Εθνικο Μετσοβιο Πολυτεχνειο

Σχολη Ηλεκτρολογων Μηχανικων
και Μηχανικων Υπολογιστων
Τομεας Ηλεκτρικης Ισχυος

Διπλωματικη Εργασια

Λειτουργια Αποθηκευτικων Σταθμων σε Περιβαλλον Αγορων Ηλεκτρικης Ενεργειας

Ιωάννης Α. Βαρέλης

Επιβλέπων καθηγητής: Σταύρος Παπαθανασίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Εθνικο Μετσοβιο Πολυτεχνειο

Σχολη Ηλεκτρολογων Μηχανικων και Μηχανικων Υπολογιστων
Τομεας Ηλεκτρικης Ισχυος

Διπλωματικη Εργασια

Λειτουργια Αποθηκευτικων Σταθμων σε Περιβαλλον Αγορων Ηλεκτρικης Ενεργειας

Ιωάννης Α. Βαρέλης

Επιβλέπων καθηγητής: Σταύρος Παπαθανασίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 22η Οκτωβρίου 2020.

.....	.....	.....
Σταύρος Παπαθανασίου	Νικόλαος Χατζηαργυρίου	Παύλος Γεωργιλάκης
Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ	Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΒΑΡΕΛΗΣ

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

Copyright © (2020) ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΒΑΡΕΛΗΣ

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. **All rights reserved.**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι φιλόδοξοι στόχοι για επίτευξη υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μείγμα έχουν διανοίξει το δρόμο για την εγκατάσταση και τη λειτουργία σταθμών αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Παρόλο που η αξία, την οποία προσδίδει η αποθήκευση σε ένα μεγάλο σύστημα ενέργειας, είναι σχετικά εμφανής και απαντάται κυρίως στην μεγαλύτερη απορρόφηση ΑΠΕ, στη μείωση των περικοπών ΑΠΕ και στην οικονομικότερη κάλυψη της αιχμής, αναδύονται θέματα οικονομικής βιωσιμότητας μιας επένδυσης στην εγκατάσταση και στη λειτουργία ενός νέου σταθμού αποθήκευσης, βασισμένος στην τεχνολογία μπαταριών ιόντων-λιθίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα της αποθήκευσης είναι η πολυχρηστικότητά της, η οποία την καθιστά ικανή να συσσωρεύει κέρδος από την παροχή διαφορετικών υπηρεσιών στο σύστημα. Ωστόσο, το αναχρονιστικό θεσμικό πλαίσιο που επικρατεί, ακόμα, σε διάφορες αγορές ενέργειας ανά την Ευρώπη και τον κόσμο, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, αποτελεί τροχοπέδη για τη ραγδαία εξάπλωσή της. Ο εκσυγχρονισμός και η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας αποτελούν δύο απαραίτητες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη αποθηκευτικών σταθμών.

Στην παρούσα εργασία, δομείται ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο επιλύεται με τη χρήση του Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Το σύστημα περιλαμβάνει διάφορους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς θερμικών μονάδων, μεταβλητά και σταθερά κόστη θερμικών μονάδων, απαιτήσεις εφεδρειών, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και μπαταρία μαζί με τους τεχνικούς και λειτουργικούς της περιορισμούς. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με χαμηλή και με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ για δεδομένο φορτίο, αρχικά χωρίς αποθήκευση και στη συνέχεια με αποθήκευση που λειτουργεί ελεύθερα με αντικειμενικό σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Επιπροσθέτως, καταστρώνεται βέλτιστη προσφορά αποθήκευσης για συμμετοχή στο ενεργειακό αρμπιτράζ κατά την προ-ημερήσια αγορά, λαμβάνοντας υπόψη μία εκτιμώμενη οριακή τιμή κάθε ώρα. Η προσφορά της αποθήκευσης εισάγεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους και αξιολογείται η ένταξή της. Τέλος, γίνεται σύγκριση διάφορων μεγεθών για το σύστημα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, όταν αυτό λειτουργεί χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση σαν ελεύθερο στοιχείο και με αποθήκευση σε λειτουργία προσφοράς.

Λέξεις Κλειδιά

αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας, ενεργειακό αρμπιτράζ, βοηθητικές υπηρεσίες αποθήκευσης, ένταξη και φόρτιση μονάδων, οικονομική κατανομή, διείσδυση ΑΠΕ, περικοπές ΑΠΕ, στρεφόμενη εφεδρεία, μη στρεφόμενη εφεδρεία, προσφορά θερμικών μονάδων, προσφορά αποθήκευσης, οριακή τιμή συστήματος, Μεικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός, γραμμικοποίηση συστήματος, αντικειμενική συνάρτηση

Abstract

The ambitious target of achieving high penetration of renewable sources (RES) in energy mix has incentivized installation and operation of large scale energy storage systems. Although energy storage advantages are rather apparent (greater RES absorption, lower RES curtailment, economical demand peak coverage), some substantial obstacles have emerged. These obstacles concern economic viability of an investment in installation and operation of an energy storage system (ESS), based on the technology of lithium-ion batteries. The advantages of an ESS include its versatility which enables revenue stacking from different services provided to the system. However, the active old-fashioned regulatory framework in some places in Europe and generally in the world makes up a barrier, which hinders its expansion. An updated regulatory framework and energy market liberalization are necessary prerequisites in order for ESS to expand.

As this project is concerned, an electrical system is formed and resolved using Mixed Integer Linear Programming. System is constituted by technical and operational restrictions of conventional units, their variable and constant costs, reserve requirements, RES and battery linked with its technical and function restrictions. Simulations are conducted considering high and low RES penetration as demand is certain. In the first simulation, system is resolved without considering any storage as in the second a storage is included which operates as a free asset. The objective is to minimize the system total cost. Furthermore, battery optimal offer schedule is shaped in order to be submitted in the day-ahead market and participate in the energy arbitrage. This offer is formed by taking into account an estimation of the marginal price. A subsequent cost optimal simulation evaluates this offer and decides if battery should be commited or not and to what extent. Finally, all respective simulation results are being compared in common graphs.

Keywords

large scale energy storage, energy arbitrage, ancillary services, unit commitment, economic dispatch, RES penetration, RES curtailment, spinning reserve, non-spinning reserve, thermal units bidding, storage bidding, system marginal price, Mixed Integer Linear Programming, system linearization, objective function

Ευχαριστίες

Η διπλωματική μου εργασία σηματοδοτεί τη λήξη των προπτυχιακών μου σπουδών. Τα ιδιαίτερα αυτά χρόνια γνώρισα πολλούς ανθρώπους, με τη βοήθεια των οποίων εξέλιξα το χαρακτήρα μου και την προσωπικότητά μου. Οι αναμνήσεις είναι αμέτρητες και οι στιγμές ανεκτίμητης αξίας.

Θα ήθελα, πρώτα από όλα, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Σταύρο Παπαθανασίου, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος είναι ο επιβλέπων της παρούσας εργασίας και μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα. Παρά το ιδιαίτερα επιβαρυμένο πρόγραμμά του, αφιέρωσε πολλές ώρες για την καθοδήγησή μου και για σημαντικές επισημάνσεις, οι οποίες συνέβαλαν αποτελεσματικά στην ομαλή ροή της εργασίας μου. Ταυτόχρονα, θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκάρδια τον κύριο Γεώργιο Ψαρρό, διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος έδειξε ενδιαφέρον για την εξέλιξη της εργασίας μου από την πρώτη στιγμή και με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Οι πολύωρες συζητήσεις για την καλή κατανόηση διάφορων εννοιών εκ μέρους μου, η διάθεσή του για συχνή επικοινωνία, η προθυμία του να επιλύσει οποιαδήποτε απορία μου αλλά και το γενικότερα άψογο κλίμα συνεργασίας συνέβαλαν καταλυτικά στη σταδιακή προσέγγιση του θέματος και στην ολοκλήρωσή του.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους, με τους οποίους μοιραστήκαμε πολλές ωραίες στιγμές όλα αυτά τα χρόνια αλλά και πολλές σκέψεις, ιδέες και ανησυχίες. Περάσαμε πολλές ώρες μαζί, είτε διαβάζοντας, είτε συγγράφοντας ομαδικές εργασίες, είτε εξηγώντας έννοιες ο ένας στον άλλο, είτε συζητώντας επί παντός επιστητού, είτε βγαίνοντας για βόλτα ή άλλη δραστηριότητα. Αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι των ιδιαίτερων αυτών φοιτητικών χρόνων και τους ευχαριστώ θερμά, μέσα από την καρδιά μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους γονείς μου, Αναστάσιο και Τριανταφυλλιά και τις αδελφές μου, Κατερίνα και Ελπίδα. Η στήριξη, η συμπαράσταση και η υπομονή τους ήταν αμέριστη καθ΄ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στους γονείς μου, Αναστάσιο και Τριανταφυλλιά
Στις αδελφές μου, Κατερίνα και Ελπίδα

Περιεχόμενα

Περίληψη **3**

Abstract **5**

Ευχαριστίες **7**

Περιεχόμενα **11**

Κατάλογος Σχημάτων **15**

Κατάλογος Πινάκων **23**

1 Εισαγωγή **25**
1.1 Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - ΑΠΕ 25
1.2 Ο ρόλος της αποθήκευσης 26
1.3 Λειτουργία της αγοράς ενέργειας 27
1.3.1 Πληρωμή στην τιμή εκκαθάρισης (Pay-as-clear Auction) 27
1.3.2 Πληρωμή στην τιμή προσφοράς (Pay-as-bid Auction) 28
1.3.3 Δομή της αγοράς ενέργειας στην παρούσα εργασία 30
1.4 Οργάνωση Εργασίας 30

2 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας **33**
2.1 Μηχανικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 34
2.1.1 Αντλησιοταμίευση (PHS - Pumped Hydroelectric Storage) 34
2.1.2 Αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES - Compressed Air Energy Storage) 35
2.1.3 Αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους (Flywheels) 35
2.2 Θερμικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 36
2.2.1 Αποθήκευση ενέργειας με άντληση θερμότητας (PHES - Pumped Heat Energy Storage) 36
2.2.2 Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα (LAES - Liquid Air Energy Storage) 37
2.3 Χημικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 37
2.3.1 Υδρογόνο (Hydrogen storage) 37
2.4 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 37
2.4.1 Μπαταρίες Μολύβδου-οξέως (Lead-acid battery) 37
2.4.2 Μπαταρίες Θείου-νατρίου (NaS battery) 37
2.4.3 Μπαταρίες Θείου-νικελίου-χλωρίου (Sodium-nickel-chloride battery) 38
2.4.4 Μπαταρίες Νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) 38
2.4.5 Μπαταρίες Ιόντων-λιθίου (Li-ion) 38

2.4.6 Μπαταρίες Ροής (Flow batteries) 38
2.5 Ηλεκτρικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 38
2.5.1 Υπερπυκνωτές (Supercapacitors) 38
2.5.2 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage) 39

3 Αγορές ενέργειας και δυνατότητες αποθήκευσης 41
3.1 Θεσμικά εμπόδια ανάπτυξης σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας . . 41
3.2 Υπηρεσίες σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 42
3.2.1 Παροχή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας 42
3.2.2 Βοηθητικές υπηρεσίες 43
3.2.3 Υπηρεσίες στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 44
3.2.4 Υπηρεσίες στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 45
3.3 Εισόδημα αποθηκευτικών σταθμών 45
3.3.1 Οικονομική βιωσιμότητα αποθηκευτικού σταθμού 45
3.3.2 Αποζημίωση της αποθήκευσης 48

4 Μεθοδολογία διαχείρισης μονάδων και αποθήκευσης 51
4.1 Κατάστρωση προβλήματος διαχείρισης συμβατικής παραγωγής 52
4.1.1 Προσδιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης 52
4.1.2 Εξίσωση παραγωγής και ζήτησης 52
4.1.3 Μεταβλητό κόστος μονάδας παραγωγής 52
4.1.4 Κόστος εκκίνησης και κόστος σβέσης μονάδας 53
4.1.5 Κόστος μεταβλητών χαλάρωσης 53
4.1.6 Μέγιστη και ελάχιστη ισχύς εξόδου 54
4.1.7 Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας και στάσης 54
4.2 Εισαγωγή αποθήκευσης 55
4.2.1 Ισοζύγιο ισχύος 55
4.2.2 Επίπεδο και όρια φόρτισης 55
4.3 Τήρηση Εφεδρείας 55
4.3.1 Πρωτεύουσα εφεδρεία 56
4.3.2 Δευτερεύουσα εφεδρεία 56
4.3.3 Τριτεύουσα εφεδρεία 57
4.3.4 Εφεδρεία από την αποθήκευση 57
4.3.5 Εφεδρεία και όρια λειτουργίας θερμικών μονάδων 58
4.4 Εισαγωγή ΑΠΕ 59
4.5 Εφαρμογή της μεθοδολογίας 60
4.5.1 Εφαρμογή με χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ 60
4.5.2 Εφαρμογή με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ 76

5 Κατάστρωση προσφοράς αποθήκευσης 93
5.1 Εκτίμηση οριακής τιμής 93
5.2 Μεγιστοποίηση κέρδους μπαταρίας και κατάστρωση προσφοράς 94
5.3 Ένταξη μπαταρίας με βάση την προσφορά 96
5.3.1 Εφαρμογή με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και με αποθήκευση 6 h x 250 MW 96
5.3.2 Επίδραση τιμής προσφοράς αποθήκευσης στην οριακή τιμή συστήματος 106
5.3.3 Επίδραση τιμής προσφοράς αποθήκευσης στα διάφορα μεγέθη 108
5.4 Συγκριτικά διαγράμματα 109
5.4.1 Συγκριτικά διαγράμματα για προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο 110
5.4.2 Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τον τρόπο προσφοράς των μονάδων 112

6 Επίλογος **119**
6.1 Συμπεράσματα 119
6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις 119

Παραρτήματα **121**

A Ονοματολογία **123**
A.1 Σύνολα 123
A.2 Δυαδικές Μεταβλητές 123
A.3 Συνεχείς Μεταβλητές 124

B Θερμικές Μονάδες **127**
B.1 Κόστος εκκίνησης μονάδων 127
B.2 Μεταβλητό κόστος μονάδων 127

Γ Προσφορά στο οριακό κόστος **131**
Γ.1 Χωρίς αποθήκευση 131
Γ.2 Με αποθήκευση σαν ελεύθερο στοιχείο 137
Γ.3 Κατάστρωση προσφοράς 145
Γ.4 Με αποθήκευση σε λειτουργία προσφοράς 147
Γ.5 Επίδραση τιμής προσφοράς αποθήκευσης στην οριακή τιμή και σε διάφορα μεγέθη 155
Γ.6 Συγκριτικά διαγράμματα 158

Βιβλιογραφία **161**

Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας για το έτος 2018 [25] 25
1.2 Πληρωμή στην τιμή εκκαθάρισης [1] 28
1.3 Πληρωμή στην τιμή προσφοράς [1] 29
1.4 Πληρωμή στην τιμή προσφοράς. Αποτέλεσμα ανεξέλεγκτου πονταρίσματος [1] 29
1.5 Δομή της αγοράς στην παρούσα εργασία 30

2.1 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση [27] 34
2.2 Σχηματικό διάγραμμα συμβατικού(διαβατικού) σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα [23] 35
2.3 Σχηματικό διάγραμμα προηγμένου αδιαβατικού σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα[23] 36
2.4 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς παγκοσμίως ανά τεχνολογία αποθήκευσης [12] 39

3.1 Παράδειγμα πολλαπλών χρήσεων αποθήκευσης. Χρονική μετατόπιση ενέργειας, περικοπή αιχμής και απόκριση στη ζήτηση με και χωρίς αποθήκευση [11] 42
3.2 Εφαρμογές και υπηρεσίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους [27] 44
3.3 Αξία σταθμού αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με τις υπηρεσίες που παρέχει [6] 46
3.4 Αξία σταθμού αποθήκευσης ενέργειας ο οποίος παρέχει πολλαπλές υπηρεσίες [9] 46

4.1 Γραμμικοποίηση μεταβλητού κόστους μονάδας παραγωγής [15] 53
4.2 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο 61
4.3 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα 61
4.4 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ 61
4.5 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 62
4.6 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 62
4.7 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 62
4.8 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 63
4.9 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 63
4.10 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών 63
4.11 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 64

4.12 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) . . . 64
4.13 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας . . . 64
4.14 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών . . . 65
4.15 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων . . . 65
4.16 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών 65
4.17 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας 66
4.18 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος . . . 66
4.19 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο . . . 68
4.20 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα . . 68
4.21 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ . . . 68
4.22 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 69
4.23 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας . . . 69
4.24 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας . . . 69
4.25 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας . . . 70
4.26 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων . . . 70
4.27 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών . 70
4.28 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 71
4.29 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) . . . 71
4.30 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας . . . 71
4.31 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών . . . 72
4.32 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων . . . 72
4.33 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών . 72
4.34 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας . 73
4.35 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος . . . 73
4.36 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή 73
4.37 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ . . . 74
4.38 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης . . . 74
4.39 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία 74
4.40 Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών . . . 75
4.41 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο . . . 76
4.42 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα . 76
4.43 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ . . . 77
4.44 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας . . . 77
4.45 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας . . . 77
4.46 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας . . . 78
4.47 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας . . . 78

4.48 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 78
4.49 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών 79
4.50 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 79
4.51 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) 79
4.52 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας 80
4.53 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών 80
4.54 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων . . . 80
4.55 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών 81
4.56 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας 81
4.57 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος 81
4.58 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο 83
4.59 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα . . . 83
4.60 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ 83
4.61 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 84
4.62 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 84
4.63 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 84
4.64 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 85
4.65 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 85
4.66 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών . . 85
4.67 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 86
4.68 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) 86
4.69 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας 86
4.70 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών 87
4.71 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων 87
4.72 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών 87
4.73 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας . 88
4.74 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος 88
4.75 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή 88
4.76 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ 89
4.77 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης 89
4.78 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία 89
4.79 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών 90

5.1 Νέφος οριακών τιμών ανά διάστημα θερμικής παραγωγής 94
5.2 Λειτουργία μπαταρίας και εκτιμώμενη οριακή τιμή 94
5.3 Εκτιμώμενο κέρδος μπαταρίας 95
5.4 Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης 95
5.5 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραγωγή-φορτίο 96
5.6 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα 97

5.7 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αξιοποίηση ΑΠΕ 97
5.8 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 97
5.9 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 98
5.10 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 98
5.11 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 98
5.12 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 99
5.13 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών 99
5.14 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 99
5.15 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) 100
5.16 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς ενέργειας 100
5.17 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς εφεδρειών 100
5.18 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων 101
5.19 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών 101
5.20 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας 101
5.21 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος 102
5.22 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή 102
5.23 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ 102
5.24 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης 103
5.25 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαφορά οριακής τιμής και κέρδους από τα εκτιμώμενα 103
5.26 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία 103
5.27 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών 104
5.28 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±15 $ 106
5.29 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±10 $ 106
5.30 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±5 $ 106
5.31 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±2,5 $ 107
5.32 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος μπαταρίας σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της 108
5.33 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Μέγεθος αγοράς σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας 108

5.34 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος συστήματος σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας 108
5.35 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας 109
5.36 Σύγκριση οριακών τιμών 110
5.37 Σύγκριση μέσου κόστους παραγωγής ενέργειας 110
5.38 Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας 110
5.39 Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας 111
5.40 Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας 111
5.41 Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας 111
5.42 Σύγκριση οριακών τιμών τριτεύουσας θετικής εφεδρείας 112
5.43 Σύγκριση οριακών τιμών ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 113
5.44 Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 113
5.45 Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 114
5.46 Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 114
5.47 Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 115
5.48 Σύγκριση οριακών τιμών τριτεύουσας θετικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 115
5.49 Σύγκριση κέρδους μπαταρίας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων . . . 116
5.50 Σύγκριση αγοραίου κόστους ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων . . . 116
5.51 Σύγκριση αντικειμενικού κόστους συστήματος ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 117
5.52 Σύγκριση κέρδους θερμικών μονάδων ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων 117

B.1 Μεταβλητό κόστος μονάδων 128
B.2 Μέσο μεταβλητό κόστος μονάδων 128
B.3 Ανάλυση κόστους μονάδας 1 (άνθρακας) 128
B.4 Ανάλυση κόστους μονάδας 11 (ΣΚ) 129

Γ.1 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο 131
Γ.2 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα . 131
Γ.3 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ 132
Γ.4 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 132
Γ.5 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 132
Γ.6 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 133
Γ.7 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 133
Γ.8 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 133
Γ.9 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών 134
Γ.10 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 134
Γ.11 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) 134
Γ.12 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας 135
Γ.13 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών 135

Γ.14 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων . . . 135
Γ.15 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών 136
Γ.16 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας 136
Γ.17 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος 136
Γ.18 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο 137
Γ.19 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα . . . 137
Γ.20 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ 137
Γ.21 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 138
Γ.22 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 138
Γ.23 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 138
Γ.24 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 139
Γ.25 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 139
Γ.26 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών . . 139
Γ.27 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 140
Γ.28 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) 140
Γ.29 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας 140
Γ.30 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών 141
Γ.31 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων 141
Γ.32 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών 141
Γ.33 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας . 142
Γ.34 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος 142
Γ.35 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή 142
Γ.36 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ 143
Γ.37 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης 143
Γ.38 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία 143
Γ.39 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών 144
Γ.40 Νέφος οριακών τιμών ανά διάστημα θερμικής παραγωγής 145
Γ.41 Λειτουργία μπαταρίας και εκτιμώμενη οριακή τιμή 145
Γ.42 Εκτιμώμενο κέρδος μπαταρίας 145
Γ.43 Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης 146
Γ.44 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραγωγή-φορτίο 147
Γ.45 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα 147
Γ.46 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αξιοποίηση ΑΠΕ 147
Γ.47 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας 148
Γ.48 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 148
Γ.49 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 148
Γ.50 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας 149

Γ.51 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων 149
Γ.52 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών 149
Γ.53 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών 150
Γ.54 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση) 150
Γ.55 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς ενέργειας 150
Γ.56 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς εφεδρειών 151
Γ.57 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων 151
Γ.58 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών 151
Γ.59 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας 152
Γ.60 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος 152
Γ.61 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή 152
Γ.62 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ 153
Γ.63 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης 153
Γ.64 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαφορά οριακής τιμής και κέρδους από τα εκτιμώμενα 153
Γ.65 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία 154
Γ.66 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών 154
Γ.67 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±15 $ 155
Γ.68 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±10 $ 155
Γ.69 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±5 $ 155
Γ.70 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±2,5 $ 156
Γ.71 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος μπαταρίας σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της 156
Γ.72 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Μέγεθος αγοράς σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας 156
Γ.73 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος συστήματος σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας 157
Γ.74 Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας 157
Γ.75 Σύγκριση οριακών τιμών 158
Γ.76 Σύγκριση μέσου κόστους παραγωγής ενέργειας 158
Γ.77 Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας 158
Γ.78 Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας 159
Γ.79 Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας 159
Γ.80 Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας 159

Γ.81 Σύγκριση οριακών τιμών τριτεύουσας θετικής εφεδρείας 160

Κατάλογος Πινάκων

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [2] 39

4.1 Σύγκριση τιμών με και χωρίς αποθήκευση για χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους 75
4.2 Σύγκριση τιμών με και χωρίς αποθήκευση για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους 90
4.3 Σύγκριση τιμών με και χωρίς αποθήκευση για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά μονάδων στο οριακό τους κόστος 90

5.1 Σύγκριση τιμών χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση (6x250) σαν ελεύθερο στοιχείο και με αποθήκευση (6x250) σε λειτουργία προσφοράς για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους 104
5.2 Σύγκριση τιμών χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση (6x250) σαν ελεύθερο στοιχείο και με αποθήκευση (6x250) σε λειτουργία προσφοράς για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο οριακό κόστους τους . 105

B.1 Κόστος εκκίνησης ανά τύπο μονάδας 127

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - ΑΠΕ

Η μαζική διείσδυση των ΑΠΕ αποτελεί τη νέα πραγματικότητα στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές κυβερνήσεις ανά τον κόσμο έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους σε βάθος χρόνου για απεξάρτηση ή ελαχιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα. Κατευθυντήρια δύναμη αυτής της προσπάθειας είναι η ανάγκη για μείωση εκπομπής ρυπογόνων ουσιών. Στο πλαίσιο αυτό δίνονται κίνητρα για εγκατάσταση νέων σταθμών ΑΠΕ (κυρίως αιολικοί, φωτοβολταϊκοί και υδροηλεκτρικοί), οι οποίοι μακροχρόνια θα αντικαταστήσουν τους συμβατικούς σταθμούς. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας για το έτος 2018. Κυρίαρχη θέση κατέχει το φυσικό αέριο και ο λιγνίτης, ενώ οι ΑΠΕ υπεισέρχονται συνολικά με ποσοστό 31,71%.

Σχήμα 1.1: Το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας για το έτος 2018 [25]

Στην πράξη, όμως, αποδεικνύεται ότι η μετάβαση στη νέα πραγματικότητα κάθε άλλο παρά εύκολη και ομαλή είναι. Ο απρόβλεπτος χαρακτήρας και η στοχαστικότητα των ΑΠΕ δεν επιτρέπουν την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, καθώς τίθεται θέμα επάρκειας ισχύος. Με άλλα λόγια, τη στιγμή, κατά την οποία η ζήτηση ενέργειας είναι υψηλή μπορεί η αιολική ή η φωτοβολταϊκή παραγωγή να μην επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση.

Ακόμα, η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στο σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα ευστάθειας

του συστήματος, τα οποία σημαίνουν έντονες και απότομες μεταβολές στη τιμή και τη συχνότητα της τάσης. Τα προβλήματα αυτά είναι διαχειρίσιμα όταν η αναλογία στοχαστικών προς συνεχούς διαθεσιμότητας μονάδες είναι σχετικά μικρή και αντιμετωπίζονται με αυξομείωση της λειτουργίας των συμβατικών μονάδων, οι οποίες ωστόσο έχουν και αυτές κάποια τεχνικά ανώτατα και κατώτατα όρια λειτουργίας που δεν πρέπει να υπερβαίνονται [28].

Οι σύγχρονες μηχανές είναι αυτές που έως τώρα ρυθμίζουν κατά κύριο λόγο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας ή μειώνοντας την παροχή καυσίμου για τη ρύθμιση της συχνότητας-φορτίου και το ρεύμα διέγερσης για τη ρύθμιση της τάσης ή της αέργου ισχύος. Η αδράνεια του συστήματος καθορίζεται από την αδράνεια των στρεφόμενων μηχανών και αυτή η αδράνεια είναι απαραίτητη για την ομαλή και ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Οι ΑΠΕ αυξάνουν την ισχύ του συστήματος, χωρίς όμως να αυξάνουν την αδράνειά του με αποτέλεσμα το σύστημα σε περίπτωση σφάλματος να μην μπορεί να επανέλθει εύκολα σε ομαλό σημείο λειτουργίας.

Έως τώρα, η διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα γίνεται με ταυτόχρονη τήρηση στρεφόμενης εφεδρείας ικανής να καλύψει μέρος ή όλη τη ζήτηση σε περίπτωση απώλειας των αιολικών. Στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, στα οποία τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι περισσότερο ευάλωτα, εφαρμόζονται αυστηροί περιορισμοί διείσδυσης ΑΠΕ, που επιβάλλουν συχνά περικοπή αιολικής παραγωγής και καθορίζουν την ακριβή ισχύ λειτουργίας ανά παραγωγό (set-point).

1.2 Ο ρόλος της αποθήκευσης

Σε αυτό το σημείο αρχίζει να αναδύεται η αξία της αποθήκευσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο εφοδιάζεται από στοχαστικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας, όταν αυτή δε μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο, είναι βαρύνουσας σημασίας για την ενσωμάτωση περισσότερων ΑΠΕ. Κατά τις ώρες που ο άνεμος είναι αρκετά δυνατός ή υπάρχει καλή ηλιοφάνεια, η περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια να μη μπορεί να αξιοποιηθεί, για λόγους οι οποίοι εξηγούνται παραπάνω, είναι ορατή. Ακριβώς αυτές τις ώρες η αποθήκευση μπορεί να αναλαμβάνει δράση και να απορροφά αυτή την ενέργεια. Στη συνέχεια κάποια άλλη στιγμή της ημέρας, όταν η ζήτηση αυξηθεί, η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια μπορεί να αξιοποιείται. Η παραπάνω διαδικασία αναφέρεται ως Energy Shifting και το όφελος της δεν είναι μόνο η μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ, αλλά η συνολικά οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος, καθώς οι θερμικές μηχανές δε λειτουργούν αποδοτικά για την κάλυψη της αιχμής του φορτίου.

Η αποθήκευση, πέραν του ρόλου που περιγράφεται προηγουμένως, μπορεί να επιτελέσει ακόμα θεμελιώδους σημασίας λειτουργίες σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αδράνεια, όπως αναφέρεται παραπάνω, αποτελεί ένα δείκτη σταθερότητας του συστήματος και ουσιαστικά η στρεφόμενη μάζα των σύγχρονων μηχανών αποτελεί αποθηκευμένη ενέργεια. Οι σταθμοί αποθήκευσης, έχοντας δυνατότητα να παρέχουν ενεργό ισχύ ανά πάσα στιγμή, κατά κάποιο τρόπο προσομοιάζουν τη λειτουργία της στρεφόμενης εφεδρείας και συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του συστήματος (δηλαδή της συχνότητας). Η δυνατότητα αυτή των αποθηκευτικών σταθμών είναι καθολικά αναγνωρισμένη στη βιβλιογραφία και αναμένεται να αξιοποιηθεί στα συστήματα του άμεσου μέλλοντος.

Το κόστος εγκατάστασης ενός αποθηκευτικού σταθμού μεγάλης κλίμακας, ανάλογα και με την τεχνολογία, είναι αυξημένο. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο αποθήκευσης με μεγάλη εγκατεστημένη χωρητικότητα ανά τον κόσμο. Πέραν των αρκετών τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί και αναπτύσσονται για αποθήκευση ενέργειας, σήμερα η τεχνολογία δείχνει προς την κατεύθυνση των μπαταριών ιόντων-λιθίου. Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου έχουν χαρακτηριστικά, όπως γρήγορη απόκριση, ικανοποιητικός όγκος απο-

θηκευμένης ενέργειας, τα οποία μοιάζουν ελκυστικά για τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Και εδώ τίθεται ένα βασικό ερώτημα, το οποίο ταλανίζει την ιδέα της αποθήκευσης και είναι αυτό της οικονομικής βιωσιμότητας μιας τέτοιας επένδυσης. Η αποθήκευση, πράγματι, δύναται να παρέχει ένα πολύ μεγάλο εύρος λειτουργιών, ωστόσο το παρόν θεσμικό πλαίσιο, η έλλειψη κινήτρων, η απουσία κατάλληλου προγραμματισμού και σχεδιασμού και η παρούσα δομή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δυσχεραίνουν την αθρόα ανάπτυξή τους, καθιστώντας πολλές φορές μια επένδυση στην αποθήκευση οριακά ή μη βιώσιμη.

1.3 Λειτουργία της αγοράς ενέργειας

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να διεκπεραιώσουν τις οικονομικές συναλλαγές που αφορούν την ανταλλαγή ενέργειας, χρησιμοποιούν τη διαδικασία της δημοπρασίας. Η διαδικασία της δημοπρασίας απαρτίζεται από τρία θεμελιώδη στοιχεία: την προσφορά, την εκκαθάριση και τους κανόνες τιμολόγησης. Κάθε υποβληθείσα προσφορά εμπεριέχει την ακριβή ποσότητα, τιμή και ποιότητα του προσφερόμενου προϊόντος. Η διαδικασία της εκκαθάρισης καθορίζει την ποσότητα του εμπορευόμενου προϊόντος και τελικά τους επιτυχόντες της δημοπρασίας. Τέλος, οι κανόνες τιμολόγησης προσδιορίζουν τελικά σε ποια τιμή θα πραγματοποιηθεί η συναλλαγή [1].

Οι διαδικασίες δημοπρασίας των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας είναι κλειστές, υπό την έννοια ότι όλοι οι συμμετέχοντες υποβάλουν ταυτόχρονα τις προσφορές τους και δεν γνωρίζουν τις αντίστοιχες προσφορές των ανταγωνιστών τους. Κάθε παραγωγός προσφέρει διάφορες ποσότητες ενέργειας, αντιστοιχίζοντας την κάθε μία σε μία τιμή. Ένα βασικό μειονέκτημα, σύμφωνα με το [1], είναι ότι οι επιτυχόντες της δημοπρασίας δεν αποκτούν γνώση του εισοδήματος των ανταγωνιστών τους και πιθανόν να θεωρήσουν ότι θα μπορούσαν να έχουν μεγαλύτερο κέρδος αν είχαν προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές.

Οι συμμετέχοντες, στη διαδικασία της ενεργειακής δημοπρασίας που διεξάγει η αγορά, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στους price-taker και στους price-maker . Οι πρώτοι συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας και δεν έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την κατάστασή της με τη δράση τους. Αντίθετα, οι price-maker μπορούν, με τη συμμετοχή τους στην αγορά, να την επηρεάσουν με τρόπο που θα είναι κερδοφόρος για αυτούς. Με αυτόν τον τρόπο η αγορά οδηγείται σε ολιγοπώλιο, αφού ουσιαστικά λίγοι παραγωγοί τη ρυθμίζουν. Είναι σημαντικό να τονισθεί, ότι κάθε συμμετέχοντας της αγοράς προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το δικό του κέρδος, αγνοώντας την ευημερία των υπολοίπων. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσει εξειδικευμένες στρατηγικές υποβολής προσφορών, με γνώση (Complete Information Games) ή χωρίς (Imperfect Information Games) της κατάστασης της αγοράς και της στρατηγικής των ανταγωνιστών του [1]. Όμως, η μεγιστοποίηση της ατομικής ευημερίας δε συνεπάγεται τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας (social welfare) [14].

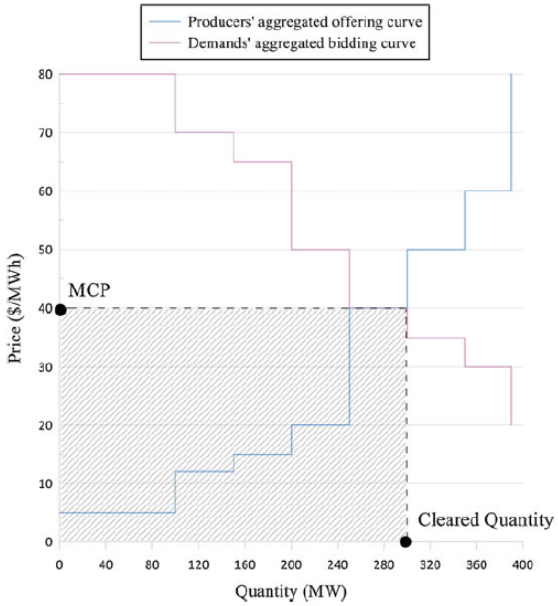
1.3.1 Πληρωμή στην τιμή εκκαθάρισης (Pay-as-clear Auction)

Στη δημοπρασία του τύπου πληρωμής στην τιμή εκκαθάρισης, οι συμμετέχοντες παραγωγοί υποβάλλουν ο καθένας ξεχωριστά τις προσφορές ενέργειας με την αντίστοιχη τιμή. Η διαδικασία γίνεται με κλειστό τρόπο, δηλαδή κάθε παραγωγός δε γνωρίζει τις προσφορές των ανταγωνιστών του. Ο ανεξάρτητος διαχειριστής του συστήματος τοποθετεί κατά αύξουσα τιμή τις προσφορές πώλησης ενέργειας και κατά φθίνουσα τιμή τις προσφορές αγοράς ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Η τομή των δύο αυτών καμπυλών ορίζει την τιμή της αγοράς, η οποία συνήθως αναφέρεται ως **οριακή τιμή** και ταυτόχρονα καθορίζει την εμπορευόμενη ποσότητα ενέργειας. Όλες οι πωλήσεις και αγορές ενέργειας πραγματοποιούνται στην οριακή τιμή. Αυτή η μέθοδος αποτελεί τον απλούστερο μηχανισμό για συναλλαγή

ενέργειας και χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ. Από τη μία όλοι οι παραγωγοί αποζημιώνονται στη μέγιστη αποδεκτή τιμή και κατά συνέπεια, ποντάροντας στο οριακό κόστος τους, δεν έχουν κάποια εισοδηματική απώλεια, ενώ από την άλλη όλοι οι αγοραστές ενέργειας πληρώνουν στο ελάχιστο δυνατό κόστος [1].

Σε μεγάλα συστήματα, συνηθίζεται το σύστημα να χωρίζεται σε ζώνες και, επομένως, κάθε ζώνη να έχει ξεχωριστή οριακή τιμή. Επίσης, σε μεγάλα συστήματα, υπάρχει και η έννοια της τοπικής οριακής τιμής (Locational Marginal Price), η οποία είναι αποτέλεσμα της συμφόρησης του δικτύου σε ορισμένα σημεία του συστήματος.

Σε γενικές γραμμές, ο μηχανισμός Pay-as-clear θεωρείται δίκαιος υπό την έννοια ότι το ποντάρισμα των παραγωγών δε μπορεί να ξεφύγει πολύ από ένα συγκεκριμένο εύρος γύρω από το οριακό κόστος τους. Πιο αναλυτικά, εάν ένας παραγωγός ποντάρει σε μια πιο υψηλή τιμή από το παρόν οριακό κόστος του, ενεδρεύει ο κίνδυνος της απόρριψής του από το διαχειριστή και με αυτόν τον τρόπο θα χαθεί η ευκαιρία συμμετοχής του στην αγορά. Από την άλλη πλευρά, εάν προσφέρει ενέργεια σε τιμή χαμηλότερη από το οριακό κόστος του, υπάρχει η πιθανότητα να διαμορφώσει αυτός την οριακή τιμή και ο διαχειριστής ενδέχεται να τον εντάξει στο σύνολο ή σε ένα μέρος της παραγωγής του με αποτέλεσμα να υποστεί ζημία. Επομένως, τον παραγωγό τον συμφέρει να ποντάρει πάντα κοντά στο οριακό κόστος του και κατά συνέπεια, η διαδικασία αυτή οδηγεί στη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας.

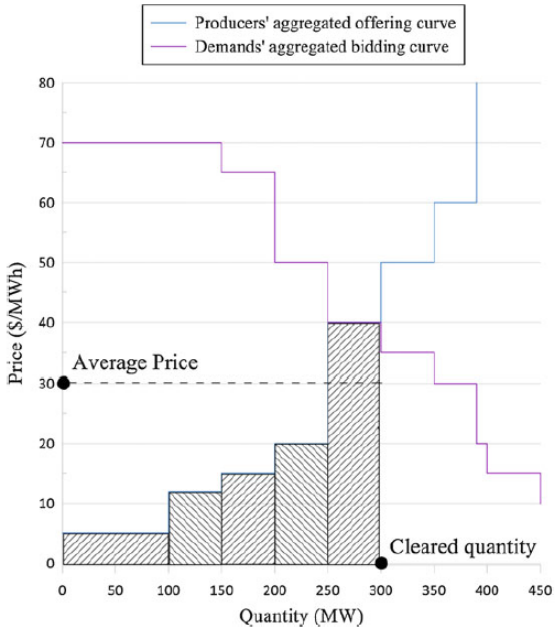


Σχήμα 1.2: Πληρωμή στην τιμή εκκαθάρισης [1]

1.3.2 Πληρωμή στην τιμή προσφοράς (Pay-as-bid Auction)

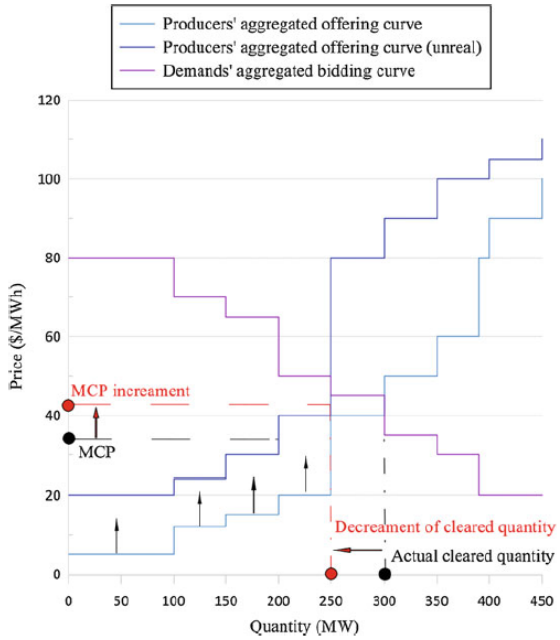
Ο μηχανισμός πληρωμής στην τιμή της προσφοράς αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο αποζημίωσης των παραγωγών. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως προϊδεάζει πιθανώς και ο τίτλος, κάθε παραγωγός αποζημιώνεται στην τιμή ποντάρίσματός του και κάθε αγοραστής πληρώνει στην τιμή προσφοράς του. Κάθε παραγωγός σε αυτήν την περίπτωση προσφέρει, όπως είναι αναμενόμενο, σε τιμή υψηλότερη από το οριακό κόστος του για να εξασφαλίσει κέρδος. Το μέγιστο κέρδος μπορεί να το εξασφαλίσει μόνο αν προβλέψει με μεγάλη ακρίβεια την οριακή τιμή.

Ωστόσο, σε αυτόν το μηχανισμό η διαφορά του οριακού κόστους του παραγωγού από την τιμή ποντάρίσματός του είναι ανεξέλεγκτη. Με άλλα λόγια, μειώνεται ο βαθμός ειλικρίνειας



Σχήμα 1.3: Πληρωμή στην τιμή προσφοράς [1]

του παραγωγού ως προς το πραγματικό κόστος παραγωγής του και επιζητεί ολοένα και μεγαλύτερο κέρδος. Όταν αυτό γίνεται μαζικά, οδηγεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4 σε αύξηση της οριακής τιμής και σε μείωση της ποσότητας ενέργειας που συναλλάσσεται (μείωση κοινωνικής ευημερίας).



Σχήμα 1.4: Πληρωμή στην τιμή προσφοράς. Αποτέλεσμα ανεξέλεγκτου πονταρίσματος [1]

Από την άλλη πλευρά, υποστηρίζεται ότι ο μηχανισμός Pay-as-bid επιτρέπει την ανάπτυξη διάφορων στρατηγικών πονταρίσματος των παραγωγών, με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερου ανταγωνισμού. Επιπροσθέτως, υποστηρίζεται ότι οι παραγωγοί δε θα ξεφεύγουν πολύ από το κόστος παραγωγής τους, δεδομένου ότι δεν κατέχουν πληροφορίες των ανταγωνιστών τους [1]. Ακόμα, στο [20] αποδεικνύεται ότι για τέλεια ανελαστική ζήτηση (πάγια ζήτηση), ο μηχανισμός Pay-as-bid οδηγεί σε χαμηλότερες μέσες οριακές τιμές από

τον μηχανισμό Pay-as-clear.

1.3.3 Δομή της αγοράς ενέργειας στην παρούσα εργασία

Στην παρούσα εργασία, η αγορά θεωρείται ότι λειτουργεί με το μηχανισμό αποζημίωσης Pay-as-clear, δηλαδή όλοι οι ενταγμένοι παραγωγοί αποζημιώνονται με ενιαία τιμή, την οριακή τιμή του συστήματος. Σαν παραγωγοί ενέργειας θεωρούνται οι θερμικές-συμβατικές μονάδες παραγωγής ή γεννήτριες, τα αιολικά, τα φωτοβολταϊκά και η αποθήκευση κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης. Οι θερμικές μονάδες υποβάλουν προσφορές πώλησης ενέργειας στο οριακό και στο μέσο μεταβλητό κόστος τους, ενώ τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά υπεισέρχονται με μηδενικό κόστος, δηλαδή υπεισέρχονται κατά προτεραιότητα. Η πιο ακριβή, αλλά ταυτόχρονα απαραίτητη στην ένταξη, θερμική μονάδα είναι αυτή που καθορίζει τελικά την οριακή τιμή κάθε ώρα. Η οριακή τιμή καθορίζεται από τη διαδικασία ένταξης των οικονομικότερων μονάδων από το διαχειριστή. Ο διαχειριστής φροντίζει για την οικονομικότερη κάλυψη του φορτίου, στο οποίο πιθανόν να προστίθεται και η αποθήκευση κατά τη διαδικασία φόρτισης. Το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσπάθεια τιμολόγησης των προσφορών αγοράς και πώλησης ενέργειας από την αποθήκευση, καθώς και του καθορισμού του τρόπου λειτουργίας της κάθε ώρα, με σκοπό να μεγιστοποιήσει το κέρδος της λαμβάνοντας υπόψη τα εσωτερικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της και το διττό ρόλο που κατέχει (απορροφά και εγχέει ισχύ). Είναι ξεκάθαρο πλέον, ότι η αποθήκευση είναι δυνητικά παραγωγός και καταναλωτής και, επομένως, έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλευτεί διαφορές τιμών στην ενέργεια μέσα στην ημέρα για να αποκομίσει κέρδος (ενεργειακό αρμπιτράζ). Σε αυτό το κέρδος δύναται να προστεθούν και οι διάφορες αμοιβές από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών, όπως η παροχή εφεδρείας. Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται η δομή που ακολουθεί η αγορά σε αυτήν την εργασία.

Σχήμα 1.5: Δομή της αγοράς στην παρούσα εργασία

1.4 Οργάνωση Εργασίας

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια ένταξης και αξιολόγησης λειτουργίας ενός αποθηκευτικού σταθμού σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αγορά θεωρείται ότι λειτουργεί με το μηχανισμό αποζημίωσης Pay-as-clear και η αποθήκευση, στο πλαίσιο αυτό, επιθυμεί να διαδραματίσει ένα ξεχωριστό ρόλο στο σύστημα, με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζει κέρδος. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία οργανώνεται ως εξής:

- Στο **κεφάλαιο 2** γίνεται μία σύντομη αναφορά των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης, του τρόπου λειτουργίας τους καθώς και των εσωτερικών χαρακτηριστικών τους.
- Στο **κεφάλαιο 3** περιγράφονται τα διάφορα θεσμικά εμπόδια ανάπτυξης των αποθηκευτικών σταθμών, οι υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει σε ένα σύστημα η αποθήκευση αλλά και διάφορα παραδείγματα τρόπων και μεθόδων αποζημίωσης αποθηκευτικών σταθμών.
- Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία διαχείρισης των συμβατικών μονάδων και της αποθήκευσης. Στη συνέχεια, η μεθοδολογία εφαρμόζεται χωρίς αποθήκευση και με αποθήκευση να λειτουργεί σαν ελεύθερο στοιχείο του συστήματος. Γίνεται εκτενής παρουσίαση των αποτελεσμάτων για δύο διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ.
- Στο **κεφάλαιο 5** εφαρμόζεται μεθοδολογία βελτιστοποίησης του κέρδους της μπαταρίας για τη συμμετοχή της στο ενεργειακό αρμπιτράζ και καθορίζονται οι προσφορές της αποθήκευσης στην αγορά ενέργειας. Οι προσφορές αυτές στη συνέχεια δίνονται ως είσοδος σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους και αξιολογείται η ένταξη της μπαταρίας από το διαχειριστή. Παρουσιάζονται διάφορα συγκριτικά διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων.
- Στο **κεφάλαιο 6** διατυπώνονται συνοπτικά τα βασικά συμπεράσματα και αναφέρονται διάφορες μελλοντικές επεκτάσεις του θέματος.
- Στο **παράρτημα Α** εξηγείται λεπτομερώς ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.
- Στο **παράρτημα Β** δίνονται πληροφορίες και στοιχεία για τις θερμικές μονάδες που χρησιμοποιούνται σε όλες τις προσομοιώσεις.
- Στο **παράρτημα Γ** δίνονται όλα τα διαγράμματα των προσομοιώσεων που αφορούν την προσφορά των θερμικών μονάδων στο οριακό τους κόστος.

Κεφάλαιο 2

Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες ως προς τον τρόπο αποθήκευσης της ενέργειας. Κάθε κατηγορία περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους:

- Μηχανικός
  - Αντλησιοταμίευση (PHS - Pumped Hydroelectric Storage)
  - Αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES - Compressed Air Energy Storage)
  - Αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους (Flywheels)
- Θερμικός
  - Άντληση θερμότητας (PHES - Pumped Heat Energy Storage)
  - Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα (LAES - Liquid Air Energy Storage)
- Χημικός
  - Υδρογόνο (Hydrogen storage)
- Ηλεκτροχημικός
  - Μπαταρίες Μολύβδου-οξέως (Lead-acid battery)
  - Μπαταρίες Θείου-νατρίου (NaS battery)
  - Μπαταρίες Θείου-νικελίου-χλωρίου (Sodium-nickel-chloride battery)
  - Μπαταρίες Νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)
  - Μπαταρίες Ιόντων-λιθίου (Li-ion)
  - Μπαταρίες Ροής (Flow batteries)
- Ηλεκτρικός και μαγνητικός
  - Υπερπυκνωτές (Supercapacitors)
  - Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage)

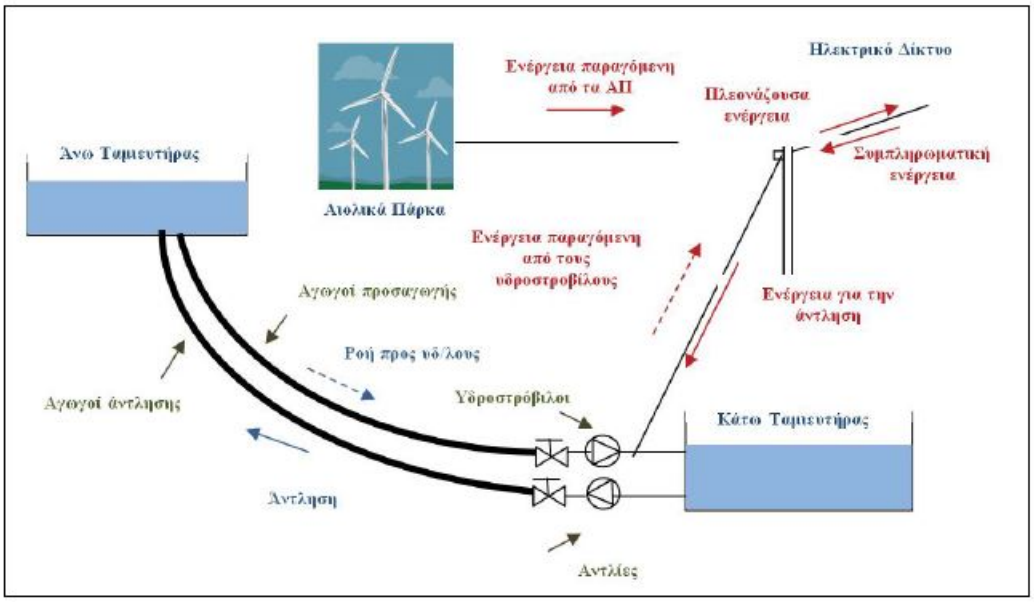
Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και διαφορετική λειτουργία. Ωστόσο από αυτές τις μεθόδους ορισμένες μόνο έχουν εμπορική εφαρμογή και μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα μεγάλης κλίμακας, καθώς οι υπόλοιπες βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο ή με την υπάρχουσα μορφή τους είναι ασύμφορες οικονομικά.

2.1 Μηχανικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

2.1.1 Αντλησιοταμίευση (PHS - Pumped Hydroelectric Storage)

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Με συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα 125 GW παγκοσμίως, η αντλησιοταμίευση κατέχει κυρίαρχη θέση στην αποθήκευση ενέργειας, καθώς αναπαριστά το 99% της συνολικής εγκατεστημένης χωρητικότητας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [2, 23].

Η τεχνολογία αυτή εδράζεται στη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικά έργα. Ειδικότερα, η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες και έναν υδροστρόβιλο. Ο άνω ταμιευτήρας, ο οποίος έχει υψομετρική διαφορά από τον κάτω ταμιευτήρα, αποθηκεύει νερό κατά της διάρκεια της «φόρτισης». Λόγω του υψομέτρου το νερό έχει δυναμική ενέργεια. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το νερό που βρίσκεται στον άνω ταμιευτήρα αφήνεται να φτάσει στον υδροστρόβιλο μέσω των ειδικών αγωγών νερού και στη συνέχεια καταλήγει στον κάτω ταμιευτήρα. Η διαδικασία γίνεται αντίστροφα, όταν πρόκειται να αποθηκευτεί ενέργεια, δηλαδή στην τελευταία περίπτωση το νερό ανεβαίνει από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω μέσω αντλιών.

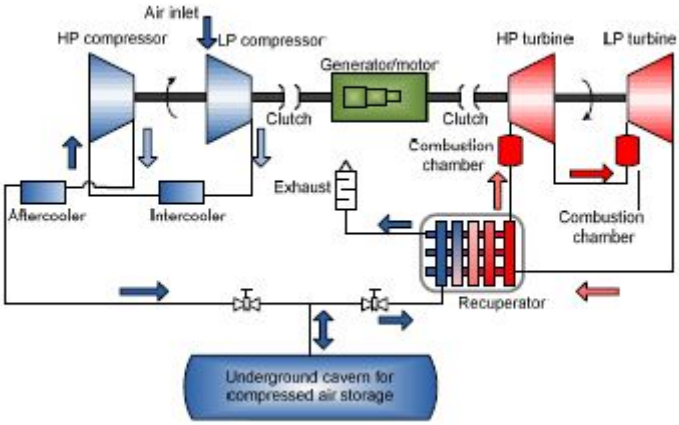


Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση [27]

Τα έργα αντλησιοταμίευσης απαιτούν κατάλληλη διαμόρφωση του φυσικού περιβάλλοντος. Είναι απαραίτητο να υπάρχει η κατάλληλη υψομετρική διαφορά αλλά να μπορούν να εξασφαλιστούν και μεγάλοι όγκοι νερού. Σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ως κάτω ταμιευτήρας η θάλασσα. Σε περιοχές στις οποίες η γεωμορφία δεν ευνοεί τα έργα αντλησιοταμίευσης, χρησιμοποιούνται υπόγεια σπήλαια ή κατασκευάζονται υπόγειοι ταμιευτήρες [3]. Είναι εμφανές, ότι στις τελευταίες περιπτώσεις το κόστος κατασκευής αυξάνεται σημαντικά.

2.1.2 Αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES - Compressed Air Energy Storage)

Οι σταθμοί αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμα σε μεγάλη έκταση για εμπορικό σκοπό, παρόλο που η τεχνολογία είναι γνωστή για αρκετά χρόνια. Είναι χαρακτηριστικό ότι λειτουργούν μόνο δύο τέτοιοι σταθμοί μεγάλης κλίμακας σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο ένας βρίσκεται στο Huntorf της Γερμανίας και ο άλλος στην Alabama των ΗΠΑ.



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα συμβατικού(διαβατικού) σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα [23]

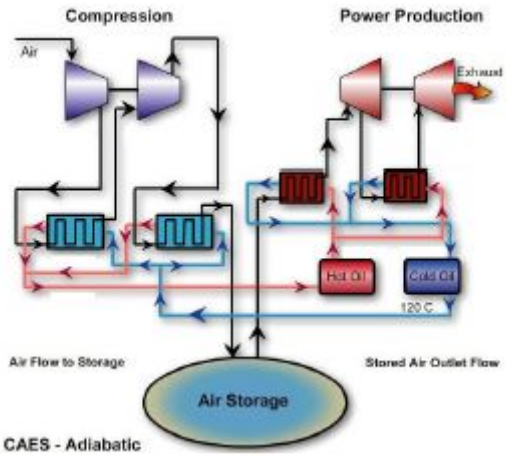
Οι σταθμοί αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για να συμπιέσουν αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας, ο οποίος βρίσκεται υπό υψηλή πίεση, αποθηκεύεται σε μια υπόγεια δεξαμενή. Η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβάνει την απελευθέρωση και τη θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα, ο οποίος οδηγείται σε αεριοστρόβιλους ή ατμοστρόβιλους. Ωστόσο, η τελευταία διαδικασία απαιτεί καύσιμο, και συνεπώς εκπομπή ρύπων, στους συμβατικούς σταθμούς αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, χαρακτηριστικό το οποίο δεν τους καθιστά τόσο ελκυστικούς.

Οι προηγμένοι αδιαβατικοί σταθμοί συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES) αποτελούν την ελπιδοφόρα εξέλιξη των σταθμών συμπιεσμένου αέρα. Κατά τη λειτουργία της αποσυμπίεσης του αέρα, δηλαδή κατά τη λειτουργία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αντλείται θερμότητα από την αποθήκη θερμικής ενέργειας, η οποία δεσμεύει θερμική ενέργεια κατά τη λειτουργία της συμπίεσης, δηλαδή της αποθήκευσης ενέργειας. Επομένως, οι προηγμένοι αδιαβατικοί σταθμοί συμπιεσμένου αέρα χαρακτηρίζονται από το σημαντικό πλεονέκτημα της μηδενικής εκπομπής ρύπων [23].

Οι σταθμοί αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, αν και έως τώρα δεν έχουν εφαρμοστεί εκτενώς, έχουν τις προϋποθέσεις να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον. Η αυξημένη απόδοση των προηγμένων αδιαβατικών σταθμών (70%) [2, 3], η μηδενική εκπομπή ρύπων, η δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε μια μικρή μονάδα και η δυνατότητα μετάβασης από τη μία λειτουργία στην άλλη σε γρήγορο χρόνο [10] αποτελούν προκλήσεις για περαιτέρω έρευνα [3], η οποία αποσκοπεί σε μια πιθανή μελλοντική και ευρεία εφαρμογή αυτών των σταθμών.

2.1.3 Αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους (Flywheels)

Στα συστήματα αποθήκευσης με σφονδύλους η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή της κινητικής ενέργειας. Η διάταξη αποτελείται κυρίως από μία ηλεκτρική μηχανή και ένα δρομέα. Τόσο ο δρομέας, όσο και η μηχανή περιβάλλονται από κενό προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια περιστροφής.



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα προηγμένου αδιαβατικού σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα[23]

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η ηλεκτρική ενέργεια επιταχύνει το δρομέα, και κατά συνέπεια τον κινητήρα. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα σημαίνει αύξηση της κινητικής ενέργειας. Στη διαδικασία της εκφόρτισης, ο κινητήρας μεταπίπτει σε λειτουργία γεννήτριας και ο δρομέας επιβραδύνεται. Η κινητική ενέργεια μέσω της γεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Τα συστήματα αυτά έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι η γρήγορη απόκριση (milliseconds), η δυνατότητα αποφόρτισης σε μικρό χρονικό διάστημα (σε κλίμακα δευτερολέπτων-λεπτών), η υψηλή ενεργειακή απόδοση (85%), η μεγάλη διάρκεια ζωής και φυσικά οι χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις [2]. Παρόλο που εφαρμόζεται στον τομέα της αυτοκίνησης, η τεχνολογία αυτή σε επίπεδο ηλεκτρικού δικτύου και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει εξαπλωθεί [27]. Ωστόσο, η γρήγορη απόκριση και η μικρή διάρκεια αποφόρτισης την καθιστούν ικανή να συμμετέχει σε διαδικασίες ρύθμισης ηλεκτρικού συστήματος (ρύθμιση συχνότητας, αδιάλειπτη παροχή ενέργειας - UPS).

2.2 Θερμικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

2.2.1 Αποθήκευση ενέργειας με άντληση θερμότητας (PHES - Pumped Heat Energy Storage)

Στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με άντληση θερμότητας χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια για να τροφοδοτηθεί μια μηχανή αποθήκευσης, η οποία είναι συνδεδεμένη με δύο μεγάλες θερμικές δεξαμενές. Κατά τη διαδικασία της αποθήκευσης, η μηχανή λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας, δηλαδή χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για την άντληση θερμότητας από τη ψυχρή στη θερμή δεξαμενή. Στην αντίθετη λειτουργία, αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η μηχανή λειτουργεί σαν θερμική μηχανή. Σε αυτήν την περίπτωση, αντλείται θερμότητα από τη θερμή δεξαμενή, μεταφέρεται η περίσσεια θερμότητα στη ψυχρή δεξαμενή και με αυτόν το τρόπο παράγεται μηχανική ενέργεια, η οποία οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια [5].

Η μέθοδος αυτή δεν έχει εφαρμοστεί εμπορικά έως τώρα λόγω, κυρίως, του χαμηλού βαθμού απόδοσης και της έλλειψης εμπειρίας [27]. Ωστόσο η βελτίωση του βαθμού απόδοσης είναι υπό έρευνα [22], και σε συνδυασμό με τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ενέργειας δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο να αποκτήσει αυτή η τεχνολογία εμπορική σημασία μελλοντικά.

2.2.2 Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα (LAES - Liquid Air Energy Storage)

Η αποθήκευση ενέργειας με υγροποιημένο αέρα χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για να ψύξει αέρα έως ότου υγροποιηθεί. Ο υγροποιημένος αέρας αποθηκεύεται σε κατάλληλη δεξαμενή. Στην αντίθετη διαδικασία, τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο υγροποιημένος αέρας θερμαίνεται, επανέρχεται σε αέρια μορφή και τροφοδοτεί το στρόβιλο που οδηγεί τη γεννήτρια [5].

Η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν έχει ακόμα εμπορική εφαρμογή λόγω της χαμηλής απόδοσης που εμφανίζει σε ερευνητικό επίπεδο. Ωστόσο, χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας, μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρούς γεωγραφικούς περιορισμούς εγκατάστασης. Εκτιμάται ότι η απόδοση θα βελτιωθεί στο άμεσο μέλλον [27].

2.3 Χημικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

2.3.1 Υδρογόνο (Hydrogen storage)

Η αποθήκευση ενέργειας με υδρογόνο περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την ηλεκτρόλυση του νερού και την παραγωγή υδρογόνου. Το υδρογόνο αποθηκεύεται σε δεξαμενές με τη μορφή συμπιεσμένου αερίου ή υγροποιημένου υδρογόνου σε κρυογενικές δεξαμενές. Η αντίστροφη διαδικασία περιλαμβάνει την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο κατά την οποία παράγεται ηλεκτρισμός και θερμότητα [27].

Η πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας αυτής της μεθόδου είναι αρκετά μεγάλη, όμως η συνολική ενεργειακή απόδοση είναι σχετικά χαμηλή. Ο μεγαλύτερος σταθμός αποθήκευσης ενέργειας με υδρογόνο εγκαινιάστηκε το 2015 στη Γερμανία.

2.4 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

2.4.1 Μπαταρίες Μολύβδου-οξέως (Lead-acid battery)

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως αποτελούν τα παλαιότερα συστήματα μπαταριών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών και, ιδιαίτερα, σε μικροδίκτυα ή σε απομονωμένα νησιά για βελτίωση ποιότητας ισχύος, αδιάλειπτη παροχή και εφεδρεία [2]. Ωστόσο, οι περιορισμένοι κύκλοι ζωής, η γρήγορη αποφόρτιση και η μικρή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας (50 Wh/kg) είναι τα κυριότερα μειονεκτήματα τους και συνήθως απορρίπτονται στην επιλογή μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας. Οι εξελίξεις αυτού του τύπου μπαταρίας είναι στην κατεύθυνση της αύξησης του κύκλου ζωής, ο οποίος είναι 10 φορές μεγαλύτερος σε προηγμένη μορφή μπαταρίας μολύβδου-οξέως σε σχέση με τη συμβατική μορφή [2].

2.4.2 Μπαταρίες Θείου-νατρίου (NaS battery)

Οι μπαταρίες θείου-νατρίου έχουν αναπτυχθεί από το 1987. Συνιστούν τον τύπο μπαταρίας με την περισσότερο αποδεδειγμένη εφαρμογή σε αποθήκευση ενέργειας σε κλίμακα των MW με συνολική εγκατάσταση 606 MW έως το 2012. Μεταξύ των κυρίων θετικών χαρακτηριστικών τους, είναι η σχετικά υψηλή συνολική ενεργειακή απόδοση (75%-85%), ο μεγάλος αριθμός κύκλων ζωής (2500-4500 κύκλοι), ο οποίος μεταφράζεται σε 15 χρόνια διάρκειας ζωής και ο χρόνος αποφόρτισης ο οποίος είναι έως 7 ώρες [2].

2.4.3 Μπαταρίες Θείου-νικελίου-χλωρίου (Sodium-nickel-chloride battery)

Οι μπαταρίες θείου-νικελίου-χλωρίου, οι οποίες είναι γνωστές και ως ZEBRA (Zero Emission Battery Research) είναι μπαταρίες που λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία. Έχουν εφαρμοστεί εμπορικά από το 1995. Η έρευνα στοχεύει σε αύξηση της αποθηκευμένης πυκνότητας ενέργειας και στην ενσωμάτωση τους στα συστήματα των μεταβαλλόμενων ΑΠΕ [2].

2.4.4 Μπαταρίες Νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου είναι μεταξύ των παλαιότερων τύπων μπαταριών, που όμως εξελίχθηκαν περί το 1990. Έχουν σχετικά μεγάλη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας (55-75 Wh/kg), χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και περίπου 2000 κύκλους ζωής. Οι κύκλοι ζωής εξαρτώνται σημαντικά από τα επίπεδα αποφόρτισης τους. Θεωρητικά, μπορούν να φτάσουν έως και τους 50000 κύκλους ζωής αν λειτουργούν σε επίπεδο αποφόρτισης του 10%. Σημαντικά μειονεκτήματα αυτού του τύπου μπαταριών είναι η τοξικότητα των βαρέων μετάλλων, του νικελίου και του καδμίου, η ευπάθεια σε υπερφόρτιση και η χαμηλή απόδοση. Η μεγαλύτερη εφαρμογή αυτού του τύπου μπαταριών στον τομέα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι στην Αλάσκα των ΗΠΑ με ισχύ 27 MW και 15 λεπτά χρόνο αποφόρτισης [2].

2.4.5 Μπαταρίες Ιόντων-λιθίου (Li-ion)

Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου, αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν σε φορητές εφαρμογές αλλά στη συνέχεια και σε επίπεδο ηλεκτρικού δικτύου. Έχουν υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας (200 Wh/kg), μεγάλη διάρκεια ζωής (10.000 κύκλους) και υψηλή απόδοση (85%-90%). Οι προοπτικές για αυτόν τον τύπο μπαταριών είναι κάτι περισσότερο από ορατές. Ήδη γίνονται προσπάθειες βελτίωσης λειτουργικότητας στις οποίες περιλαμβάνεται η επέκταση διάρκειας ζωής και η χρήση νέων, ασφαλέστερων υλικών. Ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής μειώνεται. Εκτιμάται ότι η χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα μπαταριών ιόντων-λιθίου σε επίπεδο δικτύου ανέρχεται σε 35 GWh έως το 2015 [2].

2.4.6 Μπαταρίες Ροής (Flow batteries)

Οι μπαταρίες ροής εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι το μέγεθος της ισχύος και το μέγεθος της αποθηκευμένης ενέργειας δύναται να σχεδιαστούν ανεξάρτητα[2, 16]. Έχουν μικρή αυτο-αποφόρτιση, πολύ γρήγορη απόκριση και συνολική ενεργειακή απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 60%-70%. Επιπροσθέτως, έχουν δυνατότητα μετάβασης από κατάσταση φόρτισης σε κατάσταση εκφόρτισης ή το αντίστροφο μέσα σε 1 ms[16]. Από την άλλη πλευρά έχουν σχετικά μικρή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας (10-75 Wh/kg) και ο ηλεκτρολύτης τους είναι τοξικός για το περιβάλλον [3].

2.5 Ηλεκτρικές μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

2.5.1 Υπερπυκνωτές (Supercapacitors)

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν την πιο άμεση μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν γρήγορη απόκριση και 10.000 κύκλους ζωής. Όμως, έχουν μικρή διάρκεια αποθήκευσης, χαμηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας και υψηλά επίπεδα αυτο-αποφόρτισης.

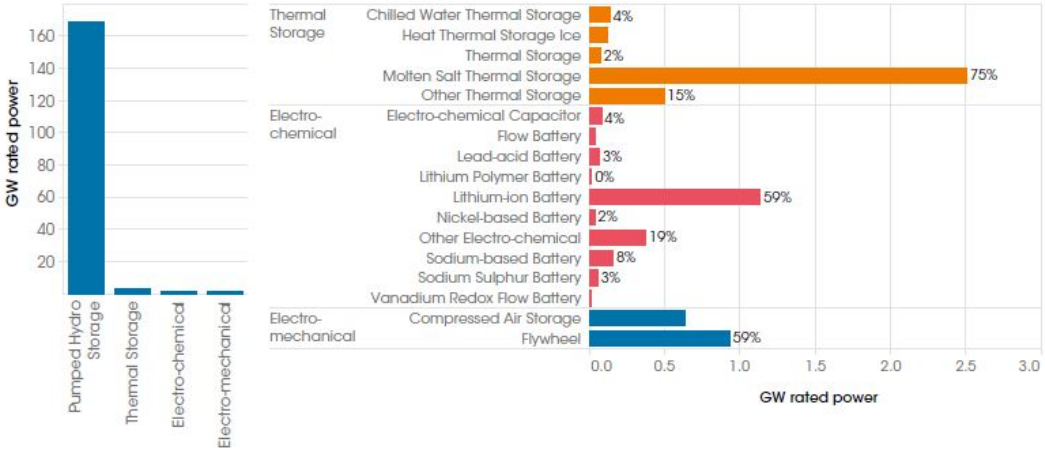
EES technology	Power range (MW)	Discharge time (ms-h)	Overall efficiency	Power density (W/kg)	Energy density (Wh/kg)	Storage durability	Self-discharge (per day)	Lifetime (yr)	Life cycles
PHS	10-5000	1-24 h	0.70-0.82		0.5-1.5	h-months	Negligible	50-60	20,000-50,000
CAES (underground)	5-400	1-24 h	0.70-0.89		30-60	h-months	Small	20-40	>13,000
CAES (aboveground)	3-15	2-4 h	0.70-0.90			h-days	Small	20-40	>13,000
Flywheel	Up to 0.25	ms-15 m	0.93-0.95	1000	5-100	s-min	100%	15-20	20,000-100,000
Lead-acid	Up to 20	s-h	0.70-0.90	75-300	30-50	min-days	0.1%-0.3%	5-15	2,000-4,500
NaS	0.05-8	s-h	0.75-0.90	150-230	150-250	s-h	20%	10-15	2,500-4,500
NaNiCl2 (ZEBRA)	50	2-5 h	0.86-0.88	150-200	100-140	s-h	15%	15	2,500-3,000
Ni-Cd	Up to 40	s-h	0.60-0.73	50-1000	15-300	min-days	0.2%-0.6%	10-20	2,000-2,500
Li-ion	Up to 0.01	m-h	0.85-0.95	50-2000	150-300	min-days	0.1%-0.3%	5-15	1,500-4,500
VRFB	0.03-3	s-10 h	0.65-0.85	166	10-35	h-months	Small	5-10	10,000-13,000
Zn-Br	0.05-2	s-10 h	0.60-0.70	45	30-85	h-months	Small	5-10	5,000-10,000
Fe-Cr	1-100	4-8 h	0.72-0.75					10-15	>10,000
PSB	15	s-10 h	0.65-0.85			h-months	Small	10-15	2,000-2,500
SMES	0.1-10	ms-8 s	0.95-0.98	500-2000	0.5-5	min-h	10%-15%	15-20	>100,000
Supercapacitors	Up to 0.05	ms-60 m	0.60-0.65	100,000	0.05-5	s-h	40%	5-8	50,000
SCES	Up to 0.3	ms-60 m	0.85-0.95	800-23500	2.5-50	s-h	20%-40%	10-20	>100,000
Hydrogen(fuel cell)	0.3-50	s-24 h	0.33-0.42	500	100-10,000	h-months	Negligible	15-20	20,000

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [2]

Κυρίως, χρησιμοποιούνται σε υπηρεσίες ποιότητας ισχύος. Η έρευνα στα υλικά κατασκευής των υπερπυκνωτών αφήνει περιθώριο για μια πιθανή μελλοντική ενσωμάτωσή τους σε επίπεδο δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας[2].

2.5.2 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage)

Ένα σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας είναι ικανό να αποθηκεύει ενέργεια σε ένα μαγνητικό πεδίο με δυνατότητα να την παρέχει στιγμιαία. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει υψηλή συνολική απόδοση (97%), γρήγορη απόκριση (milliseconds) και 100.000 κύκλους ζωής. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τη μέθοδο αυτή ικανή να παρέχει υπηρεσίες ποιότητας ισχύος, ρύθμιση συχνότητας και ενέργεια όταν υπάρχει διακοπή στο σύστημα. Παρέχει ισχύ της τάξης των kW, ωστόσο η έρευνα δείχνει ότι σύντομα θα αυξηθεί το εύρος ισχύος [2].



Σχήμα 2.4: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς παγκοσμίως ανά τεχνολογία αποθήκευσης [12]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, η αντλησιοταμίευση κυριαρχεί έναντι των ήδη υπαρχουσών τεχνολογιών αποθήκευσης και αυτό γιατί αποτελεί παλαιά αλλά και σχετικά φθηνή τεχνολογία, η οποία εφαρμοστεί εκτενώς για την ομαλοποίηση των αιχμών ισχύος. Όσο αφορά τις μπαταρίες, παρατηρείται ότι προτιμότερες είναι αυτές των ιόντνων-λιθίου, τεχνολογία η οποία τώρα αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς και αναμένεται να εισέλθει δυναμικά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχοντας ένα μεγάλο εύρος από υπηρεσίες.

Κεφάλαιο 3

Αγορές ενέργειας και δυνατότητες αποθήκευσης

3.1 Θεσμικά εμπόδια ανάπτυξης σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σταθμοί αποθήκευσης δύνανται να προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών υπηρεσιών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακριβώς αυτή η πολυχρηστικότητα τους έχει δυσχεράνει την ομαλή ένταξη τους στις αγορές. Πιο συγκεκριμένα, η δυσκολία ένταξης τους πηγάζει, καταρχάς, από την παραδοσιακή παροχή των διάφορων υπηρεσιών στο σύστημα. Το τελευταίο σημαίνει ότι τα περισσότερα συστήματα λαμβάνουν υπηρεσίες όπως π.χ. ρύθμιση συχνότητας ή εφεδρεία μόνο από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής [21] αφήνοντας εκτός παιχνιδιού τους αποθηκευτικούς σταθμούς. Η αναχρονιστική αυτή λογική δεν επιτρέπει σε αποθηκευτικούς σταθμούς να προσφέρουν υπηρεσίες, παρόλο που έχουν την τεχνική δυνατότητα να τις παρέχουν.

Ένα σημαντικό εμπόδιο στην ανάπτυξη των αποθηκευτικών σταθμών αποτελεί, επίσης, ο μη ξεκάθαρος ρόλος που προσδίδουν οι αγορές ενέργειας στους σταθμούς αποθήκευσης [27]. Οι αποθηκευτικοί σταθμοί φέρουν χαρακτηριστικά σταθμών παραγωγής και για αυτό σε πολλές αγορές θεωρούνται ως παραγωγοί. Η αντίληψη αυτή αποτελεί τροχοπέδη για την ανάπτυξη των αποθηκευτικών σταθμών, καθώς οι σταθμοί αποθήκευσης προφανώς δε μετατρέπουν πρωτογενή μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική αλλά αντλούν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και την παρέχουν πίσω σε αυτό. Αυτό, ακόμα, σημαίνει ότι δεν αναγνωρίζεται σε επίπεδο αγορών η δυνατότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών και οι ιδιοκτήτες αποθηκευτικών σταθμών επιβαρύνονται και με τέλη παραγωγής αλλά και με τέλη κατανάλωσης.

Επιπροσθέτως, η περίπλοκη επικρατούσα κατάσταση όσο αφορά την ιδιοκτησία των αποθηκευτικών σταθμών υψώνει ένα ακόμα ανάχωμα στην ενσωμάτωσή τους. Ειδικότερα, απαγορεύεται αυστηρά σε λειτουργούς του δικτύου μεταφοράς και διανομής να κατέχουν και να διαχειρίζονται συστήματα αποθήκευσης. Το [4] προτείνει ότι οι δραστηριότητες αποθήκευσης που σχετίζονται με τις ανάγκες φορτίου πρέπει να διεξάγονται μόνο από ιδιώτες που συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας. Ταυτόχρονα, προτείνει οι δραστηριότητες αποθήκευσης που έχουν σχέση με επικουρικές υπηρεσίες πρέπει να επιτρέπεται να πραγματοποιούνται με παρεμβάσεις των διαχειριστών δικτύου. Από την άλλη πλευρά, η μερική ή ολική ιδιοκτησία συστημάτων αποθήκευσης από διαχειριστές δικτύου μπορεί να επιφέρει αναποτελεσματικότητα στην αγορά και διαφωνίες [13]. Αναμφίβολα όμως, η ενσωμάτωση των αποθηκευτικών σταθμών στις βοηθητικές υπηρεσίες δύναται να μειώσει το κόστος λειτουργίας τους συστήματος, καθώς αυτές συχνά είναι κοστοβόρες για τους συμβατικούς

σταθμούς παραγωγής. Επομένως, σε αυτό το σημείο διαφαίνεται η ανάγκη της διάκρισης των διάφορων υπηρεσιών που μπορεί να παρέχει ένα σύστημα αποθήκευσης.

3.2 Υπηρεσίες σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

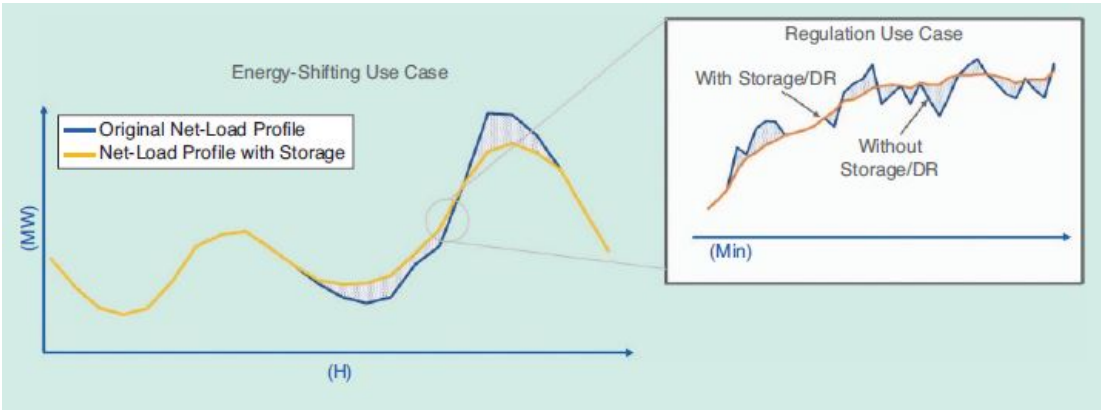
Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, οι σταθμοί αποθήκευσης, ανάλογα και με το είδος τους (Κεφάλαιο 2), μπορούν να παρέχουν μεγάλο εύρος υπηρεσιών. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες [19]:

- Παροχή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας
- Βοηθητικές υπηρεσίες
- Υπηρεσίες στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Υπηρεσίες στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

3.2.1 Παροχή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των αποθηκευτικών μέσων επιτρέπει πλέον την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Ένας σταθμός αποθήκευσης μπαταριών σήμερα μπορεί να παρέχει πλήρη ισχύ για 4 έως 8 συνεχόμενες ώρες. Το προηγούμενο σημαίνει ότι οι σταθμοί αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να βρουν εφαρμογή στη χρονική μετατόπιση ενέργειας (Energy Shifting), στην περικοπή της αιχμής (Peak Shaving) και στο ενεργειακό αρμπιτράζ (Energy Arbitrage) [11].

Η στοχαστικότητα των ΑΠΕ οδηγεί πολλές φορές σε αναπόφευκτη περικοπή της αιολικής ή φωτοβολταϊκής παραγωγής λόγω αδυναμίας απορρόφησης από το δίκτυο και περιορισμών τεχνικών ελαχίστων συμβατικών μονάδων. Τις ώρες κατά τις οποίες η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ χαμηλή, το δίκτυο δε μπορεί να απορροφήσει παραγωγή ΑΠΕ και οι συμβατικές μονάδες λειτουργούν κοντά στα τεχνικά ελάχιστα τους, λειτουργία η οποία είναι πολύ κοστοβόρα. Με την εγκατάσταση σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και τη μετατόπιση ενέργειας, καθίσταται δυνατή η απορρόφηση της άλλοτε περικοπτόμενης παραγωγής ΑΠΕ από τους αποθηκευτικούς σταθμούς. Ακόμα, οι αποθηκευτικοί σταθμοί δύναται να οδηγούν το σύστημα σε οικονομικότερη λειτουργία διευκολύνοντας ταυτόχρονα τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα πολλαπλών χρήσεων αποθήκευσης. Χρονική μετατόπιση ενέργειας, περικοπή αιχμής και απόκριση στη ζήτηση με και χωρίς αποθήκευση [11]

Η αποθηκευμένη ενέργεια, η οποία άλλοτε θα περικοπτόταν, μπορεί να επιστρέφεται στο δίκτυο τις ώρες αιχμής. Κατά τις ώρες αιχμής, το κόστος ενέργειας είναι αυξημένο καθώς το

σύστημα δεν λειτουργεί ούτε σε αυτή την περίπτωση με τον οικονομικότερο τρόπο. Η χρήση της κεντρικής αποθηκευμένης ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της αιχμής μπορεί να μειώσει την παραγωγή ενέργειας τις ώρες της αιχμής και να συμβάλει στην αποσυμφόρηση του δικτύου. Επομένως, το σύστημα οδηγείται σε πιο ομαλή και πιο οικονομική λειτουργία.

Το Energy Arbitage πρακτικά σημαίνει ανεύρεση κέρδους εξαιτίας της διαφοράς των τιμών ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τόσο στην προ-ημερήσια όσο και στην ενδο-ημερήσια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας οι τιμές ενέργειας είναι μειωμένες κατά τις ώρες μειωμένης ζήτησης και αυξημένες τις ώρες αιχμής. Οι σταθμοί αποθήκευσης, οι οποίοι έχουν διττή λειτουργία (απορροφούν αλλά και παρέχουν ενέργεια), μπορούν να εκμεταλλεύονται αυτή τη διαφορά τιμών και να αγοράζουν ισχύ όταν οι τιμές είναι χαμηλές πουλώντας την ξανά στο δίκτυο όταν οι τιμές είναι αυξημένες. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουν κέρδος που εξαρτάται από τις εκάστοτε προσφορές αγοράς και πώλησης, οι οποίες κατατίθενται στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και διαμορφώνουν την οριακή τιμή του συστήματος, δηλαδή την τιμή με την οποία τελικά πληρώνονται ή πληρώνουν οι συμμετέχοντες παραγωγοί ή προμηθευτές αντίστοιχα.

3.2.2 Βοηθητικές υπηρεσίες

Ένας πάρα πολύ σημαντικός ρόλος που μπορούν να διαδραματίσουν οι σταθμοί αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, για την εύρυθμη και ομαλή λειτουργία ενός συστήματος, είναι αυτός των βοηθητικών ή επικουρικών υπηρεσιών. Οι υπηρεσίες αυτές, οι οποίες παραδοσιακά προσφέρονται από τους παραγωγούς ενέργειας, είναι απαραίτητες προκειμένου το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί απρόσκοπτα και ομαλά. Η τεχνολογία επιτρέπει πλέον την παροχή τέτοιου είδους υπηρεσιών από αποθηκευτικούς σταθμούς, οι οποίοι μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να τις προσφέρουν με χαμηλότερο κόστος.

3.2.2.1 Ρύθμιση συχνότητας - Παρακολούθηση φορτίου

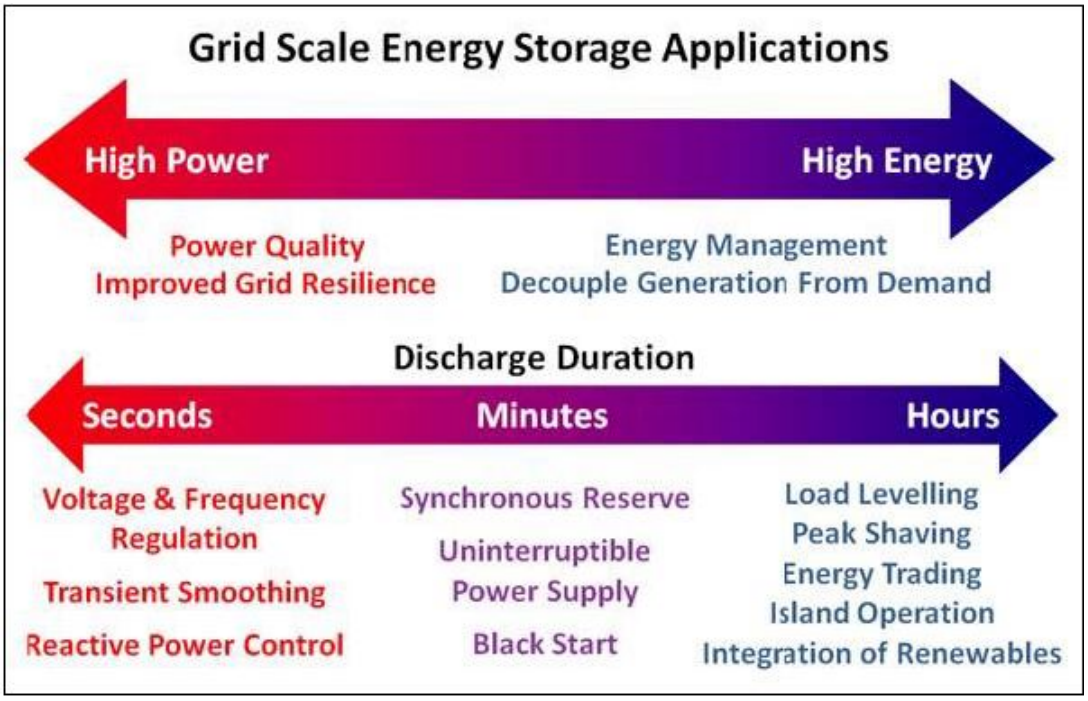
Η πιο σημαντική υπηρεσία, η οποία πρέπει να προσφέρεται στο δίκτυο από τους παραγωγούς ή τους αποθηκευτικούς σταθμούς, είναι η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Η τελευταία σημαίνει διατήρηση συχνότητας εντός ορίων, με την λειτουργία της οποίας εξασφαλίζεται η εξισορρόπησή φορτίου και παραγωγής (ή συνολικά εγχυόμενης ισχύος στο δίκτυο μιας και οι σταθμοί αποθήκευσης δεν παράγουν ενεργό ισχύ). Διακυμάνσεις στη συχνότητα οδηγούν το σύστημα σε αστάθεια ή στην χειρότερη περίπτωση ακόμα και σε μερική ή ολική σβέση. Επομένως, η υπηρεσία διατήρησης συχνότητας είναι υψίστης σημασίας και πρέπει να κατανέμεται με ευέλικτο τρόπο σε όσο το δυνατόν περισσότερους συμμετέχοντες στην αγορά ενέργειας.

3.2.2.2 Ρύθμιση σφάλματος ελέγχου περιοχής

Η ρύθμιση σφάλματος ελέγχου περιοχής αποτελεί ουσιαστικά τη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας και είναι υπεύθυνη να διορθώσει μικροσφάλματα. Οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να αναλαμβάνουν τη διορθωτική ρύθμιση ενός τμήματος μιας περιοχής ελέγχου.

3.2.2.3 Παροχή εφεδρείας

Η εφεδρεία αναπαριστά την ισχύ που θα δοθεί άμεσα στο σύστημα σε περίπτωση απώλειας ενός τμήματος της παραγωγής. Οι σταθμοί αποθήκευσης μπορούν να παρέχουν αυτήν την υπηρεσία, συμμετέχοντας ενεργά στη διατήρηση του δικτύου έπειτα από απρόσμενα σφάλματα. Ακόμα, οι σταθμοί αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα να απορροφήσουν μια απότομη αύξηση της ισχύος στο σύστημα και σε αυτή την περίπτωση παρέχουν αρνητική εφεδρεία, η οποία είναι επίσης απαραίτητη για την ομαλότητα του δικτύου.



Σχήμα 3.2: Εφαρμογές και υπηρεσίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους [27]

3.2.2.4 Ρύθμιση τάσης

Η ρύθμιση τάσης πραγματοποιείται με έγχυση ή απορρόφηση αέργου ισχύος. Παραδοσιακά η λειτουργία αυτή επιτελείται από τις σύγχρονες γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή από τα μέσα αντιστάθμισης. Οι σταθμοί αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πλήρη έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος και, επομένως, μπορούν να συμβάλουν αποτελεσματικά στη ρύθμιση τάσης.

3.2.2.5 Υπηρεσία Black start

Η υπηρεσία Black start αποτελεί μία αξιόπιστη μέθοδο αποκατάστασης της παραγωγής των γεννητριών μετά από ολική σβέση του συστήματος (blackout). Οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να παρέχουν αυτήν την υπηρεσία και να διευκολύνουν την εκκίνηση και τον συγχρονισμό των γεννητριών κατά την προσπάθεια επανηλέκτρισης του συστήματος.

3.2.3 Υπηρεσίες στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σταθμοί αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα να εξομαλύνουν τη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς. Όπως αναφέρεται παραπάνω, οι σταθμοί αποθήκευσης μπορούν να δεσμεύουν ενέργεια από το δίκτυο όταν αυτό δε βρίσκεται υπό συμφόρηση και να την επιστρέφουν πίσω σε αυτό όταν οι απαιτήσεις είναι υψηλές και το δίκτυο βρίσκεται κοντά σε κορεσμό. Με αυτόν τον τρόπο οι σταθμοί αποθήκευσης συμβάλουν στην αποσυμφόρηση του δικτύου, καθώς τις ώρες αιχμής μπορούν να τροφοδοτούν αυτοί με ισχύ το σύστημα εκεί που υπάρχει ανάγκη.

Ακόμα, η ενσωμάτωση αποθηκευτικών σταθμών σε συγκεκριμένα σημεία μπορεί να αναβάλει την ανάγκη για αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου [19]. Η συνεχής αύξηση του φορτίου σε πολλές περιοχές είναι δυσανάλογη με τις υπάρχουσες υποδομές δικτύου μεταφοράς. Οι αποθηκευτικοί σταθμοί με κατάλληλη λειτουργία μπορούν να προσδίδουν ισχύ σε ένα σύστημα τις στιγμές αυξημένης ζήτησης και με αυτόν τον τρόπο να αναστέλουν πιθανά

προβλήματα εξαιτίας της ανεπαρκούς, πλέον, ικανότητας μεταφοράς ισχύος των γραμμών και τελικά να αναβάλουν μια πιθανή κοστοβόρα αναβάθμιση του δικτύου.

3.2.4 Υπηρεσίες στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως στο σύστημα μεταφοράς έτσι και στο σύστημα διανομής, οι σταθμοί αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να οδηγήσουν σε αναβολή αναβάθμισης, παρέχοντας ισχύ τις ώρες κατά τις οποίες υπάρχει συμφόρηση. Επιπροσθέτως, οι σταθμοί αποθήκευσης δύνανται να συμμετέχουν στον έλεγχο φαινόμενης ισχύος ή αλλιώς στη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος [19]. Η ρύθμιση του συντελεστή ισχύος πραγματοποιείται μέσω της αντιστάθμισης ισχύος με ρύθμιση της εγχυόμενης ή απορροφώμενης αέργου ισχύος στο σύστημα. Συνήθως, ο συντελεστής ισχύος είναι επιθυμητό να βρίσκεται κοντά στη μονάδα.

3.3 Εισόδημα αποθηκευτικών σταθμών

Οι διάφορες υπηρεσίες των αποθηκευτικών σταθμών είναι πλέον δεδομένες. Όμως, το πρόβλημα έγκειται στον βέλτιστο σχεδιασμό και συνδυασμό των παραπάνω υπηρεσιών με σκοπό την ευημερία και τη βιωσιμότητα μιας τέτοιας επένδυσης.

Σε πρώτο επίπεδο, μία νομοθετική μεταρρύθμιση, η οποία συμπεριλαμβάνει την αποθήκευση και όλες τις δυνατότητές της σαν ενεργό μέρος του συστήματος, είναι χωρίς αμφιβολία απαραίτητη. Ο εκσυγχρονισμός της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με δυνατότητα ευελιξίας, όχι μόνο για τους αποθηκευτικούς σταθμούς αλλά για όλους τους «παίκτες», αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την ανάπτυξη καινοτόμων αλλά και οικονομικά βιώσιμων συστημάτων. Η έννοια ευελιξία υπονοεί τη χαλάρωση των αυστηρών περιορισμών της διαχείρισης του σταθμού αποθήκευσης από τους διαχειριστές δικτύου, ώστε η παροχή επικουρικών υπηρεσιών να είναι αποτελεσματική. Ακόμα, υπονοείται η επιλογή οικονομικότερων λύσεων για τη λειτουργία του συστήματος, μέσω βελτιστοποίησης της λειτουργίας των αποθηκευτικών σταθμών, οι οποίοι με την ενσωμάτωσή τους τείνουν να μειώσουν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποθήκευση, όπως όλα δείχνουν μπορεί να παίξει έναν πολύ ουσιαστικό ρόλο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας του άμεσου μέλλοντος.

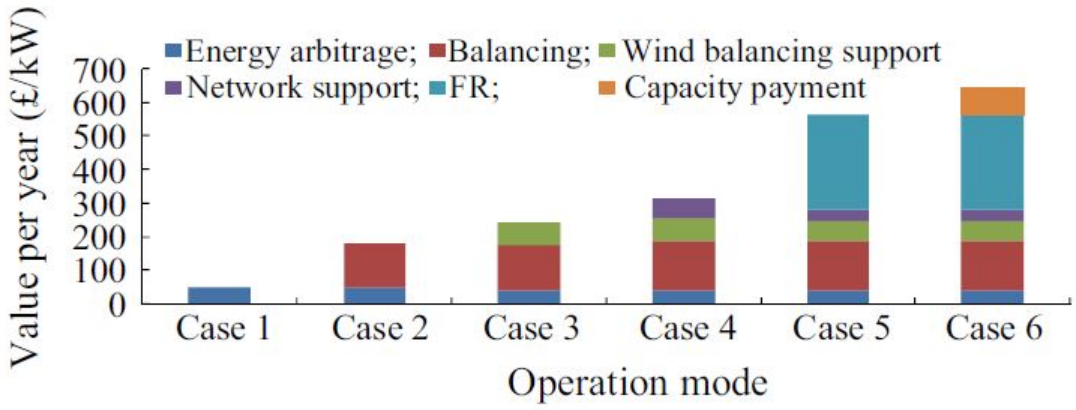
Σε επόμενο επίπεδο, ο σχεδιασμός πρέπει να επικεντρωθεί σε τρεις βασικούς πυλώνες: την αξιολόγηση της οικονομικότητας του συστήματος, την ενσωμάτωση όσο το δυνατόν περισσότερων ΑΠΕ και την αξιοπιστία, εξασφαλίζοντας επάρκεια παροχής ενέργειας και ευστάθεια δικτύου [11].

3.3.1 Οικονομική βιωσιμότητα αποθηκευτικού σταθμού

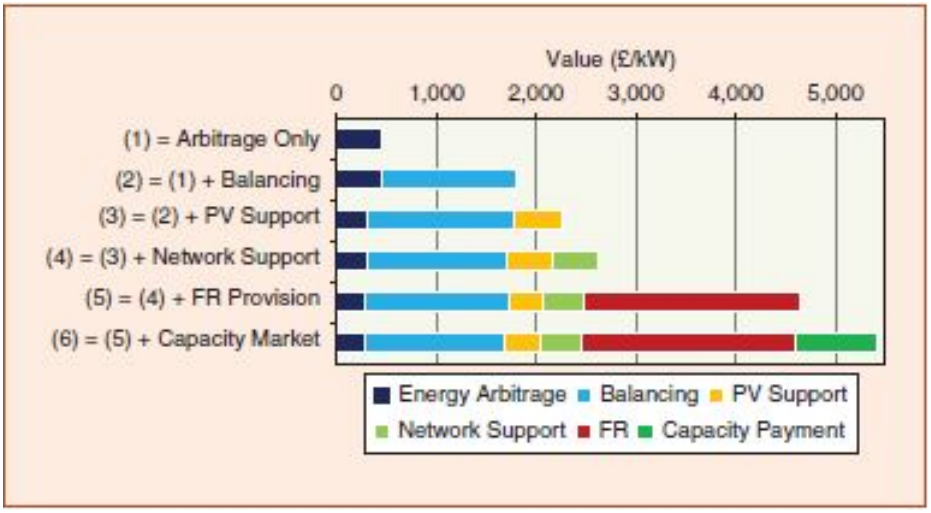
Προκειμένου να ευδοκιμήσει μία επένδυση στην αποθήκευση ενέργειας είναι αναγκαία η αναζήτηση κέρδους όχι από μία, αλλά από πολλές πηγές. Πράγματι, η παράλληλη αξιοποίηση κατά το δυνατόν μεγάλου εύρους υπηρεσιών της αποθήκευσης αποφέρει ικανοποιητικούς βαθμούς εσωτερικής απόδοσης [18].

Το [6] αναλύει την αξία της αποθήκευσης ανάλογα με τις υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, το εισόδημα αυξάνεται σημαντικά όσο παρέχονται ταυτόχρονα περισσότερες υπηρεσίες. Επισημαίνεται ότι η παροχή μίας μόνο υπηρεσίας σε καμία περίπτωση δεν είναι ικανή να αποσβέσει το υψηλό κόστος επένδυσης της αποθήκευσης, ενώ η βελτιστοποιημένη πολλαπλή υπηρεσία αποτελεί τον θεμελιώδη παράγοντα της εξασφάλισης κέρδους. Παράλληλα, τονίζεται το κατεξοχήν χαρακτηριστικό της γρήγορης απόκρισης, το οποίο μπορεί να αξιοποιείται από τους αποθηκευτικούς σταθμούς αποφέροντας μεγάλα κέρδη, όπως φαίνεται και στο Case 5 (Σχήμα 3.3). Τέλος, η συμμετοχή στην αγορά χωρητικότητας (Capacity market), της οποίας ο ρόλος είναι η εξασφάλιση επάρκειας κατά

τις ώρες αιχμής, αυξάνει σημαντικά το κέρδος ενώ μειώνει ελάχιστα αυτό από άλλες αγορές. Παρόμοια αποτελέσματα αναδεικνύονται και από το [9], το οποίο εξετάζει το σύστημα του Ηνωμένου Βασιλείου (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.3: Αξία σταθμού αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με τις υπηρεσίες που παρέχει [6]



Σχήμα 3.4: Αξία σταθμού αποθήκευσης ενέργειας ο οποίος παρέχει πολλαπλές υπηρεσίες [9]

Όπως υποστηρίζεται σε περισσότερο πρακτικό επίπεδο στο [18], σταθμοί αποθήκευσης μπαταριών μπορούν να συμμετέχουν ταυτόχρονα στο arbitrage, στην γρήγορη ρύθμιση συχνότητας αλλά και στην παροχή εφεδρείας (πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα). Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση χαρακτηριστικών περιπτώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία γίνονται προσπάθειες για ανάπτυξη αποθηκευτικών σταθμών.

3.3.1.1 Κίνητρα στην Ιρλανδία

Στην Ιρλανδία, η ποσοτικοποίηση της ισχύος που παρέχεται χωρίς αδράνεια αναπαρίσταται με το SNSP (System non-synchronous penetration). Το SNSP χρησιμοποιείται για να διατηρεί την ασφάλεια του συστήματος και να οριοθετεί την αιολική διείσδυση αλλά και τις εισροές από τις διασυνδέσεις. Πέρα από τη συμβατική υπηρεσία ρύθμισης συχνότητας, στο ιρλανδικό σύστημα έχει εισαχθεί και η υπηρεσία γρήγορης απόκρισης συχνότητας (FFR - Fast Frequency Response). Οι δύο αυτές υπηρεσίες απευθύνονται συγκεκριμένα στους σταθμούς αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες με σκοπό την αύξηση των εσόδων τους. Η υπηρεσία γρήγορης απόκρισης συχνότητας απαιτεί απόκριση σε χρόνο μικρότερο των δύο δευτερολέπτων. Όμως, η αποζημίωση της υπηρεσίας τριπλασιάζεται σε περίπτωση που η απόκριση δοθεί εντός 0,15 δευτερολέπτων. Η τακτική αυτή επιβραβεύει ανάλογα με

την ποιότητα της υπηρεσίας. Επιπροσθέτως, οι διαχειριστές συστήματος αναδεικνύουν τη δυνατότητα ευελιξίας στις πληρωμές και στις δομές αμοιβών, η οποία είναι απόρροια της καλύτερης ποσοτικοποίησης των μεγεθών των διάφορων υπηρεσιών, εισάγοντας συμβόλαια 6 χρόνων τα οποία προστατεύουν τους επενδυτές.

Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι απλές αλλαγές στα μεγέθη των υπηρεσιών δύνανται να οδηγήσουν μια επένδυση στην αποθήκευση με μπαταρίες από την οικονομική αναποδοτικότητα στην κερδοφορία. Στο εισόδημά τους, επίσης, μπορεί να προστεθεί και αυτό από το arbitrage. Κατά τη διάρκεια της αιχμής ζήτησης, η αδράνεια του συστήματος είναι υψηλή και τυπικά οι υπηρεσίες συχνότητας είναι λιγότερο αναγκαίες. Τις ώρες αυτές, οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να σταματούν να παρέχουν υπηρεσίες συχνότητας αλλά να εξάγουν ενέργεια και να συμβάλουν στην περικοπή της αιχμής. Αντίθετα, η χαμηλή αδράνεια εμφανίζεται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και υψηλής διείσδυσης αιολικής ενέργειας. Τις ώρες αυτές οι σταθμοί αποθήκευσης μπορούν να φορτίζουν αγοράζοντας φθηνή ενέργεια αλλά ταυτόχρονα να παρέχουν και τις υπηρεσίες συχνότητας [18, 9]. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύεται η δυνατότητα εξασφάλισης εισοδήματος τόσο από το arbitrage όσο και από τις υπηρεσίες συχνότητας, με την κατάλληλη πρόβλεψη αλλά και τον απαραίτητο προγραμματισμό των λειτουργιών.

3.3.1.2 Η περίπτωση του Ηνωμένου Βασιλείου

Με βάση τα στοιχεία που αναφέρονται στο [18], το 2016 εκδόθηκε προσφορά για 200 MW αποθηκευτικών σταθμών με μπαταρίες. Όμως, οι υπηρεσίες συχνότητας στο Ηνωμένο Βασίλειο απαιτούν τουλάχιστον αποθήκευση διάρκειας μισή ώρας και αυτό μεταφράζεται σε ελάχιστη χωρητικότητα ίση με 100,5 MWh. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι μία τέτοια επένδυση δυσκολεύεται να εξασφαλίσει κέρδος.

Είναι αξιοσημείωτο ότι στην περίπτωση του Ηνωμένου Βασιλείου δε δίνεται κάποιο κίνητρο ή κάποια μορφή χαλάρωσης των απαιτήσεων όσο αφορά την υπηρεσία συχνότητας και για αυτό το λόγο δε μπορεί να προκύψει εύκολα κέρδος. Αντίθετα, στην περίπτωση της Ιρλανδίας, ο σχεδιασμός στοχεύει στην ένταξη αποθηκευτικών σταθμών, εφαρμόζοντας τροποποιήσεις σε κανονισμούς για κινητοποίηση επενδύσεων και οικονομική βιωσιμότητα της αποθήκευσης.

3.3.1.3 Η περίπτωση της Γερμανίας

Η Γερμανία έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για μείωση εκπομπής ρύπων, με 55% διείσδυση ΑΠΕ έως το 2035 και 80% έως το 2050. Η διείσδυση ΑΠΕ ωστόσο είναι ήδη αρκετά μεγάλη στο ενεργειακό μείγμα της Γερμανίας καθώς έχει και τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών παγκοσμίως. Η γερμανική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πρώτη που έχει εισάγει υποστηρικτικούς μηχανισμούς, ειδικά για την αποθήκευση ενέργειας σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά. Υπολογίζεται ότι μέσα στο 2015 είχαν εγκατασταθεί 13.000 αποθηκευτικά συστήματα μπαταριών σε αστικό επίπεδο [17].

Η Γερμανία εξελίσσει την αγορά της προκειμένου να επιτύχει ενεργειακούς της στόχους. Ένα πολύ σημαντικό βήμα για την παρακίνηση των επενδύσεων στην αποθήκευση, που έχει ακολουθήσει η Γερμανία, είναι η χορήγηση χαμηλότοκων δανείων από την κρατική τράπεζα. Πιο συγκεκριμένα, η κρατική γερμανική τράπεζα χορήγησε 163 εκατομμύρια ευρώ για 10.000 έργα αποθήκευσης ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα η κυβέρνηση επιδότησε το 30% του κόστους της μονάδας αποθήκευσης. Τα φωτοβολταϊκά, συνδυαζόμενα με μονάδες αποθήκευσης, λειτουργούν εγχέοντας στο δίκτυο κατά μέγιστο το 60% της ονομαστικής τους ισχύος, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει άμεσο εισόδημα από τις μονάδες αποθήκευσης, αλλά έσοδα μπορούν να προκύψουν με κατάλληλο στρατηγικό σχεδιασμό [17].

Επιπλέον, οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να συμμετέχουν στην εξισορρόπηση του συστήματος (balancing), παρέχοντας εφεδρεία και πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας στην ανοιχτή αγορά απόκρισης συχνότητας [17].

3.3.1.4 Η περίπτωση της Καλιφόρνιας

Οι ΗΠΑ αποτελούν τη χώρα με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην αποθήκευση ενέργειας. Ένας βασικός λόγος της ανάπτυξης αυτής είναι η μετάβαση από μία μεγάλη αγορά υποδομών, η οποία περιλαμβάνει αντλησιοταμίευση και αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα, σε μία τεχνολογικά δυναμική αγορά με αυξανόμενη κλίμακα και μειούμενες τιμές. Σύμφωνα με στοιχεία του ΙΕΑ[1] , η παγκόσμια αγορά για μπαταρίες σε επίπεδο δικτύου αυξήθηκε κατά 10 φορές από το 2010 έως το 2015, με συνολική αξία πάνω από 1 δισεκατομμύριο δολάρια το 2015. Ακόμα, το εισόδημα από την αποθήκευση ενέργειας αυξήθηκε κατά 5 φορές, από 462 εκατομμύρια δολάρια το 2014 σε 2,1 δισεκατομμύρια δολάρια το 2015. Αλλά πέρα από αυτά, η αγορά αποθήκευσης ενέργειας των ΗΠΑ αυξήθηκε κατά 243% το 2015 και συνολικά κατά 800% από το 2011 [17].

Η αγορά ενέργειας της Καλιφόρνιας περιλαμβάνει ευρύ περιθώριο εφεδρείας αλλά και υψηλή διείσδυση μη-προγραμματισμένης ανανεώσιμης ενέργειας. Λόγω μεγάλης εγκατάστασης ΑΠΕ μακριά από τις περιοχές ζήτησης, ορισμένα σημεία του δικτύου της Καλιφόρνιας βρίσκονται υπό συμφόρηση. Οι τάσεις της αγοράς της Καλιφόρνιας αλλά και οι νομοθετικές ενέργειες έχουν συνδυαστεί για να δημιουργηθεί γρήγορα μία αναπτυσσόμενη αγορά για την αποθήκευση ενέργειας, τόσο σε κατανεμημένο ή διεσπαρμένο όσο και σε μεγάλης κλίμακας επίπεδο [17].

Η πολιτική της Καλιφόρνιας για την αποθήκευση μεγάλης κλίμακας προέβλεπε το 2010 να υποχρεώσει τους επενδυτές και ιδιοκτήτες αποθηκευτικών σταθμών να εγκαταστήσουν 1,3 GW επιπρόσθετης αποθήκευσης έως το 2020, χωρίς όμως να υπάρχει κάποιο επίσημο κίνητρο παρόλο που η Καλιφόρνια είναι η μεγαλύτερη αστική αγορά της Αμερικής στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών. Επιπρόσθετα, όσο αφορά το σχεδιασμό της αγοράς ενέργειας, η Καλιφόρνια βασίζεται στην τοπική οριακή τιμή συστήματος και ο διαχειριστής συστήματος συμπίπτει με το διαχειριστή αγοράς [17].

Στην Καλιφόρνια, η αποθήκευση ενέργειας επιτρέπεται να συμμετέχει σε διάφορες ενεργειακές υπηρεσίες έπειτα από τροποποιήσεις στην αγορά. Πιο συγκεκριμένα, η αποθήκευση συμμετέχει στο καθημερινό, εβδομαδιαίο και εποχικό arbitrage , στις αγορές εξισορρόπησης καθώς και στις βοηθητικές αγορές. Ωστόσο, υπάρχουν λειτουργικές δυσκολίες ως προς το συνδυασμό των διάφορων υπηρεσιών για την επίτευξη μεγαλύτερου εισοδήματος [17].

3.3.2 Αποζημίωση της αποθήκευσης

Από τις περιπτώσεις που αναλύονται παραπάνω, προκύπτει ότι η επένδυση στην αποθήκευση ενέργειας μπορεί να καταστεί βιώσιμη, αν υπάρχει κάποιου είδους θεσμική υποστήριξη ή οικονομική ενίσχυση. Πράγματι, στην περίπτωση της Ιρλανδίας (§ 3.3.1.1) δίνονται ισχυρά κίνητρα για εγκατάσταση αποθηκευτικών μονάδων με γρήγορη απόκριση. Η πληρωμή των αποθηκευτικών σταθμών είναι σε συνάρτηση με την ταχύτητα απόκρισής τους για τις υπηρεσίες συχνότητας.

Από την άλλη πλευρά, στη Γερμανία (§ 3.3.1.2) επιδοτείται από το κράτος η εγκατάσταση αποθηκευτικών σταθμών μαζί με φωτοβολταϊκά ενώ χορηγείται ταυτόχρονα και χαμηλότοκο δάνειο προκειμένου να εξαπλωθούν τα συστήματα αποθήκευσης. Ωστόσο, στη Γερμανία οι αποθηκευτικές μονάδες είναι πολλές και διεσπαρμένες και όχι συγκεντρωτικές. Χρησιμοποιούνται σαν μέρος του σχεδίου της ανάπτυξης του υφιστάμενου δικτύου και όχι σαν

[1] International Energy Agency

ξεχωριστή επένδυση [17]. Άμεσα κίνητρα κατά τη λειτουργία των αποθηκευτικών μονάδων δεν προσφέρονται, όμως ο κατάλληλος προγραμματισμός λειτουργίας μπορεί να αποφέρει έσοδα, συμμετέχοντας ταυτόχρονα και στην εξισορρόπηση του συστήματος.

Στην Καλιφόρνια (§ 3.3.1.4) δίνεται έμφαση στη διεσπαρμένη αποθήκευση αλλά ταυτόχρονα και στην κεντρική αποθήκευση μεγάλης κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποζημίωση των παραγωγών στην Καλιφόρνια γίνεται με βάση την τοπική οριακή τιμολόγηση. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει άλλη διάσταση στην αποθήκευση, επιτρέποντας περισσότερο ευέλικτη λειτουργία.

Επιπρόσθετα, καταλυτική για την εξάπλωση της αποθήκευσης φαίνεται να είναι η σύναψη συμβολαίων, τα οποία καθορίζουν με σαφή τρόπο τις οικονομικές υποχρεώσεις του σταθμού αποθήκευσης (π.χ. χρεώσεις χρήσης δικτύου), λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της τοποθεσίας και του δικτύου στο περιβάλλον του σταθμού, την ευελιξία ως προς τη χρήση και τις δυνατότητες του σταθμού και τη διάρκεια της σύμβασης.

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία διαχείρισης μονάδων και αποθήκευσης

Ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ενέργειας συνίσταται από ένα μεγάλο αριθμό γεννητριών ή συμβατικών μονάδων παραγωγής, ζυγών, γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχουν εισέλθει δυναμικά και οι ΑΠΕ, οι οποίες συμμετέχουν με ένα σημαντικό ποσοστό στο ενεργειακό μείγμα. Ο καινούριος «παίκτης» του συστήματος φιλοδοξεί να είναι η αποθήκευση, η οποία θα αλληλεπιδρά συνεχώς με το δίκτυο εγχέοντας ή απορροφώντας ισχύ ή παρέχοντας υπηρεσίες.

Η μεθοδολογία, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία εδράζεται στον *Μεικτό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (MILP - Mixed Integer Linear Programming).* Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μία μέθοδος για την ανεύρεση του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος (ελάχιστου κόστους ή μέγιστου κέρδους) μιας μαθηματικής έκφρασης λαμβάνοντας υπόψιν ένα σύνολο περιορισμών, οι οποίοι αφορούν τις μεταβλητές αυτής της έκφρασης και το εύρος στο οποίο μπορούν να κινηθούν. Τόσο η μαθηματική έκφραση όσο και οι περιορισμοί είναι γραμμικής μορφής. Μία απλή διατύπωση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να είναι η εξής:

$$max \quad c^T x$$

$$Ax \leq b$$

$$x \geq 0$$

όπου x είναι το διάνυσμα των n μεταβλητών, A γνωστός πίνακας σταθερών όρων και c, b γνωστά διανύσματα σταθερών όρων. Ο χώρος που ορίζουν αυτοί οι περιορισμοί είναι ένα κυρτό πολύεδρο n διαστάσεων και ο αλγόριθμος επίλυσης εντοπίζει το βέλτιστο σημείο (ελάχιστο ή μέγιστο), το οποίο πάντα βρίσκεται πάνω στο πολύεδρο και όχι στο εσωτερικό του.

Ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο επίλυσης του προβλήματος της οικονομικής ένταξης μονάδων και του ακριβούς καθορισμού του σημείου λειτουργίας τους, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς και τη ζήτηση φορτίου. Στην παρούσα εργασία για την επίλυση του προβλήματος του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιείται το πρόγραμμα GAMS και μέσω αυτού ο επιλύτης CPLEX. Τα δεδομένα του προβλήματος εισάγονται μέσω του προγράμματος MATLAB.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές από τις παραμέτρους λειτουργίας των μονάδων είναι μη γραμμικές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία των μονάδων

γραμμικοποιούνται ώστε να εισαχθούν σαν γραμμικές εξισώσεις. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφεται η κατάστρωση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων με όλες τις σχετικές εξισώσεις.

4.1 Κατάστρωση προβλήματος διαχείρισης συμβατικής παραγωγής

4.1.1 Προσδιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται περιλαμβάνει τα διάφορα κόστη λειτουργίας των συμβατικών μονάδων και είναι η εξής:

$$min(\sum_j \sum_t (C_p(j,t) + C_{su}(j,t) + C_{sd}(j,t)) + \sum_t (C_{sl}(t))) \tag{4.1}$$

όπου C_p είναι το μεταβλητό κόστος παραγωγής των θερμικών μονάδων, C_{su} το κόστος εκκίνησης μονάδας και C_{sd} το κόστος σβέσης μονάδας.

4.1.2 Εξίσωση παραγωγής και ζήτησης

Η θεμελιώδης εξίσωση της κάλυψης της απαιτούμενης ζήτησης από την παραγωγή εκφράζεται ως εξής:

$$\sum_j P_u(j,t) + P_{ens}(t) = P_L(t) \quad \forall t \tag{4.2}$$

Η μεταβλητή $P_u(j,t)$ συμβολίζει την παραγόμενη ισχύ της μονάδας j την ώρα t, η $P_{ens}(t)$ τη μη παρεχόμενη ισχύ την ώρα t και η $P_L(t)$ τη ζήτηση φορτίου την ώρα t. Μη ικανοποίηση της ζήτησης του φορτίου, δηλαδή μη μηδενική τιμή στη μεταβλητή $P_{ens}(t)$, οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του κόστους του συστήματος.

4.1.3 Μεταβλητό κόστος μονάδας παραγωγής

Το κόστος παραγωγής μιας θερμικής μονάδας είναι συνήθως της μορφής:

$$f(P_u) = aP_u^2 + bP_u + c \tag{4.3}$$

όπου P_u η παραγόμενη ισχύς της μονάδας σε MW. Είναι απαραίτητη η γραμμικοποίηση της παραπάνω σχέσης προκειμένου να χρησιμοποιηθεί. Η γραμμικοποίησή της γίνεται με τον τρόπο που περιγράφεται στο Σχήμα 4.1.

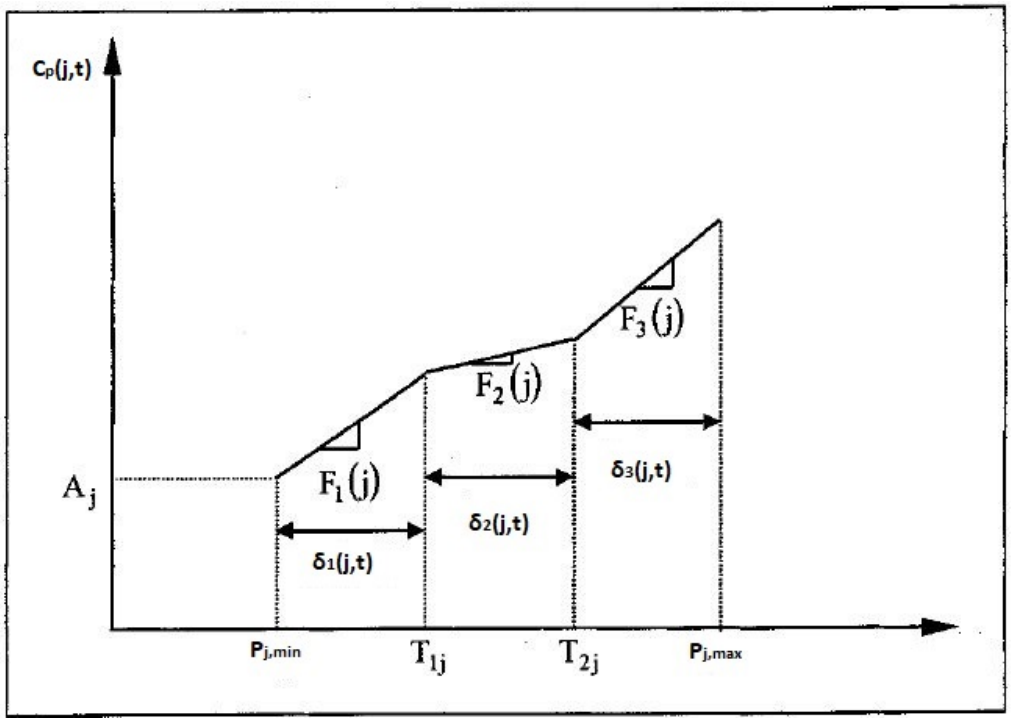
Τελικά, το γραμμικοποιημένο κόστος λειτουργίας της μονάδας j τη στιγμή t υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_p(j,t) = A(j) + \sum_{n=1}^{NL} F_n(j)\delta_n(j,t) \tag{4.4}$$

όπου NL το πλήθος των διαστημάτων (blocks) που δημιουργούνται από τη γραμμικοποίηση και $A(j)$ το σταθερό κόστος λειτουργίας. Η ισχύς που παράγει η μονάδα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_u(j,t) = P_{tmin}(j) \cdot st(j,t) + \sum_{n=1}^{NL} \delta_n(j,t) \tag{4.5}$$

όπου P_{tmin} το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας j και $st(j,t)$ δυαδική μεταβλητή η οποία λαμβάνει τιμή 1 όταν η μονάδα j είναι σε λειτουργία και παράγει ισχύ.



Σχήμα 4.1: Γραμμικοποίηση μεταβλητού κόστους μονάδας παραγωγής [15]

4.1.4 Κόστος εκκίνησης και κόστος σβέσης μονάδας

Το κόστος εκκίνησης και το κόστος σβέσης μιας μονάδας υπολογίζονται απλά με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} C_{su}(j,t) &= su(j,t) \cdot c_{su}(j) \\ C_{sd}(j,t) &= sd(j,t) \cdot c_{sd}(j) \end{aligned} \tag{4.6}$$

όπου $su(j,t)$ δυαδική μεταβλητή, η οποία λαμβάνει την τιμή 1 μόνο όταν η μονάδα j εκκινείται την ώρα t. Αντίστοιχα, η δυαδική μεταβλητή $sd(j,t)$ λαμβάνει την τιμή 1 όταν η μονάδα j σβήνει την ώρα t.

4.1.5 Κόστος μεταβλητών χαλάρωσης

Η σχέση που περιγράφει το κόστος χαλάρωσης είναι η εξής:

$$\begin{aligned} &C_{sl}(t) = K_{ens} \cdot P_{ens}(t) + K_{rp} \cdot [px1(t) + px2(t)] + K_{rs} \cdot [sx1(t) + sx2(t)] + K_{rt} \cdot tx1(t) \\ &\quad \forall t \\ &K_r << K_{ens} \end{aligned} \tag{4.7}$$

Οι μεταβλητές χαλάρωσης λαμβάνουν θετικές τιμές όταν τα δεδομένα του προβλήματος δεν επαρκούν για να το επιλύσουν. Παραδείγματος χάριν, αν το συνολικό φορτίο ξεπερνάει κάποια στιγμή την ονομαστική ισχύ παραγωγής του συστήματος, τότε η μεταβλητή χαλάρωσης ισχύος $P_{ens}(t)$ θα λάβει θετική τιμή και αυτό θα οδηγήσει το σύστημα σε πολύ αυξημένο κόστος. Γενικότερα, η μη ικανοποίηση των απαιτήσεων του συστήματος θεωρείται ότι αυξάνει σημαντικά το κόστος του. Η έννοια της χαλάρωσης υπεισέρχεται στην

παραγόμενη ισχύ, στην πρωτεύουσα εφεδρεία, στην δευτερεύουσα εφεδρεία και στην τριτεύουσα εφεδρεία. Προφανώς, ο συντελεστής κόστους χαλάρωσης της ισχύος είναι πολύ μεγαλύτερος από το συντελεστή κόστους χαλάρωσης εφεδρείας, καθώς η ικανοποίηση της απαίτησης του φορτίου είναι το κύριο και ζωτικό πρόβλημα. Αμέσως μετά ακολουθεί η τήρηση πρωτεύουσας εφεδρείας, η τήρηση δευτερεύουσας εφεδρείας και, τέλος, η τήρηση τριτεύουσας εφεδρείας [7].

4.1.6 Μέγιστη και ελάχιστη ισχύς εξόδου

Η μέγιστη και η ελάχιστη ισχύς εξόδου μιας μονάδας καθορίζεται από τις ράμπες ανόδου και καθόδου με βάση την προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, οι περιορισμοί για τη μέγιστη ισχύ εξόδου στη γραμμικοποιημένη μορφή τους είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} P_{max}(j,t) &\leq P_n(j) \cdot [st(j,t) - sd(j,t+1)] + sd(j,t+1) \cdot RD(j) \\ P_{max}(j,t) &\leq P_u(j,t-1) + RU(j) \cdot st(j,t-1) + RU(j) \cdot su(j,t) \end{aligned} \tag{4.8}$$

όπου $P_n(j)$ η ονομαστική ισχύς της μονάδας j, RD η μέγιστη δυνατή προς τα κάτω ρύθμιση και RU η μέγιστη δυνατή προς τα πάνω ρύθμιση. Αντίστοιχα, οι γραμμικοί περιορισμοί για την ελάχιστη ισχύ εξόδου είναι οι παρακάτω:

$$\begin{aligned} P_{min}(j,t) &\geq P_{tmin}(j) \cdot st(j,t) \\ P_{min}(j,t) &\geq P_u(j,t-1) - RD(j) \cdot st(j,t-1) - RD(j) \cdot sd(j,t) \end{aligned} \tag{4.9}$$

Επιπλέον, είναι απαραίτητες και οι επόμενες σχέσεις μεταξύ των δυαδικών μεταβλητών προκειμένου να διασφαλίζεται ότι μία μονάδα δε μπορεί να εκκινείται και να σβήνει ταυτόχρονα.

$$\begin{aligned} su(j,t) - sd(j,t) &= st(j,t) - st(j,t-1) \\ su(j,t) + sd(j,t) &\leq 1 \end{aligned} \tag{4.10}$$

4.1.7 Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας και στάσης

Κάθε μονάδα από τη στιγμή της ένταξης της είναι απαραίτητο να μείνει ενεργή για κάποιες συγκεκριμένες ώρες. Αυτό εκφράζεται γραμμικά ως εξής:

$$\begin{aligned} &\sum_{k=t}^{t+UT(j)-1} st(j,k) \geq UT(j) \cdot su(j,t) \quad \forall t = 1...T - UT(j) + 1 \\ &\sum_{k=t}^{T} [st(j,k) - su(j,t)] \geq 0 \quad \forall t = T - UT(j) + 2...T \end{aligned} \tag{4.11}$$

Οι δύο παραπάνω σχέσεις επιβάλλουν λειτουργία της μονάδας j για $UT(j)$ ώρες από τη στιγμή της εκκίνησης της σε ένα χρονικό ορίζοντα T ωρών. Αντίστοιχα, κάθε μονάδα από τη στιγμή της σβέσης της είναι απαραίτητο να παραμείνει σβηστή για έναν ελάχιστο αριθμό ορών και αυτό εκφράζεται γραμμικά ως εξής:

$$\begin{aligned} &\sum_{k=t}^{t+DT(j)-1} [1 - st(j,k)] \geq DT(j) \cdot sd(j,t) \quad \forall t = 1...T - DT(j) + 1 \\ &\sum_{k=t}^{T} [1 - st(j,k) - sd(j,t)] \geq 0 \quad \forall t = T - DT(j) + 2...T \end{aligned} \tag{4.12}$$

όπου $DT(j)$ ο ελάχιστος χρόνος στάσης της μονάδας j

4.2 Εισαγωγή αποθήκευσης

4.2.1 Ισοζύγιο ισχύος

Με την εισαγωγή της αποθήκευσης η εξίσωση ισοζυγίου ισχύος τροποποιείται ως εξής [7]:

$$\sum_j P_u(j,t) + \sum_s P_\xi^d(s,t) + P_{ens}(t) = P_L(t) + \sum_s P_\xi^c(s,t) \quad \forall t \tag{4.13}$$

Η μεταβλητή $P_\xi^d(s,t)$ υποδηλώνει την ισχύ εκφόρτισης της μπαταρίας ενώ η μεταβλητή $P_\xi^c(s,t)$ υποδηλώνει τη φόρτιση της μπαταρίας.

4.2.2 Επίπεδο και όρια φόρτισης

Το επίπεδο της φόρτισης της μπαταρίας s διατηρείται στη μεταβλητή $SoC(s,t)$ ως εξής:

$$SoC(s,t) = SoC(s,t-1) + P_\xi^c(s,t) \cdot \eta_\xi^c(s) - P_\xi^d(s,t)/\eta_\xi^d(s) \tag{4.14}$$

όπου $P_\xi^c(s,t)$ η ισχύς φόρτισης, $\eta_\xi^c(s)$ ο βαθμός απόδοσης κατά τη φόρτιση, $P_\xi^d(s,t)$ η ισχύς εκφόρτισης και $\eta_\xi^d(s)$ ο βαθμός απόδοσης κατά την εκφόρτιση. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί το εύρος λειτουργίας της μπαταρίας.

$$E_{\xi,min}(s) \leq SoC(s,t) \leq E_{\xi,max}(s) \tag{4.15}$$

Τα όρια ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης περιορίζονται από 0 έως $P_{\xi,max}^{c/d}(s)$.

$$\begin{aligned} 0 \leq P_\xi^c(s,t) \leq st_\xi^c(s,t) \cdot P_{\xi,max}^c(s) \\ 0 \leq P_\xi^d(s,t) \leq st_\xi^d(s,t) \cdot P_{\xi,max}^d(s) \end{aligned} \tag{4.16}$$

Οι δυαδικές μεταβλητές $st_\xi^c(s,t)$ και $st_\xi^d(s,t)$ υποδηλώνουν λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα. Προφανώς, δεν έχει νόημα να πραγματοποιείται ταυτοχρόνως και φόρτιση και εκφόρτιση με τον αντίστοιχο περιορισμό να δίνεται παρακάτω.

$$st_\xi^c(s,t) + st_\xi^d(s,t) \leq 1 \tag{4.17}$$

4.3 Τήρηση Εφεδρείας

Η έννοια της εφεδρείας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπονοεί την ύπαρξη μονάδων σε ετοιμότητα προκειμένου αυτές να μπορέσουν να αποδώσουν μέρος ισχύος στο σύστημα, την ώρα που υπάρχει μια απρόσμενη απώλεια παραγωγής, όπως για παράδειγμα η απώλεια ισχύος αιολικών. Η εφεδρεία χωρίζεται σε πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα, σε στρεφόμενη και μη στρεφόμενη και σε θετική και αρνητική. Η στρεφόμενη εφεδρεία παρέχεται από μονάδες οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ η μη στρεφόμενη από μονάδες οι οποίες είναι σε στάση. Η έννοια θετική εφεδρεία αναφέρεται στην άμεση διάθεση επαρκούς ισχύος σε περίπτωση μερικής απώλειας παραγωγής, ενώ η έννοια αρνητική εφεδρεία αναφέρεται σε περίπτωση δυνατότητας άμεσης μείωσης (ή απορρόφησης από τη μπαταρία) μέρους της παραγόμενης ισχύος σε περίπτωση αιφνίδιας απώλειας φορτίου.

4.3.1 Πρωτεύουσα εφεδρεία

Η πρωτεύουσα εφεδρεία ή πρωτεύουσα ρύθμιση στις θερμικές μονάδες πραγματοποιείται μέσω του ρυθμιστή στροφών, ο οποίος επί της ουσίας ελέγχει την παροχή ατμού στον στρόβιλο προκειμένου να προσαρμόσει την ενεργό ισχύ εξόδου ή τη συχνότητα στο επιθυμητό επίπεδο. Ο ρυθμιστής στροφών επενεργεί σε χρόνο δευτερολέπτων αλλά η ρύθμιση αφήνει ένα μόνιμο σφάλμα.

4.3.1.1 Εξισώσεις για την πρωτεύουσα εφεδρεία

Είναι συνηθισμένο να τηρείται απαίτηση πρωτεύουσας εφεδρείας ίση με τη συμβολή (παραγωγή και εφεδρεία) της εκάστοτε μεγαλύτερης μονάδας που βρίσκεται σε λειτουργία. Αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$r1(t) \geq P_u(j,t) + pr1(j,t) \quad \forall t \tag{4.18}$$

όπου $r1(t)$ η απαίτηση πρωτεύουσας εφεδρείας την ώρα t και $pr1(j,t)$ η συμβολή της μονάδας j την ώρα t στην πρωτεύουσα εφεδρεία. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέγεται να τηρείται επίπεδη πρωτεύουσα θετική εφεδρεία ύψους 300 MW. Η βασική εξίσωση που καθορίζει την εφεδρεία περιλαμβάνει τόσο τις θερμικές μονάδες, όσο και την αποθήκευση.

$$\sum_j pr1(j,t) + \sum_s prs1(s,t) + px1(t) \geq r1(t) \quad \forall t \tag{4.19}$$

Η μεταβλητή $prs1(s,t)$ συμβολίζει την πρωτεύουσα εφεδρεία που τηρείται από την αποθηκευτική μονάδα s την ώρα t ενώ η μεταβλητή $px1(t)$ συμβολίζει τη χαλάρωση της εφεδρείας, δηλαδή την εφεδρεία που δεν τηρείται την ώρα t. Μη τήρηση της απαίτησης εφεδρείας του συστήματος συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους. Με τελείως αντίστοιχο τρόπο υλοποιείται και η πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία, η απαίτηση της οποίας καθορίζεται στο μισό της απαίτησης της θετικής εφεδρείας.

$$\sum_j pr2(j,t) + \sum_s prs2(s,t) + px2(t) \geq r2(t) \quad \forall t \tag{4.20}$$

4.3.2 Δευτερεύουσα εφεδρεία

Η δευτερεύουσα ρύθμιση ή εφεδρεία συμβάλλει στη διόρθωση του μόνιμου σφάλματος που παραμένει μετά από την πρωτεύουσα ρύθμιση. Η δευτερεύουσα ρύθμιση επιτηρεί τα σφάλματα συχνότητας σε μια συγκεκριμένη ζώνη περιοχής και με τη χρήση ενός κεντρικού ρυθμιστή, είναι υπεύθυνη για τη διόρθωση τους. Επεμβαίνει σε χρονικό επίπεδο μερικών λεπτών και σε αυτήν συμβάλλουν κυρίως οι γρήγορες μονάδες, όπως για παράδειγμα οι μονάδες φυσικού αερίου ή οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου.

4.3.2.1 Εξισώσεις για την δευτερεύουσα εφεδρεία

Οι εξισώσεις που ικανοποιούν την απαίτηση θετικής και αρνητικής δευτερεύουσας εφεδρείας είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} &\sum_j sr1(j,t) + \sum_s srs1(s,t) + sx1(t) \geq s1(t) \quad \forall t \\ &\sum_j sr2(j,t) + \sum_s srs2(s,t) + sx2(t) \geq s2(t) \quad \forall t \end{aligned} \tag{4.21}$$

όπου $sr1(j,t)$ η συμβολή της μονάδας j την ώρα t στη δευτερεύουσα θετική εφεδρεία, $srs1(s,t)$ η συμβολή της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t στη δευτερεύουσα θετική εφεδρεία, $sx1(t)$ η χαλάρωση της δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας την ώρα t και $s1(t)$ η απαίτηση δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας την ώρα t. Αντίστοιχοι είναι και οι συμβολισμοί για τη δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία.

4.3.3 Τριτεύουσα εφεδρεία

Η τριτεύουσα εφεδρεία επεμβαίνει προκειμένου να συμπληρώσει μια πιθανή ανεπάρκεια ισχύος κατόπιν της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας. Σε αυτήν συμβάλλουν μονάδες με γρήγορες ράμπες ανόδου. Ο χρόνος επενέργειας της είναι 20 με 30 λεπτά. Η τριτεύουσα εφεδρεία χωρίζεται σε στρεφόμενη και σε μη στρεφόμενη [8]. Η τριτεύουσα στρεφόμενη εφεδρεία παρέχεται από μονάδες που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, ενώ η μη στρεφόμενη λαμβάνει υπόψη της μονάδες που βρίσκονται εκτός λειτουργίας, αλλά βρίσκονται σε άμεση ετοιμότητα για να λειτουργήσουν και να παρέχουν ισχύ. Αξίζει να σημειωθεί ότι λαμβάνεται μόνο θετική τριτεύουσα εφεδρεία. Η εξίσωση εξασφάλισης της τριτεύουσας εφεδρείας είναι η ακόλουθη:

$$\sum_j tr1(j,t) + \sum_j trns1(j,t) + \sum_s trs1(s,t) + tx1(t) \geq t1 \quad \forall t \tag{4.22}$$

όπου $tr1(j,t)$ η συμβολή της μονάδας j την ώρα t στην τριτεύουσα στρεφόμενη εφεδρεία, $trns1(j,t)$ η συμβολή της μονάδας j την ώρα t στην τριτεύουσα μη στρεφόμενη εφεδρεία, $trs1(s,t)$ η συμβολή της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t στην τριτεύουσα εφεδρεία, $tx1(t)$ η χαλάρωση της τριτεύουσας εφεδρείας την ώρα t και $t1$ η απαίτηση τριτεύουσας εφεδρείας.

4.3.4 Εφεδρεία από την αποθήκευση

4.3.4.1 Εξισώσεις εφεδρείας και αποθήκευσης

Οι ακόλουθες εξισώσεις καθορίζουν πλήρως το ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης μιας μπαταρίας (ισχύς εισόδου και εξόδου αντίστοιχα) και σε συνδυασμό με την παροχή εφεδρείας δεν του επιτρέπουν να υπερβεί το μέγιστο δυνατό όριο του, το οποίο είναι η ονομαστική ισχύς του [7]. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη από τις δύο παρακάτω εξισώσεις, σε περίπτωση εκφόρτισης της μπαταρίας, επιβάλλει ότι το άθροισμα της ισχύς εκφόρτισης και όλων των θετικών εφεδρειών που παρέχει, δεν πρέπει να ξεπερνά τη μέγιστη τιμή εκφόρτισης. Σε περίπτωση φόρτισης της μπαταρίας, η μέγιστη εφεδρεία, που μπορεί να παρέχει εκείνη τη στιγμή, δεν πρέπει να ξεπερνά τη μέγιστη ισχύ εκφόρτισης αυξημένη κατά την ισχύ φόρτισης εκείνη την ώρα. Με άλλα λόγια, η μπαταρία κατά την ώρα φόρτισής της μπορεί να παρέχει θετική εφεδρεία μειώνοντας την ισχύ φόρτισης της. Η δεύτερη από τις παρακάτω σχέσεις εκφράζει την αντίστοιχη λειτουργία της μπαταρίας για την αρνητική εφεδρεία.

$$\begin{aligned} &P_\xi^d(s,t) + prs1(s,t) + srs1(s,t) + trs1(s,t) \leq P_{\xi,max}^d(s) + P_\xi^c(s,t) \quad \forall s,t \\ &P_\xi^c(s,t) + prs2(s,t) + srs2(s,t) \leq P_{\xi,max}^c(s) + P_\xi^d(s,t) \quad \forall s,t \end{aligned} \tag{4.23}$$

4.3.4.2 Εξασφάλιση εύρους λειτουργίας μπαταρίας για εφεδρεία

Η αποθήκευση δύναται και μάλιστα είναι ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητά της, όπως εξηγείται σε προηγούμενα κεφάλαια, να συμμετέχει στην παροχή εφεδρείας. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ικανοποιητική ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας, ώστε να είναι δυνατή η παροχή εφεδρείας από την αποθήκευση, θεωρείται ότι το εύρος λειτουργίας της μπαταρίας

περιορίζεται ακόμα περισσότερο. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι η μπαταρία, προκειμένου να συμμετέχει στην εφεδρεία, πρέπει να είναι σε θέση να φορτίζεται ή να εκφορτίζεται για ένα ικανό χρονικό διάστημα σε πλήρη ισχύ. Η εκφόρτιση της μπαταρίας σε επίπεδο παροχής εφεδρείας αντικατοπτρίζει την παροχή θετικής εφεδρείας, ενώ η φόρτιση την παροχή αρνητικής εφεδρείας, δηλαδή την απορρόφηση περίσσειας ενεργού ισχύος, η οποία μπορεί να προκύψει από σφάλμα συνοδευόμενο με απώλεια φορτίου. Μαθηματικά, τα παραπάνω εκφράζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} SoC(s,t) &\geq E_{\xi,min}(s) + t_r \cdot P^d_{\xi,max}(s) \quad \forall s,t \\ SoC(s,t) &\leq E_{\xi,max}(s) - t_r \cdot P^c_{\xi,max}(s) \quad \forall s,t \end{aligned} \tag{4.24}$$

4.3.5 Εφεδρεία και όρια λειτουργίας θερμικών μονάδων

4.3.5.1 Καθορισμός μέγιστης δυνατής ποσότητας στρεφόμενης εφεδρείας από θερμικές μονάδες

Με βάση την μέγιστη και ελάχιστη ισχύ εξόδου μιας θερμικής μονάδας ανά ώρα, όπως αυτή καθορίζεται στην § 4.1.6, η παροχή εφεδρείας κάθε μονάδας περιορίζεται με τον εξής τρόπο:

$$pr1(j,t) + sr1(j,t) + tr1(j,t) \leq P_{max}(j,t) - P_u(j,t) \quad \forall j,t \tag{4.25}$$

$$pr2(j,t) + sr2(j,t) \leq P_u(j,t) - P_{min}(j,t) \quad \forall j,t \tag{4.26}$$

Η πρώτη από τις δύο παραπάνω εξισώσεις καθορίζει το όριο θετικής στρεφόμενης εφεδρείας (πρωτεύουσας, δευτερεύουσας ή τριτεύουσας) κάθε ώρα, το οποίο ουσιαστικά είναι η διαφορά της ισχύος λειτουργίας από την μέγιστη δυνατή ισχύ εξόδου για την εκάστοτε ώρα. Η μέγιστη δυνατή ισχύς εξόδου των μονάδων κάθε ώρα προκύπτει ανάλογα με τις ράμπες ανόδου τους. Αντίστοιχα, η δεύτερη από τις παραπάνω εξισώσεις οριοθετεί την παροχή αρνητικής εφεδρείας για κάθε μονάδα, με βάση τη διαφορά της ελάχιστης δυνατής ισχύος εξόδου της μονάδας από την τρέχουσα παραγόμενη ισχύ. Η ελάχιστη δυνατή ισχύς εξόδου των μονάδων καθορίζεται από τις ράμπες καθόδου τους.

Επιπροσθέτως, το μέγιστο ποσό στο οποίο μπορεί κάθε μονάδα να συμβάλλει σε καθένα από τα είδη στρεφόμενης εφεδρείας περιορίζεται με τις ακόλουθες απλές ανισωτικές σχέσεις:

$$\begin{aligned} pr1(j,t) &\leq mpr1(j) \quad \forall j,t \\ pr2(j,t) &\leq mpr2(j) \quad \forall j,t \\ sr1(j,t) &\leq msr1(j) \quad \forall j,t \\ sr2(j,t) &\leq msr2(j) \quad \forall j,t \\ tr1(j,t) &\leq mtr1(j) \quad \forall j,t \end{aligned} \tag{4.27}$$

4.3.5.2 Εξισώσεις μη στρεφόμενης τριτεύουσας εφεδρείας

Στην τριτεύουσα μη στρεφόμενη εφεδρεία συμμετέχουν μόνο οι μονάδες αερίου και πετρελαίου. Οι μονάδες αυτές είναι γρήγορες, δηλαδή έχουν τη δυνατότητα μέσα σε λίγο χρόνο (μισή ώρα) να φτάσουν την τεχνικά ελάχιστη παραγωγή τους και για αυτό το λόγο

θεωρούνται κατάλληλες για την παροχή τριτεύουσας μη στρεφόμενης εφεδρείας.

$$\begin{aligned} &trns1(j,t) \leq \frac{RU}{2} \cdot ns(j,t) \quad \forall j,t \\ &trns1(j,t) \geq P_{tmin}(j) \cdot ns(j,t) \quad \forall j,t \\ &ns(j,t) + st(j,t) \leq 1 \quad \forall j,t \end{aligned} \tag{4.28}$$

Οι ακόλουθες εξισώσεις, οι οποίες είναι παρόμοιες με τις εξισώσεις του ελάχιστου χρόνου στάσης, καθορίζουν τη δυαδική μεταβλητή $ns(j,t)$, η οποία λαμβάνει τιμή 1 όταν η μονάδα j είναι σε θέση να παρέχει μη στρεφόμενη εφεδρεία. Με άλλα λόγια, οι παρακάτω εξισώσεις εξασφαλίζουν ότι μια μονάδα δε μπορεί να παρέχει μη στρεφόμενη εφεδρεία, αν δεν έχει παρέλθει ο ελάχιστος χρόνος στάσης της μετά από σβέση.

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{M0(j)} [ns(j,i)] = 0 \quad \forall j \\ &\sum_{k=i}^{i+DT(j)-1} [1 - ns(j,k)] \geq DT(j) \cdot sd(j,i) \\ &\forall j, \quad \forall i = M0(j)+1...T - DT(j) + 1 \\ &\sum_{k=i}^{T} [1 - ns(j,k) - sd(j,i)] \geq 0 \quad \forall j \quad \forall i = T - DT(j) + 2...T \end{aligned} \tag{4.29}$$

4.4 Εισαγωγή ΑΠΕ

Με την εισαγωγή αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής, η εξίσωση ισοζυγίου ισχύος τροποποιείται ως εξής:

$$\sum_j P_u(j,t) + \sum_s P_\xi^d(s,t) + \sum_w P_w(w,t) + \sum_{pv} P_{pv}(pv,t) + P_{ens}(t) = P_L(t) + \sum_s P_\xi^c(s,t) \quad \forall t \tag{4.30}$$

όπου $P_w(w,t)$ η παραγωγή του αιολικού w την ώρα t και $P_{pv}(pv,t)$ η παραγωγή του φωτοβολταϊκού pv την ώρα t. Τόσο η αιολική όσο και η φωτοβολταϊκή παραγωγή δεν πρέπει να ξεπερνούν την τιμή της αντίστοιχης διαθέσιμης ποσότητάς τους κάθε ώρα.

$$\begin{aligned} &P_w(w,t) \leq A_w(w,t) \quad \forall j,t \\ &P_{pv}(pv,t) \leq A_{pv}(pv,t) \quad \forall j,t \end{aligned} \tag{4.31}$$

Η μεταβλητή $A_w(w,t)$ συμβολίζει τη διαθέσιμη παραγωγή του αιολικού w την ώρα t ενώ η $A_{pv}(pv,t)$ τη διαθέσιμη παραγωγή του φωτοβολταϊκού pv την ώρα t.

Εδώ αξίζει να τονισθεί ότι η εισχώρηση των αιολικών και των φωτοβολταϊκών στο ενεργειακό μείγμα γίνεται με μηδενικό κόστος. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος προσπαθεί κατά προτεραιότητα να εισάγει ει δυνατόν όλη τη διαθέσιμη ποσότητα ΑΠΕ. Στη συνέχεια, εντάσσει τις οικονομικότερες θερμικές μονάδες, από τις οποίες καθορίζεται τελικά η οριακή τιμή του συστήματος κάθε ώρας. Η οριακή τιμή του συστήματος αντιστοιχεί στο ακριβότερο ενταγμένο block προσφοράς κάποιας θερμικής μονάδας, που βρίσκεται σε λειτουργία (§ 4.1.3) [26]. Τα blocks προσφοράς δομούνται με δύο διαφορετικούς τρόπους: στον πρώτο τρόπο λαμβάνεται για κάθε βήμα προσφοράς, η **μέγιστη τιμή** ανάμεσα στο μέσο μεταβλητό κόστος της θερμικής μονάδας (Παράρτημα Β) και το οριακό κόστος της (**σχήμα**

προσφοράς 1) ενώ στο δεύτερο σχήμα προσφοράς λαμβάνεται σε κάθε βήμα ακριβώς το **οριακό κόστος** της μονάδας (**σχήμα προσφοράς 2**).

Ωστόσο, όπως διαπιστώνεται σε επόμενη ενότητα, οι ΑΠΕ δεν διεισδύουν πάντα σε όλη τους τη διαθεσιμότητα, εξαιτίας της απαίτησης για τήρηση εφεδρειών. Ακριβώς τις ώρες κατά τις οποίες η ζήτηση φορτίου είναι χαμηλή και η διαθεσιμότητα των ΑΠΕ υψηλή, το σύστημα αναγκάζεται να εντάξει επαρκείς θερμικές μονάδες για την κάλυψη της απαίτησης των διάφορων τύπων εφεδρειών, περικόπτοντας ΑΠΕ. Φυσικά, η ύπαρξη αποθηκευτικών μονάδων διαφόρων μεγεθών συμβάλει στη μείωση ή ακόμα και στην εξάλειψη των περικοπών ΑΠΕ. Σε επόμενη ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η συμβολή της αποθήκευσης σε ένα σύστημα όπως έχει δομηθεί μέχρι εδώ.

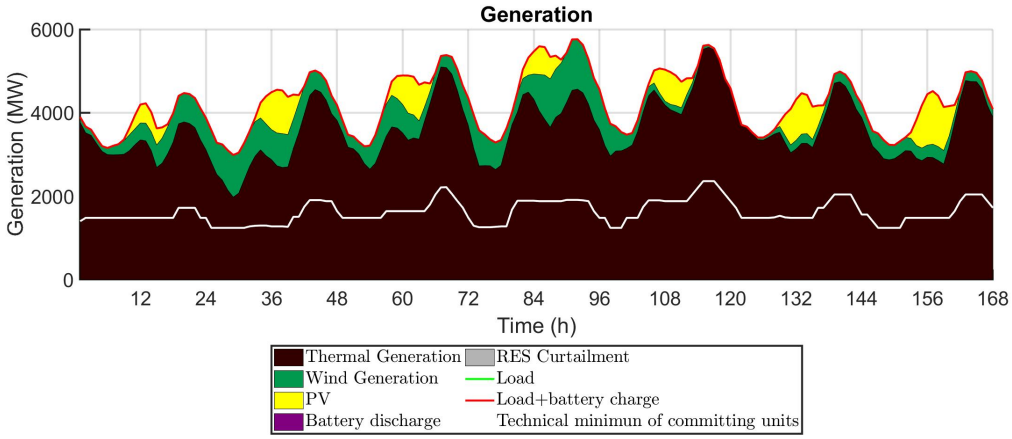
4.5 Εφαρμογή της μεθοδολογίας

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται παρουσίαση αποτελεσμάτων διάφορων προσομοιώσεων χωρίς μπαταρία ή με τη μπαταρία να λειτουργεί σαν ελεύθερο στοιχείο του συστήματος. Σε πρώτη φάση παρουσιάζονται εβδομαδιαία αποτελέσματα για χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ, ενώ σε δεύτερη φάση για υψηλή. Η εβδομάδα, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, είναι κοινή για όλες τις ακόλουθες προσομοιώσεις και αποτελεί μία μέση περίπτωση ζήτησης ισχύος στο σύνολο του έτους. Αντικειμενικός σκοπός σε αυτήν την ενότητα είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, επομένως ο αλγόριθμος ρυθμίζει κατάλληλα τη λειτουργία της μπαταρίας για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Η λειτουργία της μπαταρίας δύναται να είναι απορρόφηση ή έγχυση ισχύος αλλά και παροχή κάθε είδους εφεδρείας. Όλες οι προσομοιώσεις διεξάγονται με ακρίβεια βελτιστοποίησης 1%.

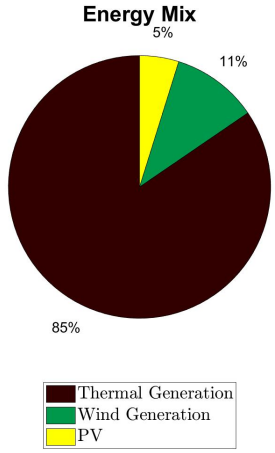
4.5.1 Εφαρμογή με χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ

Το προς εξέταση σύστημα έχει ετήσια αιχμή 6500 MW, συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύ 7640 MW, εγκατεστημένα 2000 MW αιολικών και εγκατεστημένα 2000 MW φωτοβολταϊκών. Γίνεται, αρχικά, εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας χωρίς την παρουσία αποθήκευσης και στη συνέχεια με ύπαρξη αποθηκευτικού σταθμού 6 h x 250 MW. Οι θερμικές μονάδες προσφέρουν ισχύ σύμφωνα με το πρώτο σχήμα προσφοράς (μέγιστη τιμή οριακού-μέσου μεταβλητού κόστους).

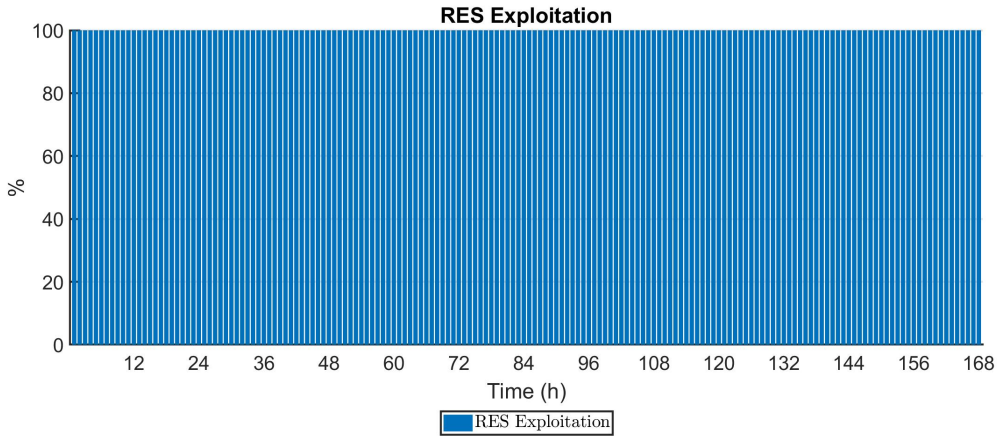
4.5.1.1 Εφαρμογή χωρίς αποθήκευση



Σχήμα 4.2: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο

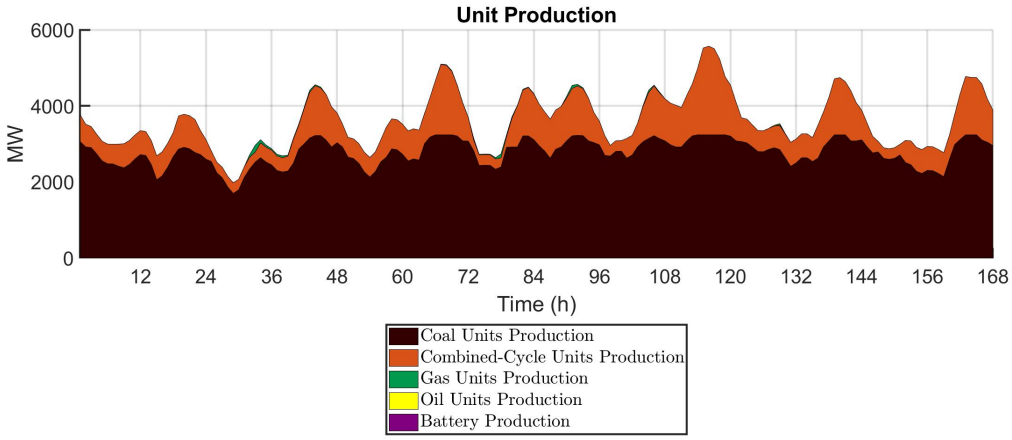


Σχήμα 4.3: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα

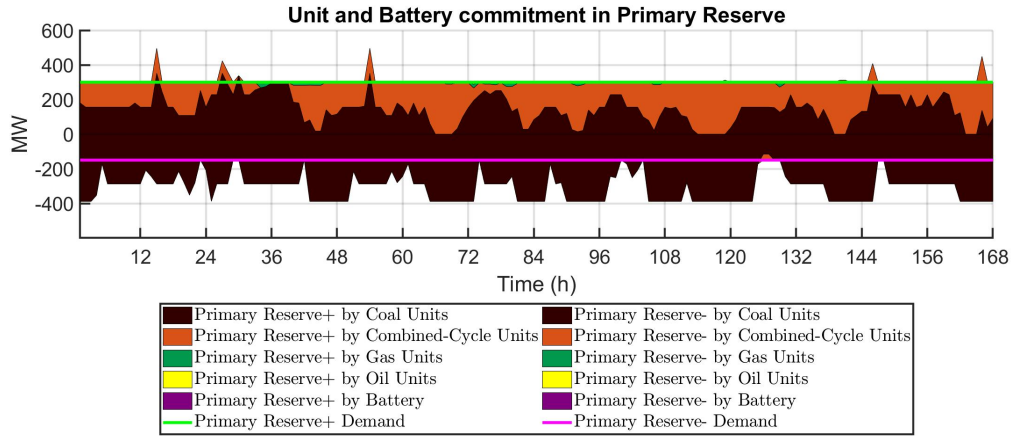


Σχήμα 4.4: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ

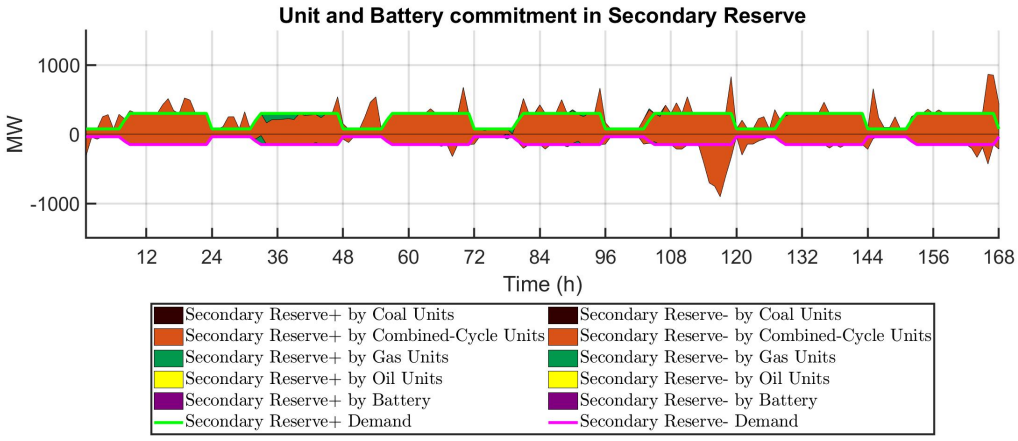
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2, στην κάλυψη του φορτίου συμβάλουν οι θερμικές μονάδες, στην παραγωγή των οποίων προστίθενται τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά, ανάλογα με τη διαθεσιμότητά τους κάθε ώρα. Η διείσδυση των ΑΠΕ για αυτήν την εβδομάδα είναι 15,47%



Σχήμα 4.5: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



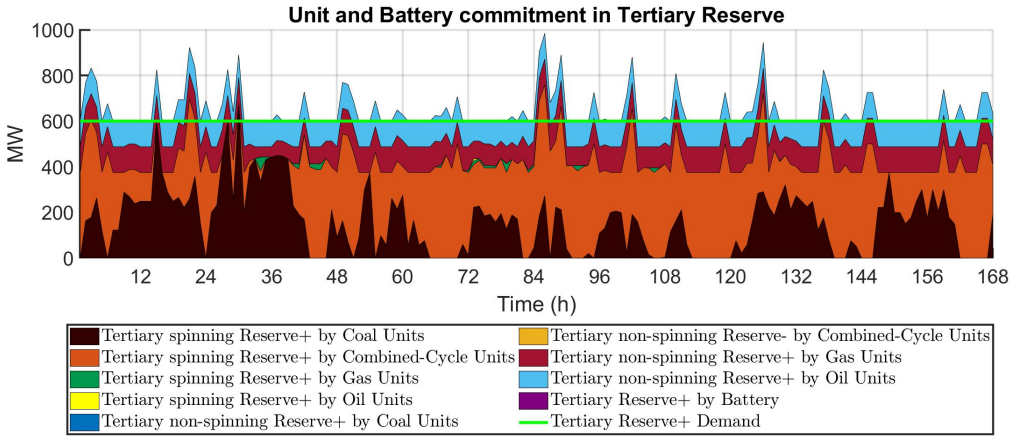
Σχήμα 4.6: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



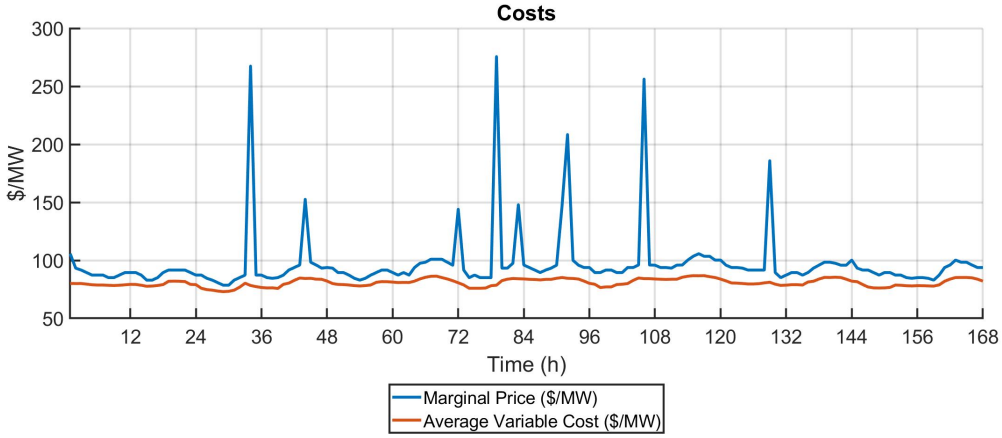
Σχήμα 4.7: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

ενώ οι διαθέσιμες ΑΠΕ αξιοποιούνται πλήρως κάθε ώρα αυτής της εβδομάδας. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ είναι πλήρης, καθώς η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ είναι σχετικά μικρή.

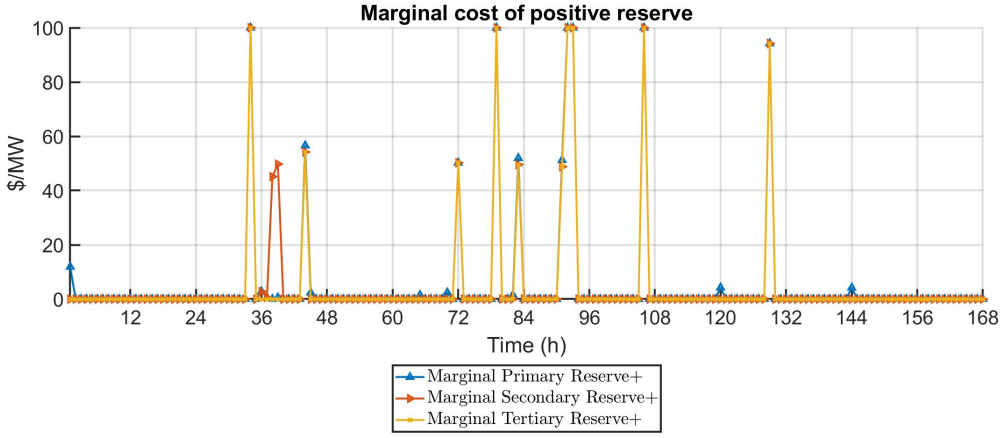
Όσο αφορά τη θερμική παραγωγή, οι μονάδες του άνθρακα παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο ε-



Σχήμα 4.8: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

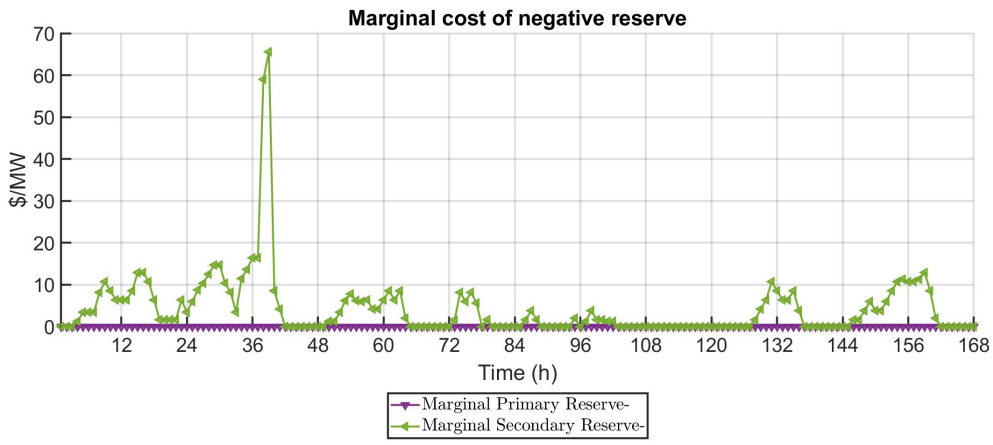


Σχήμα 4.9: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων

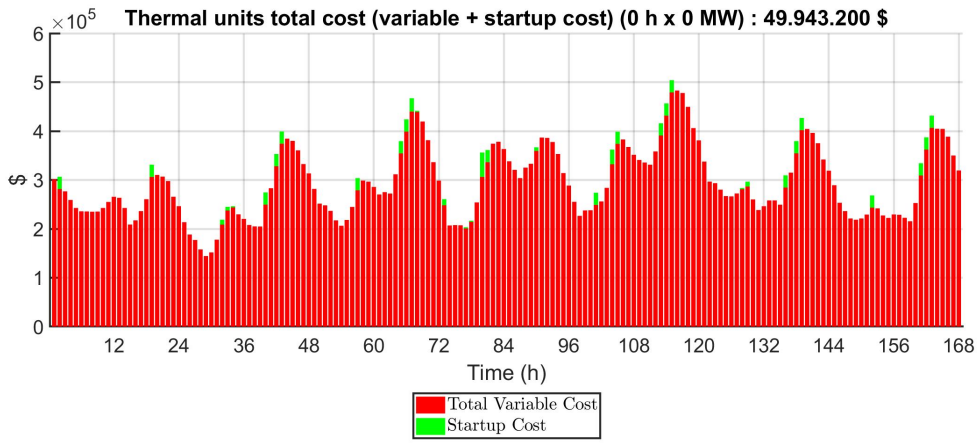


Σχήμα 4.10: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών

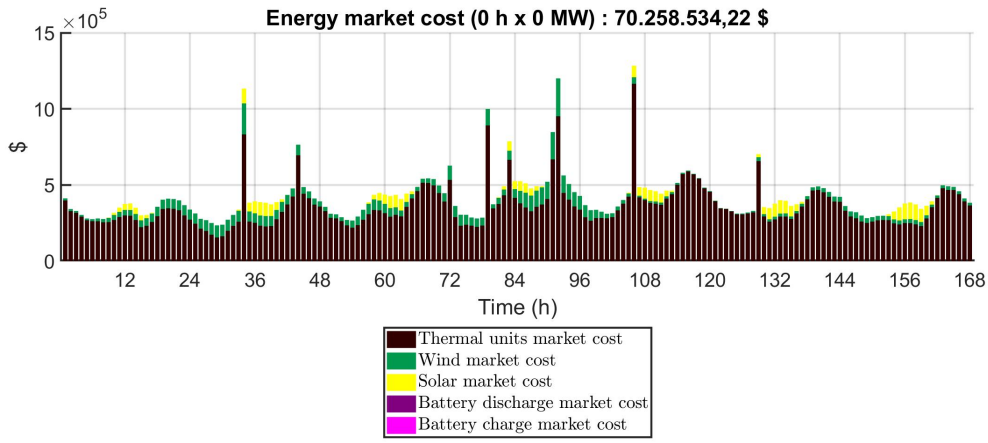
φόσον έχουν το χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου (ΜΣΚ) εντάσσονται κυρίως για παροχή δευτερεύουσας εφεδρείας, την οποία δεν παρέχουν οι ανθρακικές μονάδες. Η γρήγορη ρύθμισή τους και οι μεγάλες ράμπες ισχύος καθιστούν τις



Σχήμα 4.11: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών

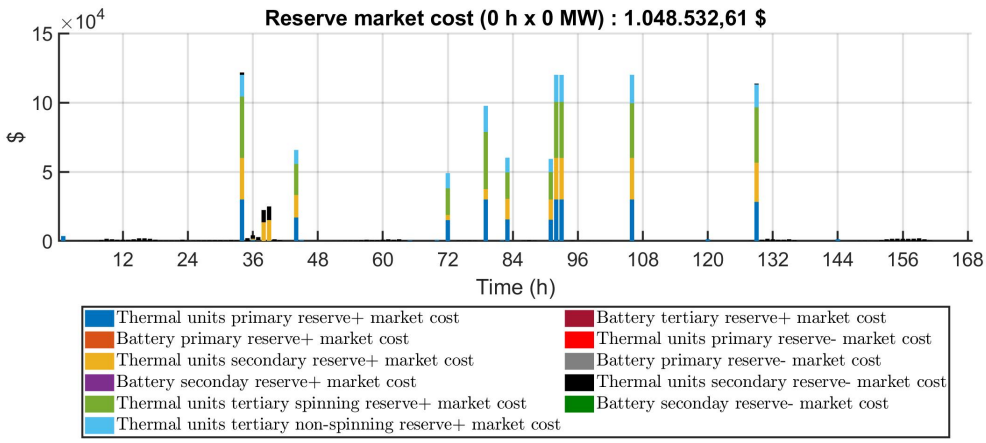


Σχήμα 4.12: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)

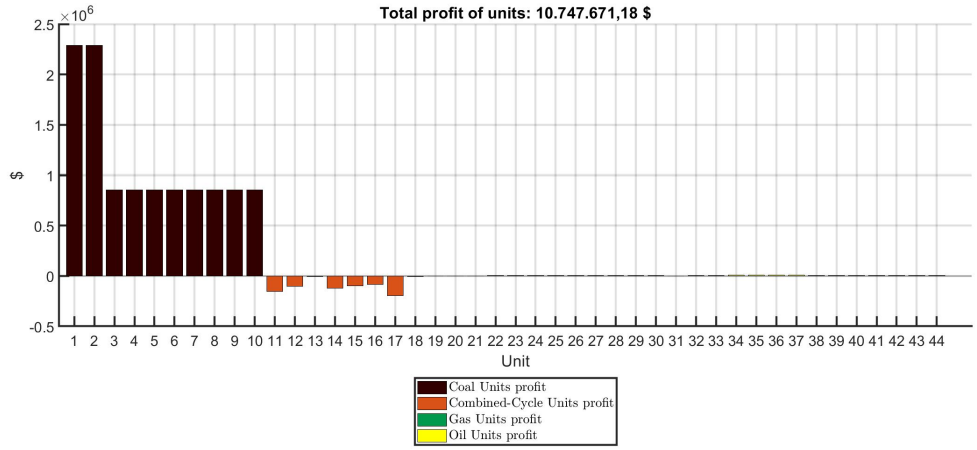


Σχήμα 4.13: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας

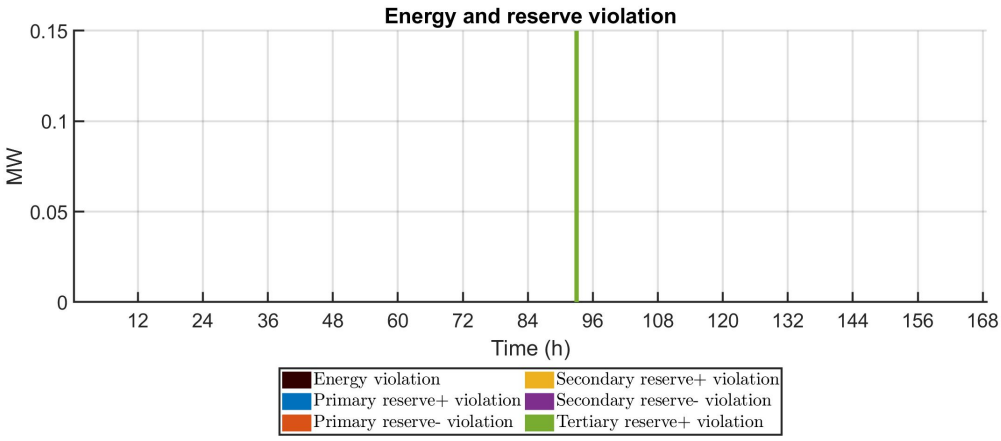
μονάδες συνδυασμένου κύκλου ιδανικές για παροχή δευτερεύουσας εφεδρείας. Ακόμα, παρατηρείται ότι για λίγες ώρες εντάσσονται και κάποιες μονάδες αερίου, και αυτές για λόγους εφεδρειών. Οι μονάδες πετρελαίου είναι οι ακριβότερες και για αυτό το λόγο δεν υπάρχει



Σχήμα 4.14: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών



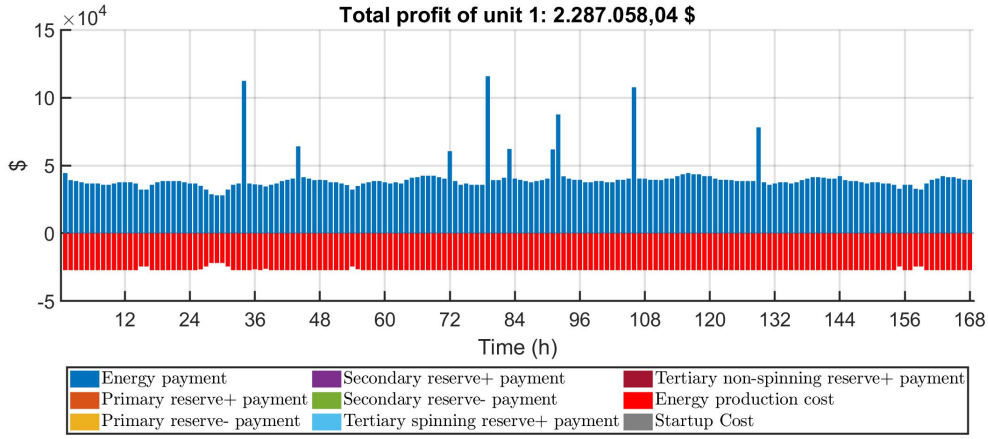
Σχήμα 4.15: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων



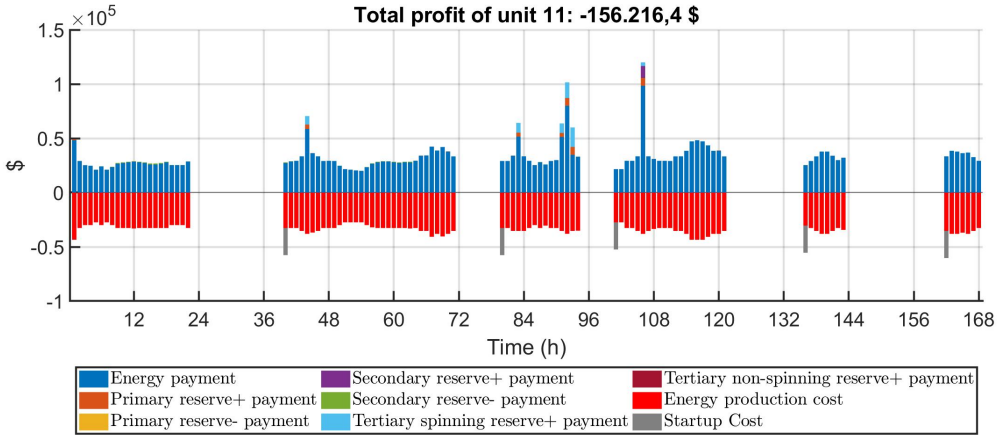
Σχήμα 4.16: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών

κάποια ένταξη τους καθ΄όλη τη διάρκεια αυτής της ενδεικτικής εβδομάδας.

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η οριακή τιμή, όπως διαμορφώνεται αυτήν την εβδομάδα. Η οριακή τιμή κυμαίνεται τις περισσότερες ώρες από 90 έως 100 $/MWh. Παρατηρείται ότι σε αρκετές αιχμές της εβδομάδας η οριακή τιμή είναι υψηλή. Αυτό συμβαίνει γιατί την οριακή τιμή αυτές



Σχήμα 4.17: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας



Σχήμα 4.18: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος

τις ώρες διαμορφώνουν οι ακριβότερες στην παραγωγή ενέργειας, σε σχέση με τις μονάδες άνθρακα και συνδυασμένου κύκλου, μονάδες αερίου. Ο αλγόριθμος επιλέγει να καλύψει ένα πολύ μικρό κομμάτι της αιχμής με μονάδες αερίου αντί να εντάξει μία ακόμα μονάδα άνθρακα ή συνδυασμένου κύκλου, οι οποίες ναι μεν έχουν χαμηλότερο μεταβλητό κόστος παραγωγής ενέργειας, όμως έχουν πολύ μεγαλύτερο κόστος εκκίνησης. Την πέμπτη ημέρα που η αιχμή κυμαίνεται και πάλι σε υψηλά επίπεδα, η κάλυψή της γίνεται από μονάδες συνδυασμένου κύκλου που όμως σε αυτήν την περίπτωση είναι αρκετή η ενταγμένη ισχύς τους από πριν και γίνεται απλά μία ρύθμιση.

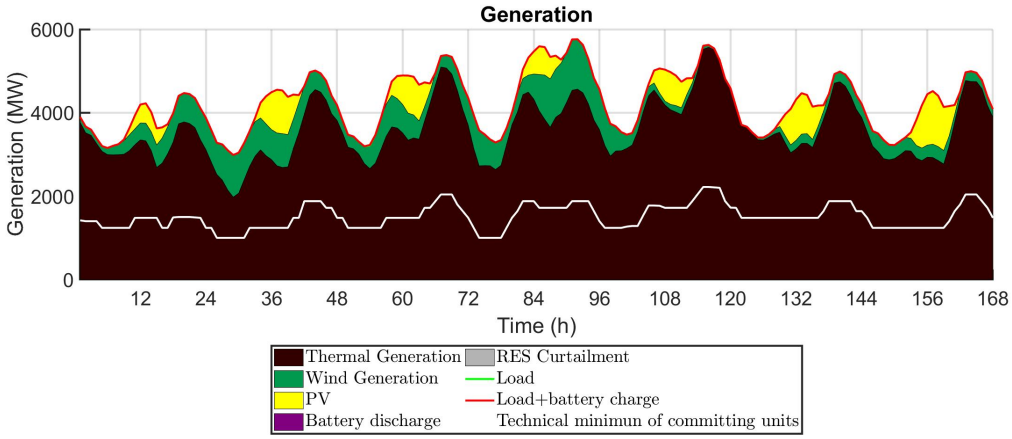
Αξίζει να σημειωθεί, ότι όταν οι μονάδες αερίου εντάσσονται αποκλειστικά για λόγους εφεδρειών δεν επηρεάζουν την οριακή τιμή της ενέργειας. Επηρεάζουν, όμως, τις οριακές τιμές εφεδρειών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 και στο Σχήμα 4.11.

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται το αντικειμενικό κόστος παραγωγής του συστήματος, το οποίο απαρτίζεται από το μεταβλητό κόστος παραγωγής των θερμικών μονάδων προσαυξημένο με το κόστος εκκίνησής τους. Το αγοραίο κόστος ενέργειας, δηλαδή το γινόμενο της οριακής τιμής επί την παραγόμενη ισχύ, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.13 ενώ στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται το αγοραίο κόστος των εφεδρειών.

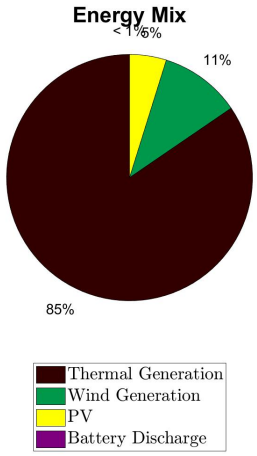
Το συνολικό κέρδος των θερμικών μονάδων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.15. Οι μονάδες

άνθρακα φαίνεται να εξασφαλίζουν ικανοποιητικό κέρδος σε σύγκριση με τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου, οι οποίες παρουσιάζουν ζημία, και, ενδεχομένως, να απαιτείται κάποιος τρίτος οικονομικός μηχανισμός υποστήριξης. Οι μονάδες αερίου λειτουργούν ελάχιστα μέσα σε αυτήν την εβδομάδα, ενώ οι μονάδες πετρελαίου δε λειτουργούν καθόλου. Στο Σχήμα 4.17 γίνεται η ανάλυση του κέρδους της μονάδας 1 (άνθρακας), ενώ στο Σχήμα 4.18 αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει ζημία για τη μονάδα 11 (συνδυασμένος κύκλος).

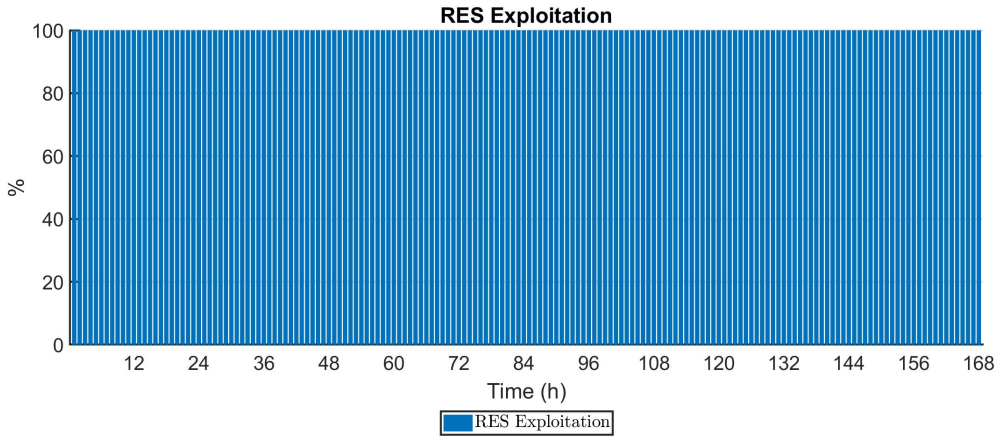
4.5.1.2 Εφαρμογή με αποθήκευση 6 h x 250 MW



Σχήμα 4.19: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο

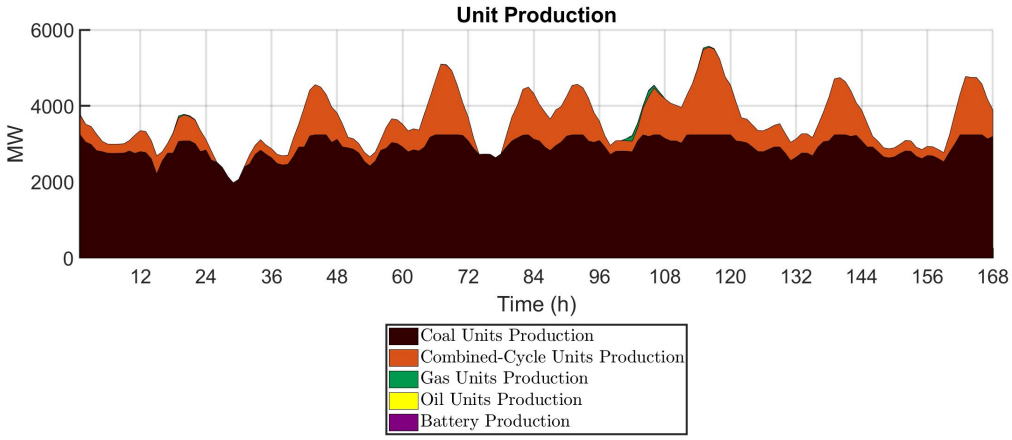


Σχήμα 4.20: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα

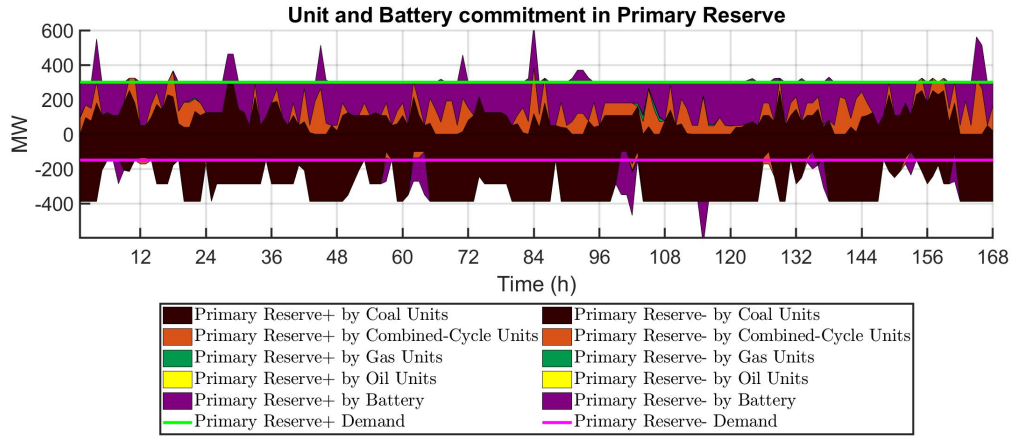


Σχήμα 4.21: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ

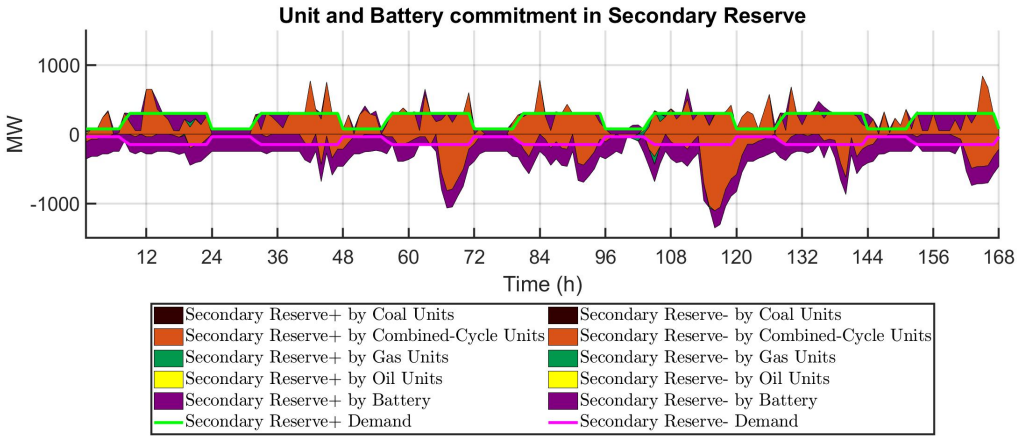
Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται η κατανομή της ισχύος για την κάλυψη του φορτίου και τη φόρτιση της μπαταρίας, η οποία λειτουργεί σαν ένα ελεύθερο στοιχείο του συστήματος, δηλαδή ο αλγόριθμος αξιοποιεί την ύπαρξή της και την εντάσσει κατάλληλα, με μοναδικό σκοπό τη



Σχήμα 4.22: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



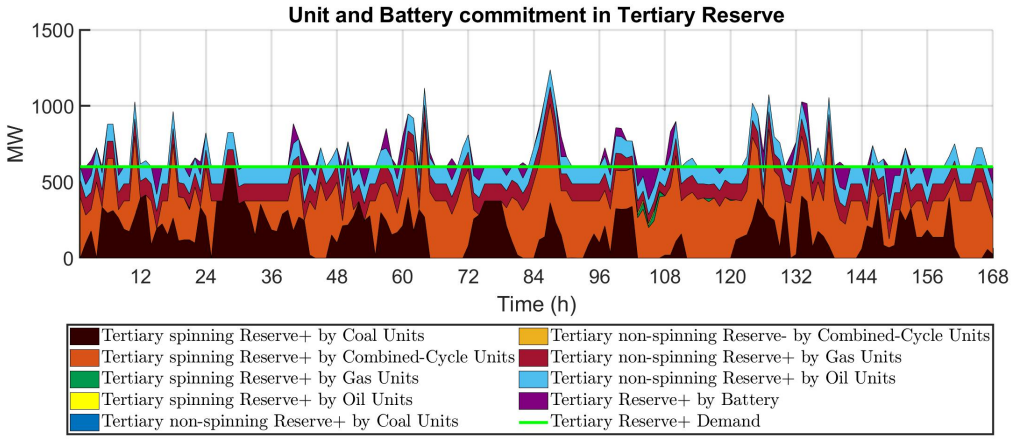
Σχήμα 4.23: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



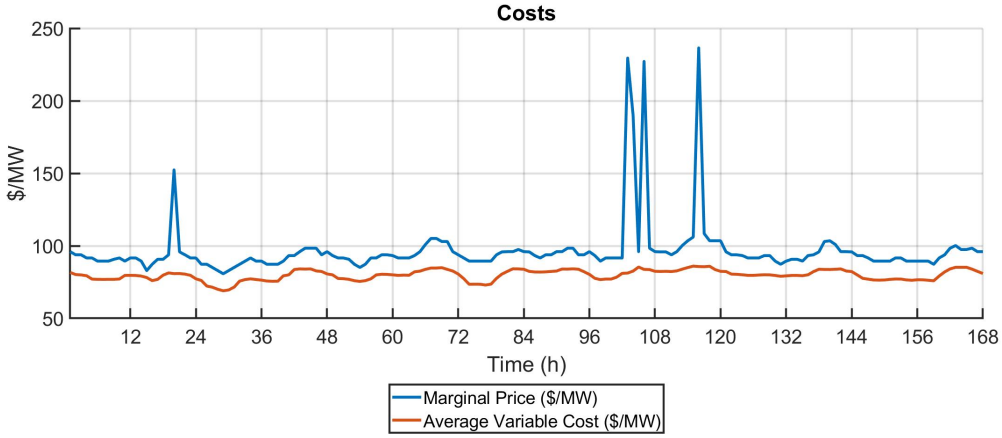
Σχήμα 4.24: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

μείωση του αντικειμενικού κόστους, χωρίς να αξιολογεί το κέρδος της. Και σε αυτήν την περίπτωση, όπως είναι αναμενόμενο, οι ΑΠΕ εντάσσονται στο σύνολο της διαθεσιμότητάς τους, ενώ ταυτόχρονα η διείσδυση ΑΠΕ ανέρχεται σε 15,47%.

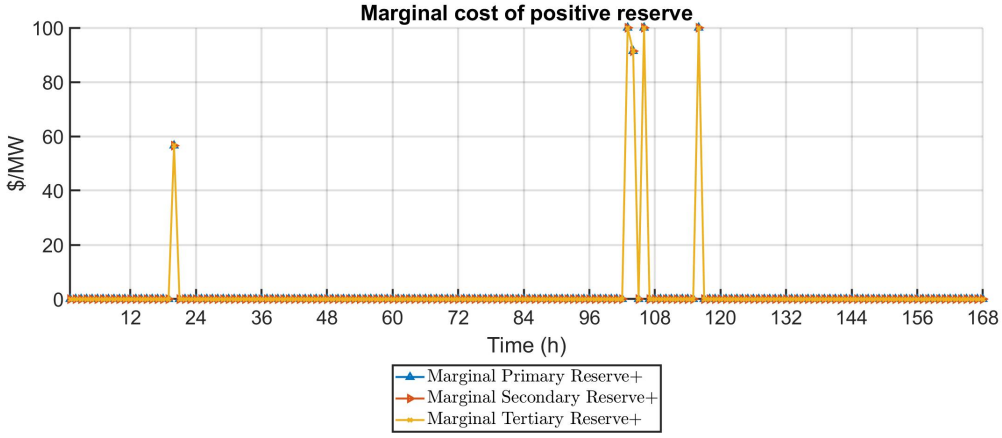
Η πρώτη σημαντική διαφορά σε σχέση με τη μη ύπαρξη αποθήκευσης, είναι αυτή που γίνεται



Σχήμα 4.25: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

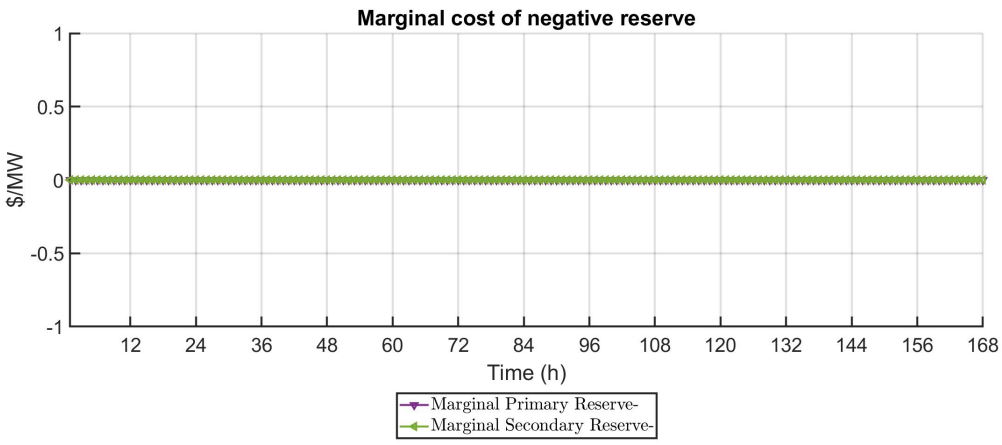


Σχήμα 4.26: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων

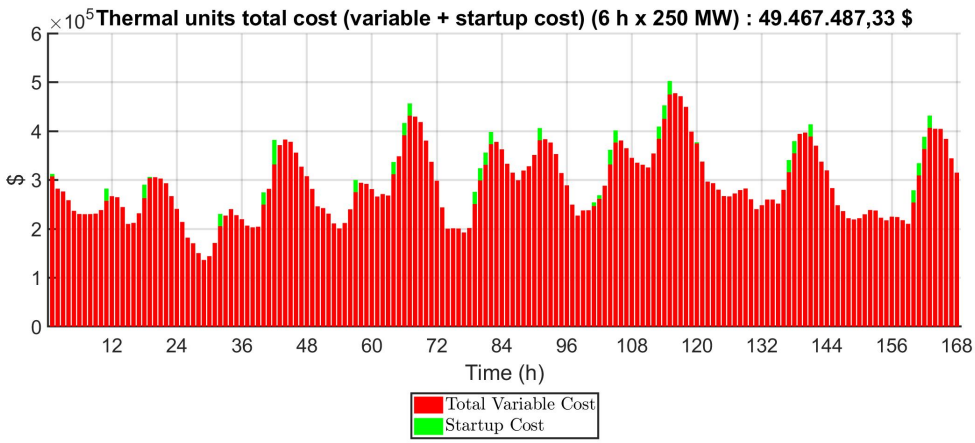


Σχήμα 4.27: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών

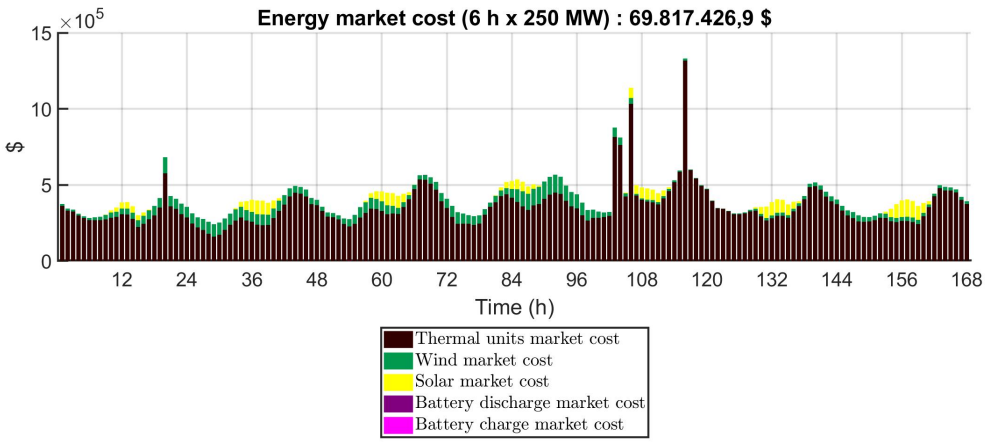
εμφανής στο Σχήμα 4.22. Οι ΜΣΚ εντάσσονται λιγότερο, ενώ οι μονάδες αερίου εντάσσονται σε μικρότερο βαθμό τόσο για την κάλυψη της αιχμής, όσο και για εφεδρείες. Τον ρόλο της παροχής δευτερεύουσας εφεδρείας έχει αναλάβει πλέον και η αποθήκευση, η οποία



Σχήμα 4.28: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών

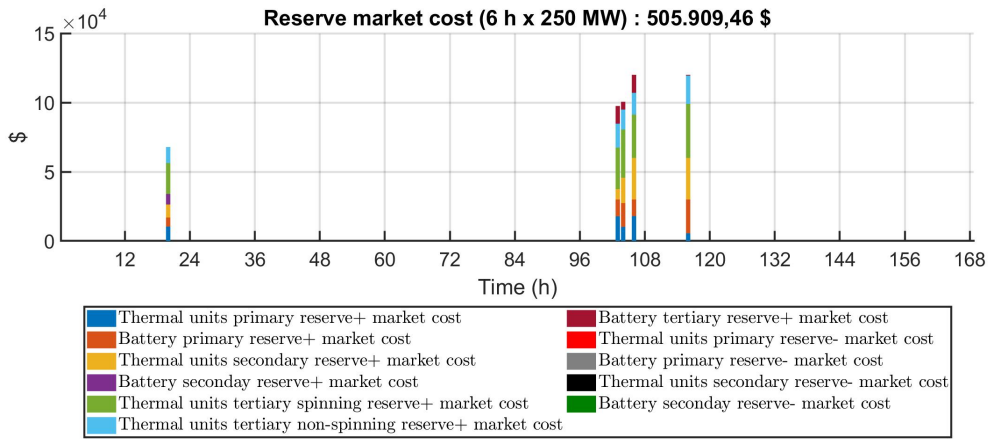


Σχήμα 4.29: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)

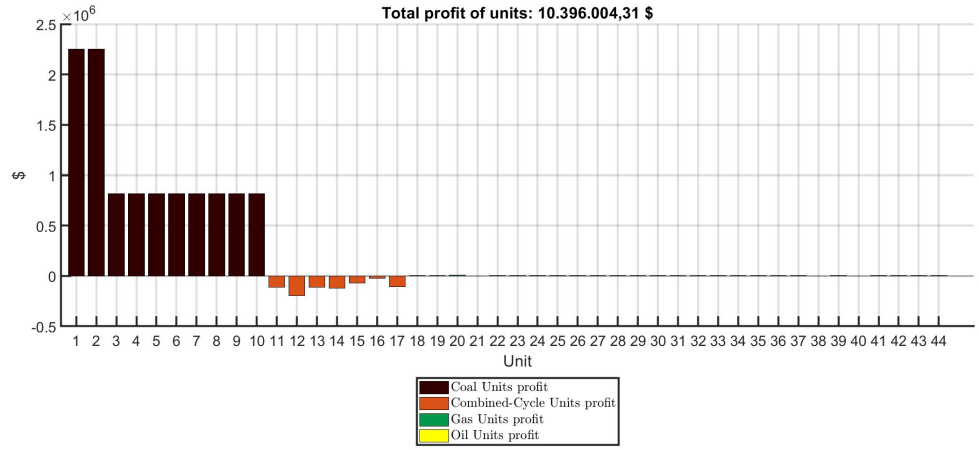


Σχήμα 4.30: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας

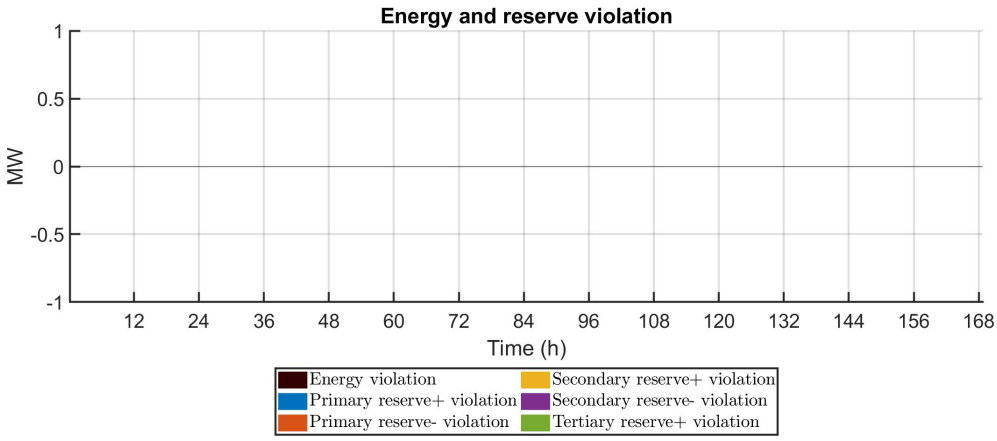
υποδεικνύει μικρότερη ένταξη ΜΣΚ και περιορίζει περαιτέρω την ένταξη μονάδων αερίου. Παράλληλα, η αποθήκευση συμβάλει στην αιχμιακή κάλυψη του φορτίου, όσο αυτό είναι δυνατό με την ταυτόχρονη συμμετοχή της στην εφεδρεία. Ο αλγόριθμος αξιοποιεί την απο-



Σχήμα 4.31: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών



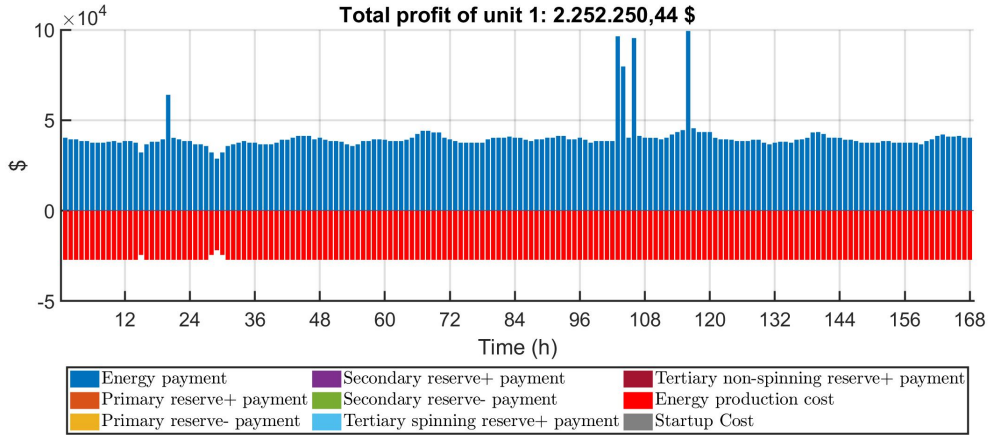
Σχήμα 4.32: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων



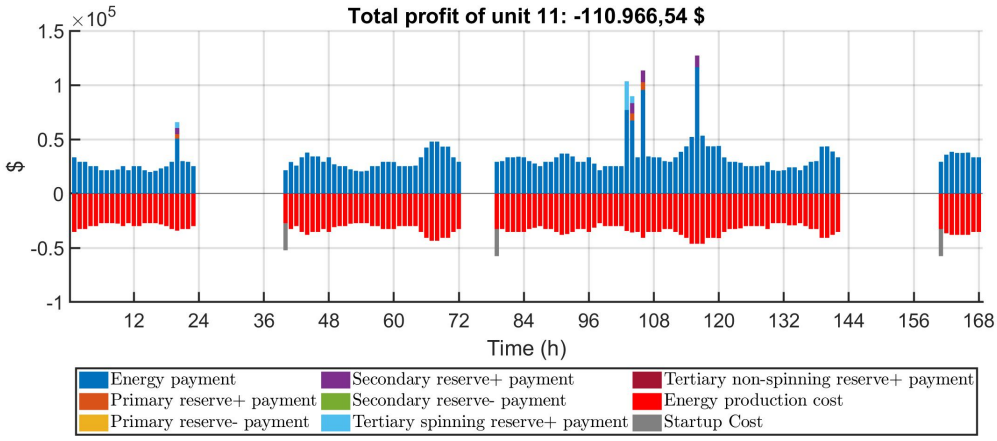
Σχήμα 4.33: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών

θήκευση είτε στην αιχμιακή κάλυψη του φορτίου είτε στην εφεδρεία, με αντικειμενικό σκοπό πάντα την μείωση του συνολικού κόστους.

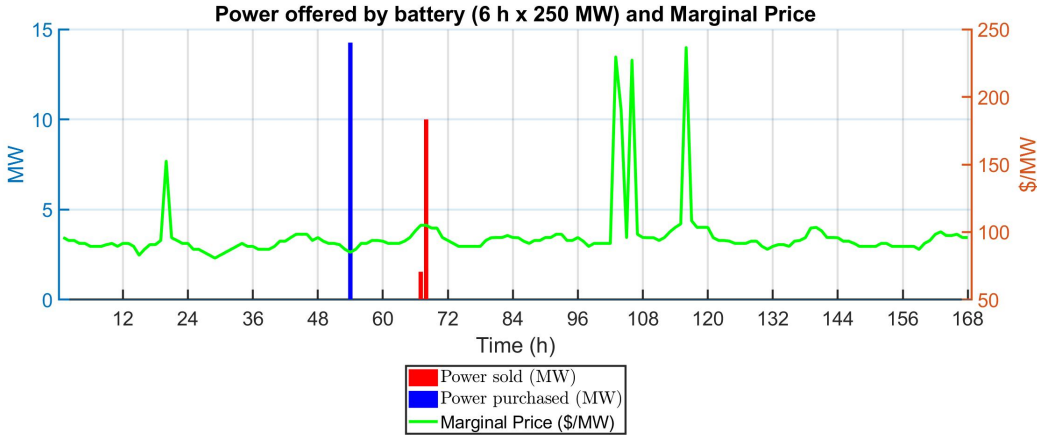
Οι οριακές τιμές ενέργειας κυμαίνονται περίπου στα ίδια επίπεδα, μεταξύ 90 έως 100 $/MWh. Ωστόσο, η οριακή τιμή έχει εξομαλυνθεί και οι αιχμές της έχουν μειωθεί αρκετά. Η εξο-



Σχήμα 4.34: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας

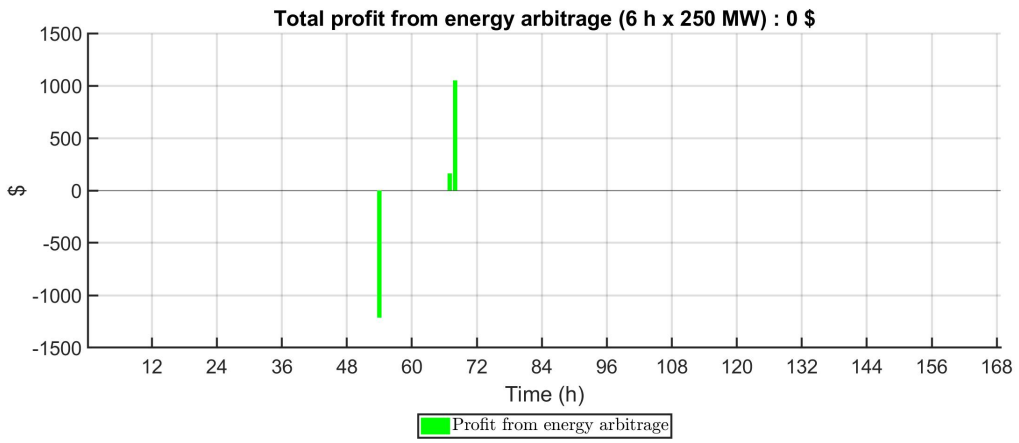


Σχήμα 4.35: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος

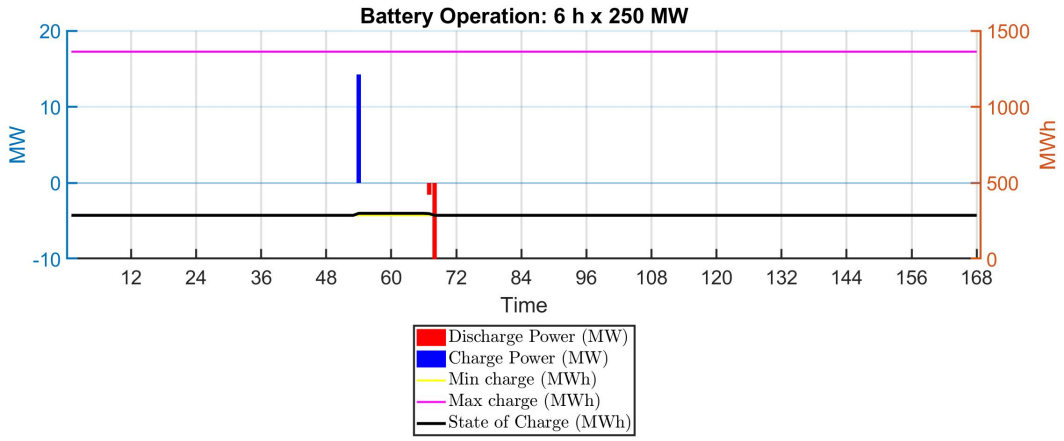


Σχήμα 4.36: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή

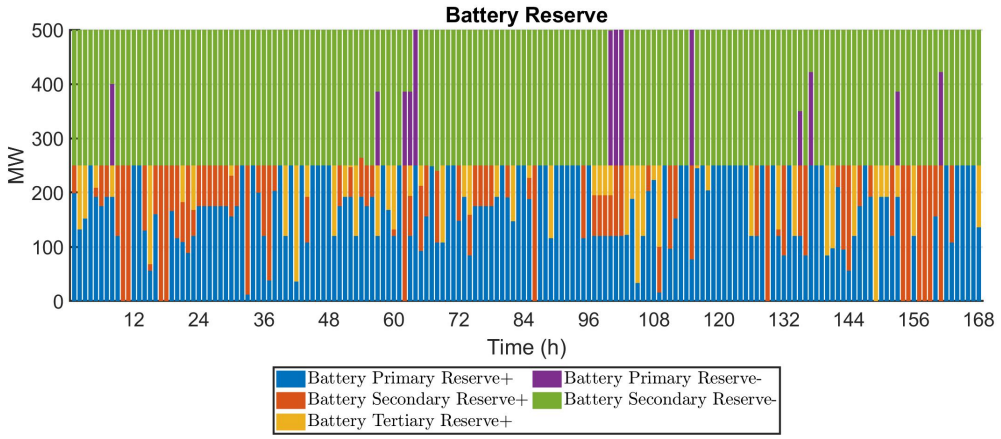
μάλυνση αυτή της οριακής τιμής αποδίδεται στην ένταξη της μπαταρίας, η οποία καλύπτει οικονομικότερα την αιχμή ή παρέχει θετική εφεδρεία. Ενώ φαίνεται οι οριακές τιμές ενέργειας και εφεδρειών να είναι ανεξάρτητες και να μην επηρεάζουν οι μεν τις δε, εν τέλει αυτό δεν ισχύει πάντα και χρήζει περισσότερης μελέτης η αλληλοσυσχέτισή τους. Η μπαταρία



Σχήμα 4.37: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ

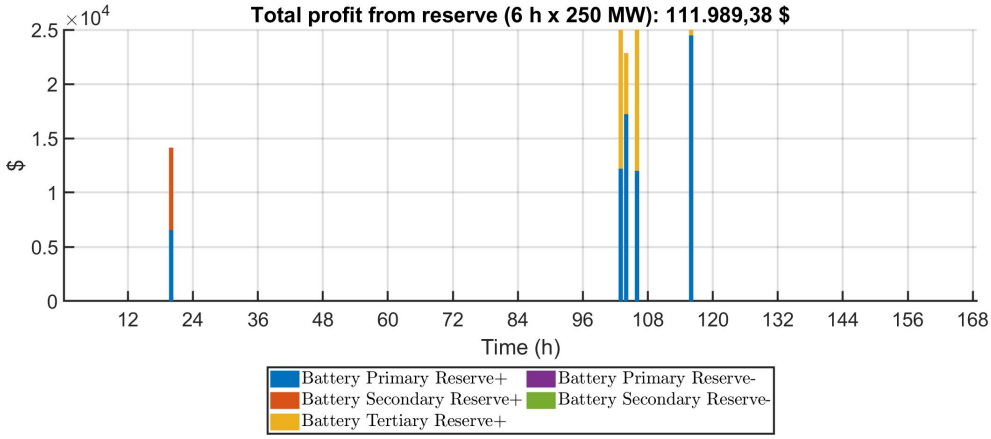


Σχήμα 4.38: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης



Σχήμα 4.39: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία

κατά την τέταρτη μέρα δεν συμμετέχει στην ενέργεια, όμως η συμμετοχή της στην αγορά εφεδρειών είναι ικανή να εξομαλύνει τις οριακές τιμές της ενέργειας. Κατά την πέμπτη ημέρα της εβδομάδας, παρατηρούνται κάποιες ώρες, κατά τις οποίες η οριακή τιμή είναι αυξημένη (Σχήμα 4.26). Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε κάποια μονάδα αερίου, η οποία πρόκειται να



Σχήμα 4.40: Χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών

δώσει την αμέσως επόμενη MWh ζήτησης. Στις οριακές τιμές των εφεδρειών παρατηρείται μεγάλη μείωση, εφόσον η μπαταρία προσφέρει εφεδρεία χωρίς κάποιο κόστος.

Οι μονάδες του άνθρακα εξασφαλίζουν και σε αυτήν την περίπτωση ικανοποιητικό κέρδος, ενώ η ζημία των ΜΣΚ είναι ελαφρώς μικρότερη, εξαιτίας και της μειωμένης ένταξής τους. Η ελεύθερη λειτουργία της μπαταρίας φαίνεται να μην είναι προσοδοφόρα όσο αφορά το ενεργειακό αρμπιτράζ. Ωστόσο, προκύπτει κέρδος ύψους περίπου 112 χιλιάδων από την παροχή εφεδρειών.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση τιμών με και χωρίς αποθήκευση για χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους

	Χωρίς αποθήκευση	**Με αποθήκευση 6x250**
Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό+εκκίνηση) ($)	49.943.200,00	49.467.487,33
Αγοραίο κόστος ενέργειας ($)	70.258.534,22	69.817.426,9
Αγοραίο κόστος εφεδρειών ($)	1.048.532,61	505.909,46
Συνολική Διείσδυση ΑΠΕ (%)	15,47	15,14
Περικοπές ΑΠΕ (% των διαθέσιμων ΑΠΕ)	0	0
Κέρδος μπαταρίας από αρμπιτράζ ($)	0	0
Κέρδος μπαταρίας από εφεδρεία ($)	0	111.989.38
Συνολικό κέρδος μπαταρίας ($)	0	111.989.38

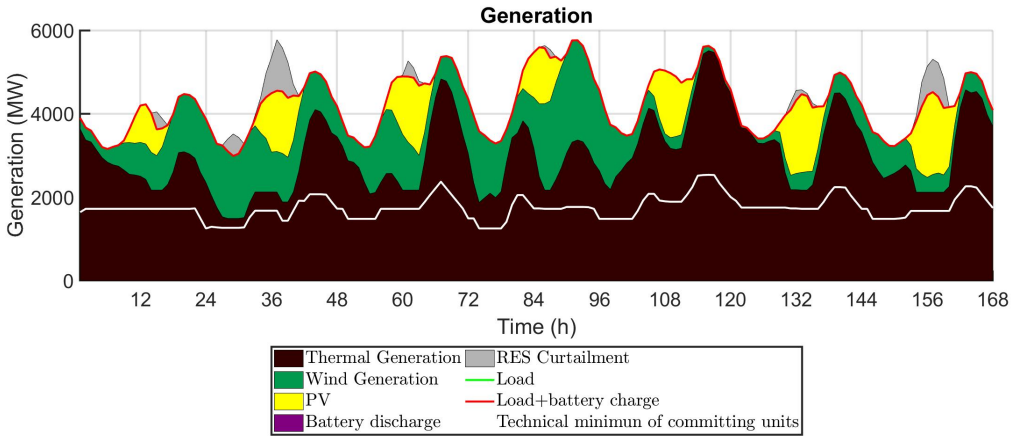
Όπως διαπιστώνεται από τον συγκριτικό πίνακα, ακόμα και στη χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ, η αποθήκευση μειώνει περίπου κατά 500 χιλιάδες το αντικειμενικό κόστος παραγωγής του συστήματος. Ταυτόχρονα, μειώνει κατά 400 χιλιάδες το συνολικό αγοραίο κόστος ενέργειας και μειώνει κατά 500 χιλιάδες το συνολικό αγοραίο κόστος εφεδρειών. Η μείωση του αγοραίου κόστους ενέργειας οφείλεται στην εξομάλυνση της οριακής τιμής, η οποία είναι αποτέλεσμα της μπαταρίας. Η μπαταρία, επίσης, παρέχει εφεδρείες χωρίς κόστος και αυτό οδηγεί στη μείωση του κόστους της αγοράς των εφεδρειών. Το εβδομαδιαίο κέρδος της, σε αυτή την περίπτωση, είναι συνολικά 112 χιλιάδες και προκύπτει εξολοκλήρου από την παροχή εφεδρειών. Το ποσό αυτό δεν είναι ικανό να καταστήσει την αποθήκευση ως μία βιώσιμη επένδυση.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται, σαφώς, στην περίπτωση της υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ. Ακολουθούν αποτελέσματα προσομοιώσεων υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ με και χωρίς αποθήκευση. Οι θερμικές μονάδες προσφέρουν ισχύ στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους (σχήμα προσφοράς 1).

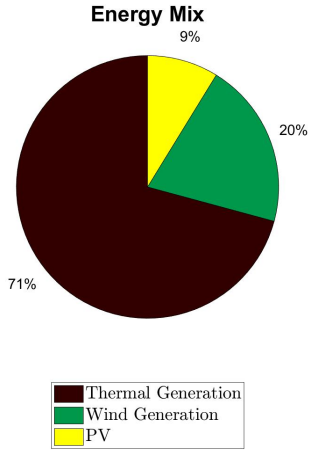
4.5.2 Εφαρμογή με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ

Το σύστημα σε αυτήν την περίπτωση έχει 4000 MW εγκατεστημένη ισχύ αιολικών και 4000 MW εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών. Τόσο η αιχμή (ετήσια) όσο και η εγκατεστημένη θερμική ισχύς παραμένουν στα 6500 MW και 7640 MW αντίστοιχα. Η απαίτηση ισχύος για τήρηση πρωτεύουσας εφεδρείας (θετικής και αρνητικής) παραμένει η ίδια (300 MW και 150 MW αντίστοιχα), ωστόσο οι απαιτήσεις ισχύος για δευτερεύουσα και τριτεύουσα εφεδρεία διπλασιάζονται, εφόσον διπλασιάζεται και η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ. Από τις δύο προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται για αυτό το σύστημα, η πρώτη αφορά τη λειτουργία του χωρίς αποθήκευση και η δεύτερη τη λειτουργία του με αποθήκευση ως ελεύθερο στοιχείο.

4.5.2.1 Εφαρμογή χωρίς αποθήκευση

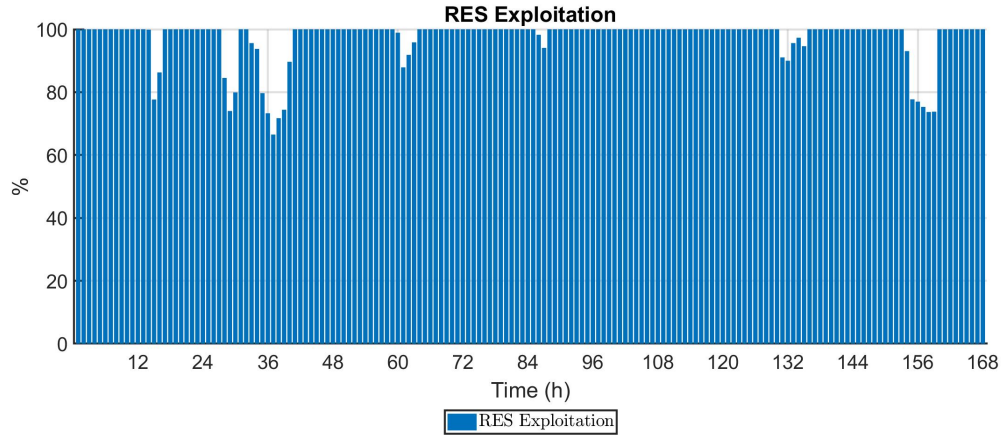


Σχήμα 4.41: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο

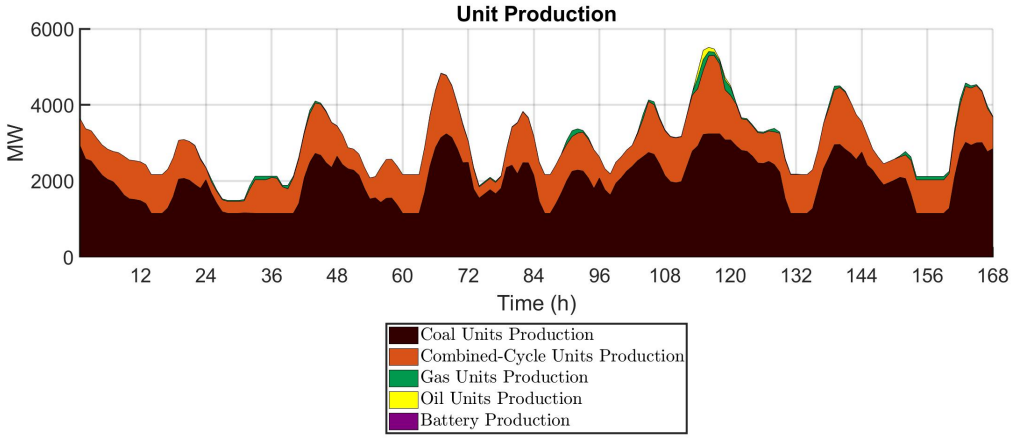


Σχήμα 4.42: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα

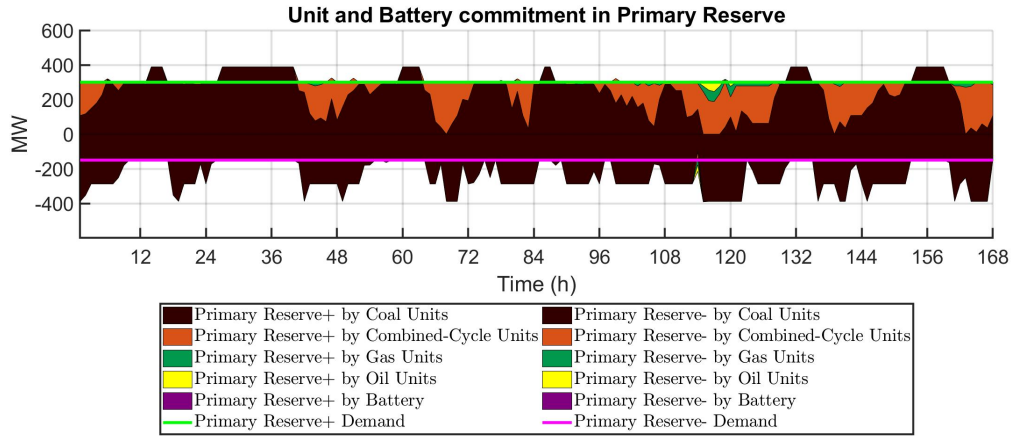
Παρατηρώντας το Σχήμα 4.41 αλλά και το Σχήμα 4.43, γίνονται εύκολα αντιληπτές οι περικοπές ΑΠΕ. Η διαθεσιμότητά τους είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με την ποσότητα που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα και για αυτό το λόγο απορρίπτει ένα μέρος τους. Η συνολική διείσδυση ΑΠΕ για αυτήν την εβδομάδα μέτριας ζήτησης φορτίου ανέρχεται στο 29,21%, ενώ οι συνολικές περικοπές ΑΠΕ ανέρχονται σε ποσοστό 5,58% στο σύνολο των διαθέσιμων ΑΠΕ.



Σχήμα 4.43: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ



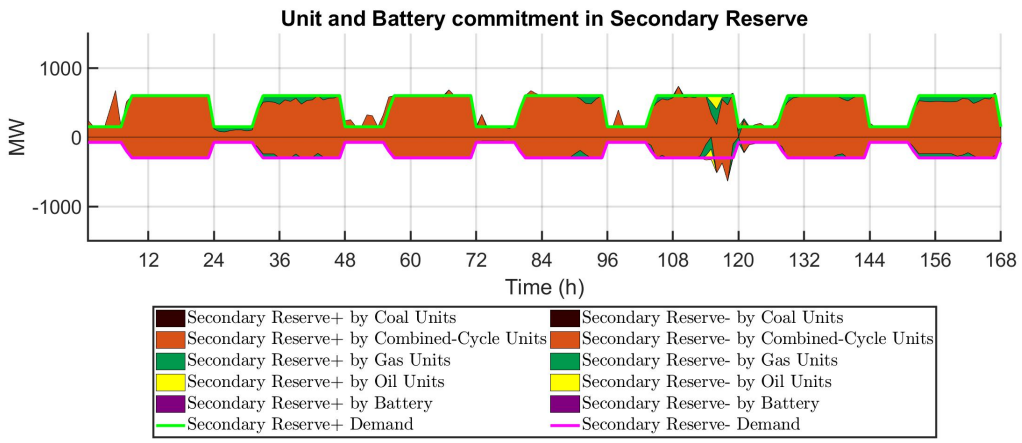
Σχήμα 4.44: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



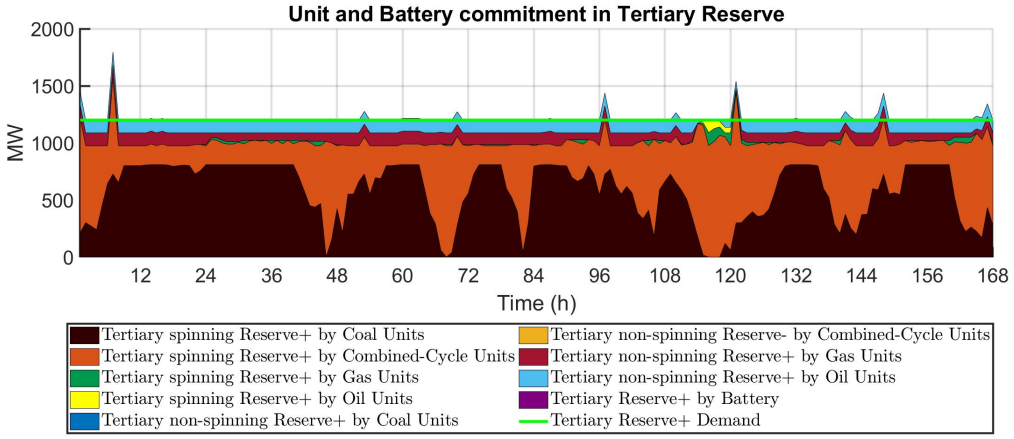
Σχήμα 4.45: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

Η θερμική παραγωγή αποτελείται στη βάση της από μονάδες άνθρακα. Οι ΜΣΚ εντάσσονται για την παροχή θετικής και αρνητικής δευτερεύουσας στρεφόμενης εφεδρείας, ενώ για τον ίδιο σκοπό εντάσσονται επίσης και κάποιες μονάδες αερίου.

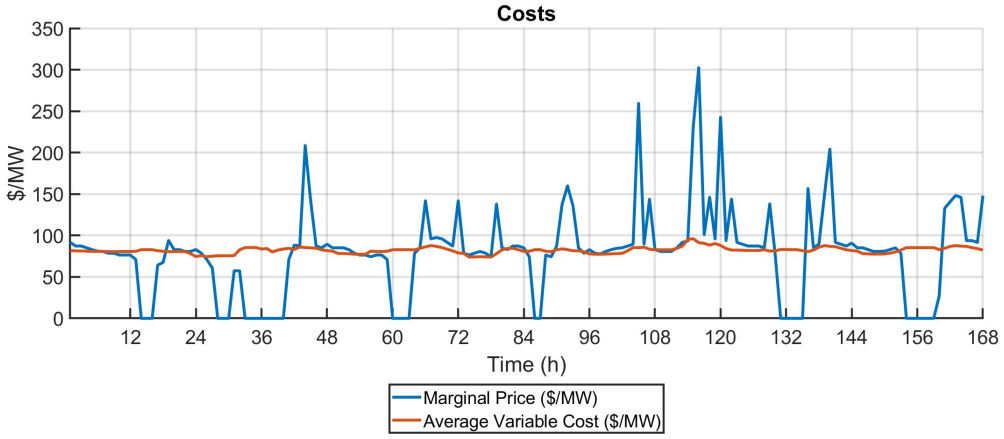
Όσο αφορά τις οριακές τιμές, από το Σχήμα 4.48 συμπεραίνεται ότι τις ώρες που υπάρ-



Σχήμα 4.46: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

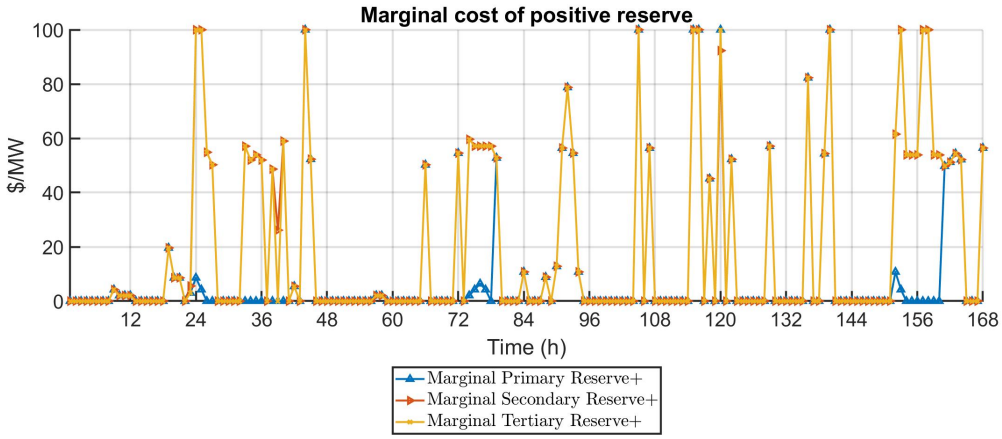


Σχήμα 4.47: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

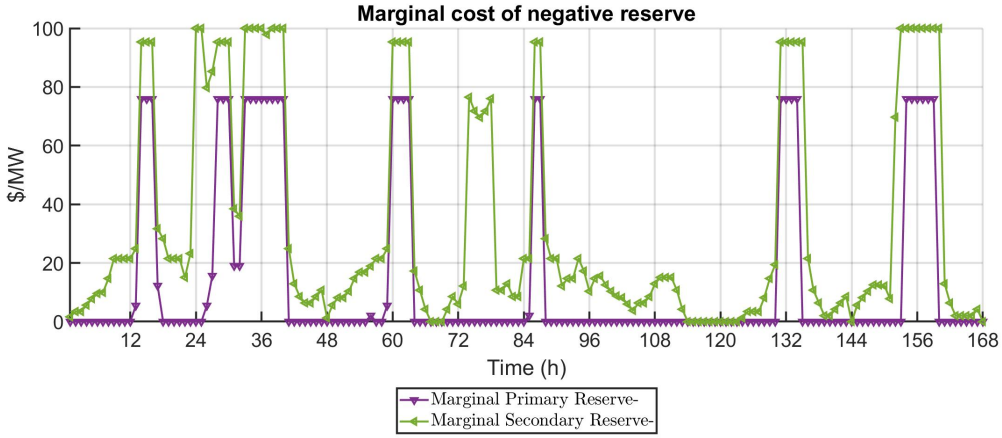


Σχήμα 4.48: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων

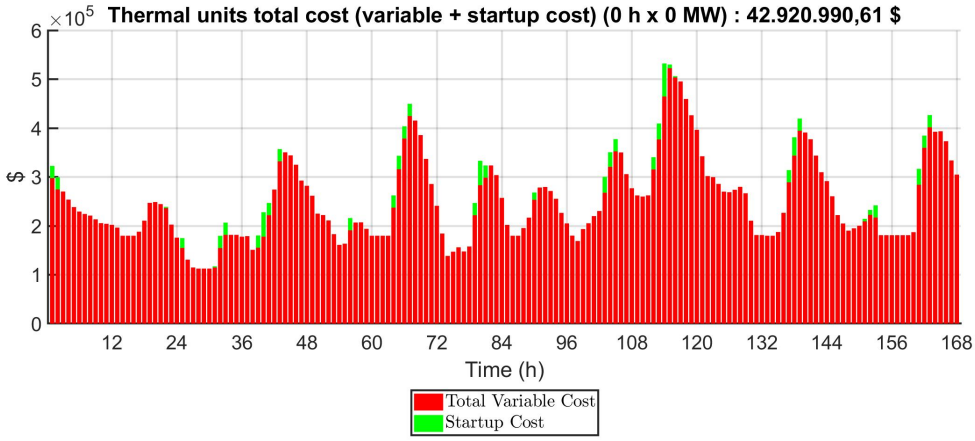
χουν περικοπές ΑΠΕ η οριακή τιμή είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας αυτές τις ώρες και η οριακή τιμή καθορίζεται από τις ΑΠΕ, οι οποίες συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση με μηδενικό κόστος. Παρόλα αυτά, τις ώρες που η



Σχήμα 4.49: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών

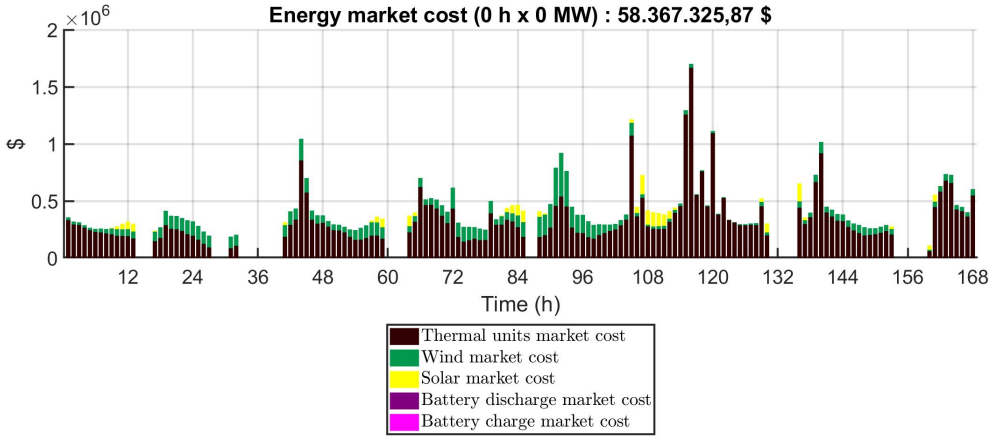


Σχήμα 4.50: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών

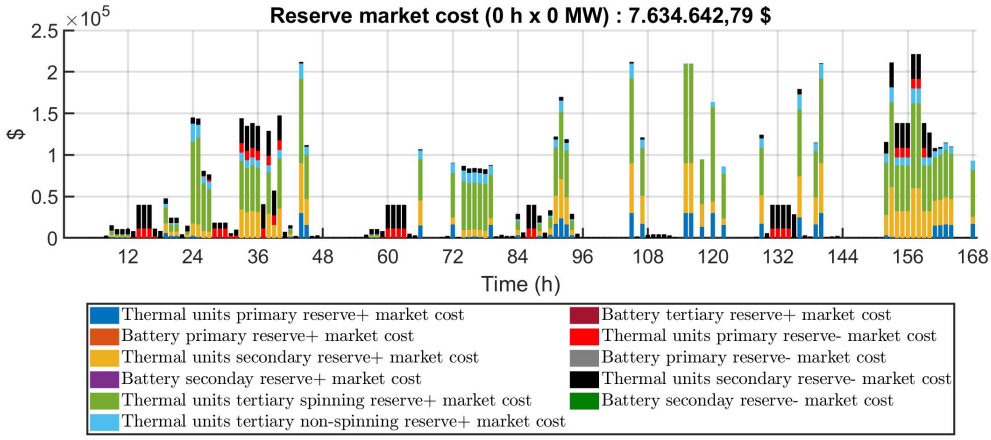


Σχήμα 4.51: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)

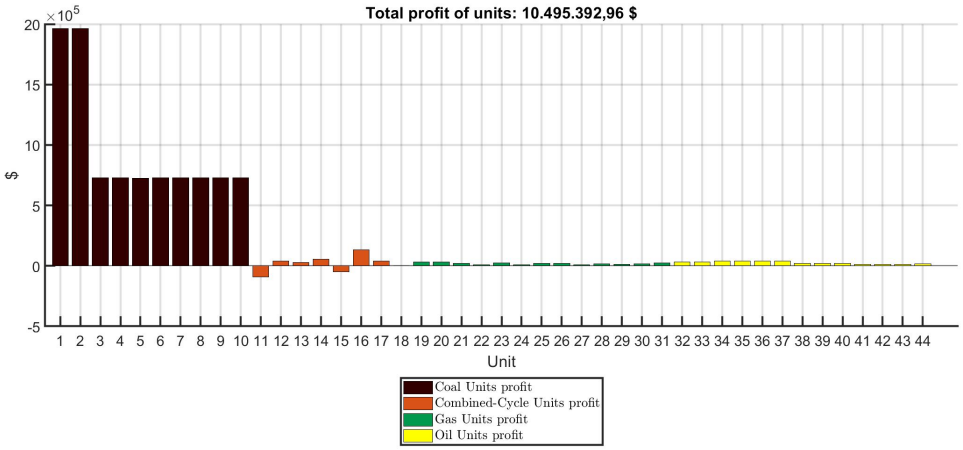
διαθεσιμότητα ΑΠΕ δεν είναι αρκετά υψηλή, η οριακή τιμή κάποιων αιχμών φαίνεται να διαμορφώνεται από τις μονάδες αερίου ή πετρελαίου. Οι οριακές τιμές τόσο των θετικών όσο και των αρνητικών εφεδρειών εμφανίζουν αύξηση, επειδή αυτές παρέχονται από θερμικές



Σχήμα 4.52: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας



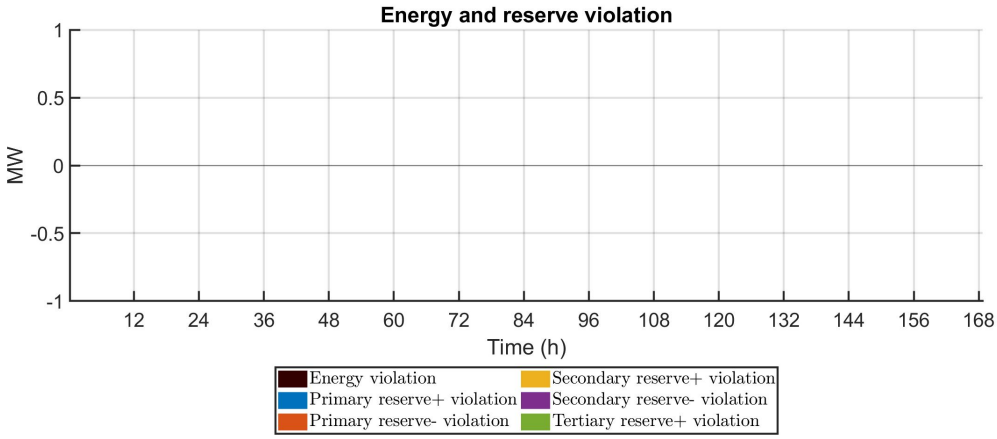
Σχήμα 4.53: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών



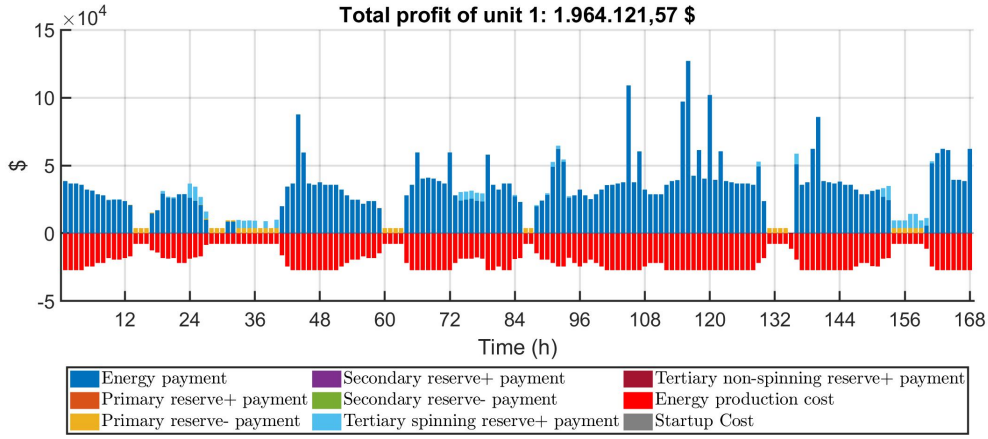
Σχήμα 4.54: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων

μονάδες και το σύστημα προσπαθεί να εντάσσει όσο το δυνατόν λιγότερες.

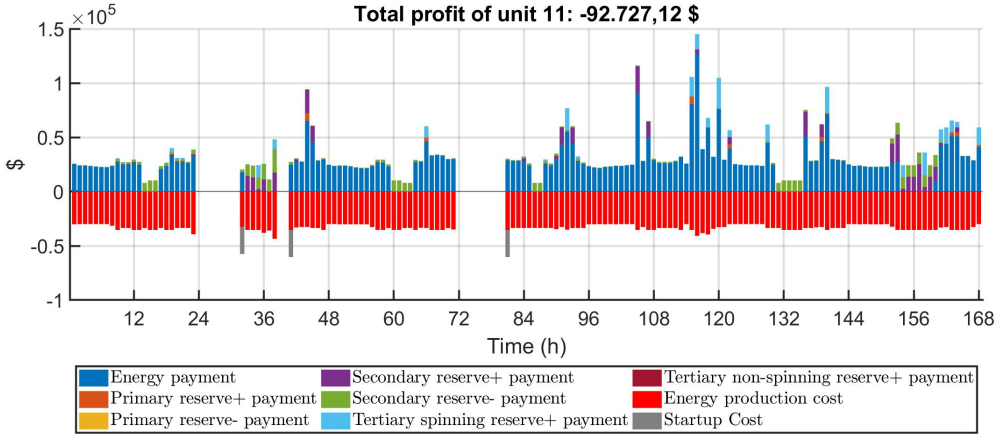
Το αντικειμενικό κόστος του συστήματος έχει μειωθεί περίπου κατά 7 εκατομμύρια σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος για χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ, ενώ το αγοραίο κόστος ενέργειας έχει μειωθεί κατακόρυφα κατά 12 εκατομμύρια, εξαιτίας της ύπαρξης μηδενικών οριακών τιμών,



Σχήμα 4.55: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών



Σχήμα 4.56: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας



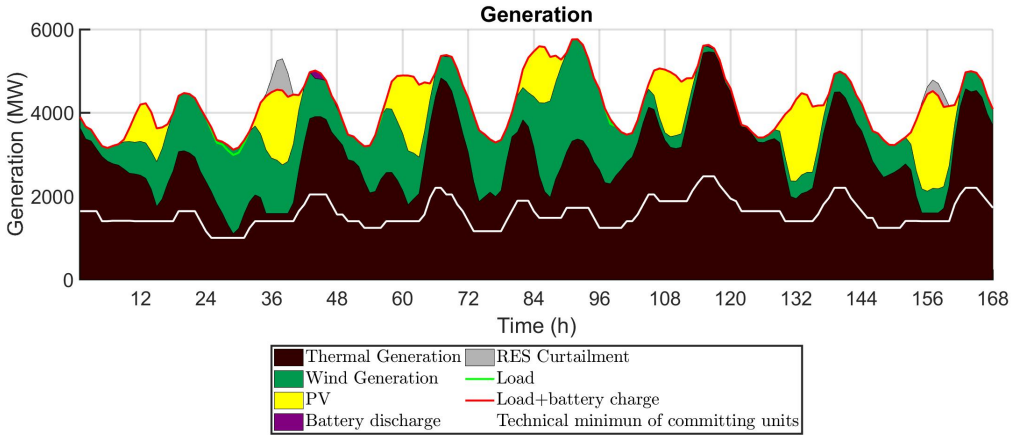
Σχήμα 4.57: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος

δηλαδή περίσσειας διαθέσιμης ενέργειας κάποιες ώρες της εβδομάδας. Ωστόσο, το αγοραίο κόστος εφεδρειών παρουσιάζει αύξηση κατά 6 εκατομμύρια, επειδή οι απαιτήσεις εφεδρειών είναι αυξημένες και η διαθεσιμότητα εφεδρειών μειωμένη, υπό την έννοια ότι ο αλγόριθμος

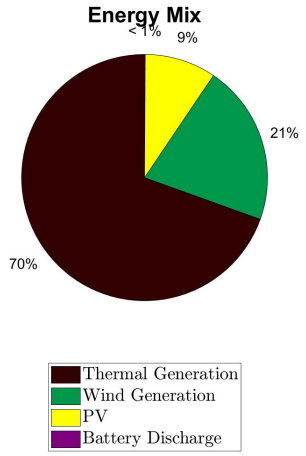
βελτιστοποίησης προσπαθεί να εντάσσει περισσότερες ΑΠΕ και λιγότερες θερμικές μονάδες.

Οι μονάδες άνθρακα φαίνεται και πάλι να εξασφαλίζουν κέρδος, ενώ οι ΜΣΚ φαίνεται να έχουν οριακό κέρδος. Τόσο οι μονάδες αερίου όσο και οι μονάδες πετρελαίου έχουν κέρδος, είτε από την μικρή ένταξή τους, είτε από την παροχή μη στρεφόμενης τριτεύουσας εφεδρείας.

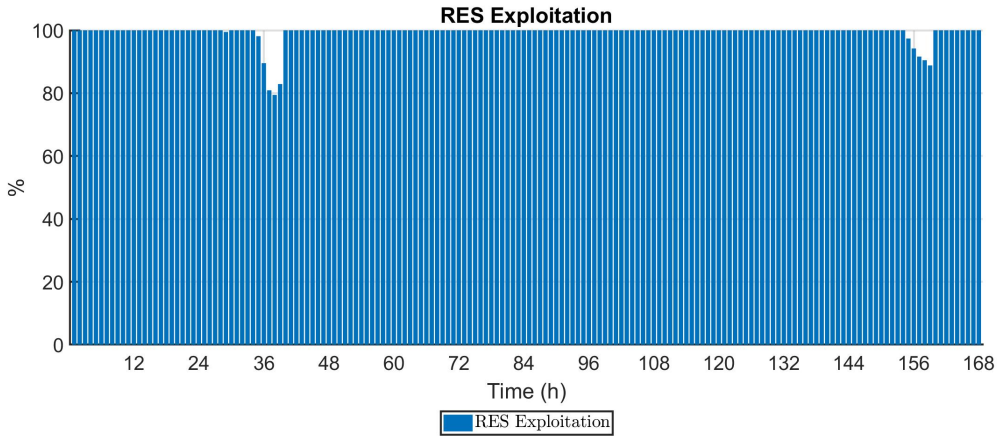
4.5.2.2 Εφαρμογή με αποθήκευση 6 h x 250 MW



Σχήμα 4.58: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο

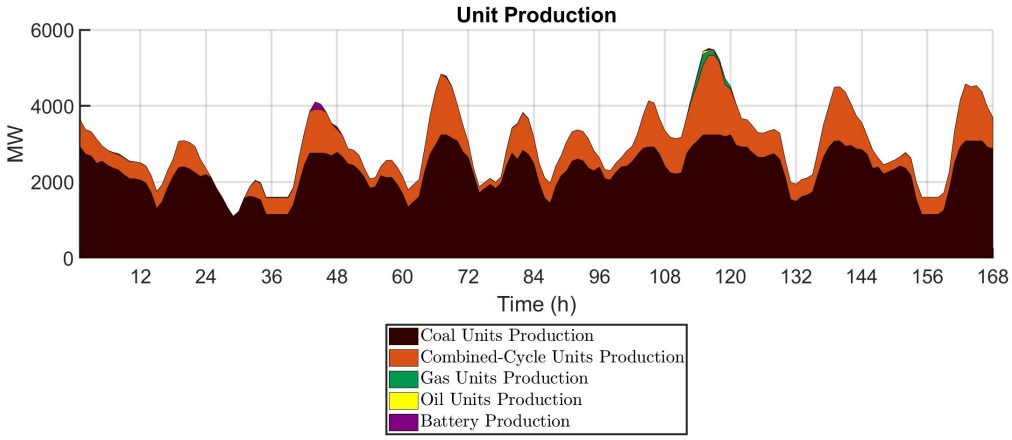


Σχήμα 4.59: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα

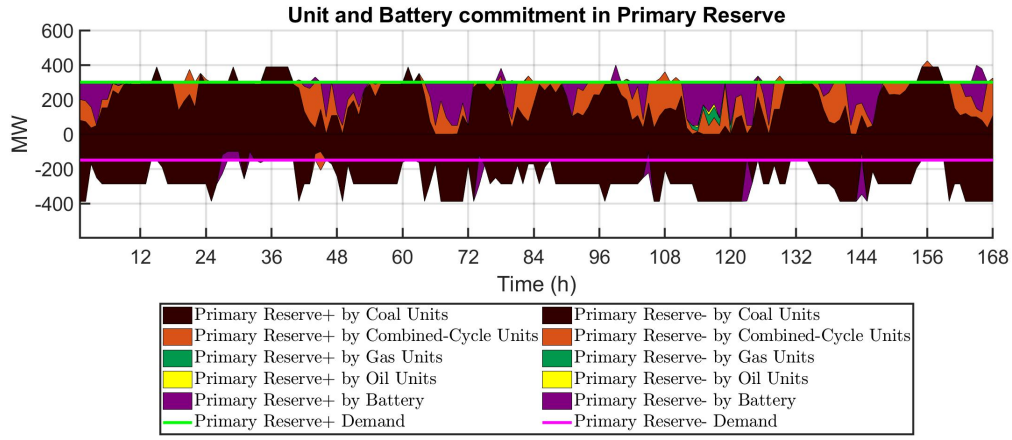


Σχήμα 4.60: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ

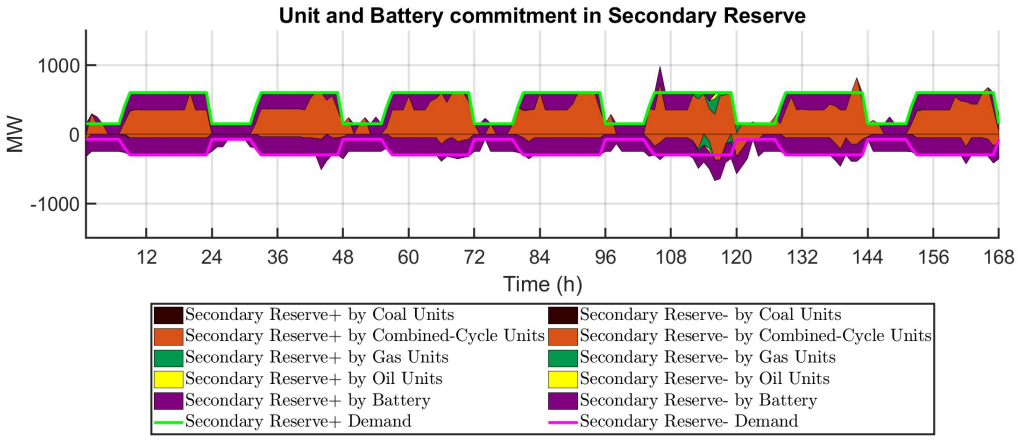
Στο Σχήμα 4.58 παρουσιάζεται η κατανομή ισχύος αλλά και οι περικοπές ΑΠΕ για την ίδια εβδομάδα, με τη διαφορά τώρα ότι στο σύστημα υπάρχει αποθήκευση που λειτουργεί σαν ελεύθερο στοιχείο. Τόσο από το Σχήμα 4.58 όσο και από το Σχήμα 4.60 τεκμαίρεται



Σχήμα 4.61: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



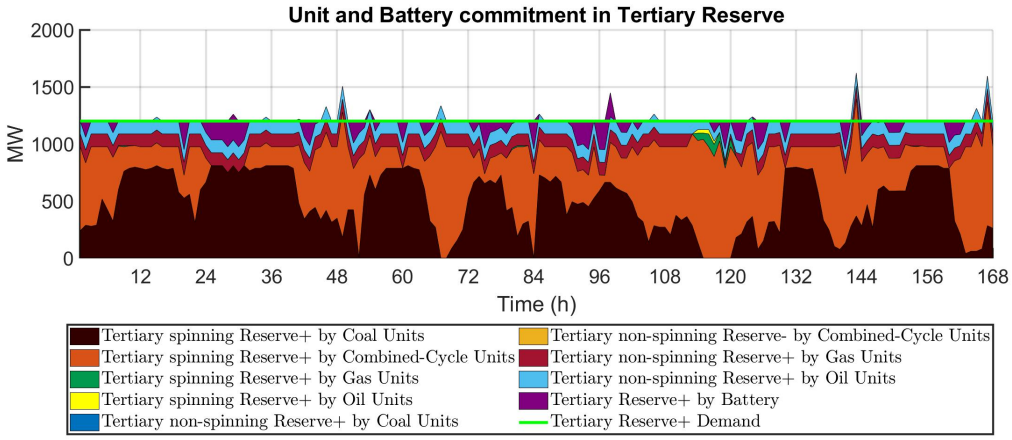
Σχήμα 4.62: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



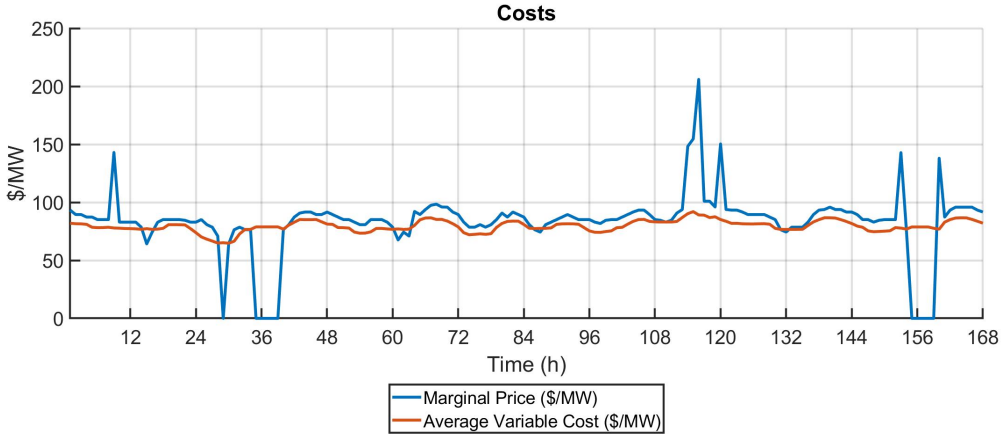
Σχήμα 4.63: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

ότι οι περικοπές ΑΠΕ είναι μειωμένες σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς την παρουσία αποθήκευσης. Η συνολική διείσδυση ΑΠΕ με τη λειτουργία της αποθήκευσης για αυτήν την ίδια εβδομάδα είναι 30,44% ενώ οι συνολικές περικοπές είναι 1,6%.

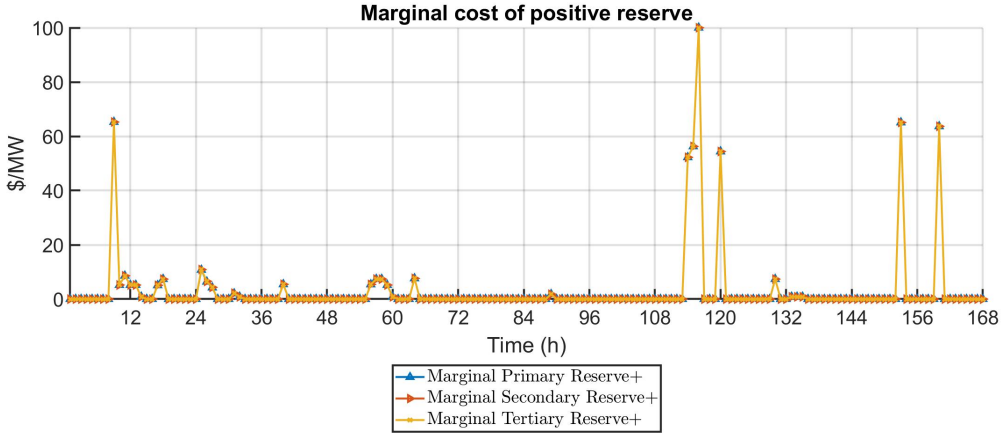
Η μπαταρία συμβάλει αποτελεσματικά στην κάλυψη της αιχμής αλλά και στην παροχή ε-



Σχήμα 4.64: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

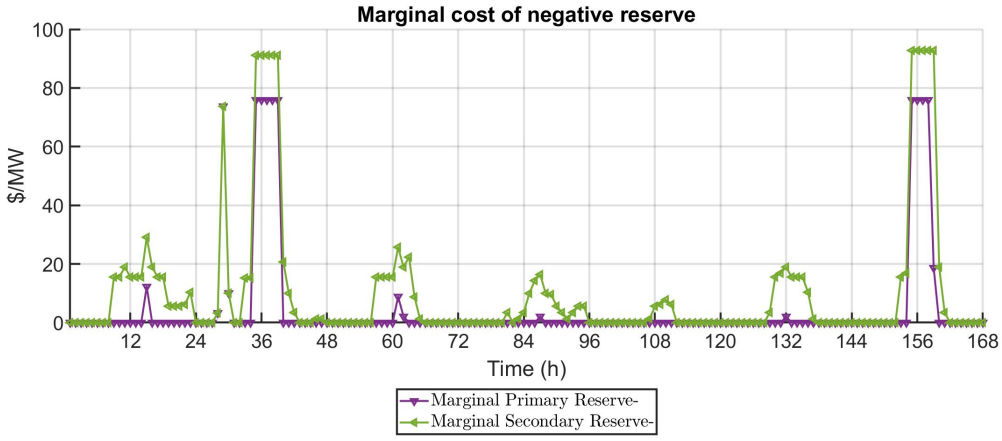


Σχήμα 4.65: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων

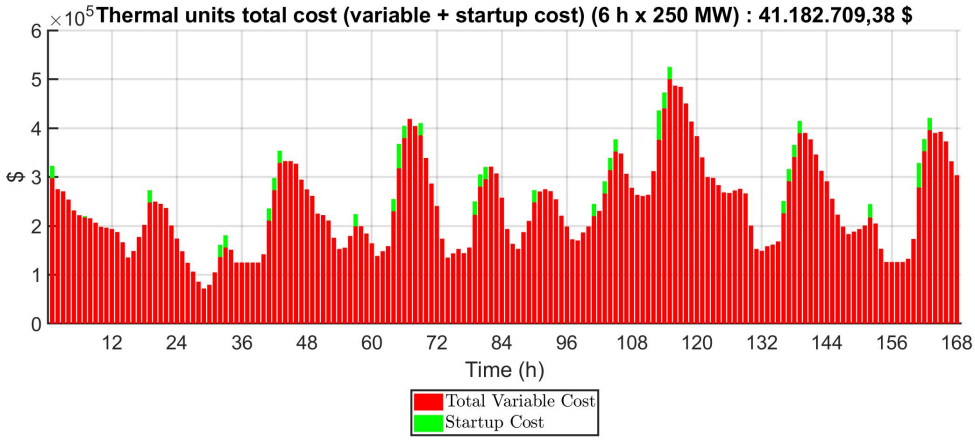


Σχήμα 4.66: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών

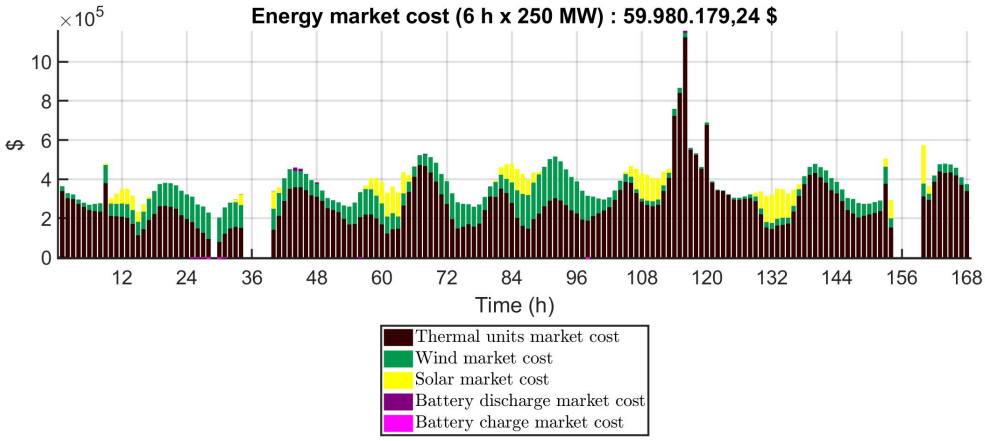
φεδρειών. Συμμετέχει σε όλες τις εφεδρείες ενώ φαίνεται να έχει αναλάβει εξολοκλήρου τη δευτερεύουσα αρνητική, η οποία άλλοτε παρεχόταν κυρίως από τις ΜΣΚ αλλά και τις μονάδες αερίου.



Σχήμα 4.67: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών

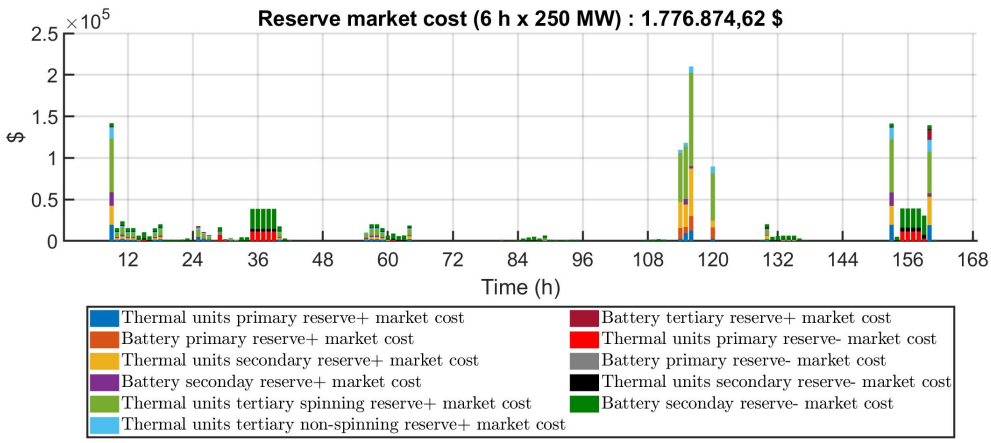


Σχήμα 4.68: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)

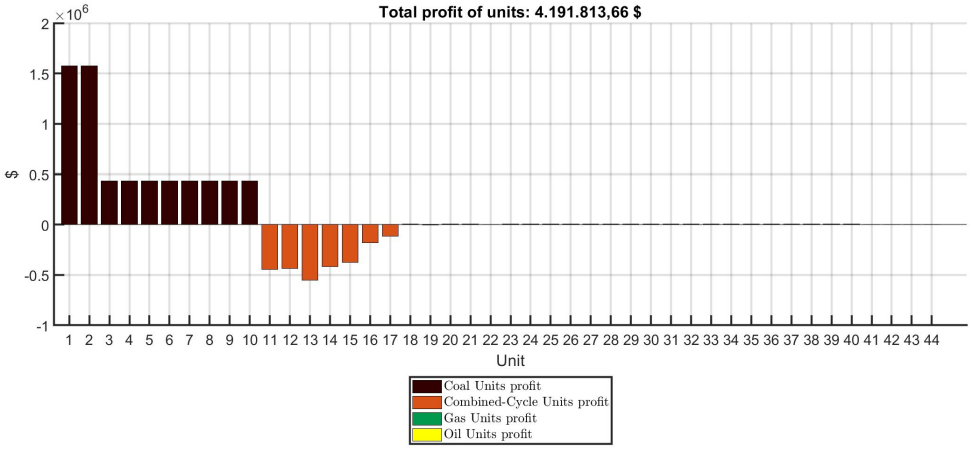


Σχήμα 4.69: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας

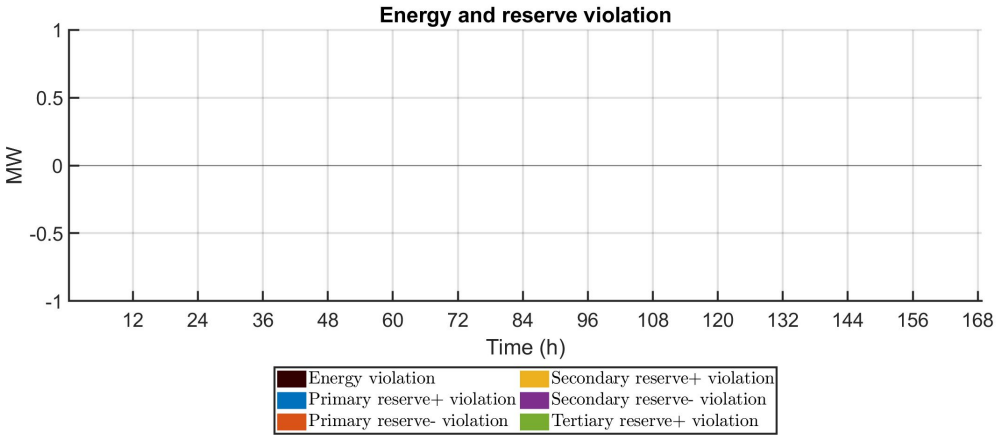
Οι μηδενικές οριακές τιμές έχουν μειωθεί, εφόσον η αποθήκευση δύναται να απορροφά ενέργεια τις ώρες κατά τις οποίες η διαθεσιμότητα των ΑΠΕ ξεπερνά τις ανάγκες του φορτίου. Η ενέργεια αυτή αξιοποιείται για τη κάλυψη αιχμών, όταν πρόκειται να μειώσει



Σχήμα 4.70: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών

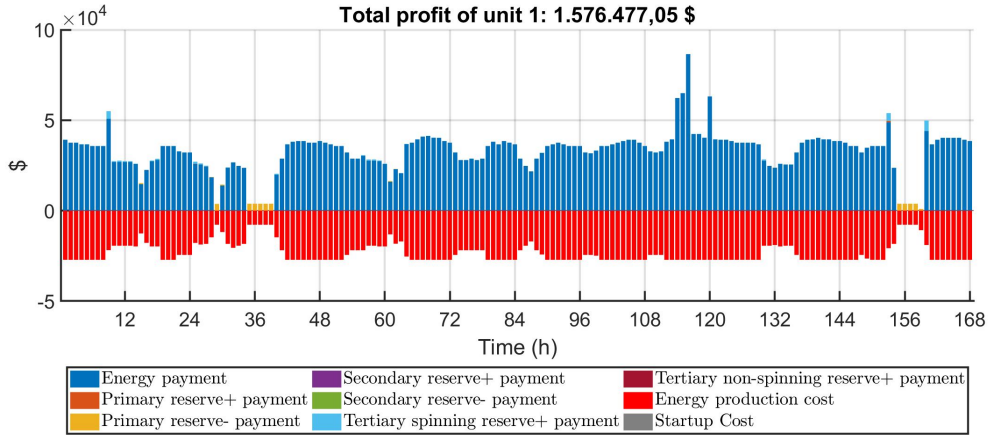


Σχήμα 4.71: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων

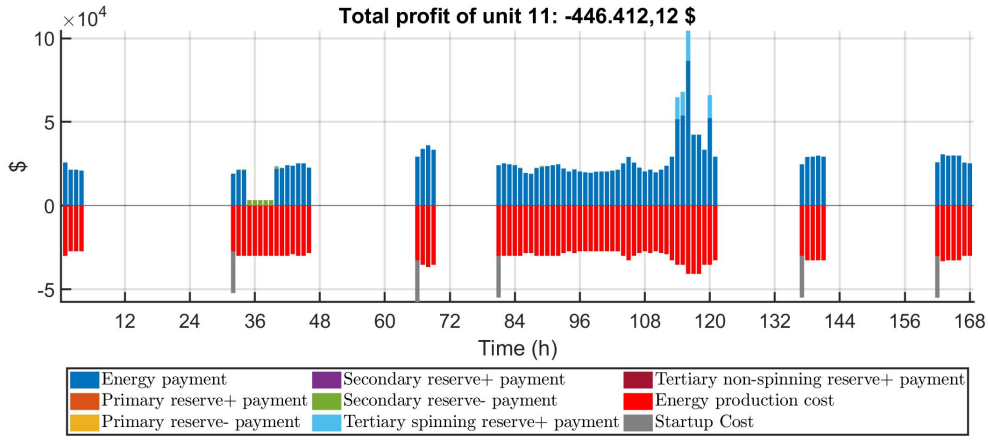


Σχήμα 4.72: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών

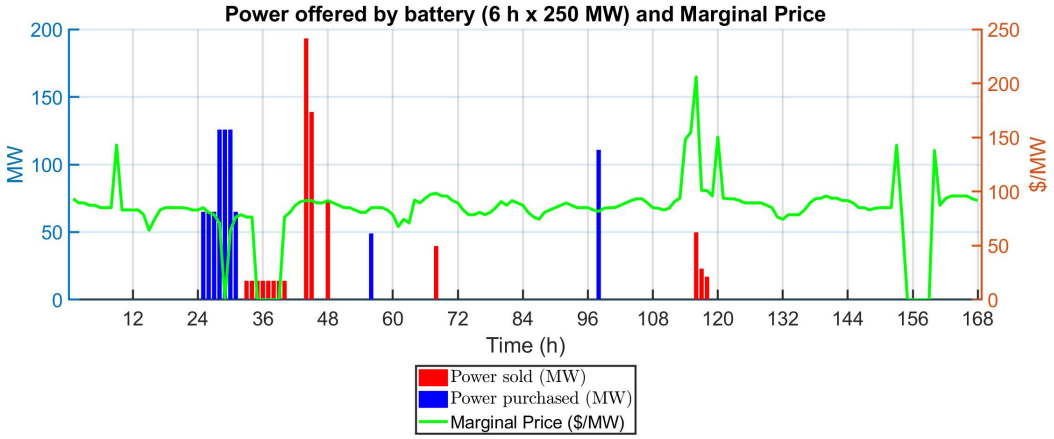
το αντικειμενικό κόστος του συστήματος. Ταυτόχρονα, η συμβολή της μπαταρίας στην εφεδρεία έχει μεγάλο αντίκτυπο στο ύψος των οριακών τιμών των εφεδρειών. Τόσο οι τιμές θετικών εφεδρειών όσο και οι τιμές αρνητικών ωθούνται προς τα κάτω, υπό την προϋπόθεση ότι η αποθήκευση τις παρέχει χωρίς κάποιο οικονομικό κόστος.



Σχήμα 4.73: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας

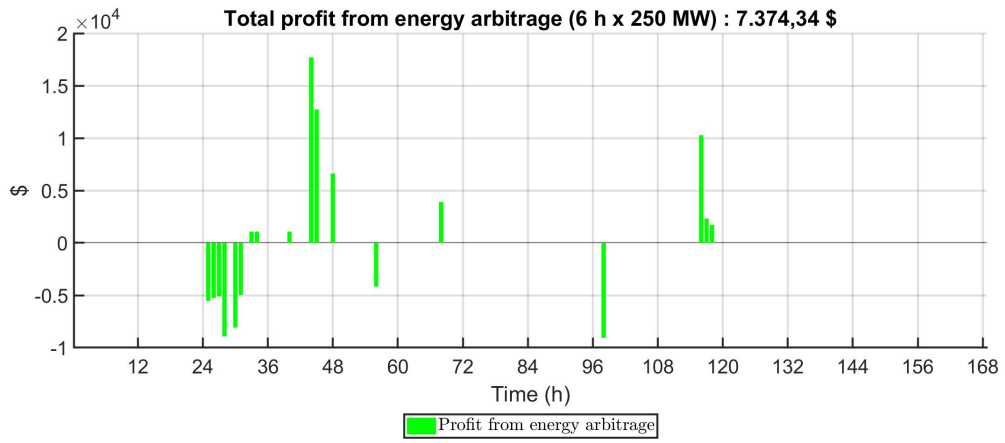


Σχήμα 4.74: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος

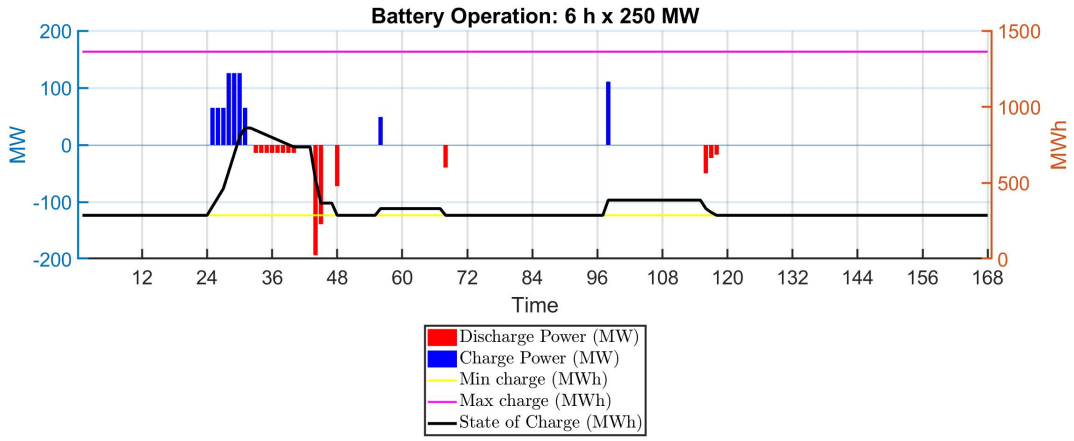


Σχήμα 4.75: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή

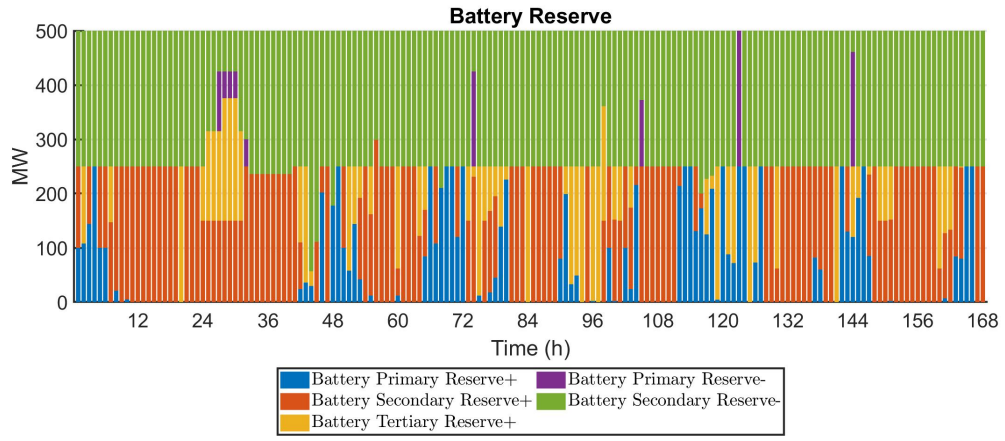
Το πραγματικό κόστος του συστήματος ανέρχεται στα 41 εκατομμύρια και παρουσιάζει μείωση κατά 2 εκατομμύρια σε σύγκριση με το ίδιο σύστημα χωρίς την ύπαρξη της αποθήκευσης. Το αγοραίο κόστος ενέργειας είναι αυξημένο λόγω του περιορισμού των μηδενικών στις οριακές τιμές, όμως η αύξηση είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη μείωση του αγοραίου



Σχήμα 4.76: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ



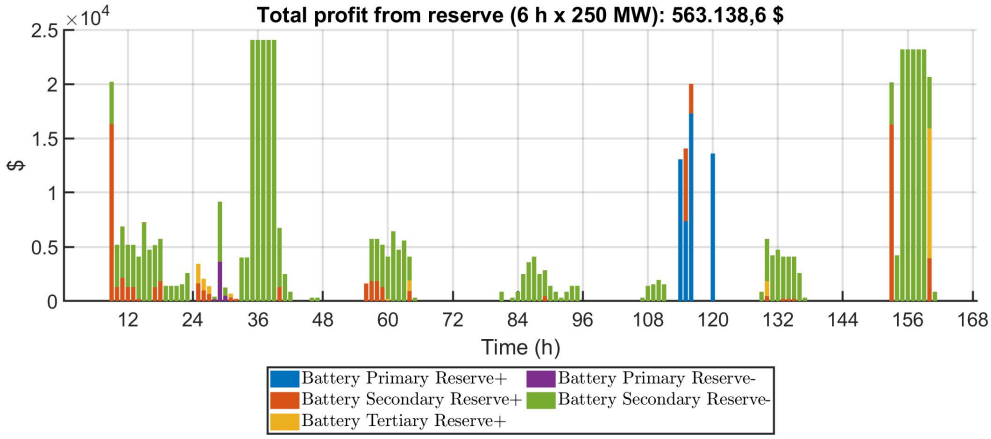
Σχήμα 4.77: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης



Σχήμα 4.78: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία

κόστους εφεδρειών, το οποίο είναι αρκετά μειωμένο λόγω της συμβολής της μπαταρίας στην εφεδρεία.

Οι μονάδες του άνθρακα εξασφαλίζουν ικανοποιητικό κέρδος ενώ οι ΜΣΚ παρουσιάζουν ζημία. Η αποθήκευση έχει κέρδος 7 χιλιάδων από το ενεργειακό αρμπιτράζ αλλά εξασφαλίζει



Σχήμα 4.79: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών

κέρδος 560 χιλιάδες από τις εφεδρείες.

Πίνακας 4.2: Σύγκριση τιμών με και χωρίς αποθήκευση για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους

	Χωρίς αποθήκευση	**Με αποθήκευση 6x250**
Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό+εκκίνηση) ($)	42,920,990.61	41.182.709,38
Αγοραίο κόστος ενέργειας ($)	58.367.325,87	59.980.179,24
Αγοραίο κόστος εφεδρειών ($)	7.634.642,79	1.776.874,62
Συνολική Διείσδυση ΑΠΕ (%)	29,21	30,44
Περικοπές ΑΠΕ (% των διαθέσιμων ΑΠΕ)	5,58	1,60
Κέρδος μπαταρίας από αρμπιτράζ ($)	0	7.374,34
Κέρδος μπαταρίας από εφεδρεία ($)	0	563.138,6
Συνολικό κέρδος μπαταρίας ($)	0	570.512,94

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι η αποθήκευση μειώνει σημαντικά το αντικειμενικό κόστος του συστήματος σε ένα σύστημα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Ακόμα, μειώνει σημαντικά τις περικοπές ΑΠΕ και σαν ελεύθερο στοιχείο εξασφαλίζει κέρδος από την παροχή εφεδρειών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εβδομάδα αυτή αποτελεί μία μέση ή και λίγο χαμηλή περίπτωση ζήτησης και διαθεσιμότητας ΑΠΕ. Μεγαλύτερη ζήτηση και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα ΑΠΕ οδηγεί σε μεγαλύτερο κέρδος της αποθήκευσης.

Παρόμοια διαγράμματα εξάγονται και από προσομοιώσεις του ίδιου συστήματος για την ίδια εβδομάδα, στις οποίες οι θερμικές μονάδες προσφέρουν στο οριακό τους κόστος (σχήμα προσφοράς 2). Όλα τα διαγράμματα που αφορούν προσομοιώσεις, στις οποίες οι μονάδες προσφέρουν στο οριακό κόστος τους, δίνονται στο Παράρτημα Γ. Ακολουθεί πίνακας ιδίων μεγεθών για την περίπτωση που οι θερμικές μονάδες προσφέρουν στο οριακό κόστος τους.

Πίνακας 4.3: Σύγκριση τιμών με και χωρίς αποθήκευση για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά μονάδων στο οριακό τους κόστος

	Χωρίς αποθήκευση	**Με αποθήκευση 6x250**
Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό+εκκίνηση) ($)	42.573.968,81	40.485.356,25
Αγοραίο κόστος ενέργειας ($)	53.930.030,90	56.485.655,75
Αγοραίο κόστος εφεδρειών ($)	6.931.040,21	2.578.979,28
Συνολική Διείσδυση ΑΠΕ (%)	29,26	30,44
Περικοπές ΑΠΕ (% των διαθέσιμων ΑΠΕ)	5,42	1,60
Κέρδος μπαταρίας από αρμπιτράζ ($)	0	4.477,72
Κέρδος μπαταρίας από εφεδρεία ($)	0	497.356,39
Συνολικό κέρδος μπαταρίας ($)	0	501.833,87

Η προσφορά των μονάδων στο οριακό τους κόστος έχει αντίκτυπο στο κέρδος που εξασφαλίζουν, το οποίο είναι ελαφρώς μικρότερο, αλλά και στο κέρδος της μπαταρίας, το οποίο παρουσιάζει και αυτό αντίστοιχα μία μικρή μείωση.

Όπως είναι λογικό, το αγοραίο κόστος ενέργειας είναι μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο για προσφορά στο μέγιστο οριακού και μέσου μεταβλητού κόστους. Τα δύο σχήματα προσφοράς των μονάδων, ουσιαστικά, διαφοροποιούνται ως προς τις ΜΣΚ. Στο σχήμα προσφοράς 1, το πρώτο μπλοκ προσφοράς των ΜΣΚ είναι ακριβότερο από το τελευταίο μπλοκ των ανθρακικών μονάδων και κατά συνέπεια εντάσσονται περισσότεροι άνθρακες. Από την άλλη πλευρά, στο σχήμα προσφοράς 2, οι ΜΣΚ δεν προσφέρουν ακριβότερα από τις μονάδες άνθρακα και για το λόγο αυτό συμμετέχουν περισσότερο στην παραγωγή ενέργειας, τη στιγμή που στο σχήμα προσφοράς 1 οι ΜΣΚ συμμετέχουν ως επί το πλείστον στις εφεδρείες.

Από τα αντίστοιχα διαγράμματα για το σχήμα προσφοράς 2 (Παράρτημα Γ), διαπιστώνεται ότι η ένταξη των μονάδων σε αυτήν την περίπτωση οδηγεί σε μία μικρή αύξηση των οριακών τιμών όλων των θετικών εφεδρειών, ενώ οι οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών είναι αυξημένες στο σχήμα προσφοράς 1. Οι αυξημένες τιμές οριακών τιμών θετικών εφεδρειών στο σχήμα προσφοράς 2 οφείλονται στην μεγαλύτερη ένταξη ΜΣΚ, οι οποίες συμμετέχουν περισσότερο στην ενέργεια λόγω οικονομικότερης προσφοράς, και με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η δυνατότητά τους για εφεδρεία. Με άλλα λόγια, αυτή η ένταξη παρουσιάζει μεγαλύτερη έλλειψη θετικής εφεδρείας και για το λόγο αυτό, κοστολογείται ακριβότερα.

Αντιθέτως, η αρνητική εφεδρεία είναι περισσότερο διαθέσιμη στην ένταξη με το σχήμα προσφοράς 2, καθώς οι ΜΣΚ λειτουργούν σε μεγαλύτερη ισχύ, και μπορούν εύκολα να παρέχουν αρνητική εφεδρεία. Στο σχήμα προσφοράς 1, ο αλγόριθμος προσπαθεί να κρατήσει τις ΜΣΚ χαμηλά, επειδή προσφέρουν σε πιο υψηλή τιμή από τον άνθρακα, και κατά συνέπεια η αρνητική εφεδρεία είναι σε έλλειψη, με αποτέλεσμα να κοστολογείται ακριβότερα.

Κεφάλαιο 5

Κατάστρωση προσφοράς αποθήκευσης

Μέχρι τώρα η αποθήκευση λειτουργεί σαν ένα ελεύθερο στοιχείο στο σύστημα, και συνεπώς, εντάσσεται από το διαχειριστή μόνο για λόγους οικονομικότητας του συστήματος. Η περίεργη συμπεριφορά φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας στο προηγούμενο κεφάλαιο οφείλεται ακριβώς στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη μπαταρία σαν μία δεξαμενή ενέργειας, στην οποία και από την οποία μπορεί να αποθηκεύει και να «αντλεί» ενέργεια, αντίστοιχα, με μοναδικό κριτήριο τη μείωση του αντικειμενικού κόστους. Ταυτόχρονα, την αξιοποιεί για παροχή εφεδρειών. Η αποθήκευση σαν ελεύθερο στοιχείο δεν καταθέτει προσφορά και, ουσιαστικά, πουλάει ενέργεια προσφέροντας σε μηδενικό κόστος, πράγμα που μπορεί ακόμα και να τη ζημιώσει, όσο αφορά την αγοραπωλησία ενέργειας.

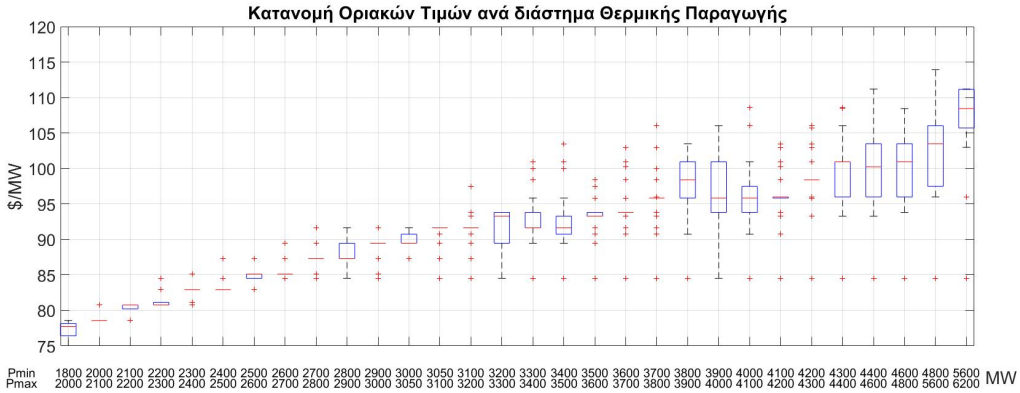
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια κατάστρωσης προσφοράς της αποθήκευσης. Αναλυτικότερα, γίνεται μία πρόχειρη εκτίμηση της οριακής τιμής με βάση ιστορικά στοιχεία και διαθέσιμα δεδομένα (φορτίο και επίπεδο ΑΠΕ) και στη συνέχεια ο αλγόριθμος επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης κέρδους της μπαταρίας, παρουσιάζοντας τις ώρες που η μπαταρία αξίζει να προσφέρει για αγορά ή για πώληση ενέργειας. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην εργασία [24] γίνεται πρόβλεψη της οριακής τιμής με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, σε μια πιο συστηματική προσπάθεια εκτίμησής της.

Η ημερήσια προσφορά αγοράς και πώλησης ενέργειας δίνεται ως είσοδος σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους, και ο αλγόριθμος εντάσσει ή όχι την αποθήκευση ανάλογα με την οικονομικότητα της προσφοράς.

5.1 Εκτίμηση οριακής τιμής

Γίνεται η υπόθεση, ότι ο διαχειριστής της μπαταρίας έχει στη διάθεση του ακριβή πρόβλεψη φορτίου και ΑΠΕ της επόμενης ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκτιμήσει το επίπεδο της θερμικής παραγωγής, το οποίο κατά κύριο λόγο είναι αυτό που επηρεάζει το μέγεθος της οριακής τιμής. Επίσης, θεωρείται ότι διαθέτει ιστορικά δεδομένα, στα οποία διάφορα διαστήματα ισχύος θερμικής παραγωγής αντιστοιχίζονται σε ένα νέφος οριακών τιμών. Με άλλα λόγια, διαθέτει το διάγραμμα στο Σχήμα 5.1. Οι οριακές τιμές έχουν μεγάλη διασπορά ανά διάστημα θερμικής παραγωγής και αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως στην απαίτηση διαφορετικής ποσότητας ισχύος για εφεδρεία κάθε ώρα, στους τεχνικούς περιορισμούς ένταξης θερμικών μονάδων, στην απότομη αυξομείωση της διαθεσιμότητας ΑΠΕ. Παρόλα αυτά, αντιστοιχίζεται κάθε διάστημα θερμικής παραγωγής στη μέση τιμή του νέφους των οριακών τιμών κάθε διαστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, προσεγγιστικά, γίνεται

αντιστοίχιση του επιπέδου της θερμικής παραγωγής σε μια οριακή τιμή.



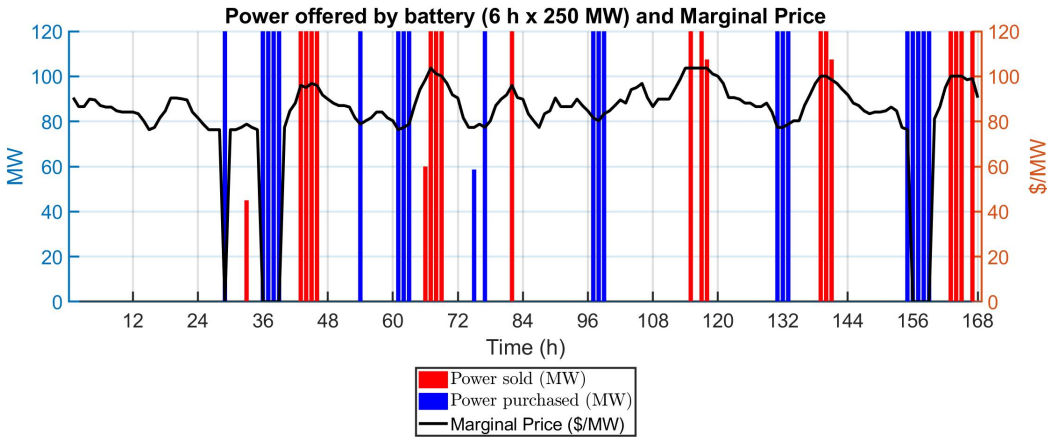
Σχήμα 5.1: Νέφος οριακών τιμών ανά διάστημα θερμικής παραγωγής

5.2 Μεγιστοποίηση κέρδους μπαταρίας και κατάστρωση προσφοράς

Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης του κέρδους της μπαταρίας περιλαμβάνει το γινόμενο της εκτιμώμενης οριακής τιμής επί την ισχύ εκφόρτισης πλην την ισχύ φόρτισης. Ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση που διατηρεί το επίπεδο φόρτισης (Εξίσωση 4.14).

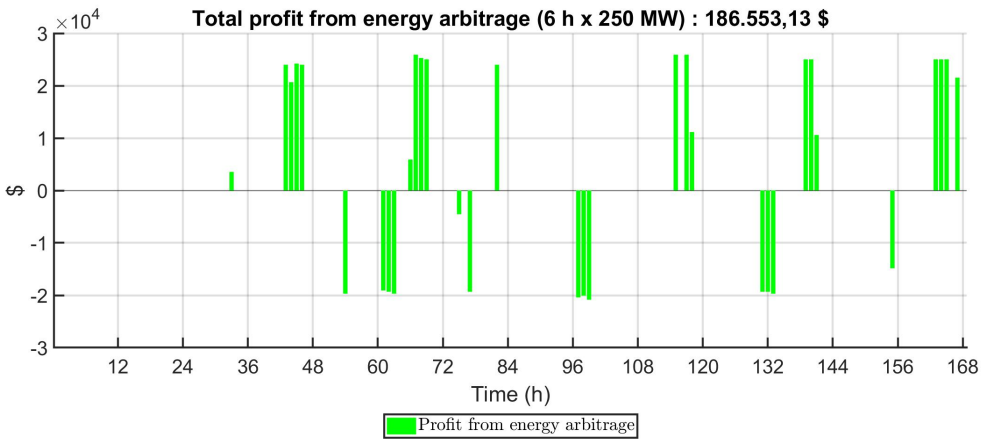
$$max \quad Profit = \sum_t [mp(t) \cdot (P_\xi^d(t) - P_\xi^c(t))] \tag{5.1}$$

όπου $mp(t)$ η εκτίμηση της οριακής τιμής για την ώρα t.

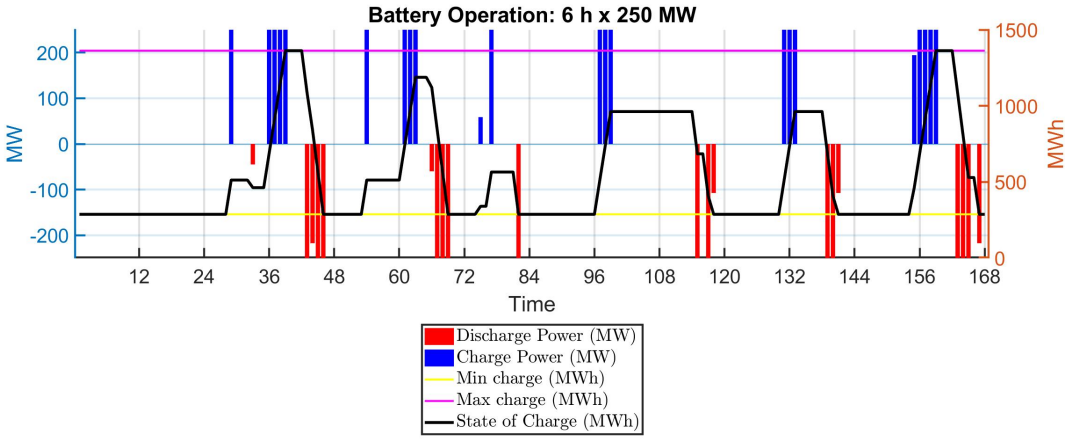


Σχήμα 5.2: Λειτουργία μπαταρίας και εκτιμώμενη οριακή τιμή

Σε αυτό το κεφάλαιο, η διείσδυση ΑΠΕ θεωρείται ότι είναι υψηλή και η εβδομάδα εξέτασης είναι η ίδια με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου, δηλαδή μία μέση ενδεικτική εβδομάδα του έτους από άποψη ζήτησης, ενώ από άποψη διαθεσιμότητας ΑΠΕ αποτελεί μία μεσαία-χαμηλή εβδομάδα. Θεωρείται ακόμα, ότι ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης και ο βαθμός απόδοσης



Σχήμα 5.3: Εκτιμώμενο κέρδος μπαταρίας



Σχήμα 5.4: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης

φόρτισης της μπαταρίας είναι $0,9$. Αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία εξασφαλίζει κέρδος αν:

$$P_s \cdot \eta_\xi^d > \frac{P_b}{\eta_\xi^c} \Leftrightarrow P_s > \frac{P_b}{\eta_\xi^d \cdot \eta_\xi^c} \Leftrightarrow \frac{P_s}{P_b} > 1,235 \tag{5.2}$$

όπου P_s η τιμή πώλησης ενέργειας, η_ξ^d ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης, P_b η τιμή αγοράς ενέργειας και η_ξ^c ο βαθμός απόδοσης φόρτισης.

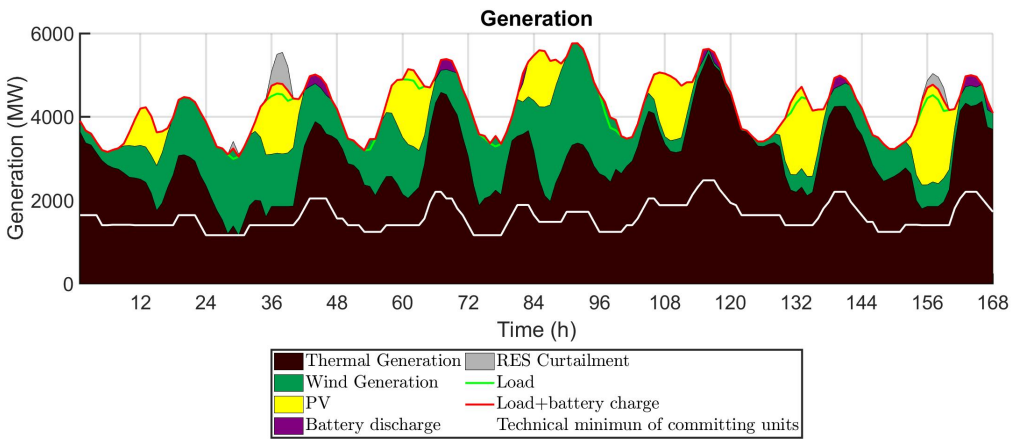
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.2, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναζητά διαδοχικές ώρες, κατά τις οποίες να ισχύει για την οριακή τιμή ο λόγος στην Εξίσωση 5.2, προκειμένου να εξασφαλίζει κέρδος από το ενεργειακό αρμπιτράζ. Προφανώς, όταν η εκτίμηση της οριακής τιμής είναι μηδέν, η μπαταρία αξιοποιεί την πλήρη δυνατότητα ισχύος της για να φορτίσει, εφόσον δεν ζημιώνεται. Το αναμενόμενο κέρδος της μπαταρίας για αυτή τη λειτουργία απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Το συγκεκριμένο πλάνο λειτουργίας φόρτισης και εκφόρτισης εκτιμάται ότι θα αποφέρει κέρδος ύψους 416 χιλιάδων στο διάστημα αυτής της εβδομάδας. Εφόσον, λοιπόν, έχει καταστρωθεί η προσφορά, απομένει η αξιοποίηση της από τον διαχειριστή, ο οποίος θα την λάβει όπως λαμβάνει προσφορές και από τις θερμικές μονάδες, με τη διαφορά βέβαια ότι η προσφορά της μπαταρίας είναι απλούστερη, δηλαδή προσφέρει όλη τη διαθέσιμη ισχύ της γραμμικά, σε σταθερή τιμή.

5.3 Ένταξη μπαταρίας με βάση την προσφορά

Η τιμή, στην οποία προσφέρει ενέργεια για πώληση η μπαταρία κάθε ώρα, θεωρείται ότι είναι 20 μονάδες κάτω από την εκάστοτε εκτίμηση της οριακής τιμής, ενώ αντίστοιχα η τιμή στην οποία προσφέρει για προμήθεια ενέργειας 20 μονάδες πάνω. Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται να ενταχθεί η μπαταρία, αν και εφόσον η προσφορά της είναι οικονομικότερη αντί άλλων μονάδων: για την πώληση ενέργειας οικονομικότερη προσφορά σημαίνει ότι η προσφορά πώλησης ενέργειας της μπαταρίας είναι χαμηλότερη από την πραγματική οριακή τιμή, ενώ για την αγορά ενέργειας οικονομικότερη προσφορά σημαίνει ότι η προσφορά αγοράς ενέργειας της μπαταρίας είναι υψηλότερη από την πραγματική οριακή τιμή. Με άλλα λόγια, αν η προσφορά πώλησης για παράδειγμα είναι αρκετά υψηλή, ενέχει ο κίνδυνος ο διαχειριστής να απορρίψει την αποθήκευση και να επιλέξει κάποια άλλη οικονομικότερη προσφορά ενέργειας από κάποιο άλλο στοιχείο του συστήματος (θερμική μονάδα). Ακόμα, στην περίπτωση που η μπαταρία είναι το τελευταίο στοιχείο που εισάγει ο διαχειριστής στο ενεργειακό μείγμα, τότε σε αυτήν την περίπτωση η μπαταρία διαμορφώνει την οριακή τιμή, και συμμετέχει όχι σε όλο το εύρος ισχύος της, αλλά ακριβώς στην ποσότητα ισχύος που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί και το τελευταίο MW ζήτησης φορτίου. Είναι ναι μεν επιθυμητό να εισάγεται η μπαταρία από το διαχειριστή, όχι όμως σε εξευτελιστικά χαμηλή τιμή, η οποία θα της αποφέρει ζημία. Για αυτό το σκοπό, επιλέγεται η μπαταρία να προσφέρει 20 $ κάτω και πάνω από την εκτίμηση της οριακής τιμής όταν πρόκειται για πώληση ή αγορά αντίστοιχα.

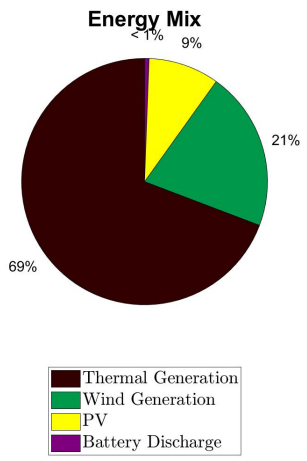
Επιπροσθέτως, σε αυτήν τη θεώρηση δίνεται προτεραιότητα στο ενεργειακό αρμπιτράζ και κατόπιν στις εφεδρείες. Η ισχύς της μπαταρίας που δεσμεύεται για ενεργειακό αρμπιτράζ με βάση τη βελτιστοποίηση προσφοράς διατίθεται αποκλειστικά για αυτό το σκοπό, είτε ο διαχειριστής εισάγει την αποθήκευση είτε όχι. Το υπόλοιπο του διαθέσιμου εύρους ισχύος της μπαταρίας ή η πλήρης ισχύς της όταν αυτή δε συμμετέχει στο αρμπιτράζ, διατίθεται με ελεύθερο τρόπο στις εφεδρείες. Τέλος, οι θερμικές μονάδες σε αυτήν την ενότητα θεωρείται ότι προσφέρουν στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους, με τα αντίστοιχα διαγράμματα για προσφορά μονάδων στο οριακό κόστος τους να δίνονται στο Παράρτημα Γ.

5.3.1 Εφαρμογή με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και με αποθήκευση 6 h x 250 MW

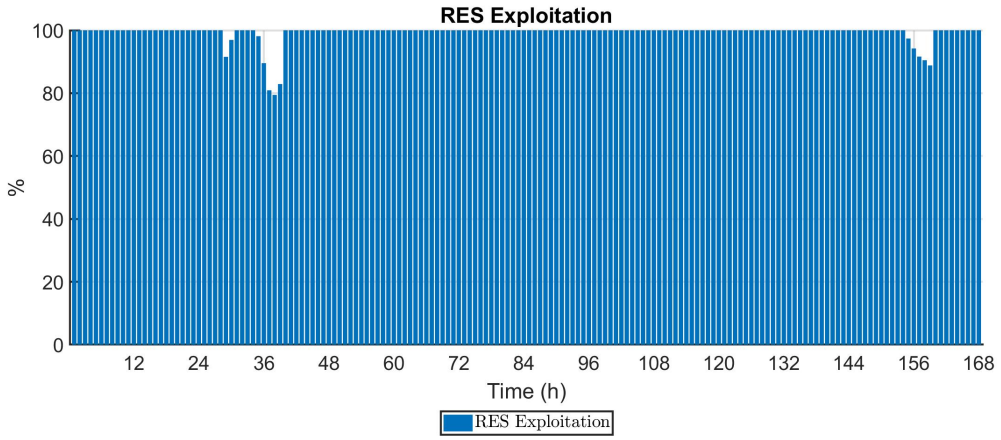


Σχήμα 5.5: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραγωγή-φορτίο

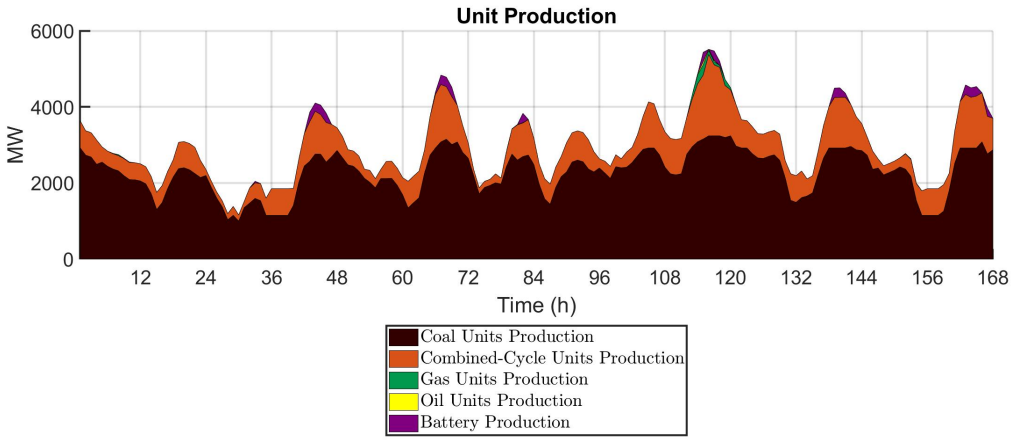
Στο Σχήμα 5.5 αποτυπώνεται το ενεργειακό μείγμα και οι περικοπές ΑΠΕ κάθε ώρας μέσα στην εβδομάδα. Οι συνολικές περικοπές ΑΠΕ της εβδομάδας είναι 1,70% των διαθέσιμων ΑΠΕ ενώ η συνολική διείσδυση ΑΠΕ είναι 30,41%.



Σχήμα 5.6: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα



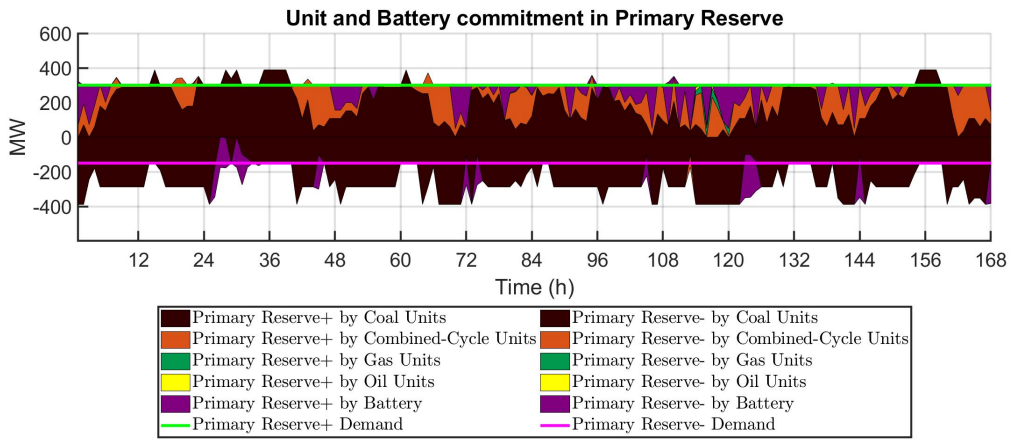
Σχήμα 5.7: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αξιοποίηση ΑΠΕ



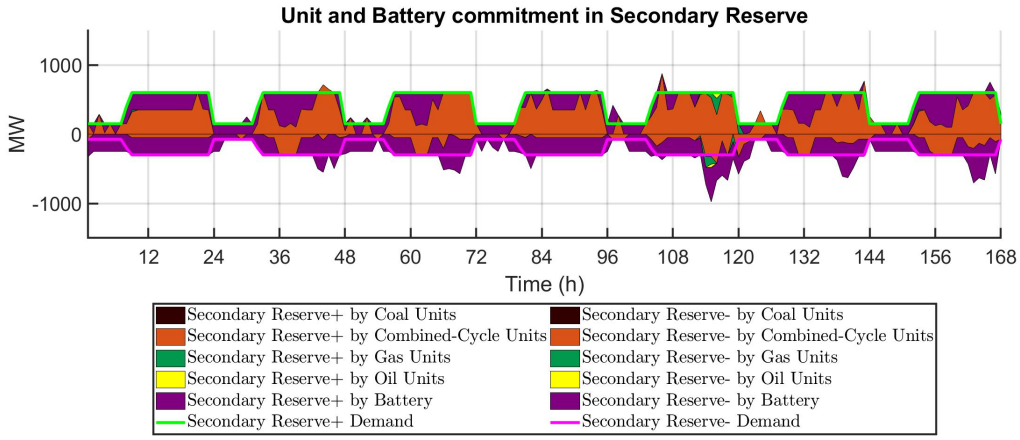
Σχήμα 5.8: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας

Ως επί το πλείστον, λειτουργούν οι μονάδες άνθρακα ενώ οι ΜΣΚ συμβάλλουν στις εφεδρείες, ιδιαίτερα τις ώρες που η μπαταρία δεσμεύεται για λειτουργία αρμπιτράζ. Οι αιχμές του φορτίου καλύπτονται τόσο από τη μπαταρία όσο και από μονάδες αερίου.

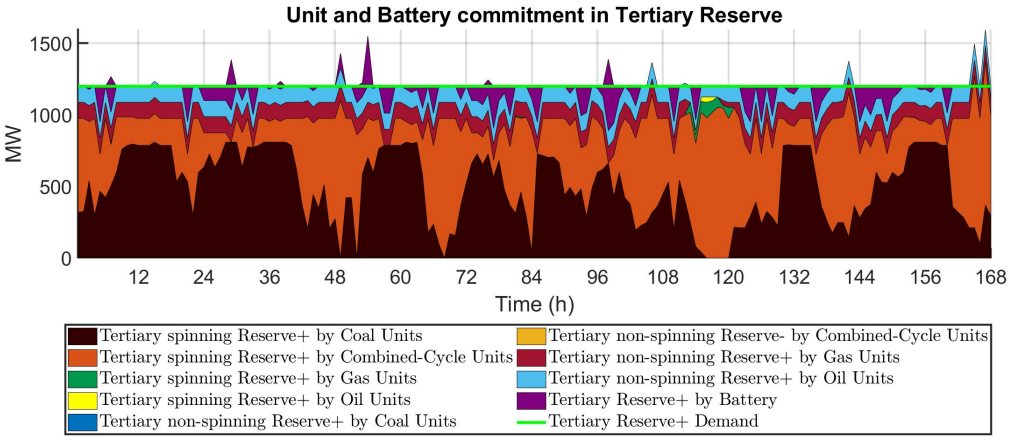
Στην πρωτεύουσα εφεδρεία συμβάλουν κυρίως οι μονάδες του άνθρακα αλλά σε μικρότερο



Σχήμα 5.9: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



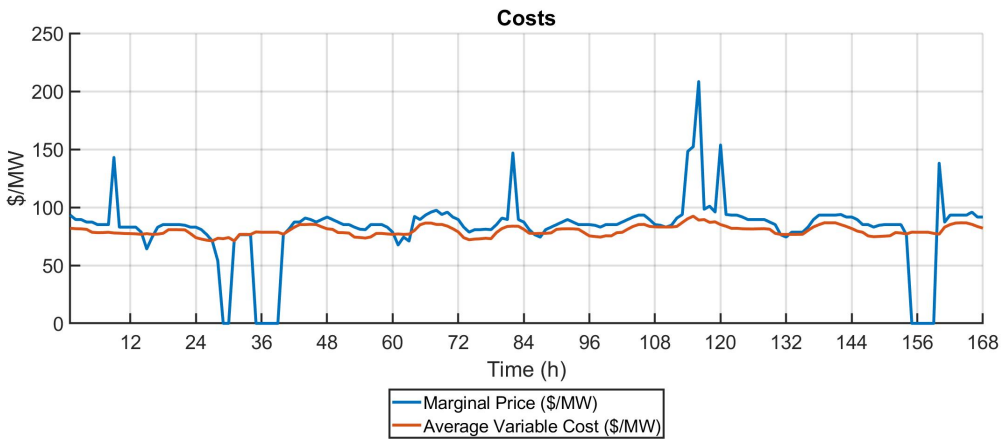
Σχήμα 5.10: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



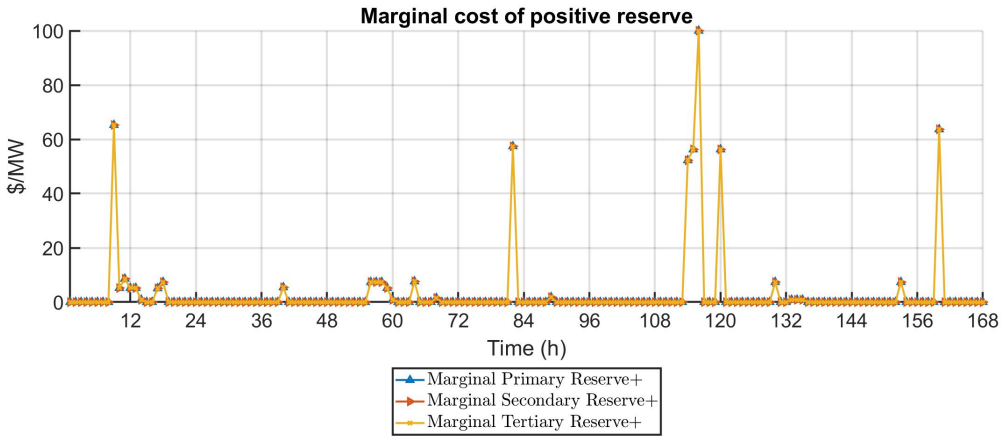
Σχήμα 5.11: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας

ποσοστό και οι ΜΣΚ ή η αποθήκευση. Η αποθήκευση συμμετέχει αρκετά στη δευτερεύουσα εφεδρεία και ειδικότερα στην αρνητική, περιορίζοντας τη λειτουργία των ΜΣΚ.

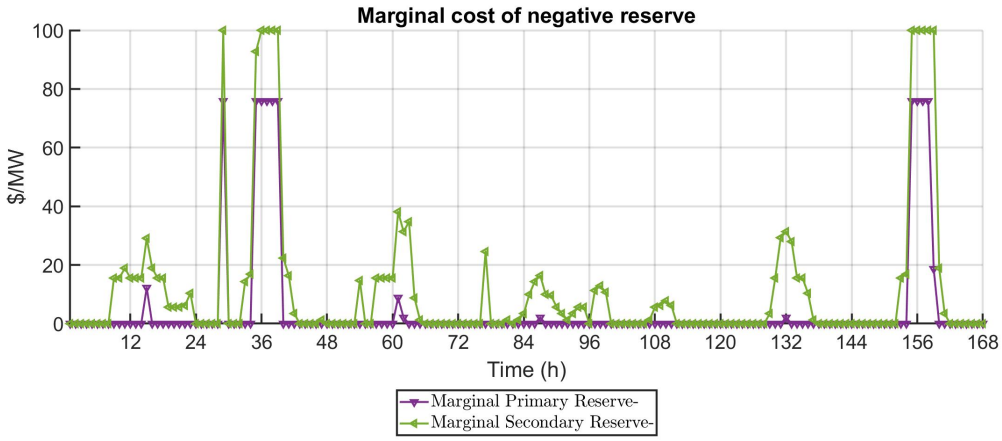
Η οριακή τιμή κυμαίνεται από 90 έως 100 % τις περισσότερες ώρες ενώ υπάρχουν και οι



Σχήμα 5.12: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων

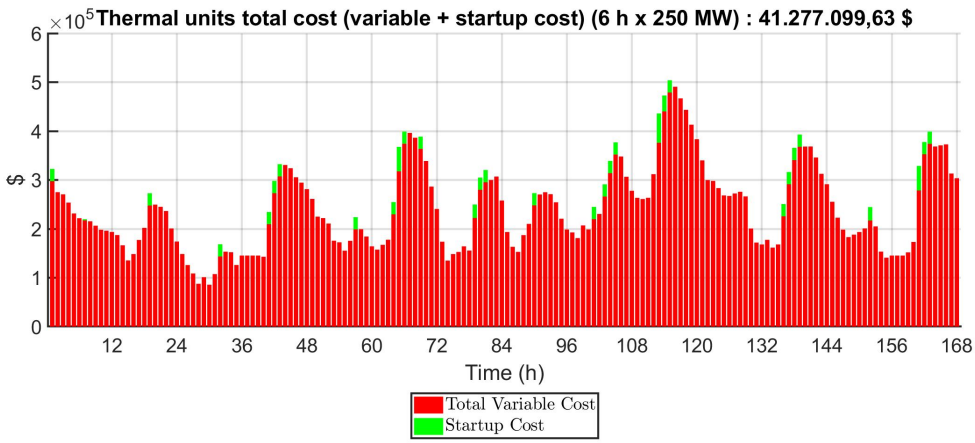


Σχήμα 5.13: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών

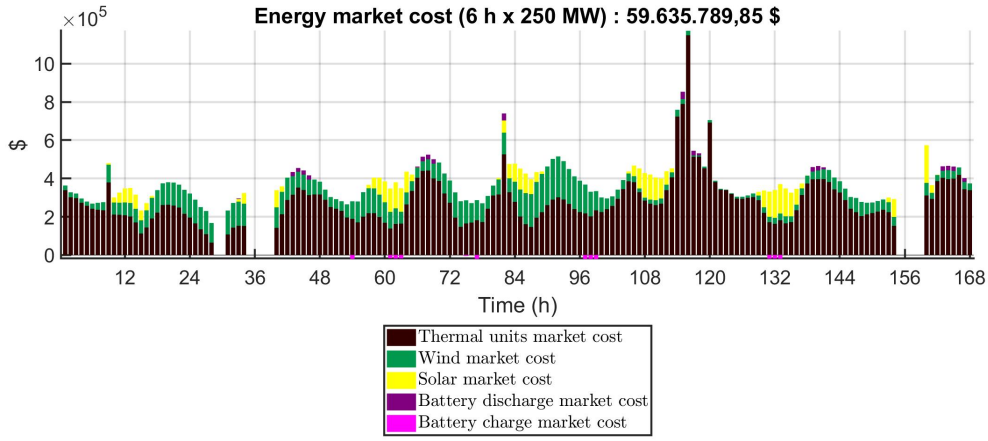


Σχήμα 5.14: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών

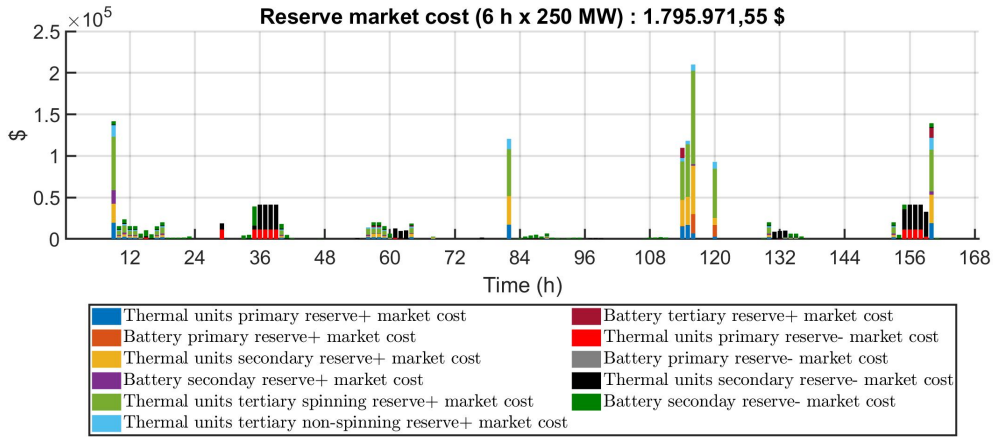
ώρες αιχμιακής κάλυψης φορτίου από ακριβές μονάδες, οι οποίες εκτινάσσουν την οριακή τιμή. Οι οριακές τιμές των εφεδρειών κινούνται σε φυσιολογικά επίπεδα, με τη δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία να είναι η πιο ακριβή, επειδή βρίσκεται σε έλλειψη και σε αυτή συμβάλουν



Σχήμα 5.15: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)



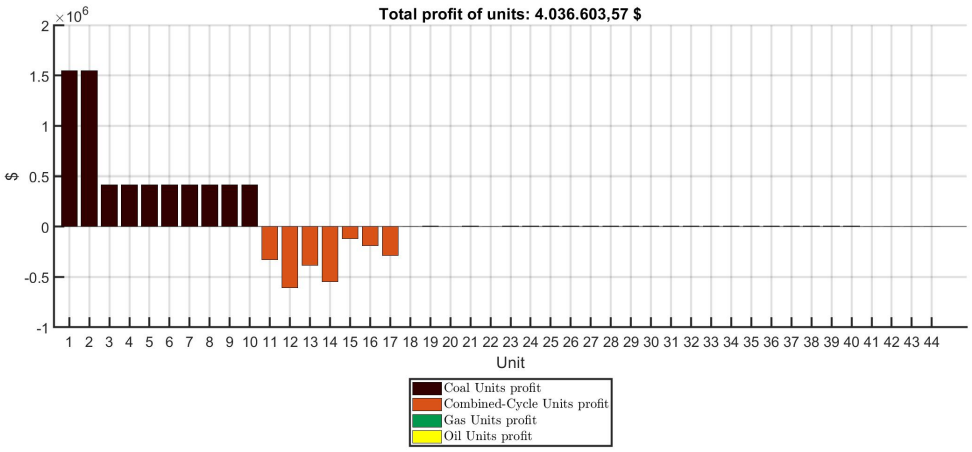
Σχήμα 5.16: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς ενέργειας



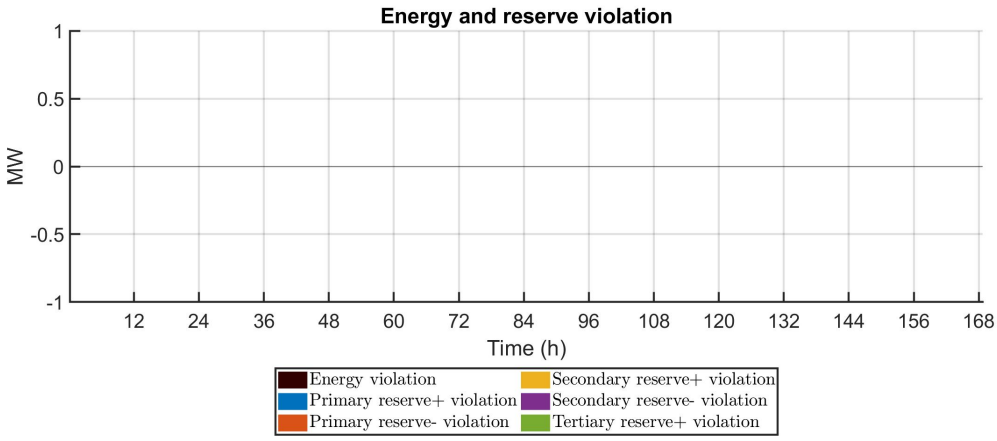
Σχήμα 5.17: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς εφεδρειών

ακριβότερες μονάδες (ΜΣΚ, μονάδες αερίου και μονάδες πετρελαίου).

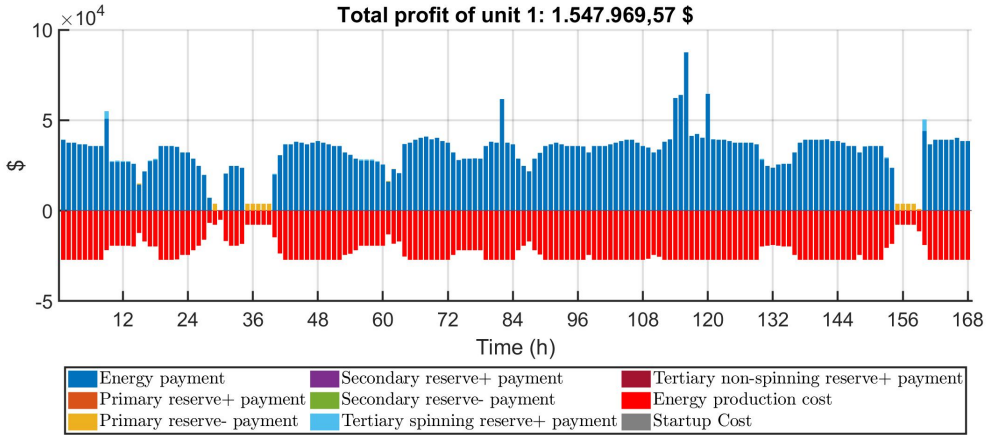
Το αντικειμενικό κόστος του συστήματος είναι 41,2 εκατομμύρια. Το αγοραίο κόστος ενέργειας είναι 59,6 εκατομμύρια, ενώ το αγοραίο κόστος εφεδρειών είναι 1,8 εκατομμύρια.



Σχήμα 5.18: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων

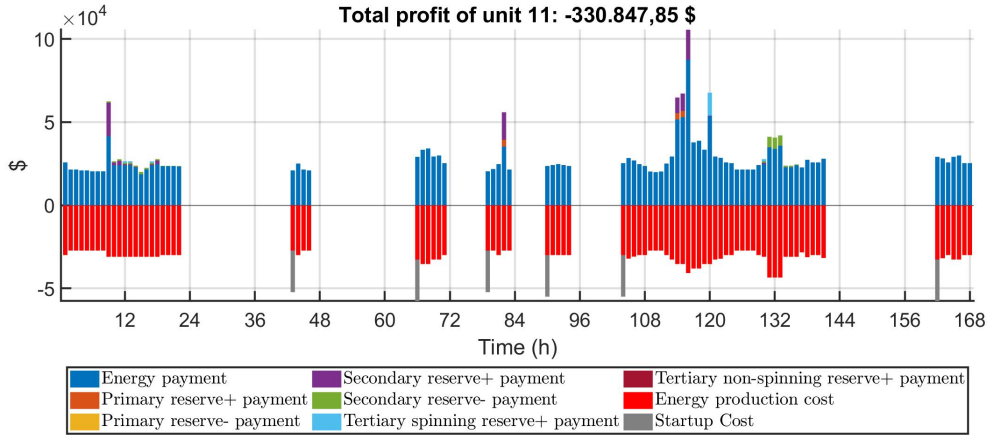


Σχήμα 5.19: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών

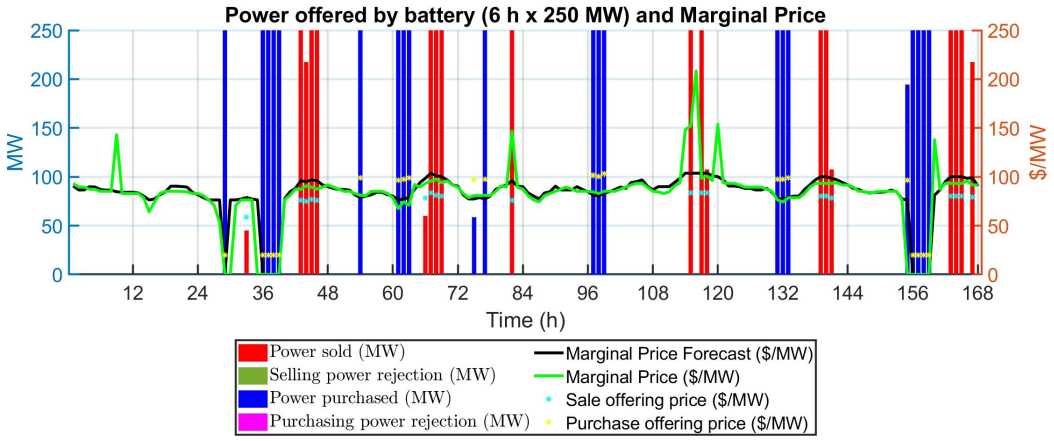


Σχήμα 5.20: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας

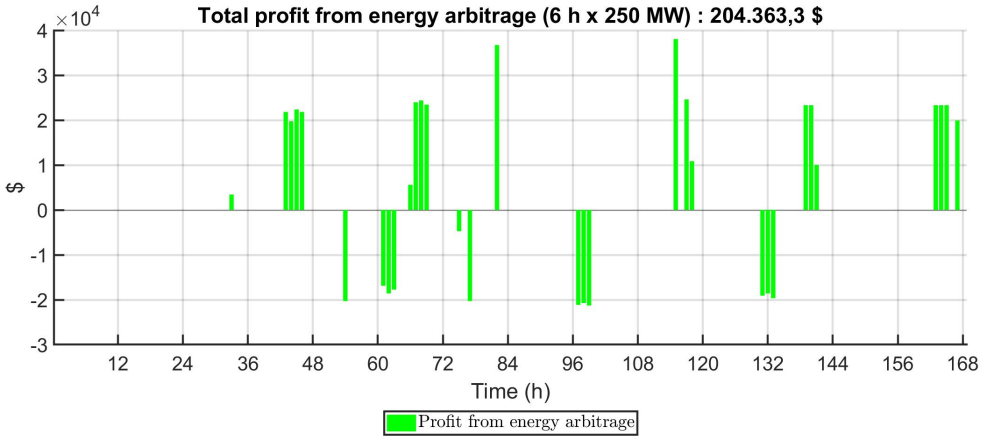
Οι μονάδες του άνθρακα εξασφαλίζουν ικανοποιητικό κέρδος, ενώ οι ΜΣΚ είναι ζημιωμένες και έχουν ανάγκη οικονομικό μηχανισμό υποστήριξης. Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται η λειτουργία της μπαταρίας, η πραγματική οριακή τιμή, η εκτιμώμενη οριακή τιμή και οι προσφορές της μπαταρίας. Το τελικό κέρδος της από το αρμπιτράζ για αυτήν την εβδομάδα ανέρχεται σε



Σχήμα 5.21: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος

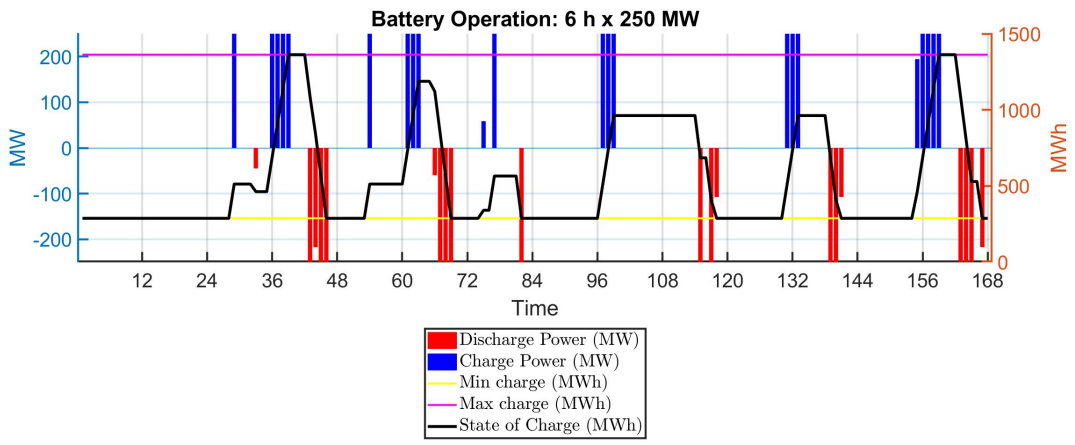


Σχήμα 5.22: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή

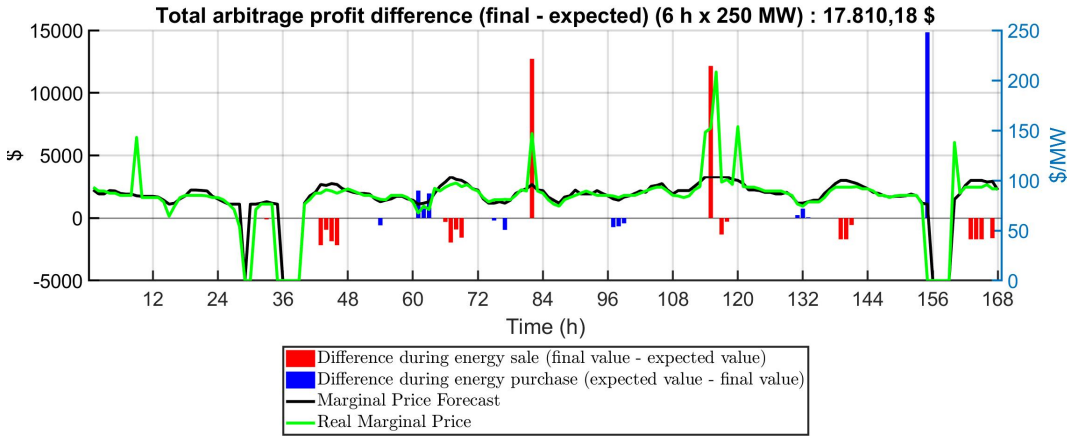


Σχήμα 5.23: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ

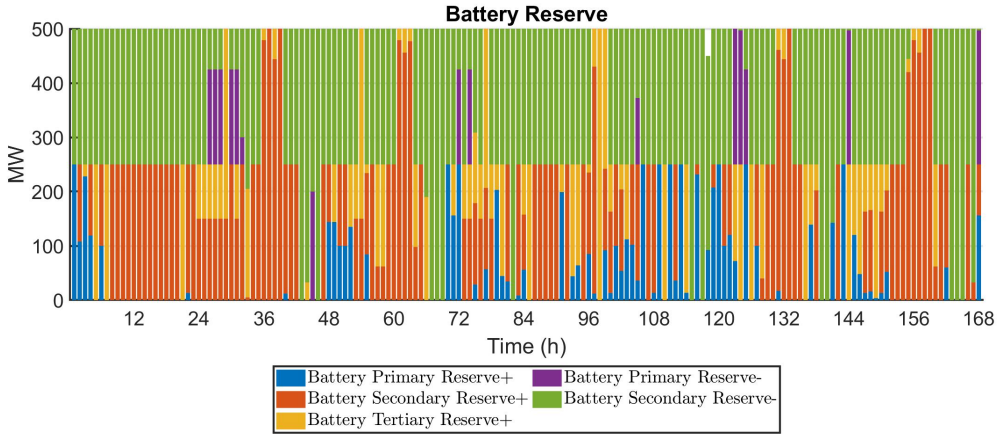
204 χιλιάδες, ενώ το εκτιμώμενο ήταν 187 χιλιάδες. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ύπαρξη κάποιων μηδενικών οριακών τιμών που δε μπόρεσαν να προβλεφθούν και στην εκτίναξη της



Σχήμα 5.24: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης

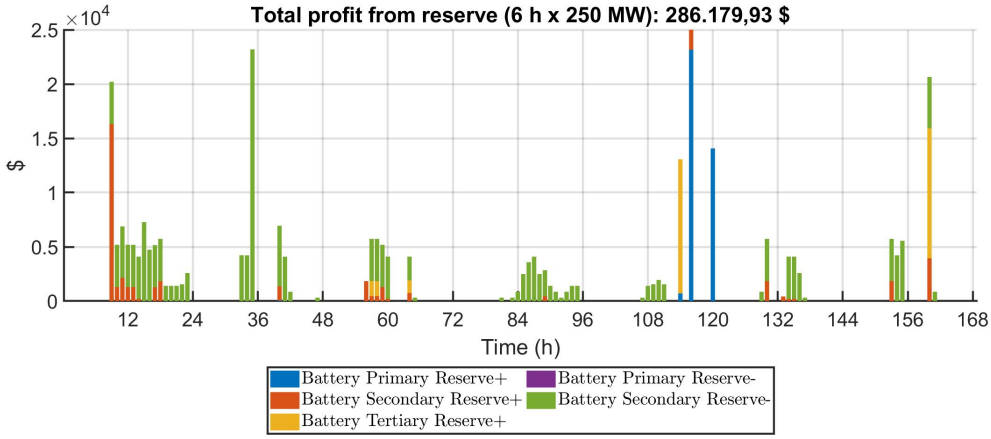


Σχήμα 5.25: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαφορά οριακής τιμής και κέρδους από τα εκτιμώμενα



Σχήμα 5.26: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία

οριακής τιμής κάποιες ώρες αιχμής. Αναλυτικότερα, οι διαφορές κάθε ώρας αναλύονται στο Σχήμα 5.25, όπου φαίνεται ακριβώς το κέρδος ή η ζημία που προέκυψε μεταξύ εκτιμώμενης



Σχήμα 5.27: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών

και πραγματικής οριακής τιμής. Η εκτίμηση του επιπέδου της υψηλής τιμής μιας οριακής τιμής δεν επιτυγχάνεται, ωστόσο επιτυγχάνεται εκτίμηση της αυξητικής τάσης της οριακής τιμής τις περισσότερες φορές, πράγμα που σημαίνει ότι η μπαταρία ούτως η άλλως θα προσφέρει ενέργεια προς πώληση εκείνες τις ώρες. Το κέρδος της μπαταρίας από την παροχή εφεδρειών με ελεύθερο τρόπο ανέρχεται σε 286 χιλιάδες και άρα το συνολικό κέρδος της είναι 490 χιλιάδες.

Στον επόμενο πίνακα γίνεται σύγκριση τιμών της μπαταρίας που λειτουργεί με προσφορά με αυτές της προηγούμενου κεφαλαίου. Σε σχέση με την ελεύθερη λειτουργία της αποθήκευσης, το κόστος συστήματος έχει αυξηθεί κατά 1 εκατομμύριο περίπου, το αγοραίο κόστος ενέργειας κυμαίνεται σε ίδια επίπεδα ενώ το αγοραίο κόστος εφεδρειών έχει αυξηθεί κατά 300 χιλιάδες, αύξηση η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η μπαταρία παρέχει ενέργεια κατά προτεραιότητα και έπειτα εφεδρεία. Η διείσδυση ΑΠΕ και οι περικοπές βρίσκονται σχεδόν στα ίδια ποσοστά. Τα έσοδα της μπαταρίας από το αρμπιτράζ είναι σαφώς αυξημένα, ενώ τα έσοδά της από τις εφεδρείες έχουν μειωθεί σημαντικά. Τα συνολικά έσοδα της μπαταρίας υστερούν κατά 80 χιλιάδες περίπου σε σχέση με την ελεύθερη λειτουργία της.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση τιμών χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση (6x250) σαν ελεύθερο στοιχείο και με αποθήκευση (6x250) σε λειτουργία προσφοράς για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους τους

	Χωρίς αποθήκευση	Αποθήκευση: Ελεύθερο στοιχείο	Αποθήκευση: Λειτουργία προσφοράς
Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων ($)	42.920.990,61	41.182.709,39	41.277.099,63
Αγοραίο κόστος ενέργειας ($)	58.367.325,87	59.980.179,24	59.635.789,85
Αγοραίο κόστος εφεδρειών ($)	7.634.642,79	1.776.874,62	1.795.971,55
Συνολική Διείσδυση ΑΠΕ (%)	29,21	30,44	30,41
Περικοπές ΑΠΕ (% των διαθέσιμων ΑΠΕ)	5,58	1,60	1.7
Κέρδος μπαταρίας από αρμπιτράζ ($)	0	7.374,34	204.363,3
Κέρδος μπαταρίας από εφεδρεία ($)	0	563.138,6	286.179,93
Συνολικό κέρδος μπαταρίας ($)	0	570.512,94	490.543,22

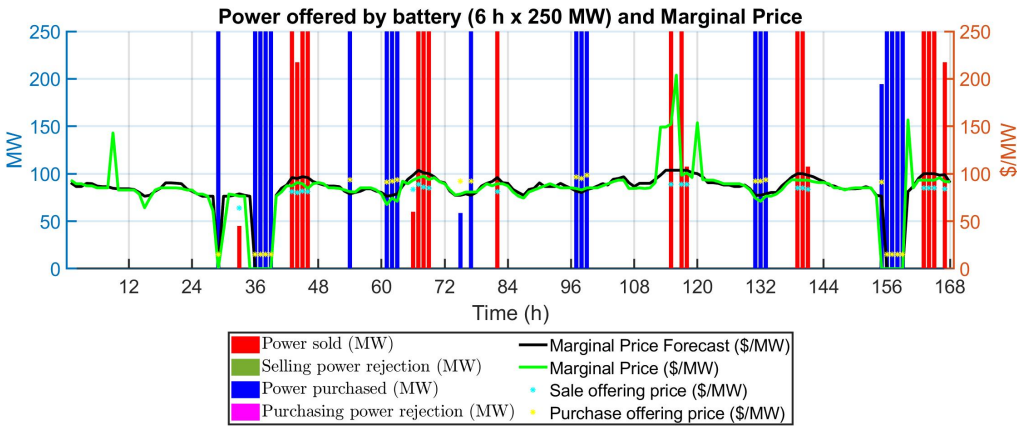
Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα ίδια μεγέθη αν οι θερμικές μονάδες προσφέρουν στο οριακό τους κόστος. Η αντιστοίχιση οριακών τιμών σε διαστήματα θερμικής παραγωγής γίνεται με τη χρήση διαφορετικού νέφους οριακών τιμών, αυτών που προκύπτουν με χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά μονάδων στο οριακό κόστος τους. Όπως αναμένεται, τα αγοραία κόστη αλλά και το κέρδος της μπαταρίας είναι μειωμένα, καθώς οι θερμικές μονάδες διαμορφώνουν την οριακή τιμή με το οριακό τους κόστος που πολλές φορές είναι χαμηλότερο από το μέσο μεταβλητό τους κόστος.

Όλα τα αντίστοιχα διαγράμματα κατάστρωσης προσφοράς και ένταξης της αποθήκευσης με βάση την προσφορά στο οριακό κόστος, βρίσκονται στο Παράρτημα Γ. Το κέρδος της μπαταρίας σε αυτήν την περίπτωση είναι 520 χιλιάδες, λίγο αυξημένο σε σχέση με το κέρδος που προκύπτει από το σχήμα προσφοράς 1. Αυτό συμβαίνει γιατί, στο σχήμα προσφοράς 2, η μπαταρία συμμετέχει λίγο λιγότερο στο αρμπιτράζ και λίγο περισσότερο στην εφεδρεία. Φαίνεται ότι η ελεύθερη συμμετοχή της μπαταρίας στην αγορά εφεδρειών είναι αρκετά προσοδοφόρα σε σχέση με τη συμμετοχή στο αρμπιτράζ.

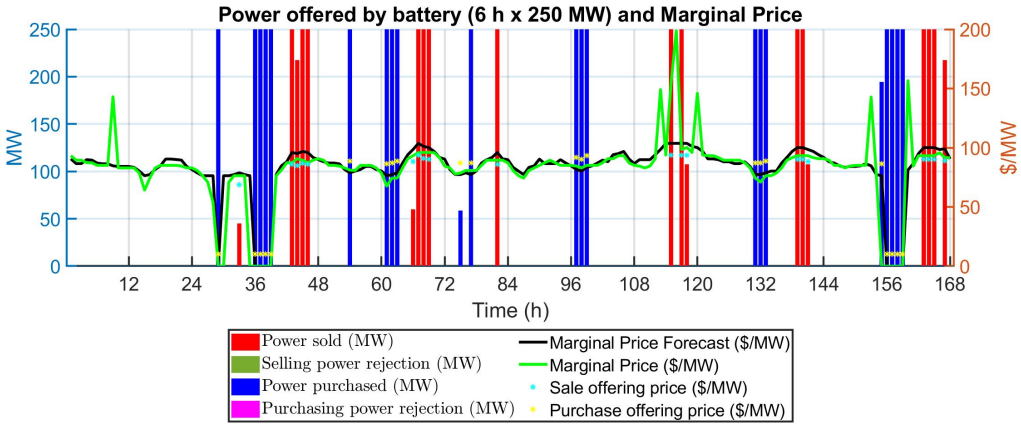
Πίνακας 5.2: Σύγκριση τιμών χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση (6x250) σαν ελεύθερο στοιχείο και με αποθήκευση (6x250) σε λειτουργία προσφοράς για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά θερμικών μονάδων στο οριακό κόστους τους

	Χωρίς αποθήκευση	Αποθήκευση: Ελεύθερο στοιχείο	Αποθήκευση: Λειτουργία προσφοράς
Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων ($)	42.573.968,81	40.485.356,25	40.574.536,20
Αγοραίο κόστος ενέργειας ($)	53.930.030,90	56.485.655,75	56.389.004,31
Αγοραίο κόστος εφεδρειών ($)	6.931.040,21	2.578.979,28	2.837.457,50
Συνολική Διείσδυση ΑΠΕ (%)	29,26	30,44	30,43
Περικοπές ΑΠΕ (% των διαθέσιμων ΑΠΕ)	5,42	1,60	1,61
Κέρδος μπαταρίας από αρμπιτράζ ($)	0	4.477,72	147.105,16
Κέρδος μπαταρίας από εφεδρεία ($)	0	497.356,39	372.572,53
Συνολικό κέρδος μπαταρίας ($)	0	501.833,87	519.677,70

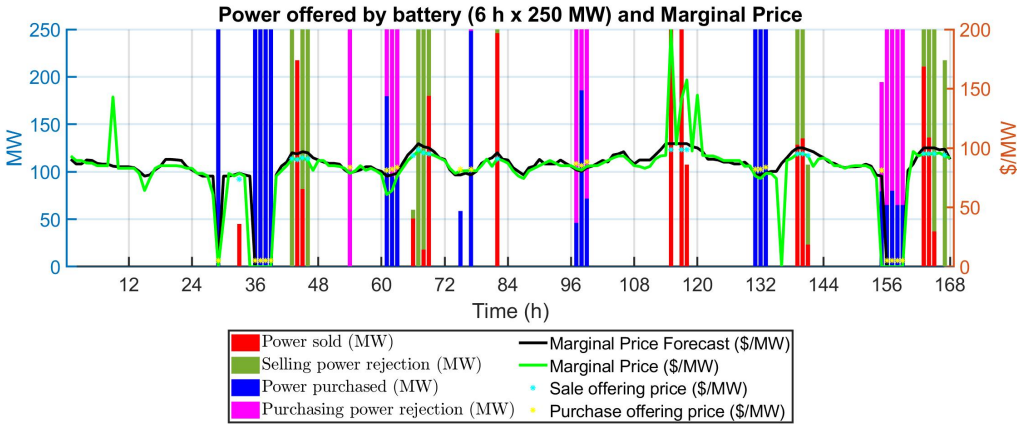
5.3.2 Επίδραση τιμής προσφοράς αποθήκευσης στην οριακή τιμή συστήματος



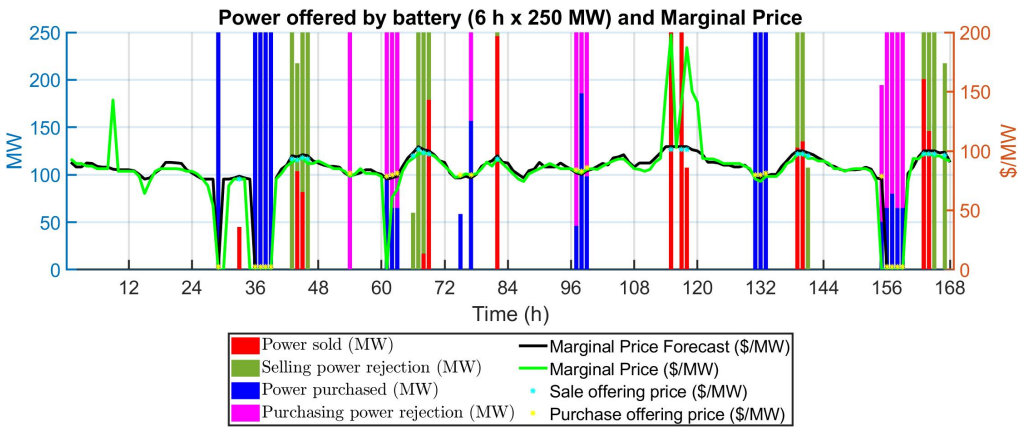
Σχήμα 5.28: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±15 $



Σχήμα 5.29: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±10 $



Σχήμα 5.30: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±5 $

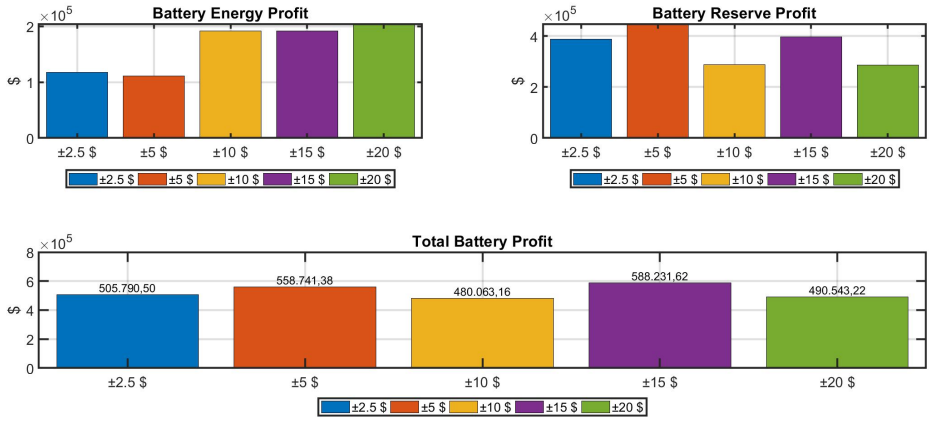


Σχήμα 5.31: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±2,5 $

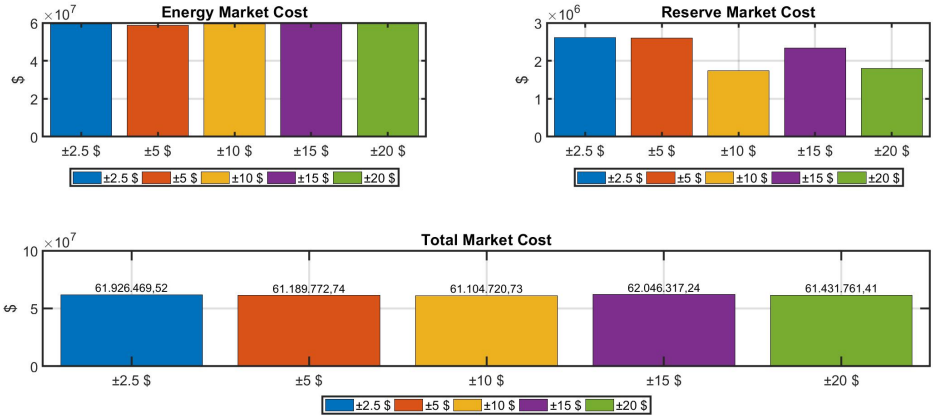
Στα παραπάνω σχήματα φαίνεται η επίδραση του ύψους της προσφοράς της αποθήκευσης στην οριακή τιμή κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης εβδομάδας. Κοιτώντας τις ώρες της τρίτης ημέρας, κατά τις οποίες η μπαταρία πουλάει ενέργεια, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η προσφορά πώλησης ενέργειας τόσο ελοχεύει ο κίνδυνος η μπαταρία να αποτελέσει το στοιχείο που θα διαμορφώσει την οριακή τιμή. Αυτό, πράγματι, αρχίζει να συμβαίνει στο Σχήμα 5.30, όπου η μπαταρία προσφέρει 5 μονάδες κάτω από την εκτίμηση, η πραγματική οριακή τιμή συμπίπτει με την προσφορά της μπαταρίας και, μάλιστα, μέρος της ισχύος της αποθήκευσης απορρίπτεται. Καθώς αυξάνεται η προσφορά και πλησιάζει περισσότερο την πρόβλεψη, η απόρριψη ισχύος της μπαταρίας από το διαχειριστή γίνεται μεγαλύτερη, και η αποθήκευση εμφανίζει μεγαλύτερη απώλεια εσόδων. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και κατά την αγορά ενέργειας. Στο Σχήμα 5.31 κατά την πέμπτη ημέρα, η τιμή αγοράς ενέργειας της μπαταρίας έχει μειωθεί πολύ και συμπίπτει, άρα και διαμορφώνει την οριακή τιμή. Ως εκ τούτου μέρος της προσφερόμενης ισχύος για αγορά ενέργειας απορρίπτεται.

Επομένως, η μπαταρία αξίζει να προσφέρει σε μία ασφαλή απόσταση των 20 μονάδων από την εκτίμησή της, προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη εξ΄ ολοκλήρου η προσφορά της. Ωστόσο, δεν πρέπει να προσφέρει σε μεγαλύτερη απόσταση, διότι υπάρχει το ενδεχόμενο να μην αποκομίζει κέρδος.

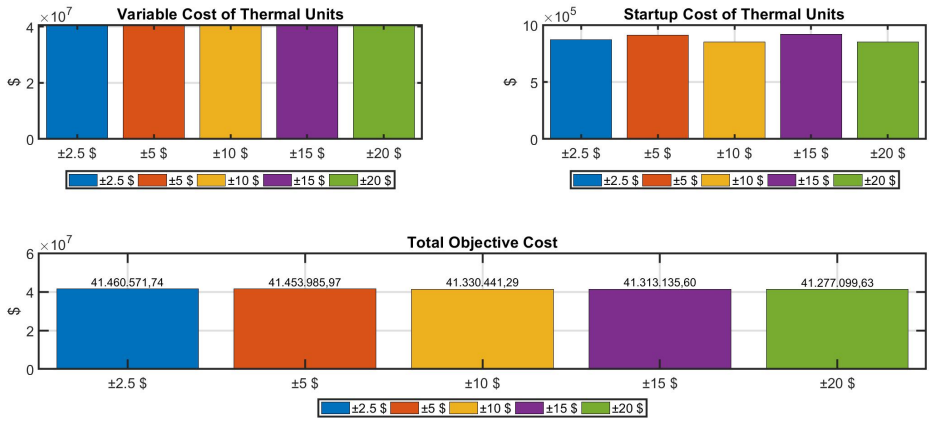
5.3.3 Επίδραση τιμής προσφοράς αποθήκευσης στα διάφορα μεγέθη



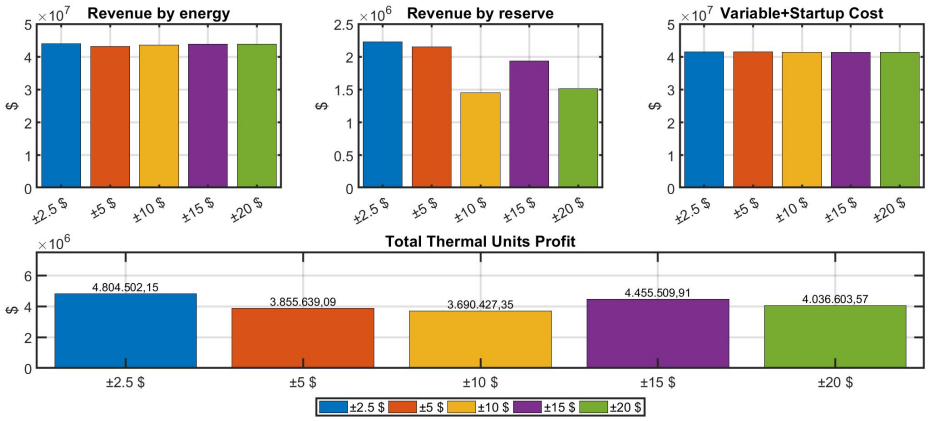
Σχήμα 5.32: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος μπαταρίας σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της



Σχήμα 5.33: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Μέγεθος αγοράς σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας



Σχήμα 5.34: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος συστήματος σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας



Σχήμα 5.35: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας

Στο Σχήμα 5.32 φαίνεται το κέρδος της μπαταρίας για διαφορετικό επίπεδο προσφοράς. Όταν η προσφορά είναι $\pm 2,5\$$ ή $\pm 5\$$, η μπαταρία χάνει χρήματα από την συμμετοχή της στην αγορά ενέργειας, καθώς μεγάλο μέρος της δεν εντάσσεται από το διαχειριστή, λόγω οικονομικότερων ανταγωνιστικών προσφορών. Από τα $\pm 10\$$ και πάνω η μπαταρία εντάσσεται σε μεγαλύτερο βαθμό και κερδίζει από την ενέργεια. Όσο αφορά το κέρδος από τις εφεδρείες, φαίνεται να μην ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο, ή τουλάχιστον δεν είναι απόλυτα προφανές. Όταν η μπαταρία συμμετέχει λιγότερο στην ενέργεια, οι εφεδρείες φαίνεται να ακριβαίνουν ενώ στο σημείο που συμμετέχει οριακά πλήρως η μπαταρία ($\pm 10\$$), οι εφεδρείες φαίνεται να είναι φθηνότερες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει, επίσης, το αντίστοιχο διάγραμμα που προκύπτει όταν οι θερμικές μονάδες προσφέρουν στο οριακό κόστος του (Σχήμα Γ.71).

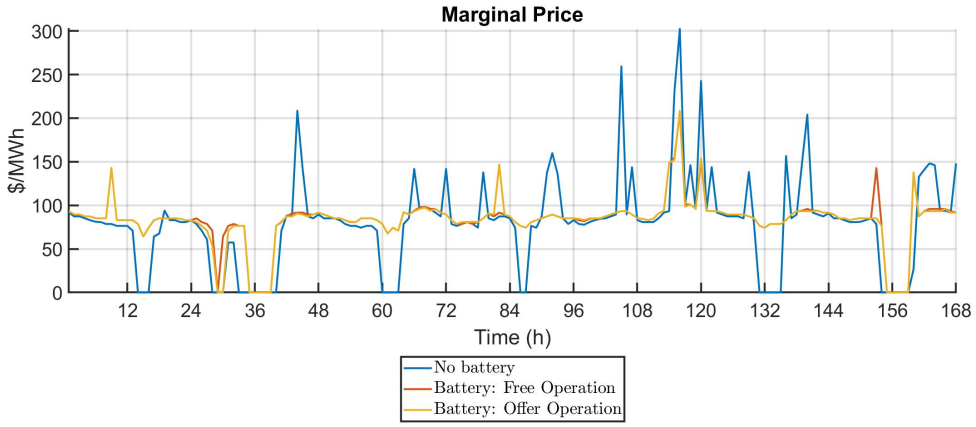
Όσο αφορά τη συνολική αγορά ενέργειας, αυτή φαίνεται να παραμένει σε παρόμοια επίπεδα ενώ στην αγορά εφεδρειών, αισθητή είναι η μείωση όταν η προσφορά της μπαταρίας είναι $\pm 10\$$. Το αντικειμενικό κόστος του συστήματος παρουσιάζει μία μικρή μείωση καθώς αυξάνεται η προσφορά της αποθήκευσης. Με άλλα λόγια, μία πιο αξιόπιστη ένταξη της αποθήκευσης οδηγεί στη μείωση του αντικειμενικού κόστους. Σαφώς μία μεγαλύτερη μπαταρία θα είχε ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση του αντικειμενικού κόστους. Το κέρδος των θερμικών μονάδων, ανά επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας, διαφοροποιείται κυρίως ως προς τις εφεδρείες και λίγο λιγότερο ως προς την ενέργεια. Η μεγαλύτερη τιμή του φαίνεται να είναι όταν η μπαταρία προσφέρει στα $\pm 2,5\$$.

5.4 Συγκριτικά διαγράμματα

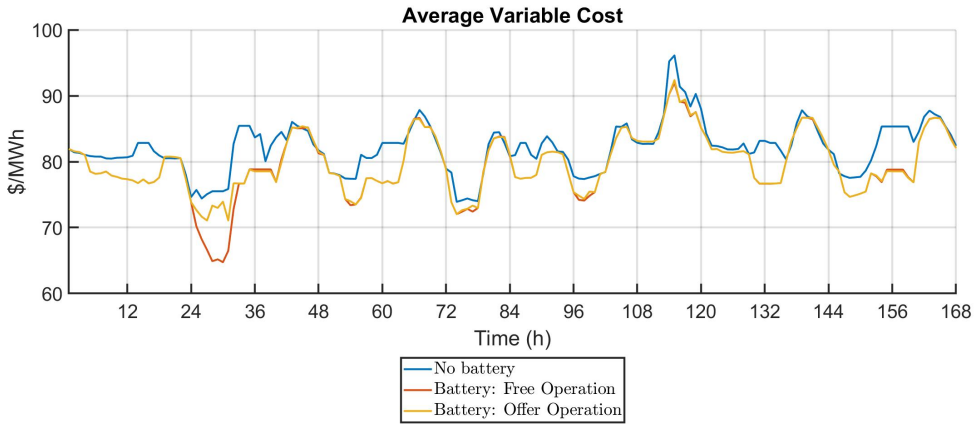
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται διάφορα συγκριτικά διαγράμματα. Στην πρώτη υποενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών ενέργειας και εφεδρειών για τις τρεις διαφορετικές επιλύσεις του συστήματος (χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση ελεύθερο στοιχείο και με αποθήκευση σε λειτουργία προσφοράς). Οι θερμικές μονάδες προσφέρουν στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους.

Στη δεύτερη υποενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν τις οριακές τιμές ενέργειας και εφεδρειών για τις τρεις επιλύσεις του συστήματος σε συνδυασμό με τον τρόπο που προσφέρουν οι μονάδες. Επίσης, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα κόστους συστήματος, κόστους αγοράς, κέρδους μπαταρίας και κέρδους θερμικών μονάδων.

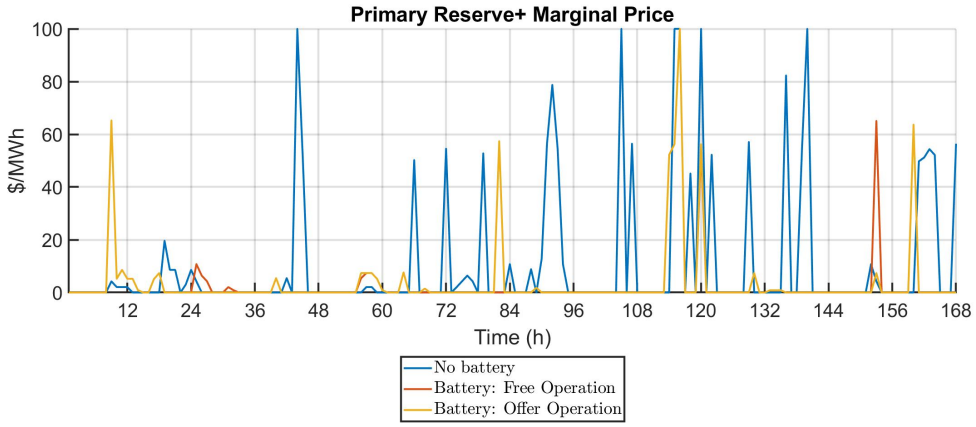
5.4.1 Συγκριτικά διαγράμματα για προσφορά θερμικών μονάδων στο μέγιστο



Σχήμα 5.36: Σύγκριση οριακών τιμών

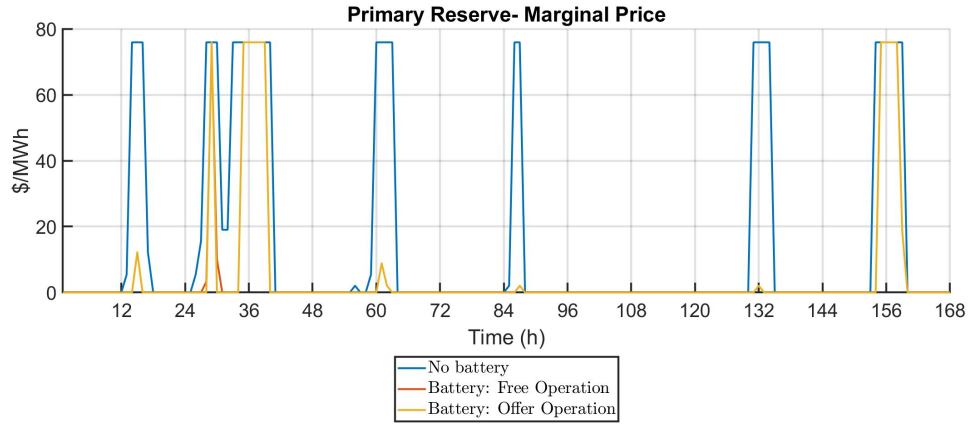


Σχήμα 5.37: Σύγκριση μέσου κόστους παραγωγής ενέργειας

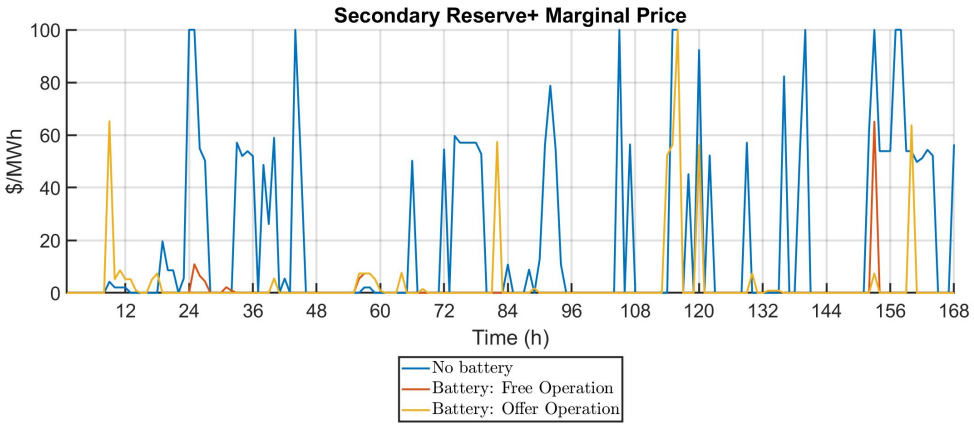


Σχήμα 5.38: Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας

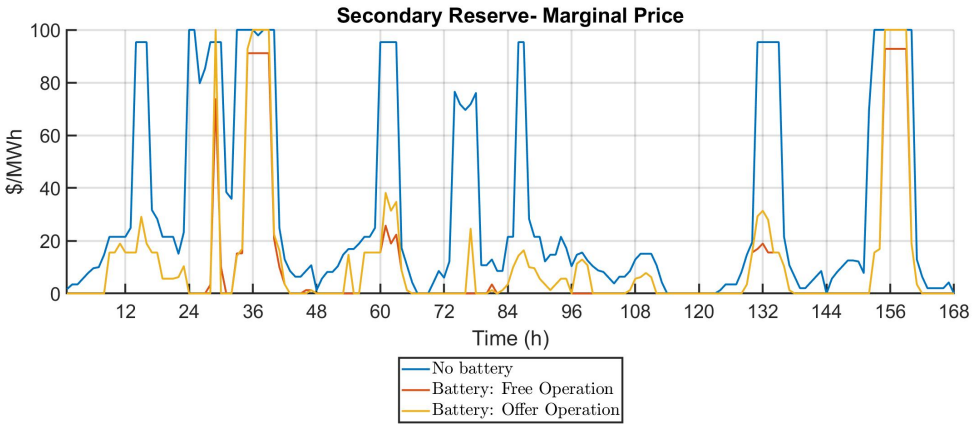
Όπως είναι αναμενόμενο, με την εισαγωγή της αποθήκευσης, η οριακή τιμή παρουσιάζει λιγότερες μηδενικές τιμές λόγω της μεγαλύτερης απορρόφησης των ΑΠΕ. Επιπροσθέτως, η αποθήκευση, εξομαλύνει την οριακή τιμή, περιορίζοντας τις απότομες μεταβολές της.



Σχήμα 5.39: Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας



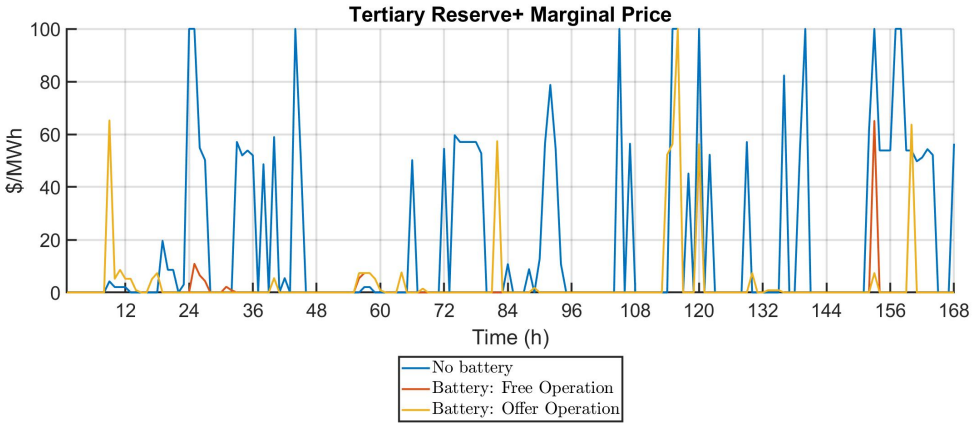
Σχήμα 5.40: Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας



Σχήμα 5.41: Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας

Ταυτόχρονα, το μέσο κόστος παραγωγής μειώνεται, καθώς η αποθήκευση συμβάλει στη μεγαλύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ. Το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ενέργειας παρατηρείται όταν η μπαταρία λειτουργεί ελεύθερα, αποτέλεσμα αναμενόμενο εφόσον ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αξιοποιεί την αποθήκευση με γνώμονα τη μείωση του αντικειμενικού κόστους.

Όσο αφορά τις οριακές τιμές των εφεδρειών, η αποθήκευση συμβάλει ως επί το πλείστον στη



Σχήμα 5.42: Σύγκριση οριακών τιμών τριτεύουσας θετικής εφεδρείας

μείωσή τους. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της αποθήκευσης σαν ελεύθερο στοιχείο, οι οριακές τιμές των εφεδρειών σχεδόν εξαλείφονται, αφού είναι μηδενικές τις περισσότερες ώρες της εβδομάδας. Στην περίπτωση της αποθήκευσης με λειτουργία προσφοράς οι οριακές τιμές των εφεδρειών κινούνται σε επίπεδα χαμηλότερα από τα αντίστοιχα όταν δεν υπάρχει αποθήκευση.

Στην πρωτεύουσα θετική εφεδρεία, η αποθήκευση σαν ελεύθερο στοιχείο συμβάλει αναμφίβολα στην κατακόρυφη μείωση της αντίστοιχης οριακής τιμής. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και στην πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία. Οι τιμές με αποθήκευση σε λειτουργία προσφοράς κινούνται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ είναι μερικές στιγμές υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν χωρίς αποθήκευση, λόγω διαφορετικής ένταξης μονάδων.

Στη δευτερεύουσα θετική εφεδρεία των ΜΣΚ και των γρήγορων μονάδων παρατηρείται ότι η συμπεριφορά είναι αντίστοιχη με αυτήν της πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας με τη μπαταρία να εξαλείφει ή να μειώνει κατακόρυφα τις τιμές. Οι τιμές της δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας παρουσιάζουν ναι μεν μείωση, η οποία όμως δεν είναι τόσο μεγάλη όσο αυτή των θετικών εφεδρειών. Αυτό συμβαίνει διότι η δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία παρέχεται κυρίως από τις ΜΣΚ και επειδή οι μονάδες προσφέρουν στο μέγιστο οριακού και μέσου μεταβλητού κόστους (σχήμα προσφοράς 1), ο αλγόριθμος προσπαθεί να κρατήσει σε χαμηλά επίπεδα παραγωγής τις ΜΣΚ λόγω των οικονομικότερων σε προσφορά μονάδων άνθρακα. Επομένως, η δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία δεν είναι σε περίσσεια, ακόμα και με την εισαγωγή αποθήκευσης.

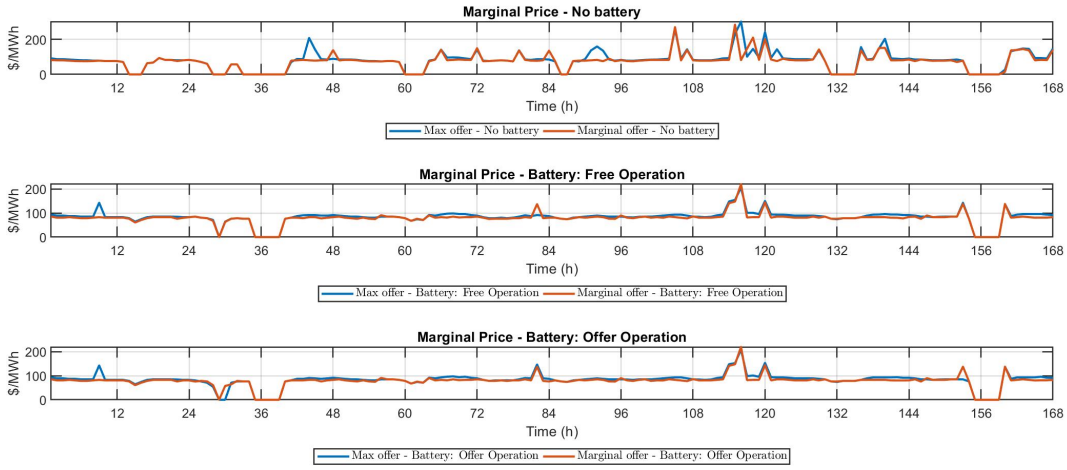
Παρόμοια συμπεριφορά με την δευτερεύουσα θετική εφεδρεία, εμφανίζει και η τριτεύουσα εφεδρεία, στο στρεφόμενο μέρος της οποίας μπορούν να συμβάλουν όλες οι ενταγμένες μονάδες και στο μη στρεφόμενο μόνο οι μονάδες αερίου και πετρελαίου. Στο μεγαλύτερο μέρος της, η τριτεύουσα εφεδρεία καλύπτεται από στρεφόμενες μονάδες άνθρακα. Το υπολειπόμενο μέρος της καλύπτεται είτε από στρεφόμενες ΜΣΚ, είτε από μη στρεφόμενες μονάδες αερίου είτε από αποθήκευση όταν υπάρχει. Όπως και στη δευτερεύουσα θετική εφεδρεία, η ύπαρξη αποθήκευσης αφήνει εκτός κάποιες ΜΣΚ, το ρόλο των οποίων αναλαμβάνει η αποθήκευση αλλά και οι μονάδες αερίου λόγω χαμηλότερου κόστους εκκίνησης.

5.4.2 Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τον τρόπο προσφοράς των μονάδων

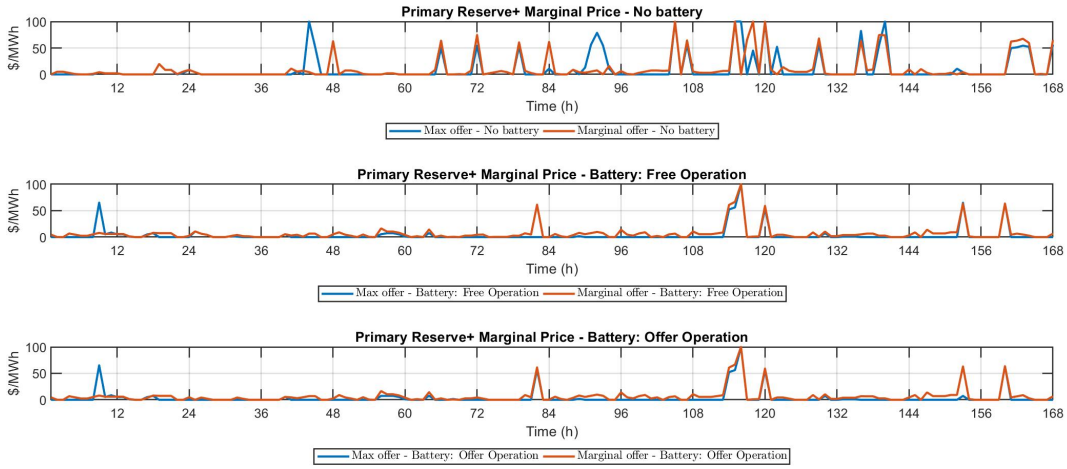
Τα επόμενα διαγράμματα αφορούν τη σύγκριση των οριακών τιμών ενέργειας και των οριακών τιμών κάθε εφεδρείας για τα δύο διαφορετικά σχήματα προσφοράς και για όλες τις

εξεταζόμενες περιπτώσεις, δηλαδή χωρίς μπαταρία, με μπαταρία σαν ελεύθερο στοιχείο και με μπαταρία σε λειτουργία προσφοράς.

5.4.2.1 Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών



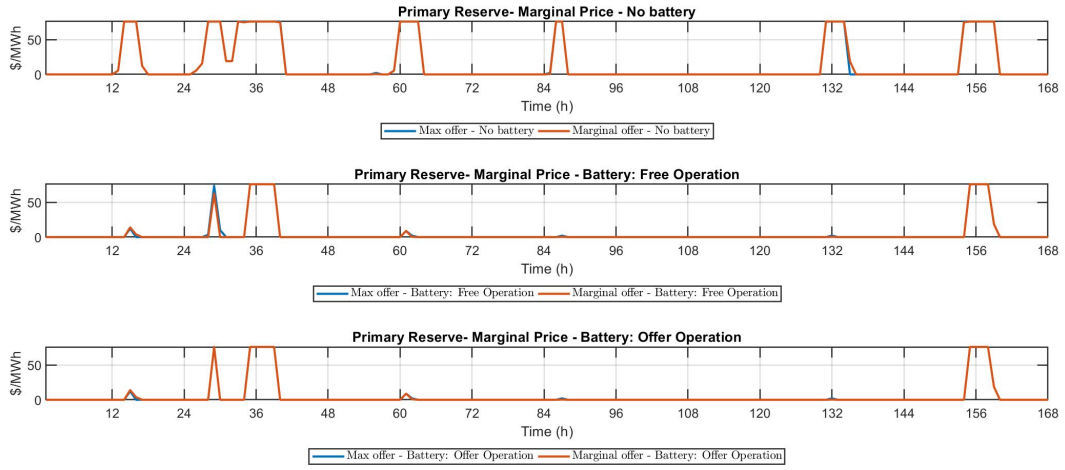
Σχήμα 5.43: Σύγκριση οριακών τιμών ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων



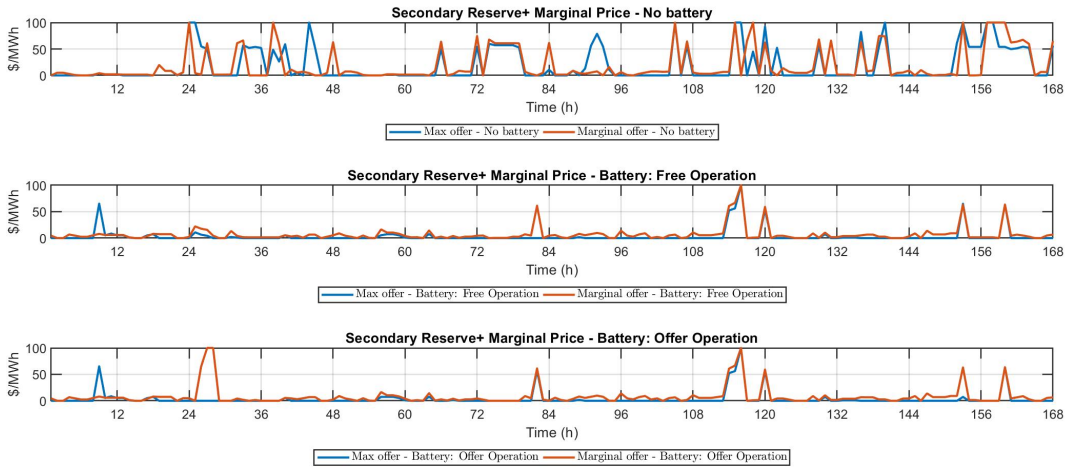
Σχήμα 5.44: Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, οι οριακές τιμές που προκύπτουν από την προσφορά στο μέγιστο του οριακού και του μέσου μεταβλητού κόστους (σχήμα προσφοράς 1) σε σχέση με την προσφορά στο οριακό κόστος (σχήμα προσφοράς 2) είναι υψηλότερες. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς στο σχήμα προσφοράς 1, οι ΜΣΚ προσφέρουν ακριβότερα, οπότε αυξάνουν τις οριακές τιμές, όταν μία από αυτές τις μονάδες είναι η τελευταία που προσφέρει ενέργεια. Στο σχήμα προσφοράς 2, οι προσφορές των ΜΣΚ κινούνται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά των προσφορών των μονάδων του άνθρακα.

Όσο αφορά την πρωτεύουσα εφεδρεία, η συμπεριφορά του συστήματος είναι αρκετά παρόμοια στην περίπτωση της ύπαρξης της αποθήκευσης. Μία διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διαφορετικών σχημάτων προσφοράς παρατηρείται στην πρωτεύουσα θετική εφεδρεία, όταν δεν υπάρχει μπαταρία. Σε αυτήν την περίπτωση, φαίνεται ότι κάποιες ώρες το σχήμα



Σχήμα 5.45: Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

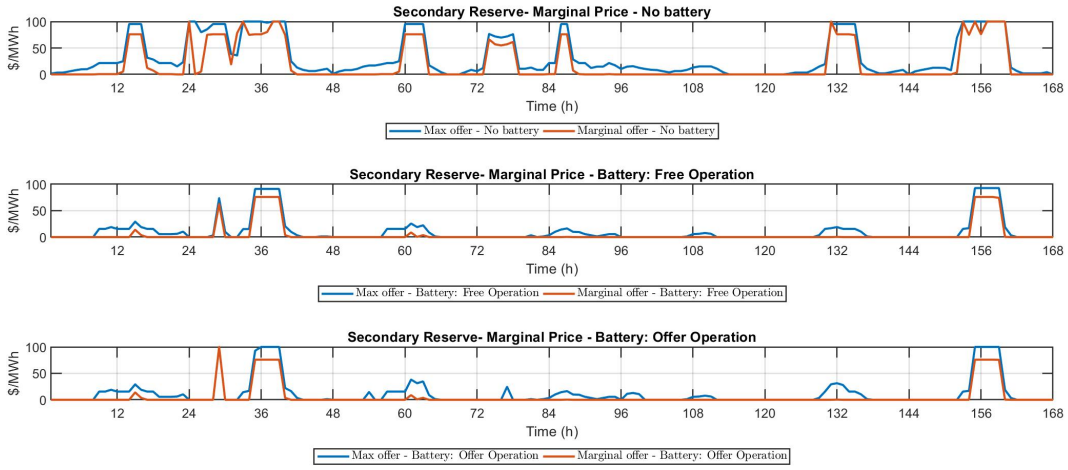


Σχήμα 5.46: Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

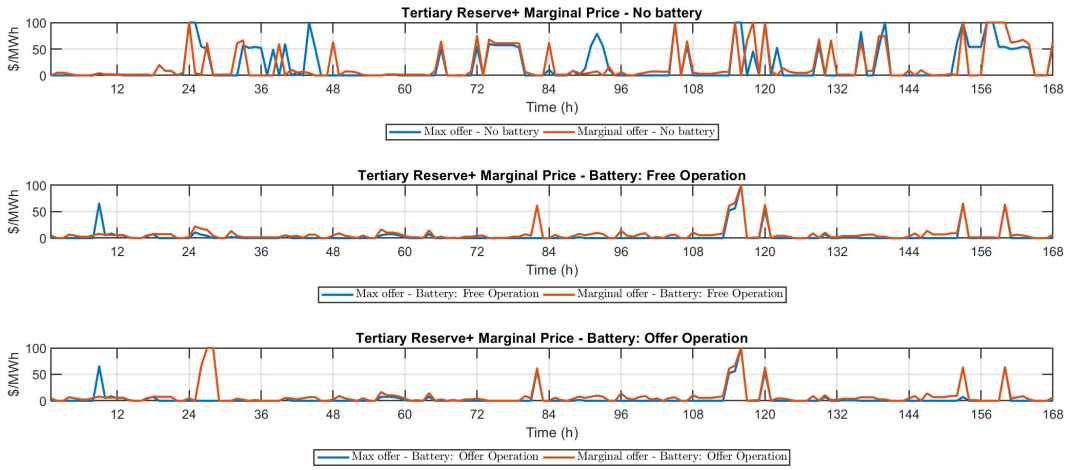
προσφοράς 2 οδηγεί σε λίγο αυξημένες τιμές σε σχέση με το σχήμα προσφοράς 1. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική ένταξη μονάδων που προκύπτει από τα δύο διαφορετικά σχήματα προσφοράς.

Επιπλέον, η εισαγωγή της αποθήκευσης οδηγεί σε παρόμοια συμπεριφορά του συστήματος τόσο για τη δευτερεύουσα εφεδρεία όσο και για την τριτεύουσα. Η δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία, όταν δεν υπάρχει αποθήκευση, φαίνεται ότι είναι λίγο ακριβότερη στο σχήμα προσφοράς 1 και αυτό οφείλεται, όπως εξηγείται και σε προηγούμενη ενότητα, στη χαμηλότερη ένταξη των ΜΣΚ.

Γενικότερα, στο παρόν σύστημα, όταν δεν υπάρχει αποθήκευση, οι θετικές εφεδρείες είναι ίσως λίγο ακριβότερες στο σχήμα προσφοράς 2, ενώ οι αρνητικές εφεδρείες είναι ακριβότερες στο σχήμα προσφοράς 1.

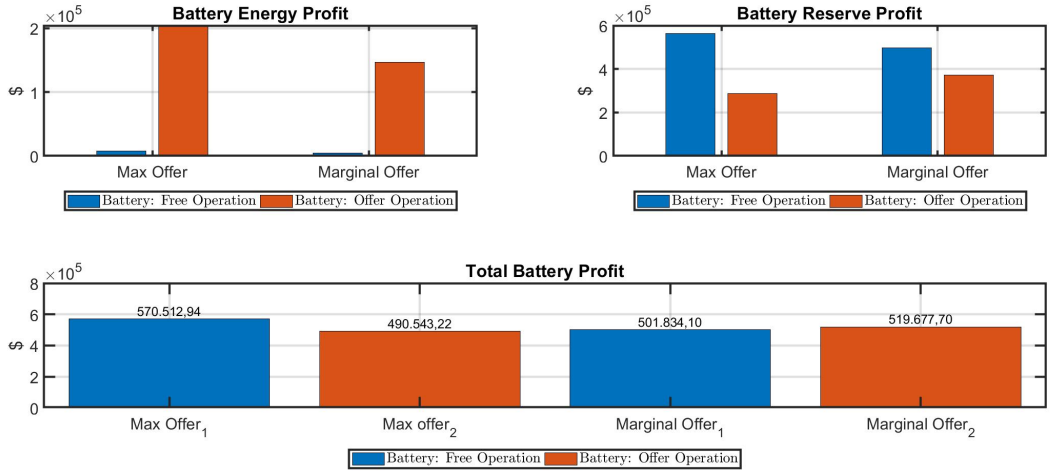


Σχήμα 5.47: Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

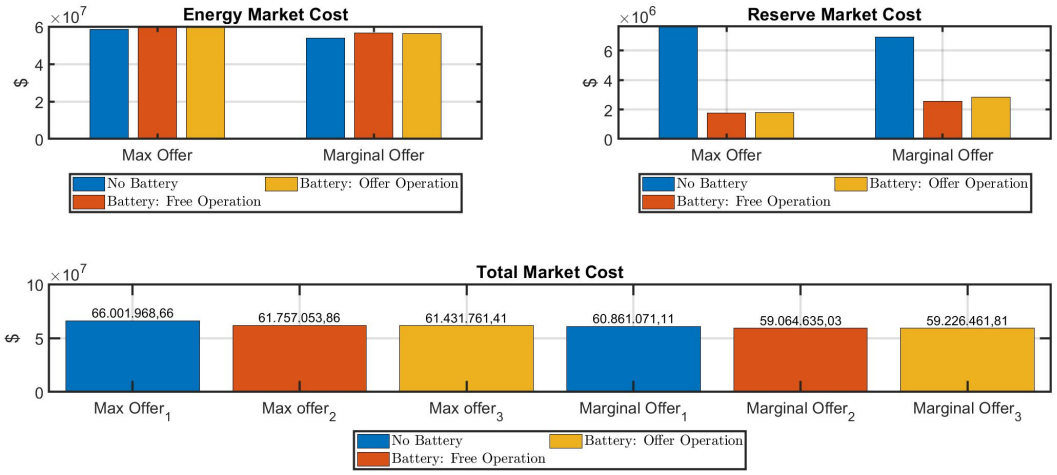


Σχήμα 5.48: Σύγκριση οριακών τιμών τριτεύουσας θετικής εφεδρείας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

5.4.2.2 Συγκριτικά διαγράμματα κέρδους και κόστους



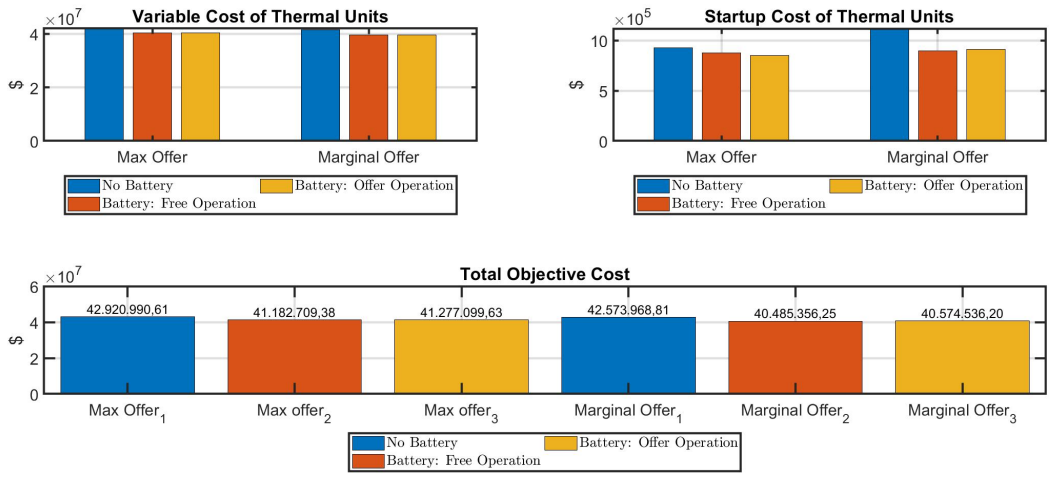
Σχήμα 5.49: Σύγκριση κέρδους μπαταρίας ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων



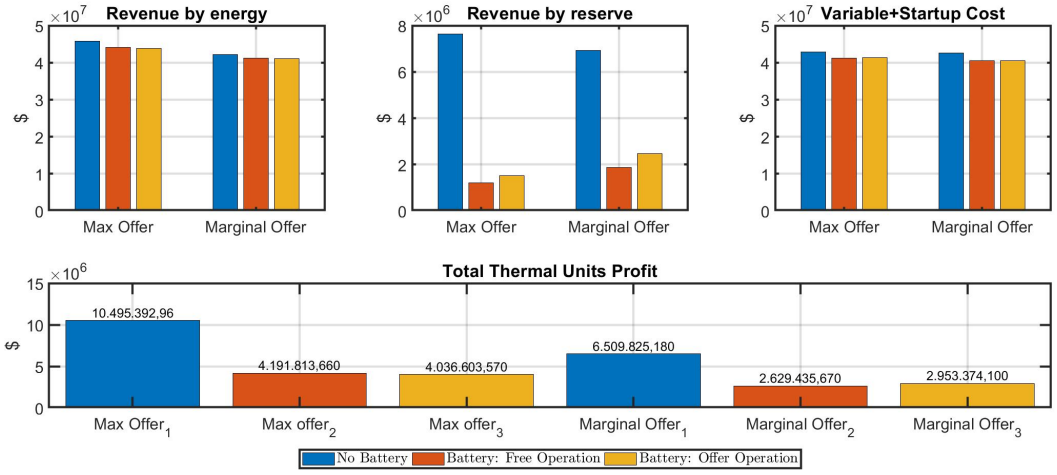
Σχήμα 5.50: Σύγκριση αγοραίου κόστους ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

Το εβδομαδιαίο κέρδος της μπαταρίας (Σχήμα 5.49) είναι μέγιστο για την περίπτωση της ελεύθερης λειτουργίας και του πρώτου σχήματος προσφοράς. Η αποθήκευση στην ελεύθερη λειτουργία της, αν και παρουσιάζει μικρό κέρδος από το αρμπιτράζ, εξασφαλίζει ικανοποιητικό κέρδος από την παροχή εφεδρειών. Η λειτουργία προσφοράς αποφέρει έσοδα μειωμένα κατά 80 χιλιάδες σε σχέση με την ελεύθερη λειτουργία. Αξιοσημείωτο είναι το κέρδος της μπαταρίας για το σχήμα προσφοράς 2 (των θερμικών μονάδων) σε συνδυασμό με τη λειτουργία προσφοράς της μπαταρίας, το οποίο είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο για το πρώτο σχήμα προσφοράς, εξαιτίας της μεγαλύτερης συμμετοχής στις εφεδρείες. Ακόμα, στο σχήμα προσφοράς 2 (των θερμικών μονάδων - marginal offer), η μπαταρία σε λειτουργία προσφοράς εξασφαλίζει μεγαλύτερο κέρδος από αυτό της ελεύθερης λειτουργίας.

Στα αγοραία κόστη (Σχήμα 5.50), η απουσία μπαταρίας οδηγεί σε μεγαλύτερο μέγεθος αγοράς κατά το σχήμα προσφοράς 1. Επίσης, η εισαγωγή της αποθήκευσης αυξάνει το μέγεθος της αγοράς ενέργειας αλλά μειώνει κατά πολύ το μέγεθος της αγοράς εφεδρειών. Η συνολική αγορά είναι πάντα μεγαλύτερη στο σχήμα προσφοράς 1 για κάθε αντίστοιχο τρόπο λειτουργίας της μπαταρίας. Σε αυτό το σημείο, προκειμένου να μη δημιουργηθεί



Σχήμα 5.51: Σύγκριση αντικειμενικού κόστους συστήματος ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων



Σχήμα 5.52: Σύγκριση κέρδους θερμικών μονάδων ανά τρόπο προσφοράς θερμικών μονάδων

σύγχυση, πρέπει να τονιστεί ότι η βελτιστοποίηση γίνεται ως προς το **αντικειμενικό κόστος** και όχι ως προς τη συνολική αγορά.

Το αντικειμενικό κόστος του συστήματος (Σχήμα 5.51) είναι περίπου το ίδιο για κάθε μία από τα αντίστοιχες προσομοιώσεις για τα δύο σχήματα προσφοράς. Όπως είναι αναμενόμενο και για τα δύο σχήματα προσφοράς, το αντικειμενικό κόστος είναι υψηλότερο στην περίπτωση της μη ύπαρξης αποθήκευσης. Το χαμηλότερο αντικειμενικό κόστος εύλογα παρατηρείται όταν η μπαταρία λειτουργεί σαν ελεύθερο στοιχείο (cost optimal). Η μπαταρία σε λειτουργία προσφοράς οδηγεί σε λίγο αυξημένο αντικειμενικό κόστος σε σχέση με την ελεύθερη λειτουργία.

Το κέρδος των θερμικών μονάδων είναι μεγαλύτερο όταν δεν υπάρχει η αποθήκευση. Με την εισαγωγή της αποθήκευσης, το κέρδος των θερμικών μονάδων μειώνεται αρκετά, εξαιτίας της καλύτερης αξιοποίησης των ΑΠΕ και της πτώσης των τιμών των εφεδρειών. Προφανώς, μεγάλη σημασία παίζει και το σχήμα προσφοράς των θερμικών μονάδων, με το σχήμα προσφοράς 1 (max) να οδηγεί σε αρκετά μεγαλύτερο κέρδος σε σύγκριση με το σχήμα προσφοράς 2 (marginal).

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η αποθήκευση δύναται να αποτελέσει το νέο στοιχείο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο θα πρέπει να αξιοποιεί την πολυχρηστικότητά της. Η αποθήκευση συμβάλει αποτελεσματικά στην καλύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, αυξάνοντας τη διείσδυση και μειώνοντας τις περικοπές. Τις ώρες που το σύστημα αδυνατεί να απορροφήσει ΑΠΕ, λόγω απαίτησης εφεδρειών και άλλων τεχνικών περιορισμών, η αποθήκευση έχει τη δυνατότητα να αντλήσει με φθηνό κόστος ενέργεια, η οποία άλλοτε θα περικοπτόταν, και να την προσφέρει πίσω στο σύστημα την ώρα της αιχμής (αρμπιτράζ). Ταυτόχρονα, συμβάλει στην παροχή κάθε είδους εφεδρείας, αντικαθιστώντας την κοστοβόρα λειτουργία διάφορων μονάδων αερίου και πετρελαίου.

Το κέρδος της αποθήκευσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το επίπεδο της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Σε ένα σύστημα με χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ, η αποθήκευση δεν έχει αρκετά περιθώρια δραστηριοποίησης, καθώς τον κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση της οριακής τιμής παίζουν οι θερμικές μονάδες. Όσο η διείσδυση ΑΠΕ αυξάνεται, οι οριακές τιμές την ώρα της κοιλάδας του φορτίου εμφανίζουν πτώση ή ακόμα, γίνονται και μηδενικές, εξαιτίας της ύπαρξης πλεονάσματος ενέργειας και η αποθήκευση έχει τη δυνατότητα να δραστηριοποιηθεί αντλώντας ενέργεια αυτές τις ώρες. Η ενέργεια αυτή, μπορεί μετέπειτα να πουληθεί την ώρα της αιχμής, σε μια πιο υψηλή τιμή και με αυτόν τον τρόπο να προκύψει κέρδος. Όπως επίσης, σημαντικό κέρδος προκύπτει και από την παροχή εφεδρειών, ειδικά τις ώρες υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, κατά τις οποίες το σύστημα έχει λιγότερες ενταγμένες θερμικές μονάδες και αναζητά εφεδρεία αποζημιώνοντας σε υψηλότερες τιμές.

Για την αποθήκευση, φαίνεται ότι η ελεύθερη λειτουργία της αποφέρει λίγο μεγαλύτερο κέρδος σε σχέση με τη λειτουργία προσφοράς. Πράγματι, η τακτική παροχής εφεδρειών τις ώρες υψηλής διείσδυσης και περικοπών ΑΠΕ, φαίνεται να είναι λίγο περισσότερο προσοδοφόρα σε σχέση με την αγορά ενέργειας εκείνες τις ώρες. Ωστόσο, αποτελεί επιλογή μεγαλύτερου ρίσκου, καθώς η ακαθόριστη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας μπορεί δυνητικά να αποβεί αρκετά ζημιογόνα, ενώ η μπαταρία μπορεί να μην είναι σε θέση πάντα να παρέχει τις εφεδρείες λόγω εξάντλησης του αποθέματος ενέργειας προοριζόμενου για εφεδρείες.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί έναν τομέα, ο οποίος αναμένεται να έχει εξέλιξη στο επόμενο διάστημα. Η θεωρητική μελέτη ενός συστήματος με αποθήκευση,

ο καθορισμός του ρόλου της και των δυνατοτήτων αξιοποίησής της αλλά και οι μέθοδοι αποζημίωσής της πρόκειται να αποτελέσουν αντικείμενα έρευνας και να απασχολήσουν την αρμόδια επιστημονική κοινότητα. Κάποιες πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις του θέματος είναι οι εξής:

- Επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης κέρδους αποθήκευσης και ελαχιστοποίηση κόστους συστήματος σε ένα ενιαίο διεπίπεδο πρόβλημα.
- Κατάστρωση κλιμακούμενης προσφοράς αποθήκευσης (αντί ενιαίας) με μεταβλητό μήκος διαστημάτων ενέργειας.
- Εισαγωγή περιορισμών δικτύου, δηλαδή γραμμών μεταφοράς και ζυγών, οι οποίοι εισάγουν την έννοια της τοπικής οριακής τιμής. Επιλογή κατάλληλων σημείων δικτύου για εγκατάσταση αποθηκευτικών σταθμών.
- Μοντελοποίηση και εισαγωγή διασυνδέσεων δικτύου με άλλα δίκτυα.
- Μοντελοποίηση της υποβάθμισης της μπαταρίας.
- Εφαρμογή θεωρίας παιγνίων και ανάπτυξη στρατηγικής προσφοράς των συμμετεχόντων στην αγορά ενέργειας.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Ονοματολογία

Παρακάτω εξηγούνται αναλυτικά οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Α.1 Σύνολα

j	Θερμικές μονάδες παραγωγής
t	Χρόνος σε συνεχόμενες ώρες
n	Διαστήματα (blocks) γραμμικοποίσης κόστους παραγωγής θερμικής μονάδας
s	Αποθηκευτικοί σταθμοί
w	Αιολικά
pv	Φωτοβολταϊκά

Α.2 Δυαδικές Μεταβλητές

Θερμικές Μονάδες

$st(j,t)$	Δυαδική μεταβλητή που είναι ίση με 1 όταν η μονάδα j είναι σε λειτουργία και παράγει ισχύ κατά τη διάρκεια της ώρας t
$su(j,t)$	Δυαδική μεταβλητή που είναι ίση με 1 όταν η μονάδα j εκκινείται στην αρχή της ώρας t
$sd(j,t)$	Δυαδική μεταβλητή που είναι ίση με 1 όταν η μονάδα j σβήνει στην αρχή της ώρας t

Αποθήκευση

$st^d_\xi(s,t)$	Δυαδική μεταβλητή που είναι ίση με 1 όταν η αποθηκευτική μονάδα s βρίσκεται σε λειτουργία εκφόρτισης κατά τη διάρκεια της ώρας t
$st^c_\xi(s,t)$	Δυαδική μεταβλητή που είναι ίση με 1 όταν η αποθηκευτική μονάδα s βρίσκεται σε λειτουργία φόρτισης κατά τη διάρκεια της ώρας t

Εφεδρεία

$ns(j,t)$	Δυαδική μεταβλητή που είναι ίση με 1 όταν η μονάδα j δύναται να παρέχει τριτεύουσα μη στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα t

Α.3 Συνεχείς Μεταβλητές

Θερμικές Μονάδες

$C_p(j,t)$	Κόστος παραγωγής της θερμικής μονάδας j κατά την ώρα t
$C_{sd}(j)$	Κόστος σβέσης της θερμικής μονάδας j
$C_{su}(j)$	Κόστος εκκίνησης της θερμικής μονάδας j
$C_{sl}(t)$	Κόστος χαλάρωσης κατά την ώρα t
$P_u(j,t)$	Παραγόμενη ισχύς της θερμικής μονάδας j την ώρα t
$P_{tmin}(j)$	Τεχνικό ελάχιστο της θερμικής μονάδας j
$P_n(j)$	Ονομαστική ισχύς της μονάδας j
$P_{min}(j,t)$	Ελάχιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς της μονάδας j την ώρα t
$P_{max}(j,t)$	Μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς της μονάδας j την ώρα t
$P_{ens}(t)$	Μη εξυπηρετούμενη ισχύς την ώρα t
$RD(j)$	Μέγιστη δυνατή προς τα κάτω ρύθμιση παραγόμενης ισχύος της μονάδας j
$RU(j)$	Μέγιστη δυνατή προς τα πάνω ρύθμιση παραγόμενης ισχύος της μονάδας j
$DT(j)$	Ελάχιστες ώρες στάσης της μονάδας j
$UT(j)$	Ελάχιστες ώρες λειτουργίας της μονάδας j

Αποθήκευση

$P_\xi^d(s,t)$	Ισχύς εκφόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s κατά την ώρα t
$P_\xi^c(s,t)$	Ισχύς φόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s κατά την ώρα t
$P_{\xi,max}^d(s)$	Μέγιστη ισχύς εκφόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s
$P_{\xi,max}^c(s)$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s
$\eta_\xi^d(s)$	Βαθμός απόδοσης εκφόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s
$\eta_\xi^c(s)$	Βαθμός απόδοσης φόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s
$SoC(s,t)$	Επίπεδο φόρτισης της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t
$E_{\xi,max}(s)$	Μέγιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια της αποθηκευτικής μονάδας s
$E_{\xi,min}(s)$	Ελάχιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια της αποθηκευτικής μονάδας s

Ανανεώσιμες Πηγές

$P_w(w,t)$	Παραγόμενη ισχύς του αιολικού w την ώρα t
$P_{pv}(pv,t)$	Παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού pv την ώρα t
$A_w(w,t)$	Διαθέσιμη ισχύς του αιολικού w την ώρα t
$A_{pv}(pv,t)$	Διαθέσιμη ισχύς του φωτοβολταϊκού pv την ώρα t

Εφεδρεία

$pr1(j,t)$	Ισχύς τηρούμενης πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας της μονάδας j την ώρα t

$pr2(j,t)$	Ισχύς τηρούμενης πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας της μονάδας j την ώρα t
$prs1(s,t)$	Ισχύς τηρούμενης θετικής εφεδρείας της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t
$prs2(s,t)$	Ισχύς τηρούμενης αρνητικής εφεδρείας της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t
$r1(t)$	Απαίτηση πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας την ώρα t
$r2(t)$	Απαίτηση πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας την ώρα t
$sr1(j,t)$	Ισχύς τηρούμενης δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας της μονάδας j την ώρα t
$sr2(j,t)$	Ισχύς τηρούμενης δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας της μονάδας j την ώρα t
$srs1(s,t)$	Ισχύς τηρούμενης δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t
$srs2(s,t)$	Ισχύς τηρούμενης δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t
$s1(t)$	Απαίτηση δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας την ώρα t
$s2(t)$	Απαίτηση δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας την ώρα t
$tr1(j,t)$	Ισχύς τηρούμενης τριτεύουσας θετικής στρεφόμενης εφεδρείας της μονάδας j την ώρα t
$trns1(j,t)$	Ισχύς τηρούμενης τριτεύουσας θετικής μη στρεφόμενης εφεδρείας της μονάδας j την ώρα t
$trs1(s,t)$	Ισχύς τηρούμενης τριτεύουσας θετικής εφεδρείας της αποθηκευτικής μονάδας s την ώρα t
$t1$	Απαίτηση τριτεύουσας θετικής εφεδρείας (στρεφόμενης και μη στρεφόμενης συνολικά)
$px1(t)$	Μη εξυπηρετούμενη πρωτεύουσα θετική εφεδρεία την ώρα t
$px2(t)$	Μη εξυπηρετούμενη πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία την ώρα t
$sx1(t)$	Μη εξυπηρετούμενη δευτερεύουσα θετική εφεδρεία την ώρα t
$sx2(t)$	Μη εξυπηρετούμενη δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία την ώρα t
$tx1(t)$	Μη εξυπηρετούμενη τριτεύουσα θετική εφεδρεία την ώρα t
$mpr1(j,t)$	Μέγιστη ισχύς τηρούμενης πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας της μονάδας j
$mpr2(j,t)$	Μέγιστη ισχύς τηρούμενης πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας της μονάδας j
$msr1(j,t)$	Μέγιστη ισχύς τηρούμενης δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας της μονάδας j
$msr2(j,t)$	Μέγιστη ισχύς τηρούμενης δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας της μονάδας j
$mtr1(j,t)$	Μέγιστη ισχύς τηρούμενης τριτεύουσας θετικής εφεδρείας της μονάδας j

Παράρτημα Β

Θερμικές Μονάδες

Στην παρούσα εργασία εισάγονται συνολικά 44 θερμικές μονάδες οι οποίες διακρίνονται στους εξής τύπους:

- 10 μονάδες άνθρακα
- 7 μονάδες συνδυασμένου κύκλου (ΜΣΚ)
- 14 μονάδες αερίου
- 13 μονάδες πετρελαίου

Οι μονάδες άνθρακα αποτελούν τις μονάδες βάσης του συστήματος και από αυτές προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής παραγωγής. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου εντάσσονται περισσότερο για λόγους εφεδρειών και λιγότερο για λόγους ενέργειας. Οι μονάδες αερίου και πετρελαίου αποτελούν τις γρήγορες μονάδες του συστήματος και χρησιμοποιούνται για την κάλυψη της αιχμής ή για παροχή εφεδρείας.

Για κάθε μονάδα λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη δυνατή παραγωγή της, το τεχνικό της ελάχιστο, οι ράμπες ανόδου και καθόδου, ο ελάχιστος χρόνος στάσης μετά από σβέση και ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας μετά από εκκίνηση. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη οι καμπύλες κόστους και τα κόστη εκκίνησης.

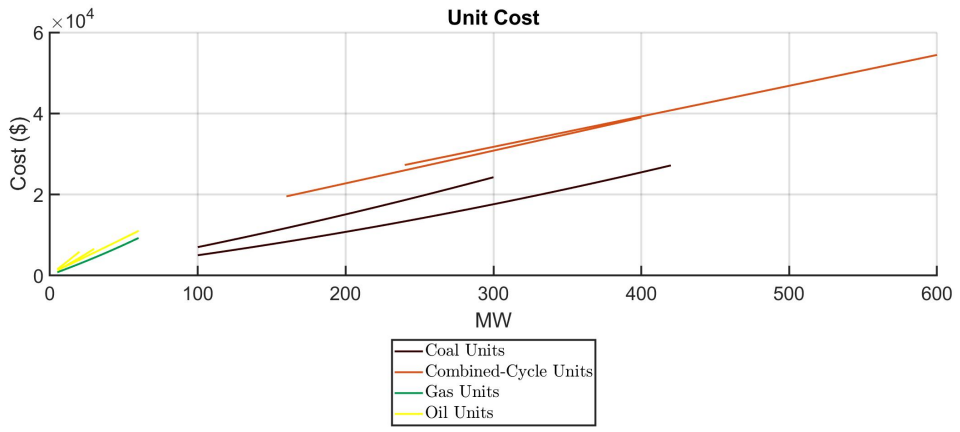
Β.1 Κόστος εκκίνησης μονάδων

Πίνακας Β.1: Κόστος εκκίνησης ανά τύπο μονάδας

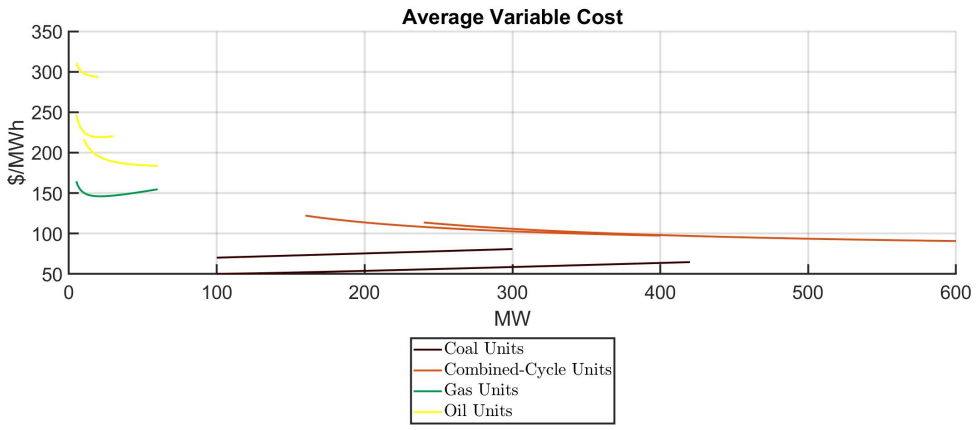
Τύπος μονάδας	Κόστος εκκίνησης ($)
Άνθρακας	80.000
Συνδυασμένος Κύκλος	25.000
Αέριο	2.500
Πετρέλαιο	2.500

Β.2 Μεταβλητό κόστος μονάδων

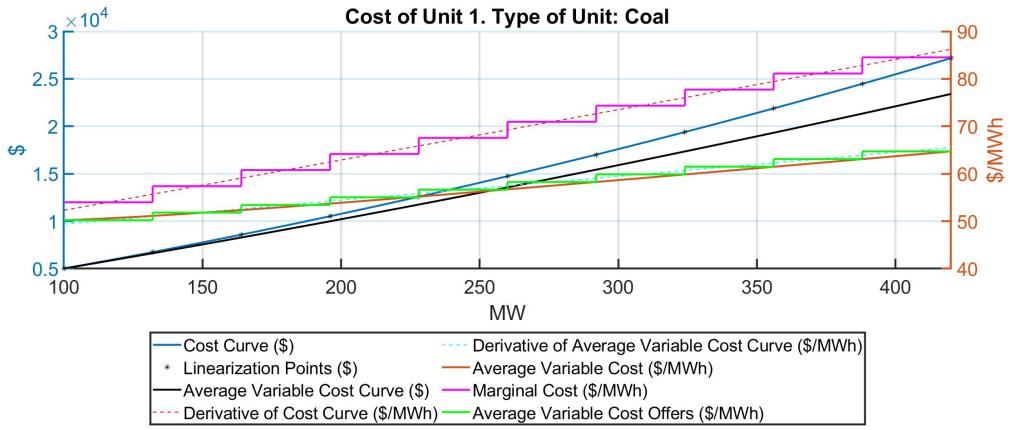
Στο Σχήμα Β.1 αποτυπώνονται οι καμπύλες κόστους όλων των μονάδων που εισάγονται στο σύστημα. Οι μονάδες άνθρακα είναι οι φθηνότερες και για αυτό το λόγο αποτελούν τις μονάδες βάσης, δηλαδή τις κύριες και μόνιμα ενταγμένες μονάδες θερμικής παραγωγής. Τόσο οι ΜΣΚ όσο και οι μονάδες αερίου και πετρελαίου είναι ακριβότερες και εντάσσονται για λόγους αιχμής και εφεδρειών.



Σχήμα Β.1: Μεταβλητό κόστος μονάδων



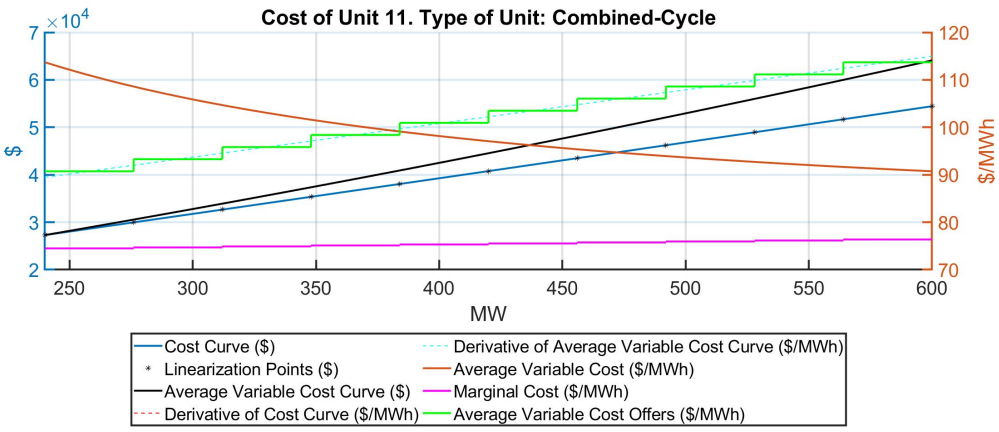
Σχήμα Β.2: Μέσο μεταβλητό κόστος μονάδων



Σχήμα Β.3: Ανάλυση κόστους μονάδας 1 (άνθρακας)

Στο Σχήμα Β.2 αποτυπώνεται το μέσο μεταβλητό κόστος των μονάδων, δηλαδή το κόστος στο Σχήμα Β.1 διαιρούμενο με την αντίστοιχη ισχύ.

Στο Σχήμα Β.3 γίνεται ανάλυση του κόστους της μονάδας 1, η οποία είναι ανθρακική. Τα ροζ σκαλοπάτια είναι το αποτέλεσμα της γραμμικοποίησης της καμπύλης κόστους της μονάδας, ενώ τα πράσινα σκαλοπάτια είναι η κλιμακούμενη προσφορά που δομείται με βάση



Σχήμα Β.4: Ανάλυση κόστους μονάδας 11 (ΣΚ)

το μέσο μεταβλητό κόστος. Η συγκεκριμένη μονάδα προσφέρει κάθε φορά στο οριακό της κόστος (ροζ σκαλοπάτια), εφόσον είναι υψηλότερο από το μέσο μεταβλητό (πράσινα σκαλοπάτια).

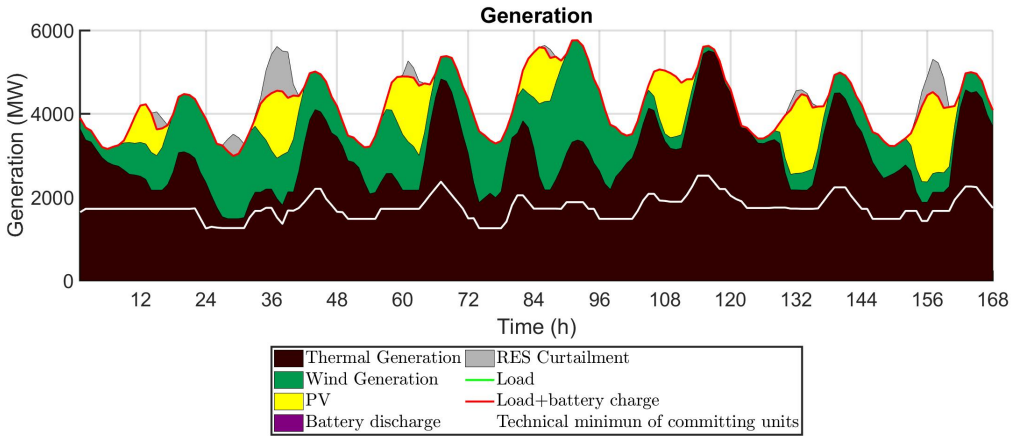
Όμως, η μονάδα 11 (ΣΚ) στο Σχήμα Β.4 έχει υψηλότερο μέσο μεταβλητό κόστος (πράσινα σκαλοπάτια). Επομένως, όταν αναφέρεται ότι οι μονάδες προσφέρουν στο μέγιστο οριακού και μέσου μεταβλητού κόστους (**σχήμα προσφοράς 1**), εννοείται ότι η μονάδα θα προσφέρει, σε αυτήν την περίπτωση, στην πράσινη καμπύλη και όχι στη ροζ. Όταν αναφέρεται ότι οι μονάδες προσφέρουν στο οριακό τους κόστος (**σχήμα προσφοράς 2**), τότε όλες οι μονάδες προσφέρουν στις αντίστοιχες ροζ καμπύλες, που είναι το αποτέλεσμα της γραμμικοποίησης του μεταβλητού κόστους.

Παράρτημα Γ

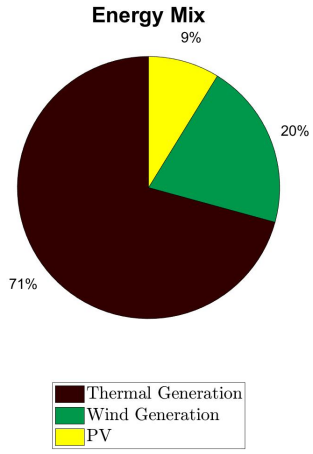
Προσφορά στο οριακό κόστος

Σε αυτό το παράρτημα δίνονται όλα τα διαγράμματα των προσομοιώσεων για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και προσφορά των θερμικών μονάδων στο οριακό τους κόστος.

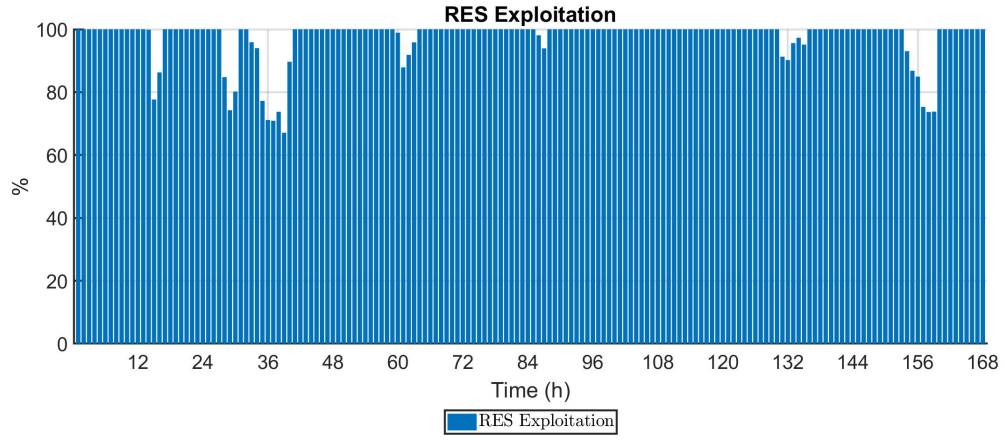
Γ.1 Χωρίς αποθήκευση



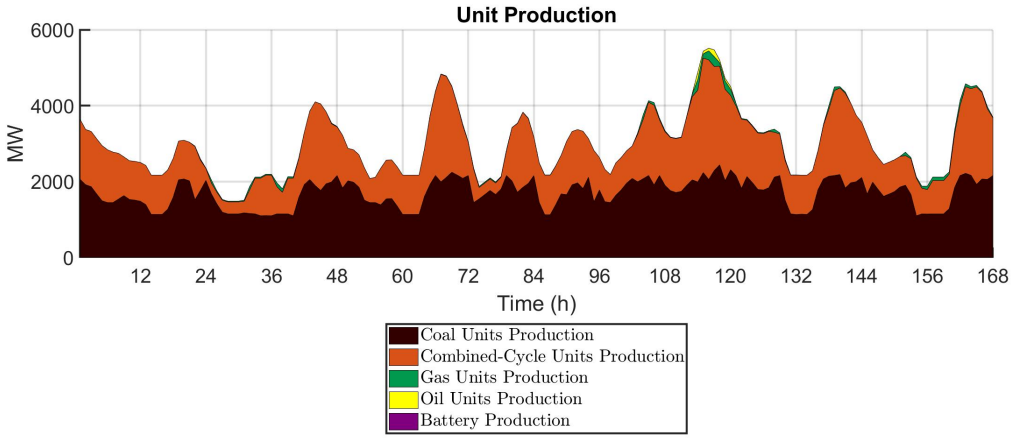
Σχήμα Γ.1: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο



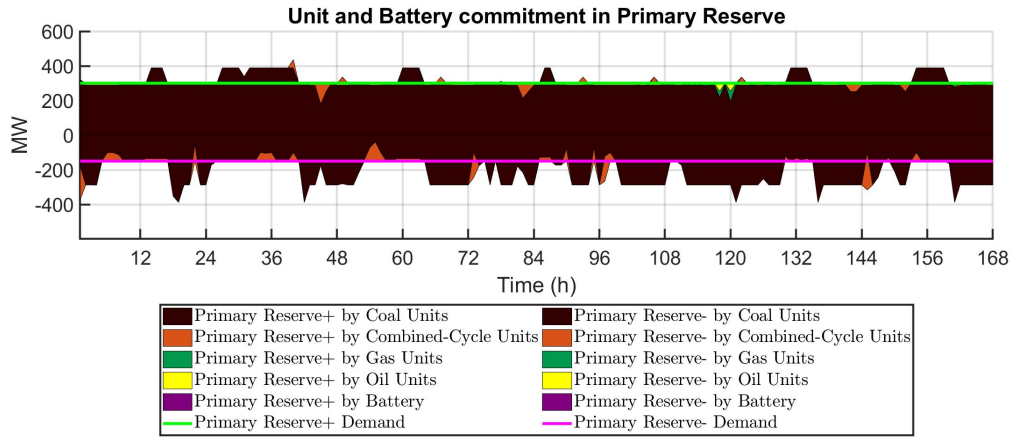
Σχήμα Γ.2: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα



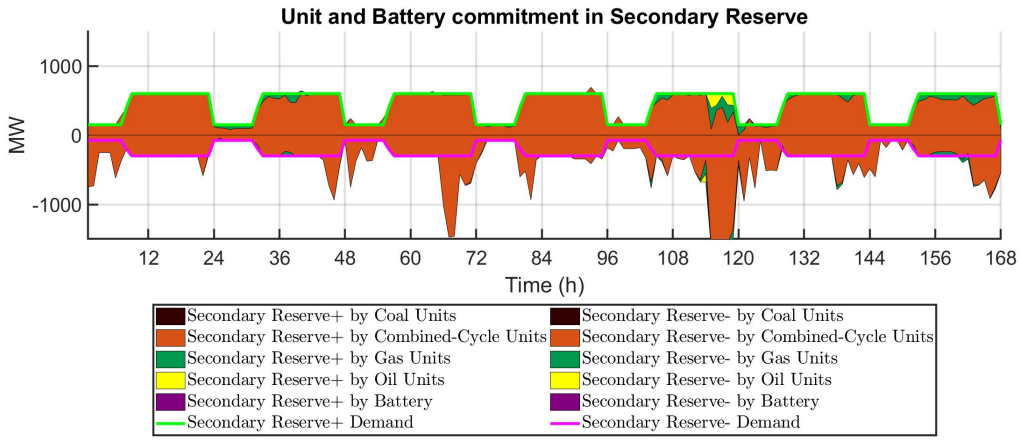
Σχήμα Γ.3: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ



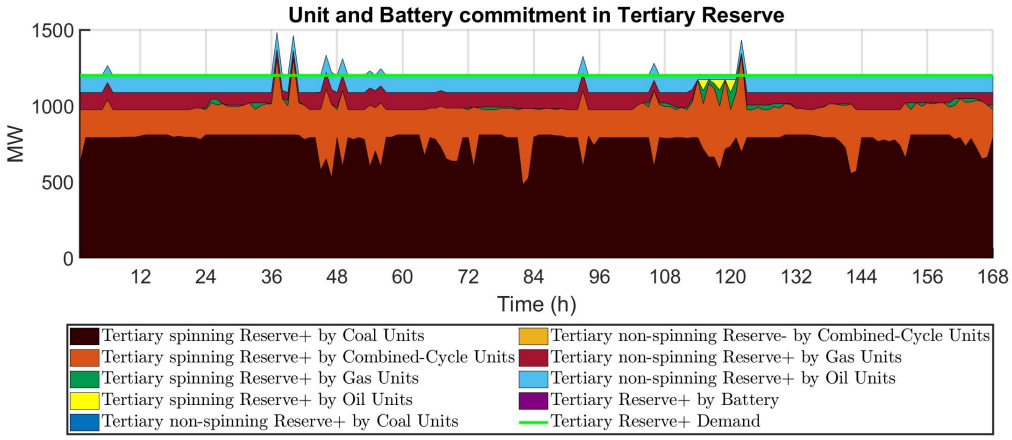
Σχήμα Γ.4: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



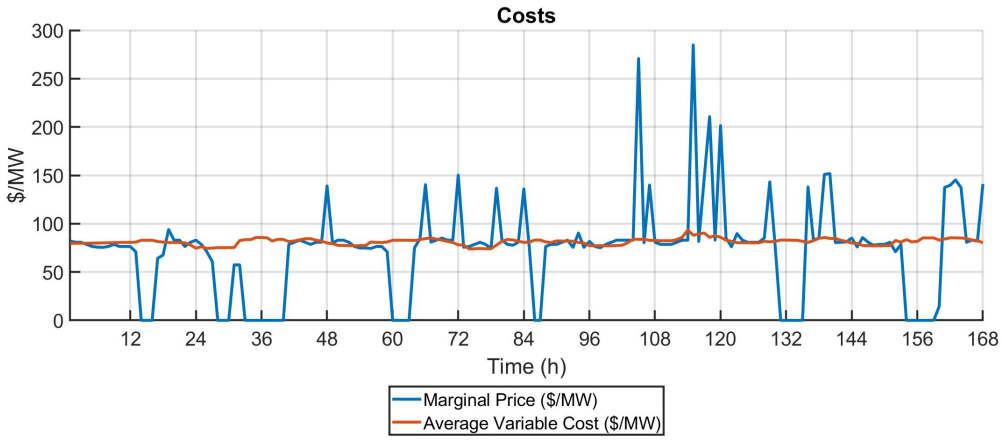
Σχήμα Γ.5: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



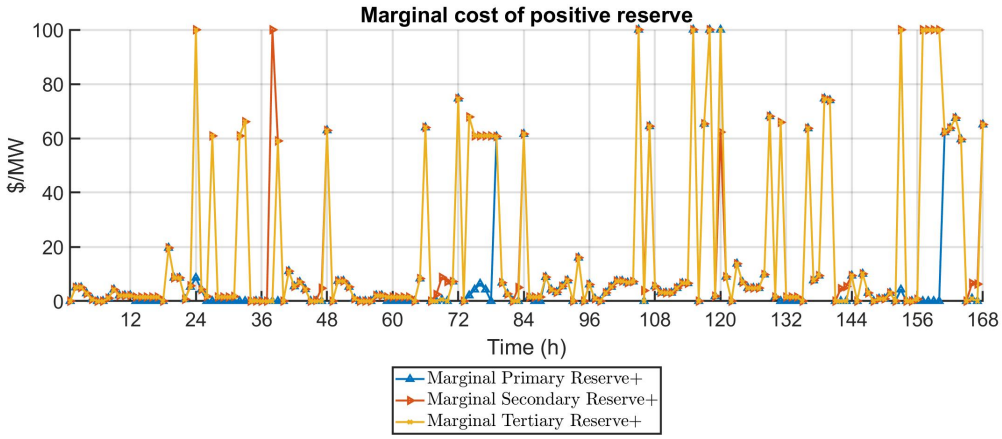
Σχήμα Γ.6: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



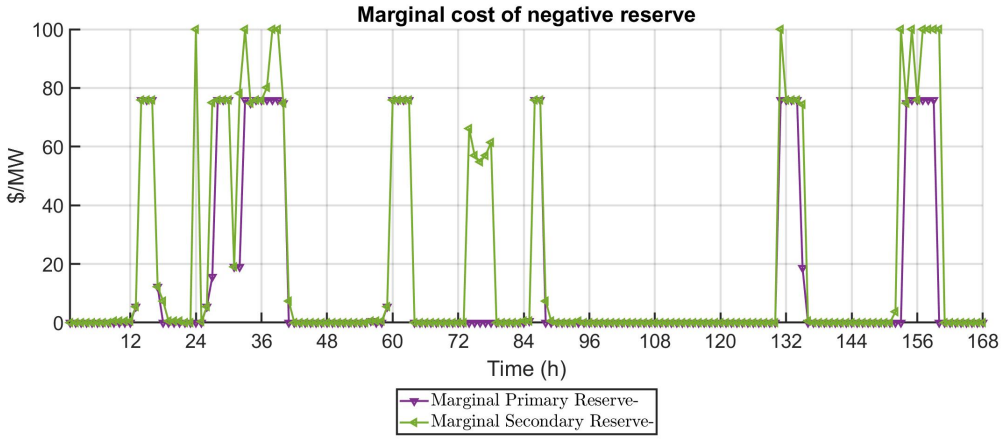
Σχήμα Γ.7: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



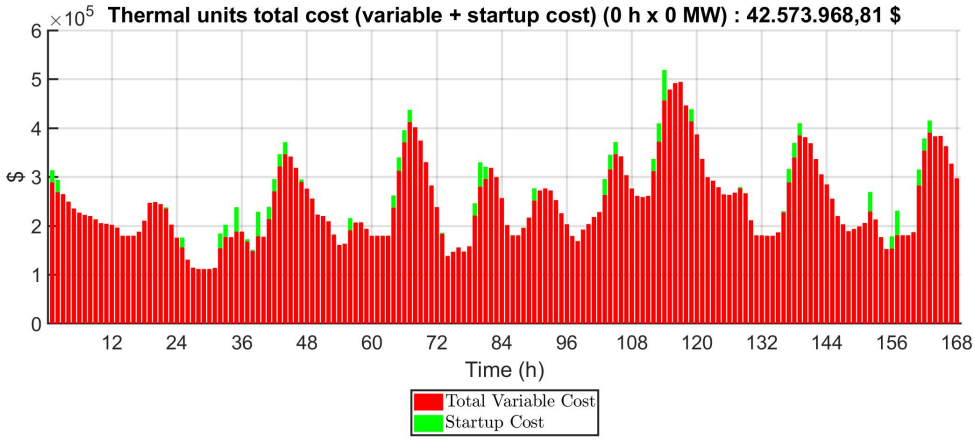
Σχήμα Γ.8: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων



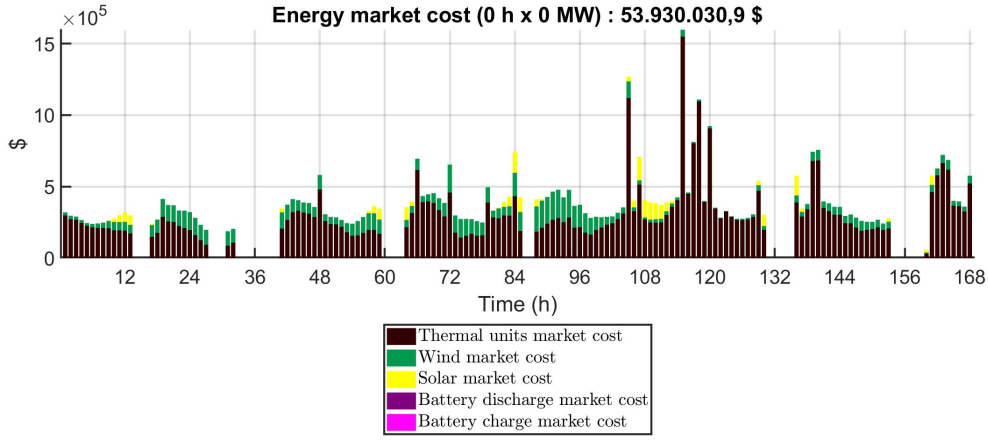
Σχήμα Γ.9: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών



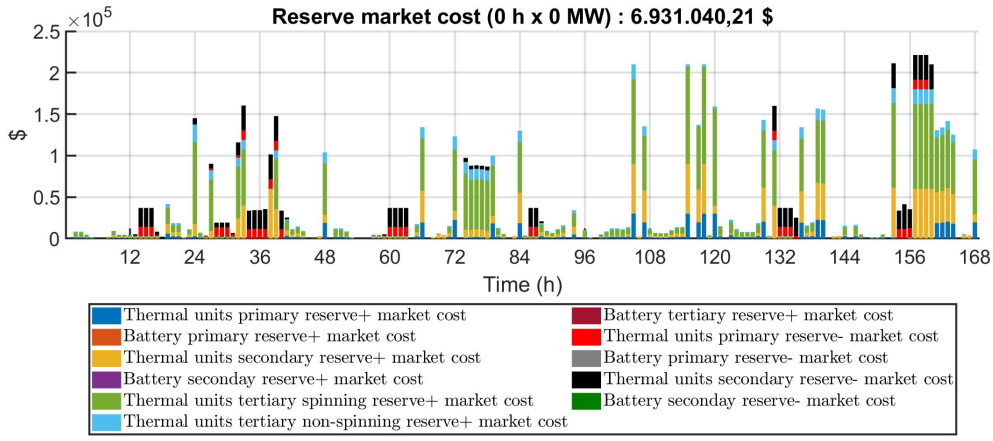
Σχήμα Γ.10: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών



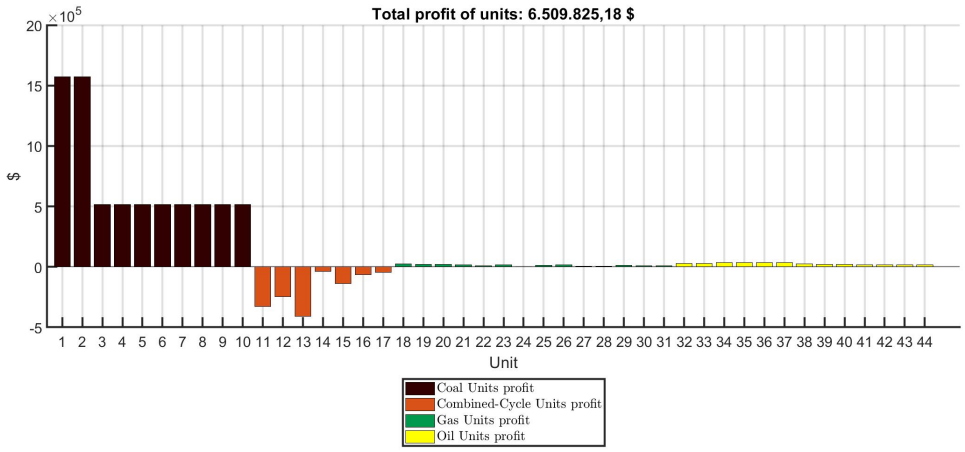
Σχήμα Γ.11: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)



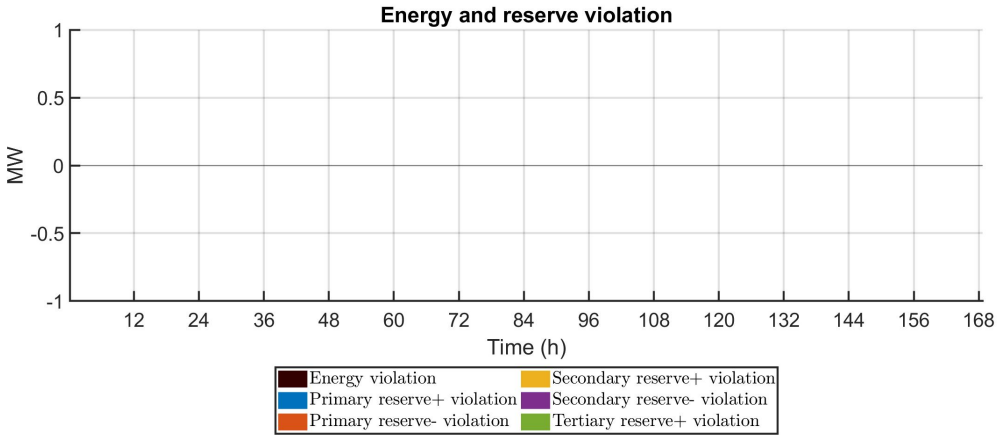
Σχήμα Γ.12: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας



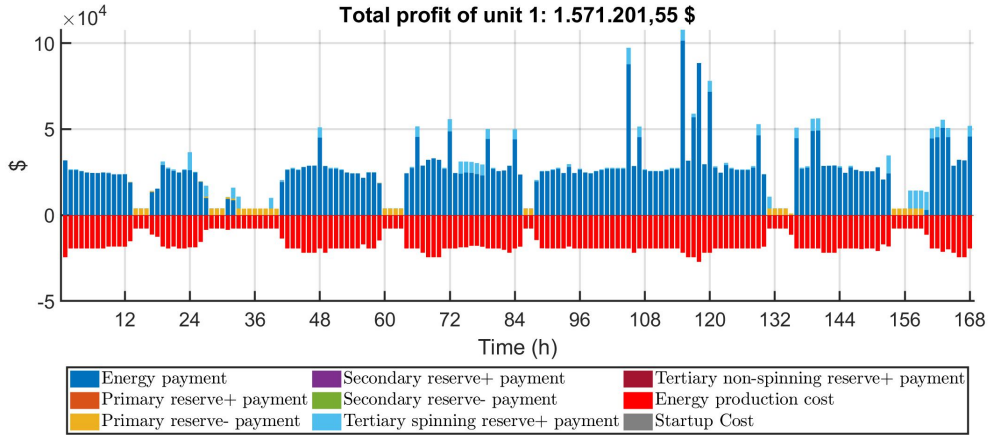
Σχήμα Γ.13: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών



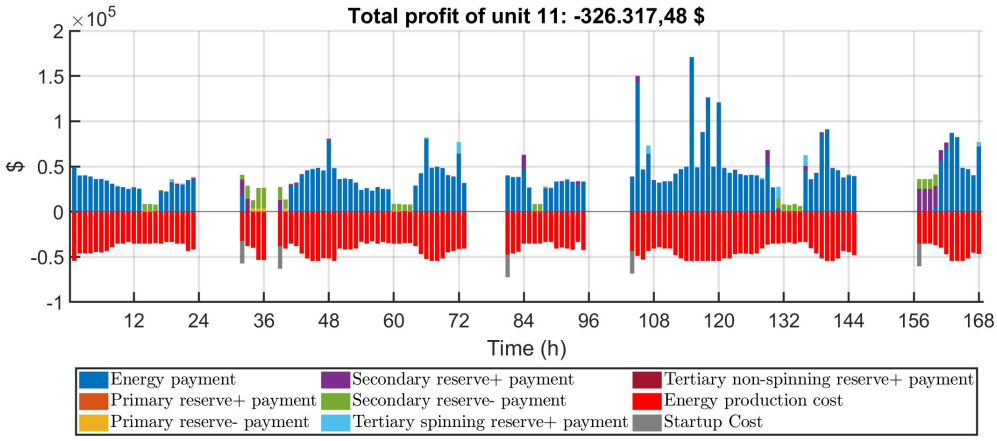
Σχήμα Γ.14: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων



Σχήμα Γ.15: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας ή εφεδρειών

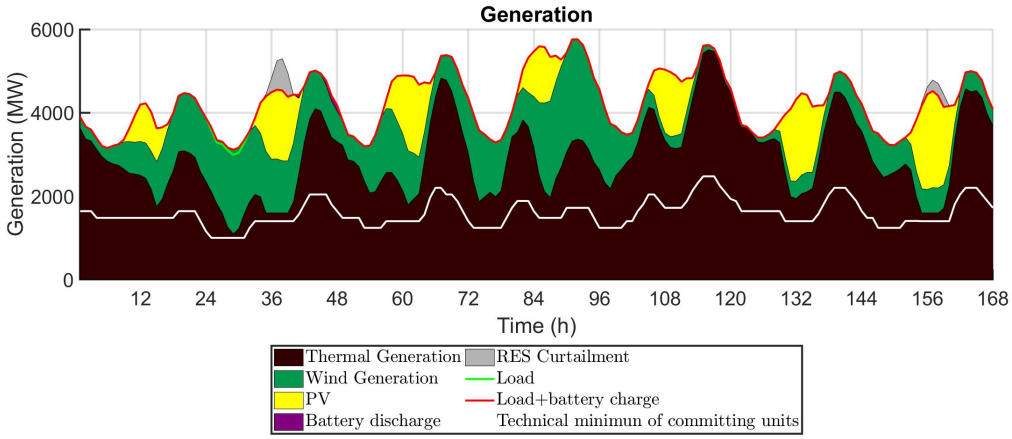


Σχήμα Γ.16: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας

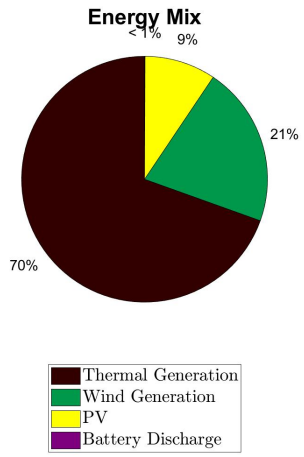


Σχήμα Γ.17: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ χωρίς αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος

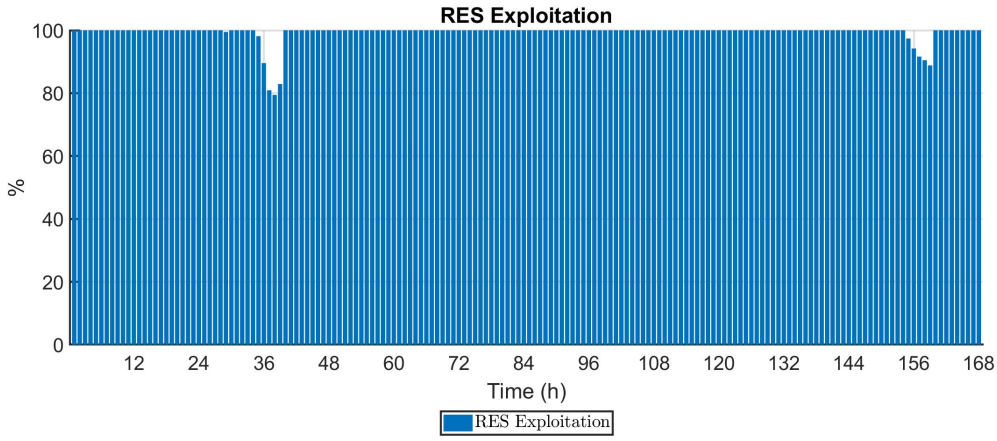
Γ.2 Με αποθήκευση σαν ελεύθερο στοιχείο



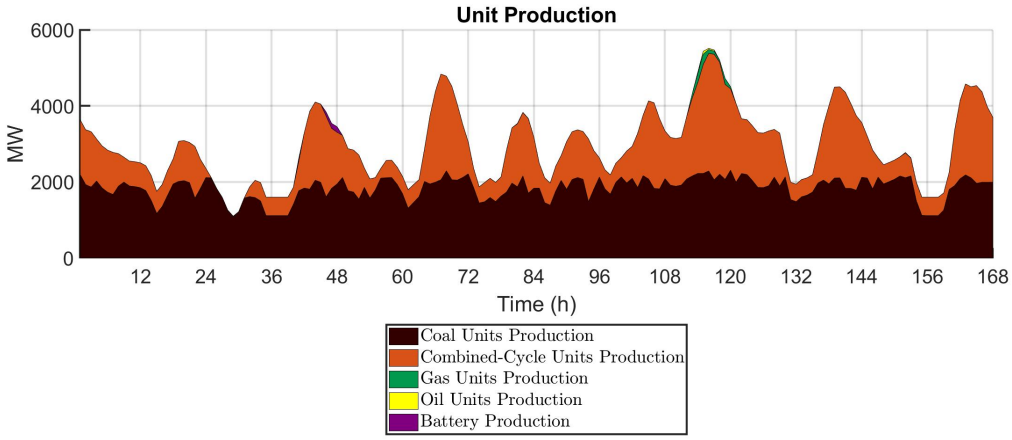
Σχήμα Γ.18: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραγωγή-φορτίο



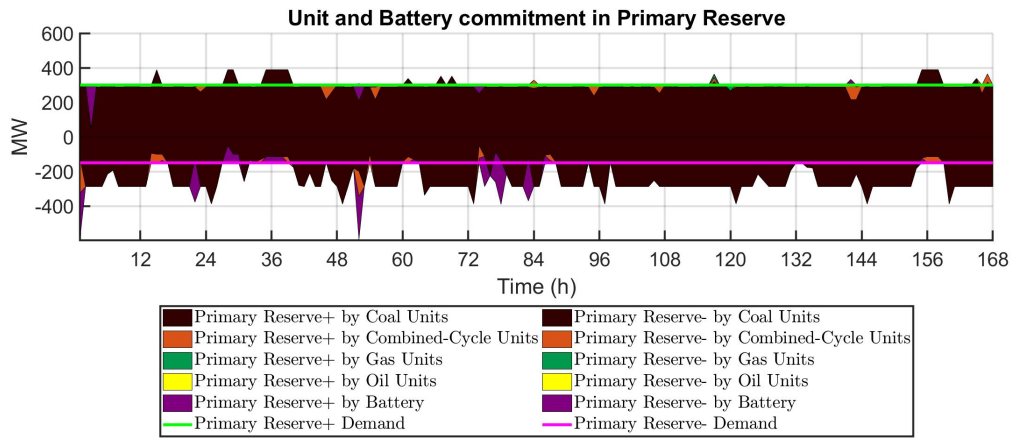
Σχήμα Γ.19: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα



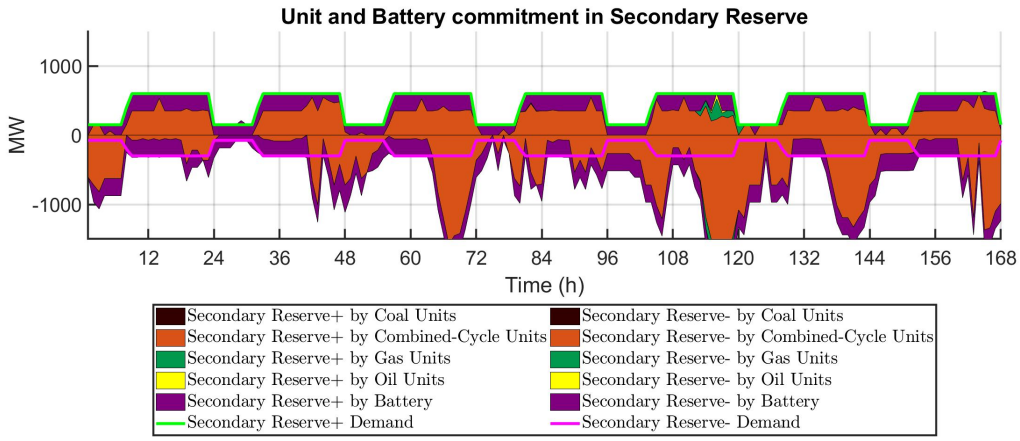
Σχήμα Γ.20: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αξιοποίηση ΑΠΕ



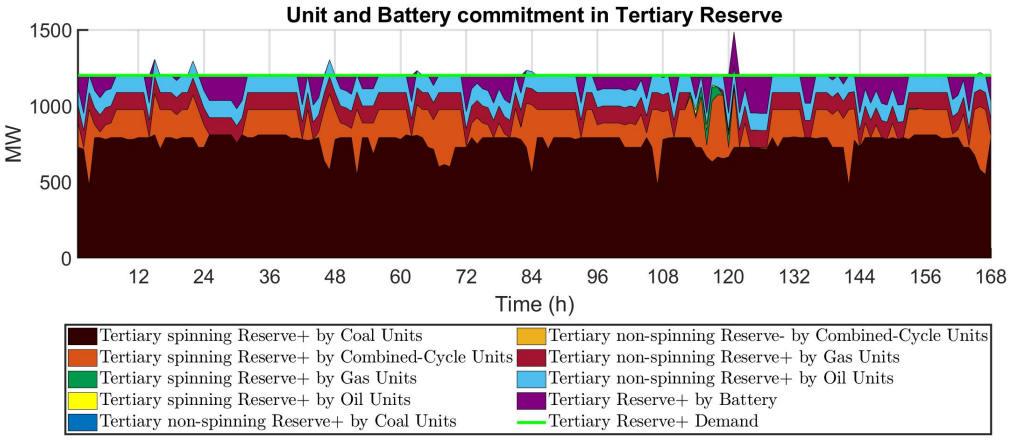
Σχήμα Γ.21: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



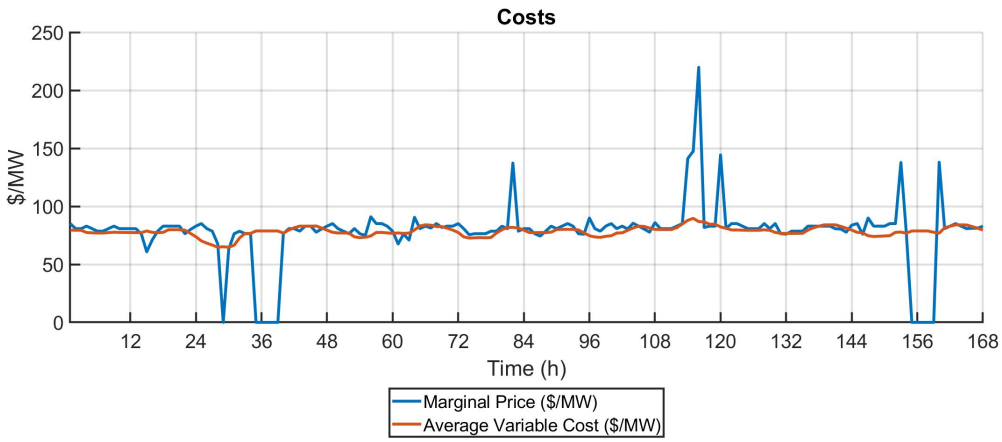
Σχήμα Γ.22: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



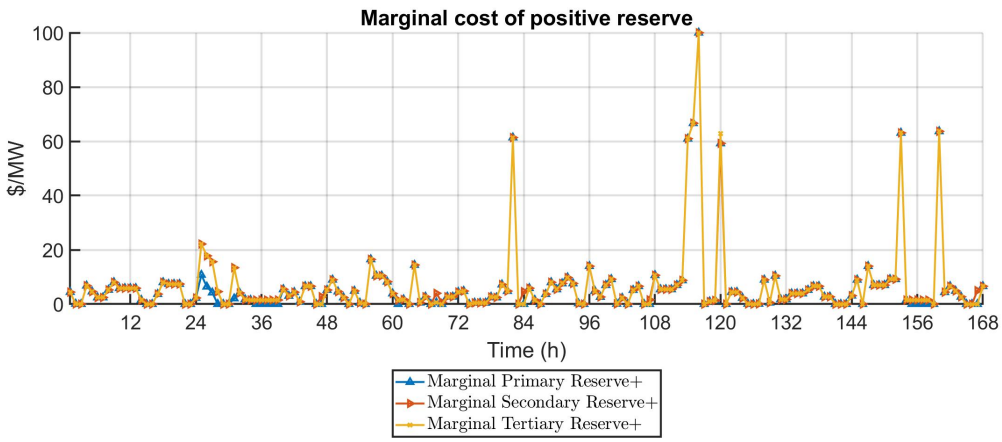
Σχήμα Γ.23: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



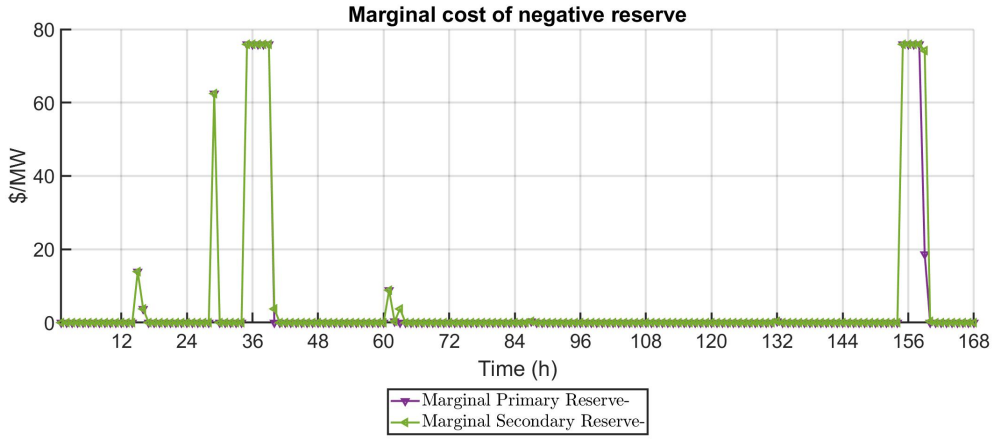
Σχήμα Γ.24: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



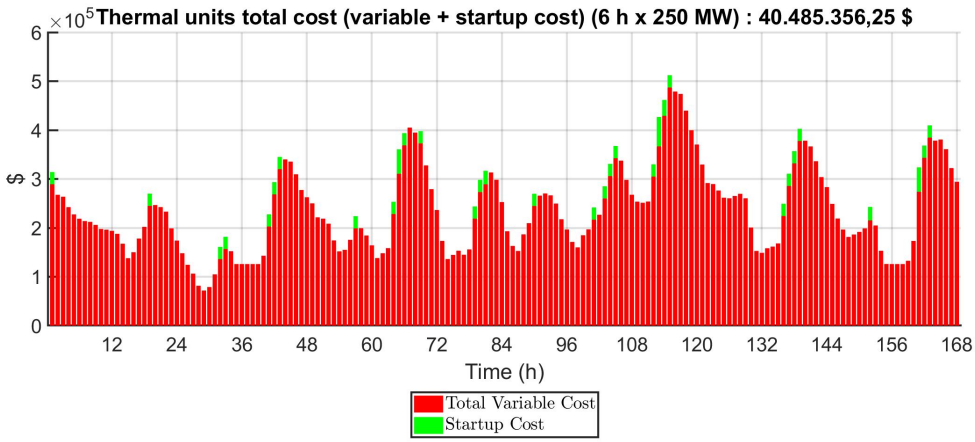
Σχήμα Γ.25: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων



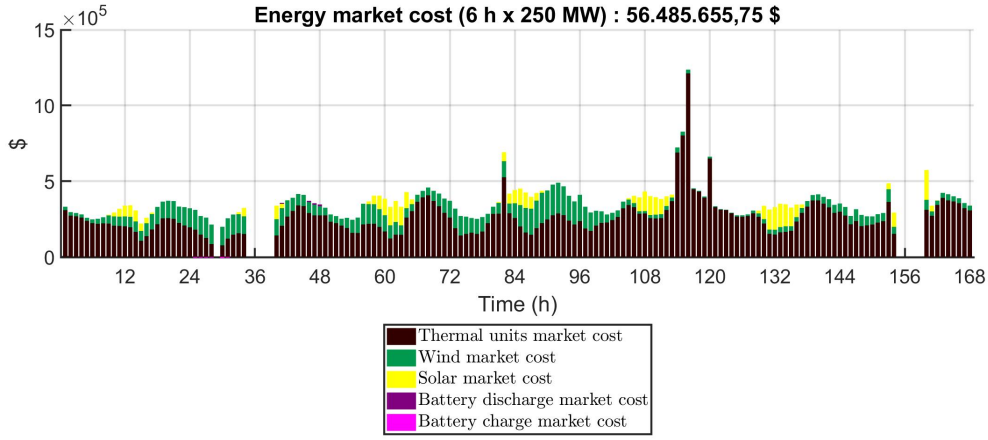
Σχήμα Γ.26: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών



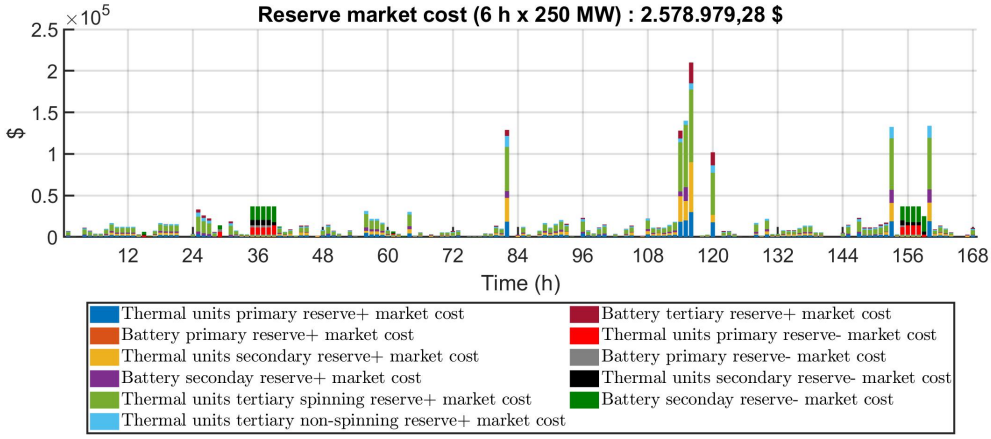
Σχήμα Γ.27: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών



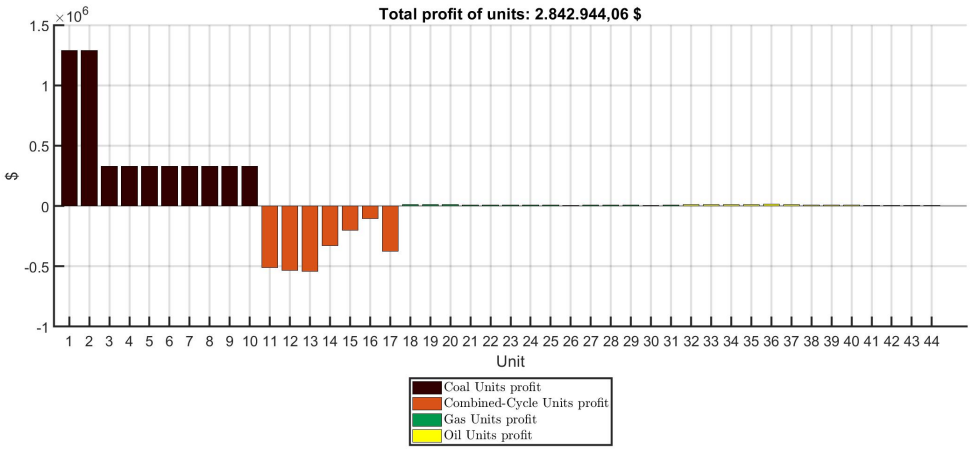
Σχήμα Γ.28: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)



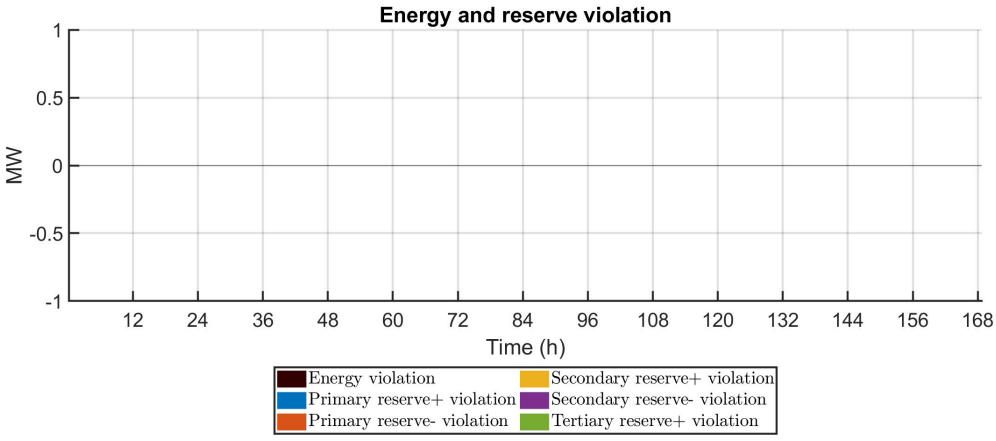
Σχήμα Γ.29: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς ενέργειας



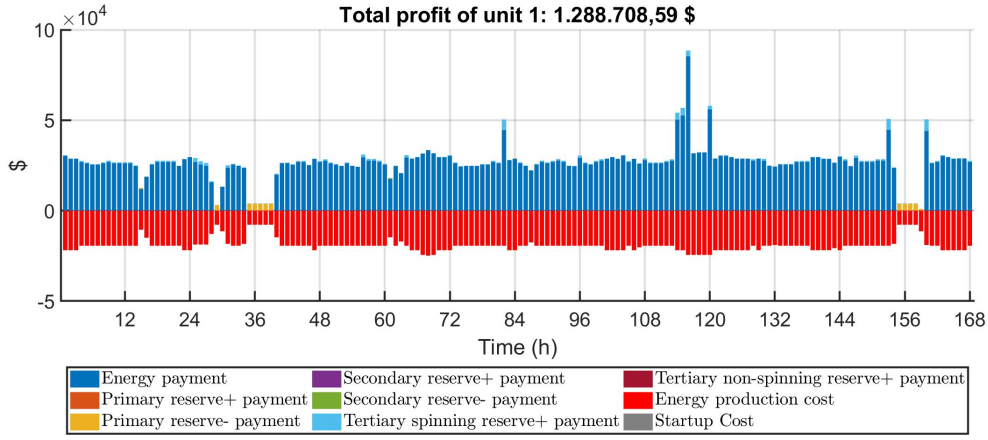
Σχήμα Γ.30: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κόστος αγοράς εφεδρειών



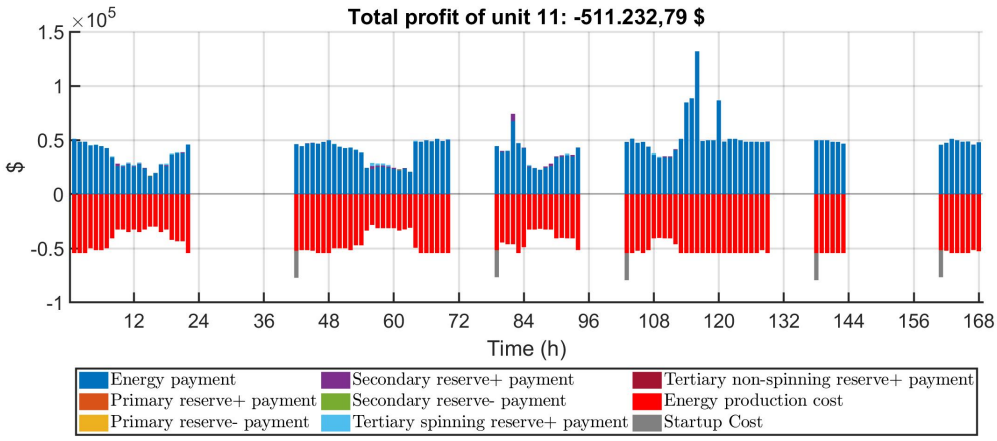
Σχήμα Γ.31: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος θερμικών μονάδων



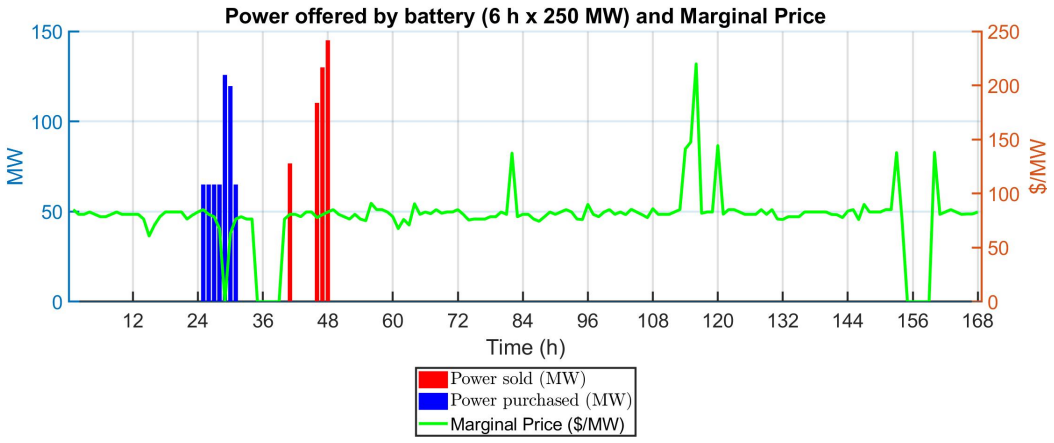
Σχήμα Γ.32: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών



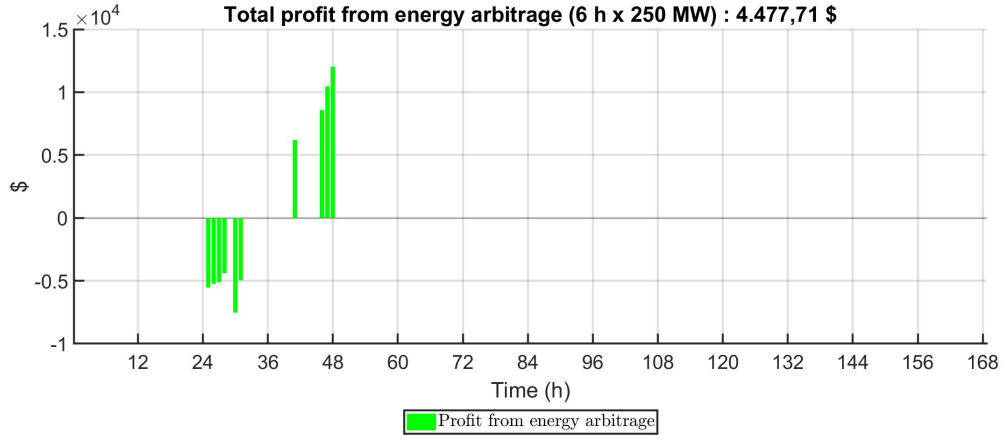
Σχήμα Γ.33: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας



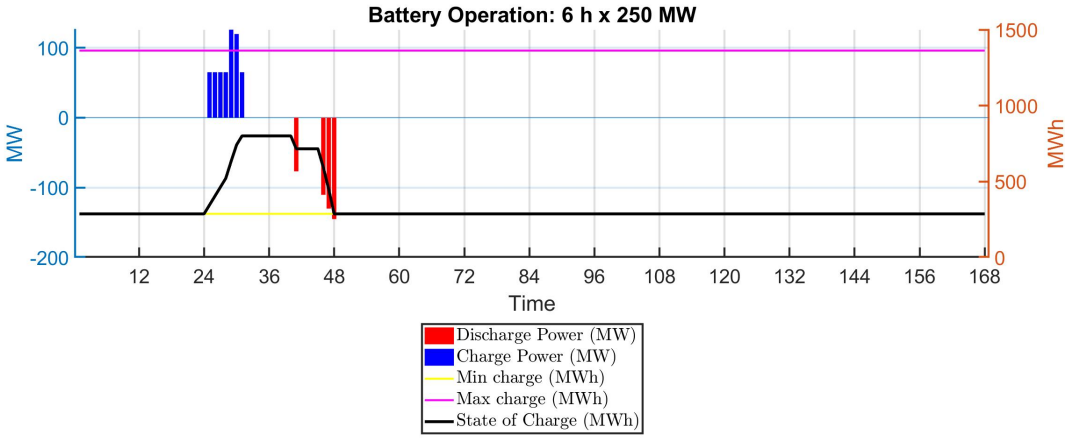
Σχήμα Γ.34: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος



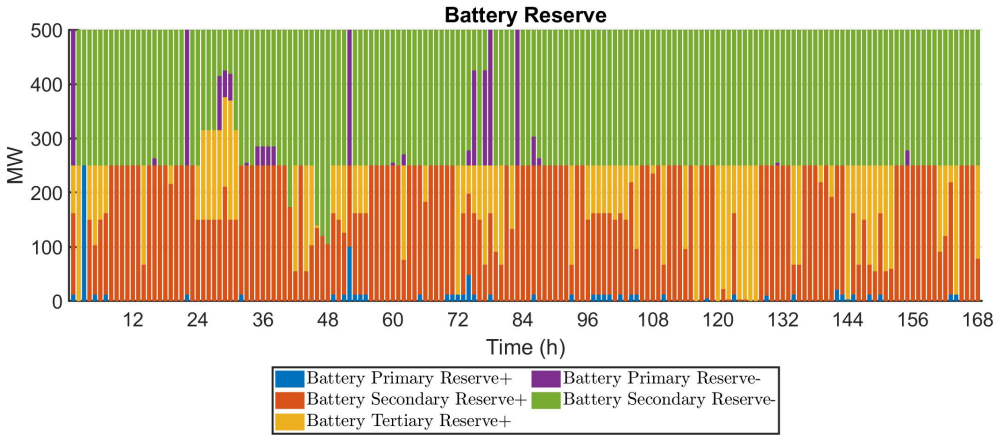
Σχήμα Γ.35: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή



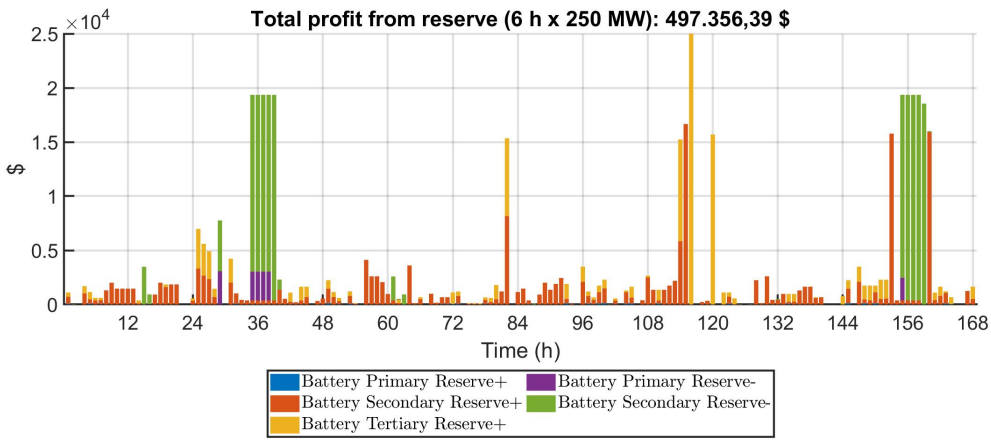
Σχήμα Γ.36: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ



Σχήμα Γ.37: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης

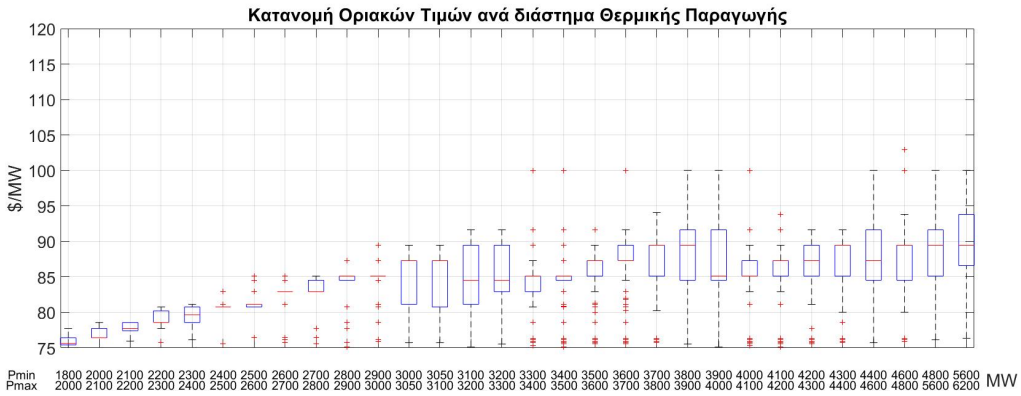


Σχήμα Γ.38: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία

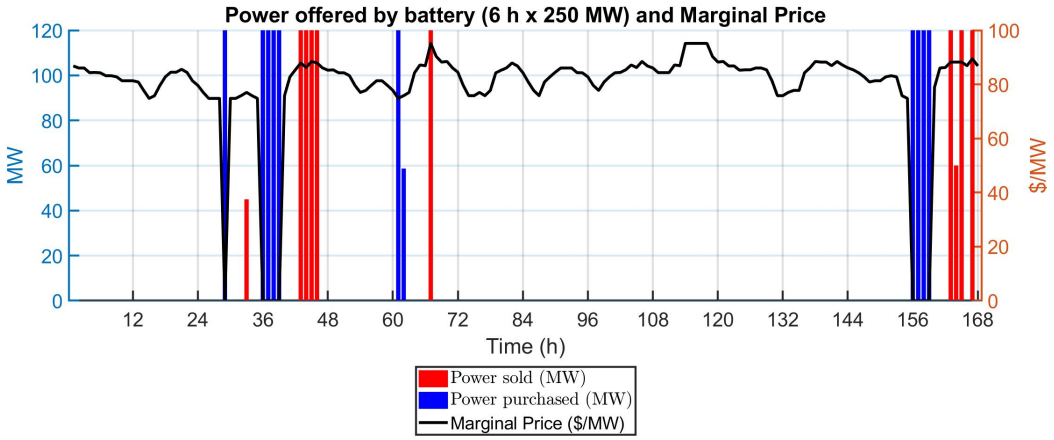


Σχήμα Γ.39: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με αποθήκευση: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών

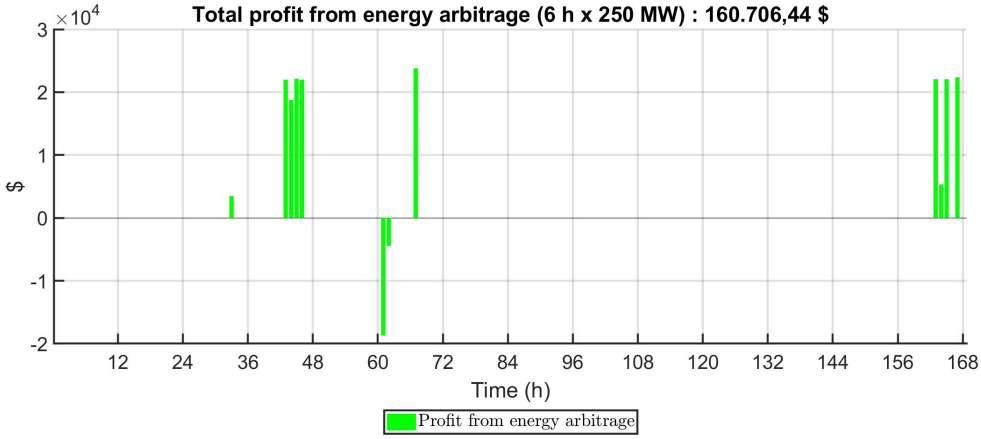
Γ.3 Κατάστρωση προσφοράς



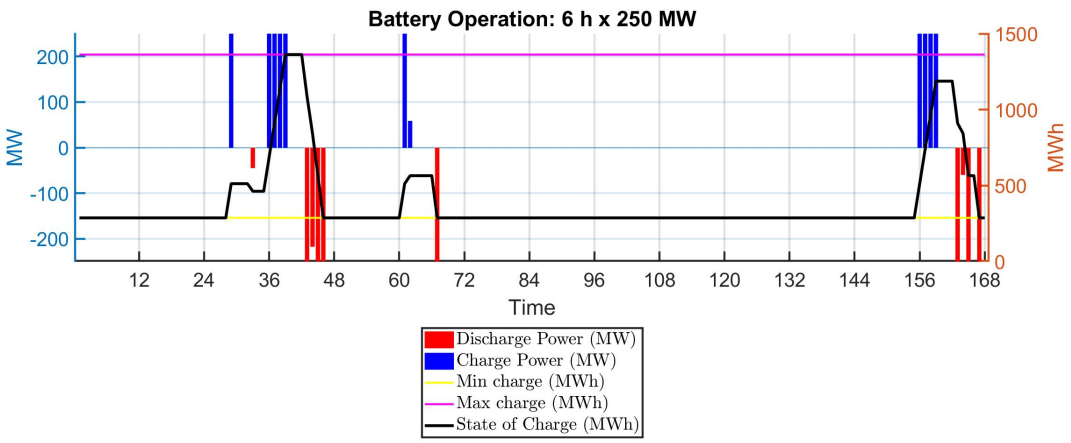
Σχήμα Γ.40: Νέφος οριακών τιμών ανά διάστημα θερμικής παραγωγής



Σχήμα Γ.41: Λειτουργία μπαταρίας και εκτιμώμενη οριακή τιμή

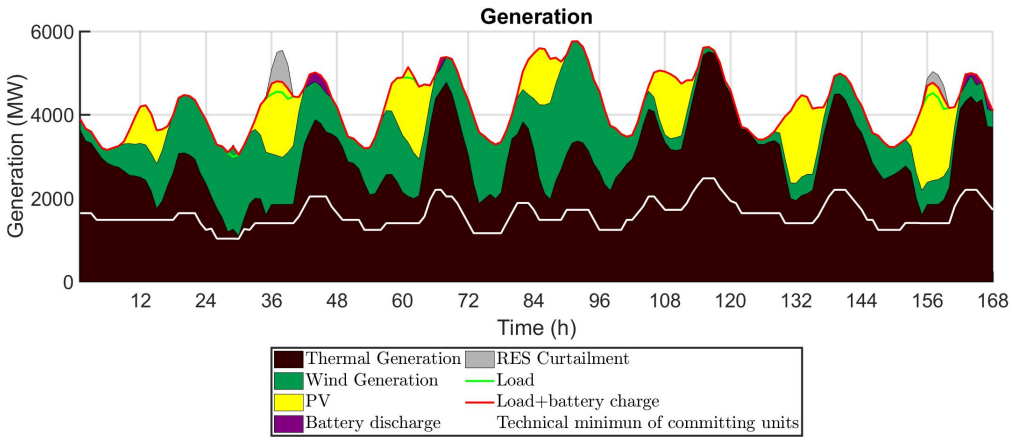


Σχήμα Γ.42: Εκτιμώμενο κέρδος μπαταρίας

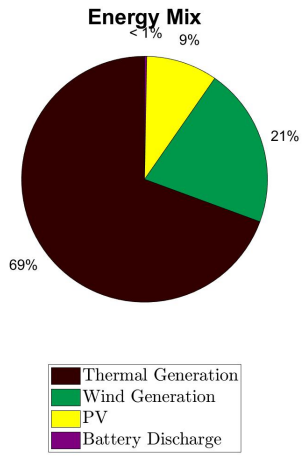


Σχήμα Γ.43: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης

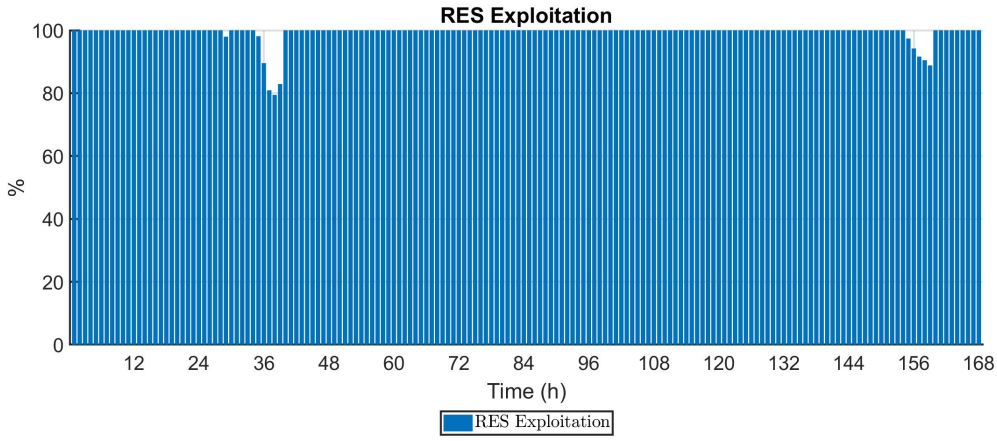
Γ.4 Με αποθήκευση σε λειτουργία προσφοράς



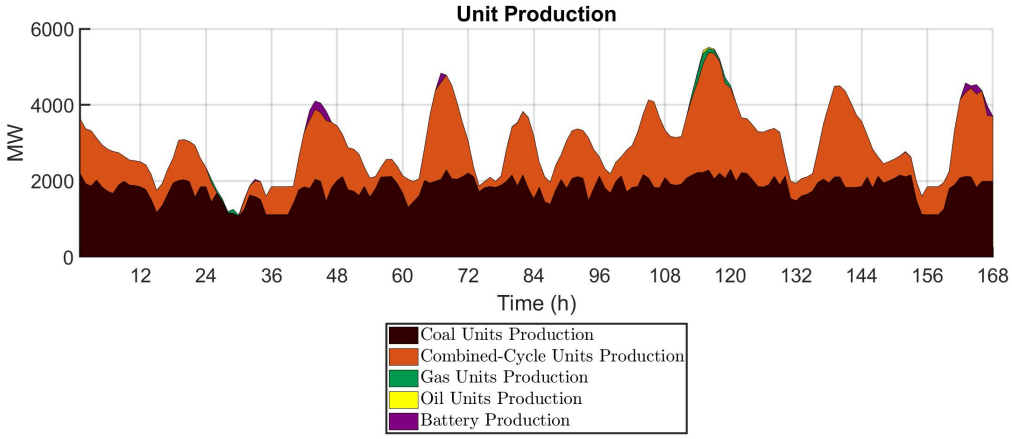
Σχήμα Γ.44: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραγωγή-φορτίο



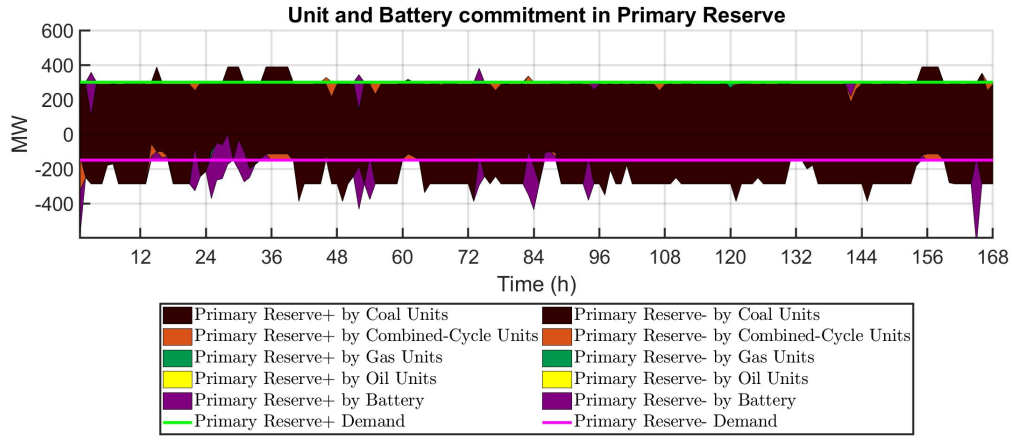
Σχήμα Γ.45: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Εβδομαδιαίο ενεργειακό μείγμα



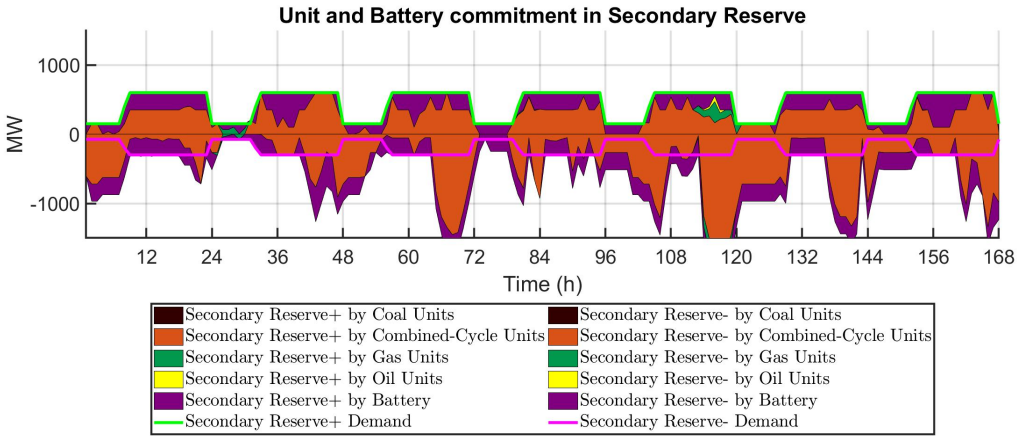
Σχήμα Γ.46: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αξιοποίηση ΑΠΕ



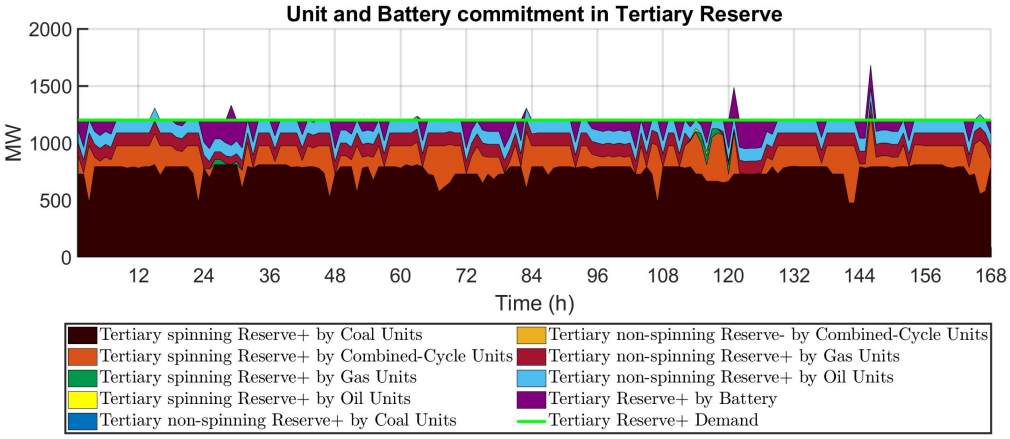
Σχήμα Γ.47: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Θερμική παραγωγή ανά τύπο μονάδας



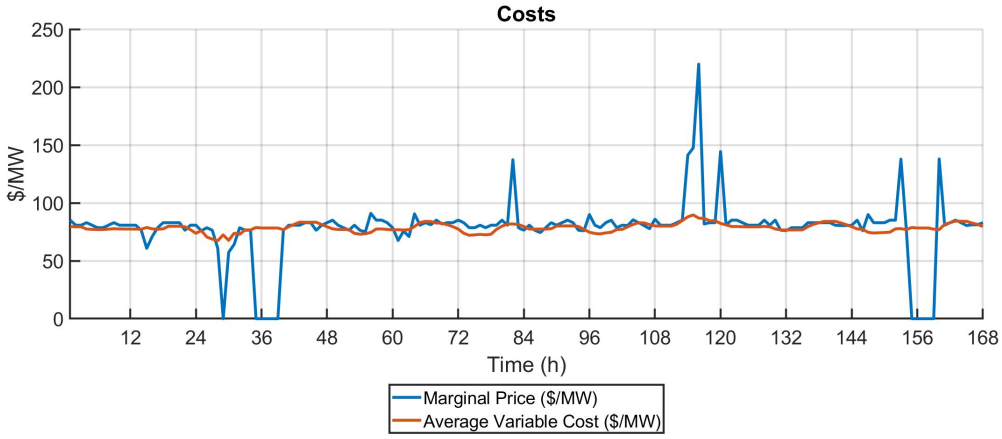
Σχήμα Γ.48: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Πρωτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



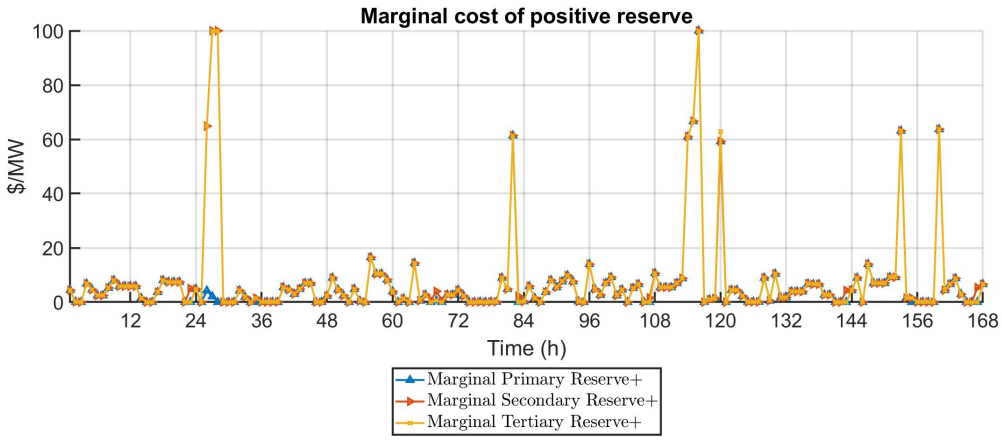
Σχήμα Γ.49: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Δευτερεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



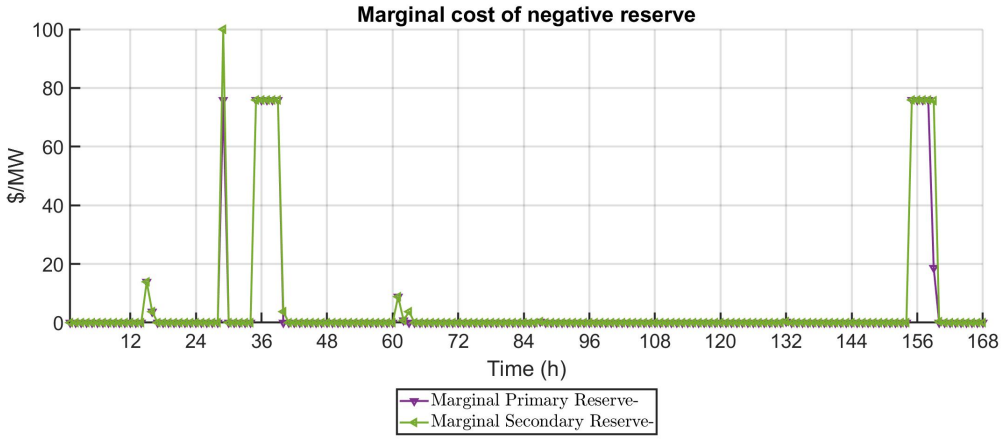
Σχήμα Γ.50: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Τριτεύουσα εφεδρεία ανά τύπο μονάδας



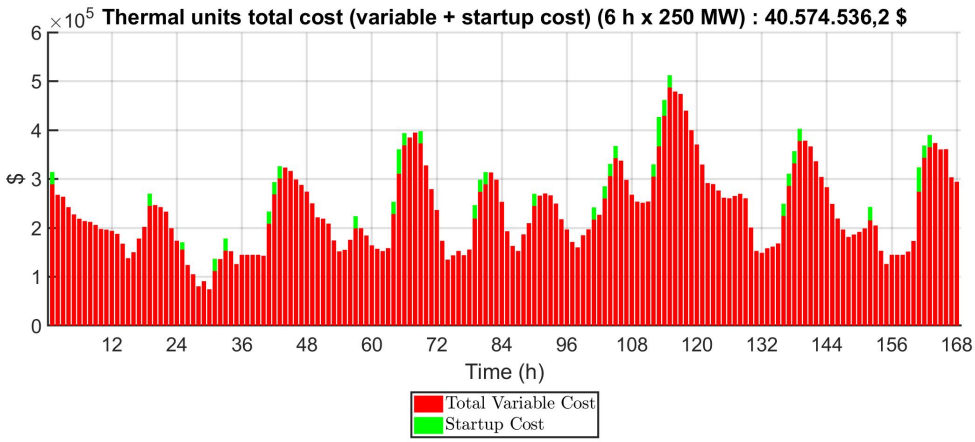
Σχήμα Γ.51: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαμορφωμένη οριακή τιμή και μέσο κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων



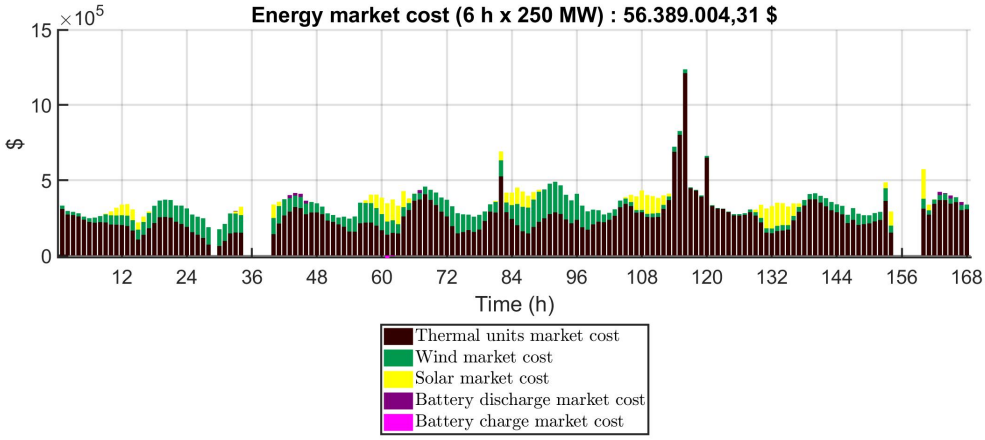
Σχήμα Γ.52: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές θετικών εφεδρειών



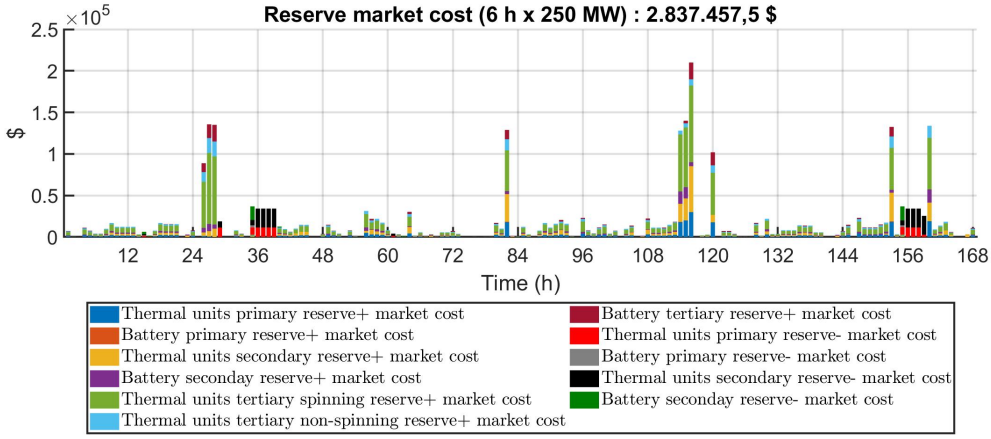
Σχήμα Γ.53: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Οριακές τιμές αρνητικών εφεδρειών



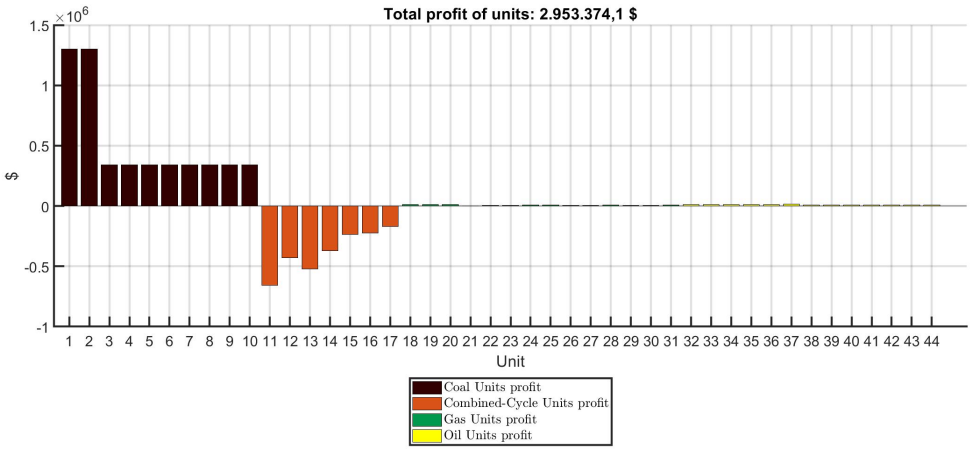
Σχήμα Γ.54: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος θερμικών μονάδων (μεταβλητό + εκκίνηση)



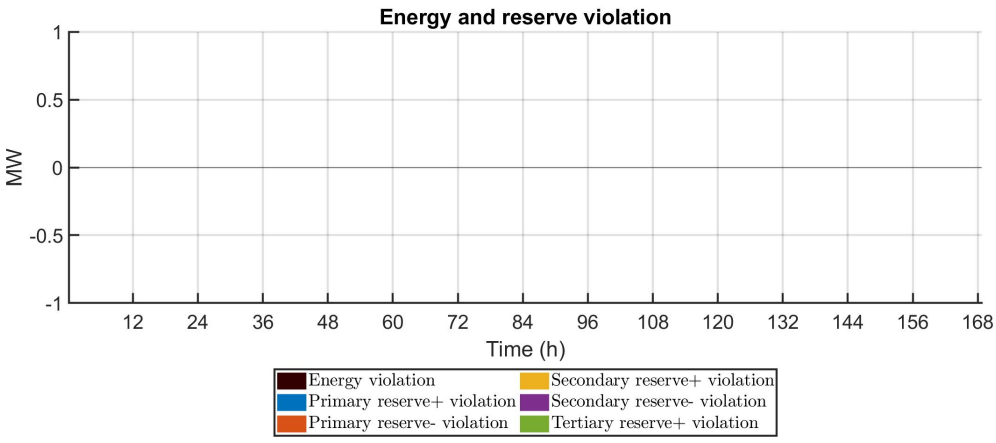
Σχήμα Γ.55: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς ενέργειας



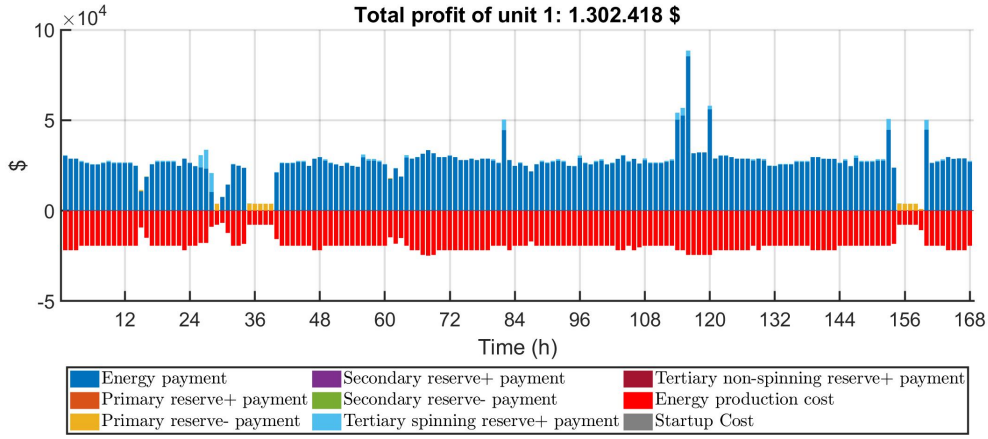
Σχήμα Γ.56: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κόστος αγοράς εφεδρειών



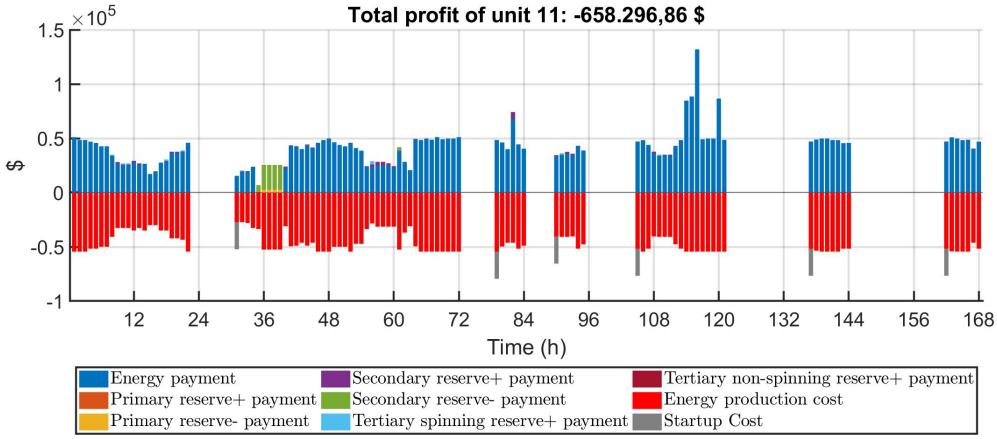
Σχήμα Γ.57: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων



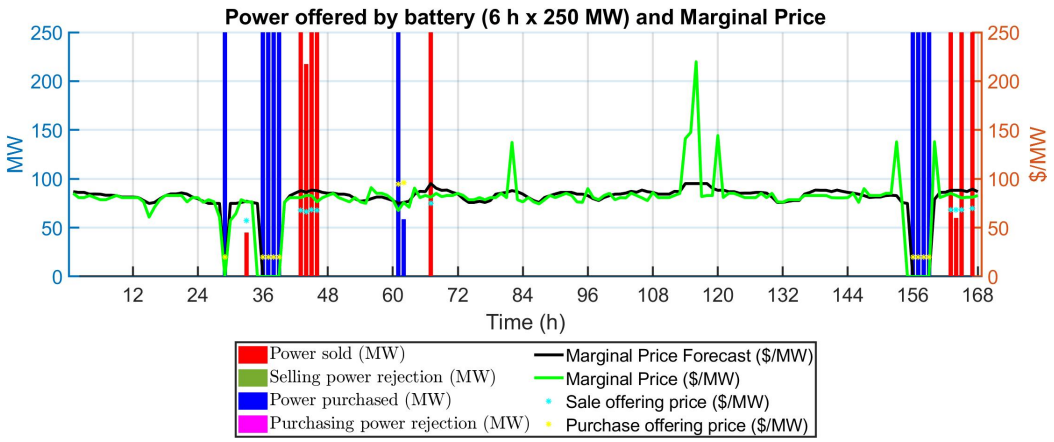
Σχήμα Γ.58: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παραβίαση ενέργειας και εφεδρειών



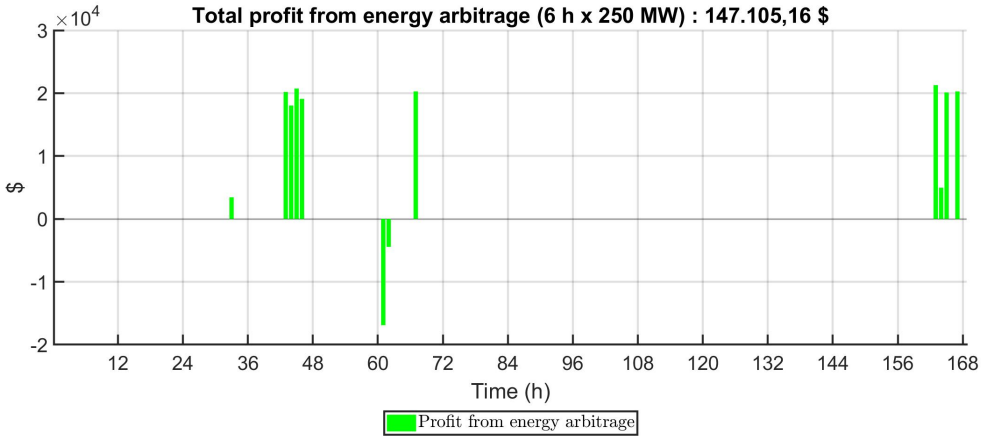
Σχήμα Γ.59: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 1: Άνθρακας



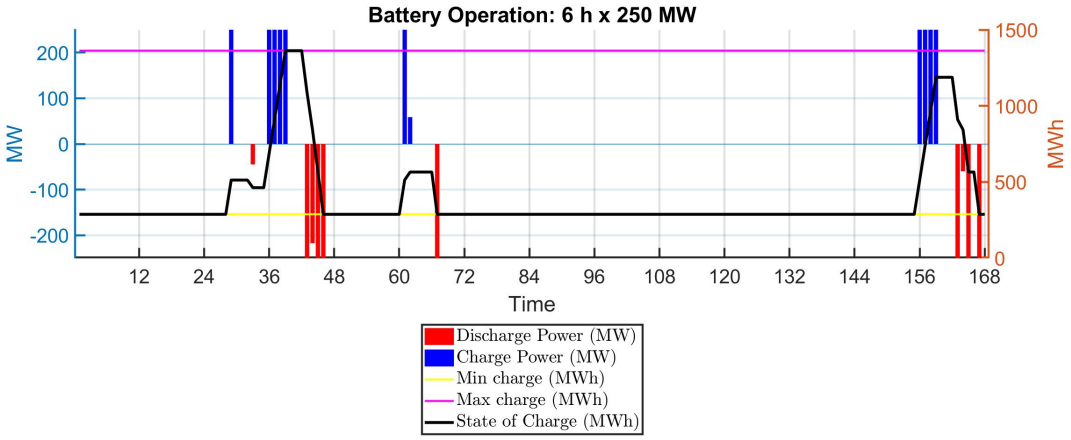
Σχήμα Γ.60: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μονάδας 11: Συνδυασμένος κύκλος



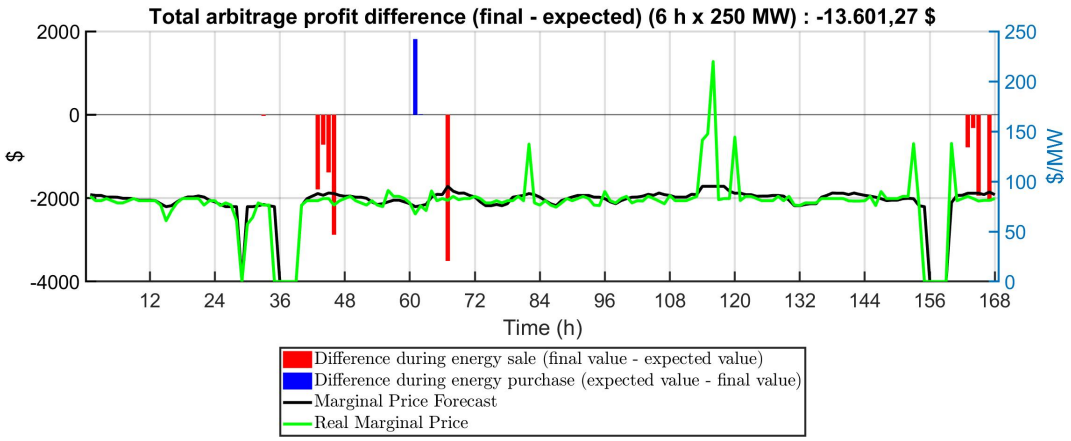
Σχήμα Γ.61: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή



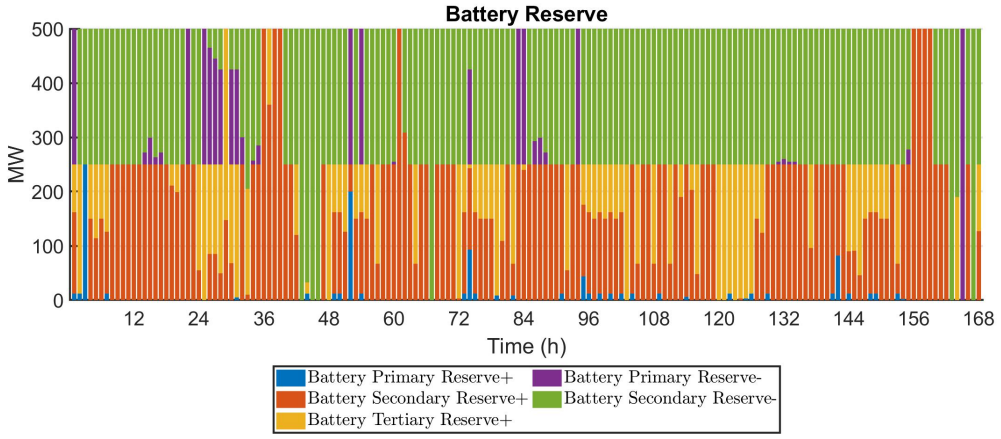
Σχήμα Γ.62: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από ενεργειακό αρμπιτράζ



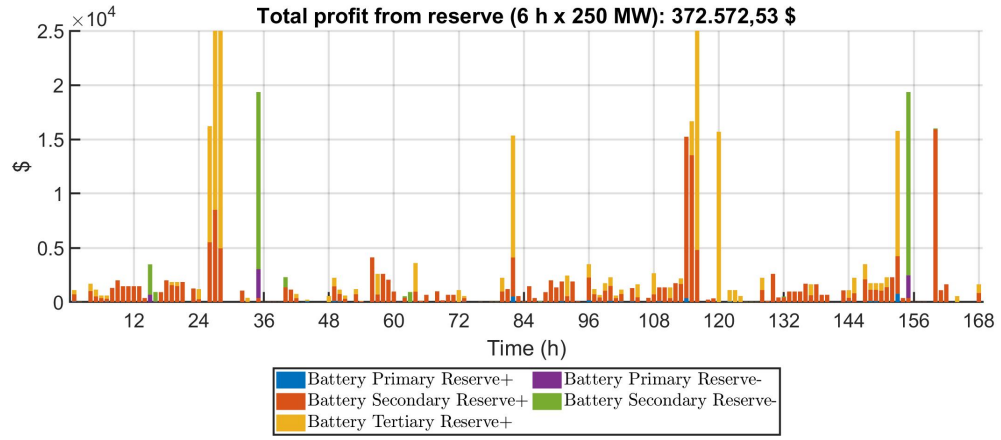
Σχήμα Γ.63: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και επίπεδο φόρτισης



Σχήμα Γ.64: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Διαφορά οριακής τιμής και κέρδους από τα εκτιμώμενα

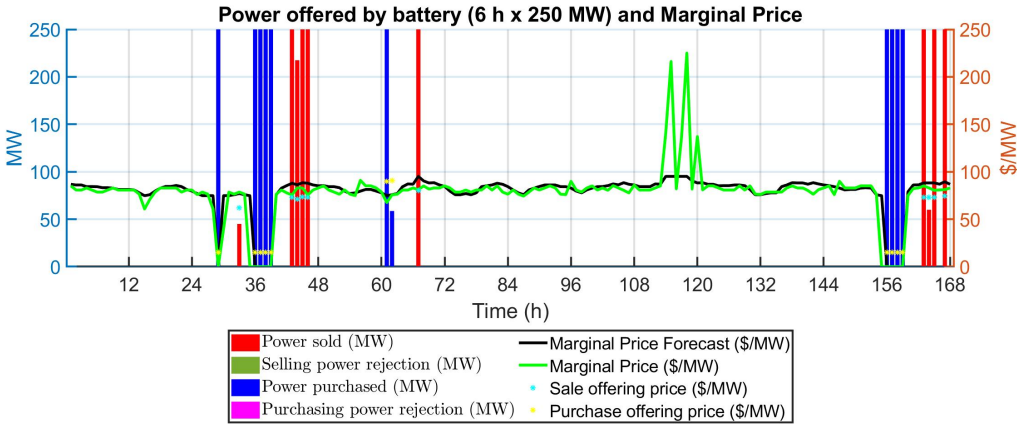


Σχήμα Γ.65: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Παροχή εφεδρειών από τη μπαταρία

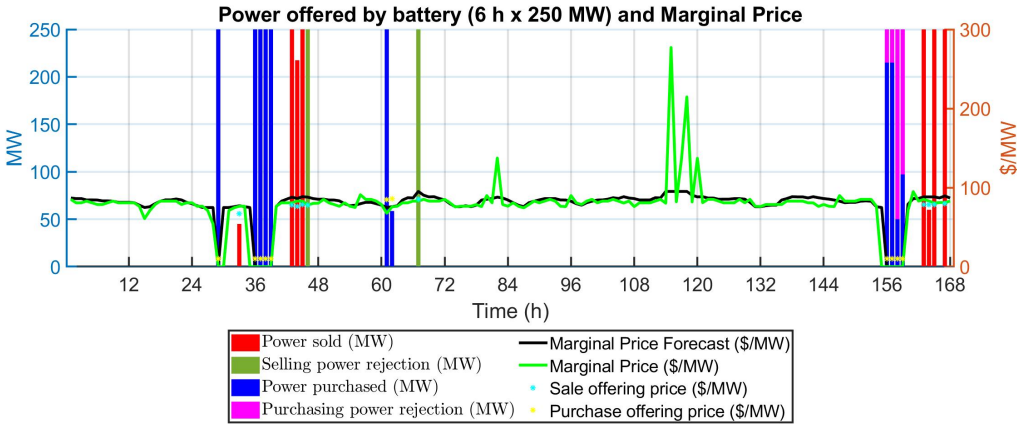


Σχήμα Γ.66: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος της μπαταρίας από παροχή εφεδρειών

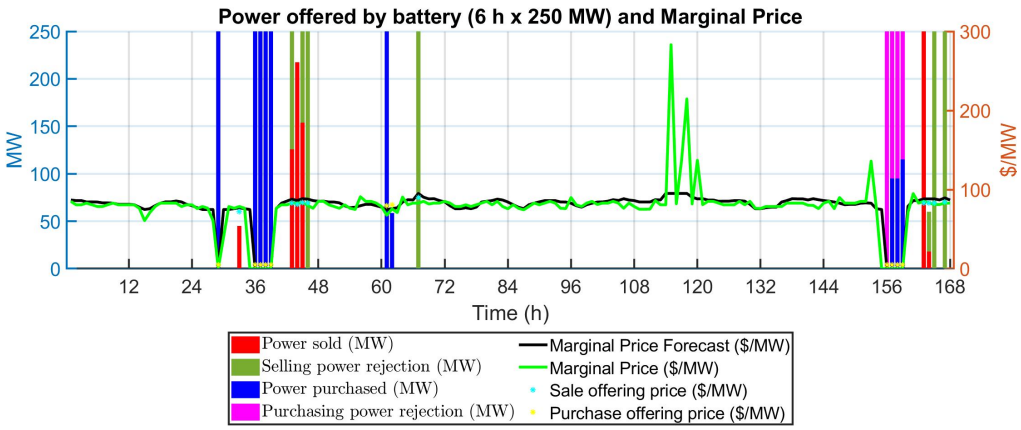
Γ.5 Επίδραση τιμής προσφοράς αποθήκευσης στην οριακή τιμή και σε διάφορα μεγέθη



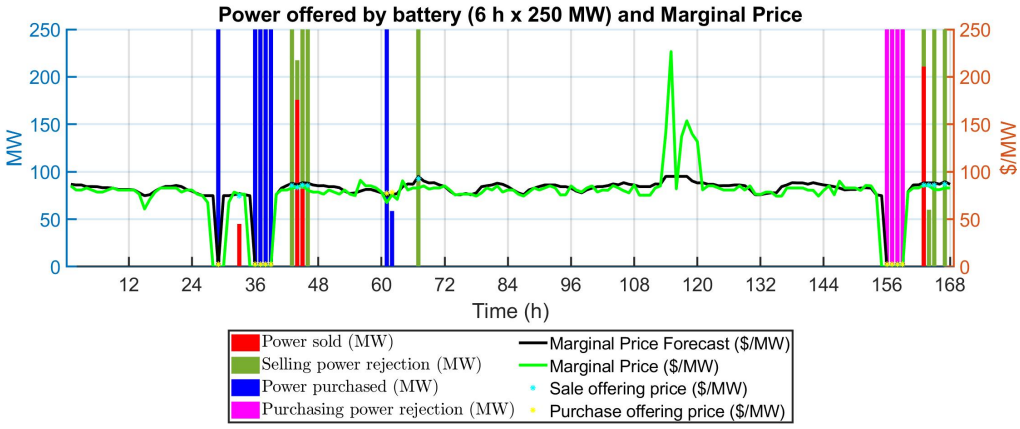
Σχήμα Γ.67: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±15 $



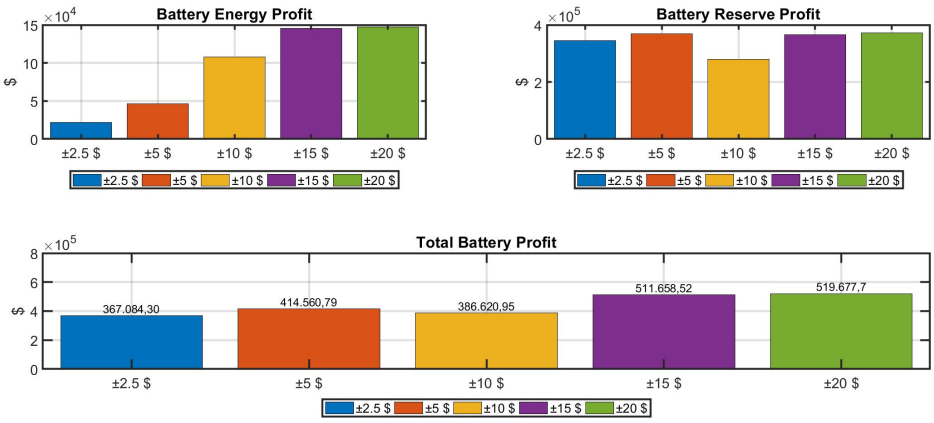
Σχήμα Γ.68: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±10 $



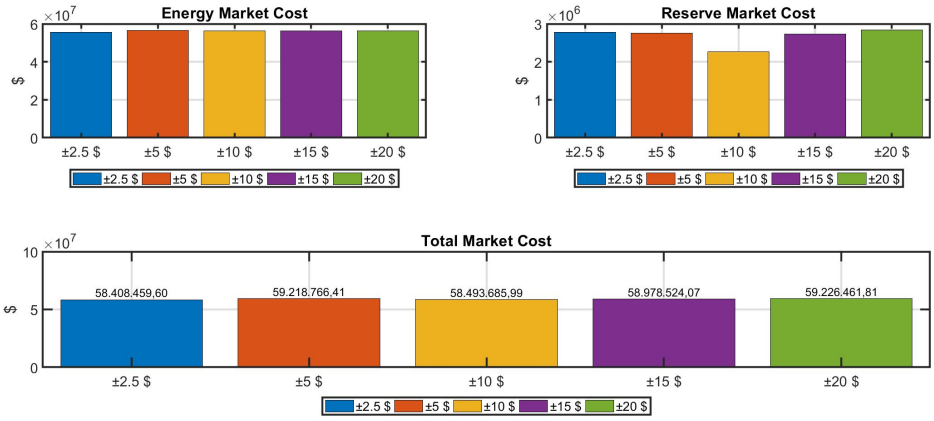
Σχήμα Γ.69: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±5 $



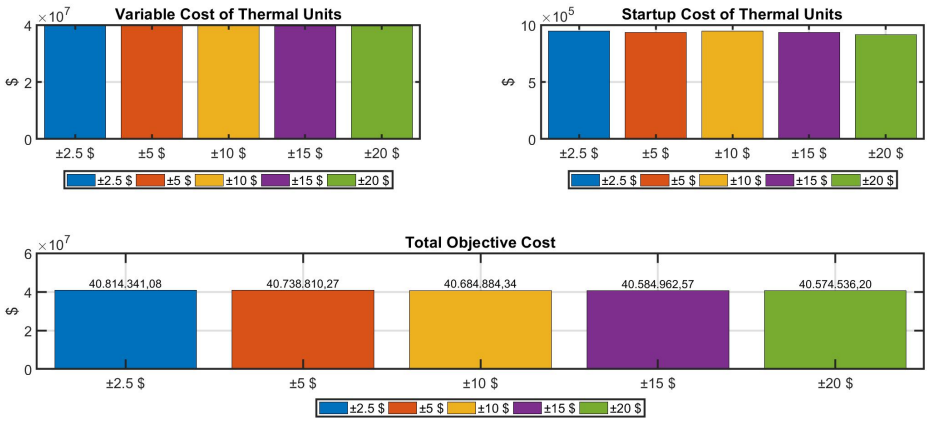
Σχήμα Γ.70: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Λειτουργία μπαταρίας και οριακή τιμή για προσφορά ±2,5 $



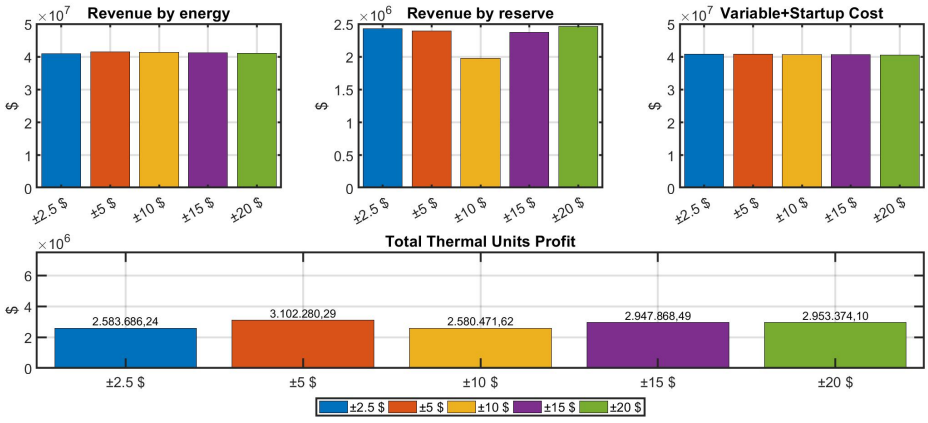
Σχήμα Γ.71: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος μπαταρίας σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της



Σχήμα Γ.72: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Μέγεθος αγοράς σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας

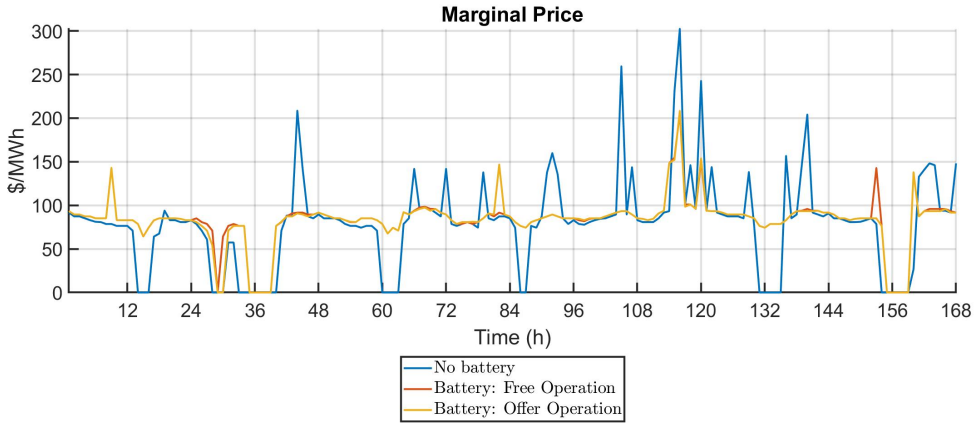


Σχήμα Γ.73: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Αντικειμενικό κόστος συστήματος σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας

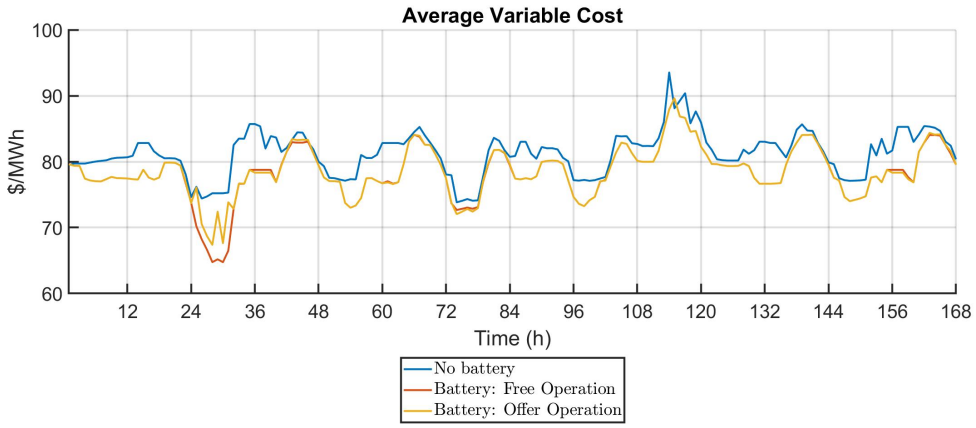


Σχήμα Γ.74: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ με προσφορά αποθήκευσης: Κέρδος θερμικών μονάδων σε σχέση με το επίπεδο προσφοράς της μπαταρίας

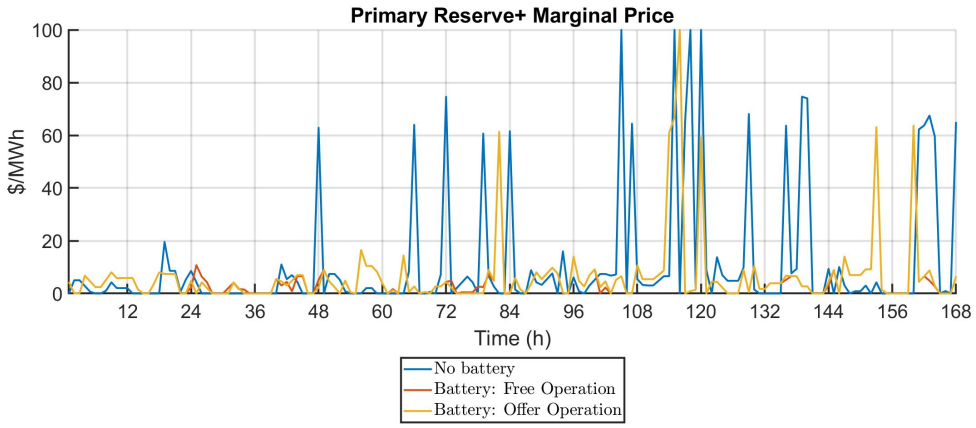
Γ.6 Συγκριτικά διαγράμματα



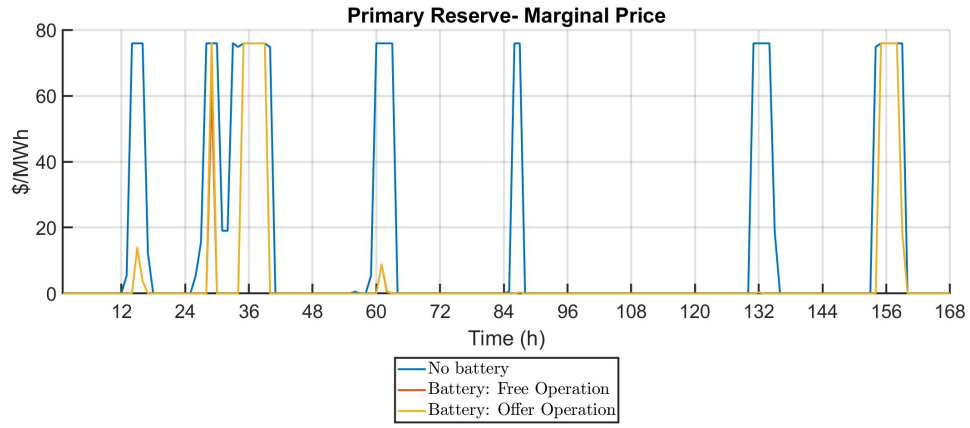
Σχήμα Γ.75: Σύγκριση οριακών τιμών



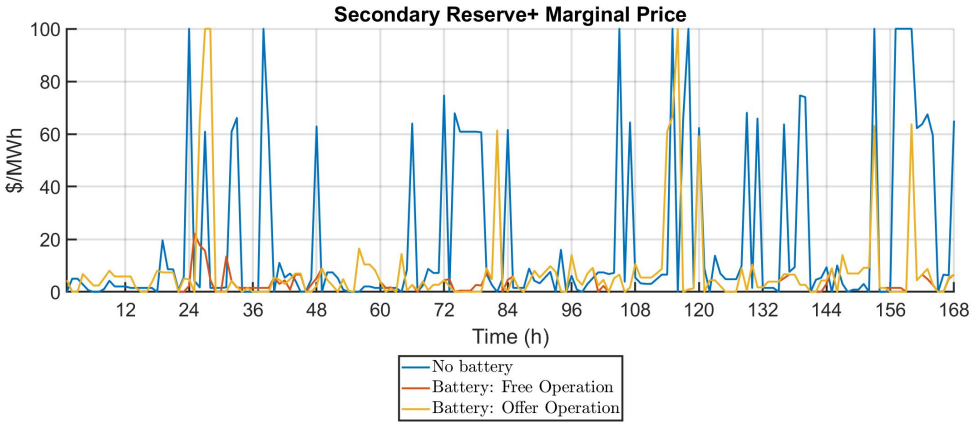
Σχήμα Γ.76: Σύγκριση μέσου κόστους παραγωγής ενέργειας



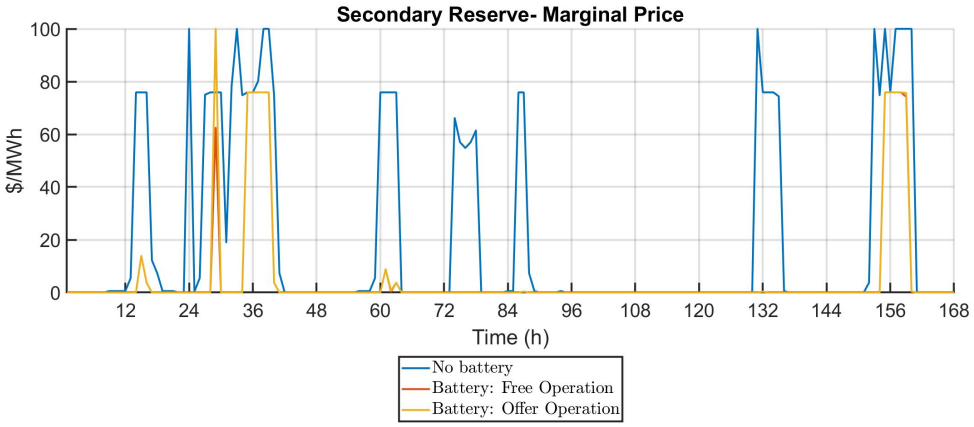
Σχήμα Γ.77: Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας



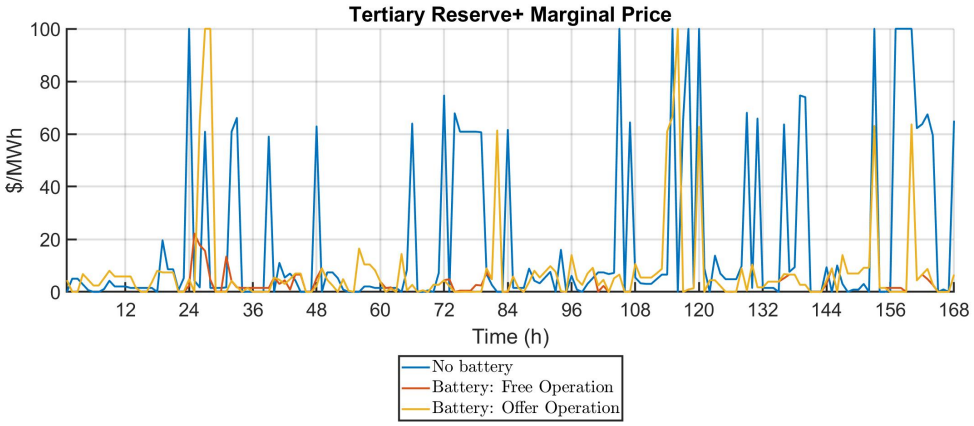
Σχήμα Γ.78: Σύγκριση οριακών τιμών πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας



Σχήμα Γ.79: Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας



Σχήμα Γ.80: Σύγκριση οριακών τιμών δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας



Σχήμα Γ.81: Σύγκριση οριακών τιμών τριτεύουσας θετικής εφεδρείας

Βιβλιογραφία

[1] Alireza Akbari-Dibavar, Bwhnam Mohammadi-Ivatloo, Kazem Zare. Electricity Markets New Players and Pricing Uncertainties, Chapter 2: Electricity Market Pricing: Uniform Pricing vs. Pay-as-Bid Pricing, 2020.

[2] Behnam Zakeri, Sanna Syri. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, 2015.

[3] Claus Krog Ekman, Søren Højgaard Jensen. Prospects for large scale electricity storage in denmark, 2010.

[4] EASE & EERA. European energy storage technology development roadmap towards 2030, 2016.

[5] Energy Storage Association. Thermal energy storage, energystorage.org.

[6] Fei TENG, Goran STRBAC. Business cases for energy storage with multiple service provision, 2016.

[7] Georgios N. Psarros, Eleni G. Karamanou, Stavros A. Papathanassiou. Feasibility Analysis of Centralized Storage Facilities in Isolated Grids, 2018.

[8] Georgios N. Psarros, Sotirios Nanou, Stefanos Papaefthymiou, Stavros Papathanassiou. Generation Scheduling in Non-Interconnected Islands with High RES Penetration, 2017.

[9] Goran Strbac, Marko Aunedi, Ioannis Konstantelos, Roberto Moreira, Fei Teng, Rodrigo Moreno, Danny Pudjianto, Adriana Laguna, Panagiotis Papadopoulos, IEEE Electrification Magazine. Opportunities for energy storage: Assesing Whole-System Economic Benefits of Energy Storage in Future Electricity Systems, 2017.

[10] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review, 2009.

[11] IEEE Electrification Magazine. Opening the Box of Energy Storage, 2018.

[12] International Renewable Energy Agency (IRENA). Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030, 2017.

[13] Inés Usera, Pablo Rodilla, Scott Burger, Ignacio Herrero and Carlos Batlle. The Regulatory Debate About Energy Storage Systems, 2017.

[14] Jesus E. Contereras-Ocana, Yishen Wang, Miguel A. Ortega-Vazquez, and Baosen Zhang. Energy Storage: Market Power and Social Welfare, 2017.

[15] J.M. Arroyo, A.J. Conejo. Optimal Response of a Thermal Unit to an Electricity Spot Market, 2000.

[16] K.C. Divya, Jacob Østergaard. Battery energy storage technology for power systems—an overview, 2009.

[17] Matteo Di Castelnuovo, Miguel Vazquez. Policy and Regulation for Energy Storage Systems, 2018.

[18] P. V. Brogan, R. Best, J. Morrow, R. Duncan, M. L. Kubik. Stacking Battery Energy Storage Revenues with Enhanced Service Provision, 2019.

[19] Patrick J. Balducci, M. Jan E. Alam, Trevor D. Hardy, Di Wu. Assigning value to energy storage systems at multiple points in an electrical grid, 2018.

[20] Peter Hasto, Par Holmberg. Some inequalities related to the analysis of electricity auctions, 2005.

[21] Public Interest Energy Research. 2020 strategic analysis of energy storage in California, 2011.

[22] T.Desruesa, J.Ruer, P.Marty, J.F.Fourmigué. A thermal energy storage process for large scale electric applications, 2010.

[23] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke, Christopher Krupke. Overview of current development in compressed air energy storage technology, 2014.

[24] Μαρίνα Γιαννούκου. Πρόβλεψη οριακής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, Διπλωματική Εργασία, 2020.

[25] Διαχειριστής ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης. Ενεργειακό μείγμα 2018, 2019.

[26] Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς. Εγχειρίδιο Υπολογισμού Κόστους Λειτουργίας Μονάδων, 2010.

[27] Χαλατσάκος Οδυσσέας. Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας: Τεχνολογίες και ρυθμιστικό πλαίσιο, Διπλωματική Εργασία, 2017.

[28] Χρήστος Π. Λεοντάρης. Έλεγχος και Δυναμική Συμπεριφορά Συστήματος Αποθήκευσης με Μπαταρίες, Διπλωματική Εργασία, 2018.