



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΕ
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Λάγγαρης

Επίβλεψη : Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΕ
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Λάγγαρης

Επίβλεψη : Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2018.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

.....
Παναγιώτης Λάγγαρης

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

Copyright © Παναγιώτης Λάγγαρης, 2018

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να είναι ωφέλιμα για εφαρμογές όπως η ελάττωση της αυξομείωσης της παραγόμενης ισχύος των γεννητριών, η κάλυψη της αιχμής του φορτίου και η αντιστάθμιση τόσο της στοχαστικότητας της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όσο και του στατιστικού λάθους που ενέχει η πρόβλεψη τους. Η βέλτιστη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συμβάλει στην μείωση του κόστους παραγωγής των συμβατικών γεννητριών και στην αύξηση της απορρόφησης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές από το δίκτυο.

Ωστόσο, η εύρεση της βέλτιστης λύσης όσον αφορά τις διαστάσεις ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι ένα απαιτητικό πρόβλημα. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο καθορισμός του βέλτιστου μεγέθους μιας μπαταρίας υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα λειτουργεί με στρατηγική προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control – MPC) και ότι η πρόβλεψη της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιέχει σφάλματα.

Κατασκευάζεται και επιλύεται ένα στοχαστικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου δύο σταδίων, όπου η βέλτιστη χρησιμοποίηση της μπαταρίας καθορίζεται ταυτόχρονα με τα βέλτιστα επίπεδα παραγωγής ενέργειας και το μέγεθος της μπαταρίας. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής με χρήση πιθανοτικών περιορισμών, σε αναλυτική μορφή. Αυτό επιτρέπει να λυθεί απευθείας το στοχαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, χωρίς τη χρήση μεθόδων που βασίζονται σε δειγματοληψία, και να γίνει η διαστασιολόγηση της μπαταρίας συνυπολογίζοντας ένα ευρύ φάσμα πιθανών σεναρίων καθώς και ένα ευρύ φάσμα πιθανών σφαλμάτων πρόβλεψης.

Στην υλοποίηση λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι τα σφάλματα της πρόβλεψης και κάθε απόφαση σε μια χρονική στιγμή επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής μεταγενέστερα και χρησιμοποιείται η μέθοδος του ορίζοντα πρόρρησης (Receding Horizon Control) για τη λειτουργία του συστήματος και την βέλτιστη χρήση της διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μπαταρίες, αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, βελτιστοποίηση, στοχαστικός προγραμματισμός, στρατηγική προβλεπτικού ελέγχου, έλεγχος ορίζοντα πρόρρησης, αιολική ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ABSTRACT

Energy storage systems (ESS) have the potential to be very beneficial for applications such as reducing the ramping of generators, peak shaving, and balancing not only the variability introduced by renewable energy sources, but also the uncertainty introduced by errors in their forecasts. Optimal usage of storage may result in reduced generation costs and an increased penetration of renewable energy.

However, the optimal sizing of these devices is a challenging problem. The thesis aims to provide the tools for the optimal ESS sizing under the assumption that it will be operated with a model predictive control scheme and that the forecast of the renewable energy resources includes prediction errors.

A two-stage stochastic model predictive control problem is formulated and solved, where the optimal usage of the storage is simultaneously determined along with the optimal generation outputs and size of the storage. Wind forecast errors are taken into account in the optimization problem via probabilistic constraints for which an analytical form is derived. This allows for the stochastic optimization problem to be solved directly, without using sampling-based approaches, and sizing the storage to account not only for a wide range of potential scenarios, but also for a wide range of potential forecast errors.

In the proposed formulation, we account for the fact that errors in the forecast affect how the device is operated later in the horizon and that a receding horizon scheme is used in order to optimally exploit the available storage systems.

KEY WORDS

Batteries, energy storage, optimization, stochastic programming, model predictive control, receding horizon control, wind energy, renewable energy sources.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου με την παρούσα διπλωματική εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Ρήγα για την συνεργασία που είχαμε και για τον χρόνο που αφιέρωσε για να με κατευθύνει.

Κλείνοντας ένα σημαντικό κεφάλαιο της ζωής μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια. Τους συμφοιτητές μου, που αντιμετωπίσαμε μαζί τις απαιτήσεις της σχολής, τους παιδικούς μου φίλους, για όσα περάσαμε μαζί από μικρά παιδιά, και όλους όσους με συμβούλεψαν και με βοήθησαν να ωριμάσω.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την μητέρα μου, τον πατέρα μου και την αδερφή μου για την ουσιαστική στήριξη που πάντοτε μου παρείχαν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Εισαγωγή	14
1.2 Αντικείμενο και μεθοδολογία.....	15
1.3 Δομή της εργασίας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	18
2.2.1 Ηλιακή Ενέργεια	18
2.2.2 Υδροηλεκτρική Ενέργεια	18
2.2.3 Γεωθερμική Ενέργεια.....	19
2.2.4 Ενέργεια από βιομάζα	19
2.2.5 Ενέργεια από παλίρροια και κύματα.....	19
2.3 Αιολική Ενέργεια.....	20
2.3.1 Χαρακτηριστικά του ανέμου.....	20
2.3.2 Ταχύτητα του ανέμου.....	20
2.3.3 Ισχύς του ανέμου.....	21
2.4 Ανεμογεννήτριες.....	21
2.4.1 Δομή Ανεμογεννητριών	21
2.4.2 Παραγωγή Ισχύος.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.2 Το σύστημα αποθήκευσης και τα οφέλη του	27
3.3 Είδη μπαταριών	30
3.4 Κόστος, κύκλος ζωής και εφαρμογές μπαταριών ιόντων λιθίου.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	35
4.1 Εισαγωγή	35
4.2 Κατηγορίες του μαθηματικού προγραμματισμού	35
4.3 Τετραγωνικός Προγραμματισμός.....	37
4.4 Στοχαστικός Προγραμματισμός	38
4.5 Στρατηγική Προβλεπτικού Ελέγχου – Model Predictive Control.....	39

4.6	Ανάλυση Ευαισθησίας.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ		43
5.1	Εισαγωγή	43
5.2	Η έννοια της τυχαίας μεταβλητής	43
5.3	Η Κανονική Κατανομή.....	44
5.4	Η Κατανομή Weibull και ο Άνεμος	46
5.5	Πιθανοτικοί Περιορισμοί – Probabilistic Constraints	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....		48
6.1	Εισαγωγή	48
6.2	Μοντελοποίηση του συστήματος	49
6.2.1	Μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης	49
6.2.2	Μοντελοποίηση Προβλεπτικού Ελέγχου	50
6.2.3	Μοντελοποίηση του Σφάλματος Πρόβλεψης	51
6.3	Στοχαστικό Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου Δύο Σταδίων	53
6.3.1	Στοχαστική βελτιστοποίηση δύο σταδίων	53
6.3.2	Εισαγωγή ορίζοντα πρόρρησης.....	55
6.4	Εισαγωγή της στοχαστικότητας	56
6.4.1	Πιθανοτικοί περιορισμοί του συστήματος αποθήκευσης	57
6.4.2	Μετατροπή πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή	57
6.4.3	Συσσωρευση σφάλματος στο πέρασμα του χρόνου.....	60
6.4.4	Χαλάρωση των πιθανοτικών περιορισμών	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		62
7.1	Εισαγωγή	62
7.2	Εργαλεία επίλυσης.....	62
7.3	Δεδομένα εισόδου.....	63
7.4	Αποτελέσματα	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		80
8.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	80
8.2	Προεκτάσεις	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		88

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σχήμα 2.1:	Κατηγορίες Ανεμογεννητριών	22
Σχήμα 2.2:	Δομή Ανεμογεννήτριας Οριζόντιου Άξονα	22
Σχήμα 2.3:	Εξάρτηση του Cp από τα λ και β	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σχήμα 3.1:	Σύνδεση μονάδας αποθήκευσης με το ηλεκτρικό δίκτυο	28
Σχήμα 3.2:	Διαχρονική διαμόρφωση τιμής μπαταριών	32
Σχήμα 3.3:	Εφαρμογές μπαταριών στα διάφορα τμήματα του δικτύου	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Σχήμα 4.1:	Η πράσινη περιοχή αναπαριστά ένα κυρτό σύνολο	37
Σχήμα 4.2:	Απεικόνιση στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων	39
Σχήμα 4.3:	Απεικόνιση της λειτουργίας του MPC	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Σχήμα 5.1:	Κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$	44
Σχήμα 5.2:	Κατανομές Weibull για διάφορες παραμέτρους	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σχήμα 6.1:	Ιστόγραμμα σφαλμάτων πρόβλεψης ανέμου τριών μηνών	51
Σχήμα 6.2 (α):	Προσέγγιση σφάλματος από Κανονική Κατανομή	52
Σχήμα 6.2 (β):	Προσέγγιση σφάλματος από Κατανομή Weibull	52
Σχήμα 6.2 (γ):	Προσέγγιση σφάλματος με εκτίμηση πυκνότητας kernel	52
Σχήμα 6.3:	Διαχωρισμός μεταβλητών σταδίων του προβλήματος διαστασιολόγησης	54
Σχήμα 6.4:	Απεικόνιση ελέγχου με ορίζοντα πρόρρησης	55
Σχήμα 6.5:	Αυξανόμενη απόκλιση προβλέψεων με το πέρασμα του χρόνου	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Διάγραμμα 7.1:	Καμπύλη φορτίου μίας εβδομάδας	64
----------------	--------------------------------	----

Διάγραμμα 7.2:	Αιολική παραγωγή μίας εβδομάδας	64
Διάγραμμα 7.3:	Συνολική ζήτηση και αιολική παραγωγή μίας εβδομάδας	65
Πίνακας 7.4:	Παράμετροι συμβατικών γεννητριών	66
Πίνακας 7.5:	Συντελεστές κόστους συμβατικών γεννητριών	66
Πίνακας 7.6:	Ρυθμός μείωσης της πιθανότητας	67
Διάγραμμα 7.7:	Απεικόνιση ρυθμού μείωσης πιθανότητας	67
Διάγραμμα 7.8:	Εισερχόμενη/Εξερχόμενη ισχύς της μπαταρίας	68
Διάγραμμα 7.9:	Επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας	68
Πίνακας 7.10:	Αποτελέσματα με χαλάρωση πιθανότητας β´	69
Διάγραμμα 7.11:	Μεταβολή Ess με β´	69
Διάγραμμα 7.12:	Μεταβολή Pss με β´	69
Πίνακας 7.13:	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για πιθανότητες β´	70
Διάγραμμα 7.14:	Σχεδιάγραμμα μεταβολών αντικειμενικής συνάρτησης με β´	70
Πίνακας 7.15:	Αποτελέσματα με σταθερή πιθανότητα β	71
Διάγραμμα 7.16:	Μεταβολή Ess με β	71
Διάγραμμα 7.17:	Μεταβολή Pss με β	72
Πίνακας 7.18:	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για σταθερό β	72
Διάγραμμα 7.19:	Σχεδιάγραμμα μεταβολών αντικειμενικής συνάρτησης με β	72
Πίνακας 7.20:	Σύγκριση διαφορετικών μπαταριών	73
Πίνακας 7.21:	Αποτελέσματα χωρίς ορίζοντα πρόρρησης	74
Διάγραμμα 7.22:	Συνολική ζήτηση δέκα ημερών	75
Πίνακας 7.23:	Αποτελέσματα υψηλής αιολικής παραγωγής	76
Σχήμα 7.24:	Κατανομές πιθανοτικών περιορισμών	77
Διάγραμμα 7.25:	Ποσοστό κατανομής άνω του κάτω ορίου	78
Διάγραμμα 7.26:	Ποσοστό κατανομής κάτω του άνω ορίου	79
Πίνακας 7.27:	Ποσοστά χρόνου ικανοποίησης περιορισμών	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΛΙΣΤΑ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

E	Επίπεδο ενέργειας στην μπαταρία
P_{bat}	Ισχύς που εισέρχεται ή εξέρχεται από την μπαταρία
η_c	Δείκτης αποδοτικότητας φόρτισης της μπαταρίας
Δt	Χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων
E_{ss}	Χωρητικότητα ενέργειας της μπαταρίας
P_{ss}	Μέγιστος ρυθμός από/φόρτισης της μπαταρίας
H, K	Διάρκεια του ορίζοντα βελτιστοποίησης
N_G	Πλήθος συμβατικών γεννητριών
P_{Gi}	Ισχύς που αποδίδει η γεννήτρια i στο δίκτυο
a_i	Συντελεστής τετραγωνικού κόστους της γεννήτριας i
b_i	Συντελεστής γραμμικού κόστους της γεννήτριας i
c_i	Σταθερό κόστος της γεννήτριας i
r_i	Συντελεστής κόστους μεταβολής ισχύος της γεννήτριας i
P_{Gi}^{\min}	Ελάχιστο όριο παραγωγής της γεννήτριας i
P_{Gi}^{\max}	Μέγιστο όριο παραγωγής της γεννήτριας i
R_{Gi}	Μέγιστο όριο μεταβολής ισχύος της γεννήτριας i
P_L	Συνολικό φορτίο
P_w	Συνολική αιολική ισχύς
P_{for}	Προβλεφθείσα ισχύς ανεμογεννητριών
P_{err}	Σφάλμα πρόβλεψης ισχύος ανεμογεννητριών
E_0	Αρχικό επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας
N_s	Πλήθος σεναρίων
w_s	Πιθανότητα εμφάνισης του σεναρίου s
d	Συντελεστής κόστους χωρητικότητας ενέργειας της μπαταρίας (€/kW-10-min)
e	Συντελεστής κόστους χωρητικότητας ισχύος της μπαταρίας (€/kW)
T_L	Πλήθος ημερών που η μπαταρία βρίσκεται σε λειτουργία
β	Πιθανότητα ικανοποίησης περιορισμού
ΔP_{Gi}^u	Δυνατότητα αύξησης ισχύος εξόδου της γεννήτριας i
ΔP_{Gi}^d	Δυνατότητα μείωσης ισχύος εξόδου της γεννήτριας i
μ_p	Μέση τιμή του P_{err}
σ_p	Τυπική απόκλιση του P_{err}
ESS	Energy Storage System
PCS	Power Conditioning System
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
DES	Distributed Energy Storage
DER	Distributed Energy Resources
DG	Distributed Generation
MPC	Model Predictive Control
QP	Quadratic Programming

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές υποδομές των σύγχρονων κοινωνιών και βασικό θεμέλιο λίθο για τις περισσότερες λειτουργίες τους. Η μεγαλύτερη πλειοψηφία, αν όχι η απόλυτη πλειοψηφία, των τεχνολογικών δραστηριοτήτων του ανθρώπου εξαρτώνται άμεσα από την αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, είτε πρόκειται για μικρούς καταναλωτές είτε για μεγάλους οργανισμούς και εγκαταστάσεις, απαιτεί να παρέχεται χωρίς διακοπές και σε υψηλή ποιότητα, ώστε να είναι συμβατή με τις προδιαγραφές των εκάστοτε συσκευών. Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το σημείο αναφοράς καθώς μετατρέπεται εύκολα και γρήγορα σε άλλες μορφές ενέργειας χωρίς καθυστερήσεις.

Η ανάγκη για αδιάλειπτη και ασφαλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε είδους καταναλωτή απαιτεί την ύπαρξη ενός συνόλου μέσων και εγκαταστάσεων. Το σύνολο αυτό ορίζεται ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Πρόκειται για ένα πολύπλοκο σύστημα με αμέτρητες παραμέτρους και μεταβλητές που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κάθε στιγμή. Ένα τέτοιο σύστημα είναι δύσκολο να διαχειριστεί και να λειτουργεί συνέχεια με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Πολλές μεταβλητές του συστήματος επιδεικνύουν δυναμική συμπεριφορά καθιστώντας τον βέλτιστο σχεδιασμό και την οργάνωση του συστήματος ένα άκρως απαιτητικό σύστημα.

Για την διαχείριση και τον προγραμματισμό της λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων του ΣΗΕ χρησιμοποιούνται πολύπλοκες μέθοδοι υπολογισμού, οι οποίες μάλιστα μπορεί να διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Τα τελευταία χρόνια, η αύξηση του ενδιαφέροντος και της ανάγκης για διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ηλεκτρικό δίκτυο έχει εισάγει νέες προκλήσεις στον σχεδιασμό και την λειτουργία του. Το παραδοσιακό μοντέλο λειτουργίας με μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από αυτούς προς τους επιμέρους καταναλωτές αλλάζει και μετατρέπεται σε ένα σύστημα όπου η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κοντά στην κατανάλωση. Η αλλαγή αυτή δεν είναι απλή και απαιτεί διαρκώς να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει αδιαμφισβήτητη αξία για τον πλανήτη και για αυτό επιδιώκεται με διεθνείς συμφωνίες και πολιτικές η όλο και μεγαλύτερη διείσδυσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως είναι φυσικό, από την στιγμή που εισέρχονται σε αυτό το πολύπλοκο σύστημα όπου η παραμικρή αλλαγή μπορεί να επιφέρει σημαντικές μεταβολές, είναι αναγκαίο να μπορεί να προβλεφθεί και να μοντελοποιηθεί η λειτουργία τους στο μέγιστο βαθμό. Ορισμένες ΑΠΕ ωστόσο, όπως για παράδειγμα η αιολική ενέργεια, έχουν προβλήματα στην ακριβή πρόβλεψη της λειτουργίας τους λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς τους και τα σφάλματα στην πρόβλεψη της παραγωγής τους αποτελούν σημαντικό πρόβλημα για τον σχεδιασμό της λειτουργίας του συστήματος.

Μία λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η χρήση μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems – ESS) μπορούν να προσφέρουν πολλές σημαντικές υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε συνδυασμό με ΑΠΕ που η παραγωγή τους δεν είναι συνεχής και βέβαιη, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, βοηθούν στην εξισορρόπηση αυτής της διακοπτόμενης παραγωγής και την μέγιστη απορρόφηση της παραγωγής τους, καθώς ακόμη και αν η «καθαρή» ενέργεια παραχθεί σε στιγμές που η ζήτηση είναι χαμηλή, αυτή αποθηκεύεται και έτσι δεν χάνεται. Επιπλέον, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τις ώρες αιχμής και έτσι να συμβάλλουν στην μείωση της αιχμής του φορτίου και του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς μειώνουν την ανάγκη για απότομες αυξομειώσεις της παραγωγής των συμβατικών γεννητριών και πιθανώς την χρήση εφεδρικών γεννητριών που έχουν μεγάλο κόστος λειτουργίας.

1.2 Αντικείμενο και μεθοδολογία

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η αύξηση της υπολογιστικής ισχύς προσφέρουν νέες δυνατότητες και σημαντικά εργαλεία στον άνθρωπο. Μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στο παρελθόν για την επίλυση προβλημάτων σταδιακά αντικαθίστανται από άλλες που στο παρελθόν δεν προτιμούνταν λόγω των απαιτήσεών τους σε υπολογιστικούς πόρους.

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η χρήση της στρατηγικής προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control) αντί του κλασσικού PID controller που χρησιμοποιούνταν συχνά για τον έλεγχο συστημάτων. Το μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου αποτελεί μια απλή μέθοδο ελέγχου συστημάτων με πολλαπλές εισόδους και πολλαπλές εξόδους (MIMO), όπου η χρήση PID ελεγκτών για κάθε είσοδο και έξοδο θα ήταν μη αποτελεσματική, ειδικά στην περίπτωση που οι εισοδοί ενός υποσυστήματος επηρεάζονται και αλληλεπιδρούν με τις εξόδους ενός άλλου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας από τη σκοπιά της βέλτιστης λειτουργίας του συνολικού συστήματος ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται το μοντέλο του προβλεπτικού ελέγχου για την αναπαράσταση του συστήματος και επιλύεται ένα πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού, καθώς χρησιμοποιούνται πιθανοτικοί περιορισμοί για την μοντελοποίηση της μπαταρίας. Οι περιορισμοί αυτοί μετατρέπονται σε αναλυτική μορφή κάνοντας χρήση των ιδιοτήτων της κανονικής κατανομής, αφού γίνεται η παραδοχή ότι τα σφάλματα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά δεδομένα φορτίου, συμβατικής και αιολικής παραγωγής. Η υλοποίηση δεν περιλαμβάνει απώλειες δικτύου και γίνονται και άλλες παραδοχές, διαφορετικά το πρόβλημα θα γινόταν εξαιρετικά σύνθετο και πολύπλοκο.

1.3 Δομή της εργασίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται επιγραμματικά η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα,

Στο **Κεφάλαιο 2**, αναφέρονται μερικές πληροφορίες για την φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δίνοντας έμφαση στην αιολική ενέργεια, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο της μοντελοποίησης του προβλήματος που αντιμετωπίζεται.

Στο **Κεφάλαιο 3**, δίνονται βασικές πληροφορίες για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και συγκεκριμένα για τις μπαταρίες, καθώς το αντικείμενο της εργασίας είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, και οι πληροφορίες αυτές συνδέονται άμεσα μαζί του.

Στο **Κεφάλαιο 4**, αναλύεται η έννοια του μαθηματικού προγραμματισμού και εξηγείται η τεχνολογία με την οποία επιλύθηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Στο **Κεφάλαιο 5**, εξηγείται η έννοια της στοχαστικότητας και η χρήση βασικών θεωρημάτων της Θεωρίας των Πιθανοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν για την τροποποίηση των πιθανοτικών περιορισμών.

Στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται η μοντελοποίηση του προβλήματος και εξηγείται η προσέγγιση του προβλήματος και των παραδοχών που έγιναν για την επίλυσή του.

Στο **Κεφάλαιο 7**, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της λειτουργίας του μοντέλου και τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν καθώς και οι πιθανές προεκτάσεις της διπλωματικής εργασίας αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Η απεξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί επιτακτική ανάγκη στην εποχή μας. Αφενός τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανεξάντλητα, γεγονός που αυξάνει σταδιακά την τιμή τους και αφετέρου η μόλυνση του περιβάλλοντος είναι δύο παράγοντες που καθιστούν την μείωση της χρήσης συμβατικών καυσίμων απαραίτητη. Η εναλλακτική λοιπόν είναι η χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), που τα τελευταία χρόνια αυξάνεται ραγδαία.

Ο όρος Ανανεώσιμη Ενέργεια αναφέρεται στην ενέργεια που προκύπτει από πηγές οι οποίες δεν εξαντλούνται ή αντικαθίστανται σχετικά σύντομα. Παραδείγματα Ανανεώσιμης Ενέργειας είναι η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η ενέργεια από βιομάζα.

Η χρήση των ΑΠΕ αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια και μάλιστα παράγουν το 18,2% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στον πλανήτη. Η διείσδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς, και μάλιστα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ έφτασε τα 2195 GW (στοιχεία 2017).

Πιο αναλυτικά, η πιο διαδεδομένη μορφή καθαρής ενέργειας είναι η υδροηλεκτρική, με 1114 GW εγκατεστημένης ισχύος. Ακολουθεί η αιολική ενέργεια με παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ 539 GW και η ηλιακή με 402 GW^[1].

Οι ΑΠΕ αποτελούν τη μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς μια βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας. Η Ελλάδα συγκεκριμένα είναι ιδιαίτερα ευνοημένη σε αυτό το πεδίο, λόγω της παρουσίας σε μεγάλο βαθμό ανανεώσιμων πηγών (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) σε όλη την επικράτειά της και ιδιαίτερα στα νησιά της. Ωστόσο, η ενέργεια που παράγεται από τις διατάξεις των ΑΠΕ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ηλίου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Κατά συνέπεια, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς), η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η αναντιστοιχία αυτή σημαίνει ότι η ενέργεια μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη της ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ, είτε στις αυτόνομες είτε στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις.

Η ανάγκη της αποθήκευσης υπήρχε και παλαιότερα, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευέλικτες και κατά περιόδους (τη νύχτα) η ενέργεια που παράγουν είναι μεγαλύτερη της ζήτησης. Το κόστος τους έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ωστόσο ακόμη παραμένουν ακριβές για χρήση σε πολύ μεγάλη κλίμακα.^[2]

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι διάφορες μορφές Ανανεώσιμης Ενέργειας με έμφαση στην αιολική, αναφέρονται μερικά σχετικά στατιστικά στοιχεία, καθώς και οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στις ηλεκτρικές μπαταρίες.

2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά οι διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με μια εκτενέστερη ανάλυση για την αιολική ενέργεια.

2.2.1 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι ουσιαστικά η θερμική ενέργεια και η ακτινοβολία του ήλιου και στις μέρες μας αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση των θερμικών εφαρμογών η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας, κυρίως για τη θέρμανση του νερού, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ατμό για την κίνηση των τουρμπινών. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών εφαρμογών η ακτινοβολία του ηλίου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών.

2.2.2 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των υδάτινων ροών (ποτάμια, φράγματα κλπ.) και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.

Πρόκειται για μια από τις πιο σημαντικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, τη στιγμή που η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς από ΑΠΕ είναι 2.011.332 MW, η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει τα 1.245.708MW. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Βραζιλία και ο Καναδάς.^[3]

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς είναι σύγχρονες, συνήθως με έκτυπους πόλους και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Βέβαια, σε εγκαταστάσεις μικρότερης ισχύος χρησιμοποιούνται ακόμα και ασύγχρονες μηχανές. Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ένας υδροηλεκτρικός σταθμός είναι συνάρτηση δύο μεγεθών. Ο όγκος του νερού που ρέει, από τη μία, και η υψομετρική διαφορά μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στη δεξαμενή αποθήκευσης και του στροβίλου, από την άλλη, είναι τα δύο καθοριστικά μεγέθη για την ποσότητα παραγωγής. Η ενέργεια που παράγεται από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς συνήθως χρησιμοποιείται συμπληρωματικά ως προς άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας, καλύπτοντας δηλαδή τα φορτία αιχμής του δικτύου.

2.2.3 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα εσωτερικών στρωμάτων της Γης, την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όταν υπάρχουν οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες. Εξάλλου, υπάρχει ένα πλήθος εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμική ενέργεια, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από 10MW μέχρι και άνω των 100MW.

Η γεωθερμία αξιοποιείται στις χώρες όπου είναι διαθέσιμη και ιδιαίτερα στις περιοχές των γεωτεκτονικών πλακών, όπως για παράδειγμα στην Ισλανδία, την Ιταλία, την Ιαπωνία και αλλού. Η γεωθερμία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τη θέρμανση κτιρίων και θερμοκηπίων ή σε βιομηχανικές διεργασίες. Όπως είναι λογικό, σε περιοχές όπου το περιεχόμενο της γεωθερμικής ενέργειας είναι υψηλό, μπορεί να αξιοποιηθεί ο ατμός ο οποίος παράγεται ακόμα και σε ατμοστροβιλικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις γεωθερμίας χαρακτηρίζονται κυρίως από το υψηλό κόστος εγκατάστασης και από το πολύ χαμηλό έως και μηδενικό κόστος παραγωγής.

2.2.4 Ενέργεια από βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα αναφερόμαστε σε οποιοδήποτε υλικό το οποίο παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς, όπως για παράδειγμα το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, τα υπολείμματα των καλλιεργειών ή τα κτηνοτροφικά απόβλητα. Η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας διότι μετασχηματίζεται, καταστρέφεται και αναδημιουργείται. Στην ουσία, η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μέσω των κατάλληλων θερμοχημικών διεργασιών επεξεργασίας.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη βιομάζα έχει ποικίλα περιβαλλοντολογικά οφέλη και για αυτόν ακριβώς το λόγο έχουν γίνει αρκετές μελέτες για την αξιοποίηση της. Οι περισσότερες από αυτές χρησιμοποιούν γεωργικά απόβλητα, λύνοντας παράλληλα και το πρόβλημα της αποκομιδής τους.

Η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες που παράγουν περίπου το ένα τρίτο της ενέργειάς τους από αυτήν. Αναλυτικότερα, περίπου 2,5 δισεκατομμύρια άνθρωποι εξαρτώνται από τη βιομάζα για την κάλυψη των αναγκών τους σε θέρμανση, φωτισμό και μαγείρεμα. Βέβαια, ο συνηθισμένος τρόπος αξιοποίησης της βιομάζας είναι η καύση της είτε σε σόμπες είτε πλέον σε λέβητες.

Μια σχετικά καινούργια μορφή αξιοποίησης της βιομάζας είναι και η παραγωγή βιοαερίου ή biodiesel. Το βιοαέριο με τη σειρά του καίγεται σε μονάδες εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2.5 Ενέργεια από παλίρροια και κύματα

Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν την ενέργεια των κυμάτων και της παλίρροιας δεν αναμένεται να διεισδύσουν σε επίπεδο τοπικής διανομής, καθώς απαιτούν συγκεκριμένες τοποθεσίες εγκατάστασης. Βέβαια, η τεχνολογία που απαιτείται για να μετατραπεί η παλιρροιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό είναι παρόμοια με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε παραδοσιακά υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Η παραγωγή ωστόσο εξαρτάται από τη δύναμη των κυμάτων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει διακυμάνσεις από μέρα σε μέρα και από ώρα σε ώρα. Όπως είναι φυσικό, οι τοποθεσίες εγκατάστασης πρέπει να εμφανίζουν έντονο και επαναλαμβανόμενο κυματισμό αρκετές φορές μέσα στη διάρκεια του χρόνου. Είναι ακόμη αναγκαίο να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα για την αντοχή των κατασκευών σε συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων.

Τέλος, αν και η συγκεκριμένη μορφή ΑΠΕ είναι η λιγότερο ώριμη σε σχέση με όσες αναφέρθηκαν νωρίτερα, το ενδιαφέρον που παρουσιάζει είναι σημαντικό. Οι περισσότερες κατασκευές που αξιοποιούν αυτήν την μορφή ενέργειας έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη και συγκεκριμένα στην Πορτογαλία και τη Μεγάλη Βρετανία.

2.3 Αιολική Ενέργεια

2.3.1 Χαρακτηριστικά του ανέμου

Ο άνεμος αποτελεί κίνηση αέριων μαζών, η οποία οφείλεται σε διαφορές θερμοκρασιών εντός της ατμόσφαιρας. Αναλυτικότερα, οι διαφορετικές θερμοκρασίες δημιουργούνται λόγω:

- Της μορφολογίας του εδάφους (βουνά, θάλασσα κτλ.)
- Της διαφοράς γεωγραφικού πλάτους

Όσον αφορά τους ανέμους της πρώτης περίπτωσης, χαρακτηρίζονται από σχετική σταθερότητα (εποχιακοί άνεμοι με μεγάλη περίοδο μεταβολής), ενώ οι άνεμοι της δεύτερης περίπτωσης χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική διάρκεια (ημερήσια ή ωριαία).

2.3.2 Ταχύτητα του ανέμου

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της τυρβώδους συνιστώσας του:

$$V_w(t) = \bar{V}_w(t) + v(t) \quad (2.1)$$

όπου:

$$\bar{V}_w(t) = \frac{1}{T} \int_0^T V_w(t), \quad T \text{ ορισμένη χρονική περίοδος} \quad (2.2)$$

Ο όρος τυρβώδης συνιστώσα οφείλεται στη χαρακτηριστική κίνηση του ανέμου στο κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας, δηλαδή στο τμήμα που υπάρχουν ανθρώπινες κατασκευές. Στην ουσία, εντός αυτού του στρώματος η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Επίσης, η ταχύτητά του στο

συγκεκριμένο στρώμα μεταβάλλεται ανάλογα με τα εμπόδια που συναντά στην επιφάνεια της γης. Με απλά λόγια, αυξάνεται διαρκώς από το μηδέν (ταχύτητα που εμφανίζει στην επιφάνεια της γης) έως μια σταθερή τιμή (ταχύτητα που εμφανίζει στο άνω όριο του στρώματος, το οποίο χαρακτηρίζεται από ελεύθερη ροή).

Σχετικά με τη μέτρηση της μέσης ταχύτητας, αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ανεμομέτρων τύπου κυπέλλου ή έλικας. Βέβαια, τα πιο σύγχρονα ανεμόμετρα, εκτός από τη μέτρηση της μέσης ταχύτητας, πραγματοποιούν και στατιστική ανάλυση του ανέμου. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να αναχθεί στο ύψος της πλήμνης της ανεμογεννήτριας. Η αναγωγή αυτή συνήθως πραγματοποιείται με τον γνωστό εκθετικό νόμο:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^a \quad (2.3)$$

ο οποίος συσχετίζει τις ταχύτητες ανέμου V_1 και V_2 , οι οποίες μετρούνται σε ύψη Z_1 και Z_2 αντίστοιχα. Η τιμή του εκθέτη a σχετίζεται με το ανάγλυφο του εδάφους και γενικά προκύπτει από μετρήσεις σε διαφορετικά ύψη, στα οποία προσαρμόζεται η σχέση (2.3). Οι τιμές του γενικά κυμαίνονται στο διάστημα μεταξύ 0.1 και 0.2, με τυπικές 0.15-0.17.

Τέλος, η τύρβη αποτελεί στατιστικό μέγεθος και εκφράζεται με τη βοήθεια της τυπικής απόκλισης και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του ανέμου. ^[4]

2.3.3 Ισχύς του ανέμου

Η ισχύς μιας ποσότητας αέρα με πυκνότητα ρ και επιφάνεια A , η οποία κινείται με ταχύτητα V , ισούται με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται σε αυτή. Συγκριμένα:

$$P = \frac{1}{2}(\rho \cdot A \cdot V) \cdot V^2 = \frac{1}{2}(\rho \cdot A \cdot V^3) \quad (2.4)$$

όπου:

$\rho \cdot A \cdot V$: Η μάζα του κινούμενου αέρα.
 ρ : Η πυκνότητα, η οποία εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία (κυμαίνεται από 1.2 έως 1.3 $\frac{kg}{m^3}$).

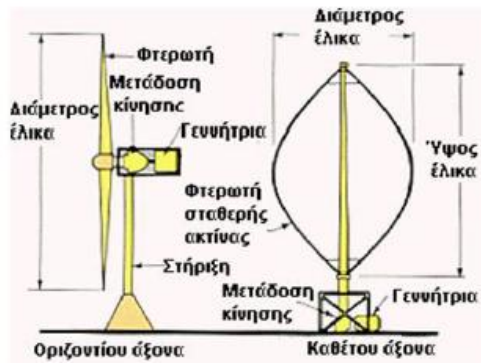
2.4 Ανεμογεννήτριες

2.4.1 Δομή Ανεμογεννητριών

Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες, οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Οριζόντιου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικας και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου του εδάφους.

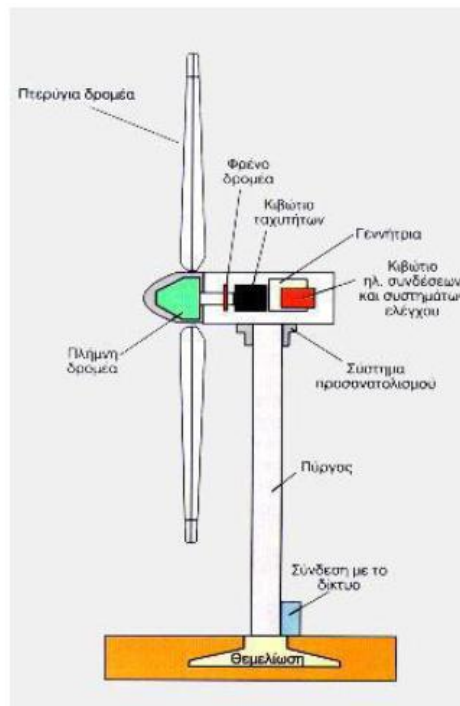
- Κατακόρυφου άξονα, των οποίων ο δρομέας παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 2.1: Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένες με σκοπό να εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου και να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Κάθε ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Τον πύργο
- Την έλικα με δύο ή τρία πτερύγια
- Το κιβώτιο ταχυτήτων (πολλαπλασιαστής στροφών)
- Το μηχανισμό ελέγχου του βήματος των πτερυγίων
- Το μηχανισμό περιστροφής και προσανατολισμού
- Το μηχανικό φρένο
- Την γεννήτρια
- Τον ηλεκτρικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου



Σχήμα 2.2: Δομή Ανεμογεννήτριας Οριζόντιου Άξονα

Παρακάτω αναλύονται ορισμένα από τα προαναφερόμενα μέρη. Συγκεκριμένα^[51]:

Ο πύργος: Ο ρόλος του είναι να στηρίζει την έλικα και την άτρακτο, στην οποία βρίσκεται το μηχανικό φρένο, το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια και ο μηχανισμός περιστροφής. Το ύψος του πύργου στο παρελθόν κυμαινόταν από 25 ως 55 μέτρα, ενώ στην σύγχρονη εποχή μπορεί να φτάσει και τα 115 μέτρα. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο πύργος είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από μέταλλο. Όσον αφορά την κατασκευή του, συνήθως είναι σωληνωτή και πιο σπάνια δικτυωτή. Αξίζει να τονιστεί ότι υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Είναι απαραίτητο λοιπόν για κατά τον σχεδιασμό του πύργου να λαμβάνονται υπόψη οι κατάλληλες προϋποθέσεις ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού.

Ο δρομέας (έλικας): Αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια, τα οποία έχουν την αεροδυναμική μορφή των ελίκων του αεροπλάνου, με αρκετή συστροφή και συνεχή μείωση της διατομής τους από την βάση προς τα άκρα. Βέβαια, η σταθερή μηχανική καταπόνηση που οφείλεται στις φυγόκεντρες δυνάμεις, καθώς και αυτή που οφείλεται στις ταλαντώσεις των πτερυγίων, καθιστούν το σχεδιασμό των πτερυγίων τον πιο αδύναμο μηχανικό σύνδεσμο του συστήματος.

Όσον αφορά τη στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα, ενδέχεται να είναι σταθερή (πτερύγιο σταθερού βήματος) ή μεταβλητή, δηλαδή να είναι δυνατή η περιστροφή του στο σημείο εδράσεως (πτερύγιο μεταβλητού βήματος). Οι συγκεκριμένες παραλλαγές είναι βασικής σημασίας για τον έλεγχο ισχύος – ταχύτητας περιστροφής του ανεμοκινητήρα, καθώς και για την ασφάλεια της λειτουργίας του.

Βέβαια, η τεχνολογία κατασκευής των πτερυγίων βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη και πολλά είδη υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως για παράδειγμα πολυουρεθάνη, υαλόνημα, ξύλο και ανθρακονήματα κ.ά.

Μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού: Ο σκοπός του μηχανισμού αυτού είναι να στρέφει την έλικα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι θεωρητικές μελέτες υπαγορεύουν τον ελεύθερο ρυθμό περιστροφής της έλικας όσο το δυνατόν περισσότερο, ωστόσο τα στρεφόμενα πτερύγια παράγουν υψηλές γυροσκοπικές ροπές κατά τη διάρκεια του προσανατολισμού, που συχνά έχουν ως αποτέλεσμα υψηλό θόρυβο (θόρυβος εκτός των προβλεπόμενων ορίων). Κατά συνέπεια ο ελεγχόμενος ρυθμός προσανατολισμού είναι απαραίτητος.

Έλεγχος ταχύτητας: Η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να ελέγχεται για τους παρακάτω λόγους:

- Μέγιστη απόληψη ισχύος από τον άνεμο.
- Προστασία του δρομέα, της γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος από υπερφόρτιση σε συνθήκες υψηλού ανέμου.
- Προστασία του δρομέα από υψηλή ταχύτητα κατά τη διάρκεια αποσύνδεσης ή άλλου φαινομένου.

Σύστημα ελέγχου: Το σύστημα ελέγχου αποτελεί το συνολικό σύστημα εποπτείας και περιλαμβάνει επιμέρους συστήματα ελέγχου, όπως της κλίσης των πτερυγίων (pitch control), των μετατροπέων ισχύος, της γεννήτριας και της περιστροφής της άτρακτου (yaw control). Στην ουσία, το σύστημα ελέγχου προσαρμόζει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας στις

εκάστοτε συνθήκες ανέμου, επιτηρεί την ασφάλεια και μεγιστοποιεί την απόδοσή της. Όπως είναι αναμενόμενο, η πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου παρουσιάζει συνεχή αύξηση κατά τα τελευταία χρόνια και αποτελεί βασικό κριτήριο εξέλιξης των ανεμογεννητριών.

Όσον αφορά το είδος της γεννήτριας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία ανεμογεννήτρια, μπορεί να είναι είτε σύγχρονη ή ασύγχρονη, με την ασύγχρονη γεννήτρια επαγωγής να προτιμάται τις περισσότερες φορές. Ακόμη, οι πρόσφατες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα πλήρους ισχύος δεν απαιτούν κιβώτιο.

Τέλος, ως αιολικό πάρκο ορίζεται μια μεγάλη σχετικά έκταση στην οποία τοποθετούνται πολλές ανεμογεννήτριες. Τα αιολικά πάρκα, ανάλογα με την τοποθεσία λειτουργίας τους διακρίνονται σε χερσαία (onshore), θαλάσσια (offshore) και κοντά στην ακτή (nearshore).

2.4.2 Παραγωγή Ισχύος

Η αεροδυναμική διατομή των πτερυγίων δημιουργεί τις αναγκαίες συνθήκες ώστε να αναπτύσσεται ωφέλιμη ροπή. Η ισχύς του δρομέα είναι:

$$P_{\text{motor}} = \frac{1}{2} (\rho \cdot C_p \cdot A \cdot v_w^3) \quad (2.5)$$

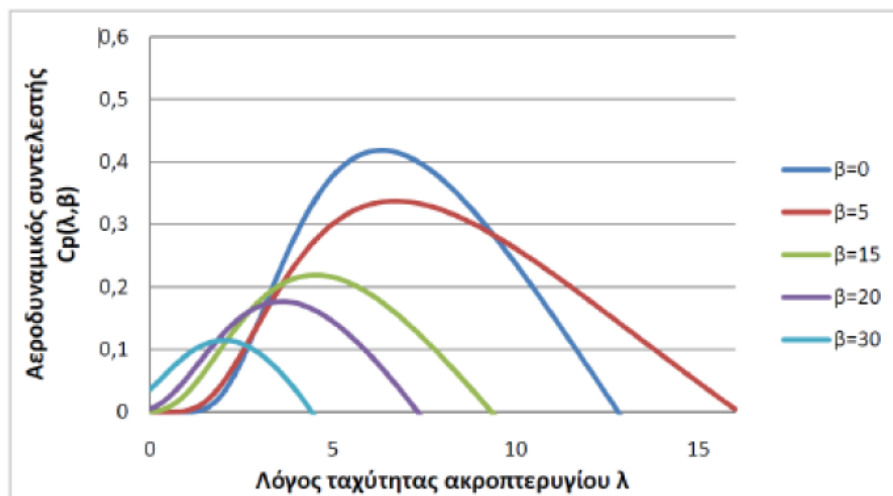
όπου:

- R : Η ακτίνα του δρομέα.
- $A = \pi \cdot R^2$: Η επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια.
- $C_p (\lambda, \beta)$: Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος.
- $\lambda = \frac{R \cdot \omega_R}{V_w}$: Ο λόγος της ταχύτητας των ακροπτερυγίων προς την ταχύτητα του ανέμου.
- ω_R : Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.
- v_w : Η ταχύτητα του ανέμου.
- β : Η γωνία των πτερυγίων ως προς την ταχύτητα του ανέμου.

Η παραπάνω ισχύς μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας και ύστερα εγχέεται στο δίκτυο.

Όσον αφορά τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p , αυτός εξαρτάται από τα λ και β . Θεωρητικά, ο συγκεκριμένος συντελεστής έχει ως μέγιστη τιμή το όριο του Betz, που είναι ίσο με $\frac{16}{27}$.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η εξάρτηση του συντελεστή C_p από τις παραμέτρους λ και β :



Σχήμα 2.3: Εξάρτηση του C_p από τα λ και β

Ανάλογα με το αν η γωνία β των πτερυγίων ως προς την ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή ή μπορεί να ελεγχθεί, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τύπου stall και τύπου pitch αντίστοιχα. Οι ανεμογεννήτριες τύπου stall θεωρούνται πλέον ξεπερασμένες, και έτσι η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τύπου pitch.

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται επίσης με βάση τον έλεγχο των στροφών. Πιο συγκεκριμένα, χωρίζονται σε ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και μεταβλητών στροφών. Ουσιαστικά, μέσω του ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και της γωνίας των πτερυγίων, αρχικά ελέγχεται η τιμή του C_p και στη συνέχεια η παραγόμενη ισχύς.

Όσον αφορά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, ισχύει ότι οι περιοχές λειτουργίας της σχετίζονται άμεσα με το εύρος τιμών της ταχύτητας του ανέμου εκείνη τη χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, καταγράφονται οι εξής περιοχές λειτουργίας της:

- Η ταχύτητα σύνδεσης της ανεμογεννήτριας (cut-in speed), στην οποία αρχίζει η ανεμογεννήτρια να παράγει ισχύ.
- Η περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή (constant maximum C_p region), όπου η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε η απόληψη ισχύος από τον άνεμο να βελτιστοποιείται.
- Η περιοχή σταθερής ισχύος εξόδου (constant power output region).
- Η ταχύτητα αποσύνδεσης (cut-out speed).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι ανεμογεννήτριες τίθενται σε λειτουργία όταν η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, της ταχύτητας ένταξης (cut-in speed) και της ταχύτητας αποσύνδεσης (cut-out speed). Συνήθως, ο έλεγχος γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη ισχύς να ισούται με ^[6]:

$$P_{\text{παραγόμενο}} = \begin{cases} 0, & V_w < V_{\text{cut-in}} \\ P_{\text{nom}} \frac{V_w - V_{\text{cut-in}}}{V_{\text{nom}} - V_{\text{cut-in}}}, & V_{\text{cut-in}} \leq V_w < V_{\text{nom}} \\ P_{\text{nom}}, & V_{\text{nom}} \leq V_w < V_{\text{cut-out}} \\ 0, & V_w \geq V_{\text{cut-out}} \end{cases} \quad (2.6)$$

όπου:

V_w : Η ταχύτητα του ανέμου κάθε χρονική στιγμή.

$V_{\text{cut-in}}$: Η ταχύτητα ένταξης της ανεμογεννήτριας (θεωρείται 4 m/s).

V_{nom} : Η ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας (θεωρείται 14 m/s).

$V_{\text{cut-out}}$: Η ταχύτητα αποσύνδεσης της ανεμογεννήτριας (θεωρείται 24 m/s).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή και οι διεθνείς συμφωνίες για την αντιμετώπισή της απαιτούν ολοένα και μεγαλύτερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών. Το γεγονός ότι οι ΑΠΕ δεν είναι διαθέσιμες κάθε στιγμή και ενέχουν μια στοχαστικότητα στην παραγωγή τους καθιστά αναγκαία τη χρησιμοποίηση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό η περίσσεια «καθαρής» ενέργειας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί την κατάλληλη στιγμή.

Με τον όρο «αποθήκευση ενέργειας» αναφερόμαστε στην αποθήκευση κάποιας μορφής ενέργειας, η οποία είναι εφικτό να αξιοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, ούτως ώστε να εκτελέσει ορισμένες χρήσιμες λειτουργίες.

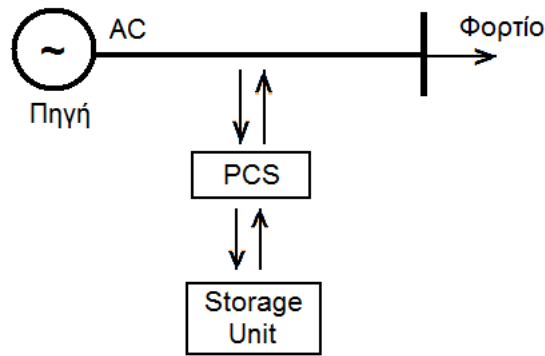
Η ηλεκτρική ενέργεια έχει το μειονέκτημα να μην μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά και οικονομικά σε μεγάλες ποσότητες. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαίο η ηλεκτρική ενέργεια να παράγεται τη χρονική στιγμή που ζητείται. Η ανάγκη αυτή οδηγεί σε εξαιρετικά απαιτητικές και σύνθετες λειτουργίες του ηλεκτρικού συστήματος, όπως η εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης, καθώς και η διατήρηση της ασφάλειάς του.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται με ένα πλήθος ζητημάτων που χρήζουν αντιμετώπισης και για αυτά έχουν προταθεί διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ως πιθανές λύσεις.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και απαριθμούνται τα τεχνικά οφέλη που προσφέρει η χρήση τους στο δίκτυο, καθώς και διάφορες εφαρμογές τους, όπως για παράδειγμα η χρήση τους σε ηλεκτρικά οχήματα.

3.2 Το σύστημα αποθήκευσης και τα οφέλη του

Ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για να συνδεθεί με το δίκτυο απαιτείται ένα σύστημα μετατροπής ισχύος (Power Conditioning System – PCS) που τοποθετείται ενδιάμεσα της μονάδας αποθήκευσης (Storage Unit) και του δικτύου. Η σύνδεση αυτή φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.1. Το PCS είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα από εναλλασσόμενο σε συνεχές και αντίστροφα. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς οι μπαταρίες φορτίζονται με συνεχές ρεύμα ενώ το δίκτυο λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχήμα 3.1: Σύνδεση μονάδας αποθήκευσης με το ηλεκτρικό δίκτυο

Ως σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν λογίζονται φυσικά μόνο οι μπαταρίες. Ένα χρήσιμο σύστημα αποθήκευσης είναι οι μονάδες αντλησιοταμίευσης που χρησιμοποιούν το νερό και το αποθηκεύουν ως δυναμική ενέργεια σε ένα συγκεκριμένο ύψος, το οποίο ρέοντας προς τα κάτω μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και τέλος μέσω της υδροηλεκτρικής γεννήτριας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, οι νέες εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης δεν επεκτείνονται καθώς απαιτούν ιδιαίτερη μορφολογία εδάφους και μεγάλους χώρους.

Η αποθηκευτική ικανότητα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και ο χώρος που απαιτείται για την εγκατάστασή του είναι αλληλένδετα στοιχεία. Αντί λοιπόν να δεσμεύονται μεγάλοι χώροι για την εγκατάσταση μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης, η λύση είναι η χρήση μικρότερων μονάδων αποθήκευσης σε διαφορετικά σημεία του συστήματος διανομής. Η έννοια αυτή ονομάζεται κατακευματισμένη αποθήκευση ενέργειας (Distributed Energy Storage – DES).

Μελλοντικά είναι πιθανό αυτή η μέθοδος να είναι η πιο διαδεδομένη και να καταγράφει πολύ υψηλότερη διείσδυση από ότι η κατακευματισμένη παραγωγή ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες DES περιλαμβάνουν μπαταρίες, σφονδύλους (flywheels), υπερπυκνωτές (supercapacitors) και υπεραγωγία πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES). Από τα παραπάνω, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι μπαταρίες και οι σφόνδυλοι. Αντίθετα με τις DES, οι τεχνολογίες αντλησιοταμίευσης και συμπίεσης αέρα (Compressed air system storage) είναι ογκώδης και απαιτούν μεγάλους χώρους για να εγκατασταθούν.

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας έχει πολλαπλά οφέλη τα οποία αναλύονται παρακάτω^[7]:

- 1. Υποστήριξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας:** Η αποθήκευση μπορεί να μειώσει τις διακυμάνσεις στην παραγόμενη αιολική και ηλιακή ενέργεια. Επίσης, επιτρέπει την πώληση της καθαρής ενέργειας σε περιόδους όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει την υψηλότερη τιμή, γεγονός που βοηθά στην γρηγορότερη απόσβεση της επένδυσης.
- 2. Αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος:** Η αποθήκευση αποτελεί δικλίδα ασφαλείας σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, ώστε τα φορτία να συνεχίσουν να τροφοδοτούνται.

3. **Έλεγχος αέργου ισχύος, διόρθωση συντελεστή ισχύος και ανύψωση τάσης:** Τα ηλεκτρονικά ισχύος των μονάδων αποθήκευσης παρέχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν γρήγορα την ενεργό και άεργο ισχύ.
4. **Ισοστάθμιση φορτίου:** Η φόρτιση των μπαταριών γίνεται σε περιόδους όπου η ηλεκτρική ενέργεια έχει χαμηλό κόστος, δηλαδή όταν το συνολικό φορτίο είναι χαμηλό. Αντίστοιχα, η εκφόρτισή τους γίνεται όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, δηλαδή στην ζώνη αιχμής του φορτίου. Αυτό έχει ως συνέπεια την βελτίωση του συντελεστή ισχύος, την αναβολή της επέκτασης των μονάδων παραγωγής και την μειωμένη ανταλλαγή ενέργειας με τους σταθμούς οι οποίοι καλύπτουν τα φορτία αιχμής.
5. **Εφεδρεία συστήματος:** Χάρη στην ικανότητα των μπαταριών να αυξομειώνουν ταχύτητα την εγγεόμενη στο δίκτυο ισχύ μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως εφεδρεία του συστήματος, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για χρήση των ασύμφωρων εφεδρικών σταθμών παραγωγής.
6. **Αναβολή αναβάθμισης ηλεκτρικών γραμμών:** Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει την τάση να αυξάνεται όσο η τεχνολογία προχωρά, γεγονός που απαιτεί και την τακτική αναβάθμιση των ηλεκτρικών γραμμών. Η τοποθέτηση μονάδων αποθήκευσης κοντά στα φορτία και η χρήση τους σε περιόδους υψηλής ζήτησης συμβάλλει στην μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται να μεταφερθεί μέσω των ηλεκτρικών γραμμών και συνεπώς η αναβάθμισή τους αναβάλλεται για το μέλλον.
7. **Αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής:** Όμοια με παραπάνω, οι κατάλληλα τοποθετημένες μονάδες αποθήκευσης ικανοποιούν τοπικά τα φορτία αιχμής και συνεπώς η συνολική ζήτηση που αντιμετωπίζει το σύστημα δεν απαιτεί την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής για την κάλυψή της.
8. **Υποστήριξη της κατανεμημένης παραγωγής:** Οι μονάδες αποθήκευσης επιτρέπουν στην κατανεμημένη παραγωγή, όπως μικροστρόβιλοι και κυψέλες καυσίμου, να λειτουργούν με σταθερή παραγωγή, μειώνοντας ταυτόχρονα τις ανάγκες σε καύσιμα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η εκφόρτιση των DES συστημάτων τις ώρες αιχμής συμβάλλει στην μείωση της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος σε κατανεμημένη παραγωγή.
9. **Ευστάθεια του συστήματος:** Οι διακυμάνσεις της ισχύος και της συχνότητας μπορούν να μειωθούν μεταβάλλοντας σε μικρά χρονικά διαστήματα την ενεργό και άεργο ισχύ που αποδίδει το σύστημα αποθήκευσης στο δίκτυο. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι το βελτιωμένο όριο ευστάθειας πετυχαίνεται χάρη στα ηλεκτρονικά ισχύος των DES συστημάτων.
10. **Μειωμένη χρήση καυσίμων – Περιβαλλοντικά οφέλη:** Οι μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ως εφεδρεία τις ώρες αιχμής, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για χρήση των λιγότερο αποδοτικών μονάδων παραγωγής. Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο, ενώ οι μπαταρίες μπορούν να φορτίζονται από ΑΠΕ, κι έτσι προκύπτουν επιπρόσθετα οφέλη από την χρήση των μονάδων αποθήκευσης. Επιπλέον, μειώνονται οι εκπομπές ρύπων καθώς και οι απώλειες του συστήματος, αφού ο συντελεστής ισχύος του βελτιώνεται κι έτσι μειώνεται η χρησιμοποιούμενη ενέργεια.

3.3 Είδη μπαταριών

Στο σημείο αυτό γίνεται μια στοιχειώδης ανάλυση των διαφόρων τεχνολογιών ηλεκτρικών μπαταριών και των εφαρμογών τους^[6]:

Μπαταρίες μολύβδου – οξέος: Πρόκειται για τον παλαιότερο τύπο επαναφορτιζόμενων μπαταριών, και τον πιο διαδεδομένο παγκοσμίως. Αυτός ο τύπος μπαταριών είναι ιδανικός για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας καθώς έχουν μικρό ποσοστό αυτοεκφόρτισης. Το πρόβλημά τους είναι ότι έχουν μικρή διάρκεια ζωής, γεγονός όμως που αντισταθμίζεται από το χαμηλό τους κόστος. Για τα λόγια αυτό είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά συστήματα. Τέλος, τα συστήματα μολύβδου – οξέος βελτιώνονται σταδιακά με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα μέσω της χρήσης των ηλεκτρολυτών σε μορφή gel.

Μπαταρίες νικελίου – καδμίου: Οι μπαταρίες αυτές είναι γνωστές και ως αλκαλικές μπαταρίες, και παρόλο που είναι ακριβότερες έως και τέσσερις φορές από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέως, έχουν διπλάσιο χρόνο ζωής. Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου είναι κατάλληλες για τοποθέτηση σε απομακρυσμένες περιοχές αφού κατά τη λειτουργία τους δεν απαιτείται παρακολούθηση, ακόμη και σε δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες. Έχουν ωστόσο σημαντικά μειονεκτήματα, που είναι από τη μία το υψηλό κόστος τους, καθώς υπάρχει πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη, και από την άλλη η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών αποβλήτων τους. Αυτός ο τύπος μπαταριών χρησιμοποιείται συνήθως στις επικοινωνίες και τον ιατρικό εξοπλισμό. Μια λύση για το πρόβλημα των τοξικών αποβλήτων είναι οι μπαταρίες Ni-MH (nickel – metal hydride), οι οποίες χαρακτηρίζονται από πιο ήπια τοξική συμπεριφορά, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

Μπαταρίες ιόντων – λιθίου: Πρόκειται για έναν πολύ γνωστό τύπο μπαταριών που χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλή ενεργειακή απόδοση και μεγαλύτερο κύκλο ζωής, σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Οι μπαταρίες αυτές απαιτούν εξαιρετικά μικρή συντήρηση και είναι κατά πολύ ελαφρύτερες από τις συνηθισμένες, χάρη στη χρήση του λιθίου, που είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο. Χάρη στο συνδυασμό αυτό μικρού βάρους και υψηλής απόδοσης, βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, ηλεκτρικά αυτοκίνητα κ.ά. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει και η δυνατότητα επέκτασης της χρήσης αυτών των μπαταριών σε εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το μειονέκτημα των μπαταριών αυτών είναι το υψηλό κόστος τους, λόγω των κυκλωμάτων προστασίας τους, το οποίο όμως μειώνεται δραστικά και θα συνεχίσει να μειώνεται χάρη στην αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικών οχημάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου παρουσιάζουν μειωμένη περιβαλλοντική επίδραση λόγω της ανακυκλωσιμότητας των υλικών που χρησιμοποιούν, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την επαναχρησιμοποίηση μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων για εφαρμογές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

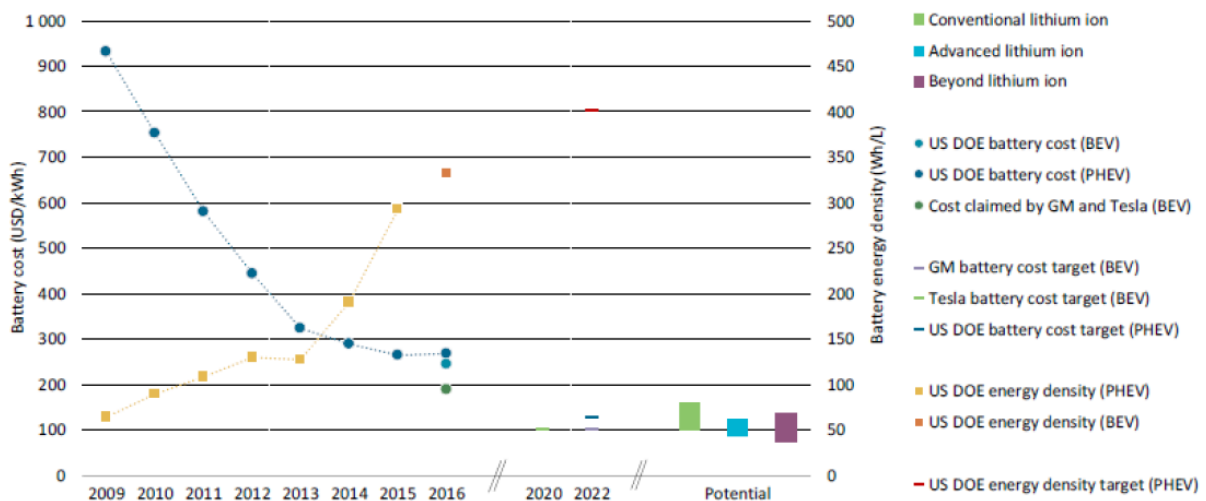
Μπαταρίες Ροής (ZnBr): Οι μπαταρίες αυτές αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία. Ένα χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου συστήματος αποθήκευσης είναι η άμεση σχέση της χωρητικότητας αποθήκευσης με την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρολυτών. Ακόμη, η ισχύς τους καθορίζεται από την ενεργό περιοχή της στοιβάς του στοιχείου (cell

stack). Έτσι, η ενέργεια και η ισχύς είναι δύο ανεξάρτητα μεγέθη, χάρη στο διαχωρισμό του ηλεκτρολύτη και της ενεργού περιοχής της στοίβας του στοιχείου. Εν συγκρίσει με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέως είναι πιο αποδοτικές και έχουν μεγαλύτερο χρόνο εκφόρτισης. Τέλος, η άμεση ανταπόκρισή τους από τη λειτουργία φόρτισης ή εκφόρτισης τις καθιστά κατάλληλες για εγκατάσταση σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση από ΑΠΕ.

3.4 Κόστος, κύκλος ζωής και εφαρμογές μπαταριών ιόντων λιθίου

Το συνολικό κόστος των μπαταριών περιλαμβάνει το αρχικό κόστος της ίδιας της μπαταρίας, καθώς και το κόστος της φόρτισης και συντήρησής της. Το κόστος της μπαταρίας καθορίζεται από το τεχνολογικό πλαίσιο της παραγωγής της μπαταρίας και το κόστος των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται. Η βιομηχανία της παραγωγής μπαταριών έχει βιώσει ριζικές αλλαγές τα τελευταία χρόνια, γεγονός που έχει οδηγήσει στην βελτίωση των εργοστασιακών μεθόδων παραγωγής και το σχηματισμό βιομηχανικών οικονομιών κλίμακας (economies of scale), που προσαρμόζονται στη σταδιακή αύξηση της ζήτησης για μπαταρίες. Η αύξηση αυτή της ζήτησης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάγκη για αύξηση της χρήσης ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και τις μεταφορές, όπου οι διεθνείς συμφωνίες και πολιτικές υπαγορεύουν την σταδιακή μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση. Η ηλεκτροκίνηση μπορεί να συμβάλλει ενεργά στην μείωση της κλιματικής αλλαγής, καθώς έτσι αποφεύγεται η χρήση ρυπογόνων καυσίμων, ειδικά όταν ο ηλεκτρισμός που χρησιμοποιούν προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αύξηση της ζήτησης των μπαταριών, λοιπόν, έχει συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της τιμής τους.

Η έρευνα και η ανάπτυξη στον συγκεκριμένο επιχειρηματικό τομέα έχει οδηγήσει στη δημιουργία μιας ανταγωνιστικής αγοράς μπαταριών, όπου διάφορες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί ή αναπτύσσονται, με τις πιο γνωστές και διαδεδομένες να είναι: Συμβατική ιόντων – λιθίου (conventional lithium-ion), Εξελιγμένη ιόντων – λιθίου (advanced lithium-ion), Διαμεταλλικής ανόδου (intermetallic anode), Προχωρημένη ιόντων – λιθίου (Beyond lithium-ion). Η αγορά των μπαταριών, και ειδικά των μπαταριών ιόντων – λιθίου έχει ευνοηθεί σημαντικά όπως προαναφέρθηκε από την αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικών οχημάτων. Οι πέντε μεγαλύτεροι κατασκευαστές μπαταριών ελέγχουν το 64% της συνολικής χωρητικότητας μπαταριών ιόντων – λιθίου που προορίζονται για ηλεκτρικά οχήματα. Πιο συγκεκριμένα, η Panasonic εφοδιάζει μπαταρίες σε τουλάχιστον 18 μοντέλα, η LGChem σε 12 και η Samsung σε 6. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μείωση του κόστους των μπαταριών ιόντων – λιθίου τα τελευταία χρόνια καθώς και μερικές προβλέψεις/στόχοι για τα επόμενα χρόνια^[8]:



Σχήμα 3.2: Διαχρονική διαμόρφωση τιμής μπαταριών

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των μπαταριών, πέρα από το κόστος τους, είναι ο κύκλος ζωής τους. Ως κύκλος ζωής μια μπαταρίας αναφέρεται ο αριθμός κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης, σε ένα συγκεκριμένο βάθος εκφόρτισης (συνήθως 80%), που η μπαταρία μπορεί να αντέξει προτού η χωρητικότητά της μειωθεί στο 80% της αρχικής της τιμής. Ο κύκλος ζωής αποτελεί μια εκτίμηση για τον αριθμό φορτίσεων και εκφορτίσεων, λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς της γήρανσης της μπαταρίας, αλλά και της αβεβαιότητας των διαδικασιών που την καθορίζουν, όπως ο σχεδιασμός σκευάσματος και η πύκνωση του στρώματος διεπαφής στερεού ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια της ανόδου.

Σύμφωνα με μελέτες, ο κύκλος ζωής της μπαταρίας υπολογίζεται ακριβέστερα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης της απόδοσης της μπαταρίας ενός μοντέλου που δίνει προτεραιότητα στο βάθος εκφόρτισης, τη θερμοκρασία και το τρέχον ρυθμό. Μία παράμετρος εξάρτησης μέσου χρόνου υποδεικνύει την ελάττωση χωρητικότητας λόγω της αύξησης της διεπαφής στερεού ηλεκτρολύτη. Όλες οι έρευνες δείχνουν ότι όσο υψηλότερο είναι το βάθος εκφόρτισης, τόσο μικρότερος είναι ο κύκλος ζωής, και συνεπώς θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες μπαταρίες με χαμηλό βάθος εκφόρτισης κατά την κανονική λειτουργία για την επίτευξη μεγαλύτερων κύκλων ζωής.

Η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών φθίνει με τον χρόνο σαν συνάρτηση ορισμένων παραγόντων που εξηγούνται επιγραμματικά παρακάτω. Σε αυτούς περιλαμβάνονται το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge – SoC), η θερμοκρασία της μπαταρίας, ο χρόνος, ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης (C-rate), ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης και το βάθος εκφόρτισής της (Depth of Discharge – DoD). Ακολουθούν μερικές πληροφορίες για τους παράγοντες αυτούς:

Ονομαστική Χωρητικότητα: Πρόκειται για την χωρητικότητα που έχει η μπαταρία στην αρχή της ζωής της, αμέσως μετά την κατασκευή της.

Εναπομένουσα Χωρητικότητα: Η εναπομένουσα χωρητικότητα είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας μια ορισμένη χρονική στιγμή. Όταν πρόκειται για καινούργια μπαταρία, η ονομαστική και η εναπομένουσα χωρητικότητα ταυτίζονται.

Επίπεδο Φόρτισης (SoC): Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που είναι ικανή η μπαταρία να δώσει σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, προς την εναπομένουσα χωρητικότητα που έχει την χρονική στιγμή εκείνη. Συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό % και δίνεται από τον τύπο:

$$\text{SoC}(t) = \frac{Q_a(t)}{Q_r} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

όπου $Q_a(t)$ η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία την χρονική στιγμή t . Όταν το SoC είναι μηδενικό, η μπαταρία είναι εντελώς άδεια, ενώ όταν το SoC είναι 100% η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη.

Βάθος Εκφόρτισης (DoD): Ορίζεται ως το ποσοστό της ενέργειας που έδωσε ή δέχτηκε η μπαταρία σε κάποια φάση της, προς την εναπομένουσα χωρητικότητα, ή αλλιώς η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών SoC. Δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{DoD} = | \text{SoC}(t_{\text{end}}) - \text{SoC}(t_{\text{start}}) | \cdot 100\% \quad (3.2)$$

όπου t_{end} και t_{start} οι χρόνοι έναρξης και λήξης της φόρτισης/εκφόρτισης.

Ρυθμός φόρτισης (C-rate): Πρόκειται για ένα μέτρο που δείχνει πόσο καταπονείται η μπαταρία κατά την φόρτιση/εκφόρτισή της. 1 C-rate σημαίνει πως το ρεύμα που φορτίζει/εκφορτίζει την μπαταρία είναι τέτοιο ώστε μια γεμάτη μπαταρία θα αποφορτιστεί σε 1 ώρα. Η τιμή του ρυθμού φόρτισης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C = \frac{|I| \cdot (1h)}{Q_r} \quad (3.3)$$

Θερμοκρασία της μπαταρίας: Είναι η μέση θερμοκρασία που παρατηρείται στην μπαταρία μετρημένη σε βαθμούς Kelvin.

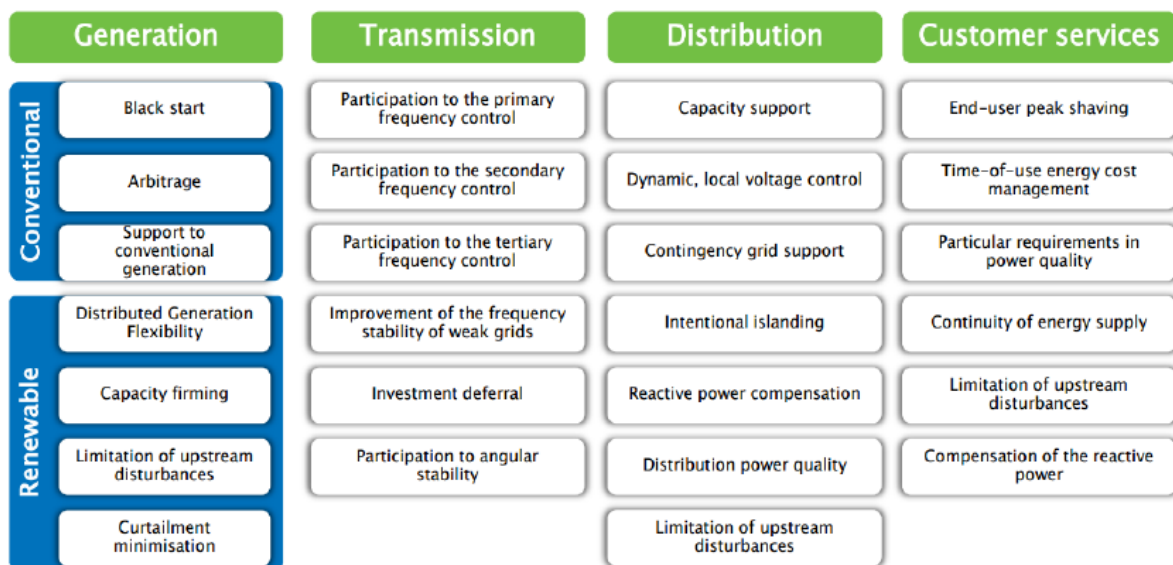
Χρόνος (t): Είναι ο χρόνος στον οποίο παρατηρούμε την μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Συντελεστής Γήρανσης: Δηλώνει το ποσοστό μείωσης της χωρητικότητας της μπαταρίας και είναι ο λόγος της εναπομένουσας χωρητικότητας προς την ονομαστική. Ο συντελεστής γήρανσης είναι πάντοτε μικρότερος ή ίσος της μονάδας.^[7]

Οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου έχουν πολλές εφαρμογές, μερικές εκ των οποίων αναφορικά είναι ως αποθήκευση ενέργειας συνδεδεμένες απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, σε κινητά, φορητούς υπολογιστές, ηλεκτρικά οχήματα, αυτόνομα συστήματα εκτός δικτύου (off-grid systems) και εφαρμογές «έξυπνων» σπιτιών (smart homes) και δικτύων (smart grids). Η ανάλυση των εφαρμογών αυτών, αν και ενδιαφέρουσα, είναι εκτός των πλαισίων της

παρούσας διπλωματικής. Για το λόγο αυτό αναφέρονται παρακάτω οι λειτουργίες των μπαταριών ως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι υπηρεσίες του ηλεκτρικού δικτύου παραδοσιακά παρέχονταν από μεγάλους και συμβατικούς σταθμούς παραγωγής που παρήγαγαν την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούσε το δίκτυο. Στη σύγχρονη εποχή παρατηρείται μια μετάβαση στον τομέα της ενέργειας, όπου χρειάζονται εναλλακτικοί πάροχοι για την παροχή των υπηρεσιών του συστήματος, ειδικά σε περιόδους όπου υπάρχει χαμηλή παροχή συμβατικής ενέργειας. Σε αυτή τη μετάβαση τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Οι υπηρεσίες που προσφέρουν οι μπαταρίες στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και τον τελικό καταναλωτή φαίνονται στο παρακάτω σχήμα^[9]:



Σχήμα 3.3: Εφαρμογές μπαταριών στα διάφορα τμήματα του δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Μαθηματικός Προγραμματισμός (mathematical programming) ή αλλιώς μαθηματική βελτιστοποίηση είναι η εύρεση των κατάλληλων τιμών για τις μεταβλητές ενός προβλήματος, μέσα από ένα σύνολο επιτρεπτών τιμών, με στόχο τη μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση μίας ή περισσότερων συναρτήσεων. Η γενική μορφή ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού είναι η παρακάτω:

Έστω οι πραγματικές συναρτήσεις $g_i, h_i, f : A \rightarrow \mathbb{R}$ όπου A ένα υποσύνολο του \mathbb{R}^n , $i=1,2,\dots,k$ και το διάνυσμα $x \in X$ με X να είναι ένα υποσύνολο του \mathbb{R}^n .

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της συνάρτησης $f(x)$ (4.1)

Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2,\dots,k$ (4.2)

$g_i(x) = 0, \quad i=1,2,\dots,m$ (4.3)

$x \in X, \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ (4.4)

Η σχέση (3.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, δηλαδή τη συνάρτηση της οποίας η τιμή πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Η σχέση (4.2) καλείται περιορισμός ανισότητας, η σχέση (4.3) περιορισμός ισότητας και η σχέση (4.4) περιορίζει το πρόβλημα στο σύνολο των εφικτών-αποδεκτών τιμών του διανύσματος μεταβλητών x .^[6]

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να καλείται να μεγιστοποιηθεί, αντί να ελαχιστοποιηθεί. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς το ζήτημα της μεγιστοποίησης της συνάρτησης $f(x)$ ισοδυναμεί με το ζήτημα της ελαχιστοποίησης της $-f(x)$. Ομοίως, αν υπάρχει περιορισμός $h_i(x) \geq 0$, αυτός ισοδυναμεί με $-h_i(x) \leq 0$. Έτσι όλα τα προβλήματα μπορούν να αναχθούν στην γενική μορφή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι για την αποδοτική επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, που συνήθως ειδικεύονται στις επιμέρους κατηγορίες που παρουσιάζονται παρακάτω. Μερικοί από αυτούς είναι ο αλγόριθμος Simplex, αλγόριθμοι εσωτερικών σημείων (interior point algorithms), οι τεχνικές χαλάρωσης κατά Lagrange, ο αλγόριθμος διακλάδωσης και οριοθέτησης (branch & bound), οι γενετικοί αλγόριθμοι κ.ά.

4.2 Κατηγορίες του μαθηματικού προγραμματισμού

Το γενικό πρόβλημα του μαθηματικού προγραμματισμού, ανάλογα με την μορφή των συναρτήσεων και του συνόλου των εφικτών λύσεων, μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορες κατηγορίες. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά οι μορφές των κυριότερων κατηγοριών

του μαθηματικού προγραμματισμού για λόγους πληρότητας και αναλύονται οι κατηγορίες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

- **Γραμμικός Προγραμματισμός – Linear Programming**

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

$$\begin{aligned} \text{Υπό τους περιορισμούς:} \quad & h_i(x) \leq 0, & i=1,2,\dots,k \\ & g_i(x) = 0, & i=1,2,\dots,m \\ & x \in X, & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

όπου οι συναρτήσεις $h_i(x), g_i(x)$ και $f(x)$ είναι γραμμικές συναρτήσεις της μεταβλητής x .

- **Μη Γραμμικός Προγραμματισμός – Non Linear Programming**

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

$$\begin{aligned} \text{Υπό τους περιορισμούς:} \quad & h_i(x) \leq 0, & i=1,2,\dots,k \\ & g_i(x) = 0, & i=1,2,\dots,m \\ & x \in X, & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

όπου τουλάχιστον μία από τις συναρτήσεις $h_i(x), g_i(x)$ και $f(x)$ είναι μη γραμμική συνάρτηση της μεταβλητής x .

- **Ακέραιος Προγραμματισμός – Integer Programming**

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

$$\begin{aligned} \text{Υπό τους περιορισμούς:} \quad & h_i(x) \leq 0, & i=1,2,\dots,k \\ & g_i(x) = 0, & i=1,2,\dots,m \\ & x \in X, & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

όπου μία ή περισσότερες από τις μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n ανήκουν στο σύνολο των ακεραίων.

- **Μεικτός Ακέραιος Προγραμματισμός – Mixed Integer Programming**

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

$$\begin{aligned} \text{Υπό τους περιορισμούς:} \quad & h_i(x) \leq 0, & i=1,2,\dots,k \\ & g_i(x) = 0, & i=1,2,\dots,m \\ & x \in X, & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

όπου τουλάχιστον μία από τις μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n ανήκει στο σύνολο των πραγματικών αριθμών, ενώ οι υπόλοιπες στο σύνολο των ακεραίων.

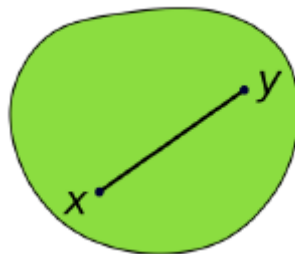
- **Κυρτός Προγραμματισμός – Convex Programming**

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

$$\begin{aligned} \text{Υπό τους περιορισμούς:} \quad & h_i(x) \leq 0, & i=1,2,\dots,k \\ & g_i(x) = 0, & i=1,2,\dots,m \\ & x \in X, & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

όπου οι συναρτήσεις $h_i(x)$, $f(x)$ είναι κυρτές, οι συναρτήσεις $g_i(x)$ είναι αφινικές, καθώς επίσης και το σύνολο X είναι κυρτό σύνολο του Ευκλείδειου χώρου. Ο κυρτός προγραμματισμός είναι υποκατηγορία του μη γραμμικού προγραμματισμού.

Με τον όρο «κυρτό σύνολο του Ευκλείδειου χώρου» εννοείται το σύνολο στο οποίο οποιοδήποτε ευθύγραμμο τμήμα ενώνει δύο στοιχεία του συνόλου βρίσκεται εντός αυτού. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά ο ορισμός του κυρτού συνόλου:



Σχήμα 4.1: Η πράσινη περιοχή αναπαριστά ένα κυρτό σύνολο

Κυρτή συνάρτηση καλείται η συνάρτηση στην οποία οποιαδήποτε ευθεία που ενώνει δύο σημεία της γραφικής της παράστασης βρίσκεται πάνω από την συνάρτηση ή πάνω σε αυτήν. Η μαθηματική διατύπωση του παραπάνω ορισμού είναι η εξής:

Έστω X κυρτό σύνολο σε πραγματικό διανυσματικό χώρο και συνάρτηση $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Η f καλείται κυρτή συνάρτηση αν ισχύει ότι

$$\forall x_1, x_2 \in X, \forall t \in [0,1]: f(tx_1 + (1-t)x_2) \leq tf(x_1) + (1-t)f(x_2)$$

Η σημαντικότερη ιδιότητα μιας κυρτής συνάρτησης είναι ότι κάθε τοπικό ελάχιστο είναι και ολικό ελάχιστο. Αυτό εξασφαλίζει ότι αν με κάποιο τρόπο βρεθεί ένα τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης, τότε θα έχει βρεθεί και το ολικό της ελάχιστο, συνεπώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα έχει λυθεί.

4.3 Τετραγωνικός Προγραμματισμός

Ο τετραγωνικός προγραμματισμός (Quadratic Programming – QP) είναι το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης και αποτελεί μία από τις πιο απλές μορφές του μη-γραμμικού προγραμματισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να περιέχει διγραμμικούς (bilinear) ή μέχρι και δεύτερης τάξης πολυωνυμικούς όρους, και

όσον αφορά τους περιορισμούς αυτοί είναι γραμμικοί και μπορούν να περιέχουν τόσο ισότητες όσο και ανισότητες. Ο τετραγωνικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία σημάτων και εικόνων, στην βελτιστοποίηση οικονομικών χαρτοφυλακίων, στην υλοποίηση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων και αλλού. Στην παρούσα διπλωματική επιλύεται ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού, όπου η αντικειμενική συνάρτηση περιέχει όρους δεύτερης τάξης που προέρχονται από τις συναρτήσεις κόστους των γεννητριών που είναι τετραγωνικές.^[10]

Η γενική μορφή ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού είναι η εξής^[11] :

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης } f(x) := \frac{1}{2} x^T B x - x^T b \quad (4.5)$$

$$\text{Υπό τους περιορισμούς: } \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (4.6)$$

$$A_1 x = c \quad (4.6)$$

$$A_2 x \leq d \quad (4.7)$$

όπου $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ συμμετρικός πίνακας, $A_1 \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $A_2 \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $b \in \mathbb{R}^n$, $c \in \mathbb{R}^m$ και $d \in \mathbb{R}^p$.

4.4 Στοχαστικός Προγραμματισμός

Ο στοχαστικός προγραμματισμός είναι το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ενός μοντέλου που περιέχει αβεβαιότητα. Σε αντίθεση με τα ντετερμινιστικά προβλήματα βελτιστοποίησης που αποτελούνται από γνωστές παραμέτρους, στον πραγματικό κόσμο τα προβλήματα βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζονται συνήθως περιέχουν κάποιες άγνωστες, τυχαίες παραμέτρους. Τα μοντέλα στοχαστικού προγραμματισμού εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι αυτές οι τυχαίες παράμετροι συνήθως ακολουθούν στατιστικές κατανομές που είναι γνωστές ή μπορούν να υπολογιστούν. Στόχος είναι η εύρεση μιας εφικτής λύσης για όσο το δυνατόν περισσότερες πιθανές τιμές των δεδομένων που βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Πιο γενικά, τέτοια μοντέλα κατασκευάζονται, επιλύονται αναλυτικά ή αριθμητικά και αναλύονται με σκοπό να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για λήψη καίριων αποφάσεων. Στην παρούσα διπλωματική αντιμετωπίζεται ένα τέτοιο πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού, όπου γίνεται χρήση της κανονικής κατανομής και των ιδιοτήτων της ώστε οι πιθανοτικοί περιορισμοί να μετατραπούν σε αναλυτική μορφή και να λυθεί εν τέλει ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού.

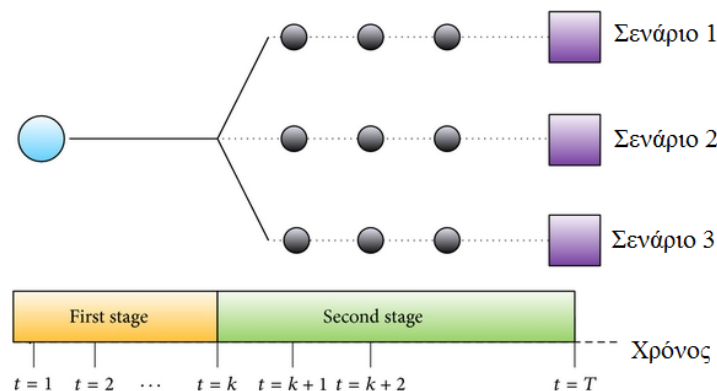
Στη γενική μορφή του προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού ζητείται να βρεθεί ένα σύνολο αποφάσεων χωρίς την πλήρη γνώση για κάποια τυχαία γεγονότα. Αυτές οι αποφάσεις καλούνται *αποφάσεις πρώτου σταδίου (first-stage decisions)* και συνήθως αναπαρίστανται από ένα διάνυσμα x . Αργότερα, προκύπτουν περισσότερες πληροφορίες για ένα τυχαίο διάνυσμα ξ , οι οποίες μπορεί και να επηρεάζονται από τις αποφάσεις που λήφθηκαν στο πρώτο στάδιο. Έτσι, προκύπτουν οι *αποφάσεις δεύτερου σταδίου (second-stage decisions)* ή *διορθωτικές αποφάσεις y*. Τα διανύσματα αυτά είναι τυχαία και χρησιμοποιείται έντονο χρώμα για την διαφοροποίησή τους από τις πραγματικές τους τιμές.

Η γενική μορφή του στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων είναι η εξής:

$$\begin{aligned} \text{Ελαχιστοποίηση της:} & \quad c^T x + E_{\xi} Q(x, \xi) \\ \text{Υπό τους περιορισμούς:} & \quad Ax = b, \\ & \quad x \geq 0, \end{aligned}$$

όπου $Q(x, \xi) = \min\{q^T y \mid Wy = h - Tx, y \geq 0\}$, ξ είναι το διάνυσμα που σχηματίζεται από τα στοιχεία q^T , h^T και T και E_{ξ} συμβολίζει την μαθηματική προσδοκώμενη τιμή με βάση το ξ . Υποτίθεται ότι το W είναι σταθερό. ^[12]

Παρακάτω φαίνεται μια απλή απεικόνιση του στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων:



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων

4.5 Στρατηγική Προβλεπτικού Ελέγχου – Model Predictive Control

Η στρατηγική προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control – MPC) είναι μια στρατηγική ελέγχου που αποτελεί ειδική περίπτωση της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου που αναπτύχθηκε το 1960 και αργότερα. Ο MPC αποτελείται από ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε χρονική στιγμή k . Το κύριο σημείο αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ο υπολογισμός ενός νέου διανύσματος ελέγχου u_k ως είσοδο, που εισέρχεται στο σύστημα και ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς της διαδικασίας. Ένας αλγόριθμος MPC αποτελείται από τα εξής στοιχεία ^[13]:

- Συνάρτηση Κόστους

Πρόκειται για μία αντικειμενική συνάρτηση ελέγχου (ή κόστους) J_k , που αποτελεί ένα βαθμωτό κριτήριο, που μετρά για παράδειγμα τη διαφορά μεταξύ μελλοντικών εξόδων, $y_{k+1/L}$, και μιας καθορισμένης (μελλοντικής) τιμής αναφοράς, $r_{k+1/L}$, ενώ την ίδια στιγμή αναγνωρίζει ότι ο έλεγχος u_k έχει κόστος. Για το λόγο αυτό η τιμή του ελέγχου συχνά προσμετρείται στην J_k . Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση είναι ένα μέτρο της συμπεριφοράς της διαδικασίας σε ένα ορίζοντα πρόβλεψης L . Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τα μελλοντικά διανύσματα ελέγχου $u_{k+1/L}$, αλλά μόνο το πρώτο διάνυσμα ελέγχου u_k χρησιμοποιείται πράγματι στην

υλοποίηση της λύσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για την επόμενη χρονική στιγμή, θέτοντας $k = k + 1$. Η διαδικασία αυτή καλείται μερικές φορές «πρόβλημα ελέγχου ορίζοντα πρόρρησης» ή «πρόβλημα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα» (Receding Horizon Control Problem) και θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω.

- Περιορισμοί

Ένας από τους κύριους λόγους για την επιλογή του MPC είναι το ότι οι περιορισμοί των μεταβλητών της διαδικασίας είναι εύκολα διαχειρίσιμοι. Συνήθεις περιορισμοί όπως περιορισμοί πλάτους εισόδου (input amplitude constraints) και περιορισμοί ρυθμού αλλαγής εισόδου (input rate of change constraints) μπορούν να διαχειρισθούν πολύ πιο αποδοτικά από ότι στα συνηθισμένα συστήματα ελέγχου (PID-control). Αυτό συχνά οδηγεί σε ένα απλό περιορισμό ανισότητας $Au_{k+1|L} \leq b$, που προστίθεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

- Μοντέλο Πρόβλεψης

Ένα βασικό μειονέκτημα του MPC είναι η ανάγκη ύπαρξης ενός μοντέλου του συστήματος, της διαδικασίας, δηλαδή ένα μοντέλο που να περιγράφει τη μετάβαση από την είσοδο στην έξοδο. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανιστικά μοντέλα που προκύπτουν από νόμους διατήρησης. Συχνά, ωστόσο, στην πράξη χρησιμοποιούνται απλά γραμμικά μοντέλα με βάση τα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του MPC είναι ότι οι διασταυρούμενες συζεύξεις (cross coupling) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO) λαμβάνονται υπόψη με το βέλτιστο τρόπο. Ο MPC είναι μια απλή μέθοδος ελέγχου συστημάτων MIMO.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η μέθοδος MPC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη του χειριστή ενός συστήματος. Σε μερικές περιπτώσεις η μέθοδος χρησιμοποιείται συμβουλευτικά για λειτουργίες ελέγχου και όχι για να καθορίσει και να εφαρμόσει τον υπολογισμένο έλεγχο u_k στη διαδικασία. Η μέθοδος MPC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε χρονική στιγμή για να υπολογίσει τους μελλοντικούς βέλτιστους ελέγχους $u_{k|L}$. Έτσι, αποτελεί μια χρήσιμη μεθοδολογία που μπορεί να υπολογίσει και να παρέχει χρήσιμες προτάσεις στους χειριστές του υπό εξέταση συστήματος. Αντίθετα, ένα συμβατικό σύστημα ελέγχου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυτόν τον τρόπο.

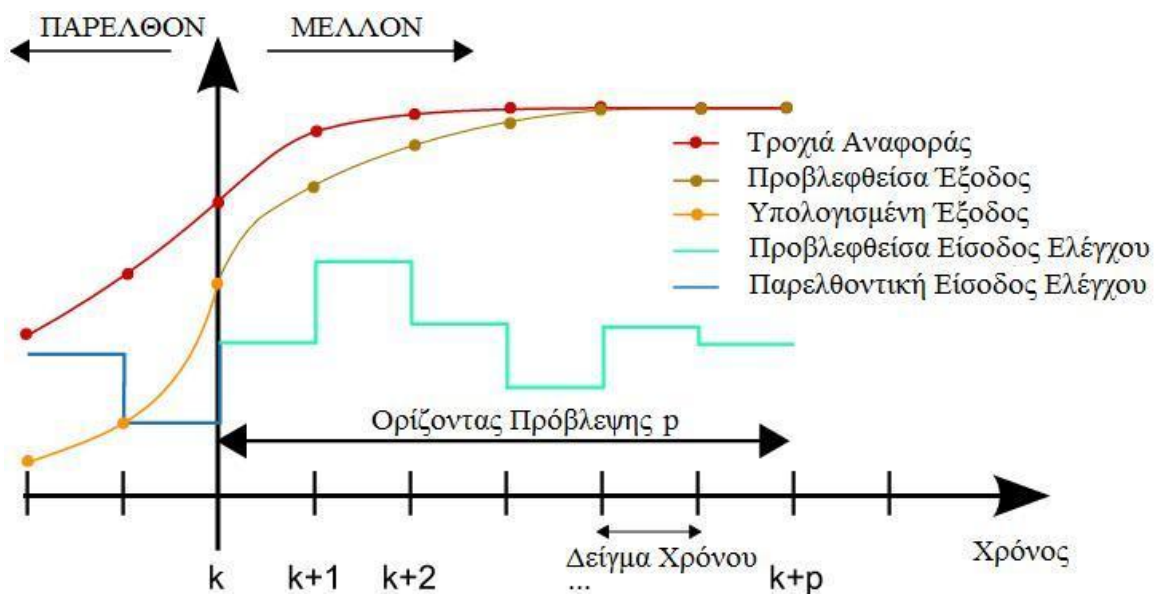
Ο προβλεπτικός έλεγχος περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία τεχνικών ελέγχου κι όχι μόνο μία συγκεκριμένη κατηγορία. Το κοινό χαρακτηριστικό ανάμεσα σε αυτές τις τεχνικές ελέγχου είναι ότι χρησιμοποιούν το μοντέλο του συστήματος ώστε να εκτιμήσουν τη μελλοντική συμπεριφορά των ελεγχόμενων μεταβλητών σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο και να αποφασίσουν για τις απαιτούμενες ενέργειες ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση κόστους. Αυτή η λογική στην οποία βασίζεται έχει τα παρακάτω σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Η βασική ιδέα του ελέγχου μπορεί να είναι καινοτόμα και εύκολα κατανοητή.
- Εφαρμόζεται εύκολα σε μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.
- Λαμβάνει υπόψη πολλά κριτήρια ταυτόχρονα.
- Το μοντέλο μπορεί να περιλαμβάνει και μη γραμμικότητες.
- Εύκολη διαχείριση των εκάστοτε περιορισμών.

- Εύκολη υλοποίηση.
- Τροποποιείται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Ένα από σημαντικότερα μειονεκτήματά του ωστόσο είναι ο μεγάλος αριθμός υπολογισμών που απαιτούνται, εν συγκρίσει με τις κλασσικές τεχνικές ελέγχου. Ακόμη, η ποιότητα του μοντέλου επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του αποτελέσματος ελέγχου, καθώς επίσης αν οι παράμετροι του μοντέλου αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η εκτίμηση αυτής της μεταβολής εντός του ελέγχου.^[14]

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η υλοποίηση της μεθόδου προβλεπτικού ελέγχου με ορίζοντα πρόβλεψης:



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση της λειτουργίας του MPC ^[15]

Στο παραπάνω σχήμα, η προβλεφθείσα είσοδος ελέγχου υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε χρονική στιγμή, μετατοπίζοντας τον ορίζοντα πρόβλεψης, με απώτερο στόχο την μείωση της διαφοράς μεταξύ της προβλεφθείσας εξόδου και της τροχιάς αναφοράς. Συνεπώς στο επόμενο βήμα του σχήματος, το $k+1$, ο αλγόριθμος θα προσπαθήσει να βρει την κατάλληλη είσοδο ελέγχου ώστε να καταφέρει να «ανεβάσει» την καμπύλη της εξόδου και να μειώσει έτσι την απόκλιση από την τροχιά αναφοράς.

4.6 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η μελέτη ενός πραγματικού προβλήματος συχνά χρειάζεται να συνεχιστεί και μετά την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου που αρχικά διαμορφώθηκε. Η ανάλυση ευαισθησίας συνεχίζει την επεξεργασία της βέλτιστης λύσης ώστε να παρέχει πρόσθετη πρακτική αντίληψη του αποτελέσματος. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται ανάλυση ευαισθησίας γιατί εξετάζει πόσο ευαίσθητη είναι η βέλτιστη λύση στις μεταβολές των συντελεστών του μαθηματικού μοντέλου που επιλύθηκε. Η διεργασία αυτή είναι επίσης γνωστή και ως «ανάλυση μεταβελτιστότητας» (postoptimality analysis) επειδή ξεκινά μετά την εύρεση της βέλτιστης λύσης.^[16]

Μερικοί λόγοι για τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση ευαισθησίας σε ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού είναι οι εξής^[17]:

- Η αρχική διαμόρφωση του προβλήματος έγινε με την παραδοχή ότι όλες οι παράμετροι του προβλήματος έχουν γνωστές σταθερές τιμές. Στην πραγματικότητα όμως πολλές από τις παραμέτρους υπολογίζονται προσεγγιστικά ή μπορούν να πάρουν ένα πεδίο από δυνατές τιμές. Για το λόγο αυτό έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί εάν και κατά πόσο αλλάζει η βέλτιστη λύση με τις μεταβολές αυτών των παραμέτρων. Αναζητείται δηλαδή το πόσο ευαίσθητη είναι η βέλτιστη λύση στις μεταβολές των διαφόρων παραμέτρων.
- Με την συνέχιση της ανάλυσης του προβλήματος διαπιστώνεται αρκετές φορές ότι το μοντέλο που κατασκευάστηκε δεν περιγράφει το πραγματικό σύστημα με την επιθυμητή ακρίβεια. Στην περίπτωση αυτή είναι στην κρίση του σχεδιαστή του προβλήματος το αν θα βελτιώσει το μοντέλο εισάγοντας νέους περιορισμούς ή και νέες μεταβλητές απόφασης. Τότε ασφαλώς χρειάζεται ανάλυση για να εξακριβωθεί πως επιδρούν οι αλλαγές αυτές στην βέλτιστη λύση του μοντέλου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν χρειάζεται να επιλυθεί από την αρχή το πρόβλημα. Απλώς εξετάζεται αν η προηγούμενη λύση εξακολουθεί να είναι βέλτιστη και αν δεν είναι χρησιμοποιούνται οι γνωστές μέθοδοι για τον καθορισμό της νέας βέλτιστης λύσης. Στην παρούσα διπλωματική, μετά την κατασκευή του μοντέλου του προβλήματος και την επίλυσή του, ακολουθεί μια ανάλυση ευαισθησίας για το πόσο μεταβάλλεται το κατάλληλο μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης με την μεταβολή μερικών παραμέτρων του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Ο όρος «στοχαστικότητα» στην επιστήμη των πιθανοτήτων αφορά τη δυνατότητα μοντελοποίησης ενός φαινομένου με χρήση πειράματος τύχης. Στην παρούσα διπλωματική η στοχαστικότητα αφορά την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα την αιολική παραγωγή από ανεμογεννήτριες. Τα καιρικά φαινόμενα επηρεάζουν άμεσα την παραγωγή των ΑΠΕ και παρόλο που έχουν αναπτυχθεί εξαιρετικά εργαλεία για την πρόβλεψη του καιρού και ειδικά του ανέμου, ακόμη παρουσιάζεται σφάλμα στην πρόβλεψη της παραγωγής τους.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι έννοιες της επιστήμης των πιθανοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

5.2 Η έννοια της τυχαίας μεταβλητής

Κατά την εκτέλεση ενός πειράματος αυτό που έχει ενδιαφέρον συνήθως δεν είναι το αποτέλεσμα του πειράματος αυτό καθ' αυτό, αλλά ένα, ή περισσότερα, αριθμητικά χαρακτηριστικά του αποτελέσματος αυτού. Κατά τον έλεγχο της ακρίβειας πρόβλεψης της παραγωγής μιας ανεμογεννήτριας, για παράδειγμα, μπορεί να γίνει λήψη σε τακτά χρονικά διαστήματα n μετρήσεων και να εξεταστεί κατά πόσο απέχουν από την τελική ηλεκτρική ενέργεια που απέδωσε η ανεμογεννήτρια. Η σειρά με την οποία παρουσιάζονται τα σφάλματα πρόβλεψης στα χρονικά αυτά διαστήματα δεν έχει σημασία. Αυτό που έχει σημασία είναι το μέγεθος της απόκλισης από την πραγματική παραγωγή και το πόσο συχνά παρατηρείται. Συμβολίζοντας με «ε» την εμφάνιση σφάλματος και με «κ» την ακριβή πρόβλεψη, τότε ο δειγματικός χώρος του πειράματος είναι:

$$\Omega = \{(x_1, x_2, \dots, x_n): x_i = \text{'κ' ή 'ε'}\}$$

Θεωρώντας τώρα την αντιστοιχία X η οποία σε κάθε στοιχειώδες αποτέλεσμα $\omega=(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Omega$ αντιστοιχεί τον αριθμό εμφανίσεων του «ε» στις συντεταγμένες του. Προφανώς η αντιστοιχία αυτή αποδίδει το ενδιαφέρον για το πλήθος των σφαλμάτων πρόβλεψης μεταξύ των n μετρήσεων και αγνοεί τη σειρά με την οποία εμφανίζονται.

Η παραπάνω αντιστοιχία αποτελεί μια απεικόνιση X , έστω, από το σύνολο Ω των 2^n επαναληπτικών διατάξεων των δύο ανά n μέσα στο σύνολο των πραγματικών αριθμών \mathbb{R} . Η τιμή την οποία λαμβάνει η X είναι τυχαία, με την έννοια ότι η τιμή αυτή εξαρτάται από το αποτέλεσμα του πειράματος τύχης και μόνο μετά την εκτέλεσή του γίνεται γνωστή. Είναι έτσι λογικό να αναζητηθεί η πιθανότητα με την οποία η απεικόνιση X λαμβάνει την τιμή $k \in \{0, 1, \dots, n\}$ εκ των προτέρων. Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με την πιθανότητα του ενδεχομένου $E_k \subset \Omega$ του οποίου κάθε στοιχείο έχει k φορές το «ε» και $n-k$ φορές το «κ».

Γενικά αν $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ είναι μια απεικόνιση από ένα δειγματικό χώρο Ω στο σύνολο \mathbb{R} των πραγματικών αριθμών, η πιθανότητα ώστε η τιμή της να ικανοποιεί κάποια ιδιότητα, να ανήκει δηλαδή σε κάποιο υποσύνολο $B \subset \mathbb{R}$ ισούται με την πιθανότητα του υποσυνόλου $\{\omega \in \Omega: X(\omega) \in B\} \subset \Omega$ όταν βέβαια αυτό το υποσύνολο ανήκει στο σύνολο F των ενδεχομένων. Η απαίτηση αυτή οδηγεί στον ακόλουθο ορισμό ^[18]:

Η απεικόνιση $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ονομάζεται τυχαία μεταβλητή όταν:

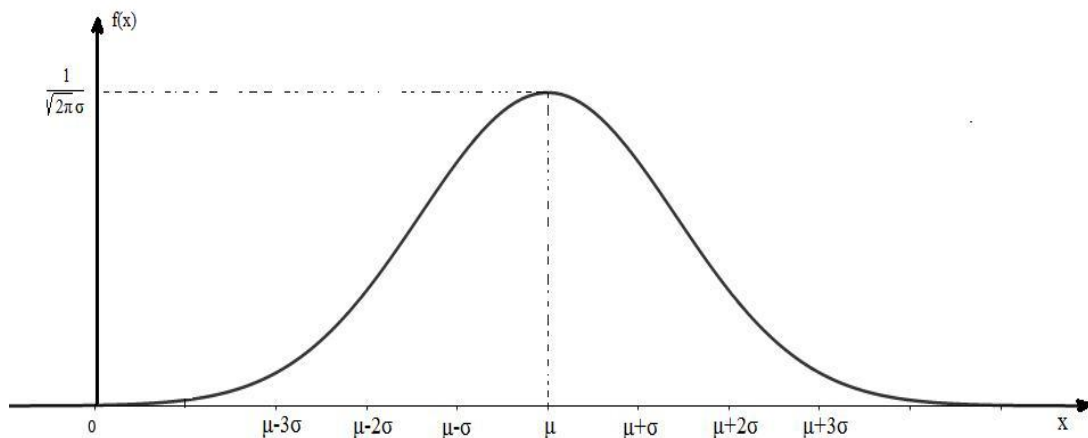
$$\{\omega \in \Omega: X(\omega) \leq x\} \in F, \forall x \in \mathbb{R}$$

5.3 Η Κανονική Κατανομή

Μία από τις πλέον χρήσιμες συνεχείς κατανομές στη Θεωρία Πιθανοτήτων αλλά και στη Στατιστική είναι η Κανονική κατανομή. Η πρώτη ιστορικά εφαρμογή της κατανομής αυτή οφείλεται στον de Moivre (1733) ο οποίος διαπίστωσε ότι οι Διωνυμικές πιθανότητες προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την Κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π). Μία δεύτερη ιστορικά σημαντική εφαρμογή της κανονικής κατανομής οφείλεται στον Gauss (1777 – 1855), ο οποίος διαπίστωσε ότι τα τυχαία σφάλματα στις εργαστηριακές μετρήσεις μιας ποσότητας ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για το λόγο αυτό η κανονική κατανομή είναι επίσης γνωστή και ως κατανομή Gauss.

Η συνεχής τυχαία μεταβλητή X αναφέρεται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή με παραμέτρους μ, σ ($-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$), και γράφεται $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, όταν έχει σ.π.π. την

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right\} \equiv N(x | \mu, \sigma^2), \quad x \in \mathbb{R} \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.1: Κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$

Είναι προφανές ότι η σ.π.π. (5.1) έχει κορυφή το σημείο $x = \mu$ και είναι συμμετρική ως προς τον άξονα που διέρχεται από το μ . Επίσης, στο διάστημα $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ περιέχονται όλες σχεδόν οι «πιθανές» τιμές της τ.μ. X . Συγκεκριμένα $P(|X-\mu| > 3\sigma) \approx 0,003$. Η παράμετρος μ καθορίζει τη θέση της κατανομής πάνω στον άξονα των x , για αυτό και ονομάζεται μέση τιμή ή και παράμετρος θέσης, ενώ η παράμετρος σ καθορίζει το πόσο απλώνεται η κατανομή πάνω στον άξονα των x και ονομάζεται τυπική απόκλιση ή και παράμετρος κλίμακας.

Στην περίπτωση όπου $\mu = 0$ και $\sigma = 1$ η κατανομή $N(0,1)$ ονομάζεται τυποποιημένη Κανονική. Η αντίστοιχη τυχαία μεταβλητή συμβολίζεται με το γράμμα Z , έχει σ.π.π. την

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}z^2\right\}, \quad z \in \mathbb{R} \quad (5.2)$$

και συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (σ.κ.π.), που συμβολίζεται με το γράμμα Φ , την

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy, \quad z \in \mathbb{R} \quad (5.3)$$

Λόγω συμμετρίας αποδεικνύεται εύκολα ότι:

$$\Phi(-z) = 1 - \Phi(z), \quad z \in \mathbb{R} \quad (5.4)$$

Μια ακόμη σημαντική ιδιότητα για την σ.κ.π. $F(x)$ μιας τ.μ. X που ακολουθεί κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$ είναι η εξής:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \quad x \in \mathbb{R} \quad (5.5)$$

Από την οποία προκύπτει και η παρακάτω επίσης σημαντική σχέση:

$$P(\alpha \leq X \leq \beta) = F(\beta) - F(\alpha) = \Phi\left(\frac{\beta-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha-\mu}{\sigma}\right) \quad (5.6)$$

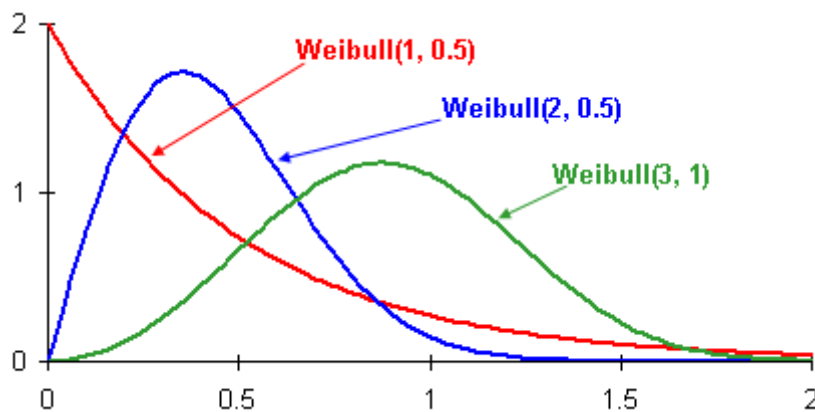
Οι δύο τελευταίες σχέσεις ειδικά θα χρησιμοποιηθούν στην υλοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης αργότερα και είναι εξαιρετικά σημαντικές για την μετατροπή των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή.

5.4 Η Κατανομή Weibull και ο Άνεμος

Η ταχύτητα του ανέμου σε έναν τόπο μεταβάλλεται κάθε στιγμή και η κατανομή της μεταβάλλεται επίσης από εποχή σε εποχή του έτους. Παρόλα αυτά, η κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός έτους επαναλαμβάνεται με πολύ μικρές αποκλίσεις από έτος σε έτος^[19]. Οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, στη διάρκεια ενός έτους, περιγράφονται από την κατανομή πιθανοτήτων (ή συχνοτήτων) Weibull, της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από την εξής σχέση:

$$f(x;\lambda,c) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

όπου $k > 0$ είναι η παράμετρος σχήματος και $c > 0$ είναι η παράμετρος μεγέθους (έντασης) της κατανομής. Η κατανομή Weibull σχετίζεται με ένα πλήθος άλλων κατανομών. Ειδικότερα, για $k = 1$ δίνει την εκθετική κατανομή και για $k = 2$ την κατανομή Rayleigh. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται μερικές κατανομές Weibull.



Σχήμα 5.2: Κατανομές Weibull για διάφορες παραμέτρους

Σημειώνεται ότι η συνάρτηση κατανομής Weibull με παράμετρο μορφής $k = 2$ είναι επίσης γνωστή και ως κατανομή Rayleigh. Η κατανομή Weibull έχει αρκετά πλεονεκτήματα που διευκολύνουν τη χρήση της. Αρχικά είναι μια κατανομή δύο παραμέτρων, γεγονός που την καθιστά πιο γενική από την Rayleigh που έχει μία παράμετρο, αλλά και λιγότερο περίπλοκη από διδιάστατες κατανομές πέντε παραμέτρων. Επίσης, έχειδειχθεί ότι παρέχει μια καλή εικόνα για την παρακολούθηση των δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου. Ακόμη αν είναι γνωστές οι παράμετροι k και c , σε ένα συγκεκριμένο ύψος, τότε υπάρχει μεθοδολογία για την εύρεση των αντίστοιχων μεγεθών σε κάθε άλλο ύψος. Τα χαρακτηριστικά του ανέμου βασίζονται σε διάφορους παράγοντες όπως η γεωγραφία, η τοπογραφία κλπ, και μπορούν να υπολογιστούν παρατηρώντας την συχνότητα της ταχύτητας του ανέμου σε μια περιοχή. Υπάρχουν συγκεκριμένες μέθοδοι με τις οποίες υπολογίζονται οι παράμετροι k , c της κατανομής Weibull^[20].

5.5 Πιθανοτικοί Περιορισμοί – Probabilistic Constraints

Οι πιθανοτικοί περιορισμοί (probabilistic or chance constraints) αν και αφορούν το πρόβλημα βελτιστοποίησης και σχετίζονται με τον μαθηματικό προγραμματισμό που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τοποθετούνται στο παρόν κεφάλαιο λόγω της συνάφειάς τους με την Θεωρία των Πιθανοτήτων και τη στοχαστικότητα που αντιμετωπίζει η παρούσα διπλωματική.

Σε μερικά μοντέλα βελτιστοποίησης οι περιορισμοί δεν είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται σε όλο το φάσμα των περιπτώσεων. Αντίθετα είναι αποδεκτό και επιθυμητό να ικανοποιούνται σε ένα βαθμό εμπιστοσύνης ή αλλιώς με κάποια πιθανότητα. Αυτοί οι πιθανοτικοί περιορισμοί έχουν την παρακάτω μορφή ^[12]:

$$P\{A^i(\omega)x \geq h^i(\omega)\} \geq \alpha^i \quad (5.8)$$

όπου $0 < \alpha^i < 1$ και $i = 1, 2, \dots, I$ είναι ένας δείκτης για τους περιορισμούς που πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα. Είναι δυνατόν ασφαλώς να μοντελοποιηθούν αυτοί οι περιορισμοί σε μια γενική αναμενόμενη μορφή $E_\omega(f^i(\omega, x(\omega))) \geq \alpha^i$ όπου f^i είναι ένας δείκτης του $\{\omega \mid A^i(\omega)x \geq h^i(\omega)\}$, αλλά τότε θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί μια μη συνεχής συνάρτηση.

Στον προγραμματισμό με πιθανοτικούς περιορισμούς η αντικειμενική είναι συχνά μια αναμενόμενη συνάρτηση όπως δείχθηκε νωρίτερα (το E-μοντέλο), ή μπορεί να είναι η διακύμανση ενός αποτελέσματος (αντιστοίχως V-μοντέλο) ή η πιθανότητα ενός συμβάντος, όπως για παράδειγμα η ικανοποίηση των περιορισμών (P-μοντέλο).

Τα κύρια αποτελέσματα με πιθανοτικούς περιορισμούς αναφέρονται σε μορφές ντετερμινιστικών ισοδυνάμων για περιορισμούς της μορφής (5.1). Έχοντας τα ντετερμινιστικά ισοδύναμα των περιορισμών αυτών και γνωρίζοντας ότι οι αντικειμενικές έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες κυρτότητας, τότε αυτές οι συναρτήσεις μπορούν να ενταχθούν στα προβλήματα ανάδρασης (recourse problems) που δόθηκαν νωρίτερα. Έτσι, όλα τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε μαθηματικό προγραμματισμό με πιθανοτικούς περιορισμούς με συναρτήσεις με κατάλληλα χαρακτηριστικά.

Ο βασικός στόχος, λοιπόν, σε προβλήματα με πιθανοτικούς περιορισμούς είναι ο καθορισμός ντετερμινιστικών ισοδυνάμων και των ιδιοτήτων τους. Η διαδικασία αυτή συχνά εμπεριέχει τη χρήση κατανομών πιθανότητας και των ιδιοτήτων τους. Στην παρούσα διπλωματική, όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο που ακολουθεί, γίνεται χρήση των ιδιοτήτων της κανονικής κατανομής για τη μετατροπή των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται έμφαση στην κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στο διάστημα της ώρας, με σκοπό να αντιμετωπιστεί τόσο η διακοπόμενη αιολική παραγωγή, όσο και η αβεβαιότητα στην πρόβλεψή της. Η βέλτιστη σχεδίαση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και η κατάλληλη τοποθέτησή τους στο δίκτυο έχει διερευνηθεί σε άλλες εργασίες, με χρήση μοντέλων βέλτιστης DC ροής φορτίου. Ωστόσο, στις περιπτώσεις αυτές γίνεται η παραδοχή ότι τα σφάλματα στην πρόβλεψη είναι πολύ μικρά και συνεπώς αμελούνται. Σε άλλες εργασίες, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της διαστασιολόγησης και τοποθέτησης σε πολλαπλά στάδια, θεωρώντας όμως τέλεια πρόβλεψη και υποθέτοντας ότι τα δεδομένα παραμένουν σταθερά σε διάστημα μίας ώρας. Ωστόσο, μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας προκύπτουν από τις διακυμάνσεις της παραγωγής ΑΠΕ εντός του διαστήματος της ώρας.

Το πρόβλημα της διαστασιολόγησης μιας μονάδας αποθήκευσης λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει επίσης μελετηθεί σε άλλες εργασίες. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές (persistence scenarios, Monte Carlo sampling κ.ά.) και βλέποντας το πρόβλημα από διαφορετικές σκοπιές, για παράδειγμα και από τη πλευρά ενός ανεξάρτητου παραγωγού με αιολικό πάρκο που συμμετέχει στην ανταγωνιστική αγορά της ενέργειας. Στην διπλωματική εργασία αυτή, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται από τη πλευρά του συστήματος, όπου δηλαδή ο στόχος είναι να διευκρινιστεί η βέλτιστη χωρητικότητα και δυνατότητα φόρτισης/εκφόρτισης που μεγιστοποιεί την αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής και ελαχιστοποιεί το κόστος της συμβατικής παραγωγής για ένα φάσμα από διαφορετικά φορτία, διαφορετική αιολική παραγωγή και διαφορετικά σφάλματα πρόβλεψης.

Ο μαθηματικός προγραμματισμός με πιθανοτικούς περιορισμούς έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς της βελτιστοποίησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποιες υλοποιήσεις ειδικά, με σκοπό να συμπεριλάβουν στη βελτιστοποίηση την αβεβαιότητα του ανέμου, χρησιμοποιούν πιθανοτικούς περιορισμούς τους οποίους αντιμετωπίζουν στη συνέχεια με δειγματοληψία Monte-Carlo, για την παραγωγή σεναρίων προσομοίωσης. Με άλλα λόγια, οι περιορισμοί δεν μετατρέπονται σε αναλυτική μορφή χρησιμοποιώντας κατανομές πιθανοτήτων όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε ευκολότερα προβλήματα στοχαστικού προγραμματισμού, τα οποία με τη σειρά τους ανάγονται σε ντετερμινιστικά προβλήματα. Η προσέγγιση αυτή εν τέλει συγκλίνει στη λύση του στοχαστικού προβλήματος.

Το πλεονέκτημα της μετατροπής των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή είναι ότι έτσι χρειάζεται να λυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης μόνο μία φορά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται πιθανοτικοί περιορισμοί για το ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο ενέργειας μιας μπαταρίας, όπου η χωρητικότητα ενέργειας και ισχύος είναι και οι δύο μεταβλητές βελτιστοποίησης. Οι περιορισμοί αυτοί μετατρέπονται σε

αναλυτική μορφή, γεγονός που επιτρέπει την απευθείας λύση του προβλήματος. Ο έλεγχος των μεταβλητών γίνεται σε χρονικό διάστημα ενός δεκαλέπτου, αντί για μίας ώρας, γεγονός που επιτρέπει στην μπαταρία να αντιμετωπίζει την ωριαία διακύμανση και τις αβεβαιότητες της αιολικής παραγωγής. Επιπλέον, υποτίθεται ότι η μπαταρία λειτουργεί υπό στρατηγική προβλεπτικού ελέγχου (model predictive control scheme), δηλαδή με ορίζοντα πρόρρησης.

Υποθέτοντας αθροισμένες συναρτήσεις κατανομών πιθανότητας για τα βήματα του ορίζοντα βελτιστοποίησης λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι τα σφάλματα πρόβλεψης στην αρχή του ορίζοντα επηρεάζουν τη λειτουργία της μπαταρίας στα επόμενα βήματα. Σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις, ο ορίζοντας πρόρρησης επιτρέπει την αντιμετώπιση του προβλήματος από τη σκοπιά της βέλτιστης διαχείρισης του συστήματος, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα κι όχι απλά λαμβάνοντας υπόψη ένα δείγμα από πιθανές κατανομές του σφάλματος^[21].

6.2 Μοντελοποίηση του συστήματος

Εδώ παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του συστήματος, η αντικειμενική συνάρτηση και οι αρχικοί περιορισμοί του.

6.2.1 Μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης

Όσον αφορά την μοντελοποίηση που χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα αποθήκευσης, στο αρχικό στάδιο είχε την παρακάτω μορφή:

$$E(t + \Delta t) = E(t) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(t) \quad (6.1)$$

$$0 \leq E(t + \Delta t) \leq E_{ss} \quad (6.2)$$

$$-P_{ss} \leq P_{bat}(t) \leq P_{ss} \quad (6.3)$$

Στο μοντέλο αυτό, το επίπεδο ενέργειας κάθε χρονικής στιγμής, $E(t)$ προκύπτει από το επίπεδο ενέργειας στην προηγούμενη χρονική στιγμή προσθέτοντας την ισχύ που εισήλθε ή εξήλθε από την μπαταρία, $P_{bat}(t)$ στο διάστημα εκείνο. Η μεταβλητή $P_{bat}(t)$ λαμβάνει θετικές τιμές όταν η μπαταρία φορτίζεται, και αρνητικές όταν εκφορτίζεται. Η σταθερά η_c είναι ένας συντελεστής που δείχνει πόσο αποδοτικά φορτίζεται/εκφορτίζεται η μπαταρία. Οι μεταβλητές E_{ss} και P_{ss} είναι μεταβλητές βελτιστοποίησης, και είναι η ονομαστική (μέγιστη) χωρητικότητα ενέργειας της μπαταρίας και ο ονομαστικός (μέγιστος) ρυθμός φόρτισής της που απαιτούνται για την βέλτιστη λύση, αντίστοιχα.

Η σταθερά Δt είναι ο χρόνος, ο οποίος είναι ίσος με 10 λεπτά της ώρας, ώστε να γίνεται η βελτιστοποίηση σε ωριαίο επίπεδο. Η ενέργεια που εισέρχεται ή εξέρχεται από την μπαταρία, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή των συμβατικών γεννητριών και η αιολική παραγωγή θεωρούνται σταθερές σε αυτά τα 10 λεπτά.

6.2.2 Μοντελοποίηση Προβλεπτικού Ελέγχου

Στην υλοποίηση που χρησιμοποιήθηκε, υποτίθεται ότι η μονάδα αποθήκευσης, αφού τοποθετηθεί στο σύστημα, λειτουργεί με τη μέθοδο του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου MPC. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή των συμβατικών γεννητριών και η χρήση της μπαταρίας καθορίζονται λύνοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης για έναν χρονικό ορίζοντα H βημάτων, εφαρμόζοντας το αποτέλεσμα του πρώτου βήματος του ορίζοντα, ο οποίος στη συνέχεια μετατοπίζεται κατά ένα βήμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Επομένως, εδώ παρουσιάζεται το ντετερμινιστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών σταδίων που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την βέλτιστη διαστασιολόγηση της μπαταρίας.

Οι συμβατικές γεννήτριες μοντελοποιούνται με χρήση δευτεροβάθμιων συναρτήσεων κόστους που ορίζονται από τους συντελεστές κόστους a_i , b_i , και c_i . Με P_{Gi}^{min} και P_{Gi}^{max} συμβολίζονται αντίστοιχα η ελάχιστη και η μέγιστη ισχύς εξόδου των συμβατικών γεννητριών, ενώ με R_{Gi} οι περιορισμοί που έχουν για τις απότομες μεταβολές στην ισχύ εξόδου τους. Έτσι, προκύπτει η παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί:

$$\min \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Gi}^2(h) + b_i P_{Gi}(h) + c_i) \quad (6.4)$$

Υπό του περιορισμούς:

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}(h) \leq P_{Gi}^{max} \quad (6.5)$$

$$| P_{Gi}(h+1) - P_{Gi}(h) | \leq R_{Gi} \quad (6.6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}(h) - P_L(h) + P_W(h) - P_{bat}(h) = 0 \quad (6.7)$$

$$-P_{ss} \leq P_{bat}(h) \leq P_{ss} \quad (6.8)$$

$$0 \leq E(h+1) \leq E_{ss} \quad (6.9)$$

$$E(H) = E_0 \quad (6.10)$$

$$E(h+1) = E(h) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(h) \quad (6.11)$$

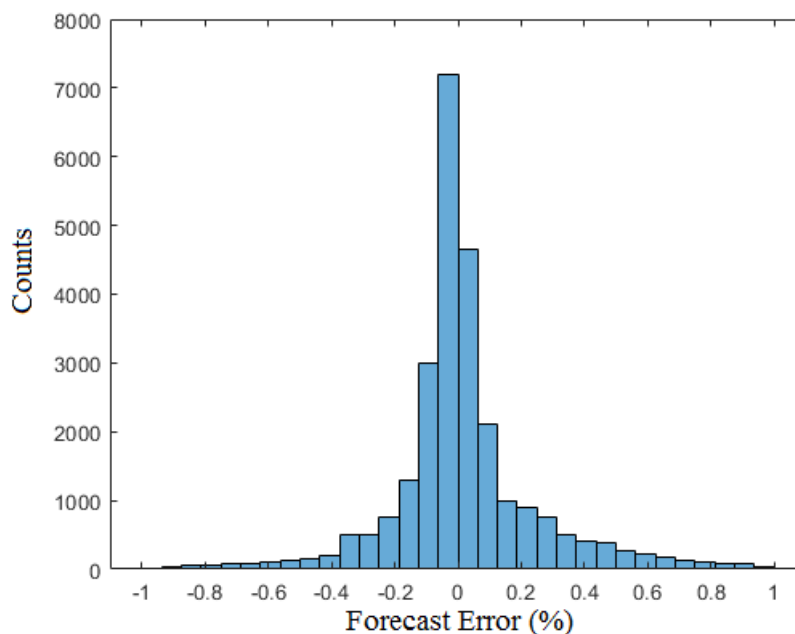
όπου τόσο το φορτίο P_L όσο και η αιολική παραγωγή P_W έχουν τιμές που προκύπτουν από πρόβλεψη.

Στην μετέπειτα υλοποίηση δεν λαμβάνουμε υπόψη το σφάλμα στην πρόβλεψη της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι μια από τις πιθανές προεκτάσεις της εργασίας που αναφέρονται στο τελευταίο κεφάλαιο.

6.2.3 Μοντελοποίηση του Σφάλματος Πρόβλεψης

Για να μπορέσει να ενσωματωθεί η αβεβαιότητα στο σχηματισμό του προβλήματος χρειάζεται ένα μοντέλο για το τυπικό σφάλμα πρόβλεψης. Για το σκοπό αυτό, και δεδομένου ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα τα πραγματικά δεδομένα για το σφάλμα πρόβλεψης, χρησιμοποιήθηκε κατά προσέγγιση το σφάλμα που παρουσιάζεται στην [21], το οποίο προκύπτει από τη σύγκριση μεταξύ δεδομένων πρόβλεψης και των αντίστοιχων πραγματικών δεδομένων για διάστημα 3 μηνών, σε χρονικά διαστήματα όμως 5 λεπτών. Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια χρησιμοποιούνται με τυχαία δειγματοληψία ανά δεκάλεπτο, για να υπάρξει αντιστοιχία με τις υπόλοιπες μεταβλητές.

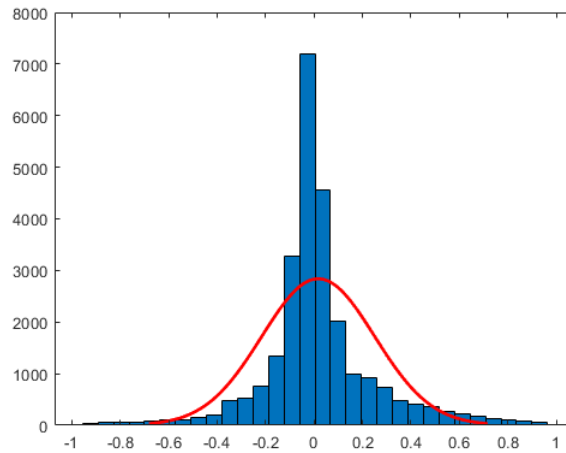
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα της κατανομής που κατασκευάστηκε, που αφορά την επί τοις εκατό απόκλιση μεταξύ προβλεφθείσας και πραγματικής μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου.



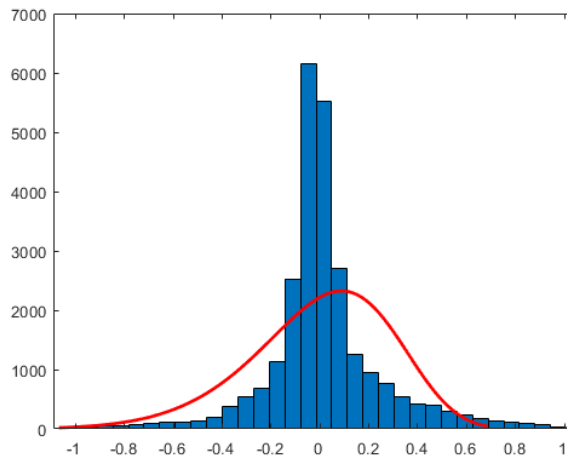
Σχήμα 6.1: Ιστόγραμμα σφαλμάτων πρόβλεψης ανέμου τριών μηνών

Το σφάλμα αυτό μπορεί να προσεγγιστεί από μια κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_p και διακύμανση σ_p^2 . Η υψηλή κυρτότητα του συνόλου αυτού των δεδομένων ενδεχομένως να υποδεικνύει ότι μια άλλη κατανομή, και όχι η κανονική, να είναι πιο ακριβής. Ωστόσο, η προσέγγιση της κατανομής του σφάλματος από την κανονική κατανομή επιτρέπει την εύκολη μετατροπή των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή.

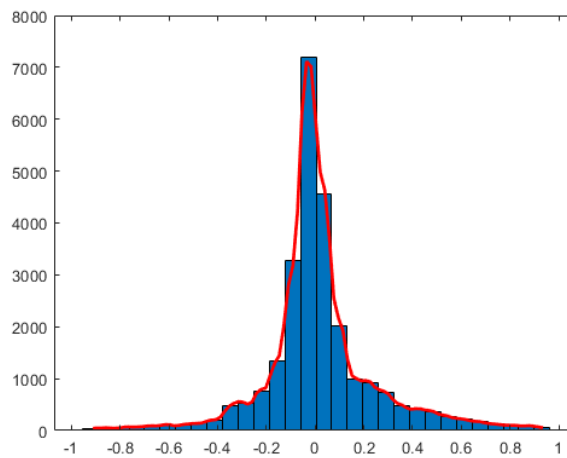
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η προσέγγιση της κατανομής του σφάλματος με την κανονική κατανομή, την κατανομή Weibull και με εκτίμηση πυκνότητας kernel.



Σχήμα 6.2(α): Προσέγγιση σφάλματος από Κανονική Κατανομή



Σχήμα 6.2(β): Προσέγγιση σφάλματος από Κατανομή Weibull



Σχήμα 6.2(γ): Προσέγγιση σφάλματος με εκτίμηση πυκνότητας kernel

Για να χρησιμοποιηθούν αυθαίρετες συναρτήσεις κατανομής θα έπρεπε το πρόβλημα να αντιμετωπιστεί με προσέγγιση Monte-Carlo. Ωστόσο, στην προσέγγιση αυτή απαιτούνται πολλές δοκιμές ώστε οι προσομοιώσεις Monte-Carlo να αναπαριστούν επαρκώς την κατανομή. Οι δοκιμές αυτές είναι δυνατόν να μειωθούν με διάφορες τεχνικές (πχ Latin Hypercube Sampling) αλλά ακόμη και έτσι χρειάζεται ένα πλήθος δοκιμών, σε αντίθεση με την μετατροπή σε αναλυτική μορφή που απαιτεί μόνο μία προσομοίωση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτές τις παραδοχές έχει η προσέγγιση της συνάρτησης κατανομής στα άκρα της. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση με χρήση της κανονικής κατανομής είναι πιο ακριβής στα άκρα της κατανομής του σφάλματος, εν συγκρίσει με μια άλλη κατανομή, όπως για παράδειγμα η Weibull, όταν εξετάζεται το πραγματικό φυσικό μοντέλο της τύρβης του ανέμου, γεγονός που ενισχύει την προτίμηση για χρήση της κατανομής Gauss και της αναφερθείσας αναλυτικής προσέγγισης.

Η διαθέσιμη αιολική ενέργεια λοιπόν μπορεί να οριστεί τώρα ως το άθροισμα της προβλεφθείσας παραγωγής και του σφάλματος πρόβλεψης, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P_w(t) = P_{for}(t) + P_{err}(t) \cdot P_{for}(t) = (1 + P_{err}(t)) \cdot P_{for}(t) \quad (6.12)$$

Συνεπώς, η αιολική ισχύς δεν είναι πλέον μια ντετερμινιστική τιμή, αλλά μια τυχαία μεταβλητή. Παρακάτω περιγράφεται η ένταξη της τυχαίας αυτής μεταβλητής στο σχεδιασμό του προβλήματος χρησιμοποιώντας πιθανοτικούς περιορισμούς.

6.3 Στοχαστικό Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου Δύο Σταδίων

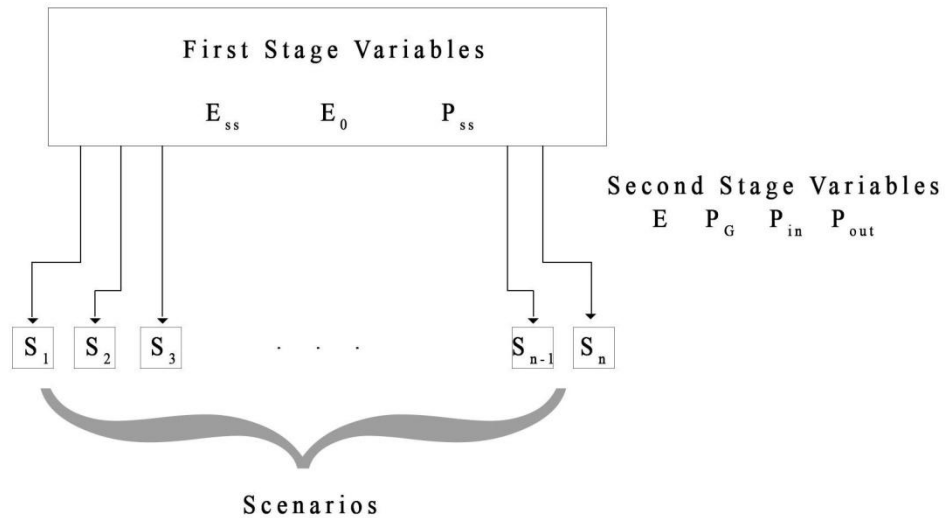
Στην ενότητα αυτή κατασκευάζεται το στοχαστικό μοντέλο βελτιστοποίησης με προβλεπτικό έλεγχο δύο σταδίων, στο οποίο το κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε μία ημέρα λειτουργίας, με φορτίο και αιολική παραγωγή που διαφοροποιούνται. Αρχικά, η μοντελοποίηση γίνεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ορίζοντας πρόρρησης και ύστερα τροποποιείται για να συμπεριληφθεί και η λειτουργία του κυλιόμενου ορίζοντα.

6.3.1 Στοχαστική βελτιστοποίηση δύο σταδίων

Ο στοχαστικός προγραμματισμός προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος ενός συγκεκριμένου πλήθους σεναρίων, ενώ παράλληλα συνυπολογίζει τις διάφορες εξελίξεις που προκαλούν οι διαταραχές.

Στον στοχαστικό προγραμματισμό δύο σταδίων υπάρχουν δύο τύποι μεταβλητών, οι μεταβλητές πρώτου σταδίου, που είναι κοινές για όλα τα σενάρια, και οι μεταβλητές δευτέρου σταδίου, που είναι διαφορετικές για κάθε σενάριο και εξαρτώνται από τις τιμές των μεταβλητών πρώτου σταδίου. Η διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία ταιριάζει απόλυτα σε αυτήν την μορφή του προβλήματος.

Οι μεταβλητές πρώτου σταδίου είναι οι παράμετροι της μπαταρίας E_{ss} , P_{ss} και E_0 και οι μεταβλητές δευτέρου σταδίου είναι οι τιμές των μεταβλητών παραγωγής των συμβατικών γεννητριών $P_G(s,k)$, ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης της αποθήκευσης $P_{bat}(s,k)$ και το επίπεδο ενέργειας της μονάδας αποθήκευσης $E(s,k)$, όπου ο δείκτης s αντιστοιχεί στο εκάστοτε σενάριο (ημέρα) και ο δείκτης k στο χρονικό διάστημα του ορίζοντα βελτιστοποίησης. Η έννοια αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.3: Διαχωρισμός μεταβλητών σταδίων του προβλήματος διαστασιολόγησης

Στο σχεδιασμό δύο σταδίων, όλες οι μεταβλητές δευτέρου σταδίου διαχωρίζονται ανά σενάριο και χρόνο. Οι μεταβλητές πρώτου σταδίου E_{ss} , P_{ss} και E_0 δεν εξαρτώνται από τα k και s . Αυτές οι μεταβλητές είναι κοινές για όλα τα σενάρια. Οι βέλτιστες τιμές τους υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ταυτόχρονα. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος παραγωγής και το κόστος της αποθήκευσης παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\min \left(\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Gi}^2(s,k) + b_i P_{Gi}(s,k) + c_i) \right) + dE_{ss} + eP_{ss} \quad (6.13)$$

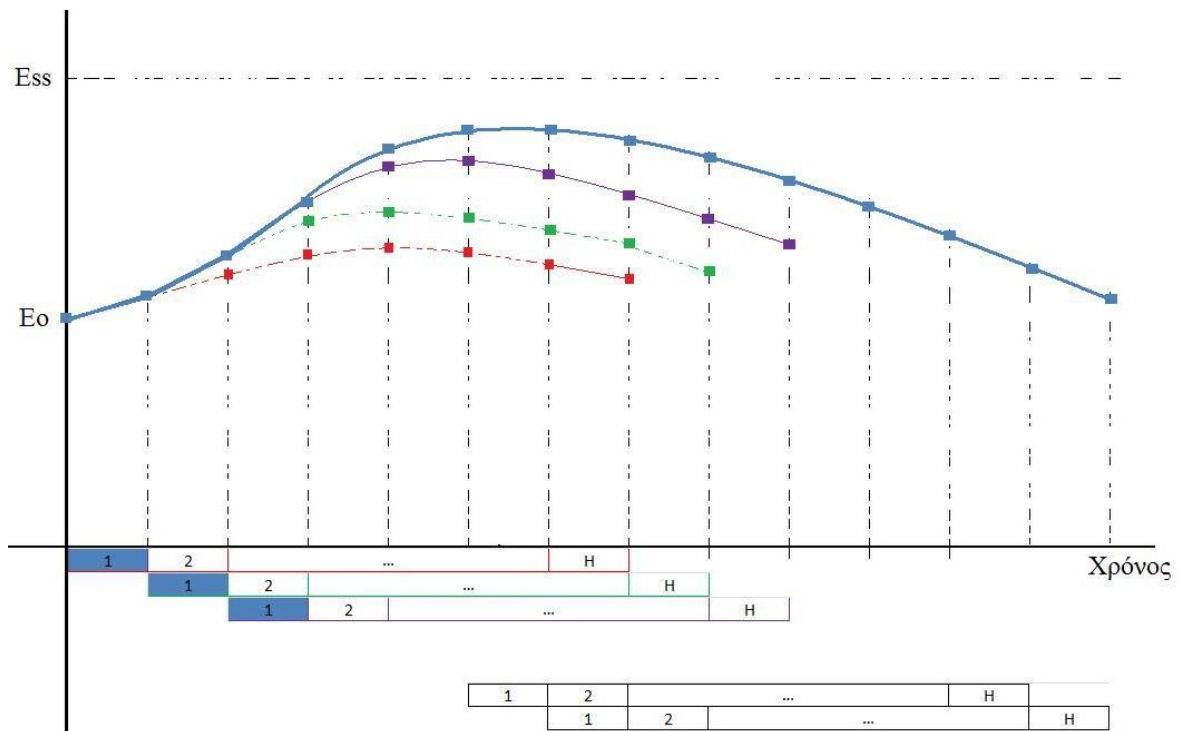
Οι περιορισμοί (6.5) έως (6.11) εξακολουθούν να ισχύουν, αλλά για χρονικό διάστημα $H = K$ και για όλα τα διαφορετικά σενάρια. Η μορφή που έχει παρουσιαστεί ως τώρα αντιστοιχεί σε μια βελτιστοποίηση πολλαπλών βημάτων χωρίς τη μέθοδο ορίζοντα πρόρρησης και τον συνυπολογισμό των σφαλμάτων πρόβλεψης. Στη συνέχεια γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να συμπεριληφθεί στο σχεδιασμό η λειτουργία της συσκευής με τον ορίζοντα πρόρρησης και η μετατροπή μερικών περιορισμών σε πιθανοτικούς.

6.3.2 Εισαγωγή ορίζοντα πρόρρησης

Όπως έχει εξηγηθεί, στον MPC η βελτιστοποίηση γίνεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα H , αλλά εφαρμόζεται μόνο το πρώτο βήμα ελέγχου κάθε φορά. Το σύστημα λειτουργεί καλύτερα με αυτή τη λειτουργία, από ότι αν εφαρμοζόταν η πλήρης σειρά των αποφάσεων ελέγχου σε όλο τον χρονικό ορίζοντα, επειδή δίνει τη δυνατότητα ανάδρασης στο σύστημα και βελτιωμένες προβλέψεις στη διαδικασία λήψης των αποφάσεων. Στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για να ληφθεί υπόψη η μετακίνηση του ορίζοντα και η ανανέωση των αποφάσεων στο πρόβλημα της διαστασιολόγησης της μονάδας αποθήκευσης, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι κυλιόμενοι ορίζοντες βελτιστοποίησης ταυτόχρονα. Η αντικειμενική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$\min \left(\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=1}^K \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Gi}^2(s, k, h) + b_i P_{Gi}(s, k, h) + c_i) \right) + dE_{ss} + eP_{ss} \quad (6.14)$$

όπου η μεταβλητή $P_{Gi}(s, k, h)$ αντιστοιχεί στην παραγωγή της συμβατικής γεννήτριας i , την χρονική στιγμή h μέσα στον ορίζοντα H , ο οποίος ξεκινά τη χρονική στιγμή k του χρονικού διαστήματος του σεναρίου s . Αυτό παρουσιάζεται εποπτικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.4: Απεικόνιση ελέγχου με ορίζοντα πρόρρησης

Η αντικειμενική συνάρτηση που ορίστηκε παραπάνω υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}(s, k, h) - P_L(s, k, h) + P_W(s, k, h) - P_{bat}(s, k, h) = 0, \quad \forall h = 0, 1, \dots, H - 1 \quad (6.15)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}(s, k, h) \leq P_{Gi}^{\max}, \quad \forall h = 0, 1, \dots, H - 1 \quad (6.16)$$

$$-P_{ss} \leq P_{bat}(s, k, h) \leq P_{ss}, \quad \forall h = 0, 1, \dots, H - 1 \quad (6.17)$$

$$0 \leq E(s, k, h + 1) \leq E_{ss}, \quad \forall h = 0, 1, \dots, H - 1 \quad (6.18)$$

$$|P_{Gi}(s, k, h + 1) - P_{Gi}(s, k, h)| \leq R_{Gi}, \quad \forall h = 0, 1, \dots, H - 1 \quad (6.19)$$

$$E(s, k, 1) = E(s, k, H) \quad (6.20)$$

$$E(s, K, 1) = E_0 \quad (6.21)$$

$$E(s, k, 1) = E(s, k-1, 1) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(s, k-1, 1) \quad (6.22)$$

$$E(s, k, h + 1) = E(s, k, h) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(s, k, h), \quad \text{για } 1 < h < H \quad (6.23)$$

Οι περιορισμοί αυτοί ισχύουν για όλα τα σενάρια $s = 1, 2, \dots, N_s$ και όλες τις χρονικές στιγμές $k = 1, 2, \dots, K$. Οι περιορισμοί τώρα καλύπτουν όλα τα σενάρια, τις χρονικές στιγμές και τα σημεία εντός του ορίζοντα. Ο περιορισμός (6.20) βεβαιώνει ότι το επίπεδο ενέργειας της συσκευής αποθήκευσης στην αρχή του κυλιόμενου ορίζοντα είναι ίδιο με το επίπεδο ενέργειας στο τέλος του. Επίσης, το επίπεδο ενέργειας στο τέλος του σεναρίου πρέπει να είναι ίσο με το αρχικό επίπεδο ενέργειας, το οποίο υπαγορεύεται από τον περιορισμό (6.21). Αν δεν υπήρχαν αυτοί οι περιορισμοί, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα κατέληγε στο να εκφορτίζει πλήρως την μπαταρία στη διάρκεια κάθε κυλιόμενου ορίζοντα. Ακόμη, τα σενάρια αποτελούν συνεχόμενες ημέρες, οπότε η αρχική ενέργεια κάθε ημέρας θα πρέπει να είναι ίδια.

6.4 Εισαγωγή της στοχαστικότητας

Στην ενότητα αυτή εισάγονται οι πιθανοτικοί περιορισμοί στο σχεδιασμό του προβλήματος για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Έπειτα, αυτοί οι περιορισμοί τροποποιούνται για να ληφθεί η αναλυτική τους μορφή που θα χρησιμοποιηθεί απευθείας στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

6.4.1 Πιθανοτικοί περιορισμοί του συστήματος αποθήκευσης

Στην υποενότητα 6.3.2 αναφέρθηκε ότι το σφάλμα πρόβλεψης του ανέμου μπορεί να οριστεί ως τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση κατανομής πιθανότητας την κανονική. Ως συνέπεια αυτού, μερικοί ντετερμινιστικοί περιορισμοί που έχουν εισαχθεί σε προηγούμενα βήματα, θα τροποποιηθούν σε πιθανοτικούς περιορισμούς. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να ικανοποιούνται με μια συγκεκριμένη, προκαθορισμένη πιθανότητα. Διαφορετικά, είναι πιθανό το πρόβλημα να καθίσταται μη επιλύσιμο ή να προκύπτει ένα εξωπραγματικά μεγάλο σύστημα αποθήκευσης.

Έτσι, οι νέοι, πιθανοτικοί περιορισμοί για τη διαστασιολόγηση της αποθήκευσης είναι οι εξής:

$$E(k + 1) = E(k) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{\text{bat}}(k) \quad (6.24)$$

$$-P_{\text{ss}} \leq P_{\text{bat}}(k) \leq P_{\text{ss}} \quad (6.25)$$

$$Pr(0 \leq E(k + 1)) \geq \beta \quad (6.26)$$

$$Pr(E(k + 1) \leq E_{\text{ss}}) \geq \beta \quad (6.27)$$

Οι περιορισμοί (6.26) και (6.27) δηλώνουν ότι με πιθανότητα τουλάχιστον β , το επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή πρέπει να βρίσκεται μεταξύ του 0 και της μέγιστης χωρητικότητας E_{ss} . Με τον τρόπο αυτό, η μπαταρία δεν χρειάζεται να αυξάνει το μέγεθός της για να ικανοποιεί ολόκληρη την κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης.

6.4.2 Μετατροπή πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή

Η παραδοχή ότι η τυχαία μεταβλητή ακολουθεί την κανονική κατανομή επιτρέπει την μετατροπή των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή. Για την ενσωμάτωση του σφάλματος πρόβλεψης, η εξίσωση μοντελοποίησης της μπαταρίας τροποποιείται ως εξής:

$$E(k + 1) = E(k) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{\text{bat}}(k) + \Delta t \cdot P_{\text{err}}(k) \cdot P_{\text{for}}(k) \quad (6.28)$$

Έτσι, η εξίσωση μετατρέπεται σε συνάρτηση του σφάλματος, που δίνει την δυνατότητα για τις παρακάτω τροποποιήσεις των περιορισμών (6.26) και (6.27). Για τον περιορισμό (6.27) προκύπτει:

$$f(P_{\text{err}}) = E(k) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{\text{bat}}(k) + \Delta t \cdot P_{\text{err}}(k) \cdot P_{\text{for}}(k) - E_{\text{ss}} \quad (6.29)$$

Οπότε ο πιθανοτικός περιορισμός γίνεται:

$$Pr(f(P_{\text{err}}) \leq 0) \geq \beta \quad (6.30)$$

που δηλώνει ότι το ο περιορισμός πρέπει να ικανοποιείται με πιθανότητα β .

Επειδή το P_{err} ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_p και διακύμανση σ_p^2 , η συνάρτηση $f(P_{err})$ ακολουθεί επίσης την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ' και τυπική απόκλιση σ' , όπου:

$$\mu' = E(k) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(k) + \Delta t \cdot \mu_p \cdot P_{for}(k) - E_{ss} \quad (6.31)$$

$$\sigma' = \Delta t \cdot \sigma_p \cdot P_{for}(k) \quad (6.32)$$

Το αριστερό μέρος της εξίσωσης (6.30) ισούται με τη συνάρτηση κατανομής της κατανομής Gauss που ορίζεται από τις παραμέτρους (6.31), (6.32) στο μηδέν, όπως προκύπτει και από τις ιδιότητες (5.5), (5.6), δηλαδή:

$$\Pr(f(P_{err}) \leq 0) = \Phi\left(\frac{0-\mu'}{\sigma'}\right) \geq \beta \quad (6.33)$$

όπου $\Phi(\cdot)$ είναι η συνάρτηση κατανομής της τυποποιημένης κανονικής κατανομής $N(0,1)$. Αντιστρέφοντας ως προς την Φ και τα δύο μέλη της ανίσωσης και τροποποιώντας την ώστε όλοι οι σταθεροί όροι να βρίσκονται στα δεξιά της ανίσωσης, προκύπτει η εξής σχέση:

$$E(k) + \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(k) - E_{ss} \leq -\Delta t \cdot \sigma_p \cdot P_{for}(k) \cdot \Phi^{-1}(\beta) - \Delta t \cdot \mu_p \cdot P_{for}(k) \quad (6.34)$$

Ομοίως, τροποποιώντας τον περιορισμό (6.26) προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$-E(k) - \eta_c \cdot \Delta t \cdot P_{bat}(k) \leq -\Delta t \cdot \sigma_p \cdot P_{for}(k) \cdot \Phi^{-1}(\beta) + \Delta t \cdot \mu_p \cdot P_{for}(k) \quad (6.35)$$

Ο περιορισμός (6.25) εξακολουθεί να συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο των περιορισμών, όπως και το αρχικό ενεργειακό ισοζύγιο στο οποίο χρησιμοποιείται η προβλεφθείσα αιολική παραγωγή, δηλαδή $P_W(k) = P_{for}(k)$.

Στην μέχρι τώρα σχεδίαση, η μονάδα αποθήκευσης αναλαμβάνει να αντιμετωπίσει το σύνολο των σφαλμάτων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Στην πραγματικότητα όμως, οι συμβατικές μονάδες παραγωγής μπορούν να προσαρμόσουν κι αυτές την παραγωγή τους για να αντιμετωπίσουν τα σφάλματα στην πρόβλεψη. Η μέχρι τώρα σχεδίαση λοιπόν μπορεί να οδηγήσει σε μια υπερβολικά μεγάλη μονάδα αποθήκευσης.

Οι δύο τελευταίοι περιορισμοί συνεπώς πρέπει να τροποποιηθούν και να συμπεριλάβουν μια εφεδρεία για απότομη αύξηση ή μείωση στην παραγωγή των γεννητριών, ώστε να τους επιτρέψουν να προσαρμόζουν την παραγωγή τους και να ανταποκρίνονται στο σφάλμα πρόβλεψης. Οι αναπροσαρμοσμένοι περιορισμοί λοιπόν είναι:

$$E(k) + \eta_c \Delta t P_{bat}(k) - E_{ss} - \Delta t \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi}^d(k) \leq -\Delta t \sigma_p P_{for}(k) \Phi^{-1}(\beta) - \Delta t \mu_p P_{for}(k) \quad (6.36)$$

$$-E(k) - \eta_c \Delta t P_{bat}(k) - \Delta t \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi}^u(k) \leq -\Delta t \sigma_p P_{for}(k) \Phi^{-1}(\beta) + \Delta t \mu_p P_{for}(k) \quad (6.37)$$

Στο άνω όριο, δηλαδή στη σχέση (6.36), η ενέργεια που εισέρχεται στην μπαταρία στην περίπτωση που έχουμε θετικό σφάλμα, μειώνεται κατά την εφεδρεία μείωσης των γεννητριών. Αυτό γιατί στην περίπτωση του θετικού σφάλματος, το σύστημα διαθέτει περισσότερη αιολική παραγωγή από όση αναμενόταν, συνεπώς περισσότερη ενέργεια μπορεί να εισέλθει στην μπαταρία. Αντίστοιχα, οι γεννήτριες θα χρειαστεί σε αυτήν την περίπτωση να παράξουν λιγότερη ενέργεια από όση είχε προγραμματιστεί. Αν πάλι το σφάλμα είναι αρνητικό, η μπαταρία απλώς θα λάβει λιγότερη ενέργεια, χωρίς να επηρεάζεται το άνω όριό της, και η εφεδρεία μείωσης των γεννητριών θα είναι μηδέν, ενώ θα υπάρχει εφεδρεία αύξησης της παραγωγής τους.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του αρνητικού σφάλματος, δηλαδή όταν το σύστημα δέχεται λιγότερη αιολική παραγωγή από όση αναμενόταν, οι γεννήτριες θα χρειαστεί να αυξήσουν την παραγωγή τους. Συνεπώς θα υπάρχει εφεδρεία αύξησης, και η μπαταρία θα χρειαστεί να δώσει λιγότερη ενέργεια στο σύστημα. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή επηρεάζεται το κάτω όριο, και για αυτό στην ισχύ που εξέρχεται από τη μονάδα αποθήκευσης προστίθεται η εφεδρεία αύξησης ώστε να μην επωμιστεί όλο το σφάλμα η συσκευή.

Για τις νέες αυτές μεταβλητές προστίθενται στο σχεδιασμό οι παρακάτω περιορισμοί:

$$|P_{Gi}(s, k, h + 1) - \Delta P_{Gi}^d(s, k, h + 1) - P_{Gi}(s, k, h) - \Delta P_{Gi}^u(s, k, h)| \leq R_{Gi} \quad (6.38)$$

$$|P_{Gi}(s, k, h + 1) + \Delta P_{Gi}^u(s, k, h + 1) - P_{Gi}(s, k, h) + \Delta P_{Gi}^d(s, k, h)| \leq R_{Gi} \quad (6.39)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}(s, k, h) - \Delta P_{Gi}^d(s, k, h) \leq P_{Gi}^{\max} \quad (6.40)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}(s, k, h) + \Delta P_{Gi}^u(s, k, h) \leq P_{Gi}^{\max} \quad (6.41)$$

Οι περιορισμοί αυτοί ισχύουν για $h = 0, 1, \dots, H-1$, μεταξύ των πρώτων βημάτων κάθε κυλιόμενου ορίζοντα, και φυσικά με $\Delta P_{Gi}^d, \Delta P_{Gi}^u \geq 0$. Οι περιορισμοί (6.38), (6.39) αναπαριστούν την περίπτωση όπου μεταξύ δύο διαδοχικών βημάτων, η ισχύς εξόδου των γεννητριών μεταβαίνει από το ελάχιστο όριό της στο μέγιστο και το αντιστρόφως.

Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν εφεδρεία για απότομες μεταβολές και δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές αποφάσεις που λαμβάνονται για τη λειτουργία του συστήματος, συνεπώς πρέπει να διασφαλίζεται ότι τέτοιες μεταβολές στην ισχύ εξόδου των γεννητριών είναι δυνατόν να συμβούν. Οι εφεδρείες αυτές προστίθενται επίσης στην αντικειμενική συνάρτηση με συντελεστές κόστους r_i , γιατί οι απότομες αυτές μεταβολές στην ισχύ εξόδου των γεννητριών τις φθείρουν και θα πρέπει να συμβαίνουν μονάχα όταν αποτελούν την βέλτιστη λύση για το σύστημα.

Η τελική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης λοιπόν είναι η εξής:

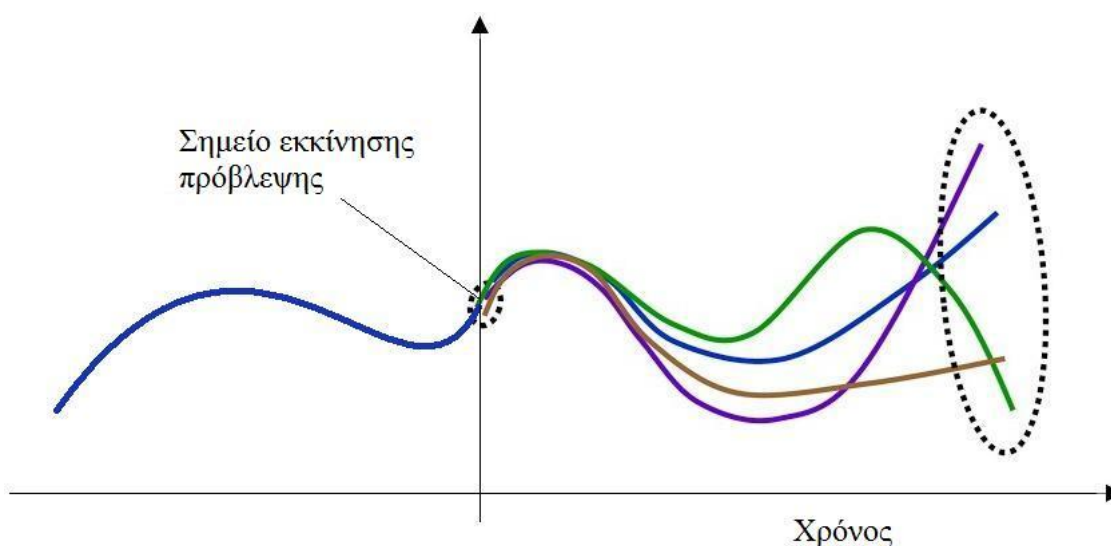
$$\min \left(\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=1}^K \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{i=1}^{N_G} \left(a_i P_{Gi}^2(s, k, h) + b_i P_{Gi}(s, k, h) + c_i + r_i \Delta P_{Gi}^d(s, k, h) + r_i \Delta P_{Gi}^u(s, k, h) \right) \right) + dE_{ss} + eP_{ss} \quad (6.42)$$

6.4.3 Συσσώρευση σφάλματος στο πέρασμα του χρόνου

Στην μέχρι τώρα σχεδίαση του προβλήματος βελτιστοποίησης κάθε χρονικό διάστημα του σεναρίου βελτιστοποιείται ταυτόχρονα και θεωρώντας ταυτόσημες, ανεξάρτητες κατανομές για το σφάλμα πρόβλεψης του ανέμου.

Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν είναι ρεαλιστικό, αφού η πρόβλεψη του ανέμου ανανεώνεται κάθε ώρα ή ανά διάστημα κάποιων ωρών, ενώ οι προβλέψεις μπορεί να γίνονται σε συντομότερα χρονικά διαστήματα. Έτσι, τα σφάλματα πρόβλεψης προς το τέλος του χρονικού ορίζοντα μπορεί να είναι μεγαλύτερα από τα σφάλματα στην αρχή του. Κατά συνέπεια, η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης αλλάζει με βάση το πέρασμα του χρόνου και οι αποκλίσεις της αυξάνονται στο βάθος του ορίζοντα.

Αυτό παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, όπου φαίνεται ότι οι προβλέψεις στην αρχή του χρόνου είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, αλλά απομακρύνονται σημαντικά προς το τέλος τους.



Σχήμα 6.5: Αυξανόμενη απόκλιση προβλέψεων με το πέρασμα του χρόνου

Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι αν και η μέση τιμή όλων των διαφορετικών αποκλίσεων ενδέχεται να είναι η πιο πιθανή, δεν θα ήταν σωστό να επιλυθεί το πρόβλημα με βάση αυτή, καθώς ενδέχεται οι πραγματικές τιμές σε μερικά χρονικά διαστήματα να είναι αρκετά μεγαλύτερες ή μικρότερες από τη μέση πρόβλεψη. Λαμβάνοντας τη μέση τιμή και επιλύοντας ως προς αυτήν δεν θα επιτρεπόταν στην βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης να αντιμετωπίσει ακραίες τιμές και συνεπώς το αποτέλεσμα ενδέχεται να ήταν μικρότερο από το πραγματικά απαιτούμενο.

Ο πιθανοτικός περιορισμός εφαρμόζεται στο σύστημα αποθήκευσης και για αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι αποκλίσεις στο επίπεδο ενέργειας σε σχέση με το ντετερμινιστικό επίπεδο ενέργειας των τέλειων προβλέψεων αθροίζονται με το πέρασμα του χρονικού ορίζοντα. Για παράδειγμα, αν σε κάποιο χρονικό βήμα αποφασιστεί η φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας λόγω ενός σφάλματος στην πρόβλεψη του ανέμου, αυτή η απόφαση θα επηρεάσει την μετέπειτα λειτουργία της μπαταρίας και πρέπει για αυτό να ληφθεί υπόψη ως συσσώρευση του σφάλματος. Επειδή η κατανομή του σφάλματος θεωρείται κανονική και

υποτίθεται ότι κάθε χρονικό διάστημα έχει ανεξάρτητη κατανομή, αυτές οι παράμετροι μπορούν να αθροίζονται σε κάθε βήμα του κυλιόμενου ορίζοντα, αναπαριστώντας την διάδοση των σφαλμάτων πρόβλεψης. Οι όροι $\mu_p P_{for}$ και $\sigma_p P_{for}$ στις σχέσεις (6.36) και (6.37) αντικαθίστανται από τους παρακάτω όρους για κάθε βήμα του ορίζοντα πρόρρησης, ώστε να αναπαριστούν την άθροιση του σφάλματος:

$$\mu_h P_{for}(h) = \sum_{i=0}^h \mu_p(i) P_{for}(i) \quad (6.43)$$

$$\sigma_h P_{for}(h) = \sqrt{\sum_{i=0}^h (\sigma_p(i) P_{for}(i))^2} \quad (6.44)$$

για $h = 0, 1, \dots, H-1$.

6.4.4 Χαλάρωση των πιθανοτικών περιορισμών

Καθώς το σφάλμα αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου, η ικανοποίηση των πιθανοτικών περιορισμών με πιθανότητα β γίνεται ολοένα και δυσκολότερη. Για αυτό, η πιθανότητα β χρειάζεται επίσης να αναπροσαρμόζεται με βάση την τρέχουσα θέση στον ορίζοντα πρόρρησης και να μειώνει την ανάγκη για ικανοποίηση των περιορισμών. Ορίζοντας ως β' την πιθανότητα που πρέπει να ικανοποιείται στο πρώτο βήμα του κυλιόμενου ορίζοντα, η πιθανότητα β θα αναπροσαρμόζεται ως εξής:

$$\beta_h = \frac{\beta'}{\sqrt{h+1}} \quad (6.45)$$

για $h = 0, 1, \dots, H-1$. Με την μετατροπή αυτή, η πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών θα επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση των αρχικών β' με μ' και σ' , αφού προσαρμόζεται στις αλλαγές των παραμέτρων της κατανομής αλλά παραμένει σταθερή για τα πρώτα βήματα κάθε ορίζοντα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, τα δεδομένα που δόθηκαν ως είσοδος στο μοντέλο που κατασκευάστηκε και τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Η λειτουργία του μοντέλου ελέγχθηκε για διάφορες τιμές των παραμέτρων του, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά.

7.2 Εργαλεία επίλυσης

Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε με χρήση του προγράμματος Matlab και της εργαλειοθήκης YALMIP. Η εργαλειοθήκη YALMIP αρχικά δημιουργήθηκε για να κατευθύνει προγραμματιστικά τα δεδομένα στους επιλύτες κάνοντας έτσι τον τρόπο προγραμματισμού ευκολότερο και αποδοτικότερο. Στην πορεία, εξελίχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρει επίλυση σε μικτά γραμμικά συστήματα (MILP). Το YALMIP αποτελεί μια νέα, έξυπνη και ευέλικτη γλώσσα μοντελοποίησης για προηγμένα μοντέλα και επίλυση κυρτών και μη κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Διατίθεται ως εργαλειοθήκη του Matlab, χωρίς ωστόσο να ανήκει στην ίδια την εταιρεία παραγωγής.

Αρχικά αναπτύχθηκε με στόχο να μοντελοποιήσει θετικά ημιορισμένα αντικείμενα και στη συνέχεια να τα επιλύσει σε περιβάλλον εξωτερικών επιλυτών (solvers). Η ταχεία προτυποποίηση ενός θετικά ημιορισμένου αλγορίθμου μπορεί να επιτευχθεί σε μερικά λεπτά χρησιμοποιώντας τυπικές εντολές του Matlab, καθιστώντας τους περισσότερους χρήστες ικανούς να μοντελοποιήσουν και να επιλύσουν το δικό τους πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η σύγχρονη έκδοση του YALMIP υποστηρίζει ένα μεγάλο εύρος κατηγοριών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Ένας μεγάλος αριθμός επιλυτών συνδέονται με το YALMIP, το οποίο αυτόματα χρησιμοποιεί τον καταλληλότερο που μπορεί να βρει, εκτός αν ο χρήστης επιλέξει έναν συγκεκριμένο. Η χρήση του YALMIP μπορεί να συνδυαστεί επίσης με την εργαλειοθήκη MPT, προκειμένου να επιλυθούν ορισμένα πολυπαραμετρικά προβλήματα. Το YALMIP έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει το είδος του προβλήματος που καλείται να επιλύσει και να επιλέγει τον πλέον κατάλληλο solver για να το φέρει εις πέρας. Αν δεν υπάρχει διαθέσιμος ο κατάλληλος επιλύτης, τότε το YALMIP προσπαθεί να τροποποιήσει το πρόβλημα έτσι ώστε να είναι δυνατόν να επιλυθεί.

Το βασικό κίνητρο για τη χρήση του YALMIP είναι η γρήγορη ανάπτυξη αλγορίθμων, και το γεγονός ότι η γλώσσα γραφής αντιστοιχεί σε κανονική γλώσσα σύνταξης σε

περιβάλλον Matlab. Επομένως, το YALMIP αποτελεί ένα εξαιρετικά εύχρηστο και απλό εργαλείο.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που διαθέτει, είναι το γεγονός ότι βρίσκει εφαρμογή σε μια πληθώρα περιπτώσεων μοντελοποίησης, επιτρέποντας στο χρήστη να επικεντρωθεί στο μοντέλο υψηλού επιπέδου, ενώ αυτό φροντίζει για την μοντελοποίηση χαμηλού επιπέδου, ώστε να διασφαλιστούν όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά και αριθμητικά περισσότερα μοντέλα^[22]. Στην παρούσα επίλυση τα δεδομένα δεν υπήρξε ανάγκη να πινακοποιηθούν και να οδηγηθούν στον επιλύτη, διότι το YALMIP κάνει αυτόματα την πινακοποίηση, γεγονός που καθιστά τον κώδικα εύκολα διαχειρίσιμο και οι αλλαγές στις παραμέτρους ή την σχεδίαση είναι εύκολες.

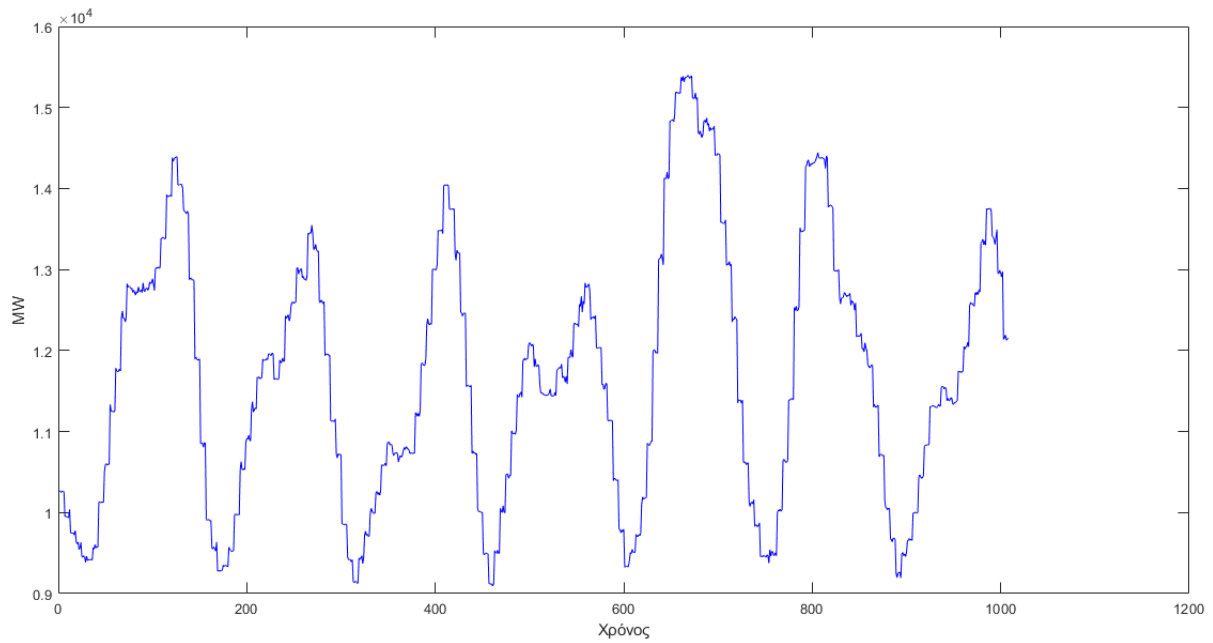
Όσον αφορά τον επιλύτη (solver) που χρησιμοποιήθηκε από το YALMIP στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αυτός ήταν ο MOSEK. Ο MOSEK είναι ένα πακέτο λογισμικού για την επίλυση προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού, κατάλληλο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως αυτό που αντιμετωπίστηκε εδώ.

7.3 Δεδομένα εισόδου

Η επίλυση του προβλήματος έγινε για χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας, χρησιμοποιώντας ορίζοντα έξι δεκαλέπτων, αλλά και χωρίς ορίζοντα πρόρρησης για εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το μήκος του κάθε σεναρίου είναι μία ημέρα, που αντιστοιχεί σε $K=144$ δεκάλεπτα. Για τους συντελεστές κόστους της μπαταρίας χρησιμοποιούνται οι τιμές που δίνονται στην [21], και συγκεκριμένα στις περισσότερες προσομοιώσεις οι τιμές που αντιστοιχούν σε μπαταρίες ιόντων λιθίου, δηλαδή $d = 600€/kWh$, $e = 400€/kW$ και $\eta_c = 85\%$. Όσον αφορά τα υπόλοιπα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

▪ Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

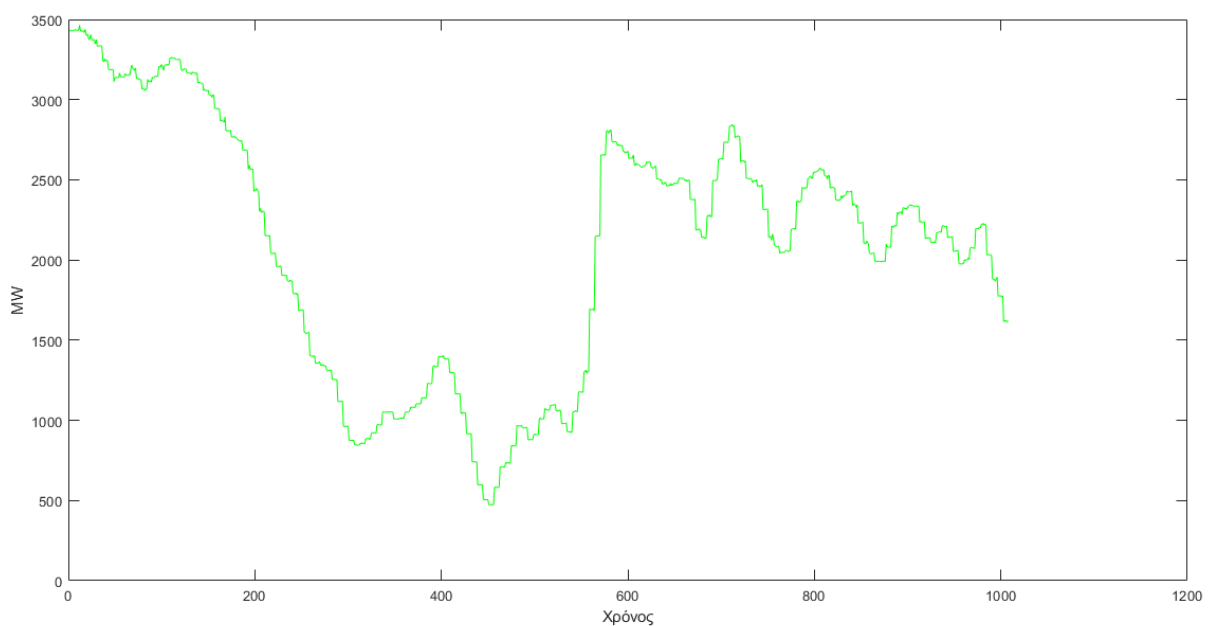
Το ηλεκτρικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από δεδομένα του εργαστηρίου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας του Ε.Μ.Π., το οποίο τροποποιήθηκε ελαφρώς ώστε να είναι ίδιας τάξεως μεγέθους με αυτό που παρουσιάστηκε στην [21]. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η χρονολογική καμπύλη φορτίου για διάστημα μίας εβδομάδας.



Διάγραμμα 7.1: Καμπύλη φορτίου μίας εβδομάδας

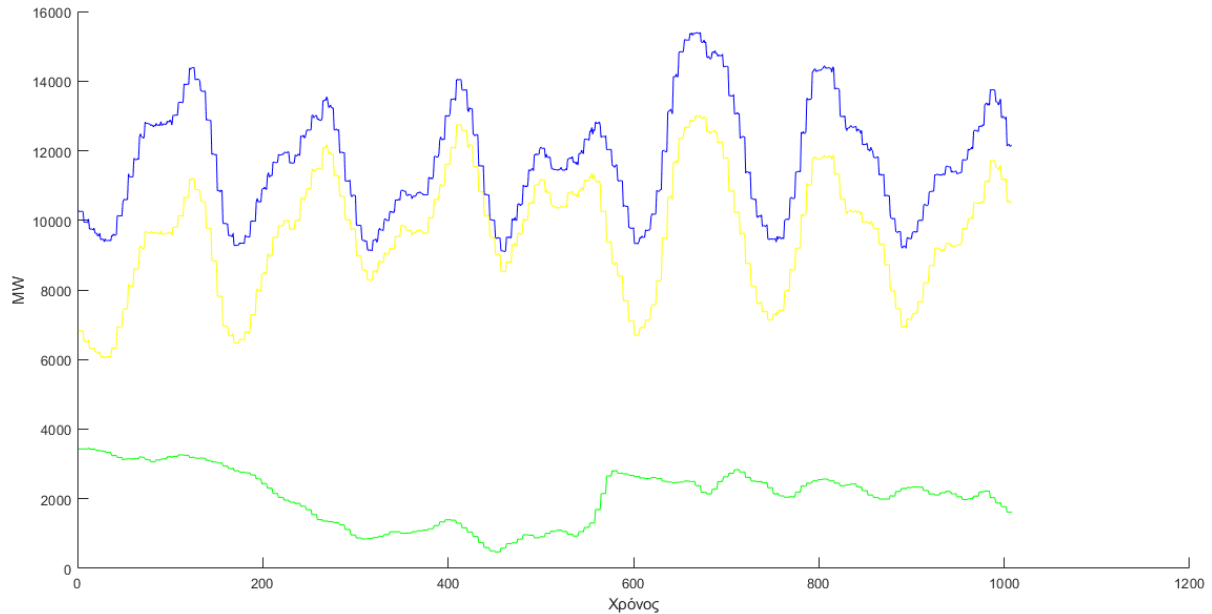
▪ Αιολική Παραγωγή

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αιολική παραγωγή προέκυψαν από πραγματικά δεδομένα παραγωγής μιας ανεμογεννήτριας σε διάστημα ενός έτους ανά ώρα, τα οποία τροποποιήθηκαν ώστε να διαφοροποιούνται ανά δεκάλεπτο και να είναι ίδιας τάξεως μεγέθους όπως στην [21]. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αιολική παραγωγή για διάστημα μίας εβδομάδας:



Διάγραμμα 7.2: Αιολική παραγωγή μίας εβδομάδας

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται σε κοινό διάγραμμα, το ηλεκτρικό φορτίο με μπλε χρώμα, η αιολική παραγωγή με πράσινο και η συνολική ζήτηση του συστήματος με κίτρινο χρώμα.



Διάγραμμα 7.3: Συνολική ζήτηση και αιολική παραγωγή μίας εβδομάδας

▪ Συμβατικές Γεννήτριες

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις συμβατικές γεννήτριες ήταν οι συντελεστές κόστους a_i , b_i και c_i , οι συντελεστές κόστους αυξομείωσης της ισχύος εξόδου r_i , η μέγιστη και ελάχιστη ισχύς εξόδου τους και η δυνατότητά τους για αυξομείωση της ισχύος εξόδου τους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι επτά γεννήτριες του IEEE συστήματος 57 ζυγών και οι συντελεστές κόστους τους από το MATPOWER^[23]. Αναλυτικά, τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των συμβατικών γεννητριών φαίνονται παρακάτω:

Παράμετροι συμβατικών γεννητριών			
Γεννήτρια i	$P_{g \max}$ (MW)	$P_{g \min}$ (MW) (10% · P_{\max})	Ramping Capacity (MW) (8% · P_{\max})
$i = 1$	7000	700	560
$i = 2$	3000	300	240
$i = 3$	5500	550	440
$i = 4$	3000	300	240
$i = 5$	6000	600	480
$i = 6$	3000	300	240
$i = 7$	6500	650	520
Σύνολο	34000	3400	2720

Πίνακας 7.4: Παράμετροι συμβατικών γεννητριών

Συντελεστές Κόστους				
Γεννήτρια i	a	b	c	r
$i = 1$	0.2	50	700	150
$i = 2$	0.01	100	300	80
$i = 3$	0.25	50	550	100
$i = 4$	0.01	100	300	80
$i = 5$	0.05	50	600	110
$i = 6$	0.01	100	300	80
$i = 7$	0.08	50	650	120

Πίνακας 7.5: Συντελεστές κόστους συμβατικών γεννητριών

Όσον αφορά τους συντελεστές κόστους r_i που αφορούν τις μεταβολές στην ισχύ εξόδου των γεννητριών, χρησιμοποιήθηκε αυτή η τάξη μεγέθους λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του [24] όπου βρίσκεται συντελεστής κόστους περί τα 130\$/MWh για υψηλή διείδυση ΑΠΕ.

7.4 Αποτελέσματα

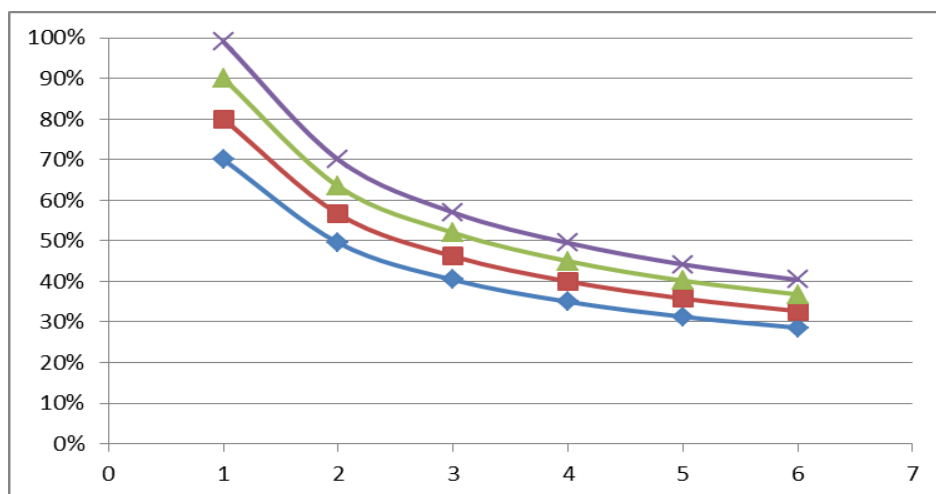
Οι προσομοιώσεις έγιναν για χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας δηλαδή για πλήθος σεναρίων $N_{scen} = 7$. Σε αυτές τις προσομοιώσεις, έγινε μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς την πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών β' . Στη συνέχεια, για διάρκεια μιας εβδομάδας και πιθανότητα ικανοποίησης $\beta' = 90\%$ έγινε διερεύνηση σχετικά με τη χρήση διαφορετικών τύπων μπαταριών. Έπειτα, διερευνάται η επίδραση της χαλάρωσης της πιθανότητας ικανοποίησης των περιορισμών, εξετάζοντας τα αποτελέσματα για 1 εβδομάδα χωρίς να γίνεται χαλάρωση της πιθανότητας. Τέλος, εξετάζεται η λειτουργία του μοντέλου στην περίπτωση που η αιολική παραγωγή είναι πολύ μεγάλη, με παραμέτρους $N_{scen} = 7$, $Horizon = 6$ και $\beta' = 90\%$.

- Δοκιμές με χαλάρωση της πιθανότητας ικανοποίησης των περιορισμών

Εδώ, όλες οι παράμετροι κρατούνται σταθερές και τροποποιείται μόνο η πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών. Ειδικότερα, οι προσομοιώσεις αφορούν το χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας, με ορίζοντα πρόρρησης 6 δεκαλέπτων, με τα δεδομένα γεννητριών που προαναφέρθηκαν. Όσον αφορά την τεχνολογία της μπαταρίας που χρησιμοποιείται εδώ, πρόκειται για μπαταρία ιόντων λιθίου, η οποία έχει παραμέτρους $d = 600€/kWh$, $e = 400€/kW$ και $\eta_c = 85\%$. Οι τιμές με τις οποίες πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί σε κάθε βήμα του κυλιόμενου ορίζοντα φαίνονται παρακάτω:

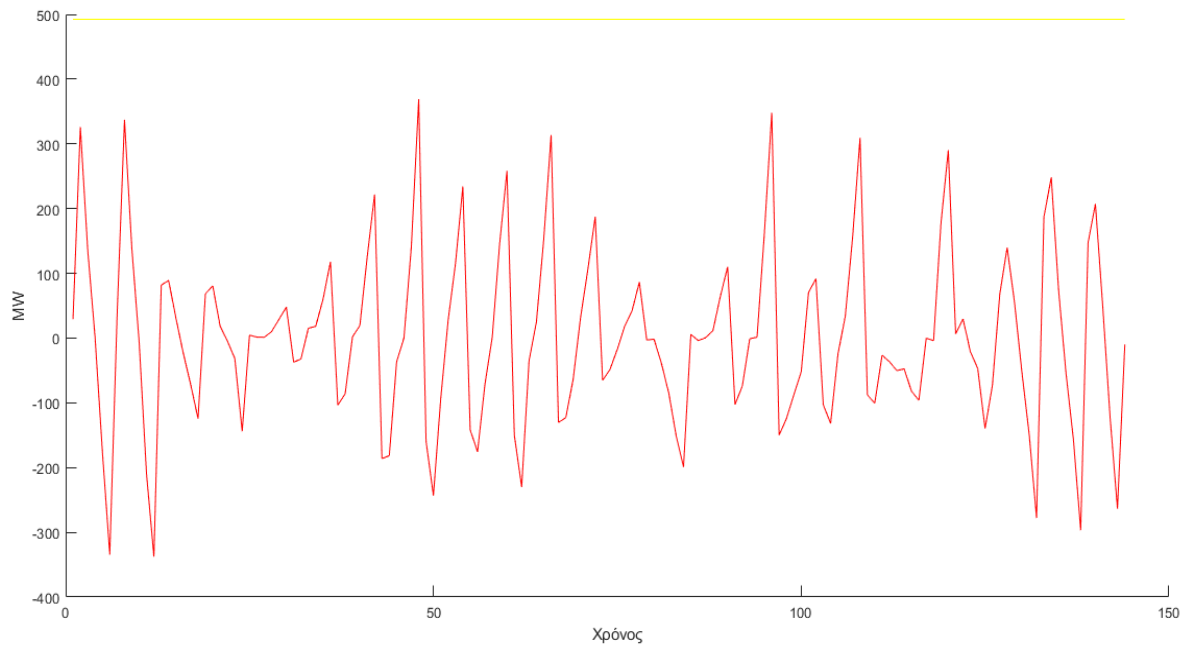
h = 1	h = 2	h = 3	h = 4	h = 5	h = 6
70%	49,50%	40,40%	35%	31,30%	28,60%
80%	56,60%	46%	40%	35,80%	32,70%
90%	63,40%	52%	45%	40,20%	36,80%
99%	70%	57%	49,50%	44,20%	40,40%

Πίνακας 7.6: Ρυθμός μείωσης της πιθανότητας

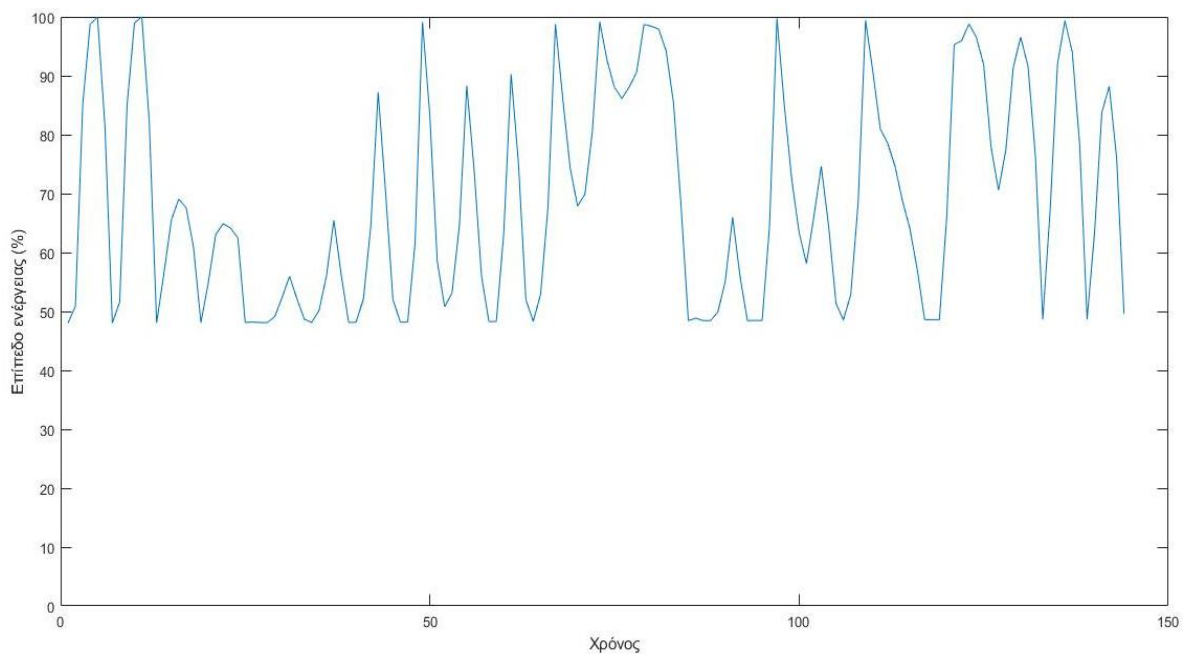


Διάγραμμα 7.7: Απεικόνιση ρυθμού μείωσης πιθανότητας

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ενδεικτικά για $\beta'=90\%$ η ισχύς που εισέρχεται (θετική τιμή) ή εξέρχεται (αρνητική τιμή) από την μπαταρία σε κάθε χρονική στιγμή και το επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας για τη δεύτερη ημέρα της εβδομάδας.



Διάγραμμα 7.8: Εισερχόμενη/Εξερχόμενη ισχύς της μπαταρίας

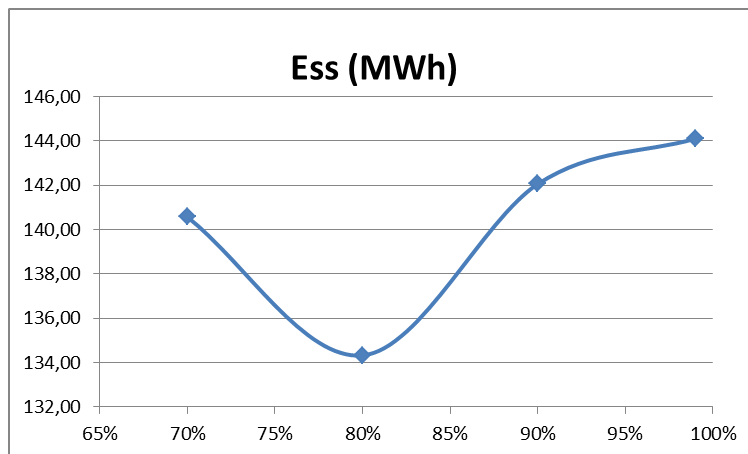


Διάγραμμα 7.9: Επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας

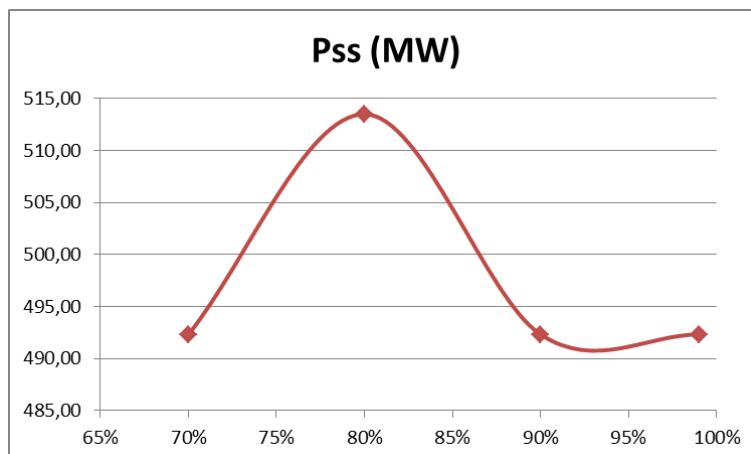
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα σχετικά με τις διαστάσεις της μπαταρίας και το πώς αυτές μεταβάλλονται με την πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών β' :

Διάρκεια Προσομοίωσης: 1 Εβδομάδα			
β'	E_o	Ess (MWh)	Pss (MW)
70%	70,03	140,57	492,32
80%	67,09	134,33	513,48
90%	70,5	142,06	492,32
99%	71,16	144,11	492,32

Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα με χαλάρωση πιθανότητας β'



Διάγραμμα 7.11: Μεταβολή Ess με β'

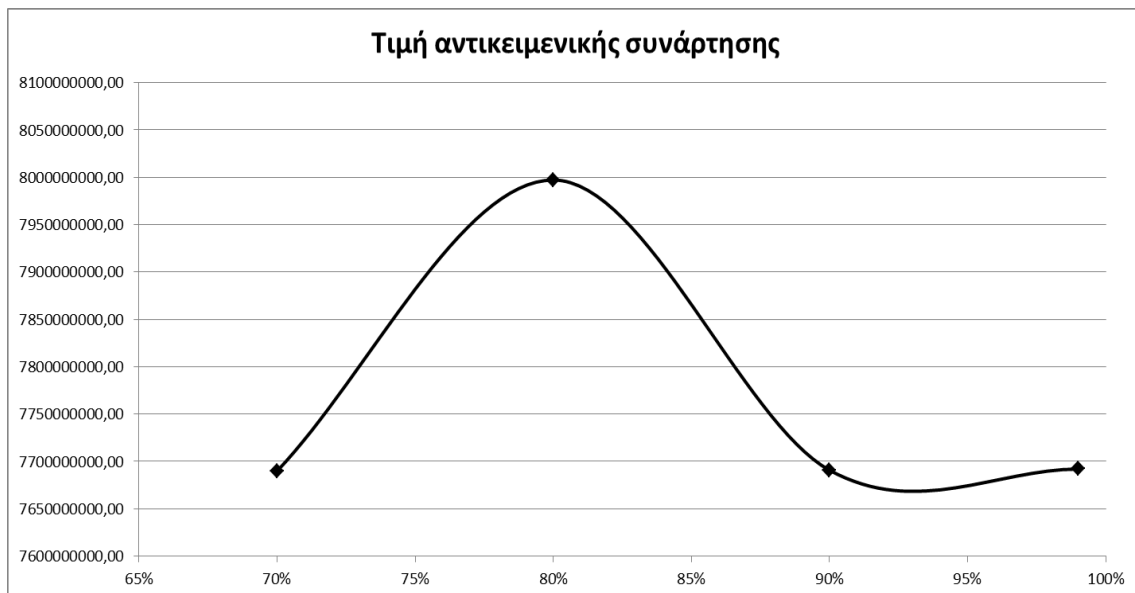


Διάγραμμα 7.12: Μεταβολή Pss με β'

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής της πιθανότητας β' στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

β'	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης
70%	7.689.863.570,00
80%	7.997.212.640,00
90%	7.690.753.913,00
99%	7.691.981.489,00

Πίνακας 7.13: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για πιθανότητες β'



Διάγραμμα 7.14: Σχεδιάγραμμα μεταβολών αντικειμενικής συνάρτησης με β'

Η διαφοροποίηση της πιθανότητας ικανοποίησης των περιορισμών εδώ δεν φαίνεται να έχει ιδιαίτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, με εξαίρεση ίσως την περίπτωση όπου $\beta' = 80\%$.

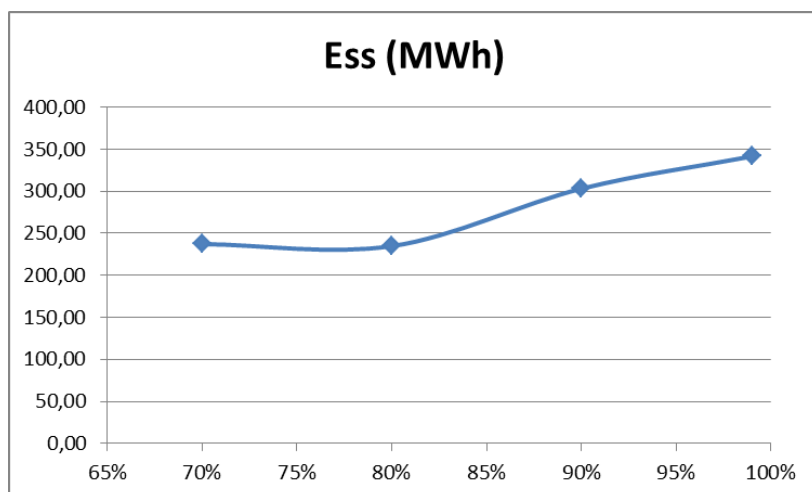
- Δοκιμές χωρίς χαλάρωση της πιθανότητας ικανοποίησης των περιορισμών

Εδώ, όλες οι παράμετροι έχουν τις ίδιες τιμές με πριν, με την διαφορά ότι η πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών β δεν μειώνεται, μα παραμένει σταθερή για όλο το μήκος του ορίζοντα πρόρρησης. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι διαστάσεις του συστήματος αποθήκευσης που προκύπτουν είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι πριν. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται τα αποτελέσματα για τις διάφορες τιμές της πιθανότητας β :

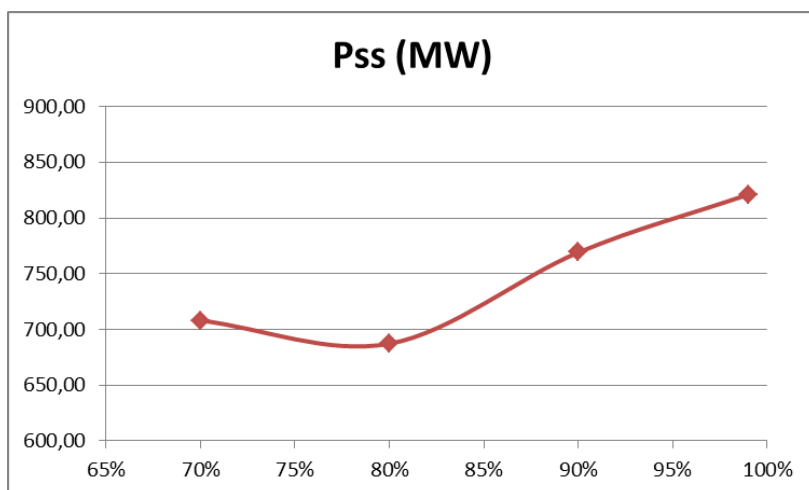
Διάρκεια Προσομοίωσης: 1 Εβδομάδα			
Σταθερό β	E_o	Ess (MWh)	Pss (MW)
70%	87,58	237,26	708,06
80%	90,04	234,87	687,19
90%	109,92	303,08	769,09
99%	120,32	341,57	821,10

Πίνακας 7.15: Αποτελέσματα με σταθερή πιθανότητα β

Η μεταβολή των μεγεθών της μπαταρίας ως συνάρτηση της πιθανότητας β γίνεται πιο εμφανής εδώ. Με απλά λόγια, όσο αυστηρότερος γίνεται ο περιορισμός, τόσο μεγαλύτερη μπαταρία προκύπτει.



Διάγραμμα 7.16: Μεταβολή Ess με β

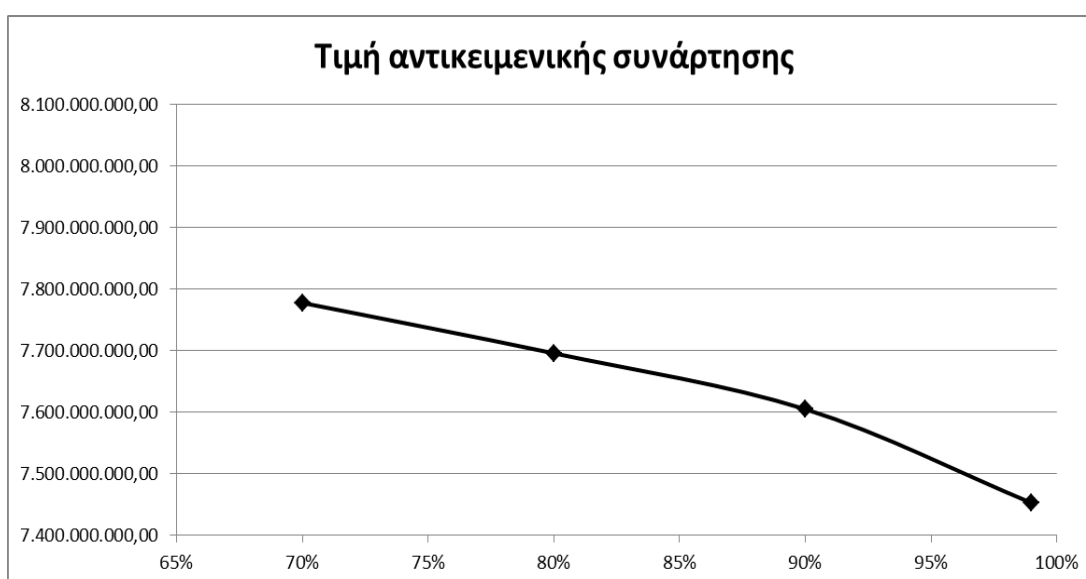


Διάγραμμα 7.17: Μεταβολή Pss με β

Ακολουθούν οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε περίπτωση και τα αντίστοιχα τελικά κόστη του συστήματος.

Σταθερό β	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης
70%	7.777.758.347,00
80%	7.695.903.474,00
90%	7.605.002.070,00
99%	7.452.626.804,00

Πίνακας 7.18: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για σταθερό β



Διάγραμμα 7.19: Σχεδιάγραμμα μεταβολών αντικειμενικής συνάρτησης με β

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν, φαίνεται ότι η λύση του συστήματος στις δύο περιπτώσεις δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη ως προς την τιμή της πιθανότητας β . Ωστόσο υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της χαλάρωσης της πιθανότητας και της σταθερής πιθανότητας β .

- Σύγκριση διαφορετικών ειδών μπαταριών

Εδώ μελετάται η λειτουργία του μοντέλου για διάφορους τύπους μπαταριών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας μακράς διάρκειας με συχνές εκφορτίσεις. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται χρησιμοποιώντας σε όλες τις προσομοιώσεις πλήθος σεναρίων 7, πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών 90%, η οποία μειώνεται προχωρώντας βαθύτερα στον ορίζοντα πρόρρησης. Η διαφοροποίηση των μπαταριών έγκειται στην διαφορετική αποδοτικότητα της φόρτισής τους και στους συντελεστές του κόστους τους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Nscen = 7, $\beta' = 90\%$					
Τύπος Μπαταρίας	η_c	d (€/kWh)	e (€/kW)	Ess (MWh)	Pss (MW)
Ιόντων Λιθίου	85%	600	400	142,06	492,32
Ψευδαργύρου Βρωμίου	70%	400	400	117,44	492,32
Οξειδοαναγωγική Βαναδίου	65%	600	400	95,93	454,96
Θειούχου Νατρίου	75%	350	350	500,52	792,42
Μολύβδου Οξέως	80%	330	400	448,92	645,03

Πίνακας 7.20: Σύγκριση διαφορετικών μπαταριών

Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα μεγέθη των μπαταριών δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από μία από τις τρεις μεταβαλλόμενες μεταβλητές, αλλά και από τις τρεις συνδυαστικά. Ο δείκτης απόδοσης της φόρτισης της μπαταρίας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την χωρητικότητα ενέργειας, όπως φαίνεται στη δοκιμή της οξειδοαναγωγικής μπαταρίας βαναδίου που έχει τον χαμηλότερο συντελεστή (65%) και προκύπτει η μικρότερη τιμή για την E_{ss} . Μάλιστα, συγκρίνοντας την περίπτωση της οξειδοαναγωγικής μπαταρίας βαναδίου με την περίπτωση της μπαταρίας ιόντων λιθίου, προκύπτει ότι παρόλο που έχουν τους ίδιους συντελεστές κόστους, η πρώτη περίπτωση δίνει πολύ μικρότερη τιμή για την χωρητικότητα ενέργειας, λόγω του χαμηλότερου δείκτη η_c . Ακόμη, συγκρίνοντας την τεχνολογία θειούχου νατρίου με την τεχνολογία μολύβδου οξέως διαφαίνεται η επίδραση των συντελεστών κόστους, καθώς παρόλο που η μπαταρία μολύβδου

οξέως έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην φόρτισή της, προκύπτουν μικρότερες διαστάσεις λόγω των αυξημένων συντελεστών κόστους που έχει.

Η επιλογή συγκεκριμένου τύπου συστήματος αποθήκευσης εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προκύπτουν. Το κόστος της αποθήκευσης στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιείται ως γραμμική συνάρτηση των διαστάσεων της μπαταρίας, κάτι που ενδεχομένως να μην είναι ακριβές, καθώς μπορεί να προκύπτουν επιπλέον κόστη εγκατάστασης που διαφοροποιούνται με την τεχνολογία της μπαταρίας και την εκάστοτε εφαρμογή. Επιπλέον, η μέγιστη χωρητικότητα κάθε συσκευής αποθήκευσης είναι διαφορετική για κάθε τύπο μπαταρίας, και όταν είναι απαραίτητη η χρήση μεγάλης χωρητικότητας αποθήκευσης θα χρειάζονται πολλαπλές μονάδες αποθήκευσης, πιθανότατα από διαφορετικούς τύπους.

- Επίλυση χωρίς ορίζοντα πρόρρησης

Στο σημείο αυτό εξετάζεται η λειτουργία του μοντέλου χωρίς την χρήση ορίζοντα πρόρρησης, θέτοντας δηλαδή $Horizon = 1$. Η βελτιστοποίηση λαμβάνει υπόψη ολόκληρη τη διάρκεια των σεναρίων (μία εβδομάδα), χωρίς όμως να υπολογίζει σε κάθε χρονική στιγμή έναν ορίζοντα βελτιστοποίησης. Η έννοια της χαλάρωσης της πιθανότητας συνεπώς εδώ δεν υφίσταται, καθώς τα πρώτα βήματα του ορίζοντα, που είναι και τα μοναδικά, έχουν πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών την β . Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές της μπαταρίας ιόντων λιθίου.

Οι προσομοιώσεις αυτές γίνονται με σκοπό να μελετηθεί η αξία της χρήσης του ορίζοντα πρόρρησης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις, με $Horizon=6$ και $Horizon=1$. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι προκύπτει ένα σημαντικά μικρότερο δείγμα σφαλμάτων πρόβλεψης, και έτσι, θεωρητικά τουλάχιστον, τα αποτελέσματα δεν είναι εξίσου ακριβή. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει και άθροιση του σφάλματος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν:

Διάρκεια Προσομοίωσης: 1 Εβδομάδα, χωρίς ορίζοντα πρόρρησης				
β	E_o	E_{ss} (MWh)	P_{ss} (MW)	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
70%	68,58	134,66	476,77	1.579.580.499,00
80%	63,98	122,08	449,08	1.581.702.651,00
90%	60,95	112,63	426,50	1.390.416.159,00
99%	60,83	116,31	434,58	1.381.151.333,00

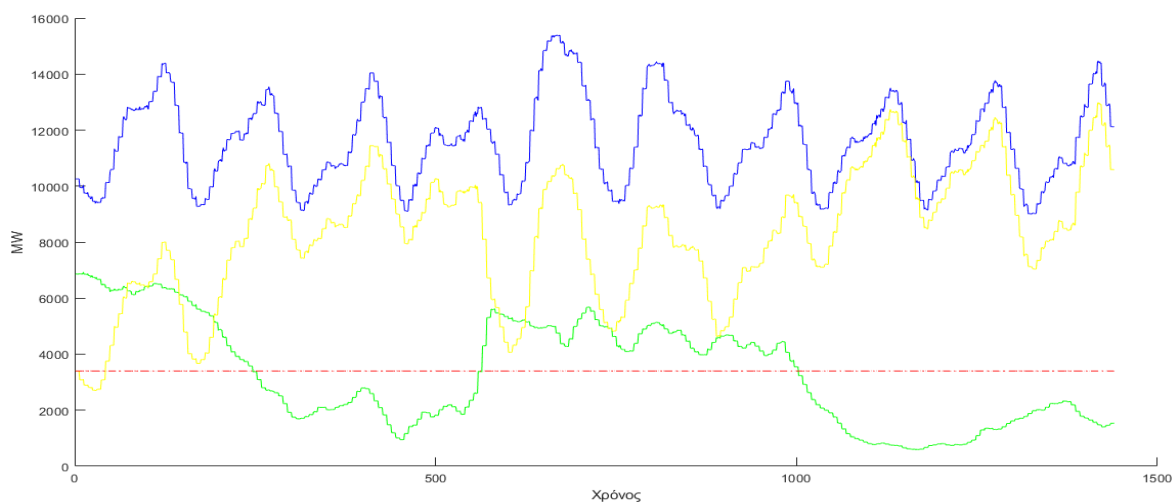
Πίνακας 7.21: Αποτελέσματα χωρίς ορίζοντα πρόρρησης

Αναλύοντας τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι διαστάσεις της μπαταρίας και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι σημαντικά μικρότερα σε σχέση με την περίπτωση όπου η πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών κρατείται σταθερή για κάθε βήμα του κυλιόμενου ορίζοντα. Συγκρίνοντας όμως τα αποτελέσματα με την περίπτωση όπου η πιθανότητα ικανοποίησης μειώνεται κατά μήκος του κυλιόμενου ορίζοντα, δεν είναι εύκολο να βγει ξεκάθαρο συμπέρασμα ως προς την βέλτιστη πρακτική, της χρησιμοποίησης ή μη του κυλιόμενου ορίζοντα. Αυτό γιατί ενώ στις δύο πρώτες περιπτώσεις ($\beta = 70\%$ και $\beta = 80\%$), η χρήση κυλιόμενου ορίζοντα δίνει μεγαλύτερες διαστάσεις αποθήκευσης με μικρότερο τελικό κόστος συστήματος, στις δύο τελευταίες περιπτώσεις ($\beta = 90\%$ και $\beta = 99\%$) η χρήση κυλιόμενου ορίζοντα αποφέρει μεγαλύτερες μεν διαστάσεις αποθήκευσης αλλά και σημαντικά μεγαλύτερο τελικό κόστος συστήματος.

- Επίλυση για υψηλή αιολική παραγωγή

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η λειτουργία του μοντέλου στην περίπτωση όπου υπάρχει πολλή υψηλή αιολική παραγωγή. Για το σκοπό αυτό, όλες οι παράμετροι του προβλήματος παραμένουν σταθερές, εκτός από την αιολική παραγωγή που αυξάνεται. Αρχικά, το πρόβλημα επιλύεται χωρίς καμία τροποποίηση στους περιορισμούς, χρησιμοποιώντας όμως τη διπλάσια αιολική παραγωγή. Ο διπλασιασμός της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής συνεπάγεται και τον διπλασιασμό του σφάλματος πρόβλεψης. Επιπλέον, για να χρησιμοποιηθεί και μεγαλύτερο δείγμα από την κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης, αυξάνεται και το πλήθος σεναρίων στις 10 ημέρες.

Στην συγκεκριμένη υλοποίηση η συνολική ζήτηση, που προκύπτει αφαιρώντας την αιολική παραγωγή από το φορτίο (κίτρινο χρώμα), στην αρχή του πρώτου σεναρίου είναι χαμηλότερη από την ελάχιστη ισχύ των συμβατικών γεννητριών (3400MW). Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβεί σε ένα αυτόνομο δίκτυο, όπως για παράδειγμα ένα νησί, όπου η αιολική παραγωγή σε περίπτωση που υπερβαίνει τις απαιτήσεις του δικτύου θα έπρεπε να αποθηκεύεται στις μπαταρίες, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν αυτό είναι εφικτό και να μην μείνει ανεκμετάλλευτη. Ακόμη, η αυξημένη αιολική παραγωγή οδηγεί εδώ και σε πιο απότομη αύξηση της καμπύλης της συνολικής ζήτησης.



Διάγραμμα 7.22: Συνολική ζήτηση δέκα ημερών

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής είναι μια μπαταρία μη ρεαλιστικού μεγέθους, με διαστάσεις $E_{ss} = 3.225.175,72MWh$ και $P_{ss} = 13.391.196,94MW$. Οι συνθήκες που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα είναι η απότομη αύξηση της καμπύλης του φορτίου, που οδηγεί σε αυξημένα κόστη παραγωγής των γεννητριών, το πλεόνασμα αιολικής παραγωγής που αναγκαστικά αποθηκεύεται στην μπαταρία αλλά και η αύξηση της κατανομής του σφάλματος πρόβλεψης, που οδηγεί σε αύξηση των διαστάσεων της μπαταρίας.

Για την επόμενη δοκιμή υψηλής αιολικής παραγωγής, χρησιμοποιήθηκε πλήθος σεναρίων μίας εβδομάδας, ώστε να υπάρχει μικρότερο δείγμα σφάλματος, πιθανότητα ικανοποίησης $\beta' = 70\%$ και αιολική παραγωγή αυξημένη κατά 50%. Τα αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Συντελεστής αύξησης αιολικής παραγωγής	Nscen	β'	E_o	E_{ss} (MWh)	P_{ss} (MW)
1	7	70%	70,03	140,57	492,32
1,5	7	70%	138,31	310,18	936,59
2	10	70%	3225175,72	11171617,15	13391196,94

Πίνακας 7.23: Αποτελέσματα υψηλής αιολικής παραγωγής

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση της αιολικής παραγωγής συνεπάγεται και αύξηση των διαστάσεων της μπαταρίας.

- Επιβεβαίωση των πιθανοτικών περιορισμών

Για την εξακρίβωση των πιθανοτικών περιορισμών και για να προσδιοριστεί η συχνότητα με την οποία αυτοί είναι δεσμευτικοί, χρησιμοποιείται εδώ μια μέθοδος επιβεβαίωσης των περιορισμών. Επειδή οι πιθανοτικοί περιορισμοί αφορούν το βέλτιστο επίπεδο ενέργειας σε κάθε χρονική στιγμή k , η κατανομή του επιπέδου ενέργειας θα εξαρτάται από το φορτίο, την κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και τις βέλτιστες τιμές για την παραγωγή των γεννητριών και άλλων παραμέτρων του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι των κατανομών αυτών για τη χρονική στιγμή k του σεναρίου s δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν.

Για τον πιθανοτικό περιορισμό του άνω ορίου της μπαταρίας είναι:

$$\mu_E^u(s, k) = E^*(s, k) + \eta_c \Delta t P_{bat}^*(s, k) + \Delta t \mu_p P_{for}(s, k) - \Delta t \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi}^{d*}(s, k) \quad (7.1)$$

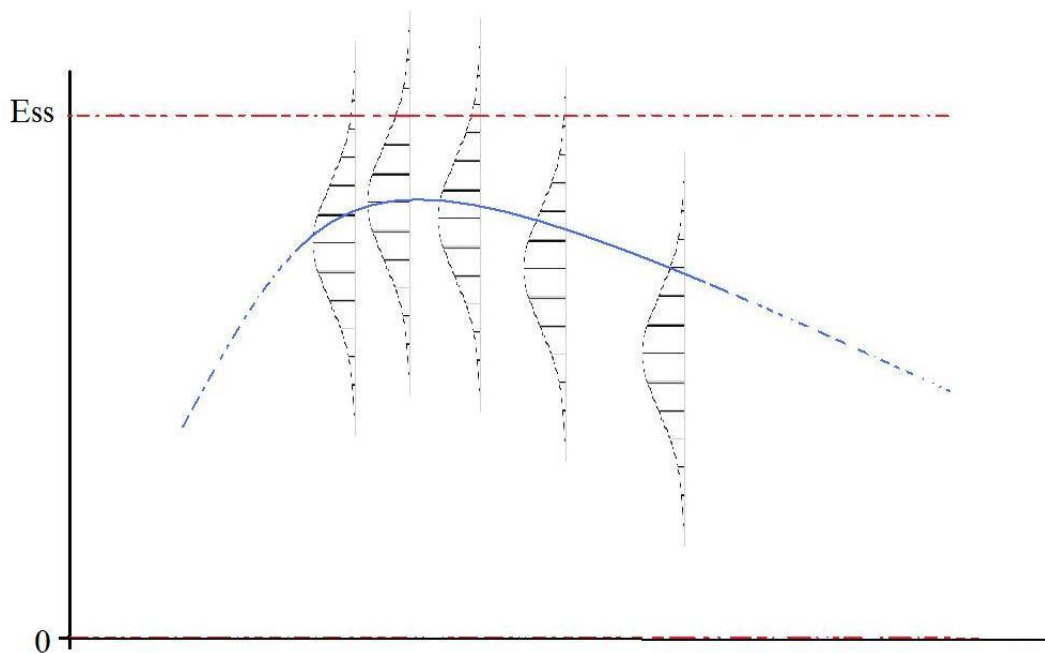
$$\sigma_E^u(s, k) = \Delta t \sigma_p P_{for}(s, k) \quad (7.2)$$

Και για τον πιθανοτικό περιορισμό του κάτω ορίου της μπαταρίας:

$$\mu_E^d(s, k) = -E^*(s, k) - \eta_c \Delta t P_{bat}^*(s, k) - \Delta t \mu_p P_{for}(s, k) - \Delta t \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi}^{u*}(s, k) \quad (7.3)$$

$$\sigma_E^d(s, k) = \Delta t \sigma_p P_{for}(s, k) \quad (7.4)$$

Ο αστερίσκος (*) υποδηλώνει ότι οι τιμές των μεταβλητών αυτών είναι οι βέλτιστες, δηλαδή αυτές που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται το ποσοστό της κατανομής που βρίσκεται εντός των περιορισμών, ώστε να εξακριβωθεί ότι οι πιθανοτικοί περιορισμοί ικανοποιούνται. Κάθε χρονική στιγμή αποτελεί μια ξεχωριστή κανονική κατανομή, η οποία μετατοπίζεται προς τα κάτω, αφαιρώντας το $\Delta t \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi}^{d*}(s, k)$, για το άνω όριο και προς τα πάνω, προσθέτοντας το $\Delta t \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi}^{u*}(s, k)$, για το κάτω όριο. Στη συνέχεια, για τις δύο αυτές κατανομές, υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης κατανομής μέχρι το E_{ss} και μέχρι το 0 αντίστοιχα. Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η έννοια αυτή:



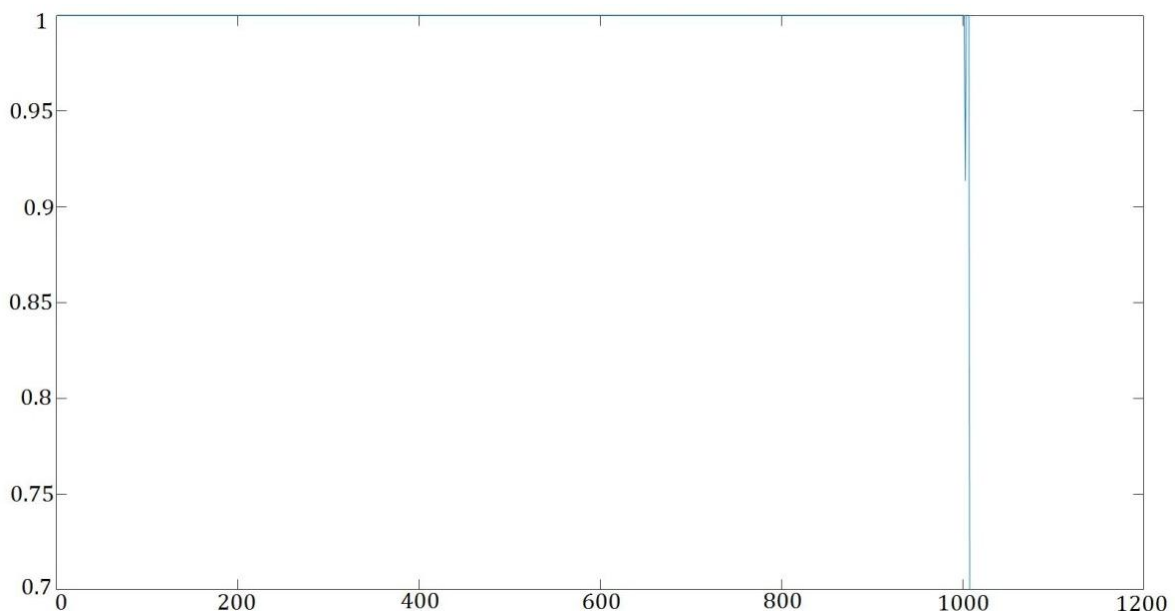
Σχήμα 7.24: Κατανομές πιθανοτικών περιορισμών

Οι πιθανοτικοί περιορισμοί είναι δεσμευτικοί, όταν ικανοποιούνται με πιθανότητα β' , και αυτό εξακριβώνεται με τη μέθοδο που αναλύθηκε παραπάνω. Στα σχήματα που ακολουθούν παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι πιθανότητες με τις οποίες ικανοποιούνται οι περιορισμοί, για την περίπτωση όπου εφαρμόζοταν η χαλάρωση της πιθανότητας προχωρώντας βαθύτερα στον ορίζοντα πρόρρησης και με $\beta' = 70\%$.

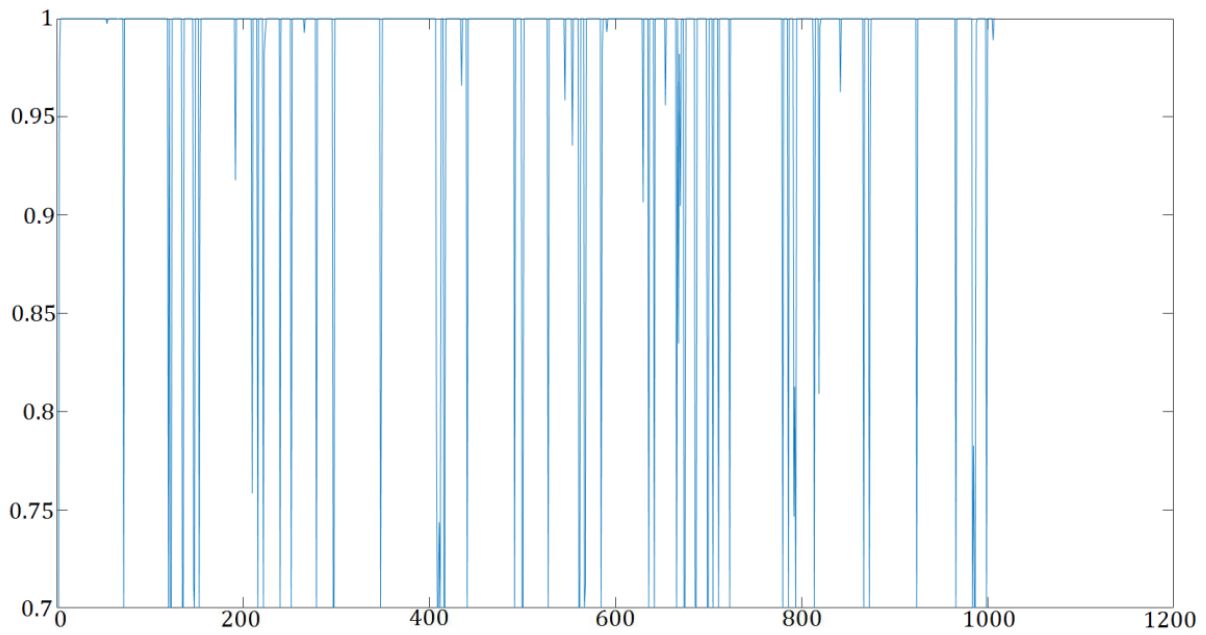
Η χαλάρωση ή μη της πιθανότητας ικανοποίησης των περιορισμών κατά μήκος του κυλιόμενου ορίζοντα δεν έχει καμία σημασία εδώ, καθώς η πιθανότητα για το πρώτο βήμα, που εφαρμόζεται ουσιαστικά και στο σύστημα, είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Με τις προσομοιώσεις αυτές γίνεται πιο κατανοητή η εισαγωγή των μεταβλητών της αυξομείωσης της παραγωγής των συμβατικών γεννητριών ΔP_{Gi}^u και ΔP_{Gi}^d στην αναλυτική μορφή των πιθανοτικών περιορισμών. Πιο συγκεκριμένα, στη μοντελοποίηση της λειτουργίας της μπαταρίας, όπου η ενέργεια σε μία χρονική στιγμή k ισούται με το άθροισμα του επιπέδου της ενέργειας και της ισχύος που εισήλθε/εξήλθε από την μπαταρία την προηγούμενη στιγμή $k - 1$, προστίθεται κάθε φορά με δειγματοληψία μια τυχαία τιμή από το δείγμα των σφαλμάτων πρόβλεψης. Στην πράξη, καμία τιμή του δείγματος αυτού δεν ξεπερνά το $\pm 1\%$. Ωστόσο, με την παραδοχή ότι η τυχαία μεταβλητή του σφάλματος ακολουθεί την κανονική κατανομή οι πιθανές τιμές του σφάλματος αυξάνονται, καθώς στα άκρα της κατανομής, θεωρητικά, οι τιμές προσεγγίζουν το άπειρο. Η παραδοχή αυτή, σε συνδυασμό με τη συσσώρευση του σφάλματος προχωρώντας βαθύτερα στον κυλιόμενο ορίζοντα βελτιστοποίησης, είναι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα για το μέγεθος της μπαταρίας. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στα μικρότερα μεγέθη των μπαταριών που προκύπτουν στην επίλυση χωρίς εφαρμογή του κυλιόμενου ορίζοντα. Ασφαλώς οι δυνατές τιμές που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές ΔP_{Gi}^u και ΔP_{Gi}^d έχουν επίσης μεγάλη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς από αυτές καθορίζεται το ποσοστό της κατανομής του σφάλματος που θα καλύπτεται από τις συμβατικές γεννήτριες.

Ακολουθούν οι πιθανότητες ικανοποίησης των περιορισμών για την προσομοίωση με χρήση χαλάρωσης της πιθανότητας ικανοποίησης και με $\beta' = 70\%$. Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο οι πιθανοτικοί περιορισμοί είναι δεσμευτικοί, και το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο οι περιορισμοί ικανοποιούνται με πιθανότητα περισσότερη από 99%.



Διάγραμμα 7.25: Ποσοστό κατανομής άνω του κάτω ορίου



Διάγραμμα 7.26: Ποσοστό κατανομής κάτω του άνω ορίου

β'	Άνω Όριο		Κάτω Όριο	
	Δεσμευτικός	Πιθανότητα Ικανοποίησης $\geq 99\%$	Δεσμευτικός	Πιθανότητα Ικανοποίησης $\geq 99\%$
70%	5,56%	91,76%	0,10%	99,80%
80%	0,00%	100,00%	0,10%	99,90%
90%	5,85%	92,66%	0,10%	99,80%
99%	6,35%	100,00%	0,10%	99,90%

Πίνακας 7.27: Ποσοστά χρόνου ικανοποίησης περιορισμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μια μέθοδος υπολογισμού των βέλτιστων διαστάσεων ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, συνυπολογίζοντας την στοχαστικότητα που ενέχει η αιολική παραγωγή και το στατιστικό σφάλμα στην πρόβλεψή της. Για την ενσωμάτωση της στοχαστικότητας αυτής στο πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν πιθανοτικοί περιορισμοί, οι οποίοι με χρήση ιδιοτήτων της Θεωρίας Πιθανοτήτων μετατράπηκαν σε αναλυτική μορφή.

Το πρόβλημα της διαστασιολόγησης μοντελοποιήθηκε με τη στρατηγική προβλεπτικού ελέγχου δύο σταδίων, για τις προσομοιώσεις της οποίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα φορτίου και αιολικής παραγωγής για χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας, σε χρονικά διαστήματα ενός δεκαλέπτου. Για την μετατροπή των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή έγινε η παραδοχή ότι το σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Η λειτουργία του μοντέλου εξετάστηκε ενδελεχώς, κάνοντας προσομοιώσεις για διάφορες τιμές της πιθανότητας ικανοποίησης των περιορισμών, τόσο για σταθερές τόσο και για μειούμενες, υλοποιώντας και μη τον ορίζοντα βελτιστοποίησης, εξετάζοντας τα αποτελέσματα για διαφορετικούς τύπους μπαταριών και τέλος ελέγχοντας ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ικανοποιούν τους εκάστοτε πιθανοτικούς περιορισμούς.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος με την προσέγγιση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα πλεονεκτήματα της εν λόγω στρατηγικής λογίζεται η μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, εν συγκρίσει με άλλες μεθόδους, αφού για κάθε απόφαση που υλοποιείται έχει προηγηθεί η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης για έναν κυλιόμενο ορίζοντα. Η προσέγγιση αυτή αντιμετωπίζει καλύτερα τις πιθανές διαταραχές του συστήματος, και μάλιστα στην παρούσα εργασία αντιμετώπισε ένα ευρύτερο φάσμα στατιστικών σφαλμάτων. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα που προκύπτει από την μέθοδο αυτή είναι ο μεγάλος όγκος υπολογισμών που προκύπτουν, η χρονική διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος που αυξάνεται μη γραμμικά σε σχέση με το πλήθος των σεναρίων της προσομοίωσης, και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται. Ενδεικτικά αναφέρεται εδώ ότι για μήκος προσομοίωσης επτά σεναρίων η επίλυση σε φορητό υπολογιστή, με μνήμη RAM 4GB και επεξεργαστή Intel Celeron CPU N2840 2.16GHz, διαρκούσε περί τις δύομιση ώρες, ενώ η αύξηση στα δέκα σενάρια είχε αποτέλεσμα η επίλυση να διαρκέσει περί τις τέσσερις ώρες. Μάλιστα, αξίζει να αναφερθεί ότι επιχειρήθηκε να γίνει προσομοίωση και για διάρκεια ενός μήνα (τριάντα σεναρίων) ωστόσο μετά από δεκαπέντε ώρες χωρίς αποτέλεσμα, η προσπάθεια αυτή εγκαταλείφθηκε.

Όσον αφορά την παραδοχή ότι το σφάλμα της πρόβλεψης ακολουθεί την κανονική κατανομή, κι εκεί υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από την μία πλευρά, η

παραδοχή αυτή επέτρεψε την εύκολη μετατροπή των πιθανοτικών περιορισμών σε αναλυτική μορφή, κι έτσι δεν χρειάστηκαν μέθοδοι δειγματοληψίας και πολλαπλές προσομοιώσεις για την επίλυση του προβλήματος. Ωστόσο, η παραδοχή αυτή έχει το μειονέκτημα ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι μεγαλύτερα σε σχέση με τις πραγματικές ανάγκες ενός ηλεκτρικού συστήματος, καθώς ενώ το σφάλμα πρόβλεψης δεν ξεπερνά το 1%, η παραδοχή ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή σημαίνει ότι τα άκρα της κατανομής τείνουν στο άπειρο. Αυτό φυσικά είναι αδύνατο, καθώς οι ανεμογεννήτριες έχουν μια μέγιστη και ελάχιστη ισχύ που δεν γίνεται να ξεπεραστεί. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον μεταβλητές αυξομείωσης της παραγωγής των συμβατικών γεννητριών, οι οποίες ουσιαστικά απορροφούσαν ένα μέρος της κατανομής του σφάλματος.

Τέλος, στα πλεονεκτήματα της παρούσας υλοποίησης προστίθεται το γεγονός ότι ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι εύκολα προσαρμόσιμος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικά συστήματα και για διαφορετικά χρονικά μήκη και υποδιαιρέσεις σεναρίων και ορίζοντα πρόρρησης.

8.2 Προεκτάσεις

Το μοντέλο που κατασκευάζεται δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες του δικτύου μεταφοράς και διανομής, η ενσωμάτωση των οποίων πιθανότατα θα οδηγούσε σε ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις συστήματος αποθήκευσης. Ακόμη, το σφάλμα της πρόβλεψης θα είχε μεγαλύτερες επιδράσεις στο δίκτυο και στην τελική βέλτιστη λύση. Εδώ πρακτικά, όλα τα φορτία και οι μονάδες παραγωγής βρίσκονται στον ίδιο ζυγό. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν σε μεγάλες ανάγκες σε αποθήκευση, που σε πραγματικές συνθήκες θα διαμοιράζονταν σε πολλαπλά συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρούσα υλοποίηση δεν μεριμνά για την βέλτιστη τοποθέτηση και το πλήθος των συστημάτων αυτών. Οι πιθανές προεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λοιπόν, αφορούν στην ενσωμάτωση απωλειών δικτύου, την βέλτιστη τοποθέτηση και τον καταμερισμό των επιμέρους μονάδων αποθήκευσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ακολουθεί ο κώδικας σε γλώσσα μοντελοποίησης YALMIP που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος στο MATLAB.

```
%%% Reset Workspace & Command Window
clear;
clc;
close all;

%%% Define constants
Ngen = 7; % Number of generators
Nscen = 7; % Number of scenarios, i.e. days
K = 144; % One day has 144 ten-minute intervals
Horizon = 6; % Time steps horizon
SKH = Nscen*K*Horizon;
Dt = 0.166666667; % 0.1666... = 1/6 - Ten minute intervals
BatEf = 0.85; % Battery's charge/discharge efficiency
d = 600000; % Cost coefficient of Ess
e = 400000; % Cost coefficient of Pss
b = 0.70; % Chance constraint fulfillment probability

ErrorCounts = load('ErrorCounts.mat');
Counts = ErrorCounts.Counts;
s = RandStream('mlfg6331_64');
Error = randsample(s,Chichi,SKH,true);

%%% Define variables
Pg = sdpvar(Ngen,SKH);
DPg_down = sdpvar(Ngen,SKH);
DPg_up = sdpvar(Ngen,SKH);
Pbat = sdpvar(1,SKH);
Ess = sdpvar(1,1);
Pss = sdpvar(1,1);
E0 = sdpvar(1,1);
E = sdpvar(1,SKH);

%%% Generation limits
Pgmax = [7000 3000 5500 3000 6000 3000 6500]; % Total Installed Capacity =
34000MW, almost twice the Peak Load
Pgmin = 0.1*Pgmax(1,:); % Total minimum generation = 3400MW

%%% Ramping assumptions for the conventional generators
GenRampCap = 0.08*Pgmax(1,:); % The ramping capacity equal to 8% of the
nominal capacity
r_param = [150; 80; 100; 80; 110; 80; 120]; % Ramping cost coefficient for
generator i

%%% Generation quadratic cost parameters
gencostparams = [
    0.20    50    700;
    0.01    100   300;
    0.25    50    550;
    0.01    100   300;
    0.05    50    600;
```

```

        0.01    100 300;
        0.08    50 650;
];

%%% Insertion of the load curve and wind generation
Pload = LoadConstruction(Nscen,K,Horizon);
Pwind = WindForecastConstruction(Nscen,K,Horizon);

%%% Define the constraints
Constraints = [];

% Generators' installed capacity constraints
for i = 1:Ngen
    for j = 1:SKH
        Constraints = [Constraints, Pgmin(1,i) <= Pg(i,j) <= Pgmax(1,i)];
    end
end

% Generators' ramping capacity constraints
% For the first steps of each horizon
for i = 1:Ngen
    t = 1;
    for j = 1:Nscen*K
        if ( (t+Horizon) <= SKH )
            Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <= (Pg(i,t)-
Pg(i,t+Horizon)) <= GenRampCap(1,i)];
            end
            t = t + Horizon;
        end
        Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <= (Pg(i,SKH-Horizon+1)-
Pg(i,1)) <= GenRampCap(1,i)];% For the last ramp, we assume the next
scenario is the same as the first.
    end
    % For the steps inside the receding horizon
    for i = 1:Ngen
        t = 1;
        for k = 1:Nscen*K
            for j = 0:(Horizon-2)
                Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <= (Pg(i,t+j)-
Pg(i,t+j+1)) <= GenRampCap(1,i)];
            end
            t = t + Horizon;
        end
    end
end

% Reserve up and down ramping constraints
for i = 1:Ngen
    for j = 1:SKH
        Constraints = [Constraints, DPg_down(i,j) >= 0];
    end
end
for i = 1:Ngen
    for j = 1:SKH
        Constraints = [Constraints, DPg_up(i,j) >= 0];
    end
end
for i = 1:Ngen
    for j = 1:SKH
        Constraints = [Constraints, Pgmin(1,i) <= (Pg(i,j) - DPg_down(i,j))
<= Pgmax(1,i)];
    end
end

```

```

    end
end
for i = 1:Ngen
    for j = 1:SKH
        Constraints = [Constraints, Pgmin(1,i) <= (Pg(i,j) + DPg_up(i,j))
<= Pgmax(1,i)];
    end
end

% Constraint for the first steps of each horizon
for i = 1:Ngen
    t = 1;
    for j = 1:Nscen*K
        if ( (t+Horizon) <= SKH )
            Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <=
(Pg(i,t+Horizon)-DPg_down(i,t+Horizon)-Pg(i,t)-DPg_up(i,t)) <=
GenRampCap(1,i)];
        end
        t = t + Horizon;
    end
    Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <= (Pg(i,SKH-Horizon+1)-
DPg_down(i,SKH-Horizon+1)-Pg(i,1)-DPg_up(i,1)) <= GenRampCap(1,i)];
%Assuming that the next scenario is the same as the first.
end
% Constraint for the steps inside the receding horizon
for i = 1:Ngen
    t = 1;
    for k = 1:Nscen*K
        for j = 0:(Horizon-2)
            Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <= (Pg(i,t+j+1)-
DPg_down(i,t+j+1)-Pg(i,t+j)-DPg_up(i,t+j)) <= GenRampCap(1,i)];
        end
        t = t + Horizon;
    end
end
% Constraint for the first steps of each horizon
for i = 1:Ngen
    t = 1;
    for j = 1:Nscen*K
        if ( (t+Horizon) <= SKH )
            Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <=
(Pg(i,t+Horizon)+DPg_up(i,t+Horizon)-Pg(i,t)+DPg_down(i,t)) <=
GenRampCap(1,i)];
        end
        t = t + Horizon;
    end
    Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <= (Pg(i,SKH-Horizon+1) +
DPg_up(i,SKH-Horizon+1) - Pg(i,1) + DPg_down(i,1)) <= GenRampCap(1,i)];
%For the last ramp, we assume the next scenario is the same as the first.
end
% Constraint for the steps inside the receding horizon
for i = 1:Ngen
    t = 1;
    for k = 1:Nscen*K
        for j = 0:(Horizon-2)
            Constraints = [Constraints, -GenRampCap(1,i) <=
(Pg(i,t+j+1)+DPg_up(i,t+j+1)-Pg(i,t+j)+DPg_down(i,t+j)) <=
GenRampCap(1,i)];
        end
        t = t + Horizon;
    end
end

```

```

end

Constraints = [Constraints, Ess >= 0];
Constraints = [Constraints, Pss >= 0];

for i = 1:SKH
    Constraints = [Constraints, -Pss <= Pbat(1,i) <= Pss ]; % Battery
limits
end

% Probabilistic constraints for the battery
[m, sigma] = ForecastError(Nscen,K);
% Aggregation of error
m_Pfor = zeros(1,SKH);
t = 1;
for i = 1:Nscen*K
    for j = 0:(Horizon-1)
        m_Pfor(1,t+j) = m*sum(Pwind(1,t:(t+j)));
    end
    t = t + Horizon;
end
s_Pfor = zeros(1,SKH);
t = 1;
for i = 1:Nscen*K
    for j = 0:(Horizon-1)
        sqroot = 0;
        for a = t:(t+j)
            sqroot = sqroot + Pwind(1,a).^2;
        end
        s_Pfor(1,t+j) = sigma*sqrt(sqroot);
    end
    t = t + Horizon;
end

% Decreasing level of chance constraint fulfillment inside the horizon
b_hor = zeros(1,Horizon);
for i = 1:Horizon
    b_hor(1,i) = b/(sqrt(i));
end
b_decreased = zeros(1,SKH);
t = 1;
for i = 1:SKH
    if (Horizon == 1)
        b_decreased(1,i) = b;
    else
        b_decreased(1,i) = b_hor(1,t);
        if (t == Horizon)
            t = 0;
        end
        t = t + 1;
    end
end

% Battery's upper bound
for i = 1:SKH
    Constraints = [Constraints, (E(1,i) + Dt*BatEf*Pbat(1,i) -
Dt*sum(DPg_down(:,i)) - Ess) <= (-Dt*s_Pfor(1,i)*norminv(b_decreased(1,i))
- Dt*m_Pfor(1,i)) ];
end

% Battery's lower bound
for i = 1:SKH

```

```

Constraints = [Constraints, (-E(1,i) - Dt*BatEf*Pbat(1,i) -
Dt*sum(DPg_up(:,i)) ) <= (-Dt*s_Pfor(1,i)*norminv(b_decreased(1,i)) +
Dt*m_Pfor(1,i)) ];
end

for i = 1:SKH
    Constraints = [Constraints, sum(Pg(:,i)) + Pwind(1,i) == Pbat(1,i) +
Pload(1,i)]; % Energy balance
end

Constraints = [Constraints, E(1,1) == E0]; % Initial energy level of
storage

% Battery's constraints
if (Horizon > 1)
    j = 1;
    for i = 1:Nscen*K
        Constraints = [Constraints, E(1,j) == E(1,j+Horizon-1)];
        %E(s,k,1) = E(s,k,H)
        j = j + Horizon;
    end
end

for i = 1:Nscen
    Constraints = [Constraints, E(1,i*(K-1)*Horizon+1+(i-1)*Horizon)==E0];
    %E(s,K,1) = E0
end

% Modelization of the battery's energy level
% For the first steps of each horizon
j = 1;
for i = 1:Nscen*K
    if ( (j+Horizon) <= SKH )
        Constraints = [Constraints, E(1,j) + BatEf*Dt*Pbat(1,j) +
Dt*Error(j,1)*Pwind(1,j) == E(1,j+Horizon)];
        end
        j = j + Horizon;
    end

% For the steps inside the receding horizon
t = 1;
for i = 1:Nscen*K
    for j = 0:(Horizon-2)
        Constraints = [Constraints, E(1,t+j) + BatEf*Dt*Pbat(1,t+j) +
Dt*Error(t+j,1)*Pwind(1,t+j) == E(1,t+j+1)];
        end
        t = t + Horizon;
    end

%%% Define objective function
Objective = 0;
for i = 1:SKH
    Objective = Objective + sum( (Pg(:,i).^2).*gencostparams(:,1) +
Pg(:,i).*gencostparams(:,2) + gencostparams(:,3) ); % Generation cost
end
for i = 1:SKH
    Objective = Objective + sum( DPg_up(:,i).*r_param(:,1) +
DPg_down(:,i).*r_param(:,1) ); % Reserve ramping penalty
end
Objective = Objective + d*Ess + e*Pss; % Battery cost

```

```

%%% Solve optimisation problem
ops = sdpsettings('solver','mosek','verbose',0,'debug',1);
solution = optimize(Constraints,Objective,ops)

Pg = value(Pg);
DPg_down = value(DPg_down);
DPg_up = value(DPg_up);
E = value(E);
Pbat = value(Pbat);
E0 = value(E0);
Ess = value(Ess);
Pss = value(Pss);

% Displaying only the first step's result of each horizon
E_first_steps = zeros(1,Nscen*K);
t = 1;
for i = 1:Nscen*K
    E_first_steps(1,i) = E(1,t);
    t = t + Horizon;
end
Pbat_first_steps = zeros(1,Nscen*K);
t = 1;
for i = 1:Nscen*K
    Pbat_first_steps(1,i) = Pbat(1,t);
    t = t + Horizon;
end
obj_value = value(Objective);
fprintf('Objective function value = %.9f\n', obj_value);
fprintf('Chance constraint fulfillment probability = %.2f\n', b);
fprintf('E0 = %.2f\n', E0);
fprintf('Ess = %.2f\n', Ess);
fprintf('Pss = %.2f\n', Pss);
%%% Validation of the chance constraint
% Making the distribution for the upper and lower bound
t = 1;
for i = 1:Nscen*K % Upper bound
    m_up(1,i) = E(1,t) + Dt*BatEf*Pbat(1,t) - Dt*sum(DPg_down(:,t)) +
Dt*m*Pwind(1,t);
    s_up(1,i) = Dt*sigma*Pwind(1,t);
    t = t + Horizon;
end
t = 1;
for i = 1:Nscen*K % Lower bound
    m_down(1,i) = -E(1,t) - Dt*BatEf*Pbat(1,t) - Dt*sum(DPg_up(:,t)) -
Dt*m*Pwind(1,t);
    s_down(1,i) = Dt*sigma*Pwind(1,t);
    t = t + Horizon;
end
for i = 1:Nscen*K
    pd_up(1,i) = makedist('Normal','mu',m_up(1,i),'sigma',s_up(1,i));
    pd_down(1,i) = makedist('Normal','mu',m_down(1,i),'sigma',s_down(1,i));
end
% Calculate probability of binding chance constraint
for i = 1:Nscen*K
    cdf_up(1,i) = cdf(pd_up(1,i),Ess);
end
for i = 1:Nscen*K
    cdf_down(1,i) = cdf(pd_down(1,i),0);
end

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, “Renewables 2018, Global Status Report”
- [2] Γ.Σταυρακάκης, «Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας», Πανεπιστήμιο Κρήτης
- [3] International Renewable Energy Agency, “Renewable Energy Statistics 2017”
- [4] Σ.Παπαθανασίου, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Παραδόσεων», ΕΜΠ Αθήνα 2014
- [5] Μ.Π.Παπαδόπουλος, «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές», Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1997
- [6] Χ.Αγαθοκλέους, «Βέλτιστη σχεδίαση συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης για έλεγχο τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας», Ιούλιος 2017
- [7] Α.Πετρόπουλος, «Βέλτιστη ροή ενεργού και αέργου ισχύος σε δίκτυο διανομής με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας», Φεβρουάριος 2014
- [8] Institute of Energy for South-East Europe – IENE, “Prospects for the Electric Vehicle Market in Greece and Business Opportunities”, Athens, 3 April 2018
- [9] H.Thurner, “Battery storage systems for electricity. Technology, applications and economics of large projects in Central and Eastern Europe”, TU Wien, Vienna November 2016
- [10] https://optimization.mccormick.northwestern.edu/index.php/Quadratic_programming
- [11] University of Houston, Department of Mathematics, “Optimization I, Chapter 3” https://www.math.uh.edu/~rohop/fall_06/Chapter3.pdf
- [12] J. Birge and F. Louveaux, *Introduction to Stochastic Programming*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1997.
- [13] David Di Ruscio, “Model Predictive Control and optimization”, Telemark University College, March 2010
- [14] Π.Κακοσίμος, «Προβλεπτικός Έλεγχος σε Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές», 2013
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Model_predictive_control
- [16] Schaum’s , «Επιχειρησιακή Έρευνα», 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος

- [17] Μ.Σαμουηλίδης, Κ.Βλάχος,Γ.Ψαρράς, «Βοηθήματα για το μάθημα Συστήματα Αποφάσεων», Εκδόσεις ΕΜΠ
- [18] Γ.Κοκολάκης,Ι.Σπηλιώτης, «Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική με Εφαρμογές», Εκδόσεις Συμεών, 2010
- [19] Γ.Μαρνέλος, «Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας. Ενότητα 2^η: Αιολική Ενέργεια», Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
- [20] Π.Δράτσας, «Αλγόριθμος Αποκεντρωμένης Οικονομικής Κατανομής Φορτίου λαμβάνοντας υπόψη Στοχαστική Αιολική Παραγωγή», Οκτώβριος 2017
- [21] K.Baker, G.Hug, Xin Li, “Energy Storage Sizing Taking Into Account Forecast Uncertainties and Receding Horizon Operation”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, January 2017
- [22] Γ.Χαρτάς Σωληναραίος, «Προβλεπτικός Έλεγχος Μικροσυστημάτων Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας», Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2012
- [23] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [24] D.Chassin, S.Behboodi, N.Djilali, “Optimal subhourly electricity resource dispatch under multiple price signals with high renewable generation availability”, USA, December 2017