



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Χωροθέτηση Αιολικού Πάρκου με τη Χρήση Λογισμικού
Προσομοίωσης**

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Ζουρουφίδης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Οκτώβριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

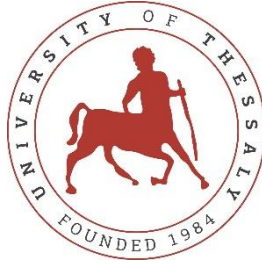
**Χωροθέτηση Αιολικού Πάρκου με τη Χρήση Λογισμικού
Προσομοίωσης**

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Ζουρουφίδης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Οκτώβριος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Wind Farm Placement Using Simulation Software

Diploma Thesis

Konstantinos Zouroufidis

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

October 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Δημήτριος Μπαργιώτας

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Σπυρίδων Λουτρίδης

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Αθανάσιος Φεύγας

Ε.ΔΙ.Π, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Κωνσταντίνος Ζουρουφίδης

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Konstantinos Zouroufidis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και σύμβουλο καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Μπαργιώτα για όλη την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχε στα χρόνια των σπουδών μου αλλά και κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας μου.

Ευχαριστώ θερμά τους κυρίους Σπυρίδωνα Λουτρίδη και Αθανάσιο Φεύγα που δέχτηκαν να είναι μέλη της επιτροπής.

Τέλος, ευχαριστώ τη μητέρα, την αδερφή, τους φίλους και τους συγγενείς μου που στάθηκαν υπομονετικά δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και δεν έπαψαν να πιστεύουν σε μένα ακόμη και όταν εγώ έπαψα να πιστεύω στον εαυτό μου.

Αφιερώνω την παρούσα εργασία στον πατέρα μου

Διπλωματική Εργασία

Χωροθέτηση Αιολικού Πάρκου με τη Χρήση Λογισμικού Προσομοίωσης

Κωνσταντίνος Ζουρουφίδης

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει σε επαναξιολόγηση της υπάρχουσας υποδομής παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έχοντας κατά νου τις περιβαλλοντικές ανησυχίες και τον περιορισμό των φυσικών πόρων, η επιτακτική ανάγκη για μετάβαση προς βιώσιμες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αδιαμφισβήτητη. Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε υπάρχοντα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, εστιάζοντας στην περίπτωση της Αιολικής Ενέργειας. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η βέλτιστη θέση χωροθέτησης αιολικών πάρκων στο σύστημα 24 ζυγών της IEEE και γίνεται η επιλογή του ζυγού σύνδεσης βάσει των απωλειών πραγματικής ισχύος. Η μελέτη και η προσομοίωση του συστήματος γίνεται μέσω του λογισμικού PowerWorld.

Λέξεις-κλειδιά:

Συστήμα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανάλυση Ροής Φορτίου, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Αιολική Ενέργεια, Ανεμογεννήτριες, Απώλειες ισχύος, Προφίλ τάσης, Χωροθέτηση, Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης, PowerWorld

Wind Farm Placement Using Simulation Software

Konstantinos Zouroufidis

Abstract

The ever-increasing global demand for electricity has led to a re-evaluation of the existing electricity generation and distribution infrastructure. Taking into consideration the environmental concerns and the limitation of natural resources, the imperative to switch to sustainable, renewable energy sources is undeniable. This thesis deals with the integration of renewable energy sources into existing electricity systems, focusing on the case of wind energy. In particular, the optimal location of wind farms in the IEEE 24-bus system is studied and the connection bus is selected based on real power losses. The study and simulation of the system is done through PowerWorld simulator.

Keywords:

Power System, Load Flow Analysis, Distributed Generation, Wind Energy, Wind Turbines, Power Losses, Voltage Profile, Wind Farm Optimal Placement, PowerWorld

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων.....</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων.....</i>	<i>xxvii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxix</i>
<i>Συντομογραφίες.....</i>	<i>xxxi</i>
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής	4
1.2 Οργάνωση του Τόμου	4
Κεφάλαιο 2 - Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	6
2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	6
2.1.1 Σταθμοί παραγωγής.....	7
2.1.2 Σύστημα Μεταφοράς.....	8
2.1.3 Σύστημα Διανομής.....	9
2.2 Βασικές συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	10
2.2.1 Σύγχρονες γεννήτριες	11
2.2.2 Γραμμές μεταφοράς	14
2.2.3 Μετασχηματιστές	18
2.2.4 Φορτία	22
2.3 Ανά Μονάδα Σύστημα	24
Κεφάλαιο 3 - Ανάλυση Ροής Φορτίου.....	27
3.1 Εισαγωγή στη ροή φορτίου	27
3.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου	29

3.3 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών και ζυγών ροής φορτίου	32
3.3.1 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών.....	32
3.3.2 Κατηγοριοποίηση ζυγών.....	33
3.4 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου	34
3.4.1 Μέθοδος Gauss – Seidel	35
3.4.2 Μέθοδος Newton – Raphson.....	36
Κεφάλαιο 4 - Διεσπαρμένη Παραγωγή	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Ορισμός Διεσπαρμένης παραγωγής	39
4.3 Στόχοι και κριτήρια χωροθέτησης των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	41
4.4 Μέθοδοι χωροθέτησης των ΜΔΠ	43
4.4.1 Εμπειρικές/απλές μέθοδοι	44
4.4.2 Αριθμητικές Μέθοδοι	44
4.4.3 Αναλυτικές Μέθοδοι.....	46
4.4.4 Μετα/Ευριστικές.....	47
4.4.5 Υβριδικές.....	49
Κεφάλαιο 5 - Ανεμογεννήτριες	51
5.1 Αιολική ενέργεια	51
5.2 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	53
5.3 Βασικά στοιχεία ανεμογεννητριών.....	56
5.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)	57
5.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT)	60
5.4 Τύποι Ανεμογεννητριών.....	63
5.4.1 Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής (Τύπος 1)	63
5.4.2 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση (Τύπος 2)	64
5.4.3 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (Τύπος 3)	65
5.4.4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα (Τύπος 4)	67
Κεφάλαιο 6 - Επιλογή του ζυγού σύνδεσης αιολικού πάρκου βάσει των απωλειών	
πραγματικής ισχύος	69
6.1 Το λογισμικό προσομοίωσης PowerWorld Simulator	69
6.2 Το σύστημα 24 ζυγών της IEEE και τα βασικά χαρακτηριστικά του	69

6.3 Επιλογή τοποθεσίας σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου με ποσοστό ενσωμάτωσης 15% του φορτίου 73

6.3.1 Σύνδεση στο ζυγό 2.....	73
6.3.2 Σύνδεση στο ζυγό 3.....	75
6.3.3 Σύνδεση στο ζυγό 4.....	76
6.3.4 Σύνδεση στο ζυγό 5.....	78
6.3.5 Σύνδεση στο ζυγό 6.....	79
6.3.6 Σύνδεση στο ζυγό 7.....	81
6.3.7 Σύνδεση στο ζυγό 8.....	82
6.3.8 Σύνδεση στο ζυγό 9.....	84
6.3.9 Σύνδεση στο ζυγό 10.....	85
6.3.10 Σύνδεση στο ζυγό 11.....	87
6.3.11 Σύνδεση στο ζυγό 12.....	88
6.3.12 Σύνδεση στο ζυγό 13.....	90
6.3.13 Σύνδεση στο ζυγό 14.....	91
6.3.14 Σύνδεση στο ζυγό 15.....	93
6.3.15 Σύνδεση στο ζυγό 16.....	94
6.3.16 Σύνδεση στο ζυγό 17.....	96
6.3.17 Σύνδεση στο ζυγό 18.....	97
6.3.18 Σύνδεση στο ζυγό 19.....	99
6.3.19 Σύνδεση στο ζυγό 20.....	100
6.3.20 Σύνδεση στο ζυγό 21.....	102
6.3.21 Σύνδεση στο ζυγό 21.....	103
6.3.22 Σύνδεση στο ζυγό 23.....	105
6.3.23 Σύνδεση στο ζυγό 24.....	106
6.3.24 Επιλογή ζυγού σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου στο δίκτυο	108

6.4 Επιλογή τοποθεσίας σύνδεσης του αιολικού πάρκου με ποσοστό ενσωμάτωσης 30% του φορτίου 110

6.4.1 Σύνδεση στο ζυγό 2.....	111
6.4.2 Σύνδεση στο ζυγό 3.....	113
6.4.3 Σύνδεση στο ζυγό 4.....	114
6.4.4 Σύνδεση στο ζυγό 5.....	116
6.4.5 Σύνδεση στο ζυγό 6.....	117
6.4.6 Σύνδεση στο ζυγό 7.....	119
6.4.7 Σύνδεση στο ζυγό 8.....	120
6.4.8 Σύνδεση στο ζυγό 10.....	122
6.4.9 Σύνδεση στο ζυγό 11.....	123

6.4.10 Σύνδεση στο ζυγό 12.....	125
6.4.11 Σύνδεση στο ζυγό 13.....	126
6.4.12 Σύνδεση στο ζυγό 14.....	128
6.4.13 Σύνδεση στο ζυγό 15.....	129
6.4.14 Σύνδεση στο ζυγό 16.....	131
6.4.15 Σύνδεση στο ζυγό 17.....	132
6.4.16 Σύνδεση στο ζυγό 18.....	134
6.4.17 Σύνδεση στο ζυγό 19.....	135
6.4.18 Σύνδεση στο ζυγό 20.....	137
6.4.19 Σύνδεση στο ζυγό 21.....	138
6.4.20 Σύνδεση στο ζυγό 22.....	140
6.4.21 Σύνδεση στο ζυγό 23.....	141
6.4.22 Σύνδεση στο ζυγό 24.....	143
6.4.23 Επιλογή ζυγού σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου στο δίκτυο	144
6.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	147
<i>Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα.....</i>	<i>151</i>
<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>153</i>

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1: Πρόβλεψη παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή..	1
Εικόνα 1.2: Παγκόσμιες επενδύσεις στην καθαρή ενέργεια και στα ορυκτά καύσιμα	2
Εικόνα 2.1: Βασική δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	7
Εικόνα 2.2: Τομή Σύγχρονης Γεννήτριας	11
Εικόνα 2.3: Περίβλημα και εσωτερικό τμήμα στάτη	12
Εικόνα 2.4: Κυλινδρικός δρομέας	13
Εικόνα 2.5: Δρομέας με έκτυπους πόλους.....	13
Εικόνα 2.6: Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	16
Εικόνα 2.7: Γραμμές μεταφοράς α) απλού κυκλώματος και β) διπλού κυκλώματος	17
Εικόνα 2.8: Βασική διάταξη και λειτουργικότητα ενός ιδανικού μετασχηματιστή	19
Εικόνα 2.9: α) Διάταξη με τρεις μεμονωμένους μονοφασικούς μετασχηματιστές β) Τριφασικός μετασχηματιστής ενιαίου πυρήνα	20
Εικόνα 2.10: Χρήση μετασχηματιστών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	21
Εικόνα 2.11: Διατάξεις των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή	22
Εικόνα 3.1 Παράσταση συστήματος η ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου	30
Εικόνα 4.1: Είδη και τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής [28].....	40
Εικόνα 4.2: Κατάταξη Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.	41
Εικόνα 4.3: Μέθοδοι Χωροθέτησης των ΜΠΔ.....	44
Εικόνα 5.1: Παγκόσμια εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας [64].....	52
Εικόνα 5.2: Σχέση μεγέθους ανεμογεννητριών και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας .	53
Εικόνα 5.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh) στην Ελλάδα ανά έτος	54
Εικόνα 5.4: Γεωγραφική κατανομή αιολικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα το 2022 [65]	55
Εικόνα 5.5: Σχέση μεγέθους ανεμογεννητριών και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας .	57
Εικόνα 5.6: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα	58
Εικόνα 5.7: Συστατικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα	59
Εικόνα 5.8: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα	61
Εικόνα 5.9: Τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα	62
Εικόνα 5.10: Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας	64

Εικόνα 5.11: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση	65
Εικόνα 5.12: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας	66
Εικόνα 5.13 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα	68
Εικόνα 6.1: Μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος 24 ζυγών	70
Εικόνα 6.2: Το σύστημα 24 ζυγών στο PowerWorld	71
Εικόνα 6.3: Οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος 24 ζυγών	71
Εικόνα 6.4: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος	72
Εικόνα 6.5: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 2	74
Εικόνα 6.6: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 3	75
Εικόνα 6.7: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 4	77
Εικόνα 6.8: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 5	78
Εικόνα 6.9: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 6	80
Εικόνα 6.10: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 7	81
Εικόνα 6.11: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 8	83
Εικόνα 6.12: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 9	84
Εικόνα 6.13: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 10	86
Εικόνα 6.14: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 11	87
Εικόνα 6.15: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 12	89
Εικόνα 6.16: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 13	90
Εικόνα 6.17: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 14	92
Εικόνα 6.18: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 15	93
Εικόνα 6.19: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 16	95
Εικόνα 6.20: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 17	96
Εικόνα 6.21: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 18	98
Εικόνα 6.22: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 19	99
Εικόνα 6.23: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 20	101
Εικόνα 6.24: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 21	102
Εικόνα 6.25: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 22	104
Εικόνα 6.26: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 23	105
Εικόνα 6.27: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 24	107
Εικόνα 6.28: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 2	112

Εικόνα 6.29: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 3.....	113
Εικόνα 6.30: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 4.....	115
Εικόνα 6.31: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 5.....	116
Εικόνα 6.32: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 6.....	118
Εικόνα 6.33: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 7.....	119
Εικόνα 6.34: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 8.....	121
Εικόνα 6.35: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 10.....	122
Εικόνα 6.36: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 11.....	124
Εικόνα 6.37: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 12.....	125
Εικόνα 6.38: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 13.....	127
Εικόνα 6.39: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 14.....	128
Εικόνα 6.40: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 15.....	130
Εικόνα 6.41: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 16.....	131
Εικόνα 6.42: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 17.....	133
Εικόνα 6.43: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 18.....	134
Εικόνα 6.44: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 19.....	136
Εικόνα 6.45: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 20.....	137
Εικόνα 6.46: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 21.....	139
Εικόνα 6.47: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 22.....	140
Εικόνα 6.48: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 23.....	142
Εικόνα 6.49: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 24.....	143

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 6.1: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος...	109
Σχήμα 6.2: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος...	146
Σχήμα 6.3: Απώλειες πραγματικής ισχύος σε κάθε σενάριο	148
Σχήμα 6.4: Τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε κάθε σενάριο	150

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.1: Κατηγορίες ζυγών στην ανάλυση ροής φορτίου	34
Πίνακας 6.1: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ.....	72
Πίνακας 6.2: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 2	74
Πίνακας 6.3: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 3	76
Πίνακας 6.4 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 4	77
Πίνακας 6.5 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 5	79
Πίνακας 6.6 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 6	80
Πίνακας 6.7 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 7	82
Πίνακας 6.8 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 8	83
Πίνακας 6.9: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 9	85
Πίνακας 6.10: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 10	86
Πίνακας 6.11: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 11	88
Πίνακας 6.12: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 12	89
Πίνακας 6.13: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 13	91
Πίνακας 6.14: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 14	92
Πίνακας 6.15: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 15	94
Πίνακας 6.16: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 16	95
Πίνακας 6.17: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 17	97
Πίνακας 6.18: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 18	98
Πίνακας 6.19: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 19	100
Πίνακας 6.20: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 20	101
Πίνακας 6.21: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 21	103
Πίνακας 6.22: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 22	104
Πίνακας 6.23: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 23	106
Πίνακας 6.24: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 24	107
Πίνακας 6.25: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος	108

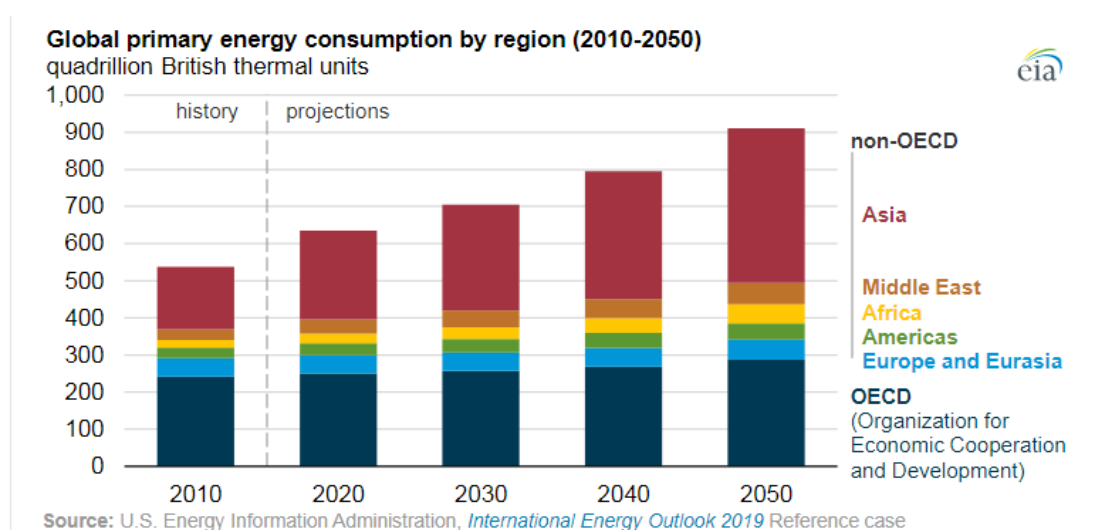
Πίνακας 6.26: Σύγκριση των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος πριν και μετά τη χωροθέτηση του Αιολικού Πάρκου	109
Πίνακας 6.27: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 2	112
Πίνακας 6.28: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 3	114
Πίνακας 6.29: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 4	115
Πίνακας 6.30: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 5	117
Πίνακας 6.31: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 6	118
Πίνακας 6.32: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 7	120
Πίνακας 6.33: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 8	121
Πίνακας 6.34: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 10	123
Πίνακας 6.35: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 11	124
Πίνακας 6.36: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 12	126
Πίνακας 6.37: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 13	127
Πίνακας 6.38: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 14	129
Πίνακας 6.39: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 15	130
Πίνακας 6.40: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 16	132
Πίνακας 6.41: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 17	133
Πίνακας 6.42: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 18	135
Πίνακας 6.43: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 19	136
Πίνακας 6.44: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 20	138
Πίνακας 6.45: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 21	139
Πίνακας 6.46: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 22	141
Πίνακας 6.47: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 23	142
Πίνακας 6.48: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε ρυ. Αιολικό στο ζυγό 24	144
Πίνακας 6.49: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος	144
Πίνακας 6.50: Σύγκριση των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος πριν και μετά τη χωροθέτηση του Αιολικού Πάρκου	146
Πίνακας 6.51: Τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε κάθε σενάριο	148

Συντομογραφίες

ΑΗΣ	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Β	Βαρέως τύπου
Β'Β'	Υπερβαρέως τύπου (δίδυμος αγωγό ανά φάση)
Β'Β'Β'	Υπερβαρέως τύπου (τρίδυμος αγωγός ανά φάση)
βλπ	βλέπε
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
Ε	Ελαφρού τύπου
ΕΛΕΤΑΕΝ	Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας
κ.α.	και άλλα
κ.λπ.	και λοιπά
κ.ο.κ	και ούτω καθεξής
ΜΔΠ	Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής
ΠΣ	Πυρηνικός Σταθμός
ΣΗΕ	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΥΗΣ	Υδροηλεκτρικός Σταθμός
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
DG	Distributed Generation
FCWT	Full Converter Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IRENA	International Renewable Energy Agency
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
pu	per unit
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WRSG	Wound Rotor Synchronous Generator

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Η παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μια συνεχώς αυξανόμενη τάση τις τελευταίες δεκαετίες, επακόλουθο της οικονομικής ανάπτυξης και της αύξησης του πληθυσμού (Εικόνα 1.1). Η Υπηρεσία Πληροφοριών για Θέματα Ενέργειας (Energy Information Administration – EIA), προβλέπει ότι μέχρι το 2050 η αύξηση θα είναι 50% από το 2010, με τον τομέα της βιομηχανίας να είναι υπεύθυνος για πάνω από το 50% της αύξησης αυτής [1].



Εικόνα 1.1: Πρόβλεψη παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή

Ακολουθώντας τις κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις, η οικονομική ανάπτυξη, η αστικοποίηση, η αύξηση του πληθυσμού, ο πλούτος και το υψηλό βιοτικό επίπεδο και οι τεχνολογικές εξελίξεις είναι μερικοί από τους παράγοντες που καθορίζουν την αυξητική αυτή τάση.

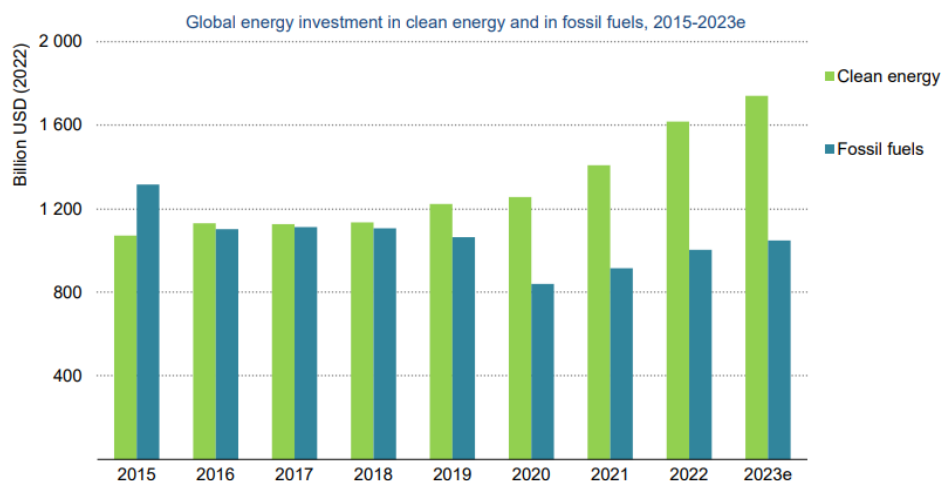
Η ενέργεια έχει καθοριστικό ρόλο για τη βιώσιμη ανάπτυξη επιταχύνοντας την κοινωνική και οικονομική πρόοδο μέσα από την ενίσχυση της παραγωγικότητας. Από την άλλη όμως, η μη βιώσιμη αύξηση της παραγωγής ώστε να καλυφτεί η ζήτηση, προκαλεί περιβαλλοντικές επιπτώσεις εντείνοντας την κλιματική αλλαγή, δημιουργώντας έτσι σοβαρές κοινωνικές προκλήσεις που επηρεάζουν την ανθρώπινη ευημερία [2]. Η αύξηση αυτή της παραγωγής, έχει ως συνέπεια τη μαζική κατανάλωση ορυκτών καυσίμων

προκαλώντας την υπερθέρμανση του πλανήτη και εγείροντας σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα [3].

Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας δε συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση στην ενεργειακή απόδοση. Επομένως, είναι σημαντικό να διασφαλιστούν τα εξής: πρόσβαση σε επαρκή ενέργεια και βιώσιμη παραγωγή με ταυτόχρονο περιορισμό της χρήσης μη βιώσιμων ορυκτών καυσίμων. Η βελτίωση της απόδοσης θα πρέπει να συνδυαστεί με την αντικατάσταση των παραδοσιακών μορφών ενέργειας με ανανεώσιμες [4],[5].

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η πυρηνική ενέργεια αναμένονται να κυριαρχήσουν στην αύξηση της παγκόσμιας προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τα επόμενα τρία χρόνια συνιστώντας μαζί περισσότερο από το 90% της επιπλέον ζήτησης [6]. Η ανάκαμψη από την πανδημία του Covid-19 και η απάντηση στην παγκόσμια ενεργειακή κρίση έχουν δώσει σημαντική ώθηση στις παγκόσμιες επενδύσεις καθαρής ενέργειας με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να είναι στο επίκεντρο ως ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς επένδυσης και τις επενδύσεις σε τεχνολογίες καθαρής ενέργειας να ξεπερνούν σημαντικά τις δαπάνες για ορυκτά καύσιμα (Εικόνα 1.2) [7].

The recovery from the Covid-19 pandemic and the response to the global energy crisis have provided a major boost to global clean energy investment



Εικόνα 1.2: Παγκόσμιες επενδύσεις στην καθαρή ενέργεια και στα ορυκτά καύσιμα

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα μπορούσαν να γίνουν η μεγαλύτερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, ξεπερνώντας τον άνθρακα. Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν στο 22% το 2014 και προβλέπεται να φτάσει το 33% το 2024 [8]. Η Ευρωπαϊκή Ένωση προσπαθεί να επιταχύνει την υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκειμένου να συμβάλει αποτελεσματικά στη φιλοδοξία μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 [9]. Μάλιστα, στο πλαίσιο της πράσινης συμφωνίας (Green Deal) υπήρξε μια αναθεωρημένη οδηγία η οποία αυξάνει τον στόχο της ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για το 2030 στο ελάχιστο 42,5%, φιλοδοξώντας να φτάσει το 45%, σχεδόν διπλάσιο από τα επίπεδα του 2021 [10].

Ο ρόλος της αιολικής ενέργειας στην καθαρή ενεργειακή μετάβαση είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Η αιολική ενέργεια ως μια σημαντική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας έχει τη δυνατότητα να καλύψει ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας προβλέπει ότι η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να παράγει έως και 35% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2040 ενώ τα σενάρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναφέρουν ότι στην Ευρώπη αυτό το ποσοστό θα μπορούσε να ξεπεράσει το 50% μέχρι το 2050 [11].

Καθώς νέες μορφές ενέργειας αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο, είναι πια επιτακτική η ανάγκη επαναξιολόγησης και επανασχεδιασμού της υπάρχουσας υποδομής παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο τη βέλτιστη ενσωμάτωση και συνδυασμό αυτών με τις κατάλληλες προδιαγραφές. Τα ηλεκτρικά δίκτυα χρειάζονται σημαντικές αναβαθμίσεις καθώς οδεύουμε προς μια παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση [12].

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης αιολικών πάρκων σε υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να αντικατασταθεί μέρος της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από συμβατικές γεννήτριες ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμη, καθαρή ενέργεια. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, είναι σημαντικό αρχικά να γίνει κατανοητή η δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, των συνιστωσών που τα απαρτίζουν αλλά και των μεθόδων ανάλυσης τους.

Η διεξόδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ένα σύστημα, πέρα από το σημαντικό αντίκτυπο που έχει στο περιβάλλον και στη διατήρηση των φυσικών πόρων, φέρει και μία πληθώρα πρόσθετων πλεονεκτημάτων. Συνεπώς, η επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης τους από τους διαχειριστές των συστημάτων γίνεται με γνώμονα συγκεκριμένα κριτήρια και στόχους που θέλουν να επιτευχθούν, τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο. Περιγράφεται επίσης η αιολική ενέργεια ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και οι κατηγορίες και οι τύποι των ανεμογεννητριών που μπορεί να απαρτίζουν ένα αιολικό πάρκο.

Η τελική επιλογή του σημείου σύνδεσης του αιολικού πάρκου στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με κριτήριο τις απώλειες πραγματικής ισχύος με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης και με τη βοήθεια του εργαλείου της ανάλυσης ροής φορτίου που διαθέτει το λογισμικό.

1.2 Οργάνωση του Τόμου

Η διπλωματική εργασία οργανώνεται σε κεφάλαια ως ακολούθως:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δίνεται ο ορισμός τους και στη συνέχεια παρουσιάζεται και περιγράφεται η δομή τους αλλά και οι βασικές συνιστώσες τους. Στην τελευταία ενότητα παρουσιάζεται το ανά μονάδα σύστημα (per unit).

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η ανάλυση ροής φορτίου, η χρησιμότητα της μεθόδου, παραθέτονται οι εξισώσεις ροής φορτίου και τέλος οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι επίλυσης αυτών (Gauss – Seidel, Newton – Raphson).

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διεσπαρμένη παραγωγή. Δίνεται ο ορισμός, στη συνέχεια οι στόχοι και τα κριτήρια χωροθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και στην τελευταία ενότητα αναφέρονται οι μέθοδοι χωροθέτησης των μονάδων.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η περιγραφή της αιολικής ενέργειας, παρουσιάζονται στατιστικά για την αιολική ενέργεια στην Ελλάδα και τέλος, περιγράφονται οι κατηγορίες και οι τύποι των ανεμογεννητριών

Το Κεφάλαιο 6 αφορά την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση του λογισμικού PowerWorld ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος ζυγός τοποθέτησης αιολικών πάρκων στο σύστημα βάσει των απωλειών πραγματικής ισχύος.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2 - Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

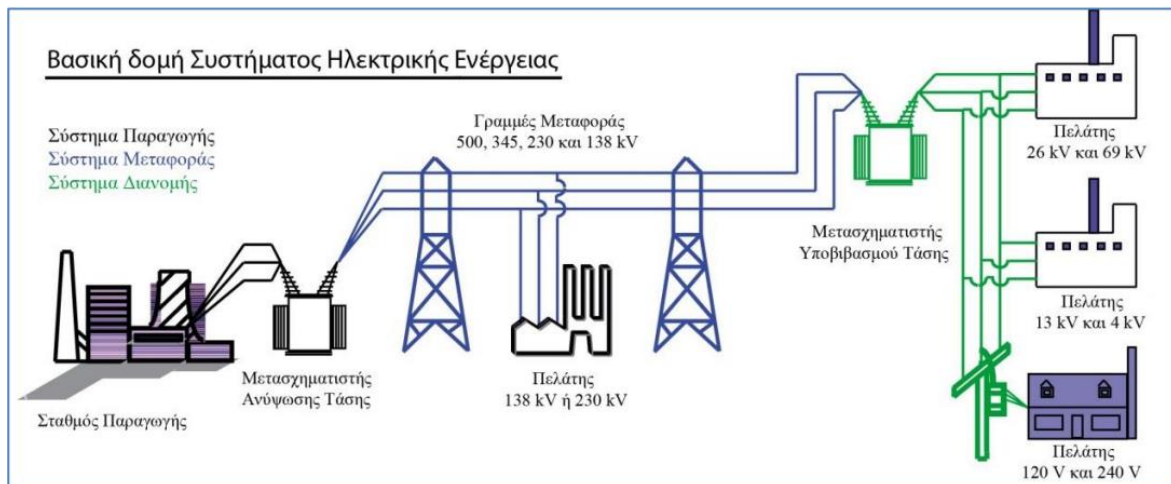
Με τον όρο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ή Σύστημα Ηλεκτρικής Ισχύος χαρακτηρίζεται ένα σύνολο εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες ισχύος, διατάξεις αντιστάθμισης κ.α.) που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι η απρόσκοπτη, ασφαλής, αξιόπιστη, ποιοτική και φιλική προς το περιβάλλον παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Κατά γενικό κανόνα η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε ποσότητες αρκετά μεγάλες, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως απαιτείται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας να πραγματοποιείται ακριβώς τη στιγμή που ζητείται από τους καταναλωτές. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να διασφαλίζεται μια συνεχής ροή της ηλεκτρικής ενέργειας από το σημείο παραγωγής μέχρι το σημείο κατανάλωσης.

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία κατανάλωσης, δηλαδή στα σημεία σύνδεσης των καταναλωτών με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συνεπώς, οι τρεις βασικοί πυλώνες που απαρτίζουν ένα ΣΗΕ είναι [17]:

- Οι σταθμοί παραγωγής
- Το σύστημα μεταφοράς
- Το σύστημα διανομής

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μία τυπική διάρθρωση ενός ΣΗΕ, από την Παραγωγή, μέχρι τους Καταναλωτές.



Εικόνα 2.1: Βασική δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1.1 Σταθμοί παραγωγής

Οι σταθμοί παραγωγής αφορούν εγκαταστάσεις στις οποίες μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Το είδος των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός ΣΗΕ καθορίζεται από το είδος των φυσικών πηγών ενέργειας που έχει κάθε χώρα. Η θέση εγκατάστασης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας και καθορίζεται από τεchnικοοικονομικούς παράγοντες. Έτσι οι λιγνιτικοί σταθμοί κατασκευάζονται δίπλα στο πεδίο εξόρυξης, ενώ οι υδροηλεκτρικοί και αιολικοί σταθμοί όπου υπάρχει εκμεταλλεύσιμο υδραυλικό ή αιολικό δυναμικό. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής, όπου διακρίνονται ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν σε [17]:

- Ατμοηλεκτρικούς (ΑΗΣ), όπου η χημική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων (π.χ. λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) μέσω της καύσης μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός με την σειρά του μετατρέπεται μέσω του ατμοστροβίλου σε μηχανική ενέργεια η οποία περιστρέφει τη γεννήτρια και τελικά παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
- Υδροηλεκτρικούς (ΥΗΣ), όπου η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική, μέσω της της κίνησης υδροστροβίλων, συνδεδεμένων με γεννήτριες.
- Πυρηνικούς (ΠΣ), όπου ο ελεγχόμενος πυρηνικός αντιδραστήρας αντικαθιστά το συμβατικό λέβητα σαν πηγή θερμικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της σχάσης χρησιμοποιείται για την κίνηση ηλεκτρικής γεννήτριας ατμού.

Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των αυξημένων απαιτήσεων για ΗΕ του σύγχρονου κόσμου, σε συνδυασμό με την μόλυνση του περιβάλλοντος και τον περιορισμό των φυσικών πόρων, υπάρχει αυξημένη κινητικότητα στην αναζήτηση και αξιοποίηση πιο φιλικών στο περιβάλλον πηγών ενέργειας, με ταυτόχρονη προσπάθεια για απεξάρτηση από ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα. Παρατηρείται αύξηση στην παραγωγή ΗΕ μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, γεωθερμία κλπ. που χρησιμοποιούν ανεξάντλητες πηγές όπως είναι ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό κ.α.

2.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Το σύστημα μεταφοράς ενός ΣΗΕ αποτελεί την κύρια διασύνδεση μεταξύ των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού διαφόρων επιπέδων τάσεων. Κύρια λειτουργία του συστήματος μεταφοράς είναι η ανύψωση της τάσης από τους σταθμούς παραγωγής για την μεταφορά της ισχύος. Οι υποσταθμοί ανύψωσης βρίσκονται κοντά στις μονάδες παραγωγής και χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης, από τα 20kV – 30kV που είναι στους ακροδέκτες των γεννητριών, στα επίπεδα τάσης του συστήματος μεταφοράς. Όταν η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με υψηλή τάση, επιτυγχάνονται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και οικονομικότερη λειτουργία. Ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί, χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς. Ενδεικτικές τάσεις που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς διαμορφώνονται στα 115, 132, 138, 150, 161, 230 και 275kV για την υψηλή τάση, και στα 345, 400, 500 και 765kV για την υπερυψηλή τάση. Στο ελληνικό ΣΗΕ τα δίκτυα μεταφοράς αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής τάσης των 400kV και υψηλής τάσης των 150kV [17]. Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε σπανιότερες περιπτώσεις και κυρίως για διασυνδέσεις με υποθαλάσσια καλώδια, χρησιμοποιείται το συνεχές ρεύμα. Το υποσύστημα μεταφοράς δομείται σχηματίζοντας ένα βρόγχο, παρέχοντάς του έτσι τη δυνατότητα να αποστέλλει την ηλεκτρική ενέργεια σε περισσότερες κατευθύνσεις. Ανάμεσα στα εθνικά συστήματα μεταφοράς των κρατών αναπτύσσονται διασυνδετικές

γραμμές δημιουργώντας έτσι ένα ενιαίο δίκτυο, η λειτουργία του οποίου ορίζεται από αντίστοιχες διακρατικές συμφωνίες. Όλα τα παραπάνω προσδίδουν στο εκάστοτε σύστημα μεταφοράς αξιοπιστία, στιβαρότητα και αντοχή σε τυχόν διαταραχές. Μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές δύνανται να συνδεθούν απευθείας με το δίκτυο υψηλής τάσης, μέσω κατάλληλων υποσταθμών. Οι γραμμές μεταφοράς καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού στα κέντρα μεγάλης κατανάλωσης, όπως οι πόλεις και οι βιομηχανίες, όπου η τάση υποβιβάζεται στα επίπεδα του δικτύου διανομής, συνήθως στα 15kV – 20kV [13]. Οι χαμηλότερες τάσεις του συστήματος μεταφοράς, 23kV – 150kV, διαμορφώνουν το λεγόμενο σύστημα υπομεταφοράς, το οποίο χαρακτηρίζεται από περισσότερες γραμμές, μικρότερου μήκους και ισχύος, ενώ μπορεί να δομηθεί σχηματίζονται ακτινωτά δίκτυα. Ο ρόλος του είναι αντίστοιχος με αυτόν του συστήματος διανομής, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, με τη διαφορά ότι καλύπτει μεγαλύτερες γεωγραφικά περιοχές, σε υψηλότερες τιμές τάσης και ισχύος. Σε πολλές περιπτώσεις ΣΗΕ αλλά και στη διεθνή βιβλιογραφία, η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και υπομεταφοράς, δεν είναι πάντοτε εμφανής, και για το λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εξετάζονται ως ένα υποσύστημα.

2.1.3 Σύστημα Διανομής

Με τον όρο διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, εννοούμε το σύνολο της υλικοτεχνικής υποδομής (υποσταθμοί, δίκτυα διανομής, διατάξεις διακοπής, ελέγχου και προστασίας) μέσω της οποίας η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης [14]. Το σύστημα διανομής παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής και μέσης τάσης και στη συνέχεια τη διανέμει προς τους τελικούς καταναλωτές. Στο σύστημα διανομής, η διανομή στους καταναλωτές πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα τάσεων, στην πρωτεύουσα διανομή (μέση τάση) και στην δευτερεύουσα (χαμηλή τάση). Στην πρωτεύουσα διανομή, η διανομή κατανέμει ενέργεια από υποσταθμούς διανομής έως μετασχηματιστές διανομής, όπου η τάση μειώνεται στα επίπεδα αξιοποίησης των πελατών και συνήθως συνδέονται παροχές μεγάλης ισχύος, άνω των 100kW, όπως βιοτεχνίες και βιομηχανίες. Στη δευτερεύουσα διανομή (χαμηλή τάση), η τάση διανομής βρίσκεται μεταξύ 120 έως 480V και τροφοδοτούνται μικρότεροι καταναλωτές, κυρίως οικιακοί, με μονοφασικές ή τριφασικές

παροχές. Με άλλα λόγια, ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του καταναλωτή μεταβάλλεται η τάση και ο τρόπος της τροφοδοσίας του. Έτσι, το σύστημα διανομής είναι υπεύθυνο για τον υποβιβασμό της τάσης, αρχικά στη μέση τάση (20kV) και έπειτα στη χαμηλή τάση (230V για του μονοφασικούς καταναλωτές και 400V για τους τριφασικούς), και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές. Ένας διαχωρισμός των δικτύων διανομής είναι σε κλειστά και ανοιχτά δίκτυα. Τα κλειστά δίκτυα συναντώνται κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και κάθε καταναλωτής μπορεί να εξυπηρετείται από τουλάχιστον δύο σημεία, έχοντας την δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περίπτωση βλάβης. Αντίθετα τα ανοιχτά συστήματα τροφοδοτούν τα φορτία τους από ένα σημείο και σε οποιοδήποτε πρόβλημα απομονώνονται όλοι οι καταναλωτές. Τα ανοιχτά δίκτυα χρησιμοποιούνται σε αραιοκατοικημένες περιοχές και η κατασκευή τους είναι οικονομικότερη σε σχέση με τα κλειστά δίκτυα. Τα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι εναέρια, υπόγεια ή και συνδυασμός αυτών ανάλογα με τη γεωγραφική πυκνότητα φορτίου και το είδος της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, στις αστικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου η πυκνότητα φορτίου είναι αρκετά μεγάλη, τα δίκτυα διανομής είναι συνήθως υπόγεια, ενώ στην επαρχία είναι εναέρια. Στις ημιαστικές περιοχές μπορεί να είναι συνδυασμών και υπόγειων και εναέριων. Τα δίκτυα συνήθως λειτουργούν όλα ακτινικά και τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο, ενώ πλέον, δύνανται να συνδεθούν σε αυτό, εκτός από φορτία καταναλωτών, και μονάδες παραγωγής που αξιοποιούν ανανεώσιμες ή άλλες πηγές ενέργειας.

2.2 Βασικές συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στην ενότητα αυτή αναλύονται διεξοδικά οι βασικές συνιστώσες που επιτελούν τις βασικότερες λειτουργίες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτές λειτουργούν ώστε το σύστημα να παραμένει ευσταθές και αξιόπιστο.

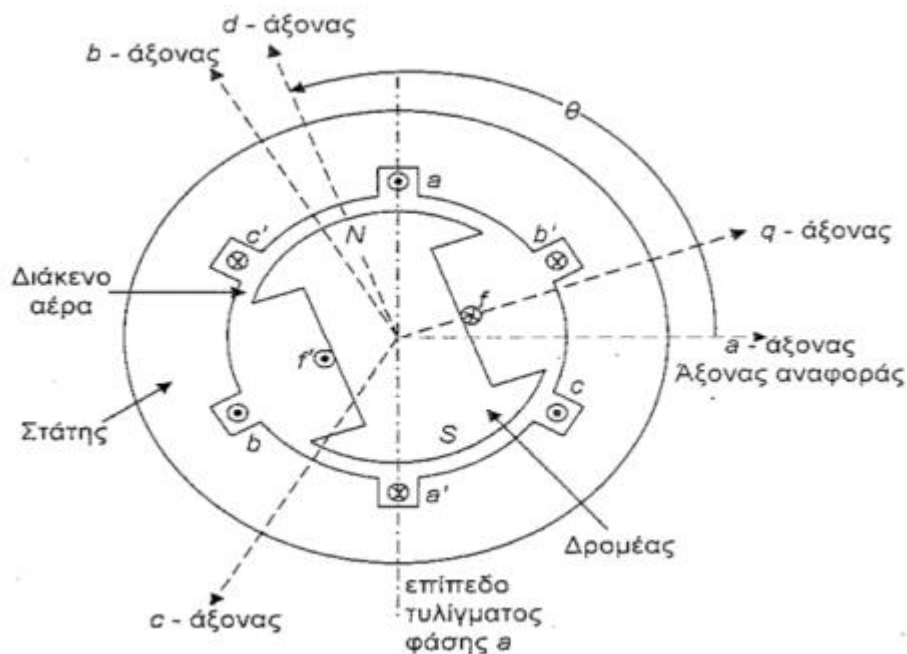
Κάθε ένα ΣΗΕ αποτελείται από τις εξής βασικές συνιστώσες [15]:

- Σύγχρονες γεννήτριες
- Τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος
- Γραμμή μεταφοράς
- Φορτίο

2.2.1 Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες (synchronous generators) αποτελούν ένα αποδοτικό και αξιόπιστο μέσο για τη μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική [13]. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται καθημερινά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες. Πρόκειται για την σημαντικότερη μηχανή παραγωγής ενέργειας, ενώ είναι γνώστη και ως εναλλακτήρας. Τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα αποτελούνται από γεννήτριες με ονομαστική ισχύ μερικών εκατοντάδων έως και πάνω από χίλια MVA.

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στον νόμο του Faraday. Ο όρος «σύγχρονη» απορρέει από το γεγονός ότι, στη μόνιμη κατάσταση, η μηχανή λειτουργεί υπό σταθερή ταχύτητα και συχνότητα [15]. Τα δύο βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια σύγχρονη γεννήτρια είναι ο στάτης, που είναι το ακίνητο μέρος και ο δρομέας, που είναι το περιστρεφόμενο μέρος. Στην Εικόνα 2.2 απεικονίζεται η τομή μιας σύγχρονης γεννήτριας, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται τα επιμέρους τμήματά της και αναλύεται η βασική της λειτουργία.



Εικόνα 2.2: Τομή Σύγχρονης Γεννήτριας

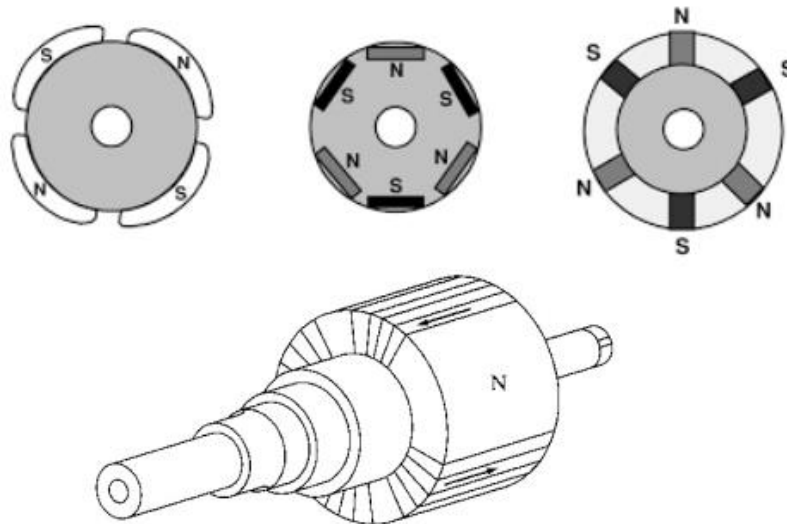
Ο στάτης, είναι μία κυλινδρική σιδηρομαγνητική κατασκευή που έχει αύλακες στην εσωτερική του επιφάνεια. Στις αύλακες αυτές, τοποθετούνται τα τρία τυλίγματα που διαθέτει σε τρεις συμμετρικές ζώνες, μία για κάθε φάση. Ο στάτης και ο δρομέας σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε για σταθερή ταχύτητα δρομέα να παράγεται μια ημιτονοειδής τάση σε κάθε ένα από τα τυλίγματα του στάτη. Οι τρεις αυτές τάσεις έχουν ίδιο μέτρο, ίδια συχνότητα αλλά παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° η μία από την άλλη. Συνδέοντας, τα τρία αυτά τυλίγματα (a-a', b-b', c-c') σε τριφασική διάταξη, σχηματίζεται μια τριφασική πηγή.[15],[16]. Για κάθε τύλιγμα φάσης του στάτη, αντιστοιχεί ένας κάθετος στο επίπεδο του αντίστοιχου τυλίγματος. Ως άξονας αναφοράς, θεωρείται πάντα ο άξονας του τυλίγματος a. Στην Εικόνα 2.3 απεικονίζεται το περίβλημα και το εσωτερικό τμήμα ενός στάτη.



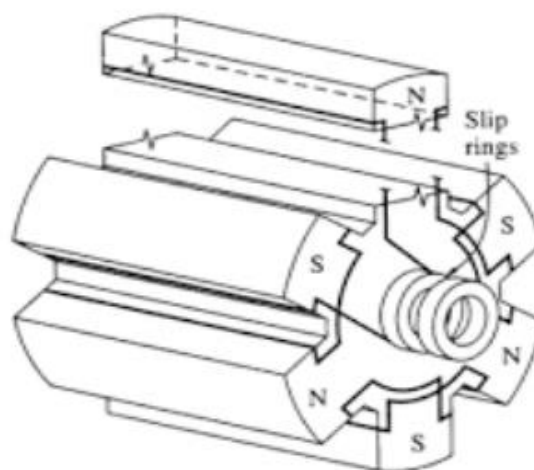
Εικόνα 2.3: Περίβλημα και εσωτερικό τμήμα στάτη

Ο δρομέας είναι μία συμπαγής σιδηρομαγνητική κατασκευή που περιστρέφεται μέσα στο στάτη. Στο δρομέα περιέχεται ένα τύλιγμα, που ονομάζεται τύλιγμα πεδίου ή διέγερσης και τροφοδοτείται με πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Στόχος της τελευταίας είναι η δημιουργία ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου [17]. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν μεγάλο μαγνήτη, ο οποίος καθώς περιστρέφεται, περιστρέφεται μαζί του το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το συνεχές ρεύμα και επάγεται τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη. Λόγω της παρουσίας του τυλίγματος αυτού, δημιουργούνται στο δρομέα δύο μαγνητικοί πόλοι N και S. Ο άξονας των μαγνητικών πόλων ονομάζεται ευθύς άξονας (d – άξονας), ενώ ο κάθετος ως προς αυτόν εγκάρσιος άξονας (q – άξονας). Η γωνία θ καθορίζει κάθε στιγμή τη θέση του d – άξονα του δρομέα ως προς τον ακίνητο άξονα αναφοράς του τυλίγματος a του στάτη. Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι για τους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών, ο κυλινδρικός δρομέας και ο δρομέας με έκτυπους πόλους.

Στην πρώτη κατηγορία ο κυλινδρικός δρομέας έχει συνήθως 2 ή 4 πόλους που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες που υψηλής ταχύτητας. Στην δεύτερη κατηγορία ο δρομέας διαθέτει συνήθως περισσότερους από 4 διακριτούς πόλους και είναι πιο αποδοτικός για γεννήτριες μικρής ταχύτητας [18]. Στην Εικόνα 2.4 απεικονίζονται κυλινδρικοί δρομείς, ενώ στην Εικόνα 2.5 απεικονίζεται ένας δρομέας με έκτυπους πόλους.



Εικόνα 2.4: Κυλινδρικός δρομέας



Εικόνα 2.5: Δρομέας με έκτυπους πόλους

2.2.2 Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα συστατικά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικός τους ρόλος αποτελεί η ασφαλής, οικονομική και με όσο το δυνατό λιγότερες απώλειες μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής σε μεγάλες αποστάσεις. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία των γραμμών μεταφοράς θα πρέπει η τάση στην αρχή και στο τέλος της γραμμής να μην παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση, η συχνότητα να είναι σταθερή και οι απώλειες να είναι ελάχιστες [13]. Για το λόγο αυτό, βασικό υλικό κατασκευής των αγωγών είναι το αλουμίνιο με ενισχυμένο χάλυβα, εξαιτίας της χαμηλής αντίστασης που προσφέρει το πρώτο σε συνδυασμό με την αντοχή στην καταπόνηση του [19]. Για την αποδοτικότερη σχεδίαση της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, υλοποιούνται κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά από ηλεκτρικές παραμέτρους όπως:

- Η εν σειρά αντίσταση r , σε Ω/m
- Η εν σειρά επαγωγή L , σε H/m
- Η εγκάρσια χωρητικότητα C , σε F/m

Από τις μονάδες των παραμέτρων αυτών, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως εξαρτώνται άμεσα από το μήκος γραμμής μεταφοράς. Συγκεκριμένα, η εν σειρά αντίσταση r ενός αγωγού που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού ρ σε $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, το μήκος l σε m και τη διατομή A του αγωγού σε mm^2 . Η εν σειρά επαγωγή L εκφράζεται από την τάση που επάγεται στους αγωγούς λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τα μαγνητικά πεδία που εμφανίζονται τους αγωγούς καθώς διαρρέονται από μεταβαλλόμενο ρεύμα. Τέλος, αναφορικά με την παράμετρο της εγκάρσιας χωρητικότητας C , αυτή οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών της γραμμής μεταφοράς, προκαλώντας τη φόρτισή τους. Η εγκάρσια χωρητικότητα εξαρτάται άμεσα από το μήκος της γραμμής, αλλά και από την απόσταση που έχουν οι αγωγοί της μεταξύ τους.

Μια γραμμή μεταφοράς μικρότερη από 80 km θεωρείται μικρού μήκους. Σε μία μικρού μήκους γραμμή μεταφοράς, η χωρητικότητα είναι τόσο μικρή που μπορεί να παραληφθεί τελείως χωρίς να έχει σημαντικές επιπτώσεις στους υπολογισμούς και να θεωρηθεί μόνο η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ως σημαντικοί παράγοντες για τους

υπολογισμούς. Συγκεκριμένα η αντίσταση δίνεται από τη σχέση $R = rl$ και η ανά φάση επαγωγική αντίδραση $X = j\omega Ll$, όπου l είναι το μήκος της γραμμής.

Σε μία γραμμή μεταφοράς μεταξύ 80 km και 120 km, (μεσαίου μήκους) η χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής υπολογίζεται μέσω της σχέσης $Y = j\omega Cl$ και διαιρείται σε δύο ίσα τμήματα τα οποία τοποθετούνται στα άκρα αναχώρησης και άφιξης της γραμμής.

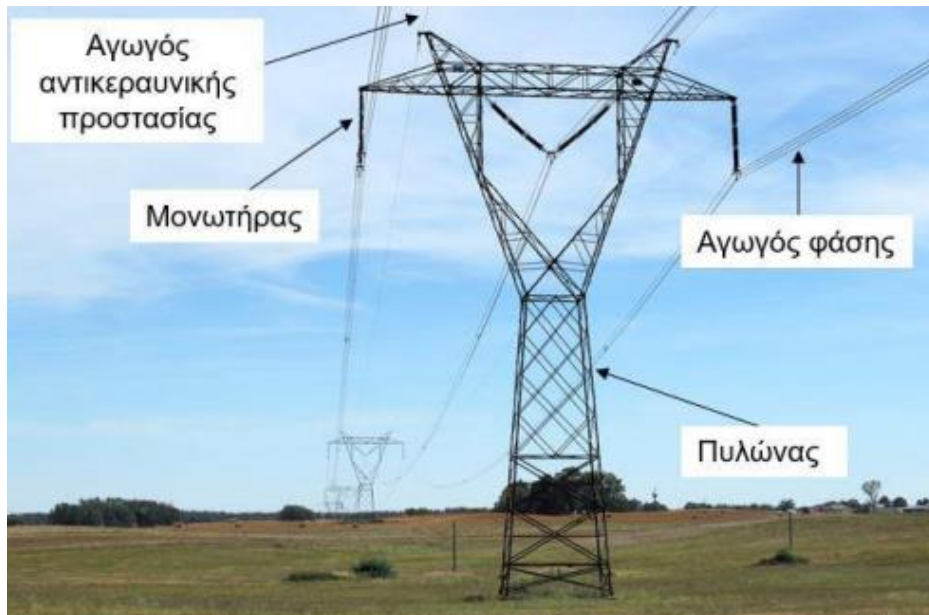
Αν, όμως, η γραμμή έχει μήκος μεγαλύτερο από 250 km (μεγάλου μήκους), θεωρείται πως οι παράμετροι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος της και επηρεάζουν ισάξια τους υπολογισμούς [15].

Οι γραμμές που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζουν απώλειες οι οποίες οφείλονται στις ωμικές αντιστάσεις R των αγωγών της γραμμής και εμφανίζονται υπό μορφή θερμότητας. Όταν ένα ρεύμα I ρέει κατά μήκος μιας γραμμής, συμβαίνουν απώλειες [21]:

$$P_{losses} = I^2 * R \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

Αξίζει να σημειωθεί πως στο ελληνικό σύστημα το 10% περίπου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται υπό μορφή απωλειών στο δίκτυο μεταφοράς [17].

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πυλώνες πάνω στους οποίους στηρίζονται μονωτήρες. Οι μονωτήρες με την σειρά τους στηρίζουν τους αγωγούς για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και εξασφαλίζουν την μόνωση τους ως προς την Γη. Εκτός από αυτά τα στοιχεία, οι γραμμές μεταφοράς περιλαμβάνουν μετασχηματιστές για τον υποβιβασμό της ηλεκτρικής τάσης καθώς και συστήματα ελέγχου και αγωγούς προστασίας που έχουν ως στόχο την έγκαιρη προειδοποίηση για πιθανά σφάλματα, διασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την εύρυθμη λειτουργία των γραμμών μεταφοράς. Εκτός από καλώδια φάσεων υπάρχει πάντα και ένας αγωγός αντικεραυνικής προστασίας. Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται ένα τέτοιο σύστημα.



Εικόνα 2.6: Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται επιπλέον ανάλογα με τον αριθμό των κυκλωμάτων σε απλού κυκλώματος (ένα τριφασικό κύκλωμα) και διπλού κυκλώματος (δύο τριφασικά κυκλώματα). Το επίπεδο της τάσης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα καθορισμού του αριθμού των κυκλωμάτων. Λόγοι όπως η μεταφερόμενη ισχύς, η ευστάθεια και η εφεδρεία επιβάλλουν συχνά την ανάγκη σχεδιασμού πυλώνων μονού ή πολλαπλού κυκλώματος. Στην Εικόνα 2.7 απεικονίζονται γραμμές μεταφοράς απλού και διπλού κυκλώματος.



α)

β)

Εικόνα 2.7: Γραμμές μεταφοράς α) απλού κυκλώματος και β) διπλού κυκλώματος

Αναφορικά με το επίπεδο της τάσης που μεταφέρουν, οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται σε υψηλής ή υπερυψηλής τάσης.

Επιπλέον, οι γραμμές μεταφοράς με βάση τη δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε:

- Ελαφρού τύπου (E)
- Βαρέως τύπου (B)
- Υπερβαρέως τύπου (B'B') (δίδυμος αγωγός ανά φάση) & (B'B'B') (τρίδυμος αγωγός ανά φάση)

Σε γενικές γραμμές, οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης ελαφρού και βαρέως τύπου είναι απλού κυκλώματος και αποτελούνται από δύο αγωγούς φάσης, ενώ οι υπερβαρέως τύπου είναι διπλού κυκλώματος και αποτελούνται από έναν αγωγό φάσης.

Μία άλλη διάκριση των γραμμών μεταφοράς σχετίζεται με το μέσο στο οποίο βρίσκονται και διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Μία εναέρια γραμμή μεταφοράς, συνήθως αποτελείται από τρεις αγωγούς που περιέχουν τις τρεις φάσεις του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή οι αγωγοί των τριών φάσεων είναι τοποθετημένοι σε μονωτήρες πάνω σε πύργους απλού ή διπλού κυκλώματος. Εξαιτίας της διάταξης των γραμμών μεταφοράς, οι πυλώνες αποτελούν το κύριο αντικείμενο ενδιαφέροντος στην εκτίμηση της συμπεριφοράς τους. Η πλειοψηφία των εναερίων γραμμών μεταφοράς είναι κατασκευασμένες με αγωγούς αλουμινίου, υλικό που χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλό βάρος. Το χαμηλό κόστος και βάρος που τους χαρακτηρίζει, σε συνδυασμό με τη μικρή ένταση ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται περιμετρικά τους, ήταν οι βασικοί λόγοι που οι αγωγοί αλουμινίου επικράτησαν των αντίστοιχων χάλκινων, που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα.

Στα υπόγεια δίκτυα οι αγωγοί είναι μονωμένοι μεταξύ τους και προστατεύονται από ένα εξωτερικό περίβλημα. Αναφορικά με το κόστος, οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι ελαφρώς ακριβότερες λόγω της δυσκολίας κατασκευής και του κόστους συντήρησής τους. Ωστόσο, παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια, καθώς και εξοικονόμηση χώρου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αστικά κέντρα και για μικρές αποστάσεις, ενώ εντοπίζονται

σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης τάσης. Για το λόγο αυτό, το δίκτυο διανομής επιδιώκεται να είναι αποκλειστικά υπόγειο [13].

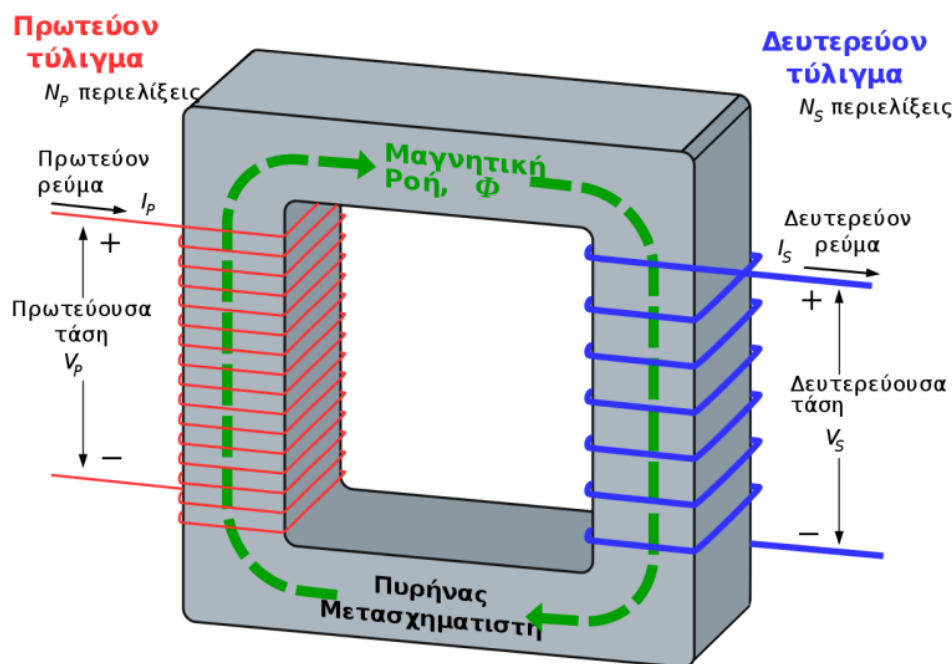
2.2.3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής ισχύος (ή απλά μετασχηματιστής) είναι μία ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης μέσω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου.

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μονή σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο που βρίσκεται στο εσωτερικό του πυρήνα. Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο (ή το τρίτο, αν υπάρχει) συνδέεται με το φορτίο. Το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα (primary winding) ή τύλιγμα εισόδου του μετασχηματιστή και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον (secondary) ή τύλιγμα εξόδου. Αν υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή [20].

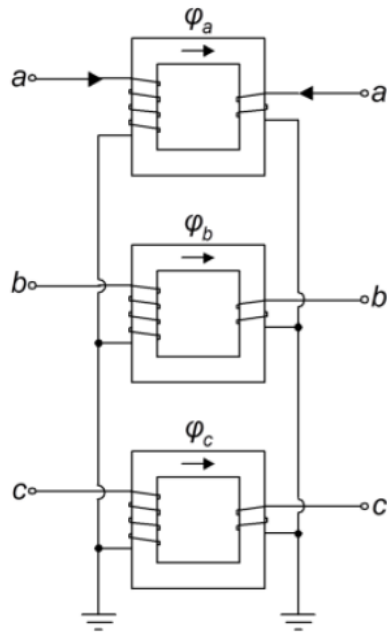
Ο λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται σε δύο βασικές αρχές. Πρώτον, ότι ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο και δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Συνεπώς, εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος. Επιπλέον, η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον τύλιγμα είναι ανάλογη της τάσης του πρωτεύοντος, κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα. Αυτό σημαίνει ότι, η κατάλληλη επιλογή του αριθμού σπειρών των τυλιγμάτων μπορεί να οδηγήσει στην ανύψωση ή στον υποβιβασμό της τάσης [13].

Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται η βασική διάταξη και λειτουργικότητα ενός ιδανικού μετασχηματιστή (χωρίς απώλειες). Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα.

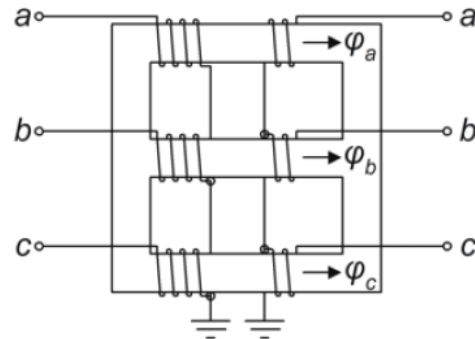


Εικόνα 2.8: Βασική διάταξη και λειτουργικότητα ενός ιδανικού μετασχηματιστή

Οι πολύ μεγάλης ισχύος τριφασικοί μετασχηματιστές συνήθως συντίθενται από τρεις μεμονωμένους μονοφασικούς μετασχηματιστές (Εικόνα 2.9α), ενώ οι τριφασικοί μετασχηματιστές μικρότερης ισχύος απαρτίζονται από μια ολοκληρωμένη τριφασική κατασκευή με ενιαίο πυρήνα και για τις τρεις φάσεις (Εικόνα 2.9β). Στην πρώτη διάταξη υπάρχει η ευελιξία αναφορικά με την όσον αφορά την ευκολότερη μεταφορά και την ευκολία στην επισκευή σε περίπτωση βλάβης. Αντίθετα, στη δεύτερη διάταξη εμφανίζονται λιγότερες απώλειες, όμως σε περίπτωση βλάβης απαιτείται αντικατάσταση ολόκληρου του μετασχηματιστή.



α)



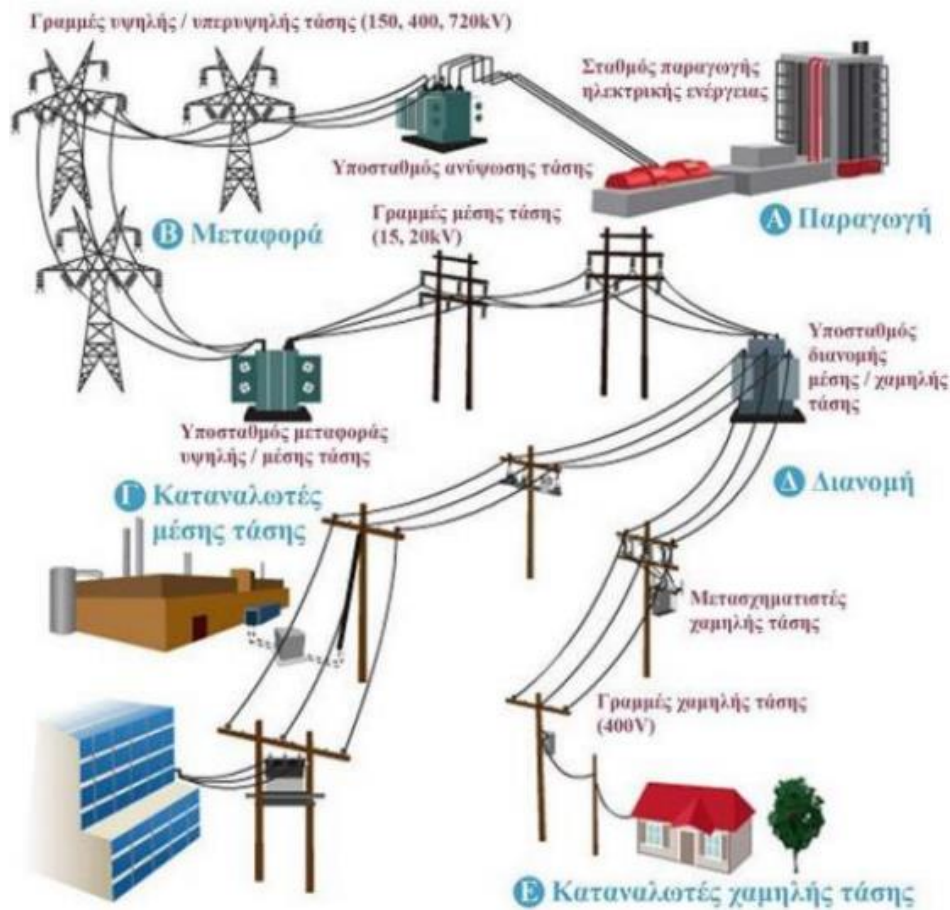
β)

Εικόνα 2.9: α) Διάταξη με τρεις μεμονωμένους μονοφασικούς μετασχηματιστές
β) Τριφασικός μετασχηματιστής ενιαίου πυρήνα

Οι μετασχηματιστές είναι απαραίτητοι για την λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελούν μια πολύ βασική συνιστώσα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών επιπέδων τάσεων. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν [17]:

- Μετασχηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από το επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς (20 / 150 kV ή 20 / 400 kV), καθώς η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνει χώρα στις σύγχρονες γεννήτριες πραγματοποιείται σε χαμηλό επίπεδο τάσεων
- Μετασχηματιστές μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς (150 / 400 kV). Καθώς η μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις για να είναι αποδοτική (ελαχιστοποίηση των απωλειών και η επαρκής φόρτιση των γραμμών μεταφοράς) απαιτεί πολύ υψηλότερες τιμές τάσης
- Μετασχηματιστές διανομής, που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης στα χαμηλά επίπεδα τάσης που ζητούνται από τους οικιακούς καταναλωτές, όπως 15 ή 20kV και για οικιακή χρήση 415V

Στην Εικόνα 2.10 απεικονίζεται η χρήση των μετασχηματιστών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπαρίσταται η ανύψωση της τάσης για την απομακρυσμένη μεταφορά της ενέργειας, στη συνέχεια η διατήρηση της και τέλος ο υποβιβασμός της σε κατάλληλα επίπεδα για τους καταναλωτές.

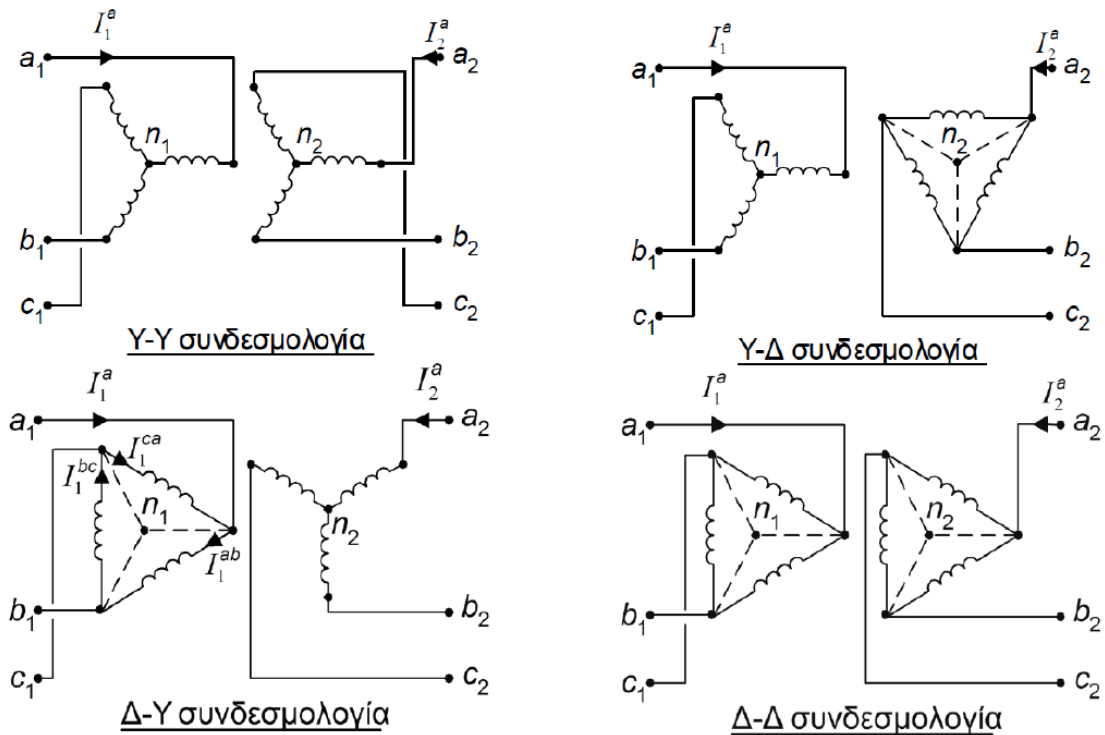


Εικόνα 2.10: Χρήση μετασχηματιστών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Ανάλογα με τη λειτουργία που πρόκειται να επιτελέσει ένας τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος, τα τυλίγματά του δύνανται να συνδεθούν με τέσσερις πιθανές συνδεσμολογίες: $Y - Y$ (αστέρας – αστέρας), $Y - \Delta$ (αστέρας – τρίγωνο), $\Delta - Y$ (τρίγωνο – αστέρας), $\Delta - \Delta$ (τρίγωνο – τρίγωνο), με καθεμιά να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Στην Εικόνα 2.11 απεικονίζονται οι πιθανές διατάξεις των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή.

Οι μετασχηματιστές γεννήτριας συνδέονται συνήθως με τη συνδεσμολογία $\Delta - Y$. Γενικά, οι γεννήτριες μεγάλης ισχύος, έχουν η καθεμία τον δικό της μετασχηματιστή ανύψωσης, συγκροτημένο από τρεις μονοφασικούς. Αντίθετα, οι γεννήτριες μικρότερης ισχύος,

δύνανται να μοιράζονται έναν κοινό μετασχηματιστή ανύψωσης. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στο σύστημα μεταφοράς είναι συνήθως συνδεδεμένοι κατά Υ-Υ. Τέλος, οι μετασχηματιστές διανομής συνδέονται συνήθως κατά Υ – Δ, με το τύλιγμα Δ στη χαμηλότερη τάση, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ασυμμετρίας στην τροφοδότηση των φορτίων [15], [17].



Εικόνα 2.11: Διατάξεις των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή

2.2.4 Φορτία

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητά απ’ όλα τα παραπάνω, η οργάνωση και διάρθρωση ενός ΣΗΕ πραγματοποιείται με κριτήριο την ομαλή και ποιοτική τροφοδότηση των φορτίων των καταναλωτών.

Με τον όρο φορτίο εννοούμε μια συσκευή ή ένα σύνολο συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Η ισχύς που καταναλώνουν τα φορτία κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών που ξεκινά από μερικά Watt και φτάνει έως και αρκετά MW. Τα φορτία διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρες
- Συσκευές θέρμανσης
- Ηλεκτρονικές συσκευές
- Φωτιστικά

Οι διάφορες κατηγορίες φορτίων παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους ως προς το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικά, τριφασικά), τη σταθερότητα (ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και τη τάση) καθώς και τη περίοδο χρήσης (κανονική ή τυχαία). Παρόλα αυτά, εφαρμόζοντας πτυχές της στατιστικής επιστήμης, είναι εφικτό να υπολογιστεί ένας μέσος όρος της ζήτησης στους μετασχηματιστές διανομής. Μάλιστα, στο επίπεδο υπομεταφοράς, αυτός ο μέσος όρος γίνεται ακόμα πιο συγκεκριμένος και, φτάνοντας στο επίπεδο μεταφοράς, η κατάσταση της ζήτησης μπορεί σχεδόν να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια. Ένα τυπικό σύνθετο ηλεκτρικό φορτίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τόσο το μέγεθός του όσο και ο τρόπος μεταβολής του με το χρόνο μπορούν να προβλεφθούν σε μεγάλο βαθμό.
- Μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο, έτσι ώστε από λεπτό σε λεπτό να μένει σχεδόν σταθερό. Αυτό μας επιτρέπει να θεωρούμε ότι το σύστημα λειτουργεί σε μια μόνιμη κατάσταση, η οποία μεταβάλλεται αργά κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Καταναλώνει πάντοτε άεργο ισχύ, καθώς τα πιο βασικά στοιχεία ενός φορτίου είναι οι επαγωγικοί κινητήρες.
- Είναι πάντοτε συμμετρικό. Οι μεγάλοι κινητήρες σχεδιάζονται για συμμετρική τριφασική λειτουργία, ενώ στα μονοφασικά φορτία, η συμμετρία επιτυγχάνεται με σκόπιμη κατανομή των φορτίων στο επίπεδο διανομής και στις τρεις φάσεις.
- Εξαρτάται από τη τάση και τη συχνότητα. Στη διάρκεια διαταραχών η εξάρτηση αυτή προκαλεί μεγάλες διακυμάνσεις στα φορτία.

Το μέγεθος και το είδος του φορτίου αποτελούν δύο σημαντικές παραμέτρους, οι οποίες χωρίζουν τους καταναλωτές σε κατηγορίες και καθορίζουν την κατηγορία στην οποία θα ανήκει ο καθένας. Με βάση τις παραμέτρους αυτές, οι καταναλωτές μπορεί να είναι: βιομηχανικοί, εμπορικοί, αγροτικοί, οικιακοί.

Επιπλέον, το ημερήσιο φορτίο διακρίνεται στις εξής κατηγορίες [17]:

- Φορτίο βάσης: Το συγκεκριμένο φορτίο ζητείται όλη την ημέρα και καλύπτεται με μονάδες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σχετικά μικρό κόστος.

- Κυμαινόμενο φορτίο: Το φορτίο μεταβάλλεται σχεδόν σε όλη την περίοδο που εξετάζεται. Εξαρτάται από παράγοντες όπως η ημέρα, ο καιρός, η εποχή κ.λπ.
- Φορτίο Αιχμής: Το φορτίο της συγκεκριμένης κατηγορίας έχει μικρή διάρκεια (συνήθως κάποιες ώρες μέσα στη μέρα) και απότομες μεταβολές. Καλύπτεται με μονάδες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, ωστόσο με υψηλό κόστος.

2.3 Ανά Μονάδα Σύστημα

Κατά τη μελέτη των ΣΗΕ, είναι αρκετά πιο βολικό οι διάφορες ηλεκτρικές παράμετροι που το χαρακτηρίζουν, όπως τάσεις, ρεύματα, αντιστάσεις και ισχύς, να εκφράζονται σε ανά μονάδα (per unit - pu) τιμές και όχι απευθείας στις αντίστοιχες μονάδες τους. Αυτή η μέθοδος υπολογισμών ονομάζεται ανά μονάδα σύστημα και καθιερώθηκε για την απλοποίηση των πράξεων. Αποτελεί μία μεθοδολογία κανονικοποίησης, η οποία θέτει τη μαθηματική βάση για την απλουστευμένη παράσταση και ανάλυση των ηλεκτρικών δικτύων.

Η τιμή ανά μονάδα οποιασδήποτε ποσότητας ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής τιμής σε οποιαδήποτε μονάδα και της βάσης ή της τιμής αναφοράς στην ίδια μονάδα (Εξίσωση 2.2). Κάθε ποσότητα μετατρέπεται σε ανά μονάδα ποσότητα διαιρώντας την αριθμητική τιμή με την επιλεγμένη τιμή βάσης της ίδιας διάστασης. Η τιμή ανά μονάδα είναι αδιάστατη και δίδεται ως δεκαδικός αριθμός ή σε ποσοστό.

$$per\ unit = \frac{\text{πραγματική τιμή}}{\text{τιμή βάσης}} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Η απόλυτη τιμή του φυσικού μεγέθους, μπορεί να είναι πραγματικός ή μιγαδικός αριθμός, ενώ η τιμή βάσης είναι πάντα πραγματικός αριθμός σε απόλυτη τιμή. Κατά την ανάλυση ενός ηλεκτρικού δικτύου, όλες οι παράμετροί του, τάσεις, ρεύματα, αντιστάσεις και ισχύες, πρέπει να μετατραπούν σε ανά μονάδα, με κατάλληλη επιλογή των αντίστοιχων τιμών βάσης. Στη συνέχεια, το ηλεκτρικό δίκτυο επιλύεται με βάση τις κλασικές μεθόδους και στη συνέχεια αν είναι επιθυμητό χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.2, δίνεται η δυνατότητα μετατροπής των μεγεθών σε απόλυτες τιμές. Η τάση, το ρεύμα, η αντίδραση και η μιγαδική ισχύς συνδέονται μεταξύ τους και αρκεί να επιλέξουμε βάσεις

οποιοσδήποτε δύο από αυτές τις ποσότητες. Οι ποσότητες που επιλέγονται ως βάση είναι η ισχύς $|S_B|$, η τάση $|V_B|$, το ρεύμα $|I_B|$ και η αντίσταση $|Z_B|$. Από αυτές, καθορίζονται δύο, με τις υπόλοιπες δύο να υπολογίζονται συναρτήσει αυτών.

Σε ένα τριφασικό σύστημα είναι σύνηθες οι τιμές της τάσης να δίνονται σε πολικές τιμές, ενώ της ισχύος σε τριφασικές. Χρησιμοποιώντας ως βάση τάσης $|V_B|_{3\phi}$ μια πολική τιμή σε kV και ως βάση ισχύος $|S_B|_{3\phi}$ μια τριφασική τιμή σε MVA, οι βάσεις ρεύματος και αντίστασης προκύπτουν κάνοντας χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$|I_B|_{3\phi} = \frac{|S_B|_{3\phi}}{\sqrt{3}|V_B|_{3\phi}} \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

$$|Z_B|_{3\phi} = \frac{|V_B|_{3\phi}^2}{|S_B|_{3\phi}} \Omega \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

Η τιμή βάσης $|S_B|_{3\phi}$ παραμένει η ίδια για όλο το σύστημα που μελετάται. Όταν υπάρχουν στο σύστημα σύνθετες αντιστάσεις σε ένα τμήμα του συστήματος, η μετατροπή τους σε pu τιμές γίνεται εφαρμόζοντας την κατάλληλη τιμή βάσης αντίστασης για το τμήμα του συστήματος που μελετάται. Ομοίως, όταν υπάρχουν σε τμήματα του συστήματος που μελετάται μετασχηματιστές, τότε ο λόγος των ονομαστικών πολικών τάσεων των δύο τυλιγμάτων του, ισούται με τον λόγο των βάσεων τάσης των δύο τμημάτων που αυτός συνδέει.

Για τμήματα του συστήματος που συνδέονται μεταξύ τους μέσω μετασχηματιστή, ο λόγος των ονομαστικών πολικών τάσεων των δύο τυλιγμάτων του, ισούται με τον λόγο των βάσεων τάσης των δύο τμημάτων που αυτός συνδέει. Έτσι, η pu τιμή της αντίστασης ενός μετασχηματιστή είναι η ίδια, είτε υπολογίζεται στο πρωτεύον, είτε στο δευτερεύον τύλιγμα.

Σε περιπτώσεις που οι per unit τιμές των σύνθετων αντιστάσεων γεννητριών και μετασχηματιστών του συστήματος που μελετάται δίνονται σε διαφορετική βάση από αυτή που έχει επιλεγεί, τότε θα πρέπει να γίνεται μετατροπή τους. Τα δεδομένα όλων των τμημάτων του κυκλώματος πρέπει να εκφράζονται μέσω της ίδιας βάσης και η μετατροπή αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{|V_B^{old}|^2}{|V_B^{new}|^2} \frac{|S_B^{new}|}{|S_B^{old}|} \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

όπου old και new οι παλιές (ονομαστικές) και οι καινούργιες (επιλεγείσες) βάσεις αντίστοιχα.

Τέλος, οι ανά μονάδα τιμές πολικής και της αντίστοιχης φασικής τάσης, αλλά και της τριφασικής και της αντίστοιχης μονοφασικής ισχύος, είναι ίδιες. Συνεπώς, εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις, είναι εφικτός ο υπολογισμός τιμών των μονοφασικών ισοδυνάμων στοιχείων, διαμορφώνοντας με τον τρόπο αυτό το ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος που μελετάται κάθε φορά.

Κεφάλαιο 3 - Ανάλυση Ροής Φορτίου

3.1 Εισαγωγή στη ροή φορτίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα ΣΗΕ είναι ένα αρκετά πολύπλοκο, ευμετάβλητο και με πολλές απαιτήσεις σύστημα. Η βασική ανάγκη δημιουργία συστημάτων πρόβλεψης του φορτίου, έγκειται στο βασικό μειονέκτημα πως η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να καταναλωθεί άμεσα, χωρίς τη δυνατότητα αποθήκευσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως κάθε χρονική στιγμή πρέπει να λειτουργούν τόσες μονάδες παραγωγής, όσες είναι απαραίτητες για να καλυφθεί η συνολική ζήτηση των καταναλωτών συν τις απώλειες. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης του φορτίου, ώστε η παραγωγή να ακολουθεί κάθε χρονική στιγμή την ζήτηση. Οι προβλέψεις του φορτίου εκτιμούν το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

Με τον όρο ανάλυση ροής φορτίου εννοείται η μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο υφίσταται συγκεκριμένη φόρτιση, στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας. Οι μελέτες ροής ισχύος παρέχουν μια συστηματική μαθηματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των διαφόρων τάσεων όλων των ζυγών, των γωνιών φάσης και της ενεργής και άεργης ισχύος που ρέει μέσω διαφορετικών κλάδων κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης. Σε ένα πρόβλημα ροής φορτίου μπορούν να προκύψουν πολλές διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις. Ο χειριστής - μηχανικός είναι αυτός που καταλήγει σε συγκεκριμένες λύσεις, οι οποίες υποχρεούνται να συμμορφώνονται όσον το δυνατό καλύτερα με κανόνες όπως [15], [21]:

- Η παραγωγή να καλύπτει την ζήτηση (φορτίο) συν τις απώλειες
- Οι τάσεις των ζυγών να παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων (ανοχή $\pm 5\%$, δηλαδή από 0.95 pu έως 1.05 pu)
- Οι γεννήτριες πρέπει να λειτουργούν εντός συγκεκριμένων ορίων πραγματικής και άεργης ισχύος
- Οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές πρέπει να μην υπερφορτώνονται

Η διαδικασία πρόβλεψης του φορτίου είναι ζωτικής σημασίας για ένα ΣΗΕ, καθώς εξασφαλίζει την ομαλή διαχείριση του συστήματος και αυξάνει την αξιοπιστία του. Πιο συγκεκριμένα, οι μελέτες ενεργειακής ροής έχουν μεγάλη σημασία για τον τωρινό και μελλοντικό σχεδιασμό αλλά και την επέκταση των συστημάτων ισχύος, όπως και για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας των υφιστάμενων συστημάτων. Επιπρόσθετα, η ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται, για την εκτίμηση της ομαλής λειτουργίας ενός συστήματος, όταν τεθούν εκτός μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς, για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαφόρων συνθηκών φόρτισής του, καθώς και για τον υπολογισμό των απαραίτητων αρχικών συνθηκών του, που απαιτούνται για τη διενέργεια μελετών βραχυκυκλωμάτων και μεταβατικής ευστάθειας. Από οικονομικής άποψης, είναι σημαντική η διενέργεια οικονομικού προγραμματισμού της λειτουργίας των μονάδων. Στόχος είναι να σχεδιαστεί ο βέλτιστος τρόπος που οι μονάδες παραγωγής θα ενταχθούν στο δίκτυο και πόση ισχύ θα παράγουν [22]. Μία πιθανή πρόβλεψη χαμηλότερων τιμών του φορτίου από τις πραγματικές έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα υποεκτίμησης της απαραίτητης εφεδρείας στο σύστημα, το οποίο παράλληλα οδηγεί και σε υψηλότερο κόστος λειτουργίας, καθώς είναι αναγκαία η χρήση πιο δαπανηρών μονάδων για να καλυφθεί η αιχμή της ζήτησης. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων πρόβλεψης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το κόστος παραγωγής του συστήματος. Αναφορικά με την ασφάλεια, μία ακριβής πρόβλεψη του φορτίου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μία έγκαιρη προειδοποίηση των χειριστών για πιθανές έντονες διακυμάνσεις της ζήτησης, ώστε οι τελευταίοι να προβούν σε ανάλογες ενέργειες για την αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων.

Για τη δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου ανάλυσης ροής φορτίου, είναι απαραίτητη η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος μέσω εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές είναι κατάλληλα διαμορφωμένες για κάθε ζυγό του συστήματος και η επίλυσή τους γίνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι είναι οι: Gauss – Seidel και Newton – Raphson.

3.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

Θεωρούμε έναν ζυγό i ενός συστήματος n ζυγών. Σε αυτόν το ζυγό συνδέονται γεννήτριες που τροφοδοτούν μιγαδική ισχύ, φορτία που καταναλώνουν μιγαδική ισχύ και γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν εκτός του ζυγού μιγαδική ισχύ. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο στάδιο της μελέτης ροής φορτίου, ανήκει στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση. Για κάθε ζυγό ισχύει ότι η ισχύς της παραγωγής ισούται με το άθροισμα της ισχύος του φορτίου του ζυγού και της ισχύος που απομακρύνεται από το ζυγό μέσω γραμμών μεταφοράς. Δηλαδή για έναν ζυγό i η ισχύς που παράγεται, S_{G_i} , ισούται με την ισχύ που καταναλώνεται άμεσα στο ζυγό αυτό, S_{L_i} , και την ισχύ που μεταφέρεται εκτός του ζυγού, μέσω των γραμμών μεταφοράς, S_{T_i} .

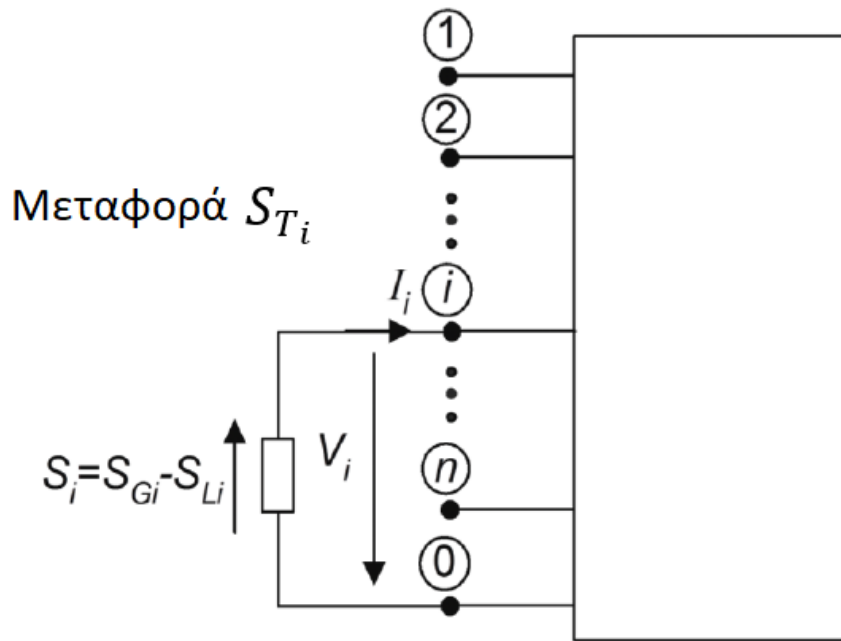
Τα παραπάνω συνδέονται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.1 [15].

$$S_{G_i} = S_{L_i} + S_{T_i} \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Από τρεις ισχύς που περιγράφονται στην Εξίσωση 3.1, η ισχύς παραγωγής (S_{G_i}) και του φορτίου (S_{L_i}) είναι γνωστές για κάθε ζυγό, ενώ η ζητούμενη είναι η ισχύς που μεταφέρεται από τον ζυγό αυτό (S_{T_i}).

Επιπλέον, η καθαρή ισχύς είναι η διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, δηλαδή ως εξής:

$$S_i = S_{G_i} - S_{L_i} \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$



Εικόνα 3.1 Παράσταση συστήματος n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου

Η Εικόνα 3.1 απεικονίζει τον κάθε ζυγό i σε σύνδεση με το δίκτυο [15]. Κάθε αριθμημένος ακροδέκτης δηλώνει ένα ζυγό του δικτύου. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ανάλυση ροής φορτίου n ζυγών χρησιμοποιούν τη μέθοδο των κόμβων και γράφονται ως εξής [15], [26]:

$$I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Όπου,

- I_{bus} το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε ζυγούς διαστάσεων $n \times 1$
- Y_{bus} ο πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών, διαστάσεων $n \times n$
- V_{bus} το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών οι οποίοι μετριοούνται ως προς το ζυγό αναφοράς, διαστάσεων $n \times 1$

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y_{bus} προέρχεται από την αντιστροφή του πίνακα αντιστάσεων Z_{bus} . Αρχικά, η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της αντίστασης, επομένως $Y = \frac{1}{Z}$ ανεξαρτήτως του πίνακα. Ο όρος Y_{bus} , στη διαγώνιο του, δηλαδή στα στοιχεία Y_{ii} , έχει το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται σε κάθε ζυγό i . Σε κάθε άλλη θέση του πίνακα Y_{ij} , έχει την αρνητική αγωγιμότητα μεταξύ ζυγού i και j , δηλαδή το $-\frac{1}{Z_{ij}}$

Για ένα σύστημα n ζυγών, η εξίσωση στην γενικευμένη μορφή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

για $i = 1, 2, 3 \dots n$.

Η ισχύς στο ζυγό i δίνεται από την εξίσωση:

$$P_i + j * Q_i = V_i * I_i^* \Leftrightarrow I_i = \frac{P_i - j * Q_i}{V_i^*} \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

με $V_i \angle \delta_i$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση της ισχύς $S_i = V_i * I_i^*$ και με βάση τις Εξισώσεις Εξίσωση 3.4 και Εξίσωση 3.5, τότε προκύπτει:

$$P_i - j * Q_i = V_i^* * \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j \Leftrightarrow \sum_{j=1}^n |Y_{ij} * V_j * V_i| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

Τέλος, διαχωρίζοντας την Εξίσωση 3.6 σε πραγματικά και φανταστικά μέρη προκύπτει:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij} * V_j * V_i| \cos (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij} * V_j * V_i| \sin (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$

Οι δυο παραπάνω εξισώσεις αναφέρονται ως στατικές εξισώσεις ροής φορτίου και εκφράζουν το ισοζύγιο της πραγματικής και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις είναι αλγεβρικές, καθώς περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του. Παράλληλα, αποτελούν μη γραμμικές εξισώσεις, όντας δύσκολο να παραχθούν αναλυτικές λύσεις χωρίς τη βοήθεια εξειδικευμένων πληροφορικών συστημάτων [15].

3.3 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών και ζυγών ροής φορτίου

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της προηγούμενης παραγράφου, δίνεται η δυνατότητα διαχωρισμού τόσο των μεταβλητών, όσο και των ζυγών που συναντώνται στο πρόβλημα της ροής φορτίου. Αυτό το βήμα κρίνεται απαραίτητο για τη συνέχεια, καθώς διαχωρίζονται καλύτερα τα δεδομένα και τα ζητούμενα όλων των τμημάτων του δικτύου.

3.3.1 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών

Σε κάθε ζυγό i ενός δικτύου συσχετίζονται οι παρακάτω μεταβλητές: PG_i , QG_i , PL_i , QL_i , $|V_i|$, δ_i . Έτσι, θεωρώντας ένα σύστημα n ζυγών, θα υπάρχουν $6n$ μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το εάν μπορούν ή όχι, να τεθούν υπό τον έλεγχο του χειριστή ενός ΣΗΕ, στις εξής τρεις κατηγορίες [15]:

- Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή Μεταβλητές διαταραχής: είναι οι πραγματικές και οι άεργες καταναλώσεις PL_i , QL_i που δεν γίνεται να τεθούν υπό τον έλεγχο του χειριστή του ΣΗΕ. Είναι εντελώς ακαθόριστες και ο μηχανικός πρέπει να υπολογίζει το μέγεθός τους μέσα από μία πρόβλεψη φορτίου ή μετρήσεις.
- Ελέγξιμες μεταβλητές: είναι οι παραγωγές πραγματικής και άεργου ισχύος PG_i , QG_i που βρίσκονται υπό τον έλεγχο του χειριστή του ΣΗΕ. Οι ελέγξιμες μεταβλητές προσδιορίζονται πριν ή μέσα στο πρόβλημα.
- Μεταβλητές κατάστασης: είναι τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i , οι οποίες επηρεάζονται αλλάζοντας τις μεταβλητές ελέγχου PL_i , QL_i . Ουσιαστικά είναι οι μεταβλητές που η τιμή τους καθορίζεται μέσα από τις ελέγξιμες μεταβλητές.

3.3.2 Κατηγοριοποίηση ζυγών

Ας υποθέσουμε ένα σύστημα n ζυγών. Κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεταβλητές, συνεπώς υπάρχουν συνολικά $6n$ μεταβλητές. Από τις σχέσεις ροής φορτίου (Εξίσωση 3.7 και Εξίσωση 3.8), προκύπτει ότι θα υπάρχουν $2n$ εξισώσεις που θα πρέπει να επιλυθούν. Ωστόσο, επειδή στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να υπάρξει λύση, $4n$ μεταβλητές πρέπει να προκαθοριστούν.

Οι μη ελέγξιμες μεταβλητές PL_i , QL_i μπορούν να θεωρηθούν γνωστές στον χειριστή του ΣΗΕ καθώς προκύπτουν από ιστορικά στοιχεία και μετρήσεις, ενώ από τις υπόλοιπες μεταβλητές, οι δύο ποσότητες θα προκαθορίζονται και οι άλλες δύο θα βρεθούν μέσω της επίλυσης των εξισώσεων. Συνεπώς, απομένουν τέσσερις άγνωστες μεταβλητές ανά ζυγό και εφόσον μιλάμε για n ζυγούς, τότε προκύπτουν αντίστοιχα $4n$ μεταβλητές.

Οι ζυγοί ανάλογα με το ποιες από τις τέσσερις ποσότητες PG_i , QG_i , $|V_i|$, δ_i , προκαθορίζονται, διακρίνονται σε τρεις τύπους [15], [25]:

- Ζυγός αναφοράς (Slack bus): πρόκειται για έναν ζυγό παραγωγής και έχει προκαθορισμένο το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης. Είναι μόνο ένας σε κάθε σύστημα και χρησιμοποιείται ως ζυγός αναφοράς για την κάλυψη της κατάστασης ισορροπίας ισχύος του συστήματος. Έχει συνήθως μέτρο τάσης 1 pu και φυσική γωνία τάσης 0° . Επομένως οι γνωστές μεταβλητές σε αυτό το ζυγό είναι οι $|V_i|$ και δ_i και οι άγνωστες είναι οι PG_i και QG_i . Επίσης μπορούν να υπολογιστούν οι φασικές γωνίες των τάσεων των άλλων ζυγών έχοντας ως αναφορά τη φασική γωνία του ζυγού αναφοράς. Ως ζυγός αναφοράς επιλέγεται συνήθως αυτός με την μεγαλύτερη παραγωγή πραγματικής ισχύος.
- Ζυγός με ελεγχόμενη τάση (Generator bus): Πρόκειται για ζυγό ελέγχου τάσης. Ο ζυγός της συγκεκριμένης κατηγορίας συνήθως συνδέεται με μια γεννήτρια στην οποία η ισχύς εξόδου που παράγεται σε αυτόν το ζυγό μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας τον πρώτο κινητήρα, ενώ η τάση μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας την διέγερση της γεννήτριας. Οι γνωστές μεταβλητές σε έναν ζυγό με ελεγχόμενη τάση είναι η πραγματική ισχύς του ζυγού PG_i , και το μέτρο της τάσης $|V_i|$. Με την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου σ' αυτούς τους ζυγούς υπολογίζεται η άεργος ισχύς QG_i και η γωνία φάσης της τάσης δ_i .

- **Ζυγός φορτίου (Load Bus):** Πρόκειται για έναν ζυγό χωρίς γεννήτρια, όπου δεν υπάρχει παραγωγή και ως εκ τούτου οι τιμές PG_i και QG_i είναι μηδέν. Σε έναν ζυγό αυτής της κατηγορίας υπάρχουν μόνο φορτία και είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ζυγών, μιας και αποτελεί το 85% του συνόλου των ζυγών ενός δικτύου. Οι γνωστές μεταβλητές για αυτό το ζυγό είναι οι PG_i και QG_i και με την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου σε αυτούς τους ζυγούς υπολογίζονται το μέτρο $|V_i|$ και η γωνία φάσης δ_i της τάσης.

Στον Πίνακα 3.1 παρατίθεται μία σύνοψη των τριών τύπων ζυγών με τις αντίστοιχες μεταβλητές που θεωρούνται δεδομένες ή πρέπει να υπολογιστούν.

Πίνακας 3.1: Κατηγορίες ζυγών στην ανάλυση ροής φορτίου

Τύπος Ζυγού	Προκαθορισμένες Μεταβλητές	Μεταβλητές προς Υπολογισμό
Ζυγός Αναφοράς	$ V_i = 1 \text{ pu},$ $\delta_i = 0,$ PL_i, QL_i	PG_i, QG_i
Ζυγός Φορτίου	$PG_i = 0,$ $QG = 0,$ PL_i, QL_i	$ V_i , \delta_i$
Ζυγός με Ελεγχόμενη Τάση	$PG_i, V_i ,$ PL_i, QL_i	QG_i, δ_i

3.4 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι μη γραμμικές. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δεν είναι εφικτό να έχουν αναλυτικές λύσεις. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική την ανάγκη εφαρμογής αριθμητικών λύσεων που μπορούν εύκολα να παραχθούν με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Κατά καιρούς έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές για επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων. Στη συνέχεια, περιγράφονται δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως στις μελέτες της ροής φορτίου. Πρόκειται

για τις μεθόδους Gauss - Seidel (G-S) και Newton – Raphson (N-R). Ο τρόπος με τον οποίο οι παραπάνω τεχνικές προσεγγίζουν το πρόβλημα της επίλυσης των στατικών εξισώσεων είναι η επαναληπτική διαδικασία, πραγματοποιώντας μία αρχική εκτίμηση της λύσης την οποία βελτιώνουν σε κάθε επαναληπτική εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου.

3.4.1 Μέθοδος Gauss – Seidel

Η δυσκολία επίτευξης μιας λύσης για τη ροή φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στις δυσκολίες που υπάρχουν αναφορικά με τον τύπο των δεδομένων για τα διάφορα είδη ζυγών. Δεν είναι πρακτική μία λύση μέσω της διατύπωσης των εξισώσεων που να ταιριάζει με τον αριθμό των άγνωστων μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

Οι λύσεις των προβλημάτων ροής φορτίου μέσω υπολογιστικών πακέτων, ακολουθούν μια επαναληπτική διαδικασία καθορίζοντας τις εκτιμώμενες τιμές στις άγνωστες τάσεις των ζυγών και υπολογίζοντας για κάθε τάση ζυγού μια νέα τιμή από τις εκτιμώμενες. Με τον συγκεκριμένο τρόπο υπολογισμού, προκύπτει ένα νέο σύνολο τιμών για την τάση σε κάθε ζυγό, το οποίο και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ακόμα ενός άλλου συνόλου τάσεων. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι αλλαγές σε κάθε ζυγό να είναι μικρότερες από μία προκαθορισμένη τιμή [23].

Για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου με την μέθοδο Gauss-Seidel χρησιμοποιείται η μιγαδική μορφή των εξισώσεων. Αρχικά, όλες οι εξισώσεις που περιγράφουν τους ζυγούς του συστήματος εκτός αυτής του ζυγού αναφοράς, απαιτείται να μετασχηματιστούν σε εξίσωση της παρακάτω μορφής:

$$I_i = \frac{P_i - j * Q_i}{V_i^*} = Y_{ii} * V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \quad \text{για } i = 2, 3, \dots, n \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Συνεπώς:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - j * Q_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \right] \quad \text{για } i = 2, 3, \dots, n \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

Στον αλγόριθμο Gauss - Siedel, η Εξίσωση 3.10 χρησιμοποιείται για την εύρεση των τελικών ζυγών τάσεων χρησιμοποιώντας διαδοχικά βήματα επαναλήψεων καταλήγοντας στην ακόλουθη μορφή:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(v)}}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(v+1)} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(v)} \right] \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

για $i = 2, 3, \dots, n$

Για έναν ζυγό ελέγχου τάσης, όπου το Q_i είναι άγνωστο, με την βοήθεια της Εξίσωσης 3.8, προκύπτει:

$$Q_i^{(v)} = V_i^{(v)} \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(v)} \sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \theta_{ij}) \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

Όπου γνωρίζοντας την τιμή Q_i , μπορεί να υπολογιστεί και η τιμή $V_i^{(v+1)}$, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της $Q_i^{(v+1)}$ κ.ο.κ.

Πρόκειται για μία σχετικά απλή επαναληπτική μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου. Χαρακτηρίζεται από ταχύτητα στην εκτέλεση, ωστόσο συγκλίνει αργά, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αποκλίσεις σε μεγάλα συστήματα, ενώ ο προγραμματισμός της απαιτεί τη χρήση μιγαδικών αριθμών. Αρχικά χρησιμοποιούταν ευρέως, ωστόσο στη συνέχεια λόγω της απόκλισης που έδιναν οι λύσεις της αντικαταστάθηκε από άλλες πιο ακριβείς μεθόδους όπως είναι η Newton – Raphson που αναλύεται στην επόμενη ενότητα [24].

3.4.2 Μέθοδος Newton – Raphson

Η μέθοδος Newton – Raphson αποτελεί μία από τις καλύτερες επαναληπτικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου. Η μέθοδος Newton – Raphson είναι ευρέως διαδεδομένη για την επίλυση μεγάλων συστημάτων παρόλο που χρειάζεται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με την Gauss - Siedel και οι μαθηματικές πράξεις που απαιτούνται είναι πολύπλοκες. Βάση της μεθόδου αυτής, αποτελούν τα αναπτύγματα της σειράς Taylor [27]. Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι πως συγκλίνει το ίδιο γρήγορα είτε για μικρά είτε για μεγάλα συστήματα με πολλούς ζυγούς. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο Newton – Raphson είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθεί η μιγαδική μορφή των εξισώσεων ροής

φορτίου όπως γίνεται στην Gauss – Seidel διότι στην προκειμένη μερικές παράγωγοι μιγαδικών μεταβλητών δεν υπάρχουν. Συνεπώς, είναι υποχρεωτική η χρήση της πραγματικής μορφής των εξισώσεων [15].

Η μέθοδος Newton – Raphson αποτελείται από τα εξής βήματα: Αρχικά, ορίζεται ο πίνακας Y_{bus} , ο οποίος είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου. Σε ένα σύστημα με n ζυγούς, απαιτούνται $n-1$ εξισώσεις, ώστε να υπάρξουν αποτελέσματα για τον ζυγό αναφοράς. Στη συνέχεια, ορίζονται αρχικές τιμές για τις τάσεις V_i καθώς και για τις γωνίες δ_i των ζυγών φορτίου και ελέγχου τάσης. Η πραγματική ισχύς P_i καθώς και η άεργη ισχύς Q_i των ζυγών υπολογίζονται από τις Εξισώσεις Εξίσωση 3.7 και Εξίσωση 3.8, αντίστοιχα.

Κάνοντας χρήση των αναπτυγμάτων της σειράς Taylor για τις Εξισώσεις Εξίσωση 3.7 Εξίσωση 3.8, σχετικά με την αρχική εκτίμηση λαμβάνεται το ακόλουθο σύνολο γραμμικών εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J3 \\ J2 & J4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$

όπου, $J1, J2, J3, J4$ είναι τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι διαφορές πραγματικής και άεργης ισχύος ΔP και ΔQ , αντίστοιχα.

$$\Delta P_{i(v)} = P_{i,spec} - P_{i(v)} \quad \text{με } i = 2, 3, \dots, n \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

$$\Delta Q_{i(v)} = Q_{i,spec} - Q_{i(v)} \quad \text{με } i = 2, 3, \dots, n \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

Οι τιμές $P_{i,spec}$ και $Q_{i,spec}$ είναι οι προκαθορισμένες τιμές πραγματικής και άεργου ισχύος στον ζυγό i , ενώ οι τιμές $P_{i(v)}$ και $Q_{i(v)}$ θα υπολογιστούν από τις αντίστοιχες εξισώσεις.

Πραγματοποιείται έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου. Αν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα. Σε αντίθετη περίπτωση, προχωρά σε επόμενη επανάληψη ($v+1$), μετατρέποντας το σύστημα των εξισώσεων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J3 \\ J2 & J4 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 3.16}$$

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 3.17}$$

Επομένως, η νέα τάση του ζυγού i θα είναι:

$$|V_i|^{(v+1)} = |V_i|^{(v)} + \Delta |V_i|^{(v)} \quad \text{Εξίσωση 3.18}$$

$$\delta_i^{(v+1)} = \delta_i^{(v)} + \Delta \delta_i^{(v)} \quad \text{Εξίσωση 3.19}$$

Αφού υπολογιστούν οι νέες τιμές των τάσεων και των γωνιών μέσω των εξισώσεων Εξίσωση 3.18 και Εξίσωση 3.19, αντίστοιχα, η μέθοδος επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρις ότου να επιτευχθεί σύγκλιση.

Τέλος, μετά τη σύγκλιση, θα μπορούν να υπολογιστούν η πραγματική ισχύς P (Εξίσωση 3.7), η άεργος ισχύς Q (Εξίσωση 3.8), οι ροές φορτίου στις γραμμές καθώς και οι απώλειες του συστήματος.

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι ότι η εφαρμογή της δεν είναι πάντοτε εφικτή, καθώς η λύση ενδέχεται να ταλαντώνεται, χωρίς να συγκλίνει. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτός ο περιορισμός, η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιείται αρχικά μέσω της μεθόδου Gauss – Seidel, και μετά από μερικές επαναλήψεις του, συνεχίζεται μέσω της μεθόδου Newton – Raphson [24].

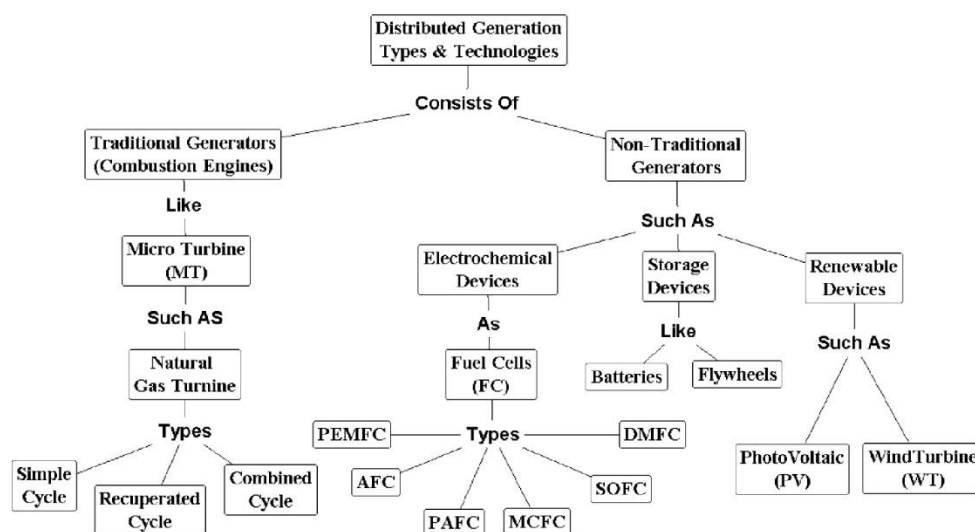
Κεφάλαιο 4 - Διεσπαρμένη Παραγωγή

4.1 Εισαγωγή

Το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο εξελίσσεται δραστικά, οδηγούμενο από τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη για ένα πιο ανθεκτικό και ασφαλές σύστημα ενέργειας. Παραδοσιακά, το κυρίαρχο μοντέλο παραγωγής ενέργειας ήταν το λεγόμενο Κεντρικό Μοντέλο, όπου μεγάλες αποδοτικές μονάδες παράγουν ηλεκτρισμό και τον διανέμουν στους καταναλωτές μέσω δικτύων μεταφοράς και διανομής. Ωστόσο, με την προσέγγιση αυτή, πολλά θέματα και προκλήσεις παραμένουν ανοιχτά προς βελτίωση/επίλυση, συμπεριλαμβανομένων της ανεπάρκειας ενέργειας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, της ευαισθησίας σε διακοπές και της περιορισμένης πρόσβασης στον ηλεκτρισμό σε απομακρυσμένες περιοχές. Ως απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, έχει εμφανιστεί η έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής ως εναλλακτική λύση.

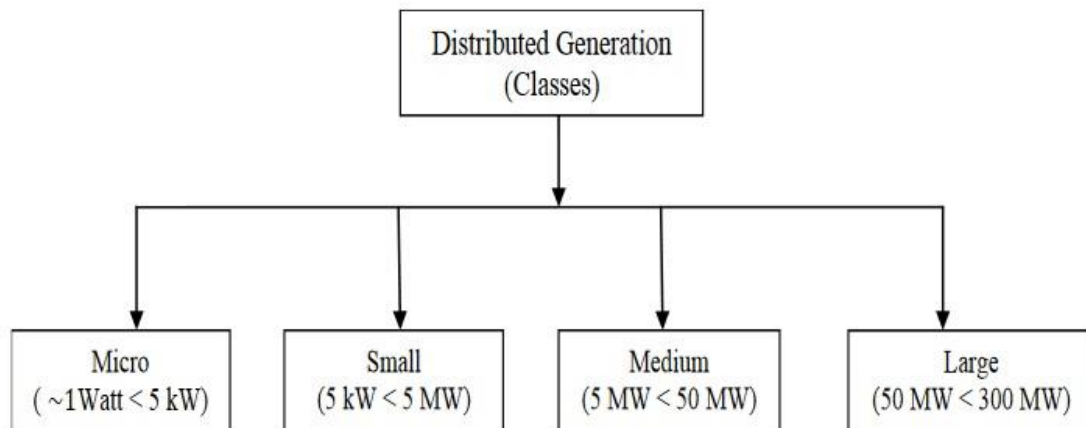
4.2 Ορισμός Διεσπαρμένης παραγωγής

Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ) (Distributed Generation-DG) ορίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές μικρής κλίμακας που είτε συνδέονται με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υποβοηθώντας και συμπληρώνοντας τις παραδοσιακές μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας, είτε λειτουργούν απομονωμένα και αυτόνομα. Οι πηγές ΔΠ μπορεί να είναι ανανεώσιμες όπως ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, βιομάζα κ.α. ή μη ανανεώσιμες όπως ντίζελ, φυσικό αέριο, μικροστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμου κ.α. καθώς και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (Εικόνα 4.1) [28]. Η ΔΠ αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία και με άλλους όρους όπως Αποκεντρωμένη Παραγωγή (Decentralized Generation) στην Ευρώπη και Ασιατικές χώρες, Διανεμημένη Παραγωγή (Dispersed Generation) στη Βόρεια Αμερική και Ενσωματωμένη Παραγωγή (Embedded Generation) στις Αγγλοαμερικανικές χώρες [29].



Εικόνα 4.1: Είδη και τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής [28]

Στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν διάφοροι ορισμοί της έννοιας ΔΠ ανάλογα με το μέγεθος των μονάδων. Η IEEE ορίζει ως ΔΠ την παραγωγή ηλεκτρισμού από μονάδες οι οποίες είναι μικρότερες από τις κεντρικές μονάδες παραγωγής έτσι ώστε να επιτρέπεται η διασύνδεση τους σχεδόν σε οποιοδήποτε σημείο ενός ΣΗΕ [30]. Το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (Electric Power Research Institute) ορίζει τη ΔΠ ως μονάδες παραγωγής ενέργειας έως 50MW. Το Ινστιτούτο Έρευνας Αερίου (Gas Research Institute) ως μονάδες χωρητικότητας μεταξύ 25kW και 25MW. Το Διεθνές Συμβούλιο για Μεγάλα Ηλεκτρικά Συστήματα (Conseil International des Grands Réseaux Electriques – CIGRE) ως μονάδες παραγωγής με μέγιστη χωρητικότητα από 50MW έως και 100MW οι οποίες συνήθως συνδέονται στο σύστημα διανομής ενέργειας. Παρόμοιες διαφορές του ορισμού υπάρχουν και μεταξύ διαφορετικών χωρών. Στην Αγγλία, ο όρος ΔΠ χρησιμοποιείται για μονάδες μικρότερες των 100MW. Στη Σουηδία, ΔΠ ορίζεται συχνά ως μονάδες έως 1500kW. Παρ' όλ' αυτά, η νομοθεσία τους επιτρέπει παραδείγματος χάριν 100 ανεμογεννήτριες των 1500kW να θεωρούνται κι αυτές ΔΠ καθώς λαμβάνει υπόψη κάθε μονάδα ξεχωριστά και όχι ως σύνολο [29]. Σύμφωνα με το μέγεθος τους λοιπόν, οι Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ) κατατάσσονται ως Πολύ Μικρές (~1 Watt < 5kW), Μικρές (5kW < 5MW), Μεσαίες (5MW < 50 MW) και Μεγάλες (50MW < 300MW) (Εικόνα 4.2) [32].



Εικόνα 4.2: Κατάταξη Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

4.3 Στόχοι και κριτήρια χωροθέτησης των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η ένταξη της ΔΠ σε ένα δίκτυο φέρει μία πληθώρα πλεονεκτημάτων τα οποία μπορεί να είναι τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντολογικής φύσεως. Είναι σημαντικό για την αξιοποίηση αυτών των πλεονεκτημάτων να επιλέγεται η κατάλληλη θέση ένταξης των ΜΔΠ στο δίκτυο. Μία επιλογή μη κατάλληλης θέσης ένταξης των ΜΔΠ, μπορεί οδηγήσει σε αντίθετα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα. Συνεπώς, η χωροθέτηση των μονάδων, δηλαδή ο καθορισμός των ζυγών στους οποίους θα συνδεθεί μία ΜΔΠ, επηρεάζει σημαντικά την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου διανομής και των ΣΗΕ. Η βέλτιστη χωροθέτηση μπορεί, αν όχι να μεγιστοποιήσει, να αυξήσει κατά πολύ την απόδοση του δικτύου και εξαρτάται από τους στόχους τους οποίους θέλει να επιτύχει ο σχεδιαστής του συστήματος. Οι στόχοι αλλά και τα κριτήρια επιλογής θέσης μπορεί να είναι [30],[31],[32]:

➤ Τεχνικοί, όπως:

- Μείωση των απωλειών ενέργειας στο δίκτυο: Όταν στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς διέρχεται ρεύμα, αναπτύσσεται θερμότητα η οποία αποτελεί απώλεια ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ρεύματος ή η ωμική αντίσταση των γραμμών, τόσο μεγαλώνουν και οι απώλειες. Μεγαλύτερο φορτίο και μεγάλες αποστάσεις των γραμμών μεταφοράς συνεπάγονται αύξηση των απωλειών ενέργειας. Συνεπώς, η

τοποθέτηση κατάλληλα διαστασιολογημένων ΜΠΔ κοντά στα φορτία, συμβάλει στη μείωση των απωλειών καθώς δεν απαιτείται μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

- Βελτίωση των προφίλ τάσεων στους ζυγούς του συστήματος: Η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο δύναται να μειώσει τις διακυμάνσεις της τάσης στους ζυγούς του συστήματος. Καθώς οι ΜΠΔ παρέχουν ενεργό ισχύ κοντά στο φορτίο ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση, μειώνεται η ισχύς που απαιτείται από τους σταθμούς διανομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη ένταση ρεύματος, να μειώνονται οι απώλειες άρα να είναι και μικρότερες οι πτώσεις τάσης κατά μήκος κάποιων γραμμών του συστήματος, επιτρέποντας έτσι στους ζυγούς του συστήματος να διατηρούν τάσεις εντός των επιτρεπτών ορίων ($0.95p_u < V < 1.05p_u$).
- Βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου διανομής ενέργειας: Οι ΜΠΔ ενεργούν ως εφεδρεία σε περίπτωση σφαλμάτων ή υψηλής ζήτησης ενέργειας, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις τάσης είναι συχνές ή η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη.
- Εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος: Επιτυγχάνεται συνεχής παροχή ενέργειας ακόμη και σε περιπτώσεις όπου κάποια κεντρική μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας, εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας στους καταναλωτές οποιαδήποτε στιγμή.

➤ Οικονομικοί, όπως:

- Μείωση του κόστους και κατά συνέπεια μεγιστοποίηση των κερδών αναβαθμίζοντας και επεκτείνοντας την υπάρχουσα δομή του συστήματος χωρίς να χρειάζεται επανασχεδιασμός του συστήματος, αυξάνοντας παράλληλα τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Αναβάλλεται έτσι η αναβάθμιση στοιχείων όπως οι μετασχηματιστές, οι γραμμές μεταφοράς κ.λπ. στις περιπτώσεις που αυξάνεται η ζήτηση του φορτίου.
- Εξοικονόμηση του κόστους ορυκτών καυσίμων. Η μείωση των απωλειών ενέργειας εξοικονομεί καύσιμα καθώς οι μονάδες παραγωγής ενέργειας

μειώνουν τη λειτουργία τους. Επιπλέον, το κόστος αυτό μηδενίζεται εφόσον η παραγωγή βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

➤ Περιβαντολογικοί, όπως:

- Μείωση εκπομπών ρύπων με την ένταξη μονάδων ανανεώσιμης ενέργειας καθώς η παραδοσιακή παραγωγή ενέργειας είναι υπεύθυνη για το 40% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, προστατεύοντας έτσι το περιβάλλον και συμβάλλοντας στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.
- Διατήρηση των φυσικών πόρων καθώς μειώνεται η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, είτε λόγω μείωσης των απωλειών ενέργειας είτε λόγω χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

➤ Συνδυασμός μερικών ή όλων των παραπάνω στόχων

4.4 Μέθοδοι χωροθέτησης των ΜΔΠ

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων και για την εύρεση της βέλτιστης θέσης χωροθέτησης των ΜΔΠ, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες μέθοδοι, οι κυριότερες εκ των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια και απεικονίζονται στην Εικόνα 4.3 [31],[33],[34].



Εικόνα 4.3: Μέθοδοι Χωροθέτησης των ΜΠΔ

4.4.1 Εμπειρικές/απλές μέθοδοι

Μέθοδος των δύο τρίτων (2/3). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον εμπειρικό κανόνα που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση πυκνωτών σε ένα σύστημα διανομής. Η ΜΔΠ τοποθετείται στα 2/3 της απόστασης από τον κοντινότερο υποσταθμό. Πρόκειται για μία λύση η οποία δεν θα είναι βέλτιστη, αλλά προσέγγιση αυτής [35].

Οι Molina-Moreno, I., Medina, A., & Cisneros-Magana, R [36] προτείνουν μία μέθοδο χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου για τη μείωση των απωλειών ενέργειας. Το αιολικό τοποθετείται σε κάθε ζυγό του συστήματος, υπολογίζονται και καταγράφονται οι απώλειες μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου και τέλος, επιλέγεται ο ζυγός με τις μικρότερες απώλειες.

4.4.2 Αριθμητικές Μέθοδοι

Οι αριθμητικές μέθοδοι βασίζονται σε μαθηματική ανάλυση και προγραμματισμό. Δεν καταλήγουν απαραίτητα σε λύση αλλά σε μία προσέγγιση αυτής και μπορεί να χρειαστεί να γίνουν παραδοχές όπως το ότι το πρόβλημα είναι γραμμικό ή να χρειαστεί να αναζητούν εξαντλητικά όλες τις λύσεις έως ότου βρεθεί η βέλτιστη. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους είναι οι εξής:

➤ Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)

Στις εργασίες των Keane, A., & O'Malley, M. [37],[38] χρησιμοποιείται ο γραμμικός προγραμματισμός για την εύρεση της βέλτιστης θέσης στο δίκτυο από άποψη επένδυσης κεφαλαίου, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη διείσδυση της ΔΠ και η μέγιστη ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από μία περιοχή.

➤ Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. (Non Linear Programming)

Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στο [39] από τους Atwa, Y. M., & El-Saadany, E. F. για τη χωροθέτηση πολλαπλών αιολικών μονάδων για τη μείωση απωλειών ενέργειας. Στο [40] χρησιμοποιήθηκε από τους El-Khattam, W., Hegazy, Y. G., & Salama, M. M. A. για το πρόβλημα της σχεδίασης του δικτύου διανομής για τη συνολική μείωση του κόστους του συστήματος.

➤ Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)

Πρόκειται για μία αποτελεσματική μαθηματική μέθοδο για τη μελέτη και βελτιστοποίηση πολυ-επίπεδων σειριακών προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Στο [41] των Khalesi, N., Rezaei, N., & Haghifam, M. R. επιλέχτηκε η μέθοδος του Δυναμικού προγραμματισμού για τη χωροθέτηση ΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των απωλειών, στη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου αλλά και στη βελτίωση του προφίλ των τάσεων. Δεν είναι κατάλληλη μέθοδος για συνθήκες δυναμικού φορτίου.

➤ Αναζήτηση Κλίσης (Gradient Search)

Χρησιμοποιήθηκε στο [42] από τους Rau, N. S., & Wan, Y.-H. για τη μείωση των απωλειών αλλά και του φορτίου σε συγκεκριμένες γραμμές και ζυγούς.

➤ Εξαντλητική Μέθοδος (Exhaustive Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος προτάθηκε από τους Khan, H., & Choudhry, M. A. [43] και από τους Zhu, D., Broadwater, R. P., Tam, K. S., Seguin, R., &

Asgeirsson, H. [44] για την μείωση των απωλειών ισχύος, της πτώσης τάσης και τη βελτίωση της αξιοπιστίας για σταθερά αλλά και μεταβλητά φορτία.

4.4.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι για τη βέλτιστη χωροθέτηση των ΜΠΔ βασίζονται σε θεωρητικές υπολογιστικές σχέσεις και μαθηματική ανάλυση για να καθορίσουν τη θέση των μονάδων, βάσει ορισμένων κριτηρίων και στόχων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών που περιγράφουν τις γραμμές ενός δικτύου διανομής ενέργειας. Παράγουν μία αριθμητική εξίσωση η οποία εξετάζεται στη συνέχεια ώστε να βελτιστοποιηθεί. Είναι κατάλληλες για την εύρεση της βέλτιστης λύσης, εξασφαλίζοντας τη σύγκλιση του προβλήματος σε σύντομο χρόνο υπολογισμού. Μερικά παραδείγματα αναλυτικών μεθόδων είναι:

- Τύπος Ακρίβειας Απωλειών (Exact Loss Formula)

Αναλυτική μέθοδος που χρησιμοποιείται από τους Acharya, N., Mahat, P., & Mithulanathan, N. [45] για την ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ισχύος στο σύστημα. Ενσωματώνει την ακριβή σχέση μεταξύ των απωλειών δικτύου με τη σωστή τοποθέτηση και το μέγεθος των ΜΔΠ.

- Παράγοντας Ευαισθησίας Απωλειών (Loss Sensitivity Factor)

Υπολογίζει την ευαισθησία των απωλειών ισχύος στην εισαγωγή ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος. Η μέθοδος εκτελείται για κάθε ζυγό του συστήματος και τελικά επιλέγεται ο ζυγός με το μεγαλύτερο παράγοντα ευαισθησίας απωλειών (Hung, D. Q., Mithulanathan [48]). Στο [46] προτάθηκε από τους Gözel, T., & Hocaoglu, M. H. ένα παράγωγο της LSF για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί άλγεβρα πινάκων χωρίς να απαιτεί πίνακες αγωγιμοτήτων (YBUS), αντιστάσεων (ZBUS) και την Ιακωβιανή Μήτρα.

- Βελτιωμένη Αναλυτική Μέθοδος (Improved Analytical)

Προτάθηκε από τους Hung, D. Q., & Mithulananthan, N. [47],[48] για την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Λαμβάνει υπόψη την ενεργό και άεργο ισχύ καθώς και το βέλτιστο συντελεστή ισχύος των ΜΔΠ.

4.4.4 Μετα/Ευριστικές

Πρόκειται κυρίως για τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης εμπνευσμένες από τη φύση. Συγκεκριμένα, προσομοιώνουν φυσικά φαινόμενα καθώς και την ευφυή συμπεριφορά και συλλογική νοημοσύνη ζώων και εντόμων, όταν αυτά αλληλοεπιδρούν είτε μεταξύ τους, είτε με το περιβάλλον τους. Μερικές από τις μεθόδους που εφαρμόζονται είναι:

- Αποικία Τεχνητής Μέλισσας (Artificial Bee Colony)

Πρόκειται για μία τεχνική εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά που εμφανίζουν σμήνη μελισσών τα οποία έχουν ευφυή χαρακτηριστικά αναζήτησης τροφής. Χρησιμοποιείται από τους Aybike Seker, A., & Hakan Hocaoglu, M. [49] με συνάρτηση στόχου την ελαχιστοποίηση των απωλειών συστήματος για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Μία τροποποιημένη μέθοδος προτάθηκε από τους Ghambari, S., & Rahati, A. [50] για την βελτίωση της αργής ταχύτητας σύγκλισης που έχει ο αρχικός αλγόριθμος.

- Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization)

Μία μέθοδος εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά των μυρμηγκιών που βρίσκουν το συντομότερο μονοπάτι στην αναζήτηση φαγητού [51]. Ο αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών που προτείνεται από τους Wang, L., & Singh, C. στο [52], χρησιμοποιείται για τη χωροθέτηση ΜΠΔ βελτιώνοντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία του συστήματος.

- Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)

Είναι μία μέθοδος εμπνευσμένη από κοινωνικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν σμήνη πουλιών. Στο [53] οι Prakash, D. B., & Lakshminarayana, C. Αξιοποιούν τον αλγόριθμο σμήνους σωματιδίων για τη χωροθέτηση

πολλαπλών ΜΔΠ με στόχο τη μείωση των απωλειών ισχύος. Στο [54] των Merzoug, Y., Abdelkrim, B., & Larbi, B. για την τοποθέτηση ανεμογεννήτριας σε ακτινικό δίκτυο διανομής για τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος. Μία βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων προτάθηκε από τους Abass, M. Abido, M. Al-Muhaini and M. Khalid στο [55] για την ελαχιστοποίηση απωλειών και τη μεγιστοποίηση κερδών.

➤ Εύρεσης Κούκου (Cuckoo Search)

Η αναζήτηση κούκου είναι ένας αλγόριθμος εμπνευσμένος από την παρασιτική συμπεριφορά των Κούκων όταν επιλέγουν φωλιές άλλων πουλιών για να γεννήσουν τα αυγά τους. Χρησιμοποιούνται στα [56],[57] των Moravej, Z., & Akhlaghi, A. και των Buaklee, W., & Hongesombut, K. αντίστοιχα, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών πραγματικής ισχύος και για τη διατήρηση των τιμών της τάσης των ζυγών του δικτύου μέσα στα επιτρεπτά όρια.

➤ Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm)

Είναι ένας αλγόριθμος εμπνευσμένος από τη βιολογία που χρησιμοποιεί χρωμοσώματα κατασκευασμένα από γονίδια για τη διαστασιολόγηση και χωροθέτηση ΜΔΠ. Η καλύτερη δυνατή λύση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας όρια διασταύρωσης και τελεστές μετάλλαξης. Στη βιβλιογραφία προτείνεται ο Γενετικός αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, τη βελτίωση της αξιοπιστίας, για την ενίσχυση του προφίλ τάσεων (Borges, C. L. T., & Falcão, D. M. [58]) αλλά και προτείνεται από τους Soroudi, A., & Ehsan, M. για τη χρονική μετάθεση στο μέλλον μιας αναγκαίας αναβάθμισης και οικονομικής επένδυσης στο υπάρχον δίκτυο [59].

Οι Μετα/Ευριστικές τεχνικές μπορούν να παρέχουν λύσεις για μεγάλα και περίπλοκα συστήματα είτε ακτινικά, είτε βρογχοειδή. Είναι αποτελεσματικές, μπορεί όμως η λύση που παρέχουν να μην είναι η βέλτιστη αλλά μία προσέγγιση αυτής. Επιπλέον, συνήθως

απαιτούν αρκετούς υπολογιστικούς πόρους, κάτι το οποίο όμως δεν είναι απαραίτητα κρίσιμο σε εφαρμογές τοποθέτησης ΔΠ.

4.4.5 Υβριδικές

Οι υβριδικές μέθοδοι συνδυάζουν μία ή περισσότερες τεχνικές από την ίδια αλλά και από διαφορετικές κατηγορίες μεθόδων επίλυσης. Απλοποιούν το πρόβλημα κάνοντας έτσι την υλοποίηση ευκολότερη, δεν συστήνονται όμως για μεγάλο αριθμό μονάδων ΔΠ και υπάρχει πιθανότητα ανακρίβειας αποτελέσματος. Μία υβριδική μέθοδος Αποικίας Μυρμηγκιών και Αποικίας Τεχνητής Μέλισσας χρησιμοποιήθηκε από τους Kefayat, Milad & Lashkar Ara, Afshin & Nabavi, Ali. [60] για τη μείωση των απωλειών, των εκπομπών ρύπων, το συνολικό κόστος της ενέργειας και τη βελτίωση της σταθερότητας της τάσης. Στο [61] των Moradi, M. H., & Abedini, M. χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός Σμήνους Σωματιδίου και Γενετικού Αλγορίθμου. Στο [62] χρησιμοποιούνται από τους Kansal, S., Kumar, V., & Tyagi, B. αλγόριθμοι από διαφορετικές κατηγορίες. Μία αναλυτική μέθοδος για τη διαστασιολόγηση των ΜΠΔ και ο αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων για τη χωροθέτηση τους στο σύστημα.

Κεφάλαιο 5 - Ανεμογεννήτριες

5.1 Αιολική ενέργεια

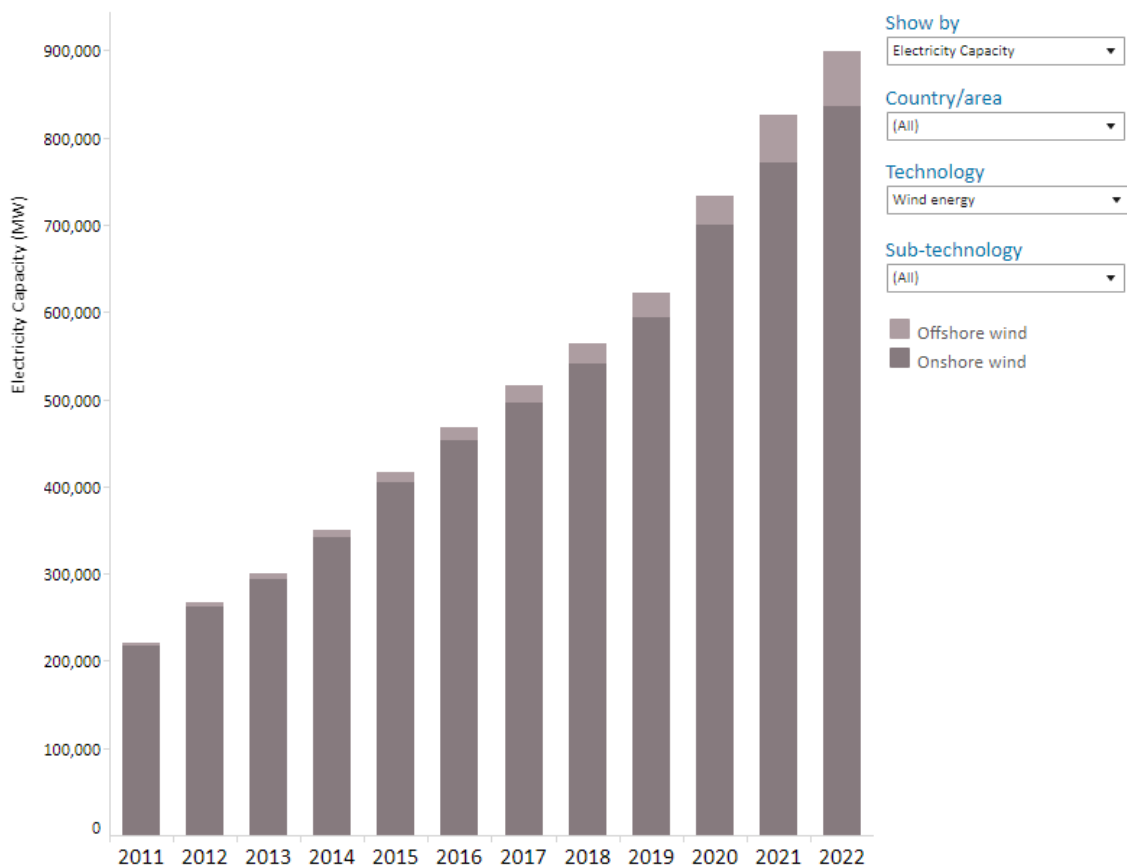
Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας, οι οποίες οφείλονται στις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο. Οι ταχύτητες του ανέμου διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και ποικίλλουν σημαντικά με την εποχή και την ημέρα. Για να θεωρηθεί μια περιοχή κατάλληλη για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (μετρούμενη 10m από το έδαφος της γης) να είναι μεγαλύτερη από 4 m/s.

Παράλληλα, εξαιτίας του έντονου προβληματισμού για την μείωση των αποθεμάτων συμβατικών μορφών ενέργειας (πετρέλαιο, γαιάνθρακας κ.α.), οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ήλιος, αέρας, υδρογόνο κ.α.) καταλαμβάνουν ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα η αιολική ενέργεια να εξελιχθεί σαν μία από τις βασικότερες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Φαίνεται μάλιστα πως παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αδιαμφισβήτητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους στο εγγύς μέλλον. Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σήμερα. Ένας τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η χρήση ανεμογεννητριών, οι οποίες, όπως θα δούμε και στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, μετατρέπουν την ενέργεια που περιέχεται στον αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια που χρησιμοποιείται σήμερα προέρχεται κυρίως από χερσαίες ανεμογεννήτριες, όμως υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, μιας και ο άνεμος είναι ισχυρότερος στη θάλασσα παρά στην ξηρά.

Στα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας, συγκαταλέγεται το χαμηλό κόστος, μιας και ο άνεμος είναι ένα αγαθό που παρέχεται σε αφθονία και δωρεάν. Επιπλέον, δεν μολύνει το περιβάλλον και βοηθά στην μείωση της κατανάλωσης των ορυκτών πόρων [63].

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα, το βασικότερο πρόβλημα της αιολικής ενέργειας είναι πως ο άνεμος έχει περιοδικά διακοπτόμενη ένταση, γεγονός που οδηγεί σε κενά στην παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπρόσθετα, τα καταλληλότερα σημεία εγκατάστασης ανεμογεννητριών είναι συνήθως σε απομακρυσμένες και δύσβατες περιοχές, αυξάνοντας το κόστος εγκατάστασης και συντήρησής τους. Τέλος, ένα ακόμη μειονέκτημα αποτελεί η παραγωγή θορύβου από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών.

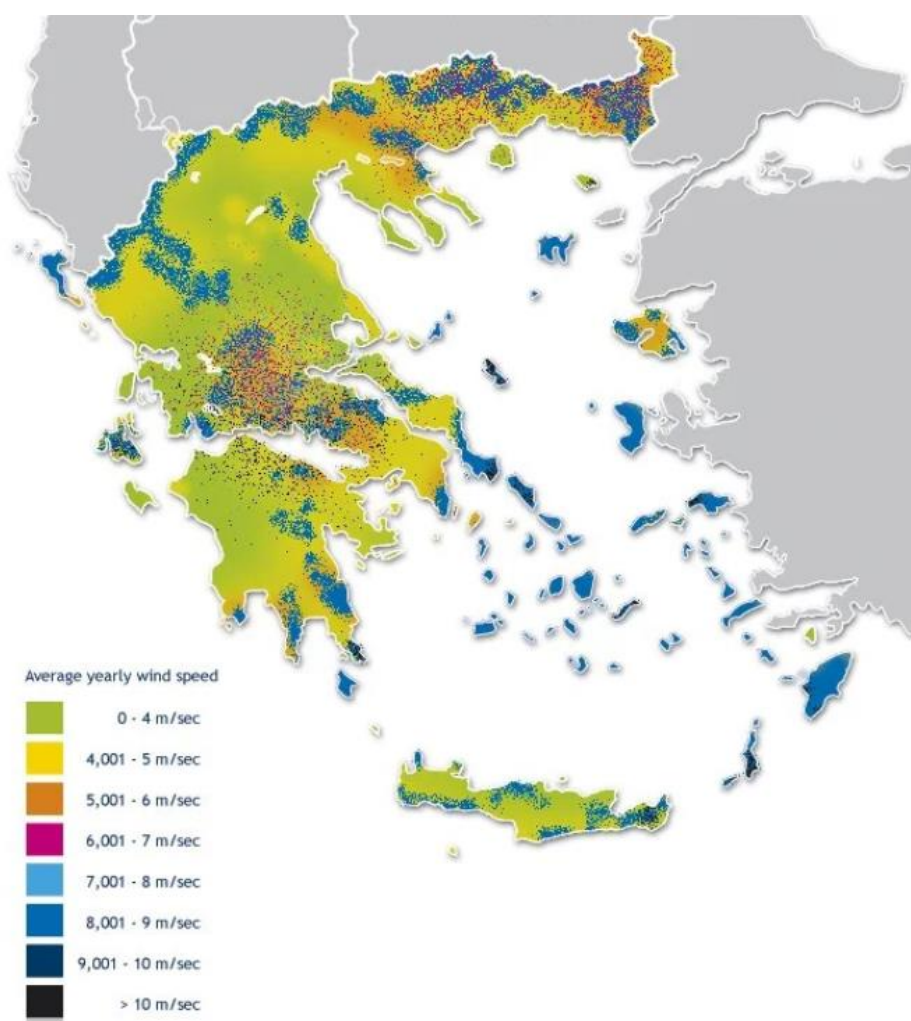
Η παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί ραγδαία τις δύο τελευταίες δεκαετίες, από 7.5 GW το 1997 σε 900 GW το 2022, σύμφωνα με τα στοιχεία από το International Renewable Energy Agency (IRENA). Στην Εικόνα 5.1 απεικονίζεται η παγκόσμια εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας τα τελευταία 10 χρόνια σύμφωνα με το IRENA [64].



Εικόνα 5.1: Παγκόσμια εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας [64]

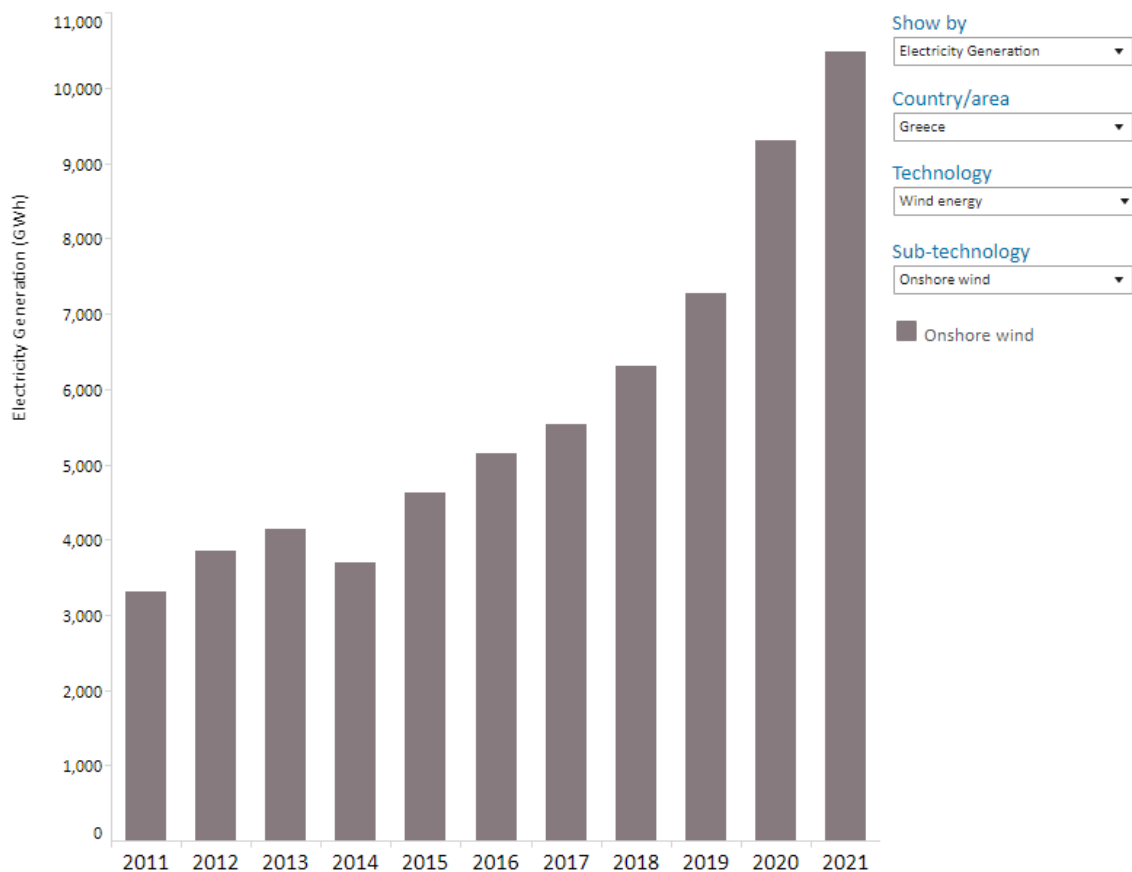
5.2 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Στη χώρα μας, η συνολική παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι ικανή να καλύψει ένα μεγάλο ποσοστό των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι έρευνες και οι προσπάθειες για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα ξεκίνησε τη δεκαετία του '80 μέσω της ΔΕΗ, ενώ συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Βασικό προνόμιο της χώρας μας αποτελούν οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως σε περιοχές, όπως τα νησιά του Αιγαίου, η Κρήτη, οι Κυκλάδες, τα νησιά του Ιονίου με έμφαση στην περιοχή της Κεφαλονιάς, η νότια Εύβοια, η νοτιοανατολική Πελοπόννησο καθώς και η Θράκη, καθιστώντας τη δημιουργία και εγκατάσταση αιολικών πάρκων απαραίτητη. Η Εικόνα 5.2 απεικονίζει τις περιοχές της Ελλάδας όπου λόγω της μεγάλης μέσης ετήσιας ταχύτητας των ανέμων μπορεί να αξιοποιηθεί η αιολική ενέργεια. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, τέτοιες περιοχές είναι κυρίως τα νησιά του Αιγαίου και η Κρήτη.



Εικόνα 5.2: Σχέση μεγέθους ανεμογεννητριών και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ετήσια συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προερχόμενη από τα αιολικά πάρκα παρουσιάζει ανοδική πορεία την τελευταία δεκαετία, φτάνοντας το 2021 σε ύψος 15.5 GWh. Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh) στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια. Η ανοδική πορεία των τελευταίων ετών δικαιολογείται καθώς η κατασκευή ανεμογεννητριών αποτελεί αντικείμενο προσιτό για την μεταλλοβιομηχανία μας χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες πρόσθετες επενδύσεις. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, στη χώρα μας υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας αιολικών πάρκων συνολικής ισχύος 3000MW, με δυνατότητα κάλυψης περίπου του 30% των συνολικών αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 5.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh) στην Ελλάδα ανά έτος

Ειδικότερα για το 2022, η αιολική ισχύς έφτασε τα 4.681,4 MW, το οποίο προκύπτει από την ετήσια Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα που ανακοίνωσε η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ). Παράλληλα, κατά το 2022 συνδέθηκαν στο δίκτυο 68 νέες ανεμογεννήτριες συνολικής αποδιδόμενης ισχύος 230 MW

που αντιστοιχούν σε επενδύσεις συνολικού ύψους άνω των 230 εκατ. ευρώ, το οποίο αποτελεί αύξηση 5,2% σε σχέση με το τέλος του 2021.

Αναφορικά με την γεωγραφική κατανομή των αιολικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα για το έτος 2022, σε επίπεδο Περιφερειών, η Στερεά Ελλάδα παραμένει στην κορυφή των αιολικών εγκαταστάσεων αφού φιλοξενεί 1.872 MW (40%) και ακολουθεί η Πελοπόννησος με 639 MW (14%) και η Ανατολική Μακεδονία – Θράκη όπου βρίσκονται 534 MW (11%) (Εικόνα 5.4) [65].



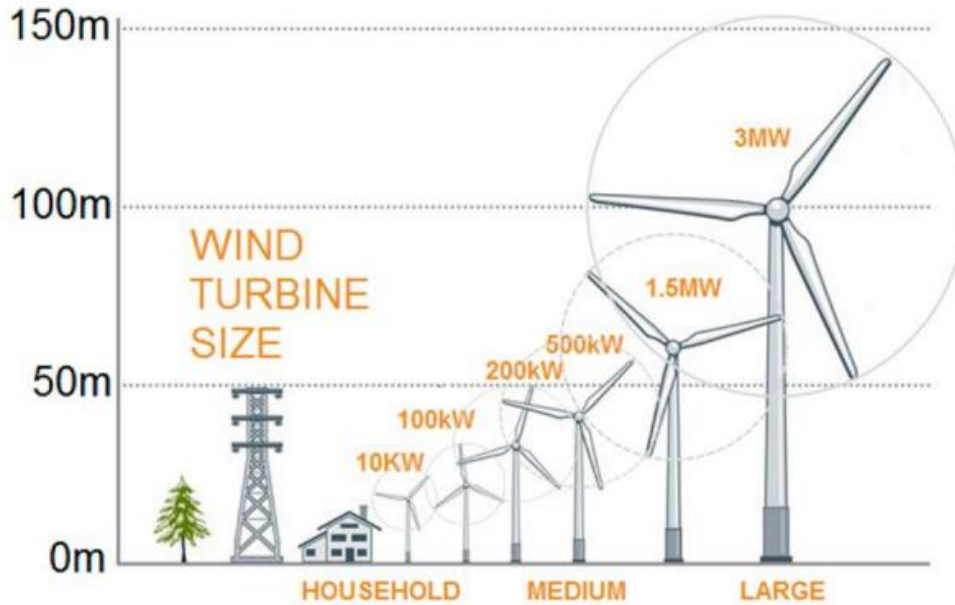
Εικόνα 5.4: Γεωγραφική κατανομή αιολικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα το 2022 [65]

5.3 Βασικά στοιχεία ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της περιστροφής του άξονα των πτερυγίων, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Στο δεύτερο στάδιο, πραγματοποιείται μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το παραγόμενο από τις ανεμογεννήτριες ηλεκτρικό ρεύμα είτε καταναλώνεται επιτόπου, είτε διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να καταναλωθεί αλλού. Σε περιπτώσεις όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες, υπερβαίνει της ζήτηση, συνήθως αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. Η διαδικασία της αποθήκευσης πραγματοποιείται με δύο τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές μονάδες. Η άντληση ύδατος με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες και η αποθήκευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό, είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλη.

Παρόλο που η αύξηση των ανεμογεννητριών τα τελευταία χρόνια είναι μεγάλη, υπάρχουν ακόμα ανοιχτά ζητήματα και προκλήσεις. Καθώς οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας και έχουν οικονομικά πλεονεκτήματα, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία τάση για αύξηση του τυπικού μεγέθους των ανεμογεννητριών [67]. Το μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας μετριέται σε kilowatt και διατίθεται σε διάφορα μεγέθη. Οι μικρότερες ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως μέγεθος μικρότερο από 100 kilowatt και συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλους εξοπλισμούς παραγωγής ενέργειας όπως γεννήτριες, μπαταρίες κ.λπ. Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες κυμαίνονται συνήθως από 100 kilowatt έως αρκετά megawatt και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μεμονωμένα είτε με τη μορφή αιολικών πάρκων. Στην Εικόνα 5.5, παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στο μέγεθος των ανεμογεννητριών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 5.5: Σχέση μεγέθους ανεμογεννητριών και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες εμφανίζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στον τρόπο λειτουργίας τους ανάλογα με τη σχεδίαση τους και την κατασκευή τους. Κατά καιρούς, έχουν προταθεί πολλές διατάξεις ανεμογεννητριών, ανάλογα και με την τεχνολογική πρόοδο, τις κατασκευαστικές ικανότητες και τις απαιτήσεις της αντίστοιχης περιόδου.

Η βασική διάκριση στις ανεμογεννήτριες γίνεται ανάλογα με τον άξονα περιστροφής, σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT) και σε ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα VAWT (Vertical Axis Wind Turbine - VAWT). Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα χρησιμοποιούνται κυρίως για οικιακές εφαρμογές, όπου ο όγκος παραγωγής είναι χαμηλός και η απόδοση είναι βέλτιστη, ενώ οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα χρησιμοποιείται για μεγαλύτερο όγκο παραγωγής.

5.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWTs) αποτελούν το πιο συνηθισμένο είδος ανεμογεννήτριας. Έχουν παρόμοιο σχεδιασμό με έναν ανεμόμυλο καθώς τα πτερύγιά τους μοιάζουν με έλικα που περιστρέφεται στον οριζόντιο άξονα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της Γης και συνήθως παράλληλα και με την διεύθυνση του ανέμου. Αυτού του τύπου οι

ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, σε αντίθεση με τους ανεμόμυλους που έχουν περισσότερα. Μία ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα απεικονίζεται στην Εικόνα 5.6.

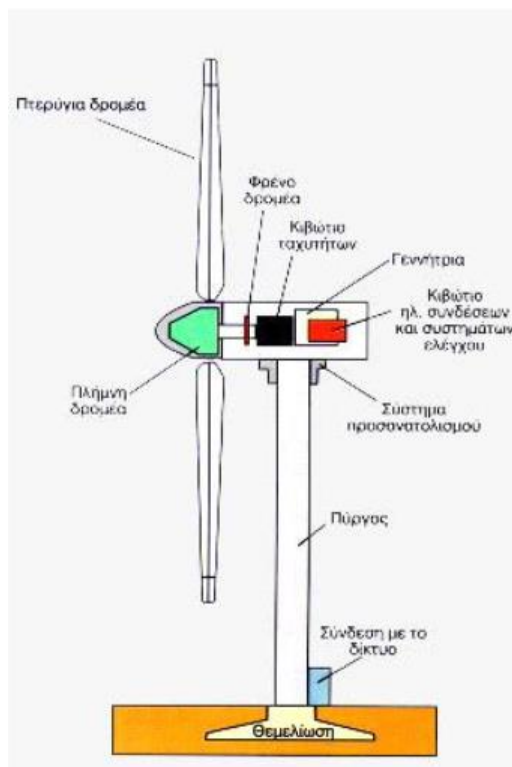


Εικόνα 5.6: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη (Εικόνα 5.7):

- Το δρομέα ή ρότορα, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια είναι τοποθετημένα σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.
- Την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας και μέσα στη νασέλα.
- Το σύστημα προσανατολισμού, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Τον πύργο, ο οποίος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.

- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί και συντονίζει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας εξασφαλίζοντας την απρόσκοπτη λειτουργία της.



Εικόνα 5.7: Συστατικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες αυτής της κατηγορίας πρέπει πάντα να είναι στραμμένες προς τη σωστή κατεύθυνση, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αποτελεσματικότητα. Για το σκοπό αυτό, οι μεγάλες οριζόντιες ανεμογεννήτριες συνήθως διαθέτουν αισθητήρες ανέμου για τον σωστό προσανατολισμό τους, ενώ στις μικρότερες, ο σωστός προσανατολισμός επιτυγχάνεται με τη χρήση ανεμοδείκτη. Ένα χαρακτηριστικό των πτερυγίων αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Οι περισσότερες διαθέτουν κινητήρα και μετρητή εκπομπής. Ο μετρητής εκτροπής διασφαλίζει την ακριβή κατεύθυνση του ανέμου, ενώ ο κινητήρας εκτροπής κινεί τον στρόβιλο για να διασφαλίσει ότι είναι πάντα τοποθετημένος στη σωστή θέση. Το σχήμα των λεπίδων είναι πολύ σημαντικό για τον έλεγχο του στρόβιλου. Πρέπει να έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ο δρομέας να περιστρέφεται με σωστό τρόπο.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποιώντας τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Απαιτούν εγκατάσταση

μεγάλου πύργου και λεπίδας, καταλαμβάνοντας περισσότερο χώρο σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που θα δούμε στη συνέχεια. Τα καταλληλότερα μέρη για εγκατάσταση είναι ακτές θαλασσών και κορυφές βουνών.

Οι οριζόντιες ανεμογεννήτριες είναι δημοφιλείς επιλογές ως πηγές ενέργειας σήμερα εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους. Αρχικά, βασικό πλεονέκτημα αποτελεί η θέση των λεπίδων, η οποία καθιστά την ανεμογεννήτρια σταθερή. Επιπλέον, η μεταβλητή κλίση των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται για την οριζόντια ανεμογεννήτρια, προσφέρει τη δυνατότητα συλλογής της μέγιστης ποσότητας ενέργειας από τον άνεμο. Επιπρόσθετα, η χρήση υψηλών πύργων λειτουργεί ευνοϊκά στην αξιοποίηση ισχυρότερων ανέμων, το οποίο με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, σε μια οριζόντια ανεμογεννήτρια επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση, καθώς έχει τις λεπίδες κάθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου και ως εκ τούτου λαμβάνει περισσότερη ισχύ για περιστροφή.

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν να κάνουν με το μέγεθος τους και το κόστος της επένδυσης. Υπάρχει μεγάλη δυσκολία κατά τη μεταφορά τους, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους που τις διακρίνει. Απαιτείται αρκετό προσωπικό για τη μεταφορά και εγκατάστασή τους, ενώ παράλληλα το κόστος της εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό. Τέλος, το κόστος συντήρησης είναι ιδιαίτερα αυξημένο σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα [66],[67],[68].

5.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT)

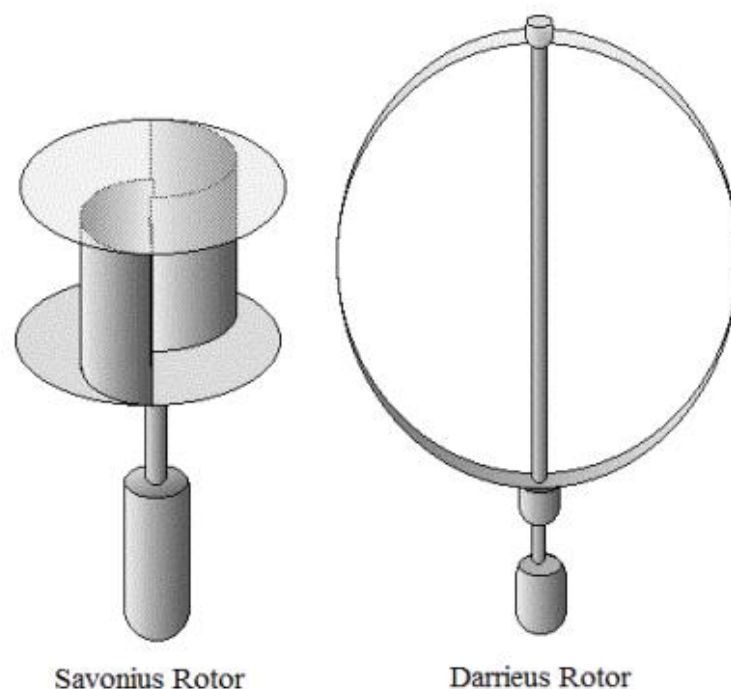
Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μπορούν να εκμεταλλευτούν το άνεμο ανεξάρτητα από τη κατεύθυνση του ανέμου. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως δεν απαιτείται η ρύθμιση του δρομέα με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου με μηχανισμό εκτροπής. Οι ανεμογεννήτριες αυτές αυτής της κατηγορίας περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα που είναι κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου, παράγουν ενέργεια με χαμηλή ταχύτητα ανέμου και λειτουργούν κοντά στο έδαφος. Το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος. Η λειτουργία τους κοντά στο έδαφος, επιτρέπει την τοποθέτηση εξοπλισμού με μεγάλο βάρος, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια, κοντά στο επίπεδο του εδάφους και όχι σε ένα θάλαμο.

Εφόσον οι άνεμοι είναι χαμηλότεροι κοντά στο έδαφος παράγεται χαμηλότερη ισχύς [67],[68]. Μία ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα απεικονίζεται στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Υπάρχουν δύο βασικά είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα, οι Savonius και οι Darrieus. Οι Savonius λειτουργούν όπως ένας τροχός νερού που χρησιμοποιεί δυνάμεις έλξης. Μία ανεμογεννήτρια αυτής της κατηγορίας αποτελείται από δύο ημι-κύλινδρους τοποθετημένους σε έναν κατακόρυφο άξονα, ο οποίος έχει το σχήμα S σε κάτοψη. Οι Darrieus λειτουργούν με λεπίδες όπως οι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων έχει αυγοειδές σχήμα και απαιτείται μία εξωτερική πηγή ενέργειας προκειμένου ξεκινήσει η περιστροφή. Η διαφορά αυτών των δυο εκτός από τον σχεδιασμό τους είναι ότι οι Savonius ξεκινάνε πιο εύκολα, είναι φθηνές και αξιόπιστες, ενώ η απόδοσή τους είναι χαμηλή. Αντίθετα οι Darrieus δεν ξεκινάνε τόσο εύκολα αλλά είναι πολύ αποδοτικές. Για αυτό το λόγο έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες που συνδυάζουν πτυχές της Savonius για να έχουν εύκολη εκκίνηση και της Darrieus για να έχουν καλή απόδοση. Στην Εικόνα 5.9, παρουσιάζονται οι δύο τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα.



Εικόνα 5.9: Τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα

Στα πλεονεκτήματα των VAWT συγκαταλέγονται το χαμηλό κόστος, καθώς και η εύκολη εγκατάσταση και συντήρησή τους, εξαιτίας του μικρού μεγέθους και της θέσης τους κοντά στο έδαφος. Δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν χρειάζονται πύργο στήριξης, μέσα σε ένα αιολικό πάρκο μπορούν να κατασκευάζονται σε κοντινές αποστάσεις με αποτέλεσμα να χρειάζονται λιγότερο χώρο εγκατάστασης. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι αθόρυβες, ενώ οι λεπίδες τους είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην απαιτείται σύστημα εκτροπής.

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα των VAWT, το σημαντικότερο είναι πως παράγουν ενέργεια που αντιστοιχεί μόνο στο 50% της απόδοσης των HAWT. Παράγουν εξαιρετικά χαμηλή ροπή εκκίνησης και έχουν προβλήματα δυναμικής σταθερότητας. Επιπλέον, οι λεπίδες τους είναι ευάλωτες λόγω της ευρείας διακύμανσης των εφαρμοζόμενων δυνάμεων σε κάθε περιστροφή. Επίσης, απαιτούν επίπεδη επιφάνεια για την εγκατάστασή τους, σε διαφορετική περίπτωση το κόστος αυξάνεται σημαντικά. Εξαιτίας της χαμηλής αποδοτικότητάς τους, δεν χρησιμοποιούνται για εμπορικούς σκοπούς, παρά μόνο σε έργα χαμηλότερης ισχύος και κατοικίες [66],[67],[68].

5.4 Τύποι Ανεμογεννητριών

Σήμερα, η πρόοδος στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, μας έχει προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες ελέγχου ισχύος των ανεμογεννητριών.

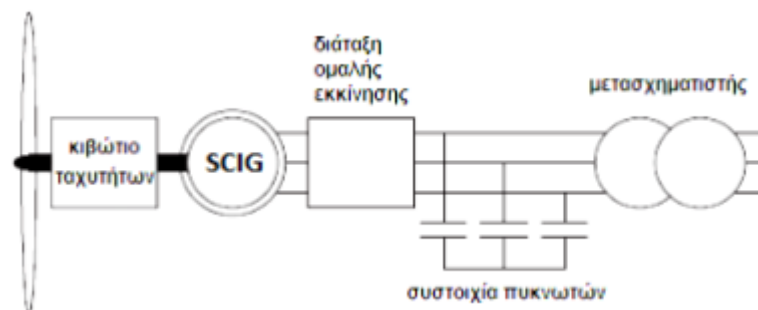
Ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας, τα ηλεκτρονικά ισχύος, τη δυνατότητα ελέγχου ισχύος και ταχύτητας, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν στις εξής τέσσερις κατηγορίες [19],[71]:

- Τύπος 1: Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής
- Τύπος 2: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση
- Τύπος 3: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας
- Τύπος 4: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα

5.4.1 Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής (Τύπος 1)

Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας, μία επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (Squirrel Cage Induction Generator - SCIG) είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω ηλεκτρικού μετασχηματιστή ισχύος. Η τοπολογία επιπλέον χρησιμοποιεί συστοιχίες πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος (η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα καταναλώνει άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία της). Χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων για τη μετατροπή ισχύος από την τουρμπίνα με χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής στο δρομέα της γεννήτριας με υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Τέλος, για την ομαλή εκκίνηση και σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter). Η συγκεκριμένη τοπολογία απεικονίζεται στην Εικόνα 5.10. Ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων και το σχεδιασμό της γεννήτριας [69].

Το πλεονέκτημά τους είναι ότι είναι απλές κατασκευαστικά, στιβαρές, αξιόπιστες και το κόστος των ηλεκτρικών τους μερών είναι χαμηλό. Δεδομένου πως η ταχύτητα είναι σχεδόν σταθερή στην συχνότητα του δικτύου και μη ελέγξιμη, δεν είναι δυνατόν να απορροφήσει την παλλόμενη ενέργεια εξαιτίας του στροβιλισμού του ανέμου. Αυτό αποτελεί και το βασικότερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας, μιας και οι διαταραχές του ανέμου μετατρέπονται σε μηχανικές διαταραχές, γεγονός που οδηγεί σε διαταραχές στην παραγόμενη ισχύ και πιθανή διαταραχή στην τάση του δικτύου. Επιπλέον, δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί η κατανάλωση αέργου ισχύος. Τα παραπάνω κάνουν τις ανεμογεννήτριες αυτής να προτιμώνται λιγότερο σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες των άλλων κατηγοριών [19],[70],[72].



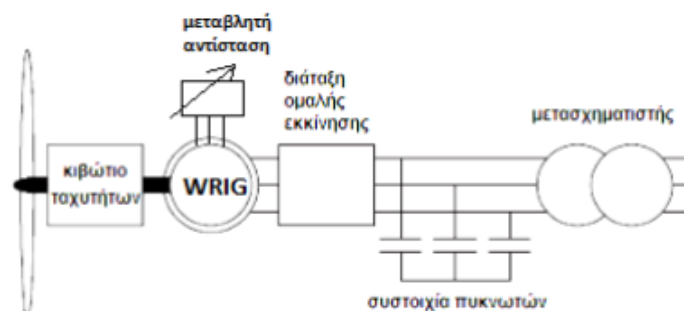
Εικόνα 5.10: Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας

5.4.2 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση (Τύπος 2)

Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για ανεμογεννήτριες μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator - WRIG). Όπως και στον τύπο 1, η γεννήτρια είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ηλεκτρικού μετασχηματιστή ισχύος, χρησιμοποιεί συστοιχίες πυκνωτών για αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και διαθέτει ελεγχόμενο εκκινητή για να μειώσει το ρεύμα εκκίνησης. Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιεί μια ελεγχόμενη αντίσταση, η οποία προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα αντίσταση του δρομέα και της δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ταχύτητα του δρομέα. Το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης, καθορίζει το εύρος της μεταβλητής ταχύτητας από 0 – 10%. Ωστόσο, ένα μέρος της ενέργειας που

εξάγεται από τη μεταβλητή αντίσταση αποβάλλεται ως απώλεια θερμότητας. Η τοπολογία τύπου 2 απεικονίζεται στην Εικόνα 5.11.

Το βασικότερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννητριών αποτελεί το εύρος στροφών λειτουργίας που μπορεί να υποστηρίξει, το οποίο σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας μπορεί να επιτρέψει τη μείωση των διακυμάνσεων στα μηχανικά φορτία και την ισχύ. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το περιορισμένο εύρος ταχύτητας (συνήθως 0 - 10%), το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της πρόσθετης αντίστασης. Παράλληλα, ένα μέρος της ισχύος, καταναλώνεται από την πρόσθετη αντίσταση, ενώ ούτε σε αυτόν τον τύπο ελέγχεται ικανοποιητικά η ενεργός και η άεργος ισχύς. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του αποτελούν μία καλή βάση για την κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας που κυριαρχούν στην αγορά σήμερα [19],[71],[72].



Εικόνα 5.11: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση

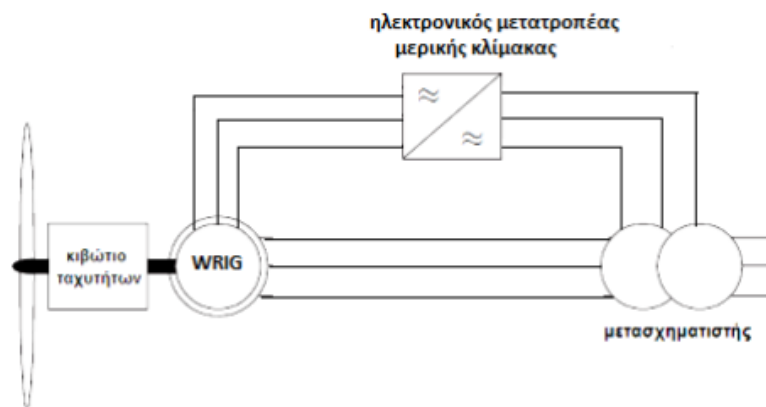
5.4.3 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (Τύπος 3)

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας είναι μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator - DFIG) και μπορεί να ελέγξει την άεργη ισχύ. Χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας με τη χρήση επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG), μέσω σύνδεσης του δρομέα σε ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μερικής κλίμακας. Ο μετατροπέας αυτός εξασφαλίζει την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και την ομαλή

σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο, χωρίς την χρήση ελεγχόμενου εκκινητή και συσκευών χωρητικής αντιστάθμισης. Η τοπολογία τύπου 3 απεικονίζεται στην Εικόνα 5.12.

Με τη συγκεκριμένη τοπολογία παρέχεται η δυνατότητα για ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών στην ταχύτητα του δρομέα σε σχέση με την τοπολογία τύπου 2, με αποτέλεσμα να είναι η δημοφιλέστερη επιλογή στην αγορά. Το συγκεκριμένο εύρος τιμών, εξαρτάται από το μέγεθος του εκάστοτε μετατροπέα. Ένα τυπικό εύρος ταχύτητας είναι από -40% έως +30% της σύγχρονης ταχύτητας. Όταν η γεννήτρια κινείται πιο γρήγορα από τη σύγχρονη ταχύτητα, εκτός από την ισχύ του δικτύου και προέρχεται από τον στάτη της γεννήτριας, υπάρχει και ισχύς μέσω του μετατροπέα. Αντίθετα, όταν η γεννήτρια κινείται πιο αργά από τη σύγχρονη ταχύτητα, η ισχύς του δικτύου προέρχεται τόσο από τους μετατροπείς, όσο και από το δρομέα στον στάτη της γεννήτριας [71].

Το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος επιβαρύνει επιπλέον το κόστος, αυξάνοντας το συνολικό κόστος του συγκεκριμένου τύπου σε σχέση με τους άλλους δύο που αναλύθηκαν παραπάνω. Ωστόσο με την κατάλληλη χρήση μικρότερης κλίμακας μετατροπέων και σε συνδυασμό με συνεχή μείωση των τιμών τους, δυνητικά τείνει να μετατραπεί σε συμφέρουσα λύση [19],[72].



Εικόνα 5.12: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας

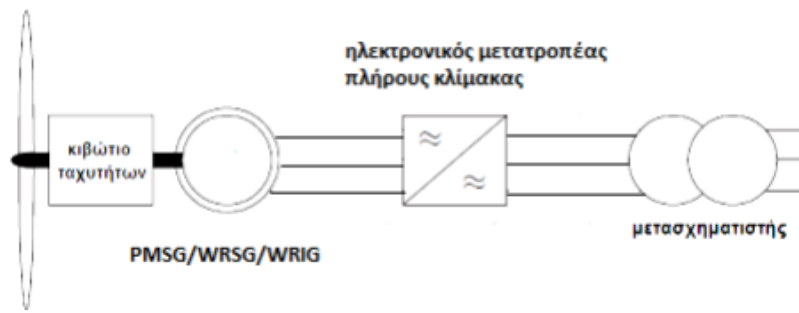
5.4.4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα (Τύπος 4)

Οι ανεμογεννήτριες που ανήκουν σε αυτόν τον τύπο, είναι μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα (Full Converter Wind Turbine - FCWT) και μπορούν να ελέγξουν την άεργη ισχύ μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με την γεννήτρια να είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας, ο οποίος επιτρέπει τον έλεγχο της γεννήτριας σε εύρος έως και 100%. Ο μετατροπέας παρέχει την απαιτούμενη άεργο ισχύ, εξασφαλίζει την ομαλή σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο και επιτυγχάνει τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος καθώς και τον έλεγχο βήματος για τον περιορισμό της ταχύτητας του δρομέα.

Στην τοπολογία αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG), είτε σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator - WRSG), είτε σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG). Η τοπολογία τύπου 3 απεικονίζεται στην Εικόνα 5.13.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου σε σχέση με τους υπόλοιπους έχουν να κάνουν με την καλύτερη απόδοση, την αύξηση της αξιοπιστίας και τον καλύτερο έλεγχο της ισχύος και της ταχύτητας. Επίσης, το κιβώτιο ταχυτήτων είναι πιο απλό στη συγκεκριμένη τοπολογία, ενώ υπό προϋποθέσεις μπορεί να παραληφθεί, οδηγώντας σε μειωμένες απώλειες.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών, έχει να κάνει με το αυξημένο κόστος, εξαιτίας του μετατροπέα ισχύος. Ωστόσο, όπως και στον τύπο 3, η κατάλληλη χρήση μικρότερης κλίμακας μετατροπέων μπορεί να καταστήσει στο εγγύς μέλλον το συγκεκριμένο τύπο ως τον πιο δημοφιλή και προσιτό [19],[72].



Εικόνα 5.13 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα

Οι ανεμογεννήτριες τύπου 3 και τύπου 4 έχουν το κοινό χαρακτηριστικό πως μπορούν είτε να απορροφήσουν είτε να παράγουν άεργη ισχύ. Ως εκ τούτου, κάθε γεννήτρια έχει έναν συντελεστή ισχύος με βάση τον οποίο που μπορεί να ρυθμίζεται δυναμικά προκειμένου να επιτευχθεί έλεγχος ενεργούς και άεργης τάσης ισχύος. Αυτός είναι και ο λόγος που οι συγκεκριμένοι τύποι ανεμογεννητριών είναι και οι πιο ευρέως διαδεδομένοι [73].

Κεφάλαιο 6 - Επιλογή του ζυγού σύνδεσης αιολικού πάρκου βάσει των απωλειών πραγματικής ισχύος

6.1 Το λογισμικό προσομοίωσης PowerWorld Simulator

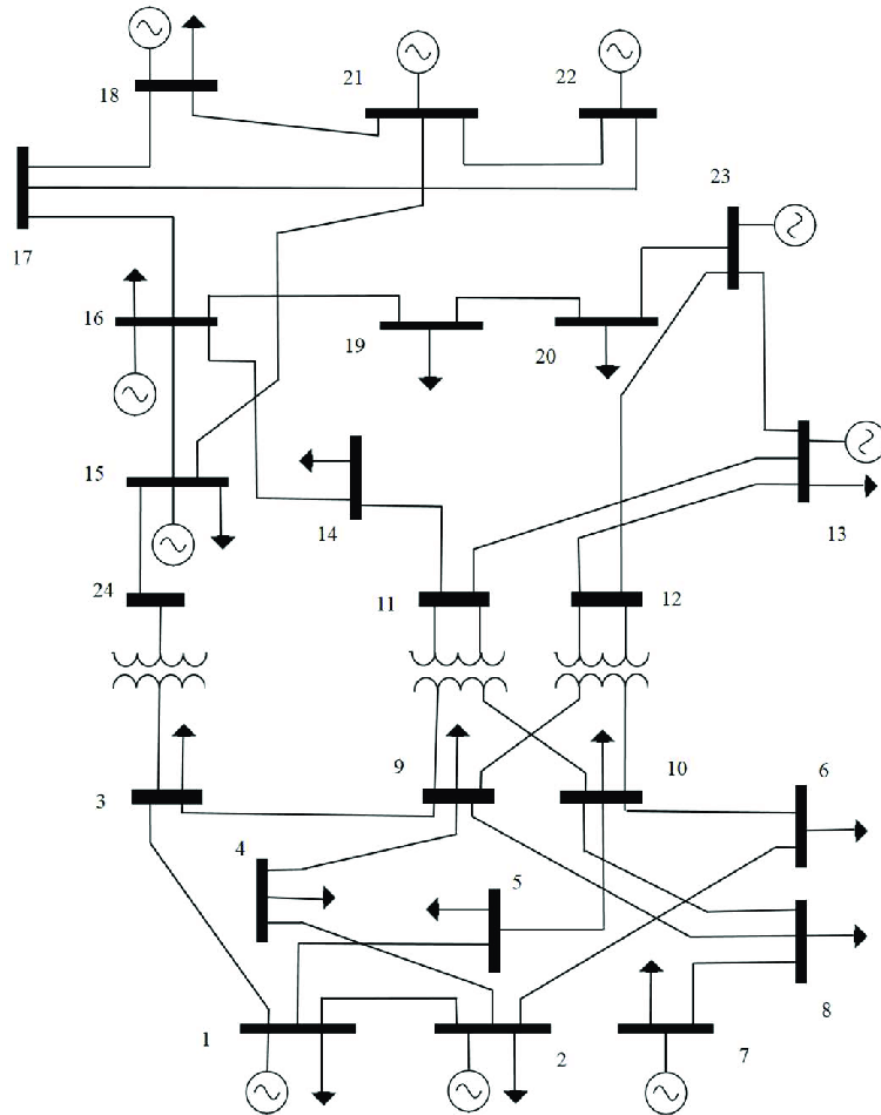
Το PowerWorld είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό στον τομέα της μηχανικής των ΣΗΕ και της μετάδοσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης και ανάλυσης πραγματικού χρόνου που βοηθά τους μηχανικούς και τους ερευνητές να αναλύουν και να μελετούν τα ηλεκτρικά δίκτυα, από μικρά συστήματα διανομής έως μεγάλα και περίπλοκα δίκτυα μετάδοσης. Είναι σχεδιασμένο να είναι φιλικό προς το χρήστη και διαδραστικό. Το λογισμικό περιέχει ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό πακέτο ανάλυσης ροής ισχύος, ικανό να επιλύει αποτελεσματικά συστήματα μεγέθους έως και 250.000 ζυγών. Το βασικό πακέτο περιέχει επίσης όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση οικονομικής κατανομής φορτίου, ανάλυση και μελέτη βραχυκυκλωμάτων, μεταβατικής ευστάθειας, βέλτιστης ροής ισχύος κ.α. Για την παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το PowerWorld Simulator Version 22 Glover, Overbye & Sarma Edition η οποία έκδοση επιτρέπει το σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων έως και 40 ζυγών.

6.2 Το σύστημα 24 ζυγών της IEEE και τα βασικά χαρακτηριστικά του

Το σύστημα 24 ζυγών (Εικόνα 6.1), αναπτύχθηκε από την υποεπιτροπή αξιοπιστίας της IEEE και δημοσιεύτηκε το 1979 ως σημείο αναφοράς για τη δοκιμή διαφόρων μεθόδων ανάλυσης αξιοπιστίας. Το σύστημα υπό μελέτη, αποτελείται από:

- 10 γεννήτριες
- 16 φορτία
- 5 μετασχηματιστές
- 32 γραμμές μεταφοράς

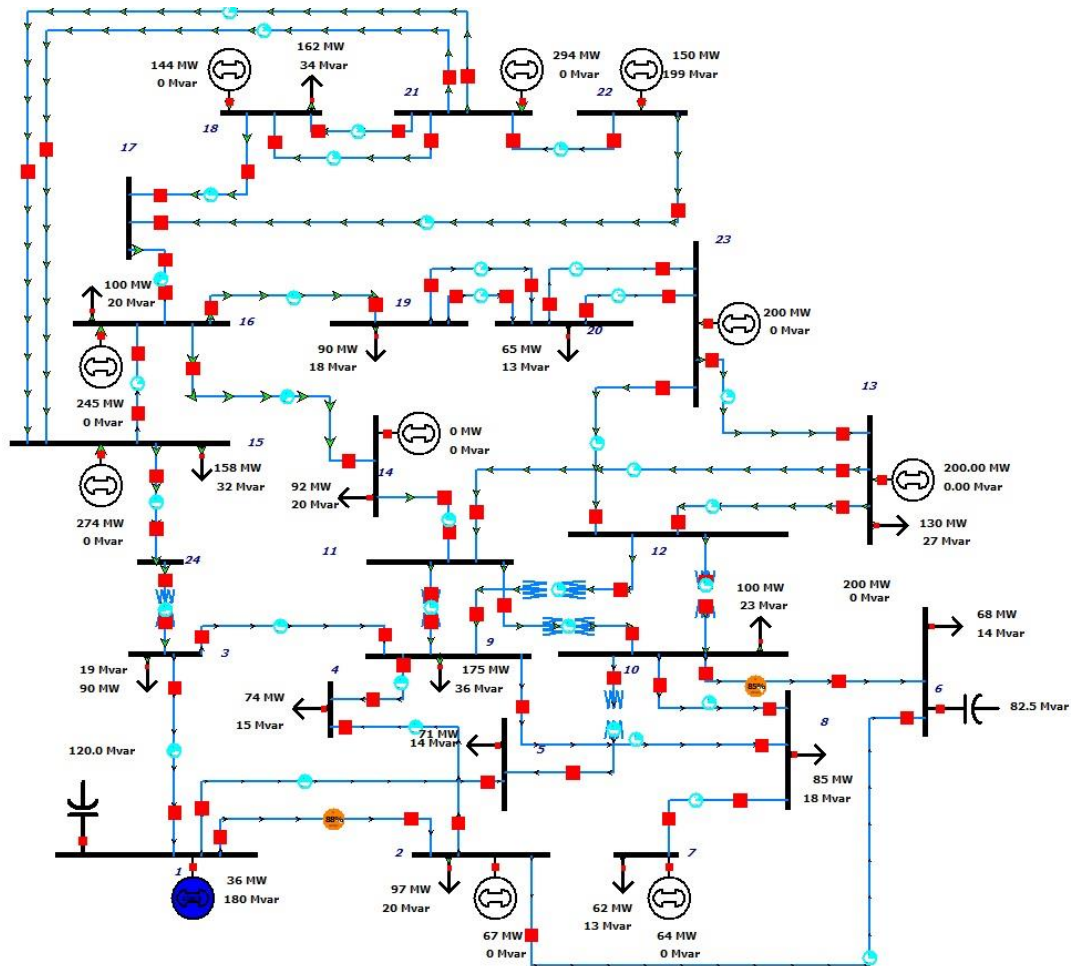
Οι βάσεις τάσης είναι 138 V για τους ζυγούς 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 και 230 V για τους ζυγούς 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24. Ο ζυγός 1 ορίζεται ως ζυγός αναφοράς (slack bus) του συστήματος.



Εικόνα 6.1: Μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος 24 ζυγών

Το σύστημα σχεδιάζεται στο λογισμικό PowerWorld (Εικόνα 6.2). Η ζήτηση του φορτίου είναι 1619 MW και 316 MVar. Το λογισμικό διαθέτει εργαλεία εκτέλεσης ανάλυσης ροής φορτίου και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η Newton-Raphson. Μετά την

ανάλυση ροής φορτίου, είναι διαθέσιμα στο χρήστη δεδομένα απωλειών ισχύος (Εικόνα 6.3) αλλά και οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.2: Το σύστημα 24 ζυγών στο PowerWorld

Case Totals (for in-service de MW	
Load	1619.0
Generation	1673.8
Shunts	0.0
Losses	54.8
Dist Gen	0.0

Εικόνα 6.3: Οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος 24 ζυγών

	Number	Name	Area Name	Monitor	Limit Group	PU Volt	Volt (kV)	Limit Low PU Volt	Limit High PU Volt	Contingency Limit Low PU Volt	Contingency Limit High PU Volt
1	1	1	1	YES	Default	1.00000	138.000	0.90	1.10	0.90	1.10
2	2	2	1	YES	Default	0.99783	137.700	0.90	1.10	0.90	1.10
3	3	3	1	YES	Default	0.86395	119.225	0.90	1.10	0.90	1.10
4	4	4	1	YES	Default	0.88721	122.434	0.90	1.10	0.90	1.10
5	5	5	1	YES	Default	0.92693	127.917	0.90	1.10	0.90	1.10
6	6	6	1	YES	Default	0.90837	125.354	0.90	1.10	0.90	1.10
7	7	7	1	YES	Default	0.79668	109.942	0.90	1.10	0.90	1.10
8	8	8	1	YES	Default	0.80581	185.336	0.90	1.10	0.90	1.10
9	9	9	1	YES	Default	0.83528	115.269	0.90	1.10	0.90	1.10
10	10	10	1	YES	Default	0.88216	121.738	0.90	1.10	0.90	1.10
11	11	11	1	YES	Default	0.83645	192.384	0.90	1.10	0.90	1.10
12	12	12	1	YES	Default	0.84016	193.236	0.90	1.10	0.90	1.10
13	13	13	1	YES	Default	0.83731	192.582	0.90	1.10	0.90	1.10
14	14	14	1	YES	Default	0.83675	192.453	0.90	1.10	0.90	1.10
15	15	15	1	YES	Default	0.88542	203.647	0.90	1.10	0.90	1.10
16	16	16	1	YES	Default	0.86242	198.358	0.90	1.10	0.90	1.10
17	17	17	1	YES	Default	0.89595	206.068	0.90	1.10	0.90	1.10
18	18	18	1	YES	Default	0.90125	207.288	0.90	1.10	0.90	1.10
19	19	19	1	YES	Default	0.85215	195.994	0.90	1.10	0.90	1.10
20	20	20	1	YES	Default	0.84969	195.428	0.90	1.10	0.90	1.10
21	21	21	1	YES	Default	0.91143	209.629	0.90	1.10	0.90	1.10
22	22	22	1	YES	Default	1.00000	230.000	0.90	1.10	0.90	1.10
23	23	23	1	YES	Default	0.85006	195.514	0.90	1.10	0.90	1.10
24	24	24	1	YES	Default	0.85521	196.698	0.90	1.10	0.90	1.10

Εικόνα 6.4: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος

Συνοπτικά, οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος είναι:

$$P_{\text{losses}} = 54.8 \text{ MW}$$

Ο υπολογισμός τους γίνεται αφαιρώντας τα MW της συνολικής παραγωγής των γεννητριών από τα MW της ζήτησης του φορτίου.

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu

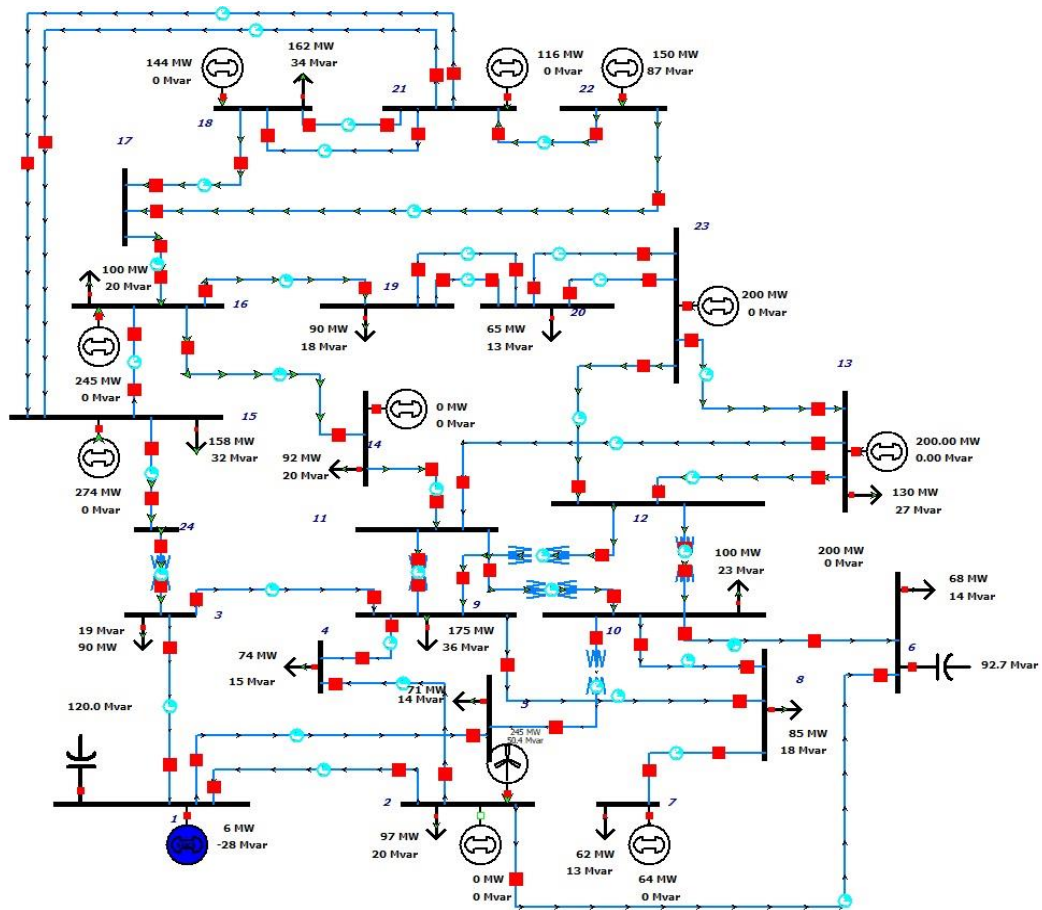
Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8373
2	0.9978	14	0.8368
3	0.8639	15	0.8854
4	0.8872	16	0.8624
5	0.9269	17	0.8959
6	0.9084	18	0.9013
7	0.7967	19	0.8521
8	0.8058	20	0.8497
9	0.8353	21	0.9114
10	0.8822	22	1.0000
11	0.8365	23	0.8501
12	0.8402	24	0.8552

6.3 Επιλογή τοποθεσίας σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου με ποσοστό ενσωμάτωσης 15% του φορτίου

Σε αυτό το σενάριο, το 15% της ζήτησης του φορτίου θα καλυφτεί από ένα Αιολικό Πάρκο τύπου 3 που αντιστοιχεί σε Επαγωγικές Γεννήτριες Διπλής Τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά του πάρκου θα είναι $1619 * 0.15 = 245 \text{ MW}$ και $316 * 0.15 = 50.4 \text{ MVar}$. Το αιολικό θα τοποθετηθεί διαδοχικά σε όλους τους ζυγούς του συστήματος εκτός του ζυγού αναφοράς ώστε να καταγραφούν οι απώλειες ισχύος και οι τάσεις σε κάθε ζυγό. Η παραγωγή θα αφαιρεθεί από τη γεννήτρια στο ζυγό 21, μεγέθους 294MW. Εάν σε κάποιο ζυγό υπάρχει συμβατική γεννήτρια, θα γίνεται αντικατάσταση της και η παραγωγή θα αφαιρείται πρώτα από εκεί και η υπόλοιπη από τη γεννήτρια στο ζυγό 21. Ως βέλτιστος ζυγός για την τοποθέτηση του αιολικού πάρκου θα επιλεγεί αυτός με τις μικρότερες απώλειες πραγματικής ισχύος.

6.3.1 Σύνδεση στο ζυγό 2

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 2 (Εικόνα 6.5) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 67MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 116MW.



Εικόνα 6.5: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 2

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 25.09 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.2.

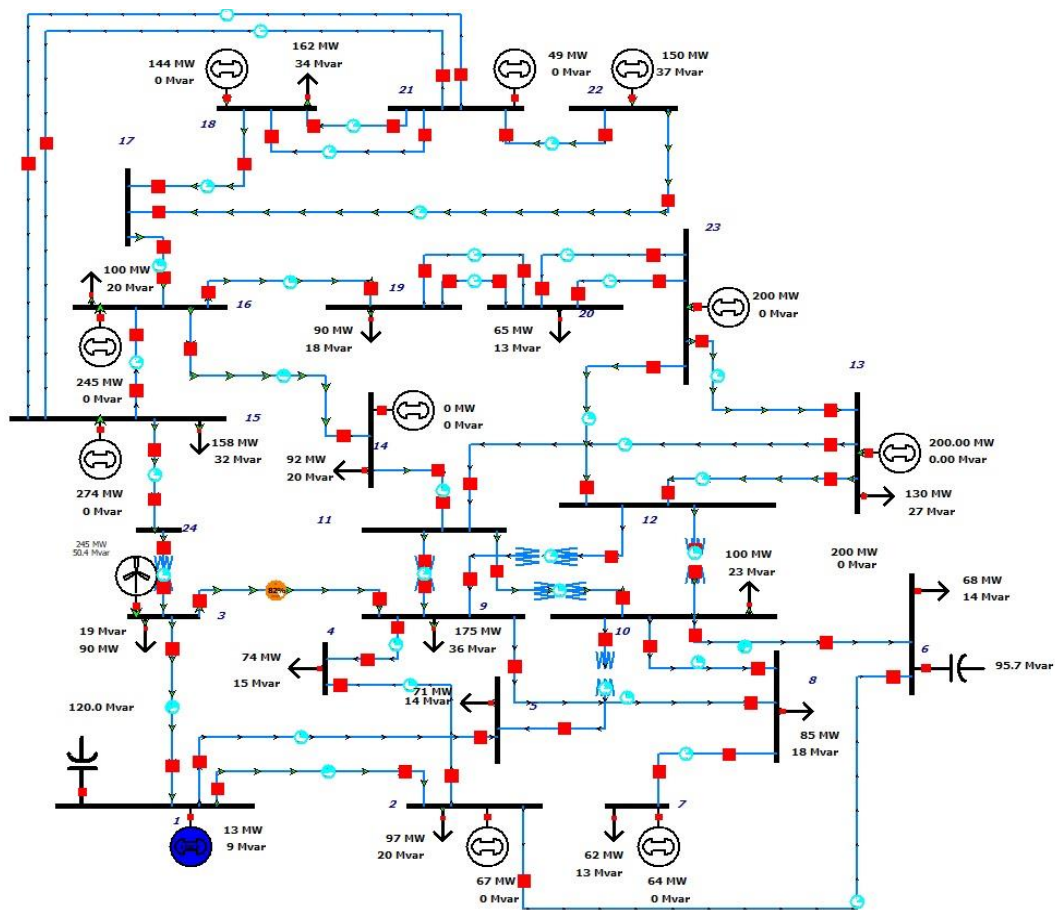
Πίνακας 6.2: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 2

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9131
2	1.0001	14	0.9116
3	0.9234	15	0.9410
4	0.9249	16	0.9289
5	0.9549	17	0.9467
6	0.9626	18	0.9484
7	0.8627	19	0.9235

8	0.8710	20	0.9237
9	0.9002	21	0.9544
10	0.9374	22	1.0000
11	0.9107	23	0.9251
12	0.9136	24	0.9244

6.3.2 Σύνδεση στο ζυγό 3

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 3 (Εικόνα 6.6). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.6: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 3

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 31.5 \text{ MW}$$

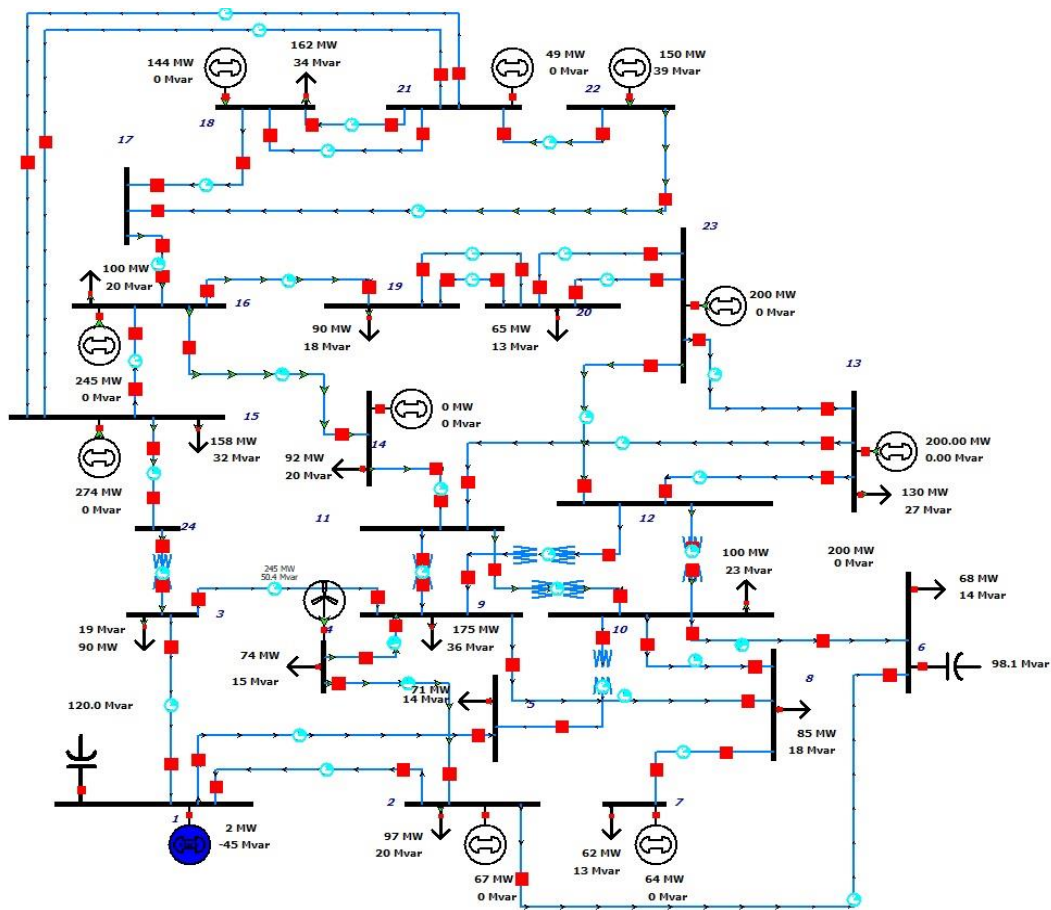
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 3

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9378
2	0.9987	14	0.9356
3	0.9931	15	0.9725
4	0.9394	16	0.9519
5	0.9653	17	0.9665
6	0.9782	18	0.9689
7	0.8883	19	0.9473
8	0.8964	20	0.9479
9	0.9271	21	0.9754
10	0.9581	22	1.0000
11	0.9350	23	0.9494
12	0.9381	24	0.9775

6.3.3 Σύνδεση στο ζυγό 4

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 4 (Εικόνα 6.7). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.7: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 4

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 21 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.4.

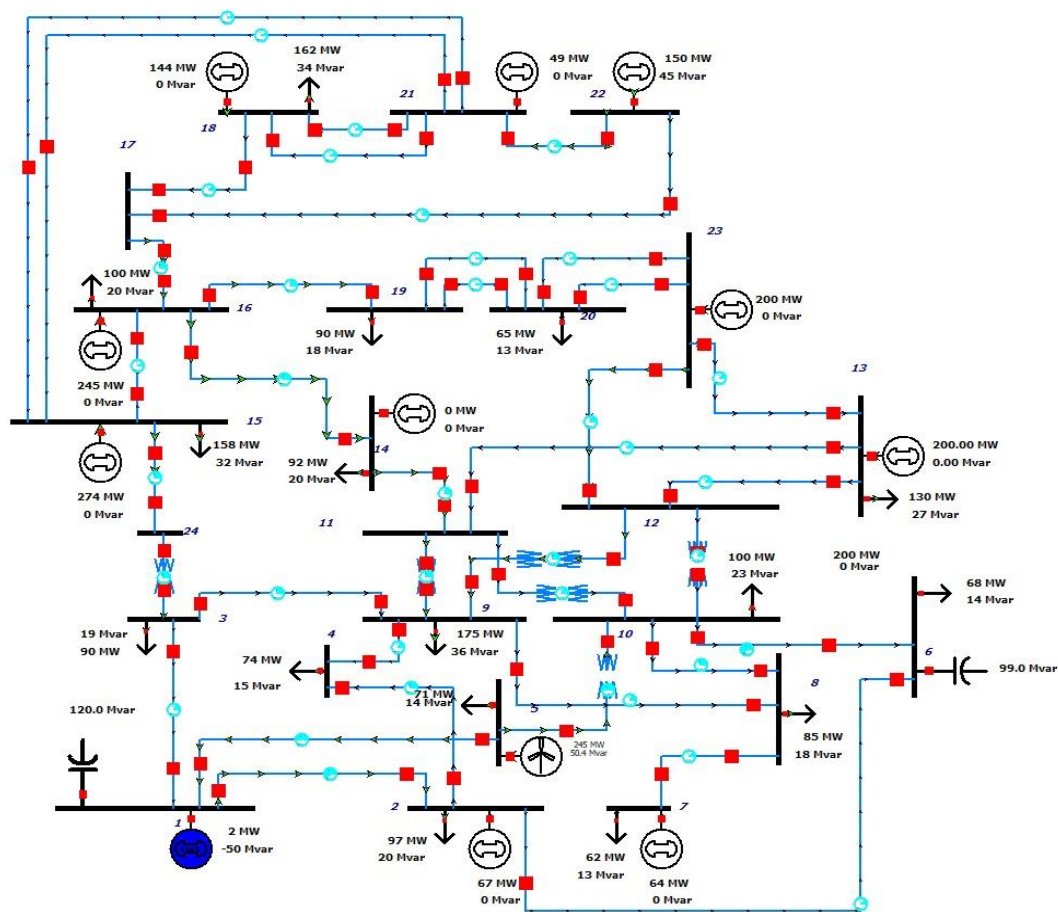
Πίνακας 6.4 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 4

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9534
2	0.9998	14	0.9478
3	0.9526	15	0.9638
4	1.0142	16	0.9591
5	0.9714	17	0.9688
6	0.9904	18	0.9686
7	0.9056	19	0.9571

8	0.9135	20	0.9596
9	0.9469	21	0.9725
10	0.9702	22	1.0000
11	0.9506	23	0.9622
12	0.9545	24	0.9524

6.3.4 Σύνδεση στο ζυγό 5

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 5 (Εικόνα 6.8). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.8: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 5

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 20.8 \text{ MW}$$

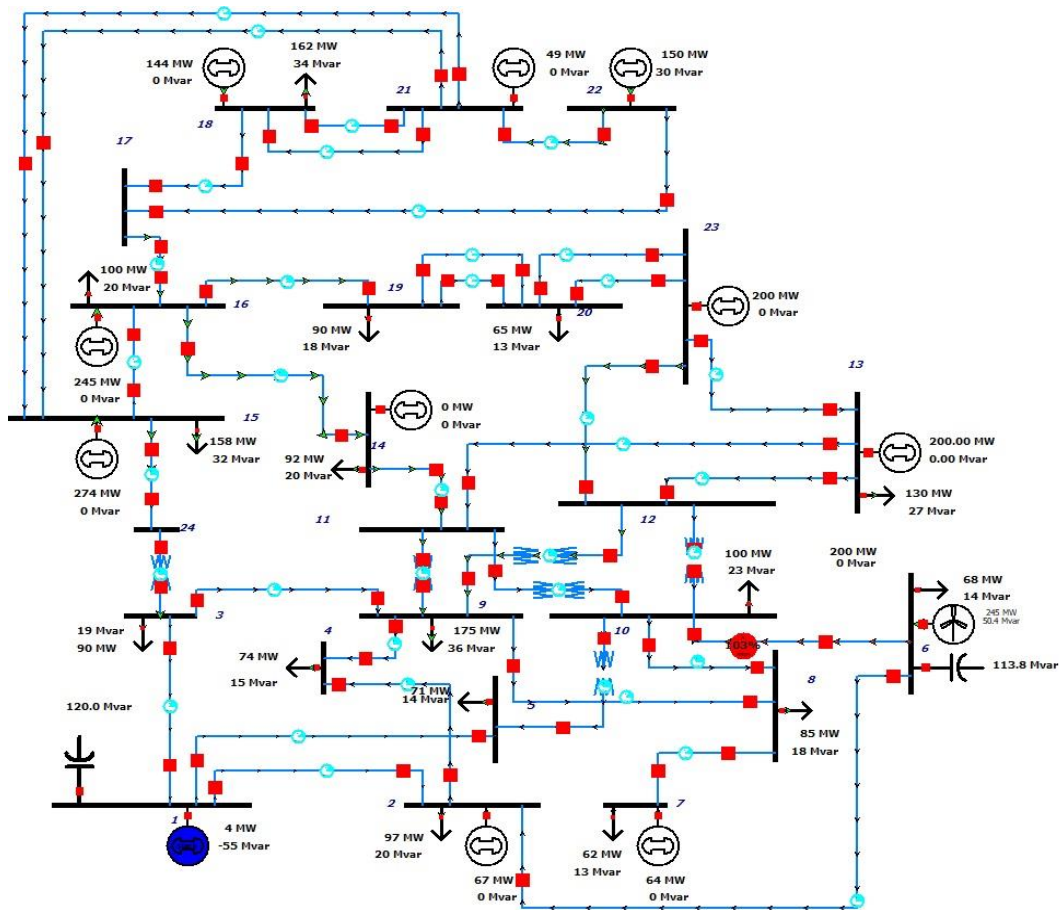
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 5

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9499
2	0.9988	14	0.9447
3	0.9450	15	0.9604
4	0.9421	16	0.9563
5	1.0223	17	0.9665
6	0.9951	18	0.9662
7	0.9013	19	0.9541
8	0.9092	20	0.9565
9	0.9320	21	0.9701
10	0.9770	22	1.0000
11	0.9471	23	0.9590
12	0.9509	24	0.9468

6.3.5 Σύνδεση στο ζυγό 6

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 6 (Εικόνα 6.9). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.9: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 6

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 23.4 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.6.

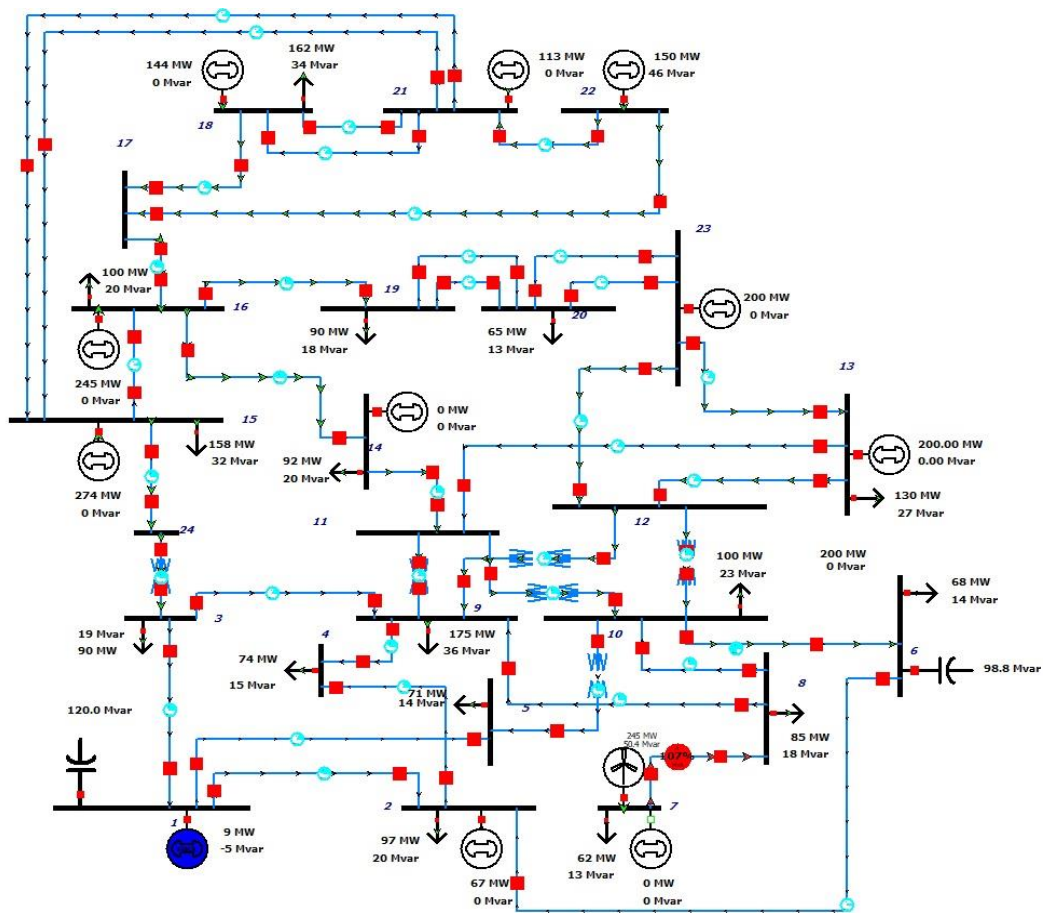
Πίνακας 6.6 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 6

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9653
2	0.9996	14	0.9576
3	0.9531	15	0.9667
4	0.9505	16	0.9665
5	0.9845	17	0.9736
6	1.0668	18	0.9726
7	0.9197	19	0.9657

8	0.9274	20	0.9693
9	0.9459	21	0.9758
10	0.9974	22	1.0000
11	0.9624	23	0.9724
12	0.9669	24	0.9534

6.3.6 Σύνδεση στο ζυγό 7

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 7 (Εικόνα 6.10) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 64MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 113MW.



Εικόνα 6.10: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 7

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 28.3 \text{ MW}$$

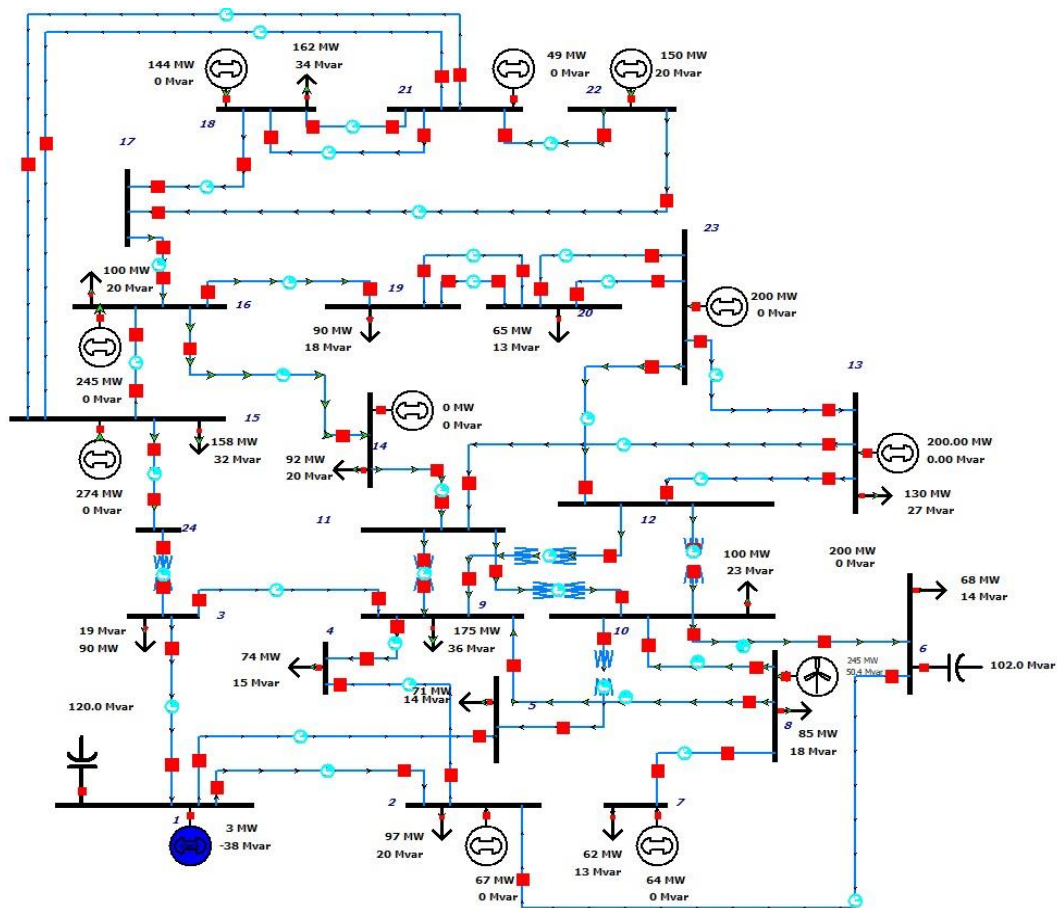
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 7

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9518
2	0.9990	14	0.9446
3	0.9475	15	0.9589
4	0.9481	16	0.9554
5	0.9753	17	0.9657
6	0.9941	18	0.9656
7	1.0288	19	0.9536
8	0.9827	20	0.9566
9	0.9429	21	0.9699
10	0.9790	22	1.0000
11	0.9492	23	0.9593
12	0.9538	24	0.9444

6.3.7 Σύνδεση στο ζυγό 8

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 8 (Εικόνα 6.11). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.11: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 8

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 22.06 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.8.

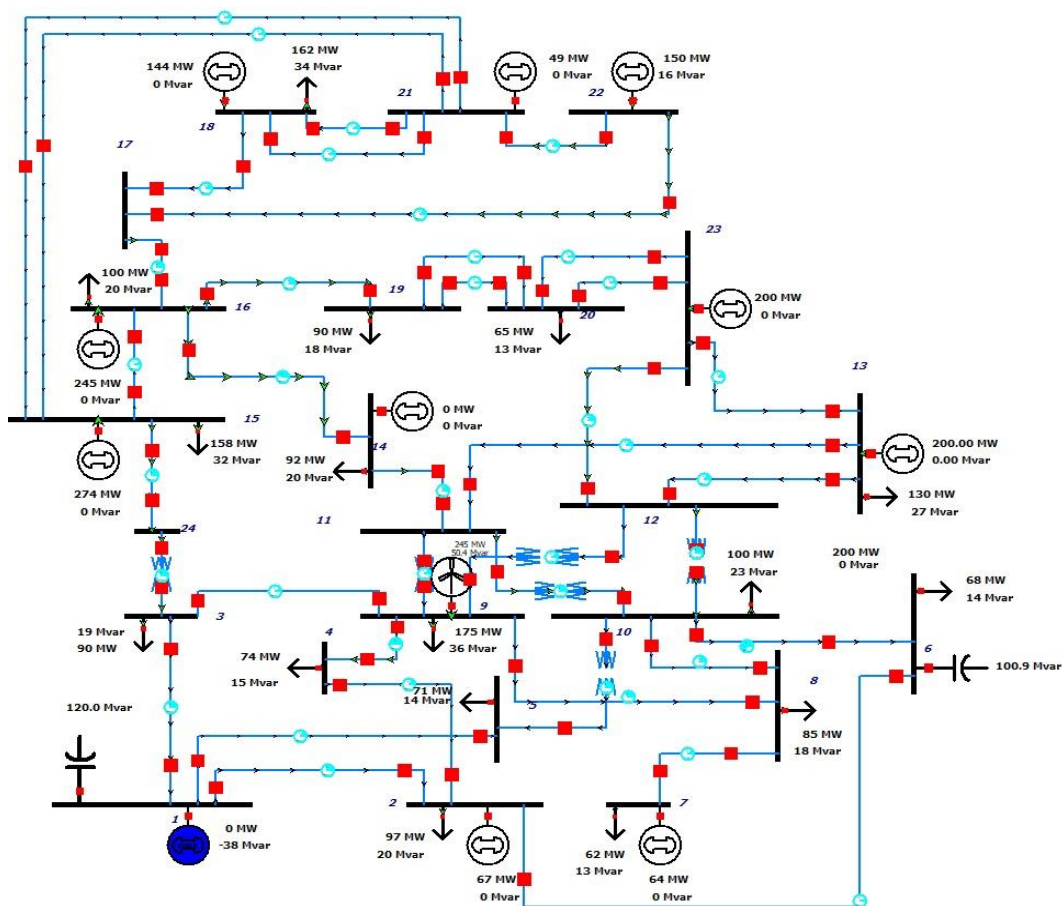
Πίνακας 6.8 Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 8

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9730
2	0.9993	14	0.9643
3	0.9617	15	0.9716
4	0.9594	16	0.9721
5	0.9844	17	0.9778
6	1.0100	18	0.9766
7	1.0197	19	0.9719

8	1.0266	20	0.9760
9	0.9630	21	0.9796
10	0.9973	22	1.0000
11	0.9701	23	0.9793
12	0.9750	24	0.9600

6.3.8 Σύνδεση στο ζυγό 9

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 9 (Εικόνα 6.12). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.12: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 9

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 19.2 \text{ MW}$$

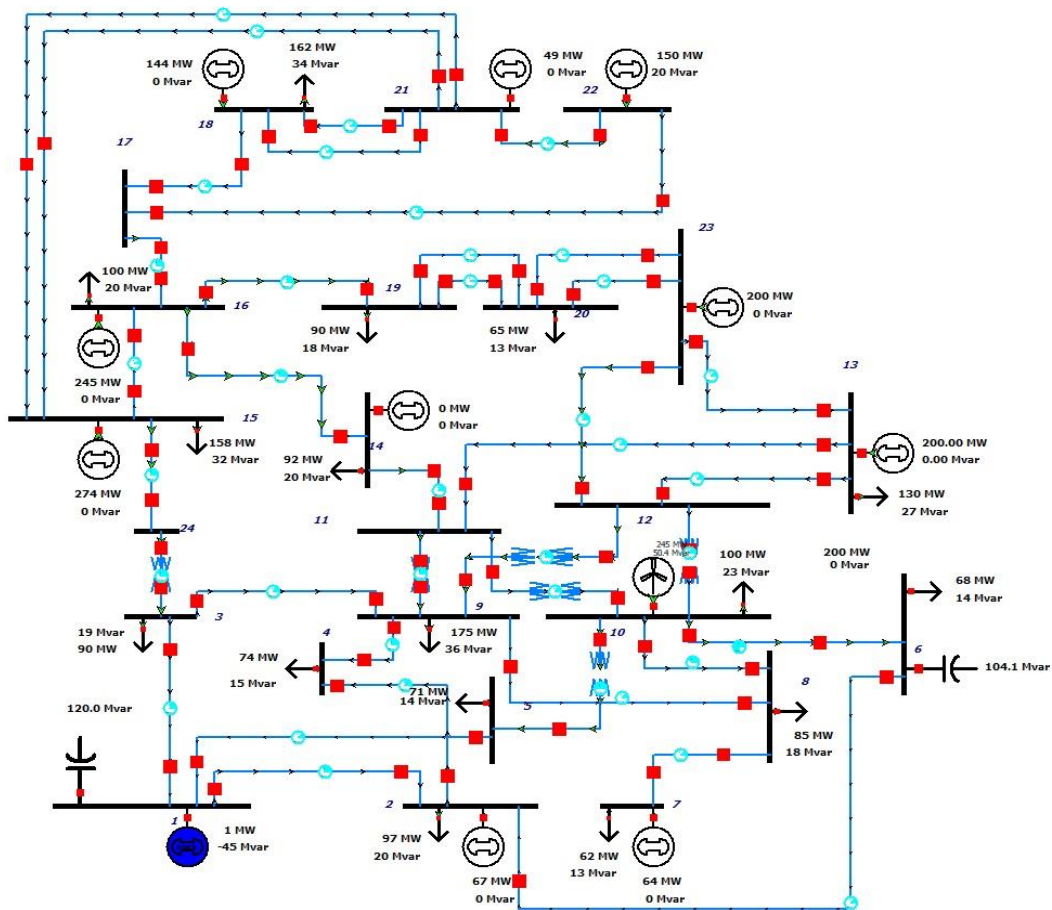
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 9

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9752
2	0.9993	14	0.9663
3	0.9684	15	0.9745
4	0.9666	16	0.9740
5	0.9808	17	0.9796
6	1.0046	18	0.9785
7	0.9319	19	0.9739
8	0.9395	20	0.9781
9	0.9774	21	0.9816
10	0.9895	22	1.0000
11	0.9724	23	0.9814
12	0.9773	24	0.9649

6.3.9 Σύνδεση στο ζυγό 10

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 10 (Εικόνα 6.13). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.13: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 10

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 19.6 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.10.

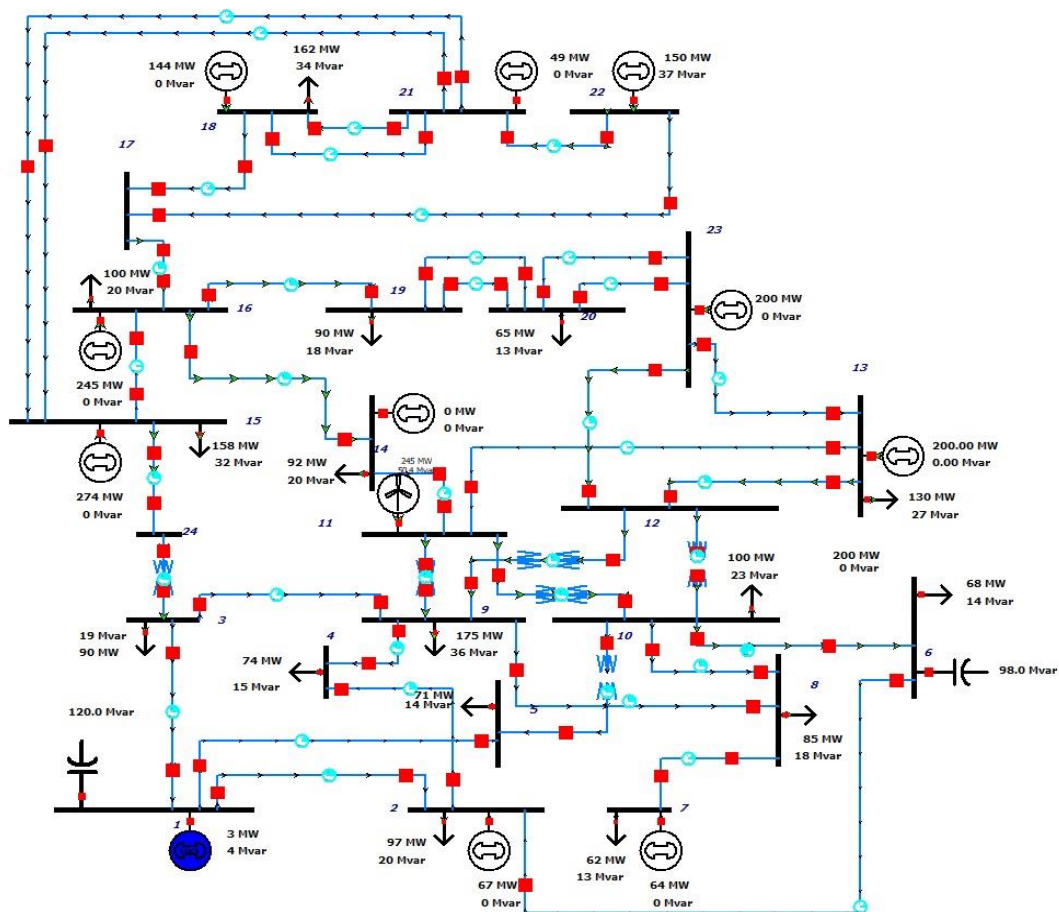
Πίνακας 6.10: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 10

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9749
2	0.9993	14	0.9657
3	0.9580	15	0.9707
4	0.9550	16	0.9729
5	0.9906	17	0.9781
6	1.0204	18	0.9766
7	0.9313	19	0.9731

8	0.9390	20	0.9774
9	0.9545	21	0.9793
10	1.0108	22	1.0000
11	0.9720	23	0.9808
12	0.9770	24	0.9576

6.3.10 Σύνδεση στο ζυγό 11

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 11 (Εικόνα 6.14). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.14: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 11

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 22.03 \text{ MW}$$

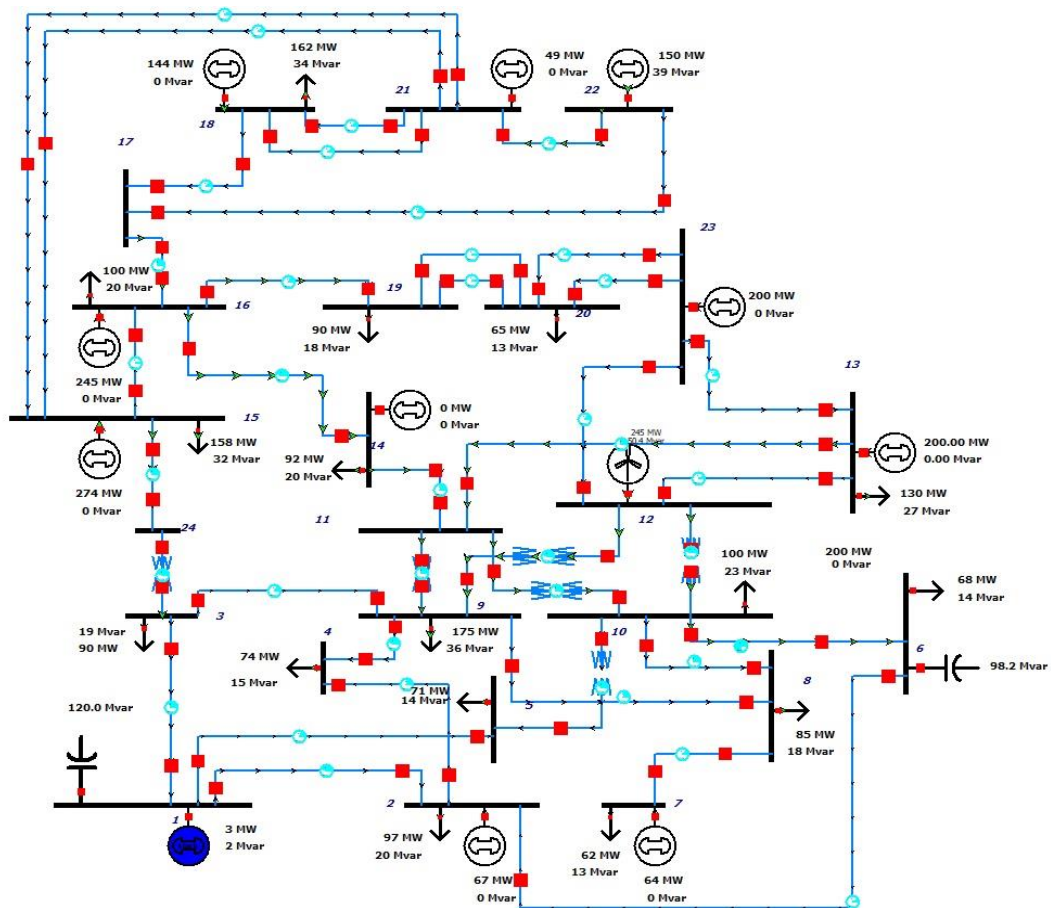
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 11

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9578
2	0.9990	14	0.9561
3	0.9472	15	0.9624
4	0.9457	16	0.9631
5	0.9730	17	0.9708
6	0.9898	18	0.9697
7	0.9038	19	0.9604
8	0.9117	20	0.9625
9	0.9388	21	0.9727
10	0.9746	22	1.0000
11	0.9617	23	0.9647
12	0.9534	24	0.9466

6.3.11 Σύνδεση στο ζυγό 12

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 12 (Εικόνα 6.15). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.15: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 12

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 21.9 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.12.

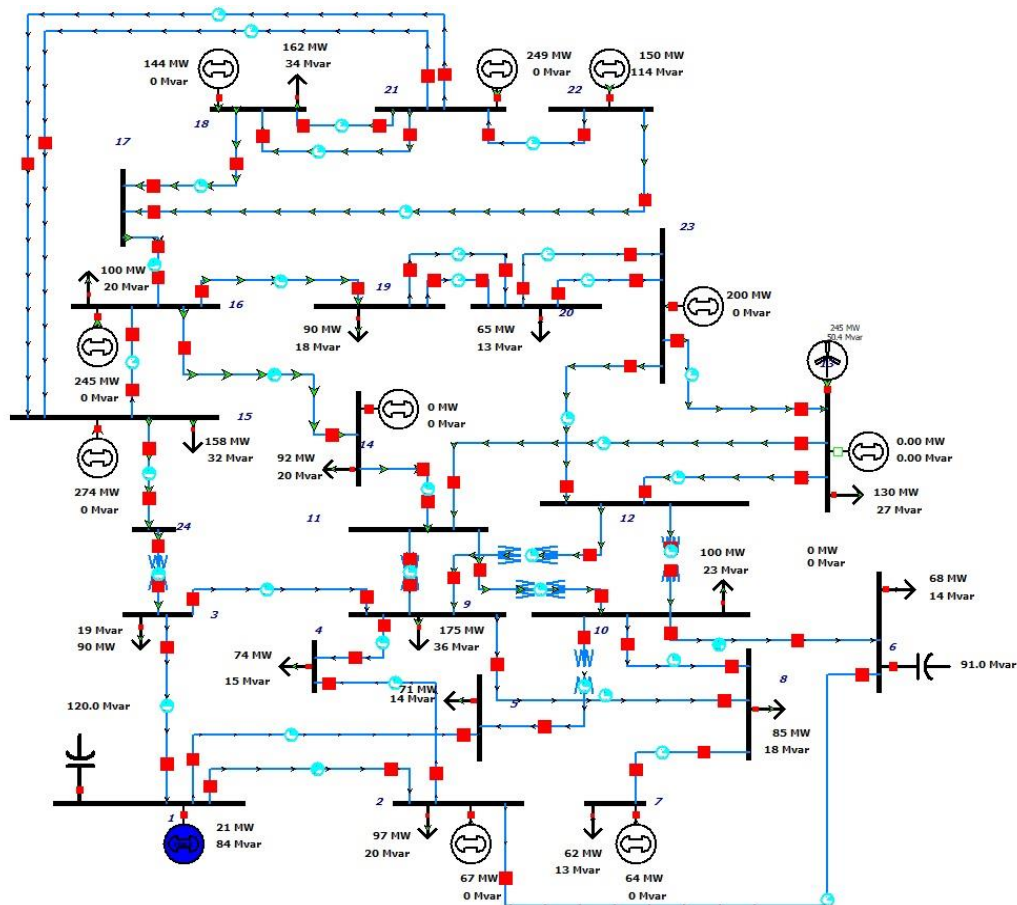
Πίνακας 6.12: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 12

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9601
2	0.9990	14	0.9490
3	0.9479	15	0.9621
4	0.9466	16	0.9613
5	0.9737	17	0.9697
6	0.9910	18	0.9688
7	0.9054	19	0.9614

8	0.9133	20	0.9657
9	0.9404	21	0.9721
10	0.9760	22	1.0000
11	0.9511	23	0.9691
12	0.9676	24	0.9472

6.3.12 Σύνδεση στο ζυγό 13

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 13 (Εικόνα 6.16) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 200MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 249MW.



Εικόνα 6.16: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 13

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 39.7 \text{ MW}$$

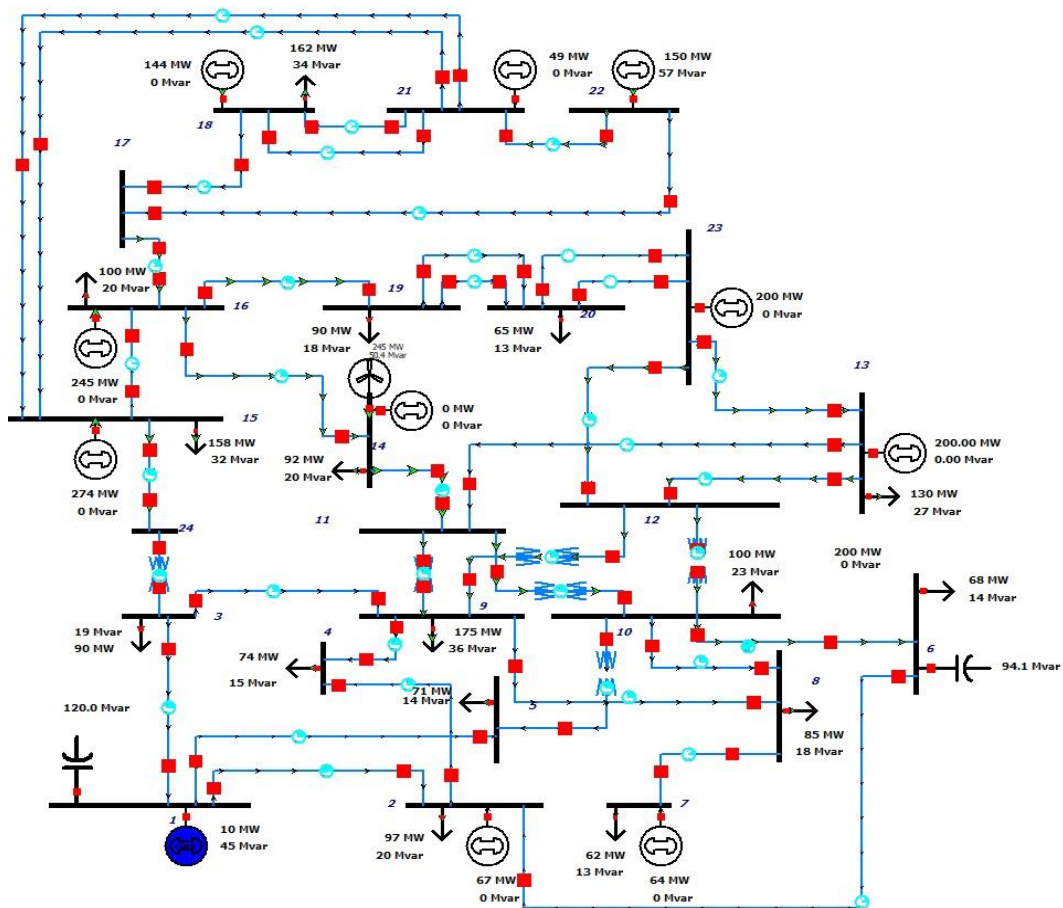
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 13

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9155
2	0.9985	14	0.8978
3	0.9073	15	0.9246
4	0.9191	16	0.9151
5	0.9525	17	0.9348
6	0.9538	18	0.9370
7	0.8556	19	0.9113
8	0.8640	20	0.9135
9	0.8915	21	0.9439
10	0.9332	22	1.0000
11	0.9013	23	0.9160
12	0.9067	24	0.9006

6.3.13 Σύνδεση στο ζυγό 14

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 14 (Εικόνα 6.17). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.17: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 14

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 28.9 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.14.

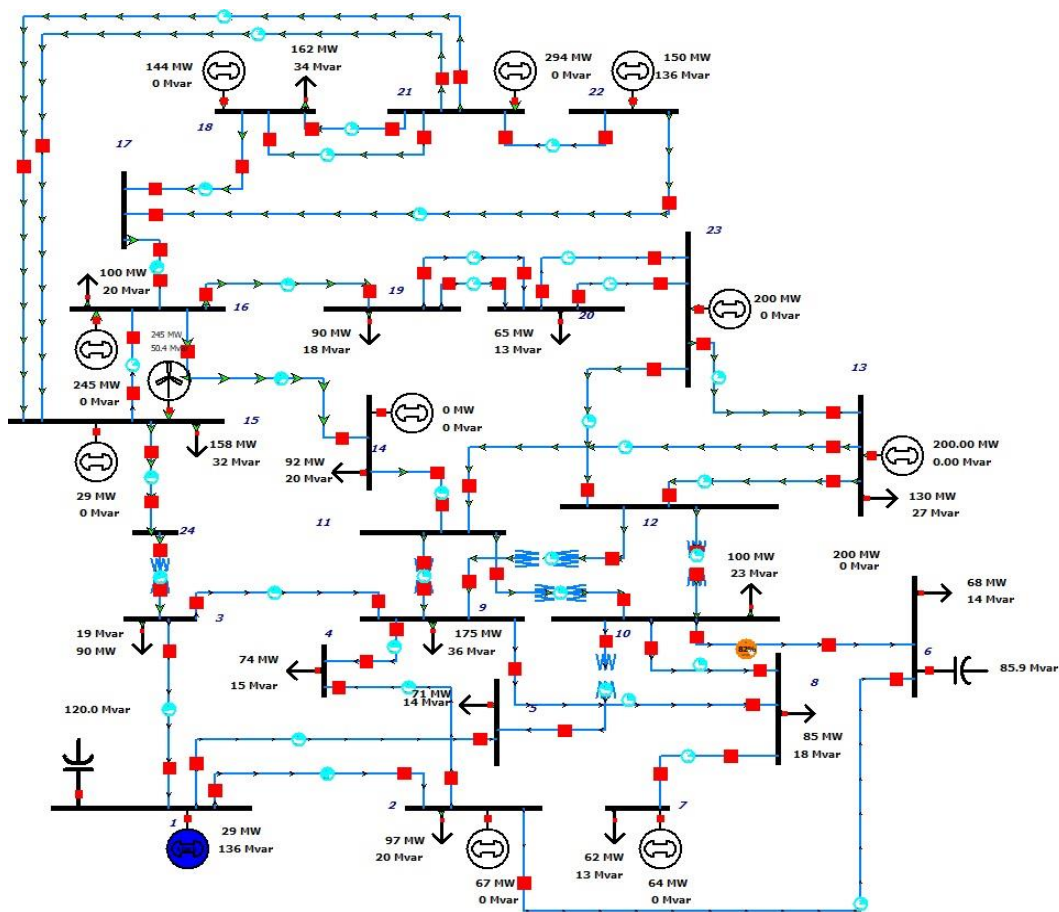
Πίνακας 6.14: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 14

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9293
2	0.9987	14	0.9493
3	0.9313	15	0.9517
4	0.9319	16	0.9523
5	0.9617	17	0.9624
6	0.9698	18	0.9614
7	0.8782	19	0.9447
8	0.8864	20	0.9430
9	0.9143	21	0.9646

10	0.9518	22	1.0000
11	0.9286	23	0.9433
12	0.9270	24	0.9316

6.3.14 Σύνδεση στο ζυγό 15

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 15 (Εικόνα 6.18) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 274MW από την οποία αφαιρούνται τα 245 MW και το νέο μέγεθος της διαμορφώνεται στα 29 MW. Η γεννήτρια στο ζυγό 21 παραμένει στα 294 MW όπως είχε αρχικά.



Εικόνα 6.18: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 15

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 48.2 \text{ MW}$$

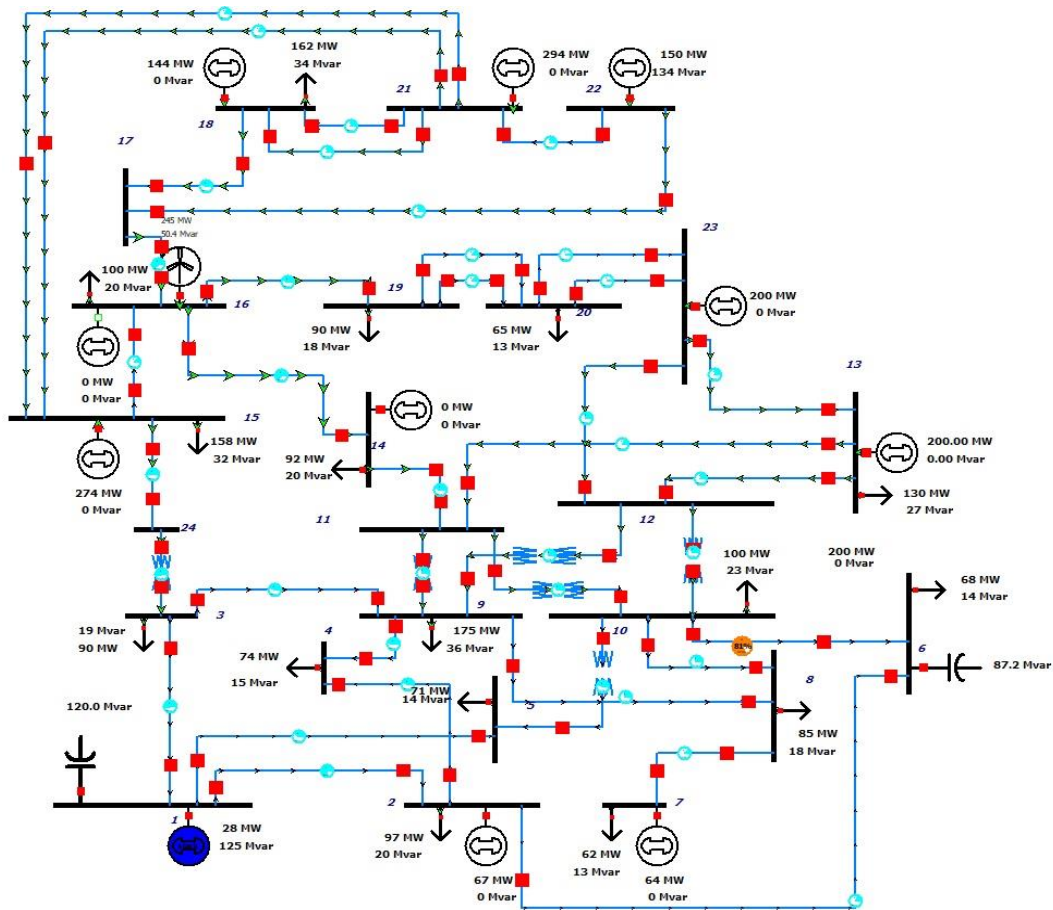
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.15.

Πίνακας 6.15: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 15

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8647
2	0.9981	14	0.8652
3	0.8911	15	0.9242
4	0.9012	16	0.8906
5	0.9374	17	0.9208
6	0.9271	18	0.9274
7	0.8218	19	0.8807
8	0.8306	20	0.8782
9	0.8600	21	0.9385
10	0.9030	22	1.0000
11	0.8632	23	0.8784
12	0.8665	24	0.8914

6.3.15 Σύνδεση στο ζυγό 16

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 16 (Εικόνα 6.19) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 245MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο.



Εικόνα 6.19: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 16

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 46.8 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.16.

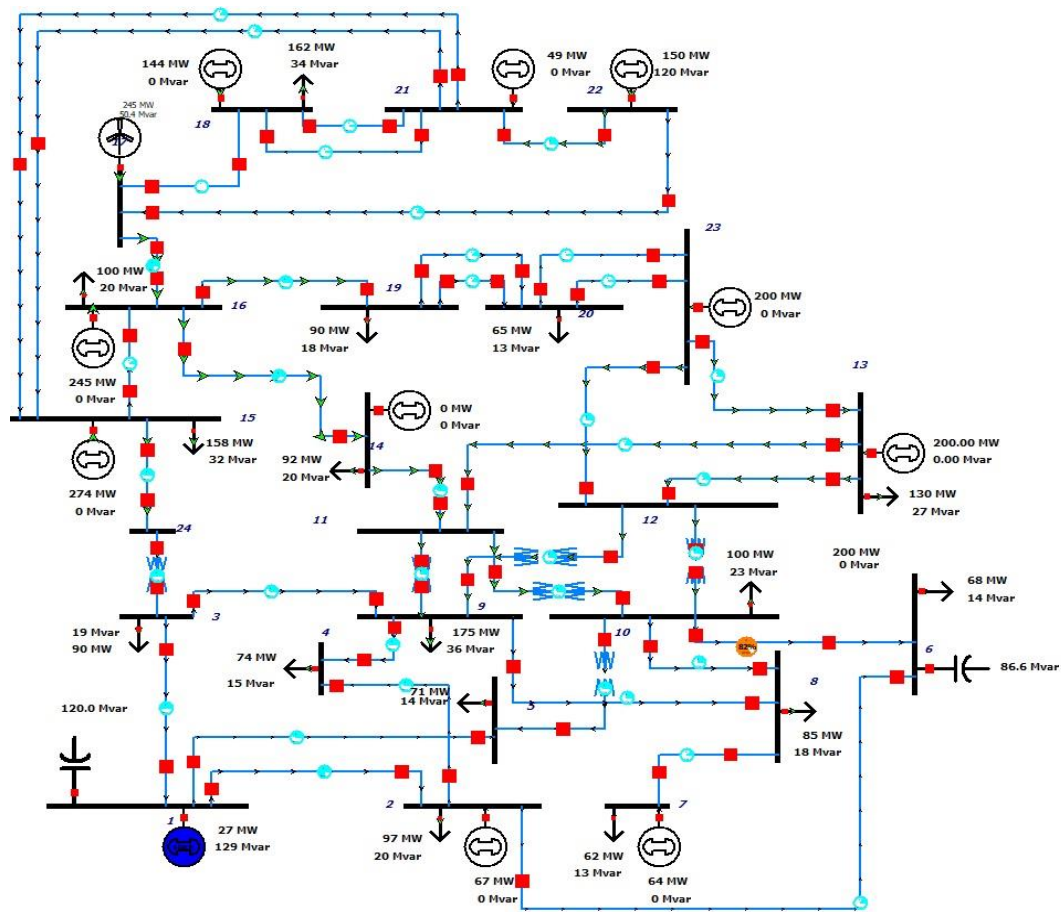
Πίνακας 6.16: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 16

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8753
2	0.9982	14	0.8779
3	0.8902	15	0.9135
4	0.9052	16	0.9050
5	0.9412	17	0.9262
6	0.9338	18	0.9286
7	0.8298	19	0.8944

8	0.8385	20	0.8911
9	0.8669	21	0.9359
10	0.9106	22	1.0000
11	0.8735	23	0.8908
12	0.8762	24	0.8847

6.3.16 Σύνδεση στο ζυγό 17

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 17 (Εικόνα 6.20). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.20: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 17

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 45.9 \text{ MW}$$

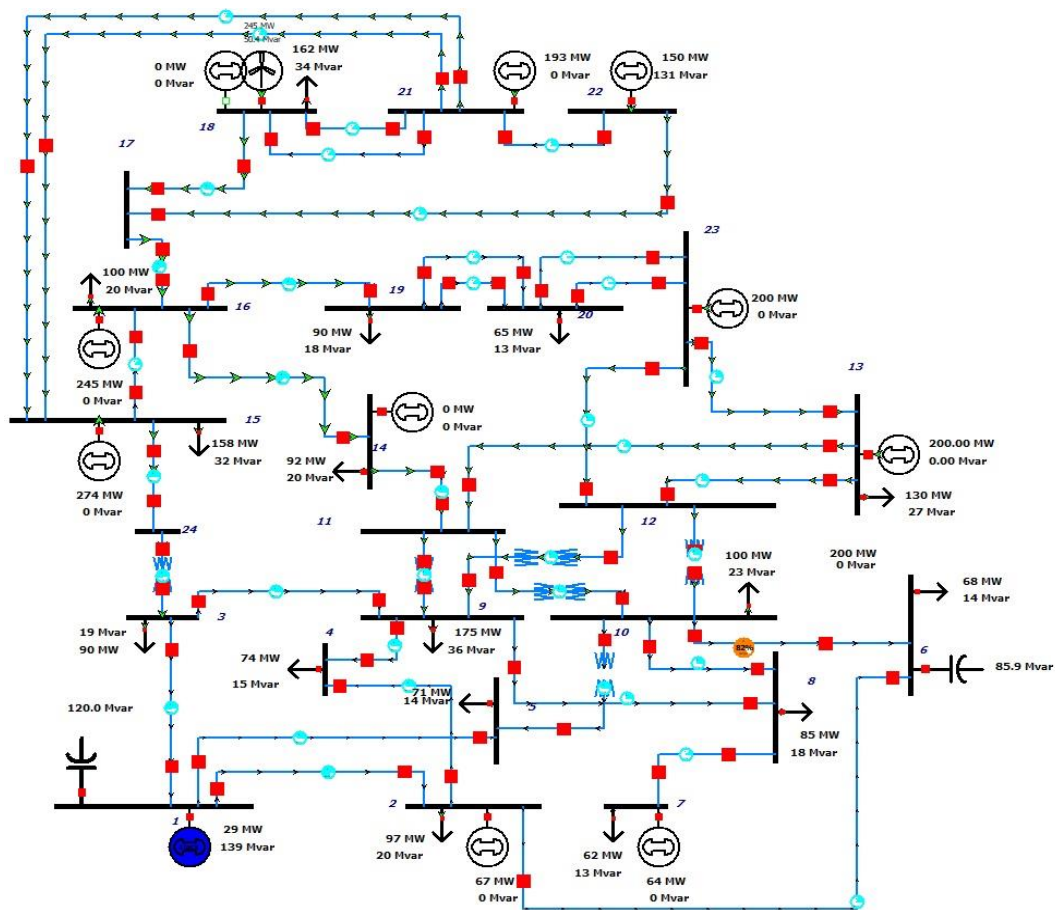
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.17.

Πίνακας 6.17: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 17

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8702
2	0.9982	14	0.8724
3	0.8922	15	0.9171
4	0.9036	16	0.8999
5	0.9393	17	0.9359
6	0.9304	18	0.9351
7	0.8264	19	0.8890
8	0.8351	20	0.8856
9	0.8643	21	0.9385
10	0.9070	22	1.0000
11	0.8685	23	0.8854
12	0.8714	24	0.8893

6.3.17 Σύνδεση στο ζυγό 18

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 18 (Εικόνα 6.21) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 144 MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 193MW.



Εικόνα 6.21: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 18

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 48.1 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.18.

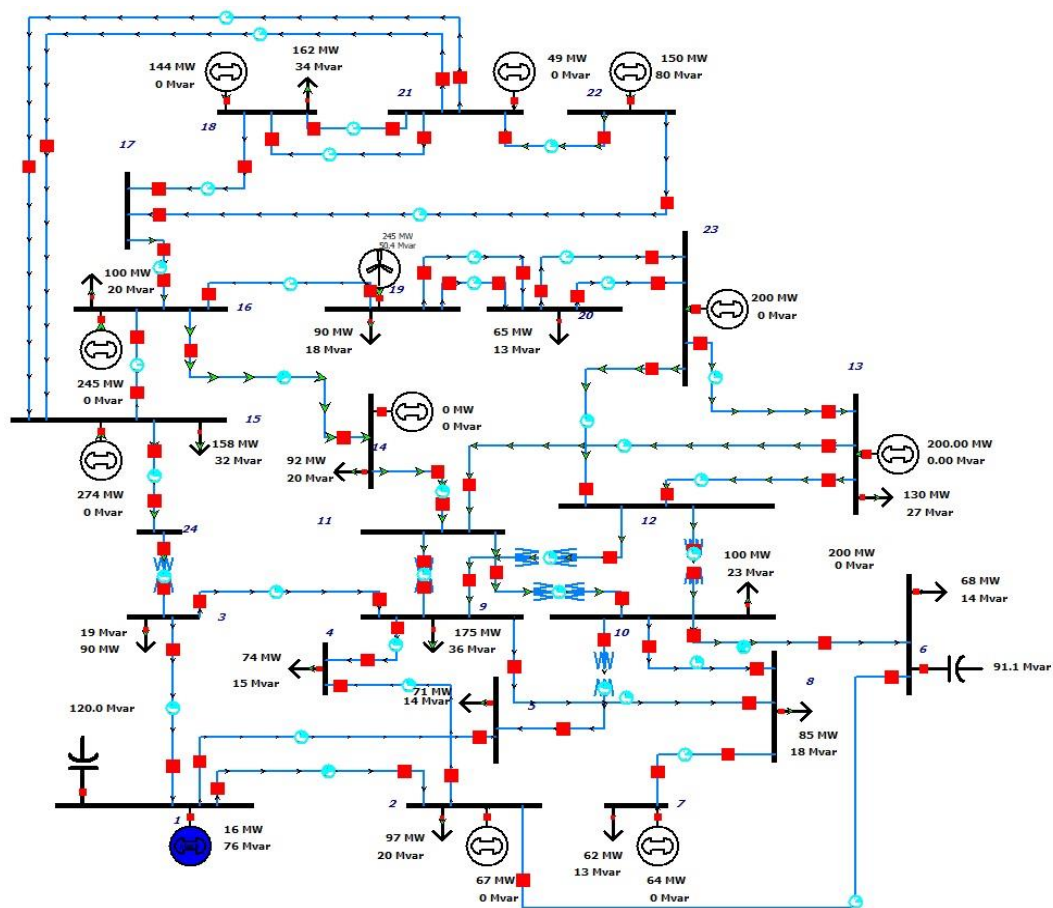
Πίνακας 6.18: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 18

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8644
2	0.9981	14	0.8656
3	0.8869	15	0.9137
4	0.9006	16	0.8919
5	0.9372	17	0.9252
6	0.9267	18	0.9342
7	0.8210	19	0.8816

8	0.8298	20	0.8788
9	0.8589	21	0.9384
10	0.9026	22	1.0000
11	0.8629	23	0.8788
12	0.8660	24	0.8835

6.3.18 Σύνδεση στο ζυγό 19

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 19 (Εικόνα 6.22). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.22: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 19

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 35.4 \text{ MW}$$

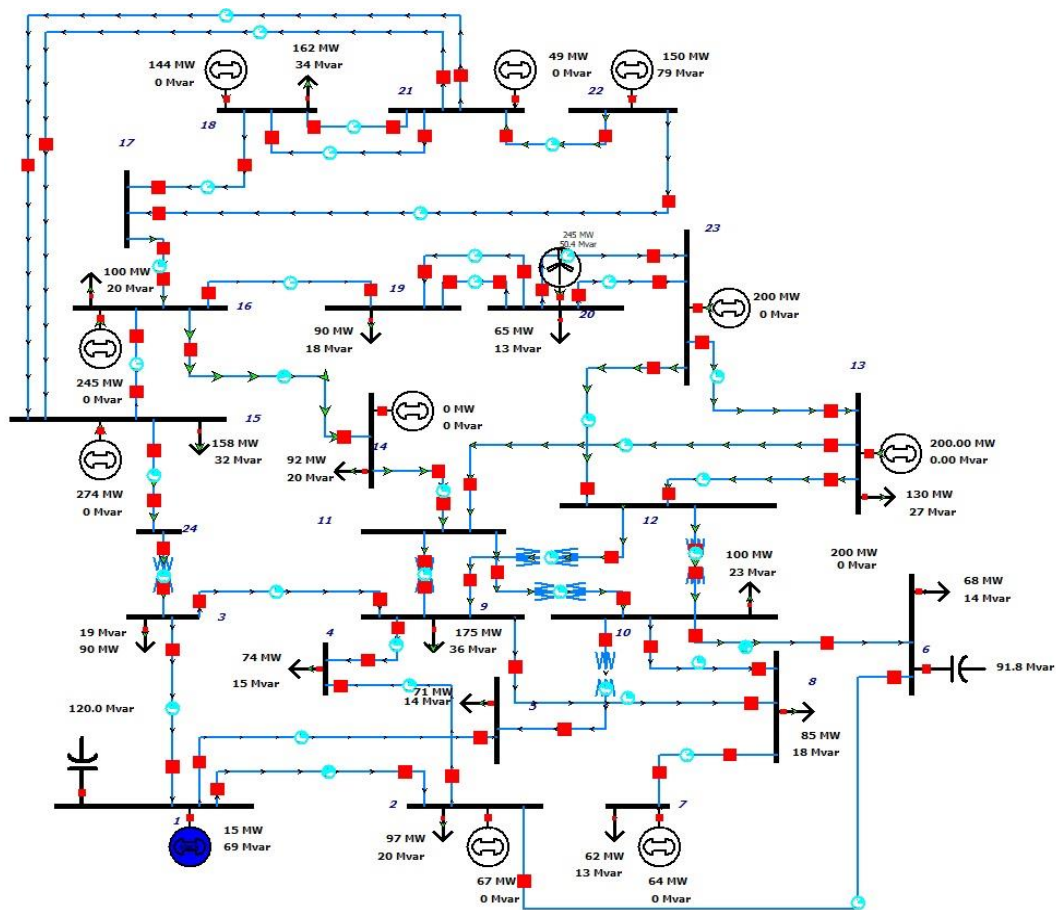
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.19.

Πίνακας 6.19: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 19

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9080
2	0.9985	14	0.9110
3	0.9182	15	0.9406
4	0.9214	16	0.9377
5	0.9531	17	0.9518
6	0.9547	18	0.9515
7	0.8587	19	0.9427
8	0.8671	20	0.9346
9	0.8957	21	0.9554
10	0.9347	22	1.0000
11	0.9044	23	0.9316
12	0.9066	24	0.9181

6.3.19 Σύνδεση στο ζυγό 20

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 20 (Εικόνα 6.23). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.23: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 20

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 34.3 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.20.

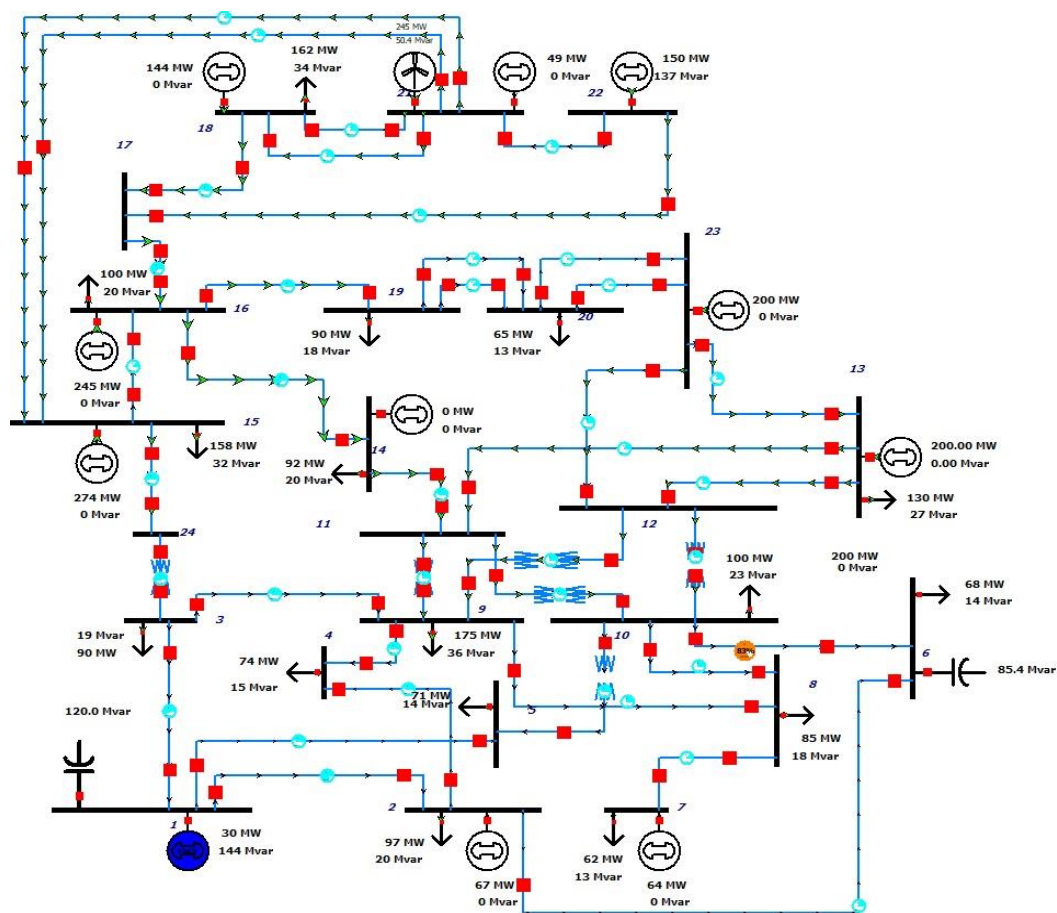
Πίνακας 6.20: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 20

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9137
2	0.9986	14	0.9144
3	0.9214	15	0.9423
4	0.9238	16	0.9380
5	0.9550	17	0.9524
6	0.9580	18	0.9523
7	0.8632	19	0.9403

8	0.8715	20	0.9466
9	0.9000	21	0.9564
10	0.9385	22	1.0000
11	0.9091	23	0.9421
12	0.9117	24	0.9214

6.3.20 Σύνδεση στο ζυγό 21

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 21 (Εικόνα 6.24) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 294 MW. Από τη γεννήτρια αφαιρούνται τα 245 MW και το νέο μέγεθος της διαμορφώνεται στα 49 MW.



Εικόνα 6.24: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 21

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 49.3 \text{ MW}$$

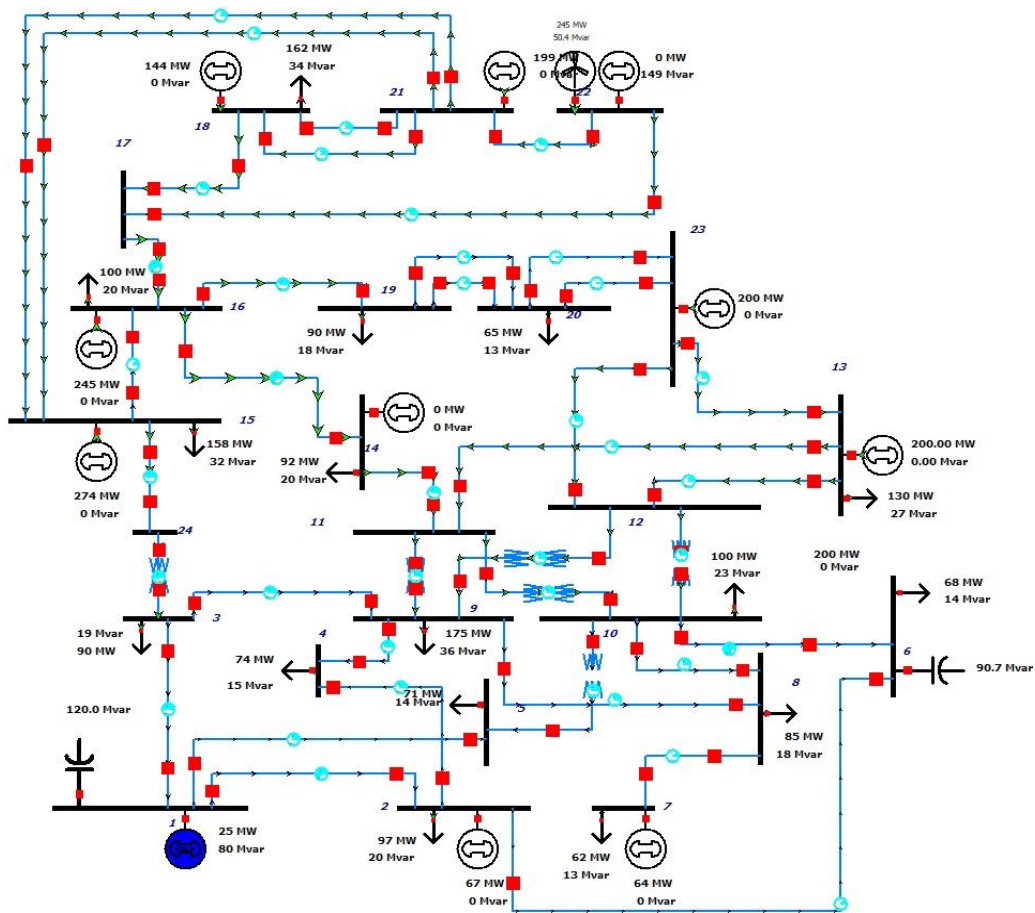
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.21.

Πίνακας 6.21: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 21

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8606
2	0.9981	14	0.8613
3	0.8845	15	0.9126
4	0.8988	16	0.8871
5	0.9358	17	0.9192
6	0.9242	18	0.9267
7	0.8177	19	0.8770
8	0.8266	20	0.8744
9	0.8557	21	0.9386
10	0.8998	22	1.0000
11	0.8592	23	0.8745
12	0.8625	24	0.8814

6.3.21 Σύνδεση στο ζυγό 21

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 21 (Εικόνα 6.25) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 150 MW και 199 MVAR. Από τη γεννήτρια αφαιρούνται τα 150 MW και τα 50.4 MVAR και το νέο μέγεθος της είναι 0 MW και 149 MVAR. Από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 αφαιρούνται τα υπόλοιπα 95 MW και το νέο της μέγεθος διαμορφώνεται στα 199 MW



Εικόνα 6.25: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 22

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 44.2 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.22.

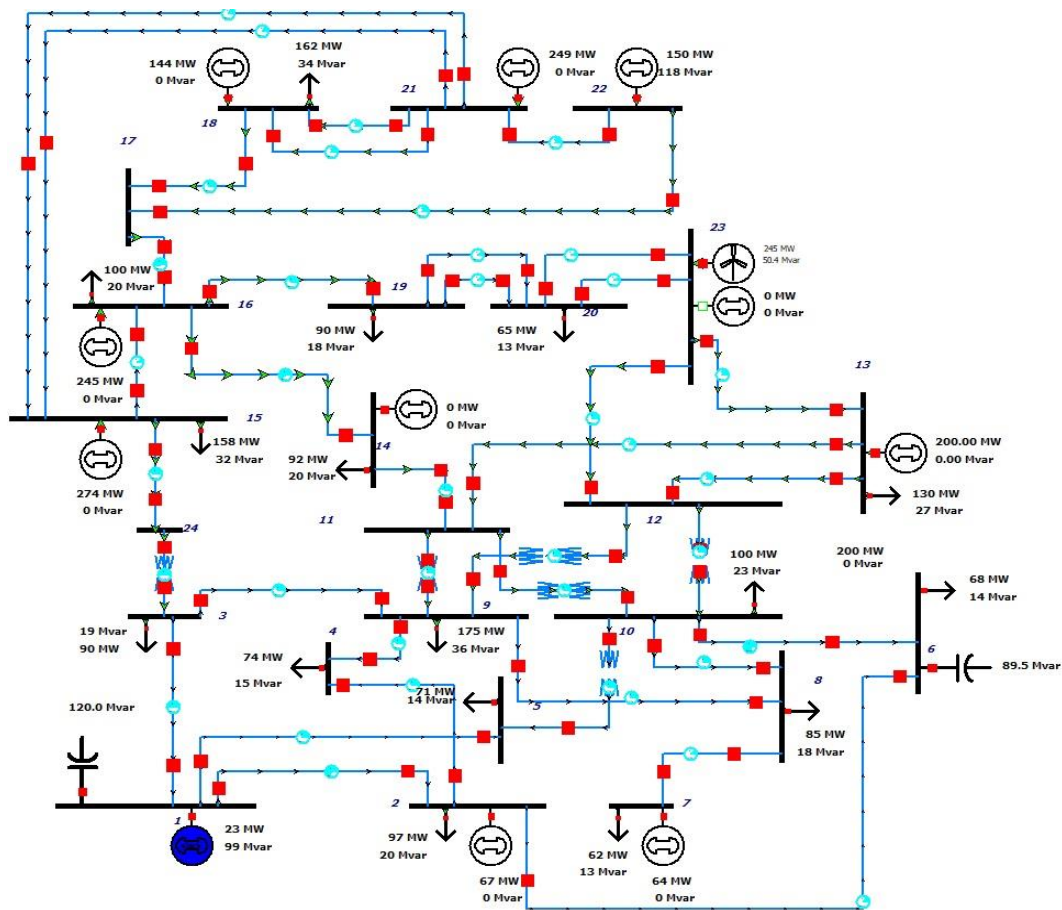
Πίνακας 6.22: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 22

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9022
2	0.9984	14	0.9059
3	0.9184	15	0.9548
4	0.9191	16	0.9330
5	0.9515	17	0.9653
6	0.9522	18	0.9701
7	0.8543	19	0.9227

8	0.8628	20	0.9193
9	0.8914	21	0.9790
10	0.9310	22	1.0656
11	0.8998	23	0.9188
12	0.9020	24	0.9232

6.3.22 Σύνδεση στο ζυγό 23

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 23 (Εικόνα 6.26) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 200 MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 249 MW.



Εικόνα 6.26: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 23

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 42.1 \text{ MW}$$

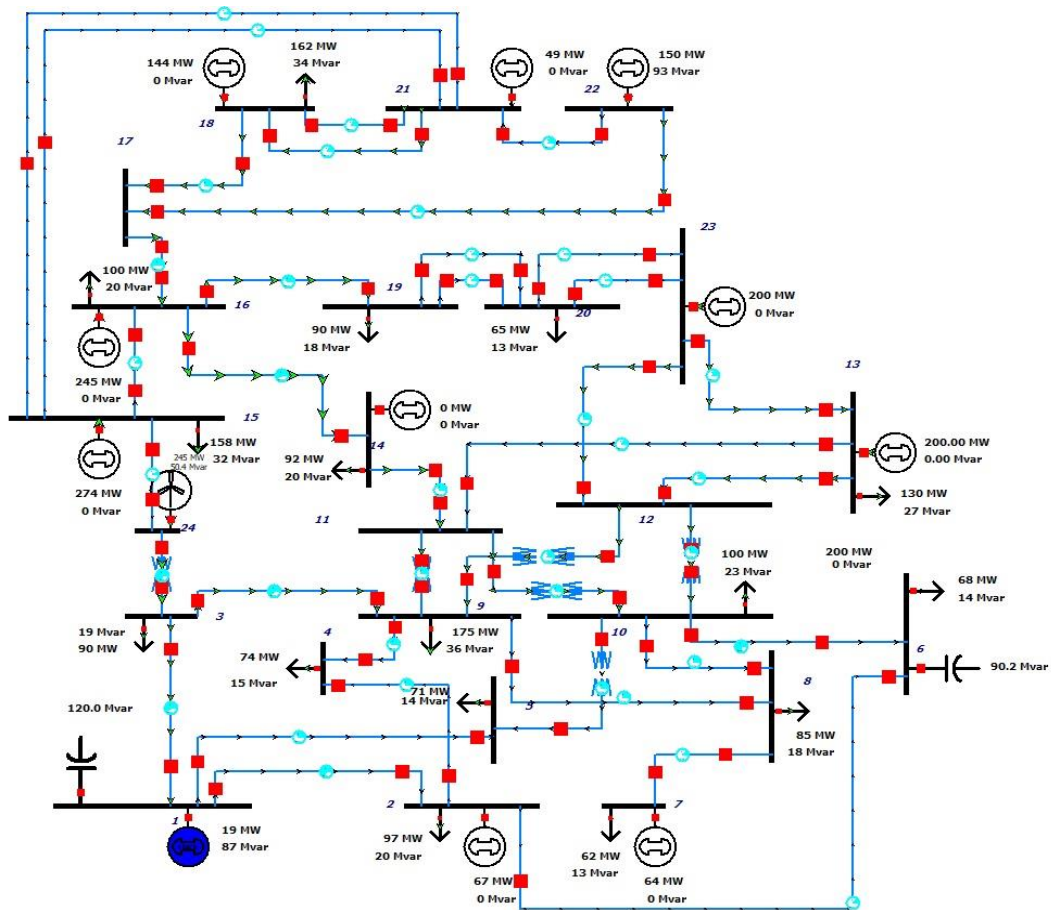
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.23.

Πίνακας 6.23: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 23

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8960
2	0.9984	14	0.8907
3	0.9019	15	0.9220
4	0.9139	16	0.9132
5	0.9482	17	0.9332
6	0.9462	18	0.9353
7	0.8459	19	0.9125
8	0.8545	20	0.9171
9	0.8824	21	0.9421
10	0.9246	22	1.0000
11	0.8897	23	0.9210
12	0.8959	24	0.8963

6.3.23 Σύνδεση στο ζυγό 24

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 24 (Εικόνα 6.27). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 21 διαμορφώνεται στα $294 - 245 = 49\text{MW}$.



Εικόνα 6.27: Σύνδεση αιολικού πάρκου στο ζυγό 24

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 37.5 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.24.

Πίνακας 6.24: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 24

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.8973
2	0.9984	14	0.8972
3	0.9255	15	0.9467
4	0.9170	16	0.9186
5	0.9499	17	0.9413
6	0.9498	18	0.9454
7	0.8503	19	0.9111
8	0.8588	20	0.9099
9	0.8876	21	0.9538

10	0.9275	22	1.0000
11	0.8952	23	0.9106
12	0.8982	24	0.9470

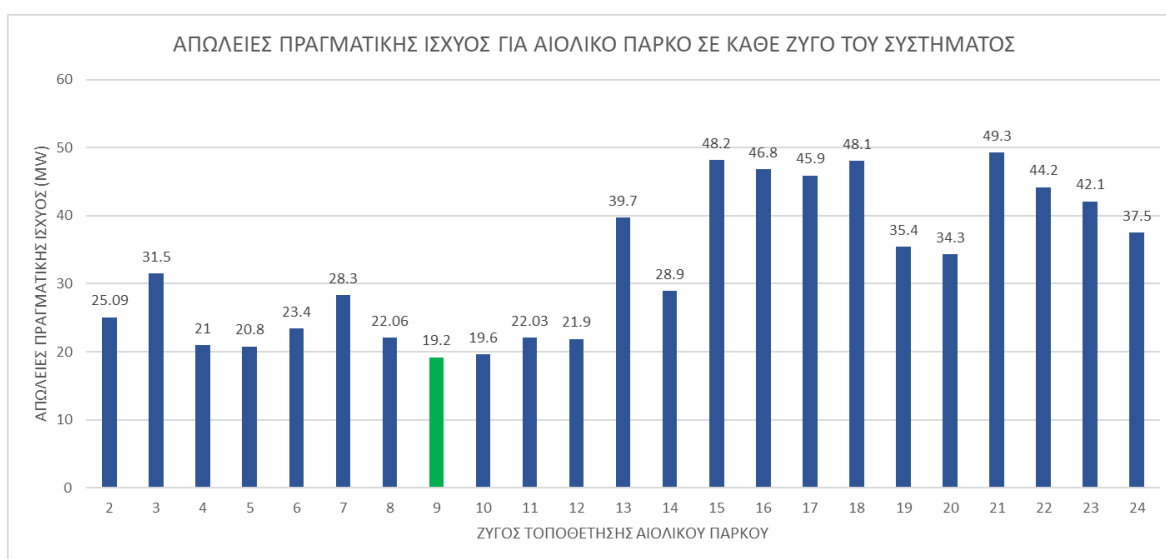
6.3.24 Επιλογή ζυγού σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου στο δίκτυο

Σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των απωλειών. Η επιλογή του ζυγού θα γίνει με βάση τις μικρότερες απώλειες πραγματικής ισχύος. Στον Πίνακα 6.25 και στο Σχήμα 6.1 παραθέτονται συγκριτικά οι απώλειες, αρχικά χωρίς αιολικό πάρκο στο σύστημα και στη συνέχεια μετά την τοποθέτηση του σε κάθε ζυγό του συστήματος, εκτός του ζυγού αναφοράς. Σύμφωνα με τα δεδομένα, ο ζυγός με τις μικρότερες απώλειες πραγματικής ισχύος είναι ο ζυγός 9, όπου οι απώλειες είναι 19.2 MW. Συνεπώς, κρίνεται ως βέλτιστος για την τοποθέτηση του Αιολικού Πάρκου.

Πίνακας 6.25: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος

ΖΥΓΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ	ΑΠΩΛΕΙΕΣ (MW)
Χωρίς Αιολικό	54.8
2	25.09
3	31.5
4	21
5	20.8
6	23.4
7	28.3
8	22.06
9	19.2
10	19.6
11	22.03
12	21.9
13	39.7
14	28.9
15	48.2
16	46.8
17	45.9

18	48.1
19	35.4
20	34.3
21	49.3
22	44.2
23	42.1
24	37.5



Σχήμα 6.1: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος

Παρατηρούμε επίσης πως βελτιώθηκε αισθητά το προφίλ των τάσεων των ζυγών του συστήματος. Οι τιμές (σε pu) βρίσκονται εντός των ορίων $0.95 < V < 1.05$, ή πολύ κοντά σε αυτές, στην περίπτωση των ζυγών 8 και 9 (Πίνακας 6.26).

Πίνακας 6.26: Σύγκριση των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος πριν και μετά τη χωροθέτηση του Αιολικού Πάρκου

Ζυγός	Τάσεις χωρίς Αιολικό (pu)	Τάσεις με Αιολικό στο ζυγό 9 (pu)
1	1.0000	1.0000

2	0.9978	0.9993
3	0.8639	0.9684
4	0.8872	0.9666
5	0.9269	0.9808
6	0.9084	1.0046
7	0.7967	0.9319
8	0.8058	0.9395
9	0.8353	0.9774
10	0.8822	0.9895
11	0.8365	0.9724
12	0.8402	0.9773
13	0.8373	0.9752
14	0.8368	0.9663
15	0.8854	0.9745
16	0.8624	0.9740
17	0.8959	0.9796
18	0.9013	0.9785
19	0.8521	0.9739
20	0.8497	0.9781
21	0.9114	0.9816
22	1.0000	1.0000
23	0.8501	0.9814
24	0.8552	0.9649

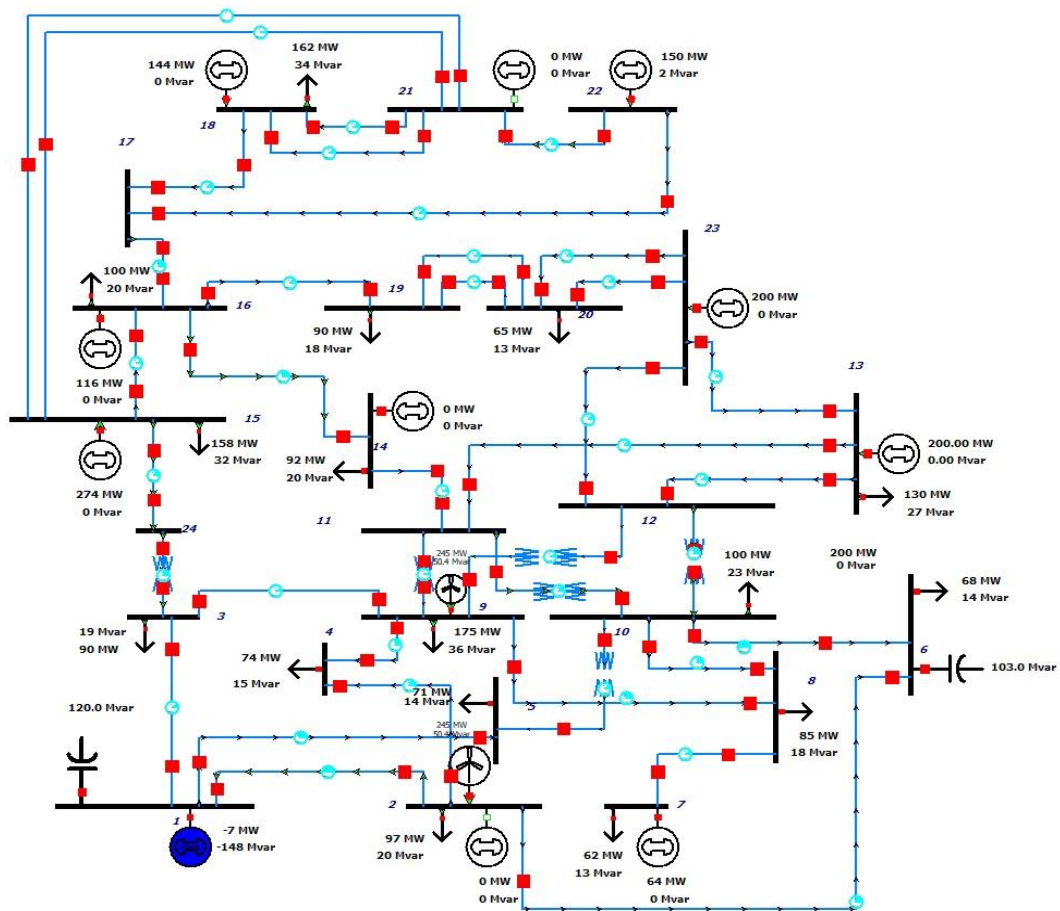
6.4 Επιλογή τοποθεσίας σύνδεσης του αιολικού πάρκου με ποσοστό ενσωμάτωσης 30% του φορτίου

Σε αυτό το σενάριο, το υπάρχον ΣΗΕ θα επεκταθεί ώστε το 30% της ζήτησης του φορτίου να καλύπτεται από ΑΠΕ. Η ποσότητα του φορτίου που πρέπει να αντικατασταθεί με ΑΠΕ είναι $1619 * 0.3 = 490 \text{ MW}$ και $316 * 0.3 = 100.8 \text{ MVAR}$. Θα χρησιμοποιηθούν δύο Αιολικά Πάρκα, μεγέθους 245 MW και 50.4 MVAR το καθένα.

Από το προηγούμενο σενάριο, καθορίστηκε η βέλτιστη θέση του ενός αιολικού στο ζυγό 9. Σε αυτό το σενάριο, το ένα αιολικό θα βρίσκεται μόνιμα στο ζυγό 9 και θα εξεταστεί η βέλτιστη θέση του δεύτερου. Το δεύτερο αιολικό θα τοποθετηθεί διαδοχικά σε όλους τους ζυγούς εκτός του ζυγού αναφοράς και του ζυγού 9 και η επιλογή της θέσης θα γίνει και πάλι με βάση τις ελάχιστες απώλειες ισχύος. Η γεννήτρια στο ζυγό 21 καταργείται και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 16, μεγέθους 245 MW. Στις περιπτώσεις που κάποιος ζυγός έχει ήδη συμβατική γεννήτρια, τα MW θα αφαιρούνται πρώτα από εκεί και στη συνέχεια από τις υπόλοιπες που προαναφέρθηκαν.

6.4.1 Σύνδεση στο ζυγό 2

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 2 (Εικόνα 6.28) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 67MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 και τη γεννήτρια στο ζυγό 16, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 116MW.



Εικόνα 6.28: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 2

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 11.5 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.27.

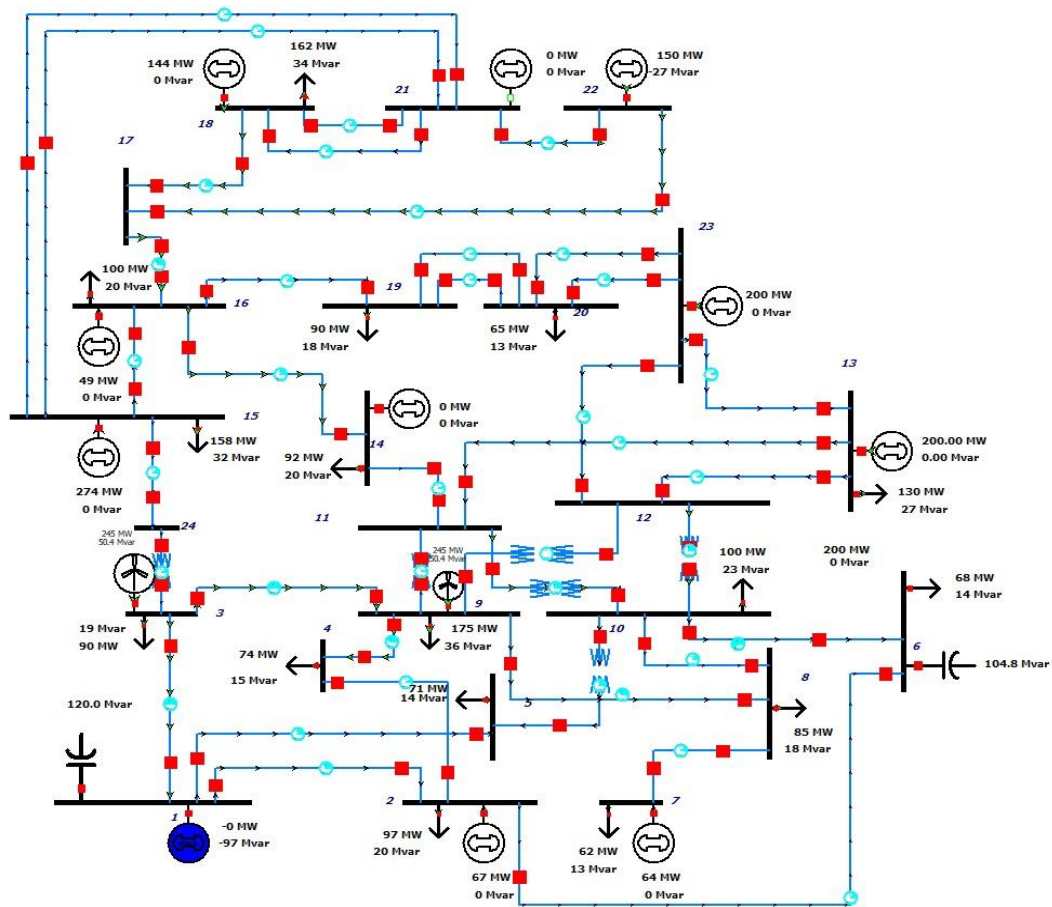
Πίνακας 6.27: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 2

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9884
2	1.0010	14	0.9781
3	0.9761	15	0.9825

4	0.9737	16	0.9821
5	0.9839	17	0.9856
6	1.0150	18	0.9841
7	0.9406	19	0.9837
8	0.9481	20	0.9891
9	0.9866	21	0.9869
10	0.9960	22	1.0000
11	0.9853	23	0.9931
12	0.9902	24	0.9771

6.4.2 Σύνδεση στο ζυγό 3

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 3 (Εικόνα 6.29). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.29: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 3

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 18.5 \text{ MW}$$

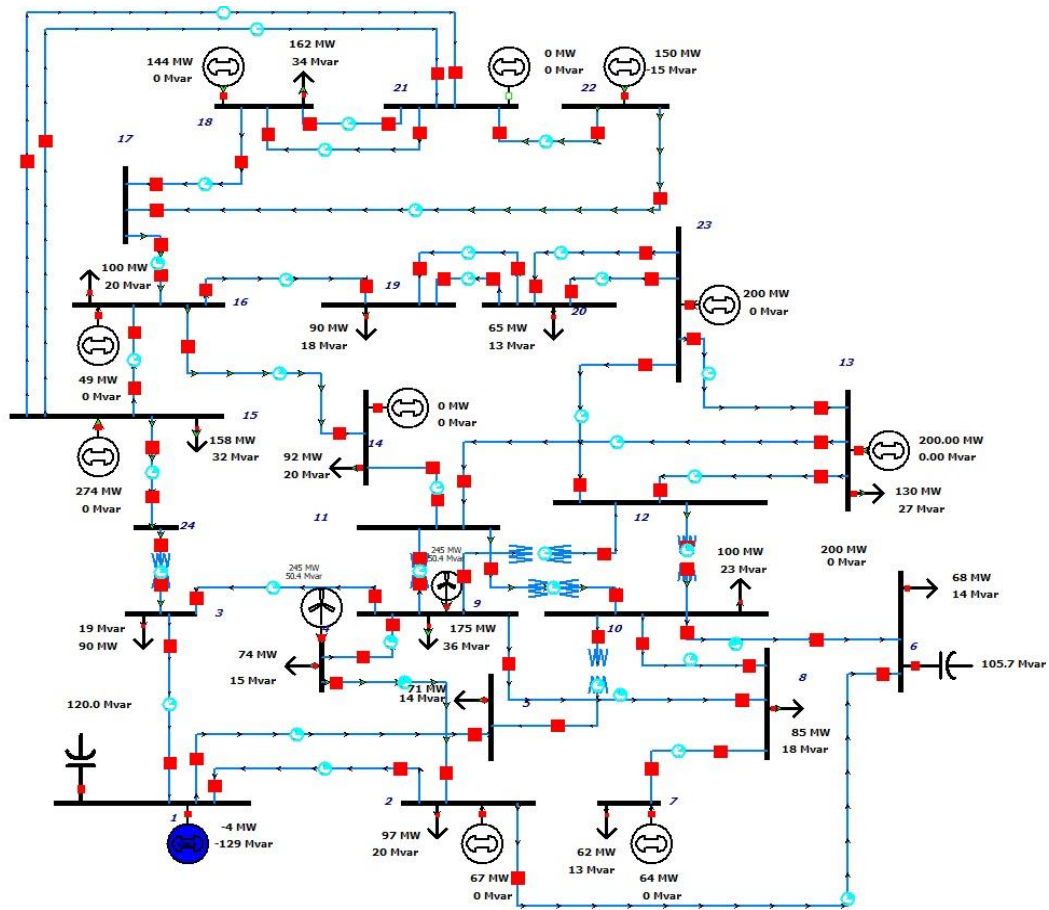
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.28.

Πίνακας 6.28: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 3

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0023
2	0.9995	14	0.9909
3	1.0360	15	1.0032
4	0.9820	16	0.9936
5	0.9906	17	0.9963
6	1.0238	18	0.9962
7	0.9560	19	0.9960
8	0.9635	20	1.0019
9	1.0038	21	1.0003
10	1.0088	22	1.0000
11	0.9990	23	1.0061
12	1.0043	24	1.0166

6.4.3 Σύνδεση στο ζυγό 4

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 4 (Εικόνα 6.30). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.30: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 4

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 14.7 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.29.

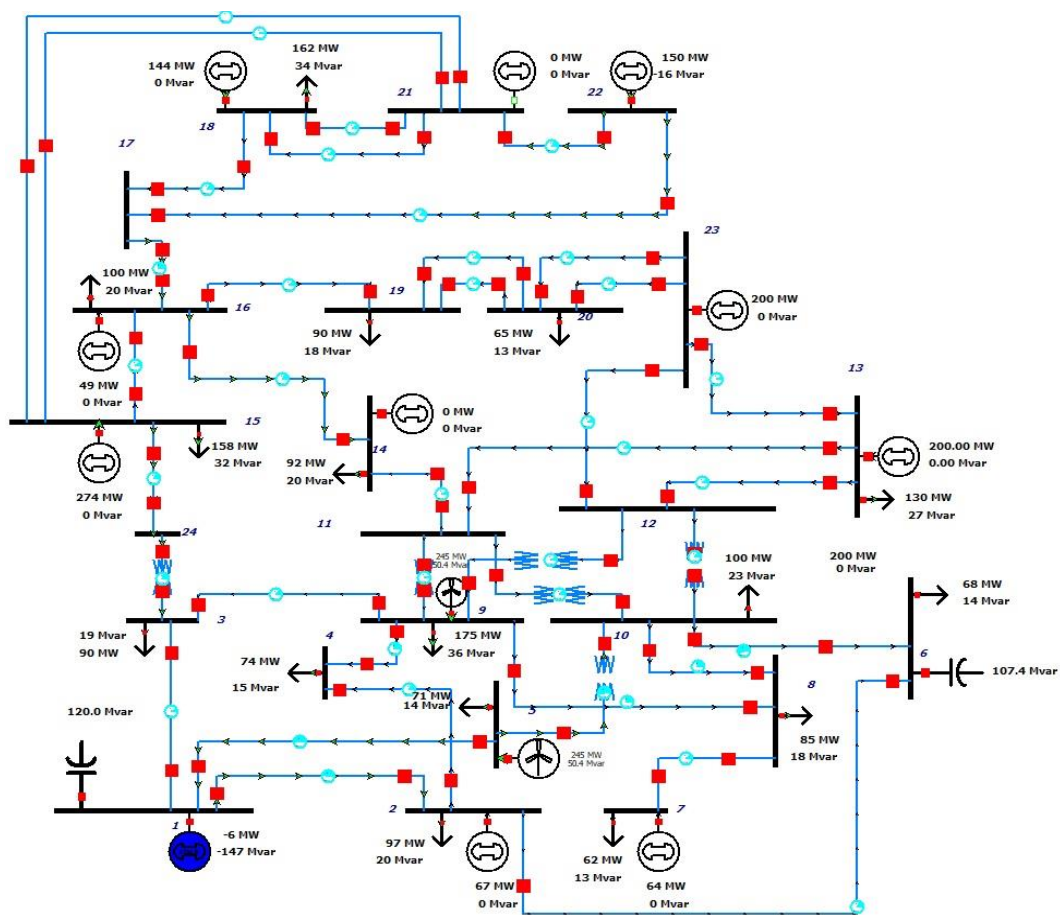
Πίνακας 6.29: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 4

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0068
2	1.0004	14	0.9931
3	0.9889	15	0.9911
4	1.0484	16	0.9930
5	0.9920	17	0.9935
6	1.0279	18	0.9916
7	0.9620	19	0.9967

8	0.9694	20	1.0037
9	1.0118	21	0.9939
10	1.0119	22	1.0000
11	1.0037	23	1.0086
12	1.0096	24	0.9883

6.4.4 Σύνδεση στο ζυγό 5

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 5 (Εικόνα 6.31). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.31: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 5

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 12.6 \text{ MW}$$

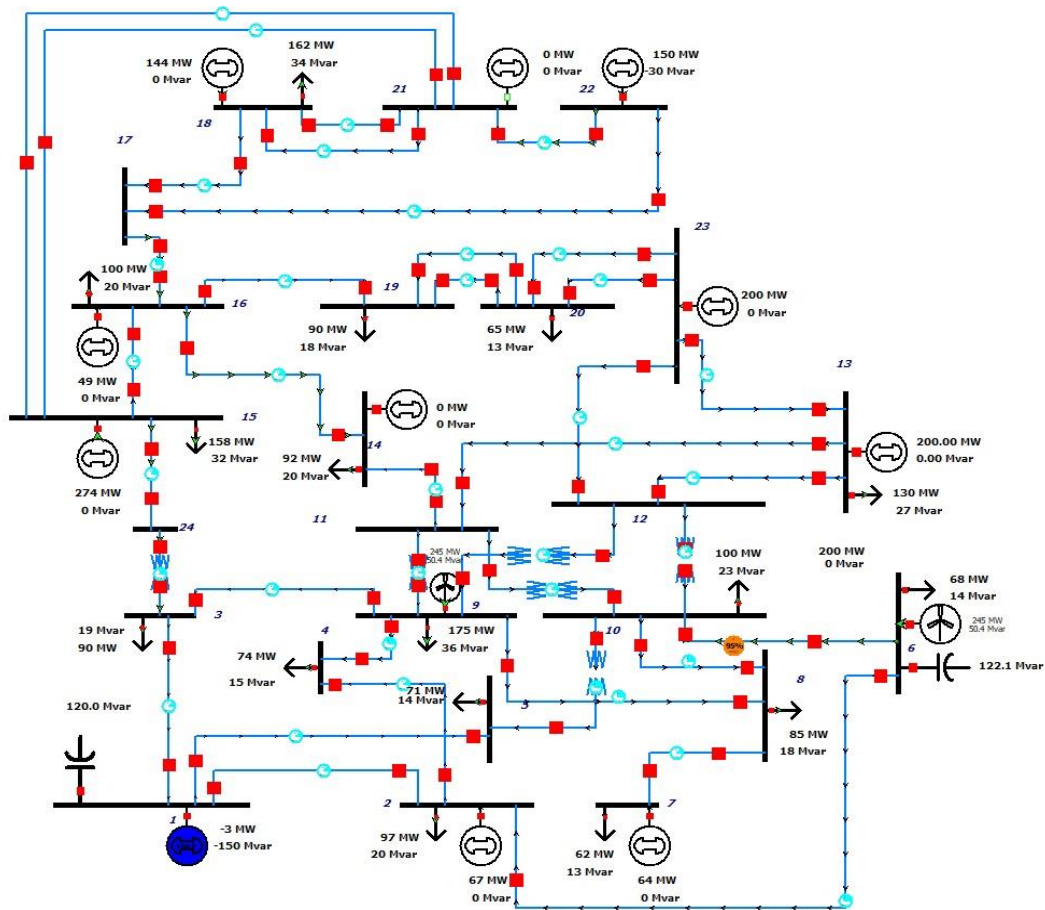
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.30.

Πίνακας 6.30: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 5

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0088
2	0.9995	14	0.9946
3	0.9860	15	0.9907
4	0.9827	16	0.9939
5	1.0440	17	0.9940
6	1.0362	18	0.9918
7	0.9645	19	0.9979
8	0.9718	20	1.0051
9	1.0039	21	0.9939
10	1.0226	22	1.0000
11	1.0057	23	1.0102
12	1.0117	24	0.9866

6.4.5 Σύνδεση στο ζυγό 6

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 6 (Εικόνα 6.32). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.32: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 6

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 15.9 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.31.

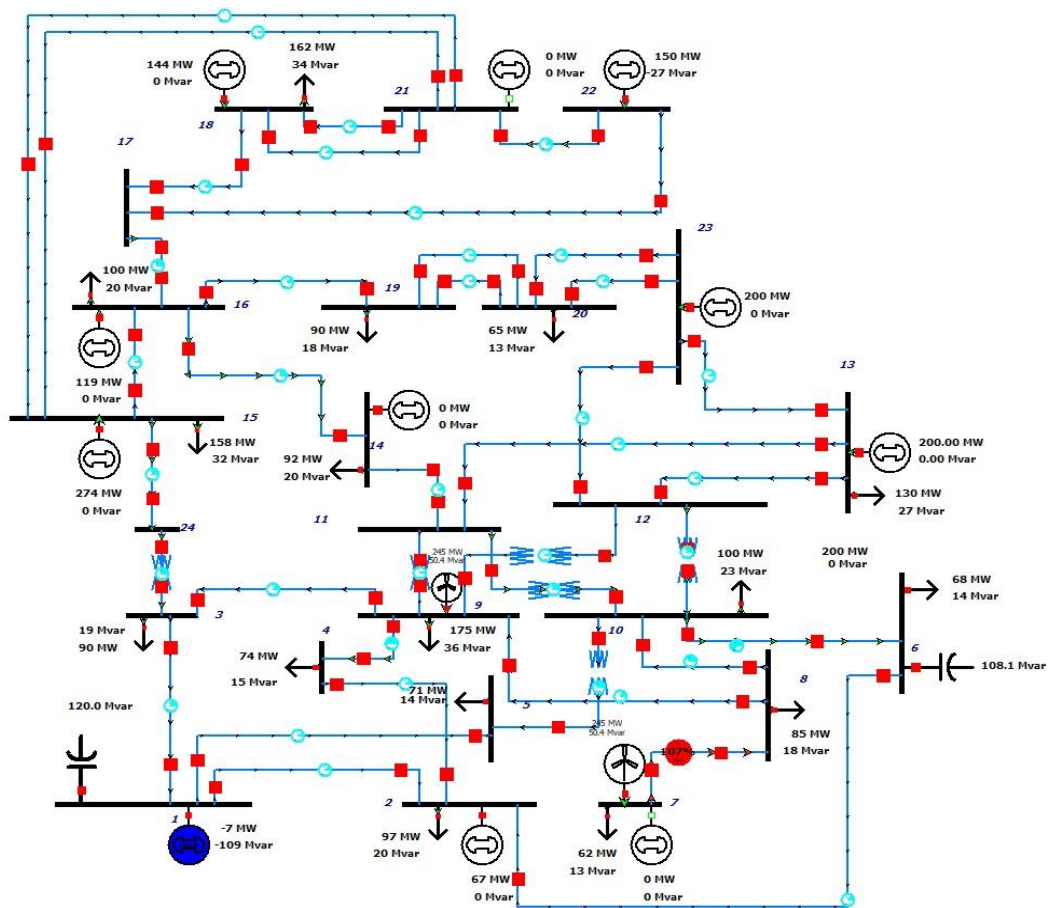
Πίνακας 6.31: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 6

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0226
2	1.0003	14	1.0061
3	0.9934	15	0.9965
4	0.9898	16	1.0030
5	1.0068	17	1.0004
6	1.1051	18	0.9976
7	0.9814	19	1.0083

8	0.9887	20	1.0166
9	1.0163	21	0.9990
10	1.0416	22	1.0000
11	1.0195	23	1.0221
12	1.0262	24	0.9927

6.4.6 Σύνδεση στο ζυγό 7

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 7 (Εικόνα 6.33) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 64MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 και τη γεννήτρια στο ζυγό 16, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 119MW.



Εικόνα 6.33: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 7

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 18.3 \text{ MW}$$

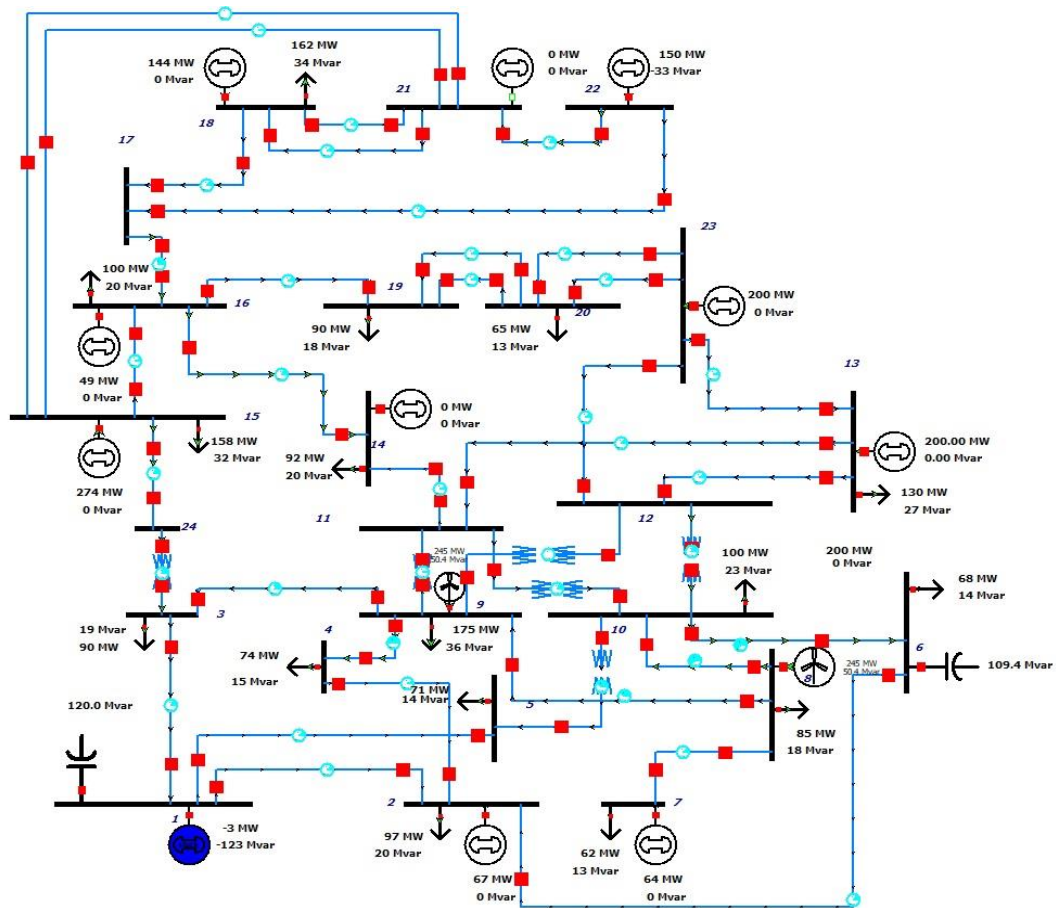
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.32.

Πίνακας 6.32: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 7

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0172
2	0.9998	14	1.0023
3	0.9938	15	0.9953
4	0.9903	16	1.0014
5	1.0007	17	0.9993
6	1.0395	18	0.9966
7	1.0911	19	1.0057
8	1.0470	20	1.0132
9	1.0192	21	0.9981
10	1.0293	22	1.0000
11	1.0141	23	1.0182
12	1.0204	24	0.9913

6.4.7 Σύνδεση στο ζυγό 8

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 8 (Εικόνα 6.34). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.34: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 8

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 16.06 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.33.

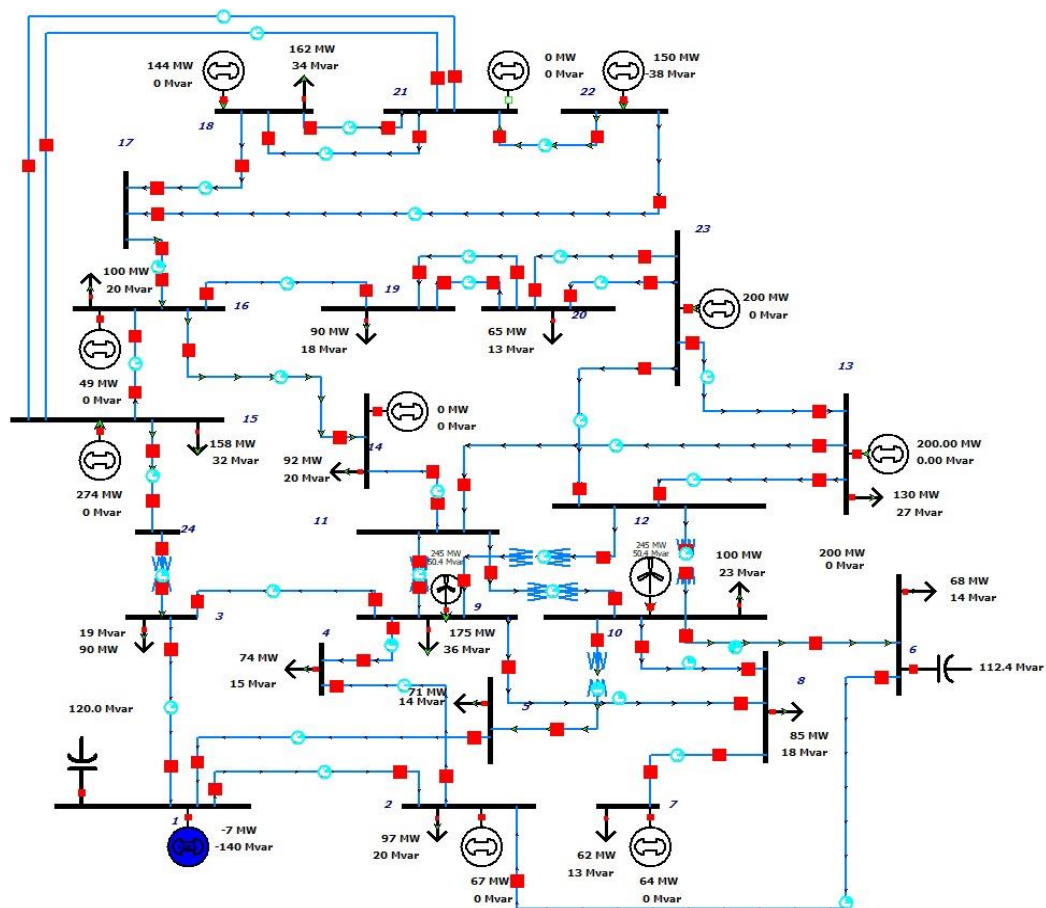
Πίνακας 6.33: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 8

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0245
2	0.9999	14	1.0078
3	0.9976	15	0.9983
4	0.9946	16	1.0046
5	1.0042	17	1.0017
6	1.0458	18	0.9989
7	1.0702	19	1.0100

8	1.0767	20	1.0183
9	1.0266	21	1.0003
10	1.0365	22	1.0000
11	1.0214	23	1.0239
12	1.0282	24	0.9956

6.4.8 Σύνδεση στο ζυγό 10

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 10 (Εικόνα 6.35). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.35: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 10

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 12.3 \text{ MW}$$

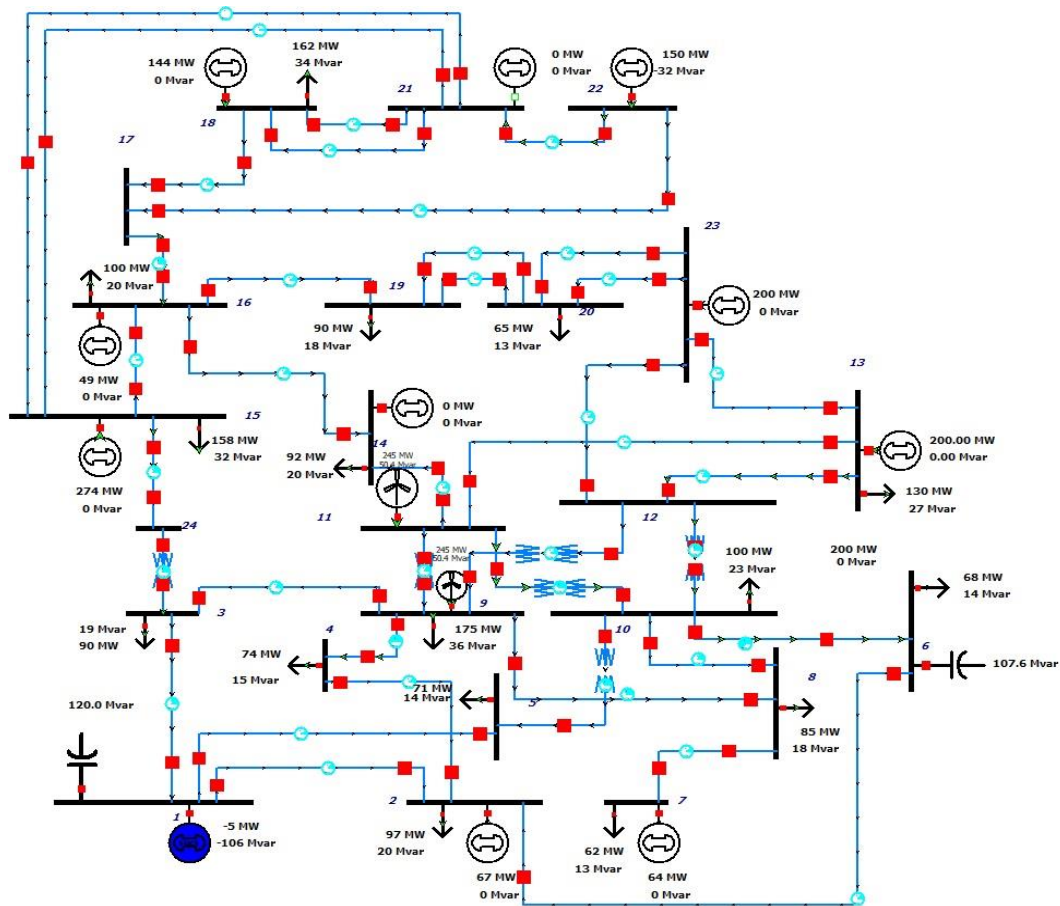
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.34.

Πίνακας 6.34: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 10

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0314
2	1.0000	14	1.0134
3	0.9980	15	1.0002
4	0.9938	16	1.0089
5	1.0129	17	1.0046
6	1.0603	18	1.0013
7	0.9924	19	1.0150
8	0.9995	20	1.0240
9	1.0241	21	1.0023
10	1.0544	22	1.0000
11	1.0283	23	1.0298
12	1.0355	24	0.9966

6.4.9 Σύνδεση στο ζυγό 11

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 11 (Εικόνα 6.36). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.36: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 11

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 13.6 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.35.

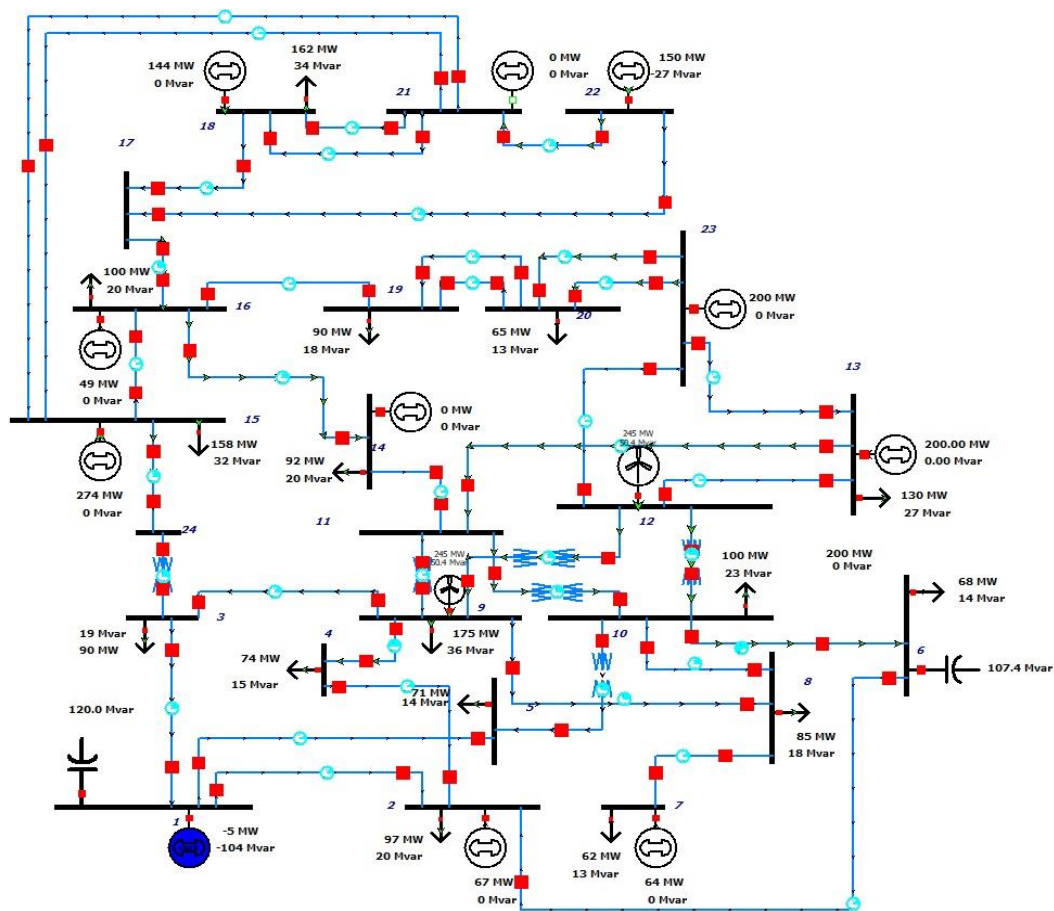
Πίνακας 6.35: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 11

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0232
2	0.9998	14	1.0106
3	0.9934	15	0.9968
4	0.9890	16	1.0049
5	0.9994	17	1.0017
6	1.0373	18	0.9985
7	0.9732	19	1.0093

8	0.9805	20	1.0168
9	1.0168	21	0.9997
10	1.0268	22	1.0000
11	1.0265	23	1.0219
12	1.0212	24	0.9919

6.4.10 Σύνδεση στο ζυγό 12

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 12 (Εικόνα 6.37). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.37: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 12

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 14.1 \text{ MW}$$

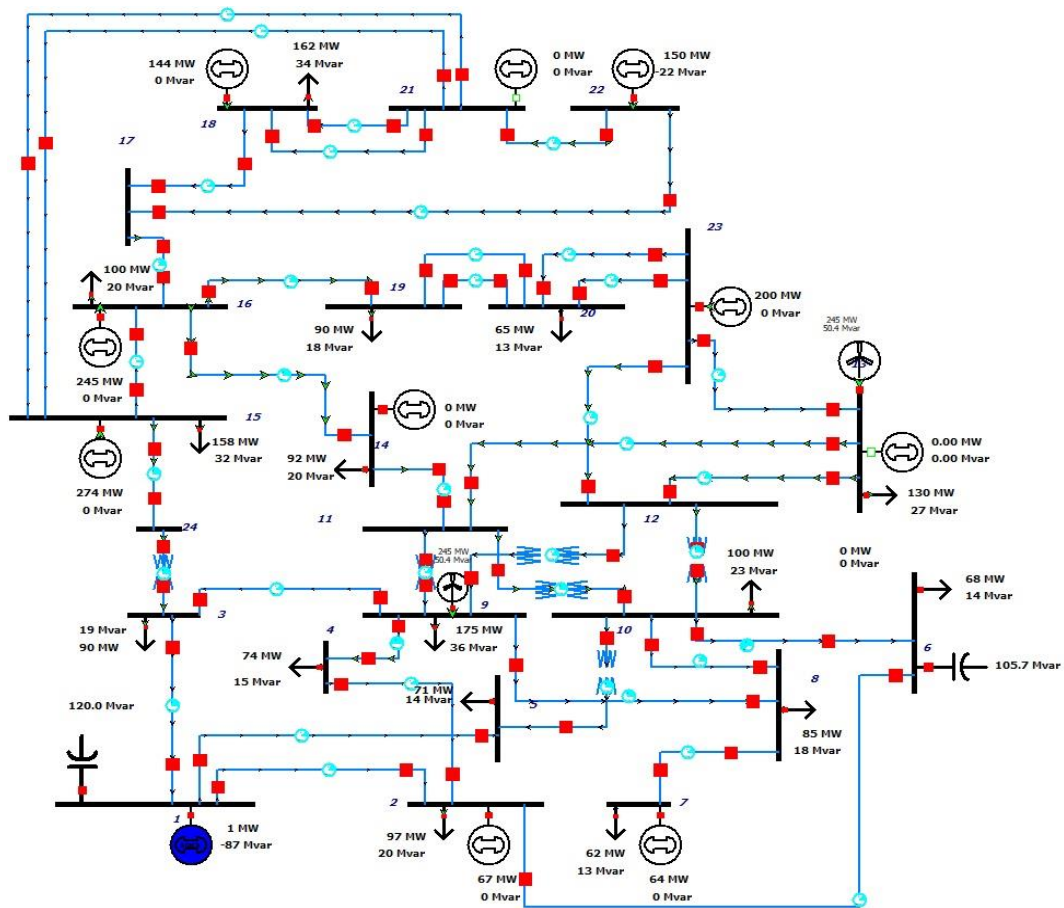
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.36.

Πίνακας 6.36: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 12

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0225
2	0.9998	14	1.0024
3	0.9923	15	0.9951
4	0.9884	16	1.0014
5	0.9990	17	0.9993
6	1.0365	18	0.9965
7	0.9723	19	1.0076
8	0.9796	20	1.0167
9	1.0159	21	0.9980
10	1.0260	22	1.0000
11	1.0138	23	1.0228
12	1.0320	24	0.9907

6.4.11 Σύνδεση στο ζυγό 13

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 13 (Εικόνα 6.38) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 200MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21.



Εικόνα 6.38: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 13

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 16.4 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.37.

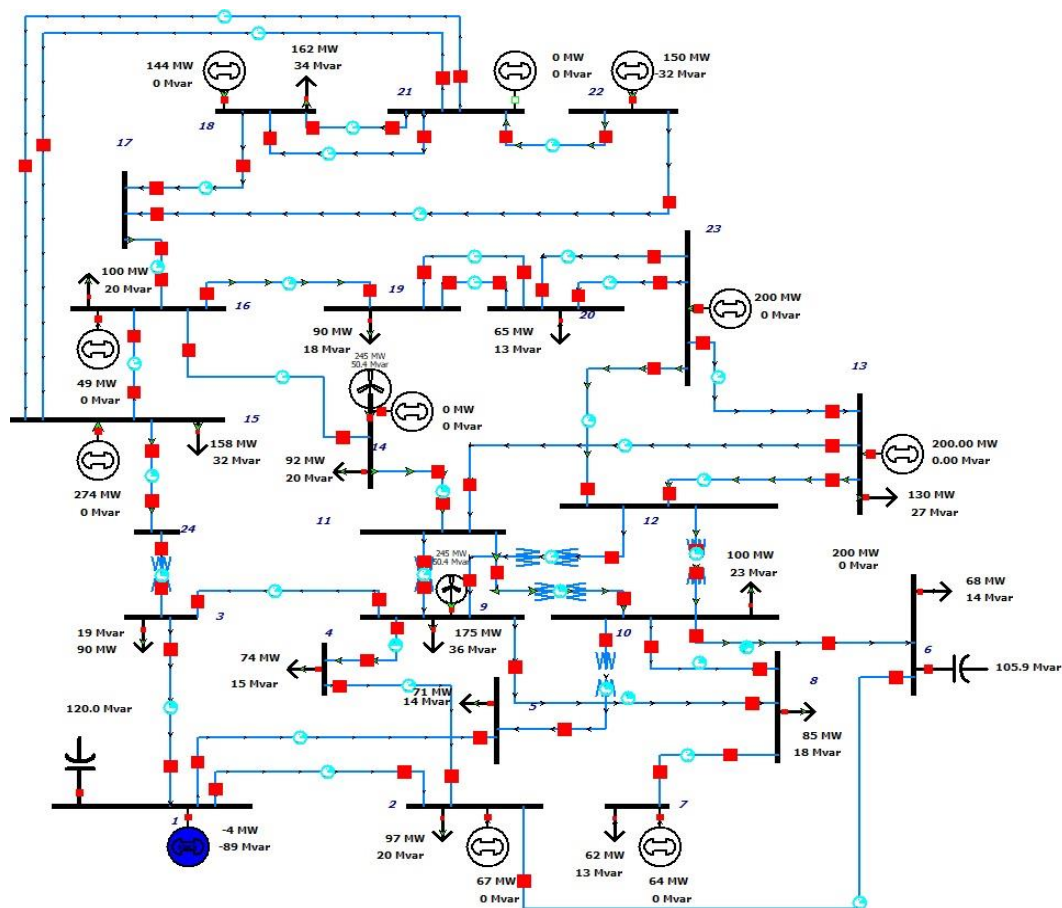
Πίνακας 6.37: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 13

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0205
2	0.9996	14	0.9966
3	0.9867	15	0.9913
4	0.9824	16	0.9994
5	0.9940	17	0.9974
6	1.0281	18	0.9944
7	0.9610	19	1.0035

8	0.9684	20	1.0109
9	1.0051	21	0.9956
10	1.0158	22	1.0000
11	1.0063	23	1.0158
12	1.0129	24	0.9839

6.4.12 Σύνδεση στο ζυγό 14

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 14 (Εικόνα 6.39). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.39: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 14

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 15.2 \text{ MW}$$

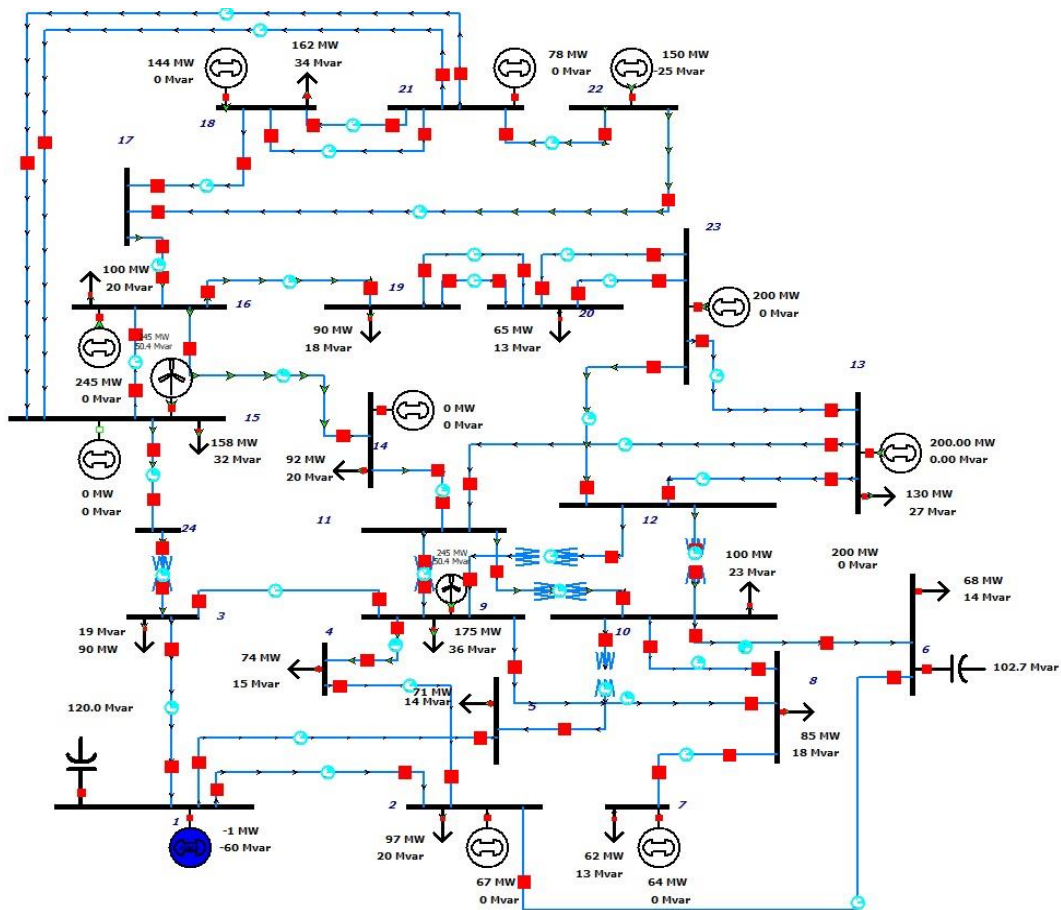
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.38.

Πίνακας 6.38: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 14

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0117
2	0.9997	14	1.0192
3	0.9891	15	0.9957
4	0.9833	16	1.0066
5	0.9946	17	1.0024
6	1.0289	18	0.9988
7	0.9626	19	1.0079
8	0.9699	20	1.0128
9	1.0068	21	0.9995
10	1.0170	22	1.0000
11	1.0110	23	1.0164
12	1.0109	24	0.9882

6.4.13 Σύνδεση στο ζυγό 15

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 15 (Εικόνα 6.40) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 274MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 78 MW.



Εικόνα 6.40: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 15

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 18.4 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.39.

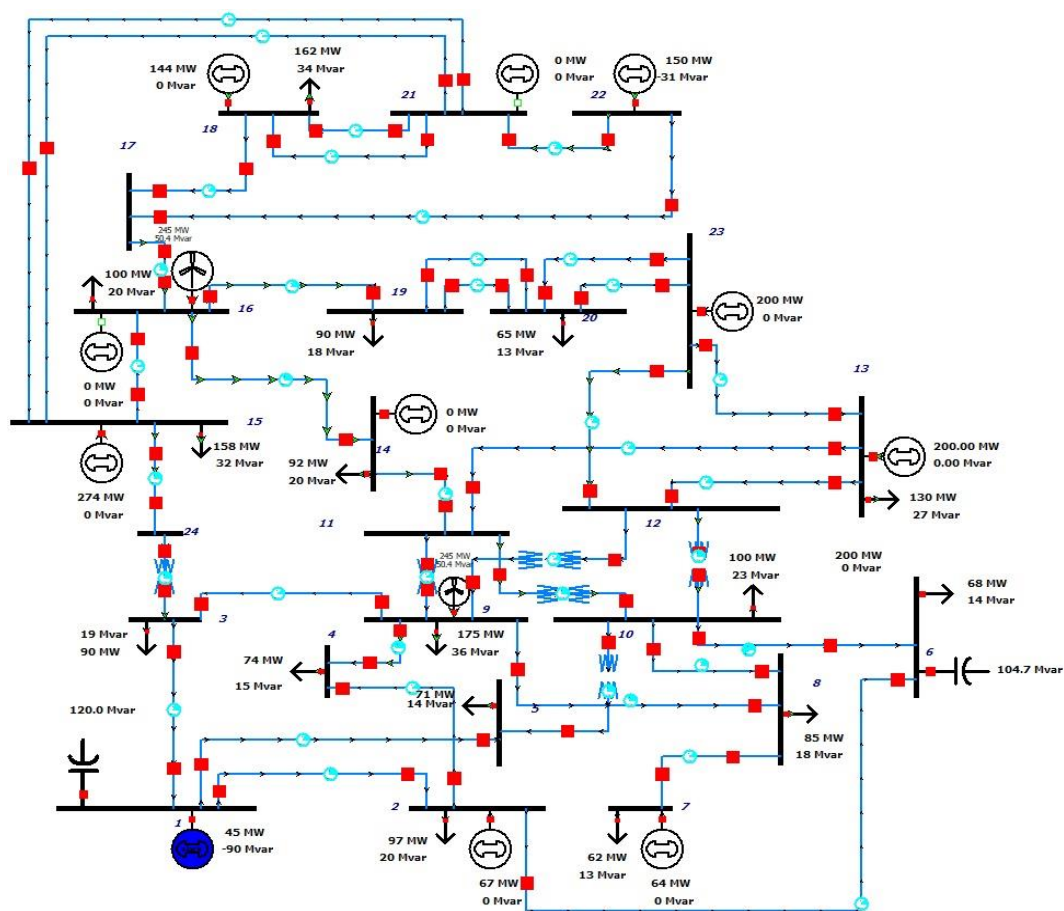
Πίνακας 6.39: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 15

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9885
2	0.9995	14	0.9808
3	0.9836	15	1.0011
4	0.9734	16	0.9896
5	0.9857	17	0.9945
6	1.0134	18	0.9952
7	0.9435	19	0.9891

8	0.9511	20	0.9928
9	0.9893	21	0.9997
10	0.9993	22	1.0000
11	0.9853	23	0.9957
12	0.9899	24	0.9877

6.4.14 Σύνδεση στο ζυγό 16

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 16 (Εικόνα 6.41) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 245MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21.



Εικόνα 6.41: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 16

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 14.6 \text{ MW}$$

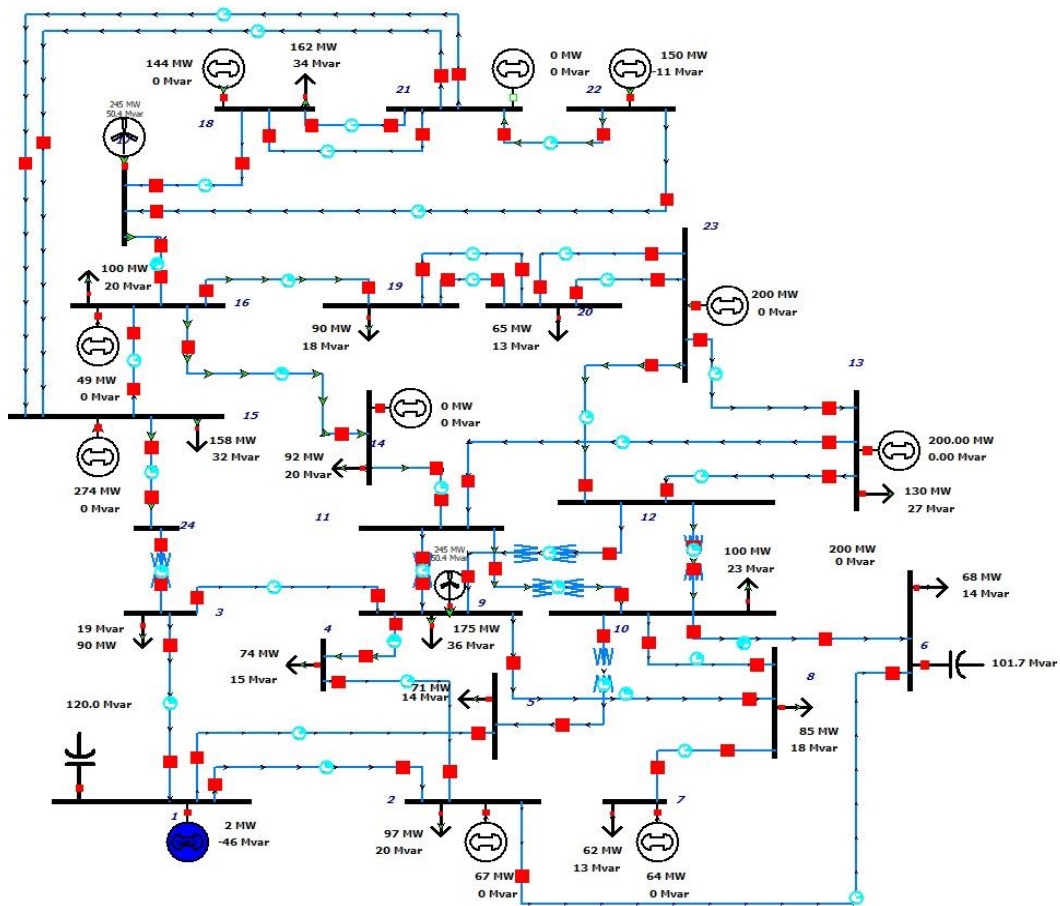
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.40.

Πίνακας 6.40: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 16

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0026
2	0.9995	14	0.9968
3	0.9857	15	0.9947
4	0.9793	16	1.0065
5	0.9906	17	1.0021
6	1.0230	18	0.9984
7	0.9537	19	1.0056
8	0.9612	20	1.0088
9	0.9986	21	0.9989
10	1.0087	22	1.0000
11	0.9991	23	1.0114
12	1.0030	24	0.9861

6.4.15 Σύνδεση στο ζυγό 17

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 17 (Εικόνα 6.42). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.42: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 17

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 21.1 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.41.

Πίνακας 6.41: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 17

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9809
2	0.9994	14	0.9726
3	0.9727	15	0.9814
4	0.9692	16	0.9805
5	0.9829	17	0.9948
6	1.0084	18	0.9902
7	0.9363	19	0.9803

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 19.02 \text{ MW}$$

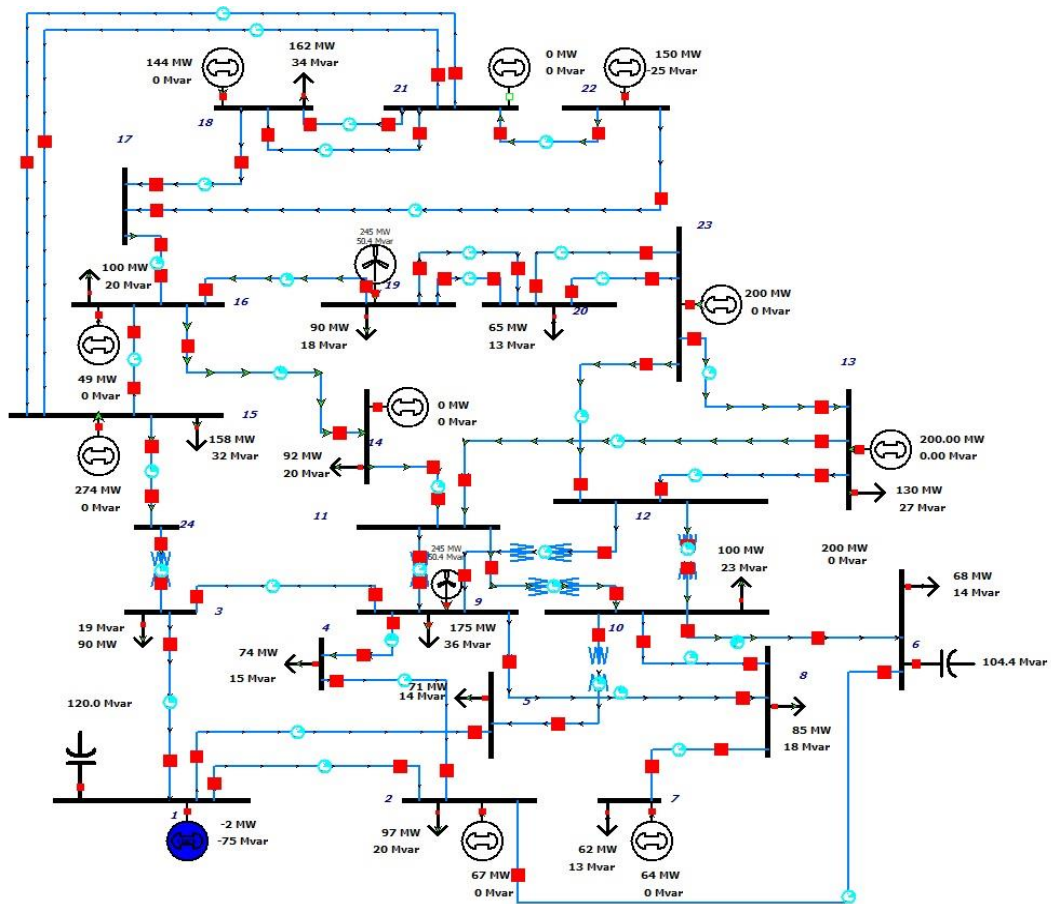
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.42.

Πίνακας 6.42: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 18

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9866
2	0.9994	14	0.9791
3	0.9781	15	0.9896
4	0.9720	16	0.9879
5	0.9850	17	0.9963
6	1.0120	18	0.9994
7	0.9413	19	0.9874
8	0.9489	20	0.9910
9	0.9867	21	0.9979
10	0.9977	22	1.0000
11	0.9835	23	0.9939
12	0.9880	24	0.9780

6.4.17 Σύνδεση στο ζυγό 19

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 19 (Εικόνα 6.44). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.44: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 19

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 17.5 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.43.

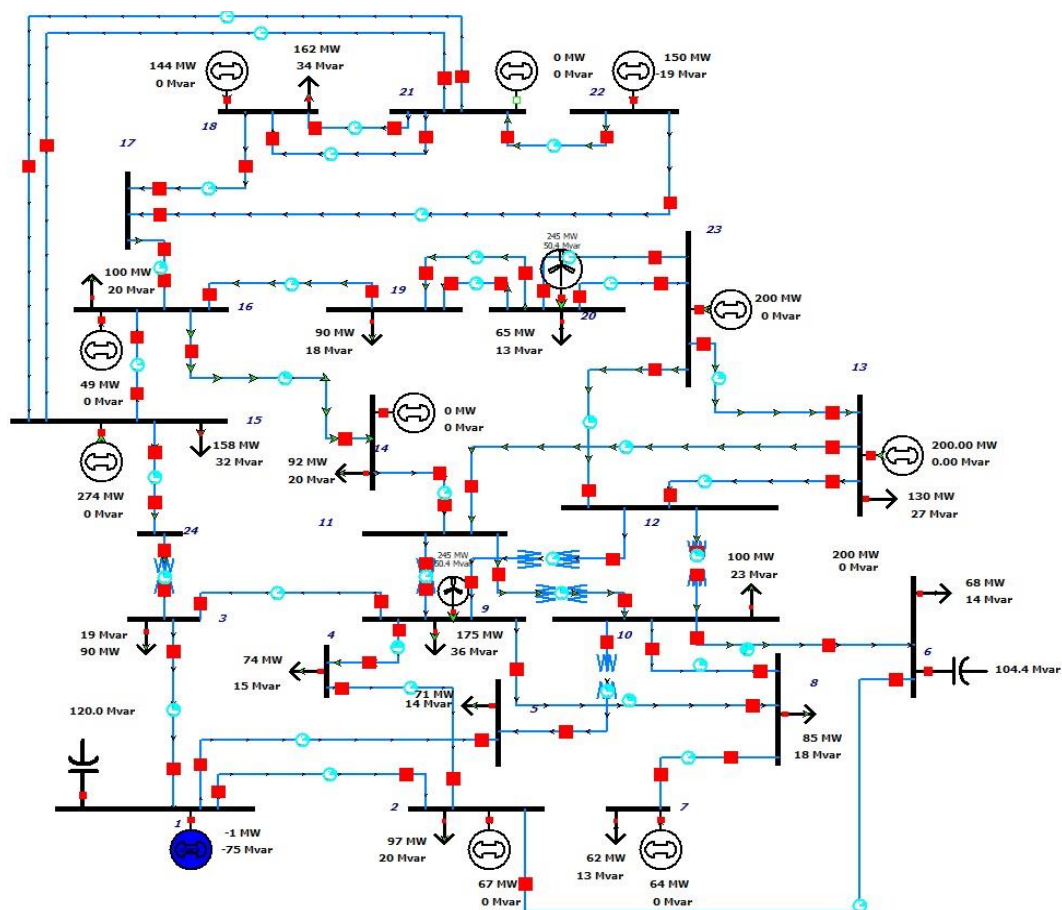
Πίνακας 6.43: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 19

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0027
2	0.9996	14	0.9938
3	0.9840	15	0.9920
4	0.9785	16	1.0021
5	0.9904	17	0.9991
6	1.0216	18	0.9956
7	0.9535	19	1.0160

8	0.9609	20	1.0160
9	0.9982	21	0.9965
10	1.0087	22	1.0000
11	0.9975	23	1.0169
12	1.0026	24	0.9833

6.4.18 Σύνδεση στο ζυγό 20

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 20 (Εικόνα 6.45). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.45: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 20

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 18.1 \text{ MW}$$

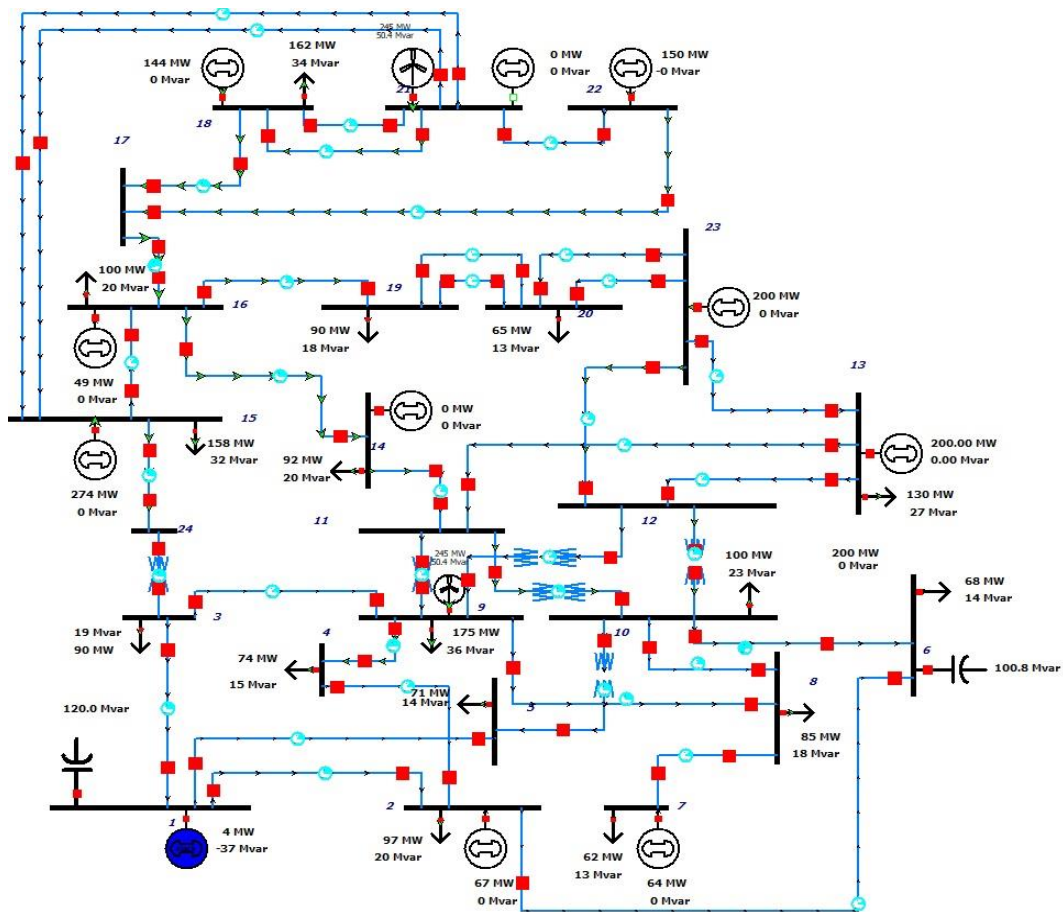
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.44

Πίνακας 6.44: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 20

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0037
2	0.9996	14	0.9919
3	0.9835	15	0.9903
4	0.9786	16	0.9978
5	0.9906	17	0.9963
6	1.0218	18	0.9933
7	0.9538	19	1.0084
8	0.9613	20	1.0218
9	0.9985	21	0.9946
10	1.0091	22	1.0000
11	0.9974	23	1.0216
12	1.0035	24	0.9826

6.4.19 Σύνδεση στο ζυγό 21

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 21 (Εικόνα 6.46) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 294MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 16, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.46: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 21

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 22.8 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.45.

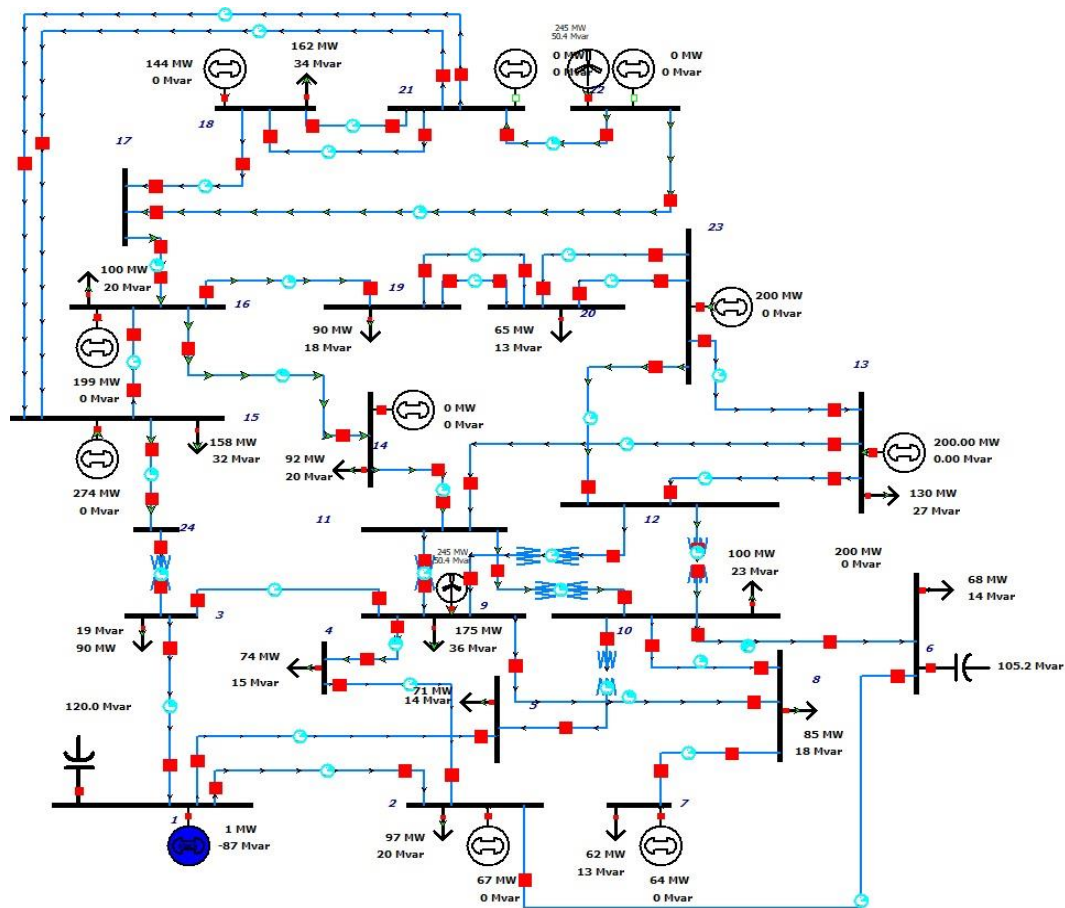
Πίνακας 6.45: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 21

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9741
2	0.9993	14	0.9643
3	0.9694	15	0.9802
4	0.9661	16	0.9706
5	0.9804	17	0.9810
6	1.0041	18	0.9845
7	0.9306	19	0.9712

8	0.9383	20	0.9758
9	0.9762	21	0.9924
10	0.9885	22	1.0000
11	0.9713	23	0.9794
12	0.9764	24	0.9670

6.4.20 Σύνδεση στο ζυγό 22

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 22 (Εικόνα 6.47) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 150MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21 και τη γεννήτρια στο ζυγό 16, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται στα 199MW.



Εικόνα 6.47: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 22

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 19.02 \text{ MW}$$

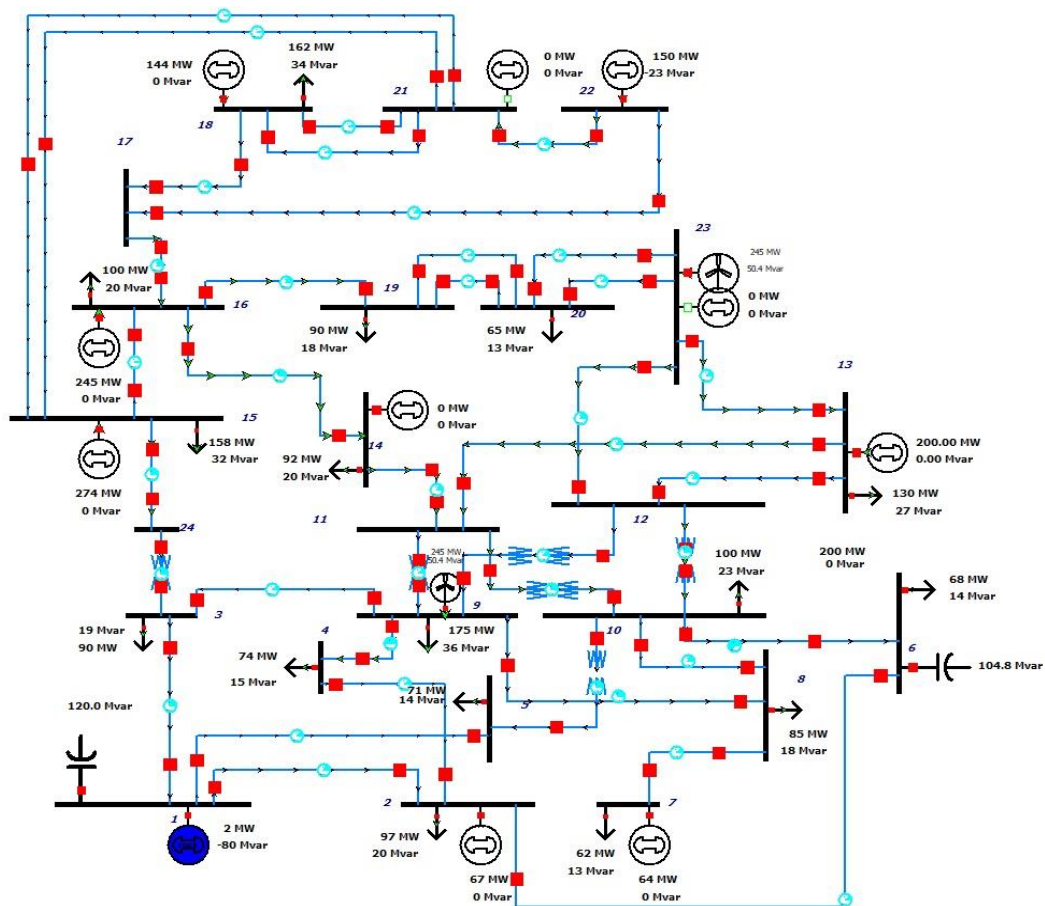
Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.46.

Πίνακας 6.46: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 22

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0072
2	0.9996	14	1.0024
3	0.9958	15	1.0170
4	0.9817	16	1.0135
5	0.9925	17	1.0235
6	1.0255	18	1.0231
7	0.9586	19	1.0120
8	0.9660	20	1.0146
9	1.0037	21	1.0266
10	1.0128	22	1.0598
11	1.0036	23	1.0169
12	1.0073	24	1.0022

6.4.21 Σύνδεση στο ζυγό 23

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 23 (Εικόνα 6.48) ο οποίος περιέχει ήδη συμβατική γεννήτρια μεγέθους 200MW. Η γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και τα υπόλοιπα MW αφαιρούνται από τη γεννήτρια στο ζυγό 21.



Εικόνα 6.48: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 23

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 17.1 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.47.

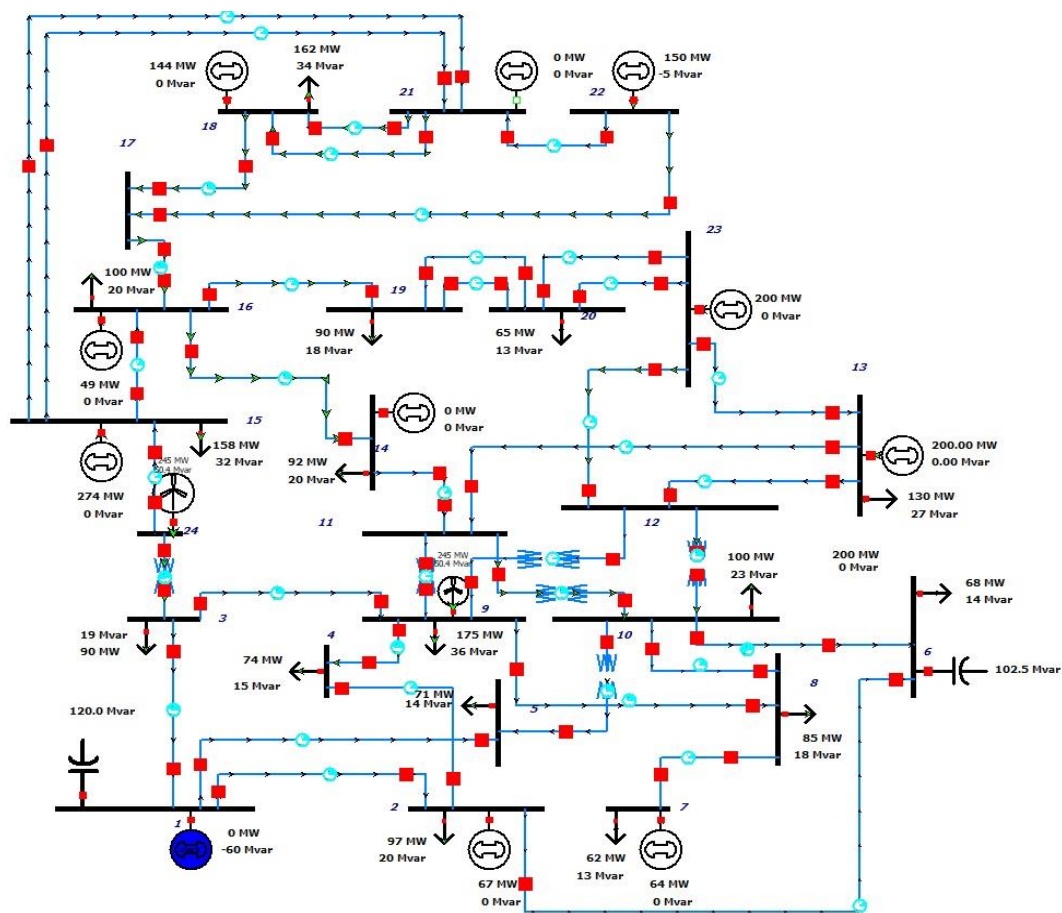
Πίνακας 6.47: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 23

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	1.0071
2	0.9996	14	0.9939
3	0.9848	15	0.9913
4	0.9798	16	1.0007
5	0.9917	17	0.9982
6	1.0240	18	0.9949
7	0.9560	19	1.0079

8	0.9634	20	1.0179
9	1.0004	21	0.9958
10	1.0112	22	1.0000
11	0.9997	23	1.0242
12	1.0072	24	0.9829

6.4.22 Σύνδεση στο ζυγό 24

Το Αιολικό πάρκο τοποθετείται στο ζυγό 24 (Εικόνα 6.49). Δεν υπάρχει συμβατική γεννήτρια, οπότε καταργείται η γεννήτρια στο ζυγό 21 και το μέγεθος της γεννήτριας στο ζυγό 16 διαμορφώνεται στα 49MW.



Εικόνα 6.49: Σύνδεση του δεύτερου αιολικού πάρκου στο ζυγό 24

Εκτελείται η ανάλυση ροής φορτίου και οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$P_{\text{losses}} = 19.4 \text{ MW}$$

Οι τάσεις (pu) στους ζυγούς του συστήματος εμφανίζονται στον Πίνακα 6.48.

Πίνακας 6.48: Οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε pu. Αιολικό στο ζυγό 24

Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)	Ζυγός	ΤΑΣΗ(pu)
1	1.0000	13	0.9860
2	0.9994	14	0.9756
3	0.9939	15	0.9937
4	0.9724	16	0.9802
5	0.9847	17	0.9860
6	1.0124	18	0.9867
7	0.9409	19	0.9816
8	0.9485	20	0.9869
9	0.9871	21	0.9918
10	0.9970	22	1.0000
11	0.9830	23	0.9908
12	0.9882	24	1.0090

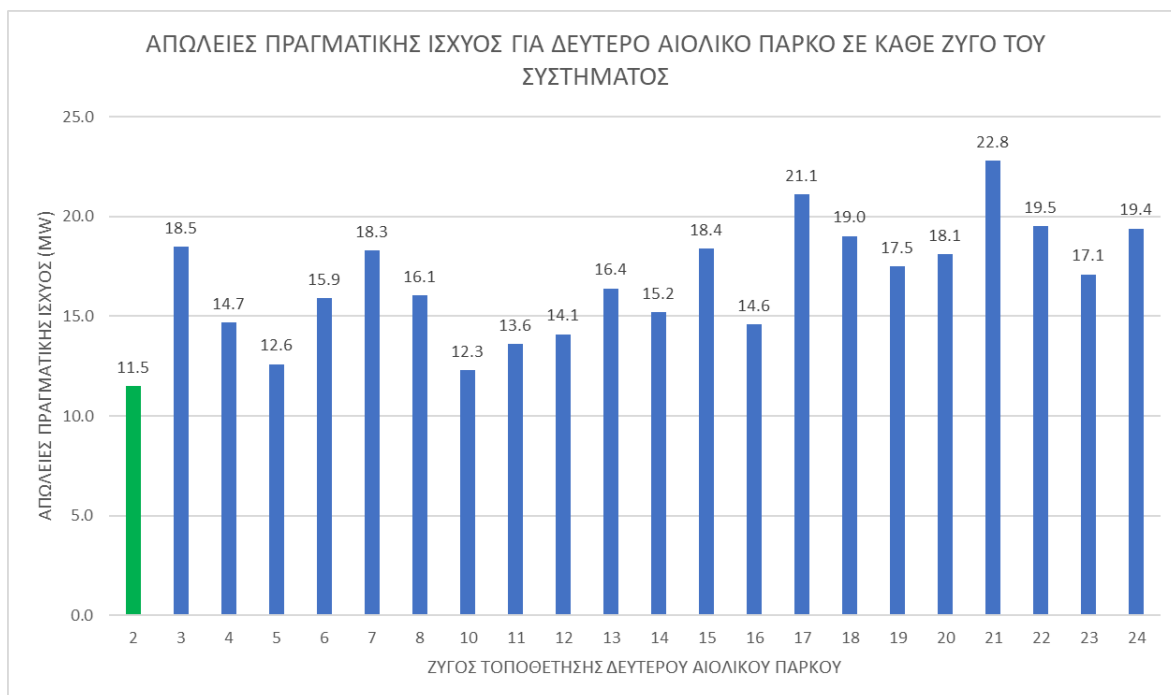
6.4.23 Επιλογή ζυγού σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου στο δίκτυο

Και σε αυτό το σενάριο, σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των απωλειών ισχύος. Στον Πίνακα 6.49 και στο Σχήμα 6.2 παραθέτονται συγκριτικά οι απώλειες, αρχικά χωρίς αιολικό πάρκο στο σύστημα και στη συνέχεια μετά την τοποθέτηση του σε κάθε ζυγό του συστήματος, εκτός του ζυγού αναφοράς και του ζυγού 9 στον οποίο έχει τοποθετηθεί αιολικό πάρκο στο προηγούμενο σενάριο. Σύμφωνα με τα δεδομένα, ο ζυγός τοποθέτησης του αιολικού πάρκου με τις μικρότερες απώλειες πραγματικής ισχύος είναι ο ζυγός 2, όπου οι απώλειες είναι 11.5 MW. Συνεπώς, κρίνεται ως βέλτιστος για την τοποθέτηση του Αιολικού Πάρκου.

Πίνακας 6.49: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος

ΖΥΓΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ	ΑΠΩΛΕΙΕΣ (MW)
Χωρίς Αιολικό	54.8
2	11.5
3	18.5

4	14.7
5	12.6
6	15.9
7	18.3
8	16.05
10	12.3
11	13.6
12	14.1
13	16.4
14	15.2
15	18.4
16	14.6
17	21.1
18	19.02
19	17.5
20	18.1
21	22.8
22	19.5
23	17.1
24	19.4



Σχήμα 6.2: Απώλειες πραγματικής ισχύος για Αιολικό σε κάθε ζυγό του συστήματος

Παρατηρούμε επίσης πως και σε αυτό το σενάριο βελτιώθηκε αισθητά το προφίλ των τάσεων των ζυγών του συστήματος. Οι τιμές (σε pu) βρίσκονται εντός των ορίων $0.95 < V < 1.05$, ή πολύ κοντά σε αυτές, στην περίπτωση των ζυγών 8 και 9 (Πίνακας 6.50).

Πίνακας 6.50: Σύγκριση των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος πριν και μετά τη χωροθέτηση του Αιολικού Πάρκου

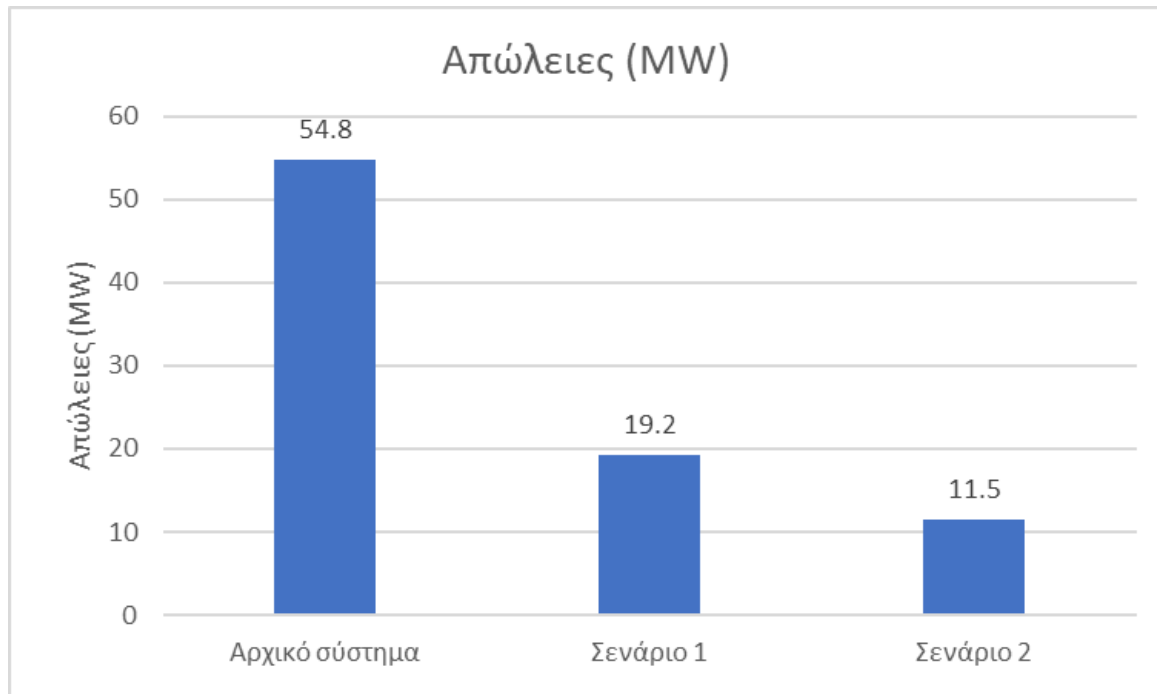
Ζυγός	Τάσεις χωρίς Αιολικό (pu)	Τάσεις με Αιολικά στους ζυγούς 2 και 9
1	1.0000	1.0000
2	0.9978	1.0010
3	0.8639	0.9761
4	0.8872	0.9737
5	0.9269	0.9839
6	0.9084	1.0150
7	0.7967	0.9406

8	0.8058	0.9481
9	0.8353	0.9866
10	0.8822	0.9960
11	0.8365	0.9853
12	0.8402	0.9902
13	0.8373	0.9884
14	0.8368	0.9781
15	0.8854	0.9825
16	0.8624	0.9821
17	0.8959	0.9856
18	0.9013	0.9841
19	0.8521	0.9837
20	0.8497	0.9891
21	0.9114	0.9869
22	1.0000	1.0000
23	0.8501	0.9931
24	0.8552	0.9771

6.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Ακολουθούν συγκεντρωτικά οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος χωρίς τη διείσδυση αιολικών αλλά και στα δύο σενάρια που μελετήθηκαν (Σχήμα 6.3). Στο πρώτο σενάριο, ένα αιολικό πάρκο μεγέθους 245 MW τοποθετήθηκε στο ζυγό 9 καθώς ήταν αυτός με τις μικρότερες απώλειες ισχύος και έγινε αλλαγή του μεγέθους της συμβατικής γεννήτριας στο ζυγό 21 από 294 MW σε 49MW. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε τη σύνδεση δύο αιολικών πάρκων μεγέθους 245 MW το καθένα. Το πρώτο τοποθετήθηκε στο ζυγό 9 και το δεύτερο στο ζυγό 2 καθώς αυτός ο συνδυασμός είχε τις μικρότερες απώλειες σύμφωνα με τα αποτελέσματα. Η συμβατική γεννήτρια που προϋπήρχε στο ζυγό 2

αφαιρέθηκε από το σύστημα και τα υπόλοιπα MW αφαιρέθηκαν από τη γεννήτρια στο ζυγό 21, το μέγεθος της οποίας διαμορφώθηκε στα 116 MW.



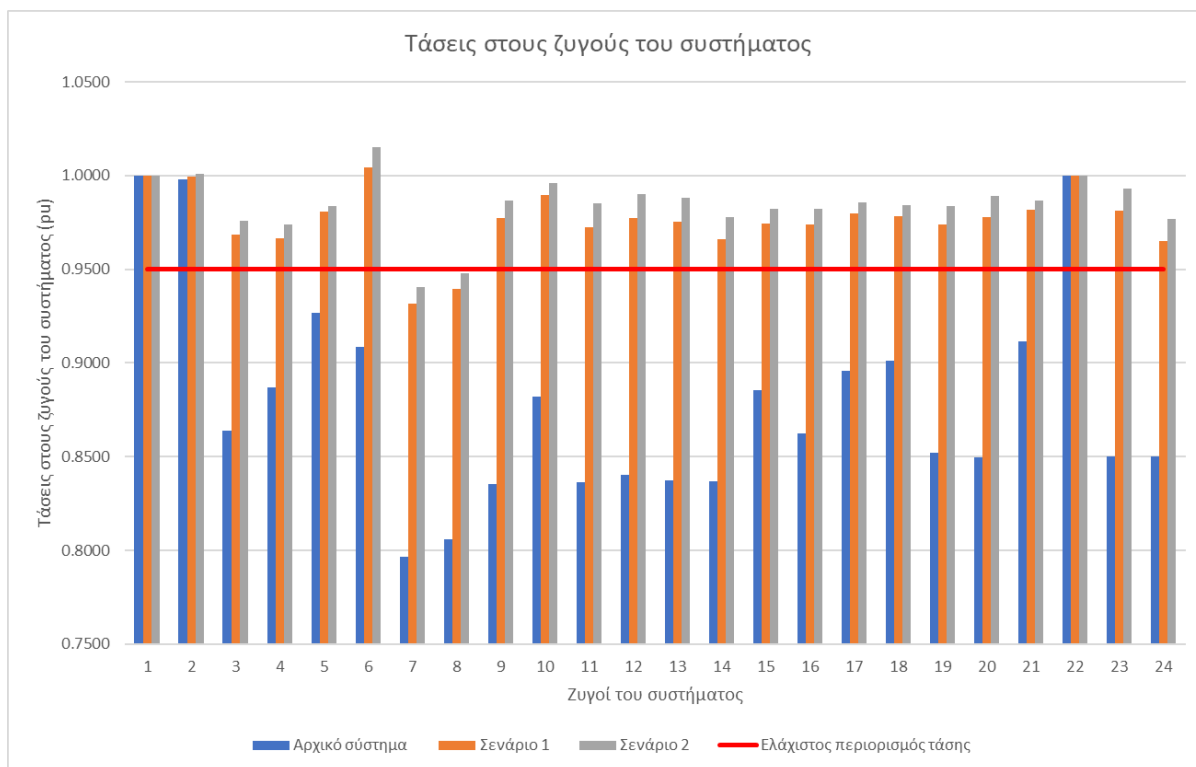
Σχήμα 6.3: Απώλειες πραγματικής ισχύος σε κάθε σενάριο

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος για κάθε σενάριο αλλά και οι αρχικές τάσεις σε p.u. χωρίς τη διεύθυνση αιολικών πάρκων (Πίνακας 6.51) (Σχήμα 6.4).

Πίνακας 6.51: Τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε κάθε σενάριο

Ζυγός	Αρχικό σύστημα	Σενάριο 1	Σενάριο 2
1	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9978	0.9993	1.0010
3	0.8639	0.9684	0.9761
4	0.8872	0.9666	0.9737
5	0.9269	0.9808	0.9839
6	0.9084	1.0046	1.0150

7	0.7967	0.9319	0.9406
8	0.8058	0.9395	0.9481
9	0.8353	0.9774	0.9866
10	0.8822	0.9895	0.9960
11	0.8365	0.9724	0.9853
12	0.8402	0.9773	0.9902
13	0.8373	0.9752	0.9884
14	0.8368	0.9663	0.9781
15	0.8854	0.9745	0.9825
16	0.8624	0.9740	0.9821
17	0.8959	0.9796	0.9856
18	0.9013	0.9785	0.9841
19	0.8521	0.9739	0.9837
20	0.8497	0.9781	0.9891
21	0.9114	0.9816	0.9869
22	1.0000	1.0000	1.0000
23	0.8501	0.9814	0.9931
24	0.8501	0.9649	0.9771



Σχήμα 6.4: Τάσεις στους ζυγούς του συστήματος σε κάθε σενάριο

Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν δύο σενάρια διείσδυσης αιολικών πάρκων σε ένα υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη θέση τοποθέτησης τους. Το πρώτο σενάριο αφορά τη σύνδεση ενός αιολικού πάρκου το οποίο καλύπτει το 15% της ζήτησης του φορτίου. Το δεύτερο σενάριο αφορά την επέκταση του δικτύου ώστε το 30% της ζήτησης του φορτίου να καλύπτεται από δύο αιολικά πάρκα. Και στα δύο σενάρια, παρατηρήθηκε μείωση των απωλειών ισχύος αλλά και βελτίωση του προφίλ των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος. Συγκεκριμένα, στο πρώτο σενάριο οι απώλειες μειώθηκαν στα 19.2 MW από τα 54.8 MW που ήταν αρχικά όταν τοποθετήθηκε το αιολικό πάρκο στο ζυγό 9 και στο δεύτερο στα 11.5 MW όταν τοποθετήθηκαν δύο αιολικά πάρκα, ένα στο ζυγό 2 και ένα στο ζυγό 9. Η διάρθρωση του δικτύου αλλά και το ποσοστό της διείσδυσης έχουν καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των απωλειών. Όσο πιο κοντά βρίσκονται τα αιολικά στα σημεία που υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου, παρατηρούνται και μικρότερες απώλειες, καθώς μειώνεται η απόσταση από την παραγωγή μέχρι το φορτίο, άρα και η αντίσταση των γραμμών μεταφοράς και απαιτείται μικρότερη ένταση ρεύματος (Εξίσωση 2.1).

Συγκρίνοντας τα δύο σενάρια μεταξύ τους, τις μικρότερες απώλειες ισχύος έχει το δεύτερο σενάριο όπου έχουν συνδεθεί στο δίκτυο δύο αιολικά πάρκα παράγοντας το 30% της ζήτησης του φορτίου. Τέλος, η δυνατότητα των ανεμογεννητριών να παρέχουν αλλά και να απορροφούν άεργο ισχύ αλλά και οι μειωμένες απώλειες που προκύπτουν από την εγκατάστασή τους, επηρεάζουν το προφίλ τάσης του συστήματος. Λιγότερες απώλειες οδηγούν σε λιγότερες πτώσεις τάσης κάτι το οποίο επιτρέπει στις τάσεις στους ζυγούς του συστήματος να παραμένουν στα επιτρεπτά όρια $0.95 < V < 1.05$ pu.

Είναι σημαντικό λοιπόν, όταν γίνεται η μελέτη εγκατάστασης ΑΠΕ σε ένα ΣΗΕ, να επιλέγεται ο βέλτιστος ζυγός για τη σύνδεση των μονάδων ώστε να μεγιστοποιούνται η απόδοση του δικτύου αλλά και τα οφέλη που προκύπτουν από αυτές. Σε συνδυασμό με τα οφέλη που προαναφέρθηκαν, προστίθενται τα οφέλη των ΑΠΕ. Αντικαθιστώντας τις συμβατικές γεννήτριες ενός συστήματος με μονάδες που παράγουν ενέργεια με καθαρό και βιώσιμο τρόπο αφήνουμε πίσω σταδιακά την εποχή της καύσης ορυκτών πόρων

θέτοντας τα θεμέλια για ένα πράσινο μέλλον συμβάλλοντας έτσι στην προστασία του περιβάλλοντος και στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Βιβλιογραφία

- [1] EIA projects nearly 50% increase in world energy usage by 2050, led by growth in Asia. Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA). (n.d.). <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433>
- [2] IBRAHIM DINCER (1998) Energy and Environmental Impacts: Present and Future Perspectives, ENERGY SOURCES, 20:4-5, 427-453, DOI: 10.1080/00908319808970070
- [3] Sato, Y. (2007). Energy consumption: an environmental problem. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2(1), 12–16. <https://doi.org/10.1002/TEE.20109>
- [4] EIA projects global energy consumption will outpace efficiency gains in most cases. Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA). (n.d.). <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=60642>
- [5] Mufutau Opeyemi, B. (2021). Path to sustainable energy consumption: The possibility of substituting renewable energy for non-renewable energy. Energy, 228. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120519>
- [6] Iea. (n.d.). Executive summary – electricity market report 2023 – analysis. IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023/executive-summary>
- [7] Iea. (n.d.-b). World Energy Investment 2023 – analysis. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- [8] Renewables could become largest electricity source by 2024, surpassing coal. Anadolu Ajansı. (n.d.). <https://www.aa.com.tr/en/economy/renewables-could-become-largest-electricity-source-by-2024-surpassing-coal/2955623#>
- [9] Renewable energy targets. Energy. (n.d.). https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en
- [10] Press corner. European Commission - European Commission. (n.d.). https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_2061
- [11] Tang, A. (2019, March 21). Wind energy at the heart of a future-proof energy system. WindEurope. <https://windeurope.org/newsroom/news/wind-energy-at-the-heart-of-a-future-proof-energy-system/>

- [12] Maguire, G. (2023, March 31). Electric grids need major upgrades to aid Global Energy Transition: Maguire. Reuters. <https://www.reuters.com/business/energy/electric-grids-need-major-upgrades-aid-global-energy-transition-maguire-2023-03-30/>
- [13] Πολυζάκης, Α. (2017). Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, Εκδόσεις Power Heat Cool
- [14] Μαλατέστας, Π. (2019). Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εκδόσεις Τζιόλα
- [15] Βοβός Νικόλαος Α, Γιαννακόπουλος, Γ. Β. (2019). Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Β' έκδοση). Εκδόσεις Ζήτη
- [16] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2017
- [17] Βοβός Νικόλαος Α. Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β (2008). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εκδόσεις Ζήτη
- [18] Loo, C. E. U., Vanfretti, L., Liceaga-Castro, E., & Acha, E. (2007). Synchronous generators modeling and control using the framework of individual channel analysis and design: Part 1. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 8(5). <https://doi.org/10.2202/1553-779x.1638>
- [19] Ponce, P., Molina, A., Mata, O., Ibarra, L., & MacCleery, B. (2017). Power system fundamentals. In Power System Fundamentals. <https://doi.org/10.1201/9781315148991>
- [20] Chapman, S (2009). 'Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC', Εκδόσεις Τζιόλα
- [21] Glover J. D. Sarma M. S. & Overbye T. J. (2015). Power system analysis and design (6th ed.). Thomson.
- [22] Χαραλάμπου Ν. Ηλία, (2012). Διδακτορική διατριβή: «Συμβολή στην Βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου και ενέργειας με χρήση ασαφούς λογικής» Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο
- [23] Grainger J. J. & Stevenson W. D. (1994). Power system analysis. McGraw-Hill.
- [24] Beaty, H. W., & Santoso, S. (2015). Handbook of Electric Power Calculations. McGraw-Hill Education.

- [25] Afolabi, O. A., Ali, W. H., Cofie, P., Fuller, J., Obiomon, P., & Kolawole, E. S. (2015). Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies. *Energy and Power Engineering*, 07(10). <https://doi.org/10.4236/epe.2015.710048>
- [26] Chatterjee, S., & Mandal, S. (2017). A novel comparison of gauss-seidel and Newton- raphson methods for load flow analysis. *International Conference on Power and Embedded Drive Control, ICPEDC 2017*. <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081050>
- [27] Saadat, H. (1999). *Power system analysis*. WCB/McGraw-Hill
- [28] El-Khattam, W., & Salama, M. M. A. (2004). Distributed generation technologies, definitions and benefits. *Electric Power Systems Research*, 71(2), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.01.006>
- [29] Ackermann, T., Ran Andersson, G., & Sö Der A, L. (2001). Distributed generation: a definition. In *Electric Power Systems Research* (Vol. 57). www.elsevier.com/locate/epsr
- [30] Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., & D’haeseleer, W. (2005). Distributed generation: Definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33(6), 787–798. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>
- [31] Malika, B. K., Pattanaik, V., Mohanty, S., Sahu, B. K., & Rout, P. K. (2021). A Detailed Review of the Optimal Distributed Generation Placement in Smart Power Distribution Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems, 202 LNNS*, 85–96. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0695-3_10
- [32] Yadav, A., & Srivastava, L. (2014). Optimal placement of distributed generation: An overview and key issues. *2014 International Conference on Power Signals Control and Computations, EPSCICON 2014*. <https://doi.org/10.1109/EPSCICON.2014.6887517>
- [33] Georgilakis, P. S., & Hatziargyriou, N. D. (2013). Optimal distributed generation placement in power distribution networks: Models, methods, and future research. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3420–3428. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2237043>

- [34] Γκαϊδατζής, Π. Α. (2020). Βέλτιστη διαστασιολόγηση μονάδων διανεμημένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. <https://doi.org/10.26262/HEAL.AUTH.IR.321421>
- [35] Willis, H. L. (2000). ANALYTICAL METHODS AND RULES OF THUMB FOR MODELING DG-DISTRIBUTION INTERACTION.
- [36] Molina-Moreno, I., Medina, A., & Cisneros-Magana, R. (2016). Methodology for optimal bus placement to integrate wind farm optimizing power flows. 2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2015. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2015.7395149>
- [37] Keane, A., & O'Malley, M. (2005). Optimal allocation of embedded generation on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1640–1646. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.852115>
- [38] Keane, A., & O'Malley, M. (2007). Optimal utilization of distribution networks for energy harvesting. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 467–475. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888959>
- [39] Atwa, Y. M., & El-Saadany, E. F. (2011). Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems. *IET Renewable Power Generation*, 5(1), 79–88. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0011>
- [40] El-Khattam, W., Hegazy, Y. G., & Salama, M. M. A. (2005). An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 1158–1165. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846114>
- [41] Khalesi, N., Rezaei, N., & Haghifam, M. R. (2011). DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(2), 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.08.024>
- [42] Rau, N. S., & Wan, Y.-H. (2014). Optimum Location of Resources in Distributed Planning. In *IEEE Transactions on Power Systems* (Vol. 9, Issue 4).

- [43] Khan, H., & Choudhry, M. A. (2010). Implementation of Distributed Generation (IDG) algorithm for performance enhancement of distribution feeder under extreme load growth. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32(9), 985–997. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.02.006>
- [44] Zhu, D., Broadwater, R. P., Tam, K. S., Seguin, R., & Asgeirsson, H. (2006). Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(1), 419–427. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.860943>
- [45] Acharya, N., Mahat, P., & Mithulanathan, N. (2006). An analytical approach for DG allocation in primary distribution network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28(10), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.02.013>
- [46] Gözel, T., & Hocaoglu, M. H. (2009). An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems. *Electric Power Systems Research*, 79(6), 912–918. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.12.007>
- [47] Hung, D. Q., & Mithulanathan, N. (2013). Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1700–1708. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2112316>
- [48] Hung, D. Q., Mithulanathan, N., & Bansal, R. C. (2010). Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 814–820. <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2044414>
- [49] Aybike Seker, A., & Hakan Hocaoglu, M. (2013). Artificial Bee Colony Algorithm for Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation.
- [50] Ghambari, S., & Rahati, A. (2018). An improved artificial bee colony algorithm and its application to reliability optimization problems. *Applied Soft Computing*, 62, 736–767. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.040>
- [51] Nayyar, A., & Singh, R. (2016). Ant Colony Optimization-Computational swarm intelligence technique. Proceedings of the 10th INDIACom; 2016 3rd

International Conference on Computing for Sustainable Global Development, INDIACom 2016.

- [52] Wang, L., & Singh, C. (2008). Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an ant colony system algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 38(6), 757–764. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2008.2001573>
- [53] Prakash, D. B., & Lakshminarayana, C. (2016). Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm. *Procedia Technology*, 25, 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.173>
- [54] Merzoug, Y., Abdelkrim, B., & Larbi, B. (2020). Optimal placement of wind turbine in a radial distribution network using PSO method. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 1074–1081. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1074-1081>
- [55] Abass, M. Abido, M. Al-Muhaini and M. Khalid (2019). Multi-Objective Optimal DG Sizing and Placement in Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Chengdu, China, 2019, pp. 1857-1861, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881564.
- [56] Moravej, Z., & Akhlaghi, A. (2013). A novel approach based on cuckoo search for DG allocation in distribution network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 44(1), 672–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.009>
- [57] Buaklee, W., & Hongesombut, K. (2013). *Optimal DG Allocation in a Smart Distribution Grid Using Cuckoo Search Algorithm*.
- [58] Borges, C. L. T., & Falcão, D. M. (2006). Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28(6), 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.02.003>
- [59] Soroudi, A., & Ehsan, M. (2011). Efficient immune-GA method for DNOs in sizing and placement of distributed generation units. *European Transactions on Electrical Power*, 21(3), 1361–1375. <https://doi.org/10.1002/etep.501>

- [60] Kefayat, Milad & Lashkar Ara, Afshin & Nabavi, Ali. (2015). A Hybrid of Ant Colony Optimization and Artificial Bee Colony Algorithm for Probabilistic Optimal Placement and Sizing of Distributed Energy Resources. *Energy Conversion and Management*. 92. 149-161. 10.1016/j.enconman.2014.12.037.
- [61] Moradi, M. H., & Abedini, M. (2012). A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 34(1), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.08.023>
- [62] Kansal, S., Kumar, V., & Tyagi, B. (2016). Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 75, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.00>
- [63] Slootweg, J. G., De Haan, S. W. H., Polinder, H., & Kling, W. L. (2003). General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.807113>
- [64] Wind energy. IRENA. (n.d.). <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- [65] Δελτίο Τύπου: Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας για το 2022. ΕΛΕΤΑΕΝ. (n.d.). <https://eletaen.gr/deltio-typou-statistiki-aiolikis-energeias-2022/>
- [66] CM.VIVEK. (2017). a Review on Vertical and Horizontal Axis Wind Turbine. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(4).
- [67] M. Saad, M. Moh. (2014). Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines. *IOSR Journal of Engineering*, 4(8). <https://doi.org/10.9790/3021-04822730>
- [68] Ghosh, T. K., Prelas, M. A., & Ghosh, T. K. (2011), *Energy resources and systems Volume 2*, Springer

- [69] Bustos, G., Vargas, L. S., Milla, F., Saez, D., Zareipour, H., & Nunez, A. (2012). Comparison of fixed speed wind turbines models: A case study. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6388937>
- [70] Seyedi, M.A. (2009). Evaluation of the DFIG wind turbine built-in model in PSS/E.
- [71] Das, K., Hansen, A. D., & Sørensen, P. E. (2016). Understanding IEC standard wind turbine models using SimPowerSystems. Wind Engineering, 40(3). <https://doi.org/10.1177/0309524X16642058>
- [72] Letcher, T. M. (2017). Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. In Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines.
- [73] Liang, X. (2017). Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2). <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253>

