



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

**Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής  
Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Μπαταρίες Μολύβδου-  
Οξέος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΜΙΚΡΟΓΕΩΡΓΙΟΥ

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020





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

## Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Μπαταρίες Μολύβδου- Οξέος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΜΙΚΡΟΓΕΩΡΓΙΟΥ

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13/10/2020

.....  
Α. Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Α. Αντωνόπουλος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....  
Νικόλαος Α. Μικρογεωργίου

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

Copyright © Νικόλαος Α. Μικρογεωργίου, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται και διερευνάται ένα δυναμικό μοντέλο που προσομοιώνει την λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που συνδυάζει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποθήκευση μέσω μπαταριών μολύβδου-οξέος. Το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια, η οποία χρησιμοποιεί μια σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, οι οποίες αποτελούν τις κύριες ενεργειακές πηγές του, ενώ μια συστοιχία μπαταριών μολύβδου-οξέος χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί την ισχύ του φορτίου, σε περιπτώσεις που αυτή υπερβαίνει την ισχύ της παραγωγής. Μια συστοιχία υπερπυκνωτών λειτουργεί επικουρικά, για να καλύψει πιθανές διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος, που μπορεί να οφείλονται σε ταχείες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων και η διαχείριση της ισχύος πραγματοποιούνται μέσω ενός κοινού ζυγού ΣΡ, με χρήση κατάλληλων μετατροπέων ισχύος και ειδικά σχεδιασμένων ελεγκτών.

Μετά την μοντελοποίηση των υποσυστημάτων, ακολουθεί η διαστασιολόγηση του συστήματος, με χρήση αναλυτικής μεθόδου που βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα χρονοσειρών για την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και την ημερήσια καμπύλη φορτίου. Ο έλεγχος του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη το ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης, δίνει έμφαση στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος. Παράλληλα, αξιοποιώντας τον επικουρικό ρόλο των υπερπυκνωτών, εξασφαλίζει την αποδοτική και οικονομική λειτουργία της συστοιχίας των μπαταριών, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής της.

Η συμπεριφορά του συστήματος εξετάζεται τόσο σε μόνιμη κατάσταση, όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις, για την ανάλυση της ομαλής λειτουργίας του. Προτείνεται μια συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου της ροής ισχύος, η οποία εξασφαλίζει ευσταθή λειτουργία και αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο και αξιολογείται ο ρόλος των υπερπυκνωτών στο ισοζύγιο ισχύος, στην αποδοτική χρήση της συστοιχίας των μπαταριών μολύβδου-οξέος και στην ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.

**Λέξεις Κλειδιά:** Διαχείριση ενέργειας, Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, Αποθήκευση με μπαταρίες, Μπαταρίες μολύβδου-οξέος, Υπερπυκνωτές, Ανεμογεννήτρια, Φωτοβολταϊκή γεννήτρια, Αιολική ενέργεια, Ηλιακή ενέργεια, Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## Abstract

The scope of this thesis is the development and investigation of a dynamic model that simulates the operation of an autonomous hybrid power generation system, which combines renewable energy sources and storage via lead-acid batteries. The system under study includes a wind turbine, which uses a synchronous permanent magnet generator, and a photovoltaic generator, which are its main energy sources, while an array of lead-acid batteries is used to power the load, in cases where power demand exceeds generation. An array of supercapacitors operates auxiliary to cover possible fluctuations in power output, which may occur due to rapid fluctuations in wind speed and solar radiation. The interconnection of the individual subsystems and the power management are carried out through a common DC bus, using suitable power converters and specially designed controllers.

After the modeling of the subsystems is carried out, the sizing of the system follows, using an analytical method based on real timeseries data for wind speed, solar radiation, as well as the daily load curve. The control system, taking into account the supply-demand equilibrium, emphasizes the quality of the power produced. At the same time, utilizing the auxiliary role of the supercapacitors, it ensures the efficient and economical operation of the battery pack, increasing its lifespan.

The behavior of the system is examined in both steady state and in transient conditions, for the analysis of its smooth operation. A particular control technique for power flow regulation is proposed, which ensures stable operation and uninterrupted power supply to the load. Moreover, the contribution of the supercapacitors is evaluated, regarding issues such as the supply-demand equilibrium, efficient use of the lead-acid battery bank and DC bus power quality.

**Keywords:** Energy management, Hybrid energy system, Battery storage, Lead-acid Batteries, Supercapacitors, Wind turbine, Photovoltaic generator, Wind energy, Solar energy, Power generation.

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Αντώνιο Κλαδά, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τα ερεθίσματα και την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία. Η καθοδήγησή του και η αδιάλειπτη επίβλεψη της εργασίας, σε όλα τα στάδια εκπόνησης της, ήταν για μένα πολύτιμη. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Σταύρο Παπαθανασίου και Αντώνιο Αντωνόπουλο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας</b> .....	<b>15</b>
1.3.1 Εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων.....	17
1.3.2 Βασικές τεχνολογικές διαμορφώσεις υβριδικών συστημάτων .....	17
1.3.3 Διατάξεις αποθήκευσης .....	19
1.3.4 Διαστασιολόγηση και μοντελοποίηση υβριδικών συστημάτων .....	21
<b>1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας</b> .....	<b>22</b>
<b>2. Μοντελοποίηση Συνιστωσών Υβριδικού Συστήματος</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1 Ανεμογεννήτρια</b> .....	<b>24</b>
2.1.1 Αεροδυναμικό μέρος .....	24
2.1.1.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους .....	27
2.1.2 Ηλεκτρικό μέρος.....	27
2.1.2.1 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού μέρους.....	29
<b>2.2 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια</b> .....	<b>29</b>
2.2.1 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας .....	30
<b>2.3 Μπαταρία μολύβδου-οξέος</b> .....	<b>34</b>
2.3.1 Επιλογή μπαταρίας .....	34
2.3.2 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας μολύβδου-οξέος .....	37
2.3.3 Βασικά χαρακτηριστικά μπαταρίας μολύβδου-οξέος .....	39
2.3.4 Μοντελοποίηση μπαταρίας μολύβδου-οξέος .....	40
<b>2.4 Υπερπυκνωτής</b> .....	<b>42</b>
2.4.1 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή .....	43
<b>2.5 Συνδυασμός μπαταρίας μολύβδου-οξέος με υπερπυκνωτή</b> .....	<b>46</b>
2.5.1 Μοντελοποίηση μπαταρίας μολύβδου-οξέος με υπερπυκνωτή.....	48
<b>2.6 Ελεγχόμενο φορτίο (Dump Load)</b> .....	<b>51</b>
2.6.1 Μοντελοποίηση ελεγχόμενου φορτίου .....	51
<b>2.7 Ηλεκτρονικά ισχύος</b> .....	<b>52</b>
2.7.1 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος DC-DC .....	52
2.7.1.1 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-up/Boost DC-DC Converter).....	53

2.7.1.2	Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-up/Boost DC-DC Converter) .....	55
2.7.1.3	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-Down/Buck DC-DC Converter) .....	56
2.7.1.4	Μοντελοποίηση μετατροπέα υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-Down/Buck DC-DC Converter).....	58
2.7.1.5	Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter).....	58
2.7.1.6	Μοντελοποίηση αμφίδρομου μικτού μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter) .....	63
2.7.2	Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης (Three-Phase Voltage Source DC-AC Inverter).....	63
2.7.3	Πλήρης τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα με διόδους (Full-Wave Three-Phase Uncontrolled Bridge Rectifier) .....	65
<b>3.</b>	<b>Διαστασιολόγηση και Ανάλυση Κόστους Υβριδικού Συστήματος.....</b>	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Διαστασιολόγηση του συστήματος με τη μέθοδο LPSP .....</b>	<b>68</b>
3.2.1	Η μέθοδος LPSP .....	71
3.2.2	Αποτελέσματα μεθόδου LPSP .....	73
3.2.2.1	Πολύ υψηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.0003) .....	73
3.2.2.2	Υψηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.00138) .....	74
3.2.2.2	Μέση αξιοπιστία (LPSP = 0.00694).....	74
<b>3.3</b>	<b>Διαστασιολόγηση υπερπυκνωτή .....</b>	<b>75</b>
<b>3.4</b>	<b>Ανάλυση κόστους .....</b>	<b>77</b>
3.4.1	Στοιχεία ανάλυσης κόστους .....	77
3.4.1.1	Ετήσιο κόστος συστήματος .....	77
3.4.1.2	Κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας.....	78
3.4.1.3	Κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας .....	78
3.4.1.4	Δεδομένα.....	79
3.4.2	Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους .....	79
<b>3.5</b>	<b>Διαστασιολόγηση του συστήματος με το λογισμικό HOMER .....</b>	<b>81</b>
3.5.1	Δομή του συστήματος και δεδομένα προσομοίωσης .....	81
3.5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	86
<b>4.</b>	<b>Περιγραφή και Έλεγχος Υβριδικού Συστήματος.....</b>	<b>92</b>
<b>4.1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>92</b>
<b>4.2</b>	<b>Διάταξη και περιγραφή του συστήματος.....</b>	<b>92</b>
<b>4.3</b>	<b>Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) 94</b>	<b>94</b>

4.3.1 Έλεγχος MPPT ανεμογεννήτριας με ελεγκτή ασαφούς λογικής.....	97
4.3.2 Έλεγχος MPPT Φ/Β γεννήτριας και Α/Γ μέσω μικρών μεταβολών.....	99
<b>4.4 Αλγόριθμος λειτουργίας διαχειριστικού ελέγχου .....</b>	<b>101</b>
<b>4.5 Τοπικοί ελεγκτές του συστήματος .....</b>	<b>103</b>
<b>5. Προσομοίωση Λειτουργίας Υβριδικού Συστήματος .....</b>	<b>108</b>
5.1 Εισαγωγή.....	108
<b>5.2 Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικού συστήματος .....</b>	<b>108</b>
5.2.1 Απόκριση μόνιμης κατάστασης .....	109
5.2.2 Απόκριση σε βηματική μεταβολή εισόδων .....	117
5.2.3 Απόκριση σε χρονοσειρές εισόδων .....	120
5.2.4 Αξιολόγηση λειτουργίας υπερπυκνωτών.....	129
<b>6. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα .....</b>	<b>133</b>
6.1 Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας .....	133
6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	134
6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση .....	135
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>136</b>

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το γενικότερο ερευνητικό πλαίσιο των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας από διάφορες ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια (Α/Γ) και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Φ/Β), οι οποίες αποτελούν τις κύριες πηγές παραγωγής ενέργειας, λόγω της αποδοτικής και οικονομικής αξιοποίησής τους. Επίσης, χρησιμοποιείται συστοιχία μπαταριών για την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας, και την απόδοσή της είτε κατά τη διάρκεια άπνοιας, είτε κατά τη διάρκεια της νύχτας. Μία συστοιχία υπερπυκνωτών λειτουργεί επικουρικά, για να καλύψει ταχεία μεταβατικά φαινόμενα, είτε του φορτίου, είτε της παραγωγής, που μπορεί να οφείλονται σε διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου ή της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, το σύστημα περιλαμβάνει ένα ελεγχόμενο φορτίο, το οποίο καταναλώνει την περίσσεια ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί ούτε από το φορτίο του συστήματος, ούτε από την συστοιχία μπαταριών. Κύριος στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση του συγκεκριμένου συστήματος, μέσω μοντελοποίησης των επιμέρους συνιστωσών και υποσυστημάτων του. Επιχειρείται κατάλληλη διαστασιολόγηση του συστήματος, με βάση το κόστος, αλλά και τη σωστή λειτουργία του. Εν συνεχεία, προτείνονται κατάλληλοι ελεγκτές για την ομαλή λειτουργία και διαχείριση του συστήματος. Τέλος, προσομοιώνεται και εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

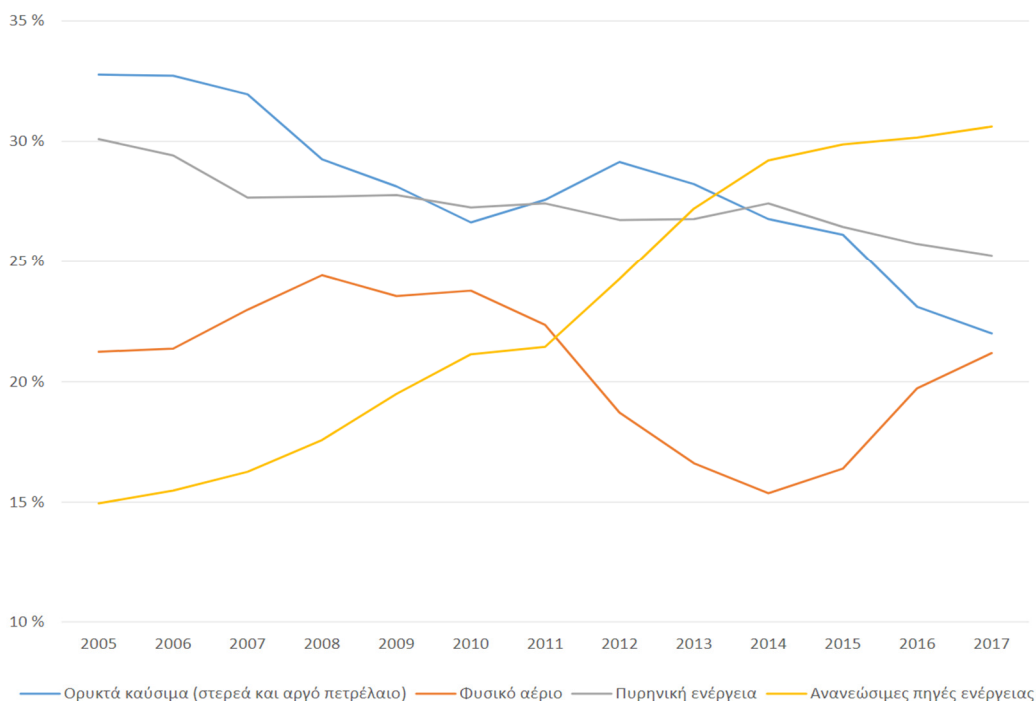
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση χώρων, τα μέσα μεταφοράς, καθώς και η λειτουργία βιομηχανικών μονάδων, είναι μερικές από τις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας που απαιτούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας, οι οποίες προέρχονται, σε μεγαλύτερο ποσοστό, από συμβατικές πηγές ενέργειας (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, σχάσιμα υλικά). Η διαφαινόμενη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων του πλανήτη, σε συνδυασμό με την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και την βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να στραφούν αφενός σε τεχνικές εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας, αφετέρου στην αξιοποίηση των ήπιων ή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά το ότι είναι ανεξάντλητες (ανανεώσιμες), άφθονες, περιβαλλοντικά καθαρότερες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η βιομάζα, η γεωθερμία, η ενέργεια της θάλασσας, η υδραυλική ενέργεια και τα βιοαέρια. Είναι οι πρώτες πηγές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και, μέχρι τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, σχεδόν αποκλειστικά, οπότε και στράφηκε στην έντονη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν μια καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον. Η χρήση τους δεν επιβαρύνει τα οικοσυστήματα των περιοχών εγκατάστασης και παράλληλα αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας, όπως τον άνθρακα και το πετρέλαιο. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων αναπτυγμένων χωρών καθιστούν τις ΑΠΕ ιδιαίτερα ελκυστικές σε σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την επόμενη δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η αξιοποίησή τους δεν το επιβαρύνει, αφού δεν συνοδεύεται από παραγωγή ρύπων ή αερίων που ενισχύουν τον κίνδυνο για κλιματικές αλλαγές, δεδομένου ότι έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικά υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος [1], [2].

Τη στιγμή που οι περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες εξαρτώνται σήμερα από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας αποτελούν μια ευκαιρία για αποκεντρωμένη προμήθεια ενέργειας, η οποία δημιουργεί περισσότερες θέσεις εργασίας τοπικά. Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας δεν ανοίγουν μόνο προοπτικές για την περιβαλλοντικά συμβατή αναδιάρθρωση της ενεργειακής αλυσίδας. Συμβάλλουν επίσης στην εκτόνωση εντάσεων στην παγκόσμια αγορά ενέργειας, και κατ' επέκταση σε πολιτική και οικονομική ασφάλεια, με απώτερο στόχο το μεγαλύτερο ενεργειακό κέρδος [3].

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το διάστημα μεταξύ 1990 και 2017, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ αυξήθηκε κατά μέσο όρο 1% ετησίως, περνώντας από λιγότερο από 2.2 δισεκατομμύρια GWh, σε περίπου 2.8 δισεκατομμύρια GWh ετησίως. Μεταξύ 2005 και 2017, το ποσοστό των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ διπλασιάστηκε, από περίπου 15% σε σχεδόν 31%, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:

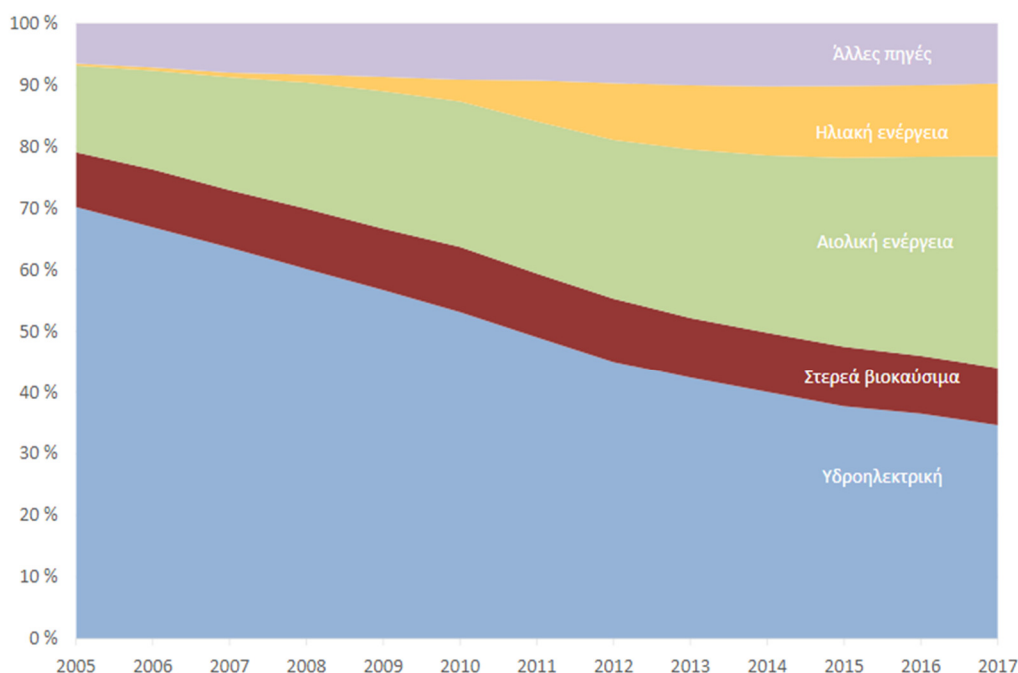


Πηγή: ΕΕΣ, βάσει στοιχείων της Eurostat.

**Σχήμα 1.1:** Ποσοστό ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ, περίοδος 2005-2017 [4].



Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται κυρίως στις εξής δύο τεχνολογίες ΑΠΕ: την αιολική και την ηλιακή. Παρά το γεγονός ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια εξακολουθεί να είναι πρώτη από άποψη ποσότητας, την περίοδο 2005-2017 η ετήσια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη από αιολική ενέργεια αυξήθηκε κατά 414%. Το αντίστοιχο ποσοστό για την ηλεκτρική ενέργεια που παρήχθη από ηλιακή ενέργεια ήταν 8086%. Το ίδιο διάστημα, η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παραγόταν από υδροηλεκτρική ενέργεια παρέμεινε σε γενικές γραμμές σταθερή. Το 2017, η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιστοιχούσε σε ποσοστό 35% του συνόλου της ηλεκτρικής παραγωγής από ΑΠΕ, ενώ η αιολική και η ηλιακή ενέργεια αντιστοιχούσαν στο 34% και στο 12% αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

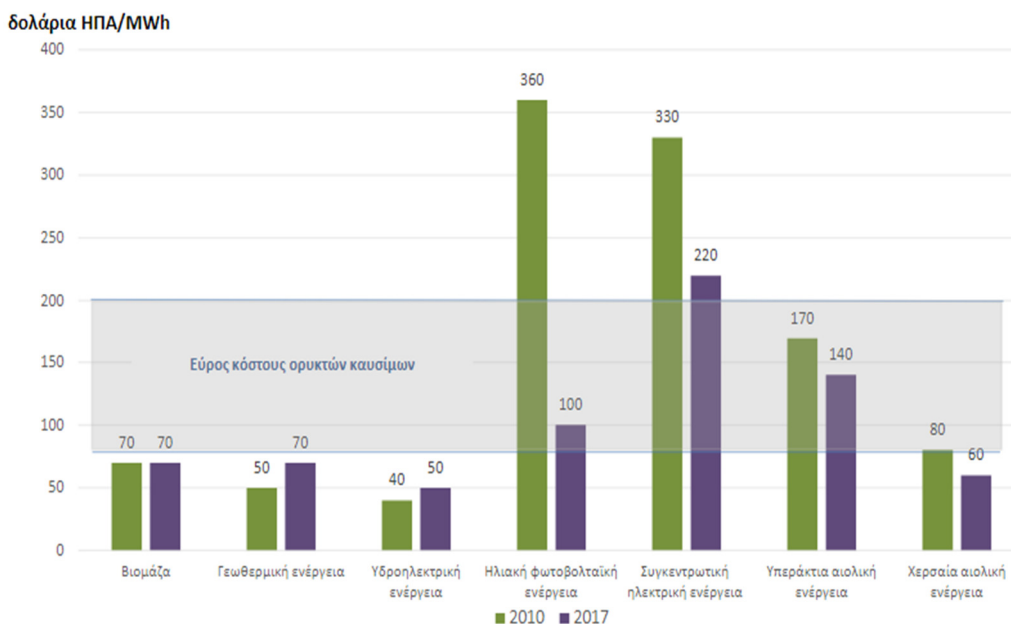


Πηγή: ΕΕΣ, βάσει στοιχείων της Eurostat.

**Σχήμα 1.2:** Μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη από ΑΠΕ στην ΕΕ των 28, περίοδος 2005-2017 [4].

Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται το συνολικό σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες τεχνολογίες παραγωγής. Παρατηρείται ότι, λόγω μειώσεων του κόστους της τεχνολογίας, η αιολική και η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια ανταγωνίζονται τα ορυκτά καύσιμα, από οικονομικής άποψης, πολύ περισσότερο από ό,τι στο παρελθόν. Ο βιομηχανικός κλάδος της ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιεί τον δείκτη του σταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΚΗΕ) προκειμένου να υπολογίσει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, είτε ΑΠΕ είτε μη. Αντιπροσωπεύει το ανά μεγαβατώρα κόστος κατασκευής και εκμετάλλευσης ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια του αναμενόμενου οικονομικού κύκλου ζωής του.

Σύμφωνα με τον IRENA, το 2017 το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με τη χρήση ΑΠΕ ήταν συχνά συγκρίσιμο με αυτό των ορυκτών καυσίμων. Εδώ και αρκετά χρόνια, το ΣΚΗΕ που αφορά την αιολική ενέργεια βρίσκεται εντός του εύρους κόστους των ορυκτών καυσίμων. Σχετικά πρόσφατα, το ΣΚΗΕ που αφορά τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς μειώθηκε και αυτό σε συγκρίσιμα επίπεδα, γεγονός που προκλήθηκε από τη μείωση κατά 81% του κόστους των φωτοβολταϊκών συλλεκτών και άλλων στοιχείων του σταθμού από τα τέλη του 2009 και μετά [4].



Πηγή: ΕΕΣ, βάσει της έκθεσης του IRENA «Renewable power generation costs in 2017», σελ. 17.

**Σχήμα 1.3:** Συνολικό σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περίοδος 2010-2017 (σε δολάρια ΗΠΑ/MWh) [4].

Οι μεγάλες ποσότητες ενέργειας που είναι δυνατό, επομένως, να παραχθούν με οικονομικά συμφέροντα τρόπο, καθώς και η ευρεία ποικιλία των εφαρμογών που μπορούν να αναπτυχθούν, καθιστούν τα πάσης φύσεως συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής και αιολικής ενέργειας ενδιαφέροντα, και, σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερος ελκυστικά [5].

Η Ελλάδα, γεωγραφικά και γεωλογικά, διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με την εκμετάλλευση των ΑΠΕ [3]. Η Ελλάδα βρίσκεται σε μία από τις πλέον ευνοημένες περιοχές του πλανήτη, τόσο από την πλευρά της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας, όσο και από αυτήν της διαθεσιμότητάς της. Πράγματι, στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρας, η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο. Ο συνδυασμός του γεωγραφικού πλάτους της Ελλάδας και της υψηλής ηλιοφάνειάς της έχει ως αποτέλεσμα να προσπίπτουν ημερησίως, κατά μέσο όρο, 4.3 kWh ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο οριζόντιας επιφάνειας. Αυτό, συντελεί στο να είναι δυνατή, σε ολόκληρη την επικράτεια, η οικονομικά επωφελής εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η Ελλάδα, κατέχει, επίσης, μερικές από τις πιο ελκυστικές τοποθεσίες για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη. Η μεγάλη ακτογραμμή της και το τεράστιο πλήθος νησιών, έχουν ως αποτέλεσμα να πνέουν ισχυροί άνεμοι, κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές, προσδίδοντας ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Είναι αξιοσημείωτο ότι το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται πως αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας [5], [6].

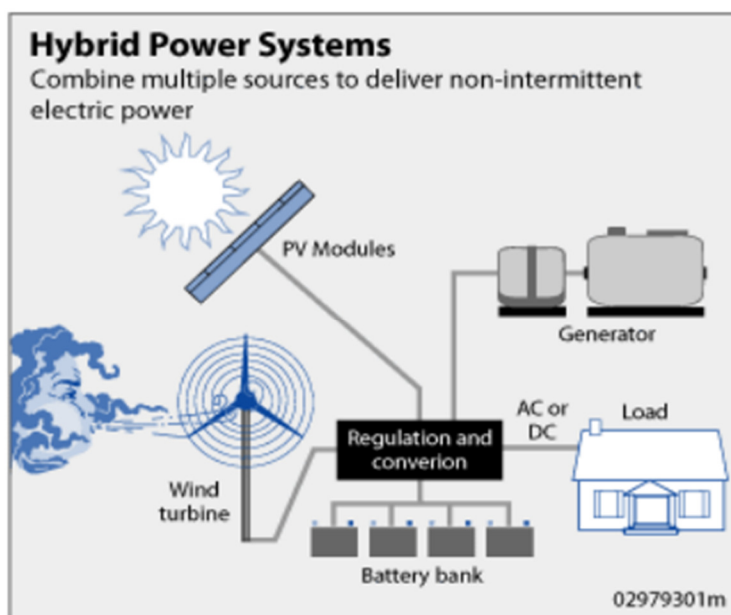
Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι ο συνδυασμός διαφορετικών μορφών ΑΠΕ, όπως της ηλιακής και της αιολικής, και η ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο υβριδικό σύστημα, σε περιοχές όπου υπάρχει υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό, μπορεί να δώσει μια αξιόπιστη απάντηση στο πολύ σημαντικό ζήτημα της αποθήκευσης και ελεγχόμενης διανομής της παραγόμενης ενέργειας.

### 1.3 Υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας

Ο στοχαστικός χαρακτήρας πολλών μορφών ΑΠΕ θέτει ορισμένους τεχνικοοικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς κατά την χρήση τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Για παράδειγμα, η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας προϋποθέτει τη χρήση αποθηκευτικών μέσων εξαιτίας της διακύμανσης στην διάθεσή της. Το ίδιο ισχύει και για την αιολική ενέργεια, η οποία παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα, λόγω αντίστοιχης μεταβλητότητας στην ταχύτητα του ανέμου. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν άλλες μορφές ΑΠΕ που παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα και υπάρχει καλύτερη προβλεψιμότητά τους, όπως η γεωθερμία και η βιομάζα. Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει στην έρευνα και ανάπτυξη των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία, γενικά, ορίζονται ως εκείνα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνουν περισσότερες από μια ηλεκτρικές γεννήτριες, διαφορετικής τεχνολογίας ως προς το εν χρήσει καύσιμο [7].

Ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου (σχήμα 1.4). Με αυτήν την έννοια, τα υβριδικά συστήματα αποτελούν μια εναλλακτική επιλογή, αντί των συμβατικών συστημάτων, τα οποία τυπικά βασίζονται στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα [8].

Τα υβριδικά συστήματα εκμεταλλεύονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας, και παρέχουν ενέργεια τέτοιας ποιότητας, όπως αυτής του δικτύου, με ένα εύρος από μερικά W μέχρι πολλές εκατοντάδες kW. Έτσι, μπορούν να αναπτυχθούν σαν καινούρια, αυτόνομα και ανεξάρτητα συστήματα μέσα σε μικρά συστήματα διανομής ενέργειας (mini-grids) ή να ενταχθούν σε υπάρχουσες θερμικές μονάδες βασιζόμενες στο πετρέλαιο, μετά από τις απαραίτητες επεμβάσεις στο υπάρχον σύστημα.



**Σχήμα 1.4:** Ένα τυπικό υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια, συμβατική γεννήτρια, μπαταρίες) με το εξυπηρετούμενο φορτίο [10].

Όπως προαναφέρθηκε, ένα τυπικό υβριδικό σύστημα συνδυάζει δύο ή και περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Από ΑΠΕ, συνηθίζεται η χρήση φωτοβολταϊκών (Φ/Β), ανεμογεννητριών (Α/Γ) ή μικρών υδροηλεκτρικών συστημάτων, ενώ

από τις συμβατικές τεχνολογίες, χρησιμοποιούνται συνήθως νηζελογεννήτριες και μονάδες που παράγουν ενέργεια από τη χρήση βιομάζας, όπου αυτό είναι εφικτό [9]. Επιπλέον, περιλαμβάνονται ηλεκτρονικά ισχύος, όπως ανορθωτές, αντιστροφείς και ρυθμιστές τάσης. Αρκετά συστήματα έχουν τη δυνατότητα είτε της άμεσης χρησιμοποίησης της ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ, είτε της αποθήκευσης της σε διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι οι συσσωρευτές.

Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας χαρακτηρίζονται γενικά ως δυναμικά συστήματα, καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εναλλάσσουν τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας, ή και να τις συνδυάζουν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να εξαρτώνται κατά το ελάχιστο από τις μεταβολές εξωγενών παραγόντων, όπως το τοπικό δίκτυο, η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου, η ροή του νερού κτλ.

Ενδεικτικά, τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας επιτυγχάνουν τα εξής [10]:

- Διασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος.
- Εκμεταλλεύονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, διασφαλίζοντας υψηλή απόδοση.
- Ικανοποιούν το φορτίο, ακόμα και σε περίπτωση χαμηλού ανανεώσιμου δυναμικού.
- Συμβάλλουν στη διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών, αποφεύγοντας, έτσι, την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.
- Επιτυγχάνουν την μειωμένη κατανάλωση καυσίμου στην περίπτωση των συμβατικών μονάδων, καθώς αυτές χρησιμοποιούνται σε σχετικά σταθερό φορτίο, σε σύγκριση με συστήματα που περιλαμβάνουν μόνο τις αντίστοιχες μονάδες συμβατικής τεχνολογίας.

Τα υβριδικά συστήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο και στα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να εγκαθίστανται είτε αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ως συστήματα υποστήριξης σε περιπτώσεις διακοπής του ηλεκτρικού δικτύου, είτε μπαίνουν σε λειτουργία τις ώρες αιχμής όταν η τιμή της kWh είναι υψηλή. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μονάδες ΑΠΕ οι οποίες είτε συνδέονται απευθείας στο δίκτυο, είτε αποθηκεύουν την ενέργειά τους σε μέσα αποθήκευσης, ώστε αυτή να χρησιμοποιηθεί όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Συνήθως οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή αυτή είναι η τιμή της παραγόμενης kWh από την κάθε μορφή ΑΠΕ και το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί, όποτε αυτό απαιτείται [9].

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού, που δεν είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς, παρά μόνο σύστημα διανομής. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι το αυτόνομο πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, πρέπει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής άεργου ισχύος, ώστε να ρυθμίζει την τάση του φορτίου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από τις μονάδες ΑΠΕ του συστήματος ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιον τρόπο, ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου [8].

### 1.3.1 Εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα κατά κύριο λόγο εφαρμόζονται για την αδιάλειπτη λειτουργία σημαντικών οικιακών και επαγγελματικών εφαρμογών ή εφαρμογών πρώτης ανάγκης, όπως στρατιωτικές μονάδες, αεροδρόμια και νοσοκομεία, ή ευαίσθητων φορτίων, σε περιοχές όπου το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει προβλήματα (διακοπές ή μεταβολές τάσης). Ο πιο συνηθισμένος συνδυασμός είναι αυτός μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών και μιας ανεμογεννήτριας. Τα φωτοβολταϊκά είναι πιο ισχυρά για μικρά φορτία, ενώ οι ανεμογεννήτριες, συνήθως, βοηθούν για μεγαλύτερα φορτία [11]. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να παρέχουν σταθερές υπηρεσίες ηλεκτρισμού σε επίπεδο κοινότητας, όπως η ηλεκτροδότηση ενός χωριού, προσφέροντας επίσης τη δυνατότητα αναβάθμισης, μέσω μελλοντικής σύνδεσης στο δίκτυο. Επιπλέον, χάρη στα τα υψηλά επίπεδα απόδοσης, αξιοπιστίας και μακροπρόθεσμης λειτουργίας, τα συστήματα αυτά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αποτελεσματική εφεδρική λύση, αντί του δημόσιου δικτύου, σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος ή αδύναμων δικτύων, και για επαγγελματικές ενεργειακές λύσεις, όπως σταθμοί τηλεπικοινωνιών ή αίθουσες έκτακτης ανάγκης στα νοσοκομεία [13]. Επίσης, μπορούν να τροφοδοτήσουν τον φωτισμό δρόμων, συστήματα τηλεπικοινωνιών και άλλες κοινοτικές υπηρεσίες (όπως άντληση νερού, κλινικές υγείας, σχολικός φωτισμός, κ.α.) [12].

Το κόστος ηλεκτροδότησης μιας περιοχής καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το κόστος εγκατάστασης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υψηλής και μέσης τάσης, το κόστος που θα έχει η πιθανή δημιουργία υποσταθμών, το κόστος κατασκευής του δικτύου διανομής, το μέγεθος του φορτίου που θα χρειαστεί να καλυφθεί, η απόσταση του φορτίου από την υπάρχουσα γραμμή μεταφοράς και το είδος του εδάφους που θα πρέπει να διασχιστεί. Συνεπώς, τα υβριδικά συστήματα βρίσκουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή σε περιοχές των οποίων η σύνδεση στο δίκτυο και η μεταφορά του καυσίμου θεωρούνται μη συμφέρουσες, οικονομικά, επιλογές. Συνηθέστερα, εγκαθίστανται σε αγροτικές περιοχές που είναι απομονωμένες από το δίκτυο. Επειδή οι περιοχές αυτές δεν εμφανίζουν υψηλό φορτίο ζήτησης και συνήθως βρίσκονται μακριά από το υπάρχον δίκτυο, κρίνεται αντιοικονομική η δημιουργία δικτύου για την ηλεκτροδότησή τους. Συνεπώς, η παροχή ενέργειας από υβριδικά συστήματα που βασίζονται σε ΑΠΕ κρίνεται πιο οικονομική σε αυτές τις περιπτώσεις, ενώ παράλληλα αποτελούν λύση φιλικότερη προς το περιβάλλον. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα υβριδικά συστήματα παρέχουν πάντοτε τη δυνατότητα μελλοντικής σύνδεσης με το δίκτυο, στις περιοχές όπου γίνεται η εγκατάστασή τους [14].

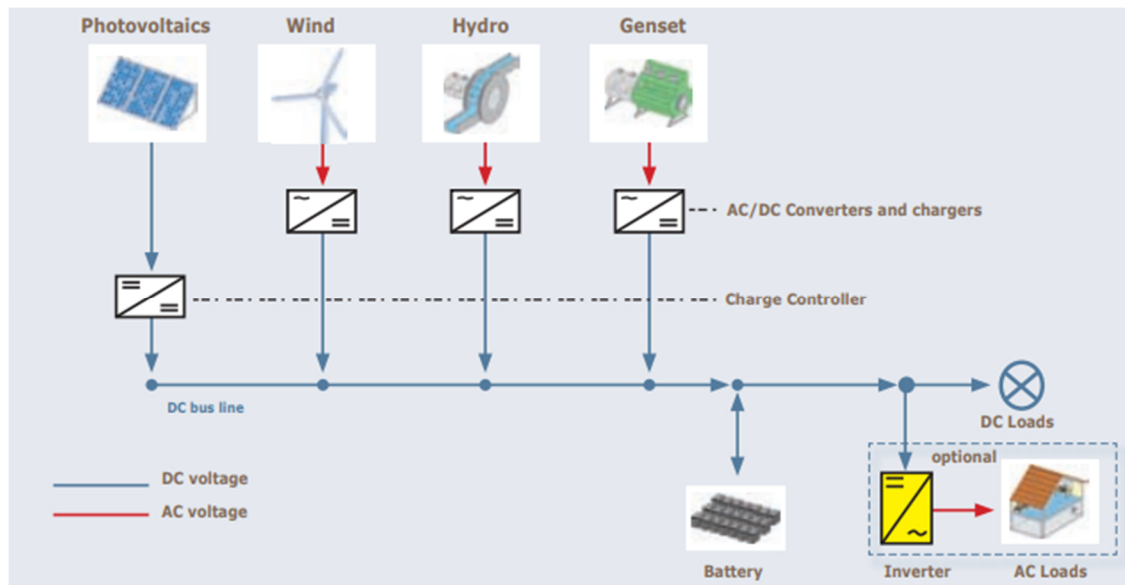
Τέλος, για οικιακή χρήση, χρησιμοποιούνται υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών θερμικής ισχύος (PV-T). Σε αυτές τις περιπτώσεις εγκαθίστανται συλλέκτες που ενσωματώνουν σε ένα σώμα την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για την κάλυψη όλων των τύπων αναγκών ενός κτιρίου [11].

Ο σχεδιασμός των υβριδικών συστημάτων επιφέρει ποικίλες τοπολογίες, με τις επιμέρους συνιστώσες τους να διαφέρουν σε μέγεθος ανάλογα με την εφαρμογή την οποία εξυπηρετούν.

### 1.3.2 Βασικές τεχνολογικές διαμορφώσεις υβριδικών συστημάτων

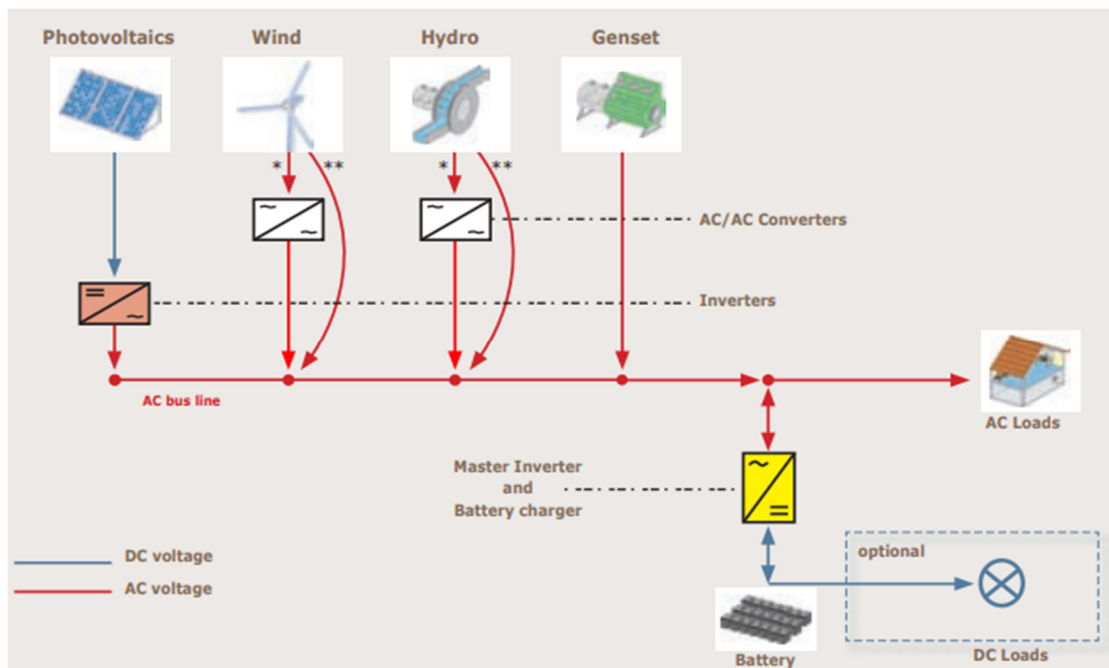
Οι κύριες διαμορφώσεις των υβριδικών συστημάτων προκύπτουν σύμφωνα με την αποτελεσματική χρήση των τοπικά διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και για την εξυπηρέτηση όλων των ηλεκτρικών συσκευών και φορτίων (που απαιτούν DC ή AC ρεύμα). Έτσι, οι τεχνολογικές διαμορφώσεις μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την τάση με την

οποία συνδέονται. Συνεπώς, προκύπτουν τρεις βασικές τοπολογίες, χρησιμοποιώντας DC, AC και μικτούς (DC και AC) ζυγούς, όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα.



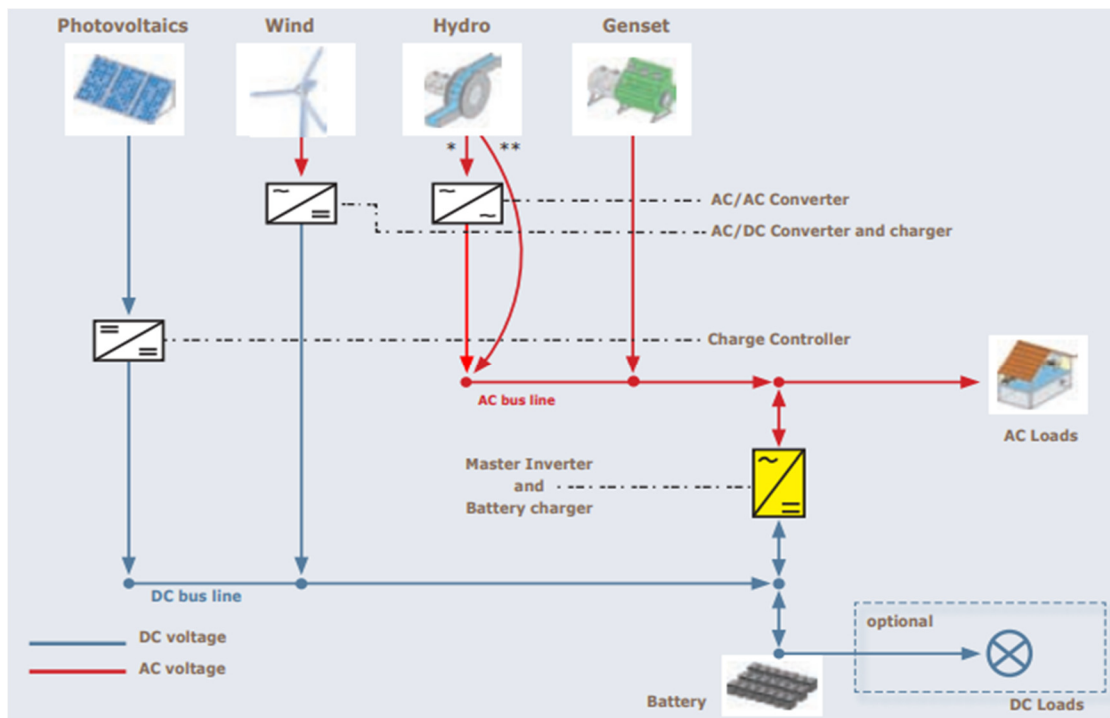
**Σχήμα 1.5:** Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας συνδεδεμένο σε DC ζυγό [13].

Στο σχήμα 1.5, παρουσιάζεται ένα υβριδικό σύστημα συνδεδεμένο σε DC ζυγό, για την εξυπηρέτηση DC φορτίων. Όλα τα στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται με μια κοινή γραμμή DC, από την οποία φορτίζεται η μπαταρία. Οι συνιστώσες που παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα απαιτούν μετατροπείς AC/DC. Η μπαταρία, ελεγχόμενη και προστατευμένη από υπερφορτίσεις και υπερεκφορτίσεις από έναν ελεγκτή φόρτισης, τροφοδοτεί, στη συνέχεια, τα φορτία DC, ανάλογα με την ζήτηση. Προαιρετικά, φορτία AC μπορούν να τροφοδοτούνται με χρήση ενός αντιστροφέα.



**Σχήμα 1.6:** Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας συνδεδεμένο σε AC ζυγό [13].

Στο σχήμα 1.6, παρουσιάζεται ένα υβριδικό σύστημα συνδεδεμένο σε AC ζυγό, για την εξυπηρέτηση AC φορτίων. Όλα τα στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται με μια κοινή γραμμή AC. Οι συνιστώσες που παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ή μπορεί να χρειαστούν μετατροπέα AC/AC για να επιτραπεί η σταθερή σύζευξή τους. Και στις δύο περιπτώσεις, ένας κύριος, αμφίδρομος αντιστροφέας ελέγχει την παροχή ενέργειας για τα φορτία AC και τη φόρτιση της μπαταρίας. Προαιρετικά, φορτία DC μπορούν να τροφοδοτούνται από την μπαταρία.



**Σχήμα 1.7:** Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας συνδεδεμένο σε AC/DC ζυγό [13].

Στο σχήμα 1.7, οι DC και AC συνιστώσες του υβριδικού συστήματος συνδέονται στις δύο πλευρές ενός κύριου αντιστροφέα, ο οποίος ελέγχει την παροχή ενέργειας των AC φορτίων. Προαιρετικά, φορτία DC μπορούν να τροφοδοτούνται από την μπαταρία. Οι συνιστώσες που παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ή μπορεί να χρειαστούν μετατροπέα AC/AC για να επιτραπεί η σταθερή σύζευξή τους, ενώ, αντίστοιχα, οι DC συνιστώσες μπορούν να συνδεθούν απευθείας στον DC ζυγό, ή μπορεί να χρειαστούν μετατροπέα DC/DC για να επιτραπεί η σταθερή σύζευξή τους [13]. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση του σχήματος 1.5, AC συνιστώσες μπορούν να συνδεθούν και στον DC ζυγό, με χρήση κατάλληλου μετατροπέα AC/DC (ανορθωτή).

### 1.3.3 Διατάξεις αποθήκευσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα αυτόνομα συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια είναι οι πιο ελπιδοφόρες ΑΠΕ για την ηλεκτροπαραγωγή. Η παραγόμενη όμως ενέργεια από τις αιολικές μηχανές και τα Φ/Β, εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, δεδομένου ότι βασίζεται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ. ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία), που προκαλούν μεταβολή στη διαθεσιμότητα του ήλιου και του ανέμου. 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 δημιουργείται πλεόνασμα ενέργειας, με αποτέλεσμα η ενέργεια να μην μπορεί να απορροφηθεί εξ' ολοκλήρου. Επομένως, σε τέτοια συστήματα, η μονάδα αποθήκευσης είναι σημαντική για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, σε περιπτώσεις πλεονάσματος, και την απόδοσή της όταν υφίσταται έλλειμμα από ΑΠΕ (π.χ. σε περίπτωση άπνοιας ή κατά τη διάρκεια της νύχτας).

Στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση ανακύπτει από την ανάγκη κάλυψης των αιχμών ισχύος. Σε τέτοια συστήματα, η μονάδα αποθήκευσης προσθέτει αξία στις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές, διευκολύνοντας τον καλύτερο συσχετισμό της τροφοδοσίας με τη ζήτηση.

Γενικά, σε συνδυασμό με την ανανεώσιμη πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αξία του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα Φ/Β και τα αιολικά συστήματα, καθιστώντας ικανή την τροφοδοσία να συμπίπτει με την περίοδο της μέγιστης ζήτησης της κατανάλωσης. Παράλληλα, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ΑΠΕ, όπως των αιολικών και ηλιακών συστημάτων, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η εφαρμογή των διατάξεων των ανανεώσιμων πηγών παράλληλα με συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης, παρέχει στις ανανεώσιμες πηγές ευελιξία εγκατάστασης, με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ενεργειακή αποθήκευση διαδραματίζει, επίσης, έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού, όσον αφορά την αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων. Επιπλέον, μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού.

Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης είναι, προφανώς, διαφορετικών τύπων, αφού απαντούν σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τα οποία ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις ανάγκες. Μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους: τις διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης και τις διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας.

Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν, δηλαδή, η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα ισχύος για μικρά χρονικά διαστήματα. Οι διατάξεις αυτές εφαρμόζονται για να βελτιώσουν την ποιότητα ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα και, συγκεκριμένα, για να διατηρήσουν σταθερή την τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν για λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά. Στην κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας εντάσσονται οι σφόνδυλοι (flywheels), οι υπερπυκνωτές (supercapacitors/ultracapacitors) και τα υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

Οι διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους. Είναι κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων, καθώς και για αποθέματα ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών, και να συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην



κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου (fuel cells – hydrogen energy storage) [15].

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, ως διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται μπαταρίες, καθώς αποτελούν την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη αποθηκευτική τεχνολογία επαναφορτιζόμενων ηλεκτροχημικών συσκευών. Οι μπαταρίες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα και αποτελούν πλέον ώριμη τεχνολογία [15]. Επίσης, σε συνδυασμό με τις μπαταρίες, επιλέγεται και η χρήση υπερπυκνωτών. Με το συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης, το σύστημα μπορεί να αποκτήσει όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η κάθε επιμέρους διάταξη, αυξάνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία του. Η μπαταρία διαθέτει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ενώ ο υπερπυκνωτής διαθέτει υψηλή πυκνότητα ισχύος [16]. Συνεπώς, ο συνδυασμός μπαταριών με υπερπυκνωτές μπορεί να προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα, ειδικά για τις απαιτήσεις ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος για άμεση και αδιάκοπη τροφοδοσία, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

### **1.3.4 Διαστασιολόγηση και μοντελοποίηση υβριδικών συστημάτων**

Η βέλτιστη σχεδίαση και η μοντελοποίηση ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας που περιλαμβάνει τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες, λόγω του μεγάλου αριθμού των διαθέσιμων επιλογών σχεδίασης, της αβεβαιότητας και μεταβλητότητας σημαντικών παραμέτρων, όπως η ζήτηση φορτίου, και της αδυναμίας ελέγχου του ρυθμού παροχής της πρωτογενούς ενέργειας σε ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία [17]. Συνήθως, ο προσδιορισμός του μεγέθους εκάστης συνιστώσας του υβριδικού γίνεται με κριτήριο τη βέλτιστη, από τεχνοοικονομικής πλευράς, κάλυψη των ηλεκτρικών ενεργειακών απαιτήσεων μιας εφαρμογής. Έχουν προταθεί ποικίλες μέθοδοι υπολογισμού των συνιστωσών ενός υβριδικού συστήματος, οι διαφορές των οποίων εντοπίζονται σε εξειδικευμένα τεχνοοικονομικά και λειτουργικά κριτήρια βελτιστοποίησης της αποδιδόμενης από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, οι ενεργειακοί υπολογισμοί σε ένα υβριδικό σύστημα αποσκοπούν στον προσδιορισμό των υποσυστημάτων του, με βάση την απαίτηση για ολική ή μερική κάλυψη των μέσων ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων των καταναλώσεων της εφαρμογής, ανά μήνα ή ετησίως. Λαμβάνονται υπόψη όλες οι απώλειες κατά τις ενεργειακές μετατροπές και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, από το χώρο παραγωγής στο χώρο εκμετάλλευσης [17].

Ωστόσο, ο τρόπος καθορισμού της καταλληλότερης τεχνολογικής λύσης για το υβριδικά συστήματα συνεπάγεται πάντοτε μια μελέτη σκοπιμότητας, που βασίζεται στη συλλογή δεδομένων για κάθε συγκεκριμένη περιοχή εγκατάστασης (πχ. χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας, κτλ.), και σε ανάλυση κόστους σε όλο τον κύκλο ζωής του συστήματος. Τεχνικές, οικονομικές, και κοινωνικό-πολιτισμικές εκτιμήσεις πρέπει να συμπεριληφθούν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, ώστε να διασφαλιστεί η κατάλληλη επιλογή των τεχνολογιών για τη λειτουργία του συστήματος. Η επιλογή της περιοχής εγκατάστασης, η αξιολόγηση των διαθέσιμων πόρων και η ανάλυση του ζητούμενου φορτίου είναι ένα από τα βασικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό μιας βέλτιστης λύσης ισχύος για το σύστημα. Μόλις ολοκληρωθεί η επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης του συστήματος, μια προσεκτική και υπεύθυνη επιλογή των συνιστωσών πρέπει να πραγματοποιείται, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως: ποιότητα (αξιοπιστία),

απόδοση, απαιτήσεις τακτικής συντήρησης, διαθεσιμότητα υπηρεσιών, το κόστος της συντήρησης, εγγύηση, διαθεσιμότητα ανταλλακτικών και κόστος [13].

Αν και υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα μεγέθη και, συνεπώς, στα χαρακτηριστικά των συνιστωσών των υβριδικών συστημάτων, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η τάση στο δίκτυο ή φορτίο και η συχνότητα του συστήματος θα παραμένουν εντός επιτρεπόμενων ορίων κατά τη διάρκεια των διάφορων διαταραχών (όπως κατά τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, τη διακύμανση του τροφοδοτούμενου φορτίου, κλπ.), με χρήση καθιερωμένων μεθόδων ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, κατάλληλα προσαρμοσμένων. Η βασική αρχή των μεθόδων αυτών συνίσταται στην μοντελοποίηση των διάφορων επιμέρους συνιστωσών, και των συστημάτων ελέγχου τους και στην εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος σε διάφορες διαταραχές που είναι ενδεχόμενο να συμβούν. Η εξέταση αυτή περιλαμβάνει, για μεν τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, την κατανομή του φορτίου, για δε τη μεταβατική κατάσταση, τον προσδιορισμό του εύρους των αποκλίσεων συχνότητας και τάσεως που προκαλούνται για μια ορισμένη διαταραχή, καθώς και τον έλεγχο για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος για μικρές ή μεγάλες διαταραχές (όπως απότομων μεταβολών του ανέμου ή βραχυκυκλωμάτων του δικτύου).

Σύμφωνα και με όσα αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, υπάρχουν πολλές διαφορές στις συνιστώσες μεταξύ συστημάτων, αλλά και πολλές διαφορές μεταξύ ίδιων συνιστωσών, αναφορικά με τον τύπο, μέγεθος και την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Εξίσου πολλές, επομένως, είναι και οι μέθοδοι προσομοίωσης (μοντέλα) των επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Η κατάλληλη επιλογή των μοντέλων, ώστε με τον απλούστερο και οικονομικότερο, από πλευράς υπολογισμών, τρόπο να επιτευχθεί ικανοποιητική προσομοίωση, εξαρτάται από το εξεταζόμενο πρόβλημα και, ειδικότερα, από την ταχύτητα των μεταβολών που προκαλούν την διαταραχή του συστήματος, τα χαρακτηριστικά του, την ακρίβεια των τιμών των παραμέτρων, κ.α. [19].

## 1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η συμβολή των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνουν ΑΠΕ και διατάξεων αποθήκευσης, στην προώθηση των ΑΠΕ. Παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές και τοπολογίες των υβριδικών συστημάτων, καθώς και τεχνικά και οικονομικά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διαστασιολόγηση και μοντελοποίηση ενός υβριδικού συστήματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αναλυτική μοντελοποίηση των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος με τη χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Το σύστημα που μελετάται περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια μόνιμων μαγνητών – μεταβλητών στροφών, μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μία συστοιχία μπαταριών μολύβδου-οξέος, μία συστοιχία υπερπυκνωτών και ένα ελεγχόμενο φορτίο. Περιγράφεται η αρχή λειτουργίας, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε συνιστώσας.

Στο τρίτο κεφάλαιο επιλέγεται κατάλληλη διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος με τη μέθοδο της πιθανότητας απώλειας τροφοδοσίας (μέθοδος LPSP). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάλυση κόστους του συστήματος και μελετάται η επίδραση της επιλεχθείσας διαστασιολόγησης στο κόστος. Τέλος, γίνεται επαλήθευση της επιλεχθείσας διαστασιολόγησης με την προσομοίωση του συστήματος σε ετήσια βάση, χρησιμοποιώντας το λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources).

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή και η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος. Τα υποσυστήματα ελέγχου περιλαμβάνουν

τον έλεγχο εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking – MPPT) των κύριων ενεργειακών πηγών, τον κύριο αλγόριθμο διαχείρισης του συστήματος, καθώς και ορισμένους τοπικούς ελεγκτές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος, με τη χρήση του λογισμικού SIMULINK/MATLAB, και της μελέτης για την ευστάθειά του, για λειτουργία σε σταθερή κατάσταση, αλλά και σε μεταβατικά φαινόμενα.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας και επισημαίνονται τα στοιχεία καινοτομίας της. Επιπλέον, προτείνονται θέματα που απαιτούν περαιτέρω μελέτη, και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας.

## 2. Μοντελοποίηση Συνιστωσών Υβριδικού Συστήματος

### 2.1 Ανεμογεννήτρια

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών, ανάλογα με την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους, καθένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα λειτουργίας. Οι πρώτες κατασκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελούνταν από ασύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών με κατάλληλο μηχανικό κιβώτιο πολλαπλασιασμού. Για τον λόγο αυτό, οι στροφές του ανεμοκινητήρα κινούνταν σε πολύ στενά πλαίσια, οπότε η παραγωγή ισχύος ήταν χαμηλότερη σε σχέση με αυτήν των μεταβλητών στροφών, ενώ οι διακυμάνσεις του ανέμου προκαλούσαν καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος προς το δίκτυο. Επίσης, ένα ακόμα πρόβλημα που προκύπτει λόγω της παρουσίας του κιβωτίου ταχυτήτων είναι η ανάγκη για την συνεχή συντήρησή του και για αντικατάσταση πολύ πριν από το αναμενόμενο όριο ζωής του. Η τάση, σήμερα, στις εφαρμογές μικρής ισχύος είναι η εξάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων, ώστε να περιοριστούν οι μηχανικές καταπονήσεις και βλάβες, με την κατασκευή πολυπολικών σύγχρονων γεννητριών, με χρήση μόνιμων μαγνητών. Τέτοιες ανεμογεννήτριες προσφέρουν πλεονεκτήματα, όπως καλύτερη αξιοπιστία, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και βελτιωμένη απόδοση. Τα υλικά των μόνιμων μαγνητών παλαιότερα εμφάνιζαν προβλήματα απομαγνήτισης με το χρόνο και σε έντονες πεδιακές μεταβολές. Ωστόσο, τα κράματα με σπάνιες γαίες όπως το νεοδύμιο, που χρησιμοποιούνται σήμερα, εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους και είναι κατάλληλα για τη χρήση σε ανεμογεννήτριες, αν και εμφανίζουν σχετικά αυξημένο κόστος [20],[21].

#### 2.1.1 Αεροδυναμικό μέρος

Η αεροδυναμική ισχύς του ανέμου που μετατρέπεται σε μηχανική από τον ανεμοκινητήρα υπολογίζεται από τη γνωστή εξίσωση:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (2.1)$$

όπου  $P_w$  είναι η ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο ( $W$ ),  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα, η οποία λαμβάνεται ίση με  $1.225 \text{ kg/m}^3$  σε επίπεδο θάλασσας και θερμοκρασία  $T = 288K$ ,  $C_p$  είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος,  $V_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου προς τα ανάντη του δρομέα ( $m/s$ ) και  $A$  είναι η περιοχή που σαρώνεται από το δρομέα ( $m^2$ ) που υπολογίζεται ως:

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2.2)$$

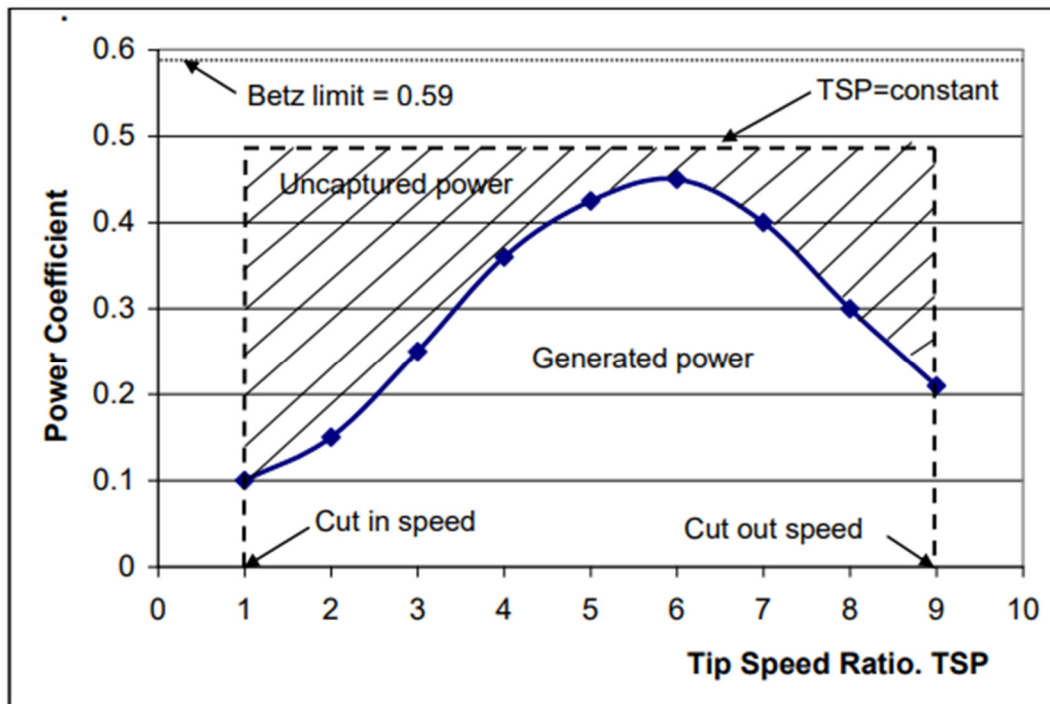
όπου  $R$  η ακτίνα της έλικας ( $m$ ).

Η αεροδυναμική ροπή,  $T_w$ , σε  $N \cdot m$  δίνεται από τον λόγο μεταξύ της εξαγόμενης από τον άνεμο ισχύος ( $P_w$ ), σε  $W$ , και της ταχύτητας του δρομέα της  $A/\Gamma$ ,  $\omega_w$ , σε  $rad/s$ , σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_w} \quad (2.3)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μηχανική ροπή που μεταδίδεται στη γεννήτρια ( $T_G$ ) είναι ίδια με την αεροδυναμική ροπή, εφόσον δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό υποδηλώνει ότι ο λόγος κιβωτίου ταχυτήτων είναι  $N_{G/B} = 1$ , οπότε και  $T_W = T_G$ .

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  φτάνει μία μέγιστη τιμή ίση με 0.593, που σημαίνει ότι η ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο είναι πάντα μικρότερη του 59.3% (όριο του Betz), λόγω της ύπαρξης διάφορων αεροδυναμικών απωλειών που εξαρτώνται από την κατασκευή του δρομέα της ανεμογεννήτριας (αριθμός και σχήμα ελίκων, βάρος, ακαμψία, κλπ.) [22]. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα οι τυπικές τιμές που λαμβάνει ο αεροδυναμικός συντελεστής να κυμαίνονται μεταξύ 0.3 και 0.5. Για κάθε ταχύτητα ανέμου, υπάρχει ένας αντίστοιχος λόγος ταχυτήτων,  $\lambda$ , για τον οποίο ο αεροδυναμικός συντελεστής λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, μεγιστοποιώντας την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ [20].



**Σχήμα 2.1:** Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ως συνάρτηση του λόγου ταχυτήτων για δρομέα με δύο έλικες [23].

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος μπορεί να υπολογιστεί είτε με τη χρήση πίνακα αναφοράς (lookup table) είτε με τη χρήση αναλυτικής συνάρτησης [22]. Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζεται εδώ, όπου η γενική συνάρτηση που καθορίζει τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, σαν συνάρτηση του λόγου ταχυτήτων,  $\lambda$ , και της γωνίας πτερυγίου (γωνία pitch),  $\beta$ , εκφράζεται ως εξής:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda \quad (2.4)$$

Εφόσον η παραπάνω συνάρτηση εξαρτάται από τον τύπο του δρομέα της ανεμογεννήτριας, οι σταθερές  $c_1 - c_6$  διαφέρουν μεταξύ ανεμογεννητριών. Οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι:  $c_1 = 0.218$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 4.21$ ,  $c_5 = 12.73$  και  $c_6 = 0$ . Επιπλέον, και η παράμετρος  $\lambda_i$  μπορεί να καθοριστεί με διαφορετικούς τρόπους. Εδώ, χρησιμοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

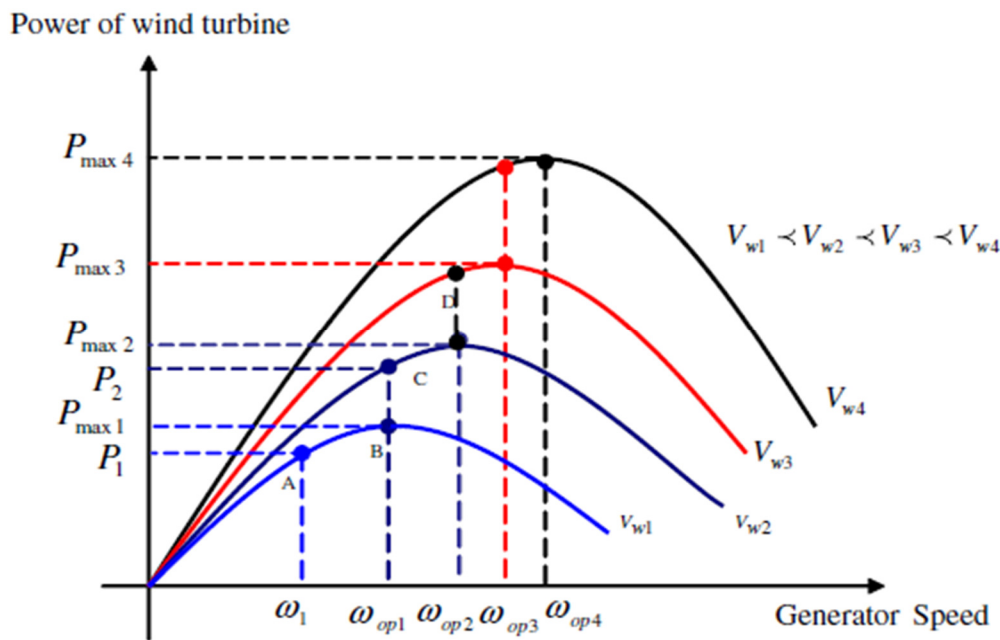
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

όπου  $\beta$  είναι η γωνία pitch ( $^\circ$ ), και ο λόγος ταχυτήτων,  $\lambda$ , ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{V_w} \quad (2.6)$$

όπου  $\omega_w$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ( $rad/s$ ),  $R$  είναι η ακτίνα του δρομέα ( $m$ ) και  $V_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου προς τα ανάντη του δρομέα ( $m/s$ ).

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ισχύος – στροφών για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

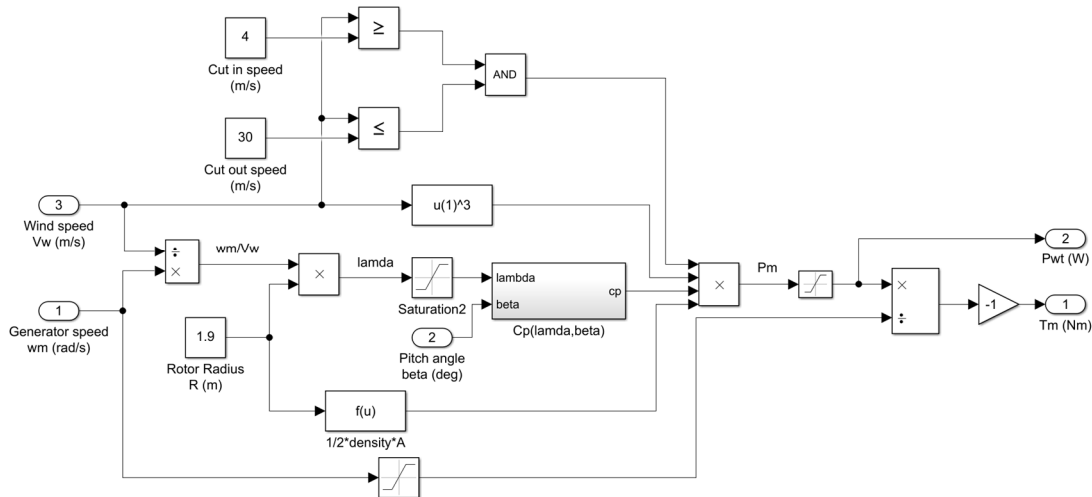


**Σχήμα 2.2:** Ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας του δρομέα [24].

Παρατηρώντας το σχήμα, αν η ταχύτητα ανέμου είναι  $V_{w1}$  και η γωνιακή ταχύτητα είναι  $\omega_1$ , η ανεμογεννήτρια θα λειτουργεί στο σημείο A, με αποδιδόμενη ισχύ  $P_1$ . Η ισχύς εξόδου μπορεί να αυξηθεί μέχρι τη μέγιστη τιμή στο σημείο B, αυξάνοντας τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε  $\omega_{op1}$ . Αν η ταχύτητα του ανέμου αλλάξει από  $V_{w1}$  σε  $V_{w2}$ , με την ταχύτητα του δρομέα να παραμένει σταθερή στην τιμή  $\omega_{op1}$ , το νέο σημείο λειτουργίας του συστήματος θα είναι το σημείο C της καμπύλης, το οποίο δεν αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point - MPP). Η ταχύτητα του δρομέα θα πρέπει να αυξηθεί από  $\omega_{op1}$  σε  $\omega_{op2}$ , ώστε να επιτευχθεί λειτουργία της ανεμογεννήτριας στο σημείο D, στο οποίο θα αποδίδεται μέγιστη ισχύς  $P_{max2}$ . Συνεπώς, όταν η ταχύτητα του ανέμου αλλάξει, η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, και, επομένως, εφόσον αμελείται το κιβώτιο ταχυτήτων, η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας, θα πρέπει να παρακολουθεί αυτές τις αλλαγές, ώστε να προκύπτει η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια, σε κάθε ταχύτητα ανέμου [24]. Συνδυάζοντας τα σημεία αυτά, μπορεί να προκύψει η βέλτιστη χαρακτηριστική ροπής στροφών, η οποία αποτελεί το ίχνος, πάνω στο οποίο θα πρέπει να λειτουργεί το σύστημα ώστε να λαμβάνεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από τον άνεμο, κάθε χρονική στιγμή.

### 2.1.1.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Βάσει των εξισώσεων που περιγράφουν το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ κατασκευάστηκε το αντίστοιχο μοντέλο στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB:



Σχήμα 2.3: Μοντέλο αεροδυναμικού μέρους.

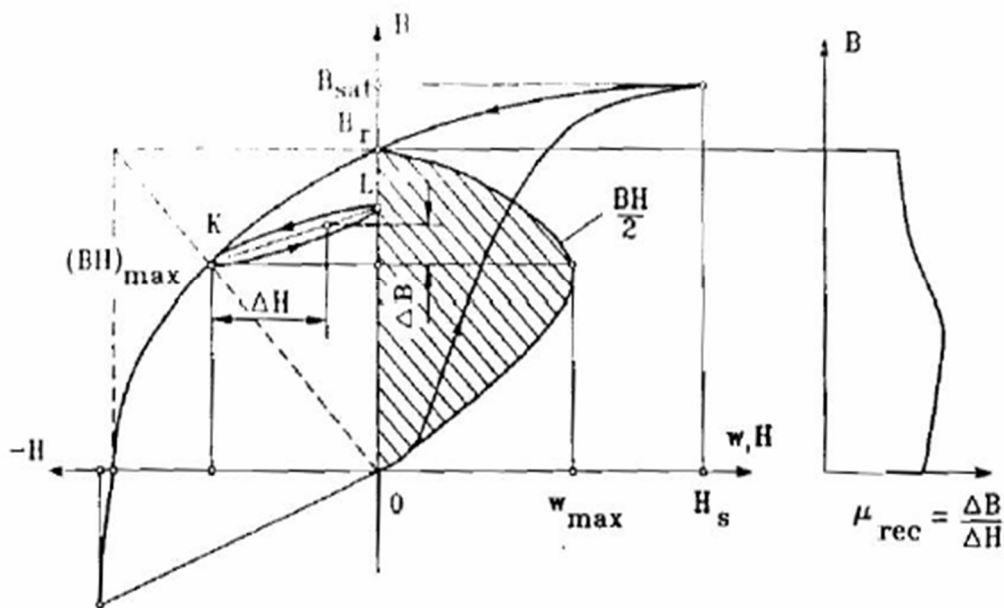
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η ταχύτητα ανέμου, η γωνία pitch και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής αποτελούν τις εισόδους του μοντέλου. Σημειώνεται ότι για την προσομοίωση η γωνία pitch της έλικας είναι μηδενική, αφού το σύστημα δεν διαθέτει ρύθμιση της κλίσης της γωνίας των πτερυγίων (pitch control). Συνηθίζεται σε Α/Γ μικρής ισχύος να μην υπάρχει ελεγκτής pitch. Συναντάται, κυρίως, σε μεγάλες ανεμογεννήτριες και χρησιμοποιείται για πέδη αλλά και για να ρυθμίζει την αεροδυναμική ισχύ στα ονομαστικά μεγέθη, όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπερνά την ονομαστική. Συνεπώς, με βάση τις στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής, υπολογίζεται, από τη σχέση 2.6 ο λόγος ταχυτήτων,  $\lambda$ , και, μέσω της εξίσωσης 2.4, με μηδενική γωνία pitch, υπολογίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος. Τέλος, μέσω των σχέσεων 2.1, 2.2 και 2.3, θεωρώντας την ακτίνα της έλικας,  $R$ , ίση με 1.9m, υπολογίζεται η ισχύς και η ροπή της ανεμογεννήτριας.

### 2.1.2 Ηλεκτρικό μέρος

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας, για το ηλεκτρικό μέρος της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG). Η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών θεωρείται ως η καταλληλότερη λύση για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Προσφέρει καλύτερη απόδοση, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση στο δρομέα, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μειωμένες απώλειες και να αναπτύσσεται μεγαλύτερη ροπή εξόδου. Επίσης, η δυναμική συμπεριφορά είναι καλύτερη στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη, λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Συγκεκριμένα, η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών μπορεί να παράγει μαγνητική ροή στο διάκενο χωρίς να απαιτείται κάποιο σύστημα διέγερσης ή ηλεκτρομαγνητική μετατροπή. Όπως κάθε άλλο φερομαγνητικό υλικό, περιγράφεται από ένα  $B - H$  βρόγχο υστέρησης, ο οποίος στις μηχανές αυτού του τύπου είναι πεπλατυσμένος, όπως

παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Η αρχή λειτουργίας των μηχανών μόνιμων μαγνητών περιγράφεται από το τμήμα της καμπύλης μαγνήτισης που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο του σχήματος, γνωστή και ως απομαγνητίζουσα καμπύλη. Στη περίπτωση που μια ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικής ροής εφαρμόζεται στην ήδη υπάρχουσα, η συνολική πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει ώσπου τελικά φτάνει στο σημείο Κ. Στη συνέχεια, όταν η ανάστροφη αυτή ροή αφαιρεθεί, τότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής επιστρέφει στο σημείο που ήταν αρχικά (σημείο L) κατά μήκος ενός μικρού βρόγχου υστέρησης. Συνεπώς, η εφαρμογή ενός ανάστροφου πεδίου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του παραμένουτος μαγνητισμού. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία εκ νέου, παρατηρείται ξανά μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής, σε σημείο αρκετά κοντά στο Κ, όπως και πριν. Ο μικρός αυτός βρόχος υστέρησης μπορεί να αντικατασταθεί από μια γραμμή, η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική απομαγνήτισης, με συγκεκριμένη κλίση, που ονομάζεται διαφορική διαπερατότητα. Όσο το πλάτος του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$  δεν ξεπερνά την μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο Κ, ο μόνιμος μαγνήτης θεωρείται ότι διατηρεί ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά του, ως προς το μαγνητικό πεδίο. Σε περίπτωση που ένα μεγαλύτερο πεδίο  $H$  εφαρμοστεί, τότε η μείωση της συνολικής πυκνότητας μαγνητικής ροής θα είναι μικρότερη του σημείου Κ.



**Σχήμα 2.4:** Τυπική μορφή βρόχου υστέρησης μηχανής μόνιμων μαγνητών [25].

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι αυτές με ομοιόμορφα στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανομημένο πεδίο στάτη και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδείς (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα). Κατασκευαστικά, οι μηχανές μόνιμων μαγνητών ποικίλουν. Ωστόσο, σε όλες, τα τυλίγματα του στάτη είναι τοποθετημένα μέσα σε αύλακες. Ο δρομέας της μηχανής αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα, οποίος μπορεί να είναι είτε συμπαγής, είτε να αποτελείται από φύλλα σιδήρου. Λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του πυρήνα. Εναλλασσόμενοι μαγνήτες αντίθετης μαγνητικής φοράς παράγουν πυκνότητα ροής ακτινικής κατεύθυνσης διαμέσου του διακένου [25].



### 2.1.2.1 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού μέρους

Για την μοντελοποίηση της γεννήτριας μονίμων μαγνητών αυτής της εργασίας, έγινε χρήση του μοντέλου σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών της βιβλιοθήκης του SIMULINK/MATLAB. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την λειτουργία της γεννήτριας, χρησιμοποιώντας ένα στρεφόμενο d-q πλαίσιο, το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Οι εξισώσεις του μοντέλου δίνονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q} \quad (2.8)$$

$$T_e = 1.5p(\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (2.9)$$

όπου  $L_d, L_q$  είναι οι επαγωγές στον d και q άξονα αντίστοιχα (ίσες με το μισό της επαγωγής μεταξύ φάσεων για κυλινδρικό δρομέα),  $R$  είναι αντίσταση του τυλίγματος του στάτη,  $i_d, v_d, i_q, v_q$  είναι τα ρεύματα και οι τάσεις στον d και q άξονα αντίστοιχα,  $\omega_m$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα,  $\lambda$  είναι το πλάτος της ροής που προκαλείται από τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα στις φάσεις του στάτη,  $p$  είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων της μηχανής και  $T_e$  είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Επιπλέον, για το μηχανικό σύστημα του μοντέλου ισχύουν οι ακόλουθες βασικές σχέσεις.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (2.10)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (2.11)$$

όπου  $J$  είναι η ροπή αδρανείας της μηχανής (συνολική αδράνεια δρομέα και φορτίου),  $\theta$  είναι η γωνία του δρομέα και  $T_m$  είναι η μηχανική ροπή. Ο παράγοντας  $\frac{d\omega_m}{dt}$  εκφράζει την επιτάχυνση του δρομέα (άξονα) της μηχανής, ο οποίος δρα σαν αποθήκη κινητικής ενέργειας. Όταν αυξάνεται η μηχανική ισχύς που παρέχει το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ, η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια αυξάνει και ο άξονας επιταχύνεται. Όταν αυξάνει η ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου και άρα η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει η γεννήτρια, η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια ελαττώνεται και ο άξονας επιβραδύνεται.

Οι παραπάνω βασικές σχέσεις περιγράφουν πλήρως το μοντέλο της γεννήτριας μονίμων μαγνητών της βιβλιοθήκης του SIMULINK/MATLAB.

## 2.2 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (αλλιώς ηλιακά κύτταρα ή φωτοστοιχεία) αποτελούν τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ή, πιο συνοπτικά, των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι πηγή σταθερού συνεχούς ρεύματος, η οποία μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα, εκμεταλλεύομενη το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται ως η εκδήλωση διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες μιας διόδου, η οποία ακτινοβολείται με ηλιακή ενέργεια. Η πρόσπτωση των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας, αναγκάζουν τους χημικούς δεσμούς της διόδου να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια,

η κίνηση των οποίων αποτελεί το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία, παράγεται από την δίοδο συνεχές ρεύμα, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ένα οποιοδήποτε φορτίο συνεχούς ρεύματος, ή, με κατάλληλες διατάξεις μετατροπών, να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα για την τροφοδότηση αντίστοιχων εναλλασσόμενων φορτίων. Όταν διακοπεί η ακτινοβολία της δίοδου, σταματάει και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά διαφορετικών προσμίξεων, με συνηθέστερο το πυρίτιο, και σχηματίζουν δίσκους, στους οποίους προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία. Πρόκειται για δίοδους επαφής τύπου n και τύπου p, οι οποίες εκτείνονται σε όλο το πλάτος του δίσκου. Τα ηλιακά στοιχεία βασίζουν την λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Χάρη στην ύπαρξη του φράγματος δυναμικού, γίνεται διαχωρισμός των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου, δηλαδή των οπών και των ηλεκτρονίων αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου [19], [20], [26].

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή Φ/Β στοιχείων είναι οι εξής [20]:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών με κρυσταλλική δομή (μονοκρυσταλλική ή πολυκρυσταλλική), με χρήση κυρίως πυριτίου.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία μειώνει το πάχος των στοιχείων σε μερικά μm, και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο κόστος κατασκευής, αλλά συγχρόνως μικρότερη ικανότητα μετατροπής.
- Άλλες τεχνολογίες, που αποσκοπούν στο να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth και μέθοδος String Process).

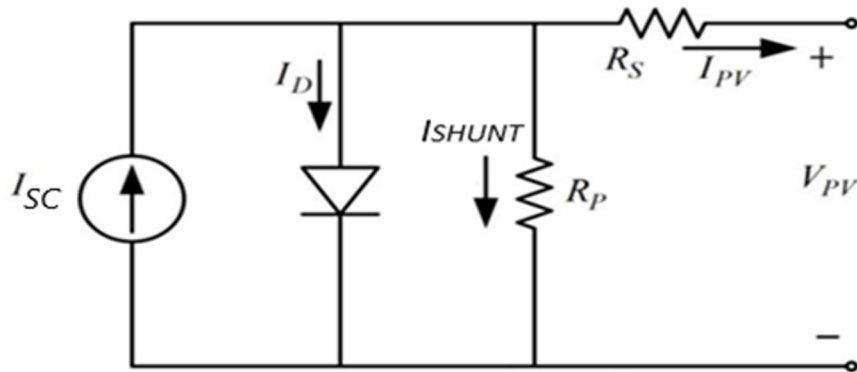
Όπως και για όλα τα ενεργειακά συστήματα, βασικής σημασίας είναι το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Για την εκτίμηση του κόστους των Φ/Β συστημάτων, χρησιμοποιείται ο όρος «Ισχύς αιχμής» ( $W_p$ , watt-peak), ο οποίος εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια του Φ/Β συστήματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1W, όταν δέχεται ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος  $1kW/m^2$ . Με τον τρόπο αυτό, το  $W_p$  εκφράζει συνδυασμένα το κόστος του Φ/Β συστήματος και την απόδοσή του. Η απόδοση του Φ/Β συστήματος εκφράζεται, όπως για όλες τις μηχανές μετατροπής, μέσω του συντελεστή απόδοσης, που ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β σύστημα, προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Η απόδοση του Φ/Β συστήματος μεταβάλλεται σημαντικά με την ένταση που παράγει, την θερμοκρασία και την μορφή της ακτινοβολίας. Τα σύγχρονα Φ/Β συστήματα επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης συνήθως 10-15%, αλλά και μέχρι 25% [19].

Τα Φ/Β στοιχεία ενώνονται και σχηματίζουν Φ/Β πλαίσια (PV modules), τα οποία με τη σειρά τους ενώνονται και συγκροτούν Φ/Β συστοιχίες (PV strings/arrays) [20]. Μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί να αποτελείται από πολλές Φ/Β συστοιχίες.

### 2.2.1 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Για την μοντελοποίηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αρχικά, απαιτείται η μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη

μοντελοποίηση ολόκληρης της συστοιχίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



**Σχήμα 2.5:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μίας διόδου Φ/Β στοιχείου [29].

Το παραπάνω κύκλωμα εκφράζει, για σταθερές συνθήκες φωτισμού, το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Το κύκλωμα περιλαμβάνει την πηγή του φωτορρέυματος,  $I_{SC}$ , το οποίο δημιουργείται με την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β στοιχείο, και η έντασή του εξαρτάται από την απορροφώμενη φωτεινή ισχύ και το μέγεθος του Φ/Β στοιχείου. Για τον λόγο αυτό, το φωτόρρευμα αναπαρίσταται σαν πηγή ρεύματος στο κύκλωμα. Επιπλέον, το κύκλωμα περιλαμβάνει την διόδο του Φ/Β στοιχείου, καθώς και τον κλάδο με την παράλληλη αντίσταση  $R_P$  (ή  $R_{shunt}$ ), που διαρρέεται από το ρεύμα  $I_{SHUNT}$ , και εισάγεται λόγω της προσάυξης του ρεύματος που διαρρέει τη μη ιδανική διόδο του Φ/Β στοιχείου, που αποδίδεται σε πρόσθετους μηχανισμούς μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων, γεγονός ιδιαίτερα αισθητό κατά την ανάστροφη πόλωση της διόδου. Ακόμη, εισάγεται και η αντίσταση σειράς,  $R_S$ , η οποία λαμβάνει υπόψη τις αντιστάσεις που εισάγουν οι ωμικές επαφές και ο όγκος των υλικών, δηλαδή του υποστρώματος και των αγωγίμων διαύλων, και καθίσταται σημαντική κατά την ορθή πόλωση. Τέλος, στο εξωτερικό κύκλωμα θεωρείται ότι υπάρχει κάποιο φορτίο, το οποίο καταναλώνει την παραγόμενη ισχύ του Φ/Β στοιχείου [30].

Από τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff, για το παραπάνω κύκλωμα, προκύπτει ότι:

$$I_D = I_{SC} - \frac{V_D}{R_P} - I_{PV} \quad (2.12)$$

όπου  $I_{PV}$  το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό φορτίο,  $V_D$  η τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος του κλάδου της διόδου και  $I_D$  το ρεύμα που διαρρέει τον κλάδο της διόδου και δίνεται από τη σχέση:

$$I_D = I_o \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

όπου  $I_o$  το ρεύμα κόρου (ανάστροφης πόλωσης) της διόδου και  $V_T$  η θερμική τάση (26mV σε θερμοκρασία 300K), η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$V_T = k \cdot T_c / q \quad (2.14)$$

όπου  $k$  η σταθερά Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ),  $q$  το φορτίο ενός ηλεκτρονίου ( $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ) και  $T_c$  η πραγματική θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου (K).

Η τάση στα άκρα της διόδου υπολογίζεται μέσω της σχέσης 2.12:

$$V_D = -R_p(I_D + I_{PV} - I_{SC}) \quad (2.15)$$

Τέλος, η τάση στα άκρα του Φ/Β στοιχείου υπολογίζεται, όπως προκύπτει από τον νόμο τάσεων του Kirchhoff, μέσω της σχέσης [28]:

$$V_{PVcell} = V_D - R_s I_{PV} \quad (2.16)$$

Οι παράμετροι βάσει των οποίων μοντελοποιήθηκε το Φ/Β στοιχείο δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

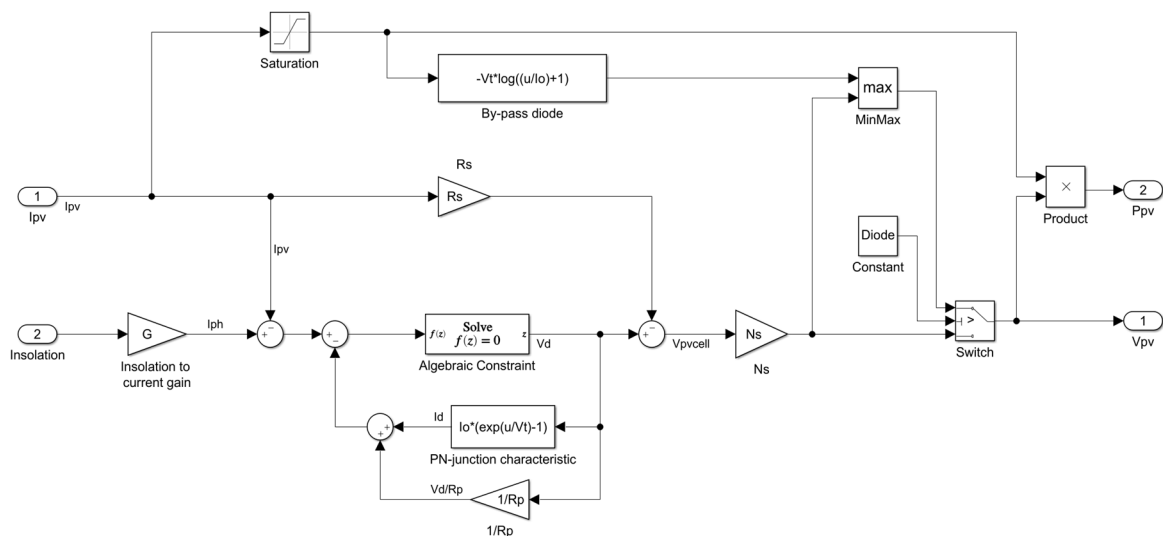
Παράμετροι	Τιμές
<b>Ρεύμα βραχυκύκλωσης <math>I_{sc}</math></b>	5.45 A
<b>Τάση ανοιχτοκύκλωσης <math>V_{oc}</math></b>	22.2 V
<b>Μέγιστο ονομαστικό ρεύμα <math>I_{max}</math></b>	4.95 A
<b>Μέγιστη ονομαστική τάση <math>V_{max}</math></b>	17.2 V

**Πίνακας 2.1:** Παράμετροι Φ/Β στοιχείου.

Ένας καθοριστικός όρος για τη συμπεριφορά ενός Φ/Β στοιχείου είναι ο παράγοντας πλήρωσης (fill factor – FF). Ο παράγοντος πλήρωσης είναι ένα μέτρο της ποιότητας του Φ/Β στοιχείου. Εκφράζει την αναλογία μεταξύ της διαθέσιμης ισχύος, στο σημείο μέγιστης ισχύος, προς την θεωρητικά μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει το Φ/Β στοιχείο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} = 70.37\% \quad (2.17)$$

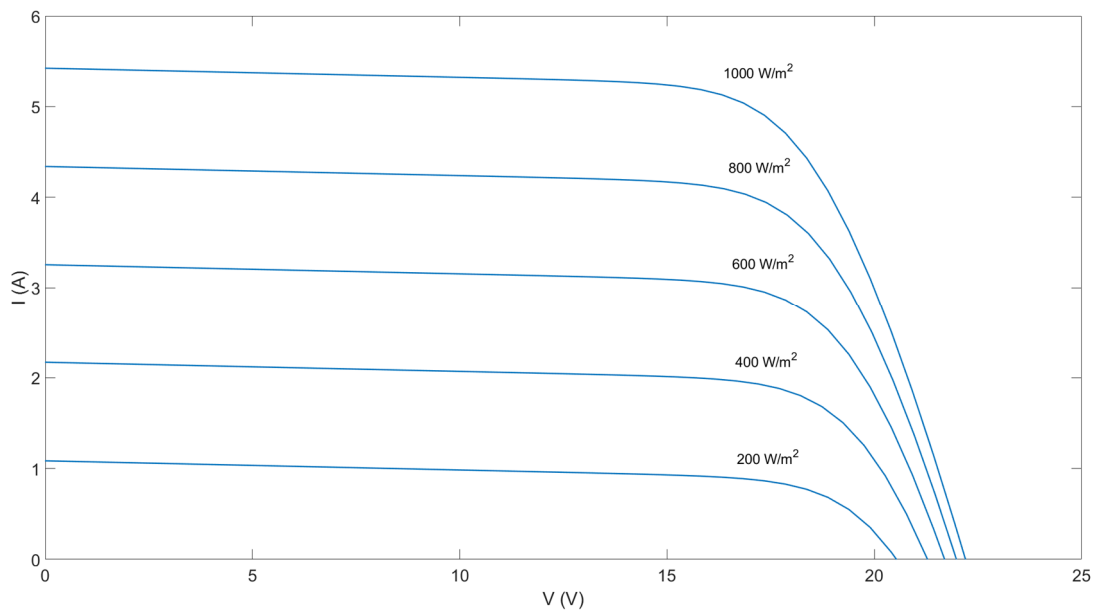
Η μοντελοποίηση του Φ/Β στοιχείου βασίζεται στις παραπάνω εξισώσεις. Συνδέοντας εν σειρά τα Φ/Β στοιχεία, κατασκευάζεται το μοντέλο ενός Φ/Β πλαισίου στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB, όπως φαίνεται παρακάτω:



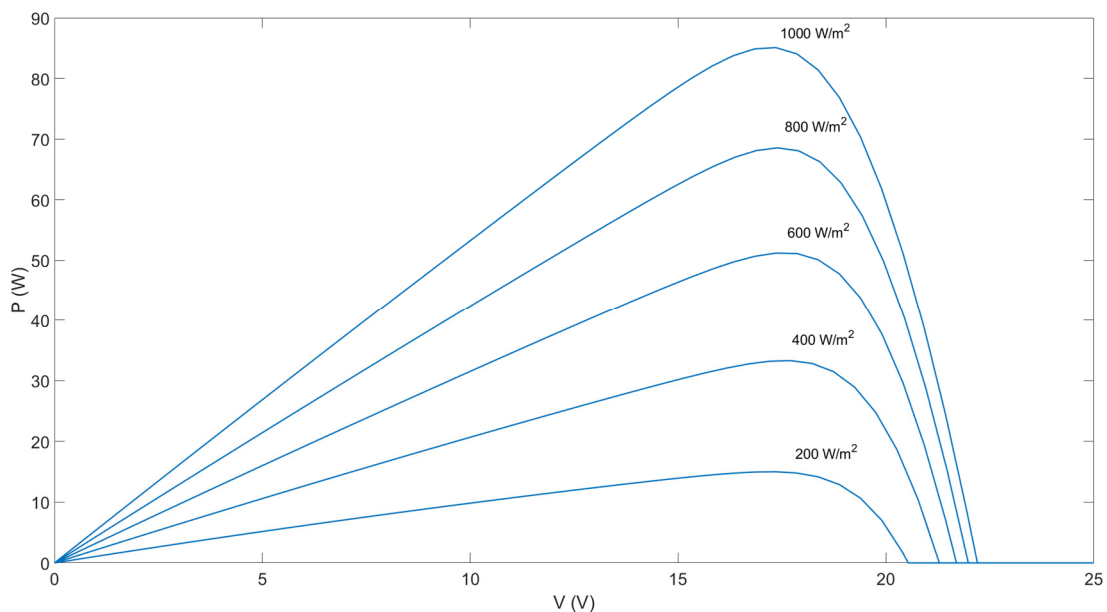
**Σχήμα 2.6:** Μοντέλο Φ/Β πλαισίου.

Είσοδοι του μοντέλου αποτελούν η ηλιακή ακτινοβολία ( $W/m^2$ ) και το ρεύμα του φορτίου ( $A$ ). Οι εξόδοι του μοντέλου είναι η τάση στα άκρα του Φ/Β πλαισίου ( $V$ ) και η ισχύς εξόδου ( $W$ ). Η ηλιακή ακτινοβολία μέσω κατάλληλου κέρδους μετατρέπεται σε ένταση ρεύματος ( $I_{SC}$ ). Το υποσύστημα Algebraic Constraint λύνει την εξίσωση 2.12 ως προς  $V_D$ , ενώ το υποσύστημα PN-junction characteristic υλοποιεί την χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου (εξίσωση 2.13). Ο αθροιστής  $V_{PVcell}$  υλοποιεί την εξίσωση 2.16. Η μεταβλητή  $N_S$  συμβολίζει το αριθμό των εν σειρά συνδεδεμένων φ/β στοιχείων, τα οποία δομούν το φ/β πλαίσιο, ενώ το υποσύστημα By-pass Diode μοντελοποιεί μία δίοδο ελεύθερης διέλευσης στα άκρα της εξόδου, ανάλογα με το αν η ένδειξη Diode είναι ενεργοποιημένη.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω μοντέλο, μπορούν να υπολογιστούν οι καμπύλες I-V και P-V του Φ/Β πλαισίου, για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας (σχήματα 2.7, 2.8).



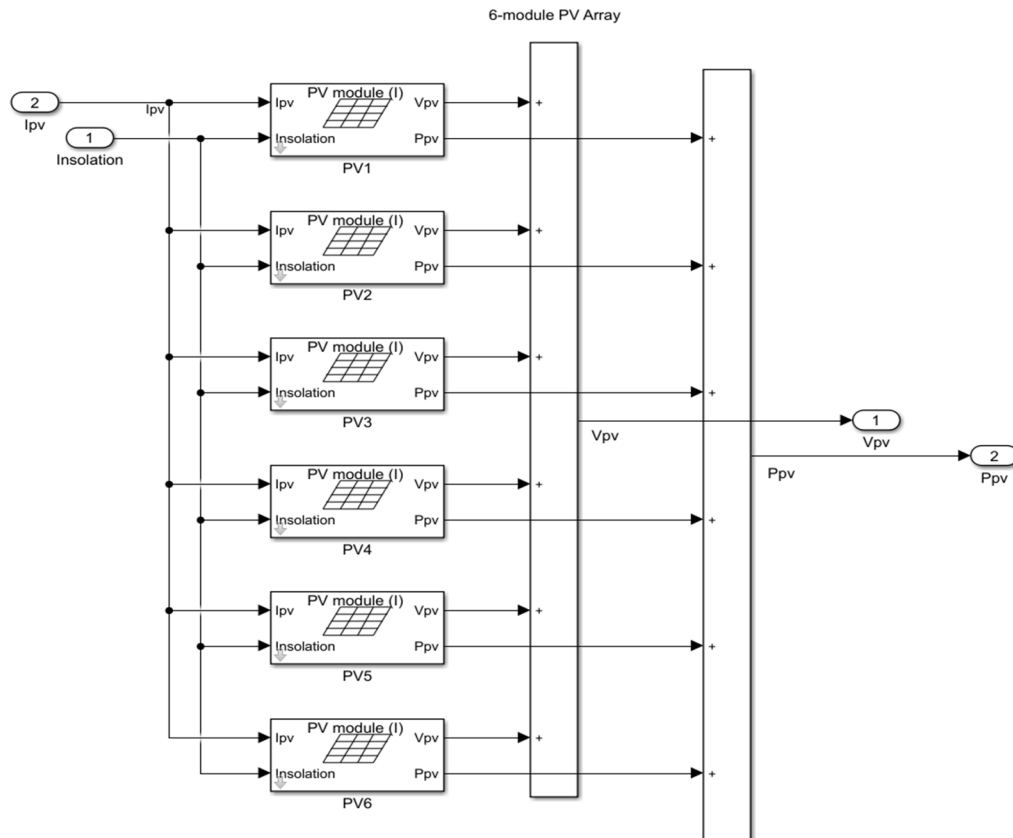
**Σχήμα 2.7:** I – V καμπύλες Φ/Β πλαισίου.



**Σχήμα 2.8:** P – V καμπύλες Φ/Β πλαισίου.

Από το διάγραμμα P-V προκύπτει ότι το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point - MPP) μετατοπίζεται με την μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς, το Φ/Β πλαίσιο θα πρέπει να λειτουργεί στο ζεύγος τάσης – ρεύματος, πάνω στο οποίο θα λαμβάνεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από τον ήλιο, για κάθε ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και για κάθε χρονική στιγμή.

Με την σύνδεση των Φ/Β πλαισίων σε σειρά ή παράλληλα, κατασκευάζεται, εν τέλει, η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το μοντέλο μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο περιλαμβάνει μία φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία αποτελείται από 6 Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά.



**Σχήμα 2.9:** Μοντέλο Φ/Β συστοιχίας 6 Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά.

## 2.3 Μπαταρία μολύβδου-οξέος

### 2.3.1 Επιλογή μπαταρίας

Μια μπαταρία (ή αλλιώς συσσωρευτής) είναι μια χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, αφού τη μετατρέψει σε χημική, και όταν χρειαστεί να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Σχηματίζεται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση. Το ηλεκτρικό μέρος αποτελείται από δύο πλάκες, φτιαγμένες από διαφορετικά μέταλλα και βυθισμένες σε ένα δοχείο με υγρό. Οι πλάκες, οι οποίες πρέπει να είναι αγωγικές, ονομάζονται ηλεκτρόδια, ενώ το υγρό είναι και αυτό αγωγικό και καλείται ηλεκτρολύτης. Τα ηλεκτρόδια αντιδρούν χημικά με τον ηλεκτρολύτη και η αντίδραση περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού

κυκλώματος/φορτίου. Δηλαδή, η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας). Η εκφορτισμένη ηλεκτρική μπαταρία φορτίζεται όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα (DC) από άλλη πηγή, ενώ, ταυτόχρονα, αντίστροφες χημικές διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι μπαταριών, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, περιγράφονται στον Πίνακα 2.2.

Τύπος μπαταρίας	Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	Πυκνότητα ενέργειας (Wh/L)	Ειδική ισχύς (W/kg)	Ονομαστική τάση κυψέλης (V)
Μολύβδου-οξέος	30	75	250	2.0
Νικελίου-καδμίου	50	80	150	1.2
Νικελίου-μεταλλικού υβριδίου	65	150	200	1.2
Λιθίου-ιόντος	90	150	300	3.6
Ψευδαργύρου-αέρα	230	270	105	1.65

**Πίνακας 2.2:** Βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τύπων μπαταριών [15].

Από τους παραπάνω τύπους μπαταριών, μόνο οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και σε μικρό βαθμό οι νικελίου-καδμίου και οι λιθίου-ιόντος χρησιμοποιούνται στα συστήματα παραγωγής ενέργειας μέχρι σήμερα [15].

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος είναι η πλέον ώριμη τεχνολογία, καθώς χρησιμοποιείται ήδη από τις προηγούμενες δεκαετίες, παρέχει ωστόσο μέτρια διάρκεια ζωής και χαμηλή πυκνότητα ενέργειας. Γενικότερα, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν το πλέον διαδεδομένο ηλεκτροχημικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Εάν και η φυσική αρχή λειτουργίας τους δεν είναι καινούρια, η έρευνα σχετικά με αυτές εξακολουθεί να εξελίσσεται [57]. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ως η παλαιότερη τεχνολογία, χρησιμοποιούνται ευρέως, και είναι σχετικά μεγάλες και ογκώδεις. Εγκαθίστανται εύκολα και έχουν χαμηλό αρχικό κόστος αγοράς και χαμηλό κόστος συντήρησης. Η απόδοση των μπαταριών μολύβδου-οξέος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ρυθμό εκφόρτισής τους, ο οποίος ελέγχεται από τα ηλεκτρονικά ισχύος ενός συστήματος [58]. Αναλυτικότερα στοιχεία για την λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των μπαταριών μολύβδου-οξέος παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

Την τελευταία δεκαετία έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών. Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη και χρήση εναλλακτικών λύσεων τύπου νικελίου μετάλλου υβριδίου και λιθίου-ιόντων, οι οποίες δίνουν πολύ ικανοποιητικές επιδόσεις, ιδιαίτερα για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Οι δύο αυτοί τύποι μπαταριών χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εργαλείων και υψηλής αξίας ηλεκτρονικών αγαθών, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ενώ πολλές μεγάλες βιομηχανίες τις ενσωματώνουν στην κατασκευή υβριδικών και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων παρέχουν καλύτερα χαρακτηριστικά ενέργειας και πυκνότητας ισχύος (πίνακας 2.2), με αποτέλεσμα, τα τελευταία χρόνια, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τύπου λιθίου-ιόντων να έχουν κερδίσει έδαφος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες μπαταριών, καθώς τα χαρακτηριστικά τους είναι ιδιαίτερα ελκυστικά.

Το λίθιο, ως μέταλλο, λόγω του ελαφριού του βάρους, της υψηλής τάσης που παρουσιάζει, της υψηλής ηλεκτροχημικής ισοδυναμίας και της καλής αγωγιμότητάς του, καθιστά τις μπαταρίες λιθίου-ιόντος ευρέως αποδεκτές σε εφαρμογές όπου το μέγεθος, το βάρος και η απόδοση είναι ζωτικής σημασίας (πχ. ηλεκτρικά οχήματα). Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα αυτών των μπαταριών είναι η μεγαλύτερη τάση στοιχείου και η μεγαλύτερη

πυκνότητα ενέργειας. Είναι ελαφρύτερες και πιο συμπαγείς από τις μπαταρίες μολύβδου οξέος, ενώ ο πολύ χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης, σε συνδυασμό με το υψηλό βάθος εκφόρτισής τους, προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Επιπλέον, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αυτών των μπαταριών, σε συνδυασμό με γρηγορότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, οδηγούν σε υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος.

Ωστόσο, οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων έχουν μικρότερη αντοχή σε κατάχρηση απ' ό,τι οι αντίστοιχες μπαταρίες μολύβδου-οξέος, με την υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση να μειώνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους. Επίσης, ανάλογα με τον τύπο της καθόδου του στοιχείου, η υπερφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση, παραγωγή αναθυμιάσεων ή ακόμη και έκρηξη της μπαταρίας. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας λειτουργίας των μπαταριών, πρέπει να ενσωματώνονται σε αυτές κατάλληλα κυκλώματα προστασίας, με την ανάγκη αυτή να είναι επιτακτικότερη στις μπαταρίες τύπου λιθίου-ιόντων, για τις οποίες προκύπτουν σοβαρότερα προβλήματα ασφάλειας κατά τη φόρτιση [57]. Σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων συχνά χρειάζονται περίπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισής τους, κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Άλλη εξίσου σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι και αυτή του κόστους. Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων είναι πιο ακριβές ανά αποθηκευμένη kWh, με κόστος τουλάχιστον διπλάσιο, σε σχέση με αντίστοιχα στοιχεία μπαταριών μολύβδου-οξέος [15]. Επομένως, οι μεγάλες χωρητικότητες μπαταριών που απαιτούνται για υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος των μπαταριών λιθίου-ιόντων, καθιστούν την επιλογή τους οικονομικά δύσχρηστη, έναντι των μπαταριών μολύβδου-οξέος.

Υπάρχουν τρεις κύριες λειτουργίες που επιτελεί μια μπαταρία σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας:

- Δρα σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης, από τις πηγές ΑΠΕ, ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Η ισχύς που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτήν, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ίση με μηδέν. Αντίστοιχη μεταβλητότητα παρουσιάζει και η παραγωγή αιολικής ισχύος από τις Α/Γ, λόγω μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου. Στα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία χρειάζεται να αποδίδεται ένα σταθερό ποσό ισχύος. Η μπαταρία παρέχει ισχύ όταν οι ΑΠΕ παράγουν μηδενική ισχύ ή όταν παράγουν λιγότερη ισχύ από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο. Επίσης, η μπαταρία, απορροφά την περίσσεια ισχύος από τις ΑΠΕ, όταν αυτές παράγουν περισσότερη ισχύ από ό,τι το φορτίο απαιτεί.
- Η μπαταρία παρέχει ένα αποθεματικό ενέργειας (αυτονομία του συστήματος) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια μερικών ωρών ή ημερών άπνοιας ή πολύ συννεφιασμένου καιρού, ή σε περίπτωση ανάγκης εάν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο τμήμα του συστήματος παραγωγής.
- Η μπαταρία αποτρέπει μεγάλες, πιθανόν καταστροφικές, διακυμάνσεις τάσης, λόγω μεταβλητότητας στην παραγωγή. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλο εύρος τάσεων. Η τοποθέτηση μιας μπαταρίας μεταξύ των ΑΠΕ και του φορτίου διασφαλίζει ότι το φορτίο δε θα παρουσιάζει διακυμάνσεις τάσεως έξω από το εύρος τάσεων στο οποίο η μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και λιθίου-ιόντων είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τύποι μπαταριών για αποθήκευση σε εφαρμογές συστημάτων παραγωγής



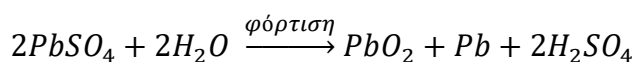
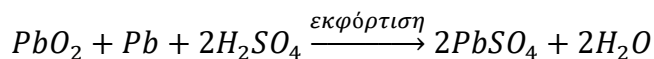
ενέργειας, επειδή κάθε μία είναι αξιόπιστη και έχει μοναδικές επιθυμητές ιδιότητες. Εφόσον κάθε τύπος έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα, η απόφαση μεταξύ των τεχνολογιών εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και από τη διαθέσιμη χρηματοδότηση [58]. Για παραδοσιακές εφαρμογές οικιακής αποθήκευσης με μέτρια απαίτηση αριθμού κύκλων μπαταριών, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παραμένουν μια πολύ αποτελεσματική λύση κόστους-οφέλους, ειδικά για τοποθεσίες όπου ο χώρος εγκατάστασης δεν αποτελεί μείζονα περιορισμό, για την επίτευξη του φθηνότερου αρχικού κόστους επένδυσης [59].

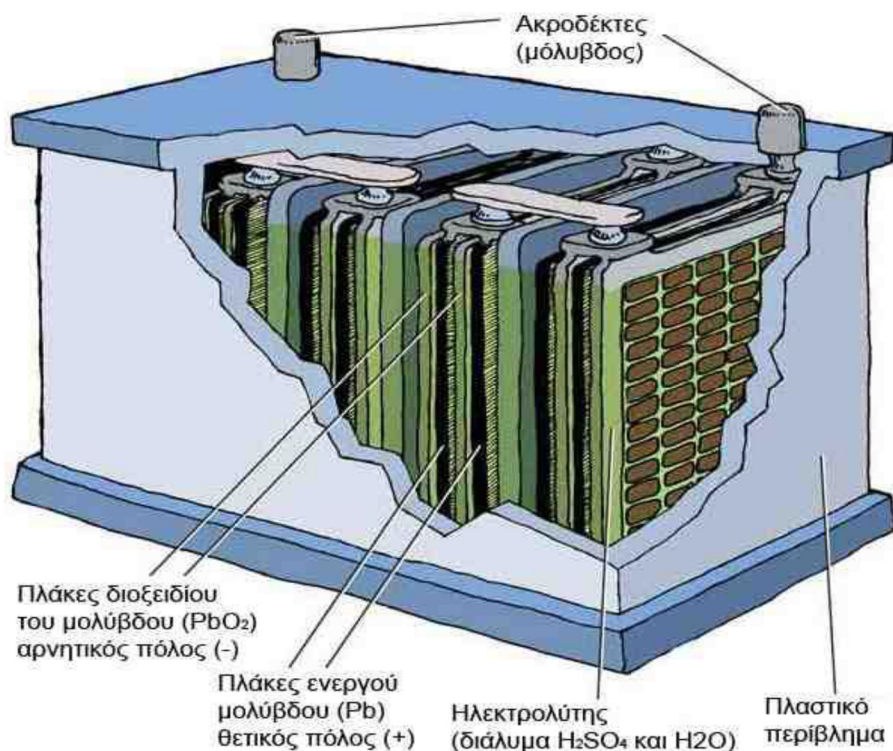
Δεδομένου ότι το αρχικό κόστος επένδυσης είναι σημαντική παράμετρος κατά την διαστασιολόγηση του συστήματος, όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο, σε αυτήν την εργασία επιλέγεται η χρήση μπαταριών μολύβδου-οξέος. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα και, με πάνω από 100 χρόνια εξελικτικής εμπειρίας, αποτελούν πλέον ώριμη τεχνολογία. Η βασικότερη αιτία της τόσο ευρείας διάδοσης των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι το μικρό κόστος τους συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες μπαταριών (100-300 €/kWh), σε συνδυασμό με την εμπορική διαθεσιμότητα, αλλά και την πολυετή συσσωρευμένη λειτουργική εμπειρία. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλούς βαθμούς απόδοσης της τάξης του 80-85%, καθώς και από υψηλή αξιοπιστία. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ρυθμός αστοχίας των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι μικρότερος από 0.25%. Οι εφαρμογές των μπαταριών μολύβδου-οξέος κυμαίνονται από τις μπαταρίες αυτοκινήτων, έως τις τεράστιες συστοιχίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας [15].

### 2.3.2 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας μολύβδου-οξέος

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης έχουν παχιές πλάκες που τοποθετούνται σε μεγάλα περιβλήματα, τα οποία έχουν μεγαλύτερο χώρο πάνω και κάτω από τις πλάκες, γεγονός που τις καθιστά μεγάλες και βαριές. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης είναι σχεδιασμένες να εκφορτίζονται επανειλημμένως κατά 80% της ικανότητάς τους χωρίς ζημιά, αν και τέτοιες βαθιές εκφορτίσεις οδηγούν σε μικρότερο αριθμό κύκλων κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μία τυπική μπαταρία μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης μπορεί να κάνει 4500 κύκλους όταν εκφορτίζεται κατά 30% της ονομαστικής της χωρητικότητας, το οποίο μπορεί να δώσει διάρκεια ζωής πάνω από 10 χρόνια. Ωστόσο, με ημερήσια εκφόρτιση κατά 80%, αναμένονται περίπου 1600 κύκλοι, οπότε η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι περίπου 5 χρόνια. Επίσης, άλλοι παράγοντες, όπως η ποιότητα της μπαταρίας, η συχνότητα συντήρησης και οι ρυθμοί φόρτισης είναι εξίσου σημαντικοί, και επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, στην κατάσταση πλήρους φόρτισης, αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου (άνοδος) και ένα ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (κάθοδος) βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη με περιεκτικότητα περίπου 37% σε θεικό οξύ. Σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης, και τα δύο ηλεκτρόδια αποτελούνται από θεικό μολύβδο, η τάση στα άκρα του στοιχείου μηδενίζεται και ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει πλέον θεικό οξύ και ουσιαστικά μετατρέπεται σε νερό. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση και την φόρτιση είναι οι ακόλουθες:





**Σχήμα 2.10:** Δομή μπαταρίας μολύβδου-οξέος [15].

Καθώς η μπαταρία μολύβδου-οξέος πλησιάζει την κατάσταση πλήρους εκφόρτισής της, η τάση του στοιχείου μειώνεται απότομα ενώ η εσωτερική του αντίσταση αυξάνει απότομα. Ενδιάμεσα, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη μειώνεται καθώς ιόντα θεικού άλατος αφήνουν το διάλυμα, παρέχοντας ένα ακριβή δείκτη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Η μπαταρία είναι περισσότερο ευάλωτη στην ψύξη στην κατάσταση εκφόρτισής της, επειδή η αντιψυκτική δράση του θεικού οξέος μειώνεται με την μείωση της ποσότητάς του. Μία πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία μολύβδου-οξέος ψύχεται περίπου στους  $-8^{\circ}\text{C}$ , ενώ μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία δεν ψύχεται μέχρι ο ηλεκτρολύτης να πέσει κάτω από τους  $-57^{\circ}\text{C}$ . Σε πολύ κρύες συνθήκες, επομένως, η ανησυχία για ψύξη μπορεί να περιορίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας.

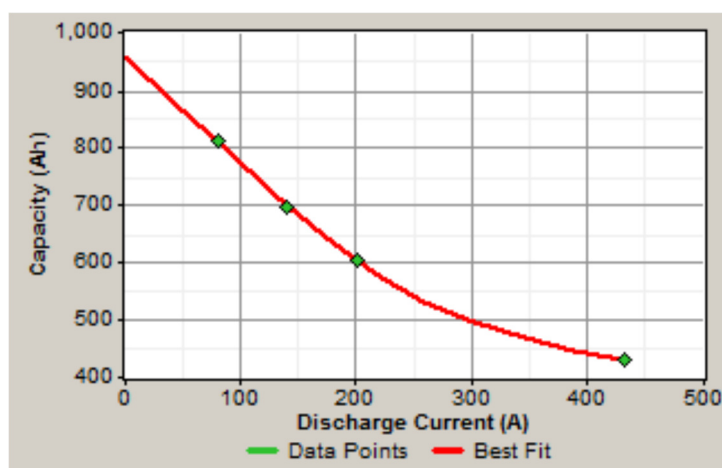
Οι αντίθετες αντιδράσεις συμβαίνουν κατά τη διάρκεια φόρτισης. Η τάση της μπαταρίας και το ειδικό βάρος αυξάνουν, ενώ η θερμοκρασία ψύξης και η εσωτερική αντίσταση μειώνονται. Το θεικό άλας απομακρύνεται από τις πλάκες και εισέρχεται ξανά στον ηλεκτρολύτη με τη μορφή ιόντων θεικού άλατος. Ωστόσο, δεν επιστρέφει όλη η ποσότητα θεικού άλατος στο διάλυμα, και κάθε κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας αφήνει λίγο περισσότερο θεικό άλας μόνιμα προσκολλημένο στις πλάκες. Αυτός είναι ο κύριος λόγος της πεπερασμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας (γήρανση). Το ποσό του  $PbSO_4$  που προσκολλάται στα ηλεκτρόδια εξαρτάται από τη διάρκεια του χρόνου που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο αυτό, το οποίο σημαίνει ότι για μία καλή μακροβιότητα της μπαταρίας, είναι σημαντικό να διατηρείται όσο το δυνατόν πλήρως φορτισμένη σε κανονική βάση. Αυτό επιδεικνύει το πόσο σημαντική είναι η ύπαρξη ενός συστήματος ελέγχου φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών, προκειμένου να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής τους [15].

### 2.3.3 Βασικά χαρακτηριστικά μπαταρίας μολύβδου-οξέος

Οι τέσσερις πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση μιας μπαταρίας είναι: η χωρητικότητα, η απόδοση, ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης και η διάρκεια ζωής. Δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση μιας μπαταρίας, με τρόπους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι η θερμοκρασία, η αυτοεκφόρτιση και η γήρανση.

Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας μίας μπαταρίας δίνεται σε Ah, σε κάποια ονομαστική τάση και σε κάποιο ρυθμό εκφόρτισης. Ωστόσο, ο προσδιορισμός της ποσότητας ενέργειας που παρέδωσε η μπαταρία κατά τη διάρκεια της εκφόρτισής της δεν μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό του γινομένου τάσης, ρεύματος, και χρονικής διάρκειας. Η ενέργεια είναι το γινόμενο τάσης, ρεύματος, και χρονικής διάρκειας, αλλά επειδή η τάση μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια εκφόρτισης, η συνολική ενέργεια δεν θα είναι ίση με το γινόμενο αυτό, σε Wh. Για να αποφευχθεί αυτή η δυσκολία, η ικανότητα της μπαταρίας προσδιορίζεται σε Ah και όχι σε Wh.

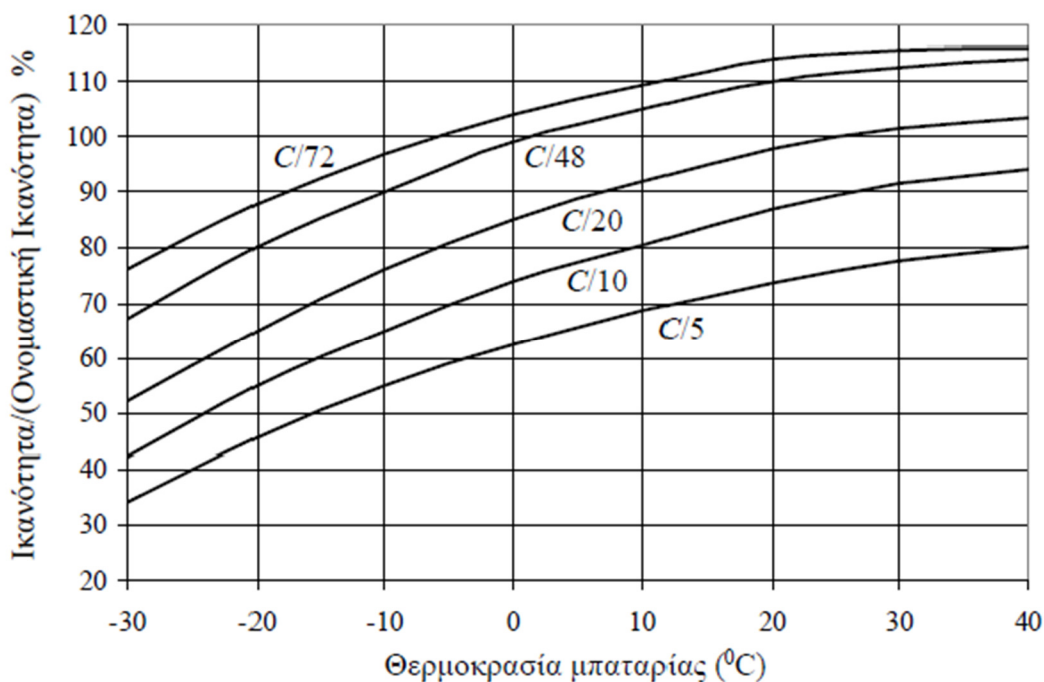
Μία μπαταρία 200Ah που παραδίδει 20A λέγεται ότι εκφορτίζεται με ρυθμό C/10, όπου το C αναφέρεται στις Ah και το 10 είναι οι ώρες που χρειάζεται για να εκφορτιστεί. Αυτή η ίδια μπαταρία των 200Ah δεν θα είναι ικανή να παραδίδει 50A για 4 πλήρεις ώρες (C/4), όμως μπορεί να παραδίδει 10A για περισσότερες από 20h (C/20). Με άλλα λόγια, η ικανότητα σε Ah εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο το ρεύμα μειώνεται. Η γρήγορη εκφόρτιση μίας μπαταρίας οδηγεί σε μικρότερη ικανότητα σε Ah, ενώ οι μεγάλοι χρόνοι εκφόρτισης οδηγούν σε μεγαλύτερη ικανότητα σε Ah. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης που προορίζονται για υβριδικά συστήματα συχνά προδιαγράφονται με βάση το ρυθμό εκφόρτισης 20h (C/20), το οποίο είναι σε γενικές γραμμές ένα πρότυπο, καθώς επίσης και με βάση τον πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εκφόρτισης C/100, που είναι πιο αντιπροσωπευτικός του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιούνται. Στο σχήμα 2.11 διακρίνεται ξεκάθαρα η μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας με την αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης.



Σχήμα 2.11: Εξάρτηση χωρητικότητας μπαταρίας από τον ρυθμό εκφόρτισης [15].

Η ικανότητα σε Ah μιας μπαταρίας δεν εξαρτάται μόνο από το ρυθμό εκφόρτισης, αλλά εξαρτάται, επίσης, και από τη θερμοκρασία. Το σχήμα 2.12 δείχνει μια προσεγγιστική συσχέτιση των δύο αυτών φαινομένων, συγκρίνοντας την ικανότητα της μπαταρίας κάτω από μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες και ρυθμούς εκφόρτισης, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το ρυθμό C/20 και τη θερμοκρασία των 25°C. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η ικανότητα της μπαταρίας μειώνεται δραματικά σε ψυχρότερες συνθήκες. Για παράδειγμα, σε θερμοκρασία -30°C η μπαταρία που εκφορτίζεται με ρυθμό C/20 θα έχει μόνο τη μισή ονομαστική της ικανότητα. Ο συνδυασμός των επιδράσεων της ψυχρής θερμοκρασίας,

δηλαδή η μείωση της ικανότητας, η μείωση της τάσης εξόδου και η αυξημένη ευπάθεια στην ψύξη κατά την εκφόρτιση σημαίνει ότι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος πρέπει να προστατεύονται καλά στα ψυχρά κλίματα. Επίσης, η προφανής αύξηση της ικανότητας της μπαταρίας στις υψηλές θερμοκρασίες δε σημαίνει ότι η θερμότητα έχει θετική επίδραση στη μπαταρία. Στην πραγματικότητα, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται κατά 50% για κάθε 10°C πάνω από τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας των 25°C.



**Σχήμα 2.12:** Επίδραση του ρυθμού εκφόρτισης και της θερμοκρασίας σε μπαταρία μολύβδου-οξέος [15].

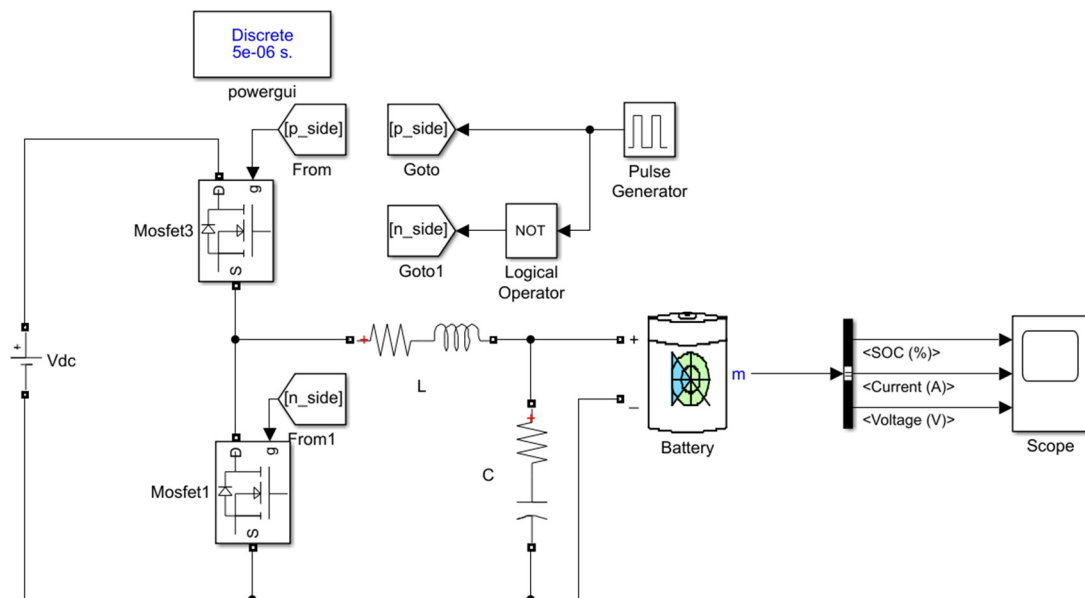
Τα περισσότερα συστήματα Φ/Β-μπαταριών βασίζονται σε μπαταρίες 6V, 12V ή 24V, οι οποίες συνδέονται σε σειρά, ή παράλληλα, ή μικτά (σειρά/παράλληλα). Για ίδιες μπαταρίες που συνδέονται σε σειρά, η συνολική τάση είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των ατομικών μπαταριών, και επειδή το ίδιο ρεύμα ρέει μέσα από κάθε μπαταρία, η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών (Ah) είναι ίδια με την χωρητικότητα κάθε ατομικής μπαταρίας. Για ίδιες μπαταρίες που συνδέονται παράλληλα, η τάση στα άκρα κάθε μπαταρίας είναι ίδια και ίση με τη συνολική τάση, αλλά επειδή το συνολικό ρεύμα είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων των ατομικών μπαταριών, η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών (Ah) είναι ίση με το άθροισμα των χωρητικότητων των ατομικών μπαταριών [15].

### 2.3.4 Μοντελοποίηση μπαταρίας μολύβδου-οξέος

Οι μπαταρίες γενικά εμφανίζουν περίπλοκη, μη γραμμική συμπεριφορά, καθώς είναι ηλεκτροχημικά συστήματα που αποθηκεύουν και απελευθερώνουν ενέργεια μέσω αντιδράσεων οξειδωσης. Υπάρχουν μοντέλα που βασίζονται στην ηλεκτροχημεία του συστήματος και, επίσης, μοντέλα ισοδύναμων κυκλωμάτων, που αποτελούνται από πυκνωτές και αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύουν την ικανότητα αποθήκευσης φόρτισης της μπαταρίας και την αντίσταση στη ροή φόρτισης αντίστοιχα. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ηλεκτροχημικό μοντέλο είναι το μοντέλο Shepherds. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται σε διάφορες μορφές, με τροποποιήσεις που γίνονται για συγκεκριμένους

τύπους μπαταριών. Ωστόσο, το απλούστερο από τα αντίστοιχα μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος για τις μπαταρίες είναι το ισοδύναμο Thevenin. Αποτελείται από πηγή τάσης χωρίς φορτίο, εσωτερική αντίσταση  $R_0$  και έναν πυκνωτή  $C$ , με αντίσταση  $R$  παράλληλα με αυτόν. Οι τιμές των διαφόρων συστατικών παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αυτό το μοντέλο δεν είναι πολύ ακριβές. Στην πραγματικότητα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τιμές των εξαρτημάτων είναι συνάρτηση πολλών συνθηκών της μπαταρίας, όπως η κατάσταση φόρτισης (SOC), η χωρητικότητα αποθήκευσης της μπαταρίας, ο ρυθμός εκφόρτισης και η θερμοκρασία [27].

Συνεπώς, η χρήση ενός μη γραμμικού μοντέλου, του οποίου οι τιμές των υποσυστημάτων μεταβάλλονται με μη γραμμικό τρόπο, ίσως είναι περισσότερο αποδεκτή. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, χρησιμοποιείται το μοντέλο της μπαταρίας της βιβλιοθήκης του SIMULINK/MATLAB. Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα γενικό δυναμικό μοντέλο, που παραμετροποιείται για να αντιπροσωπεύει τους πιο δημοφιλείς τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Εδώ, το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της μπαταρίας μολύβδου-οξέος. Μια απλή εφαρμογή του μοντέλου, για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της μπαταρίας, καθώς και για την λειτουργία ενός απλοποιημένου συστήματος ελέγχου φόρτισης/εκφόρτισης, παρουσιάζεται παρακάτω:

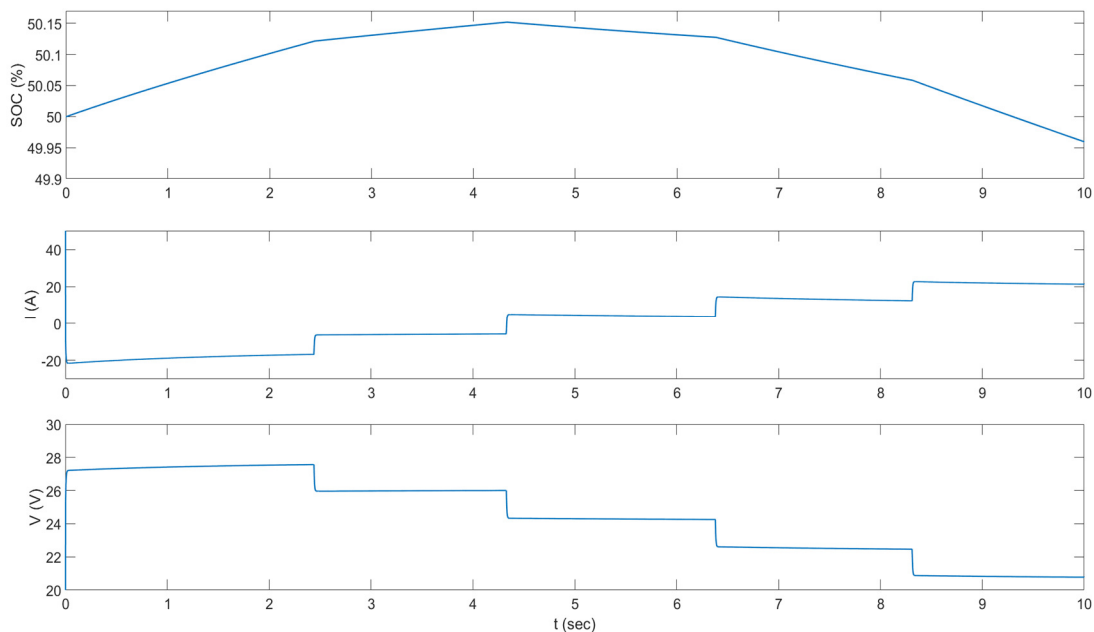


**Σχήμα 2.13:** Μοντέλο μπαταρίας μολύβδου-οξέος για έλεγχο απόκρισης.

Στο παραπάνω μοντέλο, τα δύο Mosfet, σε συνδυασμό με το πηνίο και τον πυκνωτή, προσομοιώνουν τη λειτουργία ενός απλού αμφίδρομου DC/DC μετατροπέα, ο οποίος ελέγχεται από μια γεννήτρια παλμών, συχνότητας 10kHz. Η απόκριση μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος 24V και 10Ah παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.

Στο σχήμα 2.14, παρατηρείται μεταβολή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας με μεταβολή του εύρους των παλμών της γεννήτριας, λειτουργία που επιτελεί ένας αμφίδρομος DC/DC μετατροπέας. Ξεκινώντας με εύρος παλμών στο 60% της περιόδου, και με μείωση κατά 5% μέχρι το 40% της περιόδου, η μπαταρία μεταβαίνει σταδιακά από κατάσταση φόρτισης σε κατάσταση εκφόρτισης. Αυτό φαίνεται τόσο από την καμπύλη κατάστασης φόρτισης (State of Charge - SOC), όπου για εύρος παλμών 60% και 55% της περιόδου η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται, δηλαδή η μπαταρία φορτίζεται, όσο και από την καμπύλη του ρεύματος, το οποίο για αρνητικές τιμές δηλώνει ότι η μπαταρία φορτίζεται, και για θετικές τιμές δηλώνει ότι η μπαταρία εκφορτίζεται.





**Σχήμα 2.14:** Καμπύλες κατάστασης φόρτισης (πάνω), ρεύματος (μέση) και τάσης μπαταρίας (κάτω), με μεταβολή του εύρους παλμών.

Στην πράξη, το τελικό μοντέλο που χρησιμοποιείται, δεδομένου ότι το σύστημα θα περιλαμβάνει, σε συνδυασμό με τις μπαταρίες, και υπερπυκνωτές, παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα, μετά την ανάλυση των υπερπυκνωτών.

## 2.4 Υπερπυκνωτής

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής που περιέχει συνιστώσες που σχετίζονται τόσο με μια μπαταρία όσο και με έναν πυκνωτή. Συνεπώς, η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε μερικά Volt. Ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιεί ένα μοριακά-λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη σαν διηλεκτρικό για το διαχωρισμό της φόρτισης. Η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Με τον τρόπο αυτό, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά, δηλαδή χωρίς να πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Ένας υπερπυκνωτής αποτελείται από δυο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, έναν διαχωριστή, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος. Ανάλογα με την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος (electrochemical double layer capacitors, ECDL).
- Ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors).
- Υβριδικούς πυκνωτές (hybrid capacitors).

Οι υπερπυκνωτές ECDL είναι συνήθως οι λιγότερο δαπανηροί ως προς την κατασκευή τους και είναι οι πιο διαδεδομένοι τύποι υπερπυκνωτών. Κατά τη διάρκεια της φόρτισής τους, τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα στον ηλεκτρολύτη μεταναστεύουν προς τα ηλεκτρόδια αντίθετης πολικότητας, εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των φορτισμένων ηλεκτροδίων, που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμοζόμενη τάση. Κατά συνέπεια, παράγονται δύο ξεχωριστά φορτισμένα στρώματα. Παρόμοια με μια μπαταρία, ο

υπερπυκνωτής ECDL βασίζεται στην ηλεκτροστατική δράση. Δεδομένου, όμως, ότι καμιά χημική αντίδραση δεν συμβαίνει, το αποτέλεσμα είναι εύκολα αναστρέψιμο, με ελάχιστη υποβάθμιση σε μεγάλη φόρτιση ή υπερφόρτιση, και, συνεπώς, η τυπική διάρκεια ζωής είναι εκατοντάδες χιλιάδες κύκλοι. Ο περιοριστικός παράγοντας από την άποψη της διάρκειας ζωής μπορεί να είναι τα έτη λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, έχει αναφερθεί διάρκεια ζωής μέχρι τα 12 έτη.

Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι το υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, που φθάνει σε ένα επίπεδο της τάξης του 14% της ονομαστικής ενέργειας για κάθε μήνα. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε μεγάλες φορτίσεις, το γεγονός ότι καμιά χημική αντίδραση δεν πραγματοποιείται σημαίνει ότι οι υπερπυκνωτές μπορούν εύκολα να φορτιστούν και να εκφορτιστούν σε δευτερόλεπτα, πολύ ταχύτερα δηλαδή από τις μπαταρίες. Παράλληλα, ούτε θερμότητα ούτε επικίνδυνες ουσίες απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ υψηλή και κυμαίνεται από 85% έως 98%.

Συγκριτικά με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές έχουν σημαντικά μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίου. Η ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να απορροφήσει ένας συμβατικός πυκνωτής εξαρτάται άμεσα από την εκτεθειμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Η τεχνολογία, όμως, των υπερπυκνωτών βασίζεται στην ανάπτυξη «ενεργού επιφάνειας» σε ολόκληρη τη μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μόνο στην εξωτερική τους επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο συνολικός όγκος σε ένα μικρό μόλις κλάσμα αυτού των συμβατικών πυκνωτών και πολλαπλασιάζεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους. Έχει αναφερθεί χωρητικότητα υπερπυκνωτή 5000F, ενώ η ενεργειακή του πυκνότητα φθάνει τις 5Wh/kg, σε αντίθεση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που παρουσιάζουν τυπική ενεργειακή πυκνότητα 0.5Wh/kg. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα ισχύος των υπερπυκνωτών είναι εξαιρετικά υψηλή, παίρνοντας τιμές όπως 10kW/kg, πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από τις πυκνότητες ισχύος των μπαταριών. Παρόλα αυτά, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υπερπυκνωτή, το υψηλό αυτό ποσό ισχύος είναι διαθέσιμο μόνο για πολύ μικρή χρονική διάρκεια.

Το κόστος του υπερπυκνωτή είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την περαιτέρω εμπορική χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκριτικά με τα κόστη των καθιερωμένων τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης, όπως είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ο υπερπυκνωτής εμφανίζει σημαντικά υψηλότερο κόστος. Επομένως, είναι απαραίτητη η δραστική μείωση του κόστους του ιδιαίτερα στους τομείς του άνθρακα, του ηλεκτρολύτη και του διαχωριστή. Σήμερα, η υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ισχύος των υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με τους πολύ σύντομους κύκλους εκφόρτισης, καθιστά ιδανική την εφαρμογή τους στην παροχή συμπληρωματικής φόρτισης για την ικανοποίηση ξαφνικών ενεργειακών αναγκών [15].

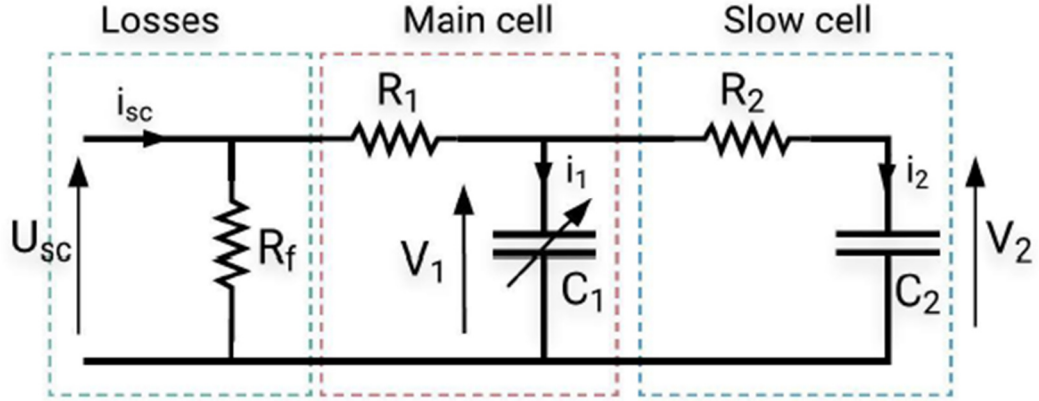
#### 2.4.1 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή

Οι υπερπυκνωτές έχουν χαμηλή τάση στοιχείου μεταξύ των ακροδεκτών τους (έως 3 V) και ως εκ τούτου είναι κατασκευασμένοι με μονάδες μεμονωμένων κυψελών που συνδέονται σε σειρά ή σε συνδυασμό σειριακών και παράλληλων συνδέσεων. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός στοιχείου υπερπυκνωτή φαίνεται στο σχήμα 2.15. Εξετάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα δύο κλάδων, το οποίο αποτελείται από τον κύριο και το αργό κλάδο.

Ο κύριος κλάδος αντιστοιχεί στην άμεση ανταπόκριση του υπερπυκνωτή κατά τη διάρκεια της φόρτισης ή της εκφόρτισης σε χρονικό διάστημα δευτερολέπτων. Στον κύριο κλάδο, η  $R_1$  αποτελεί την εν σειρά αντίσταση και αντιπροσωπεύει την απώλεια ισχύος ως θερμότητα κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση ( $m\Omega$ ). Ο πυκνωτής  $C_1$  εξαρτάται από την τάση  $V_1$  όπως εκφράζεται παρακάτω:

$$C_1 = C_0 + C_v V_1 \quad (2.18)$$

όπου  $C_0$  είναι η σταθερή χωρητικότητα σε Farad ( $F$ ) και  $C_v$  μία σταθερά ( $F/V$ ).



**Σχήμα 2.15:** Ισοδύναμο κύκλωμα δύο κλάδων ενός στοιχείου υπερπυκνωτή [31].

Ο αργός κλάδος καθορίζει την εσωτερική κατανομή ενέργειας στο τέλος του κύκλου φόρτισης ή εκφόρτισης σε χρονικό εύρος λεπτών. Η παράλληλη αντίσταση  $R_f$  περιγράφει το ρεύμα διαρροής, όταν ο υπερπυκνωτής βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής ( $k\Omega \times 10^2$ ). Αυτή η ιδιότητα αυτοεκφόρτισης μπορεί να αμεληθεί για γρήγορους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Η εξίσωση 2.19 αντιπροσωπεύει την τάση  $V_{sc}$  του υπερπυκνωτή:

$$V_{sc} = N_s U_{sc} = N_s \left( V_1 + R_1 \frac{I_{sc}}{N_p} \right) \quad (2.19)$$

όπου  $N_s$  και  $N_p$  είναι ο αριθμός των στοιχείων του υπερπυκνωτή που συνδέονται σε σειρά και παράλληλα, αντίστοιχα. Ακόμη,  $U_{sc}$  είναι η τάση του στοιχείου του υπερπυκνωτή και  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα της μονάδας του υπερπυκνωτή. Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα, για τον αργό κλάδο, η τάση  $V_2$  εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{1}{R_2} (V_1 - V_2) dt \quad (2.20)$$

Η τάση  $V_1$  του πυκνωτή  $C_1$  στον κύριο κλάδο δίνεται από τη σχέση:

$$V_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_v Q_1}}{C_v} \quad (2.21)$$

όπου  $Q_1$  είναι η στιγμιαία φόρτιση του  $C_1$  και υπολογίζεται από τη σχέση:

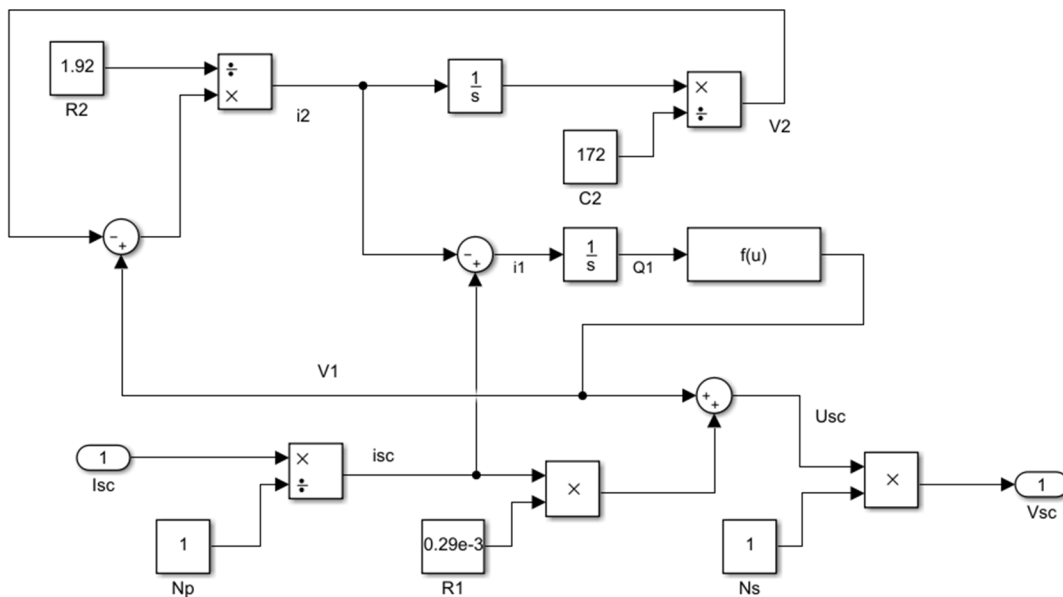
$$Q_1 = C_0 V_1 + \frac{1}{2} C_v V_1^2 \quad (2.22)$$

Ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπερπυκνωτή αναπτύσσεται στο σχήμα 2.16, σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, για τη μελέτη της απόκρισής του, το οποίο βασίζεται στις ηλεκτρικές παραμέτρους του υπερπυκνωτή Maxwell BCAP3000 (πίνακας 2.3) [31].



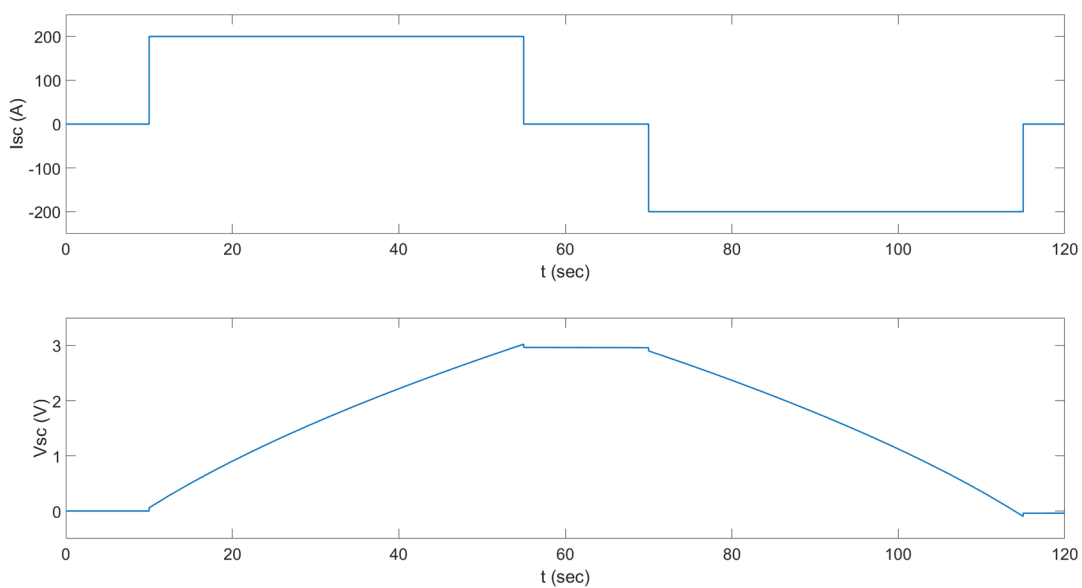
Παράμετροι	Τιμές
Όνομαστική τάση	2.7 V
Όνομαστική χωρητικότητα	3000 F
$R_1$	0.29 m $\Omega$
$C_0$	2100 F
$C_v$	623 F/V
$R_2$	1.92 $\Omega$
$C_2$	172 F

Πίνακας 2.3: Παράμετροι υπερπυκνωτή.



Σχήμα 2.16: Μοντέλο υπερπυκνωτή.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του παραπάνω μοντέλου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.17: Καμπύλες ρεύματος (πάνω) και τάσης (κάτω) υπερπυκνωτή.

Αρχικά, ένα σταθερό ρεύμα 200A φορτίζει τον υπερπυκνωτή για περίπου 40 δευτερόλεπτα, έως ότου φτάσει στην ονομαστική του τάση. Κατά την περίοδο των 55-70 δευτερολέπτων, ο υπερπυκνωτής βρίσκεται σε ηρεμία ( $I_{sc} = 0A$ ). Έπειτα, ένα σταθερό ρεύμα  $-200 A$  εκφορτίζει τελείως τον υπερπυκνωτή. Στην αρχή της εκφόρτισης, παρατηρείται μια αρχική ελαφρά πτώση τάσης 59mV. Αυτό συμβαίνει λόγω της εσωτερικής αντίστασης  $R_1$  του υπερπυκνωτή ( $\Delta V = I_{sc}R_1$ ).

Αν και το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο υπερπυκνωτή που αναπτύχθηκε δίνει σωστά αποτελέσματα, για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υπερπυκνωτή του SIMULINK/MATLAB, δεδομένου ότι για τις μπαταρίες χρησιμοποιείται το αντίστοιχο μοντέλο της βιβλιοθήκης. Ωστόσο, οι παράμετροι που εφαρμόστηκαν προηγουμένως μπορούν πολύ εύκολα να χρησιμοποιηθούν ως αρχικοποίηση στο νέο μοντέλο. Το συνολικό μοντέλο μπαταριών-υπερπυκνωτών παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

## 2.5 Συνδυασμός μπαταρίας μολύβδου-οξέος με υπερπυκνωτή

Η ταχεία ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων ΑΠΕ, περιορίζεται από το υψηλό κόστος κύκλου ζωής. Ένας από τους κύριους συντελεστές στο υψηλό κόστος ζωής αυτών των συστημάτων είναι η συστοιχία μπαταριών, που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από διαλείπουσες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή, καθώς η ενεργειακή αποθήκευση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των συστημάτων ΑΠΕ, λόγω της διαλείπουσας φύσης τους. Ωστόσο, αυτή η διαλείπουσα φύση είναι που αναγκάζει τη μπαταρία να λειτουργεί σε συνθήκες για τις οποίες δεν είχε σχεδιαστεί. Οι μπαταρίες λειτουργούν συχνά σε καταστάσεις βαθιάς εκφόρτισης και υπερφόρτισης, ενώ η συνεχής έκθεση σε ταχεία διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης υποβαθμίζει την απόδοση της μπαταρίας και μειώνει τη διάρκεια ζωής της. Η μειωμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας οδηγεί σε συχνή αντικατάσταση, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής του συστήματος [27].

Ο κύριος στόχος για την σωστή και ομαλή λειτουργία ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος είναι η δημιουργία μιας ενεργειακής πηγής, η οποία διαθέτει τόσο υψηλή πυκνότητα ισχύος, όσο και υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Με άλλα λόγια, θα πρέπει το σύστημα να διαθέτει την ικανότητα να αποθηκεύει αρκετή ενέργεια σε μικρή ποσότητα μάζας (υψηλή ενεργειακή πυκνότητα), ώστε να παρέχει κάποιο βαθμό αυτονομίας στο φορτίο που τροφοδοτεί (για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα), αλλά και να μπορεί να απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, αναλογικά με τη μάζα του (υψηλή πυκνότητα ισχύος), ώστε να καλύπτει, γρήγορα, ξαφνικές ενεργειακές ανάγκες (για μικρά χρονικά διαστήματα). Με τον συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, ένα σύστημα συνδυάζει όλα τα πλεονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας, αυξάνοντας την αξιοπιστία του. Μια γενική εικόνα για τις πυκνότητες ενέργειας και ισχύος διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης παρουσιάζεται στον πίνακα 2.4 [16].

Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι πυκνωτές έχουν υψηλές πυκνότητες ισχύος και, συνεπώς, τη δυνατότητα να συμπληρώνουν τα παραδοσιακά συστήματα μπαταριών. Αυτή η δυνατότητα εξετάζεται κυρίως από την αυτοκινητοβιομηχανία, για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, λόγω της πιθανής μείωσης του μεγέθους/όγκου του συνολικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Η χρήση των υπερπυκνωτών μειώνει επίσης την επιβάρυνση των ρευμάτων στα συστήματα μπαταριών, βελτιώνοντας, έτσι, δυνητικά τη διάρκεια ζωής τους. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, αξίζει να γίνει διερεύνηση της διαμόρφωσης μπαταρίας-υπερπυκνωτή στο πλαίσιο των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων.

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι ένας απλός παράλληλος συνδυασμός μπαταρίας και υπερπυκνωτή οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση του συστήματος αποθήκευσης

ενέργειας. Έχει αποδειχθεί θεωρητικά ότι η μέγιστη ισχύς ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να ενισχυθεί, οι εσωτερικές απώλειες να μειωθούν και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας να παραταθεί με τη χρήση υπερπυκνωτών, ενώ πειραματικά δεδομένα σε υβριδικά συστήματα μπαταρίας-υπερπυκνωτή δείχνουν βελτιωμένη απόδοση. Υβριδικά συστήματα μπαταρίας-υπερπυκνωτή διερευνώνται ως εναλλακτική λύση για τις μπαταρίες που υπόκεινται σε παλμικά φορτία σε εφαρμογές ψηφιακής επικοινωνίας. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι οι υπερπυκνωτές είναι ένας καλός συνδυασμός με συστήματα κυψελών καυσίμου, που παρουσιάζουν κακή δυναμική απόκριση. Οι υπερπυκνωτές εξετάζονται, επίσης, για χρήση σε εφαρμογές ΑΠΕ, ιδίως για την αιολική. Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών, ορισμένες μελέτες έχουν ενσωματώσει άμεσα τους υπερπυκνωτές στα φωτοβολταϊκά συστήματα για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας τους. Μελέτες μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκής και αιολικής παραγωγής αποκαλύπτουν ότι οι υπερπυκνωτές μπορούν να μοιράζονται το φορτίο κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων ισχύος υψηλής συχνότητας, ενώ άλλες συσκευές υψηλής ενεργειακής πυκνότητας μπορούν να παρέχουν ισχύ σε χαμηλότερες συχνότητες.

Τεχνολογία	Πυκνότητα ενέργειας	Πυκνότητα ισχύος
<b>Μπαταρία (Chemical Battery)</b>	Υψηλή	Χαμηλή
<b>Υπερπυκνωτής (Supercapacitor)</b>	Χαμηλή	Υψηλή
<b>Σφόνδυλος (Flywheel)</b>	Χαμηλή	Υψηλή
<b>Κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell)</b>	Υψηλή	Υψηλή

**Πίνακας 2.4:** Ποιοτική σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [16].

Συνεπώς, οι υπερπυκνωτές, με την υψηλή πυκνότητα ισχύος που διαθέτουν, μπορούν να γεμίσουν το κενό μεταξύ πυκνότητας ενέργειας και ισχύος των μπαταριών και, ως αποτέλεσμα, προσφέρονται ως πολύ καλή συμπληρωματική συσκευή για τις μπαταρίες. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται μία σύγκριση μεταξύ χαρακτηριστικών μπαταριών μολύβδου-οξέος και υπερπυκνωτών:

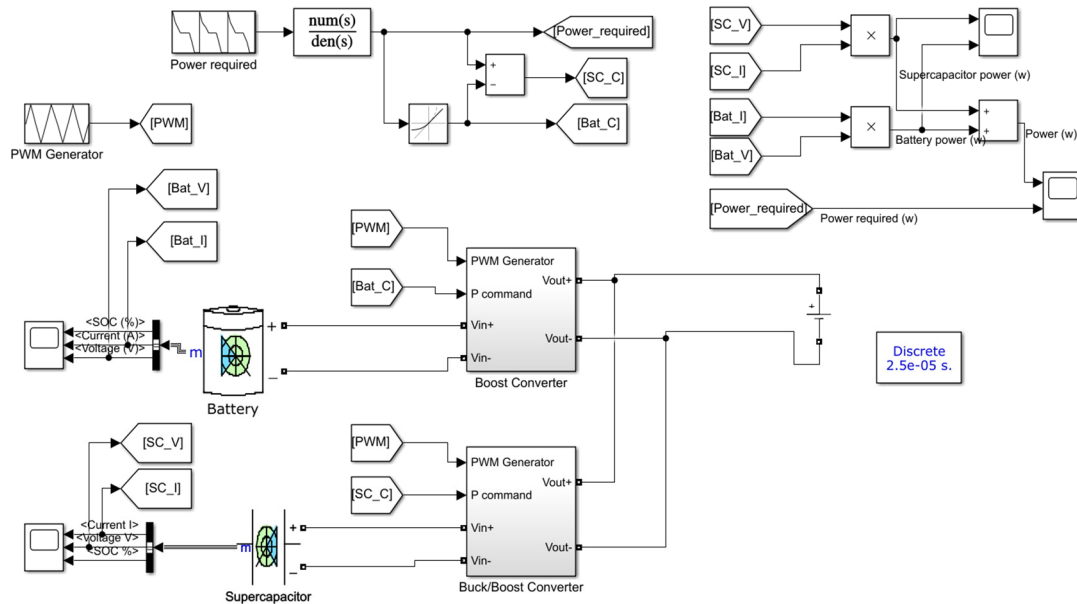
Χαρακτηριστικά	Μπαταρία μολύβδου-οξέος	Υπερπυκνωτής
<b>Πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg)</b>	10-100	1-10
<b>Πυκνότητα ισχύος (W/kg)</b>	<1000	<10000
<b>Κύκλοι ζωής</b>	1000	>500000
<b>Απόδοση</b>	0.7 – 0.85	0.85 – 0.98
<b>Χρόνος εκφόρτισης</b>	0.3 – 3 hrs	0.3 – 30s
<b>Χρόνος φόρτισης</b>	1 – 5 hrs	0.3 – 30s

**Πίνακας 2.5:** Σύγκριση χαρακτηριστικών μπαταρίας μολύβδου-οξέος και υπερπυκνωτή [27].

Συμπερασματικά, συνδυάζοντας τους υπερπυκνωτές με τις μπαταρίες, οι οποίες συνήθως είναι συσκευές χαμηλής ισχύος, η απόδοση της μπαταρίας μπορεί να βελτιωθεί όσον αφορά την πυκνότητα ισχύος. Επιπλέον, η μεγάλη διάρκεια ζωής των υπερπυκνωτών τους καθιστά ελκυστικούς για εφαρμογές υψηλής ισχύος [27].

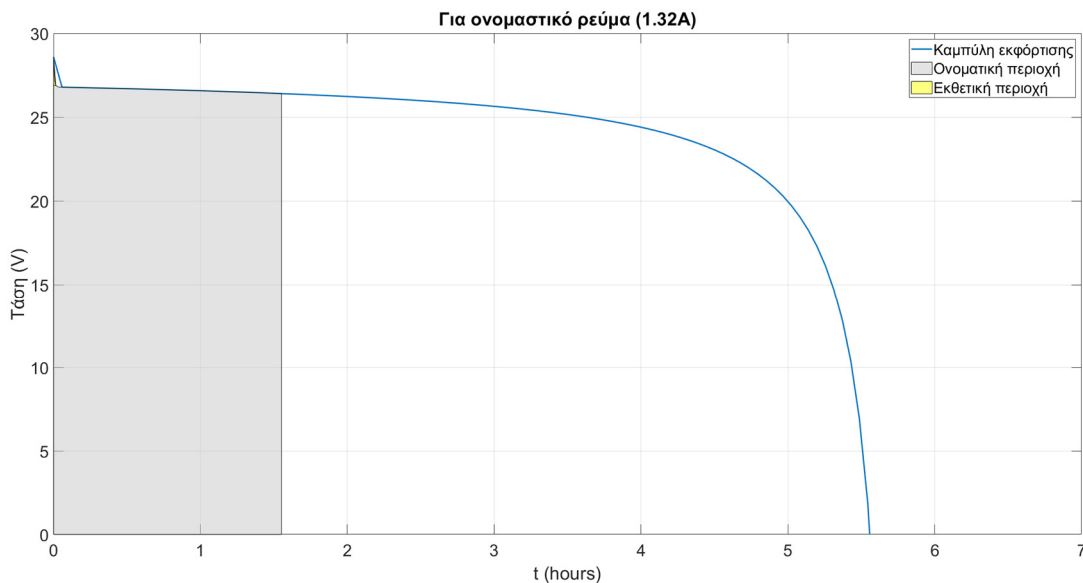
## 2.5.1 Μοντελοποίηση μπαταρίας μολύβδου-οξέος με υπερπυκνωτή

Ο συνδυασμός των μοντέλων μπαταρίας μολύβδου-οξέος και υπερπυκνωτή της βιβλιοθήκης του SIMULINK/MATLAB σε ένα ενιαίο μοντέλο παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.18: Μοντέλο μπαταρίας μολύβδου-οξέος με υπερπυκνωτή.

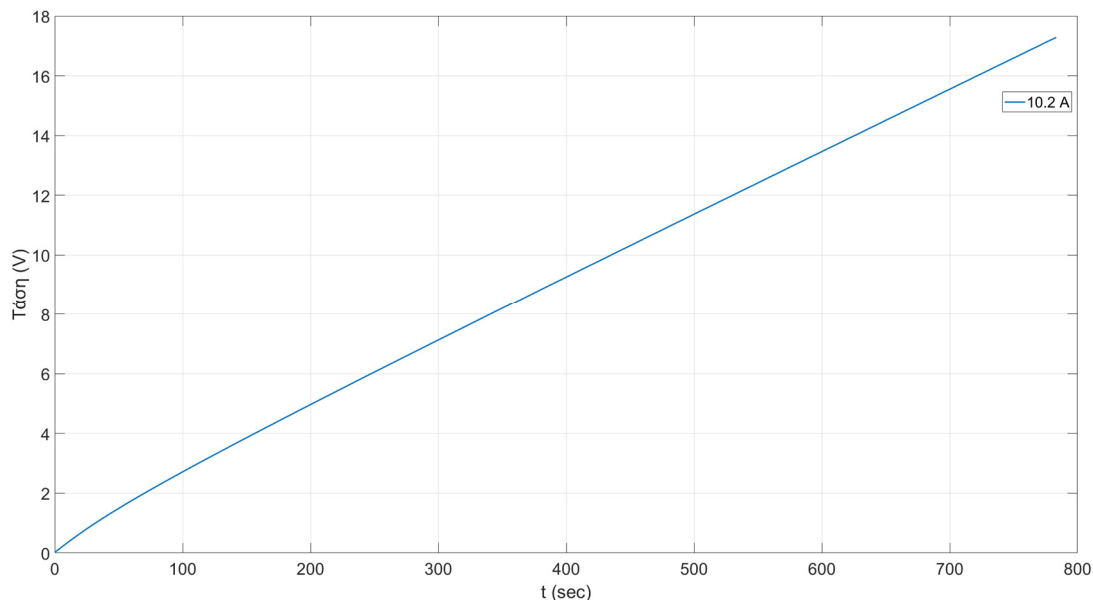
Το μοντέλο περιλαμβάνει την μπαταρία μολύβδου-οξέος και τον υπερπυκνωτή, που συνδέονται, μέσω DC/DC μετατροπέων, σε κοινό ζυγό DC, ο οποίος συμβολίζεται από την πηγή τάσης (42V). Η λειτουργία των μετατροπέων που χρησιμοποιήθηκαν θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 2.19: Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος.

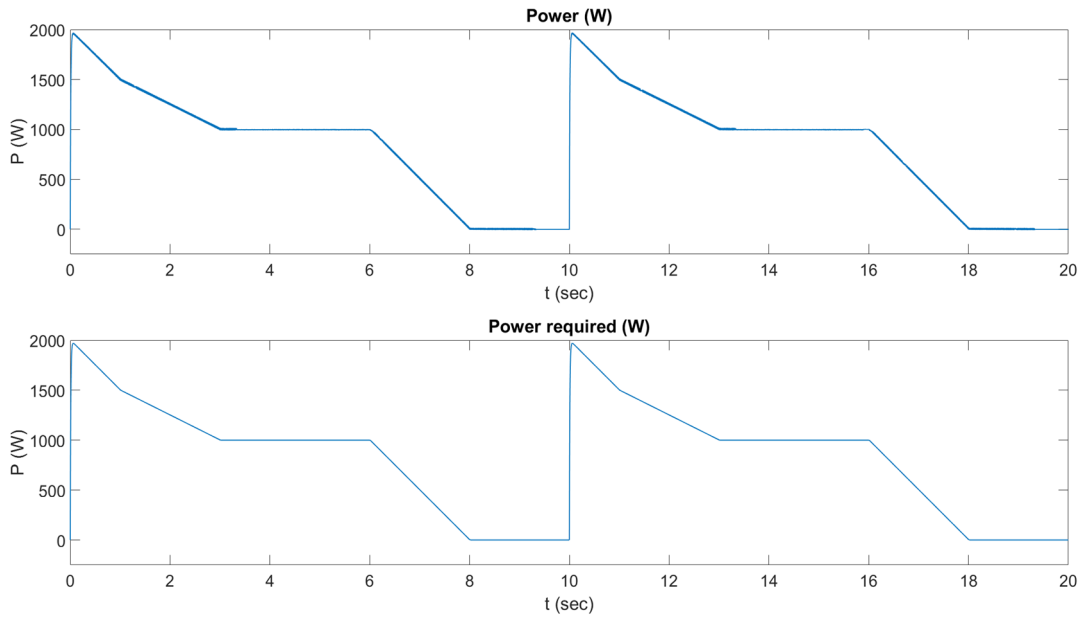
Η καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος 26.4V, 6.6Ah, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.19. Η καμπύλη αποτελείται από τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή (εκθετική) αντιπροσωπεύει την εκθετική πτώση τάσης όταν φορτίζεται η μπαταρία, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το είδος της μπαταρίας που χρησιμοποιείται. Η εκθετική ζώνη οφείλεται σε φαινόμενα υστέρησης για μπαταρίες μολύβδου-οξέος, κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης. Γενικώς, η τάση στην εκθετική περιοχή αυξάνει σταδιακά, όταν η μπαταρία φορτίζεται, ενώ κατά την εκφόρτιση η τάση μειώνεται αμέσως. Η δεύτερη περιοχή (ονομαστική) αντιπροσωπεύει την φόρτιση που μπορεί να εξαχθεί από την μπαταρία, μέχρι η τάση να πέσει κάτω από την ονομαστική τάση της μπαταρίας (26.4V στη συγκεκριμένη περίπτωση). Τέλος, η τρίτη περιοχή αντιπροσωπεύει την συνολική εκφόρτιση της μπαταρίας, κατά την οποία η τάση μειώνεται απότομα. Σημειώνεται, επίσης, ότι όταν το ρεύμα της μπαταρίας προκύπτει αρνητικό, τότε η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης. Για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη τερματική τάση ή χωρητικότητα, δημιουργούνται συστοιχίες μπαταριών, σε παράλληλες ή εν σειρά συνδεσμολογίες.

Η καμπύλη φόρτισης υπερπυκνωτή συνολικής χωρητικότητας 500F και ονομαστικής τάσης 16V παρουσιάζεται στο σχήμα 2.20. Όπως και με τις μπαταρίες, για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη τερματική τάση ή χωρητικότητα, δημιουργούνται συστοιχίες υπερπυκνωτών, σε παράλληλες ή εν σειρά συνδεσμολογίες.



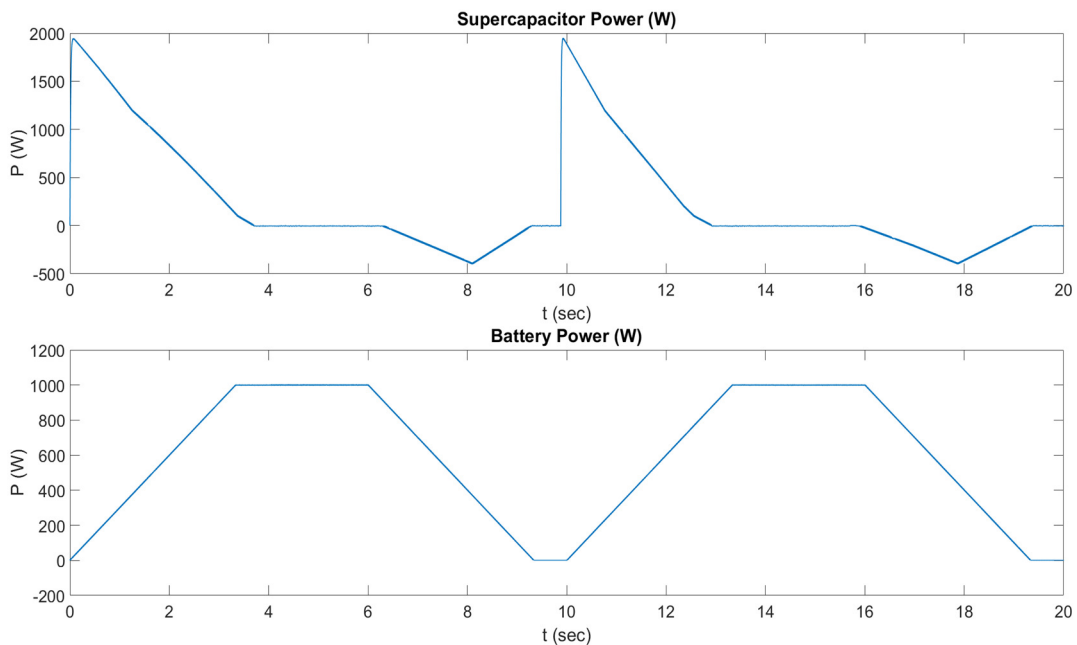
**Σχήμα 2.20:** Καμπύλη φόρτισης υπερπυκνωτή.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται στα σχήματα 2.21 και 2.22. Ο υπερπυκνωτής συνδέεται σε έναν αμφίδρομο DC/DC μετατροπέα (ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης) και η μπαταρία σε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Οι μετατροπείς διαθέτουν κυκλώματα ελέγχου για την διαχείριση της ισχύος τους, με τρόπο που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Ως είσοδος στο μοντέλο θεωρείται μία καμπύλη ισχύος, η οποία επαναλαμβάνεται το 10<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο, με μέγιστη ζήτηση ισχύος τα 2kW, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21 (Power required). Η ισχύς που αποδίδει η μπαταρία περιορίζεται από ένα μπλοκ περιορισμού (rate limiter), ώστε η υπόλοιπη απαιτούμενη ισχύς να παρέχεται στον ζυγό DC από τον υπερπυκνωτή. Η συνολική ισχύς που παράγεται από το συνδυασμένο κύκλωμα μπαταρίας-υπερπυκνωτή παρουσιάζεται στο πάνω μέρος του ίδιου σχήματος (σχήμα 2.21). Παρατηρείται ότι η ζήτηση ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή καλύπτεται πλήρως. Επίσης, η παραγωγή ισχύος από κάθε συσκευή ξεχωριστά παρουσιάζεται στο σχήμα 2.22.



**Σχήμα 2.21:** Ισχύς εξόδου μοντέλου (πάνω) και ισχύς εισόδου/ζήτηση ισχύος (κάτω).

Όπως είναι αναμενόμενο, η παραγωγή ισχύος από την μπαταρία μολύβδου-οξέος ακολουθεί μια αργή απόκριση, λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς του κυκλώματος της μπαταρίας, καθώς και του περιοριστή (χαμηλή πυκνότητα ισχύος, καθυστέρηση στην απόκριση). Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές τις χρονικές στιγμές 0s και 10s, όπου η ισχύς που απαιτείται να παραχθεί από το μοντέλο είναι η μέγιστη (2kW). Μια τέτοια ξαφνική αύξηση ισχύος καλύπτει ο υπερπυκνωτής, ο οποίος αποδίδει άμεσα την απαραίτητη ισχύ (υψηλή πυκνότητα ισχύος), μέχρι οι μπαταρίες να μπορούν να αναλάβουν πλήρως την απαιτούμενη ισχύ.



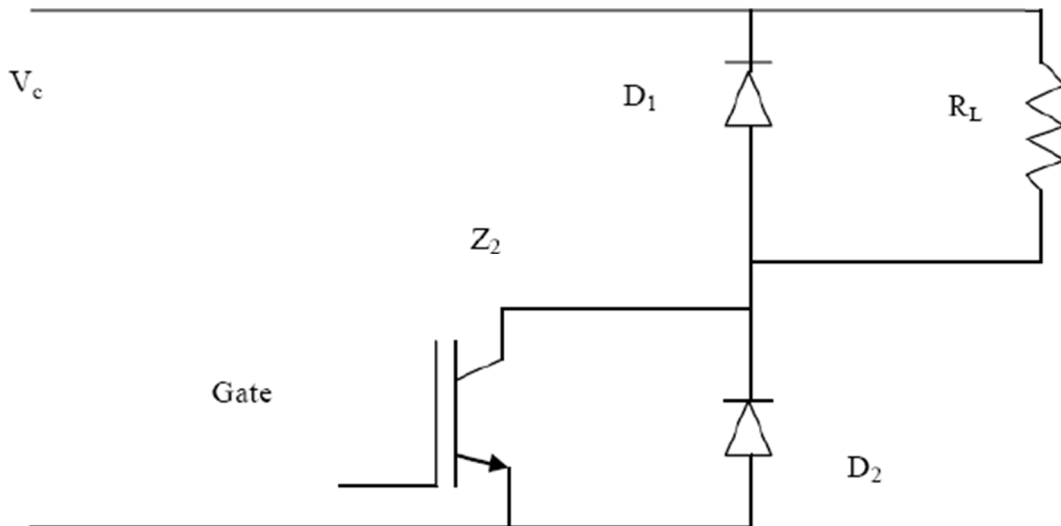
**Σχήμα 2.22:** Παραγωγή ισχύος υπερπυκνωτή (πάνω) και μπαταρίας (κάτω).

## 2.6 Ελεγχόμενο φορτίο (Dump Load)

Το ελεγχόμενο φορτίο (ή φορτίο έκτακτης ανάγκης) χρησιμοποιείται σε απομονωμένη λειτουργία για την βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος. Συνδέεται σε περιπτώσεις παραγωγής περίσσειας ισχύος από το σύστημα, η οποία δεν μπορεί να απορροφηθεί από το φορτίο, και όταν όλες οι μονάδες αποθήκευσης είναι πλήρως φορτισμένες. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται υπερτάσεις στον ζυγό συνεχούς ρεύματος. Το ελεγχόμενο φορτίο είναι ωμικό, και αποσκοπεί στην σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού συνεχούς ρεύματος. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων διατάξεων ελέγχου για την μεταβολή της τάσης και του ρεύματος που το διαρρέουν.

### 2.6.1 Μοντελοποίηση ελεγχόμενου φορτίου

Το κύκλωμα υλοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.23: Κύκλωμα ελεγχόμενου φορτίου [32].

Όταν το IGBT  $Z_2$  άγει, το φορτίο  $R_L$  διαρρέεται από ρεύμα. Όταν δεν άγει, η κυκλοφορία του ρεύματος μέσα από το φορτίο συνεχίζεται για λίγο, μέσα από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης  $D_1$ . Η δίοδος  $D_2$ , που βρίσκεται ενσωματωμένη στο  $Z_2$ , χρησιμεύει κυρίως για την προστασία του IGBT από ανάστροφες τάσεις λόγω αυτεπαγωγών σύνδεσης. Το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_L$  δίνεται από τη σχέση [32]:

$$\bar{I}_L = \frac{V_c \cdot D}{R_L} \quad (2.23)$$

όπου  $D$  είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του και  $V_c$  η τάση εισόδου.

## 2.7 Ηλεκτρονικά ισχύος

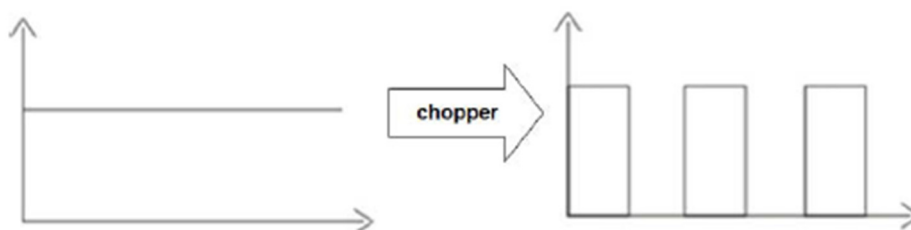
Η βασική εφαρμογή των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι η διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος. Με την χρήση του όρου «διαχείριση» υπογραμμίζεται, αρχικά, το γεγονός ότι οι διατάξεις αυτές δεν παράγουν ισχύ, αλλά την διαχειρίζονται, έχοντας και τις σχετικές απώλειες, όπως κάθε τέτοια διάταξη. Η λειτουργία αυτών των διατάξεων μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- την μετατροπή AC τάσης σε DC τάση (ανόρθωση)
- την μετατροπή DC τάσης σε AC τάση (αντιστροφή)
- την μετατροπή AC τάσης σε AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά
- την μετατροπή DC τάσης σε DC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά

Οι αντίστοιχες διατάξεις περιγράφονται με τον γενικό όρο «μετατροπείς», συνοδευόμενο από την σχετική περιγραφή (AC-AC μετατροπέας, AC-DC μετατροπέας κ.ο.κ.). Αντίστοιχα μπορεί να απαντηθούν οι όροι ανορθωτές (για AC-DC μετατροπείς), αντιστροφείς (για DC-AC μετατροπείς), AC ελεγκτές ή AC ρυθμιστές ή κυκλομετατροπείς (για AC-AC μετατροπείς) και καταμητές ή ψαλιδιστές (για DC-DC μετατροπείς). Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθούν, κατά κύριο λόγο, οι μετατροπείς DC-DC, ένας AC-DC μετατροπέας (ανορθωτής), καθώς και ένας γενικός DC-AC μετατροπέας (αντιστροφέας), των οποίων η λειτουργία αναπτύσσεται στις επόμενες ενότητες.

### 2.7.1 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος DC-DC

Οι DC-DC μετατροπείς ονομάζονται και καταμητές (ή ψαλιδιστές - «choppers»). Πρόκειται κατά βάση για κυκλώματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς διακόπτες μεγάλης διακοπτικής συχνότητας ώστε να αποκόπτουν ή όχι μια DC τάση εισόδου από το φορτίο, παράγοντας έτσι μια DC τάση εξόδου με διαφορετική μέση τιμή. Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.24. Με χρήση κατάλληλων στοιχείων και κυκλωματικών διατάξεων (αξιοποιώντας τις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας των παθητικών στοιχείων των διατάξεων) είναι δυνατόν να παραχθεί και τάση εξόδου με μεγαλύτερη μέση τιμή από αυτήν της εισόδου. Συνεπώς, οι DC-DC μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υποβιβασμό και την ανύψωση μιας DC τάσης. Έτσι, ανάλογα με την λειτουργία του μετατροπέα, αυτός μπορεί να είναι υποβιβασμού (step-down/buck), ανύψωσης (step-up/boost) ή υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost). Άλλες ονομασίες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν συγκεκριμένες τοπολογίες/ιδιότητες (Flyback, Forward, Push-pull, Half bridge, Full bridge, Cuk, SEPIC, κλπ.). Οι DC-DC μετατροπείς έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών, που περιλαμβάνει τα παλμοτροφοδοτικά, τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αντιστάθμισης, τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας DC μηχανών κ.α.



Σχήμα 2.24: Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας των καταμητών [33].



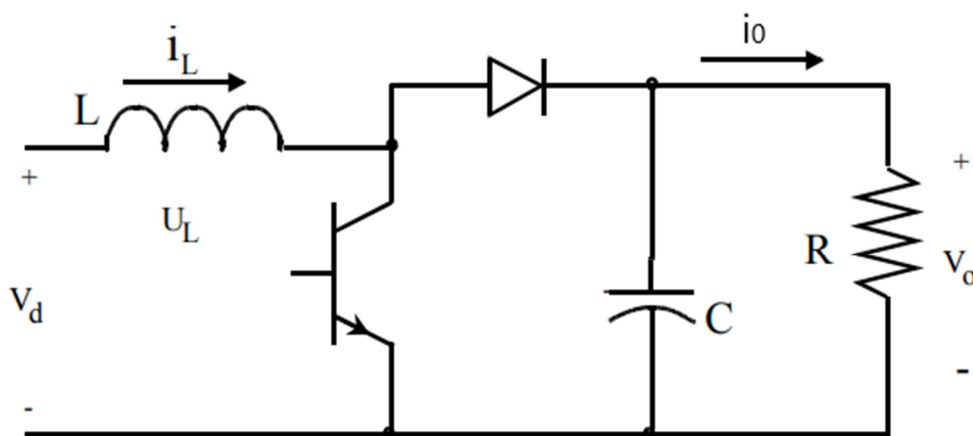
Για κάθε DC-DC μετατροπέα (ή διακόπτη) ορίζεται ο χρόνος αγωγής ( $t_{on}$ ) και ο χρόνος μη αγωγής ( $t_{off}$ ). Το άθροισμά τους αποτελεί την περίοδο κατάτμησης ή διακοπτική περίοδο η οποία συμβολίζεται συνήθως με  $T$  ή με  $T_{sw}$  (το «sw» από το «switch» (διακόπτης) συχνά προστίθεται στα μεγέθη που αφορούν τον διακόπτη), δηλαδή  $T_{sw} = t_{on} + t_{off}$ . Αντίστοιχα ορίζεται η συχνότητα κατάτμησης ή διακοπτική συχνότητα  $f$  (ή  $f_{sw}$ ) και ισχύει  $f = 1/T$ . Το πηλίκο  $D = t_{on}/T$  ονομάζεται κύκλος λειτουργίας ή βαθμός χρησιμοποίησης ή λόγος κατάτμησης («duty cycle» ή «duty ratio») και αποτελεί ένα μέγεθος με ιδιαίτερη σημασία. Προσαρμόζοντας την διάρκεια του διαστήματος αγωγής του διακόπτη, μεταβάλλοντας, δηλαδή, τον βαθμό χρησιμοποίησης  $D$ , μεταβάλλεται το εύρος του παλμού (δηλαδή η διάρκειά του). Με αυτόν τον τρόπο, όταν η διακοπτική συχνότητα παραμένει σταθερή, ρυθμίζεται η τάση εξόδου του μετατροπέα. Αυτή η τεχνική ελέγχου ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation – PWM). Στην πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιείται η PWM τεχνική ή διάφορες παραλλαγές της. Σημειώνεται ότι η διακοπτική συχνότητα επιλέγεται αρκετά υψηλή ώστε να μην διαταράσσει την λειτουργία του φορτίου.

Κατάλληλα φίλτρα (π.χ. L-C διατάξεις) χρησιμοποιούνται ώστε το ρεύμα στο φορτίο να διατηρείται σταθερό. Με τη σύνδεση ενός πηνίου σε σειρά, και ενός πυκνωτή παράλληλα, είναι δυνατή η εξομάλυνση του ρεύματος και της τάσης, αντίστοιχα, καθώς αποκόπτονται κάποιες από τις εναλλασσόμενες συνιστώσες των κυματομορφών. Για την λειτουργία των κυκλωμάτων τέτοιων μετατροπέων, συχνά, απαιτούνται παθητικά στοιχεία (πηνία) για την αποθήκευση ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, ενδιαφέρει και η μορφή του ρεύματος στα πηνία αυτά [33].

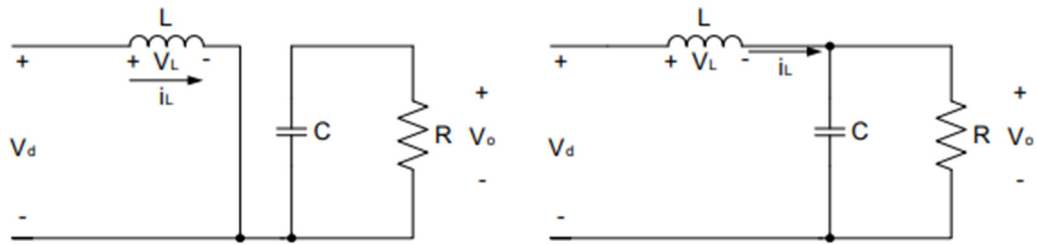
Στη συνέχεια, αναλύονται τα τρία βασικά είδη μετατροπέων συνεχούς ρεύματος, δηλαδή οι μετατροπείς ανύψωσης, υποβιβασμού και οι μικτοί μετατροπείς DC-DC.

### 2.7.1.1 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-up/Boost DC-DC Converter)

Ο ρόλος αυτού του μετατροπέα είναι η ανύψωση της συνεχούς τάσης εισόδου με ελεγχόμενο τρόπο. Η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Στο σχήμα 2.25 φαίνεται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα IGBT, μία δίοδο, ένα πηνίο και ένα πυκνωτή συνδεδεμένο στην έξοδο.

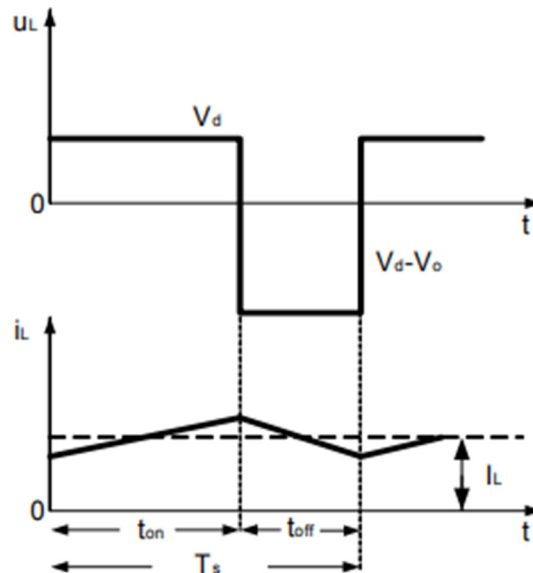


Σχήμα 2.25: Κύκλωμα DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης [34].



**Σχήμα 2.26:** Κυκλώματα σε περίπτωση αγωγής (αριστερά) και αποκοπής (δεξιά) του διακόπτη [34].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26, όταν το IGBT στοιχείο άγει, η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη, με αποτέλεσμα να απομονώνεται το κομμάτι της εξόδου. Έτσι, το ρεύμα διαρρέει τον αριστερό βρόχο και η ενέργεια που έρχεται από την είσοδο του μετατροπέα αποθηκεύεται στο πηνίο. Μόλις το στοιχείο σταματήσει να άγει, τότε η διόδος πολώνεται θετικά, με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου να προστίθεται σε αυτήν της πηγής και να διοχετεύεται προς την έξοδο. Στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, ο πυκνωτής εξομάλυνσης θεωρείται πολύ μεγάλος, ώστε να εξασφαλίζεται μία σταθερή τάση εξόδου [33], [34], [20].



**Σχήμα 2.27:** Καμπύλη τάσης πηνίου (πάνω) και ρεύματος πηνίου (κάτω) [34].

Η τάση στα άκρα του πηνίου δίνεται από τον νόμο του Faraday:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.24)$$

Παρατηρώντας τις κυματομορφές του σχήματος 2.27, το ρεύμα του πηνίου ρέει συνεχώς μέσα στο κύκλωμα, ενώ το ολοκλήρωμα της τάσης στα άκρα του πηνίου στη διάρκεια μίας διακοπτικής περιόδου πρέπει να είναι ίσο με μηδέν:

$$\int_0^{T_{sw}} V_L dt = L \int_0^{T_{sw}} di_L = 0 \quad (2.25)$$

Θεωρώντας μετατροπέα χωρίς απώλειες, η σχέση 2.25 είναι ισοδύναμη με την ακόλουθη:

$$V_d \cdot t_{on} + (V_d - V_o) \cdot t_{off} = 0 \quad (2.26)$$

όπου  $V_d$  η τάση εισόδου,  $V_o$  η τάση εξόδου και  $t_{on}, t_{off}$  τα χρονικά διαστήματα αγωγής και μη αγωγής, αντίστοιχα. Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με την περίοδο  $T_{sw}$ , προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου-εξόδου:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_{sw}}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.27)$$

Χωρίς απώλειες, η ισχύς εισόδου θα είναι ίση με την ισχύ εξόδου, οπότε:

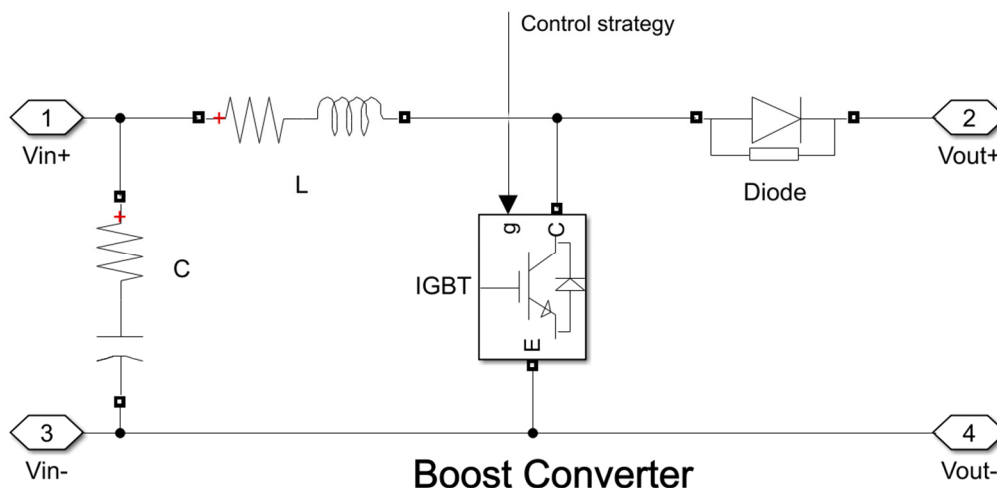
$$V_d I_d = V_o I_o \quad (2.28)$$

και από τις σχέσεις 2.27 και 2.28 προκύπτει:

$$\frac{I_o}{I_d} = 1 - D \quad (2.29)$$

### 2.7.1.2 Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-up/Boost DC-DC Converter)

Το μοντέλο του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



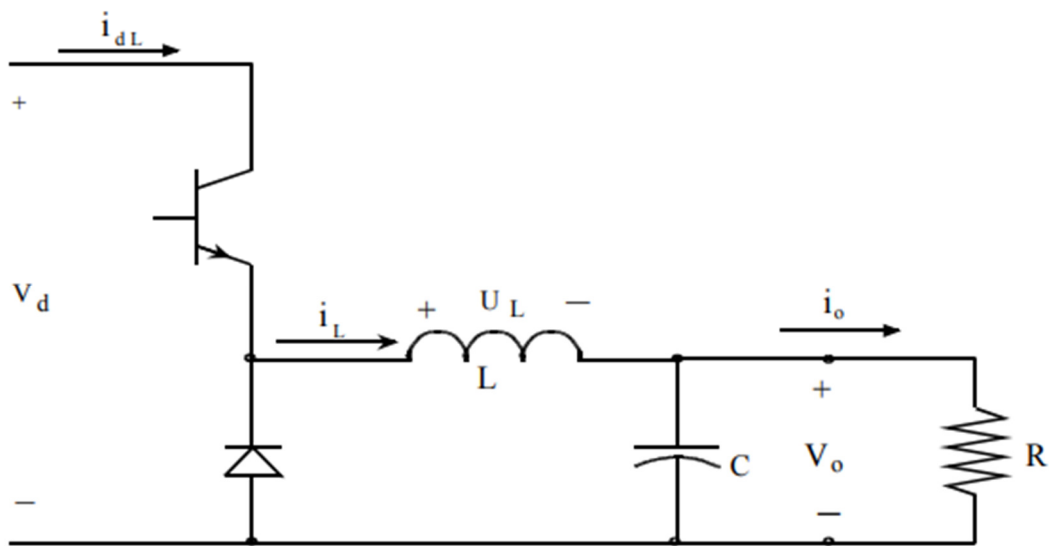
**Σχήμα 2.28:** Μοντέλο DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Το IGBT που χρησιμοποιείται έχει αντίσταση αγωγής  $0.001\Omega$  και μηδενική αυτεπαγωγή. Η τάση ορθής πόλωσης θεωρείται  $0.8V$  και η αντίσταση snubber  $100k\Omega$ . Το πηνίο και ο πυκνωτής μοντελοποιούνται σε σειρά με αντίσταση  $0.1\Omega$  και  $0.0001\Omega$  αντίστοιχα, ώστε να

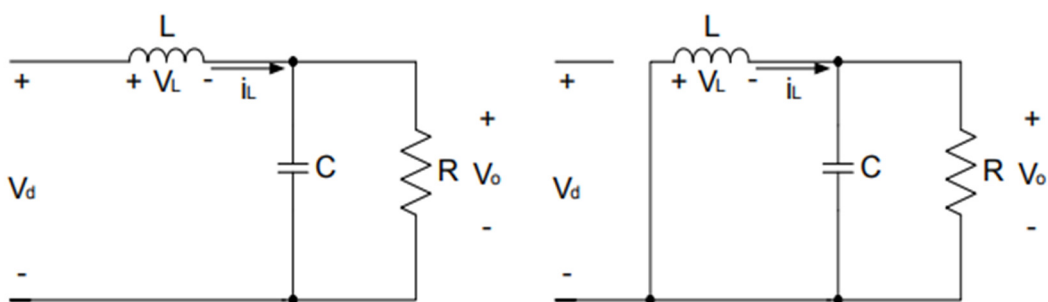
προσομοιώνεται η μη ιδανική συμπεριφορά τους. Η τιμή της αυτεπαγωγής υπολογίζεται κατάλληλα, ανάλογα με το στοιχείο το οποίο συνδέεται στον μετατροπέα, ώστε να επιτυγχάνεται εξομάλυνση του ρεύματος και λιγότερες διακοπτικές συχνότητες. Αντίστοιχα υπολογίζεται και η χωρητικότητα, ώστε να γίνεται κατάλληλη εξομάλυνση της τάσης, και, σε συνεργασία με τον ελεγκτή του μετατροπέα, η τάση εξόδου προκύπτει μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Η λειτουργία του ελεγκτή θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

### 2.7.1.3 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-Down/Buck DC-DC Converter)

Αυτό το είδος μετατροπέα παράγει μια μέση τάση εξόδου χαμηλότερη από τη συνεχή τάση εισόδου  $V_d$ . Το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού έχει τα ίδια δομικά στοιχεία με το κύκλωμα του μετατροπέα ανύψωσης και η συνδεσμολογία του φαίνεται στο σχήμα 2.29.



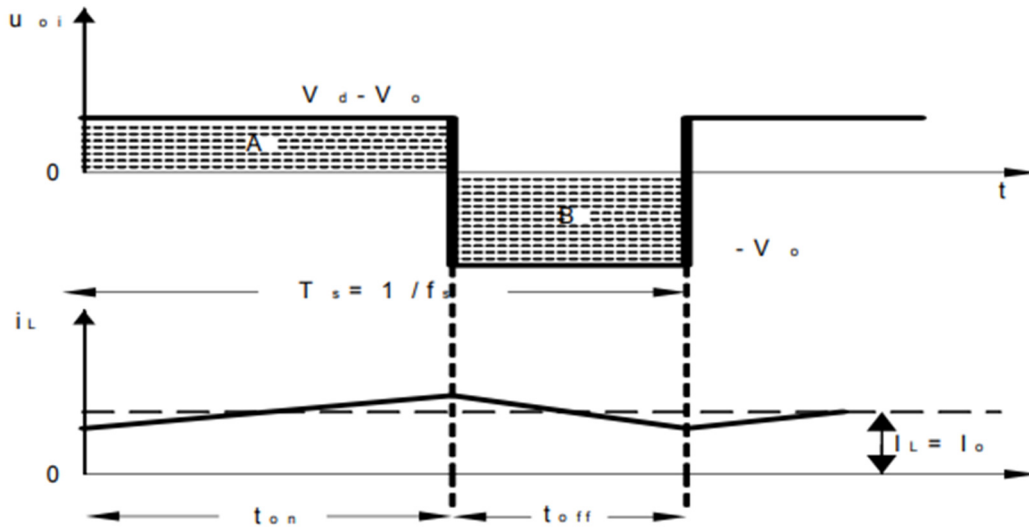
Σχήμα 2.29: Κύκλωμα DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης [34].



Σχήμα 2.30: Κυκλώματα σε περίπτωση αγωγής (αριστερά) και αποκοπής (δεξιά) του διακόπτη [34].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.30, στην περίπτωση λειτουργίας με συνεχή αγωγή ρεύματος, το ρεύμα του πηνίου ρέει συνεχώς στο κύκλωμα. Όταν ο διακόπτης κλείσει για ένα χρονικό διάστημα  $t_{on}$ , τότε αυτός άγει το ρεύμα εισόδου, με αποτέλεσμα η διόδος να πολώνεται ανάστροφα. Στα άκρα του πηνίου αναπτύσσεται μια θετική τάση  $V_L = V_d - V_o$ , η οποία προκαλεί και μια γραμμική αύξηση του ρεύματος του πηνίου  $i_L$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.31. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το ρεύμα  $i_L$  συνεχίζει να ρέει μέσω της διόδου, λόγω

της αποθηκευμένης ενέργειας στο πηνίο, και η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου είναι τώρα  $V_L = -V_o$  [34].



**Σχήμα 2.31:** Καμπύλη τάσης πηνίου (πάνω) και ρεύματος πηνίου (κάτω) [34].

Κατ' αντιστοιχία με τον μετατροπέα ανύψωσης, το ολοκλήρωμα της τάσης στο διάστημα μίας περιόδου πρέπει να είναι ίσο με μηδέν:

$$\int_0^{T_{sw}} V_L dt = \int_0^{t_{on}} V_L dt + \int_{t_{on}}^{T_{sw}} V_L dt = 0 \quad (2.30)$$

οπότε προκύπτει:

$$(V_d - V_o) \cdot t_{on} = V_o \cdot (T_{sw} - t_{on}) \quad (2.31)$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με την περίοδο  $T_{sw}$ , προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου-εξόδου:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_{sw}} = D \quad (2.32)$$

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο, η τάση μεταβάλλεται γραμμικά και εξαρτάται μόνον από την διάρκεια αγωγής  $D$ . Θεωρώντας και πάλι μετατροπέα χωρίς απώλειες, η ισχύς εισόδου θα είναι ίση με την ισχύ εξόδου, οπότε:

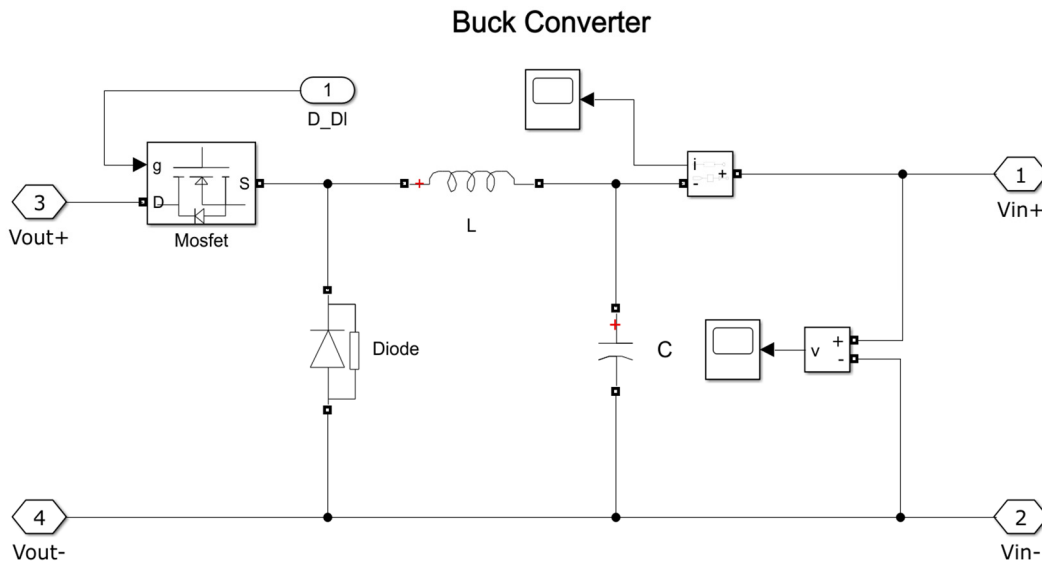
$$V_d I_d = V_o I_o \quad (2.33)$$

και από τις σχέσεις 2.33 και 2.32 προκύπτει:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D} \quad (2.34)$$

### 2.7.1.4 Μοντελοποίηση μετατροπέα υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-Down/Buck DC-DC Converter)

Το μοντέλο του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.32: Μοντέλο DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

Το MOSFET που χρησιμοποιείται έχει αντίσταση αγωγής  $0.1\Omega$  και μηδενική αυτεπαγωγή. Η τάση ορθής πόλωσης θεωρείται  $0V$  και η αντίσταση snubber  $100k\Omega$ . Τα υπόλοιπα στοιχεία προκύπτουν κατά παρόμοιο τρόπο με τον DC-DC μετατροπέα ανύψωσης. Η λειτουργία του ελεγκτή αυτού του μετατροπέα θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

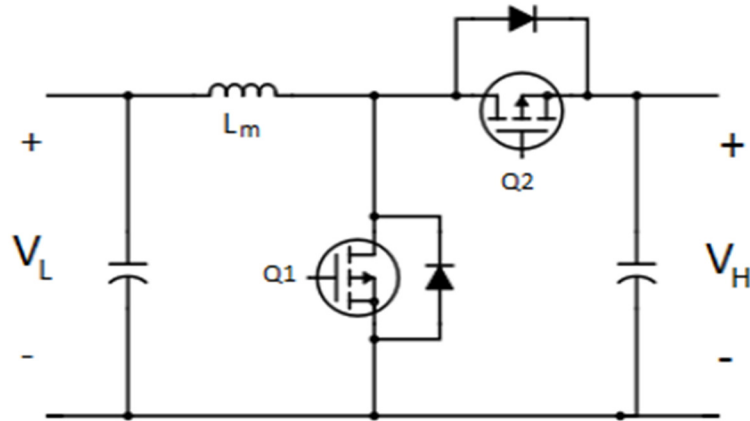
### 2.7.1.5 Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter)

Αυτός ο μετατροπέας ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση εισόδου, δίνοντας τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος από την είσοδο στην έξοδο και αντίστροφα, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του. Για τον λόγο αυτό, αυτός ο μετατροπέας είναι η κατάλληλη επιλογή για την σύνδεση της συστοιχίας μπαταριών και υπερπυκνωτών στον ζυγό DC, καθώς απαιτείται η συνεχής φόρτιση και εκφόρτισή τους, ανάλογα με την παραγωγή ισχύος του συστήματος. Στο σχήμα 2.33 παρουσιάζεται ένας αμφίδρομος DC-DC μετατροπέας (buck-boost). Το κύκλωμα του μετατροπέα αποτελείται από παρόμοια στοιχεία με αυτά των δύο προηγούμενων, με χρήση διακοπτικών στοιχείων MOSFET.

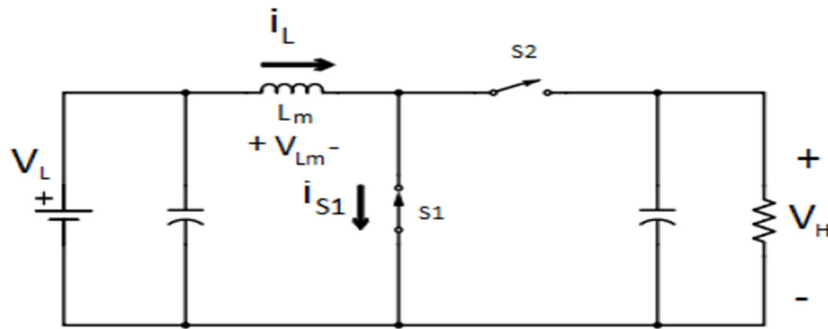
Για την ανάλυση της θεμελιώδους λειτουργίας αυτού του μετατροπέα, όπως και προηγουμένως, θεωρείται λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση, με συνεχή αγωγή ρεύματος και ιδανικά στοιχεία κυκλώματος, χωρίς απώλειες.

Η λειτουργία ανύψωσης τάσης συμβαίνει όταν η τάση εισόδου μετατρέπεται σε τάση εξόδου μεγαλύτερης τιμής, ή όταν ρεύμα ρέει από την πλευρά χαμηλότερης τάσης προς την πλευρά υψηλότερης τάσης. Η ανάλυση γίνεται σε δύο φάσεις, που περιγράφουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος κατά την διάρκεια της αλλαγής των διακοπών. Στο σχήμα 2.34 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για την πρώτη φάση, όταν ο διακόπτης  $S1$  βρίσκεται

σε κατάσταση αγωγής και ο διακόπτης S2 βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, κατά τη διάρκεια του διαστήματος  $0 < t < DT_{sw}$ .



**Σχήμα 2.33:** Κύκλωμα DC-DC μικτού μετατροπέα ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης [35].



**Σχήμα 2.34:** Πρώτη φάση λειτουργίας ανύψωσης τάσης: S1 κλειστός, S2 ανοικτός [35].

Σε αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση εισόδου  $V_L$  εφαρμόζεται στα άκρα του πηνίου, καθιστώντας την τάση εισόδου ίση με την τάση του πηνίου. Η σταθερή τάση κατά μήκος του πηνίου αυξάνει γραμμικά το ρεύμα που το διαρρέει, αυξάνοντας, έτσι, και την ενέργειά του, σύμφωνα με την σχέση:

$$V_{Lm} = V_L = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.35)$$

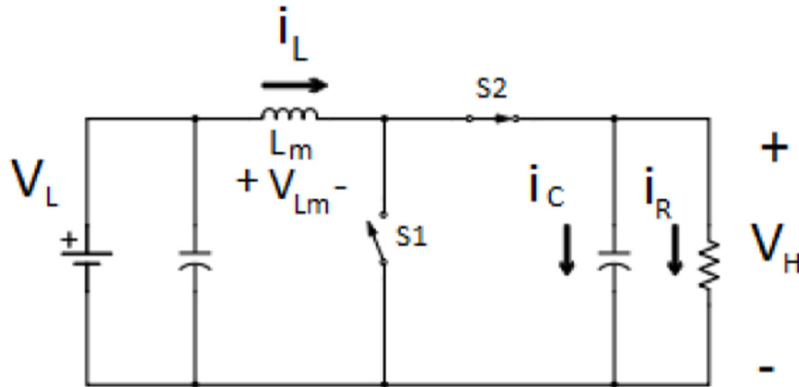
Οπότε, ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος στην πρώτη φάση λειτουργίας, δεδομένου ότι αυξάνεται γραμμικά, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} = \frac{V_L}{L_m} \quad (2.36)$$

από την οποία προκύπτει:

$$\Delta i_{Lm1} = \frac{V_L}{L_m} DT \quad (2.37)$$

Μεταβάλλοντας τους διακόπτες S1 και S2 στις καταστάσεις αποκοπής και αγωγής αντίστοιχα, ο μετατροπέας μεταβαίνει στην δεύτερη φάση. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 2.35, κατά τη διάρκεια του διαστήματος  $DT_{sw} < t < T_{sw}$ .



**Σχήμα 2.35:** Δεύτερη φάση λειτουργίας ανύψωσης τάσης: S1 ανοιχτός, S2 κλειστός [35].

Σε αυτή τη φάση, η τάση εισόδου  $V_L$  εφαρμόζεται στην μία πλευρά του πηνίου, ενώ η τάση εξόδου  $V_H$  εφαρμόζεται την άλλη πλευρά του. Αυτή η σταθερή αρνητική τάση κατά μήκος του πηνίου συνεπάγεται μία γραμμική μείωση του ρεύματός του, όπως περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{Lm} = V_L - V_H = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.38)$$

Εφόσον το ρεύμα του πηνίου μειώνεται γραμμικά, ο ρυθμός μεταβολής του κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης προκύπτει:

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = \frac{V_L - V_H}{L_m} \quad (2.39)$$

από την οποία προκύπτει:

$$\Delta i_{Lm2} = \frac{(V_L - V_H)}{L_m} (1-D)T \quad (2.40)$$

Στη μόνιμη κατάσταση και για συνεχή αγωγή ρεύματος, η συνολική μεταβολή ρεύματος για μία διακοπτική περίοδο θα ισούται με μηδέν. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.40 και 2.37 προκύπτει:

$$\Delta i_{Lm1} + \Delta i_{Lm2} = 0 \quad (2.41)$$

η οποία με αντικατάσταση εκφράζεται ως:

$$\frac{V_L}{L_m} DT + \frac{(V_L - V_H)}{L_m} (1-D)T = 0 \quad (2.42)$$



και απλοποιείται στην ακόλουθη:

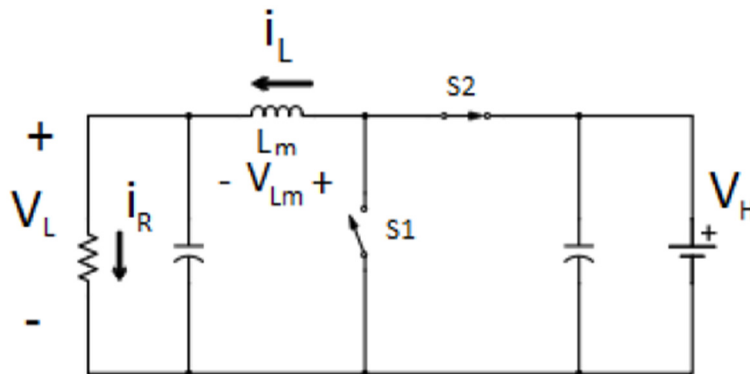
$$V_L D + (V_L - V_H)(1 - D) = 0 \quad (2.43)$$

η οποία, τελικά, καταλήγει στην σχέση μεταξύ τάσεων και βαθμού χρησιμοποίησης, για λειτουργία ανύψωσης τάσης (boost mode):

$$V_H = \frac{1}{1 - D} V_L \quad (2.44)$$

Γίνεται φανερό ότι η σχέση 2.44 εκφράζει τον ίδιο λόγο ανύψωσης τάσης με την αντίστοιχη σχέση του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης (σχέση 2.27).

Η άλλη λειτουργία του μετατροπέα είναι ο υποβιβασμός της τάσης, ο οποίος εξηγείται και πάλι σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.36, ο διακόπτης S2 βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής και ο διακόπτης S1 βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής.



**Σχήμα 2.36:** Πρώτη φάση λειτουργίας υποβιβασμού τάσης: S1 ανοιχτός, S2 κλειστός [35].

Το ρεύμα ρέει από την υψηλή τάση  $V_H$  προς την χαμηλή  $V_L$  μέσω του πηνίου. Η τάση του πηνίου προκύπτει:

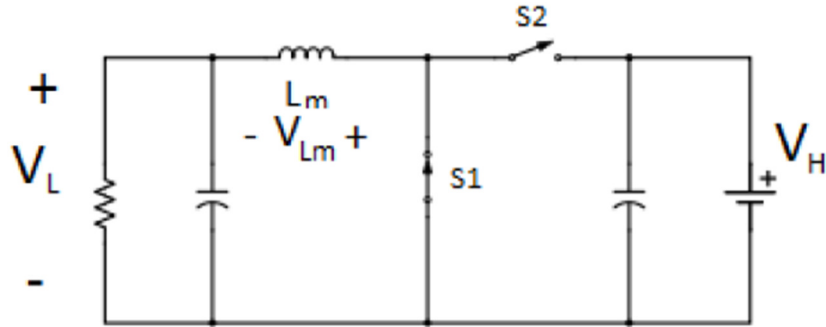
$$V_{Lm} = \frac{dI_L}{dT} L_m = V_H - V_L \quad (2.45)$$

όπου θετικό ρεύμα  $I_L$  οδηγείται σε γραμμική αύξηση, λόγω του πηνίου. Η συνολική μεταβολή στο ρεύμα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου περιγράφεται παρακάτω:

$$\frac{\Delta I_{L(on)}}{\Delta T1} = \frac{V_H - V_L}{L_m} \quad (2.46)$$

όπου το χρονικό διάστημα  $\Delta T1$  για την πρώτη φάση υπολογίζεται ως το γινόμενο του βαθμού χρησιμοποίησης  $D$  και της περιόδου  $T$ .

Κατά τη διάρκεια της επόμενης φάσης, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.37, ο διακόπτης S2 βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής και ο διακόπτης S1 βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής.



**Σχήμα 2.37:** Δεύτερη φάση λειτουργίας υποβιβασμού τάσης: S1 κλειστός, S2 ανοικτός [35].

Αυτή η κατάσταση ισοδυναμεί με το πηνίο να βρίσκεται παράλληλα με την τάση  $V_L$ , αλλά με αντίστροφη πολικότητα, το οποίο σημαίνει:

$$V_{Lm} = -V_L \quad (2.47)$$

και η αρνητική τάση στους ακροδέκτες του πηνίου συνεπάγεται αρνητική παράγωγο ρεύματος. Ως αποτέλεσμα, η μεταβολή του ρεύματος κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου υπολογίζεται:

$$\frac{\Delta I_{L(off)}}{\Delta T2} = \frac{-V_L}{L_m} \quad (2.48)$$

όπου το χρονικό διάστημα  $\Delta T2$  για την δεύτερη φάση καθορίζεται ως  $(1 - D)T$ . Θεωρώντας και πάλι μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και συνεχή αγωγή ρεύματος, η μεταβολή του ρεύματος πρέπει να ισούται με μηδέν κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, οπότε [35]:

$$\Delta I_{L(on)} + \Delta I_{L(off)} = 0 \Rightarrow \frac{V_H - V_L}{L_m} \Delta T1 + \frac{-V_L}{L_m} \Delta T2 = 0 \quad (2.49)$$

Με αντικατάσταση των χρονικών διαστημάτων  $\Delta T1$  και  $\Delta T2$ , προκύπτει η ίδια σχέση με την αντίστοιχη για μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (σχέση 2.32):

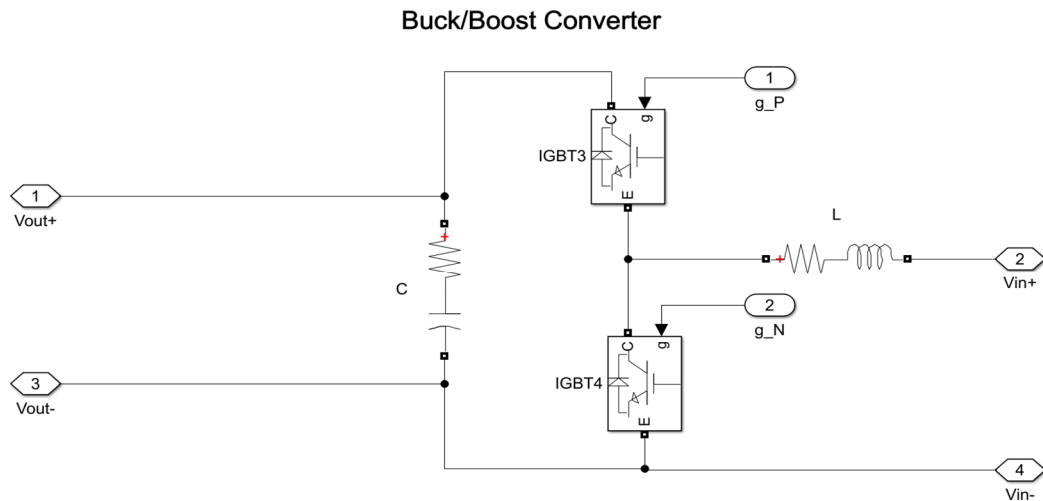
$$\frac{V_H - V_L}{L_m} DT + \frac{-V_L}{L_m} (1 - D)T = 0 \quad (2.50)$$

και τελικά:

$$V_L = D \cdot V_H \quad (2.51)$$

### 2.7.1.6 Μοντελοποίηση αμφίδρομου μικτού μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter)

Το μοντέλο του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



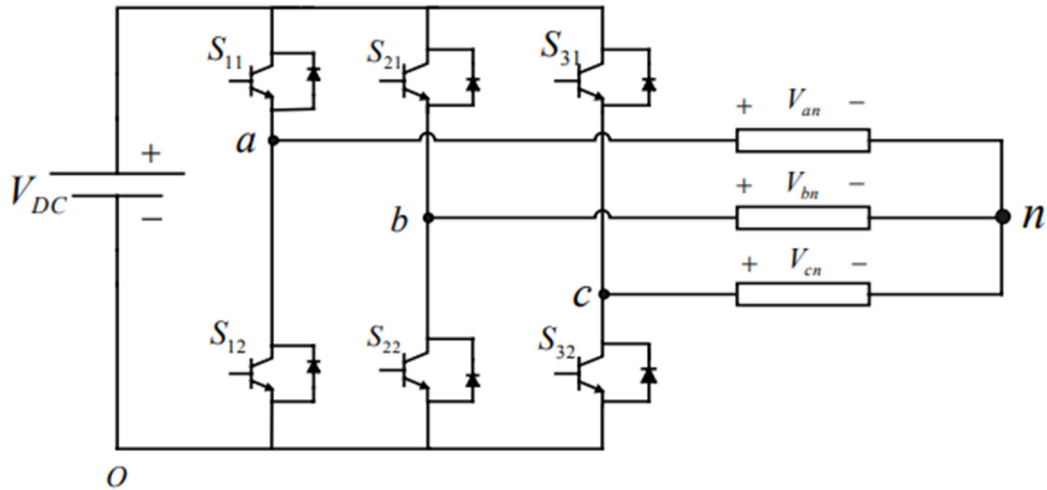
**Σχήμα 2.38:** Μοντέλο αμφίδρομου μικτού DC-DC μετατροπέα ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης.

Τα IGBT που χρησιμοποιούνται έχουν αντίσταση αγωγής  $0.001\Omega$  και μηδενική αυτεπαγωγή. Η τάση ορθής πόλωσης θεωρείται  $0.8V$  και η αντίσταση snubber  $100k\Omega$ . Το πηνίο και ο πυκνωτής μοντελοποιούνται σε σειρά με αντίσταση  $0.1\Omega$  και  $0.0001\Omega$  αντίστοιχα, ώστε να προσομοιώνεται η μη ιδανική συμπεριφορά τους. Το πηνίο έχει τιμή  $1mH$  ώστε να επιτυγχάνεται εξομάλυνση του ρεύματος και λιγότερες διακοπτικές συχνότητες. Ο πυκνωτής έχει χωρητικότητα  $3mF$ , ώστε να γίνεται κατάλληλη εξομάλυνση της τάσης και, σε συνεργασία με τον ελεγκτή του μετατροπέα, πραγματοποιείται σωστή ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του ζυγού ΣΡ και των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, αντίστοιχα. Η λειτουργία του ελεγκτή θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

### 2.7.2 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης (Three-Phase Voltage Source DC-AC Inverter)

Η σύνδεση όλων των επιμέρους μοντέλων της διάταξης προς τον AC ζυγό, πραγματοποιείται μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης, που τροφοδοτείται απευθείας από τον DC ζυγό, μετατρέποντας την συνεχή τάση εισόδου σε τριφασική εναλλασσόμενη. Το κύκλωμα ενός τυπικού τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs παρουσιάζεται στο σχήμα 2.39.

Η λειτουργία του αντιστροφέα βασίζεται στους θετικούς παλμούς έναυσης, που εφαρμόζονται κάθε φορά στις πύλες 2 εκ των 6 διακοπτικών στοιχείων, με αποτέλεσμα την ενεργοποίησή τους. Συνεπώς, δημιουργείται ένας θετικός παλμός τάσης, από την συνεχή τάση εισόδου, με εύρος που καθορίζεται από τη χρονική διάρκεια ενεργοποίησης των αντίστοιχων διακοπτικών στοιχείων. Στη συνέχεια, οι παλμοί έναυσης εφαρμόζονται στα επόμενα δύο διακοπτικά στοιχεία, δημιουργώντας έναν δεύτερο παλμό τάσης, κοκ [20].



**Σχήμα 2.39:** Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης [36].

Η συνηθέστερη τεχνική για την παραγωγή των παλμών των διακοπτικών στοιχείων είναι η τεχνική Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation – SPWM). Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την παραγωγή μιας ψηφιακής κυματομορφής, για την οποία ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) μπορεί να διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε η κυματομορφή της μέσης τάσης να αντιστοιχεί σε ένα καθαρά ημιτονοειδές σήμα. Ο απλούστερος τρόπος παραγωγής του σήματος SPWM είναι μέσω της σύγκρισης τριών όμοιων ημιτονοειδών κυματομορφών αναφοράς (μία για κάθε ημιγέφυρα) με μία τριγωνική κυματομορφή υψηλής συχνότητας. Οι ημιτονοειδείς κυματομορφές παρουσιάζουν διαφορά φάσης  $120^\circ$  η κάθε μία από τις άλλες, όπως συμβαίνει σε ένα τυπικό τριφασικό σύστημα. Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα, ορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των IGBTs. Αυτό που επιτυγχάνεται με την τεχνική SPWM είναι η μετατόπιση της κυρίαρχης ανώτερης αρμονικής συνιστώσας σε συχνότητα πολύ υψηλότερη από αυτή της βασικής αρμονικής συνιστώσας. Η κυρίαρχη ανώτερη αρμονική είναι η αρμονική που έχει το μέγιστο συντελεστή παραμόρφωσης (Distortion Factor):

$$D_n(\%) = 100 \left( \frac{V_{AB,n}}{n^2} \right) \quad (2.52)$$

όπου  $V_{AB,n}$  το πλάτος της n-οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου.

Το πλάτος και η τάξη της κυρίαρχης ανώτερης αρμονικής συνιστώσας υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{(AB,d)max} = 0.27V_{in} \quad (2.53)$$

$$d = F_{nc} - 2 \quad (2.54)$$

$$F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \quad (2.55)$$

όπου  $F_{nc}$  η ανηγμένη συχνότητα του φορέα και  $V_{in}$  η τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Ο συντελεστή διαμόρφωσης (Modulation Index) ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους κυματομορφής αναφοράς  $A_r$  (ημιτονοειδούς), προς το πλάτος της κυματομορφής φορέα  $A_c$  (τριγωνική), σύμφωνα με τη σχέση:

$$m = \frac{A_r}{A_c} \quad (2.56)$$

Το πλάτος της κυματομορφής φορέα  $A_c$  διατηρείται σταθερό, με αποτέλεσμα, όταν μεταβάλλεται το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς  $A_r$ , να μεταβάλλεται και ο συντελεστής διαμόρφωσης  $m$ . Ο συντελεστής διαμόρφωσης λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1. Για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, προκαλείται υπερδιαμόρφωση, η οποία αναγκάζει την τάση εξόδου του αντιστροφέα να αποκτά τετραγωνική μορφή. Ένα συγκεκριμένο ποσό αυτής της υπερδιαμόρφωσης επιτρέπεται συχνά, με σκοπό την απόκτηση μεγάλου μεγέθους τάσης AC, παρόλο που το φασματικό περιεχόμενο αυτής της τάσης θα είναι χαμηλό.

Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα προκύπτει:

$$V_{AB,out} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{in} m \quad (2.57)$$

Συνεπώς, με κατάλληλη μεταβολή του συντελεστή διαμόρφωσης  $m$  είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στην επιθυμητή τιμή [20], [32], [37].

Στη συγκεκριμένη εργασία, για την μοντελοποίηση του αντιστροφέα, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Simscape Electrical του SIMULINK/MATLAB.

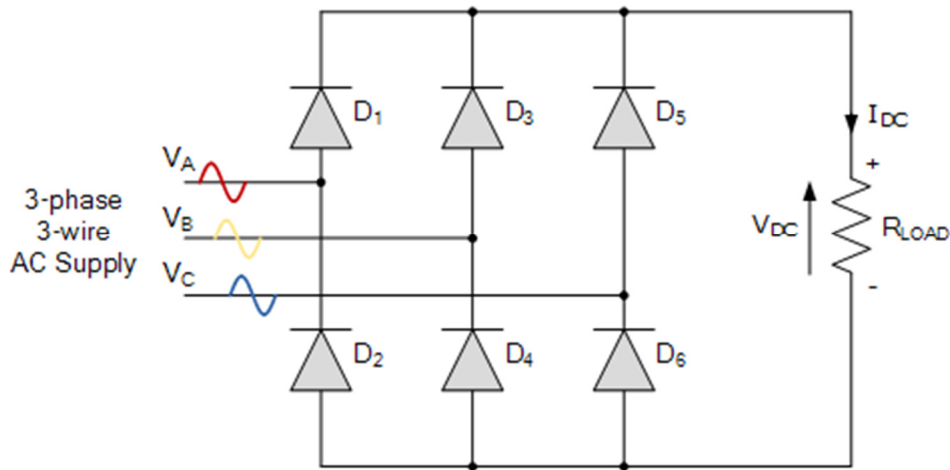
### 2.7.3 Πλήρης τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα με διόδους (Full-Wave Three-Phase Uncontrolled Bridge Rectifier)

Η διαδικασία μετατροπής μιας AC τροφοδοσίας εισόδου σε σταθερή DC τροφοδοσία εξόδου ονομάζεται ανόρθωση, με τα πιο δημοφιλή κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας να βασίζονται στη χρήση διόδων στερεάς κατάστασης. Η ανόρθωση εναλλασσόμενων τάσεων είναι μια από τις πιο δημοφιλείς εφαρμογές των διόδων, καθώς οι διόδοι είναι φθηνές, μικρές και στιβαρές, επιτρέποντας τη δημιουργία πολλών τύπων κυκλωμάτων ανορθωτών, χρησιμοποιώντας είτε μεμονωμένα συνδεδεμένες διόδους, είτε ενσωματωμένες γέφυρες διόδων. Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιείται ένα απλό κύκλωμα πλήρους τριφασικής ανόρθωσης με διόδους, που μετατρέπει την AC τάση εξόδου της A/Γ, σε DC τάση, για τροφοδοσία του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης της A/Γ και, εν τέλει, του ζυγού DC.

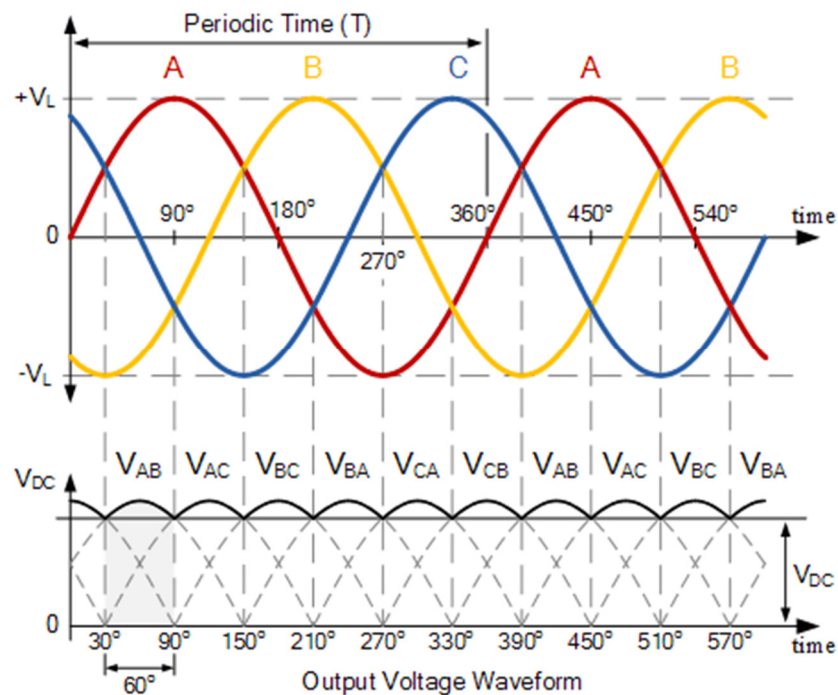
Για το συγκεκριμένο κύκλωμα ανορθωτή, απαιτούνται συνολικά 6 διόδοι, 2 διόδοι για κάθε φάση. Το κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.40. Κάθε φάση συνδέεται μεταξύ ενός ζεύγους διόδων, με την μία diόδο του ζεύγους να τροφοδοτεί την θετική πλευρά της εξόδου, και την άλλη να τροφοδοτεί την αρνητική πλευρά. Οι διόδοι  $D_1$ ,  $D_3$ ,  $D_2$  και  $D_4$  σχηματίζουν μία ανορθωτική γέφυρα διόδων μεταξύ των φάσεων A και B. Παρόμοια, οι διόδοι  $D_3$ ,  $D_5$ ,  $D_4$  και  $D_6$  σχηματίζουν μία ανορθωτική γέφυρα διόδων μεταξύ των φάσεων B και C, και οι διόδοι  $D_5$ ,  $D_1$ ,  $D_6$  και  $D_2$  μεταξύ των φάσεων C και A. Έτσι, οι διόδοι  $D_1$ ,  $D_3$  και  $D_5$  τροφοδοτούν την θετική πλευρά, ανάλογα με το ποια από αυτές έχει μεγαλύτερη θετική τάση στην άνοδο, ενώ οι διόδοι  $D_2$ ,  $D_4$  και  $D_6$  τροφοδοτούν την αρνητική πλευρά,

ανάλογα με το ποια από αυτές έχει μεγαλύτερη αρνητική τάση στην κάθοδο. Στο σχήμα 2.41 φαίνεται ότι για τριφασική ανόρθωση, οι διόδοι άγουν σε ζευγάρια, δίνοντας ένα μοτίβο αγωγιμότητας για το ρεύμα εξόδου, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$D_{1-2}D_{1-6}D_{3-6}D_{3-6}D_{3-4}D_{5-4}D_{5-2}D_{1-2}$$



Σχήμα 2.40: Κύκλωμα τριφασικού ανορθωτή [38].



Σχήμα 2.41: Κυματομορφές τάσεων εισόδου και τάσεως εξόδου [38].

Σε τριφασικούς ανορθωτές ισχύος, η αγωγή συμβαίνει πάντα στην πιο θετική δίοδο και στην αντίστοιχη πιο αρνητική δίοδο. Έτσι, καθώς οι τρεις φάσεις περιστρέφονται κατά μήκος των ακροδεκτών του ανορθωτή, η αγωγή περνά από δίοδο σε δίοδο. Συνεπώς, κάθε δίοδος άγει για  $120^\circ$  (ένα τρίτο) σε κάθε κύκλο τροφοδοσίας, αλλά καθώς χρειάζονται δύο

δίοδοι για να πραγματοποιηθεί αγωγή σε ζεύγη, κάθε ζεύγος διόδων μπορεί να άγει μόνο  $60^\circ$  (ένα έκτο) ενός κύκλου, οποιαδήποτε στιγμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.41.

Εν τέλει, η μέση DC τιμή της κυματομορφής της τάσης εξόδου, όπως προκύπτει από τριφασική πλήρη ανόρθωση διόδων δίνεται ως [38]:

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} V_{mLine} \quad (2.58)$$

όπου  $V_{mline}$  η μέγιστη πολική τάση (line to line) που δίνεται από τον τύπο:

$$V_{mline} = \sqrt{3} \cdot V_{mphase} \quad (2.59)$$

όπου  $V_{mphase}$  η μέγιστη φασική τάση που δίνεται από τον τύπο:

$$V_{mphase} = \sqrt{2} \cdot V_{phaseRMS} \quad (2.60)$$

με  $V_{phaseRMS}$  να δηλώνει την RMS τιμή της φασικής τάσης.

Στη συγκεκριμένη εργασία, για την μοντελοποίηση του ανορθωτή, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Simscape Electrical του SIMULINK/MATLAB.

### 3. Διαστασιολόγηση και Ανάλυση Κόστους Υβριδικού Συστήματος

#### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μια βασική διαστασιολόγηση των ενεργειακών πηγών του συστήματος, με κριτήριο την πιθανότητα απώλειας τροφοδοσίας και των οικονομικών του συστήματος. Επιπλέον, γίνεται διαστασιολόγηση του μεγέθους του υπερπυκνωτή, με βάση την απαίτηση κάλυψης ενεργειακών αναγκών της ημερήσιας καμπύλης φορτίου, λόγω αργής απόκρισης των μπαταριών, και την βελτίωση της διάρκειας ζωής τους. Ακόμη, γίνεται μια βασική ανάλυση κόστους των επιλεγμένων συνιστωσών του συστήματος, στο σύνολο της διάρκειας ζωής του. Τέλος, χρησιμοποιείται το λογισμικό HOMER για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

#### 3.2 Διαστασιολόγηση του συστήματος με τη μέθοδο LPSP

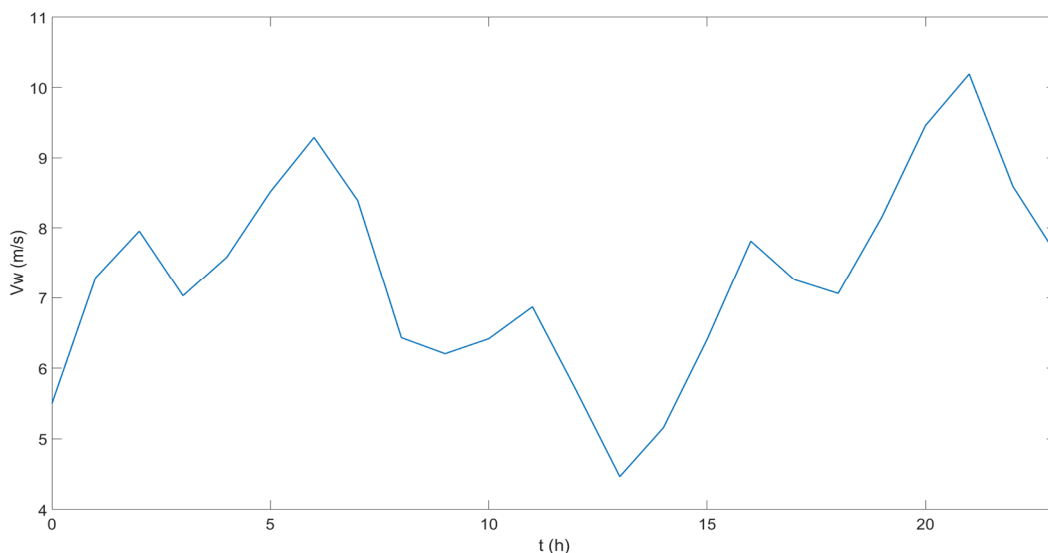
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα κοινό μειονέκτημα επιλογής αιολικής και ηλιακής ενέργειας είναι η απρόβλεπτη φύση τους και η εξάρτησή τους από τις καιρικές και κλιματικές αλλαγές. Ως αποτέλεσμα, η παραγωγή ηλιακής και αιολικής ενέργειας ενδέχεται να μην καλύπτει την κατανομή της ζήτησης, κάθε χρονική στιγμή. Ωστόσο, τα προβλήματα που προκαλούνται από τη μεταβλητή φύση αυτών των ενεργειακών πηγών μπορούν να ξεπεραστούν, εν μέρει, συνδυάζοντας τις δύο πηγές κατάλληλα, ώστε τα πλεονεκτήματα της μίας πηγής να ξεπεράσουν τις αδυναμίες της άλλης.

Τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν ηλιακές και αιολικές μονάδες με εφεδρική μπαταρία μπορούν να περιορίσουν τις ατομικές διακυμάνσεις τους και να μειώσουν σημαντικά τις απαιτήσεις αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο, προκαλούνται προβλήματα που οφείλονται στην αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, σε σύγκριση με τα συστήματα μεμονωμένων πηγών ενέργειας. Αυτή η πολυπλοκότητα, που προκύπτει από τη χρήση δύο διαφορετικών ενεργειακών πόρων σε συνδυασμό, καθιστά την ανάλυση των υβριδικών συστημάτων πιο δύσκολη. Προκειμένου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και οικονομικά, απαιτείται μια βέλτιστη μέθοδος σχεδιασμού των συνιστωσών του συστήματος. Η μέθοδος βελτιστοποίησης του μεγέθους του συστήματος μπορεί να συμβάλει στη διασφάλιση της οικονομικότερης επένδυσης, με επαρκή και πλήρη χρήση του ηλιακού συστήματος, του αιολικού συστήματος και της συστοιχίας μπαταριών, έτσι ώστε το υβριδικό σύστημα να λειτουργεί σε βέλτιστες συνθήκες, όσον αφορά την επένδυση και την απαίτηση αξιοπιστίας της ισχύος του [39].

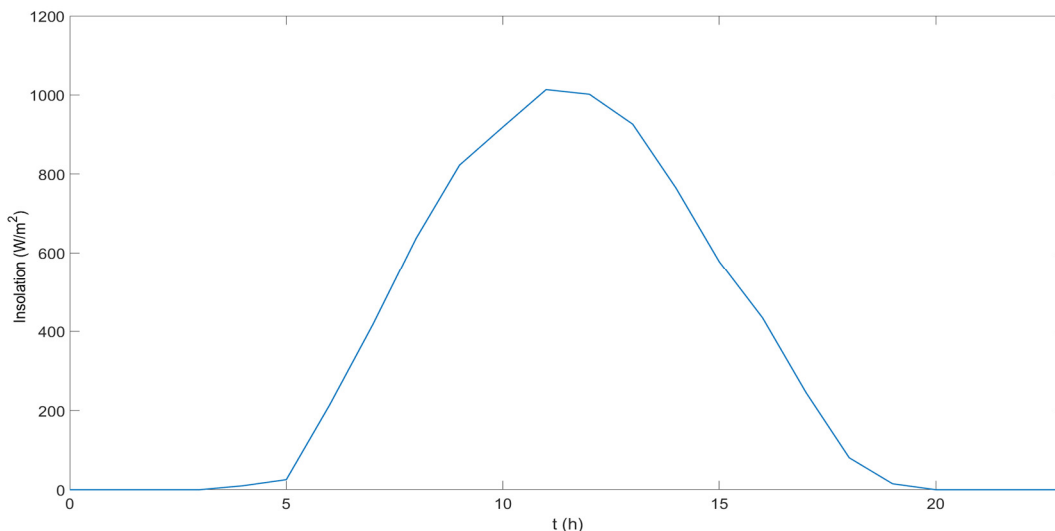
Διάφορες προσεγγίσεις έχουν προταθεί από ερευνητές για την επίτευξη των βέλτιστων διαμορφώσεων των υβριδικών συστημάτων, όσον αφορά την ανάλυσή τους με τεχνικά κριτήρια. Μεταξύ αυτών των μεθόδων, συναντάται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων ([40], [41]), η μέθοδος αντιστάθμισης ([42], [43]) και η τεχνική προσέγγιση της πιθανότητας απώλειας τροφοδοσίας ή, αλλιώς, πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (LPSP) ([39], [44], [45], [46], [47]). Οι παραπάνω μέθοδοι, εμπίπτουν σε μία από τις κατηγορίες πιθανολογικών, γραφικών ή επαναληπτικών τεχνικών [39], [44]. Δεδομένου ότι, για ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα, ο βαθμός αξιοπιστίας του πρέπει να είναι μεγάλος, αφού δεν υφίσταται σύνδεση στο δίκτυο και δεν υπάρχει εφεδρική πηγή τροφοδοσίας, για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, επιλέγεται η μέθοδος LPSP ως η καταλληλότερη για την διαστασιολόγηση του συστήματος.



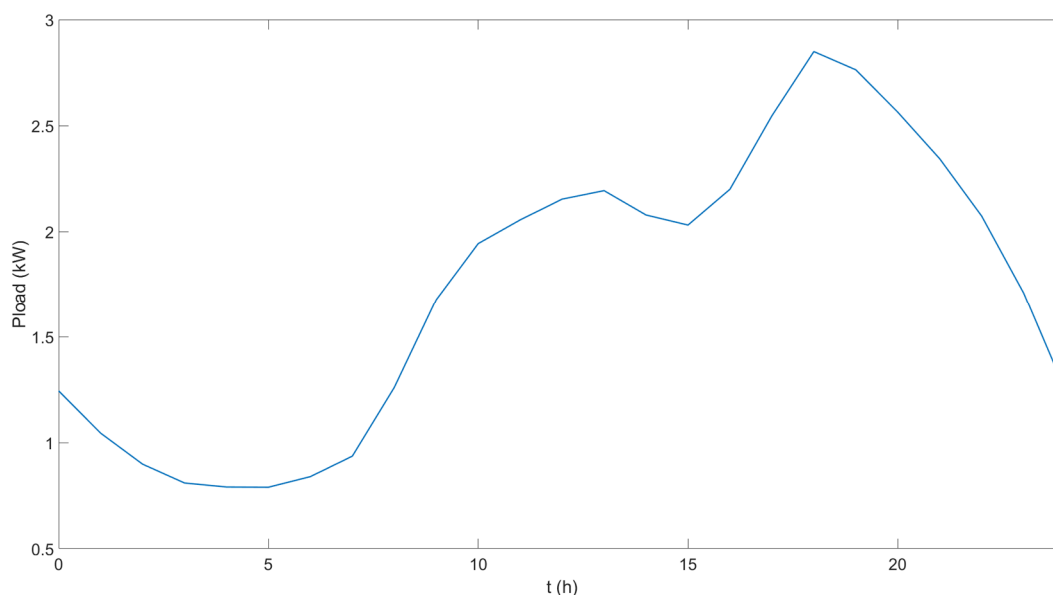
Με την εφαρμογή της μεθόδου LPSP υπολογίζεται η βέλτιστη διάταξη φωτοβολταϊκών και μπαταριών, ανάλογα με τον βαθμό αξιοπιστίας του συστήματος που απαιτείται. Με άλλα λόγια, καθορίζοντας ένα χρονικό διάστημα στο οποίο το σύστημα δεν τροφοδοτείται από τις ενεργειακές πηγές του, ελέγχονται περιπτώσεις διαφορετικών βαθμών αξιοπιστίας, από τις οποίες προκύπτουν οι κατάλληλες διατάξεις που αντιστοιχούν σε κάθε βαθμό. Η ανάλυση του συστήματος γίνεται σε 24ωρη βάση, με τη χρήση δεδομένων για την ημερήσια χρονοσειρά του ανέμου (σχήμα 3.1) και της ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 3.2) στη θέση εγκατάστασης, καθώς και της ημερήσιας καμπύλης φορτίου ενός οικιακού καταναλωτή (σχήμα 3.3). Η καμπύλη φορτίου δίνεται από την εταιρεία ELEXON, και προκύπτει από 30λεπτη δειγματοληψία της ζήτησης 2500 πελατών παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, διαφορετικών κατηγοριών (οικιακοί, εμπορικοί, βιομηχανικοί). Οι πελάτες επιλέγονται τυχαία, ανάλογα με την ετήσια κατανάλωσή τους σε kWh, δημιουργώντας ικανοποιητικά δείγματα φορτίου για κάθε κατηγορία. Τα δείγματα φορτίου, μέσω διαδικασιών ταξινόμησης, δημιουργούν ενιαία προφίλ φορτίου, τα οποία, χάρη στο μέγεθος του δείγματος και των διαδικασιών επικύρωσης και ταξινόμησης, παρέχουν ακριβή εκτίμηση της κατανάλωσης κάθε κατηγορίας πελατών.



**Σχήμα 3.1:** Ημερήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου.



**Σχήμα 3.2:** Ημερήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.3:** Ημερήσια καμπύλη φορτίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ένα υβριδικό σύστημα η Α/Γ είναι η λιγότερο ελαστική παράμετρος σχεδιασμού, καθώς τα μεγέθη τους είναι έντονα κβαντισμένα [20]. Δεδομένου ότι η ανεμογεννήτρια έχει χαμηλότερο κόστος από τα φ/β, όπως θα φανεί παρακάτω, επιλέγεται αυθαίρετα το μέγεθός της στα 4kW (ονομαστική ταχύτητα ανέμου 11m/s). Συγκεκριμένα, η Α/Γ που επιλέγεται βασίζεται στην ENAIR 70Pro, η οποία μπορεί να παράγει μέχρι 4.5kW σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου. Από τη ημερήσια χρονοσειρά ανέμου του σχήματος 3.1 φαίνεται ότι εκδηλώνονται ταχύτητες ανέμου κατώτερες της ονομαστικής ταχύτητας ανέμου της Α/Γ. Παρ' όλα αυτά, το αιολικό δυναμικό εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις και ενδέχεται να υπάρξουν ημέρες με σαφώς υψηλότερη ταχύτητα ανέμου.

Με δεδομένο το μέγεθος της Α/Γ, γίνονται αναλύσεις ευαισθησίας με παραμέτρους το μέγεθος του Φ/Β και της συστοιχίας μπαταριών. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιούνται στοιχειώδεις μονάδες διαστασιολόγησης (units). Για το Φ/Β μία μονάδα αποτελείται από μία Φ/Β συστοιχία 1kWp, ενώ για τη μπαταρία, ως μονάδα μέτρησης θεωρούνται οι 100Ah. Οι παράμετροι για το Φ/Β και τη μπαταρία παρουσιάζονται στους πίνακες 3.1 και 3.2.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
<b>Μέγιστη ισχύς (<math>W_p</math>)</b>	1200
<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	90
<b>Περιοχή (<math>m^2</math>)</b>	1.07
<b>Κόστος (\$/kW)</b>	6500

**Πίνακας 3.1:** Χαρακτηριστικά Φ/Β.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
<b>Χωρητικότητα (Ah)</b>	100
<b>Τάση στοιχείου (V)</b>	24
<b>Βαθμός απόδοσης (round-trip) (%)</b>	85
<b>Μέγιστο βάθος εκφόρτισης (%)</b>	80
<b>Κόστος (\$/kAh)</b>	1500

**Πίνακας 3.2:** Χαρακτηριστικά μπαταρίας.

Συγκεκριμένα, το Φ/Β των 1200Wp μπορεί να δώσει 1200W μέγιστη ισχύ εξόδου, όταν η ηλιακή ακτινοβολία αποκτά τη μέγιστη τιμή της ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ). Ωστόσο, λόγω απωλειών τόσο στη φωτοβολταϊκή μετατροπή, όσο και στον μετατροπέα DC-DC, που προσθέτουν έναν συνολικό βαθμό απόδοσης 90% (10% απώλειες), τελικά, το Φ/Β δίνει περίπου 1kW ισχύ εξόδου για μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, όπως απαιτείται για τη διαστασιολόγηση. Για την μπαταρία υπολογίζεται βαθμός απόδοσης 85% (round trip) και μέγιστο βάθος εκφόρτισης 80%, έτσι ώστε οι μπαταρίες να μην εκφορτίζονται πλήρως. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα θεωρείται ίσος με 95%.

Ο αλγόριθμος επίλυσης της μεθόδου LPSP περιγράφεται στην αναφορά [46] και η λειτουργία του εξηγείται παρακάτω.

### 3.2.1 Η μέθοδος LPSP

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται ως αξιόπιστο, όταν το σύστημα έχει επαρκή ισχύ για να τροφοδοτήσει τη ζήτηση φορτίου κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου ή, με άλλα λόγια, έχει μικρή πιθανότητα απώλειας τροφοδοσίας (Loss of Power Supply Probability - LPSP). Ο αριθμός LPSP ορίζεται ως η πιθανότητα να προκύψει ανεπαρκής τροφοδοσία, όταν το υβριδικό σύστημα (φωτοβολταϊκή διάταξη, ανεμογεννήτρια και αποθήκευση με μπαταρίες) δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσει τη ζήτηση φορτίου. Είναι ένα μέτρο της απόδοσης του συστήματος, για μια υποτιθέμενη ή γνωστή κατανομή φορτίου. LPSP ίσο με 0 σημαίνει ότι το φορτίο θα είναι πάντα ικανοποιημένο ενώ LPSP ίσο με 1 σημαίνει ότι το φορτίο δεν θα ικανοποιηθεί ποτέ [39].

Το φορτίο δεν θα ικανοποιηθεί, όταν η ισχύς που παράγεται τόσο από την ανεμογεννήτρια όσο και από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι ανεπαρκής, και η αποθήκευση έχει εξαντληθεί. Η ενέργεια αποθηκεύεται στις μπαταρίες, όταν η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια και τη φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι μεγαλύτερη από το φορτίο. Όταν η παραγόμενη ισχύς είναι μικρότερη από το φορτίο, η ενέργεια αντλείται από τις μπαταρίες. Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών ανά πάσα στιγμή εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης της προηγούμενης στιγμής και τη διαφορά παραγόμενης ενέργειας και φορτίου στο ενδιάμεσο διάστημα.

Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών χρησιμοποιείται ως μεταβλητή απόφασης για τον έλεγχο της προστασίας υπερφόρτισης και υπερεκφόρτισης των μπαταριών. Η περίπτωση υπερφόρτισης μπορεί να προκύψει όταν παράγεται υψηλότερη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά και την ανεμογεννήτρια, έναντι του φορτίου, ή όταν υπάρχει χαμηλή ζήτηση φορτίου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όταν η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών φτάσει στη μέγιστη τιμή,  $SOC_{max} = 1$ , το σύστημα ελέγχου παρεμβαίνει και σταματά τη διαδικασία φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, εάν η κατάσταση φόρτισης μειωθεί στο ελάχιστο επίπεδο,  $SOC_{min} = 1 - DOD$  (όπου DOD το βάθος εκφόρτισης), το σύστημα ελέγχου αποσυνδέει το φορτίο. Αυτό είναι σημαντικό για την αποφυγή φαινομένων υποβάθμισης της διάρκειας ζωής των μπαταριών ή ακόμη και της καταστροφής τους [39], [46].

Η συνολική ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ και την Φ/Β συστοιχία, για κάθε ώρα,  $t$ , εκφράζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{gen}(t) = E_W(t) + N_{PV} \cdot E_{PV}(t) \quad (3.1)$$

όπου  $E_W(t)$  και  $E_{PV}(t)$  η ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ και μία Φ/Β μονάδα αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από τις εξισώσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, και  $N_{PV}$  ο αριθμός των Φ/Β μονάδων.

Εφόσον ο βαθμός απόδοσης για την φόρτιση των μπαταριών θεωρείται ίσος με 85% (round trip efficiency) και ο βαθμός απόδοσης κατά την εκφόρτιση τίθεται ίσος με τη μονάδα, η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες, κάθε ώρα, μπορεί να εκφραστεί μελετώντας δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

Αν η παραγόμενη ενέργεια από την Α/Γ και την Φ/Β συστοιχία υπερβαίνει εκείνη της ζήτησης φορτίου (περίσσεια ισχύος), τότε οι μπαταρίες φορτίζονται με τον βαθμό απόδοσης για την φόρτιση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1) + \left( E_{gen}(t) - \frac{E_{load}(t)}{n_{inv}} \right) \cdot n_{bat} \quad (3.2)$$

όπου  $E_{bat}(t)$  και  $E_{bat}(t-1)$  η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες τις ώρες  $t$  και  $t-1$  αντίστοιχα,  $E_{gen}(t)$  η συνολικά παραγόμενη ενέργεια από την Α/Γ και την Φ/Β συστοιχία την ώρα  $t$ , που υπολογίζεται μέσω της σχέσης 3.1,  $E_{load}(t)$  η ζήτηση φορτίου την ώρα  $t$ ,  $n_{inv}$  ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα που τροφοδοτεί το φορτίο (95%) και  $n_{bat}$  ο βαθμός απόδοσης φόρτισης των μπαταριών (85% round trip).

Όταν η ζήτηση φορτίου είναι μεγαλύτερη από την διαθέσιμη, συνολικά, παραγόμενη ενέργεια (έλλειμα ισχύος), οι μπαταρίες εκφορτίζονται κατά την ποσότητα που απαιτείται για την κάλυψη του ελλείματος. Η ποσότητα αυτή εκφράζεται ως εξής:

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1) - \left( \frac{E_{load}(t)}{n_{inv}} - E_{gen}(t) \right) \quad (3.3)$$

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες κάθε ώρα  $t$  υπόκειται στον ακόλουθο περιορισμό:

$$E_{bat_{min}} \leq E_{bat}(t) \leq E_{bat_{max}} \quad (3.4)$$

Ο παραπάνω περιορισμός συνεπάγεται ότι, σε οποιαδήποτε ώρα, οι μπαταρίες δεν θα υπερεκφορτίζονται ή υπερφορτίζονται, προστατεύοντας τις μπαταρίες από υποβάθμιση και καταστροφή.

Αν η διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια, αλλά και η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες, δεν επαρκούν για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση φορτίου την ώρα  $t$ , το φορτίο δεν τροφοδοτείται, με την απώλεια τροφοδοσίας ή, αλλιώς, μη τροφοδοτούμενη ισχύ (Loss of Power Supply - LPS) να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LPS(t) = E_{load}(t) - \left( E_{gen}(t) + E_{bat}(t-1) - E_{bat_{min}} \right) \cdot n_{inv} \quad (3.5)$$

Συνεπώς, η πιθανότητα απώλειας τροφοδοσίας (LPSP) σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο λειτουργίας  $T$ , είναι ο λόγος όλων των τιμών  $LPS(t)$  για εκείνη την περίοδο, προς το άθροισμα της ζήτησης φορτίου, στο ίδιο χρονικό διάστημα:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_{load}(t)} \quad (3.6)$$

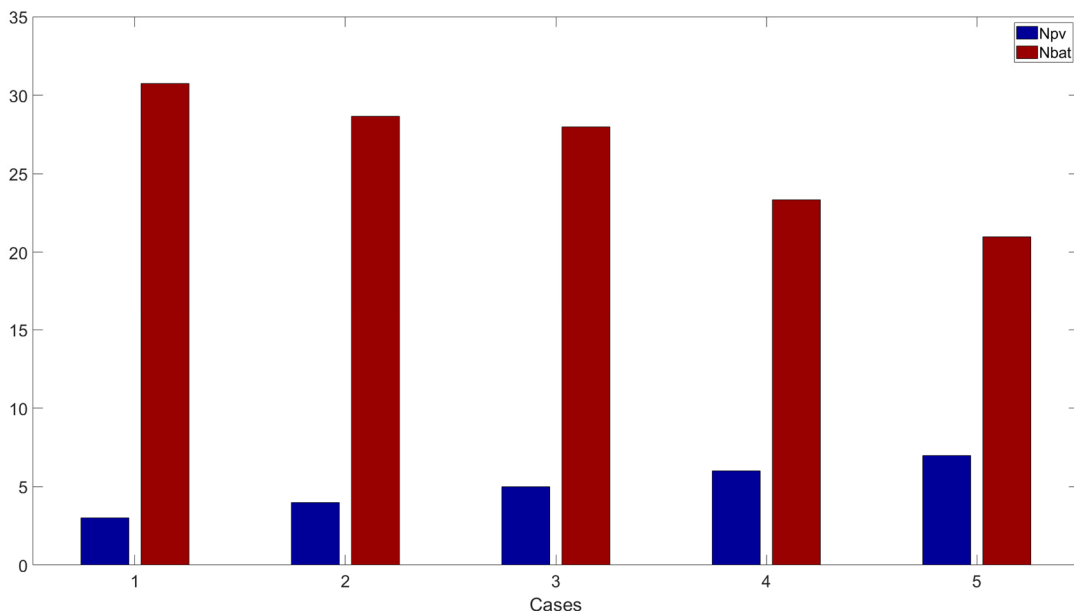
Μόλις προσδιοριστεί η διαθέσιμη ενέργεια που παράγεται τόσο από την Α/Γ όσο και από μία Φ/Β μονάδα, για κάθε ώρα μιας τυπικής ημέρας, μπορούν να υπολογιστούν διαφορετικοί συνδυασμοί του αριθμού των φωτοβολταϊκών μονάδων και του αριθμού των μπαταριών για μια επιθυμητή τιμή LPSP και ημερήσια καμπύλη φορτίου [46].

### 3.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου LPSP

Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε σε πρόγραμμα MATLAB για τον υπολογισμό του αριθμού μπαταριών και Φ/Β στοιχείων σε περιπτώσεις μέσης, υψηλής και πολύ υψηλής αξιοπιστίας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μέγιστο βάθος εκφόρτισης των μπαταριών θεωρείται ίσο με 80% της χωρητικότητάς τους, ενώ η αρχική ποσότητα φόρτισης των μπαταριών θεωρείται ίση με 85%. Επίσης, υπενθυμίζεται ότι ένα Φ/Β στοιχείο παράγει 1kWp ισχύ, ενώ μία μπαταρία έχει χωρητικότητα 100Ah. Τα αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

#### 3.2.2.1 Πολύ υψηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.0003)

Μελετάται η περίπτωση αξιοπιστίας με LPSP = 0.0003, που αντιστοιχεί σε απώλεια τροφοδοσίας για μία ημέρα στα δέκα χρόνια, ή 25.92 δευτερόλεπτα ανά ημέρα [47]. Τα κυριότερα ζευγάρια λύσεων Φ/Β μονάδων και μπαταριών για τα οποία επιτυγχάνεται ο συγκεκριμένος βαθμός αξιοπιστίας παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4. Όπως είναι λογικό, με την αύξηση του αριθμού Φ/Β, μειώνεται ο απαιτούμενος αριθμός μπαταριών.

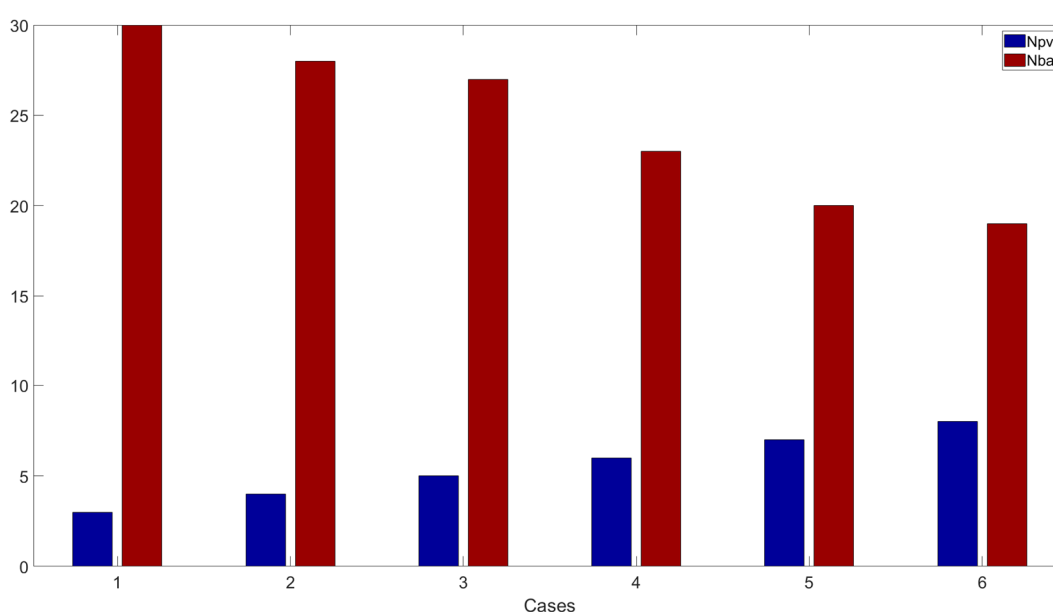


**Σχήμα 3.4:** Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τον αριθμό Φ/Β (μπλε) και μπαταριών (κόκκινο) – Πολύ υψηλή αξιοπιστία.

Ο μικρότερος αριθμός Φ/Β για τον οποίο επιτυγχάνεται η συγκεκριμένη τιμή LPSP είναι τα 3 Φ/Β ή 3kWp, σε συνδυασμό με 31 μπαταρίες, ή 3100Ah. Για μικρότερες τιμές Φ/Β, απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός των μπαταριών, που δεν είναι οικονομικά ωφέλιμο. Δεδομένου ότι το κόστος κάθε Φ/Β στοιχείου είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με το κόστος των μπαταριών, σε όλες τις περιπτώσεις επιλέγεται το ζευγάρι λύσεων που οδηγεί σε όσο το δυνατόν λιγότερα Φ/Β. Συνεπώς για LPSP = 0.0003 επιλέγονται 3kWp Φ/Β και 3100Ah μπαταριών.

### 3.2.2.2 Υψηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.00138)

Αυτή η τιμή LPSP αντιστοιχεί σε 2 λεπτά απώλειας τροφοδοσίας ανά ημέρα. Τα κυριότερα ζευγάρια λύσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

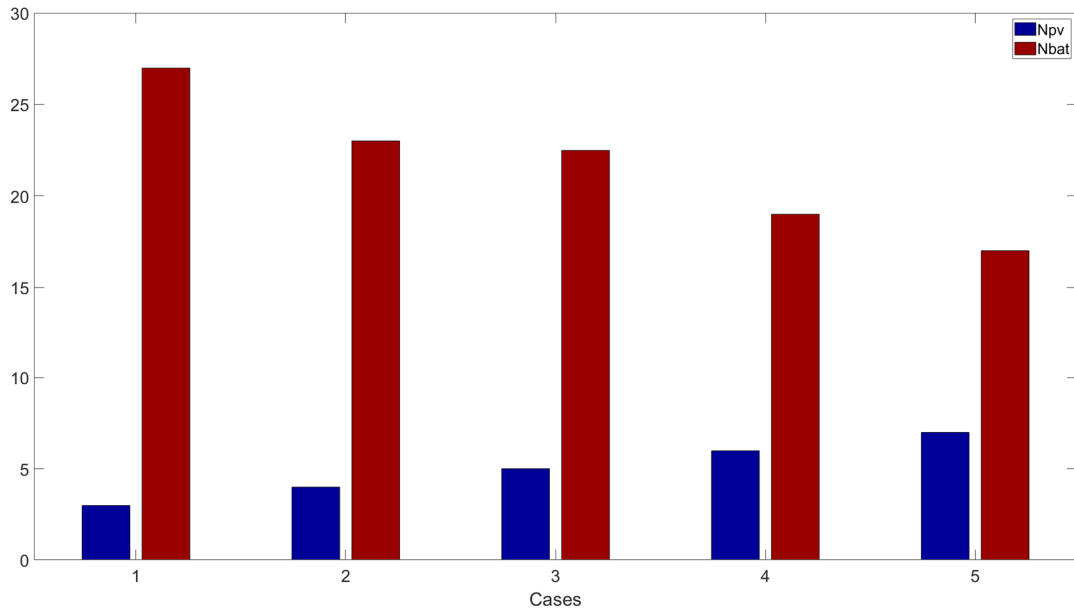


**Σχήμα 3.5:** Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τον αριθμό Φ/Β (μπλε) και μπαταριών (κόκκινο) – Υψηλή αξιοπιστία.

Ο μικρότερος αριθμός Φ/Β για τον οποίο επιτυγχάνεται η συγκεκριμένη τιμή LPSP είναι τα 3 Φ/Β ή 3kWp, σε συνδυασμό με 30 μπαταρίες, ή 3000Ah. Ο αριθμός των μπαταριών μειώνεται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς απαιτείται μικρότερος βαθμός αξιοπιστίας, και, συνεπώς, μεγαλύτερος χρόνος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Η λύση που επιλέγεται εδώ, και πάλι για την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων Φ/Β μονάδων, είναι τα 3kWp Φ/Β μαζί με 3000Ah μπαταριών.

### 3.2.2.2 Μέση αξιοπιστία (LPSP = 0.00694)

Αυτή η τιμή LPSP αντιστοιχεί σε 10 λεπτά απώλειας τροφοδοσίας ανά ημέρα. Τα κυριότερα ζευγάρια λύσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.6. Ο μικρότερος αριθμός Φ/Β για τον οποίο επιτυγχάνεται η συγκεκριμένη τιμή LPSP είναι τα 3 Φ/Β ή 3kWp, σε συνδυασμό με 27 μπαταρίες, ή 2700Ah. Ο αριθμός των μπαταριών μειώνεται και πάλι σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις, καθώς απαιτείται ακόμα μικρότερος βαθμός αξιοπιστίας.



**Σχήμα 3.6:** Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τον αριθμό Φ/Β (μπλε) και μπαταριών (κόκκινο) – Μέση αξιοπιστία.

Η λύση που επιλέγεται εδώ, και πάλι για την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων Φ/Β μονάδων, είναι τα 3kWp Φ/Β μαζί με 2700Ah μπαταριών.

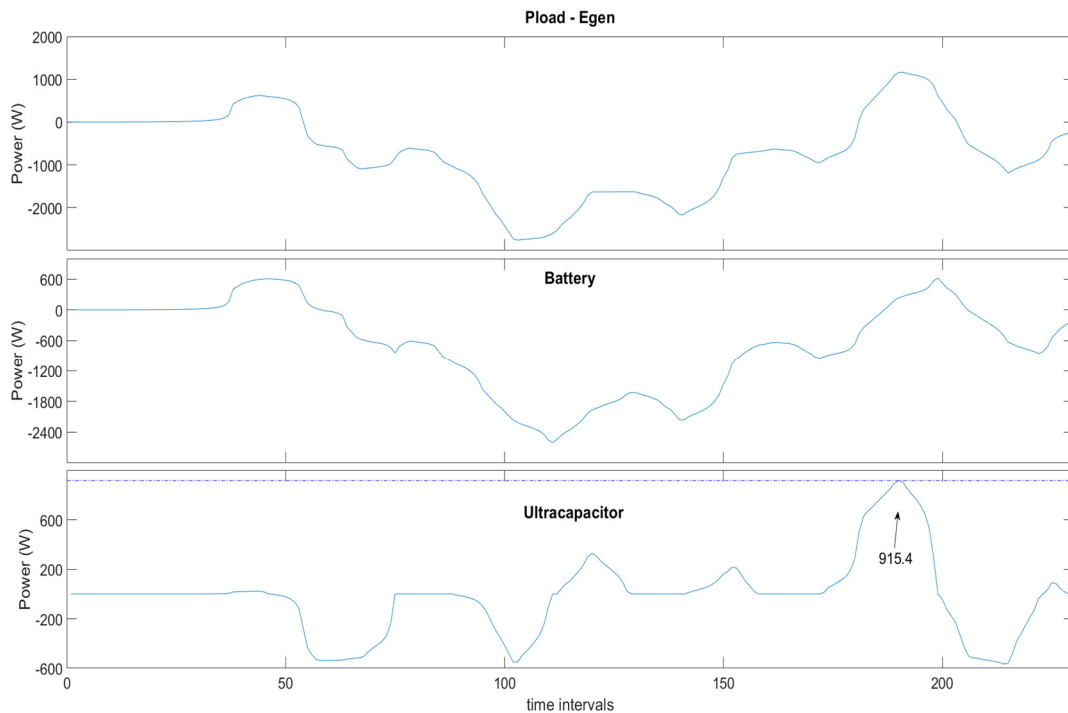
### 3.3 Διαστασιολόγηση υπερπυκνωτή

Ο ρόλος του υπερπυκνωτή σε ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας είναι να τροφοδοτεί τα αιχμακτά φορτία, τα οποία δε μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα η συστοιχία μπαταριών, βελτιώνοντας, παράλληλα, τη διάρκεια ζωής τους. Συνεπώς, αυτή η απαίτηση κάλυψης ξαφνικών ενεργειακών αναγκών της ημερήσιας καμπύλης φορτίου και βελτίωσης της διάρκειας ζωής των μπαταριών, εκφράζει συγχρόνως και την διαδικασία που ακολουθείται για την διαστασιολόγηση των υπερπυκνωτών. Στο σύστημα των μπαταριών εμπεριέχονται χρονικές καθυστερήσεις, κυρίως λόγω των επαγωγών της μπαταρίας, που περιορίζουν τον ρυθμό μεταβολής της ροής του ρεύματος και, ως αποτέλεσμα, τον ρυθμό αποκατάστασης ισορροπίας κατά τη μεταβολή του φορτίου ή της παροχής ρεύματος. Για την βελτίωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, μπορεί να καθοριστεί ένας μέγιστος ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης, η τιμή του οποίου θα καθορίσει και την απαραίτητη συστοιχία υπερπυκνωτών που απαιτείται για την κάλυψη των διακυμάνσεων ισχύος που θα δημιουργηθούν, λόγω του περιορισμού στην απόδοση ισχύος των μπαταριών. Σύμφωνα με την αναφορά [39], ορίζεται μέγιστος ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης ο ακόλουθος:

$$Rate_{charge,discharge} = \frac{C_{batmax}}{5} \quad (3.7)$$

όπου  $C_{batmax}$  η μέγιστη χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών. Χρησιμοποιώντας την περίπτωση υψηλής αξιοπιστίας, για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω, για 3000Ah προκύπτει ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης  $\pm 600Ah$ . Στη συνέχεια, υπολογίζοντας την διαφορά μεταξύ φορτίου και παραγωγής,  $P_{load} - E_{gen}$ , χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν επεξεργαστεί προηγουμένως για την περίπτωση της υψηλής αξιοπιστίας, προκύπτει η ενέργεια που αναμένεται να αποδοθεί από τις μονάδες αποθήκευσης του συστήματος

συνολικά (μπαταρίες και υπερπυκνωτές). Με την εφαρμογή του περιορισμού κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών στο μοντέλο του συστήματος, η ισχύς που πρέπει να παράγεται από την συστοιχία των υπερπυκνωτών προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής ενέργειας των μονάδων αποθήκευσης και της ενέργειας που αποδίδεται από τις μπαταρίες (μετά την εφαρμογή του περιορισμού), ώστε οι υπερπυκνωτές να καλύπτουν οποιαδήποτε αδυναμία στην απόδοση ισχύος των μπαταριών. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα:



**Σχήμα 3.7:** Ενέργεια μονάδων αποθήκευσης συνολικά (πάνω), ενέργεια μπαταριών (μέση) και ενέργεια υπερπυκνωτών (κάτω).

Από το σχήμα 3.7 παρατηρείται ότι όταν  $P_{load} - E_{gen} > 0$  το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση εκφόρτισης ( $P_{bat}, P_{UC} > 0$ ), ενώ όταν  $P_{load} - E_{gen} < 0$  το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης ( $P_{bat}, P_{UC} < 0$ ). Προκύπτει ότι η μέγιστη ισχύς που δύναται να καλύψει η συστοιχία υπερπυκνωτών υπολογίζεται περί τα 915W. Οποιαδήποτε ισχύς μεγαλύτερη από αυτήν την τιμή είναι αρκετή για την παράλληλη λειτουργία των υπερπυκνωτών με τις μπαταρίες. Σημειώνεται ότι τα χρονικά διαστήματα στο σχήμα 3.7 είναι διαφορετικά των 24 ωρών που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, καθώς οι διακριτές τιμές για την ισχύ του φορτίου και της παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν, μέσω συνάρτησης μεταφοράς, για την προσομοίωση σε μοντέλο συνεχούς χρόνου. Δεδομένου ότι για το οικιακό φορτίο που εφαρμόστηκε (σχήμα 3.3) δεν υπάρχουν αιχμές ισχύος, και, συνεπώς, οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο, επικουρικά, για την βελτίωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, αλλά και για την βελτίωση της μεταβατικής απόκρισης του συστήματος, θεωρείται ως χρόνος εκφόρτισης των υπερπυκνωτών τα 100sec. Θεωρώντας μέγιστη ισχύ 1000W (μικρή υπερδιαστασιολόγηση από τα 915W), για 100sec υπολογίζεται ότι οι υπερπυκνωτές αποδίδουν συνολικά 27.8Wh. Η τιμή αυτή ενδεχομένως να διαφέρει στην τελική προσομοίωση, ανάλογα με τις τεχνικές απαιτήσεις του συστήματος. Ωστόσο, εδώ, χρησιμοποιείται ως βάση για την ανάλυση κόστους που ακολουθεί.



### 3.4 Ανάλυση κόστους

Κάθε υβριδικό σύστημα, για τη βέλτιστη διαστασιολόγησή του, αλλά και για τη βιωσιμότητα μιας επένδυσης σε αυτό, θα πρέπει να επιλέγει το συνδυασμό εκείνων των συνιστωσών, που επιτρέπουν τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της αξιοπιστίας ισχύος του συστήματος και του συνολικού κόστους. Η οικονομική προσέγγιση πραγματοποιείται σε αυτήν την ενότητα, σύμφωνα με την έννοια του ετήσιου κόστους του συστήματος (Annualized Cost of System - ACS), η οποία αναπτύσσεται ως το καλύτερο σημείο αναφοράς της ανάλυσης κόστους του συστήματος για αυτήν την μελέτη.

#### 3.4.1 Στοιχεία ανάλυσης κόστους

##### 3.4.1.1 Ετήσιο κόστος συστήματος

Σύμφωνα με το υβριδικό σύστημα που μελετάται εδώ, το ετήσιο κόστος του συστήματος αποτελείται από το ετήσιο επενδυτικό κόστος (κόστος κεφαλαίου)  $C_{acap}$ , το ετήσιο κόστος αντικατάστασης  $C_{arep}$  και το ετήσιο κόστος συντήρησης  $C_{amain}$ . Εξετάζονται τα 4 κύρια υποσυστήματα: η Α/Γ, η Φ/Β συστοιχία, η συστοιχία μπαταριών και η συστοιχία υπερπυκνωτών. Οι υπόλοιπες συσκευές, που συμπεριλαμβάνουν τους ελεγκτές και τους μετατροπείς, δεν περιλαμβάνονται στην ανάλυση για λόγους απλοποίησης. Η διάρκεια ζωής του συστήματος εκτιμάται στα 25 χρόνια. Επιπλέον, θεωρείται ότι συνιστώσες του συστήματος δεν απαιτούν αντικατάσταση πριν το τέλος της αναμενόμενης διάρκειας ζωής τους.

Το ετήσιο κόστος του συστήματος προκύπτει σύμφωνα με την σχέση:

$$ACS = C_{acap}(Wind + PV + Bat + UC) + C_{arep}(Wind + PV + Bat + UC) + C_{amain}(Wind + PV + Bat + UC) \quad (3.8)$$

όπου  $C_{acap}$ ,  $C_{arep}$  και  $C_{amain}$  οι συντελεστές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, για κάθε συσκευή.

Το ετήσιο επενδυτικό κόστος κάθε στοιχείου λαμβάνει υπόψη το αρχικό κόστος επένδυσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{acap} = C_{cap} \cdot CRF(i, Y_{proj}) \quad (3.9)$$

όπου  $C_{cap}$  το αρχικό κόστος επένδυσης για κάθε στοιχείο,  $Y_{proj}$  η διάρκεια ζωής του συστήματος σε χρόνια και  $CRF$  ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, ένας παράγοντας που υπολογίζει την παρούσα αξία μιας σειράς ίσων, ετήσιων ταμειακών ροών, ο οποίος εκφράζεται από την εξίσωση:

$$CRF(i, Y_{proj}) = \frac{i \cdot (1 + i)^{Y_{proj}}}{(1 + i)^{Y_{proj}} - 1} \quad (3.10)$$

όπου  $i$  το επιτόκιο αναγωγής, το οποίο σε αυτήν την μελέτη επιλέγεται ίσο με 8%.

Το ετήσιο κόστος αντικατάστασης ενός στοιχείου αφορά την ετήσια αξία όλων των δαπανών αντικατάστασης που πραγματοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω, στον πίνακα 3.3, για το συγκεκριμένο σύστημα, μόνο η συστοιχία μπαταριών και υπερπυκνωτών πρέπει να αντικαθίσταται περιοδικά κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Το ετήσιο κόστος αντικατάστασης εκφράζεται από τη σχέση:

$$C_{arep} = C_{rep} \cdot SFF(i, Y_{rep}) \quad (3.11)$$

όπου  $C_{rep}$  το κόστος αντικατάστασης του στοιχείου,  $Y_{rep}$  η διάρκεια ζωής του στοιχείου σε χρόνια και  $SFF(i, Y_{rep})$  ο συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου (Sinking Fund Factor), ένας παράγοντας που υπολογίζει την μελλοντική αξία μιας σειράς ίσων, ετήσιων ταμειακών ροών, ο οποίος δίνεται από την εξίσωση:

$$SFF(i, Y_{rep}) = \frac{i}{(1+i)^{Y_{rep}} - 1} \quad (3.12)$$

Το ετήσιο κόστος συντήρησης, το οποίο λαμβάνει υπόψη τον πληθωρισμό,  $f$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{amain}(n) = C_{amain}(1) \cdot (1+f)^n \quad (3.13)$$

όπου  $C_{amain}(n)$  το κόστος συντήρησης του n-οστού χρόνου [39].

### 3.4.1.2 Κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας

Αρχικά, υπολογίζεται η ετήσια ζήτηση ενέργειας (Annual Energy Demand - AED), ως το άθροισμα της ζήτησης ενέργειας που καταναλώνεται από το φορτίο στη διάρκεια ενός έτους. Στην πράξη, η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που καταναλώνεται, εξαιτίας των απωλειών του συστήματος και της ενέργειας που καταναλώνεται από το ελεγχόμενο φορτίο. Παρόλα αυτά, το σφάλμα που προκύπτει λόγω αυτής της διαφοράς στην ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια, για τον υπολογισμό του δείκτη AED, θεωρείται αμελητέο. Με δεδομένο το συνολικό ετήσιο επενδυτικό κόστος του συστήματος, ACS, το ετήσιο κόστος της τροφοδοτούμενης ενέργειας (Cost Of Electricity - COE) υπολογίζεται ως εξής:

$$COE = \frac{ACS}{AED} \quad (3.14)$$

### 3.4.1.3 Κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας

Ο δείκτης του κόστους της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (Cost Of Energy Not Supplied – COENS ή CENS) εκφράζει το όφελος ή ζημία που αναμένεται από την αύξηση ή

μείωση της στάθμης αξιοπιστίας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές, σε \$/kWh. Υπολογίζονται διάφορες τιμές για το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας, ανάλογα με την κατηγορία καταναλωτών και την μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται [20], [26], [48]. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, θεωρείται πως η τιμή του κόστους μη τροφοδοτούμενης ενέργειας, για την περίπτωση ενός οικιακού καταναλωτή, ανέρχεται στα 1.60\$/kWh.

### 3.4.1.4 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κόστους του συστήματος, αφορούν το μοναδιαίο επενδυτικό κόστος και τη διάρκεια ζωής των συσκευών του συστήματος. Συγκεντρωτικά, τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 και βασίζονται στις αναφορές [20], [26], [39], [46], [47] και [49]. Η διάρκεια ζωής της επένδυσης θεωρείται στα 25 χρόνια, το επιτόκιο αναγωγής 8% και ο πληθωρισμός 1.5%. Τέλος, θεωρείται ότι συντήρηση θα πραγματοποιείται στα στοιχεία του συστήματος κάθε 5 χρόνια.

Παράμετρος	Τιμή	Κόστος αντικατάστασης	Κόστος συντήρησης στον πρώτο χρόνο	Διάρκεια ζωής
<b>Α/Γ</b>	2000 \$/kW	-	55 \$/kW	25
<b>Φ/Β</b>	6500 \$/kW	-	65 \$/kW	25
<b>Μπαταρία</b>	1500 \$/kAh	1500 \$/kAh	50 \$/kAh	10
<b>Υπερπυκνωτές</b>	10 \$/Wh	10 \$/Wh	-	10

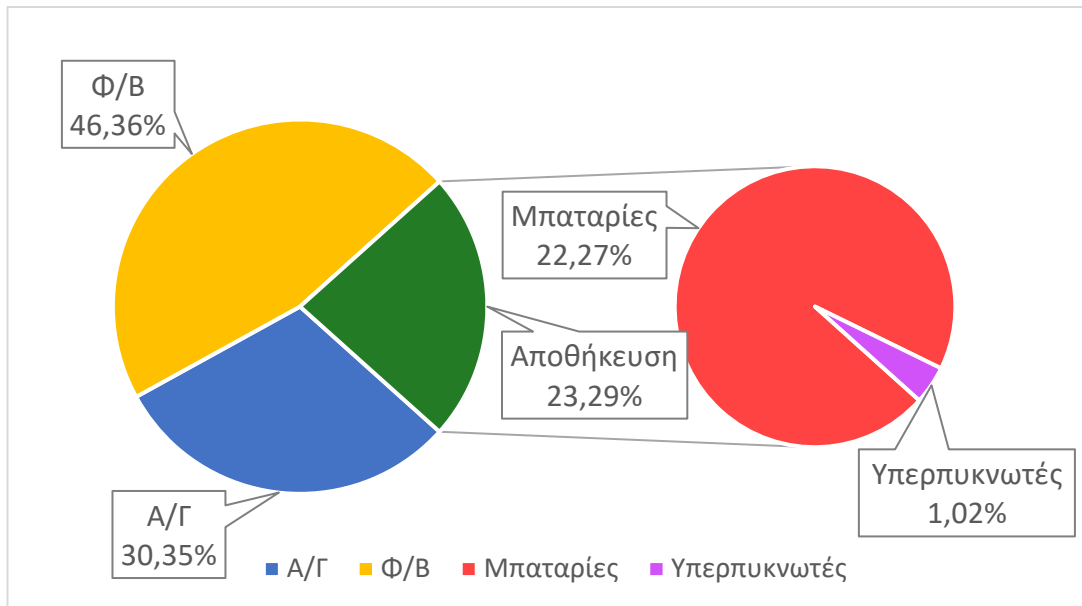
**Πίνακας 3.3:** Δεδομένα ανάλυσης κόστους.

### 3.4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους

Για την ανάλυση κόστους επιλέγεται η μελέτη της τοπολογίας που προκύπτει για την υψηλή αξιοπιστία. Σημειώνεται ότι τα οικονομικά και τεχνικά δεδομένα για τις μπαταρίες βασίζονται σε μοντέλα μπαταριών μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης. Οι μπαταρίες αυτές είναι ειδικά σχεδιασμένες για βαθιάς εκφόρτισης κυκλική λειτουργία, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές όπως τα υβριδικά συστήματα ηλιακής-αιολικής ενέργειας. Οι κατασκευαστές καθορίζουν μια ονομαστική χωρητικότητα 1000Ah και τάση 24V για κάθε στοιχείο μπαταριών. Συνεπώς, η περίπτωση υψηλής αξιοπιστίας είναι η κατάλληλη επιλογή, καθώς απαιτεί επακριβώς 3000Ah, ή τρεις μπαταρίες, συνολικά. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σύμφωνα με την προηγούμενη μεθοδολογία παρουσιάζονται παρακάτω:

Παράμετρος	Υψηλή αξιοπιστία
<b><math>ACS_{WT}</math> (\$)</b>	1813.11
<b><math>ACS_{PV}</math> (\$)</b>	2769.54
<b><math>ACS_{BAT}</math> (\$)</b>	1330.39
<b><math>ACS_{UC}</math> (\$)</b>	61.06
<b><math>ACS_{sum}</math> (\$)</b>	5974.10
<b><math>COENS</math> (\$)</b>	28.39
<b><math>ACS_{total}</math> (\$)</b>	6002.50
<b><math>COE</math> (\$/kWh)</b>	0.46981

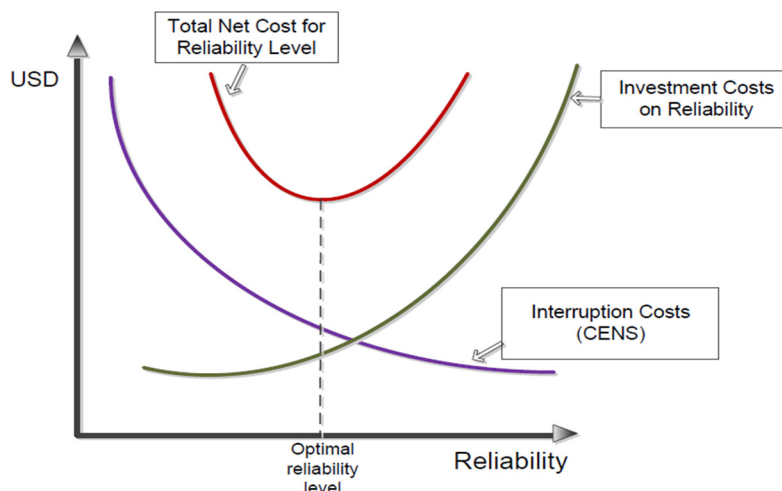
**Πίνακας 3.4:** Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους – υψηλή αξιοπιστία.



**Σχήμα 3.8:** Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος - υψηλή αξιοπιστία.

Από το παραπάνω σχήμα, παρατηρείται πως η αποθήκευση του συστήματος, συνολικά, συμβάλει σε περίπου το ένα τέταρτο του κόστους, με τους υπερπυκνωτές να κοστίζουν ελάχιστα σε σχέση με τις μπαταρίες. Αυτό οφείλεται στην χαμηλή χωρητικότητα που έχει επιλεχθεί για τους υπερπυκνωτές, η οποία, ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ενδέχεται να αυξηθεί στην τελική προσομοίωση, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η Α/Γ συμβάλει σε περίπου το ένα τρίτο του συνολικού κόστους, ενώ τα Φ/Β λαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης, λόγω του αυξημένου κόστους ανά Φ/Β στοιχείο, σε σχέση με την Α/Γ.

Η μελέτη της τοπολογίας πολύ υψηλής αξιοπιστίας δεν πραγματοποιείται, καθώς η διαφορά 100Ah μπαταρίας μεταξύ υψηλής και πολύ υψηλής αξιοπιστίας θα οδηγήσει σε παρόμοια αποτελέσματα. Επιπλέον, ο τεχνικός περιορισμός των 1000Ah ανά στοιχείο μπαταρίας εξυπηρετεί τη χρήση της τοπολογίας υψηλής αξιοπιστίας. Η τοπολογία μέσης αξιοπιστίας, εκτός από τον τεχνικό περιορισμό, οδηγεί σε 10 λεπτά απώλειας τροφοδοσίας ανά ημέρα, και κρίνεται ως ακατάλληλη επιλογή για αυτόνομη λειτουργία.



**Σχήμα 3.9:** Συνολικό κόστος (κόκκινο), κόστος επένδυσης (πράσινο) και κόστος απώλειας τροφοδοσίας (μωβ) συναρτήσει της αξιοπιστίας [48].

Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι υπάρχουν δύο βασικές εκτιμήσεις στα επίπεδα αξιοπιστίας για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για αυτόνομη λειτουργία. Από τη μία πλευρά, ένα αυξημένο επίπεδο αξιοπιστίας συνεπάγεται συνήθως σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό και υποδομές. Από την άλλη πλευρά, η μείωση της αξιοπιστίας συνεπάγεται οικονομική επιβάρυνση στους χρήστες λόγω της αύξησης των διακοπών στην τροφοδοσία. Το συνολικό κόστος εκφράζεται από το άθροισμα των δύο καμπυλών και παρουσιάζει μία ελάχιστη τιμή. Η τιμή αυτή υποδεικνύει τη βέλτιστη στάθμη αξιοπιστίας του συστήματος που πρέπει να επιτευχθεί κατά τη φάση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης του συστήματος (σχήμα 3.9). Στην παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένα σταθερό κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Ωστόσο, το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας ποικίλει ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, και, επομένως, η λύση του προβλήματος συμβιβασμού μεταξύ αξιοπιστίας και κόστους δεν είναι μονοσήμαντη [20], [48].

### 3.5 Διαστασιολόγηση του συστήματος με το λογισμικό HOMER

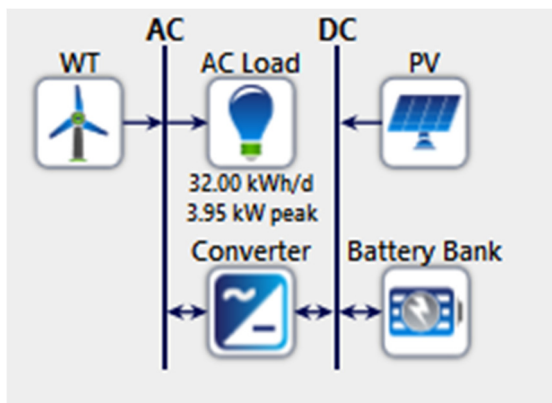
Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η επιβεβαίωση της τοπολογίας που επιλέχθηκε προηγουμένως, με την προσομοίωση του υβριδικού συστήματος σε λογισμικό, όπου με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου, μπορεί να υπολογιστεί η βέλτιστη τοπολογία του συστήματος, αλλά και το κόστος όλων των συνιστωσών του, με βάση τη διαθεσιμότητα των ενεργειακών πόρων. Το λογισμικό που επιλέγεται σε αυτήν την εργασία είναι το λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources). Το λογισμικό αυτό είναι ένα εργαλείο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των ΗΠΑ, με στόχο τον σχεδιασμό βέλτιστων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με κλίμακα που μπορεί να κυμαίνεται από ένα μικρό χωριό, έως βιομηχανίες που συνδέονται με το δίκτυο [50].

Το HOMER προσομοιώνει όλες τις πιθανές διαμορφώσεις ενός συστήματος με βάση τους συνδυασμούς των συστατικών του, που ορίζονται ως δεδομένα εισόδου, και απορρίπτει τις ανέφικτες διαμορφώσεις που δεν ικανοποιούν επαρκώς το απαιτούμενο φορτίο, ανάλογα με τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους ή/και με συγκεκριμένους περιορισμούς. Ως εκ τούτου, εμφανίζονται μόνο οι εφικτοί συνδυασμοί ενός συστήματος, που ταξινομούνται σύμφωνα με το συνολικό καθαρό κόστος (NPC), σε αυξανόμενη σειρά. Για ένα συγκεκριμένο σύνολο μεταβλητών ευαισθησίας (ηλιακή ακτινοβολία, μέση ταχύτητα ανέμου, κ.λπ.), ένας συνολικός πίνακας εμφανίζει όλες τις εφικτές διαμορφώσεις του συστήματος, ανάλογα με την αποτελεσματικότητα κόστους. Επίσης, ο συνολικός πίνακας μπορεί να χωριστεί σε κατηγορίες, παρουσιάζοντας μόνο την πιο συμφέρουσα διαμόρφωση, από κάθε πιθανό τύπο υβριδικού συστήματος [51].

#### 3.5.1 Δομή του συστήματος και δεδομένα προσομοίωσης

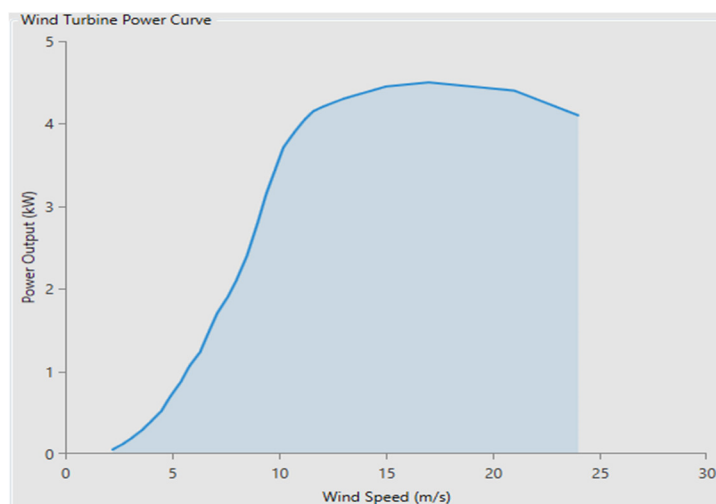
Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10. Τα Φ/Β και οι μπαταρίες συνδέονται στον ζυγό ΣΡ, ενώ η Α/Γ και το φορτίο στον ζυγό ΕΡ. Η ροή ισχύος μεταξύ των δύο ζυγών πραγματοποιείται με έναν μετατροπέα ισχύος. Σημειώνεται ότι η συστοιχία υπερπυκνωτών παραλείπεται από την ανάλυση, καθώς, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι υπερπυκνωτές λειτουργούν επικουρικά, για την βελτίωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, και, αφού δεν υπάρχουν αιχμές ισχύος στην καμπύλη φορτίου, όταν συμπεριλαμβάνονται υπερπυκνωτές στην ανάλυση, το λογισμικό τους αμελεί, υπολογίζοντας τοπολογίες χωρίς τη χρήση τους. Συνεπώς, όπως και στην διαστασιολόγηση που προηγήθηκε, οι υπερπυκνωτές θα χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις τελικές απαιτήσεις του συστήματος. Εξάλλου, όπως

διαφαίνεται από την προηγούμενη ανάλυση κόστους, το κόστος των υπερπυκνωτών είναι μηδαμινό, σε σχέση με τις υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος. Συνεπώς, η χρήση τους σε επικουρικό ρόλο, είτε με μεγαλύτερη, είτε με μικρότερη τιμή της τιμής αναφοράς που υπολογίζεται στην ενότητα 3.3, δεν θα επιφέρει μεγάλη διαφορά στα οικονομικά αποτελέσματα του συστήματος.



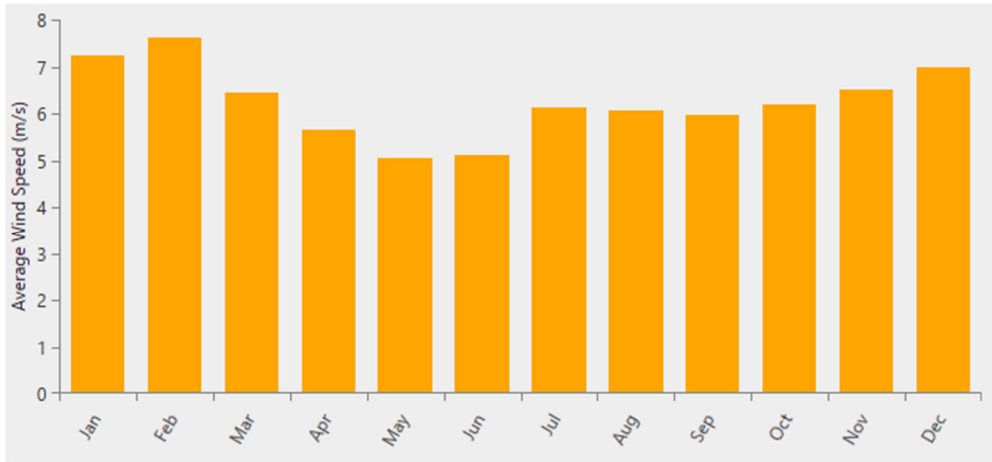
**Σχήμα 3.10:** Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος.

Το σύστημα αποτελείται από μία Α/Γ ονομαστικής ισχύος 4.2kW (σχήμα 3.11), η οποία προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την Α/Γ Enair 70Pro που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ανάλυση. Τα μεγέθη του Φ/Β και του μετατροπέα κυμαίνονται από 1 έως 10kW, με βήμα 1kW, ενώ η συστοιχία μπαταριών, αποτελούμενη από 1000Ah ανά στοιχείο της εταιρίας EnerSys, κυμαίνεται σε αριθμό από 1 μέχρι 20 στοιχεία. Το λογισμικό πραγματοποιεί προσομοιώσεις με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς και επιλέγει τη βέλτιστη λύση με κριτήρια την ικανοποίηση του φορτίου και την ελαχιστοποίηση του κόστους. Το κόστος των στοιχείων και η διάρκεια ζωής τους εισάγονται στο λογισμικό, σύμφωνα με τον πίνακα 3.3, με τον οποίο πραγματοποιήθηκε, προηγουμένως, η ανάλυση κόστους. Επίσης, το επιτόκιο αναγωγής τίθεται στο 8%, ο πληθωρισμός στο 1.5% και η διάρκεια ζωής της επένδυσης υπολογίζεται στα 25 χρόνια.

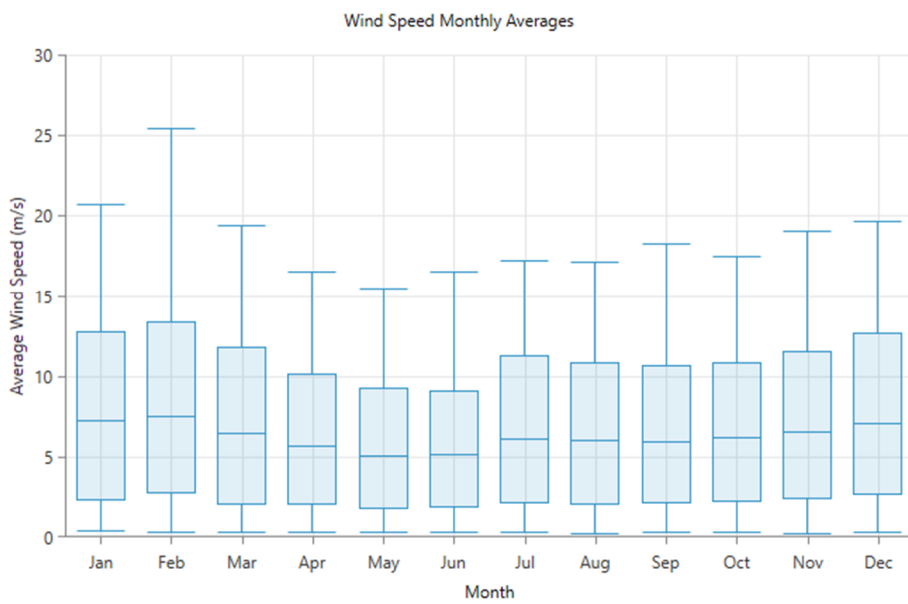


**Σχήμα 3.11:** Καμπύλη ισχύος Α/Γ του συστήματος.

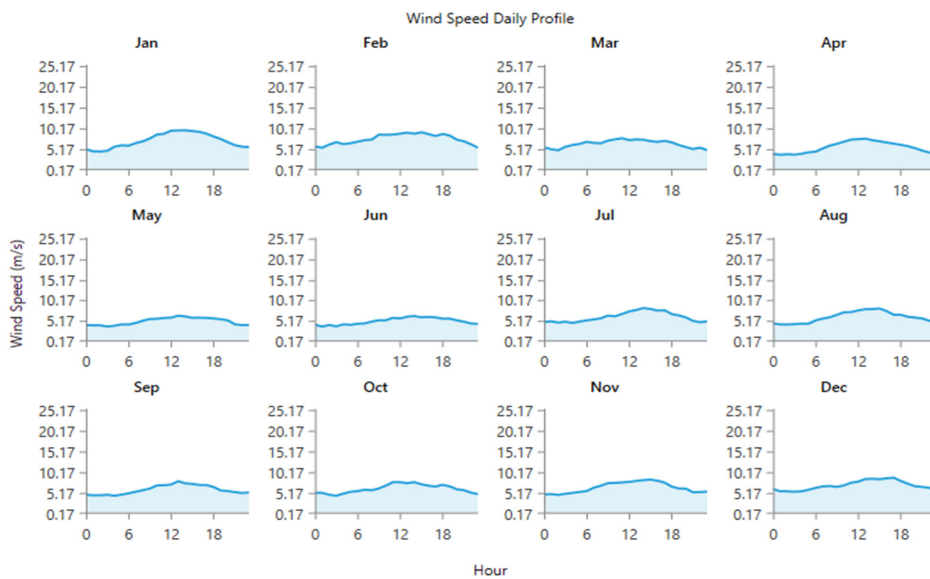
Η μέση ταχύτητα ανέμου σε m/s ανά μήνα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12. Επίσης, στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη ταχύτητα ανέμου σε m/s που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, ενώ στο σχήμα 3.14 φαίνεται η ημερήσια χρονοσειρά ανέμου ανά μήνα.



Σχήμα 3.12: Μέση ταχύτητα ανέμου ανά μήνα.

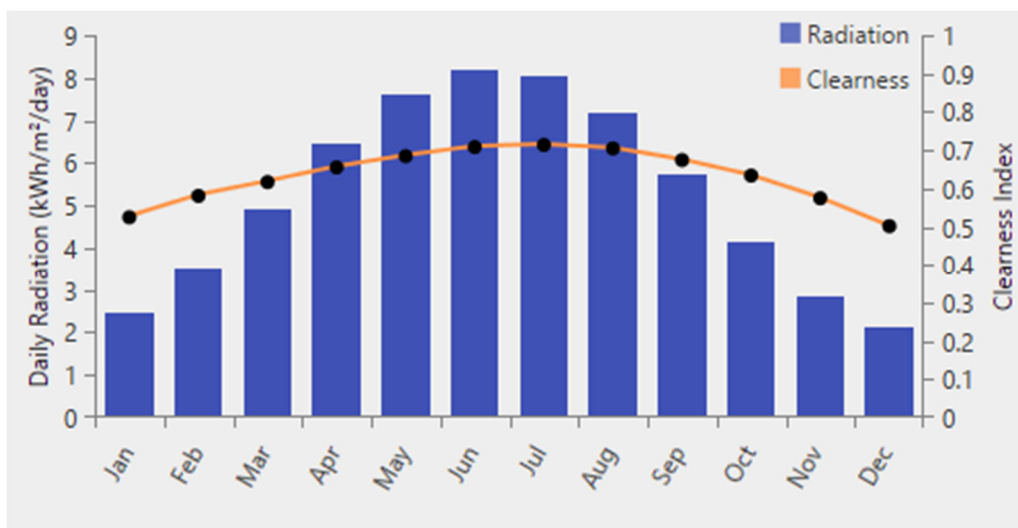


Σχήμα 3.13: Ελάχιστη, μέση και μέγιστη ταχύτητα ανέμου ανά μήνα.

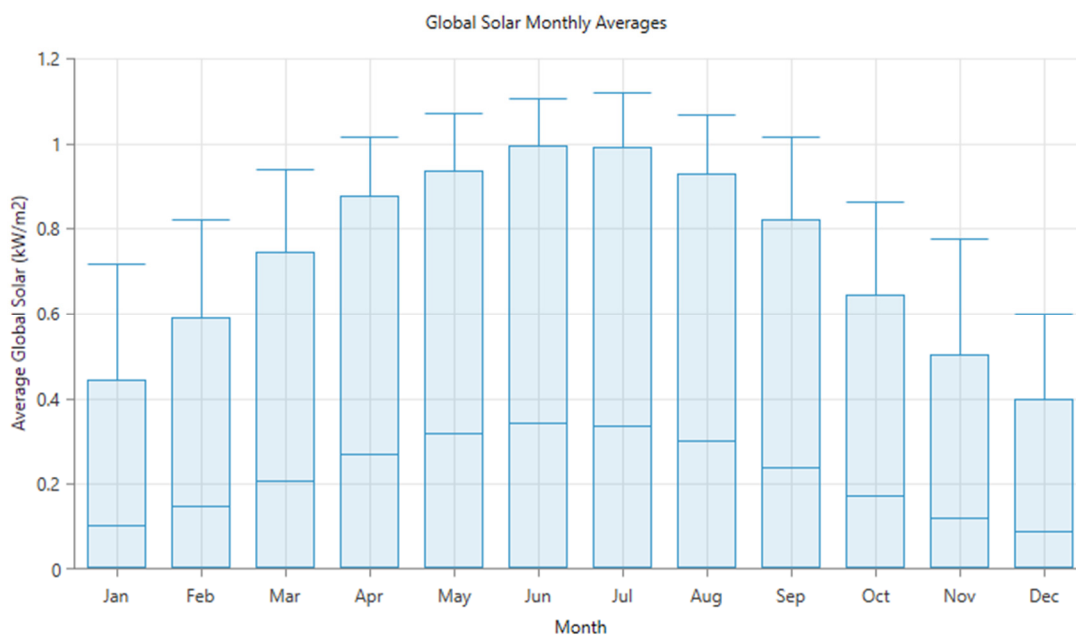


Σχήμα 3.14: Ημερήσια χρονοσειρά ανέμου ανά μήνα.

Αντίστοιχα, στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα, σε kWh/m<sup>2</sup>/ημέρα, μαζί με τον δείκτη καθαρότητας, στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η ελάχιστη, μέση και η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, σε kW/m<sup>2</sup>, και, τέλος, στο σχήμα 3.17 φαίνεται η μέση ημερήσια χρονοσειρά της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα.



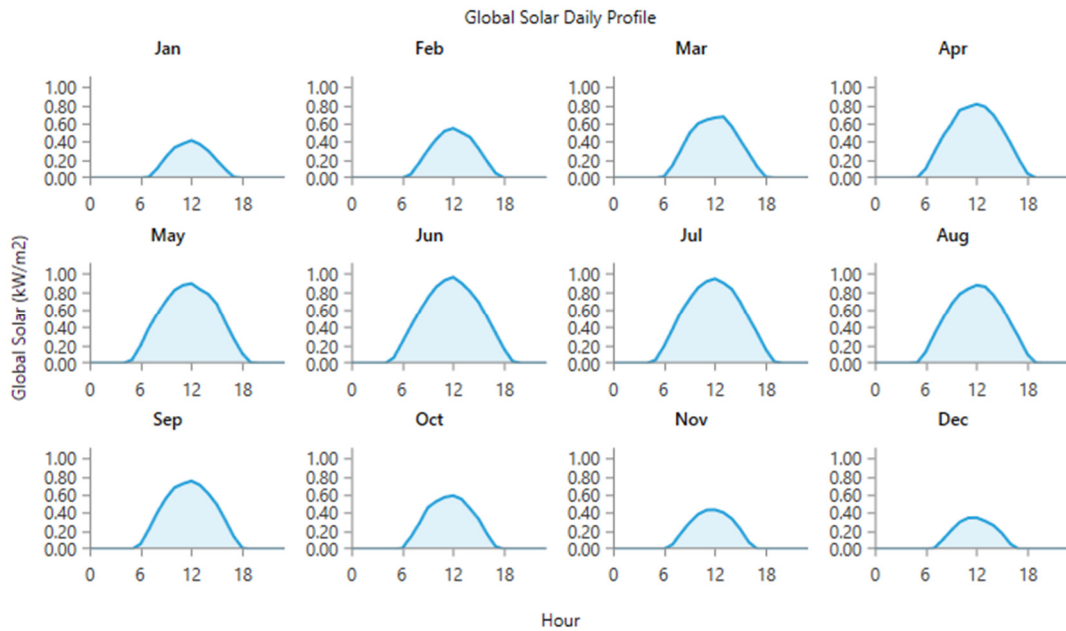
**Σχήμα 3.15:** Προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.16:** Ελάχιστη, μέση και μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα.

Τα παραπάνω δεδομένα προκύπτουν από το λογισμικό, χρησιμοποιώντας πηγές δεδομένων που προέρχονται από την NASA Surface Meteorology and Solar Energy, η οποία προμηθεύει μηνιαία δεδομένα ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας, για όλες τις περιοχές του πλανήτη, για την περίοδο 22 ετών μεταξύ Ιουλίου 1983 και Ιουνίου 2005.

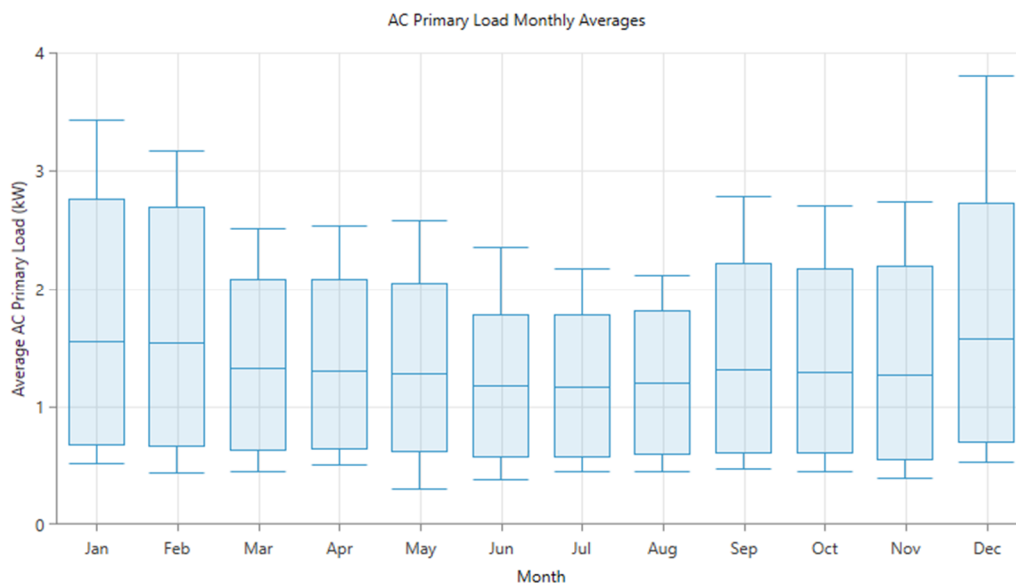




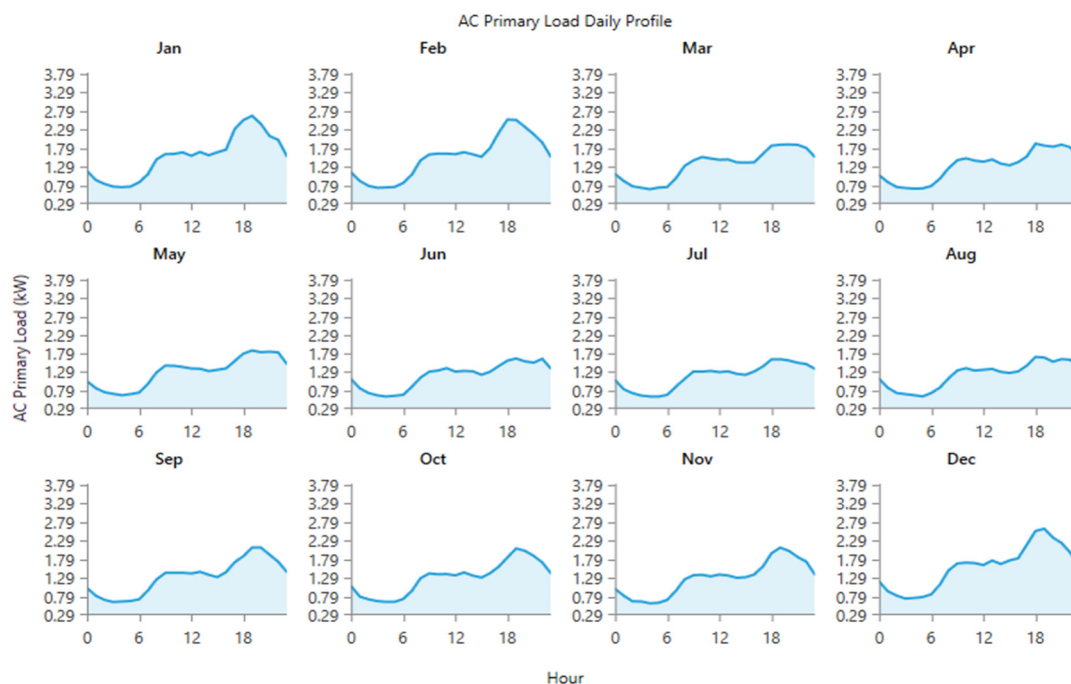
**Σχήμα 3.17:** Ημερήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα.

Για τον προσδιορισμό του φορτίου, χρησιμοποιήθηκε, όπως και στην προηγούμενη ανάλυση, ο πίνακας τιμών της εταιρίας ELEXON. Ο πίνακας περιέχει αξιόπιστες τιμές φορτίου οικιακών καταναλωτών, περιλαμβάνοντας εποχιακά προφίλ φορτίων ανά ώρα, χωρισμένα σε εργάσιμες ημέρες της εβδομάδας και σε σαββατοκύριακα. Το λογισμικό επιτρέπει παρόμοιο διαχωρισμό, οπότε τα δεδομένα εισάγονται κατάλληλα. Επιπλέον, το λογισμικό διαθέτει την δυνατότητα προσθήκης εισόδων τυχαίας μεταβλητότητας στα δεδομένα φορτίου. Με την εισαγωγή 10% μεταβλητότητας μεταξύ των ημερών αλλά και των ωρών στις οποίες εμφανίζεται κάθε τιμή φορτίου, προκύπτουν αρκετά ρεαλιστικά δεδομένα προσομοίωσης (σχήματα 3.18, 3.19). Σημειώνεται ότι το φορτίο που προέκυψε παρουσιάζει αιχμή 3.95kW και ημερήσια ζήτηση ενέργειας 32kWh/day (σχήμα 3.10).

Τέλος, για την προσομοίωση, η μέγιστη επιτρεπόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια ανά έτος τίθεται στο 2% της συνολικής ετήσιας ζήτησης.



**Σχήμα 3.18:** Ελάχιστο, μέσο και μέγιστο φορτίο ανά μήνα.



Σχήμα 3.19: Ημερήσια χρονοσειρά φορτίου ανά μήνα.

### 3.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση του συστήματος με το λογισμικό HOMER υπέδειξε την εξής διαστασιολόγηση ως την βέλτιστη για τα παραπάνω δεδομένα:

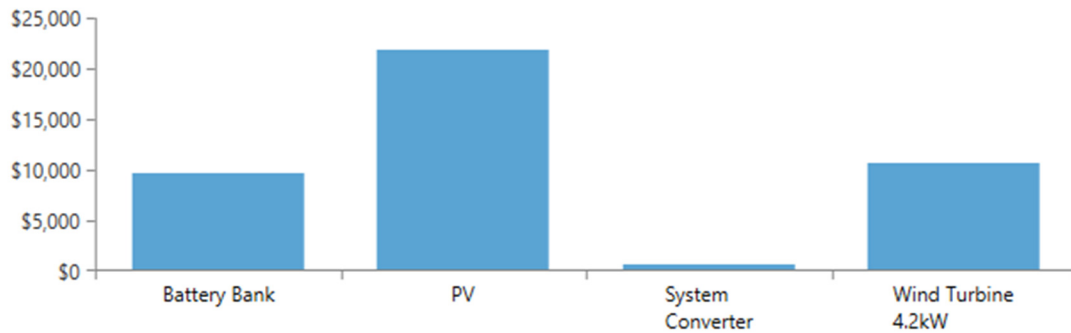
Χαρακτηριστικά	Τιμές
<b>A/Γ (kW)</b>	4.2
<b>Φ/B (kW)</b>	3
<b>Μπαταρίες (#/Ah)</b>	3/3000
<b>Μετατροπέας (kW)</b>	2

Πίνακας 3.5: Βέλτιστη διαστασιολόγηση.

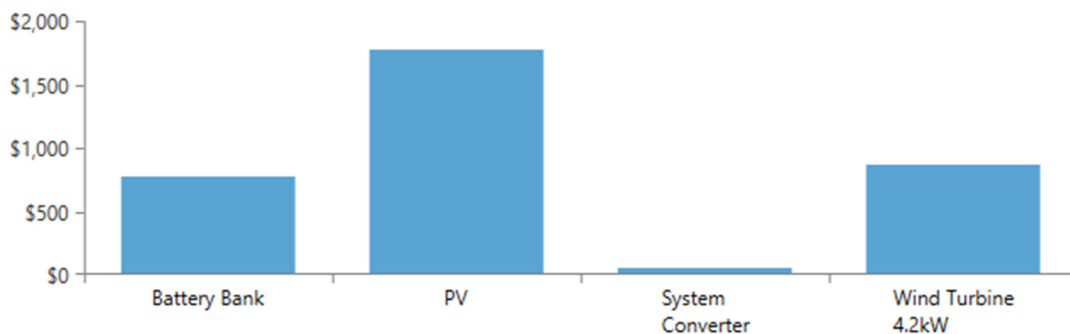
Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα είναι ίδια με αυτά της προηγούμενης ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε σε 24ωρη βάση. Η μόνη διαφορά εδώ, έγκειται στη χρήση μπαταριών με τάση στοιχείου 24V και βαθμού απόδοσης (round-trip) 97%, αντί του βαθμού απόδοσης 85% που είχε χρησιμοποιηθεί προηγουμένως. Σημειώνεται ότι η ανάλυση με το λογισμικό δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με εποχιακά δεδομένα αιολικού-ηλιακού δυναμικού και φορτίου, σε όλη τη διάρκεια του έτους.

Στη συνέχεια, για την παραπάνω τοπολογία παρουσιάζονται τα τεχνικά και οικονομικά αποτελέσματα. Στο σχήμα 3.20 παρατίθεται το συνολικό ανηγμένο κόστος ανά υποσύστημα και στο σχήμα 3.21 το ετήσιο κόστος ανά υποσύστημα. Το συνολικό ανηγμένο κόστος της επένδυσης ανέρχεται σε 42,796\$ και το συνολικό ετήσιο κόστος σε 3,477\$. Από τα διαγράμματα παρατηρείται πως την μεγαλύτερη συνεισφορά στο κόστος έχει το Φ/B σύστημα, λόγω του υψηλού κόστους ανά kW που απαιτείται για κάθε στοιχείο, ακολουθούμενο από την A/Γ και την συστοιχία μπαταριών. Στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι ταμειακές ροές της επένδυσης, σε όλη τη διάρκεια των 25 χρόνων ζωής της, ανά τύπο κόστους. Συγκεκριμένα, διακρίνονται το αρχικό κόστος επένδυσης (Capital), τα έξοδα

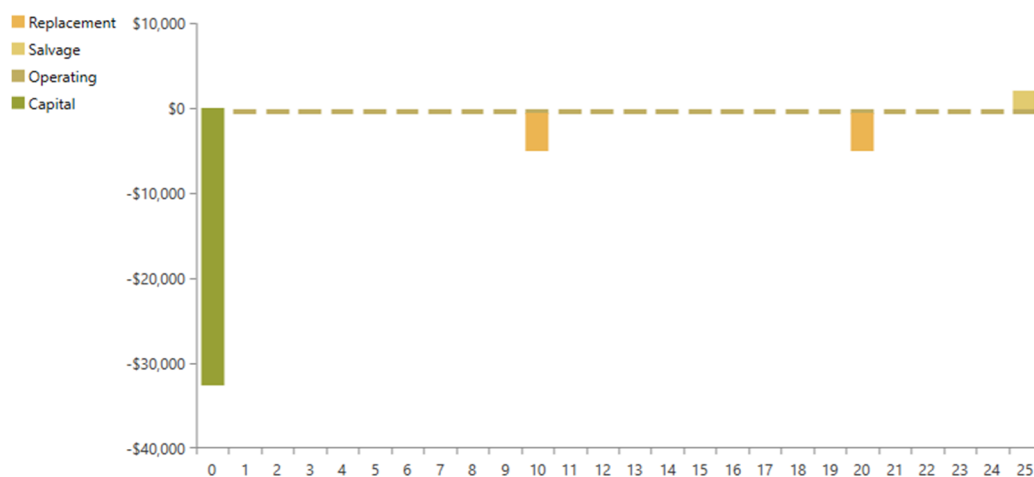
αντικατάστασης (Replacement), τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης (Operating), καθώς και η υπολειπόμενη αξία της επένδυσης (Salvage). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το ανηγμένο κόστος της παραγόμενης ενέργειας (Levelized COE) ανέρχεται σε 0.3036\$/kWh, ενώ το ετήσιο λειτουργικό κόστος, συμπεριλαμβανομένου του κόστους αντικατάστασης και της υπολειπόμενης αξίας, ανέρχεται σε 828.48\$/year.



**Σχήμα 3.20:** Συνολικό ανηγμένο κόστος ανά υποσύστημα.



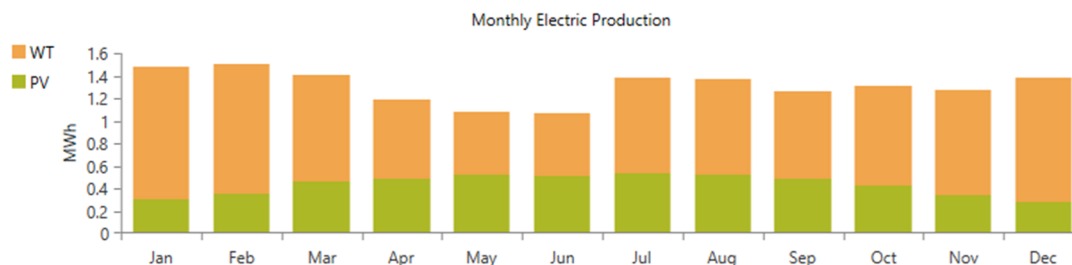
**Σχήμα 3.21:** Ετήσιο κόστος ανά υποσύστημα.



**Σχήμα 3.22:** Ταμειακές ροές ανά έτος.

Εξετάζοντας τα ενεργειακά αποτελέσματα της προσομοίωσης, στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία παραγωγή από την Α/Γ και τα Φ/Β. Όπως είναι φανερό από το σχήμα, αλλά και από τον πίνακα 3.6, η αιολική παραγωγή έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενεργειακή παραγωγή (66.8%), λόγω του υψηλού αιολικού δυναμικού και της αυξημένης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, σε σχέση με τα Φ/Β που παράγουν το 33.2% της συνολικά απαιτούμενης ενέργειας. Επίσης, παρατηρείται αύξηση της ηλιακής παραγωγής

κατά τους εαρινούς και θερινούς μήνες, λόγω της αντίστοιχης αύξησης στην ηλιακή ακτινοβολία (σχήμα 3.15), ενώ η αιολική παραγωγή παρουσιάζει ελάχιστο τους μήνες του Απριλίου, Μαΐου και Ιουνίου, λόγω του χαμηλού αιολικού δυναμικού σε αυτήν την περίοδο (σχήμα 3.12). Ωστόσο, η αιολική παραγωγή είναι αυξημένη τους υπόλοιπους μήνες, παρουσιάζοντας μέγιστο τον μήνα του Φεβρουαρίου.



**Σχήμα 3.23:** Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Production	kWh/yr	%
PV	5,204	33.2
Wind Turbine 4.2kW	10,484	66.8
<b>Total</b>	<b>15,688</b>	<b>100</b>

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	11,452	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
<b>Total</b>	<b>11,452</b>	<b>100</b>

**Πίνακας 3.6:** Παραγωγή ενεργειακών πηγών.

**Πίνακας 3.7:** Καταναλώσεις

Στον πίνακα 3.7 καταγράφονται οι καταναλώσεις της παραγόμενης ενέργειας, με 11,452kWh ενέργειας να καταναλώνονται από το φορτίο EP ετησίως. Στον πίνακα 3.8 φαίνεται η περίσσεια και το έλλειμα ενέργειας στο τέλος ενός έτους. Η περίσσεια ενέργειας εμφανίζεται όταν παράγεται πλεόνασμα ισχύος, το οποίο δεν μπορεί να απορροφηθεί από το φορτίο, και οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες. Εδώ, η περίσσεια ενέργειας ανέρχεται σε 3,829kWh ανά έτος ή 24.4% της συνολικής παραγωγής. Εάν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, η περίσσεια ενέργειας θα πρέπει να καταναλωθεί από κάποιο φορτίο έκτακτης ανάγκης (dump load), το οποίο είναι συνήθως ένας απλός θερμαντήρας αντιστάσεων (ηλεκτρικός λέβητας) ή μια συστοιχία λαμπτήρων. Ο θερμαντήρας μπορεί να μετατρέψει την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια, για την κάλυψη κάποιου θερμικού φορτίου. Εναλλακτικά, η περίσσεια ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ηλεκτροκίνηση οχημάτων [20]. Τέλος, στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και το έλλειμα ισχύος που δημιουργείται, λόγω του περιορισμού 2% στη μέγιστη επιτρεπόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια ανά έτος. Με την συγκεκριμένη τοπολογία, προκύπτει έλλειμα ισχύος 228kWh ανά έτος ή 1.95% της συνολικής παραγωγής.

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	3,829	24.4
Unmet Electric Load	228	1.95
Capacity Shortage	228	1.95

**Πίνακας 3.8:** Περίσσεια – Έλλειμα ενέργειας.

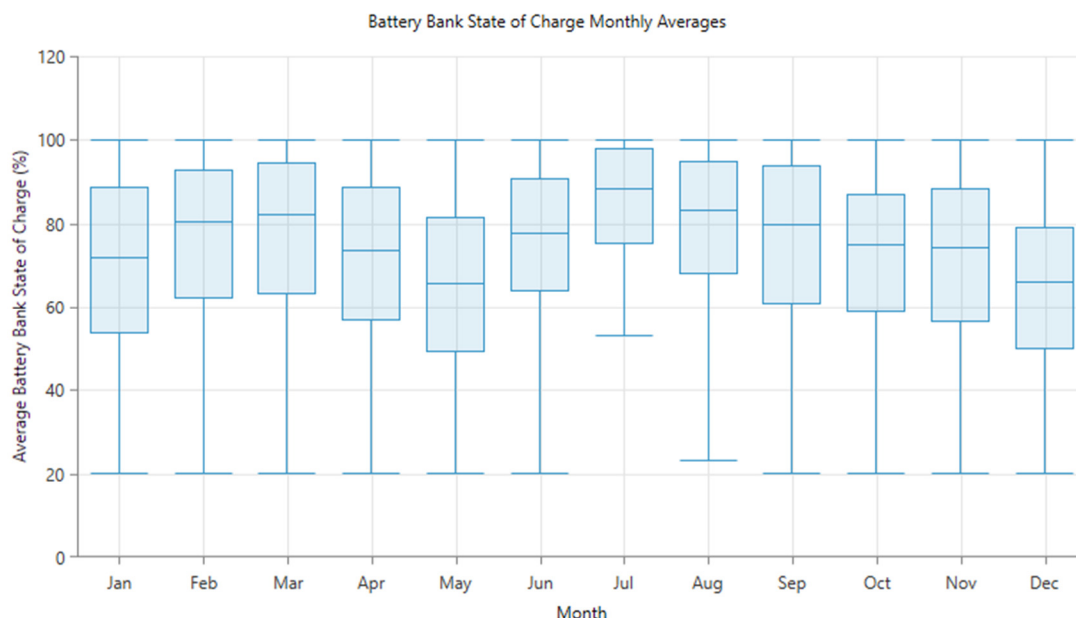
Η ανάλυση του συστήματος αξίζει να επικεντρωθεί και σε μια σύντομη παρουσίαση των στοιχείων λειτουργίας των μπαταριών. Από τον πίνακα 3.9 προκύπτει ότι η συστοιχία

μπαταριών μπορεί να δώσει 22.2 ώρες αυτονομίας στο σύστημα, με ετήσια παραγωγή 3433kWh ανά έτος, η οποία, για τα 10 χρόνια διάρκειας ζωής των μπαταριών, συνεπάγεται 34,328kWh συνολική απόδοση ενέργειας από τη συστοιχία, με απώλειες που ανέρχονται σε 104kWh ανά έτος.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Autonomy	22.2	hr	Average Energy Cost	0	\$/kWh
Storage Wear Cost	0.119	\$/kWh	Energy In	3,477	kWh/yr
Nominal Capacity	37.1	kWh	Energy Out	3,381	kWh/yr
Usable Nominal Capacity	29.7	kWh	Storage Depletion	8.36	kWh/yr
Lifetime Throughput	34,328	kWh	Losses	104	kWh/yr
Expected Life	10.0	yr	Annual Throughput	3,433	kWh/yr

**Πίνακας 3.9:** Χαρακτηριστικά μπαταριών.

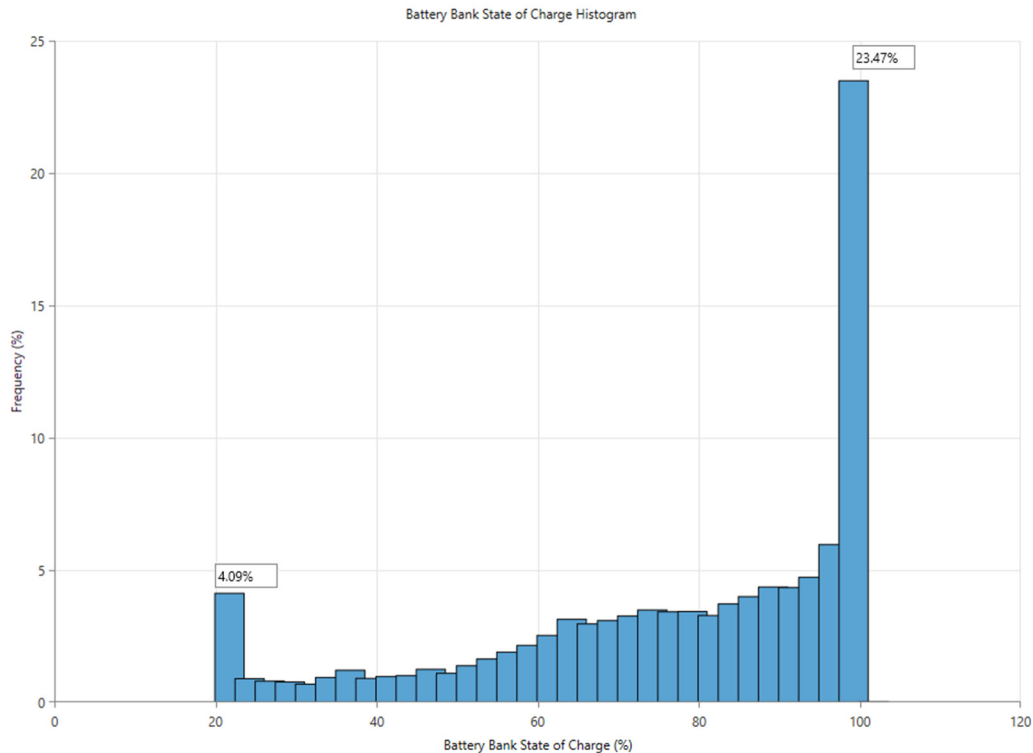
Στη συνέχεια, στο σχήμα 3.24 φαίνεται η ελάχιστη, μέση και μέγιστη κατάσταση φόρτισης (State of Charge) των μπαταριών ανά μήνα, ενώ στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των καταστάσεων φόρτισης των μπαταριών (ιστόγραμμα), στο σύνολο της διάρκειας ζωής τους. Όπως παρατηρείται, η μικρότερη μέση τιμή στην κατάσταση φόρτισης των μπαταριών εμφανίζεται τον μήνα Μάιο, επειδή τότε το αιολικό δυναμικό και, συνεπώς, η αιολική παραγωγή λαμβάνουν τις ελάχιστες τιμές τους και, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Α/Γ έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενεργειακή παραγωγή. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι ότι τον μήνα Ιούλιου η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών δεν μειώνεται πέρα από το 50%, λόγω της υψηλής αιολικής, αλλά και ηλιακής παραγωγής, σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες, όπου οι μπαταρίες εκφορτίζονται πλήρως, μέχρι το τεχνικό ελάχιστο 20%.



**Σχήμα 3.24:** Ελάχιστη, μέση και μέγιστη κατάσταση φόρτισης μπαταριών ανά μήνα.

Ακόμη, από το σχήμα 3.25 προκύπτει ότι οι μπαταρίες βρίσκονται πλήρως φορτισμένες (100%) για το 23.47% της διάρκειας ζωής τους, ενώ βρίσκονται πλήρως εκφορτισμένες (μέχρι το τεχνικό ελάχιστο του 20%) μόλις 4.09% της διάρκειας ζωής τους.

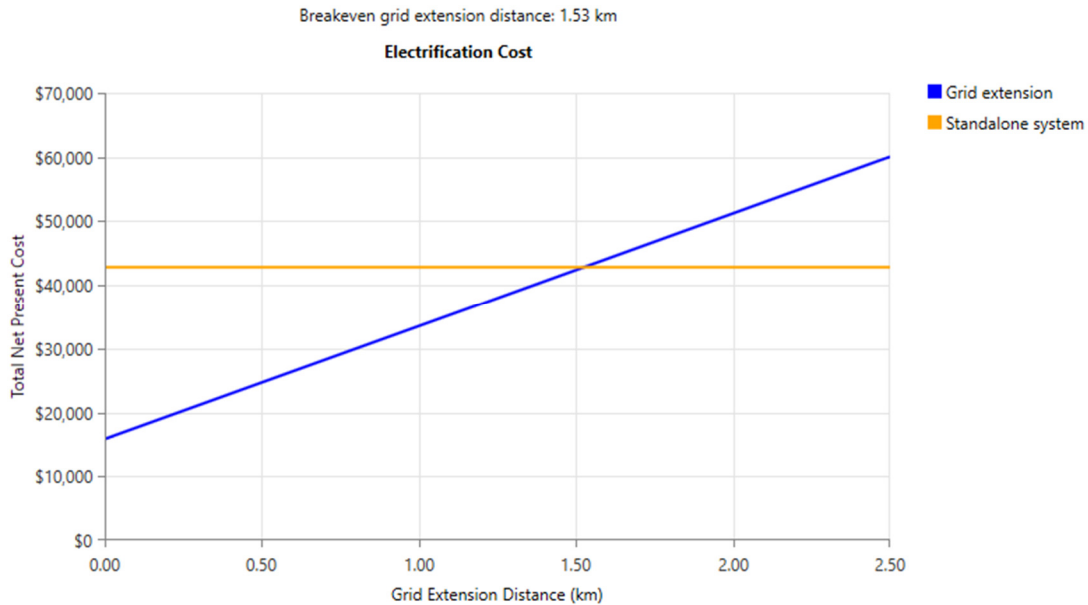
Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι συχνότητες των καταστάσεων φόρτισης που προκύπτουν για τιμές άνω του 50%, είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για καταστάσεις φόρτισης με τιμές κάτω του 50%. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει ότι οι μπαταρίες θα βρίσκονται, ως επί το πλείστον, σε επιθυμητά όρια φορτίσεων, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η διάρκεια ζωής τους, καθώς θα περιορίζεται η σταδιακή φθορά των στοιχείων από βαθιές εκφορτίσεις με την πάροδο του χρόνου.



**Σχήμα 3.25:** Συχνότητες εμφάνισης καταστάσεων φόρτισης μπαταριών.

Ένας τελευταίος παράγοντας που αξίζει να εξεταστεί για την βιωσιμότητα του συστήματος είναι το κόστος του, σε σύγκριση με το κόστος επέκτασης του ηλεκτρικού δικτύου για τη διασύνδεση του απομακρυσμένου φορτίου. Σε αυτήν την μελέτη, η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου θεωρείται ως εναλλακτική για το προτεινόμενο, εκτός δικτύου, υβριδικό σύστημα. Το κόστος επέκτασης του δικτύου είναι συνάρτηση της απόστασης του φορτίου. Το κόστος κεφαλαίου ανά km και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης για την επέκταση με εναέριες γραμμές μέσης τάσης υπολογίζονται σε 10,000\$/km και 200\$/year/km αντίστοιχα [52]. Ωστόσο, δεδομένου του πληθωρισμού, για αυτήν την ανάλυση, το κόστος κεφαλαίου θεωρείται ίσο με 14000\$/km, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης θεωρείται ίσο με 300\$/year/km. Ταυτόχρονα, η τρέχουσα τελική τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για τους καταναλωτές στην Ελλάδα είναι 0.11\$/kWh.

Με τα παραπάνω δεδομένα, στο σχήμα 3.26 παρουσιάζεται το διάγραμμα που αφορά το κόστος της αυτόνομης λειτουργίας του συστήματος, σε αντιδιαστολή με το κόστος επέκτασης του υπάρχοντος δικτύου, μέχρι το απομακρυσμένο φορτίο. Το σημείο τομής των δύο καμπυλών ορίζεται ως η ισοδύναμη απόσταση επέκτασης δικτύου (Breakeven Grid Extension Distance) και υπολογίζεται στα 1.53km, όπως φαίνεται στην κορυφή του διαγράμματος. Αυτό σημαίνει ότι, για αποστάσεις μικρότερες των 1.53km του φορτίου από το δίκτυο, η επέκταση είναι η βέλτιστη λύση, ενώ για αποστάσεις μεγαλύτερες των 1.53km, η επένδυση στο αυτόνομο υβριδικό σύστημα είναι η καλύτερη επιλογή.



**Σχήμα 3.26:** Κόστος επέκτασης ηλεκτρικού δικτύου συναρτήσει της απόστασης και κόστος αυτόνομης λειτουργίας.

Συγκεφαλαιώνοντας, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του συστήματος με το λογισμικό HOMER είναι ίδια με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου LPSP, με μόνη εξαίρεση τη χρήση μπαταριών με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Αν είχαν χρησιμοποιηθεί μπαταρίες με βαθμό απόδοσης ίδιο με τον αντίστοιχο που χρησιμοποιήθηκε στην μέθοδο LPSP, προφανώς τα τελικά αποτελέσματα θα παρουσίαζαν μια μικρή υπερδιαστασιολόγηση στον αριθμό των μπαταριών. Εντούτοις, η χρήση της συγκεκριμένης τοπολογίας για την ετήσια ανάλυση του συστήματος με το λογισμικό, επιβεβαιώνει πως έχει επιτευχθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος.



## 4. Περιγραφή και Έλεγχος Υβριδικού Συστήματος

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται η υλοποίηση του υβριδικού συστήματος, όπως έχει ήδη περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και των τεχνικών ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την εύρυθμη λειτουργία του. Κύριοι στόχοι των συστημάτων ελέγχου είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τις ΑΠΕ, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (μέθοδος MPPT), η διαχείριση των διάφορων ενεργειακών πηγών και η ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να ικανοποιούνται τα διασυνδεδεμένα φορτία του συστήματος, αλλά και να πραγματοποιείται σωστή διαχείριση όλων των υποσυστημάτων που το αποτελούν. Τέλος, σημαντικά κριτήρια για την εφαρμογή του ελέγχου αποτελούν η ενεργειακή απόδοση των υποσυστημάτων και η ποιότητα της παραγόμενης ισχύος.

### 4.2 Διάταξη και περιγραφή του συστήματος

Το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Η διακίνηση της ισχύος γίνεται μέσω του κοινού ζυγού ΣΡ, του οποίου η τάση ορίζεται στα 700V.

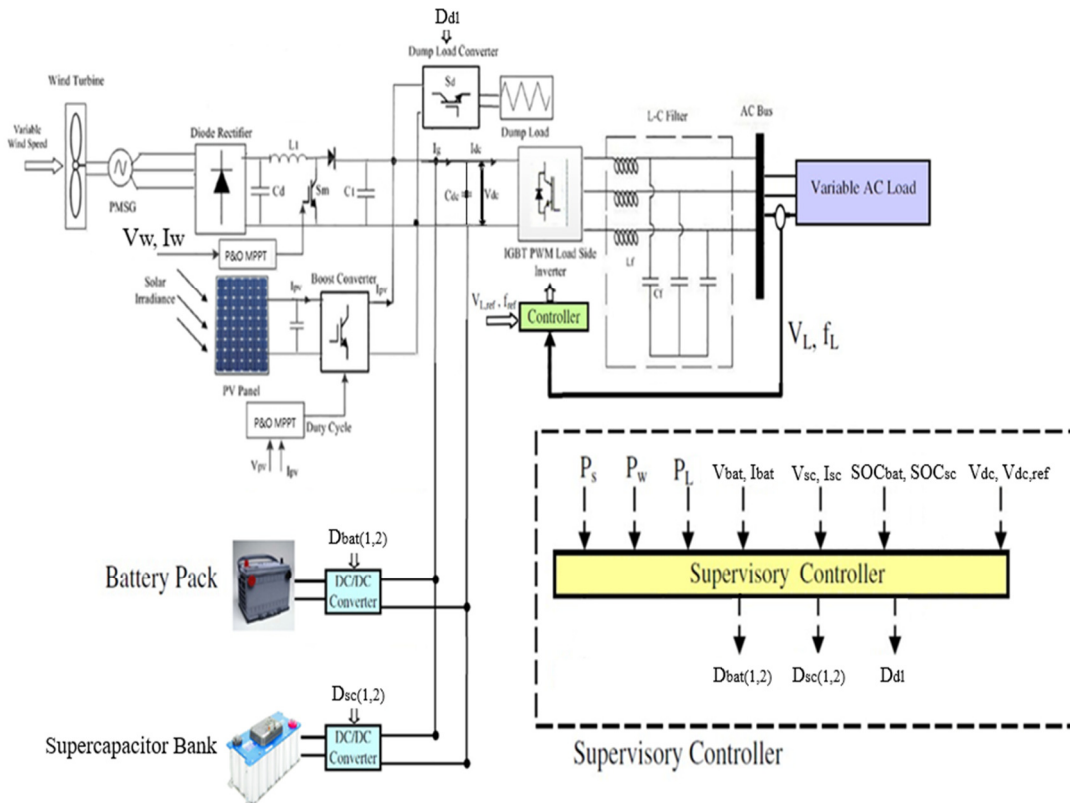
Αναλυτικότερα, η Α/Γ μονίμων μαγνητών – μεταβλητών στροφών έχει ονομαστική ισχύ 4.2kW και ονομαστική τάση εξόδου 340V<sub>peak</sub>. Η τάση εξόδου της Α/Γ ανορθώνεται μέσω μη ελεγχόμενης τριφασικής γέφυρας διόδων. Στη συνέχεια, μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης ΣΡ, η ανορθωμένη τάση ανυψώνεται στα 700V. Η διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα πραγματοποιείται με έναν ελεγκτή ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος, για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Η λειτουργία του ελεγκτή βασίζεται στην μέθοδο των συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων ή, αλλιώς, μέθοδο των μικρών μεταβολών (Perturb and Observe – P&O), η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

Η Φ/Β γεννήτρια έχει συνολική ισχύ 3kW<sub>p</sub> και αποτελείται από 6 Φ/Β συστοιχίες, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει 6 εν σειρά συνδεδεμένα Φ/Β πλαίσια, σύμφωνα με την μοντελοποίηση που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2. Η Φ/Β γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό ΣΡ μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης ΣΡ, η διακοπτική λειτουργία του οποίου πραγματοποιείται μέσω ενός ελεγκτή ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος, για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο αλγόριθμος λειτουργίας του ελεγκτή βασίζεται στην μέθοδο των συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturb and Observe – P&O).

Η συστοιχία των μπαταριών αποτελείται από 10 συνολικά στοιχεία, συνδεδεμένα σε σειρά, δημιουργώντας μία παράλληλη συστοιχία. Με αυτόν τον τρόπο, η συνολική τάση της συστοιχίας μπαταριών θα είναι αυξημένη, ώστε να μπορεί να τροφοδοτεί τον ζυγό ΣΡ, μέσω του αμφίδρομου μετατροπέα. Για κάθε στοιχείο καθορίζεται χωρητικότητα 3000Ah και τάση 24V, με αποτέλεσμα η συστοιχία των μπαταριών, συνολικά, να απαιτεί τάση 240V (10 στοιχεία σε σειρά) και να διαθέτει 3000Ah χωρητικότητα. Η σύνδεση της συστοιχίας των μπαταριών στον ζυγό ΣΡ πραγματοποιείται μέσω ενός αμφίδρομου μετατροπέα ΣΡ, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αμφίδρομη ροή της ισχύος, τόσο για την φόρτιση των μπαταριών, όσο και για την εκφόρτισή τους. Ο έλεγχος αυτού του μετατροπέα γίνεται με τη χρήση ελεγκτή τριών όρων (ελεγκτής PID), μέσω της τεχνικής PWM, και βασίζεται στη λογική σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού. Η λειτουργία του ελεγκτή θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.



Η συστοιχία των υπερπυκνωτών αποτελείται από 10 στοιχεία συνδεδεμένα εν σειρά, με μέγιστη τάση 16V ανά στοιχείο, δημιουργώντας συνολικά μία συστοιχία υπερπυκνωτών με συνολική τάση 160V και χωρητικότητα 1000F. Κατ' αντιστοιχία με τις μπαταρίες, η σύνδεση της συστοιχίας υπερπυκνωτών στον ζυγό ΣΡ πραγματοποιείται μέσω ενός αμφίδρομου μετατροπέα ΣΡ, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αμφίδρομη ροή της ισχύος, τόσο για την φόρτιση των υπερπυκνωτών, όσο και για την εκφόρτισή τους. Ο έλεγχος αυτού του μετατροπέα γίνεται και εδώ με τη χρήση ελεγκτή τριών όρων (ελεγκτής PID), μέσω της τεχνικής PWM, και λογικής σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού. Η λειτουργία του ελεγκτή θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.



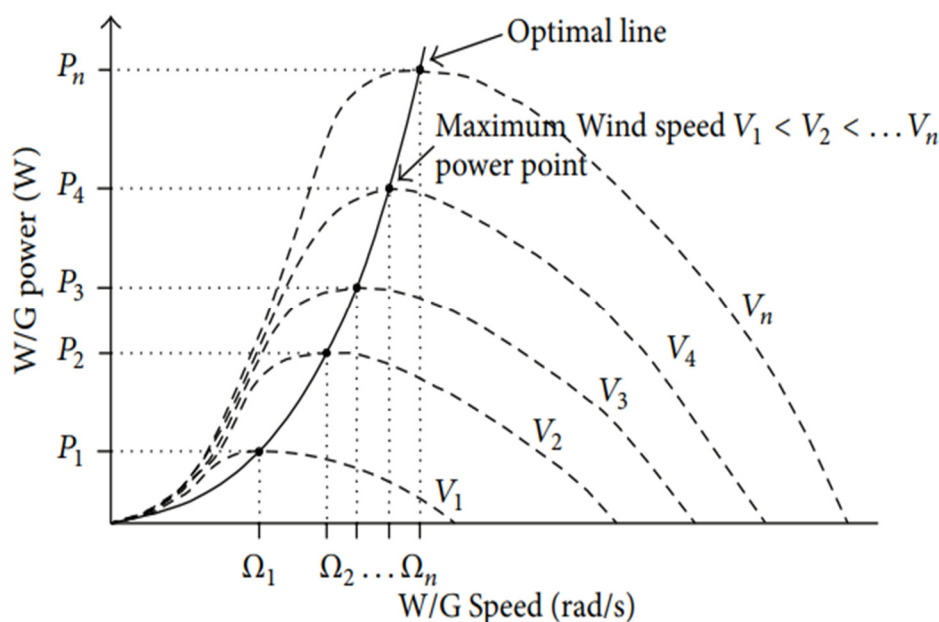
**Σχήμα 4.1:** Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού συστήματος ενέργειας.

Το φορτίο έκτακτης ανάγκης (Dump Load) χρησιμοποιείται για την κατανάλωση της περίσσειας ισχύος, όταν αυτή δεν μπορεί να απορροφηθεί από τις υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος. Το φορτίο αυτό είναι ωμικού τύπου και η συνδεσμολογία του με τον ζυγό ΣΡ έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2. Ο έλεγχος του φορτίου βασίζεται στη λογική σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού. Το προς κατανάλωση φορτίο συνδέεται στον ζυγό ΕΡ μέσω ενός αντιστροφέα, του οποίου ο έλεγχος βασίζεται στη σταθεροποίηση της τάσης του φορτίου.

Τέλος, ο βασικός ελεγκτής (supervisory controller) ελέγχει την σύνδεση και την αποσύνδεση των μονάδων αποθήκευσης (μπαταρίες και υπερπυκνωτές), σε περιπτώσεις ελλείμματος και περίσσειας ισχύος αντίστοιχα, καθώς και την σύνδεση και αποσύνδεση του φορτίου έκτακτης ανάγκης, όποτε αυτό είναι απαραίτητο. Η λειτουργία του βασικού ελεγκτή αναλύεται σε επόμενη ενότητα. Ενδεικτικά, εδώ αναφέρεται ότι οι βασικές μονάδες ελέγχου του ελεγκτή δίνουν προτεραιότητα στη συστοιχία υπερπυκνωτών, για την κάλυψη των πολύ γρήγορων μεταβατικών φαινομένων, ιδιαίτερα κατά τη σύνδεση των μονάδων αποθήκευσης, ώστε να βελτιώνεται η μεταβατική απόκριση του συστήματος και η διάρκεια ζωής των μπαταριών.

### 4.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT)

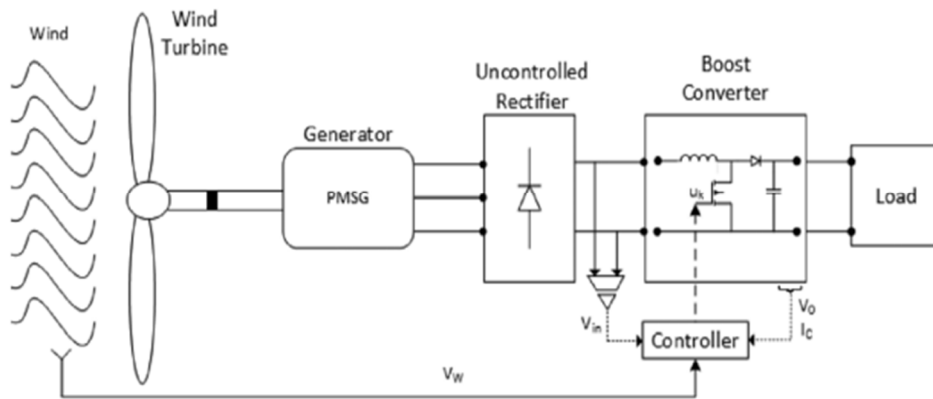
Όπως έχει αναφερθεί και στο δεύτερο κεφάλαιο, η Α/Γ απορροφά τη μέγιστη δυνατή αιολική ισχύ, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, στο σημείο της καμπύλης όπου το γινόμενο της ροπής με τις στροφές μεγιστοποιείται. Συνδυάζοντας τα σημεία αυτά, για κάθε ταχύτητα ανέμου, διαμορφώνεται η βέλτιστη χαρακτηριστική ροπής στροφών, πάνω στην οποία θα πρέπει να λειτουργεί το σύστημα ώστε να λαμβάνεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από τον άνεμο, κάθε χρονική στιγμή. Αυτή η διαδικασία ελέγχου ονομάζεται Ανεύρεση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η καμπύλη μέγιστης ισχύος της Α/Γ, πάνω στην οποία οφείλει να λειτουργήσει, ώστε παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς στην έξοδο.



**Σχήμα 4.2:** Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος στροφών και καμπύλη μέγιστης ισχύος λειτουργίας [53].

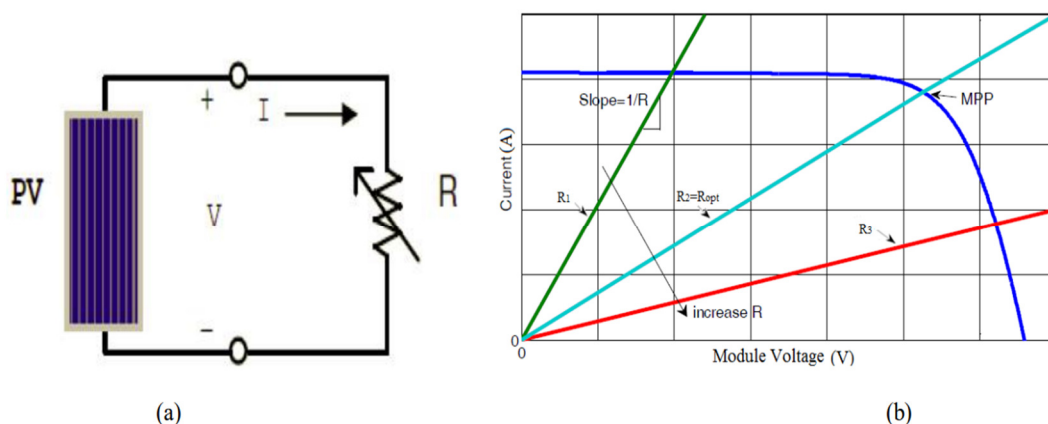
Ο έλεγχος MPPT πραγματοποιείται από ελεγκτές που ρυθμίζουν τις στροφές της Α/Γ, ακολουθώντας συγκεκριμένες τεχνικές (αλγορίθμους). Οι ελεγκτές αυτοί ονομάζονται MPPT ελεγκτές και χρησιμοποιούν ποικίλους αλγορίθμους ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας. Αρχή λειτουργίας των αλγορίθμων είναι ο έλεγχος των στροφών της Α/Γ με τέτοιο τρόπο, ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου, το σύστημα να λειτουργεί υπό μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή,  $C_{pmax}$ , ο οποίος συνηθίζεται να λαμβάνει τιμές από 0.4 έως 0.5. Για διάφορες ταχύτητες ανέμου και ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή ανάλογα με το αν τα σημεία λειτουργίας βρίσκονται δεξιά ή αριστερά από το σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης του σχήματος 4.2, ο ελεγκτής αναλαμβάνει κατάλληλη δράση, μειώνοντας και αυξάνοντας αντίστοιχα τις στροφές της Α/Γ, μετακινώντας τα σημεία λειτουργίας του συστήματος πάνω στην βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα, για κάθε σημείο λειτουργίας, μπορεί να διατηρεί μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή,  $C_{pmax}$ , και, κατ' επέκταση, να αποδίδει μέγιστη ισχύ εξόδου, για όλες τις ταχύτητες ανέμου, κάθε χρονική στιγμή [20], [26].

Η στρατηγική ελέγχου MPPT βασίζεται στην παρακολούθηση της ισχύος εξόδου της Α/Γ, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος εξόδου της, καθώς και στη χρήση ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης, του οποίου η λειτουργία καθορίζεται από τον ελεγκτή MPPT (σχήμα 4.3) [53]. Μέσω της ρύθμισης του λόγου κατάτμησης (duty cycle) του ημιαγωγικού στοιχείου του μετατροπέα ανύψωσης από τον ελεγκτή MPPT, επέρχεται άμεση μεταβολή στο ρεύμα του ανορθωτή και, συνεπώς, στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται, τελικά, η ρύθμιση των στροφών του άξονα της Α/Γ και της ισχύος εξόδου της.



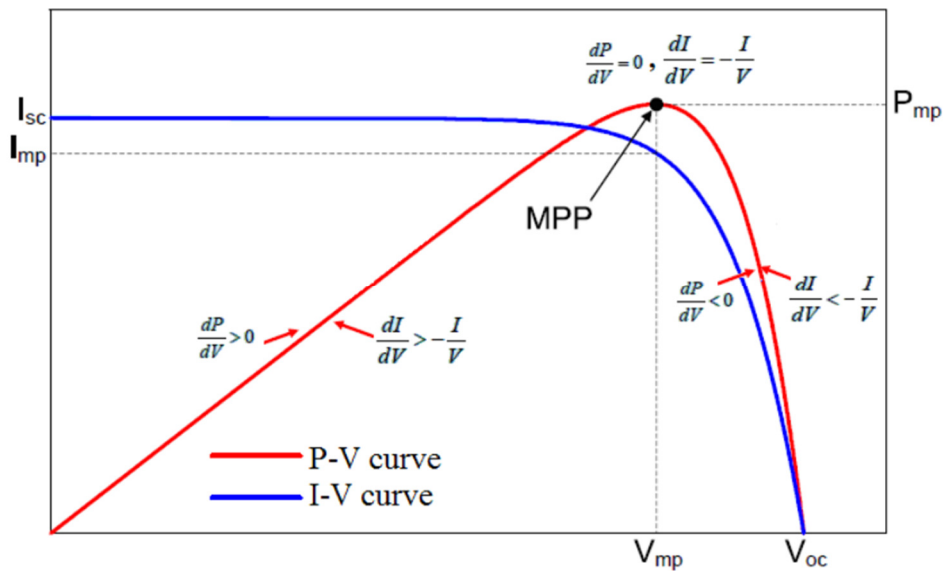
**Σχήμα 4.3:** Σύστημα ελέγχου Α/Γ μεταβλητών στροφών για την ανεύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας [54].

Κατ' αντιστοιχία με την Α/Γ, ανάλογος έλεγχος πραγματοποιείται και στην Φ/Β γεννήτρια. Ανεξάρτητα από τον τελικό προορισμό της ηλιακής ενέργειας, η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς ισχύος από το ηλιακό στοιχείο εξαρτάται τόσο από την ποσότητα του ηλιακού φωτός που πέφτει στα ηλιακά πλαίσια, όσο και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φορτίου. Τα ηλιακά κύτταρα έχουν μια περίπλοκη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ολικής αντίστασης, η οποία παράγει μια μη γραμμική απόδοση εξόδου που μπορεί να αναλυθεί με βάση την καμπύλη I-V. Όταν ένας ηλιακός συλλέκτης συνδέεται απευθείας με ένα φορτίο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.4(a), το σημείο λειτουργίας του ηλιακού πλαισίου θα βρίσκεται στη διασταύρωση της καμπύλης I-V και της γραμμής του φορτίου, που έχει κλίση  $1/R_{load}$ . Γενικά, αυτό το σημείο δεν βρίσκεται πάντα στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) του ηλιακού συλλέκτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4(b). Μια τέτοια κατάσταση παράγει λιγότερη ισχύ από την μέγιστη που μπορεί να παράγει το Φ/Β στοιχείο.

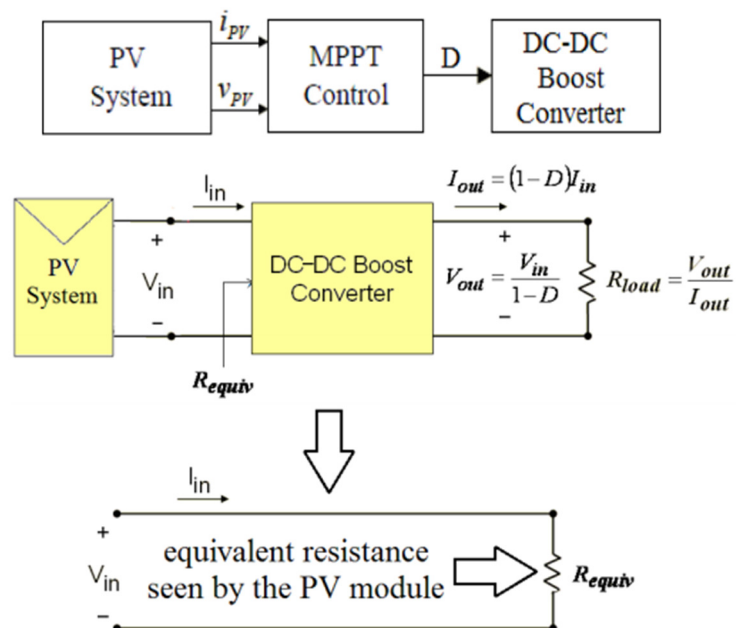


**Σχήμα 4.4:** (a) Απευθείας σύνδεση Φ/Β σε ωμικό φορτίο, (b) I-V χαρακτηριστική Φ/Β σε διαφορετικά φορτία [55].

Συνεπώς, με τον υπολογισμό του χαρακτηριστικού φορτίου που δίνει την υψηλότερη απόδοση μεταφοράς ισχύος, η απόδοση του συστήματος βελτιστοποιείται σε ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης – έντασης, στο οποίο το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Καθώς, όμως, η ποσότητα του ηλιακού φωτός ποικίλλει, η τάση εξόδου του Φ/Β στοιχείου μεταβάλλεται επίσης [55]. Είναι, λοιπόν, επιθυμητό, σε κάθε χρονική στιγμή, το Φ/Β να μην παράγει την τάση και την ένταση, όπως αυτές καθορίζονται από το φορτίο, αλλά να δίνει στην έξοδο εκείνο το ζεύγος τάσης – έντασης,  $V_{mp} - I_{mp}$ , το οποίο θα μεγιστοποιεί την ισχύ του (σχήμα 4.5) [20].



**Σχήμα 4.5:** P-V και I-V χαρακτηριστικές Φ/Β και κλίσεις των καμπυλών σε διάφορες περιοχές [55].

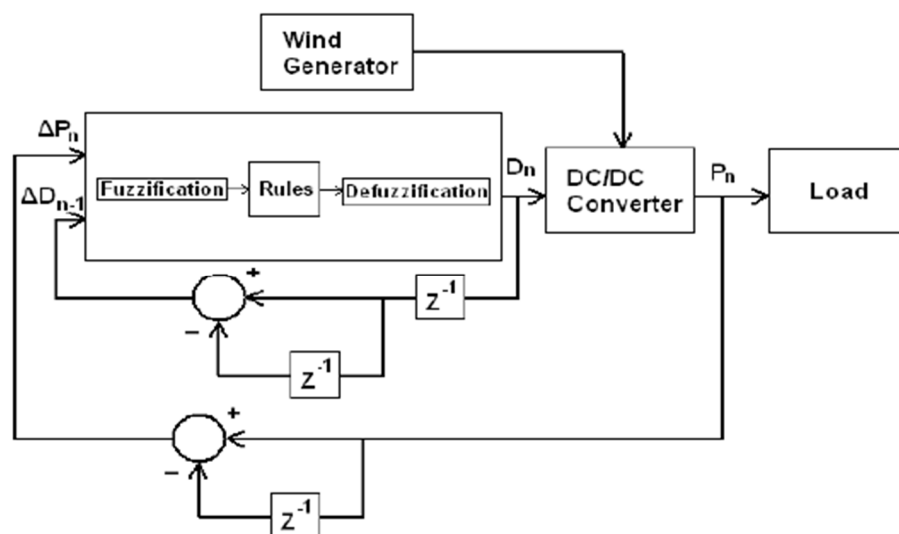


**Σχήμα 4.6:** Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου MPPT Φ/Β γεννήτριας [55].

Όπως και με την Α/Γ, οι ελεγκτές ΜΡΡΤ των Φ/Β υλοποιούνται με έναν ελεγχόμενο μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Ελέγχοντας τον λόγο κατάτμησης (duty cycle) του μετατροπέα, ελέγχεται κατάλληλα το ρεύμα εξόδου του Φ/Β, ώστε να ανταποκρίνεται στο σημείο τάσης-έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου, ανάλογα με τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 4.6).

### 4.3.1 Έλεγχος ΜΡΡΤ ανεμογεννήτριας με ελεγκτή ασαφούς λογικής

Η αρχή λειτουργίας του Fuzzy Logic ελεγκτή (σχήμα 4.7) είναι η πραγματοποίηση συνεχών μεταβολών του λόγου κατάτμησης (duty cycle) του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ώστε να εντοπίσει το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος εκτελείται μέσω ρύθμισης του λόγου κατάτμησης  $D$  του ημιαγωγικού στοιχείου [20].



Σχήμα 4.7: Δομικό διάγραμμα ελεγκτή ασαφούς λογικής Α/Γ [20].

Το παραπάνω σύστημα ελέγχου μετρά την ισχύ εξόδου της Α/Γ και την συγκρίνει με την αμέσως προηγούμενη. Αν είναι μεγαλύτερη, τότε δίνεται εντολή για μεταβολή του λόγου κατάτμησης  $D$  προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), ενώ αν είναι μικρότερη, τότε η μεταβολή του  $D$  γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αμέσως προηγούμενη. Για να μπορεί ο ελεγκτής να υπολογίσει την κατεύθυνση του λόγου κατάτμησης πριν την εντολή, εισάγεται στο σύστημα, εκτός από τη μεταβολή της ισχύος εξόδου, και η μεταβολή του ανορθωμένου ρεύματος της γεννήτριας, το οποίο εξαρτάται άμεσα από τον λόγο κατάτμησης  $D$ . Με αυτόν τον τρόπο, ο ελεγκτής λειτουργεί με μία λογική αύξησης του ρεύματος της γεννήτριας, έως ότου η εντολή για αύξηση επιφέρει μείωση της ισχύος, και μείωση του ρεύματος της γεννήτριας, έως ότου η εντολή για μείωση επιφέρει και πάλι μείωση της ισχύος. Παρ' όλα αυτά, η μεταβολή του  $D$  είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας, με αποτέλεσμα μια εντολή για αύξηση του ρεύματος να οδηγεί σε μείωση του  $D$ , και αντίστροφα [26].

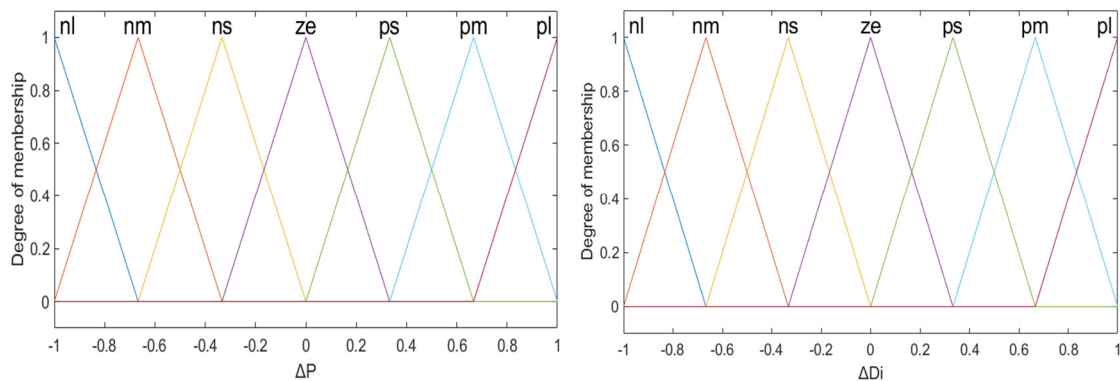
Ο αλγόριθμος ανίχνευσης μέγιστου σημείου λειτουργίας του ελεγκτή ασαφούς λογικής περιλαμβάνει τρεις χωριστές διαδικασίες. Αρχικά, πραγματοποιείται η διαδικασία της ασαφοποίησης (fuzzification), δηλαδή του καθορισμού των εισόδων και των εξόδων της συνάρτησης συμμετοχής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων, με βάση κάποιων κανόνων (rules), και, τέλος, η διαδικασία

της αποσαφοποίησης (defuzzification), όπου, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες μεθόδους, λαμβάνεται η τιμή του λόγου κατάτμησης από το σύνολο των αποτελεσμάτων. Κατά τη διαδικασία της ασαφοποίησης, οι συναρτήσεις συμμετοχής μετατρέπουν τις μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή σε τιμές συμμετοχής από 0 έως 1. Για τον συγκεκριμένο ελεγκτή, οι συναρτήσεις συμμετοχής επιλέχθηκαν τριγωνικές (σχήματα 4.8, 4.9), για λόγους απλότητας και μικρότερου υπολογιστικού κόστους. Οι εισοδοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου,  $\Delta P_n$ , μεταξύ των συμβάντων  $n$  και  $n-1$ , αλλά και οι μεταβολές του λόγου κατάτμησης,  $\Delta D_{n-1}$ , μεταξύ των συμβάντων  $n-1$  και  $n-2$ , σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

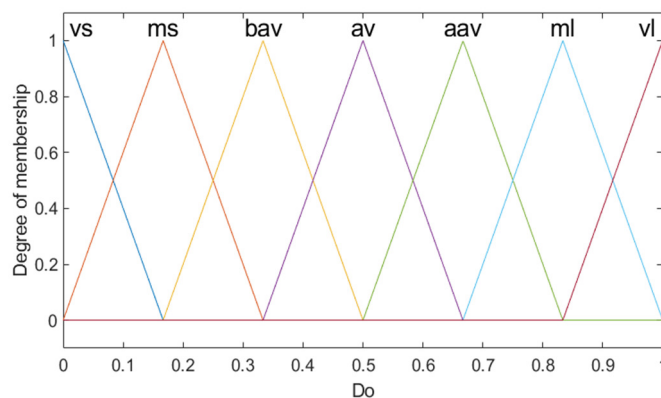
$$\Delta P_n = P_n - P_{n-1} \quad (4.1)$$

$$\Delta D_n^i = D_{n-1}^0 - D_{n-2}^0 \quad (4.2)$$

Κατά την διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, ο ελεγκτής ασαφούς λογικής πρέπει να αποφασίζει κάθε φορά τον καλύτερο τρόπο ελέγχου του φυσικού συστήματος. Η απόφαση προκύπτει με την ασαφή διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων. Οι γνώσεις που απαιτούνται βρίσκονται στη βάση ασαφών κανόνων, σύμφωνα με τους if-then κανόνες που έχουν οριστεί. Στο πίνακα 4.1 συνοψίζονται οι κανόνες στους οποίους υπακούει η ασαφής λογική ελέγχου [25].



**Σχήμα 4.8:** Συναρτήσεις συμμετοχής ασαφών μεταβλητών εισόδου  $\Delta P_n$  και  $\Delta D_{n-1}$ .



**Σχήμα 4.9:** Συναρτήσεις συμμετοχής ασαφούς μεταβλητής εξόδου  $D_n$ .

$\Delta D_n^i / \Delta P_n$	<i>nl</i>	<i>nm</i>	<i>ns</i>	<i>ze</i>	<i>ps</i>	<i>pm</i>	<i>pl</i>
<i>nl</i>	vl	vl	ml	bav	ms	vs	vs
<i>nm</i>	vl	ml	aav	bav	bav	ms	vs
<i>ns</i>	ml	aav	aav	av	bav	bav	vs
<i>ze</i>	vs	ms	bav	av	aav	ml	vl
<i>ps</i>	ms	bav	bav	av	aav	aav	ml
<i>pm</i>	vs	ms	bav	aav	aav	ml	vl
<i>pl</i>	vs	vs	ms	ml	ml	vl	vl

*Είσοδοι:* *nl* = negative large, *nm* = negative medium, *ze* = zero, *ps* = positive small, *pm* = positive medium, *pl* = positive large

*Έξοδοι:* *vs* = very small, *av* = average, *ms* = medium small, *aav* = above average, *bav* = below average, *ml* = medium large, *vl* = very large

#### Πίνακας 4.1: Κανόνες ασαφούς λογικής

Ωστόσο, αν και ο ελεγκτής ασαφούς λογικής μπορεί να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα κατά την ανίχνευση του σημείου βέλτιστης ισχύος, στην πράξη οδηγεί σε μεγάλες καθυστερήσεις του χρόνου προσομοίωσης του συστήματος, γεγονός που τον καθιστά δύσχρηστο. Συνεπώς, είναι καταλληλότερη η χρήση ενός P&O ελεγκτή, τόσο για την Α/Γ, όσο και για την Φ/Β γεννήτρια, η λειτουργία του οποίου αναλύεται παρακάτω.

#### 4.3.2 Έλεγχος MPPT Φ/Β γεννήτριας και Α/Γ μέσω μικρών μεταβολών

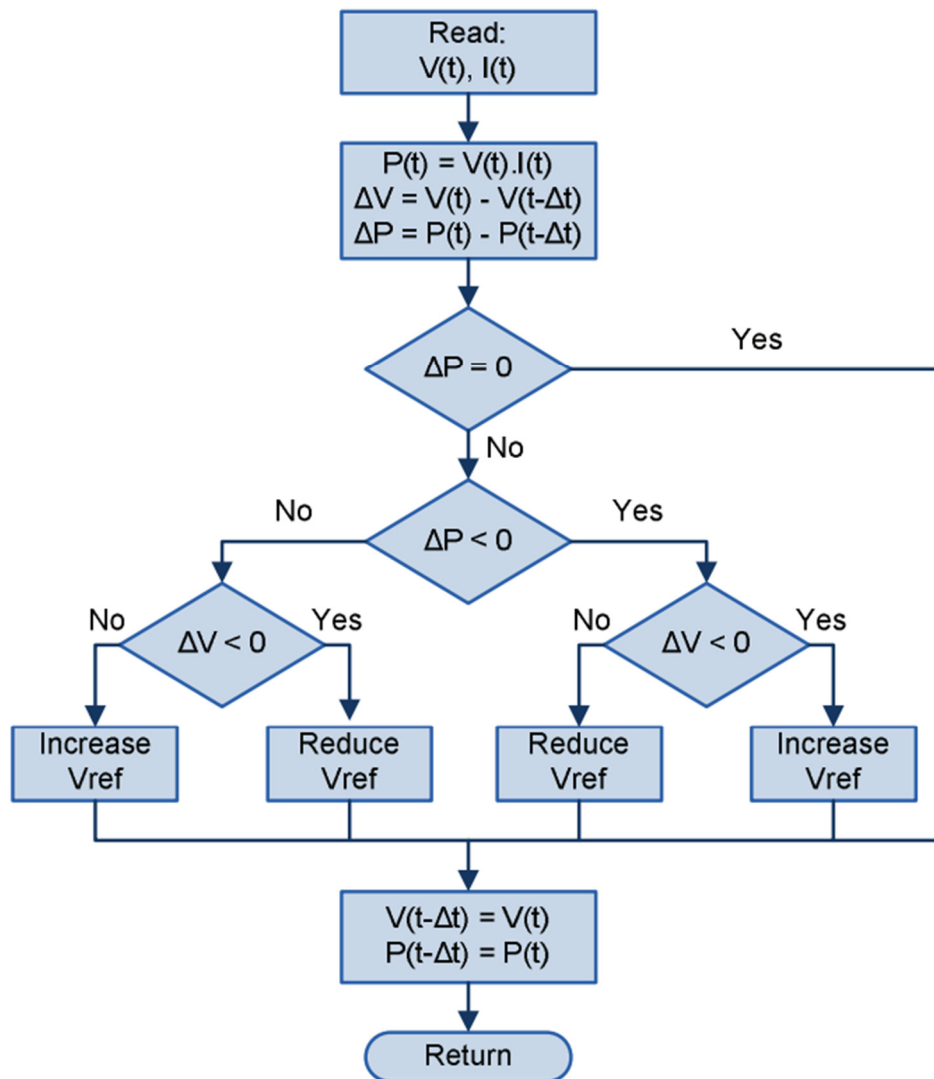
Η τεχνική ελέγχου για την ανεύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος της Φ/Β γεννήτριας και της Α/Γ βασίζεται στην μέθοδο ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών. Ο ελεγκτής μικρών μεταβολών, η αλλιώς P&O ελεγκτής, πραγματοποιεί συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις της ισχύος εξόδου, προς αναζήτηση του σημείου λειτουργίας που παράγει τη μέγιστη ισχύ. Το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10.

Η μέθοδος P&O λειτουργεί περιοδικά, αυξάνοντας ή μειώνοντας την τερματική τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας και της Α/Γ, συγκρίνοντας την ισχύ που λαμβάνεται στον τρέχοντα κύκλο, με την ισχύ του προηγούμενου κύκλου. Εάν η τάση μεταβάλλεται και η ισχύς αυξηθεί, το σύστημα ελέγχου αλλάζει το σημείο λειτουργίας προς αυτήν την κατεύθυνση, διαφορετικά αλλάζει το σημείο λειτουργίας προς την αντίθετη κατεύθυνση. Προφανώς, η μεταβολή της τάσης σε επίπεδο ελέγχου πραγματοποιείται με κατάλληλη μεταβολή του λόγου κατάτμησης (duty ratio). Μόλις γίνει γνωστή η κατεύθυνση για την αλλαγή του ρεύματος, το ρεύμα μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό [56].



Η γενική φιλοσοφία του P&O ελεγκτή είναι ότι για την επίτευξη του σημείου μέγιστης ισχύος, διαταράσσεται η τάση του στοιχείου κατά ένα μικρό πλάτος ( $\Delta V$ ) και παρατηρείται η αλλαγή της ισχύος του ( $\Delta P$ ). Με άλλα λόγια, θα πρέπει να μεταβληθεί (αύξηση ή μείωση) ο λόγος κατάτμησης,  $D$ , προς μία κατεύθυνση, μέχρι η ενεργός ισχύς να μην παρουσιάζει, πλέον, αύξηση, και η κατεύθυνση να αντιστραφεί [55]. Οι αρχικοποιήσεις των παραμέτρων, όπως το βήμα αλλαγής και η περίοδος εκτέλεσης του αλγορίθμου παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για τη σωστή λειτουργία του ελέγχου και πρέπει να προσαρμόζονται κατάλληλα, ώστε να επιτρέπεται η ισορροπία μεταξύ ταχύτερης απόκρισης και λιγότερων διακυμάνσεων, σε σταθερή κατάσταση [20].

Η χρήση αυτού του ελεγκτή ενδείκνυται σε αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα, εξασφαλίζοντας ανεξάρτητη λειτουργία από τη βέλτιστη καμπύλη ισχύος. Επιπλέον, το απλό και χαμηλό υπολογιστικό κόστος της μεθόδου, την καθιστούν ακόμη πιο ελκυστική, καθώς απαιτείται μόνο η μέτρηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού ή αιολικού στοιχείου για την λειτουργία της. Ωστόσο, ένα συχνό πρόβλημα στις μεθόδους P&O είναι ότι η τερματική τάση εξόδου του προς μέτρηση στοιχείου διαταράσσεται σε κάθε κύκλο, ακόμα και όταν έχει επιτευχθεί το σημείο μέγιστης ισχύος, με αποτέλεσμα να προκαλούνται μικρές απώλειες ισχύος.



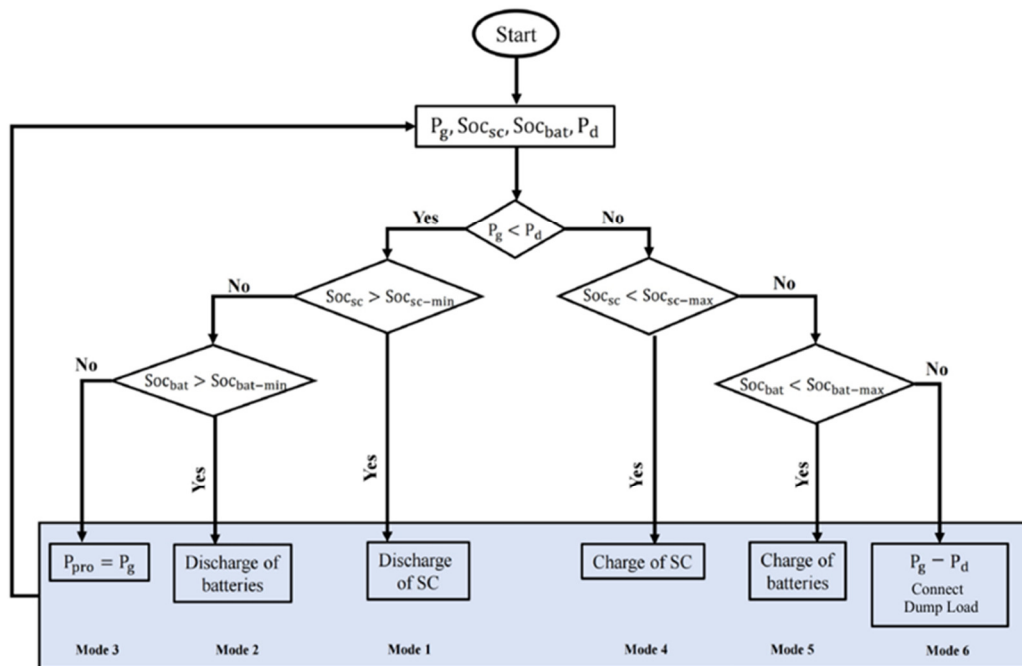
**Σχήμα 4.10:** Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου υλοποίησης ελεγκτή P&O [56].



#### 4.4 Αλγόριθμος λειτουργίας διαχειριστικού ελέγχου

Κύριος σκοπός του διαχειριστικού ελέγχου του συστήματος είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο, κατά την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος. Η απόδοση του αλγορίθμου ελέγχου θα αξιολογηθεί μελετώντας την απόκριση του συστήματος σε σταθερές και μεταβατικές καταστάσεις. Ως βασικοί στόχοι των ελεγκτών του διαχειριστικού συστήματος καθορίζονται οι εξής [20]:

- Η ζήτηση ισχύος των διασυνδεδεμένων φορτίων θα πρέπει πάντα να ικανοποιείται, τουλάχιστον για φορτία τα οποία θεωρούνται συνηθισμένα βάσει της διαστασιολόγησης.
- Όλες οι συνιστώσες του συστήματος οφείλουν να λειτουργούν σύμφωνα με τους λειτουργικούς περιορισμούς των επί μέρους στοιχείων που τις αποτελούν.
- Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια (μπαταρίες, υπερπυκνωτές) που καταναλώνεται θα πρέπει να αποκαθίσταται μετά από έναν κύκλο λειτουργίας, εάν αυτό είναι δυνατό.
- Η υψηλή ποιότητα της παραγόμενης ισχύος είναι απαραίτητη, ελλείψει άλλου συστήματος σταθεροποίησης τάσης από το δίκτυο (αυτόνομη λειτουργία).



Σχήμα 4.11: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου διαχειριστικού ελέγχου βασικού ελεγκτή.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του διαχειριστικού ελέγχου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11. Ο βασικός ελεγκτής μετράει δειγματοληπτικά την ισχύ που παράγεται από τις κύριες ενεργειακές πηγές, δηλαδή την ισχύ της Α/Γ,  $P_{WT}$ , και την ισχύ της Φ/Β γεννήτριας,  $P_{PV}$ , υπολογίζοντας την συνολικά παραγόμενη ισχύ σύμφωνα με την σχέση:

$$P_g = P_{WT} + P_{PV} \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη ισχύ του φορτίου,  $P_d$  ( $P_{load} = P_d$ ), καθώς και την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και των υπερπυκνωτών κάθε χρονική στιγμή, υπολογίζει το έλλειμμα ή την περίσσεια ισχύος του συστήματος, συγκρίνοντας την συνολικά παραγόμενη ισχύ ( $P_g$ ) με την απαιτούμενη ισχύ του φορτίου ( $P_d$ ). Παρατηρώντας τον αλγόριθμο του σχήματος 4.11, διακρίνονται 6 καταστάσεις λειτουργίας (modes) του συστήματος: οι καταστάσεις 1-3, για τις οποίες η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει μικρότερη της απαιτούμενης για το φορτίο (έλλειμμα ισχύος) και οι καταστάσεις 4-6, για τις οποίες η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη (ή ίση) της απαιτούμενης για το φορτίο (περίσσεια ισχύος).

Στην περίπτωση που δημιουργείται περίσσεια ισχύος, δηλαδή η παραγωγή ξεπερνά την ζήτηση του φορτίου ( $P_g \geq P_d$ ), αυτή διοχετεύεται, σε πρώτο στάδιο, στους υπερπυκνωτές. Όσο το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι μικρότερο της μέγιστης τιμής του,  $SOC_{sc} < SOC_{sc_{max}}$ , τότε ενεργοποιείται η κατάσταση λειτουργίας 4 (mode 4 – Charge of SC) και οι υπερπυκνωτές απορροφούν την περίσσεια ισχύος, σύμφωνα με την σχέση:

$$P_{sc} = P_g - P_d \quad (4.4)$$

Αν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι ίσο με τη μέγιστη τιμή,  $SOC_{sc} = SOC_{sc_{max}}$ , τότε οι υπερπυκνωτές είναι πλήρως φορτισμένοι. Όσο το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών είναι μικρότερο της μέγιστης τιμής του,  $SOC_{bat} < SOC_{bat_{max}}$ , τότε ενεργοποιείται η κατάσταση λειτουργίας 5 (mode 5 – Charge of batteries) και οι μπαταρίες απορροφούν την περίσσεια ισχύος, σύμφωνα με την σχέση:

$$P_{bat} = P_g - P_d \quad (4.5)$$

Αν τα επίπεδα φόρτισης τόσο των υπερπυκνωτών, όσο και των μπαταριών είναι ίσα με τις μέγιστες τιμές τους,  $SOC_{sc} = SOC_{sc_{max}}$  και  $SOC_{bat} = SOC_{bat_{max}}$ , αντίστοιχα, όλες οι μονάδες αποθήκευσης είναι πλήρως φορτισμένες. Συνεπώς, η περίσσεια ισχύος δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα, οπότε ενεργοποιείται η κατάσταση λειτουργίας 6 (mode 6 – Connect Dump Load) και η περίσσεια ισχύος διοχετεύεται στο φορτίο έκτακτης ανάγκης (Dump Load) για την αποφυγή υπερτάσεων, σύμφωνα με την σχέση:

$$P_{Dl} = P_g - P_d \quad (4.6)$$

Στην περίπτωση που δημιουργείται έλλειμμα ισχύος, δηλαδή η ζήτηση του φορτίου ξεπερνά την παραγωγή ( $P_g < P_d$ ), τότε αυτό καλύπτεται και πάλι, σε πρώτο στάδιο, από τους υπερπυκνωτές. Όσο το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι μεγαλύτερο της ελάχιστης τιμής του,  $SOC_{sc} > SOC_{sc_{min}}$ , τότε ενεργοποιείται η κατάσταση λειτουργίας 1 (mode 1 – Discharge of SC) και οι υπερπυκνωτές εκφορτίζονται, για να αντισταθμίσουν το έλλειμμα ισχύος, σύμφωνα με την σχέση:

$$P_{pro} = P_g + P_{sc} \quad (4.7)$$

Οι υπερπυκνωτές καλύπτουν γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα, έως ότου η συστοιχία των μπαταριών να μπορεί να αναλάβει πλήρως την τάση του ζυγού, λόγω της πιο αργής απόκρισης των μπαταριών. Με αυτόν τον τρόπο, οι υπερπυκνωτές υποβοηθούν την λειτουργία των μπαταριών για την κάλυψη του ελλείματος ισχύος, βελτιώνοντας την διάρκεια ζωής τους, αλλά και την απόκριση του συστήματος.

Αν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι ίσο με την ελάχιστη τιμή,  $SOC_{sc} = SOC_{sc_{min}}$ , τότε οι υπερπυκνωτές είναι πλήρως εκφορτισμένοι. Όσο το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών είναι μεγαλύτερο της ελάχιστης τιμής του,  $SOC_{bat} > SOC_{bat_{min}}$ , τότε ενεργοποιείται η κατάσταση λειτουργίας 2 (mode 2 – Discharge of batteries) και οι μπαταρίες εκφορτίζονται, για να αντισταθμίσουν το έλλειμα ισχύος, σύμφωνα με την σχέση:

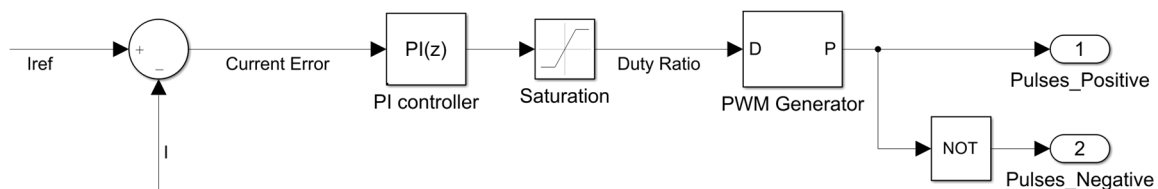
$$P_{pro} = P_g + P_{bat} \quad (4.8)$$

Τέλος, αν τα επίπεδα φόρτισης τόσο των υπερπυκνωτών, όσο και των μπαταριών είναι ίσα με τις ελάχιστες τιμές τους,  $SOC_{sc} = SOC_{sc_{min}}$  και  $SOC_{bat} = SOC_{bat_{min}}$ , αντίστοιχα, όλες οι μονάδες αποθήκευσης είναι πλήρως εκφορτισμένες. Συνεπώς, το έλλειμα ισχύος δεν μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα, οπότε ενεργοποιείται η κατάσταση λειτουργίας 3 (mode 3) και, ως αποτέλεσμα, η ισχύς που εισάγεται στο φορτίο θα είναι ίση με την παραγόμενη, δηλαδή δεν θα ικανοποιείται όλο το φορτίο του συστήματος, σύμφωνα με την σχέση:

$$P_{pro} = P_g \quad (4.9)$$

#### 4.5 Τοπικοί ελεγκτές του συστήματος

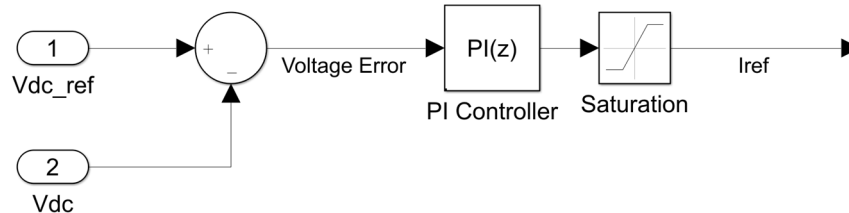
Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2, η σύνδεση και αποσύνδεση των μπαταριών, των υπερπυκνωτών, του φορτίου έκτακτης ανάγκης, αλλά και η λειτουργία του αντιστροφέα, βασίζονται στη λογική σταθεροποίησης τάσεως, χρησιμοποιώντας PI ελεγκτές και ιδανικούς διακόπτες. Οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούν PI ελεγκτές δύο επιπέδων (2-level PI control), το φορτίο έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιεί έναν I ελεγκτή, ενώ ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί έναν PI ελεγκτή. Για τους μετατροπείς ΣΡ των μπαταριών, των υπερπυκνωτών και του φορτίου έκτακτης ανάγκης, το σφάλμα τάσης (ή του ρεύματος) τροφοδοτεί έναν PI ελεγκτή, ο οποίος ελέγχει τον λόγο κατάτμησης (duty cycle) του μετατροπέα, σύμφωνα με την μέθοδο PWM (σχήμα 4.12).



**Σχήμα 4.12:** Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου PWM αμφίδρομου μετατροπέα σε λογική σταθεροποίησης τάσης.

Οι ενεργειακές πηγές του συστήματος παράγουν την μέγιστη δυνατή ισχύ κάθε χρονική στιγμή, σύμφωνα με τον P&O αλγόριθμο που αναλύθηκε προηγουμένως. Θέτοντας την τάση αναφοράς του ζυγού ΣΡ στην επιθυμητή τιμή, τόσο οι μπαταρίες όσο και οι υπερπυκνωτές, μέσω των ελεγκτών PI, παράγουν την απαραίτητη ισχύ για την διατήρηση της

τάσης του ζυγού στην τιμή αναφοράς, για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος. Σύμφωνα με το σχήμα 4.12, υπολογίζοντας την διαφορά μεταξύ του ρεύματος αναφοράς και του αντίστοιχου πραγματικού ρεύματος, όπως προκύπτει μέσω τοπικών μετρήσεων, δημιουργείται το σφάλμα ρεύματος, το οποίο, μέσω του PI ελεγκτή, του οποίου η έξοδος περιορίζεται μεταξύ 0 και 1, ρυθμίζει τα δύο ημιαγωγία στοιχεία του αμφίδρομου μετατροπέα (θετική και αρνητική πλευρά). Το ρεύμα αναφοράς προκύπτει μέσω ενός δεύτερου PI ελεγκτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13.



**Σχήμα 4.13:** Μοντέλο ελεγκτή υπολογισμού ρεύματος αναφοράς.

Η έξοδος του παραπάνω ελεγκτή περιορίζεται μεταξύ αρνητικής και θετικής τιμής του ονομαστικού ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών.

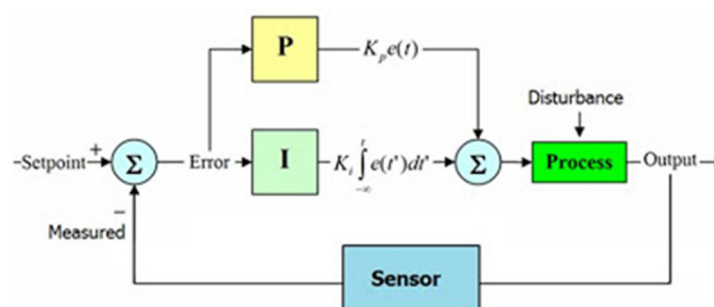
Αναλογικοί – Ολοκληρωτικοί ελεγκτές PI (Proportional – Integral Controllers) χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου (σχήμα 4.14). Το αναλογικό μέρος του ελεγκτή πολλαπλασιάζει το σφάλμα του σήματος εισόδου με ένα κέρδος  $K_p$ , και έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και του μόνιμου σφάλματος. Το ολοκληρωτικό μέρος του ολοκληρώνει το σήμα εισόδου, πολλαπλασιάζοντας το αποτέλεσμα με μία σταθερά  $K_I$ . Αυξάνοντας την απόλυτη τιμή του κέρδους  $K_I$ , το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση μειώνεται, αλλά αυξάνεται ο χρόνος απόκρισης σε μια διαταραχή του συστήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή δίνεται από την εξίσωση [20]:

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (4.10)$$

Λαμβάνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, η έξοδος του ελεγκτή στο πεδίο του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

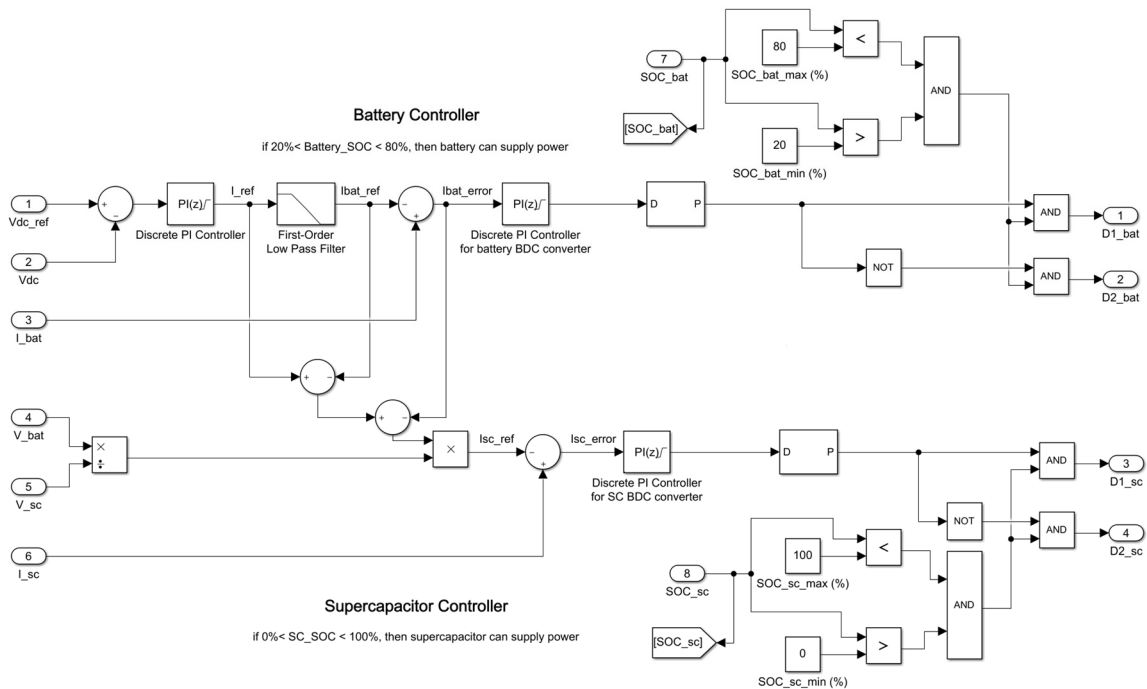
$$y(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t') dt' \quad (4.11)$$

όπου  $e(t)$  το σφάλμα εισόδου, δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου και της πραγματικής εξόδου.



**Σχήμα 4.14:** Μοντέλο PI ελεγκτή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το σύστημα ελέγχου της συστοιχίας των μπαταριών και των υπερπυκνωτών παρουσιάζεται στο σχήμα 4.15.



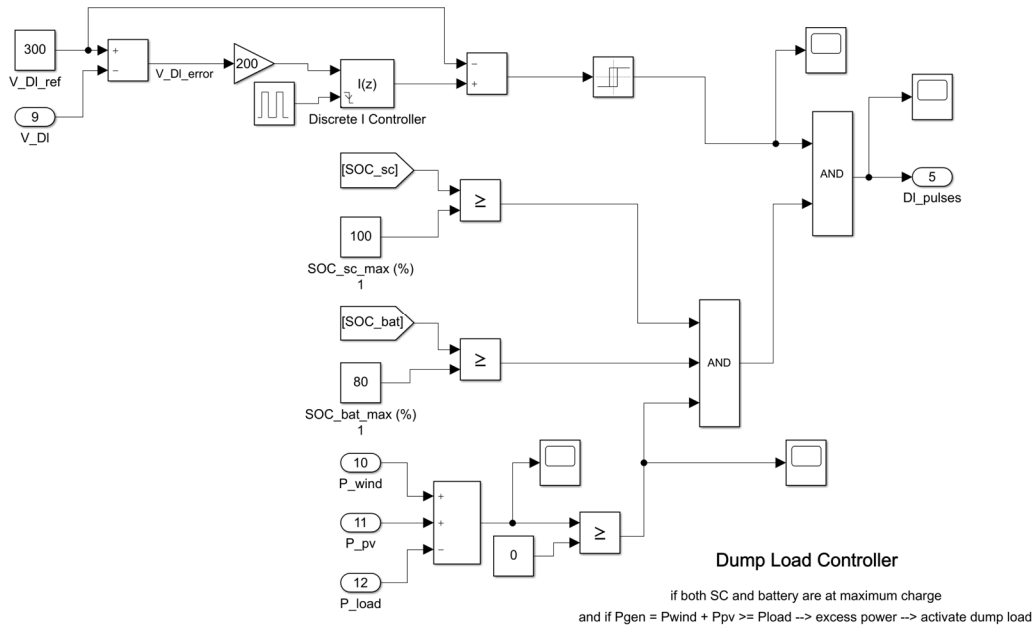
**Σχήμα 4.15:** Μοντέλο ελεγκτή συστοιχίας μπαταριών και υπερπυκνωτών.

Στο μοντέλο του σχήματος 4.15, το ρεύμα αναφοράς της συστοιχίας των μπαταριών υπολογίζεται σύμφωνα με το σχήμα 4.13, με την προσθήκη ενός low-pass φίλτρου. Το φίλτρο χωρίζει το σήμα του ρεύματος αναφοράς σε δύο ζώνες συχνοτήτων, μια χαμηλή και μία υψηλή. Το τμήμα της χαμηλής συχνότητας (αργή απόκριση) χρησιμοποιείται ως σήμα αναφοράς για την συστοιχία μπαταριών ( $I_{bat\_ref}$ ), ενώ το τμήμα υψηλής συχνότητας (γρήγορη απόκριση) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος αναφοράς της συστοιχίας των υπερπυκνωτών ( $I_{sc\_ref}$ ), μέσω σύγκρισης με το αντίστοιχο σήμα αναφοράς των μπαταριών. Ως αποτέλεσμα, οι μπαταρίες πληρούν την παροχή συνεχούς ενέργειας στον ζυγό, ενώ οι υπερπυκνωτές καλύπτουν την παροχή άμεσης ισχύος στο φορτίο, όταν αυτό είναι απαραίτητο (διακύμανση ισχύος ενεργειακών πηγών). Επιπλέον, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15, τα σήματα των μετατροπέων εκτελούνται, με τη χρήση λογικών πυλών, μόνο όταν η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και των υπερπυκνωτών είναι μεταξύ των ελάχιστων και μέγιστων τιμών τους. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, θεωρείται πως οι μπαταρίες θα λειτουργούν για καταστάσεις φόρτισης μεταξύ 20% και 80%, ενώ οι υπερπυκνωτές λειτουργούν για καταστάσεις φόρτισης μεταξύ 0% και 100%, βελτιώνοντας την διάρκεια ζωής των μπαταριών.

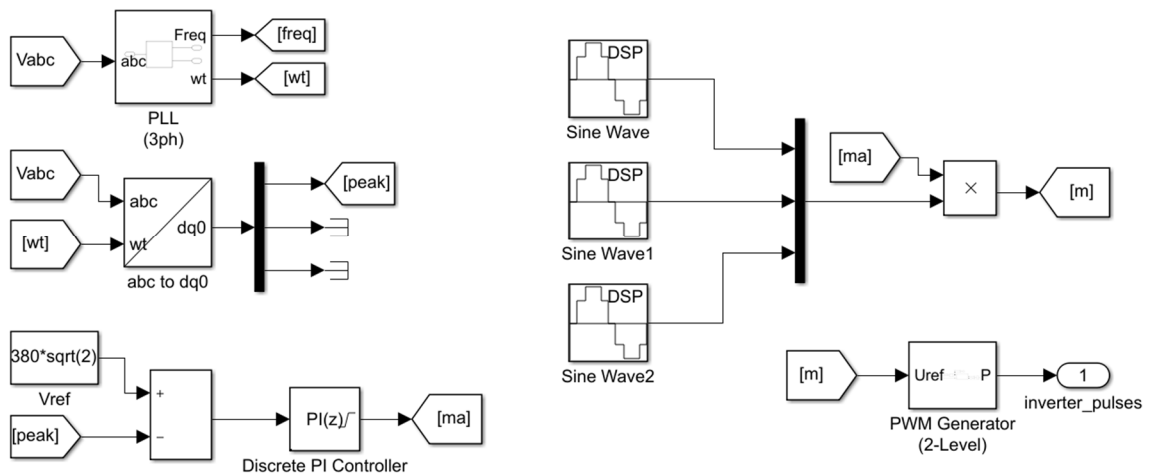
Στην περίπτωση που τόσο οι υπερπυκνωτές, όσο και οι μπαταρίες βρίσκονται στην μέγιστη κατάσταση φόρτισης, δηλαδή οι μονάδες αποθήκευσης είναι πλήρως φορτισμένες, και υπάρχει πλεόνασμα ισχύος, ενεργοποιείται το φορτίο έκτακτης ανάγκης (dump load), για την σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού. Η λειτουργία του ελεγκτή του φορτίου είναι αντίστοιχη με εκείνη που αναλύθηκε προηγουμένως, αλλά με κατάλληλες τροποποιήσεις, καθώς το φορτίο έκτακτης ανάγκης διαθέτει μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, με ένα μόνο ημιαγωγικό στοιχείο. Το μοντέλο του ελεγκτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.16.

Τέλος, στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται ο ελεγκτής του αντιστροφέα. Η λειτουργία αυτού του ελεγκτή βασίζεται στον διανυσματικό έλεγχο της τάσης του φορτίου, της τάσης, δηλαδή, που παράγει ο αντιστροφέας. Χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Park,

πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός των abc τριφασικών μεγεθών της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στο dq0 πλαίσιο αναφοράς, το οποίο περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο, η παράμετρος d του μετασχηματισμού θα συμπίπτει με το συνιστάμενο διάνυσμα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, δίνοντας την στιγμιαία μέγιστη τιμή της, κάθε χρονική στιγμή. Για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής που απαιτείται για τον συγχρονισμό του πλαισίου αναφοράς και, εν τέλει, για τον μετασχηματισμό Park, χρησιμοποιείται ένα PLL (Phase Locked Loop), το οποίο, με είσοδο την τάση εξόδου του αντιστροφέα, υπολογίζει την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των τριών διανυσμάτων της.



Σχήμα 4.16: Μοντέλο ελεγκτή φορτίου έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 4.17: Μοντέλο ελεγκτή φορτίου αντιστροφέα.

Το μπλοκ PLL είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό της γωνίας και της συχνότητας διανυσμάτων. Το PLL διαμορφώνει ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, το οποίο παρακολουθεί τη συχνότητα και τη φάση ενός ημιτονοειδούς

τριφασικού σήματος, χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό ταλαντωτή συχνότητας. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει τη συχνότητα του εσωτερικού ταλαντωτή, διατηρώντας τη διαφορά φάσεων στο 0. Έτσι, θέτοντας ως είσοδο στο PLL την τάση εξόδου του αντιστροφέα, λαμβάνεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των τριών διανυσμάτων της, με την οποία συγχρονίζεται το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς για τον μετασχηματισμό Park.

Στη συνέχεια, η στιγμιαία μέγιστη τιμή της τάσης που λαμβάνεται ως η συνιστώσα  $d$  της εξόδου του μετασχηματισμού, συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή της τάσης του φορτίου (τάση αναφοράς), η οποία, για την περίπτωση τριφασικού συστήματος, είναι ίση με  $380V_{rms}$ . Το σφάλμα της στιγμιαίας τιμής της τάσης από την τάση αναφοράς τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή, ο οποίος ελέγχει την τάση εξόδου του αντιστροφέα πριν από την σύνδεση με το φορτίο. Ο ελεγκτής PI αλλάζει τον δείκτη διαμόρφωσης (ma) σύμφωνα με το σήμα σφάλματος, για να εξασφαλίσει ότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι ίση με την τάση του φορτίου. Ο δείκτης διαμόρφωσης πολλαπλασιάζεται με τρία ημίτονα αναφοράς, που διαθέτουν διαφορά φάσης  $120^\circ$ , συχνότητα 50Hz και μοναδιαίο πλάτος, και το τελικό σήμα εφαρμόζεται σε μια γεννήτρια παλμών, για την παραγωγή των 6 παλμών που απαιτούν τα IGBT του αντιστροφέα για την λειτουργία του.

Επιπλέον, κρίνεται χρήσιμη η προσθήκη κατάλληλου φίλτρου για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Το μέγεθος του φίλτρου θα εξαρτάται από την τιμή της ισχύος που διατίθεται να καλύψει ο αντιστροφέας, με τις τιμές της επαγωγής και χωρητικότητας που απαιτούνται να υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις [18]:

$$L_f = \frac{0.1 \cdot U^2}{2\pi f \cdot P} \quad (4.12)$$

$$C_f = \frac{0.05 \cdot P}{2\pi f \cdot U^2} \quad (4.13)$$

όπου  $f = 50Hz$  η συχνότητα του φορτίου,  $P$  η ενεργός ισχύς που απορροφά το φορτίο (W) και  $U = 380V_{rms}$  η απαιτούμενη τάση του φορτίου.

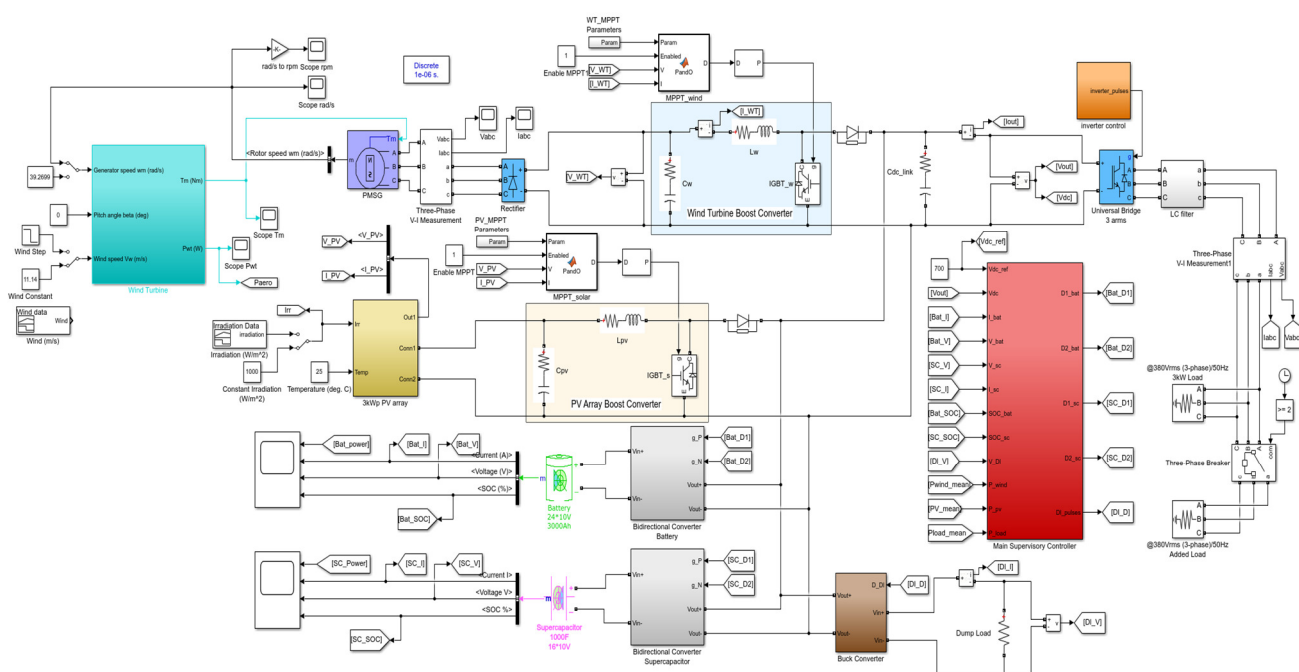
## 5. Προσομοίωση Λειτουργίας Υβριδικού Συστήματος

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο προσομοιώνεται η λειτουργία του αυτόνομου υβριδικού συστήματος, με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB. Η απόκριση του συστήματος μελετάται, αρχικά, σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή υπό σταθερή ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία στις εισόδους του μοντέλου. Στη συνέχεια, για την αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος, χρησιμοποιούνται βηματικές μεταβολές, αλλά και πραγματικές χρονοσειρές ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας, και, εν τέλει, εξετάζεται ο ρόλος των υπερπυκνωτών στο σύστημα, με την εφαρμογή μιας απότομης μεταβολής στο φορτίο του συστήματος, χωρίς την παρουσία των ενεργειακών πηγών.

### 5.2 Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικού συστήματος

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Μοντέλο προσομοίωσης υβριδικού συστήματος.

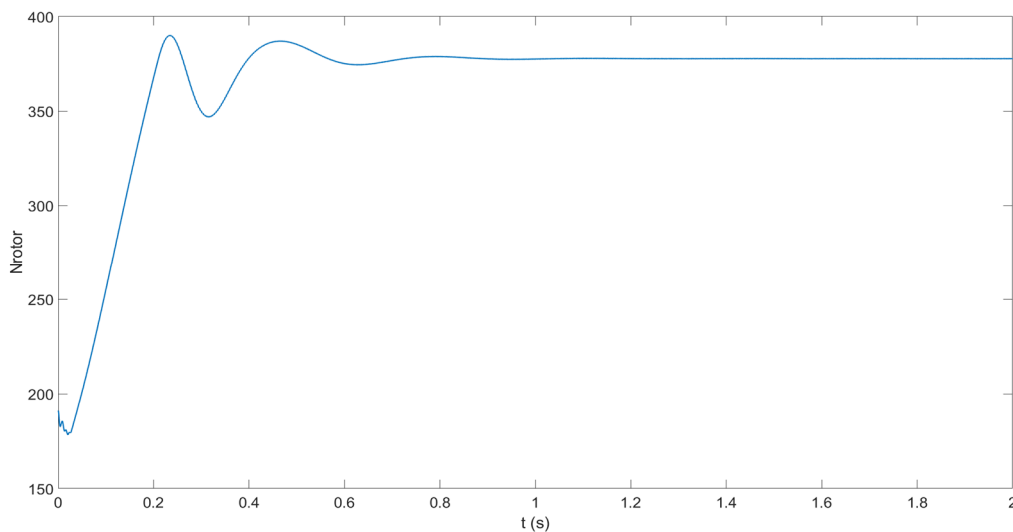
Είσοδοι του μοντέλου αποτελούν η ταχύτητα ανέμου, στο υποσύστημα του αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ, και η ηλιακή ακτινοβολία, στο υποσύστημα της Φ/Β συστοιχίας, οι οποίες μπορεί να είναι είτε σταθερές, είτε να μεταβάλλονται βηματικά, αλλά και σύμφωνα με κάποια χρονοσειρά. Επιπλέον, το φορτίο του συστήματος καθορίζεται στην πλευρά ΕΡ, ανάλογα με την επιθυμητή ισχύ. Χρησιμοποιώντας διακόπτες, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε προσθήκη είτε αφαίρεση επιπλέον φορτίου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές της προσομοίωσης, ανάλογα με το είδος της μεταβολής φορτίου για την οποία είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.



### 5.2.1 Απόκριση μόνιμης κατάστασης

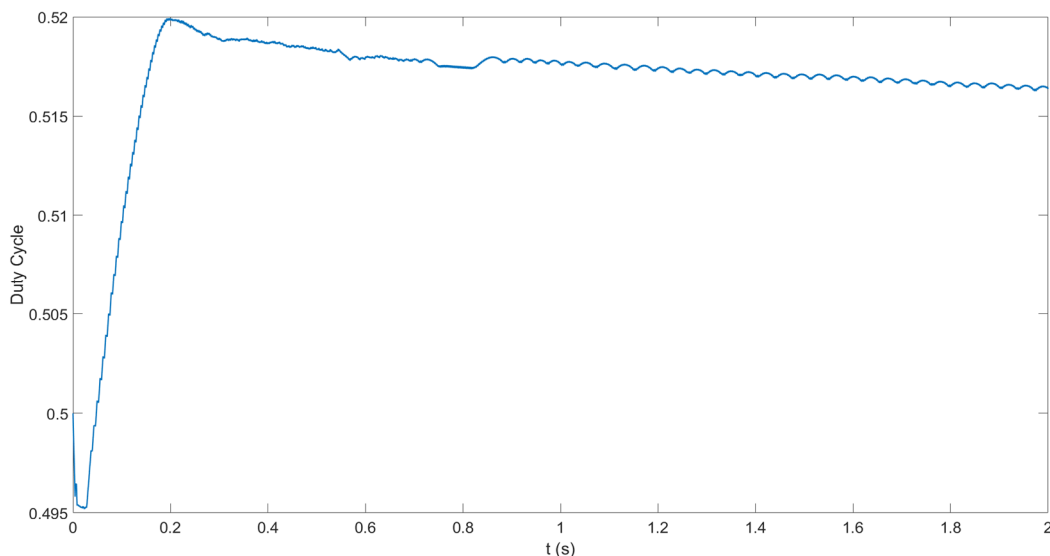
Για σταθερή ταχύτητα ανέμου, ίση με την ονομαστική, σταθερή ηλιακή ακτινοβολία στην τιμή  $1000 \text{ W/m}^2$ , καθώς και σταθερό φορτίο  $3\text{kW}$  στην έξοδο του αντιστροφέα, το σύστημα τελικά θα ισορροπήσει σε μια μόνιμη κατάσταση, στην οποία μπορεί να γίνει καταγραφή των διάφορων ηλεκτρικών μεγεθών του συστήματος.

Αρχικά, για ταχύτητα ανέμου ίση με την ονομαστική, το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ θα παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, καθώς και τη μέγιστη δυνατή ροπή στον άξονα της γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο η γεννήτρια θα ισορροπήσει στις ονομαστικές στροφές της ( $375 \text{ rpm}$ ), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.



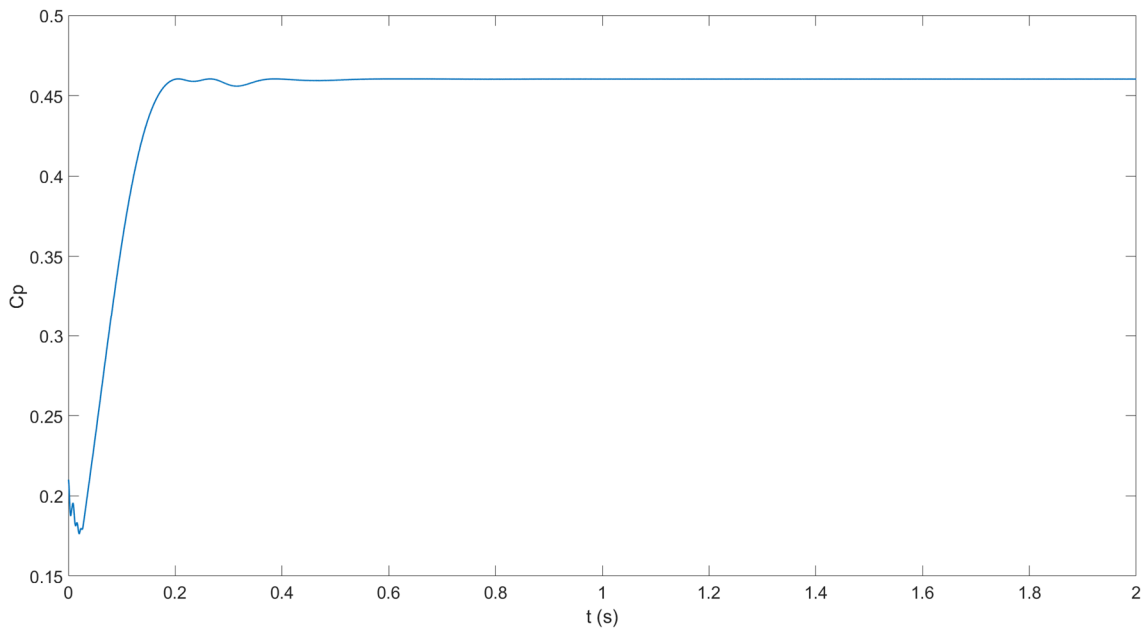
Σχήμα 5.2: Ταχύτητα περιστροφής άξονα Α/Γ.

Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει την σύγκλιση του λόγου κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ της Α/Γ περί την τιμή 0.5, με βάση τον οποίο προσαρμόζεται και ισορροπεί η ηλεκτρική ροπή και οι στροφές της Α/Γ, ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς, σύμφωνα με την τεχνική ελέγχου ΜΡΡΤ που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



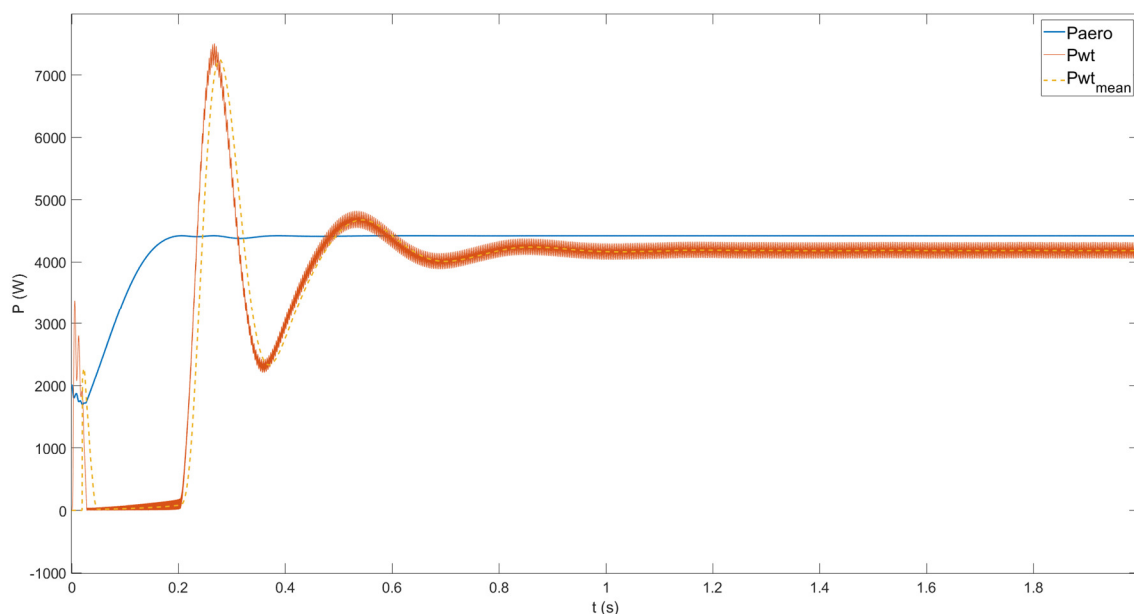
Σχήμα 5.3: Λόγος κατάτμησης μετατροπέα ΣΡ της Α/Γ.

Επιπλέον, στο σχήμα 5.4 φαίνεται και η αντίστοιχη σύγκλιση του αεροδυναμικού συντελεστή της Α/Γ στην μέγιστη τιμή του (0.46), ώστε η Α/Γ να αποδίδει την μέγιστη δυνατή ισχύ.



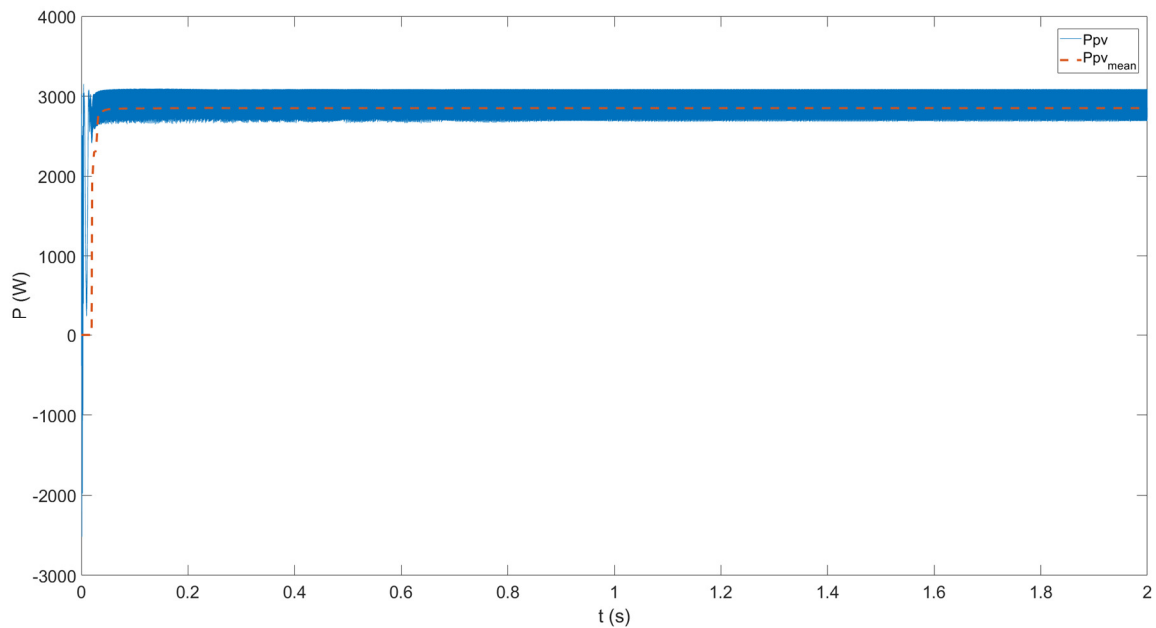
**Σχήμα 5.4:** Αεροδυναμικός συντελεστής Α/Γ.

Τελικά, η ισχύς που παράγει η Α/Γ παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5. Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται και η καμπύλες ισχύος του αεροδυναμικού μέρους, καθώς και η μέση τιμή της πραγματικής ισχύος εξόδου της Α/Γ. Είναι προφανές ότι, μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης του συστήματος, η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ ακολουθεί την καμπύλη ισχύος του αεροδυναμικού μέρους. Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής ισχύος και της ισχύος του αεροδυναμικού μέρους στην σταθερή κατάσταση οφείλεται στις απώλειες του συστήματος (απώλειες γεννήτριας, ανορθωτή και μετατροπέα ΣΡ).



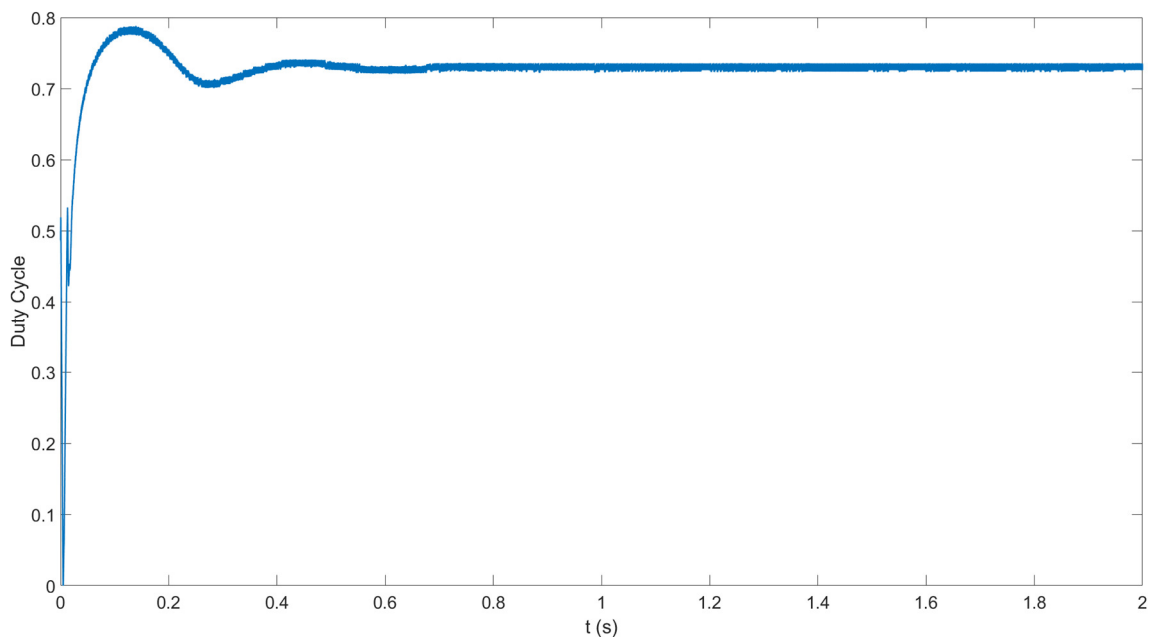
**Σχήμα 5.5:** Παραγόμενη ισχύς Α/Γ.

Αντίστοιχα, η ισχύς που παράγεται από την Φ/Β γεννήτρια, καθώς και η μέση τιμή της, παρουσιάζονται στο σχήμα 5.6. Για ακτινοβολία  $1000 \text{ W/m}^2$ , η συνολική ισχύς που παράγεται από την Φ/Β συστοιχία ανέρχεται στα 3kW.



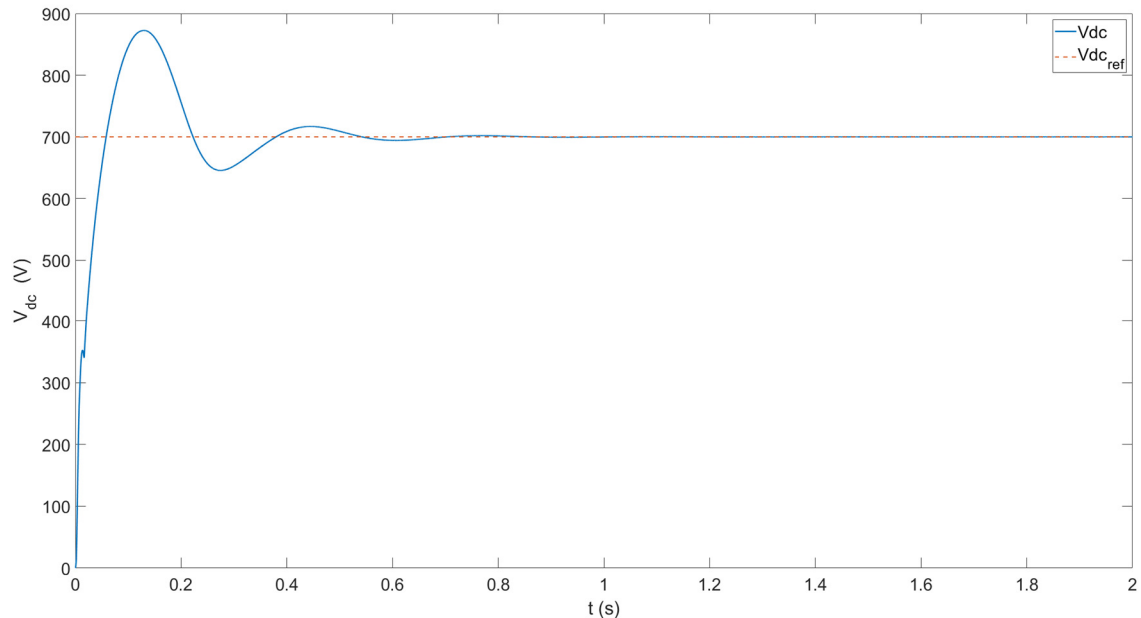
**Σχήμα 5.6:** Παραγόμενη ισχύς Φ/Β συστοιχίας.

Η ισχύς της Φ/Β γεννήτριας είναι μέγιστη, ως αποτέλεσμα του λόγου κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ της Φ/Β γεννήτριας, ο οποίος λειτουργεί σύμφωνα με την τεχνική ελέγχου MPPT που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7, και, όπως διακρίνεται από το σχήμα, λειτουργεί περί την τιμή 0.73.



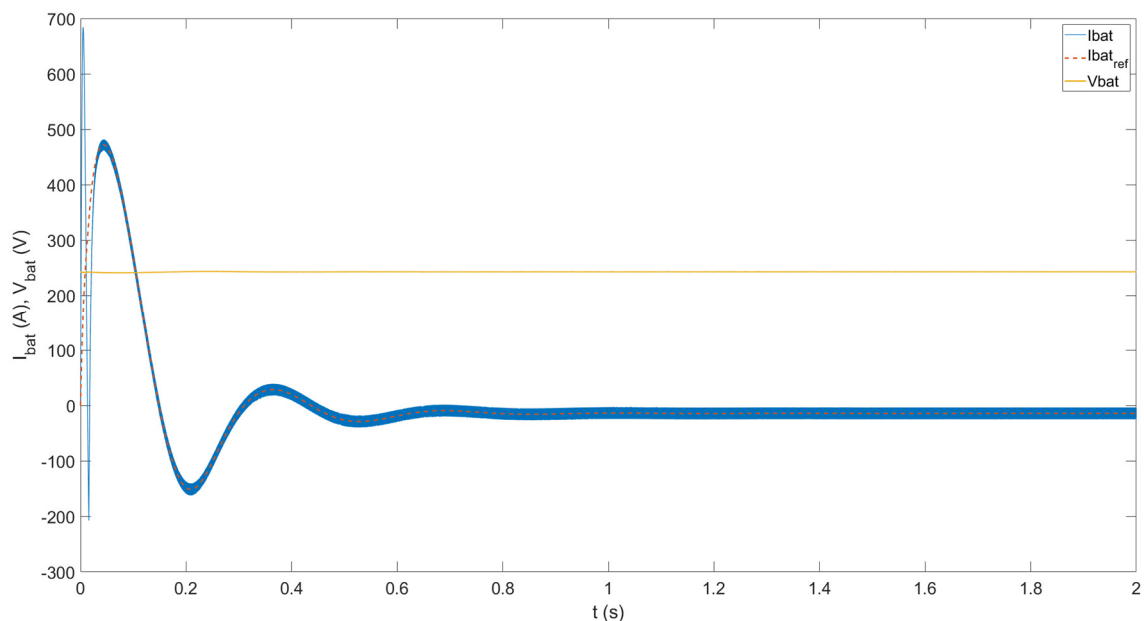
**Σχήμα 5.7:** Λόγος κατάτμησης μετατροπέα ΣΡ της Φ/Β συστοιχίας.

Στο σχήμα 5.8 παρατίθεται η τάση του ζυγού ΣΡ. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τάση αναφοράς του ζυγού ΣΡ είναι ίση με 700V, και θα πρέπει να διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα, το σύστημα συγκλίνει στην τάση αυτή, μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης, σε λιγότερο από 1sec. Η σταθερότητα της τάσης του ζυγού ΣΡ θα εξεταστεί πιο αναλυτικά σε επόμενη ενότητα, με την εφαρμογή μεταβολών στις εισόδους του συστήματος, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή διαχείριση του ισοζυγίου παραγωγής και ζήτησης ισχύος.

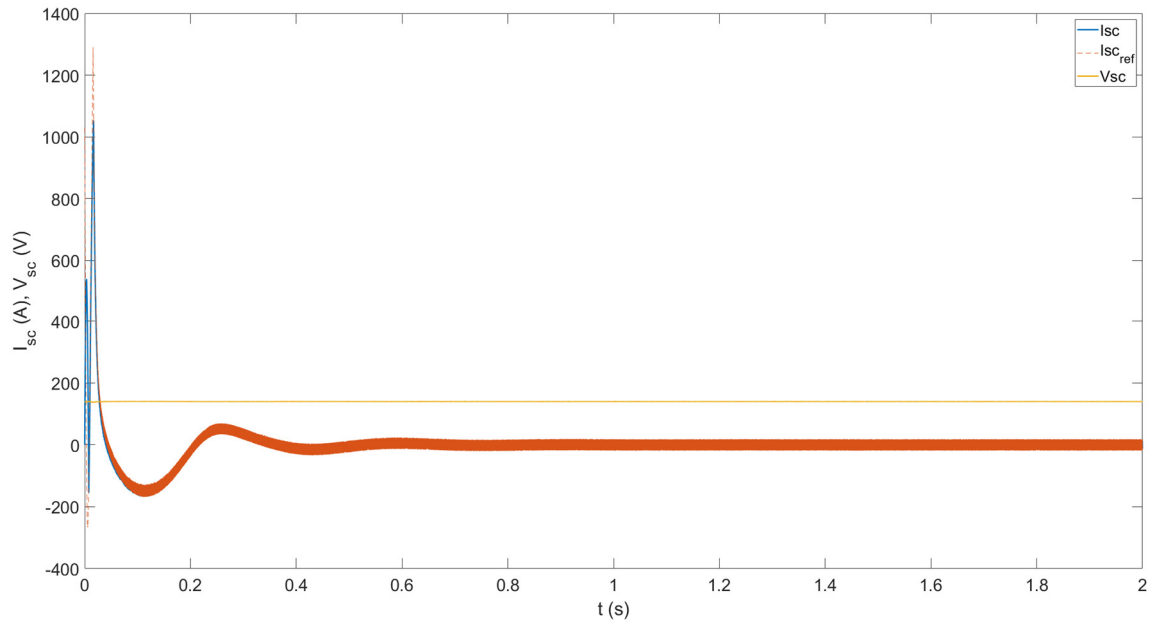


**Σχήμα 5.8:** Τάση ζυγού ΣΡ.

Η σύγκλιση της τάσης στην τιμή αναφοράς προκύπτει ως αποτέλεσμα του βασικού ελεγκτή και των PID ελεγκτών που εμπεριέχει για την ρύθμιση της απόκρισης της συστοιχίας των μπαταριών και των υπερπυκνωτών. Ειδικότερα, τα ρεύματα και οι τάσεις των μπαταριών και των υπερπυκνωτών παρουσιάζονται στα σχήματα 5.9 και 5.10, αντίστοιχα.



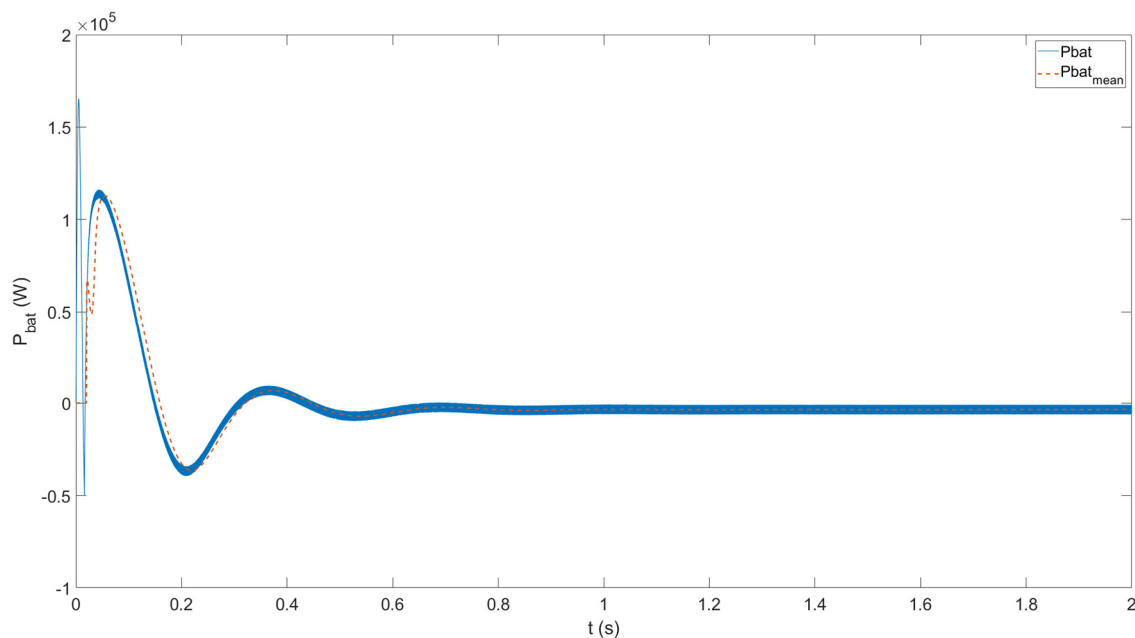
**Σχήμα 5.9:** Τάση και ρεύμα συστοιχίας μπαταριών.



**Σχήμα 5.10:** Τάση και ρεύμα συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο PID ελεγκτής της συστοιχίας υπερπυκνωτών, χάρη στην προσθήκη ενός low-pass φίλτρου για τον υπολογισμό του ρεύματος αναφοράς, λαμβάνει το τμήμα υψηλών συχνοτήτων για το ρεύμα αναφοράς, γεγονός που, εν τέλει, οδηγεί σε γρηγορότερη απόκριση της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

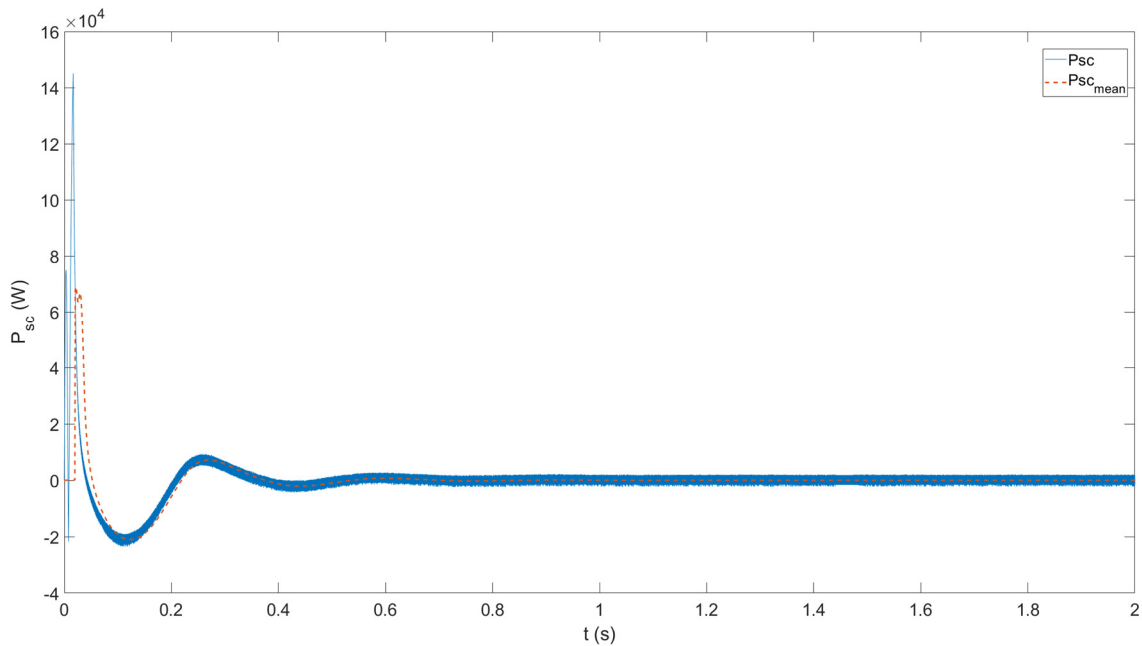
Η ισχύς των μπαταριών και των υπερπυκνωτών παρουσιάζεται στα σχήματα 5.11 και 5.12, αντίστοιχα.



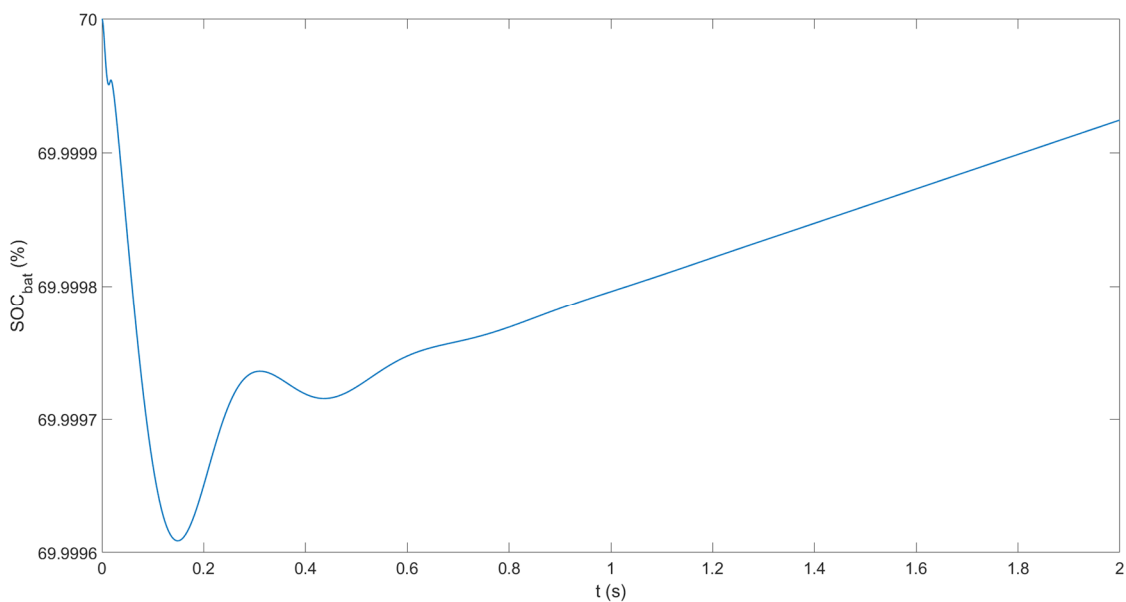
**Σχήμα 5.11:** Ισχύς συστοιχίας μπαταριών.

Δεδομένου ότι το φορτίο διατηρείται σταθερό στα 3kW, και η συνολικά παραγόμενη ισχύς του συστήματος, σύμφωνα με τα σχήματα 5.5 και 5.6, ανέρχεται στα 7kW, δημιουργείται περίσσεια ισχύος, η οποία χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών.

Αυτό γίνεται ευκολότερα κατανοητό, παρατηρώντας τα σχήματα 5.13 και 5.14, τα οποία παρουσιάζουν την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, αντίστοιχα.



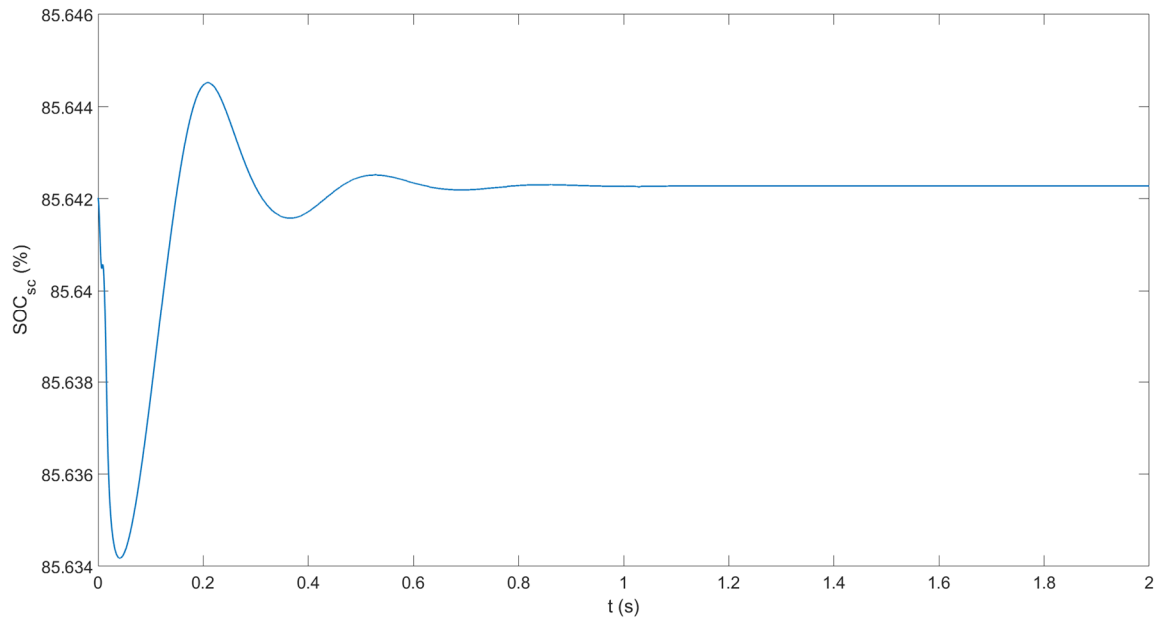
**Σχήμα 5.12:** Ισχύς συστοιχίας υπερπυκνωτών.



**Σχήμα 5.13:** Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας μπαταριών.

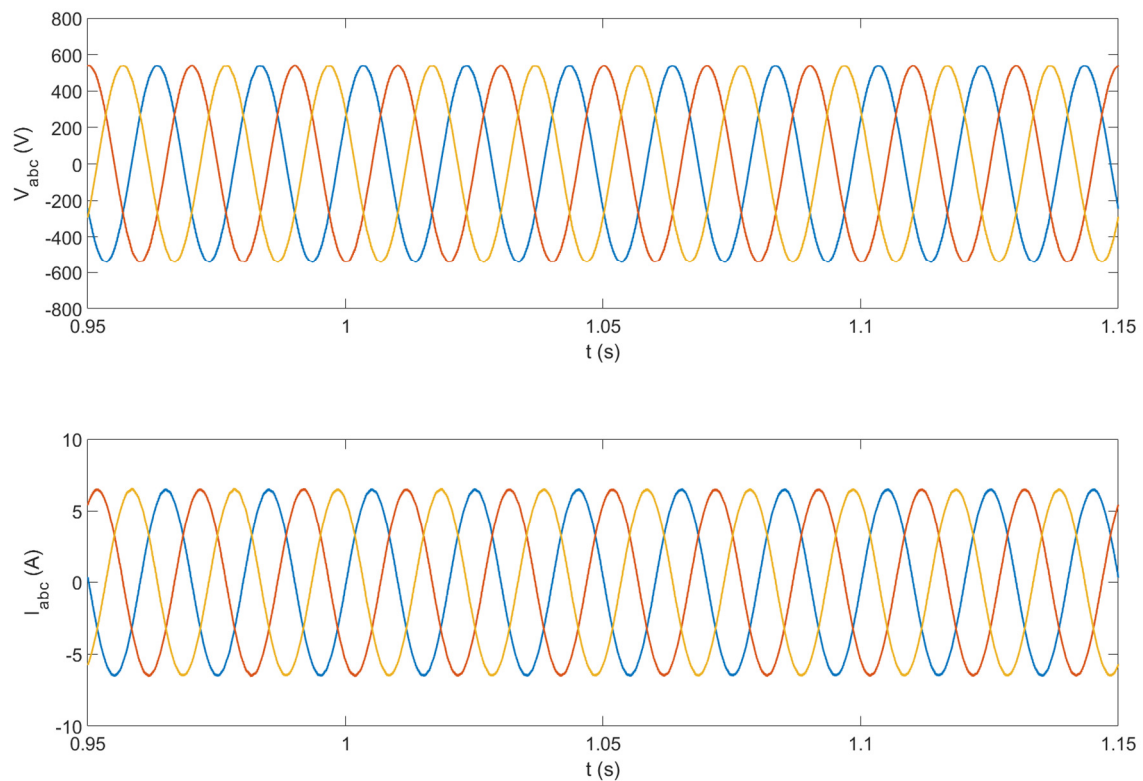
Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.13 και 5.14, η περίσσεια ισχύος χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μονάδων αποθήκευσης. Η κατάσταση φόρτισης των υπερπυκνωτών διατηρείται σταθερή, αφού επανέλθει στην αρχική της κατάσταση, ενώ η συστοιχία των μπαταριών θα εξακολουθεί να φορτίζεται, μέχρι την μέγιστη επιθυμητή τιμή φόρτισης.

Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της τάσης και του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα, καθώς και της συχνότητας και της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης στην πλευρά του φορτίου.



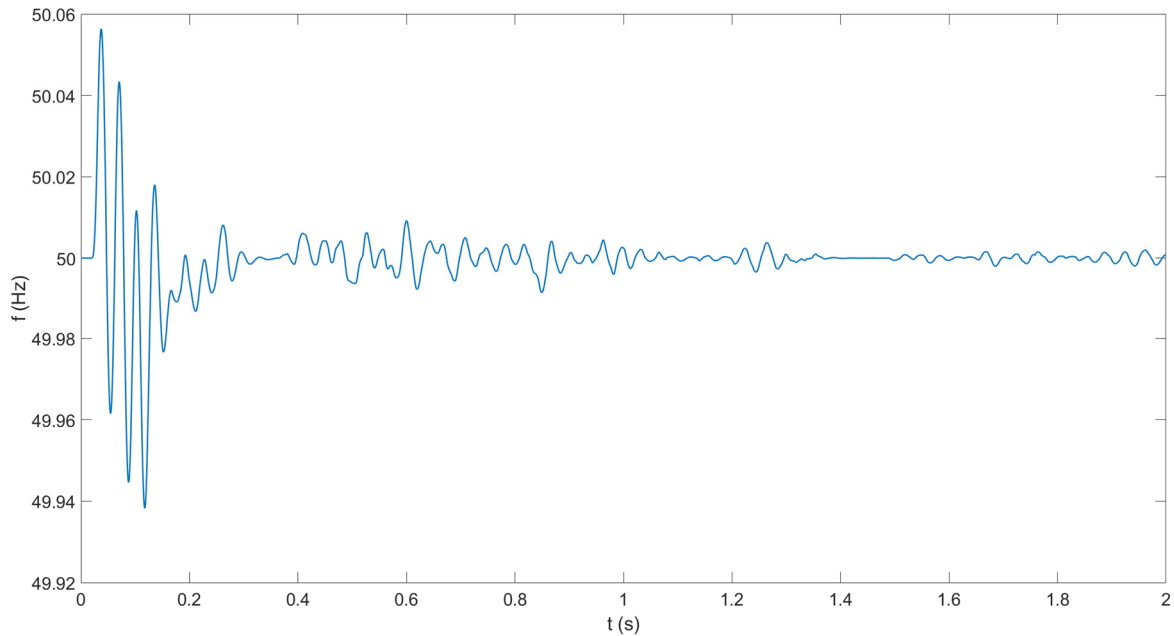
**Σχήμα 5.14:** Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Η τάση και το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα παρατίθενται στο σχήμα 5.15. Είναι προφανές ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη μέγιστη τιμή 537V για την τάση (ή  $380V_{rms}$ ). Επιπλέον, τόσο οι κυματομορφές για την τάση, όσο και οι αντίστοιχες για το ρεύμα δεν περιλαμβάνουν ανώτερης τάξης αρμονικές, χάρη στην προσθήκη κατάλληλου φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

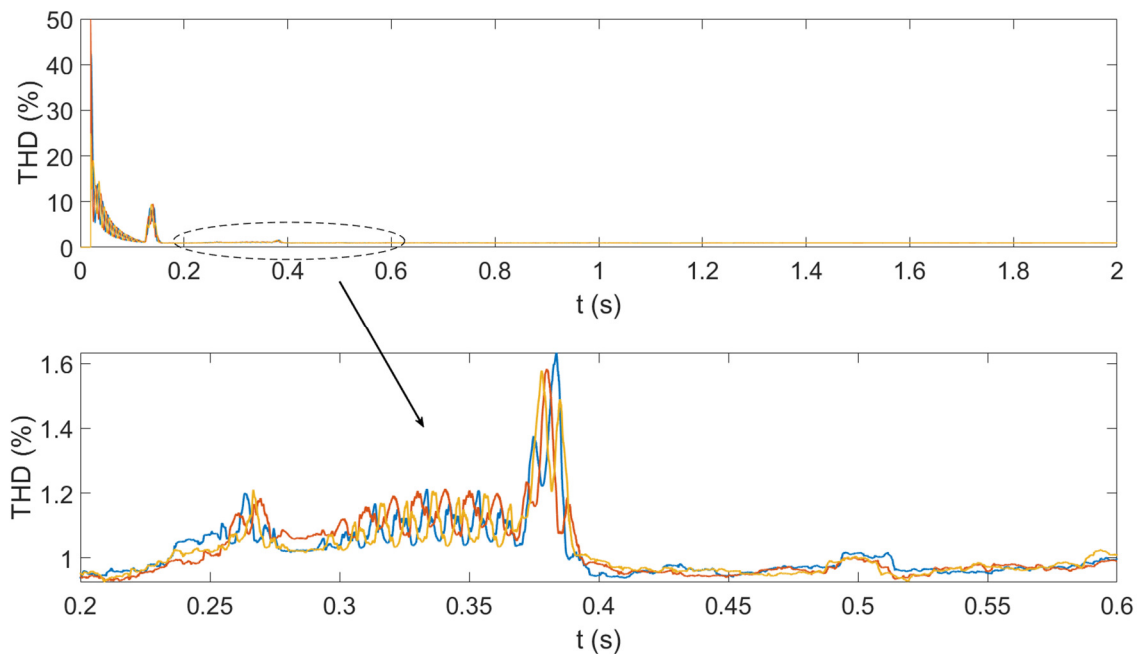


**Σχήμα 5.15:** Τάσεις (πάνω) και ρεύματα (κάτω) στην έξοδο του αντιστροφέα.

Η συχνότητα του φορτίου στην έξοδο του αντιστροφέα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16, ενώ η αρμονική παραμόρφωση των κυματομορφών της τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.17. Παρατηρείται ότι η συχνότητα παρουσιάζει ελάχιστη μεταβολή από την τιμή των 50Hz, ακόμα και κατά την αρχικοποίηση του συστήματος. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης βρίσκεται, και αυτή, σε αποδεκτά όρια, μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης, συγκλίνοντας σε τιμές περί το 1%.



**Σχήμα 5.16:** Συχνότητα του φορτίου.

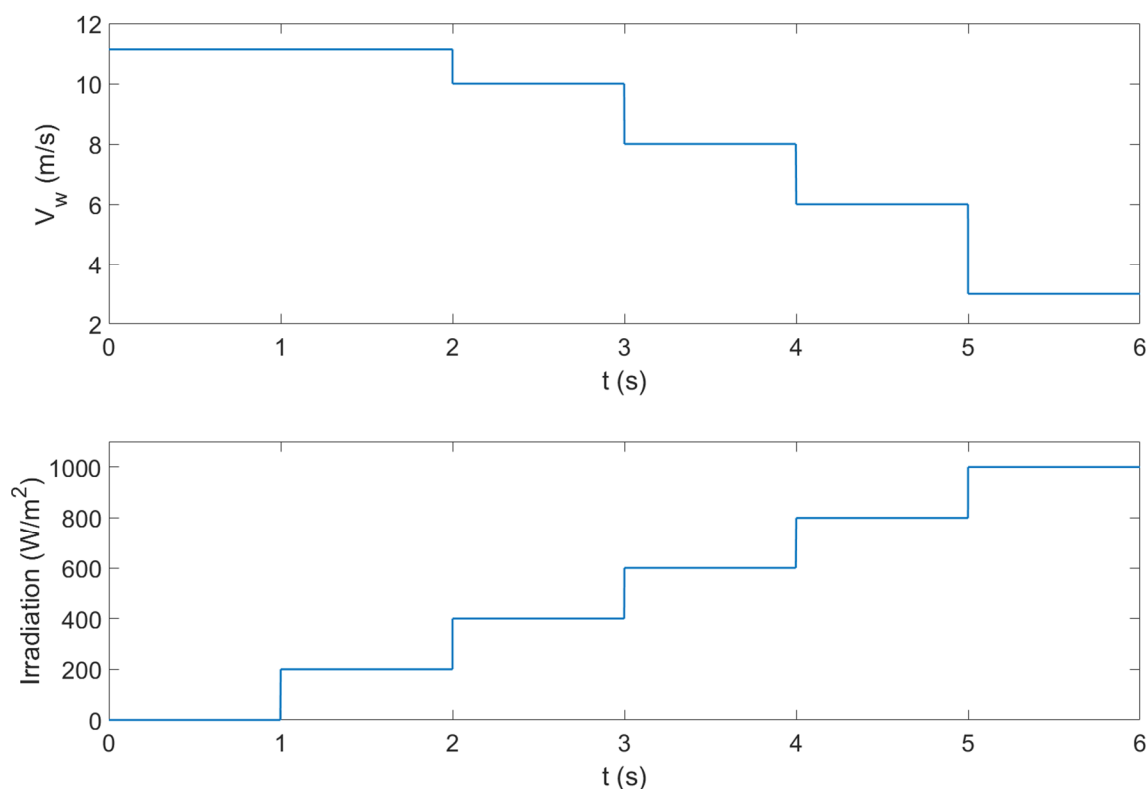


**Σχήμα 5.17:** Αρμονική παραμόρφωση τάσης φορτίου.



## 5.2.2 Απόκριση σε βηματική μεταβολή εισόδων

Για την επιβεβαίωση της ορθότητας των MPPT ελεγκτών της Α/Γ και της Φ/Β γεννήτριας, καθώς και της αντίστοιχης ισχύος εξόδου, εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η περίπτωση βηματικής μείωσης της ταχύτητας του ανέμου, ξεκινώντας από την ονομαστική τιμή της, και ταυτόχρονη βηματική αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ξεκινώντας από μηδενική τιμή, με σταθερό φορτίο 3kW στην έξοδο του αντιστροφέα. Ενδεικτικά, οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στο σχήμα 5.18.



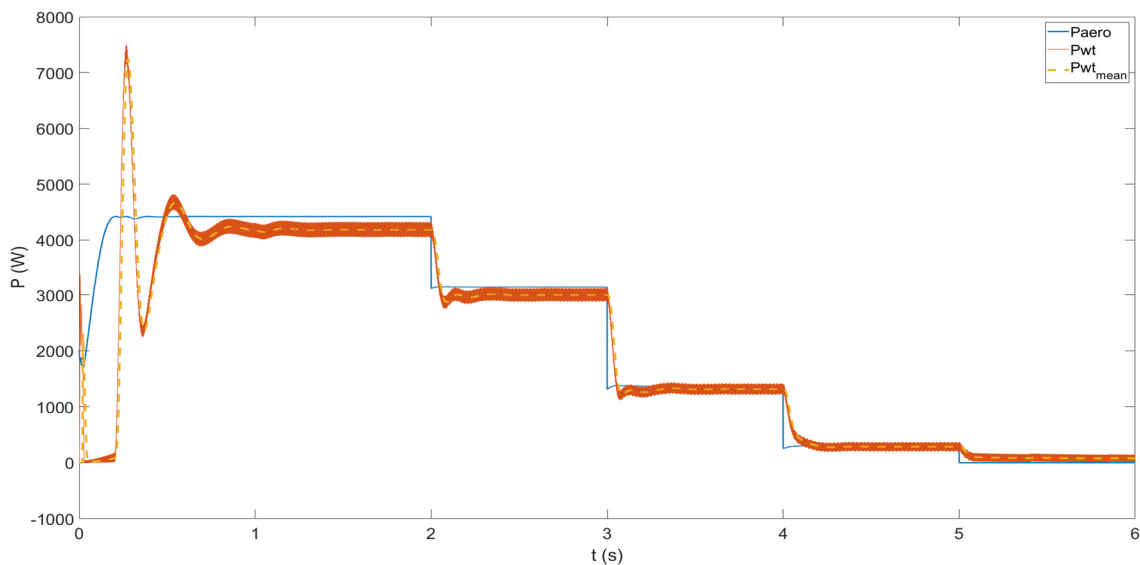
**Σχήμα 5.18:** Βηματική μεταβολή ταχύτητας ανέμου (πάνω) και ηλιακής ακτινοβολίας (κάτω).

Η ισχύς που παράγεται από την Α/Γ παρουσιάζεται στο σχήμα 5.19. Όπως είναι αναμενόμενο, με βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου, η παραγόμενη ισχύς μειώνεται κατά αντίστοιχο τρόπο, ακολουθώντας την καμπύλη ισχύος του αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ, μόλις ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση του μοντέλου, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία του MPPT ελεγκτή. Επιπλέον, παρατηρείται ότι κατά την τελευταία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, στο χρονικό διάστημα 5-6sec, η αεροδυναμική ισχύς μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει, καθώς τότε η ταχύτητα του ανέμου (3m/s) είναι μικρότερη της ταχύτητας έναρξης της Α/Γ (4m/s). Συνεπώς, σε αυτό το χρονικό διάστημα η Α/Γ δεν παράγει ισχύ. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα, η ισχύς εξόδου της Α/Γ εξακολουθεί να παράγει μια ελάχιστη ποσότητα ισχύος, καθώς η Α/Γ θα εξακολουθεί να περιστρέφεται για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, με μειούμενη ταχύτητα περιστροφής.

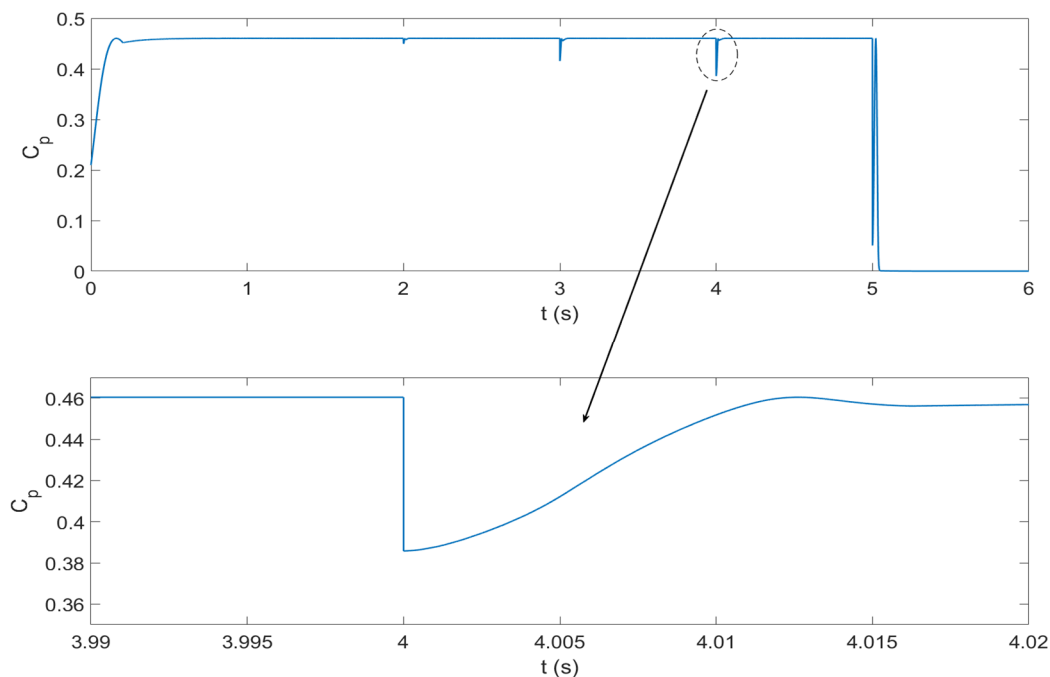
Ένα άλλο στοιχείο που φανερώνει την σωστή λειτουργία του MPPT ελεγκτή της Α/Γ είναι η καταγραφή του αεροδυναμικού συντελεστή,  $C_p$ , κατά τη διάρκεια των βηματικών μεταβολών. Για ορθή λειτουργία του ελεγκτή, ο αεροδυναμικός συντελεστής θα πρέπει να

προσεγγίζει την μέγιστη τιμή του σε κάθε ταχύτητα ανέμου, δηλαδή την τιμή 0.46 για την συγκεκριμένη Α/Γ. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.20, μετά από κάθε μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, ο αεροδυναμικός συντελεστής επιστρέφει στην μέγιστη τιμή του, επιτρέποντας στην Α/Γ να παράγει την μέγιστη δυνατή ισχύ. Εξαιρέση αποτελεί η τελευταία μεταβολή, στην οποία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Α/Γ δεν παράγει ισχύ, όποτε ο αεροδυναμικός συντελεστής μηδενίζεται.

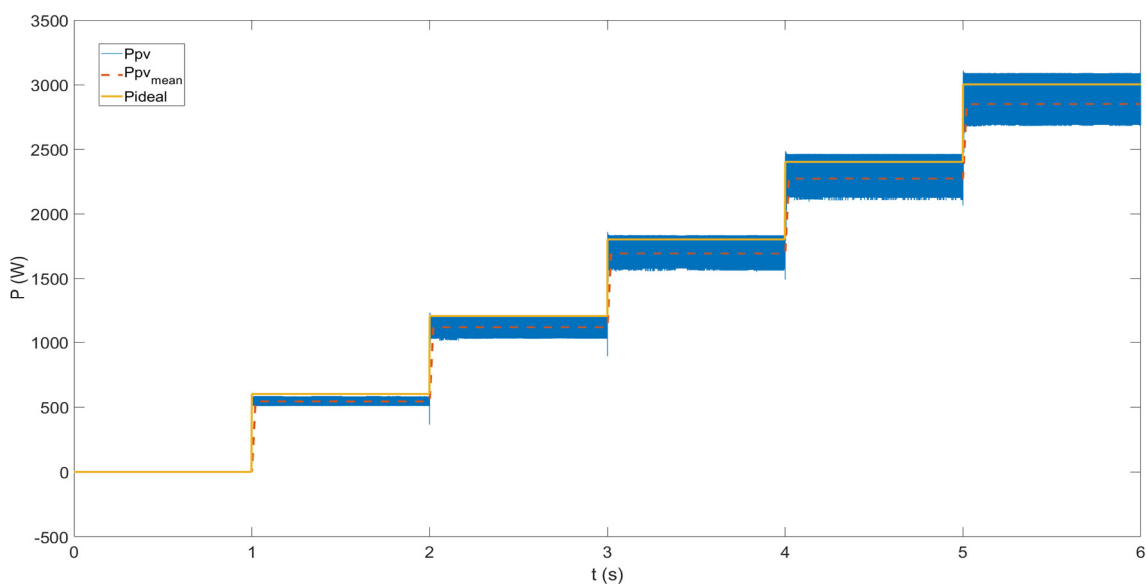
Παρόμοια, η παραγόμενη ισχύς της Φ/Β γεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η ιδανική καμπύλη ισχύος, την οποία θα πρέπει να προσεγγίζει η Φ/Β συστοιχία, για σωστή λειτουργία του MPPT ελεγκτή. Όπως διακρίνεται από το σχήμα, με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς, ακολουθώντας την ιδανική καμπύλη ισχύος, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του MPPT ελεγκτή. Η ιδανική καμπύλη δεν προσεγγίζεται πλήρως, λόγω απωλειών του συστήματος.



**Σχήμα 5.19:** Παραγόμενη ισχύς Α/Γ.

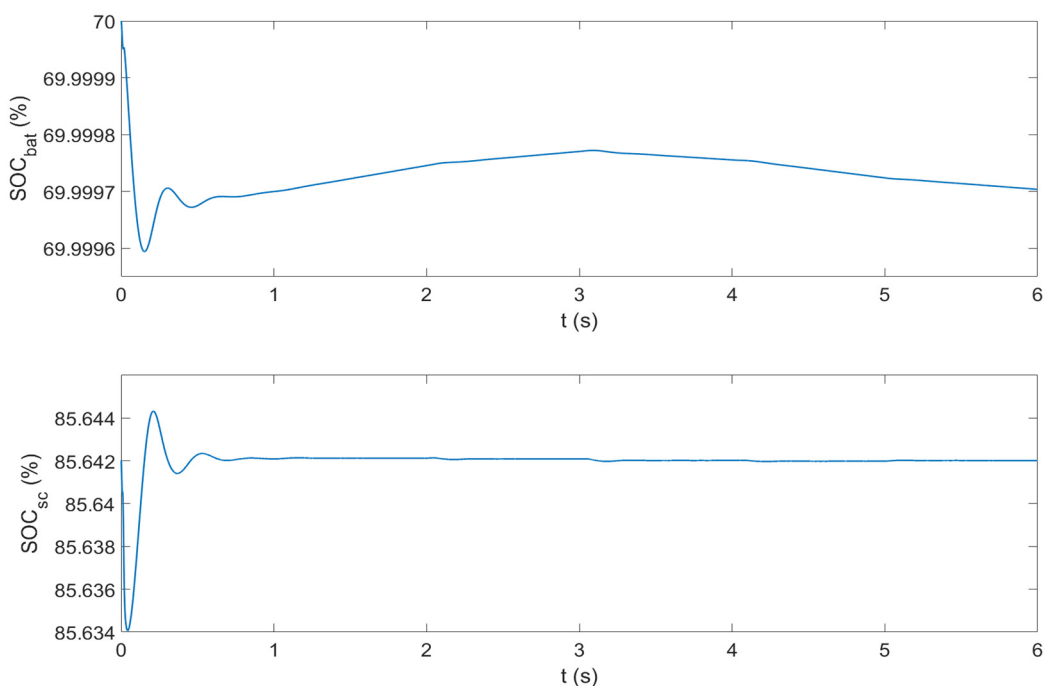


**Σχήμα 5.20:** Αεροδυναμικός συντελεστής Α/Γ.



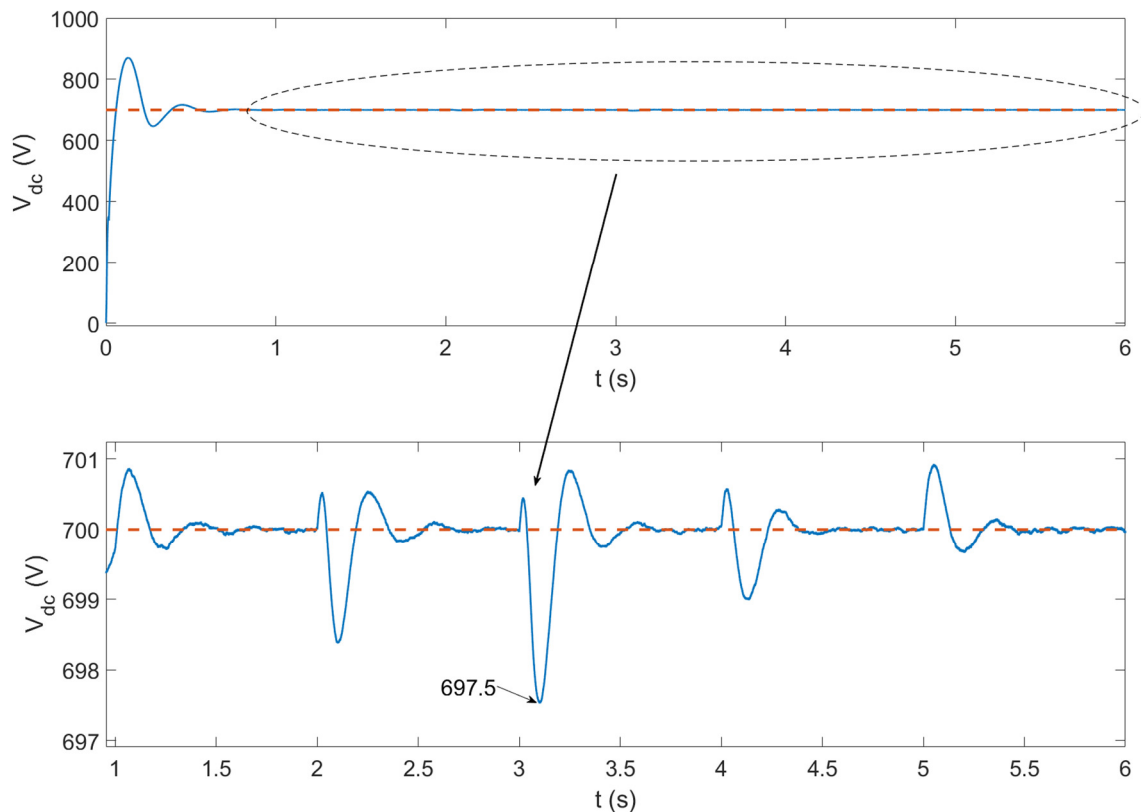
**Σχήμα 5.21:** Παραγόμενη ισχύς και ιδανική καμπύλη ισχύος Φ/Β συστοιχίας.

Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και των υπερπυκνωτών παρουσιάζεται στο σχήμα 5.22. Παρατηρείται ότι η κατάσταση φόρτισης των υπερπυκνωτών διατηρείται σε σταθερή τιμή, με μικρές μεταβολές (εκφορτίσεις) σε κάθε αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, για την εξισορρόπηση της ισχύος. Επιπλέον, η συστοιχία των μπαταριών, μετά την αρχικοποίηση του μοντέλου, αρχικά φορτίζεται, καθώς η συνολική παραγόμενη ισχύς του συστήματος είναι μεγαλύτερη του φορτίου, ενώ, καθώς η ισχύς της Α/Γ μειώνεται, τελικά, οι μπαταρίες οδηγούνται σε εκφόρτιση, ακόμα και με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, αφού ακόμη και τότε, το φορτίο είναι μεγαλύτερο της παραγόμενης ισχύος του συστήματος.



**Σχήμα 5.22:** Κατάσταση φόρτισης μπαταριών (πάνω) και υπερπυκνωτών (κάτω).

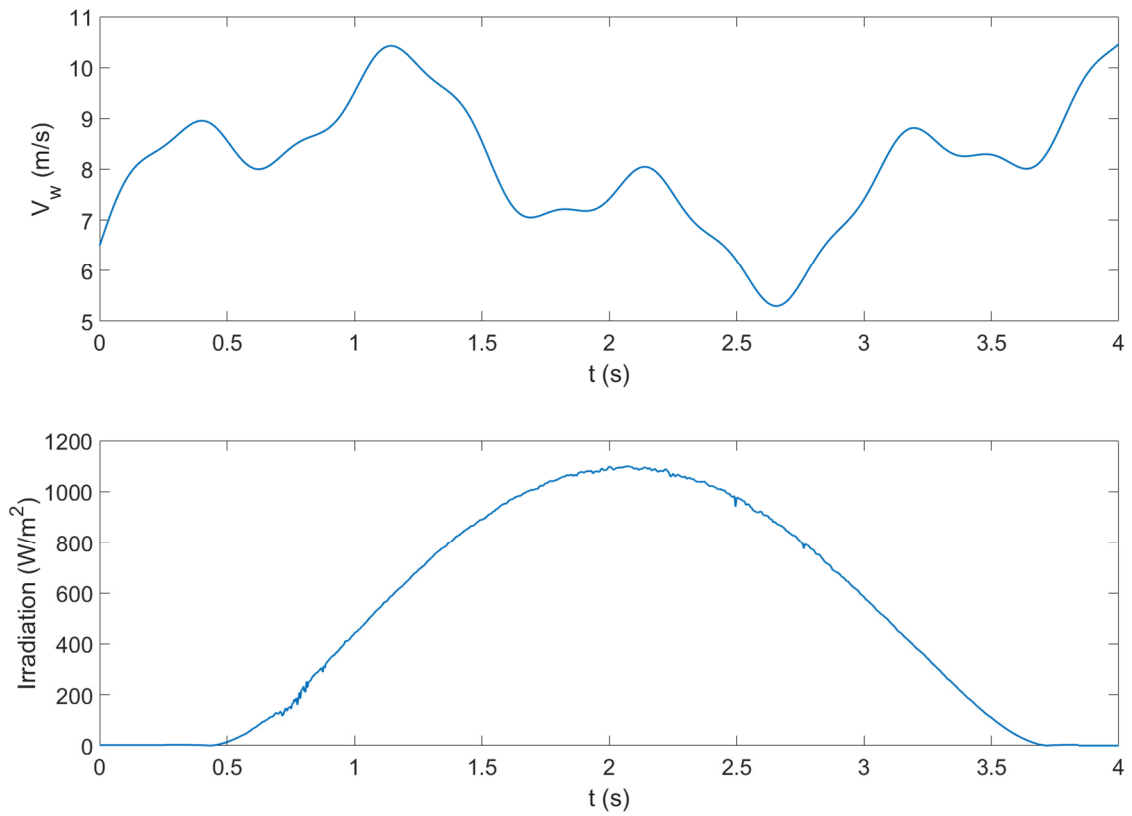
Τέλος, αξίζει να εξεταστεί η σταθερότητα της τάσης του ζυγού ΣΡ κατά την διάρκεια των ανωτέρω μεταβολών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23, χάρη στην συνεργασία των μονάδων αποθήκευσης με τις μονάδες παραγωγής του συστήματος, η τάση του ζυγού ΣΡ διατηρείται σταθερή στα 700V, για κάθε μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, με μέγιστη διακύμανση της τάξης των 2.5V. Με σταθερή την τάση του ζυγού ΣΡ, εξίσου σταθερή προκύπτει και η τάση εξόδου του αντιστροφέα, με κυματομορφές που έχουν ήδη παρουσιαστεί στην προηγούμενη ενότητα.



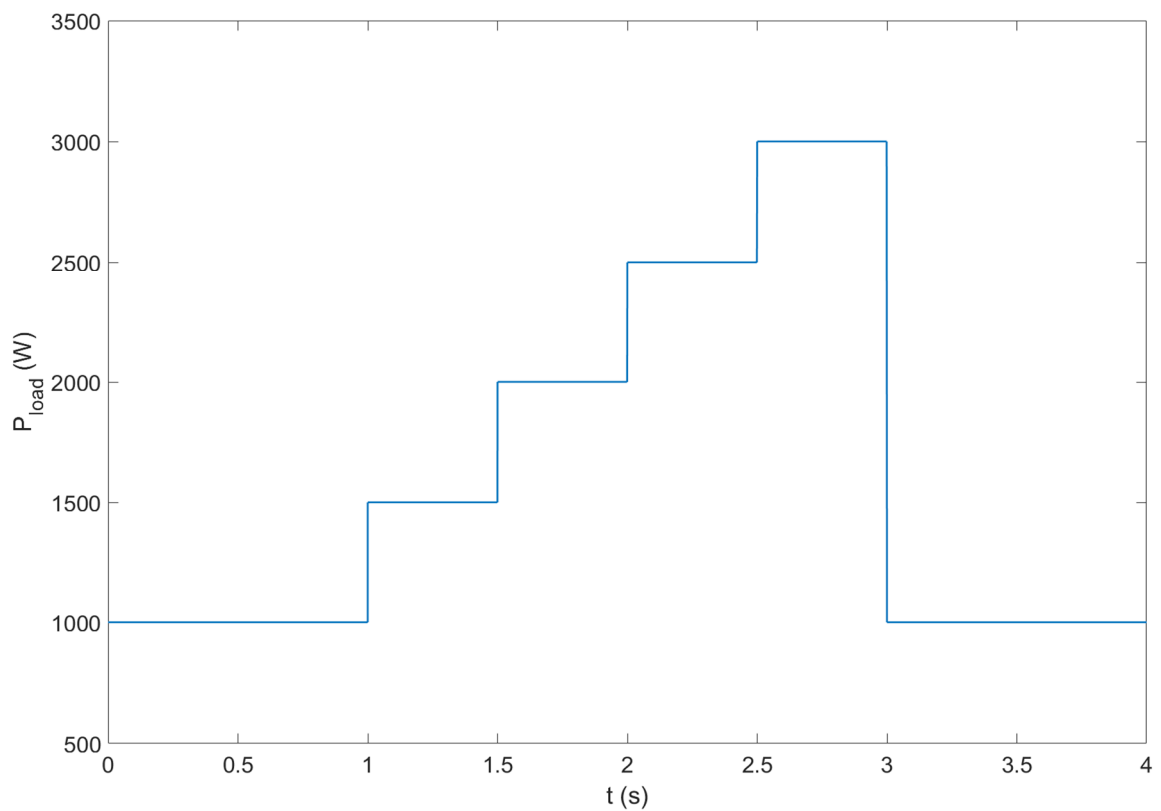
**Σχήμα 5.23:** Τάση ζυγού ΣΡ.

### 5.2.3 Απόκριση σε χρονοσειρές εισόδων

Στη συγκεκριμένη ενότητα, εισάγονται πραγματικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας στις εισόδους του συστήματος και εξετάζεται η απόκριση του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται είναι αυτές του σχήματος 5.24. Σημειώνεται ότι ο πολύ μικρός χρόνος προσομοίωσης που επιβάλλεται κατά την εκτέλεση του μοντέλου, λόγω των απαιτήσεων των υποσυστημάτων που το απαρτίζουν, καθιστά αδύνατη την προσομοίωση του μοντέλου σε 24ωρη βάση. Συνεπώς, οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται εκφράζουν μια πραγματική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, συνεπτυγμένες ως προς τον άξονα του χρόνου. Έτσι, γίνεται προσομοίωση μιας ημερήσιας μεταβολής των εισόδων του μοντέλου, σε χρονικό διάστημα που διαρκεί 4 δευτερόλεπτα, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν καταγράφονται και εξετάζονται ως προς το ποιοτικό τους περιεχόμενο. Επιπλέον, εφαρμόζεται βηματική αύξηση του φορτίου του συστήματος, ξεκινώντας από την τιμή 1kW, μέχρι την τιμή 3kW, με βήμα 500W, σύμφωνα με το σχήμα 5.25.

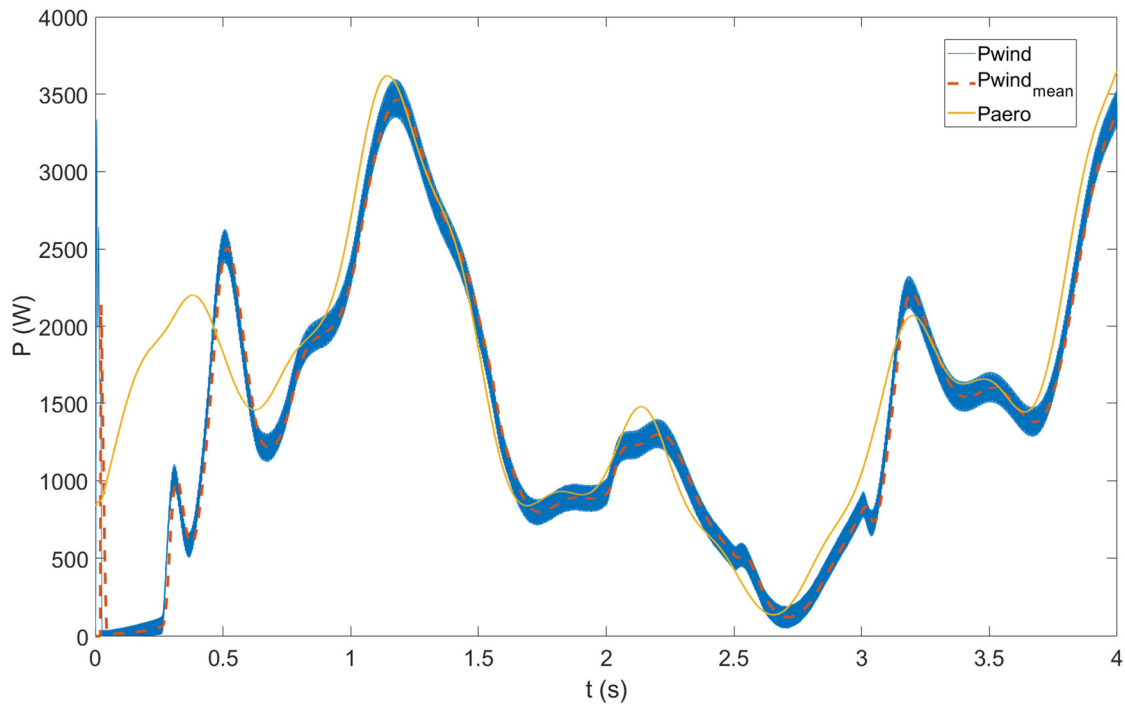


**Σχήμα 5.24:** Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (πάνω) και ηλιακής ακτινοβολίας (κάτω).

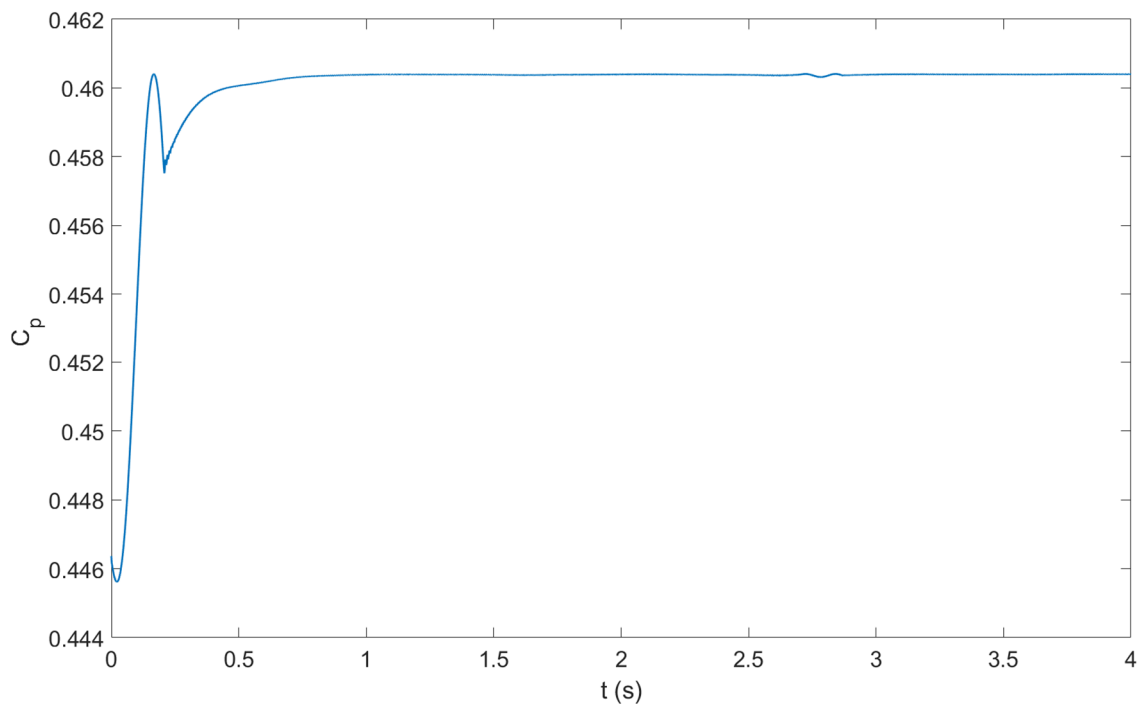


**Σχήμα 5.25:** Βηματική μεταβολή του φορτίου του συστήματος.

Η ισχύς που παράγει η Α/Γ παρουσιάζεται στο σχήμα 5.26. Όπως και στις προηγούμενες ενότητες, η καμπύλη ισχύος της Α/Γ, μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης του μοντέλου, ακολουθεί την καμπύλη ισχύος του αεροδυναμικού μέρους (καμπύλη μέγιστης ισχύος). Η παραγόμενη ισχύς είναι η μέγιστη, καθώς, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.27, ο αεροδυναμικός συντελεστής διατηρεί την μέγιστη τιμή του, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

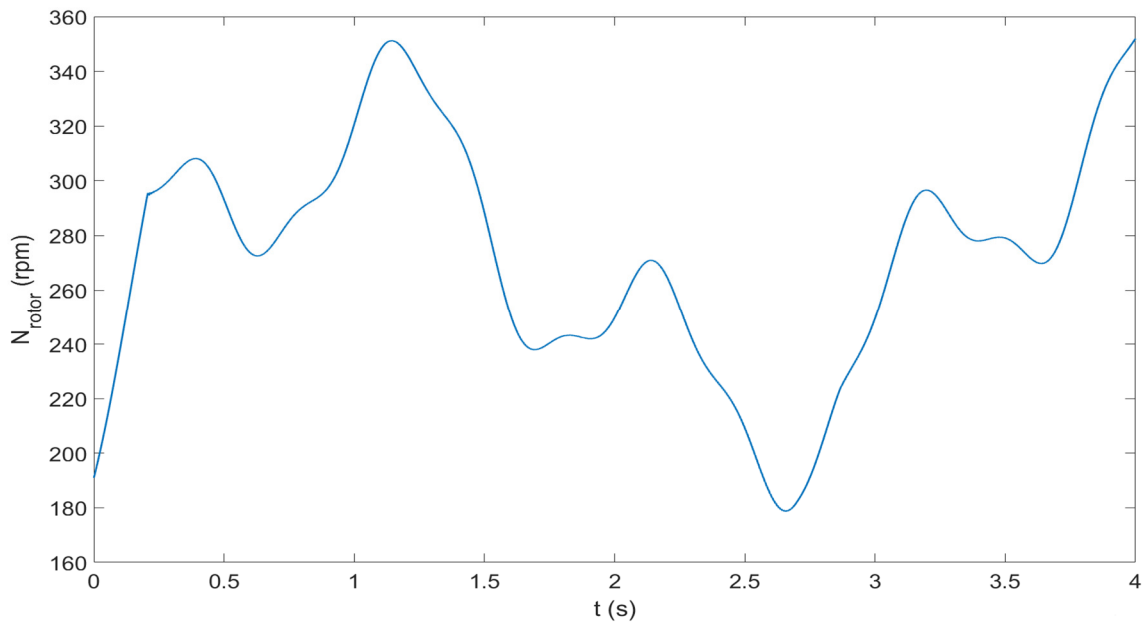


**Σχήμα 5.26:** Παραγόμενη ισχύς Α/Γ.



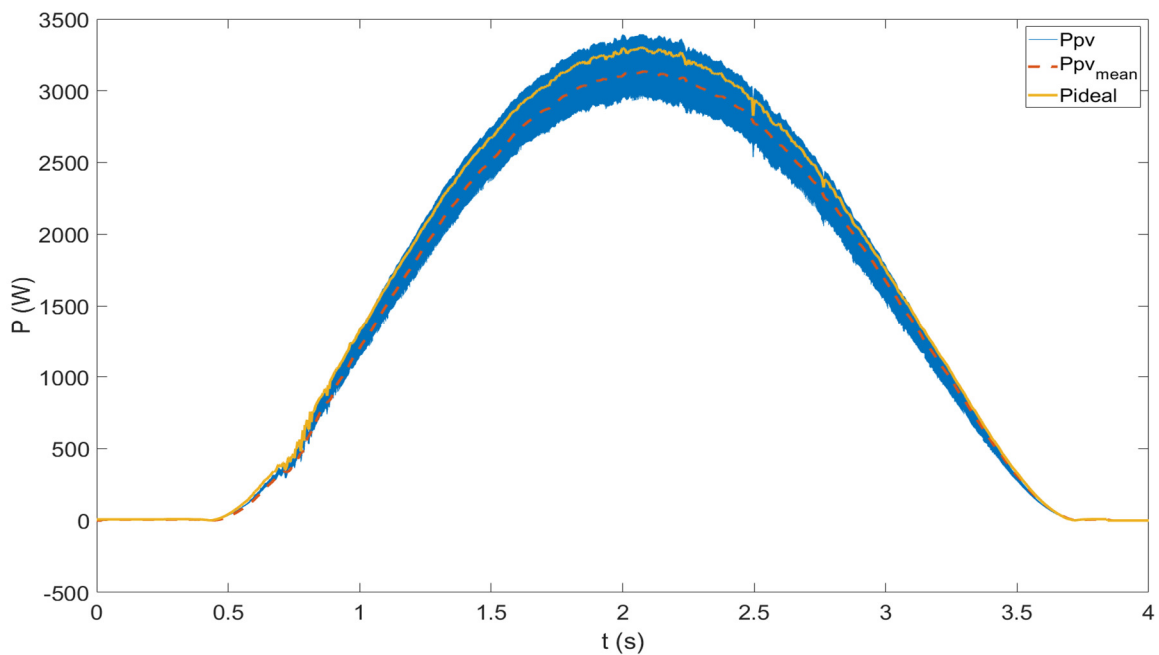
**Σχήμα 5.27:** Αεροδυναμικός συντελεστής Α/Γ.

Με τον αεροδυναμικό συντελεστή να διατηρείται στην μέγιστη τιμή του, η Α/Γ θα περιστρέφεται κατά τρόπο ανάλογο με την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Ενδεικτικά, οι στροφές της Α/Γ παρουσιάζονται στο σχήμα 5.28.



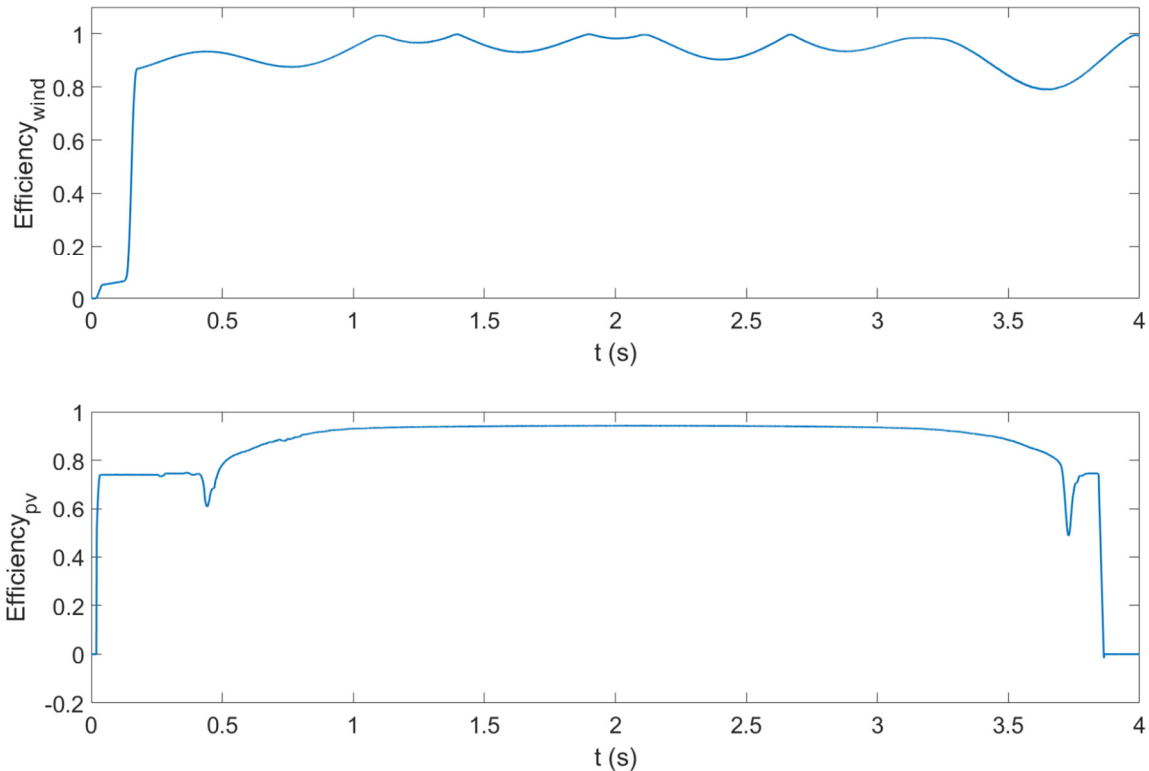
**Σχήμα 5.28:** Ταχύτητα περιστροφής άξονα Α/Γ.

Παρόμοια, η ισχύς που παράγεται από την Φ/Β γεννήτρια παρουσιάζεται στο σχήμα 5.29. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η ιδανική καμπύλη ισχύος. Όπως είναι αναμενόμενο, η Φ/Β συστοιχία ακολουθεί την ιδανική καμπύλη ισχύος για κάθε τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 5.29:** Παραγόμενη ισχύς και ιδανική καμπύλη ισχύος Φ/Β συστοιχίας.

Χρησιμοποιώντας τις καμπύλες ισχύος εξόδου για την Α/Γ και την Φ/Β γεννήτρια, καθώς και τις αντίστοιχες ιδανικές καμπύλες ισχύος (καμπύλες μέγιστης ισχύος) που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, υπολογίζεται η συνολική απόδοση των MPPT ελεγκτών της Α/Γ και της Φ/Β γεννήτριας, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.30.

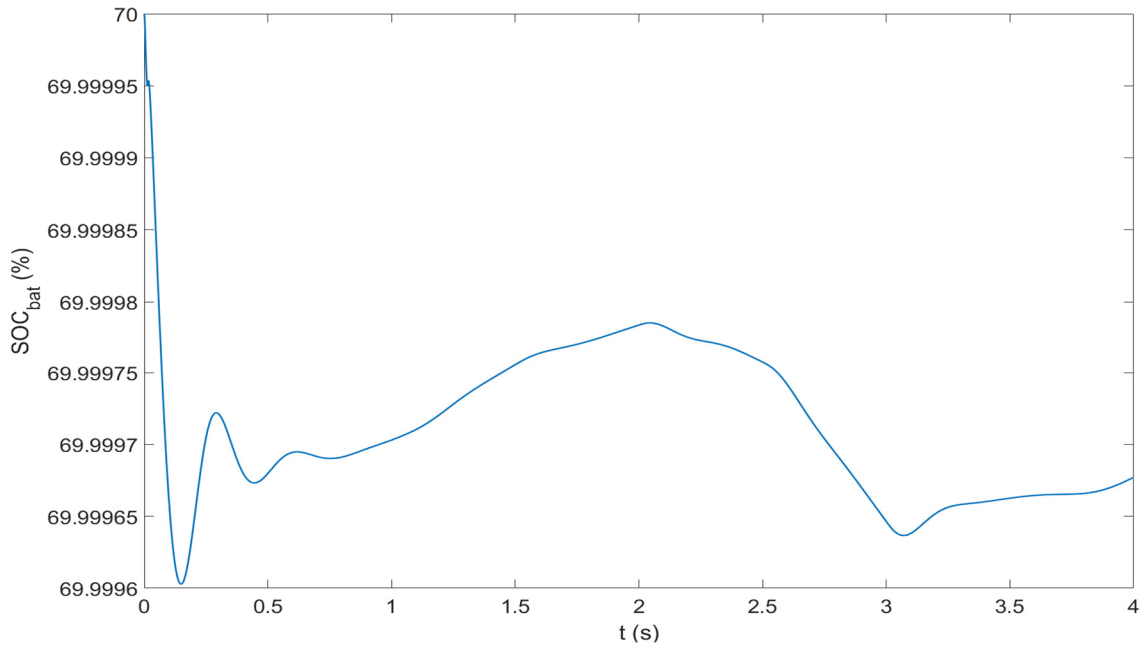


**Σχήμα 5.30:** Απόδοση MPPT ελεγκτή Α/Γ (πάνω) και Φ/Β γεννήτριας (κάτω).

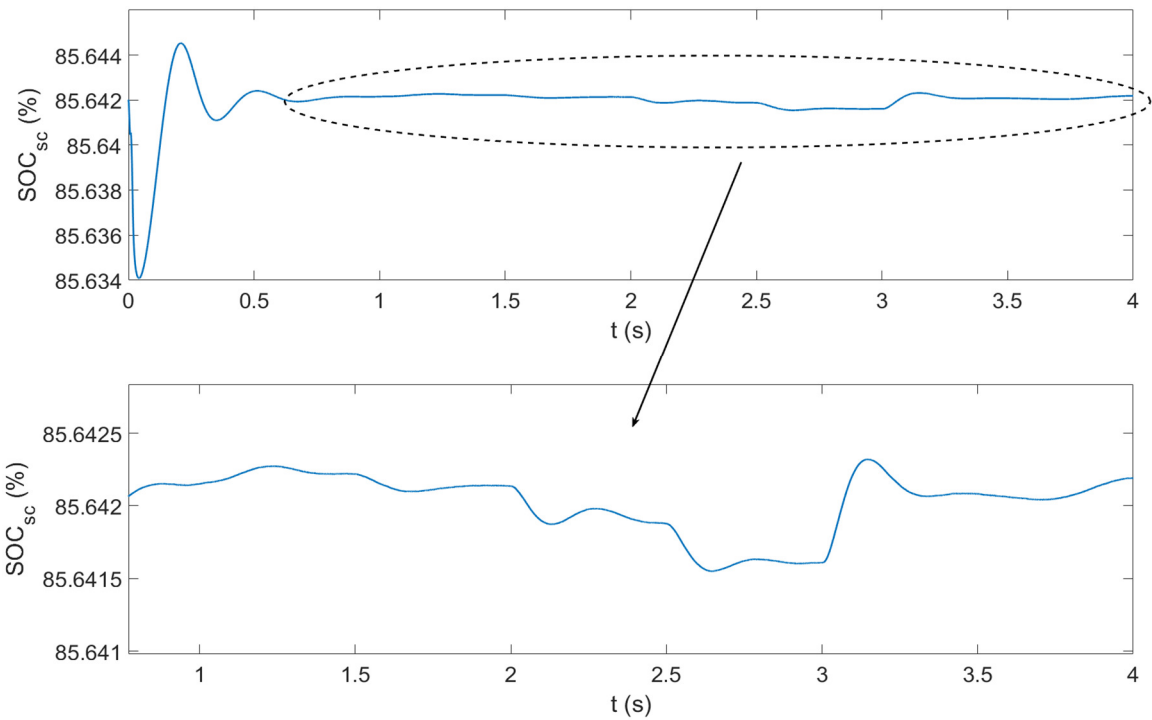
Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο βαθμός απόδοσης του MPPT ελεγκτή της Α/Γ διατηρεί τιμές μεγαλύτερες του 0.8, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ ο βαθμός απόδοσης του MPPT ελεγκτή της Φ/Β γεννήτριας προσεγγίζει τιμές μεγαλύτερες του 0.9, ειδικά καθώς η ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνει την μέγιστη τιμή της. Οι παραπάνω βαθμοί απόδοσης είναι ικανοποιητικά υψηλοί, επιβεβαιώνοντας την σωστή λειτουργία του μοντέλου που αναπτύχθηκε.

Στη συνέχεια, στα σχήματα 5.31 και 5.32 παρουσιάζονται οι καταστάσεις φόρτισης των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, αντίστοιχα, ως αποτέλεσμα της απόκρισής τους στο ισοζύγιο ισχύος. Όπως διακρίνεται από τα σχήματα, το χρονικό διάστημα  $0.7 < t < 2sec$ , δηλαδή αμέσως μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης, το σύστημα διαθέτει περίσσεια ισχύος, η οποία χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών, με τους υπερπυκνωτές να βρίσκονται σε περίπου σταθερή κατάσταση φόρτισης, ίση με την αρχική. Ωστόσο, στο χρονικό διάστημα  $t > 2sec$ , παρουσιάζεται έλλειμμα ισχύος στο σύστημα, με αποτέλεσμα η συστοιχία των μπαταριών να μεταβαίνει σε κατάσταση εκφόρτισης, για την αντιστάθμιση. Αντίστοιχα, οι υπερπυκνωτές υποβοηθούν την συστοιχία των μπαταριών, εκτελώντας πιο γρήγορες και απότομες εκφορτίσεις τις χρονικές στιγμές 2sec και 2.5sec, στις οποίες πραγματοποιείται βηματική αύξηση του φορτίου, σύμφωνα με το σχήμα 5.25. Τελικά, την χρονική στιγμή 3sec, όπου το φορτίο μεταβαίνει από 3kW σε 1kW, δημιουργείται και πάλι περίσσεια ισχύος, μικρότερη σε σχέση με πριν, αφού, πλέον, η Φ/Β συστοιχία παράγει ελάχιστη ισχύ (σχήμα 5.29). Συνεπώς, οι μπαταρίες οδηγούνται σε κατάσταση φόρτισης, ενώ οι υπερπυκνωτές μπορούν και φορτίζονται πιο γρήγορα, επανερχόμενοι στην αρχική τους κατάσταση φόρτισης.





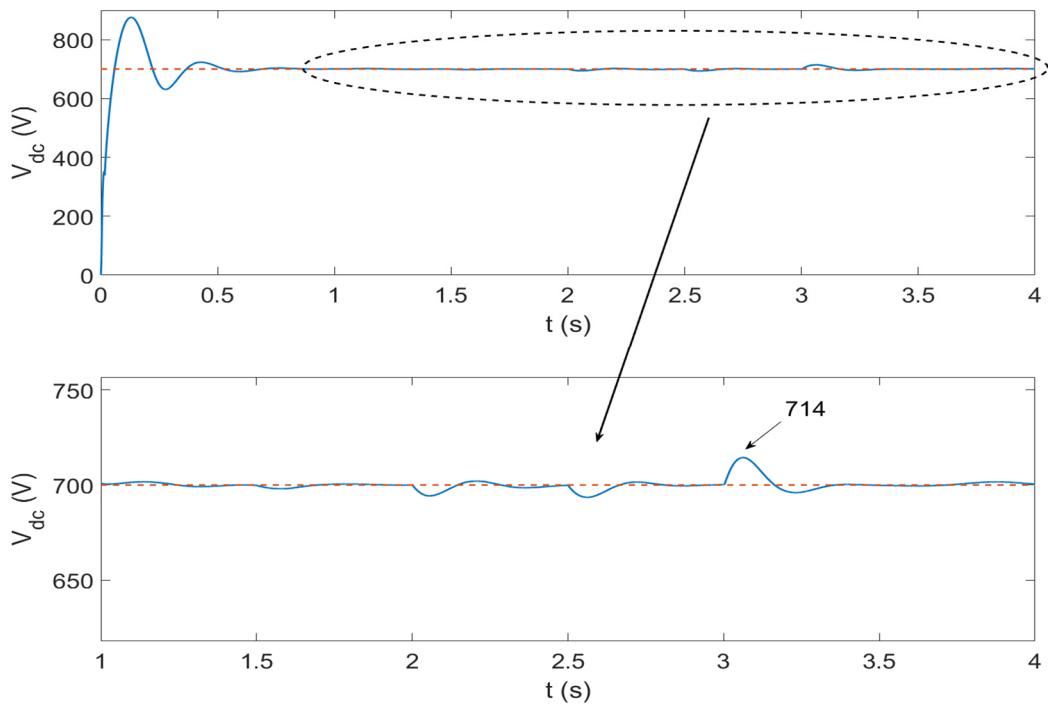
**Σχήμα 5.31:** Κατάσταση φόρτισης μπαταριών.



**Σχήμα 5.32:** Κατάσταση φόρτισης υπερπυκνωτών.

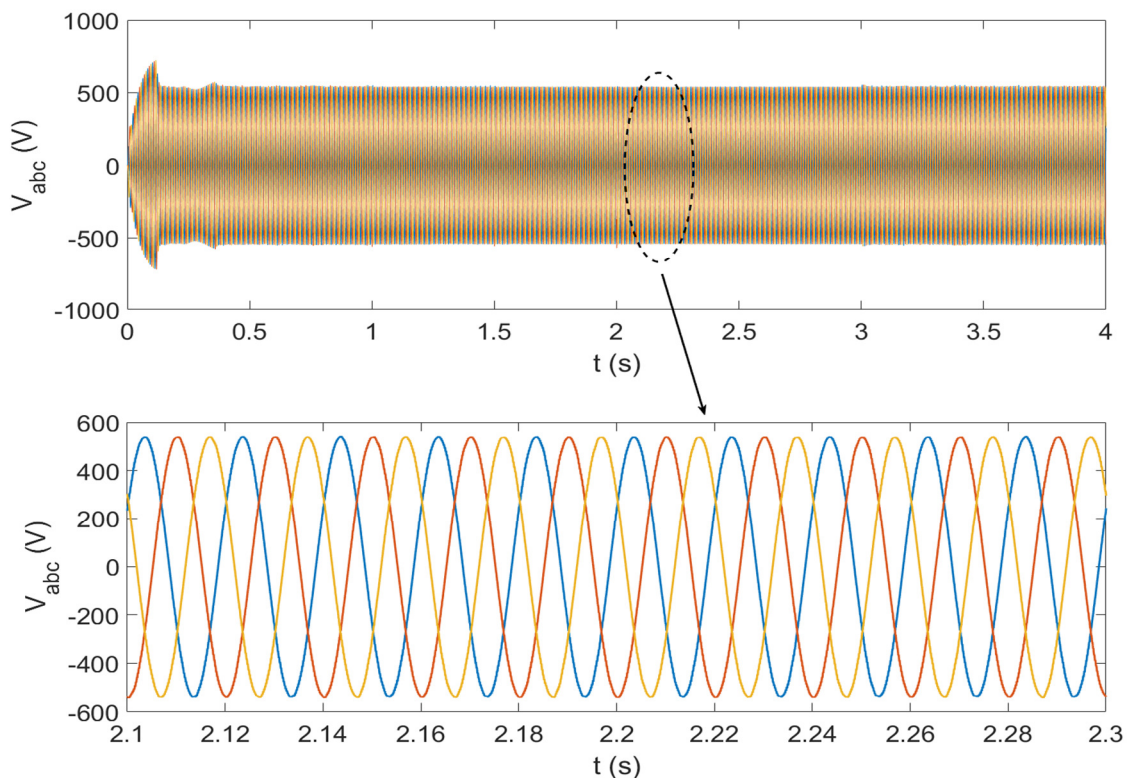
Η τάση του ζυγού ΣΡ κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.33. Η τάση ΣΡ διατηρεί σχεδόν σταθερή τιμή, ίση με την τάση αναφοράς των 700V. Μικρές μεταβολές εμφανίζονται τις χρονικές στιγμές στις οποίες μεταβάλλεται το φορτίο του συστήματος. Ειδικότερα, η μέγιστη μεταβολή της τάσης προκύπτει την χρονική στιγμή 3sec, όταν το φορτίο παρουσιάζει την μέγιστη μεταβολή του, από 3kW σε 1kW. Ωστόσο, ακόμα και αυτή η μεταβολή (από 700V σε 714V) είναι μόλις 2% ως προς την τάση αναφοράς, δηλαδή ικανοποιητικά μικρή, ώστε η τάση του ζυγού ΣΡ να θεωρείται πρακτικά σταθερή. Η σταθερότητα της τάσης του ζυγού ΣΡ είναι σημαντικός παράγοντας της ποιότητας ισχύος που

τροφοδοτείται στο φορτίο, και επιβεβαιώνει τη σωστή διαχείριση του ισοζυγίου παραγωγής – ζήτησης.

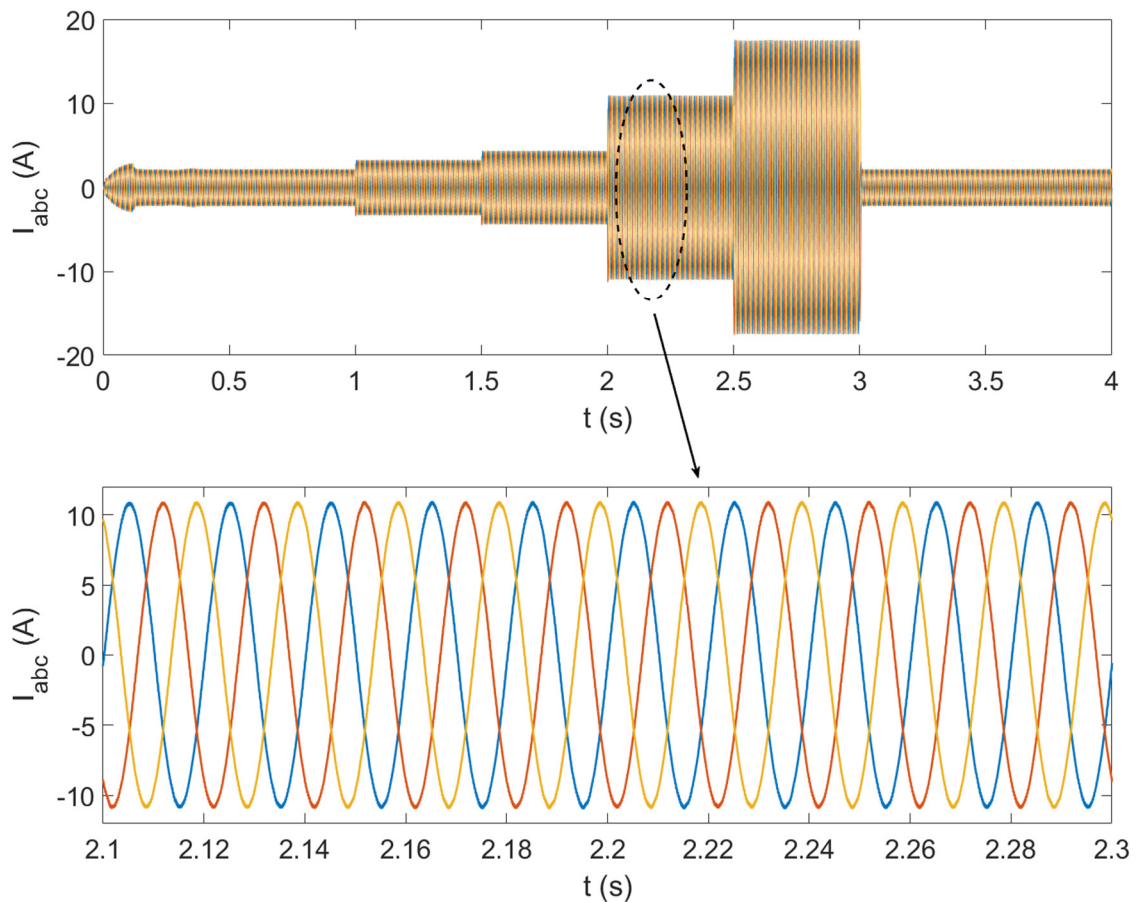


**Σχήμα 5.33:** Τάση ζυγού ΣΡ.

Τέλος, εξετάζονται τα μεγέθη του ζυγού ΕΡ. Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος που τροφοδοτούν το φορτίο παρουσιάζονται στα σχήματα 5.34 και 5.35, αντίστοιχα.



**Σχήμα 5.34:** Τάσεις φορτίου.



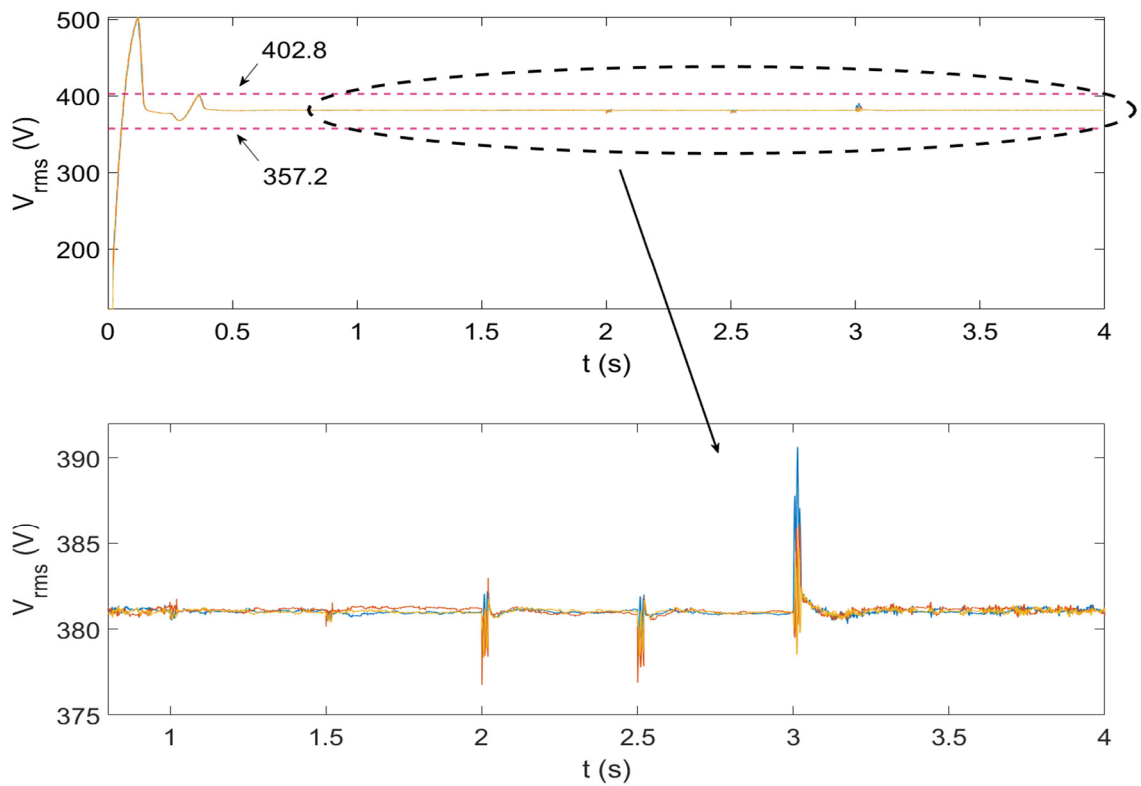
**Σχήμα 5.35:** Ρεύματα φορτίου.

Διακρίνεται εύκολα ότι η τάσεις του ζυγού EP διατηρούν και αυτές περίπου σταθερή τιμή, ίση με  $537V$  ( $380V_{rms}$ ). Μικρές διακυμάνσεις παρουσιάζονται και πάλι κατά τις χρονικές στιγμές στις οποίες μεταβάλλεται το φορτίο, αλλά δεν οδηγούν το σύστημα σε αποσταθεροποίηση. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με πρότυπα του IEEE [14], τα αποδεκτά όρια για την rms τιμή της τάσης του φορτίου είναι  $\pm 6\%$ . Με άλλα λόγια, για την περίπτωση των  $380V_{rms}$ , η τάση του φορτίου θα πρέπει να παραμένει μεταξύ  $402.8V$  και  $357.2V$ . Παρατηρώντας το σχήμα 5.36, στο οποίο παρατίθεται η rms τιμή των τάσεων του φορτίου, είναι προφανές ότι το σύστημα διατηρεί όλες τις τάσεις EP μέσα στα επιθυμητά όρια. Επιπλέον, αναφέρεται ότι, με σταθερή την τάση εξόδου, το ρεύμα του φορτίου ακολουθεί την βηματική μεταβολή της ισχύος του φορτίου (σχήμα 5.25), παρουσιάζοντας βηματική αύξηση μέχρι την χρονική στιγμή 3sec, και, εν τέλει, μείωση στην αρχική του τιμή.

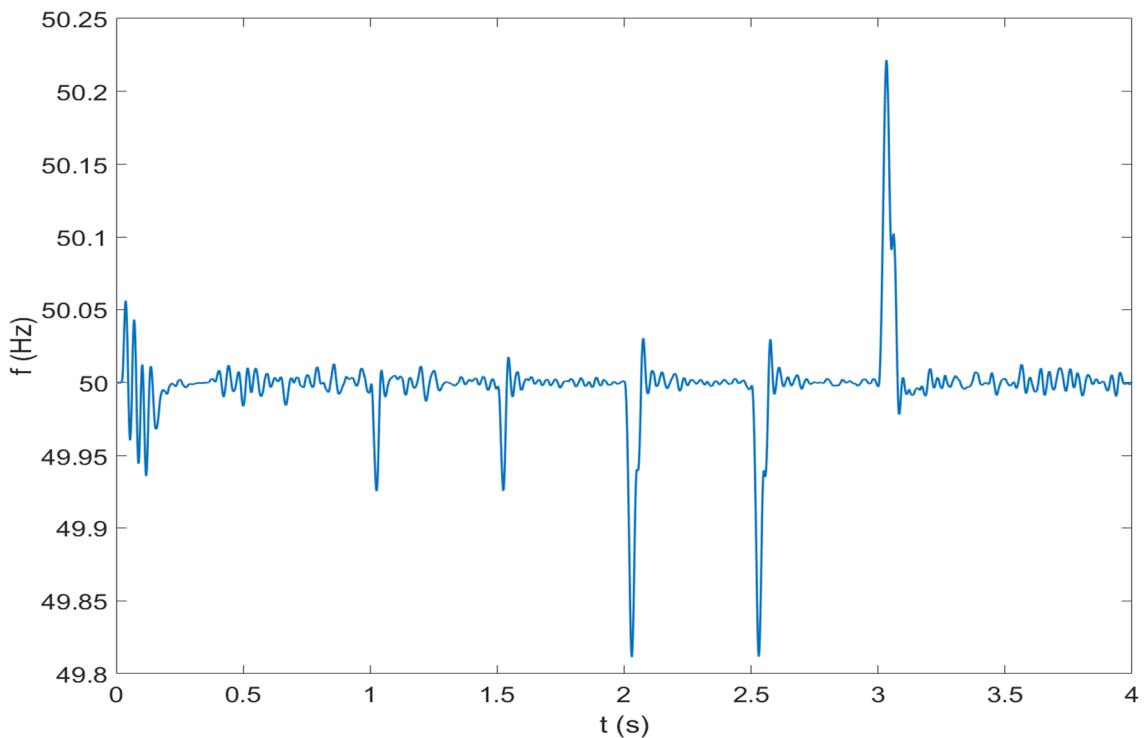
Η συχνότητα του φορτίου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.37. Παρατηρείται ότι η συχνότητα παρουσιάζει μικρή μεταβλητότητα, με τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις να προκύπτουν και πάλι τις χρονικές στιγμές που το φορτίο μεταβάλλεται βηματικά. Σύμφωνα με πρότυπα του IEEE [14], τα αποδεκτά όρια για την συχνότητα του φορτίου είναι  $\pm 0.8\%$ . Συνεπώς, για την περίπτωση των  $50Hz$ , η συχνότητα του φορτίου θα πρέπει να παραμένει μεταξύ  $50.4Hz$  και  $49.6Hz$ . Παρατηρώντας το σχήμα 5.37, είναι προφανές ότι η συχνότητα του φορτίου διατηρείται, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, μέσα στα επιθυμητά όρια.

Τελευταία εξετάζεται η συνολική αρμονική παραμόρφωση των κυματομορφών της τάσης του φορτίου, στο σχήμα 5.38. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση βρίσκεται σε ικανοποιητικά όρια, διατηρώντας τιμές μεταξύ  $1\%$  και  $2\%$ , μετά την αρχικοποίηση του μοντέλου, παρουσιάζοντας υψηλότερες διακυμάνσεις σε κάθε βηματική μεταβολή του

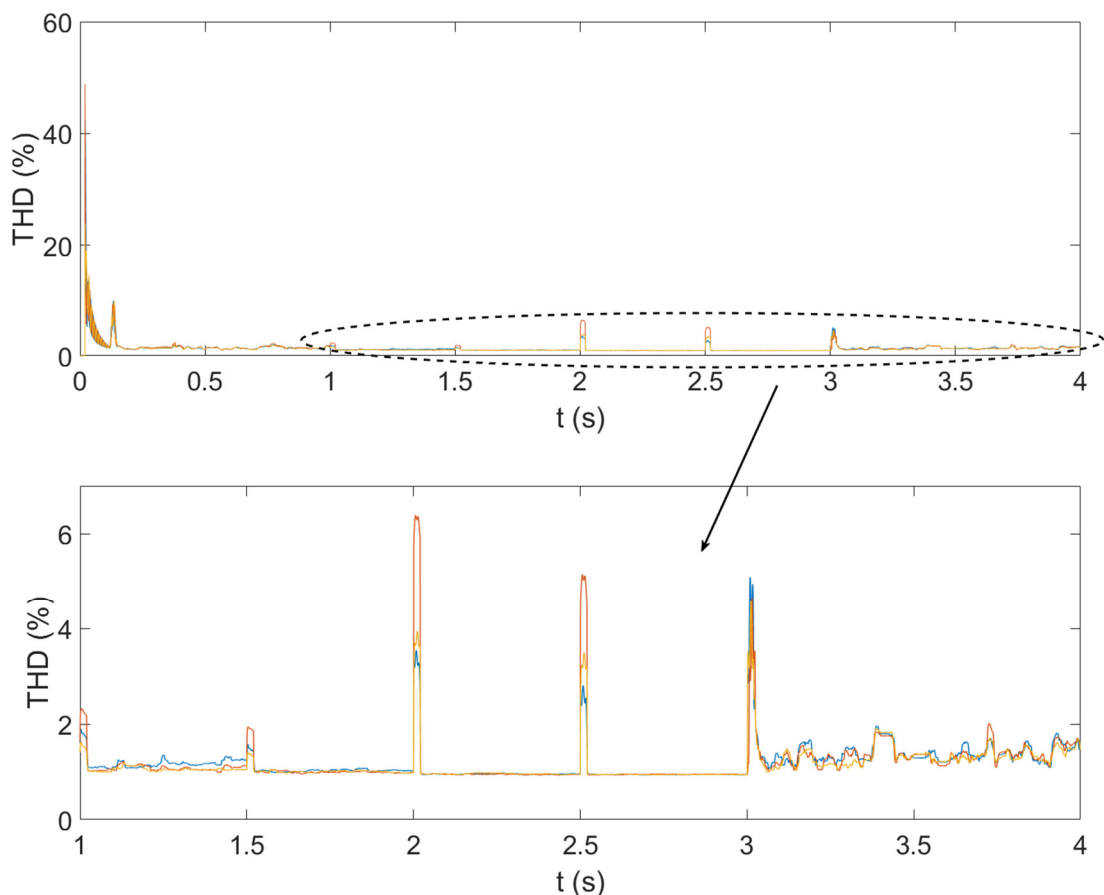
φορτίου. Συγκεκριμένα, όπως διακρίνεται στο σχήμα 5.38, η μέγιστη αρμονική παραμόρφωση προκύπτει την χρονική στιγμή 2sec, με τιμή 6.4%, ενώ τις χρονικές στιγμές 2.5sec και 3sec, η αρμονική παραμόρφωση προσεγγίζει τιμές περί το 5%.



**Σχήμα 5.36:** RMS τιμές των τάσεων του φορτίου.



**Σχήμα 5.37:** Συχνότητα του φορτίου.



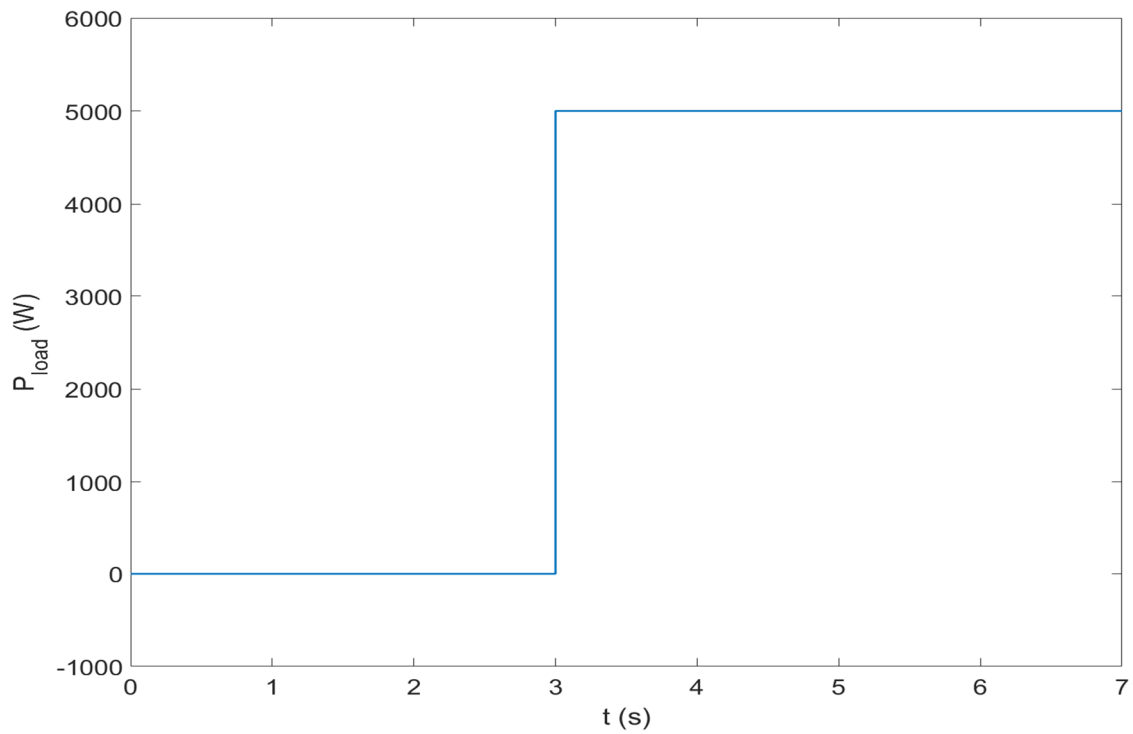
**Σχήμα 5.38:** Αρμονική παραμόρφωση τάσης φορτίου.

Ολοκληρώνοντας, υπενθυμίζεται ότι τα παραπάνω αποτελέσματα που αφορούν τον ζυγό ΕΡ προκύπτουν για την βηματική μεταβολή του φορτίου του σχήματος 5.25. Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, τα αποτελέσματα βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων. Ωστόσο, σημειώνεται ότι για φορτίο που βασίζεται σε χρονοσειρά και παρουσιάζει πιο ομαλή μεταβολή, τα αποτελέσματα που αφορούν την rms τιμή της τάσης του φορτίου, την συχνότητα του φορτίου, καθώς και την συνολική αρμονική παραμόρφωση θα προκύπτουν ακόμη καλύτερα.

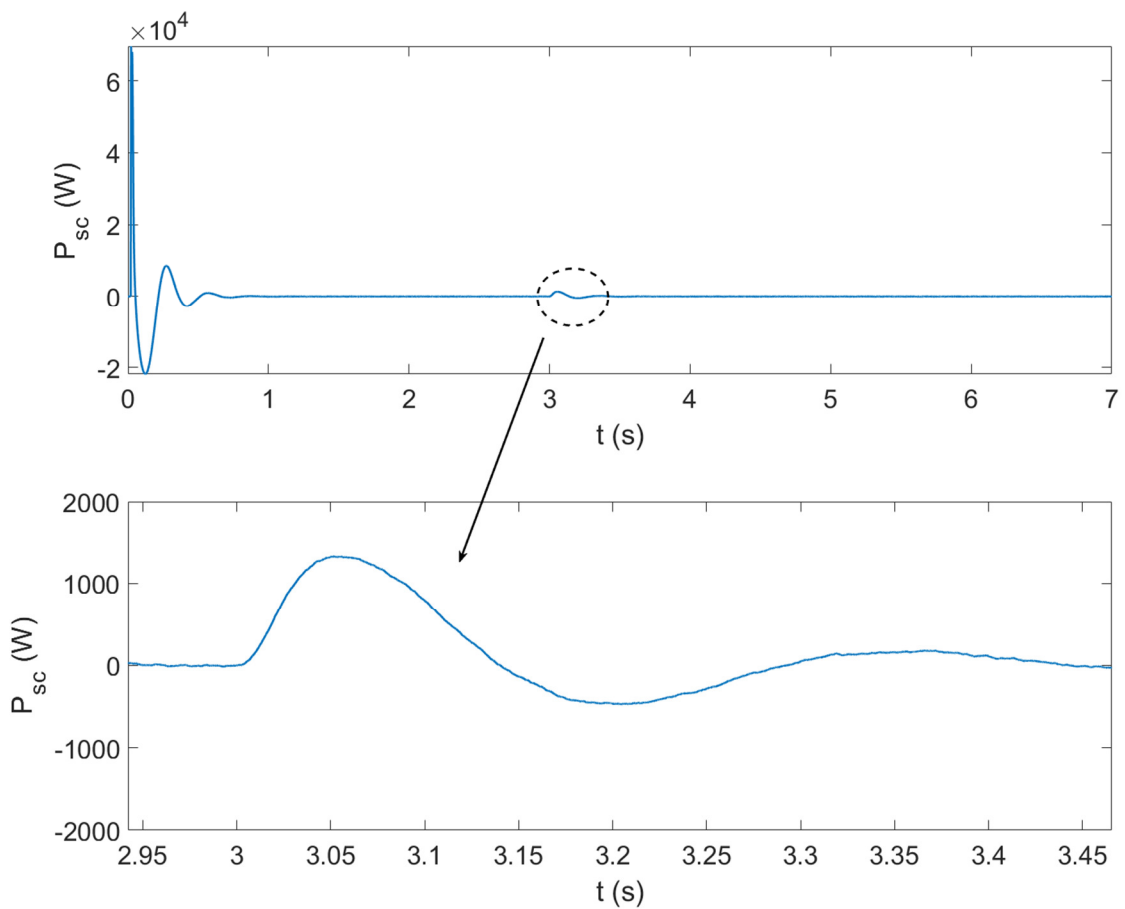
#### 5.2.4 Αξιολόγηση λειτουργίας υπερπυκνωτών

Σε αυτήν την ενότητα αξιολογείται ο επικουρικός ρόλος των υπερπυκνωτών στο ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης, στην ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ, αλλά και στην απόκριση της συστοιχίας των μπαταριών. Πιο συγκεκριμένα, επιβάλλεται στο σύστημα βηματική μεταβολή της ισχύος του φορτίου από 0kW στα 5kW, η μέγιστη που έχει εφαρμοστεί έως τώρα, χωρίς την παρουσία της Α/Γ και της Φ/Β γεννήτριας. Τα αποτελέσματα καταγράφονται με και χωρίς τη χρήση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών. Η βηματική μεταβολή του φορτίου φαίνεται στο σχήμα 5.39.

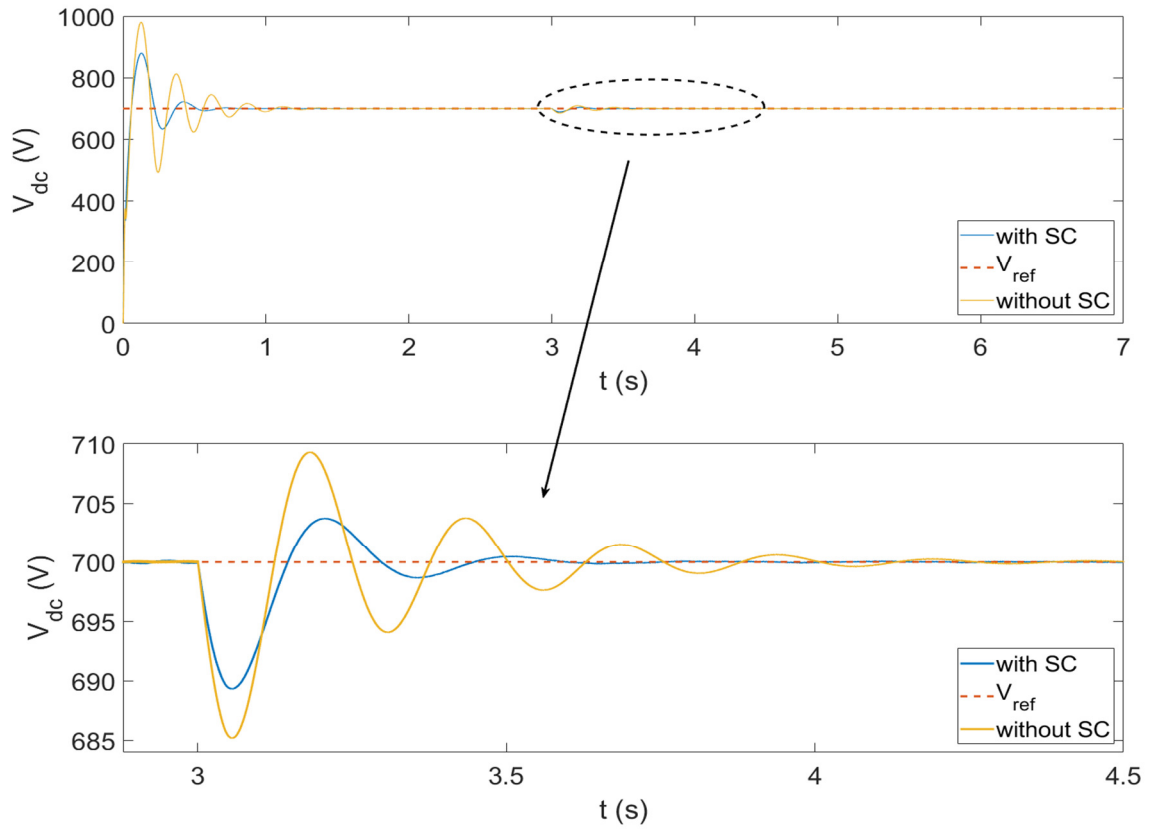
Τα αποτελέσματα της απόκρισης ισχύος που αποδίδουν οι υπερπυκνωτές κατά την σύνδεσή τους παρουσιάζονται στο σχήμα 5.40. Η λειτουργία των υπερπυκνωτών στη σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού ΣΡ παρουσιάζεται στο σχήμα 5.41, ενώ η απόκριση της συστοιχίας των μπαταριών με και χωρίς υπερπυκνωτές παρουσιάζεται στο σχήμα 5.42.



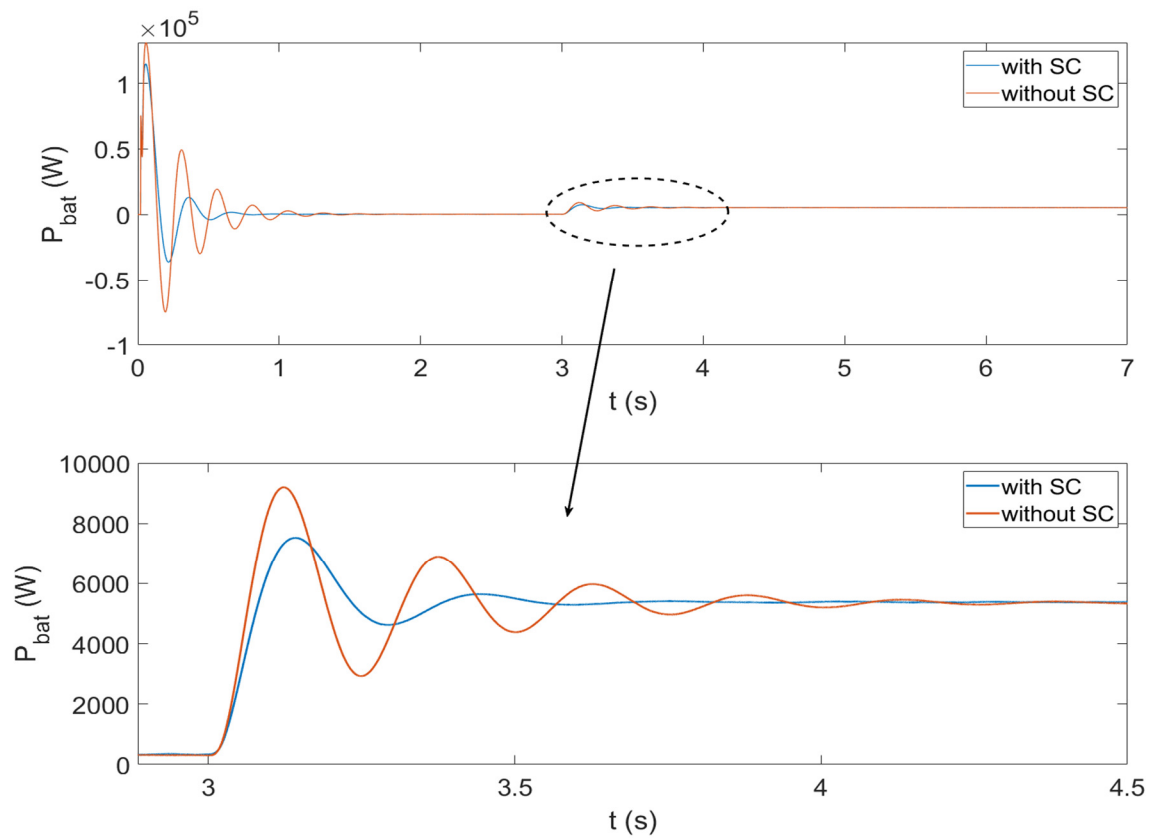
**Σχήμα 5.39:** Βηματική μεταβολή του φορτίου του συστήματος.



**Σχήμα 5.40:** Απόκριση ισχύος υπερπυκνωτών.



**Σχήμα 5.41:** Τάση ζυγού ΣΡ.



**Σχήμα 5.42:** Απόκριση συστοιχίας μπαταριών.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.41, η βύθιση της τάσης στο ζυγό ΣΡ είναι μικρότερη με τη χρήση των υπερπυκνωτών. Επιπλέον, η σταθεροποίηση της τάσης επιτυγχάνεται ταχύτερα, σε περίπου τον μισό χρόνο από ότι χωρίς την χρήση των υπερπυκνωτών. Συνεπώς, η χρήση των υπερπυκνωτών βελτιώνει αρκετά την ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.

Επιπλέον, σύμφωνα με το σχήμα 5.42, οι υπερπυκνωτές βελτιώνουν την απόκριση της συστοιχίας μπαταριών, οδηγώντας όχι μόνο σε ταχύτερη αποκατάσταση της ισορροπίας κατά τη μεταβολή του φορτίου, αλλά και σε μικρότερες αιχμές ισχύος κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο, σε βάθος χρόνου, επιβραδύνονται φαινόμενα υποβάθμισης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μπαταριών, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής τους και επιβεβαιώνοντας την σωστή επικουρική λειτουργία των υπερπυκνωτών.



## 6. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

### 6.1 Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που περιλαμβάνει ΑΠΕ και αποθήκευση μέσω μπαταριών μολύβδου-οξέος. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του συστήματος προσομοιώθηκε μέσω ενός δυναμικού μοντέλου διακριτού χρόνου, που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Στο παρόν κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα, επισημαίνονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης και αναφέρονται θέματα τα οποία, με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκε ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Τις κύριες ενεργειακές πηγές του συστήματος αποτελούν μία ανεμογεννήτρια, η οποία χρησιμοποιεί μια σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ενώ μια συστοιχία μπαταριών μολύβδου-οξέος και μια συστοιχία υπερπυκνωτών χρησιμοποιούνται ως μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Η διασύνδεση των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω ενός κοινού ζυγού ΣΡ, με χρήση κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, ενώ η διαχείριση της ισχύος του συστήματος επιτελείται με την βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων ελεγκτών.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος προέκυψε με χρήση της μεθόδου της πιθανότητας απώλειας τροφοδοσίας (LPSP), με εφαρμογή χρονοσειρών για την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και την ημερήσια καμπύλη φορτίου, βασιζόμενες σε πραγματικά δεδομένα. Μελετήθηκαν τρία σενάρια διαστασιολόγησης, με διαφορετικό βαθμό αξιοπιστίας, από τα οποία επιλέχθηκε το βέλτιστο, σύμφωνα με τους τεχνικούς περιορισμούς των συνιστωσών του συστήματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση κόστους για την επιλεγμένη διαστασιολόγηση, καθώς και επαλήθευση της ορθότητάς της, με την προσομοίωση του συστήματος σε ετήσια βάση στο λογισμικό HOMER.

Ο έλεγχος του συστήματος περιλαμβάνει ελεγκτές MPPT για την παραγόμενη ενέργεια των κύριων ενεργειακών πηγών, καθώς και τον διαχειριστικό έλεγχο του συστήματος, μαζί με επιμέρους ελεγκτές, για την βέλτιστη λειτουργία όλων των συνιστωσών. Οι MPPT ελεγκτές της ανεμογεννήτριας και της φωτοβολταϊκής γεννήτριας βασίστηκαν στην μέθοδο των μικρών μεταβολών (P&O), εκτελώντας τοπικές μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων εξόδου. Η σχεδίαση του διαχειριστικού αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε με στόχο την σωστή ικανοποίηση του ισοζυγίου παραγωγής – ζήτησης, αλλά και για την αξιοποίηση του επικουρικού ρόλου της συστοιχίας των υπερπυκνωτών στη βελτίωση της απόκρισης του συστήματος, καθώς και των τεχνικών χαρακτηριστικών των μπαταριών μολύβδου-οξέος.

Για την αξιολόγηση του συστήματος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Αρχικά, έγινε επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος, με την καταγραφή της απόκρισής του σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, υπό ονομαστική ταχύτητα ανέμου, μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία και σταθερό φορτίο. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η λειτουργία του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, με σταθερό φορτίο, επιβεβαιώνοντας την σωστή λειτουργία των ελεγκτών MPPT της ανεμογεννήτριας και της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Επιπλέον, εξετάστηκε η λειτουργία του συστήματος με χρήση πραγματικών χρονοσειρών για την ταχύτητα ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία, με βηματική μεταβολή του φορτίου, για την μελέτη της ικανότητας του συστήματος για σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού ΣΡ και της σωστής παροχής ισχύος στο φορτίο.

Εξετάζοντας όλα τα αποτελέσματα, επιτεύχθηκαν οι παρακάτω στόχοι:

- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο – επίτευξη αυτονομίας.
- Σωστή διαχείριση παραγόμενης και αποθηκευμένης ενέργειας.
- Ποιότητα ισχύος στον ζυγό ΣΡ (σταθερότητα τάσης).
- Ποιότητα ισχύος στον ζυγό ΕΡ (ζυγός φορτίου) ως προς την σταθερότητα της rms τιμής της τάσης και της συχνότητας, καθώς και χαμηλή αρμονική παραμόρφωση.
- Υψηλοί βαθμοί απόδοσης ελεγκτών MPPT για την ανεμογεννήτρια και την φωτοβολταϊκή γεννήτρια.
- Σωστή επικουρική λειτουργία υπερπυκνωτών.

Ακολούθως, εξετάστηκε η δυναμική απόκριση του συστήματος σε απότομα μεταβατικά φαινόμενα, χωρίς την παρουσία των ενεργειακών πηγών, για την αξιολόγηση του ρόλου των υπερπυκνωτών στην λειτουργία του συστήματος. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται στο σύστημα για τους παρακάτω βασικούς λόγους:

- Κάλυψη ελλειμμάτων ισχύος που οφείλονται στην αργή απόκριση της συστοιχίας των μπαταριών.
- Βελτίωση της σταθεροποίησης της τάσης στον ζυγό ΣΡ.
- Βελτίωση τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των μπαταριών, χάρη στην μείωση των καταπονήσεων της συστοιχίας, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι το σύστημα που αναπτύχθηκε, σε συνδυασμό με την μέθοδο ελέγχου που εφαρμόστηκε, παρουσιάζει σωστές αποκρίσεις σε όλες τις μεταβολές στις οποίες υποβλήθηκε, καθιστώντας το αξιόπιστο και υλοποιήσιμο.

## 6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Στην παρούσα εργασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ-μπαταριών, που προορίζεται για αυτόνομη λειτουργία, περιλαμβάνονται τα παρακάτω σημεία καινοτόμου συνεισφοράς:

- Ανάπτυξη μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου σταθμού παραγωγής ΑΠΕ-μπαταριών και όλων των απαραίτητων ελεγκτών για την εύρυθμη λειτουργία του.
- Διαστασιολόγηση του συστήματος με χρήση του αλγορίθμου LPSP και επιβεβαίωση της διαστασιολόγησης με το λογισμικό HOMER.
- Δημιουργία αλγορίθμου διαχείρισης του συστήματος, με στόχο την βέλτιστη αξιοπιστία του και την ασφαλή και αποδοτική χρήση των μπαταριών μολύβδου-οξέος.
- Χρήση συστοιχίας υπερπυκνωτών, σε συνδυασμό με την συστοιχία μπαταριών μολύβδου-οξέος, και αξιολόγηση της συμβολής τους στο ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης, στην βελτίωση της ποιότητας ισχύος του ζυγού ΣΡ, καθώς και στην μείωση των καταπονήσεων της συστοιχίας των μπαταριών, προς βελτίωση της διάρκειας ζωής τους.

### 6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας και με βάση τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν, αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική επιβεβαίωση των ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν.
- Υλοποίηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος.
- Βελτίωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, ώστε να μπορεί να προσομοιώσει την λειτουργία του υβριδικού συστήματος σε 24ωρη βάση, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι το σύστημα είναι υλοποιήσιμο.
- Βελτίωση των ελεγκτών MPPT των ενεργειακών πηγών, καθώς και των ελεγκτών των μονάδων αποθήκευσης, με χρήση διαφορετικών, πιο αποδοτικών αλγορίθμων, προς βελτίωση της απόκρισης του συστήματος και την επίτευξη οικονομικότερης λειτουργίας.
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός αντίστοιχου υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιεί μπαταρίες λιθίου-ιόντος ή κάποια διαφορετική τεχνολογία αποθήκευσης, αντί για μπαταρίες, και σύγκριση των δύο συστημάτων.

## Βιβλιογραφία

- [1] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis.htm).
- [2] Χριστοφής Ι. Κορωναίος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», ΕΜΠ, Μάρτιος 2012.
- [3] Ιωάννης Γιαννακούρας, Δέσποινα Ζαραβέλα, Αχιλλέας Μανδρίκας, “Ανανεώσιμες – Ήπιες Πηγές Ενέργειας”, Προγράμματα Ανοικτών Περιβαλλοντικών Τάξεων «ΚΑΛΛΙΣΤΩ», (n.d.).
- [4] European Court of Auditors, “Wind and solar power for electricity generation: significant action needed if EU targets to be met”, Publications Office of the European Union, Special report No 08, 2019.
- [5] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, “Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας”, ΚΑΠΕ, 2006, <http://www.cres.gr>.
- [6] Wind power, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power).
- [7] Κυριάκος Νεοκλή, “Εξομοίωση υβριδικού συστήματος με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για εγκατάσταση στην Κύπρο”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- [8] Αργυρόπουλος Φώτης, Παυλόπουλος Σπυρίδων, “Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, 2015.
- [9] Κυριαζόπουλος Γεώργιος, Παυλίδης Απόστολος-Ρωμανός, “Σύγκριση και αξιοποίηση υβριδικών συστημάτων”, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Ιούνιος 2013.
- [10] Αντωνία Παπασταματάκη, “Περιγραφή, προσομοίωση και βέλτιστη διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή των Χανίων”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Ιούλιος 2014.
- [11] Υβριδικά συστήματα ισχύος, [https://el.wikipedia.org/wiki/Υβριδικά\\_συστήματα\\_ισχύος](https://el.wikipedia.org/wiki/Υβριδικά_συστήματα_ισχύος).
- [12] Essalaimeh, Saed & Al-Salaymeh, Ahmed & Al Abdallat, Yousef, “Electrical production for domestic and industrial applications using hybrid PV-wind system”, Energy Conversion and Management. 65:736–743, January 2013
- [13] Alliance for Rural Electrification, “Hybrid power systems based on renewable energies: a suitable and cost-competitive solution for rural electrification”, (n.d.)
- [14] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," IEEE Std 1547-2003. pp. 1- 28, 2003.

- [15] Γεώργιος Σταυρακάκης, “Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας”, Πρόγραμμα Επικαιροποίησης Γνώσεων Αποφοίτων «Φωτοβολταϊκά Ενεργειακά Συστήματα», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015.
- [16] Moghbelli, H. & Sabzi, Shahab, “Analysis and simulation of hybrid electric energy storage (HEES) systems for high power applications”, ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings. 122, January 2015.
- [17] Ηλιόπουλος Α. Θεόδωρος, “Προσομοίωση και αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας που εμπεριέχουν τεχνολογίες ΑΠΕ”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.
- [18] Güler, Naki & Irmak, Erdal, “MPPT Based Model Predictive Control of Grid Connected Inverter for PV Systems”, Conference Paper, November 2019.
- [19] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1997.
- [20] Μιχαήλ Π. Αντωνακόπουλος, “Ανάλυση υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και τεχνολογίες υδρογόνου”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2010.
- [21] E. N. López-Ortiz, D. Campos-Gaona and E. L. Moreno-Goytia, "Modelling of a wind turbine with permanent magnet synchronous generator," 2012 North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, Champaign, IL, 2012.
- [22] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar and G. Azevedo, "Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator," 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 734-739, Seoul, 2009.
- [23] M. Ragheb, “Optimal rotor tip speed ratio”, 2014.
- [24] M. Kalantar, S.M. Mousavi G, “Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage”, Applied Energy, Volume 87, Issue 10, Pages 3051-3064, 2010.
- [25] Μάριος Β. Ντέκο, “Ανάλυση λειτουργίας και έλεγχος συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών διασυνδεδεμένης στο δίκτυο”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2010.
- [26] Νικολέττα Σ. Παπαλουκά, “Σχεδιασμός και έλεγχος λειτουργίας αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Νοέμβριος 2011.
- [27] Charith Tammineedi, “Modeling battery-ultracapacitor hybrid systems for solar and wind applications”, M.Sc. Thesis, The Pennsylvania State University, May 2011.

- [28] Habbati Bellia, Ramdani Youcef, Moulay Fatima, “A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB”, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Volume 3, Issue 1, Pages 53-61, June 2014.
- [29] Shiau, Jaw-Kuen & Wei, Yu-Chen & Lee, Min-Yi, “Fuzzy Controller for a Voltage-Regulated Solar-Powered MPPT System for Hybrid Power System Applications”, Energies, May 2015.
- [30] Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, “Φωτοβολταϊκά συστήματα: από τη θεωρία στην πράξη”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2013.
- [31] Argyrou, Maria & Christodoulides, Paul & Marouchos, Christosa & Kalogirou, Soteris, “Hybrid battery-supercapacitor mathematical modeling for PV application using Matlab/Simulink”, Conference Paper, December 2018.
- [32] Α. Χανιώτης, “Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία”, Διδακτορική Διατριβή, Ιανουάριος 2007.
- [33] Δ. Πυλαρινός, “Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Πρόγραμμα Επικαιροποίησης Γνώσεων Αποφοίτων «Φωτοβολταϊκά Ενεργειακά Συστήματα», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015.
- [34] Παπανικολάου Νικόλαος, “Θεωρητική ανάλυση και πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας των κυριότερων τοπολογιών ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος”, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Μάρτιος 2009.
- [35] Daniel Celius Zacharek, Filip Sundqvist, “Design of bidirectional DC/DC battery management system for electrical yacht”, B.Sc. Thesis, Linköping University, 2018.
- [36] Tennessee Tech, “Chapter 4: Model of three-phase inverter”, <https://www.tntech.edu/engineering/pdf/cesr/ojo/asuri/Chapter4.pdf>.
- [37] Bijoyprakash Majhi, “Analysis of single-phase SPWM inverter”, B.Tech Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, May 2012.
- [38] Three Phase Rectification, <https://www.electronics-tutorials.ws/power/three-phase-rectification.html>.
- [39] Hongxing Yang, Wei Zhou, Lin Lu, Zhaohong Fang, “Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm”, Solar Energy, Volume 82, Issue 4, Pages 354-367, April 2008.
- [40] W. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez, “Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system”, Electric Power Systems Research, Volume 39, Issue 1, Pages 35-38, October 1996.

- [41] A.D. Bagul, Z.M. Salameh, B. Borowy, "Sizing of a stand-alone hybrid wind-photovoltaic system using a three-event probability density approximation", *Solar Energy*, Volume 56, Issue 4, Pages 323-335, April 1996.
- [42] E. S. Gavanidous and A. G. Bakirtzis, "Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 1, pp. 42-48, March 1992.
- [43] M.a Elhadidy, S.M Shaahid, "Optimal sizing of battery storage for hybrid (wind+diesel) power systems", *Renewable Energy*, Volume 18, Issue 1, Pages 77-86, September 1999.
- [44] Said. Diaf, Djamila Diaf, Mayouf Belhamel, Mourad Haddadi, Alain Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system", *Energy Policy*, Elsevier, 35, pp.5708- 5718, October 2007.
- [45] Abd El-Shafy A. Nafeh, "Optimal Economical Sizing of a PV-Wind Hybrid Energy System Using Genetic Algorithm", *International Journal of Green Energy*, 8:1, 25-43, February 2011.
- [46] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 2, pp. 367-375, June 1996.
- [47] D.B. Nelson, M.H. Nehrir, C. Wang, "Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems", *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 10, Pages 1641-1656, August 2006.
- [48] P. Vásquez and Á. Vaca, "Methodology for Estimating the Cost of Energy not Supplied -Ecuadorian Case-", 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Montevideo, pp. 1-9, September 2012.
- [49] Hongxing Yang, Zhou Wei, Lou Chengzhi, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system", *Applied Energy*, Volume 86, Issue 2, Pages 163-169, February 2009.
- [50] J. Divya Navamani, A. Lavanya, C.M. Prahadheeshwar, S. Mohammed Riyazudeen, "Hybrid power system design using Homer Pro", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Volume 8, Issue 1S4, June 2019.
- [51] Mekonnen Abiy, "Optimal Sizing of Grid Connected PV/Wind Hybrid System Using Homer Software", January 2018.
- [52] Francisco G. Montoya and Raúl Baños Navarro, "Optimization Methods Applied to Power Systems", *Energies*, July 2019.
- [53] Wang, Chia-Nan & Lin, Wen-Chang & Le, Khoa, "Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control", *Mathematical Problems in Engineering* 2014 1-9, May 2014.

- [54] Yazici, İrfan & Yaylaci, Ersagun Kürşat, “Improving Efficiency of the TSR-MPPT method for Wind Energy Systems by using an Integral Sliding Mode Voltage Regulator”, *Journal of Energy Resources Technology*, November 2017.
- [55] Selman, Nasir, “Comparison Between Perturb & Observe, Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Techniques at Different Weather Conditions”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Volume 5, Issue 7, pp. 12556-12569, July 2016.
- [56] M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, G. Luigi, G. A. e Melo and C. A. Canesin, “Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications”, 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Ischia, pp. 99-104, June 2011.
- [57] Γίδας Παναγιώτης, Δεληγιάννης Ιωάννης, “Χρήση μπαταριών για αύξηση Φ/Β διείσδυσης σε δίκτυο ΧΤ”, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Απρίλιος 2018.
- [58] Keshan Hardik, Thornburg Jesse, Ustun Taha Selim, “Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems”, 4th IET Clean Energy and Technology Conference, January 2016.
- [59] Michael Schiemann, Chris Searles, “A technical comparison of Lead-Acid and Lithium-ion Batteries”, 2016