



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ
ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΩΝ
ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Ε. Σφήκας

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

.....
Ηλίας Ε. Σφήκας

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

Copyright © Ηλίας Σφήκας, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ταυτόχρονη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και αποθηκευτικών μονάδων σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ετήσιες απώλειες ενέργειας λόγω της σύνθετης αντίστασης των γραμμών. Στο πρόβλημα αυτό παίζουν σημαντικό ρόλο τα χαρακτηριστικά των μονάδων και του δικτύου, αλλά και οι κλιματολογικές συνθήκες. Έτσι, δημιουργείται ένα προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS, το οποίο εφαρμόστηκε διαδοχικά σε δίκτυα διανομής 5, 15 και 31 ζυγών. Αρχικά, για κάθε δίκτυο, λύνεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου για διάφορα σενάρια όσον αφορά τα είδη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ή αποθήκευσης που συνδέονται στους ζυγούς. Έπειτα αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα εκτέλεσης του κώδικα για τα σενάρια αυτά. Τέλος, εισάγονται επιπλέον παράμετροι, εξετάζεται η επίδρασή τους στα αποτελέσματα και προτείνονται τρόποι περαιτέρω επέκτασης της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες, απώλειες ενέργειας, ανταλλαγή ισχύος, βελτιστοποίηση.

ABSTRACT

The scope of this thesis is the simultaneous placement of distributed generation units and storage units in electrical energy distribution networks, in such a way to minimize the annual energy losses that are caused by the impedance of the lines. In this problem, both the characteristics of the units and the network and the climate conditions play a crucial role. Thus, an approximate mathematical model, which takes into consideration these factors, is created to find the optimal solution.

In this work, a software has been developed on a GAMS environment, which was applied consecutively to distribution networks of 5, 15 and 31 buses. Initially, for each network, the optimal power flow problem is solved for various scenarios regarding the type of distributed generation or storage units that are connected to the buses. Then, the results of running the software for these scenarios are analysed and compared. Finally, extra parameters are inserted, their effect on the results are examined and ways to further expand the thesis are proposed.

KEY WORDS

Distributed generation units, wind turbines, photovoltaics, batteries, energy losses, power exchange, optimization.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π., της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, τη συνεργασία του και την καθοδήγηση που μου παρείχε συνεχώς. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιάννη Κατσίγιαννη, επιστημονικό συνεργάτη του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ο οποίος με βοήθησε και με συμβούλεψε πολύ σε σημαντικά ζητήματα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, που με στήριξαν στην πορεία της εργασίας μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.3	Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ)	2
1.4	Δομή της εργασίας	3
1.5	Βιβλιογραφία	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγωγή	5
2.2	Αιολική ενέργεια	5
2.2.1	Χαρακτηριστικά του ανέμου	5
2.2.2	Ταχύτητα του ανέμου	6
2.2.3	Ισχύς του ανέμου	6
2.3	Ανεμογεννήτριες	7
2.3.1	Δομή των ανεμογεννητριών	7
2.3.2	Παραγωγή ισχύος	8
2.3.3	Υπολογισμός των παραμέτρων του προβλήματος	9
2.4	Ηλιακή ενέργεια	10
2.4.1	Γενικά χαρακτηριστικά	10
2.4.2	Αριθμητικοί υπολογισμοί	10
2.4.3	Χρήση της ηλιακής ενέργειας	12
2.5	Φωτοβολταϊκά	12
2.5.1	Κατασκευαστικά στοιχεία	12
2.5.2	Ισοδύναμο κύκλωμα	13
2.5.3	Εξισώσεις	14
2.5.4	Υπολογισμός των παραμέτρων του προβλήματος	15
2.6	Βιβλιογραφία	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1	Εισαγωγή	17
3.2	Τρόποι αποθήκευσης	17
3.2.1	Μπαταρίες μολύβδου – οξέος	18
3.2.2	Μπαταρίες νικελίου – καδμίου	18

3.2.3	Μπαταρίες λιθίου – ιόντος	18
3.2.4	Λοιπές μπαταρίες	19
3.2.5	Στρεφόμενες μάζες – Σφόνδυλοι	19
3.2.6	Υπερ – πυκνωτές (Supercapacitors) και Υπεραγωγία πηνία (SMES)	20
3.2.7	Αντλησιοταμίευση (Pump – hydro storage)	20
3.2.8	Σύστημα συμπίεσης αέρα	21
3.3	Αποθηκευτικές μονάδες του προβλήματος	21
3.4	Βιβλιογραφία	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ

4.1	Εισαγωγή	23
4.2	Σκοπός	23
4.3	Περιγραφή και δεδομένα του προβλήματος	23
4.3.1	Μαθηματικά σύμβολα	23
4.3.2	Δεδομένα δικτύου	25
4.3.3	Δεδομένα ΜΔΠ	25
4.3.4	Δεδομένα μπαταριών	25
4.3.5	Δεδομένα φορτίου	26
4.3.6	Ροή φορτίου και απώλειες αρχικού συστήματος	26
4.3.7	Μεταβλητές σχεδίασης	26
4.4	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος	26
4.4.1	Μοντέλο	26
4.4.2	Αντικειμενική συνάρτηση	27
4.4.3	Περιορισμοί	27
4.5	Μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος	30
4.5.1	Μεθοδολογία	30
4.5.2	Αποτελέσματα	30
4.5.3	Δοκιμαστική μεταβλητή	30
4.6	Βιβλιογραφία	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

5.1	Εισαγωγή	31
5.2	Το περιβάλλον GAMS	31
5.2.1	Γενικές αρχές	31

5.2.2	Είδη μοντέλων	32
5.2.3	Διαδικασία επίλυσης	32
5.3	Μη γραμμικός προγραμματισμός (NLP)	34
5.3.1	Γενικά	34
5.3.2	Ο solver SNOPT	35
5.4	Επεξήγηση του κώδικα με τη βοήθεια παραδείγματος	36
5.5	Βιβλιογραφία	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1	Εισαγωγή	41
6.2	Δίκτυο 5 ζυγών	41
6.2.1	Δεδομένα	41
6.2.2	Μελέτη περιπτώσεων	44
6.2.2.1	Ορισμοί σεναρίων	44
6.2.2.2	Σενάριο 1: Ροή φορτίου αρχικού συστήματος	44
6.2.2.3	Σενάριο 2: Μόνο ανεμογεννήτριες	45
6.2.2.4	Σενάριο 3: Μόνο φωτοβολταϊκά	46
6.2.2.5	Σενάριο 4: Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)	47
6.2.2.6	Σενάριο 5: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους	49
6.2.2.7	Σενάριο 6: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους	51
6.2.2.8	Σενάριο 7: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες και των δύο ειδών	53
6.2.3	Εισαγωγή και άλλων παραμέτρων	58
6.2.3.1	Επίδραση του συντελεστή ισχύος των ανεμογεννητριών	58
6.2.3.2	Περιορισμός υποψήφιων ζυγών τοποθέτησης	58
6.2.3.3	Επίδραση της απόδοσης των μπαταριών	60
6.3	Δίκτυο 15 ζυγών	62
6.3.1	Δεδομένα – Παραδοχές	62
6.3.2	Μελέτη περιπτώσεων	63
6.3.2.1	Ορισμοί σεναρίων	64
6.3.2.2	Σενάριο 1: Ροή φορτίου αρχικού συστήματος	64
6.3.2.3	Σενάριο 2: Μόνο ανεμογεννήτριες	65
6.3.2.4	Σενάριο 3: Μόνο φωτοβολταϊκά	66
6.3.2.5	Σενάριο 4: Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)	67
6.3.2.6	Σενάριο 5: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους	69
6.3.2.7	Σενάριο 6: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους	73

6.3.2.8	Σενάριο 7: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες και των δύο ειδών	78
6.3.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων	82
6.4	Δίκτυο 31 ζυγών	85
6.4.1	Δεδομένα – Παραδοχές	85
6.4.2	Μελέτη περιπτώσεων	86
6.4.2.1	Ορισμοί σεναρίων	87
6.4.2.2	Σενάριο 1: Ροή φορτίου αρχικού συστήματος	87
6.4.2.3	Σενάριο 2: Μόνο ανεμογεννήτριες	89
6.4.2.4	Σενάριο 3: Μόνο φωτοβολταϊκά	89
6.4.2.5	Σενάριο 4: Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)	91
6.4.2.6	Σενάριο 5: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες	93
6.4.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων	100
6.4.4	Επίδραση κι άλλων παραμέτρων	103
6.4.4.1	Επίδραση του πλήθους των υποψήφιων ζυγών	103
6.4.4.2	Επίδραση της απόδοσης των μπαταριών	105
6.5	Βιβλιογραφία	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	107
7.2	Επεκτάσεις της εργασίας	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία συνδέεται με την παρουσία ή την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Είναι πολύ χρήσιμη, γιατί μπορεί εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, είναι διαθέσιμη όποτε ζητηθεί και μεταφέρεται πολύ απλά. Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σφράγισε την πορεία της ανθρωπότητας τον τελευταίο αιώνα.

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ : την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και, επειδή δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που καταναλώνεται.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Τελευταία γίνεται μια ανάπτυξη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης, που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24-ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz, χρησιμοποιούνται όμως, σε ειδικές περιπτώσεις, και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης.

Τέλος, τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης (μέγιστη ζήτηση, συνολική ενέργεια, μορφή καμπύλης ζήτησης) διαμορφώνουν το κόστος μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος προοδευτικά αυξάνεται από την παραγωγή προς τη διανομή, διότι μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις. Το κόστος αυτό καταβάλλεται από τους καταναλωτές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησής τους και με τα τιμολόγια που έχουν καθοριστεί.

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής, καθώς και της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έπειτα παρουσιάζεται η δομή της εργασίας αυτής με μια πολύ σύντομη περιήληψη του κάθε κεφαλαίου της.

1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στο σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς.

Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η αξία των εγκαταστάσεων διανομής κυμαίνεται γύρω στο 30% του συνόλου των εγκαταστάσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που την αποτελούν. Επιπλέον, οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες από ότι στο επίπεδο της μεταφοράς.

Ανάλογα με την κατασκευή τους, τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και σε υπόγεια. Ένα βασικό πλεονέκτημα των εναέριων δικτύων είναι ότι είναι λιγότερο δαπανηρά, ενώ η αποκατάσταση των βλαβών είναι ταχύτερη. Οι χρησιμοποιούμενοι αγωγοί είναι συνήθως από αλουμίνιο, απλό στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης ή ενισχυμένο με χάλυβδα στα δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης. Τα τελευταία χρόνια, οι εναέρια γραμμές χαμηλής τάσης κατασκευάζονται κυρίως με μονωμένους αγωγούς, για ασφάλεια λειτουργίας και μειωμένη ενόχληση στο περιβάλλον. Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων, τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται συνήθως υπόγεια, διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος για τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας από τα κτίρια και, επίσης, για λόγους αισθητικής. Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις, ιδίως στα προάστια των πόλεων, τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται μεικτά, δηλαδή μερικώς εναέρια και μερικώς υπόγεια.

1.3 ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΜΔΠ)

Τα ΣΗΕ έχουν αναπτυχθεί κυρίως ως μεγάλες μονάδες κεντρικής παραγωγής, που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης. Αυτό το δίκτυο χρησιμοποιείται για την μεταφορά της ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, ώστε στη συνέχεια αυτή να διοχετευθεί μέσω του δικτύου διανομής στους καταναλωτές.

Τελευταία σημειώνεται σημαντικό ενδιαφέρον για τη σύνδεση μονάδων παραγωγής στα δίκτυα διανομής, κάτι που είναι γνωστό ως διεσπαρμένη παραγωγή. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής παίζουν περιβαλλοντικοί, τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες. Λόγω της διεύδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο επίπεδο διανομής, τα συστήματα διανομής δεν είναι πλέον παθητικά, τροφοδοτώντας μόνο φορτία, αλλά ενεργά, με ροές ισχύος και τάσεις που καθορίζονται τόσο από την παραγωγή όσο και από τα φορτία. Πρέπει να ακολουθηθεί μια σειρά βημάτων ώστε να εξασφαλιστεί αφενός η καλύτερη χρήση των υφιστάμενων δικτύων διανομής με τη βέλτιστη κατανομή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και αφετέρου ο βέλτιστος προγραμματισμός της αλλαγής των δικτύων από παθητικά σε ενεργά, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους σχετικούς τεχνικούς και εμπορικούς παράγοντες. Οι τεχνικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την επάρκεια του δικτύου, όσον αφορά το θερμικό όριο, τη στάθμη σφάλματος, καθώς και την επαρκή υποστήριξη ως προς την τάση του δικτύου, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η ποιότητα της τροφοδοτούμενης ισχύος. Οι εμπορικοί παράγοντες περιλαμβάνουν το κόστος της

δισπαρμένης παραγωγής, το κόστος εγκατάστασης, το λειτουργικό κόστος, τα προσδοκώμενα έσοδα, και το κέρδος λόγω των μειωμένων απωλειών του δικτύου.

Καθοριστικής σημασίας είναι ο εντοπισμός των κατάλληλων θέσεων και του κατάλληλου μεγέθους των μονάδων δισπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς ή/και οικονομικούς περιορισμούς, ώστε να επιτευχθεί μεγάλη διείσδυση δισπαρμένης παραγωγής και παράλληλα να αποφευχθεί ο κορεσμός του δικτύου, καθώς η τοποθέτηση των πηγών σε τυχαίες θέσεις μειώνει τη συνολική διείσδυση.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μαθηματική επίλυση ενός προβλήματος ταυτόχρονης τοποθέτησης μονάδων δισπαρμένης παραγωγής και μονάδων αποθήκευσης σε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών. Πιο αναλυτικά, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εστιάζοντας στην αιολική και την ηλιακή. Επίσης, καθορίζεται ο ρόλος των πηγών αυτών στο πρόβλημα που μελετάται.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρατίθενται πληροφορίες για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, με ιδιαίτερη έμφαση στις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα.

Στο **Κεφάλαιο 4** ορίζεται το μαθηματικό μοντέλο προς επίλυση, με παράθεση όλων των δεδομένων και των εξισώσεών του. Επίσης, παρουσιάζεται η μεθοδολογία επίλυσής του.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και ορισμένα παραδείγματα χρήσης του λογισμικού βελτιστοποίησης GAMS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βέλτιστης ροής φορτίου, με το GAMS, για εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου σε δίκτυα διανομής 5, 15 και 31 ζυγών.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και, επιπλέον, αναφέρονται πιθανές επεκτάσεις – περαιτέρω εφαρμογές της.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [1.2] Γ. Φίντζος, *Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Μονάδων Δισπαρμένης Παραγωγής με Χρήση Γενετικού Αλγορίθμου και Βέλτιστης Ροής Φορτίου*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2012.

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πεπερασμένο των συμβατικών πηγών ενέργειας και οι δυσμενείς επιπτώσεις που προκαλεί η χρήση τους στο περιβάλλον οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην ολοένα και μεγαλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές περιλαμβάνουν την αιολική ενέργεια, την ηλιακή ενέργεια, τα μικρά υδροηλεκτρικά, τις κυψέλες καυσίμου, την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων, τη γεωθερμική ενέργεια και την ενέργεια της βιομάζας. Ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης των πηγών αυτών είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών και τη δραστική μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, που αποτελεί σήμερα ένα από τα βασικότερα προβλήματα του πλανήτη.

Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη είναι η αιολική ενέργεια, με την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε τιμές συγκρίσιμες με των συμβατικών πηγών και σε μεγάλη σχετικά ισχύ (τάξη MW). Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται με κόστος συγκρίσιμο με των συμβατικών πηγών μόνο για τη θέρμανση νερού με τους ηλιακούς θερμοσίφωνες. Για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το κόστος είναι πολύ υψηλότερο.

Βασικής σημασίας για τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους κατά τη μετατροπή της πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική είναι το εάν υπάρχει έλεγχος του ρυθμού παροχής της πρωτογενούς αυτής ενέργειας, κάτι που δε συμβαίνει με την αιολική ή την ηλιακή ενέργεια, διότι η ταχύτητα του ανέμου ή η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλονται συνεχώς. Η αβεβαιότητα αυτή θέτει περιορισμούς στη διείσδυση των ανανεώσιμων αυτών πηγών ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύγχρονη τεχνολογία των μετατροπέων συχνότητας με ηλεκτρονικά ισχύος παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής τάσης ελεγχόμενου μεγέθους και συχνότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας, καθώς και το πώς αυτή αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών. Έπειτα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας και ο τρόπος μετατροπής της σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών.

2.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.2.1 Χαρακτηριστικά του ανέμου

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αερίων μαζών, η οποία προκαλείται κυρίως από διαφορές θερμοκρασιών εντός της ατμόσφαιρας. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες και οι αντίστοιχοι άνεμοι οφείλονται:

- Στη διαφορά γεωγραφικού πλάτους, οπότε οι άνεμοι είναι σχετικά σταθεροί (εποχικοί άνεμοι, με μεγάλη περίοδο μεταβολής).
- Στη διαφορετική φύση και επιφάνεια του εδάφους (βουνά, πεδιάδες, θάλασσα κτλ.) και χαρακτηρίζονται από μικρή χρονικά διάρκεια (ημερήσια ή ωριαία).

Το κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας, μέσα στο οποίο υπάρχουν οι ανθρώπινες κατασκευές, ονομάζεται «ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα». Η σχετική ταχύτητα του αέρα

μέσα στο στρώμα αυτό ως προς τη γη, μεταβάλλεται ανάλογα με τα εμπόδια που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης. Δηλαδή αυξάνεται συνεχώς από το μηδέν, στην επιφάνεια της γης, μέχρι μιας σταθεράς τιμής στο άνω όριο του στρώματος, όπου η ροή μπορεί να θεωρηθεί ως ελεύθερη. Εντός αυτού του στρώματος η κίνηση του ανέμου είναι τυρβώδης, δηλαδή η ταχύτητά του δεν είναι σταθερή, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

2.2.2 Ταχύτητα του ανέμου

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

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

Η μέση ταχύτητα \bar{V}_w υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{V}_w = \frac{1}{T} \int_0^T V_w(t) dt \quad (2.2)$$

όπου T είναι μια ορισμένη χρονική περίοδος.

Η μέτρηση της μέσης ταχύτητας γίνεται συνήθως με ανεμόμετρα τύπου κυπέλλου ή έλικας. Τα πιο σύγχρονα ανεμόμετρα, εκτός από τη μέτρηση της μέσης ταχύτητας, πραγματοποιούν και στατιστική ανάλυση του ανέμου.

Η μέση ταχύτητα μεταβάλλεται με το ύψος από το έδαφος σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\bar{V}_w(Z)}{\bar{V}_w(H)} = \left(\frac{Z}{H} \right)^a \quad (2.3)$$

όπου Z και H είναι δύο διαφορετικά ύψη και η παράμετρος a εξαρτάται από το είδος του εδάφους. Για παράδειγμα, σε θάλασσα ή άμμο ισούται με 0.1, ενώ σε προάστια πόλεως με 0.32.

Η τύρβη αποτελεί στατιστικό μέγεθος και εκφράζεται με τη βοήθεια της τυπικής απόκλισης και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

2.2.3 Ισχύς του ανέμου

Η ισχύς μιας ποσότητας αέρα, πυκνότητας ρ , επιφάνειας A , η οποία κινείται με ταχύτητα V , ισούται με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται σε αυτή, δηλαδή:

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

διότι ρAV είναι η μάζα του κινούμενου αέρα.

Η πυκνότητα ρ εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία και κυμαίνεται στις πιο συνήθεις συνθήκες από 1.2 έως 1.3 kg/m³.

2.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.3.1 Δομή των ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες είναι έτσι σχεδιασμένες ώστε να αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου και να τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Οι πλέον διαδεδομένες, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα. Τα βασικά μέρη της κατασκευής είναι τα εξής:

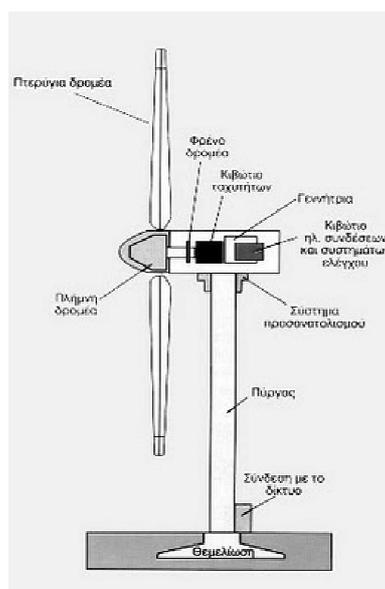
Ο πύργος: Μπορεί να είναι μεταλλικός (δικτυωτός ή συνηθέστερα σωληνωτός), αλλά και από οπλισμένο σκυρόδεμα για ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος. Ο πύργος υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός του ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού έχει βασική σημασία.

Ο δρομέας (έλικα): Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με 2 ή 3 πτερύγια, τα οποία έχουν την αεροδυναμική μορφή των ελίκων αεροπλάνων, με αρκετή συστροφή και συνεχή μείωση της διατομής τους από τη βάση προς τα άκρα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο για τις μικρές ανεμογεννήτριες, υαλόνηματα σε πολλαπλές στρώσεις και εναλλαγή κατευθύνσεων για τις μεσαίες και ανθρακονήματα για τις μεγάλες.

Η στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι σταθερή (πτερύγιο σταθερού βήματος) ή μεταβλητή, δηλαδή να είναι δυνατή η περιστροφή του στο σημείο εδράσεως (πτερύγιο μεταβλητού βήματος). Οι παραλλαγές αυτές είναι μεγάλης σημασίας για τον έλεγχο ισχύος – στροφών της ανεμογεννήτριας.

Ο χώρος των μηχανισμών (άτρακτος): Η άτρακτος περιλαμβάνει το σύστημα εδράσεως του δρομέα στον πύργο, τον πολλαπλασιαστή στροφών, τη γεννήτρια, το φρένο, τους μηχανισμούς ελέγχου του βήματος των πτερυγίων (pitch control) και το σύστημα προσανατολισμού (yaw control).

Ο πολλαπλασιασμός των στροφών επιτυγχάνεται σε πολλές περιπτώσεις με το κιβώτιο ταχυτήτων. Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη. Συνήθως προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια επαγωγής. Οι σχετικά πρόσφατες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα πλήρους ισχύος δεν απαιτούν κιβώτιο. Το σύστημα προσανατολισμού περιστρέφει την άτρακτο και το δρομέα ώστε το επίπεδο περιστροφής τους να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα 2.1: Δομή της ανεμογεννήτριας



Σχήμα 2.2: Αιολικό πάρκο

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η δομή μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο κατασκευάζονται πολλές ανεμογεννήτριες σε μια μεγάλη έκταση. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται αιολικά πάρκα. Τα αιολικά πάρκα είναι συνήθως χερσαία, αλλά τα τελευταία χρόνια δημιουργούνται και πολλά θαλάσσια. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ένα αιολικό πάρκο.

2.3.2 Παραγωγή ισχύος

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

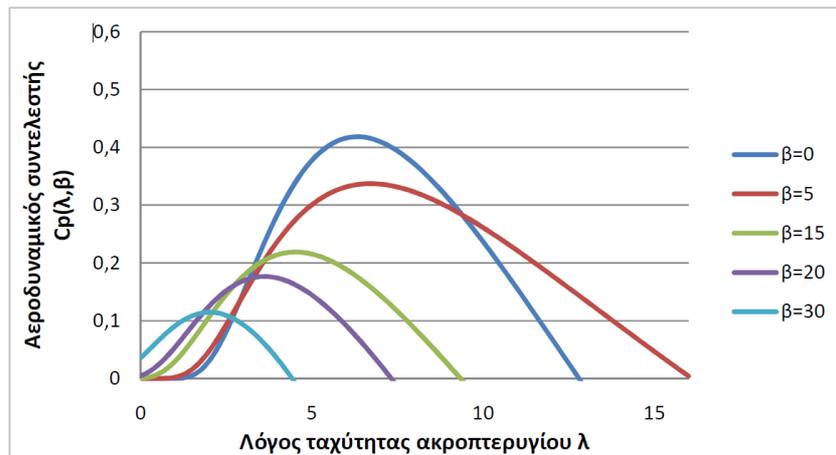
$$P_{rotor} = \frac{1}{2} \rho C_p A v_w^3 \quad (2.5)$$

όπου:

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

Η ισχύς αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας και αποδίδεται έπειτα στο δίκτυο.

Ο συντελεστής C_p εξαρτάται από τα λ και β . Θεωρητικά, ο συντελεστής αυτός δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή $\frac{16}{27}$ (όριο του Betz). Ένα τυπικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Εξάρτηση του C_p από τα λ και β

Υπάρχουν δύο είδη ανεμογεννητριών, οι τύπου stall και οι τύπου pitch. Στις πρώτες το β παραμένει σταθερό, ενώ στις δεύτερες μπορεί να ελεγχθεί. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία ως επί το πλείστον. Μια άλλη κατηγοριοποίηση συνίσταται στον έλεγχο των στροφών. Έτσι, υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Συνεπώς, μέσω του ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και της γωνίας των πτερυγίων, ελέγχεται η τιμή του C_p και κατά επέκταση η παραγόμενη ισχύς.

Οι ανεμογεννήτριες τίθενται σε λειτουργία όταν η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, της ταχύτητας ένταξης (cut-in speed) και της ταχύτητας αποσύνδεσης (cut-out speed). Συνήθως ο έλεγχος γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη ισχύς να είναι:

- Μηδενική για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ταχύτητας ένταξης.
- Γραμμικά εξαρτημένη από την ταχύτητα ανέμου, για ταχύτητες ανέμου μεταξύ της ταχύτητας ένταξης και της ονομαστικής ταχύτητας (nominal speed).
- Ίση με την ονομαστική ισχύ για ταχύτητες ανέμου μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και της ταχύτητας αποσύνδεσης.
- Μηδενική για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ταχύτητας αποσύνδεσης.

Δηλαδή:

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

2.3.3 Υπολογισμός των παραμέτρων του προβλήματος

Για το πρόβλημα, το οποίο παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, και αφορά, μεταξύ άλλων, την τοποθέτηση ανεμογεννητριών σε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, συλλέγονται ετήσια δεδομένα για την ημερήσια και ωριαία ταχύτητα του ανέμου σε έναν τόπο. Έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος (μηνιαίως) της ταχύτητας ανέμου για κάθε ώρα της

τυπικής ημέρας που αντιπροσωπεύει κάθε μήνα. Οι ανεμογεννήτριες που μελετώνται στην εργασία αυτή, υποτίθεται ότι λειτουργούν με ταχύτητα ανέμου ένταξης 4 m/s, ονομαστική ταχύτητα ανέμου 16 m/s και ταχύτητα ανέμου αποσύνδεσης 25 m/s. Συνεπώς, για κάθε ώρα

της τυπικής ημέρας κάθε μήνα υπολογίζεται ο λόγος $\frac{P_{\text{παραγόμενο}}}{P_{\text{nom}}}$, ο οποίος αποτελεί το

στοιχείο πίνακα $windpr_{j,t}$ (Κεφάλαιο 4) και ονομάζεται συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor).

2.4 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Το φάσμα συχνοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνει συχνότητες με μήκος κύματος από 0.3 έως 1.7 μm , με μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο στην περιοχή των 0.5 μm . Η συνολική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου (ισχύς) που προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια αποτελεί την πυκνότητα ισχύος (irradiance), ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, και μετράται σε W/m^2 . Η τιμή της σε ορισμένη ώρα και σημείο στην επιφάνεια της γης εξαρτάται έντονα από τη θέση του ήλιου στον ουρανό, αλλά και από τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης, ένα μέρος της απορροφάται από τα μόρια του αέρα και τα σύννεφα, ένα άλλο διαχέεται εντός της ατμόσφαιρας και ένα τρίτο μέρος προσπίπτει απευθείας στην επιφάνεια του συλλέκτη ακτινοβολίας (ακτινική ακτινοβολία). Η συνολική ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια του συλλέκτη είναι το άθροισμα της ακτινικής, που προσπίπτει επί αυτού απευθείας, και της διάχυτης, που προέρχεται από αυτήν που διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Επί πλέον, όταν ο συλλέκτης εγκαθίσταται με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο, προστίθεται και ένα μικρό σχετικά ποσοστό προερχόμενο από ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα.

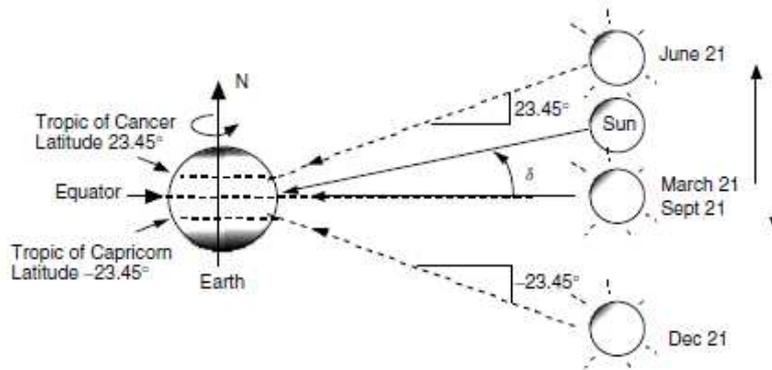
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την κίνηση της γης περί τον ήλιο, μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, με βάση γεωμετρικές σχέσεις. Αντίθετα η μείωση που υφίσταται κατά τη διαδρομή της στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από την κατάσταση της και αποτελεί στατιστικό μέγεθος.

2.4.2 Αριθμητικοί υπολογισμοί

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του 24-ώρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της, και κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά. Αν $G_{sc}=1353 \text{ W}/\text{m}^2$ είναι η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς (πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα) και n η ημέρα του έτους (1 έως 365), η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου είναι:

$$I_0 = G_{sc} \left(1 + 0.034 \cos\left(360^\circ \frac{n}{365}\right) \right) \quad (2.7)$$

Η σχετική θέση του ήλιου και της γης περιγράφεται με βάση την ουράνια σφαίρα, στο κέντρο της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται η γη. Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο φαίνεται ως η κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η γωνία δ (Σχήμα 2.4) μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης και του επιπέδου του ισημερινού ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και υπολογίζεται από τη σχέση:



Σχήμα 2.4: Ηλιακή απόκλιση

$$\delta = 23.45 \sin\left[360^\circ \frac{(n-81)}{365}\right] \quad (2.8)$$

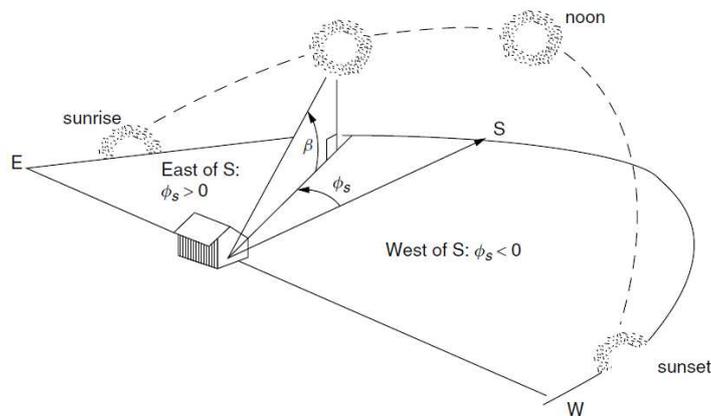
Η στιγμιαία θέση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα ορίζεται από τις γωνίες β (ύψος του ήλιου) και ϕ_s (αζιμουθια γωνία του ήλιου), οι οποίες υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις και φαίνονται στο Σχήμα 2.5:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (2.9)$$

$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \quad (2.10)$$

όπου L είναι το γεωγραφικό πλάτος και H η ωριαία γωνία, δηλαδή η γωνία που πρέπει να περιστραφεί η γη μέχρι να υπάρξει «ηλιακό μεσημέρι» (μέγιστο ύψος ηλίου στον ουρανό) στον τόπο υπό εξέταση. Αφού η γη στρέφεται με 15° ανά ώρα, ισχύει:

$$H = \frac{15^\circ}{\text{ώρα}} (\text{ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.5: Θέση του ήλιου στον ουρανό

Πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς την άνοιξη και το καλοκαίρι ο ήλιος ανατέλλει και δύει βορειότερα της ανατολής και της δύσης αντίστοιχα, η γωνία ϕ_s ενδέχεται να ξεπερνά τις 90° . Η παρακάτω σχέση είναι πολύ χρήσιμη:

$$\text{εάν } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \text{ τότε } |\phi_s| \leq 90^\circ, \text{ αλλιώς } |\phi_s| > 90^\circ \quad (2.12)$$

2.4.3 Χρήση της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση απευθείας για τη θέρμανση χώρων, με κατάλληλο σχεδιασμό των κτιρίων, καθώς και για τη θέρμανση νερού με τους ηλιακούς θερμοσίφωνες. Ευρύτερη όμως μπορεί να είναι η αξιοποίησή της όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή απευθείας ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία μελετώνται παρακάτω.

2.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

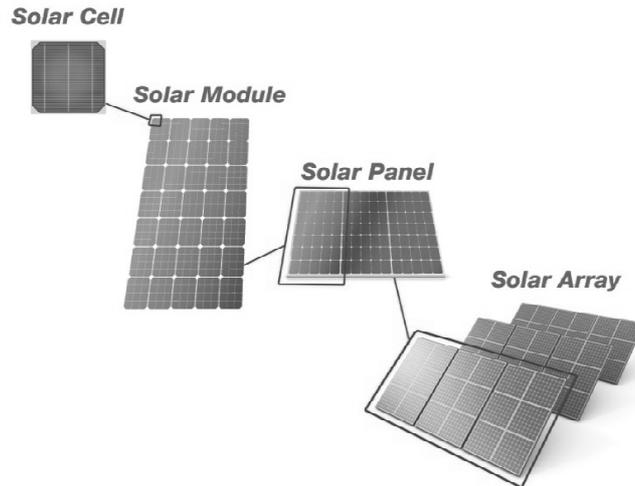
2.5.1 Κατασκευαστικά στοιχεία

Τα κύρια μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Σχήμα 2.6) είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (συλλέκτης) και οι διατάξεις προσαρμογής, μέσω των οποίων η γεννήτρια συνδέεται είτε με το δίκτυο διανομής είτε με τις καταναλώσεις και τις διατάξεις αποθήκευσης, όταν πρόκειται για αυτόνομη εγκατάσταση.

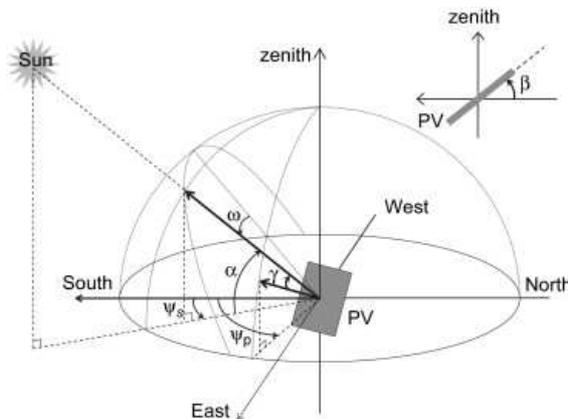
Το βασικό εξάρτημα είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η μονάδα που διαμορφώνεται στο εργοστάσιο και διατίθεται στο εμπόριο είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο περιλαμβάνει έναν αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ένας αριθμός πλαισίων στηρίζονται στην ίδια μεταλλική κατασκευή και σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Πολλά πάνελ σχηματίζουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η γεννήτρια γενικά μπορεί να περιλαμβάνει ένα μόνο πλαίσιο έως περισσότερες της μιας συστοιχίες.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάζεται ως ένωση τύπου p-n κατάλληλων ημιαγωγών (συνήα πυριτίου, Si). Όπως είναι γνωστό, εάν η πλευρά p μιας διόδου p-n συνδεθεί με το θετικό πόλο πηγής συνεχούς ρεύματος και η πλευρά n με τον αρνητικό πόλο, δηλαδή γίνει ορθή πόλωση της διόδου, διέρχεται ένα μεγάλο ρεύμα. Αντίθετα, εάν γίνει ανάστροφη πόλωση, το διερχόμενο ρεύμα είναι πολύ μικρό και ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου. Όταν ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει επί της πλευράς n του φωτοβολταϊκού στοιχείου, μεταξύ των δύο πλευρών της ένωσης εκδηλώνεται διαφορά δυναμικού, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου και αποτελεί το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.

Η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια είναι μέγιστη όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Συνεπώς, για να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης ποσότητας της ηλιακής ενέργειας, θα πρέπει ο συλλέκτης να στρέφεται συνεχώς, ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου. Αυτό όμως κατά κανόνα αυξάνει αδικαιολόγητα το κόστος της εγκατάστασης και εφαρμόζεται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις. Στην πράξη, η θέση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο (κλίση του συλλέκτη, β στο Σχήμα 2.7) και η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της καθέτου στην επιφάνειά του πάνω στο επίπεδο της γης και της κατεύθυνσης προς νότο (αζιμούθια γωνία του συλλέκτη, ψ_p στο Σχήμα 2.7), παραμένει αμετάβλητη ή το πολύ προβλέπεται η χειροκίνητη μεταβολή της μια ή δύο φορές το χρόνο.



Σχήμα 2.6: Εξαρτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων



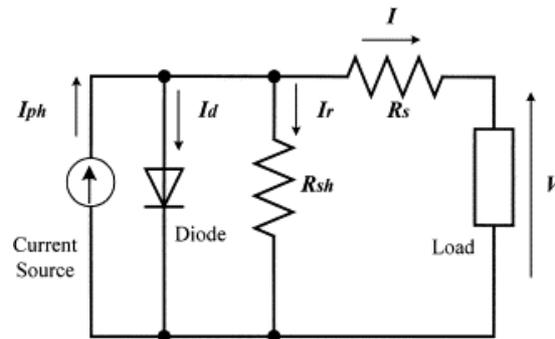
Σχήμα 2.7: Προσανατολισμός του συλλέκτη

2.5.2 Ισοδύναμο κύκλωμα

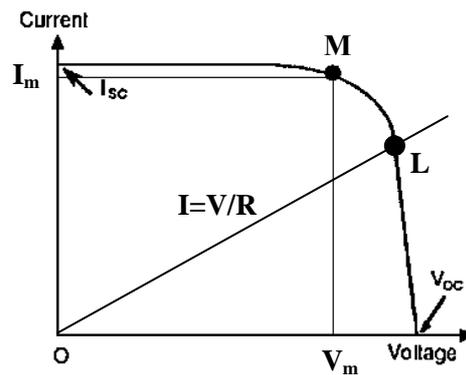
Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα, με το οποίο μπορεί να παρασταθεί ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν στα άκρα του συνδέεται φορτίο. Αποτελείται από μια πηγή εντάσεως, η οποία παράγει το Φωτόρευμα I_{ph} , όταν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία. Η ένταση του ρεύματος είναι ευθέως ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας. Οι αντιστάσεις R_{sh} και R_s εκφράζουν απώλειες ισχύος και συχνά αγνοούνται στα απλοποιημένα μοντέλα.

Η χαρακτηριστική εντάσεως εξόδου (I) – τάσεως εξόδου (V) φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Το σημείο λειτουργίας L ορίζεται από την τομή της χαρακτηριστικής με την ευθεία $I=V/R$, όπου R η αντίσταση φορτίου. Για ανοιχτό κύκλωμα, ορίζεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} , ενώ για βραχυκύκλωμα ορίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} .

Η ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο και αποδίδεται στο φορτίο είναι $P=V \cdot I$ και γίνεται μέγιστη για μια ορισμένη τιμή της αντίστασης. Η λειτουργία αντιστοιχεί τότε στο σημείο M , που ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος και χαρακτηρίζεται από το ρεύμα I_m και την τάση V_m .



Σχήμα 2.8: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου



Σχήμα 2.9: Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η χαρακτηριστική καμπύλη εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία. Αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας επιφέρει γραμμική αύξηση του ρεύματος I_{sc} και λογαριθμική αύξηση της τάσης V_{oc} . Αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει πολύ μικρή αύξηση του I_{sc} και γραμμική μείωση της V_{oc} .

2.5.3 Εξισώσεις

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, δηλαδή οι τιμές των V_{oc} , I_{sc} , V_m και I_m , δίνονται στους καταλόγους των κατασκευαστών τους για ορισμένες τυποποιημένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (τιμές αναφοράς), συνήθως $G_{av}=1\text{kW/m}^2$ και $T_{av}=25^\circ\text{C}$. Η αναγωγή σε ορισμένες πραγματικές συνθήκες λειτουργίας γίνεται με τους παρακάτω τύπους.

Αρχικά υπολογίζεται η θερμοκρασία T_c του φωτοβολταϊκού στοιχείου:

$$T_c = T_a + \frac{T_n - 20}{0.8} s \quad (2.13)$$

Πίνακας 2.1: Παράμετροι εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων

V_{oc}	55.5V
I_{sc}	1.8A
T_n	43°C
K_v	194mV/°C
K_i	1.4mA/°C

όπου T_a είναι η εξωτερική θερμοκρασία, s η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (kW/m^2) και T_n η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η οποία δίνεται επίσης από τους κατασκευαστές.

Οι παρακάτω σχέσεις λαμβάνουν υπ' όψιν την επίδραση της έντασης της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας:

$$V_y = V_{oc} - K_v(T_c - 25) \quad (2.14)$$

$$I_y = s[I_{sc} + K_i(T_c - 25)] \quad (2.15)$$

όπου οι συντελεστές K_v και K_i αφορούν την επίδραση αλλαγών της θερμοκρασίας στην τάση και στην ένταση αντίστοιχα και είναι επίσης γνωστοί.

Ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor) ορίζεται ως:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.16)$$

Έτσι, η ισχύς που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$P_{\text{παραγόμενο}} = FF \cdot V_y \cdot I_y \quad (2.17)$$

Η τάση και το ρεύμα που παράγονται είναι συνεχή μεγέθη, οπότε για να συνδεθεί μια φωτοβολταϊκή συστοιχία στο δίκτυο διανομής, παρεμβάλλονται αντιστροφείς και άλλα ηλεκτρονικά ισχύος, όπως μετατροπείς ή ελεγκτές.

2.5.4 Υπολογισμός των παραμέτρων του προβλήματος

Για το πρόβλημα, το οποίο παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, και αφορά επίσης την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, συλλέγονται ετήσια δεδομένα για την ημερήσια και ωριαία ηλιοφάνεια σε έναν τόπο. Έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος (μηνιαίως) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο σημείο εξέτασης για κάθε ώρα της τυπικής ημέρας που αντιπροσωπεύει κάθε μήνα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα που μελετώνται στην εργασία αυτή, υποτίθεται ότι έχουν τις τιμές παραμέτρων του Πίνακα 2.1. Συνεπώς, για κάθε ώρα της τυπικής ημέρας κάθε μήνα

υπολογίζεται ο λόγος $\frac{P_{\text{παραγόμενο}}}{P_{\text{nom}}} = \frac{P_{\text{παραγόμενο}}}{V_m I_m} = \frac{V_y I_y}{V_{oc} I_{sc}}$, ο οποίος αποτελεί το στοιχείο

πίνακα $\text{solarpr}_{j,t}$ (Κεφάλαιο 4) και ονομάζεται συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor).

2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 360-370, Feb. 2010.
- [2.2] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Hoboken, New Jersey: Wiley – Interscience, 2004.
- [2.3] Σ. Παπαθανασίου, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Παραδόσεων*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.

- [2.4] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Ηλιακή Ενέργεια – Φωτοβολταϊκά Συστήματα*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2.5] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1997.

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ολοένα και αυξανόμενη ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα δίκτυα διανομής, πέρα από τα πολλά πλεονεκτήματα, επιφέρει και πολλά προβλήματα, λόγω της αβεβαιότητας και μη συνεχούς διαθεσιμότητας των πηγών αυτών, ειδικά όταν πρόκειται για αξιοποίηση της αιολικής ή της ηλιακής ενέργειας. Μια λύση στο ζήτημα αυτό αποτελεί η αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, ώστε να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη στιγμή, όταν η παραγωγή των πηγών δε θα επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Παράλληλα, οι αποθηκευτικές διατάξεις χρησιμοποιούνται και για διάφορους άλλους σκοπούς, όπως αποφυγή παραβίασης τεχνικών ελαχίστων θερμικών μονάδων, οικονομική εκμετάλλευση της διαφοράς τιμών (αποθηκεύοντας ενέργεια στις ώρες χαμηλού κόστους και χρησιμοποιώντας την στις ώρες υψηλού κόστους), παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, περιορισμό των απωλειών του δικτύου, εκκίνηση μετά από διακοπή τάσης, βελτίωση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των νησιωτικών συστημάτων ή υποστήριξη τάσης και συχνότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικοί τρόποι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στις μπαταρίες. Έπειτα αναλύονται τα χαρακτηριστικά των αποθηκευτικών μονάδων για το πρόβλημα που μελετάται στην εργασία αυτή.

3.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορεί να αποθηκευθεί ως έχει με συνέπεια να μετατρέπεται σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, η οποία είναι ευκολότερο να αποθηκευτεί και να μετατραπεί πάλι πίσω σε ηλεκτρική ενέργεια, με τις αντίστοιχες απώλειες μετατροπής. Η κυκλική απόδοση αυτής της διαδικασίας συμβολίζεται με ξ . Η αναγκαία συνθήκη για να είναι οικονομικά βιώσιμη η αποθήκευση ενέργειας για κάποιες από τις παραπάνω εφαρμογές, αγνοώντας το κόστος εγκατάστασής της, είναι η ικανοποίηση της σχέσης:

$$\xi > \frac{Cost_low}{Cost_high} \quad (3.1)$$

όπου $Cost_low$ είναι το κόστος για την αποθήκευση ενέργειας και $Cost_high$ είναι το όφελος από τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Για να είναι πλήρως οικονομικά βιώσιμη η εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας, θα πρέπει η ωφέλεια από την αποθήκευση να είναι τέτοια, ώστε να αποπληρώνεται σε λογικό χρονικό διάστημα η επένδυση για την προμήθεια και συντήρηση της αποθηκευτικής διάταξης. Γενικά, τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για τα δίκτυα πρέπει να είναι υψηλού βαθμού απόδοσης, ευέλικτα στη λειτουργία τους με μεγάλη διάρκεια ζωής, χαμηλό κόστος λειτουργίας – συντήρησης και χαμηλό κόστος επένδυσης.

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και, στη συνέχεια, στην εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική.

Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις αποθήκευσης παρατίθενται παρακάτω.

3.2.1 Μπαταρίες μολύβδου – οξέος

Οι μπαταρίες αυτές είναι οι πιο διαδεδομένες παγκοσμίως. Για το ένα τρίτο του πληθυσμού της γης που ακόμη δεν είναι συνδεδεμένο με δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η μπαταρία παραμένει ο βασικός φορέας ενεργειακής αποθήκευσης. Ο περιορισμένος κύκλος ζωής των μπαταριών αυτών (ειδικά σε συνθήκες βαθιάς εκφόρτισης), εξισορροπείται από το χαμηλό κόστους τους, αν και καταβάλλονται σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για την κατανόηση των μηχανισμών γήρανσής τους και την πρόταση τεχνικών αντιμετώπισής της. Τα συστήματα μολύβδου – οξέος βελτιώνονται σταδιακά και με διάφορους τρόπους. Μια από τις βελτιώσεις είναι η χρήση ηλεκτρολυτών σε μορφή gel, αντί για υγρό, με αποτέλεσμα να μπορούν οι μπαταρίες να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε θέση, χωρίς να χρειαστεί να ανεφοδιαστούν και να είναι ανθεκτικές σε κραδασμούς. Στις ρυθμιζόμενες από βαλβίδα μπαταρίες μολύβδου – οξέος (VRLA) η διαφυγή αερίου ρυθμίζεται από ευαίσθητες βαλβίδες πίεσης. Η απόδοση και ο χρόνος ζωής βελτιώνονται από τις καινοτόμες τεχνικές φόρτισης, όπως οι παλμικές μέθοδοι φόρτισης.

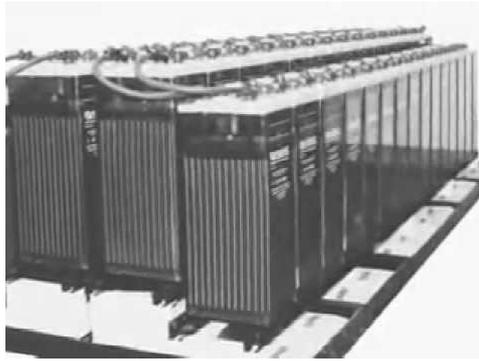
3.2.2 Μπαταρίες νικελίου – καδμίου

Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου, παρόλο που είναι ακριβότερες από τις μολύβδου – οξέος, έχουν διπλάσιο χρόνο ζωής και, επειδή δεν απαιτείται παρακολούθηση κατά τη λειτουργία τους, μπορούν να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες και στην κυριολεξία να ξεχαστούν. Στα μειονεκτήματά τους, εκτός από το κόστος, ανήκουν και η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών αποβλήτων (ύστερα από τη χρήση της μπαταρίας), καθώς και η πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη. Η πιο χαρακτηριστική εγκατάσταση αυτού του είδους μπαταριών είναι στην Αλάσκα για μια τοπική εταιρία και η οποία περιλαμβάνει 13760 μπαταρίες νικελίου – καδμίου (Ni-Cd) και μπορεί να παρέχει 27 MW για 15 λεπτά και 46MW για 4 μόλις λεπτά. Μόνο για το 2006, η συνεισφορά της συγκεκριμένης εγκατάστασης ήταν η αποφυγή συνολικά 82 περιπτώσεων διακοπών ηλεκτρισμού που, αν πραγματοποιούνταν, θα επηρέαζαν έως και 310000 καταναλωτές, με συνολική διάρκεια διακοπών 725 λεπτά.

Ως εναλλακτική πρόταση για αυτές τις μπαταρίες είναι οι μπαταρίες Ni-MH (nickel – metal hybride) οι οποίες έχουν λιγότερο τοξική συμπεριφορά, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής.

3.2.3 Μπαταρίες λιθίου – ιόντος

Οι μπαταρίες αυτές έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (300–400 kWh/m³ λιθίου), υψηλότερη απόδοση μετατροπής και μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 3000 κύκλοι για βάθος εκφόρτισης 80%). Επειδή το λίθιο είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο, οι μπαταρίες που βασίζονται σε αυτό μπορούν να είναι κατά πολύ ελαφρύτερες από τις συνηθισμένες. Για αυτό το λόγο και λόγω της μεγάλης απόδοσής τους, βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα κινητά τηλέφωνα και στους φορητούς υπολογιστές. Πρόσφατα έχει αρχίσει και η δυνατότητα επέκτασης χρήσης μπαταριών Li-Ion και σε εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.1: Μπαταρίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

3.2.4 Λοιπές μπαταρίες

Οι μπαταρίες NaS έχουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, 4.2 φορές κατ' όγκο και 5.8 φορές κατά βάρος, από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, με μικρότερες ανάγκες συντήρησης. Η πιο σημαντική εγκατάσταση τέτοιων μπαταριών αφορά εγκαταστάσεις ενίσχυσης αέργου ισχύος σε υποσταθμούς, παρέχοντας όμως και τη δυνατότητα κυκλικής λειτουργίας. Οι μπαταρίες metal – air, αν και συμπαγείς και οικονομικές, δε μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν με σημαντική απόδοση. Λοιπές μπαταρίες, περισσότερο ή λιγότερο έτοιμες για εμπορική αξιοποίηση, είναι οι ZnBr, οι ZnCl₂, οι νικελίου – ψευδαργύρου και οι ψευδαργύρου – άνθρακα. Μια τυπική αποθηκευτική διάταξη με μπαταρίες φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

3.2.5 Στρεφόμενες μάζες - Σφόνδυλοι

Οι στρεφόμενες μάζες ή σφόνδυλοι (flywheels), αναμένεται να έχουν εφαρμογές παροχής ισχύος και ενέργειας για μικρά χρονικά διαστήματα, ο κύριος ρόλος τους όμως θα είναι η παροχή εφεδρείας. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με την περιστροφή μίας στρεφόμενης μάζας σε υψηλή ταχύτητα μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική, με τη σύνδεση της μάζας σε μια γεννήτρια. Το ποσό ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στη στρεφόμενη μάζα είναι ανάλογο της μάζας του στροφέα και του τετραγώνου της ταχύτητας του στροφέα.

Τα τελευταία χρόνια, στο σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών, η έμφαση έχει μετατοπιστεί από το σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές περιστροφικές ταχύτητες. Ταχύτητες μέχρι 40000 rpm έχουν ήδη επιτευχθεί, ενώ μέχρι 60000 rpm προβλέπονται για τις μελλοντικές γενεές.

Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται μεταξύ λίγων δευτερολέπτων και 15–30 λεπτών, βοηθώντας περισσότερο σε εφαρμογές ισχύος παρά ενέργειας.

Αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα στρεφόμενων μαζών δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80–90%, χωρίς ιδιαίτερη πτώση με το χρόνο ζωής τους, ο οποίος φτάνει τα 15–20 χρόνια (για χρήση σε υψηλές συχνότητες).

Οι στρεφόμενες μάζες μπορούν να συμπληρώσουν τις μπαταρίες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή διείδυση μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξισορροπώντας τις απότομες και γρήγορες μεταβολές στο φορτίο. Οι μεταβολές αυτού του είδους θα έφθειραν γρήγορα τις μπαταρίες λόγω των περιορισμένων κύκλων ζωής που έχουν.

3.2.6 Υπερ – πυκνωτές (Supercapacitors) και Υπεραγωγία πηνία (SMES)

Οι μονάδες υπερ – πυκνωτών έχουν χωρητικότητα ισχύος και ενέργειας χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών πυκνωτών και είναι ικανοί να παρέχουν ισχύ της τάξης των 100kW, ενώ η ενέργειά τους είναι δυνατό να διοχετευτεί μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου ως και μέσα σε ένα λεπτό. Οι κυριότερες εφαρμογές τους αφορούν υποστήριξη τάσης, βελτίωση του συντελεστή ισχύος και υποστήριξη ενεργού και αέργου ισχύος.

Οι διατάξεις SMES στηρίζουν τη λειτουργία τους στη χρήση της τεχνολογίας των υπεραγωγίων υλικών, γι' αυτό και απαιτούν σημαντικές ποσότητες ψύξης.

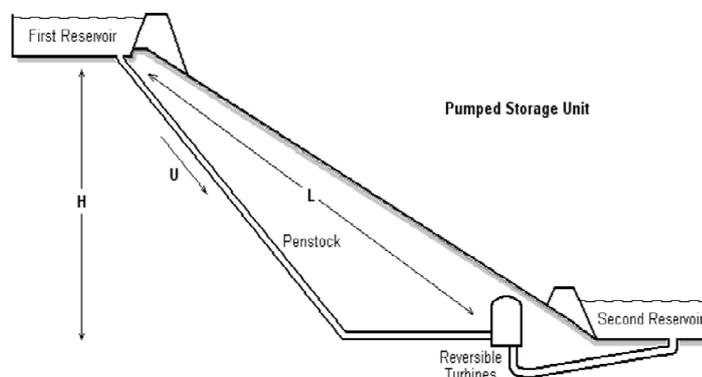
Και οι δύο τύπου διατάξεις, ειδικά οι συσκευές SMES, αποτελούν μια αποτελεσματική λύση όσον αφορά την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος στα δίκτυα διανομής. Μάλιστα υπάρχουν εταιρίες στις ΗΠΑ οι οποίες διαθέτουν τέτοιου είδους μεταφερόμενες μονάδες σε containers για την εφαρμογή τους σε διάφορες περιοχές του δικτύου διανομής.

3.2.7 Αντλησιοταμίευση (Pump – hydro storage)

Η πιο διαδεδομένη ιδέα για τη μαζική αποθήκευση ενέργειας είναι η χρήση μονάδων αντλησιοταμίευσης. Η γενική ιδέα της αντλησιοταμίευσης είναι η ακόλουθη: σε μία δεξαμενή βρίσκεται αποθηκευμένη μία ποσότητα νερού. Όταν ζητηθεί ισχύς, το νερό μπορεί να πέσει σε μία χαμηλότερα τοποθετημένη (δεύτερη) δεξαμενή με τη βοήθεια υδροστροβίλου, ενώ όταν δεν υπάρχει πια ζήτηση ισχύος μπορεί με αντλίες να οδηγηθεί ξανά πίσω στην πρώτη (ψηλότερη) δεξαμενή.

Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη: μία ανώτερη δεξαμενή (First Reservoir), αγωγοί νερού (Penstock), αντλία, υδροστροβίλος ή στρόβιλοι αντιστρέψιμης φοράς (Reversible Turbines) και μία κατώτερη, δεύτερη δεξαμενή (Second Reservoir), η οποία μπορεί να είναι ακόμη και η θάλασσα. Μια χαρακτηριστική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.

Παρόλο που η αντλησιοταμίευση μπορεί να δώσει υψηλή χωρητικότητα ενέργειας σε χαμηλό κόστος, δε χρησιμοποιείται όσο θα ήταν αναμενόμενο. Ο λόγος είναι αφενός η εξειδικευμένη περιοχή που χρειάζεται για να κατασκευαστεί η εγκατάσταση και αφετέρου ο χρόνος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία και να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, αφού αν η αντλία δεν λειτουργεί ήδη, χρειάζεται χρόνος ένταξης. Για αυτό ως επί το πλείστον χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Παγκοσμίως είναι διαθέσιμα πάνω από 90GW ισχύος από αντλησιοταμίευση και σε μερικές περιπτώσεις σε συνδυασμό με φράγματα. Στην Ελλάδα, δύο τέτοιους είδους σταθμοί υπάρχουν, στη Σφηκιά και στον υδροηλεκτρικό σταθμό Θησαυρού.



Σχήμα 3.2: Τυπική διάταξη αντλησιοταμίευσης

3.2.8 Σύστημα συμπίεσης αέρα

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι ο αέρας μπορεί να συμπιεστεί στα 800psi ως 1600psi σε ειδικές γεωλογικές δομές και να αποσυμπιεστεί ώστε, κινώντας αεριοστρόβιλο, να παράγει ηλεκτρισμό. Συμπίεση του αέρα μπορεί να γίνει π.χ. κατά τη διάρκεια των κοιλάδων φορτίου και αποσυμπίεση κατά τη διάρκεια των αιχμών φορτίου. Λόγω της ειδικής γεωλογικής δομής που απαιτεί υπόστρωμα ορυκτού άλατος, μόνο δύο τέτοιες εγκαταστάσεις υπάρχουν παγκοσμίως, η μία στις ΗΠΑ και η άλλη στη Γερμανία.

3.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι αποθηκευτικές μονάδες που μελετώνται στην εργασία αυτή, υποτίθεται ότι είναι μπαταρίες τύπου ZnBr, διότι αυτές θεωρούνται κατάλληλες για την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής. Η τεχνολογία τους βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των κυψελών καυσίμου και η ισχύς τους αποσυνδέεται από την αποθηκευτική ικανότητα, η οποία εξαρτάται από την ποσότητα του ηλεκτρολύτη. Όλες ακολουθούν έναν ημερήσιο κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης, οι ώρες του οποίου μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα. Οι μπαταρίες αυτές συνδέονται στους ζυγούς του δικτύου και λειτουργούν ως φορτίο κατά τις ώρες φόρτισης και ως πηγή παροχής ενεργού ισχύος κατά τις ώρες εκφόρτισης. Η ποσότητα της ισχύος που εισέρχεται ή εξέρχεται από τις μπαταρίες ανά πάσα στιγμή, καθώς και η ενεργειακή χωρητικότητα αυτών, αποτελούν μερικές από τις μεταβλητές του προβλήματος, όπως θα αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 4.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1815-1822, Nov. 2010.
- [3.2] Γ. Χατζηβασιλειάδης, *Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας για τα Νησιωτικά Συστήματα*, Ρόδος: ΤΕΕ, 2009. [Online].
Διαθέσιμο: http://library.tee.gr/digital/m2385/m2385_hatzivasiliadis.pdf.
- [3.3] *Αποθήκευση ενέργειας*. [Online].
Διαθέσιμο: http://www.storiesproject.eu/docs/energystorage_greek.pdf.

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού δικτύου και οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στον τόπο αυτό επηρεάζουν καθοριστικά τα σημεία τοποθέτησης και την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η κατανομή τους καλό είναι να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν οι ενεργειακές ή οικονομικές απώλειες του δικτύου. Επιπλέον, η ένταξη αποθηκευτικών μονάδων μπορεί να επιφέρει περαιτέρω βελτιστοποίηση σε πολλούς τομείς.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πρόβλημα προς επίλυση. Αρχικά παρατίθενται τα μαθηματικά σύμβολα, τα δεδομένα και το ζητούμενο. Έπειτα καθορίζεται το μαθηματικό μοντέλο και παρουσιάζονται οι διάφορες εξισώσεις του. Το μοντέλο αυτό αποτελεί συνδυασμό και επέκταση προηγούμενων εργασιών που έχουν γίνει πάνω σε θέματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης σε δίκτυα διανομής.

4.2 ΣΚΟΠΟΣ

Στο πρόβλημα αυτό μελετείται ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελείται από διάφορους ζυγούς, γραμμές διασύνδεσης και ηλεκτρικά φορτία σταθερής ισχύος. Ο σκοπός είναι να τοποθετηθούν ταυτόχρονα διάφορες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά) καθώς και αποθηκευτικές μονάδες (τυπικά μπαταρίες) στους υποψήφιους ζυγούς με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες του δικτύου. Η εργασία αυτή αφορά επομένως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.3.1 Μαθηματικά σύμβολα

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω ενότητες του Κεφαλαίου 4 είναι τα ακόλουθα:

R_{ik}	Αντίσταση της γραμμής μεταξύ των ζυγών i και k
X_{ik}	Αντίδραση της γραμμής μεταξύ των ζυγών i και k
Y_{ik}	Στοιχείο πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών που αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα

	μεταξύ των ζυγών i και k
G_{ik}	Πραγματικό μέρος του στοιχείου Y_{ik} του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών
B_{ik}	Φανταστικό μέρος του στοιχείου Y_{ik} του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών
$A(i)$	Το σύνολο $A(i)$ περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς που συνδέονται στο ζυγό i
$windpr_{j,t}$	Στοιχείο πίνακα που δηλώνει το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος που παράγουν οι ανεμογεννήτριες την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$solarpr_{j,t}$	Στοιχείο πίνακα που δηλώνει το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος που παράγουν τα φωτοβολταϊκά την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$cload_{j,t}$	Στοιχείο πίνακα που δηλώνει το ποσοστό του εγκατεστημένου φορτίο την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$P_{\zeta\gamma\omicron\upsilon\acute{o}\ i}$	Εγκατεστημένη ενεργός ισχύς φορτίου στο ζυγό i
$Q_{\zeta\gamma\omicron\upsilon\acute{o}\ i}$	Εγκατεστημένη άεργος ισχύς φορτίου στο ζυγό i
z	Ετήσιες απώλειες ενέργειας / Αντικειμενική συνάρτηση
$powerloss_{j,t}$	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος γραμμών την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
pw_i	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στο ζυγό i
ps_i	Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς στο ζυγό i
φ_w	Γωνία συντελεστή ισχύος ανεμογεννητριών
φ_s	Γωνία συντελεστή ισχύος φωτοβολταϊκών
$pin_{j,t,l}$	Ενεργός ισχύς που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον υποσταθμό την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$qin_{j,t,l}$	Άεργος ισχύς που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον υποσταθμό την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$v_{j,t,i}$	Τάση ζυγού i την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$d_{j,t,i}$	Γωνία ζυγού i την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j
$pch1_{j,t,i}$	Ισχύς φόρτισης της μπαταρίας πρώτου είδους την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j , που βρίσκεται στο ζυγό i
$pdis1_{j,t,i}$	Ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας πρώτου είδους την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j , που βρίσκεται στο ζυγό i
$p1_i$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας πρώτου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i
$ech1_{j,i}$	Ενέργεια που αποθηκεύεται στη μπαταρία πρώτου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i , κατά τη διάρκεια της τυπικής ημέρας του μήνα j
$edis1_{j,i}$	Ενέργεια που εκλύεται από τη μπαταρία πρώτου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i , κατά τη διάρκεια της τυπικής ημέρας του μήνα j
$e1_i$	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία πρώτου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i
$pch2_{j,t,i}$	Ισχύς φόρτισης της μπαταρίας δεύτερου είδους την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j , που βρίσκεται στο ζυγό i
$pdis2_{j,t,i}$	Ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας δεύτερου είδους την ώρα t της τυπικής ημέρας του μήνα j , που βρίσκεται στο ζυγό i
$p2_i$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας δεύτερου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i
$ech2_{j,i}$	Ενέργεια που αποθηκεύεται στη μπαταρία δεύτερου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i , κατά τη διάρκεια της τυπικής ημέρας του μήνα j

$edis_{2,j,i}$	Ενέργεια που εκλύεται από τη μπαταρία δεύτερου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i , κατά τη διάρκεια της τυπικής ημέρας του μήνα j
$e_{2,i}$	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία δεύτερου είδους που βρίσκεται στο ζυγό i
$bal_{j,t}$	Δοκιμαστική μεταβλητή ελέγχου
$days_j$	Διάνυσμα που περιέχει τον αριθμό των ημερών κάθε μήνα

4.3.2 Δεδομένα δικτύου

Έστω ένα δίκτυο διανομής n ζυγών, με τις αντίστοιχες γραμμές μεταξύ τους. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης, οπότε σε αυτό το ζυγό δεν μπορεί να συνδεθεί ούτε ΜΔΠ ούτε μπαταρία. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ). Τα δεδομένα του δικτύου είναι τα ακόλουθα:

1) R και X των γραμμών διανομής

Από αυτά υπολογίζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y . Είναι $Y_{ii} = \sum_k^{k \in A(i)} \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}}$ και

$$Y_{ik} = -\frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}}$$

2) Όρια τάσεων και γωνιών σε όλους τους ζυγούς

3) Στο ζυγό ταλάντωσης ισχύει ότι $v_1=1$ α.μ. και $\delta_1=0$.

4.3.3 Δεδομένα ΜΔΠ

Με βάση πολυετή δεδομένα για την ταχύτητα ανέμου και την ηλιοφάνεια στον τόπο του δικτύου ανά πάσα στιγμή, υπολογίζονται (με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2) οι πίνακες $windpr_{j,t}$ και $solarpr_{j,t}$.

4.3.4 Δεδομένα μπαταριών

Διατίθενται δύο είδη μπαταριών, που όλες τους ακολουθούν έναν κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης κάθε μέρα. Οι πρώτες αξιοποιούν τον άνεμο και το χαμηλό φορτίο τις νυχτερινές ώρες (για λόγους ευκολίας θεωρούνται οι ώρες $t1$ έως $t8$), αποθηκεύοντας ενέργεια τότε και αποδίδοντάς την την ημέρα (θεωρούνται οι ώρες $t9$ έως $t24$), που υπάρχει υψηλό φορτίο. Οι δεύτερες αξιοποιούν την ηλιοφάνεια τις ημερήσιες ώρες ($t9$ έως $t24$), αποθηκεύοντας τότε ενέργεια και αποδίδοντάς την τη νύχτα ($t1$ έως $t8$), που τα φωτοβολταϊκά είναι ουσιαστικά αδρανή.

4.3.5 Δεδομένα φορτίου

Τα εγκατεστημένα φορτία των ζυγών ($P_{\zetaυγού\ i}$, $Q_{\zetaυγού\ i}$) είναι γνωστά. Επίσης, με βάση πολυετή δεδομένα για τη ζήτηση φορτίου ανά πάσα στιγμή, διαμορφώνεται η καμπύλη φορτίου και υπολογίζεται ο πίνακας $load_{j,i}$.

4.3.6 Ροή φορτίου και απώλειες αρχικού συστήματος

Σε κάθε ζυγό, ισχύουν οι εξισώσεις ροής φορτίου. Έτσι, για την ενεργό ισχύ του ζυγού i , ισχύει:

$$P_{εισερχόμενο,i} - P_{εξερχόμενο,i} = v_i^2 G_{ii} + v_i \sum_k^{i \neq k} v_k (G_{ik} \cos(d_i - d_k) + B_{ik} \sin(d_i - d_k))$$

Για την άεργο ισχύ του ζυγού i , ισχύει:

$$Q_{εισερχόμενο,i} - Q_{εξερχόμενο,i} = -v_i^2 B_{ii} + v_i \sum_k^{i \neq k} v_k (G_{ik} \sin(d_i - d_k) - B_{ik} \cos(d_i - d_k))$$

Οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι:

$$P_{απωλειών} = 0.5 \sum_{i,k}^{i \neq k} G_{ik} (v_i^2 + v_k^2 - 2v_i v_k \cos(d_k - d_i))$$

4.3.7 Μεταβλητές σχεδίασης

Οι μεταβλητές σχεδίασης, δηλαδή τα ζητούμενα του προβλήματος, είναι ο καθορισμός του μεγέθους των ΜΔΠ σε κάθε υπονήφιο ζυγό, δηλαδή της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος \mathbf{pw}_i και της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος \mathbf{ps}_i , καθώς και της ικανότητας των μπαταριών σε κάθε υπονήφιο ζυγό, δηλαδή της μέγιστης ισχύος που μπορούν να δώσουν ή να πάρουν από το δίκτυο (δηλαδή τα μεγέθη $\mathbf{p1}_i$ και $\mathbf{p2}_i$) και της μέγιστης ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν (δηλαδή τα μεγέθη $\mathbf{e1}_i$ και $\mathbf{e2}_i$).

4.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.4.1 Μοντέλο

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος έγκειται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης υπό ορισμένους περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες του δικτύου, ενώ οι περιορισμοί αφορούν τα χαρακτηριστικά του δικτύου, των ΜΔΠ και των μπαταριών. Στους περιορισμούς αυτούς υπεισέρχονται τα μεγέθη που ψάχνονται, οπότε με τη βοήθεια αλγορίθμων βελτιστοποίησης μπορούν να καθοριστούν. Το πρόβλημα μελετάται σε χρονικά διαστήματα μίας (1) ώρας, δηλαδή υποτίθεται ότι σε αυτά τα διαστήματα όλα παραμένουν σταθερά. Επίσης υποτίθεται ότι όλες οι μέρες κάθε μήνα είναι ολόιδιες και αντιπροσωπεύονται από την τυπική ημέρα του μήνα αυτού. Έτσι, υπάρχουν $12 \cdot 24 = 288$ καταστάσεις και στην καθεμία πρέπει να ισχύουν όλοι οι περιορισμοί. Το μοντέλο (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί) παρουσιάζεται στη συνέχεια.

4.4.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των ετήσιων απωλειών ενέργειας z :

$$z = \sum_{j=1}^{12} days_j \sum_{t=1}^{24} powerloss_{j,t} \quad (4.1)$$

όπου

$$powerloss_{j,t} = 0.5 \sum_{i,k}^{i \neq k} G_{ik} (v_{j,t,i}^2 + v_{j,t,k}^2 - 2v_{j,t,i}v_{j,t,k} \cos(d_{j,t,k} - d_{j,t,i})) \quad (4.2)$$

$$\forall j,t$$

Οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες είναι το άθροισμα για όλες τις ώρες της ημέρας και για όλες τις ημέρες του έτους των ωριαίων απωλειών ενέργειας, που είναι

$$powerloss_{j,t} * 1h = powerloss_{j,t}$$

4.4.3 Περιορισμοί

A) Περιορισμοί που αφορούν το δίκτυο

1. Ισοζύγιο ενεργού ισχύος για κάθε ζυγό i , κάθε ώρα t του κάθε μήνα j :

$$\begin{aligned} & pin_{j,t,1} + windpr_{j,t}pw_i + solarpr_{j,t}ps_i - pch1_{j,t,i} \\ & + pdis1_{j,t,i} - pch2_{j,t,i} + pdis2_{j,t,i} - cload_{j,t}P_{\zeta\gamma\theta\acute{o}i} = \\ & v_{j,t,i}^2 G_{ii} + v_{j,t,i} \sum_k^{i \neq k} v_{j,t,k} (G_{ik} \cos(d_{j,t,i} - d_{j,t,k}) + B_{ik} \sin(d_{j,t,i} - d_{j,t,k})) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\forall j,t,i$$

Η εισερχόμενη ενεργός ισχύς σε κάθε ζυγό είναι η ενεργός ισχύς που μπαίνει από τον υποσταθμό (ο όρος $pin_{j,t,1}$ είναι προφανώς 0 για $i \neq 1$) συν την ενεργό ισχύ (εκείνη τη στιγμή, ανάλογα με τον αέρα και την ηλιοφάνεια) των ΜΔΠ συν την ενεργό ισχύ που αποδίδει η μπαταρία πρώτου τύπου (εφόσον η μπαταρία του συγκεκριμένου ζυγού εκφορτίζει εκείνη τη στιγμή) συν την ενεργό ισχύ που αποδίδει η μπαταρία δεύτερου τύπου (εφόσον η μπαταρία του συγκεκριμένου ζυγού εκφορτίζει εκείνη τη στιγμή). Η εξερχόμενη ενεργός ισχύς είναι η ζήτηση φορτίου της στιγμής συν την ενεργό ισχύ που απορροφά η μπαταρία πρώτου τύπου (εφόσον η μπαταρία του συγκεκριμένου ζυγού φορτίζει εκείνη τη στιγμή) συν την ενεργό ισχύ που απορροφά η μπαταρία δεύτερου τύπου (εφόσον η μπαταρία του συγκεκριμένου ζυγού φορτίζει εκείνη τη στιγμή).

2. Ισοζύγιο αέργου ισχύος για κάθε ζυγό i , κάθε ώρα t του κάθε μήνα j :

$$\begin{aligned} & qin_{j,t,1} + \tan \phi_w windpr_{j,t}pw_i + \tan \phi_s solarpr_{j,t}ps_i - cload_{j,t}Q_{\zeta\gamma\theta\acute{o}i} = \\ & -v_{j,t,i}^2 B_{ii} + v_{j,t,i} \sum_k^{i \neq k} v_{j,t,k} (G_{ik} \sin(d_{j,t,i} - d_{j,t,k}) - B_{ik} \cos(d_{j,t,i} - d_{j,t,k})) \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\forall j, t, i$$

Η εισερχόμενη άεργος ισχύς σε κάθε ζυγό είναι η άεργος ισχύς που μπαίνει από τον υποσταθμό (ο όρος $qin_{j,t,i}$ είναι προφανώς 0 για $i \neq 1$) συν την άεργο ισχύ (εκείνη τη στιγμή, ανάλογα με τον αέρα και την ηλιοφάνεια) των ΜΔΠ. Η εξερχόμενη άεργος ισχύς είναι η ζήτηση φορτίου της στιγμής.

3. Περιορισμοί μέτρων τάσεων και γωνιών τάσεων για κάθε ζυγό i , κάθε ώρα t του κάθε μήνα j :

Τα μέτρα των τάσεων και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων.

$$v_{\min} \leq v_{j,t,i} \leq v_{\max} \quad \forall j, t, i \quad (4.5)$$

$$d_{\min} \leq d_{j,t,i} \leq d_{\max} \quad \forall j, t, i \quad (4.6)$$

Στο ζυγό 1 (ζυγός ταλάντωσης), πρέπει συνεχώς $v_1=1$ α.μ. και $d_1=0$.

$$v_{j,t,1} = 1 \text{ α.μ.} \quad \forall j, t \quad (4.7)$$

$$d_{j,t,1} = 0 \quad \forall j, t \quad (4.8)$$

4. Κάλυψη ζήτησης από μπαταρίες:

Η συνολική ισχύς (όλων των μπαταριών) που εκφορτίζεται δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση φορτίου, για να μην πηγαίνει η περίσσεια ισχύς στο κύριο δίκτυο.

$$\sum_i (pdis1_{j,t,i} + pdis2_{j,t,i}) \leq \sum_i cload_{j,t} P_{\zetaυγού\ i} \quad (4.9)$$

B) Σχέσεις και περιορισμοί που αφορούν τις μπαταρίες πρώτου είδους

Η ημερήσια αποθήκευση ενέργειας στη μπαταρία, $ech1_{j,i}$, το μήνα j , για τη μπαταρία που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό i , καθώς και η ημερήσια ενέργεια, $edis1_{j,i}$, που εκφορτίζεται από τη μπαταρία του ζυγού i , το μήνα j , υπολογίζονται ως εξής:

$$ech1_{j,i} = \sum_{t=1}^8 pch1_{j,t,i} \quad \forall j, i \quad (4.10)$$

$$edis1_{j,i} = \sum_{t=9}^{24} pdis1_{j,t,i} \quad \forall j, i \quad (4.11)$$

5. Ισότητα ημερήσιας ενέργειας φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας:

Η ημερήσια ενέργεια που αποθηκεύεται στη μπαταρία πρέπει να ισούται με την ημερήσια ενέργεια που εκλύεται από αυτήν.

$$ech1_{j,i} = edis1_{j,i} \quad \forall j, i \quad (4.12)$$

Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει ή απορροφά η μπαταρία κάθε ζυγού, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$p1_i = \max(\max_{j,t}(pch1_{j,t,i}), \max_{j,t}(pdis1_{j,t,i})) \quad \forall i \quad (4.13)$$

Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να βρεθεί αποθηκευμένη στη μπαταρία κάθε ζυγού, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$e1_i = \max_j(ech1_{j,i}) \quad \forall i \quad (4.14)$$

Γ) Σχέσεις και περιορισμοί που αφορούν τις μπαταρίες δεύτερου είδους

Είναι σχεδόν ίδιοι με τους περιορισμούς για τις μπαταρίες πρώτου είδους, με μικρές τροποποιήσεις, λόγω των διαφορετικών ωρών του κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης.

Η ημερήσια αποθήκευση ενέργειας στη μπαταρία, $ech2_{j,i}$, το μήνα j , για τη μπαταρία που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό i , καθώς και η ημερήσια ενέργεια, $edis2_{j,i}$, που εκφορτίζεται από τη μπαταρία του ζυγού i , το μήνα j , υπολογίζονται ως εξής:

$$ech2_{j,i} = \sum_{t=9}^{24} pch2_{j,t,i} \quad \forall j, i \quad (4.15)$$

$$edis2_{j,i} = \sum_{t=1}^8 pdis2_{j,t,i} \quad \forall j, i \quad (4.16)$$

6. Ισότητα ημερήσιας ενέργειας φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας:

Η ημερήσια ενέργεια που αποθηκεύεται στη μπαταρία πρέπει να ισούται με την ημερήσια ενέργεια που εκλύεται από αυτήν.

$$ech2_{j,i} = edis2_{j,i} \quad \forall j, i \quad (4.17)$$

Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει ή απορροφά η μπαταρία κάθε ζυγού, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$p2_i = \max(\max_{j,t}(pch2_{j,t,i}), \max_{j,t}(pdis2_{j,t,i})) \quad \forall i \quad (4.18)$$

Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να βρεθεί αποθηκευμένη στη μπαταρία κάθε ζυγού, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$e2_i = \max_j(ech2_{j,i}) \quad \forall i \quad (4.19)$$

4.5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.5.1 Μεθοδολογία

Το πρόβλημα της Ενότητας 4.4 είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear programming – NLP). Για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης SNOPT (SNOPT solver) του λογισμικού GAMS. Ο επιλύτης SNOPT και το λογισμικό GAMS παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 της εργασίας αυτής.

4.5.2 Αποτελέσματα

Λύνοντας το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, με τους περιορισμούς να πρέπει να ισχύουν ανά πάσα στιγμή (δηλαδή για κάθε χρονικό διάστημα που χαρακτηρίζεται από το ζεύγος j,t), λαμβάνεται ένα πλήθος αποτελεσμάτων για τις τιμές των μεταβλητών, ανά πάσα στιγμή, για κάθε ζυγό. Από αυτά, σημαντικότερα είναι το βέλτιστο μέγεθος των ΜΔΠ και των μπαταριών (δηλαδή τα μεγέθη \mathbf{pw}_i , \mathbf{ps}_i , $\mathbf{p1}_i$, $\mathbf{e1}_i$, $\mathbf{p2}_i$ και $\mathbf{e2}_i$).

4.5.3 Δοκιμαστική μεταβλητή

Μπορεί να εισαχθεί προαιρετικά η δοκιμαστική μεταβλητή ελέγχου $bal_{j,t}$, η οποία αφορά το ισοζύγιο ενεργού ισχύος ανά πάσα στιγμή, δηλαδή ισούται με τη συνολική ισχύ που εισέρχεται στο δίκτυο (από τον υποσταθμό, την παραγωγή των ΜΔΠ και την εκφόρτιση των μπαταριών) μείον τη συνολική ισχύ που εξέρχεται από αυτό (ηλεκτρικά φορτία και φόρτιση των μπαταριών). Αν από τη λύση του προβλήματος προκύπτει ότι αυτή η μεταβλητή είναι ίση με το μηδέν (ή σχεδόν ίση με το μηδέν, με πολύ μικρή ανοχή σφάλματος), τότε δεν έχει γίνει λάθος. Η βοηθητική αυτή μεταβλητή υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}
 bal_{j,t} = & pin_{j,t,1} + \sum_i (windpr_{j,t}pw_i + solarpr_{j,t}ps_i - pchl_{j,t,i} + pdis1_{j,t,i} - \\
 & pch2_{j,t,i} + pdis2_{j,t,i} - cload_{j,t}P_{\zeta\gamma\theta\upsilon i}) - powerloss_{j,t} \quad \forall j,t
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 360-370, Feb. 2010.
- [4.2] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1815-1822, Nov. 2010.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές γνωρίζουν τεράστια ανάπτυξη και βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλά καθημερινά και επιστημονικά ζητήματα. Ειδικότερα, όσον αφορά τα μαθηματικά, πολλά προγράμματα έχουν δημιουργηθεί για να αντιμετωπίζουν με ευκολία και σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα προβλήματα, που θα απαιτούσαν πολλαπλάσιο κόπο και χρόνο, αν έπρεπε να λυθούν με το χέρι. Η βελτιστοποίηση, με την οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, είναι σχεδόν αδύνατη να επιτευχθεί χωρίς τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, κυρίως όταν εμπλέκονται δεκάδες ή και εκατοντάδες μεταβλητές και συναρτήσεις. Έτσι, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μέσω αυτών μπορούν να προσδιοριστούν οι καταλληλότερες επιλογές, ώστε να μεγιστοποιείται το ενεργειακό, οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το λογισμικό GAMS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος που διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού και η διαδικασία που ακολουθεί ο χρήστης για να το τρέξει. Έπειτα αναπτύσσεται ο μη γραμμικός προγραμματισμός και πώς τον χειρίζεται το λογισμικό αυτό. Τέλος, η μορφή του κώδικα και η ανάγνωση των αποτελεσμάτων γίνονται πιο κατανοητά με τη βοήθεια ενός παραδείγματος βέλτιστης ροής φορτίου.

5.2 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GAMS

5.2.1 Γενικές αρχές

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον για τον καθορισμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι μια ισχυρή γλώσσα προγραμματισμού, που αποτελείται από έναν compiler και ένα πλήθος από ολοκληρωμένους solvers υψηλής απόδοσης. Έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη μοντελοποίηση γραμμικών προβλημάτων (linear programming – lp), μη γραμμικών προβλημάτων (non-linear programming – nlp) και μη γραμμικών προβλημάτων που περιέχουν ακέραιες μεταβλητές (mixed-integer non-linear programming – minlp). Το σύστημα είναι κυρίως χρήσιμο για το χειρισμό μεγάλων, σύνθετων και ξεχωριστού είδους προβλημάτων, που απαιτούν πολύ κόπο για να βρεθεί ένα ακριβές μοντέλο και λύση. Η μοντελοποίηση των προβλημάτων γίνεται με πολύ συμπαγή και φυσικό τρόπο, προς όφελος του χρήστη. Τα βασικά πλεονεκτήματα του GAMS είναι τα ακόλουθα:

- Έχει την ικανότητα να επιλύει από μικρά προβλήματα (δεκάδες μεταβλητές και περιορισμοί) έως μεγάλα προβλήματα (χιλιάδες μεταβλητές και περιορισμοί), χρησιμοποιώντας περίπου την ίδια ποσότητα κώδικα. Μπορεί κάποιος να καθορίσει ένα πλήθος παρόμοιων

περιορισμών, γράφοντας ουσιαστικά μόνο έναν που να ισχύει για όλες τις τιμές μιας παραμέτρου, εκτός των εξαιρέσεων που θα καθορίσει ρητά.

- Διαχωρίζει τη διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος από τη χρησιμοποιούμενη τεχνική επίλυσης αυτού. Ο χρήστης γράφει το βασικό κώδικα σε μορφή GAMS και μπορεί έπειτα να καθορίσει ποιόν από τους πολλούς διαθέσιμους solvers θα χρησιμοποιήσει για την επίλυση. Έτσι, ο χρήστης αποδεσμεύεται από αλγοριθμικές τεχνικές επίλυσης.
- Μιμείται σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος. Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης σχολίων σε όλες τις γραμμές του κώδικα. Συνεπώς, ο κώδικας είναι σχεδόν επεξηγηματικός από μόνος του προς τους αναγνώστες με γνωστικό υπόβαθρο βελτιστοποίησης.
- Παρέχει μηχανισμούς επίλυσης συλλογών από δομημένα προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά που προκύπτουν από τεχνικές αποδόμησης.
- Διευκολύνει την ανάλυση ευαισθησίας. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να προγραμματίσει ένα μοντέλο να επιλύει για διαφορετικές τιμές ενός στοιχείου και μετά να δημιουργήσει μια αναφορά με τα χαρακτηριστικά της λύσης της κάθε περίπτωσης.

5.2.2 Είδη μοντέλων

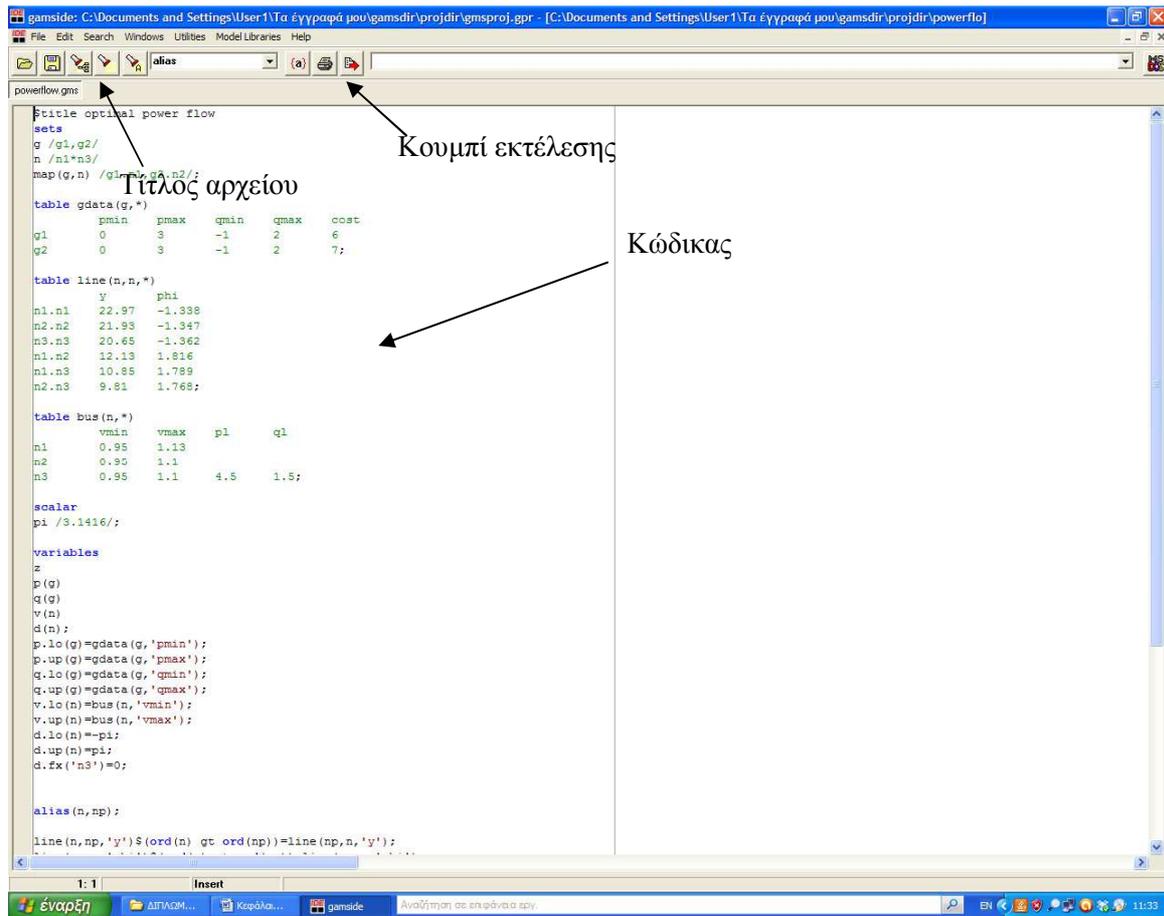
Το GAMS υποστηρίζει διάφορες διαδικασίες επίλυσης των προβλημάτων. Ο χρήστης δημιουργεί ένα αυτόνομο μοντέλο και καθορίζει ποια ή ποιες θα χρησιμοποιηθούν. Προφανώς, το ίδιο μοντέλο μπορεί να επιλυθεί με διαφορετικές διαδικασίες, κάνοντας ελάχιστες τροποποιήσεις. Οι διαδικασίες επίλυσης είναι οι ακόλουθες:

LP	Linear Programming
MIP	Mixed-Integer Programming
NLP	Non-Linear Programming
MCP	Mixed Complementarity Problems
MPEC	Mathematical Programs with Equilibrium Constraints
CNS	Constrained Nonlinear Systems
DNLP	Non-Linear Programming with Discontinuous Derivatives
MINLP	Mixed-Integer Non-Linear Programming
QCP	Quadratically Constrained Programs
MIQCP	Mixed Integer Quadratically Constrained Programs

5.2.3 Διαδικασία επίλυσης

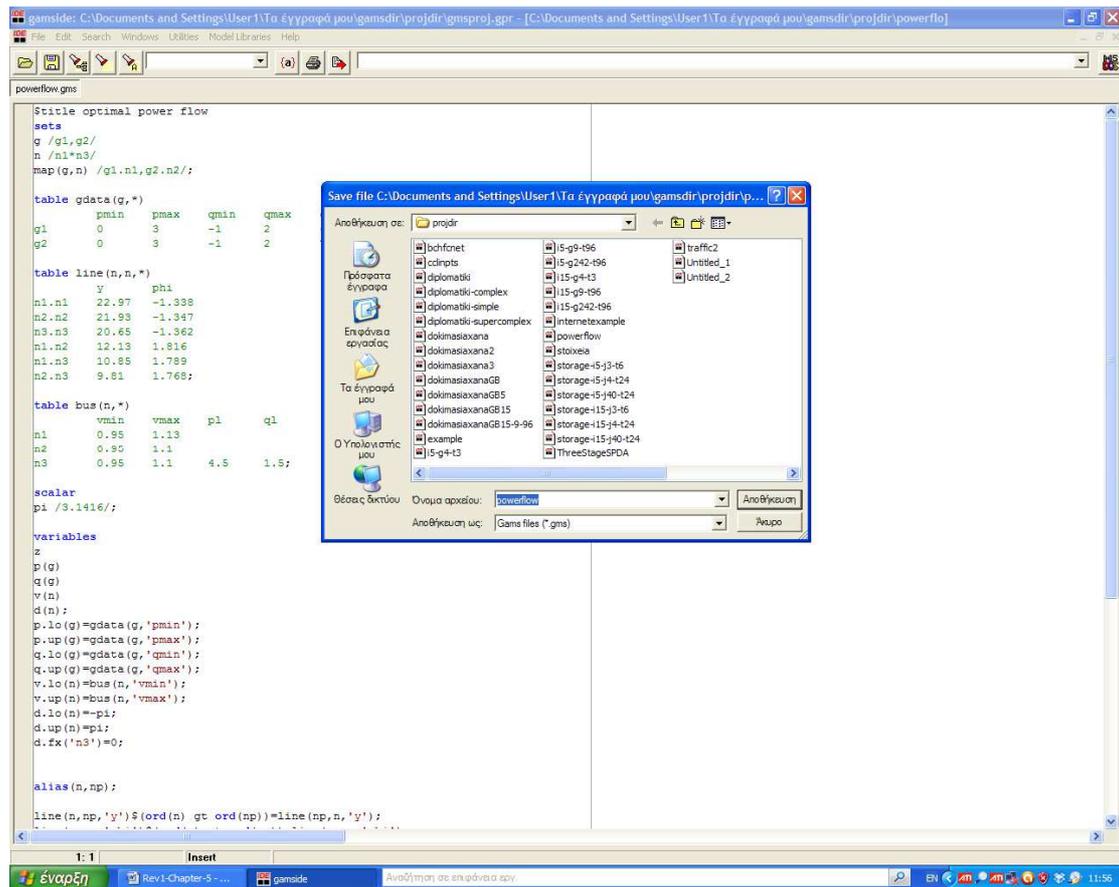
Τα βήματα που ακολουθεί ο χρήστης για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα:

- Καθορίζει το πλήρες μαθηματικό μοντέλο (δεδομένα, μεταβλητές, αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμοί).
- Ανοίγει το πρόγραμμα **gamside.exe**
- Εισάγει τα αριθμητικά δεδομένα σε μορφή παραμέτρων ή πινάκων (Σχήμα 5.1)



Σχήμα 5.1: Το παράθυρο όπου γράφεται ο κώδικας

- Καθορίζει τις μεταβλητές και ορισμένες σταθερές τιμές αυτών (Σχήμα 5.1)
- Γράφει τις εξισώσεις (Σχήμα 5.1)
- Καθορίζει τον ή τους **solvers** που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος (Σχήμα 5.1)
- Δίνει ενδεχομένως εντολή να διαβαστεί ένα **option file**, δηλαδή ένα ξεχωριστό αρχείο που περιέχει κάποιες ειδικές ρυθμίσεις
- Καθορίζει ποια είναι η αντικειμενική συνάρτηση και αν πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί (Σχήμα 5.1)
- Αποθηκεύει το αρχείο κώδικα ως **filename.gms** (Σχήμα 5.2)
- Πατάει το κουμπί εκτέλεσης **Run GAMS** (Σχήμα 5.1)
- Διαβάζει τα παράθυρα που προκύπτουν, τα οποία περιέχουν την αναφορά εκτέλεσης του κώδικα και τα αποτελέσματα (τις τιμές όλων των μεταβλητών) στο αρχείο **filename.lst** (Σχήμα 5.3)



Σχήμα 5.2: Αποθήκευση του κώδικα

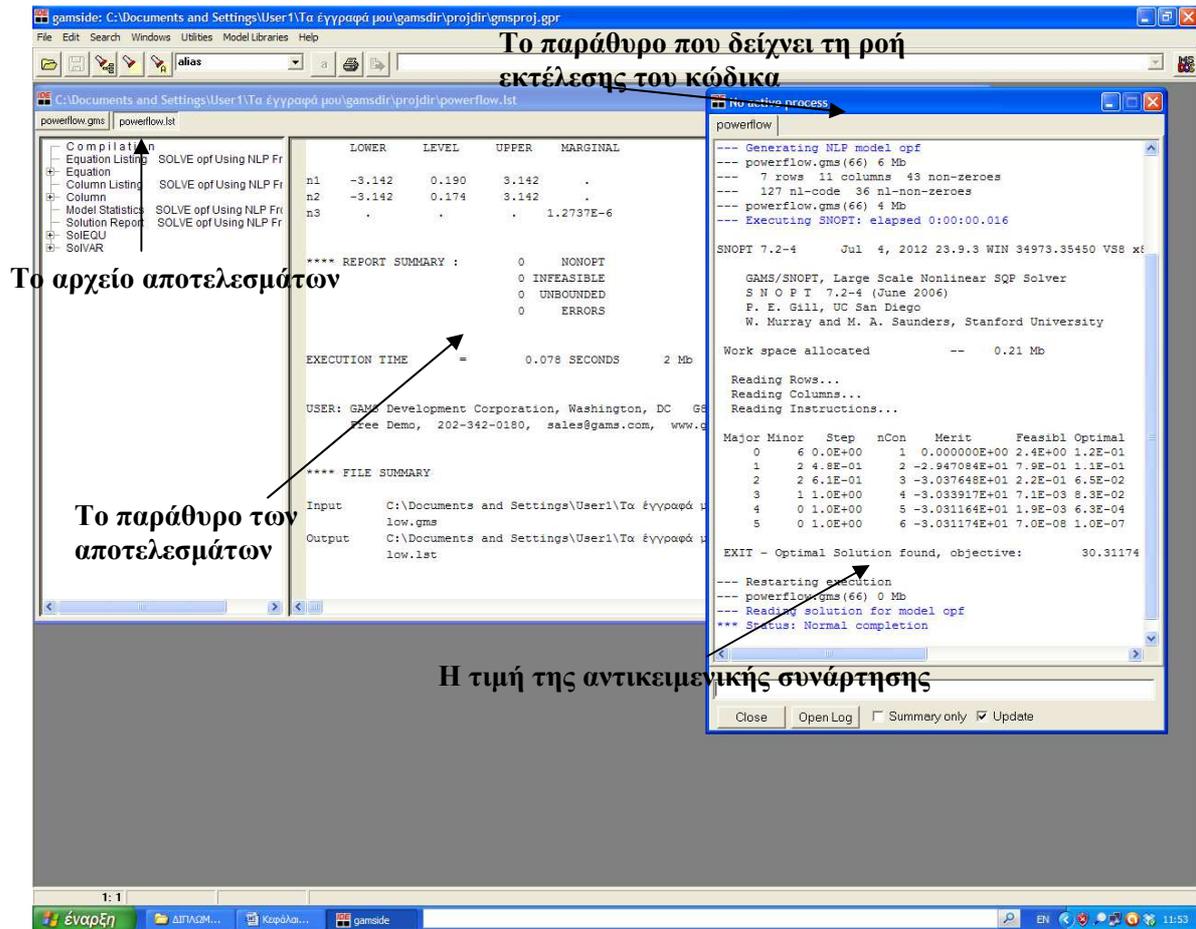
5.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ (NLP)

5.3.1 Γενικά

Μαθηματικά, ο μη γραμμικός προγραμματισμός συνίσταται στην:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Ελαχιστοποίηση της:} & f(x) \\
 \text{Υπό τους περιορισμούς:} & g(x) \leq 0 \\
 & L \leq x \leq U
 \end{array}$$

όπου x είναι ένα διάνυσμα συνεχών πραγματικών μεταβλητών, $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση, $g(x)$ είναι το σύνολο των περιορισμών, οι οποίοι είναι μη γραμμικές συναρτήσεις του x και τα διανύσματα L και U συμβολίζουν τα κάτω και άνω όρια, αντίστοιχα, των μεταβλητών.



Σχήμα 5.3: Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του κώδικα

5.3.2 Ο solver SNOPT

Η άδεια που κατέχει το ΕΜΠ για το GAMS αφορά μόνο τους solvers SBB και SNOPT. Για το μη γραμμικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, ο SNOPT είναι ο πιο κατάλληλος. Είναι ένας μεγάλης κλίμακας solver ακολουθιακού τετραγωνικού προγραμματισμού (sequential quadratic programming – SQP), κατασκευασμένος από τους Philip Gill (University of California at San Diego) και Walter Murray και Michael Saunders (Stanford University).

Ο SNOPT είναι ένα σύστημα γενικού σκοπού για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που περιέχουν πολλές μεταβλητές και περιορισμούς. Ελαχιστοποιεί μια γραμμική ή μη γραμμική συνάρτηση, υπό όρια στις μεταβλητές και γραμμικούς ή μη γραμμικούς περιορισμούς – εξισώσεις. Είναι κατάλληλος για ευρείας κλίμακας γραμμικό και τετραγωνικό προγραμματισμό και για γραμμικά περιορισμένη βελτιστοποίηση, καθώς και για γενικά μη γραμμικά προβλήματα.

Ο SNOPT βρίσκει λύσεις τοπικά βέλτιστες και, ιδανικά, οι μη γραμμικές συναρτήσεις θα πρέπει να είναι ομαλές. Συχνά τα τοπικά βέλτιστα είναι και ολικά και οι ασυνέχειες στη συνάρτηση διαβάζονται από την αυτόματη μηχανή παραγωγής του GAMS.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι ένας SQP αλγόριθμος που λαμβάνει κατευθύνσεις εύρεσης από μια ακολουθία από υποπροβλήματα τετραγωνικού προγραμματισμού. Κάθε τέτοιο υποπρόβλημα ελαχιστοποιεί ένα τετραγωνικό μοντέλο από μια συγκεκριμένη συνάρτηση Lagrange, υπό μια γραμμικοποίηση των περιορισμών. Μια

επαυξημένη συνάρτηση Lagrange μειώνεται κατά μήκος κάθε κατεύθυνσης εύρεσης, για να εξασφαλιστεί η σύγκλιση από οποιοδήποτε αρχικό σημείο.

5.4 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο κώδικας επίλυσης ενός πολύ απλού παραδείγματος βέλτιστης ροής φορτίου, για καλύτερη κατανόηση της συντακτικής μορφής του GAMS. Όπως φαίνεται, το πρόγραμμα αποτελείται από ορισμένα μπλοκ, που το καθένα καθορίζει κάποια στοιχεία του προβλήματος. Στο τέλος κάθε μπλοκ ή ορισμένες φορές στο τέλος κάθε εντολής πρέπει να μπαίνει semicolon (;). Οι αστερίσκοι (*) στην αρχή των γραμμών υποδηλώνουν σχόλια.

sets

```
g /g1,g2/
n /n1*n3/
map(g,n) /g1.n1,g2.n2/;
```

**Η ενότητα sets καθορίζει ουσιαστικά τους δείκτες και ποιες τιμές μπορούν να πάρουν. Το n1*n3 σημαίνει 'n1 έως n3'. Εδώ, το map καθορίζει ένα σύνολο συσχέτισης των g και n.*

table gdata(g,*)

	ρmin	ρmax	qmin	qmax	cost
g1	0	3	-1	2	6
g2	0	3	-1	2	7;

**Το table καθορίζει έναν πίνακα δεδομένων για το δείκτη. Δηλαδή εδώ π.χ. καθορίζεται ότι για g1, το cost ισούται με 6. Ο αστερίσκος στο (g,*) χρειάζεται για να δοθούν ονομασίες στις στήλες.*

table line(n,n,*)

	y	phi
n1.n1	22.97	-1.338
n2.n2	21.93	-1.347
n3.n3	20.65	-1.362
n1.n2	12.13	1.816
n1.n3	10.85	1.789
n2.n3	9.81	1.768;

table bus(n,*)

	vmín	vmax	p1	q1
n1	0.95	1.13		
n2	0.95	1.1		
n3	0.95	1.1	4.5	1.5;

**Το κενό που υπάρχει στα p1 και q1 των n1 και n2 υποδηλώνει προφανώς το 0.*

scalar

```
ρi /3.1416/;
```

**Η ενότητα scalar εκφράζει κάποιες μεταβλητές – σύμβολα, στις οποίες προσδίδεται μία σταθερή τιμή.*

variables

```
z
p(g)
q(g)
```

```
v(n)
d(n);
```

*Στο *variables* καταγράφονται όλες οι μεταβλητές. Το $v(n)$ υποδηλώνει ότι η μεταβλητή v παίρνει μία ξεχωριστή τιμή για κάθε n , με λίγα λόγια το $v(n)$ είναι ένα διάνυσμα των 3 στοιχείων $v(n1)$, $v(n2)$, $v(n3)$.

```
p.lo(g)=gdata(g,'pmin');
p.up(g)=gdata(g,'pmax');
q.lo(g)=gdata(g,'qmin');
q.up(g)=gdata(g,'qmax');
v.lo(n)=bus(n,'vmin');
v.up(n)=bus(n,'vmax');
d.lo(n)=-pi;
d.up(n)=pi;
```

*Με αυτές τις εντολές καθορίζονται τα άνω (*upper*) και κάτω (*lower*) όρια των μεταβλητών, τα οποία παίρνονται είτε κατευθείαν είτε διαβάζονται από την κατάλληλη στήλη πινάκων που ορίστηκαν προηγουμένως.

```
d.fx('n3')=0;
```

*Με αυτή την εντολή δίνεται μία σταθερή (*fixed*) τιμή σε μια μεταβλητή για κάποια τιμή του δείκτη, δηλαδή εδώ $d(n3)=0$.

```
alias(n,np);
```

* Με την εντολή *alias* δίνεται και μια άλλη ονομασία για το αρχικό set. Το np είναι ολόιδιο με το n και χρησιμοποιείται για να εκφραστεί η γραμμή από το ζυγό n στο ζυγό np και να μη γίνει σύγχυση με τους δείκτες.

```
line(n,np,'y')$(ord(n) gt ord(np))=line(np,n,'y');
line(n,np,'phi')$(ord(n) gt ord(np))=line(np,n,'phi');
```

*Με αυτές τις εντολές δίνονται κάποιες τιμές στους πίνακες για ορισμένα στοιχεία με τρόπο ώστε να εξοικονομείται κώδικας. Το σύμβολο του δολαρίου (\$) σημαίνει *if*. Το $ord(n) gt ord(np)$ σημαίνει 'η τιμή (τάξη) του n μεγαλύτερη από αυτή του np '.

```
equations
```

```
cost
pbal(n)
qbal(n);
```

*Στο κομμάτι *equations* γράφονται πρώτα οι ονομασίες των εξισώσεων.

```
cost.. z=e=sum(g,gdata(g,'cost')*p(g));
pbal(n).. sum(g$map(g,n),p(g))-
bus(n,'pl')=e=v(n)*sum(np,line(n,np,'y')*v(np)*cos(d(n)-d(np)-
line(n,np,'phi')));
qbal(n).. sum(g$map(g,n),q(g))-
bus(n,'ql')=e=v(n)*sum(np,line(n,np,'y')*v(np)*sin(d(n)-d(np)-
line(n,np,'phi')));
```

*Έπειτα γράφονται ξανά οι ονομασίες και δίπλα, μετά από 2 τελείες (..), οι εξισώσεις. Το $=e=$ σημαίνει ισότητα. Το $sum(g,...)$ σημαίνει 'άθροισμα για κάθε g της ποσότητας μετά το κόμμα (,)'.

```
model opf /all/;
```

*Εδώ καθορίζονται οι εξισώσεις που θα βρίσκονται στο τελικό μοντέλο, στο οποίο δίδεται μία ονομασία (εδώ *opf*, τα αρχικά του «*optimal power flow*», δηλαδή «βέλτιστη ροή φορτίου»). Το *all* υποδηλώνει ότι πρέπει να βρίσκονται όλες.

option nlp=snopt;

*Εδώ καθορίζεται ο *solver*. Δηλαδή, όπου χρειαστεί μη γραμμικός προγραμματισμός, θα χρησιμοποιηθεί ο *solver snopt*.

opf.optfile=1;

*Με αυτή την προαιρετική εντολή ενεργοποιείται το *option file* που περιέχει κάποιες ειδικές εντολές – ρυθμίσεις. Το 1 σημαίνει ενεργοποίηση, το 0 απενεργοποίηση.

solve opf using nlp minimizing z;

*Δίνεται η εντολή για επίλυση του μοντέλου που καθορίστηκε, δηλώνοντας το είδος του προγραμματισμού που θα χρησιμοποιηθεί και ποια θα είναι η αντικειμενική συνάρτηση.

display z.1;

*Με την τελική αυτή προαιρετική εντολή καθορίζονται οι μεταβλητές ή οι πίνακες που θα παρουσιαστούν στο τέλος του παραθύρου επίλυσης.

Οι τιμές όλων των μεταβλητών στο αρχείο *filename.lst* φαίνονται στο Σχήμα 5.4.

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR z	-INF	30.312	+INF	.
---- VAR p				
q1	.	3.000	3.000	-0.927
q2	.	1.759	3.000	.
---- VAR q				
q1	-1.000	1.860	2.000	.
q2	-1.000	0.746	2.000	.
---- VAR v				
n1	0.950	1.130	1.130	-0.533
n2	0.950	1.100	1.100	-3.303
n3	0.950	0.979	1.100	.
---- VAR d				
n1	-3.142	0.190	3.142	.
n2	-3.142	0.174	3.142	.
n3	.	.	.	1.2737E-6

**** REPORT SUMMARY :

0 NONOPT
0 INFEASIBLE
0 UNBOUNDED
0 ERRORS

EXECUTION TIME = 0.078 SECONDS 2 Mb WIN239-239 Sep 26, 2012

USER: GAMS Development Corporation, Washington, DC 6871201/0000CA-ANY
Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com DC0000

Σχήμα 5.4: Οι τιμές των μεταβλητών στο παράθυρο των αποτελεσμάτων

Το VAR υποδηλώνει τη μεταβλητή, το LEVEL την τιμή της και τα LOWER και UPPER τα άνω και κάτω όρια.

Το MARGINAL σχετίζεται με το πόσο μια αλλαγή στα όρια της μεταβλητής κατά μία μονάδα θα επηρεάσει την αντικειμενική συνάρτηση, είναι συνεπώς 0 όταν η μεταβλητή δεν ισούται με ένα από τα όρια.

Η τελεία (.) σημαίνει 0. Το EPS σημαίνει μια πολύ μικρή τιμή. Το INF υποδηλώνει το άπειρο ($INF = +\infty$, $-INF = -\infty$).

Στο παραπάνω παράδειγμα, δηλαδή, για τη βέλτιστη λύση πρέπει $p(g1)=3$, $p(g2)=1.759$.

5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] GAMS Development Corporation, *GAMS – A User's Guide*, Washington, DC, USA, Dec. 2012
- [5.2] B. A. McCarl, A. Meeraus, P. van der Eijk, M. Bussieck, S. Dirkse, P. Steacy, and F. Nelissen, *McCarl Expanded GAMS User Guide*, Version 23.8, July 5, 2012
- [5.3] GAMS Development Corporation, GAMS/SNOPT, accessed on February 2013. [Online].
Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/solvers/solvers.htm#SNOPT>, accessed on February 2013.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

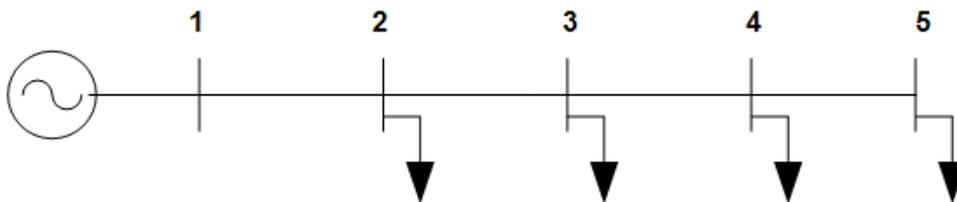
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται η μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4, διαδοχικά σε δίκτυα διανομής 5, 15 και 31 ζυγών. Σε όλα τα δίκτυα μελετώνται αρχικά διάφοροι συνδυασμοί εγκατάστασης ΜΔΠ και μπαταριών και παρατίθενται σε πίνακες και σε σχήματα τα βασικότερα αποτελέσματα του GAMS. Έπειτα γίνεται σύγκριση, σχολιασμός και επεξήγηση των αποτελεσμάτων αυτών, συχνά με τη βοήθεια γραφημάτων. Τέλος, μελετάται η επίδραση που έχουν οι αλλαγές σε ορισμένα χαρακτηριστικά του δικτύου ή των πηγών πάνω στα αποτελέσματα.

6.2 ΔΙΚΤΥΟ 5 ΖΥΓΩΝ

6.2.1 Δεδομένα

Θεωρείται ακτινικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης, 5 ζυγών και 4 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για το λόγο αυτό θεωρείται ζυγός ταλάντωσης. Σε αυτόν δεν μπορεί να συνδεθεί ούτε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής ούτε αποθηκευτική μονάδα. Το μέτρο της τάσης του είναι συνεχώς ίσο με την ονομαστική τιμή της τάσης του δικτύου, που υποτίθεται ότι είναι 11kV, και η γωνία της τάσης του είναι συνεχώς ίση με 0 rad. Στους υπόλοιπους ζυγούς υπάρχει εγκατεστημένο φορτίο σταθερής ισχύος και μπορούν να συνδεθούν και ΜΔΠ και μπαταρίες. Το μέτρο της τάσης των ζυγών αυτών πρέπει να κυμαίνεται εντός των ορίων $\pm 6\%$ της ονομαστικής τιμής, δηλαδή $v_{\min}=10.34\text{kV}$ και $v_{\max}=11.66\text{kV}$. Η γωνία της τάσης των ζυγών αυτών πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων $d_{\min}=-\pi$ rad και $d_{\max}=\pi$ rad.



Σχήμα 6.1: Ακτινικό δίκτυο 5 ζυγών

Πίνακας 6.1: Δεδομένα δικτύου 5 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MVar)
1	1	2	1.097	1.074	0.100	0.090
2	2	3	1.463	1.432	0.060	0.040
3	3	4	0.731	0.716	0.150	0.130
4	4	5	0.366	0.358	0.075	0.050

Τα δεδομένα των γραμμών και των φορτίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Από τα δεδομένα αυτά μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας αγωγιμοτήτων $[Y]=[G]+j[B]$, από τις σχέσεις:

$$Y_{ik} = -\frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} \quad (6.1)$$

$$Y_{ii} = \sum_{k \in A(i)} \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} \quad (6.2)$$

Οπότε, κάνοντας τις πράξεις, προκύπτει (με ακρίβεια 3 δεκαδικών ψηφίων):

$$Y = \begin{bmatrix} 0.465 - j0.455 & -0.465 + j0.455 & 0 & 0 & 0 \\ -0.465 + j0.455 & 0.814 - j0.797 & -0.349 + j0.341 & 0 & 0 \\ 0 & -0.349 + j0.341 & 1.047 - j1.025 & -0.698 + j0.683 & 0 \\ 0 & 0 & -0.698 + j0.683 & 2.094 - j2.049 & -1.396 + j1.365 \\ 0 & 0 & 0 & -1.396 + j1.365 & 1.396 - j1.365 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Με βάση ετήσια δεδομένα για τον άνεμο και την ηλιοφάνεια στον τόπο υπό εξέταση, υπολογίζεται, για την κάθε ώρα της τυπικής ημέρας, η οποία αναπαριστά κάθε μήνα, η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου και η μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας την ώρα αυτή. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του έτους 2009, από την ιστοσελίδα <http://www.usbr.gov/pn/agrimet/webagdayread.html> για τον τόπο Ashton, ID των Η.Π.Α.. Έτσι, με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, υπολογίζεται για κάθε ζεύγος (j,t) η παραγόμενη ισχύς (ως ποσοστό της εγκατεστημένης) των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών, δηλαδή οι πίνακες $windpr_{j,t}$ και $solarpr_{j,t}$, τα στοιχεία των οποίων φαίνονται στους Πίνακες 6.2 και 6.3, αντίστοιχα. Τα j1 έως j12 συμβολίζουν τους μήνες από Ιανουάριο έως Δεκέμβριο, ενώ τα t1 έως t24 συμβολίζουν τα χρονικά διαστήματα (διάρκειας μίας ώρας) 0:00 – 1:00 έως 23:00 – 0:00. Τις νυχτερινές ώρες, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι μηδενική, όπως αναμένεται.

Τέλος, τα δεδομένα φορτίου που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή, δηλαδή το ωριαίο φορτίο ως ποσοστό του μεγίστου, παρουσιάζουν εποχική μεταβολή (για παράδειγμα, ο χειμώνας αντιστοιχεί στους μήνες j1, j2 και j12) και φαίνονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.2: Ο πίνακας $windp_{j,t}$ της παραγωγής των ανεμογεννητριών ως ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος, το μήνα j και ώρα t

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
j1	0.33038	0.32049	0.30349	0.20227	0.20987	0.20771	0.20456	0.22811	0.16869	0.24361	0.24896	0.25668
j2	0.21752	0.23295	0.18485	0.19487	0.18505	0.13250	0.16945	0.19151	0.17863	0.26076	0.34378	0.34757
j3	0.30700	0.33200	0.39620	0.49805	0.47972	0.45977	0.47257	0.51394	0.53839	0.58418	0.63381	0.54335
j4	0.38367	0.35216	0.35486	0.23711	0.29665	0.33757	0.33484	0.32602	0.38690	0.34632	0.38845	0.36225
j5	0.31851	0.27242	0.27182	0.24502	0.23793	0.27507	0.23502	0.33876	0.41366	0.37496	0.33392	0.47062
j6	0.10846	0.05131	0.07372	0.07459	0.07599	0.10309	0.11330	0.11408	0.18682	0.18396	0.10756	0.08744
j7	0.02105	0.03950	0.00979	0.03746	0.02529	0.01754	0.01054	0.02592	0.11067	0.14105	0.01225	0.00000
j8	0.02817	0.00309	0.01874	0.02156	0.04335	0.04845	0.01327	0.02388	0.04674	0.06567	0.04791	0.00000
j9	0.08030	0.08102	0.08667	0.08549	0.10529	0.09539	0.09673	0.06655	0.12144	0.23639	0.16971	0.07350
j10	0.21288	0.17947	0.15123	0.15432	0.09400	0.10349	0.12702	0.13152	0.12605	0.18860	0.23538	0.13218
j11	0.09393	0.06857	0.14335	0.11610	0.08682	0.16931	0.15928	0.16360	0.20762	0.24534	0.28001	0.28187
j12	0.17695	0.15201	0.09117	0.08120	0.12714	0.13774	0.14231	0.11656	0.17484	0.19816	0.22360	0.21066
	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
j1	0.18175	0.20107	0.17677	0.21084	0.24412	0.29219	0.24779	0.26125	0.26888	0.27906	0.30325	0.29039
j2	0.32376	0.29947	0.21233	0.15425	0.16520	0.19906	0.20797	0.20225	0.16959	0.21582	0.23997	0.22626
j3	0.53434	0.56144	0.66169	0.65691	0.59668	0.56270	0.51042	0.44863	0.38340	0.32656	0.32308	0.25776
j4	0.43710	0.50173	0.44793	0.49571	0.38525	0.44737	0.50931	0.41344	0.31916	0.28523	0.33928	0.39034
j5	0.56195	0.66824	0.79376	0.91628	0.95828	0.95359	0.90002	0.80632	0.54834	0.35603	0.28696	0.25821
j6	0.13749	0.15428	0.29647	0.35675	0.37364	0.40136	0.37678	0.27660	0.11551	0.15723	0.06987	0.08397
j7	0.05560	0.09132	0.17623	0.20942	0.19341	0.23508	0.18455	0.08018	0.07435	0.05032	0.00225	0.07363
j8	0.00000	0.07994	0.07243	0.15321	0.17908	0.14835	0.09021	0.00000	0.02111	0.02850	0.03193	0.06411
j9	0.10595	0.20395	0.28582	0.36663	0.35312	0.35924	0.31581	0.06959	0.03759	0.04246	0.03526	0.07422
j10	0.19323	0.29610	0.32272	0.34444	0.41507	0.38079	0.26506	0.15742	0.13585	0.16123	0.17773	0.18040
j11	0.33108	0.35250	0.30302	0.26061	0.16977	0.10647	0.09083	0.07322	0.11054	0.13656	0.10539	0.05100
j12	0.20678	0.11662	0.14144	0.13537	0.13546	0.10421	0.14150	0.21787	0.22288	0.21093	0.15754	0.13822

Πίνακας 6.3: Ο πίνακας $solarp_{j,t}$ της παραγωγής των φωτοβολταϊκών ως ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος, το μήνα j και ώρα t

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
j1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00074	0.04164	0.14627	0.23713
j2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01686	0.12286	0.24984	0.39146
j3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01663	0.11633	0.27602	0.44048
j4	0	0	0	0	0	0	0	0.00438	0.07236	0.19307	0.33709	0.49032
j5	0	0	0	0	0	0	0	0.04774	0.19123	0.35360	0.49790	0.63575
j6	0	0	0	0	0	0	0.00233	0.05220	0.14051	0.24600	0.37669	0.50301
j7	0	0	0	0	0	0	0.00109	0.04629	0.19383	0.35602	0.49562	0.63767
j8	0	0	0	0	0	0	0	0.01078	0.10523	0.26700	0.43216	0.56212
j9	0	0	0	0	0	0	0	0.04676	0.20919	0.38938	0.53107	0.63767
j10	0	0	0	0	0	0	0	0.00446	0.07025	0.18962	0.31239	0.43239
j11	0	0	0	0	0	0	0	0.01359	0.09657	0.18657	0.25421	0.31239
j12	0	0	0	0	0	0	0	0.00147	0.04164	0.14359	0.22446	0.31239
	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
j1	0.31743	0.34183	0.32371	0.26060	0.16877	0.06207	0.00464	0	0	0	0	0
j2	0.48668	0.53244	0.52450	0.44535	0.33058	0.18025	0.04374	0	0	0	0	0
j3	0.55332	0.61588	0.61439	0.55538	0.49098	0.37706	0.22942	0.09380	0.01355	0	0	0
j4	0.61169	0.64516	0.68680	0.60825	0.55728	0.43821	0.32098	0.18688	0.05686	0.00225	0	0
j5	0.73332	0.79431	0.82857	0.81242	0.72716	0.59868	0.43551	0.27297	0.12390	0.02125	0	0
j6	0.62805	0.66848	0.67548	0.64258	0.57962	0.47720	0.36873	0.25520	0.15315	0.04218	0.00148	0
j7	0.74056	0.81666	0.85575	0.82903	0.74120	0.60363	0.50534	0.35133	0.18775	0.05021	0	0
j8	0.69373	0.73773	0.73438	0.72217	0.64111	0.55289	0.41396	0.23186	0.09007	0	0	0
j9	0.63426	0.69150	0.71322	0.66757	0.61537	0.47157	0.30744	0.14595	0.02074	0	0	0
j10	0.40763	0.47165	0.47047	0.39475	0.31502	0.21323	0.10938	0.01752	0	0	0	0
j11	0.32355	0.33332	0.30894	0.24089	0.13886	0.03538	0.00092	0	0	0	0	0
j12	0.27094	0.28931	0.26125	0.20419	0.11647	0.02577	0.00028	0	0	0	0	0

Πίνακας 6.4: Ο πίνακας $load_{j,t}$ του φορτίου ως ποσοστό του εγκατεστημένου, το μήνα j και ώρα t

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
j1,j2,j12	0.4757	0.4473	0.426	0.4189	0.4189	0.426	0.5254	0.6106	0.6745	0.6816	0.6816	0.6745
j3,j4,j5	0.3969	0.3906	0.378	0.3654	0.3717	0.4095	0.4536	0.5355	0.5985	0.6237	0.63	0.6237
j6,j7,j8	0.64	0.6	0.58	0.56	0.56	0.58	0.64	0.76	0.87	0.95	0.99	1
j9,j10,j11	0.3717	0.3658	0.354	0.3422	0.3481	0.3835	0.4248	0.5015	0.5605	0.5841	0.59	0.5841
	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
j1,j2,j12	0.6745	0.6745	0.6603	0.6674	0.7029	0.71	0.71	0.6816	0.6461	0.5893	0.5183	0.4473
j3,j4,j5	0.5859	0.5796	0.567	0.5544	0.567	0.5796	0.6048	0.6174	0.6048	0.567	0.504	0.441
j6,j7,j8	0.99	1	1	0.97	0.96	0.96	0.93	0.92	0.92	0.93	0.87	0.72
j9,j10,j11	0.5487	0.5428	0.531	0.5192	0.531	0.5428	0.5664	0.5782	0.5664	0.531	0.472	0.413

Πίνακας 6.5: Σενάρια για το δίκτυο των 5 ζυγών

Σενάριο	Περιγραφή
1	Αρχικό σύστημα (καμία ΜΔΠ ή μπαταρία)
2	Μόνο ανεμογεννήτριες
3	Μόνο φωτοβολταϊκά
4	Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)
5	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους
6	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους
7	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες και των δύο ειδών

6.2.2 Μελέτη περιπτώσεων

6.2.2.1 Ορισμοί σεναρίων

Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια (όσον αφορά τα είδη των ΜΔΠ και μπαταριών που εγκαθίστανται) τα οποία μελετώνται στην εργασία αυτή, για το δίκτυο των 5 ζυγών.

6.2.2.2 Σενάριο 1: Ροή φορτίου αρχικού συστήματος

Χωρίς καμία ΜΔΠ ή μπαταρία, όλη η ενεργός και άεργος ισχύς που χρειάζεται το δίκτυο εγγέεται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Τρέχοντας το GAMS, η βέλτιστη ροή φορτίου δίνει ως αποτέλεσμα, για κάθε ώρα της τυπικής ημέρας κάθε μήνα:

- Τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς (μέτρο και γωνία)
- Την ενεργό και άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού
- Τις απώλειες ενεργού ισχύος

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλαδή οι ετήσιες απώλειες ενέργειας) είναι $z = 15.446 \text{ MWh}$.

Στον Πίνακα 6.6 παρατίθεται η ημερήσια απώλεια ενέργειας για την τυπική ημέρα κάθε μήνα, δηλαδή το μέγεθος $\sum_{t=1}^{24} powerloss_{j,t}$, η μέση ημερήσια τιμή της εγγεόμενης

ενεργού ισχύος από τον υποσταθμό, δηλαδή το μέγεθος $\frac{\sum_{t=1}^{24} pin_{j,t,1}}{24}$, και η μέση ημερήσια

τιμή της εγγεόμενης αέργου ισχύος από τον υποσταθμό, δηλαδή το μέγεθος $\frac{\sum_{t=1}^{24} qin_{j,t,1}}{24}$.

Από τον Πίνακα 6.6, μπορεί να υπολογιστεί η ετήσια απώλεια ενέργειας, πολλαπλασιάζοντας την ημερήσια απώλεια ενέργειας κάθε μήνα με τον αριθμό ημερών κάθε μήνα, ως ακολούθως:

$$z = 31 \cdot 0.0377 + 28 \cdot 0.0377 + 31 \cdot 0.0295 + 30 \cdot 0.0295 + \dots + 31 \cdot 0.0377$$

Πίνακας 6.6: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το αρχικό δίκτυο των 5 ζυγών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.22845411	0.18422356	0.03776659
j2	0.22845411	0.18422356	0.03776659
j3	0.20254921	0.16330583	0.02958514
j4	0.20254921	0.16330583	0.02958514
j5	0.20254921	0.16330583	0.02958514
j6	0.32238435	0.26013059	0.07572436
j7	0.32238435	0.26013059	0.07572436
j8	0.32238435	0.26013059	0.07572436
j9	0.18961460	0.15286442	0.02592243
j10	0.18961460	0.15286442	0.02592243
j11	0.18961460	0.15286442	0.02592243
j12	0.22845411	0.18422356	0.03776659

Από τον Πίνακα 6.6 προκύπτει ότι τα μεγέθη είναι σταθερά ανά εποχή, επειδή το φορτίο της τυπικής ημέρας του μήνα (π.χ. j6, j7 και j8 για το καλοκαίρι) είναι ίδιο για κάθε εποχή (Πίνακας 6.4).

6.2.2.3 Σενάριο 2: Μόνο ανεμογεννήτριες

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα δεδομένα ανέμου, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, εκτός από τα προηγούμενα, και την εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε κάθε ζυγό, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα 6.7. Ο συντελεστής ισχύος των ανεμογεννητριών θεωρείται ότι είναι 0.9 επαγωγικός, οπότε $\tan\phi_w=0.484322$. Στον Πίνακα 6.8 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές, όπως έγινε παραπάνω. Αρνητικά πρόσημα υποδηλώνουν ότι η ροή ισχύος είναι ανάποδη, δηλαδή ότι το άπειρο δίκτυο απορροφά ισχύ.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 7.431 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 51.9% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών.

Πίνακας 6.7: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση ΜΔΠ μόνο τύπου ανεμογεννητριών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)
1	0
2	0.18537148
3	0.10306381
4	0.27934379
5	0.13028254
Σύνολο	0.69806162

Πίνακας 6.8: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση μόνο ανεμογεννητριών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.05611049	0.10013294	0.00764687
j2	0.07438563	0.10900557	0.00869386
j3	-0.13515140	-0.00065075	0.01014283
j4	-0.06261078	0.03433902	0.00319243
j5	-0.14088916	-0.00320197	0.02119006
j6	0.20209001	0.20106989	0.03693513
j7	0.26692748	0.23285060	0.05529835
j8	0.28604874	0.24225131	0.06208448
j9	0.08575767	0.10223908	0.01014770
j10	0.04723463	0.08348992	0.00570330
j11	0.06938883	0.09425230	0.00728571
j12	0.11807046	0.13027395	0.01407206

Όπως είναι αναμενόμενο, από τον Πίνακα 6.8 παρατηρείται σημαντική μείωση τόσο των απωλειών όσο και της ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Αυτό είναι λογικό, καθώς η ζήτηση φορτίου καλύπτεται πλέον κατά μεγάλο ποσοστό από πηγές (ΜΔΠ) μέσα στο ίδιο το δίκτυο. Επίσης, παρατηρείται ροή ισχύος από το δίκτυο προς τον υποσταθμό ($p_{in}, q_{in} < 0$) κατά τους μήνες της άνοιξης. Αυτό συμβαίνει διότι εκείνη την εποχή η παραγωγή των ανεμογεννητριών είναι μεγάλη σε σχέση με το φορτίο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε κάθε ζυγό (Πίνακας 6.7) είναι τυχαίος αριθμός και όχι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας συγκεκριμένης ποσότητας, όπως συμβαίνει συνήθως στην πράξη. Σε πραγματικές συνθήκες, λοιπόν, πρέπει να επιλεγεί για κάθε ζυγό το αμέσως μεγαλύτερο διαθέσιμο μέγεθος (πολλαπλάσιο συγκεκριμένης ισχύος) ανεμογεννητριών και να ρυθμιστεί κατάλληλα η έξοδος τους.

6.2.2.4 Σενάριο 3: Μόνο φωτοβολταϊκά

Εγκαθιστώντας φωτοβολταϊκά, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα δεδομένα ηλιοφάνειας, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ σε κάθε ζυγό, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα 6.9. Ο συντελεστής ισχύος των φωτοβολταϊκών θεωρείται ότι είναι 0.707 επαγωγικός, οπότε $\tan\phi_s = 1$. Στον Πίνακα 6.10 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ενεργού και αέργου ισχύος μέσω του υποσταθμού.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 8.117 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 47.4% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.

Πίνακας 6.9: Εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση ΜΔΠ μόνο τύπου φωτοβολταϊκών

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)
1	0
2	0.13434045
3	0.07092181
4	0.19966830
5	0.08919113
Σύνολο	0.49412169

Πίνακας 6.10: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση μόνο φωτοβολταϊκών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγχεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγχεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.18875813	0.14453763	0.02627875
j2	0.15934966	0.11513292	0.02199314
j3	0.11154664	0.07231486	0.01631823
j4	0.09465563	0.05542475	0.01529677
j5	0.05640058	0.01716768	0.01759122
j6	0.20088231	0.13866686	0.03193987
j7	0.16782343	0.10561083	0.02867924
j8	0.19304426	0.13082811	0.03274832
j9	0.07710046	0.04035932	0.01559109
j10	0.12788922	0.09114842	0.01519666
j11	0.14945808	0.11271552	0.01720511
j12	0.19551812	0.15129638	0.02770463

Και πάλι παρατηρείται (από τον Πίνακα 6.10) σημαντική μείωση των ενεργειακών απωλειών σε σχέση με την αρχική περίπτωση (σενάριο 1), καθώς και μείωση της ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Η μείωση όμως είναι λιγότερη από την περίπτωση εγκατάστασης μόνο ανεμογεννητριών και αυτό οφείλεται στη μηδενική παραγωγή των φωτοβολταϊκών κατά τις νυχτερινές ώρες, τη στιγμή που οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδόν πάντοτε μια, έστω και ελάχιστη, παραγωγή.

6.2.2.5 Σενάριο 4: Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)

Εγκαθιστώντας και τα δύο είδη ΜΔΠ, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, την εγκατεστημένη αιολική και φωτοβολταϊκή ισχύ σε κάθε ζυγό, όπως παρατίθεται στον Πίνακα 6.11. Οι συντελεστές ισχύος θεωρούνται 0.9 επαγωγικός και 0.707 αντίστοιχα, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Στον Πίνακα 6.12 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ενεργού και αέργου ισχύος μέσω του υποσταθμού.

Πίνακας 6.11: Εγκατεστημένη αιολική και ηλιακή ισχύς για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)
1	0	0
2	0.11861351	0.07981986
3	0.07081504	0.03855903
4	0.18133940	0.11762803
5	0.08977287	0.04861565
Σύνολο	0.46054082	0.28462257

Πίνακας 6.12: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ

Μήνας	Μέση ημερήσια εγχεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγχεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.09180650	0.10580765	0.00936621
j2	0.08700434	0.09480273	0.00952625
j3	-0.07270002	0.00269032	0.00828130
j4	-0.03447287	0.01614202	0.00547233
j5	-0.10791551	-0.03043056	0.02434350
j6	0.17308655	0.15125217	0.02617821
j7	0.19659005	0.15295320	0.03089415
j8	0.22372146	0.17366975	0.03744325
j9	0.05631653	0.05469004	0.01030383
j10	0.06015888	0.07157821	0.00720303
j11	0.08719291	0.09109569	0.00925822
j12	0.13663616	0.12964307	0.01582286

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 5.937 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 61.6% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.12, η εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ επιφέρει ακόμη μεγαλύτερη μείωση στις απώλειες ενέργειας και στην ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο. Το GAMS καθορίζει την εγκατεστημένη ισχύ των δύο αυτών ειδών ΜΔΠ με τέτοιο τρόπο, ώστε να συνυπάρχουν και να «συνεργάζονται» με το βέλτιστο τρόπο. Επίσης, από τον Πίνακα 6.11 παρατηρείται ότι η συνολική αιολική ισχύς και η συνολική φωτοβολταϊκή ισχύς μειώνονται, ενώ διατηρείται μια είδους αναλογία (μέγιστη ισχύς στο ζυγό 4, ελάχιστη ισχύς στο ζυγό 3 στο παράδειγμα), που συνδέεται με το μέγεθος του εγκατεστημένου φορτίου στον κάθε ζυγό.

6.2.2.6 Σενάριο 5: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μπαταρίες πρώτου είδους (φορτίζουν τη νύχτα, από t1 έως t8, και εκφορτίζουν τη μέρα, από t9 έως t24), το GAMS δίνει πολλά και χρήσιμα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.13 παρατίθεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ, η μέγιστη ενεργός ισχύς που απορροφούν ή αποδίδουν οι μπαταρίες και η ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών. Στον Πίνακα 6.14 παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος. Στον Πίνακα 6.15 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 2, ενδεικτικά για τους μήνες j2 (Φεβρουάριο), j6 (Ιούνιο) και j10 (Οκτώβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.2. Οι συντελεστές ισχύος των ΜΔΠ είναι ίδιοι (δηλαδή 0.9 επαγωγικός για τις ανεμογεννήτριες και 0.707 επαγωγικός για τα φωτοβολταϊκά).

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 5.798 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 62.5% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου είδους.

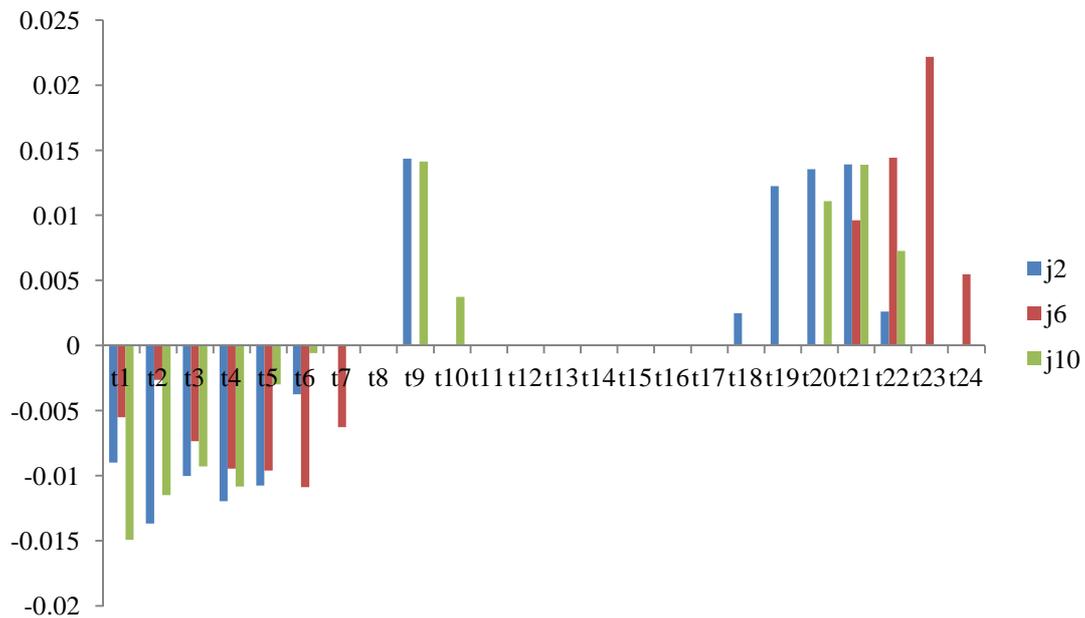
Από τους Πίνακες 6.13 και 6.14 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση μπαταριών πρώτου είδους δεν επιφέρει ιδιαίτερη μείωση των απωλειών, ούτε σχεδόν καθόλου αλλαγή στην εγκατεστημένη ισχύ των ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών. Αυτό οφείλεται στις όχι ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου κατά τις νυχτερινές ώρες και στη μηδενική παραγωγή των φωτοβολταϊκών κατά τις ώρες αυτές. Με λίγα λόγια, δεν υπάρχει και πολλή διαθέσιμη ενέργεια να αποθηκευτεί. Απλώς μειώνεται ελάχιστα η ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο. Επίσης, από τον Πίνακα 6.15 παρατηρείται ότι, τουλάχιστον για τους μήνες j2, j6 και j10, οι μπαταρίες είναι αδρανείς κατά τις μεσημεριανές ώρες. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι τις ώρες αυτές, η ζήτηση φορτίου καλύπτεται επαρκώς από τις ΜΔΠ.

Πίνακας 6.13: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου είδους

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Μέγιστη ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών (MWh)
1	0	0	-	-
2	0.12019286	0.07881703	0.02335850	0.07838998
3	0.07181771	0.03785446	0.01394664	0.04875238
4	0.18360484	0.11613495	0.03540219	0.11832398
5	0.09097920	0.04775239	0.01755621	0.06093118
Σύνολο	0.46659461	0.28055883	0.09026354	0.30639752

Πίνακας 6.14: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου είδους

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.09061384	0.10538078	0.00861115
j2	0.08622135	0.09470376	0.00903920
j3	-0.07489886	0.00199853	0.00777470
j4	-0.03589187	0.01590416	0.00519793
j5	-0.10968848	-0.03066930	0.02445277
j6	0.17302719	0.15172385	0.02583256
j7	0.19736175	0.15396931	0.03065995
j8	0.22444434	0.17455292	0.03706106
j9	0.05632816	0.05516351	0.00993933
j10	0.05941942	0.07147205	0.00681955
j11	0.08646525	0.09090262	0.00880148
j12	0.13593452	0.12943108	0.01533447



Σχήμα 6.2: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 2, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 5 ζυγών

Πίνακας 6.15: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 2, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 5 ζυγών

	Μήνας		
	j2	j6	j10
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-
t1	0.00898366	0.00550844	0.01492133
t2	0.01368295	0.00263888	0.01149590
t3	0.01003082	0.00733885	0.00928062
t4	0.01194537	0.00944557	0.01083322
t5	0.01076554	0.00961386	0.00298838
t6	0.00373306	0.01087176	0.00058444
t7	0	0.00627528	0
t8	0	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-
t9	0.01434184	0	0.01412506
t10	0	0	0.00373525
t11	0	0	0
t12	0	0	0
t13	0	0	0
t14	0	0	0
t15	0	0	0
t16	0	0	0
t17	0	0	0
t18	0.00248282	0	0
t19	0.01223937	0	0
t20	0.01354568	0	0.01108526
t21	0.01391358	0.00963094	0.01389089
t22	0.00261810	0.01442136	0.00726743
t23	0	0.02216954	0
t24	0	0.00547079	0

6.2.2.7 Σενάριο 6: Όλες οι ΜΑΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μπαταρίες δεύτερου είδους (εκφορτίζουν τη νύχτα, από t1 έως t8, και φορτίζουν τη μέρα, από t9 έως t24), το GAMS δίνει πολλά και χρήσιμα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.16 παρατίθεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΑΠ, η μέγιστη ενεργός ισχύς που απορροφούν ή αποδίδουν οι μπαταρίες και η ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών. Στον Πίνακα 6.17 παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος μέσω του υποσταθμού. Στον Πίνακα 6.18 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 4, ενδεικτικά για τους μήνες j3 (Μάρτιο), j7 (Ιούλιο) και j11 (Νοέμβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.3. Οι συντελεστές ισχύος των ΜΑΠ είναι ίδιοι (δηλαδή 0.9 επαγωγικός για τις ανεμογεννήτριες και 0.707 επαγωγικός για τα φωτοβολταϊκά).

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 5.095 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 67% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ΜΑΠ και μπαταριών δεύτερου είδους.

Πίνακας 6.16: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών δεύτερου είδους

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Μέγιστη ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών (MWh)
1	0	0	-	-
2	0.11291725	0.09977104	0.05417923	0.24369608
3	0.07105054	0.04899799	0.04633619	0.21710486
4	0.17845408	0.15181410	0.12963903	0.66818911
5	0.08983119	0.06188736	0.05798336	0.30208282
Σύνολο	0.45225306	0.36247049	0.28813781	1.43107287

Πίνακας 6.17: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών δεύτερου είδους

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.08762684	0.10058120	0.00859110
j2	0.07798123	0.08484491	0.00822587
j3	-0.08293016	-0.00960283	0.00876868
j4	-0.04823418	0.00076385	0.00567046
j5	-0.12695385	-0.05156596	0.02038434
j6	0.15544142	0.13288463	0.02139868
j7	0.17294085	0.12897505	0.02476076
j8	0.20381561	0.15354986	0.03179525
j9	0.03978907	0.03753273	0.00804456
j10	0.05212673	0.06268073	0.00580484
j11	0.08229906	0.08547142	0.00823448
j12	0.13277273	0.12511069	0.01487975

Από τους Πίνακες 6.16 και 6.17 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση μπαταριών δεύτερου είδους επιφέρει μεγαλύτερη μείωση στις απώλειες ενέργειας, καθώς και μείωση της ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μπαταρίες αυτές αξιοποιούν την υψηλότερη παραγωγή από τις ανεμογεννήτριες κατά τις ημερήσιες ώρες, καθώς και την παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Η ενέργεια αυτή εύκολα αποδίδεται στο δίκτυο τις νυχτερινές ώρες, όταν οι ΜΔΠ δεν παράγουν ιδιαίτερα πολύ. Η συμβολή τους φαίνεται από τις αυξημένες τιμές της μέγιστης ισχύος και της ενεργειακής χωρητικότητας, σε σχέση με τις μπαταρίες πρώτου είδους. Επίσης, από τον Πίνακα 6.16 παρατηρείται ότι η εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών και πάλι δεν αλλάζει ιδιαίτερα πολύ. Τέλος, από τον Πίνακα 6.18 παρατηρείται ότι, τουλάχιστον για τους μήνες j3, j7 και j11, οι μπαταρίες είναι αδρανείς αργά το βράδυ. Αυτό ίσως οφείλεται στη μη παραγωγή ιδιαίτερης ισχύος των φωτοβολταϊκών κατά τις ώρες αυτές.

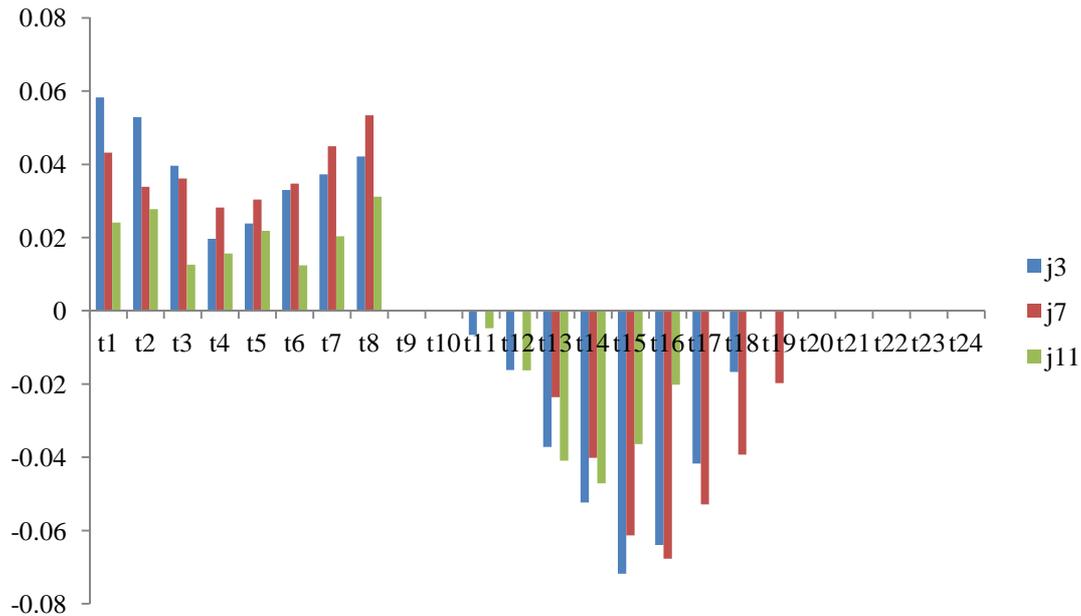
Πίνακας 6.18: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών του ζυγού 4, για το σενάριο 6 στο δίκτυο των 5 ζυγών

	Μήνας		
	j3	j7	j11
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-
t1	0.05823327	0.04319837	0.02407666
t2	0.05285596	0.03383468	0.02772359
t3	0.03957748	0.03613907	0.01257786
t4	0.01961490	0.02814819	0.01567570
t5	0.02380679	0.03033119	0.02179700
t6	0.03297476	0.03474844	0.01237779
t7	0.03726506	0.04491857	0.02038288
t8	0.04210787	0.05338716	0.03115202
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-
t9	0	0	0
t10	0	0	0
t11	0.00662768	0	0.00476746
t12	0.01622246	0	0.01628721
t13	0.03719025	0.02357860	0.04095649
t14	0.05232710	0.04012422	0.04715614
t15	0.07176016	0.06132404	0.03637889
t16	0.06392604	0.06771477	0.02021731
t17	0.04169908	0.05291180	0
t18	0.01668332	0.03931730	0
t19	0	0.01973494	0
t20	0	0	0
t21	0	0	0
t22	0	0	0
t23	0	0	0
t24	0	0	0

6.2.2.8 Σενάριο 7: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες και των δύο ειδών

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες πρώτου είδους και μπαταρίες δεύτερου είδους, το GAMS δίνει πολλά και χρήσιμα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.19 παρατίθεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ, η μέγιστη ενεργός ισχύς που απορροφούν ή αποδίδουν οι μπαταρίες όλων των ειδών και η ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών όλων των ειδών. Στον Πίνακα 6.20 παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος. Στον Πίνακα 6.21 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών πρώτου είδους στο ζυγό 2 και των μπαταριών δεύτερου είδους στο ζυγό 3, ενδεικτικά για το μήνα j5 (Μάιο). Οι συντελεστές ισχύος των ΜΔΠ είναι ίδιοι (δηλαδή 0.9 επαγωγικός για τις ανεμογεννήτριες και 0.707 επαγωγικός για τα φωτοβολταϊκά).

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 4.575 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 70.4% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου και δεύτερου είδους.



Σχήμα 6.3: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 4, για το σενάριο 6 στο δίκτυο των 5 ζυγών

Η εγκατάσταση όλων των ειδών ΜΔΠ και μπαταριών επιφέρει τη βέλτιστη λύση. Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 6.20, οι απώλειες μειώνονται στο ελάχιστο, ενώ η ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο μειώνεται στο ελάχιστο σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για αυτόνομη λειτουργία του δικτύου. Επίσης, από τον Πίνακα 6.19 παρατηρείται μείωση της συνολικής αιολικής ισχύος, αλλά αύξηση της συνολικής φωτοβολταϊκής ισχύος, καθώς και των ικανοτήτων ισχύος και ενέργειας των μπαταριών. Ενδιαφέρον προκαλεί ότι στην περίπτωση αυτή (σενάριο 7) οι μπαταρίες πρώτου είδους διαδραματίζουν πολύ σημαντικότερο ρόλο από την περίπτωση που υπάρχουν μόνο αυτές (σενάριο 5). Με λίγα λόγια, οι μπαταρίες, πρώτου και δεύτερου είδους, αποτελούν σημαντικό στοιχείο πλέον του δικτύου. Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται σε γράφημα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (όλων των ζυγών), ενώ στο Σχήμα 6.5 οι ημερήσιες απώλειες ενέργειας, για τα διάφορα σενάρια (1–7) που εξετάστηκαν. Είναι φανερό ότι σε όλες τις περιπτώσεις, οι ελάχιστες απώλειες είναι το μήνα j4 (Απρίλιο), ενώ οι μέγιστες το μήνα j8 (Αύγουστο). Ακόμη, στα σενάρια 4 έως 7, η συμπεριφορά όσον αφορά τις απώλειες είναι περίπου ίδια και μόνο το καλοκαίρι παρατηρείται μια περίπου σταθερή απόκλιση μεταξύ των σεναρίων.

Πίνακας 6.19: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου και δεύτερου είδους

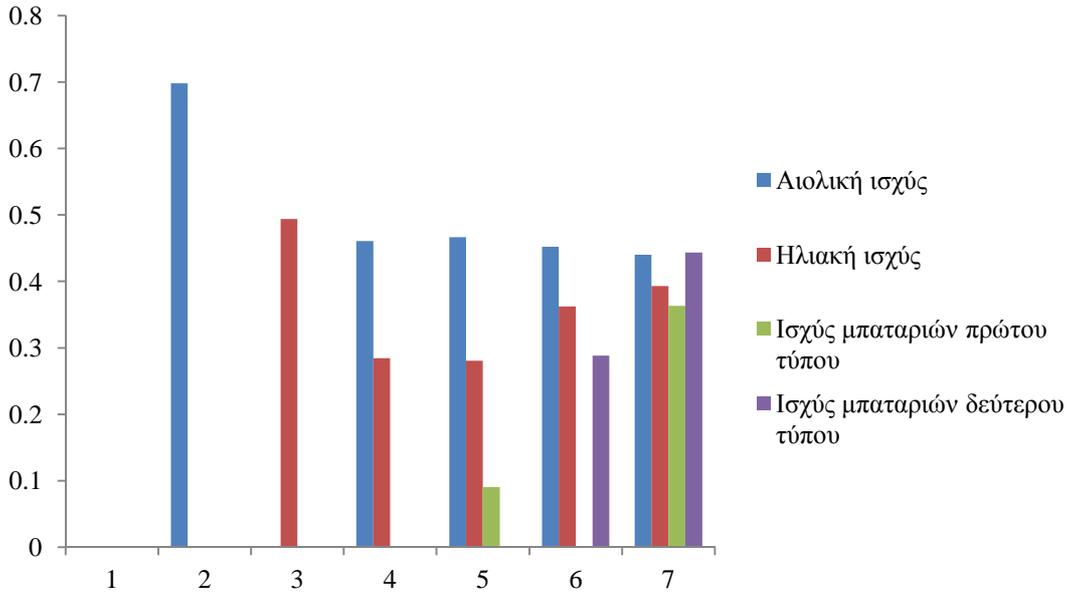
Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	-	-	-	-
2	0.10990891	0.10512228	0.10590815	0.30410358	0.10754483	0.37105597
3	0.06818152	0.05179063	0.08469443	0.34408335	0.09524651	0.36199164
4	0.17371982	0.16765744	0.10479721	0.67943697	0.15719750	0.80531638
5	0.08850559	0.06850262	0.06756856	0.26837661	0.08337716	0.39819012
Σύνολο	0.44031584	0.39307297	0.36296835	1.59600051	0.44336600	1.93655411

Πίνακας 6.20: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 5 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών και των δύο ειδών

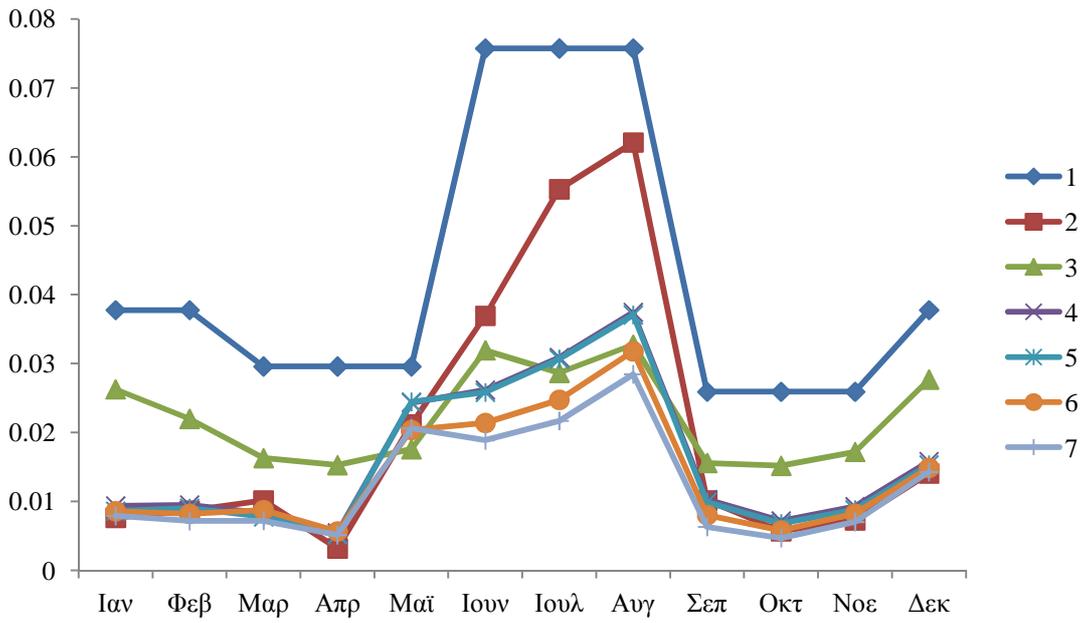
Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.08809561	0.09954184	0.00791691
j2	0.07631190	0.08182855	0.00716698
j3	-0.08283613	-0.01247826	0.00720521
j4	-0.05038562	-0.00371572	0.00514960
j5	-0.13009782	-0.05773561	0.02061278
j6	0.14995450	0.12635335	0.01889366
j7	0.16429608	0.11985142	0.02170007
j8	0.19638896	0.14581071	0.02846493
j9	0.03454054	0.03137565	0.00632594
j10	0.05070632	0.06001315	0.00471009
j11	0.08182748	0.08394754	0.00704161
j12	0.13260560	0.12397936	0.01430359

Πίνακας 6.21: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών, το μήνα j5, στους ζυγούς 2 και 3, για το σενάριο 7 στο δίκτυο των 5 ζυγών

Ζυγός	2	3
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης μπαταριών δεύτερου είδους (MW)
	ΦΟΡΤΙΣΗ	ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ
t1	0.00682598	0.01225527
t2	0.00235347	0.00390328
t3	0.00356497	0.01757690
t4	0.00187064	0.00425458
t5	0.00044477	0.00512611
t6	0.00072860	0.00487231
t7	0	0.01383329
t8	0.00011632	0.00563377
	ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ
t9	0	0
t10	0	0
t11	0	0
t12	0	0
t13	0	0
t14	0	0
t15	0	0.01230517
t16	0	0.02597826
t17	0	0.02151736
t18	0	0.00765471
t19	0	0
t20	0	0
t21	0	0
t22	0.00400709	0
t23	0.00755529	0
t24	0.00434237	0



Σχήμα 6.4: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 5 ζυγών



Σχήμα 6.5: Ημερήσιες απώλειες (MWh) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Πίνακας 6.22: Επίδραση του συντελεστή ισχύος των ανεμογεννητριών στην αντικειμενική συνάρτηση, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Συντελεστής ισχύος, $\cos\phi$	Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, z (MWh)
1	4.992
0.95 επαγωγικός	4.628
0.9 επαγωγικός	4.575
0.85 επαγωγικός	4.601
0.8 επαγωγικός	4.675

6.2.3 Εισαγωγή και άλλων παραμέτρων

6.2.3.1 Επίδραση του συντελεστή ισχύος των ανεμογεννητριών

Ο συντελεστής ισχύος των ανεμογεννητριών καθορίζει σημαντικά τη ροή αέργου ισχύος στο δίκτυο και, κατά επέκταση, την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Έστω ότι υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισής του με κατάλληλες διατάξεις. Τρέχοντας το GAMS για διάφορες τιμές του μεταξύ 1 και 0.8 επαγωγικού, παίρνονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.22. Θεωρείται ότι εγκαθίστανται όλες οι ΜΔΠ και όλων των ειδών μπαταρίες. Ο συντελεστής ισχύος των φωτοβολταϊκών παραμένει ίσος με 0.707.

Από τον Πίνακα 6.22 φαίνεται ότι, από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για συντελεστή ισχύος 0.9 επαγωγικό, όπως στα προηγούμενα παραδείγματα. Μεγαλύτερη ή μικρότερη παραγωγή αέργου ισχύος διαφοροποιεί με αρνητικό τρόπο τη ροή ισχύος και, κατά επέκταση, αυξάνει τις απώλειες.

6.2.3.2 Περιορισμός υποψήφιων ζυγών τοποθέτησης

Στις προηγούμενες περιπτώσεις έγινε η υπόθεση ότι σε κάθε ζυγό, πλην του ζυγού ταλάντωσης, μπορούν να τοποθετηθούν όλα τα είδη ΜΔΠ και μπαταριών ταυτόχρονα. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει πάντοτε στην πράξη. Εδώ εξετάζονται δύο περιπτώσεις, όπου οι υποψήφιοι ζυγοί τοποθέτησης είναι περιορισμένοι. Οι συντελεστές ισχύος των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών παραμένουν 0.9 επαγωγικός και 0.707 αντίστοιχα. Στον Πίνακα 6.23 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια, όσον αφορά τους υποψήφιους ζυγούς.

- **Σενάριο 8:** Υποψήφιοι ζυγοί τοποθέτησης ανεμογεννητριών και μπαταριών πρώτου είδους: 2 και 4, υποψήφιοι ζυγοί τοποθέτησης φωτοβολταϊκών και μπαταριών δεύτερου είδους: 3 και 5

Πίνακας 6.23: Σενάρια υποψήφιων ζυγών τοποθέτησης, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Σενάριο	Ζυγοί τοποθέτησης			
	Ανεμογεννήτριες	Μπαταρίες πρώτου είδους	Φωτοβολταϊκά	Μπαταρίες δεύτερου είδους
7	2,3,4,5	2,3,4,5	2,3,4,5	2,3,4,5
8	2,4	2,4	3,5	3,5
9	3	3	4	4

Πίνακας 6.24: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για το σενάριο 8, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	-	-	-	-
2	0.18835642	0	0.03771045	0.18165581	-	-
3	0	0.14835043	-	-	0.09629443	0.49028896
4	0.29672027	0	0.12154396	0.52247295	-	-
5	0	0.18366867	-	-	0.16742673	0.91532550
Σύνολο	0.48507669	0.33201910	0.15925441	0.70412876	0.26372116	1.40561446

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 4.703 \text{ MWh}$.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών όσον αφορά την ισχύ και την ενέργεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.24.

- **Σενάριο 9:** Υποψήφιος ζυγός τοποθέτησης ανεμογεννητριών και μπαταριών πρώτου είδους: 3, υποψήφιος ζυγός τοποθέτησης φωτοβολταϊκών και μπαταριών δεύτερου είδους: 4

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 5.210 \text{ MWh}$.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών όσον αφορά την ισχύ και την ενέργεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.25. Όπως φαίνεται, ο περιορισμός των υποψήφιων ζυγών τοποθέτησης αυξάνει τις ενεργειακές απώλειες του δικτύου. Επίσης, από τους Πίνακες 6.24 και 6.25 παρατηρείται αύξηση στην εγκατεστημένη ισχύ ΜΔΠ ανά ζυγό, καθώς και στην απαιτούμενη ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών ανά ζυγό. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, όμως, μειώνεται (σε σχέση με το σενάριο 7 της ενότητας 6.2.2.8), ειδικά όσον αφορά τις μπαταρίες πρώτου είδους.

Πίνακας 6.25: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για το σενάριο 9, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	-	-	-	-
2	0	0	-	-	-	-
3	0.36362776	0	0.14405909	0.58134237	-	-
4	0	0.34390971	-	-	0.24436263	1.27096200
5	0	0	-	-	-	-
Σύνολο	0.36362776	0.34390971	0.14405909	0.58134237	0.24436263	1.27096200

6.2.3.3 Επίδραση της απόδοσης των μπαταριών

Οι μπαταρίες, στην πράξη, δεν μπορούν να αποδώσουν πάντοτε όλη την ενέργεια που έχουν αποθηκεύσει, λόγω διαφόρων απωλειών. Εδώ εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις μειωμένης απόδοσης μπαταριών. Θεωρείται ότι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$eff * ech1_{j,t} = edis1_{j,t} \quad (6.4)$$

$$eff * ech2_{j,t} = edis2_{j,t} \quad (6.5)$$

όπου eff είναι ο βαθμός απόδοσης (efficiency). Οι σχέσεις αυτές αποτελούν μια μικρή τροποποίηση των σχέσεων (4.12) και (4.17). Δηλαδή, σε κάθε ημερήσιο κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης, οι μπαταρίες και των δύο ειδών εκλύουν συνολικά ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ενέργειας που αποθηκεύουν, διότι η υπόλοιπη ενέργεια χάνεται.

Παρακάτω παρατίθενται αποτελέσματα, ενδεικτικά για απόδοση 90%, 70% και 50%.

- Απόδοση μπαταριών 90%

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 4.630 \text{ MWh}$.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών όσον αφορά την ισχύ και την ενέργεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.26.

- Απόδοση μπαταριών 70%

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 4.637 \text{ MWh}$.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών όσον αφορά την ισχύ και την ενέργεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.27.

- Απόδοση μπαταριών 50%

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 4.489 \text{ MWh}$.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών όσον αφορά την ισχύ και την ενέργεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.28.

Πίνακας 6.26: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για απόδοση 90%, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	-	-	-	-
2	0.11485532	0.09947126	0.06000598	0.15735863	0.07918415	0.28803611
3	0.07044987	0.05019609	0.03939797	0.11466982	0.04136138	0.18382279
4	0.18382079	0.16437376	0.08062548	0.34375715	0.16984671	0.90209603
5	0.09593968	0.06603189	0.11093216	0.48968016	0.11098061	0.58130841
Σύνολο	0.46506566	0.38007300	0.29096159	1.10546576	0.40137285	1.95526334

Πίνακας 6.27: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για απόδοση 70%, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	-	-	-	-
2	0.12032410	0.09177016	0.07324328	0.14648656	0.08392228	0.33882544
3	0.07449919	0.04543633	0.04069632	0.08807071	0.04395405	0.16793704
4	0.20937192	0.15457640	0.15159079	0.43431629	0.19989820	1.14838567
5	0.12015378	0.05772778	0.24255000	0.83821406	0.27145686	1.02717109
Σύνολο	0.52434899	0.34951067	0.50808039	1.50708762	0.59923139	2.68231924

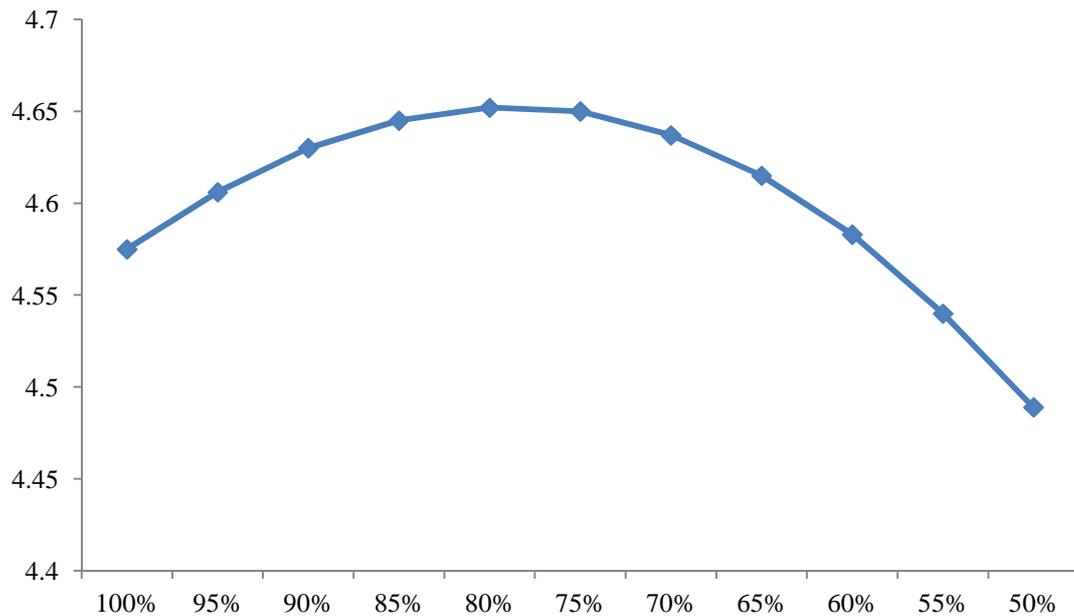
Πίνακας 6.28: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών για απόδοση 50%, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	-	-	-	-
2	0.12400073	0.08870319	0.06263001	0.10918865	0.06111896	0.30448002
3	0.07747856	0.04292427	0.02796381	0.09624680	0.03140631	0.18391767
4	0.25935087	0.13751057	0.15481354	0.91241678	0.24519742	1.53030656
5	0.14281201	0.05056179	0.17266782	0.78761337	0.13943447	1.08237453
Σύνολο	0.60364217	0.31969982	0.41807518	1.90546560	0.47715716	3.10107878

Πιο αναλυτικά, στον Πίνακα 6.29 και στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η επίδραση της απόδοσης των μπαταριών στην αντικειμενική συνάρτηση. Από το Σχήμα 6.6 παρατηρείται ότι οι απώλειες μεγιστοποιούνται για απόδοση περίπου 80%, ενώ μια ακόμη πιο βέλτιστη λύση (σε σχέση με τις προηγούμενες) επιτυγχάνεται για μικρή απόδοση μπαταριών.

Πίνακας 6.29: Επίδραση της απόδοσης των μπαταριών στην αντικειμενική συνάρτηση, στο δίκτυο των 5 ζυγών

Απόδοση μπαταριών	Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, z (MWh)
100%	4.575
95%	4.606
90%	4.630
85%	4.645
80%	4.652
75%	4.650
70%	4.637
65%	4.615
60%	4.583
55%	4.540
50%	4.489



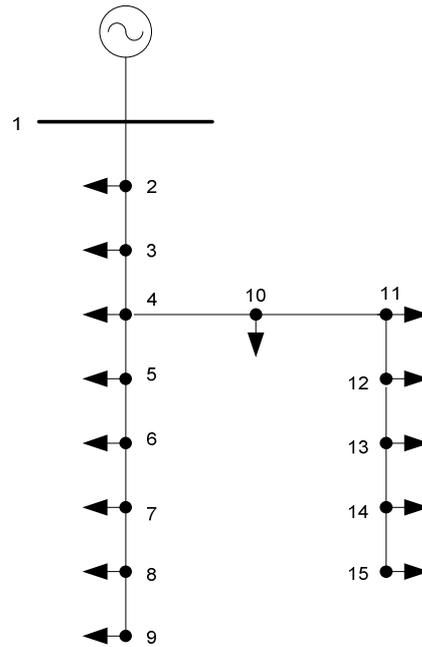
Σχήμα 6.6: Εξάρτηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (MWh) από την απόδοση των μπαταριών, στο δίκτυο των 5 ζυγών

6.3 ΔΙΚΤΥΟ 15 ΖΥΓΩΝ

6.3.1 Δεδομένα – Παραδοχές

Θεωρείται ακτινικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης, 15 ζυγών και 14 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Τα χαρακτηριστικά του ζυγού ταλάντωσης (ζυγός 1), τα όρια των τάσεων στους ζυγούς, καθώς και τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου, ηλιοφάνειας και φορτίου είναι ακριβώς όπως στο δίκτυο των 5 ζυγών, που εξετάστηκε προηγουμένως. Τα δεδομένα των γραμμών και των φορτίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.30 και από αυτά μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας αγωγιμοτήτων [Y], με τον ίδιο τρόπο όπως πριν. Το μοντέλο είναι ίδιο όπως στην περίπτωση των 5 ζυγών, με τις εξής μόνο τροποποιήσεις:

- Οι υποψήφιοι ζυγοί για σύνδεση ανεμογεννητριών και μπαταριών πρώτου είδους είναι οι ζυγοί 2, 4, 7, 12 και 15.
- Οι υποψήφιοι ζυγοί για σύνδεση φωτοβολταϊκών και μπαταριών δεύτερου είδους είναι οι ζυγοί 3, 6, 9, 10 και 13.
- Η απόδοση όλων των μπαταριών θεωρείται σταθερή και ίση με $eff=75\%$ (ρεαλιστική τιμή).
- Οι μπαταρίες πρώτου είδους φορτίζουν τις ώρες $t1-t8$ και $t21-t24$, ενώ εκφορτίζουν τις ώρες $t9-t20$, ώστε οι κύκλοι να είναι 12-ωροι.
- Οι μπαταρίες δεύτερου είδους εκφορτίζουν τις ώρες $t1-t8$ και $t21-t24$, ενώ φορτίζουν τις ώρες $t9-t20$, ώστε οι κύκλοι να είναι 12-ωροι.
- Οι συντελεστές ισχύος των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών παραμένουν 0.9 επαγωγικός και 0.707 επαγωγικός, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.7: Ακτινικό δίκτυο 15 ζυγών

Πίνακας 6.30: Δεδομένα δικτύου 15 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MVar)
1	1	2	1.097	1.074	0.100	0.090
2	2	3	1.463	1.432	0.060	0.040
3	3	4	0.731	0.716	0.150	0.130
4	4	5	0.366	0.358	0.075	0.050
5	5	6	1.828	1.790	0.015	0.009
6	6	7	1.097	1.074	0.018	0.014
7	7	8	0.731	0.716	0.013	0.010
8	8	9	0.731	0.716	0.016	0.011
9	4	10	1.080	0.734	0.020	0.010
10	10	11	1.620	1.101	0.016	0.009
11	11	12	1.080	0.734	0.050	0.040
12	12	13	1.350	0.917	0.105	0.090
13	13	14	0.810	0.550	0.025	0.015
14	14	15	1.944	1.321	0.040	0.025

6.3.2 Μελέτη περιπτώσεων

Με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως, παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια και παρατίθενται για όλα αυτά η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, πίνακες διαφόρων αποτελεσμάτων, γραφήματα, καθώς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Καθώς πρόκειται για αρκετά μεγαλύτερο δίκτυο, οι απώλειες είναι προφανώς μεγαλύτερες πάντοτε.

Πίνακας 6.31: Σενάρια για το δίκτυο των 15 ζυγών

Σενάριο	Περιγραφή
1	Αρχικό σύστημα (καμία ΜΔΠ ή μπαταρία)
2	Μόνο ανεμογεννήτριες
3	Μόνο φωτοβολταϊκά
4	Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)
5	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους
6	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους
7	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες και των δύο ειδών

Πίνακας 6.32: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, για το αρχικό δίκτυο των 15 ζυγών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.42194977	0.32711920	0.18412499
j2	0.42194977	0.32711920	0.18412499
j3	0.37358753	0.28950037	0.14373186
j4	0.37358753	0.28950037	0.14373186
j5	0.37358753	0.28950037	0.14373186
j6	0.59848728	0.46471482	0.37399461
j7	0.59848728	0.46471482	0.37399461
j8	0.59848728	0.46471482	0.37399461
j9	0.34949783	0.27077583	0.12572950
j10	0.34949783	0.27077583	0.12572950
j11	0.34949783	0.27077583	0.12572950
j12	0.42194977	0.32711920	0.18412499

6.3.2.1 Ορισμοί σεναρίων

Στον Πίνακα 6.31 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια (όσον αφορά τα είδη των ΜΔΠ και μπαταριών που εγκαθίστανται) τα οποία μελετώνται στην εργασία αυτή, για το δίκτυο των 15 ζυγών. Είναι τα ίδια με αυτά του δικτύου των 5 ζυγών.

6.3.2.2 Σενάριο 1: Ροή φορτίου αρχικού συστήματος

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλαδή οι ετήσιες απώλειες ενέργειας) είναι $z = 75.643 \text{ MWh}$.

Στον Πίνακα 6.32 παρατίθεται η ημερήσια απώλεια ενέργειας για την τυπική ημέρα κάθε μήνα, δηλαδή το μέγεθος $\sum_{t=1}^{24} powerloss_{j,t}$, η μέση ημερήσια τιμή της εγγεόμενης

ενεργού ισχύος από τον υποσταθμό, δηλαδή το μέγεθος $\frac{\sum_{t=1}^{24} pin_{j,t,1}}{24}$, και η μέση ημερήσια τιμή της εγγεόμενης αέργου ισχύος από τον υποσταθμό, δηλαδή το μέγεθος $\frac{\sum_{t=1}^{24} qin_{j,t,1}}{24}$.

Από τον Πίνακα 6.32 προκύπτει ότι τα μεγέθη είναι σταθερά ανά εποχή, επειδή το φορτίο της τυπικής ημέρας του μήνα (π.χ. j1, j2 και j12 για το χειμώνα) είναι ίδιο για κάθε εποχή (Πίνακας 6.4).

6.3.2.3 Σενάριο 2: Μόνο ανεμογεννήτριες

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα δεδομένα ανέμου, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, εκτός από τα προηγούμενα, και την εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε κάθε ζυγό, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα 6.33. Στον Πίνακα 6.34 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ενεργού και αέργου ισχύος μέσω του υποσταθμού.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $\mathbf{z} = 36.166 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 52.2% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών.

Πίνακας 6.33: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση ΜΔΠ μόνο τύπου ανεμογεννητριών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)
1	0
2	0.21515583
3	0
4	0.50695673
5	0
6	0
7	0.11737691
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0.27617420
13	0
14	0
15	0.15936947
Σύνολο	1.27503314

Πίνακας 6.34: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση μόνο ανεμογεννητριών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.10328877	0.17003137	0.03624081
j2	0.13679385	0.18635030	0.04115139
j3	-0.24560632	-0.01211424	0.05128554
j4	-0.11402597	0.05096818	0.01656913
j5	-0.25477301	-0.01559017	0.10298791
j6	0.37358442	0.35215942	0.17879630
j7	0.49443252	0.41239343	0.27042396
j8	0.53026893	0.43038670	0.30467804
j9	0.15778821	0.17649113	0.04864239
j10	0.08686751	0.14174230	0.02715496
j11	0.12752556	0.16157406	0.03466875
j12	0.21725385	0.22580084	0.06701111

Από τον Πίνακα 6.34 παρατηρείται ότι οι ετήσιες απώλειες ενέργειας μειώνονται περίπου στο μισό, ενώ μειώνεται επίσης πολύ η ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Αυτό είναι λογικό, καθώς η ζήτηση φορτίου καλύπτεται πλέον κατά μεγάλο ποσοστό από πηγές (ΜΔΠ) μέσα στο ίδιο το δίκτυο. Μάλιστα, οι περισσότεροι υποψήφιοι ζυγοί που έχουν επιλεγεί έχουν μεγάλο φορτίο σε σχέση με τους άλλους και έτσι η περισσότερη ισχύς που παράγεται, καταναλώνεται «απευθείας» (χωρίς τη μεσολάβηση γραμμών).

6.3.2.4 Σενάριο 3: Μόνο φωτοβολταϊκά

Εγκαθιστώντας φωτοβολταϊκά, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα δεδομένα ηλιοφάνειας, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ σε κάθε ζυγό, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα 6.35. Στον Πίνακα 6.36 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος μέσω του υποσταθμού.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 40.295 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 46.7% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.

Από τον Πίνακα 6.36 παρατηρείται ότι οι ετήσιες απώλειες ενέργειας μειώνονται και πάλι πάρα πολύ, όχι όμως όσο στην περίπτωση εγκατάστασης μόνο ανεμογεννητριών. Αυτό οφείλεται στη μηδενική παραγωγή των φωτοβολταϊκών κατά τις νυχτερινές ώρες. Επίσης, μειώνεται η ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού, αλλά και πάλι όχι όσο στο σενάριο 2, για τον ίδιο λόγο. Τέλος, από τον Πίνακα 6.35 φαίνεται ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι μικρότερη από ότι στο σενάριο 2 και αυτό εξηγείται, μεταξύ άλλων, από το γεγονός ότι οι υποψήφιοι ζυγοί έχουν μικρότερη ζήτηση φορτίου.

Πίνακας 6.35: Εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση ΜΔΠ μόνο τύπου φωτοβολταϊκών

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)
1	0
2	0
3	0.26490823
4	0
5	0
6	0.09607342
7	0
8	0
9	0.04115402
10	0.14663819
11	0
12	0
13	0.26753773
14	0
15	0
Σύνολο	0.81631159

Πίνακας 6.36: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση μόνο φωτοβολταϊκών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.35485798	0.26019386	0.12885307
j2	0.30572696	0.21111739	0.10864774
j3	0.22153360	0.13762247	0.08068968
j4	0.19349516	0.10959421	0.07579272
j5	0.13057444	0.04662595	0.08626432
j6	0.39189231	0.25875393	0.16082724
j7	0.33687193	0.20376407	0.14570622
j8	0.37906926	0.24591144	0.16518121
j9	0.16228514	0.08368821	0.07664104
j10	0.24614029	0.16756605	0.07478455
j11	0.28202574	0.20342760	0.08416783
j12	0.36620992	0.27152623	0.13562761

6.3.2.5 Σενάριο 4: Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)

Εγκαθιστώντας και τα δύο είδη ΜΔΠ ταυτόχρονα, λαμβάνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.37 παρατίθεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ σε κάθε

ζυγό, ενώ στον Πίνακα 6.38 οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού, για κάθε μήνα.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 28.686 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 62.1% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης και των δύο ειδών ΜΔΠ.

Πίνακας 6.37: Εγκατεστημένη αιολική και ηλιακή ισχύς για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση και των δύο τύπων ΜΔΠ

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)
1	0	0
2	0.17401122	0
3	0	0.14601670
4	0.37145427	0
5	0	0
6	0	0.05199404
7	0.06456908	0
8	0	0
9	0	0.02884941
10	0	0.06571193
11	0	0
12	0.16620072	0
13	0	0.16844238
14	0	0
15	0.11289216	0
Σύνολο	0.88912745	0.46101446

Πίνακας 6.38: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.16157361	0.17952511	0.04326058
j2	0.15757897	0.16355304	0.04458435
j3	-0.14418034	-0.00669519	0.04106226
j4	-0.06774844	0.02193991	0.02634904
j5	-0.20042411	-0.05909040	0.11669585
j6	0.32536378	0.27027935	0.12672073
j7	0.37732695	0.28009094	0.15241911
j8	0.42604021	0.31633875	0.18471559
j9	0.11030627	0.09958432	0.04961597
j10	0.10822056	0.12272856	0.03388223
j11	0.15680528	0.15677745	0.04360401
j12	0.24771310	0.22505402	0.07469768

Από τους Πίνακες 6.37 και 6.38 παρατηρείται ότι μειώνονται κατά πολύ περισσότερο οι απώλειες και η εγκατεστημένη ισχύς του κάθε είδους ΜΔΠ, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ είναι περίπου ίση με αυτή του σεναρίου 2. Υπάρχει, δηλαδή, ένα είδος «συνεργασίας» μεταξύ των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών. Παράλληλα, από τον Πίνακα 6.38 παρατηρείται μείωση της ανταλλαγής με το άπειρο δίκτυο, αφού οι ΜΔΠ καθιστούν το δίκτυο πιο ανεξάρτητο.

6.3.2.6 Σενάριο 5: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μπαταρίες πρώτου είδους στους υποψήφιους ζυγούς, το GAMS δίνει διάφορα αποτελέσματα, μεταξύ των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 6.39. Στον Πίνακα 6.40 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο. Στον Πίνακα 6.41 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 4, ενδεικτικά για τους μήνες j2 (Φεβρουάριο), j5 (Μάιο), j8 (Αύγουστο) και j11 (Νοέμβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.8. Τέλος, στον Πίνακα 6.42 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 12, ενδεικτικά για τους μήνες j2, j5, j8 και j11. Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.9.

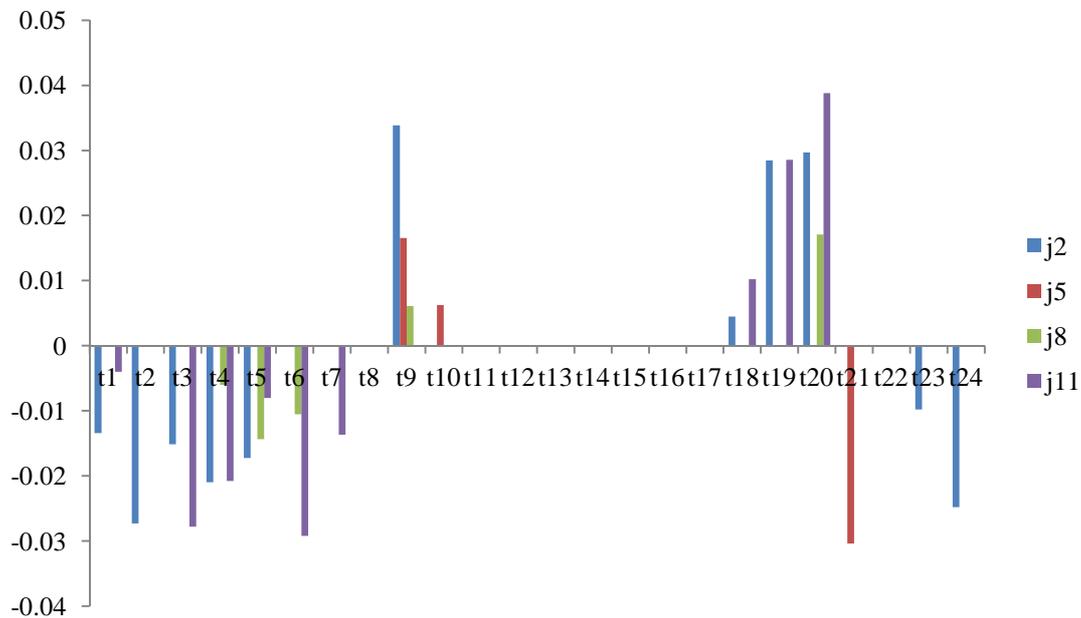
Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 28.490 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 62.3% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών πρώτου είδους.

Πίνακας 6.39: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών, στο δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου είδους

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών (MWh)
1	0	0	0	0
2	0.17595591	0	0.02567668	0.10634823
3	0	0.14410921	0	0
4	0.37631441	0	0.05865416	0.22247526
5	0	0	0	0
6	0	0.05125620	0	0
7	0.06559917	0	0.01131405	0.04116118
8	0	0	0	0
9	0	0.02863370	0	0
10	0	0.06441058	0	0
11	0	0	0	0
12	0.16850031	0	0.02821843	0.10224690
13	0	0.16696247	0	0
14	0	0	0	0
15	0.11413714	0	0.01811349	0.06763000
Σύνολο	0.90050694	0.4553721	0.1419768	0.53986157

Πίνακας 6.40: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών πρώτου είδους

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.16473713	0.17851123	0.04040851
j2	0.15906337	0.16307343	0.04318574
j3	-0.14634353	-0.00832821	0.04090508
j4	-0.06925124	0.02106626	0.02598705
j5	-0.20359498	-0.06009444	0.11775895
j6	0.32484053	0.27070245	0.12655275
j7	0.37820042	0.28142234	0.15292573
j8	0.42760604	0.31753648	0.18531849
j9	0.11061988	0.10003560	0.04925779
j10	0.10889363	0.12227383	0.03293084
j11	0.15787561	0.15624553	0.04249205
j12	0.24903342	0.22451012	0.07337322



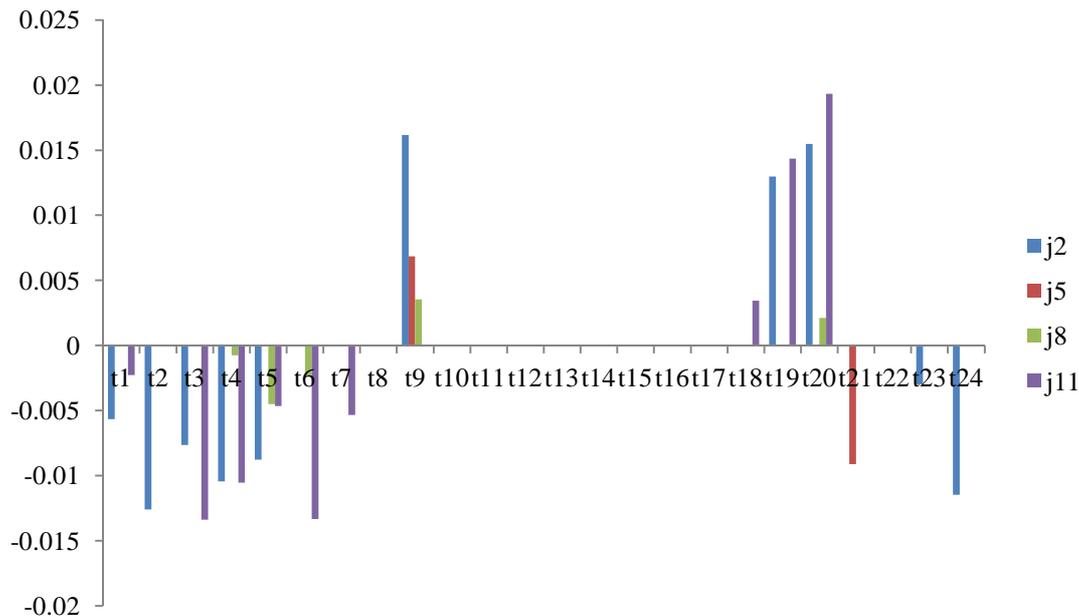
Σχήμα 6.8: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 4, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 15 ζυγών

Πίνακας 6.41: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 4, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 15 ζυγών

	Μήνας			
	j2	j5	j8	j11
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.01339991	0	0	0.00399075
t2	0.02731907	0	0	0
t3	0.01513664	0	0	0.02776384
t4	0.02094781	0	0.00601192	0.02078295
t5	0.01722884	0	0.01435765	0.00800473
t6	0	0	0.01054512	0.02922473
t7	0	0	0	0.01368452
t8	0	0	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0.03387406	0.01651921	0.00611399	0
t10	0	0.00625987	0	0
t11	0	0	0	0
t12	0	0	0	0
t13	0	0	0	0
t14	0	0	0	0
t15	0	0	0	0
t16	0	0	0	0
t17	0	0	0	0
t18	0.00446202	0	0	0.01019418
t19	0.02844609	0	0	0.02857289
t20	0.02968281	0	0.01707203	0.03882157
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0	0.03037211	0	0
t22	0	0	0	0
t23	0.00980241	0	0	0
t24	0.02478529	0	0	0

Πίνακας 6.42: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 12, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 15 ζυγών

	Μήνας			
	j2	j5	j8	j11
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.00564517	0	0	0.00226550
t2	0.01260111	0	0	0
t3	0.00764257	0	0	0.01338778
t4	0.01043031	0	0.00074649	0.01053611
t5	0.00875726	0	0.00450264	0.00464631
t6	0	0	0.00228767	0.01332369
t7	0	0	0	0.00532498
t8	0	0	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0.01617496	0.00684210	0.00353677	0
t10	0	0	0	0
t11	0	0	0	0
t12	0	0	0	0
t13	0	0	0	0
t14	0	0	0	0
t15	0	0	0	0
t16	0	0	0	0
t17	0	0	0	0
t18	0	0	0	0.00343306
t19	0.01298298	0	0	0.01436271
t20	0.01548391	0	0.00211583	0.01931750
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0	0.00912279	0	0
t22	0	0	0	0
t23	0.00298493	0	0	0
t24	0.01146112	0	0	0



Σχήμα 6.9: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 12, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 15 ζυγών

Από τον Πίνακα 6.40 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση μπαταριών πρώτου είδους επιφέρει σχεδόν μηδαμινή μείωση των απωλειών, και αυτό διότι κατά τις ώρες φόρτισής τους, τα φωτοβολταϊκά είναι σχεδόν πάντα εκτός λειτουργίας, ενώ οι ταχύτητες ανέμου δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει και πολλή ενέργεια να αποθηκευτεί. Επίσης, από τα Σχήματα 6.8 και 6.9 παρατηρείται ότι οι μπαταρίες συνήθως φορτίζουν τις ώρες που η ταχύτητα ανέμου είναι πιο υψηλή από ότι τις υπόλοιπες και εκφορτίζουν τις ώρες που η ταχύτητα ανέμου είναι πιο χαμηλή από ότι τις υπόλοιπες. Τέλος, από τον Πίνακα 6.39 παρατηρείται ότι η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ παραμένει περίπου σταθερή σε σχέση με το σενάριο 4.

6.3.2.7 Σενάριο 6: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μπαταρίες δεύτερου είδους στους υποψήφιους ζυγούς, το GAMS δίνει διάφορα αποτελέσματα, μεταξύ των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 6.43. Στον Πίνακα 6.44 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Στον Πίνακα 6.45 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 9, ενδεικτικά για τους μήνες j3 (Μάρτιο), j6 (Ιούνιο), j9 (Σεπτέμβριο) και j12 (Δεκέμβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.10. Τέλος, στον Πίνακα 6.46 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 13, ενδεικτικά για τους μήνες j3, j6, j9 και j12. Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.11.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 22.856 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 69.8% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών δεύτερου είδους.

Πίνακας 6.43: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών, στο δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών δεύτερου είδους

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών (MWh)
1	0	0	0	0
2	0.18336991	0	0	0
3	0	0.20079442	0.22744167	1.38693589
4	0.39218774	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0.07013412	0.08557302	0.52162350
7	0.06988938	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0.03730838	0.03350622	0.20157180
10	0	0.09271110	0.13578114	0.83628160
11	0	0	0	0
12	0.17504229	0	0	0
13	0	0.22576652	0.22584525	1.37277214
14	0	0	0	0
15	0.11482527	0	0	0
Σύνολο	0.93531459	0.62671454	0.7081473	4.31918493

Πίνακας 6.44: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών δεύτερου είδους

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.13860825	0.16058465	0.03536916
j2	0.13349934	0.13531024	0.03450759
j3	-0.17279125	-0.04787843	0.03957981
j4	-0.09997830	-0.02251362	0.02606358
j5	-0.22796213	-0.11985521	0.09301179
j6	0.29016040	0.22510309	0.09473096
j7	0.33627074	0.22574776	0.11581010
j8	0.38993043	0.27105866	0.14958846
j9	0.08884534	0.05806065	0.03340363
j10	0.09122687	0.09725316	0.02382556
j11	0.14497316	0.13926651	0.03487798
j12	0.23066881	0.21030488	0.06596461

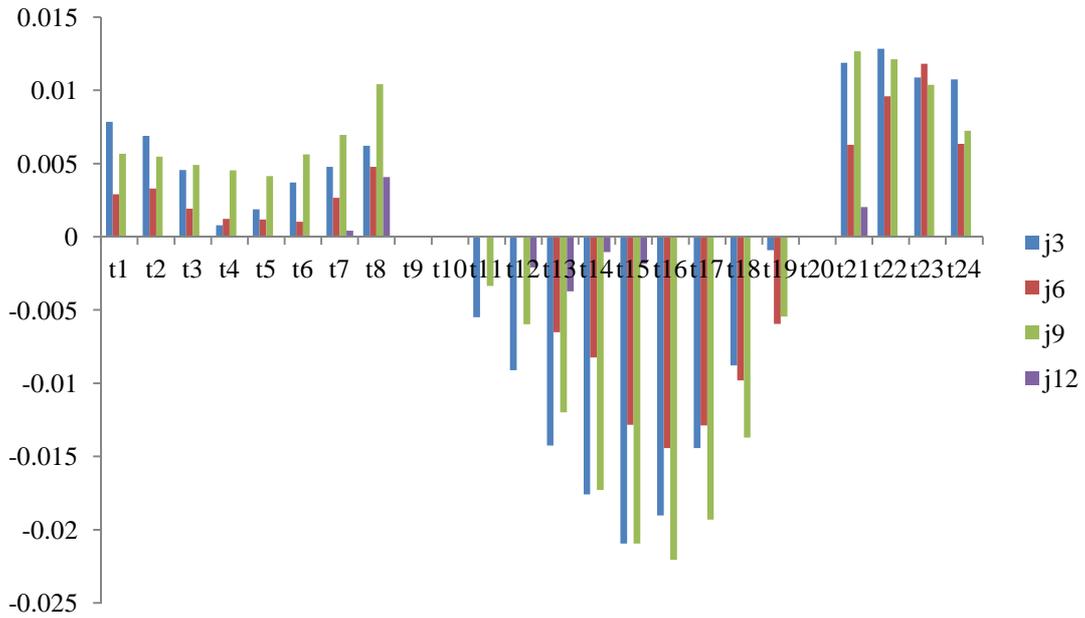
Πίνακας 6.45: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 9, για το σενάριο 6 στο δίκτυο των 15 ζυγών

	Μήνας			
	j3	j6	j9	j12
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.00783469	0.00289199	0.00567591	0
t2	0.00688386	0.00328866	0.00545815	0
t3	0.00455917	0.00192495	0.00489573	0
t4	0.00077578	0.00122071	0.00453923	0
t5	0.00186616	0.00117830	0.00413808	0
t6	0.00369923	0.00102495	0.00561354	0
t7	0.00476405	0.00265386	0.00694579	0.00042104
t8	0.00621823	0.00477717	0.01040542	0.00407941
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0	0	0	0
t10	0	0	0	0
t11	0.00549518	0	0.00334787	0
t12	0.00910571	0	0.00596300	0.00208388
t13	0.01426315	0.00651515	0.01198575	0.00373273
t14	0.01759771	0.00823238	0.01727906	0.00103677
t15	0.02094592	0.01283434	0.02095066	0.00185469
t16	0.01902880	0.01442707	0.02206291	0
t17	0.01443074	0.01287854	0.01930681	0
t18	0.00877837	0.00981758	0.01370349	0
t19	0.00091447	0.00594093	0.00545380	0
t20	0	0	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0.01187515	0.00627266	0.01265548	0.00203060
t22	0.01282970	0.00959545	0.01211221	0
t23	0.01086733	0.01180438	0.01036836	0
t24	0.01074669	0.00635141	0.00723211	0

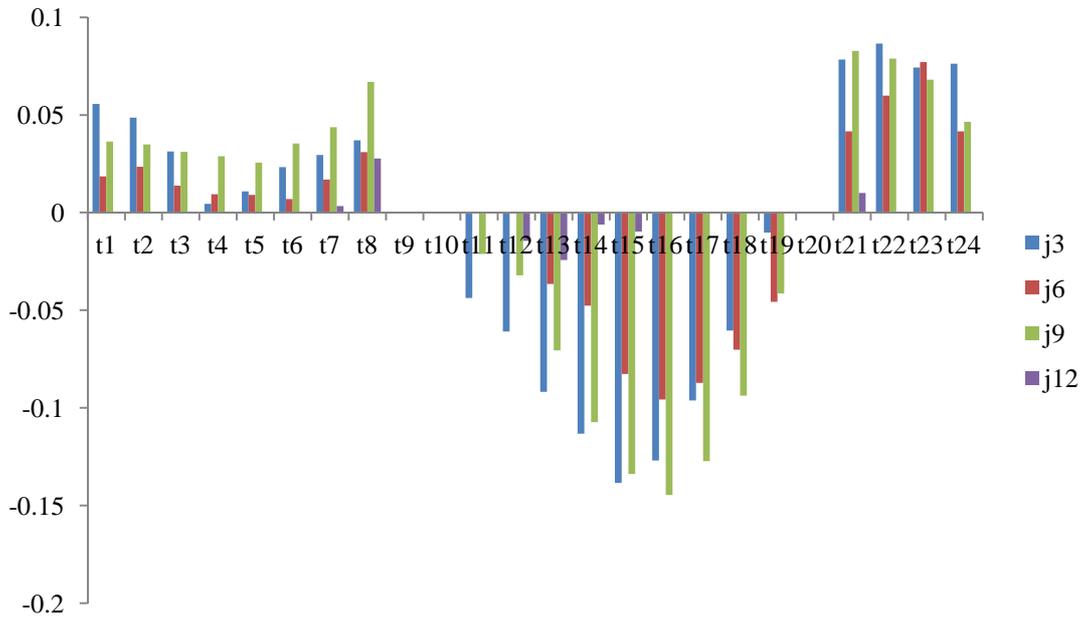
Πίνακας 6.46: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 13, για το σενάριο 6 στο δίκτυο των 15 ζυγών

	Μήνας			
	j3	j6	j9	j12
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.05570827	0.01861575	0.03632555	0
t2	0.04866462	0.02348686	0.03491141	0
t3	0.03132465	0.01387831	0.03110008	0
t4	0.00455123	0.00935979	0.02887939	0
t5	0.01087691	0.00903006	0.02551602	0
t6	0.02328478	0.00694351	0.03530786	0
t7	0.02949761	0.01692868	0.04373417	0.00331737
t8	0.03700577	0.03098331	0.06700085	0.02774410
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0	0	0	0
t10	0	0	0	0
t11	0.04368956	0	0.02116758	0
t12	0.06092370	0	0.03215372	0.01451941
t13	0.09179666	0.03658574	0.07046994	0.02430849
t14	0.11320880	0.04771535	0.10737302	0.00609063
t15	0.13843726	0.08270991	0.13372216	0.00980777
t16	0.12684622	0.09567368	0.14461911	0
t17	0.09613233	0.08726649	0.12724190	0
t18	0.06037257	0.07014784	0.09368763	0
t19	0.01020575	0.04574530	0.04147589	0
t20	0	0	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0.07831921	0.04158902	0.08276302	0.00998325
t22	0.08654740	0.05983783	0.07886618	0
t23	0.07425765	0.07706209	0.06804873	0
t24	0.07617155	0.04166801	0.04647995	0

Από τον Πίνακα 6.44 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση μπαταριών δεύτερου είδους μειώνει αρκετά τις απώλειες, καθώς και την ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο. Η βελτιστοποίηση αυτή, σε σχέση με το σενάριο 5, επιτυγχάνεται, διότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι λιγότερο αβέβαιο μέγεθος, οπότε τα φωτοβολταϊκά έχουν πιο σταθερή παραγωγή, με αποτέλεσμα αυτή να αξιοποιείται καλύτερα από τις μπαταρίες. Επίσης, από τα Σχήματα 6.10 και 6.11 φαίνεται ότι οι μπαταρίες φορτίζουν έντονα κατά τις ώρες με την περισσότερη ηλιοφάνεια, με αποτέλεσμα τη σχετικά μεγάλη τιμή της ενεργειακής τους χωρητικότητας. Τέλος, από τον Πίνακα 6.43 γίνεται φανερό ότι η εγκατεστημένη αιολική ισχύς παραμένει περίπου σταθερή, ενώ η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς αυξάνεται αρκετά, για καλύτερη τροφοδότηση των μπαταριών δεύτερου είδους.



Σχήμα 6.10: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 9, για το σενάριο 6 στο δίκτυο των 15 ζυγών



Σχήμα 6.11: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 13, για το σενάριο 6 στο δίκτυο των 15 ζυγών

6.3.2.8 Σενάριο 7: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες όλων των ειδών

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μπαταρίες πρώτου και δεύτερου είδους στους υποψήφιους ζυγούς, το GAMS δίνει διάφορα αποτελέσματα, μεταξύ των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 6.47. Στον Πίνακα 6.48 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Στον Πίνακα 6.49 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών πρώτου είδους στο ζυγό 7, ενδεικτικά για τους μήνες j1 (Ιανουάριο), j4 (Απρίλιο), j7 (Ιούλιο) και j10 (Οκτώβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.12. Τέλος, στον Πίνακα 6.50 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών δεύτερου είδους στο ζυγό 10, ενδεικτικά για τους μήνες j1, j4, j7 και j10. Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.13.

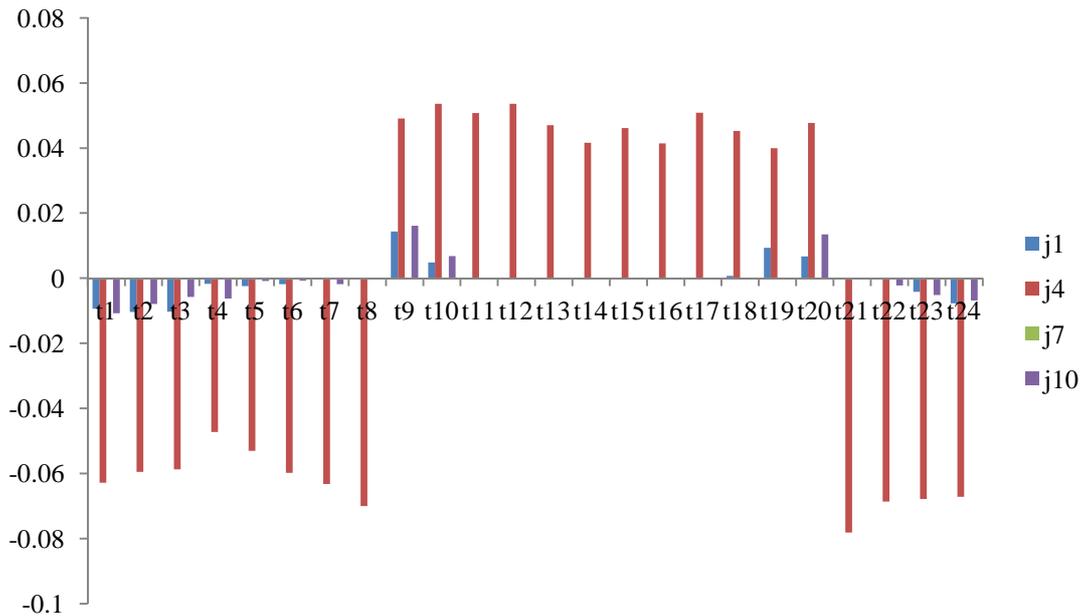
Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 21.859 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 71.1% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών και των δύο ειδών.

Πίνακας 6.47: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών, για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των τύπων ΜΔΠ και μπαταριών και των δύο ειδών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών πρώτου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών πρώτου είδους (MWh)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών δεύτερου είδους (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών δεύτερου είδους (MWh)
1	0	0	0	0	0	0
2	0.18705537	0	0.03973463	0.27617363	0	0
3	0	0.18174205	0	0	0.15644413	1.29270365
4	0.41791098	0	0.14694924	1.32648566	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0.06711462	0	0	0.09873102	0.90478782
7	0.08813291	0	0.08629305	0.82214930	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0.03577007	0	0	0.04812579	0.45262420
10	0	0.08971922	0	0	0.15227955	1.12039630
11	0	0	0	0	0	0
12	0.19726058	0	0.12566873	1.00544378	0	0
13	0	0.22200773	0	0	0.25211250	2.16429049
14	0	0	0	0	0	0
15	0.12427001	0	0.05522847	0.36493231	0	0
Σύνολο	1.01462985	0.59635369	0.45387412	3.79518468	0.70769299	5.93480246

Πίνακας 6.48: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα για το δίκτυο των 15 ζυγών, με εγκατάσταση ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών και των δύο ειδών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγχεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγχεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.12688115	0.15329296	0.02796360
j2	0.12618621	0.13089647	0.02913202
j3	-0.14142124	-0.06101932	0.03609826
j4	-0.05610154	-0.03058752	0.02299965
j5	-0.23213211	-0.12963596	0.09719036
j6	0.28396131	0.22578919	0.09114429
j7	0.33883104	0.23213807	0.11619563
j8	0.39351843	0.27698475	0.15095087
j9	0.08844756	0.05916963	0.03088482
j10	0.08472951	0.09308626	0.02013563
j11	0.13962288	0.13497286	0.03060973
j12	0.22273404	0.20606389	0.06029376



Σχήμα 6.12: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 7, για το σενάριο 7 στο δίκτυο των 15 ζυγών

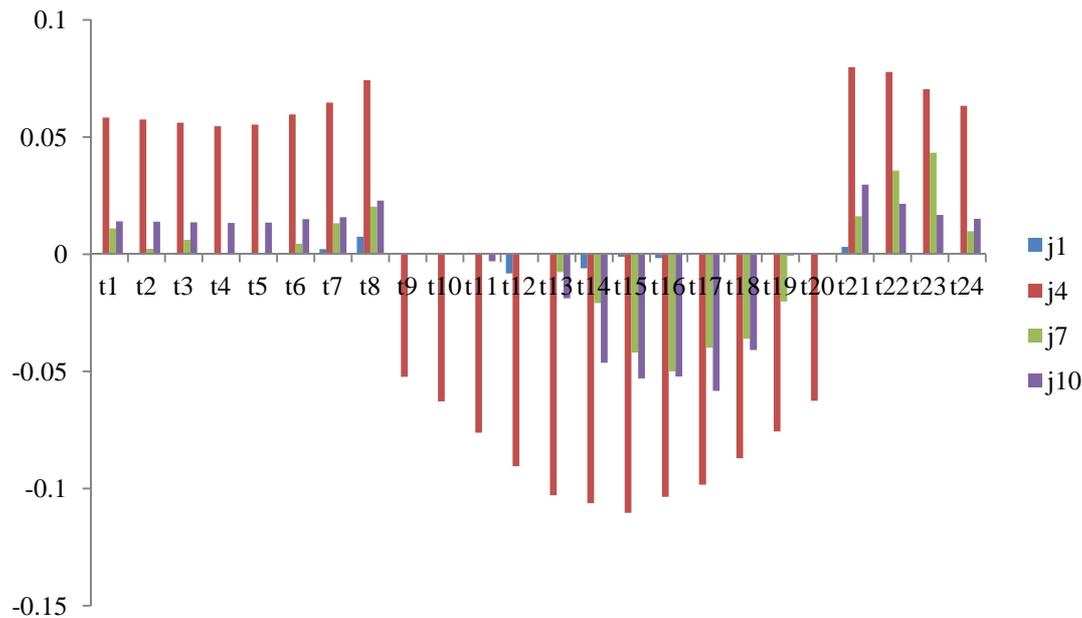
Πίνακας 6.49: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών πρώτου είδους του ζυγού 7, για το σενάριο 7 στο δίκτυο των 15 ζυγών

	Μήνας			
	j1	j4	j7	j10
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.00938340	0.06281822	0	0.01070817
t2	0.01038128	0.05950332	0	0.00790779
t3	0.01027713	0.05868453	0	0.00570575
t4	0.00176845	0.04720813	0	0.00627099
t5	0.00244326	0.05300796	0	0.00080471
t6	0.00178321	0.05979723	0	0.00077242
t7	0	0.06324637	0	0.00183285
t8	0	0.06994140	0	0.00034564
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0.01435717	0.04903122	0	0.01614144
t10	0.00483252	0.05355207	0	0.00681468
t11	0	0.05079083	0	0
t12	0	0.05360000	0	0
t13	0	0.04705845	0	0
t14	0	0.04161698	0	0
t15	0	0.04610795	0	0
t16	0	0.04143223	0	0
t17	0	0.05079890	0	0
t18	0.00072859	0.04523518	0	0
t19	0.00935727	0.03996296	0	0
t20	0.00666068	0.04770912	0	0.01346704
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0	0.07807832	0	0
t22	0	0.06861821	0	0.00224124
t23	0.00416793	0.06784960	0	0.00514604
t24	0.00771031	0.06710791	0	0.00682861

Πίνακας 6.50: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 10, για το σενάριο 7 στο δίκτυο των 15 ζυγών

	Μήνας			
	j1	j4	j7	j10
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0	0.05820833	0.01104189	0.01403867
t2	0	0.05747334	0.00227520	0.01388195
t3	0	0.05603185	0.00609278	0.01356894
t4	0	0.05453729	0	0.01325921
t5	0	0.05528462	0.00039233	0.01341705
t6	0	0.05963184	0.00445912	0.01501973
t7	0.00211762	0.06468255	0.01315452	0.01577730
t8	0.00740432	0.07419472	0.02029690	0.02285868
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0	0.05231300	0	0
t10	0	0.06276744	0	0
t11	0	0.07614426	0	0.00305659
t12	0.00813911	0.09048067	0	0
t13	0	0.10289321	0.00769614	0.01880919
t14	0.00607773	0.10624801	0.02082840	0.04632192
t15	0.00109113	0.11032597	0.04194480	0.05305531
t16	0.00160309	0.10356595	0.04996249	0.05222139
t17	0	0.09833211	0.03993965	0.05830775
t18	0	0.08711659	0.03613806	0.04082813
t19	0	0.07567552	0.02024084	0.00051023
t20	0	0.06256742	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0.00316136	0.07983032	0.01622783	0.02972221
t22	0	0.07772628	0.03563810	0.02145903
t23	0	0.07045937	0.04324685	0.01670016
t24	0	0.06326210	0.00973725	0.01512994

Από τον Πίνακα 6.48 παρατηρείται ότι η σύνδεση όλων των ΜΔΠ και όλων των ειδών μπαταριών επιφέρει τη βέλτιστη λύση όσον αφορά τις ετήσιες απώλειες ενέργειας και την ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού, με μικρή όμως διαφορά από το σενάριο 6 και αυτό οφείλεται στην ελάχιστη βελτιστοποίηση που προσφέρουν οι μπαταρίες πρώτου είδους, όπως φάνηκε και προηγουμένως. Επίσης, ο Πίνακας 6.47 φανερώνει ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών παραμένει περίπου σταθερή, με μικρή αύξηση και μείωση, αντίστοιχα.

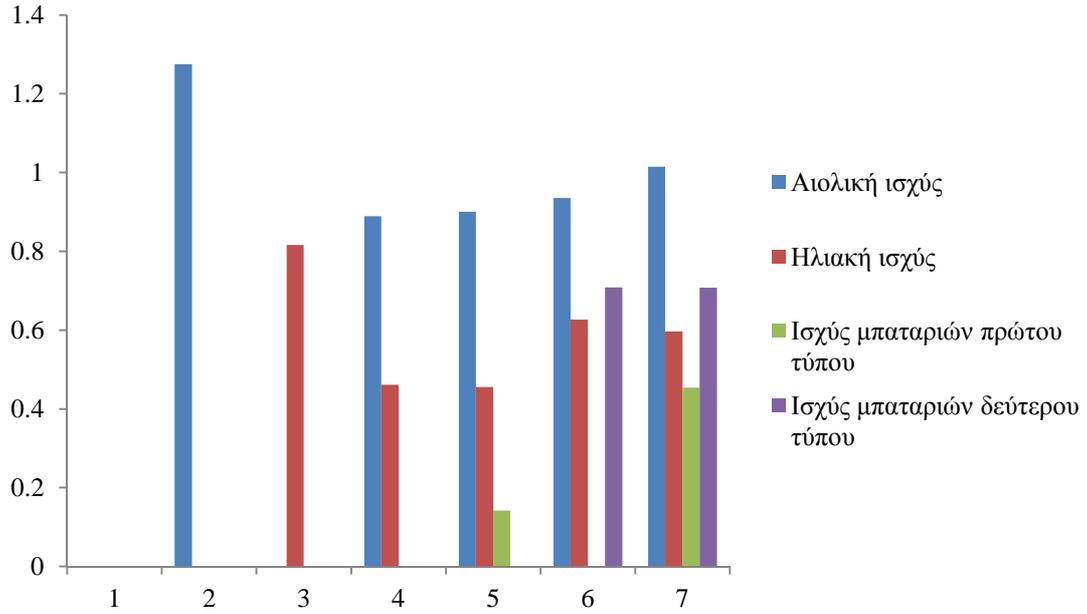


Σχήμα 6.13: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών δεύτερου είδους του ζυγού 10, για το σενάριο 7 στο δίκτυο των 15 ζυγών

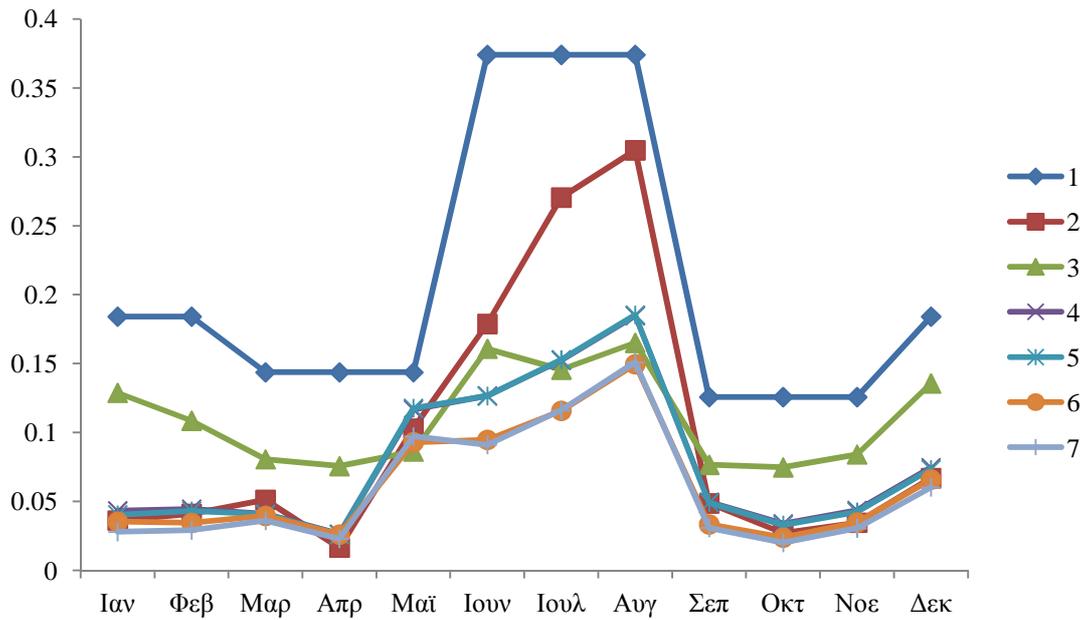
6.3.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα σχήματα, τα οποία δείχνουν πιο παραστατικά τις ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων. Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται σε γράφημα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και μπαταριών, για όλα τα σεναρία. Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζονται οι απώλειες ενέργειας της τυπικής ημέρας κάθε μήνα, για όλες τα σεναρία. Παρατηρείται ότι, όπως και στο δίκτυο των 5 ζυγών, οι ελάχιστες απώλειες συμβαίνουν το μήνα j4 (Απρίλιο) και οι μέγιστες το μήνα j8 (Αύγουστο). Οι επιλογές που επιφέρουν δραστική αλλαγή είναι η εγκατάσταση όλων των ειδών ΜΔΠ (σενάριο 4), καθώς και η επιπλέον εγκατάσταση μπαταριών δεύτερου είδους (σενάρια 6 και 7). Στα Σχήματα 6.16 και 6.17 παρουσιάζονται οι μέσες ημερήσιες τιμές κάθε μήνα της ανταλλαγής ενεργού και αέργου ισχύος, αντίστοιχα, με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού, για όλα τα σεναρία. Και πάλι, το σενάριο 4 είναι που επιφέρει τη δραστικότερη μείωση, ενώ και η εγκατάσταση μπαταριών δεύτερου είδους προκαλεί αρκετή μείωση.

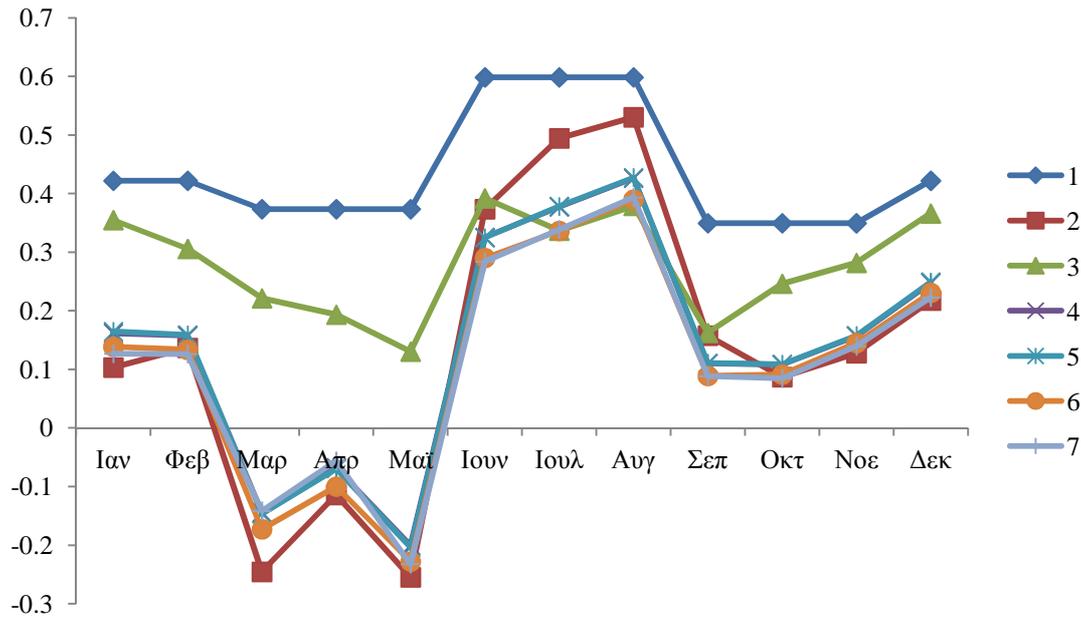
Συνεπώς, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι μπαταρίες πρώτου είδους δεν είναι ουσιαστικά απαραίτητες, μιας και τα οφέλη από τη χρήση τους είναι πολύ μικρότερα από τα μειονεκτήματά τους στην πράξη, για παράδειγμα το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Η εγκατάστασή τους μελετήθηκε απλώς για ερευνητικούς λόγους. Θα ήταν πολύ πιο χρήσιμες, αν οι ταχύτητες ανέμου κατά τις νυχτερινές ώρες ήταν υψηλές ή αν υπήρχαν εγκατεστημένα στους ζυγούς του δικτύου και άλλα είδη ΜΔΠ, όπως μονάδες βιομάζας. Έτσι, θα μπορούσαν να αποθηκεύσουν την υψηλή παραγωγή κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου.



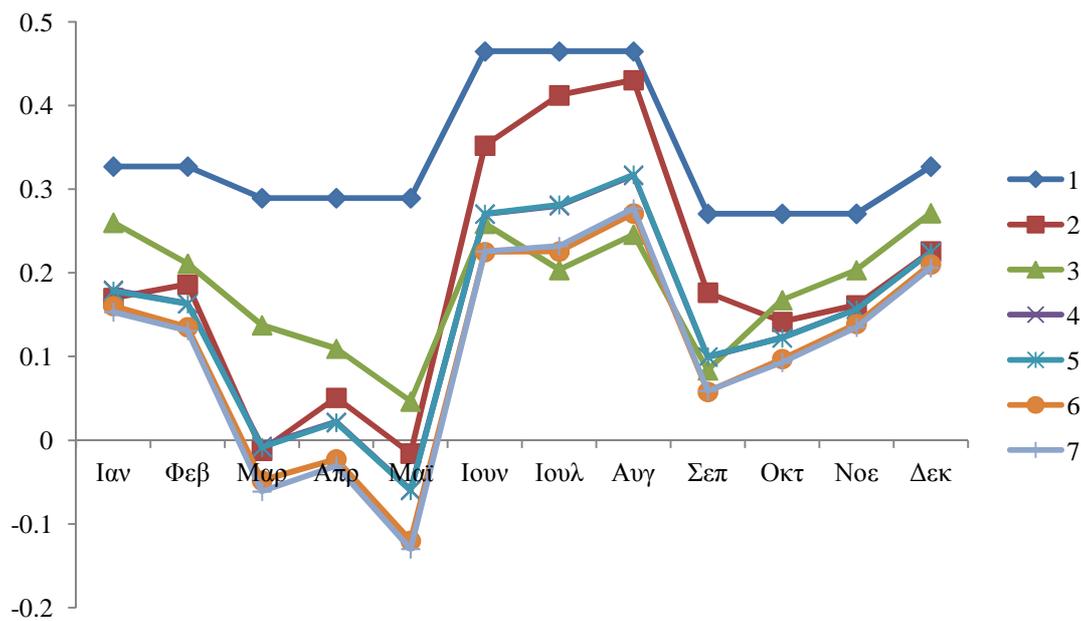
Σχήμα 6.14: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 15 ζυγών



Σχήμα 6.15: Ημερήσιες απώλειες (MWh) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 15 ζυγών



Σχήμα 6.16: Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 15 ζυγών



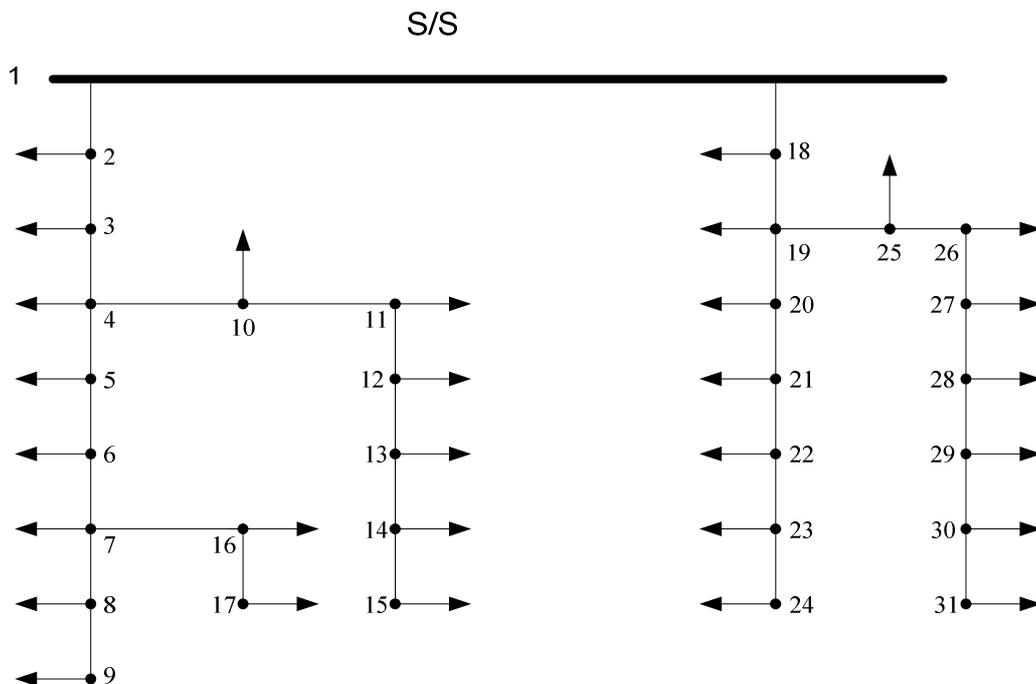
Σχήμα 6.17: Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 15 ζυγών

6.4 ΔΙΚΤΥΟ 31 ΖΥΓΩΝ

6.4.1 Δεδομένα – Παραδοχές

Θεωρείται ακτινικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης, 31 ζυγών και 30 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.18. Τα χαρακτηριστικά του ζυγού ταλάντωσης (ζυγός 1), καθώς και τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου, ηλιοφάνειας και φορτίου είναι ακριβώς όπως στα δίκτυα των 5 και 15 ζυγών, που εξετάστηκαν προηγουμένως. Τα δεδομένα των γραμμών και των φορτίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.51 και από αυτά μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας αγωγιμότητας [Y], με τον ίδιο τρόπο όπως παρουσιάστηκε στο δίκτυο των 5 ζυγών. Το μοντέλο είναι ίδιο όπως στις περιπτώσεις των 5 και 15 ζυγών, με τις εξής μόνο τροποποιήσεις:

- Χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μπαταρίες δεύτερου είδους.
- Οι υπονήφιοι ζυγοί για σύνδεση ανεμογεννητριών είναι οι ζυγοί 2, 4, 7, 11, 14, 19, 24, 27 και 30.
- Οι υπονήφιοι ζυγοί για σύνδεση φωτοβολταϊκών και μπαταριών είναι οι ζυγοί 5, 9, 10, 13, 16, 18, 22, 26 και 31.
- Η απόδοση όλων των μπαταριών θεωρείται σταθερή και ίση με $\text{eff}=75\%$ (ρεαλιστική τιμή).
- Οι μπαταρίες εκφορτίζουν τις ώρες t_1-t_8 και $t_{21}-t_{24}$, ενώ φορτίζουν τις ώρες t_9-t_{20} , ώστε οι κύκλοι να είναι 12-ωροι.
- Οι συντελεστές ισχύος των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών θεωρούνται σταθεροί και ίσοι με 0.9 επαγωγικό και 0.8 επαγωγικό, αντίστοιχα.
- Τα όρια των μέτρων των τάσεων αυξάνονται σε $\pm 7\%$ της ονομαστικής τιμής, δηλαδή $v_{\min}=10.23\text{kV}$ και $v_{\max}=11.77\text{kV}$, διότι με τα προηγούμενα όρια του $\pm 6\%$, το πρόβλημα είναι μη επιλύσιμο στα σενάρια 1, 2 και 3, σε ένα δίκτυο τέτοιου μεγέθους (το GAMS βγάζει σφάλμα).



Σχήμα 6.18: Ακτινικό δίκτυο 31 ζυγών

Πίνακας 6.51: Δεδομένα δικτύου 31 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MVar)
1	1	2	1.097	1.074	0.100	0.090
2	2	3	1.463	1.432	0.060	0.040
3	3	4	0.731	0.716	0.150	0.130
4	4	5	0.366	0.358	0.075	0.050
5	5	6	1.828	1.790	0.015	0.009
6	6	7	1.097	1.074	0.018	0.014
7	7	8	0.731	0.716	0.013	0.010
8	8	9	0.731	0.716	0.016	0.011
9	4	10	1.080	0.734	0.020	0.010
10	10	11	1.620	1.101	0.016	0.009
11	11	12	1.080	0.734	0.050	0.040
12	12	13	1.350	0.917	0.105	0.090
13	13	14	0.810	0.550	0.025	0.015
14	14	15	1.944	1.321	0.040	0.025
15	7	16	1.080	0.734	0.100	0.060
16	16	17	1.620	1.101	0.040	0.030
17	1	18	1.097	1.074	0.060	0.030
18	18	19	0.366	0.358	0.040	0.025
19	19	20	1.463	1.432	0.015	0.009
20	20	21	0.914	0.895	0.013	0.007
21	21	22	0.804	0.787	0.030	0.020
22	22	23	1.133	1.110	0.090	0.050
23	23	24	0.475	0.465	0.050	0.030
24	19	25	2.214	1.505	0.060	0.040
25	25	26	1.620	1.110	0.100	0.080
26	26	27	1.080	0.734	0.080	0.065
27	27	28	0.540	0.367	0.100	0.060
28	28	29	0.540	0.367	0.100	0.055
29	29	30	1.080	0.734	0.120	0.070
30	30	31	1.080	0.734	0.105	0.070

6.4.2 Μελέτη περιπτώσεων

Με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως, παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για τις διάφορες περιπτώσεις. Καθώς πρόκειται για ακόμα μεγαλύτερο δίκτυο, οι ετήσιες απώλειες είναι προφανώς πάντοτε ακόμα μεγαλύτερες.

Πίνακας 6.52: Σενάρια για το δίκτυο των 31 ζυγών

Σενάριο	Περιγραφή
1	Αρχικό σύστημα (καμία ΜΔΠ ή μπαταρία)
2	Μόνο ανεμογεννήτριες
3	Μόνο φωτοβολταϊκά
4	Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)
5	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες πρώτου είδους
6	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες δεύτερου είδους
7	Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες και των δύο ειδών

Πίνακας 6.53: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, για το αρχικό δίκτυο των 31 ζυγών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγχεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγχεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	1.09149874	0.75651090	0.65335046
j2	1.09149874	0.75651090	0.65335046
j3	0.96555950	0.66873266	0.50885039
j4	0.96555950	0.66873266	0.50885039
j5	0.96555950	0.66873266	0.50885039
j6	1.55325058	1.07943646	1.33861392
j7	1.55325058	1.07943646	1.33861392
j8	1.55325058	1.07943646	1.33861392
j9	0.90292486	0.62513098	0.44463974
j10	0.90292486	0.62513098	0.44463974
j11	0.90292486	0.62513098	0.44463974
j12	1.09149874	0.75651090	0.65335046

6.4.2.1 Ορισμοί σεναρίων

Στον Πίνακα 6.52 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια (όσον αφορά τα είδη των ΜΔΠ και μπαταριών που εγκαθίστανται) τα οποία μελετώνται στην εργασία αυτή, για το δίκτυο των 31 ζυγών. Είναι τα ίδια με αυτά των δικτύων των 5 και 15 ζυγών.

6.4.2.2 Σενάριο 1: Ροή φορτίου αρχικού συστήματος

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλαδή οι ετήσιες απώλειες ενέργειας) είναι $z = 269.231 \text{ MWh}$.

Στον Πίνακα 6.53 παρατίθεται η ημερήσια απώλεια ενέργειας για την τυπική ημέρα κάθε μήνα, δηλαδή το μέγεθος $\sum_{t=1}^{24} powerloss_{j,t}$, η μέση ημερήσια τιμή της εγχεόμενης

ενεργού ισχύος από τον υποσταθμό, δηλαδή το μέγεθος $\frac{\sum_{t=1}^{24} pin_{j,t,1}}{24}$, και η μέση ημερήσια

τιμή της εγγεόμενης αέργου ισχύος από τον υποσταθμό, δηλαδή το μέγεθος $\frac{\sum_{t=1}^{24} qin_{j,t,1}}{24}$.

Από τον Πίνακα 6.53 προκύπτει ότι τα μεγέθη είναι σταθερά ανά εποχή, επειδή το φορτίο της τυπικής ημέρας του μήνα (π.χ. j3, j4 και j5 για την άνοιξη) είναι ίδιο για κάθε εποχή (Πίνακας 6.4).

Πίνακας 6.54: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στο δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση ΜΔΠ μόνο τύπου ανεμογεννητριών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)
1	0
2	0.21189885
3	0
4	0.49585250
5	0
6	0
7	0.36720188
8	0
9	0
10	0
11	0.15231017
12	0
13	0
14	0.29718456
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0.28651647
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0.27625951
25	0
26	0
27	0.55756603
28	0
29	0
30	0.53435843
31	0
Σύνολο	3.1791484

Πίνακας 6.55: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, για το δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση μόνο ανεμογεννητριών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.29002862	0.35993503	0.11840407
j2	0.37377676	0.40076902	0.13561815
j3	-0.58236887	-0.08614563	0.18139113
j4	-0.25596441	0.06995860	0.05460603
j5	-0.60305544	-0.09330647	0.36237380
j6	0.98284842	0.79193743	0.62072268
j7	1.28860475	0.94527321	0.95563774
j8	1.37965920	0.99134843	1.08185798
j9	0.42134352	0.38751901	0.16662072
j10	0.24353773	0.30019182	0.08968786
j11	0.34524085	0.34986913	0.11626953
j12	0.57554799	0.49994493	0.22777979

6.4.2.3 Σενάριο 2: Μόνο ανεμογεννήτριες

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα δεδομένα ανέμου, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, εκτός από τα προηγούμενα, και την εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε κάθε ζυγό, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα 6.54. Στον Πίνακα 6.55 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 126.075 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 53.2% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών.

Από τον Πίνακα 6.55 παρατηρείται ότι οι ετήσιες απώλειες ενέργειας μειώνονται σε περισσότερο από το μισό, ενώ μειώνεται επίσης πολύ η ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού. Αυτό είναι λογικό, καθώς η ζήτηση φορτίου καλύπτεται πλέον κατά μεγάλο ποσοστό από πηγές (ΜΔΠ) μέσα στο ίδιο το δίκτυο. Επίσης, την άνοιξη η ροή ισχύος μέσω του υποσταθμού αντιστρέφεται τις περισσότερες στιγμές (συνήθως αρνητικές τιμές p_{in} και q_{in}). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι εκείνη την εποχή οι ταχύτητες ανέμου είναι υψηλότερες σε σχέση με τις άλλες εποχές, ενώ το φορτίο δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, συνεπώς παράγεται περίσσεια ισχύος από τις ανεμογεννήτριες.

6.4.2.4 Σενάριο 3: Μόνο φωτοβολταϊκά

Εγκαθιστώντας φωτοβολταϊκά, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα δεδομένα ηλιοφάνειας, το GAMS δίνει ως αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ σε κάθε ζυγό, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα 6.56. Στον Πίνακα 6.57 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ισχύος μέσω του υποσταθμού.

Πίνακας 6.56: Εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς στο δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση ΜΔΠ μόνο τύπου φωτοβολταϊκών

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0.35450537
6	0
7	0
8	0
9	0.04907259
10	0.14163528
11	0
12	0
13	0.30633931
14	0
15	0
16	0.21553059
17	0
18	0.15543018
19	0
20	0
21	0
22	0.25689482
23	0
24	0
25	0
26	0.48177587
27	0
28	0
29	0
30	0
31	0.41623674
Σύνολο	2.37742075

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 141.302 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 47.5% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.

Από τον Πίνακα 6.57 παρατηρείται ότι οι ετήσιες απώλειες ενέργειας μειώνονται και πάλι πάρα πολύ, όχι όμως όσο στην περίπτωση εγκατάστασης μόνο ανεμογεννητριών. Αυτό οφείλεται στη μηδενική παραγωγή των φωτοβολταϊκών κατά τις νυχτερινές ώρες. Επίσης, μειώνεται η ανταλλαγή ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού, αλλά και πάλι όχι όσο στην στο σενάριο 2, για τον ίδιο λόγο. Τέλος, από τον Πίνακα 6.56 φαίνεται ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με το σενάριο 2, όπως συνέβαινε και στις περιπτώσεις των 5 και 15 ζυγών. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί εν μέρει από το γεγονός ότι ο ήλιος ακολουθεί πολύ καλύτερα το προφίλ του φορτίου σε σχέση με τον άνεμο, που είναι πολύ πιο απρόβλεπτος.

Πίνακας 6.57: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, για το δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση μόνο φωτοβολταϊκών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.89448866	0.60782827	0.45368051
j2	0.75084798	0.49975291	0.38159122
j3	0.52095084	0.33420539	0.28282075
j4	0.43915009	0.27276652	0.26515681
j5	0.25615393	0.13566931	0.30174421
j6	0.94509483	0.61973002	0.56251008
j7	0.78446476	0.49898705	0.50913470
j8	0.90792047	0.59191595	0.57930416
j9	0.35631098	0.21431976	0.26863133
j10	0.60048170	0.39744111	0.26206067
j11	0.70524302	0.47617395	0.29535865
j12	0.92773962	0.63288059	0.47796236

6.4.2.5 Σενάριο 4: Όλες οι ΜΔΠ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά)

Εγκαθιστώντας και τα δύο είδη ΜΔΠ ταυτόχρονα, λαμβάνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.58 παρατίθεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ σε κάθε ζυγό, ενώ στον Πίνακα 6.59 οι ημερήσιες τιμές των απωλειών και της ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο, για κάθε μήνα.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 101.111$ MWh, οπότε προκύπτει μείωση κατά 62.4% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης και των δύο τύπων ΜΔΠ.

Από τον Πίνακα 6.58 παρατηρείται ότι μειώνονται κατά πολύ περισσότερο οι απώλειες και η εγκατεστημένη ισχύς του κάθε είδους ΜΔΠ σε σχέση με τα δύο προηγούμενα σενάρια. Λογικό, διότι μπαίνουν περισσότερες πηγές (ΜΔΠ) μέσα στο δίκτυο, σε περισσότερους ζυγούς. Οι πηγές αυτές αξιοποιούν με βέλτιστο τρόπο το αιολικό και ηλιακό δυναμικό της περιοχής, καθώς και το πώς κατανέμεται το φορτίο στους ζυγούς του δικτύου. Παράλληλα, από τον Πίνακα 6.59 παρατηρείται μείωση της ανταλλαγής με το άπειρο δίκτυο, αφού οι ΜΔΠ καθιστούν το δίκτυο πιο ανεξάρτητο.

Πίνακας 6.58: Εγκατεστημένη αιολική και ηλιακή ισχύς στο δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση και των δύο τύπων ΜΔΠ

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)
1	0	0
2	0.21103104	0
3	0	0
4	0.34417239	0
5	0	0.18193478
6	0	0
7	0.22148821	0
8	0	0
9	0	0.00873354
10	0	0.05921053
11	0.09799203	0
12	0	0
13	0	0.18820629
14	0.18881698	0
15	0	0
16	0	0.16105054
17	0	
18	0	0.08212035
19	0.15762493	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0.14080650
23	0	0
24	0.20425431	0
25	0	0
26	0	0.27372350
27	0.39245961	0
28	0	0
29	0	0
30	0.35932779	0
31	0	0.22708743
Σύνολο	2.17716729	1.32287346

Πίνακας 6.59: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, για το δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVA _r)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.43182001	0.40119155	0.14740333
j2	0.41070830	0.37028065	0.15415710
j3	-0.34239922	-0.03477924	0.14681056
j4	-0.16256193	0.03951632	0.09391277
j5	-0.49839515	-0.14539103	0.41357776
j6	0.82556973	0.62794465	0.44737735
j7	0.94115292	0.66195541	0.54078099
j8	1.07178402	0.74485074	0.65617986
j9	0.26975148	0.23451265	0.17503233
j10	0.28382293	0.27657636	0.11804844
j11	0.41164214	0.35429718	0.15184201
j12	0.64683714	0.51185697	0.25942904

6.2.4.6 Σενάριο 5: Όλες οι ΜΔΠ και μπαταρίες

Εγκαθιστώντας ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μπαταρίες (μόνο δεύτερου είδους πλέον) στους υποψήφιους ζυγούς, το GAMS δίνει διάφορα αποτελέσματα, μεταξύ των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και η ικανότητα των μπαταριών, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 6.60. Στον Πίνακα 6.61 παρατίθενται οι ημερήσιες τιμές απωλειών και ανταλλαγής ισχύος με το άπειρο δίκτυο. Στον Πίνακα 6.62 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 13, ενδεικτικά για τους μήνες j1 (Ιανουάριο), j4 (Απρίλιο), j7 (Ιούλιο) και j10 (Αύγουστο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.19. Στον Πίνακα 6.63 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 16, ενδεικτικά για τους μήνες j2 (Φεβρουάριο), j5 (Μάιο), j8 (Αύγουστο) και j11 (Νοέμβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.20. Τέλος, στον Πίνακα 6.64 παρατίθεται η ωριαία ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης των μπαταριών στο ζυγό 31, ενδεικτικά για τους μήνες j3 (Μάρτιο), j6 (Ιούνιο), j9 (Σεπτέμβριο) και j12 (Δεκέμβριο). Αυτή παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 6.21.

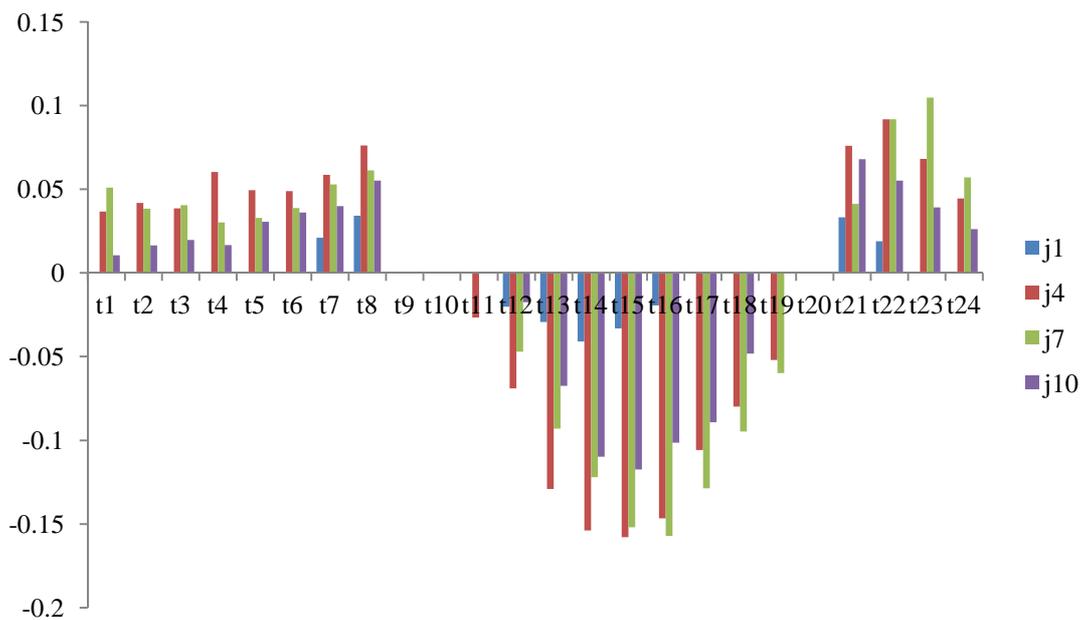
Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $z = 75.113 \text{ MWh}$, οπότε προκύπτει μείωση κατά 72.1% των ετήσιων απωλειών ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και μπαταριών.

Πίνακας 6.60: Εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και χαρακτηριστικά μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών

Ζυγός	Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μπαταριών (MWh)
1	0	0	0	0
2	0.21766589	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0.33454396	0	0	0
5	0	0.30176354	0.29448691	1.78769528
6	0	0	0	0
7	0.19907448	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0.02553634	0.04643114	0.28516296
10	0	0.10501310	0.12033213	0.73559543
11	0.09166107	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0.30579361	0.26070093	1.62838369
14	0.17151738	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0.24586375	0.17437743	1.08458748
17	0	0	0	0
18	0	0.13011607	0.10073060	0.43826844
19	0.15271316	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0.22307342	0.21312428	1.28858903
23	0	0	0	0
24	0.19892626	0	0	0
25	0	0	0	0
26	0	0.44312376	0.40162791	2.49432144
27	0.37530636	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0.33942619	0	0	0
31	0	0.36440085	0.35408039	2.18463135
Σύνολο	2.08083475	2.14468444	1.96589172	11.9272351

Πίνακας 6.61: Ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, για το δίκτυο των 31 ζυγών, με εγκατάσταση όλων των ΜΔΠ και μπαταριών

Μήνας	Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW)	Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar)	Ημερήσια απώλεια ενέργειας (MWh)
j1	0.39856255	0.36308685	0.13020087
j2	0.35021268	0.29394021	0.12150873
j3	-0.37471252	-0.12571598	0.12927999
j4	-0.23573505	-0.07668259	0.09377847
j5	-0.57273079	-0.30733007	0.32515519
j6	0.68594002	0.48122075	0.29807337
j7	0.74535405	0.46814151	0.34312435
j8	0.90026853	0.58110967	0.46072029
j9	0.17125937	0.09924654	0.10970755
j10	0.24170746	0.20834448	0.08320738
j11	0.38998325	0.31163819	0.12390276
j12	0.61390191	0.47777292	0.23626482



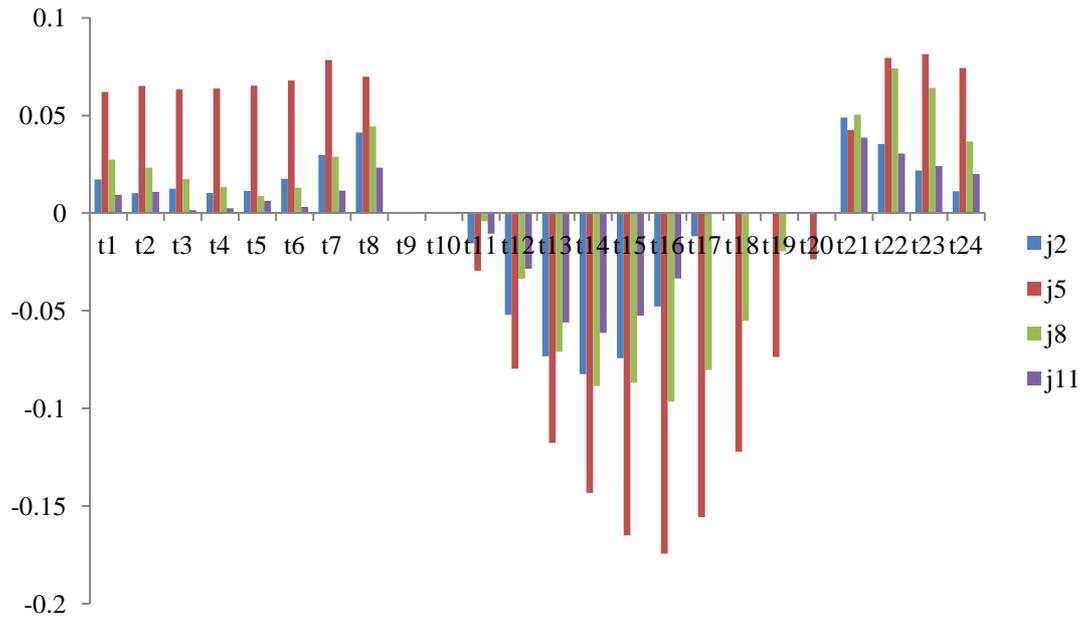
Σχήμα 6.19: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών του ζυγού 13, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 31 ζυγών

Πίνακας 6.62: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών του ζυγού 13, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 31 ζυγών

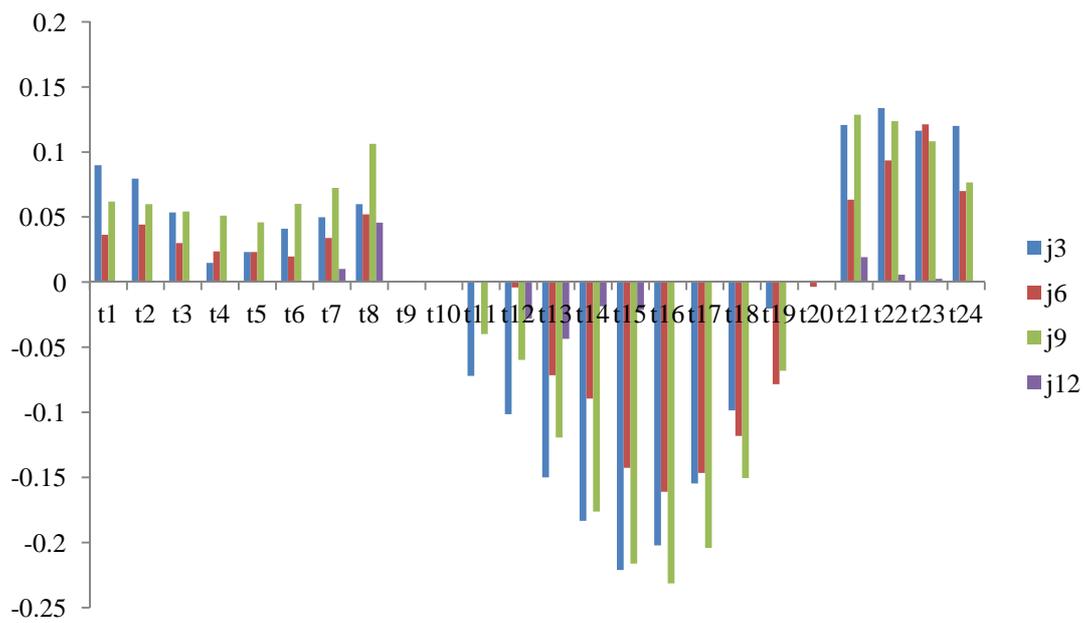
	Μήνας			
	j1	j4	j7	j10
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0	0.03663279	0.05101427	0.01060653
t2	0	0.04183335	0.03845771	0.01637043
t3	0	0.03865580	0.04045542	0.01978715
t4	0	0.06037352	0.03025899	0.01664219
t5	0	0.04937463	0.03284454	0.03052613
t6	0	0.04877839	0.03880811	0.03603086
t7	0.02095815	0.05851568	0.05290864	0.03984750
t8	0.03418097	0.07605263	0.06135646	0.05515062
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0	0	0	0
t10	0	0	0	0
t11	0	0.02663107	0.00024377	0.00035004
t12	0.02020843	0.06897186	0.04706273	0.01756652
t13	0.02929820	0.12900693	0.09292211	0.06748561
t14	0.04088939	0.15376784	0.12194968	0.10982840
t15	0.03320520	0.15785716	0.15198380	0.11750431
t16	0.01934744	0.14659298	0.15709685	0.10130778
t17	0	0.10576872	0.12861187	0.08910275
t18	0	0.07994138	0.09468564	0.04820883
t19	0	0.05197183	0.05987198	0
t20	0	0	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0.03317092	0.07595973	0.04118142	0.06799882
t22	0.01890146	0.09169852	0.09168534	0.05517282
t23	0	0.06808444	0.10473475	0.03921755
t24	0	0.04442286	0.05711569	0.02616509

Πίνακας 6.63: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών του ζυγού 16, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 31 ζυγών

	Μήνας			
	j2	j5	j8	j11
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.01725755	0.06196310	0.02732655	0.00933831
t2	0.01027292	0.06518738	0.02335156	0.01084864
t3	0.01251311	0.06329447	0.01748009	0.00158197
t4	0.01042201	0.06376157	0.01330375	0.00251006
t5	0.01136674	0.06537547	0.00873497	0.00627265
t6	0.01755653	0.06786981	0.01302436	0.00315627
t7	0.02978099	0.07830042	0.02880454	0.01147391
t8	0.04119053	0.06988740	0.04439927	0.02325322
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0	0	0	0
t10	0	0	0	0
t11	0.01538606	0.02949016	0.00414212	0.01058943
t12	0.05202718	0.07968191	0.03358690	0.02851890
t13	0.07337301	0.11765838	0.07105263	0.05604919
t14	0.08240282	0.14324939	0.08850933	0.06145311
t15	0.07435389	0.16506982	0.08694119	0.05253243
t16	0.04774292	0.17437743	0.09650390	0.03343077
t17	0.01189441	0.15565199	0.08030053	0
t18	0	0.12213457	0.05520599	0
t19	0	0.07370146	0.01949662	0
t20	0	0.02357239	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0.04894696	0.04257177	0.05042577	0.03870384
t22	0.03546176	0.07958644	0.07413508	0.03055723
t23	0.02185882	0.08138194	0.06410280	0.02418235
t24	0.01125729	0.07426086	0.03671567	0.02005192



Σχήμα 6.20: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών του ζυγού 16, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 31 ζυγών



Σχήμα 6.21: Ωριαία ισχύς φόρτισης (αρνητικές τιμές) / εκφόρτισης (θετικές τιμές) των μπαταριών του ζυγού 31, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 31 ζυγών

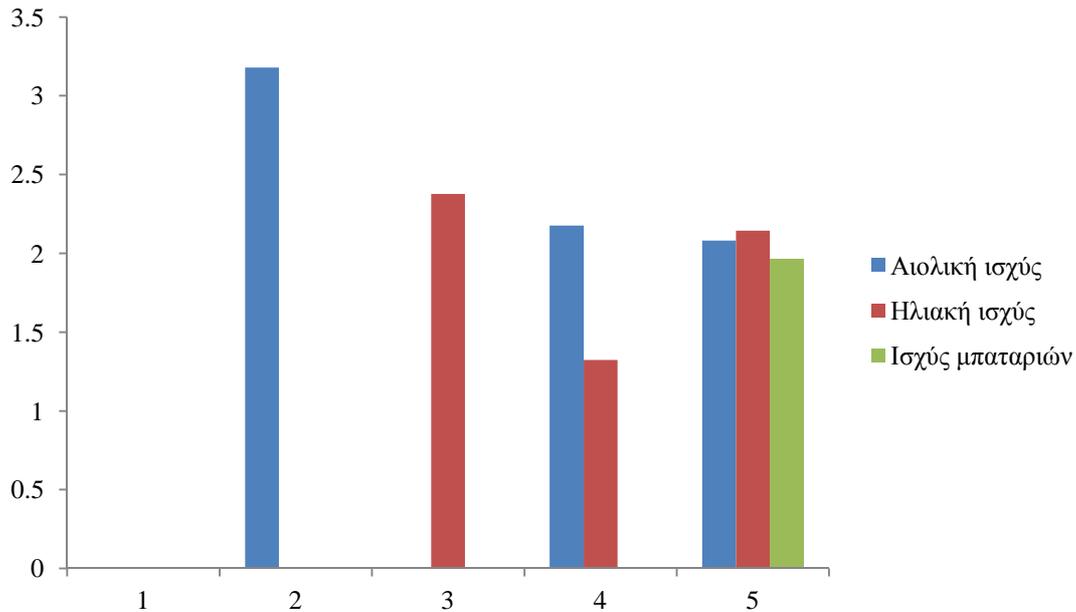
Πίνακας 6.64: Ωριαία συμπεριφορά των μπαταριών του ζυγού 31, για το σενάριο 5 στο δίκτυο των 31 ζυγών

	Μήνας			
	j3	j6	j9	j12
	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)	Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης (MW)
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t1	0.08990065	0.03642290	0.06189176	0
t2	0.07942922	0.04429623	0.05984517	0
t3	0.05361146	0.03008762	0.05427415	0
t4	0.01488756	0.02354731	0.05109437	0
t5	0.02305026	0.02305032	0.04595900	0
t6	0.04113109	0.01964030	0.06020355	0
t7	0.04983970	0.03382190	0.07231430	0.01024079
t8	0.05997049	0.05211500	0.10625438	0.04577546
ΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t9	0	0	0	0
t10	0	0	0	0
t11	0.07189761	0	0.03984822	0
t12	0.10142613	0.00417682	0.05962592	0.02773122
t13	0.14984603	0.07157968	0.11928239	0.04363921
t14	0.18334928	0.08947877	0.17615346	0.01862360
t15	0.22107518	0.14248055	0.21622206	0.02133881
t16	0.20215366	0.16086305	0.23142128	0
t17	0.15470756	0.14651069	0.20415875	0
t18	0.09857209	0.11817941	0.15036540	0
t19	0.02022162	0.07830749	0.06816284	0
t20	0	0.00354476	0	0
ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ	-	-	-	-
t21	0.12062883	0.06340118	0.12857256	0.01910209
t22	0.13378616	0.09354810	0.12369093	0.00573596
t23	0.11623354	0.12133271	0.10822880	0.00264533
t24	0.11996792	0.07007735	0.07660126	0

Από τον Πίνακα 6.61 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση μπαταριών επιφέρει σημαντική μείωση στις ενεργειακές απώλειες, καθώς και αρκετή μείωση στην ανταλλαγή ισχύος μέσω του υποσταθμού. Το δίκτυο λειτουργεί πιο σταθερά και πιο αυτόνομα. Επίσης, από τον Πίνακα 6.60 παρατηρείται ότι η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς μεταβάλλεται ελάχιστα, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς αυξάνεται πολύ. Αυτό συμβαίνει, διότι τα φωτοβολταϊκά είναι η κύρια πηγή τροφοδότησης των μπαταριών, μιας και αυτές συνδέονται στους ίδιους ζυγούς και η φόρτισή τους «ακολουθεί» κατά μία έννοια τον ήλιο. Αυτό, άλλωστε, φαίνεται κι από το γεγονός ότι οι μπαταρίες συνεισφέρουν μέγιστα τις μεσημεριανές ώρες, ιδίως τους μήνες της άνοιξης και του καλοκαιριού. Γενικότερα, ο ρόλος των μπαταριών σε αυτό το δίκτυο των 31 ζυγών είναι σημαντικότερος απ' ότι στα μικρότερα δίκτυα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι και στους 3 ζυγούς που εξετάστηκαν (13, 16 και 31), η συμπεριφορά των μπαταριών είναι παρόμοια, όπως δείχνουν τα Σχήματα 6.18, 6.19 και 6.20.

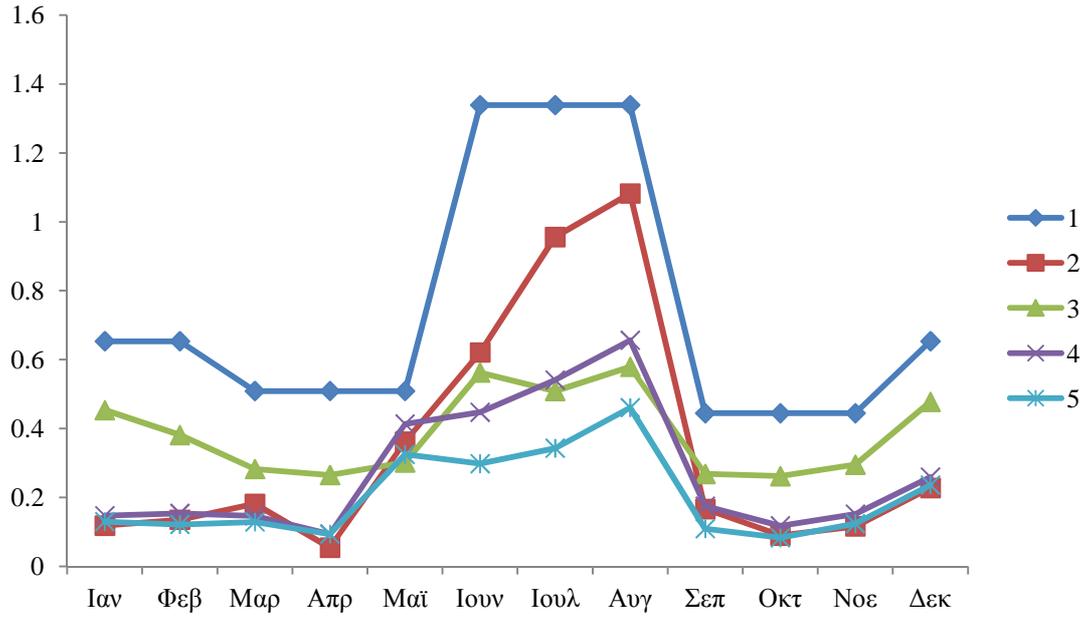
6.4.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα σχήματα, τα οποία δείχνουν πιο παραστατικά τα αποτελέσματα που βγάζει το GAMS για τα παραπάνω σενάρια. Στο Σχήμα 6.22 φαίνεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ΜΔΠ και των μπαταριών για τα σενάρια 1 έως 5. Στο Σχήμα 6.23 παρουσιάζονται οι ημερήσιες απώλειες ενέργειας για όλους τους μήνες, για όλα τα σενάρια. Στο Σχήμα 6.24 φαίνεται η ποσοστιαία μείωση των ημερήσιων απωλειών ενέργειας, για όλους τους μήνες και για όλα τα σενάρια. Ομοίως, στα Σχήματα 6.25 και 6.26 παρουσιάζονται οι ημερήσιες μέσες τιμές της ανταλλαγής ενεργού και αέργου ισχύος μέσω του υποσταθμού, αντίστοιχα.

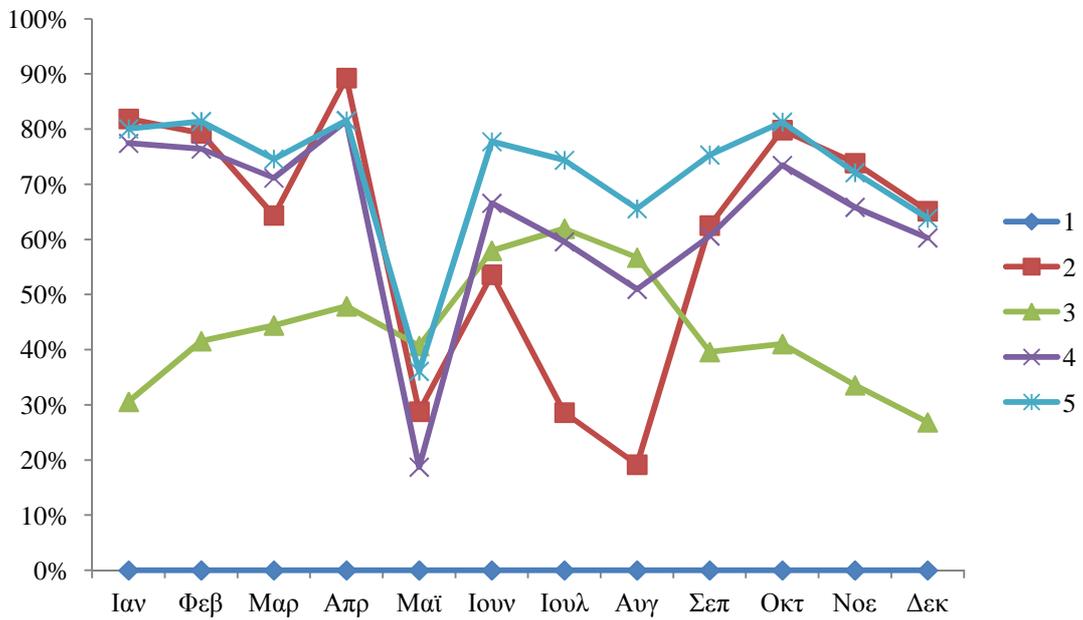


Σχήμα 6.22: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 31 ζυγών

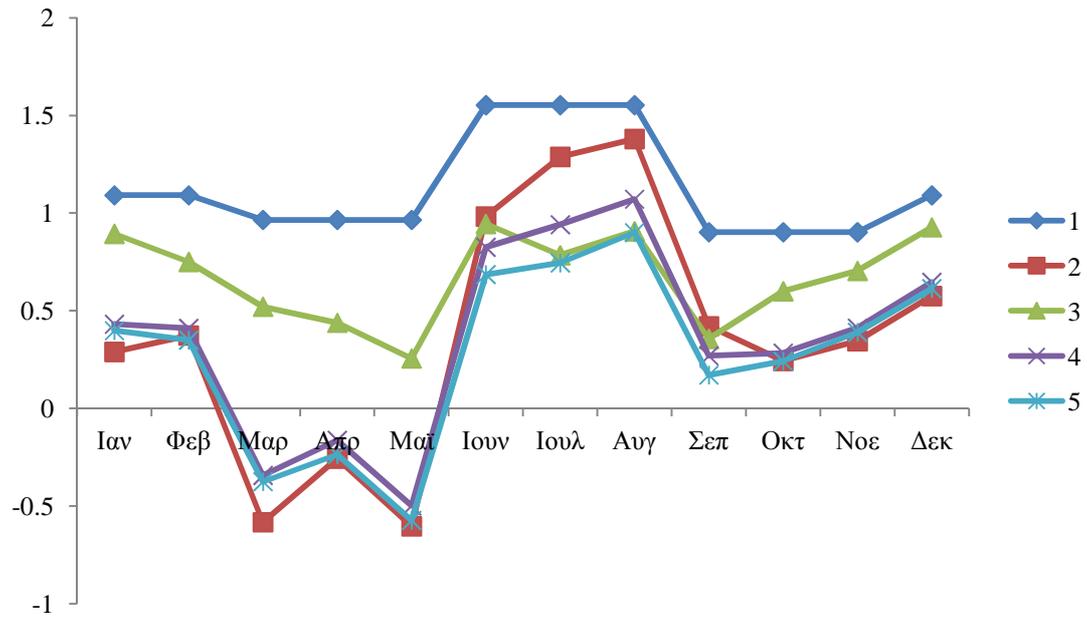
Από τα Σχήματα 6.23, 6.24, 6.25 και 6.26 παρατηρείται ότι η σύνδεση ΜΔΠ και μπαταριών βελτιώνει πολύ την κατάσταση του δικτύου σε θέματα απωλειών ενέργειας και αυτονομίας. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχουν πηγές ενεργού και αέργου ισχύος (ΜΔΠ και μπαταρίες) μέσα στο ίδιο το δίκτυο. Η συνεισφορά τους είναι μέγιστη πάντοτε το μήνα j4 (Απρίλιο), καθώς τότε ο συνδυασμός των συνθηκών ανέμου, ηλιοφάνειας και φορτίο είναι ο ιδανικότερος. Το σενάριο 5 είναι προφανώς το βέλτιστο με διαφορά. Η εγκατάσταση μπαταριών πρώτου είδους πράγματι δεν έχει νόημα, καθώς, τρέχοντας δοκιμαστικά το GAMS για την περίπτωση τοποθέτησης όλων των ειδών ΜΔΠ και μπαταριών πρώτου και δεύτερου είδους (οι μπαταρίες πρώτου είδους στους ζυγούς 2, 4, 7, 12 και 15), η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται μόνο σε **$z = 73.264 \text{ MWh}$** .



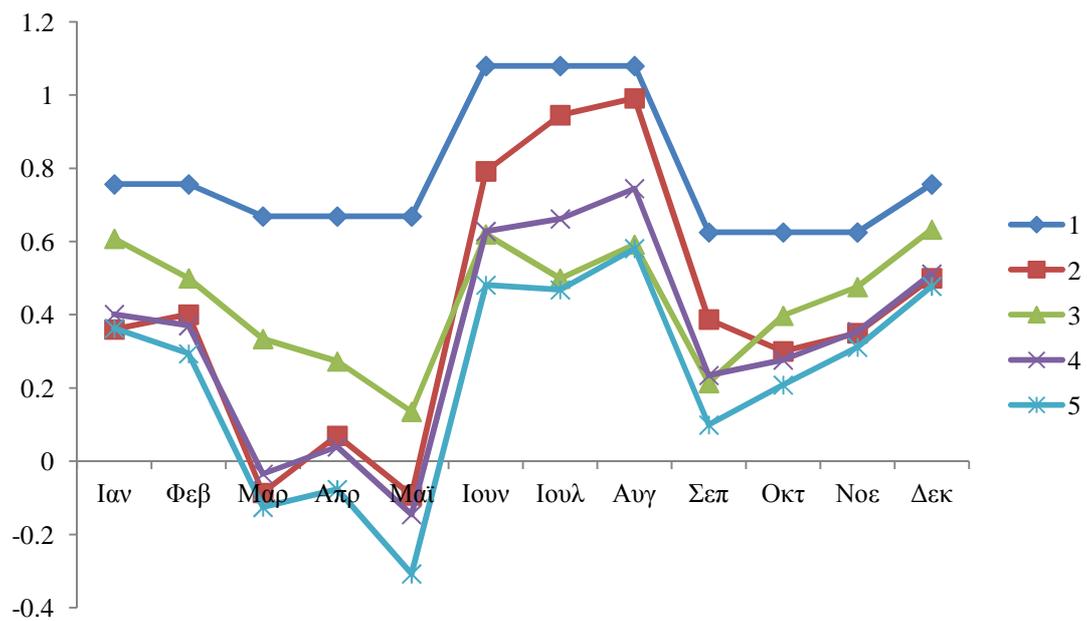
Σχήμα 6.23: Ημερήσιες απώλειες ενέργειας (MWh) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 31 ζυγών



Σχήμα 6.24: Ποσοστιαία μείωση ημερήσιων απωλειών ενέργειας κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 31 ζυγών



Σχήμα 6.25: Μέση ημερήσια εγγεόμενη ενεργός ισχύς από τον υποσταθμό (MW) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 31 ζυγών



Σχήμα 6.26: Μέση ημερήσια εγγεόμενη άεργος ισχύς από τον υποσταθμό (MVar) κάθε μήνα, για όλα τα σενάρια, στο δίκτυο των 31 ζυγών

6.4.4 Επίδραση κι άλλων παραμέτρων

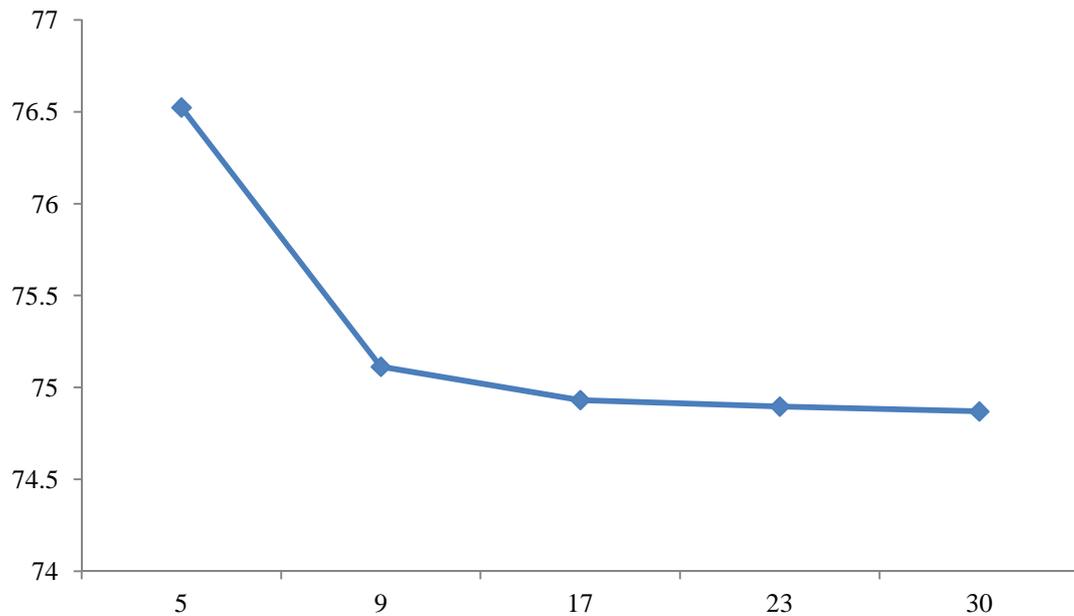
Εδώ εξετάζονται οι αλλαγές που προκαλούν ορισμένοι παράγοντες στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και στην εγκατεστημένη ισχύ ΜΔΠ και μπαταριών. Θεωρείται πάντοτε ότι εγκαθίστανται ταυτόχρονα ΜΔΠ όλων των ειδών και μπαταρίες.

6.4.4.1 Επίδραση του πλήθους των υποψήφιων ζυγών

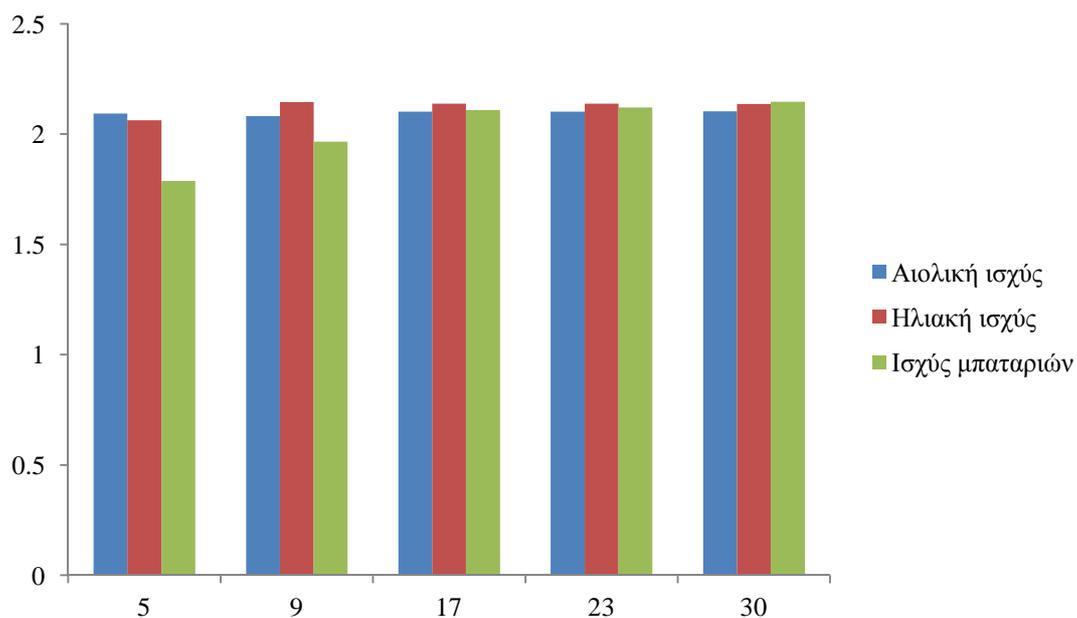
Μεταβάλλοντας τους υποψήφιους ζυγούς εγκατάστασης μπαταριών, χωρίς να αλλάζουν οι υποψήφιοι ζυγοί για τις ΜΔΠ, μεταβάλλεται και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και μπαταριών. Στον Πίνακα 6.65 παρατίθενται τα αποτελέσματα που δίνει το GAMS για τις διάφορες περιπτώσεις. Στο Σχήμα 6.27 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το πλήθος των υποψήφιων ζυγών, ενώ στο Σχήμα 6.28 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και μπαταριών για τις διάφορες περιπτώσεις.

Πίνακας 6.65: Εξάρτηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και της εγκατεστημένης ισχύος από τους υποψήφιους ζυγούς εγκατάστασης μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών

Υποψήφιοι ζυγοί τοποθέτησης μπαταριών	Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, z (MWh)	Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Συνολική εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς (MW)	Συνολική μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Συνολική ενεργειακή χωρητικότητα μπαταριών (MWh)
5, 13, 16, 22, 31 (5 ζυγοί)	76.523	2.09337772	2.06253584	1.78684724	11.0861043
5, 9, 10, 13, 16, 18, 22, 26, 31 (9 ζυγοί)	75.113	2.08083475	2.14468444	1.96589172	11.9272351
2, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 19, 22, 24, 26, 27, 29, 31 (17 ζυγοί)	74.932	2.10150943	2.13799954	2.10814898	12.29748065
2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 31 (23 ζυγοί)	74.897	2.10160802	2.13786877	2.12039584	12.29839473
Όλοι πλην του 1 (30 ζυγοί)	74.870	2.10312282	2.13562404	2.14657414	12.29538998



Σχήμα 6.27: Εξάρτηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (MWh) από το πλήθος των υποψήφιων ζυγών εγκατάστασης μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών



Σχήμα 6.28: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) σε σχέση με το πλήθος των υποψήφιων ζυγών εγκατάστασης μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών

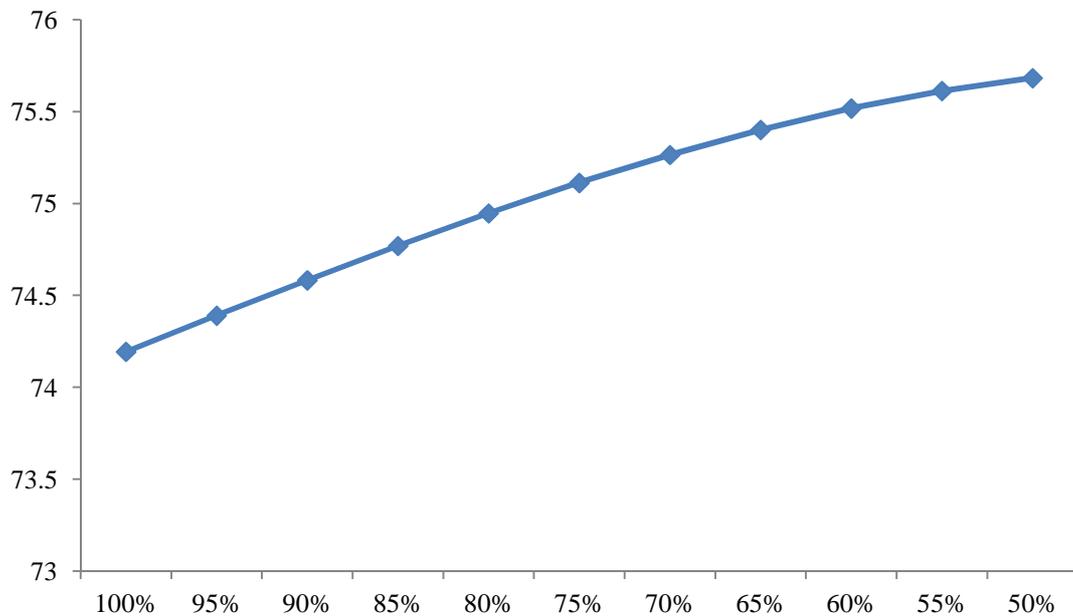
Από το Σχήμα 6.27 παρατηρείται ότι οι απώλειες μειώνονται με την αύξηση των υποψήφιων ζυγών τοποθέτησης μπαταριών, αλλά όχι ιδιαίτερα πολύ. Επίσης, από το Σχήμα 6.28 παρατηρείται ότι, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ παραμένει περίπου αμετάβλητη, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών αυξάνεται με την αύξηση των υποψήφιων ζυγών, πράγμα λογικό, αφού έτσι μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες μπαταρίες.

6.4.4.2 Επίδραση της απόδοσης των μπαταριών

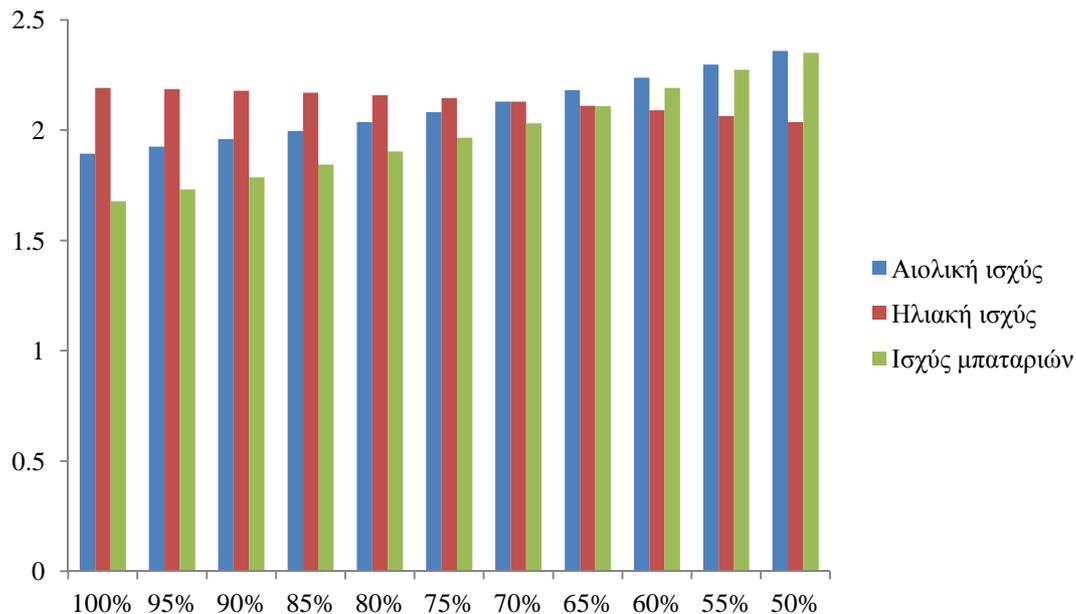
Μεταβάλλοντας την απόδοση των μπαταριών, χωρίς καμία άλλη αλλαγή στις αρχικές παραδοχές (υποψήφιοι ζυγοί, συντελεστές ισχύος κτλ.), το GAMS δίνει τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.66. Αυτά αφορούν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και την εγκατεστημένη ισχύ των ΜΔΠ και των μπαταριών. Στο Σχήμα 6.29 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με την απόδοση των μπαταριών, ενώ στο Σχήμα 6.30 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και μπαταριών για τις διάφορες περιπτώσεις.

Πίνακας 6.66: Εξάρτηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και της εγκατεστημένης ισχύος από την απόδοση των μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών

Απόδοση μπαταριών	Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, z (MWh)	Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW)	Συνολική εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς (MW)	Συνολική μέγιστη ισχύς μπαταριών (MW)	Συνολική ενεργειακή χωρητικότητα μπαταριών (MWh)
100%	74.194	1.89352207	2.19062453	1.67806261	9.30914415
95%	74.391	1.92504399	2.18521710	1.73058748	9.75224243
90%	74.583	1.95919255	2.17820929	1.78585031	10.23235908
85%	74.770	1.99630462	2.16926095	1.84349714	10.75256331
80%	74.947	2.03672487	2.15817582	1.90304387	11.30901302
75%	75.113	2.08083475	2.14468444	1.96589172	11.92723510
70%	75.265	2.12911752	2.12865821	2.03020221	12.63423596
65%	75.401	2.18127394	2.11035582	2.10890769	13.39719990
60%	75.518	2.23725851	2.08930499	2.19161613	14.20329408
55%	75.613	2.29715452	2.06456178	2.27361365	15.01315405
50%	75.683	2.35957028	2.03620201	2.34981913	15.76842752



Σχήμα 6.29: Εξάρτηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (MWh) από την απόδοση των μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών



Σχήμα 6.30: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) για όλες τις περιπτώσεις απόδοσης των μπαταριών, στο δίκτυο των 31 ζυγών

Από το Σχήμα 6.29 παρατηρείται ότι η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για απόδοση μπαταριών 100%, ενώ, με τη μείωση της απόδοσής τους, αυξάνονται και οι ενεργειακές απώλειες. Αυτό σημαίνει ότι, σε ετήσια βάση, η ανάγκη του δικτύου για ισχύ είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη περίσσεια ισχύ. Επίσης, από το Σχήμα 6.30 παρατηρείται ότι με την πτώση της απόδοσης των μπαταριών, αυξάνεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών. Αυτό συμβαίνει για να αντισταθμιστεί η μειωμένη παροχή ισχύος από τις μπαταρίες, η οποία προκαλείται από την πτώση της απόδοσής τους.

6.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 360-370, Feb. 2010.
- [6.2] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1815-1822, Nov. 2010.
- [6.3] G. Caprinelli, F. Mottola, D. Proto and A. Russo, "Optimal allocation of dispersed generators, capacitors and distributed energy storage systems in distribution networks," *IEEE Magazine*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης ταυτόχρονης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) και μπαταριών (για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας) σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ετήσιων απωλειών ενέργειας. Για την τοποθέτηση ελήφθησαν υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου, των ΜΔΠ και των μπαταριών, η καμπύλη φορτίου, καθώς και κλιματολογικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιοχής. Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS. Το λογισμικό αυτό διαθέτει ένα φιλικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης με το χρήστη.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 6, το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε τρία (3) διαφορετικά δίκτυα διανομής, 5, 15 και 31 ζυγών, αντίστοιχα. Σε καθένα από τα δίκτυα αυτά πάρθηκαν διάφοροι συνδυασμοί τοποθέτησης των ΜΔΠ και των μπαταριών όσον αφορά τα είδη που εγκαθίστανται, ώστε να φανούν οι αλλαγές και βελτιστοποιήσεις που επιφέρει η εγκατάσταση του κάθε είδους ή συνδυασμού. Έπειτα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων (με τη βοήθεια πινάκων και γραφημάτων) και σε πολλές περιπτώσεις εισήχθησαν επιπλέον παράμετροι, για να διερευνηθεί η επίδρασή τους στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και στην εγκατεστημένη ισχύ των ΜΔΠ και μπαταριών.

Από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6 προκύπτει ότι η εγκατάσταση έστω και ενός μόνο είδους ΜΔΠ μειώνει περίπου στο μισό τις ετήσιες απώλειες ενέργειας, οι οποίες οφείλονται καθαρά στην αντίσταση των γραμμών του δικτύου. Οι ανεμογεννήτριες επιφέρουν λίγο μεγαλύτερη βελτίωση σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά και αυτό διότι τα φωτοβολταϊκά δεν παράγουν ισχύ κατά τις νυχτερινές ώρες. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών είναι, όμως, συνήθως μεγαλύτερη από αυτή των φωτοβολταϊκών και αυτό συμβαίνει, μεταξύ άλλων, διότι ο άνεμος είναι πολύ πιο απρόβλεπτος από τον ήλιο. Σε περίπτωση εγκατάστασης και των δύο ειδών ΜΔΠ, αυτές συνεργάζονται με βέλτιστο τρόπο με μειώνουν ακόμα περισσότερο τις ενεργειακές απώλειες, καθώς και την ανταλλαγή ενεργού και αέργου ισχύος με το άπειρο δίκτυο μέσω του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ.

Ένα ακόμη συμπέρασμα είναι οι μπαταρίες επιφέρουν κι αυτές σημαντική μείωση στις ενεργειακές απώλειες, όχι τόσο στα μικρά όσο στα μεγάλα δίκτυα. Οι ώρες φόρτισης και εκφόρτισής τους πρέπει να ρυθμίζονται κατάλληλα, ώστε να φορτίζουν όταν η παραγωγή των ΜΔΠ είναι υψηλή και να εκφορτίζουν όταν είναι χαμηλή, καλύπτοντας, παράλληλα, επαρκώς τη ζήτηση φορτίου. Αλλιώς, επιφέρουν μηδαμινή ή ελάχιστη βελτιστοποίηση, επειδή δεν υπάρχει και πολλή ενέργεια να αποθηκευτεί σε αυτές όταν φορτίζουν (αυτό παρατηρήθηκε με την εγκατάσταση των μπαταριών πρώτου είδους). Οι μπαταρίες, επίσης, καθιστούν το δίκτυο πιο ανεξάρτητο, μειώνοντας την ανάγκη του για ισχύ από τον υποσταθμό.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6 φανερώνουν ότι η παραγωγή αέργου ισχύος από τις ΜΔΠ σχετίζεται άμεσα με τις ενεργειακές απώλειες. Η κατάλληλη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος των ΜΔΠ είναι βασικής σημασίας.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε όλα τα δίκτυα η εγκατεστημένη ισχύς ΜΔΠ και μπαταριών ακολουθεί, κατά μέσο όρο, το εγκατεστημένο φορτίο των ζυγών. Δηλαδή, η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς παρατηρείται σε ζυγούς με μεγάλη σχετικά ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος.

Τέλος, από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6 παρατηρείται ότι σε όλα τα δίκτυα, οι ημερήσιες ενεργειακές απώλειες και η ανταλλαγή ισχύος μέσω του υποσταθμού

παρουσιάζουν έντονες μηνιαίες και εποχικές διακυμάνσεις. Αυτό σημαίνει ότι το όλο σύστημα είναι πολύ ευαίσθητο στο κλίμα της εξεταζόμενης περιοχής, αλλά και στην ημερήσια και ετήσια καμπύλη φορτίου. Για το λόγο αυτό είναι απολύτως αναγκαίο τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου, ηλιοφάνειας και φορτίου να είναι έγκυρα, αξιόπιστα και να προκύπτουν από πολυετή στοιχεία.

7.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί σημαντική καινοτομία στον τομέα της ενέργειας, με πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα, ωστόσο μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω σε ορισμένα πράγματα.

Η βασικότερη επέκταση της εργασίας είναι η νησιδοποίηση του δικτύου διανομής, ώστε να λειτουργεί αυτόνομα και ανεξάρτητα από το άπειρο δίκτυο (ο ζυγός 1 αποσυνδέεται από τον υποσταθμό). Οι μπαταρίες καθιστούν δυνατή αυτή την επέκταση, αφού, με κατάλληλο προγραμματισμό, αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργεια από τις ΜΔΠ, όταν η παραγωγή των ΜΔΠ είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση φορτίου και αποδίδουν ισχύ για να καλύψουν τις ανάγκες φορτίου, όταν η ζήτηση φορτίου είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή των ΜΔΠ. Κάτι τέτοιο, άλλωστε, εφαρμόζεται σήμερα σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο. Τροποποιώντας λίγο τον κώδικα του GAMS, η βέλτιστη τοποθέτηση των ΜΔΠ και μπαταριών σε ένα αυτόνομο δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί.

Μία επίσης πολύ σημαντική επέκταση της εργασίας είναι η οικονομική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των ΜΔΠ και μπαταριών και συγκρίνοντάς το με το κόστος των ενεργειακών απωλειών. Δηλαδή, μπορεί να αλλαχθεί η αντικειμενική συνάρτηση, ώστε ο σκοπός να μην είναι πλέον η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών, αλλά των οικονομικών δαπανών.

Επιπλέον, στην εργασία αυτή έγινε η υπόθεση ότι η ταχύτητα ανέμου, η ηλιοφάνεια και η ζήτηση φορτίου έχουν συγκεκριμένη τιμή κάθε ημέρα του έτους. Αφού στην πράξη τα μεγέθη αυτά δεν είναι τελείως ντετερμινιστικά, μια πιθανή επέκταση της εργασίας είναι η δημιουργία ενός πιθανοτικού μοντέλου για τα μεγέθη αυτά, που θα διέπεται από συγκεκριμένες καταστάσεις ανά ημέρα, μήνα ή εποχή, στις οποίες καταστάσεις θα πρέπει να ισχύουν οι περιορισμοί και θα αντιστοιχεί μια πιθανότητα.