



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Ανάλυση της λειτουργίας αποθηκευτικών σταθμών σε περιβάλλον αγορών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΪΚΑΛΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ

Επιβλέπων : Παπαθανασίου Σταύρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2022



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Ανάλυση της λειτουργίας αποθηκευτικών σταθμών σε περιβάλλον αγορών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΪΚΑΛΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ

Επιβλέπων : Παπαθανασίου Σταύρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12η Απριλίου 2022.

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κορρές Γεώργιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεωργιλιάκης Πάυλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2022

.....
Χαϊκιάλης Μαρίνος

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

Copyright © Χαϊκιάλης Μαρίνος, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) έχει αποκτήσει σημαντική αξία σε όλο τον κόσμο, ιδίως τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Αν και η υψηλού επιπέδου διείσδυση των ΑΠΕ μειώνει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή ενέργειας, τίθενται αρκετά τεχνικά ζητήματα τα οποία σχετίζονται με την υψηλή αβεβαιότητα, τη χαμηλή ικανότητα αντιμετώπισης σφαλμάτων, τη χαμηλή παροχή εφεδρειών και τη χαμηλή ποιότητα ισχύος. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων χρησιμοποιούνται, εκτός των στρατηγικών ελέγχου, διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Η σημασία ενός αποθηκευτικού σταθμού σε ένα σύστημα μπορεί να είναι μέγιστης σημασίας καθώς μπορεί να επιφέρει εξομάλυνση των αιχμών του συστήματος και καλύτερη αξιοποίηση όλης της παραγόμενης ενέργειας αλλά παράλληλα και την επίτευξη εσόδων μέσα από την παροχή αυτών των υπηρεσιών.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένο σε ένα διδιάστατο πρόβλημα το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Το σύστημα περιλαμβάνει διάφορους τεχνικούς περιορισμούς θερμικών μονάδων, μαζί με τα μεταβλητά κόστη που τις χαρακτηρίζουν, πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ, ζήτηση ισχύος και εφεδρειών καθώς και τον αποθηκευτικό σταθμό μαζί με τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του. Συγκεκριμένα στο πρώτο σκέλος καταστρώνεται η βέλτιστη προσφορά την αποθήκευσης, για συμμετοχή στο ενεργειακό αρμπιτράζ και στην αγορά εφεδρειών, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους του αποθηκευτικού σταθμού για διαφορετικές διαμορφώσεις της μπαταρίας και του συστήματος ενέργειας. Στο δεύτερο σκέλος η προσφορά της αποθήκευσης εξετάζεται προς όφελος του συστήματος και συνεπώς με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος.

Λέξεις κλειδιά

Αποθήκευση ενέργειας, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Ενεργειακό αρμπιτράζ, Παροχή εφεδρειών, Διείσδυση ΑΠΕ, Διεπίπεδο πρόβλημα, Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός, Γραμμικοποίηση συστήματος, Μεγιστοποίηση κέρδους συστήματος

Abstract

The use of renewable energy sources (RES) has gained significant value around the world, especially in the last two decades. Although the high level of penetration of renewable energy reduces the negative environmental impacts compared to conventional power generation, there are several technical issues related to high uncertainty, low fault tolerance, low generation reserve and poor power quality. To address these issues, in addition to control strategies, various energy storage technologies are used. The importance of a storage plant in a system can be of utmost importance as it can bring about smoothing of system energy peaks and better utilisation of all the energy produced but also generate revenue through the provision of these services.

In this paper, a simulation of a power system based on a bi-level problem which is solved by the Mixed Integer Linear Programming method, is carried out. The system includes various technical constraints of thermal units, together with their variable costs, accurate forecast of renewable generation, power demand and reserves, and the storage plant characterized by its technical and operational constraints. Specifically, the first part of the study is to establish the optimal offer of storage for participation in the energy arbitrage and the reserve market, in order to maximize the profit of the storage plant for different battery and power system configurations. In the second part, the offer of storage is considered for the benefit of the system and thus to minimize the total system cost.

Key words

Energy storage, Renewable energy sources, Energy arbitrage, System energy reserves, Renewable energy penetration, Bi-level problem, Mixed Integer Linear Programming, System linearization, System profit maximization

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του καθηγητή μου, κυρίου Σταύρου Παπαθανασίου. Του εκφράζω ένα βαθύ ευχαριστώ για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε. Χρωστάω, επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Γεώργιο Ψαρρό για την άριστη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης αυτής της εργασίας, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για να μου δώσει σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις πάνω στο θέμα, αλλά και για την προθυμία του και τη βοήθεια, που ποτέ δε δίστασε να μου δώσει.

Ευχαριστώ πολύ, όλους τους φίλους μου αλλά και συμφοιτητές Γιάννη, Αντώνη και Θοδωρή για όλες τις εμπειρίες που ζήσαμε αλλά και για τη συμπαράσταση τους σε ό,τι εμπόδιο και μη συναντήσαμε σε όλο το διάστημα των σπουδών μας

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω πολύ τους γονείς μου, και την οικογένειά μου οι οποίοι υπήρξαν πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα και στους οποίους οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι σήμερα.

Χαϊκάλης Μαρίνος,
Αθήνα, 12η Απριλίου 2022

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος πινάκων	13
Κατάλογος σχημάτων	15
1. Εισαγωγή	21
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δυνατότητες και Περιορισμοί	21
1.2 Αναγκαιότητα για αποθήκευση	23
2. Λειτουργίες αποθήκευσης	25
2.1 Βασικές δυνατότητες της αποθήκευσης	25
2.1.1 Χρονική μετατόπιση ηλεκτρικής ενέργειας	25
2.1.2 Βοηθητικές υπηρεσίες	26
2.1.3 Αποσυμφόρηση του δικτύου διανομής και μεταφοράς	27
3. Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	29
3.1 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές	29
3.1.1 Μπαταρίες μολύβδου	29
3.1.2 Μπαταρίες ιόντων λιθίου	29
3.1.3 Μπαταρίες νικελίου	29
3.1.4 Μπαταρίες θειούχου νατρίου	30
3.1.5 Μπαταρίες ροής	30
3.2 Υπερπυκνωτής (Supercapacitor)	30
3.3 Υπεραγωγίμα πηνία (SMES)	31
3.4 Κυψέλες καυσίμου	31
3.5 Πεπιεσμένος αέρας (CAES)	31
3.6 Στρεφόμενοι σφόνδυλοι (Flywheel Energy Storage - FES)	32
3.7 Υβριδικά συστήματα	32
3.8 Υδροηλεκτρικός σταθμός με αντλησιοταμίευση (PHS)	33
4. Αγορά ενέργειας	35
4.1 Δημοπρασίες	35
4.1.1 Uniform Price Auction	35
4.1.2 Pay as Bid Auction	36
4.2 Βασικές κατηγορίες συμμετεχόντων στις δημοπρασίες αγορών ενέργειας	37
4.2.1 Price Taker	37

4.2.2	Price Maker	38
5.	Μεθοδολογίες διαχείρισης μονάδων αποθήκευσης	39
5.1	Profit Maximization - Μέθοδος Price Taker	39
5.2	Sytem Cost Optimal	40
5.3	Profit Maximization - Μέθοδος Price Maker	43
5.3.1	Διεπίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης	43
5.3.2	Πρόβλημα αποθηκευτικού σταθμού	44
6.	Αποτελέσματα μεθοδολογιών	49
6.1	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2h με τη μέθοδο του Price Maker για διαφορετικές συνθήκες επάρκειας του συστήματος	49
6.1.1	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής	49
6.1.2	Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής	56
6.1.3	Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής	62
6.1.4	Συγκριτικά διαγράμματα	68
6.2	Λειτουργία αποθηκευτικών σταθμών με διαφορετικές διαμορφώσεις με τη μέθοδο του Price Maker	70
6.2.1	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW	70
6.2.2	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW	73
6.2.3	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW	76
6.2.4	Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων	79
6.3	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος	93
6.4	Συγκριτικά διαγράμματα Μεθοδολογιών	99
6.4.1	100MW / 2Hours	101
6.4.2	200MW / 2 Hours	105
6.4.3	500MW / 2 Hours	109
6.4.4	1500MW / 2 Hours	110
7.	Επίλογος	111
7.1	Συμπεράσματα	111
7.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	112
	Βιβλιογραφία	113
	Παράρτημα	115
A.	Ονοματολογία μεταβλητών	115
A.1	Σύνολα	115
A.2	Συνεχείς Μεταβλητές	115
A.2.1	Ζήτηση ενέργειας	115
A.2.2	Οριακές τιμές	115
A.2.3	Αποθήκευση	115
A.2.4	Συμβατικές μονάδες παραγωγής	116
A.2.5	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	116
A.2.6	Μεταβλητές χαλάρωσης	116
A.3	Σταθερές	116

Κατάλογος πινάκων

6.1	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς	49
6.2	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2h με τη μέθοδο του Price Maker για διαφορετικές συνθήκες επάρκειας του συστήματος - Σύγκριση κερδών . . .	69
6.3	Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 50 MW	79
6.4	Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 100 MW	79
6.5	Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 200 MW	80
6.6	Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 500 MW	80
6.7	Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 1500 MW	80
6.8	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2 hours	94
6.9	Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού - Λειτουργία ελαχιστοποίησης του κόστους . . .	100
6.10	Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού - Λειτουργία μεγιστοποίησης του κέρδους	100

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Χρονική πρόβλεψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2030.[1]	21
1.2	Παγκόσμια επένδυση αιολικής και ηλιακής ενέργειας.[1]	22
1.3	Παγκόσμια παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας.[1]	22
1.4	Καμπύλη ζήτησης και παραγωγής ισχύος[2]	24
1.5	Η επιρροή της αποθήκευσης στην τιμή ηλεκτρικής ενέργειας[3]	24
2.1	Arbitrage	26
2.2	Εφαρμογές Αποθήκευσης Ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες σε ενέργεια, ισχύ και χρόνο εκφόρτισης.[4]	27
3.1	Λειτουργία υπερπυκνωτή.[5]	31
3.2	Διάγραμμα λειτουργίας συστήματος πεπιεσμένου αέρα.[6]	32
3.3	Διάγραμμα λειτουργίας σταθμού με αντλησιοταμίευση.	33
3.4	Σύγκριση διφόρων μεθόδων αποθήκευσης.[2]	34
4.1	Μηχανισμός πληρωμής στην uniform price auction.[7]	36
4.2	Μηχανισμός πληρωμής στην pay as bid auction.[7]	37
5.1	Ταξινόμηση των διεπίπεδων προβλημάτων.[8]	44
6.1	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος	50
6.2	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδος αποθηκευτικού σταθμού από αρμπιτράζ	50
6.3	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού	51
6.4	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ζήτηση - Παραγωγή	52
6.5	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ενεργειακό μείγμα	52
6.6	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας	53
6.7	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας	53
6.8	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας	54
6.9	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών	54
6.10	Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδη από εφεδρείες	55
6.11	Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος	56
6.12	Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδος αποθηκευτικού σταθμού από αρμπιτράζ	57

6.13 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού	57
6.14 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ζήτηση - Παραγωγή . . .	58
6.15 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ενεργειακό μείγμα	58
6.16 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας	59
6.17 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας	59
6.18 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας	60
6.19 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών	60
6.20 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδη από εφεδρείες . .	61
6.21 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος	62
6.22 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδος αποθηκευτικού σταθμού από αρμπιτράζ	63
6.23 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού	63
6.24 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ζήτηση - Παραγωγή . .	64
6.25 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ενεργειακό μείγμα . .	64
6.26 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας	65
6.27 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας	65
6.28 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας	66
6.29 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών	66
6.30 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδη από εφεδρείες . .	67
6.31 Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών	68
6.32 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών	68
6.33 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών	69
6.34 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 2Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	70
6.35 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 3Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	70
6.36 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 4Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	71
6.37 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 2Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	71
6.38 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 3Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	71
6.39 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 4Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	72
6.40 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW - Γράφημα πίτας ετήσιας συμμετοχής του αποθηκευτικού σταθμού σε εφεδρείες	72

6.41	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	73
6.42	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 3Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	73
6.43	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 4Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	74
6.44	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	74
6.45	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 3Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	74
6.46	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 4Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	75
6.47	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW - Γράφημα πίτας ετήσιας συμμετοχής του αποθηκευτικού σταθμού σε εφεδρείες	75
6.48	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	76
6.49	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 3Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	76
6.50	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 4Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού	77
6.51	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	77
6.52	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 3Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	77
6.53	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 4Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών	78
6.54	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW - Γράφημα πίτας ετήσιας συμμετοχής του αποθηκευτικού σταθμού σε εφεδρείες	78
6.55	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Εκφόρτιση	81
6.56	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Φόρτιση	81
6.57	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή συστήματος	82
6.58	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Πρωτεύουσα θετική εφεδρεία	82
6.59	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας	82
6.60	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Δευτερεύουσα θετική εφεδρεία	83
6.61	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας	83
6.62	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - τριτεύουσα θετική εφεδρεία	83
6.63	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή τριτεύουσας θετικής εφεδρείας	84
6.64	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία	84
6.65	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας	84

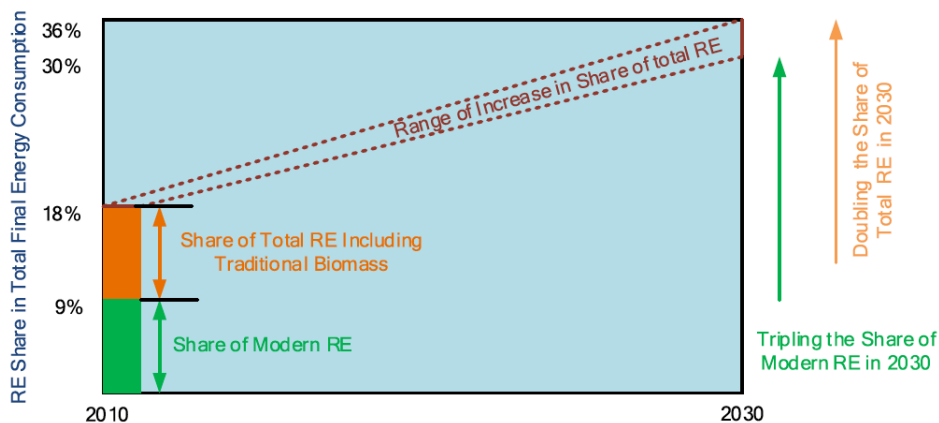
6.91	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας	97
6.92	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών . .	97
6.93	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Διαγράμματα Οριακών τιμών	98
6.94	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2 Hours για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Μέσα διαγράμματα λειτουργίας	98
6.95	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2 Hours για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Μέσα διαγράμματα λειτουργίας	98
6.96	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage	101
6.97	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα θετική εφεδρεία . .	102
6.98	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα θετική εφεδρεία .	102
6.99	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα θετική εφεδρεία . .	103
6.100	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία .	103
6.101	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία . . .	104
6.102	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα αρνητική εφεδρεία .	104
6.103	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage	105
6.104	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα θετική εφεδρεία . .	106
6.105	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα θετική εφεδρεία .	106
6.106	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα θετική εφεδρεία . .	107
6.107	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία .	107
6.108	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία	108
6.109	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα αρνητική εφεδρεία .	108
6.110	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 500MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage	109
6.111	Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 1500MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage	110

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δυνατότητες και Περιορισμοί

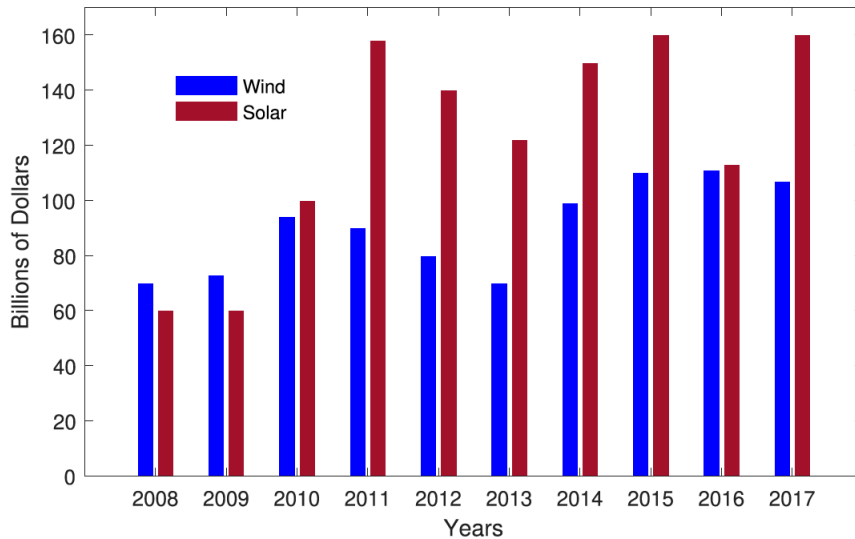
Σήμερα, πολλές περιβαλλοντικές ανησυχίες προκύπτουν λόγω της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και οξειδίου του αζώτου από τους σταθμούς παραγωγής ορυκτών καυσίμων. Αυτή η περιβαλλοντική ρύπανση προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη και όξινη βροχή. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρούνται καθαρά και φθηνότερα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, οι κυβερνήσεις και αρκετοί φορείς αναγκάζονται να αυξήσουν την παραγωγή ΑΠΕ για να αντικαταστήσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ένας οδικός χάρτης για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στον κόσμο έως το 2030 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Αναμένεται ότι ο κόσμος θα καλύψει συνολικά το 36% της ενεργειακής του ζήτησης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έως το 2030. Ο ήλιος, ο άνεμος, η παλίρροια, τα κύματα και η γεωθερμική θερμότητα είναι οι κύριες πηγές παραγωγής ΑΠΕ. Μεταξύ αυτών των πηγών, τα ηλιακά και αιολικά συστήματα είναι τα πιο ελπιδοφόρα λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής τους και της ικανότητάς τους να παρακολουθούν σημεία μέγιστης ισχύος σε ένα ευρύ φάσμα παραλλαγών του ανέμου και του ηλιακού φωτός.[1]



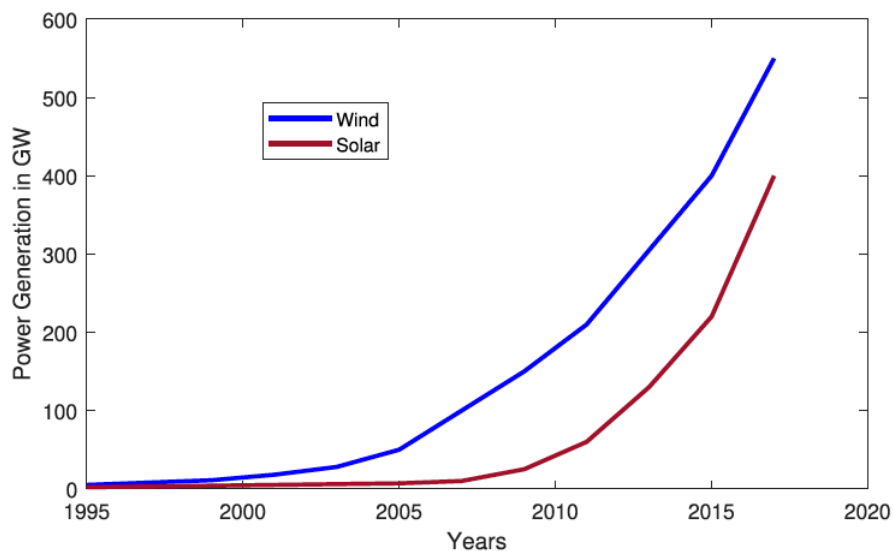
Σχήμα 1.1: Χρονική πρόβλεψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2030.[1]

Το Σχήμα 1.2 δείχνει την παγκόσμια επένδυση ενέργειας από αιολικούς και ηλιακούς πόρους ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, επενδύθηκαν περισσότερα χρήματα για την παραγωγή ενέργειας από αιολική ενέργεια μέχρι το 2009. Ωστόσο, αυτό το σενάριο αντιστράφηκε, έκτοτε η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας σε Giga Watt (GW) από αιολική και ηλιακή απεικονίζεται στο

Σχήμα 1.3. Η υψηλού επιπέδου ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο κοινής ωφέλειας μπορεί να οδηγήσει σε ανησυχίες σχετικά με τη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος λόγω της στοχαστικής φύσης της παραγωγής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στις συνεχείς διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και του ηλιακού φωτός.



Σχήμα 1.2: Παγκόσμια επένδυση αιολικής και ηλιακής ενέργειας.[1]



Σχήμα 1.3: Παγκόσμια παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας.[1]

Η διαλείπουσα και απρόβλεπτη φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί κατάλληλα για να μειωθεί ο αρνητικός αντίκτυπος στη σταθερή λειτουργία του συστήματος.

1.2 Αναγκαιότητα για αποθήκευση

Η επίδραση που έχει η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής στη λειτουργία του συστήματος εξαρτάται από το επίπεδο διείσδυσης, από το μέγεθος του ηλεκτρικού δικτύου και από την διαθέσιμη ισχύ των υπόλοιπων ευέλικτων μονάδων παραγωγής όπως υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αεροστρόβιλοι και σταθμοί συνδυασμένου κύκλου. Το πρόβλημα της διακύμανσης της παραγόμενης ισχύος επιδεινώνεται όσο αυξάνει το επίπεδο διείσδυσης της αιολικής ισχύος και όταν οι ευέλικτες μονάδες παραγωγής αντικαθίστανται από μονάδες με χαμηλό ρυθμό ανάληψης φορτίου, όπως οι λιγνιτικές μονάδες ή οι πυρηνικοί σταθμοί.[2]

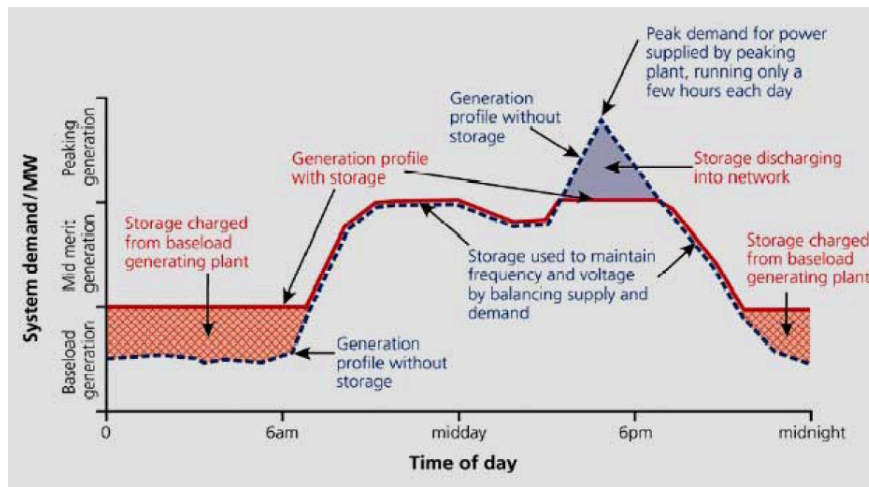
Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, οι διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι παραγωγοί και οι κυβερνήσεις, επενδύουν στην ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξωτερική διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων, γεγονός που ενισχύει το δίκτυο και μειώνει την επίδραση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής. Μία ακόμη ευεργετική λύση συνιστούν τα 'ευφυή δίκτυα' (smart grids), τα οποία διαθέτουν δυνατότητα ελέγχου της ζήτησης και την ικανότητα συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά της ζητούμενης ισχύος. Τέλος, ο απλούστερος και αποτελεσματικότερος τρόπος αντιμετώπισης της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος των αιολικών είναι με την αποθήκευση ενέργειας.

Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να γίνει σε διάφορες μορφές και με ποικίλες διατάξεις, οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια. Οι διατάξεις οι οποίες αποθηκεύουν ενέργεια δύνανται να δράσουν είτε ως καταναλωτής ισχύος στην περίπτωση όπου η περίσσεια ισχύος αποθηκεύεται σε αυτές, είτε ως παραγωγός όταν η ισχύς απελευθερώνεται από αυτές και εγχέεται στο δίκτυο. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της αποθήκευσης ενέργειας είναι ότι παρέχει βοηθητικές υπηρεσίες στη λειτουργία του συστήματος και συμβάλλει στην ευστάθεια και στην ποιότητα της ηλεκτρικής παροχής στους καταναλωτές. Επίσης, με τη χρήση μεθόδων αποθήκευσης βελτιστοποιείται η υποδομή του δικτύου και ελαχιστοποιούνται οι απαιτούμενες επενδύσεις για την ενίσχυσή του.

Στα σύγχρονα συστήματα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο οφείλει να υπερβαίνει την αναμενόμενη αιχμή του φορτίου, με σκοπό την εξασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος. Η ύπαρξη διατάξεων αποθήκευσης δίνει μεγαλύτερη ευελιξία, αφού ένα ποσοστό της αιχμής που καλυπτόταν από τις συμβατικές μονάδες θα τροφοδοτείται από τα συστήματα αποθήκευσης. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αποσύνδεσης κάποιων συμβατικών μονάδων, μειώνοντας σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διατηρώντας την αξιοπιστία της τροφοδότησης του φορτίου σε υψηλά επίπεδα. Η υποστήριξη της παραγωγής με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δίνει τη δυνατότητα μείωσης της εγκατεστημένης ισχύος ενός συμβατικού σταθμού έως και 40 % [43]. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μειωμένες εκπομπές ρύπων και αποδοτικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, δεδομένου ότι η ηλεκτρική ισχύς των μονάδων αυτών θα σημειώνει πολύ μικρότερες μεταβολές. Οι διακυμάνσεις δηλαδή των φορτίων και της αιολικής παραγωγής μπορούν να απορροφηθούν από τις διατάξεις αποθήκευσης σε ένα βαθμό, με τους συμβατικούς σταθμούς να διατηρούν σε γενικές γραμμές ένα σταθερό προφίλ παραγωγής.

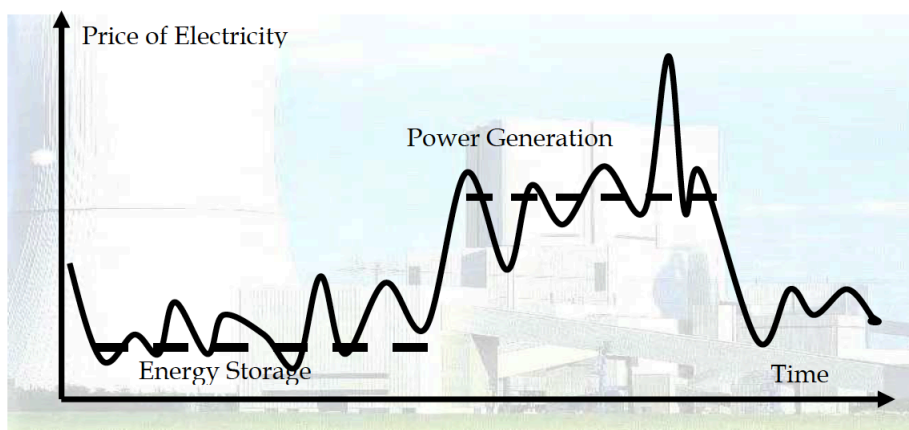
Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται πώς η αποθήκευση της ενέργειας λειτουργεί ως εξομάλυνση της παραγωγής ισχύος των συμβατικών μονάδων παραγωγής, μια τυπική μέρα του έτους [35]. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ισχύ του φορτίου στη διάρκεια της ημέρας, η οποία ταυτίζεται με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των συμβατικών μονάδων στην περίπτωση απουσίας της αποθήκευσης ενέργειας. Αντίθετα, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην παραγωγή των συμβατικών μονάδων, όταν στη λειτουργία του συστήματος ενσωματώνονται διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι με τη χρήση μεθόδων αποθήκευσης, το εύρος λειτουργίας των συμβατικών μονάδων περιορίζεται σημαντικά, οδηγώντας στην οικονομικότερη λειτουργία τους. Έτσι, στην περίπτωση που το φορτίο του συστήματος μειωθεί σημαντικά, πράγμα που συμβαίνει συνήθως τις νυχτερινές ώρες, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής παράγουν ισχύ που υπερβαίνει το φορτίο, η περίσσεια της οποίας αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Έτσι ο

βαθμός απόδοσής τους διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Τις απογευματινές ώρες όπου το φορτίο σημειώνει την αιχμή της ημέρας, αντί να ενταχθεί επιπλέον μονάδα παραγωγής που συνεπάγεται σημαντικό κόστος, η επιπλέον ισχύς που απαιτεί το φορτίο παρέχεται από την εκφόρτιση της διάταξης όπου είχε αποθηκευτεί προηγουμένως η ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 1.4: Καμπύλη ζήτησης και παραγωγής ισχύος[2]

Εκτός από τα οικονομικά οφέλη που σχετίζονται με την αποδοτικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, οικονομικά κίνητρα προκύπτουν και από τη διαχείριση του συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας. Συγκεκριμένα, τις ώρες χαμηλού φορτίου ο διαχειριστής του συστήματος επιβάλλει χαμηλές τιμές, ως κίνητρο για την αύξηση της κατανάλωσης και τη διατήρηση της παραγωγής των συμβατικών μονάδων σε αποδοτικά επίπεδα. Αντίθετα, τις ώρες όπου το φορτίο του συστήματος αυξάνει σημαντικά, ο διαχειριστής επιβάλλει υψηλές τιμές ώστε οι παραγωγοί να αποζημιωθούν για την ένταξη περαιτέρω μονάδων στο σύστημα. Το γεγονός αυτό μπορεί να εκμεταλλευτεί από τον παραγωγό που διαθέτει σύστημα αποθήκευσης, αγοράζοντας και αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες χαμηλού φορτίου, και επιστρέφοντάς την στο δίκτυο τις απογευματινές ώρες όπου η τιμή είναι υψηλή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5 [3].



Σχήμα 1.5: Η επιρροή της αποθήκευσης στην τιμή ηλεκτρικής ενέργειας[3]

Κεφάλαιο 2

Λειτουργίες αποθήκευσης

Δεδομένης της διαλείπουσας φύσης των πηγών αιολικής και ηλιακής ενέργειας, είναι σαφές ότι η ικανότητα αποθήκευσης των ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι διαθέσιμη σε αφθονία καθώς και η χρήση της σε μεταγενέστερο χρόνο, είναι πολύτιμη για το σύστημα. Τα σχέδια της ΕΕ για αύξηση του μεριδίου της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν παρακινήσει ένα νέο κύμα ενδιαφέροντος για την αποθήκευση ενέργειας.

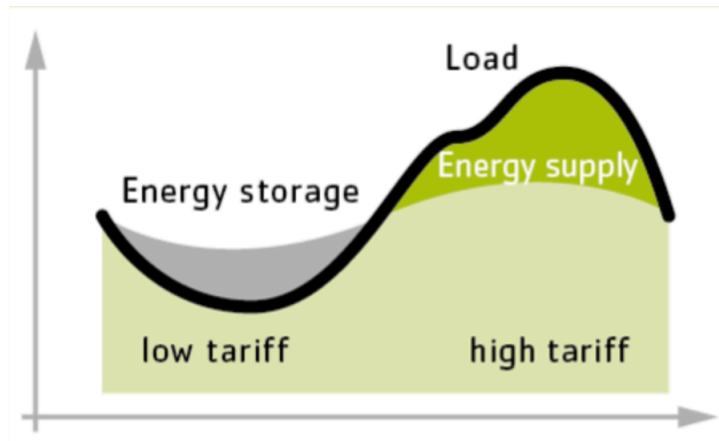
2.1 Βασικές δυνατότητες της αποθήκευσης

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναγνωρίζει την αποθήκευση ενέργειας ως σημαντικό στοιχείο στη μετάβασή της σε έναν τομέα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς άνθρακα. Η αποθήκευση μπορεί να παρέχει μια σειρά υπηρεσιών στον ενεργειακό τομέα. Ορισμένοι γενικοί τομείς-υπηρεσίες που μπορεί να παρέχει η αποθήκευση για τη διαχείριση των επιπτώσεων της αυξανόμενης διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναφέρονται στη συνέχεια.

2.1.1 Χρονική μετατόπιση ηλεκτρικής ενέργειας

Ο αποθηκευτικός σταθμός μπορεί να φορτιστεί σε περιόδους υψηλής προσφοράς και χαμηλής ζήτησης, και να εκφορτίσει την ενέργεια αυτή σε περιόδους χαμηλής προσφοράς και υψηλής ζήτησης. Η Μετατόπιση χρόνου της ηλεκτρικής ενέργειας συμβάλλει στη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου μειώνοντας τη διαφορά στην υπολειπόμενη ζήτηση. Επιτρέπει επίσης την άντληση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που θα έπρεπε να περιοχτεί λόγω περισσείας ενέργειας, παρέχοντάς τη στο δίκτυο αργότερα

Οι αγορές ενέργειας καλύπτουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και βραχυπρόθεσμα. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί σε δύο αγορές ενέργειας: την επόμενη μέρα και τις αγορές ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Η αγορά της επόμενης ημέρας είναι μια προθεσμιακή αγορά η οποία δημιουργεί οικονομικά χρονοδιαγράμματα για την κατανάλωση και την παραγωγή ενέργειας μία ημέρα πριν από την ημέρα λειτουργίας. Με βάση τις προσφορές ζήτησης, τις προσφορές παραγωγής και τις προγραμματισμένες διμερείς συναλλαγές, οι τοπικές οριακές τιμές καθορίζονται για την επόμενη ημέρα λειτουργίας. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις των τιμών της ενέργειας παρέχουν ένα καλό δυναμικό κέρδος για το arbitrage, αγοράζοντας ενέργεια όταν οι τιμές είναι χαμηλές σε ώρες αιχμής και πουλώντας τη σε υψηλότερες τιμές ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Arbitrage

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπουν μια χρονική αντιστάθμιση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας έχει σημαντικό αντίκτυπο τόσο στα φυσικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου όσο και στα πιθανά έσοδα των συμμετεχόντων στην αγορά ενέργειας.[9]

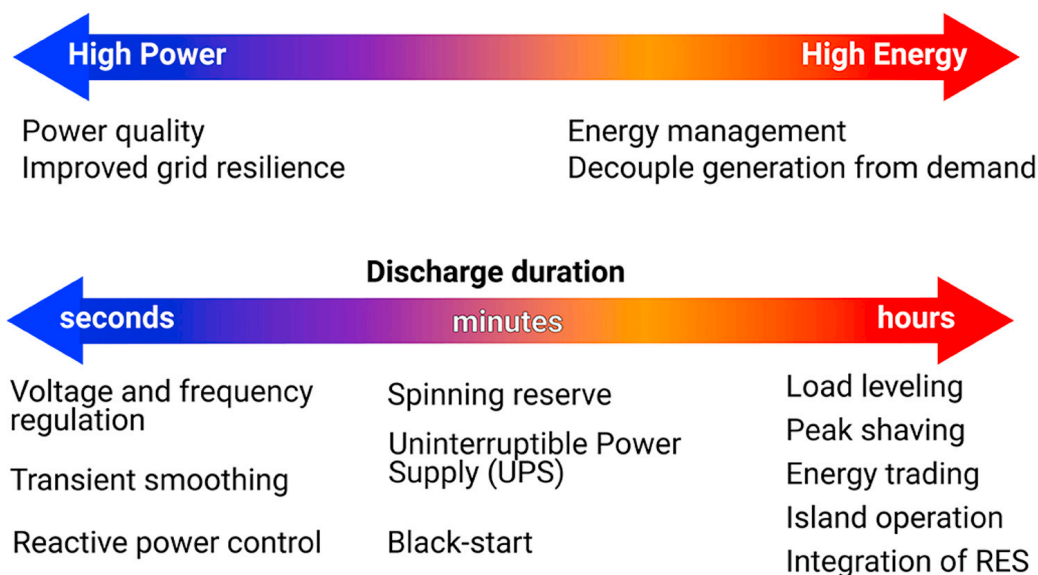
2.1.2 Βοηθητικές υπηρεσίες

Στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η αγορά βοηθητικών υπηρεσιών είναι αντίστοιχα σημαντική για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του δικτύου. Η αποθήκευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση πολλών βοηθητικών υπηρεσιών που περιλαμβάνουν υπηρεσίες ρύθμισης και εφεδρειών. Οι διακυμάνσεις της ζήτησης και της προσφοράς παρακολουθούνται από στιγμή σε στιγμή από τις υπηρεσίες ρύθμισης, ενώ οι υπηρεσίες εφεδρειών ανταποκρίνονται στις ωριαίες αλλαγές στο φορτίο και την προσφορά.

Ένας σταθμός αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να εξασφαλίσει την απαραίτητη ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Για την παροχή εφεδρειών, η αποθήκευση δεσμεύει τη χωρητικότητα της για φόρτιση όταν υπάρχει μια απρόσμενη υπέρβαση τροφοδοσία ρεύματος καθώς και για εκφόρτιση όταν υπάρχει αντίστοιχα απρόσμενη υπέρβαση της ζήτησης ισχύος. Ορισμένες περιφέρειες εξακολουθούν να μην επιτρέπουν την αποθήκευση ενέργειας να συμμετέχει σε βοηθητικές υπηρεσίες.

Οι υπηρεσίες ρύθμισης παρέχονται καλά από ορισμένα συστήματα αποθήκευσης, όπως η αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους. Ωστόσο, λόγω της μικρής διάρκειας λειτουργίας του, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακές εφαρμογές όπως το arbitrage. Άλλα συστήματα αποθήκευσης, όπως τα υδροηλεκτρικά συστήματα, μπορούν να επιφέρουν υψηλά έσοδα ενώ παρέχουν ρύθμιση συχνότητας. Οι υπηρεσίες ρύθμισης που στοχεύουν στον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης του δικτύου έχουν την ευθύνη να διατηρήσουν τη συχνότητα διασύνδεσης, ώστε να ταιριάζει με την παραγωγή/κατανάλωση ενέργειας και να ισορροπεί μεταξύ της πραγματικής/προγραμματισμένης ροής ισχύος.

Οι επιτυχείς προσφορές σε βοηθητικές αγορές λαμβάνουν την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς βοηθητικών υπηρεσιών, ξεχωριστά από την τιμή της αγοράς ενέργειας. Ως εκ τούτου, οι επιχειρήσεις μπορούν να επιλέξουν να προμηθεύουν ή να προσφέρουν την ισχύ τους, είτε σε βοηθητικές είτε σε ενεργειακές αγορές.



Σχήμα 2.2: Εφαρμογές Αποθήκευσης Ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες σε ενέργεια, ισχύ και χρόνο εκφόρτισης.[4]

2.1.3 Αποσυμφόρηση του δικτύου διανομής και μεταφοράς

Η χρήση της αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να βοηθήσει το σύστημα διανομής και μεταφοράς με την απορρόφηση ισχύος που υπερβαίνει τη χωρητικότητα της και την απελευθέρωση της αργότερα, όταν είναι διαθέσιμο το δίκτυο. Οι αναβαθμίσεις του δικτύου μεταφοράς και διανομής ενέργειας έχουν συνήθως υψηλά έξοδα (αδειοδότηση, κατασκευαστικές εργασίες κ.λπ.), τα οποία μπορεί να προκύψουν όταν η απαιτούμενη επιπλέον χωρητικότητα της γραμμής είναι περιορισμένη. Έτσι, σχετικά μικρές ποσότητες αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα να καθυστερήσουν ή ακόμα και να αποφύγουν κάποια μεγάλη επένδυση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χρήση αποθηκευτικού σταθμού για την αναβολή αναβαθμίσεων στο σύστημα μεταφοράς μπορεί να είναι μία από τις λίγες διαθέσιμες επιλογές (μαζί με τη διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης) εξαιτίας του μεγάλου χρόνου παράδοσης που απαιτείται για την απόκτηση αδειών για νέες κατασκευές.

Κεφάλαιο 3

Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

3.1 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

3.1.1 Μπαταρίες μολύβδου

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή μπαταρίες είναι μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία με εξωτερικές συνδέσεις. Οι μπαταρίες είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένες συσκευές αποθήκευσης, λόγω του ότι είναι φορητά μέσα που μπορούν να μετακινηθούν και να εγκατασταθούν οπουδήποτε. Η χρήση των μπαταριών μολύβδου χρονολογείται από τα μέσα του 18ου αιώνα. Παρότι το είδος αυτό των συσσωρευτών διαθέτει μικρή ενεργειακή πυκνότητα και περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης, εξακολουθεί να είναι η επικρατέστερη τεχνολογία μπαταριών σε εφαρμογές χαμηλού κόστους (όπως μπαταρίες αυτοκινήτου, εφαρμογές αδιάλειπτης παροχής ισχύος). Πρόσφατες μελέτες στρέφονται στην αντικατάσταση του μολύβδου με ελαφρότερα υλικά όπως ο άνθρακας, με σκοπό την αύξηση του επιπέδου παραγωγής ισχύος καθώς και της πυκνότητας ενέργειας που αποθηκεύεται.

3.1.2 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium - ion) διαθέτουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, καθώς και μικρότερο ποσοστό εκφόρτισης σε συνθήκες εκτός λειτουργίας. Ωστόσο, το κόστος αυτού του είδους των συσσωρευτών είναι αρκετά υψηλό έναντι των μπαταριών μολύβδου, και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα, φωτογραφικές μηχανές και λάμπες. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αναμένεται να διεισδύσουν περισσότερο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που διαθέτουν, και μελετάται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα ή για την εξομάλυνση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής.[10]

3.1.3 Μπαταρίες νικελίου

Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου (NiCd) έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, αλλά είναι κατώτερης ποιότητας από τους συσσωρευτές τύπου λιθίου – ιόντος και του νικελίου υβριδίου μετάλλου (NiMH). Τα μειονεκτήματα των μπαταριών NiCd έναντι των NiMH είναι η μικρότερη διάρκεια ζωής, η τοξικότητα του καδμίου, η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης, και ο αρνητικός θερμοκρασιακός συντελεστής.

Οι συσσωρευτές NiMH έχουν πλέον επικρατήσει αντί των NiCd λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων. Ωστόσο, η λειτουργία τους συνεπάγεται και κάποια αρνητικά αποτελέσματα όπως ο υψηλός ρυθμός εκφόρτισης σε συνθήκες εκτός λειτουργίας.

3.1.4 Μπαταρίες θειούχου νατρίου

Οι μπαταρίες θειούχου νατρίου (NaS) υπερτερούν κατά πολύ έναντι των συσσωρευτών μολύβδου – οξέος, διαθέτοντας πλεονεκτήματα όπως υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση, σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας και μεγάλη ασφάλεια. Οι μπαταρίες αυτές έχουν σχετικά μικρό κόστος κατασκευής με αποτέλεσμα να συνιστούν την καλύτερη επιλογή για μαζική παραγωγή συσσωρευτών. Οι μπαταρίες NaS μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο αποθηκεύοντας ενέργεια στις περιόδους χαμηλής ζήτησης και επιστρέφοντας τη στο δίκτυο στις αιχμές του φορτίου. Επίσης, δύναται να χρησιμοποιηθούν ως διατάξεις άμεσης παραγωγής ισχύος στην περίπτωση κάποιας διαταραχής στο δίκτυο ή ακόμα και ως διατάξεις αδιάλειπτης παροχής ισχύος σε αυτόνομες εφαρμογές. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το είδος αυτό των συσσωρευτών είναι κατάλληλο για την ενσωμάτωση στο δίκτυο, συμβάλλοντας στη βελτίωση της δυναμικής απόκρισης του. Το παραπάνω γεγονός είναι τεράστιας σημασίας για συστήματα όπου η διείσδυση των αιολικών πάρκων είναι μεγάλη, δίνοντας τη δυνατότητα της εξομάλυνσης της μεταβλητότητας της αιολικής ισχύος με τη διαρκή μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος από το δίκτυο προς της μπαταρίες και το αντίστροφο.

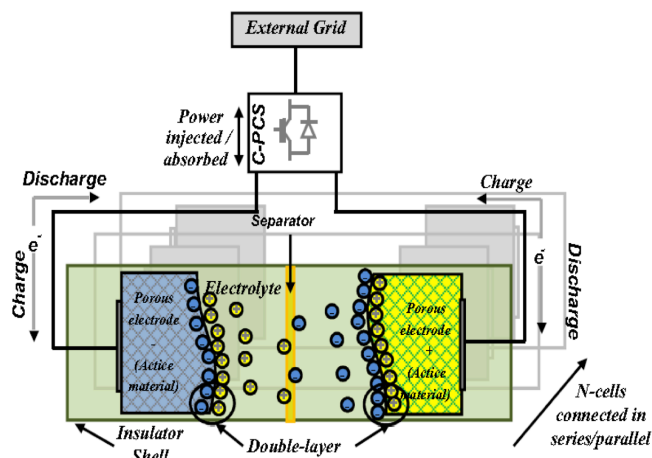
3.1.5 Μπαταρίες ροής

Οι συσσωρευτές ροής (flow batteries - FBs) είναι μία νέα υποσχόμενη τεχνολογία, με κύριο χαρακτηριστικό την απόζευξη της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας από την ικανότητα παροχής ισχύος. Έτσι δύναται να παραχθούν συσσωρευτές τύπου FBs με δυνατότητα καθορισμού του επιπέδου της ισχύος και της μέγιστης δυνατής ενέργειας προς αποθήκευση, ανεξάρτητα. Το γεγονός αυτό προσδίδει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών. Έτσι, οι συσσωρευτές αυτού του είδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι πλέον η ενέργεια προς αποθήκευση και η ισχύς των συσσωρευτών επιλέγεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του δικτύου. Τα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών αυτών είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η ευκολία στη συντήρηση, ο μεγάλος ρυθμός φόρτισης τους, η υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, η ικανότητα πλήρους εκφόρτισης, η χρήση μη διαβρωτικών μετάλλων και η λειτουργία υπό χαμηλή θερμοκρασία. Το κύριο μειονέκτημα της λειτουργίας τους είναι η χρήση μηχανικών κινητών μερών.

3.2 Υπερπυκνωτής (Supercapacitor)

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος. Η αξία του υπερβαίνει σε αρκετές περιπτώσεις την αξία του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή ακόμα και κατά χίλιες φορές. Οι μεγαλύτεροι πυκνωτές που κατασκευάζονται διαθέτουν χωρητικότητα έως 5000 farad και ενεργειακή πυκνότητα ύψους 30 Wh / kg.[10] Εξαιτίας της μεγάλης αγωγιμότητας και της μικρής απόστασης των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές εμφανίζουν μικρή διαφορά δυναμικού (συνήθως από 2 έως 3 V). Η διάρκεια ζωής τους είναι αρκετά μεγάλη, λόγω του ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας δεν σημειώνονται χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια. Επίσης διαθέτουν υψηλό συντελεστή απόδοσης, ο οποίος εξαρτάται μόνο από την ωμική αντίσταση των ηλεκτροδίων. Η πυκνότητα ισχύος τους είναι πολύ υψηλή, δεδομένου ότι τα φορτία αποθηκεύονται με φυσικό τρόπο στα ηλεκτρόδια, ενώ αντίθετως η πυκνότητα ενέργειας είναι μικρή λόγω του γεγονότος πως τα ηλεκτρόδια δεν συνοδεύονται από χημικές αντιδράσεις. Η απουσία των χημικών στοιχείων από τους υπερπυκνωτές (που αντίθετα ενυπάρχουν στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές) συνεπάγεται πως μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως, οδηγώντας σε μεγάλες ταλαντώσεις της τάσης καθώς το επίπεδο φόρτισης μεταβάλλεται. Οι υπερπυκνωτές δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες, λόγω του χάσματος μεταξύ των δύο διατάξεων ως προς την πυκνότητα ενέργειας και του κόστους αγοράς. Ωστόσο, οι υβριδικές διατάξεις συσσωρευτών – υπερπυκνωτών μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και

να αυξήσουν το χρόνο ζωής των μπαταριών. Τα υβριδικά αυτά συστήματα είναι κατάλληλες διατάξεις για τη χρήση σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και για εφαρμογές της αιολικής παραγωγής.



Σχήμα 3.1: Λειτουργία υπερπυκνωτή.[5]

3.3 Υπεραγώγιμα πηνία (SMES)

Το υπεραγώγιμο πηνίο είναι μια ηλεκτρομαγνητική διάταξη, όπου η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την ροή συνεχούς ρεύματος (dc current) σε ένα υπεραγώγιμο τύλιγμα. Το τύλιγμα ψύχεται με υγρό ήλιο σε θερμοκρασίας κάτω της κρίσιμης, για την εμφάνιση του φαινομένου της (σχεδόν) μηδενικής αντίστασης. Τα SMES έχουν πολύ μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος, μεγάλο συντελεστή απόδοσης (άνω του 90 %), και αρκετά μικρή χρονική απόκριση (της τάξεως των ms). Τα υπεραγώγιμα πηνία μπορούν να βρουν εφαρμογή στα ηλεκτρικά δίκτυα με αυξημένη αιολική διείσδυση, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα ισχύος.

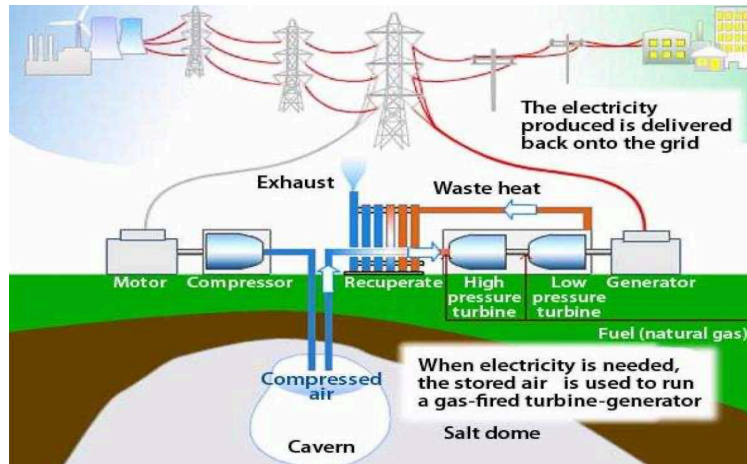
3.4 Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μικρές δεξαμενές όπου παράγεται και αποθηκεύεται υδρογόνο [35]. Όταν απαιτηθεί, το υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της καύσης δύναται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το κατάλοιπο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου είναι καθαρό νερό. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον και δύναται να αποθηκευθούν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι η χαμηλή απόδοση, η οποία στη γενική περίπτωση είναι της τάξης του 25%.

3.5 Πεπιεσμένος αέρας (CAES)

Η γενική λογική της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πεπιεσμένου αέρα είναι ότι σε περιόδους χαμηλής ζήτησης του φορτίου, καταναλώνεται ισχύς από συστοιχία συμπιεστών οι οποίοι συμπιέζουν αέρα που αποθηκεύεται σε κάποια δεξαμενή. Οι συμπιεστές βρίσκονται στον ίδιο άξονα με ένα ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος απορροφά ηλεκτρική ισχύ για την περιστροφή του. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του αέρα. Σε περιόδους αιχμής του φορτίου, ο πεπιεσμένος αέρας από τη δεξαμενή, αφού προθερμανθεί, εκτονώνεται σε έναν στρόβιλο παράγοντας περιστροφική ισχύ η οποία, με τη γεννήτρια, που είναι προσαρτημένη στον ίδιο άξονα, μετατρέπεται σε ηλεκτρική και εγχέεται στο δίκτυο, όπως φαίνεται στο

Σχήμα 3.2. Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (CAES) έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις υδραντλητικές μονάδες, με τυπική εγκατεστημένη ισχύ από 50 – 300 MW.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα λειτουργίας συστήματος πεπιεσμένου αέρα.[6]

3.6 Στρεφόμενοι σφόνδυλοι (Flywheel Energy Storage - FES)

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω στρεφόμενου σφονδύλου επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση ενός δρομέα σε μία πολύ υψηλή ταχύτητα, μετατρέποντας την ηλεκτρική ισχύ σε περιστροφική στον εν λόγω άξονα. Όταν απορροφάται ενέργεια από τη διάταξη FES, η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου αυξάνει ως απόρροια της διατήρησης της ενέργειας. Το αντίθετο συμβαίνει όταν αποδίδεται ενέργεια στο ηλεκτρικό σύστημα από τη διάταξη FES, όπου η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου μειώνεται. Η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να βρει εφαρμογή στην αιολική παραγωγή, όπου με τη χρήση AC-AC μετατροπέα αμφίδρομης ροής ισχύος, η ενσωματωμένη γεννήτρια – κινητήρας στο σφόνδυλο επιταχύνεται και επιβραδύνεται, απορροφώντας της απότομες διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος. Η ταχύτητα των στρεφόμενων σφονδύλων κυμαίνεται από 20000 έως 50000 στροφές ανά λεπτό (Σ.Α.Λ.). Οι συγκεκριμένες διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή πυκνότητα ενέργειας (100 – 130 Wh / kg) και ικανότητα για μεγάλη παραγωγή ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης των FES φτάνει το 90%.[10] Η ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 3 kWh έως 133 kWh. Η πλήρης φόρτιση των διατάξεων αυτών επέρχεται σε λιγότερο από 15 λεπτά. Η ροή ενέργειας στα συστήματα FES ελέγχεται με την ηλεκτρική μηχανή που είναι προσαρτημένη στον ίδιο άξονα με τον σφόνδυλο, μέσω του αντιστροφέα που προαναφέρθηκε. Η ηλεκτρική μηχανή αυτή είναι συνήθως μια τριφασική γεννήτρια – κινητήρας. Η χρήση των στρεφόμενων σφονδύλων είναι πολύ ευνοϊκή για τη ρύθμιση συχνότητας και την βελτίωση της ποιότητας ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλης διείσδυσης της αιολικής παραγωγής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

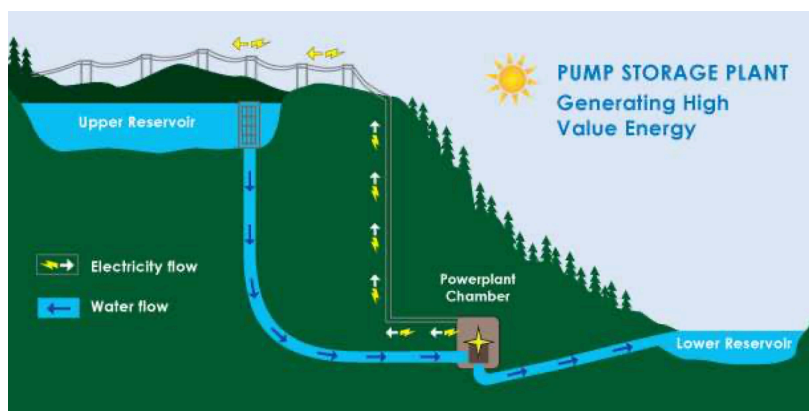
3.7 Υβριδικά συστήματα

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης για μια εφαρμογή εξαρτάται από την ικανότητα αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας και ισχύος, το χρόνο απόκρισης, το βάρος, τον όγκο, και τη θερμοκρασία λειτουργίας της κάθε διάταξης. Συχνά, οι προαναφερθείσες διατάξεις μεμονωμένα δεν ικανοποιούν στο μέγιστο βαθμό τις τεχνικές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Μερικές εφαρμογές απαιτούν συνδυασμό των χαρακτηριστικών λειτουργίας των διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης, όπως συγκεκριμένη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, καθορισμένο κόστος και χρόνο ζωής. Έτσι προκύπτουν τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης, τα οποία σχηματίζονται από την ηλεκτρική διασύνδεση κάποιων από των διατάξεων που αναφέρθηκαν παραπάνω.[10]

3.8 Υδροηλεκτρικός σταθμός με αντλησιοταμίευση (PHS)

Οι συμβατικοί υδραντλητικοί σταθμοί αποτελούνται από δύο δεξαμενές, οι οποίες είναι κατασκευασμένες σε υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Κατά τις περιόδους όπου η ζήτηση του φορτίου και η τιμή της ενέργειας είναι χαμηλή, μάζα νερού μεταφέρεται από την κάτω δεξαμενή στην πάνω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Αυτό επιτυγχάνεται με την περιστροφή ηλεκτρικών κινητήρων, όπου η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο μετατρέπεται αρχικά σε κινητική και τέλος σε δυναμική ενέργεια του νερού λόγω της υψομετρικής διαφοράς των δύο δεξαμενών. Αντιθέτως, σε περιόδους αιχμής του φορτίου, μάζα νερού ελευθερώνεται από την άνω δεξαμενή, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ροή νερού με υψηλή ταχύτητα η οποία εκτονώνεται σε κάποιον υδροστρόβιλο παράγοντας ηλεκτρική ισχύ. Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μπορούν να παράγουν ισχύ έως και 1 GW.

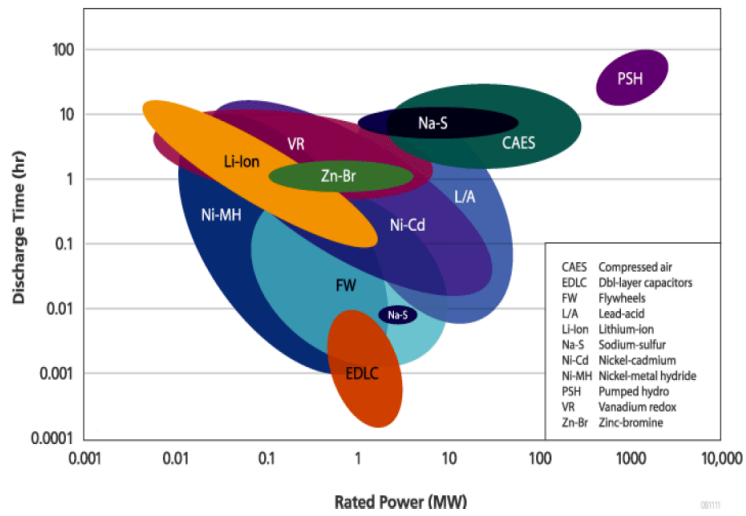


Σχήμα 3.3: Διάγραμμα λειτουργίας σταθμού με αντλησιοταμίευση.

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται λοιπόν στην κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Κατά τη διέλευσή του από τον αγωγό πτώσεως, το νερό κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες. Δύο από τους σημαντικότερους είναι ο όγκος του νερού που ρέει και η διαφορά μανομετρικού ύψους μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα και του στρόβιλου. Η ηλεκτρική παραγόμενη ισχύς, συγκεκριμένα, είναι ανάλογη των δύο αυτών μεγεθών. Για το λόγο αυτό, μόνο σε περιοχές με σημαντικές βροχοπτώσεις, πλούσιες πηγές και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατόν να κατασκευαστούν υδροηλεκτρικά έργα. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται, χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας, καλύπτοντας φορτία αιχμής.

Όσον αφορά την αντλησιοταμίευση, πρέπει να υπάρχει συγκεκριμένη δεξαμενή σε μεγάλο υψόμετρο ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με τη μεταφορά υδάτων από χαμηλό υψόμετρο σε μεγαλύτερο. Έτσι τα αρνητικά αποτελέσματα των έργων μεγάλης κλίμακας, όπως η ανάγκη για φράγματα με τις ακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενυπάρχουν και στην περίπτωση που για την αποθήκευση ενέργειας επιλεχθούν τα υδροηλεκτρικά – αντλητικά εργοστάσια. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος όπου έχει περιοριστεί

στο ελάχιστο η κατασκευή νέων υδροηλεκτρικών έργων.



Σχήμα 3.4: Σύγκριση διφόρων μεθόδων αποθήκευσης.[2]

Κεφάλαιο 4

Αγορά ενέργειας

4.1 Δημοπρασίες

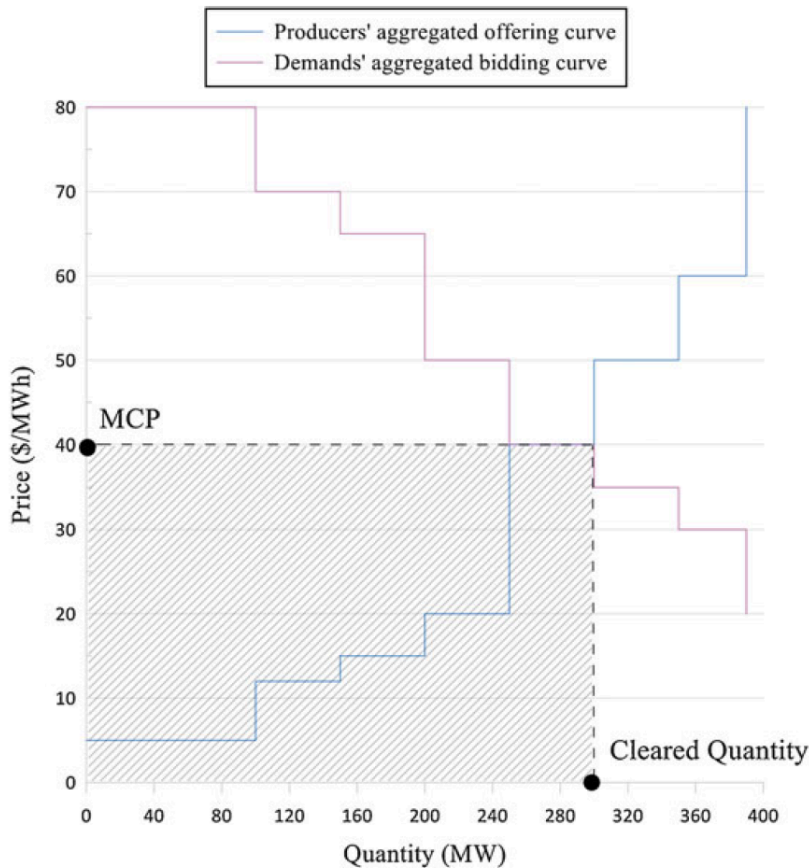
Ο μηχανισμός με τον οποίο γίνονται οι συναλλαγές στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι δημοπρασίες.[7] Οποιαδήποτε δημοπρασία βασίζεται σε τρία βασικά στοιχεία, τους κανόνες υποβολής προσφορών, εκκαθάρισης και τιμολόγησης. Οι κανόνες υποβολής προσφορών καθορίζουν την ποιότητα και την ποσότητα των προσφορών που υποβάλλονται. Οι κανόνες εκκαθάρισης καθορίζουν τον τρόπο διεύθυνσης της αγοράς, την επιλογή των βραβευθέντων συμμετεχόντων και τον καθορισμό της ποσότητας του διαπραγματευόμενου προϊόντος. Οι κανόνες τιμολόγησης καθορίζουν σε ποια τιμή θα διαπραγματευτεί η παραγωγή.

Οι δημοπρασίες αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι κλειστές, δηλαδή οι προεπιλεγμένοι πλειοδότες υποβάλλουν τις προσφορές τους στην αγορά ταυτόχρονα, ώστε να μην γνωρίζουν τις μεταξύ τους υποβολές προσφοράς. Σε αυτού του είδους τις δημοπρασίες, κάθε συμμετέχων υποβάλλει μόνο μία προσφορά για μια συγκεκριμένη ποσότητα παραγωγής. Το κύριο μειονέκτημα της κλειστής δημοπρασίας είναι ότι οι συμμετέχοντες που κερδίζουν δεν έχουν πληροφορίες για τα έσοδα των αντιπάλων με αποτέλεσμα να πιστεύουν ότι θα μπορούσαν να αποκομίσουν περισσότερα κέρδη, αν είχαν προβλέψει με ακρίβεια τις τιμές.

Στις ανταγωνιστικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, οι παραγωγοί ακολουθούν στρατηγικές για την υποβολή προσφορών τους έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους. Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των παραγωγών ενέργειας οδηγεί στο θέμα της θεωρίας παιγνίων. Αυτά τα παιχνίδια είναι γνωστά ως μη συνεργατικά παιχνίδια, στα οποία όλοι οι συμμετέχοντες προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους χωρίς να υπολογίζουν την ευημερία των άλλων. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί επανειλημμένα, και έτσι οι συμμετέχοντες μαθαίνουν τις στρατηγικές τους και των υπολοίπων σταδιακά.

4.1.1 Uniform Price Auction

Στην Uniform Price Auction, όλοι οι νικητές θα πληρωθούν σε μια ενιαία προκαθορισμένη τιμή, την οριακή τιμή του συστήματος, ανεξάρτητα από το τι είχαν προσφέρει. Η προσφορά που θα επιλεγεί τελευταία ονομάζεται «οριακή μονάδα», θα πουλήσει στην τιμή που προσέφερε και κατ' επέκταση δε θα έχει επιπλέον πλεόνασμα. Η διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς ανεξάρτητα από τον κανόνα τιμολόγησης είναι απλή και βασίζεται στην ισορροπία παραγωγής και ζήτησης λαμβάνοντας υπόψη τους οικονομικούς δείκτες. Ο ανεξάρτητος διαχειριστής συστήματος (ISO) συγκεντρώνει τις τιμές προσφοράς και ζήτησης σε μια άμεση αγορά και τις τακτοποιεί με τη μορφή αύξουσας και φθίνουσας καμπύλης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η τομή αυτών των δύο καμπυλών θα καθορίσει την τιμή αγοράς και κατά συνέπεια την εκκαθαρισμένη ποσότητα. Όλες οι πωλήσεις πραγματοποιούνται σε τιμή αγοράς. Η σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 4.1 δείχνει τα συνολικά έσοδα των νικητών παραγωγών. Η επάνω περιοχή της σκιασμένης περιοχής αντιπροσωπεύει το πλεόνασμα των αγοραστών.



Σχήμα 4.1: Μηχανισμός πληρωμής στην uniform price auction.[7]

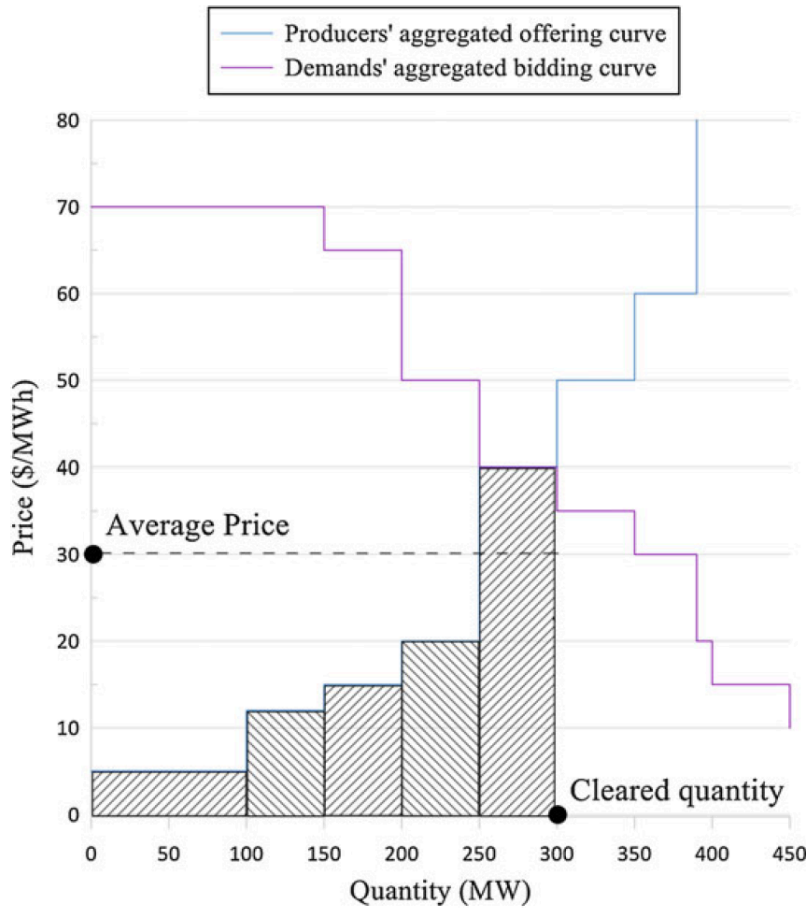
Η Uniform Price Auction είναι μηχανισμός τιμολόγησης εν χρήσει για προθεσμιακές συναλλαγές της ενέργειας στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ και είναι ο απλούστερος μηχανισμός τιμολόγησης από την άποψη των προμηθευτών και των καταναλωτών. Λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της UPA, οι νικητές πωλητές θα απονεύμουν αυτόματα την υψηλότερη αποδεκτή τιμή, επομένως δεν υπάρχει ζημία για κανέναν από τους πωλητές εάν είχαν υποβάλει προσφορά στο οριακό κόστος. Από την άλλη πλευρά, οι αγοραστές θα πληρώσουν τη μικρότερη δυνατή αξία για το εμπορεύσιμο αγαθό τους.

4.1.2 Pay as Bid Auction

Η Pay as Bid Auction ανήκει στην κατηγορία των κλειστών δημοπρασιών, στην οποία γίνονται διακρίσεις μεταξύ των νικητών. Σε αυτές τις δημοπρασίες, κάθε αγοραστής θα πληρώσει στην τιμή προσφοράς και κάθε πωλητής θα πληρωθεί στην τιμή που είχε προσφέρει. Αυτή η δημοπρασία χρησιμοποιείται όταν διαφορετικές μονάδες ενός συγκεκριμένου προϊόντος πωλούνται σε διαφορετικές τιμές και συνήθως χρησιμοποιείται από τις κυβερνήσεις και τις κεντρικές τράπεζες για την κατανομή των ομολόγων του δημοσίου, για κατανομή πιστώσεων του άνθρακα καθώς και για πληρωμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος του κάθε παραγωγού είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του. Για να το επιτύχει αυτό προσφέρει την ισχύ του με σκοπό να προβλέψει όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια την οριακή τιμή του συστήματος. Για τον λόγο αυτό οι συμμετέχοντες δεν αποκαλύπτουν το πραγματικό τους κόστος. Με άλλα λόγια, οι συμμετέχοντες προσπαθούν να προβλέψουν την οριακή τιμή ή τουλάχιστον να εκτιμήσουν τη συνάρτηση κόστους των αντιπάλων.

Το Σχήμα 4.2 δείχνει την εκκαθάριση αγοράς στο πλαίσιο του Pay as Bid Auction. Η διαδικασία εκκαθάρισης αγοράς είναι παρόμοια με την Uniform Price Auction. Τα έσοδα που κα-

ταβάλλονται στις μονάδες παραγωγής επισημαίνονται από τη σκιασμένη περιοχή. Οι αγοραστές θα πληρώνουν τη μέση τιμή αντί για την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς. Όλοι οι συμμετέχοντες υποβάλλουν τις προσφορές τους σε τιμές υψηλότερες από το πραγματικό τους κόστος για να αποκτήσουν περισσότερα έσοδα. Αυτό βέβαια οδηγεί σε υψηλότερες τιμές στο σύστημα και συνεπώς μειώνει τις ποσότητες που θα εκκαθαριστούν, γεγονός που μειώνει και την αποτελεσματικότητα της αγοράς.



Σχήμα 4.2: Μηχανισμός πληρωμής στην pay as bid auction.[7]

4.2 Βασικές κατηγορίες συμμετεχόντων στις δημοπρασίες αγορών ενέργειας

Λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική δύναμη του κάθε συμμετέχοντα, μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, του price taker και του price maker.[7]

4.2.1 Price Taker

Ένας price taker, στην οικονομική επιστήμη, αναφέρεται σε έναν συμμετέχοντα στην αγορά που δεν είναι σε θέση να υπαγορεύσει τις τιμές σε αυτή. Επομένως, ένας price taker πρέπει να αποδεχτεί την ισχύουσα τιμή αγοράς καθώς επίσης δεν έχει αρκετή ισχύ στην αγορά έτσι ώστε επηρεάσει τις τιμές των αγαθών ή των υπηρεσιών.[11]

Οι price takers εμφανίζονται σε μια απόλυτα ανταγωνιστική αγορά επειδή:

- Όλες οι εταιρείες πωλούν το ίδιο προϊόν

- Υπάρχει μεγάλος αριθμός πωλητών και αγοραστών
- Οι αγοραστές μπορούν να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με την τιμή που χρεώνουν άλλες εταιρείες
- Δεν υπάρχουν φραγμοί σε νέους ανταγωνιστές να συμμετέχουν σε αυτή την αγορά

4.2.2 Price Maker

Ένας price maker είναι ένας πωλητής που έχει αρκετή ισχύ στην αγορά καθώς και οικονομική ισχύ έτσι ώστε να επηρεάσει τις τιμές εντός της αγοράς. Σε μια τέτοια περίπτωση, η ισχύς της αγοράς και των τιμών καθορίζεται από την ικανότητα μιας επιχείρησης να αλλάζει αποτελεσματικά τις τιμές των προϊόντων και των υπηρεσιών. Η σημαντική πτυχή του φαινομένου σχετίζεται με την επίδραση της τιμής της αγοράς χωρίς απώλεια αγοραστών από τους ανταγωνιστές. Κάθε συμμετέχων στην αγορά με βαθμό ισχύος στην αγορά που μπορεί να επηρεάσει την τιμή της θεωρείται παράγοντας διαμόρφωσης τιμών.[12]

Συχνά, οι price makers βρίσκονται σε ανταγωνιστικές αγορές. Τέτοια περιβάλλοντα συχνά επινοούνται ως μονοπώλια ή ολιγοπώλια. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, είναι προφανές ότι το φαινόμενο των διαμορφωτών τιμών συσχετίζεται με την έννοια των μονοπωλίων. Ένα από τα αρνητικά αποτελέσματα των price makers σχετίζεται με την ικανότητα χειραγώγησης των τιμών για χάρη της επίτευξης τεράστιων κερδών. Ωστόσο, υπάρχουν αντιμονοπωλιακές νομοθεσίες που προσπαθούν να ρυθμίσουν τους τέτοιες συμπεριφορές.

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογίες διαχείρισης μονάδων αποθήκευσης

5.1 Profit Maximization - Μέθοδος Price Taker

Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία διατυπώνεται ένα μαθηματικό πρόβλημα το οποίο επιλύει για έναν αποθηκευτικό σταθμό, με δεδομένες τις τιμές της ενέργειας ανά ώρα, ποιο θα είναι το μέγιστο κέρδος για κάθε μέρα μέσα στο έτος καθώς και τον τρόπο λειτουργίας της μπαταρίας ημερησίως (δηλαδή ποσό αποθηκεύει και πόσο εγχέει στο δίκτυο). Ξεκινώντας η αντικειμενική συνάρτηση που μεγιστοποιεί το κέρδος του αποθηκευτικού σταθμού πρόκειται για τη διαφορά εκφόρτισης και φόρτισης επί τη δεδομένη τιμή που έχει το σύστημα εκείνη την ώρα.

$$\max \sum_t \pi(t)[q(t) - r(t)] \quad \forall t \quad (5.1)$$

Ο αποθηκευτικός σταθμός χαρακτηρίζεται από τη χωρητικότητα του η οποία αναφέρεται στη στάθμη της αποθηκευμένης ενέργειας τη δεδομένη χρονική στιγμή η οποία παίρνει τιμές από την ελάχιστη μέχρι τη μέγιστη τιμή που έχει οριστεί. Κάθε ώρα ο αποθηκευτικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να φορτίζεται και να εκφορτίζεται, με τους αντίστοιχους συντελεστές φόρτισης και εκφόρτισης, σύμφωνα με το ισοζύγιο που φαίνεται παρακάτω.

$$v(t) = v(t-1) + \delta^c r(t) - \frac{1}{\delta^d} q(t) \quad \forall t \quad (5.2)$$

$$\underline{v} \leq v(t) \leq \bar{v} \quad \forall t \quad (5.3)$$

Η μπαταρία έχει δύο δυνατότητες, να απορροφά ισχύ από το δίκτυο (φόρτιση- $r(t)$) και να αποδίδει ισχύ στο δίκτυο (εκφόρτιση- $q(t)$). Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται στην ισχύ που απορροφά η μπαταρία και στην ισχύ που εγχέεται από την μπαταρία στο δίκτυο αντίστοιχα για κάθε χρονική στιγμή. Συνεπώς, θα πρέπει να είναι πάντα θετικές ή ίσες με το μηδέν και να μην ξεπερνάνε τη μέγιστη τιμή φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα.

$$0 \leq r(t) \leq \bar{r} \quad \forall t \quad (5.4)$$

$$0 \leq q(t) \leq \bar{q} \quad \forall t \quad (5.5)$$

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι αρκετά απλή καθώς ο αποθηκευτικός σταθμός, γνωρίζοντας τις τιμές ενέργειας ανά ώρα μέσα στο έτος, μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη στιγμή που θα γίνεται η αγορά και η πώληση ενέργειας και έτσι να μεγιστοποιήσει το κέρδος του.

5.2 Sytem Cost Optimal

Σε αυτή τη μεθοδολογία θεωρείται ότι ο αποθηκευτικός σταθμός δεν είναι μια ιδιωτική επένδυση που αποσκοπεί στην επίτευξη κέρδους, αλλά ένα περιουσιακό στοιχείο που ανήκει στη διάθεση του διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος τον χρησιμοποιεί για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος και όχι την αύξηση των εσόδων του παραγωγού. Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση του συστήματος αυτού θα είναι, η ελαχιστοποίηση του συνόλου των μονάδων παραγωγής επί το κόστος λειτουργίας τους.

$$\begin{aligned} \min \sum_t [\sum_b \sum_i c_i(i, b)g'(i, b, t) + \sum_j c_j(j)im(j, t) \\ - \sum_k c_k(k)e(k, t) + da(t)c_{da}] \forall i, b, t \end{aligned} \quad (5.6)$$

όπου $g'(i, b, t)$ οι συμβατικές μονάδες παραγωγής, $im(j, t)$ οι μονάδες παραγωγής που εισάγουν ενέργεια στο σύστημα, $e(k, t)$ οι μονάδες που εξάγουν ενέργεια και $c_i(i, b)$, $c_j(j)$, $c_k(k)$ τα αντίστοιχα μεταβλητά κόστη. Η μεταβλητή da συμβολίζει τη μη παρεχόμενη ενέργεια στο δίκτυο, σε περίπτωση δηλαδή που η παραγωγή δεν είναι ικανή να καλύψει τη ζήτηση. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αφαιρεθεί από την αντικειμενική συνάρτηση καθώς το κόστος παραγωγής του είναι μηδενικό.

Ομοίως με πριν ο αποθηκευτικός σταθμός χαρακτηρίζεται από τη χωρητικότητά του και από το ισοζύγιο ενέργειας που αναφέρθηκε στην παραπάνω μεθοδολογία, τα οποία αναφέρονται στη στάθμη της αποθηκευμένης ενέργειας δεδομένη χρονική στιγμή.

$$v(t) = v(t-1) + \delta^c r(t) - \frac{1}{\delta^d} q(t) \quad \forall t \quad (5.7)$$

$$\underline{v} \leq v(t) \leq \bar{v} \quad \forall t \quad (5.8)$$

Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής, i στον αριθμό, έχουν διαφορετικό κόστος παραγωγής ανάλογα με την ισχύ που παρέχουν στο σύστημα. Το κόστος παραγωγής των συμβατικών μονάδων συνήθως είναι πολυωνυμικό αλλά για διευκόλυνση θεωρείται γραμμικό και χωρίζεται σε διαστήματα (blocks - b) και υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$0 \leq \sum_b g'(i, b, t) \leq \sum_b \bar{g}'(i, b) \quad \forall t \quad (5.9)$$

$$0 \leq g'(i, b, t) \leq \bar{g}'(i, b) \quad \forall t \quad (5.10)$$

Η θεμελιώδης εξίσωση της κάλυψης της ζήτησης από την παραγωγή διαμορφώνεται παρακάτω.

$$\sum_b \sum_i g'(i, b, t) + \sum_j im(j, t) + \sum_t q(t) + w(t) + da(t) = D(t) + \sum_k e(k, t) \quad \forall i, b, t \quad (5.11)$$

όπου $D(t)$ η συνολική ζήτηση φορτίου τη στιγμή t .

Τέλος, όλες οι μονάδες καθορίζονται από μία μέγιστη και μία ελάχιστη ισχύ που μπορούν να αποδώσουν στο σύστημα όπως φαίνεται στους επόμενους περιορισμούς.

$$0 \leq q(t) \leq x(t) \quad \forall t \quad (5.12)$$

$$0 \leq r(t) \leq y(t) \quad \forall t \quad (5.13)$$

$$0 \leq w(t) \leq \bar{w}(t) \quad \forall t \quad (5.14)$$

$$0 \leq e(k, t) \leq \bar{e}(k) \quad \forall k, t \quad (5.15)$$

$$0 \leq im(j, t) \leq \bar{im}(j) \quad \forall j, t \quad (5.16)$$

$$0 \leq da(t) \leq D(t) \quad \forall t \quad (5.17)$$

Τήρηση εφεδρειών

Η έννοια της εφεδρείας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπονοεί την ύπαρξη μονάδων σε ετοιμότητα προκειμένου αυτές να μπορέσουν να αποδώσουν μέρος της ισχύος τους στο σύστημα, την ώρα που υπάρχει μία απρόσμενη απώλεια στην παραγωγή. Μία τέτοια περίπτωση είναι η περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας των οποίων η παραγωγή δεν είναι σταθερή καθώς εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες. Οι κατηγορίες των εφεδρειών χωρίζονται σε πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα, σε θετική και αρνητική. Η πρωτεύουσα εφεδρεία ενεργεί μέσα σε δευτερόλεπτα από τη διαταραχή του συστήματος, η δευτερεύουσα μέσα σε λεπτά από τη διαταραχή του συστήματος ώστε να εξουδετερώσει διακυμάνσεις στη συχνότητα και η τριτεύουσα έρχεται να επουλώσει ότι δεν κατάφεραν οι προηγούμενες δύο. Η έννοια θετική εφεδρεία αναφέρεται στην άμεση διάθεση επάρκειας ισχύος σε περίπτωση μερικής απώλειας παραγωγής, ενώ η έννοια αρνητική εφεδρεία αναφέρεται στη δυνατότητα άμεσης μείωσης-απορρόφησης μέρους της παραγόμενης ισχύος σε περίπτωση αφνίδιας απώλειας του φορτίου.

Σε αυτή την περίπτωση οι θεμελιώδεις εξισώσεις της κάλυψης της ανάγκης των θετικών και των αρνητικών εφεδρειών διαμορφώνονται ως εξής

$$\sum_i r_{gen}^{up}(c, i, t) + r_{st}^{up}(c, t) + dru(c, t) = RR^{up}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.18)$$

$$\sum_i r_{gen}^{down}(c, i, t) + r_{st}^{down}(c, t) + drd(c, t) = RR^{down}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.19)$$

όπου $r_{gen}(c, i, t)$ η παροχή εφεδρειών από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, $r_{st}(c, t)$ η παροχή εφεδρειών από τον αποθηκευτικό σταθμό και $RR(c, t)$ η ανάγκη για εφεδρεία τη στιγμή t . Η μεταβλητή c αναφέρεται στον τύπο εφεδρείας (πρωτεύουσα, δευτερεύουσα, τριτεύουσα) και οι μεταβλητές dru και drd αναφέρονται στην ενέργεια που δεν κατάφερε να αποδοθεί στο σύστημα για εφεδρεία.

Ο αποθηκευτικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να παρέχει θετική και αρνητική εφεδρεία και στα δύο στάδια της λειτουργίας του, κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Οι παρακάτω περιορισμοί καθορίζουν την ισχύ θετικής και αρνητικής εφεδρείας που μπορεί να διαθέσει ο αποθηκευτικός σταθμός τη δεδομένη χρονική στιγμή, με την υπόθεση βέβαια ότι μπορεί να εναλλάσσει συνεχώς μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης παρέχοντας έτσι ένα μεγαλύτερο εύρος εφεδρειών.

$$q(t) \leq \sum_c k1(c, t) \leq \bar{q} \quad \forall t \quad (5.20)$$

$$0 \leq \sum_c k2(c, t) \leq r(t) \quad \forall t \quad (5.21)$$

$$r(t) \leq \sum_c k1'(c, t) \leq \bar{r} \quad \forall t \quad (5.22)$$

$$0 \leq \sum_c k2'(c, t) \leq q(t) \quad \forall t \quad (5.23)$$

$$r_{st}^{up}(c, t) = k1(c, t) + k2(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.24)$$

$$r_{st}^{down}(c, t) = k1'(c, t) + k2'(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.25)$$

όπου $k1(c, t)$ η παροχή θετικής εφεδρείας κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, $k2(c, t)$ η παροχή αρνητικής εφεδρείας κατά τη διάρκεια της φόρτισης, $k2'(c, t)$ η παροχή θετικής εφεδρείας κατά τη διάρκεια της φόρτισης, $k2'(c, t)$ η παροχή αρνητικής εφεδρείας κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ικανοποιητική ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας, ώστε να είναι δυνατή η παροχή εφεδρείας από τον αποθηκευτικό σταθμό, το εύρος λειτουργίας της πρέπει να περιοριστεί ακόμα περισσότερο. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι η μπαταρία πρέπει να είναι σε θέση να φορτίζεται ή να εκφορτίζεται σε πλήρη ισχύ τουλάχιστον ένα τέταρτο (15 min) κατά την πρωτεύουσα εφεδρεία, μισή ώρα (30 min) κατά τη δευτερεύουσα εφεδρεία και αδιάλειπτα κατά την τριτεύουσα εφεδρεία. Η εκφόρτιση της μπαταρίας σε επίπεδο παροχής εφεδρείας αντικατοπτρίζει την παροχή θετικής εφεδρείας. Η μαθηματική έκφραση αυτών διατυπώνεται στη συνέχεια.

$$v(t) \leq \bar{v} - \delta^c(k1'(1, t) * 15/60 + k1'(2, t) * 30/60 + k1'(3, t) * 60/60) \quad \forall t \quad (5.26)$$

$$v(t) \geq \underline{v} + \frac{1}{\delta^d}(k1(1, t) * 15/60 + k1(2, t) * 30/60 + k1(3, t) * 60/60) \quad \forall t \quad (5.27)$$

Όπως και προηγουμένως όλες οι επιπλέον μονάδες καθορίζονται από μία μέγιστη και μία ελάχιστη ισχύ που μπορούν να αποδώσουν στο σύστημα όπως φαίνεται στους επόμενους περιορισμούς.

$$0 \leq \sum_b g'(i, b, t) + \sum_c r_{gen}^{up}(c, i, t) \leq \bar{g}(i) \quad \forall t, i \quad (5.28)$$

$$0 \leq \sum_b g'(i, b, t) + \sum_c r_{gen}^{down}(c, i, t) \leq \bar{g}(i) \quad \forall t, i \quad (5.29)$$

$$0 \leq r_{gen}^{up}(c, i, t) \leq \bar{g}(i)m(c) \quad \forall t, i \quad (5.30)$$

$$0 \leq r_{gen}^{down}(c, i, t) \leq \bar{g}(i)m(c) \quad \forall t, i \quad (5.31)$$

$$0 \leq dru(c, t) \leq RR^{up}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.32)$$

$$0 \leq drd(c, t) \leq RR^{down}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.33)$$

Σε αντίθεση με ένα αποθηκευτικό σταθμό, όπως για παράδειγμα μία μπαταρία, οι συμβατικές μονάδες παραγωγής προκειμένου να μπορέσουν να παρέχουν την ισχύ τους άμεσα, που χρειάζεται για τις εφεδρείες, θα πρέπει είναι ήδη σε λειτουργία και να έχουν φτάσει κάποια τεχνικά ελάχιστα παραγωγή. Στη μεθοδολογία που ακολουθούμε παρακάμπτουμε αυτά τα τεχνικά ελάχιστα και προκειμένου να τα προσομοιάσουμε και στη θέση τους εντάσσουμε κάποιους περιορισμούς στην ικανότητα των συμβατικών μονάδων παραγωγής για παροχή εφεδρειών. Αυτό μαθηματικά αποτυπώνεται στις εξισώσεις (5.56) και (5.54) μέσω της μεταβλητής $m(c)$.

5.3 Profit Maximization - Μέθοδος Price Maker

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται σε ένα διεπίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο αναλύεται στη συνέχεια. Το πρόβλημα του πάνω επιπέδου είναι υπεύθυνο για τη μεγιστοποίηση του κέρδους του αποθηκευτικού σταθμού ενώ το πρόβλημα του κάτω επιπέδου είναι υπεύθυνο για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει, εκτός του αποθηκευτικού σταθμού, συμβατικές μονάδες παραγωγής, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εισαγωγές και εξαγωγές ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός των προηγούμενων δύο προβλημάτων.

Η βασική διαφορά στη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι ότι ο διαχειριστής του αποθηκευτικού σταθμού δε γνωρίζει τις τιμές ενέργειας μέσα στο έτος, παρά μόνο τη συνολική ζήτηση. Έτσι το πρόβλημα κάνει μια πρόβλεψη της οριακής τιμής του συστήματος σύμφωνα με τι μπορεί να προσφέρει ο κάθε παραγωγός με σκοπό βέβαια τη μεγιστοποίηση του κέρδους του αποθηκευτικού σταθμού και την τήρηση όλων των ισοζυγίων ενέργειας.

5.3.1 Διεπίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης

Η λήψη αποφάσεων στα περισσότερα προβλήματα στην πραγματική ζωή, ακολουθεί ιεραρχική σειρά και στις περισσότερες περιπτώσεις ο χώρος αναζήτησης είναι άγνωστος. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο επιπέδων (bi-level optimization problem) είναι ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης με δύο επίπεδα σε μια ιεραρχία, το υψηλότερο και το χαμηλότερο επίπεδο λήψης αποφάσεων. Τα δισδιάστατα αυτά προβλήματα είναι γενικά δύσκολο να επιλυθούν λόγω του ότι ο χώρος αναζήτησης δεν είναι κυρτός, το οποίο προκύπτει από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση του προβλήματος του ηγέτη και του ακολούθου.[8]

Τα προβλήματα προγραμματισμού δύο επιπέδων είναι ένα προβλήματα με εμφολευμένες βελτιστοποιήσεις που καθορίζονται από έναν υπεύθυνο λήψης αποφάσεων σε ένα επίπεδο που επηρεάζει τη συμπεριφορά ενός άλλου υπεύθυνου λήψης αποφάσεων σε άλλο επίπεδο. Έτσι, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προβλήματος προγραμματισμού δύο επιπέδων είναι ότι οι αντικειμενικές συναρτήσεις κάθε μονάδας μπορεί να καθορίζονται εν μέρει από μεταβλητές που ελέγχονται από άλλες μονάδες που λειτουργούν σε άλλα επίπεδα. Ενώ οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε κατώτερο επίπεδο δεν υπαγορεύονται τις αποφάσεις των ανώτερων επιπέδων, οι αντιδράσεις τους έχουν επιρροή στα ανώτερα επίπεδα και έχουν την τάση να βελτιώνουν τους δικούς τους στόχους. Τα κοινά χαρακτηριστικά του διεπίπεδου προγραμματισμού αναφέρονται ως εξής:

- Οι μονάδες λήψης αποφάσεων είναι διαδραστικές και υπάρχουν σε μια κατά κύριο λόγο ιεραρχική δομή.
- Η λήψη αποφάσεων είναι διαδοχική από το ανώτερο στο κατώτερο επίπεδο. Ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων κατώτερου επιπέδου εκτελεί τις πολιτικές του αφού ληφθούν αποφάσεις στο ανώτερο επίπεδο.
- Κάθε μονάδα βελτιστοποιεί ανεξάρτητα τις δικές της αντικειμενικές συναρτήσεις αλλά επηρεάζεται από ενέργειες που πραγματοποιούνται από άλλες μονάδες.

Ένα απλό διεπίπεδο πρόβλημα διαμορφώνεται ως εξής: Έστω το διάνυσμα μεταβλητών απόφασης $(x, y) \in \mathfrak{R}^n$ κατανέμεται μεταξύ των δύο επιπέδων αποφάσεων. Ο λήπτης αποφάσεων του upper level έχει τον έλεγχο του διανύσματος $y \in \mathfrak{R}^{n_1}$, και ο λήπτης αποφάσεων του lower level έχει τον έλεγχο του διανύσματος $x \in \mathfrak{R}^{n_2}$, όπου $n_1 + n_2 = n$.

$$L : \max_x F_L(x, y) = ax + by, \text{ όπου το } y \text{ λύνει το:}$$

$$F : \max_y F_F(x, y) = cx + dy, \quad \text{s.t : } Ax + By \leq r,$$

όπου $a, c \in \mathfrak{R}^{n_1}$, $b, d \in \mathfrak{R}^{n_2}$, $r \in \mathfrak{R}^m$, A είναι πίνακας $m \times n_1$, B είναι πίνακας $m \times n_2$. Το πρόβλημα περιορίζεται στην περιοχή που ορίζει το S . Ο λήπτης αποφάσεων του upper level

(L) που έχει τον έλεγχο του x , παίρνει πρώτος την απόφαση που καθορίζει το x πριν ο λήπτης αποφάσεων του lower level (F) επιλέξει το y . Δεδομένου του x , το σύνολο $Y(x)$ των βέλτιστων λύσεων του lower level (F) μπορεί να οριστεί ως:

$$\max_{y \in Q(x)} f(y) = dy,$$

$$\text{όπου } Q(x) = \{y \mid By \leq r - Ax\}.$$

Ορισμένοι από τους περιορισμούς που οφείλονται στις κλασικές προσεγγίσεις λύσεων οφείλονται στην εγγενή μη κυρτότητα και τη μη διαφορισιμότητα του σύνθετου χώρου αναζήτησης. Αν και υπάρχουν αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα, οι περισσότεροι βρίσκουν το τοπικό παρά το παγκόσμιο βέλτιστο. Μία από τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκε και στη συγκεκριμένη εργασία για τη γραμμικοποίηση του διεπίπεδου προβλήματος είναι η μέθοδος Kuhn-Tucker.

<p>T1: Linear leader and linear follower</p> <p>L : $\min_x f_L = ax + by$</p> <p>F : $\min_y f_F = cx + dy$</p>	<p>T2: Linear leader and non-linear follower</p> <p>L : $\min_x f_L = ax + by$</p> <p>F : $\min_y f_F = px^j + qy^k + rx + sy$</p>
<p>T3: Non-linear leader and linear follower</p> <p>L : $\min_x f_L = ax^n + by^m + cx + dy$</p> <p>F : $\min_y f_F = px + qy$</p>	<p>T4: Non-linear leader and non-linear follower</p> <p>L : $\min_x f_L = ax^n + by^m + cx + dy$</p> <p>F : $\min_y f_F = px^j + qy^k + rx + sy$</p>
<p>T5: Parametric BLP problem</p> <p>This is a special case of the BLP problem where the follower problem is implicitly contained in the leader problem.</p> <p>L : $\min_x f_L = ax + by + cx + dy$</p> <p>F : $\min_y f_F = px + qy$ where $p = c$, and $q = d$</p>	
<p>L: Leader, F: Follower</p>	

Σχήμα 5.1: Ταξινόμηση των διεπίπεδων προβλημάτων.[8]

5.3.2 Πρόβλημα αποθηκευτικού σταθμού

Πρόβλημα άνω επιπέδου

Στόχος του προβλήματος άνω επιπέδου είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους είτε αυτό προέρχεται από το arbitrage είτε μέσω της παροχής εφεδρειών όπως και φαίνεται στην παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση.

$$\max \sum_t \pi(t)[q(t) - r(t)]$$

$$+ \sum_c \sum_t [\pi_{reserve}^{up}(c, t)r_{st}^{up}(c, t) + \pi_{reserve}^{down}(c, t)r_{st}^{down}(c, t)] \quad \forall t \quad (5.34)$$

όπου $\pi(t)$ η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς ισχύος, $\pi_{reserve}^{up}$ η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς θετικών εφεδρειών, $\pi_{reserve}^{down}$ η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς αρνητικών εφεδρειών, $q(t)$ η ισχύς εκφόρτισης του αποθηκευτικού σταθμού κάθε στιγμή, $r(t)$ η ισχύ φόρτισης κάθε στιγμή, $r_{st}^{up}(c, t)$ η παροχή

θετικής εφεδρείας από τον αποθηκευτικό σταθμό και $r_{st}^{down}(c, t)$ η παροχή αρνητικής εφεδρείας από τον αποθηκευτικό σταθμό.

Στη συνέχεια καθορίζονται τα όρια του αποθηκευτικού σταθμού όπως και την προηγούμενη μεθοδολογία λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις για εφεδρεία.

$$v(t) \leq \bar{v} - \delta^c(k1'(1, t) * 15/60 + k1'(2, t) * 30/60 + k1'(3, t) * 60/60) \forall t \quad (5.35)$$

$$v(t) \geq \underline{v} + \frac{1}{\delta^d}(k1(1, t) * 15/60 + k1(2, t) * 30/60 + k1(3, t) * 60/60) \forall t \quad (5.36)$$

$$v(t) = v(t-1) + \delta^c r(t) - \frac{1}{\delta^d} q(t) \forall t \quad (5.37)$$

$$x(t) \leq \sum_c k1(c, t) \leq \bar{q} \forall t \quad (5.38)$$

$$0 \leq \sum_c k2(c, t) \leq r(t) \forall t \quad (5.39)$$

$$y(t) \leq \sum_c k1'(c, t) \leq \bar{r} \forall t \quad (5.40)$$

$$0 \leq \sum_c k2'(c, t) \leq q(t) \forall t \quad (5.41)$$

$$k(c, t) = k1(c, t) + k2(c, t) \forall c, t \quad (5.42)$$

$$k'(c, t) = k1'(c, t) + k2'(c, t) \forall c, t \quad (5.43)$$

Οι μεταβλητές $x(t)$, $y(t)$, $k(c, t)$ και $k'(c, t)$ είναι ουσιαστικά η προσφορά ενέργειας του αποθηκευτικού σταθμού, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στο πρόβλημα άνω επιπέδου ως μεταβλητές απόφασης και μεταβιβάζονται στο πρόβλημα κάτω επιπέδου ως άνω όρια (δηλαδή παράμετροι) της ποσότητας ενέργειας που επιτρέπει ο διαχειριστής του συστήματος να παρέχει ή να απορροφήσει η μονάδα αποθήκευσης.

$$0 \leq \beta^q(t) \forall t \quad (5.44)$$

$$0 \leq \beta^r(t) \forall t \quad (5.45)$$

Οι μεταβλητές $\beta^q(t)$ και $\beta^r(t)$ αναφέρονται στις προσφορές τιμών, οι οποίες είναι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος άνω επιπέδου και αντικατοπτρίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση του κάτω επιπέδου ως παράμετροι που αντιπροσωπεύουν πρόσθετο κόστος και έσοδα για τον διαχειριστή του συστήματος. Ο ιδιοκτήτης του αποθηκευτικού σταθμού προσφέρει όλη τη χωρητικότητά του σε αυτές τις ενδογενώς καθορισμένες τιμές, $\beta^q(t)$ και $\beta^r(t)$, στην αγορά.

Πρόβλημα κάτω επιπέδου

Στο πρόβλημα του κάτω επιπέδου προσομοιώνει τη λειτουργία της επιλογής της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς από το διαχειριστή του συστήματος. Ο ρόλος του διαχειριστή είναι να επιλέξει τους καταλληλότερους παραγωγούς, με κύριο μέλημα πάντα την ελαχιστοποίηση του κόστους, ώστε να ικανοποιηθούν τα ισοζύγια ενέργειας μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης.

Η συνάρτηση που ελαχιστοποιεί το κόστος του συστήματος είναι σχεδόν ίδια με την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος 5.2 με τη διαφορά ότι περιέχει τις μεταβλητές απόφασης $\beta^q(t)$ και $\beta^r(t)$.

$$\begin{aligned} \min \sum_t [\beta^q(t)q(t) - \beta^r(t)r(t) + \sum_b \sum_i c_i(i, b)g'(i, b, t) \\ + \sum_j c_j(j)im(j, t) - \sum_k c_k(k)e(k, t)] + da(t)c_{da} \quad \forall i, b, t \end{aligned} \quad (5.46)$$

Ομοίως, οι θεμελιώδεις εξισώσεις της κάλυψης της ζήτησης ισχύος και εφεδρειών ακολουθούν την ίδια λογική με πριν

$$\sum_b \sum_i g'(i, b, t) + \sum_j im(j, t) + \sum_t q(t) + w(t) + da(t) = D(t) + \sum_k e(k, t) \quad \forall i, b, t \quad (5.47)$$

$$\sum_i r_{gen}^{up}(c, i, t) + r_{st}^{up}(c, t) + dru(c, t) = RR^{up}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.48)$$

$$\sum_i r_{gen}^{down}(c, i, t) + r_{st}^{down}(c, t) + drd(c, t) = RR^{down}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.49)$$

Τέλος, με βάση τη μέγιστη και την ελάχιστη ισχύ εξόδου του κάθε παραγωγού (αποθήκη, συμβατικές μονάδες, εισαγωγές κλπ) διαμορφώνονται και οι παρακάτω περιορισμοί που ολοκληρώνουν το πρόβλημα του κάτω επιπέδου

$$0 \leq g'(i, b, t) \leq \bar{g}(i, b) \quad \forall t, i, b \quad (5.50)$$

$$0 \leq \sum_b g'(i, b, t) + \sum_c r_{gen}^{up}(c, i, t) \leq \bar{g}(i) \quad \forall t, i \quad (5.51)$$

$$0 \leq \sum_b g'(i, b, t) + \sum_c r_{gen}^{down}(c, i, t) \leq \bar{g}(i) \quad \forall t, i \quad (5.52)$$

$$0 \leq r_{gen}^{up}(c, i, t) \leq \bar{g}(i)m(c) \quad \forall t, i \quad (5.53)$$

$$0 \leq r_{gen}^{down}(c, i, t) \leq \bar{g}(i)m(c) \quad \forall t, i \quad (5.54)$$

$$0 \leq r_{st}^{up}(c, t) \leq k(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.55)$$

$$0 \leq r_{st}^{down}(c, t) \leq k(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.56)$$

$$0 \leq q(t) \leq x(t) \quad \forall t \quad (5.57)$$

$$0 \leq r(t) \leq y(t) \quad \forall t \quad (5.58)$$

$$0 \leq w(t) \leq \bar{w}(t) \quad \forall t \quad (5.59)$$

$$0 \leq e(k, t) \leq \bar{e}(k) \quad \forall k, t \quad (5.60)$$

$$0 \leq im(j, t) \leq \bar{im}(j) \quad \forall j, t \quad (5.61)$$

$$0 \leq da(t) \leq D(t) \quad \forall t \quad (5.62)$$

$$0 \leq dru(c, t) \leq RR^{up}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.63)$$

$$0 \leq drd(c, t) \leq RR^{down}(c, t) \quad \forall c, t \quad (5.64)$$

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα μεθοδολογιών

Σε αυτό το κεφάλαιο έχουν συγκεντρωθεί και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθοδολογιών. Συγκεκριμένα σε πρώτο στάδιο εξετάζονται οι δυνατότητες του αποθηκευτικού σταθμού μέγιστης ισχύος 100MW με δυνατότητα εκφόρτισης 2 ωρών, που λειτουργεί σαν Price maker και ποντάρει την ενέργεια του, για διάφορες συνθήκες επάρκειας ενέργειας από συμβατικές μονάδες παραγωγής. Σε αυτή τη μεθοδολογία προκύπτει μία εκτίμηση της οριακής τιμής του συστήματος καθώς και η λειτουργία του αποθηκευτικού σταθμού αλλά και όλων των μονάδων που συμμετέχουν στο σύστημα ενέργειας. Στη συνέχεια γίνεται μία παρουσίαση διαφορετικών διαμορφώσεων του αποθηκευτικού σταθμού ώστε να γίνει μία σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών οριακών τιμών που θα προκύψουν καθώς και των κερδών τους. Τέλος, θα γίνει μία σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων με την περίπτωση που ο αποθηκευτικός σταθμός είναι περιουσιακό στοιχείο του διαχειριστή του συστήματος και λειτουργεί σαν εργαλείο για την του κόστους του συστήματος, ώστε να εξεταστούν οι αποκλίσεις στη λειτουργία του.

Τα προς εξέταση συστήματα ως δεδομένα, πέρα από τις δυνατότητες του αποθηκευτικού σταθμού, λαμβάνουν υπόψιν την ετήσια ζήτηση φορτίου και την ανάγκη εφεδρειών ανά ώρα, καθώς και τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ, υδροηλεκτρικών, συμβατικών μονάδων παραγωγής, εισαγωγών και εξαγωγών ενέργειας. Υποθέτουμε ότι ο διαχειριστής του αποθηκευτικού σταθμού γνωρίζει με ακρίβεια την πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής από ΑΠΕ της επόμενης μέρας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να κάνει μια εκτίμηση της παραγωγής από θερμικές μονάδες από τις οποίες διαμορφώνεται κυρίως η οριακή τιμή του συστήματος.

	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Θερμικές Μονάδες	7020
Εισαγωγές	2690
Αιολικά	7500
Φωτοβολταϊκά	10000
Λοιπές ΑΠΕ	1000
Υδροηλεκτρικά	3400

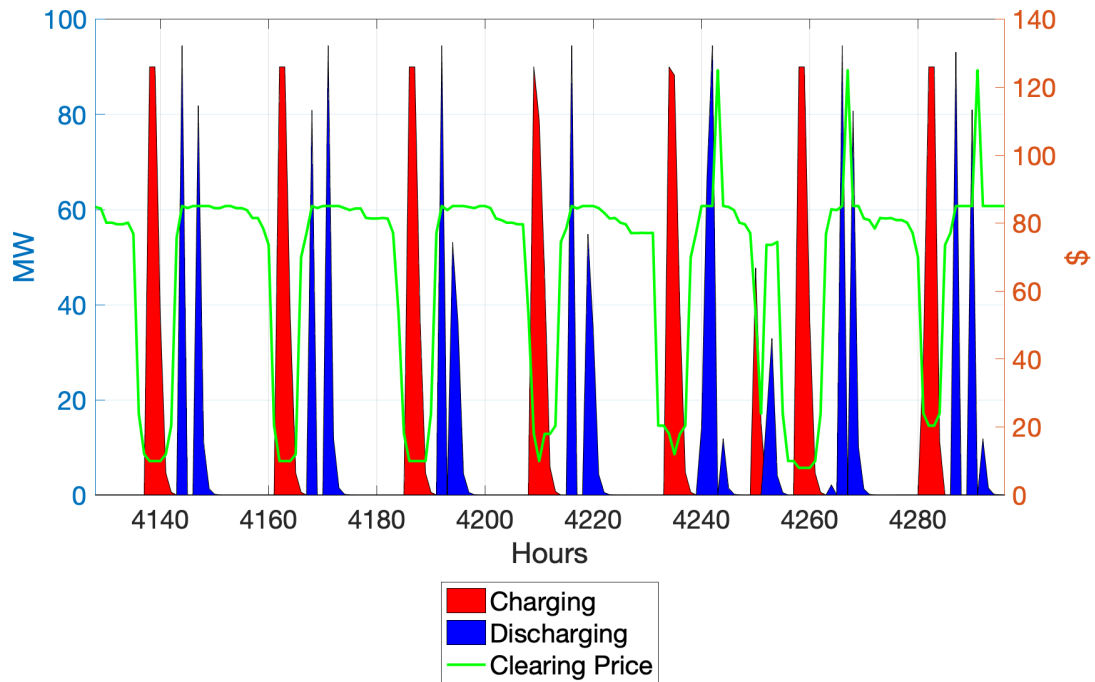
Πίνακας 6.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς

6.1 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2h με τη μέθοδο του Price Maker για διαφορετικές συνθήκες επάρκειας του συστήματος

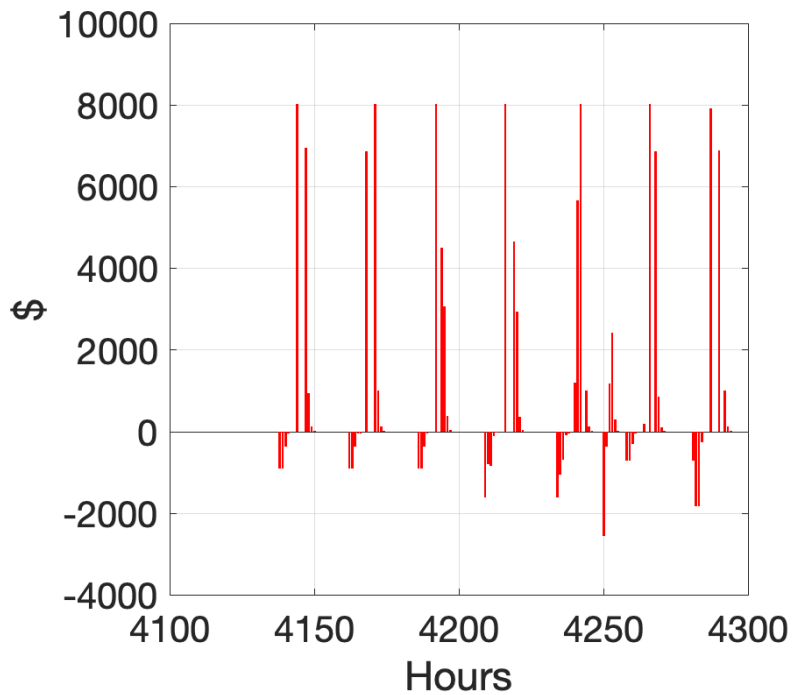
6.1.1 Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής

Όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 6.1 ο αλγόριθμος προσπαθεί να εκτιμήσει τις ώρες που η οριακή τιμή είναι χαμηλή και να φορτίσει τον αποθηκευτικό σταθμό, αγοράζοντας ενέργεια, και αντίστοιχα τις ώρες που η οριακή τιμή παίρνει υψηλές τιμές να αποδώσει την ενέργεια την οποία έχει αποθηκεύσει, πουλώντας τη στο σύστημα ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζει

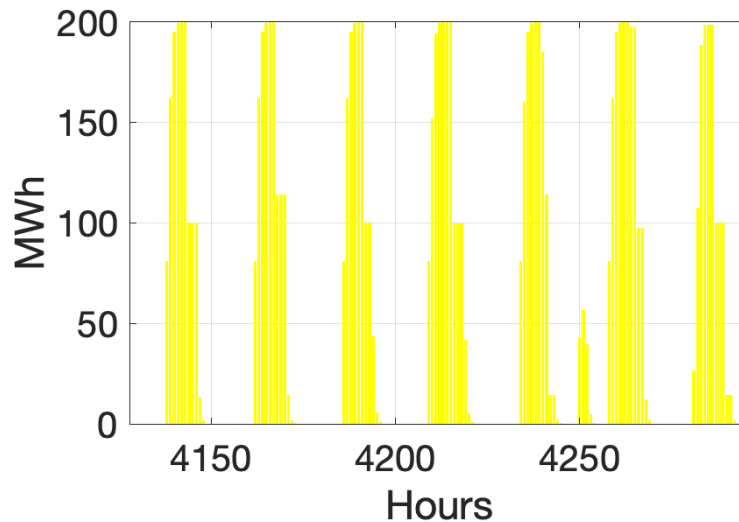
κέρδος από το ενεργειακό αρμπιτράζ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.1: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος



Σχήμα 6.2: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδος αποθηκευτικού σταθμού από αρμπιτράζ



Σχήμα 6.3: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού

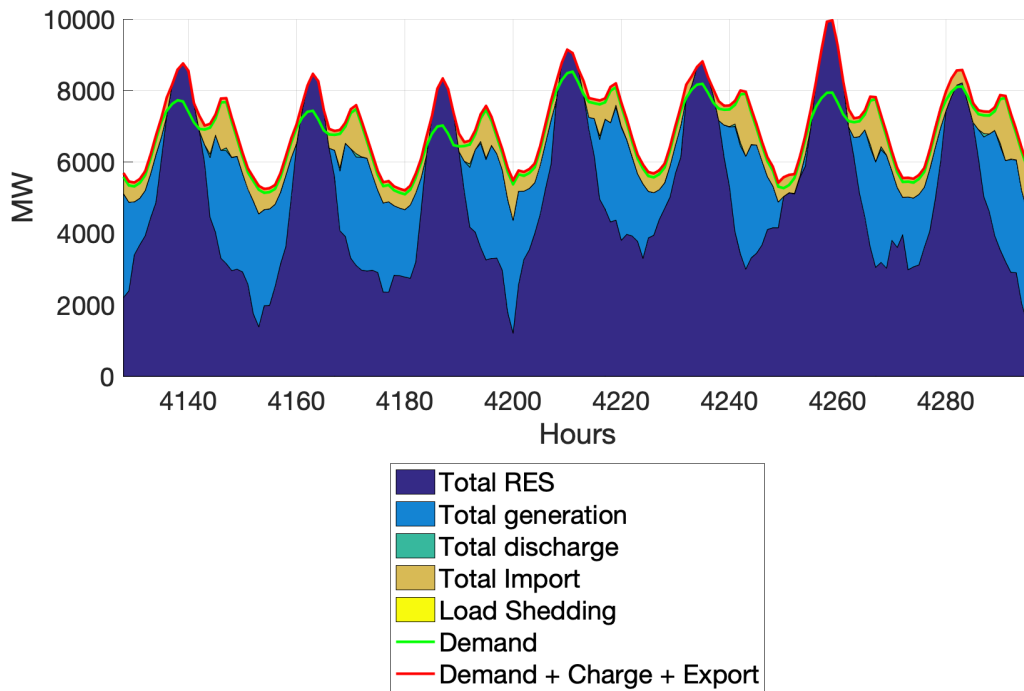
Ο διαχειριστής του συστήματος καλείται να καλύψει τη ζήτηση φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 εντάσσοντας όσες μονάδες χρειαστεί. Η εισαγωγή των ΑΠΕ στο σύστημα γίνεται με μηδενικό κόστος, κατά συνέπεια οι ΑΠΕ θα ενταχθούν πρώτες και όσο το δυνατόν όλη η διαθέσιμη ισχύ του στο σύστημα. Αμέσως μετά ο διαχειριστής θα επιλέξει τις οικονομικότερες από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής από τις οποίες διαμορφώνεται και η οριακή τιμή του συστήματος κάθε ώρα. Η οριακή τιμή ουσιαστικά θα πάρει την τιμή προσφοράς της τελευταίας ενταγμένης μονάδας στο σύστημα, η οποία θα είναι και η ακριβότερη τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Στο ενεργειακό μείγμα κυριαρχούν οι ΑΠΕ καθώς υπάρχει μεγάλη διείσδυση από αυτές όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.5, όπου τις συμπληρώνουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής, η ενέργεια από εισαγωγές και αρκετά λιγότερο η εκφόρτιση από τον αποθηκευτικό σταθμό. Αυτό συμβαίνει καθώς το σύστημα ακόμα και με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι άνετο ώστε να καλύψει τη ζήτηση φορτίου λόγω της μεγάλης διείσδυσης ΑΠΕ.

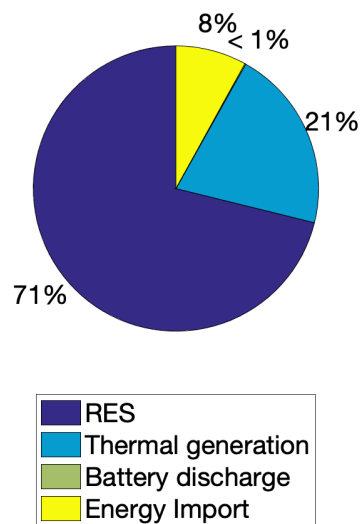
Όσον αφορά την τήρηση εφεδρειών το μεγαλύτερο ποσοστό των αναγκών καταφέρνουν να το καλύψουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής και έρχεται να συμπληρώσει ο αποθηκευτικός σταθμός στις περιπτώσεις αιχμών στη ζήτηση. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα η μπαταρία συμμετέχει αρκετά κατά την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα εφεδρεία ενώ κατά την τριτεύουσα η λειτουργία της είναι σχετικά περιορισμένη σε ορισμένες ώρες μέσα στην εβδομάδα. Είναι προφανές ότι η ενέργεια από εισαγωγές δεν μπορούν να συμμετέχουν στις εφεδρείες.

Η ισχύς που παρέχεται από την μπαταρία στο σύστημα για την κάλυψη των εφεδρειών φαίνεται στο Σχήμα 6.9 με τα αντίστοιχα κέρδη να φαίνονται στο Σχήμα 6.10.

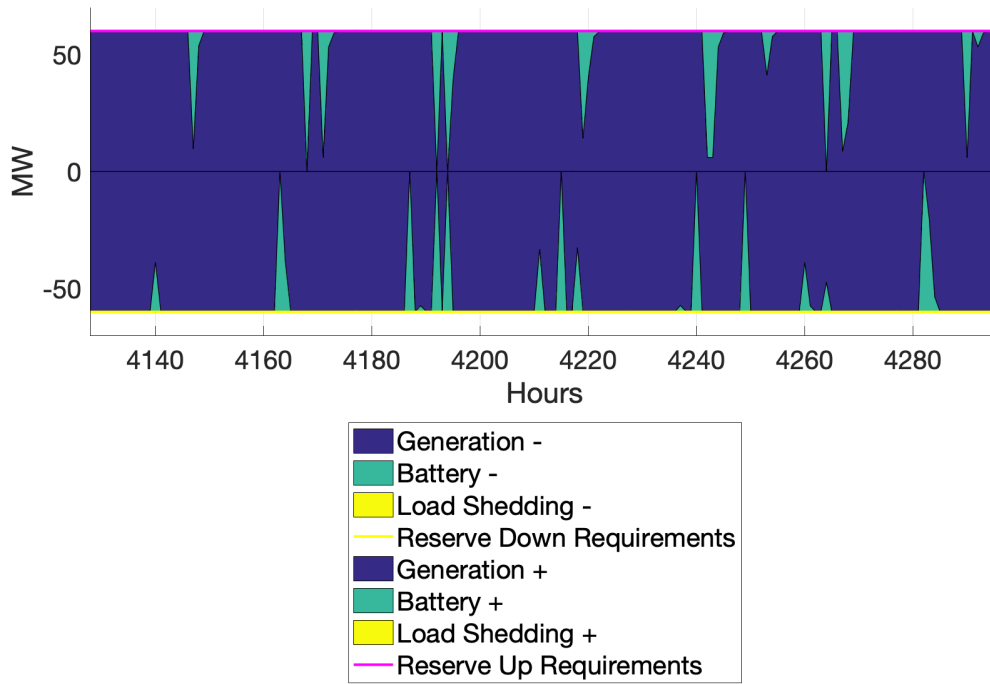
Οι ακμές που παρατηρούνται στα κέρδη από τις εφεδρείες προκύπτουν τις στιγμές όπου οι συμβατικές μονάδες παραγωγής δεν έχουν άλλη διαθέσιμη ισχύ να παρέχουν και εντάσσονται μονάδες με πάρα πολύ μεγάλο κόστος παροχής εφεδρειών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η οριακή τιμή να διαμορφωθεί από αυτές τις μονάδες σε πολύ υψηλές τιμές και συνεπώς τις συγκεκριμένες ώρες ο αποθηκευτικός σταθμός μπορεί να παρέχει εφεδρείες στο σύστημα με πολύ μεγάλο κέρδος.



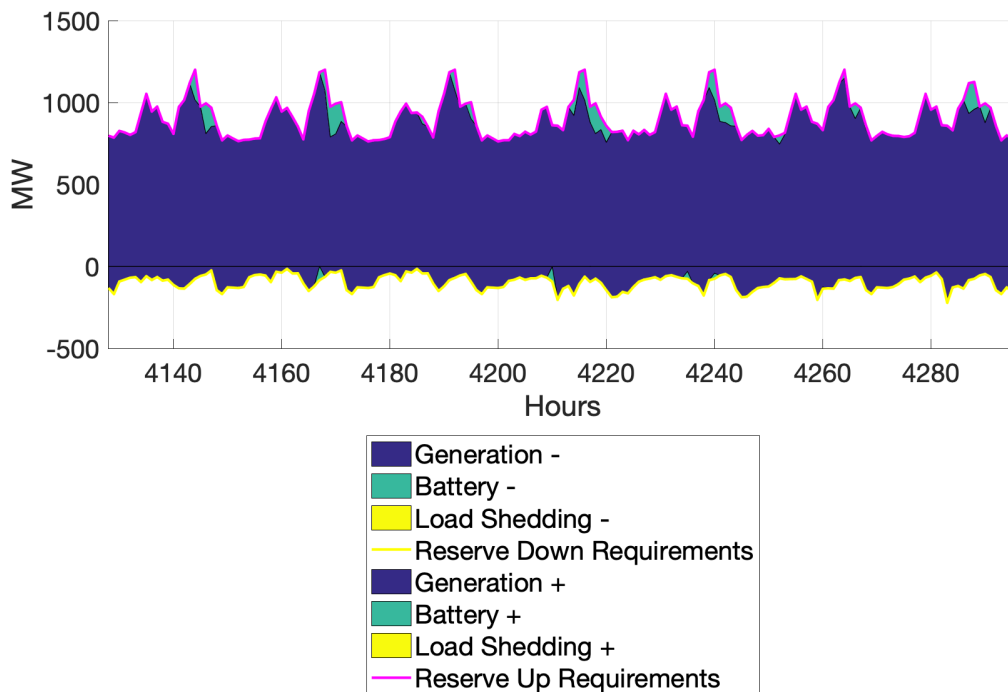
Σχήμα 6.4: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ζήτηση - Παραγωγή



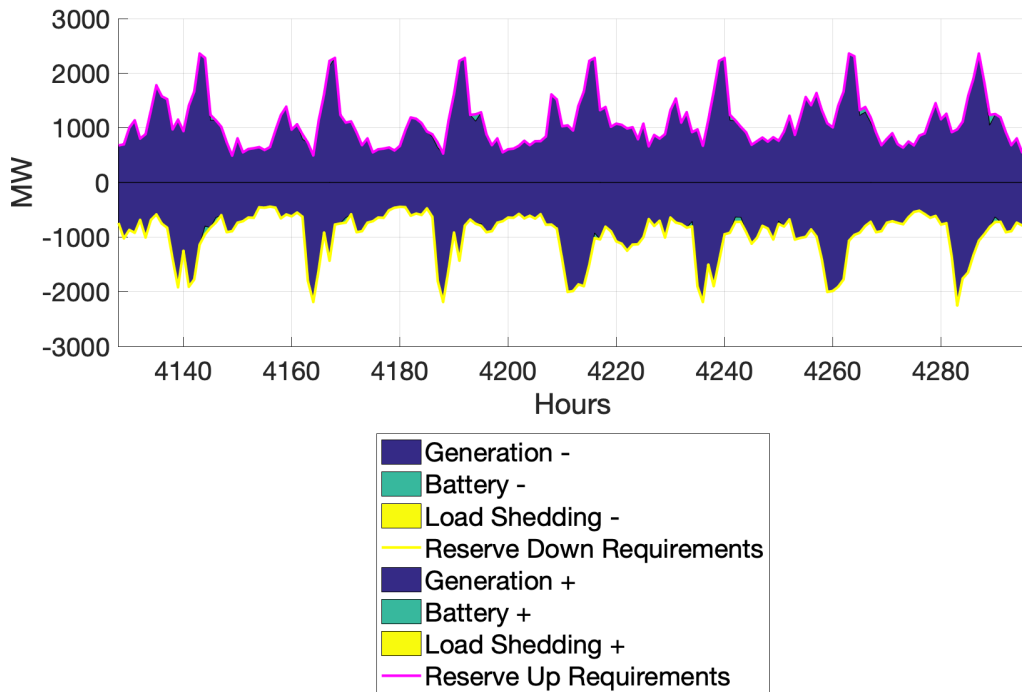
Σχήμα 6.5: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ενεργειακό μείγμα



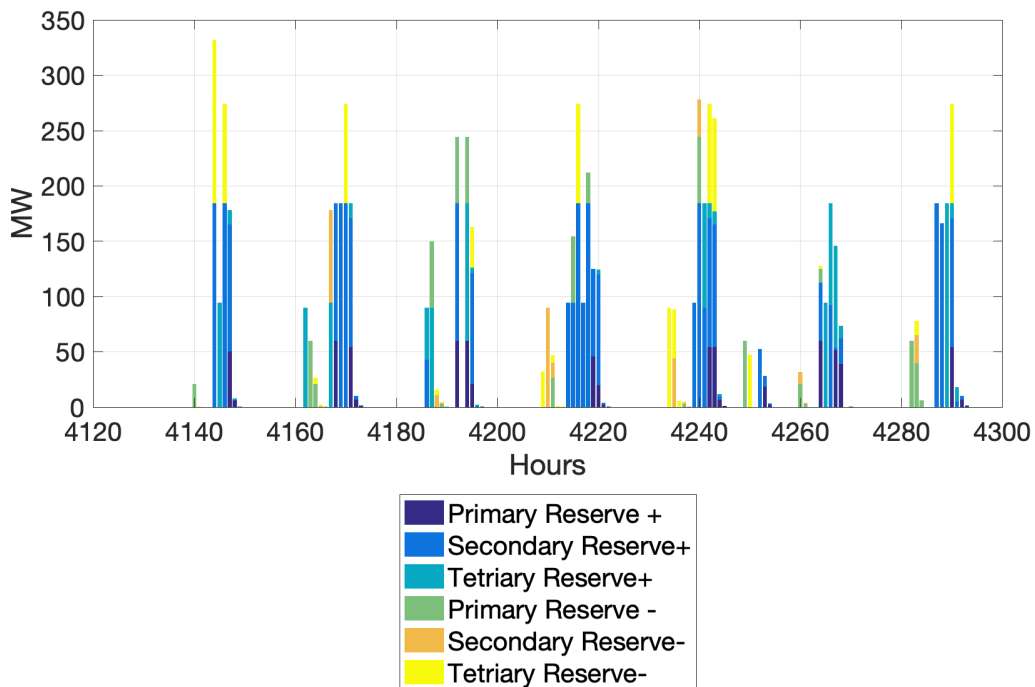
Σχήμα 6.6: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας



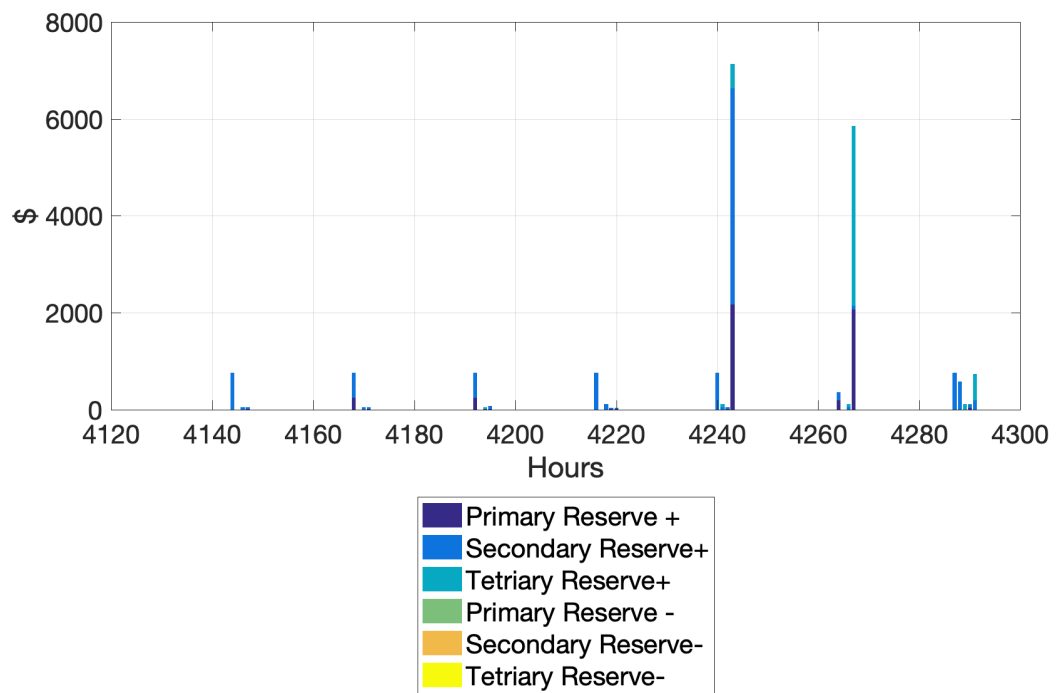
Σχήμα 6.7: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας



Σχήμα 6.8: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας



Σχήμα 6.9: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών

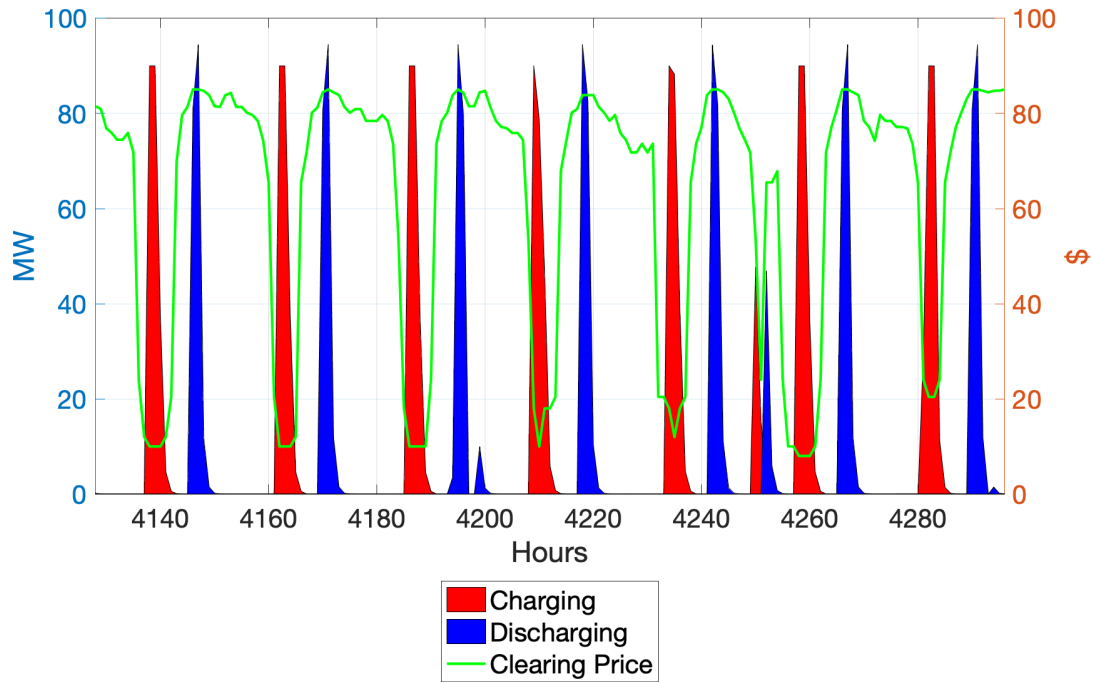


Σχήμα 6.10: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδη από εφεδρείες

6.1.2 Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής.

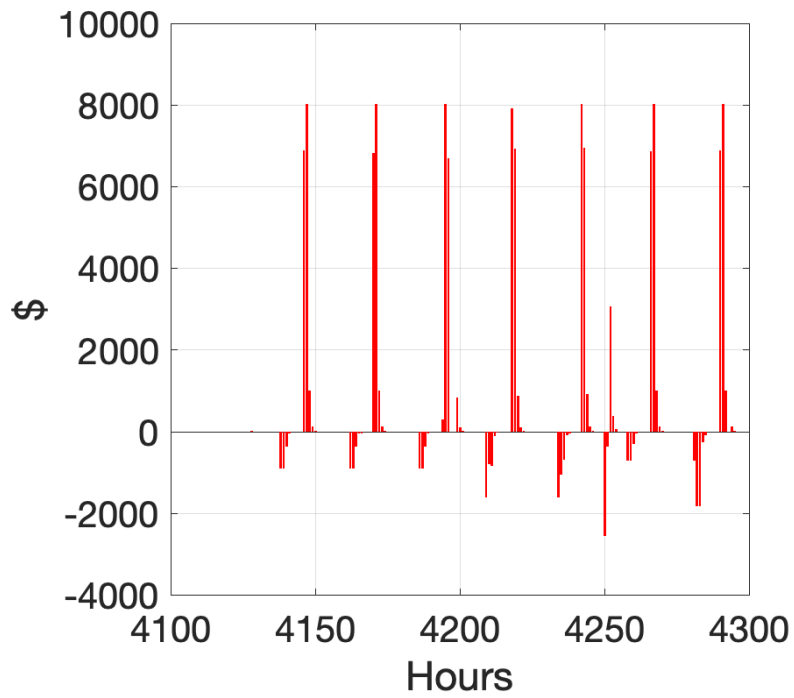
Στο συγκεκριμένο σύστημα αμέσως παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή μίας ακόμα συμβατικής μονάδας παραγωγής εξαλείφονται οι απότομες ακμές στην οριακή τιμή του συστήματος τις τελευταίες ώρες τις εβδομάδας όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11. Αντίστοιχα και η συμμετοχή του αποθηκευτικού σταθμού στο arbitrage περιορίζεται σε λιγότερες ώρες μέσα στην εβδομάδα κάτι το οποίο φαίνεται και μέσα από το διάγραμμα κέρδους στο Σχήμα 6.12.



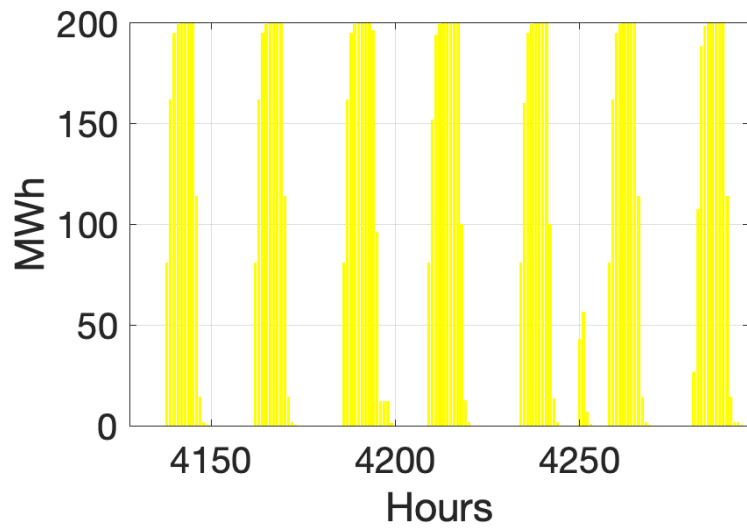
Σχήμα 6.11: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος

Παρατηρούμε ότι κατά τη λειτουργία του arbitrage από τα παραπάνω διαγράμματα δεν υπάρχει κάποια αλλαγή με τη μεταβολή του αριθμού των γεννητριών.

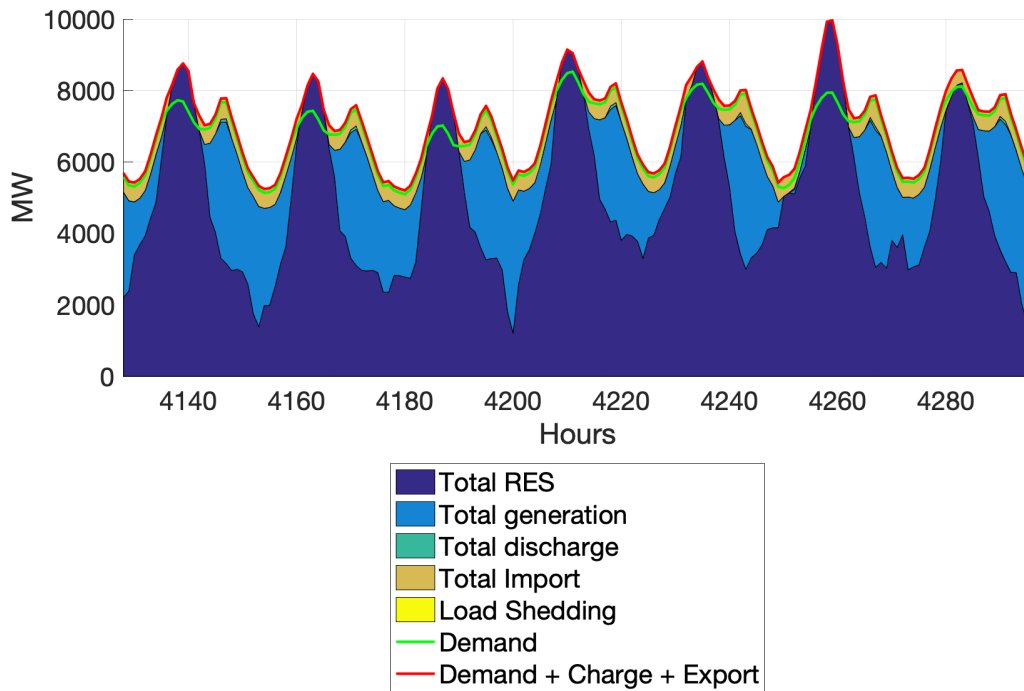
Αντίθετα με πριν οι ακμές των κερδών από τις εφεδρείες έχουν μειωθεί με την αύξηση των συμβατικών μονάδων παραγωγής κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού το σύστημα είναι πιο άνετο. Αυτό σημαίνει αντίστοιχα για τον αποθηκευτικό σταθμό λιγότερες ώρες τις οποίες θα χρειαστεί να παρέχει εφεδρείες στο σύστημα και συνεπώς λιγότερα έσοδα. Αυτό είναι φανερό από το Σχήμα 6.19 και από το Σχήμα 6.20.



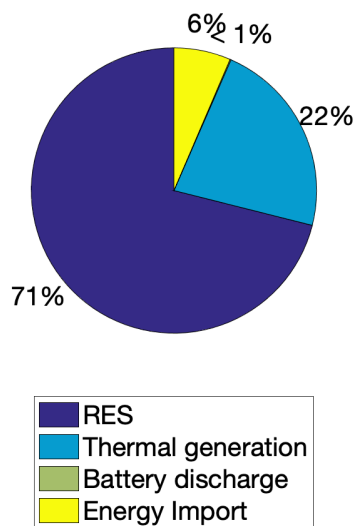
Σχήμα 6.12: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδος αποθηκευτικού σταθμού από αρπιτράζ



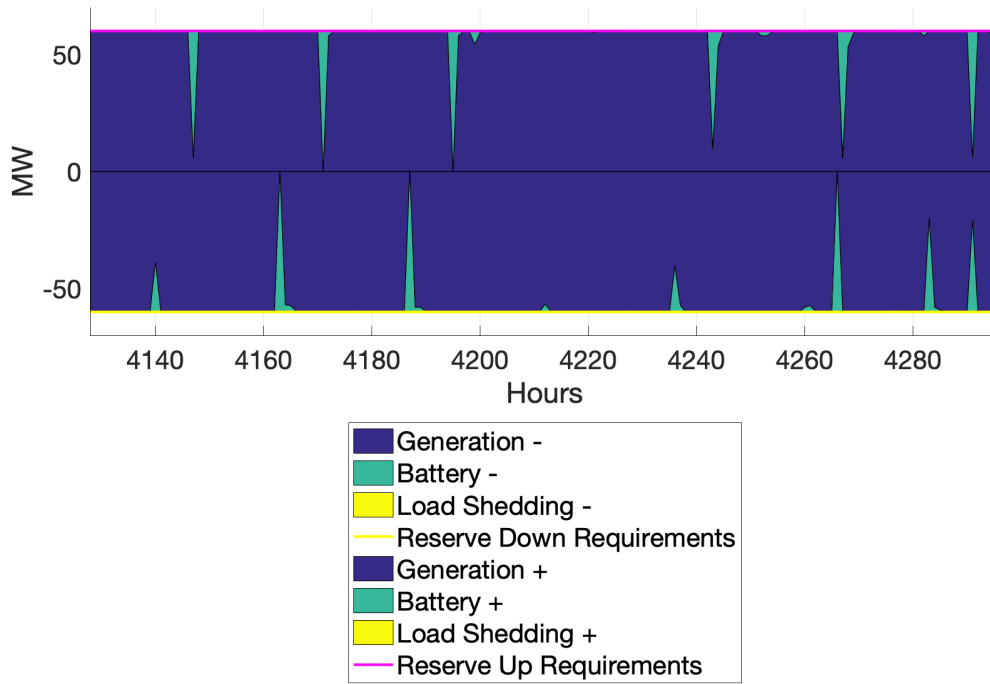
Σχήμα 6.13: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού



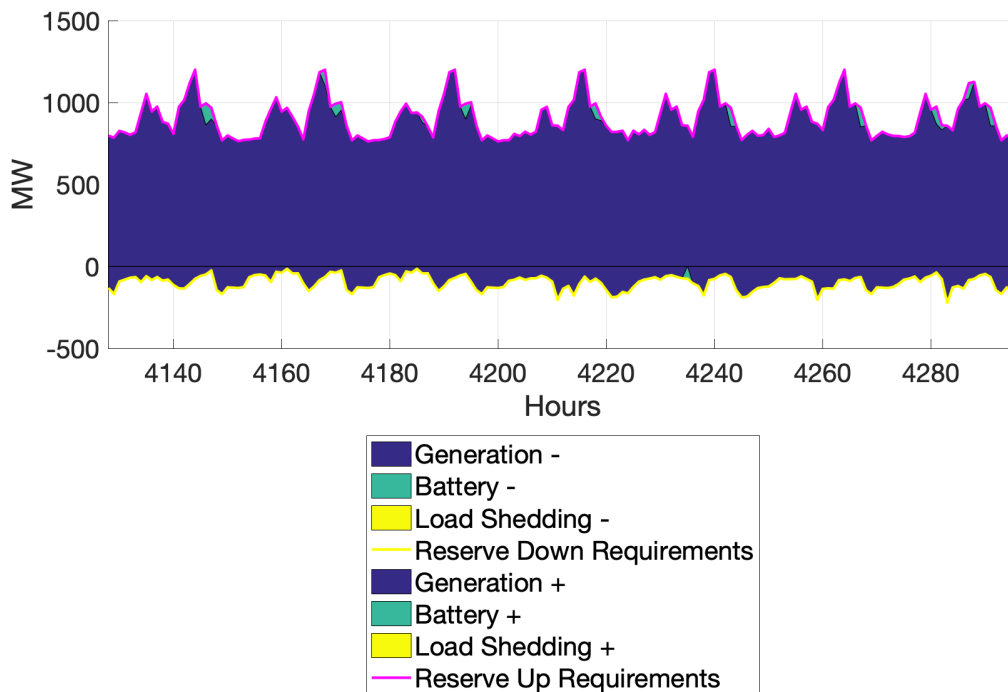
Σχήμα 6.14: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ζήτηση - Παραγωγή



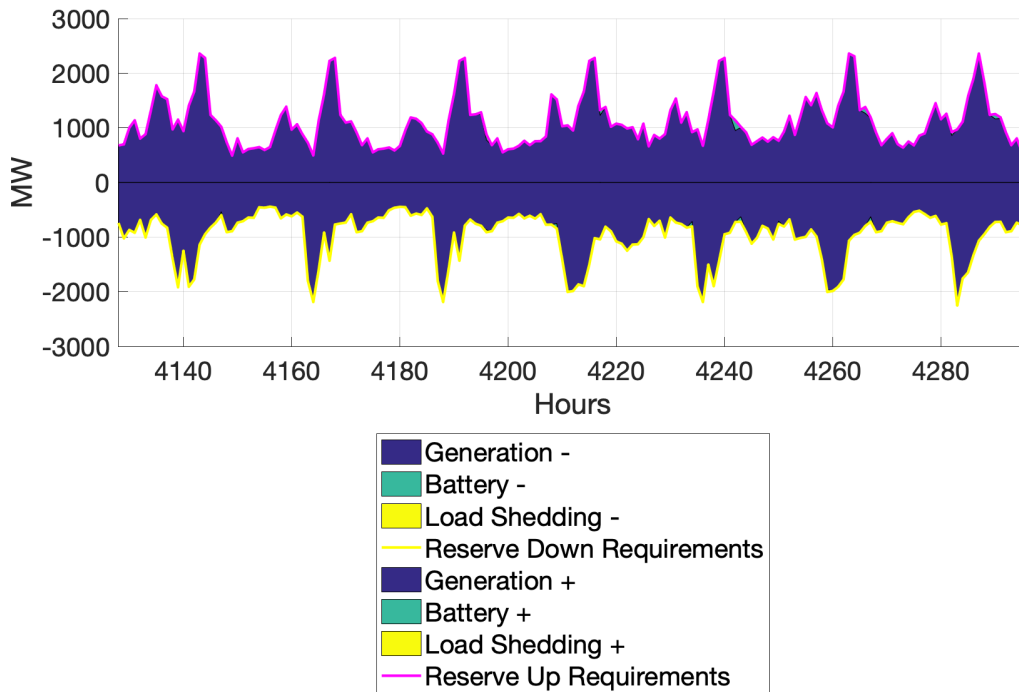
Σχήμα 6.15: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ενεργειακό μείγμα



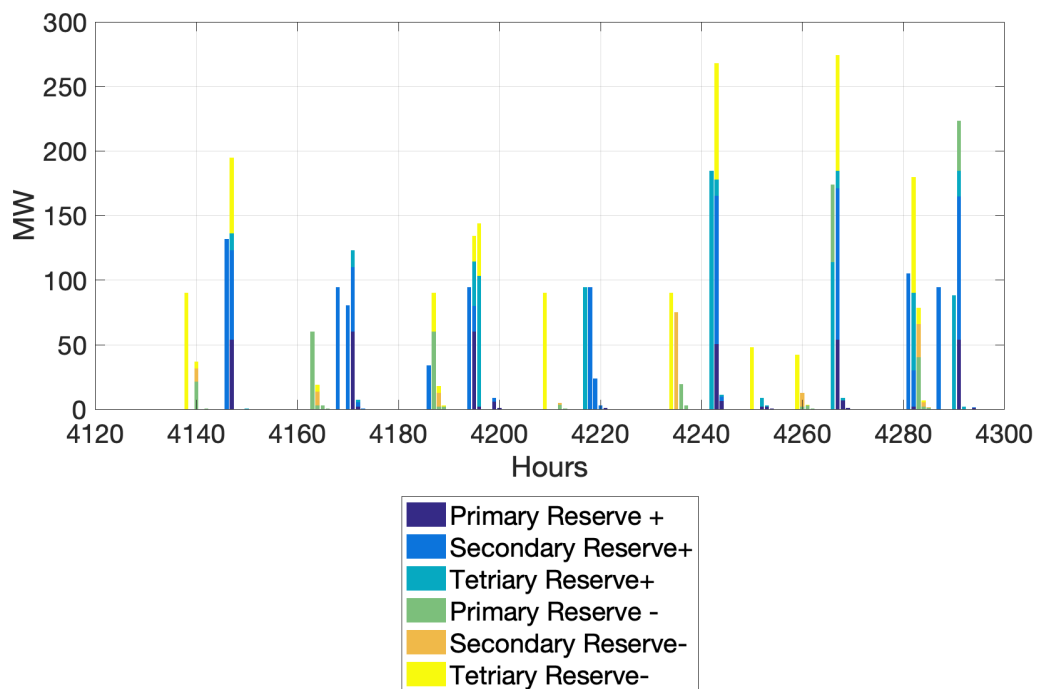
Σχήμα 6.16: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας



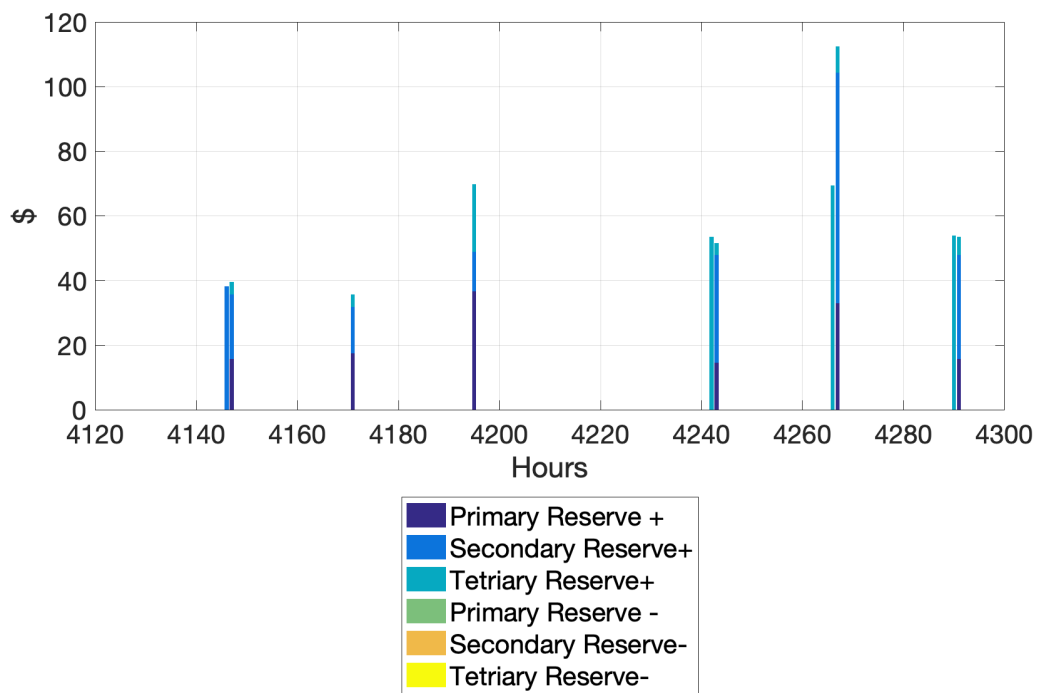
Σχήμα 6.17: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας



Σχήμα 6.18: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας



Σχήμα 6.19: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών

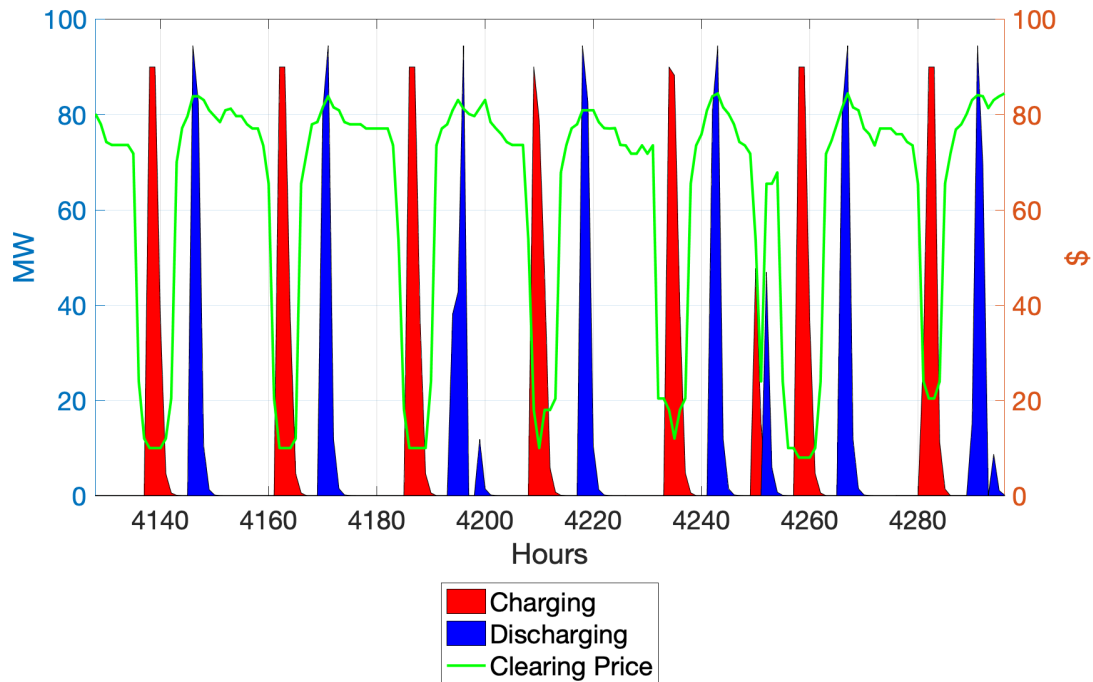


Σχήμα 6.20: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδη από εφεδρείες

6.1.3 Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής.

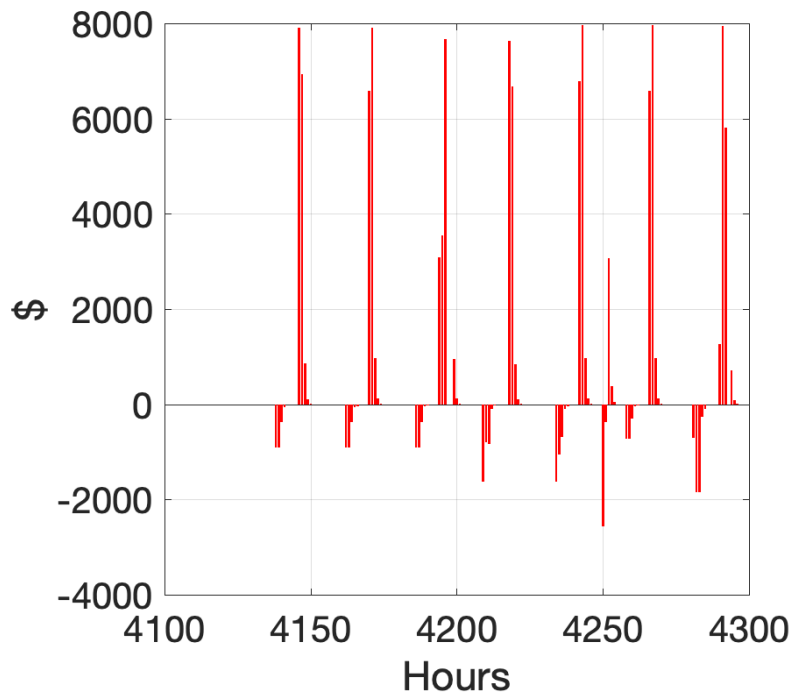
Η διαμόρφωση της οριακής τιμής δεν έχει μεγάλη διαφορά με το προηγούμενο σύστημα συνεπώς και η λειτουργία του αποθηκευτικού σταθμού στο arbitrage δε θα διαφέρει σημαντικά.



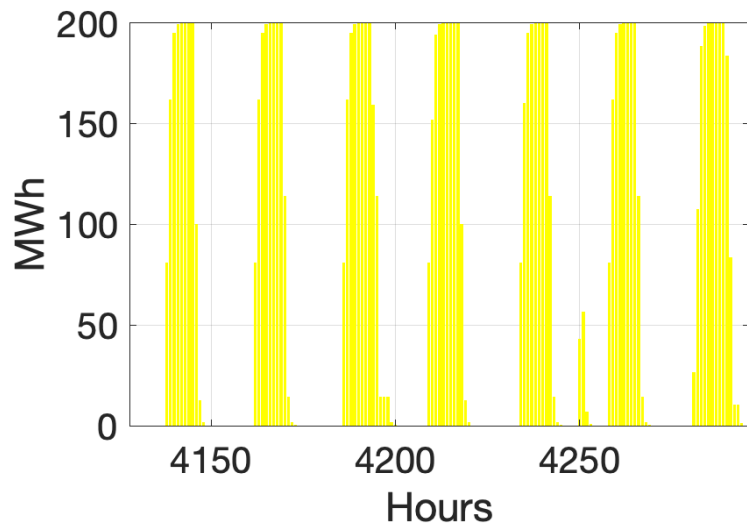
Σχήμα 6.21: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος

Ακόμη μικρότερη θα είναι και η απαίτηση εφεδρειών αφού οι συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι ικανές να καλύψουν πολύ μεγάλο κομμάτι της ζήτησης τους. Αυτό είναι αρκετά φανερό από το Σχήμα 6.28 όπου ο αποθηκευτικός σταθμός τη συγκεκριμένη εβδομάδα δε συμμετέχει καθόλου στην τριτεύουσα εφεδρεία αφού το σύστημα είναι πλήρες από τις συμβατικές μονάδες.

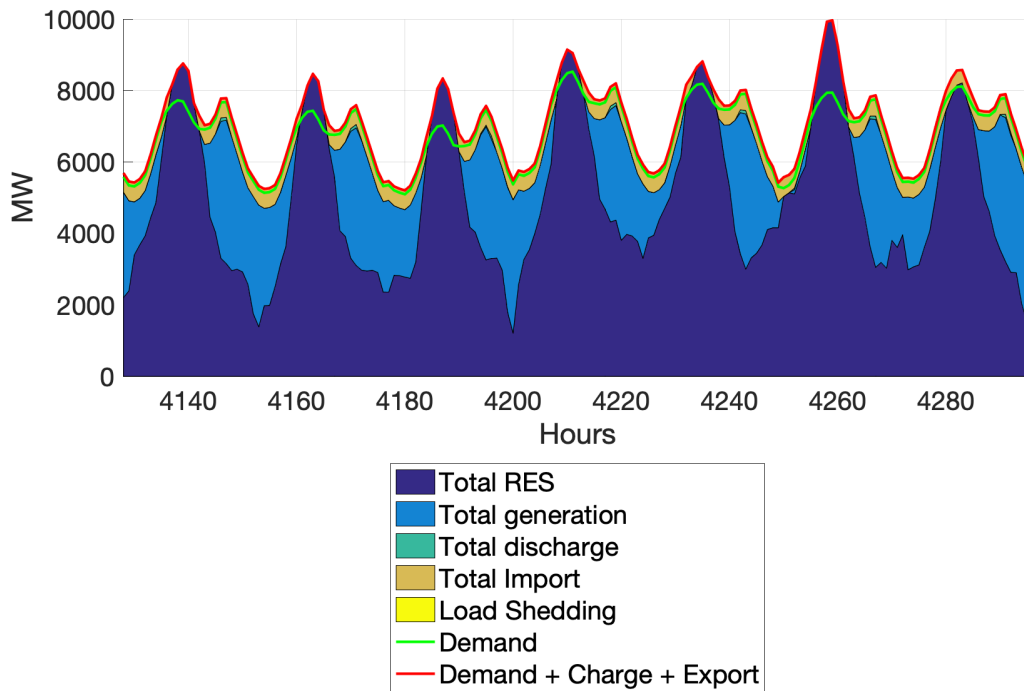
Τα κέρδη από εφεδρείες τη συγκεκριμένη βδομάδα φαίνονται σημαντικά χαμηλά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.30 καθώς ο αποθηκευτικός σταθμός προσφέρει τη δεσμευμένη ενέργειά του υπερβολικά μικρή τιμή λόγω της οριακής τιμής του συστήματος.



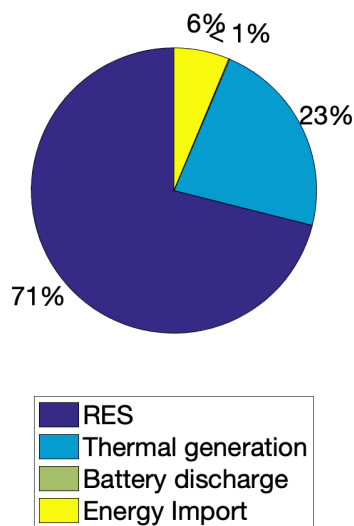
Σχήμα 6.22: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδος αποθηκευτικού σταθμού από αρπιτράζ



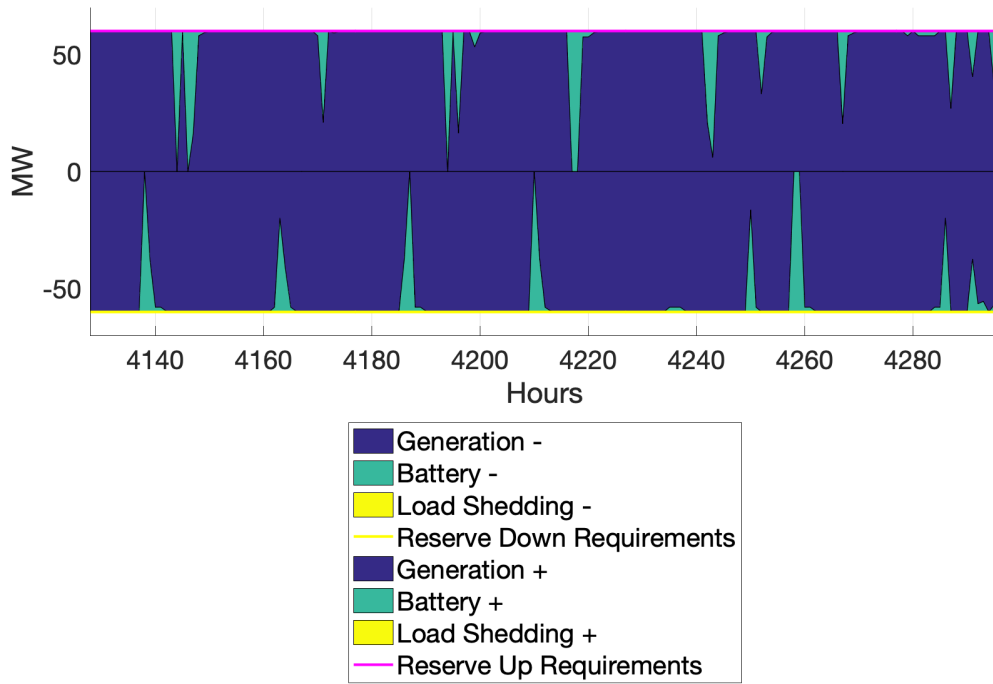
Σχήμα 6.23: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού



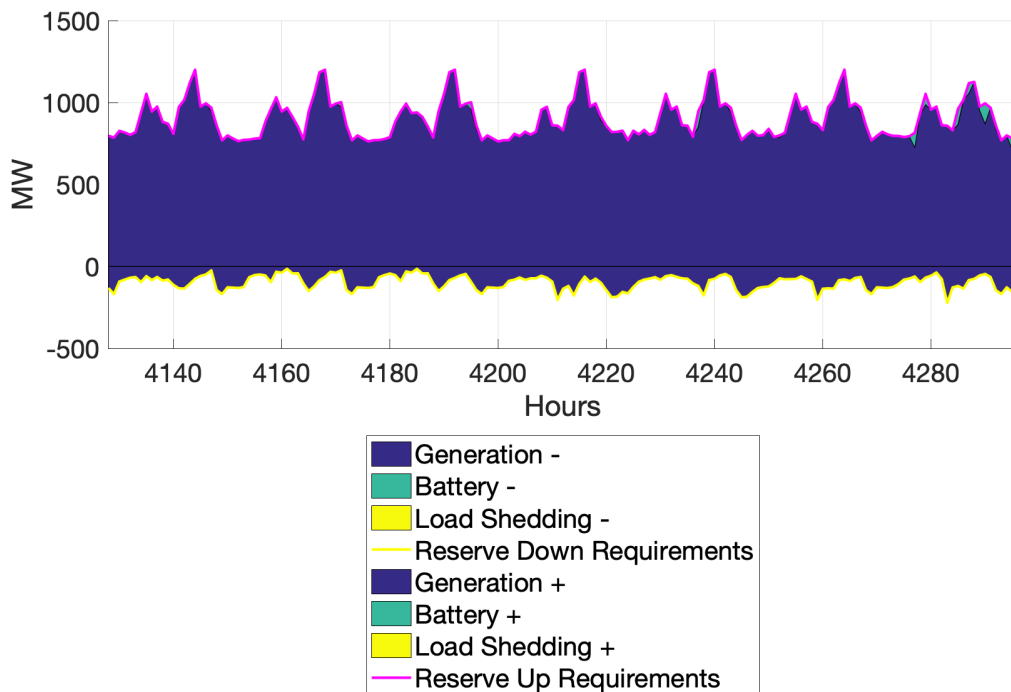
Σχήμα 6.24: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ζήτηση - Παραγωγή



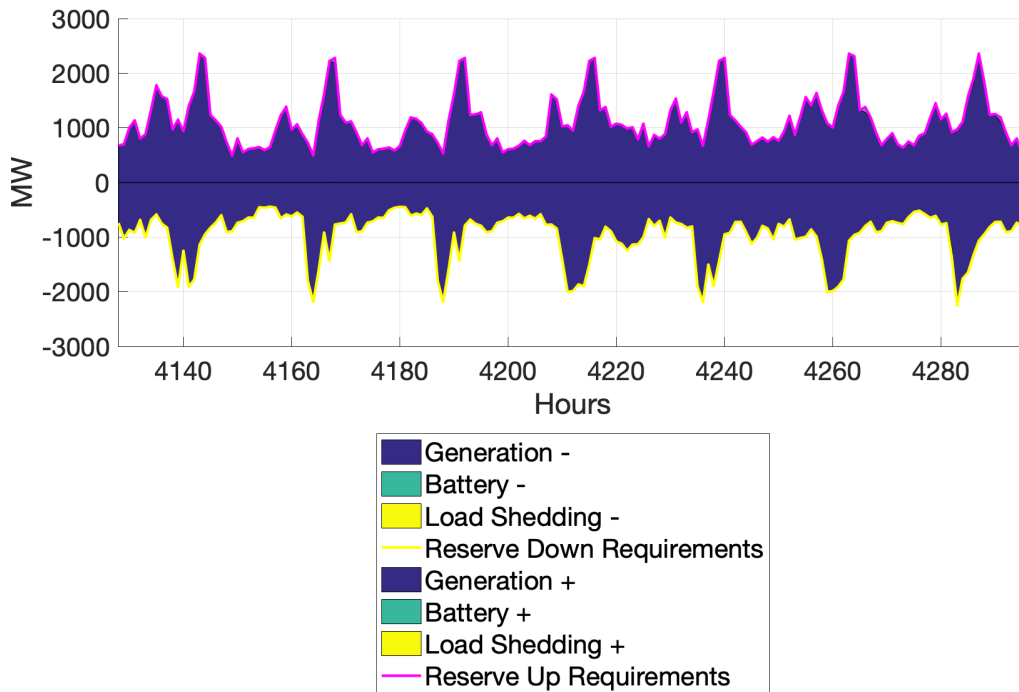
Σχήμα 6.25: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Ενεργειακό μείγμα



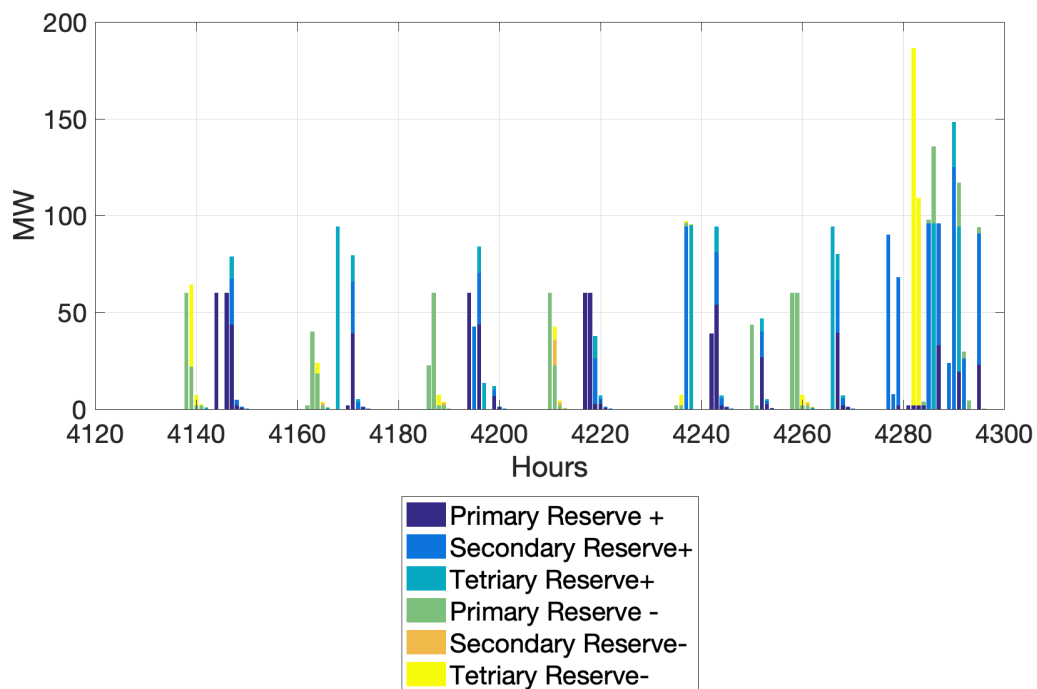
Σχήμα 6.26: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας



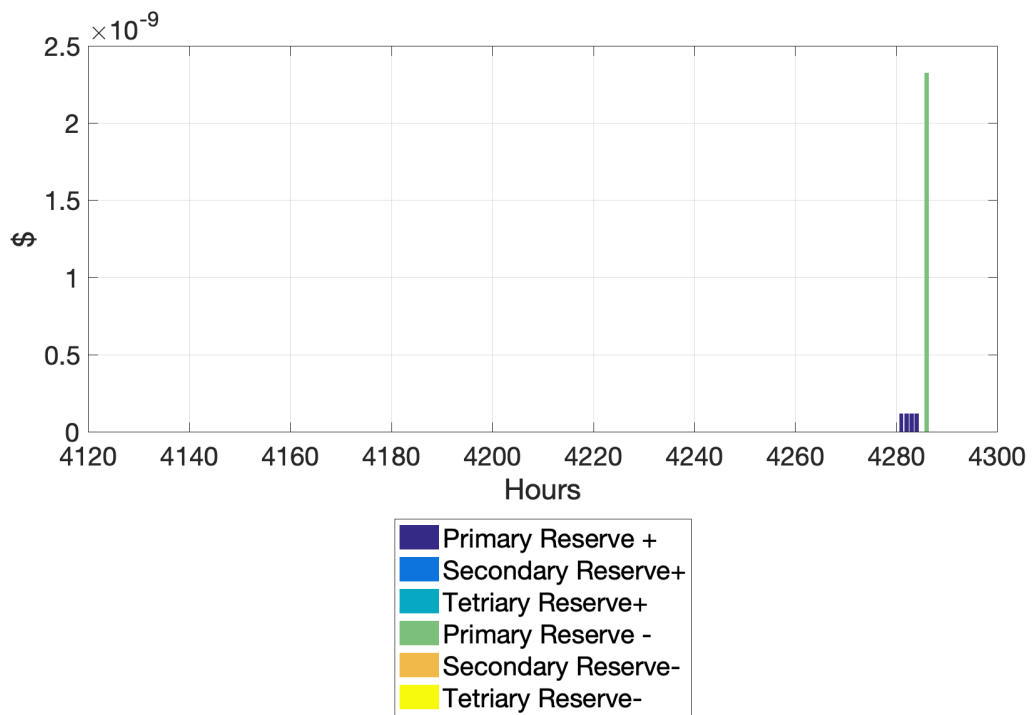
Σχήμα 6.27: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας



Σχήμα 6.28: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας

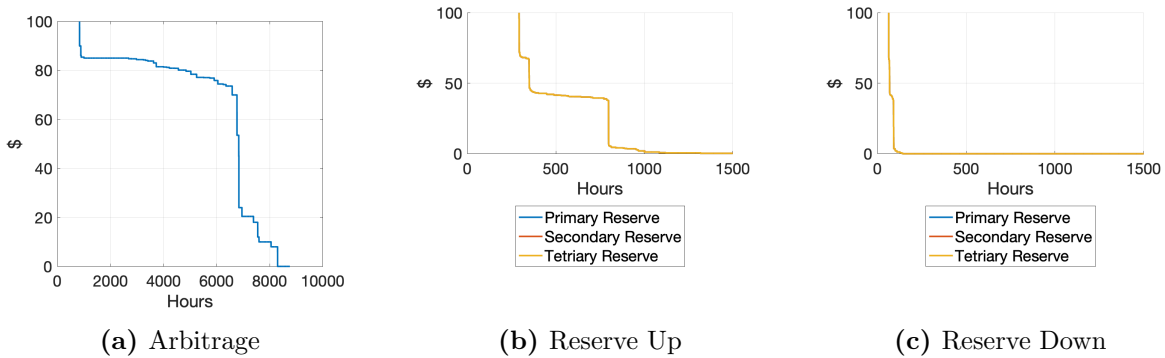


Σχήμα 6.29: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών

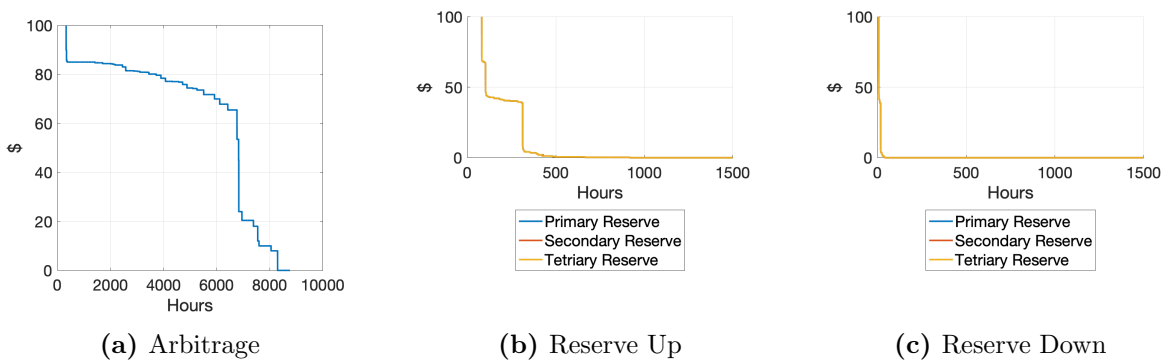


Σχήμα 6.30: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Κέρδη από εφεδρείες

6.1.4 Συγκριτικά διαγράμματα



Σχήμα 6.31: Σύστημα με έντεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών

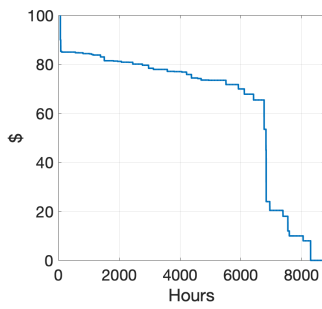


Σχήμα 6.32: Σύστημα με δώδεκα συμβατικές μονάδες παραγωγής - Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών

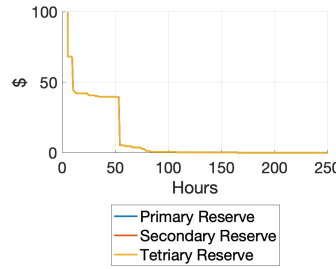
Είναι φανερό από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα ότι η διαμόρφωση της οριακής τιμής του συστήματος (Arbitrage) δε διαφέρει πολύ και στις τρεις περιπτώσεις με εξαίρεση τις πολύ υψηλές τιμές που έχουν κοπεί στον άξονα του διαγράμματος. Αυτές οι τιμές διαμορφώνονται όταν το σύστημα έχει έλλειψη σε ισχύ τη δεδομένη χρονική στιγμή και ζητά ενέργεια από πηγές με πολύ υψηλή τιμή προσφοράς. Όταν ο αποθηκευτικός σταθμός εντοπίσει αυτές τις στιγμές, παρέχει όλη τη δεσμευμένη ισχύ του για τη μεγιστοποίηση του κέρδους του. Αυτό το φαινόμενο είναι αναμενόμενο να συμβεί στα συστήματα με λιγότερες μονάδες παραγωγής.

Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι όσο λιγότερες συμβατικές μονάδες παραγωγής υπάρχουν στο σύστημα τόσο μεγαλύτερες είναι και οι ανάγκες για εφεδρείες. Το σύστημα με 13 συμβατικές μονάδες παραγωγής η ζήτηση καλύπτεται σημαντικά με τον αποθηκευτικό σταθμό να συμπληρώνει τις ανάγκες όταν χρειάζονται. Από την άλλη τα συστήματα με 11 και 12 συμβατικές μονάδες ο ρόλος του αποθηκευτικού σταθμού είναι πιο ενεργός. Τις στιγμές αυτές που υπάρχει ανεπάρκεια η οριακή τιμή διαμορφώνεται με βάση το κόστος παραβίασης το οποίο είναι απαγορευτικά υψηλό.

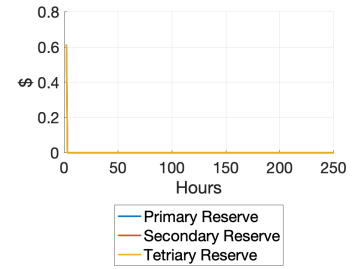
Για αυτό το λόγο σε συστήματα όπως αυτά, τα οποία είναι αρκετά πεισμένα είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, δε γίνεται να έχουμε καλή εικόνα των εσόδων που περιμένει να αποσπάσει ο αποθηκευτικός σταθμός καθώς οι τιμές του συστήματος είναι παραμορφωμένες. Πρακτικά το πρόβλημά μας, μας δίνει σαν πληροφορία τις ώρες που η τιμή εφεδρειών θα έχει κάποια αξία, αλλά μπορεί να έχει αξία και άλλες ώρες που δεν μπορεί να το δείξει το πρόβλημά μας. Αυτό συμβαίνει διότι το κάτω επίπεδο του συνολικού bi-level δεν μπορεί να έχει τεχνικά ελάχιστα τα οποία χρειάζονται τη χρήση δυαδικών μεταβλητών λόγω της μη γραμμικότητας του.



(a) Arbitrage



(b) Reserve Up



(c) Reserve Down

Σχήμα 6.33: Σύστημα με δεκατρείς συμβατικές μονάδες παραγωγής - Συγκριτικά διαγράμματα οριακών τιμών

Συνεπώς κίολας στόχος των αποτελεσμάτων είναι η ενημέρωση του εκάστοτε παραγωγού για το πώς πρέπει να ποντάρει και όχι να εκτιμήσει τα έσοδα. Μία εκτίμηση για τα κέρδη από το arbitrage και την παροχή εφεδρειών του αποθηκευτικού σταθμού αντικατοπτρίζεται στον Πίνακα 6.2. Όπως είναι φανερό από τον πίνακα τα αποτελέσματα στα πιο ανεπαρκή συστήματα δείχνουν αρκετά υπερεκτιμημένα.

Παρατηρούμε σε όλες τις περιπτώσεις κάποιες ώρες η οριακή τιμή του συστήματος είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας, εξαιτίας την υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, με αποτέλεσμα η οριακή τιμή να διαμορφώνεται από αυτές, οι οποίες συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση με μηδενικό κόστος.

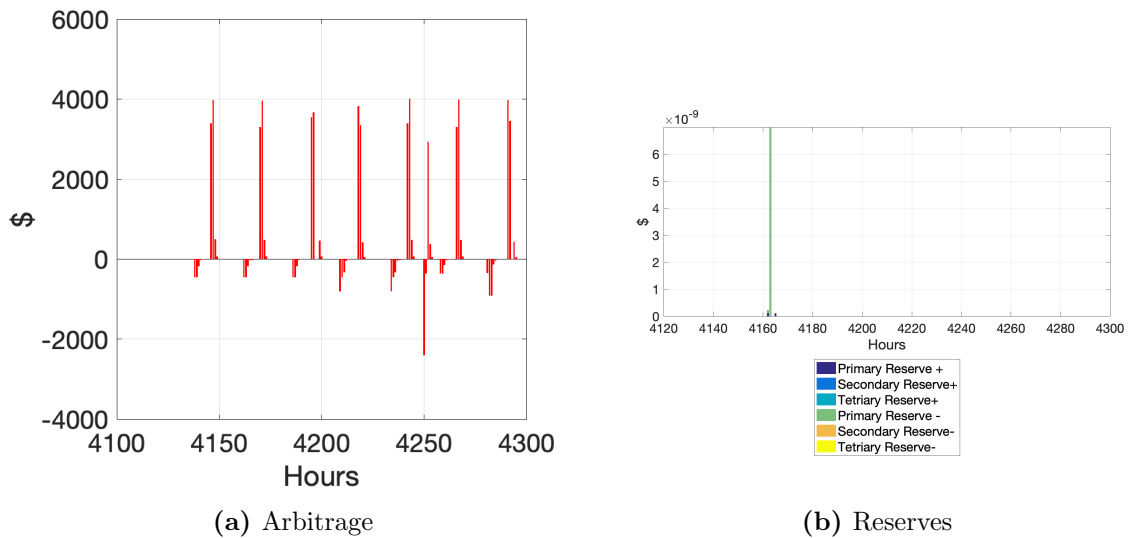
<i>Battery 100MW / 2 Hours</i>	11 Generators	12 Generators	13 Generators
Arbitrage	34.241.635,70	11.561.864,50	3.430.208,16
PrimaryReserve +	20.872.141,61	9.337.453,62	276.680,36
Secondary Reserve +	93.453.452,22	20.330.468,93	1.080.941,56
Tetriary Reserve +	37.661.354,73	12.747.546,24	478.070,11
PrimaryReserve -	5.061.471,67	549.842,17	0
Secondary Reserve -	6.321.291,98	46.069,97	54,90
Tetriary Reserve -	18.902.209,57	1.107.921,18	54,91
Total	216.513.557,50	55.681.166,63	5.266.010,00

Πίνακας 6.2: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2h με τη μέθοδο του Price Maker για διαφορετικές συνθήκες επάρκειας του συστήματος - Σύγκριση κερδών

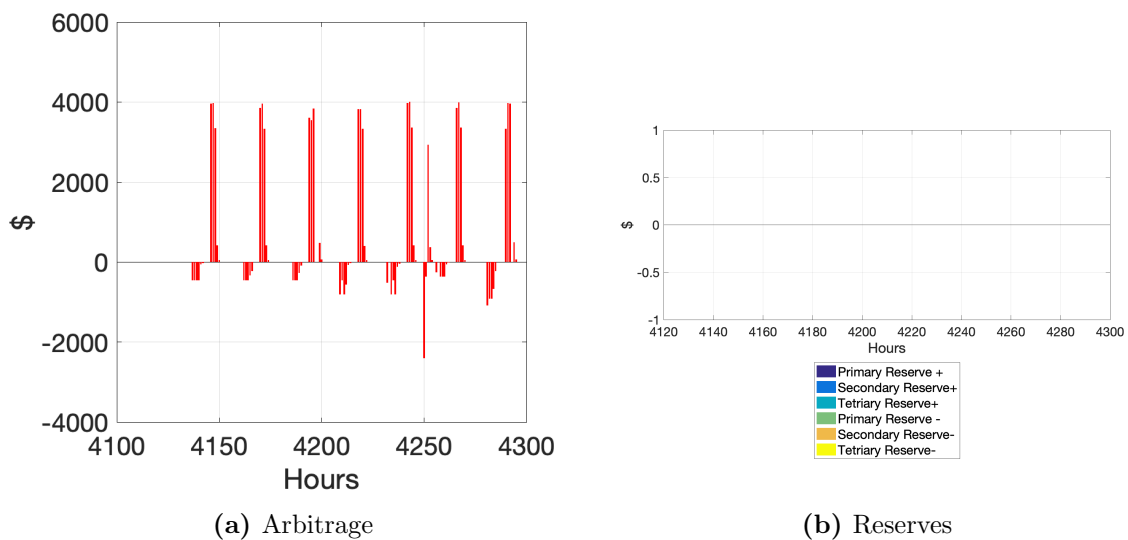
6.2 Λειτουργία αποθηκευτικών σταθμών με διαφορετικές διαμορφώσεις με τη μέθοδο του Price Maker

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα για διαφορετικές διαμορφώσεις αποθηκευτικού σταθμού, για σύστημα ενέργειας που περιλαμβάνει ΑΠΕ, εισαγωγές, εξαγωγές καθώς και δεκατρείς μονάδες συμβατικής παραγωγής. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται η σύγκριση μεταξύ των κερδών των διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικού σταθμού.

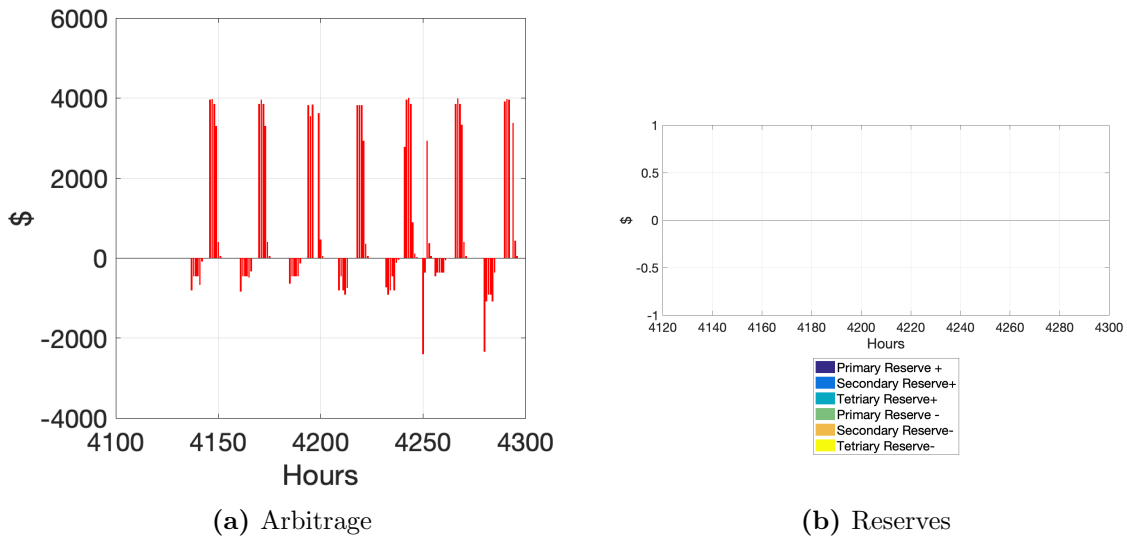
6.2.1 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW



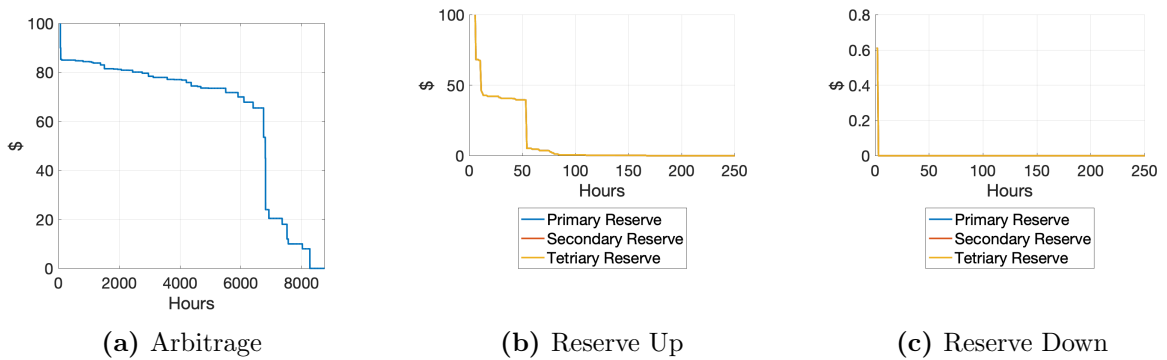
Σχήμα 6.34: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 2Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



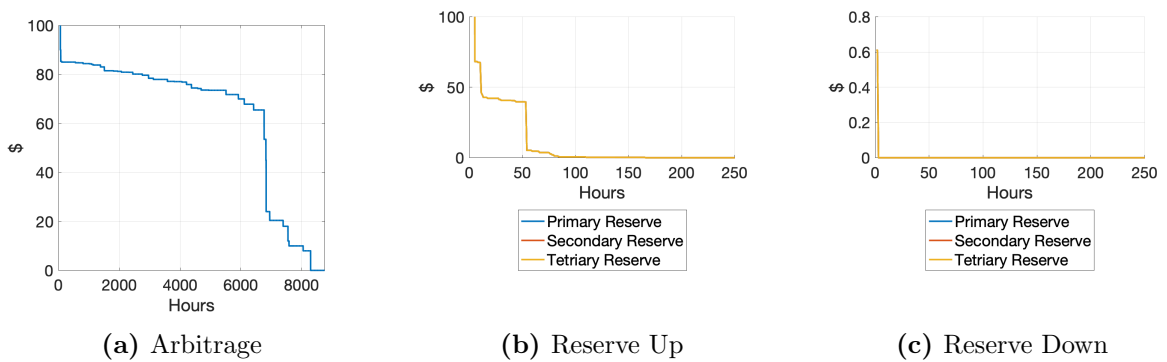
Σχήμα 6.35: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 3Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



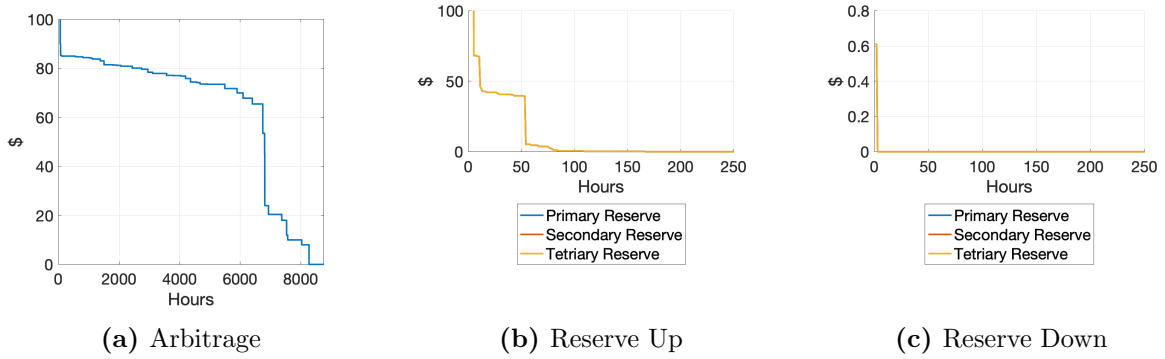
Σχήμα 6.36: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 4Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



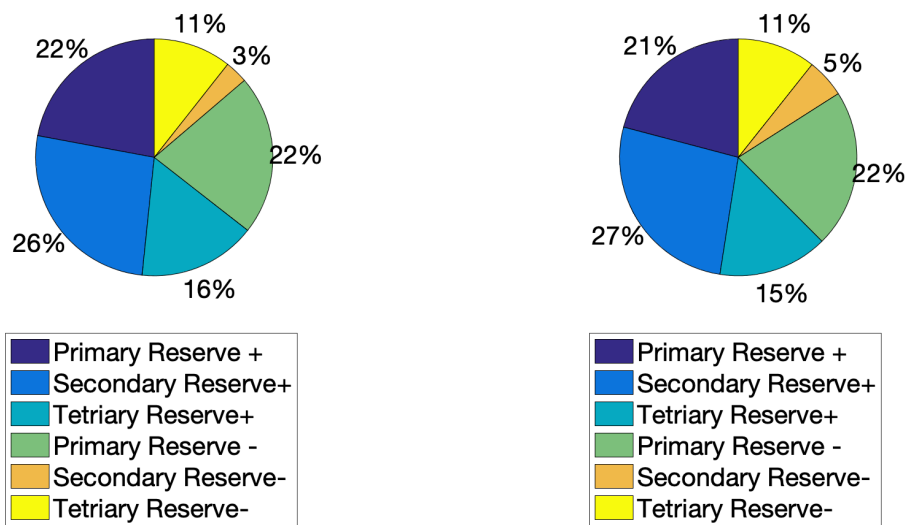
Σχήμα 6.37: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 2Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών



Σχήμα 6.38: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 3Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών

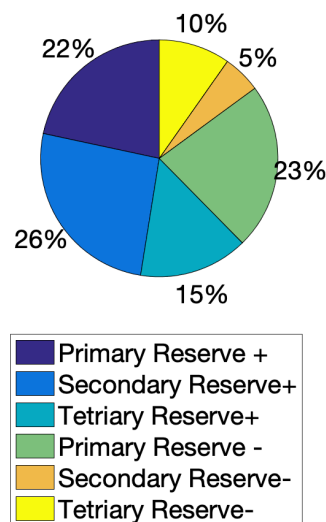


Σχήμα 6.39: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW / 4Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών



(a) 50MW / 2Hours

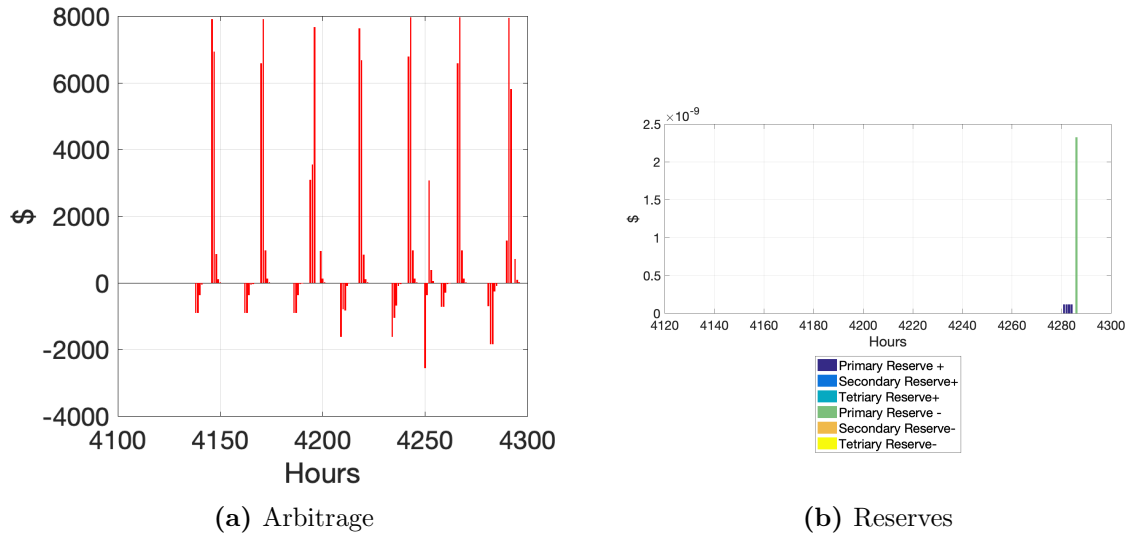
(b) 50MW / 3Hours



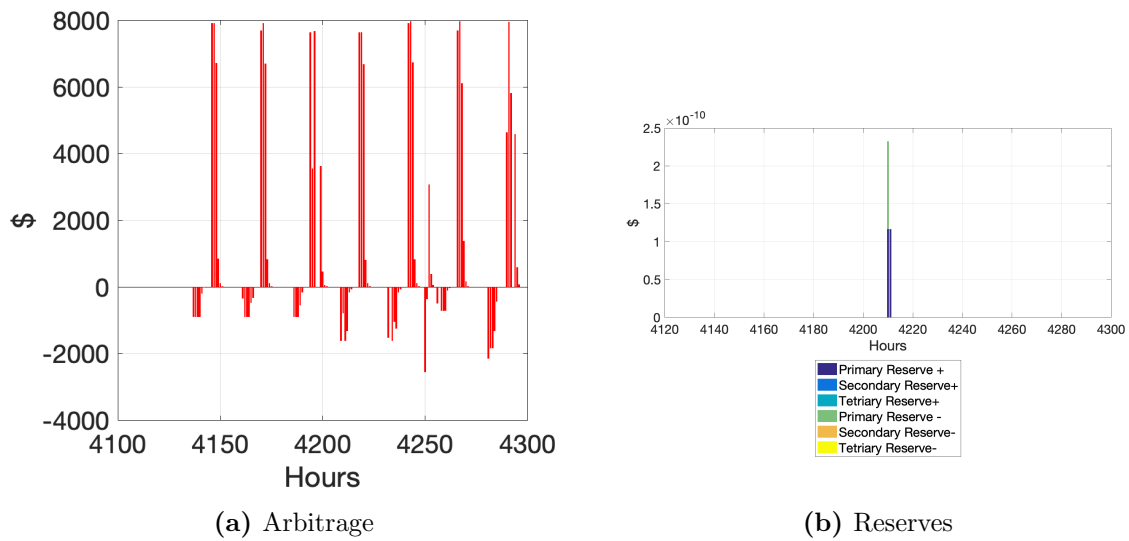
(c) 50MW / 4Hours

Σχήμα 6.40: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 50MW - Γράφημα πίτας ετήσιας συμμετοχής του αποθηκευτικού σταθμού σε εφεδρείες

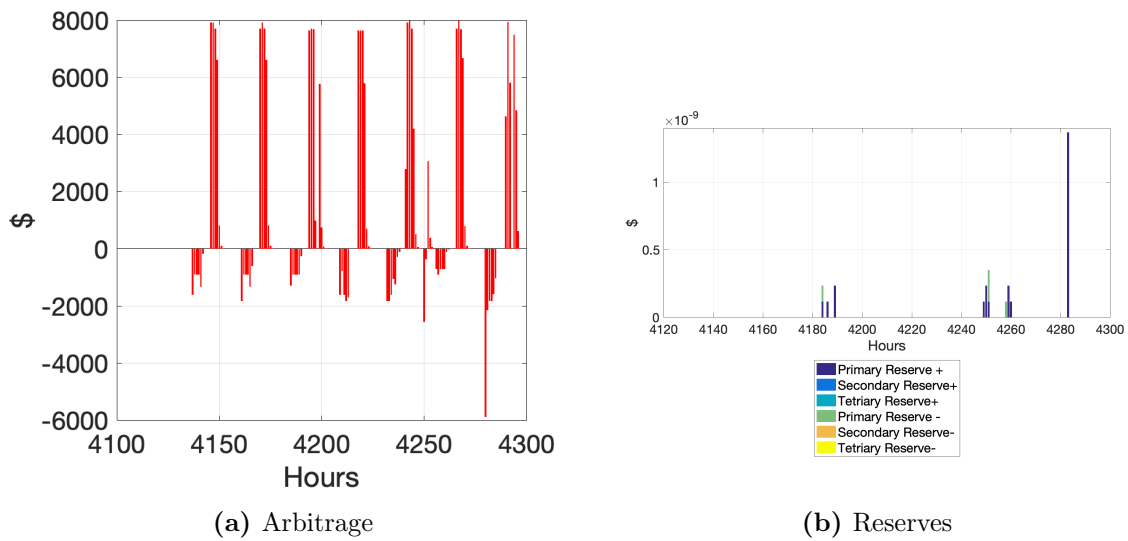
6.2.2 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW



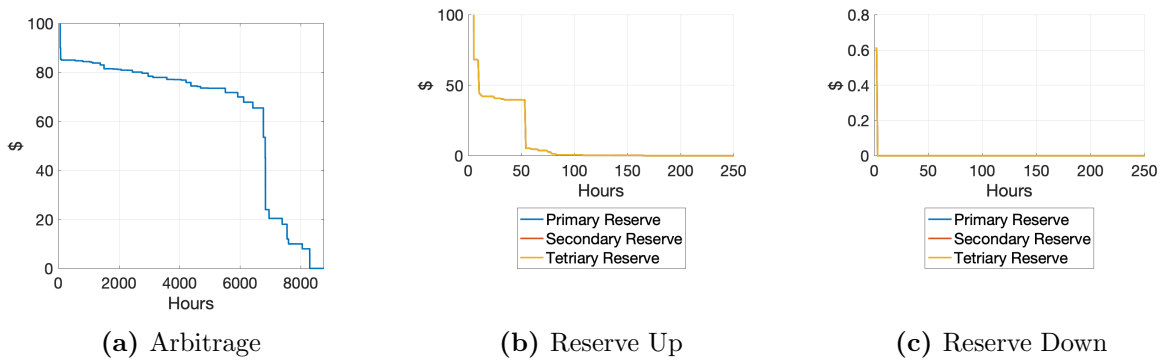
Σχήμα 6.41: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



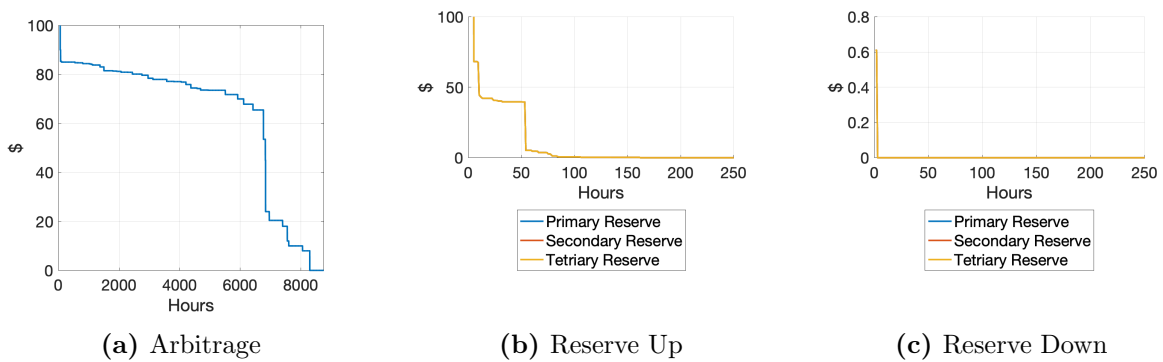
Σχήμα 6.42: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 3Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



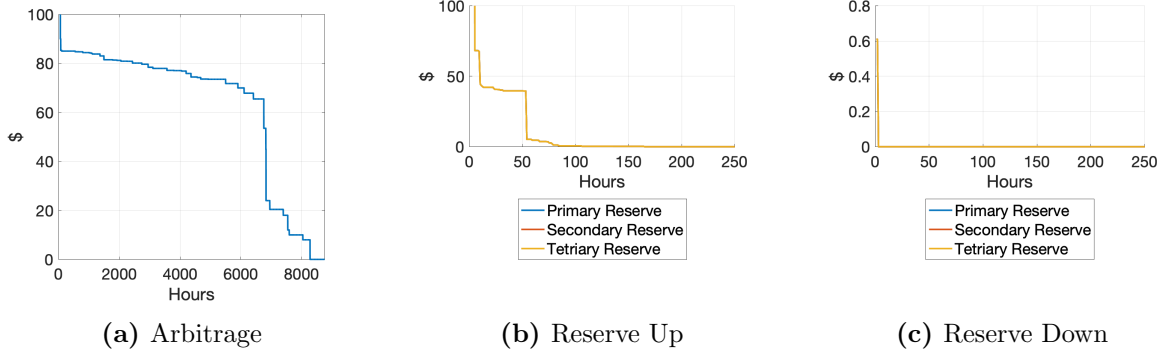
Σχήμα 6.43: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 4Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



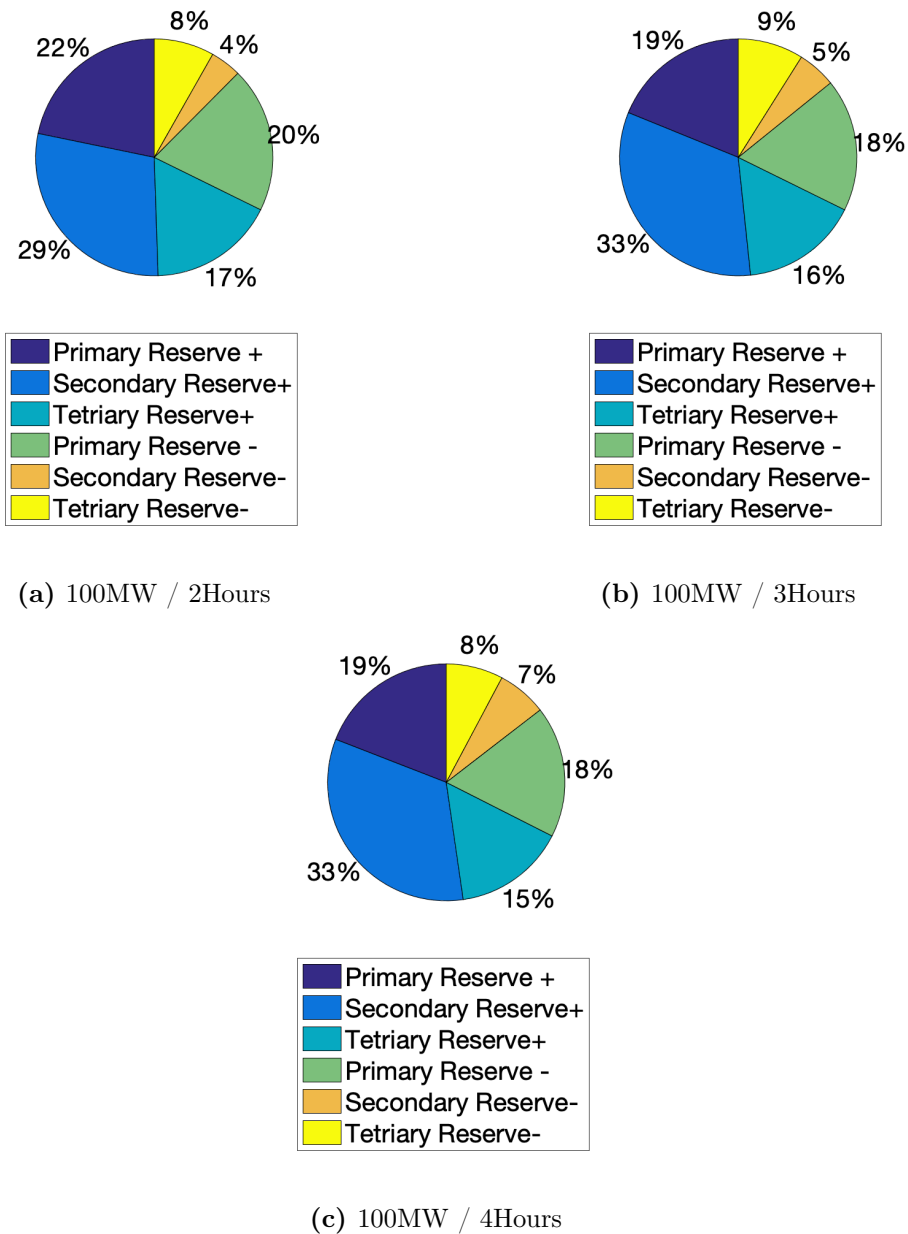
Σχήμα 6.44: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών



Σχήμα 6.45: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 3Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών

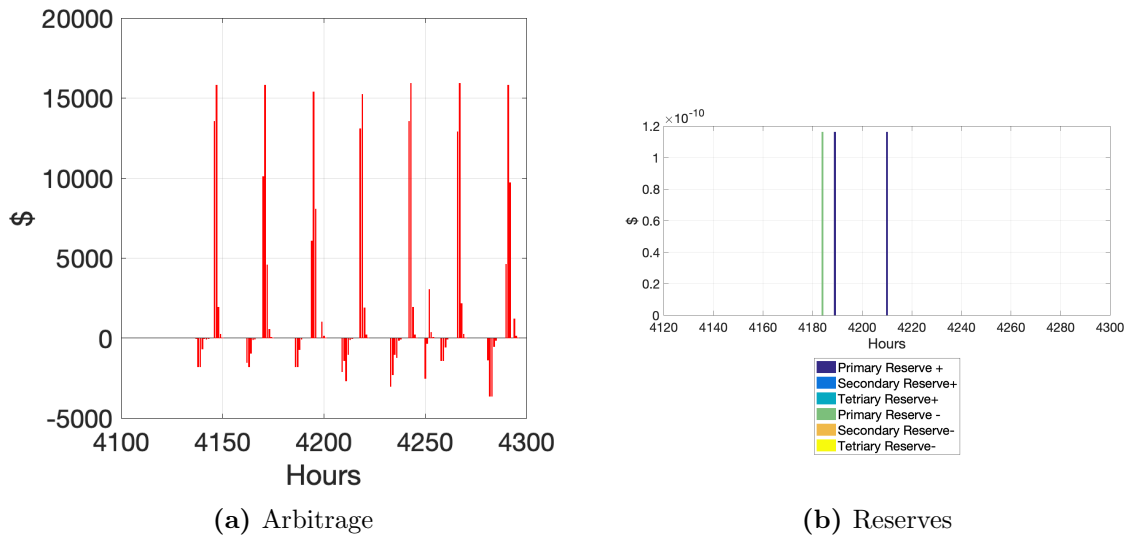


Σχήμα 6.46: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 4Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών

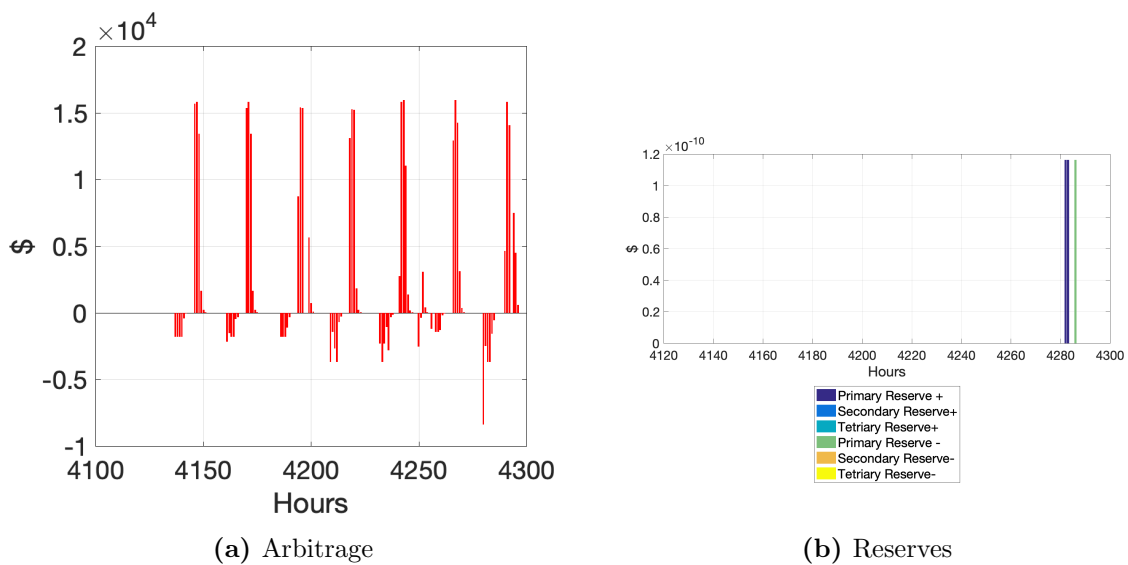


Σχήμα 6.47: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW - Γράφημα πίτας ετήσιας συμμετοχής του αποθηκευτικού σταθμού σε εφεδρείες

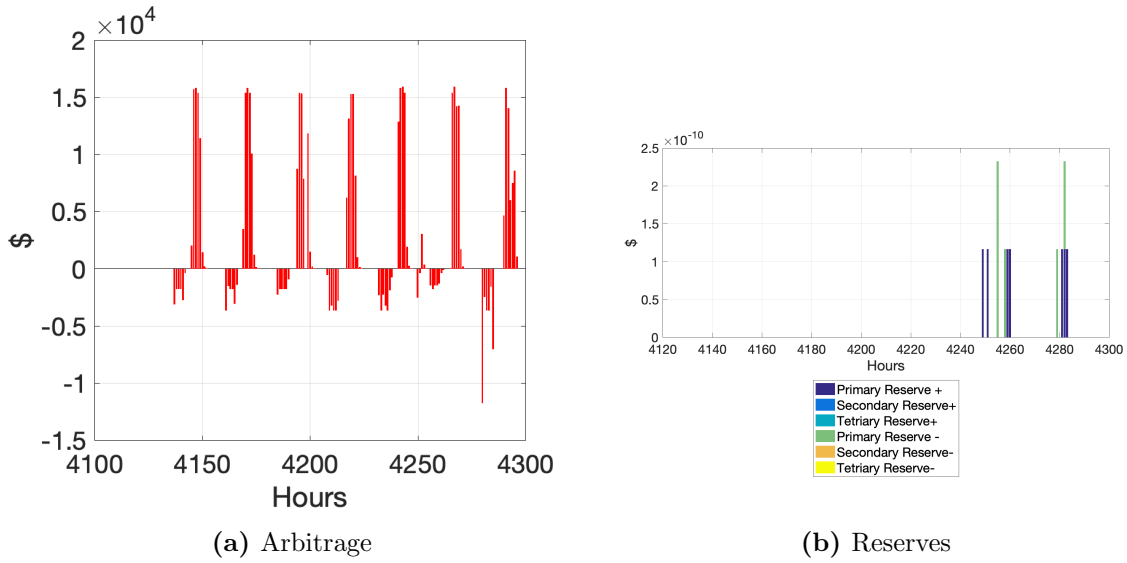
6.2.3 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW



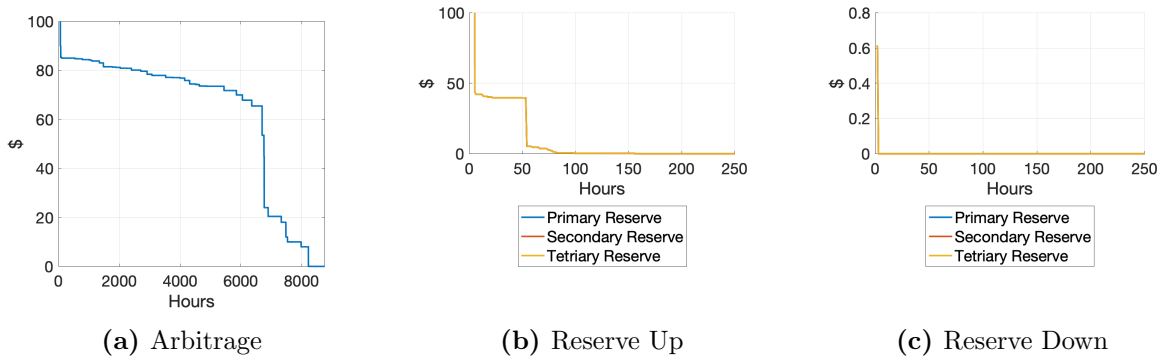
Σχήμα 6.48: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



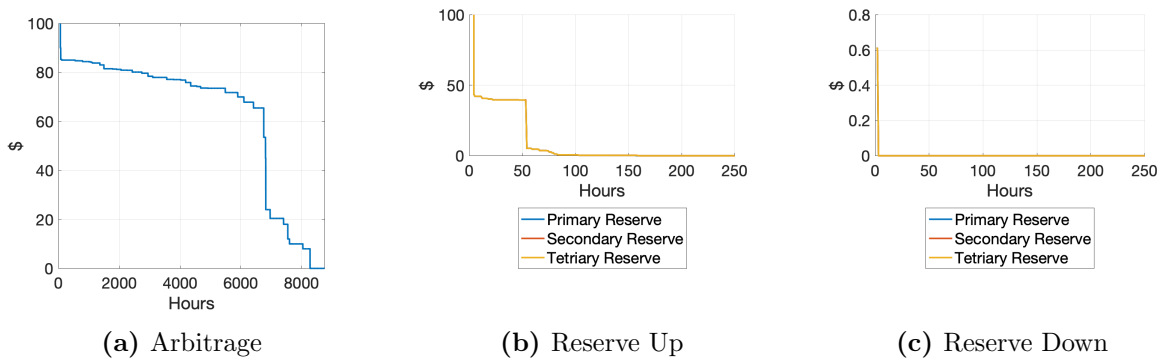
Σχήμα 6.49: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 3Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



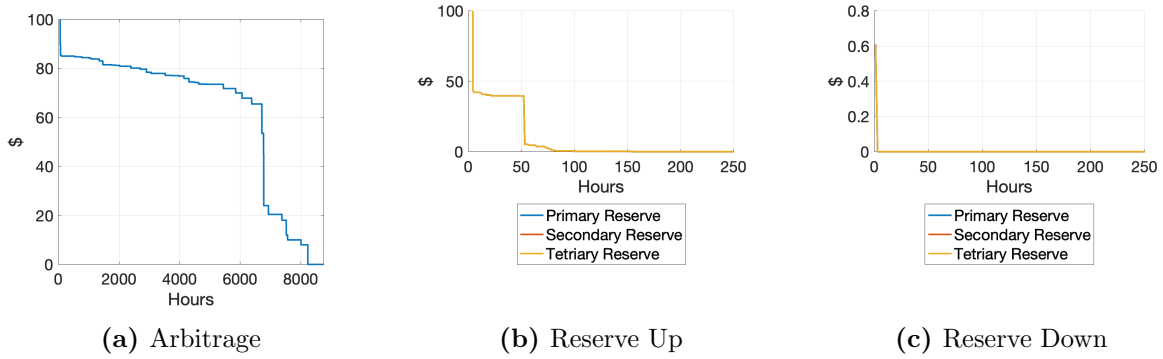
Σχήμα 6.50: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 4Hours - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού



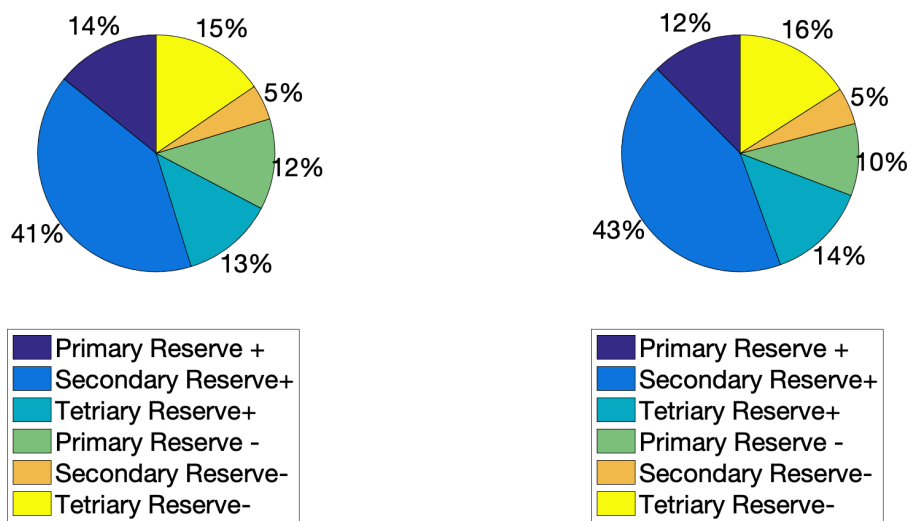
Σχήμα 6.51: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών



Σχήμα 6.52: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 3Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών

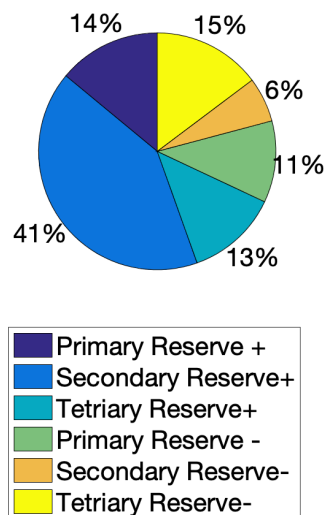


Σχήμα 6.53: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 4Hours - Διαγράμματα Οριακών τιμών



(a) 200MW / 2Hours

(b) 200MW / 3Hours



(c) 200MW / 4Hours

Σχήμα 6.54: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW - Γράφημα πίτας ετήσιας συμμετοχής του αποθηκευτικού σταθμού σε εφεδρείες

6.2.4 Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων

Από τα διαγράμματα των οριακών τιμών με φθίνουσα σειρά, βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι διαφορές μεταξύ των διαμορφώσεων είναι μηδαμινές.

Οι αποθηκευτικοί σταθμοί με μεγαλύτερη χωρητικότητα σε ενέργεια έχουν τη δυνατότητα να συμμετέχουν πιο αποτελεσματικά και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Βέβαια, καθώς θα περιμέναμε όσο αυξάνεται η ισχύς του αποθηκευτικού σταθμού να μεγαλώνει και η ικανότητα για παροχή εφεδρειών, μικρή διαφορά παρατηρείται μεταξύ των διαμορφώσεων. Αυτό βέβαια είναι και αποτέλεσμα του ότι το σύστημα μας είναι πολύ "άνετο" χάρη στις συμβατικές μονάδες παραγωγής.

Τα παραπάνω μπορούν να γίνουν κατανοητά από τους πίνακες κερδών στη συνέχεια καθώς παρατηρούμε ότι αυτό που επηρεάζει την τελική τιμή των ετήσιων κερδών είναι τα κέρδη από το arbitrage. Σημαντικό να τονιστεί ότι από τα ετήσια σχήματα πίτας συμμετοχής στις εφεδρείες Σχήμα 6.40, Σχήμα 6.47, Σχήμα 6.54 γίνεται κατανοητό ότι ο αποθηκευτικός σταθμός αποσπά τα περισσότερα κέρδη μέσα από τη δευτερεύουσα θετική εφεδρεία.

Battery	50MW / 2 Hours	50MW / 3 Hours	50MW / 4 Hours
Arbitrage	1.770.971,79	2.523.614,44	3.308.844,16
Primary Reserve +	350.049,32	349.228,53	421.293,29
Secondary Reserve +	649.896,10	787.191,00	561.525,19
Tetriary Reserve +	186.890,81	45.224,05	14.044,12
Primary Reserve -	54,90	27,45	27,45
Secondary Reserve -	11,38	11,38	38,84
Tetriary Reserve -	0,01	27,45	0
Total	2.957.874,33	3.705.324,32	4.305.773,07

Πίνακας 6.3: Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 50 MW

Battery	100MW / 2 Hours	100MW / 3 Hours	100MW / 4 Hours
Arbitrage	3.430.208,16	4.993.761,14	6.365.915,06
Primary Reserve +	276.680,36	270.385,21	280.342,77
Secondary Reserve +	1.080.941,56	772.289,79	820.558,02
Tetriary Reserve +	478.070,11	668.326,33	387.015,55
Primary Reserve -	0	73,20	0
Secondary Reserve -	54,90	7,71	54,90
Tetriary Reserve -	54,91	18,30	44,31
Total	5.266.010,01	6.704.861,70	7.853.930,63

Πίνακας 6.4: Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 100 MW

Παρατηρώντας τα μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας που αφορούν το arbitrage ενέργειας μπορεί εύκολα να βγει το συμπέρασμα πως αυξάνοντας την ικανότητα του σταθμού σε ισχύ και χωρητικότητα αυξάνεται και τη συνολική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει και να αποδώσει πίσω ο σταθμός τις ώρες που αυτή είναι ακριβότερη.

Στην περίπτωση τώρα των θετικών εφεδρειών παρατηρείται πως ο αποθηκευτικός σταθμός παρέχει την ισχύ του για εφεδρεία τις απογευματινές ώρες και καθώς αυξάνεται η ονομαστική ικανότητα του σταθμού υπάρχει μεγαλύτερη παροχή δευτερεύουσας εφεδρείας σε όλο το εύρος της ημέρας με αιχμή το απόγευμα. Παρόμοια στην περίπτωση των αρνητικών εφεδρειών φαίνεται ότι ο σταθμός παρέχει τη δεσμευμένη ισχύ κατά τις πρωινές ώρες, ενώ όσο αυξάνονται τα χα-

<i>Battery</i>	200MW / 2 Hours	200MW / 3 Hours	200MW / 4 Hours
Arbitrage	6.682.395,98	9.753.837,97	11.989.362,61
Primary Reserve +	261.821,92	254.765,63	254.543,83
Secondary Reserve +	1.475.540,11	844.021,65	848.689,55
Tetriary Reserve +	706.951,97	1.041.823,47	1.031.799,94
Primary Reserve -	0	25,01	17,40
Secondary Reserve -	109,80	68,16	0
Tetriary Reserve -	93,17	109,80	127,97
Total	9.126.912,98	11.894.651,72	14.124.541,33

Πίνακας 6.5: Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 200 MW

<i>Battery</i>	500MW / 2 Hours	500MW / 3 Hours	500MW / 4 Hours
Arbitrage	15.727.820,66	22.226.114,01	27.246.425,74
Primary Reserve +	127.698,39	279.300,73	425.503,47
Secondary Reserve +	1.762.230,77	938.611,28	1.101.081,38
Tetriary Reserve +	499.721,95	1.158.622,33	845.762,37
Primary Reserve -	36,00	1,22	0,00
Secondary Reserve -	331,07	321,42	274,47
Tetriary Reserve -	0,00	45,01	93,17
Total	18.117.839,44	24.603.016,01	29.619.140,64

Πίνακας 6.6: Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 500 MW

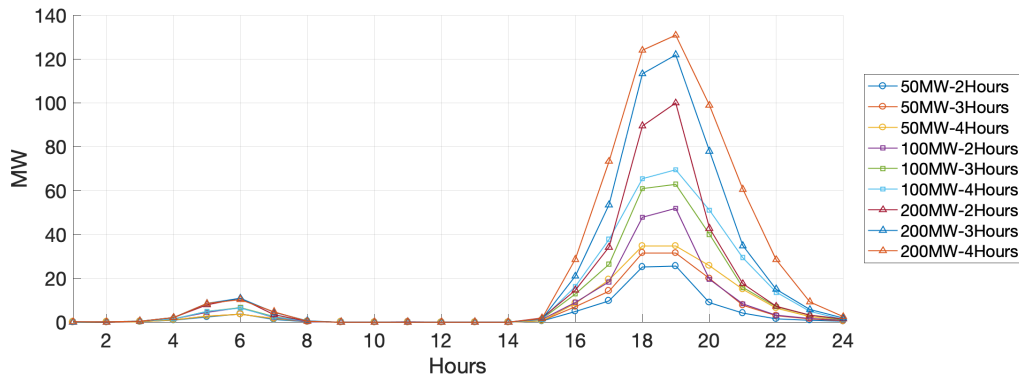
<i>Battery</i>	1500MW / 2 Hours	1500MW / 3 Hours	1500MW / 4 Hours
Arbitrage	39.206.133,91	52.548.446,02	61.671.131,71
Primary Reserve +	469.883,98	263.154,06	232.823,46
Secondary Reserve +	751.487,63	1.067.377,41	1.149.320,01
Tetriary Reserve +	1.153.555,18	1.052.253,03	1.005.176,73
Primary Reserve -	0,00	0,00	0,00
Secondary Reserve -	93,17	93,17	199,44
Tetriary Reserve -	243,24	243,24	136,98
Total	41.581.397,15	54.931.566,96	64.058.788,34

Πίνακας 6.7: Σύγκριση κερδών διαφορετικών διαμορφώσεων αποθηκευτικών σταθμών - Αποθηκευτικός σταθμός ισχύος 1500 MW

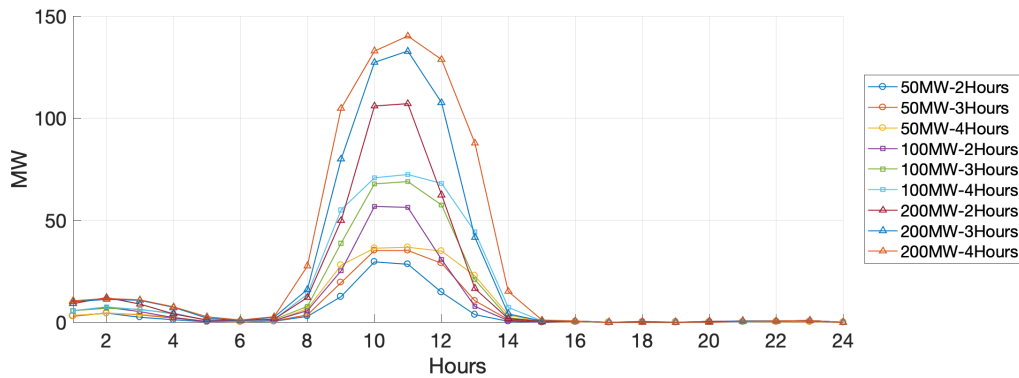
ρακτηριστικά του αυξάνεται η παροχή τριτεύουσας εφεδρείας σε όλη τη διάρκεια της ημέρας με αιχμή το πρωί και το απόγευμα.

Επιπλέον, από τα μέσα ημερήσια διαγράμματα οριακών τιμών γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η αύξηση της ισχύς του αποθηκευτικού σταθμού μπορεί να προκαλέσει τη μείωση της οριακής τιμής. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.72 κατά τις απογευματινές ώρες (17:00 - 19:00) όπου η οριακή τιμή είναι μειωμένη στα συστήματα με αποθηκευτικούς σταθμούς χαρακτηριστικών 200MW-3Hours και 200MW-4Hours. Αυτό συμβαίνει αφού η μεγαλύτερη ικανότητα του αποθηκευτικού σταθμού έχει ως αποτέλεσμα να καλύπτει μεγαλύτερη ζήτηση και συνεπώς να ενταχθούν λιγότερες μονάδες συμβατικής παραγωγής με υψηλότερο κόστος.

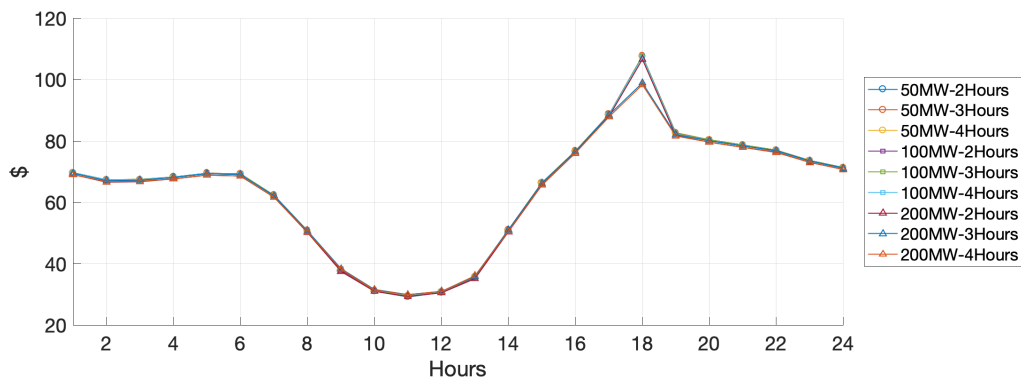
Αποθηκευτικοί σταθμοί 50 - 100 - 200 MW



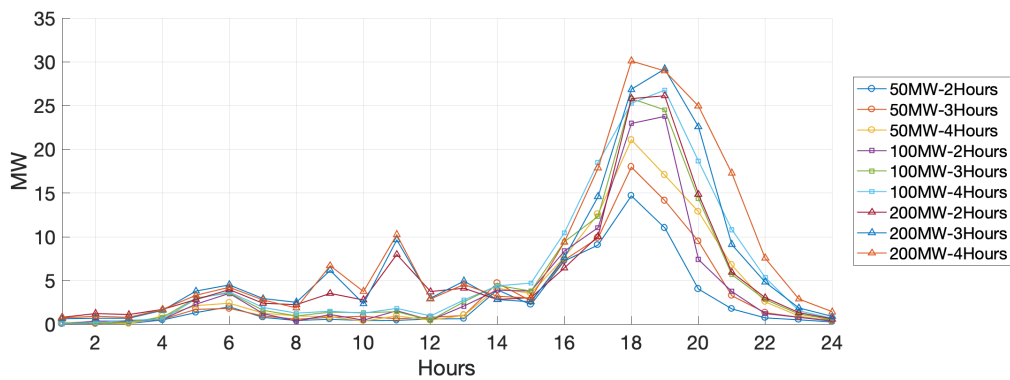
Σχήμα 6.55: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Εκφόρτιση



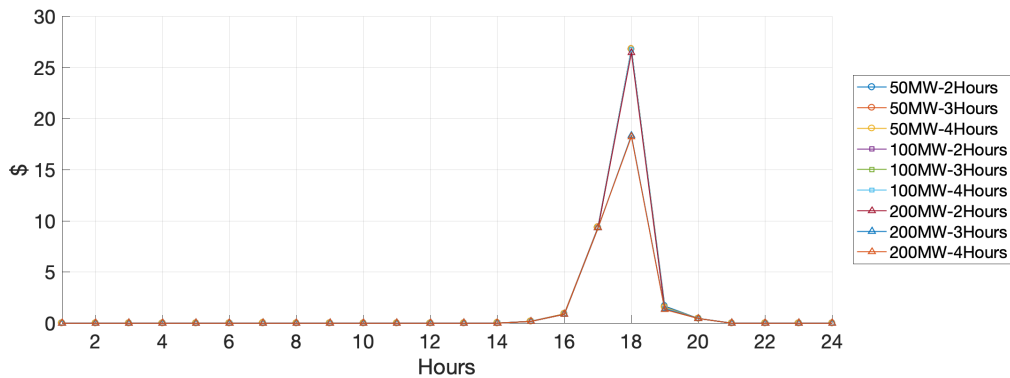
Σχήμα 6.56: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Φόρτιση



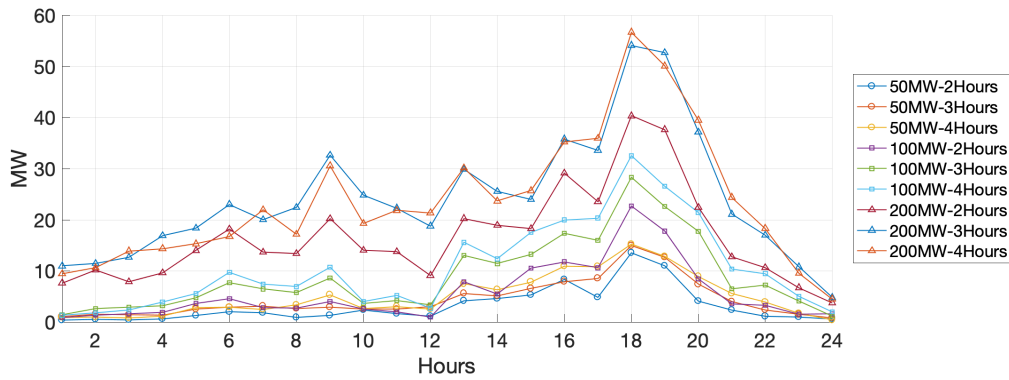
Σχήμα 6.57: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή συστήματος



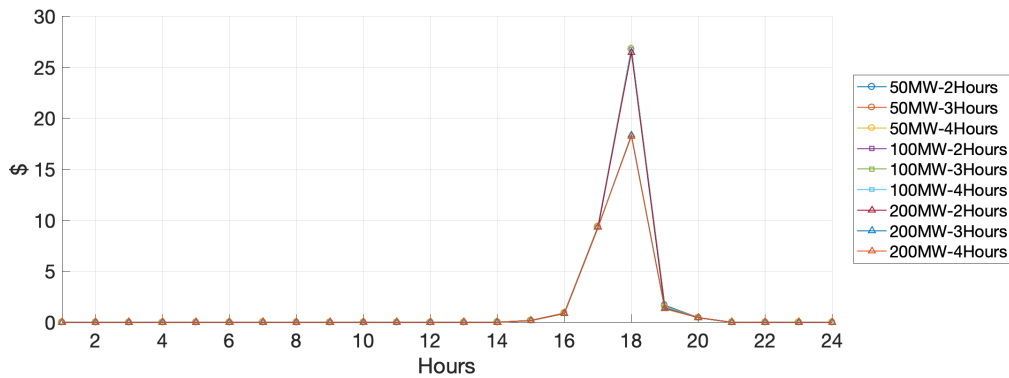
Σχήμα 6.58: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Πρωτεύουσα θετική εφεδρεία



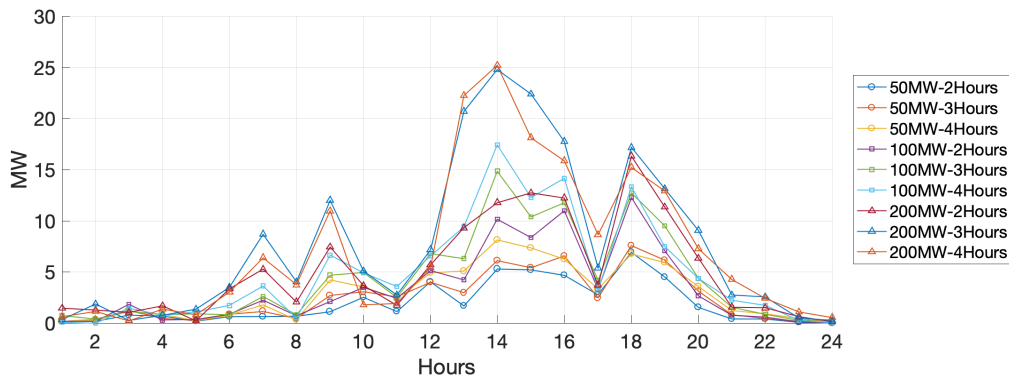
Σχήμα 6.59: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας



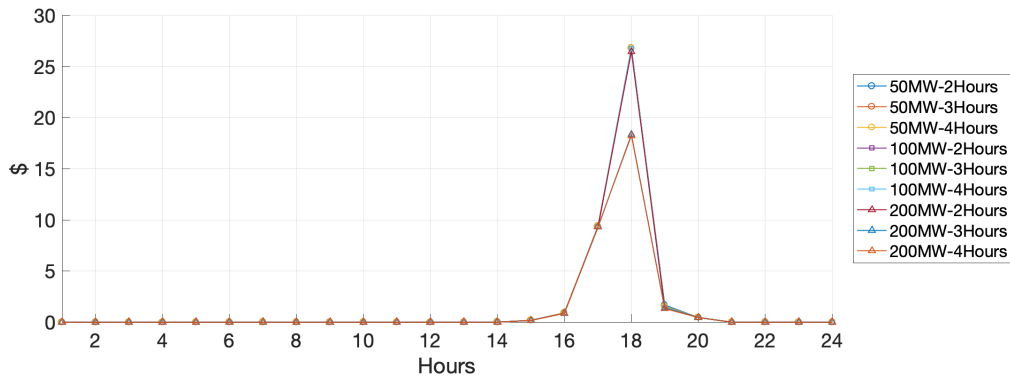
Σχήμα 6.60: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Δευτερεύουσα θετική εφεδρεία



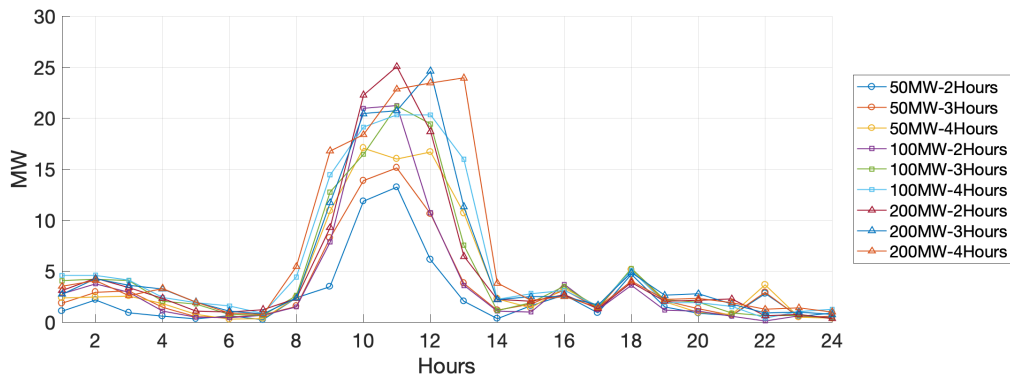
Σχήμα 6.61: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας



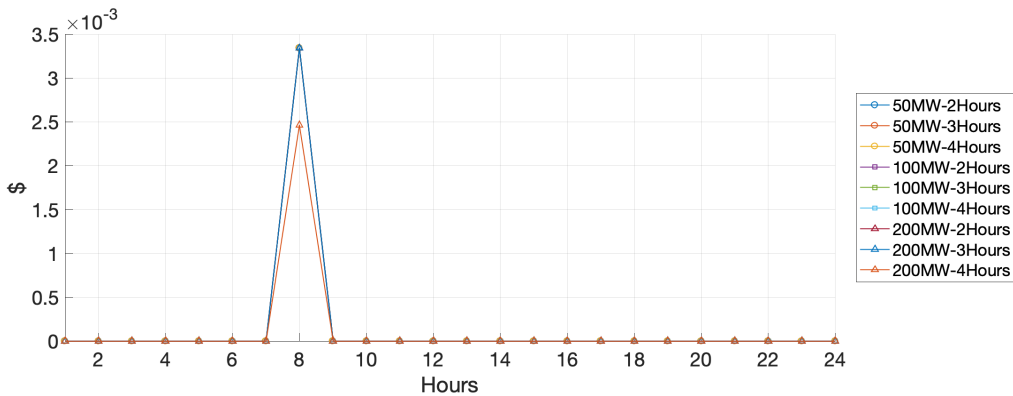
Σχήμα 6.62: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Τριτεύουσα θετική εφεδρεία



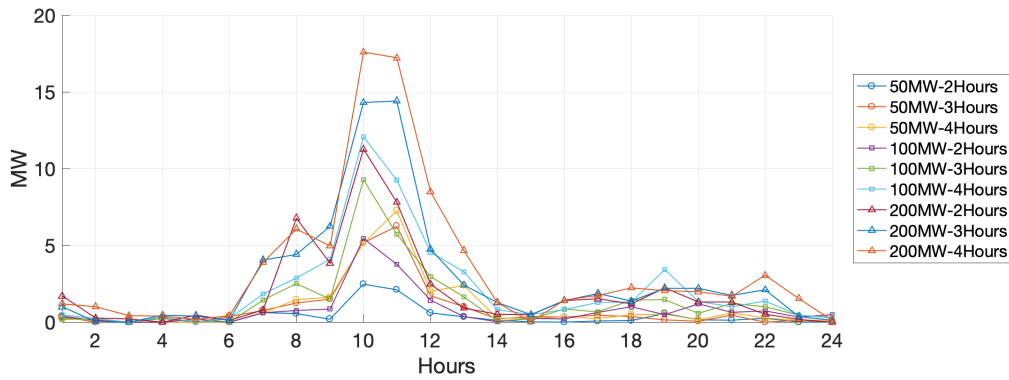
Σχήμα 6.63: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή τριτεύουσας θετικής εφεδρείας



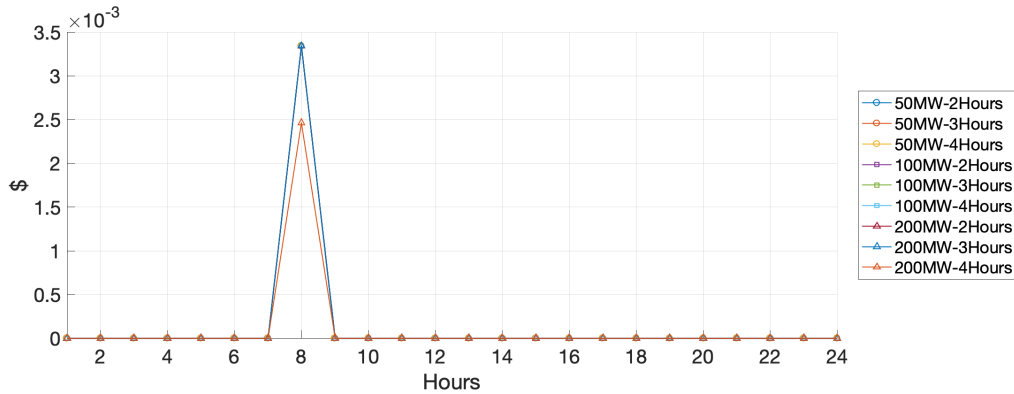
Σχήμα 6.64: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία



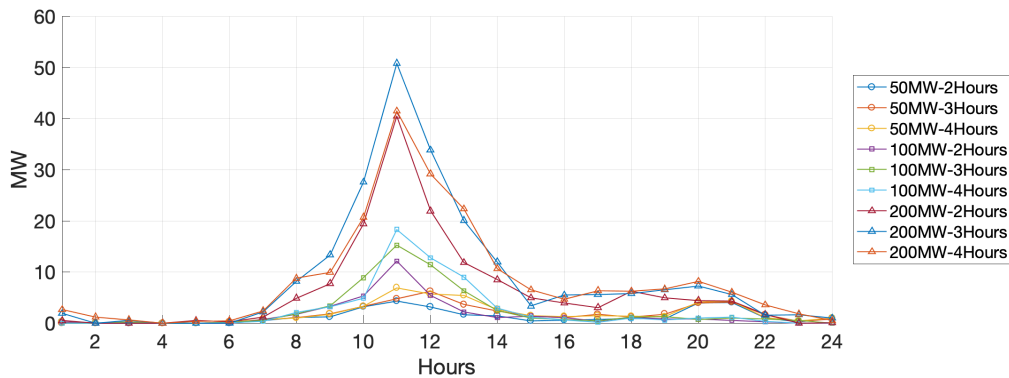
Σχήμα 6.65: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας



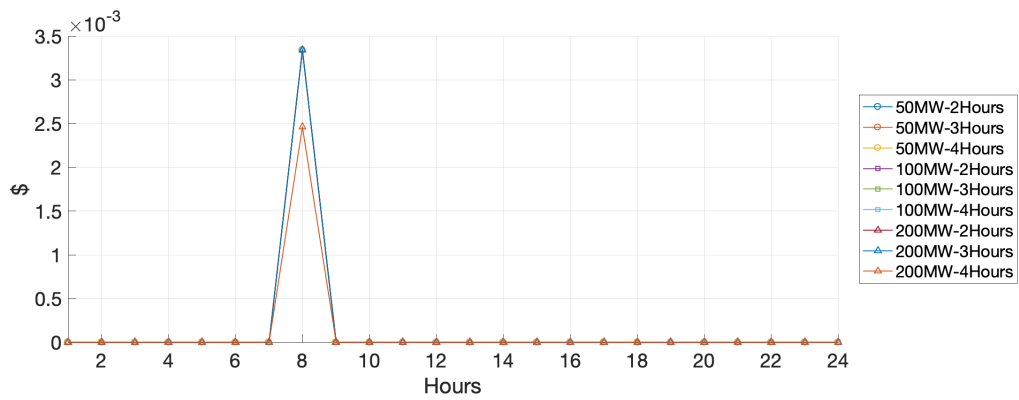
Σχήμα 6.66: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία



Σχήμα 6.67: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας

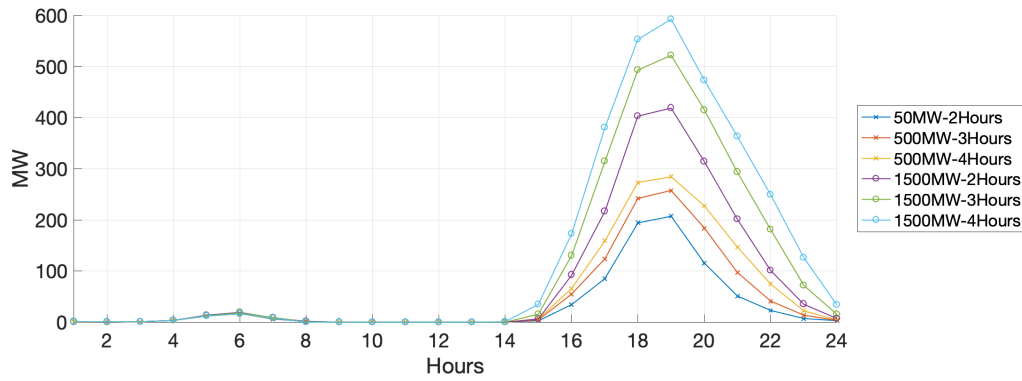


Σχήμα 6.68: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Τριτεύουσα αρνητική εφεδρεία

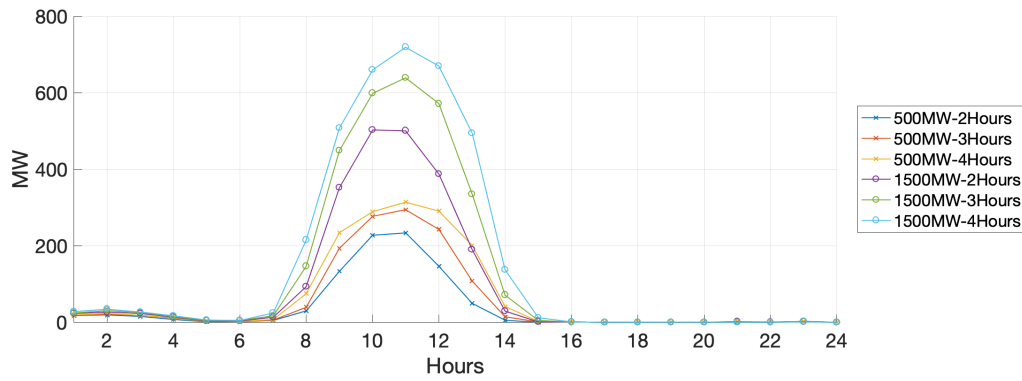


Σχήμα 6.69: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή τριτεύουσας αρνητικής εφεδρείας

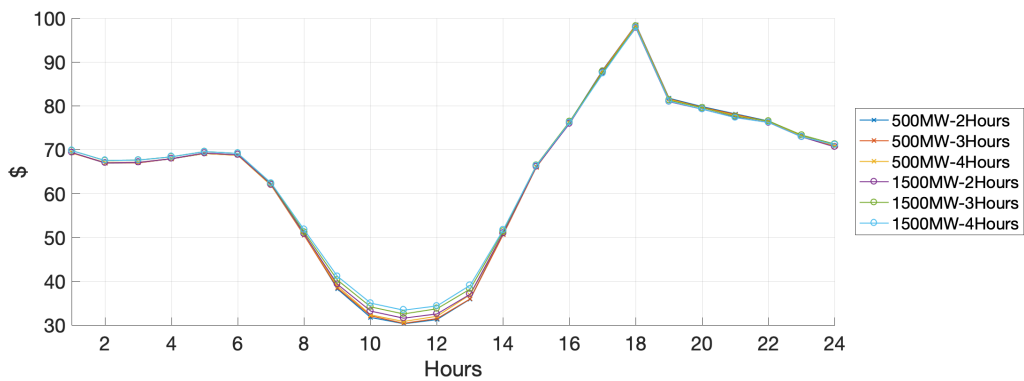
Αποθηκευτικοί σταθμοί 500 - 1500 MW



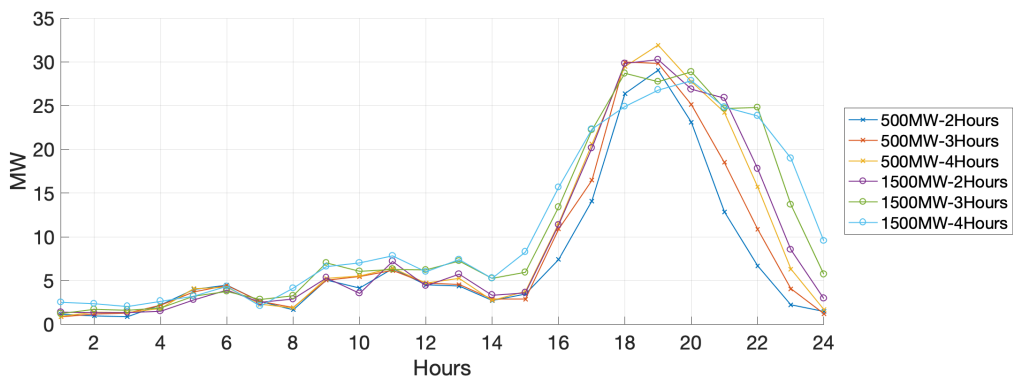
Σχήμα 6.70: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Ειςφόρτιση



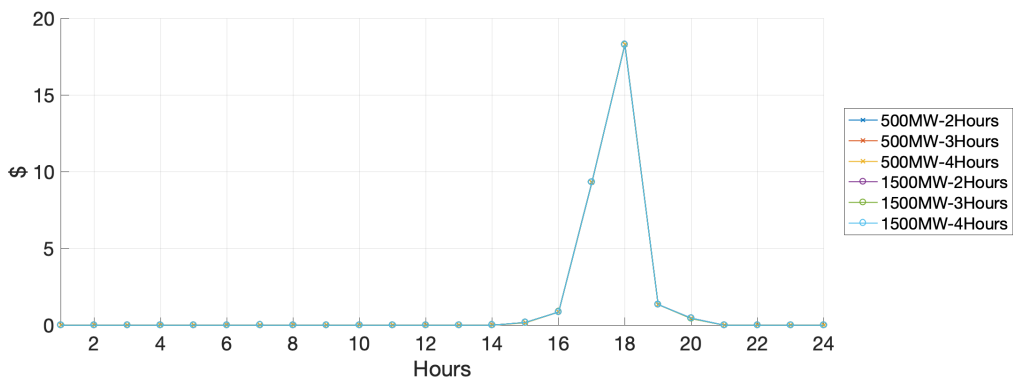
Σχήμα 6.71: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Φόρτιση



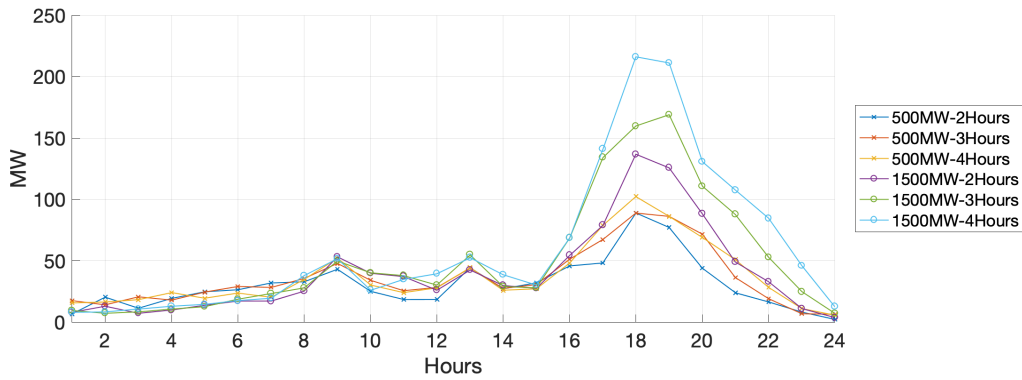
Σχήμα 6.72: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή συστήματος



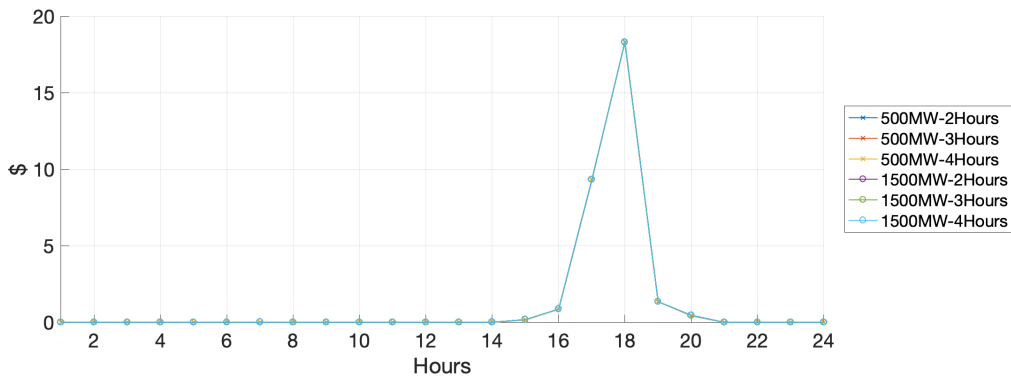
Σχήμα 6.73: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Πρωτεύουσα θετική εφεδρεία



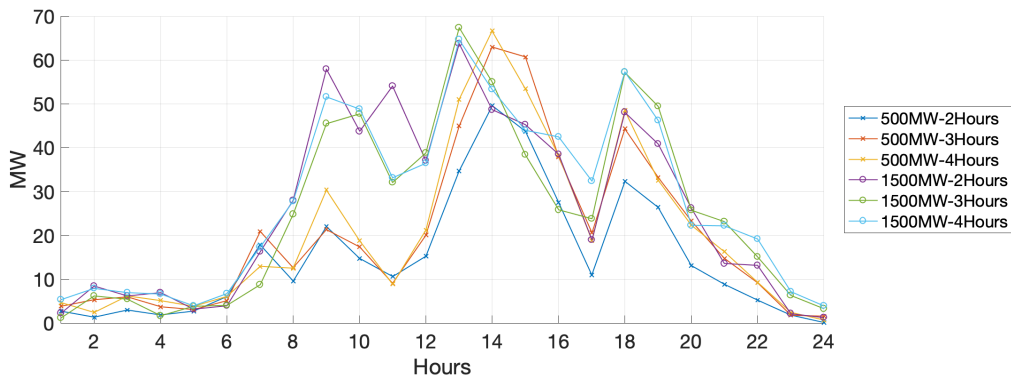
Σχήμα 6.74: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή πρωτεύουσας θετικής εφεδρείας



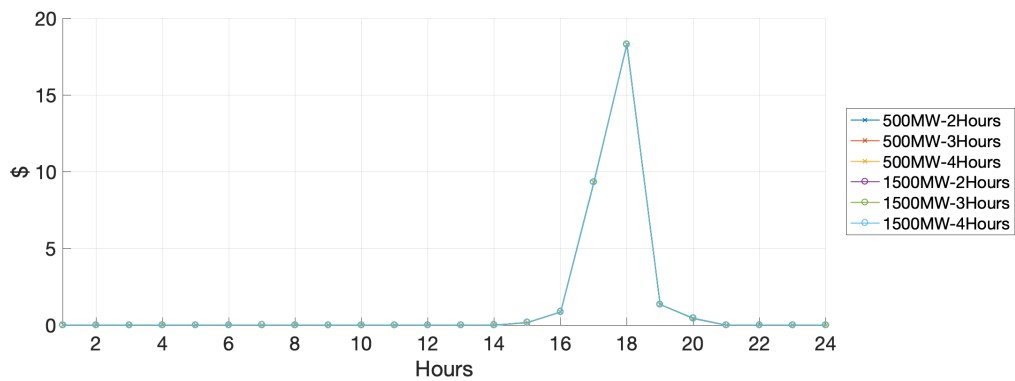
Σχήμα 6.75: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Δευτερεύουσα θετική εφεδρεία



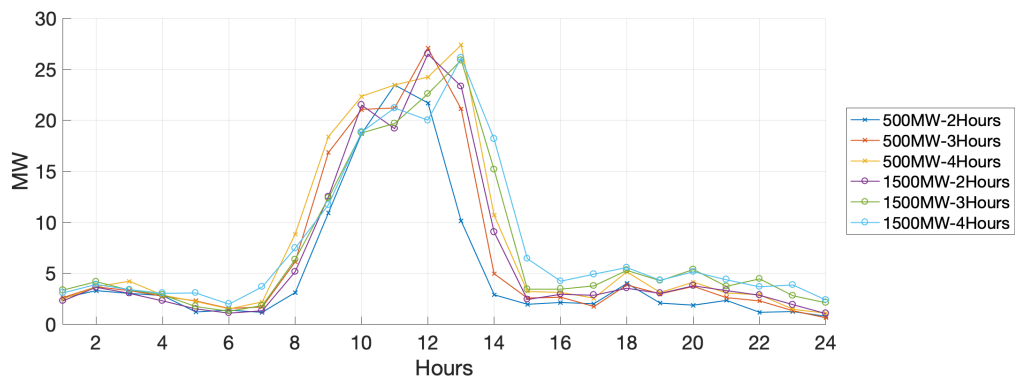
Σχήμα 6.76: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή δευτερεύουσας θετικής εφεδρείας



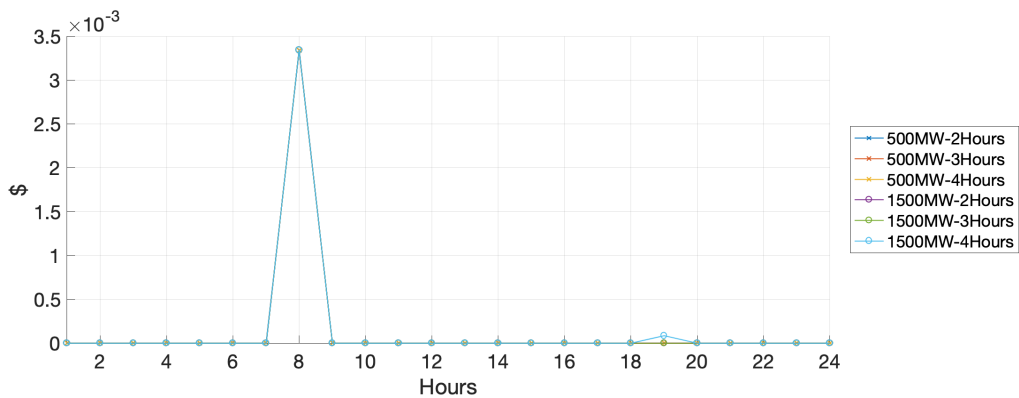
Σχήμα 6.77: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - τριτεύουσα θετική εφεδρεία



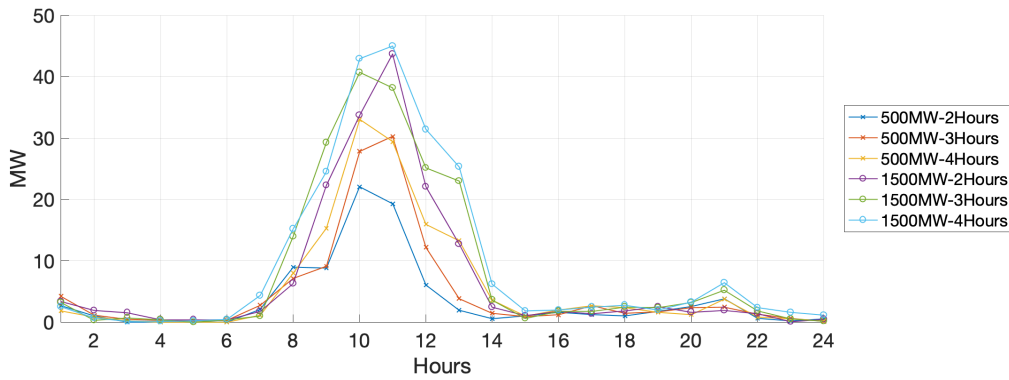
Σχήμα 6.78: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή τριτεύουσας θετικής εφεδρείας



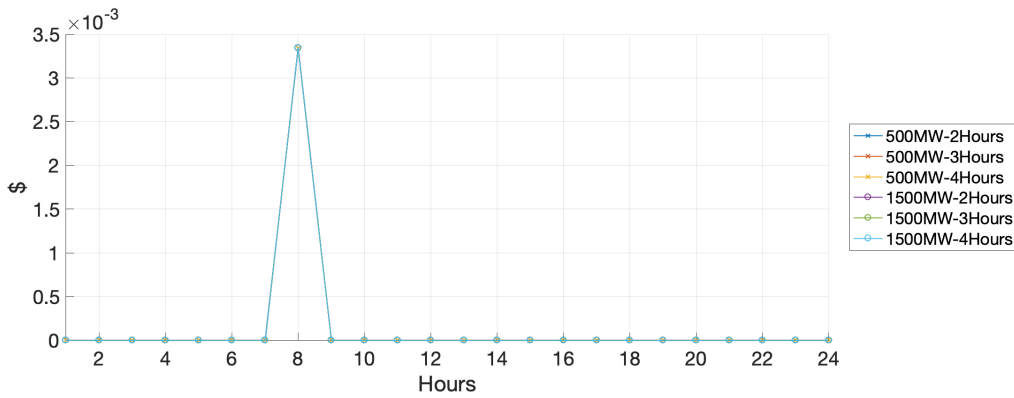
Σχήμα 6.79: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία



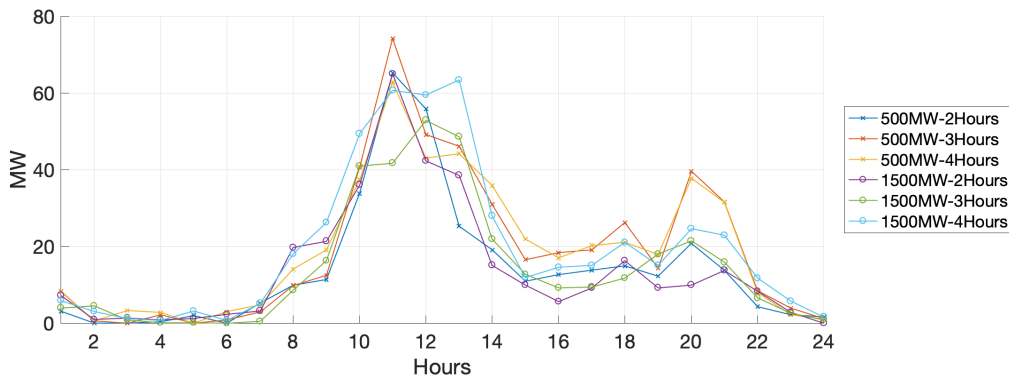
Σχήμα 6.80: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή πρωτεύουσας αρνητικής εφεδρείας



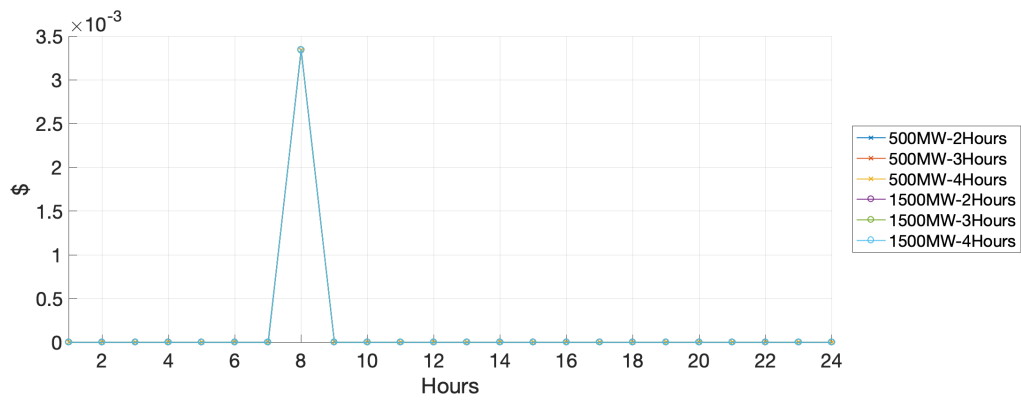
Σχήμα 6.81: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία



Σχήμα 6.82: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή δευτερεύουσας αρνητικής εφεδρείας



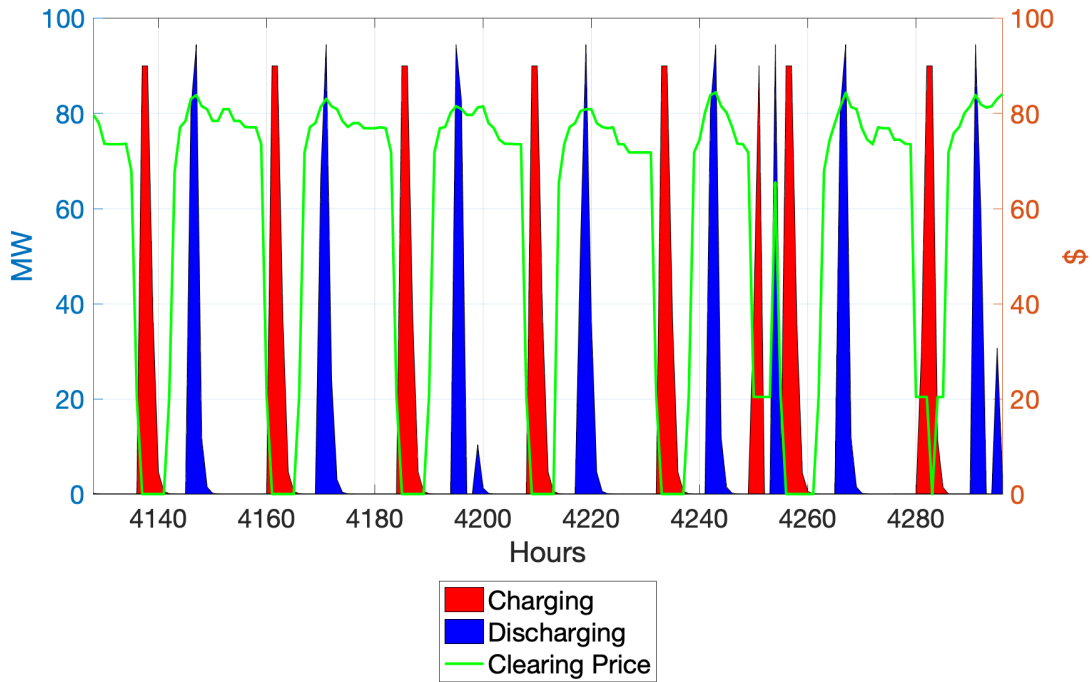
Σχήμα 6.83: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Τριτεύουσα αρνητική εφεδρεία



Σχήμα 6.84: Λειτουργία αποθηκευτικό σταθμού για τη μεγιστοποίηση του κέρδους - Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων - Οριακή τιμή τριτεύουσας αρνητικής εφεδρείας

6.3 Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος

Αντικειμενικός σκοπός σε αυτή την ενότητα είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, συνεπώς ο αλγόριθμος ρυθμίζει κατάλληλα τη λειτουργία του.

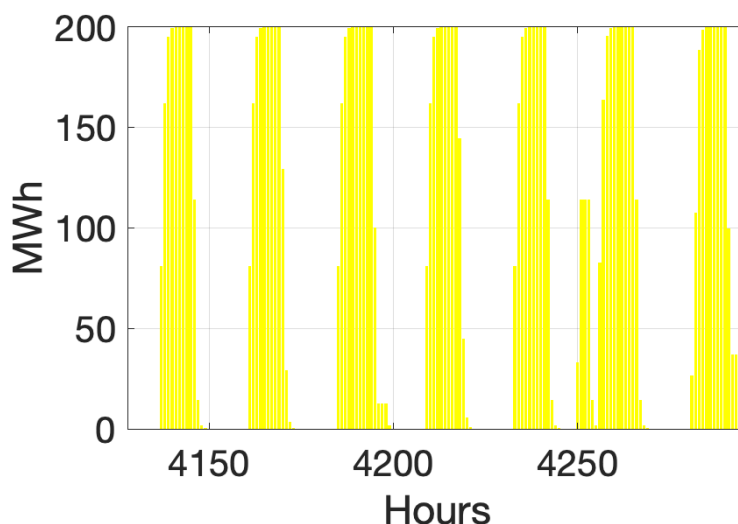


Σχήμα 6.85: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού - Οριακή τιμή συστήματος

Όπως και πριν η μπαταρία κάνει arbitrage ενέργειας με σκοπό αυτή τη στιγμή να ελαχιστοποιήσει το κόστος του συστήματος μέσα από τα έσοδα. Η λογική στον τρόπο λειτουργίας της είναι ίδια με πριν, φορτίζοντας όταν η οριακή τιμή είναι χαμηλή και εκφορτίζοντας όταν είναι υψηλή με σκοπό τη μεγιστοποίηση των εσόδων του αποθηκευτικού σταθμού. Τα συνολικά έσοδα του αποθηκευτικού σταθμού φαίνονται στον Πίνακα 6.8.

Από το Σχήμα 6.87 είναι αμέσως φανερό ότι όταν η μπαταρία λειτουργεί ως ελεύθερο στοιχείο, προς όφελος του συστήματος, εξαλείφονται οι ακμές στη ζήτηση φορτίου, καθώς ο αποθηκευτικός σταθμός είναι πάντα σε ετοιμότητα για να απορροφήσει ενέργεια τις στιγμές που υπάρχει περίσσεια και να αποδώσει ενέργεια τις στιγμές που στο σύστημα είναι σε ανάγκη. Έτσι επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.88.

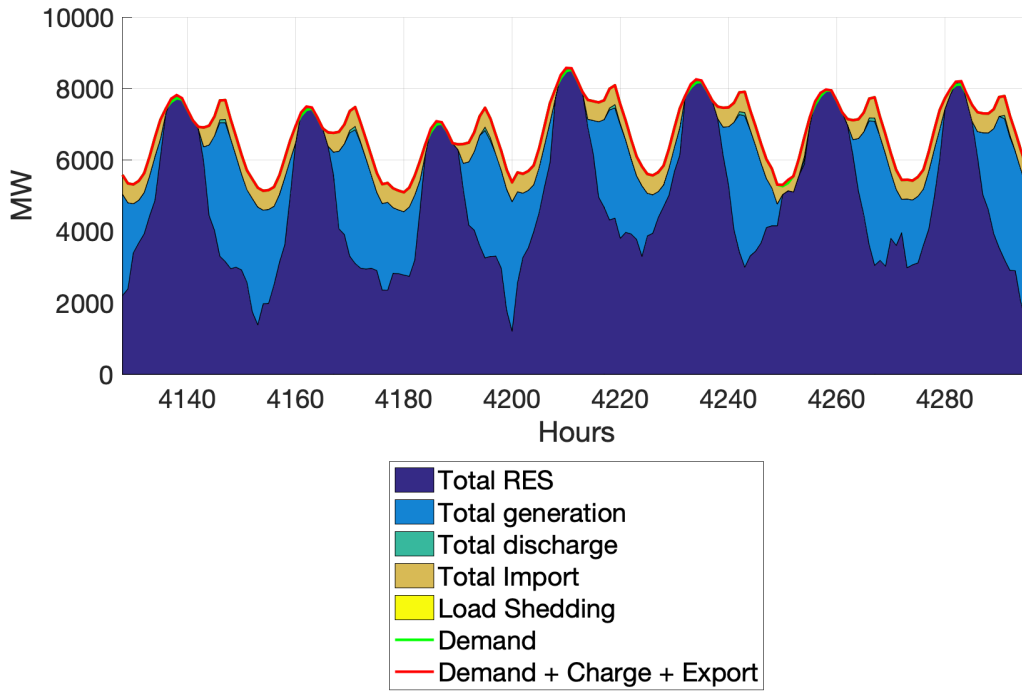
Ομοίως, η λειτουργία της μπαταρίας για την κάλυψη των εφεδρειών είναι καθοριστική και φαίνεται να συμμετέχει εξίσου σε όλες τις εφεδρείες κάτι που σημαίνει ότι αποφέρει κέρδος για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος. Μεγαλύτερη ζήτηση και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα από ΑΠΕ θα οδηγούσε σε ακόμα μεγαλύτερο κέρδος από την αποθήκευση.



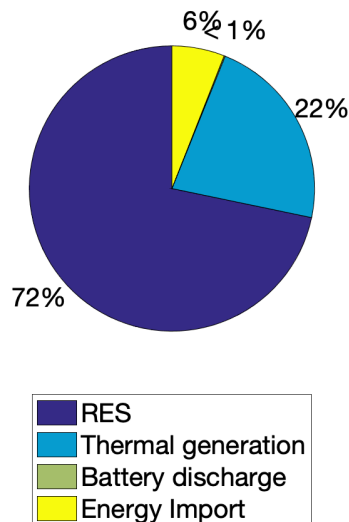
Σχήμα 6.86: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού

<i>Battery</i>	100MW / 2 Hours
Arbitrage	4.116.135,48
PrimaryReserve +	106.525,16
Secondary Reserve +	326.921,98
Tetriary Reserve +	337.915,56
PrimaryReserve -	0
Secondary Reserve -	0
Tetriary Reserve -	80.99
Total	4.887.579,20

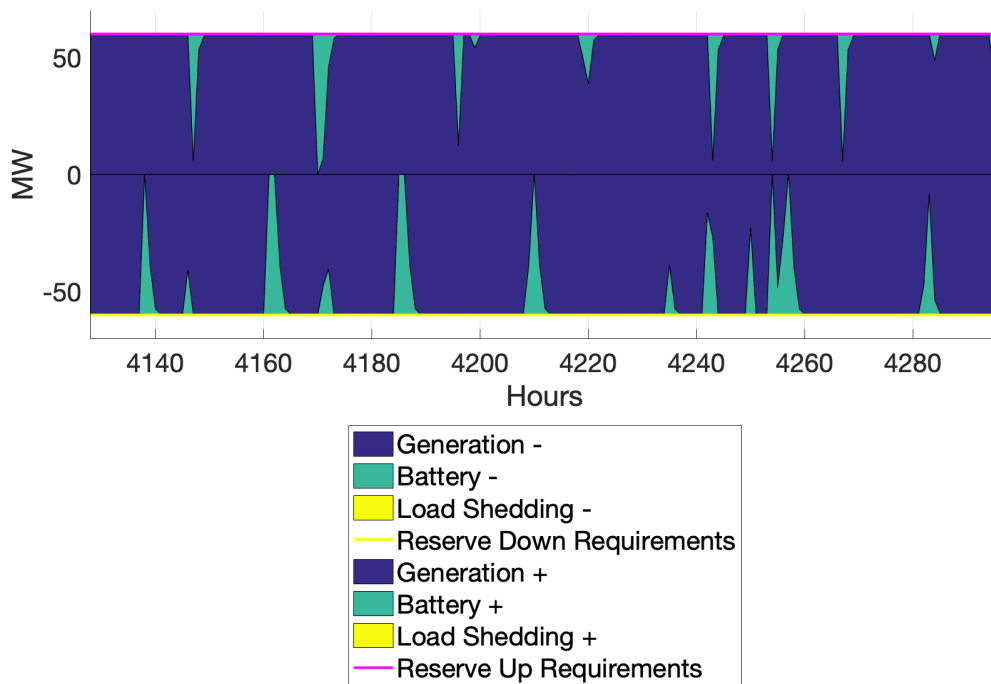
Πίνακας 6.8: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2 hours



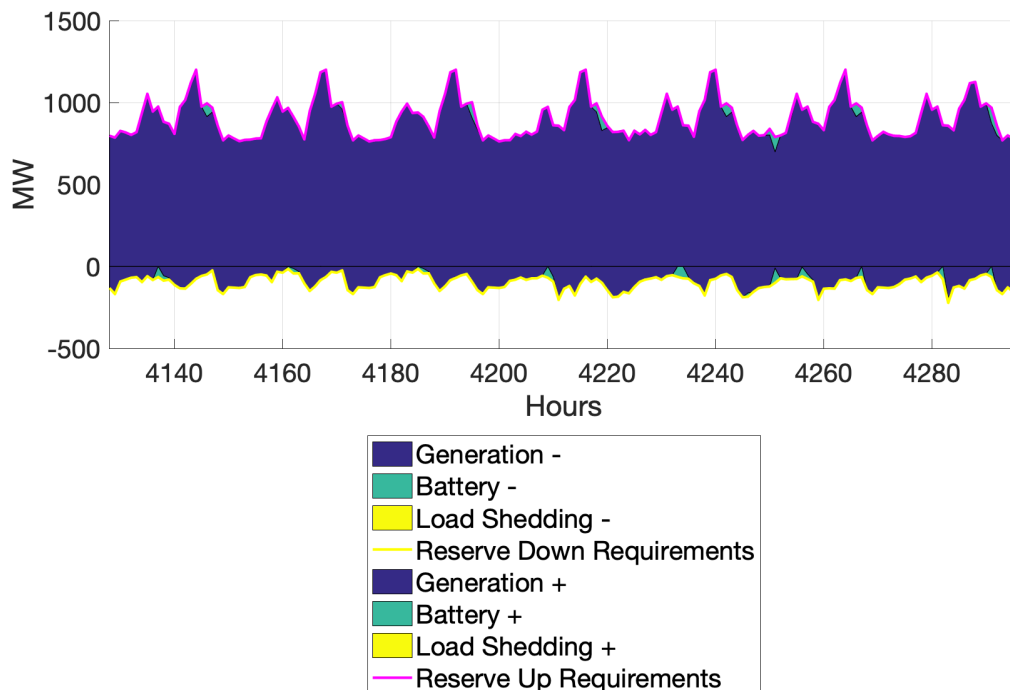
Σχήμα 6.87: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Ζήτηση - Παραγωγή



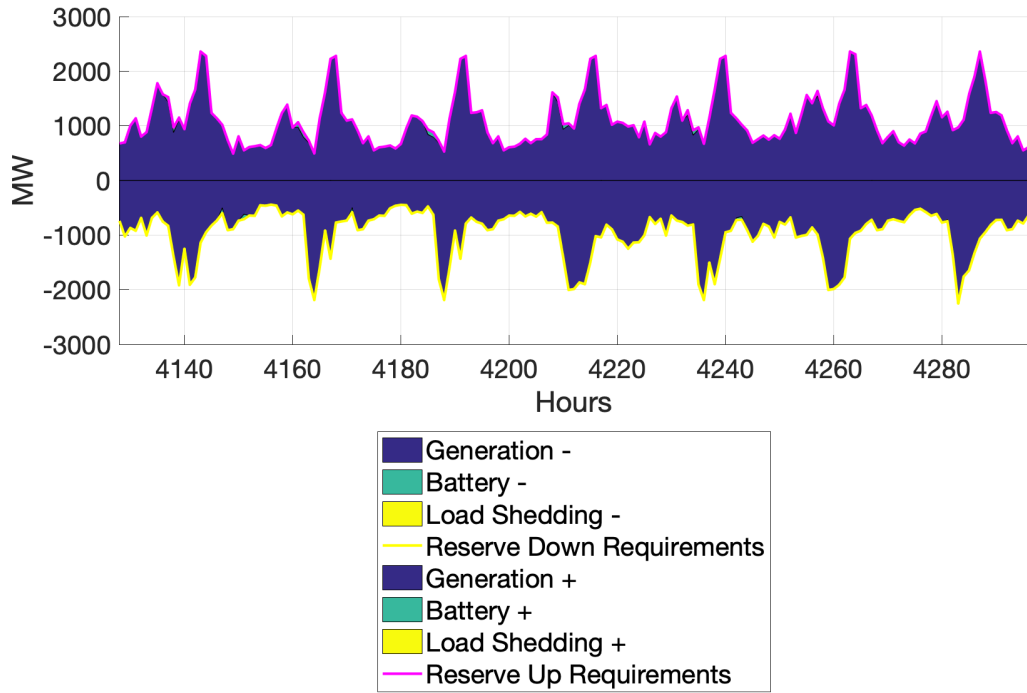
Σχήμα 6.88: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Ενεργειακό μείγμα



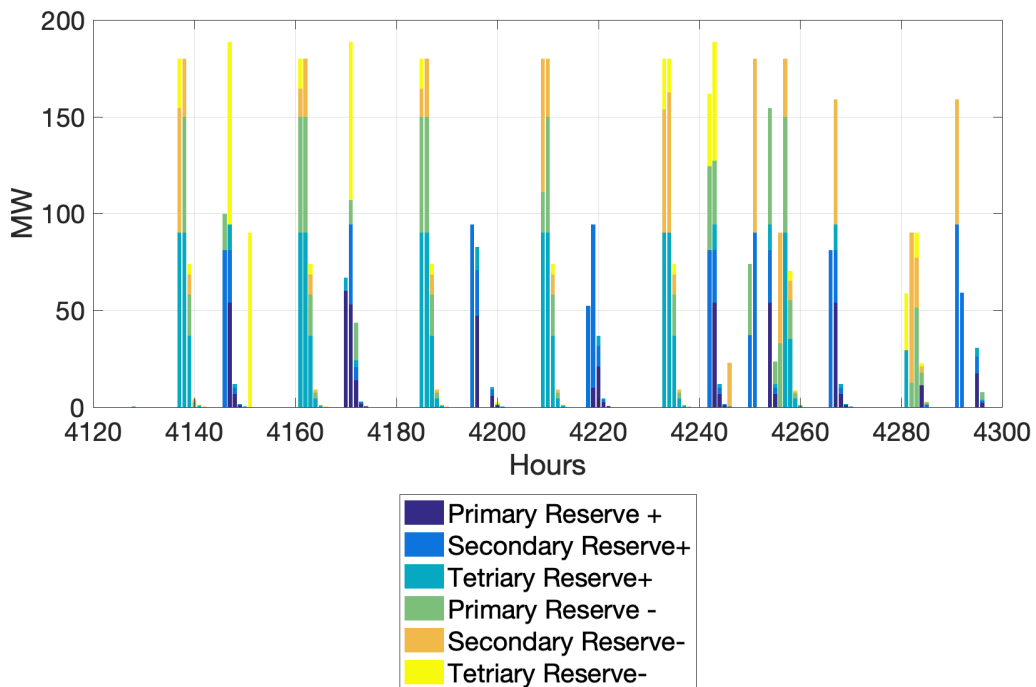
Σχήμα 6.89: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Κάλυψη πρωτεύουσας εφεδρείας



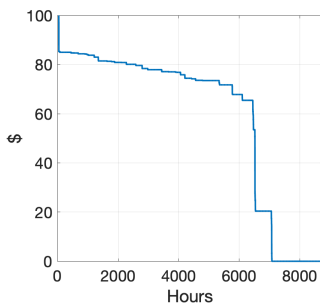
Σχήμα 6.90: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Κάλυψη δευτερεύουσας εφεδρείας



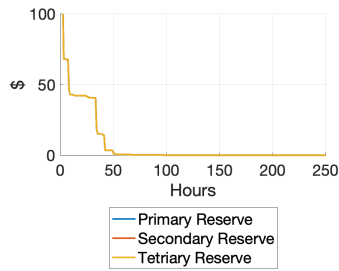
Σχήμα 6.91: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Κάλυψη τριτεύουσας εφεδρείας



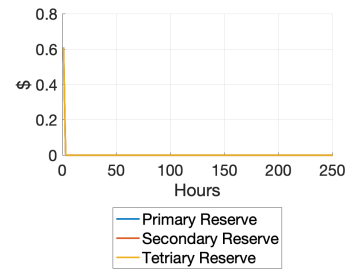
Σχήμα 6.92: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την κάλυψη εφεδρειών



(a) Arbitrage

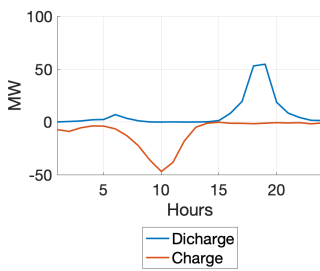


(b) Reserve Up

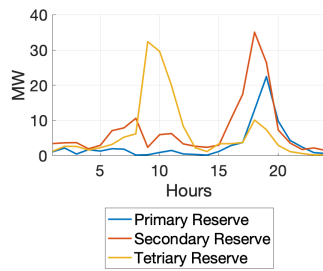


(c) Reserve Down

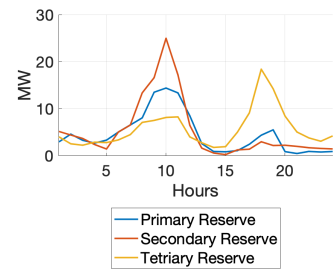
Σχήμα 6.93: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Διαγράμματα Οριακών τιμών



(a) Arbitrage

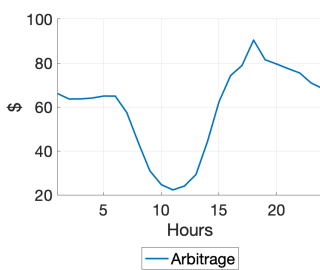


(b) Reserve Up

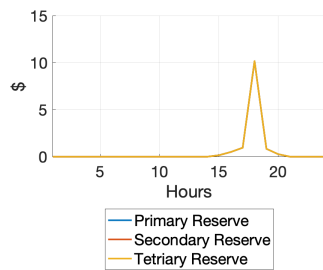


(c) Reserve Down

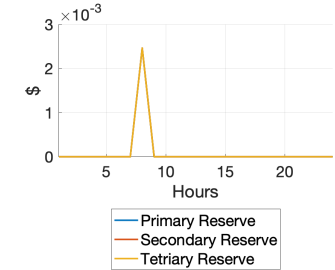
Σχήμα 6.94: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2 Hours για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Μέσα διαγράμματα λειτουργίας



(a) Arbitrage



(b) Reserve Up



(c) Reserve Down

Σχήμα 6.95: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2 Hours για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος - Μέσα διαγράμματα λειτουργίας

6.4 Συγκριτικά διαγράμματα Μεθοδολογιών

Στην ενότητα αυτή γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών ως προς τον σκοπό της λειτουργίας του αποθηκευτικού σταθμού.

Παρατηρώντας τα μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας που αφορούν το arbitrage, είναι φανερό ότι ο τρόπος λειτουργίας σε ισχύ καθώς και οι ώρες φόρτισης και εκφόρτισης δε διαφέρουν μεταξύ των μεθοδολογιών. Αύξηση της ισχύος του αποθηκευτικού σταθμού συνεπάγεται αύξηση και των ικανοτήτων του για arbitrage ενέργειας.

Στην αγορά θετικών εφεδρειών της μεθοδολογίας μεγιστοποίησης του κέρδους, η λειτουργία του αποθηκευτικού σταθμού είναι συγκεντρωμένη τις απογευματινές ώρες, σε αντίθεση με τη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης του κόστους στην οποία ο σταθμός κυρίως λειτουργεί για την ικανοποίηση της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας εφεδρείας τις απογευματινές ώρες καθώς επίσης δεσμεύει ισχύ για ικανοποίηση της τριτεύουσας τις πρωινές ώρες. Με παρόμοια λογική στην αρνητική εφεδρεία, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους, ο σταθμός δεσμεύει την ισχύ του για την κάλυψη και των τριών τύπων εφεδρειών τις πρωινές ώρες. Αντίθετα, στη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης του κόστους πρωτεύουσα και δευτερεύουσα εφεδρεία λαμβάνουν τόπο τις πρωινές ώρες ενώ η τριτεύουσα ικανοποιείται κυρίως το απόγευμα.

Ως γενική παρατήρηση στην παροχή εφεδρειών από τον αποθηκευτικό σταθμό μπορεί να σημειωθεί ότι στη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης του κόστους του συστήματος βλέπουμε μεγαλύτερη διάθεση ισχύος προς το σύστημα, συγκριτικά με τη μεθοδολογία μεγιστοποίησης του κέρδους, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς ο αποθηκευτικός σταθμός δεν περιορίζει την ισχύ που θα παρέχει αλλά φροντίζει να δώσει όση χρειαστεί για την κάλυψη των αναγκών για εφεδρεία.

Από τα μέσα ημερήσια διαγράμματα οριακών τιμών συστήματος, μπορούμε να διακρίνουμε αρχικά στα διαγράμματα που αφορούν το arbitrage ενέργειας, ότι η αύξηση της ικανότητας του αποθηκευτικού σταθμού εξομαλύνει την ημερήσια καμπύλη της οριακής τιμής τις στιγμές που αυτή παρουσιάζει ακμές μόνο στην περίπτωση της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης του κόστους. Η εξομάλυνση αυτή προφανώς προκύπτει καθώς η αύξηση της ισχύος του αποθηκευτικού σταθμού έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να καλύπτει μεγαλύτερη ζήτηση και συνεπώς να εντάσσονται λιγότερες μονάδες συμβατικής παραγωγής με υψηλότερο κόστος. Το ίδιο χαρακτηριστικό παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα που αφορούν τη μέση ημερήσια οριακή τιμή του προβλήματος μεγιστοποίησης του κέρδους, όπως σχολιάστηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, χωρίς όμως να παρατηρείτε η ίδια εξομάλυνση αλλά πολύ μικρότερη. Κάτι αναμενόμενο αφού ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης του κόστους παρέχει την ενέργεια του αποθηκευτικού σταθμού όσο περισσότερο μπορεί ώστε να ενταχθούν οι λιγότερο ακριβές συμβατικές μονάδες παραγωγής.

Μεταξύ των μεθοδολογιών στην περίπτωση της δευτερεύουσας εφεδρείας δεν υπάρχουν διαφορές καθώς η οριακή τιμή είναι σχεδόν μηδενική. Στην περίπτωση την πρωτεύουσας εφεδρείας από το διάγραμμα της μέσης οριακής τιμής διακρίνουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ακμή το απόγευμα, μεγαλύτερη βέβαια στην περίπτωση της λειτουργίας μεγιστοποίησης του κέρδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

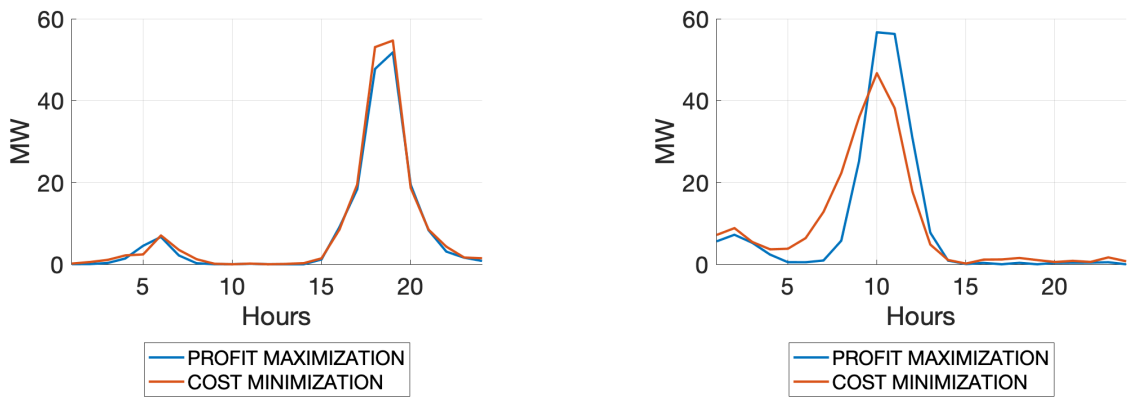
<i>Battery</i>	100MW / 2 Hours	500MW / 2 Hours	1500MW / 2 Hours
Arbitrage	4.116.135,48	17.536.904,96	39.422.024,25
Primary Reserve +	106.525,16	1.342,11	127,72
Secondary Reserve +	326.921,98	60.464,59	3.286,85
Tetriary Reserve +	337.915,56	41.446,67	1.643,42
Primary Reserve -	0	0	0
Secondary Reserve -	0	0	0
Tetriary Reserve -	80,99	0	
Total	4.887.579,20	17.640.158,35	39.427.082,25

Πίνακας 6.9: Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού - Λειτουργία ελαχιστοποίησης του κόστους

<i>Battery</i>	100MW / 2 Hours	500MW / 2 Hours	1500MW / 2 Hours
Arbitrage	3.430.208,16	15.727.820,66	39.206.133,91
Primary Reserve +	276.680,36	127.698,39	469.883,98
Secondary Reserve +	1.080.941,56	1.762.230,77	751.487,63
Tetriary Reserve +	478.070,11	499.721,95	1.153.555,18
Primary Reserve -	0	36,00	0
Secondary Reserve -	54,90	331,07	93,17
Tetriary Reserve -	54,90	0	243,24
Total	5.266.010,01	18.117.839,44	41.581.397,15

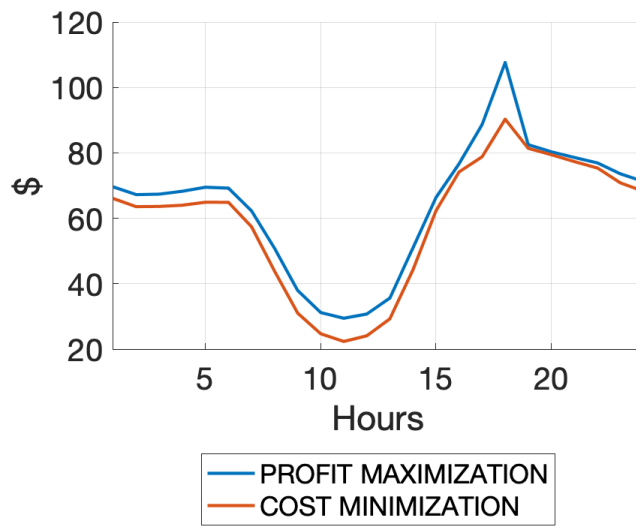
Πίνακας 6.10: Κέρδη αποθηκευτικού σταθμού - Λειτουργία μεγιστοποίησης του κέρδους

6.4.1 100MW / 2Hours



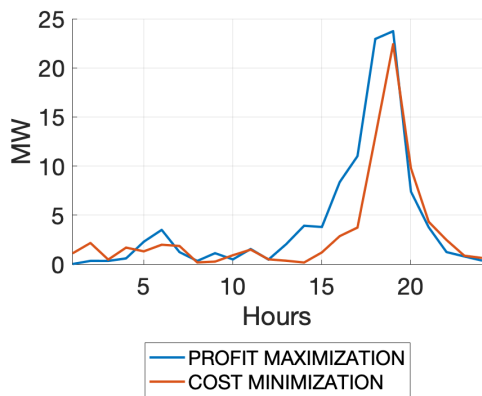
(a) Discharge

(b) Charge

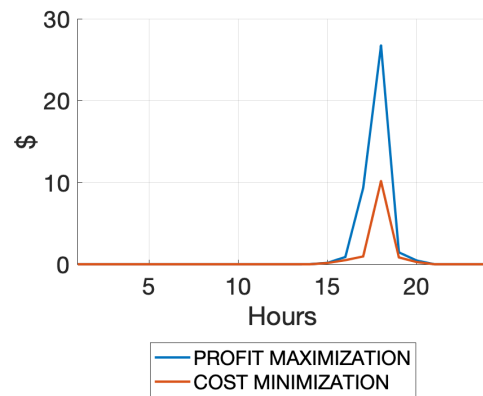


(c) Clearing price

Σχήμα 6.96: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage

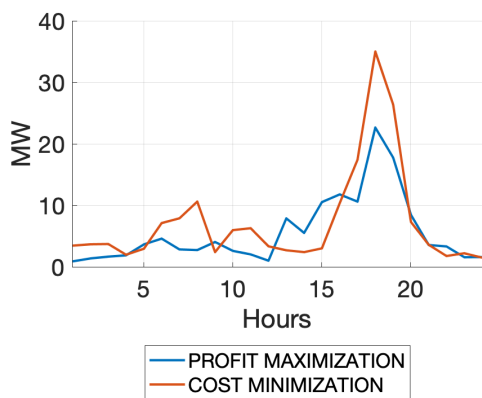


(a) Reserves

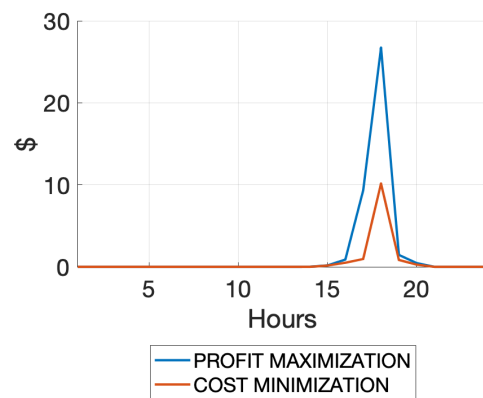


(b) Clearing price

Σχήμα 6.97: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα θετική εφεδρεία

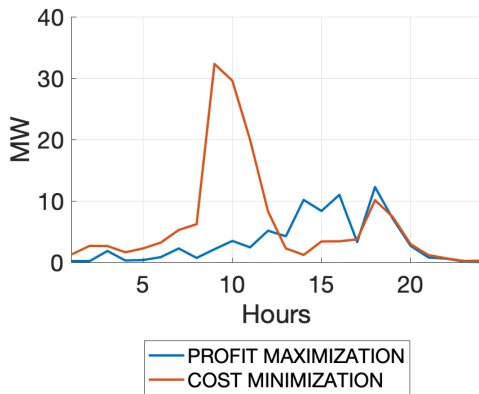


(a) Reserves

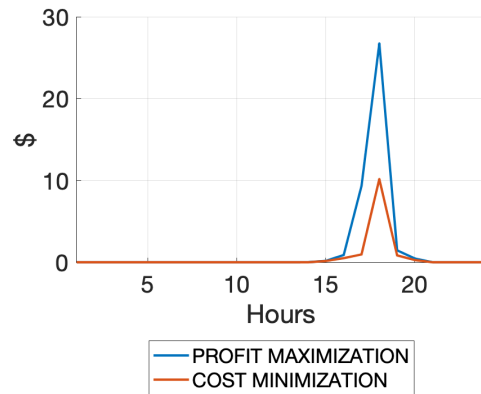


(b) Clearing price

Σχήμα 6.98: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα θετική εφεδρεία

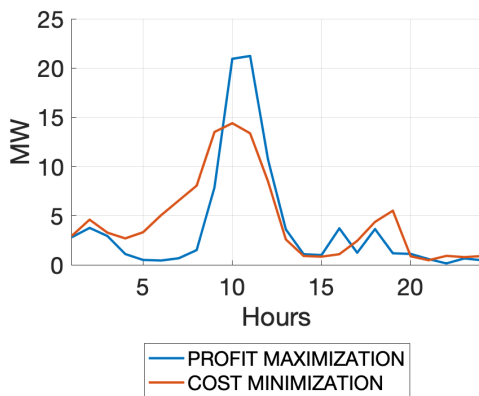


(a) Reserves

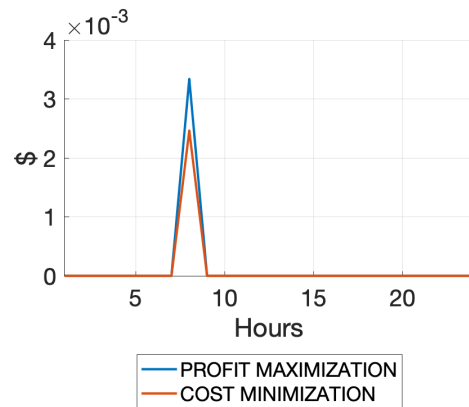


(b) Clearing price

Σχήμα 6.99: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα θετική εφεδρεία

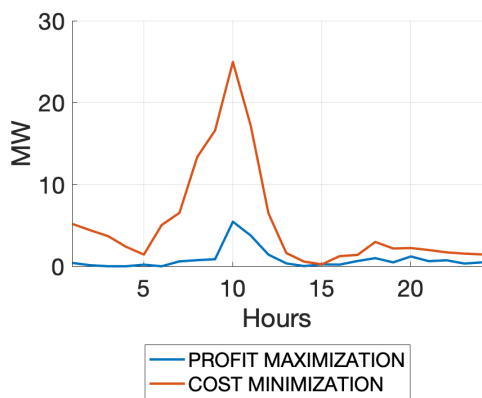


(a) Reserves

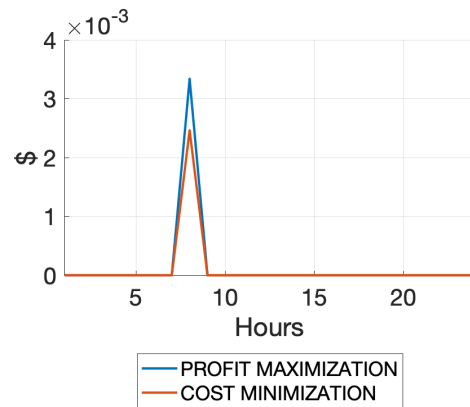


(b) Clearing price

Σχήμα 6.100: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία

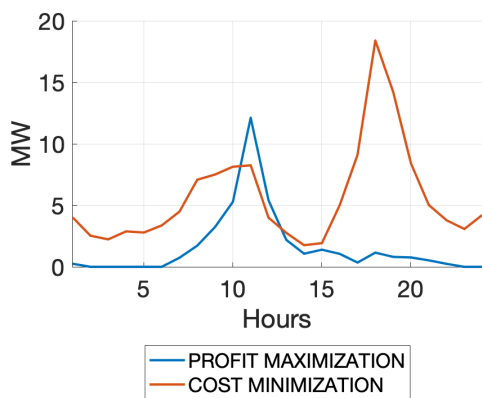


(a) Reserves

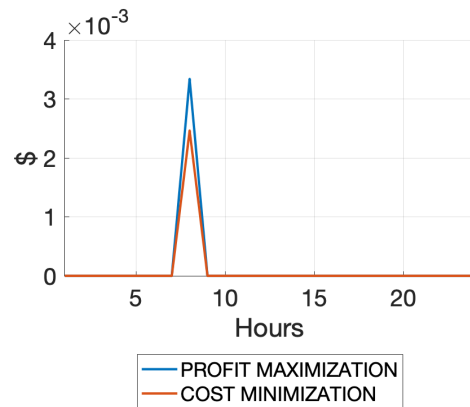


(b) Clearing price

Σχήμα 6.101: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία



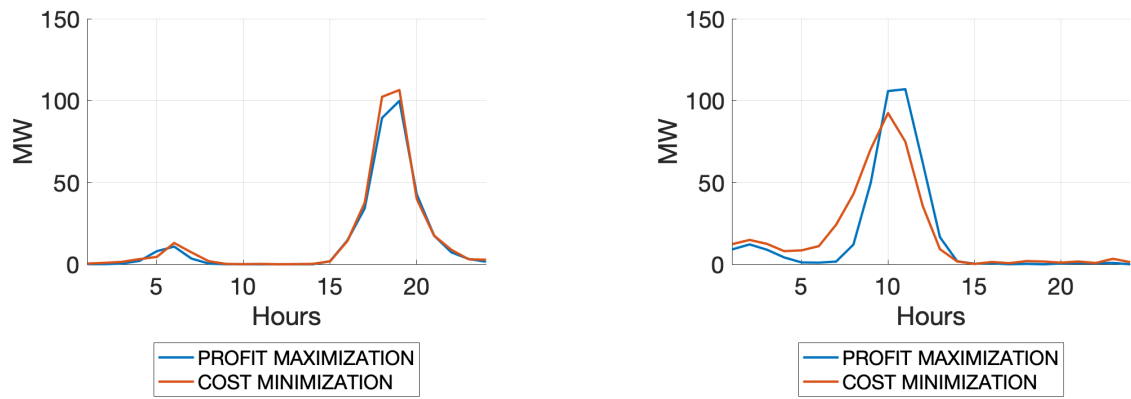
(a) Reserves



(b) Clearing price

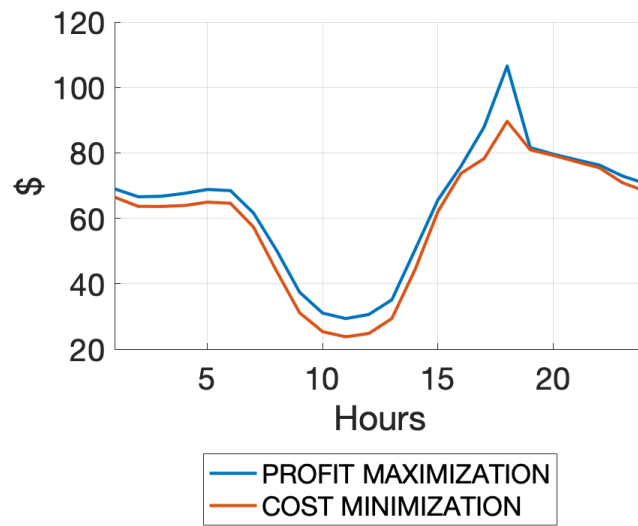
Σχήμα 6.102: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 100MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα αρνητική εφεδρεία

6.4.2 200MW / 2 Hours



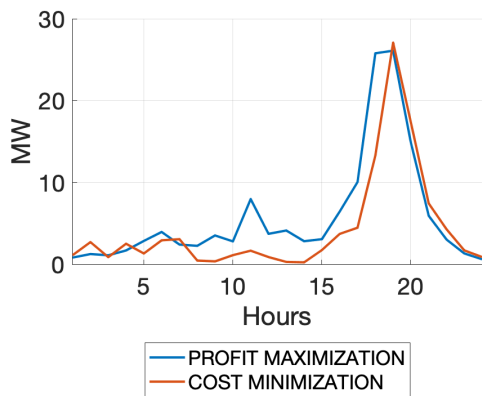
(a) Discharge

(b) Charge

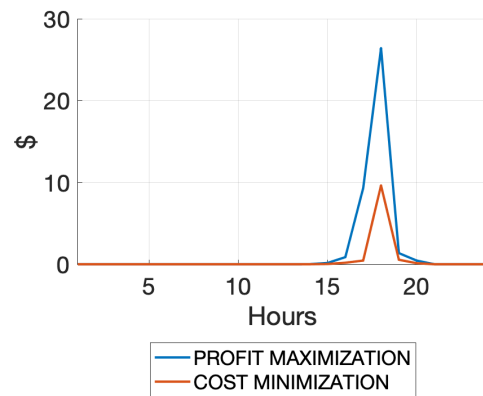


(c) Clearing price

Σχήμα 6.103: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage

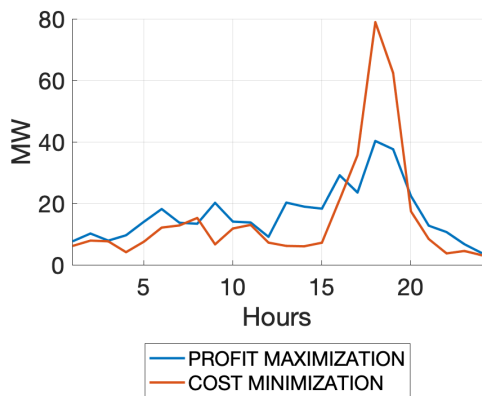


(a) Reserves

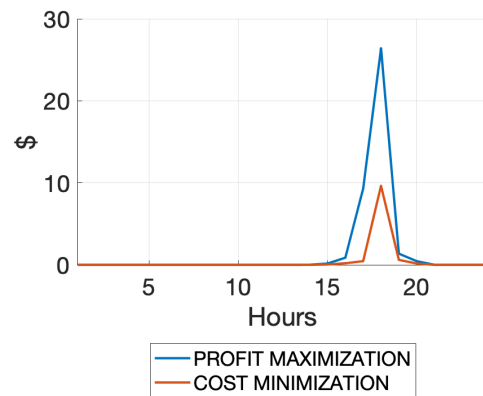


(b) Clearing price

Σχήμα 6.104: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα θετική εφεδρεία

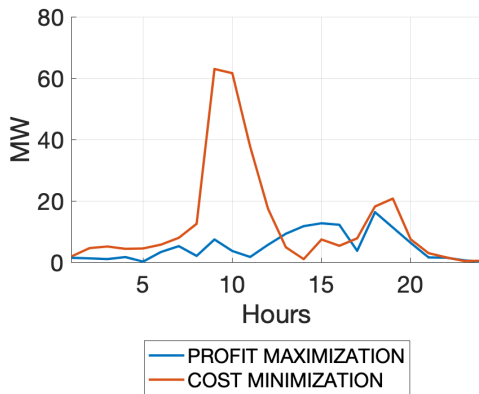


(a) Reserves

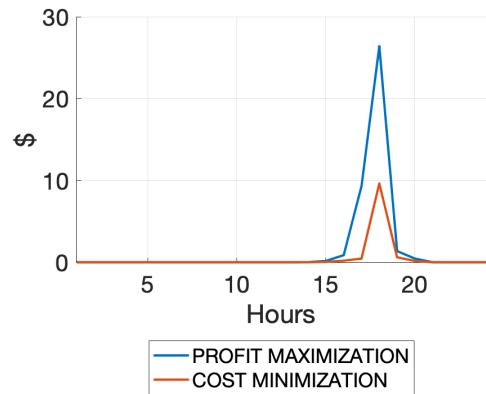


(b) Clearing price

Σχήμα 6.105: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα θετική εφεδρεία

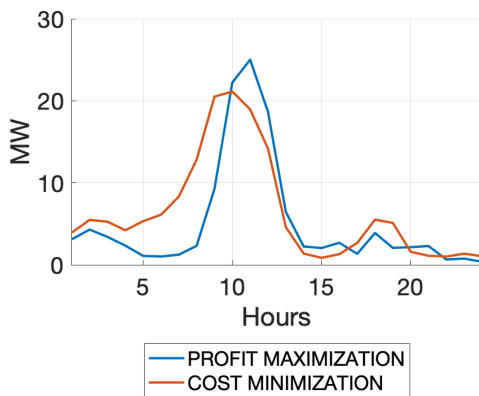


(a) Reserves

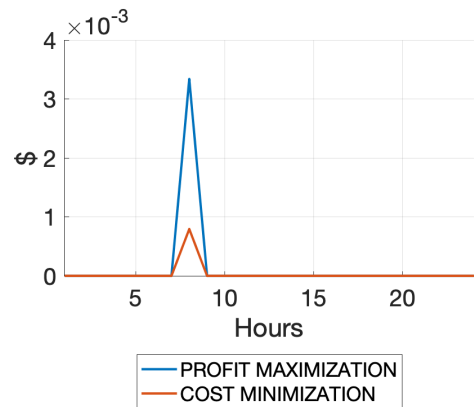


(b) Clearing price

Σχήμα 6.106: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα θετική εφεδρεία

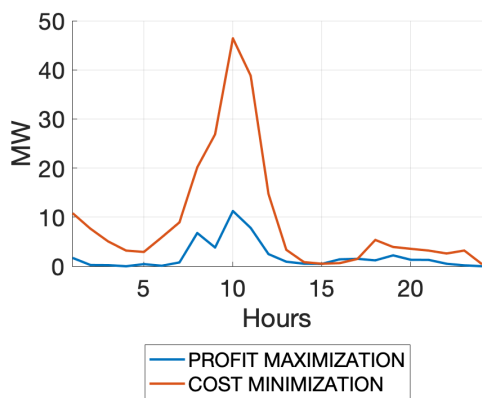


(a) Reserves

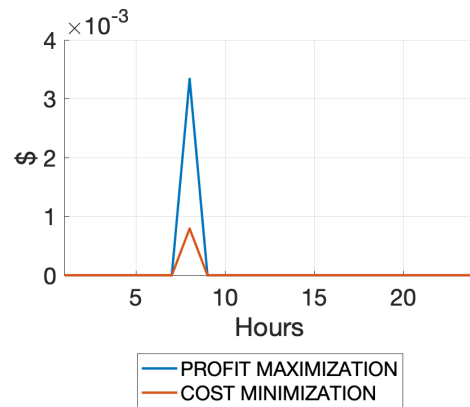


(b) Clearing price

Σχήμα 6.107: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας πρωτεύουσα αρνητική εφεδρεία

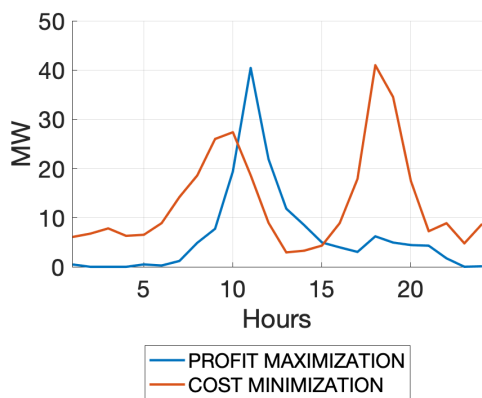


(a) Reserves

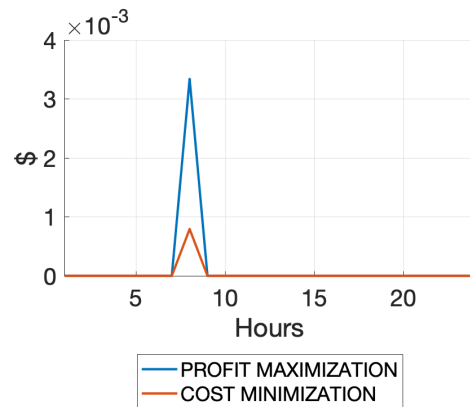


(b) Clearing price

Σχήμα 6.108: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας δευτερεύουσα αρνητική εφεδρεία



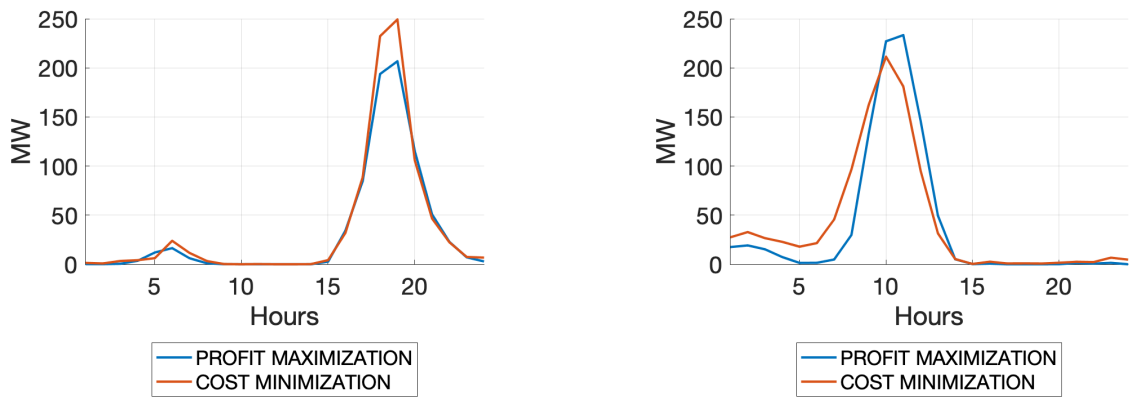
(a) Reserves



(b) Clearing price

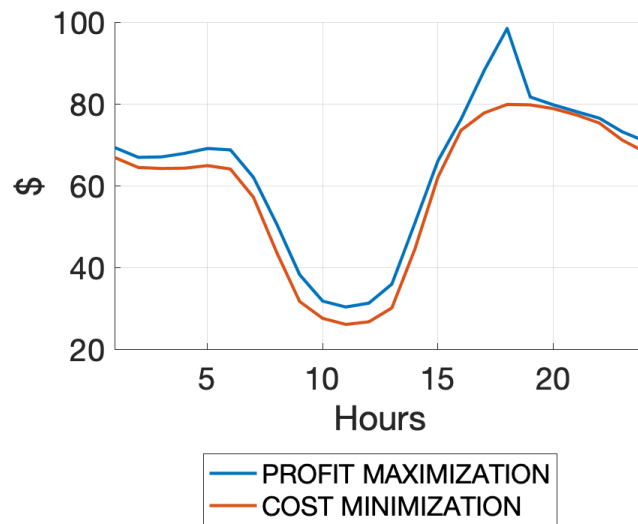
Σχήμα 6.109: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 200MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας τριτεύουσα αρνητική εφεδρεία

6.4.3 500MW / 2 Hours



(a) Discharge

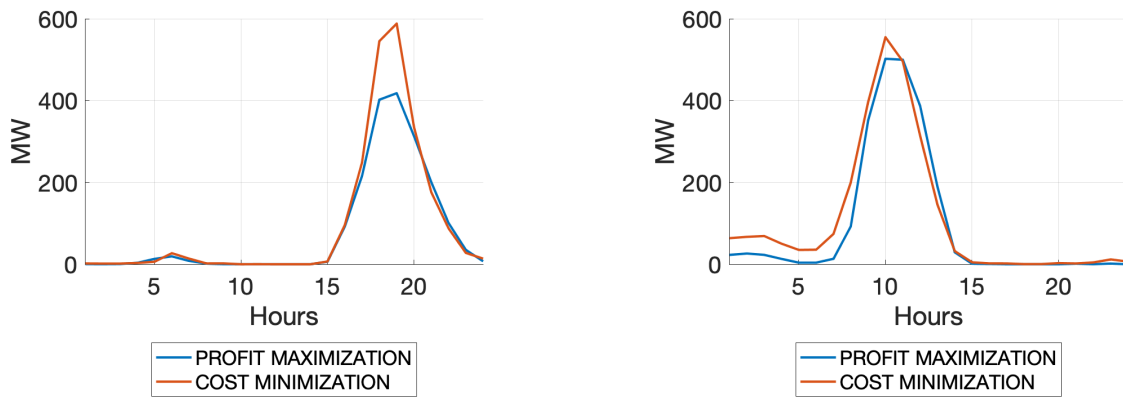
(b) Charge



(c) Clearing price

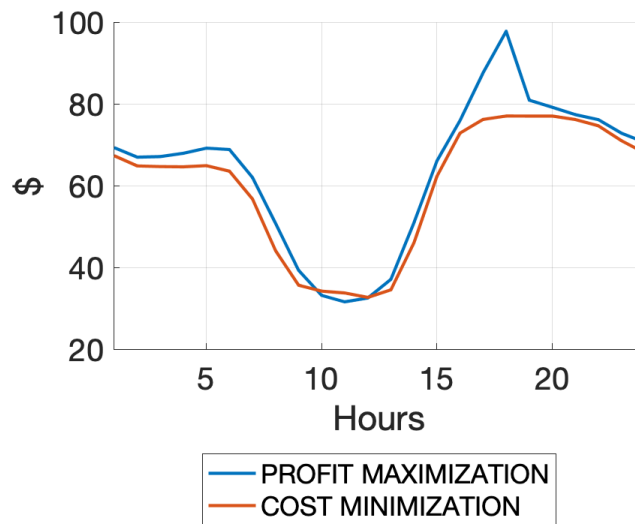
Σχήμα 6.110: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 500MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage

6.4.4 1500MW / 2 Hours



(a) Discharge

(b) Charge



(c) Clearing price

Σχήμα 6.111: Λειτουργία αποθηκευτικού σταθμού 1500MW / 2Hours για μεγιστοποίηση κέρδους - Μέσα ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας Arbitrage

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

7.1 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι η συμμετοχή ενός αποθηκευτικού σταθμού σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποτελέσει ένα πολυσήμαντο εργαλείο. Βασικότερο όσων προαναφέρθηκαν είναι η συμβολή της αποθήκευσης στην καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Όταν η παραγωγή από ΑΠΕ υπερκαλύπτει τις ανάγκες του συστήματος, ο αποθηκευτικός σταθμός μπορεί να αγοράσει φτηνά ενέργεια και να την πουλήσει τις ώρες που το σύστημα την έχει ανάγκη. Την ίδια στιγμή η αποθήκευση είναι πάντα σε ετοιμότητα να παρέχει την πλήρη ισχύ της για την κάλυψη των εφεδρειών.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι το κέρδος του αποθηκευτικού σταθμού εξαρτάται άμεσα από τις συνδεδεμένες μονάδες παραγωγής καθώς και από τη χωρητικότητά του. Βέβαια, σε αυτό βοηθάει σημαντικά και η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ καθώς δίνει στον αποθηκευτικό σταθμό αρκετά περιθώρια δραστηριοποίησης. Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ συνεπάγεται χαμηλές (μπορεί και μηδενικές) τιμές και συνεπώς χαμηλό κόστος αγοράς ενέργειας από τον αποθηκευτικό σταθμό. Αντίστοιχα όσο λιγότερες ενταγμένες μονάδες στο σύστημα τόσο περισσότερο έχει την ανάγκη το σύστημα από ενέργεια από τον αποθηκευτικό σταθμό.

Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι στο όλο πρόβλημα που έχουμε αναπτύξει δε λαμβάνονται υπόψιν δύσκολοι τεχνικοί περιορισμοί που επιβάλλει το σύστημα στην αγορά εφεδρειών όπως είναι τα τεχνικά ελάχιστα και η υποχρεωτική ένταξη των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αν θεωρηθούν αυτοί οι περιορισμοί δεν μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα λόγω της μη ικανοποίησης του strong duality theorem και συνεπώς της μη γραμμικότητας του διεπίπεδου προβλήματος μεγιστοποίησης. Οπότε και να μειώσουμε τον αριθμό των συμβατικών μονάδων παραγωγής, ή να αυξήσουμε την απαίτηση εφεδρειών όπως στο κεφάλαιο 6.1, οι μονάδες θα θεωρούνται από τον αλγόριθμο μονίμως ενταγμένες και κατά συνέπεια θα παρέχουν εφεδρείες χωρίς περιορισμούς. Στο πρόβλημα της αγοράς εξισορρόπησης αυτό που λαμβάνουμε σαν πληροφορία δεν είναι μια εκτίμηση τιμής αλλά μία ένδειξη συμφόρησης και ευκαιρίας για τον παραγωγό. Αν φαίνεται να υπάρχει αυξημένη τιμή σε εφεδρείες κάποια χρονική στιγμή, χωρίς περιορισμούς, είναι σχεδόν βέβαιο πως θα υπάρχει αυξημένη τιμή εφεδρειών και με την ένταξη περιορισμών. Στην πραγματικότητα το διεπίπεδο πρόβλημα μας δείχνει τις στιγμές που η τιμή των εφεδρειών θα έχει κάποια αξία, συνεπώς στόχος του προβλήματος δεν είναι να επιστρέψει την ακριβής πρόβλεψη κόστους και κέρδους αλλά να ενημερώσει τον παραγωγό με ποιόν τρόπο πρέπει να ποντάρει στην αγορά ενέργειας.

Στην πραγματικότητα το δισδιάστατο πρόβλημα μας δείχνει τις στιγμές που η τιμή των εφεδρειών θα έχει κάποια αξία, συνεπώς στόχος του προβλήματος δεν είναι να επιστρέψει την ακριβής πρόβλεψη κόστους και κέρδους αλλά να ενημερώσει τον παραγωγό με ποιόν τρόπο πρέπει να ποντάρει στην αγορά ενέργειας.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα φλέγον ζήτημα το οποίο έχει αρχίσει και εξελίσσεται ραγδαία. Πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις επί του θέματος θα μπορούσαν να ήταν:

- Εισαγωγή δύσκολων τεχνικών περιορισμών συμβατικών μονάδων παραγωγής για την ένταξή τους στην αγορά των εφεδρειών
- Εισαγωγή αγορά εξισορρόπησης ενέργειας
- Μοντελοποίηση υποβάθμισης της μπαταρίας
- Εισαγωγή διασυνδέσεων δικτύου με άλλα δίκτυα

Βιβλιογραφία

- [1] Md. Shafiu Alam, Fahad Saleh Al-Ismael, Aboubakr Salem, and Mohammad A. Abido. High-level penetration of renewable energy sources into grid utility: Challenges and solutions. *IEEE Access*, 8:190277–190299, 2020.
- [2] Ali Daneshi, Nima Sadrmomtazi, Hossein Daneshi, and Mojtaba Khederzadeh. Wind power integrated with compressed air energy storage. In *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, pages 634–639, 2010.
- [3] Septimus Linden. Integrating wind turbine generators (wtg’s) with gt-caes (compressed air energy storage) stabilizes power delivery with the inherent benefits of bulk energy storage. 01 2007.
- [4] Maria C. Argyrou, Paul Christodoulides, and Soteris A. Kalogirou. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94:804–821, 2018.
- [5] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli. Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120:59–80, 2014.
- [6] Ahmet Ozarslan. Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37:14265–14277, 10 2012.
- [7] Sayyad Nojavan and Kazem Zare. *Electricity Markets New Players and Pricing Uncertainties: New Players and Pricing Uncertainties*. 01 2020.
- [8] V. Oduguwa and R. Roy. Bi-level optimisation using genetic algorithm. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Systems (ICAIS 2002)*, pages 322–327, 2002.
- [9] Asmae Berrada, Khalid Loudiy, and Izeddine Zorkani. Valuation of energy storage in energy and regulation markets. *Energy*, 115:1109–1118, 2016.
- [10] M. M. Chowdhury, M. E. Haque, M. Aktarujjaman, M. Negnevitsky, and A. Gargoom. Grid integration impacts and energy storage systems for wind energy applications — a review. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–8, 2011.
- [11] Price Taker a market participant that is not able to dictate the prices in a market. <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/economics/price-taker/>. Accessed: 2021-02-02.
- [12] Price Maker what is the price maker? explore the price maker phenomenon and find out how the concept affects the market price. <https://competera.net/resources/glossary/price-maker>.
- [13] Gustavo De Vivero-Serrano, Kenneth Bruninx, and Erik Delarue. Implications of bid structures on the offering strategies of merchant energy storage systems. *Applied Energy*, 251:113375, 2019.

- [14] Gonçalo Terça and David Wozabal. Economies of scope for electricity storage and variable renewables. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(2):1328–1337, 2021.
- [15] Georgios N. Psarros, Sotirios I. Nanou, Stefanos V. Papaefthymiou, and Stavros A. Papathanassiou. Generation scheduling in non-interconnected islands with high res penetration. *Renewable Energy*, 115:338–352, 2018.
- [16] Wesley Cole, A. Will Frazier, and Chad Augustine. Cost projections for utility-scale battery storage: 2021 update.
- [17] Georgios Psarros, E. Karamanou, and Stavros Papathanassiou. Feasibility analysis of centralized storage facilities in isolated grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9:1822 – 1832, 03 2018.
- [18] Anthony L Peressini, Francis E Sullivan, and Jerry J Uhl Jr. *The mathematics of nonlinear programming*. Springer-Verlag, 1988.
- [19] Yury Dvorkin, Ricardo Fernández-Blanco, Daniel S. Kirschen, Hrvoje Pandžić, Jean-Paul Watson, and Cesar A. Silva-Monroy. Ensuring profitability of energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(1):611–623, 2017.
- [20] Zhong fu Tan, Li wei Ju, Huan huan Li, Jia yu Li, and Hui juan Zhang. A two-stage scheduling optimization model and solution algorithm for wind power and energy storage system considering uncertainty and demand response. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 63:1057–1069, 2014.
- [21] I.L.R. Gomes, H.M.I. Pousinho, R. Melício, and V.M.F. Mendes. Stochastic coordination of joint wind and photovoltaic systems with energy storage in day-ahead market. *Energy*, 124:310–320, 2017.
- [22] Edgardo D. Castronuovo and João A. Peças Lopes. Optimal operation and hydro storage sizing of a wind–hydro power plant. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 26(10):771–778, 2004.
- [23] Fritz Braeuer, Julian Rominger, Russell McKenna, and Wolf Fichtner. Battery storage systems: An economic model-based analysis of parallel revenue streams and general implications for industry. *Applied Energy*, 239:1424–1440, 2019.

Παράρτημα Α

Ονοματολογία μεταβλητών

A.1 Σύνολα

- t : Χρονική στιγμή
- i : Συμβατικές μονάδες παραγωγής
- j : Μονάδες παραγωγής από εισαγωγές
- k : Μονάδες παραγωγής για εξαγωγές
- c : Τύπος εφεδρείας
- b : Block ισχύος συμβατικών μονάδων παραγωγής

A.2 Συνεχείς Μεταβλητές

A.2.1 Ζήτηση ενέργειας

- $D(t)$: Ζήτηση ενέργειας - Αγορά ισχύος
- $RR^{up/down}(c, t)$: Ανάγκες εφεδρειών

A.2.2 Οριακές τιμές

- $\pi(t)$: Οριακή τιμή συστήματος αγοράς ισχύος
- $\pi_{reserve}^{up}(c, t)$: Οριακή τιμή συστήματος αγοράς άνω εφεδρειών
- $\pi_{reserve}^{down}(c, t)$: Οριακή τιμή συστήματος αγοράς κάτω εφεδρειών

A.2.3 Αποθήκευση

- $r(t)$: Αποδεκτή προσφορά φόρτισης
- $q(t)$: Αποδεκτή προσφορά εκφόρτισης
- $v(t)$: Στάθμη αποθηκευτικού σταθμού
- $\beta(t)$: Πρόθεση για φόρτιση/εκφόρτιση
- $x(t), y(t)$: Ποσότητες εκφόρτισης/φόρτισης
- $r_{st}^{up/down}(c, t)$: Παροχή εφεδρειών αποθηκευτικού σταθμού θετική/αρνητική
- $k(c, t), k'(c, t)$: Ποσότητες εφεδρειών θετική/αρνητική
- $k1(c, t)$: Παροχή θετικής εφεδρείας κατάσταση εκφόρτισης

- $k1'(c,t)$: Παροχή αρνητικής εφεδρείας κατάσταση φόρτισης
- $k2(c,t)$: Παροχή θετικής εφεδρείας κατάσταση φόρτισης
- $k2'(c,t)$: Παροχή αρνητικής εφεδρείας κατάσταση εκφόρτισης

A.2.4 Συμβατικές μονάδες παραγωγής

- $g(i,b,t)$: Συμβατικές μονάδες παραγωγής
- $im(j,t)$: Εισαγωγές ενέργειας
- $e(k,t)$: Εξαγωγές ενέργειας
- $r_{gen}^{up/down}(c,t)$: Παροχή εφεδρειών συμβατικών μονάδων παραγωγής θετική/αρνητική
- $c_i(i,b)$: Κόστος παραγωγής συμβατικών μονάδων παραγωγής
- $c_j(j)$: Κόστος παραγωγής εισαγωγών ενέργειας
- $c_k(k)$: Κόστος παραγωγής εξαγωγών ενέργειας

A.2.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

- $w(t)$: Παροχή ισχύος από ΑΠΕ την χρονική στιγμή t

A.2.6 Μεταβλητές χαλάρωσης

- $da(t)$: Ενέργεια που δεν αποδόθηκε στο σύστημα - Αγορά ισχύος
- $dru(c,t)$: Ενέργεια που δεν αποδόθηκε στο σύστημα - Αγορά θετικών εφεδρειών
- $drd(c,t)$: Ενέργεια που δεν αποδόθηκε στο σύστημα - Αγορά αρνητικών εφεδρειών

A.3 Σταθερές

- \bar{r} : Μέγιστη ισχύς φόρτισης
- \bar{q} : Μέγιστη ισχύς εκφόρτισης
- \bar{v} : Άνω στάθμη αποθηκευτικού σταθμού
- \underline{v} : Κάτω στάθμη αποθηκευτικού σταθμού
- $\bar{g}(i,b)$: Μέγιστη ισχύς εκφόρτισης
- δ : Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης
- c_{da} : Κόστος ενέργειας που δεν αποδόθηκε στο σύστημα - Αγορά ισχύος
- $c_{dru}(c)$: Κόστος ενέργειας που δεν αποδόθηκε στο σύστημα - Αγορά θετικών εφεδρειών
- $c_{drd}(c)$: Κόστος ενέργειας που δεν αποδόθηκε στο σύστημα - Αγορά αρνητικών εφεδρειών