



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

**Ενεργειακή Διαχείριση Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων με
Θερμική Αποθήκευση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Κ. ΤΑΚΗΣ-ΔΕΥΤΕΡΑΙΟΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



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

Ενεργειακή Διαχείριση Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων με Θερμική Αποθήκευση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Κ. ΤΑΚΗΣ-ΔΕΥΤΕΡΑΙΟΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουλίου

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....
Γεράσιμος Κ. Τάκης-Δευτεραίος

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

Copyright © Γεράσιμος Κ. Τάκης-Δευτεραίος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ενεργειακή διαχείριση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ενσωματωμένη θερμική αποθήκευση σε έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα. Η θερμική αποθήκευση, που βασίζεται σε υλικά με αλλαγή φάσης, παρέχει στον διαχειριστή του δικτύου μεγαλύτερη ευελιξία, προκειμένου να καταστεί δυνατή η όλο και αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα έξυπνα δίκτυα. Η αποδοτικότητα των σταθμών παραγωγής συνδυασμένου κύκλου και σταθμών παραγωγής με καύσιμο τον άνθρακα ποικίλλει ανάλογα με τη ζήτηση του φορτίου και την έγχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα. Στη παρούσα διπλωματική προτείνεται στις ώρες χαμηλής ζήτησης ο ατμός από τη μονάδα παραγωγής να απομαστευέται και να εξάγεται από κατάλληλο σημείο ώστε να φορτίζονται οι διατάξεις της θερμικής αποθήκευσης που περιέχουν το κατάλληλο άλας, ανάλογα τη θερμοκρασία του ατμού. Σε επόμενο στάδιο, είτε όταν κρίνεται απαραίτητο από τον διαχειριστή του συστήματος είτε όταν είναι οικονομικά συμφέρον, τα θερμικά δοχεία μπορούν να λειτουργήσουν σαν θερμικές πηγές με σκοπό να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, μέσω της δημιουργίας ατμού για μηχανές που λειτουργούν σε οργανικό κύκλο Rankine, που είναι κατάλληλες για χαμηλότερες θερμοκρασίες και μικρότερης κλίμακας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραπάνω προτεινόμενη λύση προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία από την απλή θερμική αποθήκευση που αποθηκεύει τη θερμική ενέργεια και στη συνέχεια την επιστρέφει στον αρχικό σταθμό παραγωγής.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετήθηκαν 2 σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμοδυναμική μελέτη του σταθμού παραγωγής συνδυασμένου κύκλου στο Αλιβέρι Ευβοίας ισχύος 432-MW, απέδειξε πως η συνδυασμένη μέγιστη ισχύς του σταθμού με την ένταξη της θερμικής αποθήκευσης ισούται με 495- MW, δηλαδή ο σταθμός μπορεί να προσφέρει 14% περισσότερη ισχύς κατά τη διάρκεια αιχμής της ζήτησης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ετήσιο όφελος του σταθμού παραγωγής αν εφαρμόζε αυτή την τακτική στο Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας. Η 2^η μελέτη περίπτωσης αφορά τον σταθμό παραγωγής με άνθρακα στον Αθρινόλακο, Κρήτης, μέγιστης ισχύος 50-MW και αποδείχθηκε πως η συνδυασμένη μέγιστη ισχύς του σταθμού και της θερμικής αποθήκευσης είναι 70-MW, 40% μεγαλύτερη στην αιχμή ζήτησης από ότι χωρίς τη θερμική αποθήκευση. Οι ροές ισχύος και η ευστάθεια του συστήματος, μέσω της χρήσης του λογισμικού DIGsilent, απέδειξαν το πλεονέκτημα της εφαρμογής της θερμικής αποθήκευσης. Στη περίπτωση της Κρήτης δημιουργήθηκε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας για το 2020, λαμβάνοντας υπόψιν τη διασύνδεση της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα, που σκοπό έχει τη βελτιστοποίηση της φόρτισης των θερμικών μονάδων κατά την περίοδο χαμηλής ζήτησης και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές πηγές στην αιχμή. Αυτή η πρακτική απέδειξε πως το ετήσιο όφελος για τον διαχειριστή του συστήματος είναι 5 εκατομμύρια ετησίως και η απόσβεση της επένδυσης πραγματοποιείται σε λιγότερο από 4 χρόνια.

Abstract

My diploma thesis concerns the energy management of power stations with integrated thermal energy storage based on phase change materials in order to enable the increasing penetration of intermittent renewable energy sources in smart grids. The efficiency of combined-cycle and coal-fired power plants varies with the load demand. It is proposed here that during off-peak demand, steam can be extracted from any such power station, for charging an array of thermal tanks that contain suitable phase-change materials (PCMs); at a later time when this is required and/or economically favourable, these thermal energy storage (TES) tanks can act as the heat sources of secondary thermal power plants in order to generate power, for example as evaporators of organic Rankine cycle (ORC) plants that are suitable for power generation at reduced temperatures and smaller scales. This type of solution offers greater flexibility than TES-only solutions that store thermal energy and then release this back to the original power station.

In a case study considered in this work of a 432-MW rated combined-cycle power station, in Aliveri, Greece, it is found through a thermodynamic analysis that a maximum combined power of 495 MW can be delivered during peak demand, which is 15% higher than the combined-cycle plant's full-load rating. An additional case study considered of a 50-MW rated coal-fired power plant in Crete and it is found that a maximum combined power of 70 MW can be delivered during peak demand, which is 40% higher than the combined-cycle plant's full-load rating. Power flows and stability studies by using DIGSILENT show the advantages of this scheme. In such a scheme, an energy management system (EMS) would be established to optimize the derating of power stations for the charging of the thermal tanks during off-peak demand periods and to control the discharging of the tanks for electricity generation from the secondary plants during the peak-demand periods. This practice is associated with an annualized profit of EUR 5000k and a payback period less than 4 years.

Πρόλογος

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017, τον οποίον ευχαριστώ θερμά για τη βοήθεια και τις συμβουλές του που συνεισέφεραν ουσιαστικά στο αποτέλεσμα, καθώς και την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη στις αιτήσεις μου για τις μεταπτυχιακές σπουδές μου.

Επίσης ευχαριστώ από καρδιάς τον Δρ. Παναγιώτη Ρωμανό για τον χρόνο, την υπομονή, τα ερεθίσματα και την σωστή καθοδήγηση στην επίλυση των προβλημάτων που ανέκυπταν κατά τη διάρκεια της εργασίας, χωρίς τον οποίο η εργασία δε θα μπορούσε ποτέ να έχει ξεκινήσει ή να έχει ολοκληρωθεί. Ο ρόλος του πέρα από επιστημονικός ήταν κατά κύριο λόγο παιδαγωγικός, δημιουργώντας πρώτα ολοκληρωμένους ανθρώπους και μετά σωστούς επιστήμονες.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Μανώλη Βουμβουλάκη (ΔΕΔΔΗΕ) για τη βοήθεια του, ειδικά στο κομμάτι των ροών ισχύος και στα οικονομικά δεδομένα της Κρήτης όπου ο ρόλος του ήταν καθοριστικός, καθώς και τον κ. Παναγιώτη Αγιαμαρنيώτη και τη διοίκηση του σταθμού του Αλιβερίου για τη συνεργασία και τη ξενάγηση στο σταθμό παραγωγής στο Αλιβέρι.

Η διπλωματική αυτή αφιερώνεται στην μητέρα μου μαζί με τη φράση του Αβραάμ Λίνκολν : “Όλα όσα είμαι ή ελπίζω να γίνω τα οφείλω στη μητέρα μου”...

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ-Η ΙΔΕΑ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	13
1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
1.2 Η ΙΔΕΑ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	14
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	19
ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ.....	19
2.1 ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	19
2.1.1 Γενικά στοιχεία Συνδυασμένου Κύκλου	19
2.1.2 Περιγραφή της διάταξης του Αλιβερίου.....	20
2.2 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ.....	23
2.2.1 Θερμική Αποθήκευση στην έξοδο της τουρμπίνας Υψηλής Πίεσης.....	23
2.2.2 Θερμική Αποθήκευση στην είσοδο της τουρμπίνας Χαμηλής Πίεσης.....	27
2.2.3 Θερμική Αποθήκευση στον εναλλάκτη	29
2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ	32
2.3.1 Συμπεριφορά της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της φόρτισης	32
2.3.2 Συνολική Παραγωγή κατά την εκφόρτιση της θερμικής αποθήκευσης	35
2.4 ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ	36
2.4.1 Εισαγωγή	36
2.4.2 Μελέτες Περιπτώσεων	38
2.5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	53
ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟ	53
3.1 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	53
3.1.1 Γενικά στοιχεία ατμοστρόβιλου	53
3.1.2 Περιγραφή της διάταξης του Αθερινόλακκου	53
3.2 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ.....	54
3.2.1 Θερμική Αποθήκευση στην είσοδο της τουρμπίνας Υψηλής Πίεσης	55
3.2.2 Θερμική Αποθήκευση στην 3η απομάστευση της τουρμπίνας Υψηλής πίεσης και πριν τον deaerator.....	58
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	59
3.3.1 Συμπεριφορά της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της φόρτισης	59
3.3.2 Συνολική Παραγωγή κατά την εκφόρτιση της θερμικής αποθήκευσης	61
3.4 ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ.....	62
3.4.1 Το σύστημα της Κρήτης	62
3.4.2 Μελέτες περιπτώσεων	63
3.5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟ.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	73
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	73
4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	75

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΛΙΒΕΡΙΟΥ	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΛΙΒΕΡΙΟΥ	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή-Η ιδέα της θερμικής αποθήκευσης στα έξυπνα δίκτυα

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η αλματώδης αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, σε συνδυασμό με την απαίτηση και το αυστηρό νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέχρι το 2050 στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και η ταυτόχρονη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων οδηγεί αναπόδραστα στην διαφορετική ενεργειακή διαχείριση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής άνθρακα και συνδυασμένου κύκλου, ώστε να πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Η ηλεκτρική ενέργεια, όντας αγαθό, επηρεάζει άμεσα την εύρυθμη λειτουργία της κοινωνίας και της οικονομίας. Για το λόγο αυτό η ενεργειακή επάρκεια και η άμεση κάλυψη της απαιτούμενης από τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται πάντα στο επίκεντρο του διαχειριστή του συστήματος. Η διατήρηση της συχνότητας και της τάσης εντός των ηλεκτροτεχνικών προτύπων, η υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης και η άμεση κάλυψη των αιχμών του φορτίου πρέπει να γίνεται με βέλτιστο τρόπο, τόσο όσον αφορά το κόστος παραγωγής και διανομής όσο και σχετικά με το οικολογικό κόστος.

Τα τελευταία χρόνια με την όλο και αυξανόμενη έγχυση ηλεκτρικής ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι έντονο το φαινόμενο, στα πλαίσια του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού που έχει ως στόχο την βέλτιστη οικονομική κατανομή των μονάδων παραγωγής ακολουθώντας πάντα τους κανονισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αρκετές ώρες της ημέρας κάποιοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου ή άνθρακα να τίθενται εκτός λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως για τους εξής 2 λόγους: είτε γιατί το φορτίο καλύπτεται σε μεγάλο βαθμό από τις Α.Π.Ε. είτε γιατί άλλες μονάδες παραγωγής είναι οικονομικότερες. Η εκκίνηση των μονάδων ενός τέτοιου σταθμού παραγωγής πέρα από μια χρονοβόρα διαδικασία είναι και αρκετά επιζήμια λόγω των τεχνικών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν αλλά και του γεγονότος πως από τη στιγμή που ο σταθμός δεν παράγει δεν πληρώνεται από τον διαχειριστή. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να τη δώσει η θερμική αποθήκευση που σε σύγκριση με τις μηχανικές ή χημικές μεθόδους αποθήκευσης έχει αρκετά πλεονεκτήματα τόσο στο χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου, καθώς και στην πολύ υψηλή λειτουργική αποτελεσματικότητα [1].

Επιπλέον, δεδομένου πως οι Α.Π.Ε. έχουν διακοπτόμενη παραγωγή, δηλαδή η παραγωγή τους εξαρτάται αποκλειστικά από τα καιρικά φαινόμενα, επομένως μια απότομη αλλαγή των καιρικών συνθηκών επηρεάζει άμεσα την ενέργεια που αποδίδουν στο δίκτυο, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης για την άμεση κάλυψη της ανεπάρκειας που μπορεί να δημιουργηθεί.

Η εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη των σταθμών παραγωγής και την εγκατάσταση ενσωματωμένης θερμικής αποθήκευσης ως δευτερεύουσες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την αποτελεσματικότερη και αποδοτικότερη λειτουργία των σταθμών παραγωγής συνδυασμένου κύκλου και άνθρακα τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και σε θέματα ευελιξίας.

1.2 Η Ιδέα της Θερμικής Αποθήκευσης στα Δίκτυα

Οι απαιτήσεις για μια σταθερή λειτουργία του δικτύου αυξάνονται στο πέρασμα των χρόνων λόγω του όλο και αυξανόμενου μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή. Όμως η ασταθής συμπεριφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τόσο επειδή η παραγωγή τους εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες όσο και η δημιουργία αρμονικών, λόγω του ότι τα αιολικά κατά κύριο λόγο αποτελούνται από ασύγχρονες γεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά λόγω των αντιστροφών, οδηγεί αναπόδραστα στο μετασχηματισμό του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Ορίζοντας λοιπόν ως υπολειπόμενο φορτίο τη διαφορά μεταξύ της απαιτούμενης ισχύος (πραγματικό φορτίο) και ένα κυμαινόμενο ποσοστό ισχύος παραγωγής από τα ανανεώσιμα (κατά κύριο λόγο φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) προκύπτει το συμπέρασμα πως στα επόμενα χρόνια το πρόβλημα θα εντείνεται.

Πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 1 φαίνεται το σενάριο διείσδυσης των ΑΠΕ (περιλαμβάνονται και ΑΠΕ των νησιών που θα διασυνδεθούν με το ΕΣΜΗΕ) όπως αυτό παρουσιάζεται στη μελέτη επάρκειας ισχύος του ΑΔΜΗΕ για την περίοδο 2017-2027 [2].

Πίνακας 1: Διείσδυση ΑΠΕ στην Ελλάδα [2].

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	(MW)										
Αιολικά	2047	2300	2555	2810	3065	3220	3370	3520	3990	4160	4330
Φωτοβολταϊκά	2444	2720	3000	3280	3560	3710	3860	4010	4256	4406	4556
Μικρά Υδροηλεκτρικά	223	228	237	242	247	252	257	262	267	272	277
Βιομάζα/Βιοαέριο	58	62	66	70	100	150	200	200	200	200	200
ΣΗΘΥΑ	100	104	108	110	110	125	125	125	125	125	125
Ηλιοθερμικά									50	50	50
ΣΥΝΟΛΟ	4872	5414	5966	6512	7082	7457	7812	8117	8888	9213	9538

Η όλο και αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, κυρίως των φωτοβολταϊκών και των αιολικών εισάγουν διαφορετικές ανάγκες εξισορρόπησης στο σύστημα

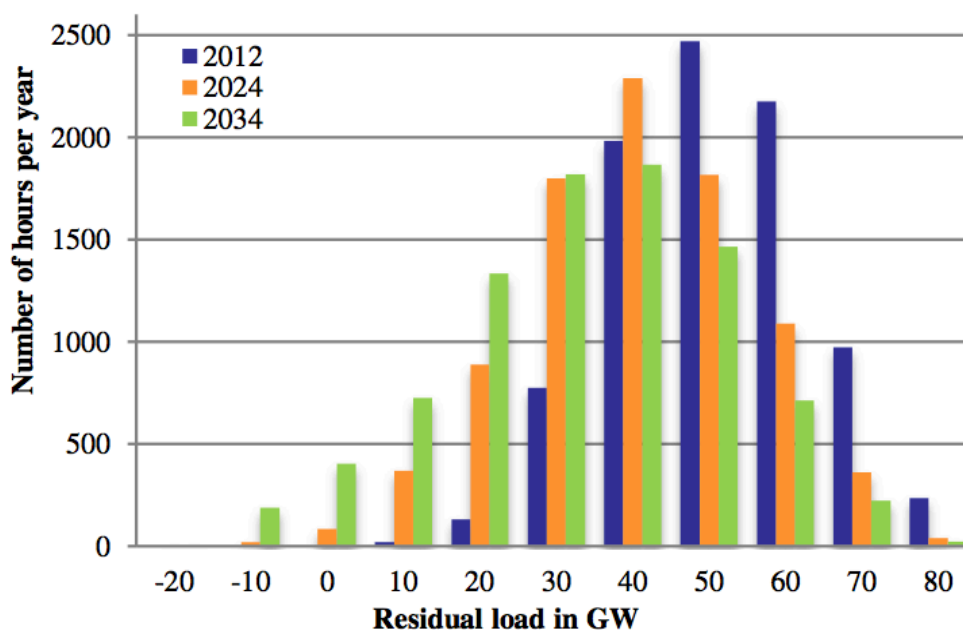
- Σχετικά με την ηλιακή ενέργεια, παρατηρείται μια συστηματική διαφοροποίηση του προφίλ του φορτίου σε καθημερινή βάση, επομένως απαιτείται κατάλληλη κατανομή των μονάδων, με αυξημένες απαιτήσεις για όσες μονάδες μπορούν να προσφέρουν ταχεία μεταβολή στην έξοδό τους για συγκεκριμένες ώρες.
- Η δεύτερη ανάγκη που δημιουργείται κυρίως με την ανάπτυξη των αιολικών, αφορά την κατανομή σε πραγματικό χρόνο, καθώς προκαλείται από στοχαστικές μεταβολές στην έξοδό τους [3].

Η περαιτέρω λοιπόν ανάπτυξη των ΑΠΕ, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1, άλλωστε υπαγορεύεται από τους θεσμοθετημένους περιβαλλοντικούς στόχους της χώρας μας για το 2020, θα εντείνουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Οι έντονες διακυμάνσεις στο υπολειπόμενο φορτίο που προκαλείται από την κατά προτεραιότητα εγγεόμενη ενέργεια των ΑΠΕ, απαιτεί από τις θερμικές μονάδες παραγωγής να λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα σε περιόδους με υψηλά επίπεδα παραγωγής από ΑΠΕ, προκειμένου να είναι έτοιμες να ανταποκριθούν γρήγορα, αναλαμβάνοντας το φορτίο, όταν αντίστοιχα μειώνεται η παραγωγή των ΑΠΕ.

Πρόκειται, επομένως, για μια αναγκαία για το Σύστημα υπηρεσία, την ευελιξία, η οποία απαιτείται προκειμένου να υποστηριχθεί περαιτέρω η διείσδυση των ΑΠΕ [3].

Οι στόχοι της Ε.Ε. για 20% παραγωγή από ΑΠΕ και ταυτόχρονα 20% από εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι το 2020, σε συνδυασμό με το γενικότερο πλαίσιο και την κατευθυνόμενη πολιτική για απανθρακοποίηση του Δικτύου μέχρι το 2050 οδηγεί στην εμφάνιση αρνητικών υπολειπόμενου φορτίου.

Η μετατόπιση του υπολειπόμενου φορτίου προς χαμηλότερες τιμές συνεπάγεται τη λειτουργία των σταθμών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα σε όσο το δυνατόν χαμηλότερο φορτίο. Στο Σχήμα 1 φαίνεται το υπολειπόμενο φορτίο για τη Γερμανία για το 2012 καθώς και μια πρόβλεψη για το 2024 και το 2034 [4].



Σχήμα 1: Ιστόγραμμα Υπολειπόμενου φορτίου στην Γερμανία[4].

Από το διάγραμμα αυτό συμπεραίνουμε πως η όλο και αυξανόμενη μεταβλητότητα του υπολειπόμενου φορτίου οδηγεί στην αύξηση των απαιτήσεων των σταθμών παραγωγής όσον αφορά το ρυθμό αλλαγής φορτίου, τις διαδικασίες εκκίνησης-τερματισμού λειτουργίας των μονάδων ως προς την ταχύτητα και το κόστος αυτών των διαδικασιών.

Θεωρώντας τη Γερμανία, ως πρωτοπόρο χώρα στη διείσδυση των ΑΠΕ, είναι πιθανό τα ίδια φαινόμενα να εμφανιστούν και στις υπόλοιπες χώρες.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές απαιτήσεις για την ευελιξία στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται σκόπιμη η εξεύρεση μηχανισμών για τη διεύρυνση και την βελτίωση ορισμένων παραμέτρων των συμβατικών σταθμών όπως:

- Μείωση του ελαχίστου φορτίου.
- Μείωση του χρόνου εκκίνησης και απενεργοποίησης του σταθμού.

Τη λύση σε όλα τα παραπάνω έρχεται να δώσει η ιδέα της θερμικής αποθήκευσης. Η ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης είναι ένα μέτρο ευελιξίας. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της χαμηλής ζήτησης, συνήθως οι σταθμοί λειτουργούν στο ελάχιστο φορτίο έτσι υπάρχει η δυνατότητα για φόρτιση μια συστοιχίας θερμικών δεξαμενών με την απομάστευση ατμού. Στη συνέχεια και όταν κρίνεται απαραίτητο είτε από οικονομικούς λόγους είτε από τον Διαχειριστή αυτή η επιπλέον ισχύ μπορεί να λειτουργήσει αθροιστικά και επικουρικά στην ήδη εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού.

Αν και η ιδέα της θερμικής αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών, π.χ. σε ηλιοθερμικούς σταθμούς όπως αναλύονται και περιγράφονται στις εργασίες [1] και [5], όλα τα συστήματα είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε κυκλική βάση (συνήθως καθημερινά, περιστασιακά, εποχιακά)[4]. Τα συστήματα επιτυγχάνουν οφέλη με την εκπλήρωση ενός ή περισσότερων από τους ακόλουθους σκοπούς:

- Αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος [5]. Η πιθανότητα μείωσης των αιχμών παραγωγής ενέργειας, ακόμα και το σβήσιμο του σταθμού για συγκεκριμένες ώρες βάση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού αυξάνει τις πιθανότητες βλαβών. Με τη θερμική αποθήκευση είναι δυνατόν ο σταθμός να αποφεύγει σβήσιμα λειτουργώντας σε πιο χαμηλά όρια.
- Αυξάνοντας την παραγωγική ικανότητα του σταθμού[6]. Η ζήτηση ενέργειας είναι σπάνια σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η πλεονάζουσα διαθέσιμη ισχύς του σταθμού κατά τη διάρκεια της χαμηλής ζήτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση της θερμικής αποθήκευσης προκειμένου να αυξηθεί η αποτελεσματική παραγωγική ικανότητα του σταθμού κατά τη διάρκεια της υψηλής ζήτησης. Έτσι η ισχύς του σταθμού αυξάνει κατά τη διάρκεια υψηλής ζήτησης.
- Μείωση του κόστους παραγωγής. Οι ανάγκες σε ενέργεια στους εμπορικούς, βιομηχανικούς και οικιακούς τομείς ποικίλλουν σε καθημερινή, εβδομαδιαία και εποχιακή βάση. Στην οικονομία των περισσότερων χωρών η ενέργεια παράγεται με τη μορφή θερμότητας, η σωστή μελέτη και χρησιμοποίηση ενός συστήματος θερμικής αποθήκευσης που λειτουργεί συνεργατικά με την μονάδα παραγωγής μπορεί να βελτιστοποιήσει και να μειώσει αισθητά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παροχή ευελιξίας στον διαχειριστή του δικτύου. Η ύπαρξη μιας δευτερεύουσας μονάδας που μπορεί να λειτουργεί είτε ταυτόχρονα είτε αυτόνομα από το σταθμό παραγωγής δίνει τη δυνατότητα στον διαχειριστή, ειδικά στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο (βλέπε Κεφάλαιο 4), να αποφεύγει τις περικοπές φορτίου.

Η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο τον άνθρακα συχνά προτείνεται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για αυξημένη ευελιξία και λειτουργίες αλλαγής του φορτίου όπως αναλύεται από τον Richter κ.α. [8]. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πηγαίνει ένα βήμα παρακάτω από αυτή την προηγούμενη μελέτη, που διερευνά την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης ως

μέσο για την προθέρμανση του ατμού και τη μείωση των απομαστεύσεων, θέτοντας ως στόχο:

- i. την εξέταση διαφορετικών διαμορφώσεων και στρατηγικών ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης σε σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας
- ii. την άμεση διασύνδεση της θερμικής αποθήκευσης με το δίκτυο μεταφοράς ως δευτερεύουσες μονάδες παραγωγής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα:
 - την κατανόηση των διαφόρων σεναρίων ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στους σταθμούς παραγωγής από θερμοδυναμική άποψη και την ποσοτικοποίηση των πιθανών μεταβολών της παραγωγικής ικανότητας του σταθμού (Κεφάλαιο 2.3 και Κεφάλαιο 3.3).
 - Εξεύρεση των πλεονεκτημάτων από την χρησιμοποίηση υλικών με αλλαγή φάσης και κατά πόσο αυτό επηρεάζει την απόδοση και τη λειτουργία του συστήματος ενεργειακής διαχείρισης (Κεφάλαιο 2.2 και Κεφάλαιο 3.2).
 - Μέτρηση της απόδοσης των δευτερογενών εγκαταστάσεων που μετατρέπουν την θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική, κάτι το οποίο δεν έχει μελετηθεί κατά το παρελθόν στον Ελλαδικό χώρο, ενώ παρόμοια εργασία γίνεται από το Imperial που εξετάζει αντίστοιχες στρατηγικές ενσωμάτωσης θερμικής αποθήκευσης σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής (Κεφάλαιο 2.2 και Κεφάλαιο 3.2).
 - Οικονομική ανάλυση και εκτίμηση των πιθανών κερδών από τη λειτουργία του προτεινόμενου ενεργειακού μοντέλου τόσο στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Χρηματιστηρίου Ενέργειας (EEX) (Κεφάλαιο 2.5) , όσο και μέσω μιας ανάλυσης κόστους-οφέλους για τη περίπτωση του μη διασυνδεδεμένου δικτύου (Κεφάλαιο 3.5).

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται κάποια σχετικά στοιχεία με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τις ΑΠΕ και την ιδέα πάνω στην οποία βασίζεται η θερμική αποθήκευση. Παράλληλα αναφέρονται κάποια από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης σε έναν σταθμό παραγωγής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται η δομή και η λειτουργία των θερμικών μονάδων παραγωγής του συνδυασμένου κύκλου για το Ηπειρωτικό δίκτυο . Πιο συγκεκριμένα μελετώνται διάφορες περιπτώσεις ώστε να αναλυθεί και να ευρεθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση θερμικής αποθήκευσης στον σταθμό του Αλιβερίου με βάση τα πρότυπα τα οποία έχουν οριστεί για μέγιστη έγχυση ισχύος. Ταυτόχρονα δίνονται τα απαραίτητα στοιχεία για τους όγκους των θερμοδοχείων και σχηματικά διαγράμματα και για την συμπεριφορά του σταθμού και τις ισχύς εξόδου του σταθμού με και χωρίς την αποθήκευση. Στη συνέχεια με τη χρήση του λογισμικού DigiSILENT μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις για την στατική ευστάθεια του δικτύου για διάφορα σενάρια έγχυσης αιολικών και φορτίου. Τέλος πραγματοποιήθηκε μια οικονομική μελέτη για την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στο Αλιβέρι αν ο σταθμός ακολουθούσε ένα συγκεκριμένο μοντέλο ενεργειακής διαχείρισης και βρισκόταν στο Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προτείνει την

αποθήκευση ενέργειας όταν η τιμή είναι χαμηλή και την προσφορά της παραπάνω ισχύος στο σύστημα κατά τη διάρκεια των ωρών με τις υψηλές τιμές.

Το τρίτο κεφάλαιο πρόκειται για μια τεχνική μελέτη της θερμικής αποθήκευσης στον σταθμό του Αθρινόλακκου στη Κρήτη, το οποίο είναι ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο σε αντίθεση με το Αλιβέρι. Αρχικά διερευνήθηκαν και προτάθηκαν 2 τρόποι ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό και δόθηκαν οι κατάλληλοι τύποι αλάτων και όγκων θερμοδοχείων. Όπως και για την Εύβοια, έτσι και για τη Κρήτη διερευνήθηκαν τα απαραίτητα σενάρια για τα αιολικά και το φορτίο τα χαρακτηριστικά της στατικής ευστάθειας του δικτύου και τα οφέλη της θερμικής αποθήκευσης τόσο για τη στήριξη του φορτίου όταν η έγχυση αιολικών μειώνεται όσο και για τη δυνατότητα μείωσης του τεχνικού ελαχίστου του σταθμού κατά τη διάρκεια υψηλών τιμών ΑΠΕ. Τέλος έγινε μια ανάλυση κόστους-οφέλους θεωρώντας ένα μοντέλο του συστήματος παραγωγής της Κρήτης για το έτος 2020 με ετήσιες χρονοσειρές ζήτησης, φορτίου και Α.Π.Ε.. Το όφελος της θερμικής αποθήκευσης προκύπτει από τη διαφορά στο ετήσιο κόστος ηλεκτροπαραγωγής των σεναρίων με και χωρίς θερμική αποθήκευση.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα, οι προοπτικές και οι μελλοντικοί στόχοι που προκύπτουν από την ανάλυση που γίνεται στη παρούσα διπλωματική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

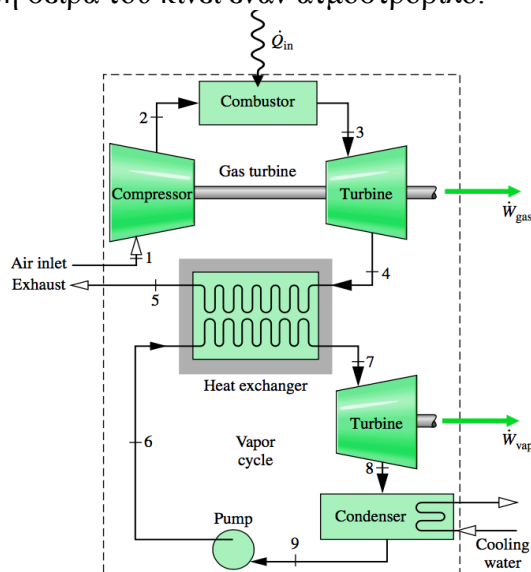
ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΛΙΒΕΡΙ

2.1 Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου

2.1.1 Γενικά στοιχεία Συνδυασμένου Κύκλου

Την τελευταία εικοσαετία υπάρχει μια νέα τάση στην ηλεκτροπαραγωγή, η οποία συνίσταται στην εγκατάσταση μονάδων συνδυασμένου κύκλου, κάτι το οποίο σχετίζεται με την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων φυσικού αερίου, το οποίο αποτελεί σχετικά φτηνό καύσιμο στους αεριοστρόβιλους, καθώς και με τα πολλαπλά πλεονεκτήματα των μονάδων αυτών. Πιο συγκεκριμένα ο συνδυασμένος κύκλος έχει την υψηλότερη θερμική απόδοση από κάθε άλλον θερμοδυναμικό κύκλο για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο παγκοσμίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [9].

Κεντρική ιδέα για τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου είναι η εκμετάλλευση και χρησιμοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων ενός ή περισσοτέρων αεριοστρόβιλων προκειμένου να παραχθεί ατμός και στην συνέχεια να κινηθεί ένας ατμοστρόβιλος [7]. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 ο αέρας συμπιέζεται στην αρχή και αναμειγνύεται με το καύσιμο σε έναν θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου. Τα καυσαέρια αφού εκτονωθούν σε έναν στρόβιλο οδηγούνται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος κάνει ανάκτηση θερμότητας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού που με τη σειρά του κινεί έναν ατμοστρόβιλο.

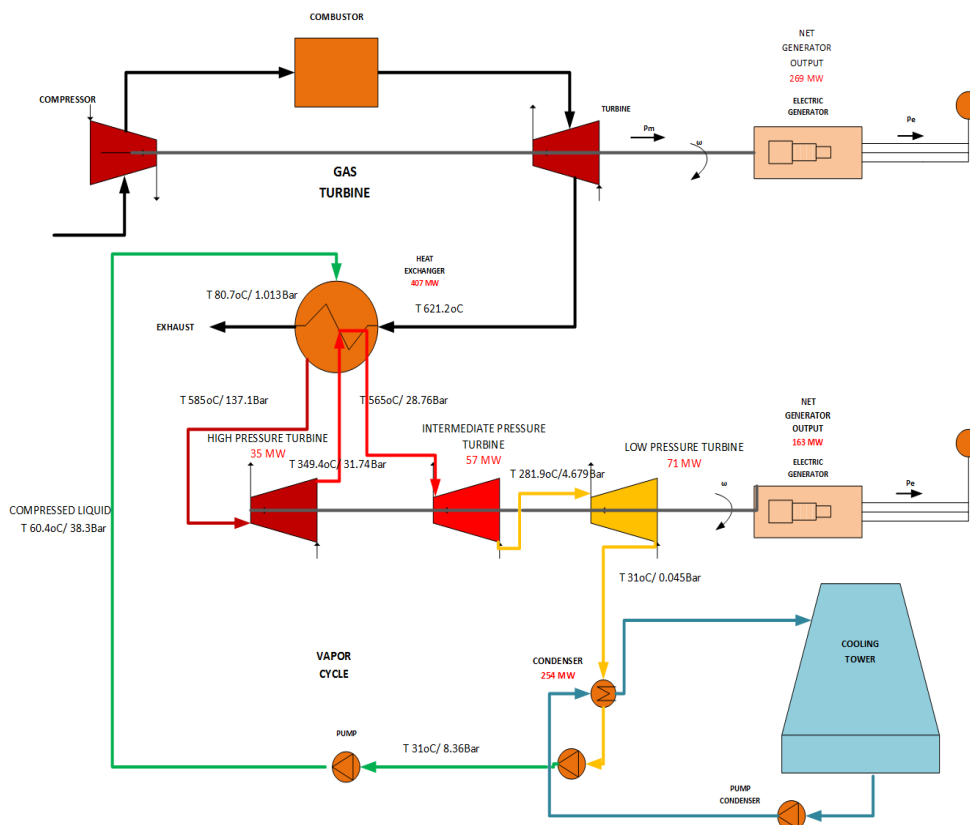


Σχήμα 2.1: Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου [9].

2.1.2 Περιγραφή της διάταξης του Αλιβερίου

Το Αλιβέρι 5 πρόκειται για έναν σταθμό παραγωγής συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο το φυσικό αέριο και μέγιστη ηλεκτρική ισχύς τα 432 MW. Ο αεριοστρόβιλος έχει καθαρή ηλεκτρική ισχύς τα 269 MW και αντίστοιχα ο ατμοστρόβιλος 163 MW. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου ακολουθούν τη διαδικασία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 και ακολουθούν τους βασικούς θερμοδυναμικούς κανόνες.

Ο θερμοδυναμικός κύκλος του σταθμού παραγωγής Αλιβέρι 5 φαίνεται στο σχήμα 2.2, το οποίο αποτελεί μια συνοπτική αναπαράσταση του θερμοδυναμικού διαγράμματος του σταθμού που βρίσκεται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 2.2: Σχηματική Αναπαράσταση σταθμού παραγωγής στο Αλιβέρι.

Με βάση τη σχηματική αναπαράσταση του σταθμού παραγωγής (σχήμα 2.2) και το σχήμα 2.1 το εργαζόμενο μέσο ακολουθεί την εξής διαδικασία για το κομμάτι του αεριοστρόβιλου[9]:

- Διαδικασία 1-2: Συμπύεση του αέρα στον συμπιεστή
- Διαδικασία 2-3: Πρόσδοση θερμότητας μέσω της καύσης του καυσίμου
- Διαδικασία 3-4: Εκτόνωση των προϊόντων της καύσης στον στρόβιλο
- Διαδικασία 4-5: Αποβολή θερμότητας των καυσαερίων μέσω του εναλλάκτη

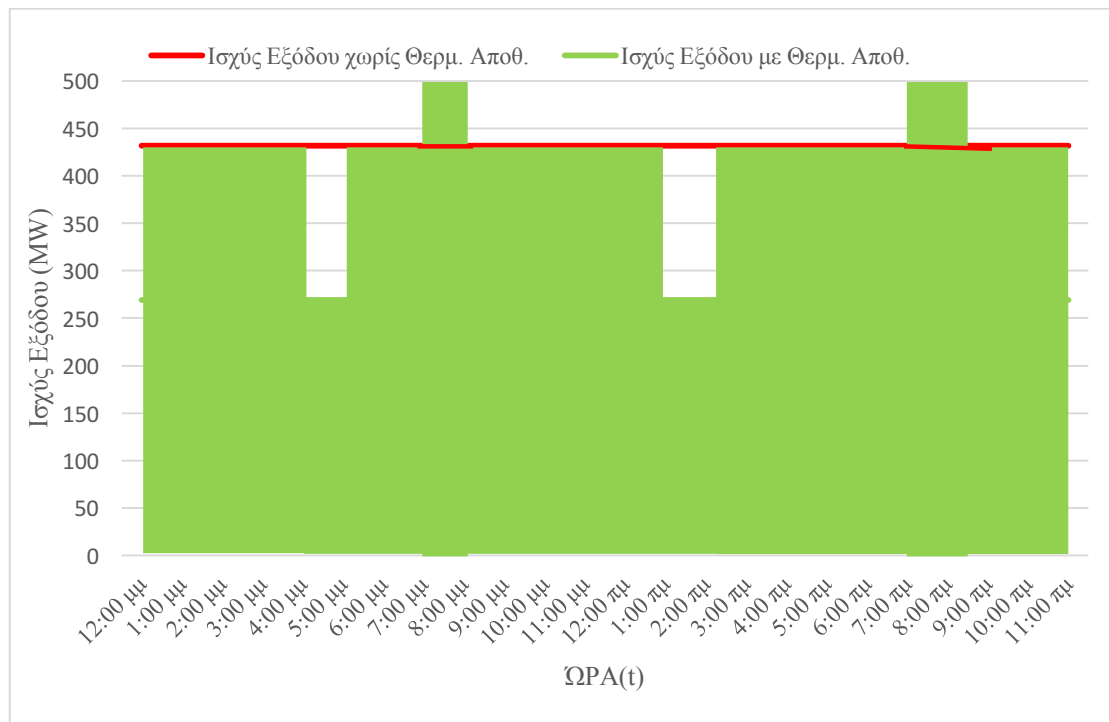
Όσον αφορά τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας μέσω του ατμοστρόβιλου ακολουθείται η εξής διαδικασία[9]:

- Διαδικασία 1-2: Εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού μέσω της τουρμπίνης υψηλής πίεσης

- Διαδικασία 2-3: Ισοβαρής μεταβολή για πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο ρευστό μέσω του εναλλάκτη
- Διαδικασία 3-4: Εκτόνωση του ατμού μέσω του στροβίλου της ενδιάμεσης πίεσης
- Διαδικασία 4-5: Εκτόνωση του ατμού μέσω του στροβίλου της χαμηλής πίεσης
- Διαδικασία 5-6: Μεταφορά θερμότητας από το υγρό καθώς ρέει υπό σταθερή πίεση μέσω του συμπυκνωτή
- Διαδικασία 6-7: Συμπύεση του κορεσμένου υγρού στην αντλία τροφοδοσίας
- Διαδικασία 7-1: Ισοβαρής μεταβολή για τη πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο υγρό μέσω του εναλλάκτη θερμότητας για να ολοκληρωθεί ο κύκλος

Η συνολική ηλεκτρική ισχύς του σταθμού είναι 432MW και η απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου 59,44%. Θα επικεντρώσουμε τη μελέτη μας στο κύκλο Rankine του αμοστροβίλου, καθώς η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης γίνεται σε αυτό το τμήμα του σταθμού. Για τον κύκλο Rankine του σταθμού η θερμική ισχύς εισόδου (από τον εναλλάκτη και την αναθέρμανση) είναι 406,7MW, η ισχύς εξόδου του αμοστροβίλου 163 MW, και η θερμική απόδοση του κύκλου Rankine 40,07%.

Η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στον σταθμό γίνεται με σκοπό την αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.3. Σε συνθήκες χωρίς θερμική αποθήκευση ο σταθμός αποδίδει σταθερά την ονομαστική ισχύ του (δηλαδή τα 432MW, κόκκινη γραμμή στο σχήμα 2.2.3). Θεωρούμε ότι ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός (HEP) του σταθμού είναι σταθερός και ίσος με το μέγιστο, γεγονός που επιβεβαιώνεται με μια στατιστική ανάλυση των δεδομένων του HEP από τον ΛΑΓΗΕ. Στο προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο ο διαχειριστής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ενημερώνεται για τις ωριαίες τιμές ανταλλαγής ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο μεταφοράς π.χ, μια μέρα μπροστά (day-ahead market). Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης λαμβάνει αποφάσεις για τη φόρτιση-εκφόρτιση των θερμικών μονάδων επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.



Σχήμα 2.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σταθμό του Αλιβερίου και παραγωγή μετά την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης. Λόγω της συμβολής της θερμικής αποθήκευσης υπερβαίνεται η βασική γραμμή παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα το σχήμα 2.3 απεικονίζει ένα σενάριο στο οποίο οι θερμικές μηχανές φορτίζονται 2 φορές την ημέρα, στις 4 μ.μ. και στις 10 π.μ. (για το λόγω αυτό παρατηρείται η βύθιση της πράσινης περιοχής). Μετά τη φόρτιση των δεξαμενών αυτές θεωρούνται αυτόνομες-ανεξάρτητες θερμικές μονάδες και συνδέονται με το δίκτυο μεταφοράς ως καταναμημένες γεννήτριες στον ίδιο ή σε ξεχωριστό ζυγό με αυτόν που συνδέεται ο κύριος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι δεξαμενές συνδέονται και παρέχουν θερμική ενέργεια σε δευτερογενείς σταθμούς, οι οποίες λειτουργούν σε οργανικό κύκλο Rankine.

Στη περίπτωση του Αλιβερίου αναλύθηκαν διάφορα σενάρια για την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης, εδώ ενδεικτικά επιλέχθηκε ισχύς περίπου 60MW μεγαλύτερη κατά την αιχμή ζήτησης. Οι δεξαμενές αποφορτίζονται και παράγουν αυτή τη περαιτέρω ισχύ κατά τις 7 μ.μ. και στις 7 π.μ. (οι κορυφές της πράσινης περιοχής). Γενικότερα μια τέτοια ευέλικτη λειτουργία των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι πιθανόν να διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο για την ταχεία διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο. Τα παραπάνω αποτελούν το ερέθισμα και το κίνητρο για την περαιτέρω εξέταση της δυνατότητας ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό παραγωγής του Αλιβερίου.

2.2 Ενσωμάτωση Θερμικής Αποθήκευσης στον σταθμό παραγωγής στο Αλιβέρι

Τα βασικά χαρακτηριστικά της θερμικής αποθήκευσης προσδιορίζονται από τη θερμοκρασία και τα σημεία από τα οποία εξάγεται ο ατμός έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα κατάλληλα υλικά, το σωστό άλας για την αποθήκευση καθώς και ο όγκος του θερμοδοχείου. Έπειτα από συνεννόηση με τη ΔΕΗ η εξαγωγή του ατμού γίνεται στα εξής σημεία:

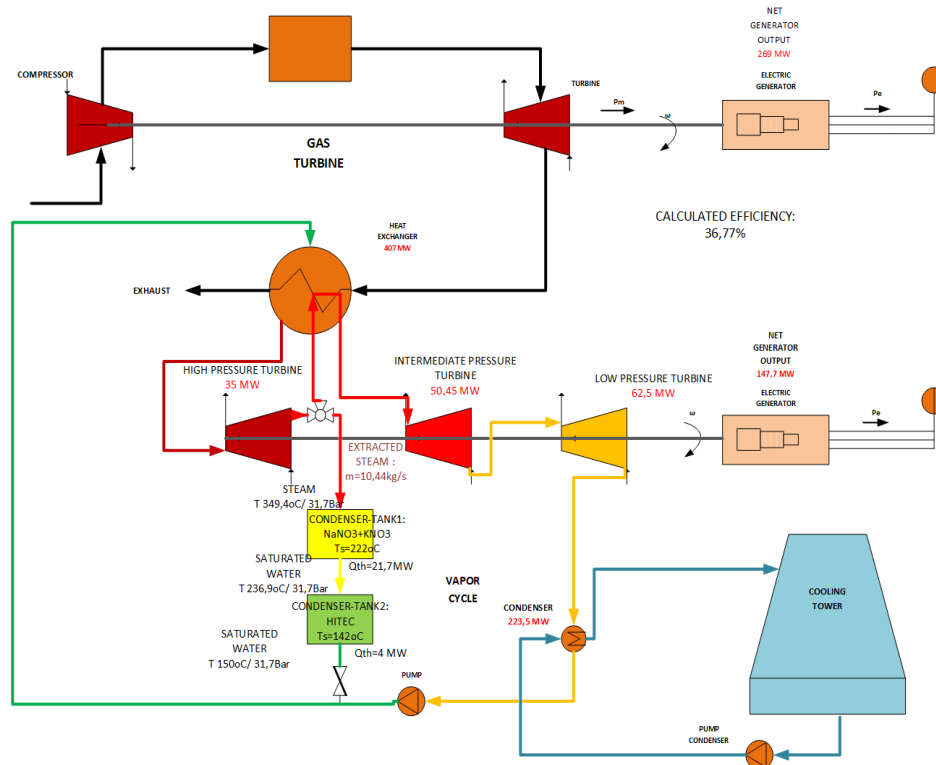
- i. Στην έξοδο της τουρμπίνας Υψηλής πίεσης σε θερμοκρασία 349 °C και πίεση 31,7 bar απομαστεύοντας το 12% του ατμού δηλαδή $m=10,4\text{kg/s}$.
- ii. Στην είσοδο της τουρμπίνας Χαμηλής Πίεσης σε θερμοκρασία 282 °C και πίεση 4,7 bar απομαστεύοντας το 80% του ατμού δηλαδή $m=85,6\text{kg/s}$.
- iii. Στον εναλλάκτη θερμότητας απομαστεύοντας το 100% του ατμού και εξάγοντάς το σε διάφορες θερμοκρασίες.

Ο σχεδιασμός των θερμικών δεξαμενών βασίζεται σε εναλλάκτες θερμότητας με κέλυφος και με σωλήνες (Shell and Tube Heat exchanger στην αγγλική ορολογία), όπου ο ατμός συμπυκνώνεται καθώς ρέει μέσα από τις σωλήνες και μεταδίδει θερμότητα. Ο ατμός έρχεται σε επαφή, και στις 2 περιπτώσεις, με τις εσωτερικές επιφάνειες των σωλήνων, των οποίων οι θερμοκρασίες είναι κάτω από τις θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Για το λόγο αυτό η σχεδίαση της θερμικής δεξαμενής επί της ουσίας ανάγεται στο σχεδιασμό των συμπυκνωτών ατμού. Στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφορες μεθοδολογίες για το σχεδιασμό τέτοιων συμπυκνωτών [16].

2.2.1 Θερμική Αποθήκευση στην έξοδο της τουρμπίνας Υψηλής Πίεσης

Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται ο μηχανισμός θερμικής αποθήκευσης στη έξοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης. Ο ατμός που αποσπάται στην έξοδο υψηλής πίεσης υφίσταται τις εξής διαδικασίες:

- Διαδικασία 2-α: Απομάστευση ατμού στην έξοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης, ακολουθούμενη από μεταφορά θερμότητας υπό σταθερή πίεση (ισοβαρής μεταβολή) και ταυτόχρονη συμπύκνωση της ροής του ατμού για τη φόρτιση της θερμικής δεξαμενής 1 που περιέχει υλικά με αλλαγή φάσης.
- Διαδικασία α-β: Ισοβαρής μεταβολή του εργαζόμενου ρευστού (κορεσμένο νερό) για απορρόφηση θερμότητας και φόρτιση μιας δεύτερης θερμικής δεξαμενής.
- Διαδικασία β-7: Συμπύκνωση του εργαζόμενου ρευστού (νερό) μέσω μιας αντλίας τροφοδοσίας και επιστροφή του στη κύρια ροή πριν την είσοδο στον εναλλάκτη.



Σχήμα 2.4: Ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης στη τουρμπίνα υψηλής πίεσης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ατμός που απομαστεύεται από την έξοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης για να θερμάνει τα θερμοδοχεία ορίστηκε να έχει μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό μέχρι 10,4 kg/s. Η συγκεκριμένη ποσότητα ατμού αντιπροσωπεύει το 12% της συνολικής ποσότητας του ατμού που υπό κανονικές συνθήκες θα οδηγούνταν για αναθέρμανση, το συγκεκριμένο ποσοστό εξαγωγής ατμού δίνεται από την EDF και το Imperial [14].

Η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί από το εκάστοτε θερμοδοχείο προκύπτει από την αλλαγή φάσης του ατμού καθώς διέρχεται και θερμαίνεται τα δοχεία, που περιέχουν το κατάλληλο άλας, και από τον θερμοδυναμικό τύπο για αλλαγή φάσης :

$$Q = \dot{m}\Delta h = \dot{m}(h_1 - h_2), \quad (1)$$

όπου \dot{m} η ροή μάζας που διέρχεται από τα θερμοκά δοχεία σε kg/s και Δh η διαφορά ενθαλπίας της εισόδου και της εξόδου των 2 διαφορετικών καταστάσεων σε kJ/kg. Στη συγκεκριμένη περίπτωση από ατμό σε κορεσμένο υγρό (για τη θερμική δεξαμενή 1) και από κορεσμένο υγρό σε συμπιεσμένο νερό (για τη θερμική δεξαμενή 2)

Ως αποτέλεσμα από την Εξίσωση (1) η θερμική δεξαμενή 1 μπορεί να αποθηκεύει θερμική ενέργεια με μέγιστη θερμική ισχύ 21,7 MWh/h και η θερμική δεξαμενή 2 με μέγιστη θερμική ισχύ 4 MWh/h.

Πιο συγκεκριμένα ο υπέρθερμος ατμός εξάγεται, πριν τον αναθερμαντήρα, σε θερμοκρασία 349°C και πίεση 31,7 bar και συμπυκνώνεται ισοβαρικά σε κάθετους σωλήνες στη θερμική δεξαμενή 1 σε κορεσμένο νερό θερμοκρασίας 236 °C. Οι ενθαλπίες για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις έχουν ληφθεί από τους θερμοδυναμικούς

πίνακες από το βιβλίο των Moran-Sapiro [9]. Το μέσο αποθήκευσης σε αυτή τη δεξαμενή είναι ένα μίγμα υλικών με αλλαγή φάσης από νιτρικά ($\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$) με σημείο τήξης τους 222°C [10], θερμοκρασία που είναι ελάχιστα πιο κάτω από τη θερμοκρασία του ατμού στη δεξαμενή. Στην έξοδο της δεξαμενής ο ατμός διαχωρίζεται από το νερό σε ένα τύμπανο ατμού και ανακυκλώνεται μέσω του συμπυκνωτή. Μεγάλη σημασία για τέτοιου είδους εφαρμογές έχει ο χώρος, δηλαδή ο όγκος που απαιτείται για την εγκατάσταση τέτοιων δεξαμενών αποθήκευσης, που αποτελούν το βασικό μέρος του συστήματος της θερμικής αποθήκευσης [10].

Όπως προκύπτει από την οικονομική ανάλυση για τη μεγιστοποίηση του κέρδους του σταθμού, σύμφωνα με το προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο διαχείρισης, απαιτείται αποθήκευση για τουλάχιστον 2 ώρες την ημέρα. Άρα η διαστασιολόγηση της θερμικής δεξαμενής θα γίνει με βάση αυτή την προϋπόθεση. Συνεπώς, για τη θερμική δεξαμενή 1 απαιτείται όγκος για 42 θερμικές MWh. Έτσι για να υπολογιστεί ο όγκος για τη θερμική δεξαμενή θεωρούμε :

$$m = \frac{Q}{\text{fusion enthalpy}}, \quad (2)$$

όπου Q οι θερμικές MWh που απαιτούνται για αποθήκευση σε kJ.

Ο όγκος λοιπόν υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$v = \frac{m}{\rho}, \quad (3)$$

όπου ρ ο ειδικός όγκος του άλατος σε kg/m^3 [10].

Με βάση αυτά τα στοιχεία προκύπτει ανάγκη για δεξαμενή με όγκο 744m^3 .

Έτσι μια δεξαμενή κυλινδρικού σχήματος με τα παρακάτω στοιχεία είναι κατάλληλη (στους υπολογισμούς περιλαμβάνεται και ο όγκος των σωληνώσεων 180m^3) :

Πίνακας 1: Στοιχεία θερμικού δοχείου 1 (τουρμπίνα υψηλής πίεσης).

Θερμικές MWh για αποθήκευση 2 ωρών	42
Όγκος Θερμοδοχείου (m^3)	924
Ύψος(m)	14
Ακτίνα(m)	4,5
Διάμετρος(m)	9

Κάθετα και σε σειρά με τη θερμική δεξαμενή 1, βρίσκεται η θερμική δεξαμενή 2 στην οποία το κορεσμένο νερό ψύχεται περαιτέρω, και πάλι ισοβαρικά, σε κάθετους σωλήνες. Η θερμοκρασία εισόδου αυτής της δεξαμενής είναι $236,9^\circ\text{C}$ στα 31,7 bar και η θερμοκρασία εξόδου είναι 150°C . Στη συγκεκριμένη δεξαμενή χρησιμοποιείται το υλικό αλλαγής φάσης που στη βιβλιογραφία συναντάται ως HITEC (σύνθεση 7 wt.% NaNO_3 + 35 wt.% KNO_3 + 40 wt.% NaNO_2) με σημείο τήξης τους 142°C , θερμοκρασία 8°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από την θερμοδεξαμενή [11].

Όμοια για τη θερμική δεξαμενή 2, από τις Εξίσωσεις (2),(3) και για 2 ώρες θερμική αποθήκευση απαιτείται όγκος $v= 174 \text{ m}^3$:

Μια δεξαμενή κυλινδρικού σχήματος με τα στοιχεία που φαίνονται στον Πίνακα 2 είναι κατάλληλη (στους υπολογισμούς περιλαμβάνεται και ο όγκος των σωληνώσεων 41 m^3):

Πίνακας 2: Στοιχεία θερμικού δοχείου Hitec (τουρμύνα υψηλής πίεσης).

Θερμικές MWh για αποθήκευση 2 ωρών	8
Όγκος Θερμοδοχείου (m^3)	215
Ύψος(m)	10
Ακτίνα(m)	2,6
Διάμετρος(m)	5,2

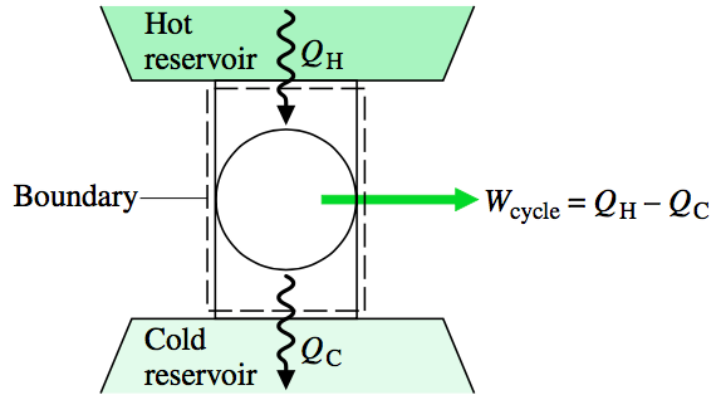
Τέλος, έπειτα από συνεννόηση με τον σταθμό, αποφασίστηκε το υποψυγμένο νερό από τις 2 θερμικές δεξαμενές να εκτονώνεται μέσω μιας βαλβίδας εκτόνωσης και να επιστρέφει μετά τον εξατμιστή χαμηλής πίεσης (Low Pressure Evaporator) και μάλιστα μετά το τύμπανο χαμηλής. Στο συγκεκριμένο σημείο η θερμοκρασία είναι $130\text{-}140 \text{ }^\circ\text{C}$ και η πίεση $4,5 \text{ bar}$ με ελάχιστη τα $2,5$. Βασική προϋπόθεση για να μην υπάρξει πρόβλημα λειτουργίας αποτελεί η παροχή του νερού, η οποία οφείλει να είναι χαμηλή και ελεγχόμενη, καθώς οποιαδήποτε απότομη μεταβολή στάθμης βγάζει τη μονάδα εκτός.

Με αυτή τη μεθοδολογία αποθήκευσης υπάρχει η δυνατότητα τόσο το θερμοδοχείο 1 όσο και το θερμοδοχείο 2 να λειτουργούν ως θερμικές πηγές για μηχανές που λειτουργούν σε Οργανικό Κύκλο Rankine. Στη περίπτωση αυτή η απόδοση της μηχανής προσδιορίζεται από τον τύπο απόδοσης του Novikov:

$$\eta_N = 1 - \sqrt{\frac{T_c}{T_H}}, \quad (4)$$

με T_H τη θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής και T_c τη θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής, σε αυτή την περίπτωση T_H θεωρείται η θερμοκρασία κατά την οποία αλλάζει φάση το άλας και T_L ορίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος, για τη συγκεκριμένη μελέτη θεωρούμε $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 K).

Η λειτουργία μιας μηχανής Novikov περιγράφεται από την παρακάτω διάταξη και είναι παρόμοια με τη λειτουργία της μηχανής Carnot. Ουσιαστικά ο τύπος του Novikov είναι ο πρακτικός τύπος υπολογισμού που ισχύει σε κάθε θερμική μηχανή, ενώ ο Carnot υπολογίζει τη μέγιστη θεωρητική απόδοση.



Σχήμα 2.5: Σύστημα που παράγει ισχύ μέσω ενέργειας που μεταφέρεται με θερμότητα μεταξύ 2 δεξαμενών[9].

Ο τύπος απόδοσης της μηχανής Carnot δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_c}{T_H} \quad . \quad (5)$$

Άρα για την θερμική δεξαμενή 1 και θεωρώντας ως $T_H = 222 \text{ }^\circ\text{C}$ (495 K), δηλαδή τη θερμοκρασία που λιώνει το άλας, προκύπτει Novikov-απόδοση ίση με $\eta_N = 0,224$, ενώ η αντίστοιχη απόδοση Carnot είναι $\eta_c = 0,399$.

Αντίστοιχα για το θερμοδοχείο 2 και με $T_H = 142 \text{ }^\circ\text{C}$ (415 K) η Novikov-απόδοση $\eta_N = 0,156$, ενώ η αντίστοιχη απόδοση Carnot είναι $\eta_c = 0,28$.

Για να υπολογιστεί η πραγματική ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδώσει η θερμική αποθήκευση κατά την διάρκεια εκφόρτισης των θερμικών δεξαμενών

$$W_{cycle} = \eta_n * Q_{th} \quad . \quad (6)$$

Με βάση τις παραπάνω αποδόσεις Novikov, με γνωστές τις δυνατότητες αποθήκευσης θερμότητας και την Εξίσωση (6) προκύπτει πως η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από το θερμοδοχείο 1 ισούται με $4,8 \text{ MW}$, ενώ για το θερμοδοχείο 2 η ίδια σχέση δίνει σαν αποτέλεσμα ηλεκτρική ισχύς της τάξης των $0,65 \text{ MW}$.

Η μερική απομάστευση ατμού οδηγεί σε μείωση της θερμικής εισόδου του κύκλου Rankine του σταθμού παραγωγής από $406,7 \text{ MW}$ σε 401 MW , και της ηλεκτρικής ισχύος σε μείωση κατά $9,4\%$ (από 163 MW σε $147,7$), αντίστοιχα και η θερμική απόδοση πέφτει από $40,07\%$ σε $36,8\%$.

2.2.2 Θερμική Αποθήκευση στην είσοδο της τουρμπίνας Χαμηλής Πίεσης

Στο σχήμα 2.6 απεικονίζεται ο μηχανισμός θερμικής αποθήκευσης στη τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Ο ατμός που αποσπάται πριν την είσοδο της τουρμπίνας χαμηλής πίεσης υφίσταται τις εξής διαδικασίες:

Έτσι μια δεξαμενή κυλινδρικού σχήματος με τα παρακάτω στοιχεία είναι κατάλληλη (στους υπολογισμούς περιλαμβάνεται και ο όγκος των σωληνώσεων 2100 m³.):

Πίνακας 3: Στοιχεία θερμικού δοχείου 3 Hitec.

Θερμικές MWh για αποθήκευση 2 ωρών	410
Όγκος Θερμοδοχείου (m ³)	11020
Ύψος(m)	25
Ακτίνα(m)	11,8
Διάμετρος(m)	23,7

Η ποσότητα του ατμού που απομαστεύτηκε για να φορτίσει τη θερμική δεξαμενή πρέπει να επιστρέψει πίσω στον αρχικό κύκλο, έπειτα από συνεννόηση με το σταθμό υπάρχει δυνατότητα για επιστροφή του κορεσμένου νερού σε 2 σημεία είτε μετά την αντλία συμπυκνώματος, είτε κατ' ευθείαν στον απαερωτή.

Πιο συγκεκριμένα, για τη πρώτη περίπτωση επιτρέπεται η ανάμειξη νερών 2 διαφορετικών θερμοκρασιών καθώς η θερμοκρασία εισόδου είναι μεγαλύτερη από την υπάρχουσα της λειτουργίας. Άρα με μια αντλία συμπίεσης μπορεί να επιστραφεί το κορεσμένο νερό μετά την αντλία συμπυκνώματος. Όμοια λόγω της χαμηλής πίεσης που επικρατεί στον απαερωτή δεν επιτρέπεται αυτή η ποσότητα νερού να επιστρέψει κατ' ευθείαν αλλά χρειάζεται μια βαλβίδα εκτόνωσης. Επιπλέον σε κάθε περίπτωση χρειάζεται προσοχή και επιβάλλεται να είναι μικρή η παροχή νερού για ισορροπία στάθμης.

Με βάση τις Εξισώσεις (4), (5) υπολογίζονται οι αποδόσεις του κύκλου Novikov και Carnot αντίστοιχα. Έτσι προκύπτει $\eta_N=0,152$, ενώ η αντίστοιχη απόδοση Carnot είναι $\eta_c=0,28$.

Από την Εξίσωση (6) προκύπτει η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδώσει η θερμική αποθήκευση για αυτό το σενάριο ενσωμάτωσης της και προκύπτει πως μπορούν να παραχθούν επιπλέον 31 ηλεκτρικά MW.

Για το συγκεκριμένο σενάριο θερμικής αποθήκευσης, όπου η ΔΕΗ μας έδωσε ως μέγιστο επιτρεπόμενο όριο απομάστευσης ατμού το 80% της συνολικής ροής πριν την είσοδο στη τουρμπίνα χαμηλής πίεσης, ποσοστό που αντιπροσωπεύει ρυθμό μάζας 85,61 kg/s, η θερμική ισχύς του κύκλου Rankine παραμένει αμετάβλητη στα 406,7 MW (σε σχέση με τη λειτουργία πλήρους φορτίου χωρίς αποθήκευση), όμως η ηλεκτρική ισχύς μειώνεται στα 106 MW, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4. Άρα η θερμική απόδοση του κύκλου μειώνεται στα 26,03%.

2.2.3 Θερμική Αποθήκευση στον εναλλάκτη

Το πλεονέκτημα που προκύπτει από την απομάστευση του ατμού από τον εναλλάκτη θερμότητας είναι η δυνατότητα εξαγωγής του ατμού σε διάφορες θερμοκρασίες. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα μελέτης για τη φόρτιση του άλατος σε διαφορετικές και κατάλληλες θερμοκρασίες. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι παρόμοια με τα προηγούμενα σενάρια. Ο ατμός απομαστεύεται στο 100% από τον εναλλάκτη, δηλαδή $m=635,7$ kg/s, για να θερμάνει το άλας στην κατάλληλη θερμοκρασία και στη συνέχεια επιστρέφει στον εναλλάκτη.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα για τις διάφορες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4: Θερμοκρασίες Αποθήκευσης από τον εναλλάκτη.

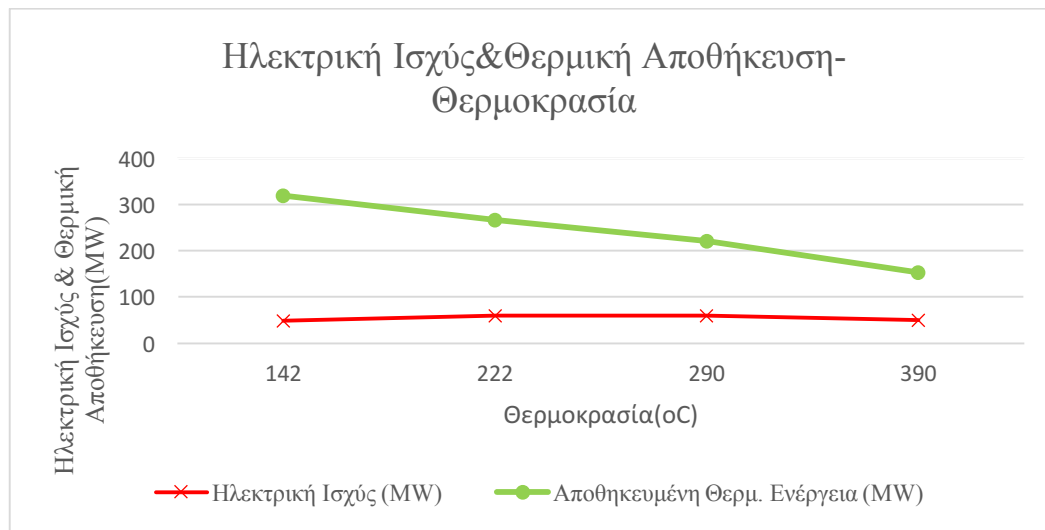
Για θερμοκρασία αποθήκευσης(°C)	Αποθήκευση Θερμικής Ισχύος(MW)	Ηλεκτρική Ισχύς (MW)	Ηλεκτρική Ισχύς (MW)
390	153,9	50,7	85,9
290	221	60,2	104,1
222	267,2	59,9	106,3
142	319,2	48,7	89,4

Για τον παραπάνω πίνακα η 2^η στήλη που αφορά την αποθήκευση ενέργειας στο θερμοδοχείο προήλθε από την Εξίσωση (1). Αντίστοιχα οι αποδόσεις των θερμικών μηχανών για τις διάφορες θερμοκρασίες υπολογίζονται από την Εξίσωση (4), (5). Πιο συγκεκριμένα:

- Για τους 390 °C, $\eta_N=0,329$ και $\eta_c = 0,558$.
- Για τους 290 °C, $\eta_N=0,272$ και $\eta_c = 0,471$.
- Για τους 222 °C, $\eta_N=0,224$ και $\eta_c =0,398$.
- Για τους 142 °C, $\eta_N=0,152$ και $\eta_c = 0,280$.

Έτσι έχοντας υπολογίσει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια και τις αποδόσεις Νονίκον με τη χρήση της Εξίσωσης (6) υπολογίζεται η 3^η στήλη του Πίνακα 4, ενώ υπολογίζεται και η μέγιστη θεωρητική ηλεκτρική ισχύς (4^η στήλη) με βάση την μέγιστη θεωρητική απόδοση του Carnot.

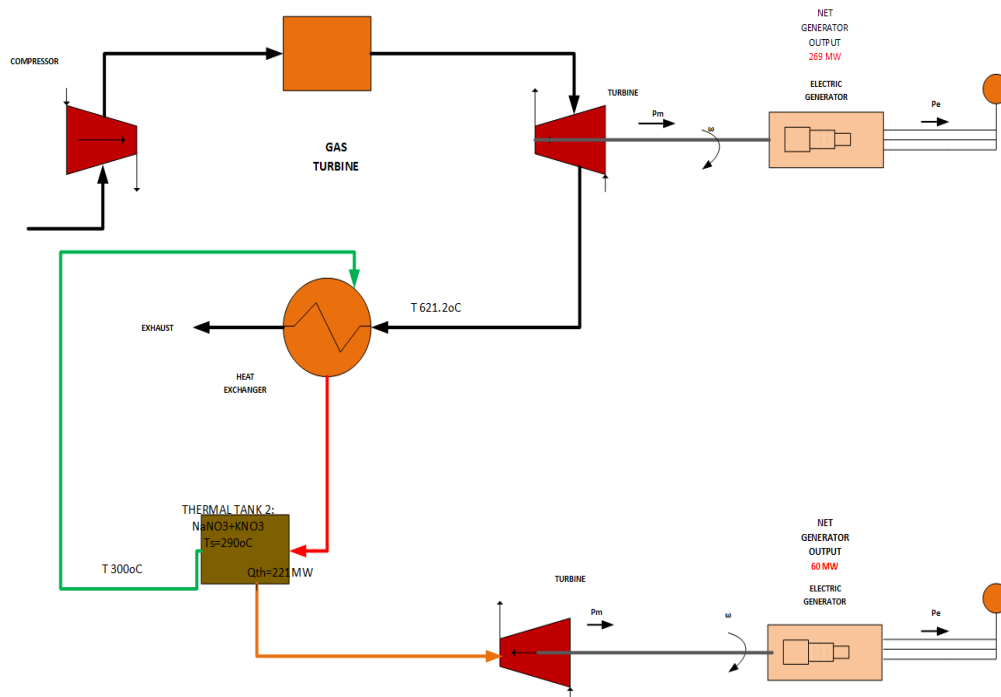
Άρα είναι σαφές πως η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποδώσει η θερμική αποθήκευση δεν είναι συνάρτηση μόνο της αποθηκευμένης θερμικής ισχύος αλλά και της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται καθώς από αυτή εξαρτάται η απόδοση της εκάστοτε μηχανής. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση της ηλεκτρικής ισχύος και της θερμικής ισχύος συναρτήσει των θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η θερμική αποθήκευση.



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα Ηλεκτρικής και Αποθηκευμένης Ισχύος στον εναλλάκτη.

Η βέλτιστη προτεινόμενη λύση βασίζεται στη μεγιστοποίηση της παραγωγής κατά τη διάρκεια της αιχμής του φορτίου έτσι ώστε ο σταθμός να μεγιστοποιεί το κέρδος του. Τις ώρες αιχμής η τιμή της ενέργειας είναι αρκετά υψηλότερη από ότι στις ώρες χαμηλής ζήτησης. Θεωρώντας σκόπιμο ο σταθμός παραγωγής να παράγει όσο το δυνατό περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια η συνέχεια της μελέτης θα βασιστεί στο σενάριο 2 και τη θερμοκρασία αποθήκευσης των 290°C , όπου η επιπλέον ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να δώσει ο σταθμός παραγωγής μέσω του συστήματος της θερμικής αποθήκευσης είναι 60 MW.

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται ο μηχανισμός θερμικής αποθήκευσης από τον εναλλάκτη θερμότητας.



Σχήμα 2.8: Ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης στον εναλλάκτη θερμότητας.

Στην περίπτωση αυτή ουσιαστικά καταργείται ο κύκλος Rankine του αμμοστροβίλου και όλος ο ατμός χρησιμοποιείται για να θερμανθεί το άλας. Πιο συγκεκριμένα ο υπέρθερμος ατμός σε θερμοκρασία 621°C εξάγεται από τον εναλλάκτη θερμότητας για να φορτίσει το θερμοδοχείο. Το μέσο αποθήκευσης σε αυτή τη δεξαμενή είναι ένα μείγμα υλικών αλλαγής φάσης από νιτρικά ($\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$) με σημείο τήξης τους 290°C [10]. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι 10°C πιο χαμηλά από την ελάχιστη θερμοκρασία της εξόδου του θερμοδοχείου.

Όταν το θερμοδοχείο είναι φορτισμένο υπάρχει η δυνατότητα για επιπλέον ηλεκτρική ισχύ από μια δευτερεύουσα γεννήτρια που ισούται με 60 MW (βλ. Πίνακα 4). Έτσι η συνολική ισχύς του σταθμού γίνεται 492 MW όταν κρίνεται απαραίτητο να συνεισφέρει και η θερμική αποθήκευση.

Η δεξαμενή που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να ικανοποιεί το σενάριο για 2 ώρες θερμική αποθήκευση. Για 2 ώρες το μέγιστο που μπορεί να αποθηκευτεί είναι 442

θερμικές MWh. Χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (2), (3) η θερμική δεξαμενή πρέπει να έχει όγκο ίσο με $v=7475 \text{ m}^3$.

Έτσι μια δεξαμενή κυλινδρικού σχήματος με τα παρακάτω στοιχεία είναι κατάλληλη (στους υπολογισμούς περιλαμβάνεται και ο όγκος των σωληνώσεων 1810 m^3):

Πίνακας 5: Στοιχεία θερμικού δοχείου $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ για τον εναλλάκτη.

Θερμικές MWh για αποθήκευση 2 ωρών	442
Όγκος Θερμοδοχείου (m^3)	9285
Ύψος(m)	25
Ακτίνα(m)	10,9
Διάμετρος(m)	21,8

Η θερμική ισχύς εισόδου από τον εναλλάκτη θερμότητας για αυτό το σενάριο θερμικής αποθήκευσης είναι 221 MW, η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ο κύκλος Rankine του ατμοστροβίλου είναι 0 MW και η απόδοση του κύκλου επίσης μηδενική.

2.3 Αποτελέσματα στο Αλιβέρι από τις Μελέτες Περιπτώσεων

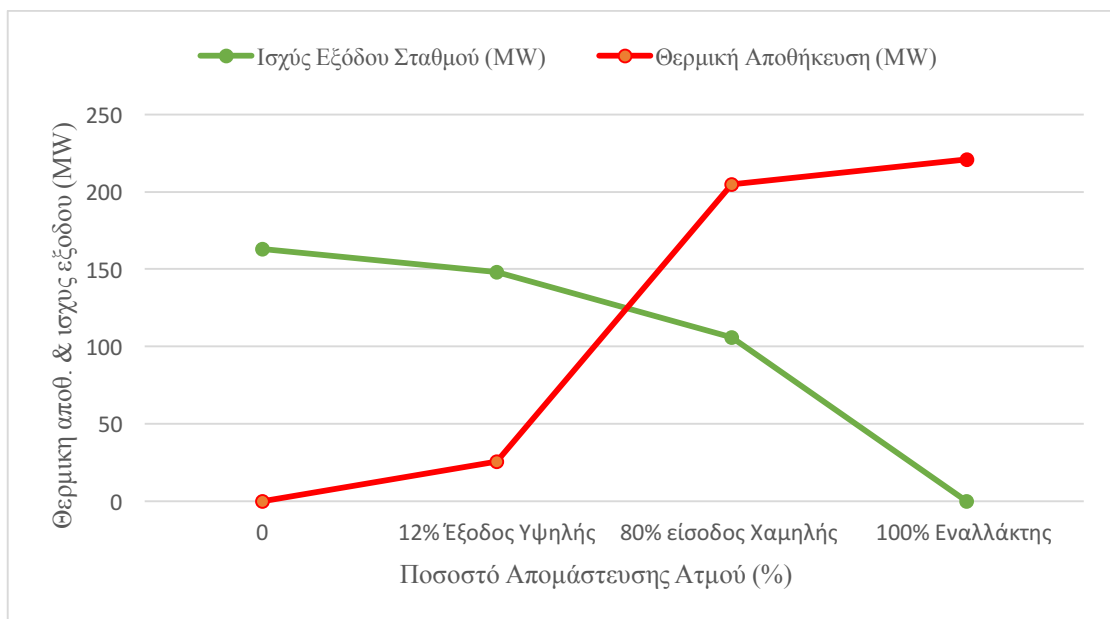
2.3.1 Συμπεριφορά της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Στις παραπάνω ενότητες αναλύθηκαν τα διαφορετικά σενάρια για την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στον σταθμό του Αλιβερίου. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η κλασματική μείωση -αποδυνάμωση του ατμοστροβίλου του σταθμού κατά τη διάρκεια της φόρτισης των θερμοδοχείων, ανάλογα με την ποσότητα του ατμού που αποσπάται κάθε φορά όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.2. Η τιμή της κλασματικής αποδυνάμωσης της ισχύος του εργοστασίου είναι ο λόγος της εξόδου της γεννήτριας με τα σενάρια απόσπασης ατμού προς την έξοδο της γεννήτριας χωρίς απόσπαση ατμού, δηλαδή στο σενάριο με μέγιστη καθαρή έξοδο γεννήτριας 163 MW. Από αριστερά προς τα δεξιά και για τα 2 σχήματα i) 12% για την απομάστευση στην έξοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης (Ενότητα 2.2.1), ii) 80% για απομάστευση ατμού στην είσοδο της τουρμπίνας χαμηλής πίεσης (Ενότητα 2.2.2), iii) 100% από τον εναλλάκτη θερμότητας (Ενότητα 2.2.3).



Σχήμα 2.9: Κλασματική Μείωση εγκατάστασης.

Σαν αποτέλεσμα αυτών των 3 στρατηγικών, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10 η ισχύς εξόδου του σταθμού παραγωγής μειώνεται, ενώ η ποσότητα της ενέργειας η οποία αποθηκεύεται αυξάνεται.

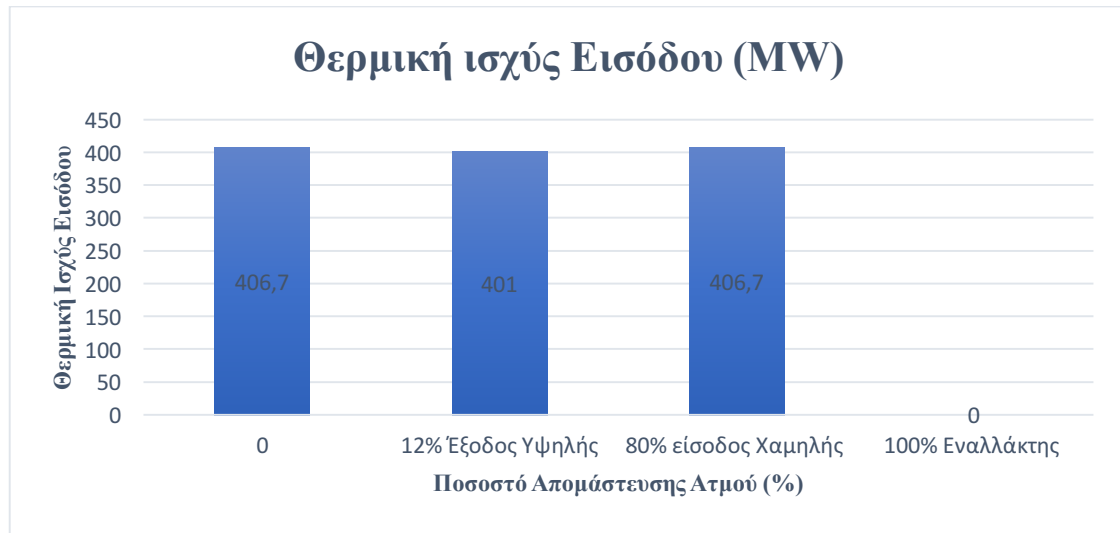


Σχήμα 2.10: Ισχύς εξόδου ατμοστροβίλου για το Αλιβέρι και αποθηκευμένη θερμική ενέργεια για τα 3 σενάρια.

Τα παραπάνω σχήματα δείχνουν πως είναι δυνατή η χρήση της υφιστάμενης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής για ευέλικτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά δίνεται η δυνατότητα μείωσης της ηλεκτροπαραγωγής από τη μονάδα του ατμοστροβίλου έως και το 100% της ονομαστικής ισχύος (βλ. Σχήμα 2.9) για μέγιστη απόσπαση ατμού από τον εναλλάκτη θερμότητας. Η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια αυξάνεται με την ποσότητα εξαγωγής ατμού έως 221 MW, καθώς η καθαρή ισχύς εξόδου του ατμοστροβίλου μειώνεται κατά 100% από 163 MW σε 0 MW. Είναι ενδιαφέρον να

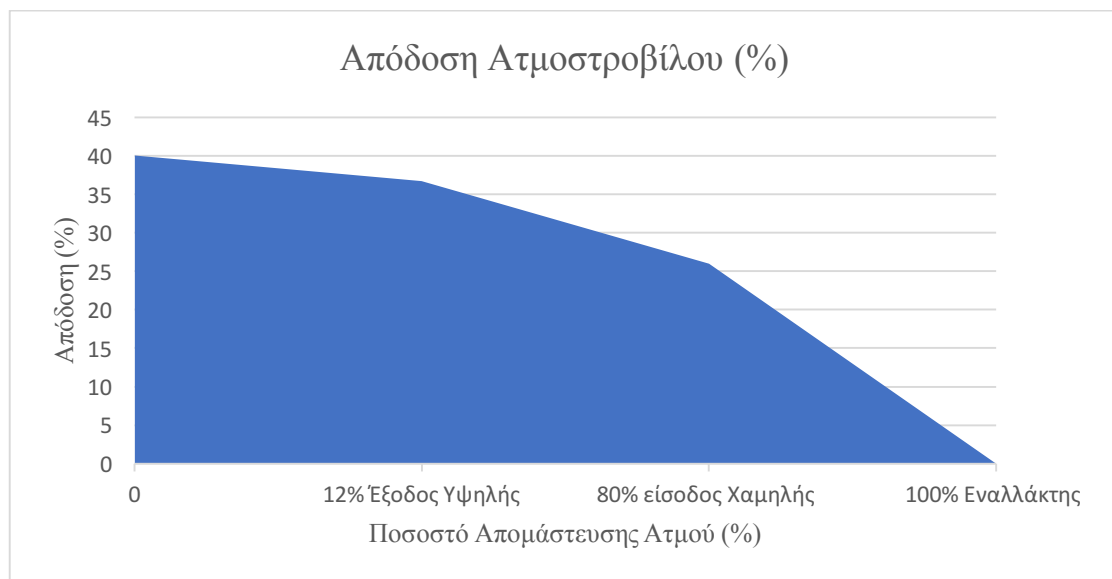
σημειωθεί ότι επιτυγχάνεται η μέγιστη ευελιξία του σταθμού παραγωγής και επομένως η μεγαλύτερη δυναμικότητα για λειτουργίες όταν ο ατμός εξάγεται από τον εναλλάκτη.

Επίσης στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η θερμική ισχύς εισόδου στην εγκατάσταση, η οποία είναι μέγιστη όταν ο ατμός δεν εξάγεται ή όταν εξάγεται πριν την τουρμπίνα χαμηλής πίεσης, που η θερμότητα αποθήκευσης είναι χαμηλότερη. Όταν ο ατμός εξάγεται πριν την αναθέρμανση (έξοδος της τουρμπίνας υψηλής) η συνολική θερμική ισχύς εισόδου μειώνεται κατά 1,4%, ενώ όταν ο ατμός απομαστεύεται από τον εναλλάκτη, και ο ατμοστρόβιλος ουσιαστικά τίθεται εκτός λειτουργίας δεν υπάρχει θερμική ισχύς εισόδου, έτσι η απόδοση του ατμοστρόβιλου από 40,07% μηδενίζεται [12-14].



Σχήμα 2.11: Θερμική Ισχύς Εισόδου ατμοστρόβιλου.

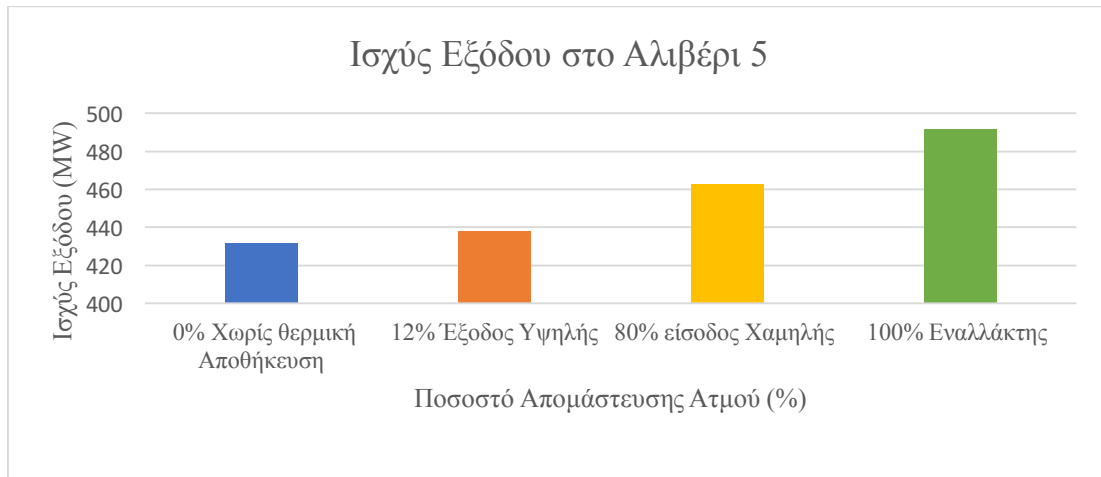
Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η απόδοση της εγκατάστασης του ατμοστρόβιλου κατά τη διάρκεια φόρτισης της θερμικής αποθήκευσης για τα 3 προτεινόμενα συστήματα εξαγωγής ατμού. Ως αποτέλεσμα της θερμικής αποθήκευσης είναι η απόδοση του συγκεκριμένου ατμοστρόβιλου στο Αλιβέρι να μειώνεται από 40,07% (λειτουργία πλήρους φορτίου) στο 0% (για λειτουργία με θερμική αποθήκευση στον εναλλάκτη).



Σχήμα 2.12: Απόδοση Κύκλου Rankine κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

2.3.2 Συνολική Παραγωγή κατά την εκφόρτιση της θερμικής αποθήκευσης

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η μέγιστη συνολική ηλεκτρική ισχύς του σταθμού που μπορεί να εγχυθεί στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης των θερμικών δεξαμενών σε ώρες αιχμής, δηλαδή όταν η θερμότητα που αποθηκεύεται στις θερμικές δεξαμενές μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τις επιπλέον δευτερεύουσες μονάδες ισχύος, που λειτουργούν επιπλέον της βασικής μονάδας. Στο συγκεκριμένο σχήμα θεωρείται η λειτουργία πλήρους φορτίου του συνδυασμένου κύκλου του σταθμού, δηλαδή τα 432 MW.



Σχήμα 2.13: Συνολική Ισχύς Εξόδου χωρίς και με θερμική αποθήκευση (3 σενάρια) (εκφόρτιση θερμικών δοχείων) κατά τη διάρκεια της αιχμής.

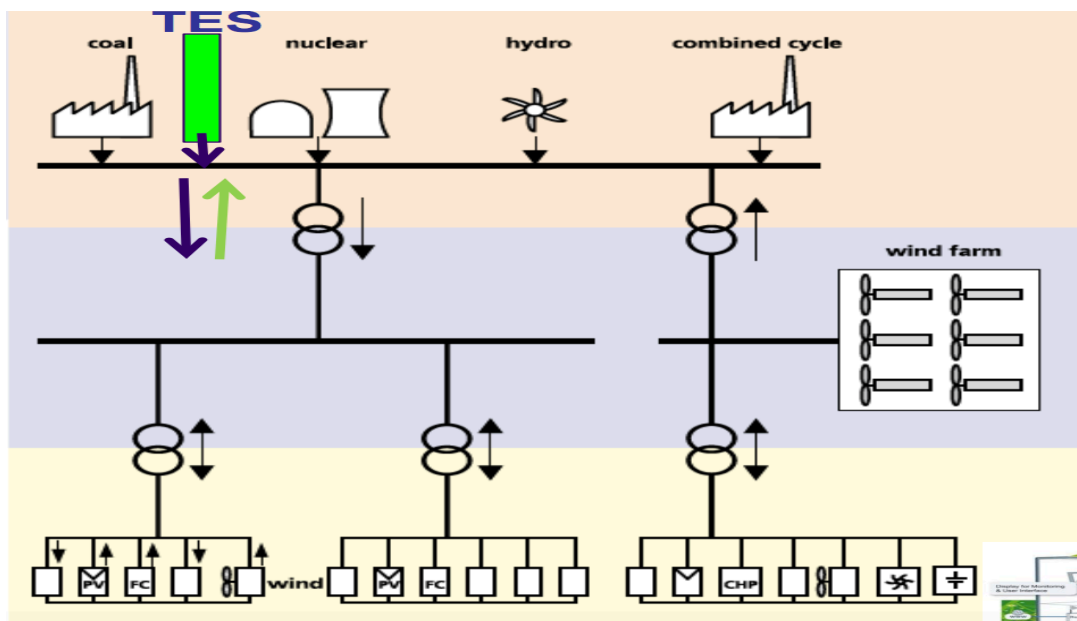
Παρατηρείται πως όταν εξάγεται ο ατμός από τον εναλλάκτη θερμότητας η μέγιστη συνολική ισχύς του σταθμού κατά τη διάρκεια της αιχμής του φορτίου μπορεί να φτάσει τα 492 MW, δηλαδή παραγόμενη ισχύ 14% αυξημένη από ότι η εγκατεστημένη ισχύς πλήρους φορτίου του σταθμού χωρίς την θερμική αποθήκευση. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη δυνατότητα του σταθμού να "απενεργοποιεί" τον ατμοστρόβιλο και ταυτόχρονα να φορτίζει τα θερμικά δοχεία κατά τη διάρκεια των ωρών χαμηλής ζήτησης, αντιπροσωπεύει μια ευέλικτη λειτουργία του σταθμού και μια αποδεκτή ικανότητα παραγωγής ιδίως κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής/χαμηλού φορτίου [12-14].

2.4 Μελέτη Στατικής Ευστάθειας της Θερμικής Αποθήκευσης στο Αλιβέρι

2.4.1 Εισαγωγή

Η μελέτη για το κατά πόσο επηρεάζει ή όχι η θερμική αποθήκευση τους ζυγούς του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού DigSILENT. Το DigSILENT πρόκειται για ένα λογισμικό ανάλυσης συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Ενσωματώνει όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες, είναι συμβατό με τα Windows και συνδυάζει αξιόπιστες και ευέλικτες δυνατότητες μοντελοποίησης συστημάτων παραγωγής.

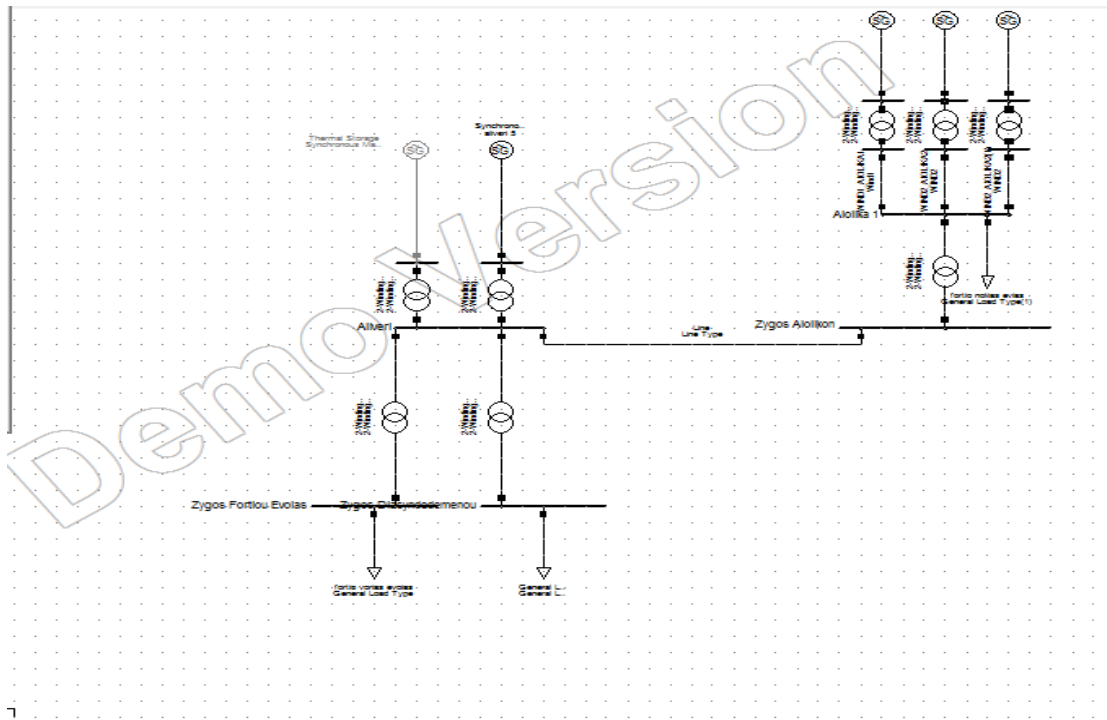
Με τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού μοντελοποιήθηκε ένα απλοποιημένο δίκτυο για την Εύβοια, παρόμοιο με αυτό του Σχήματος 2.14 χωρίς τα πυρηνικά και τα υδροηλεκτρικά, δηλαδή ένας ζυγός για τη παραγωγή από το Αλιβέρι και τη θερμική αποθήκευση, ένας ζυγός στον οποίο θεωρείται πως βρίσκεται το φορτίο της Εύβοιας, ένας ζυγός από το Αλιβέρι για το φορτίο του διασυνδεδεμένου συστήματος που δύναται να καλύψει το Αλιβέρι και ένα ζυγό για την παραγωγή από Αιολικά. Λόγω της έλλειψης παροχής δεδομένων για τις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές από αντίστοιχες μελέτες του ΔΕΔΔΗΕ για τη Κρήτη.



Σχήμα 2.14: Δίκτυο Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας [15].

Η μοντελοποίηση της Εύβοιας στο DigSILENT φαίνεται στο σχήμα 2.15. Πιο συγκεκριμένα πάνω αριστερά βρίσκεται ο σταθμός του Αλιβερίου ισχύς 432 MW και δίπλα σε αυτόν η θερμική αποθήκευση 60 MW. Ο ζυγός του Αλιβερίου συνδέεται τόσο με το ζυγό του φορτίου της βόρειας Εύβοιας καθώς και με το ζυγό του φορτίου που μπορεί να καλυφθεί για το διασυνδεδεμένο δίκτυο. Στα δεξιά βρίσκονται τα Αιολικά

με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς στην Εύβοια 200 MW και ένα μικρό φορτίο που αντιπροσωπεύει το φορτίο της νότιας Εύβοιας.



Σχήμα 2.15: Το Αλιβερί στο DigSILENT.

Για τις τάσεις λειτουργίας των ζυγών του συστήματος του διασυνδεδεμένου δικτύου ισχύουν οι προδιαγραφές της ΡΑΕ σύμφωνα με το άρθρο 213 του αντίστοιχου κανονισμού.[16] Τα επίπεδα ονομαστικής τάσης Συστήματος ορίζονται σε 400 kV και 150 kV και το εύρος διακύμανσης της τάσης κατά την κανονική λειτουργία του Συστήματος καθορίζεται ως εξής :

- 380 kV έως 420 kV στο σύστημα μεταφοράς 400 kV.
- 142,5 kV έως 162 kV στο σύστημα μεταφοράς 150 kV.

Κατά τη διάρκεια διαταραχών στο Σύστημα, έκτακτων συνθηκών λειτουργίας του ή σφαλμάτων σε αυτό, το επιτρεπόμενο εύρος διακύμανσης της τάσης καθορίζεται ως εξής:

- 350 kV έως 420 kV στο σύστημα μεταφοράς 400 kV.
- 135 kV έως 170 kV στο σύστημα μεταφοράς 150 kV.

Σε κάθε περίπτωση για τους υπόλοιπους ζυγούς η τάση περιορίζεται από την επιτρεπόμενη ζώνη τάσης $\pm 10\%$ ονομαστικής τιμής σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN50160.[17]

Για την μελέτη των ροών ισχύος στο DigSILENT με τη κλασική μέθοδο Newton-Raphson θεωρήθηκε πως το φορτίο έχει συντελεστή ισχύος ίσο με 0,87. Τα αιολικά έχουν επαγωγικό συντελεστή ισχύος ίσο με 0,865 και απορροφούν άεργο, ωστόσο για την ευκολία του μοντέλου και την δημιουργία μικρότερων προβλημάτων στα όρια παραγωγής άεργου ισχύος από το σταθμό, καθώς λόγω έλλειψης άλλων σταθμών παραγωγής, η κάλυψη της άεργου γίνεται αποκλειστικά από τον σταθμό παραγωγής του Αλιβερίου, τοποθετήθηκαν στους ζυγούς των αιολικών πυκνωτές με στόχο τη

βελτίωση του συντελεστή ισχύος τους (συντελεστής ισχύος πάνω από 0,95). Το συνολικό φορτίο των καταναλωτών εκφράζεται στο ζυγό της Μέσης Τάσης του δικτύου στα 21 kV.

2.4.2 Μελέτες Περιπτώσεων

Σενάριο 1-Σενάριο Αναφοράς

Πίνακας 6: Ζυγοί Παραγωγής και Αιολικά- Σενάριο 1.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Παραγωγή Αιολικά 1	0,98	11,43	30	-18,53	PQ
Παραγωγή Αιολικά 2	0,98	13,52	30	-18,53	PQ
Παραγωγή Αιολικά 3	0,98	13,52	30	-18,53	PQ
Αλιβέρι CC	1,01	0	422,5	319,63	SL
Θερμική Αποθήκευση		ANENERΓΗ			

Όπως αναφέρεται και από τον Stetz et. al η ύπαρξη ΑΠΕ στην παραγωγή οδηγεί στο να οριστεί η τάση του ζυγού αναφοράς λίγο μεγαλύτερη από το 1 p.u. [17]. Για το λόγο αυτό στο σενάριο αναφοράς θέτουμε τον ζυγό αναφοράς στο 1,01 p.u. Επιπλέον στην εργασία [17] αναφέρεται πως ο ζυγός αναφοράς μπορεί να τεθεί μέχρι 1,09 p.u προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα φιλοξενίας του δικτύου.

Στο σενάριο αναφοράς ορίζεται η τάση του ζυγού αναφοράς (SL) στο 1,01 p.u, λόγω της ύπαρξης ΑΠΕ[17]. Στον πίνακα φαίνονται οι μονάδες που συνεισφέρουν στην παροχή ενεργού ισχύος στο σύστημα. Πρόκειται για το σταθμό παραγωγής στον Αλιβέρι και τα 3 αιολικά πάρκα που έχουν ισχύ ίση με 90MW. Τα αιολικά θεωρούνται ζυγοί PQ και όχι PV ζυγοί καθώς έχουν απαίτηση για άεργο ισχύ και παράλληλα δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο τάσης(voltage controlled bus). Παρατηρείται η λειτουργία των ζυγών στα επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας σύμφωνα με τα πρότυπα που έχουν οριστεί από τις αρχές.

Πίνακας 7: Ζυγοί Φορτίων Εύβοιας- Σενάριο 1.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Φορτίου Ν. Εύβοιας	0,94	3,38	15	8,5	PQ
Ζυγός Φορτίου Β. Εύβοιας	1,04	-5,92	90	50	PQ
Ζυγός Φορτίου Διασύνδεσης	0,99	-11,62	400	220	PQ

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα φορτία που εξυπηρετούνται από το σύστημα, πρόκειται για το φορτίο της Εύβοιας αλλά και ένα μέρος του φορτίου στο διασυνδεδεμένο δίκτυο μέσω της διασύνδεσης του Αλιβερίου με την Αττική. Στο σενάριο αναφοράς ο σταθμός συνδυασμένου κύκλου λειτουργεί κοντά στο τεχνικό μέγιστο εγχύοντας στο σύστημα 422 MW και τα αιολικά παράγουν 90 MW ισχύς, εξυπηρετώντας έτσι ένα φορτίο 505 MW. Επιπλέον υπάρχουν και 7 MW απώλειες λόγω του δικτύου.

Πίνακας 8: Ζυγοί Μεταφοράς-Σενάριο 1.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Αλιβερίου	0,99	-4,4			Ζυγός Μεταφοράς
Ζυγός Ν. Εύβοιας	0,99	-2,37			Ζυγός Μεταφοράς

Στον Πίνακα 8 φαίνονται οι τάσεις λειτουργίας των ζυγών μεταφοράς, που λειτουργούν στα 150 kV. Οι τάσεις είναι εντός των ορίων σύμφωνα με τα πρότυπα, καθώς και οι 2 ζυγοί έχουν τάση 0,99 p.u (δηλαδή 148,5 kV), τιμή που είναι μεγαλύτερη από το κάτω όριο που θέτει ο διαχειριστής που είναι τα 0,9 p.u.. Στη συνέχεια και με βάση αυτό το σενάριο θα αξιολογηθεί η ευστάθεια του συστήματος και οι δυνατότητες φόρτισης της θερμικής αποθήκευσης υπό διάφορα σενάρια για την Εύβοια και την ηπειρωτική Ελλάδα, τόσο για διαφορετικά φορτία, όσο και για διαφορετικές εγχύσεις αιολικών.

Σενάριο 2-Μικρότερο φορτίο- Ίδια Αιολικά-Φόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Πίνακας 9: Ζυγοί Παραγωγής και Αιολικά-Σενάριο 2.

Όνομα Ζυγού	Τάση	Γωνία	P	Q	Τύπος Ζυγού
	(p.u)	(deg)	(MW)	(Mvar)	
Παραγωγή Αιολικά 1	1,02	12,75	30	-18,53	PQ
Παραγωγή Αιολικά 2	1,04	14,64	30	-18,53	PQ
Παραγωγή Αιολικά 3	1,04	14,64	30	-18,53	PQ
Αλιβέρι CC	1,01	0	180,15	287,12	SL

Θερμική Αποθήκευση

ΦΟΡΤΙΖΕΙ

Στο δεύτερο σενάριο σκοπός είναι η προσαρμογή του σταθμού σε επίπεδα λειτουργίας, τέτοια ώστε να είναι δυνατή η φόρτιση της θερμικής δεξαμενής. Για το λόγο αυτό θεωρείται πως μειώνεται η κάλυψη του φορτίου ως προς το διασυνδεδεμένο δίκτυο κατά 242 MW έτσι ο σταθμός τίθεται σε διαδικασία φόρτισης των θερμικών δεξαμενών.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 9 οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών των Αιολικών αυξάνονται σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, ωστόσο σε κάθε περίπτωση παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων του διαχειριστή, που ορίζει σύμφωνα με το πρότυπο επιτρεπόμενη ζώνη τάσης $\pm 10\%$ (δηλαδή μεταξύ 0,9 p.u και 1.1 p.u). Πιο συγκεκριμένα, για το ζυγό παραγωγής Αιολικών 1 η τάση αυξάνεται από 0,98 p.u σε 1,02 p.u, για το ζυγό παραγωγής Αιολικών 2 και για το ζυγό παραγωγής από 1,005 p.u σε 1,04 p.u.

Όμοια για τις τάσεις και για τις γωνίες των ζυγών φορτίου, από τον Πίνακα 10, για το ζυγό του φορτίου της Ν. Ευβοίας από 0,94 p.u σε 0,97 p.u, για τον ζυγό της Β. Εύβοιας από 1,04 p.u σε 1,06 p.u και για το φορτίο του διασυνδεδεμένου δικτύου από 0,99 p.u σε 1,04 p.u.

Το συνολικό φορτίο που εξυπηρετείται σε αυτό το σενάριο είναι 263 MW, και σε αυτή τη περίπτωση υπάρχουν 7 MW απώλειες δικτύου.

Πίνακας 10: Ζυγοί Φορτίων Εύβοιας-Σενάριο 2.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Φορτίου Ν. Εύβοιας	0,97	5,35	15	8,5	PQ
Ζυγός Φορτίου Β. Εύβοιας	1,06	-3,55	90	50	PQ
Ζυγός Φορτίου Διασύνδεσης	1,04	-5,1	158	90	PQ

Όσον αφορά τους ζυγούς μεταφοράς του δικτύου οι τάσεις και οι γωνίες φαίνονται στον Πίνακα 11. Και σε αυτή τη περίπτωση τηρούνται τα προβλεπόμενα όρια για το $\pm 10\%$ από την ονομαστική τάση, καθώς και για τους 2 ζυγούς η τάση είναι 1,02 p.u. .

Πίνακας 11: Ζυγοί Μεταφοράς-Σενάριο 2.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Αλιβερίου	1,02	-2,04			Ζυγός Μεταφοράς
Ζυγός Ν. Εύβοιας	1,02	-0,15			Ζυγός Μεταφοράς

Σενάριο 3 Ίδιο φορτίο- Περισσότερα Αιολικά-Φόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Ένα σενάριο που αξίζει να μελετηθεί για τη φόρτιση της θερμικής αποθήκευσης είναι η κάλυψη του ίδιου φορτίου με το σενάριο αναφοράς με τη μέγιστη δυνατή έγχυση αιολικών. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός του Αλιβερίου λειτουργεί στα 180 MW, και το φορτίο καλύπτεται από την παραγωγή αιολικών. Σε αυτή τη περίπτωση παραβιάζονται οι περιορισμοί της φόρτισης των γραμμών, καθώς ξεπερνούν το 100% (σύμφωνα με το λογισμικό η φόρτιση των γραμμών φτάνει το 310%), ωστόσο έχει αξία το ποιοτικό συμπέρασμα που προκύπτει καθώς η ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης δίνει τη δυνατότητα για μείωση της παραγωγής από τον σταθμό και ισόποση αύξηση της δυνατότητας εγκατάστασης Αιολικών για την κάλυψη του φορτίου. Στη περίπτωση της Εύβοιας μάλιστα που είναι ένα νησί με έντονο το ενδιαφέρον για ανεμογεννήτριες και λόγω της εγγύτητάς της και των διασυνδέσεων της με την ηπειρωτική Ελλάδα και τα νησιά των Κυκλάδων ένα τέτοιο σενάριο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στο εγγύς μέλλον.

Πίνακας 12: Ζυγοί Παραγωγής και Αιολικά-Σενάριο 3.

Όνομα Ζυγού	Τάση	Γωνία	P	Q	Τύπος Ζυγού
	(p.u)	(deg)	(MW)	(Mvar)	
Παραγωγή Αιολικά 1	1,1	47,34	150	-92,69	PQ
Παραγωγή Αιολικά 2	1,09	47,02	150	-92,96	PQ
Παραγωγή Αιολικά 3	1,15	43,68	150	-89,48	PQ
Αλιβέρι CC	1,09	0	178,41	369,55	SL
Θερμική Αποθήκευση	ΦΟΡΤΙΖΕΙ				

Φαίνεται λοιπόν πως σε συνθήκες ίσου φορτίου (από τον Πίνακα 13 προκύπτει πως το φορτίο σε αυτό το σενάριο είναι 505 MW) με το σενάριο αναφοράς (Πίνακας 7) και με αυξημένη έγχυση αιολικών, τα αιολικά μπορούν να χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του φορτίου, ο σταθμός παραγωγής του Αλιβερίου να λειτουργεί σε συνθήκες φόρτισης των θερμοδοχείων. Μια σωστή λοιπόν ενεργειακή διαχείριση σε συνδυασμό με την βέλτιστη επίλυση ροής ισχύος αποτελεί την πιο αποτελεσματική λύση για την αύξηση της χωρητικότητας φιλοξενείας στα δίκτυα[17]-[21].

Για τους ζυγούς του συστήματος λόγω της μέγιστης έγχυσης από τα Αιολικά ο ζυγός αναφοράς τέθηκε ίσος με 1,09 p.u. Στο συγκεκριμένο σενάριο παρατηρείται η λειτουργία των ζυγών αναφοράς, Παραγωγής Αιολικών 1 (στα 1,1 p.u) και 2 (στα 1,09) στα όρια που θέτει ο διαχειριστής, ενώ ο ζυγός Παραγωγής Αιολικών 3 παραβιάζει το όριο ονομαστικής τάσης $\pm 10\%$ καθώς εμφανίζει τάση 1,15 p.u.. Για τους ζυγούς των φορτίων, από τον Πίνακα 13, παρατηρείται πως οι ζυγοί φορτίου του Διασυνδεδεμένου Δικτύου και της Β. Εύβοιας βρίσκονται εκτός των ορίων, καθώς εμφανίζουν τάση 1,12 p.u και 1,14 p.u αντίστοιχα. Ο ζυγός του φορτίου της Ν. Εύβοιας με τάση 0,91 p.u βρίσκεται στο κάτω όριο που τίθεται στις περιπτώσεις των δικτύων.

Στη περίπτωση αυτή προκύπτουν θέματα ευστάθειας καθώς παραβιάζονται τα όρια των ζυγών του δικτύου, ωστόσο η μελέτη και η εξεύρεση του βέλτιστου σεναρίου ξεπερνά τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής.

Πίνακας 13: Ζυγοί Φορτίων Εύβοιας-Σενάριο 3.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Φορτίου Ν. Εύβοιας	0,91	17,21	15	8,5	PQ
Ζυγός Φορτίου Β. Εύβοιας	1,14	-2,91	90	50	PQ
Ζυγός Φορτίου Διασύνδεσης	1,12	-7,55	400	220	PQ

Από τον Πίνακα 14 και για τους ζυγούς μεταφοράς που έχουν ονομαστική τάση 150 kV, και οι 2 ζυγοί βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων ο ζυγός μεταφοράς του Αλιβερίου με τάση 1,08 p.u και ο ζυγός μεταφοράς της Ν. Εύβοιας με 1,009 p.u.. Για ζυγούς μεταφοράς της τάξης των 150 kV σύμφωνα με τα πρότυπα που έχουν αναφερθεί επιτρέπεται η λειτουργία τους μέχρι τα 170 kV δηλαδή μέχρι 1,13 p.u.

Πίνακας 14: Ζυγοί Μεταφοράς-Σενάριο 3.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Αλιβερίου	1,08	-1,58			Ζυγός Μεταφοράς
Ζυγός Ν. Εύβοιας	1,009	7,66			Ζυγός Μεταφοράς

Σενάριο 4 Μεγαλύτερο Φορτίο - Ίδια Αιολικά-Εκφόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Στο 4ο σενάριο μελετάται η συμπεριφορά του δικτύου σε περίπτωση αύξησης της ζήτησης του φορτίου τόσο από τους ζυγούς όσο και από το διασυνδεδεμένο δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα αιολικά εγχέουν στο σύστημα την ίδια ισχύ με το σενάριο αναφοράς και το επιπλέον φορτίο που δημιουργείται καλείται να το καλύψει η θερμική αποθήκευση του Αλιβερίου. Προφανώς θεωρείται πως οι θερμικές δεξαμενές είναι φορτισμένες επαρκώς ώστε να μπορέσουν να αποδώσουν τη μέγιστη ισχύ τους, δηλαδή τα 60 MW.

Πίνακας 15: Ζυγοί Παραγωγής και Αιολικά-Σενάριο 4.

Όνομα Ζυγού	Τάση	Γωνία	P	Q	Τύπος Ζυγού
	(p.u)	(deg)	(MW)	(Mvar)	
Παραγωγή Αιολικά 1	0,98	11,16	30	-18,53	PQ
Παραγωγή Αιολικά 2	0,98	11,17	30	-18,53	PQ
Παραγωγή Αιολικά 3	0,98	11,17	30	-18,53	PQ
Αλιβέρι CC	1,01	0	411,32	282,42	SL
Θερμική Αποθήκευση	1,01	0,34	60	36,8	PV

Στον Πίνακα 16 το φορτίο που καλύπτεται από την παραγωγή είναι ίσο με 555 MW , μεγαλύτερο από το σενάριο αναφοράς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι σημαντική η συμβολή της θερμικής αποθήκευσης για την κάλυψη του επιπλέον φορτίου που δημιουργείται τόσο από το φορτίο της Εύβοιας, όσο και από το φορτίο του διασυνδεδεμένου δικτύου. Έτσι η θερμική αποθήκευση μπορεί να λειτουργήσει ως ένας μηχανισμός ευελιξίας κάλυψης τυχόν αιχμών που δημιουργούνται, καθώς στη περίπτωση του Αλιβερίου αυτές οι θερμικές δεξαμενές έχουν ισχύ ικανή για την κάλυψη τέτοιων σεναρίων.

Λόγω της έγχυσης 90 MW από τα αιολικά ο ζυγός αναφοράς έχει οριστεί στο 1,01 p.u, όπως και στο σενάριο αναφοράς. Η επίλυση της ροής ισχύος από το DigSILENT δίνει τις τάσεις στους ζυγούς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 15 οι τάσεις των αιολικών είναι 0,98 p.u, ίδιες με το σενάριο αναφοράς, γεγονός που αποδεικνύει πως η θερμική αποθήκευση δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το σύστημα κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για τους ζυγούς του φορτίου, από τον Πίνακα 16, ο ζυγός του φορτίου της Ν. Εύβοιας έχει τάση 0,93 p.u, ελαφρώς μειωμένη από το σενάριο αναφοράς που η αντίστοιχη τάση του ζυγού ήταν 0,94 p.u. Αντίστοιχα η τάση του ζυγού φορτίου της Β. Εύβοιας αυξήθηκε κατά 0,01 p.u από 1,04 p.u σε 1,05 p.u. Τέλος ο ζυγός του διασυνδεδεμένου δικτύου έχει τη μεγαλύτερη αύξηση από 0,99 p.u σε 1,01 p.u.

Πίνακας 16: Ζυγοί Φορτίων Εύβοιας-Σενάριο 4.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Φορτίου Ν. Εύβοιας	0,93	2,56	25	14	PQ
Ζυγός Φορτίου Β. Εύβοιας	1,05	-6,11	110	65	PQ
Ζυγός Φορτίου Διασύνδεσης	1,01	-11,68	420	230	PQ

Από τον Πίνακα 17 και για τους ζυγούς μεταφοράς παρατηρείται η λειτουργία εντός των επιτρεπτών ορίων από τον διαχειριστή, καθώς και οι 2 ζυγοί καλύπτουν το όριο του $\pm 10\%$.

Πίνακας 17: Ζυγοί Μεταφοράς-Σενάριο 4.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Αλιβερίου	1,01	-4,22			Ζυγός Μεταφοράς
Ζυγός Ν. Εύβοιας	1	-2,46			Ζυγός Μεταφοράς

Σενάριο 5 Μηδενικά Αιολικά-Εκφόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η λειτουργία της θερμικής αποθήκευσης κατά την περίπτωση όπου τα αιολικά δεν παράγουν ισχύ. Φαίνεται λοιπόν η λειτουργία της θερμικής αποθήκευσης ως ένας μηχανισμός κάλυψης του φορτίου, καθώς αναλαμβάνουν 60 MW ισχύ που περισσεύουν από την παύση λειτουργίας των Αιολικών.

Πίνακας 18: Ζυγοί Παραγωγής και Αιολικά-Σενάριο 5.

Όνομα Ζυγού	Τάση	Γωνία	P	Q	Τύπος Ζυγού
	(p.u)	(deg)	(MW)	(Mvar)	
Παραγωγή Αιολικά 1					PQ
Παραγωγή Αιολικά 2					PQ
Παραγωγή Αιολικά 3					PQ
Αλιβέρι CC	1,01	0	425,34	247,8	SL
Θερμική Αποθήκευση	1,01	0,2	60	32,1	PV

Το φορτίο που εξυπηρετείται είναι ελαφρώς μειωμένο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, αλλά η ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης επιτρέπει την κάλυψη ενός μεγάλου μέρους του πλεονάσματος υπολειπόμενου φορτίου που δημιουργείται. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή το διαφορετικό προφίλ ζήτησης και παραγωγής που δημιουργείται λόγω της μεγαλύτερης διείσδυσης των ΑΠΕ, οδηγεί αναπόδραστα σε ένα διαφορετικό τρόπο αντιμετώπισης. Στο σενάριο αυτό φαίνεται η ευελιξία που παρέχει στο σύστημα η θερμική αποθήκευση όσον αφορά την ανάληψη φορτίου που προκύπτει από το μηδενισμό των αιολικών.

Πίνακας 19: Ζυγοί Φορτίων Εύβοιας-Σενάριο 5.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Φορτίου N. Εύβοιας	0,98	-5,91	15	8,5	PQ
Ζυγός Φορτίου B. Εύβοιας	1,05	-5,87	90	50	PQ
Ζυγός Φορτίου Διασύνδεσης	1,02	-10,98	380	210	PQ

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 20 ο ζυγός μεταφοράς του Αλιβερίου έχει τάση 1,02 p.u και ο ζυγός της N. Εύβοιας 1,015 p.u, επομένως και σε αυτή τη περίπτωση οι ζυγοί μεταφοράς λειτουργούν εντός των επιτρεπόμενων ορίων .

Πίνακας 20: Ζυγοί Μεταφοράς-Σενάριο 5.

Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
Ζυγός Αλιβερίου	1,02	-4,35			Ζυγός Μεταφοράς
Ζυγός Ν. Εύβοιας	1,015	-4,72			Ζυγός Μεταφοράς

2.5 Οικονομικά στοιχεία Θερμικής Αποθήκευσης στο Αλιβέρι

Το σενάριο πάνω στο οποίο βασίστηκε η συγκεκριμένη ανάλυση είναι αυτό της αποθήκευσης από τον εναλλάκτη θερμότητας και συγκεκριμένα για θερμοκρασία 222 °C (Κεφάλαιο 2.2.3). Ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης είναι αυτός που δίνει τη δυνατότητα για περισσότερη ηλεκτρική ισχύ όταν τα θερμοδοχεία είναι πλήρως φορτισμένα.

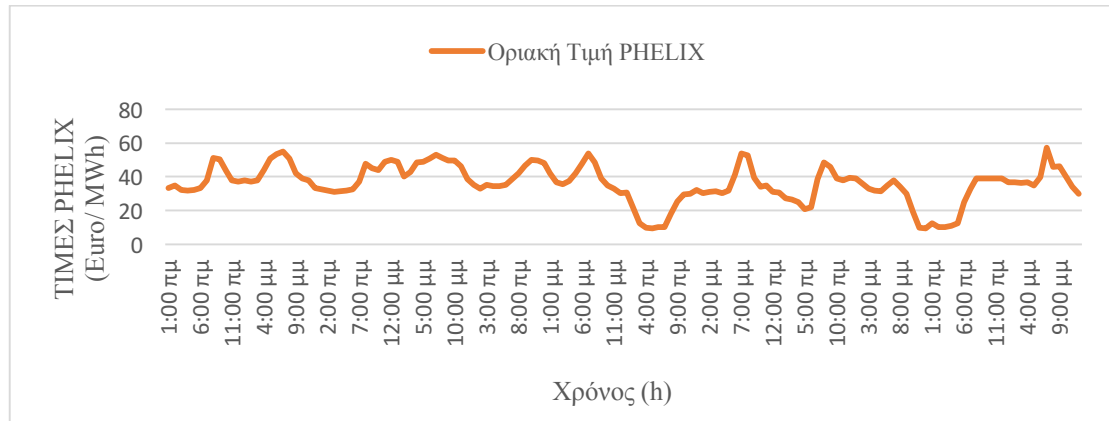
Η οικονομική ανάλυση για την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό του Αλιβερίου βασίστηκε στην διαμόρφωση της ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού έτσι ώστε κατά τη διάρκεια των χαμηλών οριακών τιμών συστήματος ο σταθμός παραγωγής να λειτουργεί σε συνθήκες φόρτισης του θερμοδοχείου, ενώ κατά το διάστημα των υψηλών οριακών τιμών η ισχύς εξόδου του σταθμού να είναι το σύνολο της παραγωγής συν την αποθηκευμένη ενέργεια.

Στο προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο διαχείρισης ο χειριστής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ενημερώνεται, π.χ. μια μέρα νωρίτερα (one day ahead), για τις οριακές τιμές ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς και στη συνέχεια ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης λαμβάνει αποφάσεις για την φόρτιση και την εκφόρτιση των θερμοδοχείων επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συγκεκριμένη μελέτη οι θερμικές δεξαμενές φορτίζονται για 2 ώρες. Μετά τη φόρτιση των δεξαμενών, αυτές θεωρούνται αυτόνομες μονάδες οι οποίες συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς. Οι δεξαμενές συνδέονται και παρέχουν θερμική ενέργεια σε δευτερογενείς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Στη περίπτωση του σταθμού παραγωγής στο Αλιβέρι:

- Κατά τη διάρκεια της ζήτησης αιχμής η παραγωγή του σταθμού είναι 492 MW, δηλαδή η παραγωγή του συνδυασμένου κύκλου και της αποθήκευσης.
- Κατά τη διάρκεια των χαμηλών φορτίων όπου τα θερμοδοχεία φορτίζονται η ηλεκτρική ισχύς του σταθμού περιορίζεται στα 269 MW.
- Τις υπόλοιπες ώρες ο σταθμός λειτουργεί κανονικά και παράγει 432 MW.

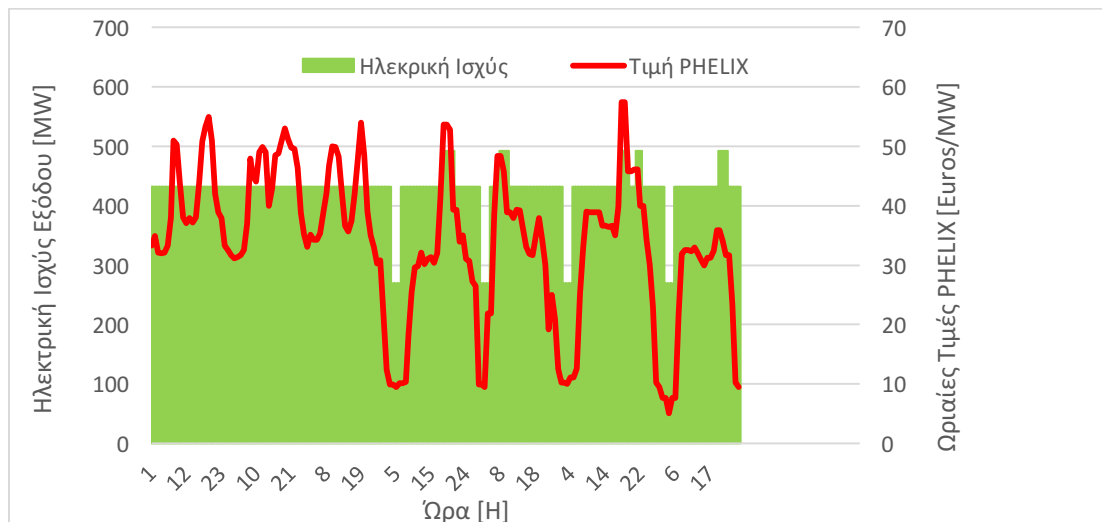
Προφανώς ένα τέτοιο σενάριο με την ευέλικτη λειτουργία των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ιδίως των σταθμών παραγωγής με καύσιμο το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο μπορεί να διαδραματίσει καίριο ρόλο στην επιτάχυνση της διεύθυνσης

των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Στη συγκεκριμένη οικονομική ανάλυση έχουν ληφθεί οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για την αγορά της Γερμανίας και της Αυστρίας (PHELIX) για την εβδομάδα 16/2/2017-22/2/2017 [18]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16 οι ωριαίες τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζουν σημαντική διακύμανση.



Σχήμα 2.16: Ωριαίες τιμές χρηματιστηρίου ενέργειας για την εβδομάδα 16/2/2017-22/2/2017.

Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η συνολική ισχύς εξόδου του σταθμού συναρτήσει των ωριαίων τιμών του Ευρωπαϊκού Χρηματιστηρίου για τη περίοδο 16/2/2016-22/2/2017 όπως αντλήθηκαν από τον αντίστοιχο ιστότοπο [18]. Οι μέγιστες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας συναντώνται κυρίως κατά τις απογευματινές ώρες, ενώ οι χαμηλότερες κατά τις πρώτες πρωινές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόζουμε ένα ενεργειακό μοντέλο διαχείρισης κατά το οποίο οι θερμικές δεξαμενές φορτίζουν κατά την διάρκεια των χαμηλών τιμών, και παρέχουν την επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια στις υψηλές τιμές. Το παρακάτω ενεργειακό μοντέλο προφανώς και δεν είναι μια βελτιστοποιημένη στρατηγική, αλλά μπορεί να παράσχει χρήσιμα συμπεράσματα. Δεδομένου πως οι τιμές από το PHELIX δημοσιοποιούνται μια μέρα νωρίτερα, το ενεργειακό σύστημα διαχείρισης του σταθμού είναι σε θέση να ξεκινήσει τις δευτερεύουσες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πριν από τις ώρες αιχμής, έτσι ώστε να υπάρχει γρήγορη ανταπόκριση και να είναι διαθέσιμη η μέγιστη ισχύς κατά τη διάρκεια της αιχμής της ζήτησης. Η ακριβής απόκριση για “black start” καθώς και η σχετική κατανάλωση ενέργειας δεν άπτονται της συγκεκριμένης διπλωματικής. Τα πρώτα αποτελέσματα στο συγκεκριμένο πεδίο πάντως δείχνουν πως οι θερμές εκκινήσεις των συγκεκριμένων μονάδων βρίσκονται μέσα στα 10 λεπτά και στα 10 δευτερόλεπτα όταν οι σταθμοί παραγωγής βρίσκονται στις κατάλληλες θερμοκρασίες[12-13]. Αποδόσεις απόκρισης κοντά σε αυτά τα χρονικά όρια θα επιτρέπουν σημαντικά οφέλη στον διαχειριστή σε θέματα πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας.



Σχήμα 2.17: Έξοδος Ηλεκτρικής Ισχύος σταθμού συναρτήσει και τιμές PHELIX 16/2/2017-22/2/2017.

Ως ημερήσιο όφελος του σταθμού για τη πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο ευρωπαϊκό χρηματιστήριο χωρίς τη θερμική αποθήκευση ορίζεται ως το άθροισμα των τιμών των 24ωρών επί την αντίστοιχη τιμή ενέργειας, δηλαδή

$$\text{Ημερήσιο όφελος} = \sum_{i=1}^{24} 432 * \text{Τιμή}(i) \quad (7)$$

Στον Πίνακα 21 φαίνονται τα ημερήσια οφέλη για τη συγκεκριμένη εβδομάδα αν στον σταθμό παραγωγής δεν υπήρχε θερμική αποθήκευση, (για τους αναλυτικούς ωριαίους υπολογισμούς βλέπε Παράρτημα Γ):

Πίνακας 21 : Αλιβέρι χωρίς Θερμική Αποθήκευση.

Ημερομηνία	Ημερήσιο Όφελος(€)
16/2/2017	421.200,00
17/2/2017	446.048,64
18/2/2017	416.711,52
19/2/2017	294.624,00
20/2/2017	323.460,00
21/2/2017	338.800,32
22/2/2017	250.300,80

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ημερήσιο όφελος για θερμική αποθήκευση 2 ωρών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ατμός εξάγεται στο 100% από τον εναλλάκτη θερμότητας φορτίζοντας τη θερμική δεξαμενή και οι δευτερεύουσες θερμικές μηχανές χρησιμοποιούνται όταν κρίνεται σκόπιμο.

Προφανώς και το αυτοματοποιημένο σύστημα θα αποφασίζει αν οι τιμές της συγκεκριμένης μέρας καθιστούν ωφέλιμη την αποθήκευση, δηλαδή αν μια μέρα η διακύμανση της τιμής είναι τέτοια η οποία δε καθιστά οικονομικά ωφέλιμη τη θερμική αποθήκευση, αυτή δε πραγματοποιείται. Για το λόγο αυτό τις ημέρες 16/2-18/2 το ημερήσιο όφελος παραμένει ίδιο με αυτό στο σενάριο χωρίς θερμική αποθήκευση. Σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα εντοπίζει τις 2 ώρες της ημέρας με τη χαμηλότερη

οριακή τιμή, και με τη προϋπόθεση πως προηγούνται των ωρών με τις υψηλότερες οριακές τιμές (προκειμένου να φορτίσουν αρχικά οι θερμικές δεξαμενές), και υπολογίζει το ωριαίο όφελος 1 για τη διάρκεια της φόρτισης των δεξαμενών

$$\text{Όφελος 1} = \text{Τιμή} (\min1 i) * 269 + \text{Τιμή} (\min2 i) * 269 , \quad (8)$$

όπου Τιμή (min1 i) και Τιμή (min2 i) οι 2 χαμηλότερες ωριαίες τιμές για τη μέρα i στο Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας.

Στη συνέχεια εντοπίζει τις 2 ώρες με τη μεγαλύτερη οριακή τιμή, προκειμένου να αποφασιστεί η εκφόρτιση των θερμικών δεξαμενών και υπολογίζει το ωριαίο όφελος 2 για αυτές τις 2 ώρες ως εξής:

$$\text{Όφελος 2} = \text{Τιμή} (\max1 i) * 492 + \text{Τιμή} (\max2 i) * 492 , \quad (9)$$

όπου Τιμή (max1 i) και Τιμή (max2 i) οι 2 υψηλότερες (ακριβότερες) ωριαίες τιμές για τη μέρα i στο Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας.

Για τις υπόλοιπες 20 ώρες της ημέρας το όφελος προκύπτει σύμφωνα με τον τύπο για το σενάριο χωρίς θερμική αποθήκευση. Έτσι το άθροισμα των 3 οφελών, δημιουργούν το ημερήσιο όφελος για το σταθμό. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον Πίνακα 22 (αναλυτικοί υπολογισμοί στο Παράρτημα Γ):

Πίνακας 22: Αλιβέρι με θερμική Αποθήκευση 2 ωρών.

Ημερομηνία	Ημερήσιο Όφελος(€)	Επιπλέον Ημερήσιο Κέρδος με θερμική αποθήκευση(€)
16/2/2017	421.200,00	-
17/2/2017	446.048,64	-
18/2/2017	416.711,52	-
19/2/2017	297.839,02	3.215,02
20/2/2017	325.944,74	2.484,74
21/2/2017	341.713,17	2.912,85
22/2/2017	252.431,13	2.130,33

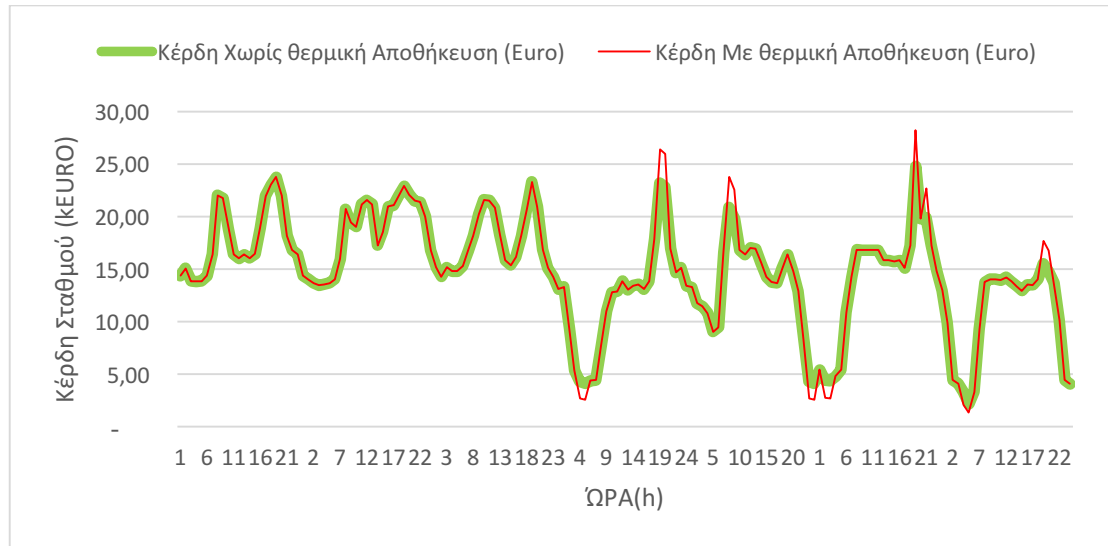
Έτσι το εβδομαδιαίο Όφελος και για τις 2 περιπτώσεις αθροίζοντας τα ημερήσια οφέλη φαίνεται στον Πίνακα 23:

Πίνακας 23 : Σύγκριση Εβδομαδιαίου Οφέλους.

Εβδομαδιαίο Όφελος χωρίς Θερμική Αποθήκευση(€)	Εβδομαδιαίο Όφελος με Θερμική Αποθήκευση(€)
2.491.145,28	2.501.888,22

Στο Σχήμα 2.18 παρουσιάζονται τα έσοδα του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής που λαμβάνονται κατά τη βδομάδα εφαρμογής του προτεινόμενου ενεργειακού μοντέλου, δηλαδή κατά την περίοδο 16/2/2017-22/2/2017. Σε αυτή τη περίπτωση ο ατμός εξάγεται από τον εναλλάκτη θερμότητας στο 100% για τη φόρτιση των θερμικών δεξαμενών και παράγονται επιπλέον 60 MW κατά τη διάρκεια των υψηλών τιμών του

PHELIX. Είναι προφανές πως τα έσοδα από την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης είναι μεγαλύτερα από τα έσοδα χωρίς αυτή, αυτό προκύπτει από το γεγονός πως το ενεργειακό μοντέλο διαχείρισης εκμεταλλεύεται τις υψηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής.



Σχήμα 2.18: Κέρδη Σταθμού Αλιβερίου χωρίς και με Θερμική Αποθήκευση τη βδομάδα 16/2/2017-22/2/2017.

Άρα το εβδομαδιαίο Κέρδος για το σταθμό παραγωγής του Αλιβερίου αν υιοθετούσε το σύστημα θερμικής αποθήκευσης θα ήταν 10.742,94 €. Θεωρώντας πως η διακύμανση των τιμών για αυτή τη βδομάδα του Φεβρουαρίου είναι ενδεικτική και για τις υπόλοιπες βδομάδες του έτους υπολογίζεται το ετήσιο όφελος (52 εβδομάδες) για τον σταθμό παραγωγής

$$\text{Ετήσιο Όφελος} = 52 \text{εβδομάδες} * 10.742,92 \frac{\text{€}}{\text{εβδομάδα}} = 558.632,88\text{€} . \quad (10)$$

Το κέρδος σε αυτή τη περίπτωση ορίζεται ως το μεγαλύτερο έσοδο του σταθμού παραγωγής για τη πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τον Lemmens [19], που αναλύει το κόστος κεφαλαίου εγκατάστασης οργανικών κύκλων Rankine, πρέπει να ληφθούν υπόψη επενδυτικά έξοδα περίπου 1000 €/kW για τους δευτερεύοντες σταθμούς παραγωγής. Με βάση αυτά τα στοιχεία κόστους όλα τα προτεινόμενα ενεργειακά μοντέλα διαχείρισης έχουν πολύ υψηλό επενδυτικό κόστος. Ωστόσο μια ακριβής οικονομική αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη την υπερπαραγωγή του σταθμού σε σχέση με την βασική δυνατότητά του, για τουλάχιστον 2 ώρες και τα επιπλέον οφέλη που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης της θερμικής αποθήκευσης και τη δυνατότητα ευελιξίας που δίνει στο σύστημα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το κόστος για την εγκατάσταση θερμικής αποθήκευσης 60MW ανέρχεται σε :

$$\text{Κόστος εγκατάστασης} = 1.000.000 \frac{\text{€}}{\text{MW}} * 60\text{MW} = 60.000.000\text{€} \quad (11)$$

Άρα τα συγκεντρωτικά στοιχεία Οφέλους-Κόστους φαίνονται στον Πίνακα 24:

Πίνακας 24: Συγκεντρωτικά στοιχεία Οφέλους- Κόστους Επένδυσης.

Κόστος Επένδυσης (€)	Ετήσιο Όφελος (€)
60.000.000	558.632,88

$$\text{Απόσβεση επένδυσης} = \frac{\text{Κόστος εγκατάστασης}}{\text{Ετήσιο Όφελος}} = \frac{60.000.000}{558.632,88} = 107 \text{ χρόνια.} \quad (12)$$

Από την εξίσωση (12) φαίνεται πόσο ακριβή επιλογή και επισφαλής είναι η επένδυση της θερμικής αποθήκευσης, καθώς **η απόσβεση γίνεται σε 107 χρόνια**. Βέβαια όπως επισημάνθηκε για την πλήρη και ουσιαστική οικονομική αξιολόγηση της θερμικής αποθήκευσης χρειάζεται να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες.

Τα κόστη της επένδυσης προφανώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τον κατάλληλο σχεδιασμό και την αντίστοιχη μελέτη εγκατάστασης της θερμικής αποθήκευσης είναι δυνατόν να μειωθούν, μια άλλη μελέτη για μεγάλης κλίμακας συστήματα οργανικού κύκλου Rankine αναφέρει πως το συνολικό κόστος μπορεί να προσεγγιστεί αναλογικά με την ισχύ και το κόστος ανά μονάδα ισχύος, μεταξύ 160 €/kW και 550 €/kW[20]. Τα συγκεκριμένα ποσά αναφέρονται σε εταιρείες που έχουν την τεχνογνωσία να συναρμολογήσουν και να κατασκευάσουν μόνες τους το εν λόγω σύστημα (assembling). Προφανώς μια τέτοια τιμή εγκατάστασης κάνει τη θερμική αποθήκευση ακόμα ελκυστικότερη επιλογή. Στη περίπτωση αυτή:

$$\text{Κόστος εγκατάστασης} = 160.000 \frac{\text{€}}{\text{MW}} * 60\text{MW} = 9.600.000\text{€}. \quad (13)$$

Άρα λαμβάνοντας το συγκεκριμένο κόστος εγκατάστασης από την Εξίσωση (13)

$$\text{Απόσβεση επένδυσης} = \frac{\text{Κόστος εγκατάστασης}}{\text{Ετήσιο Όφελος}} = \frac{9.600.000}{558.632,88} = 17 \text{ χρόνια,} \quad (14)$$

έτσι φαίνεται πως υπάρχει και το σενάριο **για απόσβεση σε 17 χρόνια**.

Λαμβάνοντας υπόψη πως ένα σύστημα με 1-2 ώρες αποθήκευσης που βασίζεται στις μπαταρίες έχει κόστος κεφαλαίου κοντά 600 \$ / kW, φαίνεται πως η θερμική αποθήκευση για μεγάλης κλίμακας θερμοκρασίες είναι λιγότερο δαπανηρή. Επιπλέον η ενεργειακή πυκνότητα του τετηγμένου άλατος HITEC είναι 46 kWh / m³, ενώ της συμβατικής μπαταρίας μεταξύ 90 και 200 kWh / m³. Άρα η θερμική αποθήκευση και από άποψη χώρου κρίνεται, έστω και με αυτόν τον απλό υπολογισμό ως πιο αποδοτική λύση[12-14].

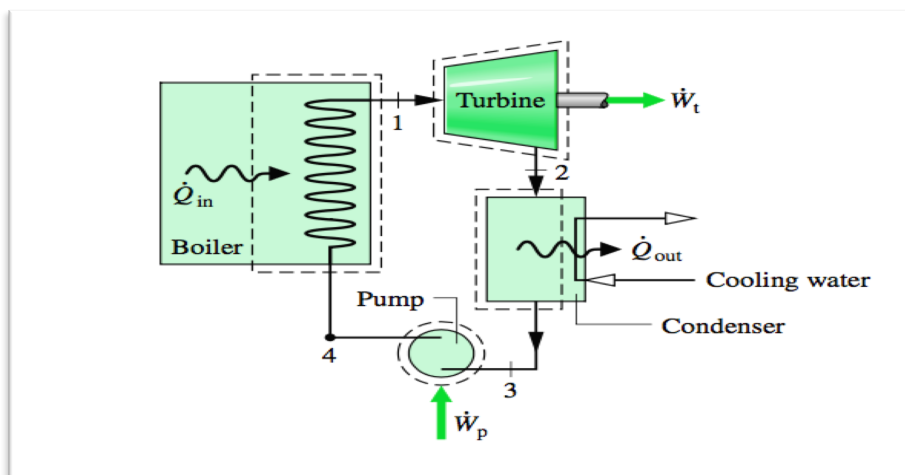
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟ

3.1 Μονάδες αμμοστροβίλου

3.1.1 Γενικά στοιχεία αμμοστροβίλου

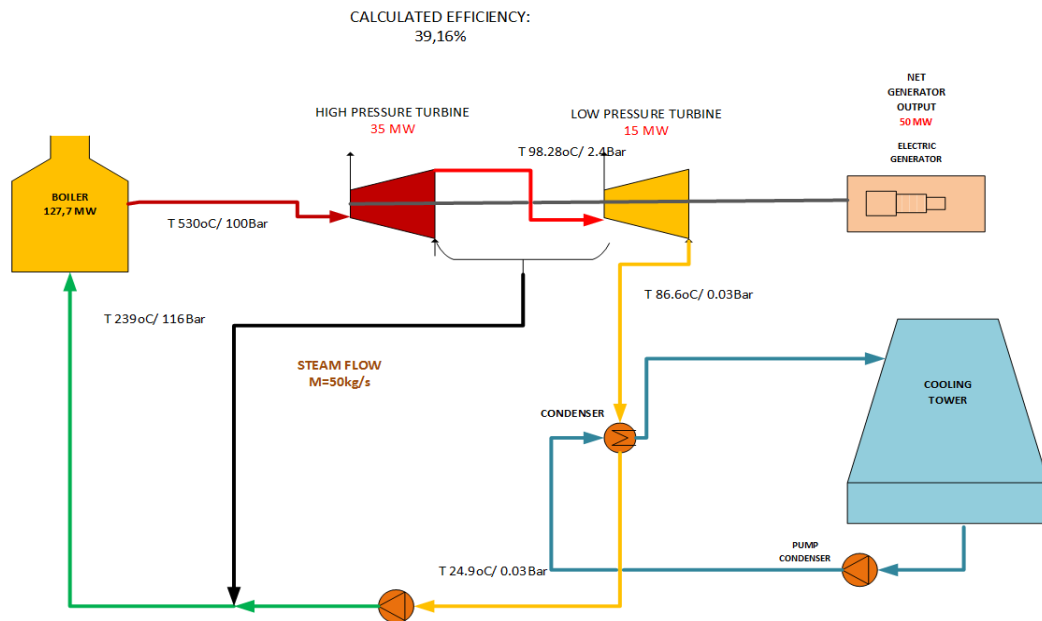
Κεντρική ιδέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση αμμοστροβίλου είναι η εκτόνωση αμμοϋ υψηλής πίεσης που κινεί μια γεννήτρια. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται μια απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση ενός αμμοστροβίλου.



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση μονάδας αμμοστροβίλου [9].

3.1.2 Περιγραφή της διάταξης του Αθερινόλακκου

Η μονάδα παραγωγής του Αθερινόλακκου λειτουργεί με καύσιμο το πετρέλαιο για τη θέρμανση του boiler και αποτελείται από 2 στροβίλους που έχουν μέγιστη ηλεκτρική ισχύ τα 50MW. Η θερμική είσοδος στο σταθμό μέσω του boiler είναι 128MW, η ηλεκτρική ισχύς 50MW και η θερμική απόδοση του κύκλου Rankine είναι 39,16% όταν αυτός λειτουργεί στο μέγιστο του. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του σταθμού.



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση Αθερινόλακκου.

Με βάση τη σχηματική αναπαράσταση του σταθμού παραγωγής (Σχήμα 3.2) και το Σχήμα 3.1 το εργαζόμενο μέσο ακολουθεί την εξής διαδικασία [9]:

- Διαδικασία 1-2: Εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού μέσω της τουρμπίνας υψηλής πίεσης
- Διαδικασία 2-3: Εκτόνωση του ατμού μέσω του στροβίλου της χαμηλής πίεσης
- Διαδικασία 3-4: Μεταφορά θερμότητας από το υγρό καθώς ρέει υπό σταθερή πίεση μέσω του συμπυκνωτή
- Διαδικασία 4-5: Συμπύεση του κορεσμένου υγρού στην αντλία τροφοδοσίας
- Διαδικασία 5-1: Ισοβαρής μεταβολή για την πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο υγρό μέσω του εναλλάκτη θερμότητας για να ολοκληρωθεί ο κύκλος

3.2 Ενσωμάτωση Θερμικής Αποθήκευσης στον σταθμό παραγωγής του Αθερινόλακκου

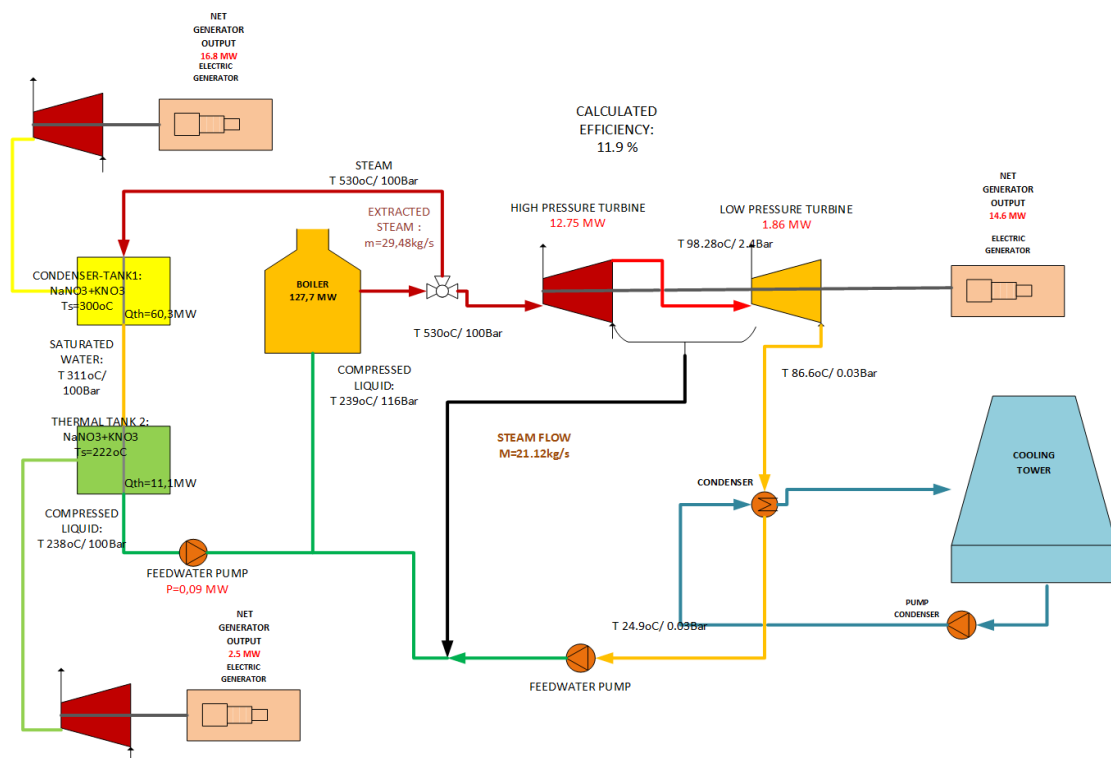
Τα βασικά χαρακτηριστικά της θερμικής αποθήκευσης προσδιορίζονται από τη θερμοκρασία και τα σημεία από τα οποία εξάγεται ο ατμός έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα κατάλληλα υλικά, το σωστό άλας για την αποθήκευση καθώς και η διαστασιολόγηση του θερμοδοχείου. Η εξαγωγή του ατμού γίνεται στα εξής σημεία:

- i. Στην είσοδο της τουρμπίνας της Υψηλής πίεσης σε θερμοκρασία 530°C και πίεση 100bar απομαστεύοντας ατμό $m=29,5 \text{ kg/s}$. Το σενάριο αυτό βασίζεται στα heat balance του κατασκευαστή, που βρίσκονται στο Παράρτημα Δ, έτσι ώστε ο boiler να λειτουργεί στο 100% και ο ατμός που περνάει μέσα από τους στροβίλους να ικανοποιεί το σενάριο του τεχνικού ελαχίστου.
- ii. Στην 3^η απομάστευση της τουρμπίνας Υψηλής πίεσης και πριν τον απαερωτή σε θερμοκρασία 213 °C και πίεση 7,8bar.

3.2.1 Θερμική Αποθήκευση στην είσοδο της τουρμπίνας Υψηλής Πίεσης

Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται ο μηχανισμός θερμικής αποθήκευσης στην είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης. Ο ατμός που απομαστεύεται πριν την είσοδο υψηλής πίεσης υφίσταται τις εξής διαδικασίες:

- Διαδικασία 1-α: Απομάστευση ατμού στην είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης, ακολουθούμενη από μεταφορά θερμότητας υπό σταθερή πίεση (ισοβαρής μεταβολή) και ταυτόχρονη συμπύκνωση της ροής του ατμού για τη φόρτιση της θερμικής δεξαμενής 1 που περιέχει υλικά με αλλαγή φάσης.
- Διαδικασία α-β: Ισοβαρής μεταβολή του εργαζόμενου ρευστού (κορεσμένο νερό) για απορρόφηση θερμότητας και φόρτιση μιας δεύτερης θερμικής δεξαμενής.
- Διαδικασία β-5: Συμπίεση του εργαζόμενου ρευστού (νερό) μέσω μιας αντλίας τροφοδοσίας και επιστροφή του στην κύρια ροή πριν την είσοδο στο λέβητα.



Σχήμα 3.3: Ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης στη τουρμπίνα υψηλής πίεσης.

Το επιτρεπόμενο όριο απομάστευσης ατμού για το συγκεκριμένο σταθμό παραγωγής ενέργειας ορίστηκε έως και 29,48 kg/s με βάση τα heat balance του κατασκευαστή και έπειτα από συνεννόηση με τη ΔΕΗ. Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με το Κεφάλαιο 2 και την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στο Αλιβέρι και κάνοντας χρήση της Εξίσωσης (1), των ενθαλιπών από το heat balance για λειτουργία 100% (Παράρτημα Β) και των ενθαλιπών από τους θερμοδυναμικούς πίνακες των Moran-Saripo [9], προκύπτει πως στη θερμική δεξαμενή 1 (Condenser-Thermal Tank 1)

μπορεί να αποθηκευτεί θερμική ενέργεια με μέγιστη θερμική ισχύ τα 60MWh/h, ενώ το αντίστοιχο μέγεθος για τη θερμική δεξαμενή 2 (Thermal Tank 2) είναι 11MWh/h.

Πιο συγκεκριμένα ο υπέρθερμος ατμός σε θερμοκρασία 530 °C και πίεση 100 bar εξάγεται πριν την είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης και συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση σε κορεσμένο νερό θερμοκρασίας 311 °C και πίεσης 100 bar. Το μέσο αποθήκευσης σε αυτή τη δεξαμενή είναι ένα μείγμα υλικών αλλαγής φάσης με νιτρικά (NaNO₃ + KNO₃) με σημείο τήξης τους 300 °C [10]. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι 11 °C πιο χαμηλά από την ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το θερμοδοχείο.

Όπως προκύπτει από την οικονομική ανάλυση για την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό του Αθρινόλακκου στη Κρήτη, απαιτείται δυνατότητα αποθήκευσης για τουλάχιστον 3 ώρες (βλ. Κεφάλαιο 3.5). Άρα η διαστασιολόγηση της δεξαμενής για το θερμικό δοχείο 1 (Thermal Tank 1- Condenser) θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη αυτή την προϋπόθεση.

Για 3 ώρες αποθήκευση η μέγιστη συνολική θερμική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί είναι 213 θερμικές MWh. Για την εύρεση του όγκου αρχικά υπολογίζεται η μάζα του άλατος που απαιτείται. Από τη στιγμή που βρισκόμαστε στην αλλαγή φάσης του άλατος η ειδική ενθαλπία τήξης (fusion enthalpy) ισούται με 108,7 kJ/kg[10]. Άρα από τις εξισώσεις (2) και (3) προκύπτει όγκος θερμοδοχείου ίσος με $v=3043 \text{ m}^3$.

Έτσι μια δεξαμενή κυλινδρικού σχήματος με τα παρακάτω στοιχεία που φαίνονται στον Πίνακα 1 είναι κατάλληλη (στους υπολογισμούς περιλαμβάνεται και ο όγκος των σωληνώσεων, όπου λήφθηκε πως απαιτείται επιπλέον όγκος 800 m³) :

Πίνακας 1: Στοιχεία θερμικού δοχείου 1.

Θερμικές MWh για αποθήκευση 2 ωρών	200
Όγκος Θερμοδοχείου (m ³)	4182
Ύψος(m)	20
Ακτίνα(m)	8,1
Διάμετρος(m)	16,3

Κάθετα και σε σειρά με τη θερμική δεξαμενή 1 υπάρχει μια δεύτερη θερμική δεξαμενή όπου το κορεσμένο νερό ψύχεται περαιτέρω υπό σταθερή πίεση και φορτίζει αυτή τη δεύτερη δεξαμενή. Η θερμοκρασία εισόδου αυτής της δεξαμενής είναι 311 °C και θερμοκρασία εξόδου 238 °C. Αυτή η δεξαμενή χρησιμοποιεί ένα κατάλληλο μείγμα με νιτρικά (NaNO₃ + KNO₃) και έχει σημείο τήξης τους 222 °C , ακριβώς 16°C πιο χαμηλά από την θερμοκρασία εξόδου του νερού από τη θερμοδεξαμενή.

Η δεξαμενή που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να ικανοποιεί το σενάριο για 3 ώρες θερμική αποθήκευση, όπως αναλύθηκε και εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Για 3 ώρες το μέγιστο που μπορεί να αποθηκευτεί είναι 32 θερμικές MWh.

Κάνοντας χρήση των Εξισώσεων (2), (3) προκύπτει ανάγκη για δεξαμενή με όγκο $v=558\text{m}^3$.

Έτσι μια δεξαμενή κυλινδρικού σχήματος με τα παρακάτω στοιχεία που φαίνονται στον Πίνακα 1 είναι κατάλληλη (στους υπολογισμούς περιλαμβάνεται και ο όγκος των σωληνώσεων, όπου λήφθηκε πως απαιτείται επιπλέον όγκος 135m^3) :

Πίνακας 2: Στοιχεία θερμικού δοχείου 2.

Θερμικές MWh για αποθήκευση 2 ωρών	33
Όγκος Θερμοδοχείου (m^3)	693
Ύψος(m)	10
Ακτίνα(m)	4,7
Διάμετρος(m)	9,4

Τέλος, μετά τις δύο δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης το νερό συμπιέζεται σε μια αντλία τροφοδοσίας και επιστρέφει στον λέβητα. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της πρόσθετης αντλίας τροφοδοσίας υπολογίζεται στα 0,9 MW.

Για τη θερμική δεξαμενή 1 και θεωρώντας ως $T_H=300^\circ\text{C}$ (573 K), δηλαδή τη θερμοκρασία που λιώνει το άλας, και $T_C=25^\circ\text{C}$ (298 K) τη θερμοκρασία περιβάλλοντος από την Εξίσωση (4) προκύπτει η απόδοση Novikov που είναι ίση με $\eta_N=0,28$, ενώ η αντίστοιχη απόδοση Carnot από την Εξίσωση (5) είναι $\eta_c=0,48$.

Αντίστοιχα για το θερμοδοχείο 2 και θεωρώντας ως $T_H=222\text{C}$ (495 K) και $T_C=25^\circ\text{C}$ (298 K) από την Εξίσωση (4) προκύπτει η απόδοση Novikov που είναι ίση με $\eta_N=0,22$, ενώ η αντίστοιχη απόδοση Carnot από την Εξίσωση (5) είναι $\eta_c=0,40$.

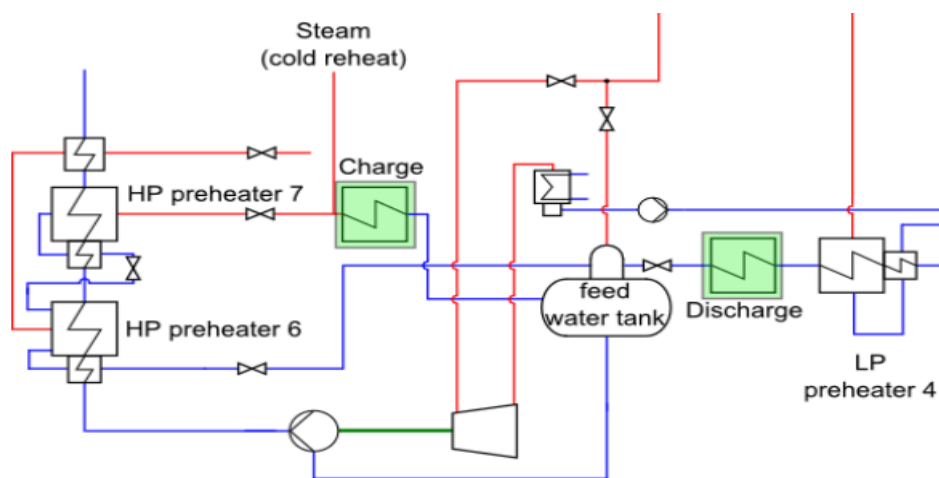
Με βάση τις παραπάνω αποδόσεις Novikov , τις δυνατότητες αποθήκευσης από τα θερμοδοχεία και την Εξίσωση (6) προκύπτει πως η επιπλέον ηλεκτρική ισχύς από Thermal Tank 1- Condenser είναι 17 MW, ενώ από Thermal Tank 2 η ίδια σχέση δίνει σαν αποτέλεσμα 2,5 MW επιπλέον ηλεκτρικής ισχύος

Η μερική απομάστευση ατμού στην είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης για τη φόρτιση των δύο θερμικών δεξαμενών οδηγεί σε πτώση της ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού καθώς από τα 50 MW πέφτει στα 14,6 MW (περίπου 70%) και η αντίστοιχη θερμική απόδοση της εγκατάστασης μειώνεται από 39,16% σε 11,9%.

Σύμφωνα με τα heat balance του κατασκευαστή (Παράρτημα Δ)το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού είναι 20 MW, όπως φαίνεται από την παραπάνω ανάλυση με την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης δίνεται η δυνατότητα ο σταθμός να λειτουργεί σε χαμηλότερα φορτία .

3.2.2 Θερμική Αποθήκευση στην 3η απομάστευση της τουρμπίνας Υψηλής πίεσης και πριν τον deaerator

Η θερμική αποθήκευση μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα μετατόπισης μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου φορτίου. Όταν ένας σταθμός παραγωγής λειτουργεί στο ελάχιστο φορτίο, η θερμική αποθήκευση μπορεί να φορτίζεται από τον κύκλο νερού-υδρατμού. Αυτή η διαδικασία φόρτισης της δεξαμενής οδηγεί σε μείωση του ηλεκτρικού ελαχίστου της γεννήτριας. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μέγιστου φορτίου η θερμική δεξαμενή μπορεί να παρεμβληθεί κατά τη διαδικασία προθέρμανσης, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ πλήρους φορτίου, παρακάμπτοντας ουσιαστικά μία απομάστευση. Η διάταξη είναι αυτή που περιγράφεται από τους M. Richter, K. Gorner στην εργασία τους “Flexibilization of coal fired power plants by dynamic simulation” [8] και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.3: Απόσπασμα του διαγράμματος της διαδικασίας ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στη διαδικασία προθέρμανσης [8].

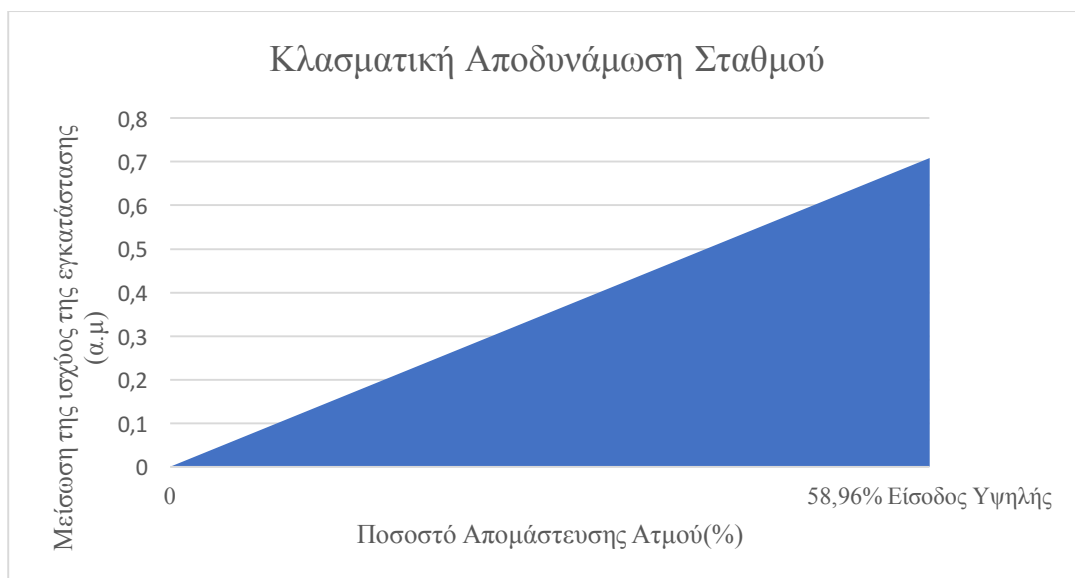
Η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στο παρόν σύστημα έχει πραγματοποιηθεί με την προσθήκη ενός καταναλωτή θερμότητας (charging) και μιας πηγής θερμότητας (discharging). Στη περίπτωση του Αθρινόλακκου είναι δυνατή η προσθήκη μιας θερμικής δεξαμενής στην 3^η απομάστευση του απαερωτή έτσι ώστε η συγκεκριμένη θερμική δεξαμενή να λειτουργεί κατά τη διάρκεια του πλήρους φορτίου ως αναθέρμανση του κύκλου νερού-υδρατμού, καταργώντας ουσιαστικά την 4^η απομάστευση της τουρμπίνας υψηλής πίεσης, επιτρέποντας περισσότερο ατμό να περάσει από την τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Το συγκεκριμένο σενάριο αυξάνει τη δυναμική του σταθμού στη λειτουργία πλήρους φορτίου κατά 2 ηλεκτρικά MW.

Πρακτικά, το παραπάνω μοντέλο ενσωμάτωσης θερμικής αποθήκευσης παρέχει μόλις 2 MW επιπλέον ισχύ κατά τη διάρκεια του μέγιστου φορτίου, ενώ το σύστημα θερμικής αποθήκευσης που προτείνεται στη παρούσα διπλωματική τουλάχιστον 17 MW (αν γίνει χρήση μόνο της μιας θερμικής δεξαμενής για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Επιπλέον στην παρούσα διπλωματική η χρήση του συστήματος θερμικής αποθήκευσης επεκτείνεται, αντί να αποτελεί μέρος της προθέρμανσης του κύκλου νερού-υδρατμού, λειτουργεί ως ανεξάρτητη-αυτόνομη θερμική πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας στο δίκτυο.

3.3 Αποτελέσματα στον Αθερινόλακκο από τις Μελέτες Περιπτώσεων

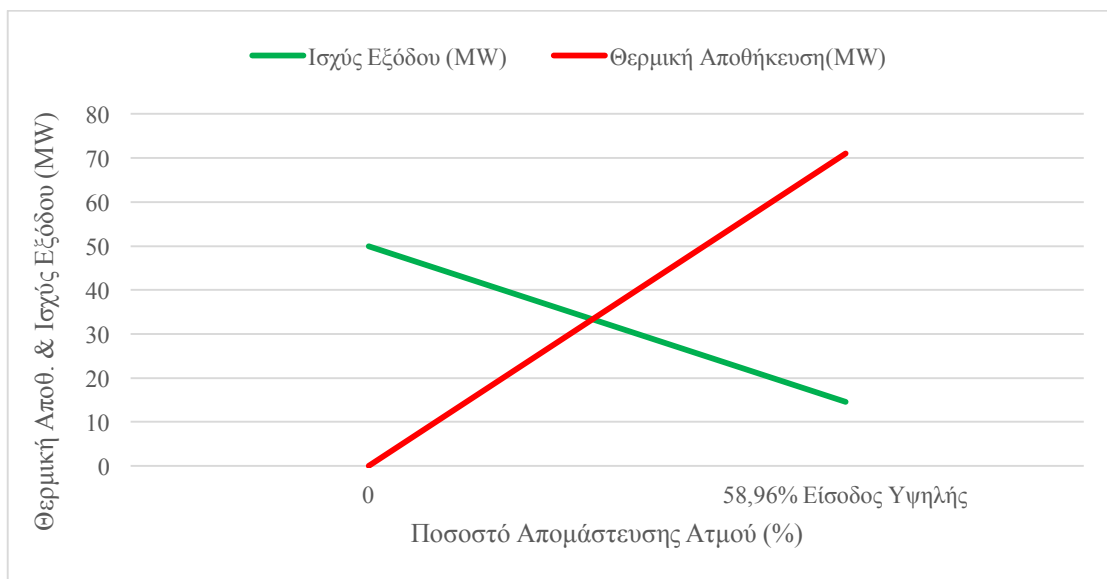
3.3.1 Συμπεριφορά της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στον Αθερινόλακκο επηρεάζει κάποια βασικά στοιχεία της παραγωγικής διαδικασίας του σταθμού. Η κλασματική αποδυνάμωση του σταθμού, δηλαδή ο λόγος της εξόδου της γεννήτριας με απόμαστευση ατμού προς την έξοδο της γεννήτριας χωρίς απομάστευση, δηλαδή για έξοδο 50 MW φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Κλασματική Μείωση εγκατάστασης.

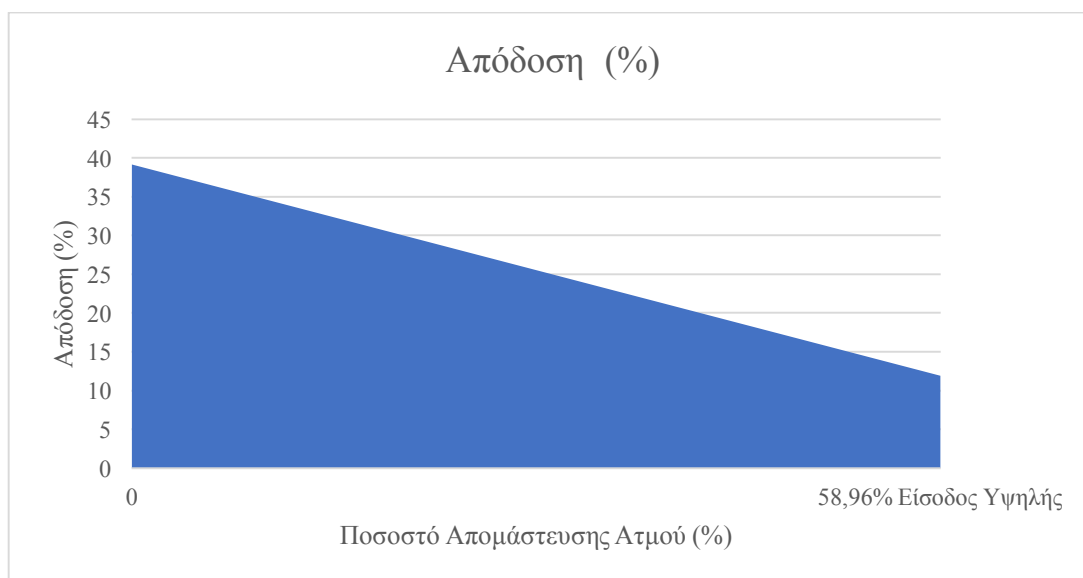
Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η ισχύς εξόδου και η θερμότητα που αποθηκεύεται στις 2 περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα χωρίς την ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης και για ισχύ εισόδου από το boiler 127,7 MW ο σταθμός παράγει 50 MW και δεν αποθηκεύει, ενώ στο σενάριο που απομαστεύονται 29,48 kg/s από την είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης για την ίδια ισχύ εισόδου (127,7 MW) η έξοδος ισούται με 14,6 MW και παράλληλα αποθηκεύονται 71 MWh/h. Έτσι δίνεται στον σταθμό παραγωγής η δυνατότητα μείωσης της ηλεκτροπαραγωγής, όταν κρίνεται σκόπιμο, και ταυτόχρονα η αποθήκευση θερμικής ενέργειας η οποία αξιοποιείται στην υψηλή ζήτηση.



Σχήμα 3.5: Ισχύς εξόδου ατμοστροβίλου και αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Με βάση τα παραπάνω σχήματα φαίνεται πως είναι δυνατή η χρήση της υφιστάμενης μονάδας για ευέλικτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά το φορτίο που μπορεί να αναλάβει ο σταθμός μειώνεται έως και 70% από το ονομαστικό. Παράλληλα η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια αυξάνεται αντίστοιχα με την απομάστευση του ατμού από την είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης φτάνοντας μέχρι τα 70 MW, όσο η καθαρή ισχύς εξόδου του σταθμού μειώνεται ως και 70%, από τα 50 MW στα 14,6MW.

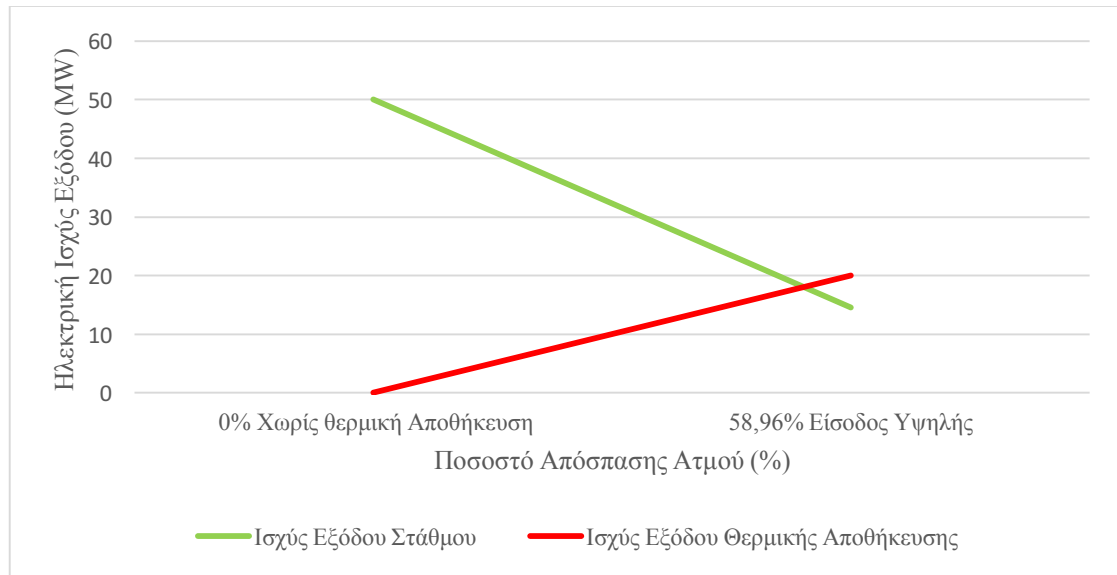
Δεδομένου πως η θερμική ισχύς εισόδου παραμένει σταθερή και ίση με 127,6MW και για τα 2 σενάρια η απόδοση του ατμοστροβίλου μειώνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, καθώς απομαστεύεται ο ατμός. Έτσι από 39,16% (λειτουργία πλήρους φορτίου) που είναι η απόδοση χωρίς θερμική αποθήκευση μειώνεται στα 11,9%.



Σχήμα 3.6: Απόδοση ατμοστροβίλου.

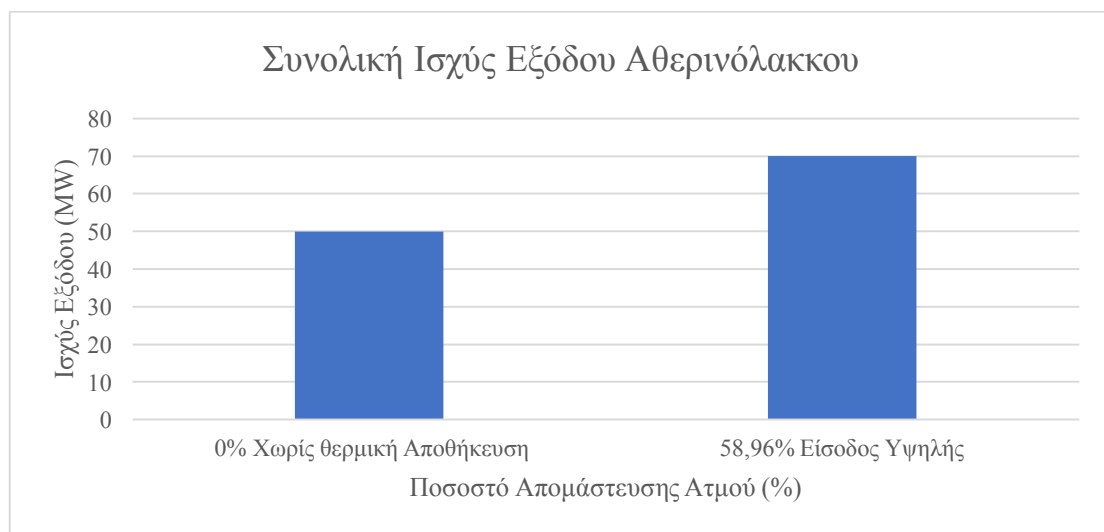
3.3.2 Συνολική Παραγωγή κατά την εκφόρτιση της θερμικής αποθήκευσης

Η βασική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού κατά τη διάρκεια φόρτισης της θερμικής αποθήκευσης μαζί με την μέγιστη δευτερεύουσα ισχύ που προκύπτει κατά τη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια όσο τα θερμοδοχεία εκφορτίζονται φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Βασική Ισχύς Εξόδου κατά τη διάρκεια φόρτισης της θερμικής αποθήκευσης και Ισχύς Εξόδου Θερμικής Αποθήκευσης.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να δοθεί στο σύστημα κατά τη διάρκεια εκφόρτισης των θερμικών δοχείων στις περιόδους υψηλής ζήτησης, όταν η αποθηκευμένη θερμότητα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τις δευτερεύουσες μονάδες ισχύος λειτουργώντας προσθετικά στην βασική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού, δηλαδή τα 50MW.



Σχήμα 3.8: Ισχύς Εξόδου χωρίς και με Θερμική Αποθήκευση.

Παρατηρείται πως όταν ο ατμός αποσπάται από την είσοδο της τουρμπίνας υψηλής πίεσης, η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς ανέρχεται στα 70 MW. Αυτή η δυνατότητα, για επιπλέον 40% παραγωγή από την λειτουργία πλήρους φορτίου του σταθμού, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα για μείωση 70% της βασικής ονομαστικής ισχύος του σταθμού κατά τη διάρκεια φόρτισης των θερμικών δεξαμενών αντιπροσωπεύει μια ευέλικτη λειτουργία του σταθμού και μια αποδεκτή ικανότητα παραγωγής ιδίως κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής/χαμηλού φορτίου [12-14].

3.4 Μελέτη στατικής ευστάθειας της Θερμικής Αποθήκευσης στον σταθμό παραγωγής του Αθερινόλακκου

3.4.1 Το σύστημα της Κρήτης

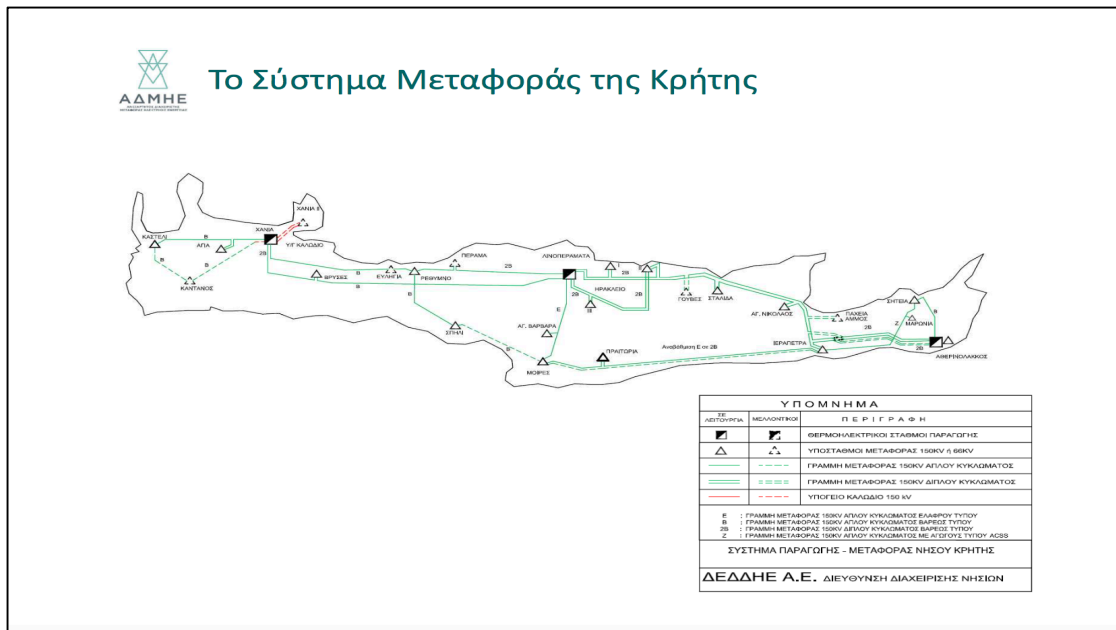
Στη Κρήτη λειτουργούν 3 θερμικοί σταθμοί παραγωγής συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 820 MW, με μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ θέρους 695,86 MW αυτοί είναι :

- ΑΗΣ Χανίων: 9 μονάδες με καύσιμο το diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 335,19 MW, με αποδιδόμενη καθαρή ισχύ θέρους 272,11 MW
- ΑΗΣ Λινοπεραμάτων: 14 μονάδες με καύσιμο μαζούτ και diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 272,59 MW, με αποδιδόμενη καθαρή ισχύ θέρους 232,75 MW
- ΑΗΣ Αθερινόλακκου: 4 μονάδες με καύσιμο μαζούτ, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 202,24 MW, με αποδιδόμενη καθαρή ισχύ θέρους 191 MW

Επιπλέον στην Κρήτη λειτουργούν 33 αιολικά πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 200 MW [22].

Το μέγιστο φορτίο που έχει καταγραφεί για τη Κρήτη με βάση τα στοιχεία μέχρι το 2015 είναι 639 MW [22].

Για την περίπτωση της Κρήτης υπήρχε η δυνατότητα οι προσομοιώσεις να γίνουν πάνω σε πραγματικά δεδομένα για τους σταθμούς παραγωγής, τα φορτία, τις γραμμές μεταφοράς και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αυτά δόθηκαν από τον ΔΕΔΔΗΕ. Παρακάτω στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται το σύστημα μεταφοράς της Κρήτης στο οποίο παρουσιάζονται και οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής.



Σχήμα 3.9 : Το σύστημα παραγωγής-μεταφοράς της Κρήτης[22].

3.4.2 Μελέτες περιπτώσεων

Στη περίπτωση της Κρήτης υπήρχε η δυνατότητα οι προσομοιώσεις των ροών ισχύος να γίνουν πάνω σε πραγματικά δεδομένα για τους σταθμούς παραγωγής, τα αιολικά και τις γραμμές μεταφοράς μέσω της εισαγωγής ενός αρχείου PSS/E στο DIgSILENT, το οποίο δόθηκε από τον ΔΕΔΔΗΕ για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής.

Για τις προσομοιώσεις το σύστημα της θερμικής αποθήκευσης ενσωματώνεται στο ζυγό του Αθερνολακκου που βρίσκεται στο νομό Λασιθίου της Κρήτης. Επιπλέον για το σταθμό παραγωγής στα Λινοπεράματα μέγιστης ισχύος θέρους 232,75 MW έχει θεωρηθεί ο αντίστοιχος σταθμός στη θέση Κορακιά ισχύος 235 MW. Ένα έργο το οποίο έχει ανασταλεί προσωρινά, ωστόσο η εγγύτητα των 2 περιοχών και η παρόμοια ισχύς ουσιαστικά δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

Επιπλέον πρέπει να τονιστεί πως στη περίπτωση της Κρήτης λόγω της ύπαρξης παλαιάς τεχνολογίας αιολικών, αυτά λειτουργούν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,86. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας απορροφούν άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους υπό σταθερό συντελεστή ισχύος, ωστόσο η ύπαρξη πυκνωτών στους ζυγούς των αιολικών βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος τους (συντελεστής ισχύος πάνω από 0,95. Για τα φορτία αντίστοιχα ο συντελεστής ισχύος έχει οριστεί στο 0.875.

Το σύστημα αποτελείται από 143 ζυγούς, 75 γραμμές μεταφοράς, 76 μετασχηματιστές και 33 φορτία. Παρακάτω αναλύονται 4 σενάρια όπου εξετάζονται οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών παραγωγής ανάλογα με το φορτίο, την έγχυση ενεργού ισχύος από τα αιολικά, καθώς και από τη διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης της θερμικής αποθήκευσης. Επιπλέον έχουν ληφθεί οι περιορισμοί για την παραγωγή της άεργου ισχύος στη διαδικασία επίλυσης του αλγορίθμου Newton-Raphson της ροής ισχύος ώστε να καλύπτεται η άεργος τόσο για τα φορτία όσο και για τα αιολικά.

Για το μη διασυνδεδεμένο σύστημα ισχύει το άρθρο 53 του κώδικα ΜΔΝ (Μη Διασυνδεδεμένο Δίκτυο), σε αυτόν περιγράφονται τα επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας

του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 15 άρθρο 53 τα όρια αποδεκτών αποκλίσεων από την ονομαστική τάση του δικτύου στο σημείο σύνδεσης σταθμού ή μονάδας παραγωγής καθορίζονται με βάση το πρότυπο EN 50160. Έτσι τα επιτρεπόμενα όρια καθορίζονται ως εξής[20]:

α) Για το δίκτυο Χαμηλής Τάσης: $\pm 10\%$

β) Για το δίκτυο Μέσης Τάσης : $\pm 10\%$

γ) Για το δίκτυο Υψηλής Τάσης: από -5% έως και 8% υπό κανονικές συνθήκες και από -10% έως και $+13\%$ υπό έκτακτες συνθήκες.

Σενάριο 1-Σενάριο Αναφοράς

Πίνακας 3 : Ζυγοί Παραγωγής-Σενάριο 1.

Πληροφορίες Ζυγών						
No	Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
361	Κοράκια	1,01	3,57	235	126,74	PV
500	Χανιά CC2	1,01	2,57	55	32,58	PV
80	Αθερινόλακος D1	1,02	6,69	40	24,92	PV
81	Αθερινόλακος D2	1,02	6,69	40	24,92	PV
85	Αθερινόλακος S2	1,02	6,35	50	33,28	PV
20	Χανια CC1	1,01	1,88	35	23,49	PV
21	Χανια CC2	1,01	1,88	35	23,49	PV
50	Χανιά ΑΣ11	1,01	0	29	31,45	SL
84	Αθερινόλακος S1	1,02	6,35	50	33,28	PV
83	Θερμική Αποθήκευση		ANENEPTH			PV

Για την πρώτη μελέτη περίπτωσης θεωρούμε τα παρακάτω δεδομένα όπως προέκυψαν από το λογισμικό.

Πίνακας 4 : Γενικά στοιχεία-Σενάριο 1.

	MW
Παραγωγή	665,84
Φορτίο	651,51
Απώλειες Δικτύου	14,33
Αιολικά	96,84
Σύνολο θερμικών μονάδων	569

Ως σενάριο αναφοράς ορίστηκε το σενάριο που προϋπήρχε στο λογισμικό και όριζε ως ζυγό αναφοράς τον ζυγό 50 (ΧΑΝΙΑ ΑΣ 11) με τάση 1,01 p.u και έγχυση αιολικών 96,84 MW. Όπως αναφέρει και ο Stetz et al. η ύπαρξη παραγωγής από ΑΠΕ οδηγεί στο να τεθεί η τάση του ζυγού αναφοράς λίγο μεγαλύτερη από το 1 p.u, ενώ η χωρητικότητα φιλοξενίας του δικτύου μπορεί να μεγιστοποιηθεί με την κατάλληλη αύξηση της τάσης μέχρι το 1,09 για τη μέγιστη έγχυση αιολικών [17].

Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι θερμικές μονάδες παραγωγής της Κρήτης οι τάσεις, οι γωνίες και οι εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος.

Από τον Πίνακα 4 το φορτίο που εξυπηρετείται στο εν λόγω σενάριο είναι 651,51 MW.

Οι θερμικές μονάδες παράγουν 569 MW. Στο σενάριο αυτό θεωρείται πως δεν υπάρχει ενσωματωμένο σύστημα της θερμικής αποθήκευσης. Παρατηρείται η λειτουργία των μονάδων στα επιτρεπόμενα όρια τάσεων σύμφωνα με τα πρότυπα.

Ο ατμοστρόβιλος 1 του Αθερινόλακκου λειτουργεί στο τεχνικό μέγιστό του. Με βάση αυτό το σενάριο (σενάριο αναφοράς) θα μελετηθεί στη συνέχεια η συμπεριφορά του δικτύου με την ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεγαλύτερη ή και μικρότερη διείσδυση Αιολικών, αλλά και μεγαλύτερο φορτίο.

Σενάριο 2 Λιγότερο Φορτίο – Μεγαλύτερη διείσδυση αιολικών- Φόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Πίνακας 5: Ζυγοί Παραγωγής-Σενάριο 2.

Πληροφορίες Ζυγών						
No	Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
361	Κοράκια	1,01	2,91	235	129,16	PV
500	Χανιά CC2	1,01	1,55	39,8	24,28	PV
80	Αθερινόλακος D1	1,02	4,49	38,5	27,5	PV
81	Αθερινόλακος D2	1,02	4,49	38,5	27,5	PV
85	Αθερινόλακος S2	1,02	3,15	50	36	PV
20	Χανια CC1	1,01	2,55	36,4	18,11	PV
21	Χανια CC2	1,01	2,55	36,4	18,11	PV
51	Χανια ΑΣ12	1,01	0,89	33,2	33,2	PV
50	Χανιά ΑΣ11	1,03	0	20,37	30	SL
84	Αθερινόλακος S1	1,02	0,97	14,6	35,99	PV
83	Θερμική Αποθήκευση		ΦΟΡΤΙΖΕΙ			PV

Πίνακας 6: Γενικά στοιχεία-Σενάριο 2.

	MW
Παραγωγή	655,05
Φορτίο	639,4
Απώλειες Δικτύου	15,65
Αιολικά	120,78
Σύνολο Θερμικών Μονάδων	534,27

Στο συγκεκριμένο σενάριο υπάρχει μια μικρή πτώση του φορτίου και ταυτόχρονη αύξηση των αιολικών όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 6. Για την κάλυψη της άεργου ισχύος που δημιουργείται είναι απαραίτητη σε αυτό το σενάριο και η λειτουργία της μονάδας ΧΑΝΙΑ ΑΣ12, καθώς όπως προαναφέρθηκε τα αιολικά λειτουργούν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως θα μπορούσε να γίνει μεγαλύτερη αντιστάθμιση από τους πυκνωτές, ωστόσο προτιμήθηκε να μην πειραχτούν τα δεδομένα του προγράμματος και να ενεργοποιηθεί μια επιπλέον μονάδα.

Στο συγκεκριμένο σενάριο με τη χρήση της θερμικής αποθήκευσης είναι δυνατό ο σταθμός να λειτουργήσει κάτω από το τεχνικό του ελάχιστο και ταυτόχρονα να φορτίζει τα θερμοδοχεία, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5. Δηλαδή για το ίδιο φορτίο, ενώ αποθηκεύουμε, ταυτόχρονα μειώνουμε την ισχύ του αμμοστρόβιλου για να επιτρέψουμε την μεγαλύτερη διείσδυση από τα Αιολικά.

Ο σταθμός παραγωγής συνεχίζει και λειτουργεί κανονικά, κάτω από το τεχνικό του ελάχιστο που είναι τα 20 MW, και το φορτίο που περισσεύει ουσιαστικά το αναλαμβάνουν τα Αιολικά, εφόσον υπάρχει η διαθέσιμη ισχύς. Έτσι δημιουργείται ένας μηχανισμός ευελιξίας, όπου όταν υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ισχύς από ΑΠΕ, δίνεται η δυνατότητα στον σταθμό παραγωγής να λειτουργεί ο boiler στο μέγιστο του, και τον επιπλέον ατμό να τον απομαστεύει για τη φόρτιση θερμικών δεξαμενών που λειτουργούν σαν δευτερεύουσες θερμικές πηγές, όπως περιγράφηκε στη διάταξη του κεφαλαίου 3.2.1. Επιπλέον από τη στιγμή που ο boiler του σταθμού λειτουργεί κανονικά παράγοντας ατμό που αντιστοιχεί στο τεχνικό μέγιστο του σταθμού είναι πολύ πιο εύκολη η μετάβαση σε υψηλότερη ισχύ, έτσι σε περίπτωση απότομης μείωσης των αιολικών ή επιπλέον ζήτησης φορτίου ο διαχειριστής μπορεί απλά με το κλείσιμο μιας βαλβίδας να ανεβάσει την παραγωγή από τον αμμοστρόβιλο 1 του Αθερινολάκκου, ενώ σε περίπτωση που έχουν φορτιστεί και τα θερμοδοχεία υπάρχει μια επιπλέον μονάδα ισχύος για την αντιμετώπιση τυχόν αιχμών.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των ροών ισχύος παρατηρείται μια πτώση στις γωνίες των ζυγών, εκτός από τους ζυγούς παραγωγής των Χανίων όπου παρατηρείται μια μικρή αύξηση. Η τάση του ζυγού αναφοράς (SL) έχει οριστεί στο 1,03 α.μ. λόγω της αύξησης των αιολικών και ακολουθώντας τη μεθοδολογία του Stetz [17].

Στα επόμενα σενάρια φαίνεται πως η θερμική αποθήκευση μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά είτε σε μια ενδεχόμενη αύξηση του φορτίου, είτε σε μια μείωση της παραγωγής των αιολικών.

Σενάριο 3 Ίδιο Φορτίο-Λιγότερη Διεϊσδυση Αιολικών- Εκφόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Πίνακας 7: Ζυγοί Παραγωγής-Σενάριο 3.

Πληροφορίες Ζυγών						
No	Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
361	Κοράκια	1,01	3,63	235	115,27	PV
500	Χανιά CC2	1,01	2,58	55	30,51	PV
80	Αθερινόλακος D1	1,02	6,86	40	18,67	PV
81	Αθερινόλακος D2	1,02	6,86	40	18,67	PV
85	Αθερινόλακος S2	1,02	6,53	50	24,9	PV
20	Χανια CC1	1,01	1,89	35	22,02	PV
21	Χανια CC2	1,01	1,89	35	22,02	PV
50	Χανιά ΑΣ11	1,005	0	29	29,48	SL
84	Αθερινόλακος S1	1,02	6,53	50	24,9	PV
83	Θερμική Αποθήκευση	1,02	4,36	20	13,4	PV

Πίνακας 8: Γενικά στοιχεία-Σενάριο 3.

	MW
Παραγωγή	663,86
Φορτίο	651,51
Απώλειες Δικτύου	12,35
Αιολικά	74,86
Σύνολο θερμικών μονάδων	589

Στο σενάριο αυτό φαίνεται η χρησιμότητα της θερμικής αποθήκευσης στη στήριξη του φορτίου. Από τον Πίνακα 8 παρατηρείται πως τα αιολικά υποχωρούν κατά 22 MW σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, ενώ το φορτίο παραμένει σταθερό. Το έλλειμα που δημιουργείται καλύπτεται από την ύπαρξη και τη πλεονάζουσα ισχύ που δύναται να προσφέρει η θερμική αποθήκευση. Στη περίπτωση αυτή φαίνεται το πλεονέκτημα της θερμικής αποθήκευσης στο γεγονός πως επιτρέπει στον ατμοστρόβιλο 1 του Αθερινόλακκου να μεταβεί ξανά στο τεχνικό του μέγιστο, καθώς ο boiler λειτουργεί στο μέγιστό του και στη περίπτωση που οι θερμικές δεξαμενές είναι επαρκώς φορτισμένες υπάρχει η δυνατότητα για πλεονάζουσα ισχύ 20 MW. Έτσι σε περιπτώσεις όπου η ισχύς των αιολικών μειώνεται και οι υπόλοιπες μονάδες λειτουργούν στο μέγιστό τους, δεν χρειάζεται η ενεργοποίηση κάποιου άλλου σταθμού καθώς ο σταθμός του Αθερινόλακκου με την ενσωματωμένη θερμική αποθήκευση μπορεί να καλύψει το υπολειπόμενο φορτίο που δημιουργείται. Η λειτουργία λοιπόν

της θερμικής αποθήκευσης επιτρέπει στο σύστημα να διατηρεί τις υπόλοιπες αμοστροβλικές μονάδες στη μέγιστη ισχύ τους, δηλαδή να λειτουργούν με την μέγιστη απόδοση τους, και οποιεσδήποτε διακυμάνσεις προκύπτουν στο φορτίο να καλύπτονται από τη μονάδα που υπάρχει ενσωματωμένη η θερμική αποθήκευση.

Σενάριο 4 Μεγαλύτερο Φορτίο- Ίδια Διείσδυση Αιολικών- Εκφόρτιση Θερμικής Αποθήκευσης

Πίνακας 9: Ζυγοί Παραγωγής-Σενάριο 4.

Πληροφορίες Ζυγών						
No	Όνομα Ζυγού	Τάση (p.u)	Γωνία (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Τύπος Ζυγού
361	Κοράκια	1,01	4,37	235	126,02	PV
500	Χανιά CC2	1,01	3,13	55	32,42	PV
80	Αθερινόλακος D1	1,02	7,66	40	24,22	PV
81	Αθερινόλακος D2	1,02	7,66	40	24,22	PV
85	Αθερινόλακος S2	1,02	7,33	50	33	PV
20	Χανια CC1	1,01	2,44	35	23,37	PV
21	Χανια CC2	1,01	2,44	35	23,37	PV
50	Χανιά ΑΣ11	1,01	0	29	30	SL
84	Αθερινόλακος S1	1,02	7,33	50	33	PV
83	Θερμική Αποθήκευση	1,02	4,76	17	12,7	PV

Πίνακας 10: Γενικά στοιχεία-Σενάριο 4.

	MW
Παραγωγή	677,19
Φορτίο	669,6
Απώλειες Δικτύου	14,59
Αιολικά	97,19
Σύνολο θερμικών μονάδων	580

Όπως και στο σενάριο 3, έτσι και στο σενάριο 4, στο σύστημα συμβαίνει μια μεταβολή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αντί να μειωθούν τα αιολικά, αυξάνεται το φορτίο κατά 17 MW, όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 10. Όμοια και με το προηγούμενο σενάριο ενεργοποιείται η θερμική αποθήκευση για τη κάλυψη του επιπλέον φορτίου. Και σε αυτή τη περίπτωση δε παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις τάσεις των ζυγών και των γωνιών του Συστήματος Η παροχή των 17 MW από τη θερμική αποθήκευση καλύπτει το επιπλέον φορτίο.

3.5 Οικονομικά στοιχεία θερμικής αποθήκευσης στον Αθερινόλακκο

Το σύστημα ισχύος της Κρήτης είναι σήμερα ένα αυτόνομο σύστημα (μη διασυνδεδεμένο σύστημα) και προβλέπεται μέσα στα επόμενα χρόνια να διασυνδεθεί με την ηπειρωτική Ελλάδα. Στο σύστημα της Κρήτης υπάρχει μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας έτσι ώστε να διασφαλίζεται η δυναμική ασφάλεια του συστήματος αποφεύγοντας την παραβίαση των τεχνικών περιορισμών των συμβατικών μονάδων. Ταυτόχρονα στην Κρήτη υπάρχουν πολλές μονάδες που λειτουργούν κατά τις ώρες αιχμής και έχουν υψηλό κόστος καυσίμου.

Στη παρούσα οικονομική μελέτη θα αξιολογηθεί η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον Αθερινόλακκο και συγκεκριμένα στην ατμοηλεκτρική μονάδα 1. Όπως έχει ήδη αναλυθεί κατά τη διάρκεια που υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή το αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισης κρίνει απαραίτητο, ο ατμός απομαστεύεται από την έξοδο του λέβητα προκειμένου να φορτίσει μια σειρά θερμικών δεξαμενών που λειτουργούν ως δευτερεύουσες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι επιπλέον θερμικές πηγές μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με τη χρήση υλικών με αλλαγή φάσης και χρησιμεύουν ως πηγές θερμότητας οργανικών εγκαταστάσεων κύκλου Rankine.

Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός παραγωγής στον Αθερινόλακκο έχει ονομαστική ισχύ 50 MW, μέσω της θερμοδυναμικής ανάλυσης στο κεφάλαιο 3.2.1 αποδεικνύεται πως η μέγιστη συνδυασμένη ισχύς του ατμοστροβίλου και της θερμική αποθήκευσης πλησιάζει τα 70 MW, δηλαδή υπάρχει δυνατότητα για 40% υψηλότερη ισχύ κατά τη διάρκεια της αιχμής του φορτίου. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα κατά τη διάρκεια των χαμηλών φορτίων να μειώνεται το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού από τα 20 MW στα 14,6 MW.

Σε πρώτο στάδιο έγινε μια ανάλυση κόστους-οφέλους για το σύστημα θερμικής αποθήκευσης για μια τυχαία μέρα λαμβάνοντας δεδομένα για το φορτίο και τα αιολικά.

Στον Πίνακα 11 φαίνεται η παραγωγή της κάθε μονάδας της Κρήτης και το συνολικό κόστος για μια τυχαία μέρα χωρίς το σύστημα της θερμικής αποθήκευσης. Αντίστοιχα στον Πίνακα 12 φαίνεται η παραγωγή της κάθε μονάδας της Κρήτης και το συνολικό κόστος για την ίδια μέρα αλλά με την ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης στον ατμοστροβίλο 1 του Αθερινόλακκου.

Δεδομένου του συγκεκριμένου αποτελέσματος κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί και να αξιολογηθεί η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης για την Κρήτη πάνω σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο για το 2020. Θεωρώντας δεδομένο πως και με τη διασύνδεση της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα, λόγω της προσαρμογής των σταθμών παραγωγής στα νέα περιβαλλοντικά δεδομένα δεν επιλύεται το ενεργειακό πρόβλημα της Κρήτης [22], χρειάζονται νέες ενεργειακές επενδύσεις.

Έτσι, προκειμένου να γίνει μια ανάλυση κόστους-οφέλους της θερμικής αποθήκευσης για το συγκεκριμένο μοντέλο, λήφθηκαν ετήσιες χρονοσειρές ζήτησης φορτίου, παραγωγής και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου και εκκίνησης των μονάδων, λαμβάνοντας υπόψιν τους τεχνικούς περιορισμούς τεχνικού μεγίστου και ελαχίστου των μονάδων. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος εφαρμόζει μια οικονομική κατανομή του φορτίου δεσμεύοντας τις αντίστοιχες μονάδες παραγωγής. Για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ένας στοχαστικός αλγόριθμος βλαβών και διακοπής της παραγωγής τόσο για τους σταθμούς παραγωγής όσο και για τη διασύνδεση της Κρήτης. Ο αλγόριθμος επίλυσης και η μοντελοποίηση που εφαρμόστηκε στο Matlab με τη χρήση Gams σε συνεργασία με τον ΔΕΔΔΗΕ φαίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Δ.

Ουσιαστικά για ένα έτος πραγματοποιήθηκε ένα σενάριο οικονομικής κατανομής φορτίου στη Κρήτη χωρίς την ύπαρξη της θερμικής αποθήκευσης και ένα σενάριο για τις ίδιες ετήσιες χρονοσειρές με την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση για το σύστημα θερμικής αποθήκευσης θεωρήθηκε πως γίνεται χρήση μόνο των 17 MW του σεναρίου που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.2.1, δηλαδή μόνο για το Thermal Tank 1-Condenser.

Τα συνοπτικά αποτελέσματα της ανάλυσης που προέκυψαν από την επίλυση της οικονομικής κατανομής φορτίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα όπου ως κόστος λειτουργίας συμπεριλαμβάνεται το κόστος καυσίμου και το κόστος εναύσεως των μονάδων ενώ το VOLL (Κόστος μη Εξυπηρετούμενης Ενέργειας) ορίζεται ως 2000€/MWh :

Πίνακας 14 : Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας Μονάδων της Κρήτης με και χωρίς την Θερμική Αποθήκευση.

	Με αποθήκευση	Χωρίς Αποθήκευση
Κόστος Λειτουργίας	220.197.320,32 €	224.556.463,38 €
Περικοπή Φορτίου (MW)	529,7	791,8
VOLL	1.059.441,26 €	1.583.670,21 €
Συνολικό Κόστος	221.256.761,58 €	226.140.133,59 €
Όφελος Αποθήκευσης		4.883.372,01 €

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται πως η θερμική αποθήκευση συμβάλλει τόσο στη μείωση του Κόστους λειτουργίας των υφιστάμενων μονάδων όσο και στην επάρκεια του δικτύου της Κρήτης.

Σύμφωνα με τον Lemmens [19], που αναλύει το κόστος κεφαλαίου εγκατάστασης οργανικών κύκλων Rankine, πρέπει να ληφθούν υπόψη επενδυτικά έξοδα περίπου 1000 €/kW για τους δευτερεύοντες σταθμούς παραγωγής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το κόστος για την εγκατάσταση θερμικής αποθήκευσης 17MW ανέρχεται σε :

$$\text{Κόστος εγκατάστασης} = 1.000.000 \frac{\text{€}}{\text{MW}} * 17\text{MW} = 17.000.000\text{€}. \quad (15)$$

Άρα η απόσβεση της εν λόγω επένδυσης σύμφωνα με την Εξίσωση (15) πραγματοποιείται σε :

$$\text{Απόσβεση Επένδυσης} = \frac{\text{Κόστος εγκατάστασης}}{\text{Όφελος Αποθήκευσης}} = \frac{17.000.000}{4.883.372} = 3,5 \text{ χρόνια}. \quad (16)$$

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται πως η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στη περίπτωση της Κρήτης είναι μια ελκυστική επένδυση, καθώς **η απόσβεση πραγματοποιείται σε 3,5 χρόνια.**

Λαμβάνοντας υπόψη πως άλλες μελέτες αναφέρουν πως τα κόστη με τον κατάλληλο σχεδιασμό και με την εξέλιξη της τεχνολογίας μπορούν να μειωθούν και να περιοριστούν μεταξύ 160 €/kW και 550 €/kW [20]. Έτσι αν υπολογιστεί το κόστος επένδυσης με βάση το μικρότερο δυνατό ποσό που συναντάται στη βιβλιογραφία προκύπτει από την Εξίσωση (17):

$$\text{Κόστος εγκατάστασης} = 160.000 \frac{\text{€}}{\text{MW}} * 17\text{MW} = 2.720.000\text{€}. \quad (17)$$

Με βάση το συγκεκριμένο κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται η απόσβεση της επένδυσης από την Εξίσωση (18):

$$\text{Απόσβεση Επένδυσης} = \frac{\text{Κόστος εγκατάστασης}}{\text{Όφελος Αποθήκευσης}} = \frac{2.720.000}{4.883.372} = 7 \text{ μήνες}. \quad (18)$$

Προκύπτει λοιπόν πως αν υπάρξει ο βέλτιστος σχεδιασμός, η συναρμολόγηση και η κατασκευή από κάποια εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. ΔΕΗ) **η απόσβεση της επένδυσης πραγματοποιείται σε 7 μήνες.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα-προοπτικές

4.1 Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση μια αποθήκης θερμικής ενέργειας είναι ένα πιθανό μηχανισμός ευελιξίας για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι επιπτώσεις της ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης, όπως γίνεται αντιληπτό και από τις παραπάνω μελέτες για τους 2 σταθμούς παραγωγής, εξαρτώνται :

1. στον τρόπο που θα γίνει η ενσωμάτωση, δηλαδή την επιλογή του σημείου από το οποίο θα απομαστεύεται ο ατμός.
2. το βαθμό της ενσωμάτωσης, δηλαδή τι ποσοστό του ατμού θα απομαστεύεται κάθε φορά.
3. την παραγωγική ικανότητα του σταθμού και τα επιτρεπόμενα όρια απομάστευσης.

Η σωστή θερμοδυναμική ανάλυση, σε συνδυασμό με τα επιτρεπόμενα όρια από τον κατασκευαστή για την απομάστευση του ατμού αποτελούν βασικά συστατικά για την εξεύρεση του βέλτιστου συνδυασμού.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα όλων των θερμοδυναμικών αναλύσεων των παραπάνω περιπτώσεων εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Η απόδοση του κύκλου του ατμού μειώνεται, η θερμική αποθήκευση επηρεάζει την τελική απόδοση του σταθμού τόσο θερμικά όσο και οικονομικά.
2. Με βάση τις θερμοκρασίες απομάστευσης του ατμού επιλέγεται το κατάλληλο άλας.
3. Πρέπει να πληρούνται αρκετοί περιορισμοί σχεδιασμού για να είναι δυνατή η ενσωμάτωση ενός συστήματος θερμικής αποθήκευσης.
4. Η υλοποίηση του συστήματος θερμικής αποθήκευσης ποικίλλει και εξαρτάται από τις ανάγκες, την οικονομική μελέτη και τις ώρες που χρησιμοποιείται η θερμική αποθήκευση ώστε να γίνει ο κατάλληλος σχεδιασμός.

Στην παρούσα διπλωματική αναπτύχθηκαν και υλοποιήθηκαν τα σενάρια ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης σε 2 σταθμούς παραγωγής. Πρόκειται για έναν σταθμό του ηπειρωτικού διασυνδεδεμένου δικτύου της χώρας και για έναν σταθμό παραγωγής του μη διασυνδεδεμένου. Αφού αναλύθηκαν και εντοπίστηκαν, μέσω της θερμοδυναμικής ανάλυσης και στους 2 σταθμούς παραγωγής, όλα τα δυνατά σενάρια για την ενσωμάτωση του εν λόγω συστήματος προκρίθηκαν αυτά που θεωρήθηκαν περισσότερο ωφέλιμα με βάση τις προδιαγραφές που είχαν τεθεί για παροχή μέγιστης ισχύος κατά τη διάρκεια της αιχμής του φορτίου. Έτσι για το σταθμό συνδυασμένου κύκλου στο Αλιβέρι διαπιστώθηκε πως η μέγιστη συνδυασμένη ισχύς είναι 495 MW κατά την αιχμή ζήτησης, 15% υψηλότερη από την αντίστοιχη πλήρους

φορτίου της μονάδας του συνδυασμένου κύκλου. Στην επιπρόσθετη μελέτη-περίπτωσης για τον Αθρινόλακκο της Κρήτης προέκυψε πως η μέγιστη συνδυασμένη ισχύς είναι 70 MW, δηλαδή 40% υψηλότερη από την αντίστοιχη του απλού κύκλου του σταθμού παραγωγής.

Όπως για κάθε μέσο αποθήκευσης, έτσι και για τη θερμική αποθήκευση, σημαντικό κριτήριο για να καταστεί εφικτή είναι η χωροθέτηση, δηλαδή ο όγκος που θα καταλαμβάνουν τα θερμοδοχεία. Είναι προφανές πως αν το μέσο στο οποίο πραγματοποιείται η αποθήκευση έχει διαστάσεις αρκετά μεγάλες, δυσκολεύει η πραγματοποίηση της επένδυσης λόγω έλλειψης χώρου. Με βάση λοιπόν την μεθοδολογία υπολογίστηκαν οι όγκοι των θερμοδοχείων που χρειάζονται σε κάθε περίπτωση, ώστε να υπάρχει μια προσέγγιση στην πραγματικότητα και να μην δημιουργούνται ασάφειες και ερωτηματικά στο κατά πόσο είναι εφικτή ή όχι η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος.

Επιπλέον για την εγκατάσταση και προώθηση οποιασδήποτε ενεργειακής επένδυσης βασικό κριτήριο είναι το οικονομικό όφελος το οποίο προκύπτει από τη συγκεκριμένη επένδυση. Στη περίπτωση της ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στο Αλιβέρι εφαρμόστηκε ένα υποθετικό μοντέλο ενεργειακής διαχείρισης στο οποίο ο χειριστής του σταθμού ενημερώνεται, π.χ. μια μέρα νωρίτερα (one day ahead), για τις οριακές τιμές ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς και στη συνέχεια ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης λαμβάνει αποφάσεις για την φόρτιση και την εκφόρτιση των θερμοδοχείων επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αρχικά λήφθηκαν οι τιμές του Ευρωπαϊκού Χρηματιστηρίου Ενέργειας για τη βδομάδα 16/2/2017-22/2/2017 και με βάση αυτές υπολογίστηκαν τα κέρδη του σταθμού σύμφωνα με το προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο διαχείρισης. Με βάση αυτά προέκυψε ένα ετήσιο επιπλέον κέρδος της τάξης των 550.000€ ανά έτος για το σταθμό, ωστόσο τα υψηλά κόστη εγκατάστασης του συστήματος της θερμικής αποθήκευσης καθιστούν επισφαλής οποιαδήποτε επένδυση τέτοιας μορφής.

Όσον αφορά τις μελέτες στατικής ευστάθειας για την Εύβοια προέκυψε πως με τον κατάλληλο ενεργειακό σχεδιασμό και τη βέλτιστη επίλυση των ροών ισχύος μπορεί να αυξηθεί το δυναμικό των ΑΠΕ στο δίκτυο και οποιεσδήποτε μεταβολές πραγματοποιούνται στην παραγωγή τους να καλύπτονται από τη σωστή ενεργειακή διαχείριση των σταθμών που λειτουργούν με καύσιμο.

Το συγκεκριμένο συμπέρασμα παρουσιάζει ενδιαφέρον σε μεσαίου μεγέθους δίκτυα όπως αυτό της Κρήτης. Οι μεταβολές στην παραγωγή των ΑΠΕ ή/και του φορτίου μπορούν να καλύπτονται από την σωστή ενεργειακή διαχείριση των σταθμών παραγωγής, γεγονός στο οποίο συντελεί και η θερμική αποθήκευση λειτουργώντας ως ένας μηχανισμός ευελιξίας. Πιο συγκεκριμένα αποδείχτηκε πως η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στον ατμοστρόβιλο 1 του Αθρινόλακκου δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον παραγωγή 40% (από 50MW στα 70MW) από ότι η εγκατεστημένη ισχύς πλήρους φορτίου, ενώ κατά τη φόρτιση των θερμικών δεξαμενών η αποδυνάμωση της ισχύος του σταθμού φτάνει το 70% .

Επιπλέον η οικονομική ανάλυση της απέδειξε και το μέγεθος του οικονομικού οφέλους, καθώς το κόστος λειτουργίας των μονάδων μειώνεται κοντά στα 5.000.000€ και απόσβεση σε 3,5 χρόνια, αλλά και ως προς την επάρκεια και την εξασφάλιση της κάλυψης του φορτίου. Προφανώς και το ενεργειακό πρόβλημα της Κρήτης δεν

επιλύεται πλήρως ούτε με τη διασύνδεση της, ούτε με τη θερμική αποθήκευση σε ένα σταθμό παραγωγής. Χρειάζονται περαιτέρω ενεργειακές επενδύσεις με σκοπό την κάλυψη του φορτίου, ωστόσο η ύπαρξη μιας ή και παραπάνω διάταξης αποθήκευσης κρίνεται σκόπιμη για τους εξής λόγους:

- Πλουραλισμός ενεργειακού μείγματος
- Πλεονέκτημα για σταθμούς με μεγάλα κόστη εναύσεως
- Τεχνολογική και περιβαλλοντική αναβάθμιση τοπικών υποδομών
- Μεγαλύτερη εκμετάλλευση Α.Π.Ε.

4.2 Μελλοντικές Προοπτικές

Γενικότερα το θέμα της θερμικής αποθήκευσης στα δίκτυα χρήζει περαιτέρω έρευνας και μελέτης ώστε να εξακριβωθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα και η δυνατότητα εφαρμογής της στο δίκτυο και στους σταθμούς παραγωγής συνδυασμένου κύκλου και άνθρακα. Ένα χαρακτηριστικό της θερμικής αποθήκευσης που χρήζει επιπλέον μελέτης και έρευνας είναι ο χρόνος απόκρισης της. Στα πλαίσια αυτά θα αποσαφηνιστεί και η δυνατότητα παροχής πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης στο Σύστημα και τα τυχόν επιπλέον οφέλη που μπορεί να προσφέρει.

Επιπλέον η μείωση του κόστους εγκατάστασης ή η βελτίωση της απόδοσης των θερμικών μηχανών αποτελεί ξεχωριστό σημείο έρευνας και μελέτης καθώς πρόοδος σε αυτούς τους τομείς θα έδινε μεγαλύτερη αξία στην θερμική αποθήκευση είτε λόγω του μικρότερου κόστους εγκατάστασής της είτε λόγω της μεγαλύτερης ισχύος που θα μπορούσε να προκύψει από αυτές τις δευτερεύουσες μονάδες παραγωγής.

Στις προοπτικές της εργασίας αυτής εντάσσεται και η δυναμική μελέτη ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης έτσι ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη μελέτη και να παρουσιάζεται εναργέστερα η χρησιμότητα και η δυνατότητα εγκατάστασής της.

Επιπροσθέτως του ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού ενδιαφέροντος, σημαντική είναι η εξέλιξη και η έρευνα που πρέπει να γίνει στον τομέα των υλικών. Πιο συγκεκριμένα ενδιαφέρον παρουσιάζει ο κύκλος ζωής, δηλαδή στο πόσες φορές φορτίζει και εκφορτίζει το άλας μέχρι την αντικατάστασή του, αλλά και η δυνατότητα εύρεσης και χρησιμοποίησης άλλων υλικών που μπορούν να υπηρετήσουν τη συγκεκριμένη λειτουργία.

Τέλος, ορμώμενοι από το γεγονός πως στη Κρήτη, τόσο τα οικονομικά αποτελέσματα της θερμικής αποθήκευσης όσο και το γεγονός της μικρότερης περικοπής φορτίου, και υπό το πρίσμα πως απαιτούνται επιπλέον ενεργειακές επενδύσεις ακόμα και με τη διασύνδεση του νησιού, θα ήταν ωφέλιμο να εξεταστεί η ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης πέραν της μίας ατμομονάδας του Αθρινόλακκου, και σε άλλες μονάδες που έχουν μεγάλα κόστη εναύσεως.

Βιβλιογραφία

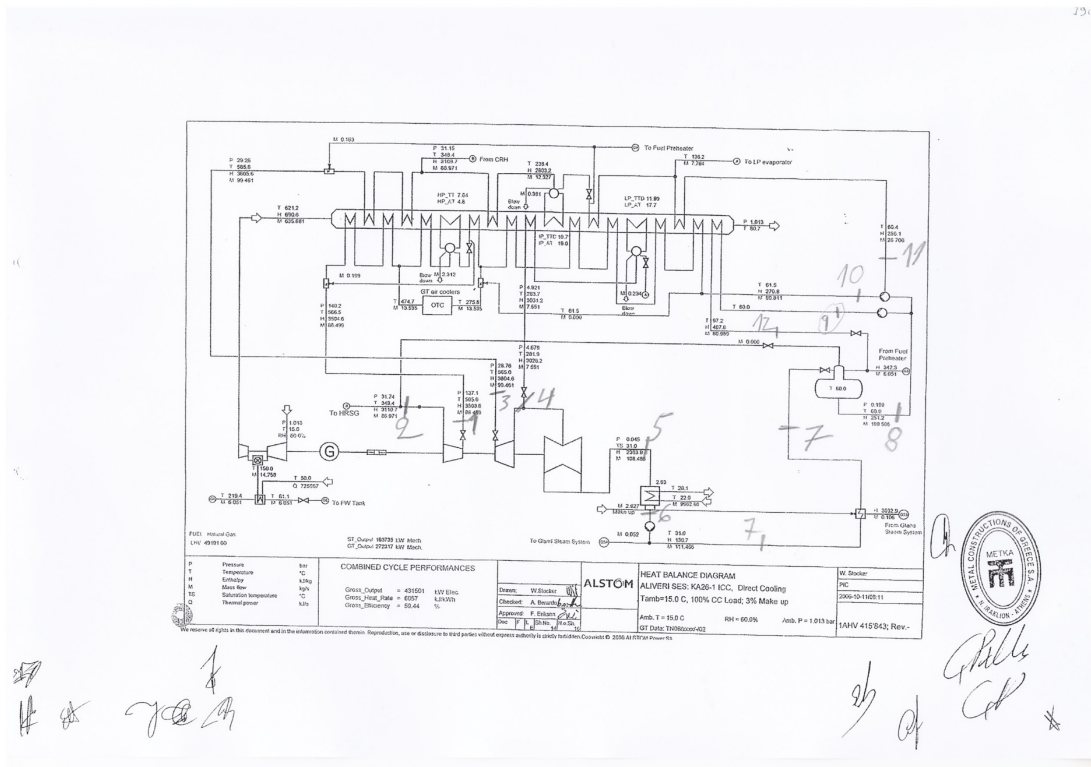
- [1] Sarada Kuravi, Jamie Trahan, Elias Stefanakos ‘Thermal Energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants’, Progress in Energy and Combustion Science 39 (2013),p 285-319
- [2] Μελέτη επάρκειας ισχύος για την περίοδο 2017-2027, ΑΔΜΗΕ, Αθήνα Μάιος 2017
- [3] ΤΕΛΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ ΤΗΣ ΡΑΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΕΠΑΡΚΟΥΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ Ανάπτυξη Μηχανισμού Αποζημίωσης Ευελιξίας (ΜΑΕ)
- [4] Market simulation data from the Institute of Energy Economics at the University of Cologne in the frame of the Project Partner Steam Power Plant
- [5] State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies, Marc Medrano, Antoni Gil, Ingrid Martorell, Xavi Potau, Luisa F. Cabeza
- [6] Nava P, Herrmann U. Trough thermal storage: status spring 2007. Denver (USA): Trough Workshop; 2007.
- [7][Bo Lu, Mohammad Shahidehpour, “Short Term Scheduling of Combined Cycle Units”, IEEE Transaction on Power Systems, vol.19, No3, August 2004
- [8] Marcel Richter, Florian Mollenbuck, Andreas Starinski, Gerd Oeljeklaus, Klaus Goerner, “Flexibilization of coal-fired power plans of Dynamic simulation”
- [9] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, Fifth Edition
- [10] Doerte Laing, Carstel Bahl, Thomas Bauer, Michael Fiss, “High-Temperature Solid-Media Thermal Energy Storage for Solar Thermal Power Plants”
- [11] Zhen Yang, Suresh V. Garimella , “Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline”
- [12] P. Romanos, P. Eames, C. Markides . Oral presentation at the UK Energy Storage Conference in Birmingham, November 1015, “Energy Management of Power Stations with Thermal Energy Storage Systems”.
- [13] P. Romanos, P. Eames, C. Markides, N. Hatziaargyriou, N. Soultanis. Oral presentation at the UK Thermal Energy Storage workshop (UKTES), at Imperial College, June 2016, “Ancillary Services by Thermal Energy Storage Systems in Smart Grids”.

- [14] P. Romanos, P. Eames, C. Markides, N. Hatziargyriou, N. Soultanis, G. Takis. Oral presentation at the UK Energy Storage Conference in Birmingham, December 2016, “Frequency Control by Thermal Energy Storage in Smart Grids”.
- [15] Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΠΑΕ
- [16] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, “Boiling and Condensation,” in “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” 5th Ed., John Wiley & Sons, USA, pp. 615-627, 1999.
- [17] T. Stetz, K. Diwold, M. Kraiczy, D. Geibel, S. Schmidt, M. Braun, “Techno-Economic Assessment of Voltage Control Strategies in Low Voltage Grids”
- [18] www.eex.com
- [19] S. Lemmens, “A perspective on costs and cost estimation techniques for organic Rankine cycle systems,” 3rd Int. Semin. ORC Power Syst., October 12-14, Brussels, Belgium, 2015.
- [20] On the use of SAFT-VR Mie for assessing large-glide fluorocarbon working-fluid mixtures in organic Rankine cycles, Oyeniyi A. Oyewunmi, Aly I. Taleb, Andrew J. Haslam, Christos N. Markides
- [21] Jesus Varela, Nikos Hatziargyriou, Lisandro Puglisi, Marco Rossi, Andreas Abart, Benoit BletTERIE “The IGREENGrid Project, Increasing Hosting Capacity in Distribution Grids”, IEEE Power & Energy, May-June 2017
- [22] ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΚΡΗΤΗΣ Σχεδιασμός & Οδικός Χάρτης Υλοποίησης, Γ. ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ

Παράρτημα

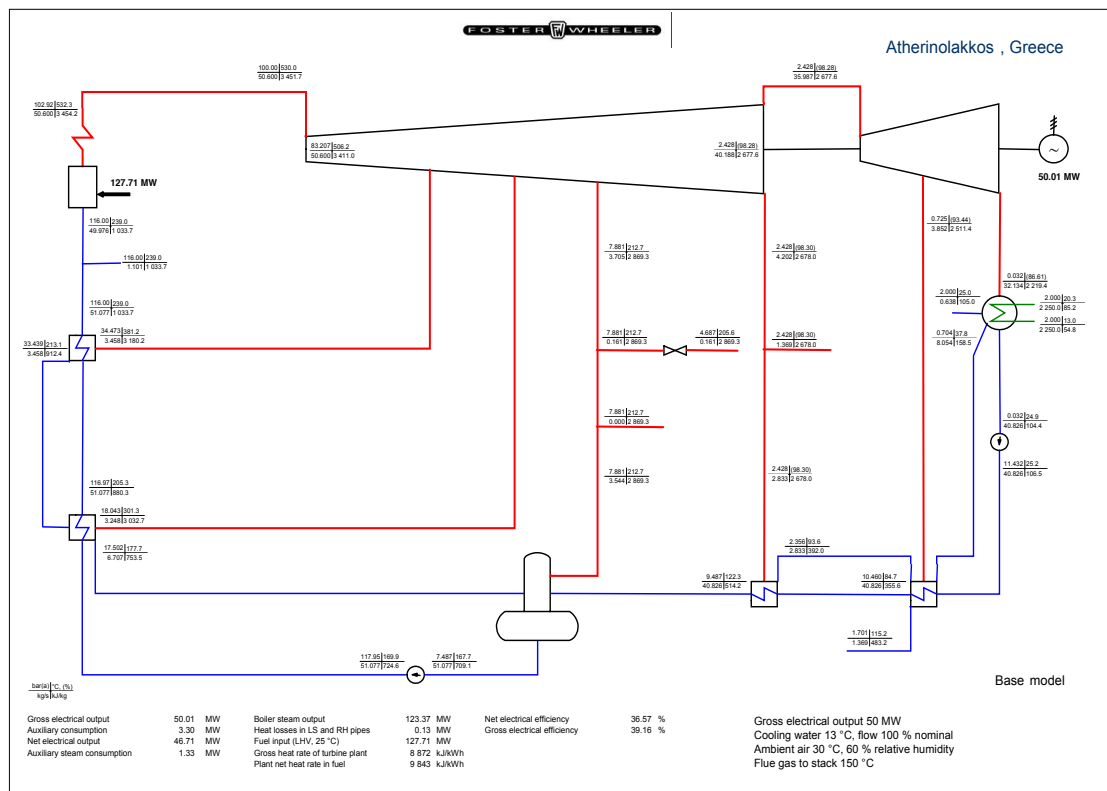
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Θερμοδυναμικό Διάγραμμα Αλιβερίου

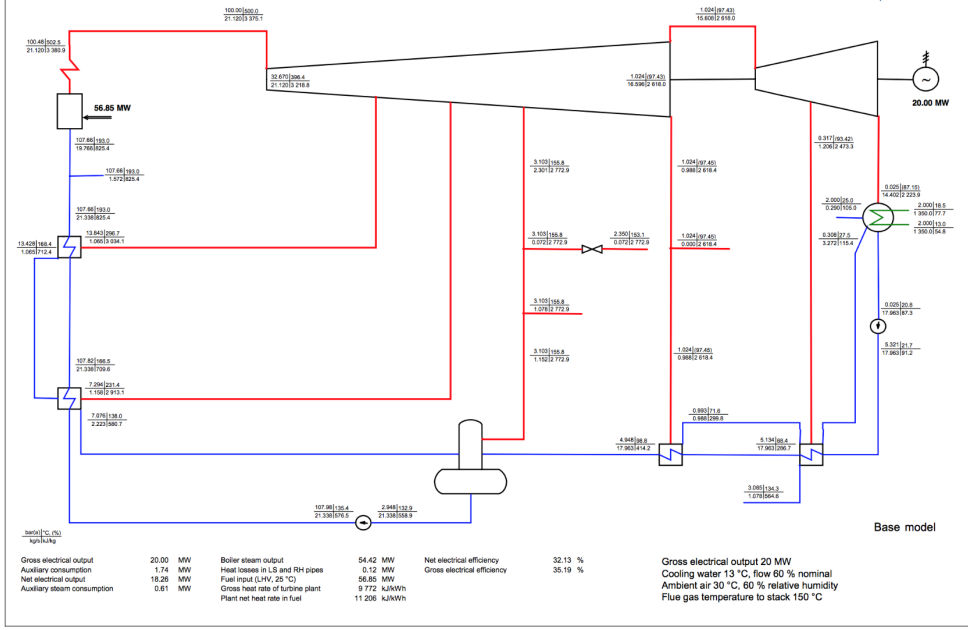
Προκειμένου να μελετηθεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό παραγωγής του Αλιβερίου χρειάστηκε η θερμοδυναμική μελέτη του διαγράμματος του σταθμού, ώστε να εξαχθούν σωστά τα αποτελέσματα των θερμοδυναμικών καταστάσεων και να εξευρεθεί η βέλτιστη λύση θερμικής αποθήκευσης ανάλογα με τα πρότυπα που είχαν τεθεί. Το θερμοδυναμικό διάγραμμα του σταθμού του Αλιβερίου με βάση το οποίο έγιναν οι υπολογισμοί στο κεφάλαιο 2 φαίνεται παρακάτω.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Θερμοδυναμικό Διάγραμμα Αθερινολάκκου

Όμοια με την περίπτωση της Εύβοιας έτσι και για τη Κρήτη χρησιμοποιήθηκαν τα θερμοδυναμικά διαγράμματα του σταθμού για να είναι δυνατή η μελέτη των περιπτώσεων ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης. Για την περίπτωση της Κρήτης έγινε χρήση των παρακάτω σχεδίων. Στη πρώτη εικόνα φαίνεται η λειτουργία του σταθμού για το μέγιστο φορτίο, ενώ στη δεύτερη απεικονίζεται το τεχνικό ελάχιστο λειτουργίας του σταθμού μαζί με τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις των διάφορων εισόδων-εξόδων του σταθμού. Με βάση αυτά τα διαγράμματα έγιναν οι υπολογισμοί για το κεφάλαιο 3 και την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης στον Αθερινολάκκο.





Gross electrical output	20.00 MW	Boiler steam output	54.42 MW	Net electrical efficiency	32.13 %	Gross electrical output 20 MW Cooling water 13 °C, flow 60 % nominal Ambient air 30 °C, 60 % relative humidity Flue gas temperature to stack 150 °C
Auxiliary consumption	1.74 MW	Heat losses in LS and RH pipes	0.12 MW	Gross electrical efficiency	35.19 %	
Net electrical output	18.26 MW	Fuel input (LHV, 25 °C)	56.85 MW			
Auxiliary steam consumption	0.61 MW	Gross heat rate of turbine plant	9 172 kJ/kWh			
		Plant net heat rate in fuel	11 206 kJ/kWh			

C:\...Valid models\Final calculations\base_v1.xls

Case 1a 40 %

time processed: 8.5.2006

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Οικονομικά στοιχεία Αλιβερίου

Στον πίνακα Γ.1 φαίνονται οι ωριακές τιμές του χρηματιστηρίου ενέργειας, όπως αντλήθηκαν από τον ιστότοπο του ευρωπαϊκού χρηματιστηρίου.

Πίνακας Γ.1: Ωριαίες Τιμές Χρηματιστηρίου Ενέργειας

Hour (CET)	16/2/17	17/2/17	18/2/17	19/2/17	20/2/17	21/2/17	22/2/17
1	33,27	32,52	35,1	30,81	30,75	12,54	22,92
2	34,93	31,69	33,09	21,68	27,22	10,19	10,26
3	32,09	31,13	35,08	12,44	26,5	10,06	9,5
4	32	31,35	34,3	9,93	25,04	11,12	7,66
5	32,06	31,69	34,3	9,53	20,95	12,56	5,03
6	33,28	32,5	35,36	10,13	21,93	25,16	7,68
7	38,01	36,96	38,81	10,3	38,49	33	21,52
8	50,99	47,95	42,08	18,12	48,35	38,96	31,86
9	50,31	45,01	46,81	25,47	45,82	38,94	32,51
10	43,72	44,05	50	29,59	38,92	38,94	32,51
11	38	48,98	49,85	29,82	37,92	38,95	32,29
12	37,09	49,9	48,24	32,09	39,38	38,95	32,96
13	37,91	48,98	42,25	30,17	39,18	36,63	32,01
14	37,19	40	36,64	31,07	36,08	36,65	30,94
15	38,05	42,92	35,64	31,41	33,03	36,41	29,94
16	43,79	48,53	37,35	30,34	31,87	36,68	31,28
17	50,82	48,81	42,04	31,99	31,63	34,98	31,24
18	53,3	50,92	47,94	41,37	34,92	39,9	32,48
19	54,98	53,04	53,94	53,65	37,94	57,42	35,93
20	50,92	51,14	48,46	52,8	34,27	45,8	34,05
21	42,06	49,77	39,01	39,28	29,92	46,14	31,65
22	38,95	49,52	35	33,95	19,22	40	23,45
23	37,98	46,34	33,03	35,05	9,94	34,25	10,26
24	33,3	38,82	30,29	31,01	9,48	30,03	9,47

Στον πίνακα Γ.2 φαίνεται το ωριαίο κέρδος του σταθμού αν συμμετείχε στο χρηματιστήριο ενέργειας πουλώντας κάθε ώρα τα 432 MW ισχύς που παράγει (σενάριο χωρίς θερμική αποθήκευση).

Πίνακας Γ.2: Ημερήσιο Όφελος χωρίς θερμική Αποθήκευση

Hour (CET)	16/2/17	17/2/17	18/2/17	19/2/17	20/2/17	21/2/17	22/2/17
1	14.372,6	14.048,6	15.163,2	13.309,9	13.284,0	5.417,2	9.901,4
2	15.089,7	13.690,0	14.294,8	9.365,7	11.759,0	4.402,0	4.432,3
3	13.862,8	13.448,1	15.154,5	5.374,0	11.448,0	4.345,9	4.104,0
4	13.824,0	13.543,2	14.817,6	4.289,7	10.817,2	4.803,8	3.309,1
5	13.849,9	13.690,0	14.817,6	4.116,9	9.050,4	5.425,9	2.172,9
6	14.376,9	14.040,0	15.275,5	4.376,1	9.473,7	10.869,1	3.317,7
7	16.420,3	15.966,7	16.765,9	4.449,6	16.627,8	14.256,0	9.296,6
8	22.027,6	20.714,4	18.178,5	7.827,8	20.887,2	16.830,7	13.763,2
9	21.733,9	19.444,3	20.221,9	11.003,0	19.794,2	16.822,0	14.044,3
10	18.887,0	19.029,6	21.600,0	12.782,8	16.813,4	16.822,0	14.044,3
11	16.416,0	21.159,3	21.535,2	12.882,2	16.381,4	16.826,4	13.949,2
12	16.022,8	21.556,8	20.839,6	13.862,8	17.012,1	16.826,4	14.238,7
13	16.377,1	21.159,3	18.252,0	13.033,4	16.925,7	15.824,1	13.828,3
14	16.066,0	17.280,0	15.828,4	13.422,2	15.586,5	15.832,8	13.366,0
15	16.437,6	18.541,4	15.396,4	13.569,1	14.268,9	15.729,1	12.934,0
16	18.917,2	20.964,9	16.135,2	13.106,8	13.767,8	15.845,7	13.512,9
17	21.954,2	21.085,9	18.161,2	13.819,6	13.664,1	15.111,3	13.495,6
18	23.025,6	21.997,4	20.710,0	17.871,8	15.085,4	17.236,8	14.031,3
19	23.751,3	22.913,2	23.302,0	23.176,8	16.390,0	24.805,4	15.521,7
20	21.997,4	22.092,4	20.934,7	22.809,6	14.804,6	19.785,6	14.709,6
21	18.169,9	21.500,6	16.852,3	16.968,9	12.925,4	19.932,4	13.672,8
22	16.826,4	21.392,6	15.120,0	14.666,4	8.303,0	17.280,0	10.130,4
23	16.407,3	20.018,8	14.268,9	15.141,6	4.294,0	14.796,0	4.432,3
24	14.385,6	16.770,2	13.085,2	13.396,3	4.095,3	12.972,9	4.091,0
DAY BENEFIT	421.200,0	446.048,6	416.711,5	294.624,0	323.460,0	338.800,3	250.300,8

Στον πίνακα Γ.3 παρουσιάζονται τα ωριαία οφέλη για κάθε μέρα της εβδομάδας 16/2-22/2 αν το σύστημα της θερμικής αποθήκευσης λειτουργούσε καθημερινά. Προφανώς για την βέλτιστη λύση το αυτοματοποιημένο ενεργειακό σύστημα διαχείρισης αποφασίζει αν τη συγκεκριμένη μέρα αξίζει να πραγματοποιηθεί ή όχι η θερμική αποθήκευση. Έτσι μέσω των συναρτήσεων στο πρόγραμμα Microsoft Excel εντοπίζονται οι 2 ώρες με τη χαμηλότερη και οι 2 ώρες με την υψηλότερη τιμή. Στη συνέχεια οι 2 ώρες με τη χαμηλότερη τιμή πολλαπλασιάζονται με 269 MW, που είναι η ισχύς του σταθμού παραγωγής κατά τη διάρκεια της φόρτισης των θερμικών δεξαμενών. Αντίστοιχα οι 2 ώρες με την υψηλότερη τιμή πολλαπλασιάζονται με τα 492 MW, που είναι η αθροιστική ισχύς του μεγίστου του σταθμού παραγωγής μαζί με την εκφόρτιση της θερμικής αποθήκευσης. Για τις υπόλοιπες ώρες ο σταθμός λειτουργεί κανονικά με την ισχύ των 432 MW. Αν το ημερήσιο όφελος του πίνακα Γ.3 είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ημερήσιο όφελος του πίνακα Γ.2 τότε συμφέρει το σταθμό παραγωγής να ενεργοποιήσει τη θερμική αποθήκευση. Σε αντίθετη περίπτωση για τη συγκεκριμένη μέρα η θερμική αποθήκευση παραμένει ανενεργή.

Πίνακας Γ.3 : Ημερήσιο Όφελος με Θερμική Αποθήκευση

Hour (CET)	16/2/17	17/2/17	18/2/17	19/2/17	20/2/17	21/2/17	22/2/17
1	14.372,6	14.048,6	15.163,2	13.309,9	13.284,0	5.417,2	9.901,4
2	15.089,76	13.690,8	14.294,8	9.365,7	11.759,0	2.741,1	4.432,3
3	13.862,8	8.373,9	15.154,6	5.374,0	11.448,0	2.706,1	4.104,0
4	8.608,0	8.433,1	14.817,6	2.671,1	10.817,2	4.803,8	2.060,5
5	8.624,1	13.690,0	14.817,6	2.563,5	9.050,4	5.425,9	1.353,0
6	14.376,9	14.040,0	15.275,5	4.376,1	9.473,7	10.869,1	3.317,7
7	16.420,3	15.966,7	16.765,9	4.449,6	16.627,6	14.256,0	9.296,6
8	22.027,6	20.714,4	18.178,5	7.827,8	23.788,2	16.830,7	13.763,5
9	21.733,9	19.444,3	20.221,9	11.003,4	22.543,4	16.822,0	14.044,3
10	18.887,0	19.029,6	24.600,0	12.782,8	16.813,4	16.822,0	14.044,3
11	16.416,0	21.159,3	21.535,2	12.882,2	16.381,4	16.826,4	13.949,2
12	16.022,8	21.556,8	20.839,6	13.862,8	17.012,1	16.826,4	14.238,7
13	16.377,1	21.159,3	18.252,0	13.033,4	16.925,7	15.824,1	13.828,3
14	16.066,0	17.280,0	15.828,4	13.422,2	15.586,5	15.832,8	13.366,0
15	16.437,6	18.541,4	15.396,4	13.569,1	14.268,9	15.729,1	12.934,0
16	18.917,2	20.964,9	16.135,2	13.106,8	13.767,8	15.845,7	13.512,9
17	21.954,2	21.085,9	18.161,2	13.819,6	13.664,1	15.111,3	13.495,6
18	26.223,6	21.997,4	20.710,0	17.871,8	15.085,4	17.236,8	14.031,3
19	27.050,1	26.095,6	26.538,4	26.395,8	16.390,0	28.250,6	17.677,5
20	21.997,4	25.160,8	20.934,7	25.977,6	14.804,6	19.785,6	16.752,6
21	18.169,9	21.500,6	16.852,3	16.968,9	12.925,4	22.700,8	13.672,8
22	16.826,4	21.392,6	15.120,0	14.666,4	8.303,0	17.280,0	10.130,4
23	16.407,3	20.018,8	8.885,0	15.141,6	2.673,8	14.796,0	4.432,3
24	14.385,6	16.770,2	8.148,0	13.396,3	2.550,1	12.972,9	4.091,0
DAY BENEFIT	417.255,2	442.115,2	412.626,7	297.839,0	325.944,7	341.713,1	252.431,1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Οικονομικά στοιχεία Αθερινόλακκου

The simplified model of the storage system is illustrated in Figure 1

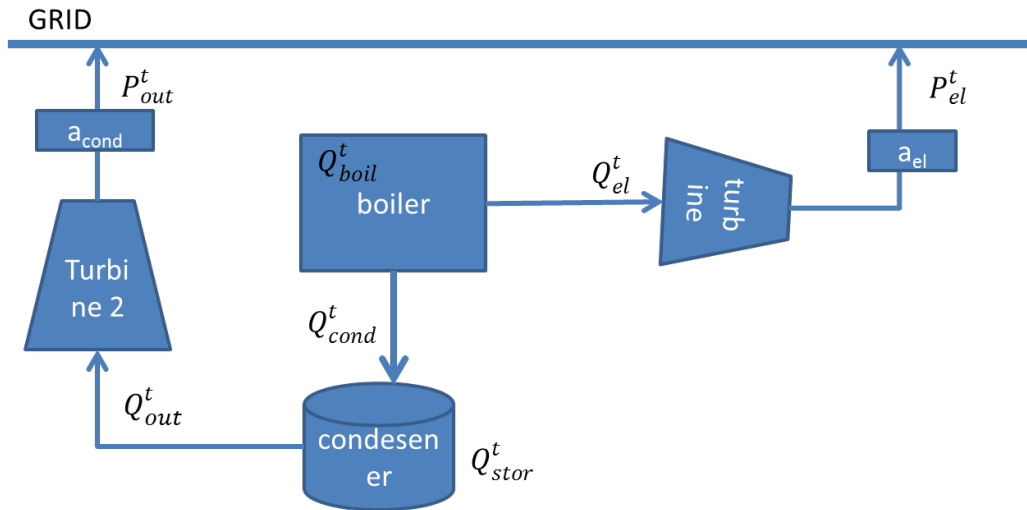


Figure 1

Definitions

Variables

- Q_{boil}^t The produced thermal energy of the boiler at time t
- $x(t)$ binary value, equals to 1 when the unit is ON at time t , 0 otherwise
- $y(t)$ binary value equals to 1 if Energy is stored at time t
- Q_{el}^t Thermal energy extracted by the main turbine at time t
- Q_{cond}^t Thermal energy extracted by the condenser at time t
- P_{el}^t Electric output of the main system at time t
- Q_{stor}^t Total thermal Energy stored at time t in the condenser
- P_{out}^t Electric output of storage system at time t
- Q_{out}^t Electric Output of the storage system at time t

Parameters

- Q_{boil}^{max} Maximum thermal production of boiler =127 0MWh
- Q_{boil}^{min} Minimum thermal production of boiler=69,23 0MWh
- a_{cond} Efficiency Rate of condenser =0,28
- Q_{cond}^{max} Maximum Energy that can be extracted by the condenser = 60 0MWh
- Q_{cond}^{min} Minimum Energy that can be extracted by the condenser =0 0MWh
- Q_{el}^{max} Maximum Energy that can be extracted by the main turbine =49 MW
- Q_{el}^{min} Minimum Energy that can be extracted by the main turbine
- a_{gen} Efficiency Rate of main turbine=0,39
- P_{out}^{max} Maximum electric output of the storage system =17 MW

The boiler at time t produces steam with thermal energy Q_{boil}^t . The boiler production must fall within its technical limits,

$$x(t) \cdot Q_{boil}^{min} \leq Q_{boil}^t \leq x(t) \cdot Q_{boil}^{max}, \quad (1)$$

Part of boiler steam production (i.e. Q_{el}^t) is extracted by the main turbine, while another part (i.e. Q_{cond}^t) is extracted by the condenser

$$Q_{boil}^t = Q_{el}^t + Q_{cond}^t \quad (2)$$

Technical maximum and minimum constraints apply also for the steam quantities extracted by the main turbine and the condenser

$$y(t) \cdot Q_{cond}^{min} \leq Q_{cond}^t \leq y(t) \cdot Q_{cond}^{max} \quad (3)$$

$$x(t) \cdot Q_{el}^{min} \leq Q_{el}^t \leq x(t) \cdot Q_{el}^{max} \quad (4)$$

The electrical output of the turbine is proportional to the steam thermal energy it extracts from the boiler

$$P_{el}^t = a_{gen} \cdot Q_{el}^t \quad (5)$$

The condenser stores the energy it extracts by the boiler and uses part of it (i.e. Q_{out}^t) to produce electricity.

$$Q_{out}^t = Q_{stor}^{t-1} - Q_{stor}^t + Q_{cond}^t \quad (6)$$

The electric output of the storage system is proportional to Q_{out}^t

$$P_{out}^t = a_{cond} \cdot Q_{out}^t \quad (7)$$

This output is subjected to technical maximum and minimum constraints

$$(1 - y(t)) \cdot P_{out}^{min} \leq P_{out}^t \leq (1 - y(t)) \cdot P_{out}^{max} \quad (8)$$

A Unit commitment and Economic Dispatch Optimization problem is constructed according to the following:

1) Minimize cost

$C=F()$ (fuel cost + shutdown cost)

subject to

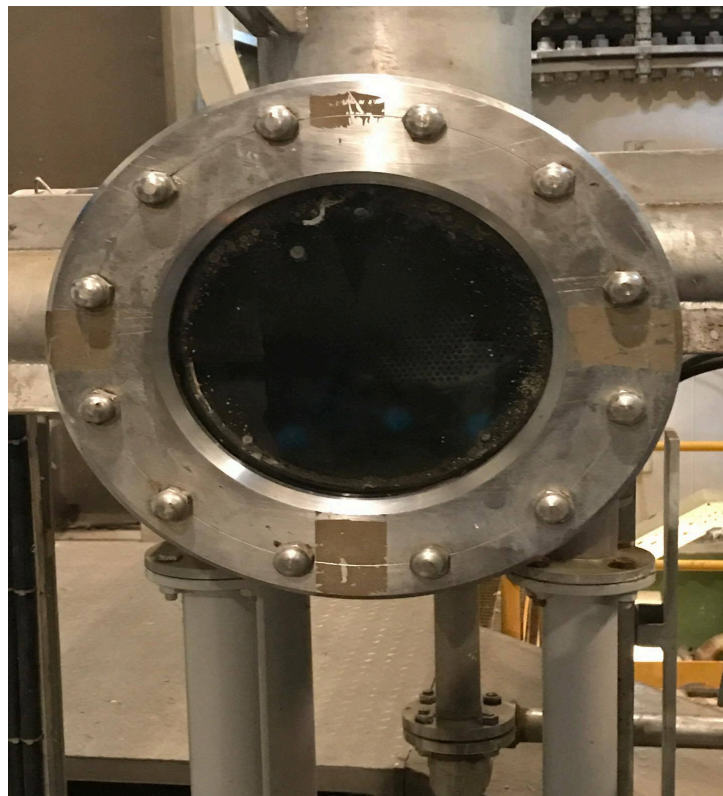
- 1) Power balance
- 2) Ramp rates
- 3) Spinning Reserve (Up and Down)
- 4) Minimum Up Time
- 5) Minimum Down Time
- 6) Technical Minimum and Maximum
- 7) Must Run Units
- 8) Corridor limits

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Φωτογραφίες από το σταθμό παραγωγής στο Αλιβέρι

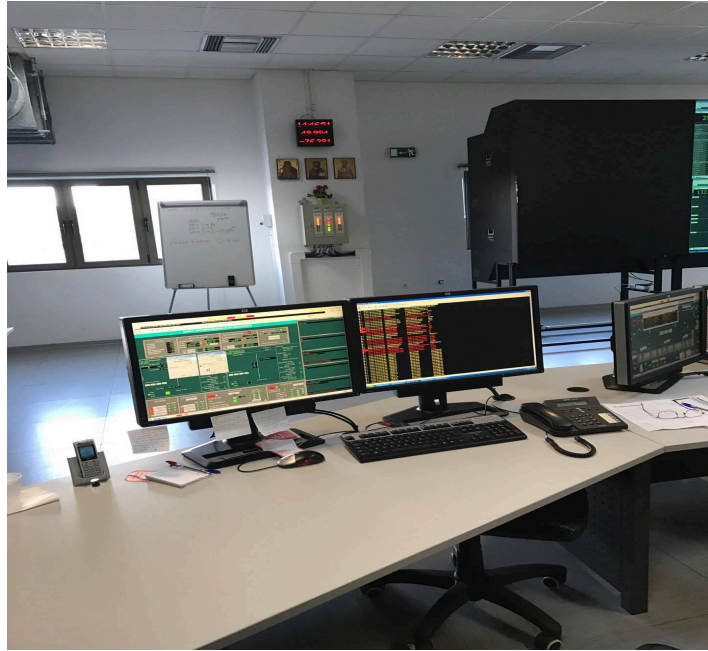
Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στο σταθμό παραγωγής συνδυασμένου κύκλου στο Αλιβέρι προκειμένου να συζητηθούν με τη διοίκηση και τους μηχανικούς του σταθμού τεχνικά θέματα για τη δυνατότητα ενσωμάτωσης της θερμικής αποθήκευσης στο σταθμό. Κατά τη διάρκεια της επίσκεψης πραγματοποιήθηκε και ξενάγηση στους χώρους του σταθμού από τον κ. Παναγιώτη Αγιαμαρνιώτη. Ορισμένες φωτογραφίες από το σταθμό παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 1: Εξωτερική άποψη του συμπυκνωτή.



Εικόνα 2: Φίλτρο καθαρισμού του θαλασσινού νερού.



Εικόνα 3: Control Room του σταθμού.



Εικόνα 4: Ατμοστρόβιλος Αλιβερίου.



Εικόνα 5: Αριστερά ο Αεριοστρόβιλος και δεξιά ο Ατμοστρόβιλος του Αλιβερίου.