



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

# Μοντελοποίηση μικροδικτύου και ένταξη αυτού στην αγορά ενέργειας με χρήση ευφυούς πράκτορα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Νικολάου Γ. Δανιήλ

Επιβλέπων : Νίκος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2011





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

# Μοντελοποίηση μικροδικτύου και ένταξη αυτού στην αγορά ενέργειας με χρήση ευφυούς πράκτορα

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**Νικολάου Γ. Δανιήλ**

**Επιβλέπων :** Νίκος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....2011

.....  
Νίκος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2011

.....

Νικόλαος Γ. Δανιήλ

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

Copyright © Νικόλαος Δανιήλ, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση του μικροδικτύου που βρίσκεται εγκατεστημένο στο εργαστήριο ΣΗΕ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και η μελέτη ένταξης του στην αγορά ενέργειας με χρήση ευφυούς πράκτορα. Τα συστήματα του εργαστηρίου που μοντελοποιούνται είναι το Φ/Β σύστημα και το σύστημα των μπαταριών. Εφαρμόζονται και επαληθεύονται μοντέλα που αφορούν τις μπαταρίες, τα Φ/Β πανέλα και την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτά. Επίσης υπολογίζεται η καμπύλη απόδοσης του Φ/Β αντιστροφέα και του μετατροπέα των μπαταριών. Για το μετατροπέα των μπαταριών υπολογίζονται δύο καμπύλες, μία για τη λειτουργία του ως ανορθωτής και μία ως αντιστροφέας. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα για την ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας, με βάση την οριακή τιμή συστήματος που δίνεται από το EEX (European Energy Exchange). Το πρόγραμμα λειτουργεί ως πράκτορας και αποφασίζει για κάθε στιγμή αν η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β θα διοχετευθεί στο δίκτυο ή αν θα αποθηκευτεί στις μπαταρίες προκειμένου να διατεθεί όταν η οριακή τιμή του συστήματος παρουσιάσει αιχμή. Τέλος, γίνεται μία εκτίμηση για την επίπτωση που θα είχε στην ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας η ύπαρξη ενός φορτίου που θα πρέπει να εξυπηρετηθεί από το ίδιο το μικροδίκτυο.

## Λέξεις κλειδιά

μικροδίκτυο, ευφυής πράκτορας, εργαστήριο, πειραματικές μετρήσεις, μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας, απόδοση Φ/Β αντιστροφέα, μοντέλο των Φ/Β πανέλων, απόδοση μετατροπέα μπαταριών, μοντέλο μπαταριών, ένταξη στην αγορά ενέργειας

## **Abstract**

The purpose of this diploma thesis is the modeling of the microgrid located in the Power Systems Laboratory of the department of Electrical Engineering at the National Technical University of Athens and the study of its integration in the energy market using an intelligent agent. The laboratory systems that are modeled are the PV system and the battery system. There are implemented and verified models on the batteries, the PV panels and the solar radiation incident on the PV panels. Also, it is calculated the yield curve of the PV inverter and the battery converter. For the battery converter, there are two calculated curves, one for its function as a rectifier and one as an inverter. Then, a program of integrating the microgrid in the energy market is developed, based on the system marginal price given by the EEX (European Energy Exchange). The program, which functions as an intelligent agent, decides at any time whether the energy generated by PV system will be allocated to the network or stored in batteries to be disposed of when the system marginal price takes its peak. Finally, there is an estimation of the impact it would have on integrating the microgrid in the energy market, the existence of a load that should be served by the microgrid.

## **Key words**

microgrid, intelligent agent, laboratory, experimental measurements, model of solar radiation, PV inverter yield, model of the PV panels, battery converter yield, battery model, integration in the energy market

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Παναγιώτη Ρωμανό που ήταν ο εμπνευστής αυτής της διπλωματικής. Το όραμά του για τη δημιουργία μιας ομάδας που θα επέκτεινε το εργαστήριο ΣΗΕ, μας ενέπνευσε όλους και μας έδωσε κίνητρο να αφιερώσουμε πολύ χρόνο και προσπάθεια για τον σκοπό αυτό. Μέσα από την καθοδήγησή του και τις πολύτιμες συμβουλές του, καταφέραμε να δημιουργήσουμε μία ομάδα που εργάστηκε αρμονικά και συντονισμένα, αποκομίζοντας ταυτόχρονα εμπειρίες που θα αποδειχθούν πολύτιμες στην μετέπειτα πορεία μας ως Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί. Προσπαθούσε συνεχώς να μας εξοικειώνει με νέες έννοιες και μερίμνησε ώστε να παρακολουθήσουμε πλήθος σεμιναρίων και συνεδρίων που διεύρυναν τις γνώσεις καθώς και την αντίληψη για τον κλάδο μας. Σε προσωπικό επίπεδο, μου έμαθε πόσο σημαντικό είναι για ένα μηχανικό η απόδοση των συστημάτων που σχεδιάζει και η εκπόνηση ποιοτικών μελετών, γεγονός που θα θυμάμαι σε όλη τη διάρκεια της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας. Τέλος, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που ήταν πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος να συζητήσουμε οτιδήποτε αφορούσε τη διπλωματική. Μέσα από τη συζήτηση, διαμορφώσαμε τη διπλωματική έτσι ώστε να μου κρατήσει αμείωτο το ενδιαφέρον ως το τέλος, χωρίς παράλληλα να χάσει την επιστημονική της αξία.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Νίκο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που έδειξε στην ομάδα και στο έργο της. Αψήφησε το γεγονός ότι είχαμε ελάχιστη εργαστηριακή εμπειρία και μας άφησε να πειραματιζόμαστε με τα συστήματα του εργαστηρίου μέχρι να εξοικειωθούμε πλήρως με αυτά. Παράλληλα, φρόντιζε για την προμήθεια όλων των εξαρτημάτων που θεωρούσαμε ότι χρειαζόταν το εργαστήριο, έχοντας μας πλήρη εμπιστοσύνη. Τέλος θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που αναγνώρισε τη δουλειά μας και που έδωσε στα μέλη της ομάδας όση πίστωση χρόνου επιθυμούσαν για την ολοκλήρωση των διπλωματικών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στα υπόλοιπα μέλη της ομάδας, Κώστα Πανταζή, Στέφανο Μπόνια, Μάκη Χριστάκη και Γιώργο Τσολάκο. Η συμμετοχή μου στην ομάδα με γέμιζε με κέφι και ενθουσιασμό, χωρίς να μετανιώσω ούτε μία στιγμή για την επιλογή μου να ασχοληθώ με την ανάπτυξη του εργαστηρίου. Εκτός από τις γνώσεις και τις εμπειρίες που αποκόμισα στα πλαίσια της διπλωματικής, μπορώ να πω ότι πάνω από όλα έκανα μερικούς πολύ καλούς φίλους.





# Περιεχόμενα

	σελίδα
Κατάλογος σχημάτων.....	12
Κατάλογος πινάκων.....	15
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>17</b>
1.1. Σύντομη περιγραφή του εργαστηρίου.....	17
1.1.1. Η γραμμή ισχύος.....	18
1.1.2. Η γραμμή ελέγχου.....	20
1.2. Σκοπός της διπλωματικής και οδηγός των κεφαλαίων.....	20
<b>2. Το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας.....</b>	<b>23</b>
2.1. Οι είσοδοι του μοντέλου.....	23
2.2. Η λειτουργία του μοντέλου.....	27
2.2.1. Υπολογισμός των συνιστωσών του ανισοτροπικού μοντέλου σε οριζόντια επιφάνεια .....	28
2.2.2. Προσαρμογή των συνιστωσών στην επιθυμητή επιφάνεια .....	29
2.3. Πειραματική επιβεβαίωση των μοντέλων.....	33
2.4. Συμπεράσματα.....	35
<b>3. Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα.....</b>	<b>37</b>
3.1. Ο Φ/Β αντιστροφέας.....	37
3.1.1. Η απόδοση του Φ/Β αντιστροφέα.....	38
3.2. Τα Φ/Β πανέλα.....	39
3.2.1. Το ηλεκτρικό ισοδύναμο του πανέλου.....	40
3.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος του πανέλου.....	43
3.2.3. Το μοντέλο των Φ/Β πανέλων.....	44
3.3. Δείκτες που περιγράφουν τη λειτουργία μιας Φ/Β εγκατάστασης .....	48
3.4. Συμπεράσματα.....	51
<b>4. Ο Μετατροπέας των Μπαταριών.....</b>	<b>53</b>
4.1. Η απόδοση του μετατροπέα για τη λειτουργία του ως ανορθωτής.....	56
4.2. Η απόδοση του μετατροπέα για τη λειτουργία του ως αντιστροφέας.....	58
4.3. Συμπεράσματα.....	60
<b>5. Οι Μπαταρίες.....</b>	<b>61</b>
5.1. Το μοντέλο των μπαταριών.....	62
5.1.1. Οι εξισώσεις του μοντέλου.....	63
5.1.2. Η διαδικασία προσδιορισμού των σταθερών $c$ και $k$ του μοντέλου.....	65
5.1.3. Προσδιορισμός της εσωτερικής τάσης $E$ και της εσωτερικής αντίστασης $R_0$ .....	66
5.1.4. Παραδοχές του μοντέλου.....	66

## Περιεχόμενα

5.2.	Η εφαρμογή του μοντέλου των μπαταριών.....	67
5.2.1.	Εύρεση της εσωτερικής αντίστασης $R_0$ .....	68
5.2.2.	Εύρεση των παραμέτρων $c$ , $k$ και του μέγιστου συνολικού φορτίου $Q_{max}$ .....	69
5.2.3.	Εύρεση των τάσεων $E_{0,c}$ , $E_{max}$ , $E_{min}$ και $E_{0,d}$ .....	70
5.3.	Η λειτουργία του μοντέλου των μπαταριών.....	71
5.3.1.	Ένα απλό σενάριο εκφόρτισης.....	71
5.3.2.	Η λειτουργία του μοντέλου για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας.....	72
5.4.	Συμπεράσματα.....	75
<b>6.</b>	<b>Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα.....</b>	<b>77</b>
6.1.	Ο τρόπος λειτουργίας του πράκτορα.....	78
6.2.	Οι περιορισμοί στους οποίους υπόκειται ο πράκτορας.....	79
6.3.	Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη λειτουργία του πράκτορα.....	80
6.3.1.	Τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του προγράμματος-πράκτορα για μία ημέρα.....	81
6.3.2.	Τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του προγράμματος-πράκτορα για ένα χρόνο.....	85
6.4.	Παρατηρήσεις πάνω στην εφαρμογή του πράκτορα.....	88
6.5.	Συμπεράσματα.....	89
<b>7.</b>	<b>Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας.....</b>	<b>91</b>
7.1.	Πρώτο σενάριο: Ανεξάρτητη ένταξη παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας χωρίς τη χρήση ευφυούς πράκτορα.....	92
7.2.	Δεύτερο σενάριο: Ανεξάρτητη ένταξη παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα.....	93
7.3.	Τρίτο σενάριο: Η παραγωγή καλύπτει το σύνολο των καταναλώσεων και η επιπλέον ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο με τη χρήση ευφυούς πράκτορα.....	94
7.4.	Σύγκριση των σεναρίων και συμπεράσματα.....	95
<b>8.</b>	<b>Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.....</b>	<b>99</b>
8.1.	Συμπεράσματα.....	99
8.2.	Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	101
<b>A.</b>	<b>Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων.....</b>	<b>103</b>
A.1.	Οι μετρήσεις στο εναλλασσόμενο ρεύμα.....	103
A.2.	Οι μετρήσεις DC μεγεθών και ακτινοβολίας.....	105
A.2.1.	Οι μετρήσεις στο συνεχές ρεύμα.....	106
A.2.2.	Οι μετρήσεις ακτινοβολίας.....	114
<b>B.</b>	<b>Η Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον οικισμό Μελέμι της Ραφήνας.....</b>	<b>117</b>

## Περιεχόμενα

<b>Γ.</b>	<b>Η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων.....</b>	<b>121</b>
	Γ.1. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου.....	121
<b>Δ.</b>	<b>Η επαναληπτική μέθοδος της τέμνουσας.....</b>	<b>123</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>125</b>

## Κατάλογος σχημάτων

σελίδα

1.1.	το μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.....	17
1.2.	η γραμμή ισχύος και η γραμμή ελέγχου του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	18
1.3.	οι αντιστάσεις που εγκαταστάθηκαν στο μικροδίκτυο κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας.....	19
2.1.	η ηλιακή απόκλιση $\delta$ .....	24
2.2.	η αζιμουθιακή γωνία $\gamma_s$ και το ηλιακό ύψος $\alpha_s$ .....	26
2.3.	ο αισθητήρας της ακτινοβολίας (πυρανόμετρο) του ISET.....	27
2.4.	η ανάλυση της ακτινοβολίας.....	28
2.5.	οι μετρήσεις ισχύος της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο και οι μέσοι όροι αυτής ανά 10 λεπτό.....	34
2.6.	σύγκριση της μέσης ισχύος της μετρούμενης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα μοντέλα ανάλυσης ακτινοβολίας, σε 10 λεπτά διαστήματα.....	34
3.1.	ο φωτοβολαϊκός αντιστροφέας Sunny Boy 1100 του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	37
3.2.	η καμπύλη απόδοσης του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 για ονομαστική DC τάση MPPT $V_{MPPTnom}=230V$ .....	39
3.3.	τα Φ/Β πανέλα του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	39
3.4.	το απλοποιημένο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου.....	40
3.5.	η I-V καμπύλη λειτουργίας των 11 πανέλων I-110/12 της Isofoton του εργαστηρίου σε STC, όπως αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή.....	41
3.6.	το σύνθετο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου.....	43
3.7.	η I-V καμπύλη λειτουργίας για το σύνολο των 11 πανέλων του εργαστηρίου για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας.....	44
3.8.	σύγκριση της μετρούμενης DC ισχύος εισόδου στον Φ/Β αντιστροφέα με την αντίστοιχη ισχύ που προβλέπεται από το μοντέλο των πανέλων.....	47
4.1.	ο μετατροπέας των μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA που βρίσκεται εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΣΗΕ.....	53
4.2.	η καμπύλη συχνότητας - ενεργού ισχύος του μετατροπέα Sunny Island 4500 της SMA για λειτουργία Droop Mode.....	55
4.3.	η καμπύλη τάσης - άεργου ισχύος του μετατροπέα Sunny Island 4500 της SMA για λειτουργία Droop Mode.....	55
4.4.	η απόδοση του μετατροπέα των μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA του εργαστηρίου ΣΗΕ κατά τη φόρτιση (λειτουργία ανορθωτή).....	57
4.5.	η απόδοση του μετατροπέα των μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA του εργαστηρίου ΣΗΕ κατά τη εκφόρτιση (λειτουργία αντιστροφέα).....	59

5.1.	οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως του μικροδικτύου του εργαστηρίου ΣΗΕ...	61
5.2.	αναπαράσταση του μοντέλου των μπαταριών KiBaM (μοντέλο των συγκοινωνούντων δοχείων).....	63
5.3.	η σχεδίαση της V-I καμπύλης των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ για την εύρεση της συνολικής εσωτερικής τους αντίστασης $R_0$ .....	68
5.4.	σύγκριση των χρόνων εκφόρτισης των μπαταριών (όπως αυτοί δίνονται από τον κατασκευαστή και το πρότυπο DIN 40737-3) με τους αντίστοιχους που προκύπτουν από την εφαρμογή τριών διαφορετικών μοντέλων για τις μπαταρίες.....	70
5.5.	η προσομοίωση της εξέλιξης του φορτίου των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ, για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 133A για μία ώρα.....	71
5.6.	η ισχύς των καταναλώσεων ενός βιβλιοπωλείου στο Γέρακα στις 27 Αυγούστου 2009 και η παραγόμενη ισχύς που θα προέκυπτε από το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου την ίδια ημέρα.....	72
5.7.	η AC ισχύς στον μετατροπέα των μπαταριών (>0 όταν έχουμε εκφόρτιση) και η ισχύς των απωλειών στις μπαταρίες και στον μετατροπέα τους.....	73
5.8.	η προσομοίωση της εξέλιξης του φορτίου των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ, για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας.....	74
5.9.	η προσομοίωση της εξέλιξης της εσωτερικής τάσης των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ, για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας.....	75
6.1.	οι οριακές τιμές του συστήματος που προκύπτουν από το χρηματιστήριο ενέργειας Γερμανίας-Αυστρίας (Phelix) για τις 27 Αυγούστου 2009.....	81
6.2.	η προσομοίωση της παραγωγής του Φ/Β του εργαστηρίου ΣΗΕ για ηλιοφάνεια που μετρήθηκε στο Γέρακα στις 27 Αυγούστου 2009.....	82
6.3.	η ροή των ρευμάτων στις μπαταρίες μετά την εφαρμογή του προγράμματος-πράκτορα για τις 27 Αυγούστου 2009.....	83
6.4.	η εξέλιξη του φορτίου των μπαταριών σύμφωνα με το KiBaM, για το σενάριο λειτουργίας που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3.....	83
6.5.	η εξέλιξη της εσωτερικής τάσης των μπαταριών σύμφωνα με το KiBaM, για το σενάριο λειτουργίας που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3.....	84
6.6.	τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας, με και χωρίς τη χρήση ευφυούς πράκτορα για διάστημα ενός έτους.....	86
6.7.	τα ποσά της ενέργειας που παρήχθησαν και αυτά που διοχετεύθηκαν στο δίκτυο με τη χρήση ευφυούς πράκτορα για διάστημα ενός έτους.....	86
6.8.	η πορεία του δείκτη τελικής απόδοσης $\gamma_F$ , του δείκτη απωλειών μετατροπής $L_C$ και του δείκτη απωλειών συστήματος $L_S$ έπειτα από τη χρήση ευφυούς πράκτορα στο Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου ΣΗΕ για ένα έτος.....	87
6.9.	ο λόγος επίδοσης PR και η ενέργεια που διατέθηκε στο δίκτυο έπειτα από τη χρήση ευφυούς πράκτορα στο Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου ΣΗΕ για ένα έτος.....	87
7.1.	το προφίλ που επιλέχθηκε ως ιδιοκατανάλωση του μικροδικτύου.....	91

<b>7.2.</b>	ο δείκτης τελικής απόδοσης $Y_F$ , ο δείκτης απωλειών μετατροπής $L_C$ και ο δείκτης απωλειών συστήματος $L_S$ που προκύπτουν από την εφαρμογή για μία εβδομάδα των τριών σεναρίων ένταξης του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας.....	96
<b>A.1.</b>	το πολυόργανο MIC της DEIF.....	103
<b>A.2.</b>	το ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης του πολυοργάνου MIC της DEIF στον αντιστροφέα των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	104
<b>A.3.</b>	η PLC κάρτα AICan της GMA.....	105
<b>A.4.</b>	το ισοδύναμο κύκλωμα του LEM μέτρησης τάσης LV 25-P.....	107
<b>A.5.</b>	το ισοδύναμο κύκλωμα του LEM μέτρησης ρεύματος LA 25-NP.....	108
<b>A.6.</b>	το ισοδύναμο κύκλωμα και η προτεινόμενη συνδεσμολογία του LEM ρεύματος HAI5 200-P.....	110
<b>A.7.</b>	ο μετατροπέας MINI MCR-SL-SHUNT-UI της PHOENIX CONTACT .....	111
<b>A.8.</b>	το ηλεκτρολογικό σχέδιο του τροφοδοτικού που κατασκευάστηκε για την τροφοδοσία των LEM του εργαστηρίου.....	113
<b>A.9.</b>	το πυρανόμετρο του ISET που τοποθετήθηκε επί των Φ/Β πανέλων του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	114
<b>A.10.</b>	ο μετατροπέας CC-U/RTD της ABB για ανάγνωση θερμοκρασίας από αισθητήρα PT1000 .....	115
<b>A.11.</b>	η συνδεσμολογία που προτείνει ο κατασκευαστής για τον μετατροπέα CC-U/RTD της ABB .....	115
<b>B.1.</b>	τα πανέλα της Φ/Β εγκατάστασης στο χώρο στάθμευσης του συνοικισμού “Μελτέμι” της Ραφήνας.....	117
<b>B.2.</b>	ο αντιστροφέας Würth Solergy του Φ/Β πάρκου στο Μελτέμι της Ραφήνας.....	118
<b>B.3.</b>	ο λόγος επίδοσης PR και η παραγόμενη ενέργεια ανά διμηνίες όπως αυτά προκύπτουν από το Φ/Β σύστημα της Ραφήνας.....	119
<b>B.4.</b>	η πορεία του δείκτη τελικής απόδοσης $Y_F$ , του δείκτη απωλειών μετατροπής $L_C$ και του δείκτη απωλειών συστήματος $L_S$ που προκύπτουν για το Φ/Β σύστημα της Ραφήνας σε διάστημα ενός έτους.....	120

## Κατάλογος πινάκων

	σελίδα
2.1. συντελεστές ανάκλασης του εδάφους.....	30
2.2. υπολογισμός παραμέτρων με βάση την καθαρότητα της ατμόσφαιρας....	31
2.3. μέσοι όροι των σφαλμάτων των μοντέλων επί των μη μηδενικών μετρήσεων.....	35
3.1. τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 της SMA που βρίσκεται εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΣΗΕ.....	37
3.2. η απόδοση του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 για διάφορα επίπεδα φόρτισης για την ονομαστική DC τάση MPPT $V_{MPPTnom}$ .....	38
3.3. τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελου I-110/12 της Isofoton.....	40
4.1. τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA που βρίσκεται εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΣΗΕ.....	54
4.2. οι μέσοι όροι των απολύτων τιμών των σφαλμάτων της απόδοσης του μετατροπέα των μπαταριών στη λειτουργία του ως ανορθωτή, για προσέγγιση αυτής με πολυώνυμα $4^{ου}$ , $5^{ου}$ και $6^{ου}$ βαθμού.....	57
4.3. οι μέσοι όροι των απολύτων τιμών των σφαλμάτων της απόδοσης του μετατροπέα των μπαταριών στη λειτουργία του ως αντιστροφέα, για προσέγγιση αυτής με πολυώνυμα $4^{ου}$ , $5^{ου}$ και $6^{ου}$ βαθμού.....	59
5.1. τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	61
5.2. το συνολικό φορτίο που παρέχουν οι μπαταρίες που χρησιμοποιεί το εργαστήριο ΣΗΕ για διάφορα σενάρια εκφόρτισης, όπως αυτό δίνεται από τον κατασκευαστή και από το πρότυπο DIN 40737-3.....	69
5.3. υπολογισμός των παραμέτρων $c$ , $k$ και του μεγίστου συνολικού φορτίου $Q_{max}$ για τις μπαταρίες του εργαστηρίου ΣΗΕ, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετική τριάδα πειραμάτων εκφόρτισης.....	69
6.1. μεγέθη που προκύπτουν από την εφαρμογή του προγράμματος-πράκτορα για τις 27 Αυγούστου 2009.....	85
7.1. η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου από 24 έως 30 Αυγούστου 2009.....	91
7.2. τα αποτελέσματα από την ανεξάρτητη ένταξη μονάδων παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας χωρίς τη χρήση ευφυούς πράκτορα.	92
7.3. τα αποτελέσματα από την ανεξάρτητη ένταξη μονάδων παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα.....	93
7.4. τα αποτελέσματα από την πλήρη εξυπηρέτηση του φορτίου από το σύστημα των μπαταριών και τη διοχέτευση της επιπλέον ενέργειας στο δίκτυο με τη χρήση ευφυούς πράκτορα.....	94
7.5. σύγκριση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή για μία εβδομάδα των τριών σεναρίων ένταξης του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας.....	95

## Κατάλογος πινάκων

<b>A.1.</b>	περιγραφή της λειτουργίας των ακροδεκτών της κάρτας AICan της GMA..	106
<b>A.2.</b>	οι προτεινόμενες συνδεσμολογίες για κάθε λόγο μετατροπής του LEM μέτρησης ρεύματος LA 25-NP.....	109
<b>B.1</b>	τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελου P-23b της Yingli Solar.....	118
<b>Δ.1.</b>	η εφαρμογή της επαναληπτικής μεθόδου της τέμνουσας για τις εξισώσεις (Δ.2) και (Δ.3).....	124



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία στόχο έχει τη μοντελοποίηση ενός μικροδικτύου και την ένταξη αυτού στην αγορά ενέργειας με χρήση ευφυούς πρακτόρα (**intelligent agent**). Το μικροδίκτυο που μοντελοποιείται είναι αυτό του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η μοντελοποίηση στηρίζεται σε θεωρητικά μοντέλα, τα οποία όμως επιβεβαιώνονται και συχνά διορθώνονται από τις μετρήσεις στο εργαστήριο. Η ένταξή του στην αγορά ενέργειας γίνεται με τη χρήση ενός προγράμματος-πράκτορα που αποφασίζει για την πολιτική πώλησης της παραγόμενης ενέργειας. Μία σύντομη περιγραφή του εργαστηρίου και των θεμάτων που διαπραγματεύεται κάθε κεφάλαιο της διπλωματικής, παρουσιάζονται ακολούθως.

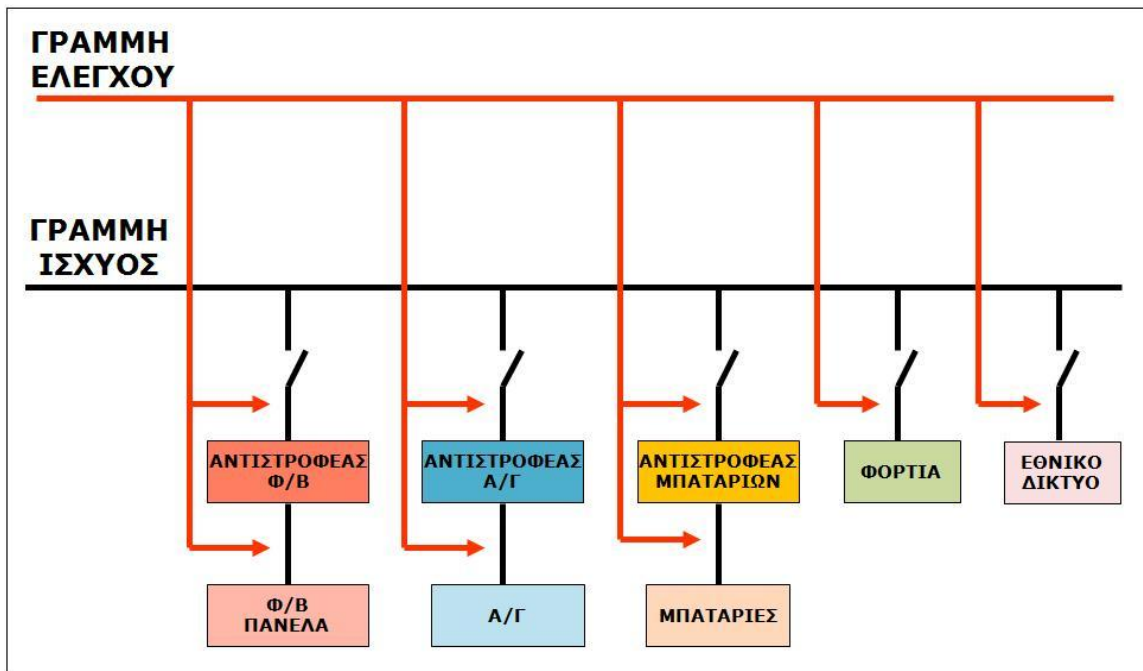
### 1.1. Σύντομη περιγραφή του εργαστηρίου

Το μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ διαθέτει μονάδες παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκό και ανεμογεννήτρια), μονάδες διαχείρισης ενέργειας (σύστημα μπαταριών), φορτία και σύστημα ελέγχου των ηλεκτρικών του μεγεθών. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης του με το εθνικό δίκτυο (ΔΕΗ). Φωτογραφία του μικροδικτύου παρουσιάζεται στο «Σχήμα 1.1».



«Σχήμα 1.1, το μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ»

Τα φορτία, τα συστήματα παραγωγής και διαχείρισης της ενέργειας καθώς και το εθνικό δίκτυο συνδέονται στον ίδιο ζυγό μέσω διακοπών που ελέγχονται είτε χειροκίνητα είτε με χρήση υπολογιστή. Τον ζυγό αυτό, όπου ρέει AC ισχύς, τον ονομάζουμε “γραμμή ισχύος”. Ο λόγος είναι για να τον ξεχωρίζουμε από τη “γραμμή ελέγχου”. Η γραμμή ελέγχου αποτελεί ένα ανεξάρτητο δίκτυο το οποίο καταγράφει μεγέθη του μικροδικτύου (ηλεκτρικά και μη) και ελέγχει κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται. Μία αναπαράσταση του μικροδικτύου, όπου φαίνονται οι γραμμές ελέγχου και ισχύος, παρουσιάζεται στο «Σχήμα 1.2».



«Σχήμα 1.2, η γραμμή ισχύος και η γραμμή ελέγχου του εργαστηρίου ΣΗΕ»

### 1.1.1. Η γραμμή ισχύος

Η γραμμή ισχύος είναι ο ζυγός μέσω του οποίου γίνονται όλες οι ροές της AC ενέργειας. Τα συστήματα που συνδέονται σε αυτή είναι τα ακόλουθα:

- i. **Το φωτοβολταϊκό σύστημα (Φ/Β).** Αυτό αποτελείται από τα πανέλα και τον αντιστροφέα τους. Τα πανέλα παράγουν DC ισχύ η οποία πρέπει να μετατραπεί σε AC πριν συνδεθεί στο ζυγό. Η μέγιστη AC ισχύς του Φ/Β συστήματος είναι 1100 W.
- ii. **Το σύστημα της ανεμογεννήτριας.** Η ανεμογεννήτρια του εργαστηρίου παράγει AC τάση και ρεύμα, μεταβλητής όμως συχνότητας και τάσης. Αυτή η ισχύς ανορθώνεται και μετατρέπεται σε DC μέσω ενός ανορθωτή. Στη συνέχεια, αυτή η DC ισχύς μετατρέπεται εκ νέου σε AC (με τα επιθυμητά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αυτή τη φορά) μέσω ενός αντιστροφέα και παρέχεται στο

μικροδίκτυο. Η μέγιστη AC ισχύς που εγγεί το σύστημα της ανεμογεννήτριας του εργαστηρίου είναι 1100W.

- iii. **Το σύστημα των μπαταριών.** Ο ρόλος του συστήματος των μπαταριών είναι να αποθηκεύουν ενέργεια όταν υπάρχει περίσσειμα προκειμένου να τη διαθέσουν όταν υπάρξει ανάγκη. Το εργαστήριο διαθέτει 30 μπαταρίες ονομαστικής τάσης 2 V και χωρητικότητας 250 Ah. Οι μπαταρίες όμως λειτουργούν σε DC μεγέθη. Συνεπώς, συνδέονται στη γραμμή ισχύος μέσω ενός μετατροπέα ο οποίος λειτουργεί άλλοτε ως ανορθωτής και άλλοτε ως αντιστροφέας. Η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα είναι 3300 W.
- iv. **Τα φορτία.** Στο εργαστήριο αρχικά χρησιμοποιούνταν ως φορτία λαμπτήρες συνολικής ισχύος 580 W και ένας κινητήρας ονομαστικής ισχύος 0.5 HP. Τα φορτία όμως αυτά δεν επαρκούσαν για τις ανάγκες των πειραμάτων που έπρεπε να διεξαχθούν. Για αυτό το λόγο έγινε προσθήκη επαγωγικών φορτίων (πηνία) ισχύος 3 kVar και ωμικών φορτίων (αντιστάσεις) ισχύος 15 kW. Για την ψύξη των αντιστάσεων χρησιμοποιήθηκαν ανεμιστήρες ισχύος 300 W. Οι αντιστάσεις που εγκαταστάθηκαν παρουσιάζονται στο «Σχήμα 1.3».
- v. **Το εθνικό δίκτυο.** Το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει είτε αυτόνομα είτε συνδεδεμένο στο εθνικό δίκτυο (ΔΕΗ). Πριν τη σύνδεση με το δίκτυο, το σύστημα των μπαταριών πρέπει είτε να αποσυνδεθεί είτε να ρυθμιστεί για διασυνδεδεμένη λειτουργία.



«Σχήμα 1.3, οι αντιστάσεις που εγκαταστάθηκαν στο μικροδίκτυο κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας»

### 1.1.2. Η γραμμή ελέγχου

Η γραμμή ελέγχου είναι υπεύθυνη για τις μετρήσεις ακτινοβολίας, θερμοκρασίας, DC και AC μεγεθών και για τον έλεγχο των συστημάτων του εργαστηρίου (*Παράρτημα Α*). Οι μετρήσεις AC μεγεθών στη γραμμή ισχύος γίνονται με πολυόργανα. Αυτά χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Modbus για την επικοινωνία τους με τον υπολογιστή. Οι υπόλοιπες μετρήσεις καθώς και ο έλεγχος γίνονται με χρήση PLC. Τον έλεγχο και τον προγραμματισμό των PLC αναλαμβάνει μία CPU χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο CANBus. Συγκεκριμένα τα PLC χρησιμοποιούνται για:

- i. **Λήψη μετρήσεων από το DC.** Η μετρήσεις στο DC γίνονται με LEM. Αυτά δίνουν στην έξοδό τους ρεύμα 0..20 mA, σε αναλογία με το μέγεθος που μετράνε, το οποίο στη συνέχεια μετριέται από τα PLC.
- ii. **Λήψη μετρήσεων ακτινοβολίας.** Η ακτινοβολία μετριέται με πυρανόμετρα τα οποία στην έξοδό τους δίνουν μία τιμή τάσης σε αναλογία με την ακτινοβολία που δέχονται. Αυτή η τάση με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μετατροπών αντιστοιχίζεται σε ρεύμα 0..20 mA και εισέρχεται στα PLC για μέτρηση.
- iii. **Λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας.** Η ένδειξη που προκύπτει από τα πυρανόμετρα απαιτεί μία θερμοκρασιακή διόρθωση. Για αυτό το λόγο, μετριέται και η θερμοκρασία των πυρανομέτρων με PT 1000. Στη συνέχεια, ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας αντιστοιχίζει αυτή τη μέτρηση σε ρεύμα 0..20 mA, το οποίο μετριέται από τα PLC.
- iv. **Έλεγχο των συστημάτων του μικροδικτύου.** Η σύνδεση των συστημάτων παραγωγής και διαχείρισης της ενέργειας καθώς και των φορτίων στη γραμμή ισχύος, γίνεται μέσω ηλεκτρονικών ρελέ. Ο χειρισμός αυτών των ρελέ γίνεται με τη βοήθεια των PLC.

## 1.2. Σκοπός της διπλωματικής και οδηγός των κεφαλαίων

Σε πρώτη φάση, σκοπός της διπλωματικής ήταν η επέκταση του εργαστηρίου. Η γραμμή ισχύος επεκτάθηκε με την εγκατάσταση επιπλέον φορτίων. Όσον αφορά τη γραμμή ελέγχου, αυτή εγκαταστάθηκε και προγραμματίστηκε εξ' ολοκλήρου. Μετά από αυτές τις προσθήκες, το εργαστήριο είναι πλέον σε θέση να διεξάγει πειράματα και να κάνει συστηματική καταγραφή των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη λειτουργία του μικροδικτύου. Στη συνέχεια, ο εξοπλισμός αυτός χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ή την επαλήθευση των μοντέλων των συστημάτων που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα τα μοντέλα αφορούν:

- i. **Την ηλιακή ακτινοβολία.** Μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας γίνονται κατά κανόνα σε οριζόντιο επίπεδο. Για την εύρεση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα πάνελα απαιτείται η εφαρμογή ενός μοντέλου της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματά που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου συγκρίθηκαν

με τις μετρήσεις ακτινοβολίας που έγιναν στην επιφάνεια του πανέλου και παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 2**.

- ii. **Τον Φ/Β αντιστροφέα.** Στην περίπτωση αυτή δεν έγινε εφαρμογή κάποιου μοντέλου αλλά βρέθηκε η καμπύλη απόδοσής του. Η διαδικασία υπολογισμού της απόδοσης έγινε σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61683 και παρουσιάζεται στο **Κεφάλαιο 3**. Τα αποτελέσματα αυτά, καθώς και μία σειρά άλλων πειραμάτων πάνω σε Φ/Β αντιστροφείς δημοσιεύτηκαν στο συνέδριο MedPower 2010.
- iii. **Τα Φ/Β πανέλα.** Η μοντελοποίησή τους αρχικά επιχειρήθηκε να γίνει με βάση το ισόδυναμο ηλεκτρικό τους κύκλωμα. Ωστόσο αυτό δεν κατέστη δυνατόν και καταφύγαμε στο μοντέλο που προτείνεται από το πρότυπο EN 50530. Η μοντελοποίηση αυτή και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τις πειραματικές τιμές παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 3**.
- iv. **Το μετατροπέα των μπαταριών.** Σε αυτή την περίπτωση, πάλι δεν έγινε εφαρμογή κάποιου μοντέλου αλλά προσδιορίστηκε η καμπύλη της απόδοσής του. Αυτό έγινε μέσα από μία σειρά πειραμάτων στα οποία λειτουργούσε είτε ως ανορθωτής, είτε ως αντιστροφέας. Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η διαδικασία και οι καμπύλες απόδοσης που προέκυψαν.
- v. **Τις μπαταρίες.** Για την προσομοίωση της λειτουργίας των μπαταριών χρησιμοποιήθηκε Kinetic Battery Model (KiBaM - Μοντέλο των Συγκοινωνούντων Δοχείων). Αυτό στηρίζεται στις ροές φορτίου στις μπαταρίες και όχι στις ροές ενέργειας. Η ανάπτυξη του μοντέλου παρουσιάζεται στο **Κεφάλαιο 5**.

Το σύστημα της ανεμογεννήτριας δεν εντάχθηκε στην παρούσα εργασία για τεχνικούς λόγους.

Σε δεύτερη φάση, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης για τη μελέτη της **ένταξης του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας** και τη δημιουργία ενός ευφυούς πράκτορα (**intelligent agent**) για την υλοποίηση αυτής. Η ένταξη γίνεται με βάση την οριακή τιμή του συστήματος όπως αυτή προκύπτει από τα ωριαία συμβόλαια που δημοσιεύονται από το Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας (EEX – European Energy Exchange). Θεωρώντας ως δεδομένα την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και τη διακύμανση της οριακής τιμής του συστήματος, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα που αποφασίζει ανά πάσα στιγμή αν η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β θα πωληθεί στο δίκτυο ή αν θα αποθηκευτεί στις μπαταρίες προκειμένου να διοχετευθεί όταν η οριακή τιμή του συστήματος παρουσιάσει αιχμή. Το πρόγραμμα αυτό και τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της εφαρμογής του για ένα χρόνο παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 6**.

Το πρόγραμμα διαχείρισης της ενέργειας που αναπτύχθηκε, θεωρεί ότι δεν υπάρχουν καταναλώσεις ενέργειας στο μικροδίκτυο. Η προσθήκη φορτίων που πρέπει να εξυπηρετηθούν περιπλέκει αρκετά το πρόβλημα της ένταξης. Εξετάστηκαν συνολικά τρία σενάρια για την ένταξη ενός τέτοιου συστήματος στην αγορά ενέργειας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 7**.



## Κεφάλαιο 2

### Το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας

Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου, η πηγή παραγωγής ενέργειας που μελετήθηκε είναι τα φωτοβολταϊκά. Αυτά έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γνωρίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα πανέλα. Αυτό είναι χρήσιμο τόσο κατά τη σχεδίαση της εγκατάστασης, ώστε να τοποθετηθούν τα πανέλα σε θέση που θα προσφέρει τη μέγιστη παραγωγή, όσο και για την αξιολόγηση της αφού αυτή πραγματοποιηθεί.

Οι μετρήσεις ακτινοβολίας γίνονται με πυρανόμετρα σε οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών επιλέγονται θέσεις με κλίση και προσανατολισμό τέτοια ώστε να προκύπτει μέγιστη παραγωγή. Το γεγονός αυτό γεννά την ανάγκη εφαρμογής ενός μοντέλου ακτινοβολίας που θα προσαρμόζει τη μετρούμενη από τα πυρανόμετρα ηλιακή ακτινοβολία σε αυτή που τελικά προσπίπτει στους δέκτες [1]. Τα μοντέλα δέχονται σαν είσοδο τη θέση του ήλιου ως προς τους συλλέκτες, την εξωγήινη ακτινοβολία και τη μετρούμενη από το πυρανόμετρο ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και δίνουν ως έξοδο την ακτινοβολία που τελικά προσπίπτει στην επιφάνειες των δεκτών.

#### 2.1. Οι είσοδοι του μοντέλου

##### A. Η εξωγήινη ακτινοβολία

Ως εξωγήινη ακτινοβολία ορίζουμε την ακτινοβολία του ήλιου που θα έφτανε στην επιφάνεια της γης αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα [1]. Η τροχιά όμως της γης γύρω από την ήλιο είναι ελαφρώς ελλειπτική. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση γης-ήλιου έχει διακυμάνσεις που εξαρτώνται από την εποχή. Συνεπώς και η ισχύς της ακτινοβολίας που δέχεται η γη αλλάζει στη διάρκεια του έτους. Αυτή δίνεται από τον τύπο (2.1):

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Στον παραπάνω τύπο:

- $G_{on}$  η εξωγήινη ακτινοβολία ( $W/m^2$ ) σε επιφάνεια κάθετη στην ακτινοβολία
- $G_{sc}$  η ηλιακή σταθερά ( $G_{sc}=1367 W/m^2$ ). Πρόκειται για την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια κάθετη σε αυτή για τη μέση απόσταση γης-ήλιου
- $n$  η μέρα του χρόνου στην οποία αναφερόμαστε (π.χ.  $n=1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου)

## B. Η θέση του ήλιου ως προς τους συλλέκτες

Η παραγωγή μιας φωτοβολταϊκής διάταξης εξαρτάται από τις ώρες ηλιοφάνειας καθώς και από τη γωνία υπό την οποία προσπίπτουν οι ηλιακές ακτίνες στους δέκτες. Συνεπώς η γνώση της θέσης του ήλιου ως προς τα πάνελα είναι κρίσιμη για τη μελέτη της λειτουργίας τους. Τα μεγέθη που είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό αυτής της θέσης παρουσιάζονται ακολούθως.

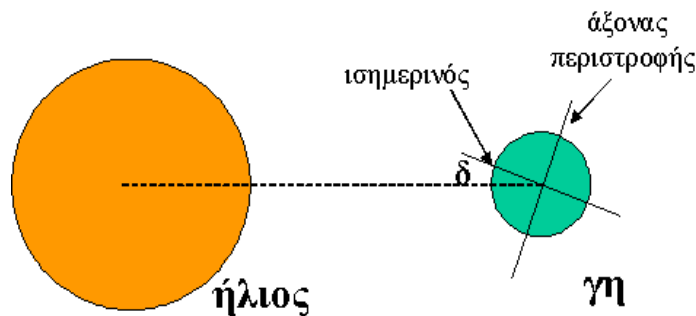
### i. Η ηλιακή απόκλιση

Ο άξονας της γης δεν είναι κάθετος στην τροχιά περιστροφής της, αλλά έχει μία κλίση όπως φαίνεται και στο «Σχήμα 2.1». Εξαιτίας της κλίσης αυτής το καλοκαίρι η μέρα διαρκεί περισσότερο και ο ήλιος φαίνεται ψηλότερα στον ουρανό, με άμεση επίδραση στην απόδοση των φωτοβολταϊκών. Η ηλιακή απόκλιση ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ισημερινού και τη γραμμή που ενώνει το κέντρο του ήλιου με αυτό της γης [1]. Η τιμή της υπολογίζονται από τον τύπο (2.2).

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.2)$$

Στον παραπάνω τύπο:

$\delta$  η ηλιακή απόκλιση ( $^{\circ}$ ) μία συγκεκριμένη μέρα του χρόνου.



«Σχήμα 2.1 η ηλιακή απόκλιση  $\delta$ »

### ii. Η διαφορά της ώρας

Κάθε περιοχή έχει τη δική της τοπική ώρα. Σύμφωνα με αυτή, μεσημέρι έχουμε τη στιγμή που ο ήλιος διασχίζει το μεσημβρινό του παρατηρητή. Στην καθημερινή ζωή όμως δε χρησιμοποιούμε την τοπική ώρα αλλά αυτή της ζώνης ώρας στην οποία ανήκουμε. Ωστόσο για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου απαιτείται η γνώση της τοπικής ώρας. Η διαφορά αυτής από την επίσημη σε λεπτά της ώρας, υπολογίζεται από τους τύπους (2.3), (2.4) και (2.5) [1]:

$$T_{st} - T_{loc} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.3)$$



## Κεφάλαιο 2 – Το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.4089\sin 2B) \quad (2.4)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.5)$$

Στους παραπάνω τύπους:

$T_{st}$	η επίσημη ώρα της τοποθεσίας
$T_{loc}$	η τοπική ώρα.
$L_{st}$	ο μεσημβρινός του οποίου την ώρα καθιερώνουμε ως επίσημη
$L_{loc}$	ο μεσημβρινός (γεωγραφικό μήκος) του παρατηρητή
$E$	εξίσωση χρόνου
$B$	η γωνία ημέρας

Συγκεκριμένα, η Αθήνα έχει γεωγραφικό μήκος  $L_{loc} = -24^\circ$  [2] (δηλαδή  $24^\circ$  ανατολικά του μεσημβρινού του Γκρήνουιτς). Το χειμώνα έχει την ώρα του μεσημβρινού με  $L_{st}^w = -30^\circ$  (χειμερινή ώρα) και το καλοκαίρι αυτή του μεσημβρινού με  $L_{st}^s = -45^\circ$  (θερινή ώρα). Σε όλους τους υπολογισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιείται η τοπική ώρα, καθώς είναι αυτή που εκφράζει την πραγματική θέση του ήλιου.

### iii. Η γωνία ώρας $\omega$

Η γωνία ώρας  $\omega$  αντιπροσωπεύει την ώρα της ημέρας (τοπική) στην οποία βρισκόμαστε. Αντιστοιχίζοντας το 24ωρο σε  $360^\circ$ , προκύπτει αντιστοιχία  $15^\circ$  για κάθε ώρα της ημέρας. Σαν αναφορά παίρνουμε το μεσημέρι ( $0^\circ$ ), με τις πρωινές γωνίες ώρας να έχουν αρνητικά πρόσημα και τις απογευματινές θετικά [1].

### iv. Η θέση των πανέλων

Εκτός από τη θέση του ήλιου, εξίσου σημαντικό ρόλο παίζει και η θέση των πανέλων. Συγκεκριμένα εστιάζουμε στις παρακάτω παραμέτρους [1]:

$\phi$	το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας ( $^\circ$ ), με $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
$\gamma$	ο προσανατολισμός των πανέλων ( $^\circ$ ). Στο βόρειο ημισφαίριο έχουμε $\gamma = 0^\circ$ για νότιο, $\gamma = 90^\circ$ για δυτικό, $\gamma = -90^\circ$ για ανατολικό και $\gamma = 180^\circ$ για βόρειο προσανατολισμό, με $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$
$\beta$	η κλίση των πανέλων ως προς την οριζόντια επιφάνεια, με $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

### v. Η γωνία πρόσπτωσης

Η γωνία πρόσπτωσης ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη διεύθυνση της εξωγήινης ακτινοβολίας του ήλιου σε μία επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή. Αυτή δίνεται από τη σχέση (2.6) [1]:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.6)$$

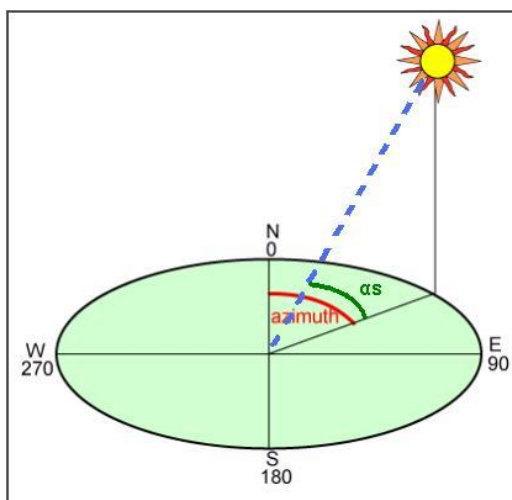
Αν στον παραπάνω τύπο θεωρήσουμε οριζόντια επιφάνεια ( $\beta=0$ ) τότε παίρνουμε τη γωνία πρόσπτωσης οριζόντιας επιφάνειας  $\theta_z$ . Το συμπλήρωμα της  $\theta_z$  ονομάζουμε ηλιακό ύψος και δίνεται από τη σχέση (2.7) [1]:

$$a_s = 90^\circ - \theta_z \quad (2.7)$$

### vi. Η αζιμουθιακή γωνία

Τέλος, σημαντική γωνία για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου είναι η αζιμουθιακή γωνία  $\gamma_s$ . Αυτή ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η προβολή της εξωγήινης ακτινοβολίας του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο με το νότο, όπως παρουσιάζεται στο «Σχήμα 2.2». Η αζιμουθιακή γωνία περιγράφεται από τη σχέση (2.8) [1]:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right| \quad (2.8)$$



«Σχήμα 2.2, η αζιμουθιακή γωνία  $\gamma_s$  και το ηλιακό ύψος  $\alpha_s$ »

### Γ. Η μετρούμενη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Για τη μέτρηση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε το πυρανόμετρο του ISET [3] που φαίνεται στην «Σχήμα 2.3».



«Σχήμα 2.3, ο αισθητήρας της ακτινοβολίας (πυρανόμετρο) του ISET»

Ο αισθητήρας παίρνει μετρήσεις ισχύος της ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) κάθε 200ms (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000 [4]) οι οποίες μπορούν να καταγραφούν στον υπολογιστή και να είναι διαθέσιμες προς επεξεργασία.

## 2.2. Η λειτουργία του μοντέλου

Όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους για την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, αφορούν την εξωγήινη ακτινοβολία. Η παρουσία της ατμόσφαιρας όμως προκαλεί σκεδάσεις, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά της ακτινοβολίας να αλλάζει σημαντικά. Καθίσταται συνεπώς επιτακτική η χρήση μοντέλων για τον προσδιορισμό της ακτινοβολίας που τελικά προσπίπτει σε μία επιφάνεια [1].

Τα μοντέλα χρησιμοποιούν μετρήσεις ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο μέσω αισθητήρων. Μέσα από τη σύγκριση των μετρήσεων με τις αντίστοιχες τιμές της εξωγήινης ακτινοβολίας, προτείνεται ο διαχωρισμός της μετρούμενης ακτινοβολίας σε συνιστώσες [1]. Αυτές είναι:

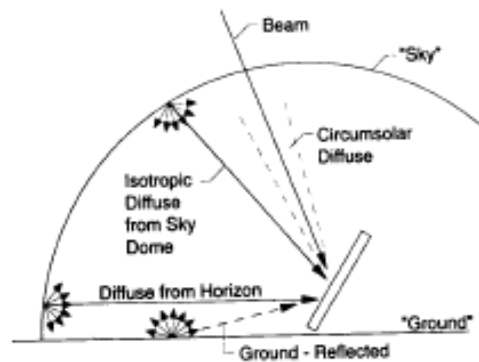
- **Άμεση (beam):** η ακτινοβολία που προσπίπτει άμεσα από τον ήλιο στον δέκτη.
- **Ανακλώμενη από το έδαφος (ground reflected):** η ακτινοβολία που φτάνει στο δέκτη μετά από ανάκλαση στο έδαφος.
- **Διάχυσης (diffuse):** η ακτινοβολία που διαχέεται στην ατμόσφαιρα.

Ανάλογα με το μοντέλο διάχυσης που υιοθετούν, τα μοντέλα διακρίνονται σε ιστροπικά και ανιστροπικά. Τα ιστροπικά μοντέλα κάνουν την παραδοχή ότι η ακτινοβολία διάχυσης κατανέμεται ομοιόμορφα (ιστροπικά) στην ατμόσφαιρα [1]. Το γεγονός αυτό τα καθιστά αρκετά απλά μα και ανακριβή. Στον αντίποδα βρίσκονται τα ανιστροπικά μοντέλα. Αυτά προτείνουν τον περαιτέρω διαχωρισμό της ακτινοβολίας διάχυσης σε συνιστώσες και μελετούν κάθε μια από αυτές ξεχωριστά, ώστε να είναι ακριβέστερη η προσαρμογή της στην επιφάνεια που μας ενδιαφέρει. Τέτοια μοντέλα τα οποία μελετήθηκαν είναι το HDKR και το Perez [1].

Τα ανισοτροπικά μοντέλα που μελετήθηκαν, χωρίζουν την ακτινοβολία διάχυσης στις εξής υποκατηγορίες [1]:

- **Ηλιακού δίσκου (circumsolar):** η ακτινοβολία που προέρχεται από το μέρος του ουρανού που είναι γύρω από τον ήλιο.
- **Ορίζοντα (horizon):** η ακτινοβολία που είναι συγκεντρωμένη στον ορίζοντα, κυρίως τις μέρες με καθαρό ουρανό.
- **Ισοτροπική (isotropic):** η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο.

Μία αναπαράσταση του τρόπου διαχωρισμού της ακτινοβολίας όπως αυτή προτείνεται από τα ανισοτροπικά μοντέλα παρουσιάζεται στο «Σχήμα 2.4».



«Σχήμα 2.4, η ανάλυση της ακτινοβολίας»

Συγκριτικά με το HDKR, το μοντέλο Perez προβλέπει ελαφρώς μεγαλύτερες ακτινοβολίες. Αυτό έχει ως συνέπεια όταν χρησιμοποιείται το Perez η απόδοση των φωτοβολταϊκών να προκύπτουν ελαφρώς μειωμένες [1].

### 2.2.1. Υπολογισμός των συνιστωσών του ανισοτροπικού μοντέλου σε οριζόντια επιφάνεια

Αρχικά το μοντέλο επιχειρεί ένα διαχωρισμό σε συνιστώσες της μετρούμενης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Ο διαχωρισμός γίνεται στη συνιστώσα διάχυσης και τη συνιστώσα άμεσης ακτινοβολίας. Για την εύρεση της συνιστώσας διάχυσης σε οριζόντια επιφάνεια  $I_d$ , απαιτείται ο συντελεστής καθαρότητας  $k_T$  που δίνεται από τη σχέση (2.9) [1]:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (2.9)$$

όπου:

- $I$  η μετρηθείσα ωριαία ενέργεια της ακτινοβολίας ( $\text{kJ/m}^2$ )
- $I_o$  η εξωγήινη ωριαία ενέργεια της ακτινοβολίας ( $\text{kJ/m}^2$ )

Η  $I_o$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο (2.10) [1]:

## Κεφάλαιο 2 – Το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας

$$I_0 = G_{on} \frac{12 \cdot 3600}{\pi} [\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta] \quad (2.10)$$

όπου  $\omega_1$  και  $\omega_2$  η αρχική και η τελική γωνία ώρας αντίστοιχα του ωριαίου διαστήματος. Γνωρίζοντας τον συντελεστή καθαρότητας, υπολογίζουμε τη συνιστώσα διάχυσης  $I_d$  από τον τύπο (2.11) [1]:

$$\frac{I_d}{I} = 1.0 - 0.09k_T \quad \text{για } k_T < 0,22$$

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I} &= 0.9511 - 0.1604k_T \\ &+ 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 \\ &+ 12.336k_T^4 \end{aligned} \quad \text{για } 0,22 < k_T < 0,8 \quad (2.11)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.165 \quad \text{για } k_T > 0,8$$

Στη συνέχεια η συνιστώσα άμεσης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο  $I_b$  μπορεί να βρεθεί από τη σχέση (2.12) [1]:

$$I_b = I - I_d \quad (2.12)$$

### 2.2.2. Προσαρμογή των συνιστωσών στην επιθυμητή επιφάνεια

#### A. Άμεση ακτινοβολία $I_{Tb}$ (beam)

Η προσαρμογή της είναι πολύ απλή καθώς εξαρτάται μόνο από τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτή δίνεται από τον τύπο (2.13) [1]:

$$I_{Tb} = I_b R_b \quad (2.13)$$

Ο γεωμετρικός παράγοντας  $R_b$  δίνεται από τον τύπο (2.14) [1]:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.14)$$

όπου

$\theta$  η γωνία πρόσπτωσης στη ζητούμενη επιφάνεια  
 $\theta_z$  η γωνία πρόσπτωσης σε οριζόντια επιφάνεια

## B. Ακτινοβολία από ανάκλαση στο έδαφος $I_{Tgr}$ (ground reflected)

Η τιμή της εξαρτάται από το ποσοστό της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον περιβάλλοντα χώρο του δέκτη και προσδιορίζεται από τον τύπο (2.15) [1]:

$$I_{Tgr} = I\rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.15)$$

όπου  $\rho_g$  ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους. Ο ακριβής προσδιορισμός του είναι δύσκολος και για αυτό βασιζόμαστε κυρίως στον «Πίνακα 2.1» [2]:

Τοποθεσία	$\rho_g$ (%)
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	5
Άσφαλτος	7
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χρώμα	8
Πράσινος αγρός	15
Βραχώδης επιφάνεια	20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοικτό χρώμα	30
χιόνι (φρέσκο)	60

«Πίνακας 2.1, συντελεστές ανάκλασης του εδάφους»

## Γ. Ακτινοβολία διάχυσης $I_{Td}$ (diffuse)

### i. Μοντέλο Perez

Το μοντέλο Perez προτείνει το διαχωρισμό της σε τρεις συνιστώσες [1] όπως παρουσιάζεται στους τύπους (2.16), (2.17) και (2.18).

$$I_{Tiso} = I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (2.16)$$

$$I_{Tcirc} = I_d F_1 \frac{a}{b} \quad (2.17)$$

$$I_{Thor} = I_d F_2 \sin \beta \quad (2.18)$$

όπου:

- $I_{Tiso}$  η ιστροπική συνιστώσα (isotropic)
- $I_{Tcirc}$  η συνιστώσα ηλιακού δίσκου (circumsolar)
- $I_{Thor}$  η συνιστώσα του ορίζοντα (horizon)
- $F_1, F_2$  συσχετίσεις φωτεινότητας
- $a, b$  προσδιοριστικοί παράγοντες

Τα  $a$  και  $b$  δίνονται από τις σχέσεις (2.19) και (2.20) [1]:

**Κεφάλαιο 2 – Το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας**

$$a = \max [0, \cos\theta] \quad (2.19)$$

$$b = \max [\cos 85, \cos\theta_z] \quad (2.20)$$

Για τον υπολογισμό των συσχετίσεων φωτεινότητας θα απαιτηθεί ο προσδιορισμός των μεγεθών που προκύπτουν από τους τύπους (2.21) έως (2.25) [1]:

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad (2.21)$$

$$I_{on} = G_{on} \frac{3600}{1000} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_n}{I_d} + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad (2.23)$$

$$I_n = \frac{I_b}{\cos \theta_z} \quad (2.24)$$

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.25)$$

στις παραπάνω σχέσεις:

- $\Delta$  η φωτεινότητα
- $I_{on}$  η ωριαία ενέργεια της εξωγήινης ακτινοβολίας σε κάθετη επιφάνεια ( $\text{kJ/m}^2$ )
- $\varepsilon$  η καθαρότητα της ατμόσφαιρας
- $I_n$  η άμεση ακτινοβολία (beam) σε επιφάνεια κάθετη σε αυτή ( $\text{kJ/m}^2$ )
- $\theta_z$  η γωνία πρόσπτωσης σε οριζόντια επιφάνεια ( $^\circ$ ).
- $m$  η αέρια μάζα, (συμβολίζεται και AM). Ορίζεται ως ο λόγος της διαδρομής του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα προς το πάχος της ατμόσφαιρας.

Με βάση τις τιμές για την καθαρότητα  $\varepsilon$ , επιλέγουμε τα μεγέθη  $f_{11}$  έως  $f_{23}$  από τον «Πίνακα 2.2» [1]:

εύρος του $\varepsilon$	f11	f12	f13	f21	f22	f23
0 - 1.065	-0.196	1.084	-0.006	-0.114	0.18	-0.019
1.065 - 1.230	0.236	0.519	-0.18	-0.011	0.02	-0.038
1.230 - 1.500	0.454	0.321	-0.255	0.072	-0.098	-0.046
1.500 - 1.950	0.866	-0.381	-0.375	0.203	-0.403	-0.049
1.950 - 2.800	1.026	-0.711	-0.426	0.273	-0.602	-0.061
2.800 - 4.500	0.978	-0.986	-0.35	0.28	-0.915	-0.024
4.500 - 6.200	0.748	-0.913	-0.236	0.173	-1.045	0.065
6.200 και άνω	0.318	-0.757	0.103	0.062	-1.698	0.236

«Πίνακας 2.2, υπολογισμός παραμέτρων με βάση την καθαρότητα της ατμόσφαιρας»

## Κεφάλαιο 2 – Το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας

Με χρήση των παραπάνω μεγεθών, οι συσχετίσεις φωτεινότητας προκύπτουν από τους τύπους (2.26) και (2.27) [1]:

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{13} \right) \right] \quad (2.26)$$

$$F_2 = \left( f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{23} \right) \quad (2.27)$$

### ii. Μοντέλο HDKR

Το μοντέλο HDKR προτείνει το διαχωρισμό της ακτινοβολίας σε τρεις συνιστώσες [1] όπως παρουσιάζεται στους τύπους (2.28), (2.29) και (2.30).

$$I_{Tiso} = I_d (1 - A_i) \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.28)$$

$$I_{Tcirc} = I_d A_i R_b \quad (2.29)$$

$$I_{Thor} = I_{Tiso} \cdot f \cdot \sin^3 \frac{\beta}{2} \quad (2.30)$$

Όπου:

$I_{Tiso}$	η ιστροπική συνιστώσα (isotropic)
$I_{Tcirc}$	η συνιστώσα ηλιακού δίσκου (circumsolar)
$I_{Thor}$	η συνιστώσα του ορίζοντα (horizon)
$A_i$	ο ανιστροπικός δείκτης
$f$	παράγοντας διαφοροποίησης

Τα  $A_i$  και  $f$  δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους (2.31) και (2.32) [1]:

$$A_i = \frac{I_b}{I_0} \quad (2.31)$$

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (2.32)$$

Σημειώνεται ότι όλες οι τιμές ακτινοβολίας που υπολογίζονται από τα μοντέλα Perez και HDKR αφορούν ωριαίες τιμές ενέργειας και είναι εκφρασμένες σε  $\text{kJ/m}^2$ . Ωστόσο, για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακτινοβολίες που αναφέρονται σε μικρότερο χρονικό διάστημα [5]. Σε κάθε περίπτωση εξυπακούεται ότι πρέπει όλες οι τιμές της ενέργειας να αναφέρονται στο ίδιο χρονικό διάστημα.



### 2.3. Πειραματική επιβεβαίωση των μοντέλων

Για την επιβεβαίωση της λειτουργίας των μοντέλων πήραμε μετρήσεις ακτινοβολίας ενός 24ώρου. Οι μετρήσεις έγιναν με βήμα του ενός λεπτού και αφορούσαν την ισχύ της ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο. Θα πρέπει λοιπόν οι τιμές που υπολογίζει το μοντέλο με βάση την οριζόντια ακτινοβολία και αφορούν το κεκλιμένο επίπεδο να μη διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες πειραματικές.

Το κεκλιμένο επίπεδο που επιλέχτηκε είναι αυτό των πανέλων που είναι τοποθετημένα στην ταράτσα του κτιρίου HMMY του ΕΜΠ. Συγκεκριμένα η επιφάνεια έχει τα εξής χαρακτηριστικά [6]:

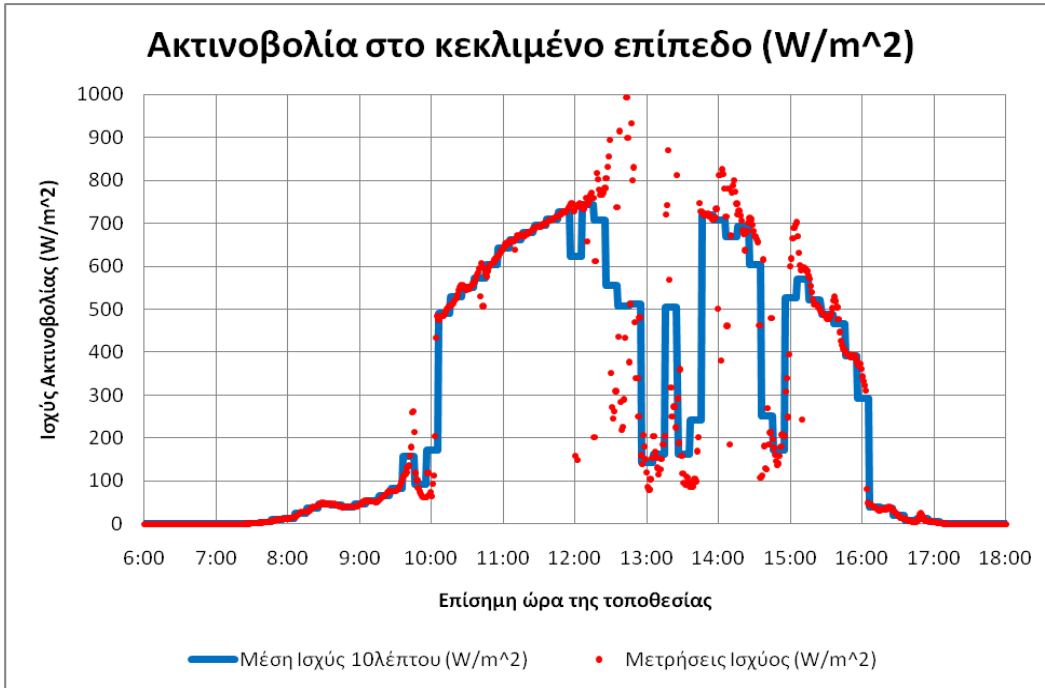
- Γεωγραφικό μήκος  $L_{loc}=-23.79^{\circ}$
- Γεωγραφικό πλάτος  $\phi=37.98^{\circ}$
- Προσανατολισμός  $\gamma=22^{\circ}$
- Κλίση  $\beta=36^{\circ}$
- Συντελεστής ανάκλασης περιβάλλοντος χώρου  $\rho_g=0.3$

Σημειώνεται ότι για μία εγκατάσταση φωτοβολταϊκού στην Ελλάδα ο προσανατολισμός θα έπρεπε να είναι νότιος ( $\gamma=0^{\circ}$ ) [2]. Ωστόσο πιθανώς λόγω σκίασης ενός γειτονικού βουνού (Υμηττός) να επιλέχθηκε διαφορετικός προσανατολισμός.

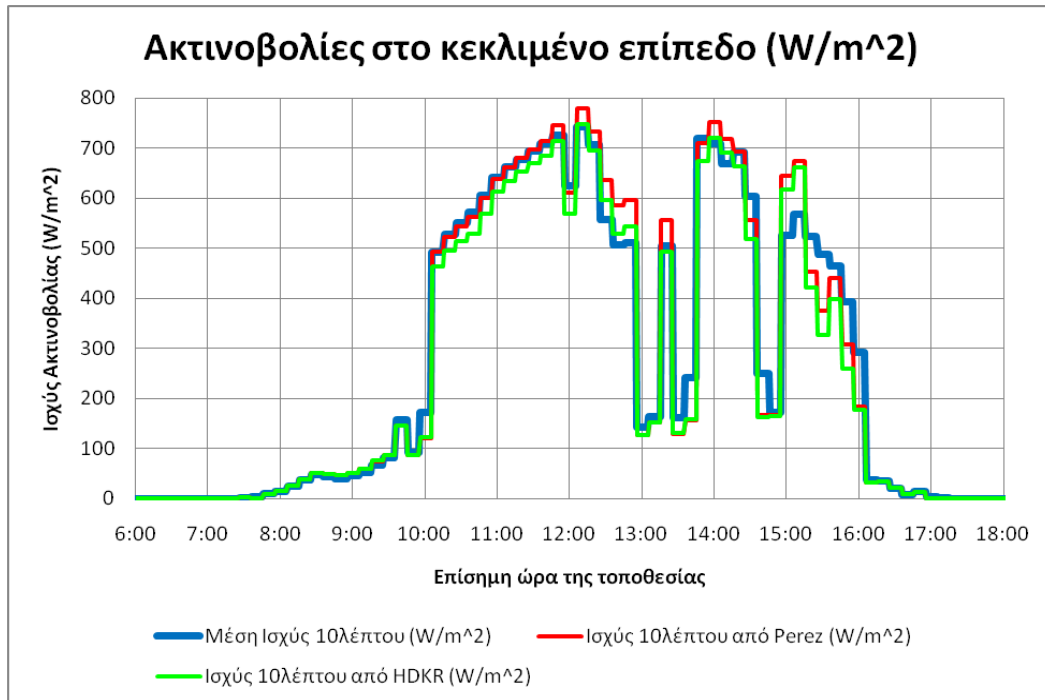
Μετρήσεις έγιναν στις 18 Δεκεμβρίου. Για αυτή τη μέρα έχουμε:

- Μέρα του χρόνου  $n=352$
- Μεσημβρινός επίσημης ώρας  $L_{st}=-30^{\circ}$  (χειμερινή ώρα)

Η εφαρμογή του μοντέλου επιλέχθηκε να γίνει σε 10λεπτα διαστήματα. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε η μετρούμενη ακτινοβολία να προκύπτει από το μέσο όρο 10 τιμών και να επηρεάζεται όσο το δυνατό λιγότερο από στιγμιαίες σκιάσεις. Στο «Σχήμα 2.5» παρουσιάζεται η ισχύς της μετρούμενης ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο με βήμα ενός λεπτού και ο μέσος όρος αυτής ανά 10λεπτο. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των μέσων όρων των 10λέπτων με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα μοντέλα. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται στο «Σχήμα 2.6».



«Σχήμα 2.5, Οι μετρήσεις ισχύος της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο και οι μέσοι όροι αυτής ανά 10λεπτο»



«Σχήμα 2.6, σύγκριση της μέσης ισχύος της μετρούμενης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα μοντέλα ανάλυσης ακτινοβολίας, σε 10λεπτα διαστήματα»

Από τα παραπάνω σχήματα, βλέπουμε ότι τα μοντέλα δουλεύουν αρκετά ικανοποιητικά, προβλέποντας τιμές πολύ κοντά στις μετρούμενες. Ωστόσο, για την καλύτερη αξιολόγησή τους χρησιμοποιήθηκαν ο μέσος όρος των διαφορών και ο μέσος όρος της απόλυτης τιμής των διαφορών των τιμών των μοντέλων από τις τιμές που προκύπτουν πειραματικά. Ο μέσος όρος βγήκε μόνο επί των μη μηδενικών μετρήσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον «Πίνακα 2.3».

Μεγέθη	Perez	HDKR
Μέσος όρος σφαλμάτων ( $W/m^2$ )	1,148578	17,63916
Μέσος όρος απόλυτης τιμής σφαλμάτων ( $W/m^2$ )	25,33598	29,43197

«Πίνακας 2.3, μέσοι όροι των σφαλμάτων των μοντέλων επί των μη μηδενικών μετρήσεων»

## 2.4. Συμπεράσματα

Η παραγωγή ενέργειας από ένα Φ/Β σύστημα εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Οι μετρήσεις ακτινοβολίας που διεξάγονται αφορούν οριζόντια επιφάνεια. Είναι συνεπώς απαραίτητη η χρήση ενός μοντέλου ακτινοβολίας για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα πανέλα.

Η προσαρμογή της ακτινοβολίας στις ζητούμενες επιφάνειες γίνεται με χρήση μοντέλων, όπως το Perez και το HDKR. Αυτά λαμβάνουν υπόψιν μετρήσεις της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, τη μέρα του έτους, και τη θέση της επιφάνειας που μας ενδιαφέρει και υπολογίζουν την ακτινοβολία που τελικά προσπίπτει σε αυτή.

Με την εφαρμογή των μοντέλων για μία τυχαία μέρα, παρατηρούμε ότι είναι αρκετά ακριβή. Συγκεκριμένα το μοντέλο Perez είχε μέσο σφάλμα  $1.1W/m^2$  και μέσο όρο των απολύτων τιμών των σφαλμάτων  $25.3W/m^2$ . Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο HDKR είχε μέσο σφάλμα  $17.6W/m^2$  και μέσο όρο των απολύτων τιμών των σφαλμάτων  $29.4W/m^2$ . Προκύπτει συνεπώς ότι και τα δύο κάνουν πολύ καλή προσέγγιση μα ελαφρώς ακριβέστερο είναι το μοντέλο Perez. Στο εξής λοιπόν για τους υπολογισμούς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιλεγμένη επιφάνεια θα χρησιμοποιείται αυτό το μοντέλο.



## Κεφάλαιο 3

### Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ βρίσκεται εγκατεστημένο ένα φωτοβολταϊκό (Φ/Β) σύστημα παραγωγής ενέργειας. Το σύστημα αποτελείται από τα πάνελα που παράγουν συνεχή (DC) τάση και ρεύμα και τον αντιστροφέα DC-AC που μετατρέπει αυτά τα μεγέθη σε εναλλασσόμενα (AC) ώστε να διοχετευθούν στο δίκτυο ή να καταναλωθούν από συσκευές του εργαστηρίου. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού της απόδοσής και γενικότερα της συμπεριφοράς του συστήματος και μελετώνται κάποια μεγέθη ενδεικτικά για την παραγωγή μιας Φ/Β εγκατάστασης.

#### 3.1. Ο Φ/Β αντιστροφέας

Στο εργαστήριο βρίσκεται εγκαταστημένος ο Φ/Β αντιστροφέας Sunny Boy 1100 της SMA που παρουσιάζεται στο «Σχήμα 3.1». Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον «Πίνακα 3.1» [7].



«Σχήμα 3.1, ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας Sunny Boy 1100 του εργαστηρίου ΣΗΕ»

Χαρακτηριστικά Ισχύος Εισόδου	
Μέγιστη DC Ισχύς	1210 W
Μέγιστη DC Τάση	400 V
Εύρος λειτουργίας DC τάσης	139V - 400V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	10 A
Χαρακτηριστικά Ισχύος Εξόδου	
Μέγιστη AC Ισχύς	1100 W

Ονομαστική AC Ισχύς	1000 W
Συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD)	< 4%
Μέγιστη Απόδοση	93%

«Πίνακας 3.1, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 της SMA που βρίσκεται εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΣΗΕ»

Ο αντιστροφέας αυτός λειτουργεί με τη μέθοδο της «Εύρεσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος» (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Πηγαίνει δηλαδή στην I-V καμπύλη (δες παράγραφο 3.2.1) του συστήματος των Φ/Β πανέλων και διαμορφώνει την εσωτερική του φαινόμενη αντίσταση έτσι ώστε να δέχεται τη μέγιστη δυνατή DC ισχύ. Ο αντιστροφέας αυτός μπορεί να λειτουργήσει μόνο ως πηγή ρεύματος. Δηλαδή πρέπει να εντοπίσει στην έξοδό του κάποια τάση στην οποία θα προσαρμοστεί πριν αρχίσει να παρέχει ισχύ [7]. Σε διαφορετική περίπτωση παραμένει εκτός λειτουργίας.

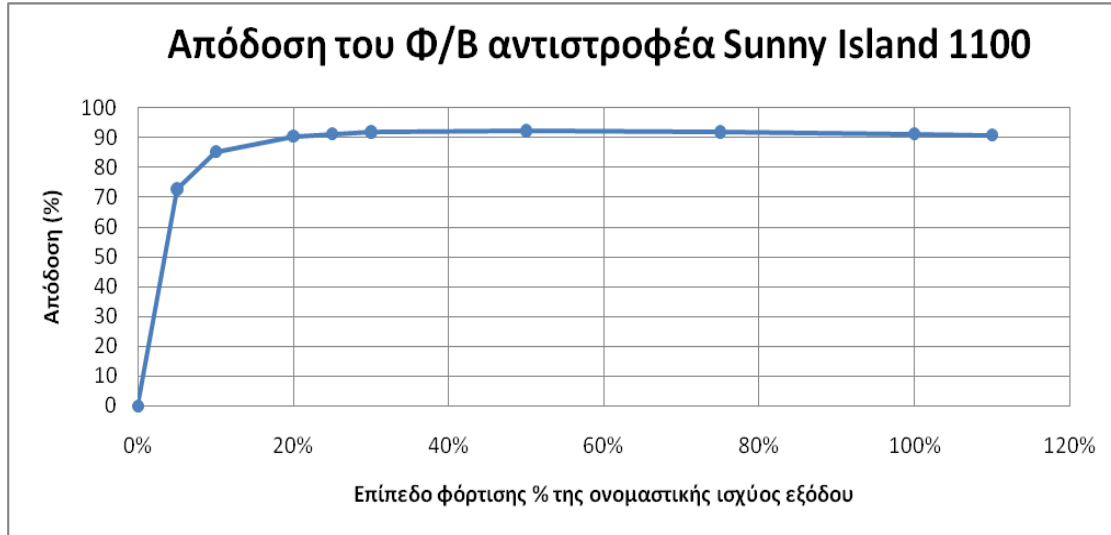
### 3.1.1. Η απόδοση του Φ/Β αντιστροφέα

Ο κατασκευαστής δίνει τη μέγιστη απόδοση του αντιστροφέα στο 93%. Ωστόσο είναι απαραίτητη η γνώση της απόδοσής του σε όλο το εύρος λειτουργίας του ώστε να σχεδιαστεί η καμπύλη απόδοσής του. Στο εργαστήριο διεξήχθησαν και δημοσιεύτηκαν μετρήσεις της απόδοσής του [8] σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61683 [4]. Αυτό το πρότυπο υπαγορεύει τη μέτρηση της απόδοσης του αντιστροφέα σε επίπεδα λειτουργίας 5%, 10%, 20%, 25%, 50%, 75%, 100% και εφόσον είναι εφικτό και 120% επί της ονομαστικής του ισχύος.

Συνολικά διεξήχθησαν τρεις σειρές μετρήσεων, μία για την ελάχιστη επιτρεπτή DC τάση MPPT ( $V_{MPPTmin}=145V$ ), μία για τη μέγιστη ( $V_{MPPTmax}=320V$ ) και μία για τη διάμεσο του εύρους τους ( $V_{MPPTrat}=230V$ ) [8]. Τα πανέλα που υπάρχουν στο εργαστήριο λειτουργούν σε τιμές MPPT κοντά στη διάμεσο του εύρους τους, οπότε επιλέχθηκε η συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων. Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στον «Πίνακα 3.2» και η καμπύλη απόδοσης στο «Σχήμα 3.2». Σημειώνεται ότι η τελευταία μέτρηση είναι στο 110% και όχι στο 120% της ονομαστικής ισχύος διότι μέχρι αυτό το επίπεδο φόρτισης εγγυάται ο κατασκευαστής την ομαλή λειτουργία του αντιστροφέα [8].

Επίπεδο Φόρτισης ως ποσοστό επί της Ονομαστικής Ισχύος Εξόδου	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%	110%
Ενεργός AC Ισχύς (W)	37,8	94,8	203,7	249,8	308,3	503,3	764,9	982,5	1096,1
DC Ισχύς (W)	51,8	111,0	225,0	273,5	335,5	544,8	831,9	1076,2	1206,3
Απόδοση (%)	72,9	85,4	90,5	91,3	91,9	92,4	92,0	91,3	90,9

«Πίνακας 3.2, η απόδοση του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 για διάφορα επίπεδα φόρτισης για DC τάση MPPT  $V_{MPPTrat}=230V$ »



«Σχήμα 3.2, η καμπύλη απόδοσης του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 για DC τάση MPPT  $V_{MPPTrat}=230V$ »

### 3.2. Τα Φ/Β πανέλα

Το Φ/Β σύστημα διαθέτει 11 πανέλα συνολικής επιφάνειας  $9.42m^2$  που είναι τοποθετημένα στην ταράτσα του εργαστηρίου. Έχουν προσανατολισμό  $\gamma=22^{\circ}$  (νοτιο-νοτιοδυτικό) και κλίση  $\beta=36^{\circ}$ . Κατασκευάστρια εταιρία είναι η Isofoton και το μοντέλο το I-110/12. Κάθε πάνελο έχει ονομαστική μέγιστη ισχύ  $P_{nom}=110W_p$ , άρα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι  $P_{TOT}=1210W_p$ . Οι Φ/Β συλλέκτες του εργαστηρίου παρουσιάζονται στο «Σχήμα 3.3». Για τις Πρότυπες Συνθήκες Λειτουργίας [2] (STC – Standard Test Conditions,  $25^{\circ}C$ ,  $1kW/m^2$ ,  $AM=1.5$ ) τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε πανέλου παρουσιάζονται στον «Πίνακα 3.3» [9].



«Σχήμα 3.3, τα Φ/Β πανέλα του εργαστηρίου ΣΗΕ»

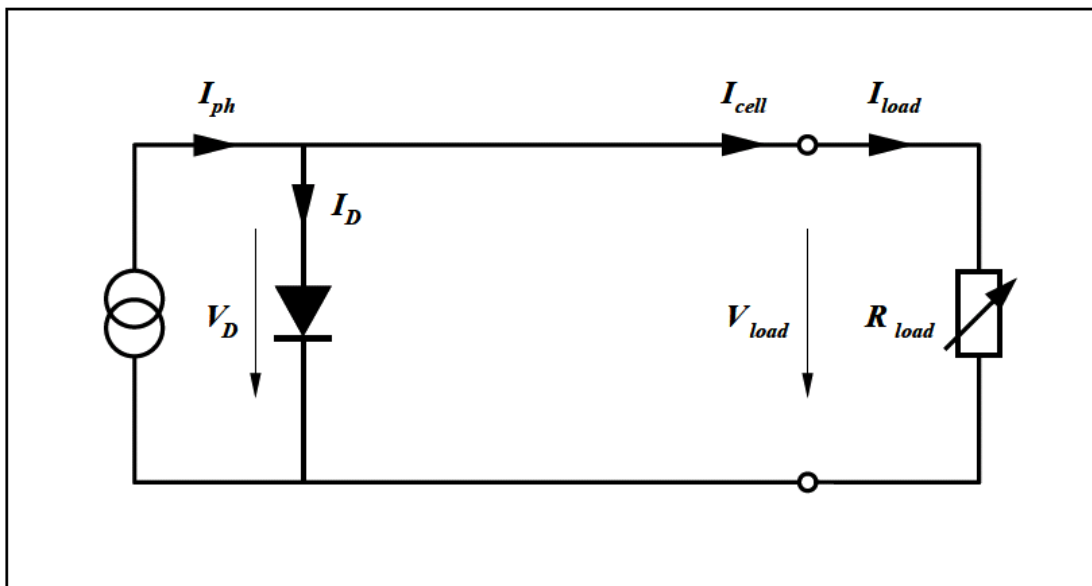
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	
Τύπος	Μονοκρυσταλικό πυρίτιο
Ονομαστική Ισχύς	110 W
Τάση λειτουργίας στη Μέγιστη Ισχύ	17,4 V
Ρεύμα λειτουργίας στη Μέγιστη Ισχύ	6,32 A
Τάση Ανοικτοκύκλωσης	21,6 V
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	6,76 A
Απόδοση	12,9%
Μηχανικά χαρακτηριστικά	
Διαστάσεις (Μήκος x Πλάτος x Πάχος)	1310x654x39.5 mm
Επιφάνεια	0,86 m <sup>2</sup>

«Πίνακας 3.3, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πανέλου I-110/12 της Isofoton»

### 3.2.1. Το ηλεκτρικό ισοδύναμο του πανέλου

#### A. Το απλοποιημένο ηλεκτρικό ισοδύναμο

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του πανέλου απαιτείται η χρήση ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Σε πρώτη φάση μπορούμε να θεωρήσουμε το πάνελο σαν μία ιδανική πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο [2], όπως περιγράφεται στο «Σχήμα 3.4»



«Σχήμα 3.4, το απλοποιημένο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου»

Στο παραπάνω κύκλωμα έχουμε μία ιδανική πηγή ρεύματος που παράγει ρεύμα  $I_{ph}$  το οποίο εξαρτάται από τη φωτεινότητα. Στα άκρα του κυκλώματος υπάρχει ένα φορτίο με αντίσταση  $R_{load}$ . Το ρεύμα που το διαρρέει δίνεται από τον τύπο (3.1) [2].

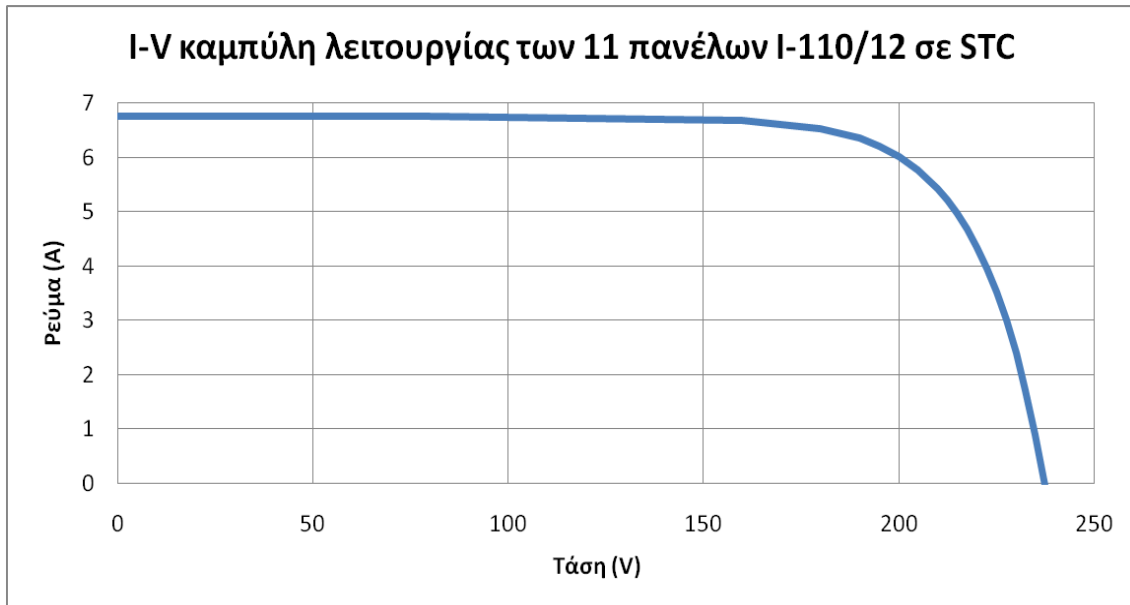


$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

όπου:

- $I_{cell}$  το ρεύμα (A) στην έξοδο του πανέλου
- $I_{ph}$  το ρεύμα (A) που παράγει η ιδανική πηγή ρεύματος και εξαρτάται από τη φωτεινότητα
- $I_D$  το ρεύμα (A) που διαρρέει τη δίοδο
- $I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (A) που εξαρτάται από κατασκευαστικές παραμέτρους του πανέλου
- $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου Ισχύει ότι  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$
- $V$  η τάση (V) στα άκρα της διόδου
- $k$  η σταθερά Boltzmann. Ισχύει ότι  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J / K$
- $T$  η θερμοκρασία ( $^{\circ}K$ ) του πανέλου

Στον παραπάνω τύπο, για δεδομένη ακτινοβολία και θερμοκρασία ( $I_{ph}$ ,  $T$  σταθερά), το ρεύμα  $I_{cell}$  στην έξοδο του πανέλου είναι συνάρτηση μόνο της τάσης  $V$  στα άκρα της διόδου. Το γράφημα που προκύπτει από τη σχέση αυτή ονομάζεται “I-V καμπύλη του πανέλου” [2]. Η I-V καμπύλη λειτουργίας συνολικά για τα 11 πανέλα I-110/12 της Isofoton που χρησιμοποιεί το εργαστήριο ΣΗΕ παρουσιάζεται στο «Σχήμα 3.5» [9].



«Σχήμα 3.5, η I-V καμπύλη λειτουργίας των 11 πανέλων I-110/12 της Isofoton του εργαστηρίου σε STC, όπως αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή»

Όπως φαίνεται από το «Σχήμα 3.5» και τον τύπο (3.1), υπάρχει μία βέλτιστη τιμή του  $R_{load}$  για την οποία η ροή ισχύος προς το φορτίο βελτιστοποιείται, προκύπτει δηλαδή το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP – Maximum Power Point). Η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό συμβολίζεται με  $V_{MPP}$  και το ρεύμα με  $I_{MPP}$ .

Εκτός από το σημείο μέγιστης ισχύος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά μεγέθη που προκύπτουν από την (3.1) αν συνδεθεί φορτίο μηδενικής και άπειρης αντίστασης.

Για φορτίο μηδενικής αντίστασης έχουμε βραχυκύκλωμα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  όπως παρουσιάζεται και στον τύπο (3.2).

$$V_{load} = 0 \Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow I_{ph} = I_{sc} \quad (3.2)$$

Για φορτίο άπειρης αντίστασης έχουμε ανοικτοκύκλωμα. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο του παραγόμενου ρεύματος διέρχεται από τη δίοδο, στην οποία θα έχουμε μία πτώση τάσης  $V_{oc}$  όπως παρουσιάζεται στον τύπο (3.3).

$$I_{load} = 0 \Rightarrow I_{ph} = I_D = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \Rightarrow V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (3.3)$$

Από τα παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή πλήρωσης (FF – Fill Factor) [2]. Αυτός ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να παράσχει το πανέλο προς το γινόμενο της τάσης ανοικτοκύκλωσης με το ρεύμα βραχυκύκλωσης, όπως παρουσιάζεται στον τύπο (3.4).

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης μαζί με την τάση ανοικτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης αποτελούν τα βασικότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της λειτουργίας των Φ/Β και της απόδοσής του. Η τελευταία δίνεται από τον τύπο (3.5) [2].

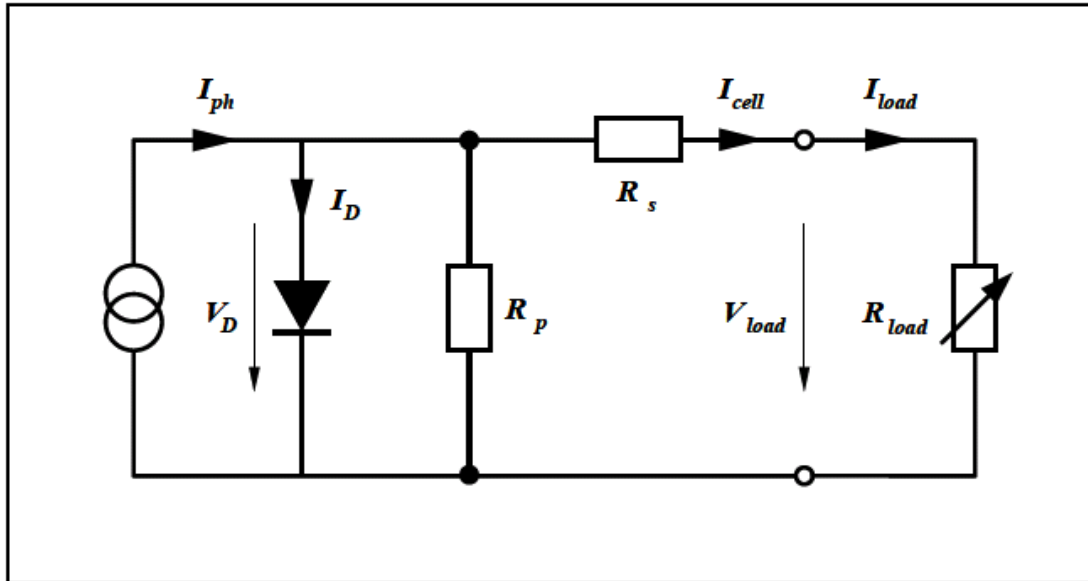
$$n = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{G \cdot A} \quad (3.5)$$

όπου:

- n η απόδοση του πανέλου
- G η ακτινοβολία που προσπίπτει στο πανέλο ( $W/m^2$ )
- A η επιφάνεια του πανέλου ( $m^2$ )

## B. Το σύνθετο ηλεκτρικό ισοδύναμο

Οι τύποι (3.1), (3.2) και (3.3) στηρίζονται στο απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του πανέλου, που θεωρεί το πανέλο μία ιδανική πηγή ρεύματος που ελέγχεται από δίοδο. Αυτό όμως δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα γιατί υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που προκαλούν απώλειες. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται το σύνθετο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα [2] που παρουσιάζεται στο «Σχήμα 3.6».



«Σχήμα 3.6, το σύνθετο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου»

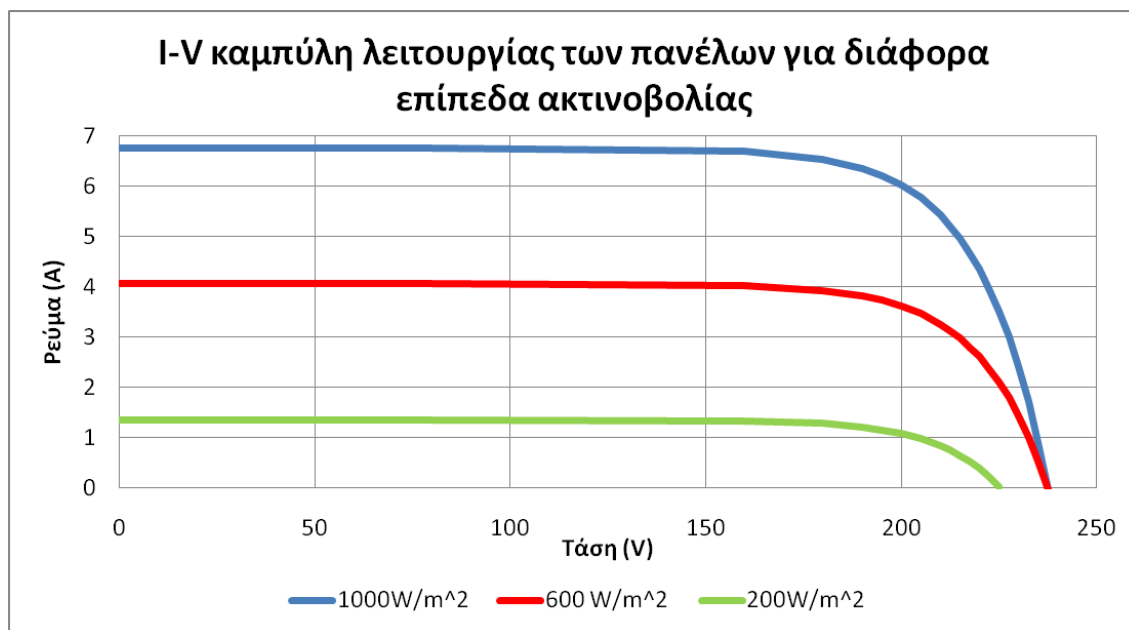
Η διαφορά του σύνθετου ισοδυνάμου κυκλώματος από το απλό είναι η ύπαρξη της αντίστασης εν σειρά  $R_s$  και της παράλληλης  $R_p$ . Η πρώτη οφείλεται στην αντίσταση που συναντούν οι ηλεκτρικοί φορείς κατά την κίνησή τους μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Η παράλληλη αντίσταση οφείλεται στο ότι η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού υπάρχουν διαρροές ρευμάτων μέσα από αυτή. Το ρεύμα που τελικά θα διαρρέει το φορτίο δίνεται από τον τύπο (3.6).

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{load} + I_{cell} \cdot R_s}{kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{load} + I_{cell} \cdot R_s}{R_p} \quad (3.6)$$

### 3.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος του πανέλου

#### A. Ακτινοβολία

Η ακτινοβολία που προσπίπτει στα πανέλα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την παραγωγή τους. Υπάρχει μία σχεδόν γραμμική σχέση που συνδέει την προσπίπτουσα ακτινοβολία και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Αντιθέτως η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό από την ακτινοβολία. Οι I-V καμπύλες των πανέλων του εργαστηρίου για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας παρουσιάζονται στο «Σχήμα 3.7» [9].



«Σχήμα 3.7, η I-V καμπύλη λειτουργίας για το σύνολο των 11 πανέλων του εργαστηρίου για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας»

## B. Θερμοκρασία

Ένας άλλος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας των πανέλων είναι η θερμοκρασία τους. Οι συντελεστές διόρθωσης της I-V καμπύλης δίνονται από τον κατασκευαστή. Συγκεκριμένα, για το πανέλο I-110/12, η Isofoton μας πληροφορεί ότι η τάση ανοικτοκύκλωσης μεταβάλλεται κατά  $T_k(V_{oc}) = -0.37\%/^{\circ}\text{C}$  (μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας) ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά  $T_k(I_{sc}) = +0.06\%/^{\circ}\text{C}$  (αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας) [9]. Η μεταβολή της τάσης ανοικτοκύκλωσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Συνεπώς στο σύνολο, η απόδοση του πανέλου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

### 3.2.3. Το μοντέλο των Φ/Β πανέλων

Ο τύπος (3.6) αν και περιγράφει αρκετά καλά την ηλεκτρική συμπεριφορά του πανέλου, είναι δύσκολο να εφαρμοστεί. Ο λόγος είναι ότι οι τιμές των  $I_0$ ,  $R_s$  και  $R_p$  δεν είναι γνωστές ούτε είναι εύκολο να υπολογιστούν. Επίσης δε μας δίνει καμία πληροφορία για την εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και της τάσης ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  από την ακτινοβολία. Για αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία των πανέλων. Το συγκεκριμένο μοντέλο μάλιστα προτείνεται από το πρότυπο EN 50530 [10] για τη προσομοίωση της λειτουργίας των πανέλων κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της απόδοσης ενός Φ/Β αντιστροφέα.

Το ρεύμα που παρέχει το πανέλο στο φορτίο δίνεται από τον τύπο (3.7) [10].

### Κεφάλαιο 3 – Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα

$$I_{pv} = I_{sc}^c - I_r \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_{pv}}{V_{oc}^c \cdot C_{AQ}}\right) - 1 \right] \quad (3.7)$$

όπου:

- $I_{pv}$  το ρεύμα (A) στην έξοδο του πανέλου
- $I_{sc}^c$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης (A) για τις τρέχουσες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας
- $I_r$  ρεύμα (A) εξαρτώμενο από την ακτινοβολία
- $V_{oc}^c$  η τάση (V) ανοικτοκύκλωσης για τις τρέχουσες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας
- $V_{pv}$  η τάση στην έξοδο του πανέλου
- $C_{AQ}$  σταθερά που εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πανέλου

Η εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}^c$  από τις τρέχουσες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας δίνεται από τον τύπο (3.8) [10].

$$I_{sc}^c = I_{sc,STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{pv} - T_{STC})] \quad (3.8)$$

όπου:

- $I_{sc,STC}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης (A) σε πρότυπες συνθήκες λειτουργίας, το οποίο για τα πανέλα του εργαστηρίου είναι  $I_{sc,STC} = 6.76A$
- $G$  η ακτινοβολία ( $W/m^2$ ) που προσπίπτει στα πανέλα
- $G_{STC}$  η ακτινοβολία πρότυπων συνθηκών λειτουργίας,  $G_{STC} = 1000W / m^2$
- $\alpha$  συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης του ρεύματος, ο οποίος για τα πανέλα I-110/12 δίνεται  $\alpha = T_k(I_{sc}) = 0.06\%/^{\circ}C$
- $T_{pv}$  η θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ ) των πανέλων
- $T_{STC}$  η θερμοκρασία πρότυπων συνθηκών λειτουργίας,  $T_{STC} = 25^{\circ}C$

Η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}^c$  για τις τρέχουσες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας δίνεται από τον τύπο (3.9) [10].

$$V_{oc}^c = V_{oc,STC} \cdot [1 + \beta \cdot (T_{pv} - T_{STC})] \cdot \left[ \ln\left(\frac{G}{C_G} + 1\right) \cdot C_V - C_R \cdot G \right] \quad (3.9)$$

όπου:

- $V_{oc,STC}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης (V) για πρότυπες συνθήκες λειτουργίας, η οποία για το σύνολο των 11 πανέλων του εργαστηρίου είναι  $V_{oc,STC} = 237.6V$
- $\beta$  συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης της τάσης, ο οποίος για τα πανέλα του εργαστηρίου δίνεται  $\beta = T_k(V_{oc}) = -0.37\%/^{\circ}C$

### Κεφάλαιο 3 – Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα

$C_G$ ,  $C_V$  και  $C_R$  είναι σταθερές οι οποίες για πανέλα τεχνολογίας πυριτίου παίρνουν τις τιμές  $C_G = 2.514 \cdot 10^{-3} W/m^2$ ,  $C_V = 8.593 \cdot 10^{-2}$  και  $C_R = 1.088 \cdot 10^{-4} m^2/W$

Για τον προσδιορισμό των  $C_{AQ}$  και  $I_r$ , απαιτείται η χρησιμοποίηση των λόγων  $FF_V$  και  $FF_I$  τους οποίους θα μπορούσαμε να ορίσουμε ως «συντελεστής πλήρωσης τάσης» και «συντελεστής πλήρωσης ρεύματος» αντίστοιχα. Το  $FF_V$  ισούται με το λόγο της τάσης ανοικτοκύκλωσης προς την τάση σημείου μέγιστης ισχύος για πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Αντίστοιχα το  $FF_I$  ισούται με το λόγο του ρεύματος βραχυκύκλωσης προς το ρεύμα του σημείου μέγιστης ισχύος για πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Αναλυτικά τα  $FF_V$  και  $FF_I$  δίνονται από τους τύπους (3.10) και (3.11) [10].

$$FF_V = \frac{V_{MPP,STC}}{V_{oc,STC}} \quad (3.10)$$

$$FF_I = \frac{I_{MPP,STC}}{I_{sc,STC}} \quad (3.11)$$

Για τα πανέλα του εργαστηρίου προκύπτει ότι  $FF_V=0.806$  και  $FF_I=0.935$ .

Τέλος η σταθερά  $C_{AQ}$  και το εξαρτώμενο από την ακτινοβολία ρεύμα  $I_r$  δίνονται από τους τύπους (3.12) και (3.13) αντίστοιχα [10].

$$C_{AQ} = \frac{FF_V - 1}{\ln(1 - FF_I)} \quad (3.12)$$

$$I_r = I_{sc,STC} \cdot (1 - FF_I)^{\frac{1}{1-FF_V}} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (3.13)$$

Για την εφαρμογή των εξισώσεων των μοντέλων, απαιτείται πλέον μόνο η γνώση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα πανέλα και της θερμοκρασίας τους. Αντικαθιστώντας αυτές τις δύο μεταβλητές μπορούμε να βρούμε το ρεύμα εξόδου των πανέλων για κάθε τιμή της τάσης στα άκρα τους και με αυτό τον τρόπο να κατασκευάσουμε τις I-V καμπύλες που επιθυμούμε.

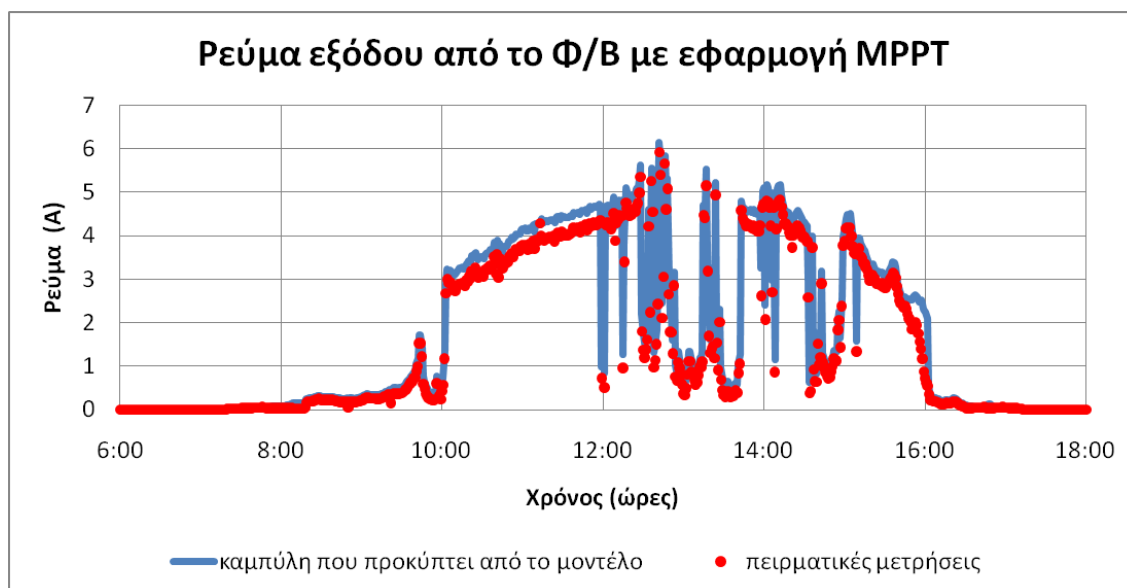
#### A. Η επαλήθευση του μοντέλου των Φ/Β πανέλων

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου των πανέλων πρέπει να συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές που μετρούνται κατά τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Στο εργαστήριο, για μια τυχαία ημέρα, έγιναν μετρήσεις της ακτινοβολίας που προσέπιπτε στα πανέλα, της θερμοκρασίας τους καθώς και της τάσης και του ρεύματος που αυτά παρείχαν στην έξοδό τους. Οι τιμές τάσης και ρεύματος προέκυπταν από το MPPT που έκανε ο Φ/Β αντιστροφείας. Για δεδομένες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και θεωρώντας ως τάση εξόδου αυτή που προκύπτει από το MPPT του αντιστροφεία,

υπολογίζαμε τις τιμές του ρεύματος εξόδου που προκύπτουν από το μοντέλο. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις μετρούμενες, έγινε μία προσπάθεια να προσδιοριστεί η ακρίβεια του μοντέλου.

Σημειώνεται ότι τις τιμές τάσης και ρεύματος τις μετρούσαμε στην είσοδο του αντιστροφέα και όχι στην έξοδο των πανέλων. Συνεπώς πρέπει να συνυπολογιστεί και η πτώση τάσης στην καλωδίωση. Τα πανέλα συνδέονται με ένα χάλκινο καλώδιο μήκους 30m ( $l=60m$  αν συνυπολογισθεί η πτώση τάσης και στο καλώδιο της επιστροφής) και διατομής  $S=2.5mm^2$ . Ο χαλκός έχει ειδική αντίσταση  $\rho = 1.79 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot mm$  στους  $20^{\circ}C$  [11]. Η συνολική αντίσταση του καλωδίου προκύπτει συνεπώς  $R = \rho \cdot l / S = 0.43\Omega$ .

Στο «Σχήμα 3.8» παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών της ισχύος των πανέλων που μετρήθηκε στην είσοδο του αντιστροφέα με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου των πανέλων, λαμβάνοντας υπόψιν και την πτώση τάσης στη γραμμή.



«Σχήμα 3.8, σύγκριση της μετρούμενης DC ισχύος εισόδου στον Φ/Β αντιστροφέα με την αντίστοιχη ισχύ που προβλέπεται από το μοντέλο των πανέλων»

Οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν πειραματικά, όπως φαίνεται και στο «Σχήμα 3.8». Συγκεκριμένα το μοντέλο προβλέπει τιμές ισχύος κατά 11.8% υψηλότερες από αυτές που τελικά προέκυψαν. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται σε επιπλέον απώλειες στην καλωδίωση που δεν υπολογίστηκαν, όπως οι απώλειες στις κλέμες, στα μετρητικά όργανα και στις συνδέσεις των καλωδίων [12]. Επίσης μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες που έχουν να κάνουν με την κατάσταση των πανέλων όπως η ύπαρξη σκόνης στην επιφάνειά τους, η ανάκλαση στην επιφάνειά τους περισσότερης ακτινοβολίας από ότι αναμένεται ή η σκίαση κάποιων από αυτά [12]. Μία άλλη παράμετρος που επιδρά αρνητικά στην παραγωγή ενέργειας από τα πανέλα είναι η γήρανσή τους (degradation time) [12]. Υπάρχει τέλος το ενδεχόμενο κάποια από τα

πανέλα να έχουν τεχνικά χαρακτηριστικά ελαφρώς διαφορετικά από αυτά που προσδιορίζει ο κατασκευαστής και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία του μοντέλου.

## **B. Η λειτουργία του μοντέλου των Φ/Β πανέλων**

Η σχέση (3.7) μας δίνει το ρεύμα που θα παράγει το πάνελ, για δεδομένες τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, συναρτήσει της τάσης  $V_{pv}$  στα άκρα του. Η τάση δηλαδή στους ακροδέκτες του πάνελου και το ρεύμα αυτού, εξαρτώνται από τη φαινόμενη αντίσταση στην είσοδο του Φ/Β αντιστροφέα. Κατά τη προσομοίωση της λειτουργίας του, θεωρήθηκε ότι το  $V_{pv}$  μεταβάλλεται με βήμα 0.1V. Η εύρεση συνεπώς του σημείου μέγιστης ισχύος γίνεται με την προαναφερθείσα ακρίβεια.

Το μοντέλο των πανέλων, όπως είδαμε, απαιτεί και την τιμή της θερμοκρασίας των δεκτών προκειμένου να προσομοιώσει τη συμπεριφορά τους. Θα πρέπει συνεπώς να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που να προβλέπει την εξέλιξη της θερμοκρασίας τους συναρτήσει της ακτινοβολίας που δέχονται και της εξωτερικής θερμοκρασίας. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου ξεφεύγει από τα πλαίσια της διπλωματικής. Συνεπώς, κατά τις προσομοιώσεις, όπου δεν υπήρχαν καταγραφές θερμοκρασίας των πανέλων, αυτή θεωρήθηκε σταθερή στους 25°C.

## **3.3. Δείκτες που περιγράφουν τη λειτουργία μιας Φ/Β εγκατάστασης**

Η αξιολόγηση της λειτουργίας μιας Φ/Β εγκατάστασης μπορεί να διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση κάποιων δεικτών [13]. Η παραγόμενη ενέργεια από μόνη της δεν αρκεί για να αντιληφθούμε αν μία εγκατάσταση λειτουργεί ικανοποιητικά. Πρέπει να ληφθούν υπόψιν και άλλοι παράγοντες όπως η εγκατεστημένη ισχύς του Φ/Β συστήματος, η ηλιοφάνεια που επικρατεί στην περιοχή και οι απώλειες που υπάρχουν σε διάφορα στάδια της Φ/Β διαδικασίας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι δείκτες που παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

### **A. Η απόδοση της εγκατάστασης $Y_A$**

Η απόδοση της εγκατάστασης ( $Y_A$  – array yield) περιγράφεται από τον τύπο (3.14) [13]:

$$Y_A = \frac{E_{PVAC}}{P_{nom}} \quad (3.14)$$

Στον παραπάνω τύπο:

$E_{PVAC}$  Η ημερήσια παραγόμενη AC ενέργεια από τη Φ/Β εγκατάσταση όπως αυτή παρέχεται από τον Φ/Β αντιστροφέα



$P_{nom}$  Η ονομαστική ισχύς της εγκατάστασης

Η  $E_{PVAC}$  εκφράζεται σε kWh/ημέρα και η ονομαστική ισχύς σε kW. Έτσι η απόδοση της εγκατάστασης  $Y_A$  έχει μονάδα ώρες/ημέρα (h/d). Αυτός ο λόγος εκφράζει δηλαδή πόσες ώρες θα χρειαζόταν να δουλέψει η εγκατάσταση στην ονομαστική της ισχύ για να παράγει ενέργεια ίση με την  $E_{PVAC}$  [13].

## Β. Η απόδοση αναφοράς $Y_R$

Η απόδοση αναφοράς ( $Y_R$  – reference yield) αναφέρεται στην ηλιοφάνεια που επικρατεί στην περιοχή όπου βρίσκεται το Φ/Β που μελετάμε και περιγράφεται από τον τύπο (3.15) [13]:

$$Y_R = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad (3.15)$$

Στον παραπάνω τύπο:

$H_i$  η ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια των πανέλων ανά  $m^2$

$G_{STC}$  η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας υπό ιδανικές συνθήκες (STC – Standard Test Conditions) που ισούται με  $1kW/m^2$

Η  $H_i$  εκφράζεται σε kWh/( $m^2 \cdot$  ημέρα) και η  $G_{STC}$  σε  $kW/m^2$ . Έτσι η απόδοση αναφοράς  $Y_R$  έχει μονάδες ώρες/ημέρα (h/d). Αυτός ο λόγος εκφράζει δηλαδή πόσες ώρες ηλιοφάνειας ιδανικών συνθηκών (STC) απαιτούνται για να δεχτούν τα πάνελα ηλιακή ενέργεια ίση με την  $H_i$  [13].

## Γ. Η τελική απόδοση $Y_F$

Η τελική απόδοση ( $Y_F$  – final yield) περιγράφεται από τον τύπο (3.16) [13]:

$$Y_F = \frac{E_{PVuse}}{P_{nom}} \quad (3.16)$$

Στον παραπάνω τύπο:

$E_{PVuse}$  το ποσό της ημερήσιας παραγόμενης AC ενέργειας από τη Φ/Β εγκατάσταση που φτάνει στον καταναλωτή

Η  $Y_F$  έχει και αυτή μονάδες ώρες/ημέρα (h/d). Η διαφορά της  $Y_A$  από την  $Y_F$  είναι ότι η πρώτη έχει στον αριθμητή την παραγόμενη AC ενέργεια από την εγκατάσταση ενώ η δεύτερη το ποσό της ενέργειας που τελικά φτάνει στον καταναλωτή. Απώλειες υπάρχουν στις καλωδιώσεις, στους μετασχηματιστές (εάν υπάρχουν) και στο σύστημα των μπαταριών αν το Φ/Β δεν είναι συνδεδεμένο στο εθνικό δίκτυο αλλά λειτουργεί στα πλαίσια ενός αυτόνομου συστήματος [13]. Για τα διασυνδεδεμένα συστήματα οι απώλειες στις καλωδιώσεις πρέπει να μην υπερβαίνουν το 4% [11].

#### Δ. Ο λόγος επίδοσης PR

Ο λόγος επίδοσης (PR – performance ratio) αποτελεί το πλέον χαρακτηριστικό μέγεθος για την αξιολόγηση της εγκατάστασης ενός Φ/Β συστήματος. Πρόκειται για έναν καθαρό αριθμό (χωρίς μονάδα μέτρησης) και δίνεται από τον τύπο (3.17) [13]:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} = \frac{\frac{E_{PVuse}}{P_{nom}}}{\frac{H_i}{G_{STC}}} \quad (3.17)$$

Πρόκειται στην ουσία για μια κανονικοποίηση του λόγου της τελικής απόδοσης  $Y_F$ . Ο λόγος της τελικής απόδοσης  $Y_F$  εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία. Ένα κακοσχεδιασμένο πάρκο σε μία ηλιόλουστη χώρα θα έχει καλύτερο  $Y_F$  από ότι ένα άρτια σχεδιασμένο το οποίο όμως βρίσκεται σε μία χώρα με μικρότερη ηλιοφάνεια. Για αυτό τον λόγο κανονικοποιούμε το  $Y_F$  ως προς τις καιρικές και κλιματολογικές συνθήκες, που εκφράζονται από τον λόγο της απόδοσης αναφοράς  $Y_R$  [13].

#### Ε. Οι απώλειες μετατροπής $L_C$

Οι απώλειες μετατροπής  $L_C$  (capture losses) δίνονται από τον τύπο (3.18) [13]:

$$L_C = Y_R - Y_A = \frac{H_i}{G_{STC}} - \frac{E_{PVAC}}{P_{nom}} \quad (3.18)$$

Οι απώλειες μετατροπής έχουν μονάδα μέτρησης ώρες/ημέρα (h/d). Εκφράζουν τις απώλειες που έχει το σύστημα από τη στιγμή που προσπίπτουν οι ακτίνες του ήλιου στα πάνελ μέχρι τη στιγμή που δίνει ο αντιστροφέας την ενέργεια στο δίκτυο. Αυτές οφείλονται στους εξής λόγους [13]:

- σκίαση των πανέλων
- αντανάκλαση του ήλιου στην επιφάνειά των πανέλων
- λανθασμένος προσανατολισμός των πανέλων
- ύπαρξη σκόνης πάνω στους συλλέκτες
- απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας
- γήρανση των πανέλων
- μη βέλτιστη τεχνική MPPT από τους αντιστροφέες και απώλειες σε αυτούς

#### ΣΤ. Οι απώλειες συστήματος $L_S$

Οι απώλειες συστήματος ( $L_S$  - system losses) δίνονται από τον τύπο (3.7) [13]:

$$L_S = Y_A - Y_F = \frac{E_{PVAVC} - E_{PVuse}}{P_{nom}} \quad (3.7)$$

Οι απώλειες συστήματος εκφράζουν τις απώλειες ενέργειας από την έξοδο του Φ/Β αντιστροφέα μέχρι τον καταναλωτή [13]. Ουσιαστικά είναι η διαφορά  $E_{PVAC}-E_{PVuse}$  εκφρασμένη σε μονάδα μέτρησης ώρες/ημέρα (h/d).

## 2. Ο λόγος ηλιακής παραγωγής $F_{sol}$

Ο λόγος ηλιακής παραγωγής ( $F_{sol}$  – solar fraction) έχει νόημα όταν εξετάζουμε την παραγωγή ενός Φ/Β συστήματος ως προς κάποια κατανάλωση. Ορίζεται ως ο λόγος της Φ/Β ενέργειας που έφτασε στον καταναλωτή προς το σύνολο των καταναλώσεών του. Είναι καθαρός αριθμός και δίνεται ως ποσοστό % από τον τύπο (3.8) [13]:

$$F_{sol} = \frac{E_{PVuse}}{E_{LOAD}} \cdot 100 \quad (3.8)$$

όπου:

$E_{LOAD}$  η καταναλισκόμενη ενέργεια

Η χρησιμότητα των δεικτών στην αξιολόγηση της λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος θα φανεί παρακάτω, στα *Κεφάλαια 6* και *7*. Στο *Κεφάλαιο 6* χρησιμοποιούνται οι δείκτες για να αποτυπωθεί η επίπτωση που θα επιφέρει στην απόδοση του Φ/Β συστήματος του εργαστηρίου η χρήση ευφυούς πράκτορα για την ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας. Στο *Κεφάλαιο 7* οι δείκτες θα χρησιμοποιηθούν σαν εργαλείο σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή τριών διαφορετικών σεναρίων για την ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η πορεία των δεικτών αξιολόγησης που προέκυψε από τη λειτουργία μιας τυπικής Φ/Β εγκατάστασης, που παρουσιάζεται στο *Παράρτημα Β*. Η εγκατάσταση βρίσκεται στον οικισμό **Μελτέμι** της Ραφήνας στο νομό Αττικής και οι μετρήσεις αφορούν διάστημα ενός έτους.

## 3.4. Συμπεράσματα

Για τον προσδιορισμό της παραγόμενης ισχύος από μία Φ/Β εγκατάσταση, εκτός από την ακτινοβολία που προσπίπτει στα πάνελα, πρέπει να γνωρίζουμε τη συμπεριφορά των πανέλων και την απόδοση του αντιστροφέα. Η καμπύλη απόδοσης του αντιστροφέα Sunny Island 1100 που διαθέτει το εργαστήριο υπολογίστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου IEC 61683 [4]. Η απόδοσή του κυμαίνεται από 72.9% μέχρι 92.4%. Όταν εργάζεται σε επίπεδο φόρτισης άνω του 20% του ονομαστικού του, η απόδοση είναι σταθερά μεγαλύτερη από 90%.

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των πανέλων, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που συστήνεται από το πρότυπο EN 50530 [10]. Το συγκεκριμένο πρότυπο

### **Κεφάλαιο 3 – Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα**

προτιμήθηκε από το ηλεκτρικό ισοδύναμο διότι το δεύτερο απαιτεί τη χρήση παραμέτρων για τα πάνελ τις οποίες δε γνωρίζαμε. Από την εφαρμογή του προτύπου για μία τυχαία μέρα, προκύπτει ότι αυτό προβλέπει τιμές ισχύος αυξημένες κατά 11.8% σε σχέση με τις πειραματικές.

## Κεφάλαιο 4

### Ο Μετατροπέας των Μπαταριών

Το μικροδίκτυο του εργαστηρίου έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει είτε αυτόνομα είτε συνδεδεμένο στο δίκτυο της ΔΕΗ. Για την περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας χρειάζεται ένα σύστημα που να «δημιουργεί» το δίκτυο πάνω στο οποίο θα συνδεθούν διάφορες πηγές ρεύματος όπως ο Φ/Β αντιστροφέας. Το ρόλο αυτό έρχεται να καλύψει το σύστημα των μπαταριών. Αυτό το σύστημα αποτελείται από τον μετατροπέα των μπαταριών και τις μπαταρίες. Ο μετατροπέας των μπαταριών λειτουργεί ως αντιστροφέας (DC-AC) ή ανορθωτής (AC-DC) ανάλογα με τις ανάγκες του μικροδικτύου. Στην πρώτη περίπτωση παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια από τις μπαταρίες στις καταναλώσεις ενώ στη δεύτερη διοχετεύει στις μπαταρίες ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής.

Στο εργαστήριο βρίσκεται εγκατεστημένος ο μετατροπέας Sunny Island 4500 της SMA με ονομαστική ισχύ 3.3kW [7]. Συχνά στα τεχνικά φύλλα αναφέρεται ως «Αντιστροφέας Μπαταριών» (Battery Inverter). Ωστόσο αυτή η έκφραση δεν είναι σωστή διότι η συγκεκριμένη συσκευή λειτουργεί και ως ανορθωτής. Για αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε ο όρος «Μετατροπέας Μπαταριών». Φωτογραφία αυτού παρουσιάζεται στο «Σχήμα 4.1» ενώ τα τεχνικά του χαρακτηριστικά στον «Πίνακα 4.1» [7].



«Σχήμα 4.1, ο μετατροπέας των μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA που βρίσκεται εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΣΗΕ»

<b>Χαρακτηριστικά AC Ισχύος για Λειτουργία Αντιστροφή</b>	
Ονομαστική Τάση (δυνατότητα ρύθμισης)	230 V (200-260 V)
Συχνότητα Δικτύου (δυνατότητα ρύθμισης)	50 ή 60 Hz (40-70 Hz)
Ονομαστική Ισχύς Εξόδου στους 25°C / 45°C	3700 / 3300 W
Μέγιστη Ισχύς Εξόδου στους 25°C για διάστημα 30 / 5 / 1 λεπτών	4500 / 5200 / 6000 W
Ονομαστικό Ρεύμα Εξόδου	16 A
Μέγιστο Ρεύμα εξόδου για χρόνο έως 5 δευτερόλεπτα	70 A
Συντελεστής Αρμονικής Παραμόρφωσης της Τάσης	< 3 %
Συντελεστής Ισχύος	από -1 έως +1
<b>Χαρακτηριστικά AC Ισχύος για Λειτουργία Ανορθωτή</b>	
Ονομαστική Τάση Εισόδου (αποδεκτές τιμές)	230 V (150-260 V)
Ονομαστική Συχνότητα Εισόδου (αποδεκτές τιμές)	50 ή 60 Hz (40-70 Hz)
Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου (με την κατάλληλη καλωδίωση)	500 A
<b>Χαρακτηριστικά Μπαταριών</b>	
Ονομαστικό Εύρος Τάσης	48 - 60 V
Μέγιστο Εύρος Τάσης	41 - 81 V
Μέγιστο Ρεύμα για Συνεχή Φόρτιση	60 A
Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης	125 A
Χωρητικότητα Μπαταριών	100 - 10000 Ah
<b>Λοιπά Χαρακτηριστικά</b>	
Απόδοση	> 91 %
Ιδιοκατανάλωση σε Λειτουργία	60 W
Ιδιοκατανάλωση σε Αναμονή	9 W

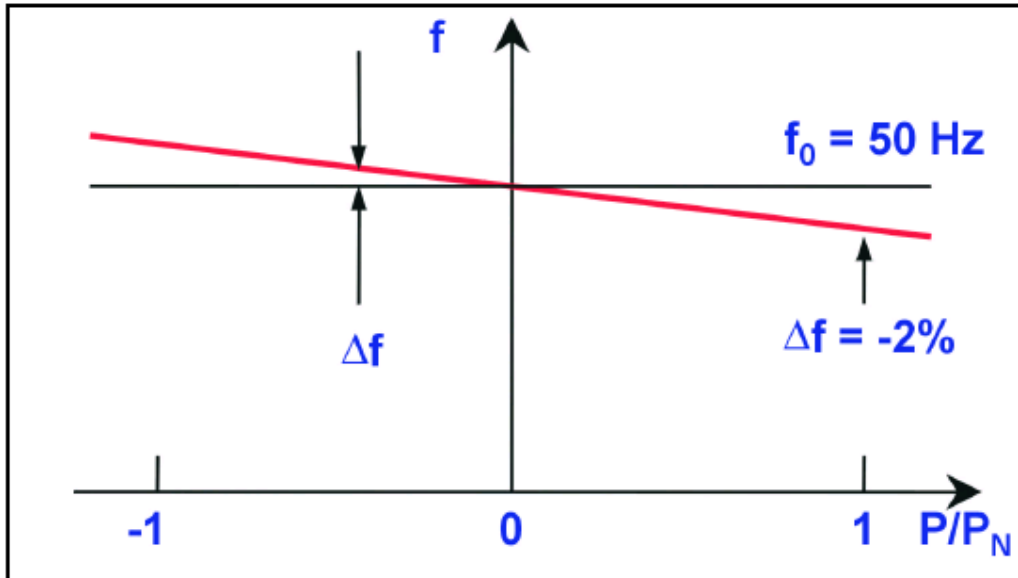
«Πίνακας 4.1, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA που βρίσκεται εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΣΗΕ»

Ο μετατροπέας Sunny Island 4500 έχει τρεις επιλογές λειτουργίας [7]:

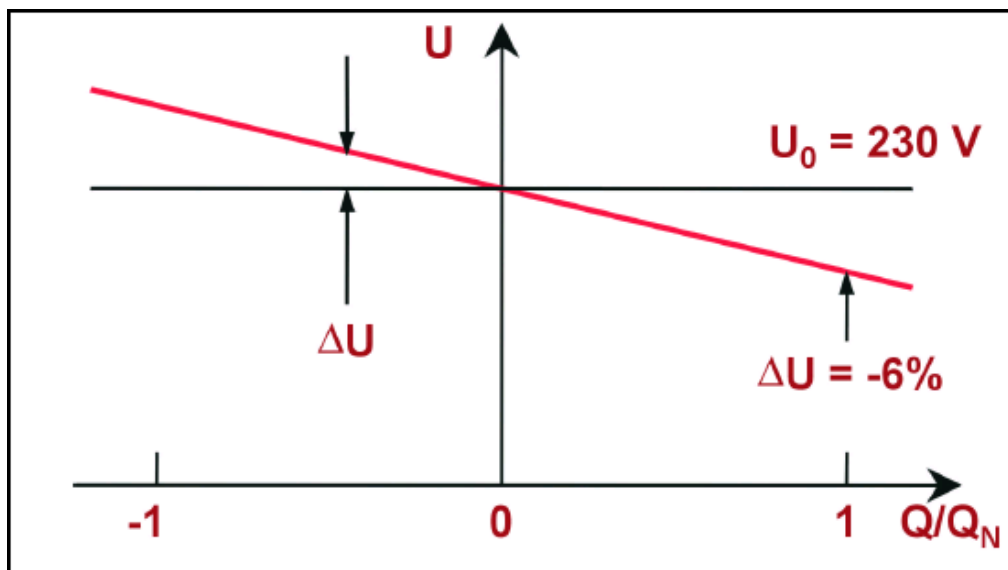
**A. Αυτόνομη λειτουργία (Grid forming – RUN\_U).** Σε αυτή την λειτουργία δημιουργεί το δίκτυο. Είναι η κυρίαρχη πηγή τάσης και είναι υπεύθυνη για τη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα. Όλες οι άλλες συσκευές παραγωγής ενέργειας του μικροδικτύου θα πρέπει να λειτουργούν ως πηγές ρεύματος.

**B. Συνδεδεμένη στο δίκτυο (Grid tied – RUN\_I).** Σε αυτή τη λειτουργία είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο μα δεν του παρέχει ισχύ. Αντιθέτως απορροφά ισχύ από το δίκτυο για να φορτίσει τις μπαταρίες του. Υπάρχει η δυνατότητα να είναι σε αυτή τη λειτουργία και να ρυθμιστεί ώστε να μεταβαίνει σε λειτουργία “RUN\_U” σε περίπτωση διακοπής ρεύματος (εφεδρεία).

Γ. Λειτουργία υποστήριξης στο δίκτυο ( Droop mode – RUN\_UEXT). Στη λειτουργία αυτή ο μετατροπέας επιτηρεί την τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Σε περίπτωση που αυτές διαφέρουν από τις προκαθορισμένες, ανάλογα με την περίπτωση παράγει ή αποθηκεύει ενεργό ή άεργο ισχύ, όπως παρουσιάζεται στο «Σχήμα 4.2» και στο «Σχήμα 4.3» [7].



«Σχήμα 4.2, η καμπύλη συχνότητας - ενεργού ισχύος του μετατροπέα Sunny Island 4500 της SMA για λειτουργία Droop Mode»



«Σχήμα 4.3, η καμπύλη τάσης - άεργου ισχύος του μετατροπέα Sunny Island 4500 της SMA για λειτουργία Droop Mode»

Ένας μετατροπέας σε λειτουργία Droop Mode, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πηγή ρεύματος για το δίκτυο με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος οδήγησης από τον υπολογιστή. Το πρόγραμμα μπορεί να επιτηρεί την τάση και τη συχνότητα του δικτύου και να τροποποιεί τις αντίστοιχες ρυθμίσεις στον μετατροπέα έτσι ώστε αυτός να παράγει ή να απορροφά την ενεργό και άεργο ισχύ που ο χρήστης επιθυμεί.

Ο μετατροπέας των μπαταριών μπορεί να λειτουργήσει είτε σε μονοφασικό σύστημα είτε σε τριφασικό [7]. Για λειτουργία σε τριφασικό αυτόνομο δίκτυο απαιτούνται τρεις τουλάχιστον μετατροπείς (ένας σε κάθε φάση) που να δημιουργούν το δίκτυο. Η επικοινωνία του μετατροπέα των μπαταριών με άλλους μετατροπείς ή με τον υπολογιστή γίνεται με RS485 ή RS232 [7]. Η επικοινωνία με άλλους μετατροπείς είναι απαραίτητη στην τριφασική λειτουργία για να δημιουργηθεί η αλληλουχία των φάσεων. Η επικοινωνία με τον υπολογιστή είναι απαραίτητη για να καθοριστούν κάποιες εξειδικευμένες παράμετροι για τη λειτουργία του αλλά και για να παρέχει πληροφορίες για τα ηλεκτρικά μεγέθη που διαχειρίζεται. Ωστόσο, σε όλα τα πειράματα τα ηλεκτρικά μεγέθη μετρούνταν με εξωτερικά όργανα που θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστα.

Στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου μετατροπέα συγκαταλέγεται η μέθοδος που χρησιμοποιεί για τη διαχείριση των μπαταριών. Ο χρήστης καθορίζει στο εσωτερικό μενού του μετατροπέα παραμέτρους των μπαταριών όπως τύπος, χωρητικότητα, τάση, πυκνότητα οξέως και άλλα ώστε να γίνει η βέλτιστη διαχείριση [7]. Για να μπορέσει ο μετατροπέας να κάνει σωστή διαχείριση των μπαταριών και να τις προστατέψει από υπερφορτίσεις και υπερβολικές εκφορτίσεις, εφαρμόζει ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό του επιπέδου φόρτισης τους [7]. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί αξιόπιστα εφόσον έχουν προηγηθεί μία σειρά από φορτίσεις και εκφορτίσεις των μπαταριών κατά τις οποίες ο μετατροπέας εφαρμόζει έναν αλγόριθμο εκμάθησης της λειτουργίας τους [7]. Συνεπώς, η ένδειξη που δίνεται για το τρέχον επίπεδο φόρτισης των μπαταριών ενδέχεται να διαφέρει από την πραγματικότητα, εφόσον δεν έχει προηγηθεί ένας ικανός αριθμός κύκλων λειτουργίας τους.

Ο κατασκευαστής δίνει την απόδοση του μετατροπέα στο 91% χωρίς να διευκρινίζει αν αυτή αφορά τη λειτουργία του ως ανορθωτή ή αντιστροφή. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι απαραίτητη η γνώση της καμπύλης απόδοσης του. Ανάλογα με το επίπεδο ισχύος στο οποίο δουλεύει ο μετατροπέας και ανάλογα με τον αν βρίσκεται σε λειτουργία αντιστροφή ή ανορθωτή, αναμένουμε διαφορετική απόδοση.

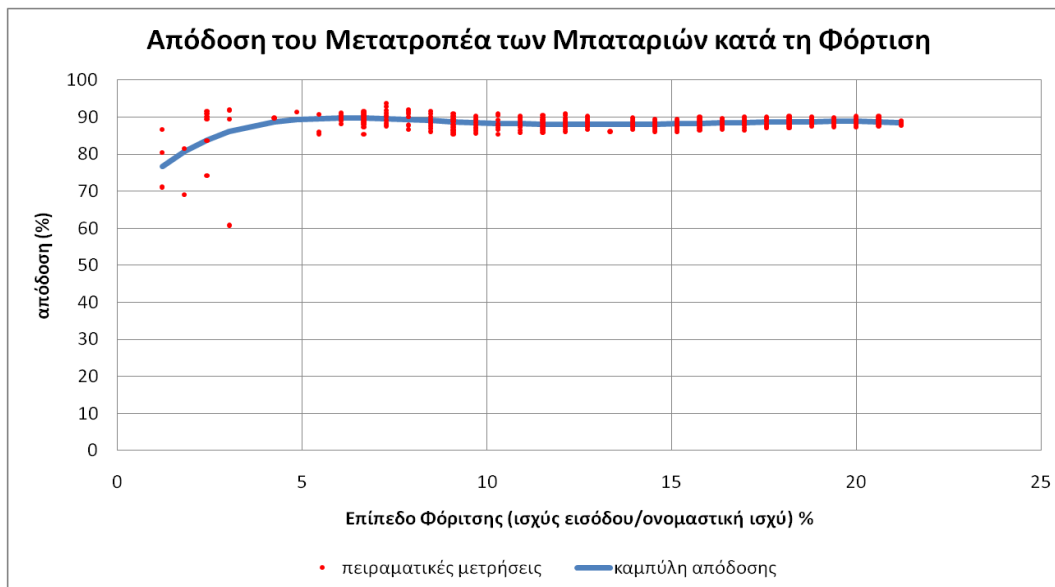
#### **4.1. Η απόδοση του μετατροπέα για τη λειτουργία του ως ανορθωτής**

Στη λειτουργία του Sunny Island 4500 ως ανορθωτή, έχουμε μετατροπή της εναλλασσόμενης (AC) ισχύος σε συνεχή (DC) ώστε αυτή να αποθηκευτεί στις



#### Κεφάλαιο 4 – Ο Μετατροπέας των Μπαταριών

μπαταρίες. Οι μετρήσεις της απόδοσης δεν έγιναν στα πλαίσια κάποιου πειράματος αλλά κατά τη λειτουργία του συστήματος. Η παραγόμενη ισχύς δηλαδή από τον Φ/Β αντιστροφέα διοχετευόταν στο σύστημα των μπαταριών και διεξάγονταν μετρήσεις. Οι μετρήσεις και η καμπύλη απόδοσης που προκύπτει παρουσιάζονται στο «Σχήμα 4.4».



«Σχήμα 4.4, η απόδοση του μετατροπέα των μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA του εργαστηρίου ΣΗΕ κατά τη φόρτιση (λειτουργία ανορθωτή)»

Στο «Σχήμα 4.4», παρατηρούμε ότι ο μετατροπέας των μπαταριών λειτουργεί σε επίπεδα ισχύος μέχρι το 21% της ονομαστικής του ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί η μέγιστη ισχύς του Φ/Β αντιστροφέα είναι 1100W ενώ η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα 3300W. Τη συγκεκριμένη μέρα μάλιστα η μέγιστη ισχύς που παρήγαγε ο Φ/Β αντιστροφέας ήταν 720W. Ωστόσο από το 15% της φόρτισης και μετά παρατηρούμε μια σταθεροποίηση της καμπύλης απόδοσης στο 89%, οπότε μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή ότι μέχρι το 100% της φόρτισης η απόδοση παραμένει σε αυτό το επίπεδο.

Για την εύρεση της καμπύλης απόδοσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Παράρτημα Γ). Για την προσέγγιση χρησιμοποιήθηκαν πολυώνυμα 4<sup>ου</sup>, 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> βαθμού. Οι μέσοι όροι των απολύτων τιμών των σφαλμάτων για κάθε πολυώνυμο παρουσιάζονται στο «Πίνακα 4.2».

Πολυώνυμο	Μέσος όρος απολύτων τιμών των σφαλμάτων της απόδοσης
4ου βαθμού	1,41%
5ου βαθμού	1,38%
6ου βαθμού	1,37%

«Πίνακας 4.2, οι μέσοι όροι των απολύτων τιμών των σφαλμάτων της απόδοσης του μετατροπέα των μπαταριών στη λειτουργία του ως ανορθωτή, για προσέγγιση αυτής με πολυώνυμα 4<sup>ου</sup>, 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> βαθμού»

Από τον «Πίνακα 4.2» παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στο σφάλμα, όποιο πολυώνυμο και να διαλέξουμε. Τελικά αποφασίστηκε η χρήση του πολυωνύμου 6<sup>ου</sup> βαθμού, το οποίο δίνεται από τον τύπο (4.1):

$$\begin{aligned}
 n_{ch} &= 64.322 + 12.8057 \cdot fort_{ch} - 2.4493 \cdot fort_{ch}^2 \\
 \text{για } fort_{ch} < 20\% &+ 0.228825 \cdot fort_{ch}^3 - 0.011464 \cdot fort_{ch}^4 \\
 &+ 0.000301026 \cdot fort_{ch}^5 - 3.3063E-06 \cdot fort_{ch}^6 \\
 \text{για } fort_{ch} \geq 20\% &n_{ch} = 89
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Στον παραπάνω τύπο:

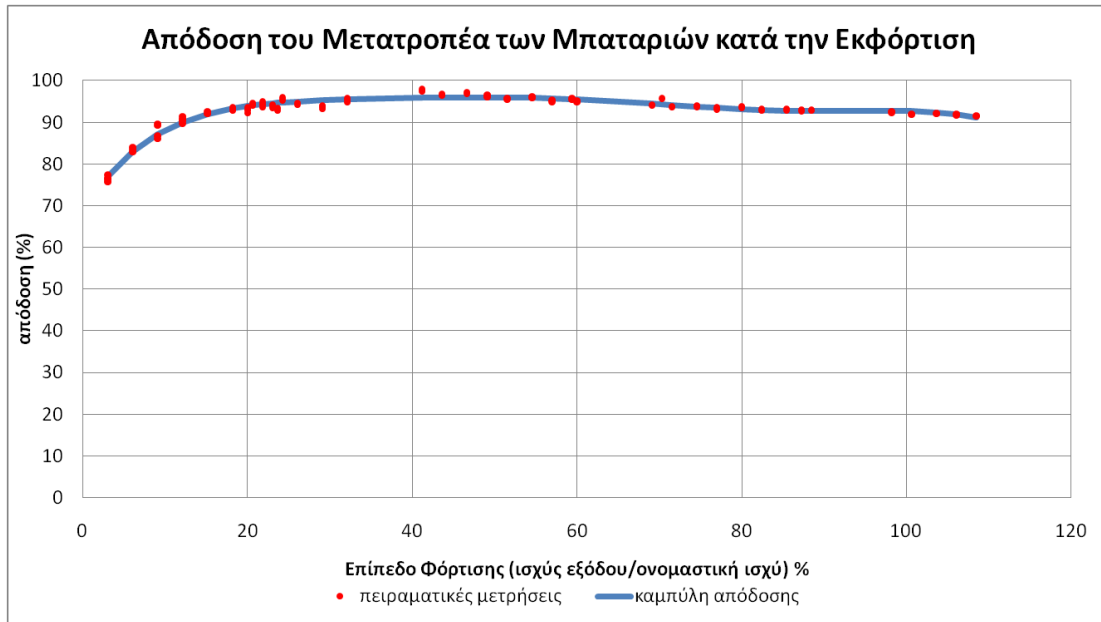
$n_{ch}$  η % απόδοση του μετατροπέα κατά τη λειτουργία του ως ανορθωτής  
 $fort_{ch}$  το % επίπεδο φόρτισης (AC ισχύς εισόδου προς την ονομαστική ισχύ 3.3kW)

Μετρήσεις θερμοκρασίας στο μετατροπέα δεν είχαμε, έτσι η επίδρασή της θεωρήθηκε αμελητέα στον προσδιορισμό της απόδοσης.

## 4.2. Η απόδοση του μετατροπέα για τη λειτουργία του ως αντιστροφέας

Όταν τα φορτία στο δίκτυο απαιτούν περισσότερη ισχύ από αυτή που παρέχουν οι μονάδες παραγωγής (στην περίπτωσή μας το Φ/Β σύστημα), τότε καλείται ο μετατροπέας των μπαταριών να παράσχει την απαιτούμενη ισχύ. Σε αυτή την περίπτωση, μετατρέπει τη συνεχή (DC) ισχύ των μπαταριών σε εναλλασσόμενη (AC) προκειμένου να τη διοχετεύσει στο δίκτυο. Λειτουργεί δηλαδή ως αντιστροφέας. Η καμπύλη απόδοσης του σε αυτή την περίπτωση θα διαφέρει από αυτή που έχει για λειτουργία ανορθωτή. Ο λόγος είναι ότι άλλα κυκλώματα αναλαμβάνουν τη διαδικασία ανόρθωσης και διαφορετικά αυτή της αντιστροφής.

Για την εξαγωγή της καμπύλης απόδοσης για τη λειτουργία του Sunny Island 4500 ως αντιστροφέα διεξάχθηκε μια σειρά από μετρήσεις. Για διάφορα επίπεδα AC ισχύος που διοχετευόταν στα φορτία, μετρούσαμε την αντίστοιχη DC ισχύ και βρήκαμε την απόδοση για κάθε επίπεδο φόρτισης. Τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού παρουσιάζονται στο «Σχήμα 4.5».



«**Σχήμα 4.5**, η απόδοση του μετατροπέα των μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA του εργαστηρίου ΣΗΕ κατά τη εκφόρτιση (λειτουργία αντιστροφή)»

Για την εύρεση της καμπύλης απόδοσης χρησιμοποιήθηκε και εδώ η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Παράρτημα Γ). Επιχειρήθηκε η προσέγγιση με πολυώνυμα 4<sup>ου</sup>, 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> βαθμού. Οι μέσοι όροι των απολύτων τιμών των σφαλμάτων για κάθε πολυώνυμο παρουσιάζονται στο «Πίνακα 4.3».

Πολυώνυμο	Μέσος όρος απολύτων τιμών των σφαλμάτων της απόδοσης
4ου βαθμού	0,52%
5ου βαθμού	0,53%
6ου βαθμού	0,46%

«**Πίνακας 4.3**, οι μέσοι όροι των απολύτων τιμών των σφαλμάτων της απόδοσης του μετατροπέα των μπαταριών στη λειτουργία του ως αντιστροφή, για προσέγγιση αυτής με πολυώνυμο 4<sup>ου</sup>, 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> βαθμού»

Με βάση τα δεδομένα του «Πίνακα 4.3», επιλέχθηκε πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού για την προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης. Αυτή δίνεται από τον τύπο (4.2):

$$\begin{aligned}
 n_{dis} = & 69.0485 + 3.057 \cdot fort_{dis} - 0.1489 \cdot fort_{dis}^2 \\
 & + 0.003833 \cdot fort_{dis}^3 - 5.3478E - 05 \cdot fort_{dis}^4 \\
 & + 3.7682E - 07 \cdot fort_{dis}^5 - 1.0467E - 09 \cdot fort_{dis}^6
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Στον παραπάνω τύπο:

$n_{dis}$  η % απόδοση του μετατροπέα κατά τη λειτουργία του ως αντιστροφέας  
 $fort_{dis}$  το % επίπεδο φόρτισης (AC ισχύς εξόδου προς την ονομαστική ισχύ 3.3kW)

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει για τη θερμοκρασία ό,τι και για την λειτουργία του μετατροπέα ως ανορθωτή, δηλαδή θεωρείται αμελητέα η επίδρασή της στην απόδοση.

### 4.3. Συμπεράσματα

Από όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους διαπιστώνουμε ότι ο μετατροπέας των μπαταριών αποτελεί την καρδιά του μικροδικτύου όταν αυτό λειτουργεί αυτόνομα. Όλες οι καταναλώσεις και οι παραγωγές πρέπει να υπόκεινται στους περιορισμούς που αυτός θέτει ώστε να υπάρχει ομαλή λειτουργία του δικτύου. Στο εργαστήριο χρησιμοποιείται ο μετατροπέας Sunny Island 4500 της SMA. Ο κατασκευαστής προσδιορίζει την απόδοσή του σε ποσοστά μεγαλύτερα του 91%. Ωστόσο καθώς μεταβάλλεται η ισχύς στην οποία λειτουργεί ο μετατροπέας, παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στο βαθμό απόδοσης. Για το λόγο αυτό έγινε μία σειρά μετρήσεων και με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προσεγγίστηκε η καμπύλη απόδοσης του μετατροπέα τόσο για τη λειτουργία του ως ανορθωτής όσο και ως αντιστροφέας. Η γνώση των καμπυλών αυτών μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζουμε τις απώλειές του για κάθε επίπεδο ισχύος.

Για τη λειτουργία του Sunny Island ως ανορθωτής, προσεγγίστηκε η καμπύλη απόδοσής του με ένα πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού. Ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των σφαλμάτων της προσέγγισης αυτής είναι 1.37%, γεγονός που την καθιστά σχετικά ακριβή. Η μέγιστη απόδοση που μετρήθηκε δεν ξεπερνά το 90%. Για τη λειτουργία του μετατροπέα ως αντιστροφέα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία. Το πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού με το οποίο έγινε η προσέγγιση της απόδοσης παρουσίασε μέσο όρο των απολύτων τιμών των σφαλμάτων 0.46%. Η μέγιστη απόδοση που προκύπτει από την προσέγγιση αυτή είναι 96%.

## Κεφάλαιο 5

### Οι Μπαταρίες

Οι μπαταρίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι για τη λειτουργία ενός μικροδικτύου. Η επιλογή των μπαταριών που θα τοποθετηθούν και του μετατροπέα που θα τις ελέγχει είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία του. Ο μετατροπέας Sunny Island του εργαστηρίου είναι συνδεδεμένος με ένα σύστημα 30 μπαταριών μολύβδου-οξέως της εταιρίας Ergon Batteries. Φωτογραφία των μπαταριών παρουσιάζεται στο «Σχήμα 5.1» ενώ τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά στον «Πίνακα 5.1» [14].



«Σχήμα 5.1, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως του μικροδικτύου του εργαστηρίου ΣΗΕ»

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Τιμή
Τύπος	Μολύβδου-Οξέως
Μοντέλο	OPzS
Ονομαστική Τάση	2 V
Μέγιστη Τάση	2,23 V
Ονομαστική Χωρητικότητα (εκφόρτιση σε 10 ώρες)	250 Ah
Μέγιστη Χωρητικότητα (εκφόρτιση σε 120 ώρες)	375 Ah
Χρόνος Ζωής	2000 κύκλοι

«Πίνακας 5.1, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ»

Οι τιμές της τάσης αναφέρονται σε ανοικτοκύκλωμα. Ο χρόνος ζωής μιας μπαταρίας ορίζεται ως το πλήθος των κύκλων φόρτισης που μπορεί να κάνει πριν η χωρητικότητά της πέσει στο 80% της ονομαστικής [4].

Κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου εισέρχεται και εξέρχεται διαρκώς ενέργεια στις μπαταρίες. Είναι λοιπόν σημαντικό να γνωρίζουμε ανά πάσα στιγμή το φορτίο των μπαταριών ώστε να είμαστε σε θέση να αποφασίσουμε αν μπορούν να δεχτούν ή να διαθέσουν ενέργεια. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η χρήση ενός μοντέλου για τις μπαταρίες αντίστοιχο με αυτό που χρησιμοποιεί ο μετατροπέας των μπαταριών. Ένα τέτοιο μοντέλο θα επέτρεπε τον υπολογισμό του τρέχοντος επιπέδου φόρτισης των μπαταριών, έτσι ώστε να γίνεται μία σύγκριση με την ένδειξη που δίνει ο μετατροπέας. Ο σημαντικότερος όμως λόγος που μας οδηγεί στην εφαρμογή του μοντέλου είναι ότι θα μας έδινε τη δυνατότητα πρόβλεψης του φορτίου των μπαταριών μετά από κάποια υποθετικά σενάρια φόρτισης και εκφόρτισής τους.

### 5.1. Το μοντέλο των μπαταριών

Από τα διάφορα μοντέλα που έχουν προταθεί για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως επιλέχτηκε το KiBaM (Kinetic Battery Model) [15]. Στα ελληνικά θα μπορούσε να αποδοθεί ως «Μοντέλο των Συγκοινωνούντων Δοχείων» λόγω του τρόπου που αντιλαμβάνεται τη λειτουργία των μπαταριών όπως θα αναλυθεί ακολούθως. Η εφαρμογή του είναι αρκετά απλή. Απαιτεί ωστόσο συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της τάσης των μπαταριών και κυρίως των ρευμάτων που εξέρχονται και εισέρχονται σε αυτές.

Οι μπαταρίες κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση παρουσιάζουν ωμικές απώλειες. Επίσης, η τάση των μπαταριών εξαρτάται από το επίπεδο της φόρτισής τους [15]. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή ενός μοντέλου που στηρίζεται στις ροές ενέργειας παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Αντιθέτως, μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή ότι κατά τις διαδικασίες της φόρτισης και της εκφόρτισης το φορτίο των μπαταριών δεν παρουσιάζει απώλειες [15]. Συνεπώς είναι απλούστερη η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μοντέλου που θα δίνει βάση στις ροές ρεύματος και άρα στη μεταβολή του φορτίου των μπαταριών. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το KiBaM.

Το μοντέλο αυτό διαχωρίζει το φορτίο των μπαταριών σε δύο κατηγορίες [15]. Από τη μία υπάρχει το φαινόμενο φορτίο. Πρόκειται για το φορτίο που είναι άμεσα διαθέσιμο για κατανάλωση. Αντίστοιχα όταν η μπαταρία φορτίζεται, αυτό είναι το φορτίο που αυξάνεται. Από την άλλη υπάρχει το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς. Όταν η μπαταρία εκφορτίζεται οι δεσμοί σπάνε και σταδιακά παρέχουν και πάλι φορτίο στην μπαταρία. Αυτό όμως απαιτεί χρόνο. Έτσι μπορεί η μπαταρία να φαίνεται άδεια (μηδενικό φαινόμενο φορτίο) αλλά μετά από λίγη ώρα να εμφανιστεί φορτίο που θα έχει προέλθει από τους χημικούς δεσμούς. Αντίστοιχα κατά τη φόρτιση, μπορεί η μπαταρία να φαίνεται γεμάτη και μετά από λίγη ώρα να έχει μειωθεί το φαινόμενο φορτίο της επειδή μέρος αυτού αποθηκεύτηκε στους χημικούς δεσμούς.

Το KiBaM προσομοιώνει αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιώντας δύο «δεξαμενές» φορτίου [15]. Η πρώτη είναι αυτή που παρέχει ή δέχεται άμεσα φορτίο. Η δεύτερη απορροφά ή παρέχει σταδιακά φορτίο στην πρώτη προκειμένου να αποκατασταθεί η μεταξύ τους ισορροπία και να αποκτήσουν και οι δύο το ίδιο επίπεδο φόρτισης. Η όλη διαδικασία θυμίζει διάταξη συγκοινωνούντων δοχείων, από όπου προκύπτει και η απόδοση της ονομασίας του μοντέλου στα ελληνικά.

### 5.1.1. Οι εξισώσεις του μοντέλου

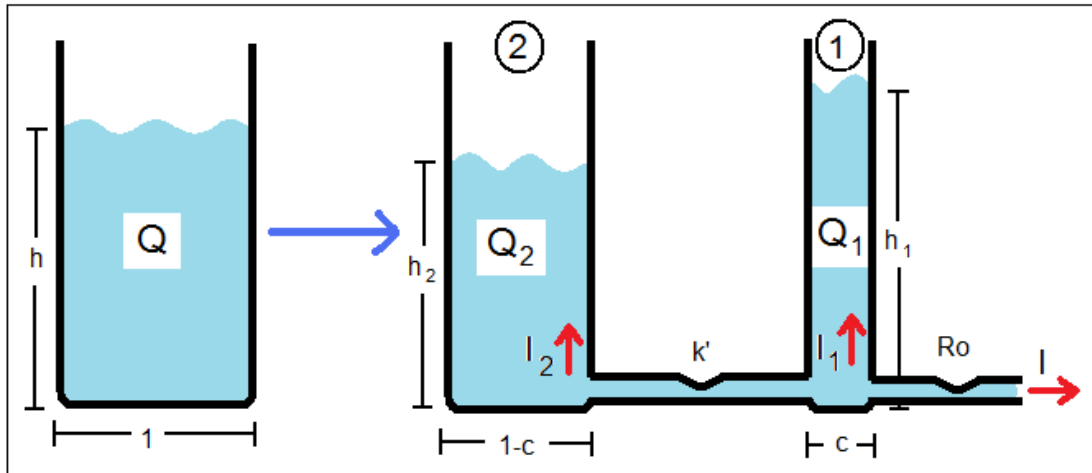
Για κάθε μπαταρία η τάση στους ακροδέκτες της δίνεται από τον τύπο (5.1).

$$V = E - I \cdot R_0 \quad (5.1)$$

όπου:

- V η τάση σε V στους ακροδέκτες της μπαταρίας
- E η εσωτερική τάση της μπαταρίας σε V (τάση ανοικτοκύκλωσης)
- I το ρεύμα σε A (θετικές τιμές κατά την εκφόρτιση, αρνητικές κατά τη φόρτιση)
- $R_0$  η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας σε  $\Omega$

Το KiBaM όπως είπαμε μοντελοποιεί τη λειτουργία μιας μπαταρίας χρησιμοποιώντας δύο δεξαμενές όπως παρουσιάζεται στο «Σχήμα 5.2» [15].



«Σχήμα 5.2, αναπαράσταση του μοντέλου των μπαταριών KiBaM (μοντέλο των συγκοινωνούντων δοχείων)»

Στο «Σχήμα 5.2» η δεξαμενή 1 αντιπροσωπεύει το φορτίο που είναι άμεσα διαθέσιμο και η δεξαμενή 2 αυτό που είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς. Ανάμεσα στις δεξαμενές 1 και 2 υπάρχει μία αγωγιμότητα  $k'$ , ενώ στην έξοδο της δεξαμενής 1 υπάρχει η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας  $R_0$ . Τα μεγέθη  $I$ ,  $I_1$  και  $I_2$  αναπαριστούν τις ροές ρεύματος κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Ισχύει δηλαδή ο τύπος του Ampere (5.2):

$$I + I_1 + I_2 = 0 \quad (5.2)$$

Έστω ότι η μπαταρία έχει συνολικό φορτίο  $Q$ , το οποίο βρίσκεται στην αρχική δεξαμενή με ύψος  $h$  και βάση ίση με τη μονάδα. Επίσης έστω ότι η δεξαμενή 1 έχει φορτίο  $Q_1$ , ύψος  $h_1$  και βάση  $c_1$ . Αντίστοιχα η δεξαμενή 2 θα έχει φορτίο  $Q_2$ , ύψος  $h_2$  και βάση  $c_2$ . Για το φορτίο έχουμε ότι:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (5.3)$$

Όταν οι δεξαμενές είναι γεμάτες ισχύει ότι

$$h^{\max} = h_1^{\max} = h_2^{\max} \text{ άρα}$$

$$Q^{\max} = Q_1^{\max} + Q_2^{\max} \Rightarrow h^{\max} \cdot 1 = h_1^{\max} \cdot c_1 + h_2^{\max} \cdot c_2 \Rightarrow c_1 + c_2 = 1 \quad (5.4)$$

Αν ορίσουμε  $c_1=c$  προκύπτει ότι  $c_2=1-c_1=1-c$ , όπως φαίνεται και στο «Σχήμα 5.2». Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο είναι οι (5.5) και (5.6) [15]:

$$\frac{dQ_2}{dt} = I_2 = (h_1 - h_2) \cdot k' \quad (5.5)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = I_1 = -I_2 - I = -(h_1 - h_2) \cdot k' - I \quad (5.6)$$

Αν στις εξισώσεις (5.5) και (5.6) αντικαταστήσουμε

$$h_1 = \frac{Q_1}{c}, \quad h_2 = \frac{Q_2}{1-c} \quad \text{και} \quad k = \frac{k'}{c(1-c)}$$

προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις (5.7) και (5.8) [14]:

$$\frac{dQ_1}{dt} = -I - k \cdot (1-c) \cdot Q_1 + k \cdot c \cdot Q_2 \quad (5.7)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = k \cdot (1-c) \cdot Q_1 - k \cdot c \cdot Q_2 \quad (5.8)$$

Από την επίλυση των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων με τη βοήθεια του μετασχηματισμού του Laplace, προκύπτουν οι τελικές εξισώσεις (5.9) και (5.10) που προσδιορίζουν το φορτίο που είναι άμεσα διαθέσιμο και το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς μιας μπαταρίας αντίστοιχα [15].

$$Q_1 = Q_{1,0} \cdot e^{-kt} + \frac{(Q_0 \cdot k \cdot c - I)(1 - e^{-kt})}{k} - \frac{I \cdot c \cdot (kt - 1 + e^{-kt})}{k} \quad (5.9)$$

$$Q_2 = Q_{2,0} \cdot e^{-kt} + Q_0 \cdot (1-c)(1 - e^{-kt}) - \frac{I \cdot (1-c) \cdot (kt - 1 + e^{-kt})}{k} \quad (5.10)$$

όπου  $Q_{1,0}$  και  $Q_{2,0}$  το αρχικό φαινόμενο φορτίο και το φορτίο που είναι αρχικά αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς αντίστοιχα. Ισχύει ότι  $Q_0 = Q_{1,0} + Q_{2,0}$  [15].



Στις παραπάνω εξισώσεις τα  $Q_{1,0}$ ,  $Q_{2,0}$  και  $Q_0$  αποτελούν αρχικές συνθήκες και τα  $I$  και  $t$  προκύπτουν από τις πειραματικές καταγραφές. Μένει λοιπόν μόνο ο προσδιορισμός των σταθερών  $c$  και  $k$  για να γίνει δυνατή η εφαρμογή των εξισώσεων (5.9) και (5.10).

### 5.1.2. Η διαδικασία προσδιορισμού των σταθερών $c$ και $k$ του μοντέλου

Έστω ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Στην περίπτωση αυτή όπως είδαμε θα ισχύει ότι  $h_1 = h_2$  και  $Q_0 = Q_{1,0} + Q_{2,0}$ . Συνεπώς προκύπτει ότι:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{c}{1-c} \quad (5.11)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στην (5.9), προκύπτει η εξίσωση (5.12) [15]:

$$Q_1 = Q_{\max} \cdot c - \frac{I(1-e^{-kt})(1-c)}{k} - I \cdot c \cdot t \quad (5.12)$$

Αν υποβάλουμε την φορτισμένη μπαταρία σε πλήρη εκφόρτιση (μέχρι να εξαντληθεί το φαινόμενο φορτίο, όχι και το σύνολο αυτού που είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς) προκύπτει ότι [15]:

$$I_{T=t} = \frac{Q_{\max} \cdot c \cdot k}{(1-e^{-kt})(1-c) + kct} \quad (5.13)$$

Όπου  $I_{T=t}$  το ρεύμα που επιλέχθηκε για να γίνει η εκφόρτιση και  $t$  ο χρόνος που χρειάστηκε. Το φορτίο που τελικά καταναλώθηκε προκύπτει από τον τύπο  $Q_t = I_{T=t} \cdot t$ . Το  $Q_t$  αποτελείται από το  $Q_1$  συν ένα μέρος του  $Q_2$  το οποίο απελευθερώθηκε από τους χημικούς δεσμούς όσο διαρκούσε η εκφόρτιση. Είναι λοιπόν αναμενόμενο αν η εκφόρτιση γίνει με μικρό ρεύμα και διαρκέσει περισσότερη ώρα, το  $Q_t$  να προκύψει μεγαλύτερο αφού μεγαλύτερο μέρος του  $Q_2$  θα έχει γίνει διαθέσιμο. Έστω ότι εκτελούμε δύο εκφορτίσεις, μία με ρεύμα  $I_{t1}$  σε χρόνο  $t_1$  και μία με ρεύμα  $I_{t2}$  σε χρόνο  $t_2$ . Ορίζουμε το λόγο  $F_{t1t2}$  ως εξής [15]:

$$F_{t1t2} = \frac{Q_{t1}}{Q_{t2}} = \frac{I_{t1} \cdot t_1}{I_{t2} \cdot t_2} = \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{(1-e^{-kt_2})(1-c) + kct_2}{(1-e^{-kt_1})(1-c) + kct_1} \quad (5.14)$$

Αν λύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς  $c$ , προκύπτει ο τύπος (5.15) [15]:

$$c = \frac{F_{t1t2} \cdot (1-e^{-kt_1}) \cdot t_2 - (1-e^{-kt_2}) \cdot t_1}{F_{t1t2} \cdot (1-e^{-kt_1}) \cdot t_2 - (1-e^{-kt_2}) \cdot t_1 - kF_{t1t2} + kt_1t_2} \quad (5.15)$$

Αν πραγματοποιήσουμε και μία τρίτη εκφόρτιση με ρεύμα  $I_{t3}$  σε χρόνο  $t_3$ , μπορούμε να έχουμε και μία δεύτερη εξίσωση όμοια με την (5.15) μόνο που όπου  $t_1$  θα υπάρχει  $t_3$  και όπου  $F_{t1t2}$  το  $F_{t3t2}$ . Θα προκύψει λοιπόν ένα σύστημα 2x2 με αγνώστους τα  $c$  και  $k$ . Το σύστημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με χρήση επαναληπτικής μεθόδου (Παράρτημα Δ). Έχοντας υπολογίσει τις σταθερές  $c$  και  $k$ , το μέγιστο συνολικό φορτίο της μπαταρίας

(φαινόμενο και αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς) προκύπτει από τον τύπο (5.16) [15]:

$$Q_{\max} = \frac{I_t[(1 - e^{-kt})(1 - c) + kct]}{kc} \quad (5.16)$$

Για τον υπολογισμό του  $Q_{\max}$ , τα  $I_t$  και  $t$  πρέπει να επιλεγθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε μία αρκετά αργή εκφόρτιση (>20 ώρες) [15].

### 5.1.3. Προσδιορισμός της εσωτερικής τάσης $E$ και της εσωτερικής αντίστασης $R_0$

Όπως είδαμε από τον τύπο (5.1), ισχύει για την τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας ότι  $V = E - I \cdot R_0$ . Το επίπεδο της εσωτερικής τάσης σύμφωνα με το μοντέλο εξαρτάται από το επίπεδο του φαινόμενου φορτίου  $Q_1$  και από το αν η μπαταρία υπόκειται σε φόρτιση ή εκφόρτιση [15]. Η εσωτερική τάση  $E$  δίνεται από τους τύπους (5.17) και (5.18) για τις περιπτώσεις φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα [15].

$$E_{ch} = E_{0,c} + (E_{\max} - E_{0,c}) \frac{Q_1}{Q_{1,\max}} \quad (5.17)$$

$$E_{dis} = E_{\min} + (E_{0,d} - E_{\min}) \frac{Q_1}{Q_{1,\max}} \quad (5.18)$$

όπου:

$E_{ch}$	η εσωτερική τάση κατά τη φόρτιση σε V
$E_{0,c}$	η ελάχιστη επιτρεπτή εσωτερική τάση φόρτισης σε V
$E_{\max}$	η μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική τάση φόρτισης σε V
$E_{dis}$	η εσωτερική τάση κατά την εκφόρτιση σε V
$E_{\min}$	η ελάχιστη επιτρεπτή εσωτερική τάση εκφόρτισης σε V
$E_{0,d}$	η μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική τάση εκφόρτισης σε V

Η εσωτερική αντίσταση  $R_0$  είναι η κλίση  $dV/dI$  για δεδομένο επίπεδο εσωτερικής τάσης [15]. Για την εύρεση αυτής εφαρμόζουμε μία σειρά από φορτίσεις και εκφορτίσεις στις οποίες μετράμε τάση και ρεύμα. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν διαδοχικά και να κρατήσουν ελάχιστο χρονικό διάστημα ώστε το φορτίο  $Q_1$  και άρα η εσωτερική τάση  $E$  να παραμείνουν ουσιαστικά αμετάβλητα [15]. Στη συνέχεια από τα ζεύγη των μετρήσεων και με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων βρίσκουμε την  $R_0$ .

### 5.1.4. Παραδοχές του μοντέλου

Το μοντέλο KiBaM προκειμένου να γίνει απλούστερο κάνει κάποιες παραδοχές [15]. Αυτές αφορούν:

**A. Τη θερμοκρασία.** Το μοντέλο θεωρεί ότι οι μπαταρίες κατά τη λειτουργία τους έχουν σταθερή θερμοκρασία. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι αν θεωρούσαμε ότι οι μπαταρίες θερμαίνονται καθώς φορτίζονται ή εκφορτίζονται, αυτό θα έπρεπε να έχει επίδραση στη χωρητικότητά τους. Συνεπώς, για κάθε προσομοίωση της λειτουργίας τους θα απαιτούνταν και θερμοδυναμική μελέτη των μπαταριών καθώς και του χώρου στον οποίο βρίσκονται. Κάτι τέτοιο θα δυσχέραινε σημαντικά τους υπολογισμούς.

Αν η θερμοκρασία των μπαταριών είναι σταθερή αλλά μεγαλύτερη από τους 20°C, τότε μπορούμε να δεχτούμε μία διόρθωση της χωρητικότητας που δίνεται από τον τύπο (5.19) [5]:

$$C_{\theta} = C_{20^{\circ}C} \cdot [1 + \lambda(\theta - 20^{\circ}C)] \quad (5.19)$$

όπου:

- $C_{\theta}$  η αναθεωρημένη χωρητικότητα σε Ah
- $C_{20^{\circ}C}$  η χωρητικότητα στους 20°C σε Ah
- $\theta$  η θερμοκρασία σε °C
- $\lambda$  συντελεστής διόρθωσης, με  $\lambda=0.01$  για ταχεία εκφόρτιση (<3h) και  $\lambda=0.006$  για βραδεία εκφόρτιση (>3h)

**B. Τη γήρανση των μπαταριών.** Μετά από κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας, η χωρητικότητα μειώνεται ελαφρώς. Κατά συνέπεια μετά από ένα πλήθος κύκλων το μοντέλο παύει να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και παρουσιάζει όλο και σημαντικότερες αποκλίσεις.

**Γ. Την τυχαία εκφόρτιση των μπαταριών.** Οι μπαταρίες όταν δε χρησιμοποιούνται χάνουν το φορτίο τους σταδιακά. Ο ρυθμός απώλειας του φορτίου είναι πολύ αργός οπότε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα αυτή η απώλεια.

**Δ. Την εσωτερική αντίσταση.** Η εσωτερική αντίσταση  $R_0$  θεωρείται σταθερή και ανεξάρτητη από το επίπεδο φόρτισης και τη θερμοκρασία των μπαταριών. Επίσης θεωρείται ίδια είτε αν βρισκόμαστε σε φάση φόρτισης είτε εκφόρτισης [15]. Στην πράξη έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της  $R_0$  αλλάζει δυναμικά, παρουσιάζοντας όμως σχετικά μικρές διακυμάνσεις.

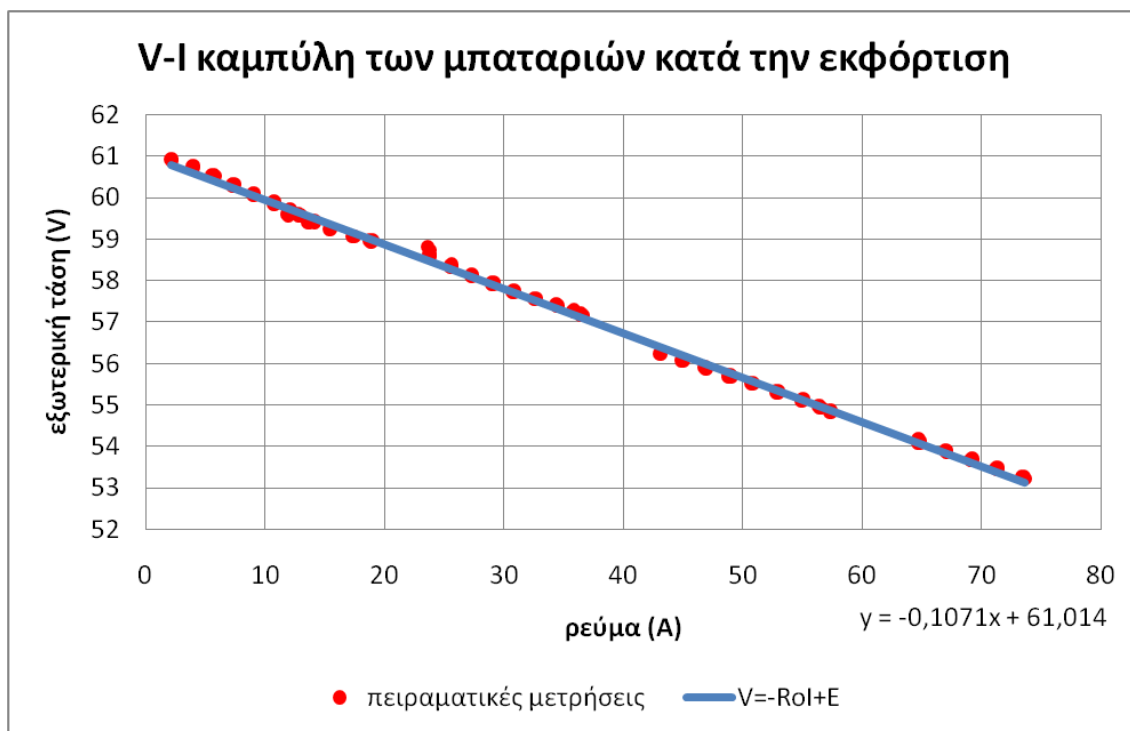
## 5.2. Η εφαρμογή του μοντέλου των μπαταριών

Η εφαρμογή και λειτουργία του KiBaM στις μπαταρίες του εργαστηρίου απαιτεί την εύρεση των σταθερών  $c$ ,  $k$ ,  $R_0$ ,  $E_{0,c}$ ,  $E_{max}$ ,  $E_{min}$  και  $E_{0,d}$  όπως είδαμε. Αυτές προκύπτουν πειραματικά. Ωστόσο τα πειράματα αυτά απαιτούν πλήρεις εκφορτίσεις οι οποίες καταπονούν σημαντικά τις μπαταρίες και σε κάποιες περιπτώσεις τις καταστρέφουν. Προκειμένου να αποφευχθεί ένα τέτοιο ενδεχόμενο, κρίθηκε σκόπιμο να απευθυνθούμε στον κατασκευαστή για να τις παράσχει. Το μειονέκτημα είναι ότι οι τιμές που μας έδωσε [14] αφορούν καινούργιες μπαταρίες και δε λαμβάνουν υπόψιν τις καταπονήσεις που έχουν υποστεί οι μπαταρίες του εργαστηρίου. Συνεπώς ενδέχεται

τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να διαφέρουν από την πραγματικότητα. Πείραμα διεξάχθηκε μόνο για την εύρεση της εσωτερικής αντίστασης  $R_0$ .

### 5.2.1. Εύρεση της εσωτερικής αντίστασης $R_0$

Για την εύρεση της εσωτερικής αντίστασης, διεξήχθη ένα πείραμα σύμφωνα με τις περιγραφές του μοντέλου [15]. Για διάφορες τιμές του ρεύματος εξόδου μετρούσαμε την τάση στους ακροδέκτες των μπαταριών. Το όλο πείραμα κράτησε μικρό χρονικό διάστημα ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμετάβλητο το φαινόμενο φορτίο  $Q_1$ , άρα και η εσωτερική τάση  $E$  [15]. Οι μετρήσεις αφορούσαν το σύνολο των 30 μπαταριών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Θεωρήσαμε δηλαδή ότι έχουμε μία ισοδύναμη μπαταρία με ονομαστική τάση 60 V. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Παράρτημα Γ) στα ζεύγη των μετρήσεων. Η προσέγγιση της V-I καμπύλης των μπαταριών έγινε με γραμμική εξίσωση αφού η σχέση που συνδέει την τάση και το ρεύμα της μπαταρίας είναι επίσης γραμμική. Από την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στις μετρήσεις, προέκυψε συνολική εσωτερική αντίσταση  $R_0=0.1071\Omega$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο «Σχήμα 5.3».



«Σχήμα 5.3, η σχεδίαση της V-I καμπύλης των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ για την εύρεση της συνολικής εσωτερικής τους αντίστασης  $R_0$ »

### 5.2.2. Εύρεση των παραμέτρων $c$ , $k$ και του μέγιστου συνολικού φορτίου $Q_{max}$

Για την εύρεση των  $c$ ,  $k$  και  $Q_{max}$  απαιτείται η γνώση των  $F_{t1t2}$  και  $F_{t3t2}$  όπως είδαμε προηγουμένως. Προκειμένου να υπολογιστούν αυτά τα μεγέθη, απευθυνθήκαμε στον κατασκευαστή για να μας δώσει τα  $Q_{t1}$ ,  $Q_{t2}$  και  $Q_{t3}$ . Η Ergon Batteries μας έδωσε τα  $Q_{10h}$  και  $Q_{120h}$  και για περισσότερες πληροφορίες μας παρέπεμψε στο πρότυπο IEC 60896-11 [4] το οποίο ακολουθούν οι μπαταρίες της και στο ισοδύναμό του DIN 40737-3 [16]. Τα μεγέθη που βρέθηκαν παρουσιάζονται στον «Πίνακα 5.2».

Χρόνος Εκφόρτισης	Φορτίο	Σταθερό Ρεύμα Εκφόρτισης
1 ώρα	133 Ah	133 A
3 ώρες	192 Ah	64 A
5 ώρες	212,5 Ah	42,5 A
10 ώρες	250 Ah	25 A
120 ώρες	375 Ah	3,125 A

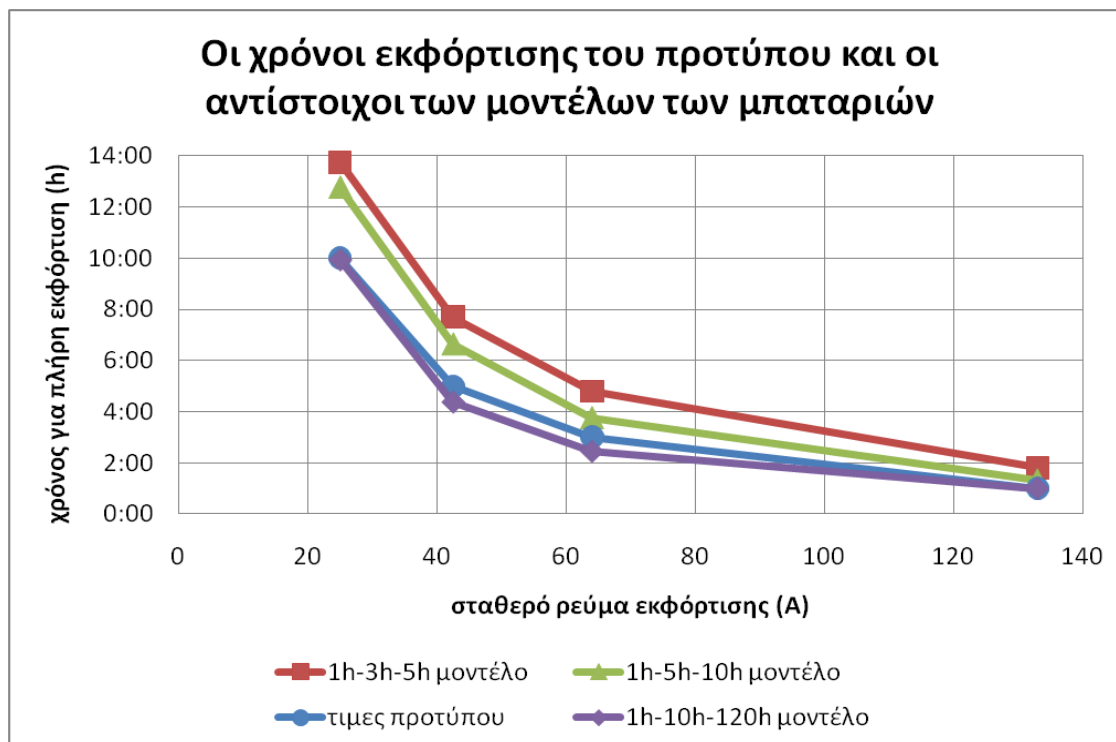
«**Πίνακας 5.2**, το συνολικό φορτίο που παρέχουν οι μπαταρίες που χρησιμοποιεί το εργαστήριο ΣΗΕ για διάφορα σενάρια εκφόρτισης, όπως αυτό δίνεται από τον κατασκευαστή και από το πρότυπο DIN 40737-3»

Ο υπολογισμός των  $c$ ,  $k$  και  $Q_{max}$  έγινε τρεις φορές, χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο της τέμνουσας (Παράρτημα Δ). Για κάθε υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά  $F_{t1t2}$  και  $F_{t3t2}$ . Τα αποτελέσματα όμως των τριών υπολογισμών διέφεραν σε μεγάλο βαθμό. Αυτά παρουσιάζονται στον «Πίνακα 5.3».

Χρόνοι εκφόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν	Συντελεστές $F$ που χρησιμοποιήθηκαν	$c$	$k$	$Q_{max}$
1 ώρα, 3 ώρες, 5 ώρες	$F_{1h,3h}$ , $F_{3h,5h}$	0,264051	2,921751	378 Ah
1 ώρα, 5 ώρες, 10 ώρες	$F_{1h,5h}$ , $F_{5h,10h}$	0,339077	0,883104	382 Ah
1 ώρα, 10 ώρες, 120 ώρες	$F_{1h,10h}$ , $F_{10h,120h}$	0,295511	0,409232	393 Ah

«**Πίνακας 5.3**, υπολογισμός των παραμέτρων  $c$ ,  $k$  και του μέγιστου συνολικού φορτίου  $Q_{max}$  για τις μπαταρίες του εργαστηρίου ΣΗΕ, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετική τριάδα πειραμάτων εκφόρτισης»

Τα αποτελέσματα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Για να καταλήξουμε σε αυτό που προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα, δημιουργήσαμε ένα μοντέλο για κάθε μία από τις τριάδες πειραμάτων εκφόρτισης. Στη συνέχεια υποβάλαμε τα μοντέλα σε προσομοιώσεις εκφόρτισης με τα ρεύματα που παρουσιάζονται στον «Πίνακα 5.2». Οι χρόνοι εκφόρτισης θα πρέπει να συμπίπτουν με τους αντίστοιχους χρόνους που δίνονται από τον κατασκευαστή [14] και από το πρότυπο [16]. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των τριών μοντέλων παρουσιάζονται στο «Σχήμα 5.4».



«**Σχήμα 5.4**, σύγκριση των χρόνων εκφόρτισης των μπαταριών (όπως αυτοί δίνονται από τον κατασκευαστή και το πρότυπο DIN 40737-3) με τους αντίστοιχους που προκύπτουν από την εφαρμογή τριών διαφορετικών μοντέλων για τις μπαταρίες»

Όπως παρατηρούμε, καλύτερη προσέγγιση κάνει το μοντέλο που χρησιμοποιεί τριάδα εκφορτίσεων 1h-10h-120h. Από αυτή την τριάδα εκφορτίσεων, προκύπτουν παράμετροι  $c=0.295511$ ,  $k=0.409232$  και μέγιστο φορτίο  $Q_{\max}=393\text{Ah}$ . Συνεπώς το μέγιστο φαινόμενο φορτίο είναι  $Q_1^{\max}=116\text{Ah}$  και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στους δεσμούς  $Q_2^{\max}=277\text{Ah}$ .

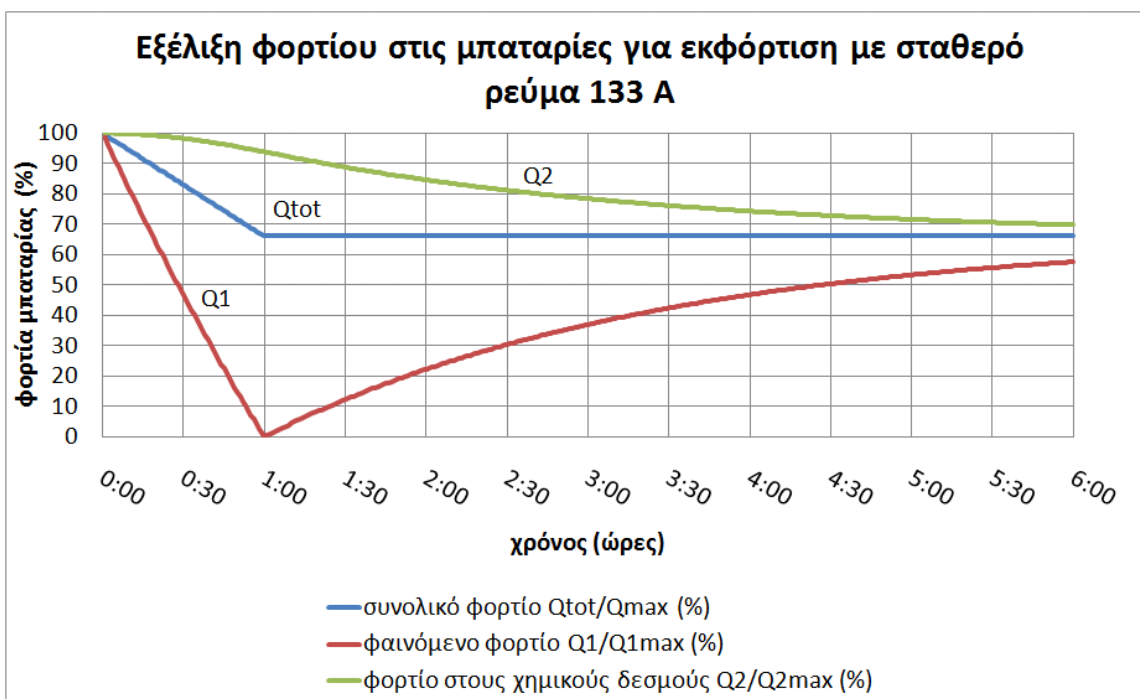
### 5.2.3. Εύρεση των τάσεων $E_{0,c}$ , $E_{\max}$ , $E_{\min}$ και $E_{0,d}$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την εύρεση της μέγιστης και της ελάχιστης επιτρεπτής τάσης φόρτισης και εκφόρτισης απευθυνθήκαμε στον κατασκευαστή. Δυστυχώς αυτός μας παρείχε μόνο τη μέγιστη και την ελάχιστη επιτρεπτή τάση εκφόρτισης [14, 16], των οποίων οι τιμές είναι αντίστοιχα  $E_{0,d} = 2.23\text{V}$  και  $E_{\min} = 1.56\text{V}$ . Για το σύνολο λοιπόν των 30 μπαταριών έχουμε  $E_{0,d}^{\text{tot}} = 66.9\text{V}$  και  $E_{\min}^{\text{tot}} = 46.8\text{V}$ . Για τη μέγιστη και την ελάχιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης γίνεται η παραδοχή ότι συμπίπτουν με τις αντίστοιχες της εκφόρτισης. Συνεπώς έχουμε  $E_{0,c} = 1.56\text{V}$  και  $E_{\max} = 2.23\text{V}$  και για το σύνολο των μπαταριών  $E_{\max}^{\text{tot}} = 66.9\text{V}$  και  $E_{0,c}^{\text{tot}} = 46.8\text{V}$ .

### 5.3. Η λειτουργία του μοντέλου των μπαταριών

#### 5.3.1 Ένα απλό σενάριο εκφόρτισης

Κατά τη λειτουργία του μοντέλου των μπαταριών, οι διακυμάνσεις του φαινομένου φορτίου  $Q_1$  και του φορτίου που είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς  $Q_2$ , παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα προσομοίωσης της εξέλιξης του φορτίου των μπαταριών παρουσιάζεται στο «Σχήμα 5.5». Αυτό αφορά την πλήρη εκφόρτιση του φαινομένου φορτίου των μπαταριών με σταθερό ρεύμα σε διάστημα μιας ώρας. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή [14] και το πρότυπο DIN 40737-3 [16], μία τέτοια εκφόρτιση παρέχει 133Ah, συνεπώς πρέπει να γίνει με σταθερό ρεύμα 133A.



«Σχήμα 5.5, η προσομοίωση της εξέλιξης του φορτίου των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ, για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 133A για μία ώρα»

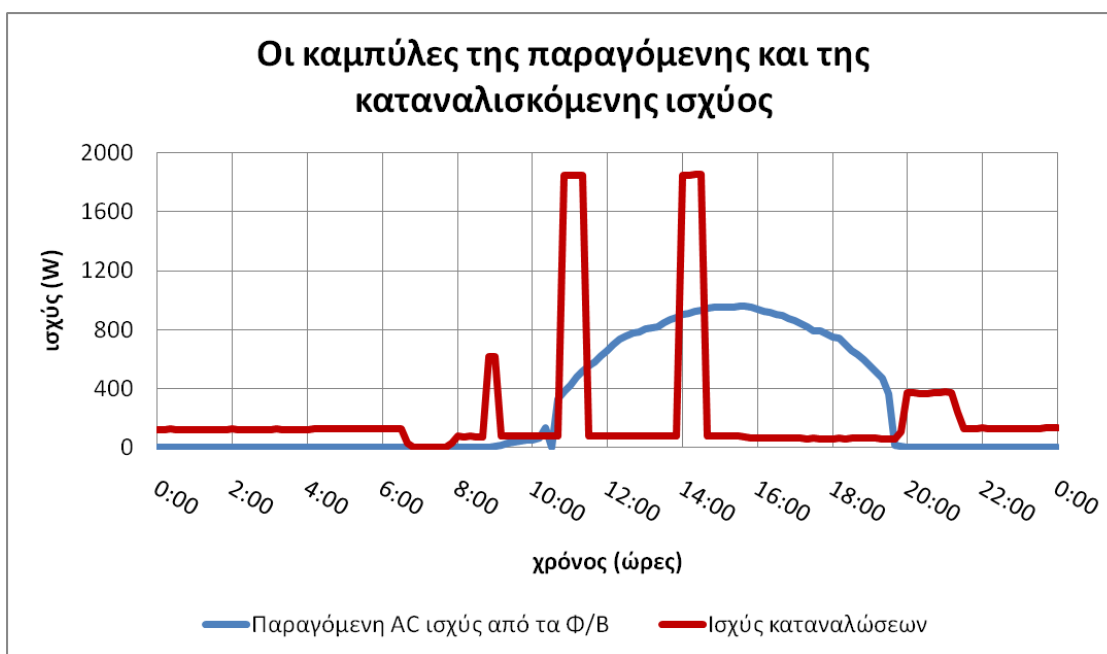
Η προσομοίωση της εξέλιξης του φορτίου των μπαταριών που βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα, επιβεβαιώνει ότι μία εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 133A εξαντλεί το φαινόμενο φορτίο των μπαταριών σε διάστημα μιας ώρας. Αρχικά η μπαταρία είναι 100% φορτισμένη. Έπειτα έχουμε εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα διάρκειας μιας ώρας και παρατηρείται μία γραμμική μείωση του συνολικού φορτίου  $Q_{tot}$ . Ταυτόχρονα διαπιστώνεται μία ραγδαία μείωση του φαινομένου φορτίου  $Q_1$ , ενώ το αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς φορτίο  $Q_2$  μειώνεται σχετικά αργά. Αυτό συμβαίνει γιατί στο διάστημα της πρώτης ώρας ένα μικρό μέρος των δεσμών προλαβαίνει να σπάσει και να

απελευθερώσει φορτίο. Συνεπώς το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης για φορτίο την καλύπτει το  $Q_1$ .

Στη συνέχεια αφήνουμε το μοντέλο να επανέλθει σε ισορροπία χωρίς να πραγματοποιείται καμία διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης. Αυτό φαίνεται από τη σταθεροποίηση του συνολικού φορτίου  $Q_{tot}$  στο τέλος της πρώτης ώρας. Καθώς περνάει η ώρα, το φορτίο  $Q_2$  σταδιακά μειώνεται ενώ το  $Q_1$  αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι σπάνε οι χημικοί δεσμοί και το φορτίο που ήταν αποθηκευμένο σε αυτούς απελευθερώνεται και προστίθεται στο φαινόμενο φορτίο. Απώλεια φορτίου δεν υπάρχει στη διαδικασία αυτή, μόνο μεταφορά αυτού. Η διαδικασία μεταφοράς του φορτίου συνεχίζεται μέχρι τα ποσοστά % των  $Q_1$  και  $Q_2$  να συμπέσουν μεταξύ τους.

### 5.3.2. Η λειτουργία του μοντέλου για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διακύμανση του φορτίου των μπαταριών πάνω σε ένα πραγματικό σενάριο. Αυτό περιλαμβάνει την παραγωγή ενέργειας που προκύπτει από το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου και κατανάλωση ενέργειας όπως αυτή μετρήθηκε σε ένα βιβλιοπωλείο στο Γέρακα [17] την ίδια μέρα. Η καμπύλη της παραγόμενης AC ισχύος από τα Φ/Β καθώς και η καμπύλη ισχύος των καταναλώσεων παρουσιάζονται στο «Σχήμα 5.6».



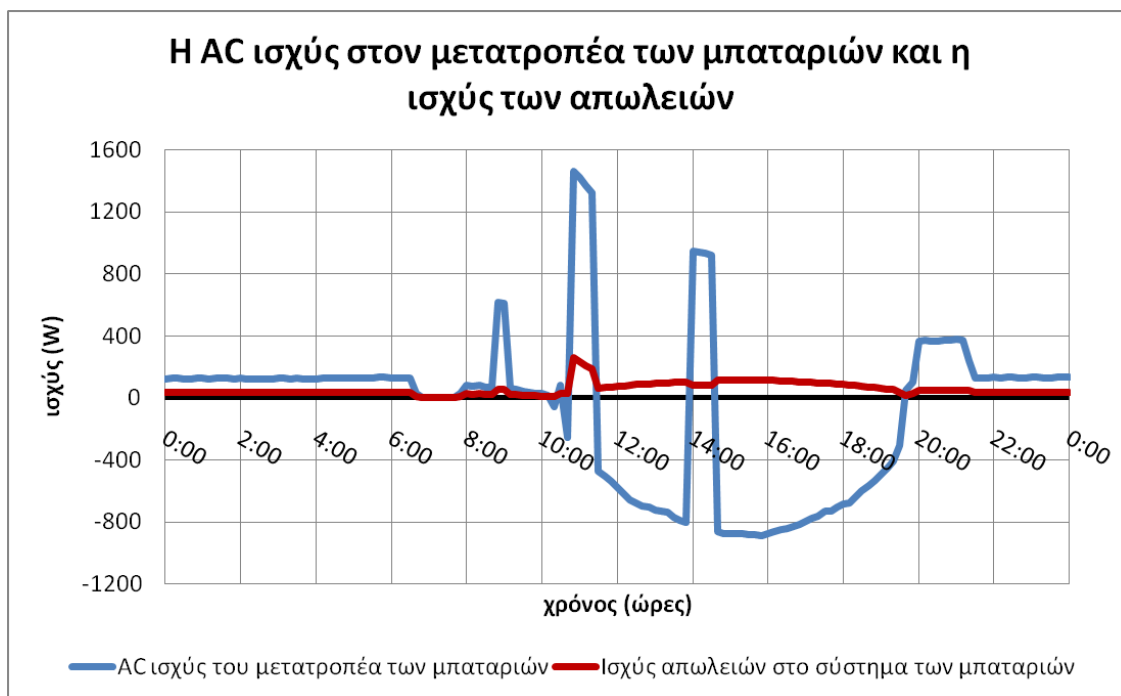
«Σχήμα 5.6, η ισχύς των καταναλώσεων ενός βιβλιοπωλείου στο Γέρακα στις 27 Αυγούστου 2009 και η παραγόμενη ισχύς που θα προέκυπτε από το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου την ίδια ημέρα»



Για την εύρεση της παραγόμενης ενέργειας, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις ισχύος της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο που διεξάγονται στο κτίριο του Γέρακα [17]. Με χρήση του μοντέλου της ηλιακής ακτινοβολίας που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2, μπορούμε στη συνέχεια να βρούμε την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των πανέλων. Έπειτα, με βάση τη μοντελοποίηση της λειτουργίας των πανέλων και της απόδοσης του Φ/Β αντιστροφέα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, είναι δυνατός ο υπολογισμός της καμπύλης παραγωγής AC ισχύος του Φ/Β συστήματος.

Το ύψος της παραγόμενης ενέργειας ανέρχεται σε 6913Wh και της καταναλισκόμενης ενέργειας σε 5146Wh. Παρατηρούμε συνεπώς ότι παράγονται 1767Wh περισσότερες από όσες απαιτούν τα φορτία.

Η AC ισχύς στον μετατροπέα των μπαταριών και η ισχύς των απωλειών στο σύστημα των μπαταριών παρουσιάζονται στο «Σχήμα 5.7».



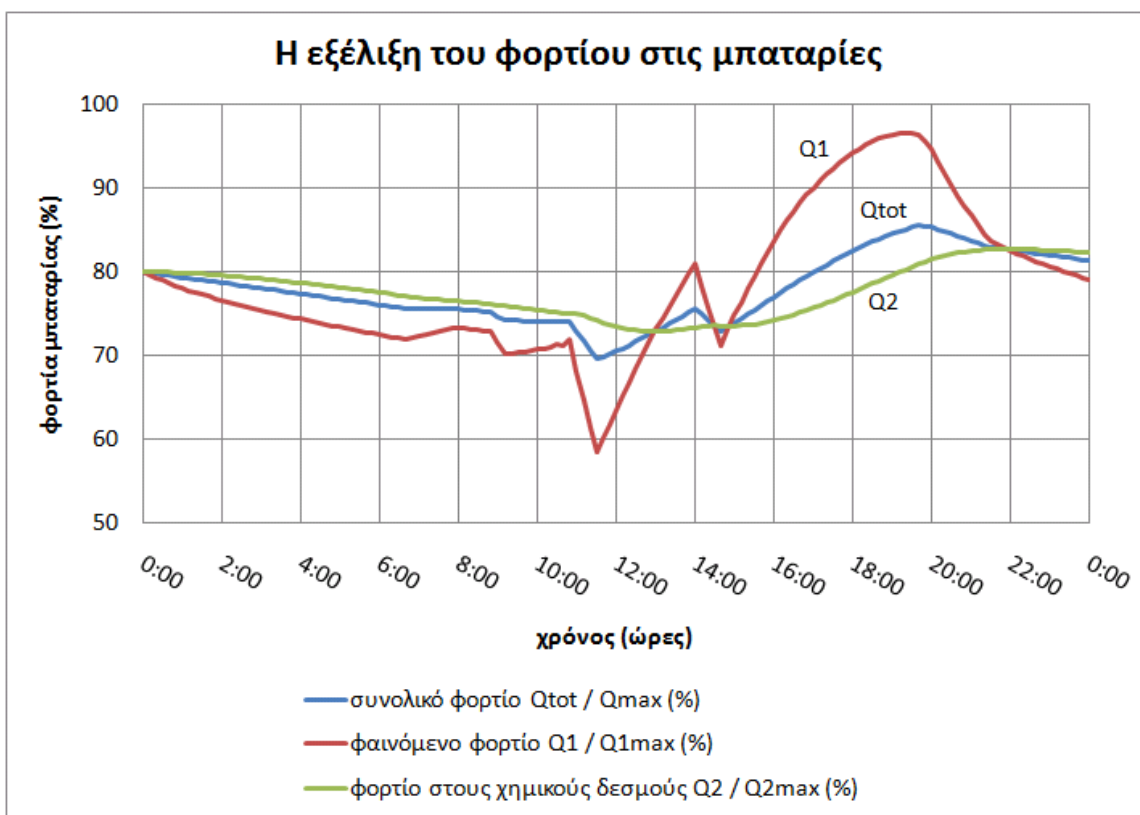
«Σχήμα 5.7, η AC ισχύς στον μετατροπέα των μπαταριών (>0 όταν έχουμε εκφόρτιση) και η ισχύς των απωλειών στις μπαταρίες και στον μετατροπέα τους»

Οι απώλειες προέρχονται από τον μετατροπέα των μπαταριών (με βάση όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4) και στην εσωτερική αντίσταση  $R_0$  των μπαταριών. Η συνολική απώλεια ενέργειας είναι 1363Wh. Το ποσό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς ανέρχεται στο 26.5% της ισχύος των καταναλώσεων. Συνεπώς στο τέλος της ημέρας θα έχουν παραχθεί μόλις 404Wh περισσότερες από όσες απαιτούνται. Αυτό το περίσσειμα ενέργειας θα αποθηκευτεί στις μπαταρίες. Στην περίπτωση όπου οι μπαταρίες είναι ήδη πλήρως φορτισμένες, ο μετατροπέας των μπαταριών θα εφαρμόσει διαδικασία απόρριψης της παραγόμενης ενέργειας [7]. Αυτό γίνεται αυξάνοντας τη συχνότητα στον AC ζυγό [7]. Όταν ο Φ/Β αντιστροφέας εντοπίσει δίκτυο

με αυξημένη συχνότητα, αντιλαμβάνεται ότι υπάρχει περίσσειμα ενεργού ισχύος και τίθεται αυτομάτως εκτός λειτουργίας [7].

Από τις απώλειες, οι 1194Wh προέρχονται από τον μετατροπέα και οι 169Wh από την εσωτερική αντίσταση των μπαταριών. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών προέρχονται από το μετατροπέα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι για πολλές ώρες της ημέρας ο μετατροπέας λειτουργεί σε μικρή ισχύ, πολύ μακριά από την ονομαστική του. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, όπως είδαμε από το Κεφάλαιο 4, ο μετατροπέας παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διακύμανση των φορτίων της μπαταρίας που παρουσιάζεται στο «Σχήμα 5.8».

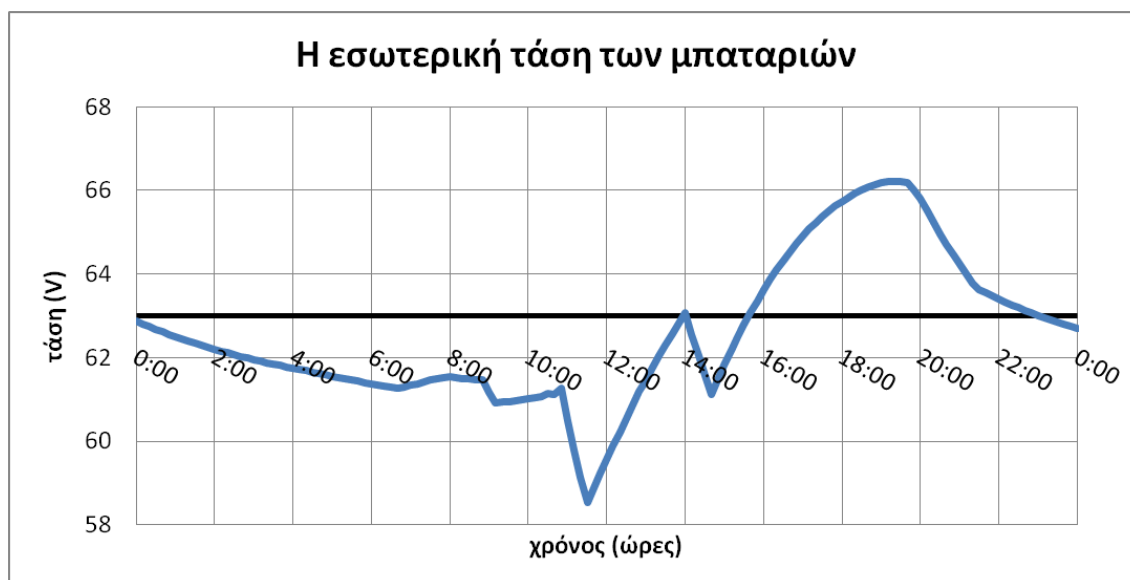


«Σχήμα 5.8, η προσομοίωση της εξέλιξης του φορτίου των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ, για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας»

Θεωρήθηκε ότι αρχικά οι μπαταρίες ήταν φορτισμένες στο 80% του μέγιστου φορτίου τους. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να υπάρχει ένα περιθώριο φόρτισής τους και να αποφευχθούν φαινόμενα απόρριψης της παραγόμενης ενέργειας. Από την άλλη, το αρχικό επίπεδο φόρτισης δε θα μπορούσε να είναι πολύ χαμηλό διότι σε αυτή την περίπτωση θα υπήρχε το ενδεχόμενο να πέσει το φορτίο των μπαταριών κάτω από το 40% και να τεθεί ο μετατροπέας των μπαταριών εκτός λειτουργίας [5], [7]. Γενικά, μας συμφέρει το φορτίο των μπαταριών να κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα διότι έτσι αυτές καταπονούνται λιγότερο [5]. Ένας άλλος παράγοντας που μας οδηγεί στο να

επιδιώκουμε όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο στις μπαταρίες είναι το γεγονός ότι η τάση των μπαταριών μεγαλώνει όσο αυξάνει το φορτίο τους [15]. Η φόρτιση ή εκφόρτιση μιας μπαταρίας με υψηλή τάση απαιτεί μικρές ροές ρευμάτων και συνεπώς προκύπτουν λιγότερες ωμικές απώλειες στην εσωτερική αντίσταση των μπαταριών σε σχέση με μία μπαταρία με χαμηλότερη τάση.

Ένα άλλο γράφημα στο οποίο αξίζει να σταθούμε αυτό της διακύμανσης της εσωτερικής τάσης των μπαταριών που παρουσιάζεται στο «Σχήμα 5.9». Όπως είδαμε αυτή εξαρτάται από το λόγο του φαινομένου φορτίου προς το μέγιστο φαινόμενο φορτίο της μπαταρίας.



«Σχήμα 5.9, η προσομοίωση της εξέλιξης της εσωτερικής τάσης των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ, για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας»

Στο «Σχήμα 5.8» φαίνεται πάλι ότι το φορτίο που αλλάζει άμεσα όταν έχουμε φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας, είναι το φαινόμενο φορτίο  $Q_1$ . Οι μεταβολές του  $Q_2$  είναι πολύ πιο αργές. Στο τέλος της ημέρας το συνολικό φορτίο  $Q_{TOT}$  είναι ελαφρώς περισσότερο από ότι στην αρχή της. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι οι 404Wh που περισσεύουν, αποθηκεύονται στις μπαταρίες αυξάνοντας το συνολικό τους φορτίο.

## 5.4. Συμπεράσματα

Στη λειτουργία ενός μικροδικτύου είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός του επίπεδου φόρτισης και γενικότερα της συμπεριφοράς των μπαταριών. Η χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας των μπαταριών είναι απαραίτητη για τη διαχείρισή τους. Το KiBaM που εφαρμόστηκε είναι ένα μοντέλο που δίνει βάση στις ροές του ρεύματος στις μπαταρίες. Διαχωρίζει το φορτίο σε δύο κατηγορίες, το

φαινόμενο φορτίο που είναι άμεσα διαθέσιμο και το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς και τα μελετά ξεχωριστά [15].

Για τη επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου απαιτείται ο προσδιορισμός κάποιων σταθερών οι οποίες προκύπτουν από πειράματα στις μπαταρίες. Οι σταθερές αυτές είναι χαρακτηριστικές των μπαταριών στις οποίες θα εφαρμοστεί το μοντέλο. Συγκεκριμένα για το σύνολο των 30 μπαταριών, η εσωτερική αντίσταση υπολογίστηκε  $R_0=0.1071\Omega$ , το μέγιστο φορτίο  $Q_{\max}=393Ah$ , η ελάχιστη εσωτερική τάση των μπαταριών  $E_{\min}^{tot} = 46.8V$  και η μέγιστη  $E_{\max}^{tot} = 66.9V$ . Η λειτουργία του μοντέλου απαιτεί και την εύρεση δύο άλλων παραμέτρων που υπολογίστηκαν  $c=0.295511$  και  $k=0.409232$ .

Από τις παραπάνω τιμές, μόνο η εσωτερική αντίσταση  $R_0$  βρέθηκε με πείραμα στις μπαταρίες. Για την εύρεση των υπόλοιπων τιμών χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα από πειράματα που έκανε ο κατασκευαστής [14] τα οποία είναι σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο [16]. Τα αποτελέσματα αυτά όμως αφορούν καινούργιες μπαταρίες. Είναι συνεπώς πιθανό το μοντέλο να διαφέρει σε κάποια σημεία από την πραγματική συμπεριφορά των μπαταριών.

Η χρήση του μοντέλου των μπαταριών μας επιτρέπει να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά τους σε διάφορα σενάρια λειτουργίας. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο κατά τη διαχείριση του φορτίου καθώς μας επιτρέπει να κάνουμε τη βέλτιστη δυνατή κατανομή του ώστε να εξασφαλίζεται η διαρκής παροχή ισχύος στις καταναλώσεις. Από την εφαρμογή του μοντέλου για ένα πραγματικό σενάριο λειτουργίας, διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν πολύ σημαντικές απώλειες στο σύστημα των μπαταριών. Αυτές οφείλονται κυρίως στις μετατροπές ενέργειας από AC σε DC και αντίστροφα και λιγότερο στην εσωτερική αντίσταση των μπαταριών. Συγκεκριμένα οι απώλειες ανήλθαν σε 1363Wh, αυξάνοντας στην ουσία τις καταναλώσεις κατά 26.5%. Από αυτές τις απώλειες ενέργειας, οι 1194Wh οφείλονται στον μετατροπέα των μπαταριών και οι 169Wh στην εσωτερική αντίσταση των μπαταριών  $R_0$ .

## Κεφάλαιο 6

### Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα (intelligent agent)

Στο εθνικό δίκτυο κατά τη διάρκεια της ημέρας η ισχύς των καταναλώσεων μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό [18]. Κατά συνέπεια το ίδιο συμβαίνει και με την ισχύ των μονάδων παραγωγής ενέργειας. Το μοναδιαίο κόστος όμως της MWh για μια μονάδα παραγωγής δεν είναι σταθερό. Αντιθέτως, μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος της παραγωγής και μάλιστα μη γραμμικά [18]. Για το λόγο αυτό υπάρχει στο δίκτυο ένας διαχειριστής που αναλαμβάνει να εξασφαλίσει από τις μονάδες παραγωγής την απαιτούμενη ενέργεια για την κάλυψη των καταναλώσεων. Στην Ελλάδα, διαχειριστής του συστήματος είναι ο ΔΕΣΜΗΕ [19].

Ο διαχειριστής του συστήματος ζητάει από κάθε παραγωγό να καταθέσει τη δική του καμπύλη προσφοράς ενέργειας, να δηλώσει δηλαδή πόση ενέργεια είναι διατεθειμένος να προσφέρει για κάθε τιμή της MWh [19]. Από το σύνολο των καμπυλών προσφοράς διαμορφώνεται η αθροιστική καμπύλη προσφοράς της ενέργειας. Στη συνέχεια, για κάθε ώρα της ημέρας ο διαχειριστής κάνει μία πρόβλεψη για το ύψος της κατανάλωσης ενέργειας που αναμένεται [19]. Έτσι δημιουργείται και η καμπύλη ζήτησης της ενέργειας. Από την τομή των δύο καμπυλών, προκύπτει η οριακή τιμή του συστήματος για κάθε ώρα της ημέρας [20]. Το ότι ο διαχειριστής αγοράζει με μεταβλητές τιμές δε σημαίνει απαραίτητα και η τιμή πώλησης στους καταναλωτές θα διαφέρει στη διάρκεια της ημέρας [19]. Οι πολιτικές τιμολόγησης της ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές εξαρτώνται από τη νομοθεσία της κάθε χώρας.

Στην Ελλάδα, είναι πολιτική του διαχειριστή να εντάσσει στο δίκτυο το σύνολο της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [19]. Συγκεκριμένα όσο αφορά τα φωτοβολταϊκά πάρκα, αυτά εντάσσονται σε τιμή προνομιακή, κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερη από την οριακή τιμή του συστήματος [19]. Στην εργασία αυτή όμως έγινε η υπόθεση ότι το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου δεν εντάσσεται σε αυτό το καθεστώς αλλά αντιμετωπίζεται ισότιμα με τους παραγωγούς ενέργειας από συμβατικές πηγές. Επίσης έγινε η υπόθεση ότι το σύστημα του εργαστηρίου μπορεί να ενταχθεί στην αγορά ενέργειας αφότου προσδιοριστεί η οριακή τιμή της ενέργειας για κάθε ώρα της ημέρας. Αυτή η υπόθεση είναι αρκετά βάσιμη διότι η ενέργεια που θα εγχύσει το μικροδίκτυο στο δίκτυο είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ενέργεια που διοχετεύει το σύνολο των παραγωγών. Συνεπώς, η ένταξή του μικροδικτύου στην αγορά δε θα έχει επίδραση στη διαμόρφωση της οριακής τιμής του συστήματος.

Χαρακτηριστικό του Φ/Β είναι ότι παράγει ενέργεια τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια οι οποίες είναι συγκεκριμένες κάθε μέρα. Τις ώρες αυτές όμως η οριακή τιμή του

συστήματος δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή [19]. Έγινε λοιπόν η σκέψη να αποθηκεύεται μέρος της παραγόμενης ενέργεια στις μπαταρίες του εργαστηρίου και να διοχετεύεται στο δίκτυο όταν η οριακή του τιμή παρουσιάσει αιχμή. Η πραγματοποίηση αυτού όμως είναι εξαιρετικά πολύπλοκη διότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι απώλειες στον μετατροπέα των μπαταριών και στις μπαταρίες οι οποίες δεν είναι σταθερές, ούτε γραμμικές. Επιπλέον απαιτείται να ληφθεί υπόψιν μία σειρά από περιορισμούς που παρουσιάζει το σύστημα των μπαταριών. Για τη διαχείριση λοιπόν της παραγόμενης ενέργειας των Φ/Β με τον βέλτιστο τρόπο αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα-πράκτορας [21],[22] σε περιβάλλον LabView [23].

## **6.1. Ο τρόπος λειτουργίας του πράκτορα**

Στόχος του πράκτορα είναι να διαχειριστεί την παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β έτσι ώστε να προκύψει το μέγιστο δυνατό έσοδο από αυτή. Για να το επιτύχει αυτό είναι απαραίτητο να γνωρίζει εκ των προτέρων τη διακύμανση της οριακής τιμής του συστήματος στη διάρκεια της ημέρας. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες για την οριακή τιμή του συστήματος, όπως αυτές προκύπτουν από τα ωριαία συμβόλαια που δημοσιεύτηκαν από το Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας (EEX – European Energy Exchange) [24]. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι τιμές συμβολαίων του συστήματος Phelix (Physical Electricity Index) που αφορά τις αγορές της Γερμανίας και της Αυστρίας.

Η παραγωγή ενέργειας του Φ/Β είναι άμεση συνάρτηση της ηλιοφάνειας. Για να γνωρίζει λοιπόν ο πράκτορας την καμπύλη παραγωγής ισχύος που θα πρέπει να διαχειριστεί, χρειάζεται μία πρόβλεψη για την ακτινοβολία που αναμένεται να δεχτούν τα πανέλα. Μία τέτοια πρόβλεψη θα μπορούσε να βασίζεται στην ακτινοβολία της προηγούμενης ημέρας, στις μετρήσεις ακτινοβολίας παρελθόντων ετών κ.α. Ωστόσο, η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας. Το πρόγραμμα-πράκτορας που αναπτύχθηκε, χρησιμοποίησε στις προσομοιώσεις του ως δεδομένα πραγματικές μετρήσεις ακτινοβολίας προηγούμενων ημερών. Από αυτές και με βάση όσα αναπτύχθηκαν στα *Κεφάλαια 2 και 3*, προκύπτει η καμπύλη παραγωγής AC ισχύος από τα Φ/Β.

Το πρόγραμμα εργάζεται σε δύο κύκλους, τον κύκλο αποθήκευσης και τον κύκλο διάθεσης της ενέργειας, οι οποίοι εναλλάσσονται μεταξύ τους. Ο χρόνος χωρίζεται σε 10λεπτα. Το πρόγραμμα αρχίζει με τον κύκλο αποθήκευσης, εξετάζοντας την παραγωγή ενέργειας του 10λέπτου στο οποίο έχουμε την χαμηλότερη οριακή τιμή του συστήματος. Εκεί υπολογίζει με πόσα Ah θα φορτιστούν οι μπαταρίες αν αυτή η ενέργεια αποθηκευτεί, συνυπολογίζοντας φυσικά και τις απώλειες. Στη συνέχεια μεταβαίνει στον κύκλο διάθεσης της ενέργειας. Εκεί υπολογίζει το έσοδο που θα έχουμε αν το φορτίο που αποθηκεύτηκε στις μπαταρίες διοχετευθεί στο 10λεπτο όπου η οριακή τιμή του συστήματος παρουσιάζει αιχμή. Στον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψιν και πάλι οι απώλειες ενέργειας. Εφόσον το έσοδο είναι μεγαλύτερο από αυτό που θα είχαμε χωρίς τη μεταφορά της ενέργειας, καταχωρεί αυτή τη ροή ρεύματος στις

μπαταρίες και επαναλαμβάνει τη λειτουργία του εξετάζοντας το 10λεπτο με την αμέσως χαμηλότερη οριακή τιμή συστήματος. Οι απώλειες ενέργειας που λαμβάνονται υπόψιν είναι αυτές που παρατηρούνται στις μετατροπές ενέργειας και στην εσωτερική αντίσταση των μπαταριών, όπως αυτές παρουσιάζονται στα *Κεφάλαια 4 και 5*. Επίσης λαμβάνεται υπόψιν και η διακύμανση της τάσης των μπαταριών. Υπενθυμίζεται ότι η τάση των μπαταριών εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισής τους, όπως αναφέρθηκε στο *Κεφάλαιο 5*.

Ο κύκλος της αποθήκευσης και της διάθεσης της ενέργειας στηρίζεται στις ροές ρεύματος και κατά συνέπεια φορτίου στις μπαταρίες. Όπως είδαμε και στο *Κεφάλαιο 5*, το φορτίο διατηρείται κατά τις διαδικασίες της φόρτισης και της εκφόρτισης των μπαταριών. Στο τέλος της ημέρας θα έχει διοχετευθεί στο δίκτυο το σύνολο του φορτίου που αποθηκεύτηκε στις μπαταρίες και το τελικό τους συνολικό φορτίο  $Q_{TOT}$  θα είναι όσο και στην αρχή της ημέρας. Ο υπολογισμός του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών γίνεται με το μοντέλο KiBaM που αναπτύχθηκε στο *Κεφάλαιο 5*.

Αντίθετα με το φορτίο των μπαταριών που διατηρείται, η ενέργεια εμφανίζει απώλειες. Η ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο είναι σαφώς λιγότερη από αυτή που παράγεται. Ωστόσο η πώληση γίνεται με σημαντικά υψηλότερη τιμή, οπότε προκύπτει μεγαλύτερο έσοδο, ακόμα και αν πωλούνται λιγότερες kWh.

## **6.2. Οι περιορισμοί στους οποίους υπόκειται ο πράκτορας**

Ο ευφυής πράκτορας, κατά τη λειτουργία του ως διαχειριστής της ενέργειας που παράγεται από το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου, θα πρέπει να λαβαίνει υπόψιν κάποιους περιορισμούς. Αυτοί προκύπτουν κυρίως από λειτουργία του συστήματος των μπαταριών και του μετατροπέα τους.

### **A. Το μέγιστο ρεύμα εξόδου των μπαταριών**

Η ονομαστική ισχύς εξόδου του μετατροπέα των μπαταριών είναι 3.3kW. Η απόδοσή του όταν εργάζεται ως αντιστροφέας στην ονομαστική του ισχύ είναι 93% όπως προκύπτει από το *Κεφάλαιο 4*. Συνεπώς η μέγιστη επιτρεπτή ισχύς εισόδου είναι  $P_{\max}^{dc}=3.55kW$ . Στο *Κεφάλαιο 5* είδαμε ότι η μέγιστη τάση των μπαταριών είναι 66.9V. Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα εξόδου των μπαταριών θα υπολογιστεί με βάση αυτή την τάση προκειμένου να είμαστε καλυμμένοι για κάθε πιθανό επίπεδο της τάσης. Συνεπώς για το μέγιστο ρεύμα εξόδου των μπαταριών θα έχουμε:

$$P_{\max}^{DC} = I_{\max} \cdot V = I_{\max} (E - I_{\max} \cdot R_0) \Rightarrow 3550 = I_{\max} \cdot 66.9 - I_{\max}^2 \cdot 0.1071 \Rightarrow I_{\max} \cong 58.5A$$

Όπου  $I_{\max}$  το μέγιστο ρεύμα των μπαταριών κατά την εκφόρτιση. Από την εξίσωση προκύπτει και ρίζα  $I_2=566A$  η οποία απορρίπτεται.

## **B. Το μέγιστο και το ελάχιστο φορτίο των μπαταριών**

Οι μπαταρίες καταπονούνται μετά από κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισής τους. Ωστόσο η καταπόνηση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη αν το φαινόμενο φορτίο τους  $Q_1$  πέσει κάτω από το 40% του μέγιστου φαινόμενου φορτίου  $Q_1^{\max}$  ή αν υποστούν υπερφόρτιση και υπερβεί το 100% του  $Q_1^{\max}$  [5]. Ο πράκτορας εφαρμόζει το μοντέλο KiBaM για τις μπαταρίες που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5 για τον υπολογισμό του φαινόμενου φορτίου  $Q_1$ , φροντίζοντας για την τήρηση αυτών των ορίων κατά τη διαχείριση της ενέργειας.

## **Γ. Το ελάχιστο ρεύμα εξόδου των μπαταριών**

Ο μετατροπέας των μπαταριών κατά τη λειτουργία του ως αντιστροφέας δεν έχει κάποιο κατώτατο όριο φόρτισης. Ωστόσο, όταν δουλεύει σε μικρή ισχύ έχει μικρή απόδοση όπως φάνηκε και στο Κεφάλαιο 4. Το αντίθετο συμβαίνει με τις μπαταρίες. Όταν παρέχουν μικρή ισχύ έχουν μικρές ωμικές απώλειες, όταν όμως η ισχύς τους αυξηθεί, οι απώλειες αυξάνονται πολύ γρηγορότερα. Ζητούμενο λοιπόν είναι να βρεθεί η καμπύλη της συνολικής απόδοσης του μετατροπέα και των μπαταριών κατά την εκφόρτιση. Πρόβλημα σε αυτό παρουσιάζει η μεταβλητή τάση των μπαταριών. Για την ελάχιστη εσωτερική τάση των μπαταριών (46.8V), το σύστημα παρουσιάζει μέγιστη απόδοση 90.89% για DC ρεύμα εξόδου των μπαταριών 17A. Από την άλλη πλευρά, για τη μέγιστη συνολική εσωτερική τάση των μπαταριών (66.5V), η απόδοση μεγιστοποιείται για DC ρεύμα εξόδου των μπαταριών 14.6A και παίρνει την τιμή 92.99%. Για μεγαλύτερο DC ρεύμα εξόδου από τις μπαταρίες, η απόδοση πέφτει. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε το ελάχιστο επιτρεπτό ρεύμα εκφόρτισης των μπαταριών να είναι  $I_{\min}=14.6A$ .

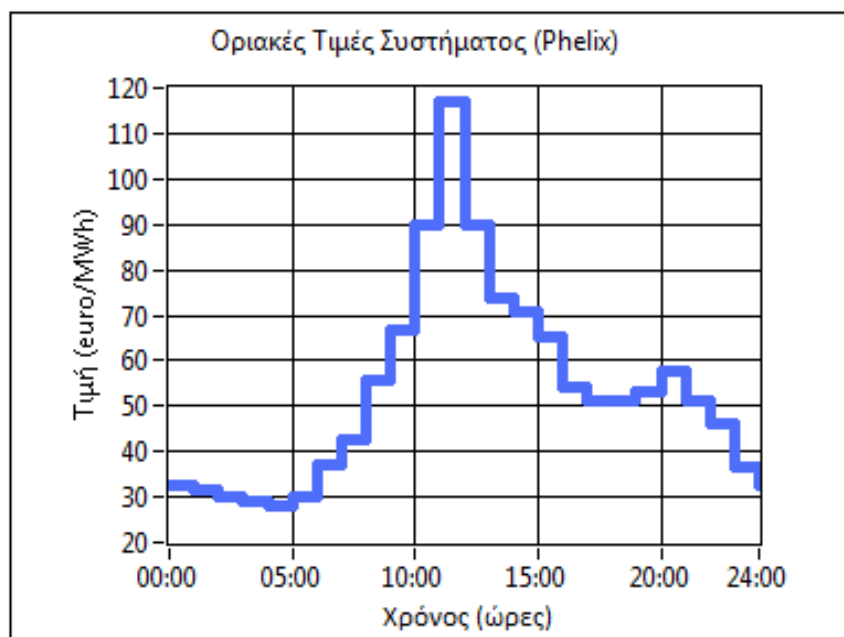
## **6.3. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη λειτουργία του πράκτορα**

Το πρόγραμμα διαχείρισης της ενέργειας που υλοποιεί τον ευφυή πράκτορα, δέχεται ως δεδομένα την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο που αναμένεται να υπάρξει την ερχόμενη ημέρα και τις προβλέψεις για την πορεία της οριακής τιμής του συστήματος. Επίσης, προκειμένου να γίνει σωστή διαχείριση των μπαταριών, πρέπει να προσδιοριστεί στις παραμέτρους του προγράμματος το αρχικό επίπεδο φόρτισής τους. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό μπορεί να υπολογιστεί από τη μέτρηση της εσωτερικής τάσης των μπαταριών και με τη βοήθεια των τύπων (5.16) και (5.17), κάνοντας χρήση του μοντέλου των μπαταριών που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5.

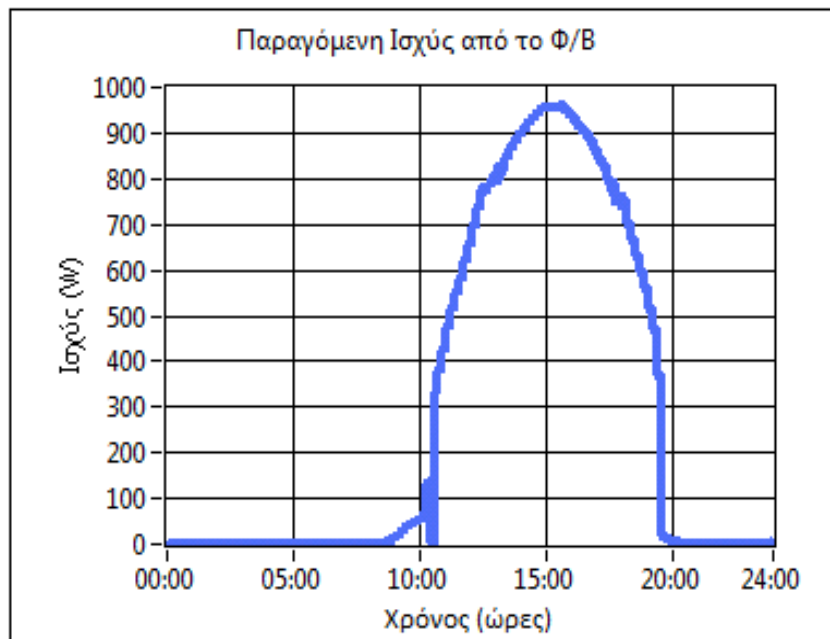


### 6.3.1. Τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του προγράμματος-πράκτορα για μία ημέρα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας του προγράμματος-πράκτορα για μία ενδεικτική ημέρα. Συγκεκριμένα η καμπύλη οριακών τιμών του συστήματος είναι από το χρηματιστήριο ενέργειας Γερμανίας-Αυστρίας (EEX – Phelix) για τις 27 Αυγούστου 2009 [24], ενώ οι τιμές ακτινοβολίας προέκυψαν από μετρήσεις που έγιναν στο Γέρακα της Αττικής την ίδια ημέρα [17]. Η καμπύλη με τις οριακές τιμές του συστήματος παρουσιάζεται στο «Σχήμα 6.1». Η προσομοίωση της παραγωγής του Φ/Β συστήματος του εργαστηρίου για τη συγκεκριμένη ακτινοβολία, όπως αυτή προκύπτει από τα Κεφάλαια 1 και 2, παρουσιάζεται στο «Σχήμα 6.2».



«Σχήμα 6.1, οι οριακές τιμές του συστήματος που προκύπτουν από το χρηματιστήριο ενέργειας Γερμανίας-Αυστρίας (Phelix) για τις 27 Αυγούστου 2009»

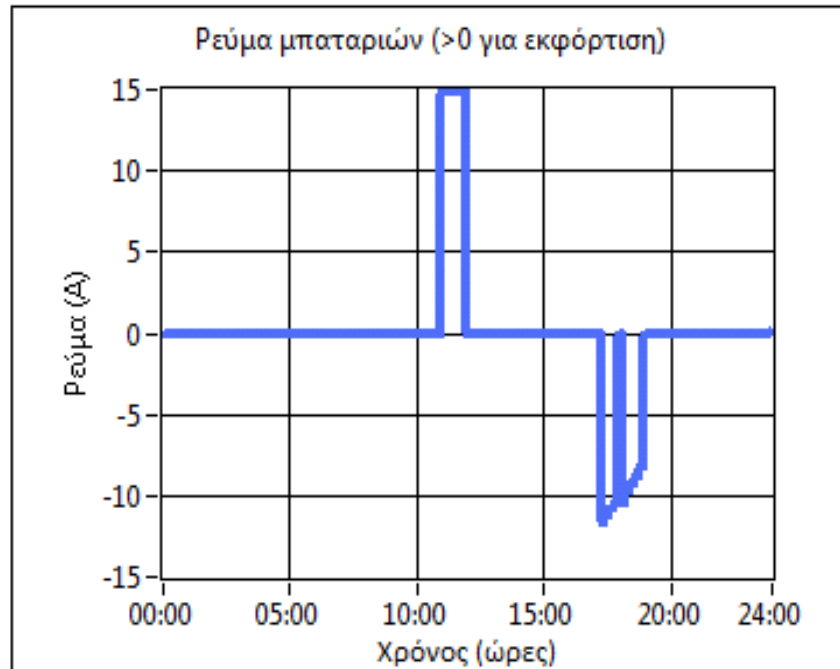


«**Σχήμα 6.2**, η προσομοίωση της παραγωγής του Φ/Β του εργαστηρίου ΣΗΕ για ηλιοφάνεια που μετρήθηκε στο Γέρακα στις 27 Αυγούστου 2009»

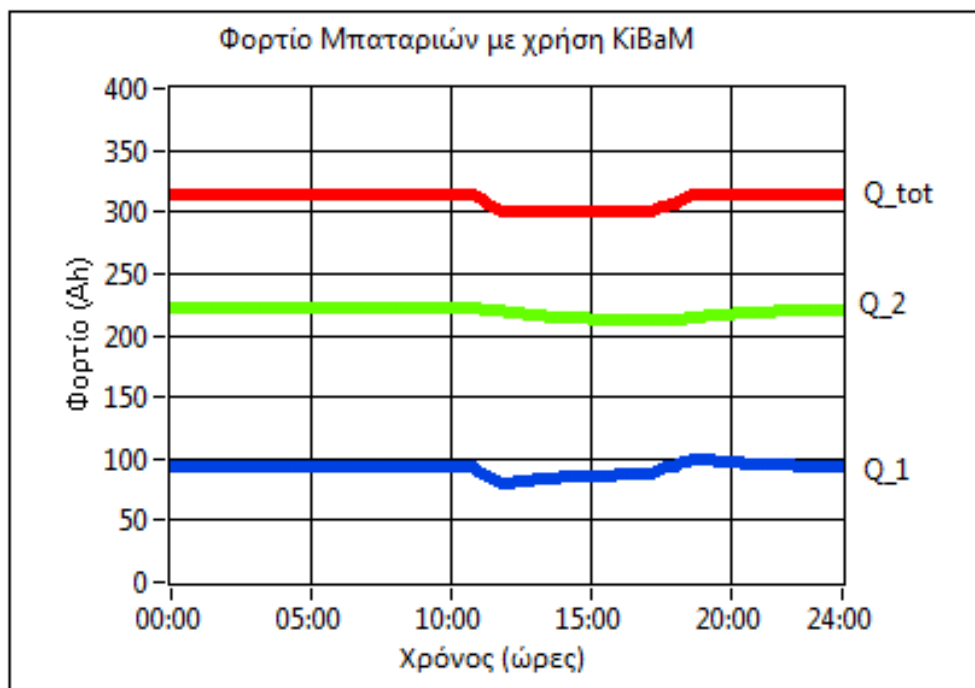
Στο «Σχήμα 6.2» παρατηρούμε ότι η αιχμή της παραγωγής είναι περίπου στις 15.00 και όχι στις 12.00 όπως θα περίμενε κανείς. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον εξαιτίας της διαφοράς της ώρας. Το καλοκαίρι που εφαρμόζεται η θερινή ώρα στην Ελλάδα, αυτή διαφέρει από την τοπική περίπου κατά μιάμιση ώρα, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου της ηλιακής ακτινοβολίας που αναπτύχθηκε στο *Κεφάλαιο 2*. Δεύτερον εξαιτίας του προσανατολισμού των πανέλων που είναι νοτιο-νοτιοδυτικός και δέχονται τη μέγιστη ακτινοβολία μετά το ηλιακό μεσημέρι [1].

Αν εξετάσουμε το «Σχήμα 6.1», διαπιστώνουμε ότι στις 15.00 όπου η παραγωγή παρουσιάζει αιχμή, η οριακή τιμή του συστήματος είναι σχετικά χαμηλή. Εδώ φαίνεται η χρησιμότητα του πράκτορα. Αυτός θα φροντίσει ώστε να αποθηκευτεί η ενέργεια από το Φ/Β και να διοχετευθεί στο δίκτυο την ώρα που η οριακή του τιμή παρουσιάζει αιχμή. Η καμπύλη της ροής των ρευμάτων στις μπαταρίες που προκύπτει από την εφαρμογή του προγράμματος παρουσιάζεται στο «Σχήμα 6.3» και η διακύμανση του φορτίου των μπαταριών στο «Σχήμα 6.4».

Κεφάλαιο 6 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα (intelligent agent)



«Σχήμα 6.3, η ροή των ρευμάτων στις μπαταρίες μετά την εφαρμογή του προγράμματος-πράκτορα για τις 27 Αυγούστου 2009»



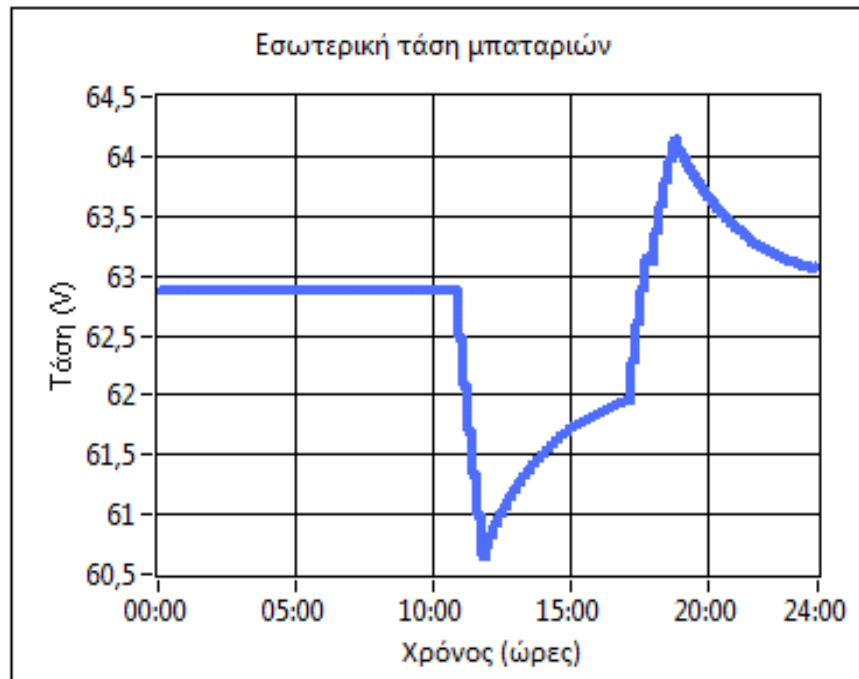
«Σχήμα 6.4, η εξέλιξη του φορτίου των μπαταριών σύμφωνα με το KiBaM, για το σενάριο λειτουργίας που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3»

Από το «Σχήμα 6.3» διαπιστώνουμε ότι πρώτα διοχετεύεται φορτίο στο δίκτυο και στη συνέχεια το φορτίο αυτό αναπληρώνεται από την παραγωγή των Φ/Β. Το συνολικό

**Κεφάλαιο 6 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα (intelligent agent)**

φορτίο των μπαταριών στο τέλος της ημέρας είναι όσο και στην αρχή της, διοχετεύθηκε δηλαδή στο δίκτυο ακριβώς όσο φορτίο αποθηκεύτηκε. Αυτό φαίνεται και από το «Σχήμα 6.4» όπου το συνολικό φορτίο  $Q_{TOT}$  στο τέλος της ημέρας επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα. Για την προσομοίωση αυτή, θεωρήθηκε ότι το αρχικό επίπεδο φόρτισης των μπαταριών είναι στο 80%.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διακύμανση της εσωτερικής τάσης των μπαταριών που παρουσιάζεται στο «Σχήμα 6.5». Υπενθυμίζεται ότι η εσωτερική τάση εξαρτάται από το φαινόμενο φορτίο  $Q_1$ .



«**Σχήμα 6.5**, η εξέλιξη της εσωτερικής τάσης των μπαταριών σύμφωνα με το KiBaM, για το σενάριο λειτουργίας που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3»

Στο «Σχήμα 6.5» παρατηρούμε ότι στο τέλος της ημέρας η τάση είναι υψηλότερη από ότι στην αρχή της αν και το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών έχει επανέλθει στο αρχικό επίπεδο. Αυτό συμβαίνει διότι η εσωτερική τάση των μπαταριών εξαρτάται από το φαινόμενο φορτίο και όχι από το ολικό [15]. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το φαινόμενο φορτίο  $Q_1$  αυξήθηκε ραγδαία. Όταν σταμάτησε η φόρτιση, αυτό άρχισε να μειώνεται αφού το φορτίο αποθηκεύεται σταδιακά στους χημικούς δεσμούς, αυξάνοντας το φορτίο  $Q_2$ . Όταν επανέλθει η ισορροπία, τα ποσοστά του  $Q_1$  και του  $Q_2$  θα ταυτιστούν και η εσωτερική τάση των μπαταριών θα επανέλθει στα αρχικά της επίπεδα.

Τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του ευφυούς πράκτορα, καθώς και το μέγιστο και το ελάχιστο φαινόμενο φορτίο των μπαταριών, παρουσιάζονται στον «Πίνακα 6.1». Από αυτά συγκρατούμε την αύξηση των εσόδων κατά 9.41% από τη χρήση του πράκτορα, παρόλο που τελικά διοχετεύθηκε στο δίκτυο ενέργεια κατά 3.18% μειωμένη.

Μεγέθη	Τιμές
Παραγόμενη Ενέργεια	6,91 kWh
Ενέργεια που διοχετεύθηκε στο δίκτυο	6,69 kWh
Απώλειες μετατροπής	3,18%
Έσοδα χωρίς χρήση του ευφυούς πράκτορα	0,478 €
Έσοδα με χρήση του ευφυούς πράκτορα	0,523 €
Αύξηση εσόδων	9,41%
Χαμηλότερο επίπεδο φαινόμενου φορτίου μπαταριών ως ποσοστό επί του μέγιστου φαινόμενου φορτίου για πλήρως φορτισμένες μπαταρίες	68,85%
Υψηλότερο επίπεδο φαινόμενου φορτίου μπαταριών ως ποσοστό επί του μέγιστου φαινόμενου φορτίου για πλήρως φορτισμένες μπαταρίες	86,21%

«Πίνακας 6.1, μεγέθη που προκύπτουν από την εφαρμογή του προγράμματος-πράκτορα για τις 27 Αυγούστου 2009»

### 6.3.2. Τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του προγράμματος-πράκτορα για ένα χρόνο

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, αφορούν μία τυχαία μέρα του καλοκαιριού. Η καμπύλη της οριακής τιμής του συστήματος και η ακτινοβολία για αυτή την ημέρα διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τις αντίστοιχες που συναντάμε άλλες μέρες του έτους, όπως προκύπτει από τα δεδομένα που δημοσιεύονται στο χρηματιστήριο ενέργειας Γερμανίας-Αυστρίας (EEX – Phelix) [24] και από τις μετρήσεις ακτινοβολίας που διεξέγονται [17]. Συνεπώς, για να εξαγάγουμε συμπέρασμα για το σύνολο του έτους, πρέπει να εφαρμοστεί το πρόγραμμα για όλες τις εποχές του έτους. Ο χρόνος χωρίστηκε σε τριμηνίες και από κάθε τριμηνία εξετάσαμε μία τυχαία εβδομάδα, ως εξής:

2 έως 8 Δεκεμβρίου για την τριμηνία Νοέμβριος-Δεκέμβριος-Ιανουάριος

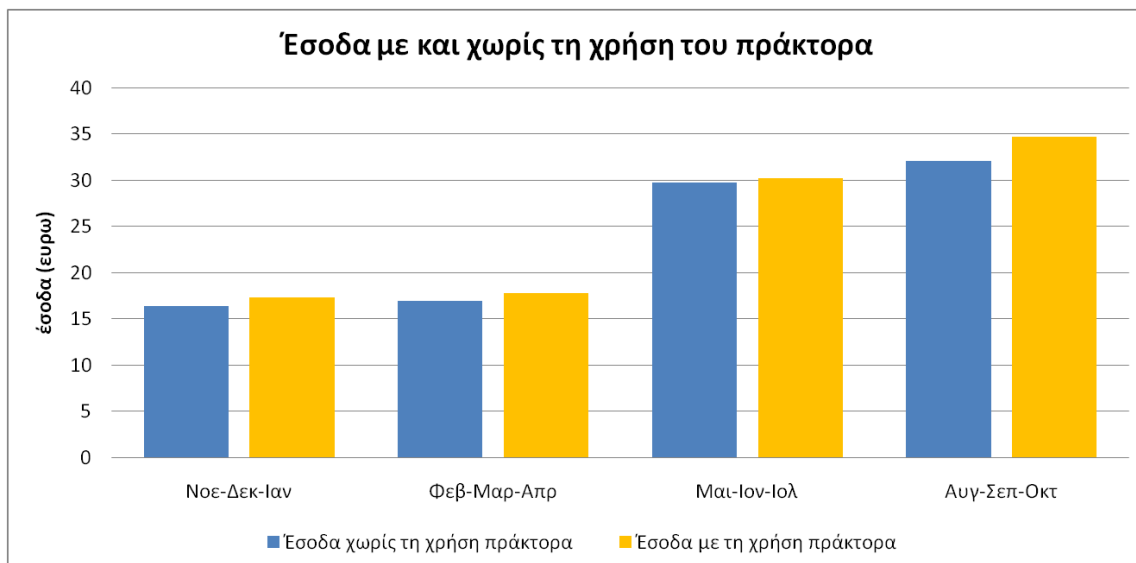
22 έως 28 Μαρτίου για την τριμηνία Φεβρουάριος-Μάρτιος-Απρίλιος

19 έως 25 Ιουνίου για την τριμηνία Μάιος-Ιούνιος-Ιούλιος

24 έως 30 Αυγούστου για την τριμηνία Αύγουστος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος

Τα έσοδα με και χωρίς τη χρήση του ευφυούς πράκτορα για κάθε τριμηνία, παρουσιάζονται στο «Σχήμα 6.6».

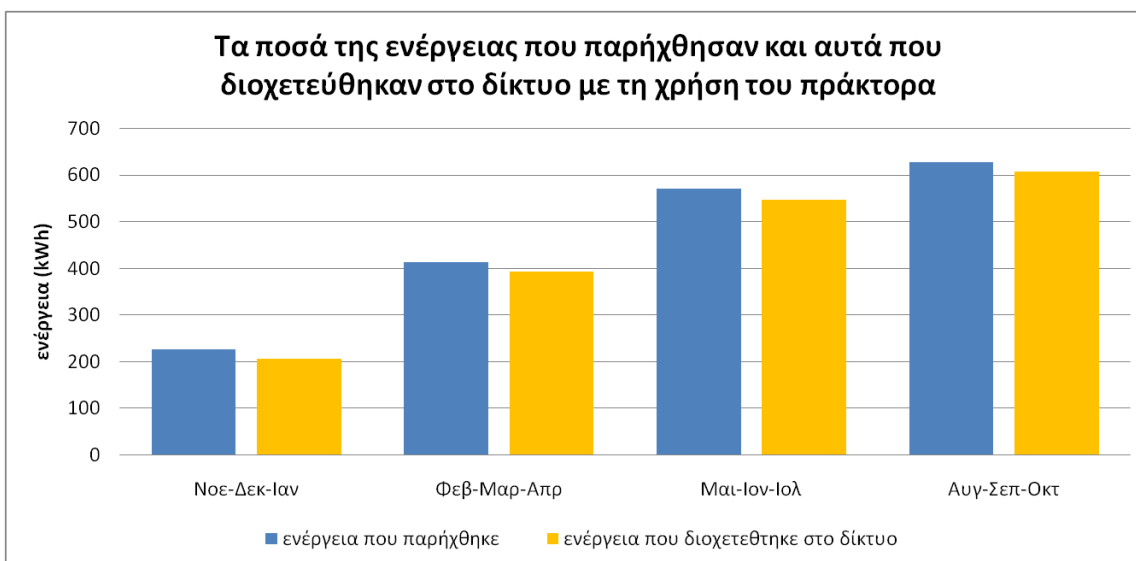
**Κεφάλαιο 6 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα (intelligent agent)**



«**Σχήμα 6.6**, τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας, με και χωρίς τη χρήση ευφυούς πράκτορα για διάστημα ενός έτους»

Από το «Σχήμα 6.6» παρατηρούμε ότι έχουμε μέγιστη αύξηση του κέρδους την τριμηνία Αύγουστος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος. Αυτό συμβαίνει διότι επιλέχθηκε μια εβδομάδα του Αυγούστου ως χαρακτηριστική. Την εβδομάδα αυτή παρατηρήθηκε ότι τις ώρες όπου η ακτινοβολία (άρα η παραγόμενη ενέργεια του Φ/Β) ήταν σε υψηλά επίπεδα, η οριακή τιμή του συστήματος ήταν αρκετά χαμηλή [24]. Συνεπώς προέκυψε μεγαλύτερη διαφορά εσόδων από τη χρήση του ευφυούς πράκτορα.

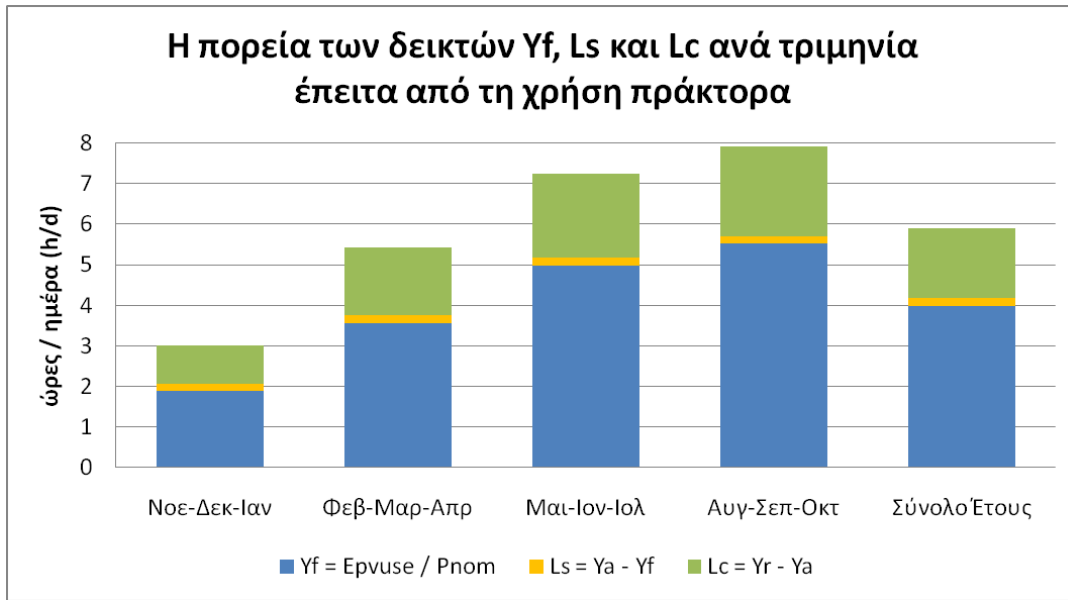
Το ποσό της ενέργειας που παράχθηκε αλλά και αυτό που τελικά διοχετεύθηκε κάθε τριμηνία, παρουσιάζονται στο «Σχήμα 6.7».



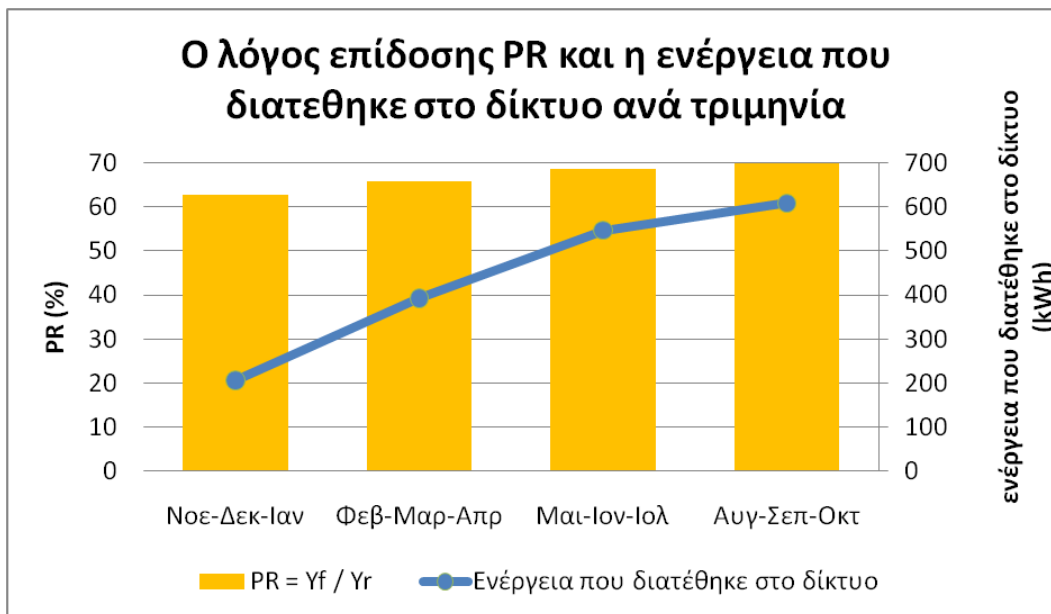
«**Σχήμα 6.7**, τα ποσά της ενέργειας που παρήχθησαν και αυτά που διοχετεύθηκαν στο δίκτυο με τη χρήση του ευφυούς πράκτορα για διάστημα ενός έτους»

**Κεφάλαιο 6 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα (intelligent agent)**

Η απόδοση που προκύπτει για το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου με τη χρήση του ευφυούς πράκτορα, φαίνεται καλύτερα αν χρησιμοποιήσουμε τους δείκτες για την αξιολόγηση μιας Φ/Β εγκατάστασης που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η διακύμανση των δεικτών απόδοσης και απωλειών της εγκατάστασης που προκύπτουν παρουσιάζονται στο «Σχήμα 6.8». Ο λόγος επίδοσης PR παρουσιάζεται στο «Σχήμα 6.9».



«Σχήμα 6.8, η πορεία του δείκτη τελικής απόδοσης  $Y_F$ , του δείκτη απωλειών μετατροπής  $L_C$  και του δείκτη απωλειών συστήματος  $L_S$  έπειτα από τη χρήση ευφυούς πράκτορα στο Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου ΣΗΕ για ένα έτος»



«Σχήμα 6.9, ο λόγος επίδοσης PR και η ενέργεια που διατέθηκε στο δίκτυο έπειτα από τη χρήση ευφυούς πράκτορα στο Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου ΣΗΕ για ένα έτος»

Υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

- $Y_A = Y_F + L_S$
- $Y_R = Y_A + L_C = Y_F + L_S + L_C$
- $PR = \frac{Y_F}{Y_R}$

Όπου:

$Y_R$	η απόδοση αναφοράς
$Y_A$	η απόδοση της εγκατάστασης
$Y_F$	η τελική απόδοση
$L_C$	οι απώλειες μετατροπής
$L_S$	οι απώλειες του συστήματος
PR	ο λόγος επίδοσης του συστήματος

Για το σύνολο του έτους προκύπτει ότι  $Y_R=5.89\text{h/d}$ ,  $Y_A=4.17\text{h/d}$ ,  $Y_F=3.98\text{h/d}$  και  $PR=67.6\%$ .

Από το «Σχήμα 6.8» και το «Σχήμα 6.9» παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραγωγή του Φ/Β συστήματος προκύπτει και την τριμηνία Αύγουστος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιλέχθηκε μία εβδομάδα του Αυγούστου ως χαρακτηριστική, η οποία παρουσίασε υψηλή ηλιοφάνεια. Ο δείκτης επίδοσης κυμαίνεται από το 62% έως το 70%. Όσο υψηλότερος είναι ο λόγος επίδοσης, τόσο καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχουμε.

Συνολικά σε διάστημα ενός έτους, η συνολική παραγωγή AC ενέργειας από το Φ/Β υπολογίζεται σε 1837kWh. Από αυτή την ενέργεια, οι 1754kWh διοχετεύθηκαν στο δίκτυο και η υπόλοιπη χάθηκε κατά τις διαδικασίες της μετατροπής και της αποθήκευσης. Το ποσοστό των απωλειών είναι 4.51%. Αν η παραγόμενη ενέργεια διοχετευόταν κατευθείαν στο δίκτυο, θα προέκυπταν έσοδα 95.2€. Μετά τη χρήση του ευφυούς πράκτορα τα συνολικά έσοδα θα ανέρχονταν σε 100€. Παρατηρείται δηλαδή μια αύξηση των εσόδων 5.05%.

## 6.4. Παρατηρήσεις πάνω στην εφαρμογή του πράκτορα

Το πρόγραμμα που υλοποιεί τον ευφυή πράκτορα, δέχεται ως δεδομένα εισόδου τη διακύμανση της οριακής τιμής του συστήματος και την ισχύ της ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να αναφέρονται στην ίδια μέρα, είναι όμως από διαφορετικές περιοχές. Υπάρχει για παράδειγμα το ενδεχόμενο κάποια μέρα λόγω ψύχους στην κεντρική Ευρώπη, να αυξήθηκε πολύ η κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς η οριακή τιμή του συστήματος να κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα. Την ίδια μέρα όμως στην Ελλάδα μπορεί να επικρατούσε ηλιοφάνεια με αποτέλεσμα η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β να παρουσιάζεται αυξημένη. Συνεπώς τα



αποτελέσματα θα αποκτήσουν περισσότερη αξιοπιστία εφόσον η οριακή τιμή του συστήματος και η ακτινοβολία αφορούν την ίδια περιοχή.

Μία άλλη παρατήρηση έχει να κάνει με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Το πρόγραμμα-πράκτορας εφαρμόζει στις προσομοιώσεις του ένα μοντέλο για κάθε στοιχείο που χρησιμοποιεί. Τα μοντέλα του Φ/Β αντιστροφέα και του μετατροπέα των μπαταριών προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις και ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Τα μοντέλα της ακτινοβολίας και των πανέλων είναι μεν θεωρητικά αλλά επαληθεύτηκαν από πειραματικές μετρήσεις. Το μεν μοντέλο της ακτινοβολίας κρίθηκε ακριβές. Το δε μοντέλο των πανέλων παρουσιάζει μία απόκλιση σχεδόν σταθερή η οποία λήφθηκε υπόψιν στη συνέχεια. Αντίθετα, για το μοντέλο των μπαταριών δεν έχουμε πειραματική επιβεβαίωση. Αυτό συνέβη διότι τα μεγέθη που περιγράφονται είναι αρκετά και η επαλήθευσή τους απαιτεί μία σειρά εξειδικευμένων πειραμάτων. Αυτά τα πειράματα απαιτούν χρόνο και εξειδικευμένες εργαστηριακές υποδομές και ξεφεύγουν από τα πλαίσια αυτής της εργασίας. Επίσης, κατά τις προσομοιώσεις, δε λάβαμε υπόψιν τη γήρανση των μπαταριών και τη θερμοκρασία των μπαταριών θεωρήθηκε ότι παραμένει σταθερή στους 20 °C.

Η υλοποίηση του ευφυούς πράκτορα έγινε με ένα πρόγραμμα σε περιβάλλον LabView [23]. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο περιβάλλον διότι αυτό χρησιμοποιήθηκε εξ αρχής στο στήσιμο της γραμμής ελέγχου του μικροδικτύου. Ο λόγος είναι ότι το LabView γενικά προσφέρεται για την επικοινωνία μετρητικών οργάνων με τον υπολογιστή. Η σύνδεση των μετρητικών οργάνων και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στην επικοινωνία τους με τον υπολογιστή παρουσιάζονται στο *Παράρτημα Α*. Εναλλακτικά, η στρατηγική του πράκτορα θα μπορούσε να υλοποιηθεί με συστήματα που υποστηρίζουν το πρωτόκολλο KNX/EIB [25] ή και άλλα πρωτόκολλα.

## **6.5. Συμπεράσματα**

Σε ένα περιβάλλον όπου η αγορά ενέργειας είναι απελευθερωμένη, η τιμή που αγοράζει ο διαχειριστής του συστήματος την ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής μεταβάλλεται στη διάρκεια της ημέρας. Η τιμή αυτή ονομάζεται οριακή τιμή του συστήματος [19]. Αν υποθέσουμε ότι το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου συμμετέχει σε αυτή την αγορά ισότιμα, τα έσοδά του θα εξαρτώνται από την οριακή τιμή του συστήματος τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια και άρα αυτό παράγει ενέργεια. Έγινε λοιπόν η σκέψη να χρησιμοποιηθεί το σύστημα των μπαταριών ώστε όταν υπάρχει παραγωγή ενέργειας αλλά η οριακή τιμή του συστήματος είναι χαμηλή, αυτή να αποθηκεύεται προκειμένου να διοχετευθεί όταν η οριακή τιμή παρουσιάσει αιχμή.

Το εγχείρημα αυτό είναι σύνθετο διότι υπάρχουν απώλειες κατά τη μετατροπή της ενέργειας από AC σε DC και αντίστροφα, καθώς και στις μπαταρίες. Οι απώλειες αυτές μάλιστα δεν είναι στατικές αλλά εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε σε περιβάλλον LabView [23] ένα πρόγραμμα-πράκτορας για τη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας. Αυτό δέχεται ως δεδομένα εισόδου την ισχύ της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο που αναμένεται την επόμενη μέρα καθώς και

**Κεφάλαιο 6 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που δεν παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα (intelligent agent)**

την διακύμανση της οριακής τιμής του συστήματος. Στη συνέχεια εφαρμόζει τα μοντέλα της ηλιακής ακτινοβολίας, των πανέλων και των μπαταριών, συνυπολογίζοντας ταυτόχρονα τις απώλειες στον Φ/Β αντιστροφέα και στο μετατροπέα των μπαταριών, και αποφασίζει αν και σε ποια ώρα της ημέρας πρέπει να αποθηκευτεί ενέργεια στις μπαταρίες και πότε πρέπει αυτή να διοχετευθεί στο δίκτυο. Οι υπολογισμοί των εισροών και των εκροών γίνονται με βάση το φορτίο (Ah), το οποίο θεωρούμε ότι διατηρείται, και όχι με βάση την ενέργεια η οποία παρουσιάζει απώλειες κατά τις μετατροπές.

Το πρόγραμμα-πράκτορας εφαρμόστηκε για μία τυχαία ημέρα και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματά του. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν 4 εβδομάδες του έτους (μία σε κάθε εποχή) προκειμένου να διαπιστωθεί το επιπλέον ετήσιο έσοδο που προκύπτει από την εφαρμογή του προγράμματος. Στη διάρκεια ενός έτους, υπολογίστηκε ότι η παραγωγή από τα Φ/Β θα ανερχόταν σε 1837kWh, εκ των οποίων θα διοχετευόταν στο δίκτυο 1754kWh. Οι απώλειες μετατροπής στο σύστημα των μπαταριών είναι 4.51%. Χωρίς τη χρήση του ευφυούς πράκτορα θα προέκυπταν έσοδα 95.2 ευρώ ενώ με τη χρήση αυτού τα έσοδα θα αυξάνονταν κατά 5.05% και θα ανέρχονταν σε 100 ευρώ. Παρατηρούμε συνεπώς ότι παρόλο που έχουμε διοχέτευση λιγότερης ενέργειας στο δίκτυο, αυτή πωλείται σε σημαντικά μεγαλύτερη τιμή και τελικά προκύπτουν περισσότερα έσοδα.

## Κεφάλαιο 7

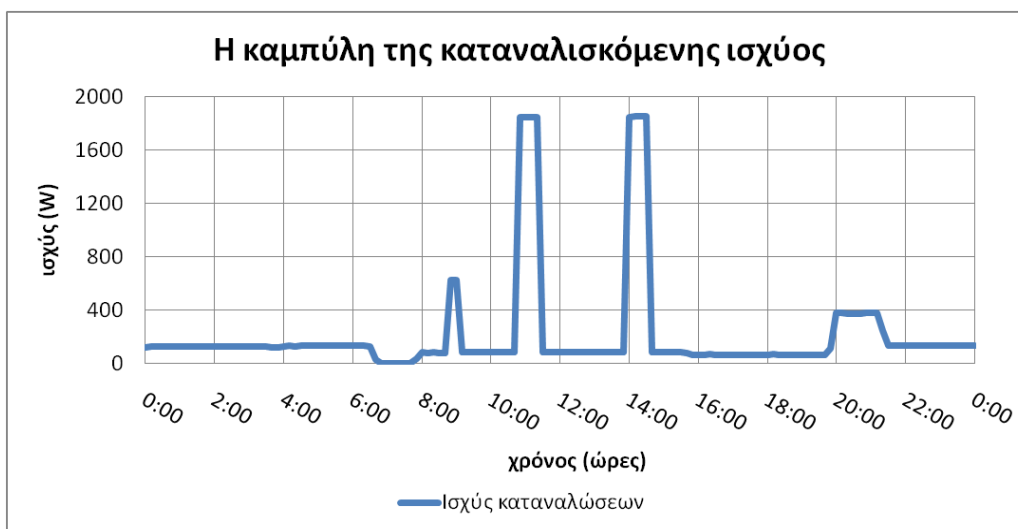
### Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η ένταξη στην αγορά ενέργειας ενός μικροδικτύου, στο οποίο όμως δεν υπάρχουν καταναλώσεις ενέργειας. Στην περίπτωση που υπάρχει ένα φορτίο το οποίο πρέπει να εξυπηρετηθεί από το μικροδίκτυο, τότε έχουμε να αντιμετωπίσουμε ένα αρκετά διαφορετικό πρόβλημα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία προσπάθεια να εκτιμηθεί η επίπτωση που επιφέρει η ύπαρξη ενός φορτίου στην ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας. Η μελέτη γίνεται για μία εβδομάδα του καλοκαιριού από την οποία μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη λειτουργία του συστήματος ολόκληρο το χρόνο. Συγκεκριμένα, η μελέτη αφορά την εβδομάδα από 24 έως 30 Αυγούστου, η οποία μελετήθηκε και στο Κεφάλαιο 6. Η ηλεκτρική ενέργεια που θα παρήγαγε το μικροδίκτυο αυτές τις μέρες με βάση την ακτινοβολία που μετρήθηκε στο Γέρακα [17] παρουσιάζεται στον «Πίνακα 7.1».

Ημέρα	24-Αυγ	25-Αυγ	26-Αυγ	27-Αυγ	28-Αυγ	29-Αυγ	30-Αυγ
Παραγωγή (Wh)	6918	6821	6900	6952	7122	6909	6732

«Πίνακας 7.1, η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β σύστημα του εργαστηρίου από 24 έως 30 Αυγούστου 2009»

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, για λόγους ευκολίας θεωρήθηκε ένα σταθερό προφίλ. Πρόκειται για την κατανάλωση που μετρήθηκε στο βιβλιοπωλείο του Γέρακα στις 27 Αυγούστου 2009 [17]. Η καμπύλη ισχύος αυτής παρουσιάζεται στο «Σχήμα 7.1».



«Σχήμα 7.1, το προφίλ που επιλέχθηκε ως ιδιοκατανάλωση του μικροδικτύου»

Το σύνολο της καταναλισκόμενης ενέργειας ισούται με 5146Wh.

Από τον «Πίνακα 7.1» παρατηρούμε ότι η παραγωγή είναι πάντα αρκετά μεγαλύτερη από την κατανάλωση. Αυτό το γεγονός αποτελεί ένδειξη ότι το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει και αυτόνομα τις ημέρες αυτές, εάν το επιθυμούμε. Για να δούμε αν πράγματι αυτό μπορεί να συμβεί, πρέπει να εξεταστούν και οι απώλειες ενέργειας στο σύστημα των μπαταριών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις πολιτικές ένταξης του μικροδικτύου στο εθνικό δίκτυο προκειμένου να γίνει μια συγκριτική μελέτη. Η ένταξη θα γίνεται με βάση τις οριακές τιμές του ευρωπαϊκού χρηματιστηρίου της ενέργειας (EEX - Phelix) για τις αντίστοιχες ημέρες [24].

## 7.1. Πρώτο σενάριο: Ανεξάρτητη ένταξη παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας χωρίς τη χρήση ευφυούς πράκτορα

Αυτή η πολιτική ένταξης είναι η απλούστερη. Έχουμε δύο ανεξάρτητους μετρητές ενέργειας, έναν που μετράει την ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο από το Φ/Β και έναν που μετράει αυτή που αγοράζεται για την εξυπηρέτηση των καταναλώσεων. Ασφαλώς πρόκειται για έξυπνους μετρητές που αλλάζουν την τιμολόγηση ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Η ενέργεια πωλείται στο δίκτυο όταν αυτή παράγεται, χωρίς τη χρήση πράκτορα και συστήματος μπαταριών. Οι υπολογισμοί γίνονται με την παραδοχή ότι οι τιμές αγοράς και πώλησης της kWh στο δίκτυο είναι ανά πάσα στιγμή ίσες μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα για την εβδομάδα του καλοκαιριού που μελετάμε παρουσιάζονται στον «Πίνακα 7.2».

Ημέρα	24/8	25/8	26/8	27/8	28/8	29/8	30/8	Σύνολο
Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)	6,92	6,82	6,90	6,95	7,12	6,91	6,73	48,36
Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	36,03
Έσοδα από πώληση ενέργειας (ευρώ)	0,413	0,481	0,417	0,482	0,322	0,255	0,110	2,480
Έξοδα για αγορά ενέργειας (ευρω)	0,283	0,348	0,312	0,358	0,240	0,195	0,100	1,836
Κέρδη (ευρω)	0,131	0,133	0,105	0,124	0,082	0,061	0,009	0,644

«Πίνακας 7.2, τα αποτελέσματα από την ανεξάρτητη ένταξη μονάδων παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας χωρίς τη χρήση ευφυούς πράκτορα»

Από τον «Πίνακα 7.2» συγκρατούμε τα τελικά κέρδη που ανέρχονται σε 0.644 ευρώ για το σύνολο της εβδομάδας.

## 7.2. Δεύτερο σενάριο: Ανεξάρτητη ένταξη παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα

Σε αυτό το σενάριο ένταξης υπάρχουν και πάλι δύο έξυπνοι μετρητές. Ο ένας μετράει την ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο για την εξυπηρέτηση των καταναλώσεων. Η διαφορά είναι ότι η πώληση της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο γίνεται με χρήση ευφυούς πράκτορα, όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6. Υπενθυμίζεται ότι πολιτική του πράκτορα είναι να αποθηκεύει την ενέργεια που παράγεται όταν η οριακή τιμή του συστήματος είναι χαμηλή και να τη διοχετεύει στο δίκτυο όταν η οριακή του τιμή παρουσιάσει αιχμή. Τα αποτελέσματα για την εβδομάδα του καλοκαιριού που μελετήθηκε παρουσιάζονται στον «Πίνακα 7.3».

Ημέρα	24/8	25/8	26/8	27/8	28/8	29/8	30/8	Σύνολο
Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)	6,92	6,82	6,90	6,95	7,12	6,91	6,73	<b>48,36</b>
Ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο (kWh)	6,72	6,58	6,65	6,69	6,92	6,7	6,53	<b>46,79</b>
Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	<b>36,03</b>
Έσοδα από πώληση ενέργειας (ευρω)	0,43	0,525	0,449	0,523	0,338	0,263	0,14	<b>2,668</b>
Έξοδα για αγορά ενέργειας (ευρω)	0,283	0,348	0,312	0,358	0,240	0,195	0,100	<b>1,836</b>
Κέρδη (ευρω)	0,147	0,177	0,137	0,165	0,098	0,068	0,040	<b>0,832</b>

«Πίνακας 7.3, τα αποτελέσματα από την ανεξάρτητη ένταξη μονάδων παραγωγής και κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα»

Από τα αποτελέσματα του «Πίνακα 7.3», βλέπουμε ότι τα κέρδη ανέρχονται σε 0.832 ευρώ. Εφόσον τα έξοδα για την αγορά ενέργειας είναι όσα και στο προηγούμενο σενάριο, έχει περισσότερη αξία να σταθούμε στα έσοδα. Αυτά ανήλθαν σε 2.67 ευρώ, παρουσιάζοντας μία αύξηση 7.58% σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Σημειώνεται ότι για τη λειτουργία του συστήματος των μπαταριών, θεωρήθηκε ότι το αρχικό φορτίο των μπαταριών ήταν στο 80% του μεγίστου.

### 7.3. Τρίτο σενάριο: Η παραγωγή καλύπτει το σύνολο των καταναλώσεων και η επιπλέον ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο με τη χρήση ευφυούς πράκτορα

Στην περίπτωση αυτή, το μικροδίκτυο πουλάει ενέργεια στο εθνικό δίκτυο αλλά δεν αγοράζει από αυτό. Συνεπώς θα πρέπει να καλύψει το σύνολο των καταναλώσεών του με δικά του μέσα και στη συνέχεια να πουλήσει στο δίκτυο την ενέργεια που περισσεύει. Εδώ είναι απαραίτητη η χρήση του συστήματος των μπαταριών προκειμένου να εξασφαλίζεται η ροή ενέργειας στα φορτία τις ώρες που το Φ/Β σύστημα δεν παράγει.

Σε αυτό το σενάριο, την πρώτη ημέρα το μικροδίκτυο δεν διοχετεύει καθόλου ενέργεια στο δίκτυο. Στο τέλος της ημέρας παρατηρείται μία αύξηση του φορτίου στις μπαταρίες. Την επόμενη ημέρα, με τη χρήση ευφυούς πράκτορα, διοχετεύεται ενέργεια που αντιστοιχεί σε αυτό το φορτίο όταν η οριακή τιμή του συστήματος παρουσιάσει αιχμή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται για όλη την εβδομάδα που μελετάμε. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον «Πίνακα 7.4». Η αρχική φόρτιση των μπαταριών θεωρήθηκε και πάλι ότι ήταν στο 80%. Η ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο την πρώτη μέρα της προσομοίωσης (24 Αυγούστου), είναι αυτή που περισσεύει από τη λειτουργία του συστήματος την προηγούμενη ημέρα (23 Αυγούστου).

Ημέρα	24/8	25/8	26/8	27/8	28/8	29/8	30/8	Σύνολο
Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)	6,92	6,82	6,90	6,95	7,12	6,91	6,73	<b>48,36</b>
Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	<b>36,03</b>
Απώλειες Ενέργειας (kWh)	1,27	1,29	1,29	1,30	1,28	1,28	1,31	<b>9,03</b>
Ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο (kWh)	0,45	0,41	0,43	0,48	0,64	0,55	0,31	<b>3,28</b>
Κέρδη (ευρω)	0,037	0,036	0,039	0,047	0,039	0,022	0,008	<b>0,229</b>

«Πίνακας 7.4, τα αποτελέσματα από την πλήρη εξυπηρέτηση του φορτίου από το σύστημα των μπαταριών και τη διοχέτευση της επιπλέον ενέργειας στο δίκτυο με τη χρήση ευφυούς πράκτορα»

Από τον «Πίνακα 7.4» φαίνεται ότι οι απώλειες είναι αρκετά υψηλές και φτάνουν στο 18.67% της παραγόμενης ενέργειας. Εναλλακτικά μπορούμε να πούμε ότι οι απώλειες αυξάνουν τη μέση ισχύ της κατανάλωσης κατά 25.06%. Αυτό οφείλεται, όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 5, κυρίως στις μετατροπές ενέργειας από AC σε DC και αντίστροφα

και λιγότερο στην εσωτερική αντίσταση των μπαταριών. Ο λόγος που είναι τόσο υψηλές είναι ότι ο μετατροπέας των μπαταριών εργάζεται τις περισσότερες ώρες της ημέρας μακριά από τα ονομαστικά του μεγέθη. Στο σύνολο της εβδομάδας έχουν διοχετευθεί στο δίκτυο μόλις 3.28kWh οι οποίες απέφεραν κέρδη 0.228 ευρώ.

Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή του τρίτου σεναρίου, η πολιτική του πράκτορα δεν υλοποιήθηκε αυτόματα με κάποιο πρόγραμμα σε υπολογιστή. Το πλάνο διαχείρισης της ενέργειας προέκυψε για κάθε ημέρα ξεχωριστά, μέσα από τον έλεγχο του χειριστή του υπολογιστή κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων της εξέλιξης του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών.

## **7.4. Σύγκριση των σεναρίων και συμπεράσματα**

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των τριών σεναρίων για το σύνολο της εβδομάδας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον «Πίνακα 7.5»

<b>Καθεστώς ένταξης στην Αγορά Ενέργειας</b>	<b>1<sup>ο</sup> σενάριο</b>	<b>2<sup>ο</sup> σενάριο</b>	<b>3<sup>ο</sup> σενάριο</b>
<b>Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)</b>	48,36	48,36	48,36
<b>Ενέργεια που προμηθεύεται από το δίκτυο (kWh)</b>	36,03	36,03	0
<b>Απώλειες Ενέργειας (kWh)</b>	0	1,57	9,03
<b>Ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο (kWh)</b>	48,36	46,79	3,28
<b>Κέρδη (ευρω)</b>	0,644	0,832	0,229

«**Πίνακας 7.5**, σύγκριση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή για μία εβδομάδα των τριών σεναρίων ένταξης του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας»

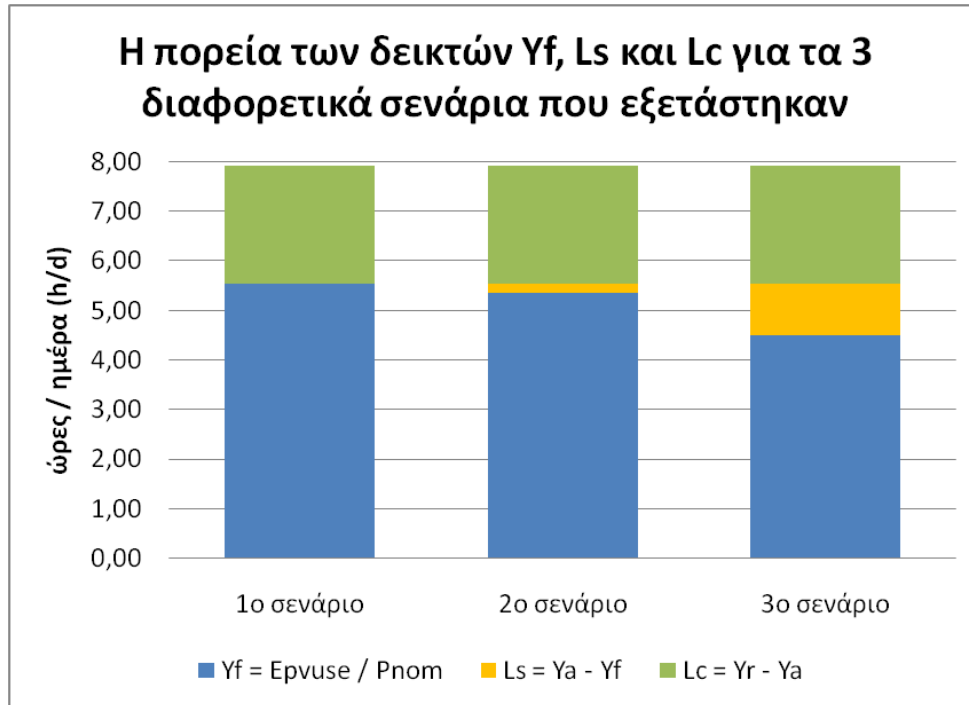
Από τη συγκριτική μελέτη των τριών σεναρίων, βλέπουμε ότι περισσότερα κέρδη προκύπτουν όταν η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο με τη χρήση ευφυούς πράκτορα. Ωστόσο αυτό απαιτεί εκτός από το Φ/Β σύστημα, και την αγορά του συστήματος των μπαταριών η οποία είναι αρκετά δαπανηρή. Το γεγονός αυτό αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην εφαρμογή αυτού του σεναρίου. Αντιθέτως, αν βρίσκεται ήδη εγκατεστημένο ένα τέτοιο σύστημα (λόγου χάρη για εφεδρεία σε περίπτωση διακοπής ρεύματος) συμφέρει σαφώς η χρησιμοποίησή του για την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου.

Στο τρίτο σενάριο, το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί μεγάλες απώλειες ενέργειας στο σύστημα των μπαταριών και συνεπώς τα κέρδη παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Σε πρώτη ανάγνωση, η εφαρμογή αυτού του σεναρίου δε συμφέρει. Ωστόσο είναι πιθανόν να οδηγηθούμε στην εφαρμογή ενός τέτοιου σεναρίου στην περίπτωση που το πλαίσιο της αγοράς ενέργειας δεν επιτρέπει σε αυτοπαραγωγούς να αγοράζουν ενέργεια από το εθνικό δίκτυο. Σε αυτό το

## Κεφάλαιο 7 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας

ενδεχόμενο, για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου θα απαιτηθεί η εγκατάσταση ενός συστήματος μπαταριών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των τριών σεναρίων με τη βοήθεια των δεικτών αξιολόγησης μιας Φ/Β εγκατάστασης που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Οι δείκτες απόδοσης και απωλειών της εγκατάστασης που προκύπτουν από την εφαρμογή των τριών σεναρίων για τη συγκεκριμένη εβδομάδα, παρουσιάζονται στο «Σχήμα 7.2».



«**Σχήμα 7.2**, ο δείκτης τελικής απόδοσης  $Y_f$ , ο δείκτης απωλειών μετατροπής  $L_c$  και ο δείκτης απωλειών συστήματος  $L_s$  που προκύπτουν από την εφαρμογή για μία εβδομάδα των τριών σεναρίων ένταξης του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας»

Υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

- $Y_A = Y_f + L_s$
- $Y_R = Y_A + L_c = Y_f + L_s + L_c$

Όπου:

- $Y_R$  η απόδοση αναφοράς
- $Y_A$  η απόδοση της εγκατάστασης
- $Y_f$  η τελική απόδοση
- $L_c$  οι απώλειες μετατροπής
- $L_s$  οι απώλειες του συστήματος

Από το «Σχήμα 7.2, παρατηρούμε ότι και στα 3 σενάρια η απόδοση αναφοράς  $Y_R$  και οι απώλειες μετατροπής  $L_c$  είναι κοινές. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και τα 3 σενάρια αναφέρονται στην παραγωγή ενέργειας από το Φ/Β σύστημα κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Αυτό που διαφέρει σημαντικά είναι οι απώλειες του συστήματος  $L_s$ .



## **Κεφάλαιο 7 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας**

Υπενθυμίζεται ότι αυτές αφορούν τις απώλειες ενέργειας από την έξοδο του Φ/Β αντιστροφέα μέχρι τον καταναλωτή.

Στο πρώτο σενάριο δεν έχουμε απώλειες συστήματος. Ο λόγος είναι ότι θεωρούμε ότι ο καταναλωτής συνδέεται απευθείας στην έξοδο του αντιστροφέα. Στο δεύτερο σενάριο εμφανίζονται απώλειες συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι μέρος της ενέργειας χάνεται στις μετατροπές ενέργειας στο σύστημα των μπαταριών. Οι μετατροπές αυτές απαιτούνται για την εφαρμογή της πολιτικής ένταξης από τον ευφυή πράκτορα. Οι απώλειες που προκύπτουν είναι σχετικά μικρές διότι ένα μικρό μέρος της παραγόμενης ενέργειας συμφέρει να αποθηκευτεί στις μπαταρίες προκειμένου να διατεθεί στο δίκτυο όταν η οριακή τιμή του συστήματος παρουσιάσει αιχμή. Στο τρίτο σενάριο οι απώλειες συστήματος είναι αρκετά αυξημένες. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα των μπαταριών πρέπει να καλύψει μόνο του τις ανάγκες του φορτίου του. Συνεπώς, έχουμε αποθήκευση ενός πολύ μεγάλου μέρους της ενέργειας που παράγεται και αυτό προκαλεί σημαντικές απώλειες ενέργειας στο σύστημα των μπαταριών.

Η σύγκριση των τριών σεναρίων έγινε πιλοτικά για μία εβδομάδα του έτους. Αυτή η εβδομάδα είχε την ιδιαιτερότητα ότι υπήρχε συνεχής ηλιοφάνεια και η παραγωγή ενέργειας του Φ/Β συστήματος ήταν σημαντικά υψηλότερη από την κατανάλωση. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στο μικροδίκτυο να λειτουργήσει αυτόνομα και συνεπώς να μπορέσει να εξεταστεί η εφαρμογή και του τρίτου σεναρίου. Τις υπόλοιπες εποχές του χρόνου, το προφίλ της κατανάλωσης αναμένεται να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό [17]. Επίσης, θα διαφέρει πολύ και η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β σύστημα και μάλιστα συχνά θα είναι αρκετά μικρότερη από την καταναλισκόμενη ενέργεια. Συνεπώς, για να έχουμε δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας, θα έπρεπε να επιλεγεί εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος μεγαλύτερης ισχύος, συστήματος μπαταριών με μεγαλύτερη χωρητικότητα και ενδεχομένως ενός Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους για εφεδρεία. Ταυτόχρονα θα πρέπει να εξεταστούν θέματα που αφορούν την αξιοπιστία του όλου συστήματος. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συνθέτουν ένα πρόβλημα διαστασιολόγησης η λύση του οποίου ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Αυτό που θα πρέπει να κρατήσουμε από την εφαρμογή του τρίτου σεναρίου είναι το γεγονός ότι οι απώλειες στο σύστημα των μπαταριών αυξάνουν την ισχύ των καταναλώσεων κατά 25.06%, γεγονός που σαφώς πρέπει να συνεκτιμηθεί στη διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος.

**Κεφάλαιο 7 – Η ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που παρουσιάζει ιδιοκατανάλωση ενέργειας**

## Κεφάλαιο 8

# Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

### 8.1. Συμπεράσματα

Συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του μικροδικτύου και την ένταξη αυτού στην αγορά ενέργειας, παρουσιάζονται ακολούθως:

1. Η χρήση **μοντέλων για την ηλιακή ακτινοβολία** είναι απαραίτητη για την εύρεση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα Φ/Β πανέλα προκειμένου να αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά τους. Αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν δύο μοντέλα, το HDKR και το Perez. Από τη σύγκριση των τιμών που προβλέπουν με τις αντίστοιχες πειραματικές διαπιστώσαμε ότι το Perez είναι ελαφρώς ακριβέστερο. Συγκεκριμένα το μοντέλο Perez είχε μέσο σφάλμα  $1.1\text{W/m}^2$  και μέσο όρο των απολύτων τιμών των σφαλμάτων  $25.3\text{W/m}^2$ . Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο HDKR είχε μέσο σφάλμα  $17.6\text{W/m}^2$  και μέσο όρο των απολύτων τιμών των σφαλμάτων  $29.4\text{W/m}^2$ .
2. Η **καμπύλη απόδοσης του Φ/Β αντιστροφέα Sunny Boy 1100 της SMA** είναι αυτή που περιγράφεται από το «Σχήμα 3.2» και τον «Πίνακα 3.2», όπως προσδιορίστηκε με βάση το πρότυπο IEC 61683. Η απόδοσή του κυμαίνεται από 72.9% μέχρι 92.4%. Όταν εργάζεται σε επίπεδο φόρτισης άνω του 20% του ονομαστικού του, η απόδοση είναι σταθερά μεγαλύτερη από 90%.
3. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα των πανέλων δε μας βοηθά να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά των πανέλων I-110/12 της Isofoton. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε το **μοντέλο προσομοίωσης των πανέλων** που συστήνεται από το πρότυπο EN 50530. Κατά την εφαρμογή του και τη σύγκριση των τιμών που προέβλεπε με τις αντίστοιχες πειραματικές, διαπιστώθηκε ότι υπερεκτιμά την παραγόμενη ισχύ των πανέλων κατά 11.8%.
4. Η **καμπύλη απόδοσης του μετατροπέα μπαταριών Sunny Island 4500 της SMA** προσδιορίστηκε πειραματικά, τόσο κατά τη λειτουργία του ως ανορθωτής, όσο και ως αντιστροφέας. Ο προσδιορισμός της απόδοσης έγινε με πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των σφαλμάτων της προσέγγισης αυτής είναι 1.37% κατά τη λειτουργία του ως ανορθωτής και 0.46% κατά τη λειτουργία του ως αντιστροφέας. Στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη απόδοση που μετρήθηκε είναι το 90% ενώ στη δεύτερη 96%.

5. Από την εφαρμογή του **μοντέλου των μπαταριών KiBaM** (Kinetic Battery Model) προκύπτει για τις μπαταρίες του εργαστηρίου ότι η συνολική εσωτερική τους αντίσταση είναι  $R_0=0.1071\Omega$ , το μέγιστο φορτίο τους  $Q_{\max}=393Ah$ , η ελάχιστη εσωτερική τους τάση  $E_{\min}^{tot} = 46.8V$  και η μέγιστη  $E_{\max}^{tot} = 66.9V$ . Από την εφαρμογή του μοντέλου για ένα πραγματικό σενάριο αυτόνομης λειτουργίας του μικροδικτύου, προκύπτει ότι οι συνολικές απώλειες στο σύστημα των μπαταριών ανήλθαν σε 1363Wh, αυξάνοντας στην ουσία την ισχύ των καταναλώσεων κατά 26.5%.
6. **Η ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας** έγινε με βάση την οριακή τιμή του συστήματος που προκύπτει από το EEX (European Energy Exchange). Αρχικά θεωρήθηκε ότι **δεν υπήρχαν καταναλώσεις** από το μικροδίκτυο. Αναπτύχθηκε σε περιβάλλον LabView ένας **ευφυής πράκτορας** (intelligent agent) ο οποίος όταν η οριακή τιμή του συστήματος είναι χαμηλή, θα αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β σύστημα στις μπαταρίες προκειμένου να τη διαθέσει όταν η οριακή του τιμή παρουσιάσει αιχμή. Στη διάρκεια ενός έτους, υπολογίστηκε ότι η παραγωγή από τα Φ/Β θα ανερχόταν σε 1837kWh, εκ των οποίων θα διοχετευόταν στο δίκτυο 1754kWh. Οι απώλειες μετατροπής που προκύπτουν στο σύστημα των μπαταριών είναι 4.51%. Χωρίς τη χρήση του ευφυούς πράκτορα θα προέκυπταν έσοδα 95.2 ευρώ ενώ με τη χρήση αυτού τα έσοδα θα αυξάνονταν κατά 5.05% και θα ανέρχονταν σε 100 ευρώ.
7. Για την **ένταξη στην αγορά ενέργειας μικροδικτύου που παρουσιάζει κατανάλωση ενέργειας** εξετάστηκαν **τρία σενάρια** για χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας. Στο πρώτο, η παραγωγή διοχετευόταν στο δίκτυο ως είχε και για την εξυπηρέτηση των φορτίων προμηθευόταν εκ νέου ενέργεια από το δίκτυο. Από το σενάριο αυτό προέκυψαν κέρδη 0.644€. Χρήση αυτού του σεναρίου γίνεται όταν το πλαίσιο της αγοράς ενέργειας επιτρέπει σε αυτοπαραγωγούς να αγοράζουν ενέργεια από το δίκτυο. Στο δεύτερο σενάριο, πάλι τα φορτία εξυπηρετούσαν ανεξάρτητα από την παραγωγή, αλλά η παραγωγή διοχετευόταν στο δίκτυο με χρήση του ευφυούς πράκτορα που αναπτύχθηκε. Από το σενάριο αυτό προέκυψαν κέρδη 0.832€. Το σενάριο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί εάν οι κανονισμοί της αγοράς ενέργειας επιτρέπουν σε αυτοπαραγωγούς να αγοράζουν ενέργεια από το δίκτυο αλλά παράλληλα υπάρχει και σύστημα μπαταριών εγκατεστημένο στο μικροδίκτυο. Τέλος, στο τρίτο σενάριο, το μικροδίκτυο κάλυπτε με δικά του μέσα το σύνολο του φορτίου και διοχέτευε στο δίκτυο το περίσσειμα της ενέργειας με τη χρήση ευφυούς πράκτορα. Από το τρίτο σενάριο προέκυψαν κέρδη 0.229€. Το σενάριο αυτό είμαστε αναγκασμένοι να το εφαρμόσουμε εάν το πλαίσιο της αγοράς ενέργειας δεν επιτρέπει σε αυτοπαραγωγούς να αγοράζουν ενέργεια από το εθνικό δίκτυο αλλά μόνο να πωλούν.

## 8.2. Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η παρούσα διπλωματική εργασία αγγίζει αρκετούς τομείς και συνεπώς δεν είναι δυνατόν να εμβαθύνει σε όλους. Περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να διεξαχθεί στους παρακάτω τομείς:

- 1. Στο μοντέλο της ακτινοβολίας.** Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6, απαιτεί προβλέψεις ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για την επόμενη μέρα. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου πρόβλεψης θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον και θα καθιστούσε άμεσα εφαρμόσιμο το πρόγραμμα διαχείρισης.
- 2. Στο μοντέλο των πανέλων.** Το μοντέλο των πανέλων που αναπτύχθηκε, προέκυψε ότι υπερεκτιμά την απόδοση των πανέλων. Θα μπορούσε να εφαρμοστεί το μοντέλο αυτό και σε άλλες εγκαταστάσεις για να διαπιστώσουμε αν η απόκλιση αυτή οφείλεται σε παραμέτρους που αφορούν την εγκατάσταση του δικού μας μικροδικτύου, σε κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της Isofoton, στη γήρανση των πανέλων ή σε σφάλμα του μοντέλου. Επίσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί ένα μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας των πανέλων, που θα καθιστούσε τις προβλέψεις για την παραγωγή τους σημαντικά πιο ακριβείς.
- 3. Στην απόδοση του μετατροπέα των μπαταριών.** Η εύρεση της καμπύλης απόδοσης του μετατροπέα έγινε με μετρήσεις στο εργαστήριο κατά τη λειτουργία του και όχι με βάση κάποιο πρότυπο. Θα είχε ενδιαφέρον επανάληψη του υπολογισμού της απόδοσης με βάση κάποιο πρότυπο, όπως έγινε και με τον Φ/Β αντιστροφέα. Θα πρέπει να σημειωθεί βεβαίως, ότι σε αντίθεση με τα AC συστήματα, στα DC δεν υπάρχουν πρότυπα που να επιβάλουν κάποιους κανόνες λειτουργίας. Συνεπώς θα πρέπει πρώτα να αναπτυχθούν αντίστοιχα πρότυπα και στη συνέχεια να υπολογιστεί με ακρίβεια η απόδοση του μετατροπέα βάσει αυτών.
- 4. Στο μοντέλο των μπαταριών.** Η ανάπτυξη του μοντέλου στηρίχθηκε στα δεδομένα που μας έδωσε ο κατασκευαστής και όχι σε πειράματα στο εργαστήριο. Η διεξαγωγή των απαιτούμενων πειραμάτων θα έδινε ένα αρκετά πιο αξιόπιστο μοντέλο και θα μπορούσε να μας οδηγήσει σε συμπεράσματα για τη μεταβολή της συμπεριφοράς των μπαταριών κατά τη γήρανσή τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η εξέταση διαφορετικών μοντέλων για τις μπαταρίες. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να γίνει μία συγκριτική μελέτη διαφορετικών μοντέλων και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβειά τους.
- 5. Στον ευφυή πράκτορα.** Το πρόγραμμα που υλοποιεί τον ευφυή πράκτορα αποφασίζει αν ο μετατροπέας των μπαταριών θα αποθηκεύσει ή θα διοχετεύσει ενέργεια, όμως δεν επικοινωνεί μαζί του. Για να εφαρμοστεί η πολιτική του πράκτορα στην πράξη, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα λογισμικό ελέγχου του μετατροπέα. Επίσης θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να επιχειρηθεί η

επικοινωνία του και με άλλους πράκτορες (**multi-agent**) προκειμένου να καταλήξουν απο κοινού σε ένα πλάνο διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας.

6. Στη διαστασιολόγηση του μικροδικτύου για να καλύπτει τις ανάγκες του φορτίου. Η ένταξη του μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας παρουσία φορτίου, επιχειρήθηκε για μία μόνο εβδομάδα. Για να προκύψουν αποτελέσματα που αφορούν όλο το χρόνο θα πρέπει να γίνει διαστασιολόγηση και να αναπτυχθεί ένα νέο πρόγραμμα διαχείρισης της ενέργειας που να λαμβάνει υπόψιν και τις καταναλώσεις του μικροδικτύου.
7. Τέλος, σημαντικές προοπτικές παρουσιάζει και το εργαστήριο αν ενταχθούν στο μικροδίκτυο τα συστήματα που έχουν ήδη προμηθευτεί. Η προσθήκη ενός συστήματος μπαταριών των οποίων οι μετατροπείς δημιουργούν τριφασικό AC δίκτυο, μίας κυψέλης υδρογόνου και υπερπυκνωτών (super-capacitors) θα αναβάθμιζε σημαντικά τις δυνατότητες του εργαστηρίου.

## Παράρτημα Α

### Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων

Το μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ δουλεύει στο εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα. Οι πηγές που χρησιμοποιούνται όμως (μπαταρίες, φωτοβολταϊκό και το σύστημα της ανεμογεννήτριας με τον ανορθωτή της) παράγουν συνεχή τάση και ρεύμα. Αυτή η DC ισχύς εγχέεται μέσω αντιστροφένων (Sunny Island, Sunny Boy και Windy Boy αντίστοιχα) [7] στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου. Για την αξιολόγηση λοιπόν των πηγών και τον προσδιορισμό της απόδοσής τους, απαιτούνται μετρήσεις τόσο στο DC όσο και στο AC. Επίσης, για την αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών, είναι αναγκαία μία σειρά μετρήσεων ακτινοβολίας. Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ο τρόπος λήψης των μετρήσεων παρουσιάζονται ακολούθως.

#### A.1. Οι μετρήσεις στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Για τη λήψη των μετρήσεων που αφορούσαν τιμές στο AC χρησιμοποιήθηκαν πολυόργανα, και συγκεκριμένα έγινε χρήση του μοντέλου MIC της DEIF [26]. Το πολυόργανο αυτό έχει έναν μικροεπεξεργαστή ικανό να μετρά ένα πλήθος ηλεκτρικών μεγεθών που μπορεί να ζητηθούν, είτε σε μονοφασική, είτε σε τριφασική λειτουργία. Συγκεκριμένα μπορεί να μετρήσει:

- Συχνότητα
- Το ρεύμα που διαρρέει την κάθε φάση
- Την πολική και την φασική τάση καθώς και ασυμμετρίες στις φάσεις
- Ενεργό, Άεργο και Φαινόμενη ισχύ
- Συντελεστή ισχύος και THD με μέτρηση 31 αρμονικών

Ένα από τα πολυόργανα που τοποθετήθηκαν παρουσιάζεται στο «Σχήμα Α.1»

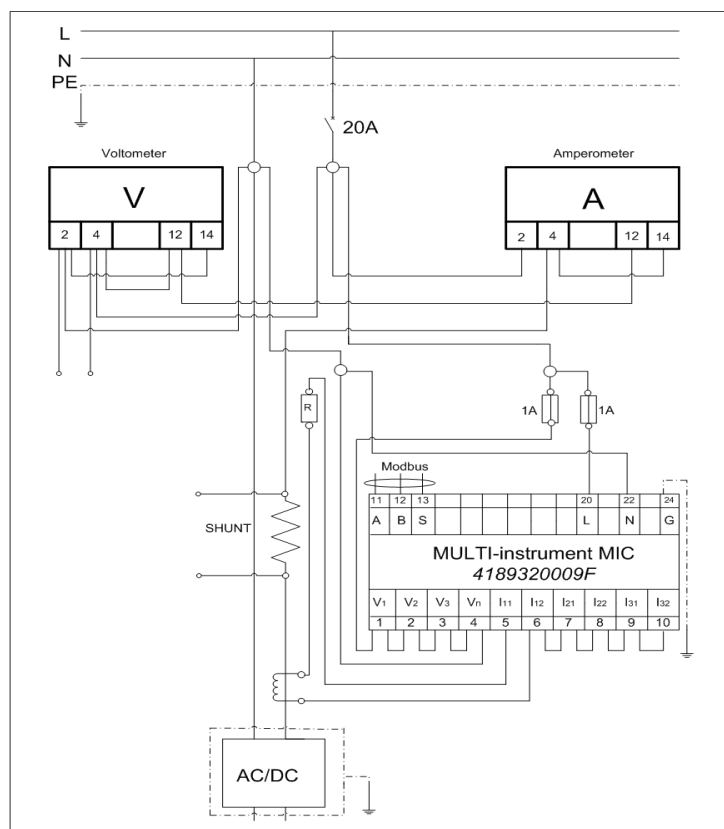


«Σχήμα Α.1, το πολυόργανο MIC της DEIF»

## Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων

Οι μετρήσεις του πολυοργάνου παρουσιάζονται στην οθόνη του και επιπλέον μπορούν να σταλούν σε υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Η επικοινωνία με τον υπολογιστή γίνεται με το Modbus RTU πρωτόκολλο [26]. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού LabView [23] για την λήψη, παρουσίαση και αποθήκευση των μετρήσεων. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 5 πολυόργανα, για την ανεμογεννήτρια, το φωτοβολταϊκό, τον αντιστροφέα των μπαταριών, τα φορτία και την παροχή της ΔΕΗ.

Το πολυόργανο παίρνει τιμές τάσης και ρεύματος τις οποίες αναλύει και βγάζει όλες τις μετρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δεχτεί είναι 5 Α. Για αυτό το λόγο, στις εφαρμογές όπου αναμένονται μεγαλύτερα ρεύματα τοποθετήθηκαν μετασχηματιστές ρεύματος προς ρεύμα. Συγκεκριμένα αυτό κρίθηκε απαραίτητο στα πολυόργανα της παροχής του δικτύου, των φορτίων και του αντιστροφέα των μπαταριών. Ο μετασχηματιστής που επιλέχθηκε για να τοποθετηθεί ανήκει στην οικογένεια της DEIF [26] και είναι κλάσεως 0.2. Η καλή κλάση του μετασχηματιστή είναι απαραίτητη κυρίως για τις μετρήσεις που αφορούν την ποιότητα και ειδικά το THD. Ένας μη ποιοτικός μετασχηματιστής, μπορεί να παραμορφώνει το ρεύμα που στέλνει προς μέτρηση στο πολυόργανο με συνέπεια να προκύπτουν μετρήσεις διαφορετικές από τις πραγματικές. Το ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης του πολυοργάνου των μπαταριών παρουσιάζεται στο «Σχήμα Α.1».



«Σχήμα Α.2, το ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης του πολυοργάνου MIC της DEIF στον αντιστροφέα των μπαταριών του εργαστηρίου ΣΗΕ»

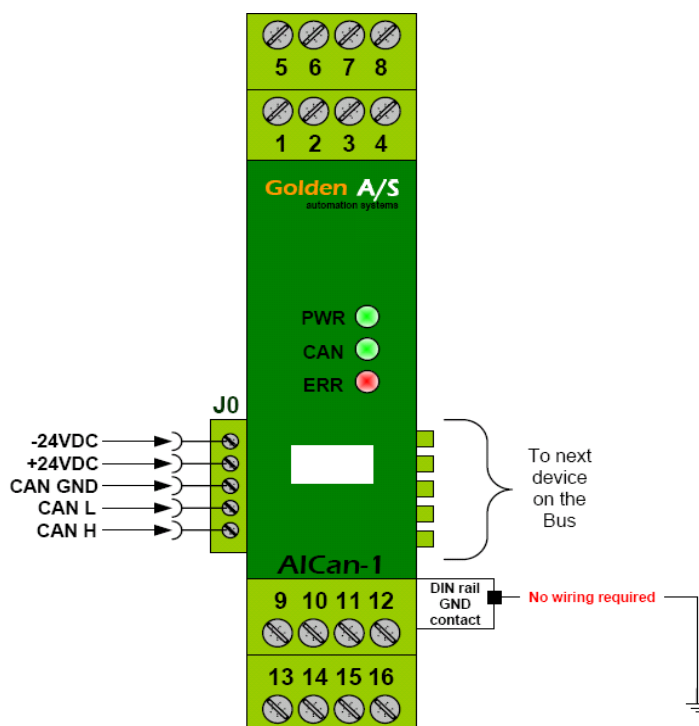


## A.2. Οι μετρήσεις DC μεγεθών και ακτινοβολίας

Για το εναλλασσόμενο ρεύμα υπάρχει ένα πλήθος συσκευών όχι ιδιαίτερα ακριβών που μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια τα ηλεκτρικά μεγέθη και να μεταφέρουν τις μετρήσεις αυτές στον υπολογιστή για επεξεργασία. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και με το συνεχές ρεύμα. Εκεί, όπως και με τις μετρήσεις ακτινοβολίας, ακολουθήθηκε διαφορετική φιλοσοφία. Για τη μέτρηση των μεγεθών αυτών και τη μεταφορά τους στον υπολογιστή χρησιμοποιήθηκαν PLC της GMA [27] (Golden Measurement and Automation). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η κάρτα AICan. Αυτή η κάρτα έχει τη δυνατότητα για τις εξής επιλογές μέτρησης:

- Ρεύμα 0...20 mA
- Ρεύμα 4...20 mA
- Τάση 0..10 V

Οι AICan του εργαστηρίου ρυθμίστηκαν να μετράνε ρεύμα 0...20mA. Κάθε κάρτα έχει 8 εισόδους, οπότε μπορεί να πραγματοποιήσει ισάριθμες μετρήσεις. Το σχέδιο που δίνει ο κατασκευαστής παρουσιάζεται στο «Σχήμα A.3» και η περιγραφή της λειτουργίας των ακροδεκτών στον «Πίνακα A.1» [27].



«Σχήμα A.3, η PLC κάρτα AICan της GMA»

Αριθμός Καναλιού	Ακροδέκτης	Τύπος Ακροδέκτη	Περιγραφή
CH1	1	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH2	2	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH3	3	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH4	4	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
COM CH1,2	5	Εξόδου (-)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
(+) 24 VDC	6	Τροφοδοσίας (+)	Τροφοδοσία συνεργαζόμενων συσκευών
(-) 24 VDC	7	Τροφοδοσίας (-)	Τροφοδοσία συνεργαζόμενων συσκευών
COM CH3,4	8	Εξόδου (-)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH5	9	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH6	10	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH7	11	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
CH8	12	Εισόδου (+)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
COM CH5,6	13	Εξόδου (-)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος
(+) 24 VDC	14	Τροφοδοσίας (+)	Τροφοδοσία συνεργαζόμενων συσκευών
(-) 24 VDC	15	Τροφοδοσίας (-)	Τροφοδοσία συνεργαζόμενων συσκευών
COM CH7,8	16	Εξόδου (-)	Είσοδος Τάσης ή Ρεύματος

«Πίνακας Α.1, περιγραφή της λειτουργίας των ακροδεκτών της κάρτας AICan της GMA»

Η κάρτα AICan χρησιμοποιεί για την επικοινωνία της το ανοικτό πρωτόκολλο CANBus [27]. Μέσω αυτού επικοινωνούν οι κάρτες με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU). Τα δεδομένα από εκεί στέλνονται στον υπολογιστή μέσω πρωτοκόλλου TCP/IP. Εκτός από τις κάρτες AICan που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών, μέσω του CANBus είναι συνδεδεμένες οι κάρτες DIOCan για τον έλεγχο ρελέ και οι κάρτες TMPCan για μετρήσεις θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας PT 100 [27]. Ο προγραμματισμός και ο έλεγχος όλων αυτών καθώς και η λήψη των μετρήσεων, γίνεται από τον υπολογιστή με το λογισμικό Codesys [28]. Για τη λειτουργία της κεντρικής μονάδας των PLC, χρησιμοποιείται ένα τροφοδοτικό 24V. Η κεντρική μονάδα τροφοδοτεί το CANBus, μέσω του οποίου παίρνουν ισχύ όλες οι κάρτες.

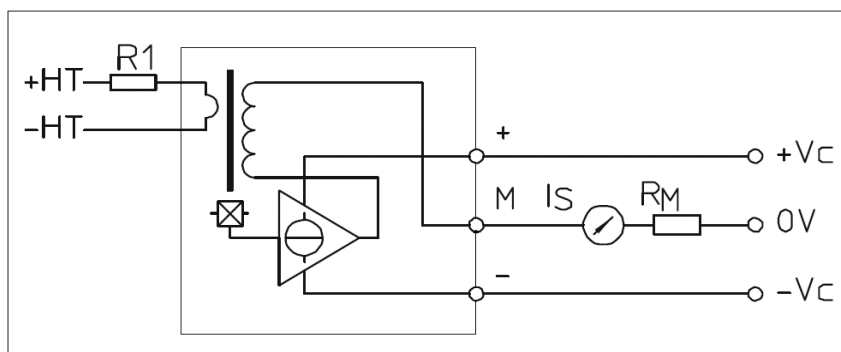
### A.2.1. Οι μετρήσεις στο συνεχές ρεύμα

Για τις μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών που αφορούν το συνεχές ρεύμα, χρησιμοποιήθηκαν LEM [29]. Πρόκειται για ηλεκτρονικά εξαρτήματα που λειτουργούν ως ιδανικοί μετασχηματιστές ρεύματος προς ρεύμα και τάσης προς ρεύμα. Σκοπός μας ήταν να μετατρέψουμε τα ηλεκτρικά μεγέθη της DC πλευράς του μικροδικτύου σε άλλα

ηλεκτρικά μεγέθη, τα οποία όμως θα είναι αναγνώσιμα από τα PLC AICan που επικοινωνούν με τον υπολογιστή.

### ι. LEM για τη μέτρηση τάσης

Για τη μέτρηση της τάσης χρησιμοποιήθηκε το LEM LV 25-P. Το ισοδύναμο κύκλωμα που δίνει ο κατασκευαστής [29] παρουσιάζεται στο «Σχήμα Α.4».



«Σχήμα Α.4, το ισοδύναμο κύκλωμα του LEM μέτρησης τάσης LV 25-P»

Η λειτουργία του είναι η εξής [29]: για ρεύμα 10 mA στην είσοδό του (ακροδέκτες +HT, -HT) το LEM δίνει στην έξοδο 25 mA (ακροδέκτης M). Πρόκειται δηλαδή για ιδανικό μετασχηματιστή ρεύματος προς ρεύμα. Το ρεύμα εξόδου από τον ακροδέκτη M οδηγείται στο μετρητικό όργανο και από εκεί στη γη ή στο σημείο που θεωρούμε ότι έχει δυναμικό μηδέν. Για να αποφευχθεί όμως το βραχυκύκλωμα προς τη γη, τοποθετείται όπως φαίνεται και στο σχήμα 2 μία αντίσταση σε σειρά  $R_M$ . Ο κατασκευαστής προτείνει τιμή 100 ως 190 Ω. Στο κύκλωμα που υλοποιήθηκε επιλέχθηκε  $R_M=150$  Ω. Για τη λειτουργία του LEM απαιτείται τροφοδοσία +15V και -15V DC που συνδέεται στους ακροδέκτες +V<sub>c</sub> και -V<sub>c</sub> αντίστοιχα.

Το μέγεθος που έπρεπε να υπολογιστεί ήταν η τιμή της αντίστασης R1. Οι ακροδέκτες +HT και -HT πρέπει να συνδεθούν με το θετικό και τον αρνητικό πόλο των DC πηγών αντίστοιχα. Αν αυτό συμβεί χωρίς την εν σειρά παρεμβολή κάποια αντίστασης, θα έχουμε βραχυκύκλωμα αφού τα +HT και -HT λειτουργούν σαν ακροδέκτες αμπερομέτρου με μηδενική αντίσταση. Το μέγιστο ρεύμα που θα περάσει από τον +HT προς τον -HT πρέπει να περιοριστεί στα 10 mA.

Υπάρχει όμως και ένας ακόμη περιορισμός. Τα PLC που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να αναγνώσουν ρεύμα 0-20mA. Κατά συνέπεια η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ρεύματος εξόδου από το LEM είναι 20mA, άρα η αντίστοιχη εισόδου είναι 8mA. Η R1 πρέπει συνεπώς να έχει τέτοια τιμή, ώστε να επιτυγχάνεται αυτός ο περιορισμός. Συγκεκριμένα:

- Για τα φωτοβολταϊκά και την ανεμογεννήτρια η μέγιστη τιμή της DC τάσης είναι 250V. Η ελάχιστη τιμή της αντίστασης που έπρεπε να τοποθετηθεί είναι:

## Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων

$$R1 = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} = \frac{250V}{8mA} = 31.25k\Omega$$

Η τιμή της αντίστασης που τελικά τοποθετήθηκε ήταν  $R1=34.6k\Omega$ . Συνεπώς, αν το όργανο μέτρησης διαβάζει ρεύμα  $I_m$ , η τάση στο DC θα δίνεται από τον τύπο (A.1)

$$V_{DC} = 34600 \cdot I_m \cdot \frac{10}{25} \Rightarrow V_{DC} = 13840 \cdot I_m \quad (A.1)$$

- Για τις μπαταρίες, η μέγιστη τιμή τάσης που μπορούν να πάρουν είναι 80V. Άρα η ελάχιστη τιμή της αντίστασης που πρέπει να τοποθετηθεί είναι:

$$R1 = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} = \frac{90V}{8mA} = 11.25k\Omega$$

Η τιμή της αντίστασης που τελικά τοποθετήθηκε ήταν 12.8kΩ. Ο τελικός τύπος που προκύπτει για αυτή την περίπτωση δίνεται από τον τύπο (A.2):

$$V_{DC} = 12800 \cdot I_m \cdot \frac{10}{25} \Rightarrow V_{DC} = 5120 \cdot I_m \quad (A.2)$$

### ii. LEM για μέτρηση DC ρεύματος σε φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτρια

Για τη μέτρηση του ρεύματος από την πλευρά του DC στα φωτοβολταϊκά και την ανεμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε το LEM LA 25-NP. Το ισοδύναμο κύκλωμα που δίνει ο κατασκευαστής παρουσιάζεται [29] στο «Σχήμα A.5».



«Σχήμα A.5, το ισοδύναμο κύκλωμα του LEM μέτρησης ρεύματος LA 25-NP»

Στην περίπτωση αυτή, όλο το DC ρεύμα περνάει μέσα από το LEM πριν οδηγηθεί στον αντιστροφέα. Σε αντίθεση με το LEM τάσης, εδώ ο λόγος μετατροπής δεν είναι συγκεκριμένος αλλά καθορίζεται από τον εγκαταστάτη. Στο κάτω μέρος του LEM υπάρχουν κάποιοι ακροδέκτες και ανάλογα με το πώς θα βραχυκυκλωθούν αλλάζει και ο λόγος μετατροπής. Ο σχετικός πίνακας που δίνεται από τον κατασκευαστή [29], παρουσιάζεται στον «Πίνακα A.2».

## Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων

Πλήθος Περιλιξίων Πρωτεύοντος	Ρεύμα Πρωτεύοντος		Ονομαστικό Ρεύμα Εξόδου $I_{SN}$ [mA]	Λόγος Μετατροπής $K_N$	Αντίσταση Πρωτεύοντος $R_P$ [mΩ]	Ανάδραση Πρωτεύοντος $L_P$ [μH]	Προτεινόμενες Συνδέσεις Ακροδεκτών
	ονομαστικό $I_{PN}$ [A]	μέγιστο $I_P$ [A]					
1	25	36	25	1/1000	0.3	0.023	
2	12	18	24	2/1000	1.1	0.09	
3	8	12	24	3/1000	2.5	0.21	
4	6	9	24	4/1000	4.4	0.37	
5	5	7	25	5/1000	6.3	0.58	

«Πίνακας Α.2, οι προτεινόμενες συνδεσμολογίες για κάθε λόγο μετατροπής του LEM μέτρησης ρεύματος LA 25-NP»

Από τον παραπάνω πίνακα, έγινε η συνδεσμολογία που αντιστοιχεί σε ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος 8 A (τρίτη σειρά). Το ρεύμα εισέρχεται στο LEM μέσω των ακροδεκτών 1 έως 5 και εξέρχεται από τους 6 έως 10. Το ρεύμα εξόδου εξέρχεται από τον ακροδέκτη M (όπως συνέβαινε και με τα LEM τάσης) και μέσω μιας αντίστασης  $R_M=150 \Omega$  οδηγείται στο μετρητικό όργανο και από εκεί στη γη. Ο κατασκευαστής προτείνει αντίσταση τιμής από 100 Ω έως 190 Ω, οπότε η επιλεγείσα τιμή είναι μέσα στα όρια. Η τροφοδοσία είναι και εδώ +15 V και -15 V DC και συνδέεται στους ακροδέκτες “+” και “-” αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω, αν το μετρητικό όργανο διαβάσει ρεύμα  $I_m$ , το DC ρεύμα  $I_{DC}$  που οδηγείται στον αντιστροφέα δίνεται από τον τύπο (Α.3):

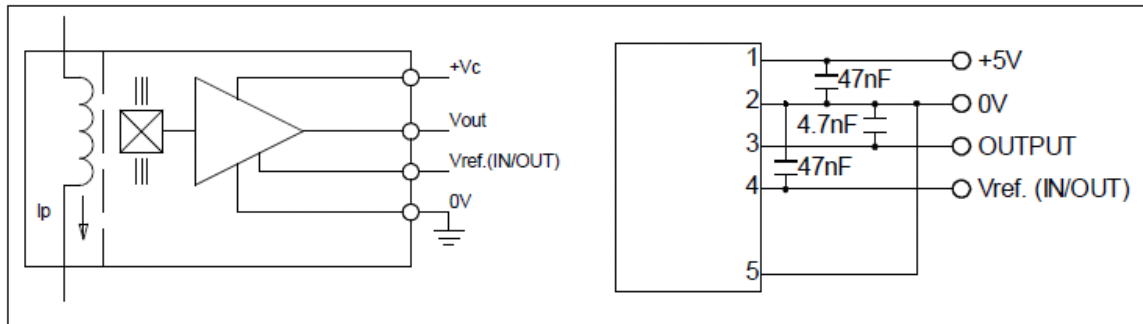
$$I_{DC} = I_m \cdot \frac{8}{24} \cdot 1000 \Rightarrow I_{DC} = 333 \cdot I_m \quad (\text{A.3})$$

### iii. LEM για τη μέτρηση ρεύματος στις μπαταρίες

Ο μετατροπέας των μπαταριών έχει διαφορετική λογική σε σχέση με αυτούς των φωτοβολταϊκών και της ανεμογεννήτριας. Η βασική του διαφορά είναι ότι λειτουργεί αμφίπλευρα, έχει δηλαδή τη δυνατότητα να κάνει και ανόρθωση ώστε να επιτρέψει τη ροή ισχύος από το AC προς της μπαταρίες. Το γεγονός αυτό γεννά την ανάγκη χρησιμοποίησης LEM που να επιτρέπουν τη ροή ρεύματος προς και τις δύο κατευθύνσεις, σε αντίθεση με τα LA 25-NP. Επίσης, τα συνεχή ρεύματα που διαχειρίζεται ο Battery inverter μπορούν να φτάσουν τα 75 A στη μόνιμη κατάσταση, τιμή πολύ μεγαλύτερη από αυτή των 25 A που υποστηρίζουν τα LA 25-NP. LEM που πληρούν αυτές τις προδιαγραφές είναι αυτά της σειράς HAIS [29]. Συγκεκριμένα είχαμε στη διάθεσή μας το μοντέλο HAIS 200-P. Για τη λειτουργία αυτού απαιτείται τάση 0V

**Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων**

και 5V. Το ισοδύναμο κύκλωμα και η προτεινόμενη συνδεσμολογία από τον κατασκευαστή [29] παρουσιάζονται στο «Σχήμα Α.6».



«Σχήμα Α.6, το ισοδύναμο κύκλωμα και η προτεινόμενη συνδεσμολογία του LEM ρεύματος HAI5 200-P»

Όπως φαίνεται, το LEM αυτό λειτουργεί σαν αμπεροτσιμπίδα. Το ρεύμα διέρχεται από μία οπή και το LEM βγάζει στην έξοδό του (ακροδέκτης 3) μία τιμή τάσης ανάλογα με το διερχόμενο ρεύμα. Η τιμή της τάσης εξόδου  $V_{OUT}$  (σε V ως προς γη) δίνεται από τον τύπο (Α.4) [29]:

$$V_{OUT} = V_{REF} \pm 0.625 \cdot \frac{I_{DC}}{I_{PN}} \quad (A.4)$$

Στον παραπάνω τύπο:

$$V_{REF} = 2.5 \text{ V}$$

$$I_{PN} = 200 \text{ A}$$

$I_{DC}$  είναι το ρεύμα που διέρχεται από την οπή

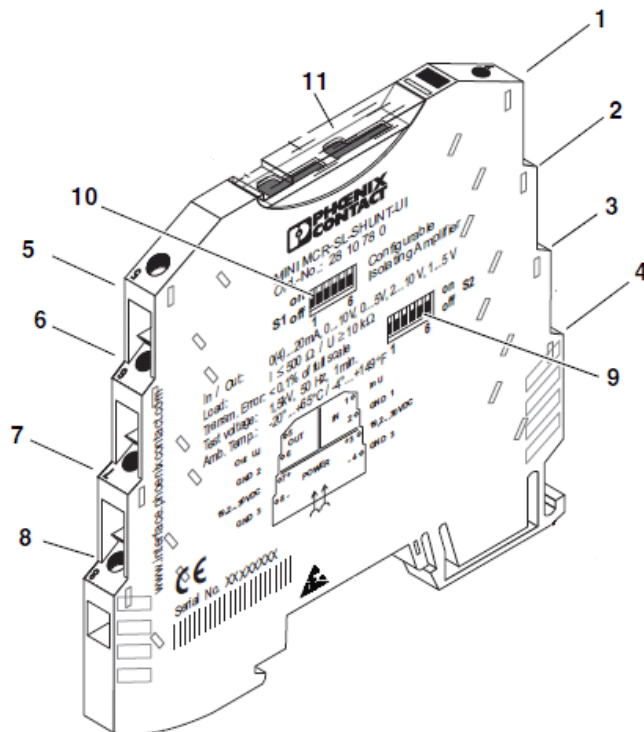
Στον τύπο (Α.4)  $V_{REF}$  είναι μία τάση αναφοράς που μας δίνεται από τον ακροδέκτη 4 και  $I_{PN}$  το ονομαστικό ρεύμα του συγκεκριμένου μοντέλου LEM. Το θετικό ή αρνητικό πρόσημο έχει να κάνει με το αν θεωρείται θετικό το ρεύμα που εισέρχεται ή που εξέρχεται από τις μπαταρίες. Στην εγκατάσταση επιλέχθηκε θετική φορά αυτή που εξέρχεται από τις μπαταρίες. Τελικά το ρεύμα προς μέτρηση δίνεται από τον τύπο (Α.5):

$$I_{DC} = \pm \frac{(V_{OUT} - V_{REF}) \cdot I_{PN}}{0.625} \Rightarrow I_{DC} = (V_{OUT} - 2.5) \cdot 320 \quad (A.5)$$

Το πρόβλημα που δημιουργείται εδώ είναι το ότι σαν έξοδο παίρνουμε μία τιμή τάσης, ενώ η κάρτα AICap έχουμε επιλέξει να μετράει μόνο ρεύμα 0 έως 20 mA. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας αναλογικού σήματος και συγκεκριμένα ο MINI MCR-SL-SHUNT-UI της PHOENIX CONTACT [30]. Η λειτουργία του περιγράφεται ακολούθως.

#### iv. Ο μετατροπέας για το σήμα εξόδου του LEM ρεύματος των μπαταριών

Το μοντέλο MINI MCR-SL-SHUNT-UI της PHOENIX CONTACT είναι ένας μετατροπέας χαμηλού θορύβου τάσης σε τάση ή τάσης σε ρεύμα [30]. Μπορεί δηλαδή να μετατρέψει ένα αναλογικό σήμα τάσης σε κάποιο άλλο, το οποίο όμως μπορεί να καταγραφεί με ακρίβεια από τα διαθέσιμα όργανα. Η τροφοδοσία που απαιτεί είναι 24 V η οποία λαμβάνεται από το τροφοδοτικό των PLC. Σχέδιο του μετατροπέα παρουσιάζεται στο «Σχήμα Α.7».



«Σχήμα Α.7, ο μετατροπέας MINI MCR-SL-SHUNT-UI της PHOENIX CONTACT»

Για τις επισημάνσεις του παραπάνω σχήματος ισχύει:

- 1 Ακροδέκτης “+” σήματος εισόδου
- 2 Ακροδέκτης “-” σήματος εισόδου
- 3,7 Ακροδέκτες τροφοδοσίας (+24 V)
- 4,8 Ακροδέκτες τροφοδοσίας (GND)
- 5 Ακροδέκτης “+” σήματος εξόδου
- 6 Ακροδέκτης “-” σήματος εξόδου
- 9 Ομάδα διακοπών S2 για καθορισμό του εύρους του σήματος εισόδου
- 10 Ομάδα διακοπών S1 για καθορισμό του εύρους του σήματος εξόδου
- 11 Ποτενσιόμετρο για καλιμπράρισμα της μετατροπής

Το πλεονέκτημά του μετατροπέα είναι ότι έχει ένα πλήθος από διακόπτες επιλογής για να καθορίσει ο χρήστης το εύρος του σήματος τάσης εισόδου τον τύπο του σήματος της εξόδου. Προκειμένου να γίνει η επιλογή του εύρους του σήματος εισόδου που θα

## Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων

ρυθμιστεί ο μετατροπέας να δέχεται στην είσοδο, είναι απαραίτητο να βρεθεί η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που μπορεί να παράγει το LEM ρεύματος των μπαταριών. Προκύπτει λοιπόν:

$$(V_{OUT} - V_{REF})_{\max} = \pm \frac{I_{DC}^{\max}}{I_{PN}} \cdot 0.625 = \pm \frac{75}{200} \cdot 0.625 \Rightarrow (V_{OUT} - V_{REF})_{\max} = \pm 0.234V$$

Το πλησιέστερο εύρος τιμών είναι το -240...+240mV. Ωστόσο αν επιλεγεί ένα τέτοιο εύρος, δε θα είναι δυνατόν να μετρηθεί το ρεύμα όταν μελετώνται φαινόμενα υπερφόρτισης με το ρεύμα να υπερβαίνει τα 75 A. Συνεπώς, ως εύρος του σήματος εισόδου επιλέχθηκαν τα -300...300mV. Το σήμα εξόδου επιλέγεται να είναι 0...20mA.

Αντιστοιχίζουμε λοιπόν ρεύμα  $I_m=10mA$  σε τάση  $V_{OUT}=0V$ ,  $I_m=0mA$  σε  $V_{OUT}=-300mV$  και  $I_m=20mA$  σε  $V_{OUT}=300mV$ . Έστω λοιπόν ότι το PLC διαβάζει ρεύμα  $I_m$  το οποίο εξέρχεται από τον μετατροπέα. Η τάση εισόδου σε αυτόν δίνεται από τον τύπο (A.6):

$$(V_{OUT} - V_{REF}) = 30(I_m - 0.01) \quad (A.6)$$

Όπου οι τιμές των  $V_{OUT}$  και  $V_{REF}$  είναι σε V και του  $I_m$  σε A.

Έτσι τελικά το ρεύμα που εξέρχεται από τις μπαταρίες δίνεται από τον τύπο (A.7):

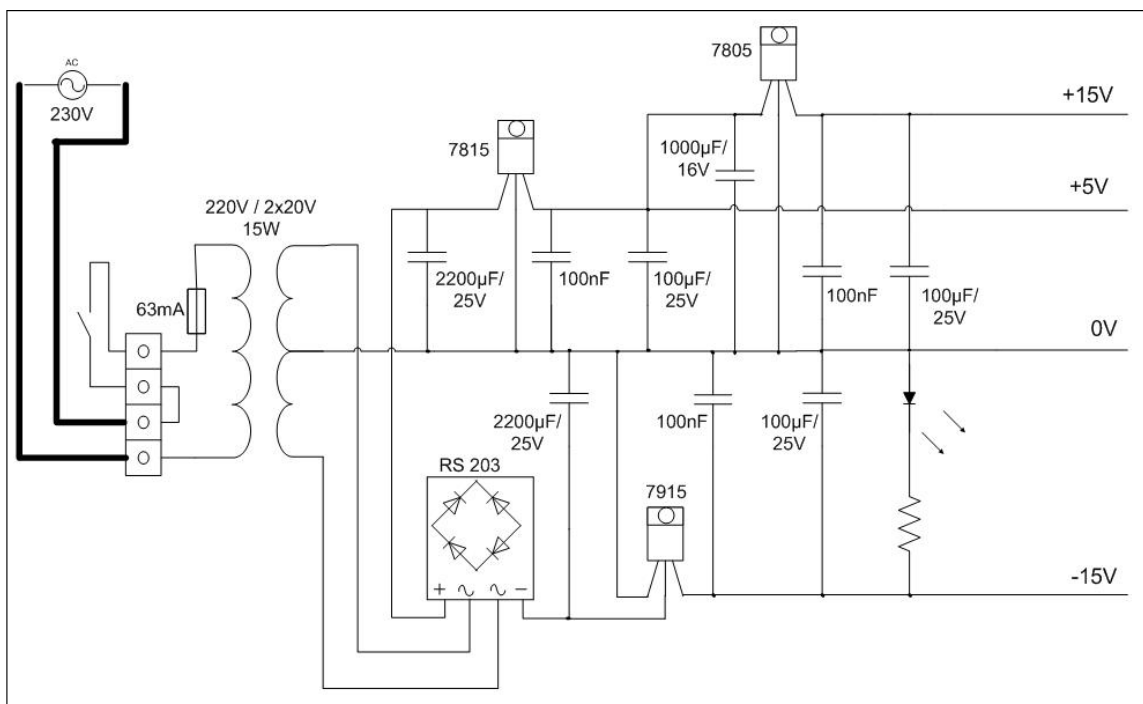
$$I_{DC} = (V_{OUT} - V_{REF}) \cdot 320 \Rightarrow I_{DC} = 9600 \cdot (I_m - 0.01) \quad (A.7)$$

### v. Το τροφοδοτικό των LEM

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα μοντέλα LV 25-P και LA 25-NP απαιτούν τροφοδοσία +15V και -15V ενώ το HAI5 200-P απαιτεί 5 V. Το τροφοδοτικό που χρησιμοποιείται για τα PLC παρέχει τάσεις -12V, 0V και +12V, οπότε δεν προσφέρεται για την τροφοδότηση των LEM. Για αυτό το λόγο λοιπόν, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα τροφοδοτικό που παρέχει τα ζητούμενα επίπεδα τάσης. Το ηλεκτρολογικό σχέδιο του τροφοδοτικού που κατασκευάστηκε παρουσιάζεται στο «Σχήμα A.8».



## Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων



«Σχήμα Α.8, το ηλεκτρολογικό σχέδιο του τροφοδοτικού που κατασκευάστηκε για την τροφοδοσία των LEM του εργαστηρίου»

Η μέγιστη κατανάλωση ισχύος του κάθε LEM είναι 1W [29]. Συνολικά λοιπόν υπάρχει κατανάλωση 6 W. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες του τροφοδοτικού και την δυνατότητα για μελλοντική επέκταση του εργαστηρίου, επιλέχθηκε μετασχηματιστής 230V / 2\*20V στα 15 W. Το πλησιέστερο τυποποιημένο μέγεθος ασφάλειας για το πρωτεύων του μετασχηματιστή είναι στα 63 mA.

Το δευτερεύων του μετασχηματιστή είναι ένα τύλιγμα με μεσαία λήψη. Η μεσαία λήψη θεωρείται το σημείο με δυναμικό 0V, ενώ οι ακραίες λήψεις τα +20V και -20V rms. Μετά τον μετασχηματιστή, τοποθετήθηκε ανορθωτική γέφυρα και κάποιοι πυκνωτές για εξομάλυνση της τάσης. Η συνεχής πλέον τάση στις εξόδους του ανορθωτή είναι:

$$V^+ = 20 \cdot \sqrt{2} = 28.3V \quad \text{και} \quad V^- = -20 \cdot \sqrt{2} = -28.3V$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα ολοκληρωμένα 7815 και 7915 [31]. Η λειτουργία του 7815 είναι να κάνει σταθεροποίηση τάσης στα +15V, ενώ αυτή του 7915 στα -15V. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε τα επιθυμητά επίπεδα τάσης τροφοδοσίας για τα LEM LV 25-P και LA 25-NP. Τέλος, για τη λήψη της τάσης των 5V του απαιτείται για τη λειτουργία του LEM HAI5 200-P, τοποθετείται το ολοκληρωμένο 7805 [31] μετά την έξοδο του 7815. Οι πυκνωτές στις εξόδους των 7815, 7915 και 7805 χρησιμοποιούνται για καλύτερη σταθεροποίηση τάσης.

## A.2.2. Οι μετρήσεις ακτινοβολίας

Για τη μέτρηση της ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες (πυρανόμετρα) του ISET [3]. Ένας αισθητήρας τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση και ένας σε κλίση ίση με αυτή των πανέλων. Φωτογραφίες του αισθητήρα που τοποθετήθηκε στην ίδια κλίση με τα πάνελα παρουσιάζεται στο «Σχήμα A.9»



«Σχήμα A.9, το πυρανόμετρο του ISET που τοποθετήθηκε επί των Φ/Β πανέλων του εργαστηρίου ΣΗΕ»

Από κάθε αισθητήρα παίρνουμε δύο μετρήσεις. Η μία είναι σε mV και αφορά την ακτινοβολία και η άλλη είναι ένα PT 1000 που μετράει τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού συλλέκτη της ακτινοβολίας [3]. Αυτή η μέτρηση είναι απαραίτητη γιατί σε θερμοκρασίες δέκτη άνω των 25 °C (εκτός δηλαδή των ιδανικών συνθηκών λειτουργίας – STC) απαιτείται διόρθωση της μέτρησης της ακτινοβολίας [3].

Ο αισθητήρας που τοποθετήθηκε σε κλίση ίση με αυτή των φωτοβολταϊκών βγάζει στην έξοδό του σήμα τάσης  $V_1=93.7$  mV όταν δέχεται ακτινοβολία  $G=1000\text{W/m}^2$ . Όπως όμως είδαμε, τα μετρητικά όργανα μπορούν να αναγνώσουν ρεύμα 0 έως 20 mA. Κατά συνέπεια και εδώ θα χρειαστεί ένας μετατροπέας σήματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε πάλι ο MINI MCR-SHUNT-UI της PHOENIX CONTACT [30] η λειτουργία του οποίου αναπτύχθηκε προηγουμένως. Στην περίπτωση αυτή οι διακόπτες του μετατροπέα ρυθμίζονται για να δέχεται είσοδο 0...120 mV και για να δίνει στην έξοδο ρεύμα 0...20 mA.

Έστω λοιπόν ότι το μετρητικό όργανο μετράει ρεύμα  $I_m$ . Η τάση εξόδου  $V_1$  του πυρανόμετρου δίνεται από τον τύπο (A.8):

$$V_1 = I_m \cdot \frac{120}{20} = 6 \cdot I_m \quad (\text{A.8})$$

Κατά συνέπεια η προσπίπτουσα ακτινοβολία  $G_1^t$  (χωρίς τη διόρθωση λόγω θερμοκρασίας) προκύπτει από τον τύπο (A.9):

**Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων**

$$G_1' = \frac{1000 \cdot V_1}{0.0937} = \frac{1000 \cdot 6 \cdot I_m}{0.0937} \Rightarrow G_1' = I_m \cdot \frac{6}{9.37} \cdot 10^5 W/m^2 \quad (A.9)$$

Στον παραπάνω τύπο το  $V_1$  είναι σε V και το  $I_m$  σε mA.

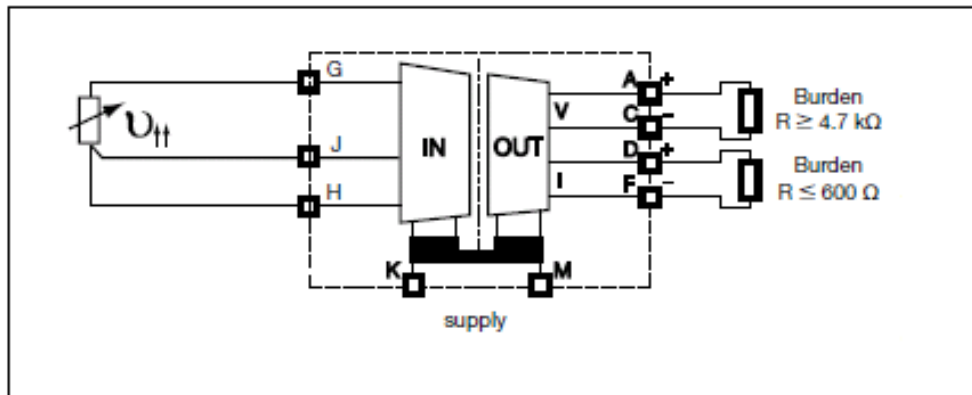
Για τον αισθητήρα σε οριζόντιο επίπεδο, έχουμε σήμα τάσης εξόδου  $V_2=93.6mV$  για ακτινοβολία  $G=1000W/m^2$ . Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, η προσπίπτουσα ακτινοβολία  $G_2'$  (χωρίς τη διόρθωση λόγω θερμοκρασίας) προκύπτει από τον τύπο (A.10):

$$G_2' = I_m \cdot \frac{6}{93.6} \cdot 10^5 W/m^2 \quad (A.10)$$

Για να γίνει η διόρθωση με βάση τη θερμοκρασία, απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας του συλλέκτη η οποία δίνεται με έναν αισθητήρα PT 1000. Για την ανάγνωση της πληροφορίας από τον δέκτη αυτόν χρησιμοποιήθηκε ο μετατροπέας CC-U/RTD της ABB [32]. Φωτογραφία του και ένα παράδειγμα συνδεσμολογίας που δίνει ο κατασκευαστής, παρουσιάζονται στο «Σχήμα A.10» και στο «Σχήμα A.11» αντίστοιχα.



«**Σχήμα A.10**, ο μετατροπέας CC-U/RTD της ABB για ανάγνωση θερμοκρασίας από αισθητήρα PT1000»



«**Σχήμα A.11**, η συνδεσμολογία που προτείνει ο κατασκευαστής για τον μετατροπέα CC-U/RTD της ABB»

## Παράρτημα Α – Τρόπος και μέσα διεξαγωγής των μετρήσεων

Η συσκευή αυτή έχει τη δυνατότητα να δέχεται ως είσοδο PT 10, PT 100 και PT 1000 διάφορων τύπων και να δίνει στην έξοδο τάση ή ρεύμα με εύρος που επιλέγεται από τον χρήστη. Η επιλογή της εισόδου που αναμένεται να δεχτεί αλλά και της επιθυμητής εξόδου γίνεται με τη βοήθεια διακοπών όπως και στην περίπτωση του MINI MCR-SL-SHUNT-UI. Η τροφοδοσία που χρησιμοποιήθηκε για τη λειτουργία του ήταν 24 VDC η οποία λήφθηκε από το τροφοδοτικό των PLC.

Ως είσοδος επιλέχθηκε το PT 1000 με εύρος 0...60°C. Στην έξοδο παίρνουμε σήμα ρεύματος 0...20mA. Έστω λοιπόν ότι το μετρούμενο ρεύμα είναι  $I_{\theta}$ . Η θερμοκρασία του συλλέκτη θα δίνεται από τον τύπο (A.11).

$$\theta = I_{\theta} \cdot \frac{0.02}{60} \quad (\text{A.11})$$

Όπου  $\theta$  η θερμοκρασία σε °C και  $I_{\theta}$  το μετρούμενο ρεύμα σε A.

Η θερμοκρασιακή διόρθωση που δίνεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα ακτινοβολίας είναι 0.06%/°C για θερμοκρασίες άνω των 25°C. Ο συντελεστής διόρθωσης  $k$  με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι ακτινοβολίες  $G_1^t$  και  $G_2^t$  που υπολογίστηκαν προηγουμένως προκύπτει από τον τύπο (A.12):

$$k = 1 + (\theta - 25) \cdot 0.0006 \quad \text{για } \theta > 25^{\circ}\text{C} \quad (\text{A.12})$$

## Παράρτημα Β

### Η Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον οικισμό Μελτέμι της Ραφήνας

Το εργαστήριο ΣΗΕ εκτός από το Φ/Β σύστημα που διαθέτει, έχει εγκαταστήσει και μελετήσει μια σειρά από αντίστοιχα συστήματα σε άλλους χώρους. Στον οικισμό Μελτέμι της Ραφήνας έχουν εγκατασταθεί κάποια πιλοτικά Φ/Β συστήματα. Το σύστημα που μελετήθηκε, βρίσκεται εγκατεστημένο στο χώρο στάθμευσης του συνοικισμού και παρουσιάζεται στο «Σχήμα Β.1».



«Σχήμα Β.1, τα πανέλα της Φ/Β εγκατάστασης στο χώρο στάθμευσης του συνοικισμού “Μελτέμι” της Ραφήνας»

Το πάρκο αποτελείται από 16 πανέλα συνολικής ισχύος 2.72kWp και επιφάνειας 19.7m<sup>2</sup>. Η κλίση των πανέλων είναι  $\beta=17^{\circ}$  και ο προσανατολισμός τους νότιος ( $\gamma=0^{\circ}$ ). Χρησιμοποιήθηκαν τα πανέλα YL170 P-23b της Yingli Solar, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον «Πίνακα Β.1» [33].

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	
Τύπος	Πολυκρυσταλικό πυρίτιο
Ονομαστική Ισχύς	170 W
Τάση λειτουργίας στη Μέγιστη Ισχύ	23 V
Ρεύμα λειτουργίας στη Μέγιστη Ισχύ	7,17 A
Τάση Ανοικτοκύκλωσης	29 V
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	7,9 A
Απόδοση	12,7%
Μηχανικά χαρακτηριστικά	
Διαστάσεις (Μήκος x Πλάτος x Πάχος)	1310x990x50 mm
Επιφάνεια	1,3 m <sup>2</sup>

«Πίνακας Β.1, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελου P-23b της Yingli Solar»

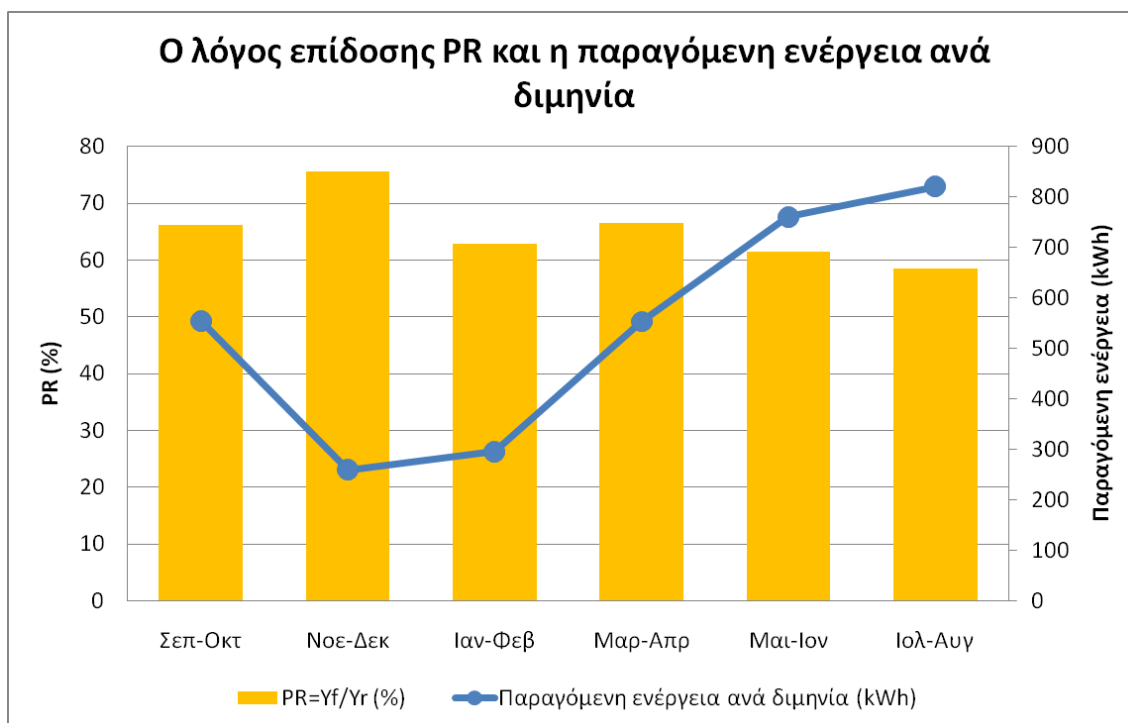
Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιήθηκε στο Φ/Β πάρκο της Ραφήνας είναι της Würth Solergy, ονομαστικής ισχύος 4.6kW. Φωτογραφία του αντιστροφέα και η πινακίδα όπου αναγράφονται τα ονομαστικά του μεγέθη παρουσιάζονται στο «Σχήμα Β.2».



«Σχήμα Β.2, ο αντιστροφέας Würth Solergy του Φ/Β πάρκου στο Μελέμι της Ραφήνας»

Από αυτό το Φ/Β σύστημα γίνονται συστηματικές καταγραφές της παραγόμενης ενέργειας. Για την εξαγωγή των δεικτών απόδοσης του Φ/Β συστήματος που αναπτύσσονται στο *Κεφάλαιο 3*, απαιτούνται και καταγραφές της ακτινοβολίας. Αυτές γίνονται από πυρανόμετρα που βρίσκονται εγκατεστημένα στον Γέρακα [17]. Από τις καταγραφές της ηλεκτρικής ισχύος και της ακτινοβολίας, μπορούμε να υπολογίσουμε την πορεία των δεικτών απόδοσης για διάστημα ενός έτους. Τα αποτελέσματα αυτά [34] παρουσιάζονται ακολούθως ομαδοποιημένα σε διμηνίες.

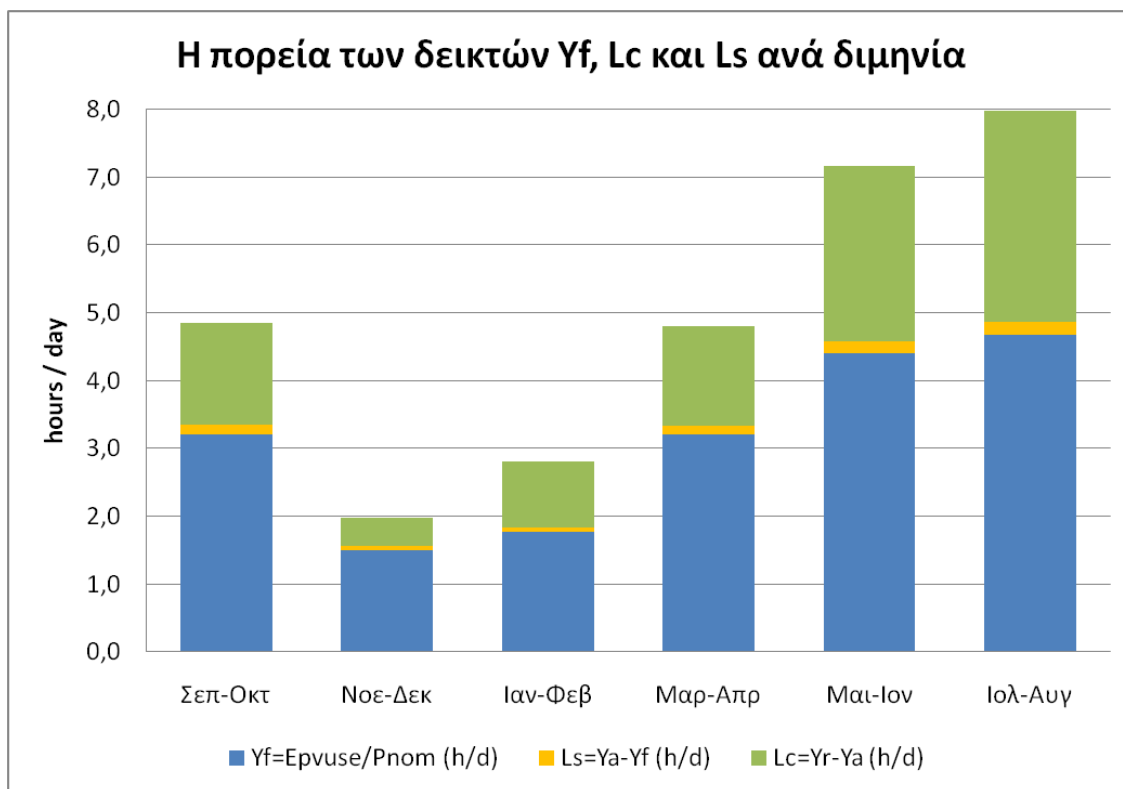
Η πορεία του λόγου επίδοσης PR παρουσιάζεται στο «Σχήμα Β.3». Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και το ύψος της παραγόμενης ενέργειας προκειμένου να γίνει μία συγκριτική μελέτη.



«**Σχήμα Β.3**, ο λόγος επίδοσης PR και η παραγόμενη ενέργεια ανά διμηνίες όπως αυτά προκύπτουν από το Φ/Β σύστημα της Ραφήνας»

Στο σύνολο του έτους παρήχθησαν 3243kWh και ο λόγος επίδοσης διαμορφώθηκε στο 63.3%. Από το «Σχήμα Β.3» παρατηρούμε ότι ο λόγος επίδοσης είναι καλύτερος τους μήνες με μικρή παραγωγή, άρα και μικρή ηλιοφάνεια. Αντιθέτως μειώνεται ελαφρώς τους μήνες με μεγάλη ηλιοφάνεια και παραγωγή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι μήνες με μικρή ηλιοφάνεια είναι και ψυχρότεροι, άρα το Φ/Β δουλεύει με καλύτερο συντελεστή απόδοσης. Επίσης τους θερινούς μήνες έχουμε λιγότες βροχές οπότε η σκόνη που επικάθεται πάνω στους συλλέκτες είναι σαφώς περισσότερη. Επιπλέον λόγοι θα πρέπει να αναζητηθούν στη λειτουργία του αντιστροφέα, στην καμπύλη απόδοσής του και στο πόσο επιτυχημένη είναι η τεχνική του στο MPPT.

Η πορεία των δεικτών απόδοσης και των δεικτών απωλειών της εγκατάστασης παρουσιάζεται στο «Σχήμα Β.4».



«**Σχήμα Β.4**, η πορεία του δείκτη τελικής απόδοσης  $Y_f$ , του δείκτη απωλειών μετατροπής  $L_c$  και του δείκτη απωλειών συστήματος  $L_s$  που προκύπτουν για το Φ/Β σύστημα της Ραφήνας σε διάστημα ενός έτους»

Υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

- $Y_A = Y_f + L_s$
- $Y_R = Y_A + L_c = Y_f + L_s + L_c$
- $PR = \frac{Y_f}{Y_R}$

Όπου:

- $Y_R$  η απόδοση αναφοράς
- $Y_A$  η απόδοση της εγκατάστασης
- $Y_f$  η τελική απόδοση
- $L_c$  οι απώλειες μετατροπής
- $L_s$  οι απώλειες του συστήματος
- $PR$  ο λόγος επίδοσης του συστήματος

Για το σύνολο του έτους προκύπτει ότι  $Y_R = 4.95 \text{ h/d}$ ,  $Y_A = 3.27 \text{ h/d}$  και  $Y_f = 3.14 \text{ h/d}$ .



## Παράρτημα Γ

### Η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων

Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς διαφόρων συστημάτων είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αφορά γραμμικά συστήματα της μορφής  $Ax=b$  [35]. Τα  $A$  και  $b$  αφορούν μετρήσεις ενώ το  $x$  τις παραμέτρους του μοντέλου.

Έστω λοιπόν το σύστημα  $Ax=b$  με διαστάσεις  $m \times n$  για τις οποίες ισχύει  $m \gg n$ . Το σύστημα αυτό είναι συνήθως αδύνατο, οπότε έχουμε για κάθε  $x$  τον τύπο (Γ.1):

$$Ax = b + \varepsilon(x) \quad (\Gamma.1)$$

Όπου  $\varepsilon(x)$  το σφάλμα (ή υπόλοιπο). Στόχος της μεθόδου είναι να επιλεγεί το  $x$  έτσι ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση του  $\varepsilon(x)$ . Αποδεικνύει ότι αν ισχύει μία από τις ακόλουθες προτάσεις τότε είναι υπάρχει  $x$  που ελαχιστοποιεί το  $\varepsilon(x)$ . Αυτές είναι:

- Ο πίνακας  $A^T A$  είναι θετικά ορισμένος
- Ο πίνακας  $A^T A$  είναι ομαλός
- Οι στήλες του είναι γραμμικά ανεξάρτητες, οπότε  $m \geq n$

Σε αυτή την περίπτωση το βέλτιστο  $x$  το συμβολίζουμε με  $\bar{x}$  και αποτελεί τη λύση του συστήματος που δίνεται από τον τύπο (Γ.2) [35]:

$$A^T A \cdot \bar{x} = A^T \cdot b \quad (\Gamma.2)$$

#### Γ.1. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου

Έστω ότι έχουμε μεγάλο πλήθος από  $m$  ζεύγη  $(x_i, y_i)$  μετρήσεων. Έστω ότι διαλέγουμε το  $x$  ως ανεξάρτητη μεταβλητή και το  $y$  ως εξαρτημένη. Θέλουμε να βρούμε μία συνάρτηση  $f(x)$  που να περιγράφει την εξάρτηση των δύο μεγεθών μεταξύ τους. Αυτή η συνάρτηση θα είναι της μορφής του τύπου (Γ.3):

$$f(x) = \sum_{j=1}^n c_j f_j(x) \quad (\Gamma.3)$$

Στην περίπτωσή μας επιλέξαμε η προσέγγιση να γίνει με πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού. Κατά συνέπεια η  $f(x)$  παίρνει τη μορφή που δίνεται από τον τύπο (Γ.4):

$$f(x) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + c_4 \cdot x^4 + c_5 \cdot x^5 + c_6 \cdot x^6 \quad (\Gamma.4)$$

Αν αντικαταστήσουμε στην παραπάνω εξίσωση τις μετρήσεις τότε έχουμε:

$$f(x_i) = y_i + \varepsilon_i \quad (\Gamma.5)$$

Η εξίσωση (Γ.5) μπορεί να γραφεί με τη μορφή πινάκων όπως παρουσιάζεται στον τύπο (Γ.6):

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^6 \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_m & \dots & x_m^6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0 \\ \dots \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad (\Gamma.6)$$

Πρόκειται δηλαδή για ένα σύστημα της μορφής

$$Ac = y + \varepsilon \quad (\Gamma.7)$$

με γνωστούς τους πίνακες A και y και ζητούμενο το βέλτιστο πίνακα  $\bar{c}$  ώστε να ελαχιστοποιείται ο πίνακας ε. Το διάνυσμα  $\bar{c}$  όπως είδαμε προκύπτει από την εξίσωση (Γ.8) [35]:

$$\bar{c} = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot y \quad (\Gamma.8)$$

## Παράρτημα Δ

### Η επαναληπτική μέθοδος της τέμνουσας

Κατά τη μοντελοποίηση συστημάτων, συχνά συναντάμε μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις της μορφής  $f(x)=0$  οι οποίες είναι πολύ δύσκολο (και ορισμένες φορές αδύνατο) να επιλυθούν αναλυτικά. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε επαναληπτικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων [35]. Οι επαναληπτικές αυτές μέθοδοι έχουν τη μορφή  $x_{n+1}=g(x_n)$ , όπου η ακολουθία  $x_n$  συγκλίνει σε μία ρίζα της εξίσωσης  $f(x)=0$ .

Έχουν προταθεί διάφορες επαναληπτικές μέθοδοι όπως η μέθοδος της διχοτόμησης, η μέθοδος της τέμνουσας, η γενική επαναληπτική μέθοδος, η Newton-Raphson και άλλες. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας προτιμήθηκε η μέθοδος της τέμνουσας. Ο λόγος είναι ότι συγκλίνει σχετικά γρήγορα χωρίς να απαιτεί υπολογισμό παραγώγων, ο οποίος μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύπλοκος.

Στη μέθοδο της τέμνουσας για την επίλυση μιας εξίσωσης της μορφής  $f(x)=0$ , κατασκευάζουμε μια ακολουθία  $x_n$  με τον τύπο (Δ.1) [35]:

$$x_{n+1} = x_n - f(x_n) \frac{x_n - x_{n-1}}{f(x_n) - f(x_{n-1})} \text{ με } x_0, x_1 \text{ δοθέντα} \quad (\Delta.1)$$

Η επαναληπτική μέθοδος εφαρμόστηκε στο *Κεφάλαιο 5* για τον προσδιορισμό κάποιων παραμέτρων απαραίτητων για τη λειτουργία του μοντέλου των μπαταριών. Το σύστημα του οποίου οι λύσεις αποτελούν τις ζητούμενες παραμέτρους δίνεται από τις εξισώσεις (Δ.2) και (Δ.3).

$$c_A(k) = \frac{F_{t_1 t_2} \cdot (1 - e^{-kt_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-kt_2}) \cdot t_1}{F_{t_1 t_2} \cdot (1 - e^{-kt_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-kt_2}) \cdot t_1 - kF_{t_1 t_2} + kt_1 t_2} \quad (\Delta.2)$$

$$c_B(k) = \frac{F_{t_2 t_3} \cdot (1 - e^{-kt_2}) \cdot t_3 - (1 - e^{-kt_3}) \cdot t_2}{F_{t_2 t_3} \cdot (1 - e^{-kt_2}) \cdot t_3 - (1 - e^{-kt_3}) \cdot t_2 - kF_{t_2 t_3} + kt_2 t_3} \quad (\Delta.3)$$

Το  $c$  όμως είναι κοινό, ισχύει δηλαδή ότι  $c_A(k)=c_B(k)$ . Για την επίλυση λοιπόν των παραπάνω εξισώσεων ορίζουμε:

$$h(k) = c_A(k) - c_B(k) = 0 \quad (\Delta.4)$$

$$k_{n+1} = k_n - f(k_n) \frac{k_n - k_{n-1}}{f(k_n) - f(k_{n-1})} \quad (\Delta.5)$$

Αν στις παραπάνω εξισώσεις αντικαταστήσουμε  $t_1=1h$ ,  $t_2=10h$ ,  $t_3=120h$ ,  $F_{t_1 t_2}=0.532$ ,  $F_{t_2 t_3}=0.666667$  και πάρουμε για αρχικές συνθήκες  $k_0=0.1$ ,  $k_1=0.01$ , τα αποτελέσματα της επαναληπτικής μεθόδου παρουσιάζονται στον «Πίνακα Δ.1».

#### Παράρτημα Δ – Η επαναληπτική μέθοδος της τέμνουσας

Οι αρχικές τιμές  $k_0$  και  $k_1$  βρέθηκαν με τυχαία επιλογή. Έγινε δηλαδή μια σειρά δοκιμών για τις τιμές τους και εξετάζαμε τη σύγκλιση της μεθόδου. Σε περίπτωση που δεν συνέκλινε για καμία από τις επιλογές μας, θα έπρεπε να καταφύγουμε σε μεθόδους εντοπισμού του πεδίου των ριζών [35].

A/A	$K_n$	$c_A(k)$	$c_B(k)$	$h(k) = c_A(k) - c_B(k)$
0	0,1	1	2	-1
1	0,01	-9,23554	0,135126	-9,37067
2	0,110752	-0,27526	0,495841	-0,7711
3	0,119786	-0,21077	0,489007	-0,69977
4	0,208414	0,113808	0,418701	-0,30489
5	0,276845	0,212341	0,369794	-0,15745
6	0,349923	0,268464	0,325617	-0,05715
7	0,391565	0,288655	0,303983	-0,01533
8	0,406825	0,294628	0,296642	-0,00201
9	0,409133	0,295475	0,295557	-8,2E-05
10	0,409231	0,295511	0,295511	-4,6E-07
11	0,409232	0,295511	0,295511	-1,1E-10
12	0,409232	0,295511	0,295511	0

«Πίνακας Δ.1, η εφαρμογή της επαναληπτικής μεθόδου της τέμνουσας για τις εξισώσεις (Δ.2) και (Δ.3)»

Από την τελευταία σειρά του «Πίνακα Δ.1» προκύπτουν οι τιμές  $k=0.409232$  και  $c=0.295511$  οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις του μοντέλου.

## Βιβλιογραφία

- [1] **Duffie J. A., Beckman W. A.:** Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons., U.S.A. 1991.
- [2] **Καγκαράκη Κ.:** Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Συμμετρία, Αθήνα 1992.
- [3] **ISET [Ηλεκτρονικό]** [www.iset.uni-kassel.com](http://www.iset.uni-kassel.com)
- [4] **Οι προδιαγραφές της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Ένωσης (IEC):** IEC 61000, IEC 61683, IEC 60896-1, IEC 60896-11.
- [5] **Manwell J. F., Rogers A., Hayman G., Avelar C. T., McGowan J.G., Abdulwahid U., Wu K.:** Hybrid 2 – A Hybrid System Simulation Model Theory Manual, University of Massachusetts, 2006.
- [6] **Google Maps [Ηλεκτρονικό]:** [maps.google.com](http://maps.google.com)
- [7] **SMA Hellas [Ηλεκτρονικό]:** [www.sma-hellas.com](http://www.sma-hellas.com)
- [8] **Romanos P., Hatziargyriou N., La Rocca V., Tsolakos G., Pantazis K., Daniil N., Bonias S.:** PV inverters supporting the Grid – First experiences with testing and qualification according to the grid interconnection guidelines in Greece and Cyprus, MedPower 2010.
- [9] **Isofoton [Ηλεκτρονικό]:** [www.isofoton.com](http://www.isofoton.com)
- [10] **Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN):** EN 50530.
- [11] **Ντοκόπουλος Π.:** Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών, Ζητή, Θεσσαλονίκη 2005.
- [12] **University of Kassel:** Lectures for Photovoltaic Systems, 2003.
- [13] **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems:** Photovoltaic Systems, Freiburg, 1995.
- [14] **Συσσωρευτές Έργων [Ηλεκτρονικό]:** [www.ergonbatteries.gr](http://www.ergonbatteries.gr)
- [15] **Manwell J. F., McGowan J. G.:** Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems, Solar Energy vol 50, U.S.A. 1993.
- [16] **Οι Γερμανικοί κανονισμοί (DIN):** DIN 40737-3.
- [17] **Romanos P.:** Thermal Model Predictive Control for Demand Side Management Cooling Strategies, Germany: Kassel University Press, 2008.
- [18] **Παπαδιάς Π., Κονταξής Γ.:** Ηλεκτρική Οικονομία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003.
- [19] **ΔΕΣΜΗΕ [Ηλεκτρονικό]:** [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)
- [20] **Κάπρος Π., Ντελκής Κ.:** Οικονομική Ανάλυση Επιχειρήσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2001.

## Βιβλιογραφία

- [21] **Franklin S., Graesser A.:** Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents, Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages, Springer-Verlag, 1996.
- [22] **Russell S., Norving P.:** Artificial Intelligence: A Modern Approach, Prentice-Hall, 1995
- [23] **National Instruments:** LabView Bookshelf – User Manual. U.S.A. 2001.
- [24] **EEX (European Energy Exchange)** [Ηλεκτρονικό]: [www.eex.com](http://www.eex.com)
- [25] **KNX Association** [Ηλεκτρονικό]: [www.knx.org](http://www.knx.org)
- [26] **DEIF A/S** [Ηλεκτρονικό]: [www.deif.com](http://www.deif.com)
- [27] **Golden A/S** [Ηλεκτρονικό]: [www.gma.gr](http://www.gma.gr)
- [28] **3s Software** [Ηλεκτρονικό]: [www.3s-software.com](http://www.3s-software.com)
- [29] **LEM** [Ηλεκτρονικό]: [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [30] **Phoenix Contact** [Ηλεκτρονικό]: [www.phoenixcontact.com](http://www.phoenixcontact.com)
- [31] **Electronic Component's Datasheet Search Site** [Ηλεκτρονικό]: [www.alldatasheets.com](http://www.alldatasheets.com)
- [32] **The ABB Group** [Ηλεκτρονικό]: [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [33] **Yingli Solar** [Ηλεκτρονικό]: [www.yinglisolar.com](http://www.yinglisolar.com)
- [34] **Romanos P., Hatziargyriou N., Bonias S., Daniil N., Pantazis K. and all:** Photovoltaic in Smart Buildings, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg 2009.
- [35] **Μπακόπουλος Α., Χρυσοβέργης Ι.:** Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση, Συμειών, Αθήνα 1999.

## Βιβλιογραφία