και λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας. Είναι μια δυνατότητα την οποία, σύμφωνα με τους κατασκευαστές, διαθέτουν οι Α/Γ τελευταίας τεχνολογίας, με συμβατότητα προς τις απαιτήσεις τόσο υφιστάμενων Κωδίκων Συστήματος (grid code compatibility), [75, 76], όσο και μελλοντικών βάσει σχετικού draft, [77]. Ο ελεγκτής συχνότητας που έχει υλοποιηθεί στην παρούσα ανάλυση, ενσωματώνει τις δύο θεμελιώδεις μεθόδους απόκρισης σε μεταβολές της συχνότητας του συστήματος, **αδρανειακή απόκριση** (inertia response) και **έλεγχο στατισμού** (droop control), [66], το block διάγραμμα του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14. Η έξοδός του, ΔP_{freq}^{WT} , προστίθεται στην επιθυμητή ισχύ αναφοράς, P_{ref0} , της Α/Γ (Σχήμα 2.15). Η ισχύς αναφοράς, P_{ref0} , αποτελεί τη μικρότερη τιμή μεταξύ του set-point ισχύος που έχει κατανεμηθεί στο Α/Π από το Διαχειριστή του ΥΒΣ και της μέγιστης ισχύος, P_{MPPT} , που μπορεί να παραχθεί από την Α/Γ βάσει της εκάστοτε ταχύτητάς της.



Σχήμα 2.14. Ελεγκτής συχνότητας των Α/Γ μεταβλητών στροφών του Α/Π του ΥΒΣ, [66]



Σχήμα 2.15. Υπολογισμός της ισχύος αναφοράς της Α/Γ όταν στο σύστημα ελέγχου της έχει ενσωματωθεί ελεγκτής συχνότητας.

Σημειώνεται ότι ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα ελέγχου των επιμέρους Α/Γ ενός Α/Π (με στόχο τη γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της συχνότητας) ενώ η ρύθμιση με βάση χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας (ρύθμιση στατισμού) ενσωματώνεται στον ελεγκτή σε επίπεδο Α/Π. Κατά τη μελέτη της συμβολής των Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, εφαρμόζεται η ομαδοποίηση (aggregation) των επιμέρους Α/Γ εντός του κάθε Α/Π και επομένως η διάκριση μεταξύ ελεγκτών σε επίπεδο Α/Π και σε επίπεδο Α/Γ δεν έχει ιδιαίτερη σημασία.

Αναλυτικότερα, ο έλεγχος στατισμού ακολουθεί τη λογική ελέγχου των ρυθμιστών των συμβατικών μονάδων του συστήματος, παρέχοντας έναν όρο ισχύος ανάλογο της απόκλισης της συχνότητας, f , από την τιμή αναφοράς (τυπικά $f_0=50$ Hz), ο οποίος επιτρέπει τη συμβολή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, αναλαμβάνοντας μέρος του φορτίου. Συγκεκριμένα ο ελεγκτής στατισμού υλοποιεί την παρακάτω εξίσωση (σε α.μ. τιμές):

$$\Delta P_{droop}^{WT} = -K_{droop} \cdot (f - f_0) \quad (2.11)$$

Ο έλεγχος στατισμού απαιτεί την ύπαρξη εφεδρείας ισχύος στο Α/Π (δηλαδή λειτουργία με set-point περιορισμού της ισχύος εξόδου του), προκειμένου να μην οδηγηθούν σε αστάθεια οι Α/Γ σε καταστάσεις χαμηλής συχνότητας. Το άνω όριο του ΔP_{droop}^{WT} σε καταστάσεις υποσυχνότητας είναι συνεπώς ίσο με τη διαφορά της διαθέσιμης αιολικής ισχύος από το set-point περιορισμού της ισχύος της Α/Γ. Αλλιώς ο έλεγχος στατισμού είναι ενεργός μόνο σε καταστάσεις υπερσυχνότητας. Επίσης έχει ενσωματωθεί ζώνη υστέρησης με εύρος 49.9-50.1 Hz, που καθιστά τον έλεγχο στατισμού ανενεργό όταν η συχνότητα είναι εντός αυτών των ορίων. Η τιμή στατισμού στα Α/Π ενδείκνυται να επιλέγεται μεγαλύτερη ή ίση από την αντίστοιχη των συμβατικών μονάδων, ώστε να εξασφαλίζεται ότι στις διάφορες διαταραχές τα Α/Π δε συμμετέχουν αναλογικά περισσότερο από τις συμβατικές μονάδες στη ρύθμιση. Στην παρούσα ανάλυση η τιμή στατισμού που επιλέχθηκε για το Α/Π του ΥΒΣ είναι ίση με $R=5\%$ (δηλ. $K_{droop}=20$).

Σχετικά με την αδρανειακή απόκριση, η Α/Γ αποκρίνεται με βάση το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας, ιδιότητα που υφίσταται εγγενώς τόσο στις συμβατικές μονάδες όσο και στις Α/Γ σταθερών στροφών, όπου μέρος της κινητικής τους ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αντιστρόφως κατά τη διάρκεια μεταβολών συχνότητας. Κάτι τέτοιο δεν υφίσταται εγγενώς στις Α/Γ μεταβλητών στροφών λόγω παρεμβολής των ηλεκτρονικών ισχύος, αλλά μπορεί να επιτευχθεί τεχνητά μέσω του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης που υλοποιεί την παρακάτω εξίσωση (σε α.μ. τιμές):

$$\Delta P_{inertia}^{WT} = -K_{inertia} \cdot \frac{df}{dt} \quad (2.12)$$

Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά προσθέτει μια εικονική αδράνεια (virtual inertia) στο σύστημα, καθώς εισάγει στην ισχύ αναφοράς της Α/Γ έναν όρο ανάλογο προς το $-2H_{WT} \frac{d\omega}{dt}$, όπου H_{WT} είναι η σταθερά αδράνειας της Α/Γ σε δευτερόλεπτα και εκφράζει την κινητική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο δρομέα σε ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, ενώ με $2 \cdot H_{WT}$ ισούται ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής από την ονομαστική τιμή στο μηδέν υπό ονομαστική επιβραδύνουσα ισχύ. Συνεπώς το κέρδος $K_{inertia}$ της εξίσωσης (2.12) αποτελεί μέτρο της εικονικής αδράνειας της Α/Γ.

Επειδή το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί το διαφορικό σήμα df/dt , απαιτείται προσεκτική επιλογή φίλτρου για αποφυγή του θορύβου. Για την αποφυγή αυξημένης καταπόνησης της γεννήτριας είναι δυνατή επίσης η χρήση ζώνης υστέρησης της τάξης των 0.001-0.01 Hz/s. Η επιπρόσθετη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί μέσω της αδρανειακής απόκρισης σε καταστάσεις μείωσης της συχνότητας είναι περιορισμένη από την ποσότητα της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα (και εκφράζεται από το H_{WT}), τις αποδεκτές μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα και την αναγκαία λειτουργία επαναφοράς της κινητικής ενέργειας (και άρα της ταχύτητας περιστροφής) στην προ της διαταραχής τιμή.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ενέργεια που βρίσκεται πραγματικά αποθηκευμένη ως κινητική στο δρομέα ενδέχεται να είναι μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί σε H_{WT} , καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις Α/Γ μεταβλητών στροφών κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος τιμών και μπορεί να απέχει αρκετά από την ονομαστική τιμή της. Παρ' όλα αυτά, η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου εξασφαλίζει την ευσταθή λειτουργία του συστήματος της Α/Γ κατά τη διάρκεια πρόσθετης έγχυσης ενεργού ισχύος. Η τιμή για το κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης που έχει επιλεγεί ($K_{inertia}=20$) δε δημιουργεί ζητήματα αστάθειας της Α/Γ, [66]. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για τον έλεγχο της αδρανειακής απόκρισης δεν απαιτείται εφεδρεία ισχύος όπως στην περίπτωση του ελέγχου στατισμού και το άνω όριο του $\Delta P_{inertia}^{WT}$ σε καταστάσεις μείωσης της συχνότητας καθορίζεται βάσει της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ και όχι της διαθέσιμης αιολικής ισχύος.

2.5 Μοντέλο προσομοίωσης του αντλιοστάσιου του ΥΒΣ

2.5.1 Μοντελοποίηση υδραυλικού μέρους

Για τη μοντελοποίηση του υδραυλικού μέρους του αντλιοστάσιου, δηλαδή του συστήματος αγωγών κατάθλιψης – αντλίας, χρησιμοποιήθηκε ένα μη γραμμικό κυματικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στο [78] και είναι παρόμοιο με το μοντέλο του συστήματος αγωγών παραγωγής – υδροστρόβιλου.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά το **μοντέλο της αντλίας**, αυτό συνίσταται από την εξίσωση μηχανικής ισχύος καθώς και τις χαρακτηριστικές πίεσης και απόδοσης της αντλίας συναρτήσει της παροχής και των στροφών της.

Για τον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος της αντλίας σε α.μ. τιμές χρησιμοποιείται η (2.13):

$$\bar{P}_{p,i} = \frac{\bar{h}_{p,i} \cdot \bar{q}_{p,i}}{n_{p,i}} \cdot A_p \quad (2.13)$$

όπου,

$\bar{P}_{p,i}$: η μηχανική ισχύς της αντλίας i

$\bar{h}_{p,i}$: η πίεση που προκαλεί η αντλία i

$\bar{q}_{p,i}$: η παροχή της αντλίας i

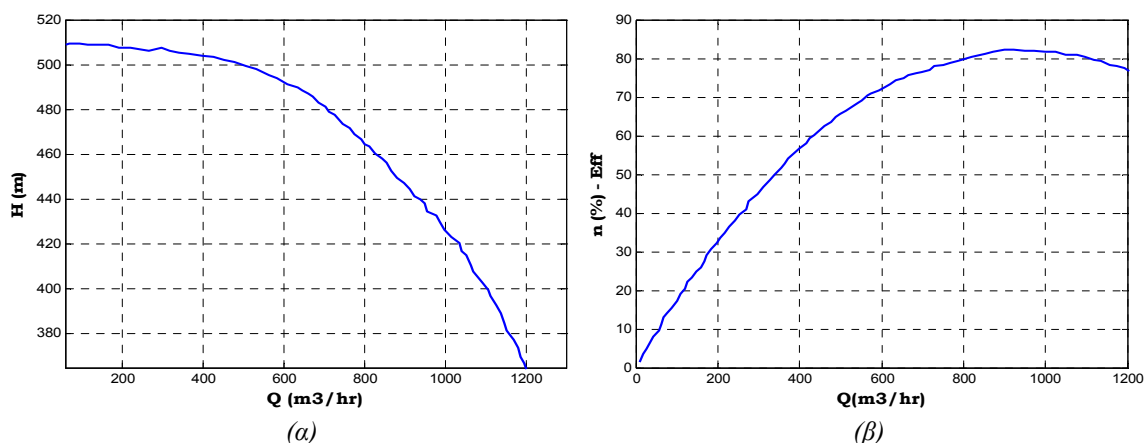
$n_{p,i}$: ο βαθμός απόδοσης της αντλίας i

A_p : συντελεστής αναλογίας ώστε να προκύπτει $P_{p,i}=1$ α.μ. όταν η αντλία στρέφεται στις ονομαστικές της στροφές και η βάνα κατάθλιψης είναι πλήρως ανοιχτή

Ο όρος A_p δίνεται από τη (2.14) και σχετίζεται με τις τιμές βάσης που έχουν επιλεχτεί για την παροχή (Q_{base}), την πίεση (H_{base}) και την ισχύ της αντλίας ($P_{p,base}$). Επίσης περιλαμβάνεται και ο λόγος της ονομαστικής ισχύος της αντλίας ($P_{p,nom}$) προς την ονομαστική ισχύ του κινητήρα ($P_{M,nom}$). Στην παρούσα ανάλυση ως βασικές τιμές χρησιμοποιήθηκαν η ονομαστική παροχή της αντλίας, το στατικό ύψος των εγκαταστάσεων αντλησιοταμίευσης και η ονομαστική ισχύς της αντλίας η οποία θεωρήθηκε ίση με την ονομαστική του κινητήρα.

$$A_p = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{base} \cdot H_{base}}{P_{base}} \cdot \frac{P_{p,nom}}{P_{M,nom}} \quad (2.14)$$

Όσον αφορά τα μεγέθη $\bar{h}_{p,i}$ και $n_{p,i}$ της σχέσης (2.13), αυτά δίνονται από τις στατικές χαρακτηριστικές της αντλίας ως συνάρτηση της παροχής και των στροφών της. Για τον υπολογισμό αυτών των χαρακτηριστικών, (βλ. [78]), χρησιμοποιήθηκαν ως βάση οι καμπύλες (H, Q) και (n, Q) πραγματικής αντλίας, αντίστοιχου μεγέθους με τις εξεταζόμενες στην παρούσα ανάλυση και για παρόμοιο στατικό ύψος, ορισμένες για τις σύγχρονες στροφές του κινητήρα τους. Στη συνέχεια οι καμπύλες της συγκεκριμένης αντλίας προσαρμόστηκαν για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας (H_n, Q_n) = (423 m, 1013 m³/h) των εξεταζόμενων αντλιών, όπως αυτό προκύπτει για τη δεδομένη χαρακτηριστική σωλήνωσης του αντλησιοταμιευτικού συστήματος ($H_S=H_0+k \cdot Q^2$) και τη θεωρούμενη ονομαστική απορροφούμενη αντλητική ισχύ (1.47 MW). Ουσιαστικά χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές αναλογίας των ονομαστικών σημείων λειτουργίας των δύο τύπων αντλιών. Οι προκύπτουσες καμπύλες (H, Q) και (n, Q) δίνονται στο Σχήμα 2.16 και αντιστοιχούν στις στροφές της αντλίας που δίνεται η ονομαστική ισχύς. Για μια αντλία σταθερών στροφών ή μια αντλία μεταβλητών στροφών με μετατροπέα στο στάτη του κινητήρα, οι στροφές αυτές είναι οι σύγχρονες του κινητήρα. Από την άλλη για μια αντλία μεταβλητών στροφών με κινητήρα διπλής τροφοδότησης, η ονομαστική ισχύς δίνεται στις υπερσύγχρονες στροφές του κινητήρα.



Σχήμα 2.16. Θεωρούμενες καμπύλες (H, Q) και (n, Q) των εξεταζόμενων αντλιών της παρούσας ανάλυσης, ορισμένες στις ονομαστικές στροφές της αντλίας.

Για τη μοντελοποίηση πάντως αντλιών μεταβλητών στροφών απαιτείται ο προσδιορισμός αντίστοιχων καμπυλών και σε στροφές χαμηλότερες των ονομαστικών. Γι' αυτόν το σκοπό έγινε χρήση των γνωστών νόμων ομοιότητας που ισχύουν για φυγόκεντρες αντλίες (οι οποίες χρησιμο-

ποιούνται κατά κόρον σε τέτοιου είδους εφαρμογές όπως η εξεταζόμενη της παρούσας ανάλυσης), [79, 80]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2, \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \quad (2.15)$$

όπου οι δείκτες 1, 2 αναφέρονται σε λειτουργικά σημεία που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές ταχύτητες.

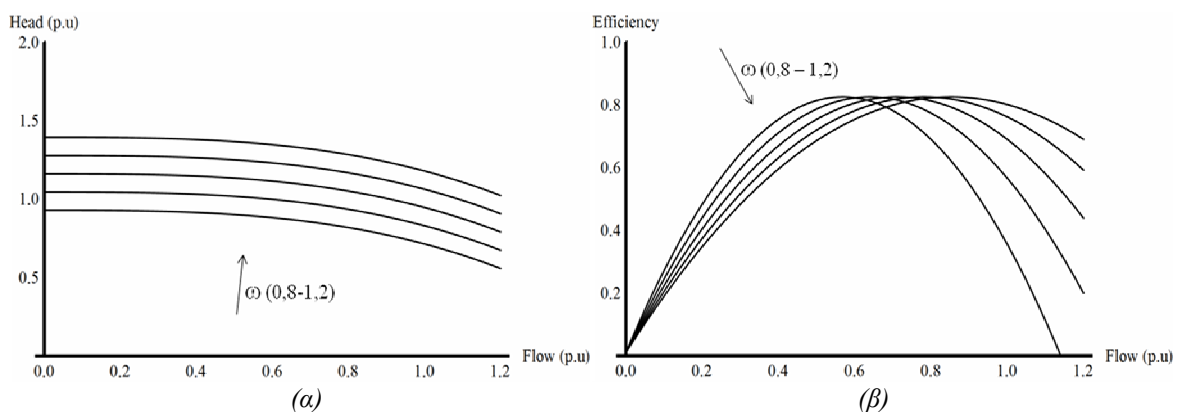
Συνεπώς από τις χαρακτηριστικές του Σχήματος 2.16 μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές στις διάφορες ταχύτητες από τις σχέσεις:

$$H(Q_2) = H\left(Q_1 \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \quad (2.16)$$

$$n(Q_2) = n\left(Q_1 \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \quad (2.17)$$

Σημειωτέον ότι στην περίπτωση των αντλιών μεταβλητών στροφών με κινητήρα διπλής τροφοδότησης θα πρέπει να προσδιοριστούν οι υπερσύγχρονες στροφές στις οποίες παράγεται η ονομαστική ισχύς, ώστε να μπορέσουν μετά να προσδιοριστούν και οι υπόλοιπες καμπύλες από τους λόγους ομοιότητας. Στην παρούσα ανάλυση όπως και στην [78], οι στροφές αυτές προσδιορίστηκαν ως εξής: Αν θεωρηθεί το τεχνικό ελάχιστο των αντλιών γύρω στο 60% (τυπική τιμή) της ονομαστικής, τότε το εύρος μεταβολής της ισχύος 60-100% αντιστοιχεί, βάσει των λόγων ομοιότητας, σε ένα εύρος μεταβολής στροφών της τάξης του 85-100% των ονομαστικών. Και αν είναι επιθυμητό οι σύγχρονες στροφές να είναι στο μέσο του εύρους μεταβολής, δηλ. το 92.5% των ονομαστικών να αντιστοιχεί στις σύγχρονες, τότε ανάγοντας τα ποσοστά ως προς τις σύγχρονες (πολλαπλασιάζοντας με το συντελεστή $100/92.5=1.081$), προκύπτει εύρος μεταβολής της τάξης του 92-108% των σύγχρονων στροφών του κινητήρα. Συνεπώς στην προκειμένη περίπτωση οι ονομαστικές στροφές της αντλίας αντιστοιχούν σε 108% των σύγχρονων και το αντίστοιχο εύρος μεταβολής στροφών 92-108%.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις σχέσεις (2.16) και (2.17) και έχοντας ως βάση τις καμπύλες του Σχήματος 2.16, προέκυψαν οι καμπύλες του Σχήματος 2.17 για την περίπτωση της αντλίας μεταβλητών στροφών με κινητήρα διπλής τροφοδότησης, οι οποίες δίνονται κανονικοποιημένες ως προς την ονομαστική παροχή της αντλίας και το στατικό ύψος του αντλιοστάσιου. Οι ταχύτητες περιστροφής της αντλίας δίνονται κανονικοποιημένες ως προς τις σύγχρονες στροφές του κινητήρα τους.



Σχήμα 2.17. Κανονικοποιημένες καμπύλες (h, q) και (η, q) των εξεταζόμενων αντλιών της παρούσας ανάλυσης, οριζόμενες σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής ω .

Με curve fitting στις καμπύλες του Σχήματος 2.17, προέκυψαν οι παρακάτω εξισώσεις που συσχετίζουν την πίεση και την απόδοση των αντλιών με τις στροφές και την παροχή.

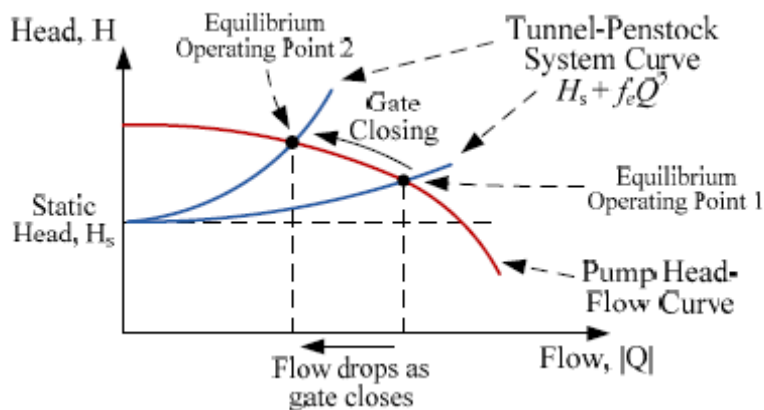
$$\bar{h}_p(\bar{q}_p, \bar{\omega}) = 1.162 \cdot \bar{\omega} - 0.214 \cdot \bar{q}_p^3 \quad (2.18)$$

$$n_p(\bar{q}_p, \bar{\omega}) = 0.0107 + 2.293 \cdot \left(\frac{\bar{q}_p}{\bar{\omega}}\right) - 1.613 \cdot \left(\frac{\bar{q}_p}{\bar{\omega}}\right)^2 \quad (2.19)$$

Σχετικά με τη μοντελοποίηση της βάνας κατάθλιψης ισχύουν τα εξής: Στην περίπτωση της αντλίας οι υδατοθυρίδες παραμένουν σε σταθερή θέση (για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση) και δεν ελέγχονται από κάποιον ρυθμιστή όπως συμβαίνει στην περίπτωση υδροστρόβιλου. Έτσι, στις [81, 82] δε μοντελοποιείται το άνοιγμα των υδατοθυρίδων, καθώς δεν είναι επιθυμητό να μεταβάλλεται σε μεταβατικές καταστάσεις παρά μόνο σε καταστάσεις εκκίνησης ή διακοπής της λειτουργίας των αντλιών. Ωστόσο για λόγους πληρότητας, στην παρούσα ανάλυση έχει μοντελοποιηθεί επίσης η δυναμική των υδατοθυρίδων. Συγκεκριμένα, στις [65, 78, 79] προτείνεται η μοντελοποίηση της δυναμικής των υδατοθυρίδων ως μία επιπλέον βαθμίδα απωλειών πίεσης. Το κλείσιμο των υδατοθυρίδων έχει ως αποτέλεσμα τον στραγγαλισμό της πίεσης και τη μετακίνηση της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης σε μεγαλύτερες πιέσεις, όπως δείχνεται στο Σχήμα 2.18. Ο επιπλέον όρος απωλειών πίεσης λόγω κλεισίματος των υδατοθυρίδων μοντελοποιείται ως το γινόμενο του τετραγώνου της παροχής επί έναν συντελεστή \bar{k}_g , κατά αντιστοιχία δηλαδή με τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών των αγωγών. Ο συντελεστής \bar{k}_g δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{k}_g = \frac{\bar{G}_{\max} - \bar{G}}{\bar{G}} \quad (2.20)$$

όπου \bar{G}_{\max} το μέγιστο άνοιγμα των υδατοθυρίδων (σε α.μ.). Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι για μέγιστο άνοιγμα των υδατοθυρίδων (όπως θα είναι στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας) δεν προστίθενται στο σύστημα επιπλέον απώλειες. Αντιθέτως όταν το \bar{G} προσεγγίζει το μηδέν, τότε οι απώλειες απειρίζονται οπότε μηδενίζεται και η παροχή.



Σχήμα 2.18. Η καμπύλη (H, Q) της αντλίας και η μετακίνηση της χαρακτηριστικής σωλήνωσης για κλείσιμο των υδατοθυρίδων, [65].

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση των υδραυλικών φαινομένων εντός των αγωγών κατάθλιψης, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο παρόμοιο με αυτό στην περίπτωση του ΥΗΣ, βασιζόμενο στο κυματικό μοντέλο. Τα σημεία στα οποία τα δύο μοντέλα διαφοροποιούνται είναι τα εξής:

- Στην περίπτωση του αντλιοστάσιου δεν υπάρχει μετακίνηση υδατοθυρίδων. Οι μεταβολές πίεσης εντός των αγωγών δεν προκαλούνται από μετακίνηση των υδατοθυρίδων αλλά από την α-

ντλία λόγω μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος, που συνακόλουθα προκαλεί μεταβολή των στροφών και άρα μεταβολές στην πίεση και την παροχή της αντλίας.

- Ενώ στην περίπτωση των υδροστρόβιλων η πίεση στην είσοδό τους επιβάλλεται από το στατικό ύψος, στην περίπτωση του αντλιοστάσιου η πίεση στο κάτω μέρος των αγωγών κατάθλιψης επιβάλλεται από τις αντλίες και δίνεται από τη στατική χαρακτηριστική (2.18). Κινητήρια δύναμη για το νερό αποτελεί η πίεση της αντλίας, με την παροχή να μεταβάλλεται κατά τη διαφορά της πίεσης στην έξοδο της αντλίας και της στατικής πίεσης αυξημένης κατά τις απώλειες.
- Ενώ για τη μοντελοποίηση των υδραυλικών φαινομένων εντός του κοινού αγωγού χρησιμοποιείται το κυματικό μοντέλο (όπως στην περίπτωση του μοντέλου για τον ΥΗΣ), για τα υδραυλικά φαινόμενα εντός των μεμονωμένων αγωγών χρησιμοποιείται το ανελαστικό μοντέλο, για λόγους απλότητας αλλά χωρίς απώλεια της ακρίβειας, από τη στιγμή που το θεωρούμενο μήκος των αγωγών στην παρούσα ανάλυση είναι πολύ μικρό.

Αναλυτικότερα, για τη μοντελοποίηση των κυματικών φαινομένων εντός του κοινού αγωγού κατάθλιψης, που προκαλούνται από τη μεταβολή των στροφών της αντλίας λόγω μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος τους, χρησιμοποιείται και πάλι η κυματική συνάρτηση μεταφοράς (2.4), που δίνει τις μεταβολές πίεσης συναρτήσει των μεταβολών παροχής.

Από την άλλη, για τη μοντελοποίηση των υδραυλικών φαινομένων εντός των μεμονωμένων αγωγών μικρού μήκους χρησιμοποιείται το ανελαστικό μοντέλο, [62], που θεωρεί ασυμπιεστο το υγρό και ανελαστικούς τους αγωγούς. Συγκεκριμένα, η επιτάχυνση της υδάτινης στήλης σε μια μεταβολή πίεσης χαρακτηρίζεται από το 2^ο νόμο του Νεύτωνα και εκφράζεται ως:

$$T_{w,i} \cdot \frac{d\bar{q}_{p,i}}{dt} = \bar{h}_{p,i} - \bar{h}_c - (\bar{h}_{0,i} - \bar{h}_{0,c}) - \bar{k}_i \cdot \bar{q}_{p,i}^2 \quad (2.21)$$

όπου,

$T_{w,i}$: ο χρόνος εκκίνησης ύδατος για το μεμονωμένο αγωγό, υπολογισμένος βάσει της ονομαστικής παροχής της μιας αντλίας και το στατικό ύψος του αντλιοστάσιου

$\bar{q}_{p,i}$: η παροχή της αντλίας i

$\bar{h}_{p,i}$: η πίεση που προκαλεί η αντλία i

\bar{h}_c : η πίεση στην έξοδο του κοινού αγωγού

$\bar{h}_{0,i}$: η στατική πίεση στη θέση της αντλίας i

$\bar{h}_{0,c}$: η στατική πίεση στην έξοδο του κοινού αγωγού

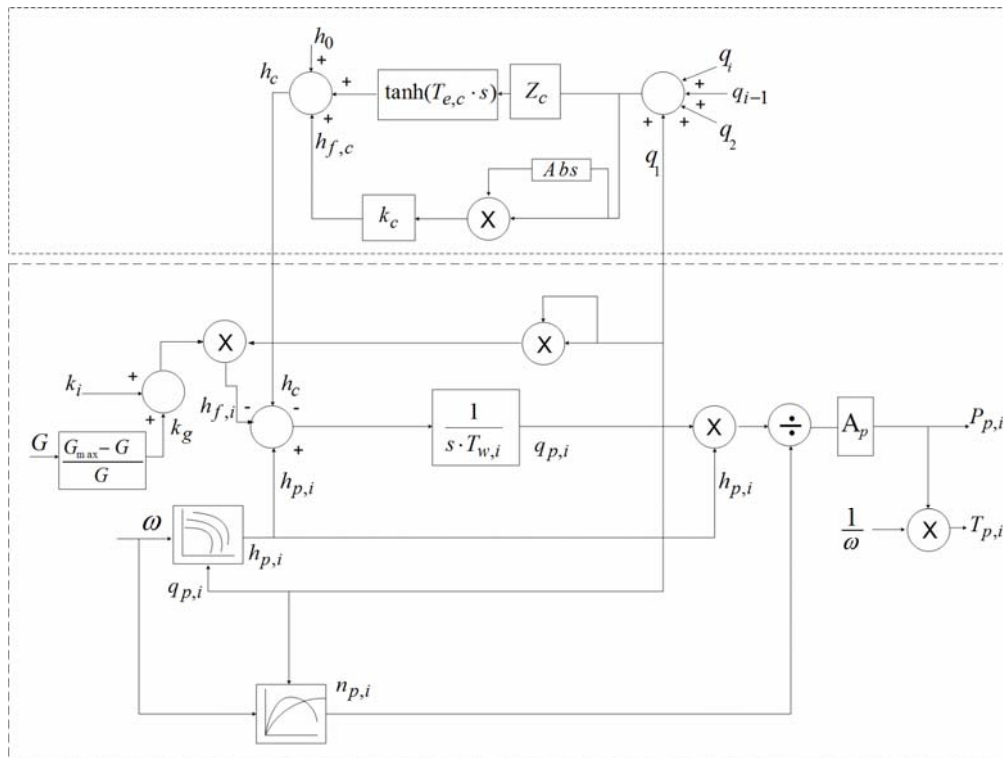
\bar{k}_i : ο συντελεστής γραμμικών απωλειών του μεμονωμένου αγωγού

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Laplace, η (2.21) μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\bar{q}_{p,i} = \frac{\bar{h}_{p,i} - \bar{h}_c - (\bar{h}_{0,i} - \bar{h}_{0,c}) - \bar{k}_i \cdot \bar{q}_{p,i}^2}{T_{w,i} \cdot s} \quad (2.22)$$

Σημειωτέον ότι στην περίπτωση μεμονωμένων αγωγών μεγαλύτερου μήκους με σημαντικούς κυματικούς χρόνους, ενδείκνυται η χρησιμοποίηση του ακριβέστερου μοντέλου που προτείνεται στην [65], το οποίο μοντελοποιεί τα κυματικά φαινόμενα και εντός των μεμονωμένων αγωγών, ενώ η παροχή του κοινού αγωγού δεν ισούται με το άθροισμα των παροχών των επιμέρους αντλιών αλλά οι διάφορες παροχές δίνονται από τις αντίστοιχες κυματικές εξισώσεις.

Από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων μοντελοποίησης των αντλιών και των υδραυλικών φαινομένων εντός των αγωγών κατάθλιψης προκύπτει το block διάγραμμα του Σχήματος 2.19, το οποίο αναπαριστά το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο DigSilent/PowerFactory για την προσομοίωση του υδραυλικού μέρους του αντλιοστάσιου.



Σχήμα 2.19. Μοντέλο του υδραυλικού μέρους του αντλιοστάσιου

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δίνονται στον Πίνακα 2.5 και για τον υπολογισμό τους θεωρήθηκε μια τυπική διαμόρφωση αντλιοστάσιου (βασιζόμενη σε διαθέσιμα κατασκευαστικά στοιχεία ΥΒΣ υπό σχεδίαση), αποτελούμενο από 12 αντλίες των 1.47 MW και με ύψη παρόμοια με αυτά του ΥΗΣ. Συγκεκριμένα το στατικό ύψος του αντλιοστάσιου θεωρήθηκε ίσο με $H_0=400$ m και η ονομαστική παροχή κάθε αντλίας ίση με $Q_{p,i}=0.281$ m³/s, ώστε η απορροφούμενη ισχύς της αντλίας, λαμβάνοντας υπόψη τη χαρακτηριστική σωλήνωσης, να προκύπτει περίπου 1.47 MW. Η συνολική παροχή συνεπώς στον κοινό αγωγό θα είναι ίση με $Q_c=3.376$ m³/s όταν θα λειτουργούν και οι 12 αντλίες. Για αυτές τις παροχές και με βάση την υποτυπώδη οικονομοτεχνική ανάλυση του [78], προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες διάμετροι για τους αγωγούς προσαγωγής. Αναλυτικά, το σύστημα αγωγών προσαγωγής συνίσταται από έναν κοινό αγωγό από χάλυβα με μήκος $L_c=1700$ m, διάμετρο $d_c=1.2$ m και πάχος $e_c=19$ mm, και 12 μεμονωμένους αγωγούς από χάλυβα με $L_i=20$ m, $d_i=0.5$ m και $e_i=15$ mm. Σημειωτέον ότι οι χρόνοι εκκίνησης ύδατος που δίνονται στον Πίνακα 2.5, τόσο για τον κοινό, $T_{w,c}$, όσο και για τους μεμονωμένους αγωγούς, $T_{w,i}$, έχουν υπολογιστεί από τη (2.6) για την ονομαστική παροχή της μιας αντλίας και το στατικό ύψος του αντλιοστάσιου.

Πίνακας 2.5. Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου του υδραυλικού μέρους του αντλιοστάσιου

Σύμβολο	Παράμετροι Επεξήγηση	Μονάδα	Τιμές
$T_{e,c}$	Wave time constant of common tunnel	s	1.4167
$T_{e,i}$	Wave time constant of individual penstock	s	0.0167
$T_{w,c}$	Water starting time of common tunnel	s	0.1078
$T_{w,i}$	Water starting time of individual penstock	s	0.0073
k_c	Friction losses factor of common tunnel	p.u.	0.00036
k_i	Friction losses factor of individual penstock	p.u.	0.00034
A_p	Pump gain	-	0.7516

Όσον αφορά την αδράνεια των στρεφόμενων μαζών του συστήματος κινητήρα-αντλίας, θεωρήθηκε ότι η χρονική σταθερά αδράνειας ισούται με $H_p=2.08$ s, κανονικοποιημένη ως προς τις

σύγχρονες στροφές και την ονομαστική ισχύ των 1.47 MW. Η ροπή αδράνειας που αντιστοιχεί στην παραπάνω σταθερά αδράνειας είναι $250 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, από τα οποία θεωρήθηκε ότι τα $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ αντιστοιχούν στη ροπή αδράνειας της αντλίας⁶ και τα υπόλοιπα στον κινητήρα⁷.

2.5.2 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού μέρους

Αν οι αντλίες είναι σταθερών στροφών τότε αυτές κινούνται από έναν απλό ασύγχρονο κινητήρα κλωβού, για τη μοντελοποίηση του οποίου χρησιμοποιείται το γνωστό μοντέλο ασύγχρονου κινητήρα 4^{ης} τάξης που περιγράφεται στην [53].

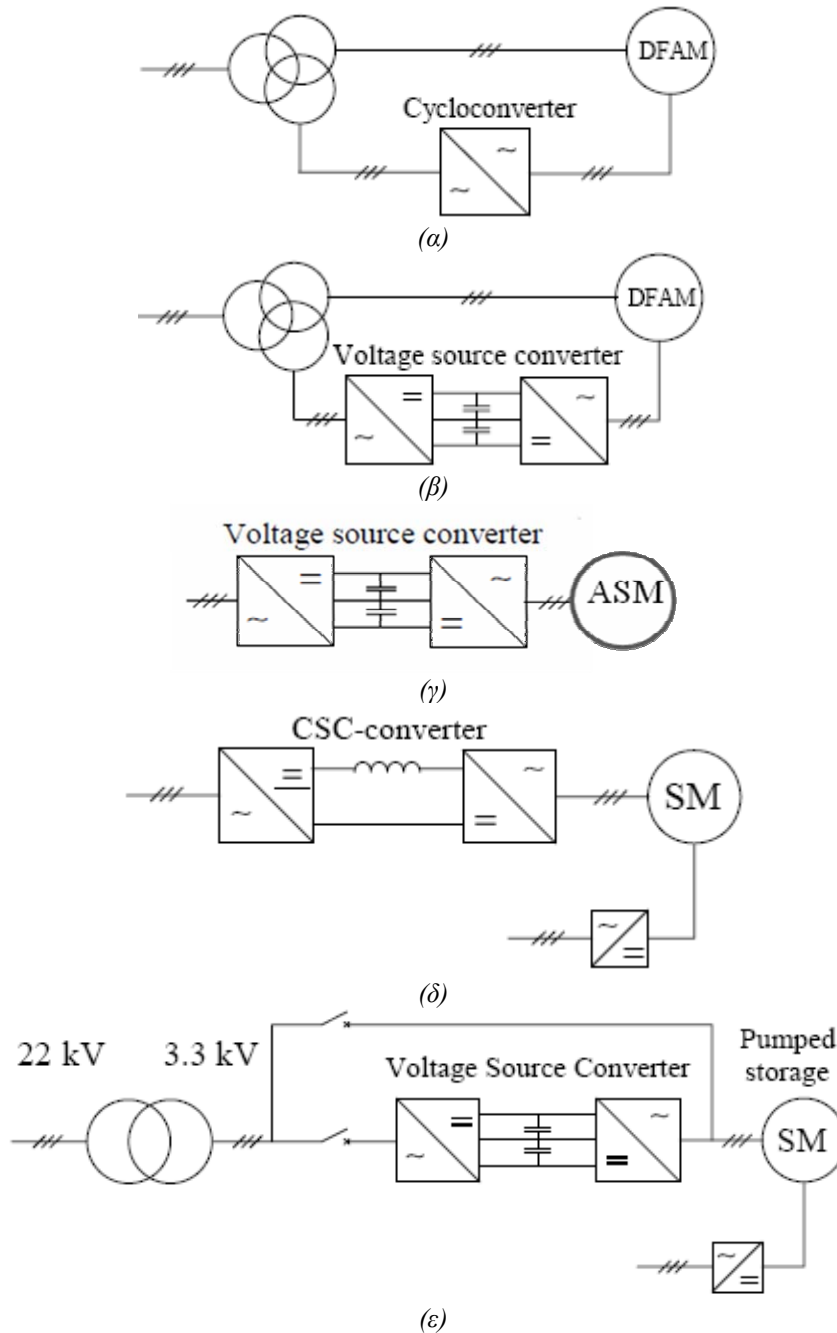
Από την άλλη στην περίπτωση αντλιών μεταβλητών στροφών, η οδήγησή τους επιτυγχάνεται από κινητήρες που ελέγχονται από κατάλληλους μετατροπείς ισχύος (Variable Speed Drives - VSDs), [83, 84]. Οι συνηθέστερες τοπολογίες κινητήριων συστημάτων μεταβλητών στροφών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αντλησιοταμίευσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.20, [51, 85]. Από τις τοπολογίες του Σχήματος 2.20, οι τέσσερις πρώτες συναντώνται στην πράξη ενώ η πέμπτη προτείνεται ως πιθανή λύση για αντλησιοταμιευτικά συστήματα με αναστρέψιμες μηχανές σε απομονωμένα συστήματα, [51]. Γενικότερα, οι τοπολογίες (δ) και (ε) με σύγχρονο κινητήρα συναντώνται στις περιπτώσεις αναστρέψιμων μηχανών, που λειτουργούν είτε ως γεννήτριες είτε ως κινητήρες, ιδιαίτερα σε μικρά αυτόνομα συστήματα. Στις περιπτώσεις αυτές δίνεται η δυνατότητα στη μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια, παρακάμπτοντας το μετατροπέα (bypass), όπως απαιτείται σε έκτακτες καταστάσεις, π.χ. επανατροφοδότησης του ηλεκτρικού συστήματος μετά από black-out, όπου ο μετατροπέας είναι εκτός λειτουργίας. Για την περίπτωση μηχανών που θα χρησιμοποιηθούν μόνο ως κινητήρες, όπως στην περίπτωση του εξεταζόμενου ΥΒΣ όπου υδροστρόβιλοι και αντλίες είναι ξεχωριστές μηχανές, οι τοπολογίες που έχουν επικρατήσει είναι οι (α), (β) και (γ). Η τοπολογία (γ) είναι αρκετά διαδεδομένη στη βιομηχανία και εφαρμόζεται κυρίως στις περιπτώσεις μετατροπής αντλιών σταθερών στροφών σε μεταβλητών, όπου οι υφιστάμενοι κινητήρες είναι ασύγχρονες μηχανές κλωβού. Το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η μεγάλη ισχύς του μετατροπέα, η οποία θα πρέπει να είναι στα επίπεδα ισχύος του κινητήρα που ελέγχουν από τη στιγμή που ο μετατροπέας συνδέεται στο στάτη του κινητήρα. Το γεγονός αυτό αυξάνει το κόστος και τις απώλειες της διάταξης ενώ αρχίζει να μην είναι και τεχνικά εφικτή για αντλίες πολύ μεγάλης ισχύος. Αντίθετα οι τοπολογίες (α) και (β), στις οποίες ο μετατροπέας συνδέεται στο δρομέα του κινητήρα (άρα απαιτείται κινητήρας τυλιγμένου δρομέα), παρουσιάζονται ως οι πιο οικονομικές, κυρίως γιατί μειώνουν το απαιτούμενο μέγεθος τόσο του μετατροπέα όσο και της ασύγχρονης μηχανής. Η τοπολογία (α) έχει το πλεονέκτημα των φθηνότερων ημιαγωγικών στοιχείων (θυρίστωρες αντί για τα IGBTs ή GTOs της τοπολογίας (β)), ενώ η τοπολογία (β) παρουσιάζει καλύτερη ποιότητα απορροφούμενης ισχύος, τόσο από την πλευρά του δικτύου όσο και από την πλευρά του κινητήρα.

Στο παρόν ερευνητικό έργο θεωρήθηκε ότι οι κινητήρες μεταβλητών στροφών των αντλιών θα έχουν την τοπολογία (β) του Σχήματος 2.20. Συγκεκριμένα το αντλιοστάσιο του εξεταζόμενου ΥΒΣ θεωρήθηκε ότι θα αποτελείται από 12 αντλίες με τετραπολικούς ασύγχρονους κινητήρες διπλής τροφοδότησης ονομαστικής ισχύος $(1-s)\cdot 1.47 \text{ MW}$ και με μετατροπέα πηγής τάσης στο δρομέα διαστασιολογημένο για ισχύ της τάξης του $1.47\cdot s$, προσαυξημένη κατά τις απαιτήσεις για παροχή έργου ισχύος. Η ονομαστική τάση του στάτη του κινητήρα καθώς και του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου θεωρήθηκε ίση με 0.69 kV, στα πρότυπα των αντίστοιχων Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης.

⁶ Για τη ροπή αδράνειας της αντλίας χρησιμοποιήθηκε σχετική τιμή από datasheet μιας εμπορικής αντλίας, παρόμοιου μεγέθους.

⁷ Η επιλογή της ροπής αδράνειας του κινητήρα βασίστηκε σε αντίστοιχες τιμές ασύγχρονων Α/Γ διπλής τροφοδότησης παρόμοιας ισχύος.

Το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο DigSilent/PowerFactory για την προσομοίωση του ηλεκτρικού μέρους του αντλιοστασίου είναι το αντίστοιχο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ηλεκτρικού μέρους των Α/Γ μεταβλητών στρωφών διπλής τροφοδότησης (βλ. παράγραφο 2.4.2), με αντιστροφή όμως της ροής ισχύος.



Σχήμα 2.20. Σνηθέστερες τοπολογίες κινητήριων συστημάτων μεταβλητών στρωφών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αντλιοσταμείωσης. α) Ασύγχρονος κινητήρας διπλής τροφοδότησης με κυκλομετατροπέα, β) Ασύγχρονος κινητήρας διπλής τροφοδότησης με μετατροπέα πηγής τάσης, γ) Ασύγχρονος κινητήρας κλωβού με μετατροπέα στο στάτη, δ) Σύγχρονος κινητήρας με μετατροπέα πηγής ρεύματος, ε) Σύγχρονος κινητήρας με μετατροπέα πηγής τάσης, [51, 78].

2.5.3 Έλεγχος της ισχύος των αντλιών μεταβλητών στροφών

Η απορροφούμενη ισχύς του αντλιοστάσιου θα πρέπει να παρακολουθεί την παραγόμενη αιολική ισχύ του ΥΒΣ στα πλαίσια της αντλησιοαιολικής συνεργασίας (κύρια κατάσταση λειτουργίας του ΥΒΣ)⁸, ώστε να μη δημιουργείται έλλειμμα ή πλεόνασμα παραγωγής, καταστάσεις μη αποδεκτές για το σύστημα όταν οι αποκλίσεις είναι σημαντικές.

Συνεπώς το set-point ισχύος των αντλιών καθορίζεται βάσει της παραγόμενης ισχύος του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ και συγκεκριμένα της ποσότητας αιολικής ισχύος που προορίζεται για άντληση (καθώς ένα ποσό της αιολικής ισχύος μπορεί να χρησιμοποιείται για υποκατάσταση υδροτροβιλικής ισχύος στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας). Στην παρούσα ανάλυση εξετάστηκαν δύο λογικές καθορισμού του set-point ισχύος των αντλιών:

1. Το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου παρακολουθεί την αιολική ισχύ του ΥΒΣ που προορίζεται για άντληση σε στιγμιαία βάση. Δηλαδή οι αντλίες λαμβάνουν ως set-point τη στιγμιαία παραγόμενη ισχύ του Α/Π, P_{HW} , με αντίθετο φυσικά πρόσημο. Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται η πλήρης αντιστάθμιση της μεταβλητότητας της αιολικής ισχύος και άρα η εξάλειψη των όποιων αρνητικών επιπτώσεων στη λειτουργία του συστήματος. Βέβαια σε αυτήν την περίπτωση προφανώς θα αναιρείται η τυχόν παρεχόμενη ρύθμιση συχνότητας από το Α/Π.

$$P_{ref} = -P_{HW} \quad (2.23)$$

2. Το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου παρακολουθεί τη μέση τιμή της αιολικής παραγωγής κάποιου χρονικού διαστήματος. Δηλαδή οι αντλίες λαμβάνουν ως set-point τη μέση τιμή της αιολικής ισχύος του προηγούμενου λεπτού και η τιμή αυτή εξελίσσεται με το χρόνο (moving average). Με αυτόν τον τρόπο στο σήμα ελέγχου θα εξαλείφονται οι μεγάλες και υψίσυχνες διακυμάνσεις (άρα λιγότερες καταπονήσεις για το αντλιοστάσιο) και παράλληλα το σήμα θα περιέχει την κύρια τάση της αιολικής ισχύος, χωρίς δηλαδή να απομακρύνεται ο κύριος στόχος της αντλησιοαιολικής συνεργασίας που είναι η άντληση της αιολικής παραγωγής και χωρίς να αναιρείται η όποια ρύθμιση συχνότητας από το Α/Π. Βέβαια από τη στιγμή που η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής δεν αντισταθμίζεται σε στιγμιαία βάση, προστίθεται μια επιπλέον διαταραχή στο σύστημα, οι αρνητικές επιπτώσεις της οποίας είναι υπό διερεύνηση.

$$P_{ref} = -\frac{\int_0^m P_{HW,t} dt}{T} \quad (2.24)$$

όπου,

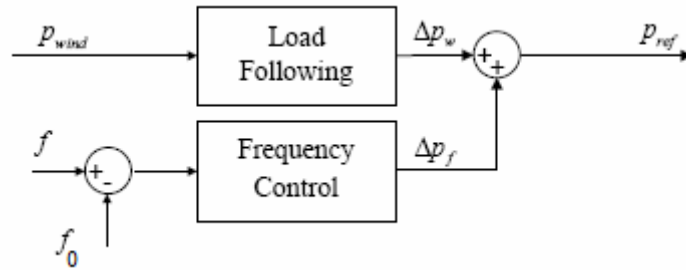
m : ο χρόνος αναφοράς

T : το χρονικό διάστημα του κινούμενου μέσου, που μπορεί να είναι μερικά δευτερόλεπτα μέχρι και μερικά λεπτά⁹ – στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε ίσο με ένα λεπτό

Παράλληλα, σε ορισμένες δημοσιεύσεις, [51], εξετάζεται και η ικανότητα των αντλιών να παρέχουν λειτουργία ρύθμισης συχνότητας, οι επιπτώσεις της οποίας για το σύστημα διερευνώνται στο επόμενο κεφάλαιο. Η λειτουργία αυτή μπορεί να υλοποιηθεί στους ελεγκτές των VSDs των αντλιών με κατάλληλη διαμόρφωση του set-point απορροφούμενης ισχύος από τις αντλίες. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21, το set-point της απορροφούμενης ισχύος των αντλιών θα είναι το άθροισμα του σήματος βάσει της παραγόμενης ισχύος του Α/Π του ΥΒΣ (που προορίζεται για άντληση) και του σήματος από τον ελεγκτή συχνότητας.

⁸ Αν έχει προγραμματιστεί και άντληση από το δίκτυο τότε η απορροφούμενη ισχύς του αντλιοστάσιου θα είναι αυξημένη κατά το συγκεκριμένο ποσό ισχύος.

⁹ Δε θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα μεγάλο ώστε να αποφευχθούν η αποσύζευξη από την κύρια τάση της αιολικής ισχύος και οι συνεπαγόμενες μεγάλες αποκλίσεις αιολικής και αντλητικής ισχύος. Δε θα πρέπει όμως να είναι και ιδιαίτερα μικρό ώστε να μην αναιρείται η όποια ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ.



Σχήμα 2.21. Καθορισμός του *set-point* απορροφούμενης ισχύος των αντλιών όταν αυτές παρέχουν απόκριση συχνότητας.

Ο ελεγκτής συχνότητας που έχει υλοποιηθεί στην παρούσα ανάλυση είναι παρόμοιος με αυτόν των Α/Γ του ΥΒΣ¹⁰ και περιλαμβάνει έναν όρο στατισμού και ένα διαφορικό όρο. Η λειτουργία του περιγράφεται από την εξίσωση (2.25). Στην παρούσα ανάλυση, το κέρδος του στατισμού επιλέχθηκε ίσο με το θεωρούμενο κέρδος όλων των υπόλοιπων μονάδων παραγωγής, δηλ. $K_{droop}=20$, ενώ για το διαφορικό κέρδος επιλέχθηκε ίδια τιμή με αυτή των Α/Γ του ΥΒΣ, δηλ. $K_D=20$.

$$\Delta p_f = K_{droop} \cdot (f - f_0) + K_D \cdot \frac{df}{dt} \quad (2.25)$$

Το προκύπτον συνολικό *set-point* ισχύος για τις αντλίες μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ του τεχνικού τους ελάχιστου (~60% της ονομαστικής) και της ονομαστικής τους ισχύος.

¹⁰ Το σήμα ισχύος όμως του ελεγκτή συχνότητας των αντλιών έχει αντίθετο πρόσημο από το αντίστοιχο των Α/Γ, καθώς οι αντλίες αποτελούν φορτίο για το σύστημα ενώ οι Α/Γ μονάδες παραγωγής.

3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΥΒΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

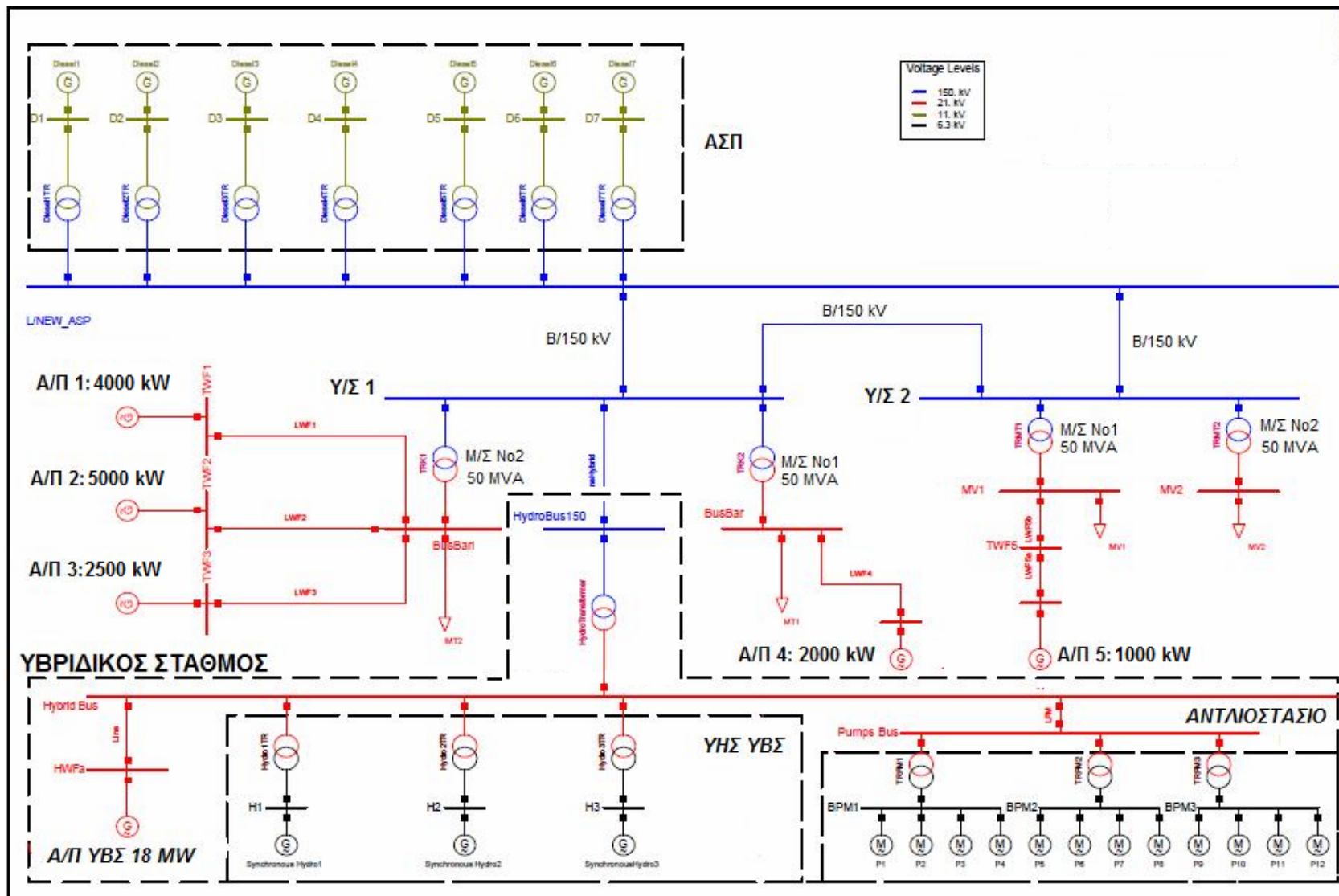
Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα προσομοίωσης του προηγούμενου κεφαλαίου και με τη βοήθεια του προγράμματος DigSilent/PowerFactory, στη συνέχεια αναλύεται εκτενώς η δυναμική συμπεριφορά ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος χωρίς και με τον ΥΒΣ, για πλέον κρίσιμες από τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος. Στόχος της ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου είναι να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις που προκαλούνται στη μεταβατική απόκριση του συστήματος από την ένταξη του ΥΒΣ, να εντοπιστούν οι πιθανοί λειτουργικοί περιορισμοί του σταθμού και να προταθούν τεχνικές λύσεις για την αντιμετώπιση των όποιων προβλημάτων διαπιστωθούν.

3.1 Περιγραφή του υπό εξέταση συστήματος

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται δυναμική προσομοίωση ενός τυπικού αυτόνομου νησιωτικού συστήματος μέσου μεγέθους (ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα για τα ΜΔΝ στην Ελλάδα σήμερα) με ενταγμένο έναν ενδεικτικό ΥΒΣ. Η διαμόρφωση του συστήματος ισχύος του νησιού επιλέχθηκε έτσι ώστε να ανταποκρίνεται κατά το δυνατόν περισσότερο στη μέση υφιστάμενη κατάσταση των νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων τα αμέσως επόμενα χρόνια, [86], όταν και αναμένεται η ένταξη των ΥΒΣ.

Το ηλεκτρικό σύστημα του εξεταζόμενου νησιού συνίσταται από έναν ΑΣΠ αποτελούμενο από επτά (7) μονάδες diesel των 15 MW, καθώς και ένα σύστημα μεταφοράς στα 150 kV, με τρεις γραμμές ΥΤ να συνθέτουν ένα βρόχο μεταξύ του ΑΣΠ και των δύο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (150/20 kV) του νησιού. Στο δίκτυο διανομής του νησιού είναι συνδεδεμένα Α/Π συνολικής ισχύος 14.5 MW, αποτελούμενα από Α/Γ διαφόρων τύπων. Επίσης ένας ΥΒΣ τυπικού μεγέθους (βάσει των υφιστάμενων αδειών παραγωγής για ΥΒΣ στα ΜΔΝ), αποτελούμενος από ένα Α/Π με εννιά (9) Α/Γ (μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια) των 2 MW, ένα αντλιοστάσιο με δώδεκα (12) αντλίες των 1.47 MW και έναν ΥΗΣ με 3 υδροστρόβιλους των 5 MW, είναι συνδεδεμένος μέσω αποκλειστικής γραμμής ΥΤ στον έναν από τους δύο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ του νησιού. Η επιλογή των ισχύων των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ βασίστηκε σε σχετική ανάλυση βέλτιστης διαστασιολόγησης που πραγματοποιήθηκε στις [35, 36, 87].

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται συνολικά το ηλεκτρικό σύστημα του νησιού με όλες τις μονάδες παραγωγής του, όπως αυτό προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα PowerFactory της DigSilent.



Σχήμα 3.1. Το ηλεκτρικό σύστημα του εξεταζόμενου νησιωτικού συστήματος, όπως έχει προσομοιωθεί στο DigSilent/PowerFactory.

3.2 Συγκριτική διερεύνηση της ικανότητας ρύθμισης συχνότητας των μονάδων diesel και των υδροστρόβιλων

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται συγκριτική διερεύνηση της ικανότητας ρύθμισης συχνότητας των μονάδων diesel και των υδροστρόβιλων, η οποία εξαρτάται τόσο από την αδράνεια των μονάδων, όσο και από την ταχύτητα απόκρισης των ρυθμιστών στροφών τους.

Για τις ανάγκες της διερεύνησης της παρούσας ενότητας, επιβάλλονται βηματικές μεταβολές φορτίου σε νοητό αυτόνομο σύστημα το οποίο τροφοδοτείται είτε από μονάδες diesel είτε από υδροστρόβιλους. Στην περίπτωση των υδροστρόβιλων, που το μοντέλο τους είναι μη γραμμικό, θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση της ταχύτητας απόκρισής τους υπό διάφορες φορτίσεις και αριθμό υδροστρόβιλων σε λειτουργία. Επίσης, θα εξεταστεί η επίδραση της σταθεράς αδράνειας στη ρύθμιση συχνότητας από τους υδροστρόβιλους. Το φορτίο στις μεταβατικές προσομοιώσεις θεωρήθηκε σταθερής σύνθετης αντίστασης.

Αναλυτικότερα, επιβάλλονται βηματικές αυξήσεις φορτίου στις μονάδες diesel και στους υδροστρόβιλους και συγκρίνεται η ικανότητά τους για ρύθμιση της συχνότητας. Παράλληλα διαπιστώνεται το μέγεθος της μέγιστης αύξησης φορτίου που μπορούν να αναλάβουν οι επιμέρους μονάδες παραγωγής σε έκτακτες περιπτώσεις (όπως απώλεια αιολικής παραγωγής ή απώλεια συμβατικής μονάδας), ώστε η συχνότητα να μη μειωθεί κάτω από το όριο των 48 Hz, που είναι η θεωρούμενη συχνότητα λειτουργίας των H/N υποσυχνότητας του συστήματος του ΜΔΝ¹¹. Το τελευταίο έχει ενδιαφέρον και για τον προσδιορισμό του συντελεστή μέγιστης διείσδυσης αιολικής ισχύος, c_D , των μονάδων παραγωγής, προκειμένου στο ενδεχόμενο απότομης απώλειας της αιολικής παραγωγής να μην προκληθεί απόρριψη φορτίου από τη λειτουργία των H/N υποσυχνότητας.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η απόκριση της μονάδας diesel και η μεταβολή της συχνότητας σε βηματική αύξηση φορτίου ίση με το 25% της ονομαστικής ισχύος της. Η συγκεκριμένη μεταβολή φορτίου είναι οριακή, καθώς η συχνότητα πέφτει μέχρι την οριακή τιμή των 48 Hz και άρα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το δυναμικό όριο διείσδυσης αιολικής ισχύος για το σύστημα του ΜΔΝ είναι της τάξης του 25% της ικανότητας των εν λειτουργία θερμικών μονάδων, αν τίθεται η απαίτηση μηδενικής περικοπής φορτίου ακόμη και σε πλήρη απώλεια της αιολικής παραγωγής. Αξίζει να επισημανθεί πάντως ότι το εφαρμοζόμενο στην πράξη όριο διείσδυσης είναι της τάξης του 30-35%, ενδεχομένως διότι η παραπάνω απαίτηση είναι σχετικά αυστηρή, καθώς το ενδεχόμενο απώλειας του συνόλου της αιολικής παραγωγής είναι χαμηλής πιθανότητας.

Παρόμοιες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και για την περίπτωση όπου αντί για μία μονάδα diesel των 15 MW το σύστημα τροφοδοτείται από τρεις υδροστρόβιλους των 5 MW, με αρχική φόρτιση στο 50% της ονομαστικής τους ισχύος. Αρχικά (Σχήμα 3.3) παρατίθεται συγκριτικά η απόκριση συχνότητας του ΥΗΣ και μιας μονάδας diesel αντίστοιχα, για την ίδια βηματική αύξηση φορτίου, ίση με 25% της ονομαστικής τους ισχύος. Διαπιστώνεται ξεκάθαρα ότι ο ΥΗΣ παρουσιάζει πολύ χειρότερη δυναμική απόκριση και ικανότητα ρύθμισης συχνότητας συγκριτικά με την εξεταζόμενη μονάδα diesel. Όσον αφορά το μέγεθος της αύξησης φορτίου που μπορούν να αναλάβουν οι τρεις υδροστρόβιλοι χωρίς η συχνότητα να πέσει κάτω από τα 48 Hz, αυτό είναι της τάξης του 12.5% και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 3.4. Δηλαδή οι υδροστρόβιλοι παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, περίπου κατά το ήμισυ συγκριτικά με τις μονάδες diesel και αντίστοιχα μειωμένο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης. Συνεπώς η υποκατάσταση μονάδων diesel από τον ΥΗΣ του ΥΒΣ ενδεχομένως να προκαλέσει τη μείωση των συντελεστών χρησιμοποίησης των υφιστάμενων Α/Π.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της συχνότητας για την ίδια διαταραχή με του Σχήματος 3.4, αλλά για διαφορετικές αρχικές φορτίσεις των υδροστρόβιλων: 25%, 50% και 75% της ονομαστικής τους ισχύος. Από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σχήματος

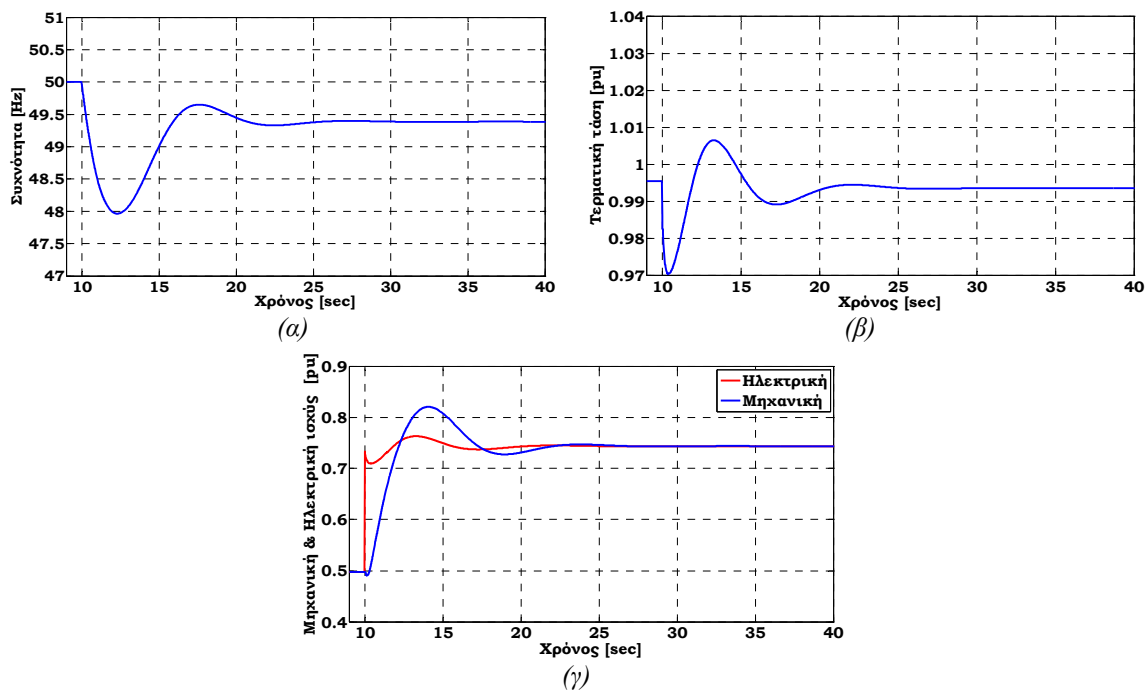
¹¹ Η συχνότητα λειτουργίας των H/N υποσυχνότητας διαφέρει στα διάφορα συστήματα των ΜΔΝ και κυμαίνεται μεταξύ 48 και 49 Hz, ανάλογα με το μέγεθος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων.

διαπιστώνεται ότι η ταχύτητα απόκρισης των υδροστρόβιλων αυξάνεται σε χαμηλότερες φορτίσεις. Αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση τόσο των απωλειών στους αγωγούς προσαγωγής ($\sim k \cdot q^2$) όσο και του όρου απόσβεσης $D \cdot G \cdot \Delta \omega$ που είναι συνάρτηση του ανοίγματος της βελόνης (G) και άρα και της φόρτισης.

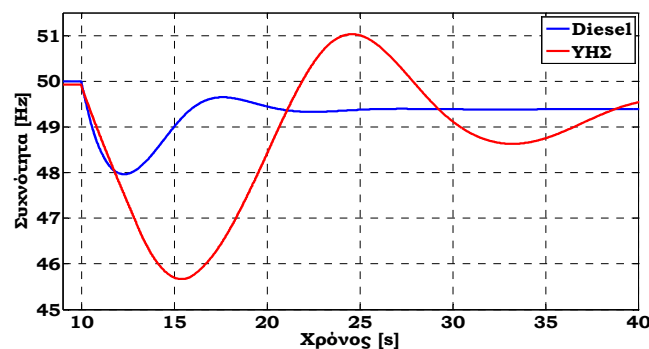
Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται συγκριτικά η μεταβολή της συχνότητας για τις περιπτώσεις που λειτουργούν ένας και τρεις υδροστρόβιλοι αντίστοιχα, για την ίδια ποσοστιαία (ως προς τη συνολική ονομαστική ισχύ των εν λειτουργία υδροστρόβιλων) βηματική αύξηση φορτίου 12.5%. Παρατηρείται ότι η πτώση της συχνότητας είναι μικρότερη στην περίπτωση του ενός υδροστρόβιλου συγκριτικά με τους τρεις, διαφοροποίηση που αποδίδεται στο γεγονός ότι οι τρεις υδροστρόβιλοι του ΥΗΣ διαθέτουν κοινό κύριο αγωγό προσαγωγής, ο οποίος είναι διαστασιολογημένος για ονομαστική παροχή τριών στροβίλων.

Επιπλέον στο Σχήμα 3.7, απεικονίζεται συγκριτικά η επίδραση της σταθεράς αδράνειας στη ρύθμιση συχνότητας, όπου είναι εμφανές ότι μικρότερες αδράνειας έχουν αρνητική επίπτωση στη ρύθμιση συχνότητας που επιτυγχάνουν οι υδροστρόβιλοι.

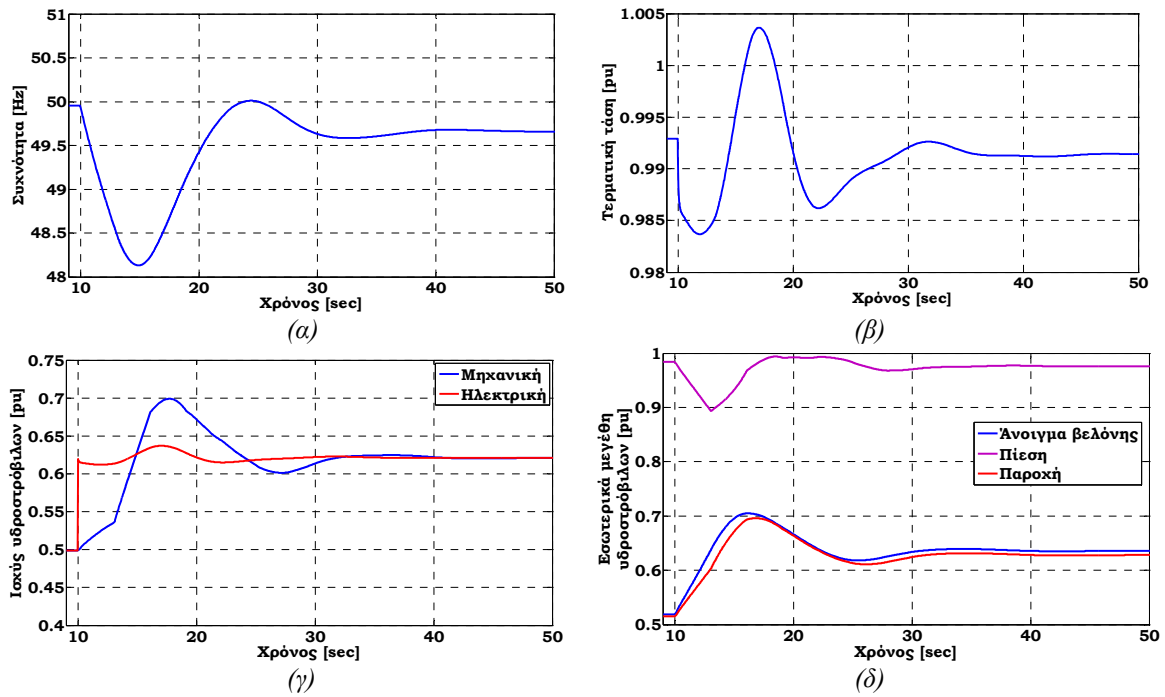
Τέλος, είναι εξεταστέα η βελτίωση που θα μπορούσε να προκύψει στην απόκριση της συχνότητας από ενδεχόμενη χρησιμοποίηση σταθεροποιητή ισχύος (PSS) στις γεννήτριες των υδροστρόβιλων, [88].



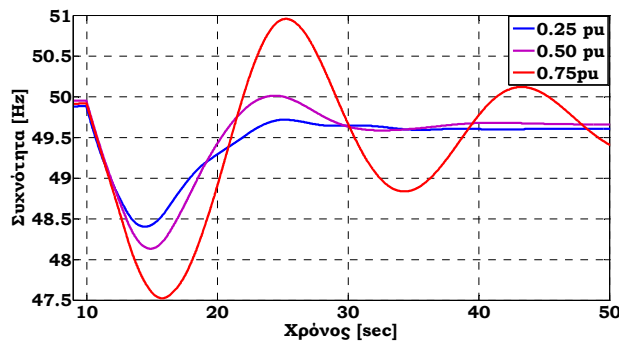
Σχήμα 3.2. Απόκριση μονάδας diesel σε βηματική αύξηση φορτίου ίση με 25% της ονομαστικής της ισχύος. α) Συχνότητα, β) Τερματική τάση γεννήτριας, γ) Μηχανική και ηλεκτρική ισχύς μονάδας diesel.



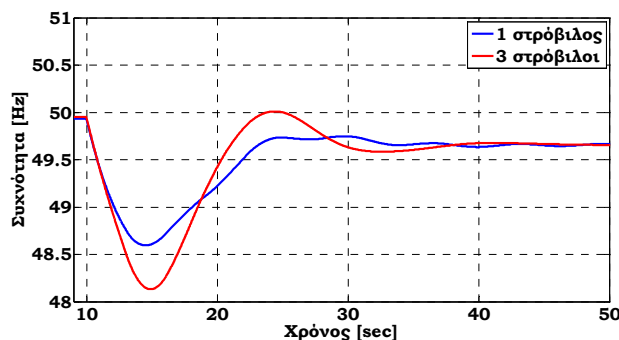
Σχήμα 3.3. Συγκριτική αντιπαράθεση της απόκρισης συχνότητας μιας μονάδας diesel και του ΥΗΣ (3 υδροστρόβιλοι σε λειτουργία) για βηματική αύξηση φορτίου ίση με 25% της ονομαστικής τους ισχύος.



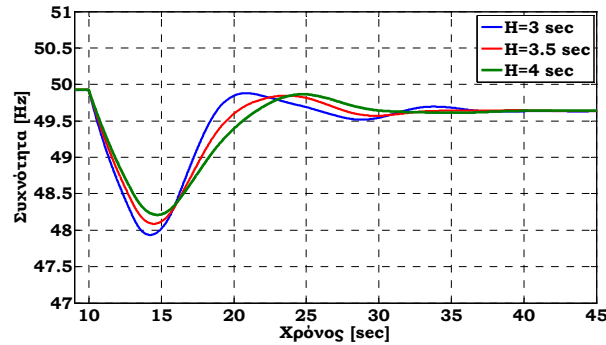
Σχήμα 3.4. Απόκριση των τριών υδροστρόβιλων σε βηματική αύξηση φορτίου ίση με 12.5% της συνολικής ονομαστικής τους ισχύος και για αρχική φόρτιση 0.5 α.μ.. α) Συχνότητα, β) Τερματική τάση γεννήτριας, γ) Ισχύς υδροστρόβιλων, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.



Σχήμα 3.5. Επίδραση της αρχικής φόρτισης των τριών υδροστρόβιλων στην απόκρισή τους, για βηματική αύξηση φορτίου ίση με 12.5% της συνολικής ονομαστικής τους ισχύος.



Σχήμα 3.6. Επίδραση του αριθμού των εν λειτουργία υδροστρόβιλων στην απόκριση του ΥΗΣ, για την ίδια ποσοστιαία βηματική αύξηση φορτίου 12.5%.



Σχήμα 3.7. Επίδραση της σταθεράς αδράνειας στην απόκριση των τριών υδροστροβίλων σε βηματική αύξηση φορτίου ίση με 12.5% της συνολικής ονομαστικής τους ισχύος (αρχική φόρτιση 0.4 α.μ.).

3.3 Διερεύνηση των επιπτώσεων της λειτουργίας των υδροστροβίλων του ΥΒΣ

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η επίδραση της ένταξης και λειτουργίας των υδροστροβίλων του ΥΒΣ στη μεταβατική συμπεριφορά και ευστάθεια του συστήματος ισχύος του ΜΔΝ. Γι' αυτόν το σκοπό προσομοιώνονται διάφορα πιθανά σενάρια που αφορούν είτε την κανονική λειτουργία του συστήματος είτε τις δυσμενέστερες αναμενόμενες διαταραχές, χωρίς και με τους υδροστροβίλους. Συγκεκριμένα, τα σενάρια που προσομοιώνονται είναι τα εξής:

1. Κανονική λειτουργία με σταθερό φορτίο και στοχαστικές διακυμάνσεις της παραγωγής των Α/Π.
2. Απώλεια της μεγαλύτερης μονάδας diesel.
3. Στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς που θα προκαλέσει την άμεση αποσύνδεση όλων των Α/Π εκτός ΥΒΣ, θεωρώντας ότι αυτά δε διαθέτουν ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση (fault ride-through).
4. Απώλεια φορτίου από την απώλεια του ενός Μ/Σ του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ.

Σημειωτέον ότι οι υδροστροβίλοι του ΥΒΣ αναμένεται να εντάσσονται από το ΔΜΔΝ (βάσει της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης του επόμενου κεφαλαίου) στις περιόδους υψηλού και ενδιάμεσου φορτίου. Στα επόμενα παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο για το ενδιάμεσο φορτίο, ως η χειρότερη περίπτωση λόγω της αυξημένης διείσδυσης της ισχύος του ΥΒΣ.

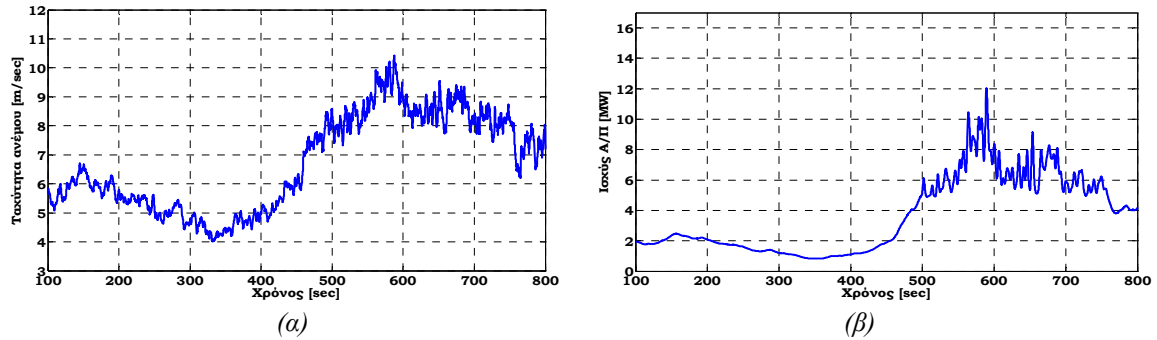
Όσον αφορά την κατανομή των φορτίων στην περίπτωση του ενδιάμεσου φορτίου, θεωρείται ότι οι Μ/Σ των Υ/Σ 1 και 2 φορτίζονται με 8 MW και 12 MW αντίστοιχα και η συνολική ισχύς εξόδου των μονάδων παραγωγής του συστήματος είναι περίπου 41 MW ενώ το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι κοντά στα 40 MW, με τη διαφορά παραγωγής και φορτίου να αντιστοιχεί στις απώλειες του συστήματος μεταφοράς. Το φορτίο θεωρείται σταθερής αντίστασης με συντελεστή ισχύος 0.85 επαγωγικό.

Τα αιολικά και οι αντλίες του ΥΒΣ δε λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση της παρούσας ενότητας. Η υδροαιολική και αντλησιοαιολική συνεργασία θα εξεταστούν στις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου, όπου και θα διερευνηθούν οι επιπτώσεις τους στο σύστημα του υπό εξέταση ΜΔΝ.

3.3.1 Διακυμάνσεις αιολικής παραγωγής

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων του συστήματος του ΜΔΝ στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, θεωρώντας σταθερό φορτίο και μόνη πηγή δια-

ταραχών για το σύστημα τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής. Στην κατάσταση αυτή θεωρείται ότι τηρείται στρεφόμενη εφεδρεία τουλάχιστον ίση με την ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας. Οι χρονοσειρές ανέμου στις διάφορες θέσεις των Α/Π θεωρούνται απόλυτα ταυτοχρονισμένες, παραδοχή ιδιαίτερα δυσμενής για τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Επιλέχθηκε τυχαία χρονοσειρά ανέμου με εύρος τιμών 4-10 m/s, όπου η ισχύς εξόδου του Α/Π εμφανίζει αξιόλογη μεταβλητότητα, [59, 70]. Η συγκεκριμένη χρονοσειρά ανέμου και η αντίστοιχη συνολική παραγωγή από όλα τα Α/Π του συστήματος απεικονίζονται στο Σχήμα 3.8.

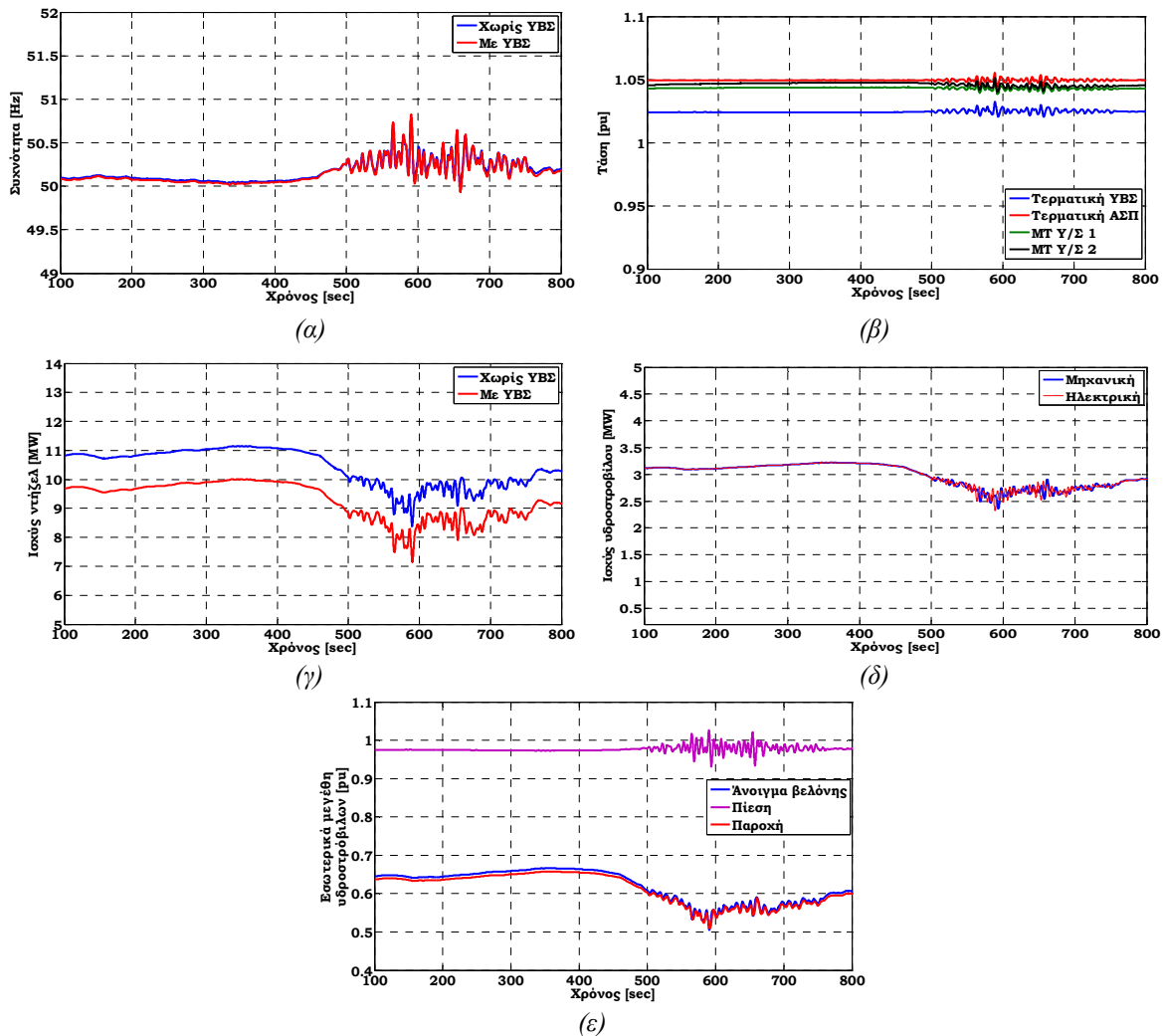


Σχήμα 3.8. α) Η χρονοσειρά ανέμου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, όμοια για όλα τα Α/Π του συστήματος, β) Η συνολική παραγωγή όλων των Α/Π (εκτός ΥΒΣ) του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος του ΜΔΝ, χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, με μόνη πηγή διαταραχών τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9.

Στην περίπτωση που ο ΥΒΣ είναι εκτός, την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων της αιολικής παραγωγής επωμίζονται οι τέσσερις (4) μονάδες diesel των 15 MW που είναι σε λειτουργία, μέσω της συμμετοχής τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις της συχνότητας παρατηρούνται φυσικά στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων ανέμου (άνω των 8 m/s), όπου οι διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής είναι πιο έντονες (βλ. Σχήμα 3.8).

Στην περίπτωση τώρα που στη θέση της τέταρτης μονάδας diesel εντάσσονται οι τρεις υδροστρόβιλοι του ΥΒΣ, η μεταβλητότητα της συχνότητας αυξάνεται ελαφρώς (κυρίως στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων ανέμου) λόγω της μικρότερης ταχύτητας απόκρισης των υδροστρόβιλων σε σχέση με τις μονάδες diesel (βλ. ενότητα 3.2), οι οποίοι τώρα αντιστοιχούν στο 1/3 της συνολικής ικανότητας των ενταγμένων μονάδων. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι παρατηρούμενες μεταβολές της συχνότητας είναι απολύτως αποδεκτές.



Σχήμα 3.9. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ, χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, με μόνη πηγή διαταραχών τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Τάσεις του συστήματος (ίδιες χωρίς και με τον ΥΒΣ), γ) Ισχύς των μονάδων diesel, δ) Ισχύς κάθε υδροστρόβιλου, στ) Εσωτερικά μεγέθη των υδροστρόβιλων.

3.3.2 Απόλεια μονάδας

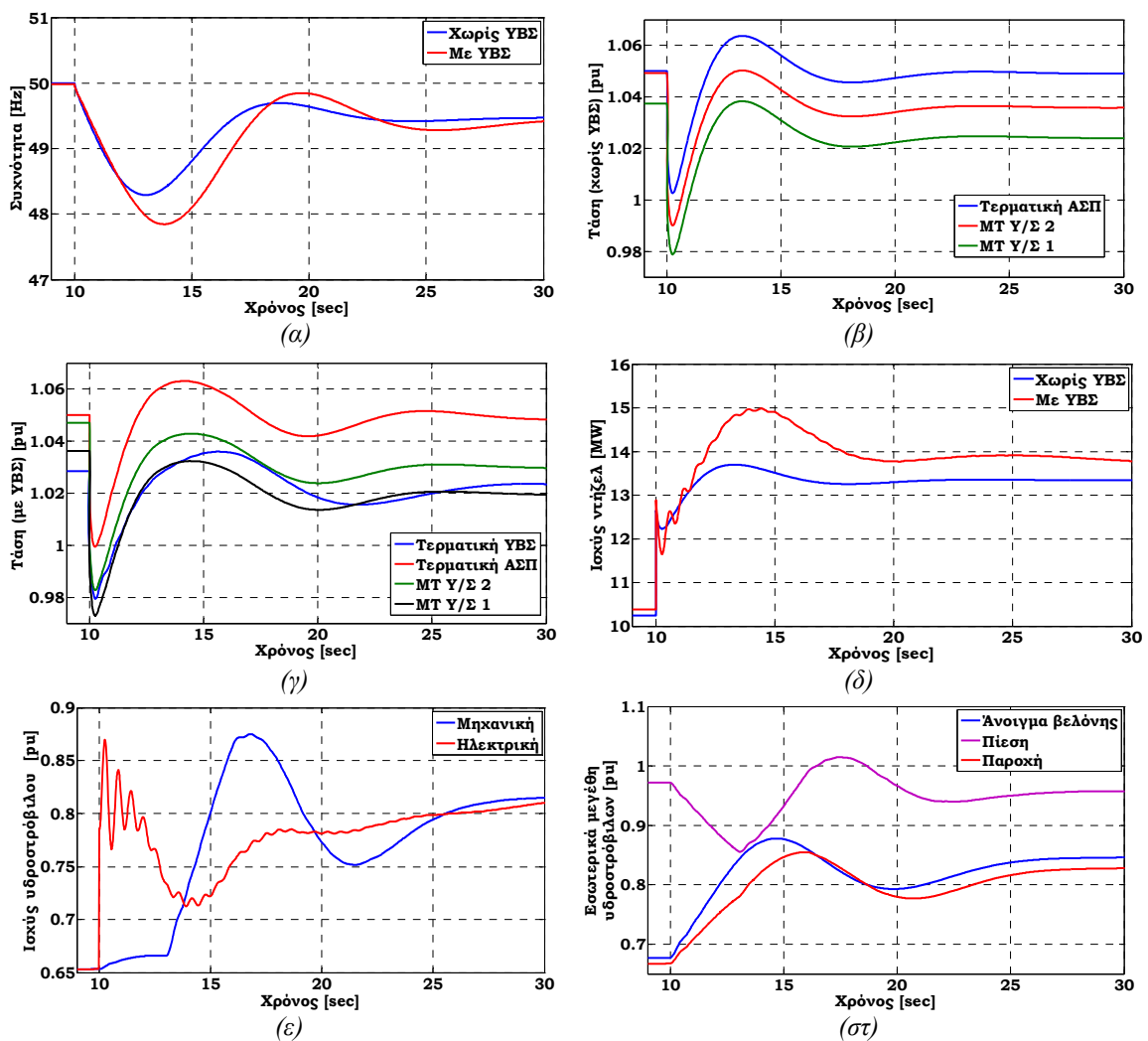
Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η ευστάθεια του συστήματος στην περίπτωση απώλειας της μεγαλύτερης συμβατικής μονάδας παραγωγής. Θεωρείται ότι τηρείται στρεφόμενη εφεδρεία τουλάχιστον ίση με την ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας, ενώ τα αιολικά πάρκα θεωρούνται εκτός λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος του ΜΑΝ για απώλεια μιας μονάδας diesel των 15 MW, χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10.

Στην περίπτωση που ο ΥΒΣ είναι εκτός, το φορτίο εξυπηρετείται από τις τέσσερις πρώτες μονάδες diesel των 15 MW με αρχική φόρτιση στα 10.25 MW. Η απώλεια μιας από τις μονάδες των 15 MW ισοδυναμεί με βηματική αύξηση φορτίου για τις παραμένουσες μονάδες ίση με 23% της ονομαστικής τους ισχύος. Το προκύπτον έλλειμμα παραγωγής συνεπάγεται μείωση της συχνότητας μέχρι οι ρυθμιστές στροφών των μονάδων να αυξήσουν την παραγωγή τους στα επίπεδα της ζήτησης του φορτίου. Το μέγεθος της μείωσης της συχνότητας εξαρτάται τόσο από τις αδράνειες, όσο και από την απόκριση των ρυθμιστών και των στροβίλων. Τελικά η συχνότητα ισορροπεί σε νέα τιμή, χαμηλότερη των 50 Hz, λόγω του μόνιμου στατισμού των ρυθμιστών στροφών. Το σύ-

στημα πάντως καταφέρνει να ανταπεξέλθει στην παραπάνω διαταραχή χωρίς να αποσυγχρονιστεί κάποια μονάδα και χωρίς η συχνότητα να πέσει κάτω από τα 48 Hz, γεγονός που θα προκαλούσε απόρριψη φορτίου από τους Η/Ν υποσυχνότητας.

Στην περίπτωση τώρα που στη θέση της τέταρτης μονάδας diesel εντάσσονται οι τρεις υδροστρόβιλοι του ΥΒΣ, παρατηρείται ότι η συχνότητα μειώνεται περισσότερο λόγω της μικρότερης ταχύτητας απόκρισης των υδροστρόβιλων σε σχέση με τις μονάδες diesel (βλ. ενότητα 3.2), πέφτοντας οριακά κάτω από τα 48 Hz, κάτι που ενδεχομένως θα προκαλέσει τη λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας του συστήματος και άρα μερική απόρριψη φορτίου. Παρ' όλα αυτά, η υπέρβαση του κατωφλίου των 48 Hz είναι οριακή και δεν αξιολογείται ως μη αποδεκτή.

Επίσης παρατηρούνται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ των μονάδων diesel και των υδροστρόβιλων, οι οποίες δε φαίνεται να δημιουργούν πρόβλημα στο σύστημα, αφού δεν προκαλούν αποσυγχρονισμό κάποιας μονάδας παραγωγής ή κίνδυνο ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας τους. Το πλάτος των ταλαντώσεων αυτών θα μπορούσε να περιοριστεί με τη χρήση PSS στους υδροστρόβιλους.



Σχήμα 3.10. Απώλεια μιας μονάδας diesel των 15 MW, χωρίς και με τον ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Τάσεις του συστήματος χωρίς τον ΥΒΣ, γ) Τάσεις του συστήματος με τον ΥΒΣ, δ) Ισχύς των μονάδων diesel, ε) Ισχύς κάθε υδροστρόβιλου, στ) Εσωτερικά μεγέθη των υδροστρόβιλων.

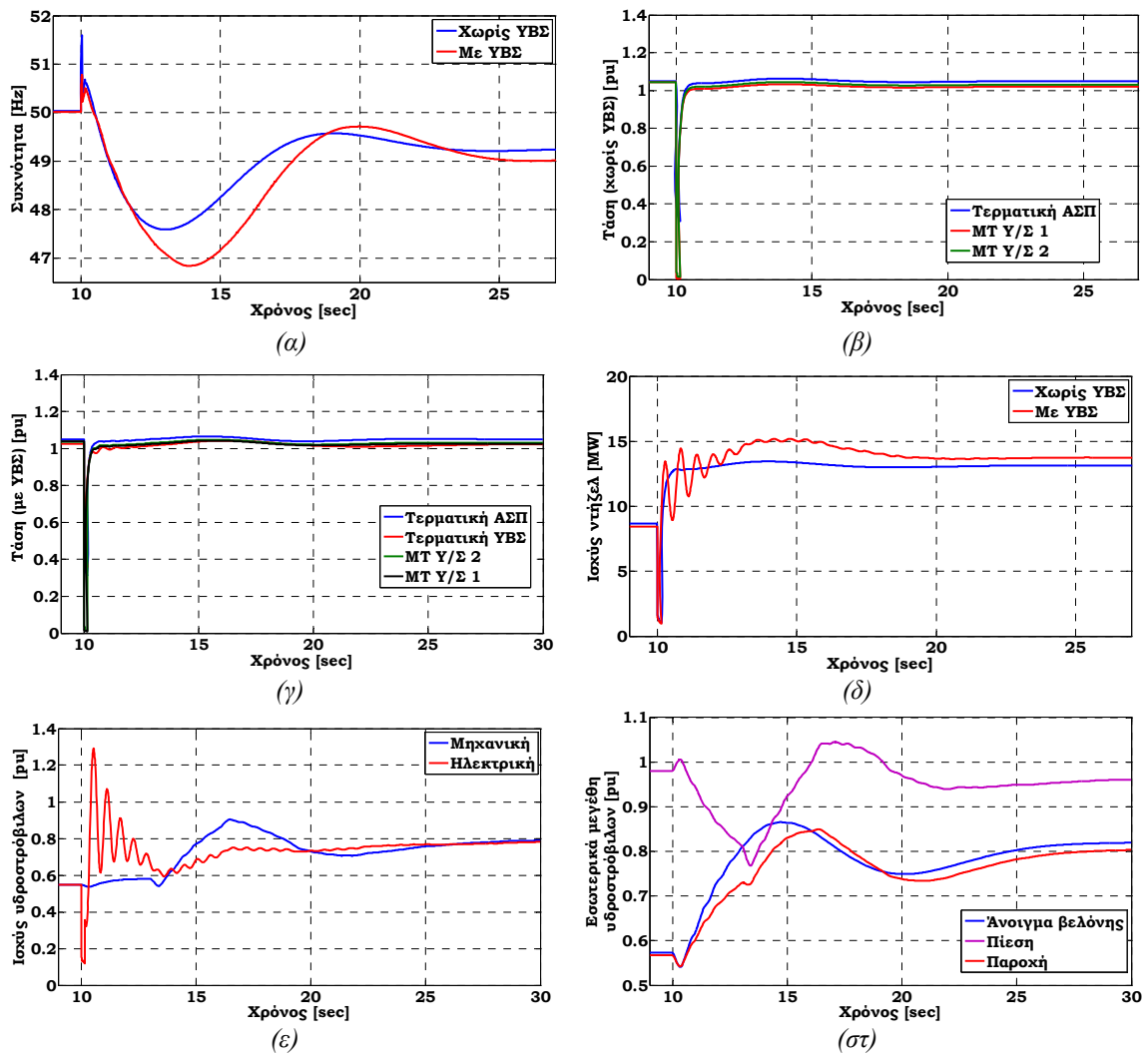
3.3.3 Στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η ευστάθεια του συστήματος σε περίπτωση στέρεου τριφασικού βραχυκυκλώματος στο σύστημα μεταφοράς, υπό συνθήκες υψηλής αιολικής παραγωγής όπου τα Α/Π παράγουν την ονομαστική τους ισχύ, ώστε να εξεταστεί η δυσμενέστερη για την ευστάθεια του συστήματος διαταραχή. Θεωρείται ότι τηρείται στρεφόμενη εφεδρεία από το σύστημα τουλάχιστον ίση με την αιολική παραγωγή, συν ένα πρόσθετο ποσοστό 10% επί της ισχύος του φορτίου. Το στέρεο βραχυκύκλωμα επιβάλλεται στο μέσο της γραμμής ΥΤ που συνδέει τον ΑΣΠ με τον Υ/Σ 1. Λόγω της μεγάλης βύθισης τάσης προκαλείται η άμεση αποσύνδεση (σε 100 ms) όλων των Α/Π του συστήματος, οι Α/Γ των οποίων θεωρείται ότι δε διαθέτουν ικανότητα FRT. Οι Δ/Ι εκατέρωθεν της γραμμής ΥΤ εκκαθαρίζουν το σφάλμα, θέτοντας εκτός τη γραμμή σε χρόνο 150 ms. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος του ΜΔΝ για στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς του νησιού, χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11.

Στην περίπτωση που ο ΥΒΣ είναι εκτός, το φορτίο εξυπηρετείται από τις τρεις πρώτες μονάδες diesel των 15 MW με αρχική φόρτιση 8.7 MW και τα Α/Π του συστήματος που παράγουν την ονομαστική ισχύ τους (συνολικά 14.5 MW). Με την εκδήλωση του σφάλματος, οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος βυθίζονται (διάγραμμα 3.11(β)) και οι γεννήτριες υπερταχύνονται, με το μέγεθος της αύξησης της συχνότητας στο χρονικό διάστημα μέχρι την ενεργοποίηση των προστασιών της γραμμής ΥΤ να εξαρτάται κυρίως από τις αδράνειες των μονάδων παραγωγής, καθώς η μηχανική τους ισχύ δεν προλαβαίνει να μεταβληθεί. Στη συνέχεια, όταν εκκαθαρίζεται το σφάλμα και έχουν αποσυνδεθεί τα Α/Π, δημιουργείται έλλειμμα παραγωγής που είναι της τάξης του 32% της ονομαστικής ισχύος των παραμένουσων μονάδων, με αποτέλεσμα η συχνότητα να μειώνεται μέχρι οι ρυθμιστές στροφών των μονάδων να αυξήσουν την παραγωγή τους στα επίπεδα της ζήτησης φορτίου. Το μέγεθος της μείωσης της συχνότητας εξαρτάται τόσο από τις αδράνειες όσο και από την απόκριση των ρυθμιστών και των κινητήρων. Στην προκειμένη περίπτωση η μείωση της συχνότητας είναι σημαντική, καθώς η διείσδυση των αιολικών στο σύστημα ήταν αρκετά υψηλή πριν από το βραχυκύκλωμα. Μάλιστα η ελάχιστη τιμή της συχνότητας πέφτει κάτω από τα 48 Hz, γεγονός που θα προκαλέσει τη λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας οδηγώντας σε μερική απόρριψη φορτίου. Αν αυτό δεν κρίνεται αποδεκτό από το ΔΜΔΝ, θα πρέπει να επιβληθούν περιοχές ισχύος στα Α/Π του συστήματος, ώστε σε ενδεχόμενη ολική απώλεια των Α/Π, το σύστημα να ανταπεξέλθει χωρίς απόρριψη φορτίου.

Στην περίπτωση τώρα που στη θέση της τρίτης μονάδας diesel εντάσσονται οι τρεις υδροστρόβιλοι του ΥΒΣ, παρατηρείται ότι η συχνότητα μειώνεται πολύ περισσότερο, κάτω και από τα 47 Hz, λόγω της αρκετά μικρότερης ταχύτητας απόκρισης των υδροστρόβιλων σε σχέση με τις μονάδες diesel. Για την αποφυγή μιας τέτοιας κατάστασης όταν οι υδροστρόβιλοι εντάσσονται για παραγωγή σε συνθήκες ενδιάμεσου φορτίου, η οποία θα προκαλούσε σημαντική απόρριψη φορτίου από την προστασία υποσυχνότητας του συστήματος, τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης στο σύστημα θα πρέπει να περιορίζονται σημαντικά, σε τιμές περί το 15-20% του φορτίου. Το γεγονός αυτό θα έχει οπωσδήποτε επίπτωση στις ΣΑΩΛ των Α/Π, η οποία είναι εξεταστέο κατά πόσο αντισταθμίζεται από τα χαμηλότερα τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων.

Επιπλέον παρατηρούνται αυξημένες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ των μονάδων παραγωγής στην περίπτωση που λειτουργούν και οι υδροστρόβιλοι, καθώς ο ΑΣΠ και ο ΥΒΣ σχηματίζουν ένα απομακρυσμένο δίπολο παραγωγής (ιδιαίτερα μετά την απώλεια της γραμμής ΥΤ που συνδέει άμεσα τον ΑΣΠ με τον ΥΒΣ) το οποίο διεγείρεται από τις απότομες διαταραχές του συστήματος.



Σχήμα 3.11. Στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς του νησιού, χωρίς και με τον ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Τάσεις του συστήματος χωρίς τον ΥΒΣ, γ) Τάσεις του συστήματος με τον ΥΒΣ, δ) Ισχύς των μονάδων diesel, ε) Ισχύς κάθε υδροστρόβιλου, στ) Εσωτερικά μεγέθη των υδροστρόβιλων.

3.3.4 Απόλεια φορτίου

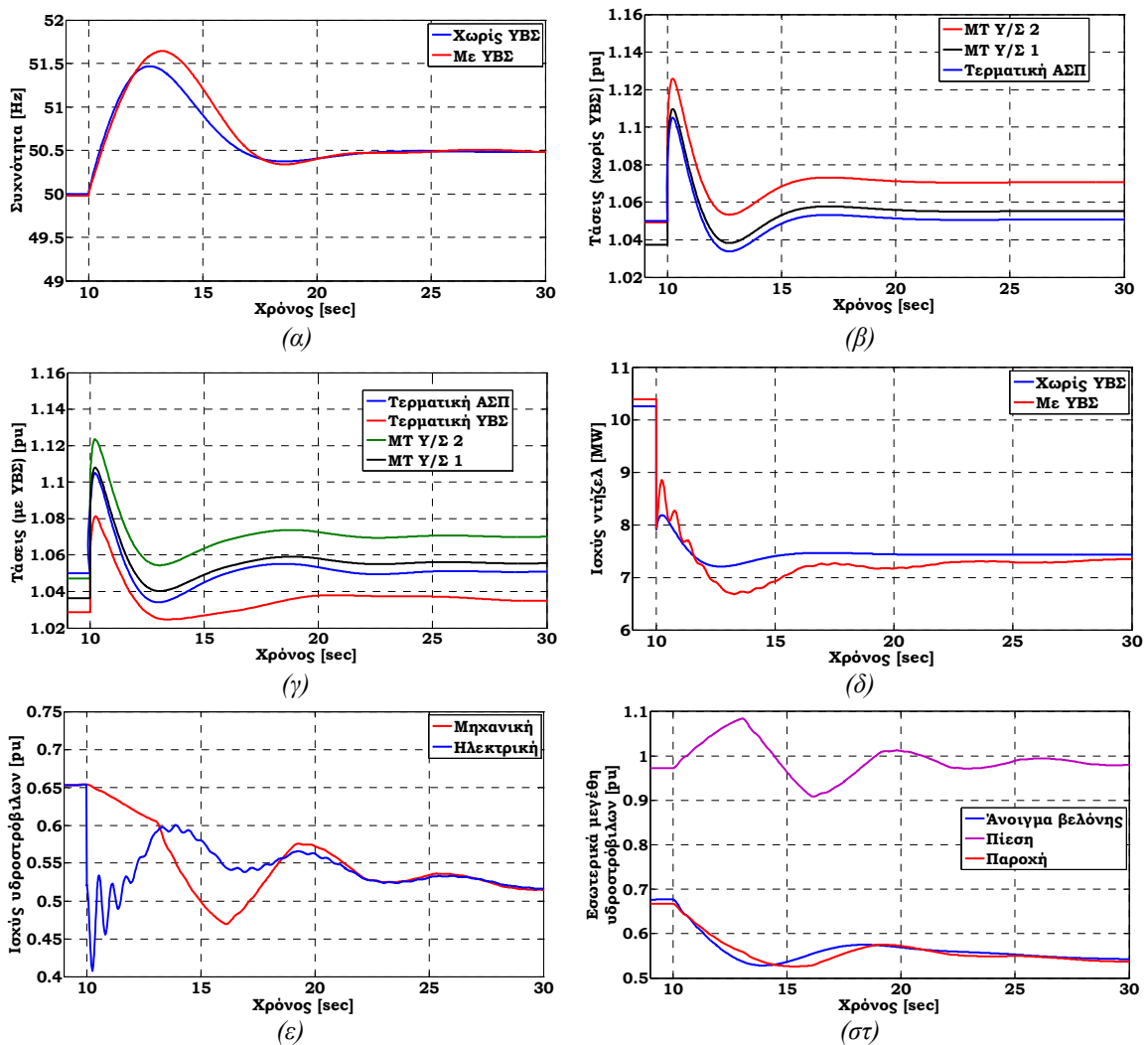
Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος σε περίπτωση βηματικής απώλειας φορτίου. Δυσμενέστερη περίπτωση θεωρείται η απώλεια ενός Μ/Σ του Υ/Σ 2 που είναι και ο πιο φορτισμένος. Το ακραίο σενάριο της απώλειας ολόκληρου του Υ/Σ 2 δεν εξετάζεται στην παρούσα ανάλυση καθώς θεωρείται γεγονός με αμελητέα πιθανότητα να συμβεί. Επίσης θεωρείται ότι τηρείται στρεφόμενη εφεδρεία τουλάχιστον ίση με την ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας, ενώ τα Α/Π θεωρούνται εκτός ως δυσμενέστερη περίπτωση, καθώς ενδεχόμενη απώλεια της αιολικής παραγωγής λόγω ενεργοποίησης της προστασίας υπερσυχνότητας θα αντιστάθμιζε την απώλεια φορτίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος του ΜΔΝ για απώλεια του ενός Μ/Σ του Υ/Σ 2, χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12.

Στην περίπτωση που ο ΥΒΣ είναι εκτός, το φορτίο εξυπηρετείται από τέσσερις (4) μονάδες diesel με τις ίδιες αρχικές φορτίσεις που αναφέρονται και στην §3.3.2. Η απώλεια του ενός Μ/Σ του Υ/Σ 2 φορτισμένου στα 12 MW περίπου, αποτελεί βηματική μείωση φορτίου για τις ενταγμένες μονάδες της τάξης του 20% της ονομαστικής τους ισχύος. Η περίσσεια παραγωγής μετά την απώλεια του Μ/Σ προκαλεί αύξηση της συχνότητας μέχρι οι ρυθμιστές στροφών των μονάδων να μειώσουν την παραγωγή τους στα επίπεδα της ζήτησης. Στη συνέχεια η συχνότητα ισορροπεί σε

μια νέα τιμή, υψηλότερη των 50 Hz, λόγω του μόνιμου στατισμού των ρυθμιστών. Επίσης παρατηρούνται υπερτάσεις στο σύστημα, το μέγεθος και η διάρκεια των οποίων όμως δεν κρίνεται απαγορευτική.

Στην περίπτωση τώρα που στη θέση της τέταρτης μονάδας diesel εντάσσονται οι τρεις υδροστρόβιλοι του ΥΒΣ, προκύπτει ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση της συχνότητας λόγω της χειρότερης δυναμικής απόκρισης του ΥΗΣ. Μάλιστα η συχνότητα υπερβαίνει για λίγα δευτερόλεπτα την κρίσιμη τιμή των 51.5 Hz που συνήθως τίθεται σαν όριο υπερσυχνότητας στους Αυτόματους Διακόπτες Διασύνδεσης (ΑΔΔ) των Α/Π, γεγονός που θα συνεπαγόταν την αποσύνδεση όλων των Α/Π του συστήματος εάν αυτά ήταν σε λειτουργία, με θετική επίπτωση στη μεταβολή της συχνότητας. Πάντως η απώλεια ενός Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ αποτελεί διαταραχή με μικρή πιθανότητα εμφάνισης. Αντίθετα συχνές είναι οι απορρίψεις φορτίου λόγω απώλειας κάποιας γραμμής Μ.Τ., που όμως συνιστούν μικρές διαταραχές με όχι σημαντική επίπτωση στη συχνότητα.

Αξίζει σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι η προσομοίωση της απόκρισης των υδροστρόβιλων Pelton σε απόρριψη φορτίου δεν είναι πλήρης, καθώς αγνοεί την πιθανή ενεργοποίηση των ονύχων εκτροπής της δέσμης νερού, γεγονός που αναμένεται να οδηγεί σε αποτελεσματικότερο περιορισμό ισχύος και άρα βελτιωμένη απόκριση της συχνότητας.



Σχήμα 3.12. Απώλεια του ενός Μ/Σ του Υ/Σ 2, χωρίς και με τον ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Τάσεις του συστήματος χωρίς τον ΥΒΣ, γ) Τάσεις του συστήματος με τον ΥΒΣ, δ) Ισχύεις των μονάδων diesel, ε) Ισχύς κάθε υδροστρόβιλου, ζ) Εσωτερικά μεγέθη των υδροστρόβιλων.

3.4 Διερεύνηση των επιπτώσεων της υποκατάστασης υδραυλικής παραγωγής από αιολική εντός του ΥΒΣ

Με βάση το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο είναι αποδεκτή η υδροαιολική συνεργασία, δηλαδή η υποκατάσταση μέρους της παραγωγής των υδροστρόβιλων από την παραγόμενη ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ για την κάλυψη της συνολικής προγραμματισμένης ισχύος παραγωγής του ΥΒΣ. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται ο βαθμός και οι τεχνικές προϋποθέσεις υπό τις οποίες αυτό είναι εφικτό. Συγκεκριμένα, αρχικά διερευνώνται οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν στους ρυθμιστές στροφών των υδροστρόβιλων για την επίτευξη της υδροαιολικής συνεργασίας και ακολούθως εξετάζονται οι επιπτώσεις από αυτή την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα του υπό εξέταση ΜΔΝ.

3.4.1 Τροποποιήσεις στους ρυθμιστές στροφών των υδροστρόβιλων για την επίτευξη της υδροαιολικής συνεργασίας

Η υδροαιολική συνεργασία προϋποθέτει καταρχάς ότι οι υδροστρόβιλοι (μονάδες ελεγχόμενης παραγωγής) θα παρακολουθούν τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής (κατά βάση μη ελεγχόμενη παραγωγή) του ΥΒΣ, έτσι ώστε η συνολική παραγόμενη ισχύς από τον ΥΒΣ να παραμένει κατά το δυνατόν σταθερή και ίση με την ισχύ κατανομής του σταθμού¹², όπως αυτή εκφράζεται από το σχετικό σήμα (P_{AGC}) από το AGC του νησιού. Δηλαδή θα πρέπει ο συνδυασμός ΥΗΣ-Α/Π του ΥΒΣ να λειτουργεί ως ενιαία κατανεμόμενη μονάδα παραγωγής, η οποία θα παράγει κατά το δυνατόν σταθερή συνολική ισχύ (ίση με P_{AGC}).

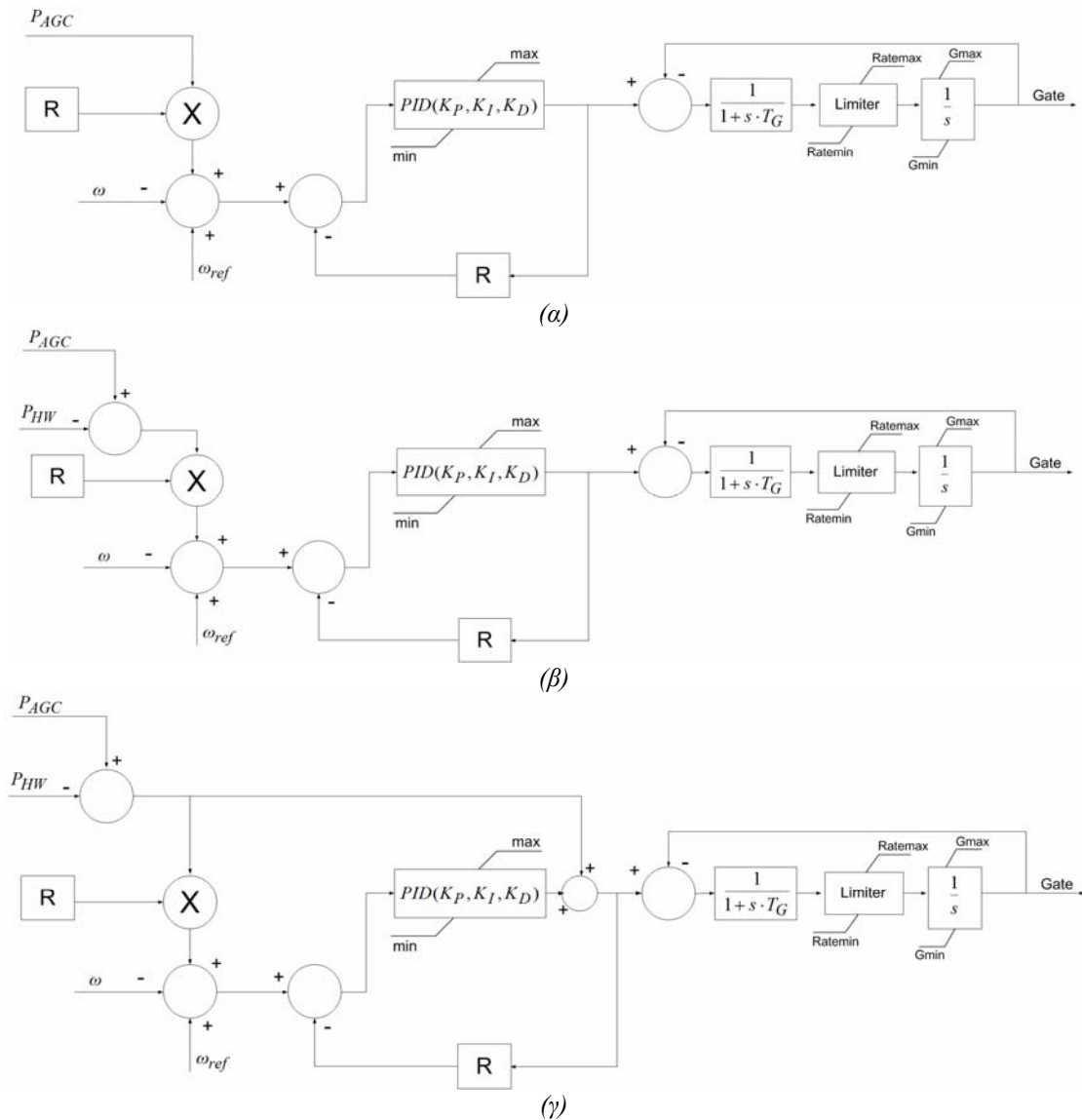
Στη συνέχεια παρατίθενται τρεις εναλλακτικές υλοποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.13 και περιλαμβάνουν διαφορετικές διαμορφώσεις του ρυθμιστή στροφών των υδροστρόβιλων. Από τους τρεις τρόπους, ο πρώτος ουσιαστικά δεν υλοποιεί την υδροαιολική συνεργασία εντός του ΥΒΣ αλλά παρατίθεται απλώς ως βασικό σενάριο για σύγκριση με τους δύο επόμενους σχετικά με τις επιπτώσεις της υδροαιολικής συνεργασίας στη συχνότητα.

1. Ο ρυθμιστής στροφών κάθε υδροστρόβιλου λαμβάνει set-point φόρτισης που αντιστοιχεί στην τιμή επιθυμητής ισχύος (P_{AGC}) από το AGC του νησιού¹³ (Σχήμα 3.13 (α)). Οι υδροστρόβιλοι παρακολουθούν τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ μέσω της πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας που πραγματοποιούν, αντιμετωπίζουν δηλαδή το Α/Π του ΥΒΣ όπως τα εκτός ΥΒΣ αιολικά του νησιού. Ουσιαστικά αυτός ο τρόπος δεν υλοποιεί την υδροαιολική συνεργασία εντός του ΥΒΣ, καθώς στη μόνιμη κατάσταση η ισχύς κατανομής P_{AGC} παράγεται μόνο από τους υδροστρόβιλους.
2. Οι ρυθμιστές των υδροστρόβιλων παίρνουν set-point φόρτισης ίσο με την τιμή ισχύος P_{AGC} μείον την εκάστοτε ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ (P_{HW}). Η διαφορά των δύο σημάτων (κανονικοποιημένη ως προς την ονομαστική ισχύ των υδροστρόβιλων), αφού πολλαπλασιαστεί με το μόνιμο στατισμό (R) του ρυθμιστή, προστίθεται στο σφάλμα $\Delta\omega$ (Σχήμα 3.13 (β)). Με αυτόν τον τρόπο οι υδροστρόβιλοι επιδιώκουν να παρακολουθούν τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ, όχι μόνο έμμεσα μέσω της μετρούμενης συχνότητας αλλά και άμεσα μέσω αλλαγής του set-point φόρτισης.

¹² Υπό συνθήκες βέβαια σταθερού φορτίου, οπότε δεν απαιτείται απόκλιση της συνολικά παραγόμενης ισχύος του ΥΒΣ από την κατανεμόμενη, P_{AGC} , λόγω συμμετοχής στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

¹³ Έχει θεωρηθεί ότι οι α.μ. τιμές ισχύος και ανοίγματος βελόνης συμπίπτουν (βλ. §2.3.2), γι' αυτό τα set-points ισχύος δίνονται απ' ευθείας στον ρυθμιστή, χωρίς την παρεμβολή κάποιας βαθμίδας μετασχηματισμού. Επειδή όμως η θεώρηση αυτή είναι προσεγγιστική, στα επόμενα αποτελέσματα παρατηρείται μια ελαφρά απόκλιση της παραγόμενης ισχύος του ΥΒΣ από το P_{AGC} ακόμα και όταν η συχνότητα είναι ίση με 50 Hz. Αυτό δεν αλλάζει σε τίποτα την ουσία των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα σχετικά με την επίτευξη της υδροαιολικής συνεργασίας και τις επιπτώσεις της στο σύστημα.

3. Ότι και στην υλοποίηση (2), αλλά επιπλέον η διαφορά των σημάτων ($P_{AGC} - P_{HW}$) προστίθεται και στην έξοδο του ελεγκτή PID, πριν από την ανάδραση του στατισμού (Σχήμα 3.13 (γ)). Πρόκειται δηλαδή για υλοποίηση ελεγκτή πρόσω τροφοδότησης (feedforward controller, [61]) με σκοπό την ταχύτερη απόκριση του ρυθμιστή στις αλλαγές των set-points. Εφαρμόζεται κυρίως στις περιπτώσεις υδροστρόβιλων που είναι συγχρονισμένοι σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, με σκοπό να ακολουθούν γρήγορα τις εντολές κατανομής του κέντρου ελέγχου, παρακάμπτοντας τον αρκετά πιο αργό ελεγκτή PID. Η ευστάθεια των στροφών τους εξασφαλίζεται μέσω της διασύνδεσής τους με το ισχυρό σύστημα. Σε περίπτωση όμως απομονωμένης ή νησιδοποιημένης λειτουργίας, η πρόσω τροφοδότηση απενεργοποιείται, για την αποφυγή ανεπιθύμητων διαταραχών στη ρύθμιση συχνότητας.



Σχήμα 3.13. Εναλλακτικές διαμορφώσεις του ρυθμιστή στροφών του υδροστρόβιλου, οι οποίες εξετάζονται στο πλαίσιο της διερεύνησης της υδροαιολικής συνεργασίας. α) Set-point φόρτισης ίσο με P_{AGC} , β) Set-point φόρτισης ίσο με $P_{AGC} - P_{HW}$, γ) Set-point φόρτισης ίσο με $P_{AGC} - P_{HW}$ και επιπλέον πρόσω τροφοδότηση του σήματος αυτού στην έξοδο του ελεγκτή PID, πριν από την ανάδραση του στατισμού.

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι τρεις παραπάνω υλοποιήσεις, πραγματοποιείται προσομοίωση του ΥΒΣ σε απομονωμένη λειτουργία με σταθερό φορτίο έστω 10 MW. Το set-point παραγόμενης ισχύος του ΥΒΣ είναι επίσης 10 MW. Θεωρείται ότι είναι εντός και οι τρεις υδροστρόβιλοι ισοφορτισμένοι, κατάσταση βέλτιστη από άποψη ρύθμισης συχνότητας. Στην περίπτωση της

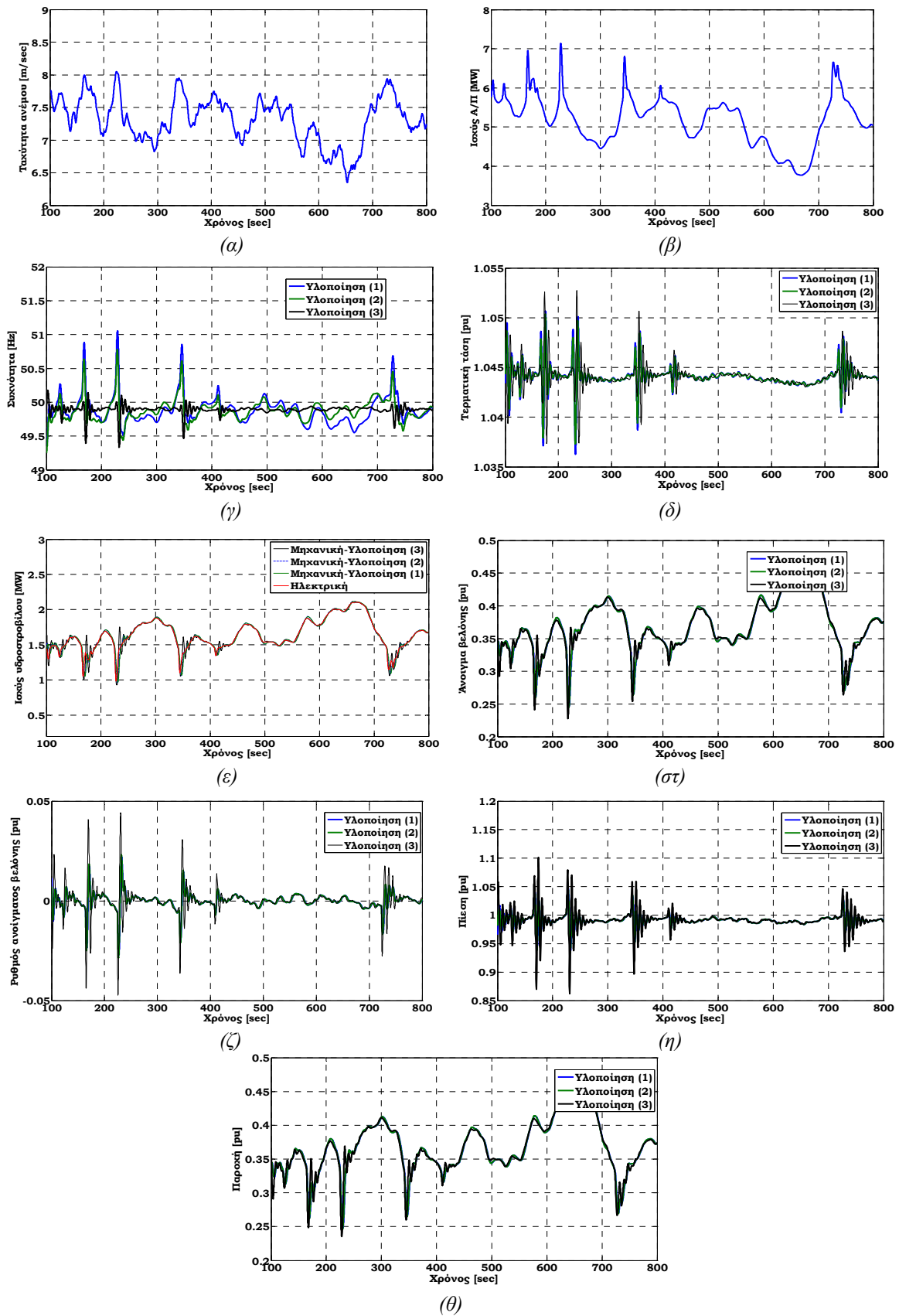
υλοποίησης (1) το set-point στους ρυθμιστές των υδροστρόβιλων είναι ίσο με $P_{AGC}=10/15=0.67$ α.μ., ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις είναι ίσο με $P_{AGC} - (P_{HW}/15)^{14}$.

Αρχικά προσομοιώνεται η απόκριση του απομονωμένου συστήματος για σταθερό φορτίο και τυχαία χρονοσειρά ανέμου μέσω των ταχυτήτων, [70], για την οποία η μέση τιμή της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ είναι περίπου 5 MW. Μόνη διαταραχή στο σύστημα αποτελεί η διακύμανση της αιολικής παραγωγής, η οποία θα πρέπει να αντισταθμίζεται κατά το δυνατόν από τους υδροστρόβιλους ώστε να περιορίζονται οι διαταραχές στη συχνότητα.

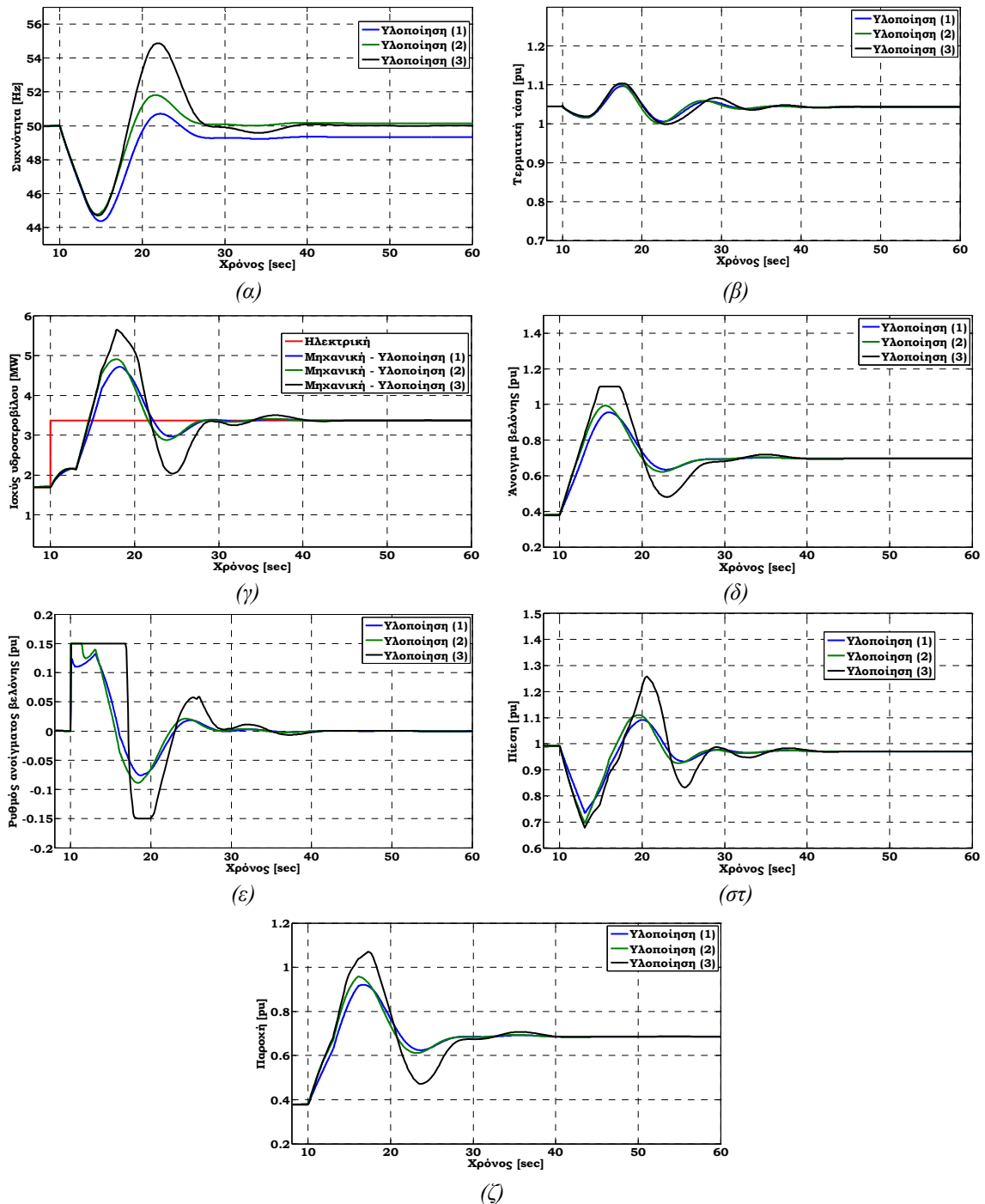
Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.14 διαπιστώνεται ότι με την υλοποίηση (2) οι διακυμάνσεις της συχνότητας είναι μικρότερες συγκριτικά με την υλοποίηση (1), γεγονός αναμενόμενο αφού η ρύθμιση της ισχύος των υδροστρόβιλων συναρτήσει της αιολικής παραγωγής γίνεται όχι μόνο μέσω της προκαλούμενης μεταβολής της συχνότητας, όπως στην υλοποίηση (1), αλλά και μέσω άμεσης μεταβολής του set-point φόρτισης. Από την άλλη, με την προσθήκη και της πρόσθιας τροφοδότησης (υλοποίηση (3)) μειώνεται το εύρος της διακύμανσης συχνότητας αλλά προστίθενται υψίσυχνες διαταραχές, καθώς οι μεταβολές της αιολικής παραγωγής εισάγουν μέσω της πρόσθιας τροφοδότησης αντίστοιχες μεταβολές στο άνοιγμα της βελόνης, οι οποίες προκαλούν μεταβατικά στην πίεση και τη μηχανική ισχύ που αποτυπώνονται και στη συχνότητα και τα οποία προκαλούν καταπόνηση στο μηχανολογικό εξοπλισμό του ΥΗΣ. Επιπλέον, παρότι το άνοιγμα της βελόνης προσαρμόζεται άμεσα στις τιμές που σε μόνιμη κατάσταση αντιστοιχούν στις επιθυμητές ισχύεις υδροστρόβιλων προκειμένου να αντισταθμίζονται οι διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής, εντούτοις η ισχύς δεν προσαρμόζεται άμεσα αλλά εμφανίζει καθυστέρηση της τάξης του χρόνου εκκίνησης ύδατος (T_w), ενώ παράλληλα προκαλούνται και κυματικά φαινόμενα λόγω των απότομων μεταβολών στο άνοιγμα της βελόνης. Γενικότερα πάντως, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι η υδροαιολική συνεργασία προκαλεί διακυμάνσεις στη συχνότητα, γεγονός αναμενόμενο βάσει και των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων, καθώς οι υδροστρόβιλοι δεν έχουν την απαιτούμενη ταχύτητα απόκρισης που χρειάζεται για να ακολουθούν πλήρως τις ταχείες διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής.

Στη συνέχεια προσομοιώνεται η απόκριση του ίδιου συστήματος για απότομη απώλεια της αιολικής παραγωγής. Από το Σχήμα 3.15 διαπιστώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι αποκλίσεις της συχνότητας είναι αρκετά μεγάλες, ενδεικτικό της χαμηλής ταχύτητας απόκρισης των υδροστρόβιλων. Πάντως με την υλοποίηση (2) επιτυγχάνεται μικρότερη πτώση συχνότητας συγκριτικά με την υλοποίηση (1) και επίσης στη μόνιμη κατάσταση η συχνότητα επιστρέφει στα 50 Hz, καθώς το set-point φόρτισης των υδροστρόβιλων ενσωματώνει τις μεταβολές της αιολικής παραγωγής. Όσον αφορά την υλοποίηση (3), η πτώση συχνότητας είναι παρόμοια με την υλοποίηση (2), καθώς αρχικά η ταχύτητα ανοίγματος της βελόνης περιορίζεται από τον περιοριστή ρυθμού. Στη συνέχεια όμως παρουσιάζει χειρότερη μεταβατική συμπεριφορά προκαλώντας σημαντική υπερσυχνότητα.

¹⁴ Ο αριθμός 15 με τον οποίο διαιρούνται οι διάφορες ισχύεις αποτελεί την ονομαστική ισχύ του ΥΗΣ του ΥΒΣ.



Σχήμα 3.14. Απόκριση του ΥΒΣ σε απομονωμένη λειτουργία υπό σταθερό φορτίο και χρονοσειρά στοχαστικού ανέμου μέσων ταχυτήτων, για τις τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις του set-point φόρτισης στους ρυθμιστές στροφών. α) Χρονοσειρά ανέμου, β) Ισχύς Α/Π ΥΒΣ, γ) Συχνότητα του απομονωμένου συστήματος, δ) Τερματική τάση ΥΒΣ, ε) Ισχύς υδροστρόβιλου, στ) Άνοιγμα βελόνης των υδροστρόβιλων, ζ) Ρυθμός ανοίγματος βελόνης, η) Πίεση στην είσοδο των υδροστρόβιλων, θ) Παροχή στον κάθε υδροστρόβιλο.



Σχήμα 3.15. Απόκριση του ΥΒΣ (σε απομονωμένη λειτουργία υπό σταθερό φορτίο) σε απότομη απώλεια 5 MW αιολικής παραγωγής, για τις τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις του set-point φόρτισης στους ρυθμιστές στροφών. α) Συχνότητα του απομονωμένου συστήματος, β) Τερματική τάση ΥΒΣ, γ) Ισχύς υδροστρόβιλου, δ) Άνοιγμα βελόνης των υδροστρόβιλων, ε) Ρυθμός ανοίγματος βελόνης, στ) Πίεση στην είσοδο των υδροστρόβιλων, ζ) Παροχή στον κάθε υδροστρόβιλο.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υλοποίηση (2) είναι η καταλληλότερη για το ρυθμιστή στροφών του υδροστρόβιλου για την επίτευξη της υδροαιολικής συνεργασίας. Αυτό γιατί πλεονεκτεί τόσο έναντι της (1) (που ούτως ή άλλως δεν υλοποιεί την υδροαιολική συνεργασία) καθώς επιτυγχάνει μικρότερες διακυμάνσεις συχνότητας, όσο και έναντι της (3) διότι παρουσιάζει καλύτερη μεταβατική συμπεριφορά με μικρότερες καταπονήσεις του μηχανολογικού εξοπλισμού του ΥΗΣ. Συνεπώς η υλοποίηση (2) είναι αυτή που τελικά υιοθετείται σε όλες τις επόμενες προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στις επόμενες παραγράφους.

Γενικότερα πάντως, διαπιστώνεται ότι οι υδροστρόβιλοι δεν έχουν την απαιτούμενη ταχύτητα απόκρισης ώστε να παρακολουθούν τις μεταβολές της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ. Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για να επιτραπεί η υδροαιολική συνεργασία από το ΔΜΔΝ είναι το Α/Π του ΥΒΣ να παρέχει λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας (βλ. §2.4.4), τις οποίες σύμφωνα με τους κατασκευαστές μπορούν να παρέχουν οι σύγχρονες Α/Γ τελευταίας τεχνολογίας. Ο βαθμός στον οποίο αυτές οι δυνατότητες μπορούν να βελτιώσουν την υδροαιολική συνεργασία και οι γενικότερες επιπτώσεις της στο συνολικό σύστημα ισχύος για τα διάφορα σενάρια λειτουργίας, θα εξεταστούν λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα.

3.4.2 Επιπτώσεις της υδροαιολικής συνεργασίας στο σύστημα του ΜΔΝ

Στην παρούσα ενότητα διερευνώνται εκτενώς οι επιπτώσεις της υδροαιολικής συνεργασίας στην ευστάθεια του συστήματος του ΜΔΝ μέσω προσομοιώσεων διαφόρων σεναρίων λειτουργίας. Παράλληλα εξετάζεται κατά πόσο η ικανότητα των Α/Γ του ΥΒΣ να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας μπορεί να συνεισφέρει θετικά στο σύστημα.

Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων, οι οποίες αφορούν την πλέον δυσμενή κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή ενδιάμεσο φορτίο και σημαντική διείσδυση ισχύος των υδροστρόβιλων του ΥΒΣ. Οι προσομοιώσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ χωρίς τα Α/Π εκτός ΥΒΣ, με μοναδική πηγή διαταραχών το Α/Π του ΥΒΣ.
2. Προσομοιώσεις του συστήματος του ΜΔΝ με όλα τα Α/Π, εντός και εκτός ΥΒΣ, σε λειτουργία.
3. Προσομοιώσεις του συστήματος του ΜΔΝ για ισχυρά βραχυκυκλώματα που οδηγούν σε απώλεια σημαντικής αιολικής παραγωγής.

3.4.2.1 Κανονική λειτουργία συστήματος χωρίς αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ

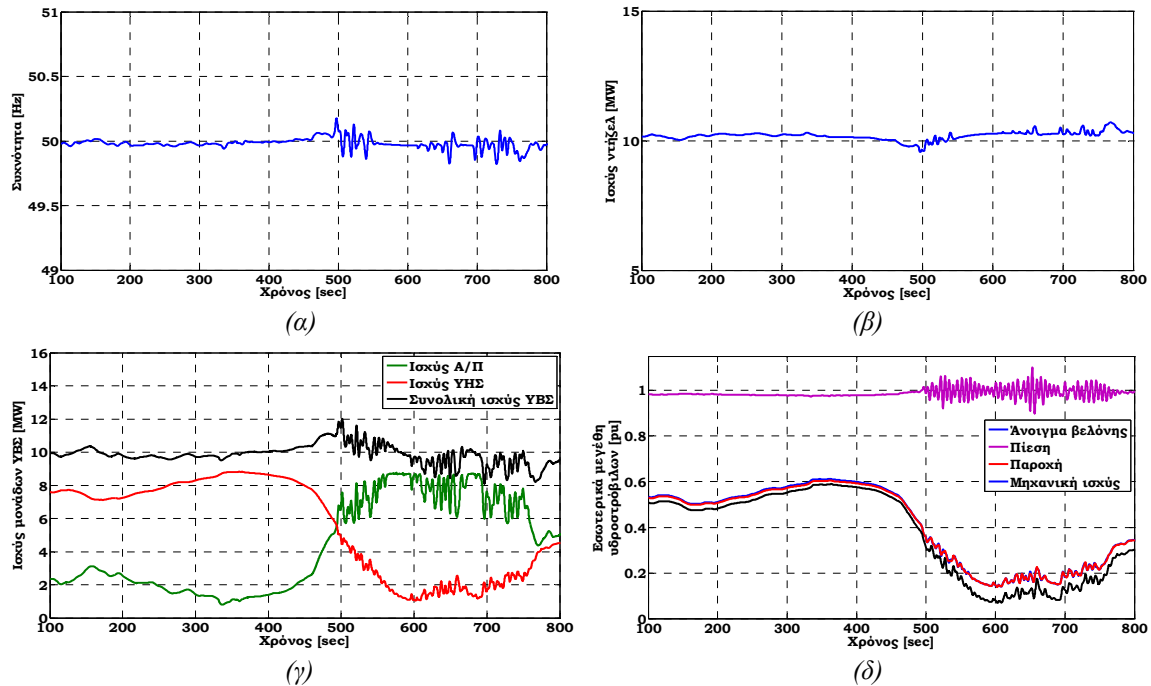
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος του ΜΔΝ χωρίς τα Α/Π εκτός ΥΒΣ, οπότε μοναδική πηγή διαταραχών αποτελεί η διακύμανση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ. Η εξέταση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της εγγενούς μεταβλητότητας της συνολικής ισχύος εξόδου του ΥΒΣ σε κατάσταση υδροαιολικής συνεργασίας και την αποτίμηση των επιπτώσεών της στη συχνότητα του συστήματος.

Η προσομοίωση αφορά τη λειτουργία του συστήματος του ΜΔΝ χωρίς τα Α/Π εκτός ΥΒΣ, οπότε το φορτίο (θεωρούμενο ως σταθερής ισχύος) τροφοδοτείται από τρεις μονάδες diesel και τον ΥΒΣ, με φορτίσεις όπως στην §3.3.2. Στην περίπτωση όμως αυτή, η συνολική ισχύς του ΥΒΣ δε δίνεται αποκλειστικά από τους υδροστρόβιλους αλλά σε συνδυασμό με το Α/Π του ΥΒΣ. Για τον υπολογισμό της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ χρησιμοποιήθηκε η τυχαία χρονοσειρά ανέμου με εύρος τιμών 4-10 m/s του Σχήματος 3.8, για την οποία η ισχύς εξόδου του Α/Π εμφανίζει αξιόλογη μεταβλητότητα. Όσον αφορά το set-point μέγιστης ισχύος του Α/Π του ΥΒΣ, θεωρείται η χειρότερη περίπτωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή συμμετοχή των αιολικών, περιοριζόμενη μόνο από τα τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων. Συνεπώς το υπόψη set-point δίνεται από τη σχέση $P_{AGC} - P_{Hmin}$, όπου P_{Hmin} ¹⁵ αποτελεί το εκάστοτε τεχνικό ελάχιστο του ΥΗΣ του ΥΒΣ.

Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 3.16 και διαπιστώνεται ότι η μεταβλητότητα στην αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αντανακλάται και στη συχνότητα του συστήματος, καθώς οι υδροστρόβιλοι δεν έχουν την απαιτούμενη ταχύτητα απόκρισης προκειμένου να τις αντισταθμίσουν, όπως

¹⁵ Στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε ότι το τεχνικό ελάχιστο του κάθε υδροστρόβιλου ισούται με 20% της ονομαστικής του ισχύος, δηλαδή 1 MW.

φαίνεται και από το διάγραμμα της συνολικής ισχύος του ΥΒΣ. Συνεπώς η υδροαιολική συνεργασία φαίνεται ότι προσθέτει μια επιπλέον μεταβλητότητα στο σύστημα.

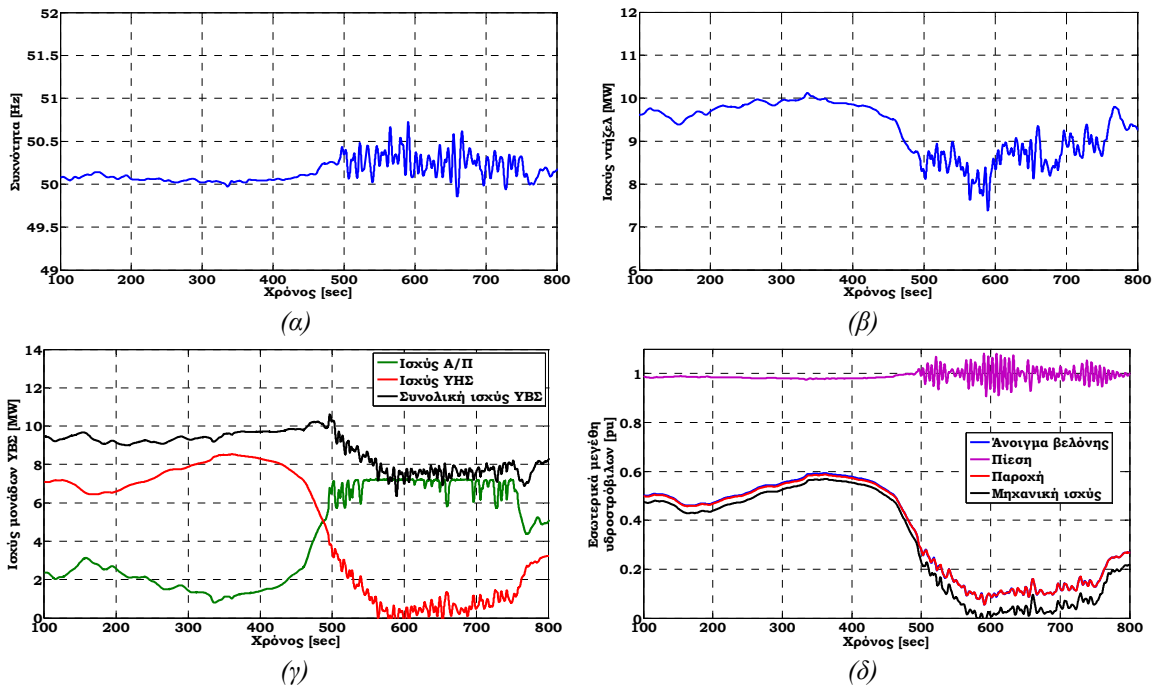


Σχήμα 3.16. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ χωρίς αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ, με το Α/Π του ΥΒΣ να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή συμμετοχή στην παραγωγή του ΥΒΣ (set-point ίσο με $P_{AGC}-P_{Hmin}$). α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

3.4.2.2 Κανονική λειτουργία συστήματος με αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων (Σχήμα 3.17) για το ίδιο σενάριο όπως στην §3.4.2.1, με τη διαφορά όμως ότι τώρα είναι εντός λειτουργίας το σύνολο των Α/Π του νησιού και άρα η διακύμανση της παραγωγής τους (βλ. Σχήμα 3.8) αποτελεί πρόσθετη πηγή διαταραχών για το σύστημα. Οι χρονοσειρές ανέμου στις διάφορες θέσεις των Α/Π θεωρούνται απόλυτα ταυτοχρονισμένες, παραδοχή που συνιστά τη δυσμενέστερη περίπτωση για τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος.

Αποτελέσματα από την προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ υπό τις συνθήκες αυτές, χωρίς υδροαιολική συνεργασία, έχουν παρουσιαστεί στην §3.3.1 (Σχήμα 3.9), χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ σε λειτουργία. Συγκρίνοντας το Σχήμα 3.17 με το Σχήμα 3.9, παρατηρείται ότι η ύπαρξη της υδροαιολικής συνεργασίας αυξάνει ελαφρώς τη μεταβλητότητα της συχνότητας καθώς προσθέτει μια επιπλέον διαταραχή στο σύστημα, όπως διαπιστώθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.

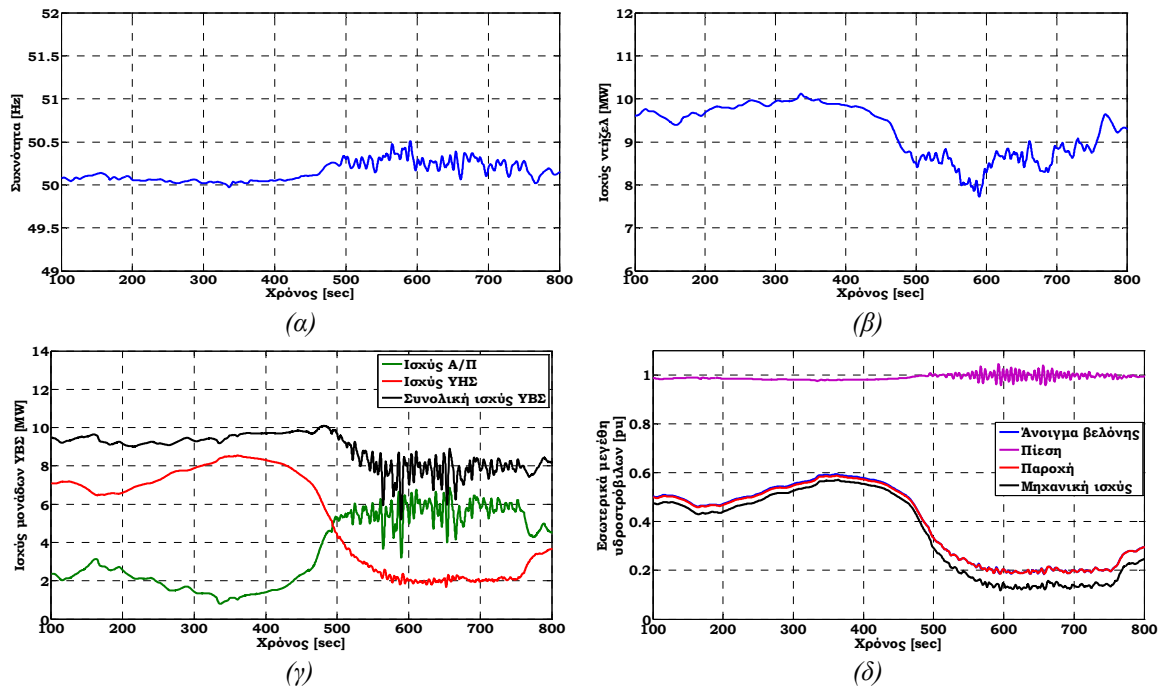


Σχήμα 3.17. Προσομοίωση του συστήματος του MAN για σταθερό φορτίο και όλα τα A/Π (εντός και εκτός ΥΒΣ) σε λειτουργία, με τη μέγιστη δυνατή αιολική συμμετοχή στην παραγωγή του ΥΒΣ (set-point για το A/Π του ΥΒΣ ίσο με $P_{AGC} - P_{Hmin}$). α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση που το A/Π του ΥΒΣ συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (βλ. §2.4.4) παρατίθενται στο Σχήμα 3.18. Συγκρίνοντας το Σχήμα 3.18 με το Σχήμα 3.17, διαπιστώνεται εμφανής μείωση των διακυμάνσεων της συχνότητας του συστήματος και της ισχύος των υπόλοιπων ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής που συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας, ενώ ιδιαίτερα για τον ΥΗΣ του ΥΒΣ είναι αξιοσημείωτη η μείωση της μεταβλητότητας των διαφόρων μεγεθών των υδροστρόβιλων (άνοιγμα βελόνης, πίεση, παροχή), που συνεπάγεται σημαντική μείωση των καταπονήσεών τους.

Συγκρίνοντας επίσης το Σχήμα 3.18 με το Σχήμα 3.9, παρατηρείται ότι η συμμετοχή του A/Π του ΥΒΣ στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας οδηγεί σε μείωση των διακυμάνσεων της συχνότητας, όχι μόνο συγκριτικά με το σενάριο που το A/Π του ΥΒΣ είναι εκτός λειτουργίας αλλά ακόμη και με την περίπτωση που ολόκληρος ο ΥΒΣ δε λειτουργεί. Εάν δηλαδή το A/Π του ΥΒΣ έχει τη δυνατότητα αποτελεσματικής συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας, τότε μπορεί να αντισταθμίσει επαρκώς τους περιορισμούς στη δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων, με αποτέλεσμα ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής να αποκρίνεται ταχύτερα στη ρύθμιση συχνότητας ακόμη και από τις υφιστάμενες μονάδες diesel.

Συμπερασματικά, εάν οι A/Γ του ΥΒΣ δε διαθέτουν απόκριση συχνότητας, τότε η ύπαρξη της υδροαιολικής συνεργασίας επιβαρύνει ακόμη περισσότερο το σύστημα, αυξάνοντας τη μεταβλητότητα της ολικής αιολικής παραγωγής και επιδεινώνοντας τη ρύθμιση συχνότητας. Αν όμως οι A/Γ του ΥΒΣ έχουν τη δυνατότητα συμμετοχής στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, τότε το σύστημα παρουσιάζεται πιο στιβαρό, αντισταθμίζοντας καλύτερα τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής εκτός ΥΒΣ, ενώ παράλληλα μειώνονται και οι καταπονήσεις στις μονάδες που συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας.



Σχήμα 3.18. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ για σταθερό φορτίο και όλα τα Α/Π (εντός και εκτός ΥΒΣ) σε λειτουργία, με τη μέγιστη δυνατή αιολική συμμετοχή στην παραγωγή του ΥΒΣ (set-point για το Α/Π του ΥΒΣ ίσο με $P_{AGC} - P_{Hmin}$) και επίσης συμμετοχή των Α/Γ του ΥΒΣ στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

3.4.2.3 Ισχυρά βραχυκυκλώματα

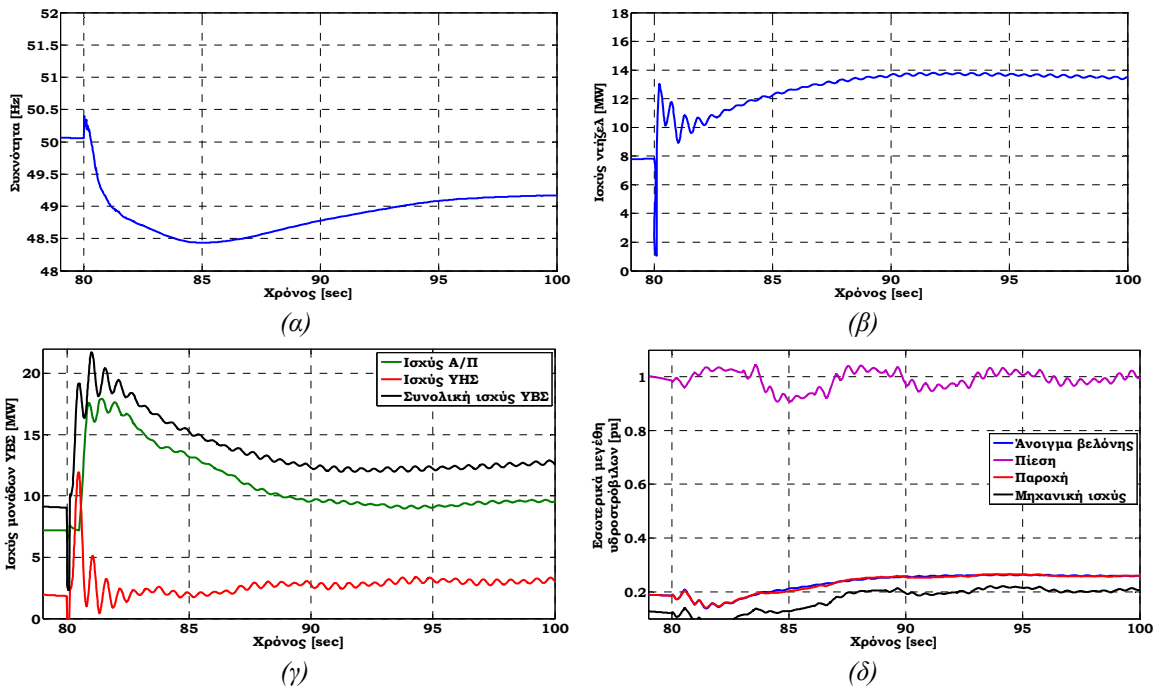
Στην §3.3.3 παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την προσομοίωση στέρεου βραχυκυκλώματος στο σύστημα μεταφοράς, με επακόλουθη απώλεια όλων των Α/Π του συστήματος που προηγουμένως λειτουργούσαν στην ονομαστική τους ισχύ. Από την ανάλυση αυτή διαπιστώθηκε ότι η συχνότητα πέφτει κάτω από το όριο των 48 Hz όπου ενεργοποιούνται οι Η/Ν υποσυχνότητας, καθιστώντας αναγκαία την επιβολή αυστηρότερου δυναμικού περιορισμού στην ισχύ των Α/Π. Η ένταξη υδροστρόβιλων με υποκατάσταση συμβατικών μονάδων επιδεινώσε ακόμη περισσότερο την απόκριση του συστήματος.

Στη συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα από την προσομοίωση του ίδιου σεναρίου, αλλά με το Α/Π του ΥΒΣ να υποκαθιστά μέρος της παραγωγής των υδροστρόβιλων. Η ταχύτητα ανέμου που επικρατεί στη θέση του Α/Π του ΥΒΣ πριν το βραχυκύκλωμα θεωρείται ίση με την ονομαστική, όπως και στην περίπτωση των λοιπών Α/Π. Λαμβάνεται ως δεδομένο ότι οι Α/Γ του ΥΒΣ διαθέτουν ικανότητα FRT, όπως πλέον όλες οι σύγχρονες Α/Γ που είναι διαθέσιμες στην αγορά¹⁶. Όσον αφορά τη δυνατότητα των Α/Γ του ΥΒΣ να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, αν οι Α/Γ δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα τότε τα αποτελέσματα είναι όμοια με αυτά του Σχήματος 3.11. Εάν όμως παρέχουν ρύθμιση συχνότητας, τότε προκύπτουν τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.19, όπου διαπιστώνεται ότι η συχνότητα του συστήματος μετά το βραχυκύκλωμα και την απώλεια των Α/Π εκτός ΥΒΣ, δε μειώνεται κάτω από τα 48 Hz και άρα αποφεύγεται η ενεργοποίηση της προστασίας υποσυχνότητας και η απόρριψη φορτίου. Εκ του λόγου αυτού δεν είναι ε-

¹⁶ Σε αντίθετη περίπτωση, λόγω της βύθισης της τάσης κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος θα αποσυνδέονταν και οι Α/Γ του ΥΒΣ, οδηγώντας σε πρόσθετη απώλεια παραγωγής και άρα επιδείνωση της απόκρισης συχνότητας. Καθώς ήδη τίθεται περιορισμός ισχύος στα άλλα Α/Π του νησιού, είναι σαφές ότι δεν θα υπήρχε περιθώριο να παράγει και το Α/Π του ΥΒΣ υποκαθιστώντας ισχύ των υδροστρόβιλων και άρα η υδροαιολική συνεργασία δε θα μπορούσε να επιτραπεί από το ΔΜΔΝ.

πίσης αναγκαία η επιβολή πρόσθετων περιορισμών ισχύος στα υπόλοιπα Α/Π. Επομένως ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής, παρουσιάζεται ταχύτερος από τις μονάδες diesel και η υδροαιολική συνεργασία καθιστά το σύστημα πιο στιβαρό στις ισχυρές διαταραχές των στέρεων βραχυκυκλωμάτων στο σύστημα μεταφοράς.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω ευνοϊκές για τον ΥΒΣ διαπιστώσεις είναι βάσιμες μόνο όταν οι Α/Γ του Α/Π όχι μόνο διαθέτουν FRT ικανότητα και απόκριση συχνότητας, αλλά η απόκριση αυτή είναι άμεσα διαθέσιμη μετά την εκδήλωση της διαταραχής και όχι σε χρόνους λίγων δευτερολέπτων, οι οποίοι θα ήταν ενδεχομένως επαρκείς σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα. Η προϋπόθεση αυτή πρέπει να διασταυρωθεί με κατασκευαστές Α/Γ.



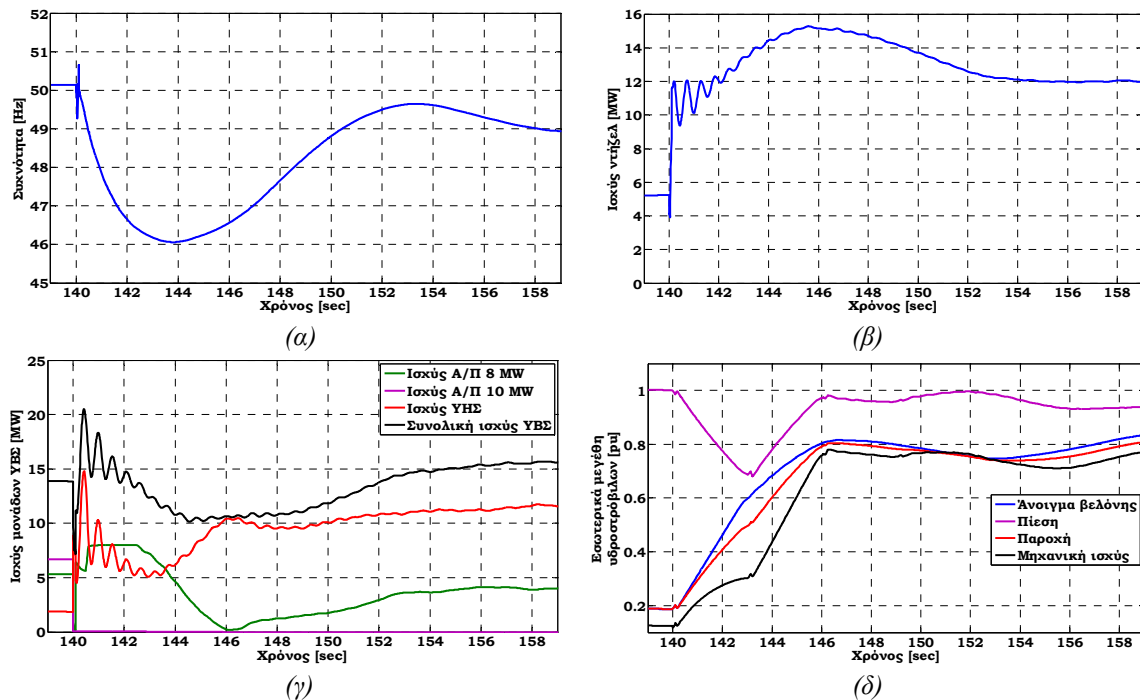
Σχήμα 3.19. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς. Όλα τα Α/Π (εντός και εκτός ΥΒΣ) σε λειτουργία, με τη μέγιστη δυνατή αιολική συμμετοχή στην παραγωγή του ΥΒΣ και επίσης συμμετοχή των Α/Γ του ΥΒΣ στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

Το δυσμενέστερο όμως σενάριο σε περίπτωση που υφίσταται υδροαιολική συνεργασία, είναι να συμβεί μόνιμο σφάλμα στην αποκλειστική γραμμή Μ.Τ. του Α/Π του ΥΒΣ. Αυτό θα προκαλούσε αναγκαστικά την απώλεια του συγκεκριμένου Α/Π, ενώ η προκαλούμενη βύθιση τάσης πιθανότατα θα οδηγούσε και στην αποσύνδεση των υπόλοιπων Α/Π του νησιού που δεν έχουν ικανότητα FRT. Στην περίπτωση αυτή και υπό συνθήκες υψηλών ταχυτήτων ανέμου, θα προέκυπτε μεγάλη απώλεια αιολικής παραγωγής, η οποία θα οδηγούσε σε μεγάλη βύθιση της συχνότητας, απορρίψεις φορτίου και ενδεχομένως σε απώλεια της ευστάθειας του συστήματος. Η πιθανότητα ενός τέτοιου ενδεχομένου δεν είναι αμελητέα και συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό ενός ΥΒΣ. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ενδεχόμενο αυτό, επιθυμητό θα ήταν οι Α/Γ του ΥΒΣ να διαχωρίζονται ηλεκτρικώς σε δύο τουλάχιστον πάρκα, τα οποία θα συνδέονται στους ζυγούς Μ.Τ. του Υ/Σ ανύψωσης του ΥΒΣ μέσω ανεξάρτητων γραμμών Μ.Τ., ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ταυτόχρονου σφάλματος και απώλειας του συνόλου της αιολικής παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο μόνο ένα μέρος της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ αναμένεται να χαθεί, με τις εναπομείνουσες Α/Γ του ΥΒΣ (οι οποίες έχουν FRT ικανότητα) να αναλαμβάνουν την αντιστάθμιση της χαμένης αιολικής παραγωγής μέσω της παροχής πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας. Στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε ο ηλεκτρικός διαχωρισμός των Α/Γ του ΥΒΣ σε δύο πάρκα,

όπου στο ένα πάρκο υφίστανται 4 Α/Γ συνολικής ισχύος 8 MW και στο άλλο 5 Α/Γ συνολικής ισχύος 10 MW.

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του σφάλματος στην αποκλειστική γραμμή Μ.Τ. ενός από τα δύο Α/Π του ΥΒΣ, δίνονται στο Σχήμα 3.20, όπου εξετάζονται οι δυσμενέστερες συνθήκες με τη μέγιστη δυνατή αιολική διεύθυνση. Συγκεκριμένα τα Α/Π εκτός ΥΒΣ λειτουργούν και πάλι στην ονομαστική ισχύ τους ενώ η προγραμματισμένη ισχύς του ΥΒΣ θεωρήθηκε αυτή τη φορά ίση με την ονομαστική των υδροστρόβιλων ($P_{AGC}=15\text{MW}$), ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή υποκατάσταση υδραυλικής ενέργειας από αιολική. Ειδικότερα το set-point των αιολικών του ΥΒΣ θεωρήθηκε ίσο με το μέγιστο δυνατό, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων ($P_{AGC}-P_{Hmin}=15-3=12\text{ MW}$). Επιπλέον η διαθέσιμη αιολική ισχύς του ΥΒΣ θεωρήθηκε ίση με το set-point, ώστε να υφίσταται μόνο αδρανειακή απόκριση από τις Α/Γ. Ο ελεγκτής στατισμού είναι ανενεργός από τη στιγμή που δεν υφίσταται εφεδρεία ισχύος για το Α/Π του ΥΒΣ.

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.20 παρατηρείται μεγάλη πτώση της συχνότητας έως 46 Hz, αισθητά μεγαλύτερη από την περίπτωση που τα Α/Π του ΥΒΣ είναι εκτός λειτουργίας και λειτουργούν μόνο οι υδροστρόβιλοι (βλ. Σχήμα 3.11). Δηλαδή για το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας και το υψηλό set-point στα Α/Π του ΥΒΣ, η υδροαιολική συνεργασία φαίνεται να επιδεινώνει την κατάσταση συγκριτικά με την κάλυψη της προγραμματισμένη ισχύος μόνο από τους υδροστρόβιλους. Αυτό οφείλεται στο ότι το περιθώριο αύξησης της ισχύος του ενός Α/Π του ΥΒΣ (~2.7 MW) που παραμένει σε λειτουργία δεν επαρκεί για να καλύψει την απώλεια του άλλου Α/Π του ΥΒΣ που παρήγαγε ισχύ περίπου 6.7 MW. Αυτό σημαίνει ότι το set-point που δίνεται στα Α/Π του ΥΒΣ θα πρέπει να είναι μικρότερο.

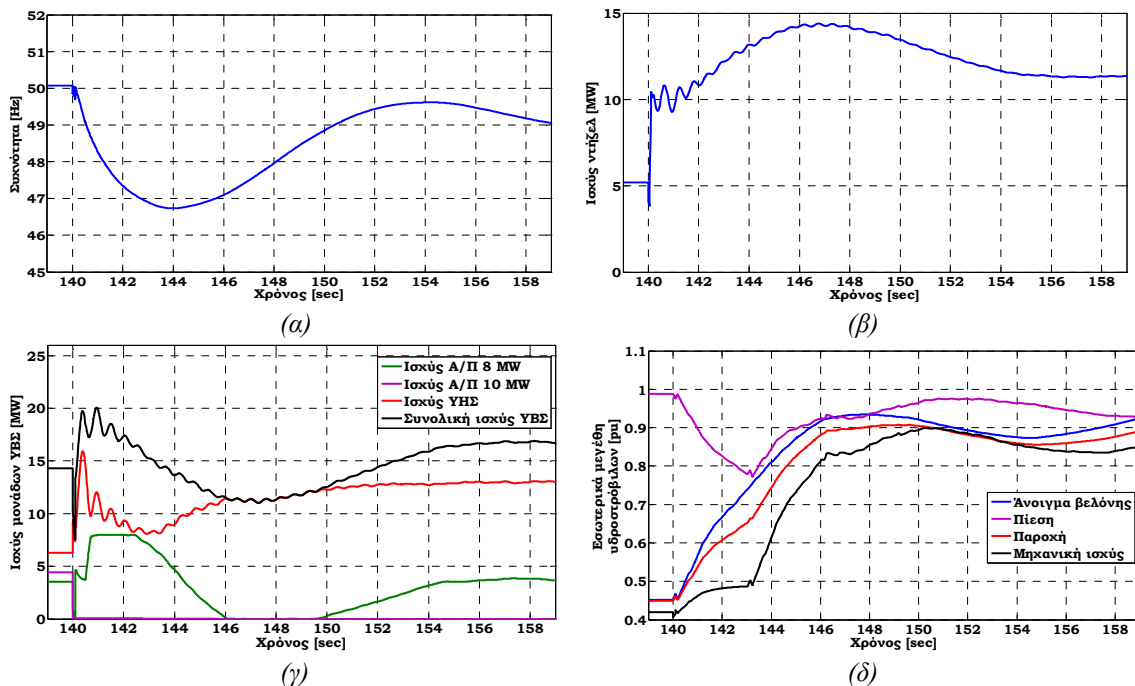


Σχήμα 3.20. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ για στερεό βραχυκύκλωμα στην αποκλειστική γραμμή Μ.Τ. του ενός από τα δύο Α/Π του ΥΒΣ. Όλα τα Α/Π εκτός ΥΒΣ σε λειτουργία υπό ονομαστική ισχύ, set-point για τα Α/Π του ΥΒΣ ίσο με $P_{AGC} - P_{Hmin}=12\text{ MW}$, διαθέσιμη αιολική ισχύς ΥΒΣ ίση με το set-point και ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

Για τον καθορισμό του ορίου υποκατάστασης της υδραυλικής παραγωγής από αιολική, δηλαδή τον προσδιορισμό του set-point για τα Α/Π του ΥΒΣ στο πλαίσιο της υδροαιολικής συνεργα-

σίας¹⁷, πραγματοποιήθηκε πλήθος προσομοιώσεων της παραπάνω δυσμενούς για το σύστημα διαταραχής για διάφορες τιμές του υπόψη set-point. Κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου set-point αποτέλεσε η μη επιδείνωση της ρύθμισης συχνότητας συγκριτικά με την περίπτωση που τα Α/Π του ΥΒΣ είναι εκτός λειτουργίας και λειτουργούν μόνο οι υδροστρόβιλοι (βλ. Σχήμα 3.11).

Στο Σχήμα 3.21 παρατίθενται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που το set-point είναι ίσο με την ονομαστική ισχύ του μικρότερου από τα δύο Α/Π του ΥΒΣ, δηλ. 8 MW, έτσι ώστε το κάθε Α/Π να διαθέτει πάντα την απαιτούμενη (αδρανειακή) εφεδρεία ισχύος για να καλύψει την απώλεια του άλλου. Η διαθέσιμη αιολική ισχύς του ΥΒΣ θεωρήθηκε και πάλι ίση με το set-point ώστε να υφίσταται μόνο αδρανειακή απόκριση από τις Α/Γ (ως δυσμενέστερη περίπτωση), ενώ η αδρανειακή εφεδρεία ισχύος (το περιθώριο μέχρι την ονομαστική ισχύ) για το Α/Π του ΥΒΣ που παραμένει σε λειτουργία είναι ίση με την απώλεια αιολικής ισχύος του ΥΒΣ λόγω αποσύνδεσης του έτερου Α/Π. Παρατηρείται ότι η πτώση συχνότητας είναι παρόμοια με την περίπτωση που τα Α/Π του ΥΒΣ είναι εκτός λειτουργίας και λειτουργούν μόνο οι υδροστρόβιλοι (βλ. Σχήμα 3.11). Δηλαδή η υδροαιολική συνεργασία υπό αυτές τις συνθήκες δε βελτιώνει ούτε επιβαρύνει την κατάσταση. Επομένως μπορεί να ειπωθεί ότι ένα κατάλληλο set-point για το σύνολο της παραγωγής των Α/Π του ΥΒΣ στο πλαίσιο της υδροαιολικής συνεργασίας θα μπορούσε να είναι η ονομαστική αιολική ισχύς του ΥΒΣ μείον την ονομαστική ισχύ του μεγαλύτερου Α/Π του ΥΒΣ, έτσι ώστε να υπάρχει πάντοτε η απαιτούμενη εφεδρεία ισχύος για την κάλυψη της απώλειας ενός από τα Α/Π του ΥΒΣ.

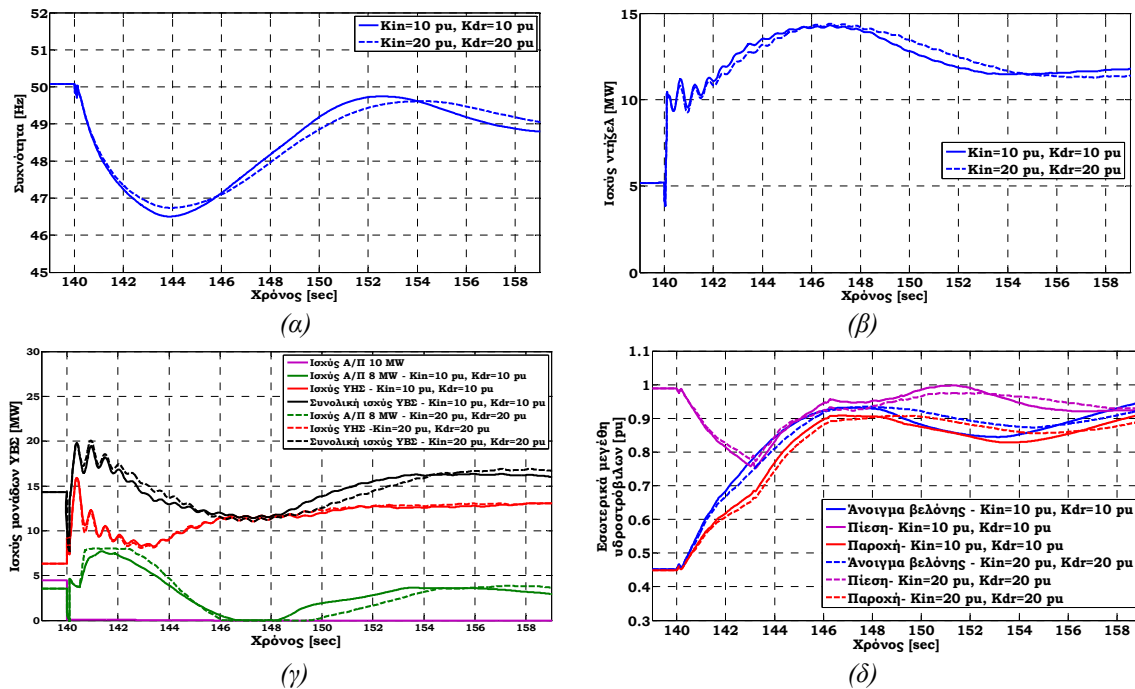


Σχήμα 3.21. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για στέρεο βραχυκύκλωμα στην αποκλειστική γραμμή Μ.Τ. του ενός από τα δύο Α/Π του ΥΒΣ. Όλα τα Α/Π εκτός ΥΒΣ σε λειτουργία υπό ονομαστική ισχύ, set-point για τα Α/Π του ΥΒΣ ίσο με 8 MW, διαθέσιμη αιολική ισχύς ΥΒΣ ίση με το set-point και ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

Τέλος, στο πλαίσιο μιας υποτυπώδους ανάλυσης ευαισθησίας, παρατίθενται αποτελέσματα αντίστοιχα του Σχήματος 3.21, έχοντας θεωρήσει ότι τα κέρδη (K_{droop} , $K_{inertia}$) του ελεγκτή συχνό-

¹⁷ Το set-point αφορά το μέρος της αιολικής παραγωγής που υποκαθιστά ισχύ υδροστρόβιλων. Η παραγόμενη ισχύς των αιολικών του ΥΒΣ μπορεί να είναι υψηλότερη από το set-point, εφόσον βρίσκονται σε λειτουργία αντλίες που την απορροφούν, όπως θα δειχθεί στην επόμενη ενότητα.

τητας των Α/Γ του ΥΒΣ¹⁸ είναι μειωμένα κατά 50%, προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο η μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή συχνότητας μπορεί να επηρεάσει τα συμπεράσματα. Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.22 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη διαφοροποίηση στις αποκρίσεις των διαφόρων μεγεθών, ενώ όσον αφορά τη συχνότητα διαπιστώνεται μια πρόσθετη μικρή βύθιση της τάξης των 0.2 Hz. Συνεπώς η διαφοροποίηση των τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή συχνότητας των Α/Γ του ΥΒΣ δε φαίνεται ότι είναι καθοριστική για τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που προηγήθηκε. Αντίθετα είναι κρίσιμη, όπως έχει προαναφερθεί, η ταχύτητα απόκρισης της Α/Γ, η οποία πρέπει να είναι της κλίμακας χρόνου των δεκάτων του δευτερολέπτου προκειμένου να είναι αποτελεσματική σε συστήματα χαμηλής αδράνειας όπως το εδώ εξεταζόμενο.



Σχήμα 3.22. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ για την περίπτωση του Σχήματος 3.21, για δύο διαφορετικές τιμές στα κέρδη των ελεγκτών στατισμού (K_{droop}) και αδρανειακής απόκρισης ($K_{inertia}$) των Α/Γ του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη υδροστρόβιλων.

3.5 Διερεύνηση των επιπτώσεων της συνεργασίας Α/Π και αντλιών του ΥΒΣ

Η συνεργασία μεταξύ αντλιών και Α/Π ενός ΥΒΣ συνιστά κεντρική ιδέα του υφιστάμενου θεσμικού πλαισίου για ΥΒΣ σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα. Προκειμένου να περιοριστεί το μέγεθος των αποκλίσεων ισχύος μεταξύ παραγωγής Α/Π και λειτουργίας αποθηκευτικών μονάδων για λόγους ασφαλείας του συστήματος, καθορίστηκαν συγκεκριμένα όρια αποκλίσεων, όπως αυτά αναγράφονται στις άδειες παραγωγής των ΥΒΣ. Συγκεκριμένα ορίζεται ανοχή η οποία δεν υπερβαίνει για τις αντίστοιχες ποσότητες ενέργειας το 5% ωριαίως και το 3% ημερησίως. Επιπλέον, ενδεχομένως να τεθούν στον υπό έκδοση ΚΑΜΔΝ και στιγμιαία όρια για τις αποκλίσεις της παραγόμενης ισχύος του αιολικού σταθμού και του αντλητικού συστήματος. Για το λόγο αυτόν, ο

¹⁸ Στην προκειμένη περίπτωση ο ελεγκτής στατισμού είναι ουσιαστικά ανενεργός κατά τις πρώτες χρονικές στιγμές της πτώσης της συχνότητας και άρα ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης είναι αυτός που πρακτικά επηρεάζει τα αποτελέσματα όσον αφορά την ελάχιστη τιμή της συχνότητας.

σχεδιασμός του αντλητικού-αιολικού συστήματος θα πρέπει να ανταποκρίνεται στις ως άνω απαιτήσεις.

Στην παρούσα ενότητα αρχικά εξετάζονται οι πιθανές διαμορφώσεις του αντλιοστάσιου για την επίτευξη της αντλησιοαιολικής συνεργασίας και στη συνέχεια διερευνώνται ο βαθμός και οι τεχνικές προϋποθέσεις υπό τις οποίες είναι εφικτή αυτή η συνεργασία, καθώς και οι επιπτώσεις της στη λειτουργία του συστήματος.

3.5.1 Πιθανές διαμορφώσεις του αντλιοστάσιου για την επίτευξη της αντλησιοαιολικής συνεργασίας

Μία φυγόκεντρη αντλία εγκατεστημένη σε μία αντλητική εγκατάσταση (δεδομένη υψομετρική διαφορά, h , και δεδομένη σωλήνωση μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής), η οποία στρέφεται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, λειτουργεί σε σημείο λειτουργίας το οποίο είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής ($H - Q$) της αντλίας με τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης:

$$H_{\Sigma} = h + k \cdot Q^2 \quad (3.1)$$

στην οποία σχέση με ($k \cdot Q^2$) συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης. Στο σημείο αυτό, παροχής Q και ολικού ύψους H , αντιστοιχεί μία τιμή του βαθμού απόδοσης, n , της αντλητικής εγκατάστασης (αντλίας και ηλεκτροκινητήρα). Επομένως η ισχύς που απορροφάται από το αντλητικό συγκρότημα είναι ίση προς:

$$P_p = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{n} \quad (3.2)$$

Δεδομένου ότι η υψομετρική διαφορά, h , μεταβάλλεται σχετικά λίγο, ανάλογα με τον βαθμό πλήρωσης των ταμιευτήρων, η απορροφούμενη ισχύς από ένα δεδομένο αντλητικό συγκρότημα σε μία συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι περίπου σταθερή. Για να γίνει δυνατή η προσαρμογή της αντλητικής εγκατάστασης ώστε η απορροφούμενη από αυτή ισχύς να μεταβάλλεται και να παρακολουθεί κατά το δυνατόν την παραγόμενη από το αιολικό πάρκο, υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες, [87]:

1. Η εγκατάσταση περισσότερων όμοιων αντλιών, παράλληλα συνδεδεμένων, σταθερής ταχύτητας περιστροφής. Όταν λειτουργεί μία αντλία, η παροχή είναι ίση προς Q_1 και η απορροφούμενη ισχύς P_1 . Όταν λειτουργούν z αντλίες η διακινούμενη παροχή είναι ίση προς $Q_z < z \cdot Q_1$, ενώ η απορροφούμενη ισχύς θα είναι ίση προς $P_z < z \cdot P_1$. Στην περίπτωση αυτή η αντλούμενη παροχή και η συνολικά απορροφούμενη ισχύς εμφανίζει τη γνωστή μεταβολή κλίμακας σταδιακά μειούμενου ύψους.
2. Η εγκατάσταση περισσότερων όμοιων μεγάλων αντλιών και ενός αριθμού μικρότερων αντλιών (jockey), όλες παράλληλα συνδεδεμένες. Με τον τρόπο αυτό οι μεγάλης κλίμακας μεταβολές της απορροφούμενης ισχύος καλύπτονται από τη λειτουργία των μεγάλων αντλιών (μεγάλα σκαλοπάτια της κλιμακωτής απόκρισης) και μεταξύ αυτών οι μικρότερες μεταβολές καλύπτονται από τη λειτουργία των μικρότερων αντλιών, οπότε ανάμεσα στα μεγάλα σκαλοπάτια διαμορφώνονται μικρότερα που προσομοιάζουν προς τη συνεχή μεταβολή.
3. Η εγκατάσταση περισσότερων ταυτόσημων αντλιών παράλληλα συνδεδεμένων, εκ των οποίων μία ή περισσότερες έχουν δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής τους (με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος). Στην περίπτωση αυτή η αντλούμενη παροχή και η απορροφούμενη ισχύς είναι συνεχής καμπύλη, με παράμετρο τον αριθμό των εν λειτουργία αντλιών και την ταχύτητα περιστροφής. Η λύση αυτή, σε σύγκριση με τις προηγούμενες, βελτιώνει την απόκριση της εγκατάστασης σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, όμως επιβαρύνει το κόστος εγκατάστασης, ενώ είναι δύσκολα εφαρμόσιμη για πολύ μεγάλες τιμές της ισχύος της αντλίας. Η

παραλλαγή του να έχουν όλες οι αντλίες δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής τους βελτιώνει λίγο την απόδοση της αντλητικής εγκατάστασης, επιβαρύνει όμως δυσανάλογα το κόστος κατασκευής της.

Από τις παραπάνω λύσεις, οι δύο πρώτες βασίζονται στην τεχνολογία των σταθερών στροφών ενώ η τρίτη προτείνει τη χρησιμοποίηση αντλιών μεταβλητών στροφών. Το μειονέκτημα των αντλιών σταθερών στροφών είναι ότι σε περίπτωση χαμηλού ορίου στιγμιαίας απόκλισης ισχύος του Α/Π και των αντλιών θα προκύπτει υψηλός αριθμός χειρισμών των αντλιών (και άρα αυξημένες καταπονήσεις του εξοπλισμού) καθώς και μειωμένη αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού¹⁹. Αντίθετα η χρήση αντλιών μεταβλητών στροφών προσδίδει μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητα καλύτερης παρακολούθησης της αιολικής παραγωγής, που αντισταθμίζει το επιπρόσθετο κόστος τους συγκριτικά με τις αντλίες σταθερών στροφών, [35]. Γι' αυτόν το λόγο, στην παρούσα διερεύνηση υιοθετήθηκε η λύση (3) και ειδικότερα θεωρήθηκε ότι όλες οι αντλίες είναι μεταβλητών στροφών για διευκόλυνση των προσομοιώσεων.

Συνεπώς στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκαν όλες οι αντλίες ως μεταβλητών στροφών με κινητήρα διπλής τροφοδότησης, για την προσομοίωση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.5. Το εύρος μεταβολής της ισχύος τους θεωρήθηκε ότι είναι της τάξης του 60-100% της ονομαστικής των 1.47 MW, που αντιστοιχεί σε εύρος μεταβολής στροφών 92-108% περίπου των σύγχρονων στροφών του κινητήρα.

3.5.2 Επιπτώσεις της αντλησιοαιολικής συνεργασίας στο σύστημα του ΜΔΝ

Στην παρούσα ενότητα διερευνώνται οι επιπτώσεις της αντλησιοαιολικής συνεργασίας στη λειτουργία του συστήματος του ΜΔΝ μέσω προσομοιώσεων διαφόρων σεναρίων. Σημειώνεται ότι αντλησιοαιολική συνεργασία μπορεί να υπάρξει σε όλες τις καταστάσεις φόρτισης του συστήματος (υψηλό, ενδιάμεσο και χαμηλό φορτίο), σε αντίθεση με την υδροαιολική συνεργασία που γενικά αναμένεται στο ενδιάμεσο και υψηλό φορτίο όταν και θα εντάσσονται κατά κανόνα οι υδροστρόβιλοι. Εντούτοις, σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων για το ενδιάμεσο φορτίο (ως μέση κατάσταση λειτουργίας) με σημαντική διείσδυση ισχύος των υδροστρόβιλων του ΥΒΣ, προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενότητων. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

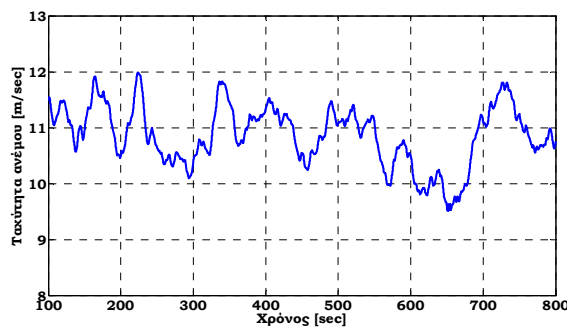
1. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ χωρίς τα Α/Π του συστήματος, με μοναδική πηγή διαταραχών το Α/Π του ΥΒΣ.
2. Προσομοιώσεις του συστήματος του ΜΔΝ με όλα τα Α/Π (εντός και εκτός ΥΒΣ) σε λειτουργία.
3. Προσομοιώσεις του συστήματος του ΜΔΝ για ισχυρά βραχυκυκλώματα που οδηγούν σε απώλεια σημαντικής αιολικής παραγωγής από το σύστημα.

Η διαφορά σε σχέση με τα σενάρια λειτουργίας που προσομοιώθηκαν στην ενότητα 3.4, είναι ότι τώρα η αιολική παραγωγή δε χρησιμοποιείται για υποκατάσταση της ισχύος των υδροστρόβιλων αλλά αποκλειστικά για άντληση. Σε αυτήν την περίπτωση το set-point φόρτισης του ΥΗΣ του ΥΒΣ είναι ίσο με P_{AGC} . Επίσης, άλλη διαφορά είναι η χρησιμοποίηση τυχαίας χρονοσειράς ανέμου με υψηλές ταχύτητες ανέμου, [70], (εύρος μεταβολής 9.5-12 m/s, Σχήμα 3.23) για το Α/Π του ΥΒΣ, που αποτελεί δυσμενή περίπτωση για το σύστημα, καθώς προκύπτει μεγάλη μεταβλητότητα της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Για αυτήν τη χρονοσειρά ανέμου προκύπτει εύρος μεταβολής της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ περίπου ίσο με το εύρος μεταβολής της ισχύος του αντλιοστάσιου όταν είναι ενταγμένες και οι 12 αντλίες μεταβλητών στροφών. Πρόκειται δηλαδή για το μέγιστο

¹⁹ Για παράδειγμα, αν απενταχθεί ορισμένος αριθμός αντλιών λόγω μείωσης της αιολικής παραγωγής και στη συνέχεια το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό αυξηθεί, τότε οι απενταγμένες αντλίες δεν μπορούν να ενταχθούν άμεσα καθώς απαιτείται ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για την επανένταξή τους (της τάξης των 20-30 min). Σε αυτό το χρονικό διάστημα η αιολική παραγωγή αναγκαστικά θα περιορίζεται.

εύρος μεταβολής που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να απαιτηθεί απένταξη αντλιών ή περικοπή αιολικής ισχύος²⁰. Όσον αφορά τη χρονοσειρά ανέμου των Α/Π εκτός ΥΒΣ, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά του Σχήματος 3.8 με εύρος τιμών 4-10 m/s, προκειμένου να γίνει σύγκριση των παρόντων αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των προηγούμενων ενοτήτων.

Όσον αφορά το set-point απορροφούμενης ισχύος του αντλιοστάσιου, εξετάζονται οι δύο λογικές καθορισμού της ενότητας 2.5.3, δηλαδή είτε με βάση τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ είτε με βάση τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος, προκειμένου να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις της κάθε λογικής στη μεταβατική λειτουργία του συστήματος. Και βέβαια το αντλιοστάσιο ακολουθεί πάντα την αιολική ισχύ που προορίζεται για άντληση. Δηλαδή ακόμα και στην περίπτωση που θα συνυπήρχαν υδροαιολική και αντλησιοαιολική συνεργασία, η απορροφούμενη ισχύς των αντλιών θα ακολουθούσε μόνο το τμήμα της αιολικής ισχύος που προορίζεται για άντληση, καθώς το υπόλοιπο τμήμα θα ακολουθούσαν από τους υδροστρόβιλους στο πλαίσιο της υδροαιολικής συνεργασίας (βλ. Κεφάλαιο 4 περί προτεινόμενο τρόπο καθορισμού των set-points).



Σχήμα 3.23. Χρονοσειρά ανέμου για το Α/Π του ΥΒΣ

3.5.2.1 Κανονική λειτουργία συστήματος χωρίς αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ

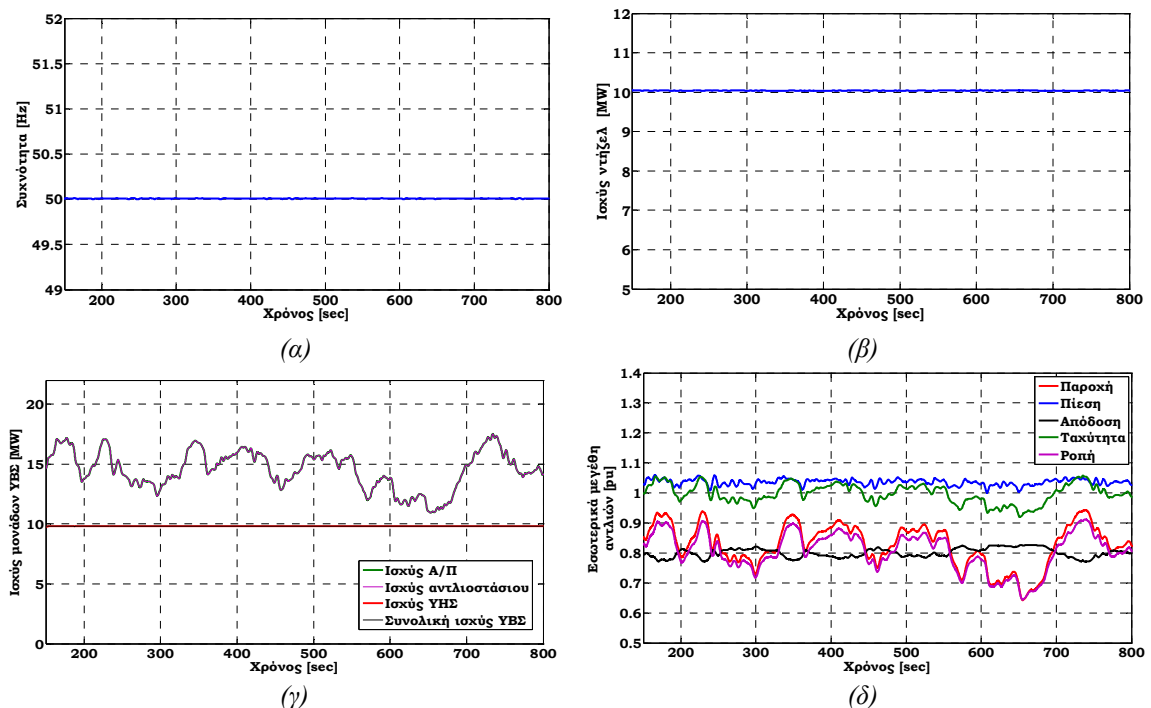
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος του ΜΔΝ με τα Α/Π του συστήματος εκτός λειτουργίας, οπότε μοναδική πηγή διαταραχών είναι η διακύμανση της παραγωγής του Α/Π του ΥΒΣ. Σε λειτουργία είναι και οι 12 αντλίες του ΥΒΣ προκειμένου να αξιοποιήσουν την παραγόμενη αιολική ισχύ για αποθήκευση νερού στην άνω δεξαμενή. Η εξέταση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της εγγενούς μεταβλητότητας της συνολικής ισχύος εξόδου του ΥΒΣ σε κατάσταση αντλησιοαιολικής συνεργασίας και την αποτίμηση των επιπτώσεών της στη συχνότητα του συστήματος.

Α) Καθορισμός του set-point ισχύος του αντλιοστάσιου βάσει της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ

Στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. Διαπιστώνεται ότι οι αντλίες αντισταθμίζουν πλήρως τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής, γεγονός αναμενόμενο αφού η απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς τους ρυθμίζεται από τα ηλεκτρονικά ισχύος του συστήματος οδήγησης των κινητήρων τους, των οποίων η απόκριση είναι πολύ γρήγορη. Οι όποιες απειροστές αποκλίσεις της ισχύος των αντλιών από την ισχύ του Α/Π οφείλονται στα φίλτρα των μετρητών ισχύος και στη χρονική καθυστέρηση της απόκρισης των υφιστάμενων PI-ελεγκτών των VSDs των

²⁰ Για μεγαλύτερο εύρος μεταβολής θα προκύψει απένταξη μιας ή περισσότερων αντλιών όταν η αιολική παραγωγή μειωθεί κάτω από το άθροισμα των τεχνικών ελαχίστων των ενταγμένων αντλιών και στη συνέχεια, εάν το αιολικό δυναμικό αυξηθεί κατά πολύ, θα απαιτηθεί περικοπή της αιολικής παραγωγής μέχρι την απένταξη απενταγμένων αντλιών.

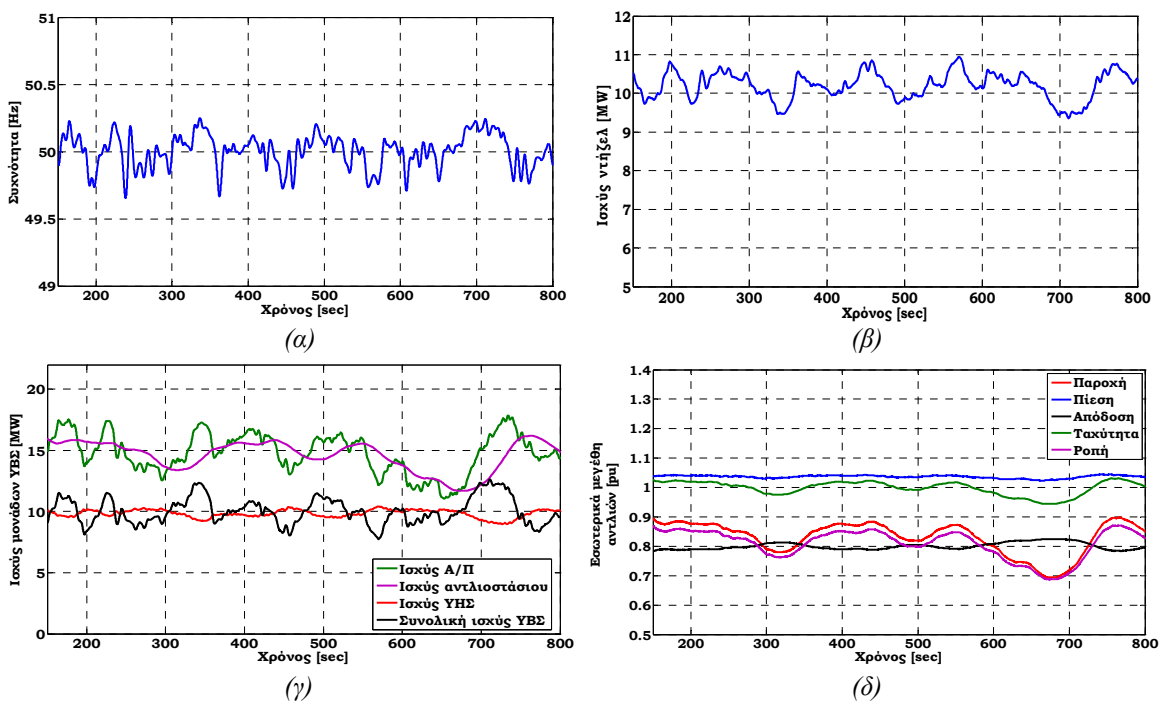
αντλιών. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συχνότητα του συστήματος να είναι ουσιαστικά σταθερή όπως και η ισχύς των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής (υδροστρόβιλοι και diesel) που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση. Επίσης ο ελεγκτής συχνότητας των Α/Γ του ΥΒΣ παραμένει ανενεργός. Ομοίως η συνολική ισχύς του ΥΒΣ (που είναι το άθροισμα της ισχύος των υδροστρόβιλων και του Α/Π μείον την ισχύ των αντλιών) παρουσιάζεται σταθερή και ίση με την ισχύ κατανομής από το AGC. Όσον αφορά τις αντλίες, η ταχύτητα περιστροφής τους κυμαίνεται γύρω από τις σύγχρονες στροφές του κινητήρα, με ένα εύρος που αντιστοιχεί στο εύρος της απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος τους βάσει των λόγων ομοιότητας. Η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής συνεπάγεται αντίστοιχες μεταβολές στη μηχανική ροπή της αντλίας, η οποία όμως παρουσιάζεται ελαφρώς εξομαλυσμένη σε σχέση με την απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύ, εξαιτίας της αδράνειας του συστήματος κινητήρα-αντλίας που εξομαλύνει τις διαταραχές (αποκόπτονται οι υψίσυχνες διαταραχές). Επίσης η μεταβολή της ταχύτητας των αντλιών οδηγεί και σε μεταβολές στην πίεση και την παροχή τους, το εύρος των οποίων σχετίζεται με τις χαρακτηριστικές των αντλιών, τη χαρακτηριστική σωλήνωσης και το εύρος μεταβολής των στροφών. Στην προκειμένη περίπτωση η παροχή παρουσιάζει ένα εύρος μεταβολής της τάξης του 35% της ονομαστικής ενώ η πίεση της τάξης του 5% της στατικής. Αντίστοιχο εύρος εκτιμώνται και οι μεταβολές πίεσης εντός των αγωγών κατάθλιψης, δηλαδή ιδιαίτερα χαμηλές για να προκαλέσουν καταπόνηση στα μηχανικά μέρη. Σχετικά με το βαθμό απόδοσης των αντλιών, διαπιστώνεται ότι αυτός παρουσιάζει ένα εύρος μεταβολής της τάξης μόλις του 3-4%, παρά το μεγάλο εύρος μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος (που είναι περίπου ίσο με το μέγιστο δυνατό). Συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η λειτουργία μεταβλητών στροφών δε φαίνεται να οδηγεί την αντλητική εγκατάσταση σε λειτουργία με βαθμό απόδοσης που να αποκλίνει ιδιαίτερα από το βέλτιστο.



Σχήμα 3.24. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με τον ΥΒΣ σε λειτουργία και τα Α/Π του συστήματος εκτός λειτουργίας. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλησιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστασίου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

B) Καθορισμός του set-point ισχύος του αντλιοστάσιου βάσει του κινούμενου μέσου της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περίπτωση που το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου καθορίζεται βάσει κινούμενων μέσων τιμών λεπτού της αιολικής ισχύος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.25. Σημειωτέον ότι ούτε οι Α/Γ ούτε οι αντλίες του ΥΒΣ συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση που η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ δεν αντισταθμίζεται από τις αντλίες του σε στιγμιαία βάση, η αντλιοσαιολική συνεργασία αποτελεί μια επιπλέον διαταραχή για το σύστημα, κάτι που αποτυπώνεται στη συχνότητα του συστήματος, η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 49.65 και 50.25 Hz, επιβαρύνοντας παράλληλα τις ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση. Από την άλλη, η λειτουργία του αντλιοστάσιου είναι εμφανώς εξομαλυμένη συγκριτικά με το Σχήμα 3.24, με τη μεταβολή των εσωτερικών μεγεθών των αντλιών να ακολουθεί την κύρια τάση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ.

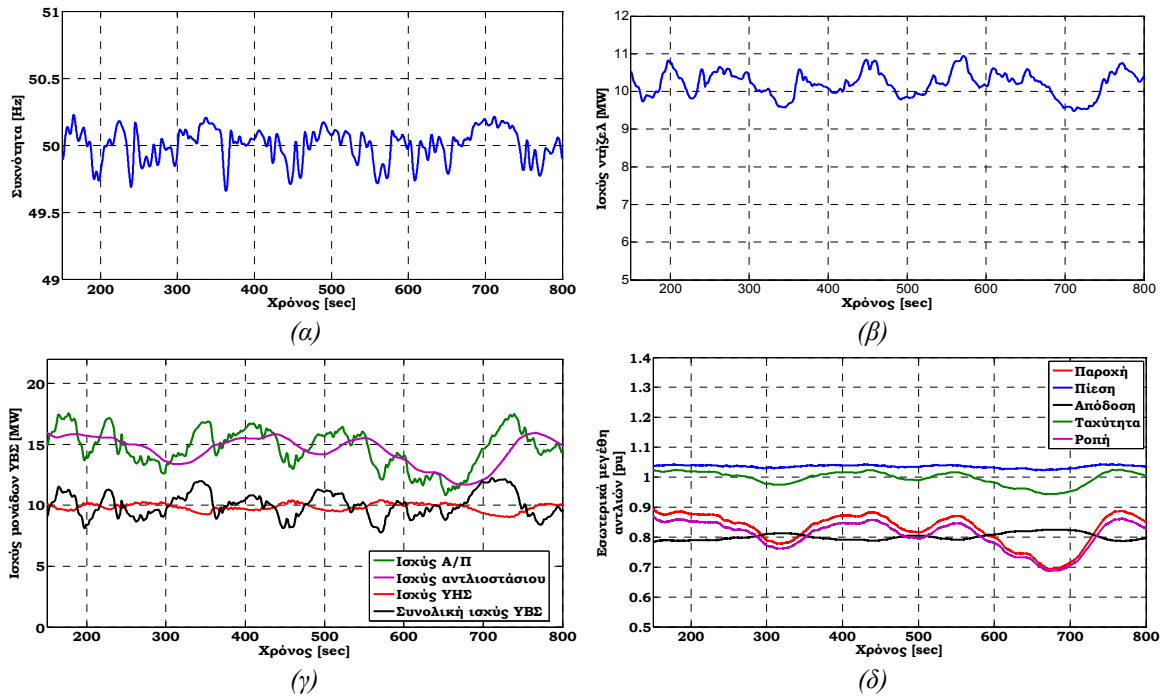


Σχήμα 3.25. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με τον ΥΒΣ σε λειτουργία και τα Α/Π του συστήματος εκτός λειτουργίας. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοσαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Χωρίς ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ και τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

Απ' ότι φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, με τη λογική καθορισμού του set-point του αντλιοστάσιου βάσει του κινούμενου μέσου, η αντλιοσαιολική συνεργασία αποτελεί μια επιπλέον διαταραχή για το σύστημα (σε αντίθεση με τη λογική της στιγμιαίας παρακολούθησης), κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Στη συνέχεια εξετάζονται κάποιες πιθανές μέθοδοι αντισταθμίσεως των αρνητικών επιπτώσεων της αντλιοσαιολικής συνεργασίας στην περίπτωση του κινούμενου μέσου, όπως να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας είτε το Α/Π, είτε το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ, είτε και τα δύο.

Στο Σχήμα 3.26 παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση που οι Α/Γ του ΥΒΣ παρέχουν ρύθμιση συχνότητας (έλεγχος στατισμού και αδρανειακή απόκριση), δυνατότητα που στην περίπτωση της υδροαιολικής συνεργασίας κρίθηκε αναγκαία. Διαπιστώνεται μια ελαφρά

μείωση της μεταβλητότητας της συχνότητας²¹, ιδιαίτερα στις καταστάσεις υπερ-συχνότητας όπου είναι ενεργοί και ο ελεγκτής στατισμού και ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης. Αντίθετα στις καταστάσεις υπό-συχνότητας ο ελεγκτής στατισμού είναι ανενεργός με αποτέλεσμα η βελτίωση που επιτυγχάνεται να είναι μειωμένη. Για να είναι ενεργός ο συγκεκριμένος ελεγκτής και σε καταστάσεις υποσυχνότητας, θα πρέπει να τηρείται εφεδρεία ισχύος από το Α/Π του ΥΒΣ, κάτι όμως που είναι αντικοινομικό για τον παραγωγό. Όσον αφορά τη λειτουργία του αντλιοστάσιου, αυτή δε διαφοροποιείται σε σχέση με το Σχήμα 3.25.

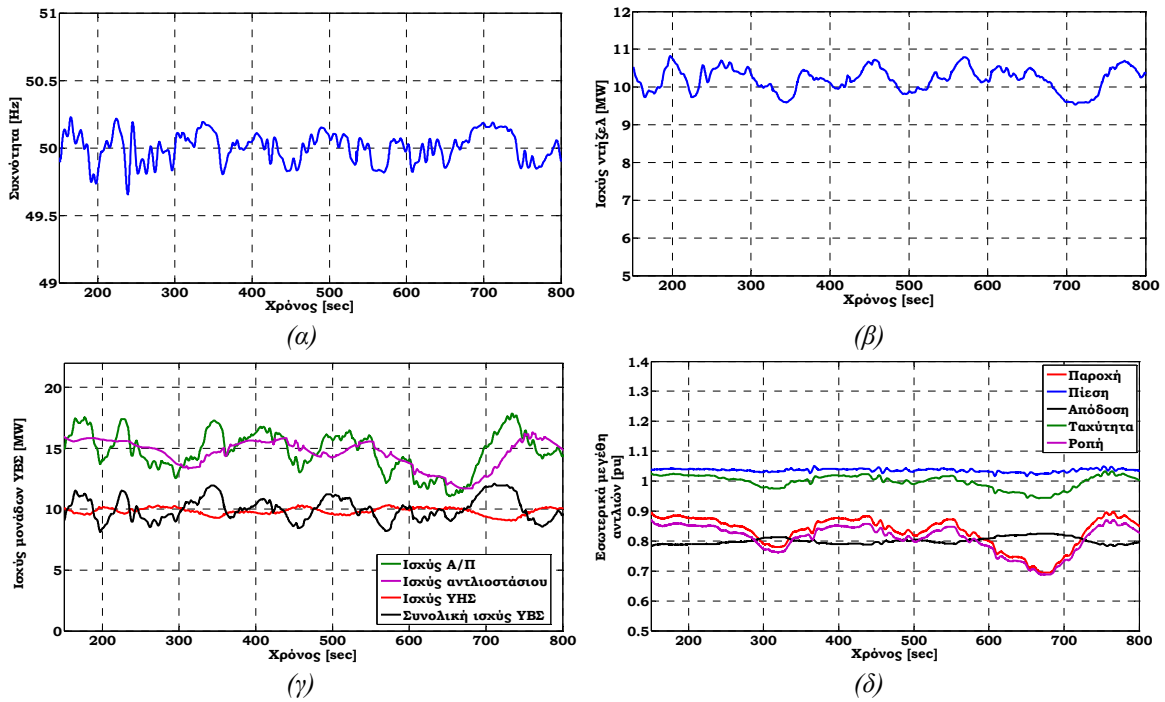


Σχήμα 3.26. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με τον ΥΒΣ σε λειτουργία και τα Α/Π του συστήματος εκτός λειτουργίας. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλησιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

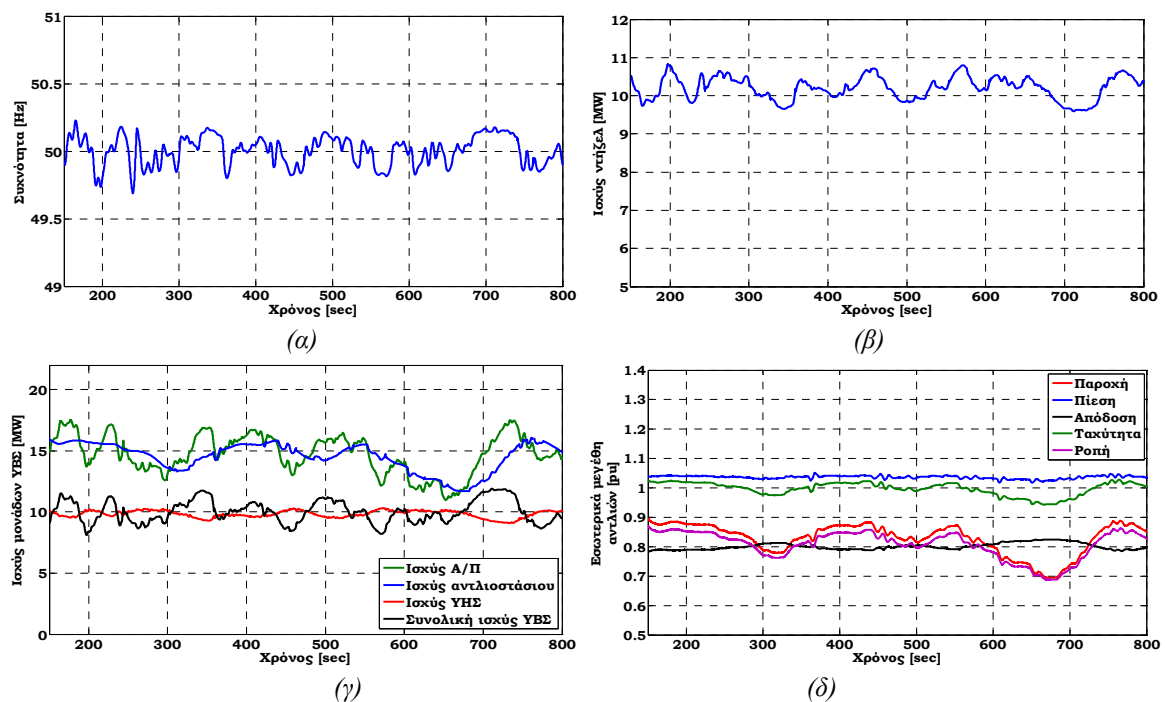
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περίπτωση που οι αντλίες παρέχουν ρύθμιση συχνότητας αντί για τις Α/Γ, δίνονται στο Σχήμα 3.27. Σε αυτήν την περίπτωση ο ελεγκτής στατισμού των αντλιών είναι ενεργός σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας με αποτέλεσμα η ρύθμιση συχνότητας συνολικά του συστήματος να παρουσιάζεται καλύτερη, με τη συχνότητα να κυμαίνεται σε στενότερα όρια, 49.8 – 50.2 Hz. Βέβαια διαταράσσεται κάπως η λειτουργία του αντλιοστάσιου σε σχέση με τα προηγούμενα δύο σχήματα, αυξάνοντας ελαφρώς τη μεταβλητότητα των διαφόρων μεγεθών των αντλιών.

Αν τώρα λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας παρέχουν και οι Α/Γ και οι αντλίες του ΥΒΣ, τότε η μεταβλητότητα της συχνότητας του συστήματος μειώνεται περαιτέρω, όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.28, από τη στιγμή που υφίσταται συνδυασμός των επικουρικών υπηρεσιών των δύο μονάδων του ΥΒΣ.

²¹ Για μεγαλύτερες διαταραχές η βελτίωση θα ήταν πιο εμφανής.



Σχήμα 3.27. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με τον ΥΒΣ σε λειτουργία και τα Α/Π του συστήματος εκτός λειτουργίας. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.



Σχήμα 3.28. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με τον ΥΒΣ σε λειτουργία και τα Α/Π του συστήματος εκτός λειτουργίας. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ και τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

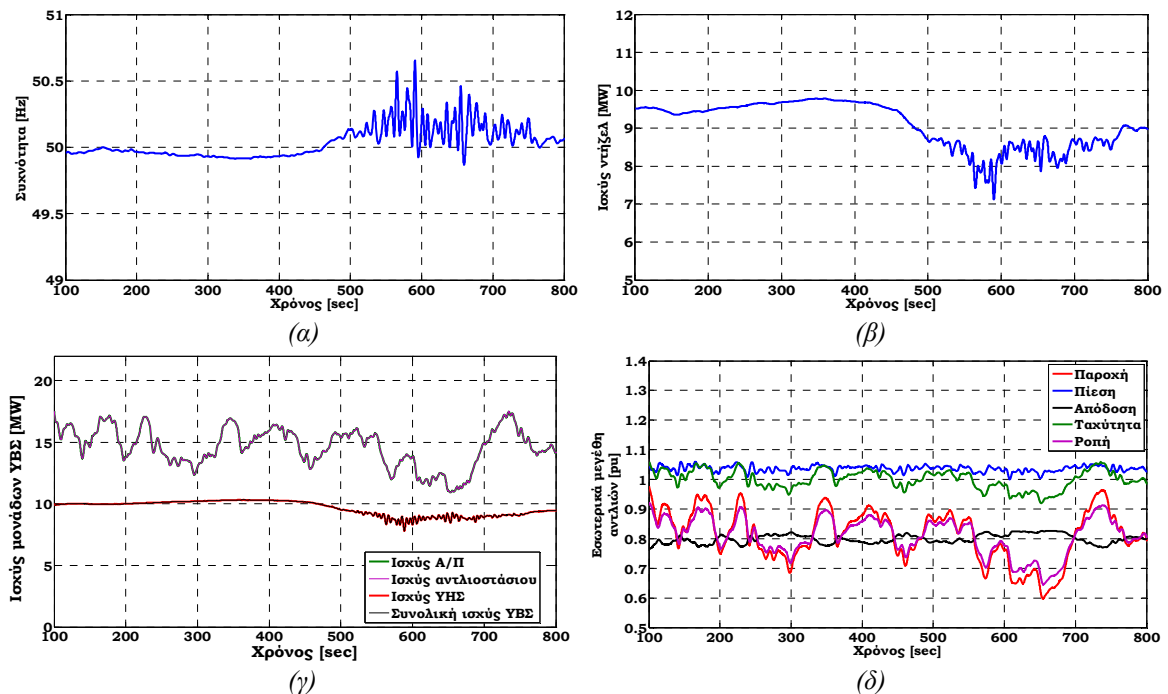
3.5.2.2 Κανονική λειτουργία συστήματος με αιολική παραγωγή εκτός ΥΒΣ

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα ίδια σενάρια όπως στην παράγραφο 3.5.2.1, με τη διαφορά ότι τώρα είναι εντός λειτουργίας το σύνολο των Α/Π του νησιού και άρα η διακύμανση της παραγωγής τους (βλ. Σχήμα 3.8) αποτελεί πρόσθετη πηγή διαταραχών για το σύστημα. Οι χρονοσειρές ανέμου στις διάφορες θέσεις των Α/Π εκτός ΥΒΣ θεωρούνται όμοιες, παραδοχή που συνιστά τη δυσμενέστερη περίπτωση για τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος.

Αποτελέσματα από την προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ υπό τις συνθήκες αυτές, χωρίς αντλιοαιολική συνεργασία, έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.3.1 (Σχήμα 3.9), χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ σε λειτουργία.

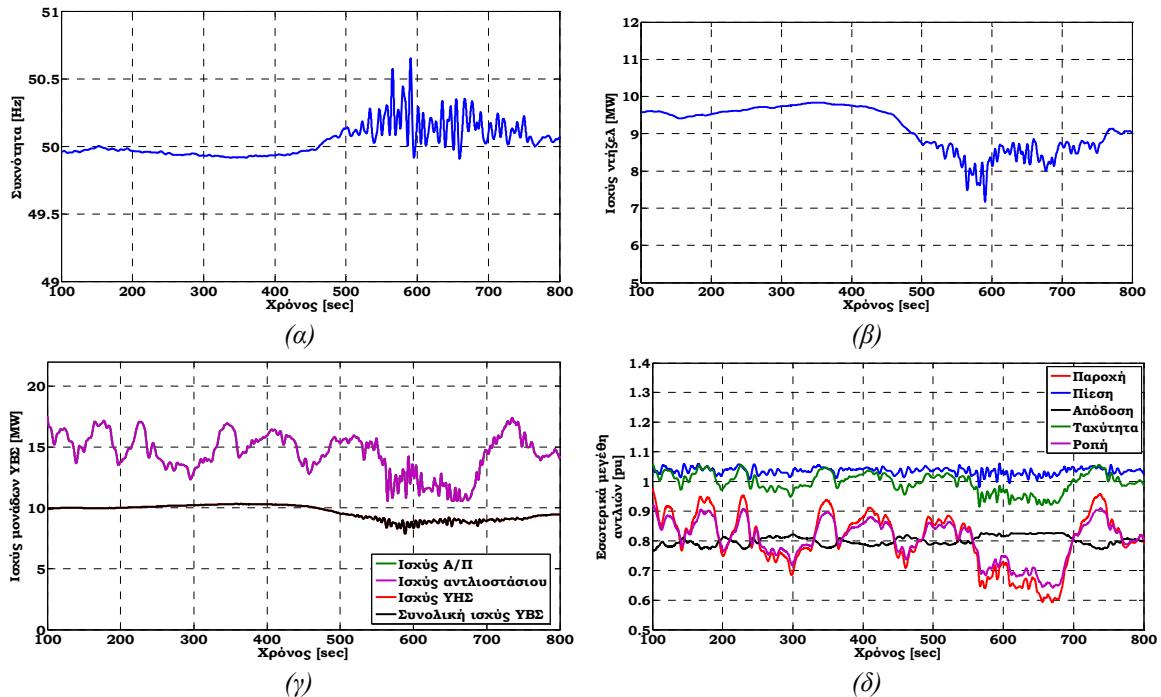
Α) Καθορισμός του set-point ισχύος του αντλιοστάσιου βάσει της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ

Στο Σχήμα 3.29 παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση που υφίσταται αντλιοαιολική συνεργασία εντός του ΥΒΣ και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. Από τη σύγκριση των Σχημάτων 3.29 και 3.9, διαπιστώνεται ότι με τη συγκεκριμένη λογική καθορισμού του set-point του αντλιοστάσιου η αντλιοαιολική συνεργασία δεν επιβαρύνει καθόλου το σύστημα από τη στιγμή που οι αντλίες αντισταθμίζουν επιτυχώς τις όποιες διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ, όπως φάνηκε και από την προηγούμενη ενότητα. Δηλαδή η αντλιοαιολική συνεργασία είναι ουδέτερη για το σύστημα, ενώ και η λειτουργία του Α/Π και του αντλιοστάσιου του ΥΒΣ δεν επηρεάζεται καθόλου από τη λειτουργία των εγκαταστάσεων εκτός ΥΒΣ, γι' αυτό και τα διαγράμματα που αφορούν το Α/Π και το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ είναι όμοια με τα αντίστοιχα του Σχήματος 3.24.



Σχήμα 3.29. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. Χωρίς ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ και τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλίων.

Η μεταβολή των αποτελεσμάτων του προηγούμενου σχήματος σε περίπτωση που οι Α/Γ του ΥΒΣ συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση του συστήματος (δυνατότητα που κρίθηκε απαραίτητη στην περίπτωση της υδροαιολικής συνεργασίας) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.30. Διαπιστώνεται ότι οι διακυμάνσεις της συχνότητας είναι ακριβώς όμοιες με του Σχήματος 3.29, δηλαδή δεν επιτυγχάνεται καμία βελτίωση στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, καθώς οι αντλίες, αντισταθμίζοντας τη μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής, αναιρούν παράλληλα τη συμμετοχή του Α/Π του ΥΒΣ στη ρύθμιση συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνονται οι καταπονήσεις των αιολικών και αντλησιοταμειυτικών εγκαταστάσεων του ΥΒΣ αλλά εντελώς ανούσια, από τη στιγμή που δεν επιτυγχάνεται καμία θετική επίπτωση για το σύστημα. Συνεπώς στα πλαίσια αυτά δεν είναι επιθυμητή η ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. Άλλωστε συνεπάγεται και ελαφρώς μειωμένη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και άρα απώλεια εσόδων για τον παραγωγό, από τη στιγμή που οι Α/Γ αποκλίνουν από την επιθυμητή ισχύ τους στα πλαίσια της ρύθμισης της συχνότητας. Σε περίπτωση όμως που υφίσταται παράλληλα και η υδροαιολική συνεργασία, τότε απαιτείται η παροχή πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας από τις Α/Γ, όπως διαπιστώθηκε από την προηγούμενη ενότητα, η οποία όμως σε μεγάλο βαθμό θα αναιρείται από τη λειτουργία των αντλιών που θα παρακολουθούν την αιολική ισχύ που προορίζεται για άντληση. Επομένως τίθεται το θέμα κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί η παρακολούθηση της αιολικής παραγωγής από τις αντλίες χωρίς να αναιρείται η απόκριση συχνότητας των Α/Γ.

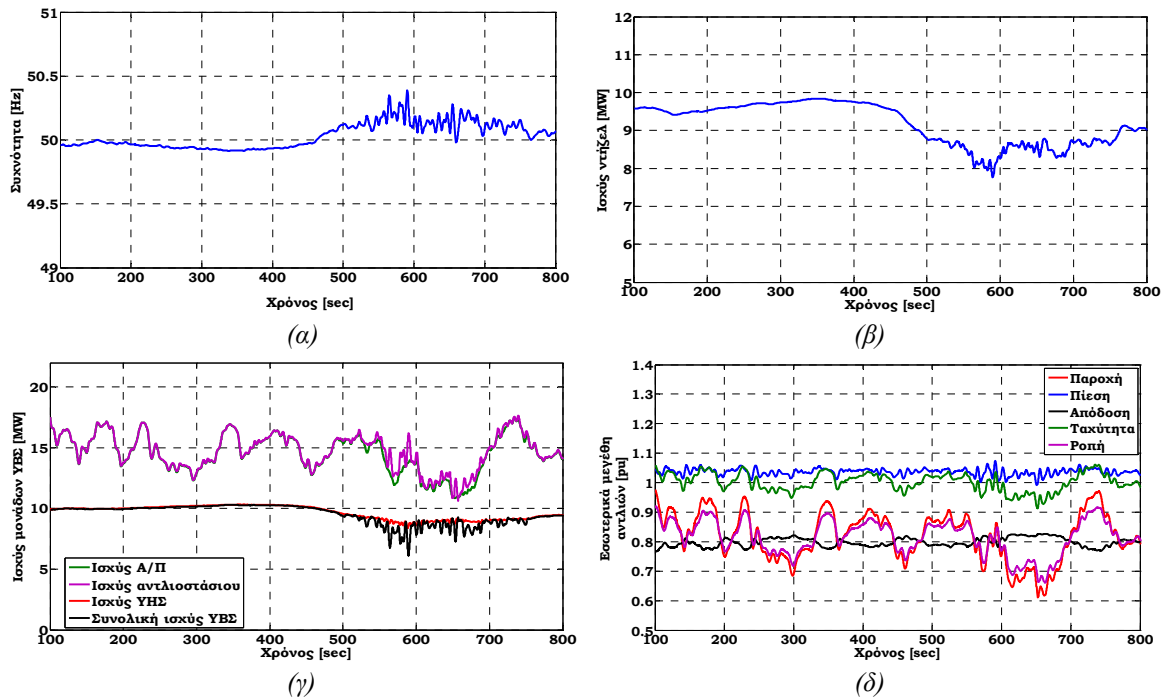


Σχήμα 3.30. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΔΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλησιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστασίου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση που οι αντλίες συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος αντί για τις Α/Γ του ΥΒΣ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.31, όπου διαπιστώνεται εμφανής μείωση των διακυμάνσεων της συχνότητας του συστήματος και της ισχύος των υπόλοιπων ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής. Μάλιστα η μεταβλητότητα της συχνότητας είναι μικρότερη ακόμη και από την περίπτωση που είναι σε λειτουργία μόνο μονάδες diesel (με τον ΥΒΣ εκτός, Σχήμα 3.9). Επίσης, η συνολική ισχύς του ΥΒΣ παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερες διακυμάνσεις συγκριτικά με τα δύο προηγούμενα σχήματα, αφού τώρα υφίστανται επιπλέον

και οι αποκλίσεις ισχύος αντλιών και Α/Π του ΥΒΣ, από τη στιγμή που οι αντλίες δεν αντισταθμίζουν μόνο τις διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ αλλά συμμετέχουν και στη ρύθμιση συχνότητας. Όσον αφορά τις καταπονήσεις των αντλιών, αυτές αυξάνονται (αλλά πάντα σε αποδεκτά επίπεδα) σε σχέση με το σενάριο του Σχήματος 3.29, λόγω της μεγαλύτερης μεταβλητότητας της ισχύος τους που συνεπάγεται η συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, παρουσιάζονται όμως μειωμένες συγκριτικά με το σενάριο του Σχήματος 3.30.

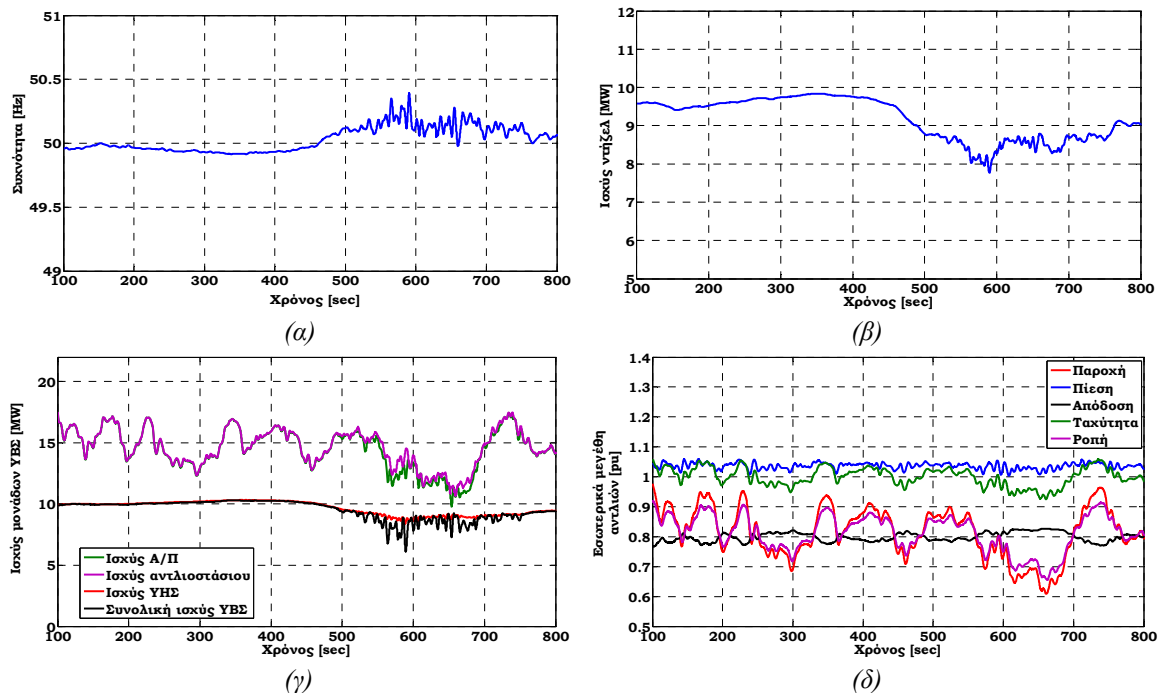
Συνεπώς αν είναι επιθυμητό η αντλιοαιολική συνεργασία να μην είναι απλώς ουδέτερη αλλά να έχει θετικές επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος, τότε ενδείκνυται η παροχή λειτουργιών πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας από τις αντλίες και όχι από τις Α/Γ του ΥΒΣ, με την εδώ εξεταζόμενη λογική καθορισμού του set-point ισχύος του αντλιοστάσιου.



Σχήμα 3.31. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

Τέλος στο Σχήμα 3.32 δίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε περίπτωση που τόσο οι Α/Γ όσο και οι αντλίες του ΥΒΣ συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Διαπιστώνεται ότι οι διακυμάνσεις της συχνότητας είναι παρόμοιες με του προηγούμενου σχήματος, όπου ρύθμιση συχνότητας κάνουν μόνο οι αντλίες. Αυτό γιατί στην προκειμένη περίπτωση η παρεχόμενη ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ αναιρείται από τις αντλίες. Σημειωτέον ότι οι αντλίες φαίνεται να καταπονούνται λιγότερο σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα, καθώς ο συνδυασμός της στιγμιαίας παρακολούθησης της αιολικής ισχύος (που περιλαμβάνει τις μεταβολές ισχύος λόγω ρύθμισης συχνότητας από τις Α/Γ) και της παρεχόμενης ρύθμισης συχνότητας από τις αντλίες, εξομαλύνει τις μεταβολές της απορροφούμενης ισχύος των αντλιών, από τη στιγμή που οι δύο αυτές λειτουργίες επιφέρουν μεταβολές με αντίθετο πρόσημο στην ισχύ των αντλιών σε περίπτωση διαταραχών στο σύστημα. Το μειονέκτημα είναι ότι μειώνεται η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού λόγω της ρύθμισης συχνότητας από τις Α/Γ και χωρίς κάποιο αποτέλεσμα για το σύστημα. Οπότε φαίνεται πως δεν υπάρχει λόγος για ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ υπό αυτές τις συνθήκες. Ωστόσο αν συνυπάρχει και υδροαιολική συνεργασία τότε η συγκεκριμένη επικουρική υπηρεσία των Α/Γ κρίνεται απαραίτητη για το σύστημα, όπως προέκυψε από την ανάλυση

της προηγούμενης ενότητας. Σε αυτήν την περίπτωση θα αναιρείται μεν κατά ένα μέρος η ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ, θα αντισταθμίζεται δε από την παρεχόμενη ρύθμιση συχνότητας των αντλιών. Σημειωτέον ότι η ρύθμιση συχνότητας των Α/Γ δε θα αναιρείται πλήρως στις μεγάλες διαταραχές του συστήματος λόγω του περιορισμένου εύρους μεταβολής της ισχύος των αντλιών, το οποίο στην περίπτωση που θα συνυπάρχει και η υδροαιολική συνεργασία θα είναι μικρότερο, καθώς από τη στιγμή που η διαθέσιμη αιολική ισχύς του ΥΒΣ δε θα αξιοποιείται μόνο για άντληση, η ονομαστική ικανότητα των ενταγμένων αντλιών θα υπολείπεται της συνολικής αιολικής ισχύος.



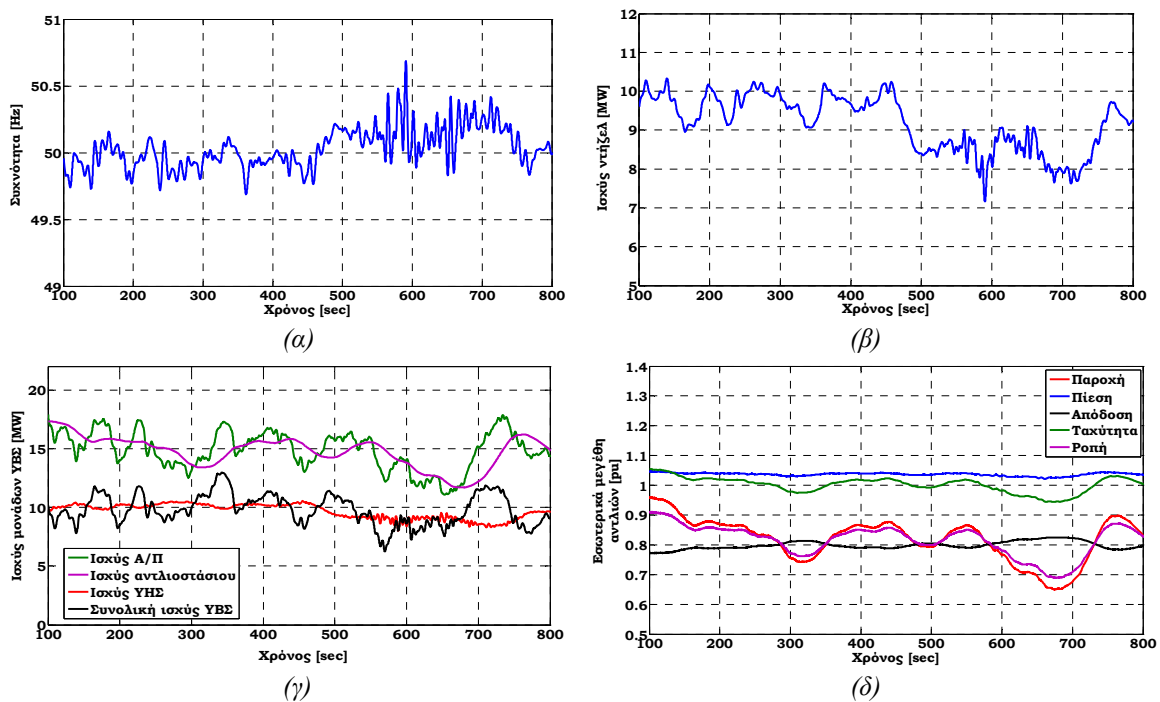
Σχήμα 3.32. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ και τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η αντλιοαιολική συνεργασία δεν επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στο σύστημα του νησιού εφόσον οι αντλίες παρακολουθούν τη στιγμιαία ισχύ των αιολικών του ΥΒΣ, ενώ επίσης δεν υπάρχει λόγος οι Α/Γ του ΥΒΣ να παρέχουν λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας (εφόσον βέβαια δεν υφίσταται παράλληλα υδροαιολική συνεργασία) και να προκύπτει μειωμένη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και άρα απώλεια εσόδων για τον παραγωγό. Αν ήταν επιθυμητό η αντλιοαιολική συνεργασία να συμβάλει θετικά στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, τότε θα μπορούσαν να παρέχουν λειτουργίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας οι αντλίες. Σε αυτήν την περίπτωση δεν προκύπτει και μείωση εσόδων για τον παραγωγό αφού το αιολικό δυναμικό αξιοποιείται πλήρως, ενώ ως μειονέκτημα υφίσταται η αύξηση των καταπονήσεων των αντλιών λόγω της μεγαλύτερης μεταβλητότητας της ισχύος τους, πάντα όμως σε αποδεκτά επίπεδα. Επίσης, η ρύθμιση συχνότητας από τις αντλίες είναι επιθυμητή και στις περιπτώσεις που θα συνυπάρχουν η υδροαιολική και αντλιοαιολική συνεργασία, καθώς σε αντίθετη περίπτωση οι αντλίες θα αναιρούν σε μεγάλο βαθμό (στα πλαίσια του εύρους μεταβολής της ισχύος τους) τη ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. Αν συμμετέχουν όμως οι αντλίες στην πρωτεύουσα ρύθμιση, τότε η αναίρεση της ρύθμισης συχνότητας από τις Α/Γ αντισταθμίζεται από τις αντίστοιχες υπηρεσίες των αντλιών, με αποτέλεσμα ο ΥΒΣ στο σύνολό του να συνεχίζει να συμβάλλει θετικά στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

B) Καθορισμός του set-point ισχύος του αντλιοστάσιου βάσει του κινούμενου μέσου της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα σενάρια της προηγούμενης παραγράφου, με το set-point της ισχύος του αντλιοστάσιου να καθορίζεται αυτή τη φορά βάσει του κινούμενου μέσου της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με αυτήν τη λογική δεν αντισταθμίζεται βέβαια πλήρως η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής αλλά δεν αναιρείται και η ενδεχόμενη ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ.

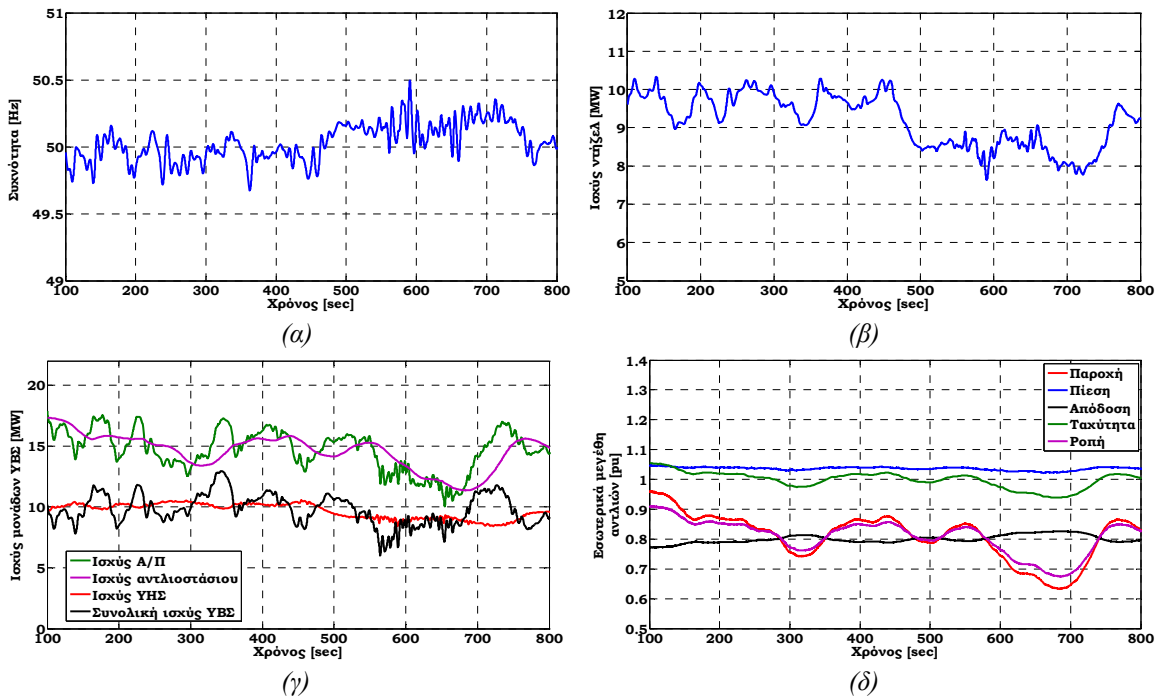
Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.33 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το σενάριο που το αντλιοστάσιο ακολουθεί απλώς την κύρια τάση της αιολικής παραγωγής και χωρίς καμιά επικουρική υπηρεσία από τις αιολικές και αντλιοσταμειυτικές εγκαταστάσεις του ΥΒΣ. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι διακυμάνσεις της συχνότητας του συστήματος αυξάνονται συγκριτικά με τα Σχήματα 3.29 και 3.9, καθώς στην προκειμένη περίπτωση προστίθεται στο σύστημα η διαταραχή των αποκλίσεων ισχύος του αντλιοστάσιου και του Α/Π του ΥΒΣ.



Σχήμα 3.33. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοσταμειυτική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Χωρίς ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ και τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

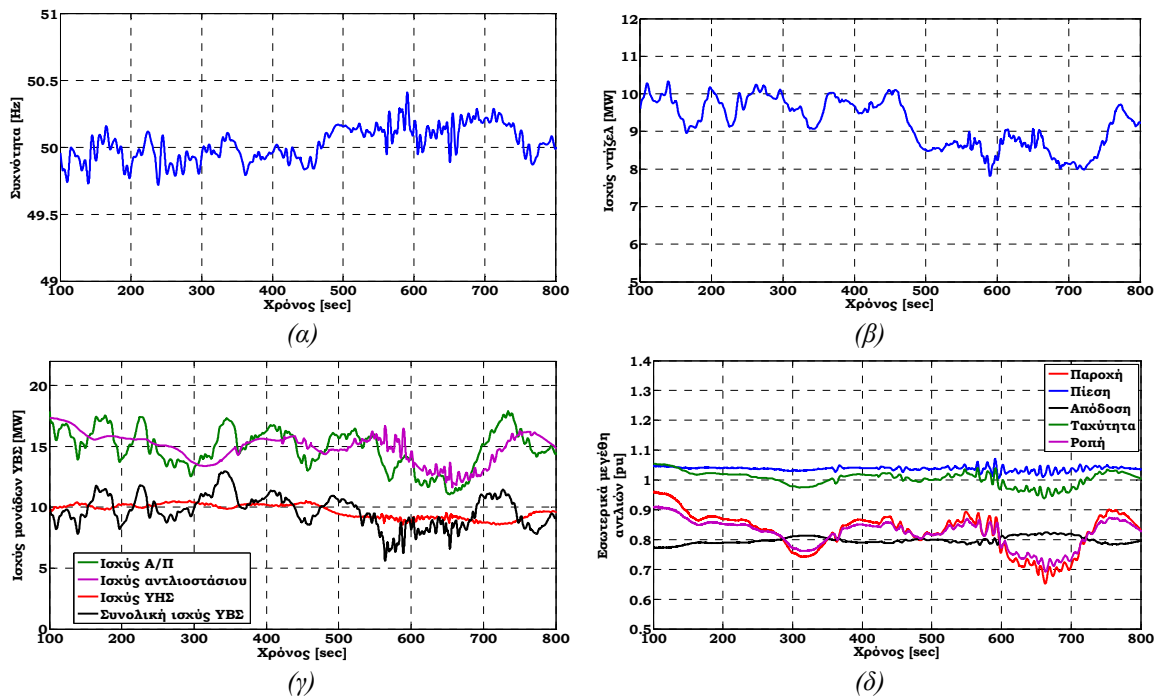
Στο Σχήμα 3.34 παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περίπτωση που οι Α/Γ του ΥΒΣ συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Όπως είναι φυσικό οι διακυμάνσεις της συχνότητας μειώνονται σε σχέση με του Σχήματος 3.33 από τη στιγμή που μια επιπλέον μονάδα συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Από την άλλη συγκρίνοντας με τα σενάρια των Σχημάτων 3.29 αλλά και 3.9 (χωρίς αντλιοσταμειυτική συνεργασία), διαπιστώνεται ότι στην προκειμένη περίπτωση και για την περίοδο των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου για τα Α/Π εκτός ΥΒΣ (100-500 s) και άρα της χαμηλής διακύμανσης της ισχύος τους (βλ. Σχήμα 3.8), οι διακυμάνσεις της συχνότητας του συστήματος αυξάνονται από τη στιγμή που η ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ δεν καταφέρνει να αντισταθμίσει πλήρως τις αποκλίσεις αντλητικής και αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, όπως φάνηκε στην παράγραφο 3.5.2.2 (βλ. Σχήμα 3.26). Αντίθετα στην περίοδο των υψηλών ταχυτήτων ανέμου (500-800 s) οπότε είναι αυξημένες οι απαιτήσεις για

πρωτεύουσα εφεδρεία, οι διακυμάνσεις της συχνότητας του συστήματος μειώνονται λόγω της προστιθέμενης επικουρικής υπηρεσίας των Α/Γ του ΥΒΣ.



Σχήμα 3.34. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστασίου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

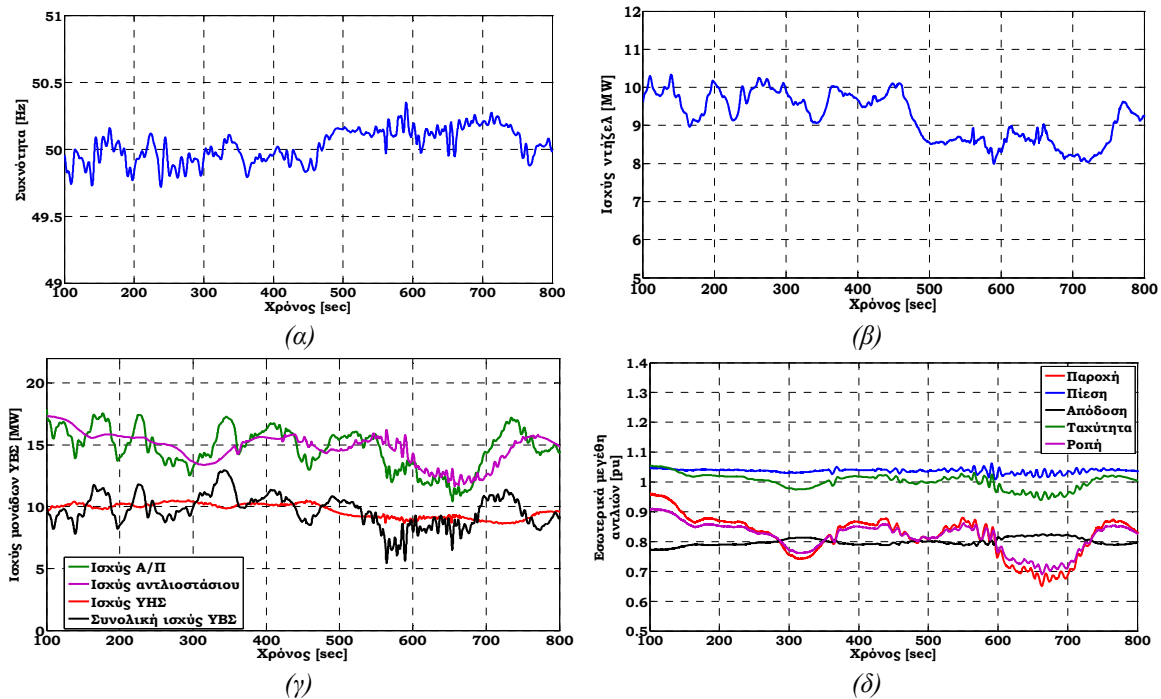
Αν οι αντλίες παρέχουν ρύθμιση συχνότητας αντί για τις Α/Γ του ΥΒΣ, τότε τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται σε αυτά του Σχήματος 3.35. Συγκριτικά με το Σχήμα 3.34, διαπιστώνεται περαιτέρω μείωση των διακυμάνσεων της συχνότητας του συστήματος, λόγω του ότι ο ελεγκτής στατισμού στην περίπτωση των αντλιών είναι ενεργός σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας (υπερσυχνότητας και υποσυχνότητας). Ωστόσο οι διακυμάνσεις της συχνότητας παραμένουν μεγαλύτερες συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος από το αντλιοστάσιο, καθώς στην προκειμένη περίπτωση υφίστανται πάντα οι αποκλίσεις της αιολικής και αντλητικής ισχύος του ΥΒΣ, που αντισταθμίζουν εν μέρει το όφελος από την παρεχόμενη επικουρική υπηρεσία του αντλιοστασίου. Όσον αφορά τις καταπονήσεις των αντλιών, αυτές είναι αυξημένες σε σχέση με το Σχήμα 3.34 λόγω της παρεχόμενης ρύθμισης συχνότητας από το αντλιοστάσιο, αλλά μικρότερες συγκριτικά με το Σχήμα 3.31 από τη στιγμή που δε χρειάζεται οι αντλίες να παρακολουθούν την αιολική ισχύ του ΥΒΣ σε στιγμιαία βάση.



Σχήμα 3.35. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.

Τέλος στο Σχήμα 3.36 παρατίθενται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος συμμετέχουν τόσο οι Α/Γ όσο και οι αντλίες του ΥΒΣ. Όπως ήταν αναμενόμενο, σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν οι μικρότερες διακυμάνσεις συχνότητας συγκριτικά με τα σενάρια των τριών προηγούμενων σχημάτων. Συγκρίνοντας με το αντίστοιχο σενάριο της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, διαπιστώνεται ότι στο υπόψη σενάριο προκύπτει αύξηση της μεταβλητότητας της συχνότητας στην περίοδο των χαμηλών διακυμάνσεων της αιολικής ισχύος εκτός ΥΒΣ, ενώ προκύπτει παρόμοιο εύρος μεταβολής στην περίοδο των σημαντικών διαταραχών για το σύστημα αλλά με μικρότερη καταπόνηση για το αντλιοστάσιο.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στην περίπτωση διαταραχών για το σύστημα που δε σχετίζονται με διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής, όπως π.χ. απώλεια μονάδας, με τη λογική της παρακολούθησης των μέσων τιμών της αιολικής παραγωγής και με ρύθμιση συχνότητας τόσο από τις Α/Γ όσο και από τις αντλίες του ΥΒΣ, το σύστημα αναμένεται πιο στιβαρό, με καλύτερη δυναμική συμπεριφορά συγκριτικά με τη λογική της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος όπου ουσιαστικά ρύθμιση συχνότητας μπορούν να παρέχουν μόνο οι αντλίες.



Σχήμα 3.36. Προσομοίωση του συστήματος του ΜΑΝ για σταθερό φορτίο, με όλα τα Α/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλιοαιολική συνεργασία) και το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου ισούται με τον κινούμενο μέσο της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Με ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ και τις αντλίες του ΥΒΣ. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλίων.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν το set-point της ισχύος του αντλιοστάσιου καθορίζεται βάσει μέσων τιμών της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ τότε υφίστανται αποκλίσεις μεταξύ της αιολικής και αντλητικής ισχύος του ΥΒΣ, συνιστώντας διαταραχή για το σύστημα και προσθέτοντας επιπλέον μεταβλητότητα στη συχνότητα του συστήματος. Από την άλλη οι καταπονήσεις του αντλιοστάσιου είναι μειωμένες, ενώ δεν αναιρείται και η όποια ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος από το αντλιοστάσιο. Προκειμένου να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος απαιτείται συμμετοχή στην πρωτεύουσα ρύθμιση είτε από τις Α/Γ είτε από τις αντλίες του ΥΒΣ ή ακόμη καλύτερα και από τα δύο. Μάλιστα σε περιόδους σημαντικών διαταραχών, οπότε και οι ανάγκες του συστήματος για πρωτεύουσα εφεδρεία είναι σημαντικές, η αντλιοαιολική συνεργασία με αυτήν τη λογική καθορισμού του set-point του αντλιοστάσιου και με ρύθμιση συχνότητας είτε από την αντλητική είτε από την αιολική εγκατάσταση του ΥΒΣ, βελτιώνει τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με το σενάριο όχι μόνο της μη ύπαρξης της αντλιοαιολικής συνεργασίας αλλά και της μη λειτουργίας του ΥΒΣ. Και αν συμμετέχουν και οι Α/Γ και οι αντλίες του ΥΒΣ από κοινού στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας τότε τα αποτελέσματα προσεγγίζουν αυτά της στιγμιαίας παρακολούθησης της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ όταν η ρύθμιση συχνότητας πραγματοποιείται από τις αντλίες. Επιπλέον η συγκεκριμένη λογική καθορισμού θα μπορούσε να υιοθετηθεί σε ΥΒΣ που είναι επιθυμητή η εφαρμογή της υδροαιολικής συνεργασίας και παράλληλα δε διατίθενται αντλίες με ικανότητα ρύθμισης συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, επειδή είναι απαραίτητη η ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ, δεν ενδείκνυται η παρακολούθηση της στιγμιαίας ισχύος του Α/Π του ΥΒΣ καθώς θα αναιρούνταν η συγκεκριμένη επικουρική υπηρεσία των Α/Γ. Επίσης, η υπόψη λογική ενδείκνυται για μεγάλα νησιωτικά συστήματα όπου λειτουργεί πλήθος ΥΒΣ με σημαντική διασπορά των Α/Π τους, οι ταχείες μεταβολές της παραγωγής των οποίων αλληλοαναιρούνται σε σημαντικό βαθμό και άρα δεν υφίσταται ανάγκη στιγμιαίας αντισταθμίσεώς τους.

3.5.2.3 Ισχυρά βραχυκυκλώματα

Στην § 3.3.3 παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την προσομοίωση στέρεου βραχυκυκλώματος στο σύστημα μεταφοράς, με επακόλουθη απώλεια όλων των Α/Π του συστήματος που προηγουμένως λειτουργούσαν στην ονομαστική τους ισχύ (δυσμενέστερη περίπτωση), χωρίς και με τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα για το ίδιο σενάριο λειτουργίας, με τη διαφορά όμως ότι τώρα υφίσταται και αντλησιοαιολική συνεργασία εντός του ΥΒΣ, με τις Α/Γ και τις αντλίες να λειτουργούν στην ονομαστική τους ισχύ.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.37, όπου έχει θεωρηθεί ότι οι αντλίες δεν έχουν FRT ικανότητα, οπότε για λόγους προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος των VSDs, αποσυνδέονται σε 100 ms από τη στιγμή που συμβαίνει το σφάλμα, μαζί με τα Α/Π εκτός ΥΒΣ. Στον ίδιο περίπου χρόνο εκκαθαρίζεται και το σφάλμα, ενώ στη συνέχεια αποσυνδέεται και το Α/Π του ΥΒΣ λόγω απώλειας του αντλιοστάσιου και παραβίασης του ισοζυγίου ισχύος του ΥΒΣ²². Η αποσύνδεση του Α/Π θα γίνει μετά από 1 s, καθώς λαμβάνεται υπόψη η αναμενόμενη καθυστέρηση στην επικοινωνία των επιμέρους μονάδων και του κεντρικού συστήματος ελέγχου του ΥΒΣ.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.37 και 3.11, διαπιστώνεται ότι αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος και μέχρι να αποσυνδεθεί το Α/Π του ΥΒΣ, η συχνότητα στο Σχήμα 3.37 αυξάνεται ενώ στο Σχήμα 3.11 μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση του Σχήματος 3.37, εκτός από τα Α/Π χάνεται και το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ. Και επειδή η απορροφούμενη ισχύς των αντλιών πριν το σφάλμα είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη ισχύ των Α/Π εκτός ΥΒΣ, συνολικά προκύπτει απώλεια φορτίου για το σύστημα και άρα αύξηση συχνότητας. Η αύξηση της συχνότητας περιορίζεται από τις ρυθμιζόμενες μονάδες του συστήματος, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και το Α/Π του ΥΒΣ, το οποίο μέχρι να αποσυνδεθεί μεταβάλλει την ισχύ του σε συνάρτηση με τη συχνότητα του συστήματος. Στη συνέχεια, με την αποσύνδεση του Α/Π του ΥΒΣ προκύπτει έλλειμμα παραγωγής για το σύστημα και η συχνότητα πέφτει αρκετά χαμηλά, κάτω και από 47 Hz, όπως και στην περίπτωση του Σχήματος 3.11, κάτι που θα προκαλέσει σημαντική απόρριψη φορτίου από την προστασία υποσυχνότητας του συστήματος. Δηλαδή η ύπαρξη της αντλησιοαιολικής συνεργασίας δε διαφοροποιεί τα αποτελέσματα (εκτός από το διάστημα του πρώτου δευτερόλεπτου από τη στιγμή που συμβαίνει το σφάλμα) καθώς λόγω του σφάλματος, τόσο οι αντλίες όσο και το Α/Π τίθενται εκτός λειτουργίας.

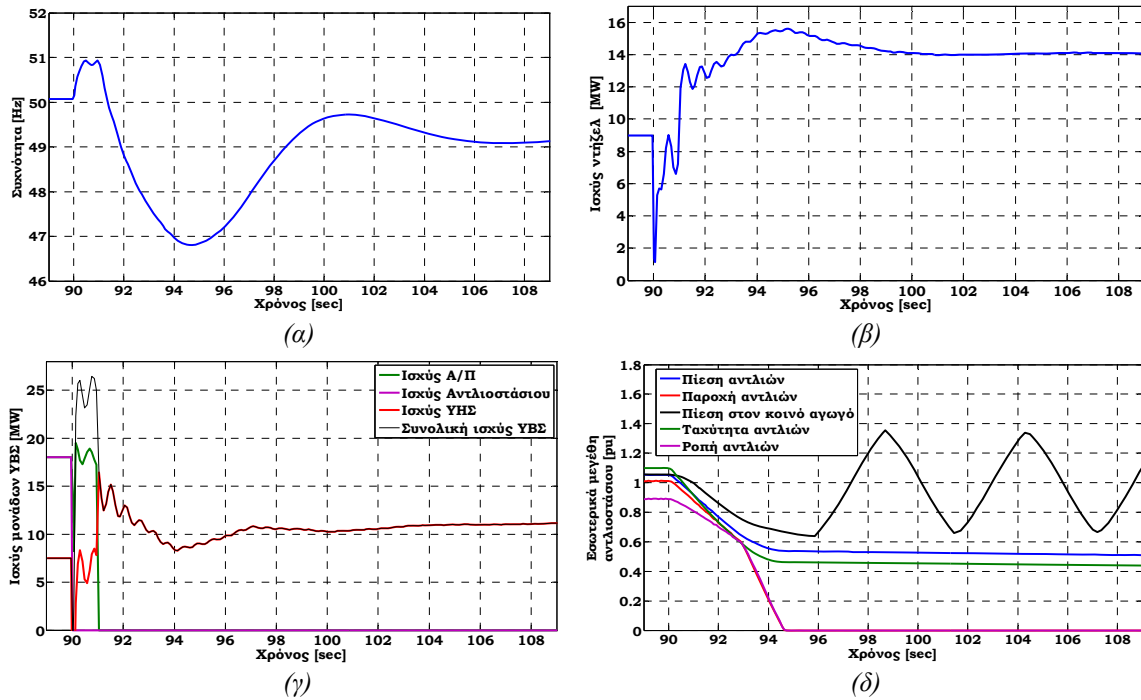
Σχετικά με την καταπόνηση του αντλιοστάσιου κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, η προσοχή επικεντρώνεται στις μεταβολές της πίεσης, δηλαδή στα κύματα υπερπίεσης και υποπίεσης που λαμβάνουν μέρος στους αγωγούς λόγω της άμεσης αποσύνδεσης των αντλιών. Τα αποτελέσματα για τα εσωτερικά μεγέθη των αντλιών παρουσιάζονται στο διάγραμμα (δ). Όταν ανοίγουν οι διακόπτες των κινητήρων των αντλιών, η ηλεκτρική ισχύς τους μηδενίζεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται πολύ γρήγορα η ταχύτητα περιστροφής τους και άρα η πίεση και η ροπή των αντλιών. Συνεπώς η παροχή των αντλιών μηδενίζεται και τείνει να αντιστραφεί. Για το λόγο αυτόν θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη, μέσω αυτοματισμού, να ενεργοποιείται η στραγγαλιστική βάνα και να αποτρέπει αντιστροφή της ροής του ρευστού. Στην προκειμένη περίπτωση δεν έχει προσομοιωθεί το κλείσιμο της βάνας, καθώς δεν είναι γνωστή επακριβώς η διαδικασία κλεισίματος των αντλιών²³, αλλά απλώς επιβάλλεται ως ελάχιστη τιμή για την παροχή το μηδέν²⁴. Η απότομη μετα-

²² Για λόγους ασφαλείας του συστήματος, σε περίπτωση απώλειας είτε του Α/Π είτε του αντλιοστάσιου του ΥΒΣ, ενδείκνυται η άμεση αποσύνδεση και του άλλου, προς αποφυγή των συνεπαγόμενων μεγάλων αποκλίσεων ισχύος που θα συνιστούσαν σημαντική διαταραχή για το σύστημα.

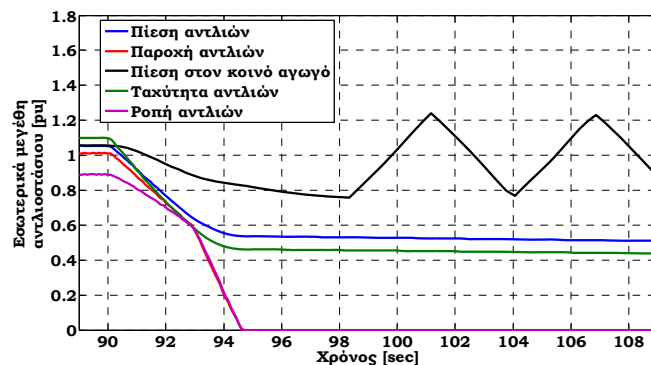
²³ Λογικά η βάνα θα πρέπει να κλείνει με τέτοιο ρυθμό ώστε το οριστικό κλείσιμο της να συμβαίνει μεν πριν την αντιστροφή της παροχής, όχι όμως πολύ σύντομα, προς αποφυγή του απότομου μηδενισμού της παροχής και άρα πρόκλησης μεγαλύτερων μεταβατικών πίεσης εντός των αγωγών.

²⁴ Σημειωτέον ότι μετά το μηδενισμό της παροχής, οι στροφές της αντλίας φαίνεται να μη μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου. Αυτό οφείλεται στο ότι η μηδενική παροχή συνεπάγεται μηδενική μηχανική ροπή. Στην πραγματικότητα όμως υφίστανται οι απώλειες περιστροφής της αντλίας οι οποίες θα την επιβραδύνουν άμεσα.

βολή της παροχής των αντλιών έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση κυμάτων πίεσης στο εσωτερικό των αγωγών κατάθλιψης, εύρους 0.7-1.3 α.μ.. Σημειώτέον ότι η διαταραχή της άμεσης αποσύνδεσης των αντλιών αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση από πλευράς καταπονήσεων του αντλιοστάσιου και αν τα προκαλούμενα μεταβατικά πίεσης κρίνονται απαγορευτικά για την αντοχή του εξοπλισμού τότε απαιτείται αύξηση της αδράνειας των στρεφόμενων μαζών των αντλιών. Ενδεικτικά αποτελέσματα όσον αφορά τα εσωτερικά μεγέθη του αντλιοστάσιου, για διπλάσια αδράνεια των αντλιών ($H_p=4.16$ s), δίνονται στο Σχήμα 3.38, όπου διαπιστώνεται μείωση του πλάτους των προκαλούμενων κυμάτων πίεσης.



Σχήμα 3.37. Προσομοίωση του συστήματος του MAN για στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς, με όλα τα A/Π του συστήματος και τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ αξιοποιείται πλήρως για άντληση (αντλησιοαιολική συνεργασία). Οι αντλίες δεν έχουν FRT ικανότητα. α) Συχνότητα του συστήματος, β) Ισχύς των μονάδων diesel, γ) Ισχύς των επιμέρους μονάδων και συνολική ισχύς ΥΒΣ, δ) Εσωτερικά μεγέθη αντλιών.



Σχήμα 3.38. Μεταβολή των εσωτερικών μεγεθών του αντλιοστάσιου για μεγαλύτερη αδράνεια των στρεφόμενων μαζών των αντλιών, $H_p=4.16$ s.

Επομένως η αντλησιοαιολική συνεργασία δεν αναμένεται να έχει καμία επίδραση στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια ισχυρών σφαλμάτων στο δίκτυο. Θετικές επιπτώσεις θα μπορούσε να έχει μόνο στην περίπτωση που οι αντλίες επιδεικνύουν ικανότητα FRT και παράλληλα παρέχεται ρύθμιση συχνότητας από το αντλιοστάσιο στην περίπτωση καθορισμού

του set-point του βάσει της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, ή από τουλάχιστον ένα εκ των Α/Π και αντλιοστάσιου του ΥΒΣ στην περίπτωση καθορισμού του set-point του βάσει του κινούμενου μέσου της αιολικής ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση η βύθιση της συχνότητας λόγω του ισχυρού βραχυκυκλώματος θα περιορίζονταν σημαντικά, σε επίπεδα ανάλογα με την περίπτωση της υδροαιολικής συνεργασίας όπου εκεί τη ρύθμιση συχνότητας πραγματοποιούν οι Α/Γ του ΥΒΣ (βλ. §3.4.2.3). Επίσης με το να έχουν FRT ικανότητα οι αντλίες αποφεύγονται πρόσθετοι χειρισμοί στο αντλιοστάσιο και άρα και στο Α/Π του ΥΒΣ, καθώς και η όποια απώλεια εσόδων του παραγωγού λόγω αποσύνδεσης του Α/Π. Ωστόσο παραμένει ανοικτό το ζήτημα του κατά πόσο η ικανότητα FRT υφίσταται σε εμπορικά διαθέσιμες αντλίες, καθώς και τα περιθώρια παραμονής τους σε λειτουργία υπό συνθήκες βύθισης της τάσης λόγω υποτάχυνσής τους.

3.6 Συμπεράσματα

Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου ήταν η διερεύνηση των επιπτώσεων της ένταξης και λειτουργίας ενός ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ενός ΜΔΝ. Για το σκοπό αυτόν πραγματοποιήθηκε δυναμική προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος ενός τυπικού ΜΔΝ με χρήση του προγράμματος DigSilent/PowerFactory και αναλύθηκε εκτενώς η δυναμική συμπεριφορά του, χωρίς και με ενταγμένο έναν ενδεικτικό ΥΒΣ, για τις πλέον κρίσιμες από τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος.

Συγκεκριμένα, αφού αρχικά διερευνήθηκε συγκριτικά η δυναμική απόκριση των μονάδων diesel και των υδροστρόβιλων σε ό,τι αφορά την επιτυγχανόμενη ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομα συστήματα, στη συνέχεια εξετάστηκαν οι επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος του ΜΔΝ από την υποκατάσταση συμβατικών μονάδων από υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, μέσω προσομοιώσεων διαφόρων πιθανών σεναρίων που αφορούσαν είτε την κανονική λειτουργία του συστήματος είτε τις δυσμενέστερες αναμενόμενες διαταραχές. Ακολούθως διερευνήθηκε το θέμα της υδροαιολικής συνεργασίας, δηλαδή της υποκατάστασης υδραυλικής παραγωγής από αιολική, και των επιπτώσεών της στο σύστημα του ΜΔΝ, ενώ στη συνέχεια εξετάστηκε το θέμα της συνεργασίας του αιολικού πάρκου (Α/Π) και των αντλιών του ΥΒΣ σε ό,τι αφορά την ικανότητα του αντλητικού συγκροτήματος να παρακολουθεί τις μεταβολές της αιολικής παραγωγής και τις ενδεχόμενες επιπτώσεις αυτής της κατάστασης λειτουργίας στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου παρατίθενται αμέσως παρακάτω.

Αναλυτικότερα, από τη **συγκριτική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς των μονάδων diesel και των υδροστρόβιλων** προέκυψαν τα εξής:

- Οι υδροστρόβιλοι φαίνεται να επιδεικνύουν υποδεέστερη δυναμική απόκριση συγκριτικά με τις μονάδες diesel κατά τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Θα πρέπει βέβαια να συνυπολογιστεί και το γεγονός ότι στην πραγματικότητα η απόκριση της πλειοψηφίας των υφιστάμενων μονάδων diesel στα ΜΔΝ απέχει από την ιδεατή συμπεριφορά των προσομοιώσεων.
- Η δυναμική απόκριση του ΥΗΣ του ΥΒΣ παρουσιάζεται αναλογικά καλύτερη για χαμηλότερες φορτίσεις των υδροστρόβιλων, καθώς και για μικρότερο αριθμό υδροστροβιλικών μονάδων σε λειτουργία, λόγω του κοινού αγωγού προσαγωγής. Δηλαδή για μικρότερη συνολική φόρτιση του ΥΗΣ του ΥΒΣ βελτιώνεται και η δυναμική του απόκριση.
- Βελτίωση της δυναμικής απόκρισης των υδροστρόβιλων για ΥΗΣ με δεδομένες υψομετρικές διαφορές μπορεί να επιτευχθεί είτε με αύξηση της αδράνειας των στρεφόμενων μαζών των υδροστρόβιλων μέσω προσθήκης σφονδύλων, είτε με μείωση των χαρακτηριστικών χρόνων T_w και T_e μέσω αύξησης της διατομής του αγωγού προσαγωγής ή της κατασκευής πύργου αναπόσβεως πλησίον των υδροστρόβιλων, [40, 45, 62, 63]. Βέβαια οι συγκεκριμένες λύσεις αυξάνουν σημαντικά το κόστος εγκατάστασης του ΥΗΣ. Άλλωστε η περαιτέρω βελτίωση της δυνα-

μικής απόκρισης των υδροστρόβιλων δεν κρίνεται καθοριστικής σημασίας εφόσον τόσο οι Α/Γ όσο και οι αντλίες του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT και παρέχουν λειτουργίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, όπως προκύπτει από τα επόμενα συμπεράσματα.

Από τη διερεύνηση των επιπτώσεων της υποκατάστασης μονάδων diesel από τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ προέκυψαν τα παρακάτω:

- Η υποκατάσταση των συμβατικών μονάδων από τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ στο υψηλό και ενδιάμεσο φορτίο (οπότε και αναμένεται να εντάσσονται οι υδροστρόβιλοι του ΥΒΣ από το ΔΜΔΝ) επιβαρύνει τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος λόγω της χειρότερης δυναμικής τους απόκρισης. Η επιβάρυνση αυτή αφορά βασικά το ενδιάμεσο φορτίο όπου οι υδροστρόβιλοι αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό της συνολικής ικανότητας παραγωγής. Επίσης δεν ενδείκνυται η ένταξή τους σε καταστάσεις χαμηλού φορτίου, ώστε να αποφευχθούν σημαντικές απορρίψεις φορτίου σε περίπτωση απώλειας κάποιας μονάδας παραγωγής.
- Όταν οι υδροστρόβιλοι εντάσσονται για παραγωγή σε καταστάσεις ενδιάμεσου φορτίου (οπότε θα αποτελούν σημαντικό ποσοστό της ικανότητας παραγωγής του συστήματος), τα επίπεδα διείσδυσης των Α/Π του συστήματος θα πρέπει να περιορίζονται σημαντικά, σε τιμές περί το 15-20% του φορτίου, αν τίθεται η απαίτηση μηδενικής περικοπής φορτίου ακόμη και σε πλήρη απώλεια της αιολικής παραγωγής. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να έχει επίπτωση στις ΣΑΩΛ των Α/Π, η οποία είναι εξεταστέο κατά πόσο αντισταθμίζεται από τα χαμηλότερα τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων.
- Η επιδείνωση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος λόγω της ένταξης των υδροστρόβιλων ισχύει κυρίως για τα μικρά και μέσου μεγέθους νησιωτικά συστήματα με ΑΣΠ που αποτελούνται βασικά από μονάδες diesel. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις όμως, θα πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός ότι η πραγματική συμπεριφορά των υφιστάμενων μονάδων diesel στα ΜΔΝ απέχει από την ιδεατή των προσομοιώσεων. Για μεγαλύτερα συστήματα από την άλλη, όπως αυτά της Κρήτης και της Ρόδου με σταθμούς παραγωγής αποτελούμενους και από μονάδες διαφορετικού τύπου (όπως ατμοστρόβιλους ή συνδυασμένου κύκλου), των οποίων η απόκριση δεν υπερτερεί των υδροστρόβιλων, η υποκατάσταση συμβατικών μονάδων από τον ΥΗΣ του ΥΒΣ δεν αναμένεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος, (βλ. [89, 90]).
- Όταν ο ΥΒΣ διαθέτει Α/Γ αλλά και αντλίες με απόκριση συχνότητας και FRT ικανότητα, τότε η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος παρουσιάζεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παρόμοια ή και καλύτερη σε σχέση με την κατάσταση χωρίς τον ΥΒΣ σε λειτουργία. Προφανής προϋπόθεση είναι να βρίσκονται οι Α/Γ του ΥΒΣ σε λειτουργία, πράγμα που βεβαίως θα συμβαίνει όταν το σύστημα λειτουργεί υπό συνθήκες υψηλής αιολικής διείσδυσης, οπότε και υπάρχει βασικά αυξημένη ανάγκη για πρωτεύουσα εφεδρεία.

Από τη διερεύνηση της υδροαιολικής συνεργασίας και των επιπτώσεών της στο σύστημα του ΜΔΝ, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι υδροστρόβιλοι δεν έχουν την απαιτούμενη ταχύτητα απόκρισης ώστε να παρακολουθούν πλήρως τις μεταβολές της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ. Ωστόσο, η υδροαιολική συνεργασία μπορεί να γίνει αποδεκτή από το ΔΜΔΝ, υπό την έννοια ότι δεν αναμένεται να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος για κάθε πιθανό σενάριο λειτουργίας, εφόσον ισχύουν όλες οι παρακάτω προϋποθέσεις:
 - Οι Α/Γ του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT.
 - Οι Α/Γ του ΥΒΣ θα πρέπει να παρέχουν λειτουργίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, οι οποίες θα περιλαμβάνουν έλεγχο στατισμού (droop control) και απαραίτητως έλεγχο αδρανειακής απόκρισης (inertia control). Η απόκριση συχνότητας όμως θα πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμη μετά την εκδήλωση της διαταραχής και όχι σε χρόνους λίγων δευτερολέπτων.

- Οι Α/Γ του ΥΒΣ είναι ηλεκτρικά διαχωρισμένες σε περισσότερες της μιας ομάδες, ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα απώλειας του συνόλου της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ.
- Το set-point για τον περιορισμό της αιολικής ισχύος που θα εγχέεται άμεσα στο δίκτυο υποκαθιστώντας ισχύ υδροστρόβιλων θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε πάντοτε να υπάρχει επαρκής αδρανειακή εφεδρεία ισχύος (περιθώριο μέχρι την ονομαστική) τουλάχιστον ίση με την αναμενόμενη απώλεια αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ που προκύπτει από την απώλεια μιας ομάδας Α/Γ του ΥΒΣ²⁵. Με βάση αυτό το κριτήριο, το set-point ισχύος προτείνεται να είναι ίσο με τη συνολική ονομαστική αιολική ισχύ του ΥΒΣ μείον την ονομαστική ισχύ του μεγαλύτερου από τα Α/Π του ΥΒΣ.
- Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις, η υδροαιολική συνεργασία αποδείχθηκε ότι μπορεί να συνεισφέρει θετικά στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, τόσο στην κανονική λειτουργία όσο και σε ισχυρές διαταραχές, όπως στέρεο βραχυκύκλωμα στο σύστημα μεταφοράς του νησιού, καθώς ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής επιδεικνύει αξιόλογη ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, παρόμοια ή και καλύτερη από τις μονάδες diesel²⁶. Ακόμη και για σφάλματα στην αποκλειστική γραμμή διασύνδεσης κάποιου από τα Α/Π του ΥΒΣ, η υδροαιολική συνεργασία δεν παρουσιάζεται χειρότερη όσον αφορά τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος συγκριτικά με την περίπτωση λειτουργίας μόνο των υδροστρόβιλων για την κάλυψη της προγραμματισμένης ισχύος του ΥΒΣ. Επομένως η υδροαιολική συνεργασία όχι μόνο δεν επιβαρύνει το σύστημα αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων επιδρά θετικά στην ευστάθειά του. Ταυτόχρονα, η υδροαιολική συνεργασία μειώνει σημαντικά τις διακυμάνσεις ισχύος όλων των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής (diesel και υδροστρόβιλοι) που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος και άρα τις καταπονήσεις τους.
- Στο πλαίσιο της υδροαιολικής συνεργασίας και πάντοτε υπό τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις, εφόσον ο ΥΒΣ επιδεικνύει αξιόλογη δυναμική απόκριση ως ενιαία μονάδα παραγωγής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντίστοιχα αυξημένη τιμή για το συντελεστή δυναμικής διείσδυσης κατά τον υπολογισμό των set-points των Α/Π εκτός ΥΒΣ, με θετικές επιπτώσεις στις ΣΑΩΛ των Α/Π. Άλλωστε, όταν κατά τη λειτουργία του συστήματος η προγραμματισμένη παραγωγή του ΥΒΣ καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από τους υδροστρόβιλους λόγω άπνοιας στο Α/Π του ΥΒΣ, τότε δεν τίθεται θέμα ευστάθειας του συστήματος λόγω απώλειας αιολικής παραγωγής, καθώς σε αυτή την περίπτωση η αιολική διείσδυση στο σύστημα αναμένεται να είναι χαμηλή. Το σενάριο που μπορεί να δημιουργήσει θέμα δυναμικής συμπεριφοράς είναι το μόνιμο σφάλμα σε κάποια από τις γραμμές Μ.Τ. των Α/Π του ΥΒΣ, σε ενδιάμεσο φορτίο και συνθήκες υψηλής αιολικής διείσδυσης στο σύστημα, με την παραγωγή του ΥΒΣ να είναι κοντά στα ονομαστικά του ΥΗΣ και με μέγιστη υποκατάσταση υδροστροβλικής ενέργειας από αιολική, οπότε η δυναμική απόκριση του ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής, προκύπτει παρόμοια με αυτή των υδροστρόβιλων. Ωστόσο είναι θέμα του ΔΜΔΝ το αν θα εφαρμόσει υψηλό συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους, αξιολογώντας το παραπάνω σενάριο ως ελάχιστα πιθανό, ή θα λάβει χαμηλό συντελεστή, ώστε να εξασφαλίσει μηδενική περικοπή φορτίου σε κάθε περίπτωση, εις βάρος όμως των ΣΑΩΛ των Α/Π εκτός ΥΒΣ.

Από τη διερεύνηση της αντλιοαιολικής συνεργασίας και των επιπτώσεών της στο σύστημα του ΜΔΝ, διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Καταρχάς ενδείκνυται η χρήση αντλιών μεταβλητών στροφών στο αντλιοστάσιο του ΥΒΣ, καθώς προσδίδουν μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητα καλύτερης παρακολούθησης της αιολικής παραγωγής, με μειωμένο αριθμό χειρισμών των αντλιών και καλύτερη αξιοποίηση του δι-

²⁵ Δε θεωρείται πιθανή η ταυτόχρονη απώλεια περισσότερων της μιας ομάδας Α/Γ όταν τα διασυνδεδετικά κυκλώματά τους είναι ανεξάρτητα.

²⁶ Η ικανότητα ρύθμισης συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ αντισταθμίζει τη μειωμένη δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων.

αθέσιμου αιολικού δυναμικού, πλεονεκτήματα που αντισταθμίζουν το επιπρόσθετο κόστος συγκριτικά με τις αντλίες σταθερών στροφών.

- Σχετικά με τον καθορισμό του set-point ισχύος του αντλιοστάσιου, εξετάστηκαν δύο λογικές, με τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά τις επιπτώσεις τους στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος:
 - Αν το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου καθορίζεται βάσει της στιγμιαίας ισχύος των αιολικών του ΥΒΣ, τότε η αντλιοστασιακή συνεργασία παρουσιάζεται ουδέτερη για το σύστημα, χωρίς καμία αρνητική επίπτωση, ενώ επίσης δεν υπάρχει λόγος οι Α/Γ του ΥΒΣ να παρέχουν λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας (εφόσον βέβαια δεν υφίσταται παράλληλα υδροαιολική συνεργασία) και να προκύπτει μειωμένη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, από τη στιγμή που αυτή θα αναιρείται από τη λειτουργία των αντλιών. Αν είναι επιθυμητό η αντλιοστασιακή συνεργασία να συμβάλλει θετικά στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, τότε θα μπορούσαν να παρέχουν λειτουργίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας οι αντλίες. Επίσης, η ρύθμιση συχνότητας από τις αντλίες είναι επιθυμητή και στις περιπτώσεις που θα συνυπάρχουν η υδροαιολική και αντλιοστασιακή συνεργασία, καθώς σε αντίθετη περίπτωση οι αντλίες θα αναιρούν σε μεγάλο βαθμό (στα πλαίσια του εύρους μεταβολής της ισχύος τους) τη ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ (η οποία κρίνεται απαραίτητη στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας).
 - Αν το set-point ισχύος του αντλιοστάσιου καθορίζεται βάσει μέσων τιμών της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, τότε υφίστανται αποκλίσεις μεταξύ της αιολικής και αντλητικής ισχύος του ΥΒΣ, συνιστώντας διαταραχή για το σύστημα και προσθέτοντας επιπλέον μεταβλητότητα στη συχνότητα του συστήματος. Από την άλλη οι καταπονήσεις του αντλιοστάσιου είναι μειωμένες, ενώ δεν αναιρείται και η όποια ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ. Προκειμένου να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, απαιτείται συμμετοχή στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος είτε από τις Α/Γ είτε από τις αντλίες του ΥΒΣ ή ακόμη καλύτερα και από τα δύο. Μάλιστα σε περιόδους σημαντικών διαταραχών για το σύστημα, οπότε και οι ανάγκες του συστήματος για πρωτεύουσα εφεδρεία είναι σημαντικές, η αντλιοστασιακή συνεργασία με ρύθμιση συχνότητας είτε από την αντλητική είτε από την αιολική εγκατάσταση του συστήματος, βελτιώνει τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με το σενάριο όχι μόνο της μη ύπαρξης της αντλιοστασιακής συνεργασίας αλλά και της μη λειτουργίας του ΥΒΣ γενικότερα. Μάλιστα αν συμμετέχουν τόσο οι Α/Γ όσο και οι αντλίες του ΥΒΣ στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας τότε τα αποτελέσματα προσεγγίζουν αυτά της στιγμιαίας παρακολούθησης της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ όταν η ρύθμιση συχνότητας πραγματοποιείται από τις αντλίες.
 - Συγκρίνοντας τις δύο λογικές, πιο «καθαρή» για το σύστημα αποτελεί η πρώτη, καθώς αποφεύγονται οι αποκλίσεις αιολικής και αντλητικής ισχύος. Ωστόσο η πρώτη αναιρεί την όποια ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ, το οποίο αποτελεί πρόβλημα στην περίπτωση που υφίσταται και υδροαιολική συνεργασία και παράλληλα οι αντλίες δεν έχουν αντίστοιχη ικανότητα για ρύθμιση συχνότητας (προς αντιστάθμιση της αναιρέσεως της ρύθμισης συχνότητας των Α/Γ). Από την άλλη με τη λογική της παρακολούθησης της μέσης τιμής της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, προκύπτουν αποκλίσεις μεταξύ της αιολικής και αντλητικής ισχύος του ΥΒΣ, που συνιστούν διαταραχή για το σύστημα. Ωστόσο είναι δυνατόν να προσεγγιστούν τα αποτελέσματα της πρώτης λογικής κατά τις περιόδους σημαντικών διαταραχών για το σύστημα οπότε και υφίσταται η ανάγκη για σημαντική πρωτεύουσα εφεδρεία, εφόσον τόσο οι Α/Γ όσο και οι αντλίες του ΥΒΣ συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Επίσης με τη δεύτερη λογική μειώνονται οι καταπονήσεις του αντλιοστάσιου και επίσης ενδείκνυται σε ΥΒΣ που είναι επιθυμητή η εφαρμογή της υδροαιολικής συνεργασίας και παράλληλα ρύθμιση συχνότητας παρέχεται μόνο από τις Α/Γ και όχι από τις αντλίες. Αν αντίθετα οι Α/Γ του ΥΒΣ δεν έχουν ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, τότε ενδείκνυται η υιοθέτηση της λογικής παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος

του ΥΒΣ από το αντλιοστάσιο. Επίσης, η λογική της παρακολούθησης της μέσης αιολικής παραγωγής προτείνεται για μεγάλα νησιωτικά συστήματα, όπου μπορεί να λειτουργούν περισσότεροι ΥΒΣ με σημαντική διασπορά των Α/Π τους, οι ταχείες μεταβολές της παραγωγής των οποίων αλληλοαναιρούνται σε σημαντικό βαθμό και άρα δεν υφίσταται ανάγκη στιγμιαίας αντιστάθμισής τους.

- Αν είναι επιθυμητό η αντλιοσαιολική συνεργασία να συμβάλλει θετικά στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων, τότε απαιτείται σίγουρα FRT ικανότητα από τις αντλίες, καθώς και ρύθμιση συχνότητας από το αντλιοστάσιο στην περίπτωση καθορισμού του set-point του βάσει της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ ή ρύθμιση συχνότητας από τουλάχιστον ένα εκ των Α/Π και αντλιοστασίου του ΥΒΣ στην περίπτωση καθορισμού του set-point του αντλιοστασίου βάσει του κινούμενου μέσου της αιολικής ισχύος. Υπό τις συνθήκες αυτές το σύστημα παρουσιάζεται πιο στιβαρό και θα μπορούσε να επιτραπουν υψηλότερα επίπεδα αιολικής διείσδυσης στο σύστημα όταν υφίσταται η αντλιοσαιολική συνεργασία εντός του ΥΒΣ σε σχέση με τη μη ύπαρξή της.
- Σχετικά με την καταπόνηση του αντλιοστασίου, αυτή παρουσιάζεται αυξημένη όταν το set-point ισχύος του καθορίζεται βάσει της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ και όταν οι αντλίες συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, χωρίς όμως να φτάνει σε ανησυχητικά επίπεδα. Φυσικά η μεγαλύτερη καταπόνηση προκύπτει στην περίπτωση της άμεσης αποσύνδεσης του αντλιοστασίου οπότε και προκαλούνται ισχυρά μεταβατικά πιέσεων εντός των αγωγών κατάθλιψης, τα οποία μπορούν να περιοριστούν με αύξηση της αδράνειας των στρεφόμενων μαζών των αντλιών ώστε να περιοριστεί ο ρυθμός μεταβολής των στροφών τους.
- Όσον αφορά την αποδοτικότητα του αντλιοστασίου, η λειτουργία μεταβλητών στροφών δε φαίνεται να οδηγεί την αντλητική εγκατάσταση σε λειτουργία με βαθμό απόδοσης που να αποκλίνει ιδιαίτερα από το βέλτιστο.

Συνοψίζοντας, οι υδροστρόβιλοι παρουσιάζονται πιο αργοί από τις μονάδες diesel που υποκαθιστούν, με αποτέλεσμα η μελλοντική ενσωμάτωσή τους στα νησιωτικά συστήματα ενδεχομένως να επιδεινώσει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και παράλληλα να οδηγήσει σε μείωση των συντελεστών χρησιμοποίησης των Α/Π. Στα πλαίσια όμως της υδροαιολικής συνεργασίας και εφόσον οι Α/Γ του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT και ρύθμισης συχνότητας, τότε ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής παρουσιάζει δυναμική απόκριση παρόμοια ή και καλύτερη από τις συμβατικές μονάδες που υποκαθιστούν. Τα ίδια ισχύουν και στην περίπτωση της αντλιοσαιολικής συνεργασίας αν, εκτός από τις Α/Γ, και οι αντλίες του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT, καθώς επίσης και δυνατότητα πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, χαρακτηριστικό απαραίτητο τόσο στην περίπτωση της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος, όσο και της μέσης τιμής αν οι Α/Γ του ΥΒΣ δεν έχουν απόκριση συχνότητας. Επίσης, υπό τις προϋποθέσεις αυτές, μπορεί να θεωρηθεί αυξημένη τιμή για το συντελεστή δυναμικής διείσδυσης των υδροστρόβιλων του ΥΒΣ, στα επίπεδα των συμβατικών μονάδων που υποκαθιστούν, ενιαία για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δεν ισχύουν οι παραπάνω τεχνικές προϋποθέσεις, ενδείκνυται η θεώρηση μειωμένης τιμής για τον υπόψη συντελεστή δυναμικής διείσδυσης, που θα αντιστοιχεί στην αργή απόκριση των υδροστρόβιλων και μόνο.

Σχετικά με την υδροαιολική συνεργασία, αυτή παρουσιάζεται τεχνικά εφικτή και χωρίς αρνητικές επιπτώσεις για την ευστάθεια του συστήματος ακόμη και υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες, εφόσον οι Α/Γ του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT, παρέχουν λειτουργίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, είναι ηλεκτρικά διαχωρισμένες σε περισσότερες της μιας ομάδες και επιπλέον δέχονται κατάλληλο set-point ώστε πάντοτε να υπάρχει επαρκής αδρανειακή εφεδρεία ισχύος τουλάχιστον ίση με την αναμενόμενη απώλεια αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ. Μάλιστα υπό αυτές τις συνθήκες η υδροαιολική συνεργασία βελτιώνει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος τόσο στην κανονική λειτουργία όσο και στην πλειοψηφία των πλέον δυσμενών διαταραχών για το σύστημα.

Όσον αφορά την αντλησιοαιολική συνεργασία, αν υιοθετηθεί η λογική της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος, τότε αυτή παρουσιάζεται ουδέτερη για το σύστημα, χωρίς καμία αρνητική επίπτωση. Αν επιπλέον οι αντλίες έχουν ικανότητα ρύθμισης συχνότητας τότε η αντλησιοαιολική συνεργασία βελτιώνει τη δυναμική συμπεριφορά του νησιωτικού συστήματος συνολικά. Από την άλλη, αν υιοθετηθεί η λογική της παρακολούθησης της μέσης τιμής της αιολικής ισχύος, τότε προκύπτουν αποκλίσεις μεταξύ της αιολικής και αντλητικής ισχύος, που συνιστούν επιπλέον διαταραχή για το σύστημα και συνεπάγονται αύξηση της μεταβλητότητας της συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση και για την επίτευξη θετικών επιπτώσεων στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, κυρίως σε περιόδους σημαντικών διαταραχών οπότε και υπάρχει βασικά η ανάγκη για σημαντική πρωτεύουσα εφεδρεία, απαιτείται ικανότητα ρύθμισης συχνότητας από τουλάχιστον ένα εκ των Α/Π και αντλιοστάσιου του ΥΒΣ, ή και από τα δύο αν είναι επιθυμητή η προσέγγιση των αποτελεσμάτων της λογικής της στιγμιαίας παρακολούθησης. Από τις δύο λογικές, πιο «καθαρή» για το σύστημα αποτελεί η πρώτη καθώς αποφεύγονται οι αποκλίσεις αιολικής και αντλητικής ισχύος, ενώ η δεύτερη συνεπάγεται μικρότερες καταπονήσεις για το αντλιοστάσιο και επίσης ενδείκνυται σε ΥΒΣ όπου μόνο οι Α/Γ παρέχουν ρύθμιση συχνότητας και όχι οι αντλίες, ιδιαίτερα όταν είναι επιθυμητή και η εφαρμογή της υδροαιολικής συνεργασίας. Αν αντίθετα οι Α/Γ του ΥΒΣ δεν έχουν ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, τότε ενδείκνυται η υιοθέτηση της λογικής παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ από το αντλιοστάσιο. Επίσης, η λογική της παρακολούθησης της μέσης αιολικής παραγωγής ενδείκνυται για μεγάλα νησιωτικά συστήματα, όπου μπορεί να λειτουργούν περισσότεροι ΥΒΣ με σημαντική διασπορά των Α/Π τους, οι ταχείες μεταβολές της παραγωγής των οποίων αλληλοαναιρούνται σε σημαντικό βαθμό και άρα δεν υφίσταται ανάγκη στιγμιαίας αντιστάθμισής τους. Τέλος αν είναι επιθυμητό η αντλησιοαιολική συνεργασία να συμβάλλει θετικά και κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων, τότε θα πρέπει οι αντλίες να έχουν και ικανότητα FRT.

4. ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΔΝ ΜΕ ΥΒΣ

Το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο, [31, 32], παρέχει ορισμένες γενικές αρχές²⁷ όσον αφορά την αδειοδότηση, λειτουργία και τιμολόγηση των ΥΒΣ, χωρίς να προσδιορίζεται σαφής και συγκεκριμένη πολιτική λειτουργίας τους. Το στοιχείο αυτό είναι καίριας σημασίας καθώς επηρεάζει τη διαμόρφωση και οικονομικότητα των ΥΒΣ, αλλά και τις επιπτώσεις (λειτουργικές, ενεργειακές, οικονομικές) στο νησιωτικό σύστημα στο οποίο εντάσσονται.

Στα επόμενα, πραγματοποιείται αρχικά μια σύντομη περιγραφή του υφιστάμενου νομοθετικού πλαισίου για ΥΒΣ σε ΜΔΝ και στη συνέχεια αφού γίνει διερεύνηση και σχολιασμός των εναλλακτικών πολιτικών λειτουργίας, προτείνεται μια συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης για αυτόνομα νησιωτικά συστήματα με ΥΒΣ, η οποία κρίθηκε κατάλληλη για την εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας των ΥΒΣ και την αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των υφιστάμενων Α/Π των νησιών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του παρόντος κεφαλαίου προέκυψε στα πλαίσια ερευνητικού έργου που έγινε για λογαριασμό της ΡΑΕ, [87], και αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση του ρυθμιστικού πλαισίου για τους ΥΒΣ σήμερα, καθώς συμπεριλήφθη στο σχετικό κείμενο Δημόσιας Διαβούλευσης του 2008 της ΡΑΕ, [52], ενώ αναμένεται να ενσωματωθεί και στον υπό έκδοση ΚΔΜΔΝ.

4.1 Σύντομη περιγραφή του νομοθετικού πλαισίου για ΥΒΣ σε ΜΔΝ

Το νομοθετικό πλαίσιο, όπως διαμορφώθηκε πρόσφατα στην Ελλάδα για ΥΒΣ σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, συνίσταται από:

- Το Νόμο 3468/2006, [31], όπου τίθεται το βασικό θεσμικό πλαίσιο περί ΥΒΣ σε ΜΔΝ.
- Τον Κανονισμό Αδειών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση ΑΠΕ, [32], όπου εξειδικεύεται το νομικό πλαίσιο και παρέχονται πρόσθετες αρχές για τη λειτουργία και την τιμολόγηση των ΥΒΣ.

Οι βασικές αρχές του υφιστάμενου νομοθετικού πλαισίου είναι οι εξής: Η αντλησιοταμίευση αντιμετωπίζεται ως ένα εργαλείο για εγκατάσταση επιπλέον αιολικής ισχύος σε κορεσμένα νησιωτικά συστήματα, παρά για αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των ήδη υφιστάμενων Α/Π μέσω μείωσης των περικοπών αιολικής ενέργειας. Συνεπώς ένας ΥΒΣ αποτελείται από εγκαταστάσεις αποθήκευσης και έναν (ή περισσότερους) νέο σταθμό ΑΠΕ, όλα συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η παραγόμενη ενέργεια του Α/Π του ΥΒΣ να αποθηκεύεται αντί να δίνεται απ' ευθείας στο φορτίο, έτσι ώστε να μη μειωθούν τα περιθώρια απορρόφησης ενέργειας από τα ήδη υφιστάμενα ή αδειοδοτημένα Α/Π του νησιού. Η ενέργεια κατά συνέπεια που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή νερού, μπορεί στη συνέχεια να ανακτηθεί μέσω της λειτουργίας των υδροστρόβιλων με πλήρως ελεγχόμενο τρόπο, κατά προτίμηση κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής κάθε ημέρας, υποκαθιστώντας τις ακριβές μονάδες αιχμής.

Από τη στιγμή που οι υδροστρόβιλοι αποτελούν πλήρως ελεγχόμενη παραγωγή, μπορούν να υποκαθιστούν όχι μόνο ενέργεια αλλά και εγκατεστημένη ισχύ συμβατικών μονάδων. Για να είναι όμως κάτι τέτοιο πιθανό, απαιτείται να είναι πάντοτε εξασφαλισμένη η παροχή ενός σταθερού ποσού ισχύος (που αποκαλείται εγγυημένη ισχύς), ακόμη και σε παρατεταμένες περιόδους άπνοιας, οπότε τα αποθέματα νερού στην άνω δεξαμενή του ΥΒΣ εξαντλούνται. Για αυτόν το σκοπό, επιτρέπεται η απορρόφηση ενός περιορισμένου ποσού συμβατικής ενέργειας από το δίκτυο (άντληση

²⁷ Καθώς επίσης και κάποιες ιδιαίτερα λεπτομερείς προβλέψεις και περιορισμούς, ορισμένοι από τους οποίους ελέγχονται ως προς τη σκοπιμότητα και ακρίβειά τους.

από δίκτυο). Η απορρόφηση αυτή ενέργειας είναι λογικό να πραγματοποιείται τις ώρες χαμηλού φορτίου, όπως είναι οι νυχτερινές ώρες, οπότε είναι ενταγμένες οι σχετικά φθηνές μονάδες βάσης ή και μέσου φορτίου. Ουσιαστικά η άντληση από το δίκτυο θα αποτελεί μεταφορά ενέργειας από την αιχμή στην κοιλάδα της καμπύλης φορτίου.

Όσον αφορά τις αποζημιώσεις του ΥΒΣ, ο παραγωγός προβλέπεται να αποζημιώνεται τόσο για τις παραγόμενες ενέργειες των επιμέρους μονάδων του όσο και για την εγγυημένη ισχύ του, ενώ θα πληρώνει την ενέργεια που απορροφάται από τις αντλίες του. Η ενέργεια μετράται ανεξάρτητα για το Α/Π, τον ΥΗΣ και το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ. Οι τιμολογήσεις των ενεργειών αυτών σχετίζονται με τα αποφευγόμενα κόστη του συστήματος από τη λειτουργία του ΥΒΣ, έτσι ώστε η ένταξη και λειτουργία των ΥΒΣ να μην επιβαρύνει κατά το δυνατόν το συνολικό κόστος του συστήματος παραγωγής:

- Η παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες ΑΠΕ του ΥΒΣ θα τιμολογείται με το εκάστοτε ισχύον τιμολόγιο για ΑΠΕ στα ΜΔΝ.
- Η παραγόμενη ενέργεια από τους υδροστρόβιλους που προέρχεται από αντλησιοταμίευση τιμολογείται με βάση το μέσο μεταβλητό κόστος των συμβατικών μονάδων αιχμής του νησιωτικού συστήματος κατά το προηγούμενο έτος από το έτος έκδοσης της άδειας παραγωγής. Ως μονάδες αιχμής νοούνται αυτές που λειτουργούν για χρονικό διάστημα μικρότερο του 30% του έτους αναφοράς.
- Η απορροφούμενη ενέργεια από τις αντλίες τιμολογείται με βάση το μέσο μεταβλητό κόστος των μονάδων βάσης του συστήματος κατά το προηγούμενο έτος από το έτος έκδοσης της άδειας παραγωγής. Ως μονάδες βάσης νοούνται αυτές που λειτουργούν για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του 70% του έτους αναφοράς.
- Η τιμή της παραγόμενης ενέργειας των υδροστρόβιλων από αντλησιοταμίευση δεν μπορεί να είναι κατώτερη από την τιμή της απορροφούμενης ενέργειας, προσαυξημένη κατά ποσοστό 25%, σύμφωνα με το Άρθρο 13, Παράγραφο 3 του Νόμου 3468/2006, [31].

Τα μεταβλητά κόστη των συμβατικών μονάδων περιλαμβάνουν το κόστος καυσίμου, το μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων. Όλες οι παραπάνω τιμολογήσεις παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του χρόνου και είναι ίδιες για όλους τους ΥΒΣ που λειτουργούν σε ένα νησί. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα από τον παραγωγό επιλογής του συμψηφισμού της απορροφούμενης ενέργειας για άντληση με την παραγόμενη αιολική ενέργεια, δηλαδή τιμολόγησης της διαφοράς τους. Ο συμψηφισμός προφανώς θα επιλέγεται από τον παραγωγό όταν το κόστος άντλησης (δηλ. το μέσο μεταβλητό κόστος των συμβατικών μονάδων βάσης) υπερβαίνει την τιμή της αιολικής ενέργειας, όπως συμβαίνει στα περισσότερα νησιά σήμερα.

Τέλος, προβλέπεται αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος του ΥΒΣ με βάση την εγγυημένη ισχύ των μονάδων ελεγχόμενης παραγωγής του και το κόστος νέου συμβατικού σταθμού αντίστοιχης ισχύος, με το σκεπτικό ότι η παροχή εγγυημένης ισχύος και ενέργειας από τον ΥΒΣ επιτρέπει την αποφυγή επένδυσης σε συμβατικό σταθμό παραγωγής αντίστοιχης ικανότητας για την κάλυψη των αιχμών.

4.2 Διερευνητική επισκόπηση εναλλακτικών πολιτικών λειτουργίας

Το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο που περιγράφηκε εν συντομία στην προηγούμενη παράγραφο, παρέχει μόνο ορισμένες γενικές αρχές όσον αφορά την αδειοδότηση, λειτουργία και τιμολόγηση των ΥΒΣ, χωρίς να προσδιορίζεται σαφής και συγκεκριμένη πολιτική λειτουργίας τους. Εναλλακτικές πολιτικές λειτουργίας διερευνήθηκαν και αναλύθηκαν εκτενώς (βλ. [87]), οι οποίες όμως για λόγους οικονομίας χώρου, δε θα παρουσιαστούν με λεπτομέρεια στην παρούσα παράγραφο. Αντ' αυτού, μια γενική συζήτηση πραγματοποιείται γύρω από τις βασικές αρχές και τα

πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εναλλακτικών πολιτικών, για την κατάληξη στη συνέχεια στην προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Μια απλή πολιτική διαχείρισης για ΥΒΣ που έχει ήδη αξιολογηθεί σε σχετικές μελέτες, (π.χ. [28, 35, 36]), είναι οι υδροστρόβιλοι να παράγουν σταθερή ισχύ (τυπικά την ονομαστική τους) σε προσυμφωνημένες ώρες του 24ώρου, οι οποίες γενικά συμπίπτουν με τις ώρες του ημερήσιου μέγιστου φορτίου (βραδινές ή και μεσημβρινές), σε καθημερινή βάση. Η υδραυλική ενέργεια που απαιτείται για αυτόν το σκοπό εξασφαλίζεται μέσω άντλησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας αλλά επίσης και μέσω απορρόφησης σημαντικού ποσού ενέργειας από το δίκτυο για άντληση κατά τη διάρκεια των ωρών χαμηλού φορτίου. Πρόκειται για μια στοιχειωδώς απλή πολιτική, η οποία δημιουργεί ένα σταθερό έσοδο για τους ΥΒΣ βασιζόμενο στην ημερησίως σταθερή και προσυμφωνημένη διάθεση της υδραυλικής ενέργειας, ενώ επιπλέον έσοδα μπορεί να προκύψουν και από την άντληση από το δίκτυο στην περίπτωση που η διαφορά των τιμών των ενεργειών υδροστρόβιλων και αντλιών είναι μεγάλη (τυπικά της τάξης του 1.5:1, όπως συνήθως συμβαίνει στα νησιωτικά συστήματα), ώστε να καλύπτει τις απώλειες ενέργειας του κύκλου άντλησης-παραγωγής.

Αυτή η πολιτική παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα, ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλων ΥΒΣ. Πρώτα απ' όλα, προκύπτει σημαντική άντληση από το δίκτυο και άρα σπατάλη συμβατικής ενέργειας και καυσίμου λόγω των απωλειών ενέργειας του κύκλου άντλησης-παραγωγής. Γι' αυτόν το λόγο η άντληση από το δίκτυο θα πρέπει να επιτρέπεται μόνο σε περιόδους υψηλού φορτίου (π.χ. την τουριστική περίοδο του καλοκαιριού), όταν η παροχή εγγυημένης ισχύος από τους ΥΒΣ είναι πραγματικά απαραίτητη, παρά σε καθημερινή βάση. Το γεγονός αυτό μειώνει δραματικά το εύρος της άντλησης από το δίκτυο, από περίπου 30% σε λιγότερο από 5% της συνολικής απορροφούμενης ενέργειας των αντλιών σε ετήσια βάση.

Ένα δεύτερο μειονέκτημα της παραπάνω πολιτικής είναι ότι οι υδροστρόβιλοι εντάσσονται για παραγωγή σε σταθερή ισχύ, κάτι το οποίο μειώνει το περιθώριο απορρόφησης ενέργειας από τα Α/Π εκτός ΥΒΣ. Προκύπτει δηλαδή μείωση της απόδοσης των υφιστάμενων αιολικών σταθμών, παραβιάζοντας τις σχετικές συμβάσεις αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι οι στρόβιλοι υποκαθιστούν συμβατικές μονάδες, οι οποίες διαθέτουν ευελιξία φόρτισης και λειτουργίας προκειμένου να διεισδύσει αιολική παραγωγή στο σύστημα, ενώ οι ίδιοι φορτίζονται σε σταθερή ισχύ²⁸. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, οι ενταγμένοι υδροστρόβιλοι πρέπει να λειτουργούν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο με τις συμβατικές μονάδες που υποκαθιστούν, δηλ. θα πρέπει να παρέχουν πρωτεύουσα εφεδρεία και να υποφορτίζονται όπως και οι συμβατικές μονάδες για την απορρόφηση της αιολικής παραγωγής. Επίσης θα πρέπει να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες, όπως ρύθμιση συχνότητας και τάσης, στα πρότυπα των συμβατικών μονάδων που υποκαθιστούν.

Η πολιτική διαχείρισης που θα υιοθετηθεί θα πρέπει να επιδεικνύει ευελιξία στην ένταξη και κατανομή όλων των μονάδων παραγωγής και να ταιριάζει στην ημερήσια λειτουργία της αγοράς ενέργειας, όπου αυτή εφαρμόζεται. Στα πλαίσια αυτά εξετάστηκαν δύο τύποι πολιτικών:

- Πολιτικές όπου ο Υβριδικός παραγωγός υποβάλλει ωριαίες προσφορές ισχύος για τους υδροστρόβιλους του και δηλώσεις φορτίου για τις αντλίες (όταν προβλέπεται άντληση από το δίκτυο), βάσει της εσωτερικής βελτιστοποίησης της λειτουργίας του ΥΒΣ, όπως θεωρήθηκε στην [91]. Η ένταξη των υδροστρόβιλων πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρόγραμμα που έχει υποβάλλει ο παραγωγός, καθώς οι υδροστρόβιλοι έχουν προτεραιότητα ως προς τις θερμικές μονάδες, από τη στιγμή που αξιοποιούν την «καθαρή» αιολική ενέργεια που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί.

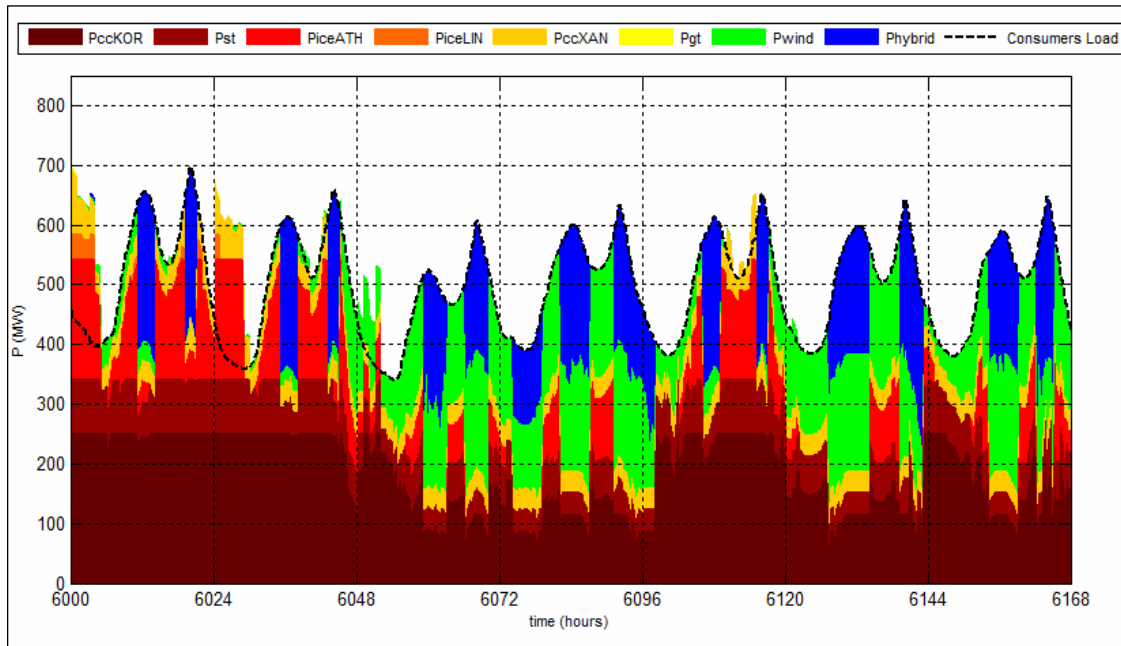
²⁸ Για δεδομένο φορτίο, η αύξηση στην απορρόφηση αιολικής παραγωγής πραγματοποιείται μέσω της ισόποσης υποφόρτισης των ενταγμένων συμβατικών μονάδων μέχρι το τεχνικό τους ελάχιστο, οι οποίες διατηρούν την αναγκαία στρεφόμενη εφεδρεία για κάλυψη ενδεχόμενης απώλειας της αιολικής παραγωγής. Υποκαθιστώντας μια συμβατική μονάδα με έναν υδροστρόβιλο που λειτουργεί υπό σταθερή ισχύ (π.χ. την ονομαστική του), το συνολικό περιθώριο υποφόρτισης για απορρόφηση αιολικής ισχύος προφανώς μειώνεται κατά τη διαφορά της ικανότητας της συμβατικής μονάδας από το τεχνικό της ελάχιστο.

- Πολιτικές όπου ο Υβριδικός παραγωγός υποβάλλει ημερήσια προσφορά ενέργειας, καθώς και ημερήσια δήλωση φορτίου για άντληση από το δίκτυο, όποτε αυτή απαιτείται. Ο Διαχειριστής του ΜΔΝ (ΔΜΔΝ) οφείλει να σεβαστεί την υποβληθείσα ημερήσια προσφορά ενέργειας του παραγωγού, αλλά το ωριαίο πρόγραμμα ένταξης των στροβίλων καθορίζεται από το ΔΜΔΝ με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος συνολικά. Τα ίδια και για την περίπτωση των αντλιών, τις ημέρες που έχει υποβληθεί δήλωση φορτίου.

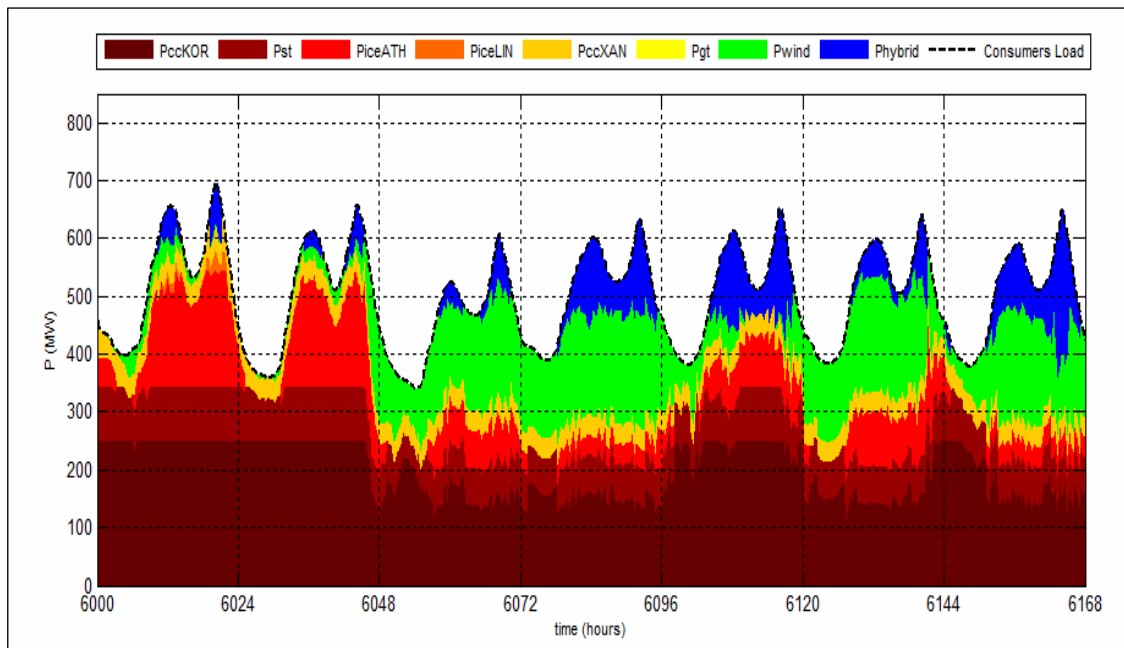
Η αξιολόγηση των δύο παραπάνω τύπων πολιτικών διαχείρισης έδειξε ότι η στρατηγική των ωριαίων προσφορών ισχύος είναι πιο προσοδοφόρα για τους ΥΒΣ, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μικρών δεξαμενών νερού, επειδή δίνει την ευχέρεια στον παραγωγό να βελτιστοποιεί τη λειτουργία του εντός της ημέρας, ακόμη και όταν χρησιμοποιεί πρόβλεψη αιολικής ενέργειας περιορισμένης ακρίβειας. Με αυτή τη στρατηγική, οι υδροστρόβιλοι πρακτικά εντάσσονται σε πλήρη ισχύ όταν η άνω δεξαμενή είναι γεμάτη, ελευθερώνοντας χώρο για αποθήκευση ενέργειας μέσω άντλησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας. Συνεπώς ελαχιστοποιούνται οι απορρίψεις της αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ.

Ωστόσο στην περίπτωση ΥΒΣ μεγάλου σχετικά μεγέθους, η συγκεκριμένη στρατηγική προκαλεί πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, οι οποίες πρέπει να προσαρμοστούν στο πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστρόβιλων. Οι επιπτώσεις αυτές φαίνονται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα 4.1(α), όπου παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος ισχύος της Κρήτης με ένα μεγάλο ΥΒΣ των 250 MW, για μια εβδομάδα του έτους 2012. Είναι προφανές ότι η λειτουργία των συμβατικών μονάδων διαταράσσεται πλήρως από την «ελεύθερη» ένταξη των υδροστρόβιλων. Συγκεκριμένα, η ένταξη/απένταξη των στροβίλων απαιτεί την απένταξη/ένταξη συμβατικών μονάδων σημαντικής ισχύος, αυξάνοντας τη συχνότητα εκκινήσεων-στάσεων των τελευταίων και οδηγώντας σε υψηλούς ρυθμούς ανόδου/καθόδου της ισχύος εξόδου τους. Επίσης, πλέον σημαντικό πρόβλημα είναι και η παραμόρφωση της καμπύλης φορτίου του νησιού, όταν σε αυτό εντάσσεται ΥΒΣ μεγάλου μεγέθους. Η παραμόρφωση προκαλείται για δύο λόγους: Από τη μία, η ένταξη στροβίλων μεγάλης ισχύος σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, με βάση συγκεκριμένη προσφορά έγχυσης του παραγωγού, δεν οδηγεί απλώς σε αποκοπή των σχετικών αιχμών της ζήτησης, αλλά στην αφαίρεση σημαντικού τμήματος της καμπύλης φορτίου. Από την άλλη, σε περιόδους χαμηλού ανέμου η εξασφάλιση της εγγυημένης ισχύος και ενέργειας του ΥΒΣ κατ' ανάγκην πραγματοποιείται με άντληση από το δίκτυο κατά τις νυχτερινές ώρες. Το φορτίο που προσθέτει η άντληση μπορεί να είναι τόσο υψηλό, ώστε η αιχμή της 24ωρης καμπύλης φορτίου να μετατοπίζεται στις νυχτερινές ώρες. Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι αυτή η πολιτική διαχείρισης περιορίζει δραστικά το μέγεθος των ΥΒΣ που μπορούν να ενσωματωθούν στα νησιωτικά συστήματα.

Από την άλλη, η πολιτική των ημερήσιων προσφορών ενέργειας επιτυγχάνει πολύ καλύτερη ποιότητα λειτουργίας για το σύστημα παραγωγής του νησιού, όπως διαπιστώνεται στο διάγραμμα 4.1(β), όπου ο ΥΒΣ αποκόπτει/εξομαλύνει τις αιχμές της καμπύλης φορτίου, συντελώντας στην αποδοτικότερη λειτουργία του ΑΣΠ. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της πολιτικής είναι ότι απαιτείται σχετικά αυξημένη χωρητικότητα δεξαμενών για τον ΥΒΣ (της τάξης του 25-30%, [87]) συγκριτικά με τη στρατηγική των ωριαίων προσφορών ισχύος, για την επίτευξη των ίδιων αποτελεσμάτων. Ο λόγος είναι ότι οι υδροστρόβιλοι εντάσσονται από το ΔΜΔΝ μόνο τις ώρες αιχμής, δηλ. τις μεσημεριανές ή βραδινές ώρες υψηλού φορτίου. Συνεπώς, όλη η παραγόμενη αιολική ενέργεια κατά τις νυχτερινές και πρωινές ώρες θα πρέπει να αποθηκευτεί μέχρι τη στιγμή ένταξης και παραγωγής των στροβίλων. Ωστόσο, αυτό το μειονέκτημα αντισταθμίζεται πλήρως από τη σημαντική ευελιξία που προσφέρει η συγκεκριμένη πολιτική, η οποία εξομαλύνει ουσιαστικά τη λειτουργία του συμβατικού ΑΣΠ και επιτρέπει την ενσωμάτωση μεγάλων ΥΒΣ στα νησιωτικά συστήματα.



(α)



(β)

Σχήμα 4.1. Προσομοίωση του συστήματος ισχύος της Κρήτης το έτος 2012 (μία εβδομάδα λειτουργίας), θεωρώντας ΥΒΣ 250 MW και δύο πολιτικές διαχείρισης: α) Ο ΥΒΣ υποβάλλει ωριαίες προσφορές ισχύος, β) Ο ΥΒΣ υποβάλλει ημερήσιες προσφορές ενέργειας. Καφέ/κόκκινες/κίτρινες αποχρώσεις χρησιμοποιούνται για τις θερμικές μονάδες, πράσινο για τα Α/Π εκτός ΥΒΣ και μπλε για τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ, [33, 34].

4.3 Προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης ΜΑΝ με ΥΒΣ

Από την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου καθίσταται σαφές ότι η ενσωμάτωση ΥΒΣ οποιουδήποτε μεγέθους σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα είναι σκόπιμο και αναγκαίο να

πραγματοποιηθεί με βάση τις παρακάτω αρχές, οι οποίες συνιστούν μια πολιτική διαχείρισης καλύτερα προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά του αυτόνομου συστήματος.

Συγκεκριμένα, η απόδοση της αποθηκευμένης στον ταμιευτήρα ενέργειας από τους στροβίλους πρέπει να προσαρμόζεται στην καμπύλη φορτίου του νησιού, αποκόπτοντας/εξομαλύνοντας τις αιχμές, ώστε να διευκολύνεται και να καθίσταται οικονομικότερη η λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Συνεπώς, η ένταξη των στροβίλων δεν μπορεί να πραγματοποιείται στη βάση ωριαίων προσφορών ισχύος που διαμορφώνονται αποκλειστικά από τον υβριδικό παραγωγό, αλλά με βάση την ημερήσια προσφορά ενέργειας του τελευταίου, η οποία θα μεταφράζεται σε πρόγραμμα παραγωγής από το Διαχειριστή του νησιού. Αντίστοιχα, η άντληση από το δίκτυο για εξασφάλιση της εγγυημένης ενέργειας, θα πρέπει επίσης να προσαρμόζεται στην κοιλιά της καμπύλης φορτίου. Άρα και πάλι δεν μπορεί να προκύπτει από αυθαίρετες δηλώσεις φορτίου του παραγωγού, αλλά πρέπει να κατανέμεται (ή έστω να περιορίζεται ως προς το μέγεθός της) από το ΔΜΔΝ.

Επίσης, η ημερήσια παροχή εγγυημένης ενέργειας από τον ΥΒΣ θα πρέπει να προσαρμόζεται στις πραγματικές (ημερήσιες) ανάγκες του συστήματος, αντί να είναι ένα δεδομένο ποσό ενέργειας, σταθερό για όλες τις ημέρες του έτους. Π.χ. στις ημέρες χαμηλού φορτίου ενδέχεται να μην απαιτείται η παροχή εγγυημένης ενέργειας από τον ΥΒΣ. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η άντληση από το δίκτυο κατά τις νυχτερινές ώρες, η οποία συνιστά απλώς μετάθεση ενέργειας μεταξύ διαφορετικών διαστημάτων της καμπύλης φορτίου, με σημαντικές όμως απώλειες και άρα αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου²⁹ όταν δεν υφίσταται επαρκής αιολική παραγωγή. Αντίθετα, σε ό,τι αφορά την αποθηκευμένη στον ταμιευτήρα ενέργεια ΑΠΕ (η οποία μπορεί να υπερβαίνει την εγγυημένη), ο Διαχειριστής θα διασφαλίζει την κατά προτεραιότητα διάθεσή της από τους στροβίλους του ΥΒΣ, αλλά και πάλι κατά τρόπο που θα προσαρμόζεται στην καμπύλη φορτίου, όπως προαναφέρθηκε³⁰.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερα η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης, βασισμένη στον 24ωρο προγραμματισμό λειτουργίας του συστήματος παραγωγής του νησιού, η υλοποίηση του οποίου περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Απαίτηση Εγγυημένης Ισχύος και Ενέργειας από το ΔΜΔΝ

Ο ΔΜΔΝ μπορεί να απαιτήσει από το Διαχειριστή του ΥΒΣ (ΔΥΒΣ) ένα συγκεκριμένο ποσό εγγυημένης ισχύος και ενέργειας (P_G και E_G) για το επόμενο 24ωρο, εφόσον κρίνει ότι αυτό είναι σκόπιμο ή απαραίτητο, ώστε να καλυφθεί αξιόπιστα η προβλεπόμενη ζήτηση.

Δηλαδή, η ημερήσια παροχή εγγυημένης ισχύος και ενέργειας από τον ΥΒΣ καθορίζεται με βάση τις πραγματικές (ημερήσιες) ανάγκες του συστήματος, αντί να είναι ένα δεδομένο ποσό ενέργειας, σταθερό για όλες τις ημέρες του έτους. Ο καθορισμός της απαιτούμενης ανά ημέρα ενέργειας και ισχύος από τον ΥΒΣ είναι αποκλειστικό δικαίωμα και ευθύνη του ΔΜΔΝ με στόχο τη διασφάλιση της κάλυψης της ζήτησης και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος του νησιού.

Βήμα 2^ο: Προσφορά Ενέργειας από το ΔΥΒΣ

Ο ΔΥΒΣ, λαμβάνοντας υπόψη τον ωφέλιμο (διαθέσιμο) όγκο νερού στην άνω δεξαμενή στο τέλος της ημέρας, καθώς ενδεχομένως και την προβλεπόμενη παραγωγή του Α/Π του ΥΒΣ για το επόμενο 24ωρο, υποβάλλει Προσφορά Ενέργειας (E_O) τουλάχιστον ίση με την απαιτηθείσα ως εγγυημένη από τον ΔΜΔΝ (E_G).

²⁹ Ο κύκλος άντλησης-απόδοσης ενός αντλησιοταμιευτικού συστήματος χαρακτηρίζεται από συνολικές απώλειες ενέργειας της τάξης του 30%.

³⁰ Είναι επίσης αυτονόητο ότι ο προγραμματισμός ένταξης και φόρτισης των στροβίλων του ΥΒΣ θα πρέπει να προσαρμόζεται στους τεχνικούς περιορισμούς που εισάγει η λειτουργία των κύριων μονάδων βάσης του συστήματος (όπως π.χ. τα τεχνικά ελάχιστα των ατμοστροβίλων, η διακοπή της λειτουργίας των οποίων δεν είναι εφικτή).

Βήμα 3^ο: Δήλωση Φορτίου από το ΔΥΒΣ

Εάν ο ΔΥΒΣ διαπιστώνει ότι η διαθέσιμη προς απόδοση ενέργεια (E_H) υπολείπεται της ζητηθείσας από το ΔΜΔΝ εγγυημένης ενέργειας του επόμενου 24ωρου, τότε υποβάλλει στο ΔΜΔΝ Δήλωση Φορτίου (E_D), δηλαδή αιτείται την απορρόφηση ορισμένης ποσότητας ενέργειας από το δίκτυο ώστε να αντλήσει την απαιτούμενη ποσότητα νερών για τη διασφάλιση της εγγυημένης παροχής.

Προκειμένου να ελαχιστοποιείται η απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο, η δήλωση φορτίου περιορίζεται από το ποσό της ενέργειας που απαιτείται να προστεθεί στην ήδη αποθηκευμένη, E_H , ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή της εγγυημένης, E_G . Συνεπώς:

$$E_D = \max\left\{0, \frac{E_G - E_H}{n_{P-H}}\right\} \quad (4.1)$$

όπου n_{P-H} ο συντελεστής απόδοσης του πλήρους κύκλου άντλησης – παραγωγής του ΥΒΣ. Επίσης, δήλωση φορτίου δεν μπορεί να υποβληθεί αν ο ΔΜΔΝ δεν έχει απαιτήσει παροχή εγγυημένης ενέργειας ($E_G=0 \Rightarrow E_D=0$). Από την άλλη, όταν ο ΔΥΒΣ υποβάλλει δήλωση φορτίου τότε η προσφορά ενέργειας του θα πρέπει να είναι αναγκαστικά ίση με την εγγυημένη ($E_D \neq 0 \Rightarrow E_O = E_G$).

Βήμα 4^ο: Κατάρτιση Προγράμματος Παραγωγής και Άντλησης του ΥΒΣ από το ΔΜΔΝ

Ο ΔΜΔΝ, με βάση την Προσφορά Ενέργειας και τη Δήλωση Φορτίου του ΥΒΣ, καταρτίζει αντίστοιχα προγράμματα παραγωγής και άντλησης. Η προσφερόμενη ενέργεια του ΥΒΣ προσαρμόζεται στην ημερήσια καμπύλη φορτίου έτσι ώστε να αποκόπτονται/εξομαλύνονται οι αιχμές και να διευκολύνεται και να καθίσταται οικονομικότερη η λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αντίστοιχα, η άντληση από το δίκτυο για εξασφάλιση της εγγυημένης ενέργειας προσαρμόζεται στην κοιλάδα της καμπύλης φορτίου.

Κατά τον καθορισμό του προγράμματος παραγωγής του ΥΒΣ, ο ΔΜΔΝ λαμβάνει υπόψη του τις μέγιστες ισχείς παραγωγής και τα τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων. Επίσης κατά τον καθορισμό του προγράμματος άντλησης του ΥΒΣ, ο ΔΜΔΝ λαμβάνει υπόψη τις ονομαστικές ισχείς και τα τεχνικά ελάχιστα των αντλιών.

Βήμα 5^ο: Κατάρτιση Προγράμματος Ένταξης των Συμβατικών Μονάδων από το ΔΜΔΝ

Αφού έχει καθοριστεί το πρόγραμμα ένταξης και λειτουργίας των υδροστρόβιλων και αντλιών του ΥΒΣ, ο ΔΜΔΝ πραγματοποιεί από την προηγούμενη ημέρα τον προγραμματισμό ένταξης των συμβατικών μονάδων του συστήματος για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Με βάση την πρόβλεψη φορτίου και ένα κατάλληλο ποσοστό εφεδρείας ε , τυπικά 10%, η συνολική ικανότητα των συμβατικών μονάδων την i ώρα του επόμενου 24ώρου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της ισχύος $P'_{L,i}$:

$$P'_{L,i} = (1 + \varepsilon) \cdot [(P_{L,i} - P_{PV,i}) + P_{D,i} - P_{E,i}] \quad (4.2)$$

όπου $P_{L,i}$: η ισχύς του φορτίου που προβλέπεται για την ώρα i

$P_{PV,i}$: η προβλεπόμενη φωτοβολταϊκή³¹ παραγωγή για την ώρα i

$P_{D,i}$: η προγραμματισμένη απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο για άντληση την ώρα i

$P_{E,i}$: η προγραμματισμένη ισχύς παραγωγής του ΥΒΣ για την ώρα i

Σημειώνεται ότι η σειρά ένταξης και η φόρτιση των συμβατικών μονάδων παραγωγής γίνεται γενικά κατά τον καθιερωμένο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής και να ικανοποιούνται οι λειτουργικοί περιορισμοί. Στις προσομοιώσεις της παρούσας διατριβής ακολουθήθηκε η σειρά προτεραιότητας που υποδεικνύει ο ΔΜΔΝ.

³¹ Για τη Φ/Β παραγωγή που εγκαθίσταται στα νησιά δεν προβλέπεται η δυνατότητα επιβολής ορίων (δηλαδή περικοπών ισχύος, όπως στα Α/Π). Συνεπώς τα Φ/Β αντιμετωπίζονται ως ενσωματωμένα στο φορτίο των νησιών και ουσιαστικά πραγματοποιείται πρόβλεψη της καθαρής ζήτησης φορτίου $P_L - P_{PV}$, [92, 93].

Βήμα 6^ο: Καθορισμός Ορίων Διείσδυσης των Αιολικών εκτός ΥΒΣ

Με δεδομένη τη ζήτηση φορτίου και το πρόγραμμα ένταξης των συμβατικών και υδροστροβλικών μονάδων παραγωγής, υπολογίζονται τα όρια διείσδυσης για τα Α/Π εκτός ΥΒΣ. Γι' αυτό το σκοπό εφαρμόζεται η καθιερωμένη πρακτική, [4], που διασφαλίζει ότι δεν παραβιάζονται τα τεχνικά ελάχιστα των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής και ότι δεν υπερβαίνεται το άνω επιτρεπτό όριο στιγμιαίας αιολικής διείσδυσης στο σύστημα:

$$P_{W,i} \leq P_{W \max,i}^T = (P_{L,i} - P_{PV,i}) + P_{D,i} - \sum_{j \in AC,i} c_{Tj} \cdot P_{Cnj} - c_{HT,e} \cdot \sum_{j \in AH,i} P_{Hnj} \quad (4.3)$$

$$P_{W,i} \leq P_{W \max,i}^D = \sum_{j \in AC,i} c_{Dj} \cdot P_{Cnj} + c_{HD} \cdot \sum_{j \in AH,i} P_{Hnj} \quad (4.4)$$

$$P_{W \max,i} = \min \{ P_{W \max,i}^T, P_{W \max,i}^D \} \quad (4.5)$$

όπου (ο δείκτης i δηλώνει σε όλες τις περιπτώσεις την ώρα i της επόμενης ημέρας):

- $P_{W \max,i}^T$: η μέγιστη επιτρεπόμενη αιολική ισχύς την ώρα i λόγω του περιορισμού τεχνικού ελάχιστου
- $P_{W \max,i}^D$: η μέγιστη επιτρεπόμενη αιολική ισχύς την ώρα i λόγω του δυναμικού περιορισμού
- $P_{W \max,i}$: η μέγιστη επιτρεπόμενη αιολική ισχύς την ώρα i
- $P_{W,i}$: ισχύς εξόδου όλων των Α/Π εκτός ΥΒΣ
- P_{Cnj} : ονομαστική ισχύς της συμβατικής μονάδας j
- P_{Hnj} : ονομαστική ισχύς του υδροστρόβιλου j
- c_{Tj} : ο συντελεστής τεχνικού ελάχιστου της κάθε συμβατικής μονάδας j (% της ονομαστικής της ισχύος)
- c_{Dj} : το δυναμικό όριο διείσδυσης της κάθε συμβατικής μονάδας j (% της ονομαστικής της ισχύος)
- $c_{HT,e}$: το «συμβατικό» τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων, που προκαθορίζεται ως ποσοστό επί της ονομαστικής τους ισχύος. Αντιστοιχεί στο τεχνικό ελάχιστο των υποκαθιστάμενων συμβατικών μονάδων και όχι κατ' ανάγκη στο πραγματικό τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων.
- c_{HD} : το δυναμικό όριο διείσδυσης του κάθε υδροστρόβιλου, % της ονομαστικής του ισχύος, το οποίο εκφράζει τη διαθέσιμη δυναμική του εφεδρεία
- $A_{C,i}, A_{H,i}$: το σύνολο των συμβατικών μονάδων και των υδροστρόβιλων αντίστοιχα, που έχουν προγραμματιστεί για ένταξη την ώρα i

Η εξίσωση (4.3) υποδηλώνει ότι οι υδροστρόβιλοι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως οι συμβατικές μονάδες που υποκαθιστούν, δηλ. παρέχουν εφεδρεία για την απορρόφηση αιολικής ισχύος. Συνεπώς, οι υδροστρόβιλοι μπορεί να εντάσσονται για προγραμματισμένη παραγωγή στην ονομαστική ισχύ, αλλά είναι αρκετά πιθανό να υποφορτίζονται για απορρόφηση της ισχύος των Α/Π εκτός ΥΒΣ μέχρι και το «συμβατικό» τεχνικό τους ελάχιστο, αφού όμως πρώτα έχουν υποφορτιστεί οι συμβατικές μονάδες στα τεχνικά τους ελάχιστα (καθώς οι υδροστρόβιλοι έχουν προτεραιότητα φόρτισης ως προς τις συμβατικές). Όσον αφορά το «συμβατικό» τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων, $c_{HT,e}$, αυτό προκαθορίζεται ως ποσοστό επί της ονομαστικής τους ισχύος και αντιστοιχεί στο τεχνικό ελάχιστο των υποκαθιστάμενων συμβατικών μονάδων (π.χ. 40%-60%) και όχι κατ' ανάγκη στο πραγματικό τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων, που μπορεί να είναι αρκετά χαμηλότερο (για υδροστρόβιλους τύπου Pelton είναι της τάξης του 20% ενώ για τύπου Francis περίπου 50%). Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι η υποκατάσταση συμβατικών μονάδων από υδροστρόβιλους δεν επηρεάζει σημαντικά το διαθέσιμο περιθώριο διείσδυσης της αιολικής παραγωγής.

Η εξίσωση (4.4) διασφαλίζει ότι η αιολική ισχύς που εγχύεται στο σύστημα δεν ξεπερνά τη διαθέσιμη δυναμική εφεδρεία των μονάδων που συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας (συμβατικών και υδροστρόβιλων) και η οποία εκφράζεται μέσω των συντελεστών c_D . Σχετικά με το δυναμικό όριο διείσδυσης των συμβατικών μονάδων, c_D , αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων και των ρυθμιστών τους, το είδος και τη γεωγραφική διασπορά των αιολικών πάρκων και τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας κάθε συστήματος, τα διατιθέμενα μέσα παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος κλπ.. Με βάση την ακολουθούμενη μέχρι σήμερα πρακτική, το δυναμικό όριο διείσδυσης, c_D , γενικά παίρνει τιμές περί το 30%-35% της ικανότητας των εν λειτουργία συμβατικών μονάδων. Στις λογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια, ελήφθη $c_D = 30\%$. Επισημαίνεται ότι το δυναμικό όριο c_D στην παρούσα ανάλυση δεν εφαρμόζεται επί του φορτίου ζήτησης, αλλά επί της ικανότητας των συμβατικών μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία, καθώς με τον τρόπο αυτό θεωρείται ότι προσεγγίζεται ορθότερα η διαθέσιμη δυναμική εφεδρεία. Όσον αφορά το δυναμικό όριο διείσδυσης των υδροστρόβιλων, αυτό καθορίζεται από την ταχύτητα απόκρισής τους που σχετίζεται με τα εν γένει τεχνικά και δυναμικά τους χαρακτηριστικά (υψομετρική διαφορά των δύο δεξαμενών, μήκος αγωγών προσαγωγής, ρυθμιστές στροφών κτλ.). Όπως προέκυψε από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, ο συντελεστής δυναμικής διείσδυσης των υδροστρόβιλων παρουσιάζεται αρκετά χαμηλότερος από αυτόν των μονάδων diesel. Αν όμως ισχύουν οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3 ως προς τις Α/Γ και αντλίες του ΥΒΣ, τότε η τιμή του υπόψη συντελεστή για τους υδροστρόβιλους μπορεί να θεωρηθεί στα επίπεδα των υποκαθιστάμενων συμβατικών μονάδων.

Ο συνολικός περιορισμός διείσδυσης για τα Α/Π εκτός ΥΒΣ, $P_{Wmax,i}$, είναι ο αυστηρότερος των δύο παραπάνω περιορισμών, βάσει της εξίσωσης (4.5), και κατανέμεται στα διάφορα Α/Π αναλογικά προς την εγκατεστημένη ισχύ τους. Αν ο συνολικός περιορισμός απορρόφησης αιολικής ισχύος, $P_{Wmax,i}$, υπερβαίνει την εγκατεστημένη (ή συμφωνημένη) ισχύ των Α/Π εκτός ΥΒΣ, τότε η περίσσεια διατίθεται στο Α/Π του ΥΒΣ για απ' ευθείας έγχυση αιολικής παραγωγής στο δίκτυο (συμμετοχή στο set-point). Οι υπολογισμοί των set-points των Α/Π μπορούν να πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος, δηλ. σε πραγματικό χρόνο αντί για την προηγούμενη ημέρα, σε περίπτωση ύπαρξης αναβαθμισμένων Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ).

4.4 Εσωτερική διαχείριση του ΥΒΣ

Ο Διαχειριστής του ΥΒΣ (ΔΥΒΣ) στο τέλος κάθε ημέρας και πριν την επόμενη ημέρα κατανομή, υποβάλλει προσφορά ενέργειας και δήλωση φορτίου (εφόσον απαιτείται) στο ΔΜΔΝ. Στη συνέχεια, αφού έχει γίνει ο καθορισμός από το ΔΜΔΝ του 24ωρου προγράμματος παραγωγής και άντλησης (αν απαιτείται άντληση από το δίκτυο) του ΥΒΣ, ο παραγωγός κατά τη διάρκεια του 24ώρου προχωρά στην ένταξη των στρόβιλων και αντλιών του βάσει αυτού του προγράμματος και παράλληλα επιλέγει τον κατάλληλο τρόπο εκμετάλλευσης της διαθέσιμης αιολικής του ισχύος με κριτήριο τη μεγιστοποίηση των εσόδων του. Η λογική της εσωτερικής διαχείρισης του ΥΒΣ περιγράφεται αναλυτικά αμέσως παρακάτω.

4.4.1 Προσφορά ενέργειας

Ο ΔΥΒΣ στο τέλος κάθε ημέρας, έχοντας υπόψη την ποσότητα των νερών στην άνω δεξαμενή και ενδεχομένως την προβλεπόμενη παραγωγή του Α/Π του για τις επόμενες ώρες, υποβάλλει προσφορά ενέργειας τουλάχιστον ίση με την εγγυημένη ενέργεια που ζητείται από το ΔΜΔΝ. Εφόσον ο ΔΥΒΣ έχει υποβάλλει δήλωση φορτίου για να εξασφαλίσει την εγγυημένη ενέργεια του

επόμενου 24ώρου, τότε η προσφερόμενη ενέργεια θα είναι υποχρεωτικά ίση με την εγγυημένη ενέργεια και όχι μεγαλύτερη.

Η προσφερόμενη ενέργεια γενικά βασίζεται στα διαθέσιμα νερά της άνω δεξαμενής του ΥΒΣ. Δυνητικά για αύξηση των εσόδων, μπορεί να συνεκτιμηθεί και η αναμενόμενη αιολική παραγωγή, γεγονός όμως που εισάγει σημαντικές αβεβαιότητες (σφάλμα πρόβλεψης του ανέμου, ταυτοχρονισμός της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής και της προγραμματιζόμενης παραγωγής του ΥΒΣ). Στην παρούσα ανάλυση υιοθετήθηκε η παρακάτω απλή λογική συνυπολογισμού της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής, με ενδεικτικούς συντελεστές ασφαλείας, οι οποίοι κλιμακώνονται στα διαδοχικά χρονικά διαστήματα του επόμενου 24ωρου. Συγκεκριμένα η Προσφορά Ενέργειας για το επόμενο 24ωρο θα είναι το άθροισμα:

- Της διαθέσιμης προς εκμετάλλευση υδραυλικής ενέργειας στην άνω δεξαμενή επί το συνολικό συντελεστή απόδοσης αγωγών προσαγωγής και υδροστρόβιλων και
- Των παρακάτω ποσοτήτων της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής ενέργειας:
 - Του 80% της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής για τις ώρες 00:00 έως τις 08:00 (επί το συνολικό συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντληση-παραγωγής), λαμβάνοντας υπόψη και την ικανότητα άντλησης. Το άθροισμα της συγκεκριμένης ενέργειας δεν μπορεί να ξεπερνά τη μέγιστη χωρητικότητα σε ενέργεια της άνω δεξαμενής αντλησιοταμίευσης.
 - Του 50% της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής για τις ώρες 08:00 έως τις 16:00 (επί το συνολικό συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντληση-παραγωγής), λαμβάνοντας υπόψη και την ικανότητα άντλησης.
 - Του 30% της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής για τις ώρες 16:00 έως τις 21:00 (επί το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντληση-παραγωγής), λαμβάνοντας υπόψη και την ικανότητα άντλησης.

Πρόκειται για μια συντηρητική λογική που συνυπολογίζει την αναμενόμενη αιολική παραγωγή στην προσφορά ενέργειας, έτσι ώστε να προκύπτει όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού (μείωση των απορρίψεων αιολικής παραγωγής προς άντληση λόγω γεμάτης δεξαμενής) και μεγιστοποίηση των εσόδων του ΥΒΣ, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα σφάλματα της πρόβλεψης αυξάνονται σημαντικά σε μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες.

Οι παραπάνω συντελεστές ασφαλείας επιλέχθηκαν με το ακόλουθο σκεπτικό: Τις πρώτες ώρες του 24ωρου (00:00 έως και τις 08:00), όπου οι υδροστρόβιλοι ΥΒΣ δεν αναμένεται να λειτουργούν, επιλέγεται συντελεστής ασφαλείας 20%, που αφορά κυρίως την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Τις λοιπές ώρες, στις οποίες ο ΥΒΣ κατά πάσα πιθανότητα θα κληθεί να παράγει (κυρίως τις μεσημβρινές και βραδινές ώρες, όπου εντοπίζονται οι αιχμές στην ημερήσια καμπύλη φορτίου), οι συντελεστές ασφαλείας είναι πολύ μεγαλύτεροι λόγω της αβεβαιότητας που υφίσταται για τις συγκεκριμένες ώρες αναφορικά με την ισχύ την οποία θα κληθεί να παράγει ο ΥΒΣ, αλλά και λόγω του αυξημένου σφάλματος πρόβλεψης. Για παράδειγμα, αν προβλέπεται σημαντική αιολική παραγωγή τις απογευματινές ώρες και αυτή συνυπολογιστεί στην προσφορά ενέργειας, τότε είναι πιθανό να μην μπορέσει ο ΥΒΣ να αποδώσει την απαιτούμενη ενέργεια τις μεσημβρινές ώρες όπου συνήθως εμφανίζεται η αιχμή. Για τον ίδιο λόγο δε συνυπολογίζεται και η αιολική παραγωγή των ΥΒΣ τις τρεις τελευταίες ώρες του 24ωρου. Ειδικά για ΥΒΣ μονού αγωγού, η προβλεπόμενη αιολική παραγωγή τις ώρες υψηλού φορτίου δε λαμβάνεται καθόλου υπόψη καθώς είναι πολύ πιθανό να κληθεί να παράγει και άρα δε θα έχει τη δυνατότητα να αντλεί ταυτόχρονα. Ιδεατά, ο ΔΥΒΣ θα πρέπει να προβλέπει την αναμενόμενη αιολική παραγωγή του και να προσαρμόζει ανάλογα τους συντελεστές ασφαλείας, ώστε αφενός να μεγιστοποιεί τις ημερήσιες προσφορές ενέργειας (και άρα τα έσοδά του) και αφετέρου να είναι σε θέση να δίνει πάντοτε στο σύστημα την ισχύ και ενέργεια κατανομής του.

Στην παρούσα ανάλυση, λόγω απουσίας ειδικών αλγορίθμων πρόβλεψης, υλοποιείται η απλουστευμένη λογική που παρουσιάστηκε παραπάνω, η οποία κρίνεται ικανοποιητική για την εξαγωγή των ενεργειακών και οικονομικών αποτελεσμάτων από την ένταξη των ΥΒΣ.

4.4.2 Δήλωση φορτίου

Υποβάλλεται για την εξασφάλιση της εγγυημένης ενέργειας που απαιτεί ο ΔΜΔΝ για το επόμενο 24ωρο, εφόσον η διαθέσιμη ενέργεια του ΥΒΣ δεν επαρκεί. Για να αποτραπεί η ανεξέλεγκτη απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο (πράγμα που μπορεί να ευνοεί τον ΥΒΣ όταν η τιμή παραγωγής είναι σημαντικά μεγαλύτερη της τιμής άντλησης), ο ΔΥΒΣ υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

- Εφόσον ο ΔΥΒΣ υποβάλλει δήλωση φορτίου, η προσφορά ενέργειας δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγγυημένη ενέργεια που ζητήθηκε από το ΔΜΔΝ.
- Η δήλωση φορτίου περιορίζεται από το ποσό της ενέργειας που απαιτείται να προστεθεί στην ήδη αποθηκευμένη, E_H , ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή της εγγυημένης, E_G , βάσει της εξίσωσης (4.1). Στην πράξη, επειδή ο ΔΜΔΝ θα είναι δύσκολο να μπορεί να γνωρίζει την αποθηκευμένη ενέργεια του ΥΒΣ κάθε στιγμή, η δήλωση φορτίου θα περιορίζεται από την τιμή της εγγυημένης ενέργειας δια τον ελάχιστο συντελεστή απόδοσης του πλήρους κύκλου (άντλησης-παραγωγής) του ΥΒΣ.

4.4.3 Αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος του ΥΒΣ

Αναφορικά με την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος από το Α/Π του ΥΒΣ, υφίστανται τρεις δυνατοί τρόποι (modes) εκμετάλλευσης:

- Mode 1:* Η διαθέσιμη αιολική ισχύς αποθηκεύεται μέσω άντλησης (αντλησιοαιολική συνεργασία).
- Mode 2:* Απευθείας διάθεση της αιολικής ισχύος στο φορτίο όταν υπάρχει περίσσεια set-point (δηλαδή τις ώρες που η ικανότητα απορρόφησης αιολικής ισχύος από το δίκτυο υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των αιολικών εκτός ΥΒΣ).
- Mode 3:* Απευθείας διάθεση της αιολικής ισχύος στο φορτίο υποκαθιστώντας υδροστροβλική ισχύ στην παροχή της προγραμματισμένης ισχύος παραγωγής του ΥΒΣ (υδροαιολική συνεργασία). Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, οι υδροστρόβιλοι και το Α/Π του ΥΒΣ λειτουργούν ουσιαστικά σαν ένας συνδυασμένος σταθμός που παράγει την προγραμματισμένη ισχύ του ΥΒΣ. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι τεχνικές προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν ώστε να είναι τεχνικά εφικτή η υδροαιολική συνεργασία χωρίς αρνητικές επιπτώσεις για το σύστημα.

Ο καθορισμός των προτεραιοτήτων ως προς την αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ εξαρτάται από την τιμολόγηση των ενεργειών των διαφόρων συνιστωσών του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα αν η τιμή της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη από την τιμή της αιολικής ενέργειας δια το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής, όπως συνήθως συμβαίνει στα νησιά, τότε είναι οικονομικά συμφέρουσα η αξιοποίηση της αιολικής ισχύος για άντληση (Mode 1). Σε αντίθετη περίπτωση είναι προτιμητέα η απευθείας έγχυση της αιολικής ισχύος στο φορτίο (Mode 2 ή 3). Σε κορεσμένα νησιωτικά συστήματα, όπου το περιθώριο αιολικής διείσδυσης κατανέμεται πρακτικά στα Α/Π εκτός ΥΒΣ, η αξιοποίηση της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ βάσει του Mode 2 αναμένεται να συμβαίνει σπάνια.

Αναλυτικότερα οι προτεραιότητες ως προς την εκμετάλλευση της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, καθορίζονται ως εξής: Αν η τιμή παραγωγής από τους υδροστρόβιλους επί το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής είναι υψηλότερη από την τιμή της αιολικής παραγωγής, τότε οι προτεραιότητες έχουν ως εξής:

1. Η διαθέσιμη αιολική παραγωγή αξιοποιείται πρωτίστως για άντληση (Mode 1).
2. Η περίσσεια αιολικής παραγωγής, η οποία δεν μπορεί να αντληθεί (είτε λόγω πληρότητας της άνω δεξαμενής, είτε λόγω περιορισμένης ικανότητας του αντλητικού σταθμού, είτε λόγω παραγωγής των υδροστρόβιλων στην περίπτωση ΥΒΣ μονού αγωγού), διατίθεται απευθείας στο

δίκτυο όταν υπάρχει περίσσεια set-point (Mode 2). Αν όμως με τη συμμετοχή στο set-point προκύπτει υποφόρτιση των υδροστρόβιλων, τότε τίθεται θέμα για το αν συμφέρει ή όχι να συμμετέχουν τα αιολικά του ΥΒΣ στο set-point και θα πρέπει να εφαρμοστούν τα κριτήρια του παρακάτω σημείου 3.

3. Αν παραμένει ανεκμετάλλευτη αιολική παραγωγή, τότε τίθεται θέμα για το αν συμφέρει να απορριφθεί (περικοπή παραγωγής του Α/Π του ΥΒΣ) ή να εγχυθεί απευθείας στο δίκτυο, συμμετέχοντας στην παραγωγή ισχύος του ΥΒΣ με υποφόρτιση των στρόβιλων (Mode 3). Στην περίπτωση που δεν μπορεί να αντληθεί η περίσσεια αιολικής παραγωγής λόγω πληρότητας της άνω δεξαμενής, τότε κριτήριο για την επιλογή της συμμετοχής ή όχι των αιολικών στην παροχή ισχύος στο δίκτυο είναι η προβλεπόμενη αιολική παραγωγή κατά τις επόμενες ώρες.
 - Όταν προβλέπεται σημαντικό αιολικό δυναμικό τότε συμφέρει η παροχή ισχύος αποκλειστικά από τους υδροστρόβιλους και η απόρριψη της περιπτώσεως αιολικής παραγωγής, ώστε να δημιουργηθεί δυνατότητα αποθήκευσης αιολικής ενέργειας τις επόμενες ώρες.
 - Αντίθετα, όταν προβλέπεται σχετικά χαμηλό αιολικό δυναμικό για τις επόμενες ώρες, το οποίο δεν επαρκεί για να γεμίσει τη δεξαμενή μέχρι το τέλος της ημέρας, τότε μάλλον συμφέρει να συμμετέχουν τα αιολικά του ΥΒΣ στην προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής του ΥΒΣ, με υποφόρτιση των υδροστρόβιλων.

Στην περίπτωση που η άνω δεξαμενή δεν είναι γεμάτη και η περίσσεια αιολικής παραγωγής δεν μπορεί να αντληθεί λόγω της μικρής ικανότητας του αντλητικού σταθμού σε σχέση με την ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ ή λόγω παραγωγής των υδροστρόβιλων στην περίπτωση ΥΒΣ μονού αγωγού, τότε συμφέρει να συμμετέχουν τα αιολικά στην προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής του ΥΒΣ με υποφόρτιση των υδροστρόβιλων.

Η παραπάνω ιεράρχηση προτεραιοτήτων σε σχέση με την αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής αποκαλείται στη συνέχεια «**προτεραιότητα στην άντληση**».

Αν η τιμή παραγωγής από τους υδροστρόβιλους επί το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής είναι επαρκώς χαμηλότερη από την τιμή της αιολικής παραγωγής, τότε συμφέρει η αλλαγή προτεραιοτήτων:

1. Η διαθέσιμη αιολική παραγωγή εγχέεται απ' ευθείας στο δίκτυο τις ώρες που έχει διατεθεί set-point στο Α/Π του ΥΒΣ (Mode 2).
2. Η διαθέσιμη αιολική παραγωγή συμμετέχει στην προγραμματισμένη παραγωγή του ΥΒΣ με υποφόρτιση των υδροστρόβιλων (Mode 3).
3. Η περίσσεια αιολικής παραγωγής αξιοποιείται για άντληση (Mode 1).

Η εναλλακτική ιεράρχηση προτεραιοτήτων για τη διάθεση της αιολικής παραγωγής που περιγράφηκε παραπάνω αποκαλείται στη συνέχεια «**προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση**».

4.4.4 Ισοζύγιο ισχύος του ΥΒΣ

Σε όλες τις χρονικές περιόδους του έτους και για οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση λειτουργίας του ΥΒΣ, θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση (4.6), η οποία εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος του σταθμού, ώστε η λειτουργία του να ανταποκρίνεται στον ημερήσιο προγραμματισμό που έχει προηγηθεί. Στο συγκεκριμένο ισοζύγιο δεν περιλαμβάνεται η ισχύς των αιολικών που δίνεται απ' ευθείας στο δίκτυο μέσω της συμμετοχής του Α/Π του ΥΒΣ στην κατανομή του set-point (Mode 2):

$$P_{HT} + P_{HW} - P_P = P_H \quad (4.6)$$

όπου,

P_{HT} : η ισχύς λειτουργίας των υδροστρόβιλων του ΥΒΣ

P_{HW} : η ισχύς λειτουργίας του Α/Π του ΥΒΣ

P_P : η ισχύς των αντλιών του ΥΒΣ

P_H : η ολική ισχύς του ΥΒΣ (θετική όταν παράγει και αρνητική όταν απορροφά ενέργεια από το δίκτυο)

Η σχέση (4.6) εκφράζει την απαίτηση η ισχύς εξόδου των υδροστρόβιλων μαζί με την καθαρή αιολική παραγωγή και αφού αφαιρεθεί η τυχόν άντληση, να ισούται με την ισχύ κατανομής του ΥΒΣ, με τις οποίες αποκλίσεις να οφείλονται στη συμμετοχή των μονάδων του ΥΒΣ στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Σε κατάσταση άντλησης από το δίκτυο, η παραπάνω ισχύς P_H είναι προφανώς αρνητική. Μη τήρηση του ισοζυγίου κατά τη φάση της λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του συνολικού φορτίου του συστήματος από το φορτίο για το οποίο έγινε ο προγραμματισμός λειτουργίας του συστήματος από το ΔΜΔΝ (π.χ. όταν η ισχύς άντλησης υπερβαίνει σημαντικά την παραγωγή του Α/Π του ΥΒΣ, χωρίς να έχει υποβληθεί δήλωση φορτίου). Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια έλλειμμα ή πλεόνασμα παραγωγής στο σύστημα, καταστάσεις κατ' αρχήν μη αποδεκτές όταν οι σχετικές αποκλίσεις είναι σημαντικές.

Προκειμένου να τηρείται το ισοζύγιο ισχύος σε κατάσταση αντλησιοαιολικής συνεργασίας (Mode 1), πρέπει να εξασφαλίζεται κατά το δυνατόν ισορροπία μεταξύ της αιολικής ισχύος και της ισχύος των αντλιών. Μάλιστα, προκειμένου να περιοριστεί το μέγεθος των αποκλίσεων ισχύος μεταξύ παραγωγής Α/Π και λειτουργίας αποθηκευτικών μονάδων, για λόγους ασφάλειας του συστήματος, καθορίστηκαν συγκεκριμένα όρια αποκλίσεων στο υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο, τα οποία αναγράφονται και σε άδειες παραγωγής που έχουν εκδοθεί από τη ΡΑΕ για ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, ορίζεται ανοχή η οποία δεν υπερβαίνει για τις αντίστοιχες ποσότητες ενέργειας, το 5% ωριαίως και το 3% ημερησίως. Επιπλέον, η απόκλιση της παραγόμενης ισχύος του αιολικού σταθμού και του αντλητικού συστήματος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα αντίστοιχα όρια στιγμιαίας λειτουργίας που θα καθοριστούν στον υπό έκδοση ΚΔΜΔΝ. Για την επίτευξη των παραπάνω ορίων, βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος (της τάξης της μιας ώρας μπροστά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο «persistence») θα πρέπει να εφαρμόζεται για τον προγραμματισμό της ένταξης των απαιτούμενων αντλιών. Σε πραγματικό χρόνο τώρα, η μεταβλητότητα της αιολικής ισχύος θα αντισταθμίζεται από το αντλιοστάσιο, χρησιμοποιώντας το παρεχόμενο περιθώριο ρύθμισης των αντλιών μεταβλητών στροφών (~40-50% της ονομαστικής τους ισχύος). Στην περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, η παρακολούθηση της αιολικής ισχύος είναι δυνατή μέχρι κάποιο βαθμό, μέσω χειρισμών σύνδεσης/αποσύνδεσης του απαιτούμενου αριθμού αντλιών. Μεγάλες αυξήσεις της αιολικής ισχύος, που υπερβαίνουν τη μέγιστη ισχύ των αντλιών σε λειτουργία, θα αντιμετωπίζονται με περικοπές αιολικής ισχύος. Από την άλλη μεγάλες μειώσεις της αιολικής ισχύος θα αντιμετωπίζονται με αποσύνδεση του απαιτούμενου αριθμού αντλιών (εφόσον δεν επαρκεί το περιθώριο ρύθμισης των αντλιών μεταβλητών στροφών).

Στην περίπτωση της υδροαιολικής συνεργασίας (Mode 3), οι υδροστρόβιλοι θα πρέπει να αντισταθμίζουν τη μεταβλητότητα της αιολικής ισχύος, έτσι ώστε η συνολική ισχύς που δίνεται στο σύστημα από το συνδυασμό ΥΗΣ και Α/Π ΥΒΣ να ακολουθεί την κατανεμόμενη ισχύ του ΥΒΣ. Γι' αυτόν το σκοπό, η ισχύς εξόδου των υδροστρόβιλων θα ελέγχεται βάσει των άμεσων μετρήσεων της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ, ενώ παράλληλα απαιτείται και ρύθμιση συχνότητας από τις Α/Γ του ΥΒΣ ώστε να αντισταθμιστούν οι όποιες αρνητικές επιπτώσεις της υδροαιολικής συνεργασίας στο σύστημα λόγω της σχετικά αργής απόκρισης των υδροστρόβιλων, όπως προέκυψε από το προηγούμενο κεφάλαιο. Όταν οι υδροστρόβιλοι φτάνουν στα τεχνικά τους ελάχιστα, τότε θα περικόπτεται αιολική ισχύς.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για την τήρηση του ισοζυγίου ισχύος κάθε χρονική στιγμή, απαιτείται ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου του ΥΒΣ, το οποίο θα παρακολουθεί και θα συντονίζει τη λειτουργία των επιμέρους συνιστωσών του και λαμβάνοντας υπόψη τις κατανεμόμενες ισχύεις παραγωγής και άντλησης του ΥΒΣ, θα υπολογίζει και θα αποστέλλει τα κατάλληλα set-points ισχύος στις μονάδες του ΥΒΣ. Ο υπολογισμός βέβαια αυτών των set-points δεν αποτελεί απλή διαδικασία, λόγω των πολλαπλών καταστάσεων λειτουργίας που μπορεί να βρεθεί ο ΥΒΣ.

Στη συνέχεια προτείνονται ενδεικτικά συγκεκριμένες εξισώσεις υπολογισμού των set-points ισχύος (παραγωγής για τον ΥΗΣ, μέγιστης παραγωγής για το Α/Π και κατανάλωσης για τις αντλί-

ες) των μονάδων του ΥΒΣ, τις οποίες θα πρέπει να υλοποιεί το κεντρικό σύστημα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Η κατάρτιση των εξισώσεων εξαρτάται από τις προτεραιότητες που θα ακολουθηθούν στην αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής (ανάλογα με τις τιμολογήσεις των ενεργειών του ΥΒΣ), αν δηλαδή θα δοθεί προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυσή της στο δίκτυο ή στην άντλησή της.

Αναλυτικότερα τα set-points καθορίζονται ως εξής για τις δύο προτεραιότητες:

A) Προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση στο δίκτυο

- Set-point παραγόμενης ισχύος ΥΗΣ:

$$P_{HT,min} \leq P_{AGC} - \min\left[P_{HW}, \min\left[P_{AGC} - P_{HT,min}, P_{HWsub}^{set}\right]\right] \leq P_{HT,nom} \quad (4.7)$$

- Set-point μέγιστης παραγόμενης ισχύος Α/Π:

$$0 \leq \min\left[P_{AGC} - P_{HT,min}, P_{HWsub}^{set}\right] + (P_{p,max} - P_{p,grid}) + P_{HW,set} \leq P_{HW,nom} \quad (4.8)$$

- Set-point απορροφούμενης ισχύος αντλιοστάσιου:

$$P_{p,min} \leq P_{HW} - P_{HW,set} - \min\left[P_{AGC} - P_{HT,min}, P_{HWsub}^{set}\right] + P_{p,grid} \leq P_{p,max} \quad (4.9)$$

B) Προτεραιότητα στην άντληση

- Set-point παραγόμενης ισχύος ΥΗΣ:

$$P_{HT,min} \leq P_{AGC} - \min\left[\max\left[P_{HW} - P_{HW,set} - P_{p,max}, 0\right], P_{HWsub}^{set}\right] \leq P_{HT,nom} \quad (4.10)$$

- Set-point μέγιστης παραγόμενης ισχύος Α/Π:

$$0 \leq \min\left[P_{AGC} - P_{HT,min}, P_{HWsub}^{set}\right] + (P_{p,max} - P_{p,grid}) + P_{HW,set} \leq P_{HW,nom} \quad (4.11)$$

- Set-point απορροφούμενης ισχύος αντλιοστάσιου:

$$P_{p,min} \leq P_{HW} \leq P_{p,max} \quad (4.12)$$

Ακολουθεί η επεξήγηση των συμβόλων των παραπάνω εξισώσεων:

P_{AGC} : η ισχύς κατανομής του ΥΒΣ

$P_{HT,min}$: το άθροισμα των τεχνικών ελαχίστων των ενταγμένων υδροστρόβιλων

$P_{HT,nom}$: το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων των ενταγμένων υδροστρόβιλων

P_{HW} : η ισχύς λειτουργίας του Α/Π του ΥΒΣ

P_{HWsub}^{set} : set-point περιορισμού της αιολικής ισχύος που θα υποκαθιστά υδραυλική παραγωγή

$P_{HW,set}$: το set-point που έχει καταναμωθεί στο Α/Π του ΥΒΣ για απευθείας έγχυση

$P_{HW,nom}$: η ονομαστική ισχύς του Α/Π του ΥΒΣ

$P_{p,min}$: το άθροισμα των τεχνικών ελαχίστων όλων των ενταγμένων αντλιών

$P_{p,max}$: το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων όλων των ενταγμένων αντλιών

$P_{p,grid}$: η απορροφούμενη από το δίκτυο ισχύς των αντλιών βάσει του προγράμματος άντλησης που έχει καταρτιστεί από το ΔΜΔΝ

Οι εξισώσεις (4.7), (4.8) και (4.9) ισχύουν για προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση της αιολικής παραγωγής στο δίκτυο. Τότε ο ΥΗΣ του ΥΒΣ υποφορτίζεται μέχρι και τα τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων υδροστρόβιλων (ανάλογα με την αιολική παραγωγή), παίρνοντας ως set-point (εξίσωση (4.7)) την ισχύ κατανομής του ΥΒΣ (P_{AGC}) μείον το ελάχιστο της εκάστοτε παραγόμενης

αιολικής ισχύος και της μέγιστης δυνατότητας για υποκατάσταση υδραυλικής παραγωγής. Από την άλλη, το set-point για τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ του Α/Π του ΥΒΣ (εξίσωση (4.8)) ισούται με το άθροισμα του ορίου της αιολικής ισχύος για υποκατάσταση υδραυλικής παραγωγής (εφόσον ο ΥΗΣ είναι σε λειτουργία), συν τη διαφορά της ικανότητας απορρόφησης ισχύος των εκάστοτε ενταγμένων αντλιών από την προγραμματισμένη για εκείνη την ώρα άντληση από το δίκτυο, συν το set-point που έχει κατανεμηθεί στο Α/Π του ΥΒΣ για απ' ευθείας έγχυση. Το άθροισμα αυτό δεν υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ του Α/Π. Όσον αφορά τις αντλίες, το set-point που θα τους κατανέμεται κάθε στιγμή από το κεντρικό σύστημα ελέγχου του ΥΒΣ θα ισούται, βάσει της εξίσωσης (4.9), με την προγραμματισμένη (αν υφίσταται) άντληση από το δίκτυο για τη συγκεκριμένη ώρα, συν τη διαφορά της παραγόμενης αιολικής ισχύος από το set-point που έχει κατανεμηθεί στο Α/Π του ΥΒΣ για απ' ευθείας έγχυση, μείον τη μέγιστη δυνατή υποκατάσταση υδραυλικής παραγωγής από αιολικά. Σημειωτέον ότι η αιολική παραγωγή που λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του set-point του αντλιοστάσιου, μπορεί να ισούται είτε με τη στιγμιαία τιμή της είτε με τον κινούμενο μέσο της, ανάλογα με την υιοθετηθείσα λογική ελέγχου των αντλιών (βλ. Κεφάλαιο 2). Το set-point αυτό δεν μπορεί να είναι μικρότερο από το άθροισμα των τεχνικών ελαχίστων όλων των ενταγμένων αντλιών, ούτε μεγαλύτερο από την ολική ονομαστική ισχύ τους. Στην περίπτωση που το υπολογιζόμενο set-point βάσει της εξίσωσης (4.9) προκύψει μικρότερο του $P_{p,min}$, και μάλιστα η διαφορά τους υπερβαίνει το όριο στιγμιαίας απόκλισης ισχύος Α/Π και αντλιοστάσιου που θέτει ο ΔΜΔΝ, τότε θα αποσυνδέεται ο απαιτούμενος αριθμός αντλιών και θα αναπροσαρμόζονται τα όρια $P_{p,min}$ και $P_{p,max}$ που λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις (4.8) και (4.9).

Σε περίπτωση που δοθεί προτεραιότητα στην άντληση, τότε διαφοροποιούνται οι εξισώσεις υπολογισμού των set-points για τον ΥΗΣ και το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, το set-point για το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ (εξίσωση (4.12)) θα ισούται με την εκάστοτε συνολική αιολική ισχύ του ΥΒΣ (στιγμιαία ή μέση τιμή), με μόνους περιορισμούς και πάλι τα $P_{p,min}$ και $P_{p,max}$. Όσον αφορά τον ΥΗΣ, το set-point ισχύος του (εξίσωση (4.10)) θα ισούται με την κατανεμόμενη ισχύ του ΥΒΣ, P_{AGC} , μείον το ελάχιστο μεταξύ του P_{HWsub}^{set} και της διαφοράς (εφόσον είναι θετική) που προκύπτει αν αφαιρεθεί η μέγιστη ικανότητα των ενταγμένων αντλιών καθώς και το τυχόν set-point που έχει κατανεμηθεί στο Α/Π του ΥΒΣ για απ' ευθείας έγχυση, από τη συνολική παραγόμενη αιολική ισχύ του ΥΒΣ. Δηλαδή το set-point ισχύος του ΥΗΣ θα είναι κατά βάση ίσο με P_{AGC} στην πλειονότητα του χρόνου λειτουργίας του ΥΒΣ.

5. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΥΒΣ

Στο παρόν κεφάλαιο, προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του Κεφαλαίου 4 και να διερευνηθούν οι αναμενόμενες ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις από τη λειτουργία των ΥΒΣ, παρουσιάζονται και αναλύονται αποτελέσματα προσομοιώσεων της ετήσιας λειτουργίας τριών νησιών (Κρήτη, Λέσβος, Κάρπαθος) διαφορετικού μεγέθους και χαρακτηριστικών, χωρίς και με ΥΒΣ, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab. Εκτός όμως από την ανάλυση υποθετικών περιπτώσεων, στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και αποτελέσματα από την ανάλυση μιας πραγματικής εφαρμογής, αυτής του ΥΒΣ της Ικαρίας, που αποτελεί έναν από τους πρώτους ΥΒΣ υπό κατασκευή στην Ελλάδα και πιθανώς παγκοσμίως. Τα αναλυτικά δεδομένα των προσομοιώσεων αναφορικά με τα εξεταζόμενα ΜΔΝ παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

Στις προσομοιώσεις αυτές έχουν ληφθεί βέβαια υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη δυναμική ανάλυση του Κεφαλαίου 3. Συγκεκριμένα, στο βασικό σενάριο διερεύνησης έχει θεωρηθεί ότι τηρούνται όλες οι τεχνικές προϋποθέσεις ώστε ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής, να παρουσιάζει παρόμοια ταχύτητα απόκρισης με τις συμβατικές μονάδες που υποκαθιστά και επίσης η υδροαιολική συνεργασία να είναι τεχνικά εφικτή. Στα πλαίσια όμως της πληρότητας της ανάλυσης εξετάστηκαν και σενάρια που δεν ισχύουν οι συγκεκριμένες προϋποθέσεις, προκειμένου να διερευνηθούν οι αντίστοιχες επιπτώσεις στα συστήματα των ΜΔΝ.

Στα επόμενα, αφού περιγραφεί το λογιστικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος και καθοριστούν η αποζημιωτέα εγγυημένη ισχύς (capacity credit) και οι τιμολογήσεις ισχύος και ενέργειας των εξεταζόμενων ΥΒΣ στα νησιά Κρήτη, Λέσβος και Κάρπαθος, στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται ενδελεχώς τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του Κεφαλαίου 4 και να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις της ένταξης των ΥΒΣ στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των υφιστάμενων Α/Π καθώς και στο συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος. Επίσης αξιολογείται ενδεικτικά η βιωσιμότητα των επενδύσεων για ΥΒΣ υπό το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα από την ανάλυση της πραγματικής εφαρμογής του ΥΒΣ της Ικαρίας.

5.1 Λογιστικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης του Κεφαλαίου 4 και τη διερεύνηση των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών αποτελεσμάτων από τη λειτουργία των ΥΒΣ, χρησιμοποιήθηκε το λογιστικό μοντέλο που περιγράφεται στην παρούσα παράγραφο, το οποίο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και βασίζεται στο ισοζύγιο ενέργειας και ισχύος των συστημάτων. Επειδή σε αναλύσεις αυτού του τύπου το ενδιαφέρον εστιάζεται στα ενεργειακά και οικονομικά μεγέθη, απαιτούνται μεγάλες χρονικές διάρκειες προσομοίωσης (τυπικά ετήσιες), γεγονός που επιβάλλει τη χρήση απλουστευμένων ενεργειακών μοντέλων, αγνοώντας τα δυναμικά φαινόμενα. Στην παρούσα ανάλυση, όλες οι προσομοιώσεις είναι ετήσιας διάρκειας και πραγματοποιούνται με 20λεπτο χρονικό βήμα. Ο αλγόριθμος του μοντέλου προσομοίωσης περιγράφεται από το block διάγραμμα που παρατίθεται σε επόμενη ενότητα, στο Σχήμα 5.12 (που αφορά την προσομοίωση του ΥΒΣ Ικαρίας), και υλοποιεί την πολιτική διαχείρισης που προτάθηκε στο Κεφάλαιο 4.

Η ζήτηση φορτίου αναπαρίσταται από μια ωριαία χρονοσειρά φορτίου, για την οποία έγινε γραμμική παρεμβολή των τιμών της σε 20λεπτη βάση, λόγω του χρησιμοποιούμενου βήματος προσομοίωσης.

Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής περιγράφονται από τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, δηλ. ονομαστική και αποδιδόμενη ισχύς, τεχνικό ελάχιστο, ειδικές καταναλώσεις για διάφορα ποσοστά φόρτισης, μεταβλητά κόστη λειτουργίας και συντήρησης, εκπομπές CO₂.

Τα Α/Π αναπαρίστανται από τις καμπύλες ισχύος των επιμέρους Α/Γ. Είσοδος στα μοντέλα των Α/Π αποτελούν οι χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου στις τοποθεσίες των Α/Π, ανηγμένες στο ύψος της πλήμνης των Α/Γ, οι οποίες μεταφράζονται σε χρονοσειρές ισχύος εξόδου αφού αφαιρεθούν οι διαφορές απώλειες (εδώ θεωρήθηκαν ίσες με το 10% της παραγόμενης ισχύος).

Για τα Φ/Β χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά φωτοβολταϊκής ισχύος ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β συλλεκτών. Η συγκεκριμένη χρονοσειρά εκτιμήθηκε μέσω κατάλληλου υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του ΕΜΠ και βασίζεται στις εξισώσεις περιγραφής του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης Φ/Β συστοιχίας [94], το οποίο έχει αναπτυχθεί στα εργαστήρια Sandia (Sandia National Laboratories, SNL). Για την εκτίμηση της χρονοσειράς φωτοβολταϊκής ισχύος χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα ανέμου κλπ.) του έτους 2004 από την περιοχή της Αθήνας, τα οποία διατίθενται σε βάση δεδομένων που διατηρείται στον ιστοχώρο του σταθμού [95].

Για την προσομοίωση της υδροστροβλικής και αντλητικής λειτουργίας των ΥΒΣ χρησιμοποιήθηκαν απλουστευμένα μοντέλα που κάνουν χρήση μέσω τιμών των συνολικών συντελεστών απόδοσης. Η χωρητικότητα των δεξαμενών εκφράζεται απ' ευθείας σε ενέργεια (MWh) αντί μονάδες όγκου (m³). Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση είναι κατάλληλη για αναλύσεις όπως η παρούσα, όπου προσομοιώνονται υποθετικοί ΥΒΣ και συνεπώς δε διατίθενται συγκεκριμένα κατασκευαστικά στοιχεία.

Για προσομοιώσεις όμως συγκεκριμένων ΥΒΣ, όπως το υβριδικό έργο της Ικαρίας όπου διατίθενται αναλυτικά τεχνικά στοιχεία των επιμέρους μονάδων παραγωγής, άντλησης και αποθήκευσης, η μοντελοποίησή τους διαφοροποιείται και είναι πιο ακριβής. Αναλυτικότερα, οι υδροστρόβιλοι και αντλίες του ΥΒΣ προσομοιώνονται από λεπτομερή μοντέλα που χαρακτηρίζονται από τις καμπύλες απόδοσής τους για διάφορα ποσοστά φόρτισης και υψομετρικές διαφορές, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της στάθμης των δεξαμενών και τις απώλειες των σωληνώσεων (βλ. Παράρτημα 1). Όσον αφορά τη χωρητικότητα των δεξαμενών, αυτή εκφράζεται σε μονάδες όγκου (m³) και όχι ενέργειας. Επίσης, για τον υπολογισμό της παροχής νερού σε έναν υδροστρόβιλο ή αντλία μεταβλητών στροφών, για δεδομένη ηλεκτρική ισχύ, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αντίστοιχες σχέσεις:

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q_H \cdot (H_{0,H} - k_H \cdot Q_H^2) \cdot n_H \cdot n_G \cdot n_{Htr} \quad (5.1)$$

$$P_P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_P \cdot (H_{0,P} + k_P \cdot Q_P^2)}{n_P \cdot n_M \cdot n_{Ptr}} \quad (5.2)$$

όπου:

- P_H, P_P : ηλεκτρική ισχύς υδροστρόβιλων και αντλιών αντίστοιχα
- Q_H, Q_P : παροχές υδροστρόβιλων και αντλιών αντίστοιχα
- $H_{0,H}, H_{0,P}$: υδραυλικά ύψη υδροστρόβιλων και αντλιών αντίστοιχα (σχετίζονται με τις υψομετρικές διαφορές και τις στάθμες των δεξαμενών)
- k_H, k_P : συντελεστές απωλειών για τις σωληνώσεις υδροστρόβιλων και αντλιών αντίστοιχα
- n_H, n_P : συντελεστές απόδοσης υδροστρόβιλων και αντλιών αντίστοιχα
- n_G, n_M : συντελεστές απόδοσης γεννήτριας υδροστρόβιλου και κινητήρα αντλίας αντίστοιχα
- n_{Htr}, n_{Ptr} : συντελεστές απόδοσης των Μ/Σ
- ρ : πυκνότητα νερού (1000 kg/m³)
- g : επιτάχυνση βαρύτητας (9.81 m/s²)

Συγκεκριμένα, για δεδομένη ηλεκτρική ισχύ (P_H, P_P) και τις εκάστοτε στάθμες των δεξαμενών, προκύπτουν από τις καμπύλες αποδόσεως οι συντελεστές απόδοσης και στη συνέχεια η παροχή (Q_H, Q_P) από τη λύση των παραπάνω τριτοβάθμιων, ως προς Q , εξισώσεων.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση των αντλιών σταθερών στροφών του ΥΒΣ, στις τεχνικές προδιαγραφές του δίνονται συγκεκριμένα στοιχεία απορροφούμενης ισχύος και παροχής, σε συσχέτιση με τα συνολικά ύψη (περιλαμβανομένων των απωλειών πίεσης). Στις προσομοιώσεις είναι δεδομένες κάθε φορά οι στάθμες των δεξαμενών και άρα η απόλυτη υψομετρική διαφορά, αλλά δεν είναι γνωστό το ύψος των απωλειών ($k \cdot Q^2$) καθώς αυτό εξαρτάται από την παροχή, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το συνολικό ύψος. Για τη λύση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη επαναληπτική μέθοδος: Για δεδομένη υψομετρική διαφορά και μια αρχική τιμή της παροχής, υπολογίζεται το ύψος απωλειών και ένα νέο συνολικό ύψος, από το οποίο υπολογίζεται με παρεμβολή στα υπάρχοντα στοιχεία των τεχνικών προδιαγραφών μια νέα παροχή. Με εκτέλεση επαναλήψεων, η παραπάνω μέθοδος συγκλίνει σε μια συγκεκριμένη τιμή παροχής για τις αντλίες. Βάσει της παροχής αυτής, υπολογίζεται στη συνέχεια με παρεμβολή η απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς του αντλιοστάσιου.

Σημειώνεται ότι με την παραπάνω προσομοίωση του υδραυλικού μέρους του ΥΒΣ, λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίηση της μοναδιαίας ισχύος λειτουργίας και παροχής των αντλιών όταν αυξάνεται ο αριθμός των μονάδων που λειτουργούν παράλληλα λόγω των απωλειών στον κοινό αγωγό κατάθλιψης. Αντίστοιχα λαμβάνεται υπόψη και η επίπτωση των απωλειών στον αγωγό προσαγωγής για τη λειτουργία των υδροστρόβιλων.

5.2 Καθορισμός ορίου εγγυημένης ισχύος ΥΒΣ – Απαίτηση παροχής εγγυημένης ισχύος

5.2.1 Καθορισμός ορίου εγγυημένης ισχύος

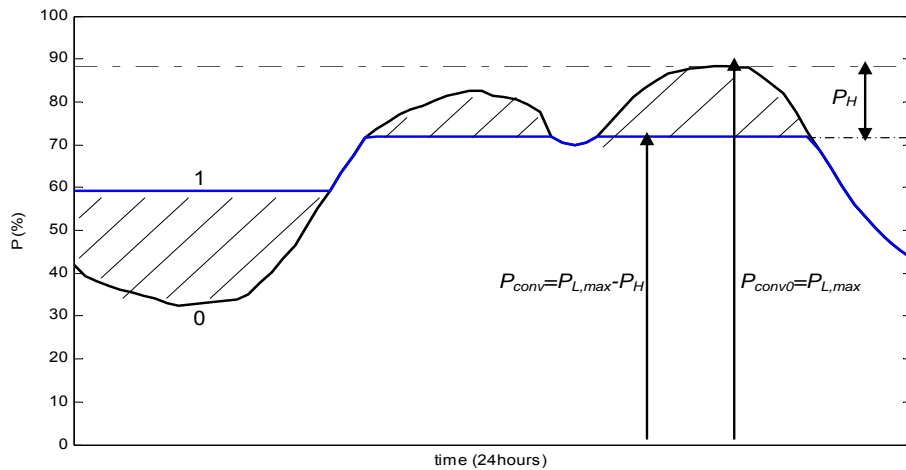
Σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, προβλέπεται αποζημίωση διαθεσιμότητας ισχύος (capacity credit) του ΥΒΣ με βάση την εγγυημένη ισχύ των μονάδων ελεγχόμενης παραγωγής του και το κόστος νεοεισερχόμενου συμβατικού σταθμού αντίστοιχης ισχύος, με το σκεπτικό ότι η παροχή εγγυημένης ισχύος και ενέργειας από τον ΥΒΣ επιτρέπει την αποφυγή επένδυσης σε συμβατικό σταθμό παραγωγής αντίστοιχης ικανότητας για την κάλυψη των αιχμών. Με τη θεώρηση αυτή, ως εγγυημένη ισχύς ενός ΥΒΣ θεωρείται η ισχύς που είναι πάντοτε εξασφαλισμένη, ανεξαρτήτως ανεμολογικών συνθηκών, και παράλληλα οδηγεί σε ισόποση μείωση της απαιτούμενης εγκατεστημένης συμβατικής παραγωγής του νησιού.

Προκειμένου ένα ποσό ισχύος και ενέργειας του ΥΒΣ να είναι πάντοτε εγγυημένο, παρέχεται η δυνατότητα άντλησης από το δίκτυο, κατά βάση στις νυχτερινές ώρες, μεταθέτοντας ενέργεια από την αιχμή στην κοιλάδα της καμπύλης φορτίου. Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί από την αιχμή στην κοιλάδα και η προκύπτουσα μείωση της ισχύος αιχμής είναι προφανώς περιορισμένη και εξαρτάται κατ' αρχήν από τη μορφή της καμπύλης φορτίου. Συνεπώς προκύπτει αντίστοιχος περιορισμός ως προς το μέγεθος της εγγυημένης ισχύος και ενέργειας που μπορεί σε ημερήσια βάση να παρέχεται από τους ΥΒΣ κατά τρόπο απόλυτα διασφαλισμένο και άρα ως προς την εγγυημένη ισχύ που μπορούν αυτοί να παράσχουν υποκαθιστώντας αντίστοιχες θερμικές μονάδες αιχμής.

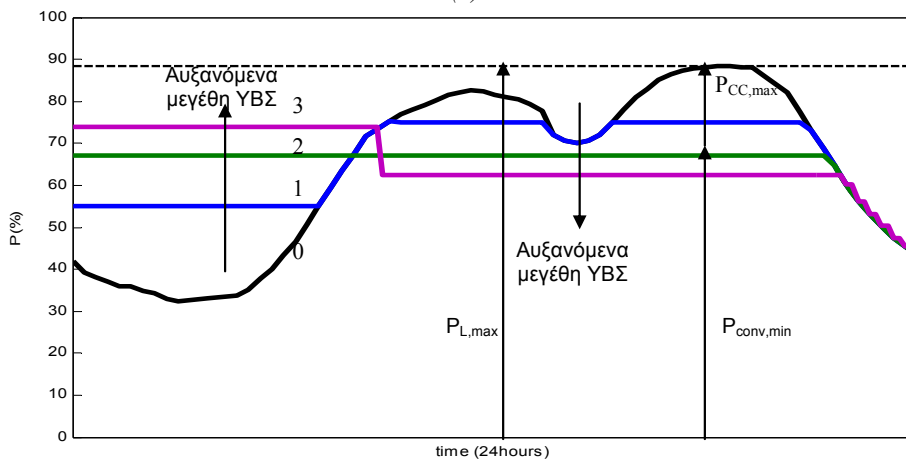
Για τον καθορισμό του ορίου εγγυημένης ισχύος των ΥΒΣ προτείνεται αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στη θεώρηση ότι υπό τις δυσμενέστερες ανεμολογικές συνθήκες, η κάλυψη οποιασδήποτε ενέργειας αιχμής της ημερήσιας καμπύλης φορτίου προϋποθέτει αντίστοιχη άντληση τις νυχτερινές ώρες χαμηλού φορτίου και συγκεκριμένα απορρόφηση της προς απόδοση ενέργειας αιχμής, προσαυξημένης κατά τις συνολικές απώλειες του κύκλου αποθήκευσης-ανάκτησης ενέργειας του ΥΒΣ. Η μετατόπιση φορτίου από την αιχμή στην κοιλάδα έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση μιας νέας ημερήσιας καμπύλης φορτίου των λοιπών (συμβατικών) μονάδων παραγωγής, η οποία εμφα-

νίζει αυξημένη νυχτερινή και μειωμένη ημερήσια αιχμή, όπως ενδεικτικά απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.1(α). Η παρουσία του ΥΒΣ μετασχηματίζει την καμπύλη φορτίου, μειώνοντας τις απαιτήσεις συμβατικής παραγωγής κατά την ικανότητα των υδροστρόβιλων, $P_H = P_{conv,0} - P_{conv}$.

Εντούτοις, η κατάσταση διαφοροποιείται σε περιπτώσεις ΥΒΣ μεγάλου μεγέθους σε σχέση με τη ζήτηση φορτίου του νησιωτικού συστήματος. Στο διάγραμμα 5.1(β) απεικονίζεται ο μετασχηματισμός της ημερήσιας καμπύλης φορτίου για αυξανόμενα μεγέθη ΥΒΣ. Για το μεγαλύτερο ΥΒΣ (καμπύλη 3), παρατηρείται ότι η καμπύλη φορτίου παρουσιάζει νέα αιχμή κατά τις νυχτερινές ώρες. Συνεπώς, παρότι η ημερήσια αιχμή πράγματι μειώνεται κατά ποσό ίσο με την ονομαστική ισχύ των υδροστρόβιλων, η προκύπτουσα μείωση στην απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ συμβατικών μονάδων είναι μικρότερη, καθώς απαιτείται επιπλέον συμβατική ισχύς για να καλυφθεί η νέα νυχτερινή αιχμή.



(α)



(β)

Σχήμα 5.1. Μετασχηματισμός μιας τυπικής ημερήσιας καμπύλης φορτίου για αυξανόμενα μεγέθη ΥΒΣ (0: χωρίς ΥΒΣ, 3: μέγιστο μέγεθος ΥΒΣ), θεωρώντας ότι όλη η ενέργεια που παρέχεται από τους υδροστρόβιλους τις ώρες αιχμής έχει προηγουμένως αντληθεί από το δίκτυο κατά τις νυχτερινές ώρες.

Η ελάχιστη απαιτούμενη συμβατική ισχύς, $P_{conv,min}$, βάσει του διαγράμματος 5.1(β), προκύπτει στην ιδανική περίπτωση που η καμπύλη φορτίου γίνεται επίπεδη (καμπύλη 2 στο διάγραμμα). Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται άμεσα και το όριο της εγγυημένης ισχύος που έχει νόημα να ζητηθεί από τον ΥΒΣ. Στον υπολογισμό αυτόν έχει θεωρηθεί ότι το σύνολο της ενέργειας που παρέχεται κατά τις ώρες αιχμής έχει προηγουμένως αντληθεί κατά τις νυχτερινές ώρες, δηλαδή έχει υιοθετηθεί το δυσμενέστερο σενάριο, απόλυτης άπνοιας και μηδενικών αποθεμάτων νερού στην άνω δεξαμενή του ΥΒΣ. Επίσης έχουν ληφθεί υπόψη οι απώλειες του κύκλου άντλησης-παραγωγής για

τη συσχέτιση της αντλούμενης και αποδιδόμενης ενέργειας. Επιπλέον υφίσταται και η προφανής προϋπόθεση επαρκούς χωρητικότητας των δεξαμενών αποθήκευσης και επαρκούς ικανότητας απορρόφησης ισχύος από το αντλητικό συγκρότημα.

Από τα προηγούμενα είναι σαφές ότι το όριο της εγγυημένης ισχύος στην περίπτωση μεγάλων ΥΒΣ δε συμπίπτει απαραίτητα με το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των υδροστρόβιλων τους, διότι δεν μπορεί να διασφαλιστεί η παροχή της αντίστοιχης ενέργειας παρά μόνο αν γίνει αποδεκτή η δημιουργία νυχτερινής αιχμής που υπερβαίνει το ημερήσιο μέγιστο φορτίο των συμβατικών μονάδων. Από τη μορφή της καμπύλης φορτίου ενός νησιού προκύπτει ένα συγκεκριμένο όριο εγγυημένης ισχύος που ενδείκνυται να αποζημιωθεί για οποιονδήποτε ΥΒΣ και το οποίο όριο υπολογίζεται σε ετήσια βάση. Για το σκοπό αυτόν, ο ημερήσιος υπολογισμός που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.1(β) επαναλαμβάνεται για τις 365 ημέρες του χρόνου. Η ελάχιστη απαιτούμενη συμβατική ισχύς για ένα συγκεκριμένο έτος, $P_{conv,min}^A$, υπολογίζεται από τις ημερήσιες ελάχιστες απαιτήσεις σε συμβατική ισχύ, $P_{conv,min}^j$:

$$P_{conv,min}^A = \max_j [P_{conv,min}^j] \quad (5.3)$$

Με δεδομένη την ετήσια αιχμή φορτίου του συστήματος, $P_{L,max}$, το άνω όριο της αποζημιωτέας εγγυημένης ισχύος, $P_{CC,max}$, ισούται με:

$$P_{CC,max} = P_{L,max} - P_{conv,min}^A \quad (5.4)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία για τον καθορισμό του ορίου εγγυημένης ισχύος για τους εξεταζόμενους ΥΒΣ στα συστήματα της Κρήτης, της Λέσβου και της Κάρπαθου, προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1. Εκτός από τα όρια εγγυημένης ισχύος (τα οποία εξαρτώνται μόνο από τις καμπύλες φορτίου), στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται και οι απαιτήσεις διαστασιολόγησης του αντλιοστασίου και των δεξαμενών του κάθε εξεταζόμενου ΥΒΣ, προκειμένου να είναι εξασφαλισμένη η μέγιστη αυτή εγγυημένη ισχύς.

Πίνακας 5.1. Όρια εγγυημένης ισχύος και περιορισμοί διαστασιολόγησης των ΥΒΣ για κάθε εξεταζόμενο νησιωτικό σύστημα

		Κρήτη	Λέσβος	Κάρπαθος
Αιχμή φορτίου	MW	820	78	11.9
Ελάχιστο φορτίο	MW	200	14.4	1.0
Συντελεστής φορτίου	%	53.3	51.0	42.7
Ελάχιστη απαιτούμενη συμβατική ισχύς ($P_{conv,min}$)	MW	652.3	59.8	8.4
Όριο εγγυημένης ισχύος ($P_{CC,max}$)	MW	167.7	18.2	3.5
Ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς αντλιοστασίου	MW	223.2	25.8	3.2
Ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα άνω δεξαμενής	h	6.5	6.3	4.4

(*) Η χωρητικότητα δίνεται σε ισοδύναμες ώρες λειτουργίας των υδροστρόβιλων σε εγγυημένη ισχύ

Καταβολή αποζημίωσης διαθεσιμότητας ισχύος μεγαλύτερης της $P_{CC,max}$ δεν είναι κατ' αρχήν εύλογη, καθώς η αντίστοιχη ισχύς δεν είναι απόλυτα εξασφαλισμένη και άρα ο ΔΜΔΝ δεν απαλλάσσεται από την υποχρέωση εγκατάστασης (και αντίστοιχης αποζημίωσης) θερμικών μονάδων ανάλογης ικανότητας. Τυχόν καταβολή αποζημιώσεων για εγγυημένη ισχύ υψηλότερη της $P_{CC,max}$, θα μπορούσε να είναι αποδεκτή ως μέτρο ενίσχυσης της βιωσιμότητας των σχετικών επενδύσεων. Επισημαίνεται πάντως ότι η θεώρηση αυτή δεν προβλέπεται ρητώς στο ισχύον θεσμικό πλαίσιο [31, 32], ενώ στη Δημόσια Διαβούλευση 8/2008 της ΡΑΕ, [52], παρουσιάζεται μια αρκετά πιο ελαστική φιλοσοφία σε σχέση με την αποζημιωτέα εγγυημένη ισχύ (capacity credit) των ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, βάσει του [52], ο παραγωγός καθορίζει την προς αποζημίωση εγγυημένη ισχύ του

σταθμού (π.χ. το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής του ΥΒΣ) και σε περίπτωση αδυναμίας ικανοποίησης της εγγυημένης παροχής που ζητείται από τον ΔΜΔΝ, προβλέπονται πρόστιμα, το ύψος και ο τρόπος επιβολής των οποίων δεν έχουν καθοριστεί. Εάν υιοθετηθεί μια τέτοια λογική, ο παραγωγός θα σταθμίζει από τη μια πλευρά το κέρδος από το αυξημένο capacity credit και από την άλλη τα πρόστιμα που πιθανόν να του επιβληθούν, καθώς και τις όποιες άλλες συνέπειες από την ενδεχόμενη μη ανταπόκρισή του στις εκάστοτε απαιτήσεις του ΔΜΔΝ. Προφανώς η στάθμιση αυτή βασίζεται στην πιθανότητα μη κάλυψης της απαίτησης εγγυημένης παροχής, η οποία πιθανότητα μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν ο παραγωγός φροντίζει τις περιόδους υψηλού φορτίου να διατηρεί επαρκή αποθηκευμένη ποσότητα νερών στην άνω δεξαμενή του. Με βάση το σκεπτικό αυτό, οι ΔΥΒΣ θα μπορούσαν να διεκδικούν αποζημίωση της μέγιστης ισχύος των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής τους, φροντίζοντας παράλληλα να τηρούν κάποιο ελάχιστο ποσοστό πληρότητας στην άνω δεξαμενή τις περιόδους υψηλού φορτίου, ώστε να αποφευχθεί κατά το δυνατό το ενδεχόμενο αδυναμίας κάλυψης της εγγυημένης παροχής.

Στη παρούσα διερεύνηση έχει θεωρηθεί ότι οι ΥΒΣ θα αποζημιώνονται για το ελάχιστο μετὰξύ της εγκατεστημένης ισχύος των υδροστρόβιλων τους και του ορίου εγγυημένης ισχύος, $P_{CC,max}$, εφόσον βέβαια είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη ικανότητα άντλησης και χωρητικότητα των δεξαμενών για την εξασφάλιση της αποζημιωτέας ισχύος.

5.2.2 Απαίτηση παροχής εγγυημένης ισχύος

Οι ΥΒΣ λαμβάνουν αποζημίωση για την παροχή εγγυημένης ισχύος και συνεπώς οφείλουν να διασφαλίζουν τη διαθεσιμότητα της ισχύος αυτής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (πλην των προσυμφωνημένων διαστημάτων συντήρησης). Οι συμβάσεις αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας των ΥΒΣ θα πρέπει να προβλέπουν επαρκώς υψηλές ρήτρες για το ενδεχόμενο αδυναμίας παροχής της ζητηθείσας ισχύος και ενέργειας από υπαιτιότητα του παραγωγού.

Από την άλλη πλευρά, η ζήτηση εγγυημένης παροχής από τον ΥΒΣ καθορίζεται από το ΔΜΔΝ με βάση τις εκάστοτε πραγματικές ανάγκες του νησιωτικού συστήματος και δεν θα υφίσταται σε καθημερινή βάση, αλλά μόνο όταν οι συνθήκες λειτουργίας του νησιωτικού συστήματος καθιστούν αναγκαία την πρόσθετη ισχύ των μονάδων ελεγχόμενης παροχής του ΥΒΣ. Τα κριτήρια μπορεί να είναι οικονομικά, δυναμικής απόκρισης/επικουρικών υπηρεσιών, ενώ θα εξαρτάται επίσης και από γεγονότα μη διαθεσιμότητας συμβατικών μονάδων.

Η συχνότητα και το μέγεθος της ζητούμενης από τον ΔΜΔΝ εγγυημένης παροχής έχουν επίπτωση στα αποτελέσματα των αναλύσεων, καθώς επηρεάζουν άμεσα την πραγματοποιούμενη άντληση από το δίκτυο. Στην πράξη όμως αποτελεί στοχαστικό φαινόμενο και συνεπώς είναι δύσκολο να προσομοιωθεί. Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης έγινε η απλουστευμένη θεώρηση ότι ο ΔΜΔΝ απαιτεί εγγυημένη παροχή μόνο τις ώρες που το φορτίο του νησιού είναι μεγαλύτερο από την ετήσια αιχμή του φορτίου ($P_{L,max}$) μείον την αποζημιωτέα εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ που προσδιορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι το σύστημα του νησιού διαθέτει τη θεωρητικά ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη συμβατική ισχύ, $P_{conv,min}^A$, δηλαδή ότι ο ΔΜΔΝ έχει επιλέξει να αποφύγει την εγκατάσταση συμβατικής παραγωγής κατά το μέγεθος της αποζημιωτέας εγγυημένης ισχύος των ΥΒΣ (πράγμα που βέβαια δεν συμβαίνει στα εξεταζόμενα νησιά, βάσει του υφιστάμενου σχεδιασμού ανάπτυξης της παραγωγής τους). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η δημιουργία νυχτερινής αιχμής για το φορτίο των συμβατικών μονάδων, ακόμα και αν η εγκατεστημένη συμβατική ισχύς είναι μεγαλύτερη από $P_{conv,min}^A$, πράγμα που θα μπορούσε να συμβεί στην περίπτωση μεγάλων ΥΒΣ. Βασικό πλεονέκτημα της θεώρησης αυτής είναι ότι οδηγεί σε πολύ χαμηλά ποσοστά άντλησης από το δίκτυο (γενικά κάτω ή περί το 1% της ολικής ενέργειας άντλησης) και άρα σε ελαχιστοποίηση των απωλειών συμβατικής ενέργειας στα συστήματα αποθήκευσης.

5.3 Τιμολόγηση ισχύος και ενέργειας ΥΒΣ

Στην παρούσα ανάλυση ελήφθησαν υπόψη οι αρχές τιμολόγησης του υφιστάμενου θεσμικού πλαισίου [31, 32], οι οποίες παρουσιάστηκαν συνοπτικά στο Κεφάλαιο 4, βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι τιμολογήσεις των εξεταζόμενων ΥΒΣ ως εξής:

Για την παραγόμενη ενέργεια των Α/Π των ΥΒΣ, θεωρήθηκε ότι αυτή θα τιμολογείται με το ισχύον τιμολόγιο για σταθμούς ΑΠΕ στα ΜΔΝ το έτος 2008. Συγκεκριμένα, η τιμή της παραγόμενης ενέργειας από Α/Π σε ΜΔΝ το έτος 2008 ήταν ορισμένη στα 87.4 €/MWh, βάσει της Υπουργικής Απόφασης Δ6/Φ1/οικ. 14610/9.7.2007. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής για την αιολική ενέργεια συνδέεται με το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν τιμές του 2008 για τα συμβατικά καύσιμα.

Όσον αφορά τις τιμές της παραγόμενης ενέργειας των υδροστρόβιλων και της απορροφούμενης των αντλιών, αυτές θα ισούνται με τα μέσα ετήσια μεταβλητά κόστη των συμβατικών μονάδων αιχμής και βάσης αντίστοιχα, πριν την ένταξη του ΥΒΣ. Για τον προσδιορισμό αυτών των κοστών ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

- Προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του συστήματος χωρίς τον ΥΒΣ.
- Προσδιορισμός των συμβατικών μονάδων με χρόνο λειτουργίας πάνω από το 70% του έτους και μικρότερο από το 30% του έτους. Οι πρώτες ορίζονται ως μονάδες βάσης και οι δεύτερες ως μονάδες αιχμής του συστήματος βάσει του [4].
- Προσδιορισμός της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας κάθε μονάδας βάσης και αιχμής και του αντίστοιχου ετήσιου μεταβλητού κόστους παραγωγής, το οποίο περιλαμβάνει κόστος καυσίμου, κόστος εκπομπών CO₂ και μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Το πλήικο του συνολικού ετήσιου κόστους παραγωγής των μονάδων βάσης και αιχμής ξεχωριστά προς τη συνολική παραχθείσα ενέργειά τους, αποτελεί το μέσο μεταβλητό κόστος των μονάδων βάσης και αιχμής αντίστοιχα.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τους παραπάνω υπολογισμούς, δηλ. οι τιμές των καυσίμων, το μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των διαφόρων συμβατικών μονάδων και οι εκπομπές CO₂ ανά καύσιμο δίνονται στους Πίνακες 5.2 έως 5.4. Σχετικά με τις τιμές των συμβατικών καυσίμων, θεωρήθηκαν αυτές του 2008, ως μια μέση τιμή της εξέλιξης της τιμής τους τα τελευταία χρόνια. Όσον αφορά τη θεωρούμενη σύνθεση των συμβατικών σταθμών παραγωγής και τις ειδικές καταναλώσεις των μονάδων τους για τα τρία εξεταζόμενα νησιά, αυτές δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 1 και είναι τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην [87] και αφορούσαν την εκτιμώμενη κατάσταση των ηλεκτρικών συστημάτων των εξεταζόμενων νησιών για το έτος 2012. Σχετικά με το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂, θεωρήθηκε ίσο με 25 €/tnCO₂, που αποτελεί μια εκτίμηση για την εξέλιξη της τιμής τους τα επόμενα χρόνια στα Χρηματιστήρια Ενέργειας.

Πίνακας 5.2. Τιμές καυσίμων

Καύσιμο	Μαζούτ	Diesel	Φυσικό Αέριο
Τιμή καυσίμου (€/tn)	396	705	330

Πίνακας 5.3. Μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης για τους διάφορους τύπους συμβατικών μονάδων

Τύπος Μονάδων	Δηξελ/νήτριες (Δ/Ζ)	Ατμοηλ/κές (Α/Τ)	Συνδ. Κύκλου (ΣΚ)	Αεριο/βίολο (Α/Σ)
Μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (€/kWh)	5	5	4	4

Πίνακας 5.4. Εκπομπές CO₂ ανά καύσιμο

Καύσιμο	Μαζούτ (Κ.Θ.Δ.: 9600 kcal/kg)	Diesel (Κ.Θ.Δ.: 10200 kcal/kg)	Φυσικό Αέριο (Κ.Θ.Δ.: 11500 kcal/kg)
Εκπομπές CO ₂ (tnCO ₂ /TJ)	77	74	56
Εκπομπές CO ₂ (tnCO ₂ /tn καυσίμου)	3.093	3.158	2.694

*Οι συντελεστές εκπομπών των διαφόρων καυσίμων σε tnCO₂/TJ, δίνονται στην Απόφαση 2004/156/ΕΚ, [96], όπου έχουν εξαιρεθεί οι συντελεστές οξείδωσης. Για τη μετατροπή τους σε tnCO₂/tn καυσίμου, χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικές τιμές των κατώτερων θερμογόνων δυνάμεων (Κ.Θ.Δ.) των καυσίμων.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα, από τις προσομοιώσεις των νησιωτικών συστημάτων χωρίς ΥΒΣ προέκυψαν τα αποτελέσματα των τριών επόμενων πινάκων. Συγκεκριμένα, στους Πίνακες 5.5-5.7 δίνονται οι παραγόμενες ενέργειες ανά συμβατική μονάδα (ή ομάδα μονάδων στην περίπτωση της Κρήτης) για τα τρία εξεταζόμενα νησιά αντίστοιχα, τα επιμέρους, συνολικά και μέσα ετήσια μεταβλητά κόστη λειτουργίας τους, καθώς και οι ποσοστιαίοι χρόνοι λειτουργίας τους από τους οποίους προκύπτει ο καθορισμός των μονάδων βάσης και αιχμής κάθε νησιού.

Πίνακας 5.5. Παραγόμενες ενέργειες και κόστη των μονάδων παραγωγής της Κρήτης, χωρίς τον ΥΒΣ

ΟΜΑΔΑ ΜΟΝΑΔΩΝ		ST ATHERIN	CC KORAKIAS	CC XANIWN	ICE ATHERIN	ICE LINOPERLIN	GT XAN	ΣΥΝΟΛΟ
Ονομαστική ισχύς	kW	92000	250000	132000	204000	44000	292000	
Αποδιδόμενη ισχύς	kW	92000	250000	112000	200000	44000	263000	961000
Τεχνικό ελάχιστο	kW	36800	87500	35000	95700	15000	49000	
Καύσιμο		Μαζούτ	Φυσικό Αέριο	Diesel	Μαζούτ	Μαζούτ	Diesel	
Ενέργεια	GWh	55.17	94.51	37.81	52.71	2.98	2.06	3216.68
Κόστος Καυσίμου	Μ€	10.75	19.29	4.23	10.27	0.58	0.23	245.24
Κόστος Ρύπων	Μ€	2.82	7.16	0.81	3.08	0.18	0.04	45.36
Κόστος Λειτουργίας & Συντήρησης	Μ€	68.74	120.96	42.85	66.06	3.74	2.33	14.08
Συνολικό Κόστος	Μ€	55.17	94.51	37.81	52.71	2.98	2.06	304.67
Μέσο Κόστος Μονάδων	€/MWh	121.87	67.58	211.15	107.32	105.92	260.46	
Χρόνος Λειτουργίας	%	99.98	99.98	58.06	49.26	13.61	1.96	
Μονάδες Βάσης/Αιχμής		B	B			A	A	

Πίνακας 5.6. Παραγόμενες ενέργειες και κόστη των μονάδων παραγωγής της Λέσβου, χωρίς τον ΥΒΣ

Μονάδα	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9	No10	No11	No12	Σύνολο	
Ονομαστική ισχύς	kW	11000	10360	8000	8000	10720	5848	5848	5848	4000	3104	18000	15500	
Αποδιδόμενη ισχύς	kW	9500	10360	8000	8000	7500	5000	5000	5000	2700	3100	18000	14000	96160
Τεχνικό ελάχιστο	kW	5650	5180	3200	3200	5350	2925	2925	2925	2000	1552	6300	7750	
Καύσιμο	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Μαζ.	Diesel	Diesel	Diesel		
Ενέργεια	GWh	60.92	62.75	46.17	40.22	36.69	16.16	11.90	8.11	3.19	2.25	7.73	0.07	296.16
Κόστος Καυσίμου	Μ€	4.54	5.04	3.77	3.28	3.02	1.35	1.00	0.68	0.30	0.36	1.67	0.02	25.02
Κόστος Ρύπων	Μ€	0.886	0.985	0.735	0.640	0.590	0.264	0.194	0.133	0.058	0.040	0.187	0.002	4.72
Κόστος Λειτουργίας & Συντήρησης	Μ€	0.305	0.314	0.231	0.201	0.183	0.081	0.060	0.041	0.016	0.009	0.031	0.000	1.47
Συνολικό Κόστος	Μ€	5.73	6.34	4.73	4.12	3.79	1.70	1.25	0.85	0.37	0.41	1.89	0.02	31.20
Μέσο Κόστος Μονάδων	€/MWh	94.07	101.07	102.52	102.46	103.35	105.04	105.02	105.01	116.67	181.92	243.74	260.56	
Χρόνος Λειτουργίας	%	99.98	99.98	99.70	85.83	68.64	49.59	36.36	24.93	16.14	11.97	8.30	0.08	
Μονάδες Βάσης/Αιχμής		B	B	B	B				A	A	A	A	A	

Πίνακας 5.7. Παραγόμενες ενέργειες και κόστη των μονάδων παραγωγής της Καρπάθου, χωρίς τον ΥΒΣ

Μονάδα	No1	No2	No3	No4	No5	Σύνολο	
Ονομαστική ισχύς	kW	5327	5327	2200	2200	800	
Αποδιδόμενη ισχύς	kW	5300	5300	1800	1800	600	14800
Τεχνικό ελάχιστο	kW	2120	2120	1100	1100	400	
Καύσιμο		Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	
Ενέργεια	GWh	25.056	12.090	0.039	0.003	0.000	37.19
Κόστος Καυσίμου	Μ€	3.788341	1.844203	0.006214	0.000423	0	5.64
Κόστος Ρύπων	Μ€	0.424251	0.20653	0.000696	4.74E-05	0	0.63
Κόστος Λειτουργίας & Συντήρησης	Μ€	0.125281	0.060448	0.000194	1.32E-05	0	0.19
Συνολικό Κόστος	Μ€	4.337873	2.11118	0.007104	0.000484	0	6.46
Μέσο Κόστος Μονάδων	€/MWh	173.13	174.63	183.02	183.65	--	
Χρόνος Λειτουργίας	%	99.98	52.44	0.32	0.02	0	
Μονάδες Βάσης/Αιχμής		B		A	A	--	

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση της Κρήτης (Πίνακας 5.5), μονάδες βάσης είναι οι ατμοστρόβιλοι του Αθρινολακκου και ο συνδυασμένος κύκλος της Κορακιάς που καταναλώνουν μαζούτ και φυσικό αέριο αντίστοιχα (1^η και 2^η ομάδα μονάδων) και μονάδες αιχμής οι νητζελογεννήτριες των Λινοπεραμάτων που καταναλώνουν μαζούτ και οι αεριοστρόβιλοι που καταναλώνουν

diesel (5^η και 6^η ομάδα μονάδων). Στην περίπτωση της Λέσβου (Πίνακας 5.6), μονάδες βάσης είναι οι μονάδες Νο1, Νο2, Νο3 και Νο4 που καταναλώνουν μαζούτ και μονάδες αιχμής είναι οι Νο8, Νο9 που καταναλώνουν μαζούτ και οι Νο10, Νο11 και Νο12 που καταναλώνουν diesel. Στην περίπτωση της Καρπάθου (Πίνακας 5.7), μονάδα βάσης είναι η Νο1 και μονάδες αιχμής είναι οι Νο3, Νο4. Η μονάδα Νο5 λειτουργεί μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις. Όλες οι μονάδες καταναλώνουν diesel.

Αθροίζοντας στη συνέχεια τα ετήσια συνολικά κόστη όλων των μονάδων βάσης και αιχμής αντίστοιχα και διαιρώντας τα με τις αντίστοιχες συνολικές τους ενέργειες, προκύπτουν τα ζητούμενα μέσα ετήσια μεταβλητά κόστη μονάδων βάσης και αιχμής και άρα και οι αντίστοιχες τιμές απορροφούμενης ενέργειας αντλιών και παραγόμενης υδροστρόβιλων. Οι τιμές αυτές των ενεργειών των ΥΒΣ για τα τρία εξεταζόμενα νησιά παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.8. Στην περίπτωση της Καρπάθου, οι τιμές παραγωγής και άντλησης του ΥΒΣ διαφοροποιούνται από τα μέσα ετήσια μεταβλητά κόστη των μονάδων αιχμής και βάσης, που είναι αντίστοιχα 183 €/MWh και 173 €/MWh. Κι αυτό γιατί με βάση το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο, η τιμή παραγωγής των υδροστρόβιλων δεν μπορεί να είναι κατώτερη από την τιμή με την οποία τιμολογείται η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφά ο ΥΒΣ από το Δίκτυο για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσής του, προσαυξημένη κατά 25%. Επομένως αν θεωρηθεί ως τιμή παραγωγής των υδροστρόβιλων τα 183 €/MWh, τότε η μέγιστη δυνατή τιμή άντλησης είναι τα 146 €/MWh. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να κρατηθεί σταθερή η τιμή άντλησης και να προσαυξηθεί η τιμή παραγωγής, κάτι το οποίο θα πριμοδοτούσε μεν τους ΥΒΣ, θα αύξανε δε σημαντικά το συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος σε ενδεχόμενη ένταξη κάποιου ΥΒΣ.

Πίνακας 5.8. Τιμολογήσεις ενέργειας υδροστρόβιλων και αντλιών των ΥΒΣ, για τα τρία ΜΔΝ

	Κρήτη	Λέσβος	Κάρπαθος
Τιμή ενέργειας υδροστρόβιλων (€/MWh)	137	166	183
Τιμή ενέργειας αντλιών (€/MWh)	81	100	146

Επίσης, με βάση τις προκύπτουσες τιμολογήσεις είναι προφανές ότι στις περιπτώσεις των νησιών Λέσβου και Καρπάθου ενδείκνυται η επιλογή του συμψηφισμού της παραγόμενης από το Α/Π ενέργειας με την απορροφούμενη από τις αντλίες του ΥΒΣ, από τη στιγμή που η τιμή της ενέργειας των αντλιών υπερβαίνει την τιμή της αιολικής. Αντίθετα στην Κρήτη που δεν ισχύει κάτι τέτοιο, ο συμψηφισμός δεν επιλέγεται.

Όσον αφορά την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος, λαμβάνεται υπόψη η ετήσια απόσβεση κεφαλαίου και το σταθερό κόστος λειτουργίας του θεωρητικά νεοεισερχόμενου συμβατικού σταθμού. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 5.9 και είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο [87], τα οποία αποτελούν εκτιμήσεις της ΡΑΕ που βασίστηκαν σε στοιχεία νεοαναγειρόμενων σταθμών παραγωγής. Το κάτω όριο στα κόστη των νηζελογεννητριών αφορά εγκατάσταση στο σύστημα της Κρήτης ενώ το άνω όριο αφορά εγκατάσταση σε μικρότερα νησιωτικά συστήματα όπως στη Λέσβο και την Κάρπαθο. Για τον υπολογισμό του ετήσιου κεφαλαιουχικού κόστους (απόσβεση) των μονάδων έχει ληφθεί επιτόκιο 7.4% και διάρκεια ζωής 20 χρόνια. Στην παρούσα ανάλυση, ως νεοεισερχόμενος σταθμός στην Κρήτη θεωρήθηκε ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο, ενώ στη Λέσβο και στην Κάρπαθο ένας σταθμός με νηζελογεννήτριες. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τα παραπάνω, προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 5.10 για την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος των ΥΒΣ στα τρία εξεταζόμενα ΜΔΝ.

Πίνακας 5.9. Ετήσιο κόστος διαθεσιμότητας ισχύος ανάλογα με το θεωρούμενο τύπο νεοεισερχόμενου συμβατικού σταθμού

Τύπος Μονάδων	Δηζελ/νήτριες (Δ/Ζ)	Ατμοηλ/κές (Α/Τ)	Συνδ. Κύκλου (Σ/Κ)	Αεριο/βίλοι (Α/Σ)
Κόστος εγκατάστασης (€/kW)	1100-1300	1250	700	450
Ετήσιο Κεφαλαιουχικό κόστος (€/kW-έτος)	107-126	122	68	44
Σταθερό κόστος (€/kW-έτος)	60	50	35	25
Ετήσιο Κόστος Διαθεσιμότητας Ισχύος (€/kW-έτος)	167-186	172	103	69

Πίνακας 5.10. Τιμολογήσεις της διαθεσιμότητας ισχύος ΥΒΣ, για τα τρία ΜΔΝ

	Κρήτη	Λέσβος	Κάρπαθος
Τιμή διαθεσιμότητας ισχύος (€/kW-έτος)	103	186	186

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμολογήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση για την Κρήτη και τη Λέσβο διαφοροποιούνται από τις αντίστοιχες που ανακοίνωσε η ΡΑΕ με σχετική απόφαση, [97], και που βασίστηκαν σε σχετικό ερευνητικό έργο του ΕΜΠ, [98]. Ο λόγος είναι ότι οι δύο υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και για διαφορετικά δεδομένα όσον αφορά τις συνθέσεις των σταθμών παραγωγής, το είδος και τις τιμές των καυσίμων. Άλλωστε σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να απεικονίσει επακριβώς την πραγματικότητα, η οποία διαφοροποιείται από έτος σε έτος, αλλά να εξάγει ορισμένα γενικά συμπεράσματα όσον αφορά τις οικονομικές και ενεργειακές επιπτώσεις της ένταξης και λειτουργίας των ΥΒΣ στα ΜΔΝ.

5.4 Ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για συστήματα ΜΔΝ με ΥΒΣ

Η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης εφαρμόστηκε σε τρία διαφορετικά ελληνικά νησιά, Κρήτη, Λέσβο και Κάρπαθο, ως αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μεγάλου, μέσου και μικρού νησιού αντίστοιχα, και προσομοιώθηκε η λειτουργία τους χωρίς και με ΥΒΣ. Τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών αυτών ΜΔΝ καθώς και των εξεταζόμενων ΥΒΣ, όπως αυτά θεωρήθηκαν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.11. Επίσης δίνονται και οι τιμολογήσεις ισχύος και ενέργειας που θεωρήθηκαν για κάθε ΥΒΣ, όπως αυτές υπολογίστηκαν από την ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων.

Η Κρήτη διαθέτει ένα εκτενές σύστημα παραγωγής που περιλαμβάνει διάφορους τύπους μονάδων, όπως ατμοστρόβιλους, μονάδες συνδυασμένου κύκλου, μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) και αεριοστρόβιλους, που καταναλώνουν μαζούτ, diesel ή φυσικό αέριο. Η Λέσβος από την άλλη, διαθέτει ένα σταθμό παραγωγής που περιλαμβάνει ΜΕΚ που καταναλώνουν μαζούτ, καθώς και αεριοστρόβιλους για λειτουργία στην αιχμή. Τέλος, η Κάρπαθος ηλεκτροδοτείται από ένα σταθμό παραγωγής αποτελούμενο από ΜΕΚ που καταναλώνουν diesel. Τα αναλυτικά στοιχεία για τη σύνθεση των συστημάτων παραγωγής των τριών εξεταζόμενων ΜΔΝ, τις ειδικές καταναλώσεις των μονάδων τους, τα καύσιμά τους και τις εκπομπές ρύπων, καθώς και οι χρονοσειρές φορτίου και ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

Όσον αφορά τους εξεταζόμενους ΥΒΣ, έχουν προσομοιωθεί ΥΒΣ τόσο με αναστρέψιμες μηχανές και μονό αγωγό προσαγωγής, όσο και με ξεχωριστές εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής παραγωγής και άντλησης και διπλό αγωγό. Στη συνέχεια οι δύο αυτές ομάδες εξεταζόμενων ΥΒΣ θα αποκαλούνται ΥΒΣ μονού και διπλού αγωγού αντίστοιχα. Η επιλογή των μεγεθών των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ βασίστηκε σε ενδεικτική ανάλυση βέλτιστης διαστασιολόγησης που πραγματοποιήθηκε στις [35, 36, 87]. Διεξοδικά το θέμα της βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ εξετάζεται στο Κεφάλαιο 6.

Πίνακας 5.11. Βασικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων νησιωτικών συστημάτων

	Κρήτη	Λέσβος	Κάρπαθος
Δεδομένα των νησιωτικών συστημάτων			
Αιχμή φορτίου	820 MW	78 MW	11.9 MW
Ελάχιστο φορτίο	200 MW	14.4 MW	1.6 MW
Συντελεστής φορτίου	53.3%	51.0%	42.7%
Εγκατεστημένη αιολική ισχύς	220 MW	20 MW	2.45 MW
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου	8.5 m/s	8.5 m/s	11 m/s
Δεδομένα ΥΒΣ			
Υδροστρόβιλοι	4 x 25 MW	4 x 5 MW	2 x 1 MW
Αντλίες	5 x 25 MW	9 x 2.5 MW	3 x 0.75 MW
Α/Π	130 MW	25 MW	2.4 MW
Δεξαμενές(*)	18 h	18 h	18 h
Ενεργειακές απώλειες	ΥΒΣ: ~30%, Α/Π: 10%		
Αγωγός προσαγωγής	Μονός/Διπλός		
Τιμολογήσεις			
Ενέργεια υδροστρόβιλων	137 €/MWh	166 €/MWh	183 €/MWh
Ενέργεια αντλιών	81 €/MWh	100 €/MWh	146 €/MWh
Αιολική ενέργεια	87.4 €/MWh	87.4 €/MWh	87.4 €/MWh
Διαθεσιμότητα ισχύος	103 €/kW-year (x 100 MW)	186 €/kW-year (x 18.2 MW)	186 €/kW-year (x 2 MW)

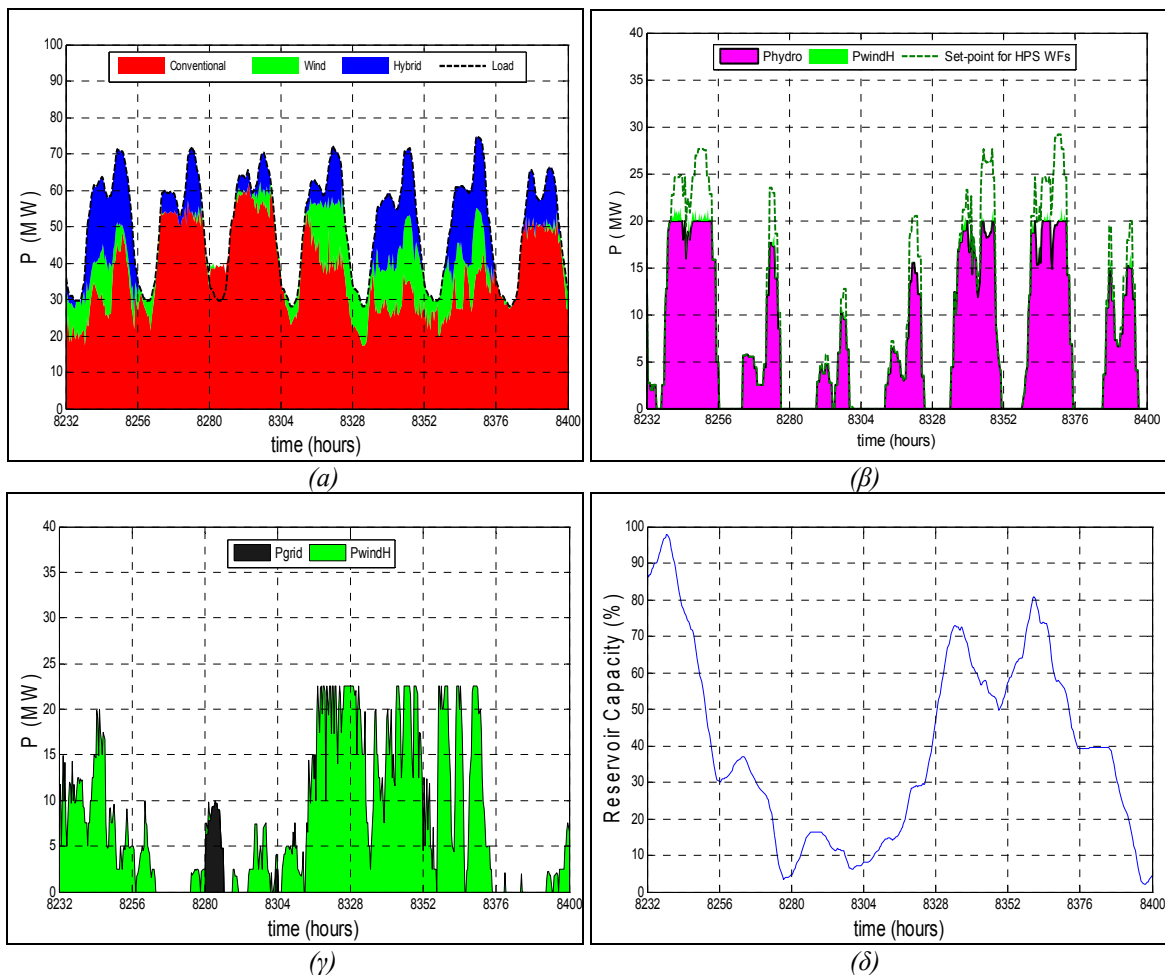
(*) Η χωρητικότητα των δεξαμενών δίνεται σε ισοδύναμες ώρες λειτουργίας των υδροστρόβιλων σε ονομαστική ισχύ

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα λειτουργίας του συστήματος της Λέσβου προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του όλου συστήματος και η πολιτική διαχείρισής του.

Στο διάγραμμα 5.2(α) παρουσιάζεται η κάλυψη του φορτίου μιας εβδομάδας του συστήματος της Λέσβου από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, τον ΥΒΣ, και τα Α/Π εκτός ΥΒΣ. Είναι εμφανής η εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου λόγω της λειτουργίας του ΥΒΣ, με αποκοπή των αιχμών, που συνεπάγεται την αποφυγή της ένταξης των συμβατικών μονάδων αιχμής. Παράλληλα, κατά τη διάρκεια της τρίτης νύχτας προκύπτει άντληση από το δίκτυο (διάστημα όπου η συνολική παραγωγή υπερβαίνει το φορτίο του νησιού που απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή), για την κάλυψη των απαιτήσεων εγγυημένης παροχής του ΔΜΔΝ (που υφίστανται τις ημέρες που το φορτίο του νησιού είναι μεγαλύτερο από $P_{L,max}-P_{CC,max}$), κάτι το οποίο συνεπάγεται γέμισμα της κοιλάδας φορτίου. Γενικότερα, με τη λογική των προσφορών ενέργειας αντί ισχύος και την κατανομή της συγκεκριμένης ενέργειας από το ΔΜΔΝ, εξομαλύνεται η λειτουργία των συμβατικών μονάδων

χωρίς συχνές στάσεις-εκκινήσεις και απότομες μεταβολές της αποδιδόμενης ισχύος τους. Οι όποιες διαταραχές στη φόρτιση των μονάδων παραγωγής (συμβατικών και ΥΒΣ) οφείλονται αποκλειστικά στις τυχαίες μεταβολές της αιολικής παραγωγής των πάρκων εκτός ΥΒΣ.

Στα επόμενα τρία διαγράμματα, παρουσιάζεται η εσωτερική λειτουργία του ΥΒΣ με περισσότερη λεπτομέρεια. Στο διάγραμμα 5.2(β) απεικονίζεται η παραγωγή του ΥΒΣ, η οποία μπορεί να προέρχεται είτε από τους υδροστρόβιλους είτε από το Α/Π του στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας (Mode 2) ή της κατανομής set-point από το σύστημα (Mode 3). Η δυνατότητα συμμετοχής του Α/Π του ΥΒΣ στο set-point παριστάνεται με τη διακεκομμένη γραμμή πάνω από τη συνεχή μαύρη, η οποία απεικονίζει την προγραμματισμένη παραγωγή των μονάδων του ΥΒΣ. Στην προκειμένη περίπτωση (ομοίως και στις περιπτώσεις των άλλων δύο νησιών) λόγω των θεωρούμενων τιμολογήσεων των ενεργειών του ΥΒΣ, υδροαιολική συνεργασία δεν προκύπτει σχεδόν ποτέ, καθώς δίνεται προτεραιότητα στην αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας για άντληση. Συνεπώς η κατανεμόμενη ισχύς του ΥΒΣ παρέχεται εξ' ολοκλήρου από τους υδροστρόβιλους, οι οποίοι λειτουργούν βάσει του προγράμματος του ΔΜΔΝ. Το Α/Π του ΥΒΣ εγχύει απ' ευθείας τη ενέργεια του στο σύστημα μόνο όταν υπάρχει περίσσεια set-point στο σύστημα.



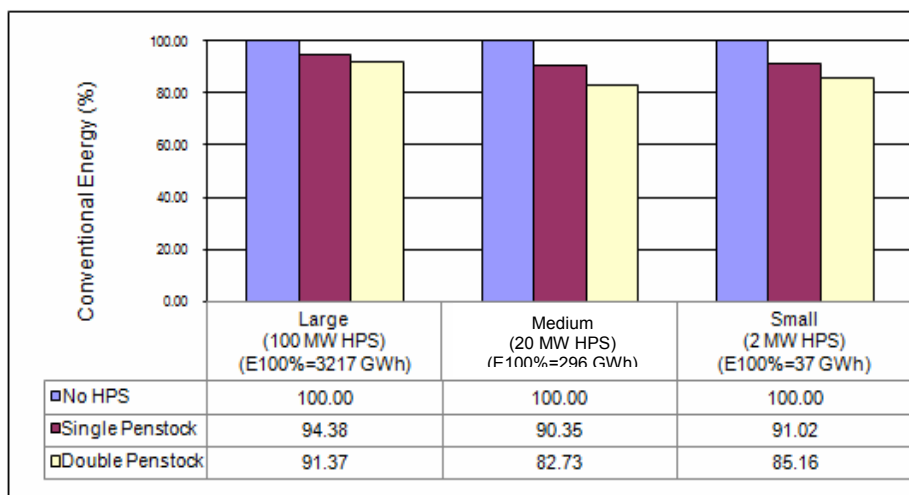
Σχήμα 5.2. Διαγράμματα λειτουργίας του συστήματος της Λέσβου με ΥΒΣ, για μια τυπική εβδομάδα. α) Παραγωγή συμβατικών μονάδων, ΥΒΣ και Α/Π εκτός ΥΒΣ. β) Προέλευση της παραγόμενης ισχύος του ΥΒΣ. γ) Προέλευση της αντλούμενης ισχύος του ΥΒΣ. δ) Στάθμη άνω δεξαμενής (% της μέγιστης χωρητικότητας) του ΥΒΣ, [12, 13].

Η λειτουργία των αντλιών του ΥΒΣ παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.2(γ). Η απορροφούμενη ενέργειά τους προέρχεται βασικά από το Α/Π του ΥΒΣ (πράσινο χρώμα). Μόνο στην αρχή της τρίτης ημέρας σημειώνεται απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο για άντληση (μαύρο χρώμα), καθώς η αιολική παραγωγή δεν αρκεί για την εξασφάλιση της ζητούμενης εγγυημένης ενέργειας από το

ΔΜΔΝ. Σημειώνεται ότι στην προκειμένη περίπτωση είναι δυνατή η ταυτόχρονη παραγωγή και άντληση, καθώς ο εξεταζόμενος ΥΒΣ έχει θεωρηθεί με ξεχωριστές εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής παραγωγής και άντλησης. Αν ήταν εξοπλισμένος με αναστρέψιμες μηχανές, τότε κάτι τέτοιο δε θα ήταν δυνατό.

Στο τέταρτο διάγραμμα απεικονίζεται η διακύμανση της χωρητικότητας της άνω δεξαμενής του ΥΒΣ κατά τη διάρκεια της εβδομάδας, η οποία γεμίζει με τη λειτουργία των αντλιών και αδειάζει με τη λειτουργία των υδροστρόβιλων.

Ο κύριος σκοπός της ένταξης των ΥΒΣ στα ΜΔΝ είναι η αύξηση της αιολικής διείσδυσης στα ΜΔΝ και συνεπώς η μείωση της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3, όπου παρουσιάζεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια των συμβατικών μονάδων για τα τρία εξεταζόμενα ΜΔΝ, χωρίς και με τους ΥΒΣ. Διαπιστώνεται ότι με την ένταξη και λειτουργία των ΥΒΣ επιτυγχάνεται αξιόλογη μείωση της συμβατικής ενέργειας, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του θεωρούμενου ΥΒΣ. Η σημαντική αυτή μείωση της συμβατικής ενέργειας αποτελεί αντίστοιχη αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα τρία ΜΔΝ, η οποία είναι συγκρίσιμη με την αιολική διείσδυση που επιτυγχάνεται από όλα τα υπόλοιπα Α/Π των υπόψη νησιών. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση της συμβατικής ενέργειας είναι αρκετά μεγαλύτερη για ΥΒΣ διπλού αγωγού συγκριτικά με τους αντίστοιχους μονού αγωγού, καθώς δίνεται η δυνατότητα της ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης και άρα της πλήρους αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής και όταν οι υδροστρόβιλοι παράγουν.

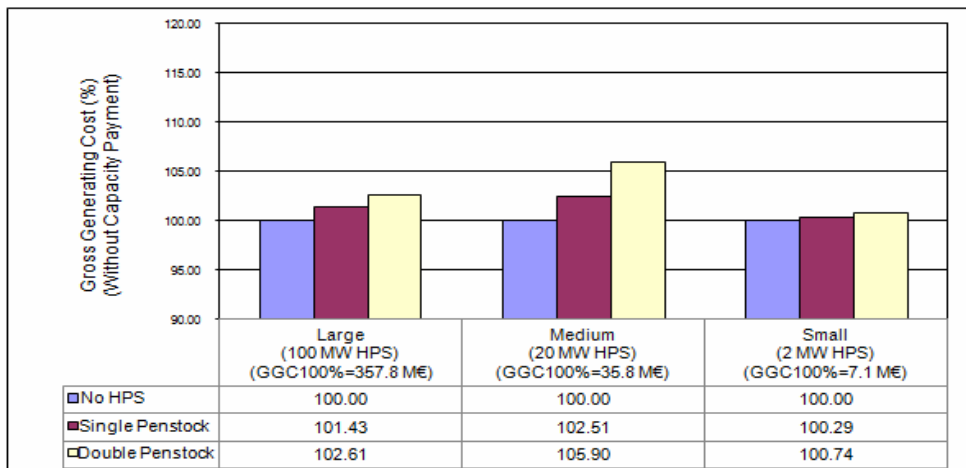


Σχήμα 5.3. Μείωση της συμβατικής ενέργειας λόγω της λειτουργίας των ΥΒΣ. Ετήσια παραγωγή ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες για τα τρία ΜΔΝ (Large-Κρήτη, Medium-Λέσβος, Small-Κάρπαθος), [33, 34].

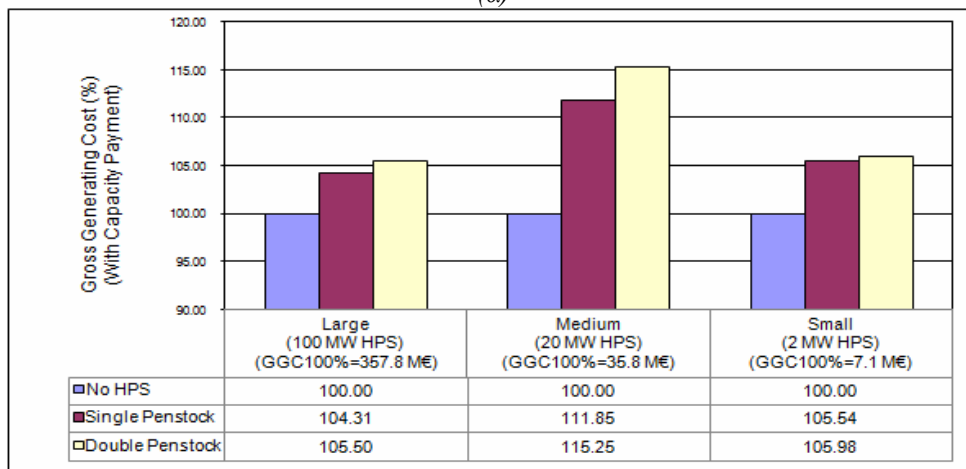
Η επίπτωση της λειτουργίας του ΥΒΣ στο συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος μπορεί να μην είναι δραματική, είναι όμως αξιοπρόσεκτη, καθώς οι αποζημιώσεις του ΥΒΣ δεν αντικατοπτρίζουν επακριβώς το αποφευγόμενο κόστος συμβατικής παραγωγής. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4, όπου το συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου και το μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των συμβατικών μονάδων, το κόστος δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων, την αποζημίωση αιολικών παραγωγών και τις αποζημιώσεις του ΥΒΣ. Αγνοώντας την αποζημίωση για τη διαθεσιμότητα ισχύος του ΥΒΣ (Σχήμα 5.4(α)), η αύξηση στο συνολικό κόστος είναι σχετικά μικρή. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι ΥΒΣ δεν υποκαθιστούν μόνο ενέργεια συμβατικών μονάδων αιχμής, το κόστος των οποίων αποτέλεσε τη βάση για τον καθορισμό της τιμής παραγωγής των υδροστρόβιλων. Κι αυτό γιατί οι υδροστρόβιλοι μπορεί να εντάσσονται κυρίως στις ώρες αιχμής κάθε ημέρας, όμως σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (π.χ. το χειμώνα για τα τουριστικά νησιά), οι συγκεκριμένες αιχμές εξυπηρετούνται από μονάδες ενδιάμεσου φορτίου ή και βάσης. Και φυσικά η αύξηση του συνολικού κόστους θα είναι εντονότερη για μεγαλύτερα μεγέθη ΥΒΣ, καθώς η αποθηκευμένη ενέργεια των ΥΒΣ θα

παρέχεται περισσότερες ώρες της ημέρας και όχι μόνο στις αιχμές. Για τον ίδιο λόγο παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση στο κόστος για λειτουργία ΥΒΣ διπλού αγωγού συγκριτικά με τους αντίστοιχους μονού αγωγού. Αν συμπεριληφθεί και η αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος των ΥΒΣ (Σχήμα 5.4(β)), τότε η αύξηση του κόστους του συστήματος είναι ακόμη μεγαλύτερη. Ωστόσο, αυτό μπορεί να είναι παραπλανητικό, καθώς η παροχή εγγυημένης ισχύος από τον ΥΒΣ αποτρέπει την εγκατάσταση συμβατικού σταθμού παραγωγής αντίστοιχης ισχύος, του οποίου το κόστος επένδυσης είναι συγκρίσιμο με την ετήσια αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος του ΥΒΣ.

Πάντως, μπορεί η λειτουργία των ΥΒΣ να επιφέρει μια μικρή αύξηση στο συνολικό κόστος των συστημάτων, ωστόσο η αύξηση αυτή είναι ποσοστιαία αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη μείωση της συμβατικής ενέργειας (και άρα αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ) που επιτυγχάνεται. Αν ήταν επιθυμητή η αποφυγή της αύξησης του κόστους από την εισαγωγή των ΥΒΣ στα ΜΔΝ, τότε οι τιμολογήσεις των ενεργειών των ΥΒΣ θα έπρεπε να ανταποκρίνονται στο πραγματικά αποφευγόμενο κόστος συμβατικής παραγωγής. Μια τέτοια διερεύνηση εναλλακτικών μεθοδολογιών τιμολόγησης πραγματοποιήθηκε σε σχετικό ερευνητικό έργο του ΕΜΠ για λογαριασμό της ΡΑΕ, [98], όπου δε διαπιστώθηκε ότι κάποια πλεονεκτεί σημαντικά έναντι των υπολοίπων ώστε να προταθεί ανεπιφύλακτα η υιοθέτησή της. Ωστόσο, η μέθοδος του Κανονισμού Αδειών (τιμολόγηση βάσει του μέσου μεταβλητού κόστους των μονάδων βάσης και αιχμής) κρίθηκε συγκριτικά προτιμητέα, καθώς παράγει συνεπέστερα αποτελέσματα, μη εξαρτώμενα από το μέγεθος ή την πολιτική λειτουργίας των ΥΒΣ, παρότι δεν αποτρέπει την αύξηση του κόστους παραγωγής των νησιών μετά την είσοδο ΥΒΣ σημαντικού μεγέθους.



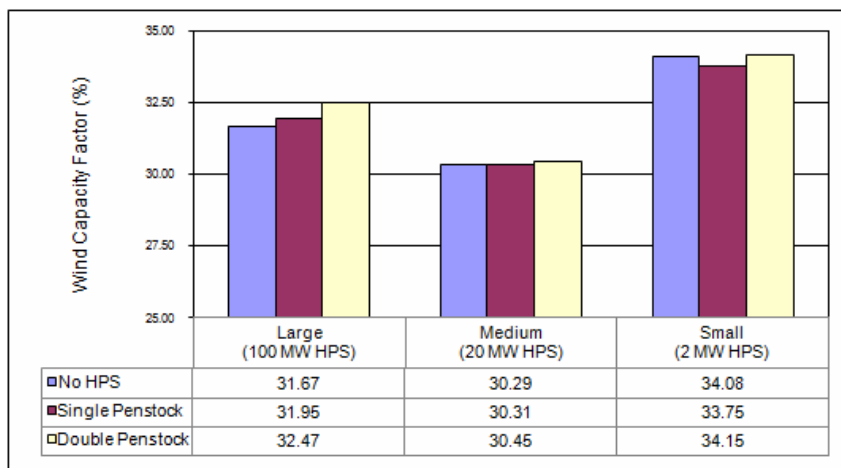
(α)



(β)

Σχήμα 5.4. Διαφοροποίηση του ετήσιου κόστους λειτουργίας των τριών νησιωτικών συστημάτων από τη λειτουργία των ΥΒΣ. α) Μόνο ενεργειακές αποζημιώσεις στον ΥΒΣ, β) Αποζημιώσεις και ενέργειας και ισχύος στον ΥΒΣ, [33, 34].

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της ένταξης και λειτουργίας ενός ΥΒΣ στο συντελεστή χρησιμοποίησης των υπόλοιπων Α/Π του συστήματος, θεωρώντας ότι ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής, παρουσιάζει παρόμοια απόκριση με τις συμβατικές μονάδες. Επίσης έχει θεωρηθεί ότι το συμβατικό τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων είναι ίσο με 50% της ονομαστικής τους ισχύος, στα επίπεδα δηλαδή των συμβατικών μονάδων που υποκαθιστούν. Διαπιστώνεται ότι η ένταξη ενός ΥΒΣ, ο οποίος λειτουργεί σύμφωνα με τις αρχές που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4 και υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις, δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την αποδοτικότητα των Α/Π εκτός ΥΒΣ. Οι όποιες μεταβολές στους συντελεστές χρησιμοποίησης σχετίζονται με διαφορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά (τεχνικό ελάχιστο, ρυθμός ανάληψης φορτίου, ονομαστική ισχύς) των υδροστρόβιλων και των υποκαθιστάμενων συμβατικών μονάδων.



Σχήμα 5.5. Επίπτωση της λειτουργίας των ΥΒΣ στους συντελεστές χρησιμοποίησης των υφιστάμενων Α/Π των τριών ΜΑΝ, [33, 34].

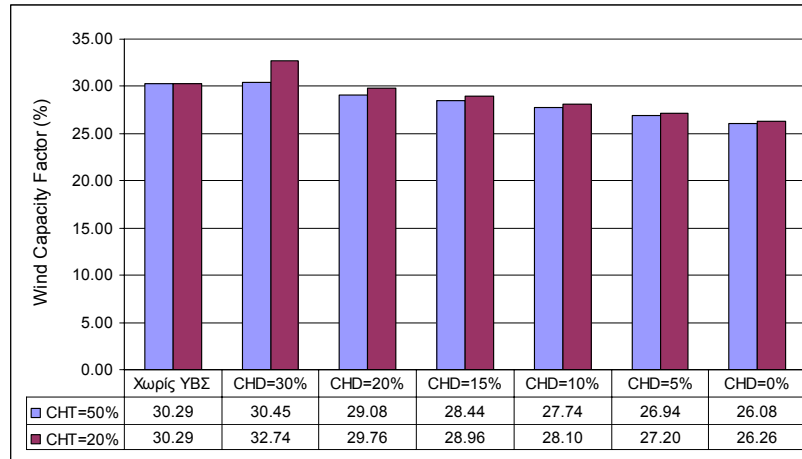
Αν όμως δεν τηρούνται οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3 και άρα θεωρηθούν χαμηλότερες τιμές για το συντελεστή δυναμικής διείδυσης των υδροστρόβιλων, τότε οι δυναμικοί περιορισμοί για το σύστημα γίνονται αυστηρότεροι, με αρνητικές επιπτώσεις στους συντελεστές χρησιμοποίησης των Α/Π. Οι επιπτώσεις αυτές μπορούν ενδεχομένως να αντισταθμιστούν αν τα συμβατικά τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων θεωρηθούν ίσα με τα πραγματικά τους, για την περίπτωση βέβαια που αυτοί είναι τύπου Pelton οπότε έχουν χαμηλό τεχνικό ελάχιστο³². Τα αποτελέσματα από μια τέτοια διερεύνηση παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6, όπου δίνονται οι τιμές των συντελεστών χρησιμοποίησης των υφιστάμενων Α/Π για διαφορετικές τιμές στους συντελεστές δυναμικής διείδυσης και τα τεχνικά ελάχιστα των υδροστρόβιλων. Συγκεκριμένα εξετάζεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων σε περίπτωση που ο συντελεστής δυναμικής διείδυσης των υδροστρόβιλων αντί να είναι παρόμοιος με των συμβατικών μονάδων (δηλ. 30%), θεωρηθεί χαμηλότερος, όπως 20%, 15%, 10% και 5%, ή ακόμα και 0% θεωρώντας ότι οι υδροστρόβιλοι δεν παρέχουν καθόλου δυναμική εφεδρεία. Επίσης εξετάζεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων για δύο διαφορετικές τιμές τεχνικού ελαχίστου για τους υδροστρόβιλους: 50% που αντιστοιχεί σε υδροστρόβιλους τύπου Francis και 20% που αντιστοιχεί σε υδροστρόβιλους τύπου Pelton. Τα αποτελέσματα αφορούν την περίπτωση της Λέσβου ως μέσο νησί όπου οι περιορισμοί δυναμικής διείδυσης και τεχνικού ελαχίστου παρουσιάζονται ισοδύναμοι³³.

Διαπιστώνεται ότι η μείωση της παρεχόμενης δυναμικής εφεδρείας από τους υδροστρόβιλους οδηγεί σε μειώσεις στους συντελεστές χρησιμοποίησης των Α/Π, καθώς ο δυναμικός περιορισμός του συστήματος καθίσταται σημαντικά αυστηρότερος, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απορ-

³² Οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton έχουν τεχνικό ελάχιστο της τάξης του 20%. Αντίθετα για υδροστρόβιλους τύπου Francis το τεχνικό τους ελάχιστο είναι ίσο με τη θεωρούμενη συμβατική τιμή, δηλ. 50%.

³³ Η απορριπτόμενη αιολική ενέργεια λόγω τεχνικού ελαχίστου είναι στα ίδια επίπεδα με την αντίστοιχη απορριπτόμενη ενέργεια λόγω δυναμικού περιορισμού.

ρίψεις αιολικής ενέργειας. Και φυσικά οι επιπτώσεις γίνονται δυσμενέστερες όσο το μέγεθος του ΥΒΣ αυξάνεται. Από την άλλη, μείωση του τεχνικού ελαχίστου των υδροστρόβιλων καθιστά ελαστικότερο τον περιορισμό λόγω τεχνικού ελαχίστου, επιτρέποντας μεγαλύτερα επίπεδα αιολικής διεύδυσης στο σύστημα και αντισταθμίζοντας εν μέρει τις απορρίψεις λόγω δυναμικού περιορισμού. Στον Πίνακα 5.12 δίνονται αναλυτικά οι απορρίψεις αιολικής ενέργειας που αντιστοιχούν σε κάθε περιορισμό και πώς αυτές μεταβάλλονται για τις διάφορες τιμές των συντελεστών c_{HD} και c_{HT} των υδροστρόβιλων. Γενικότερα μπορεί να ειπωθεί ότι για τιμές του c_{HD} μέχρι 15%, που είναι μια λογική τιμή για τους υδροστρόβιλους βάσει της ανάλυσης του Κεφαλαίου 3, οι μειώσεις των συντελεστών χρησιμοποίησης των Α/Π μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, κυμαινόμενες γύρω στο 1.5% ως προς τις αντίστοιχες τιμές του σεναρίου αναφοράς (χωρίς τον ΥΒΣ σε λειτουργία).

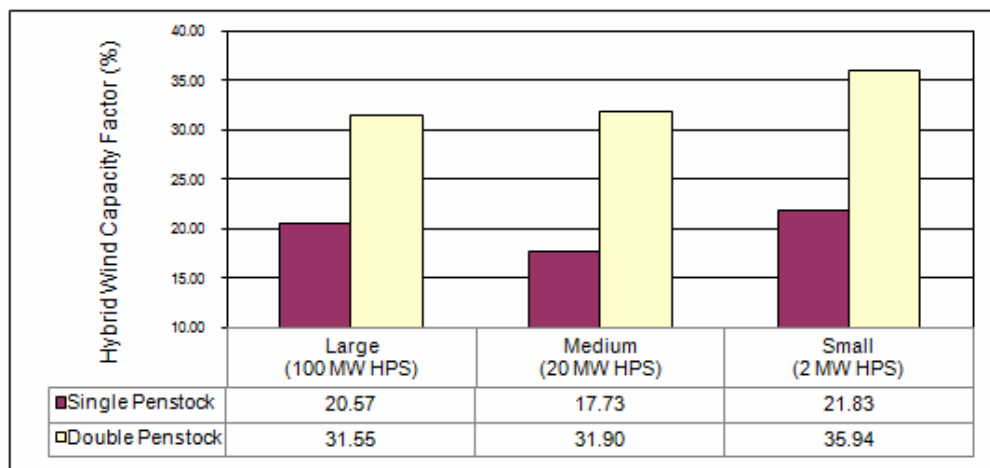


Σχήμα 5.6. Μεταβολή του συντελεστή χρησιμοποίησης των υφιστάμενων αιολικών από την ένταξη και λειτουργία ενός ΥΒΣ των 20 MW στο νησί της Λέσβου, για διάφορες τιμές των τεχνικών ελαχίστων (c_{HT}) και των συντελεστών δυναμικής διεύδυσης (c_{HD}) των υδροστρόβιλων.

Πίνακας 5.12. Απορρίψεις αιολικής ενέργειας σε GWh για τις διάφορες τιμές των συντελεστών c_{HD} και c_{HT} των υδροστρόβιλων.

		Λόγω τεχνικού ελαχίστου	Λόγω δυναμικού περιορισμού	
Χωρίς ΥΒΣ		5.03	5.90	
Με ΥΒΣ	$c_{HT}=50\%$	$c_{HD}=30\%$	8.21	2.44
		$c_{HD}=20\%$	6.50	6.56
		$c_{HD}=15\%$	5.86	8.32
		$c_{HD}=10\%$	5.24	10.17
		$c_{HD}=5\%$	4.74	12.07
		$c_{HD}=0\%$	4.18	14.13
	$c_{HT}=20\%$	$c_{HD}=30\%$	4.65	1.99
		$c_{HD}=20\%$	2.69	9.17
		$c_{HD}=15\%$	2.47	10.80
		$c_{HD}=10\%$	2.36	12.41
		$c_{HD}=5\%$	2.13	14.22
		$c_{HD}=0\%$	2.08	15.93

Στο Σχήμα 5.7 εξετάζεται η αποδοτικότητα του Α/Π του ΥΒΣ προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης οδηγεί σε ικανοποιητική εκμετάλλευση της αιολικής εγκατάστασης του ΥΒΣ. Διαπιστώνεται ότι το Α/Π ενός ΥΒΣ με διπλό αγωγό είναι το ίδιο αποδοτικό με τα υπόλοιπα Α/Π του συστήματος (βλ. Σχήμα 5.5). Ωστόσο για ΥΒΣ μονού αγωγού, μεγάλο μέρος της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας απορρίπτεται κατά τις ώρες λειτουργίας των υδροστρόβιλων, κάτι που συνεπάγεται μείωση του συντελεστή χρησιμοποίησης του Α/Π του ΥΒΣ κατά 1/3 περίπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενέργεια που τελικά παρέχεται στο φορτίο μειώνεται ακόμη περισσότερο, κατά τις απώλειες στο σύστημα αντλησιοταμίευσης (περίπου 30%).



Σχήμα 5.7. Συντελεστές χρησιμοποίησης των Α/Π των ΥΒΣ σε καθένα από τα τρία ΜΔΝ, [33, 34].

Σχετικά με το εύρος της άντλησης από το δίκτυο, αυτό είναι αμελητέο σε όλες τις περιπτώσεις, μικρότερο του 2% της συνολικής απορροφούμενης ενέργειας για άντληση. Μάλιστα για ΥΒΣ διπλού αγωγού, η άντληση από το δίκτυο είναι ακόμα μικρότερη, καθώς η αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας είναι η βέλτιστη λόγω της δυνατότητας ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης. Συνεπώς η φιλοσοφία της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης και οι περιορισμοί στις δηλώσεις φορτίου από τους ΥΒΣ (βλ. Κεφάλαιο 4), οδηγούν σε περιορισμό της άντλησης από το δίκτυο στο ελάχιστο, κάτι το επιθυμητό μιας και η άντληση από το δίκτυο αποτελεί σπατάλη ενέργειας για το σύστημα, καθώς αποθηκεύεται συμβατική ενέργεια για να δοθεί στη συνέχεια στο φορτίο μειωμένη κατά τις απώλειες του συστήματος αντλησιοταμίευσης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προσομοιώσεων φαίνεται ότι προκύπτει ο παρακάτω εμπειρικός κανόνας: Για ΥΒΣ διπλού αγωγού, τα Α/Π τους θα λειτουργούν με συντελεστή χρησιμοποίησης περίπου ίδιο με των λοιπών Α/Π εκτός ΥΒΣ³⁴. Και καθώς βάσει των τιμολογήσεων δίνεται προτεραιότητα στην άντληση, η παραγόμενη αιολική ενέργεια θα κυκλοφορεί πρώτα στα συστήματα αντλησιοταμίευσης προτού δοθεί στο φορτίο, υφιστάμενη απώλειες της τάξης του 30%. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η καθαρή ενεργειακή απόδοση του ΥΒΣ θα είναι τελικά της τάξης των 2/3 της παραγόμενης ενέργειας του Α/Π του ΥΒΣ. Τα καθαρά έσοδα επομένως μπορούν χονδρικά να θεωρηθούν ίσα με το γινόμενο της παραπάνω ενέργειας επί την τιμή παραγωγής των υδροστρόβιλων (θεωρώντας ότι έχει επιλεγθεί συμφηφισμός μεταξύ ενέργειας Α/Π και αντλιών), συν τα έσοδα από την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν περιπτώσεις υψηλών σχετικά τιμολογήσεων για τις ενέργειες του ΥΒΣ, οπότε δίνεται προτεραιότητα στην άντληση για την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής. Ενδιαφέρον θα είχε να εξεταστεί και ένα σεβαστό χαμηλότερης τιμολόγησης για τις ενέργειες του ΥΒΣ, για το οποίο θα σύμφερε να δοθεί προ-

³⁴ Στην περίπτωση ΥΒΣ μονού αγωγού, ο συντελεστής χρησιμοποίησης του Α/Π του μπορεί να μειωθεί κατά 1/3.

τεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο, και να διερευνηθούν οι αντίστοιχες ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις στο σύστημα.

Ένα τέτοιο σενάριο εξετάστηκε για το σύστημα της Λέσβου. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι όλες οι συμβατικές μονάδες παραγωγής της Λέσβου καταναλώνουν το φθηνό καύσιμο μαζούτ, οπότε οι τιμολογήσεις για τις ενέργειες του ΥΒΣ προκύπτουν παρόμοιες με αυτές που ανακοίνωσε η ΡΑΕ με σχετική απόφαση, [97], για το νησί της Λέσβου, δηλ.: 125 €/MWh για την ενέργεια των υδροστρόβιλων και 100 €/MWh για την ενέργεια των αντλιών. Επίσης η τιμή της αιολικής παραγωγής έχει θεωρηθεί λίγο υψηλότερη, της τάξης των 100 €/MWh, ώστε η τιμή της υδροστροβιλικής ενέργειας επί το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής να προκύπτει μικρότερη. Σε αυτήν την περίπτωση ο υβριδικός παραγωγός θα επιλέξει να δώσει προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση της αιολικής παραγωγής του στο δίκτυο, ως πιο προσοδοφόρα. Επιπλέον έχει υποτεθεί ότι ισχύουν οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3 ώστε η υδροαιολική συνεργασία να είναι τεχνικά εφικτή.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.13. Διαπιστώνεται ότι όταν δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση τότε προκύπτουν ελαφρώς μεγαλύτερες μειώσεις της συμβατικής ενέργειας συγκριτικά με την περίπτωση που δίνεται προτεραιότητα στην άντληση (βλ. Σχήμα 5.3), καθώς μειώνεται ποσοστιαία η αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος για άντληση και άρα αποφεύγονται οι αντίστοιχες απώλειες ενέργειας του κύκλου αντλησιοταμίευσης. Επίσης συνεπάγεται μικρότερες ποσοστιαίες αυξήσεις του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς το να δίνεται απ' ευθείας η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ στο δίκτυο αποτελεί φθηνή λύση για το σύστημα από τη στιγμή που η αιολική ενέργεια αποζημιώνεται σε τιμή μικρότερη από το κόστος παραγωγής των περισσότερων συμβατικών μονάδων. Αντιθέτως όταν η αιολική παραγωγή δίνεται μέσω των συστημάτων αντλησιοταμίευσης τότε αποζημιώνεται στην υψηλή τιμή των μονάδων αιχμής, οδηγώντας σε ελαφρά αύξηση του κόστους του συστήματος τις περιόδους που η συγκεκριμένη ενέργεια υποκαθιστά τις φθηνότερες συμβατικές μονάδες ενδιάμεσου φορτίου αλλά και βάσης. Όσον αφορά τις επιπτώσεις στους συντελεστές χρησιμοποίησης των υφιστάμενων Α/Π, αυτές δε διαφοροποιούνται για τις δύο προτεραιότητες στην αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής. Τέλος όσον αφορά την αξιοποίηση του Α/Π του ΥΒΣ, αυτή αυξάνεται ελαφρώς όταν δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση. Αυτό γιατί όταν δίνεται προτεραιότητα στην άντληση τότε γεμίζει περισσότερο η άνω δεξαμενή με αποτέλεσμα ελαφρώς περισσότερες απορρίψεις αιολικής παραγωγής λόγω γεμάτης δεξαμενής.

Πίνακας 5.13. Αποτελέσματα για το σύστημα της Λέσβου στην περίπτωση που δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ στο δίκτυο.

		Χωρίς ΥΒΣ	Με ΥΒΣ	
			Μονός Αγωγός	Διπλός Αγωγός
Συμβατική ενέργεια (GWh)		296.16 (100%)	264.17 (89.20%)	241.82 (81.65%)
Συνολικό κόστος συστήματος (Μ€)	Με διαθεσιμότητα ισχύος ΥΒΣ	35.62 (100%)	35.87 (100.70%)	36.20 (101.63%)
	Χωρίς διαθεσιμότητα ισχύος ΥΒΣ		39.26 (110.22%)	39.58 (111.12%)
Συντελεστής χρησιμοποίησης υφιστάμενων Α/Π (%)		30.29	30.31	30.45
Συντελεστής χρησιμοποίησης Α/Π ΥΒΣ (%)		–	17.89	32.08

5.5 Αξιολόγηση της βιωσιμότητας των επενδύσεων για ΥΒΣ

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται μια ενδεικτική οικονομική αξιολόγηση των επενδύσεων για ΥΒΣ σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, προκειμένου να δοθεί μια πρώτη εικόνα αναφορικά με τη βιωσιμότητα των επενδύσεων αυτών. Για το σκοπό αυτόν καταστρώθηκε ένα βασικό σενάριο οικονομικής αξιολόγησης, το οποίο περιλαμβάνει παραδοχές ως προς το κόστος της επένδυσης, τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, τα επιτόκια αναγωγής και δανεισμού, τα ποσοστά επιδότησης και δανεισμού κλπ., οι οποίες βασίστηκαν σε στοιχεία υπό κατασκευή παρόμοιων έργων. Τα δεδομένα και οι υποθέσεις που έγιναν για τη συγκεκριμένη ανάλυση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14. Βασικές υποθέσεις για την οικονομική αξιολόγηση

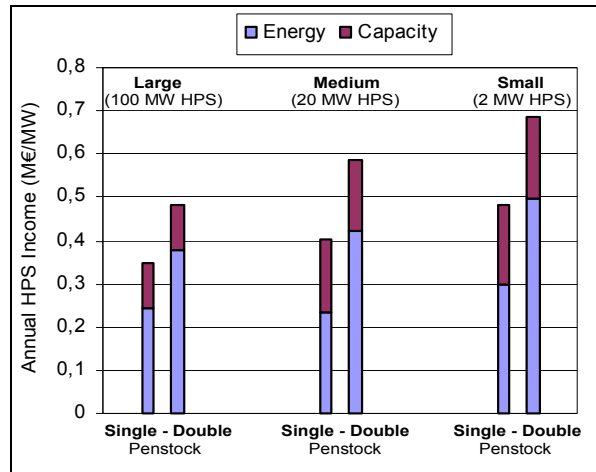
		Κρήτη	Λέσβος	Κάρπαθος
Κόστος επένδυσης	€/kW ³⁵	3000	4000	5000
Ετήσια έσοδα	Μ€/ MW	0.48	0.59	0.68
Καθαρή ετήσια ενεργειακή απόδοση	MWh/MW	2553	2518	2690
Κόστος λειτουργίας και επένδυσης (% κόστους επένδυσης)	%		2%	
Επιτόκιο αναγωγής	%		7.4%	
Διάρκεια οικονομικής ζωής	Έτη		20	
Συντελεστής φορολογίας	%		25%	
Ίδια κεφάλαια	%		30%	
Επιδότηση	%		25%	
Δάνειο	%		45%	
Επιτόκιο δανείου	%		6%	
Διάρκεια δανείου	Έτη		15	

Στα πλαίσια της οικονομικής αξιολόγησης, υπολογίζονται οι βασικοί οικονομικοί δείκτες των επενδύσεων για ΥΒΣ, δηλ. η καθαρή παρούσα αξία (NPV), ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), η έντοκη περίοδος αποπληρωμής (DPP) και το κόστος παραγωγής του ΥΒΣ (c). Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις που παρατίθενται στο Παράρτημα 2 και μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε βιβλίο οικονομικών μαθηματικών, π.χ. [99, 100]. Σημειώνεται ότι στους υπολογισμούς θεωρήθηκε μηδενική παραμένουσα αξία για τους ΥΒΣ στο τέλος της 20ετίας (κάτι που πρακτικά δεν ισχύει), ώστε να απλουστευτεί η οικονομική αξιολόγηση καθώς είναι δύσκολη η εκτίμησή της, ενώ δεν αλλάζει και την ουσία των συμπερασμάτων από τη στιγμή που απλώς θα προσθέσει έναν επιπλέον όρο στην καθαρή παρούσα αξία. Άλλωστε στον υπολογισμό των μεγεθών IRR και DPP, δε θα λαμβάνονταν έτσι κι αλλιώς υπόψη η παραμένουσα αξία.

Τα ετήσια έσοδα του ΥΒΣ σε κάθε περίπτωση, τα οποία απαιτούνται για την οικονομική αξιολόγηση, υπολογίζονται από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων της προηγούμενης ενότητας και τις τιμολογήσεις ενέργειας και ισχύος της ενότητας 5.3. Οι περιορισμοί ως προς το όριο της αποζημιωτέας εγγυημένης ισχύος της ενότητας 5.3 έχουν ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς και συγκεκριμένα ο ΥΒΣ στη Λέσβο αποζημιώνεται για μέρος (18.2 MW) της εγκατεστημένης ισχύος

³⁵ Τα κόστη επένδυσης στον Πίνακα 5.14 δίνονται ανά kW εγκατεστημένης ισχύος του ΥΗΣ. Όσον αφορά τις τιμές αυτών των κόστων, πρόκειται για χονδρικές εκτιμήσεις βάσει στοιχείων από παρόμοια έργα υπό κατασκευή.

των υδροστρόβιλων και όχι για το σύνολο των 20 MW. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8 (καθώς και στον Πίνακα 5.14 για ΥΒΣ διπλού αγωγού), όπου τα ετήσια έσοδα των ΥΒΣ δίνονται κανονικοποιημένα ως προς την ονομαστική ισχύ των υδροστρόβιλων. Παρατηρείται ότι για ΥΒΣ διπλού αγωγού προκύπτουν σημαντικά υψηλότερα έσοδα συγκριτικά με τους αντίστοιχους ΥΒΣ μονού αγωγού, κάτι το οποίο αντισταθμίζει πλήρως το αυξημένο αρχικό επενδυτικό τους κόστος.



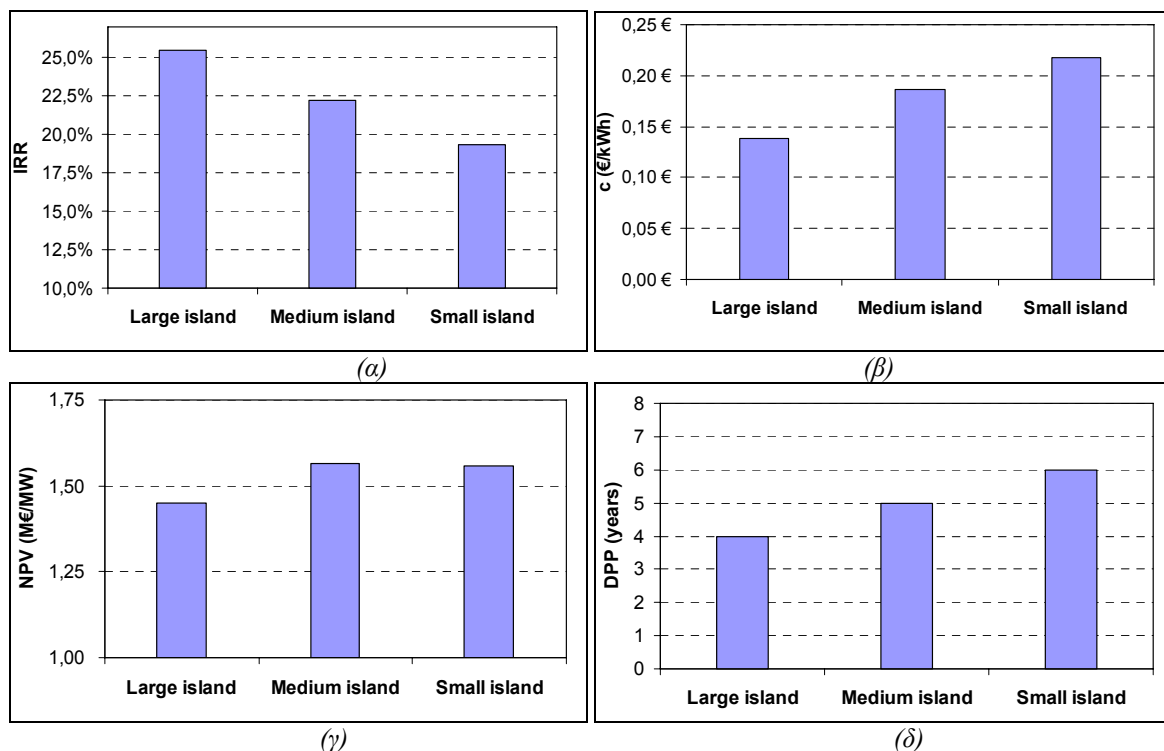
Σχήμα 5.8. Ετήσια έσοδα ΥΒΣ ανά εγκατεστημένο MW υδροστρόβιλων, για τα τρία ΜΑΝ, [33, 34].

Έχοντας υπόψη τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.8, υπολογίζονται στη συνέχεια οι οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης των επενδύσεων. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους ΥΒΣ διπλού αγωγού, από τη στιγμή που αποδείχτηκαν αρκετά πιο προσοδοφόροι συγκριτικά με τους αντίστοιχους μονού αγωγού. Διαπιστώνεται ότι οι επενδύσεις για ΥΒΣ είναι εξαιρετικά ελκυστικές σε όλες τις περιπτώσεις. Στην περίπτωση της Καρπάθου η έντοκη περίοδος αποπληρωμής (DPP) είναι συγκριτικά μεγαλύτερη σε σχέση με τα άλλα δύο νησιά, παρά τα υψηλότερα ετήσια έσοδα, λόγω του ότι το αρχικό κόστος επένδυσης έχει θεωρηθεί πολύ μεγαλύτερο. Για τον ίδιο λόγο, το υψηλότερο κόστος παραγωγής ΥΒΣ (c) και ο χαμηλότερος εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) προκύπτουν στην περίπτωση της Καρπάθου. Αντίθετα, η καθαρή παρούσα αξία (NPV) ανά εγκατεστημένο MW υδροστρόβιλων προκύπτει υψηλότερη για τα νησιωτικά συστήματα της Λέσβου και της Καρπάθου συγκριτικά με της Κρήτης, εξαιτίας των υψηλότερων ετήσιων εσόδων.

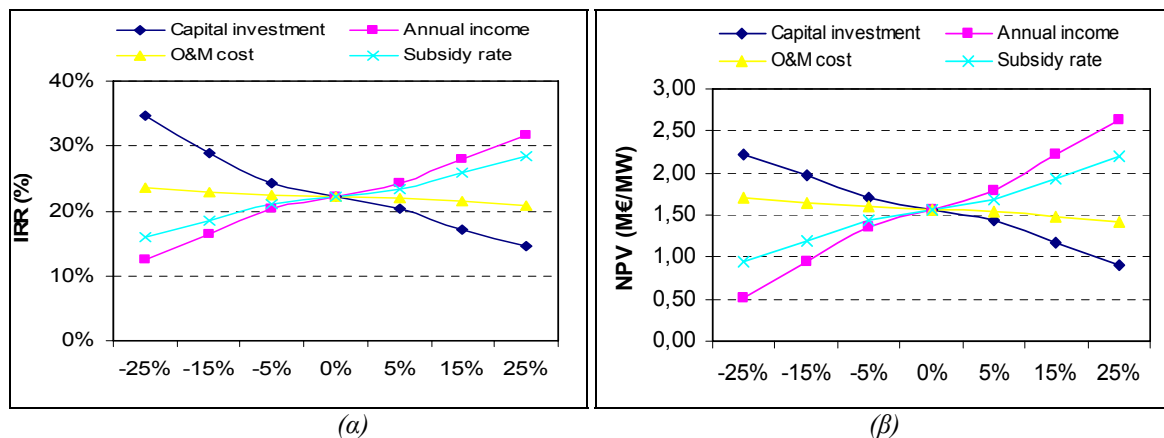
Αξίζει να τονιστεί ότι τα οικονομικά στην περίπτωση ΥΒΣ μονού αγωγού δεν προκύπτουν το ίδιο ελκυστικά, ιδιαίτερα στην περίπτωση της Καρπάθου όπου το υπολογιζόμενο IRR είναι χαμηλότερο του 10%, βάσει της ενδεικτικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του [87].

Τέλος, προκειμένου να αποκτηθεί μια εικόνα των επιπτώσεων που έχουν οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων στον καθορισμό της οικονομικότητας των επενδύσεων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των σημαντικότερων οικονομικών δεικτών ως προς τις κύριες παραμέτρους της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε κατά πόσο επηρεάζονται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) και η καθαρή παρούσα αξία (NPV) των επενδύσεων από τις μεταβολές του κόστους επένδυσης, των ετήσιων εσόδων, των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης (O&M) και του ποσοστού επιδότησης, για την περίπτωση της Λέσβου ως μέσο νησί. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.10, από τα οποία διαπιστώνεται ότι η βιωσιμότητα των επενδύσεων επηρεάζεται σημαντικά από τις διαφοροποιήσεις στο κόστος επένδυσης και τα ετήσια έσοδα, τα οποία αποτελούν τους κρίσιμότερους παράγοντες. Τα ποσοστά επιδότησης μεταφράζονται σε αντίστοιχες μειώσεις στο κόστος επένδυσης και συνεπώς επηρεάζουν επίσης σημαντικά την οικονομικότητα των υβριδικών έργων, ενώ αμελητέα είναι η επίδραση των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης, από τη στιγμή που έχουν θεωρηθεί ιδιαίτερα χαμηλές. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι επενδύσεις για ΥΒΣ

παραμένουν ιδιαίτερα αποδοτικές, επιδεικνύοντας τιμές για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης μεγαλύτερες του 10%.



Σχήμα 5.9. Βασικοί οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης των επενδύσεων για ΥΒΣ. α) Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), β) Κόστος παραγωγής ΥΒΣ (c), γ) Καθαρή παρούσα αξία (NPV) ανά εγκατεστημένο MW, δ) Έντοκη περίοδος αποπληρωμής (DPP), [33, 34].



Σχήμα 5.10. Ανάλυση ευαισθησίας για α) τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR) και β) την καθαρή παρούσα αξία (NPV) των επενδύσεων για ΥΒΣ στη Λέσβο, ως προς το κόστος επένδυσης, τα αναμενόμενα ετήσια έσοδα, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το ποσοστό επιδότησης. Οι τιμές του x-άξονα αφορούν ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις ως προς τις τιμές του βασικού σεναρίου του Πίνακα 5.14, [33, 34].

5.6 Πραγματική εφαρμογή: ΥΒΣ Ικαρίας

Παρά τις εξαιρετικές προοπτικές και τα οφέλη που υπόσχεται η αντλησιοταμίευση, καμία τέτοια εγκατάσταση δεν έχει τεθεί σε λειτουργία μέχρι τώρα και οι δημοσιευμένες έρευνες ασχολούνται βασικά με υποθετικές περιπτώσεις (με την εξαίρεση του σταθμού El-Hierro στα Κανάρια νησιά, [101]). Συνεπώς υπάρχει έλλειψη τόσο τεχνικής εμπειρίας όσο και αναλυτικών τεχνικοοικονομικών

κονομικών μελετών ώριμων έργων, για την παροχή ρεαλιστικών δεδομένων ή αξιόπιστων και συγκεκριμένων αποτελεσμάτων.

Μια πραγματική περίπτωση εγκατάστασης ΥΒΣ αντλησιοταμίευσης αποτελεί το υβριδικό έργο της Ικαρίας, το οποίο αναμένεται να αποτελέσει από τους πρώτους υδροαιολικούς αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς παραγωγής στα ελληνικά ΜΔΝ αλλά και παγκοσμίως. Ο ΥΒΣ της Ικαρίας είναι έργο της ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., η σύλληψη και μελέτη του οποίου πραγματοποιήθηκε από τη Δ/νση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής (ΔΥΗΠ, πρώην ΔΑΥΕ) της ΔΕΗ Α.Ε. και πλέον βρίσκεται στη φάση της κατασκευής. Για την αδειοδότηση του συγκεκριμένου έργου σύμφωνα με το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο για ΥΒΣ στην Ελλάδα, [31, 32, 52], απαιτήθηκαν εκτεταμένες τεχνικο-ενεργειακές μελέτες, [102], που περιλάμβαναν τον καθορισμό συγκεκριμένης πολιτικής διαχείρισης για το σταθμό και το νησιωτικό σύστημα, καθώς επίσης την αξιολόγηση των αναμενόμενων επιπτώσεων από τη λειτουργία του ΥΒΣ στο σύστημα της Ικαρίας. Αποτελέσματα αυτών των μελετών παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα, βασιζόμενα σε πραγματικά χαρακτηριστικά του ΥΒΣ και δεδομένα του συστήματος ισχύος της Ικαρίας. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν μόνο τις ενεργειακές επιπτώσεις του ΥΒΣ στο σύστημα της Ικαρίας.

5.6.1 Περιγραφή του συστήματος της Ικαρίας με τον ΥΒΣ

Το σύστημα παραγωγής της Ικαρίας, περιλαμβανομένου του ΥΒΣ, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11 και αφορά τη μελλοντική διαμόρφωσή του όταν θα έχει ενταχθεί και ο ΥΒΣ, όπως θεωρείται στο [102] βάσει στοιχείων που ελήφθησαν από τη ΔΕΗ Α.Ε.. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τον τοπικό σταθμό παραγωγής (ΤΣΠ) Αγίου Κήρυκου που καταναλώνει μαζούτ και υφιστάμενα ή αδειοδοτημένα (από στοιχεία της ΡΑΕ) Α/Π εκτός του ΥΒΣ, των οποίων η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 1835 kW. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη Φ/Β σταθμοί συνολικής ισχύος 1040 kW, όσοι προβλέπεται να αδειοδοτηθούν σύμφωνα με το περιθώριο ισχύος της Απόφασης 96/2007 της ΡΑΕ, όπως τροποποιήθηκε με την Απόφαση 703/2008. Όλοι οι σταθμοί παραγωγής συνδέονται στο δίκτυο Μ.Τ. του νησιού. Το αναβαθμισμένο δίκτυο διανομής του νησιού λόγω της ένταξης του ΥΒΣ, έχει ήδη μελετηθεί στο πλαίσιο του έργου [103]. Η μελλοντική αιχμή του φορτίου του νησιού για την περίοδο που το ΥΒΣ αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία, εκτιμάται στα 9 MW, με συντελεστή φορτίου 42%. Αναλυτικά στοιχεία για το θεωρούμενο στις προσομοιώσεις ηλεκτρικό σύστημα της Ικαρίας παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

Όσον αφορά τον ΥΒΣ της Ικαρίας, αυτός διαθέτει τρεις δεξαμενές νερού με επαρκείς υψομετρικές διαφορές (οι τιμές των υψόμετρων από την επιφάνεια της θάλασσας σημειώνονται στο Σχήμα 5.11):

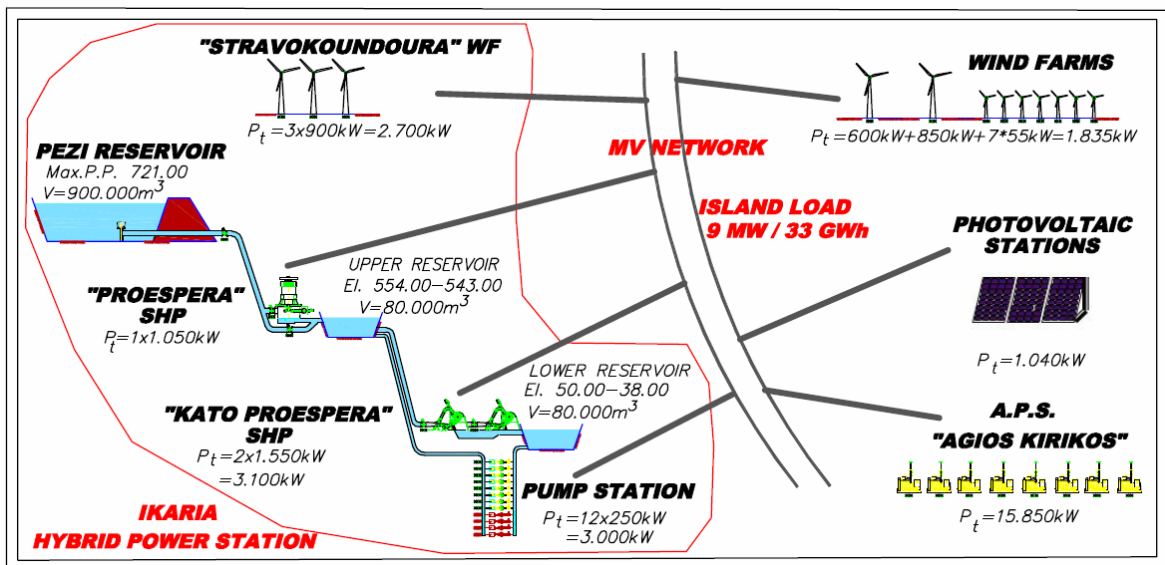
- Έναν υφιστάμενο ταμιευτήρα στη θέση Πέζι (900000 m³), ο οποίος χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή για λόγους ύδρευσης και άρδευσης. Η περίσσεια νερών αυτής της δεξαμενής θα χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Δύο νέες δεξαμενές στις θέσεις Προεσπέρα και Κάτω Προεσπέρα, με εκμεταλλεύσιμο όγκο περίπου 80000 m³ έκαστη, για λόγους αντλησιοταμίευσης. Οι δύο αυτές δεξαμενές αντλησιοταμίευσης συνδέονται μέσω διπλού αγωγού, ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη παραγωγή και άντληση.

Επίσης, ο ΥΒΣ περιλαμβάνει δύο μικρούς ΥΗΣ, εξοπλισμένους με υδροστρόβιλους τύπου Pelton. Τον ΥΗΣ Προεσπέρα με έναν υδροστρόβιλο ισχύος 1.05 MW, που θα αξιοποιεί μόνο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα Πεζίου (αφού πρώτα ικανοποιηθούν οι υποχρεώσεις για ύδρευση, οικολογική παροχή και άρδευση) και τον ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρα με δύο υδροστρόβιλους ισχύος 2x1.55 MW, που θα αξιοποιεί τόσο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα Πεζίου όσο και νερά που προέρχονται από τη λειτουργία της αντλησιοταμίευσης. Το αντλιοστάσιο του ΥΒΣ θα εγκατασταθεί στην Κάτω Προεσπέρα και θα αποτελείται από 8 αντλίες σταθερών στροφών και 4 αντλίες μεταβλητών στροφών, εγκατεστημένης ισχύος 8 x 250 + 4 x 250 = 3000 kW (ονομαστική ηλεκτρική

ισχύς κινητήρων). Όσον αφορά το Α/Π του ΥΒΣ, αυτό θα εγκατασταθεί στη θέση Στραβοκου- ντούρα και θα αποτελείται από τρεις (3) Α/Γ των 900 kW. Αναλυτικά τα τεχνικά στοιχεία των επι- μέρους μονάδων του ΥΒΣ δίνονται στο Παράρτημα 1.

Ιδιαίτερότητα του συγκεκριμένου ΥΒΣ, που το διαφοροποιεί από τη συνήθη διαμόρφωση ΥΒΣ που περιγράφηκε στην ενότητα 1.3, είναι ότι εκτός από τις δύο δεξαμενές που εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης για την απορρόφηση της αιολικής παραγωγής, υφίσταται και ένας τρίτος ταμιευτήρας στα ανάντη της άνω δεξαμενής αντλησιοταμίευσης, η περίσσεια υδάτων του οποίου εισρέει στην τελευταία μέσω ενός επιπλέον ΥΗΣ. Η διαμόρφωση δηλαδή του ΥΒΣ της Ικαρίας επιτρέπει την αξιοποίηση δύο μορφών ΑΠΕ, της αιολικής μέσω της αντλησιοταμίευσης και της υδροηλεκτρικής μέσω της εκμετάλλευσης των διαθέσιμων υδάτων του ταμιευτήρα. Γι' αυ- τόν το σκοπό απαιτείται κατάλληλη πολιτική εσωτερικής λειτουργίας του ΥΒΣ, η οποία θα εξα- σφαλίσει την αποδοτική αξιοποίηση των δύο μορφών ΑΠΕ και η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση τους όρους περιβαλλοντικής αδειοδότησης του έρ- γου, η λειτουργία των δύο ΥΗΣ διέπεται από υποχρεώσεις που έχουν σκοπό την εξασφάλιση της επάρκειας του ταμιευτήρα Πεζίου για σκοπούς ύδρευσης και άρδευσης. Συγκεκριμένα, δεν επιτρέ- πεται η λειτουργία του ΥΗΣ Προεσπέρας τη θερινή περίοδο (1^η Μαΐου - 30^η Σεπτεμβρίου), ενώ το υπόλοιπο διάστημα του έτους, 1^η Οκτωβρίου έως 30^η Απριλίου (αποκαλούμενη ως χειμερινή περί- οδος), τίθενται απαιτήσεις ελάχιστης στάθμης νερού στον ταμιευτήρα Πεζίου. Προκειμένου να α- νταποκριθεί η διαχείριση του ταμιευτήρα στις σύνθετες αυτές απαιτήσεις, καταρτίστηκε από τους μελετητές της ΔΥΗΠ (πρώην ΔΑΥΕ) σενάριο ελάχιστου επιτρεπτού όγκου νερού στον ταμιευτήρα για το χρονικό διάστημα της ενεργειακής λειτουργίας του, δηλαδή τη χειμερινή περίοδο. Οι περιο- ρισμοί στους οποίους υπόκειται ο Διαχειριστής του ΥΒΣ (ΔΥΒΣ) ως προς την αξιοποίηση των νε- ρών του ταμιευτήρα Πεζίου παρουσιάζονται λεπτομερώς στο Παράρτημα 1. Τα διαθέσιμα προς α- ξιοποίηση νερά του ταμιευτήρα για κάθε ημέρα ισούνται με τη διαφορά των αποθηκευμένων υδάτων του από τον εκάστοτε επιτρεπτό ελάχιστο όγκο νερού.



Σχήμα 5.11. Ο ΥΒΣ και οι υπόλοιποι σταθμοί παραγωγής της Ικαρίας (μελλοντική κατάσταση), [34]

5.6.2 Προτεινόμενη πολιτική εσωτερικής λειτουργίας του ΥΒΣ Ικαρίας

Βάσει της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2, ο ΔΜΔΝ καθορίζει το πρόγραμμα παραγωγής (επίσης το πρόγραμμα άντλησης, αν απαιτείται ά-

ντληση από το δίκτυο) για τους υδροστρόβιλους του ΥΒΣ. Στη συνέχεια ο ΔΥΒΣ αποφασίζει την κατανομή της προγραμματισμένης παραγωγής στους υδροστρόβιλους των δύο ΥΗΣ, καθώς επίσης και τις προτεραιότητες στην αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής με σκοπό τη μεγιστοποίηση του αναμενόμενου οικονομικού οφέλους. Οι αποφάσεις διαφοροποιούνται τη θερινή περίοδο (1^η Μαΐου - 30^η Σεπτεμβρίου) σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο (1^η Οκτωβρίου - 30^η Απριλίου), από τη στιγμή που η λειτουργία του ΥΗΣ Προεσπέρας επιτρέπεται μόνο τη χειμερινή περίοδο.

Αναλυτικότερα, όταν η λειτουργία του ΥΗΣ Προεσπέρας δεν είναι πιθανή (κατά τη θερινή περίοδο, καθώς επίσης και τις ημέρες της χειμερινής περιόδου που δεν υπάρχει περίσσεια νερού στον ταμιευτήρα Πεζίου), η πολιτική εσωτερικής λειτουργίας του ΥΒΣ είναι ακριβώς η ίδια με αυτήν που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.3 για τις τυπικές διαμορφώσεις ΥΒΣ. Ως προς την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής, δίνεται προτεραιότητα στην άντληση λόγω των υψηλών τιμολογήσεων για τις ενέργειες του ΥΒΣ, βάσει της τροποποίησης της άδειας παραγωγής του, [104].

Από την άλλη, τις ημέρες της χειμερινής περιόδου με περίσσεια νερών, τίθεται θέμα σχετικά με τις προτεραιότητες ως προς την ένταξη και φόρτιση των δύο ΥΗΣ του ΥΒΣ για την παροχή της προγραμματισμένης ισχύος. Δίνοντας προτεραιότητα στον ΥΗΣ Προεσπέρας, αξιοποιείται η περίσσεια νερών του ταμιευτήρα Πεζίου, που αλλιώς θα υπερχειλίζαν τον ταμιευτήρα και θα χάνονταν, για υδροηλεκτρική παραγωγή. Την ίδια στιγμή όμως, η στάθμη της δεξαμενής της Προεσπέρας αυξάνεται, περιορίζοντας τη δυνατότητα για αντλησιοταμίευση, που είναι πιο επικερδής. Η λογική διαχείρισης προτεραιοτήτων των δύο ΥΗΣ που υιοθετείται, αποσκοπεί στη διατήρηση της δεξαμενής της Προεσπέρας σε πληρότητα αρκετά υψηλή ώστε να αξιοποιούνται τα διαθέσιμα νερά του ταμιευτήρα Πεζίου, χωρίς όμως να υφίσταται ζήτημα απόρριψης αιολικής παραγωγής προς άντληση εντός του ημερήσιου κύκλου λειτουργίας. Το ποσοστό αυτό εδώ λαμβάνεται 85%, γεγονός που πρακτικά σημαίνει ότι το 85% της χωρητικότητας της δεξαμενής Προεσπέρας διατίθενται για την αξιοποίηση των πλεοναζόντων υδάτων του ταμιευτήρα Πεζίου, ενώ το υπόλοιπο 15% (12000 m³ νερού περίπου) για αποθήκευση της αντλούμενης αιολικής παραγωγής, το οποίο αποδείχτηκε από τις προσομοιώσεις ικανοποιητικό για τα χαρακτηριστικά (ονομαστικές παροχές) των προς εγκατάσταση αντλιών. Η διατήρηση της συγκεκριμένης στάθμης φόρτισης της δεξαμενής επιτυγχάνεται με την εναλλαγή της προτεραιότητας φόρτισης των υδροστρόβιλων των ΥΗΣ Προεσπέρας και Κάτω Προεσπέρας. Προκειμένου να αποφευχθούν συνεχείς εντάξεις-απεντάξεις υδροστρόβιλων ή εναλλαγές στη φόρτισή τους, υιοθετείται υστέρηση στην εναλλαγή των προτεραιοτήτων, της τάξης του ±5%.

Ως προς την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής κατά τη χειμερινή περίοδο, δίνεται προτεραιότητα στην άντληση (Mode 1), διότι η συμμετοχή των αιολικών στην προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής των υδροστρόβιλων (Mode 3) συνεπάγεται συχνή υποφόρτιση του ΥΗΣ Προεσπέρας και άρα όχι καλή αξιοποίηση των διαθέσιμων νερών του ταμιευτήρα Πεζίου.

5.6.3 Αποτελέσματα από τη λειτουργία του ΥΒΣ Ικαρίας

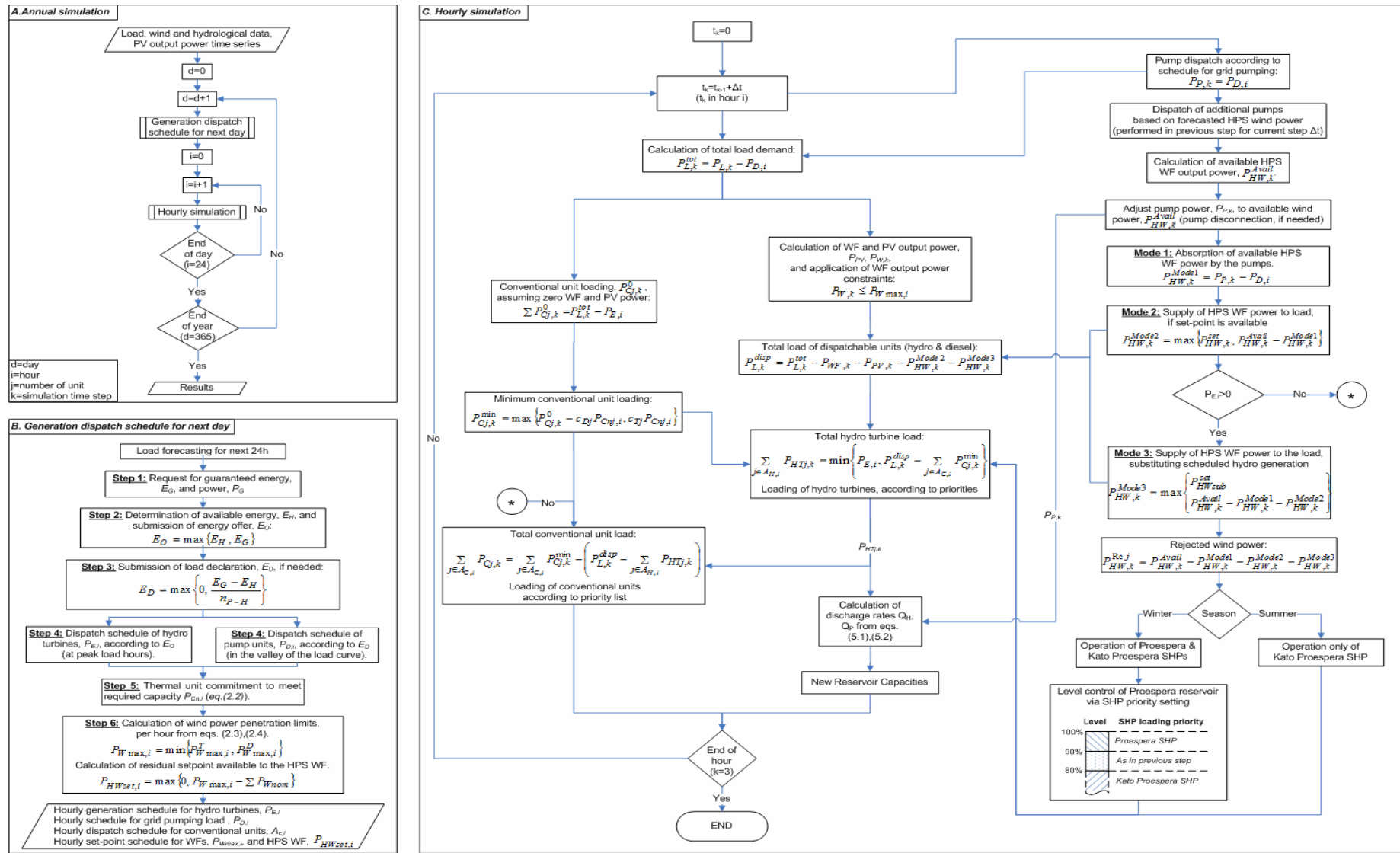
Προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις του ΥΒΣ στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού, το σύστημα ισχύος της Ικαρίας, περιλαμβανομένου του ΥΒΣ, μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με την ενότητα 5.1 και προσομοιώθηκε η λειτουργία του για μελλοντικό έτος, όταν και αναμένεται η ένταξη του ΥΒΣ. Το block διάγραμμα του αλγόριθμου προσομοίωσης δίνεται στο Σχήμα 5.12.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα 1. Αναφορικά με τις εισροές υδάτων στον ταμιευτήρα Πεζίου, θεωρήθηκαν τρεις ετήσιες χρονοσειρές που αφορούν έτη αυξημένης, μέσης και πολύ χαμηλής υγρότητας αντίστοιχα, συνιστώντας αντιπροσωπευτικό δείγμα των υδρολογικών συνθηκών που αναμένονται στο νησί της Ικαρίας. Επίσης, επειδή για το Α/Π του ΥΒΣ δεν υπάρχει μετρηθείσα χρονοσειρά ανέμου στη θέση εγκατάστασής του (Στραβοκουντούρα), στις προσομοιώσεις ελήφθησαν υπόψη διαθέσιμες χρονο-

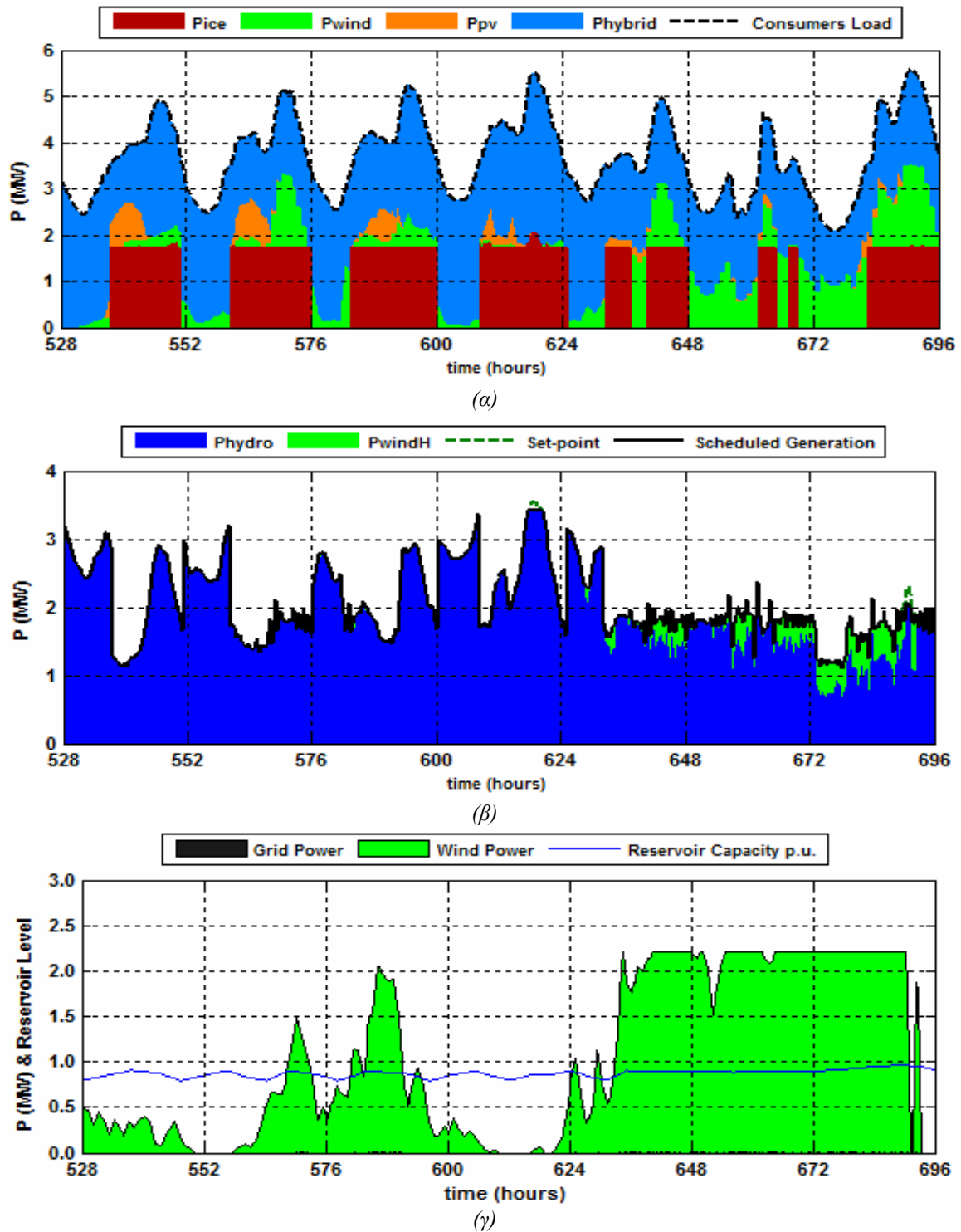
σειρές ανέμου σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες του νησιού (Περδίκι και Πέζι), οι οποίες θεωρείται ότι αποτελούν το άνω και κάτω όριο αντίστοιχα της αναμενόμενης ταχύτητας ανέμου στη θέση του Α/Π.

Σημειώνεται πως στις προσομοιώσεις έχει θεωρηθεί ότι τηρούνται όλες οι τεχνικές προϋποθέσεις (βλ. Κεφάλαιο 3) ώστε το ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής, να παρουσιάζει παρόμοια ταχύτητα απόκρισης με τις συμβατικές μονάδες που υποκαθιστά και επίσης η υδροαιολική συνεργασία να είναι τεχνικά εφικτή. Όσον αφορά το “συμβατικό” τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων, $c_{HT,c}$, αυτό γενικά καθορίζεται ως ποσοστό επί της ονομαστικής τους ισχύος και αντιστοιχεί στο τεχνικό ελάχιστο των υποκαθιστάμενων συμβατικών μονάδων (π.χ. 40%-60%) και όχι κατ’ ανάγκη στο πραγματικό τεχνικό ελάχιστο των υδροστρόβιλων, που είναι αρκετά χαμηλότερο (βλ. ενότητα 2.2.2). Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι η υποκατάσταση συμβατικών μονάδων από υδροστρόβιλους δεν επηρεάζει σημαντικά το διαθέσιμο περιθώριο διεύθυνσης της αιολικής παραγωγής. Επειδή όμως στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό ποιοι υδροστρόβιλοι θα ενταχθούν κάθε ώρα του επόμενου 24ώρου και δεδομένου ότι οι υδροστρόβιλοι των δύο ΥΗΣ έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, θεωρήθηκε ένα κοινό τεχνικό ελάχιστο για όλους τους υδροστρόβιλους, ίσο με 600 kW, και επιπλέον ότι θα εντάσσεται ο μικρότερος δυνατός αριθμός υδροστρόβιλων. Το παραπάνω τεχνικό ελάχιστο αντιστοιχεί στο 60% της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος εξόδου του υδροστρόβιλου του ΥΗΣ Προεσπέρας και στο 40%, περίπου, της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος των υδροστρόβιλων του ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας.

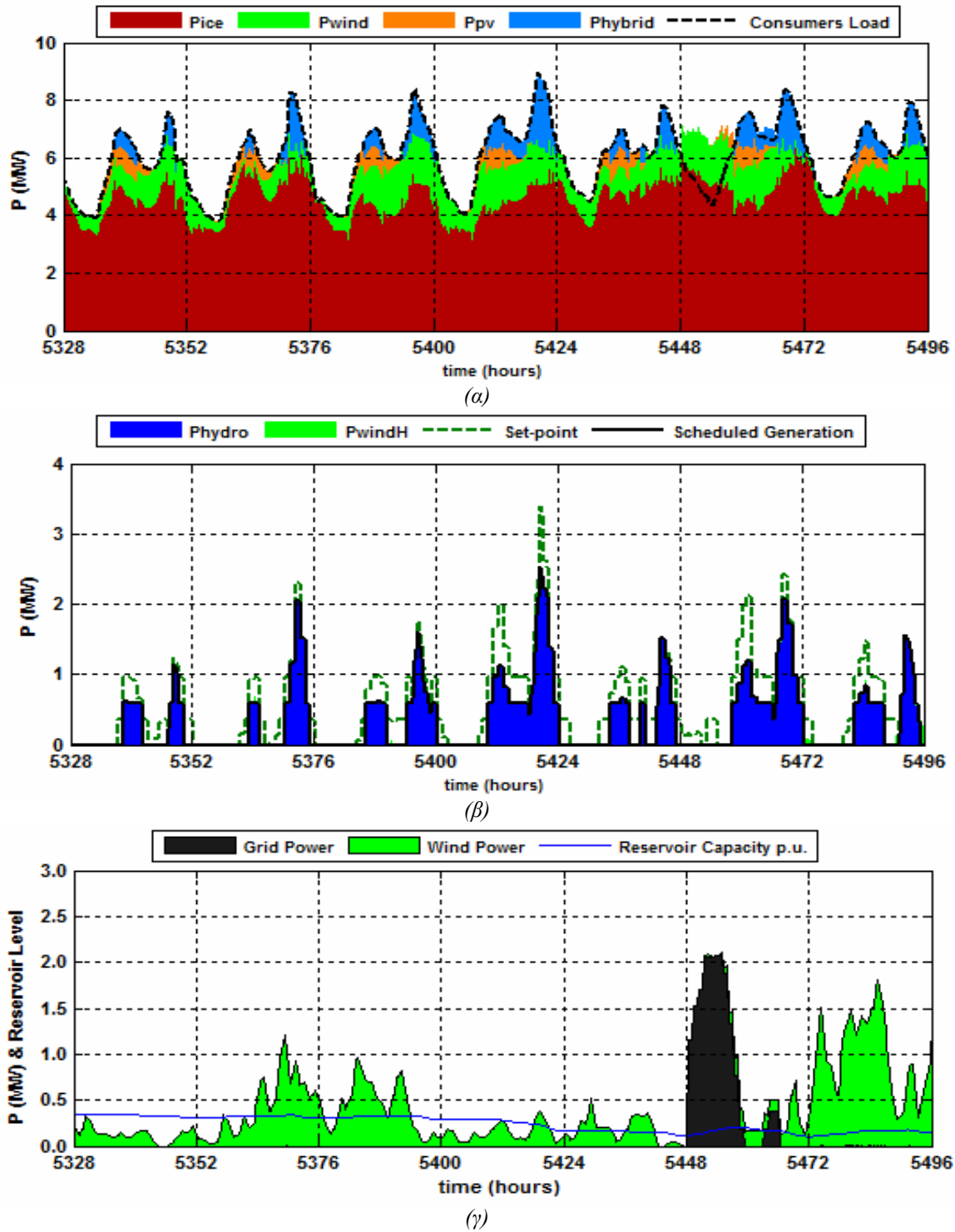
Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζεται η λειτουργία του συστήματος της Ικαρίας για δύο ενδεικτικές εβδομάδες, θεωρώντας τη χαμηλή χρονοσειρά ανέμου για το Α/Π του ΥΒΣ και συνθήκες ενδιάμεσης υγρότητας. Τα διαγράμματα 5.13(α) και 5.14(α) απεικονίζουν τη συνεισφορά κάθε σταθμού παραγωγής στην εξυπηρέτηση της ζήτησης φορτίου (ΑΣΠ, ΥΒΣ, λοιπά Α/Π και Φ/Β σταθμοί). Την εβδομάδα χαμηλού φορτίου της χειμερινής περιόδου (Σχήμα 5.13), όπου υπάρχουν διαθέσιμα νερά από τον ταμιευτήρα Πεζίου και άρα οι προσφορές ενέργειας του ΔΥΒΣ είναι υψηλές, διαπιστώνεται ότι το φορτίο καλύπτεται κυρίως από την παραγόμενη ενέργεια του ΥΒΣ και μόνο τις ώρες υψηλής ζήτησης εντάσσεται μία συμβατική μονάδα βάσης στο τεχνικό της ελάχιστο. Αντίθετα, την εβδομάδα υψηλού φορτίου της θερινής περιόδου (Σχήμα 5.14), όπου δεν επιτρέπεται η λειτουργία του ΥΗΣ Προεσπέρας και οι προσφορές ενέργειας είναι μικρότερες, το ΥΒΣ καλύπτει μόνο τις αιχμές του φορτίου. Στο διάγραμμα 5.14(α) διακρίνεται επίσης η άντληση από το δίκτυο κατά τις νυχτερινές ώρες της έκτης ημέρας της εβδομάδας, για την κάλυψη των απαιτήσεων εγγυημένης παροχής (διαστήματα όπου η συνολική παραγωγή υπερβαίνει το φορτίο του νησιού, που απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρά το σχετικά μεγάλο μέγεθος του ΥΒΣ, η ένταξη και λειτουργία των υδροστρόβιλων του δεν επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις στις συμβατικές μονάδες (στην πραγματικότητα εξομαλύνει την καμπύλη φορτίου του ΤΣΠ).



Σχήμα 5.12. Block διάγραμμα του αλγόριθμου προσομοίωσης, [34, 105]



Σχήμα 5.13. Λειτουργία του συστήματος της Ικαρίας για μια τυπική εβδομάδα χαμηλού φορτίου (τον Ιανουάριου). α) Παραγόμενη ισχύς συμβατικών μονάδων (Pice), ΥΒΣ (Phybrid), Α/Π εκτός ΥΒΣ (Pwind) και Φ/Β σταθμών (Ppv). β) Συνεισφορά των υδροστρόβιλων και του Α/Π στην προγραμματισμένη ισχύ του ΥΒΣ. γ) Προέλευση της απορροφούμενης ισχύος των αντλιών και πληρότητα της δεξαμενής Προεσπέρας (I=μέγιστη χωρητικότητα δεξαμενής), [34, 105].



Σχήμα 5.14. Λειτουργία του συστήματος της Ικαρίας για μια τυπική εβδομάδα υψηλού φορτίου (του Αυγούστου). α) Παραγόμενη ισχύς συμβατικών μονάδων (Pice), ΥΒΣ (Phybrid), Α/Π εκτός ΥΒΣ (Pwind) και Φ/Β σταθμών (Ppv). β) Συνεισφορά των υδροστρόβιλων και του Α/Π στην προγραμματισμένη ισχύ του ΥΒΣ. γ) Προέλευση της απορροφούμενης ισχύος των αντλιών και πληρότητα της δεξαμενής Προεσπέρας (I =μέγιστη χωρητικότητα δεξαμενής), [34, 105].

Στα διαγράμματα 5.13(β) και 5.14(β) απεικονίζεται η παραγόμενη ισχύς των υδροστρόβιλων (μπλε χρώμα) και το τμήμα της αιολικής ισχύος που δίνεται απ' ευθείας στο φορτίο (πράσινο χρώμα) στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας (Mode 2) ή της κατανομής set-point από το σύστημα (Mode 3). Η δυνατότητα συμμετοχής του Α/Π του ΥΒΣ στο set-point παριστάνεται με τη διακεκομμένη γραμμή πάνω από τη συνεχή μαύρη που απεικονίζει την προγραμματισμένη παρα-

γωγή των μονάδων του ΥΒΣ. Στις συγκεκριμένες δύο εβδομάδες (αλλά και γενικότερα) η συμμετοχή στο set-point είναι πρακτικώς αμελητέα. Συμμετοχή των αιολικών στην προγραμματισμένη παραγωγή υφίσταται όταν η τελευταία καλύπτεται ταυτόχρονα από υδροστρόβιλους και αιολική ισχύ, όπως π.χ. συμβαίνει στο τέλος της εβδομάδας του διαγράμματος 5.13(β). Γενικά πάντως, η προγραμματισμένη ισχύς παραγωγής του ΥΒΣ καλύπτεται από τους υδροστρόβιλους, ενώ η παραγωγή των αιολικών του ΥΒΣ αξιοποιείται κυρίως για άντληση, καθώς λόγω των υψηλών τιμολογήσεων συμφέρει να δίνεται προτεραιότητα στην άντληση.

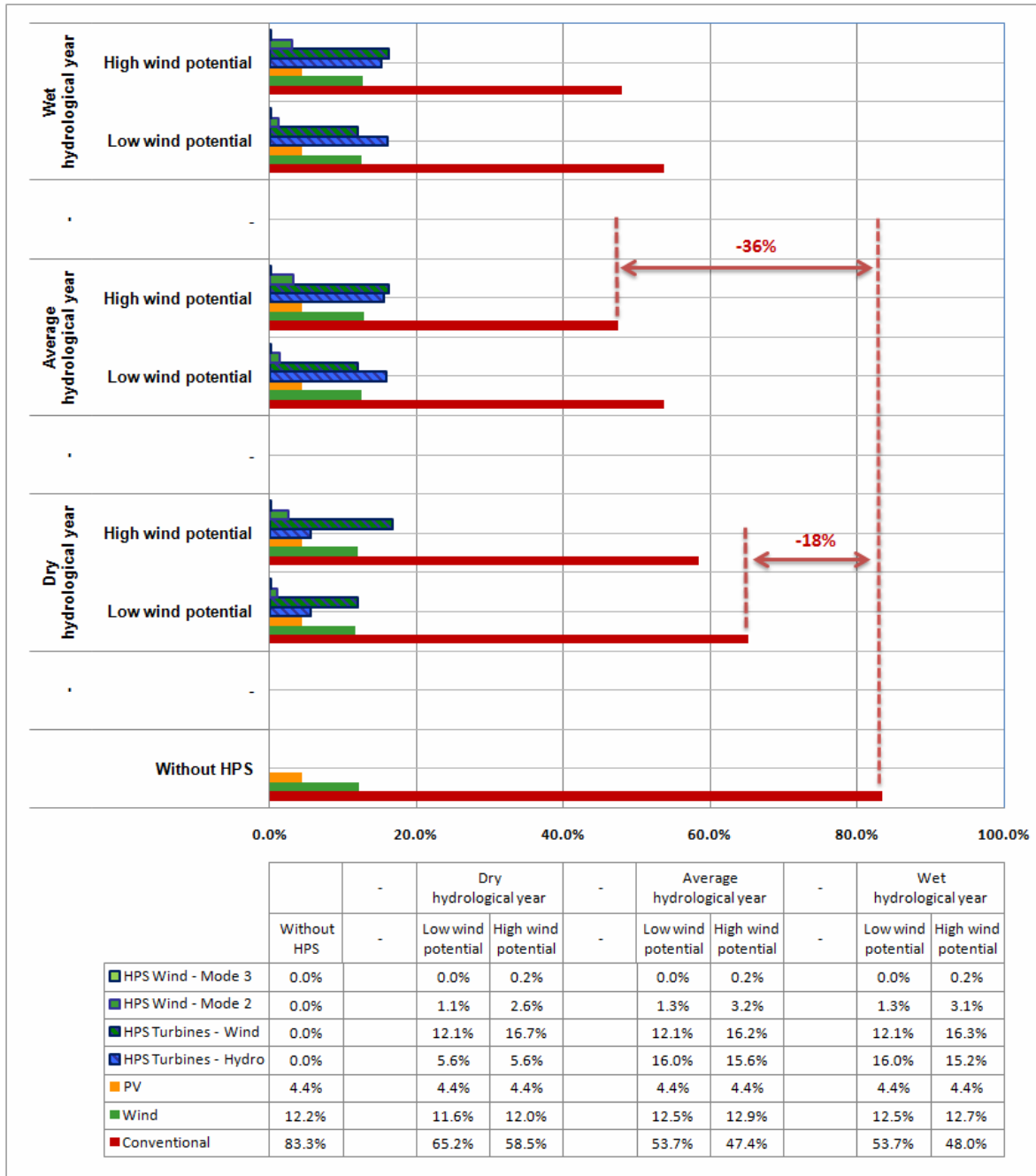
Στα διαγράμματα 5.13(γ) και 5.14(γ) απεικονίζεται η λειτουργία άντλησης καθώς και η διακύμανση της πληρότητας της δεξαμενής στην Προεσπέρα. Την εβδομάδα χαμηλού φορτίου, η άντληση πραγματοποιείται απορροφώντας μόνο την αιολική παραγωγή του ΥΒΣ (πράσινο χρώμα), καθώς το φορτίο της συγκεκριμένης εβδομάδας είναι χαμηλό και ο ΔΜΔΝ δεν απαιτεί εγγυημένη ισχύ και ενέργεια από το ΥΒΣ. Την εβδομάδα υψηλού φορτίου αντίθετα και συγκεκριμένα την έκτη ημέρα της εβδομάδας, σημειώνεται απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο για άντληση (μαύρο χρώμα), καθώς η αποθηκευμένη ποσότητα νερού στη δεξαμενή Προεσπέρας δεν αρκεί για την εξασφάλιση της ζητούμενης εγγυημένης ενέργειας από τον ΔΜΔΝ. Σε ό,τι αφορά τη στάθμη της δεξαμενής Προεσπέρας, παρατηρείται ότι τη χειμερινή εβδομάδα (διάγραμμα 5.13(γ)), αυτή διατηρείται σε υψηλά επίπεδα (άνω του 80% της ολικής χωρητικότητας), ως αποτέλεσμα της σημαντικής διαθεσιμότητας υδάτων από τον ταμιευτήρα Πεζίου και της ακολουθούμενης στρατηγικής εσωτερικής λειτουργίας του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, η πληρότητα της δεξαμενής Προεσπέρας κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 80% και 90%, αυξανόμενη περαιτέρω στα διαστήματα υψηλού αιολικού δυναμικού όπως το τέλος της εβδομάδας, οπότε και αξιοποιείται πλήρως η εγκατεστημένη ισχύς του αντλιοστάσιου. Τη θερινή εβδομάδα από την άλλη (διάγραμμα 5.14(γ)), η στάθμη του νερού παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα και τα αποθηκευμένα ύδατα αξιοποιούνται πλήρως όταν ζητείται εγγυημένη ισχύς και ενέργεια από το ΔΜΔΝ.

Στα επόμενα σχήματα ποσοτικοποιούνται τα οφέλη από τη λειτουργία του ΥΒΣ σε ετήσια βάση, για διάφορα σενάρια λειτουργίας.

Αναλυτικότερα, η επιτυγχανόμενη αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15, το οποίο παρουσιάζει τη συνεισφορά όλων των σταθμών παραγωγής του συστήματος στην κάλυψη της ετήσιας ζήτησης φορτίου. Αποτελέσματα για το βασικό σενάριο λειτουργίας του συστήματος χωρίς τον ΥΒΣ, απεικονίζονται από τη χαμηλότερη ομάδα ράβδων του σχήματος. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για λειτουργία με τον ΥΒΣ, για τις τρεις συνθήκες υγρότητας και τις δύο χρονοσειρές ανέμου για το Α/Π του ΥΒΣ, παρουσιάζονται από τις άλλες έξι ομάδες ράβδων.

Στο βασικό σενάριο, τα λοιπά Α/Π (εκτός ΥΒΣ) και οι Φ/Β σταθμοί επιτυγχάνουν ετήσια διείσδυση ενέργειας ΑΠΕ γύρω στο 17%, το οποίο είναι κοντά στο μέγιστο δυνατό όριο που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς αποθήκευση, ακολουθώντας την υφιστάμενη πρακτική λειτουργίας των νησιωτικών συστημάτων. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) των εγκατεστημένων Α/Π είναι περίπου 25%, παρά το υψηλό αιολικό δυναμικό του νησιού, εξαιτίας των επιβαλλόμενων περικοπών ισχύος (στα επίπεδα του 40% της ετήσιας διαθέσιμης αιολικής παραγωγής). Αυξάνοντας την εγκατεστημένη αιολική ισχύ για την επίτευξη υψηλότερων διεισδύσεων ΑΠΕ, θα μειώνε περαιτέρω το CF των Α/Π, καθιστώντας μη βιώσιμες τις επενδύσεις. Με την είσοδο όμως του ΥΒΣ, αυξάνεται δραστικά η διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα κατά 18-36%, ανάλογα με τις θεωρούμενες υδρολογικές και αιολικές συνθήκες, φτάνοντας τα συνολικά επίπεδα διείσδυσης ακόμη και στο 50%. Και είναι σημαντικό ότι αυτή η αύξηση επιτυγχάνεται χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις για τη λειτουργία των υφιστάμενων ή αδειοδοτημένων Α/Π του νησιού, των οποίων ο συντελεστής χρησιμοποίησης παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστος στα διάφορα σενάρια προσομοίωσης. Προφανώς το ίδιο ισχύει και για τους Φ/Β σταθμούς, των οποίων η ισχύς δεν υπόκειται σε περικοπές. Σχετικά με την προέλευση της παραγόμενης ενέργειας του ΥΒΣ, αυτή προέρχεται κατά κύριο λόγο από τα διαθέσιμα νερά του ταμιευτήρα Πεζίου (HPS Turbines - Hydro) και από την αντλησιοταμίευση (HPS Turbines - Wind). Η απ' ευθείας έγχυση της αιολικής παραγωγής στο δίκτυο, είτε ως συμμετοχή στην προγραμματισμένη ισχύ του ΥΒΣ (HPS Wind - Mode 2), είτε ως συμμετοχή στο set-

point (HPS Wind – Mode 3), είναι αρκετά μικρότερη, καθώς δίνεται προτεραιότητα στην άντληση, εξαιτίας των υψηλών τιμολογήσεων για τις ενέργειες του ΥΒΣ.



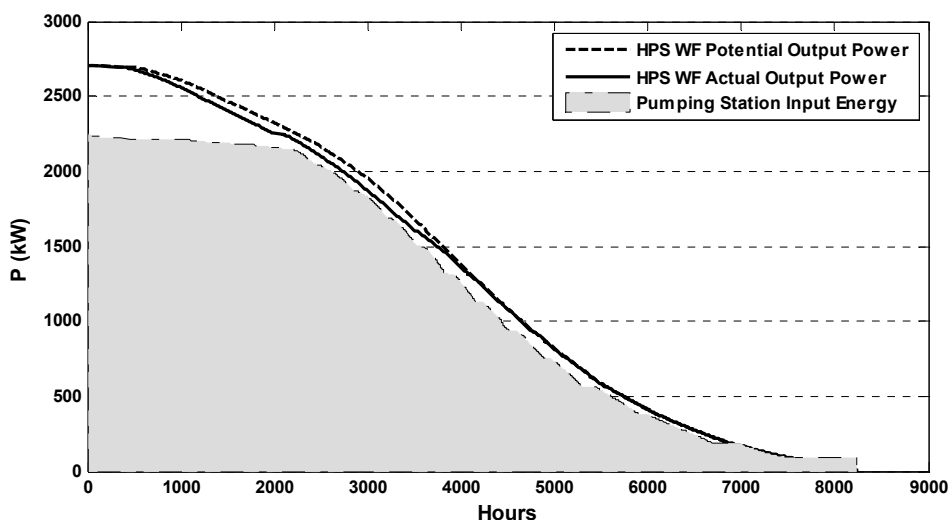
Σχήμα 5.15. Συνεισφορά των συμβατικών μονάδων, του ΥΒΣ και των λοιπών σταθμών ΑΠΕ (Α/Π, Φ/Β) στην κάλυψη της ετήσιας ζήτησης φορτίου, χωρίς και με τον ΥΒΣ, για διάφορες υδρολογικές και αιολικές συνθήκες, [34].

Όσον αφορά την άντληση από το δίκτυο, αυτή επιτρέπεται από το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο για την εξασφάλιση της παροχής της εγγυημένης ισχύος και ενέργειας του ΥΒΣ, ωστόσο θα πρέπει να ελαχιστοποιείται κατά το δυνατόν περισσότερο, καθώς αποτελεί ουσιαστικά σπατάλη συμβατικών καυσίμων. Με την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης πράγματι επιτυγχάνεται αμελητέα άντληση από το δίκτυο, της τάξης του 0.5-2.5% της συνολικής ετήσιας απορροφούμενης ενέργειας του αντλιοστάσιου. Το άνω όριο των παραπάνω ποσοστών αντιστοιχεί στο σενάριο της χαμηλής χρονοσειράς ανέμου, οπότε η αποθήκευση νερών από την αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ περιορίζεται.

Εκτός από τα ενεργειακά οφέλη, ο ΥΒΣ της Ικαρίας παρέχει επίσης εγγυημένη ισχύ στο σύστημα, καταργώντας την ανάγκη για εγκατάσταση επιπλέον συμβατικής μονάδας παραγωγής αντίστοιχης ισχύος στο μέλλον. Η εγγυημένη αυτή ισχύς ισούται με 2.66 MW (και όχι με την ονομαστική 2x1.55 MW του ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας³⁶ (βλ. [102])), η οποία αποτελεί τη μέγιστη ισχύ εξόδου του ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας υπό συνθήκες ελάχιστου υδραυλικού ύψους (ελάχιστη στάθμη νερού στη δεξαμενή Προεσπέρας, βλ. Παράρτημα 1).

Αξίζει επίσης να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι από τη στιγμή που βάσει των θεωρούμενων τιμολογήσεων δίνεται προτεραιότητα στην άντληση για την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής, ο ΥΒΣ της Ικαρίας (αν αμελήσουμε τον ΥΗΣ Προεσπέρας) αποτελεί ουσιαστικά έναν αιολικό σταθμό εξοπλισμένο με εγκαταστάσεις αποθήκευσης συνδεδεμένες εικονικά σε σειρά, καθώς η παραγόμενη αιολική ενέργεια πρακτικά πρώτα αντλείται και μετά παρέχεται στο φορτίο. Και μια αποδοτική πολιτική διαχείρισης θα πρέπει να εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος του ΥΒΣ. Πράγματι, οι επιτυγχανόμενοι συντελεστές χρησιμοποίησης είναι περίπου 29% και 43% για τη χαμηλή και υψηλή χρονοσειρά ανέμου αντίστοιχα, ενώ η απορριπτόμενη αιολική ενέργεια σε ετήσια βάση είναι μόλις 1.5% και 3.5% ως προς τη διαθέσιμη. Προφανώς, η ενέργεια που παρέχεται τελικά στο φορτίο είναι μειωμένη, λόγω των αναπόφευκτων απωλειών στα συστήματα αντλιοσταμείωσης (μέση τιμή του συντελεστή απόδοσης του συνολικού κύκλου άντλησης-υδροηλεκτρικής παραγωγής μικρότερο του 60%, βλ. [102] και Παράρτημα 1).

Στο Σχήμα 5.16 παρατίθενται οι ετήσιες καμπύλες διάρκειας της απορροφούμενης ισχύος του αντλιοστασίου, καθώς και της δυνάμενης και πραγματικής ισχύος εξόδου του Α/Π του ΥΒΣ. Απόρριψη αιολικής ισχύος για άντληση προκύπτει όταν η διαθέσιμη ξεπερνά την πραγματική μέγιστη ισχύ των αντλιών (περίπου 2.2 MW). Το μεγαλύτερο όμως τμήμα της περισσευούμενης αυτής αιολικής ισχύος (επιφάνεια του Σχήματος 5.16 μεταξύ της δυνάμενης αιολικής ισχύος και της ισχύος των αντλιών) παρέχεται απ' ευθείας στο φορτίο στα πλαίσια των λειτουργικών καταστάσεων Mode 2 και 3, όποτε αυτό είναι δυνατό. Συνεπώς οι πραγματικές απορρίψεις αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα μειωμένες (μικρή επιφάνεια του Σχήματος 5.16 μεταξύ της δυνάμενης και της πραγματικής ισχύος εξόδου του ΥΒΣ).

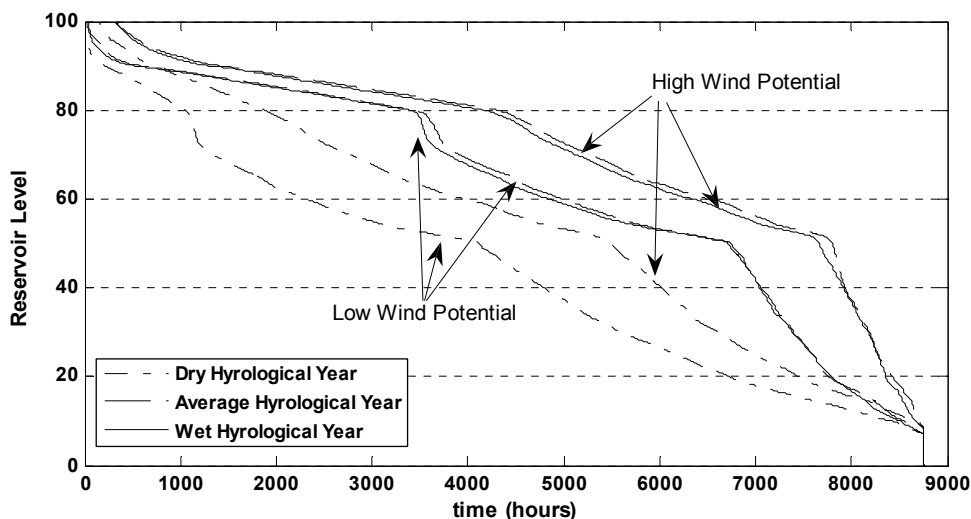


Σχήμα 5.16. Ετήσιες καμπύλες διάρκειας της απορροφούμενης ισχύος του αντλιοστασίου, καθώς και της δυνάμενης και πραγματικής ισχύος εξόδου του Α/Π του ΥΒΣ, [34]

³⁶ Η ισχύς του ΥΗΣ Προεσπέρας δε λαμβάνεται υπόψη στον καθορισμό της εγγυημένης ισχύος του ΥΒΣ, καθώς τη θερινή περίοδο, όταν και θα ζητείται βασικά εγγυημένη ισχύς και ενέργεια από το ΔΜΔΝ, αυτός θα είναι εκτός λειτουργίας.

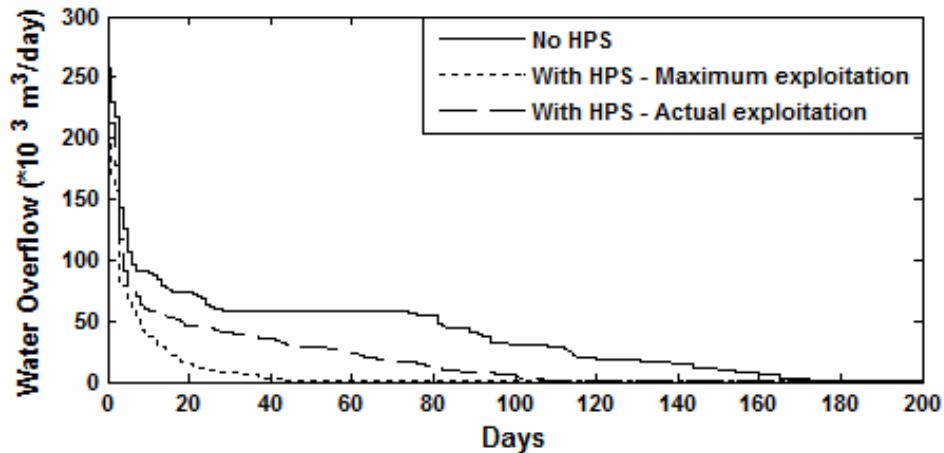
Απορρίψεις αιολικής ενέργειας μπορεί να προκύψουν επίσης και λόγω πληρότητας της δεξαμενής Προεσπέρας. Ωστόσο, η διαστασιολόγηση των δεξαμενών σε συνάρτηση με την προταθείσα πολιτική εσωτερικής λειτουργίας της ενότητας 5.6.2, συνεπάγονται πολύ χαμηλές απορρίψεις αυτού του τύπου. Αυτό διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.17 όπου απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας της πληρότητας της δεξαμενής Προεσπέρας για τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης. Η χωρητικότητα της δεξαμενής εξαντλείται για ένα πολύ μικρό ποσοστό του χρόνου (λιγότερο του 2%), αλλά ακόμη και τότε υπάρχει πάντα η δυνατότητα της απ' ευθείας έγχυσης της αιολικής ενέργειας στο φορτίο στα πλαίσια των Modes 2 και 3.

Η αποδοτικότητα, από την άλλη του ΥΒΣ ως μικρού ΥΗΣ, αξιολογείται από την ανάλυση των υπερχειλίσεων³⁷ του ταμιευτήρα Πεζίου, των οποίων οι ετήσιες καμπύλες διάρκειας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.18 για τις συνθήκες μέσης υγρότητας, με και χωρίς τον ΥΒΣ. Η επιφάνεια μεταξύ της συνεχούς και της διακεκομμένης γραμμής του σχήματος, αναπαριστά το ποσό των υπερχειλίσεων που αξιοποιήθηκε από τον ΥΒΣ (περίπου 48%). Η γραμμή με τις κουκίδες αντιστοιχεί στο υποθετικό σενάριο της υδροηλεκτρικής λειτουργίας χωρίς περιορισμούς, οποτεδήποτε υπάρχει περίσσεια νερών στον ταμιευτήρα Πεζίου. Αποτελεί το άνω όριο αξιοποίησης των υπερχειλίσεων (82%) για τη δεδομένη διαστασιολόγηση των ΥΗΣ, το οποίο δεν είναι εφικτό στην πράξη λόγω των περιορισμών του συστήματος ισχύος του νησιού και της ανάγκης να ενσωματωθεί και η λειτουργία της αντλησιοταμίευσης κάνοντας χρήση της ίδιας υδραυλικής υποδομής (δεξαμενές, στροβίλους, αγωγούς προσαγωγής νερού).



Σχήμα 5.17. Ετήσιες καμπύλες διάρκειας της πληρότητας της δεξαμενής Προεσπέρας για τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης. [34]

³⁷ Υπερχειλίσεις συμβαίνουν όταν οι εισροές στον ταμιευτήρα Πεζίου ξεπερνούν τις εκροές διαμέσου του αγωγού προσαγωγής, γεμίζοντας σταδιακά τον ταμιευτήρα μέχρι τη μέγιστη χωρητικότητά του. Στη συνέχεια, η περίσσεια νερού υπερχειλίζει τον ταμιευτήρα, χωρίς να αξιοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ή για οποιοδήποτε άλλο σκοπό, όπως άρδευση).



Σχήμα 5.18. Αξιοποίηση του υδραυλικού δυναμικού. Ετήσιες καμπύλες διάρκειας των υπερχειλίσεων του ταμιευτήρα Πεζίου (συνθήκες μέσης υγραρότητας), με και χωρίς το ΥΒΣ, [34, 105].

5.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις της λειτουργίας τριών ΜΔΝ, της Κρήτης, της Λέσβου και της Καρπάθου, ως αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μεγάλου, μέσου και μικρού νησιωτικού συστήματος αντίστοιχα, με ενταγμένους τυπικούς ΥΒΣ, εφαρμόζοντας την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του Κεφαλαίου 4. Επίσης παρατέθηκαν αποτελέσματα από την ανάλυση της πραγματικής εφαρμογής του ΥΒΣ της Ικαρίας. Σκοπός της διερεύνησης του παρόντος κεφαλαίου ήταν η αξιολόγηση της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης και η διερεύνηση των αναμενόμενων επιπτώσεων από την ένταξη και λειτουργία των ΥΒΣ στο ενεργειακό ισοζύγιο και την οικονομικότητα των συστημάτων παραγωγής. Επίσης πραγματοποιήθηκε ενδεικτική αξιολόγηση της βιωσιμότητας των επενδύσεων για ΥΒΣ. Από την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η εγκατάσταση ΥΒΣ σε ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της διείσδυσης ενέργειας ΑΠΕ και συνεπώς στη μείωση της συμβατικής παραγωγής και των εκπομπών CO_2 . Συνεπώς, η αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας μέσω αντλησιοταμιευτικών συστημάτων, φαίνεται να αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την αύξηση της διείσδυσης ενέργειας ΑΠΕ στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από αυτά που μπορεί να επιτευχθούν αυτή τη στιγμή με την εγκατάσταση μόνον ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών. Μάλιστα στην περίπτωση του ΥΒΣ Ικαρίας, η εκτιμώμενη μείωση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου είναι της τάξης του 18% - 36%, ανάλογα με τις επικρατούσες υδρολογικές και ανεμολογικές συνθήκες, με αντίστοιχη αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού, η οποία φτάνει συνολικά μέχρι και 50%. Επίπεδα διείσδυσης εξαιρετικά υψηλά, που αν επιτευχθούν στην πράξη θα συνιστούν παγκόσμια πρωτοπορία.
- Οι ΥΒΣ μπορούν να παρέχουν εγγυημένη ισχύ, υποκαθιστώντας συμβατικές μονάδες αιχμής και αποτρέποντας την εγκατάσταση νέων συμβατικών μονάδων αντίστοιχης ισχύος.
- Με την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης, η παροχή της προσφερόμενης ενέργειας του ΥΒΣ πραγματοποιείται κατά τρόπο απόλυτα προσαρμοσμένο στην ημερήσια καμπύλη φορτίου του νησιού, με σημαντική εξομάλυνση των αιχμών ή και των κοιλάδων της, διευκολύνοντας και καθιστώντας οικονομικότερη τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής.
- Η επίπτωση των ΥΒΣ στη λειτουργία των λοιπών αιολικών εγκαταστάσεων δεν είναι αξιοσημείωτη, από τη στιγμή που οι υδροστρόβιλοι λειτουργούν όπως οι συμβατικές μονάδες που υποκαθιστούν, δηλαδή με δυνατότητα υποφόρτισης και παροχή πρωτεύουσας εφεδρείας προ-

κειμένου να απορροφηθεί η αιολική παραγωγή των πάρκων εκτός ΥΒΣ. Μάλιστα αν τηρούνται οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3 ώστε οι ΥΒΣ ως ενιαίες μονάδες παραγωγής, να παρουσιάζουν παρόμοια δυναμική απόκριση με τις συμβατικές μονάδες, τότε δεν αναμένεται καμία αρνητική επίπτωση στους συντελεστές χρησιμοποίησης των υφιστάμενων Α/Π. Σε αντίθετη περίπτωση οι χαμηλότεροι συντελεστές δυναμικής διείσδυσης των υδροστροβίλων θα επιφέρουν μειώσεις στις ΣΑΩΛ των Α/Π, αυξανόμενες με το μέγεθος του ΥΒΣ, οι οποίες εν μέρει αντισταθμίζονται στην περίπτωση των υδροστροβίλων τύπου Pelton από τα χαμηλά τους τεχνικά ελάχιστα. Γενικότερα πάντως, για μειωμένους συντελεστές δυναμικής διείσδυσης των υδροστροβίλων μέχρι 15%, δηλ. στα επίπεδα που προέκυψαν από τη δυναμική ανάλυση του Κεφαλαίου 3, δε φαίνεται να προκύπτουν μειώσεις της αποδοτικότητας των υφιστάμενων Α/Π σε μη αποδεκτά επίπεδα.

- Με τη νέα πολιτική διαχείρισης επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της απορροφούμενης ενέργειας από το δίκτυο για άντληση. Αυτό διότι ο ΔΜΔΝ απαιτεί εγγυημένη ενέργεια από τον ΥΒΣ μόνο τις μέρες που κρίνει ότι είναι απαραίτητη προκειμένου να καλυφθεί αξιόπιστα το προβλεπόμενο φορτίο ζήτησης και όχι σε ημερήσια βάση. Επιπλέον, η δήλωση φορτίου του ΥΒΣ δεσμεύεται από την απαίτηση εγγυημένης ενέργειας που θέτει ο ΔΜΔΝ, αποτρέποντας έτσι την άντληση με απορρόφηση συμβατικής παραγωγής και τη συνακόλουθη απόδοση της ενέργειας αυτής με σημαντικές απώλειες.
- Παρότι η παραγόμενη ενέργεια από τους στροβίλους των ΥΒΣ τιμολογείται με το υψηλό κόστος των μονάδων αιχμής, εντούτοις η αύξηση του συνολικού κόστους παραγωγής των συστημάτων είναι σχετικά μικρή όταν ακολουθείται η νέα πολιτική διαχείρισης ως προς την κατανομή της προσφερόμενης ενέργειας του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, η προσφερόμενη ενέργεια κατανέμεται στην αιχμή της ημερήσιας καμπύλης φορτίου και συνεπώς υποκαθιστά πρωτίστως ενέργεια των συμβατικών μονάδων αιχμής, με αποτέλεσμα η τιμολόγηση της ενέργειας των υδροστροβίλων να αντανακλά το πραγματικά αποφευγόμενο κόστος παραγωγής. Αν βέβαια το μέγεθος του ενταγμένου ΥΒΣ γίνει ιδιαίτερα μεγάλο συγκριτικά με το φορτίο του εκάστοτε νησιού, τότε ο ΥΒΣ δεν υποκαθιστά μόνο μονάδες αιχμής αλλά και μονάδες μέσου φορτίου ή και βάσης, ιδιαίτερα τις μέρες χαμηλού φορτίου, με αποτέλεσμα την αισθητή αύξηση του συνολικού κόστους παραγωγής.
- Η διαμόρφωση ΥΒΣ με δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης (δηλ. με ξεχωριστές υδραυλικές μηχανές για παραγωγή και άντληση) είναι σαφώς προτιμητέα, αφού επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση ικανοποιητικός βαθμός αξιοποίησης της παραγωγής των Α/Π του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής χρησιμοποίησης των αιολικών του ΥΒΣ προσεγγίζει αυτόν των λοιπών Α/Π του νησιού (της τάξης του 30%), ενώ η καθαρή προσφερόμενη ενέργεια στο σύστημα, μετά τη διακίνηση της αιολικής παραγωγής μέσω των συστημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης, αντιστοιχεί σε ισοδύναμες τιμές συντελεστή χρησιμοποίησης της τάξης του 20%. Αντίθετα οι ΥΒΣ με αναστρέψιμες μηχανές, χωρίς δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης, χαρακτηρίζονται από χαμηλό βαθμό αξιοποίησης της δεδομένης αιολικής παραγωγής (περίπου στα 2/3 των τιμών για ΥΒΣ με δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης), γεγονός αρνητικό όχι μόνο για την οικονομικότητα του ΥΒΣ αλλά και για τον επιδιωκόμενο στόχο της αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο των νησιών.
- Συγκρίνοντας τις δύο προτεραιότητες στην αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ (άντληση ή απ' ευθείας έγχυση), προέκυψε ότι όταν δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση (κάτι που θα επιλέγεται από τον υβριδικό παραγωγό σε περίπτωση χαμηλών τιμολογήσεων για τις ενέργειές του) προκύπτουν ελαφρώς μεγαλύτερες μειώσεις της συμβατικής ενέργειας και παράλληλα μικρότερες ποσοστιαίες αυξήσεις του συνολικού κόστους του συστήματος.
- Οι επενδύσεις για ΥΒΣ στα νησιωτικά συστήματα με βάση το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, παρουσιάζουν αξιόλογο οικονομικό ενδιαφέρον, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό εσωτερικό βαθμό απόδοσης και μικρή περίοδο αποπληρωμής, ακόμη και με συντηρητικές εκτιμήσεις ως προς

το ποσοστό επιδότησης του επενδυτικού τους κόστους. Επισημαίνεται ότι η αναμενόμενη ανοδική πορεία των τιμών των συμβατικών καυσίμων, καθώς και των δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων, θα βελτιώσει περαιτέρω τους οικονομικούς δείκτες των επενδύσεων για ΥΒΣ.

- Γενικότερα, με την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία των νησιωτικών συστημάτων με την ενσωμάτωση οποιουδήποτε μεγέθους ΥΒΣ. Κύριοι περιορισμοί στο μέγιστο μέγεθος ΥΒΣ που μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα ΜΔΝ, φαίνεται πως είναι:
 - Η αύξηση του κόστους παραγωγής του νησιού.
 - Η βιωσιμότητα της επένδυσης για μεγάλους ΥΒΣ λόγω κορεσμού στην απορρόφηση της ενέργειάς τους από το σύστημα.
 - Η μείωση των συντελεστών χρησιμοποίησης των λοιπών Α/Π, σε περίπτωση που ο ΥΒΣ χαρακτηρίζεται από υποδεέστερη δυναμική απόκριση σε σχέση με τις υποκαθιστάμενες συμβατικές μονάδες.

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΥΒΣ

Όπως διαπιστώθηκε από τα προηγούμενα κεφάλαια, οι ΥΒΣ φαίνεται να αποτελούν μια ρεαλιστική και εφικτή λύση για την επίτευξη υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, παρουσιάζοντας παράλληλα ιδιαίτερο επενδυτικό ενδιαφέρον, υπό την προϋπόθεση όμως ότι αυτοί είναι κατάλληλα διαστασιολογημένοι. Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται διεξοδικά το θέμα της βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από διάφορες οπτικές και για πληθώρα σεναρίων προκειμένου να προκύψουν ορισμένα γενικευμένα συμπεράσματα επί του ζητήματος.

Σε κάθε περίπτωση, η διαστασιολόγηση των διαφόρων συνιστωσών ενός ΥΒΣ εξαρτάται από την υιοθετηθείσα πολιτική διαχείρισης, το ύψος του επενδυτικού τους κόστους και των τιμολογήσεων ενέργειας και ισχύος του ΥΒΣ, καθώς και από τα θεωρούμενα κριτήρια (στόχους) βελτιστοποίησης. Στην παρούσα ανάλυση υιοθετείται η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του Κεφαλαίου 4. Επίσης το υπόψη πρόβλημα εξετάζεται από διάφορες οπτικές όσον αφορά τους αντικειμενικούς στόχους βελτιστοποίησης: α) Οπτική επενδυτή, όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης της επένδυσης. β) Οπτική του συστήματος, όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της διείσδυσης ΑΠΕ με το μικρότερο δυνατό κόστος παραγωγής για το σύστημα. Η δεύτερη οπτική αποτελεί ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης και θα μπορούσε να υιοθετηθεί από ρυθμιστικές αρχές ή διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, στα πλαίσια της αναζήτησής τους για λύσεις που θα επιφέρουν υψηλές διεισδύσεις ΑΠΕ, κρατώντας όμως παράλληλα υπό έλεγχο το κόστος ηλεκτροπαραγωγής το οποίο τελικά επιβαρύνει τους καταναλωτές.

Η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) και με εφαρμογή στο σύστημα της Λέσβου, ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μέσου νησιού, με δεδομένα του έτους 2010.

6.1 Περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης ενός ΥΒΣ που πρόκειται να εγκατασταθεί στη Λέσβο. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με οικονομικά κυρίως, αλλά και ενεργειακά κριτήρια, για διάφορα σενάρια και οπτικές του προβλήματος. Η ανάλυση πραγματοποιείται για την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης του Κεφαλαίου 4 και αφορά ΥΒΣ με ξεχωριστές υδραυλικές μηχανές για παραγωγή και άντληση (και άρα με δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης), κάτι που στο Κεφάλαιο 5 αποδείχτηκε ενεργειακά αλλά και οικονομικά αποδοτικότερο. Επίσης, στα βασικά σενάρια της παρούσας διερεύνησης θεωρείται ότι τηρούνται οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3, ώστε η υδροαιολική συνεργασία να είναι τεχνικά εφικτή και επίσης ο ΥΒΣ να παρουσιάζει παρόμοια δυναμική απόκριση σε σχέση με τις υποκαθιστάμενες συμβατικές μονάδες. Ωστόσο για την πληρότητα της ανάλυσης εξετάζονται και σενάρια που δεν ισχύουν οι συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Τα δεδομένα που ελήφθησαν υπόψη για το σύστημα της Λέσβου αφορούν την κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος του νησιού το έτος 2010. Τα αναλυτικά στοιχεία για τη σύνθεση του συστήματος παραγωγής, τις ειδικές καταναλώσεις των συμβατικών μονάδων, το είδος και τις τιμές των καυσίμων τους, τις εκπομπές ρύπων ανά μονάδα και το κόστος αγοράς δικαιωμάτων ρύπων, καθώς και οι χρονοσειρές φορτίου και ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται στο Παράρτημα 1. Αναφορικά με τις τιμές συμβατικών καυσίμων (μαζούτ και diesel), αυτές εκτιμήθηκαν θεωρώντας ότι η τιμή του αργού πετρελαίου Brent κυμαίνεται στα 90\$ ανά βαρέλι (αντιπροσωπευτική τιμή για τα επόμενα χρόνια). Ως προς την τιμολόγηση της παραγόμενης ενέρ-

γιας από Α/Π χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 99.44 €/MWh, που ίσχυε για το έτος 2010 βάσει της Υπουργικής Απόφασης Δ6/Φ1/14.12.2009.

Όσον αφορά τις τιμολογήσεις ενέργειας και ισχύος του ΥΒΣ, λαμβάνονται υπόψη τρία σενάρια (χαμηλών, ενδιάμεσων και υψηλών τιμών) που καλύπτουν όλο το εύρος πιθανών τιμολογήσεων για ΥΒΣ σε ΜΔΝ. Στο σενάριο χαμηλών τιμών χρησιμοποιούνται οι τιμές που ανακοίνωσε η ΡΑΕ με σχετική απόφαση, [97], για ΥΒΣ στη Λέσβο και οι οποίες αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές για την περίπτωση νησιών με συμβατικές μονάδες που καταναλώνουν το φθινό καύσιμο μαζούτ. Το σενάριο υψηλών τιμών αντιστοιχεί στην περίπτωση που όλες οι συμβατικές μονάδες του νησιού καταναλώνουν το ακριβότερο καύσιμο diesel. Τέλος εξετάζεται και το σενάριο των ενδιάμεσων τιμών, οι οποίες θεωρούνται ως αντιπροσωπευτικές μέσες τιμές για την αποζημίωση των ΥΒΣ στα ΜΔΝ. Σημειώνεται ότι σε όλα τα σενάρια της παρούσας ανάλυσης έχει θεωρηθεί ότι το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος είναι ίσο με την πραγματικά εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ, όπως αυτή καθορίζεται στην §5.2.1. Επίσης ότι η ενέργεια του Α/Π του ΥΒΣ θα τιμολογείται με βάση το εκάστοτε ισχύον τιμολόγιο για σταθμούς ΑΠΕ στα ΜΔΝ³⁸, δηλ. στην προκειμένη περίπτωση 99.44 €/MWh.

Πίνακας 6.1. Θεωρούμενα σενάρια τιμολογήσεων της ενέργειας και ισχύος των ΥΒΣ

		Τιμολογήσεις		
		Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές
Ενέργεια ΥΗΣ	€	125	200	324 ³⁹
Ενέργεια αντλιοστάσιου	€	100	160	259
Ενέργεια Α/Π	€	99.44	99.44	99.44
Διαθεσιμότητα ισχύος	€/kW-year	165	165	165

Όσον αφορά τις μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης, αυτές είναι οι εξής:

- Ονομαστική ισχύς του Α/Π του ΥΒΣ, P_W
- Ονομαστική ισχύς του αντλιοστάσιου του ΥΒΣ, P_P
- Ονομαστική ισχύς των υδροστρόβιλων του ΥΗΣ του ΥΒΣ, P_H
- Χωρητικότητα της άνω δεξαμενής του ΥΒΣ, V_R . Η χωρητικότητα της κάτω δεξαμενής θεωρείται ίση με την αντίστοιχη της άνω.

Σημειώνεται ότι στο παρόν κεφάλαιο επιδιώκεται μια διεξοδική διερεύνηση θεμάτων βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από διάφορες οπτικές για την εξαγωγή κάποιων γενικευμένων συμπερασμάτων και όχι να εξεταστεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση κάποιου συγκεκριμένου έργου. Συνεπώς η βελτιστοποίηση περιορίζεται στη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ και δεν επεκτείνεται σε συγκεκριμένες συνθέσεις και τεχνικά χαρακτηριστικά που θα είχε νόημα για ένα συγκεκριμένο έργο με δεδομένες υψομετρικές διαφορές και μήκη αγωγών. Γι' αυτό το λόγο στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιούνται απλουστευμένα μοντέλα για τον ΥΒΣ, που κάνουν χρήση μέσων τιμών των συνολικών συντελεστών απόδοσης, ενώ η χωρητικότητα της άνω δεξαμενής εκφράζεται απ' ευθείας σε ενέργεια (MWh). Για τη μετατροπή στη συνέχεια της ενέργειας αυτής σε μονάδες όγκου ώστε να είναι δυνατή η κοστολόγηση των δεξαμενών, που είναι απαραίτητη για την οικονομική αξιολόγηση του έργου του ΥΒΣ, απαιτείται κάποια εκτίμηση για

³⁸ Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής εκδόθηκαν από τη ΡΑΕ Άδειες Παραγωγής για ΥΒΣ σε Κρήτη και Λέσβο που υιοθετούν την υψηλή τιμολόγηση της ενέργειας των υδροστρόβιλων για το 50% της απ' ευθείας εγγεώμενης στο δίκτυο αιολικής παραγωγής. Η προσέγγιση αυτή διαφοροποιείται από τις παραδοχές της παρούσας ανάλυσης και δεν περιλαμβάνεται στη μελέτη, καθώς προέκυψε σε πολύ προχωρημένο στάδιο εκπόνησης της διατριβής.

³⁹ Έχει ληφθεί υπόψη ότι η τιμή παραγωγής του ΥΗΣ θα πρέπει, βάσει του Νόμου 3468/2006, [1], να είναι μεγαλύτερη της τιμής άντλησης κατά 25% τουλάχιστον.

την υψομετρική διαφορά μεταξύ άνω δεξαμενής και υδροστρόβιλων. Στην παρούσα ανάλυση το ύψος αυτό θεωρήθηκε ίσο με 400 m, ως μια αντιπροσωπευτική τιμή βάσει πραγματικών δεδομένων από έργα ΥΒΣ υπό κατασκευή. Γι' αυτό το ύψος και για δεδομένο ενεργειακό περιεχόμενο, υπολογίζεται ο ζητούμενος όγκος της άνω δεξαμενής από τη σχέση (6.1):

$$V_R = \frac{E_R \cdot 3600}{g \cdot H_0} \quad (6.1)$$

όπου:

- V_R : όγκος δεξαμενής σε m^3
 E_R : χωρητικότητα δεξαμενής σε ενέργεια (MWh)
 g : επιτάχυνση της βαρύτητας
 H_0 : ονομαστική υψομετρική διαφορά μεταξύ άνω δεξαμενής και υδροστρόβιλων

Σχετικά με τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος, αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θεωρούμενη οπτική του προβλήματος, όπως αναλυτικά περιγράφεται στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

6.1.1 Οπτική επενδυτή

Αυτό που ενδιαφέρει τον επενδυτή είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης της επένδυσής του. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση, αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) της επένδυσης για ΥΒΣ, ο οποίος αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα χρήσης του κεφαλαίου, γεγονός που κυρίως ενδιαφέρει έναν επενδυτή. Ένας άλλος δείκτης που συχνά χρησιμοποιείται για την οικονομική αξιολόγηση των επενδύσεων, είναι η καθαρή παρούσα αξία (NPV) μιας επένδυσης. Ωστόσο προτιμήθηκε ο IRR, καθώς ο δείκτης NPV είναι εξαρτώμενος από το επιτόκιο αναγωγής που η επιλογή του είναι σχετικά αυθαίρετη και εξαρτάται επίσης από το μέγεθος της αρχικής επένδυσης. Αντίθετα ο δείκτης IRR είναι ανεξάρτητος του μεγέθους της αρχικής επένδυσης και δεν απαιτεί παρά γνώση του ελάχιστου αποδεκτού βαθμού απόδοσης για σύγκριση.

Συνεπώς το πρόβλημα βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\min_{x \in R^4} F(x) = \min_{x \in R^4} [-IRR], \quad l \leq x \leq u \quad (6.2)$$

όπου $x = [P_W, P_P, P_H, V_R]$ είναι το διάνυσμα των τεσσάρων μεταβλητών του προβλήματος, l , u , το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα του εύρους τιμών τους και $F(x)$ η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, ίση με την αρνητική τιμή του IRR της επένδυσης, καθώς στόχος είναι η ελαχιστοποίηση.

Για τον υπολογισμό του IRR για κάθε πιθανή διαστασιολόγηση ΥΒΣ που εξετάζεται, χρησιμοποιήθηκε η διαθέσιμη συνάρτηση της Matlab, *irr.m*, που ουσιαστικά επιλύει την εξίσωση (Π2.10) του Παραρτήματος 2 και δέχεται ως ορίσματα τα ίδια κεφάλαια του κόστους της επένδυσης ($K_{0,i}$) και τις καθαρές ταμειακές ροές (KTP_i) για κάθε έτος της περιόδου εξέτασης.

Οι KTP_i υπολογίζονται βάσει των σχέσεων του Παραρτήματος 2. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την οικονομική αξιολόγηση δίνονται στον Πίνακα 6.1. Όσον αφορά τα ετήσια έσοδα του εκάστοτε εξεταζόμενου ΥΒΣ που απαιτούνται για την εκτίμηση των KTP_i , αυτά υπολογίζονται κάθε φορά μέσω προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας του συστήματος της Λέσβου με τον ΥΒΣ, κάνοντας χρήση του λογιστικού μοντέλου προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5. Σημειώνεται ότι τα έσοδα του ΥΒΣ θεωρούνται προσεγγιστικά σταθερά κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του. Επίσης οι KTP_i εκφράζονται σε σταθερές τιμές και το επιτόκιο αναγωγής είναι το πραγματικό (αποπληθωρισμένο) και όχι το ονομαστικό, προκειμένου να μη χρειάζεται να γίνει εκτίμηση για την εξέλιξη του πληθωρισμού κατά τη διάρκεια της περιόδου εξέ-

τασης, κάτι το οποίο είναι αρκετά δύσκολο. Η χρησιμοποίηση σταθερών τιμών για την οικονομική αξιολόγηση βασίζεται στην παραδοχή ότι τα αναμενόμενα έσοδα και έξοδα του ΥΒΣ θα μεταβάλλονται με τον ίδιο ρυθμό, παρακολουθώντας τον πληθωρισμό, και ότι επίσης ο πληθωρισμός θα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα⁴⁰.

Πίνακας 6.1. Δεδομένα για την οικονομική αξιολόγηση

Διάρκεια οικονομικής ζωής⁴¹	Έτη	20
Επιτόκιο αναγωγής	%	8
Ίδια κεφάλαια	%	25
Δάνειο	%	75
Επιτόκιο δανείου	%	7
Διάρκεια δανείου	Έτη	15
Συντελεστής φορολογίας	%	25
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (% κόστους επένδυσης)	%	2

Για τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης του εκάστοτε εξεταζόμενου ΥΒΣ, C_{HPS} , γίνεται χρήση εμπειρικών προσεγγιστικών σχέσεων που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα από άλλα έργα, καθώς και σε βιβλιογραφικές πηγές, [38, 60]. Όλα τα παρακάτω κόστη δίνονται σε €, οι ισοσχείες των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ σε kW και ο όγκος των δεξαμενών σε m^3 .

- Κόστος κατασκευής Α/Π: $C_W = 1500 \cdot P_W$ (6.3)

- Κόστος κατασκευής αντλιοστάσιου: $C_P = 600 \cdot P_P^{0.95}$ (6.4)

- Κόστος υδροστρόβιλων του ΥΗΣ: $C_H = 700 \cdot P_H^{0.95}$ (6.5)

- Κόστος κατασκευής των δύο δεξαμενών: $C_R = 2 \cdot 420 \cdot V_R^{0.7}$ (6.6)

Ο συντελεστής 2 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους και των δύο δεξαμενών, της άνω και της κάτω, από τη στιγμή που οι δύο δεξαμενές θεωρούνται πανομοιότυπες.

- Κόστος Υ/Σ ζεύξης και έργων σύνδεσης: $C_{con} = \begin{cases} 1 \cdot 10^6 + 40 \cdot P_H, & 0 < P_H < 5000 \\ 2 \cdot 10^6 + 40 \cdot P_H, & 5000 \leq P_H < 10000 \\ 5 \cdot 10^6 + 40 \cdot P_H, & 10000 \leq P_H \end{cases}$ (6.7)

Οι εξισώσεις (6.7) αποτελούνται από ένα σταθερό όρο και ένα μεταβλητό όρο που είναι ανάλογος της εγκατεστημένης ισχύος του ΥΗΣ. Ο εκάστοτε σταθερός όρος των εξισώσεων αφορά τα πάγια έξοδα που εξαρτώνται ελάχιστα από τη διαμόρφωση του ΥΒΣ και αφορούν:

- Έξοδα κατασκευής του Υ/Σ ζεύξης,
- Έξοδα κατασκευής της γραμμής σύνδεσης του Α/Π του ΥΒΣ στον Υ/Σ ζεύξης,
- Έργα σύνδεσης του ΥΒΣ, τα οποία κλιμακώνονται ανάλογα με την τάξη μεγέθους του ΥΗΣ (το μέγεθος του οποίου είναι αυτό που θα καθορίζει βασικά τον τρόπο σύνδεσης του ΥΒΣ). Συγκεκριμένα:
 - Για ΥΗΣ μέχρι 5 MW, ο ΥΒΣ θα συνδέεται σε υφιστάμενη γραμμή ΜΤ.

⁴⁰ Σε διαφορετική περίπτωση θα προκαλείται σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων της οικονομικής αξιολόγησης βάσει σταθερών και τρέχουσων τιμών αντίστοιχα, λόγω των αποσβέσεων (που παραμένουν σταθερές, σε αντίθεση με τα έσοδα και έξοδα σε τρέχουσες τιμές) και κατ' επέκταση της φορολογίας, [106, 107].

⁴¹ Η διάρκεια οικονομικής ζωής της επένδυσης θεωρήθηκε ίση με 20 έτη που αντιστοιχεί στη διάρκεια της σύμβασης αγοραπωλησίας.

- Για ΥΗΣ από 5 μέχρι 10 MW, ο ΥΒΣ θα συνδέεται με αποκλειστική γραμμή ΜΤ στους ζυγούς ΜΤ του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ.
- Για ΥΗΣ μεγαλύτερους των 10 MW, ο ΥΒΣ θα συνδέεται στην ΥΤ.

Ο μεταβλητός όρος αφορά κυρίως τη διαφοροποίηση της διαστασιολόγησης των έργων σύνδεσης ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του ΥΗΣ, όπου ο συντελεστής 40 προέκυψε εμπειρικά βάσει πραγματικών δεδομένων.

- Λοιπά κόστη: $C_{other} = 0.2 \cdot C_{HPS}$ (6.8)

Τα λοιπά κόστη αφορούν τα κόστη σωληνώσεων, κτηρίων και διαμορφώσεων, δρόμων και αγοράς γης, μελετών και επίβλεψης, κλπ.. Θεωρήθηκε εμπειρικά ότι είναι της τάξης του 20% του συνολικού κόστους του ΥΒΣ, βάσει πραγματικών δεδομένων.

Συνεπώς η συνάρτηση συνολικού κόστους του ΥΒΣ είναι η εξής:

$$C_{HPS} = \frac{C_W + C_P + C_H + C_R + C_{con}}{0.8} \quad (6.9)$$

Όσον αφορά τα σενάρια που εξετάζονται στα πλαίσια του προβλήματος βελτιστοποίησης από την οπτική του επενδυτή, αυτά κατά σειρά είναι τα εξής:

- Εξετάζεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης για τα τρία σενάρια τιμολογήσεων των ενεργειών του ΥΒΣ.
- Εξετάζεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων για τα τρία σενάρια τιμολογήσεων αν δεν τηρούνται οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3, οπότε δεν είναι εφικτή η υδροοιολική συνεργασία και επίσης ο ΥΒΣ παρουσιάζει αργότερη δυναμική απόκριση σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες, με θεωρούμενο δυναμικό όριο διείσδυσης της τάξης του 15% (η μισή δηλαδή τιμή συγκριτικά με την αντίστοιχη των συμβατικών).
- Πραγματοποιείται υποτυπώδης ανάλυση ευαισθησίας για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στον προσδιορισμό των βέλτιστων μεγεθών ενός ΥΒΣ, για το σενάριο της ενδιάμεσης τιμολογήσης. Οι παράμετροι αυτές αφορούν:
 - Το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος, αν θα είναι δηλ. ίσο με την πραγματικά εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ, όπως αυτή καθορίζεται στην §5.2.1, ή με την εκάστοτε ονομαστική ισχύ του ΥΗΣ.
 - Την τιμή αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος
 - Τη μέση ταχύτητα ανέμου του νησιού
 - Τα μοναδιαία κόστη των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ
- Εξετάζονται σενάρια όπου οι 3 από τις 4 μεταβλητές του προβλήματος είναι ελεύθερες και η μία δεσμευμένη, για την περίπτωση της ενδιάμεσης τιμολογήσης. Πιο αναλυτικά:
 - Δεδομένη η χωρητικότητα (ή το ισοδύναμο ενεργειακό περιεχόμενο) της άνω δεξαμενής, έστω ίση με 250 MWh. Το σενάριο αυτό αντικατοπτρίζει την περίπτωση που υφίστανται τοπογραφικοί περιορισμοί, δηλαδή η θέση και χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι κατά κάποιον τρόπο καθορισμένα και αναζητείται το βέλτιστο μέγεθος των λοιπών μεγεθών.
 - Δεδομένη η εγκατεστημένη ισχύς του Α/Π του ΥΒΣ, έστω ίση με 12.5 MW. Αυτό το σενάριο περιγράφει την περίπτωση όπου υπάρχει ήδη εγκατεστημένο ένα Α/Π δεδομένης δυναμικότητας και επιθυμείται η μετατροπή του σε υβριδική μονάδα παραγωγής.
 - Δεδομένο το μέγεθος του ΥΗΣ, έστω ίσο με 12.5 MW. Το σενάριο αυτό αφορά την περίπτωση όπου, για την εξασφάλιση της επάρκειας ισχύος παραγωγής του νησιού, προκηρύσσεται διαγωνισμός για ΥΒΣ συγκεκριμένης εγγυημένης ισχύος⁴².

⁴² Βέβαια η εγγυημένη για το σύστημα ισχύς του ΥΒΣ (που θα συνεπάγεται ισόποση μείωση σε απαιτήσεις συμβατικής ισχύος για την κάλυψη του φορτίου) μπορεί να μην είναι κατ' ανάγκη ίση με την ονομαστική του ΥΗΣ αν ο ΥΒΣ δεν έχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά (μεγέθη αντλιών, χωρητικότητα δεξαμενών), σύμφωνα με την §5.2.1.

6.1.2 Οπτική συστήματος

Από διαφορετική οπτική θα εξετάζοταν το πρόβλημα στην περίπτωση των ρυθμιστικών αρχών ή διαχειριστών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι ενδιαφέρονται για την επίτευξη υψηλών διεισδύσεων ΑΠΕ, κρατώντας όμως πάντα υπό έλεγχο το κόστος ηλεκτροπαραγωγής το οποίο τελικά επιβαρύνει τους καταναλωτές. Το τελευταίο ποσοτικοποιείται με το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost of Energy - LCOE) του συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τα σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας, καθώς και τα κόστη απόσβεσης κεφαλαίου όλων των σταθμών παραγωγής (συμβατικών και ανανεώσιμων). Εκφράζει δηλαδή το πραγματικό κόστος παραγωγής του νησιού, ανεξαρτήτως των τιμών αποζημίωσης των διαφόρων μονάδων παραγωγής που καθορίζονται από τους ρυθμιστικούς μηχανισμούς της αγοράς.

Συνεπώς η συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις και μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^4} F(x) = \min_{x \in \mathbb{R}^4} [F_1(x), F_2(x)] = \min_{x \in \mathbb{R}^4} [LCOE_S, -RES_{Pen}], \quad l \leq x \leq u \quad (6.10)$$

όπου $F(x)=[F_1(x), F_2(x)]$ είναι το διάνυσμα των αντικειμενικών συναρτήσεων, $x=[P_W, P_P, P_H, V_R]$ το διάνυσμα των τεσσάρων μεταβλητών του προβλήματος και l, u , το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα του εύρους τιμών τους. $F_1(x)=LCOE_S$ είναι η συνάρτηση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας του συστήματος και $F_2(x)=-RES_{Pen}$ η συνάρτηση της αρνητικής τιμής της εκάστοτε διεισδύσης ΑΠΕ (καθώς στόχος είναι η ελαχιστοποίηση).

Επειδή οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους, δεν υπάρχει μοναδική λύση. Σε αυτήν την περίπτωση έχει εφαρμογή η λογική των βέλτιστων κατά Pareto, [108, 109], όπου λύση του προβλήματος αποτελεί ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων κατά Pareto. Από εκεί και πέρα είναι στην κρίση του εκάστοτε μελετητή να επιλέξει τη λύση ή τις λύσεις που θεωρεί καταλληλότερες για την περίπτωση που εξετάζεται. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει υπενθύμιση κάποιων βασικών εννοιών και όρων της οικονομικής θεωρίας Pareto⁴³:

- **Υπεροχή κατά Pareto:** Ένα διάνυσμα $u=(u_1, u_2, \dots, u_k)$ υπερέχει του διανύσματος $v=(v_1, v_2, \dots, v_k)$ (συμβολίζεται με $u \prec v$) αν και μόνο αν το u είναι μερικώς μικρότερο του v , δηλ. $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}: u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, 2, \dots, k\}: u_i < v_i$.
- **Βέλτιστη λύση κατά Pareto:** Μια λύση $x \in \Omega$ (όπου Ω είναι το αποδεκτό εύρος τιμών του x βάσει των περιορισμών) είναι βέλτιστη κατά Pareto αν και μόνο αν δεν υπάρχει άλλη λύση $x' \in \Omega$ για την οποία το $v = F(x') = (f_1(x'), f_2(x'), \dots, f_k(x'))$ να υπερέχει του $u = F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$.
- **Σύνολο λύσεων Pareto:** Για ένα δεδομένο διάνυσμα αντικειμενικών συναρτήσεων $F(x)$, το σύνολο βέλτιστων λύσεων κατά Pareto (P^*) ορίζεται ως εξής: $P^* = \left\{ x \in \Omega \mid \neg \exists x' \in \Omega : F(x') \prec F(x) \right\}$.
- **Μέτωπο Pareto:** Με δεδομένα το διάνυσμα αντικειμενικών συναρτήσεων $F(x)$ και το σύνολο λύσεων Pareto P^* , το μέτωπο Pareto (PF^*) ορίζεται ως εξής: $PF^* = \left\{ u = F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \mid x \in P^* \right\}$.

Για τον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος, $F(x)$, για την εκάστοτε διαστασιολόγηση ΥΒΣ, x , απαιτείται καταρχάς προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του συστήματος της Λέσβου με τον υπόψη ΥΒΣ, κάνοντας χρήση του λογιστικού μοντέλου προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίζονται οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων από τις παρακάτω σχέσεις.

⁴³ Η συγκεκριμένη θεωρία πηγάζει από τον Ιταλό οικονομολόγο Vilfredo Pareto και έχει ευρεία εφαρμογή στην αντιμετώπιση πάσης φύσεως πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Συγκεκριμένα, το LCOE του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LCOE_S = \left[\frac{(VC_{APS} + IC_{APS} + FC_{APS}) + (IC_{RES} + OMC_{RES}) + (IC_{HPS} + OMC_{HPS} - AC)}{E_L} \right] \quad (6.11)$$

όπου:

VC_{APS} : το μεταβλητό κόστος του συμβατικού σταθμού παραγωγής, που συνίσταται από το κόστος καυσίμων, το μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το κόστος αγοράς δικαιωμάτων ρύπων

IC_{APS} : το ετήσιο κόστος απόσβεσης κεφαλαίου του συμβατικού σταθμού

FC_{APS} : το ετήσιο σταθερό κόστος λειτουργίας του συμβατικού σταθμού

IC_{RES} : το ετήσιο κόστος απόσβεσης κεφαλαίου των σταθμών ΑΠΕ εκτός ΥΒΣ

OMC_{RES} : το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης των σταθμών ΑΠΕ εκτός ΥΒΣ

IC_{HPS} : το ετήσιο κόστος απόσβεσης κεφαλαίου του ΥΒΣ

OMC_{HPS} : το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης του ΥΒΣ

E_L : το ετήσιο φορτίο ζήτησης του συστήματος – δε λαμβάνεται υπόψη το φορτίο άντλησης του ΥΒΣ

AC : το αποφευγόμενο κόστος, το οποίο δίνεται από την (6.12) και αντιστοιχεί στο ετήσιο κόστος απόσβεσης κεφαλαίου και το σταθερό κόστος συμβατικού σταθμού παραγωγής, του οποίου η εγκατάσταση αναβάλλεται για τα επόμενα χρόνια λόγω της εγκατάστασης του ΥΒΣ

$$AC = (IC_{APS} + FC_{APS}) \cdot \min\{P_{HN}, P_{CC,max}\} \quad (6.12)$$

όπου P_{HN} είναι η ονομαστική ισχύς του ΥΗΣ του ΥΒΣ και $P_{CC,max}$ το όριο εγγυημένης ισχύος για ΥΒΣ στη Λέσβο, όπως αυτό ορίστηκε στην §5.2.1 και το οποίο εξαρτάται τόσο από την ετήσια καμπύλη φορτίου του νησιού όσο και από τα χαρακτηριστικά του υπόψη ΥΒΣ.

Το ετήσιο κόστος απόσβεσης κεφαλαίου, IC , των διαφόρων σταθμών παραγωγής, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$IC = C_{0,tot} \cdot CRF(N, i) = C_{0,tot} \cdot \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (6.13)$$

όπου $C_{0,tot}$ είναι το συνολικό κόστος εγκατάστασης του υπόψη σταθμού, CRF (Capital Recovery Factor) είναι ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, N η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του σταθμού και i το επιτόκιο αναγωγής, ίσο με 8%. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του συμβατικού σταθμού θεωρήθηκε ίση με 30 έτη, των Α/Π 20 έτη και των μονάδων του ΥΒΣ (εκτός του Α/Π) 40 έτη.

Ιδιαίτερα για το ετήσιο κόστος απόσβεσης του συμβατικού σταθμού, IC_{APS} , καθώς και το σταθερό κόστος λειτουργίας του, FC_{APS} , χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία, [98], που αφορούσαν εκτιμήσεις για νεοεισερχόμενο συμβατικό σταθμό στη Λέσβο. Συγκεκριμένα, θεωρώντας επιτόκιο αναγωγής 8% και ωφέλιμη ζωή 30 έτη, το ισοδύναμο ετήσιο κεφαλαιακό κόστος εκτιμήθηκε ίσο με 111 €/kW-έτος. Το σταθερό κόστος λειτουργίας του σταθμού θεωρήθηκε ίσο με 47 €/kW-έτος⁴⁴.

Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης των Α/Π, OMC_{RES} , και του ΥΒΣ, OMC_{HPS} , θεωρήθηκε ότι θα είναι της τάξης του 2% του συνολικού τους επενδυτικού κόστους.

Όσον αφορά την επιτυγχανόμενη διείσδυση ΑΠΕ που αποτελεί τη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

⁴⁴ Σημειωτέον ότι το άθροισμα του ετήσιου κόστους απόσβεσης με το σταθερό κόστος λειτουργίας του νεοεισερχόμενου σταθμού είναι 158 €/kW-έτος, δηλ. διαφορετικό από την τιμή αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος (165 €/kW-έτος) που ισχύει σήμερα για τους ΥΒΣ στη Λέσβο και η οποία αντιστοιχεί σε ωφέλιμη διάρκεια ζωής για το σταθμό 25 έτη.

$$RES_{pen}(\%) = \frac{E_R + E_{HH} + E_{HW} - E_{HP}}{E_L} \cdot 100 \quad (6.14)$$

όπου:

E_R : η παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες ΑΠΕ εκτός ΥΒΣ

E_{HH} : η παραγόμενη ενέργεια του ΥΗΣ του ΥΒΣ

E_{HW} : η παραγόμενη ενέργεια του Α/Π του ΥΒΣ

E_{HP} : η απορροφούμενη ενέργεια του αντλιοστάσιου του ΥΒΣ

Σχετικά με τα εξεταζόμενα σενάρια στα πλαίσια της συγκεκριμένης οπτικής του προβλήματος, αυτά είναι τα εξής:

- Εξέταση του προβλήματος της βέλτιστης διαστασιολόγησης για το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης του συμβατικού σταθμού το έτος 2010, όπου οι μονάδες καταναλώνουν κατά βάση μαζούτ.
- Εξέταση του προβλήματος για το σενάριο όλες οι συμβατικές μονάδες να καταναλώνουν το πολύ ακριβότερο καύσιμο diesel.
- Εξετάζεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των δύο παραπάνω σεναρίων σε περίπτωση που δεν τηρούνται οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3, οπότε δεν είναι εφικτή η υδροαιολική συνεργασία και επίσης ο ΥΒΣ παρουσιάζει αργότερη δυναμική απόκριση σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες.

6.2 Περιγραφή των αλγόριθμων βελτιστοποίησης

Στα προηγούμενα περιγράφηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης, ορίστηκαν οι μεταβλητές του προβλήματος και παρουσιάστηκαν οι εκάστοτε αντικειμενικές συναρτήσεις ανάλογα με την εξεταζόμενη οπτική, καθώς και το πώς αυτές υπολογίζονται. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα από την οπτική του επενδυτή έγκειται στην εύρεση του κατάλληλου διανύσματος των μεταβλητών, x , που ελαχιστοποιεί τη μία και μοναδική αντικειμενική συνάρτηση, ενώ από την οπτική του συστήματος διαμορφώνεται σε πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με σκοπό την εύρεση ενός συνόλου λύσεων Pareto. Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφούν οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων.

6.2.1 Αλγόριθμος μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης

Η θεωρία της βελτιστοποίησης αποτελεί κλάδο των μαθηματικών και οι εφαρμογές της αναδεικνύονται σε πολύτιμα εργαλεία στα χέρια ερευνητών άλλων επιστημών για την επίλυση προβλημάτων. Στα πλαίσια αυτά έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνικές βελτιστοποίησης, οι οποίες μπορούν χονδρικά να κατηγοριοποιηθούν σε κλασικές ντετερμινιστικές μεθόδους και σε ευριστικές - στοχαστικές μεθόδους.

Οι κλασικές ντετερμινιστικές μέθοδοι είναι σαφώς ταχύτερες στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης και βασίζονται στην παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης, προϋποθέτοντας βέβαια τη γνώση τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης όσο και των περιορισμών σε κλειστή μορφή. Υπάρχουν ωστόσο, πολύπλοκα προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί δεν είναι ορισμένοι με αυστηρή μαθηματική σχέση, καθώς η μορφή τους εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων που μεταβάλλονται συναρτήσει των μεταβλητών βελτιστοποίησης, ενώ ο προσδιορισμός των σχέσεων που τις συνδέει είναι δύσκολος έως αδύνατος. Επιπρόσθετα, οι κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης κινδυνεύουν να εγκλωβιστούν σε τοπικό ελάχιστο ή μέγιστο χάνο-

ντας το ολικό ακρότατο. Για αυτούς τους λόγους υπάρχουν προβλήματα για τα οποία οι κλασικές μέθοδοι κρίνονται ανεπαρκείς ή ακόμα και ακατάλληλες.

Έτσι, τα τελευταία τριάντα χρόνια παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη ευριστικών – στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης και κυρίως μεθόδων βασισμένων στις αρχές της φυσικής εξέλιξης. Οι μέθοδοι αυτού του είδους λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προς επίλυση προβλήματος και εφαρμόζοντας σε αυτόν διάφορες διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντας τους προηγούμενους πληθυσμούς. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) είναι ένα παράδειγμα τέτοιας μεθόδου, που μαζί με τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming), τις Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies), τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) και το Γενετικό Προγραμματισμό (Genetic Programming) αποτελούν μια κατηγορία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων που είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms).

Η βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων (ΓΑ) αποτελεί μια στοχαστική μέθοδο συστηματικής τυχαίας αναζήτησης, η οποία αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική για την εύρεση ενός ολικού μεγίστου (ή ελαχίστου) σε ένα πολυδιάστατο πεδίο τιμών. Ο βασικός μηχανισμός τους είναι εμπνευσμένος από τη Δαρβινική θεωρία της εξέλιξης της φύσης και εφευρέτης τους θεωρείται ο John Holland, [110]. Πιο συγκεκριμένα, [111-114], οι ΓΑ διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων ο οποίος υφίσταται προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά “καλές” λύσεις αναπαράγονται ενώ οι σχετικά “κακές” απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός. Η δομή ενός απλού ΓΑ έχει σε γενικές γραμμές ως εξής, [111, 115]: Κατά τη διάρκεια της γενιάς t , ο ΓΑ διατηρεί έναν πληθυσμό $P(t)$ από n πιθανές λύσεις (άτομα): $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$. Κάθε άτομο x_i^t αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς του. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (γενιά $t+1$) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούργιο αυτόν πληθυσμό υφίστανται αλλαγές με τη βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δύο γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας κομμάτια από τους γονείς και με αυτόν τον τρόπο εξυπηρετείται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος και με αυτόν τον τρόπο εξυπηρετείται η εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό. Εκτενέστερη περιγραφή των ΓΑ με αποσαφήνιση των σχετικών εννοιών και όρων, παρατίθεται στο Παράρτημα 3.

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης των ΓΑ για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής, [111]: Καταρχάς μπορούν να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα και η εφαρμογή τους ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι ασυνεχής, μη διαφορίσιμη, στοχαστική ή εξαιρετικά μη γραμμική. Επιπλέον μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με υφιστάμενα συστήματα και μοντέλα, μην απαιτώντας την επανασχεδιάσή τους. Επίσης είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι, μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους, εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο και δεν απαιτούν περιορισμούς (π.χ. ύπαρξη παραγώγου) στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται, σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους. Τέλος, δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας καθώς η μόνη επικοινωνία των ΓΑ με το περιβάλλον τους είναι η αντικειμενική συνάρτηση, έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού και μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους, κάνουν ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας και επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.

Στην προκειμένη λοιπόν περίπτωση του πολύπλοκου προβλήματος της βέλτιστης διαστασιολόγησης ενός ΥΒΣ, η επίλυσή του με τις κλασικές μεθόδους φαντάζει αδύνατη από τη στιγμή που δεν είναι γνωστή η αντικειμενική συνάρτηση σε κλειστή μορφή. Αντιθέτως σύμφωνα με τα παραπάνω, οι ΓΑ παρουσιάζονται ως οι πλέον κατάλληλοι, με επιβεβαιωμένη την αποτελεσματικότητά τους στην επίλυση ανάλογων προβλημάτων, [38, 39, 116-118], και επιπλέον και κυριότερο είναι εύκολο να συνεργαστούν με το υφιστάμενο λογιστικό μοντέλο προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 και το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης.

Έτσι λοιπόν, για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης από την οπτική του επενδυτή, χρησιμοποιήθηκε η υφιστάμενη συνάρτηση ga του MATLAB (υφίσταται και αντίστοιχο Toolbox) που υλοποιεί ένα ΓΑ, τα βασικά βήματα του οποίου είναι τα εξής, [119]:

1. Ο αλγόριθμος ξεκινά με τη δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού πιθανών λύσεων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον τύπο αναπαράστασης των λύσεων (*double vector* ή *bit string*) καθώς και τη μέθοδο δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού. Κατά τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού λαμβάνονται υπόψη το πεδίο τιμών και οι όποιοι γραμμικοί περιορισμοί ισχύουν για τις μεταβλητές του προβλήματος.
2. Στη συνέχεια ο ΓΑ δημιουργεί μια σειρά από νέους πληθυσμούς (γενιές). Σε κάθε βήμα, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα άτομα της παρούσας γενιάς για να δημιουργήσει τον επόμενο πληθυσμό σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:
 - Αποτίμηση της καταλληλότητας του κάθε ατόμου (πιθανής λύσης) του εκάστοτε πληθυσμού βάσει της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για αυτό το άτομο.
 - Κλιμάκωση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε ατόμου, μετατρέποντάς τες σε ένα πεδίο τιμών που χαρακτηρίζει καλύτερα την “καταλληλότητα” των ατόμων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής της μεθόδου κλιμάκωσης.
 - Επιλογή των ατόμων που θα αποτελέσουν τους γονείς της επόμενης γενιάς βάσει της καταλληλότητάς τους. Η μέθοδος επιλογής εκλέγεται από το χρήστη ανάμεσα στις διαθέσιμες του MATLAB.
 - Ορισμένα από τα άτομα του εκάστοτε πληθυσμού για τα οποία προκύπτουν οι μικρότερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (και άρα είναι «καταλληλότερα»), επιλέγονται ως τα καλύτερα άτομα (elite) και περνάνε αυτούσια στην επόμενη γενιά. Ο αριθμός των elite ατόμων σε κάθε γενιά επιλέγεται από το χρήστη.
 - Από τους επιλεγμένους γονείς δημιουργούνται οι απόγονοι με χρήση των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation). Η διασταύρωση συνδυάζει δύο γονείς για τη δημιουργία ενός απογόνου με την τυχαία επιλογή ενός ή περισσοτέρων σημείων στο χρωμόσωμα (άτομο), την ανταλλαγή και τη συνένωση γονιδίων (μεταβλητών του προβλήματος). Από την άλλη, η μετάλλαξη αλλάζει την τιμή ενός τυχαία επιλεγμένου γονιδίου ενός χρωμοσώματος. Ο χρήστης επιλέγει τη μέθοδο διασταύρωσης και μετάλλαξης που θα χρησιμοποιηθεί στο ΓΑ καθώς και το ποσοστό του πληθυσμού, εκτός των elite απογόνων, που θα προέρχεται από διασταύρωση (crossover fraction). Τα εναπομείναντα άτομα θα προέρχονται από μετάλλαξη.
 - Αντικατάσταση του παρόντος πληθυσμού με τους απογόνους για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς.
3. Το βήμα 2 επαναλαμβάνεται μέχρι κάποιο από τα κριτήρια τερματισμού ικανοποιηθεί, οπότε ο αλγόριθμος σταματά. Τα κριτήρια αυτά καθορίζονται από το χρήστη. Το άτομο της τελευταίας γενιάς για το οποίο προκύπτει η μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, αποτελεί και τη λύση του προβλήματος.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους της συνάρτησης ga και οι οποίες αποδείχτηκε βάσει δοκιμών, ότι παρουσιάζουν ικανοποιητικά χαρακτηριστικά ως προς τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση. Συγκεντρωτικά οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3. Οι τιμές των παραμέτρων της συνάρτησης *ga* που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Τύπος αναπαράστασης λύσεων	<i>Double vector</i>	Αριθμός ελιτιστικών απογόνων	3
Μέγεθος πληθυσμού κάθε γενιάς	15xN (N: αριθμός μεταβλητών)	Μέθοδος επιχιασμού	<i>Scattered</i>
Πεδίο ορισμού μεταβλητών	[0, 6.5; 0, 6.5; 0, 6.5; 0, 5]	Ποσοστό επιχιασμού (crossover fraction)	0.7
Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού	Custom	Μέθοδος μετάλλαξης	<i>Adaptive feasible</i>
Εύρος αρχικού πληθυσμού	Ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο	Μέγιστος αριθμός γενεών	100
Μέθοδος κλιμάκωσης	<i>Proportional</i>	Πλήθος γενιών καθυστέρησης	30
Μέθοδος επιλογής	<i>Stochastic uniform</i>	Όριο μεταβολής fitness function	10 ⁻⁶

Καταρχάς, ο τύπος αναπαράστασης των λύσεων που χρησιμοποιείται είναι αυτός των πραγματικών αριθμών (*double vector*) ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι γενετικοί τελεστές δίνουν λύσεις στη γειτονιά των ήδη εξετασμένων λύσεων και να υπάρχει συνεκτικότητα, στοιχείο που δεν υπάρχει πάντα στη δυαδική κωδικοποίηση.

Το μέγεθος του πληθυσμού επιλέχθηκε ίσο με 15 επί τον αριθμό των μεταβλητών του προβλήματος, ως ένας συμβιβασμός μεταξύ της καλύτερης εξερεύνησης του χώρου των πιθανών λύσεων και της διάρκειας του ΓΑ.

Το πεδίο αναζήτησης για τις ισχύεις του Α/Π, του αντλιοστάσιου και του ΥΗΣ κανονικοποιήθηκε ως προς την τιμή των 10 MW, ενώ το ενεργειακό περιεχόμενο της άνω δεξαμενής ως προς την τιμή των 250 MWh. Το εύρος πιθανών τιμών για όλες τις μεταβλητές του προβλήματος είναι [0, 6.5], εκτός από τη χωρητικότητα της άνω δεξαμενής που είναι [0, 5]. Επιπλέον, με κατάλληλες τροποποιήσεις στις συναρτήσεις δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού και της μετάλλαξης, η ακρίβεια των τιμών των μεταβλητών περιορίστηκε στα δύο δεκαδικά, η οποία θεωρείται ικανοποιητική για το πρόβλημα που εξετάζεται. Με αυτούς τους τρόπους περιορίζεται και εξερευνάται καλύτερα ο χώρος αναζήτησης του προβλήματος.

Για τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού υλοποιήθηκε μια νέα συνάρτηση που δημιουργεί άτομα όσα το καθοριζόμενο μέγεθος του πληθυσμού, με τις τιμές των μεταβλητών τους να παίρνουν τυχαίες τιμές με ακρίβεια δύο δεκαδικά και σε ένα πεδίο ορισμού μικρότερο από το εύρος αναζήτησης, το εύρος του οποίου εξαρτάται από τις αναμενόμενες λύσεις για το εκάστοτε εξεταζόμενο σενάριο.

Η μέθοδος κλιμάκωσης που εφαρμόζεται είναι η αναλογική (*Proportional*), δηλ. κλιμάκωση των ατόμων βάσει των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος επιλογής που επιλέχθηκε είναι η *Stochastic Uniform*, που αποτελεί τη default επιλογή του Toolbox και που όπως αναφέρεται στο Παράρτημα 3, βασίζεται στη μέθοδο επιλογής της ρουλέτας με τη διαφορά ότι τα άτομα του ενδιάμεσου πληθυσμού επιλέγονται σε μία μόνο πλήρη περιστροφή της ρουλέτας. Σε ό,τι αφορά την αναπαραγωγή επιλέγεται η διατήρηση τριών (3) ελιτιστικών απογόνων σε κάθε γενιά. Σχετικά με τη διασταύρωση, χρησιμοποιείται η μέθοδος του διάσπαρτου επιχιασμού (*Scattered*) και το ποσοστό των απογόνων που προέρχονται από επιχιασμό καθορίστηκε στο 70% του συνολικού πληθυσμού. Λόγω της ύπαρξης περιορισμών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, επιλέγεται η μέθοδος *Adaptive feasible*, η οποία αποτελεί μία προσαρμοστική μέθοδο μετάλλαξης εξασφαλίζοντας ότι οι απόγονοι που προκύπτουν ικανοποιούν τους περιορισμούς. Η συγκεκριμένη όμως μέθοδος τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε η ακρίβεια των τιμών των μεταβλητών των μεταλλαγμένων ατόμων να

περιορίζεται στα δύο δεκαδικά. Σε ό,τι αφορά τα κριτήρια τερματισμού του ΓΑ, επιλέγεται μέγιστος αριθμός γενιών ίσος με 100 και πλήθος γενιών όπου δεν παρατηρείται βελτίωση μεγαλύτερη από ένα όριο (που στην προκειμένη περίπτωση επιλέχτηκε ίσο με τη default τιμή 10^{-6}), ίσο με 30.

6.2.2 Αλγόριθμος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας των πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η χρήση ευριστικών μεθόδων για την επίλυσή τους, [120]. Μια από τις πιο διαδεδομένες ευριστικές μεθόδους αποτελούν οι πολυκριτηριακοί εξελικτικοί αλγόριθμοι (ΜΟΕΑ), οι οποίοι εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα των ΓΑ που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, συνιστούν ιδιαίτερα αποτελεσματικές μεθόδους για την επίλυση πάσης φύσεως πολυκριτηριακών προβλημάτων, [121].

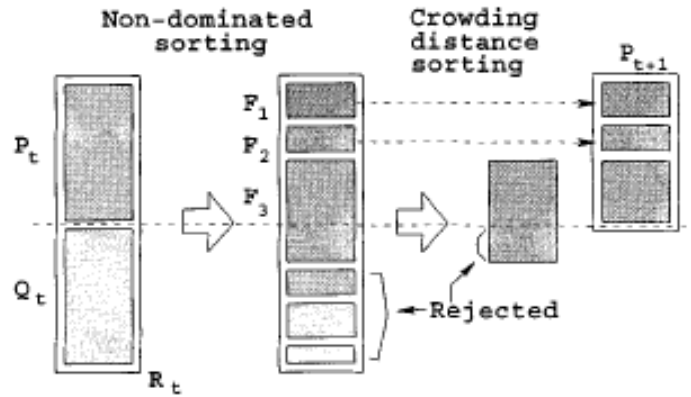
Σε αντίθεση με την περίπτωση των μονοκριτηριακών προβλημάτων όπου η λύση είναι μία και μοναδική, ή και πολυκριτηριακών προβλημάτων που η επίλυση τους πραγματοποιείται προσεγγιστικά με τη χρήση μιας συνδυαστικής αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση βαθμών βαρύτητας, [118], στην περίπτωση των ΜΟΕΑ στόχος είναι η εύρεση (ή ακριβέστερα προσέγγιση) του συνόλου λύσεων Pareto του προβλήματος. Βασικά ο στόχος των ΜΟΕΑ είναι διπλός, [122]: Πρώτον η κατά το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του συνόλου λύσεων Pareto και δεύτερον η διατήρηση ικανοποιητικής διασποράς (ποικιλίας) αυτών των λύσεων ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο το σύνολο Pareto να αποτελείται από σχεδόν πανομοιότυπες λύσεις. Ο πρώτος στόχος επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function) για την αξιολόγηση των πιθανών λύσεων, η οποία σε αντίθεση με τα μονοκριτηριακά προβλήματα, δε συμπίπτει με τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Ο δεύτερος στόχος επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση της πληροφορίας της πυκνότητας των λύσεων στη διαδικασία της επιλογής και πιο συγκεκριμένα η πιθανότητα ενός ατόμου να επιλεγεί μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των ατόμων στη γειτονιά του. Ένα τρίτο ζήτημα που σχετίζεται με τους δύο παραπάνω στόχους είναι ο ελιτισμός, δηλ. το θέμα της διατήρησης των “καλύτερων” λύσεων και στις επόμενες γενιές. Στα πλαίσια αυτά έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τη συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιούν, τον τρόπο διατήρησης ικανοποιητικής διασποράς λύσεων και τη μέθοδο υλοποίησης του ελιτισμού.

Για την επίλυση των πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης της παρούσας ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η υφιστάμενη συνάρτηση *gamultiobj* του MATLAB (υφίσταται και αντίστοιχο Toolbox) που υλοποιεί έναν πολυκριτηριακό ΓΑ, όπως αυτός περιγράφεται στα [119, 123]. Ουσιαστικά υλοποιεί μια παραλλαγή της διαδεδομένης τεχνικής πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης NSGA-II που παρουσιάζεται στην [124], τα βασικά βήματα του οποίου είναι τα εξής:

1. Ο αλγόριθμος ξεκινά με τη δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού πιθανών λύσεων (P_0), όπως ακριβώς και στην περίπτωση της συνάρτησης *ga*.
2. Στη συνέχεια ο ΓΑ δημιουργεί μια σειρά από νέους πληθυσμούς (γενιές). Για τη δημιουργία κάθε γενιάς ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:
 - Υπολογίζονται για όλα τα άτομα του παρόντος πληθυσμού (P_t) οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και κατατάσσονται τα άτομα σε ομάδες ή μέτωπα (fronts) βάσει της υπεροχής τους κατά Pareto. Συγκεκριμένα, στο πρώτο front κατατάσσονται τα άτομα (πιθανές λύσεις) που υπερέχουν⁴⁵ έναντι όλων των άλλων ατόμων. Στο front 2 κατατάσσονται τα άτομα που υπερέχουν έναντι των υπολοίπων (εκτός του front 1) και ούτω καθεξής. Δηλαδή στον υπόψη αλγόριθμο η “καταλληλότητα” του κάθε ατόμου αξιολογείται με βάση την υπεροχή του κατά Pareto.

⁴⁵ Δηλαδή δεν υπάρχουν άλλα άτομα στον πληθυσμό για τα οποία οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν για τα υπόψη άτομα του front 1.

- Από τον παρόντα πληθυσμό (P_t) δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (Q_t) με τη μέθοδο επιλογής τουρνουά (tournament selection) και τους γενετικούς τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της συνάρτησης ga .
 - Δημιουργείται ένας συνδυασμένος πληθυσμός $R_t = P_t \cup Q_t$, μεγέθους $2N$, όπου N το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ο ελιτισμός, καθώς στο συνδυασμένο πληθυσμό, R_t , που θα υποστεί τη διαδικασία της επιλογής, περιλαμβάνονται τόσο τα άτομα του παλιού πληθυσμού, P_t , όσο και του νέου, Q_t . Τα άτομα του πληθυσμού R_t κατατάσσονται σε ομάδες (fronts) βάσει της υπεροχής τους κατά Pareto.
 - Στη συνέχεια δημιουργείται ο πληθυσμός της επόμενης γενιάς P_{t+1} επιλέγοντας αρχικά άτομα από το front 1, έπειτα επιλέγονται άτομα από το front 2 και ούτω καθεξής, μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός N . Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η διαδικασία αυτή όπως υλοποιείται στην τεχνική NSGA-II, [124]. Ωστόσο η συνάρτηση $gamultiobj$ υλοποιεί μια παραλλαγή της παραπάνω διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα:
 - Ενώ στην τεχνική NSGA-II επιλέγονται όλα τα άτομα από το front 1 για τη σύνθεση του πληθυσμού P_{t+1} , (εκτός αν είναι περισσότερα από N), στον αλγόριθμο που υλοποιείται με τη συνάρτηση $gamultiobj$, τα άτομα που επιλέγονται από το front 1 δεν μπορούν να υπερβαίνουν ένα ποσοστό (Pareto fraction) του πληθυσμού P_{t+1} , το οποίο επιλέγεται από το χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η κυριαρχία των ατόμων του front 1 στον πληθυσμό, συντελώντας στη διατήρηση της ποικιλομορφίας του.
 - Στη συνέχεια επιλέγονται άτομα από τα επόμενα fronts βάσει γεωμετρικού τύπου, ξεκινώντας από το «καλύτερο» front και συνεχίζοντας στο «χειρότερο».
 - Αν περισσεύουν θέσεις στο P_{t+1} τότε συμπληρώνονται με την αντίστροφη διαδικασία, ξεκινώντας δηλ. από το «χειρότερο» front και συνεχίζοντας στο «καλύτερο».
 - Σχετικά με την επιλογή μεταξύ των ατόμων του ίδιου front, τα οποία είναι ισοδύναμα μεταξύ τους κατά Pareto, χρησιμοποιείται το κριτήριο της πυκνότητας των λύσεων στη γειτονιά τους. Συγκεκριμένα μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής έχουν τα άτομα με τη μικρότερη πυκνότητα. Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται η διατήρηση της διασποράς των λύσεων στο σύνολο Pareto. Για τη μέτρηση της πυκνότητας αυτής χρησιμοποιείται το μέγεθος *crowding distance*, όπως περιγράφεται στην [124]. Η μέθοδος υπολογισμού του *crowding distance* παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2 και επιγραμματικά έχει ως εξής: Αρχικά πραγματοποιείται ταξινόμηση των ατόμων κάθε front με βάση τις τιμές έκαστης από τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, κατά αύξουσα σειρά. Έπειτα για κάθε αντικειμενική συνάρτηση ακολουθεί η εξής διαδικασία: Στις λύσεις με τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη τιμή της υπόψη αντικειμενικής συνάρτησης, η τιμή του *crowding distance* τίθεται ίση με ∞ . Σε όλες τις ενδιάμεσες λύσεις αποδίδεται τιμή ίση με την απόλυτη τιμή της κανονικοποιημένης διαφοράς των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης των δύο λύσεων που βρίσκονται εκατέρωθεν της υπόψη λύσης. Ο ίδιος υπολογισμός πραγματοποιείται και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Η συνολική τιμή του *crowding distance* κάθε πιθανής λύσης ισούται με το άθροισμα των επιμέρους τιμών που υπολογίστηκαν για κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Οι λύσεις με το μικρότερο *crowding distance* (και άρα μεγαλύτερη πυκνότητα λύσεων στη γειτονιά τους), έχουν και τη μικρότερη πιθανότητα να επιλεγούν.
3. Το βήμα 2 επαναλαμβάνεται μέχρι κάποιο από τα κριτήρια τερματισμού ικανοποιηθεί, οπότε ο αλγόριθμος σταματά. Τα άτομα του front 1 της τελευταίας γενιάς αποτελούν το ζητούμενο σύνολο λύσεων Pareto του προβλήματος.



Σχήμα 6.1. Η διαδικασία δημιουργίας της επόμενης γενιάς, όπως αυτή υλοποιείται στην τεχνική NSGA-II, [124].

$\text{crowding-distance-assignment}(\mathcal{I})$	
$l = \mathcal{I} $	number of solutions in \mathcal{I}
for each i , set $\mathcal{I}[i].\text{distance} = 0$	initialize distance
for each objective m	
$\mathcal{I} = \text{sort}(\mathcal{I}, m)$	sort using each objective value
$\mathcal{I}[1].\text{distance} = \mathcal{I}[l].\text{distance} = \infty$	so that boundary points are always selected
for $i = 2$ to $(l - 1)$	for all other points
$\mathcal{I}[i].\text{distance} = \mathcal{I}[i].\text{distance} + (\mathcal{I}[i + 1].m - \mathcal{I}[i - 1].m) / (f_m^{\max} - f_m^{\min})$	

Σχήμα 6.2. Αλγόριθμος υπολογισμού της τιμής crowding distance για κάθε λύση στο front I , όπου $I[i].m$ είναι η τιμή της m^{ns} αντικειμενικής συνάρτησης για την i λύση στο front I και f_m^{\max} , f_m^{\min} είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της m^{ns} αντικειμενικής συνάρτησης, [124].

Στη συνέχεια παρατίθενται οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους της συνάρτησης *gamultiobj* και οι οποίες αποδείχτηκε βάσει δοκιμών, ότι παρουσιάζουν ικανοποιητικά χαρακτηριστικά ως προς τη σύγκλιση στο σύνολο λύσεων Pareto. Συγκεντρωτικά οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 6.4.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον τύπο αναπαράστασης των λύσεων, τα πεδία ορισμού, τη μέθοδο δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού και τους γενετικούς τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, ισχύουν όσα παρατέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για την περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ως μέθοδος επιλογής επιλέχθηκε η default (και μοναδική) μέθοδος του τουρνουά (*Tournament*), η οποία περιγράφεται στο Παράρτημα 3. Το άνω όριο του ποσοστού των ατόμων κάθε γενιάς που θα προέρχονται από το front 1, ορίστηκε ίσο με τη default τιμή 0.35 του Toolbox. Σχετικά με τη μέθοδο μέτρησης της πυκνότητας των λύσεων χρησιμοποιήθηκε η default (και μοναδική) συνάρτηση *distancecrowding* του Toolbox. Σε ό,τι αφορά τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου, επιλέχθηκε μέγιστος αριθμός γενεών ίσος με 200 και πλήθος γενεών όπου δεν παρατηρείται βελτίωση μεγαλύτερη από ένα όριο (που στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε ίσο με τη default τιμή 10^{-4}), ίσο με 30.

Πίνακας 6.4. Οι τιμές των παραμέτρων της συνάρτησης $gamultiobj$ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Τύπος αναπαράστασης λύσεων	<i>Double vector</i>	Ποσοστό επιχιασμού	0.8
Μέγεθος πληθυσμού κάθε γενιάς	60	Μέθοδος μετάλλαξης	<i>Adaptive feasilbe</i>
Πεδίο ορισμού μεταβλητών	[0, 6.5; 0, 6.5; 0, 6.5; 0, 5]	Pareto fraction	0.35
Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού	Custom	Μέθοδος μέτρησης της πυκνότητας των λύσεων	<i>distancecrowding</i>
Εύρος αρχικού πληθυσμού	Ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο	Μέγιστος αριθμός γενεών	200
Μέθοδος επιλογής	<i>Tournament</i>	Πλήθος γενιών καθυστέρησης	30
Μέθοδος επιχιασμού	<i>Scattered</i>	Όριο μεταβολής fitness function	10^{-4}

6.3 Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της βέλτιστης διαστασιολόγησης αντλιοσταμειωτικών ΥΒΣ, για τις τρεις εξεταζόμενες οπτικές του προβλήματος και για διάφορα σενάρια.

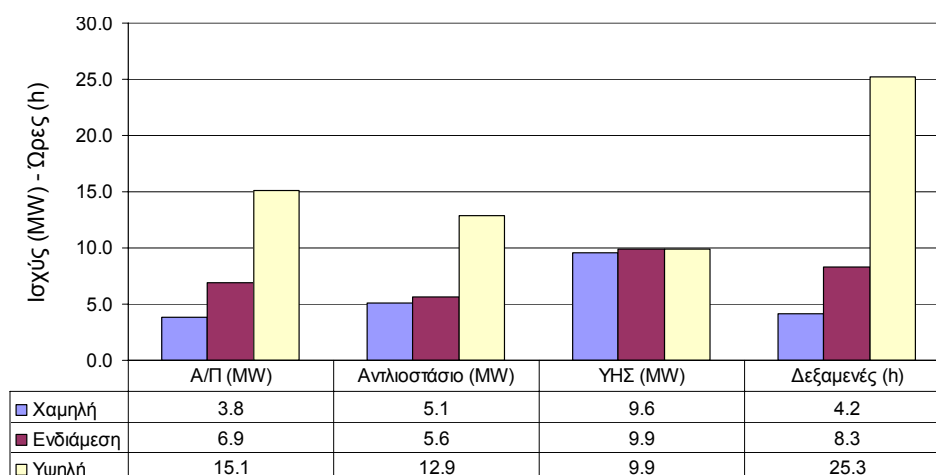
6.3.1 Οπτική επενδυτή

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από τη σκοπιά του επενδυτή για τα τρία σενάρια τιμολογήσεων των ενεργειών του ΥΒΣ (χαμηλή, ενδιάμεση, υψηλή), απεικονίζονται στο Σχήμα 6.3.

Το πρώτο και αναμενόμενο συμπέρασμα που αποκομίζεται από το Σχήμα 6.3 είναι ότι το μέγεθος του βέλτιστου ΥΒΣ αυξάνεται με το ύψος των τιμολογήσεων. Όσον αφορά τα μεγέθη των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ, διαπιστώνονται τα παρακάτω σχετικά με την εξάρτησή τους από τις τιμολογήσεις των ενεργειών.

- Η ισχύς του ΥΗΣ δε διαφοροποιείται ιδιαίτερα για τα τρία σενάρια τιμολογήσεων. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο χαμηλής τιμολόγησης η ισχύς του ΥΗΣ συμπίπτει με το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος που αντιστοιχεί στην πραγματικά εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ, όπως αυτή υπολογίζεται βάσει της §5.2.1 για τα προκύπτοντα μεγέθη αντλιοστάσιου και δεξαμενών. Δηλαδή φαίνεται ότι η βέλτιστη ισχύς του ΥΗΣ ακολουθεί το μέγιστο δυνατό μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος για δεδομένη ισχύ αντλιοστάσιου και χωρητικότητα δεξαμενών, καθώς οι ετήσιες αποζημιώσεις της διαθεσιμότητας ισχύος στη διάρκεια οικονομικής ζωής του έργου καταφέρνουν να υπερκαλύψουν το πρόσθετο κόστος εγκατάστασης επιπλέον ισχύος ΥΗΣ. Στις άλλες δύο τιμολογήσεις ωστόσο, το βέλτιστο μέγεθος του ΥΗΣ περιορίζεται γύρω στα 10 MW, σε μια ισχύ δηλαδή που υπολείπεται της πραγματικά εγγυημένης των δύο υπόψη ΥΒΣ. Το γεγονός μάλιστα ότι προέκυψε ακριβώς ίδια ισχύς για τον ΥΗΣ και στις δύο περιπτώσεις, οφείλεται στη θεώρηση ότι ΥΒΣ με εγκατεστημένη ισχύ ΥΗΣ άνω των 10 MW θα συνδέονται στην ΥΤ, κάτι που αυξάνει το πάγιο κόστος σύνδεσης κατά 3 εκ. € (βλ. §6.1.1). Η αύξηση αυτή καθιστά αυτομάτως μη συμφέρουσα την εγκατάσταση επιπλέον ισχύος ΥΗΣ.

- Η ισχύς του Α/Π επηρεάζεται σημαντικά από τις τιμολογήσεις, παρουσιάζοντας σημαντική αύξηση συναρτήσει του ύψους των τιμών αποζημίωσης. Κι αυτό γιατί όσο αυξάνονται οι τιμές τόσο πιο κερδοφόρα αποδεικνύεται η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας (πρωτογενούς ενέργειας του ΥΒΣ) οδηγώντας σε μεγαλύτερα μεγέθη Α/Π, καθώς το κέρδος από τη μεγαλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού αντισταθμίζει το πρόσθετο κόστος εγκατάστασης επιπλέον αιολικής ισχύος.
- Η ισχύς του αντλιοστάσιου γενικά ακολουθεί την ισχύ του Α/Π στις περιπτώσεις των υψηλών σχετικά τιμολογήσεων (ενδιάμεση και υψηλή) όπου συμφέρει η αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας πρωτίστως για άντληση. Πιο συγκεκριμένα, η βέλτιστη ισχύς του αντλιοστάσιου κυμαίνεται γύρω στο 80-85% της ισχύος του Α/Π. Στην περίπτωση της χαμηλής τιμολογήσης από την άλλη, η ισχύς του αντλιοστάσιου προκύπτει υψηλότερη αυτής του Α/Π, κάτι που είναι αντιφατικό από τη στιγμή που για το υπόψη σενάριο τιμών δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση για την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος, ως πιο συμφέρουσα επιλογή. Απαιτείται όμως η συγκεκριμένη ισχύς αντλιοστάσιου για την εξασφάλιση της εγγυημένης ισχύος του ΥΒΣ και άρα σημαντικών εσόδων από την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος.
- Η χωρητικότητα των δεξαμενών (η οποία στο σχήμα δίνεται σε ισοδύναμες ώρες λειτουργίας του ΥΗΣ στην ονομαστική του ισχύ) ακολουθεί γενικά την ισχύ του Α/Π ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος των σημαντικών απορρίψεων αιολικής ισχύος λόγω γεμάτης δεξαμενής, που συνεπάγεται μείωση εσόδων. Και όσο υψηλότερες είναι οι τιμές τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι ενδεχόμενες μειώσεις εσόδων, καθιστώντας συμφέρουσες μεγαλύτερες αυξήσεις της χωρητικότητας των δεξαμενών. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι η χωρητικότητα των δεξαμενών αυξάνεται περισσότερο συγκριτικά με τα μεγέθη των υπόλοιπων μονάδων του ΥΒΣ για υψηλότερες τιμολογήσεις, καθώς το κόστος των διαφόρων μονάδων παραγωγής και άντλησης του ΥΒΣ έχει θεωρηθεί ότι αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος τους ενώ το κόστος των δεξαμενών εκθετικά, με εκθέτη μικρότερο της μονάδας.



Σχήμα 6.3. Αποτελέσματα της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για τα τρία σενάρια τιμολογήσεων των ενεργειών του ΥΒΣ (χαμηλή, ενδιάμεση, υψηλή).

Στον Πίνακα 6.5 παρατίθενται τα κόστη των βέλτιστων ΥΒΣ, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) και η καθαρή παρούσα αξία (NPV) των επενδύσεών τους, καθώς και η επιτυγχανόμενη συνεισφορά τόσο της ενέργειας του ΥΒΣ όσο και της ενέργειας των λοιπών ΑΠΕ του νησιού στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού, εκφραζόμενες σε % τιμές της ετήσιας ζήτησης φορτίου (δε λαμβάνεται υπόψη το φορτίο άντλησης του ΥΒΣ). Επίσης δίνονται τα προκύπτοντα μεταβλητά κόστη λειτουργίας (Variable Operating Cost – VOC) του συστήματος λόγω της ένταξης των βέλτιστων

ΥΒΣ, για όλα τα σενάρια τιμολογήσεων εκτός από αυτό των ενδιάμεσων τιμών⁴⁶. Ενδεικτικά το VOC του συστήματος χωρίς ΥΒΣ είναι 99.8 €/MWh για το σενάριο χαμηλών τιμολογήσεων όπου οι συμβατικές μονάδες καταναλώνουν κατά βάση μαζούτ και 242.8 €/MWh για το σενάριο υψηλών τιμολογήσεων όπου όλες οι συμβατικές μονάδες καταναλώνουν diesel. Το VOC δίνεται από τη σχέση:

$$VOC_S = \frac{VC_{APS} + C_{RES} + C_{HPS}}{E_L} \quad (6.15)$$

όπου:

C_{RES} : η αποζημίωση για τους σταθμούς ΑΠΕ εκτός ΥΒΣ

C_{HPS} : η αποζημίωση της ενέργειας του ΥΒΣ - η αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος του ΥΒΣ αγνοείται από τη στιγμή που θεωρητικά αντισταθμίζεται από το αποφευγόμενο κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση συμβατικού σταθμού αντίστοιχης ισχύος

Όπως είναι φυσικό, για υψηλότερες τιμολογήσεις προκύπτουν ευνοϊκότεροι δείκτες οικονομικής αξιολόγησης (υψηλότερες τιμές για IRR και NPV) για την επένδυση του εκάστοτε βέλτιστου ΥΒΣ. Όσον αφορά τα προκύπτοντα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ, διαπιστώνεται ότι όσο περισσότερο πριμοδοτείται η ενέργεια του ΥΒΣ τόσο περισσότερο συμφέρει τους παραγωγούς να επενδύσουν σε μεγαλύτερα μεγέθη ΥΒΣ που συνεπάγεται και μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, για την υψηλότερη τιμολόγηση και με κριτήριο (αντικειμενική συνάρτηση) τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του επενδεδυμένου κεφαλαίου του υβριδικού παραγωγού, προκύπτει συνολικό ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα περίπου 20%, με το ποσοστό που αναλογεί στον ΥΒΣ να κυμαίνεται στο 10%. Αντίθετα στην περίπτωση της χαμηλής τιμολόγησης, η προκύπτουσα συνεισφορά του βέλτιστου ΥΒΣ φτάνει μόλις το 2.7%. Σημειωτέον ότι η ενεργειακή απόδοση των λοιπών ΑΠΕ δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη στιγμή που έχει θεωρηθεί ότι οι εξεταζόμενοι ΥΒΣ παρουσιάζουν παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά (τεχνικό ελάχιστο, δυναμικό όριο διείσδυσης) με τις συμβατικές μονάδες που υποκαθιστούν. Σχετικά με την επίπτωση στο κόστος παραγωγής του συστήματος, παρατηρείται μια μικρή αύξηση του VOC λόγω της ένταξης των βέλτιστων ΥΒΣ, της τάξης του 0.4% για το σενάριο χαμηλών τιμολογήσεων και 2.3% για τις υψηλές τιμολογήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια των υδροστρόβιλων αποζημιώνεται σε τιμή που καθορίζεται με βάση το μεταβλητό κόστος παραγωγής των συμβατικών μονάδων αιχμής, ενώ στην πραγματική λειτουργία οι υδροστρόβιλοι υποκαθιστούν επίσης μονάδες ενδιάμεσου φορτίου και βάσης, ιδιαίτερα τη χειμερινή περίοδο (βλ. Κεφάλαιο 5). Ωστόσο διαπιστώνεται ότι ακόμα και με την ένταξη μεγάλων ΥΒΣ δεν προκύπτει σημαντική αύξηση του VOC από τη στιγμή που διαφοροποιείται πολύ λίγο το κόστος παραγωγής των μονάδων βάσης και αιχμής του εξεταζόμενου νησιού. Αρκετά διαφορετικά θα ήταν τα αποτελέσματα αν το κόστος λειτουργίας των μονάδων αιχμής ήταν σημαντικά υψηλότερο από αυτό των μονάδων βάσης.

⁴⁶ Στο σενάριο ενδιάμεσων τιμών οι θεωρούμενες τιμολογήσεις των ενεργειών του ΥΒΣ δε συσχετίζονται με το πραγματικό κόστος της συμβατικής ενέργειας όπως στα άλλα δύο σενάρια. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση δεν έχει νόημα να εξεταστεί η επίπτωση στο VOC του συστήματος λόγω της ένταξης ΥΒΣ.

Πίνακας 6.5. Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης και προκύπτοντα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ και VOC για τους βέλτιστους ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή.

		Τιμολόγηση		
		Χαμηλή	Ενδιάμεση	Υψηλή
Κόστος ΥΒΣ	εκ. €	19.5	26.8	48.7
IRR	%	11.7	20.5	41.3
NPV (χωρίς υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	1.7	8.1	39.4
NPV (με υπολειπόμενη αξία ⁴⁷)	εκ. €	4.2	11.0	43.9
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας ΥΒΣ	%	2.70	4.35	9.69
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας λοιπών ΑΠΕ	%	10.92	10.91	10.84
VOC	€/MWh	100.2	—	248.3

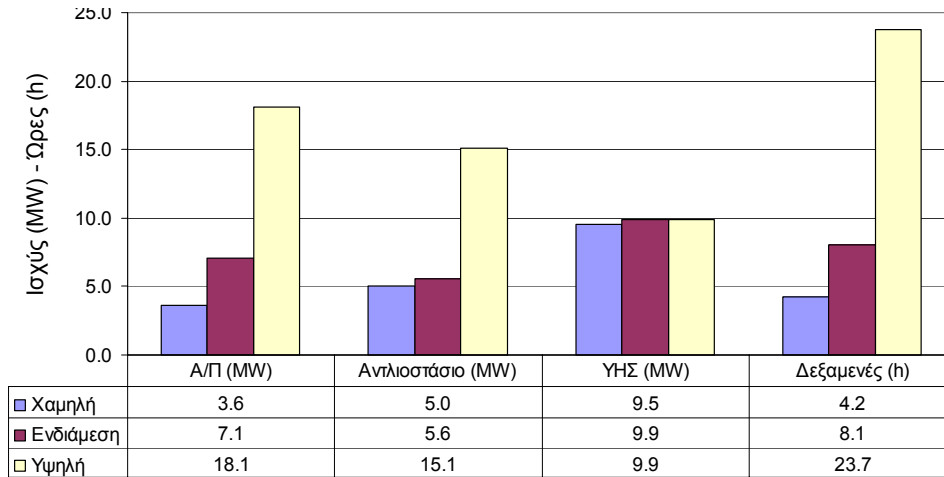
Στη συνέχεια εξετάζεται η διαφοροποίηση των παραπάνω αποτελεσμάτων αν δεν είναι εφικτή η υδροαιολική συνεργασία και επίσης ο ΥΒΣ παρουσιάζει αργότερη δυναμική απόκριση σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες, με θεωρούμενο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους της τάξης του 15% (η μισή δηλαδή τιμή συγκριτικά με την αντίστοιχη των συμβατικών). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 6.4 και τον Πίνακα 6.6.

Καταρχάς διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση της χαμηλής τιμολόγησης όπου συμφέρει να δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση στο δίκτυο, η απαγόρευση της υδροαιολικής συνεργασίας οδηγεί γενικά σε μείωση της οικονομικής αποδοτικότητας (μειωμένο IRR) των επενδύσεων για ΥΒΣ. Ωστόσο η μείωση αυτή είναι πολύ μικρή (μόλις 0.1%) για τους εξής δύο λόγους: Πρώτον, υπάρχει ακόμη η δυνατότητα της απ' ευθείας έγχυσης της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο στα πλαίσια του Mode 2 και μάλιστα υπάρχει αρκετά συχνά περίσσεια set-point, καθώς το σύστημα της Λέσβου δεν είναι αυτή τη στιγμή και τόσο κορεσμένο. Μάλιστα η ισχύς που διατίθεται απ' ευθείας στο δίκτυο αντιστοιχεί σε σημαντικό ποσοστό της συνολικής ισχύος του Α/Π του ΥΒΣ καθώς η τελευταία είναι σχετικά μικρή. Δεύτερον, είναι σχετικά μικρή η διαφορά της τιμής της αιολικής παραγωγής από την τιμή παραγωγής των υδροστρόβιλων επί το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής. Όσον αφορά τη διαστασιολόγηση του προκύπτοντος βέλτιστου ΥΒΣ, αυτή διαφοροποιείται ελάχιστα από την αντίστοιχη του Σχήματος 6.3, με τα μεγέθη των επιμέρους μονάδων να προκύπτουν ελαφρώς μικρότερα.

Από την άλλη, για τις υψηλότερες τιμολογήσεις όπου συμφέρει η αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας για άντληση και άρα η υδροαιολική συνεργασία αποτελεί τελευταία προτεραιότητα, διαπιστώνεται ότι η οικονομική αποδοτικότητα είτε δεν επηρεάζεται καθόλου (ενδιάμεση τιμολόγηση) είτε αυξάνεται ελαφρώς (υψηλή τιμολόγηση). Σχετικά με τις βέλτιστες διαστασιολογήσεις, αυτές γενικά προκύπτουν ελαφρώς μεγαλύτερες, ιδιαίτερα στην περίπτωση της υψηλής τιμολόγησης, εκτός από τις δεξαμενές που προκύπτουν μικρότερες. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι όταν δεν είναι εφικτή η υδροαιολική συνεργασία, υποφορτίζονται λιγότερο συχνά οι υδροστρόβιλοι και άρα αδειάζει περισσότερο η άνω δεξαμενή, κάτι που συνεπάγεται μικρότερες απορρίψεις της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας λόγω γεμάτης δεξαμενής. Αυτό υποδηλώνει επίσης ότι στην περίπτωση που δίνεται προτεραιότητα στην άντληση και αν μετά την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής στα πλαίσια των Modes 1, 2 υφίσταται ανεκμετάλλευτη αιολική ισχύς (κυρίως επειδή δεν μπορεί να αντληθεί λόγω γεμάτης δεξαμενής) τότε μάλλον είναι καλύ-

τερα να απορριφθεί η συγκεκριμένη ισχύς παρά να αξιοποιηθεί στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας (Mode 3), ιδιαίτερα στην περίπτωση των υψηλών τιμολογήσεων.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις του χαμηλού δυναμικού ορίου διείσδυσης των υδροστρόβιλων στους συντελεστές χρησιμοποίησης των λοιπών Α/Π, διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνονται τα μεγέθη ΥΒΣ τόσο μειώνεται το ποσοστό διείσδυσης των λοιπών Α/Π. Ωστόσο οι μειώσεις αυτές κρίνονται αποδεκτές καθώς είναι ιδιαίτερα μικρές, με τη μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται στην περίπτωση της υψηλής τιμολόγησης και να είναι της τάξης μόλις του 0.5% στο συντελεστή χρησιμοποίησης των λοιπών Α/Π. Δηλαδή τα προκύπτοντα βέλτιστα μεγέθη ΥΒΣ δεν προκαλούν σημαντικές μειώσεις στους συντελεστές χρησιμοποίησης των λοιπών Α/Π, τέτοιες που να καθιστούν απαγορευτική την εγκατάστασή τους στο σύστημα.



Σχήμα 6.4. Αποτελέσματα της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για τα τρία σενάρια τιμολογήσεων, θεωρώντας όμως μη εφικτή την υδροαιολική συνεργασία και χαμηλότερο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους, της τάξης του 15%.

Πίνακας 6.6. Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης και προκύπτοντα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ και VOC για τους βέλτιστους ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, θεωρώντας όμως μη εφικτή την υδροαιολική συνεργασία και χαμηλότερο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους.

		Τιμολόγηση		
		Χαμηλή	Ενδιάμεση	Υψηλή
Κόστος ΥΒΣ	εκ. €	19.1	27.1	55.0
IRR	%	11.6	20.5	42.3
NPV (χωρίς υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	1.6	8.2	45.9
NPV (με υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	4.0	11.1	50.8
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας ΥΒΣ	%	2.52	4.44	11.31
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας λοιπών ΑΠΕ	%	10.92	10.91	10.76
VOC	€/MWh	100.2	—	249.5

⁴⁷ Για τον υπολογισμό της υπολειπόμενης αξίας του ΥΒΣ, έχει θεωρηθεί ότι η διάρκεια ζωής όλων των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ είναι 40 έτη, εκτός από το Α/Π που είναι 20 έτη.

Η βασική θεώρηση που έχει γίνει για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ως προς το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος, είναι ότι αυτό ισούται με την πραγματικά εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ, όπως αυτή καθορίζεται στην §5.2.1. Ωστόσο στη Δημόσια Διαβούλευση 8/2008 της ΡΑΕ, [26], παρουσιάζεται μια αρκετά πιο ελαστική φιλοσοφία σε σχέση με την αποζημιωτέα εγγυημένη ισχύ των ΥΒΣ, σύμφωνα με την οποία ο παραγωγός καθορίζει την προς αποζημίωση εγγυημένη ισχύ του σταθμού (π.χ. το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής του ΥΒΣ) και σε περίπτωση αδυναμίας ικανοποίησης της εγγυημένης παροχής που ζητείται από το ΔΜΔΝ, προβλέπονται πρόστιμα, το ύψος και ο τρόπος επιβολής των οποίων είναι προς καθορισμό (αναμένεται να γίνει στον ΚΔΜΔΝ). Στα πλαίσια αυτά εξετάστηκε το σενάριο της ενδιάμεσης τιμολόγησης για τη θεώρηση η αποζημιωτέα διαθεσιμότητα ισχύος να ισούται με την εκάστοτε ονομαστική ισχύ του ΥΗΣ, και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6.7. Βέβαια στις προσομοιώσεις δεν ελήφθησαν υπόψη τα πρόστιμα που θα επιβάλλονταν στον παραγωγό λόγω αδυναμίας παροχής της εγγυημένης ισχύος, κάτι που θα διαφοροποιούσε σημαντικά τα αποτελέσματα, καθώς δεν είναι γνωστός ακόμη ο τρόπος υπολογισμού και το ύψος των προστίμων αυτών. Ακόμα κι έτσι όμως έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί το υπόψη σενάριο ώστε να διαπιστωθεί ποια θα ήταν η πιο συμφέρουσα διαστασιολόγηση ΥΒΣ για τον επενδυτή στην ακραία αυτή περίπτωση, όπου και αποζημιώνεται για το σύνολο της ισχύος του ΥΗΣ και πρόστιμα δεν του επιβάλλονται.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.7 διαπιστώνεται ότι μια τέτοια θεώρηση εκφυλίζει το πρόβλημα και η προκύπτουσα βέλτιστη λύση συνιστά ουσιαστικά την εγκατάσταση μόνο ενός ΥΗΣ, ισχύος που φτάνει το άνω όριο του πεδίου τιμών, χωρίς Α/Π, αντλιοστάσιο και δεξαμενές. Σε αυτή την περίπτωση ο υπόψη σταθμός παρόλο που δε θα μπορεί να παράγει, θα αποζημιώνεται για διαθεσιμότητα ισχύος ίση με την ισχύ του ΥΗΣ, ασχέτως αν στην πραγματικότητα ποτέ δε θα μπορεί να την παρέχει. Το γεγονός αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη επένδυση εξαιρετικά συμφέρουσα με κριτήριο τον IRR. Σημειωτέον ότι αν κριτήριο ήταν η NPV, τότε η προκύπτουσα βέλτιστη λύση θα συνιστούσε την εγκατάσταση και των υπόλοιπων συνιστωσών ενός ΥΒΣ, με μεγέθη όμως αρκετά μικρότερα από την ισχύ του ΥΗΣ, [118]. Βέβαια η βέλτιστη λύση του Πίνακα 6.7 δεν αποτελεί ουσιαστικά ΥΒΣ και ποτέ δε θα αδειοδοτούνταν στην πραγματικότητα. Ωστόσο και παρόλο που στις προσομοιώσεις δεν έχουν ληφθεί υπόψη πρόστιμα, η επίλυση του υπόψη σεναρίου καταδεικνύει ότι αν η αποζημιωτέα διαθεσιμότητα ισχύος των ΥΒΣ ισούται με την εκάστοτε ονομαστική ισχύ του ΥΗΣ, τότε ενδεχομένως οι επενδυτές να επιλέξουν την εγκατάσταση ΥΒΣ με μεγάλο σχετικά μέγεθος ΥΗΣ συγκριτικά με τις άλλες συνιστώσες. Το επιλεχθέν βέλτιστο μέγεθος του ΥΗΣ θα εξαρτηθεί από την τιμή αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος σε συνδυασμό με το ύψος και τον τρόπο επιβολής των προστίμων, καθώς και από τη συχνότητα που θα ζητά εγγυημένη ισχύ και ενέργεια ο ΔΜΔΝ. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό να προβλεφθούν κατάλληλα πρόστιμα στον ΚΔΜΔΝ ώστε να αποφευχθούν οι περιπτώσεις εκφυλισμένων ΥΒΣ με μεγάλους ΥΗΣ, που θα αποζημιώνονται για διαθεσιμότητα ισχύος που ουσιαστικά δε θα μπορούν να εγγυηθούν, οδηγώντας σε αύξηση του κόστους του συστήματος χωρίς την ανάλογη ανταποδοτικότητα σε ενέργεια και ισχύ. Το ιδανικό θα ήταν τα πρόστιμα που θα καθοριστούν στον ΚΔΜΔΝ να είναι τέτοια που να καθιστούν συμφέρον για τον επενδυτή να διεκδικεί αποζημίωση για διαθεσιμότητα ισχύος όση η πραγματικά εγγυημένη του σταθμού, κάτι που ισοδυναμεί ουσιαστικά με τη βασική θεώρηση της παρούσας ανάλυσης ως προς το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος.

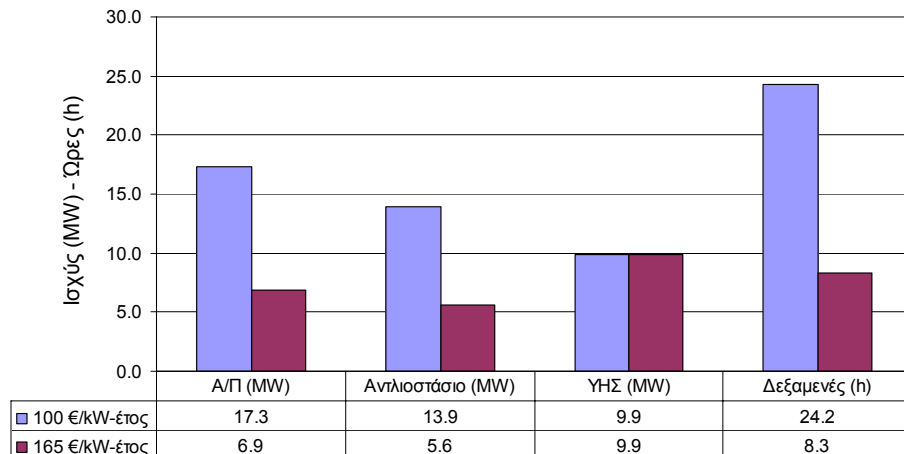
Πίνακας 6.7. Αποτελέσματα βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ για το σενάριο της ενδιάμεσης τιμολόγησης και για τη θεώρηση η αποζημιωτέα διαθεσιμότητα ισχύος να ισούται με την εκάστοτε ονομαστική ισχύ του ΥΗΣ.

Ισχύς Α/Π	MW	0.0
Ισχύς Αντλιοστάσιου	MW	0.2
Ισχύς ΥΗΣ	MW	65.0
Χωρητικότητα Δεξαμενών	MWh	10.0
	h	0.15
Κόστος ΥΒΣ	εκ. €	42.9
IRR	%	47.5
NPV (χωρίς υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	41.2
NPV (με υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	48.8
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας ΥΒΣ	%	0.00

Μέχρι τώρα διερευνήθηκε η επίδραση των τιμολογήσεων των ενεργειών του ΥΒΣ στη βέλτιστη διαστασιολόγησή τους. Στη συνέχεια διερευνάται η επίδραση της τιμής αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 6.5 και τον Πίνακα 6.8 για δύο θεωρούμενες τιμές: Την τιμή των 165 €/kW-έτος, που είναι η τιμή που έχει θεωρηθεί σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια και αντιστοιχεί σε ένα συμβατικό σταθμό με ΜΕΚ, και τη χαμηλότερη τιμή των 100 €/kW-έτος, που είναι η τιμή που προκύπτει αν θεωρηθεί ως νεοεισερχόμενος συμβατικός σταθμός στο νησί ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου (βλ. Κεφάλαιο 5).

Διαπιστώνεται ότι η μείωση της τιμής αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος επιφέρει αύξηση των βέλτιστων μεγεθών των επιμέρους συνιστωσών του ΥΒΣ (εκτός από τον ΥΗΣ). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με τη μείωση της τιμής ισχύος μειώνονται τα περιθώρια κέρδους από την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος και παράλληλα αυξάνεται η συνεισφορά στα κέρδη από την αποζημίωση της ενέργειας, με αποτέλεσμα ο IRR να μεγιστοποιείται για μεγαλύτερα μεγέθη ΥΒΣ προκειμένου να αξιοποιηθεί περισσότερο η διαθέσιμη αιολική ενέργεια.

Όσον αφορά την επίδραση στην οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης για ΥΒΣ, παρατηρείται ότι με τη μείωση της τιμής ισχύος, ο IRR του βέλτιστου ΥΒΣ μειώνεται κατά πέντε (5) ποσοστιαίες μονάδες, καταδεικνύοντας πόσο σημαντικό είναι το κομμάτι της αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος στη βιωσιμότητα των επενδύσεων.

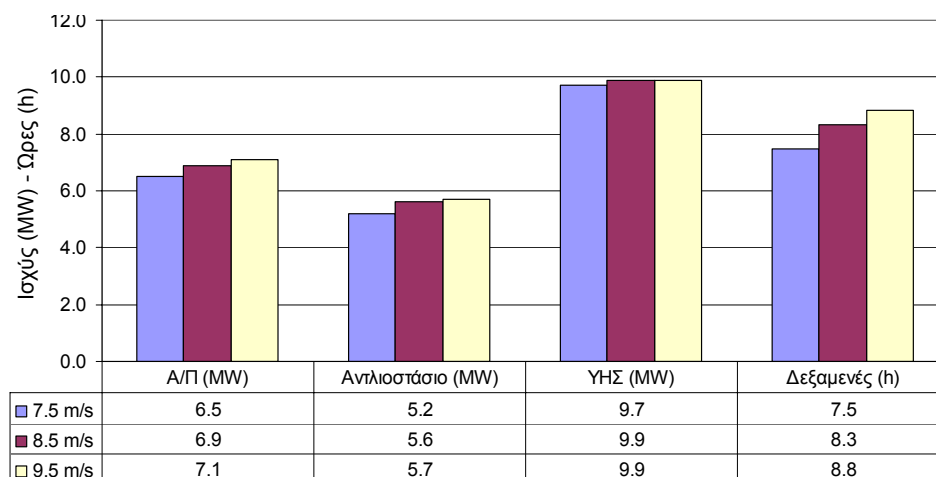
**Σχήμα 6.5.** Αποτελέσματα της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για δύο διαφορετικές τιμές αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος: 100 €/kW-έτος και 165 €/kW-έτος.

Πίνακας 6.8. Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης και προκύπτοντα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ για τους βέλτιστους ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για δύο διαφορετικές τιμές αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος.

		Τιμή Διαθεσιμότητας Ισχύος	
		100 €/kW-έτος	165 €/kW-έτος
Κόστος ΥΒΣ	εκ. €	53.1	26.8
IRR	%	15.1	20.5
NPV (χωρίς υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	9.1	8.1
NPV (με υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	13.9	11.0
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας ΥΒΣ	%	11.00	4.35
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας λοιπών ΑΠΕ	%	10.82	10.91

Η επίδραση του αιολικού δυναμικού στη βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 και τον Πίνακα 6.9. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση της ενδιάμεσης τιμολόγησης, θεωρώντας τη χρονοσειρά ανέμου του Παραρτήματος 1, σταθμισμένη για τρεις μέσες τιμές: 7.5 m/s, 8.5 m/s (η βασική τιμή που έχει θεωρηθεί σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια) και 9.5 m/s.

Διαπιστώνεται ότι η αύξηση του αιολικού δυναμικού του νησιού συνεπάγεται όπως είναι φυσικό, σημαντικά ευνοϊκότερους δείκτες οικονομικής αξιολόγησης για τον επενδυτή καθώς επίσης και αυξημένα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα. Σχετικά με τις διαστάσεις όμως των προκύπτοντων βέλτιστων ΥΒΣ, παρατηρείται ότι η αύξηση του αιολικού δυναμικού επιφέρει απλώς μια ελαφρά αύξηση των βέλτιστων μεγεθών των συνιστωσών του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα για αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου κατά 1 m/s προκύπτει αύξηση των ονομαστικών μεγεθών των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ μόλις κατά 2-10%. Συμπερασματικά, το μέγεθος του αιολικού δυναμικού μπορεί να αποτελεί κρίσιμος παράγοντας για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, όχι όμως και για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ.

**Σχήμα 6.6.** Αποτελέσματα της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για την περίπτωση της ενδιάμεσης τιμολόγησης και για τρεις διαφορετικές μέσες τιμές της χρονοσειράς ανέμου στο νησί: 7.5 m/s, 8.5 m/s και 9.5 m/s.

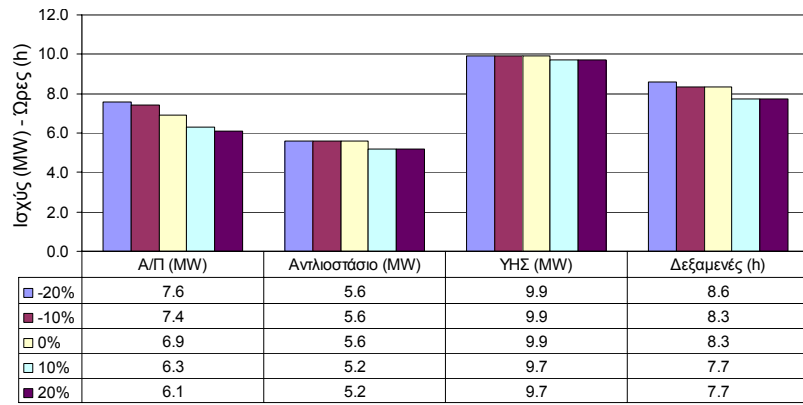
Πίνακας 6.9. Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης και προκύπτοντα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ για τους βέλτιστους ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για τρεις διαφορετικές μέσες τιμές της χρονοσειράς ανέμου στο νησί.

		Μέση Τιμή Ανέμου		
		7.5 m/s	8.5 m/s	9.5 m/s
Κόστος ΥΒΣ	εκ. €	25.5	26.8	27.4
IRR	%	14.9	20.5	25.2
NPV (χωρίς υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	4.3	8.1	11.4
NPV (με υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	7.1	11.0	14.4
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας ΥΒΣ	%	3.29	4.35	5.22
Ποσοστό διείσδυσης ενέργει- ας λοιπών ΑΠΕ	%	8.89	10.91	12.63

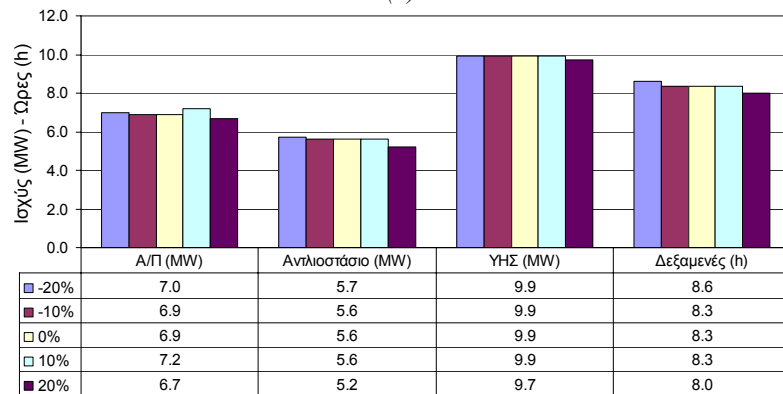
Στη συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα από την υποτυπώδη ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε ως προς τα μοναδιαία κόστη των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις στη βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός ΥΒΣ από τη μεταβολή του κόστους κατασκευής των 4 βασικών συνιστωσών του (Α/Π, αντλιοστάσιο, υδροστρόβιλος σταθμός, δεξαμενές) κατά $\pm 20\%$ σε σχέση με τις τιμές του βασικού σεναρίου ενδιάμεσης τιμολόγησης. Στο Σχήμα 6.7 απεικονίζεται η επίδραση στη βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ, ενώ στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του κόστους έκαστης συνιστώσας του ΥΒΣ στον IRR.

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 6.7 διαπιστώνεται ότι οι μεταβολές των μοναδιαίων κοστών των διαφόρων συνιστωσών του ΥΒΣ δεν επιφέρουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις στη βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ. Τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις επιφέρει κατά πρώτο λόγο η μεταβολή του κόστους του Α/Π και ακολούθως των υδροστρόβιλων, ενώ ιδιαίτερος μικρή παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του κόστους των συνιστωσών αντλιοσταμείωσης. Σε γενικές γραμμές πάντως οι ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις του βέλτιστου μεγέθους του ΥΒΣ είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες ποσοστιαίες μεταβολές του κόστους των επιμέρους μονάδων του σταθμού. Επίσης η αύξηση των μοναδιαίων κοστών του Α/Π, του αντλιοστασίου και των δεξαμενών συνεπάγονται γενικά μείωση των βέλτιστων μεγεθών των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ. Από την άλλη, η μεταβολή του κόστους των υδροστρόβιλων έχει τα αντίθετα αποτελέσματα, για λόγους παρόμοιους με την περίπτωση της επίδρασης της τιμής αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος: Η αύξηση του κόστους των υδροστρόβιλων μειώνει ουσιαστικά τα περιθώρια κέρδους από την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος, καθιστώντας αναγκαία την αύξηση των εσόδων από την αποζημίωση της ενέργειας για τη διατήρηση της κερδοφορίας.

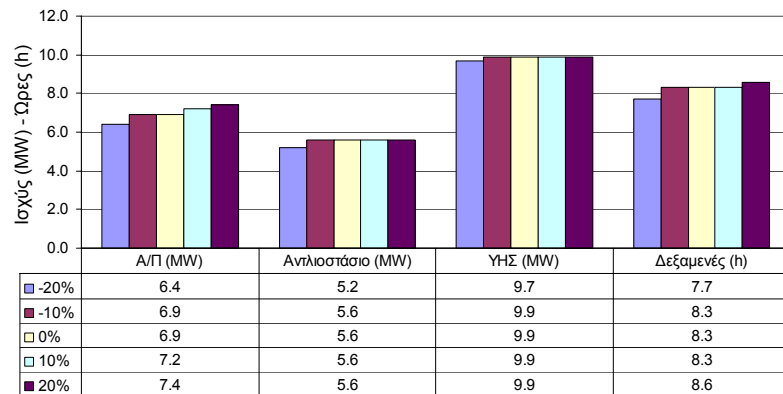
Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 6.8 διαπιστώνεται εύλογα ότι το μέγεθος της επίδρασης στον IRR της επένδυσης από τη μεταβολή του κόστους έκαστης συνιστώσας εξαρτάται από την ποσοστιαία συνεισφορά του κόστους κατασκευής της συγκεκριμένης συνιστώσας στο συνολικό κόστος του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι καθοριστικός παράγοντας στην οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης αποτελεί το μοναδιαίο κόστος του Α/Π, καθώς μεταβολή του κόστους του κατά $\pm 20\%$ επιφέρει μεταβολή του IRR από 16.3% έως 25.8%. Αντίθετα λιγότερο καθοριστικοί παράγοντες αποτελούν τα κόστη κατασκευής των δεξαμενών και του αντλιοστασίου, όπου η διαφοροποίηση του κόστους τους κατά $\pm 20\%$ επιφέρει εύρος μεταβολής του IRR ίσο με δύο ποσοστιαίες μονάδες (από 19.5% έως 21.5%).



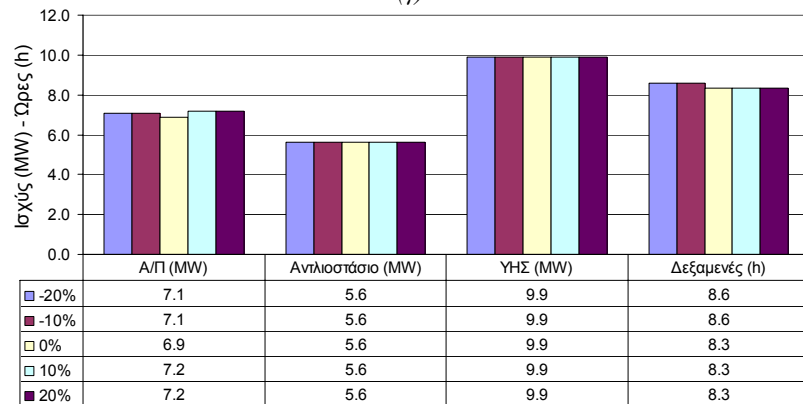
(α)



(β)

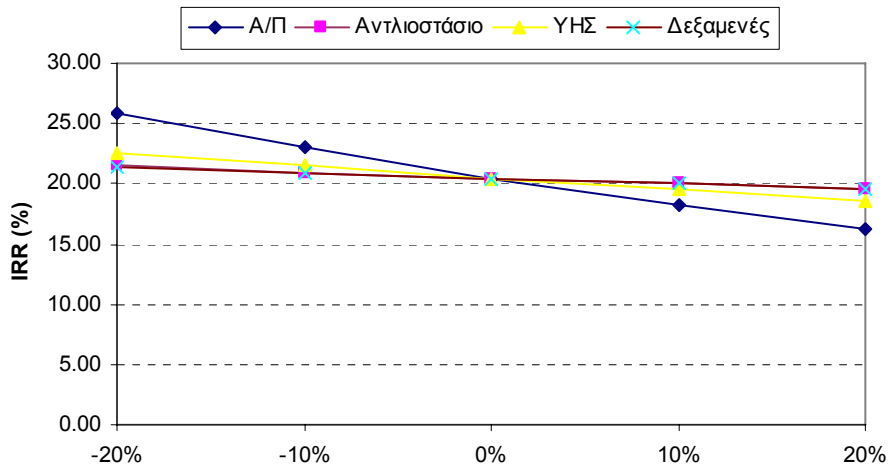


(γ)



(δ)

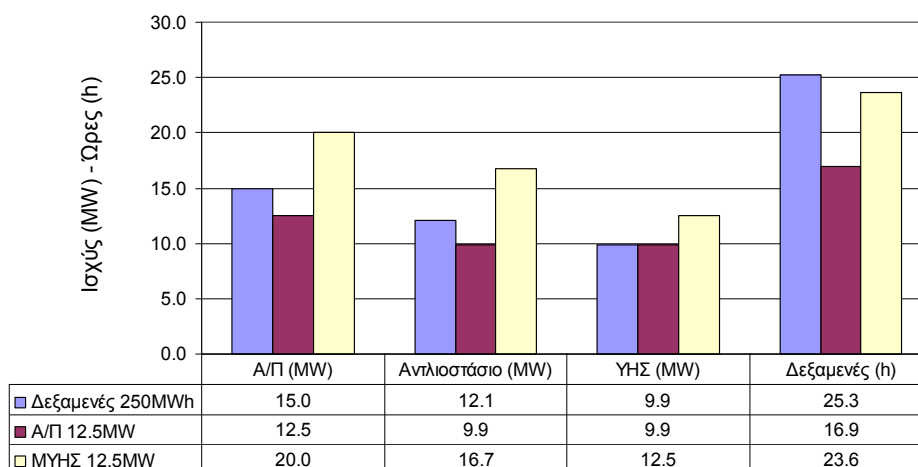
Σχήμα 6.8. Επίδραση της μεταβολής του κόστους έκαστης συνιστώσας του ΥΒΣ στη βέλτιστη διαστασιολόγησή του: α) Μεταβολή κόστους A/Π, β) Μεταβολή κόστους αντλιοστάσιου, γ) Μεταβολή κόστους υδροστρόβιλων, δ) Μεταβολή κόστους δεξαμενών.



Σχήμα 6.8. Αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του IRR ως προς τα μοναδιαία κόστη των επιμέρους συνιστωσών του ΥΒΣ. Οι τιμές του x-άξονα αφορούν ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις ως προς τις τιμές του βασικού σεναρίου ενδιάμεσης τιμολόγησης.

Τέλος, παρατίθενται αποτελέσματα για τα σενάρια όπου οι 3 από τις 4 μεταβλητές του προβλήματος είναι ελεύθερες και δεσμευμένη μεταβλητή είναι είτε η χωρητικότητα των δεξαμενών είτε η ισχύς του Α/Π είτε η ισχύς του ΥΗΣ. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση της ενδιάμεσης τιμολόγησης και για τη θεώρηση ότι τηρούνται οι τεχνικές προϋποθέσεις του Κεφαλαίου 3 (που είναι και η βασική θεώρηση για όλα τα σενάρια).

Καταρχάς διαπιστώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις που η μία μεταβλητή είναι δεσμευμένη προκύπτουν, όπως είναι λογικό, μικρότεροι IRR για τις επενδύσεις των βέλτιστων ΥΒΣ συγκριτικά με την περίπτωση που και οι 4 μεταβλητές είναι ελεύθερες, ιδιαίτερα από τη στιγμή που η τιμή της δεσμευμένης μεταβλητής απέχει σημαντικά από τη βέλτιστη του αντίστοιχου σεναρίου των 4 ελεύθερων μεταβλητών. Μικρότερο IRR προκύπτει για το σενάριο της δεδομένης ισχύος ΥΗΣ, καθώς η τιμή των 12.5 MW που επιλέχτηκε, επιβάλλει τη σύνδεση του ΥΒΣ στην ΥΤ, κάτι που αυξάνει σημαντικά το κόστος σύνδεσης. Όσον αφορά τις προκύπτουσες βέλτιστες διαστασιολογήσεις ΥΒΣ, διαπιστώνεται ότι αυτές προκύπτουν μεγαλύτερες συγκριτικά με το σενάριο των 4 ελεύθερων μεταβλητών, από τη στιγμή που οι τιμές των δεσμευμένων μεταβλητών είναι επίσης μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες βέλτιστες. Οι αναλογίες βέβαια των μεγεθών των επιμέρους μονάδων του ΥΒΣ είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των σεναρίων των 4 ελεύθερων μεταβλητών που εξετάστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 6.9. Αποτελέσματα της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από τη σκοπιά του επενδυτή, για τα σενάρια όπου οι 3 από τις 4 μεταβλητές του προβλήματος είναι ελεύθερες και δεσμευμένη μεταβλητή είναι είτε η χωρητικότητα των δεξαμενών (250 MWh) είτε η ισχύς του Α/Π (12.5 MW) είτε η ισχύς του ΥΗΣ (12.5 MW).

Πίνακας 6.10. Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης και προκύπτοντα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ για τους βελτιστούς ΥΒΣ από την οπτική του επενδυτή, για τα σενάρια όπου οι 3 από τις 4 μεταβλητές του προβλήματος είναι ελεύθερες.

		Δεσμευμένη Μεταβλητή		
		Χωρητικότητα Δεξαμενών	Ισχύς Α/Π	Ισχύς ΥΗΣ
Κόστος ΥΒΣ	εκ. €	48.1	41.0	64.5
IRR	%	19.0	19.3	17.0
NPV (χωρίς υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	12.8	11.3	14.2
NPV (με υπολειπόμενη αξία)	εκ. €	17.3	15.2	20.5
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας ΥΒΣ	%	9.66	7.93	12.58
Ποσοστό διείσδυσης ενέργειας λοιπών ΑΠΕ	%	10.84	10.90	10.78

6.3.2 Οπτική συστήματος

Το σύνολο λύσεων Pareto για το συγκεκριμένο πολυκριτηριακό πρόβλημα και για το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης του συμβατικού σταθμού το έτος 2010, όπου οι μονάδες καταναλώνουν κατά βάση μαζούτ, παρατίθεται στον Πίνακα 6.11, μαζί με τις προκύπτουσες τιμές των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων (LCOE και ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ). Τα ζεύγη τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων για τις αντίστοιχες λύσεις του προβλήματος αποτελεί το μέτωπο Pareto και απεικονίζεται στο Σχήμα 6.10.

Το σύνολο Pareto του Πίνακα 6.11 περιλαμβάνει τις λύσεις που δίνουν υψηλά ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ με το μικρότερο δυνατό συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος. Διαπιστώνεται ότι ακόμα και στην περίπτωση ενός συστήματος με χαμηλό μεταβλητό κόστος λειτουργίας, είναι δυνατό με την ένταξη μικρών και κατάλληλα διαστασιοποιημένων ΥΒΣ να συνδυαστεί η αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ με μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής (ενδεικτικά, το LCOE του συστήματος χωρίς ΥΒΣ είναι 145.1 €/MWh). Οι πανομοιότυπες λύσεις Νο 1 και 2 του Πίνακα 6.11 είναι αυτές που αντιστοιχούν στο μικρότερο LCOE. Μάλιστα η διαστασιολόγηση ΥΒΣ που προτείνεται από τις λύσεις Νο 1 και 2 είναι παρόμοια με την αντίστοιχη της λύσης που προκύπτει για το πρόβλημα από την οπτική του επενδυτή και για το σενάριο χαμηλής τιμολόγησης, καθώς τα κριτήρια βελτιστοποίησης για τα δύο προβλήματα είναι κατά κάποιο τρόπο παρόμοια. Ουσιαστικά το παρόν πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ως μια παραλλαγή του προβλήματος από την οπτική του επενδυτή, με τον ΥΒΣ να αποζημιώνεται βάσει του πραγματικά αποφευγόμενου κόστους από την υποκατάσταση συμβατικής ενέργειας και ισχύος, σε τιμές δηλαδή που λίγο διαφοροποιούνται από τις αντίστοιχες τιμές του σεναρίου χαμηλών τιμολογήσεων του Πίνακα 6.1. Στο σημείο που διαφοροποιούνται τα δύο προβλήματα είναι ότι για την υπόψη οπτική του προβλήματος υφίσταται και το κριτήριο της αύξησης των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ. Και για μεγέθη ΥΒΣ μεγαλύτερα των λύσεων Νο 1 και 2, η αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ συνδυάζεται με μείωση του LCOE, δηλαδή οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος γίνονται ανταγωνιστικές, οδηγώντας στο σύνολο λύσεων Pareto του Πίνακα 6.11. Όσον αφορά τη λύση που συνεπάγεται το υψηλότερο ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ με το μικρότερο δυνατό συνολικό κόστος παραγωγής, αυτή είναι η λύση Νο 21, όπου η ισχύς του Α/Π καθώς επίσης και η χωρητικότητα των δεξαμενών φτάνουν τα άνω όρια του πεδίου τιμών του προβλήματος. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η επιπλέον αύξηση του ποσοστού διείσδυσης ΑΠΕ κατά 42%, που επιτυγχάνεται λόγω της ένταξης του συ-

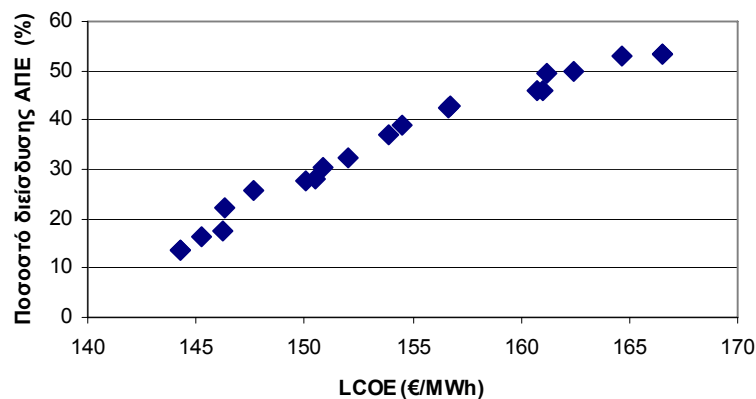
γκεκριμένου ΥΒΣ, αντιστοιχεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος μόλις κατά 15%. Μάλιστα αυτή η αύξηση του LCOE οφείλεται κυρίως στο κόστος εγκατάστασης του ΥΒΣ, το οποίο για ένα μέγεθος ΥΗΣ (~12.5 MW) και πάνω αρχίζει να επιβαρύνει το συνολικό κόστος αφού δεν ανταποκρίνεται σε αντίστοιχη μείωση της απαιτούμενης συμβατικής ισχύος για τα επόμενα χρόνια.

Στη συνέχεια εξετάζεται η διαφοροποίηση των παραπάνω αποτελεσμάτων αν δεν είναι εφικτή η υδροαιολική συνεργασία και επίσης ο ΥΒΣ παρουσιάζει αργότερη δυναμική απόκριση σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6.12 και στο Σχήμα 6.11.

Διαπιστώνεται ότι η απαγόρευση της υδροαιολικής συνεργασίας συνεπάγεται υψηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής για το σύστημα και παράλληλα χαμηλότερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ. Επιπλέον προκύπτουν μεγαλύτερα μεγέθη αντλιών, καθώς από τη στιγμή που η υδροαιολική συνεργασία δεν είναι εφικτή, μόνος τρόπος αξιοποίησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας απομένει η άντληση.

Πίνακας 6.11. Το σύνολο λύσεων Pareto και το μέτωπο Pareto για το πρόβλημα βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από την οπτική του συστήματος, για το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης του συμβατικού σταθμού το έτος 2010 (χαμηλό κόστος συμβατικής παραγωγής).

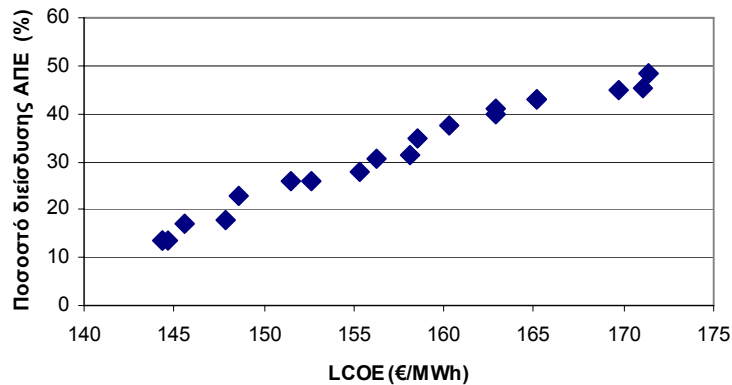
Α/Α Λύσεων	Ισχύς Α/Π	Ισχύς Αντλιο- οστάσιου	Ισχύς ΥΗΣ	Χωρητικότητα	Δεξαμενών	LCOE	Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ
	MW	MW	MW	MWh	h	€/MWh	%
1	4.1	5.6	9.9	47.5	4.8	144.29	13.82
2	4.1	5.6	9.9	47.5	4.8	144.29	13.82
3	8.9	5.6	9.9	47.5	4.8	145.22	16.45
4	8.9	11.2	9.9	237.5	24.0	146.27	17.53
5	15.6	11.2	9.9	235.0	23.7	146.29	22.33
6	21.5	11.7	9.9	300.0	30.3	147.67	25.61
7	27.9	11.4	9.9	305.0	30.8	150.06	27.77
8	28.8	11.3	9.9	305.0	30.8	150.46	28.00
9	28.8	20.6	9.9	647.5	65.4	150.84	30.58
10	28.9	20.6	11.3	1250.0	110.6	152.06	32.41
11	38.6	27.3	19.3	650.0	33.7	153.87	36.92
12	38.8	27.6	20.7	1250.0	60.4	154.51	38.91
13	46.9	27.7	20.3	1210.0	59.6	156.61	42.45
14	47.1	27.7	20.8	1250.0	60.1	156.73	42.69
15	57.2	27.7	20.6	1250.0	60.7	160.78	45.84
16	57.7	27.6	20.7	1250.0	60.4	161.01	45.96
17	57.2	43.9	33.1	1250.0	37.8	161.20	49.61
18	57.7	44.5	40.7	1250.0	30.7	162.42	50.06
19	65.0	44.5	41.2	1250.0	30.3	164.65	53.11
20	65.0	59.9	40.6	1250.0	30.8	166.54	53.21
21	65.0	59.9	40.6	1250.0	30.8	166.54	53.21



Σχήμα 6.10. Το μέτωπο Pareto του προβλήματος βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από την οπτική του συστήματος, για το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης του συμβατικού σταθμού το έτος 2010 (χαμηλό κόστος συμβατικής παραγωγής).

Πίνακας 6.12. Το σύνολο λύσεων Pareto και το μέτωπο Pareto για το πρόβλημα βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από την οπτική του συστήματος, για χαμηλό κόστος συμβατικής παραγωγής και θεωρώντας μη εφικτή την υδροαιολική συνεργασία και χαμηλότερο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους.

Α/Α Λύσεων	Ισχύς Α/Π	Ισχύς Αντλιο- στάσιου	Ισχύς ΥΗΣ	Χωρητικότητα	Δεξαμενών	LCOE	Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ
	MW	MW	MW	MWh	h	€/MWh	%
1	3.6	5.6	9.9	50.0	5.1	144.36	13.40
2	3.6	5.6	9.9	50.0	5.1	144.36	13.40
3	3.8	5.8	9.9	77.5	7.8	144.61	13.56
4	10.1	5.8	9.9	77.5	7.8	145.61	17.21
5	10.3	15.9	9.9	295.0	29.8	147.88	17.93
6	18.3	15.9	9.9	287.5	29.0	148.60	22.88
7	26.5	15.9	9.9	287.5	29.0	151.46	25.89
8	26.5	15.9	10.1	297.5	29.5	152.65	25.93
9	32.3	20.1	10.1	297.5	29.5	155.31	28.02
10	32.2	33.9	9.9	975.0	98.5	156.25	30.69
11	32.3	34.0	22.3	1082.5	48.5	158.08	31.24
12	38.1	34.4	21.6	1082.5	50.1	158.51	34.88
13	44.9	34.3	22.3	975.0	43.7	160.27	37.68
14	50.8	34.3	22.3	1082.5	48.5	162.85	39.68
15	50.8	44.7	22.3	1082.5	48.5	162.86	41.12
16	56.8	44.7	22.4	1082.5	48.3	165.13	43.16
17	56.8	44.7	22.4	1082.5	48.3	165.13	43.16
18	56.8	65.0	43.9	1082.5	24.7	169.72	44.80
19	64.3	65.0	22.5	1085.0	48.2	171.02	45.40
20	64.2	65.0	43.9	1085.0	24.7	171.33	48.45
21	64.2	65.0	43.9	1085.0	24.7	171.33	48.45



Σχήμα 6.11. Το μέτωπο Pareto για το πρόβλημα βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από την οπτική του συστήματος, για χαμηλό κόστος συμβατικής παραγωγής και θεωρώντας μη εφικτή την υδροαιολική συνεργασία και χαμηλότερο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους.

Επίσης εξετάστηκε το πρόβλημα και για το σενάριο όλες οι συμβατικές μονάδες να καταναλώνουν το πολύ ακριβότερο καύσιμο diesel, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα να δίνονται στον Πίνακα 6.13. Στην προκειμένη περίπτωση, λόγω του υψηλού κόστους της συμβατικής παραγωγής, η ένταξη ΥΒΣ όχι μόνο αυξάνει το ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ αλλά παράλληλα μειώνει το συνολικό κόστος παραγωγής, δηλαδή οι αντικειμενικές συναρτήσεις δεν παρουσιάζονται ανταγωνιστικές μεταξύ τους (τουλάχιστον για το οριζόμενο πεδίο τιμών των μεταβλητών του προβλήματος). Γι' αυτόν το λόγο, αντί να προκύπτει μια ποικιλία λύσεων όπως στις παραπάνω περιπτώσεις, στο συγκεκριμένο σενάριο οι προκύπτουσες λύσεις του Πίνακα 6.13 είναι παρόμοιες, με την ισχύ του Α/Π και τη χωρητικότητα των δεξαμενών να εξισώνονται με τα άνω όρια του πεδίου τιμών του προβλήματος και τις υπόλοιπες συνιστώσες να διαμορφώνονται κατά το βέλτιστο τρόπο, προσομοιάζοντας ουσιαστικά την τελευταία λύση του Πίνακα 6.11. Συνεπώς και το μέτωπο Pareto, αντί να είναι μια καμπύλη, προσεγγίζει ουσιαστικά ένα σημείο, με το συνολικό κόστος παραγωγής να κυμαίνεται στα 238.7 €/MWh και το ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ στο 53%. Σημειωτέον ότι το συνολικό κόστος παραγωγής του συστήματος χωρίς ΥΒΣ κυμαίνεται στα 288 €/MWh, δηλαδή για το βέλτιστο μέγεθος ΥΒΣ του υπόψη προβλήματος επιτυγχάνεται εκτός από υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και σημαντική μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος, της τάξης του 17%.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα αν δεν είναι εφικτή η υδροαιολική συνεργασία και επίσης ο ΥΒΣ παρουσιάζει αργότερη δυναμική απόκριση σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες, παρατίθενται στον Πίνακα 6.14. Και σε αυτή την περίπτωση οι προκύπτουσες λύσεις είναι παρόμοιες και το μέτωπο Pareto προσεγγίζει και πάλι ένα σημείο, με τη διαφορά όμως ότι αφορά υψηλότερο LCOE, της τάξης των 250 €/MWh (που αντιστοιχεί σε ποσοστό μείωσης του συνολικού κόστους 13%), και χαμηλότερο ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ που κυμαίνεται στο 49.5%. Επιπλέον μια άλλη διαφοροποίηση είναι ότι προκύπτουν μεγαλύτερα μεγέθη αντλιών με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, μιας και στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί το μοναδικό τρόπο αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας από τη στιγμή που η υδροαιολική συνεργασία δεν είναι εφικτή.

Πίνακας 6.13. Το σύνολο λύσεων Pareto και το μέτωπο Pareto για το πρόβλημα βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από την οπτική του συστήματος, για το σενάριο όλες οι συμβατικές μονάδες να καταναλώνουν diesel (υψηλό κόστος συμβατικής παραγωγής).

A/A Λύσεων	Ισχύς Α/Π	Ισχύς Αντλιο- στάσιου	Ισχύς ΥΗΣ	Χωρητικότητα Δεξαμενών	LCOE	Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ	
	MW	MW	MW	MWh	h	€/MWh	%
1	65.0	43.7	38.1	1250.0	32.8	238.78	53.05
2	65.0	43.7	38.1	1250.0	32.8	238.78	53.05
3	65.0	43.9	38.1	1250.0	32.8	238.79	53.06
4	65.0	46.5	38.4	1250.0	32.6	238.79	53.20
5	65.0	47.2	38.4	1250.0	32.6	238.84	53.22
6	65.0	47.2	38.4	1250.0	32.6	238.84	53.22
7	65.0	47.4	38.4	1250.0	32.6	238.87	53.22
8	65.0	48.9	38.1	1250.0	32.8	238.87	53.28
9	65.0	48.9	38.4	1250.0	32.6	238.92	53.28
10	65.0	49.1	38.4	1250.0	32.6	238.92	53.29
11	65.0	51.8	38.1	1250.0	32.8	239.20	53.29
12	65.0	51.8	38.4	1250.0	32.6	239.22	53.31
13	65.0	51.7	39.8	1250.0	31.4	239.40	53.31
14	65.0	51.7	39.8	1250.0	31.4	239.40	53.31
15	65.0	51.7	40.4	1250.0	30.9	239.50	53.31
16	65.0	51.8	40.5	1250.0	30.9	239.54	53.32
17	65.0	51.8	40.5	1250.0	30.9	239.54	53.32
18	65.0	53.0	40.0	1250.0	31.3	239.60	53.32
19	65.0	53.1	40.0	1250.0	31.3	239.62	53.32
20	65.0	53.6	40.0	1250.0	31.3	239.69	53.32
21	65.0	53.6	40.0	1250.0	31.3	239.69	53.32

Πίνακας 6.14. Το σύνολο λύσεων Pareto και το μέτωπο Pareto για το πρόβλημα βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ από την οπτική του συστήματος, για υψηλό κόστος συμβατικής παραγωγής και θεωρώντας μη εφικτή την υδροαιολική συνεργασία και χαμηλότερο συντελεστή δυναμικής διείσδυσης για τους υδροστρόβιλους.

Α/Α Λύσεων	Ισχύς Α/Π MW	Ισχύς Αντλιο- στάσιου MW	Ισχύς ΥΗΣ MW	Χωρητικότητα MWh	Δεξαμενών h	LCOE €/MWh	Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ %
1	65.0	56.2	37.3	1250.0	33.5	249.83	49.37
2	65.0	56.2	37.3	1250.0	33.5	249.83	49.37
3	65.0	56.2	38.3	1250.0	32.6	249.84	49.42
4	65.0	56.4	38.4	1250.0	32.6	249.85	49.44
5	65.0	57.3	38.7	1250.0	32.3	249.86	49.49
6	65.0	57.3	39.4	1247.5	31.7	249.90	49.50
7	65.0	57.4	39.8	1250.0	31.4	249.93	49.52
8	65.0	58.4	39.4	1250.0	31.7	249.98	49.53
9	65.0	58.4	39.8	1250.0	31.4	250.01	49.54
10	65.0	58.0	40.9	1250.0	30.6	250.09	49.55
11	65.0	58.0	41.0	1250.0	30.5	250.10	49.56
12	65.0	58.5	41.2	1250.0	30.3	250.19	49.56
13	65.0	58.5	41.3	1250.0	30.3	250.20	49.57
14	65.0	57.4	44.2	1250.0	28.3	250.43	49.58
15	65.0	57.4	44.2	1250.0	28.3	250.43	49.58
16	65.0	58.4	44.2	1250.0	28.3	250.49	49.61
17	65.0	58.4	44.2	1250.0	28.3	250.49	49.61
18	65.0	58.4	46.0	1250.0	27.2	250.71	49.62
19	65.0	58.5	46.0	1250.0	27.2	250.71	49.62
20	65.0	58.5	46.5	1250.0	26.9	250.77	49.63
21	65.0	58.5	46.5	1250.0	26.9	250.77	49.63

6.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνήθηκε διεξοδικά το ζήτημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης αντλιοσταμειωτικών ΥΒΣ με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων, με σκοπό την εξαγωγή ορισμένων γενικευμένων συμπερασμάτων επί του θέματος. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για το νησί της Λέσβου, ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μέσου νησιού, με πραγματικά δεδομένα για το έτος 2010. Το υπόψη πρόβλημα βελτιστοποίησης εξετάστηκε τόσο από την οπτική του επενδυτή όσο και από την οπτική του συστήματος.

Αναλυτικότερα, από την εξέταση του **προβλήματος από την οπτική του επενδυτή**, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Με την αύξηση των τιμολογήσεων των ενεργειών αυξάνεται και το μέγεθος του βέλτιστου ΥΒΣ στο οποίο θα συνέφερε να επενδύσει ένας παραγωγός, κάτι που συνεπάγεται αυξημένα

ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα. Όσον αφορά τα μεγέθη των επιμέρους συνιστωσών του ΥΒΣ, διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Η βέλτιστη ισχύς του ΥΗΣ δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις τιμολογήσεις των ενεργειών, καθώς εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος, που έχει θεωρηθεί ότι ισούται με την πραγματικά εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ για δεδομένη ισχύ αντλιοστάσιου και χωρητικότητα δεξαμενών. Ενδεχομένως άνω όριο της βέλτιστης ισχύος του ΥΗΣ να αποτελεί η ισχύς εκείνη που επιβάλλει τη σύνδεση του ΥΒΣ στην ΥΤ, αλλά αυτό είναι κάτι που εξαρτάται από τα εκάστοτε κόστη σύνδεσης.
- Η βέλτιστη ισχύς του Α/Π, που αποτελεί το εργαλείο αξιοποίησης της πρωτογενούς πηγής ενέργειας του ΥΒΣ (δηλ. του ανέμου), επηρεάζεται σημαντικά από τις ενεργειακές τιμολογήσεις, παρουσιάζοντας σημαντική αύξηση συναρτήσει του ύψους των τιμών αποζημίωσης.
- Η βέλτιστη ισχύς του αντλιοστάσιου γενικά ακολουθεί την ισχύ του Α/Π καθώς η άντληση αποτελεί μία από τις βασικές δυνατότητες αξιοποίησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των σχετικά υψηλών τιμολογήσεων όπου συμφέρει να δίνεται προτεραιότητα στην άντληση. Πιο συγκεκριμένα, η βέλτιστη ισχύς του αντλιοστάσιου κυμαίνεται γύρω στο 80-85% της ισχύος του Α/Π. Στην περίπτωση των χαμηλών τιμολογήσεων όμως, όπου η βέλτιστη ισχύς του Α/Π αναμένεται χαμηλή, ενδεχομένως η βέλτιστη ισχύς του αντλιοστάσιου να προκύπτει μεγαλύτερη αυτής του Α/Π, προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλή εγγυημένη ισχύς για τον ΥΒΣ και άρα σημαντικά έσοδα από την αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος.
- Η βέλτιστη χωρητικότητα των δεξαμενών ακολουθεί γενικά την ίδια αυξητική τάση με τη βέλτιστη ισχύ του Α/Π, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος των σημαντικών απορρίψεων αιολικής ισχύος λόγω γεμάτης δεξαμενής, που συνεπάγεται μείωση εσόδων.
- Αν η υδροαιολική συνεργασία δεν είναι τεχνικά εφικτή και επίσης οι υδροστρόβιλοι παρουσιάζουν χειρότερη δυναμική απόκριση από τις συμβατικές μονάδες, τότε:
 - Στις περιπτώσεις χαμηλών τιμολογήσεων όπου συμφέρει να δίνεται προτεραιότητα στην απ' ευθείας έγχυση στο δίκτυο, η απαγόρευση της υδροαιολικής συνεργασίας αναμένεται να οδηγήσει γενικά σε μείωση της οικονομικής αποδοτικότητας των επενδύσεων για ΥΒΣ, καθώς και σε ελαφρώς μικρότερα μεγέθη βέλτιστων ΥΒΣ. Η μείωση αυτή εξαρτάται από το κατά πόσο μεγάλη είναι η διαφορά της τιμής της αιολικής παραγωγής από την τιμή παραγωγής των υδροστρόβιλων επί το συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής, καθώς και από το κατά πόσο υπάρχει η δυνατότητα της απ' ευθείας έγχυσης της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο στα πλαίσια του Mode 2.
 - Για υψηλότερες τιμολογήσεις όπου συμφέρει η αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας για άντληση, η απαγόρευση της υδροαιολικής συνεργασίας δεν αναμένεται να επηρεάσει ιδιαίτερα τόσο τις βέλτιστες διαστασιολογήσεις των ΥΒΣ όσο και την οικονομική αποδοτικότητά τους.
 - Τα ενδεχομένως χαμηλά δυναμικά όρια διείσδυσης των υδροστρόβιλων θα προκαλέσουν κάποιες μειώσεις στους συντελεστές χρησιμοποίησης των Α/Π εκτός ΥΒΣ. Ωστόσο οι μειώσεις που παρατηρούνται από την ένταξη των βέλτιστων (για τις διάφορες τιμολογήσεις ενέργειας) ΥΒΣ δεν είναι τέτοιες που να καθιστούν απαγορευτική την εγκατάστασή τους.
- Η λογική που θα υιοθετηθεί σχετικά με τον καθορισμό του μεγέθους της διαθεσιμότητας ισχύος που θα πρέπει να αποζημιώνεται σε έναν ΥΒΣ, επηρεάζει σημαντικά τη βέλτιστη διαστασιολογήση ενός ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, η ισχύς του ΥΗΣ γενικά ακολουθεί το μέγεθος της αποζημιωτέας διαθεσιμότητας ισχύος. Οπότε αν υιοθετηθεί η ελαστική φιλοσοφία που προτείνεται στο [26], όπου ο παραγωγός καθορίζει την προς αποζημίωση ισχύ χωρίς αυτή να είναι κατ' ανάγκη και η πραγματικά εγγυημένη, τότε ο βέλτιστος ΥΒΣ τείνει να εκφυλιστεί σε ένα σταθμό με μεγάλο σχετικά μέγεθος ΥΗΣ συγκριτικά με τις άλλες συνιστώσες (Α/Π, αντλιοστάσιο, δεξαμενές), τα έσοδα του οποίου θα προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την αποζημίωση ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, εξασφαλίζεται μεν η βιωσιμότητα της επένδυσης του ΥΒΣ, προ-

κύπτει δε αύξηση του κόστους του συστήματος χωρίς να αντικατοπτρίζεται σε ικανοποιητική αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ αλλά και πλήρως εξασφαλισμένη εγγυημένη ισχύ για το σύστημα. Αντίθετα, με τη λογική που προτείνεται στην παρούσα διατριβή, όπου ο παραγωγός θα πρέπει να αποζημιώνεται με βάση την πραγματικά εγγυημένη του (βλ. Κεφάλαιο 5), προκύπτουν εξορθολογισμένες διαστασιολογήσεις ΥΒΣ, για τις οποίες επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ με μικρή σχετικά αύξηση του κόστους του συστήματος.

- Η μείωση της τιμής αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος επιφέρει αύξηση του βέλτιστου μεγέθους του ΥΒΣ και παράλληλα μείωση της οικονομικής αποδοτικότητας της επένδυσης. Η μόνη συνιστώσα του ΥΒΣ της οποίας η διαστασιολόγηση φαίνεται να μην επηρεάζεται, είναι ο ΥΗΣ.
- Το μέγεθος του αιολικού δυναμικού μπορεί να αποτελεί κρίσιμος παράγοντας για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, για τον προσδιορισμό όμως της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ ο ρόλος του είναι δευτερεύον.
- Από υποτυπώδη ανάλυση ευαισθησίας της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ από τα μοναδιαία κόστη των συνιστωσών του, προέκυψε ότι οι μεταβολές των τελευταίων δεν επιφέρουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις στη βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ. Τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις επιφέρει κατά πρώτο λόγο η μεταβολή του κόστους του Α/Π και ακολούθως των υδροστρόβιλων, ενώ ιδιαίτερος μικρή παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του κόστους των συνιστωσών αντλησιοταμίευσης. Σε γενικές γραμμές πάντως οι ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις του βέλτιστου μεγέθους του ΥΒΣ είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες ποσοστιαίες μεταβολές του κόστους των επιμέρους μονάδων του σταθμού. Επιπλέον η μεταβολή του κόστους του Α/Π, του αντλιοστάσιου και των δεξαμενών επιφέρει γενικότερα αντίρροπη μεταβολή των βέλτιστων μεγεθών των επιμέρους συνιστωσών του ΥΒΣ, σε αντίθεση με την περίπτωση των υδροστρόβιλων που προκαλείται ομόρροπη μεταβολή. Όσον αφορά την επίπτωση στον IRR της επένδυσης, διαπιστώθηκε ότι τη σημαντικότερη επίδραση προκαλεί η μεταβολή του μοναδιαίου κόστους του Α/Π, ακολούθως των υδροστρόβιλων, ενώ λιγότερο καθοριστικοί παράγοντες αποτελούν τα μοναδιαία κόστη των συνιστωσών αντλησιοταμίευσης.

Όσον αφορά το **πρόβλημα από την οπτική του συστήματος**, πρόκειται για ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με δύο ανταγωνιστικές αντικειμενικές συναρτήσεις (LCOE και ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ), η επίλυση του οποίου απαιτεί τον προσδιορισμό ενός συνόλου λύσεων Pareto. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Σε περίπτωση χαμηλού κόστους παραγωγής των συμβατικών μονάδων, διαπιστώθηκαν τα εξής:
 - Δύναται με την εγκατάσταση σχετικά μικρού και κατάλληλα διαστασιολογημένου ΥΒΣ, να συνδυαστεί η επιτυχανόμενη αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ με μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος.
 - Για υψηλότερες διεισδύσεις ΑΠΕ απαιτούνται μεγαλύτερα μεγέθη ΥΒΣ, οδηγώντας όμως σε αύξηση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος.
- Σε περίπτωση υψηλού κόστους παραγωγής των συμβατικών μονάδων, διαπιστώθηκαν τα εξής:
 - Η αύξηση του μεγέθους του ΥΒΣ δε συνεπάγεται μόνο αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ αλλά και μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος. Δηλαδή οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος παύουν να είναι ανταγωνιστικές με αποτέλεσμα το σύνολο λύσεων Pareto να προσεγγίζει μία λύση.
 - Η βέλτιστη λύση συνιστά την εγκατάσταση ΥΒΣ με όσο το δυνατόν μεγαλύτερα μεγέθη Α/Π και δεξαμενών και με τις διαστάσεις των υπόλοιπων συνιστωσών να διαμορφώνονται κατά το βέλτιστο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή διείσδυση ΑΠΕ με το μικρότερο δυνατό συνολικό κόστος συστήματος.
- Η απαγόρευση της υδροαιολικής συνεργασίας οδηγεί σε βέλτιστους ΥΒΣ που συνεπάγονται μεγαλύτερο συνολικό κόστος παραγωγής και χαμηλότερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ. Επίσης προκύπτουν μεγαλύτερα μεγέθη αντλιών για τους βέλτιστους ΥΒΣ, καθώς η άντληση σε μια

τέτοια περίπτωση αποτελεί ουσιαστικά το μοναδικό τρόπο αξιοποίησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας.

7. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Ανακεφαλαίωση

Η ανάλυση της παρούσας διατριβής επικεντρώθηκε σε τρία κυρίως θέματα: α) Διερεύνηση των επιπτώσεων από τη λειτουργία ενός αντλησιοταμιευτικού ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος του νησιού στο οποίο εντάσσεται. β) Προσδιορισμός κατάλληλης πολιτικής διαχείρισης για ένα ΜΔΝ με ΥΒΣ και διερεύνηση των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων στο νησιωτικό σύστημα από τη λειτουργία του ΥΒΣ. γ) Διερεύνηση θεμάτων βέλτιστης διαστασιολόγησης ενός ΥΒΣ.

Αναλυτικότερα, το πρώτο σκέλος της ανάλυσης που αφορά τις επιπτώσεις των ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά των νησιωτικών συστημάτων, εξετάστηκε στα Κεφάλαια 2 και 3. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν τα δυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση ενός τυπικού ΜΔΝ με ΥΒΣ. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν εκτενώς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη βοήθεια του προγράμματος DigSilent/PowerFactory για τις πλέον κρίσιμες από τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις του ηλεκτρικού συστήματος του νησιού, χωρίς και με τον ΥΒΣ σε λειτουργία, προκειμένου να διαπιστωθούν οι αναμενόμενες επιπτώσεις των διαφόρων λειτουργικών καταστάσεων ενός ΥΒΣ στη μεταβατική απόκριση του συστήματος, να εντοπιστούν οι πιθανοί λειτουργικοί περιορισμοί και να προταθούν λύσεις για την αντιμετώπιση των όποιων προβλημάτων.

Το δεύτερο σκέλος της ανάλυσης που αφορά τον προσδιορισμό της πολιτικής διαχείρισης και των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων, εξετάστηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 4, αφού αρχικά διερευνήθηκαν εναλλακτικές στρατηγικές διαχείρισης λαμβάνοντας υπόψη το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, στη συνέχεια προτάθηκε συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης για ΜΔΝ με ΥΒΣ. Κριτήρια για την επιλογή της αποτέλεσαν η αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ στα ΜΔΝ και η εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας των ΥΒΣ, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των υφιστάμενων Α/Π των νησιών και χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος. Παράλληλα προτάθηκε κατάλληλη πολιτική εσωτερικής λειτουργίας των ΥΒΣ, για τη μεγιστοποίηση των εσόδων τους. Στο Κεφάλαιο 5 εξετάστηκε η καταλληλότητα της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης μέσω προσομοιώσεων της ετήσιας λειτουργίας τριών νησιωτικών συστημάτων (Κρήτης, Λέσβου, Καρπάθου) διαφορετικού μεγέθους και χαρακτηριστικών, με ενταγμένους υποθετικούς ΥΒΣ, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και το οποίο βασίζεται στο ισοζύγιο ενέργειας και ισχύος των συστημάτων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν, προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης και να διαπιστωθούν οι αναμενόμενες ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις της ένταξης των ΥΒΣ στα νησιωτικά συστήματα. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ενδεικτική αξιολόγηση της βιωσιμότητας των επενδύσεων για ΥΒΣ υπό το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο. Παράλληλα, στα πλαίσια αυτής της ανάλυσης και προς επικύρωση των συμπερασμάτων, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε και μια πραγματική εφαρμογή (εκτός από υποθετικά σενάρια), αυτή του ΥΒΣ της Ικαρίας, που αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους πρώτους αντλησιοταμιευτικούς ΥΒΣ στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως.

Το τρίτο σκέλος της ανάλυσης που αφορά τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ, εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 6. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων και με εφαρμογή στο σύστημα της Λέσβου, αναλύθηκε και διερευνήθηκε το θέμα της βέλτιστης διαστασιολόγησης αντλησιοταμιευτικών ΥΒΣ τόσο από την οπτική του επενδυτή όσο και από την οπτική του συστήματος. Πληθώρα σεναρίων εξετάστηκε προκειμένου να εξαχθούν ορισμένα γενικευμένα συμπεράσματα επί του ζητήματος.

Τέλος, στο παρόν Κεφάλαιο παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της παρούσας διατριβής, επισημαίνονται τα σημεία καινοτομίας και προαγωγής της επιστήμης και περιγράφονται προοπτικές συνέχισής της.

7.2 Τελικά συμπεράσματα

Από τη διερεύνηση των επιπτώσεων των ΥΒΣ στη δυναμική συμπεριφορά των αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων των ΥΒΣ αναμένεται να είναι υποδεέστερη συγκριτικά με τις μονάδες diesel κατά τη συμμετοχή τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Συνεπώς η ενσωμάτωσή τους στα νησιωτικά συστήματα, με υποκατάσταση μονάδων diesel σημαντικής ικανότητας, οι οποίες συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας, ενδεχομένως να επιδεινώσει τη δυναμική απόκριση του συστήματος σε σημαντικές διαταραχές και ίσως να οδηγήσει σε μείωση των συντελεστών χρησιμοποίησης των υφιστάμενων Α/Π, εάν υιοθετηθούν μειωμένες τιμές για τον δυναμικό περιορισμό διείσδυσης. Σημειωτέον ότι η επιδείνωση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος λόγω της ένταξης των υδροστρόβιλων ισχύει κυρίως για τα μικρού και μέσου μεγέθους νησιωτικά συστήματα με ΑΣΠ που αποτελούνται βασικά από μονάδες diesel. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις όμως, θα πρέπει να τονιστεί ότι η πραγματική συμπεριφορά των υφιστάμενων μονάδων diesel στα ΜΔΝ απέχει από την ιδεατή των προσομοιώσεων. Από την άλλη, για μεγαλύτερα συστήματα όπως αυτά της Κρήτης και της Ρόδου, με σταθμούς παραγωγής αποτελούμενους και από μονάδες διαφορετικού τύπου, όπως ατμοστρόβιλους ή συνδυασμένους κύκλους, των οποίων η απόκριση δεν υπερτερεί των υδροστρόβιλων, η υποκατάσταση συμβατικών μονάδων από τον ΥΗΣ του ΥΒΣ δεν αναμένεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος.
- Βελτίωση της ικανότητας ρύθμισης συχνότητας των υδροστρόβιλων για ΥΗΣ με δεδομένες υψομετρικές διαφορές μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της αδράνειας των στρεφόμενων μαζών των υδροστρόβιλων. Βελτίωση αναμένεται κατ' αρχήν να προκύψει και από τη μείωση των χαρακτηριστικών χρόνων T_w και T_e , μέσω αύξησης της διατομής του αγωγού παραγωγής ή της κατασκευής πύργου αναπόσβεως πλησίον των υδροστρόβιλων. Βέβαια οι συγκεκριμένες λύσεις αυξάνουν σημαντικά το επενδυτικό κόστος του ΥΗΣ.
- Στα πλαίσια της υδροαιολικής συνεργασίας και εφόσον οι Α/Γ του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT και ρύθμιση συχνότητας, τότε ο ΥΒΣ ως ενιαία μονάδα παραγωγής παρουσιάζει δυναμική απόκριση παρόμοια ή και καλύτερη από τις συμβατικές μονάδες που υποκαθιστούν. Τα ίδια ισχύουν και στην περίπτωση της αντλιοστασιακής συνεργασίας αν, εκτός από τις Α/Γ, και οι αντλίες του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT, καθώς επίσης και δυνατότητα πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, χαρακτηριστικό απαραίτητο τόσο στην περίπτωση της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος, όσο και της μέσης τιμής αν οι Α/Γ του ΥΒΣ δεν έχουν απόκριση συχνότητας. Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, αντισταθμίζεται η υποδεέστερη δυναμική απόκριση των υδροστρόβιλων.
- Η υδροαιολική συνεργασία δεν αναμένεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ακόμα και για τις δυσμενέστερες διαταραχές, εφόσον ικανοποιούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:
 - Οι Α/Γ του ΥΒΣ έχουν ικανότητα FRT και επίσης παρέχουν λειτουργίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, οι οποίες περιλαμβάνουν έλεγχο στατισμού (droop control) και απαραίτητως αδρανειακή απόκριση (inertia control). Η απόκριση συχνότητας θα πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμη μετά την εκδήλωση της διαταραχής και όχι σε χρόνους λίγων δευτερολέπτων.
 - Οι Α/Γ του ΥΒΣ είναι ηλεκτρικά διαχωρισμένες σε περισσότερες της μιας ομάδες, ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα απώλειας του συνόλου της αιολικής παραγωγής του

ΥΒΣ. Επιπλέον, οι Α/Γ πρέπει να λειτουργούν με επαρκές περιθώριο ανάληψης ισχύος ώστε να μπορούν να αντισταθμίσουν προσωρινά (μέσω της αδρανειακής τους απόκρισης) την ενδεχόμενη απώλεια αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ που προκύπτει από την απώλεια μιας ομάδας Α/Γ του ΥΒΣ. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με κατάλληλη επιλογή του set-point ισχύος των Α/Γ, όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 3.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις, η υδροαιολική συνεργασία όχι μόνο δεν επιδεινώνει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων έχει θετικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος, εξομαλύνοντας παράλληλα τη μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου των μονάδων που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, μειώνοντας συνεπώς τις καταπονήσεις τους.

- Όσον αφορά την αντλησιοαιολική συνεργασία, διαπιστώθηκαν τα εξής:
 - Αν υιοθετηθεί η λογική της παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής παραγωγής από τις αντλίες, τότε η αντλησιοαιολική συνεργασία παρουσιάζεται ουδέτερη για το σύστημα, χωρίς καμία αρνητική επίπτωση, εφόσον βέβαια οι αντλίες διαθέτουν την απαιτούμενη ταχύτητα απόκρισης. Αν επιπλέον οι αντλίες έχουν ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, τότε η αντλησιοαιολική συνεργασία βελτιώνει τη δυναμική συμπεριφορά του νησιωτικού συστήματος συνολικά.
 - Αν υιοθετηθεί η λογική παρακολούθησης της μέσης τιμής της αιολικής ισχύος, τότε προκύπτουν αποκλίσεις μεταξύ της αιολικής και αντλητικής ισχύος, που συνιστούν πρόσθετη διαταραχή για το σύστημα και επιβαρύνουν τη ρύθμιση της συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση και για την επίτευξη θετικών επιπτώσεων στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, κυρίως σε περιόδους σημαντικών διαταραχών οπότε και υπάρχει βασικά η ανάγκη για σημαντική πρωτεύουσα εφεδρεία, απαιτείται ικανότητα ρύθμισης συχνότητας από το Α/Π ή τις αντλίες του ΥΒΣ, ή και από τα δύο για καλύτερα αποτελέσματα.
 - Από τις παραπάνω δύο λογικές, πιο «καθαρή» για το σύστημα είναι η πρώτη (παρακολούθηση της στιγμιαίας αιολικής παραγωγής) καθώς αποφεύγονται οι αποκλίσεις αιολικής και αντλητικής ισχύος. Η δεύτερη (παρακολούθηση της μέσης αιολικής παραγωγής) συνεπάγεται μικρότερες καταπονήσεις για το αντλιοστάσιο και επίσης ενδείκνυται σε ΥΒΣ όπου μόνο οι Α/Γ έχουν δυνατότητα ρύθμισης συχνότητας και όχι οι αντλίες, ιδιαίτερα όταν είναι επιθυμητή η εφαρμογή υδροαιολικής συνεργασίας. Αντίθετα, αν οι Α/Γ του ΥΒΣ δεν έχουν ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, τότε ενδείκνυται η υιοθέτηση της λογικής παρακολούθησης της στιγμιαίας αιολικής ισχύος του ΥΒΣ από το αντλιοστάσιο. Επίσης, η λογική της παρακολούθησης της μέσης αιολικής παραγωγής προτείνεται για μεγάλα νησιωτικά συστήματα, όπου μπορεί να λειτουργούν περισσότεροι ΥΒΣ με σημαντική διασπορά των Α/Π τους, οι ταχείες μεταβολές της παραγωγής των οποίων αλληλοαναιρούνται σε σημαντικό βαθμό και άρα δεν υφίσταται ανάγκη στιγμιαίας αντιστάθμισής τους.
 - Αν είναι επιθυμητό η αντλησιοαιολική συνεργασία να συμβάλλει θετικά στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων (και όχι να είναι απλώς ουδέτερη), τότε θα πρέπει οι αντλίες να έχουν επίσης ικανότητα FRT.

Από την αξιολόγηση της προτεινόμενης πολιτικής διαχείρισης και των αναμενόμενων ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων των ΥΒΣ στα ΜΑΝ, διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Η εγκατάσταση ΥΒΣ σε ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα αναμένεται να συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της διείσδυσης ενέργειας ΑΠΕ και συνεπώς στη μείωση της συμβατικής παραγωγής και των εκπομπών CO₂, σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από αυτά που μπορεί να επιτευχθούν σήμερα με την εγκατάσταση μόνο Α/Γ και Φ/Β.
- Οι ΥΒΣ μπορούν να παρέχουν εγγυημένη ισχύ, υποκαθιστώντας συμβατικές μονάδες αιχμής και επιτρέποντας την αποφυγή εγκατάστασης νέων συμβατικών μονάδων αντίστοιχης ισχύος.
- Η προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης καθιστά δυνατή την ομαλή ενσωμάτωση ακόμη και μεγάλων ΥΒΣ σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, χωρίς μεγάλη επιβάρυνση της λειτουργίας

των συμβατικών μονάδων παραγωγής και με ελαχιστοποίηση των όποιων αρνητικών επιπτώσεων στην ενεργειακή απόδοση των υφιστάμενων Α/Π.

- Με το υφιστάμενο πλαίσιο τιμολόγησης της ενέργειας και της διαθεσιμότητας ισχύος των ΥΒΣ και την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης, η ένταξη ΥΒΣ δεν αναμένεται να επιβαρύνει δραματικά το συνολικό κόστος παραγωγής των νησιωτικών συστημάτων, υπό την έννοια ότι η προκύπτουσα αύξηση του κόστους παραγωγής υπολείπεται σημαντικά της επιτυγχανόμενης αύξησης της διείσδυσης ΑΠΕ. Για μεγάλα μεγέθη ΥΒΣ συγκριτικά με το φορτίο του νησιού, η αύξηση του κόστους παραγωγής καθίσταται πάντως σημαντική.
- Οι επενδύσεις ΥΒΣ στα νησιωτικά συστήματα με βάση το ισχύον θεσμικό πλαίσιο παρουσιάζουν αξιόλογο οικονομικό ενδιαφέρον. Η αναμενόμενη ανοδική πορεία των τιμών των συμβατικών καυσίμων, ενδεχομένως και των δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων, θα βελτιώσει ακόμη περισσότερο τους οικονομικούς δείκτες των επενδύσεων ΥΒΣ.
- Με την προτεινόμενη πολιτική διαχείρισης επιτυγχάνεται η ομαλή ενσωμάτωση ΥΒΣ μεγάλου μεγέθους στα νησιωτικά συστήματα. Κύριοι περιορισμοί στο μέγιστο μέγεθος ΥΒΣ που μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα ΜΔΝ, πέρα από την επίπτωση στο κόστος παραγωγής του νησιού, φαίνεται πως είναι η βιωσιμότητα των επενδύσεων, λόγω κορεσμού στην απορρόφηση της ενέργειάς τους από το σύστημα, καθώς και η ενδεχόμενη μείωση των συντελεστών χρησιμοποίησης των λοιπών Α/Π.

Από τη διερεύνηση του ζητήματος της βέλτιστης διαστασιολόγησης αντλησιοταμιευτικών ΥΒΣ από δύο διαφορετικές οπτικές και για πληθώρα σεναρίων, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Από τη διερεύνηση του προβλήματος από την οπτική του επενδυτή, διαπιστώθηκαν τα εξής:
 - Οι τιμολογήσεις των ενεργειών καθώς και της διαθεσιμότητας ισχύος αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης ενός ΥΒΣ, με τα βέλτιστα μεγέθη των βασικών συνιστωσών του ΥΒΣ να αυξάνονται για υψηλότερες τιμολογήσεις των ενεργειών και χαμηλότερες τιμές αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος. Μόνο η βέλτιστη ισχύς του ΥΒΣ φαίνεται να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις τιμολογήσεις, καθοριζόμενη βασικά από τη μέγιστη εγγυημένη ισχύ που μπορεί να εξασφαλίσει ένας ΥΒΣ στο εκάστοτε νησιωτικό σύστημα. Ενδεχομένως, άνω όριο της βέλτιστης ισχύος του ΥΒΣ να αποτελεί η ισχύς εκείνη που επιβάλλει τη σύνδεση του ΥΒΣ στην ΥΤ, αλλά αυτό είναι κάτι που εξαρτάται από τα εκάστοτε κόστη διασύνδεσης.
 - Ενδεχόμενη μη εφικτότητα της υδροαιολικής συνεργασίας επηρεάζει ελάχιστα τη βέλτιστη διαστασιολόγηση των ΥΒΣ καθώς και την οικονομική απόδοση των επενδύσεών τους.
 - Το αολικό δυναμικό αποτελεί μεν καθοριστικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα των επενδύσεων ΥΒΣ, όχι όμως και για τον καθορισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης τους.
 - Οι μεταβολές του μοναδιαίου κόστους των βασικών συνιστωσών του ΥΒΣ δεν επιφέρουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις στη βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ, με καθοριστικότερο παράγοντα το κόστος του Α/Π. Η μεταβολή του κόστους του Α/Π, του αντλιοστάσιου και των δεξαμενών επιφέρει γενικά αντίρροπη μεταβολή των βέλτιστων μεγεθών των επιμέρους συνιστωσών του ΥΒΣ, ενώ μεταβολή στο κόστος των υδροστρόβιλων προκαλεί ομόρροπη μεταβολή.
- Από τη διερεύνηση του προβλήματος από την οπτική του συστήματος διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:
 - Σε περίπτωση συστημάτων με χαμηλό μεταβλητό κόστος συμβατικής παραγωγής (π.χ. κατανάλωση μαζούτ από τις μονάδες του ΑΣΠ), δύναται με την εγκατάσταση σχετικά μικρού και κατάλληλα διαστασιολογημένου ΥΒΣ, να συνδυαστεί η επιτυγχανόμενη αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ με μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος. Για την επίτευξη υψηλότερων διεισδύσεων ΑΠΕ απαιτούνται μεγαλύτερα μεγέθη ΥΒΣ, οδηγώντας όμως σε αύξηση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος.

- Σε περίπτωση συμβατικής παραγωγής με υψηλό μεταβλητό κόστος (π.χ. κατανάλωση diesel από τις μονάδες του ΑΣΠ), η επιτυγχανόμενη αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ λόγω της ένταξης ΥΒΣ συνδυάζεται με μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος. Δηλαδή οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος παύουν να είναι ανταγωνιστικές, με αποτέλεσμα το σύνολο λύσεων Pareto να προσεγγίζει μία λύση, η οποία συνιστά την εγκατάσταση ΥΒΣ με όσο το δυνατόν μεγαλύτερα μεγέθη Α/Π και δεξαμενών και με τις διαστάσεις των υπόλοιπων συνιστωσών να διαμορφώνονται κατά το βέλτιστο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή διείσδυση ΑΠΕ με το μικρότερο δυνατό LCOE.

7.3 Σημεία καινοτομίας και προαγωγής της επιστήμης

Η πρωτοτυπία της παρούσας εργασίας και η συμβολή της στην προαγωγή της επιστήμης, εντοπίζεται κυρίως στα παρακάτω σημεία:

- Αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για αντλησιοταμιευτικούς ΥΒΣ, κατάλληλο για αναλύσεις της δυναμικής συμπεριφοράς τους και των επιπτώσεών της στη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων.
- Αναλύθηκε εκτενώς η δυναμική συμπεριφορά ΥΒΣ και οι επιπτώσεις της στη μεταβατική απόκριση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων και διερευνήθηκε κατά πόσο οι πιθανές λειτουργικές καταστάσεις των ΥΒΣ είναι αποδεκτές και υπό ποιες προϋποθέσεις. Η δημοσιευμένη έρευνα πάνω σε αυτό το ζήτημα παρουσιάζεται ιδιαίτερα ελλιπής, παρ' ότι το θέμα αυτό έχει πρακτικό ενδιαφέρον, τόσο από την πλευρά των Διαχειριστών ΜΔΝ, όσο και των παραγωγών.
- Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση εναλλακτικών πολιτικών διαχείρισης ΜΔΝ με ΥΒΣ, λαμβάνοντας υπόψη το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, για να προταθεί συγκεκριμένη πολιτική, ως καταλληλότερη βάσει ενεργειακών και οικονομικών κριτηρίων. Η συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης έχει αποτελέσει τη βάση για τη διαμόρφωση του ρυθμιστικού πλαισίου για τους ΥΒΣ που ισχύει σήμερα στην Ελλάδα. Παράλληλα αναλύθηκαν εκτενώς οι αναμενόμενες ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις από την εισαγωγή ΥΒΣ σε ΜΔΝ.
- Πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένη διερεύνηση, υπό διάφορες οπτικές και για πλήθος σεναρίων, της βέλτιστης διαστασιολόγησης αντλησιοταμιευτικών ΥΒΣ, για τη δεδομένη πολιτική λειτουργίας.
- Για όλες τις παραπάνω διερευνήσεις αναπτύχθηκαν κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης νησιωτικών συστημάτων με ΥΒΣ, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σε μελλοντικές περαιτέρω αναλύσεις.

7.4 Προοπτικές συνέχισης της εργασίας

Η λειτουργία των ΥΒΣ στα ΜΔΝ και οι αναμενόμενες επιπτώσεις τους στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, αποτελεί ένα πολύ ευρύ αντικείμενο, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον όχι μόνο από ακαδημαϊκής και ερευνητικής απόψεως αλλά και σε πρακτικό επίπεδο. Η παρούσα εργασία αποτέλεσε μια πρώτη συμβολή στην ανάλυση του πλήθους των τεχνικών και οικονομικών ζητημάτων που σχετίζονται με τους ΥΒΣ και οι προοπτικές συνέχισης της είναι πολλές, όπως ενδεικτικά:

- Ενώ η εγκυρότητα του δυναμικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ΥΗΣ έχει επιβεβαιωθεί σε πολλές δημοσιεύσεις, δεν ισχύει το ίδιο και για το μοντέλο του αντλιοστάσιου. Ένα σημαντικό βήμα θα μπορούσε να αποτελέσει η πειραματική επιβεβαίωση των δυναμικών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διατριβή για την προσομοίωση του ΥΗΣ και κυρίως του αντλητικού συγκροτήματος του ΥΒΣ. Αντίστοιχα σημαντική κρίνεται και η πειραματική επιβεβαίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των νησιωτικών συστημάτων

συνολικά, τόσο χωρίς όσο και παρουσία ΥΒΣ (μελλοντικά), ώστε να επιβεβαιωθούν τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

- Η πραγματοποίηση αντίστοιχης δυναμικής ανάλυσης για νησιωτικά συστήματα τα οποία διαθέτουν και άλλους τύπους συμβατικών μονάδων πέραν των νηξελογεννητριών, όπως ατμοστρόβιλους, αεριοστρόβιλους, μονάδες συνδυασμένου κύκλου, προκειμένου να διαπιστωθεί αν τα συμπεράσματα είναι άμεσα επεκτάσιμα.
- Το θέμα των ΥΒΣ στα ΜΔΝ εξετάστηκε στην παρούσα εργασία λαμβάνοντας υπόψη το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο και θεωρώντας δεδομένες τις βασικές αρχές του κατά την ανάπτυξη των πολιτικών λειτουργίας των ΥΒΣ. Σημαντική επέκταση της εργασίας αυτής θα ήταν η εξέταση εναλλακτικών προσεγγίσεων όπως:
 - Η αντιμετώπιση της αντλησιοταμίευσης ως κεντρικού εργαλείου για την αξιοποίηση των απορρίψεων ισχύος των σταθμών ΑΠΕ του νησιού, αιολικών ή και άλλων, και όχι ως εγκαταστάσεων αποκλειστικής χρήσης.
 - Η υιοθέτηση εναλλακτικών λογικών τιμολόγησης της ενέργειας και ισχύος των ΥΒΣ (π.χ. η υιοθέτηση εγγυημένων τιμών).
- Η επέκταση της ανάλυσης σε ΥΒΣ οι οποίοι διαθέτουν διαφορετική τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα οι συσσωρευτές, τεχνολογία ταχύτατα αναπτυσσόμενη και υποσχόμενη, ακόμα και για το άμεσο μέλλον.
- Στην παρούσα εργασία η διαχείριση των ΥΒΣ και των νησιωτικών συστημάτων πραγματοποιείται βάσει κανόνων. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης του προγραμματισμού ένταξης και της λειτουργίας, τόσο των ΥΒΣ (εσωτερική βελτιστοποίηση), όσο και των συστημάτων όπου αυτοί εντάσσονται.
- Διερεύνηση ζητημάτων ελέγχου και διαχείρισης συστημάτων ΜΔΝ όπου λειτουργούν περισσότεροι ΥΒΣ, διαφορετικών μεγεθών και τεχνολογιών, οπότε αναδεικνύονται θέματα ισότιμης μεταχείρισης των επιμέρους σταθμών.
- Περαιτέρω ανάλυση ζητημάτων ελέγχου των μονάδων των ΥΒΣ, σχεδίασης των εγκαταστάσεων διασύνδεσης μεγάλων και σύνθετων ΥΒΣ, διαμόρφωσης των προστασιών και επιλογής των συστημάτων μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας των συνιστωσών των ΥΒΣ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΔΝ

Π1.1 Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης

Π1.1.1 Χαρακτηριστικά των συμβατικών σταθμών παραγωγής

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ελήφθησαν υπόψη η προβλεπόμενη σύνθεση και σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής με τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται στους Πίνακες Π1.1 και Π1.2. Τα δεδομένα των συγκεκριμένων πινάκων είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο ερευνητικό έργο [87], τα οποία παρασχέθηκαν από τη ΡΑΕ και αφορούσαν την εκτιμώμενη κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης για το έτος 2012.

Η ένταξη των συμβατικών μονάδων παραγωγής θεωρήθηκε ότι θα γίνεται με την ακόλουθη σειρά:

1. Ατμοστρόβιλοι (ΑΤΜ) Αθερινόλακου
2. Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου (ΣΚ) Κορακιάς
3. Μονάδες ΣΚ Χανίων (όταν λειτουργεί)
4. Μονάδες diesel Αθερινόλακου Νο 1, 2, 3, 4
5. Μονάδες diesel Λινοπεραμάτων Νο 1, 2, 3, 4
6. Αεριοστρόβιλοι Νο 3, 5 Λινοπεραμάτων
7. Αεριοστρόβιλοι Νο 2, 11, 12 Χανίων
8. Αεριοστρόβιλοι 5, 4, 2 Λινοπεραμάτων
9. Αεριοστρόβιλοι 5, 1 Χανίων

Επίσης, στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι κατά τη φόρτιση των παραπάνω μονάδων θα ακολουθούνται οι ακόλουθοι κανόνες:

- Ως μονάδες βάσεως λειτουργούν οι ατμοστρόβιλοι Αθερινόλακου και ακολούθως η μονάδα ΣΚ Κορακιάς, η οποία μπορεί να μειώνει την παραγωγή της μέχρι το τεχνικό της ελάχιστο.
- Η μονάδα ΣΚ Χανίων εντάσσεται μόνο τους μήνες υψηλού φορτίου (Ιούλιος, Αύγουστος, Σεπτέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) και φορτίζεται στο τεχνικό της ελάχιστο.
- Ακολουθούν οι μονάδες diesel του Αθερινόλακου, οι οποίες αναλαμβάνουν το κύριο μέρος του μέσου φορτίου.
- Ακολουθούν οι μονάδες diesel Λινοπεραμάτων, οι οποίες αναλαμβάνουν το υπόλοιπο του μέσου φορτίου.
- Τελευταίοι τίθενται σε λειτουργία οι αεριοστρόβιλοι, προκειμένου να καλύψουν το φορτίο αιχμής.

Πίνακας ΠΙ.1. Ονομαστική και αποδιδόμενη ισχύς, τεχνικό ελάχιστο και καύσιμο των μονάδων παραγωγής της Κρήτης

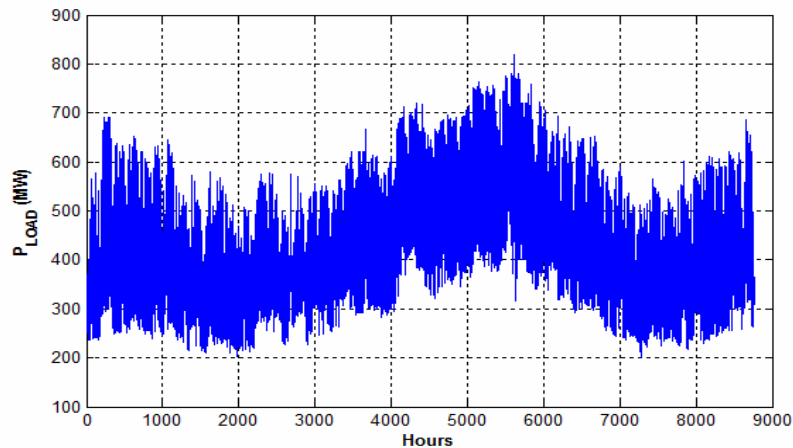
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ, ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΚΑΤΑ ΣΕΙΡΑ ΕΝΤΑΞΗΣ																	
Μονάδα	ST ATH	CC KOR	CC XAN	ICE ATH	ICE ATH	ICE ATH	ICE	ICE	ICE	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT
				No 1	No 2	No 3 & 4	LIN	LIN	LIN	LIN	XAN	LIN	XAN	XAN	LIN	XAN	
Ονομαστική ισχύς (kW)	2x46.000	250.000	132.000	4x51.000	4x51.000	4x51.000	2x11.000	11.000	11.000	43.000	2x28.000	2x59.000	14.000	30.000	15.000	16.000	
Αποδιδόμενη ισχύς (kW)	2x46.000	250.000	112.000	4x50.000	4x50.000	4x50.000	2x11.000	11.000	11.000	41.000	2x25.000	2x54.000	13.000	27.000	13.000	11.000	
Τεχνικό ελάχιστο (kW)	2x18.400	87.500	35.000	35.000	25.000	2x17.850	2x3.000	6.000	3.000	5.000	2x5.000	2x10.000	3.000	5.000	3.000	3.000	
Καύσιμο	Mazut	Natural Gas	Diesel	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel

Πίνακας Π1.2. Ειδικές καταναλώσεις και εκπομπές ρύπων των μονάδων παραγωγής της Κρήτης

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ							
Τύπος μονάδας	Ειδική Κατανάλωση (kg/kWh)			Τιμή καυσίμου	Εκπομπές ρύπων		Κόστος Ο&Μ
	50%	75%	100%	(€/kg)	kgCO ₂ /kg καυσίμου	€/kgCO ₂	(€/kWh)
ST ATH No 1	0.261	0.248	0.235	0.397	3.093	0.025	0.005
No2	0.261	0.248	0.235	0.397	3.093		0.005
CC KORAKIAS	0.201	0.198	0.200	0.330	2.694		0.004
CC XANIWN	0.250	0.218	0.191	0.705	3.158		0.004
ICE ATH No 1	0.201	0.198	0.200	0.397	3.093		0.005
No 2	0.201	0.198	0.200	0.397	3.093		0.005
No 3	0.261	0.248	0.235	0.397	3.093		0.005
No 4	0.261	0.248	0.235	0.397	3.093		0.005
ICE LIN No 1	0.217	0.209	0.213	0.397	3.093		0.005
No 2	0.217	0.209	0.213	0.397	3.093		0.005
No 3	0.217	0.209	0.213	0.397	3.093		0.005
No 4	0.217	0.209	0.213	0.397	3.093		0.005
GT LIN No 3	0.268	0.228	0.216	0.705	3.158		0.004
GT XAN No 2	0.273	0.238	0.221	0.705	3.158		0.004
GT LIN No 5	0.298	0.256	0.243	0.705	3.158		0.004
GT XAN No 11	0.306	0.266	0.249	0.705	3.158		0.004
GT XAN No 12	0.306	0.266	0.249	0.705	3.158		0.004
GT LIN No 4	0.363	0.315	0.293	0.705	3.158		0.004
GT XAN No 5	0.432	0.352	0.332	0.705	3.158		0.004
GT LIN No 2	0.561	0.490	0.435	0.705	3.158		0.004
GT XAN No 1	0.641	0.534	0.385	0.705	3.158		0.004

Π1.1.2 Χαρακτηριστικά φορτίου

Ελήφθη υπόψη τυπική ωριαία χρονοσειρά φορτίου (έτους 2001), προσαρμοσμένη στη μέγιστη ζήτηση του 2012, [87], η οποία βάσει εκτιμήσεων της ΡΑΕ θεωρήθηκε ίση με 820 MW. Ο συντελεστής φορτίου θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με 53.3%. Η χρονοσειρά του φορτίου της Κρήτης για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις, απεικονίζεται στο Σχήμα Π1.1.

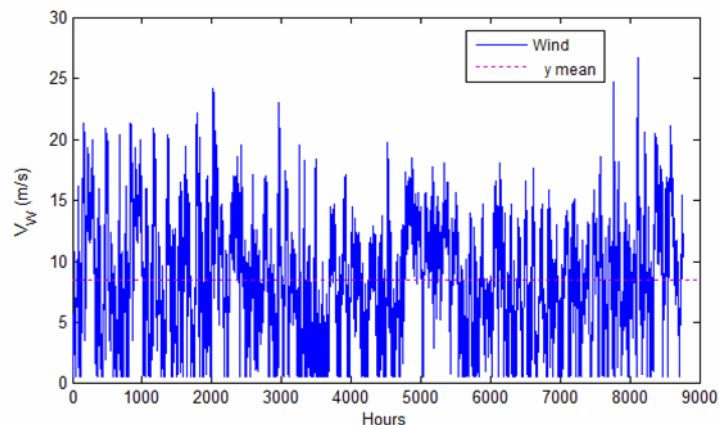


Σχήμα Π1.1. Ετήσια χρονοσειρά φορτίου της Κρήτης για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις.

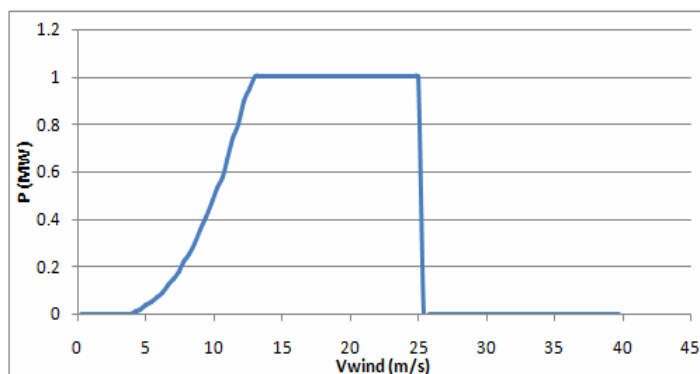
Π1.1.3 Αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ

Στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε εγκατεστημένη αιολική ισχύς ίση με την αδειοδοτημένη, δηλαδή 220 MW. Επίσης θεωρήθηκε μια ενιαία χρονοσειρά ανέμου (Σχήμα Π1.2) για όλα τα Α/Π του νησιού, μέσης τιμής 8.5 m/s, η οποία θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης αιολικής ισχύος της Κρήτης, βάσει των διαθέσιμων από τη ΡΑΕ χρονοσειρών για το υπόψη νησί, [87].

Ο υπολογισμός της ανά ώρα παραγόμενης αιολικής ενέργειας γίνεται με βάση τη χρονοσειρά ανέμου του Σχήματος Π1.2 και την τυπική καμπύλη ισχύος Α/Γ (Vestas V52) του Σχήματος Π1.3.



Σχήμα Π1.2. Ετήσια χρονοσειρά ανέμου (μέση ετήσια τιμή 8.5 m/s)



Σχήμα Π1.3. Καμπύλη ισχύος A/T - Vestas V52

Π1.2 Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Λέσβου

Το σύστημα της Λέσβου χρησιμοποιήθηκε ως εφαρμογή τόσο στην ανάλυση του Κεφαλαίου 5 όσο και στην αντίστοιχη του Κεφαλαίου 6. Ωστόσο στις δύο αυτές αναλύσεις θεωρήθηκαν διαφορετικά στοιχεία για το σύστημα της Λέσβου που αφορούν διαφορετικές χρονικές περιόδους. Συγκεκριμένα, για τη διερεύνηση των ενεργειακών και οικονομικών αποτελεσμάτων από τη λειτουργία του ΥΒΣ (Κεφάλαιο 5), χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του ερευνητικού έργου [87], τα οποία παρασχέθηκαν από τη ΡΑΕ και αφορούσαν την εκτιμώμενη κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος της Λέσβου για το έτος 2012. Από την άλλη, για τη διερεύνηση της βέλτιστης διαστασιολόγησης ΥΒΣ (Κεφάλαιο 6), χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μεταγενέστερου ερευνητικού έργου, [98], τα οποία επίσης παρασχέθηκαν από τη ΡΑΕ και αφορούσαν την υφιστάμενη κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος του συγκεκριμένου νησιού για το έτος 2010.

Στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά οι συνθέσεις του ηλεκτρικού συστήματος της Λέσβου που θεωρήθηκαν σε κάθε μία από τις αναλύσεις των Κεφαλαίων 5 και 6 αντίστοιχα.

Π1.2.1 Χαρακτηριστικά του συμβατικού σταθμού παραγωγής

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 5, ελήφθησαν υπόψη η προβλεπόμενη σύνθεση και σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής με τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται στους Πίνακες Π1.3 και Π1.4.

Τα αντίστοιχα δεδομένα που ελήφθησαν υπόψη στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 6, είναι αυτά των Πινάκων Π1.5 και Π1.6. Αναφορικά με τις τιμές συμβατικών καυσίμων (μαζούτ και diesel), αυτές εκτιμήθηκαν θεωρώντας ότι η τιμή του αργού πετρελαίου Brent κυμαίνεται στα 90\$ ανά βαρέλι (αντιπροσωπευτική τιμή για τα επόμενα χρόνια). Η αντιστοίχιση της τιμής του αργού πετρελαίου με τις θεωρούμενες τιμές καυσίμου μαζούτ και diesel των μονάδων παραγωγής δόθηκε από τη ΡΑΕ και βασίζεται σε ιστορικά στατιστικά στοιχεία συσχέτισης των τιμών αυτών. Σημειωτέον ότι οι τιμές diesel περιλαμβάνουν τον αυξημένο ειδικό φόρο κατανάλωσης που επιβλήθηκε το Μάιο του 2010 με το Ν.3833/15-5-2010.

Πίνακας ΠΙ.3. Ονομαστική και αποδιδόμενη ισχύς, τεχνικό ελάχιστο και καύσιμο των μονάδων παραγωγής της Λέσβου – Εκτιμώμενη κατάσταση για το έτος 2012

Μονάδα	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9	No10	No11	No12
Ονομαστική ισχύς (kW)	11000	10360	8000	8000	10720	5848	5848	5848	4000	3104	18000	15500
Αποδιδόμενη ισχύς (kW)	9500	10360	8000	8000	7500	5000	5000	5000	2700	3100	18000	14000
Τεχνικό ελάχιστο(kW)	5650	5180	3200	3200	5350	2925	2925	2925	2000	1552	6300	7750
Καύσιμο	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Diesel	Diesel

Πίνακας ΠΙ.4. Ειδικές καταναλώσεις και εκπομπές ρύπων των μονάδων παραγωγής της Λέσβου – Εκτιμώμενη κατάσταση για το έτος 2012

Μονάδα	Ειδική Κατανάλωση (kg/kWh)			Τιμή καυσίμου (€/kg)	Εκπομπές ρύπων		Κόστος O&M (€/kWh)
	50%	75%	100%		kgCO ₂ /kg καυσίμου	€/kgCO ₂	
No1	0.196	0.187	0.183	0.396	3.093		0.005
No2	0.211	0.200	0.198	0.396	3.093		0.005
No3	0.210	0.205	0.200	0.396	3.093		0.005
No4	0.210	0.205	0.200	0.396	3.093		0.005
No5	0.221	0.208	0.206	0.396	3.093		0.005
No6	0.215	0.210	0.212	0.396	3.093	0.025	0.005
No7	0.215	0.210	0.212	0.396	3.093		0.005
No8	0.215	0.210	0.212	0.396	3.093		0.005
No9	0.245	0.236	0.236	0.396	3.093		0.005
No10	0.244	0.220	0.221	0.705	3.158		0.004
No11	0.320	0.290	0.260	0.705	3.158		0.004
No12	0.358	0.318	0.292	0.705	3.158		0.004

Πίνακας ΠΙ.5. Ονομαστική και αποδιδόμενη ισχύς, τεχνικό ελάχιστο και καύσιμο των μονάδων παραγωγής της Λέσβου – Υφιστάμενη κατάσταση το έτος 2010

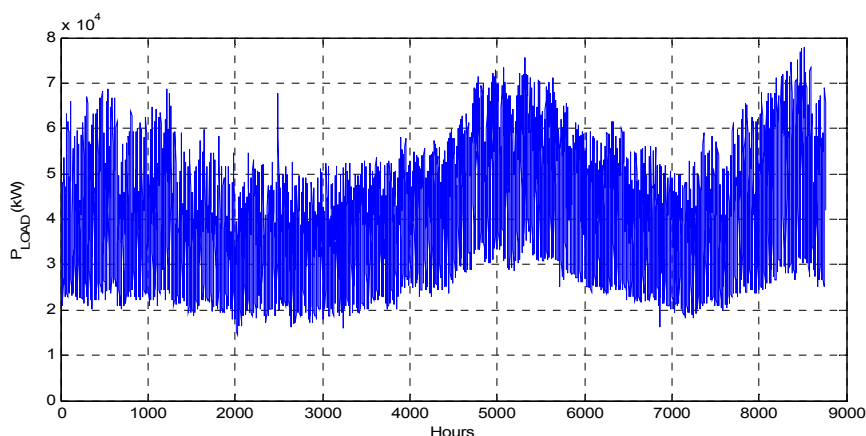
Μονάδα	No1	No2	No3	No4	No5	No6-No8	No9	No10	No11-No20	No21
Ονομαστική ισχύς (kW)	10000	10000	11000	11000	7500	3x4500	2700	3104	10x1275	15500
Αποδιδόμενη ισχύς (kW)	9263	9750	10725	10725	7313	3x4388	2438	3023	10x1100	12188
Τεχνικό ελάχιστο(kW)	5650	5180	4400	4400	5350	3x2925	2000	1552	10x510	7750
Καύσιμο	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Mazut	Diesel	Diesel	Diesel

Πίνακας Π1.6. Ειδικές καταναλώσεις και εκπομπές ρύπων των μονάδων παραγωγής της Λέσβου – Υφιστάμενη κατάσταση το έτος 2010, με πρόβλεψη των τιμών καυσίμου για τα επόμενα χρόνια.

Μονάδα	Ειδική Κατανάλωση (kg/kWh)			Τιμή καυσίμου (€/kg)	Εκπομπές ρύπων		Κόστος O&M (€/kWh)
	50%	75%	100%		kgCO ₂ /kg καυσίμου	€/kgCO ₂	
No1	0.196	0.187	0.183	0.418	3.093		0.004
No2	0.211	0.200	0.198	0.418	3.093		0.004
No3	0.211	0.200	0.198	0.418	3.093		0.004
No4	0.211	0.200	0.198	0.418	3.093		0.004
No5	0.221	0.208	0.206	0.418	3.093	0.020	0.004
No6-No8	0.215	0.210	0.212	0.418	3.093		0.004
No9	0.245	0.236	0.236	0.418	3.093		0.004
No10	0.244	0.220	0.221	1.221	3.158		0.004
No11-No20	0.218	0.210	0.208	1.221	3.158		0.004
No21	0.358	0.318	0.292	1.221	3.158		0.004

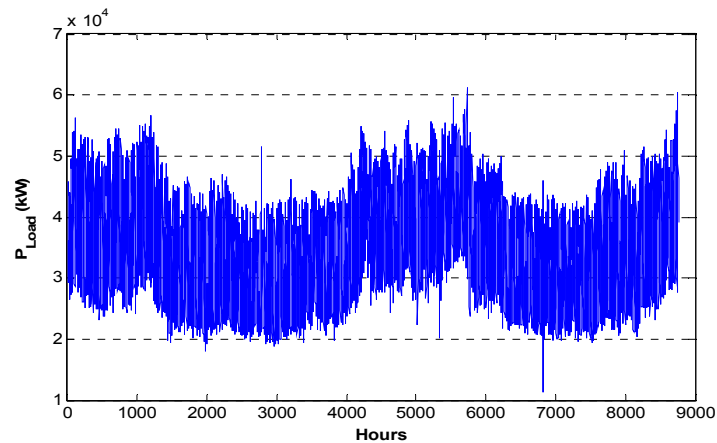
Π1.2.2 Χαρακτηριστικά φορτίου

Στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 5 ελήφθη υπόψη τυπική ωριαία χρονοσειρά φορτίου (έτους 2001), προσαρμοσμένη στη μέγιστη ζήτηση του 2012, [87], η οποία βάσει εκτιμήσεων της ΡΑΕ θεωρήθηκε ίση με 78 MW. Ο συντελεστής φορτίου θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με 51%. Η χρονοσειρά του φορτίου της Λέσβου για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 5, απεικονίζεται στο Σχήμα Π1.4.



Σχήμα Π1.4. Ετήσια χρονοσειρά φορτίου της Λέσβου για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 5.

Στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 6 ελήφθη υπόψη η διαθέσιμη ωριαία χρονοσειρά φορτίου του έτους 2008, προσαρμοσμένη στην αιχμή (61.19 MW) και ενέργεια (312.12 GWh) του φορτίου για το 2010, [98]. Ο συντελεστής φορτίου προκύπτει ίσος με 58.2%. Η χρονοσειρά του φορτίου της Λέσβου για το έτος 2010, όπως θεωρήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 6, απεικονίζεται στο Σχήμα Π1.5.

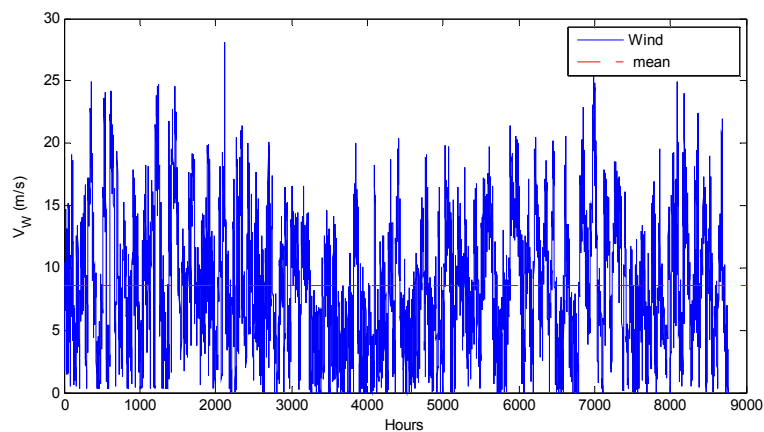


Σχήμα Π1.5. Ετήσια χρονοσειρά φορτίου της Λέσβου για το έτος 2010, όπως θεωρήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 6.

Π1.2.3 Αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ

Στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 5 θεωρήθηκε εγκατεστημένη αιολική ισχύς ίση με την αδειοδοτημένη, δηλαδή περίπου 20 MW. Επίσης θεωρήθηκε μια ενιαία χρονοσειρά ανέμου (Σχήμα Π1.6) για όλα τα Α/Π του νησιού, μέσης τιμής 8.56 m/s, η οποία θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης αιολικής ισχύος της Λέσβου, βάσει των διαθέσιμων από τη ΡΑΕ χρονοσειρών ανέμου για το υπόψη νησί, [87].

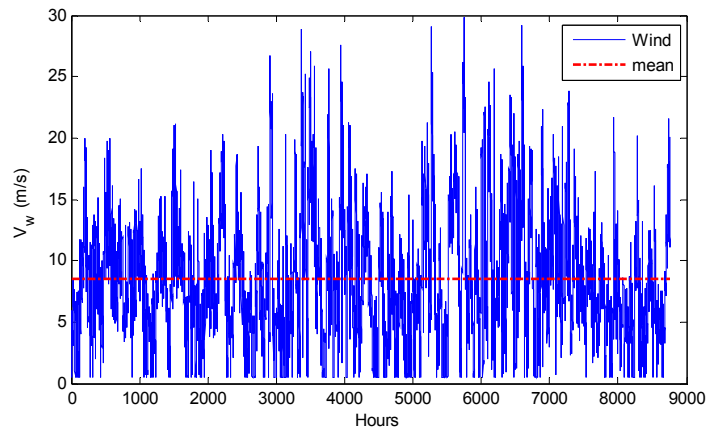
Ο υπολογισμός της ανά ώρα παραγόμενης αιολικής ενέργειας γίνεται με βάση τη χρονοσειρά ανέμου του Σχήματος Π1.6 και την τυπική καμπύλη ισχύος Α/Γ (Vestas V52) του Σχήματος Π1.3.



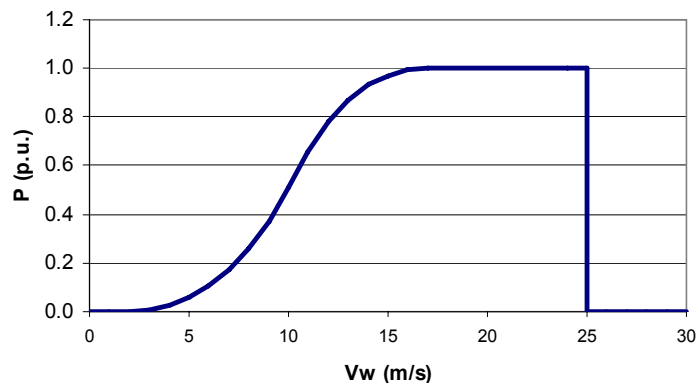
Σχήμα Π1.6. Ετήσια χρονοσειρά ανέμου (μέση ετήσια τιμή 8.56 m/s), όπως θεωρήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 5.

Από την άλλη στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 6, η εγκατεστημένη αιολική ισχύς θεωρήθηκε ίση με την υφιστάμενη των 11.85 MW το έτος 2010. Για τον υπολογισμό της ανά ώρα παραγόμενης αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε η επικαιροποιημένη χρονοσειρά ανέμου που δόθηκε από τη ΡΑΕ στα πλαίσια του ερευνητικού έργου [98], σταθμισμένη για μέση τιμή 8.5 m/s

(Σχήμα Π1.7), και η αντιπροσωπευτική καμπύλη ισχύος A/Γ του Σχήματος Π1.8 (Enercon E-44 900 kW)⁴⁸.



Σχήμα Π1.7. Ετήσια χρονοσειρά ανέμου (μέση ετήσια τιμή 8.5 m/s), όπως θεωρήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 6.



Σχήμα Π1.8. Καμπύλη ισχύος A/Γ σε α.μ. (Enercon E-44 900 kW)

Π1.3 Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Καρπάθου

Π1.3.1 Χαρακτηριστικά του συμβατικού σταθμού παραγωγής

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ελήφθησαν υπόψη η προβλεπόμενη σύνθεση και σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής με τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται στους Πίνακες Π1.7 και Π1.8. Τα δεδομένα των συγκεκριμένων πινάκων είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο ερευνητικό έργο [87], τα οποία παρασχέθηκαν από τη ΡΑΕ και αφορούσαν την εκτιμώμενη κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος της Καρπάθου για το έτος 2012.

⁴⁸ Τα δεδομένα για τη χρονοσειρά ανέμου και την αντιπροσωπευτική καμπύλη ισχύος A/Γ που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση του Κεφαλαίου 6 είναι επικαιροποιημένα (και γι' αυτό διαφοροποιούνται) συγκριτικά με τα αντίστοιχα του Κεφαλαίου 5, από τη στιγμή που δόθηκαν στα πλαίσια του έργου [98] που είναι μεταγενέστερο του [87].

Πίνακας ΠΙ.7. Ονομαστική και αποδιδόμενη ισχύς, τεχνικό ελάχιστο και καύσιμο των μονάδων παραγωγής του συστήματος Καρπάθου-Κάσου

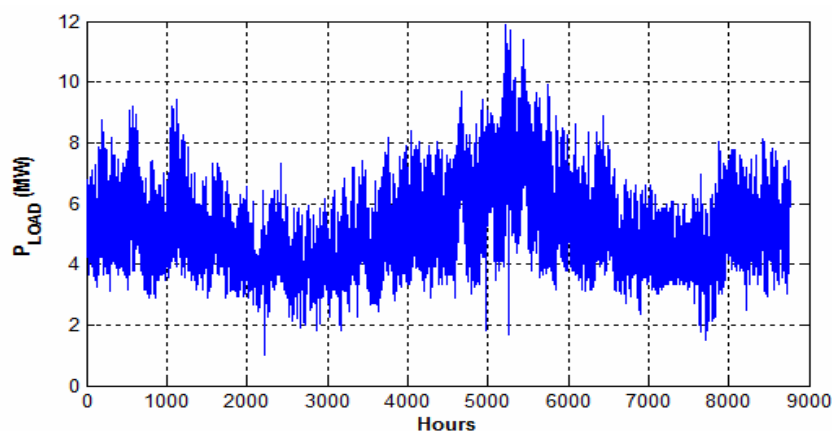
Μονάδα	No1	No2	No3	No4	No5
Ονομαστική ισχύς (kW)	5327	5327	2200	2200	800
Αποδιδόμενη ισχύς (kW)	5300	5300	1800	1800	600
Τεχνικό ελάχιστο (kW)	2120	2120	1100	1100	400
Καύσιμο	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel

Πίνακας ΠΙ.8. Ειδικές καταναλώσεις και εκπομπές ρύπων των μονάδων παραγωγής του συστήματος Καρπάθου-Κάσου

Μονάδα	Ειδική Κατανάλωση (kg/kWh)			Τιμή καυσίμου (€/kg)	Εκπομπές ρύπων		Κόστος O&M (€/kWh)
	50%	75%	100%		kgCO ₂ /kg καυσίμου	€/kgCO ₂	
No1	0.217	0.207	0.206	0.705	3.158		0.005
No2	0.217	0.207	0.206	0.705	3.158		0.005
No3	0.238	0.227	0.223	0.705	3.158	0.025	0.005
No4	0.238	0.227	0.223	0.705	3.158		0.005
No5	0.242	0.24	0.238	0.705	3.158		0.005

ΠΙ.3.2 Χαρακτηριστικά φορτίου

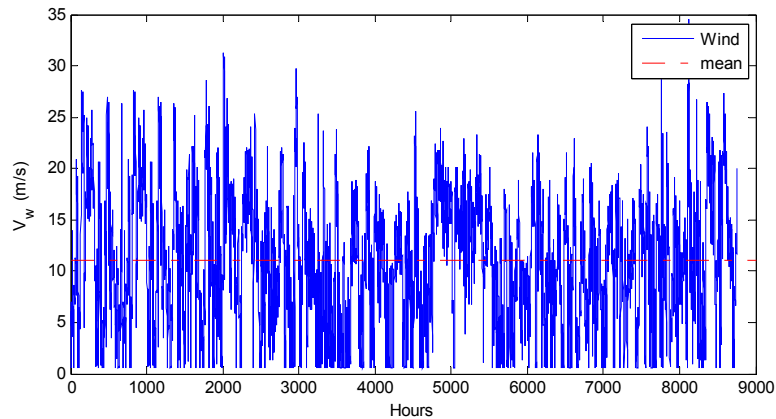
Ελήφθη υπόψη τυπική ωριαία χρονοσειρά φορτίου (έτους 2004), προσαρμοσμένη στη μέγιστη ζήτηση του 2012, [87], η οποία βάσει εκτιμήσεων της ΡΑΕ θεωρήθηκε ίση με 11.9 MW. Ο συντελεστής φορτίου θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με 42.7%. Η χρονοσειρά του φορτίου του συστήματος Καρπάθου-Κάσου για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις, απεικονίζεται στο Σχήμα ΠΙ.9.

**Σχήμα ΠΙ.9.** Ετήσια χρονοσειρά φορτίου του συστήματος Καρπάθου-Κάσου για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις.

Π1.3.3 Αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ

Στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε εγκατεστημένη αιολική ισχύς ίση με την αδειοδοτημένη, δηλαδή 2.45 MW. Επίσης θεωρήθηκε μια ενιαία χρονοσειρά ανέμου (Σχήμα Π1.10) για όλα τα Α/Π του νησιού, μέσης τιμής 11 m/s, [87], η οποία θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης αιολικής ισχύος της Καρπάθου, βάσει των διαθέσιμων από τη ΡΑΕ χρονοσειρών ανέμου για το υπόψη νησί.

Ο υπολογισμός της ανά ώρα παραγόμενης ενέργειας γίνεται με βάση τη χρονοσειρά ανέμου του Σχήματος Π1.10 και την τυπική καμπύλη ισχύος Α/Γ (Vestas V52) του Σχήματος Π1.3.



Σχήμα Π1.10. Ετήσια χρονοσειρά ανέμου (μέση ετήσια τιμή 11 m/s)

Π1.4 Δεδομένα του ηλεκτρικού συστήματος της Ικαρίας

Π1.4.1 Χαρακτηριστικά του συμβατικού σταθμού παραγωγής

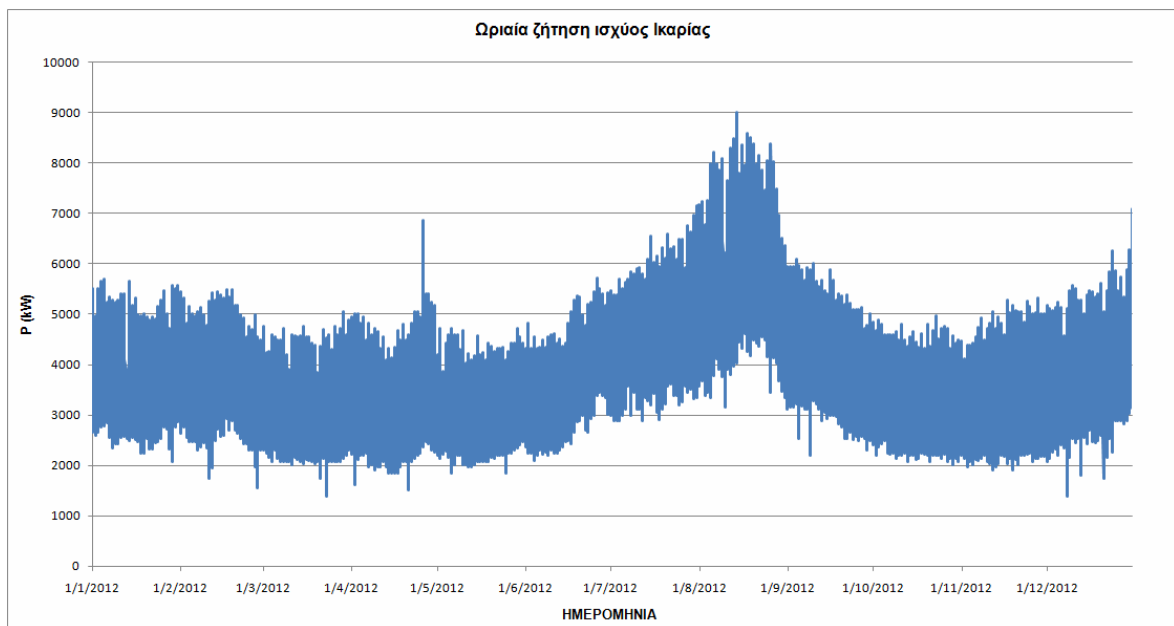
Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ελήφθησαν υπόψη η προβλεπόμενη σύνθεση και σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής με τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται στον Πίνακα Π1.9. Τα δεδομένα του συγκεκριμένου πίνακα είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο ερευνητικό έργο [102], τα οποία ελήφθησαν από τη ΔΕΗ Α.Ε. και αφορούσαν την εκτιμώμενη κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος της Ικαρίας για το έτος 2012.

Πίνακας Π1.9. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων παραγωγής της Ικαρίας

Σειρά Ένταξης	Τύπος	Καύσιμο	Ονομαστική	Αποδιδόμενη	Τεχνικό	Εκπομπές ρύπων (kgCO ₂ /kg καυσίμου)	Κόστος O&M (€/MWh)	Ειδικές Καταναλώσεις (gr/kWh)		
			ισχύς (kW)	ισχύς (kW)	ελάχιστο (kW)			50%	75%	100%
1A	CEGIELSKI SULZER		3500	3500	1750			235.7	226.5	224.3
1B	CEGIELSKI SULZER		3500	3500	1750			235.7	226.5	224.3
2	CEGIELSKI SULZER		3104	2900	1550			235.7	226.5	224.3
3	CEGIELSKI SULZER	Μαζούτ	2260	2200	1100	3.093	1.89	245.4	225.8	220.9
4A	FIAT		976	750	500			255.0	239.0	237.5
4B	FIAT		976	750	500			255.0	239.0	237.5
4Γ	FIAT		976	750	500			255.0	239.0	237.5
4Δ	FIAT		976	750	500			255.0	239.0	237.5
5	SACM		1200	750	600			267.5	252.6	246.0

Π1.4.2 Χαρακτηριστικά φορτίου

Ελήφθη υπόψη η ωριαία χρονοσειρά φορτίου του έτους 2008, προσαρμοσμένη στη μέγιστη ζήτηση του 2012, [102], η οποία βάσει εκτιμήσεων της ΔΕΔΔΗΕ/ΔΔΝ θεωρήθηκε ίση με 9 MW. Ο συντελεστής φορτίου θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με 42%. Η χρονοσειρά του φορτίου της Ικαρίας για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις, απεικονίζεται στο Σχήμα Π1.11.

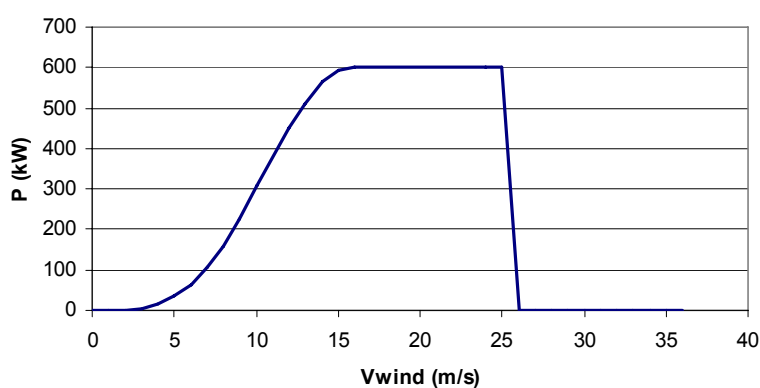


Σχήμα Π1.11. Ετήσια χρονοσειρά φορτίου της Ικαρίας για το έτος 2012, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις.

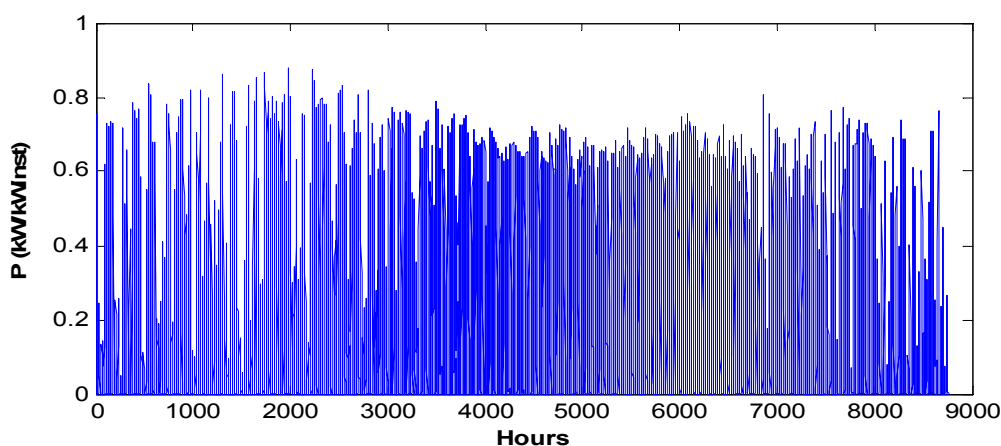
Π1.4.3 Αιολικά πάρκα και Φ/Β σταθμοί

Στο νησί της Ικαρίας είναι ήδη εγκατεστημένη μία Α/Γ ισχύος 600 kW ιδιώτη παραγωγού στην τοποθεσία Κεφαλές Αγ. Κύρηκου και ένα Α/Π συνολικής ισχύος $7 \times 55 = 385$ kW της ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε. στην τοποθεσία Περδίκι. Επιπλέον, έχουν αδειοδοτηθεί από τη ΡΑΕ άλλα 850 kW κοντά στη θέση Περδίκι. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικών για την προσομοίωση του έτους 2012 θεωρήθηκε ίση με 1835 kW (600 kW + 385 kW + 850 kW). Η θεωρούμενη, στις προσομοιώσεις, καμπύλη ισχύος των Α/Γ είναι αυτή της Enercon E-40 600 kW του Σχήματος Π1.12.

Επιπλέον στο νησί της Ικαρίας προβλέπεται να αδειοδοτηθούν 1040 kW Φ/Β σταθμών, σύμφωνα με το περιθώριο ισχύος της Απόφασης 96/2007 της ΡΑΕ, όπως τροποποιήθηκε με την Απόφαση 703/2008. Στις προσομοιώσεις του έτους 2012 θεωρείται συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ίση με 1040 kW. Η ωριαία χρονοσειρά φωτοβολταϊκής παραγωγής ανά εγκατεστημένο kW που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις (Σχήμα Π1.13), βασίζεται στη χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας της Αττικής και αντιστοιχεί σε ετήσια παραγωγή 1412 kWh ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β συλλεκτών.



Σχήμα Π1.12. Καμπύλη ισχύος Α/Γ σε kW (Enercon E-40 600 kW)



Σχήμα Π1.13. Χρονοσειρά φωτοβολταϊκής παραγωγής ανά εγκατεστημένο kW (ωριαίες τιμές)

Π1.4.4 Τεχνικά στοιχεία για τον ΥΒΣ

Συνοπτικά τα στοιχεία των επιμέρους μονάδων παραγωγής, άντλησης και αποθήκευσης του ΥΒΣ, βάσει των τεχνικών προδιαγραφών του έργου, είναι τα εξής:

Π1.4.4.1 Δεξαμενές

A) Ταμιευτήρας Πεζίου

Ο υφιστάμενος ταμιευτήρας εξυπηρετεί ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα είναι η ανώτατη στάθμη λειτουργίας (ΑΣΛ) που ταυτίζεται με τη στάθμη της στέγης του υπερχειλιστή (+721), ο συνολικός όγκος στην ΑΣΛ που είναι 910000 m^3 , η κατώτατη στάθμη λειτουργίας (ΚΣΛ) που ταυτίζεται με τη στάθμη του στομίου της υδροληψίας (+707) και ο αντίστοιχος όγκος που είναι 122752 m^3 . Οι στάθμες δίνονται σε ύψη από την επιφάνεια της θάλασσας. Η συσχέτιση μεταξύ της στάθμης και του όγκου του νερού στον ταμιευτήρα δίνεται στην [102].

B) Δεξαμενή Προεσπέρας

Ο μέγιστος όγκος νερού της δεξαμενής είναι 93600 m^3 και ο εκμεταλλεύσιμος όγκος 80300 m^3 . Η στάθμη της κυμαίνεται μεταξύ 543 και 554 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Η συσχέτιση μεταξύ της στάθμης και του όγκου του νερού στη δεξαμενή δίνεται στην [102].

Γ) Δεξαμενή Κάτω Προεσπέρας

Ο μέγιστος όγκος νερού της δεξαμενής είναι 91300 m^3 και ο εκμεταλλεύσιμος όγκος 79500 m^3 . Η στάθμη της κυμαίνεται μεταξύ 38 και 50 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Η συσχέτιση μεταξύ της στάθμης και του όγκου του νερού στη δεξαμενή δίνεται στην [102].

Π1.4.4.2 ΥΗΣ

A) ΥΗΣ Προεσπέρας

Ένας (1) υδροστρόβιλος τύπου Pelton, ονομαστικής ισχύος 1.05 MW, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 89.85%. Αναλυτικά οι συντελεστές απόδοσης του στρόβιλου συναρτήσκει του εκάστοτε ύψους και του ποσοστού φόρτισής του δίνονται στην [102]. Το ύψος (από την επιφάνεια της θάλασσας) στο οποίο βρίσκεται ο υδροστρόβιλος είναι 555.20 m.

Ο υδροστρόβιλος συνδέεται σε μια σύγχρονη γεννήτρια 1300 kVA με ονομαστικό συντελεστή ισχύος 0.8 επαγωγικό και μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 95.83%. Η σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός Μ/Σ 6.3/20 kV, 1300 kVA, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 98.70%. Όσον αφορά τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής από τον ταμιευτήρα Πεζίου στον ΥΗΣ Προεσπέρας, αυτές υπολογίζονται μέσω του τύπου $\Delta h_{H,\Pi} = K_{H,\Pi} \cdot Q_{H,\Pi}^2$, όπου ο συντελεστής απωλειών των σωληνώσεων είναι ίσος με $K_{H,\Pi}=30.82$.

B) ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας

Δύο (2) υδροστρόβιλοι τύπου Pelton, ονομαστικής ισχύος 1.55 MW έκαστος, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 90.37%. Αναλυτικά οι συντελεστές απόδοσης των στρόβιλων συναρτήσκει του εκάστοτε ύψους και του ποσοστού φόρτισής τους δίνονται στην [102]. Το ύψος (από την επιφάνεια της θάλασσας) στο οποίο βρίσκονται οι υδροστρόβιλοι είναι 50.70 m.

Κάθε υδροστρόβιλος συνδέεται σε μια σύγχρονη γεννήτρια 1900 kVA, με ονομαστικό συντελεστή ισχύος 0.8 επαγωγικό και μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 94.30%. Η σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός Μ/Σ 6.3/20 kV, 1900 kVA, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 98.78%. Όσον αφορά τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής από

τη δεξαμενή Προεσπέρας στον ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, αυτές υπολογίζονται μέσω του τύπου $\Delta h_{H,K\Pi} = K_{H,K\Pi} \cdot Q_{H,K\Pi}^2$, όπου ο συντελεστής απωλειών των σωληνώσεων είναι ίσος με $K_{H,K\Pi}=79.18$.

Π1.4.4.3 Αντλιοστάσιο

Αποτελείται από οκτώ (8) αντλίες σταθερών στροφών και τέσσερις (4) αντλίες μεταβλητών στροφών, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης 73%. Αναλυτικά οι συντελεστές απόδοσης, οι παροχές και οι απορροφούμενες ισχύεις των αντλιών σταθερών στροφών συναρτήσει του συνολικού ύψους δίνονται στην [102]. Όσον αφορά τις τέσσερις επιπλέον αντλίες μεταβλητών στροφών, αυτές θεωρήθηκαν όμοιων τεχνικών χαρακτηριστικών με τις αντλίες σταθερών στροφών και με τεχνικό ελάχιστο ίσο με το 50% της ονομαστικής τους ισχύος.

Όλες οι αντλίες οδηγούνται από κινητήρες επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα, ονομαστικής ισχύος 250 kW, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης ίσο με 96%. Η τροφοδότηση όλων των κινητήρων γίνεται μέσω δύο Μ/Σ 0.4/20 kV, ισχύος 2000 kVA έκαστος, με μέσο σταθμισμένο συντελεστή απόδοσης ίσο με 98.96%.

Όσον αφορά τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό κατάθλιψης για παροχή νερού από το αντλιοστάσιο στη δεξαμενή Προεσπέρας, αυτές υπολογίζονται μέσω του τύπου $\Delta h_p = K_p \cdot Q_p^2$, όπου ο συντελεστής απωλειών των σωληνώσεων είναι ίσος με $K_p=185$.

Π1.4.4.4 Αιολικό πάρκο

Αποτελείται από 3 Α/Γ μεταβλητών στροφών των 900 kW τύπου Enercon E-44, με καμπύλη ισχύος αυτή του Σχήματος Π1.8.

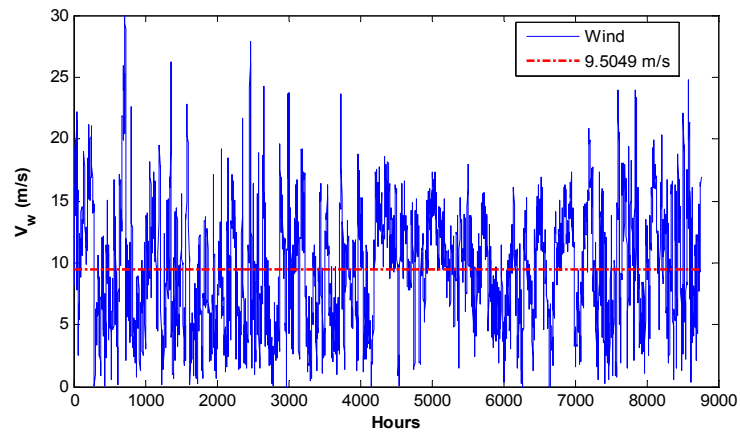
Π1.4.4.5 Συντελεστής απόδοσης του συνολικού κύκλου άντλησης-παραγωγής

Ο βαθμός απόδοσης του συνολικού κύκλου άντλησης-παραγωγής του ΥΒΣ εξαρτάται από τις φορτίσεις των μονάδων παραγωγής και άντλησής του, καθώς επίσης από τις στάθμες των δεξαμενών. Η ελάχιστη τιμή απόδοσης του συνολικού κύκλου υπολογίστηκε ίση με 50.3% (βλ. [102]). Η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης είναι περίπου 56%, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων.

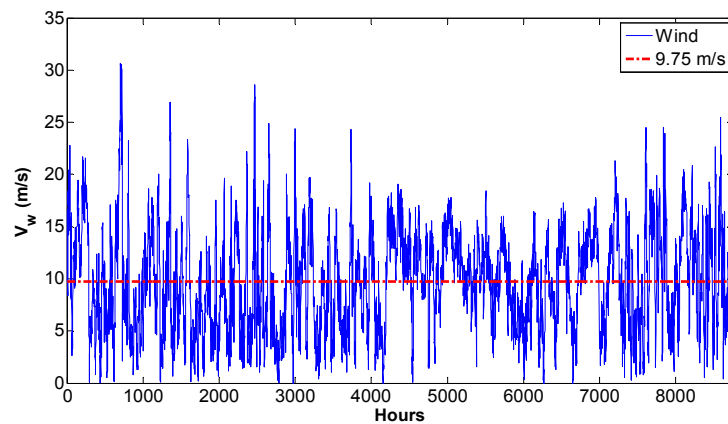
Π1.4.5 Ανεμολογικά δεδομένα

Τα ανεμολογικά δεδομένα είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην [102] και βασίζονται σε μετρήσεις των ΔΕΗ/ΔΥΗΠ και ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε. στις τοποθεσίες Πέζι και Περδίκι. Για τον υπολογισμό της αιολικής παραγωγής των Α/Π εκτός ΥΒΣ, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά Περδικίου ανηγμένη στα 46 m (Σχήμα Π1.14) και η καμπύλη ισχύος της Enercon E-40 600 kW (Σχήμα Π1.12). Από την άλλη, για τον υπολογισμό της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ, χρησιμοποιήθηκαν τόσο η χρονοσειρά Περδικίου όσο και αυτή του Πεζίου, ως άνω και κάτω όριο αντίστοιχα της αναμενόμενης ταχύτητας ανέμου στη θέση του Α/Π, ανηγμένες όμως αυτή τη φορά στα 55 m (Σχήματα Π1.15, Π1.16 αντίστοιχα), και η καμπύλη ισχύος της Enercon E-44 900 kW (Σχήμα Π1.8). Η αναγωγή των χρονοσειρών στα επιθυμητά ύψη πραγματοποιήθηκε μέσω της εμπειρικής σχέσης (Π1.1). Η τιμή του εκθέτη αναγωγής, α , στην περίπτωση της χρονοσειράς Περδικίου είναι 0.14, ενώ για τη χρονοσειρά Πεζίου είναι 0.10.

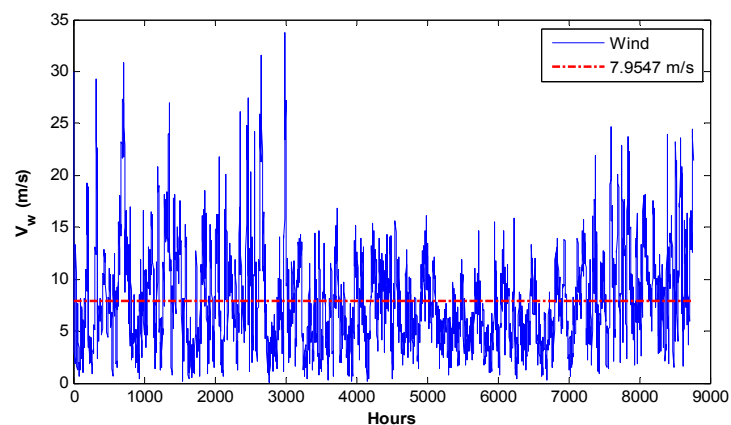
$$V_{h,new} = V_{h,old} \left(\frac{h_{new}}{h_{old}} \right)^a \quad (\text{Π1.1})$$



Σχήμα Π1.14. Η θεωρούμενη ετήσια χρονοσειρά ανέμου για τα Α/Π εκτός ΥΒΣ, μέσης τιμής 9.5 m/s. Χρονοσειρά Πεδικίου ανηγμένη στα 46 m.



Σχήμα Π1.15. Η θεωρούμενη ετήσια χρονοσειρά ανέμου για το Α/Π του ΥΒΣ, μέσης τιμής 9.75 m/s (άνω όριο της αναμενόμενης ταχύτητας ανέμου). Χρονοσειρά Πεδικίου ανηγμένη στα 55 m.

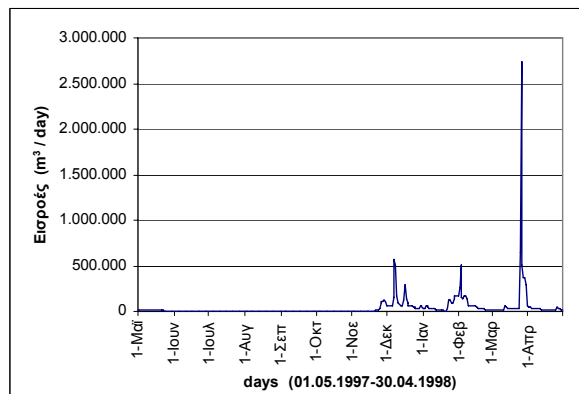


Σχήμα Π1.16. Η θεωρούμενη ετήσια χρονοσειρά ανέμου για το Α/Π του ΥΒΣ, μέσης τιμής 7.95 m/s (κάτω όριο της αναμενόμενης ταχύτητας ανέμου). Χρονοσειρά Πεζίου ανηγμένη στα 55 m.

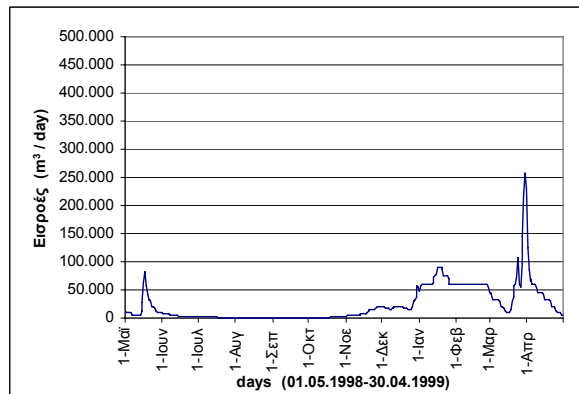
Π1.4.6 Υδρολογικά δεδομένα

A) Εισροές στον ταμιευτήρα Πεζίου

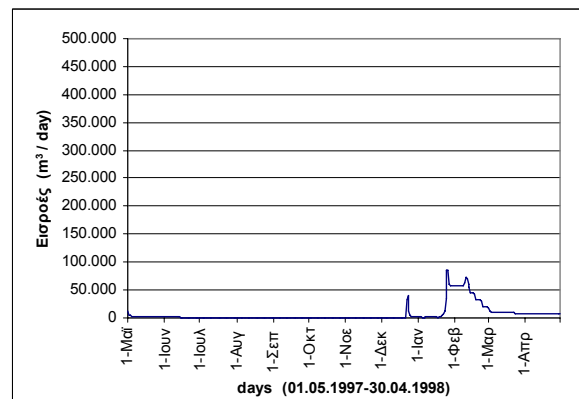
Τα υδρολογικά δεδομένα για τις ημερήσιες εισροές του ταμιευτήρα Πεζίου είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην [102], τα οποία ελήφθησαν από τη ΔΕΗ/ΔΥΗΠ και αφορούσαν μια συγκεκριμένη τριετία αποτελούμενη από έτη αυξημένης, μέσης και πολύ χαμηλής υγρότητας, συνιστώντας αντιπροσωπευτικό δείγμα των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν στο νησί της Ικαρίας. Τα δεδομένα αυτά για καθένα από τα τρία έτη αντίστοιχα, απεικονίζονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα Π1.17. Εισροές παρατηρούνται κυρίως το χειμώνα και την άνοιξη, με το πρώτο έτος να είναι το πιο υγρό και το τρίτο το πιο ξηρό.



(α)



(β)

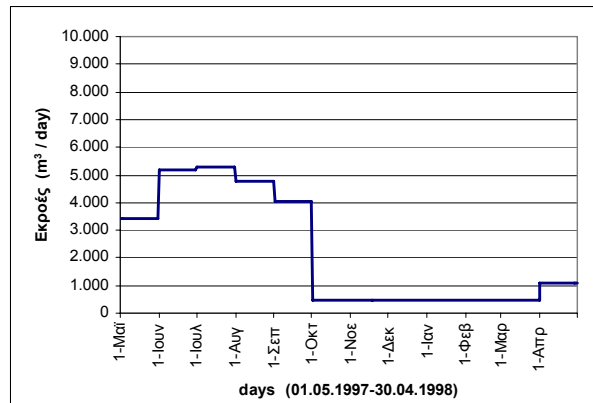


(γ)

Σχήμα Π1.17. Ετήσιες χρονοσειρές των εισροών στον ταμιευτήρα Πεζίου για τρία έτη: α) Υγρό έτος, β) Έτος ενδιάμεσης υγρότητας, γ) Ξηρό έτος.

Β) Υποχρεωτικές εκροές από τον ταμιευτήρα Πεζίου

Οι υποχρεωτικές εκροές από τον ταμιευτήρα (υδρολογικά στοιχεία από ΔΕΗ/ΔΥΗΠ, πρώην ΔΑΥΕ, βλ. [102]) συνίστανται στην ικανοποίηση των αναγκών για ύδρευση, οικολογική παροχή και άρδευση, με αυτήν τη σειρά προτεραιότητας. Η ετήσια χρονοσειρά των υποχρεωτικών εκροών από τον ταμιευτήρα Πεζίου, όπως θεωρήθηκε στις προσομοιώσεις, δίνεται στο Σχήμα Π1.18.

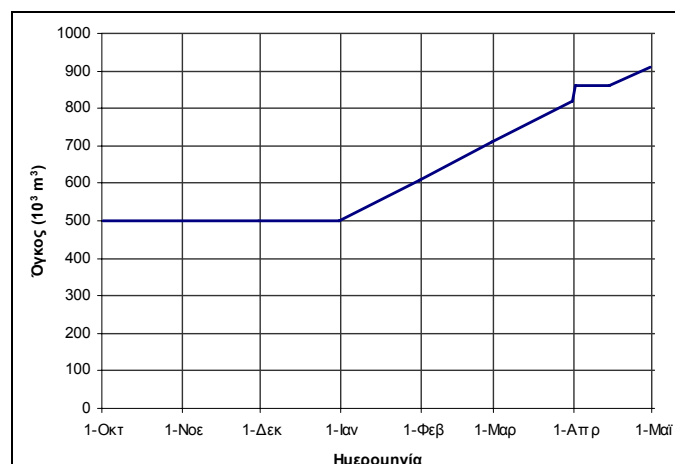


Σχήμα Π1.18. Ετήσια χρονοσειρά των υποχρεωτικών εκροών από τον ταμιευτήρα Πεζίου

Γ) Ελάχιστος επιτρεπτός όγκος νερών στον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια του έτους

Η λειτουργία των δύο ΥΗΣ, πέραν των υποχρεώσεων οικολογικής παροχής, διέπεται και από ορισμένες άλλες υποχρεώσεις που τίθενται στη σχετική ΚΥΑ ως περιβαλλοντικοί όροι και έχουν σκοπό την εξασφάλιση της αρδευτικής επάρκειας του ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα, στο τέλος του μήνα Μαρτίου θα πρέπει η στάθμη του νερού να μην είναι μικρότερη του +720, καθ' όλη τη διάρκεια του Απριλίου να μην είναι μικρότερη του +720.50, στο δε τέλος του Απριλίου θα πρέπει ο ταμιευτήρας να είναι γεμάτος, δηλαδή η στάθμη του νερού στο +721. Κατά τη χρονική αυτή στιγμή ο ταμιευτήρας παύει να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέχρι τέλους της αρδευτικής περιόδου.

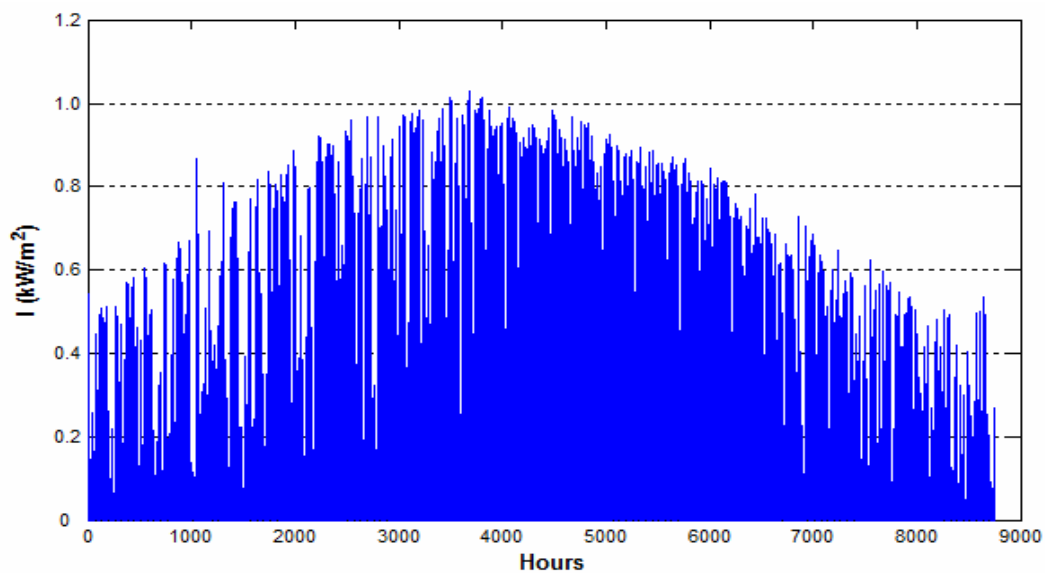
Προκειμένου να ανταποκριθεί η διαχείριση του ταμιευτήρα στις απαιτήσεις αυτές, καταρτίστηκε από τους μελετητές της ΔΥΗΠ ένα σενάριο ελαχίστου επιτρεπτού όγκου νερού στον ταμιευτήρα για το χρονικό διάστημα της ενεργειακής λειτουργίας του, δηλαδή τη χειμερινή περίοδο Οκτωβρίου – Απριλίου. Το σενάριο αυτό παρουσιάζεται ως γράφημα στο Σχήμα Π1.19.



Σχήμα Π1.19. Ελάχιστος επιτρεπτός όγκος νερών στον ταμιευτήρα Πεζίου

Π1.4.7 Ηλιακά δεδομένα

Όπως έχει προαναφερθεί, για τα Φ/Β χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά φωτοβολταϊκής ισχύος ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β συλλεκτών. Η συγκεκριμένη χρονοσειρά εκτιμήθηκε μέσω κατάλληλου υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του ΕΜΠ και βασίζεται στις εξισώσεις περιγραφής του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης Φ/Β συστοιχίας, [94], το οποίο έχει αναπτυχθεί στα εργαστήρια Sandia (Sandia National Laboratories, SNL). Για την εκτίμηση της χρονοσειράς φωτοβολταϊκής ισχύος χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα ανέμου κλπ.) του έτους 2004 από την περιοχή της Αθήνας, τα οποία διατίθενται σε βάση δεδομένων που διατηρείται στον ιστόχωρο του σταθμού, [95]. Η πρωτογενής ωριαία χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, μετρημένη από τον μετεωρολογικό σταθμό της Πολυτεχνειούπολης ΕΜΠ το έτος 2004, παρατίθεται στο Σχήμα Π1.20.



Σχήμα Π1.20. Χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (μετρήσεις έτους 2004 στην Αττική, ωριαίες τιμές).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται εν συντομία οι βασικοί οικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για την αξιολόγηση των επενδύσεων για ΥΒΣ. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε βιβλίο οικονομικών μαθηματικών (π.χ. [99, 100, 107]).

Αναλυτικότερα, η **καθαρή παρούσα αξία (NPV)** μιας επένδυσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$NPV = -K_{0,i} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+i)^t} + \frac{YA_N}{(1+i)^N} \quad (\text{Π2.1})$$

όπου:

$K_{0,i}$: τα ίδια κεφάλαια

KTP_t : η καθαρή ταμειακή ροή για το χρόνο t

N : η διάρκεια οικονομικής ζωής της επένδυσης

i : το επιτόκιο αναγωγής της επένδυσης

YA_N : η υπολειπόμενη αξία του έργου στο τέλος της περιόδου εξέτασης

Η υπολειπόμενη αξία, YA_N , ισούται με την αρχική αξία του έργου, $K_{0,tot}$, μείον την “υποτίμηση” που έχει υποστεί η εγκατάσταση μέχρι το έτος N . Δίνεται από την εξίσωση (Π2.2), όπου N_{tot} είναι η πραγματική διάρκεια ζωής του έργου.

$$YA_N = K_{0,tot} \cdot \frac{(1+i)^{N_{tot}} - (1+i)^N}{(1+i)^{N_{tot}} - 1} \quad (\text{Π2.2})$$

Η καθαρή ταμειακή ροή του χρόνου t , KTP_t , υπολογίζεται μέσω της σχέσης :

$$KTP_t = E_t - \Lambda\Delta_t - \Phi\Sigma \cdot (E_t - \Lambda\Delta_t - A_t - T_t) - \Delta\Delta_t \quad (\text{Π2.3})$$

όπου:

E_t : τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας

$\Lambda\Delta_t$: οι ετήσιες λειτουργικές δαπάνες (ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης)

$\Phi\Sigma$: ο φορολογικός συντελεστής της επιχείρησης

A_t : η ετήσια λογιστική απόσβεση της επένδυσης και υπολογίζεται από τον τύπο

$$A_t = \frac{K_{0,i} + K_{\Delta}}{n_A}, \text{ όπου } K_{0,i} \text{ τα ίδια κεφάλαια που επενδύθηκαν, } K_{\Delta} \text{ το δανειζόμενο ποσό}$$

για τη χρηματοδότηση της επένδυσης και n_A η διάρκεια της λογιστικής απόσβεσης

$\Delta\Delta_t$: η ετήσια ισόποση δόση του δανείου που χρηματοδότησε μέρος της επένδυσης

T_t : οι ετήσιοι τόκοι του δανείου

Η ετήσια ισόποση δόση του δανείου (ή τοκοχρεολύσιο), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Delta_t = CRF(n_{\Delta}, j) \cdot K_{\Delta} \quad (\text{Π2.4})$$

όπου K_{Δ} το ποσό δανείου και CRF (Capital Recovery Factor) ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, που δίνεται από τον τύπο:

$$CRF(n_{\Delta}, j) = \frac{j(1+j)^{n_{\Delta}}}{(1+j)^{n_{\Delta}} - 1} \quad (\text{Π2.5})$$

όπου n_{Δ} είναι η διάρκεια αποπληρωμής του δανείου και j το επιτόκιο δανεισμού. Η ετήσια δόση του δανείου αποτελεί το άθροισμα του χρεολυσίου, δηλαδή του ποσού που καταβάλλεται για την εξόφληση του κεφαλαίου του δανείου, και των τόκων.

Το χρεολυτικό ποσοστό ή χρεολύσιο μίας νομισματικής μονάδας (Sinking Fund Factor – SFF) ορίζεται ως εξής :

$$SFF = \frac{j}{(1+j)^{n_{\Delta}} - 1} \quad (\text{Π2.6})$$

Το χρεολύσιο του 1^{ου} έτους μπορεί να υπολογιστεί με βάση το ύψος του δανείου και το χρεολυτικό ποσοστό ή χρεολύσιο μίας νομισματικής μονάδας για διάρκεια εξόφλησης (έτη) του δανείου, n_{Δ} , και επιτόκιο δανεισμού, j , ως εξής:

$$X_1 = SFF(n_{\Delta}, j) \cdot K_{\Delta} \quad (\text{Π2.7})$$

Σημειώνεται ότι το χρεολύσιο κάθε έτους (εκτός του πρώτου), είναι ίσο με το χρεολύσιο του προηγούμενου, αναπροσαρμοσμένο με το συντελεστή $1+j$.

$$X_t = X_{t-1} \cdot (1+j)^{t-1} \quad (\text{Π2.8})$$

Όσον αφορά τους τόκους του δανείου, αυτοί υπολογίζονται ως η διαφορά της δόσης δανείου από το χρεολύσιο:

$$T_t = \Delta\Delta_t - X_t \quad (\text{Π2.9})$$

Ο **εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)** είναι το επιτόκιο αναγωγής που καθιστά την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, για τη διάρκεια της οικονομικής της ζωής, ίση με το μηδέν. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του IRR συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη η υπολειπόμενη αξία, κάτι που αποτελεί τη συνήθη πρακτική των επενδυτών κατά την οικονομική αξιολόγηση των επενδύσεών τους. Κι αυτό γιατί το ενδιαφέρον των επενδυτών εστιάζεται κυρίως στο να διαπιστώσουν κατά πόσο οι προκύπτουσες ετήσιες χρηματοροές κατά τη διάρκεια οικονομικής ζωής καθιστούν αποδοτική ή όχι τη χρήση του αρχικού επενδυτικού κεφαλαίου, ανεξαρτήτως από το ύψος της παραμένουσας αξίας. Η υπολειπόμενη αξία σίγουρα ευνοεί τα αποτελέσματα και οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του IRR, ωστόσο η πραγματοποιηθείσα οικονομική αξιολόγηση σε μια τέτοια περίπτωση δε γίνεται από την ασφαλή πλευρά.

Συνεπώς ο IRR αποτελεί τη λύση της εξίσωσης (Π2.10) ως προς το επιτόκιο αναγωγής i , για δεδομένη διάρκεια οικονομικής ζωής N :

$$-K_{0,i} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (\text{Π2.10})$$

Η **έντοκη περίοδος αποπληρωμής (DPP)** είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης, καθώς και των τόκων που θα μπορούσαν να ληφθούν από μια εναλλακτική τοποθέτηση του αρχικού κεφαλαίου. Αποτελεί τη λύση της εξίσωσης (Π2.10) ως προς τη διάρκεια οικονομικής ζωής N , για δεδομένο επιτόκιο αναγωγής i . Αν οι καθαρές ταμειακές ροές είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της περιόδου εξέτασης, τότε η εξίσωση (Π2.10) μετασχηματίζεται στην (Π2.11), από όπου προκύπτει η αναλυτική λύση (Π2.12) για την έντοκη περίοδο αποπληρωμής.

$$\sum_{t=1}^N \frac{1}{(1+i)^t} = \frac{K_{0,i}}{KTP} \quad (\text{Π2.11})$$

$$DPP = \frac{-\ln(1 - i \frac{K_{0,i}}{KTP})}{\ln(1+i)} \quad (\text{Π2.12})$$

Τέλος, το **κόστος παραγωγής (c)** του ΥΒΣ υπολογίζεται από τη σχέση (Π2.13):

$$c = \frac{K_{0,tot} \cdot CRF(N,i) + OMC}{E_{net}} \quad (\text{Π2.13})$$

όπου:

$K_{0,tot}$: το συνολικό επενδυτικό κόστος

OMC : το κόστος λειτουργίας και συντήρησης

E_{net} : η ετήσια καθαρή ενεργειακή απόδοση

$CRF(N,i)$: ο συντελεστής ανάκτησης του συνολικού επενδυτικού κόστους στην περίοδο οικονομικής ζωής της επένδυσης, N , και για επιτόκιο αναγωγής i .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Στο παρόν παράρτημα πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή των γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ), με αποσαφήνιση των βασικών εννοιών και όρων και παρουσίαση των πιο διαδεδομένων μεθόδων επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης, βάσει αντλούμενων πληροφοριών από σχετική βιβλιογραφία, [111-115, 117-119, 126].

Π3.1 Ιστορική αναδρομή

Η θεωρία της εξέλιξης (evolution) που διατυπώθηκε από το Δαρβίνο και περιγράφει το μηχανισμό βιολογικής εξέλιξης των ειδών, έχει χρησιμοποιηθεί σε μία κατηγορία αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων, που ονομάζονται Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms). Η φύση έχει έναν πολύ ισχυρό μηχανισμό εξέλιξης των οργανισμών, που βασίζεται στον κανόνα της φυσικής επιλογής: *“οι οργανισμοί που δεν μπορούν να επιβιώσουν στο περιβάλλον τους πεθαίνουν, ενώ οι υπόλοιποι πολλαπλασιάζονται μέσω της αναπαραγωγής”*.

Οι απόγονοι παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις από τους προγόνους τους, ενώ συνήθως υπερισχύουν αυτοί που συγκεντρώνουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά. Αν το περιβάλλον μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς, τα διάφορα είδη μπορούν να εξελίσσονται σταδιακά ώστε να προσαρμόζονται σε αυτό. Αν όμως συμβούν ραγδαίες μεταβολές, αρκετά είδη οργανισμών θα εξαφανιστούν. Σποραδικά, συμβαίνουν τυχαίες μεταλλάξεις, από τις οποίες οι περισσότερες οδηγούν τα μεταλλαγμένα άτομα στο θάνατο, αν και είναι πιθανό, πολύ σπάνια όμως, να οδηγήσουν στη δημιουργία νέων «καλύτερων» οργανισμών. Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους γενετικούς αλγόριθμους είναι η μίμηση αυτών των μηχανισμών εξέλιξης που απαντώνται στη φύση.

Τις δεκαετίες του 1950 και 1960 πολλοί ερευνητές της επιστήμης υπολογιστών πραγματοποίησαν μελέτες σε εξελικτικά συστήματα με την σκέψη ότι η εξέλιξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο βελτιστοποίησης για προβλήματα που απασχολούσαν μηχανικούς. Η ιδέα σε όλα αυτά τα συστήματα ήταν να αναπτύξουν έναν πληθυσμό «υποψήφιων» λύσεων σε ένα δεδομένο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τελεστές παρόμοιους με αυτούς που χρησιμοποιεί η φύση κατά τη διάρκεια γενετικών παραλλαγών και φυσικής επιλογής. Οι γενετικοί αλγόριθμοι τελικά επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τους φοιτητές του και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980 η μελέτη των γενετικών αλγορίθμων περιοριζόταν σε θεωρητικό επίπεδο, με λίγες πρακτικές εφαρμογές. Στην περίοδο αυτή οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνταν κυρίως για προβλήματα βελτιστοποίησης συναρτήσεων, χρησιμοποιώντας χρωμοσώματα συγκεκριμένου μήκους, δυαδικής κωδικοποίησης. Χαρακτηριστικές είναι οι μελέτες των Hollstien και De Jong την περίοδο αυτή. Ο Hollstien πραγματοποίησε ανάλυση για το πώς επιδρούν οι τελεστές της επιλογής και της διασταύρωσης στην επίδοση του αλγορίθμου. Ο De Jong προσπάθησε να προσδιορίσει τα στοιχεία εκείνα που εμποδίζουν τους αλγορίθμους να φτάσουν γρήγορα σε σύγκλιση.

Από την αρχή της δεκαετίας του '80, η επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με τη θεωρία και εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων, έχει χρησιμοποιήσει τους ΓΑ σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών που εκτείνονται σε πολλούς τομείς της ερευνητικής και όχι μόνο δραστηριότητας. Βελτιώνοντας την απόδοση των γενετικών με κατάλληλη ρύθμιση και τροποποίηση των γενετικών τελεστών, αποδεικνύεται ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων και αποτελούν μια ισχυρή μέθοδο βελτιστοποίησης. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ευρεία εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων στις φυσικές επιστήμες, τη μηχανι-

κή και τον κόσμο των επιχειρήσεων, χρησιμοποιούμενοι σε προβλήματα προγραμματισμού (scheduling), βελτιστοποίησης (optimization) κλπ..

Π3.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί γενετικών αλγορίθμων

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται οι βασικές έννοιες και ορισμοί των ΓΑ, όπως αυτές συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία, [111-115, 117-119, 126]:

A) Άτομο

Είναι κάθε πιθανή λύση του προβλήματος, δηλαδή κάθε σημείο του χώρου αναζήτησης (search space). Η παράσταση των ατόμων γίνεται με *χρωμοσώματα* (*chromosomes*), καθένα από τα οποία αποτελείται από *γονίδια* (*genes*). Στους ΓΑ τα άτομα, που ονομάζονται και γενότυποι, συνήθως αποτελούνται από ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ατόμου βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος που ονομάζονται *loci*. Οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο λέγονται *alleles*, ενώ το αποκωδικοποιημένο αποτέλεσμα ενός χρωμοσώματος λέγεται *φαινότυπος* (*phenotype*).

B) Πληθυσμός και γενιά

Ο *πληθυσμός* είναι το σύνολο των ατόμων σε κάθε βήμα της εξέλιξης του ΓΑ. Ο τρέχον πληθυσμός χρησιμοποιείται για την παραγωγή του επόμενου πληθυσμού που ονομάζεται *νέα γενιά*. Η αναπαραγωγή πραγματοποιείται με τη χρήση των γενετικών τελεστών και συνεχίζεται έως ότου να δημιουργηθεί μία νέα γενιά η οποία θα αντικαταστήσει την προηγούμενη. Τα χρωμοσώματα της εκάστοτε γενιάς με τα καλύτερα χαρακτηριστικά θα παράγουν περισσότερα αντίγραφα τους στην επόμενη γενιά με αποτέλεσμα μία γενική μετατόπιση του πληθυσμού προς τη βέλτιστη λύση. Η διαδικασία ολοκληρώνεται είτε θέτοντας ένα όριο του καλύτερου ατόμου που παράγεται από τη διαδικασία είτε καθορίζοντας ένα μέγιστο αριθμό γενεών.

Γ) Γονείς και απόγονοι

Γονείς ονομάζονται τα άτομα ενός πληθυσμού που θα συμμετέχουν στη δημιουργία της επόμενης γενιάς. Η διαδικασία *επιλογής* (*selection*) γονέων σχετίζεται με την απόδοση πιθανοτήτων επιλογής προς αναπαραγωγή στα μέλη ενός πληθυσμού υποψηφίων λύσεων. Κατά τη διαδικασία αυτή, κάποιοι γονείς με υψηλή τιμή στη συνάρτηση καταλληλότητας ενδέχεται να επιλεγούν προς αναπαραγωγή περισσότερες από μία φορές, ενώ κάποιοι γονείς με χαμηλή καταλληλότητα ενδέχεται να μην επιλεγούν καθόλου. Κατά τη διαδικασία επιλογής, αρχικά οι υποψήφιοι λύσεις αντιγράφονται σε μια δεξαμενή ζευγαρώματος (*mating pool*). Η δεξαμενή αυτή έχει μέγεθος ίσο με τον αρχικό πληθυσμό και σε αυτήν αντιγράφονται μέλη του αρχικού πληθυσμού με πιθανότητα ανάλογη της καταλληλότητάς τους. Οι *απόγονοι* (*offspring*) ή *παιδιά* δημιουργούνται από την εφαρμογή των στοχαστικών γενετικών τελεστών στο επιλεγμένο ζεύγος γονέων.

Δ) Γενετικοί τελεστές

Οι *γενετικοί τελεστές* καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο ο ΓΑ παράγει τα παιδιά σε κάθε γενιά μέσω της διαδικασίας της αναπαραγωγής. Οι γενετικοί τελεστές περιλαμβάνουν τον *επιχιασμό* (*crossover*) και τη *μετάλλαξη* (*mutation*). Ο επιχιασμός συνδυάζει δύο γονείς για τη δημιουργία ενός απογόνου με την τυχαία επιλογή ενός σημείου στο χρωμόσωμα, την ανταλλαγή και τη συνέ-

νωση γονιδίων. Αποτέλεσμα του επιχιασμού είναι τα δύο παιδιά να κληρονομήσουν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Συνήθως, η πιθανότητα επιχιασμού ($p_{crossover}$) κυμαίνεται στο εύρος (0.6-0.8) και στην ουσία δηλώνει το ποσοστό των παιδιών που θα προκύψουν με το συγκεκριμένο τελεστή. Η μετάλλαξη αλλάζει την τιμή ενός τυχαία επιλεγμένου γονιδίου ενός χρωμοσώματος και αποτελεί ένα μηχανισμό ο οποίος διασφαλίζει ότι η επιλογή δε συγκλίνει πρώιμα σε ένα τοπικό μέγιστο. Επίσης, διευρύνει την περιοχή αναζήτησης καθώς εισάγει γενετικό υλικό το οποίο δεν υπάρχει στην προηγούμενη γενιά, ούτε είναι δυνατόν να προκύψει από τον τελεστή επιχιασμού. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με πολύ μικρότερη πιθανότητα ($p_{mutation}$) από τον επιχιασμό, της τάξης μεγέθους του 0.05.

E) Συνάρτηση καταλληλότητας

Η αντικειμενική συνάρτηση αναθέτει μία τιμή (score) σε κάθε άτομο του πληθυσμού και καθορίζει πόσο ικανοποιητική είναι η αντίστοιχη λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση καταλληλότητας μπορεί να είναι η ίδια η αντικειμενική συνάρτηση ή μία άλλη συνάρτηση που η τιμή της εξαρτάται από το score της αντικειμενικής συνάρτησης. Η συνάρτηση καταλληλότητας χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση και την επιλογή των γονέων προς αναπαραγωγή, ενώ σε αντιστοιχία με τη Φυσική Επιλογή προσομοιώνει το ρόλο του περιβάλλοντος στην εξέλιξη.

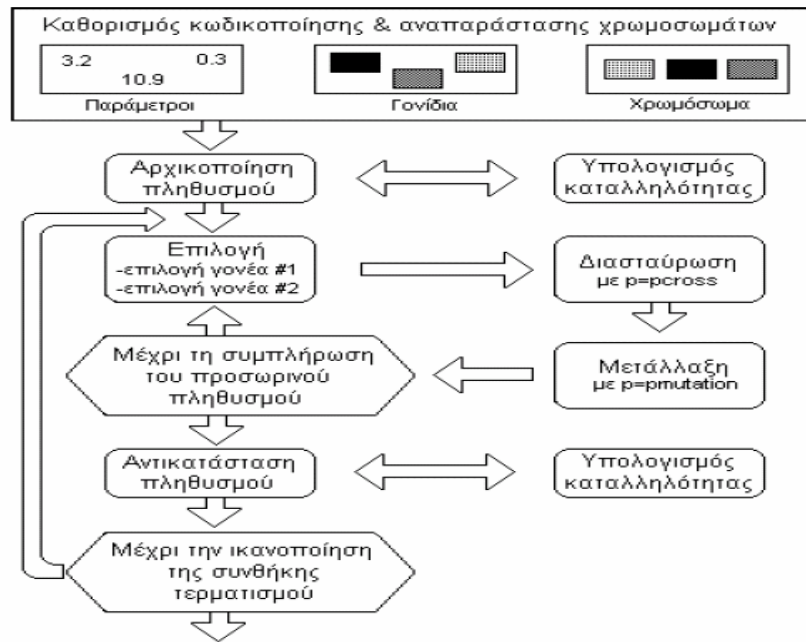
Π3.3 Γενική περιγραφή γενετικών αλγορίθμων

Το διάγραμμα ενός απλού γενετικού αλγόριθμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου εμπεριέχει βασικά τρεις φάσεις. Αυτές οι φάσεις είναι η αρχικοποίηση, η αναπαραγωγή και η αντικατάσταση των γενεών.

Στο σχήμα η αρχικοποίηση αποτελείται από τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού, προκαθορισμένου αριθμού ατόμων. Τα κωδικοποιημένα χρωμοσώματα αυτών των ατόμων δημιουργούνται τυχαία. Το σύνολο των ατόμων καλείται τρέχουσα γενιά. Σε αυτή τη φάση συμπεριλαμβάνεται επίσης ο καθορισμός για κάθε άτομο μιας τιμής καταλληλότητας. Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε άτομο.

Κατά τη φάση αναπαραγωγής δημιουργείται μια νέα γενιά από την τρέχουσα. Κάθε φορά επιλέγεται ένα ζεύγος ατόμων από την τρέχουσα γενιά τα οποία θα παίζουν το ρόλο των γονέων. Οι γονείς υπόκεινται τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη παράγοντας ένα ζεύγος τέκνων. Τα τέκνα αυτά τοποθετούνται στη νέα γενιά. Η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη επαναλαμβάνονται όσες φορές χρειαστεί ώστε η νέα γενιά να αποκτήσει τον απαιτούμενο αριθμό χρωμοσωμάτων. Σε ορισμένες εφαρμογές γενετικών αλγόριθμων αυτός ο τρόπος συναντάται ελαφρά τροποποιημένος. Συγκεκριμένα η επιλογή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της νέας γενιάς και η διασταύρωση και η μετάλλαξη επιδρούν σε αυτή μέσω τυχαίου σχηματισμού ζευγαριών. Σε κάθε περίπτωση η νέα γενιά αντικαθιστά την προηγούμενη.

Στον παρακάτω γενετικό αλγόριθμο η νέα γενιά έχει το ίδιο μέγεθος και αντικαθιστά εξολοκλήρου την παλιά. Σε πιο πολύπλοκους αλγόριθμους η νέα γενιά μπορεί να έχει διαφορετικό μέγεθος από την προηγούμενη. Στη φάση της αντικατάστασης γενεών, η νέα γενιά αντικαθιστά την παλιά, η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται για κάθε άτομο και στο κάθε ένα προσδίδεται μία τιμή καταλληλότητας. Τότε ο αλγόριθμος ελέγχει αν το κριτήριο τερματισμού ικανοποιείται και αν όχι η φάση αναπαραγωγής επαναλαμβάνεται.



Σχήμα Π3.1. Μπλοκ διάγραμμα απλού γενετικού αλγόριθμου, [117].

Π3.4 Κωδικοποίηση

Μία από τις πρώτες αποφάσεις που πρέπει να παρθούν κατά την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με ΓΑ αφορά στον τρόπο αναπαράστασης των λύσεων (solution encoding). Οι πρώτοι ΓΑ που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιούσαν *δυναδική αναπαράσταση (binary encoding)*, στην οποία κάθε άτομο του πληθυσμού αναπαρίσταται με ένα string από bits, όπου κάθε γονίδιο είναι ένα τμήμα του string. Με βάση τη δυαδική αναπαράσταση έγινε η θεωρητική θεμελίωση των ΓΑ. Το πρόβλημα που παρουσίαζε η αναπαράσταση αυτή είναι γνωστό ως πρόβλημα *πλεονάζουσων τιμών*. Όταν το πεδίο ορισμού μίας μεταβλητής είναι γνήσιο υποσύνολο του συνόλου των τιμών που αναπαρίστανται με έναν αριθμό bits, τότε ανακύπτει το ζήτημα πώς θα γίνει ο χειρισμός αυτών των πλεονάζουσων τιμών. Υπάρχει η επιλογή να απορριφθούν τα χρωμοσώματα που αντιστοιχούν σε πλεονάζουσες τιμές και να αντικατασταθούν με άλλα, ή να καταχωρηθεί στο χρωμόσωμα πολύ μικρή καταλληλότητα ώστε να μην είναι πιθανή η επιλογή του, ή να εφαρμοστεί η μέθοδος *σταθερής αντιστοίχισης (fixed remapping)* ή *τυχαίας αντιστοίχισης (random remapping)* που αντιστοιχεί το bit σε κάποιο άλλο που είναι αποδεκτό. Επιπρόσθετο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αναπαράστασης είναι το γεγονός ότι η αλλαγή κάποιων bits με την εφαρμογή των γενετικών τελεστών δεν εξασφαλίζει πάντα χωρική συσχέτιση στο search space των ατόμων της προηγούμενης και της επόμενης γενιάς. Σημειώνεται ότι στη δυαδική αναπαράσταση των λύσεων έχει χρησιμοποιηθεί και ο κώδικας Gray.

Εναλλακτική της δυαδικής αποτελεί η *αναπαράσταση τιμής (value encoding)*. Σε αυτήν το κάθε χρωμόσωμα αναπαρίσταται με την κανονική τιμή των λύσεων ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Τυπική εφαρμογή της αναπαράστασης τιμής είναι προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι πραγματικοί αριθμοί.

Π3.5 Αναπαραγωγή – Γενετικοί Τελεστές

Π3.5.1 Επιλογή

Σε αναλογία με τον πραγματικό κόσμο και σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι πιο εύρωστοι οργανισμοί τείνουν να αναπαράγονται με αυξημένη πιθανότητα. Οι ΓΑ επιλέγουν από το σύνολο του πληθυσμού τα γενετικά πιο ανεπτυγμένα άτομα με βάση τη συνάρτηση καταλληλότητας, στα οποία και θα εφαρμοστούν εν συνεχεία οι γενετικοί τελεστές. Η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας του κάθε χρωμοσώματος, αποτελεί μέτρο του βαθμού ικανοποίησης των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Η επιλογή όμως δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην εκλογή του καλύτερου ατόμου της γενιάς, δηλαδή αυτού με τη μεγαλύτερη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας, καθώς αυτό μπορεί να μη βρίσκεται κοντά στη βέλτιστη λύση. Πρέπει να επιλέγονται και μη ικανοποιητικές λύσεις έτσι ώστε τα γονίδια τα οποία περιέχουν τα χρωμοσώματα αυτά να μη χαθούν πρόωρα από τον πληθυσμό. Σε πολλές περιπτώσεις η επιλογή περιλαμβάνει ένα μηχανισμό με τον οποίο συνδυάζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του κάθε χρωμοσώματος με τη μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του πληθυσμού.

Πάνω σε αυτήν τη λογική έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο ντετερμινιστικών και στοχαστικών μεθόδων επιλογής, οι σημαντικότερες των οποίων αναπτύσσονται εν συντομία παρακάτω.

A) Αποδεκατισμός πληθυσμού

Μία πρώτη προσέγγιση στις μεθόδους επιλογής αποτελούν οι ντετερμινιστικές μέθοδοι, η απλούστερη από τις οποίες ονομάζεται μέθοδος *αποδεκατισμού του πληθυσμού* (*population decimation*). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή επιβιώνουν τα χρωμοσώματα που χαρακτηρίζονται από τις καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας, ενώ παράλληλα απομακρύνονται τα άτομα με τις χειρότερες τιμές. Δηλαδή ο πληθυσμός «αποδεκατίζεται» και στη συνέχεια ξαναδημιουργείται μέσω της αναπαραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, τα άτομα κατατάσσονται σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη. Έπειτα, επιλέγεται μια αυθαίρετη τιμή σαν τιμή κατωφλίου και τα χρωμοσώματα με συνάρτηση καταλληλότητας χαμηλότερη από αυτή, απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Τα υπόλοιπα άτομα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της νέας γενιάς μέσω των γενετικών τελεστών. Σε μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής, μπορεί να δημιουργηθεί πριν τον αποδεκατισμό ένας αριθμός ατόμων με τυχαίο ταίριασμα, να προστεθούν στον πληθυσμό και έπειτα να χρησιμοποιηθεί ο αποδεκατισμός για να επαναφερθεί ο πληθυσμός στο αρχικό του μέγεθος.

Ο *αποδεκατισμός του πληθυσμού* χαρακτηρίζεται ως ντετερμινιστική μέθοδος καθώς τα άτομα που αποκλείονται από τον πληθυσμό επιλέγονται βάσει κάποιας ντετερμινιστικής σύγκρισης μεταξύ των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας και μιας αυθαίρετης τιμής κατωφλίου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αποδεκατισμού είναι η απλότητα της, ενώ το μειονέκτημα της είναι ο κίνδυνος πρόωμης απώλειας γενετικής πληροφορίας, αφού εάν ένα χρωμόσωμα απομακρυνθεί από τον πληθυσμό, τα γενετικά χαρακτηριστικά που εμπεριείχε χάνονται για πάντα. Αυτό βέβαια συμβαίνει σε όλες τις μεθόδους επιλογής, απλά στη συγκεκριμένη συμβαίνει πολύ πριν η διαδικασία εξέλιξης αναγνωρίσει τη χρησιμότητα κάποιου συγκεκριμένου χαρακτηριστικού ενός χρωμοσώματος που έχει χαθεί. Δυστυχώς τα καλά γενετικά χαρακτηριστικά μπορεί να μη συνδέονται άμεσα με την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας σε πρώιμα στάδια του αλγορίθμου. Όταν ένα χαρακτηριστικό απομακρυνθεί από τον πληθυσμό, ο μόνος τρόπος για να επανέλθει σε αυτόν είναι μέσω της μετάλλαξης. Ακριβώς εξαιτίας των επιδράσεων της πρόωμης απώλειας των γενετικών χαρακτηριστικών που έχουν οι ντετερμινιστικές μέθοδοι, δημιουργήθηκαν οι στοχαστικές μέθοδοι επιλογής.

B) Επιλογή Ρουλέτας

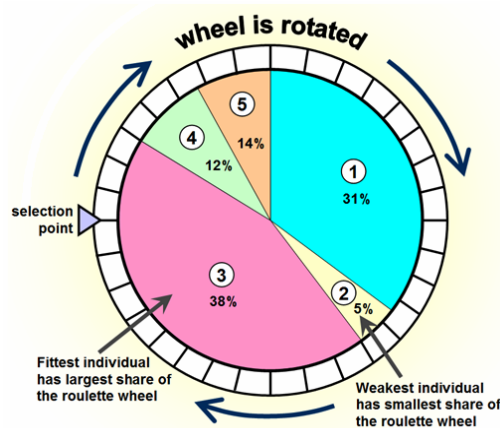
Ο κανόνας της ρουλέτας ή αναλογική επιλογή (*proportional selection*) ή στοχαστική δειγματοληψία με επανατοποθέτηση όπως είναι η πιο δόκιμη ονομασία του τρόπου αυτού επιλογής, μιμείται τους φυσικούς νόμους. Η διαδικασία αυτή της επιλογής προσομοιάζει την περιστροφή μιας ρουλέτας στην οποία έχει μοιραστεί ο χώρος στους γονείς ανάλογα με την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητάς τους. Οι γονείς επιλέγονται βάσει μιας πιθανότητας επιλογής που δίνεται από τον παρακάτω τύπο, όπου $f(\text{parent}_i)$ είναι η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας του i στού γονέα:

$$P_{\text{selection}} = \frac{f(\text{parent}_i)}{\sum_i f(\text{parent}_i)} \quad (\text{Π3.1})$$

Η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο από τον πληθυσμό είναι συνάρτηση της σχετικής τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας του ατόμου. Χρωμοσώματα με μεγάλη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συμμετέχουν στη δημιουργία του επόμενου πληθυσμού, ωστόσο υπάρχει μία μικρή πιθανότητα και για άτομα με μικρή καταλληλότητα να μετέχουν στην αναπαραγωγική διαδικασία. Αρχικά επιλέγεται ένας αριθμός μεταξύ του 0 και του 1 και υπολογίζεται η κανονικοποιημένη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για καθένα από τα άτομα του πληθυσμού. Έπειτα, αθροίζονται οι κανονικοποιημένες τιμές καταλληλότητας, αυξάνοντας παράλληλα ένα δείκτη σε κάθε άθροιση, έως ότου το άθροισμα να γίνει μεγαλύτερο ή ίσο από τον τυχαίο αριθμό που επιλέχτηκε αρχικά. Η τελική τιμή του δείκτη δίνει τη θέση του χρωμοσώματος το οποίο επιλέχθηκε για αναπαραγωγή. Αυτή η αλγοριθμική διαδικασία μπορεί να προσομοιωθεί με μία ρουλέτα στην οποία το κάθε άτομο καταλαμβάνει χώρο ανάλογο με τη σχετική συνάρτηση καταλληλότητάς του, όπως σχηματικά αναπαρίσταται στο Σχήμα Π3.2. Κάθε βήμα επιλογής γονέα αντιστοιχεί σε μία περιστροφή της ρουλέτας.

Συνεπώς η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο από τον πληθυσμό είναι συνάρτηση της σχετικής τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας του ατόμου. Αυτό γενικότερα έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την απομάκρυνση του χειρότερου χρωμοσώματος στον αποδεκατισμό πληθυσμού.

Η διαφορά ανάμεσα στις δύο παραπάνω μεθόδους έγκειται στην πιθανολογική επιλογή της δεύτερης, καθώς δύναται άτομα με μικρή συνάρτηση καταλληλότητας, να μετέχουν στην αναπαραγωγική διαδικασία με σαφώς μικρότερη πιθανότητα βέβαια. Η ρουλέτα «περιστρέφεται» και με τυχαίο τρόπο επιλέγεται το άτομο που θα μετέχει στην αναπαραγωγή του πληθυσμού. Η μέθοδος αυτή έχει σοβαρά στοχαστικά λάθη όταν ο πληθυσμός είναι μικρός. Επιπλέον ήδη από τα πρώτα στάδια της βελτιστοποίησης κυριαρχούν τα πιο «ισχυρά» χρωμοσώματα, ενώ στα τελευταία στάδια παρουσιάζεται στασιμότητα στη διαδικασία εξαιτίας της αδυναμίας της να αναγνωρίσει τα καλύτερα χρωμοσώματα, όταν όλα τα άτομα έχουν σχεδόν την ίδια συνάρτηση καταλληλότητας. Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών έχουν δημιουργηθεί διάφορες παραλλαγές της μεθόδου.



Σχήμα Π3.2. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου επιλογής της ρουλέτας, [117]

Γ) Επιλογή *Stochastic Uniform*

Και αυτή η μέθοδος βασίζεται στη λογική της επιλογής γονέων με τη βοήθεια ρουλέτας, ωστόσο εμφανίζει μία σημαντική διαφορά από την επιλογή ρουλέτας. Στη μέθοδο *ρουλέτας* για την επιλογή κάθε γονέα επιλέγεται ένας διαφορετικός κάθε φορά τυχαίος αριθμός, πράγμα που ισοδυναμεί με περιστροφή της ρουλέτας τόσες φορές όσο είναι το μέγεθος του ενδιαμέσου πληθυσμού της δεξαμενής ζευγαρώματος. Αντίθετα, στη μέθοδο *stochastic uniform* τα άτομα του τρέχοντος πληθυσμού τοποθετούνται με τυχαία σειρά σε ένα διάγραμμα πίτας στο οποίο ο χώρος που καταλαμβάνουν είναι ανάλογος της αναμενόμενης τιμής τους. Ο αλγόριθμος προχωράει κατά μήκος της πίτας με βήμα ίσου μεγέθους, το οποίο είναι ίσο με $1/N_{parents}$ έτσι ώστε να καλύπτεται όλη η ρουλέτα σε $N_{parents}$ βήματα. Σε κάθε βήμα επιλέγεται ο γονέας στον οποίο «προσγειώνεται» ο αλγόριθμος. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα να επιλέγονται όλοι οι γονείς με μία μόνο περιστροφή της ρουλέτας, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ταχύτερη και παράλληλα ακριβή διαδικασία επιλογής.

Δ) Επιλογή *Remainder Stochastic Uniform*

Μια άλλη διαδικασία επιλογής είναι η *στοχαστική δειγματοληψία υπολοίπου (remainder stochastic sampling)*. Η ιδιαιτερότητά της είναι ότι μηδενίζει την πιθανότητα της μη συμμετοχής των καλύτερων ατόμων στην αναπαραγωγή, χωρίς όμως να εξαλείφεται η τυχαιότητα στην επιλογή του πληθυσμού.

Η διαδικασία συνοψίζεται στη διαίρεση της καταλληλότητας του κάθε χρωμοσώματος με τη μέση τιμή της τρέχουσας γενιάς. Το ακέραιο μέρος της διαίρεσης δείχνει πόσες φορές σίγουρα θα συμμετέχει το παρόν άτομο στην αναπαραγωγή, ενώ το υπόλοιπο αντιστοιχεί στην πιθανότητα συμμετοχής μια φορά ακόμα εφόσον φυσικά ο αριθμός γονέων που συγκεντρώθηκε δεν είναι επαρκής. Για παράδειγμα, αν για ένα χρωμόσωμα ο παραπάνω λόγος είναι 1.25, τότε θα τοποθετηθεί ένα αντίγραφο του στον ενδιαμέσο πληθυσμό και υπάρχει πιθανότητα 0.25 για ακόμα μια αντιγραφή. Αν ο λόγος ήταν 0.84, τότε το άτομο θα συμμετείχε στην αναπαραγωγή με αυτήν ακριβώς την πιθανότητα.

Ε) Επιλογή *Τουρνουά*

Η μέθοδος *τουρνουά (tournament selection)* αποτελεί τη δεύτερη πιο δημοφιλή στοχαστική μέθοδο επιλογής. Σε κάθε βήμα της επιλογής τουρνουά N άτομα επιλέγονται τυχαία από τον πληθυσμό διαλέγοντας έναν αριθμό από το ένα έως τον αριθμό των ατόμων του πληθυσμού. Ο αριθμός αυτός καθορίζει το χρωμόσωμα που θα πάρει μέρος στο τουρνουά και η διαδικασία συνεχίζει έως ότου να συμπληρωθούν τα N άτομα της ομάδας. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει επιλογή *ρουλέτας* για να συμπληρωθεί η ομάδα (*Wetzel ranking*). Έπειτα, για κάθε μέλος της ομάδας αυτής υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας και το χρωμόσωμα με τη μεγαλύτερη τιμή κερδίζει το τουρνουά και επιλέγεται. Τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας επιστρέφουν στον αρχικό πληθυσμό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου συμπληρωθεί ο επιθυμητός αριθμός γονέων. Η πιο συνηθισμένη μορφή τουρνουά είναι αυτή όπου $N=2$, δηλαδή η κάθε ομάδα αποτελείται από δύο χρωμοσώματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η μέθοδος τουρνουά όσο και αυτή της ρουλέτας, χρησιμοποιούν επιλογή με αντικατάσταση ώστε τα άτομα να επιτελούν περισσότερες από μία φορές το ρόλο του γονέα. Κάτι τέτοιο συμβαίνει πολύ συχνά όταν ο πληθυσμός συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου τουρνουά έναντι της ρουλέτας είναι ότι παρουσιάζει καλύτερη σύγκλιση σε μία λύση στα πρώτα στάδια του αλγόριθμου και είναι γενικά πιο γρήγορη. Ενδεικτικά, η πολυπλοκότητα χρόνου για την επιλογή ρουλέτας είναι $O(n^2)$ ενώ για τη μέθοδο τουρνουά $O(n)$.

ΣΤ) Επιλογή Βαθμονόμησης

Στη μέθοδο αυτήν κάθε άτομο του πληθυσμού βαθμονομείται βάσει της τιμής καταλληλότητας και ο υπολογισμός της πιθανότητας επιλογής γίνεται βάσει της βαθμονομημένης τιμής αυτής. Στη γραμμική βαθμονόμηση τα άτομα του πληθυσμού κατατάσσονται με σειρά από το χειρότερο προς το καλύτερο.

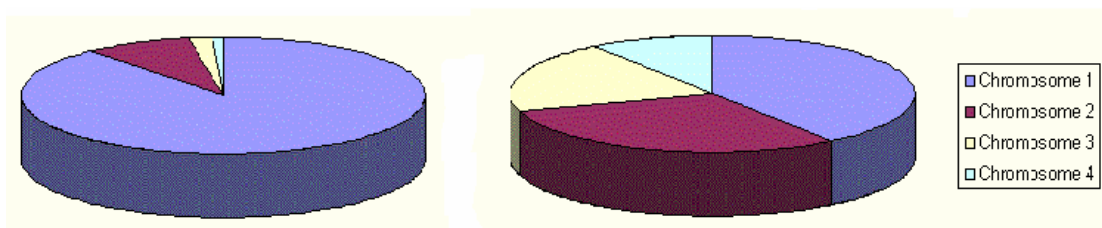
Η μέθοδος της επιλογής με γραμμική βαθμονόμηση (*linear rank selection*) προτάθηκε για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πρώιμης σύγκλισης (*premature convergence*). Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα στην επιλογή ρουλέτας όταν κατά τις πρώτες γενιές η καταλληλότητα του καλύτερου ατόμου είναι τόσο υψηλή ώστε να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ρουλέτας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται η ποικιλομορφία καθώς το άτομο με την υψηλότερη καταλληλότητα επιλέγεται για αναπαραγωγή πολλές φορές, έναντι λιγότερο κατάλληλων χρωμοσωμάτων. Η επίδραση της γραμμικής βαθμονόμησης στη πιθανότητα επιλογής του κάθε ατόμου απεικονίζεται στο Σχήμα Π3.3.

Κάθε άτομο έχει πιθανότητα επιλογής βάσει κάποιας γραμμικής συνάρτησης της βαθμονομημένης τιμής του. Αυτό γίνεται συνήθως αναθέτοντας στο άτομο στη θέση i την πιθανότητα επιλογής:

$$p_i = \frac{1}{\|P\|} \cdot \left(2 - c + (2 \cdot c - 2) \cdot \frac{i-1}{\|P\|-1} \right) \quad (\text{Π3.2})$$

όπου $\|P\|$ το μέγεθος του πληθυσμού P και $1 < c < 2$ είναι το βάρος της επιλογής: μεγάλες τιμές του οδηγούν στο αλγόριθμο επιλογής να εστιάζει στα καλύτερα άτομα. Βάσει των παραπάνω το άτομο με τη μεγαλύτερη καταλληλότητα έχει πιθανότητα επιλογής $\frac{c}{\|P\|}$ ενώ το χειρότερο άτομο $\frac{2-c}{\|P\|}$.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η επιλογή βαθμονόμησης μειώνει το βαθμό της επιλογής όταν η διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, ενώ τον αυξάνει όταν δεν εμφανίζεται μεγάλη διασπορά. Μία τέτοια συμπεριφορά είναι επιθυμητή καθώς κατά τις πρώτες γενιές που είμαστε ακόμα μακριά από το βέλτιστο πολλά άτομα συμμετέχουν στο σχηματισμό απογόνων, ενώ σε προχωρημένες γενιές όπου έχει προσεγγιστεί η βέλτιστη λύση, είναι καθοριστικότερη η συνεισφορά των καταλληλότερων ατόμων. Ωστόσο, μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η πιο αργή διαδικασία βελτιστοποίησης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τη γραμμική υπάρχουν και άλλες μέθοδοι βαθμονόμησης, όπως η εκθετική.



Σχήμα Π3.3. Επίδραση της βαθμονόμησης στην πιθανότητα επιλογής των ατόμων. Αριστερά: Η σειρά καταλληλότητας των ατόμων του πληθυσμού με βάση την αντικειμενική συνάρτηση και πριν τη βαθμονόμηση. Δεξιά: Η σειρά καταλληλότητας μετά τη βαθμονόμηση, [126].

Ζ) Διαβάθμιση Σίγμα

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πρώιμης σύγκλισης, έχουν δημιουργηθεί μέθοδοι επιλογής όπως η διαβάθμιση σίγμα (*sigma scaling*). Η μέθοδος αυτή σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης του αλγόριθμου, κρατάει σε σταθερά επίπεδα το βαθμό στον οποίο κατάλληλα άτομα συμμετέχουν

στη δημιουργία απογόνων, χωρίς να εξαρτάται από τη διασπορά των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας.

Σε κάθε γενιά t , η πιθανότητα επιλογής, $ExpVal(i,t)$, του κάθε ατόμου, i , για αναπαραγωγή, εξαρτάται από την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητάς του, $f(i)$, τη μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας του πληθυσμού, $\overline{f(t)}$, και την τυπική απόκλιση του πληθυσμού, $\sigma(t)$.

$$ExpVal(i,t) = \begin{cases} 1 + \frac{f(i) - \overline{f(t)}}{2 \cdot \sigma(t)}, & \sigma(t) \neq 0 \\ 1, & \sigma(t) = 0 \end{cases} \quad (\text{Π3.3})$$

Όταν μελετάται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας, ενώ στην αντίθετη περίπτωση τα πρόσημα του αριθμητή είναι αντίθετα. Όταν η συνάρτηση καταλληλότητας του ατόμου ξεπερνά τη μέση τιμή κατά την τυπική απόκλιση, η τιμή της $ExpVal(i,t)$ τίθεται ίση με 1.5. Όταν η $ExpVal(i,t)$ γίνει αρνητική, τότε τίθεται ίση με 0.1 ώστε και τα χειρότερα άτομα να έχουν κάποια πιθανότητα να μετέχουν στην αναπαραγωγή.

Η διαβάθμιση σίγμα εξασφαλίζει ότι στην αρχή που η τυπική απόκλιση των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας είναι υψηλή, τα καταλληλότερα διανύσματα δε θα ξεπερνούν κατά πολύ τη μέση τιμή ώστε να μονοπωλούν την αναπαραγωγική διαδικασία. Αντιθέτως, αργότερα που ο πληθυσμός γίνεται ομοιόμορφος και η τυπική απόκλιση των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας είναι χαμηλή, το καταλληλότερο άτομο θα ξεχωρίζει και η εξέλιξη θα συνεχίζεται.

Η) Κανονικοποιημένη Γεωμετρική Βαθμονόμηση

Μία ακόμα πιο επιθετική μορφή επιλογής είναι η *κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση* (*normalized geometric rank*). Τα άτομα του πληθυσμού βαθμολογούνται από το καλύτερο στο χειρότερο σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Η πιθανότητα επιλογής του κάθε χρωμοσώματος υπολογίζεται σύμφωνα με την κανονικοποιημένη γεωμετρική κατανομή και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_{selection} = q' \cdot (1 - q)^{rank(i,t)-1} \quad \text{με} \quad q' = \frac{q}{1 - (1 - q)^N} \quad (\text{Π3.4})$$

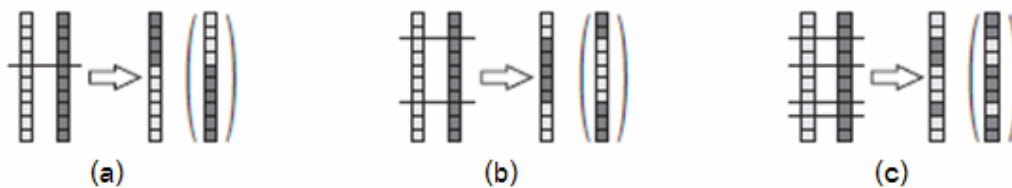
όπου q : η πιθανότητα επιλογής του καλύτερου ατόμου,
 $rank(i,t)$: η βαθμολογία του κάθε χρωμοσώματος, όπου 1 είναι η μέγιστη,
 N : το μέγεθος του πληθυσμού

Θ) Ελιτισμός

Ανάλογα με το σχήμα αντικατάστασης που ακολουθείται, υπάρχει πιθανότητα το καλύτερο χρωμόσωμα του πληθυσμού να επιλεγεί προς αναπαραγωγή και να αντικατασταθεί από απογόνους του. Ακόμη, υπάρχει το ενδεχόμενο το καλύτερο γονίδιο να μην επιλεγεί καθόλου για εξέλιξη στην επόμενη γενιά ή ακόμη και να μεταλλαχθεί και οι πολύτιμες γονιδιακές συναθροίσεις να χαθούν. Για την αντιμετώπιση της παραπάνω περιγραφείσας «ατυχούς» απώλειας του καλύτερου γονιδίου, εφαρμόζεται διατήρηση καλύτερου χρωμοσώματος (*ελιτισμός*), όπου το καλύτερο χρωμόσωμα αντιγράφεται στην επόμενη γενιά του πληθυσμού σε κάθε περίπτωση. Ο κίνδυνος που εμπεριέχει η χρήση αυτής της τεχνικής, είναι προφανώς η δημιουργία πολλών αντιγράφων ενός προσωρινά καλού χρωμοσώματος με αποτέλεσμα την πρόωρη σύγκλιση σε όχι βέλτιστες λύσεις. Τον *ελιτισμό* εισήγαγε πρώτος ο *Kenneth De Jong* (1975).

Π3.5.2 Διασταύρωση

Η διασταύρωση αποτελεί τη βασικότερη διαδικασία εξέλιξης και άρα αποτελεί βασικό στοιχείο των γενετικών αλγορίθμων. Σε αυτήν δύο άτομα συνδυάζουν τα γονίδια τους και δίνουν απογόνους. Η επίδραση της διασταύρωσης είναι ότι διαμορφώνει εκ νέου τα γονίδια με στόχο τη δημιουργία καλύτερων χρωμοσωμάτων. Το είδος του τελεστή, δηλαδή η διαδικασία διασταύρωσης, εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος. Ας σημειωθεί ότι μπορεί σε ένα πρόβλημα ένας τελεστής να δίνει πολύ καλά αποτελέσματα ενώ σε ένα άλλο να μη δίνει καλές λύσεις. Έχει παρατηρηθεί ότι τιμές της πιθανότητας διασταύρωσης ($p_{crossover}$) από 0.6 έως 0.8 δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Ακολουθούν οι βασικές τεχνικές διασταύρωσης οι οποίες απεικονίζονται και στο Σχήμα Π3.4.



Σχήμα Π3.4. α) Διασταύρωση ενός σημείου, β) Διασταύρωση δύο σημείων, γ) Διάσπαρτη διασταύρωση, [118]

A) Διασταύρωση ενός σημείου

Στη διασταύρωση μονού σημείου (*single point*) επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός p από 0 έως 1. Εάν $p > p_{crossover}$ επιλέγεται ένας ακέραιος, έστω n , από το 1 έως N το πλήθος των μεταβλητών (γονιδίων). Στον 1^ο απόγονο που θα προκύψει, τα γονίδια από 1 έως N θα προέρχονται από τον πρώτο γονέα και τα γονίδια από $n+1$ έως N από το δεύτερο. Ακριβώς αντίθετα θα είναι τα γονίδια στο 2^ο απόγονο.

Στην περίπτωση που $p < p_{crossover}$ δε γίνεται διασταύρωση, αλλά όλο το χρωμόσωμα του γονέα 1 αντιγράφεται στο 1^ο παιδί και αντίστοιχα του γονέα 2 στο 2^ο παιδί.

B) Διασταύρωση δύο σημείων

Η διασταύρωση διπλού σημείου (*two point*) αποτελεί παραλλαγή της διασταύρωσης μονού σημείου όπου οι γονείς διασταυρώνονται δύο φορές, αφού πρώτα επιλεγούν με τυχαίο τρόπο δύο θέσεις κοπής, έστω k και n , $k < n$. Τότε ο 1^{ος} απόγονος θα έχει τα γονίδια 1 έως k και n έως N από τον πρώτο γονέα και τα γονίδια k έως n από το δεύτερο. Αντίστοιχα θα προκύψει (με συμπληρωματικό τρόπο) το δεύτερο παιδί.

Γ) Διάσπαρτη διασταύρωση

Στη διάσπαρτη διασταύρωση δημιουργείται με τυχαίο τρόπο μία φόρμα δυαδικών αριθμών πλήθους όσος και ο αριθμός των γονιδίων. Στις θέσεις της φόρμας με τιμή 1 επιλέγεται το αντίστοιχο γονίδιο από τον πρώτο γονέα και στις θέσεις με τιμή 0 από το δεύτερο.

Δ) Αριθμητική διασταύρωση

Η αριθμητική διασταύρωση ή διασταύρωση μέσου όρου ενεργεί πάνω σε δύο γονείς και παράγει ένα νέο άτομο, που είναι το αποτέλεσμα υπολογισμού του αριθμητικού μέσου όρου των γο-

νέων του. Μερικές φορές μάλιστα, οι δυο γονείς δε μετέχουν ισότιμα αλλά με βάρη στον υπολογισμό. Για παράδειγμα έστω ότι έχουμε δύο γονείς x_1, x_2 . Οι απόγονοι τους, x_1^* και x_2^* , θα προκύψουν ως εξής:

$$x_1^* = x_1 + a \cdot (x_2 - x_1) \quad \text{και} \quad x_2^* = x_2 + a \cdot (x_1 - x_2) \quad (\text{Π3.5})$$

Ο τελεστής χρησιμοποιεί μία τυχαία μεταβλητή a , η οποία μπορεί να είναι βαθμωτή με $a \in [0, 1]$ ή διάνυσμα με συνιστώσες $a_i \in [0, 1]$ και στην ουσία αποτελεί ένα σταθμισμένο μέσο. Στην ειδική περίπτωση που $a=0.5$, ο αριθμητικός επιχιασμός ονομάζεται *ενδιάμεσος επιχιασμός* (*intermediate crossover*).

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο αυτή παρουσιάζουν γρηγορότερη σύγκλιση και είναι αρκετά σταθερά με χαμηλότερη τυπική απόκλιση. Σε περίπτωση κωδικοποίησης των λύσεων με πραγματικούς αριθμούς, η διασταύρωση μέσου όρου δουλεύει πολύ καλά, πέρα από το γεγονός ότι ταιριάζει διαισθητικά με τη μορφή των ατόμων και είναι αρκετά δημοφιλής στις εφαρμογές.

E) Ευριστική διασταύρωση

Το παιδί που προκύπτει από την *ευριστική διασταύρωση* αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των δύο γονέων και κείται πλησιέστερα στο γονιό με τη μεγαλύτερη τιμή καταλληλότητας. Η παρακάτω εξίσωση περιγράφει το παιδί που προκύπτει από την *ευριστική διασταύρωση* δύο γονέων x_1 και x_2 :

$$x_1' = x_2 + (x_2 - x_1) \cdot r \quad (\text{Π3.6})$$

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το γονέα x_2 πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή της συνάρτησης για το γονέα x_1 , δηλαδή $f(x_1) \geq f(x_2)$ για προβλήματα μεγιστοποίησης. Αντίστοιχα πρέπει να είναι μικρότερη, δηλ. $f(x_1) \leq f(x_2)$, για προβλήματα ελαχιστοποίησης.

Το πόσο κοντά βρίσκεται ο απόγονος στον γονέα x_2 καθορίζεται από το συντελεστή r . Είναι πιθανό ο τελεστής αυτός να δημιουργήσει ένα χρωμόσωμα εκτός του πεδίου τιμών. Σε μια τέτοια περίπτωση επιλέγεται νέο r και δημιουργείται ένας νέος απόγονος. Εάν μετά από μερικές προσπάθειες δεν έχει βρεθεί μία λύση που να ικανοποιεί τους περιορισμούς, ο τελεστής σταματά και δεν παράγει απόγονο.

Συνεπώς το κυριότερο προτέρημα του τελεστή αυτού είναι ότι οδηγεί στη καλύτερη κατεύθυνση αναζήτησης, ενώ συμβάλλει και στην ακρίβεια της λύσης που βρίσκει ο αλγόριθμος.

Π3.5.3 Μετάλλαξη

Η μετάλλαξη προσφέρει τη γενετική διαφοροποίηση από γενιά σε γενιά και διευρύνει το πεδίο αναζήτησης του αλγόριθμου. Από την άλλη, η μετάλλαξη συχνά διακόπτει τη διαδικασία προς ένα συγκλίνων πληθυσμό, γι' αυτό και ενδείκνυται η πιθανότητα μετάλλαξης (p_{mutation}) να είναι χαμηλή, δηλαδή της τάξης του 1% έως 1%. Μετάλλαξη γίνεται αν $p > p_{\text{mutation}}$. Τότε ένα στοιχείο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και αλλάζεται. Στην περίπτωση δυαδικής κωδικοποίησης αυτό σημαίνει επιλογή ενός bit και μετατροπή του από 0 σε 1 και αντίστροφα. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των συνήθων μεθόδων μετάλλαξης των γονιδίων.

A) Ομοιόμορφη μετάλλαξη

Η *ομοιόμορφη μετάλλαξη* είναι μία διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, ο αλγόριθμος επιλέγει ένα τμήμα του χρωμοσώματος του γονέα που προορίζεται για μετάλλαξη, όπου κάθε τμήμα έχει

την ίδια πιθανότητα μετάλλαξης, ίση με το ρυθμό μετάλλαξης. Στο δεύτερο στάδιο ο αλγόριθμος αντικαθιστά κάθε επιλεγμένο τμήμα με έναν τυχαίο αριθμό που επιλέγεται ομοιόμορφα από το επιτρεπτό εύρος (πεδίο ορισμού) του αντίστοιχου τμήματος. Η επίδραση του τελεστή αυτού είναι πολύ σημαντική στα πρώτα στάδια της εξελικτικής διαδικασίας, όταν τα άτομα-λύσεις κινούνται ακόμα ελεύθερα στο πεδίο αναζήτησης. Ο τελεστής αυτός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όταν ο αρχικός πληθυσμός είναι αρκετά ομοιόμορφος, περιέχει δηλαδή πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου χρωμοσώματος. Για παράδειγμα όταν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ο χρήστης επιλέγει σημείο εκκίνησης της διαδικασίας έτσι ώστε η κάθε επανάληψη του αλγόριθμου να ξεκινά από την καλύτερη λύση της προηγούμενης επανάληψης, ο τελεστής αυτός εισάγει την επιθυμητή διαφοροποίηση στα άτομα της γενιάς. Επίσης, στα τελευταία στάδια της διαδικασίας ο τελεστής βοηθάει τον αλγόριθμο να απομακρύνεται από τοπικά μέγιστα και να μην παγιδεύεται σε αυτά.



Σχήμα Π3.5. Μετάλλαξη ενός (a) και πολλαπλών σημείων (b), [118]

B) Ανομοιόμορφη μετάλλαξη

Ο Michalewicz πρότεινε ένα δυναμικό *non-uniform* τελεστή ώστε να μειωθεί το μειονέκτημα της τυχαίας μετάλλαξης. Εάν ένα άτομο $x_i^t = \{x_1, \dots, x_k, \dots, x_m\}$ ανήκει σε ένα πληθυσμό t γενιάς και το στοιχείο (γονίδιο) x_k επιλέγεται για μετάλλαξη, τότε το αποτέλεσμα είναι ένα διάνυσμα $x_i^{t+1} = \{x_1, \dots, x_k^*, \dots, x_m\}$, όπου:

$$x_k^* = \begin{cases} x_k + \Delta(t, UB - x_k) & \text{if a random } \xi \text{ is } 0 \\ x_k - \Delta(t, x_k - LB) & \text{if a random } \xi \text{ is } 1 \end{cases} \quad (\text{Π3.7})$$

Στην παραπάνω εξίσωση UB , LB είναι το άνω και το κάτω όριο αντίστοιχα του πεδίου ορισμού της μεταβλητής x_k , ενώ η συνάρτηση $\Delta(t, y)$ ορίζεται έτσι ώστε να επιστρέφει μία τιμή στο διάστημα $[0, y]$ που προσεγγίζει το μηδέν όσο το t αυξάνεται. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στον τελεστή να εξερευνά το χώρο αναζήτησης ομοιόμορφα στα πρώτα στάδια του ΓΑ (όταν το t είναι μικρό) και πολύ τοπικά σε μεταγενέστερα στάδια. Η συνάρτηση $\Delta(t, y)$ ορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta(t, y) = y \cdot \left(1 - r \left(1 - \frac{t}{T} \right)^b \right) \quad (\text{Π3.8})$$

όπου r είναι μία ομοιόμορφα τυχαία τιμή στο διάστημα $[0, 1]$, T είναι ο μέγιστος αριθμός γενιών και b είναι μία παράμετρος που καθορίζει το βαθμό της μη ομοιομορφίας.

Γ) Οριακή μετάλλαξη

Ο τελεστής οριακής μετάλλαξης (*boundary mutation*) επιλέγει και αυτός ένα τμήμα του χρωμοσώματος, στο οποίο αλλάζει τα γονίδια με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης. Εδώ τα γονίδια δεν αντικαθίσταται με έναν ομοιόμορφα τυχαίο αριθμό, αλλά αντικαθίστανται ισοπίθανα με το αριστερό ή το δεξιό όριο του πεδίου ορισμού της μεταβλητής. Ο τελεστής αυτός χρησιμοποιείται

για προβλήματα βελτιστοποίησης όπου η βέλτιστη λύση βρίσκεται κοντά στα όρια του πεδίου αναζήτησης. Συνεπώς, η χρήση του τελεστή αυτού δεν έχει θετικά αποτελέσματα αν δεν υπάρχουν περιορισμοί και τα όρια των παραμέτρων είναι ευρεία.

4) *Μετάλλαξη Gaussian*

Η σημαντικότερη διαφορά της μετάλλαξης *Gaussian* από τις προηγούμενες έγκειται στο ότι στην προκειμένη περίπτωση δεν επιλέγεται κάποιο τμήμα του ατόμου προς μετάλλαξη, αλλά αντιθέτως όλα τα γονιδια του μεταλλάσσονται ελαφρώς. Μετάλλαξη ενός γονιδίου σημαίνει διαταραχή της αρχικής τιμής του με έναν τυχαίο αριθμό που λαμβάνεται από γκαουσιανή κατανομή. Συνήθως η γκαουσιανή κατανομή έχει κεντρική τιμή το μηδέν, μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε μεταβλητή βελτιστοποίησης και μπορεί να αλλάζει δυναμικά σε κάθε βήμα του ΓΑ. Έστω ένα γονίδιο x_i ενός ατόμου με την αντίστοιχη γκαουσιανή κατανομή $N(0, \sigma_i)$, τότε η τελική τιμή του γονιδίου μετά τη μετάλλαξη μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$x_i^* = x_i + \sigma_i \cdot N(0,1) \quad (\text{Π3.9})$$

όπου σ_i είναι η τυπική απόκλιση της γκαουσιανής κατανομής της εκάστοτε μεταβλητής και $N(0,1)$ είναι η τυπική κανονική κατανομή. Η τυπική απόκλιση σ_i μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση δύο παραμέτρων. Η πρώτη ονομάζεται *παράμετρος κλίμακας (scale parameter)* και καθορίζει το μέγεθος της τυπικής απόκλισης κατά την πρώτη γενιά του ΓΑ. Η δεύτερη ονομάζεται *παράμετρος συρρίκνωσης (shrink parameter)* και καθορίζει το βαθμό ελάττωσης της τυπικής απόκλισης με την πάροδο των γενεών. Για παράδειγμα, εάν η *παράμετρος συρρίκνωσης* είναι 0 τότε η τυπική απόκλιση είναι σταθερή, ενώ εάν είναι 1 συρρικνώνεται γραμμικά καθώς η εξέλιξη προσεγγίζει την τελευταία γενιά. Ο τρόπος λειτουργίας της *Gaussian* μετάλλαξης σε πραγματική αναπαράσταση είναι προφανής, όχι όμως και για τη δυαδική αναπαράσταση. Στην περίπτωση αυτή, οι δυαδικές μεταβλητές μετά την εφαρμογή του επιχιασμού αποκωδικοποιούνται στις πραγματικές τους τιμές, στις οποίες και εφαρμόζεται η *Gaussian* μετάλλαξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/EK και 2003/30/EK, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 140/16, 5.6.2009.
- [2] Οδηγία 2001/77/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Σεπτεμβρίου 2001 για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 283/33, 27.10.2001.
- [3] Νόμος 3851/2010, “Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής,” ΦΕΚ 85 τ.Α, 4.6.2010.
- [4] S. Parathanassiou, N. Boulaxis, “Power limitations and energy yield calculation for wind farms operating in island systems,” Elsevier, Renewable Energy, April 2006, 31, (4), pp. 457-479.
- [5] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, “Present situation and future prospects of electricity generation in Aegean Archipelago islands,” Elsevier, Energy Policy, 2007, 35, (9), pp. 4623-4639.
- [6] E. Tsioliariidou, G. C. Bakos, M. Stadler, “A new energy planning methodology for the penetration of renewable energy technologies in electricity sector application for the island of Crete,” Elsevier, Energy Policy, December 2006, 34, (18), pp. 3757-3764.
- [7] K. A. Kavadias, D. Zafirakis, E. Kondili, J. K. Kaldellis, “The contribution of renewables on reducing the electricity generation cost in autonomous island networks,” Proc. International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP 2007, Capri, Italy, May 2007, pp. 777-783.
- [8] J. K. Kaldellis, K. A. Kavadias, A. E. Filios, S. Garofallakis, “Income loss due to wind energy rejected by the Crete island electrical network – the present situation,” Applied Energy, Oct. 2004, 79, (2), pp. 127-144.
- [9] J. D. Maddaloni, A. M. Rowe, G. Cornelis van Kooten, “Network constrained wind integration on Vancouver Island,” Elsevier, Energy Policy, February 2008, 36, (2), pp. 591-602.
- [10] H. Lund, “Large scale integration of wind power into different energy systems,” Energy, October 2005, 30, (13), pp. 2402-2412.
- [11] D. Wassier, R. S. Garcia, “Instantaneous wind energy penetration in isolated electricity grids: concepts and review,” Renewable Energy, July 2005, 30, (8), pp. 1299-1308.
- [12] L. E. Benitez, P. C. Benitez, G. Cornelis van Kooten, “The economics of wind power with energy storage,” Elsevier, Energy Economics, July 2008, 30, (4), pp. 1973-1989.
- [13] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, K. Kavvadias, “Techno-economic comparison for energy storage systems for island autonomous electrical networks,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, Issue 2, February 2009, pp. 378-392.
- [14] T. Hennessy, M. Kuntz, “The multiple benefits of integrating electricity storage with wind energy,” Power Engineering Society General Meeting, 2005, IEEE, Vol. 2, 12-16 June 2005, pp. 1952-1954.
- [15] A. Tsikalakis, I. Tassiou, N. Hatziaargyriou, “Impact of energy storage in the secure and economic operation of small islands,” MedPower04, 15-17 November 2004, Larnaca, Cyprus.
- [16] B. C. Ummels, E. Pelgrum, W. L. Kling, “Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply,” IET Renewable Power Generation, Vol. 2, Issue 1, March 2008, pp. 34-46.
- [17] J. Kaldellis, K. Kavvadias, D. Vlachou, “Electricity load management of APS using wind-hydro solution,” Proc. MedPower 2002, Athens, Greece.

- [18] G. C. Bakos, "Feasibility study of a hybrid wind/hydro power-system for low-cost electricity production," *Applied Energy*, July-August 2002, 72, (3-4), pp. 599-608.
- [19] N. Hatziaargyriou, J. Stefanakis, S. Alexandridis et al, "Safe increase of wind energy penetration in island systems by pumped storage units - The Crete case," *Proc. RENES 2001*, Athens, Greece.
- [20] N. G. Boulaxis, M. P. Papadopoulos, "Assessment of the contribution of hybrid systems in renewable energy penetration in islands," *Proc. of ISAP 2003 Conference*, Lemnos, Greece, 2003.
- [21] K. Protopapas, S. Papathanasiou, "Application of pumped storage to increase wind penetration in isolated island grids," *Proc. EWEC 2006*, Athens, February 2006.
- [22] G. Caralis, A. Zervos, "Analysis of the combined use of wind and pumped storage systems in autonomous Greek islands," *IET Renewable Power Generation*, March 2007, 1, (1), pp. 49-60.
- [23] P. Theodoropoulos, A. Zervos, G. Betzios, "Hybrid systems using pump-storage implementation in Ikaria island," *Proc. OPET Island International Conference 2001*, Chania, Greece.
- [24] Z. Mantas, P Theodoropoulos, G. Betzios, A. Zervos, "Hybrid system using pump-storage for maximum wind energy penetration in Serifos island," *Bulletin of the Hellenic Association of Mechanical & Electrical Engineers*, Vol. 6/2003.
- [25] J. Anagnostopoulos, D. Papantonis, "Pumped storage wind/hydro plants in non-interconnected grids," *Proc. Hydro 2008 Conference*, Oct. 2008, Ljubliana, Slovenia.
- [26] J. Garcia-Gonzalez, R. M. R de la Muela, L. M. Santos, A. M. Gonzalez, "Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, Issue 2, May 2008, pp. 460-468.
- [27] E. D. Castronuovo, J. A. Pecas Lopes, "Optimal operation and hydro storage sizing of a wind hydro power plant," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, December 2004, 26, (10), pp. 771-778.
- [28] C. Bueno, J. A. Carta, "Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, August 2006, 10, (4), pp. 312-340.
- [29] O. A. Jaramillo, M. A. Borja, J. M. Huacuz, "Using hydropower to complement wind energy: a hybrid system to provide firm power," *Renewable Energy*, September 2004, 29, (11), pp. 1887-1909.
- [30] J. Angarita, J. Usaola, "Combining hydro-generation and wind energy: Biddings and operation on electricity spot markets," *Electric Power Systems Research*, April 2007, 77, (5-6), pp. 393-400
- [31] Νόμος 3468/2006, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις," ΦΕΚ 129 τ.Α, 27.6.2006.
- [32] ΥΑ Αριθμ. Δ6/Φ1/οικ.5707, "Κανονισμός Αδειών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση ΑΠΕ και μέσω Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης," ΦΕΚ 438 τ.Β, 3.4.2007.
- [33] S. Papaefthimiou, E. Karamanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, "Operating policies for wind-pumped storage hybrid power stations in island grids," *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, Sept. 2009, pp. 293-307.
- [34] S. V. Papaefthymiou, S. A. Papathanassiou, E. G. Karamanou, "Application of pumped storage to increase renewable energy penetration in autonomous island systems," in *Wind Energy Conversion Systems: Technology and Trends*, Ed. Springer-Verlag London, 2012, pp. 295-335.

- [35] J. Anagnostopoulos, D. Papantonis, "Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant," *Energy Conversion & Management*, November 2007, 48, (11), pp. 3009-3017.
- [36] J. Anagnostopoulos, D. Papantonis, "Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy," *Renewable Energy*, July 2008, 33, (7), pp. 1685-1694.
- [37] P. D. Brown, J. A. Peas Lopes, M. A. Matos, "Optimization of pumped storage capacity in an isolated power system with large renewable penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, Issue 2, May 2008, pp. 523-531.
- [38] Γ. Μωραϊτης, "Μοντελοποίηση ένταξης και λειτουργίας υβριδικού υδροηλεκτρικού σταθμού με αντλησιοταμίευση αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής σε μη διασυνδεδεμένο δίκτυο. Διερεύνηση επίδρασης του σχεδιασμού του σταθμού στα ενεργειακά και οικονομικά του αποτελέσματα," Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [39] Ι. Μπαρούνη, "Ανάλυση και βελτιστοποίηση σχεδιασμού υβριδικού υδροηλεκτρικού-αιολικού σταθμού με δύο παράλληλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας: Αντλησιοταμίευση και παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση," Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2011.
- [40] Working Group on prime mover and energy supply models for system dynamic performance studies, "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, pp. 167 - 179, 1992.
- [41] E. De Jaeger, N. Janssens, B. Malfliet, F. Van De Meulebroeke, "Hydro turbine model for system dynamic studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [42] L. N. Hannett, B. Fardanesh, "Field tests to validate hydro-governor model structure and parameters," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [43] L. N. Hannet, B. P. Lam, Q. Guofu, "Modeling of a pumped storage hydro plant for power system stability studies," *POWERCON '98*, Vol 2, pp. 1300-1304, Aug. 1998.
- [44] C. Vournas, A. Zaharakis, "Hydro turbine transfer functions with hydraulic coupling," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 8, pp. 527-532, 1993.
- [45] S. P. Mansoor, "Behaviour and operation of pumped storage hydro plants," Thesis, University of Wales, Bangor, School of Informatics, July 2000.
- [46] C. Jauch, A. D. Hansen, P. Sørensen, F. Blaabjerg, "Simulation model of an active-stall fixed-speed wind turbine controller," *Wind Engineering* 2004; vol. 28 (2), pp. 177-195.
- [47] Ι. Δ. Μάργαρης, "Προσομοίωση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και μελέτη δυνατότητας παραμονής σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης," Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2006.
- [48] Ξ. Κ. Χανιώτη, "Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας," Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Οκτώβριος 2010.
- [49] S. Papaefthimiou, S. Papathanassiou, "Modeling of a variable speed wind turbine with synchronous generator," *EWEC 2009*, Marseille, France.
- [50] P. D. Brown, "Evaluation of integration pumped storage units in an isolated network," MSc Thesis, University of Porto, Department of Electrical and Computer Engineering, May 2006.
- [51] J. A. Suul, K. Uhlen, T. Undeland, "Variable speed pumped storage hydropower for integration of wind energy in isolated grids – case description and control strategies," *NORPIE/2008*, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 9-11, 2008.
- [52] "Βασικές αρχές λειτουργίας, διαχείρισης & τιμολόγησης Υβριδικών Σταθμών σε μη διασυνδεδεμένα νησιά," Κείμενο Δημόσιας Διαβούλευσης της ΠΑΕ, Ιούλιος 2008.
- [53] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, "Analysis of electric machinery", IEEE PRESS, 1995.

- [54] I. Kamwa et al., “Experience with computer-aided graphical analysis of sudden-short-circuit oscillograms of large synchronous machines,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- [55] IEEE Committee Report, “Computer representation of excitation systems,” *IEEE Trans.*, Vol. PAS-87, pp. 1460-1464, June 1968.
- [56] IEEE Committee Report, “Excitation system dynamic characteristics,” *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 64-75, Jan/Feb. 1973.
- [57] IEEE Committee Report, “Excitation system models for power system stability studies,” *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 494-509, Feb. 1981.
- [58] “IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies,” *IEEE Standard 421.5.-1992*.
- [59] “Ανάπτυξη μοντέλων για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με παρουσία μονάδων ΑΠΕ και την εκτίμηση του ορίου ασφαλούς αιολικής διεύθυνσης,” Ερευνητικό Έργο ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΔΕΗ Α.Ε.), Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008.
- [60] Δ. Παπαντώνης, “Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα,” Εκδόσεις Συμεών, 2007.
- [61] “IEEE guide for the application of turbine governing systems for hydroelectric generating units,” *IEEE Power Engineering Society*, November 2004.
- [62] P. Kundur, “Power system stability and control,” *EPRI Power System Engineering Series*, McGraw-Hill, 1994.
- [63] Β. Γ. Λακιώτης, “Ρύθμιση συχνότητας μέσω υβριδικού αντλησιοταμιευτικού σταθμού,” Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Φεβρουάριος 2010.
- [64] J. M. Undrill, J. L. Woodward, “Non-linear hydro governing model and improved calculation for determining temporary droop,” *IEEE Trans.*, Vol. PAS-86, No. 4, pp. 443-453, April 1967.
- [65] J. Liang, R. G. Harley, “Pumped storage hydro-plant models for system transients and long-term dynamic studies,” *Proc. Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE, Minneapolis, USA, June 2010.
- [66] I. D. Margaritis, S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziaargyriou, A. D. Hansen, P. Sørensen, “Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 2, 2012, pp. 189-199.
- [67] A. D. Hansen, C. Jauch, P. Sørensen, F. Iov, F. Blaabjerg, “Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT,” *Risø-R-1400(EN)*, 2003.
- [68] A. D. Hansen, G. Michalke, “Fault ride-through capability of DFIG wind turbines,” *Renewable Energy* 2007; vol 32, pp. 1594-1610.
- [69] A. D. Hansen, P. Sørensen, F. Iov, F. Blaabjerg, “Centralised power control of wind farm with doubly-fed induction generators,” *Renewable Energy* 2006; vol 31, pp. 935-951.
- [70] I. D. Margaritis, A. D. Hansen, N. A. Cutululis, P. Sørensen, N. D. Hatziaargyriou, “Impact of wind power in autonomous power systems - power fluctuations – modeling and control issues,” *Wind Energy*, 2010, 14, (1), pp. 133 – 153.
- [71] A. D. Hansen, G. Michalke, “Modelling and control of variable speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine,” *Wind Energy* 2008; vol.11 (5), pp 537- 554.
- [72] A. D. Hansen, G. Michalke, “Multi-pole PMSG wind turbines’ grid support capability in uninterrupted operation during grid faults,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, Sept. 2009, pp. 333-348.
- [73] V. Akhmatov, “Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power,” PhD thesis, 2003, Ørsted DTU.
- [74] M. Poeller, S. Achilles, “Aggregated wind park models for analyzing power system dynamics,” 4th international workshop on large-scale integration of wind power and transmission networks, October 2003, Billund, Denmark, DIgSILENT, pp. 10.

- [75] “Τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση αιολικών σταθμών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας – Επισκόπηση Κωδίκων άλλων χωρών και διαθέσιμων τεχνολογιών ανεμογεννητριών,” Ερευνητικό Έργο ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΠΑΕ), Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- [76] M. Tsili, S. Papathanassiou, “A review of grid code technical requirements for wind farms,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, Sept. 2009, pp. 308-332.
- [77] “Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators,” Working Draft by ENTSO-E, within the context of the future Pilot Network Code and the future Pilot Framework Guidelines by ERGEG, August 2010.
- [78] Β. Γ. Λακιώτης, “Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου αντλιοστασίου και ενσωμάτωσή του στο δυναμικό μοντέλο υβριδικού αιολικού-αντλιοσταμειυτικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ: «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας», ΕΜΠ, Ιούλιος 2012.
- [79] M. Volk, “Pump characteristics and applications,” 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2005. ISBN-13: 978-0824727550.
- [80] P. Girdhar, “Practical centrifugal pumps: design, operation and maintenance,” Oxford, Newnes, 2005, ISBN-13: 978-0750662734.
- [81] S. Mansoor, D. Jones, D. Bradley, F. Aris, G. Jones, “Stability of a pumped storage hydro-power station connected to a power system,” *Proc. Power Engineering Society Winter Meeting*, 1999 IEEE, vol. 1, pp. 646 – 650, New York, USA, Jan. 31- Feb. 4, 1999.
- [82] H. Gao, C. Wang, “A detailed pumped storage station model for power system analysis,” *Proc. Power Engineering Society General Meeting*, 2006 IEEE, Montreal, Canada, June 2006.
- [83] “VSDs for Electric Motor Systems,” project carried out for the European Commission and sponsored by the Directorate-General for Transport and Energy, under the SAVE II Programme.
- [84] ISR-University of Coimbra, Motors Study Group, “Actions to Promote Energy Efficient Electric Motors,” DGXVII, European Commission, October 1996.
- [85] J. Simond, A. Sapin, D. Schafer, “Expected benefits of adjustable speed pumped storage in the European network,” *Hydropower into the next century*, pp. 579-583, Gmunden, Austria 1999.
- [86] Σχέδιο μελέτης ανάπτυξης συστημάτων μεταφοράς (ΜΑΣΜ) νησιών περιόδου 2010-2014.
- [87] “Διερεύνηση τεχνικών και οικονομικών ζητημάτων ένταξης Υβριδικών Σταθμών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά,” Ερευνητικό Έργο ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΠΑΕ), Μάρτιος 2008.
- [88] C. Nicolet, B. Greiveldinger, P. Allenbach, B. Kawkabani, J. Hérou, J. Simond, F. Avellan, “Turbine speed governor parameters validation in islanded production,” 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, October 24 - 26, 2007.
- [89] “Μελέτες ανάπτυξης συστήματος και ευστάθειας αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με υβριδικούς σταθμούς ΑΠΕ και αντλιοσταμείυση,” Ερευνητικό Έργο ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΔΕΗ Α.Ε. (ΔΔΝ)), Αθήνα, Μάιος 2011.
- [90] N. Sakellaridis, J. Mantzaris, S. Papathanassiou, I. Vitellas, C. Vournas, “Security Assessment of an Autonomous System with Increased Wind Penetration and Pumped Storage Hybrid Plants”, *IEEE PES 2012 General Meeting*, San Diego, July 2012.
- [91] J. Anagnostopoulos, D. Papantonis, “Pumped storage wind/hydro plants in non-interconnected grids,” *Proc. Hydro 2008 Conference*, Oct. 2008, Ljubliana, Slovenia.
- [92] E. Karamanou, S. Papathanassiou, N. Boulaxis, “Operating policies for autonomous island grids with PV penetration,” *Proc. 4th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference*, Athens, May 2008.

- [93] “Διερεύνηση των δυνατοτήτων διείσδυσης φωτοβολταϊκών σταθμών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά και των επιπτώσεων στη λειτουργία των εγκατεστημένων αιολικών σταθμών”, Ερευνητικό Έργο ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΠΑΕ), Φεβρουάριος 2007.
- [94] D. King, W. Boyson, J. Kratochvil, “Photovoltaic array performance model”, Sandia National Laboratories, Report SAND2004-3535, 2004.
- [95] [Online]. Available: <http://www.meteo.ntua.gr>
- [96] Απόφαση 2004/156/ΕΚ της Επιτροπής της 29ης Ιανουαρίου 2004 περί θεσπίσεως κατευθυντήριων γραμμών για την παρακολούθηση και την υποβολή εκθέσεων σχετικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατ’ εφαρμογή της οδηγίας 2003/87/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 59/1, 26.2.2004.
- [97] “Καθορισμός τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας από Υβριδικούς Σταθμούς για τα νησιά Κρήτη και Λέσβο,” Απόφαση ΠΑΕ υπ’ αριθμ. 1333/2010, Σεπτέμβριος 2010.
- [98] “Παραμετρική διερεύνηση της τιμολόγησης Υβριδικών Σταθμών σε μη διασυνδεδεμένα νησιά,” Ερευνητικό Έργο ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΠΑΕ), Αθήνα, Οκτώβριος 2010.
- [99] E. P. DeGarmo, W. G. Sullivan, J. A. Bontadelli, “Engineering economy – 8th edition”, Macmillan, New York, 1988.
- [100] Π. Κάπρος, Κ. Ντελκής, “Οικονομική ανάλυση επιχειρήσεων,” ΕΜΠ 2001.
- [101] [Online]. Available: <http://www.insula-elhierro.com>
- [102] “Ενεργειακή και οικονομοτεχνική μελέτη του ΥΒΣ Ικαρίας,” Ερευνητικό Έργο ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης: ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.), Οκτώβριος 2009.
- [103] “Μελέτη ασφάλειας και αξιοπιστίας λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της νήσου Ικαρίας,” ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ (Φορέας Ανάθεσης η ΔΑΥΕ/ΔΕΗ Α.Ε.), Φεβρουάριος 2004.
- [104] “Τροποποίηση και Μεταβίβαση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υβριδικό σταθμό ισχύος 2,70 MW (Αιολικά Πάρκα) – 2,55 MW (Εγγυημένη Ισχύς), στις θέσεις «Στραβοκούντουρας», «Προεσπέρας» και «Κάτω Προεσπέρας» του Δήμου Ικαρίας, της εταιρείας «ΔΕΗ Α.Ε.» στην εταιρεία «ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.»,” Απόφαση ΠΑΕ υπ’ αριθμ. 1147/2011.
- [105] S. V. Papaefthymiou, E. G. Karamanou, S. A. Papathanassiou, M. P. Papadopoulos, “A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Icaria,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 1, no. 3, Oct. 2010, pp. 163-172.
- [106] T. Torries, “Evaluating Mineral Projects: Applications and misconceptions,” Society for Mining, Metallurgy and Exploration, USA, 1998.
- [107] A. Damodaran, “Corporate Finance: Theory and Practice,” 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2001.
- [108] Y. Censor, “Pareto optimality in multiobjective problems,” Appl. Math. Optimiz., Vol. 4, pp 41–59, 1977.
- [109] Da Cunha, N.O. and E. Polak, “Constrained minimization under vector-valued criteria in finite dimensional spaces,” J. Math. Anal. Appl., Vol. 19, pp 103–124, 1967.
- [110] J. Holland, “Adaptation in natural and artificial systems,” MIT press, 1992.
- [111] Ε. Γεωργόπουλος, Σ. Λυκοθανάσης, “Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους,” Εργαστήριο Αναγνώρισης Προτύπων, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1999.
- [112] M. Mitchel, “An introduction to genetic algorithms,” MIT press, 1998.
- [113] D. Whitley, “A genetic algorithm tutorial,” Statistics and Computing, Vol. 4 (1994): 65-85.
- [114] L. Davis, “Handbook of Genetic Algorithms,” Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [115] Z. Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs,” Springer-Verlag, New York, 3rd ed., 1996.

- [116] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, G. Stavrakakis, “Optimal design and economic evaluation of a battery energy storage system for the maximization of the energy generated by wind farms in isolated electric grids,” *Wind Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp 55–81, 2009.
- [117] Ε. Ι. Βρεττός, “Ενεργειακή προσομοίωση και βέλτιστη διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου,” Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιανουάριος 2010.
- [118] Ι. Ε. Κοκός, “Βέλτιστη διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος με χρήση ΑΠΕ και αντλησιοταμίευσης,” Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ: «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας», ΕΜΠ, Οκτώβριος 2010.
- [119] “Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox™ 2 User’s Guide,” MATLAB, the Mathworks.
- [120] Michalewicz Z, Fogel DB, “How to solve it: modern heuristics,” 2nd ed. Berlin: Springer; 2004.
- [121] Coello CA, Veldhuizen DAV, Lamont GB, “Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems”, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2002.
- [122] E. Zitzler, M. Laumanns, S. Bleuler, “A tutorial on evolutionary multiobjective optimization,” in *Metaheuristics for multiobjective optimization*, Ed. Springer, 2004.
- [123] D. Kalyanmoy, “Multi-objective optimization using evolutionary algorithms,” John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2001.
- [124] D. Kalyanmoy, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, No. 2, April 2002.
- [125] Π. Φασουλάκης, “Σχεδίαση βροχοκεραίων Yagi-Uda με χρήση του λογισμικού πακέτου SuperNEC και βελτιστοποίηση τους με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων,” Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούνιος 2009.
- [126] M. Semadeni, “Storage of energy, Overview,” *Encyclopedia of Energy*, Vol. 5 (2004):719-738.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Περιοδικά:

1. S. Papaefthimiou, E. Karamanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, "Operating policies for wind-pumped storage hybrid power stations in island grids," IET Renewable Power Generation, Vol. 3, No. 3, Sept. 2009, pp. 293-307.
2. S. V. Papaefthymiou, E. G. Karamanou, S. A. Papathanassiou, M. P. Papadopoulos, "A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Ikaria," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 1, no. 3, Oct. 2010, pp. 163-172.
3. S. V. Papaefthymiou, S. A. Papathanassiou, "Optimum sizing of wind-pumped-storage hybrid power stations," IEEE Transactions on Sustainable Energy, submitted for publication.
4. S. V. Papaefthymiou, V. G. Lakiotis, I. D. Margaritis, S. A. Papathanassiou, P. Mentzelopoulos, G. Manos, "Dynamic analysis of island systems with wind-pumped-storage hybrid power stations," IEEE Transactions on Power Systems, submitted for publication.

Κεφάλαιο βιβλίου:

1. S. V. Papaefthymiou, S. A. Papathanassiou, E. G. Karamanou, "Application of pumped storage to increase renewable energy penetration in autonomous island systems," in *Wind Energy Conversion Systems: Technology and Trends*, Ed. Springer-Verlag London, 2012, pp. 295-335.

Συνέδρια:

1. S. Papaefthimiou, S. Papathanassiou, "Simulation and control of a variable speed wind turbine with synchronous generator," XVII International Conference on Electrical Machines – ICEM 2006, Chania, Crete Island, Greece.
2. S. Papaefthymiou, E. Karamanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, N. Boulaxis, "Operating policies for hybrid wind-hydro power stations in island grids," EWEC 2008, Brussels, Belgium.
3. S. Papaefthimiou, S. Papathanassiou, "Modeling of a variable speed wind turbine with synchronous generator," EWEC 2009, Marseille, France.
4. S. Papaefthimiou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, "Evaluation of voltage dip characteristics in autonomous island networks and correlation with wind turbine FRT curves," 20th International Conference on Electricity Distribution – CIRED 2009, Prague, 8-11 June 2009, Czech Republic.
5. Σ. Παπαεθυμίου, Ε. Καραμάνου, Σ. Παπαθανασίου, Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Ροντήρης, Ι. Δρυμωνίτης, "Αρχές Διαχείρισης Υβριδικών Σταθμών: Εφαρμογή στο Σύστημα της Ικαρίας," Σύνοδος της Ελληνικής Επιτροπής CIGRE, Αθήνα, Δεκέμβριος 2009.