



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Αξιολόγηση Ασφαλείας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με την
Παρουσία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κρυστάμτσης Νικόλαος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούλιος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

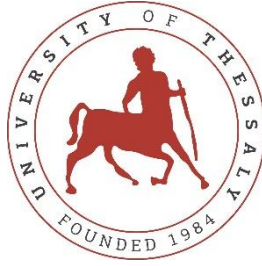
**Αξιολόγηση Ασφαλείας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με την
Παρουσία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κρυστάμτσης Νικόλαος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούλιος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Security Assessment of a Power System in the Presence of
Renewable Energy Sources**

MSc Thesis

Krystamtsis Nikolaos

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

July 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δασκαλοπούλου Ασπασία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Χροναίος Αλέξανδρος

Καθηγητής, 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 μεταπτυχιακή 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

Κρυστάμτσης Νικόλαος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this MSc 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

Krystamtsis Nikolaos

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έρχεται ως αποτέλεσμα συνεργασίας με διάφορα άτομα, κάθε ένα από τα οποία συνέβαλλε με το δικό του τρόπο στην περάτωση της. Αξίζει λοιπόν να αφιερωθεί η σελίδα αυτή, ώστε να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες, στα άτομα αυτά.

Αρχικά, στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Μπαργιώτα Δημήτριο, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Π.Θ ο οποίος είχε καθοριστικό ρόλο στην διεξαγωγή και ολοκλήρωση παρούσας διπλωματικής εργασίας, ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και συνεργασία του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης την κ. Δασκαλοπούλου Ασπασία, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και τον κ. Χροναίο Αλέξανδρο, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, που καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου υπήρξαν στήριγμα, μέσα από όλες τις δυσκολίες που μπορεί να αντιμετώπιζαν.

Αξιολόγηση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την παρουσία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Κρυστάμτσης Νικόλαος

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η συμπεριφορά του δικτύου 30 ζυγών της IEEE, με την παρουσία αιολικών πάρκων κατά την εμφάνιση διαταραχών. Αρχικά, γίνεται μία αναφορά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική τους. Έπειτα, περιγράφεται η ανάγκη για ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και υπογραμμίζονται προβλήματα και προκλήσεις στο στάδιο αυτό, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις αρμονικές. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στην αιολική ενέργεια και τις ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, πάνω στο σύστημα 30 ζυγών της IEEE, εξετάζεται η τοποθέτηση αιολικών πάρκων, σε ενδεικτικούς ζυγούς και μελετώνται δύο σενάρια, με ποσοστό διείσδυσης 15% και 30% έκαστο. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, γίνεται υπολογισμός των απωλειών πραγματικής ισχύος στο σύστημα. Τα αιολικά πάρκα τελικά εγκαθίστανται σε εκείνους τους ζυγούς, όπου εμφανίζονται οι λιγότερες απώλειες πραγματικής ισχύος για το σύστημα. Αυτό συμβαίνει όταν το ποσοστό ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ είναι ίσο με 30% και οι ανεμογεννήτριες είναι εγκατεστημένες στους ζυγούς 5, 8 και 11. Πάνω στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται N-1 και N-1-1 contingency analysis για ενδεικτικές διαταραχές στο λογισμικό PowerWorld. Τέλος, γίνεται κατάταξη των διαταραχών με βάση το δείκτη PI_{MVA} και εντοπίζεται ως πιο επιβλαβής διαταραχή η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4 και 12 του ΣΗΕ.

Λέξεις-κλειδιά:

Αιολική, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ανεμογεννήτριες, απώλειες, αρμονικές, ασφάλεια, δείκτης, διαταραχή, ενσωμάτωση, ισχύς, κατάταξη, προσομοίωση, σενάριο, σύστημα

Security Assessment of a Power System in the Presence of Renewable Energy Sources

Krystamtsis Nikolaos

Abstract

In this thesis, the behavior of the 30-bus IEEE system, with the presence of wind farms during the occurrence of contingencies, is studied. Firstly, a reference is made to power grids and their architecture is presented. Then, the need to integrate renewable energy sources into the power grid is described w problems and challenges at this stage are highlighted, with particular emphasis on harmonics. Next, a reference is made to wind energy and wind turbines. In addition, on the IEEE 30-bus system, the placement of wind farms is examined, on indicative buses, and two scenarios are studied, with a penetration rate of 15% and 30% each. In all cases considered, the real power losses in the system are calculated. Wind farms are finally installed on those buses where the least real power losses occur for the power grid. This happens when the integration rate of wind energy in the power grid is equal to 30% and the wind turbines are installed in buses 5, 8 and 11 respectively. In this case, N-1 and N-1-1 contingency analysis is applied for indicative disturbances in the PowerWorld Simulator. Finally, the disturbances are ranked based on the PI_{MVA} index and it occurs that the most harmful is the removal of the transmission line between busses 4 and 12 of the power grid.

Keywords:

Contingency analysis, harmonics, index, losses, power, power grid, penetration, rank, renewable energy sources, scenario, simulation, wind energy, wind park, wind turbine

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	1
1.1.1 Συνεισφορά.....	1
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	3
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	3
2.2 Αρχιτεκτονική ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	4
2.3 Ασφάλεια στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	6
2.3.1 Ανάλυση ασφάλειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	6
2.3.2 Τύποι διαταραχών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	8
2.3.3 Δείκτες κατάταξης διαταραχών	8
Κεφάλαιο 3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	12
3.1 Ανάγκη για ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο	12
3.2 Προβλήματα από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο	14
3.3 Αρμονικές από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο	17
3.3.1 Ταξινόμηση των αρμονικών	17
3.3.2 Δείκτες ποιότητας ισχύος υπό αρμονικές	19

3.3.3 Όρια αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο	20
3.3.4 Αντιμετώπιση αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο	22
Κεφάλαιο 4 Αιολική ενέργεια.....	24
4.1 Ανασκόπηση της αιολικής ενέργειας.....	24
4.2 Αιολικά πάρκα.....	25
4.2.1 Αξιολόγηση ανεμολογικών δεδομένων	25
4.2.2 Τύποι ανεμογεννητριών	26
4.2.3 Κριτήρια για τη βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης ανεμογεννητριών	28
4.3 Προβλήματα από την ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στο ηλεκτρικό δίκτυο	29
Κεφάλαιο 5 Προσομοιώσεις στο σύστημα 30 ζυγών της IEEE	31
5.1 Ανάλυση συστήματος	31
5.2 Περιγραφή ερευνητικών σεναρίων προς μελέτη	34
5.2.1 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE	34
5.2.2 Contingency analysis N-1, N-1-1 για το δίκτυο 30 ζυγών της IEEE	36
5.2.3 Κατάταξη δυσμενέστερων διαταραχών για το δίκτυο 30 ζυγών της IEEE.....	37
5.3 Προσομοιώσεις στο PowerWorld Simulator.....	37
5.3.1 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE-Σενάριο Α.....	37
5.3.2 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE-Σενάριο Β.....	43
5.3.3 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE-Σενάριο Γ.....	52
5.3.4 Διαταραχές προς μελέτη.....	63
5.3.5 Διαταραχή 1 ^η (Δ1): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 4 και 12 του ΣΗΕ.....	64
5.3.6 Διαταραχή 2 ^η (Δ2): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6 και 9 του ΣΗΕ.....	68
5.3.7 Διαταραχή 3 ^η (Δ3): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6 και 10 του ΣΗΕ.....	72
5.3.8 Διαταραχή 4 ^η (Δ4): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 27 και 28 του ΣΗΕ.....	76
5.3.9 Διαταραχή 5 ^η (Δ5): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1 και 2 του ΣΗΕ	80
5.3.10 Διαταραχή 6 ^η (Δ6): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2 και 5 του ΣΗΕ	84
5.3.11 Διαταραχή 7 ^η (Δ7): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15 και 18 του ΣΗΕ	88
5.3.12 Διαταραχή 8 ^η (Δ8): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4 και 6 του ΣΗΕ	92
5.3.13 Διαταραχή 9 ^η (Δ9): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 2 του ΣΗΕ	96
5.3.14 Διαταραχή 10 ^η (Δ10): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 5 του ΣΗΕ	100

5.3.15 Διαταραχή 11η (Δ11): Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25 του ΣΗΕ	104
5.3.16 Διαταραχή 12η (Δ12): Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15 του ΣΗΕ	108
5.3.17 Διαταραχή 13η (Δ13): Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17 του ΣΗΕ	112
5.3.18 Διαταραχή 14η (Δ14): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 2 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18 του ΣΗΕ	116
5.3.19 Διαταραχή 15η (Δ15): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 5 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8-28 του ΣΗΕ	120
5.3.20 Διαταραχή 16η (Δ16): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 8 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 10-17 του ΣΗΕ	124
5.3.21 Διαταραχή 17η (Δ17): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 11 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 12-14 του ΣΗΕ	128
5.3.22 Διαταραχή 18η (Δ18): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 5 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 19-20 του ΣΗΕ	132
5.3.23 Διαταραχή 19η (Δ19): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 11 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 3-4 του ΣΗΕ	136
5.3.24 Διαταραχή 20η (Δ20): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 2 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-3 του ΣΗΕ	140
5.3.25 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων – Κατάταξη των διαταραχών	145
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά	152
Βιβλιογραφία.....	154

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Ιστορικές στιγμές – ορόσημα για την εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [4].....	4
Εικόνα 2: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [5].....	5
Εικόνα 3: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με παρουσία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [22].....	14
Εικόνα 4: Προκλήσεις από την ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο [22].....	15
Εικόνα 5: Θεμελιώδης αρμονική, αρμονικές μεγαλύτερης τάξης και ο συνδυασμός τους [31].....	18
Εικόνα 6: Σύνδεση φίλτρου ενεργού ισχύος διακλάδωσης [35].....	22
Εικόνα 7: Σύνδεση STATCOM [34].....	23
Εικόνα 8: Ισχύς και διάμετρος ρότορα ανεμογεννητριών, σε συνάρτηση με την πάροδο του χρόνου [37]	26
Εικόνα 9: Τύποι ανεμογεννητριών [31].....	27
Εικόνα 10: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator [47].....	33
Εικόνα 11: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, κατά την ανάλυση ροής ισχύος (Σενάριο Α) [45]	38
Εικόνα 12: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 5 (Σενάριο B1).....	44
Εικόνα 13: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 8 (Σενάριο B2).....	45
Εικόνα 14: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 11 (Σενάριο B3).....	46
Εικόνα 15: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 13 (Σενάριο B4).....	47
Εικόνα 16: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 5, 8, 11 και 13 (Σενάριο Γ1)	53
Εικόνα 17: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 5, 8 και 11 (Σενάριο Γ2)	54

Εικόνα 18: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 5, 8 και 13 (Σενάριο Γ3)	55
Εικόνα 19: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 8, 11 και 13 (Σενάριο Γ4)	56
Εικόνα 20: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 4 και 12 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 1 ^η)	65
Εικόνα 21: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 6 και 9 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 2 ^η)	69
Εικόνα 22: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 6 και 10 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 3 ^η)	73
Εικόνα 23: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 27 και 28 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 4 ^η)	77
Εικόνα 24: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 1 και 2 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 5 ^η)	81
Εικόνα 25: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 2 και 5 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 6 ^η)	85
Εικόνα 26: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 15 και 18 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 7 ^η)	89
Εικόνα 27: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 4 και 6 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 8 ^η)	93
Εικόνα 28: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 9 ^η).....	97
Εικόνα 29: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 τίθεται εκτός λειτουργία (Διαταραχή 10 ^η)	101
Εικόνα 30: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν οι γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 11 ^η)	105
Εικόνα 31: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν οι γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 12 ^η).....	109

Εικόνα 32: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν οι γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 13 ^η)	113
Εικόνα 33: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 14 ^η)	117
Εικόνα 34: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8-28 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 15 ^η)	121
Εικόνα 35: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 8 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 10-17 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 16 ^η)	125
Εικόνα 36: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 12-14 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 17 ^η)	129
Εικόνα 37: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 19-20 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 18 ^η)	133
Εικόνα 38: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 3-4 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 19 ^η)	137
Εικόνα 39: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-3 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 20 ^η)	141

Κατάλογος σχημάτων

Διάγραμμα 1: Απεικόνιση απωλειών πραγματικής και αέργου ισχύος για τα σενάρια A, B και Γ.....	55
Διάγραμμα 2: Διαταραχές N-1 με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA}	117
Διάγραμμα 3: Διαταραχές N-1 με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA}	119
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα 4: Σύνολο διαταραχών με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA}	122

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Αρμονικές με βάση την θετική, αρνητική και μηδενική ακολουθία (για $k = 0, 1, 2, 3, \dots$).....	18
Πίνακας 2: Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης ρεύματος για ΣΗΕ ονομαστικής τάσης από 120V έως 69kV.....	20
Πίνακας 3: Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης ρεύματος για ΣΗΕ ονομαστικής τάσης από 69kV έως 161kV.....	21
Πίνακας 4: Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης ρεύματος για ΣΗΕ ονομαστικής τάσης > 161kV.....	21
Πίνακας 5: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του σεναρίου Α.....	39
Πίνακας 6: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του σεναρίου Α.....	41
Πίνακας 7: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του σεναρίου Β.....	48
Πίνακας 8: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του σεναρίου Β.....	50
Πίνακας 9: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του σεναρίου Γ.....	57
Πίνακας 10: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του σεναρίου Γ.....	59
Πίνακας 11: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος κατά την ανάλυση ροής ισχύος, για τα σενάρια Α, Β, Γ.....	61
Πίνακας 12: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 1.....	66
Πίνακας 13: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 2.....	70

Πίνακας 14: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 3.....	74
Πίνακας 15: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 4.....	78
Πίνακας 16: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 5.....	82
Πίνακας 17: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 6.....	86
Πίνακας 18: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 7.....	90
Πίνακας 19: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 8.....	94
Πίνακας 20: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 9.....	98
Πίνακας 21: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 10....	102
Πίνακας 22: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 11....	106
Πίνακας 23: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 12....	110
Πίνακας 24: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 13....	114
Πίνακας 25: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 14....	118
Πίνακας 26: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 15....	122
Πίνακας 27: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 16....	126
Πίνακας 28: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 17....	130
Πίνακας 29: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 18....	134
Πίνακας 30: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 19....	138
Πίνακας 31: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 20....	143
Πίνακας 32: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα contingency analysis για τις N-1 διαταραχές που μελετήθηκαν.....	146
Πίνακας 33: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα contingency analysis για τις N-1-1 διαταραχές που μελετήθηκαν.....	148
Πίνακας 34: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα contingency analysis για όλες τις διαταραχές που μελετήθηκαν.....	150

Συντομογραφίες

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΜΤ	Μέση Τάση
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση
EIA	Energy Information Administration
GWEC	Global Wind Energy Company
LODF	Line Outage Distribution Factor
PI	Performance Index
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
SF	Sensitivity Factor
STATCOM	STATIC synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TDD	Total Demand Distortion
VSI	Voltage Stability Index
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WRSG	Wound Rotor Synchronous Generator
WWEA	World Wind Energy Association

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Βασικό αντικείμενο ενασχόλησης των ηλεκτρολόγων μηχανικών ανά τον κόσμο, αποτελεί η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η συμπεριφορά των τελευταίων με την παρουσία αιολικών πάρκων κατά την εμφάνιση μίας ή περισσότερων διαταραχών. Για τις προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PowerWorld.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της διπλωματικής αποτέλεσε αρχικά η εύρεση των κατάλληλων ζυγών για σύνδεση των αιολικών πάρκων. Εξετάσθηκαν δύο σενάρια, όπου η ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων έγινε με διαφορετικό ποσοστό διείσδυσης. Με βάση τις λιγότερες απώλειες πραγματικής ισχύος για το σύστημα, έγινε μελέτη contingency analysis N-1 και N-1-1 (ανάλυση διαταραχών ή ανάλυση έκτακτης ανάγκης N-1 και N-1-1). Τέλος, οι διαταραχές που εξετάσθηκαν κατατάχθηκαν με βάση το δείκτη απόδοσης PI_{MVA} (Performance Index που αποτελεί την ποσοτικοποίηση κάθε διακοπής, στην υπερφόρτωση των άλλων γραμμών μεταφοράς), ώστε να εντοπισθεί η πιο επιβλαβής για το σύστημα.

1.1.1 Συνεισφορά

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελείται από δύο μέρη. Το βιβλιογραφικό και το κομμάτι των προσομοιώσεων. Σε ότι έχει να κάνει με το δεύτερο, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

1. Μελετήθηκε το σύστημα 30 ζυγών της IEEE
2. Εξετάσθηκαν τρία σενάρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πάνω σε αυτό, δύο εκ των οποίων είχαν τη συμμετοχή αιολικών πάρκων. Τα τελευταία τοποθετήθηκαν σε ενδεικτικούς ζυγούς πάνω στο δίκτυο, για την εξέταση διαφορετικών περιπτώσεων

3. Αξιολογήθηκαν οι απώλειες του συστήματος, στα σενάρια προς μελέτη και επιλέχθηκε η περίπτωση που εμφάνιζε τις λιγότερες απώλειες για την εγκατάσταση των αιολικών πάρκων
4. Στην περίπτωση αυτή, έγινε μελέτη N-1 και N-1-1 contingency analysis
5. Έγινε κατάταξη των διαταραχών με βάση τον δείκτη PI_{MVA}

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική τους και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει κατάταξη των διαταραχών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η κατάταξη των διαταραχών γίνεται με βάση το δείκτη PI_{MVA} .

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αρχικά, περιγράφεται η επιτακτική ανάγκη για ενσωμάτωση τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Έπειτα, αναφέρονται οι προκλήσεις που προκύπτουν κατά την ενσωμάτωση των τελευταίων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις αρμονικές.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται ανασκόπηση της αιολικής ενέργειας. Περιγράφεται η σημερινή κατάσταση και δίνεται έμφαση στους τύπους ανεμογεννητριών που εντοπίζονται. Επιπλέον, αναφέρονται οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνονται οι προσομοιώσεις πάνω στο σύστημα 30 ζυγών της IEEE. Εξετάζονται τρία σενάρια, δύο εκ των οποίων περιλαμβάνουν αιολικά πάρκα με διαφορετικό ποσοστό ενσωμάτωσης, σε ενδεικτικούς ζυγούς του συστήματος. Η τοποθεσία εγκατάστασης των τελευταίων, επιλέγεται με βάση τις λιγότερες απώλειες πραγματικής ισχύος για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται N-1, N-1-1 contingency analysis και έπειτα γίνεται κατάταξη των διαταραχών, χρησιμοποιώντας το δείκτη PI_{MVA} .

Στο **Κεφάλαιο 6** αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

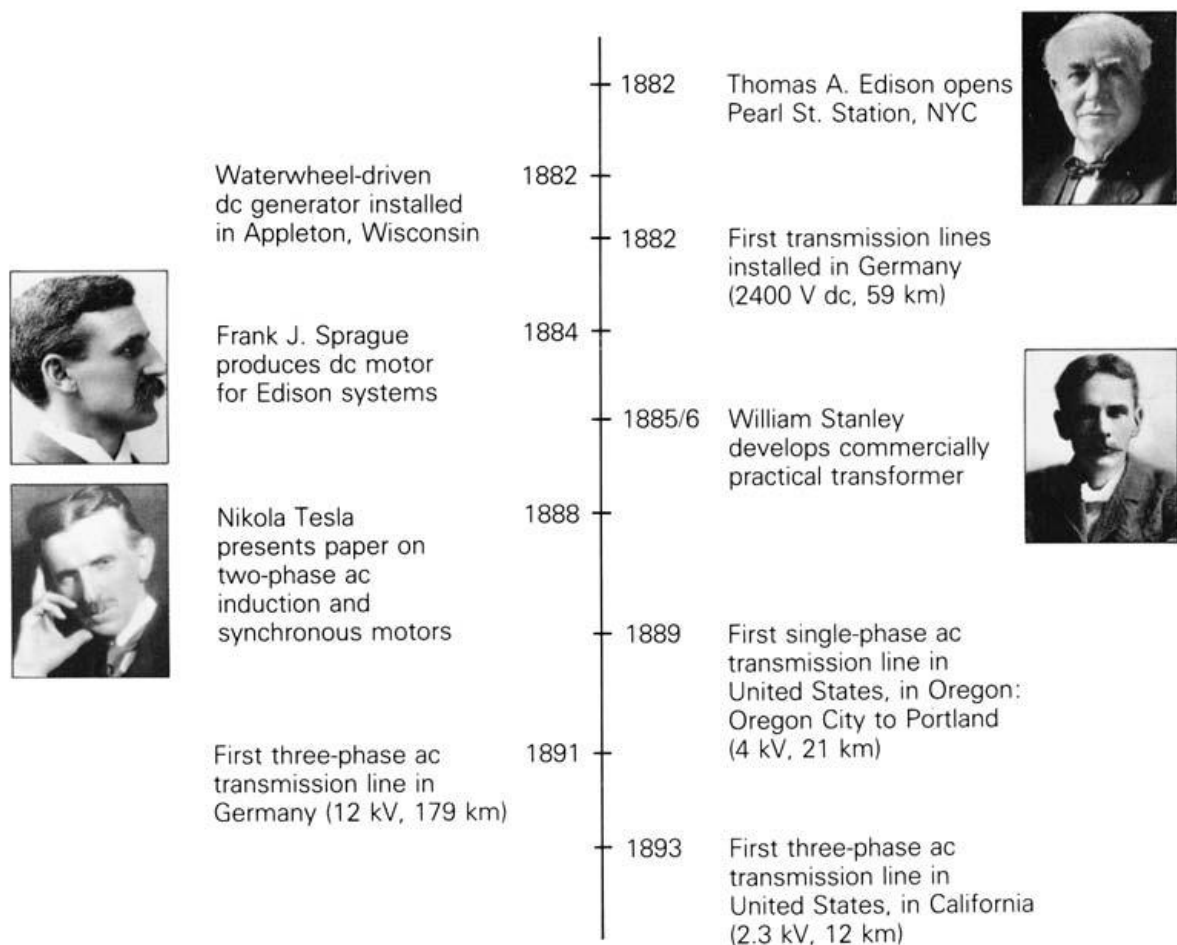
Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Ιστορική αναδρομή

Ο σταθμός της Pearl Street αποτέλεσε τον πρώτο ολοκληρωμένο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος κατασκευάστηκε από τον Τόμας Έντισον στη Νέα Υόρκη. Τα εγκαίνια του σταθμού έγιναν το Σεπτέμβριο του 1882 και το σύστημα αυτό παρήγαγε τάση συνεχούς ρεύματος για να εξυπηρετήσει τους καταναλωτές σε ακτίνα 1,5 χιλιομέτρου. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφερόταν στα 110 V, μέσω υπόγειων καλωδίων και το φορτίο προς κάλυψη αποτελούταν κυρίως από λαμπτήρες [1].

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον George Westinghouse και τον William Stanley, το 1886 στο Great Barrington. Το σύστημα αυτό περιλάμβανε εναέρια καλώδια και για πρώτη φορά τοποθετημένους μετασχηματιστές στα υπόγεια κτηρίων. Αποτέλεσμα αυτής της καινοτομίας, ήταν η αναγνώριση του πρώτου και η μετέπειτα ίδρυση της εταιρείας του με όνομα Electric Company. Η τελευταία έθεσε προς λειτουργία 300 σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για προμήθεια ηλεκτρισμού κυρίως σε φορτία φωτισμού, έως το 1890 [2].

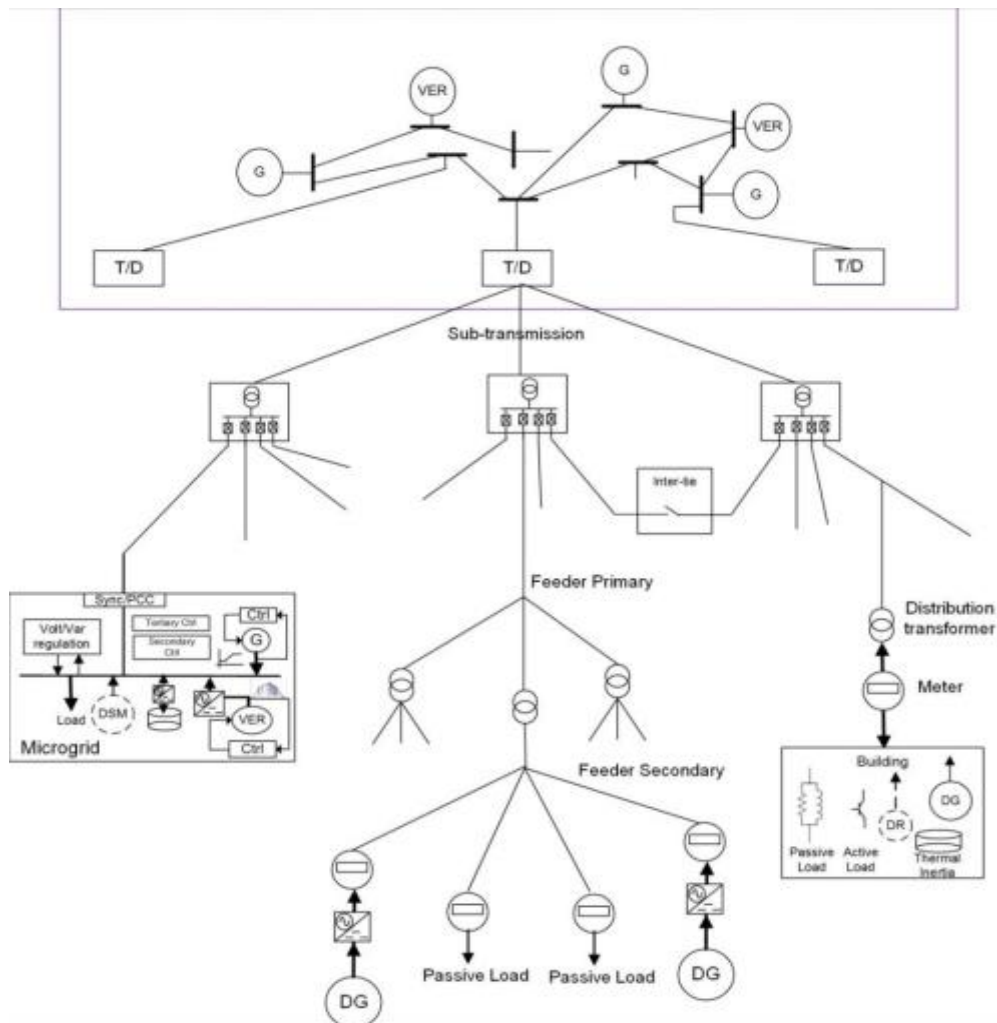
Η ανάπτυξη των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος πήρε ανοδική πορεία το 1888, όταν ο Νίκολα Τέσλα περιέγραψε τα πλεονεκτήματα των πολυφασικών συστημάτων έναντι των μονοφασικών, μέσω της εργασίας του πάνω σε διφασικούς επαγωγικούς και σύγχρονους κινητήρες, στο συνέδριο του Ινστιτούτου Αμερικανών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών. Η πρώτη τριφασική γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία, κατασκευάστηκε το 1891 μεταφέροντας τάση στο επίπεδο των 12kV για 179km. Δύο χρόνια αργότερα, το 1893 στις ΗΠΑ, τέθηκε σε λειτουργία ο πρώτος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας, ο οποίος ήταν έργο του Νίκολα Τέσλα. Οι καινοτόμες εφευρέσεις του τελευταίου, αποτέλεσαν τη βάση για τα μοντέρνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας [3], [4]. Στην Εικόνα 1, παρουσιάζονται οι ιστορικές στιγμές ορόσημα για την εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 1: Ιστορικές στιγμές – ορόσημα για την εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [4]

2.2 Αρχιτεκτονική ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η δομή του ηλεκτρικού δικτύου σχετίζεται στενά με τη δομή της βιομηχανίας και όπως η τελευταία, μεγάλωσε σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα. Η δομή των παραδοσιακών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: μονόδρομη ροή ισχύος από τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής, μέσω δικτύων μεταφοράς και υποσταθμών σε ακτινωτά συστήματα διανομής και κατά συνέπεια σε τελικούς πελάτες χρήσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2 [5].



Εικόνα 2: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [5]

Οι υποσταθμοί μεταφοράς και διανομής περιλαμβάνουν μετασχηματιστές ισχύος και επιτρέπουν την απομόνωση μεμονωμένων τμημάτων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στο ηλεκτρικό δίκτυο των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, τα περισσότερα κυκλώματα διανομής, εκτός πυκνών αστικών περιοχών είναι ακτινωτά, με κάποιες διακλαδώσεις. Σε μη αγροτικές περιοχές, συχνά εντοπίζονται κάποιες διασυνδέσεις, μέσω διακοπών (χειροκίνητοι ή τηλεχειριζόμενοι), για την απομόνωση ενός τμήματος δικτύου για διαδικασίες συντήρησης ή περιορισμού σφαλμάτων [5].

Το σύστημα διανομής, έχει δομή δύο επιπέδων. Το πρωτεύων κύκλωμα αποτελεί ένα τριφασικό δίκτυο μέσης τάσης που λειτουργεί με τιμές από 4 kV έως 36 kV (πιο συνηθισμένες τιμές για το Αμερικανικό δίκτυο είναι τα 12 kV ή 23 kV). Το δεύτερο επίπεδο, αφορά το τμήμα του δικτύου που συνδέεται στο δευτερεύων των μετασχηματιστών. Στις ΗΠΑ, τα κυκλώματα αυτά εξυπηρετούν 5 έως 7 οικιακά φορτία και σε ορισμένες

περιπτώσεις να φτάνουν τα 9. Αντίστοιχα, στις αστικές περιοχές χρησιμοποιείται ένα πυκνό υπόγειο δίκτυο διανομής με ειδικό εξοπλισμό, προκειμένου να επιτευχθεί η τροφοδότηση των κτηρίων από το πρωτεύων κύκλωμα των μετασχηματιστών. Σκοπός των ειδικών συσκευών είναι η προστασία του δικτύου από ρεύματα αντίστροφης ροής ισχύος από το δίκτυο πίσω στους μετασχηματιστές ισχύος [5].

Στην Ελλάδα, χαρακτηριστικές τιμές τάσης για το σύστημα μεταφοράς είναι τα 150 kV και 400 kV, ενώ στα αστικά κέντρα, οι τιμές αυτές υποβιβάζονται σε υποσταθμούς των 15-20 kV και σπανιότερα 6 kV [6]. «*Το τμήμα ενός ΣΗΕ που συνδέει τους υποσταθμούς υψηλής τάσης μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης στους υποσταθμούς διανομής, ονομάζεται δίκτυο υπομεταφοράς*» [7]. Συνήθεις τιμές για το δίκτυο υπομεταφοράς είναι τα 23 και 150kV, ωστόσο δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ των πρώτων και των δικτύων μεταφοράς [8].

Τα δίκτυα διανομής, τροφοδοτούν τους καταναλωτές μέσης τάσης (Μ.Τ.) και χαμηλής τάσης (Χ.Τ.), με την ηλεκτρική ενέργεια που δέχονται από τα δίκτυα μεταφοράς. Χαρακτηριστικές τιμές μέσης τάσης για την Ελλάδα, είναι τα 6,6 και 22 kV [9]. Αντίστοιχες τιμές για την χαμηλή τάση είναι τα 400/230 V (πολική/φασική) [6]. Ανάλογα με το είδος της περιοχής που καλύπτεται, τα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι είτε εναέρια, είτε υπόγεια. Συνήθως, η υπογειοποίηση του δικτύου γίνεται μέσα σε αστικά κέντρα, ενώ σε αγροτικές περιοχές το δίκτυο είναι εναέριο [9].

Για το ελληνικό σύστημα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες καταναλωτών [9]:

- Καταναλωτές υψηλής τάσης (ΥΤ) στα 150 kV, για ισχύ ≥ 10 MW
- Καταναλωτές μέσης τάσης (ΜΤ) στα 22 kV, για ισχύ ≥ 200 kW
- Καταναλωτές χαμηλής τάσης (ΧΤ) στα 230 / 400 V, για ισχύ ≤ 200 kW

2.3 Ασφάλεια στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

2.3.1 Ανάλυση ασφάλειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Στη σημερινή εποχή, μεγάλο αντικείμενο μελέτης των ηλεκτρολόγων μηχανικών αποτελεί η σταθερότητα και η ασφάλεια του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Παραδοσιακά, η επίβλεψη και η εποπτεία του δικτύου, γίνεται μέσω των συστημάτων SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Τα τελευταία, έχουν τη δυνατότητα να ενημερώνουν το διαχειριστή του συστήματος, τόσο για την κατάσταση πριν, όσο και για μετά το σφάλμα που συνέβη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε πιθανές διακοπές του δικτύου ο διαχειριστής του τελευταίου να μπορεί να προβεί σε διορθωτικές ενέργειες, πριν το δίκτυο έρθει σε μη ασφαλή κατάσταση [10, 11].

Η ανάλυση της ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιείται με τρεις λειτουργίες, την εποπτεία του δικτύου, την ανάλυση διαταραχών (contingency analysis) και τη βέλτιστη ροή ισχύος [12]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη βέλτιστη ροή ισχύος και τις ελάχιστες απώλειες του συστήματος, σε συνδυασμό με την ανάλυση διαταραχών. *«Η διαδικασία αναγνώρισης των απρόβλεπτων και κρίσιμων συμβάντων, μικρών χρονικών διαστημάτων που παρεμβαίνουν στην κανονική ροή του ρεύματος και περιλαμβάνουν αφαιρέσεις γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και άλλων στοιχείων του κυκλώματος, καλείται ανάλυση διαταραχών»* [13, 14].

Προκειμένου να επιτευχθεί η ανάλυση διαταραχών στα δίκτυα ισχύος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή τριών βημάτων [14, 15]:

- Η δημιουργία των διαταραχών
- Η επιλογή των διαταραχών
- Η κατάταξη των διαταραχών

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται μεγάλες λίστες που περιλαμβάνουν όλα τα απρόοπτα που μπορούν να εντοπιστούν σε ένα σύστημα ισχύος. Στη δεύτερη κατηγορία, περιλαμβάνεται η εύρεση των σοβαρών ενδεχόμενων που προκαλούν παραβίαση στα μέτρα των τάσεων και απώλειες ισχύος στις γραμμές μεταφοράς του δικτύου. Σε αυτό το στάδιο, γίνεται χρήση των δεικτών απόδοσης (Performance Index) για τον εντοπισμό των πιο κρίσιμων περιστατικών. Σε επόμενη παράγραφο, θα γίνει περαιτέρω ανάλυση των συγκεκριμένων δεικτών. Τέλος, το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την κατάταξη των περιστατικών και την εφαρμογή μέτρων για ασφαλείας για τη μείωση των επιπτώσεων τους, πάνω στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [12, 14].

2.3.2 Τύποι διαταραχών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Στα δίκτυα ισχύος, οι κύριοι τύποι διαταραχών που εμφανίζονται στις γεννήτριες και τις γραμμές μεταφοράς είναι οι εξής [16,17]:

- Διαταραχές τάσης
- Διαταραχές στη ροή ισχύος των τελευταίων

Η πρώτη περίπτωση, αφορά τους ζυγούς μεταφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας κάθε ζυγού πρέπει να έχει τιμή μεταξύ των 0.95 pu και 1.05 pu. Επιπλέον, εάν η τάση λειτουργίας λάβει τιμή μικρότερη των 0.95 pu τότε ο ζυγός αναφέρεται ότι έχει υπόταση, ενώ αν η τιμή του ξεπεράσει τα 1.05 pu έχει υπέρταση. Προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα τάσης στους ζυγούς του δικτύου, γίνεται χρήση της αέργου ισχύος. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις υπότασης, συνδέονται συσκευές παροχής αέργου ισχύος στον αντίστοιχο ζυγό. Αντίθετα, σε περιπτώσεις υπέρτασης, μέρος της αέργου ισχύος απορροφάται, ώστε να διατηρηθεί το απαραίτητο επίπεδο λειτουργίας από το σύστημα [16, 17].

Οι διαταραχές της δεύτερης περίπτωσης εμφανίζονται όταν τα MVA μίας γραμμής μεταφοράς υπερβαίνουν ένα άνω όριο. Συνήθως αυτό οφείλεται στην αύξηση του μέτρου του ρεύματος, που ρέει στη γραμμή μεταφοράς. Οι τελευταίες, είναι σχεδιασμένες για να αντέχουν σε καταπόνηση που φτάνει το 125% των ονομαστικών χαρακτηριστικών τους. Όταν εντοπισθεί ροή ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς ίση με το 80-90% του ονομαστικού της φορτίου, τότε πυροδοτείται η κατάσταση συναγερμού του δικτύου [16, 17].

Οι διαταραχές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δηλώνονται με τους όρους «N-n», όπου [17]:

- N: αναφέρεται στο συνολικό αριθμό στοιχείων του δικτύου
- n: αναφέρεται στον αριθμό των στοιχείων που έχουν βγει εκτός λειτουργίας εξαιτίας της διαταραχής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα μελετηθούν διαταραχές επιπέδου N-1 και N-1-1.

2.3.3 Δείκτες κατάταξης διαταραχών

Η ανάλυση διαταραχών είναι η υπόθεση διαφορετικών κρίσιμων σεναρίων που είναι πιθανό να λάβουν χώρα στο σύστημα ισχύος. Συνήθως, μία τέτοια κατάσταση προκύπτει εξαιτίας της διακοπής λειτουργίας ενός στοιχείου του συστήματος, το οποίο με τη σειρά

του μπορεί να οδηγήσει σε υπερφορτίσεις κατά τη μεταφορά ισχύος και μεταβολές στα επίπεδα της τάσης των ζυγών. Μέρος της ανάλυσης διαταραχών, αποτελεί ο σχεδιασμός βέλτιστων λύσεων για την επίλυση αυτών των προβλημάτων [12]. Προκειμένου να γίνει κατάταξη των σεναρίων και να εντοπισθούν τα πιο κρίσιμα εξ αυτών, γίνεται χρήση των παρακάτω δεικτών [2, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19]:

- *PI - Performance Index* (Δείκτης απόδοσης)
- *SF - Sensitivity factor* (Δείκτης ευαισθησίας), *LODF - Line Outage Distribution Factor* (Παράγοντας διανομής διακοπής γραμμής μεταφοράς)
- *VSI - Voltage Stability Index* (Δείκτης ευστάθειας τάσης)

Αρχικά, ο *PI* αποτελεί τον πιο ευρέως διαδεδομένο δείκτη για την ταξινόμηση των κρίσιμων διαταραχών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ισχύει ότι [2, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19]:

$$PI = PI_{MW} + PI_V \quad (1)$$

Όπου:

- *PI_{MW}*, αναφέρεται στο δείκτη απόδοσης της πραγματικής ροής ισχύος
- *PI_V*, αναφέρεται στο δείκτη απόδοσης της τάσης

Η υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς του δικτύου προς μελέτη, εκφράζεται από το δείκτη απόδοσης της πραγματικής ροής ισχύος της σχέσης (2) και ισχύει ότι [2, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19]:

$$PI_{MW} = \sum_{i=1}^{N_L} \frac{W}{2z} \left(\frac{P_l}{P_l^{max}} \right)^{2z} \quad (2)$$

Όπου:

- *P_l*, είναι η ροή ισχύος στη γραμμή μεταφοράς *l*
- *P_l^{max}*, είναι η μέγιστη ικανότητα ροής ισχύος στη γραμμή μεταφοράς *l*
- *N_L*, είναι ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που μελετάται
- *W*, είναι ένας μη αρνητικός συντελεστής στάθμισης, ο οποίος λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα
- *z*, είναι ο συντελεστής ποινής και έχει τιμή ίση με τη μονάδα

Επιπλέον, για τη μέγιστη ικανότητα ροής ισχύος της γραμμής μεταφοράς, ισχύει ότι [2, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19]:

$$P_l^{max} = \frac{V_i * V_j}{X} \quad (3)$$

Όπου:

- V_i , η τάση στο ζυγό i
- V_j , η τάση στο ζυγό j
- X , η αντίδραση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j

Οι παραβιάσεις στα όρια της τάσης σε κάποιον ζυγό του ΣΗΕ, εκφράζονται από τη μαθηματική σχέση του δείκτη απόδοσης τάσης [2, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19]:

$$PI_V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W}{2z} \right) \left\{ \frac{|V_i| - |V_i^{sp}|}{\Delta V_i^{lim}} \right\}^{2z} \quad (4)$$

Όπου:

- $|V_i|$, το μέτρο της τάσης στο ζυγό i
- $|V_i^{sp}|$, η προβλεπόμενη τιμή τάσης στο ζυγό i
- ΔV_i^{lim} , το όριο απόκλισης της τάσης του ζυγού i. Ο υπολογισμός του προκύπτει από το μέσο όρο των επιτρεπόμενων τιμών που μπορεί να λάβει ο ζυγός (άνω όριο ίσο με 1,05 pu και κάτω όριο ίσο με 0,95pu)
- n, ο αριθμός των ζυγών του συστήματος
- W, z, ομοίως με τη σχέση (2)

Το άθροισμα των σχέσεων (2) και (4) είναι ίσο με το συνολικό δείκτη απόδοσης της διαταραχής (1). Ο τελευταίος ονομάζεται OPI (Overall Performance Index) και ισχύει ότι όσο πιο μεγάλη τιμή λάβει, τόσο πιο κρίσιμη θεωρείται η διαταραχή που εφαρμόστηκε [14, 18].

Ο δείκτης PI_{MVA} , χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση κάθε διακοπής, στην υπερφόρτωση των άλλων γραμμών μεταφοράς. Η μαθηματική σχέση που τον περιγράφει, δίνεται από τον τύπο [10, 20]:

$$PI_{MVA} = \sum_{i=1}^{all\ branches} \frac{W_l}{2} \left(\frac{|MVAflow_{i,j}^k|}{MVAflow_{i,j,max}^k} \right)^2 \quad (5)$$

Όπου:

- W_l , ομοίως με τη σχέση (2)
- $MVAflow_{i,j}^k$, η ισχύς που ρέει στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j του συστήματος, όταν εφαρμόζεται μία διαταραχή στη γραμμή μεταφοράς k
- $MVAflow_{i,j,max}^k$ η μέγιστη ισχύς που μπορεί να ρέει στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j του συστήματος, όταν εφαρμόζεται μία διαταραχή στη γραμμή μεταφοράς k

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μέγιστη ικανότητα ροής των γραμμών μεταφοράς εκφράζεται σε MVA πάνω στο λογισμικό PowerWorld και γι' αυτό θα γίνει χρήση του PI_{MVA} (5), προκειμένου να γίνει καθορισμός και κατάταξη των διαταραχών που θα μελετηθούν. Όσο μεγαλύτερη τιμή λάβει ο τελευταίος, τόσο πιο κρίσιμη θεωρείται η διαταραχή που εφαρμόζεται.

Ο δείκτης ευαισθησίας (SF), υποδεικνύει τα ευάλωτα στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (μεταβολές τάσης στους ζυγούς και ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς). Η ανάλυση ροής ισχύος είναι το πιο ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την εύρεση των LODF. Οι τελευταίοι δίνονται από τη μαθηματική σχέση [18, 19]:

$$d_{l,k} = \frac{\Delta f_l}{f_k^0} \quad (6)$$

Όπου:

- Δf_l , οLODF κατά την παρακολούθηση της γραμμής μεταφοράς l, μετά την εμφάνιση διαταραχής στη γραμμή μεταφοράς k

- Δf , η μεταβολή της πραγματικής ροής ισχύος πριν και μετά τη διαταραχή στη γραμμή μεταφοράς l
- f_k^0 , η πραγματική ροή ισχύος, πριν τη διαταραχή στη γραμμή μεταφοράς k

Η αναγνώριση των αδύναμων περιοχών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιείται από τον εντοπισμό των ευαίσθητων γραμμών μεταφοράς. Οι τελευταίες, γίνονται φανερές, χρησιμοποιώντας την τεχνική της ανάλυσης ευστάθειας τάσης. Προκειμένου να εφαρμοσθεί η συγκεκριμένη μέθοδος, ο δείκτης ευστάθειας, χρησιμοποιείται ως δείκτης σταθερότητας τάσης (VSI). Η μαθηματική του έκφραση ορίζεται ως εξής [21]:

$$L_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j X}{V_i^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \quad (7)$$

Όπου :

- Z , Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς
- X , η αντίδραση της γραμμής μεταφοράς
- Q_j , η άεργος ισχύς στο τέλος της γραμμής μεταφοράς
- R , η πραγματική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς
- V_i , η τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς

Σε οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς ο δείκτης ευστάθειας έχει τιμή μικρότερη της μονάδας, τότε θεωρείται ότι η κατάσταση της πρώτης είναι ασφαλής και το σύστημα δεν κινδυνεύει. Όταν η τιμή του δείκτη αγγίζει τη μονάδα, τότε η γραμμή αγγίζει το όριο της και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση του συστήματος [21].

Κεφάλαιο 3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

3.1 Ανάγκη για ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει επηρεασθεί σε σημαντικό βαθμό, λόγω της εκπομπής αερίων, από την καύση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ρύποι αυτοί προκαλούν προβλήματα στην υγεία των ατόμων, μεταβάλλουν τις καιρικές συνθήκες και φέρουν αρνητικό αντίκτυπο για το περιβάλλον. Οι περισσότερες μονάδες

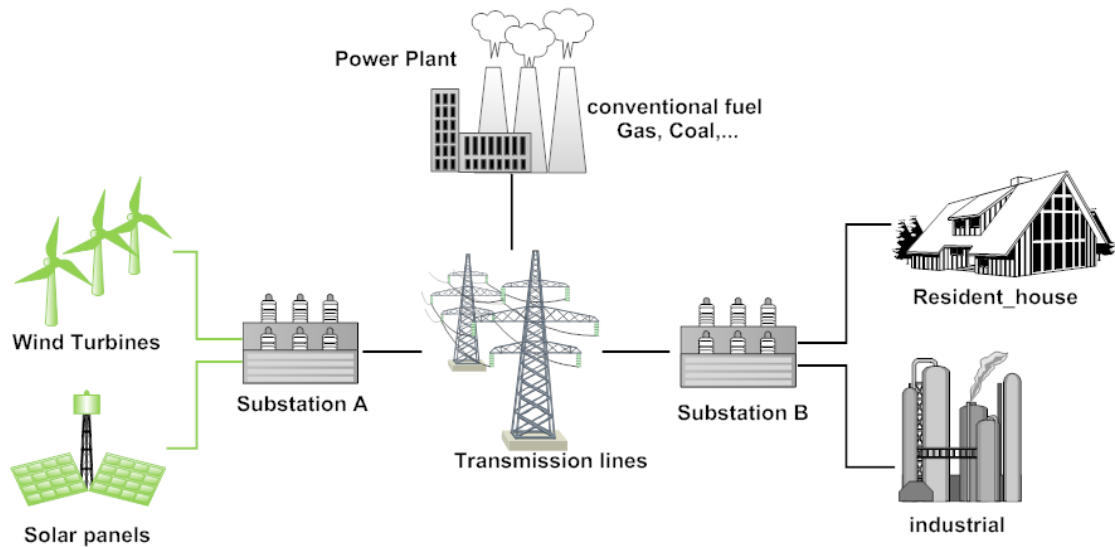
παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διεθνώς, χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα με αποτέλεσμα την παραγωγή αρνητικών εκπομπών, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Σύμφωνα με την Διεύθυνση Πληροφοριών Ενέργειας των ΗΠΑ (Energy Information Administration-EIA), οι συνολικές εκπομπές του τελευταίου στις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν 5.271 εκατομμύρια τόνοι το 2015 και οι 1.925 προέρχονταν μόνο από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [22, 23].

Ωστόσο, η επίγνωση της κατάστασης, οι κίνδυνοι που εμφανίζονται και η υπερθέρμανση του πλανήτη, έχει οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα σε αναζήτηση λύσεων για τα παραπάνω προβλήματα. Οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν αναπτύξει διάφορες μεθόδους ως απάντηση στα ζητήματα αυτά, υποστηρίζοντας τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Βασικό πλεονέκτημα των τελευταίων αποτελεί η άφθονη διαθεσιμότητα τους. Οι ΑΠΕ έχουν πολύ μικρότερο αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με βιώσιμο τρόπο. Η ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), στο ηλεκτρικό δίκτυο έχει βελτιωθεί και αυξηθεί με γοργούς ρυθμούς, παρουσιάζοντας υψηλή απόδοση και μειώνοντας σημαντικά τους κινδύνους από την εκπομπή αερίων. Ήδη από το 2011, οι ΑΠΕ αποτελούν τις μισές προσθήκες στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [22, 23, 24]. Οι τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες [23]:

- Αποσπώμενες
- Μη αποσπώμενες

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη γεωθερμία και τη βιομάζα και αποτελούν τεχνικές που είναι έτοιμες για παραγωγή κατόπιν ζήτησης. Αντίθετα, οι μη αποσπώμενες ή μεταβλητές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιλαμβάνουν την αιολική και ηλιακή ενέργεια και εξαρτώνται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και ώρες της μέρας. Το τυπικό μέγεθος των μη αποσπώμενων τεχνολογιών είναι κατάλληλο για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που συνδέονται με το δίκτυο διανομής και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κοντά στο πεδίο ζήτησης [22, 25]. Η μελέτη που θα γίνει στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα περιλαμβάνει μη αποσπώμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί μία διαδικασία μεταφοράς ισχύος από τις τεχνολογίες της πρώτης, στο ήδη υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ισχύος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3 [22, 26].



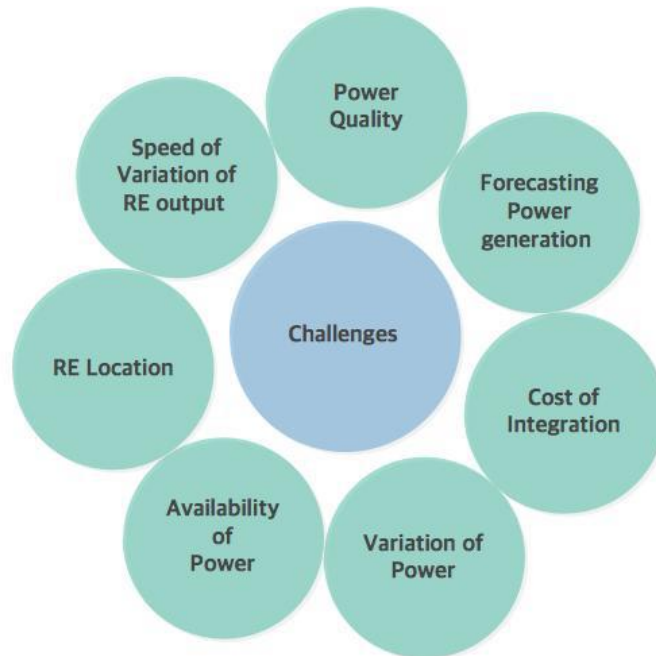
Εικόνα 3: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με παρουσία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [22]

Το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος περιλαμβάνει σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, με συμβατικό τρόπο και με ΑΠΕ, αντίστοιχα. Η ενέργεια που παράγεται μεταφέρεται μέσω εναλλασσόμενου ρεύματος, σε υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης και έπειτα μέσω γραμμών μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής. Το σύστημα διανομής, το οποίο λειτουργεί σε επίπεδα χαμηλής ή μέσης τάσης μεταφέρει τελικά την ενέργεια στους καταναλωτές. Ωστόσο, η εξάρτηση σε μεγάλο βαθμό από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φέρνει προκλήσεις στην ενεργειακή πολιτική, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. [6, 22, 25, 26]

3.2 Προβλήματα από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται δραστικά εξαιτίας της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων και των αρνητικών επιπτώσεων από την χρήση τους. Δεδομένου ότι οι περισσότερες ΑΠΕ είναι περιοδικές, η ενσωμάτωση τους στα συστήματα ηλεκτρικής

ενέργειας, καθίσταται δύσκολο έργο, που συνοδεύεται από πολλές προκλήσεις, όπως φαίνεται από την Εικόνα 4 [25, 27].



Εικόνα 4: Προκλήσεις από την ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο [22]

Η ποιότητα και αναλογία της πραγματικής και αέργου ισχύος, είναι σημαντική για το ΣΗΕ, αφού διασφαλίζει την υψηλή απόδοση και αξιοπιστία του δικτύου. Σε αντίθετες περιπτώσεις, οι επιπτώσεις για το σύστημα και τις βιομηχανίες μπορεί να είναι επιβλαβείς, εξαιτίας του υψηλού κόστους και αστοχίας του εξοπλισμού. Μέσα από μελέτες που έχουν γίνει, υπολογίσθηκε ότι τα προβλήματα εξαιτίας της ροής ισχύος, είναι υπεύθυνα για πάνω από 15 δισεκατομμύρια δολλάρια ετησίου κόστους, στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ. Στα προβλήματα που προκαλεί η κακή ποιότητα ισχύος, περιλαμβάνονται οι διακυμάνσεις στη συχνότητα και την τάση, οι χαμηλοί δείκτες απόδοσης, οι αρμονικές στα ρεύματα και τις τάσεις. Οι τελευταίες αποτελούν μεγάλο αντικείμενο μελέτης και θα αναλυθούν περαιτέρω, στην παράγραφο 3.3 [22, 25, 26, 27]. Ένας από τους μεγαλύτερους προβληματισμούς κατά την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ότι οι πρώτες εξαρτώνται από φυσικούς πόρους που είναι ανεξέλεγκτοι από τον άνθρωπο. Τα φωτοβολταϊκά πάρκα μπορούν να παράγουν ισχύ, μόνο τις ώρες που είναι διαθέσιμες οι ακτίνες του ηλίου, ενώ το βράδυ η παραγωγή εκμηδενίζεται. Ομοίως, τα αιολικά πάρκα, δεν έχουν τη δυνατότητα να παράγουν

ηλεκτρική ενέργεια, σε χαμηλές ταχύτητες του ανέμου. Η αστάθεια της παραγωγής, καθιστά την ενσωμάτωση των ΑΠΕ πιο περίπλοκη και επιζήμια για το δίκτυο ισχύος. Επιπλέον, τα διαφορετικά επίπεδα παραγωγής ισχύος από τις ΑΠΕ, αποτελούν άλλη μία πρόκληση κατά την ενσωμάτωση τους στο ΣΗΕ. Σε περιπτώσεις μικρών διακυμάνσεων στην ισχύ εξόδου, τα αποτελέσματα δεν είναι ανησυχητικά. Ωστόσο, σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις, οι απαιτήσεις από τις υποδομές θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ενισχυμένες. Η παραπάνω πρόκληση, αποκτά ακόμα μεγαλύτερο βάρος, εφόσον ληφθεί υπόψη η ταχύτητα που συμβαίνουν αυτές οι μεταβολές [22, 25, 26, 27].

Η πρόβλεψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στα δίκτυα ισχύος, είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας. Επειδή οι περισσότερες ΑΠΕ εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να επιτευχθεί, όσον αφορά την ακρίβεια των προβλέψεων. Επιπρόσθετα, κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και οι μελέτες πρόβλεψης είναι διαφορετικές. Ακόμα, οι βραχυπρόθεσμες μελέτες μπορούν να αποδειχθούν επικερδείς για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δεν αποτελεί πρόβλημα η ενσωμάτωση τους. Αντίθετα, οι μακροπρόθεσμες μελέτες παρουσιάζουν σημαντικά ζητήματα, εξαιτίας της έλλειψης ακρίβειας, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η λειτουργία του δικτύου [22, 25, 26, 27].

Πολλές από τις ΑΠΕ, απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης προκειμένου να παράγουν μία σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, για το δίκτυο. Κάθε τεχνολογία, έχει ξεχωριστά κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης. Ορισμένες από αυτές, δεν είναι διαθέσιμες σε κάθε περιοχή και έχουν μεγάλη εξάρτηση από τις γεωγραφικές θέσεις και το εκάστοτε κλίμα. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ του χώρου εγκατάστασης των ΑΠΕ και του σημείου διασύνδεσης αποτελεί παράγοντα σημαντικού κόστους. Το τελευταίο, είναι ένας εκ των σημαντικότερων προκλήσεων που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί, ώστε να εντάξουν τις ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η παραγωγή της ενέργειας κοστίζει ελάχιστα, ωστόσο η αρχική εγκατάσταση, οι συντηρήσεις των πάρκων και ο τρόπος διασύνδεσης, φέρουν το μεγαλύτερο κόστος κατά την διείσδυση των ΑΠΕ στα ΣΗΕ [22, 25, 26, 27, 28].

3.3 Αρμονικές από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο

3.3.1 Ταξινόμηση των αρμονικών

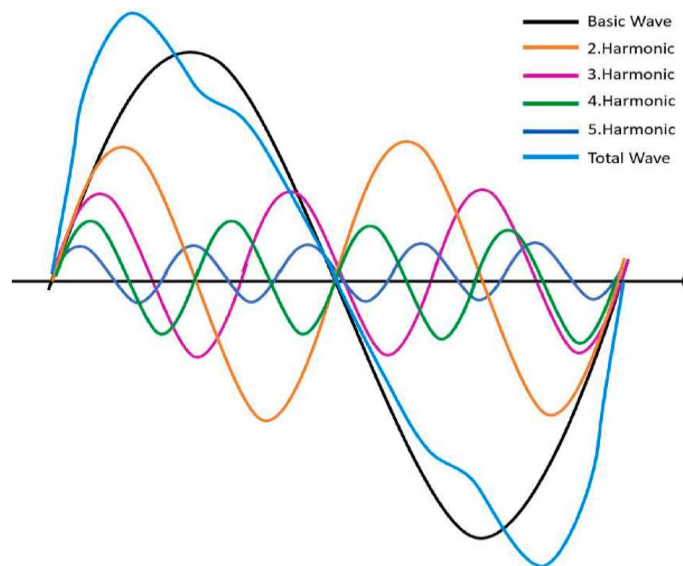
Η διακοπτόμενη φύση των ΑΠΕ και ιδιαίτερα της ηλιακής και αιολικής ενέργειας, έχει αντίκτυπο στη λειτουργία των δικτύων ισχύος, επηρεάζοντας την ποιότητα και την απόδοση τους. Οι inverters (ημιαγωγοί), τα μη γραμμικά φορτία και οι ηλεκτρονικές συσκευές, προκαλούν τις αρμονικές στα ΣΗΕ, έχοντας ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των μετασχηματιστών, τη διακοπή λειτουργίας των αυτόματων διακοπών ισχύος και τις καταπονήσεις που υφίσταται ο διασυνδεδεμένος εξοπλισμός. Οι αρμονικές είναι δύσκολο να ανιχνευθούν, αλλά παρουσιάζουν οικονομικές επιπτώσεις και απώλειες στα συστήματα διανομής [29, 30]. Οι τελευταίες, αποτελούν παραμορφώσεις της τάσης και του ρεύματος και μπορούν να παρουσιασθούν ως μια σειρά ημιτονοειδών σημάτων που αποσυντίθεται με μία σειρά Fourier. Η αρμονική με συχνότητα $f_n = 50$ Hz, είναι η θεμελιώδης και οι συχνότητες f_h , όπως φαίνεται από τη σχέση (8), καλούνται ως αρμονικές μεγαλύτερης τάξης [30, 31, 32, 33]:

$$f_h = h \cdot f_n \quad (8)$$

Όπου:

- f_h , οι αρμονικές μεγαλύτερης τάξης
- h , ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδης αρμονικής, καθορίζει τον αριθμό της αρμονικής μεγαλύτερης τάξης
- f_n , η θεμελιώδης αρμονική συχνότητα, ίση με 50 Hz

Στην Εικόνα 5, παρουσιάζεται η θεμελιώδης ημιτονοειδής κυματομορφή, οι τέσσερις επόμενες αρμονικές μεγαλύτερης τάξης και ο συνδυασμός τους.



Εικόνα 5: Θεμελιώδης αρμονική, αρμονικές μεγαλύτερης τάξης και ο συνδυασμός τους [31]

Ο βασικός διαχωρισμός των αρμονικών γίνεται σε άρτιες και περιττές. Κυματομορφές που είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα του χρόνου, αντιπροσωπεύονται από τη δεύτερη κατηγορία. Αντίστοιχα, οι άρτιες αρμονικές κυματομορφές, μπορούν να προκύψουν μόνο από κυματομορφές που είναι μη συμμετρικές ως προς τον άξονα του χρόνου [29, 32]. Ωστόσο, οι αρμονικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις ακολουθίες. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, οι αρμονικές θετικής ακολουθίας αποτελούνται από την τάξη $3k + 1$ των αρμονικών, οι αρμονικές αρνητικής ακολουθίας αποτελούνται από την τάξη $2k + 1$, ενώ οι αρμονικές μηδενικής ακολουθίας αποτελούνται από την τάξη $3k + 3$.

Πίνακας 1: Αρμονικές με βάση την θετική, αρνητική και μηδενική ακολουθία (για $k = 0, 1, 2, 3...$) [32]

Συμμετρικές συνιστώσες	Θετική ακολουθία	Αρνητική ακολουθία	Μηδενική ακολουθία
Αρμονικές μεγαλύτερης τάξης	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12

	$3k + 1$	$3k + 2$	$3k + 3$

3.3.2 Δείκτες ποιότητας ισχύος υπό αρμονικές

Η στιγμιαία τάση και το ρεύμα, μπορούν να εκφραστούν ως άθροισμα των στιγμιαίων τιμών της θεμελιώδους αρμονικής και των αρμονικών μεγαλύτερης τάξης, της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα, όπως περιγράφεται από τις σχέσεις (9), (10) [32, 33].

$$u(t) = \sum_{h=1}^n U_{mh} \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \varphi_{uh}) \quad (9)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^n I_{mh} \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \varphi_{ih}) \quad (10)$$

Όπου:

- n , ο αριθμός των υπολογισμένων αρμονικών
- U_{mh} , I_{mh} , το πλάτος της αρμονικής της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα
- h , ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους αρμονικής, καθορίζει τον αριθμό της αρμονικής μεγαλύτερης τάξης
- ω , η γωνιακή συχνότητα
- t , ο χρόνος
- φ_{uh} , φ_{ih} , η αρχική φάση της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα

Οι σχέσεις για τις ενεργές τιμές της τάσης και του ρεύματος δίνονται από τις σχέσεις (11), (12) [33].

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (11)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (12)$$

«Ο κύριος δείκτης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόκλισης των παραμορφωμένων κυματομορφών από την ημιτονοειδή συνάρτηση, ονομάζεται Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion - THD)» και περιγράφεται από τις σχέσεις (13) και (14) για την τάση και το ρεύμα αντίστοιχα [31, 32, 33].

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (13)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (14)$$

Οι δείκτες των σχέσεων (12) και (13) περιγράφουν το μέγεθος της παραμόρφωσης που εντοπίζεται σε μία κυματομορφή, τάσης ή ρεύματος αντίστοιχα [32].

Ο δείκτης που περιγράφει την ολική παραμόρφωση σε σχέση με το μέγιστο ρεύμα φορτίου καλείται Παραμόρφωση Ολικής Ζήτησης (Total Demand Distortion - TDD) και χρησιμοποιείται όταν το δίκτυο τροφοδοτεί καταναλωτές με εξαιρετικά μεταβλητό χρονοδιάγραμμα ζήτησης, όπως είναι οι εγχώριοι καταναλωτές [32], [33]. Η σχέση (15) περιγράφει μαθηματικά τον δείκτη TDD [33].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (15)$$

Όπου:

- I_L , το μέγιστο ρεύμα φορτίου του καταναλωτή (μέγιστη ζήτηση)

3.3.3 Όρια αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο

Τόσο οι χρήστες, όσο και οι διαχειριστές των ΣΗΕ θα πρέπει να είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των αρμονικών στην ισχύ του δικτύου. Το πρότυπο IEEE 519-2014 ορίζει τα όρια της αρμονικής τάσης και του ρεύματος. Επομένως, είναι ευθύνη όλων των εμπλεκομένων να διασφαλίσουν τα επιτρεπτά όρια. Η εφαρμογή των συνιστώμενων ορίων, ισχύει μόνο στο σημείο διασύνδεσης και δεν χρησιμοποιείται σε μεμονωμένο εξοπλισμό, στη βιομηχανία ή σε άλλες εγκαταστάσεις [31, 32, 33]. Οι Πίνακες 2, 3 και 4 περιγράφουν αυτά τα όρια, συναρτήσει του ρεύματος βραχυκύκλωσης, για τα διάφορα επίπεδα τάσης.

Πίνακας 2: Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης ρεύματος για ΣΗΕ ονομαστικής τάσης από 120V έως 69kV [32]

<i>Μέγιστη παραμόρφωση αρμονικών ρευμάτων συναρτήσει του I_L</i>						
I_{sc}/I_L	<i>Αρμονικές μεγαλύτερης τάξης (περιττές αρμονικές)^{a, b}</i>					<i>TDD</i>
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
$< 20^c$	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Πίνακας 3: Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης ρεύματος για ΣΗΕ ονομαστικής τάσης από 69kV έως 161kV [32]

Μέγιστη παραμόρφωση αρμονικών ρευμάτων συναρτήσει του I_L

I_{sc}/I_L	Αρμονικές μεγαλύτερης τάξης (περιττές αρμονικές) ^{a, b}					TDD
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
$< 20^c$	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50<100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100<1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

Πίνακας 4: Συνιστώμενα όρια παραμόρφωσης ρεύματος για ΣΗΕ ονομαστικής τάσης $> 161kV$ [32]

Μέγιστη παραμόρφωση αρμονικών ρευμάτων συναρτήσει του I_L

I_{sc}/I_L	Αρμονικές μεγαλύτερης τάξης (περιττές αρμονικές) ^{a, b}					TDD
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
$< 25^c$	1	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Όπου:

- a, οι άρτιες αρμονικές περιορίζονται στο 25% των περιττών αρμονικών ορίων
- b, δεν επιτρέπονται παραμορφώσεις του ρεύματος που οδηγούν σε συνιστώσες συνεχούς ρεύματος
- c, όλος ο εξοπλισμός παραγωγής ενέργειας περιορίζεται σε αυτές τις τιμές παραμόρφωσης ρεύματος, ανεξάρτητα από το I_{sc}/I_L
- I_{sc} , το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος στο σημείο διασύνδεσης

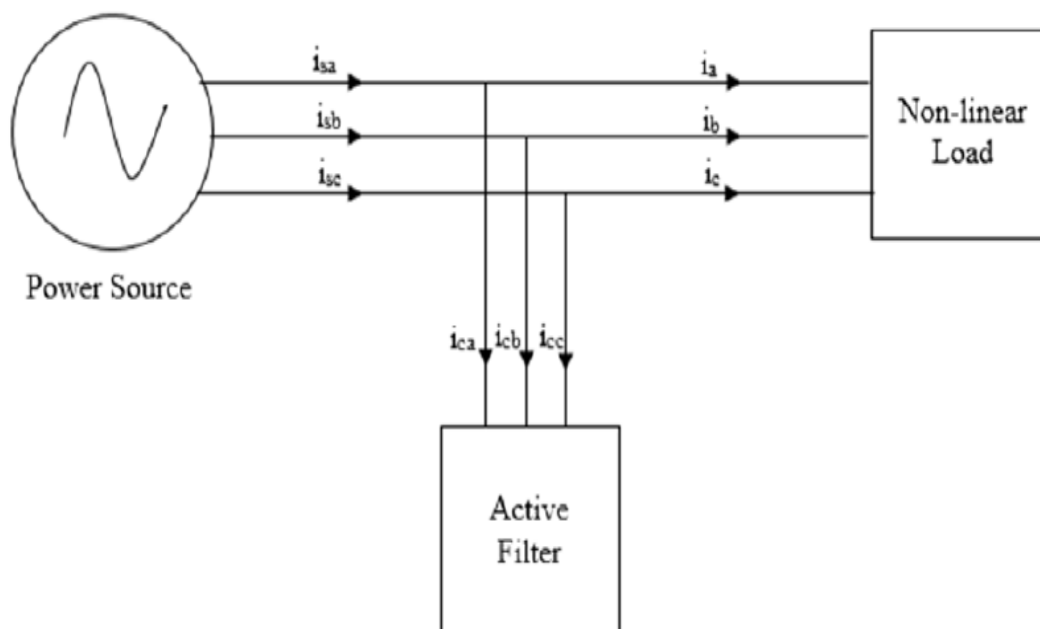
Οι αρμονικές της τάσης και του ρεύματος προκαλούν απώλειες, θερμότητα και καταστρέφουν τη μόνωση του εξοπλισμού. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, προκαλούνται από μη γραμμικά φορτία και κυριαρχούν στα ηλεκτρονικά ισχύος. Τα τελευταία εντοπίζονται σε τεχνολογίες των ΑΠΕ και κατά συνέπεια το ολοένα και αυξανόμενο ποσοστό διείσδυσης τους, δημιουργεί περισσότερες αρμονικές στα ΣΗΕ [30, 31, 32].

3.3.4 Αντιμετώπιση αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο

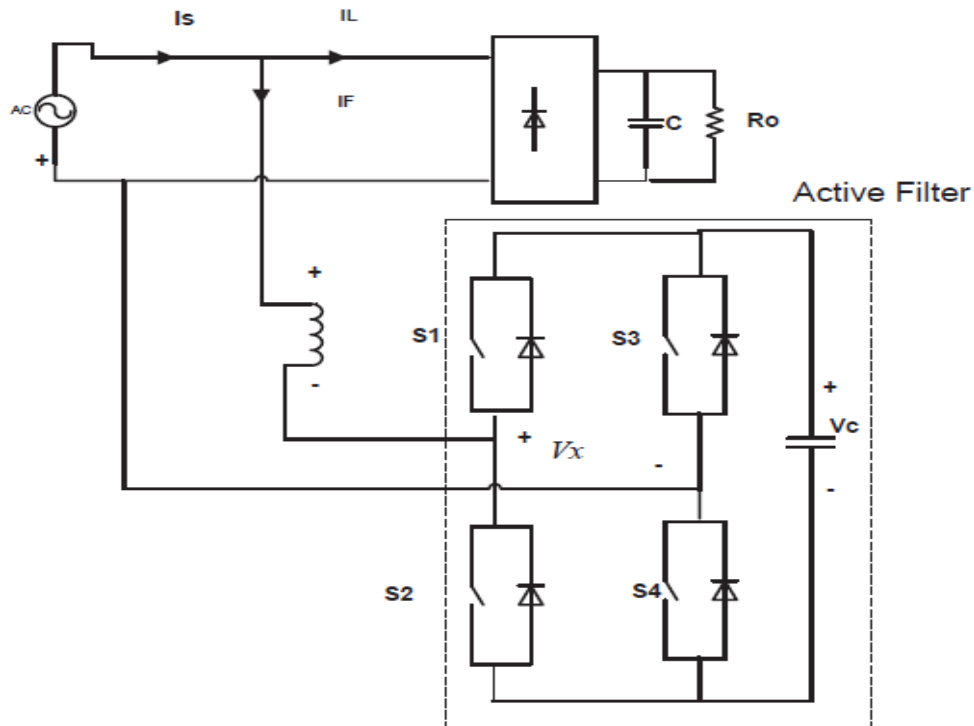
Η χρήση των μετατροπέων ισχύος και άλλων μη γραμμικών φορτίων, εισάγει στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αρμονικές και αντλεί ρεύμα αέργου ισχύος από την τροφοδοσία του συστήματος. Οι επιπτώσεις για το δίκτυο είναι αρνητικές και προκαλούνται υπερθέρμανση, κακή απόδοση και καταπόνηση του καταναλωτικού εξοπλισμού. Λύση στον περιορισμό των αρμονικών, αποτελούν τα φίλτρα ενεργού ισχύος καθώς μπορούν να αντισταθμίσουν την άεργο ισχύ. Τα τελευταία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες [34]:

- Φίλτρα ενεργού ισχύος διακλάδωσης (Shunt active power filter)
- Φίλτρα ενεργού τροφοδοσίας σειράς (Series active power filter)

Τα φίλτρα της πρώτης κατηγορίας, χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του ρεύματος της πηγής, ενώ τα φίλτρα της δεύτερης, έχουν τη δυνατότητα για αντιστάθμιση αρμονικών τάσεως. Ευρέως διαδεδομένη, είναι η χρήση των συσκευών STATCOM, οι οποίες ανήκουν στην πρώτη κατηγορία. Βασικό πλεονέκτημα τους, αποτελεί η αποτελεσματική αντιστάθμιση και το ονομαστικό ρεύμα που παρέχουν είναι πολύ μικρότερο από τα φίλτρα σειράς, καθώς συνδέονται παράλληλα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [34, 35]. Στις Εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται τα φίλτρα ενεργού ισχύος διακλάδωσης και μίας συσκευής STATCOM αντίστοιχα.



Εικόνα 6: Σύνδεση φίλτρου ενεργού ισχύος διακλάδωσης [35]



Εικόνα 7: Σύνδεση STATCOM [34]

Βασική λειτουργία των φίλτρων ενεργού ισχύος διακλάδωσης, είναι να ακυρώσει την παραγωγή αρμονικών ή ημιτονοειδών ρευμάτων, δημιουργώντας ρεύμα ίσο με το αρμονικό ρεύμα, αλλά με μετατόπιση φάσης κατά 180 μοίρες. Γενικά, τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούν ένα inverter ελεγχόμενου ρεύματος, που παράγει το ρεύμα αντιστάθμισης ημιτονοειδούς μορφής. Σε ότι έχει να κάνει με τις συσκευές STATCOM, προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητα ισχύος του δικτύου, η έξοδος από τις συσκευές αυτές ποικίλλει σύμφωνα με την στρατηγική ελέγχου [30, 34, 35].

Η εγκατάσταση των φίλτρων ενεργού ισχύος διακλάδωσης στα ΣΗΕ, γίνεται είτε από μεμονωμένους καταναλωτές, κοντά σε αναγνωρισμένα αρμονικά φορτία, είτε από επιχειρήσεις παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε υποσταθμούς διανομής. Στόχος των πρώτων, είναι ο περιορισμός των αρμονικών από δικά τους φορτία, ενώ αντίστοιχα στόχος των δεύτερων, αποτελεί ο συνολικός εκμηδενισμός των αρμονικών σε όλο το δίκτυο [30, 34, 35]. Οι συσκευές STATCOM είναι αυτές με τις καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με άλλες, για τη μείωση των διακυμάνσεων τάσης και αρμονικών [30].

Κεφάλαιο 4 Αιολική ενέργεια

4.1 Ανασκόπηση της αιολικής ενέργειας

Η αύξηση των παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων, η κλιμάκωση των τιμών της ενέργειας και οι αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα, έχει τονίσει την ανάγκη της παραγωγής ενέργειας με βάση τις ανανεώσιμες πηγές. Η ροή του ανέμου σε ορισμένες ταχύτητες, αποτελεί έναν άφθονο πόρο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς ρύπανση. Η τελευταία καλείται αιολική ενέργεια και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της είναι οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου [8, 37].

Οι ανεμογεννήτριες κατηγοριοποιούνται με βάση τη κατεύθυνση περιστροφής του άξονα του ρότορα, ο οποίος μπορεί να είναι είτε οριζόντιος είτε κατακόρυφος. Οι σύγχρονες εμπορικές ανεμογεννήτριες είναι ως επί των πλείστον οριζόντιου άξονα, δηλαδή τα πτερύγια περιστρέφονται σε κατακόρυφο επίπεδο. Κύριες παράμετροι για την επιλογή των κατάλληλων ανεμογεννητριών αποτελούν η τοποθεσία της εγκατάστασης, η διάμετρος του ρότορα και η ταχύτητα του ανέμου [38]. Σε θεωρητικό επίπεδο, ο διπλασιασμός της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί τον πολλαπλασιασμό της ενεργειακής απόδοσης οκτώ φορές [37].

Μεταξύ των ετών 2000 και 2017, η παγκόσμια ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από την αιολική ενέργεια, διπλασιαζόταν κάθε τρία χρόνια αγγίζοντας συνολικά τα 540 GW στα τέλη του 2017. Κατά τη διάρκεια του 2017, η Κίνα, η ΗΠΑ και η Γερμανία αποτελούσαν τις κορυφαίες χώρες των για τις εγκαταστάσεις και ενσωμάτωσης του αιολικού δυναμικού, σε παγκόσμιο επίπεδο. Ένα από τα πιο αισιόδοξα σενάρια, προβλέπει ότι η αιολική ενέργεια θα συνεισφέρει σχεδόν 41% στην παγκόσμια εγκατεστημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έως το 2050 [37, 39]. Το έτος 2022, εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 94 GW, εκ των οποίων τα 21GW προήλθαν από υπεράκτια αιολικά πάρκα [39].

4.2 Αιολικά πάρκα

4.2.1 Αξιολόγηση ανεμολογικών δεδομένων

Η επιλογή εγκατάστασης των αιολικών πάρκων στις γεωγραφικές περιοχές, γίνεται με βάση την συλλογή και την αξιολόγηση των ανεμολογικών δεδομένων. Βασικές μεταβλητές που εξετάζονται για κάθε περίπτωση είναι, η ταχύτητα του ανέμου και το ύψος εγκατάστασης των αιολικών πάρκων. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της πρώτης αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας και μεταβάλλονται ανάλογα με το ύψος της τοποθεσίας εγκατάστασης. Μία από τις πιο ευρέως διαδεδομένες κατανομές για την αναπαράσταση του ανέμου, είναι η κατανομή Weibull. Η τελευταία, χρησιμοποιείται στον τομέα της αιολικής βιομηχανίας και εκφράζει την πιθανότητα το μέτρο της έντασης της ταχύτητας του ανέμου να βρίσκεται μεταξύ ενός διαστήματος τιμών. Το μαθηματικό μοντέλο που την περιγράφει είναι η σχέση (16), ενώ η αντίστοιχη αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας, δίνεται από τη σχέση (17) [40].

$$f(u) = \frac{k}{u} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (16)$$

$$F(u) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (17)$$

Όπου:

- u , η ταχύτητα του ανέμου
- c , η παράμετρος κλίμακας, η οποία εξαρτάται από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας
- k , η παράμετρος μορφής, η οποία αφορά τη μέση ταχύτητα

Παρόλο που η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται ευρέως, στις ανεμογεννήτριες λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη ακόμη δύο περιορισμών. Δεδομένου ότι ο στρόβιλος δε μπορεί να παράγει ισχύ υπό οποιαδήποτε ταχύτητα, ο ορισμός μίας ταχύτητας u_{in} ως κάτω ορίου και μίας ταχύτητας u_{out} ως άνω ορίου, αποτρέπουν τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας εκτός των ταχυτήτων αποκοπής. Γι' αυτό το λόγο, η κατανομή Weibull λαμβάνει τη μορφή που περιγράφεται από το σύστημα εξισώσεων, ως εξής [40]:

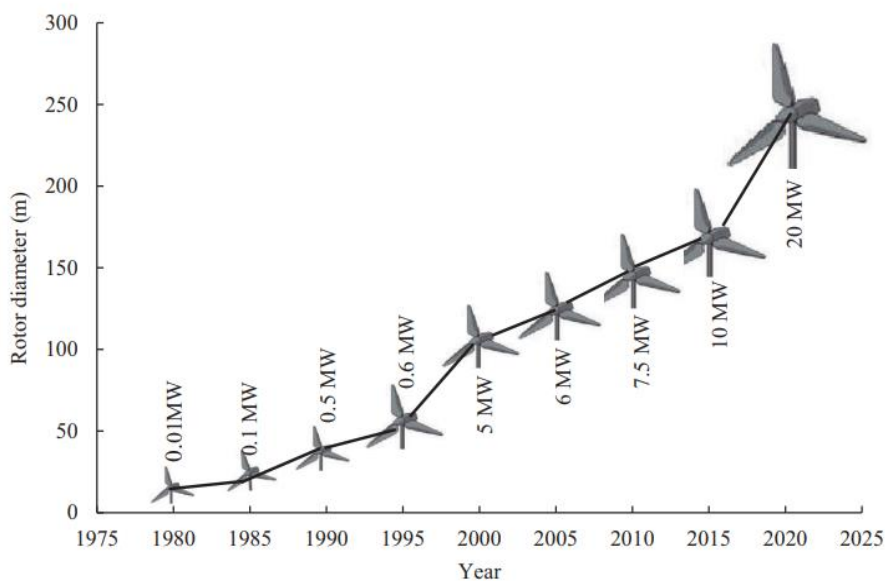
$$f(u) = \begin{cases} P, (u < u_{in}), u = u_{in} \\ \frac{[1-P(u < u_{in})-P(u > u_{out})]}{1-e^{-\left(\frac{u_{out}-u_{in}}{c}\right)^k}} \cdot \frac{k}{c} \left(\frac{u-u_{in}}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u-u_{in}}{c}\right)^k}, u_{in} < u < u_{out} \\ P, (u > u_{out}), u = u_{out} \end{cases} \quad (18)$$

Όπου:

- u , c , k , ομοίως με τις σχέσεις (16) και (17)
- u_{in} , κάτω όριο επιτρεπόμενης ταχύτητας
- u_{out} , άνω όριο επιτρεπόμενης ταχύτητας
- $P()$, αφορά την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι εντός των ορίων που θέτει η παρένθεση

4.2.2 Τύποι ανεμογεννητριών

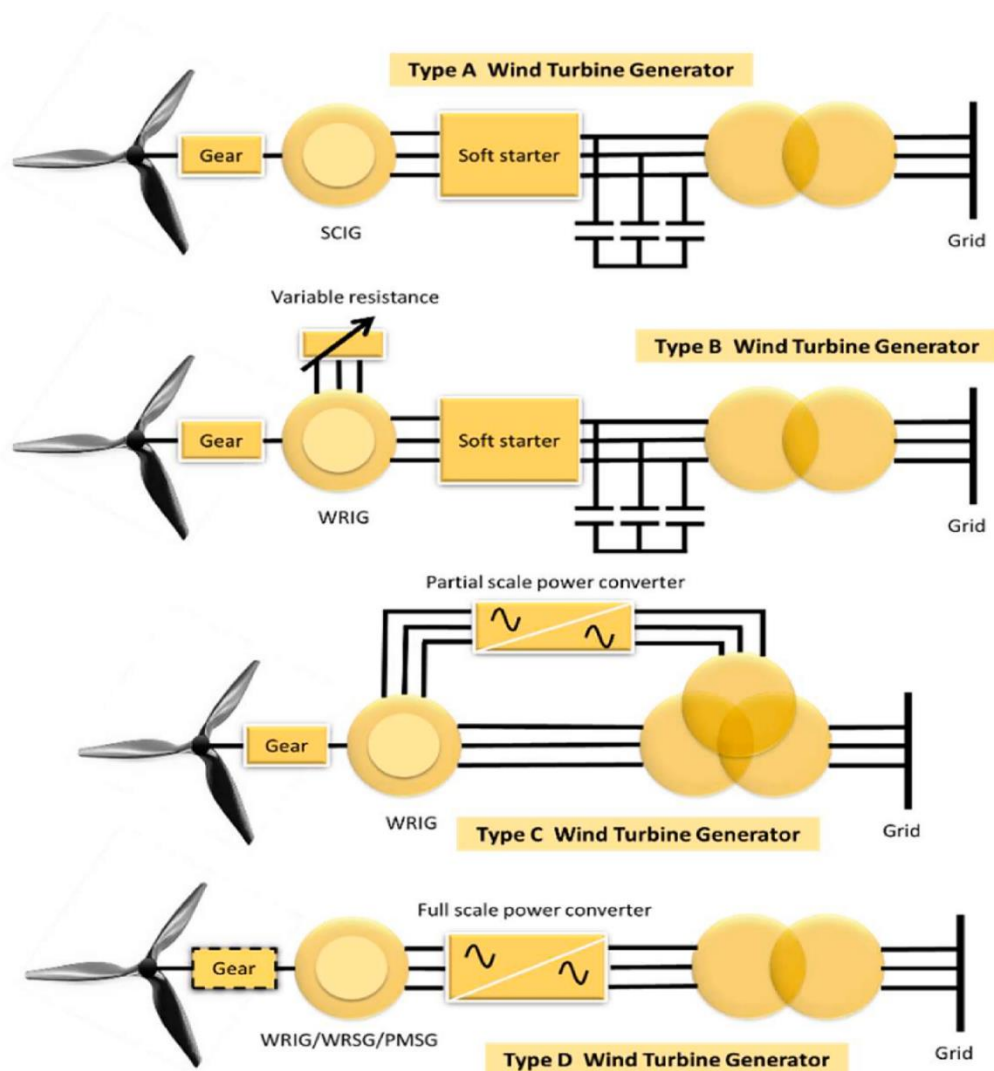
Οι ανεμογεννήτριες παραγωγής ισχύος από 1,5 έως 3 MW χρησιμοποιούνται σε χερσαία αιολικά πάρκα. Τα τελευταία, αναπτύσσονται συνήθως πιο κοντά σε κέντρα ζήτησης και σε περιοχές με χαμηλότερες ταχύτητες του ανέμου. Η εγκατάσταση αυτών των ανεμογεννητριών γίνεται σε ψηλότερους πύργους και οι λεπίδες περιστροφής, είναι μεγαλύτερες. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, περιέχουν στροβίλους με διάμετρο ρότορα που φτάνει τα 250 μέτρα και στη σημερινή κατάσταση βρίσκονται σε φάση περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης [37]. Στην Εικόνα 8, παρουσιάζεται η ισχύς και η διάμετρος του ρότορα των ανεμογεννητριών, σε συνάρτηση με την πάροδο των χρόνων.



Εικόνα 8: Ισχύς και διάμετρος ρότορα ανεμογεννητριών, σε συνάρτηση με την πάροδο του χρόνου [37]

Οι βασικοί τύποι των ανεμογεννητριών που εντοπίζονται παρουσιάζονται στην Εικόνα 9 και είναι οι εξής [17]:

- Τύπου A, με τη γεννήτρια τύπου SCIG (Squirrel Cage Induction Generator)
- Τύπου B, με τη γεννήτρια τύπου WRIG (Wound Rotor Induction Generator)
- Τύπου C, με τη γεννήτρια τύπου WRIG (Wound Rotor Induction Generator) και μετατροπείς ισχύος μερικής κλίμακας
- Τύπου D, με τη γεννήτρια τύπου PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) ή WRIG ή WRS (Wound Rotor Synchronous Generator) και μετατροπείς ισχύος ολικής κλίμακας



Εικόνα 9: Τύποι ανεμογεννητριών [31]

Στις ανεμογεννήτριες τύπου A, ο μετασχηματιστής υπερύψωσης, είναι συνδεδεμένος με τη γεννήτρια επαγωγικού κλωβού (SCIG). Οι soft starters (ομαλοί εκκινητές) χρησιμοποιούνται για τη σωστή σύνδεση στο δίκτυο, ενώ οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για σύγκριση. Αναφορικά με τις ανεμογεννήτριες τύπου B, ο μετασχηματιστής είναι απευθείας συνδεδεμένος στα τυλίγματα της γεννήτριας επαγωγής (WRIG), μαζί με τους ομαλούς εκκινητές, για να μειωθούν οι υψηλές τιμές του ρεύματος κατά την εκκίνηση. Οι πυκνωτές συνδέονται στο σύστημα, προκειμένου να αντισταθμίσουν την άεργο ισχύ, από την κατανάλωση της γεννήτριας. Τα ηλεκτρονικά ισχύος, αποτελούν μέρη των ανεμογεννητριών τύπου C, D. Στις ανεμογεννήτριες τύπου C, οι γεννήτριες επαγωγής συνδέονται απευθείας στον μετασχηματιστή ανύψωσης. Επίσης, οι μετατροπείς ισχύος μερικής κλίμακας, χρησιμοποιούνται μεταξύ του μετασχηματιστή και του ρότορα. Στον τύπο D, οι μετατροπής ισχύος ολικής κλίμακας, συνδέονται σε μία μόνιμη μαγνητική σύγχρονη γεννήτρια (PMSG) είτε σε μία γεννήτρια επαγωγής (WRIG), είτε σε μία σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου ρότορα (WRSG) [31, 41].

4.2.3 Κριτήρια για τη βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης ανεμογεννητριών

Η βέλτιστη θέση εγκατάστασης των ανεμογεννητριών αποτελεί τη βάση για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού σε συνδυασμό με την κείμενη νομοθεσία. Επίσης, ο συνδυασμός τοποθεσίας με χαμηλότερο υψόμετρο και υψηλότερο αιολικό δυναμικό μπορεί να δώσει κατάλληλες θέσεις για νέες εγκαταστάσεις μειώνοντας το αρχικό επενδυτικό κόστος και τις μετέπειτα συντηρήσεις. Προκειμένου οι εγκαταστάσεις των ανεμογεννητριών να γίνουν στη βέλτιστη τοποθεσία, λαμβάνονται υπόψη οι εξής δείκτες [42]:

- C_{wind} , το μέγιστο δυνατό αιολικό δυναμικό που απαιτείται για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες
- C_{alt} , αναμένεται ότι το μέγιστο αιολικό παρατηρείται σε τοποθεσίες με μεγαλύτερο υψόμετρο. Αυτός ο δείκτης αφορά την επιθυμία για μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας
- C_{set} , όσο πιο κοντά βρίσκονται οι ανεμογεννήτριες σε οικισμούς, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες, εξαιτίας του μικρού μήκους των καλωδίων. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η νομοθεσία που αφορά τις ελάχιστες αποστάσεις εγκατάστασης αιολικών πάρκων, σε σχέση με τους οικισμούς

- C_{road} , όσο πιο κοντά βρίσκονται οι ανεμογεννήτριες σε υπάρχον δρόμους, τόσο πιο εύκολη θα είναι η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων, καθώς δε θα είναι απαραίτητη η κατασκευή συνοδευτικών έργων. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ισχύουσα νομοθεσία
- C_{tele} , όσο πιο κοντά βρίσκονται οι ανεμογεννήτριες σε υπάρχον δίκτυα τηλεπικοινωνίας, τόσο χαμηλότερες θα είναι οι απαιτήσεις για συνοδευτικά έργα προς κατασκευή. Αντίστοιχα, η ισχύουσα νομοθεσία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη

Αντίστοιχα, σε ότι έχει να κάνει με τα κριτήρια επιλογής των ανεμογεννητριών, από τις εταιρείες που κατασκευάζουν τα αιολικά πάρκα, αυτά έχουν να κάνουν με την αξιοπιστία του προϊόντος, την ένταση παραγωγής, το κόστος, τη διαθεσιμότητα των πόρων στην τοποθεσία εγκατάστασης και τις μελλοντικές συντηρήσεις που απαιτούνται [8].

4.3 Προβλήματα από την ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στο ηλεκτρικό δίκτυο

Η ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, εκτός των πλεονεκτημάτων, προκαλεί έντονες ανησυχίες σε χώρες ανά τον κόσμο. Οι δύο κυριότεροι προβληματισμοί, έχουν να κάνουν με τη μεταβλητότητα του ανέμου και την αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαθεσιμότητα του πρώτου, συχνά αποτελεί εμπόδιο, καθώς πολλές ευνοϊκές θέσεις εγκατάστασης αιολικών πάρκων, βρίσκονται μακριά από υπάρχουσες υποδομές. Η δημιουργία νέων εγκαταστάσεων και γραμμών μεταφοράς έρχονται αντιμέτωπες με φραγμούς δικαιωμάτων χρήσης γης και αυξημένου κόστους [43, 44].

Σε ότι έχει να κάνει με την αιολική ενέργεια, βασικό μειονέκτημα αποτελεί η μεταβλητή παραγωγή ενέργειας, εξαιτίας των διακυμάνσεων του ανέμου. Ωστόσο, η ενσωμάτωση ανεμογεννητριών είναι πολύ λιγότερο περίπλοκη, αν οι τελευταίες συνδέονται σε μεγάλα συστήματα ισχύος. Η μεγάλη γεωγραφική κατανομή των αιολικών πάρκων, μειώνει τη μεταβλητότητα και αυξάνει την ικανότητα για πρόβλεψη, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται το επίπεδο κινδύνου για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [43, 44].

Οι ανεμογεννήτριες που είχαν εγκατασταθεί την προηγούμενη δεκαετία, προκαλούσαν προβλήματα ποιότητας ισχύος όπως βυθίσεις τάσης και διακυμάνσεις συχνότητας στα ΣΗΕ, ωστόσο τα προβλήματα αυτά έχουν περιορισθεί σημαντικά σήμερα. Όσες από αυτές φέρουν ασύγχρονες μηχανές, τείνουν να απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο

ηλεκτρικής ενέργειας και συχνά προκαλούν αστάθεια στο σύστημα εάν δεν γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις και αντισταθμίσεις. Η κακή ποιότητα ισχύος ευθύνεται για καταπονήσεις στον εξοπλισμό του τελικού χρήστη, με αποτέλεσμα την κακή τροφοδοσία συσκευών. Τα προβλήματα ποιότητας ισχύος που προκαλούνται από την αιολική ενέργεια, λύνονται καλύτερα στο σημείο διασύνδεσης της γεννήτριας πάνω στο ΣΗΕ. Η χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος στο στρόβιλο ελέγχει τις γωνίες φάσης του ρότορα, ρεύματα για τον έλεγχο τάσης και το συντελεστή ισχύος [31, 43, 44].

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο, προκαλεί αρμονικές. Σε ότι έχει να κάνει με τις αρμονικές που οφείλονται στην αιολική ενέργεια, οι τελευταίες προκαλούνται από τα soft starters, τους μετατροπείς ισχύος και τις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Η σύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφέρει ισχύ και εγχέονται αρμονικές συνιστώσες. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Α, Β συμβάλλουν στις αρμονικές εξαιτίας των μη γραμμικών χαρακτηριστικών τους. Αντίστοιχα, οι ανεμογεννήτριες τύπου C, D αποτελούν πηγή αρμονικών λόγω των μετατροπών και των ηλεκτρονικών ισχύος που φέρουν. Εάν οι αρμονικές στο ΣΗΕ, συμπίπτουν με οποιοδήποτε σημείο συντονισμού, είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο. Σε συστήματα όπου ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα είναι συνδεδεμένα, είναι απαραίτητη η επίγνωση των χαρακτηριστικών του καθενός, μεμονωμένα. Ωστόσο, είναι η πρόβλεψη αυτή, καθίσταται αδύνατη με τις παραδοσιακές μεθόδους αξιολόγησης [31, 43, 44].

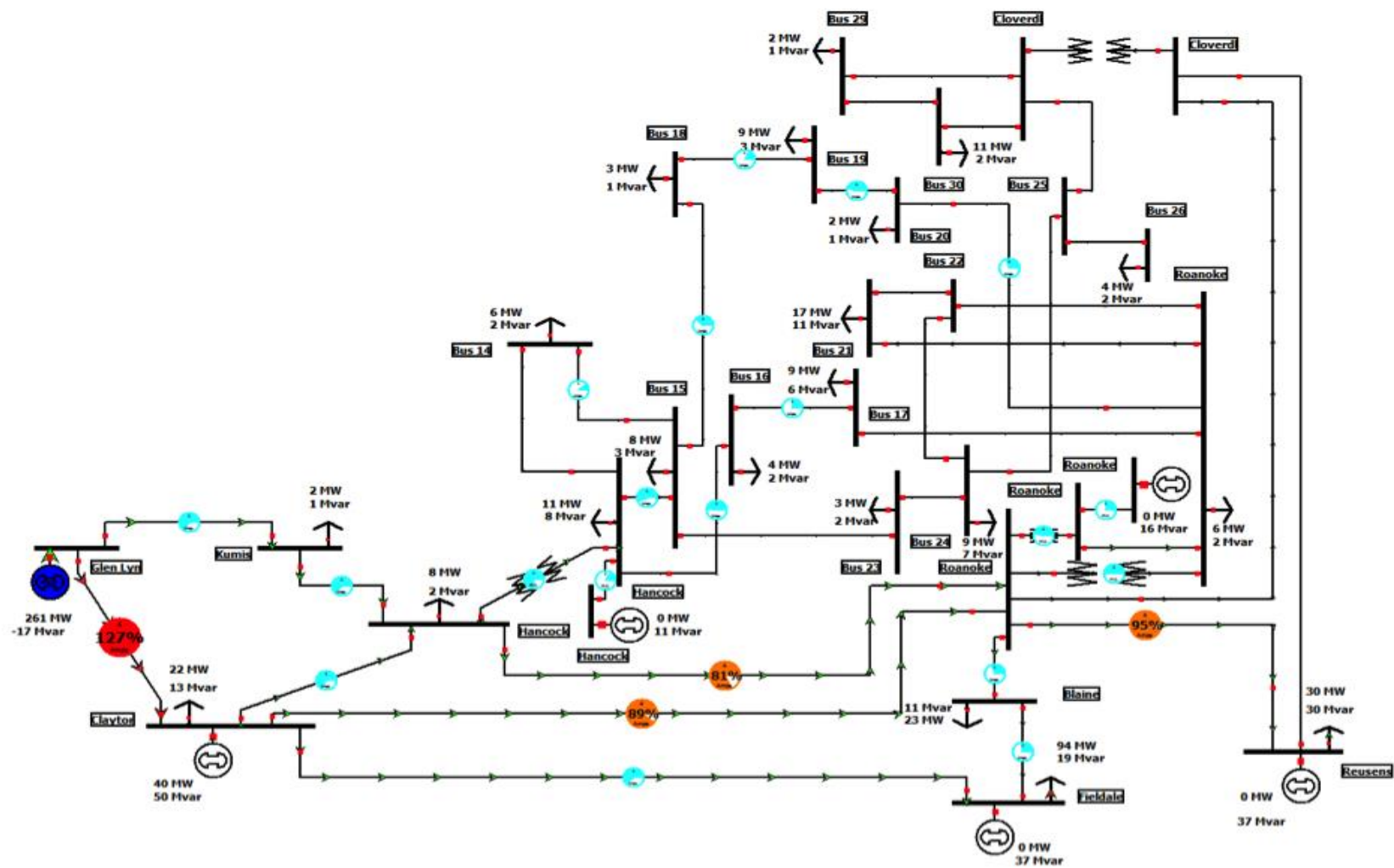
Κεφάλαιο 5 Προσομοιώσεις στο σύστημα 30 ζυγών της IEEE

5.1 Ανάλυση συστήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται κατάταξη των διαταραχών που μπορούν να εμφανισθούν στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE, με την παρουσία αιολικού πάρκου, ως προς την επικινδυνότητά τους για το ΣΗΕ. Αρχικά, εξετάζονται δύο σενάρια για την ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο. Το ποσοστό ενσωμάτωσης είναι 15% και 30%, αντίστοιχα και γίνεται σε ενδεικτικούς ζυγούς του ΣΗΕ. Αφού μελετηθούν οι απώλειες πραγματικής ισχύος στις περιπτώσεις που εξετάζονται, επιλέγεται αυτή με τις λιγότερες απώλειες πραγματικής ισχύος για την τελική εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Στο επιλεγέν σενάριο, εφαρμόζεται contingency analysis N-1, N-1-1 και γίνεται κατάταξη των διαταραχών με βάση το δείκτη απόδοσης PI_{MVA} . Όλες οι προσομοιώσεις γίνονται με το λογισμικό PowerWorld Simulator. Το σύστημα προς μελέτη, περιέχει:

- 30 ζυγούς
- 6 γεννήτριες (4 από τις οποίες παράγουν μόνο άεργο ισχύ στο σύστημα) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με 300,95 MW και 133,99 MVA_r
- 41 γραμμές μεταφοράς
- 4 μετασχηματιστές
- 21 φορτία

Τα επίπεδα τάσης που εντοπίζονται στο σύστημα, είναι 1 kV, 111 kV, 331 kV, 1321 kV. Το σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator [47]

5.2 Περιγραφή ερευνητικών σεναρίων προς μελέτη

5.2.1 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.1, αρχικά γίνεται μία μελέτη για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στο ΣΗΕ. Εξετάζονται δύο σενάρια ενσωμάτωσης των αιολικών πάρκων με ποσοστό ίσο με 15% και 30% αντίστοιχα, σε ενδεικτικούς ζυγούς του συστήματος. Για κάθε περίπτωση μελετώνται οι απώλειες πραγματικής ισχύος. Η τελική εγκατάσταση των αιολικών πάρκων γίνεται με βάση τις λιγότερες απώλειες για το ΣΗΕ. Τα σενάρια που μελετώνται είναι:

- **Σενάριο Α:** Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται εξ ολοκλήρου από συμβατικές γεννήτριες που έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 1, 2, 5, 8, 11, 13 του συστήματος. Οι γεννήτριες των τεσσάρων τελευταίων ζυγών προσφέρουν μόνο άεργο ισχύ στο σύστημα, καθώς το ΣΗΕ αναπαριστά το απλοποιημένο δίκτυο των ΗΠΑ το 1961 με αυτές τις προδιαγραφές.
- **Σενάριο Β:** Ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με ποσοστό ίσο με 15% της συνολικής ενέργειας
- **Σενάριο Γ:** Ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με ποσοστό ίσο με 30% της συνολικής ενέργειας

Στο Σενάριο Β, ένα αιολικό πάρκο αντιπροσωπεύει το ποσοστό διείσδυσης 15%, το οποίο αντιστοιχεί σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με 45 MW. Ενδεικτικά, εξετάσθηκαν τέσσερις περιπτώσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών:

- **Σενάριο Β1:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 5 με ποσοστό διείσδυσης 15%
- **Σενάριο Β2:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 8 με ποσοστό διείσδυσης 15%
- **Σενάριο Β3:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 11 με ποσοστό διείσδυσης 15%
- **Σενάριο Β4:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 13 με ποσοστό διείσδυσης 15%

Αντίστοιχα, στο Σενάριο Γ, εξετάσθηκε συνδυασμός ενδεικτικών ζυγών για την εγκατάσταση των αιολικών πάρκων. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών, είναι ίση με 90 MW. Οι περιπτώσεις που εξετάσθηκαν είναι:

- **Σενάριο Γ1:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 5, 8, 11, 13 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 22,5 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%

- **Σενάριο Γ2:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 5, 8, 11 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 30 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%
- **Σενάριο Γ3:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 5, 8, 13 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 30 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%
- **Σενάριο Γ4:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 8, 11, 13 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 30 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%

Για κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν, το παραγόμενο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα, αφαιρέθηκε από τη γεννήτρια 1 του ΣΗΕ. Διαφορετικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το σύστημα ήταν πολύ μεγαλύτερη από τις καταναλώσεις των υπάρχοντων φορτίων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η συχνότητα του συστήματος να αυξάνεται και τελικά να χάνεται ο συγχρονισμός των γεννητριών. Η εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, έγινε με βάση τις απώλειες ισχύος. Από τις παραπάνω ενδεικτικές περιπτώσεις προς μελέτη, επιλέχθηκε ως βέλτιστο Σενάριο, η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών να γίνει σύμφωνα με τις ελάχιστες απώλειες πραγματικής ισχύος για το σύστημα. Τέλος, απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι αποδεκτή η θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου στο ΣΗΕ, η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 120% της ονομαστικής τους φόρτισης. Στο λογισμικό προσομοίωσης, έχουν ορισθεί οι ακόλουθες καταστάσεις -οι οποίες απεικονίζονται σαν γράφημα πάνω στις γραμμές- για τα ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς:

- Μπλε χρώμα, για φορτίσεις έως 80% της ονομαστικής τιμής φόρτισης
- Κατάσταση συναγερμού, για φορτίσεις από 80-100% της ονομαστικής τιμής φόρτισης
- Κατάσταση κινδύνου, για φορτίσεις >100% της ονομαστικής τιμής φόρτισης

5.2.2 Contingency analysis N-1, N-1-1 για το δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Αφού εξετασθούν οι περιπτώσεις που αναφέρθηκαν για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών και γίνει υπολογισμός των απωλειών πραγματικής ισχύος, εντοπίζεται η βέλτιστη τοποθεσία για την ενσωμάτωση τους στο ΣΗΕ. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται contingency analysis N-1 και N-1-1, για ενδεικτικές περιπτώσεις. Οι διαταραχές που εξετάζονται για N-1 contingency analysis είναι:

- **Διαταραχή 1^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 4-12
- **Διαταραχή 2^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6-9
- **Διαταραχή 3^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6-10
- **Διαταραχή 4^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 27-28
- **Διαταραχή 5^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-2
- **Διαταραχή 6^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-5
- **Διαταραχή 7^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18
- **Διαταραχή 8^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4-6
- **Διαταραχή 9^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 2
- **Διαταραχή 10^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 5

Αντίστοιχα, οι διαταραχές που μελετώνται για N-1-1 contingency analysis είναι:

- **Διαταραχή 11^η:** Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25
- **Διαταραχή 12^η:** Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15
- **Διαταραχή 13^η:** Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17
- **Διαταραχή 14^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 2 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18
- **Διαταραχή 15^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 5 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8-28
- **Διαταραχή 16^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 8 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 10-17

- **Διαταραχή 17^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 11 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 12-14
- **Διαταραχή 18^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 5 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 19-20
- **Διαταραχή 19^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 11 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 3-4
- **Διαταραχή 20^η:** Αφαίρεση γεννήτριας 2 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-3

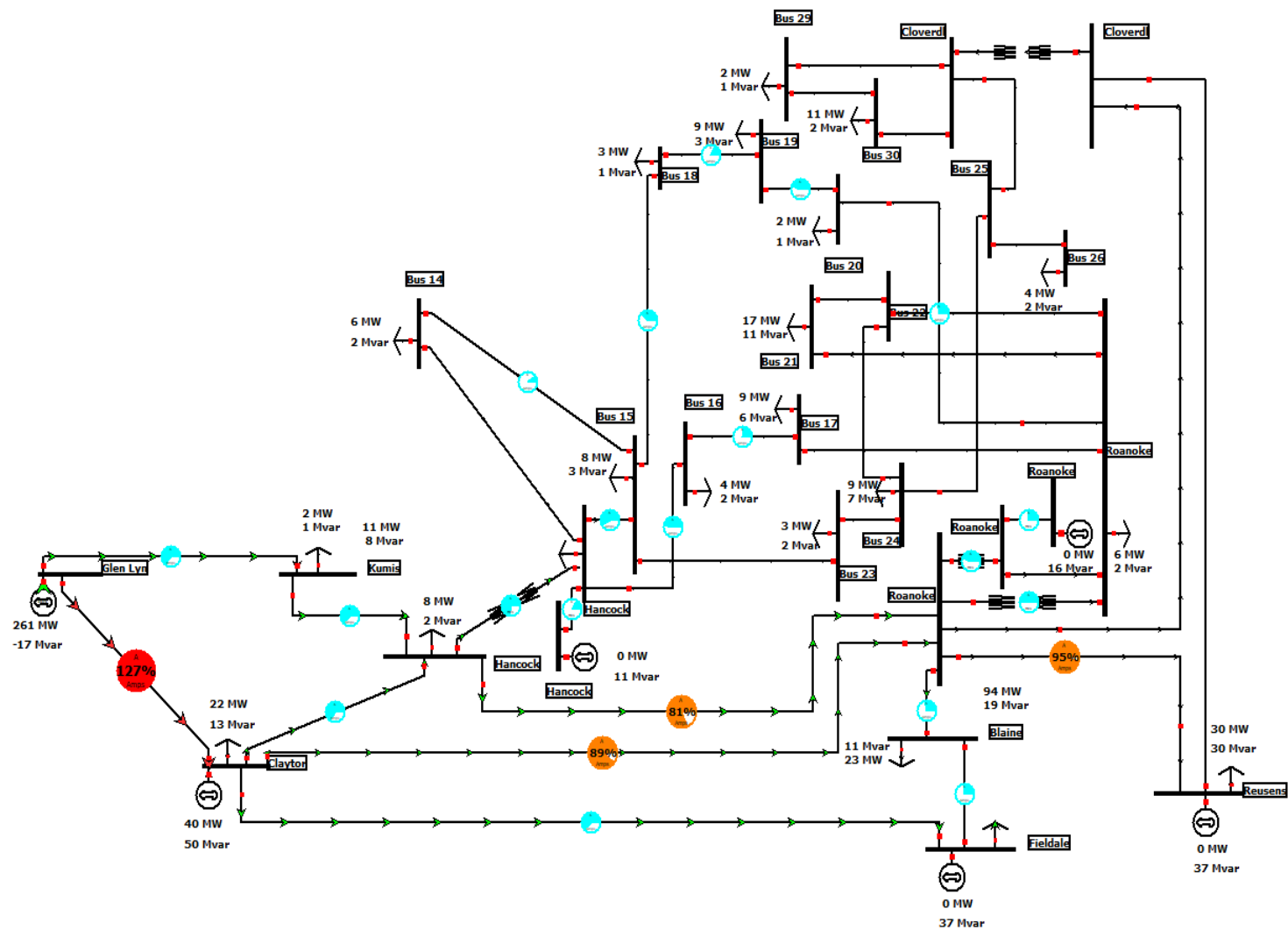
5.2.3 Κατάταξη δυσμενέστερων διαταραχών για το δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Όπως έχει ορισθεί από την παράγραφο 2.3.3, θα γίνει χρήση του δείκτη PI_{MVA} , προκειμένου να εντοπισθεί η πιο επιβλαβής διαταραχή για το δίκτυο. Παρακάτω, περιγράφονται τα βήματα του αλγορίθμου που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε να εντοπισθεί η πιο κρίσιμη διαταραχή του συστήματος [11, 13]:

- **Βήμα 1:** Ορισμός των δεδομένων για το σύστημα 30 ζυγών της IEEE
- **Βήμα 2:** Ανάλυση ροής ισχύος για το σύστημα προς μελέτη
- **Βήμα 3:** Εφαρμογή διαταραχής πάνω στο σύστημα
- **Βήμα 4:** Ανάλυση ροής ισχύος μετά τη διαταραχή που εφαρμόστηκε
- **Βήμα 5:** Υπολογισμός του δείκτη PI_{MVA} (Παράγραφος 2.3.3)
- **Βήμα 7:** Επανάληψη των προηγούμενων βημάτων για όλες τις διαταραχές που μελετώνται στο σύστημα
- **Βήμα 8:** Οι διαταραχές κατατάσσονται σύμφωνα την κρισιμότητά τους για το ΣΗΕ, όπως δηλώνει ο δείκτης PI_{MVA} , με φθίνουσα σειρά

5.3 Προσομοιώσεις στο PowerWorld Simulator

5.3.1 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE-Σενάριο Α
Στο αρχικό δίκτυο 30 ζυγών της IEEE, που απεικονίζεται στην Εικόνα 11 [45], εφαρμόζεται ανάλυση ροής ισχύος. Τα ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 και οι απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος του συστήματος, συγκεντρώνονται στον Πίνακα 6, αντίστοιχα.



Εικόνα 11: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, κατά την ανάλυση ροής ισχύος (Σενάριο Α) [45]

Πίνακας 5: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του
Σεναρίου Α

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
Σενάριο Α		
1	2	134,3
1	3	67,6
2	4	67,4
2	5	63,4
2	6	92,8
3	4	63,3
4	6	82,2
4	12	71,5
5	7	28,6
6	7	29,4
6	8	95,8
6	9	45,2
6	10	49,6
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	24,9
10	17	0
10	20	30,5
10	21	0

10	22	0
12	13	16,3
12	14	0
12	15	59,8
12	16	49,9
14	15	10,7
15	18	38,9
15	23	0
16	17	24,8
18	19	17,8
19	20	45,7
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Παρατηρείται ότι υπάρχει τουλάχιστον μία γραμμή μεταφοράς που φορτίζεται, σε τέτοιο βαθμό που καθιστά το ΣΗΕ σε κατάσταση κινδύνου. Στο Σενάριο Α, εφαρμόζεται η ανάλυση ροής ισχύος και εξετάζονται οι πραγματικές και άεργες απώλειες του συστήματος. Στόχος αυτού του σεναρίου είναι να αποτελέσει τη βάση για τις μετέπειτα συγκρίσεις με τα Σενάρια Β και Γ.

Πίνακας 6: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του Σεναρίου Α

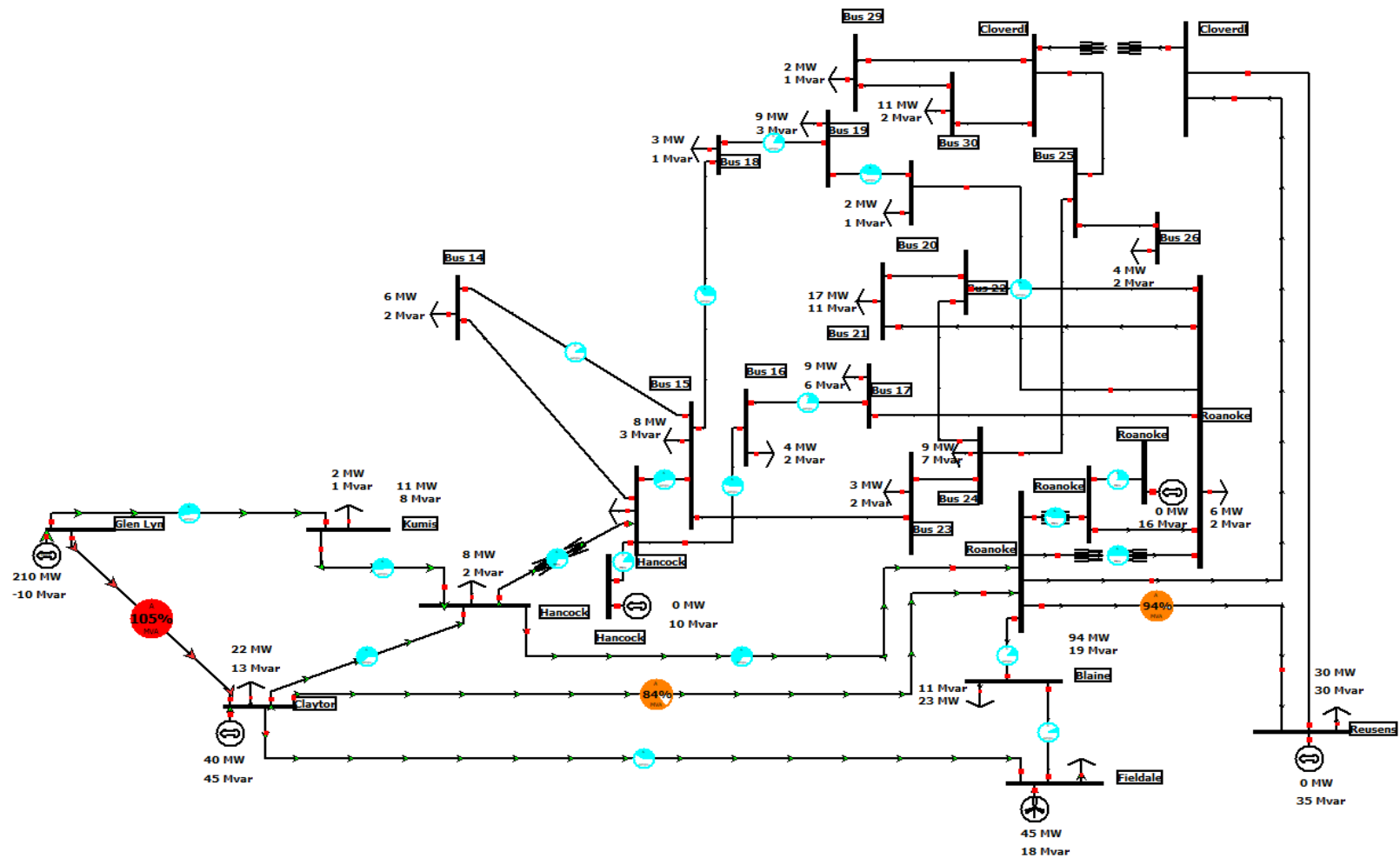
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	Απώλειες (MW)	Απώλειες (MVA _r)
1	2	5,19	9,69
1	3	3,11	6,97
2	4	1,02	-0,79
2	5	2,95	7,99
2	6	1,95	1,97
3	4	0,86	1,59
4	6	0,63	1,29
4	12	0	4,69
5	7	0,17	-1,63
6	7	0,38	-0,55
6	8	0,11	-0,53
6	9	0	1,63
6	10	0	1,28
6	28	0,06	-1,12
8	28	0	-4,35
9	10	0	0,8
9	11	0	0,46
10	17	0,01	0,04
10	20	0,08	0,18

10	21	0,11	0,24
10	22	0,05	0,11
12	13	0	0,14
12	14	0,07	0,15
12	15	0,22	0,43
12	16	0,05	0,11
14	15	0,01	0,01
15	18	0,04	0,08
15	23	0,03	0,06
16	17	0,01	0,03
18	19	0	0,01
19	20	0,02	0,03
21	22	0	0
22	24	0,05	0,07
23	24	0,01	0,01
24	25	0,01	0,02
25	26	0,04	0,07
25	27	0,02	0,05
28	27	0	1,29
27	29	0,09	0,16
27	30	0,16	0,31
29	30	0,03	0,06
Συνολικά		17,54	33,05

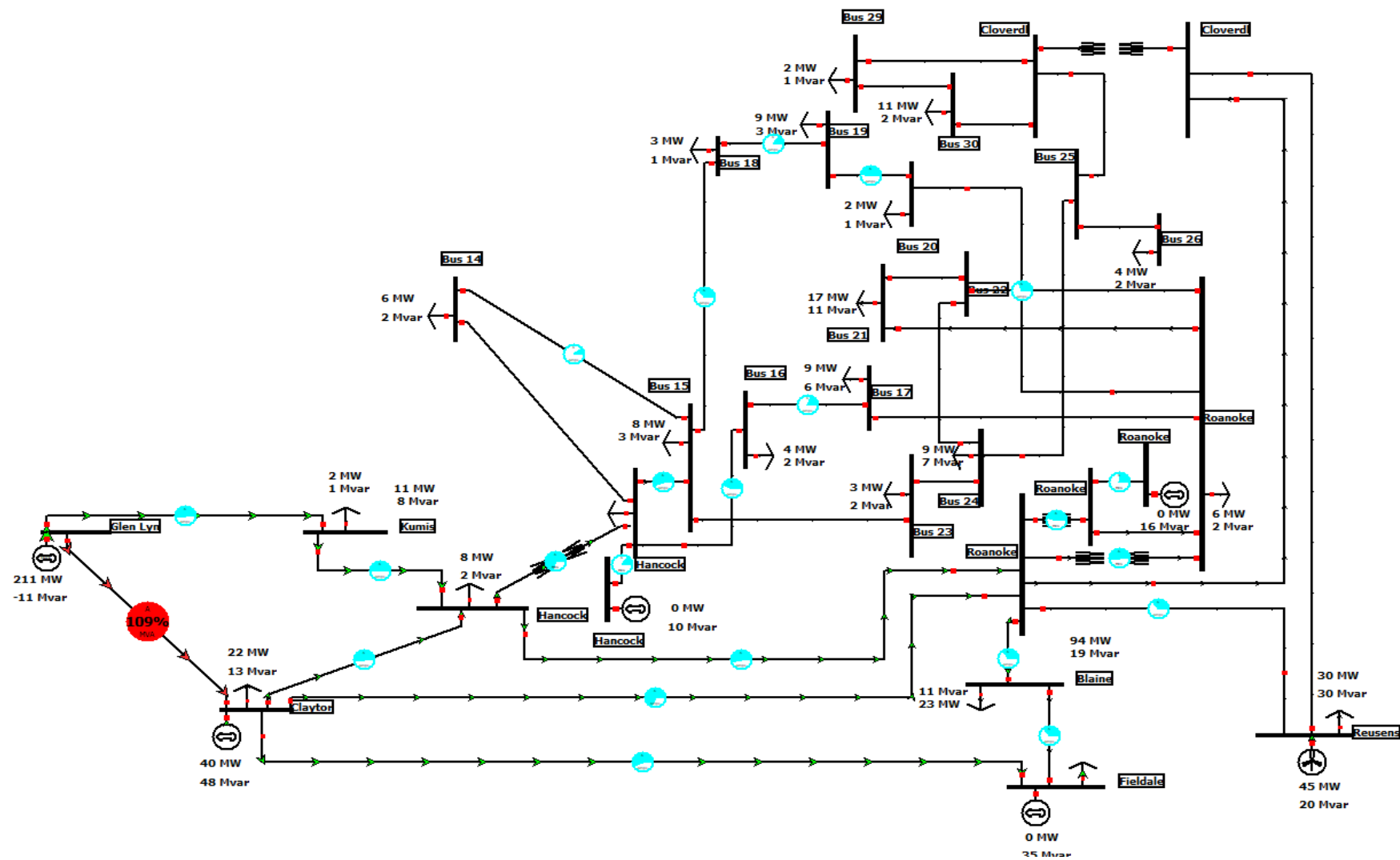
5.3.2 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE-Σενάριο Β
Στο Σενάριο Β, εξετάζεται η τοποθέτηση ανεμογεννητριών με ποσοστό ενσωμάτωσης ίσο με 15% που μεταφράζεται σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με 45 MW. Πιο συγκεκριμένα το Σενάριο Β, καλύπτει τις εξής περιπτώσεις:

- **Σενάριο Β1:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 5 και ποσοστό διείσδυσης 15%
- **Σενάριο Β2:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 8 και ποσοστό διείσδυσης 15%
- **Σενάριο Β3:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 11 και ποσοστό διείσδυσης 15%
- **Σενάριο Β4:** Σύνδεση αιολικού πάρκου στο Ζυγό 13 και ποσοστό διείσδυσης 15%

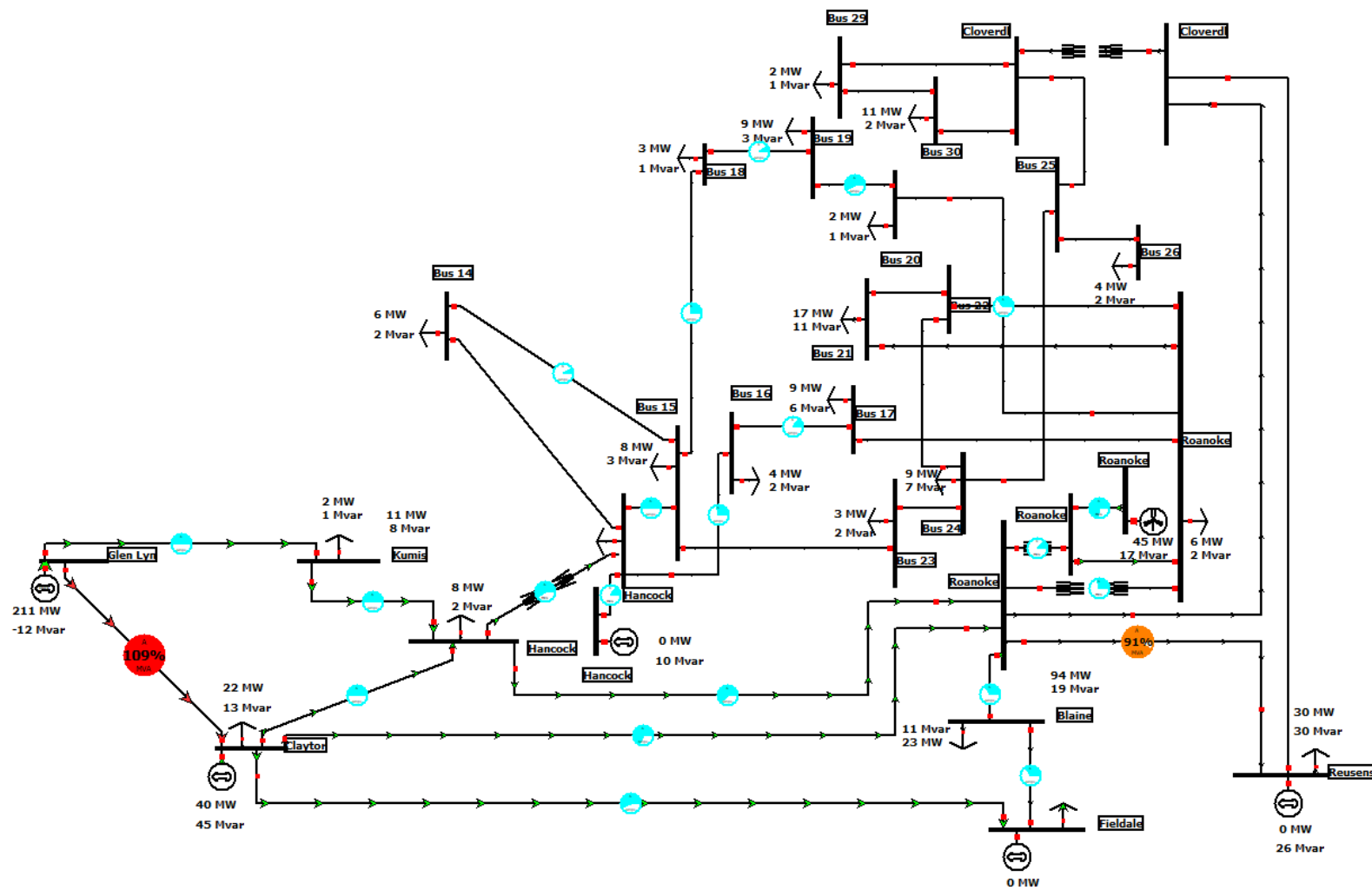
Στις Εικόνες 12, 13, 14 και 15, παρουσιάζεται το ΣΗΕ, με παρουσία αιολικών πάρκων, στους ζυγούς σύνδεσης όπως περιγράφονται στα Σενάρια Β1-Β4. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς για κάθε ένα από τα Σενάρια Β1-Β4.



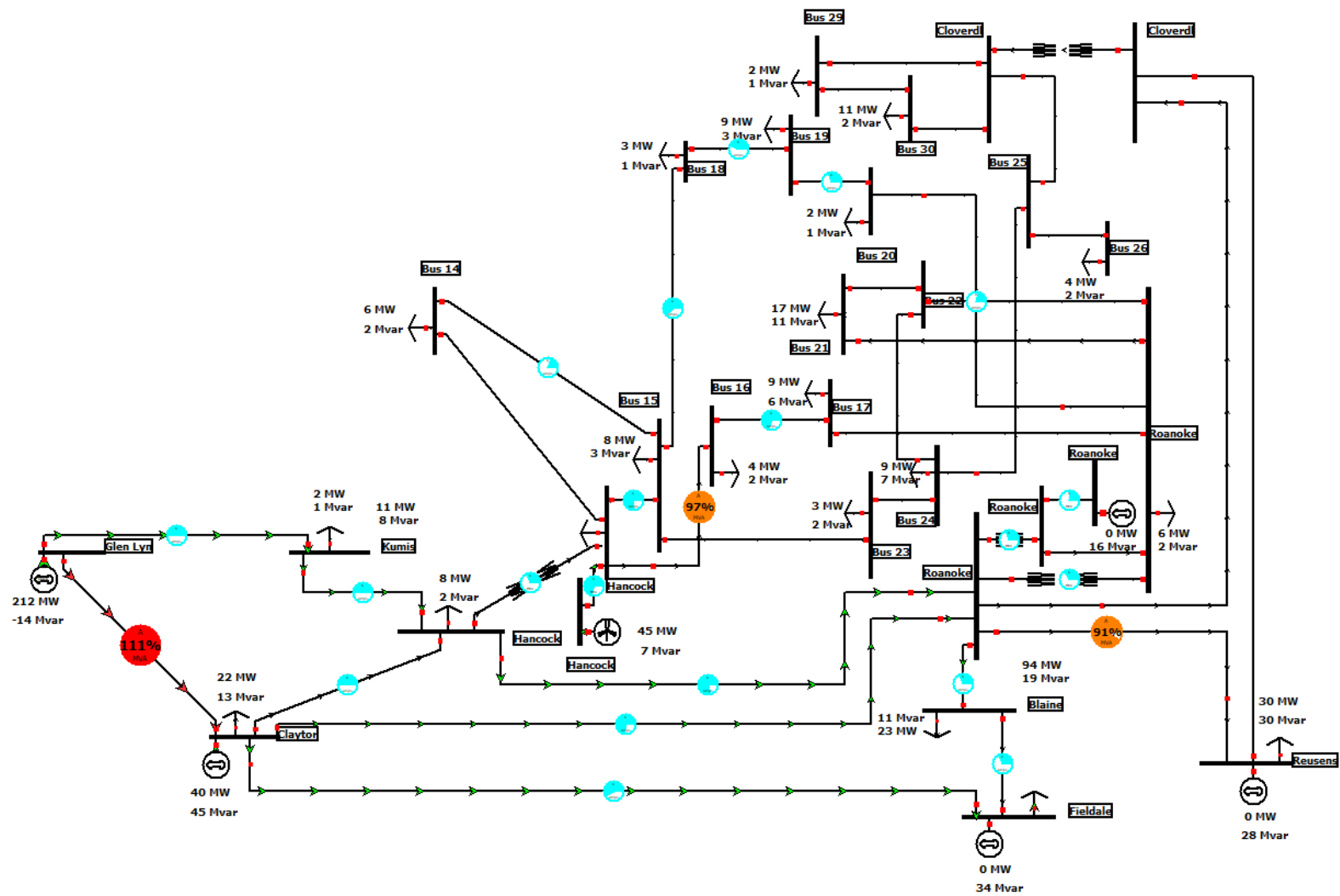
Εικόνα 12: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 5 (Σενάριο B1)



Εικόνα 13: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 8 (Σενάριο B2)



Εικόνα 14: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 11 (Σενάριο B3)



Εικόνα 15: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 13 (Σενάριο B4)

Πίνακας 7: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του
Σεναρίου Β

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)			
		Σενάρια			
		B1	B2	B3	B4
1	2	104,8	109	109,4	110,8
1	3	57,6	54,2	53,9	53,1
2	4	63,6	53,6	52,4	49,7
2	5	42,5	58,3	58,5	59,3
2	6	84,1	70,4	71,5	75
3	4	53,8	50,6	50,4	49,7
4	6	66,4	55,1	62,3	80,4
4	12	70,2	69,1	59,2	31,8
5	7	10,3	37,1	35,7	34,5
6	7	14,7	34,5	34,2	33,4
6	8	94,4	36,8	91	90,6
6	9	45,9	46,3	12,9	31,7
6	10	50,6	51	28,8	34,1
6	28	0	0	0	0
8	28	0	0	0	0
9	10	0	0	0	0
9	11	24,4	24,1	73,8	24,4
10	17	0	0	0	0
10	20	31,1	31,6	37,8	21,6

10	21	0	0	0	0
10	22	0	0	0	0
12	13	15,7	15,5	15,2	70,2
12	14	0	0	0	0
12	15	58,7	57,7	51,1	80,1
12	16	47,5	45,7	30,1	96,5
14	15	10,2	9,9	7,9	20,6
15	18	37,6	36,6	25,5	63,7
15	23	0	0	0	0
16	17	22,3	20,6	15,6	72,4
18	19	16,4	15,5	8,7	43,2
19	20	46,9	47,8	60,1	30,4
21	22	0	0	0	0
22	24	0	0	0	0
23	24	0	0	0	0
24	25	0	0	0	0
25	26	0	0	0	0
25	27	0	0	0	0
28	27	0	0	0	0
27	29	0	0	0	0
27	30	0	0	0	0
29	30	0	0	0	0

Για κάθε μία από τις περιπτώσεις B1, B2, B3 και B4 παρατηρείται ότι υπάρχει τουλάχιστον μία γραμμή μεταφοράς που φορτίζεται, σε βαθμό που καθιστά το ΣΗΕ σε κατάσταση κινδύνου. Επομένως η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων σε αυτούς τους ζυγούς, αποτελεί μη ασφαλή επιλογή για το δίκτυο. Υποσχόμενη λύση στο πρόβλημα αυτό,

αποτελεί η χρήση αντισταθμίσεων με συσκευές είτε SVC είτε STATCOM ή η κατασκευή παράλληλων γραμμών μεταφοράς δίπλα στις υπάρχουσες που φορτίζονται σε επικίνδυνο βαθμό. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος του συστήματος για τα Σενάρια B1-B4, με σκοπό να γίνει έπειτα σύγκριση τιμών με το Σενάριο Α και Γ.

Πίνακας 8: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του Σεναρίου Β

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	Απώλειες (MW)				Απώλειες (MVar)			
		Σενάρια				Σενάρια			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B3
1	2	3,16	3,42	3,44	3,53	3,62	4,38	4,45	4,71
1	3	2,27	2,01	1,98	1,93	3,86	2,9	2,81	2,6
2	4	0,9	0,65	0,62	0,56	-1,14	-1,92	-2,03	-2,22
2	5	1,33	2,49	2,51	2,58	1,17	6,05	6,11	6,41
2	6	1,6	1,13	1,16	1,27	0,89	-0,54	-0,46	-0,1
3	4	0,62	0,55	0,54	0,52	0,91	0,7	0,67	0,62
4	6	0,41	0,28	0,36	0,6	0,51	0,06	0,33	1,16
4	12	0	0	0	0	4,51	4,36	3,18	0,92
5	7	0,02	0,29	0,27	0,25	-2,02	-1,32	-1,38	-1,43
6	7	0,1	0,52	0,51	0,49	-1,43	-0,12	-0,16	-0,23
6	8	0,11	0,02	0,1	0,1	-0,55	-0,87	-0,57	-0,58
6	9	0	0	0	0	1,68	1,7	0,13	0,8
6	10	0	0	0	0	1,33	1,35	0,43	0,6
6	28	0,06	0,03	0,05	0,05	-1,12	-1,22	-1,16	-1,17
8	28	0	0,02	0	0	-4,35	-4,29	-4,36	-4,36

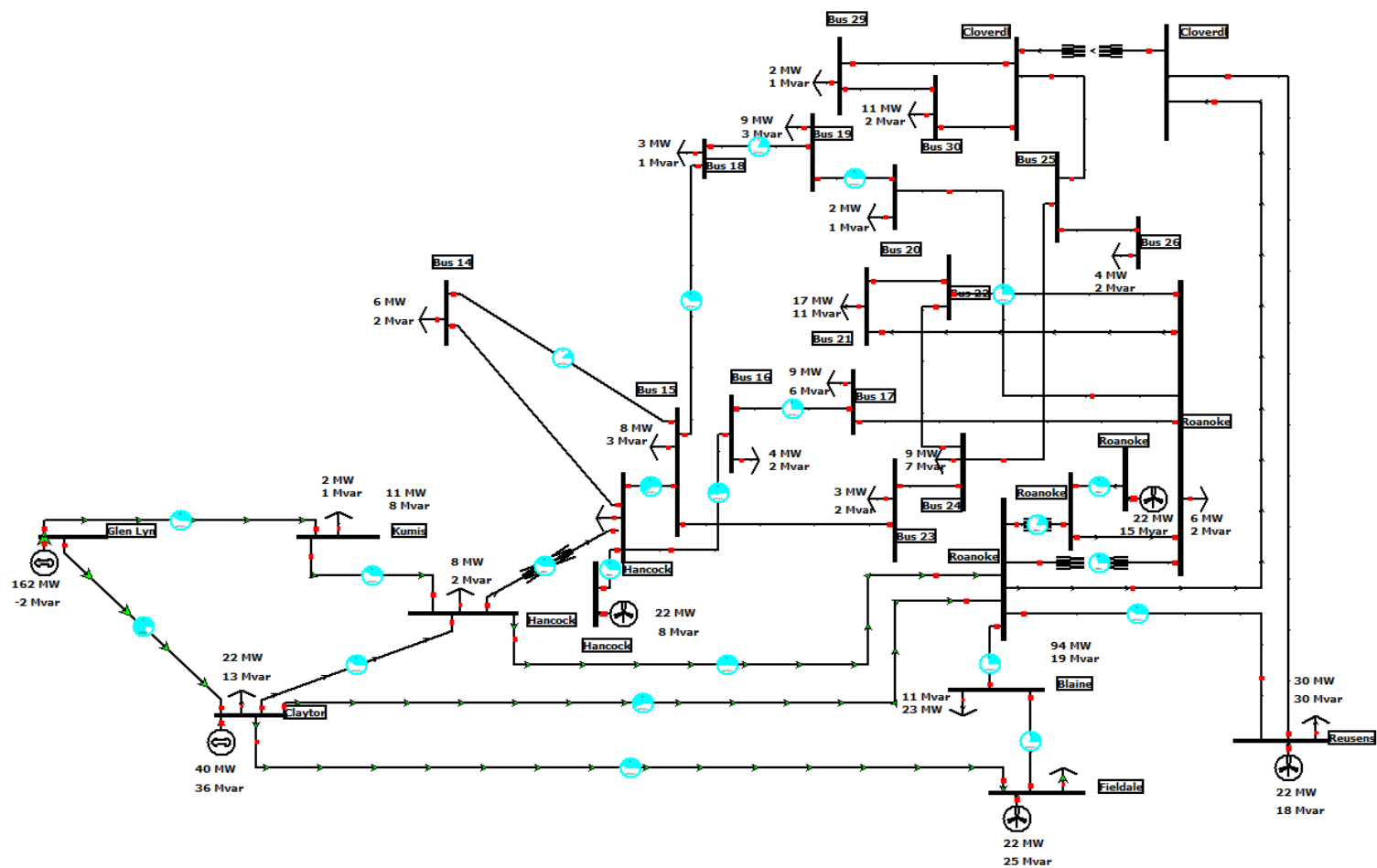
9	10	0	0	0	0	0,83	0,84	2,08	0,42
9	11	0	0	0	0	0,45	0,43	4,09	0,45
10	17	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,04	0,09	0,03
10	20	0,08	0,09	0,12	0,04	0,19	0,19	0,28	0,09
10	21	0,11	0,11	0,13	0,1	0,24	0,24	0,28	0,22
10	22	0,05	0,05	0,07	0,05	0,11	0,11	0,14	0,1
12	13	0	0	0	0	0,13	0,12	0,12	2,54
12	14	0,07	0,07	0,06	0,1	0,15	0,15	0,13	0,22
12	15	0,21	0,2	0,16	0,38	0,41	0,4	0,31	0,76
12	16	0,05	0,05	0,02	0,2	0,1	0,09	0,04	0,42
14	15	0,01	0,01	0	0,02	0	0	0	0,02
15	18	0,04	0,03	0,02	0,1	0,07	0,07	0,03	0,21
15	23	0,03	0,03	0,02	0,09	0,06	0,06	0,05	0,17
16	17	0,01	0,01	0	0,06	0,02	0,02	0,01	0,24
18	19	0	0	0	0,03	0,01	0,01	0	0,06
19	20	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,04	0,06	0,02
21	22	0	0	0	0	0	0	0	0
22	24	0,05	0,05	0,1	0,03	0,07	0,07	0,16	0,05
23	24	0,01	0	0	0,05	0,01	0,01	0,01	0,1
24	25	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01
25	26	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
25	27	0,03	0,03	0,01	0,01	0,05	0,06	0,02	0,01
28	27	0	0	0	0	1,31	1,36	1,02	0,98
27	29	0,09	0,09	0,09	0,09	0,16	0,16	0,16	0,16

27	30	0,16	0,16	0,16	0,16	0,3	0,3	0,3	0,31
29	30	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06
Συνολικά		11,7	12,51	12,63	13,49	12,77	16,15	13,06	15,45

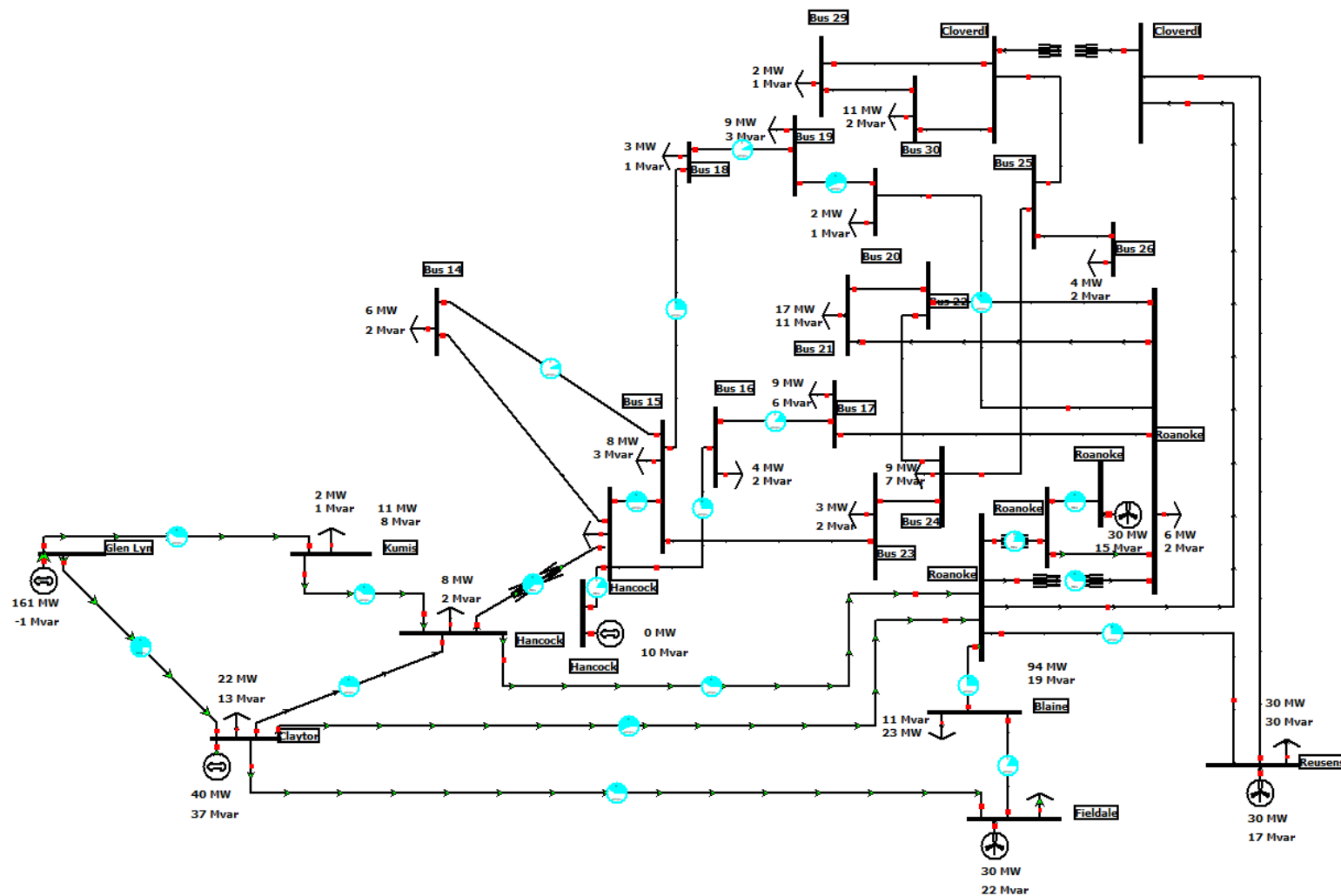
5.3.3 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE–Σενάριο Γ
Στο σενάριο Γ, εξετάζεται η τοποθέτηση ανεμογεννητριών με ποσοστό ενσωμάτωσης ίσο με 30%. Πιο συγκεκριμένα το Σενάριο Γ, αποτελείται από τα εξής:

- **Σενάριο Γ1:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 5, 8, 11, 13 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 22,5 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%
- **Σενάριο Γ2:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 5, 8, 11 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 30 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%
- **Σενάριο Γ3:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 5, 8, 13 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 30 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%
- **Σενάριο Γ4:** Σύνδεση αιολικών πάρκων στους ζυγούς 8, 11, 13 με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 30 MW έκαστο και συνολικό ποσοστό διείσδυσης 30%.

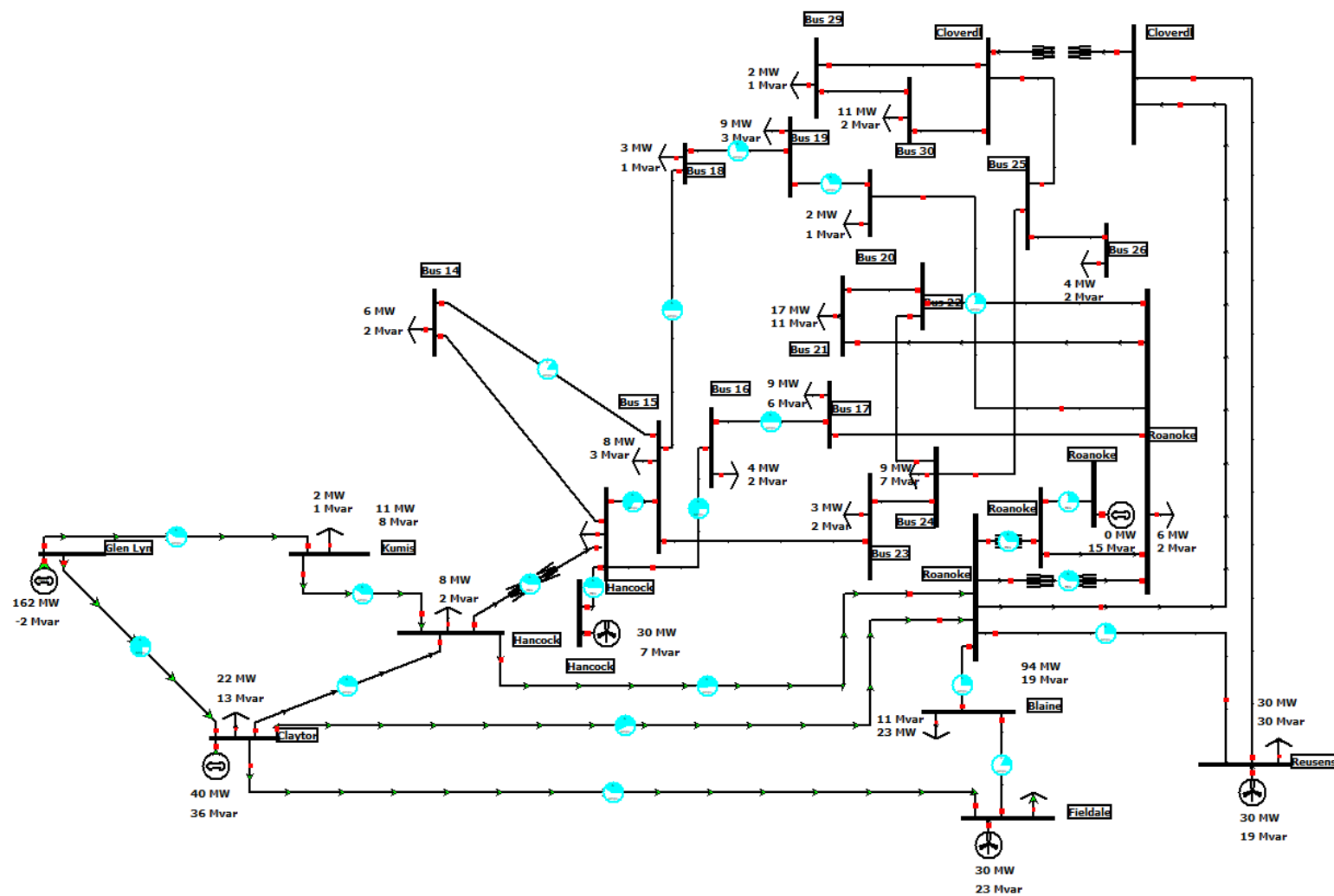
Στις Εικόνες 16, 17, 18 και 19, παρουσιάζεται το ΣΗΕ, με παρουσία αιολικών πάρκων, στους ζυγούς σύνδεσης όπως περιγράφονται για τα Σενάρια Γ1-Γ4. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς για κάθε ένα από τα Σενάρια Γ1-Γ4.



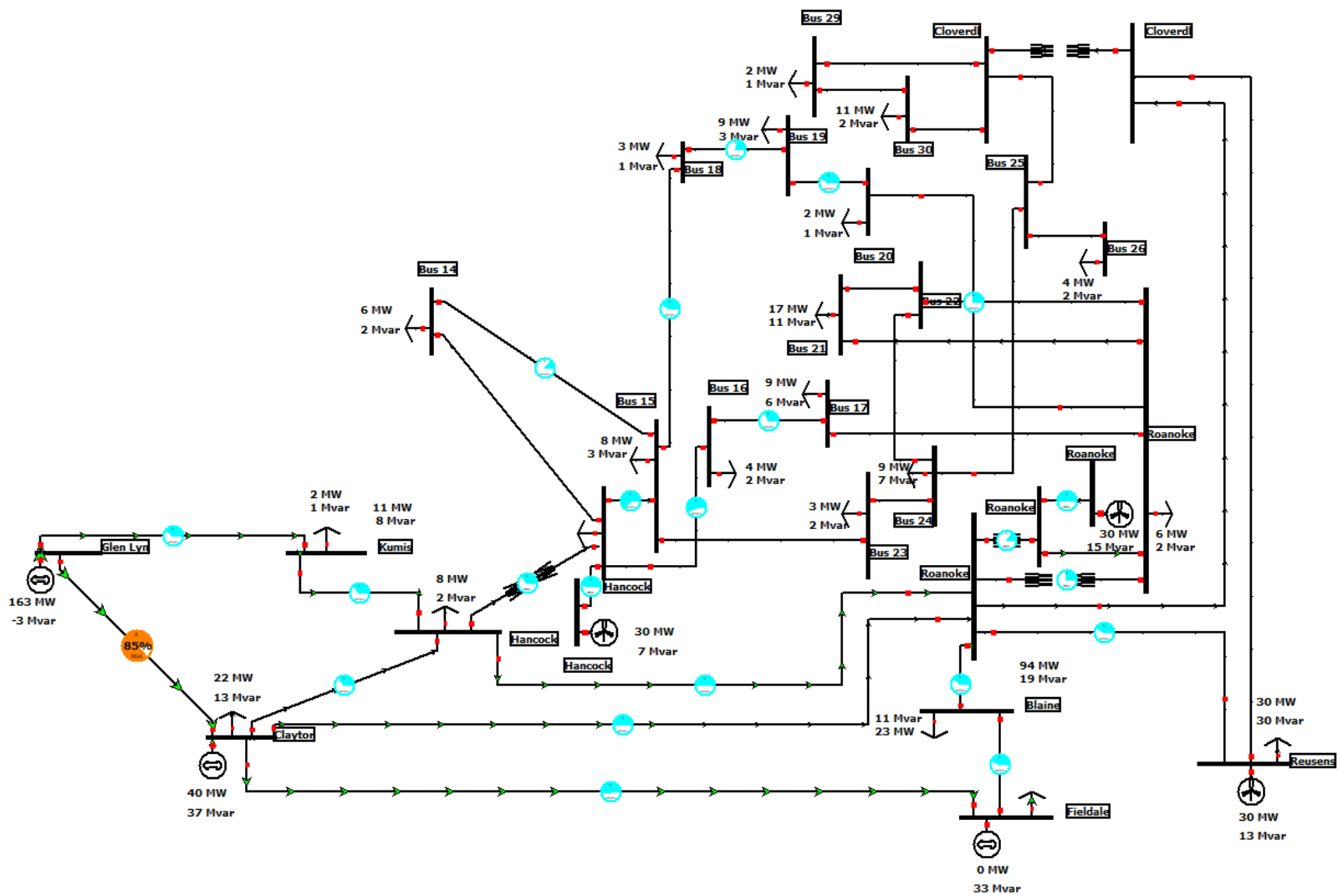
Εικόνα 16: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 5, 8, 11 και 13 (Σενάριο Γ1)



Εικόνα 17: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 5, 8 και 11 (Σενάριο Γ2)



Εικόνα 18: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 5, 8 και 13 (Σενάριο Γ3)



Εικόνα 19: Σύστημα 30 ζυγών της IEEE, με παρουσία αιολικού πάρκου στους ζυγούς 8, 11 και 13 (Σενάριο Γ4)

Πίνακας 9: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του
Σεναρίου Γ

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)			
		Σενάρια			
		Γ1	Γ2	Γ3	Γ4
1	2	82,8	81,4	82,2	85,4
1	3	42	43,1	42,6	40,2
2	4	42,7	45,9	44,2	37,6
2	5	45,9	42,8	43,3	54
2	6	57,8	58	60,3	52,2
3	4	39,1	40,2	39,7	37,4
4	6	50,2	40,6	52,8	50,2
4	12	43,2	60,7	41,9	35,5
5	7	25,1	20,1	19,4	43,5
6	7	28,6	25,7	25,2	38,6
6	8	42	31,8	28,3	43
6	9	20,5	21,1	37,4	13,8
6	10	32,5	37,4	40,7	26,2
6	28	0	0	0	0
8	28	0	0	0	0
9	10	0	0	0	0
9	11	41,6	51,8	23,7	51,8
10	17	0	0	0	0
10	20	29,5	36,6	24,9	28,7
10	21	0	0	0	0

10	22	0	0	0	0
12	13	36,5	14,8	47,6	47,5
12	14	0	0	0	0
12	15	63,2	51,8	70,8	65,1
12	16	54,9	31,9	75,2	58,5
14	15	12,2	8	15,9	13,1
15	18	41,2	27,3	52,6	42,9
15	23	0	0	0	0
16	17	30	13,5	50,8	33,6
18	19	20,1	8,5	31,8	21,9
19	20	43,8	57,7	35,3	42,3
21	22	0	0	0	0
22	24	0	0	0	0
23	24	0	0	0	0
24	25	0	0	0	0
25	26	0	0	0	0
25	27	0	0	0	0
28	27	0	0	0	0
27	29	0	0	0	0
27	30	0	0	0	0
29	30	0	0	0	0

Σε καμία από τις περιπτώσεις Γ1, Γ2, Γ3, Γ4 δεν παρατηρείται υπερφόρτιση κάποιας γραμμής μεταφοράς. Επομένως η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων σε αυτούς τους ζυγούς, αποτελεί ασφαλή επιλογή για το δίκτυο. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος του συστήματος, για το Σενάριο Γ.

Πίνακας 10: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς για τις περιπτώσεις του Σεναρίου Γ

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	Απώλειες (MW)				Απώλειες (MVar)			
		Σενάρια				Σενάρια			
		Γ1	Γ2	Γ3	Γ4	Γ1	Γ2	Γ3	Γ4
1	2	1,97	1,91	1,94	2,1	0,06	-0,14	-0,03	0,43
1	3	1,21	1,28	1,24	1,11	-0,01	0,23	0,11	-0,4
2	4	0,41	0,48	0,44	0,31	-2,68	-2,46	-2,58	-2,98
2	5	1,55	1,35	1,38	2,14	2,09	1,26	1,4	4,59
2	6	0,76	0,77	0,83	0,63	-1,65	-1,63	-1,45	-2,07
3	4	0,32	0,34	0,33	0,3	0,05	0,11	0,08	-0,03
4	6	0,23	0,15	0,26	0,23	-0,12	-0,39	-0,03	-0,12
4	12	0	0	0	0	1,69	3,35	1,59	1,14
5	7	0,13	0,08	0,08	0,41	-1,74	-1,86	-1,88	-1,04
6	7	0,36	0,29	0,28	0,65	-0,64	-0,84	-0,88	0,26
6	8	0,02	0,01	0,01	0,02	-0,85	-0,88	-0,89	-0,85
6	9	0	0	0	0	0,33	0,35	1,11	0,15
6	10	0	0	0	0	0,55	0,72	0,86	0,35
6	28	0,03	0,03	0,03	0,03	-1,21	-1,21	-1,22	-1,24
8	28	0	0,01	0,01	0,01	-4,36	-4,34	-4,34	-4,35
9	10	0	0	0	0	1,1	1,65	0,56	1,19
9	11	0	0	0	0	1,3	2,02	0,42	2,01
10	17	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,08	0,02	0,03
10	20	0,08	0,12	0,05	0,07	0,17	0,26	0,12	0,16

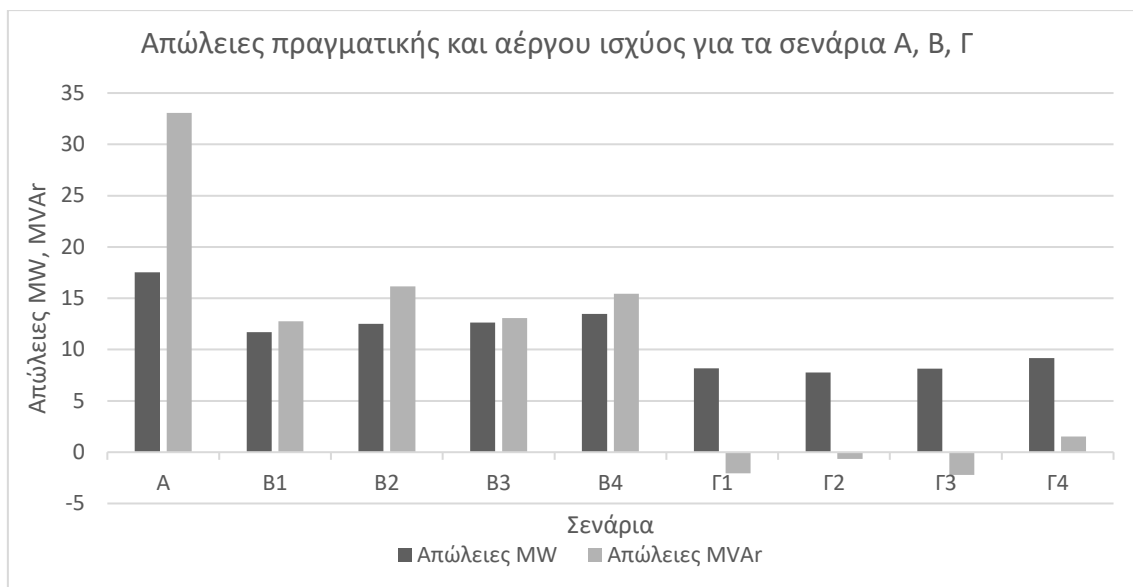
10	21	0,12	0,12	0,11	0,12	0,25	0,27	0,23	0,25
10	22	0,06	0,06	0,05	0,06	0,11	0,13	0,1	0,12
12	13	0	0	0	0	0,69	0,11	1,17	1,16
12	14	0,08	0,06	0,09	0,08	0,16	0,13	0,19	0,17
12	15	0,24	0,16	0,3	0,25	0,47	0,32	0,59	0,5
12	16	0,06	0,02	0,12	0,07	0,14	0,05	0,26	0,15
14	15	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01
15	18	0,04	0,02	0,07	0,05	0,09	0,04	0,14	0,09
15	23	0,04	0,02	0,06	0,05	0,08	0,04	0,11	0,09
16	17	0,01	0	0,03	0,01	0,04	0,01	0,12	0,05
18	19	0,01	0	0,02	0,01	0,01	0	0,03	0,01
19	20	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,05	0,02	0,03
21	22	0	0	0	0	0	0	0	0
22	24	0,06	0,08	0,03	0,06	0,09	0,12	0,05	0,09
23	24	0,01	0	0,02	0,02	0,02	0,01	0,05	0,03
24	25	0	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
25	26	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
25	27	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01
28	27	0	0	0	0	1,03	1,15	1,12	0,94
27	29	0,09	0,09	0,09	0,09	0,16	0,16	0,16	0,16
27	30	0,16	0,16	0,16	0,16	0,3	0,3	0,3	0,3
29	30	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06
Συνολικά		8,17	7,77	8,14	9,16	-2,05	-0,66	-2,21	1,53

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι συνολικές απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος του ΣΗΕ, για τα σενάρια Α, Β και Γ που μελετήθηκαν. Στα πρώτα δύο σενάρια, παρατηρήθηκε η υπερφόρτιση τουλάχιστον μίας γραμμής μεταφοράς, με αποτέλεσμα το ΣΗΕ να βρίσκεται σε κατάσταση κινδύνου. Αντίθετα, στο Σενάριο Γ δεν υπήρξε τέτοιο πρόβλημα, καθιστώντας όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν πιο ασφαλείς, σε σύγκριση με τις προηγούμενες. Στο Διάγραμμα 1 γίνεται η απεικόνιση των δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Απώλειες πραγματικής και αέργου ισχύος κατά την ανάλυση ροής ισχύος, για τα Σενάρια Α, Β και Γ

Σενάριο	P _{LOSSES} (MW)	Q _{LOSSES} (MVar)
Σενάριο Α	17,54	33,05
Σενάριο Β1	11,7	12,77
Σενάριο Β2	12,51	16,15
Σενάριο Β3	12,63	13,06
Σενάριο Β4	13,49	15,45
Σενάριο Γ1	8,17	-2,05
Σενάριο Γ2	7,77	-0,66
Σενάριο Γ3	8,14	-2,21
Σενάριο Γ4	9,16	1,53

Οι αρνητικές τιμές στις απώλειες αέργου ισχύος, δηλώνουν ότι η τελευταία ρέει από το ΣΗΕ προς τις γεννήτριες του συστήματος.



Διάγραμμα 1: Απεικόνιση απωλειών πραγματικής και αέργου ισχύος για τα σενάρια A, B και Γ

Η επιλογή εγκατάστασης των αιολικών πάρκων στο ΣΗΕ, γίνεται με βάση τις λιγότερες απώλειες πραγματικής ισχύος. Επομένως, από τον Πίνακα 11 και όπως απεικονίζεται από το Διάγραμμα 1, αυτές εντοπίζονται στο Σενάριο Γ2 κατά τη σύνδεση των ανεμογεννητριών στους ζυγούς 5, 8, 11. Το συνολικό ποσοστό ενσωμάτωσης των αιολικών πάρκων είναι ίσο με 30% και μεταφράζεται σε συνολική παραγωγή ίση με 90 MW. Κάθε ένα από τα τελευταία, παρέχει ισχύ στο δίκτυο πραγματική ισχύ ίση με 30 MW. Στη συνέχεια εφαρμόζεται στο Σενάριο Γ2 contingency analysis N-1 και N-1-1.

5.3.4 Διαταραχές προς μελέτη

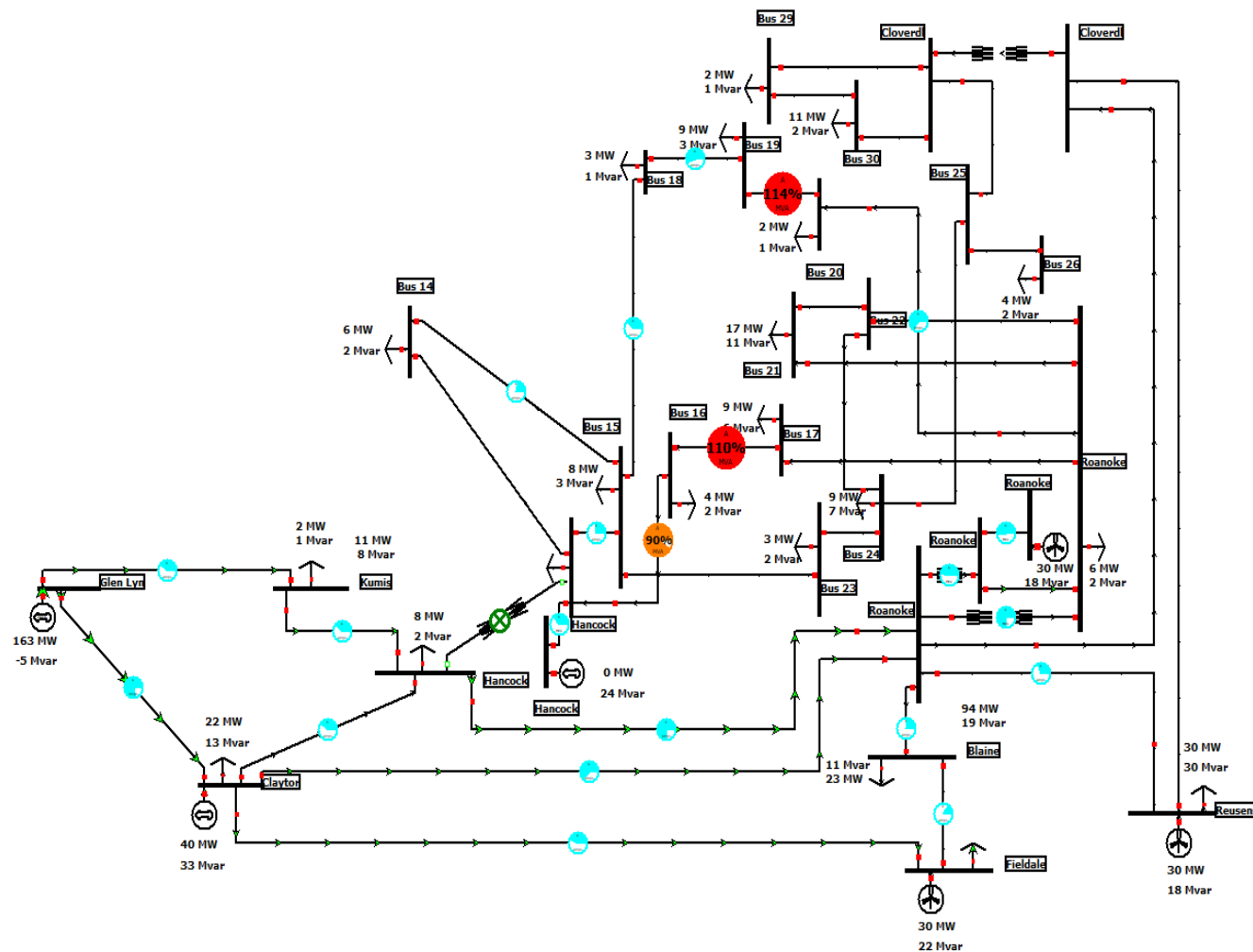
Στο σύστημα 30 ζυγών με την ενσωμάτωση αιολικών πάρκων με ποσοστό ίσο με 30% στους ζυγούς 5, 8, και 11 (Σενάριο Γ2) μελετώνται οι ακόλουθες ανεξάρτητες N-1 και ταυτόχρονες N-1-1 διαταραχές:

- **Διαταραχή 1^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 4-12
- **Διαταραχή 2^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6-9
- **Διαταραχή 3^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6-10
- **Διαταραχή 4^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με ύπαρξη μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 27-28
- **Διαταραχή 5^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-2
- **Διαταραχή 6^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-5
- **Διαταραχή 7^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18
- **Διαταραχή 8^η:** Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4-6
- **Διαταραχή 9^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 2
- **Διαταραχή 10^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 5
- **Διαταραχή 11^η:** Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25
- **Διαταραχή 12^η:** Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15
- **Διαταραχή 13^η:** Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17
- **Διαταραχή 14^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 2 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18
- **Διαταραχή 15^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 5 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8-28
- **Διαταραχή 16^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 8 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 10-17
- **Διαταραχή 17^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 11 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 12-14
- **Διαταραχή 18^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 5 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 19-20

- **Διαταραχή 19^η:** Αφαίρεση γεννήτριας του ζυγού 11 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 3-4
- **Διαταραχή 20^η:** Αφαίρεση γεννήτριας 2 και γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-3

5.3.5 Διαταραχή 1^η (Δ1): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 4 και 12 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 4 και 12. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή, τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 20: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 4 και 12 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 1^η)

Πίνακας 12: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για Διαταραχή 1

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 1^η</i>		
1	2	84
1	3	41,7
2	4	40,3
2	5	44,3
2	6	64,6
3	4	38,9
4	6	76,2
4	12	0
5	7	17,5
6	7	24,2
6	8	32,7
6	9	47,6
6	10	72,6
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,7
10	17	0
10	20	65,9
10	21	0
10	22	0

12	13	36,9
12	14	0
12	15	25,9
12	16	90,3
14	15	22,1
15	18	38
15	23	0
16	17	110,6
18	19	55,1
19	20	114,5
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 12 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 11,976.

5.3.6 Διαταραχή 2^η (Δ2): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6 και 9 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 2, παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 6 και 9. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 13. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.

Πίνακας 13: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 2

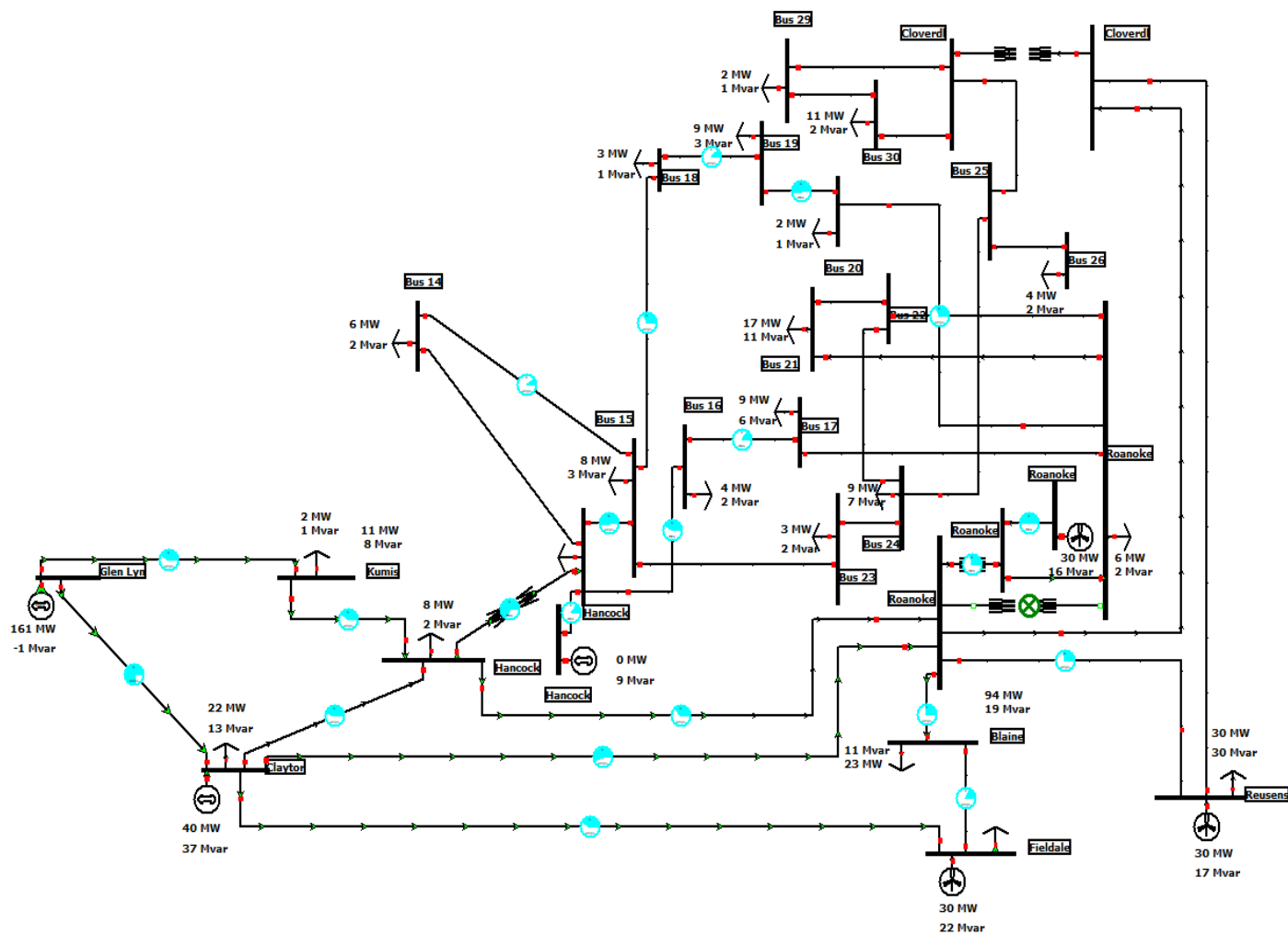
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 2^η</i>		
1	2	81,2
1	3	43,3
2	4	46,7
2	5	42,7
2	6	57,5
3	4	40,4
4	6	36,4
4	12	66,4
5	7	21
6	7	25,8
6	8	23,1
6	9	0
6	10	52,5
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	49
10	17	0
10	20	33,6
10	21	0
10	22	0

12	13	12,7
12	14	0
12	15	54,8
12	16	38,5
14	15	8,3
15	18	32,8
15	23	0
16	17	13,6
18	19	11,8
19	20	51,8
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 13 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,439.

5.3.7 Διαταραχή 3^η (Δ3): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 6 και 10 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 6 και 10. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 14. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 22: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 6 και 10 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 3^η)

Πίνακας 14: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 3

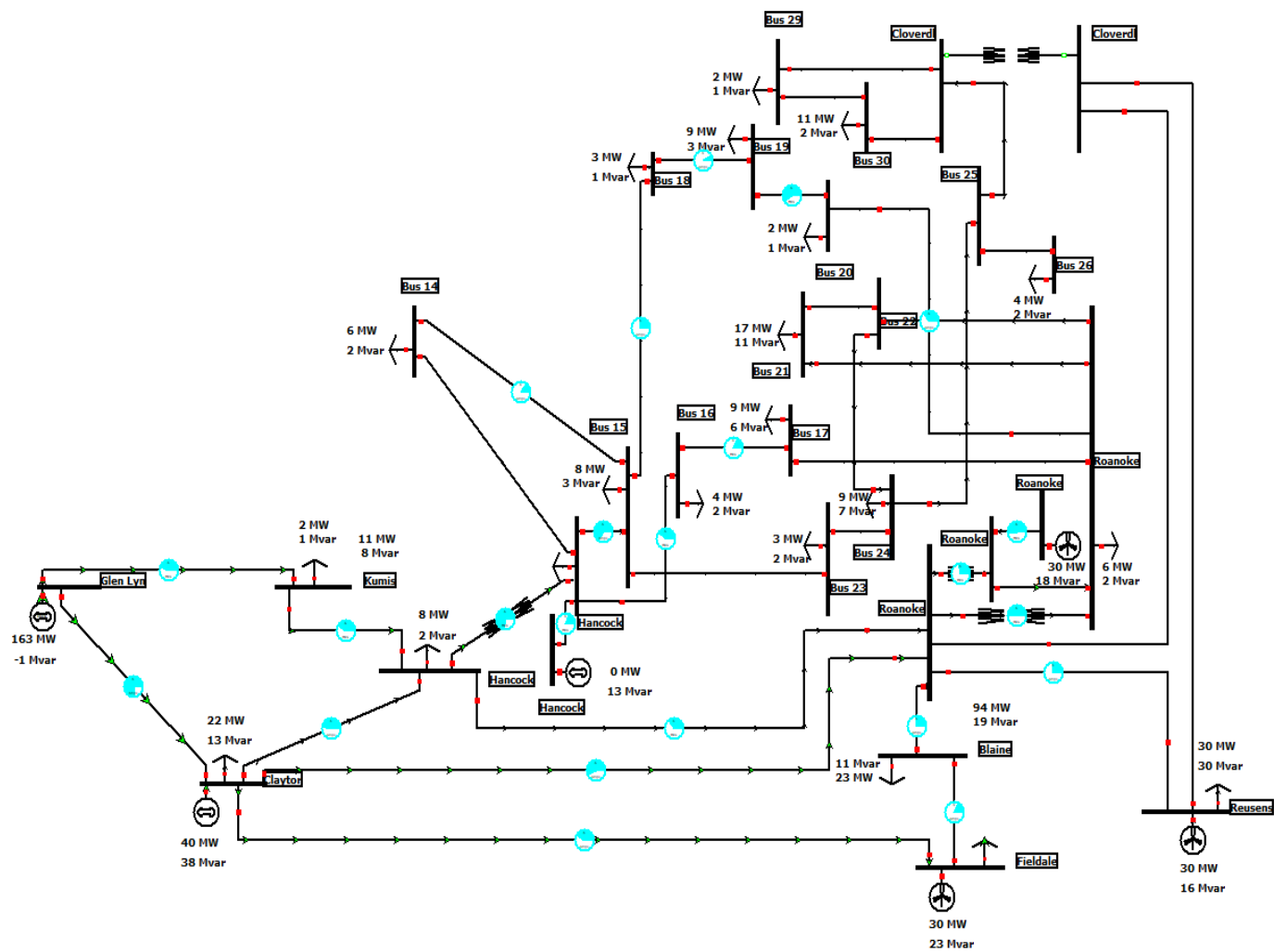
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 3^η</i>		
1	2	81,2
1	3	43,3
2	4	46,5
2	5	42,7
2	6	57,4
3	4	40,4
4	6	37
4	12	66,2
5	7	20,4
6	7	25,8
6	8	31,4
6	9	29,5
6	10	0
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,2
10	17	0
10	20	33,3
10	21	0

10	22	0
12	13	14,5
12	14	0
12	15	55,4
12	16	40,1
14	15	9
15	18	33,2
15	23	0
16	17	15,5
18	19	12,3
19	20	51,1
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 14 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,384.

5.3.8 Διαταραχή 4η (Δ4): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή μεταξύ των ζυγών 27 και 28 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 27 και 28. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 15. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 23: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 27 και 28 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 4^η)

Πίνακας 15: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 4

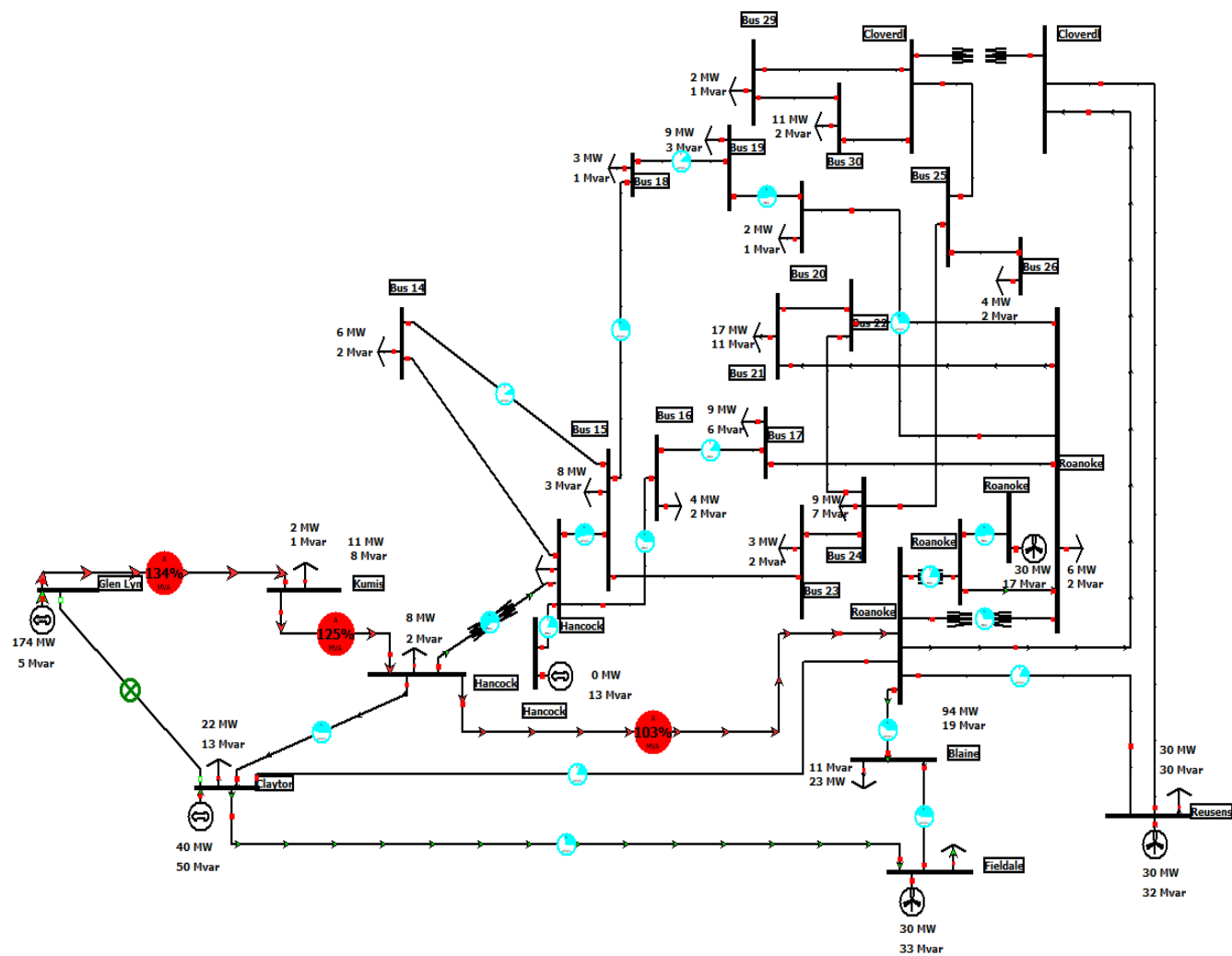
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 4^η</i>		
1	2	82,1
1	3	44,1
2	4	47,7
2	5	42,8
2	6	57,9
3	4	41,1
4	6	35,1
4	12	72,2
5	7	20,4
6	7	25,7
6	8	29,3
6	9	29,6
6	10	50,8
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,7
10	17	0
10	20	37,2
10	21	0

10	22	0
12	13	19,8
12	14	0
12	15	69
12	16	39,4
14	15	16
15	18	26
15	23	0
16	17	17,7
18	19	7,3
19	20	58,9
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 15 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 9,238.

5.3.9 Διαταραχή 5η (Δ5): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1 και 2 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 24, παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 1 και 2. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή, συγκεντρώνονται τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου, στον Πίνακα 16. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 24: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 1 και 2 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 5^η)

Πίνακας 16: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 5

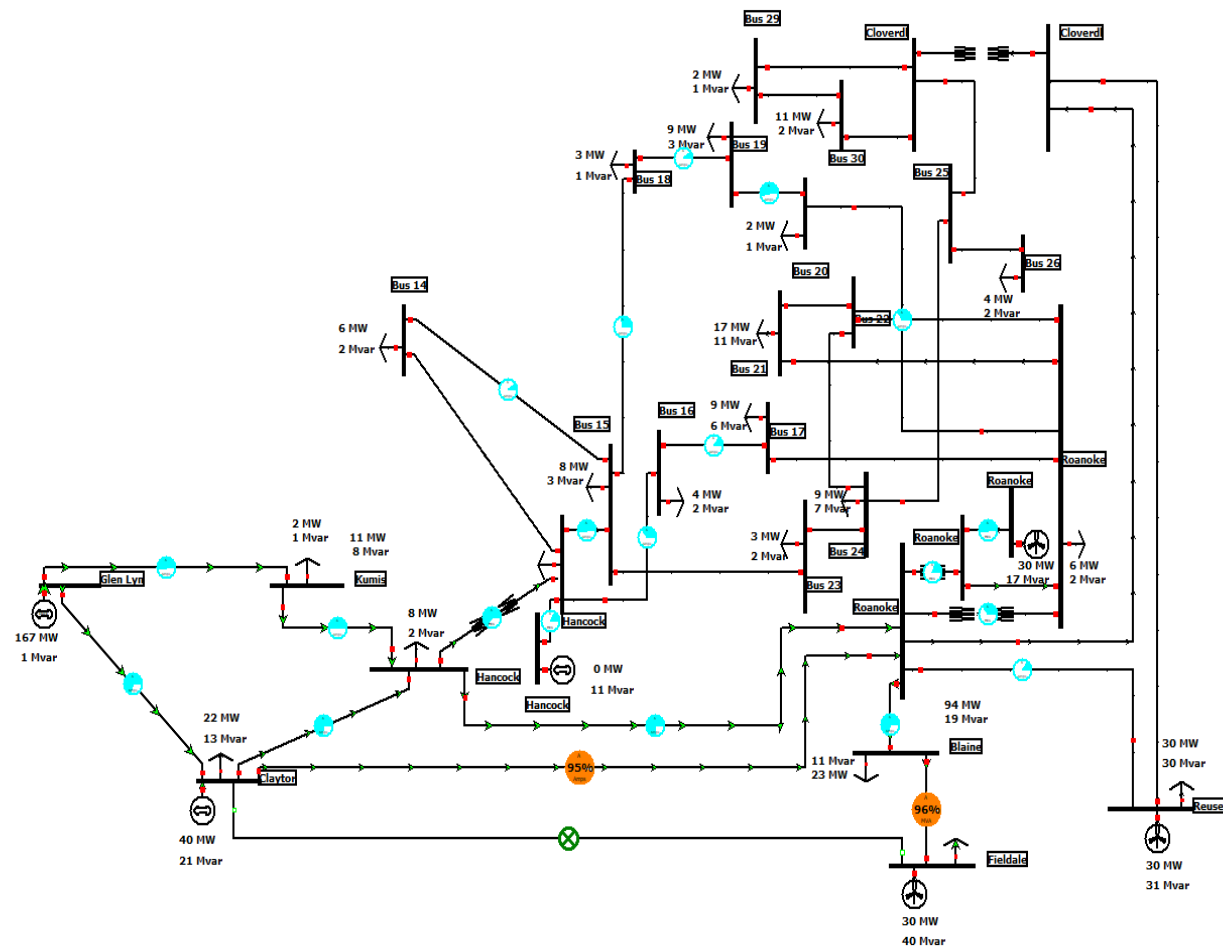
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 5^η</i>		
1	2	0
1	3	133,6
2	4	49,9
2	5	30
2	6	24,8
3	4	125,4
4	6	103,4
4	12	64,5
5	7	45,9
6	7	38,8
6	8	16,6
6	9	19,7
6	10	33,7
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,3
10	17	0
10	20	34
10	21	0
10	22	0

12	13	19,5
12	14	0
12	15	55,8
12	16	38,4
14	15	9,1
15	18	31,8
15	23	0
16	17	13,9
18	19	11
19	20	52,5
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 16 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 10,056.

5.3.10 Διαταραχή 6η (Δ6): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2 και 5 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 2 και 5. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 17. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 25: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 2 και 5 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 6^η)

Πίνακας 17: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 6

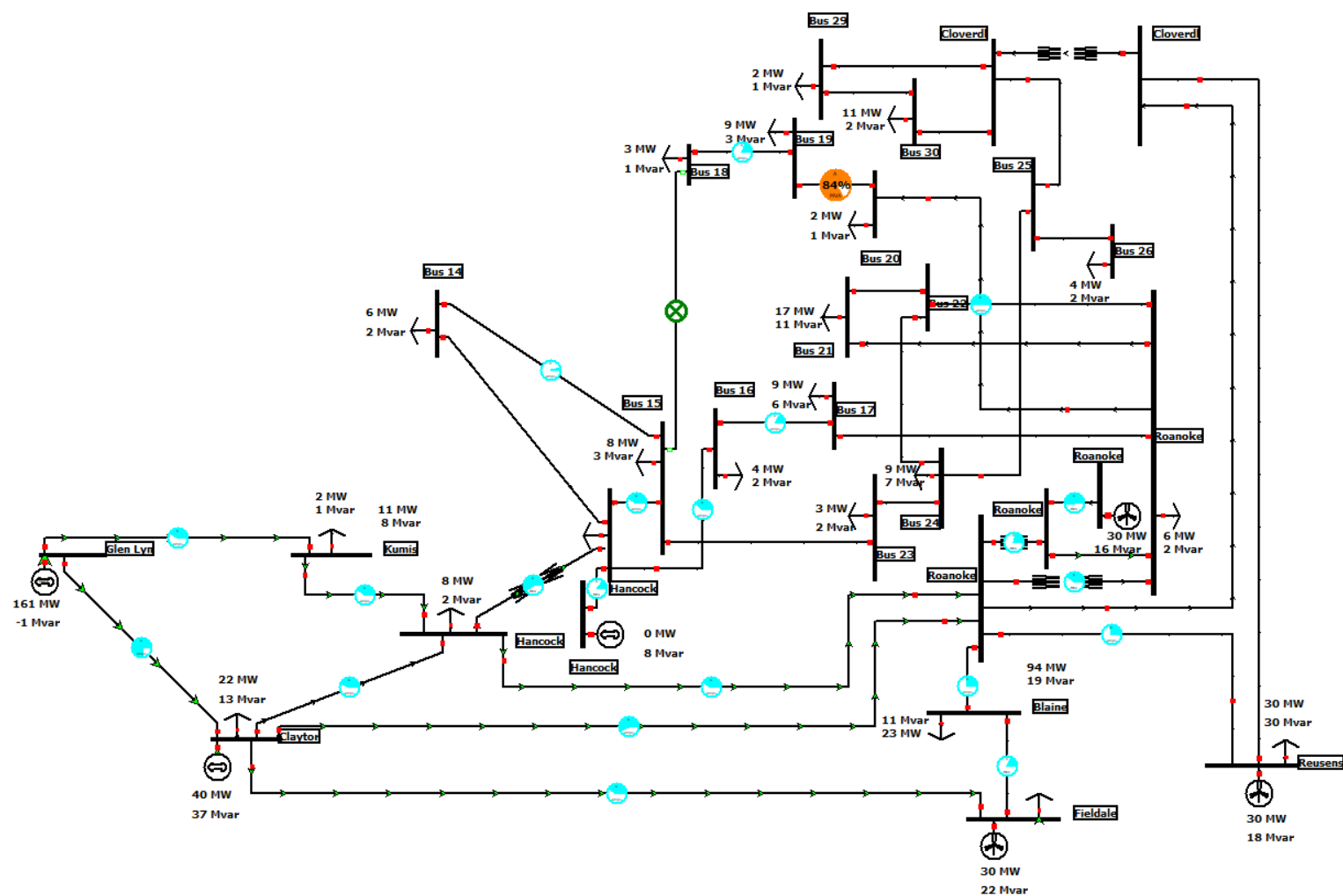
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 6^η</i>		
1	2	74,4
1	3	54,5
2	4	75,4
2	5	0
2	6	99
3	4	50,9
4	6	75,4
4	12	63,4
5	7	98,1
6	7	70,3
6	8	13,7
6	9	20,8
6	10	35,3
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,9
10	17	0
10	20	34,9
10	21	0
10	22	0

12	13	16,9
12	14	0
12	15	54,5
12	16	36,3
14	15	8,8
15	18	30,3
15	23	0
16	17	13,8
18	19	10,1
19	20	54,4
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 17 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 10,441.

5.3.11 Διαταραχή 7η (Δ7): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15 και 18 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 15 και 18. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 26: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 15 και 18 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 7^η)

Πίνακας 18: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 7

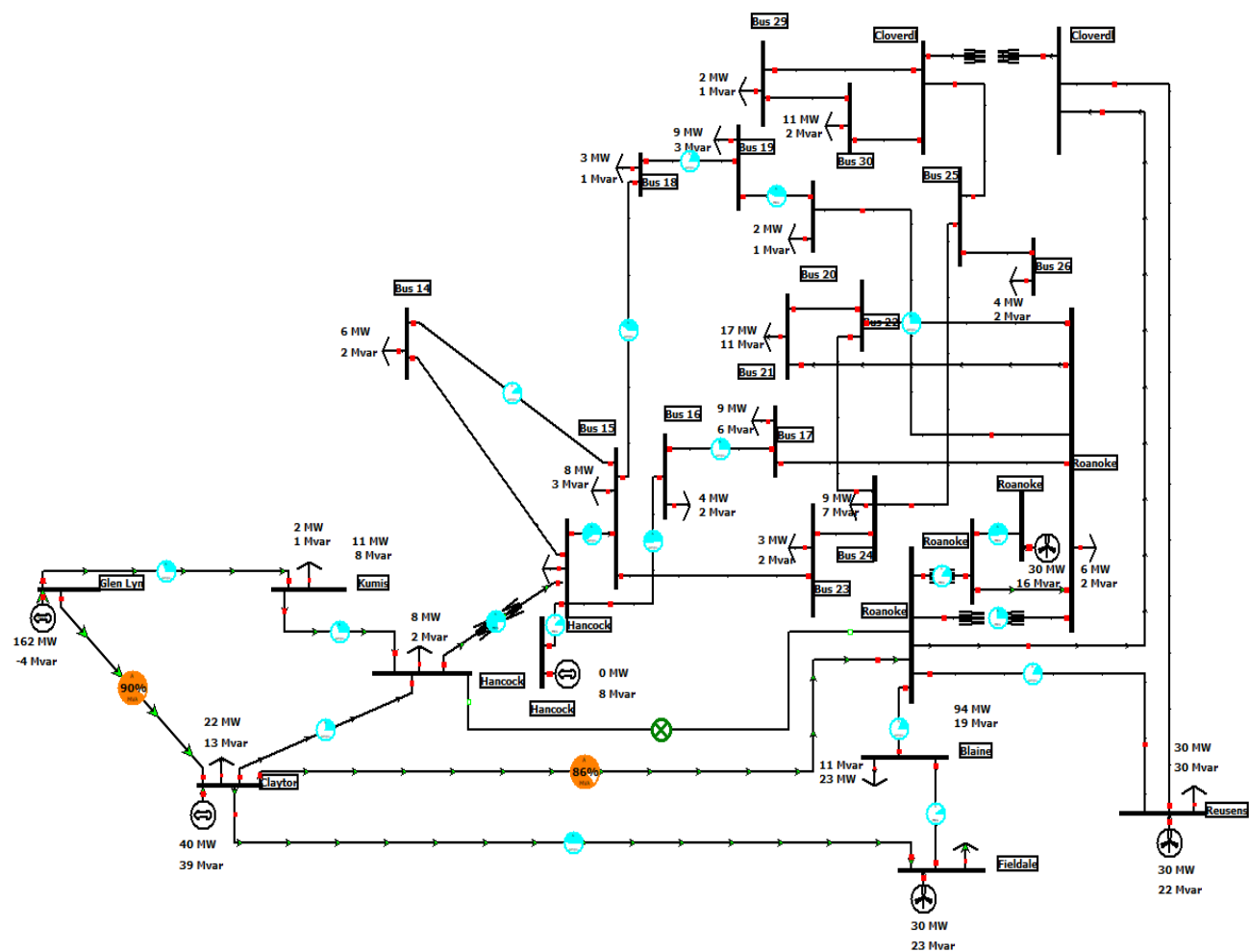
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 7^η</i>		
1	2	81,5
1	3	43,1
2	4	45,8
2	5	42,8
2	6	58,3
3	4	40,1
4	6	41,7
4	12	58,7
5	7	20,1
6	7	25,6
6	8	30,6
6	9	21,4
6	10	38,6
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,3
10	17	0
10	20	50,5
10	21	0
10	22	0

12	13	13,1
12	14	0
12	15	44
12	16	39,7
14	15	4,5
15	18	0
15	23	0
16	17	17
18	19	20,6
19	20	84,2
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 18 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,742.

5.3.12 Διαταραχή 8η (Δ8): Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4 και 6 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 27, παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς με παρουσία μετασχηματιστή, μεταξύ των ζυγών 4 και 6. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 19. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 27: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γραμμή μεταξύ των ζυγών 4 και 6 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 8^η)

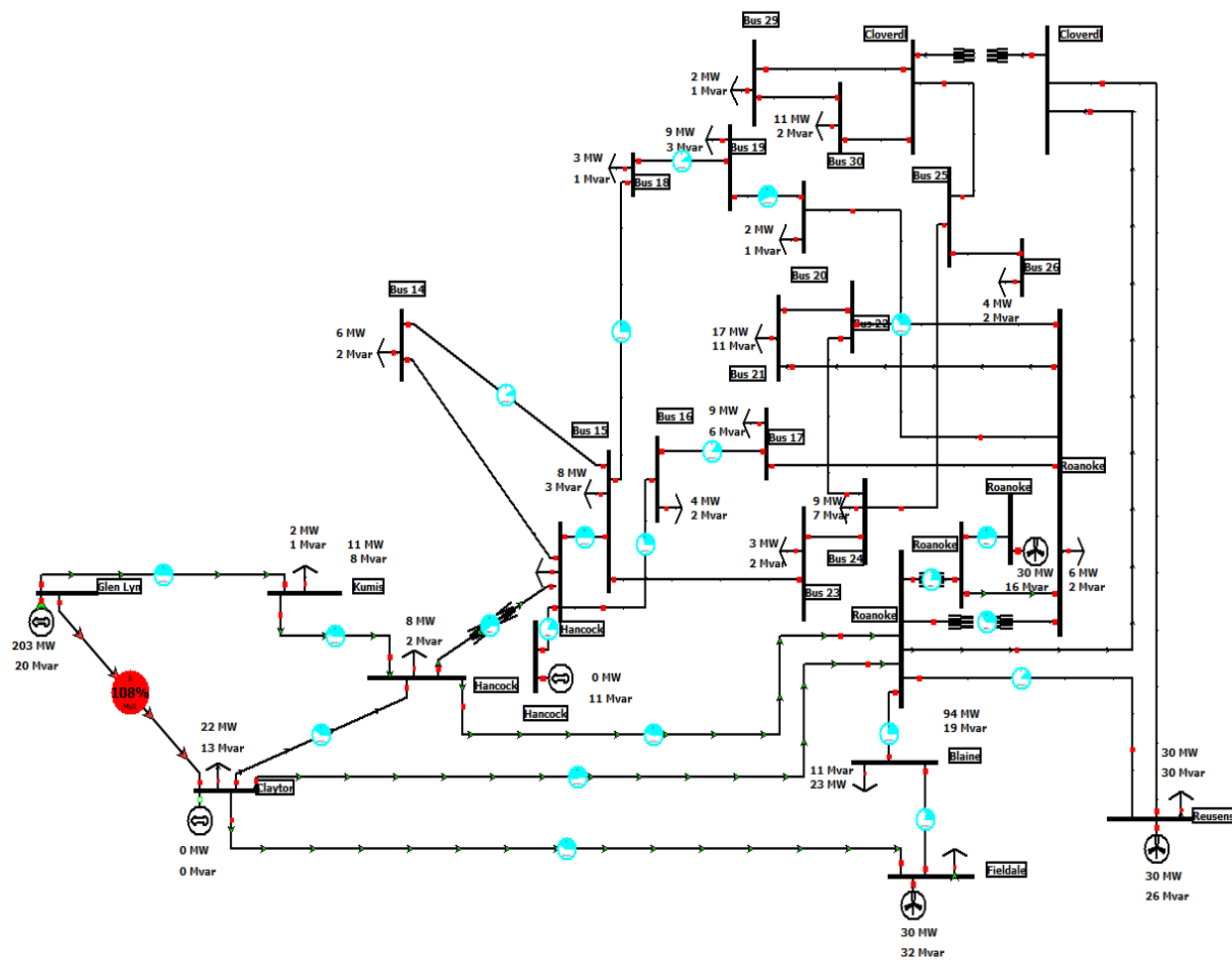
Πίνακας 19: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 8

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 8^η</i>		
1	2	90,4
1	3	34,8
2	4	27
2	5	49,1
2	6	86,3
3	4	32,4
4	6	0
4	12	76,7
5	7	11,3
6	7	19,5
6	8	19,3
6	9	15,6
6	10	27,6
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,4
10	17	0
10	20	29,5
10	21	0
10	22	0

12	13	12,1
12	14	0
12	15	63,6
12	16	55
14	15	12,4
15	18	41
15	23	0
16	17	29,9
18	19	19,9
19	20	43,8
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 19 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,496.

5.3.13 Διαταραχή 9η (Δ9): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 2 του ΣΗΕ
Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 20. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 28: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 τίθεται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 9^η)

Πίνακας 20: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 9

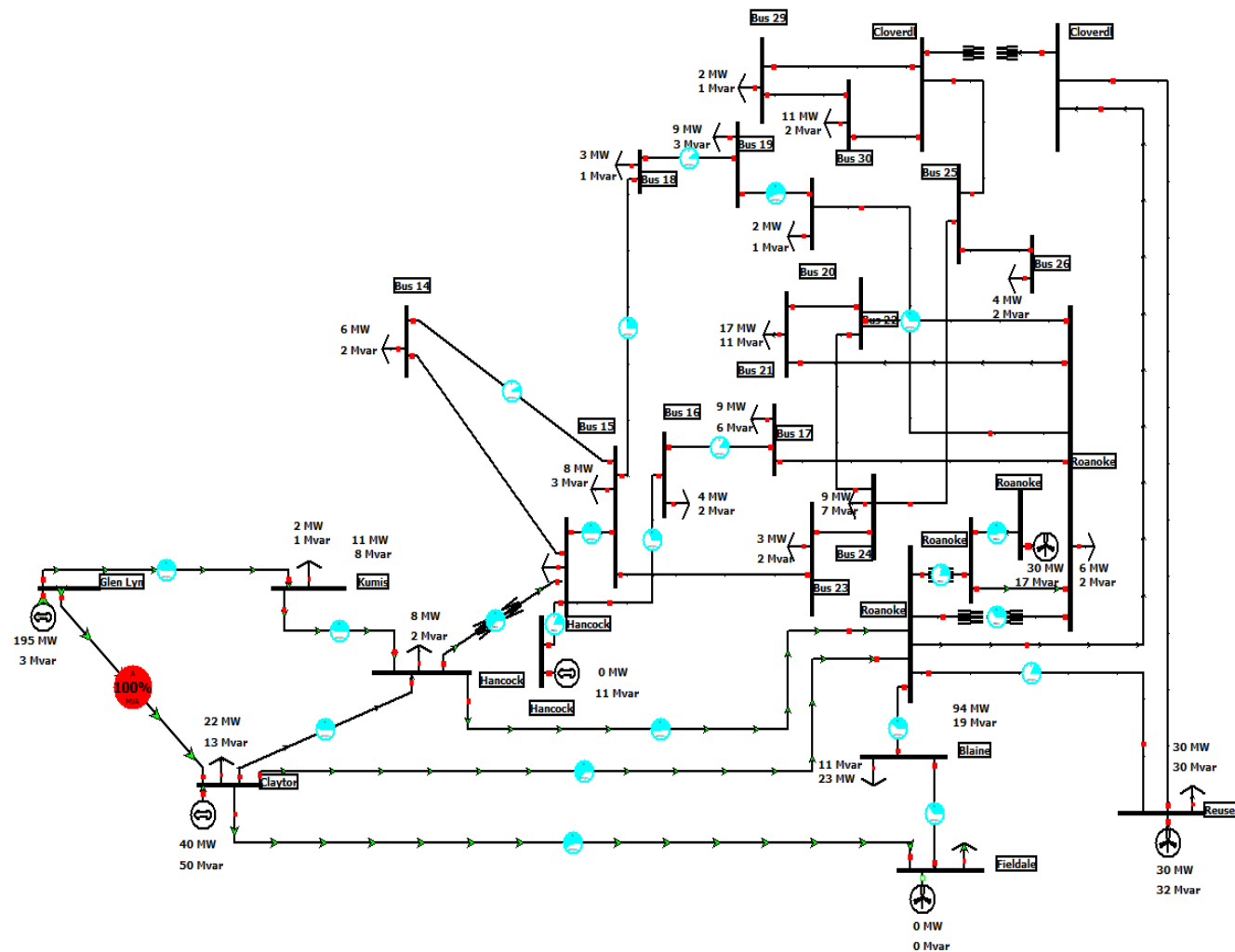
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 9^η</i>		
1	2	108,1
1	3	48,8
2	4	39,6
2	5	41,9
2	6	53,4
3	4	45,5
4	6	45
4	12	60,4
5	7	22,9
6	7	26,4
6	8	12,3
6	9	21,6
6	10	37,1
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,5
10	17	0
10	20	36,4
10	21	0
10	22	0

12	13	17
12	14	0
12	15	52,2
12	16	32,5
14	15	8,2
15	18	27,8
15	23	0
16	17	13,4
18	19	8,7
19	20	57,2
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 20 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,689.

5.3.14 Διαταραχή 10η ($\Delta 10$): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 5 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 29: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 τίθεται εκτός λειτουργία (Διαταραχή 10^η)

Πίνακας 21: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 10

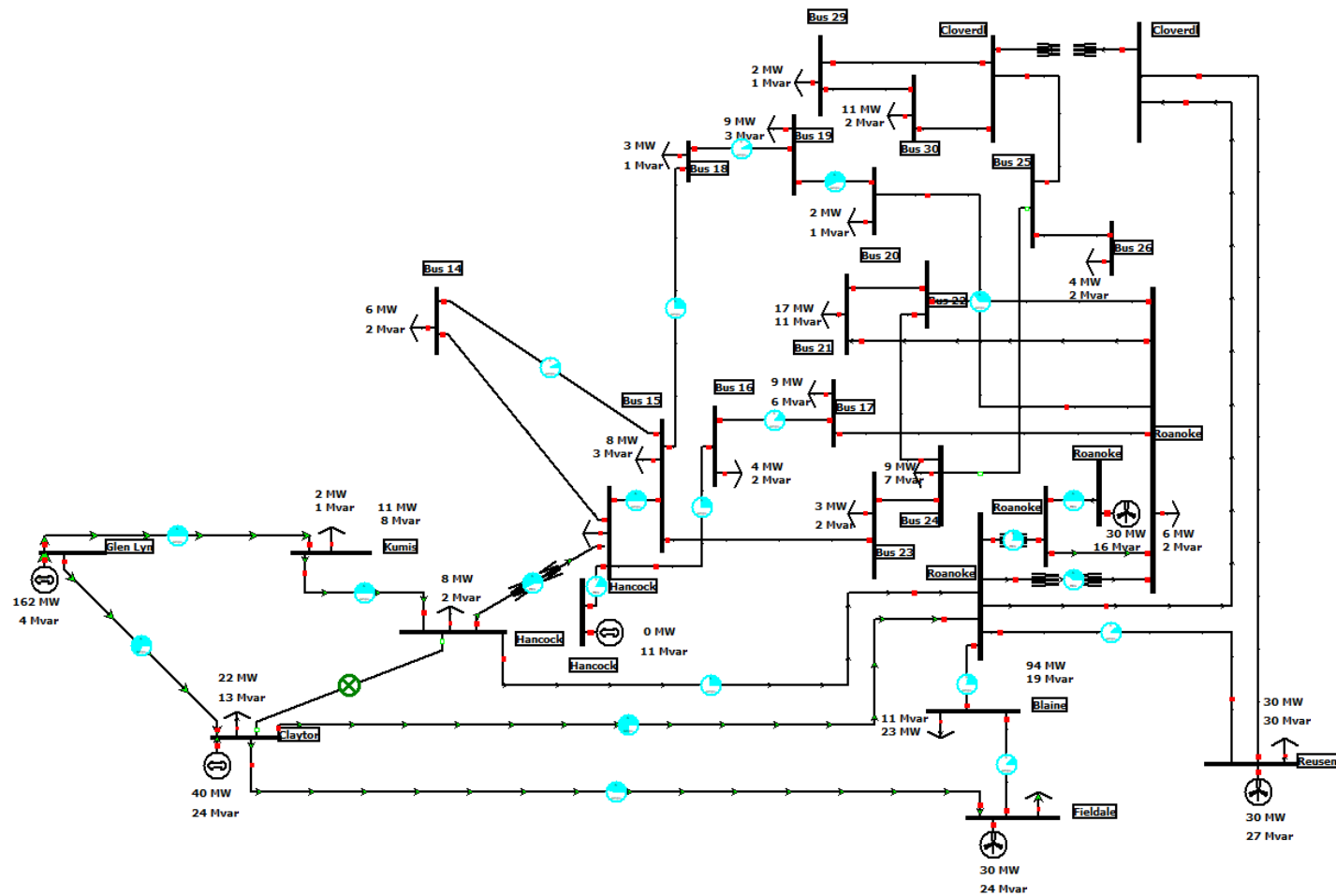
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 10^η</i>		
1	2	100,2
1	3	50,1
2	4	48,8
2	5	58,1
2	6	64,7
3	4	46,7
4	6	51,6
4	12	61,2
5	7	35,5
6	7	38,5
6	8	17
6	9	21,9
6	10	36,8
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53
10	17	0
10	20	35,9
10	21	0
10	22	0

12	13	17,3
12	14	0
12	15	53
12	16	34
14	15	8,5
15	18	28,6
15	23	0
16	17	14,2
18	19	9,4
19	20	56,4
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 21 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 9,414.

5.3.15 Διαταραχή 11η (Δ11): Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας οι γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 22. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 30: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν οι γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-4 και 24-25 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 11^η)

Πίνακας 22: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 11

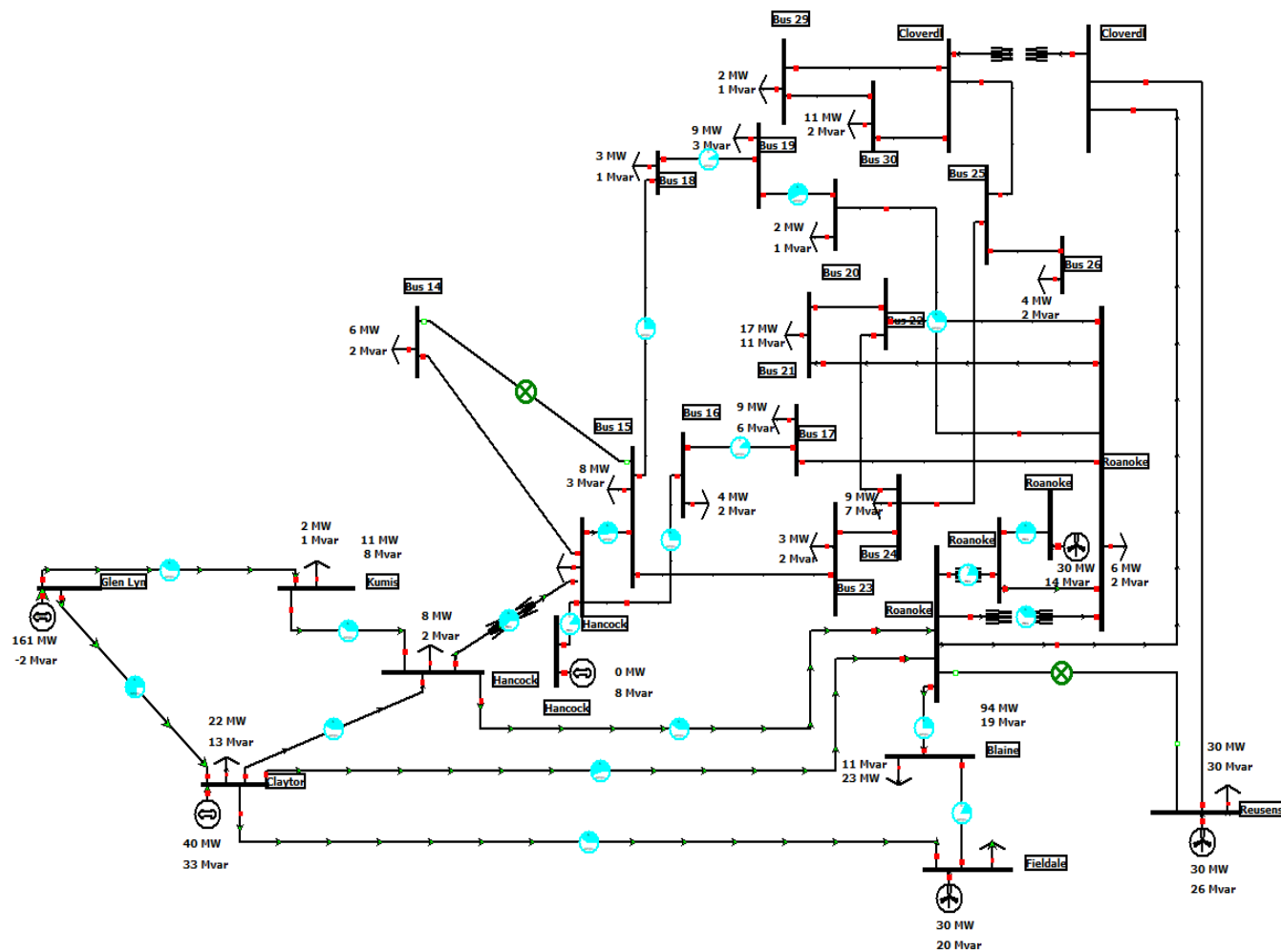
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 11^η</i>		
1	2	72,7
1	3	52,1
2	4	0
2	5	47,2
2	6	77,3
3	4	48,6
4	6	24,4
4	12	57,8
5	7	14,8
6	7	21,4
6	8	11,8
6	9	23
6	10	38,8
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,3
10	17	0
10	20	37,5
10	21	0
10	22	0

12	13	17,5
12	14	0
12	15	50,1
12	16	29,2
14	15	7,1
15	18	25,8
15	23	0
16	17	13,5
18	19	8,1
19	20	59,5
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 22 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 7,905.

5.3.16 Διαταραχή 12η ($\Delta 12$): Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας οι γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή, τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 23. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 31: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν οι γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται μεταξύ των ζυγών 6-8 και 14-15 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 12^η)

Πίνακας 23: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 12

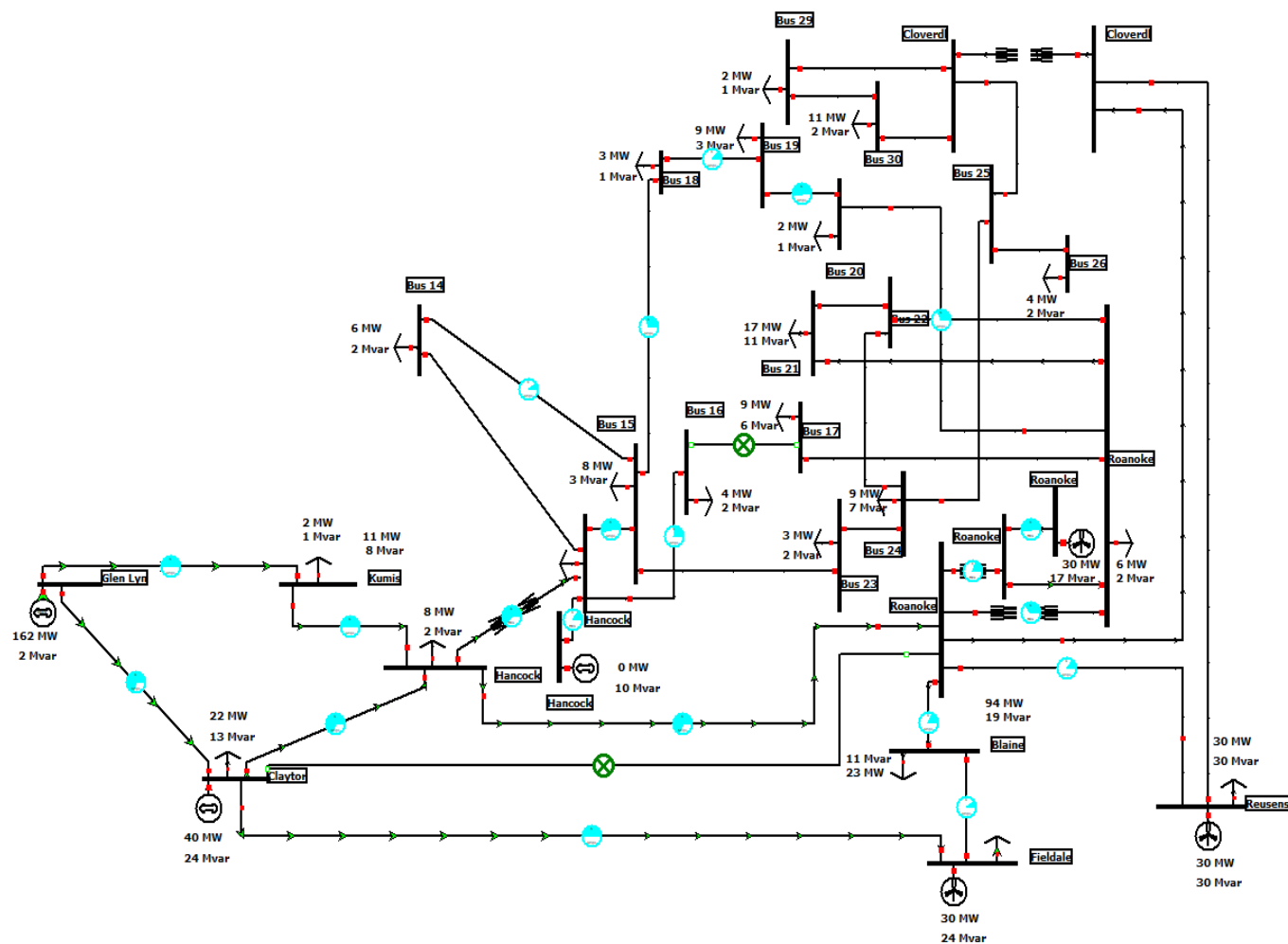
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 12^η</i>		
1	2	81,3
1	3	43,1
2	4	45,4
2	5	42,7
2	6	57,7
3	4	40,2
4	6	41,3
4	12	61
5	7	18,6
6	7	25,8
6	8	0
6	9	20,3
6	10	37,5
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	51,1
10	17	0
10	20	37,1
10	21	0
10	22	0

12	13	13,1
12	14	0
12	15	54,6
12	16	31,6
14	15	0
15	18	26,2
15	23	0
16	17	12,5
18	19	7,1
19	20	58,5
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 23 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,067.

5.3.17 Διαταραχή 13η (Δ13): Αφαίρεση γραμμών μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας οι γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 24. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 32: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν οι γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 2-6 και 16-17 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 13^η)

Πίνακας 24: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 13

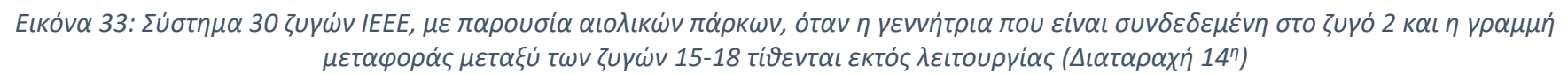
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 13^η</i>		
1	2	72,9
1	3	52,1
2	4	70,8
2	5	50,6
2	6	0
3	4	48,6
4	6	69,1
4	12	62,5
5	7	12
6	7	18,1
6	8	13,2
6	9	20,4
6	10	35,6
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,3
10	17	0
10	20	34,1
10	21	0
10	22	0

12	13	15,2
12	14	0
12	15	55,8
12	16	24,8
14	15	9,7
15	18	32,2
15	23	0
16	17	0
18	19	12,5
19	20	52,9
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 24 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,164.

5.3.18 Διαταραχή 14η (Δ14): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 2 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 15-18 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 15-18. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 25. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Πίνακας 25: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 14

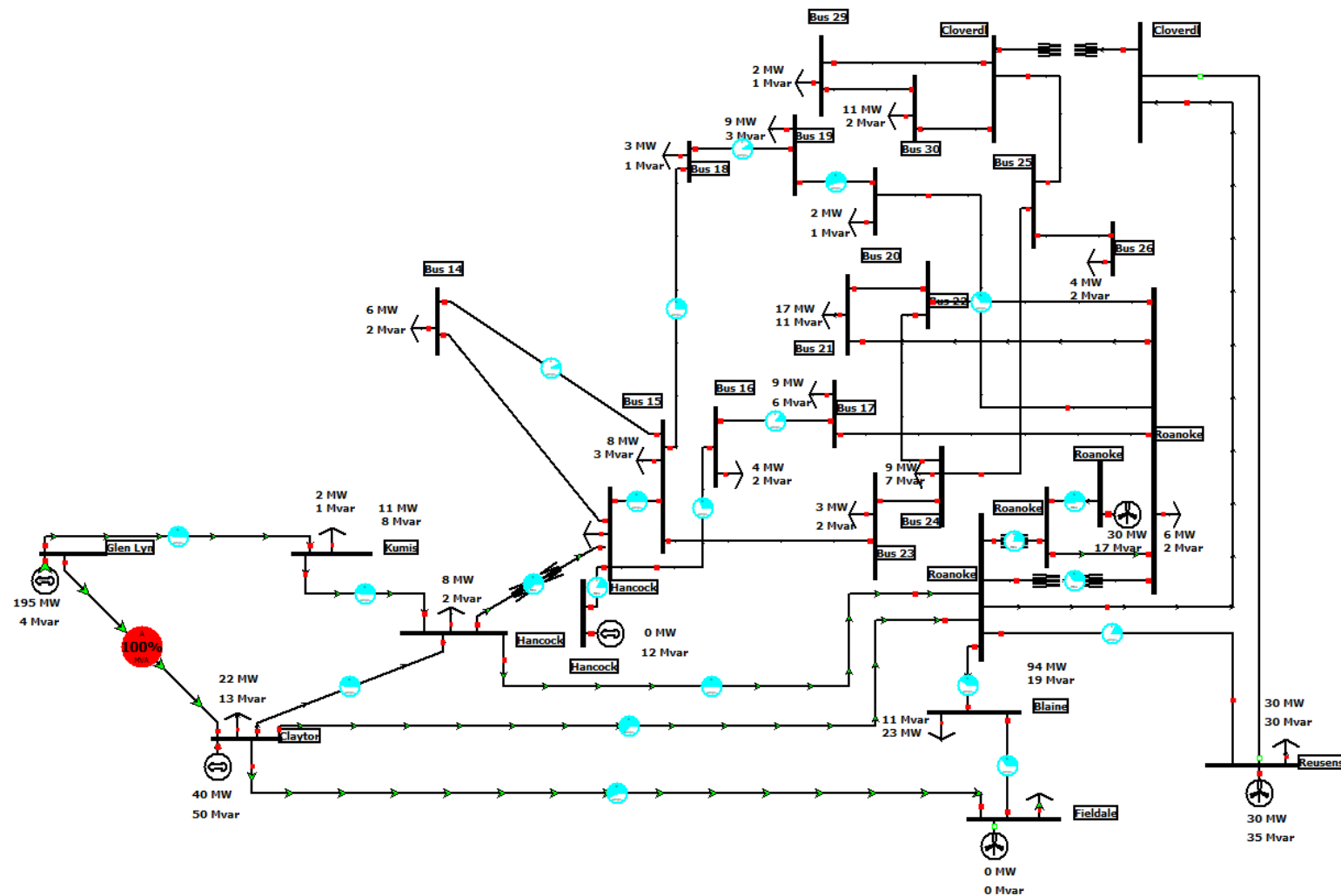
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 14^η</i>		
1	2	108,2
1	3	48,8
2	4	39,4
2	5	42
2	6	53,6
3	4	45,5
4	6	46
4	12	58,4
5	7	22,9
6	7	26,3
6	8	11,6
6	9	21,9
6	10	38,4
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,1
10	17	0
10	20	50,6
10	21	0
10	22	0

12	13	15,3
12	14	0
12	15	44,4
12	16	40,6
14	15	4,6
15	18	0
15	23	0
16	17	17,6
18	19	20,8
19	20	84,5
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 25 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 8,945.

5.3.19 Διαταραχή 15η (Δ15): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 5 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8-28 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 8-28. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 26. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 34: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8-28 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 15^η)

Πίνακας 26: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 15

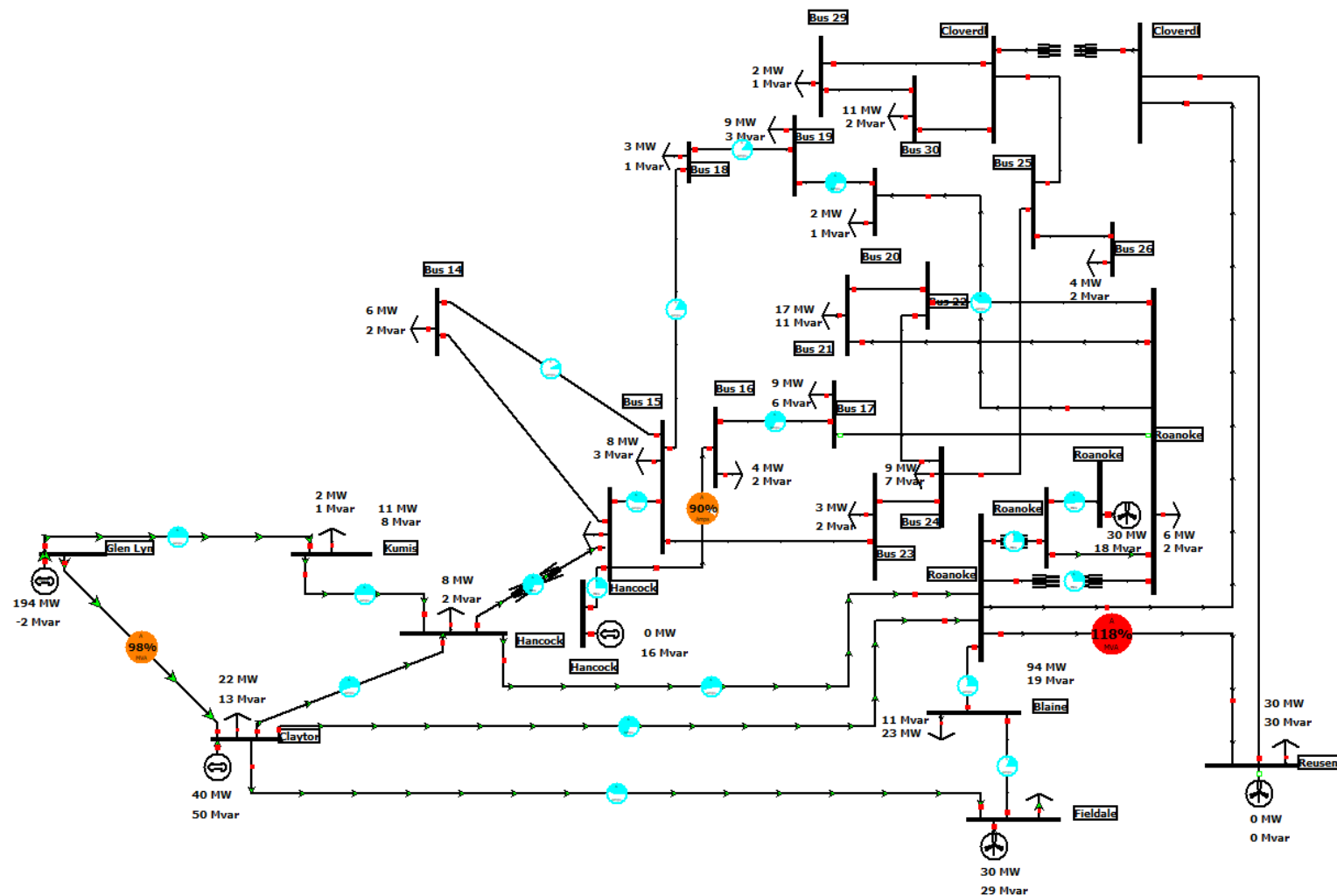
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 15^η</i>		
1	2	100,2
1	3	50,1
2	4	48,9
2	5	58,1
2	6	64,8
3	4	46,7
4	6	51,4
4	12	61,2
5	7	35,4
6	7	38,5
6	8	18,4
6	9	22,2
6	10	36,9
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,3
10	17	0
10	20	35,9
10	21	0
10	22	0

12	13	17,9
12	14	0
12	15	53,3
12	16	34,3
14	15	8,7
15	18	28,7
15	23	0
16	17	14,6
18	19	9,5
19	20	56,3
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 26 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 9,453.

5.3.20 Διαταραχή 16η (Δ16): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 8 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 10-17 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 35 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 8 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 10-17. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 27. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 35: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 8 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 10-17 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 16^η)

Πίνακας 27: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 16

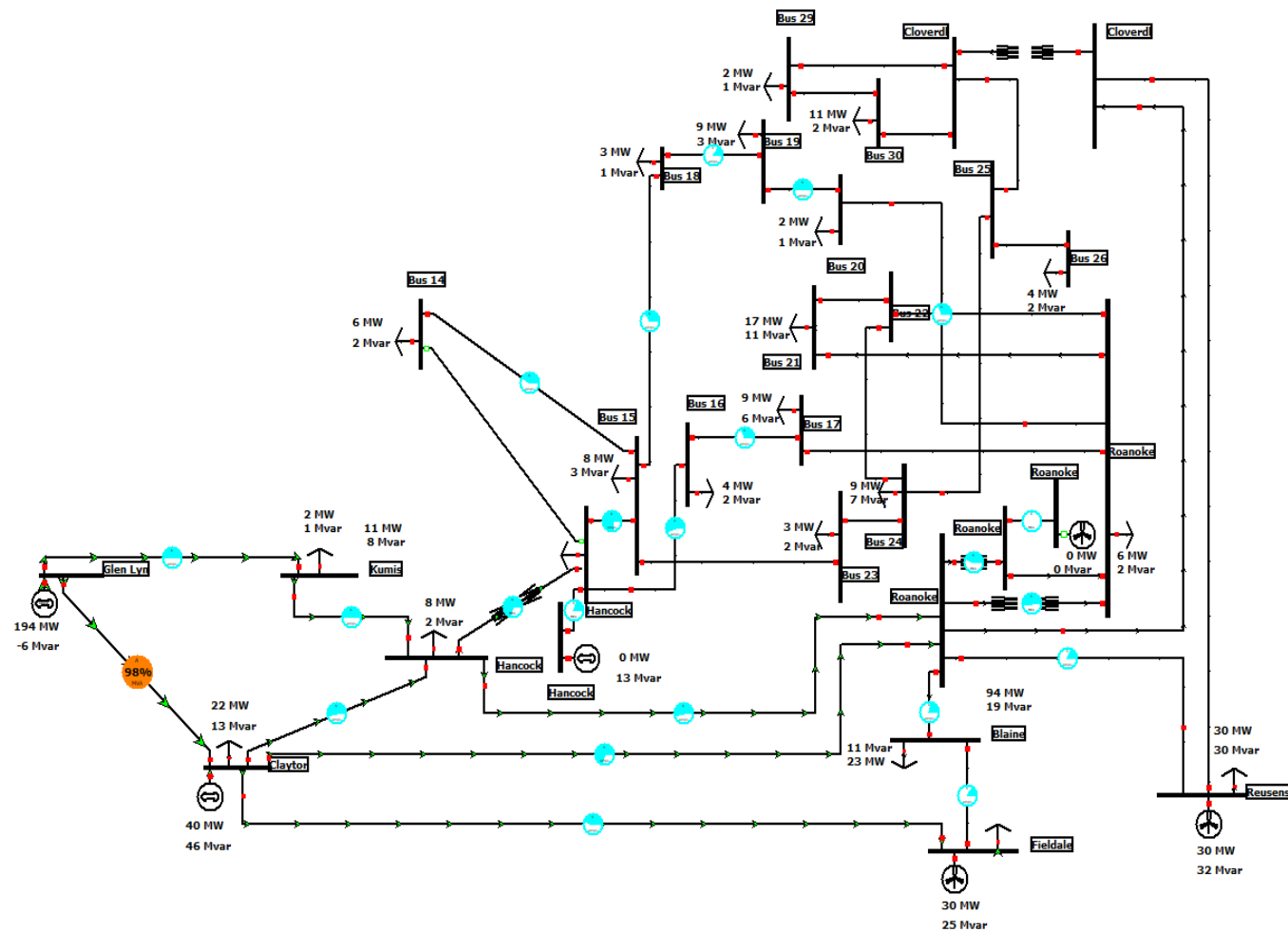
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 16^η</i>		
1	2	98,2
1	3	52,3
2	4	56,9
2	5	46,3
2	6	73,4
3	4	48,7
4	6	53,1
4	12	68,7
5	7	22,3
6	7	22,5
6	8	118,4
6	9	23,2
6	10	33,2
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	53,6
10	17	0
10	20	43,3
10	21	0
10	22	0

12	13	25,1
12	14	0
12	15	44,3
12	16	94,9
14	15	7,8
15	18	18,3
15	23	0
16	17	68
18	19	14
19	20	70,8
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 27 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 11,573.

5.3.21 Διαταραχή 17η (Δ17): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 11 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 12-14 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 12-14. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 28. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 36: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 12-14 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 17^η)

Πίνακας 28: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 17

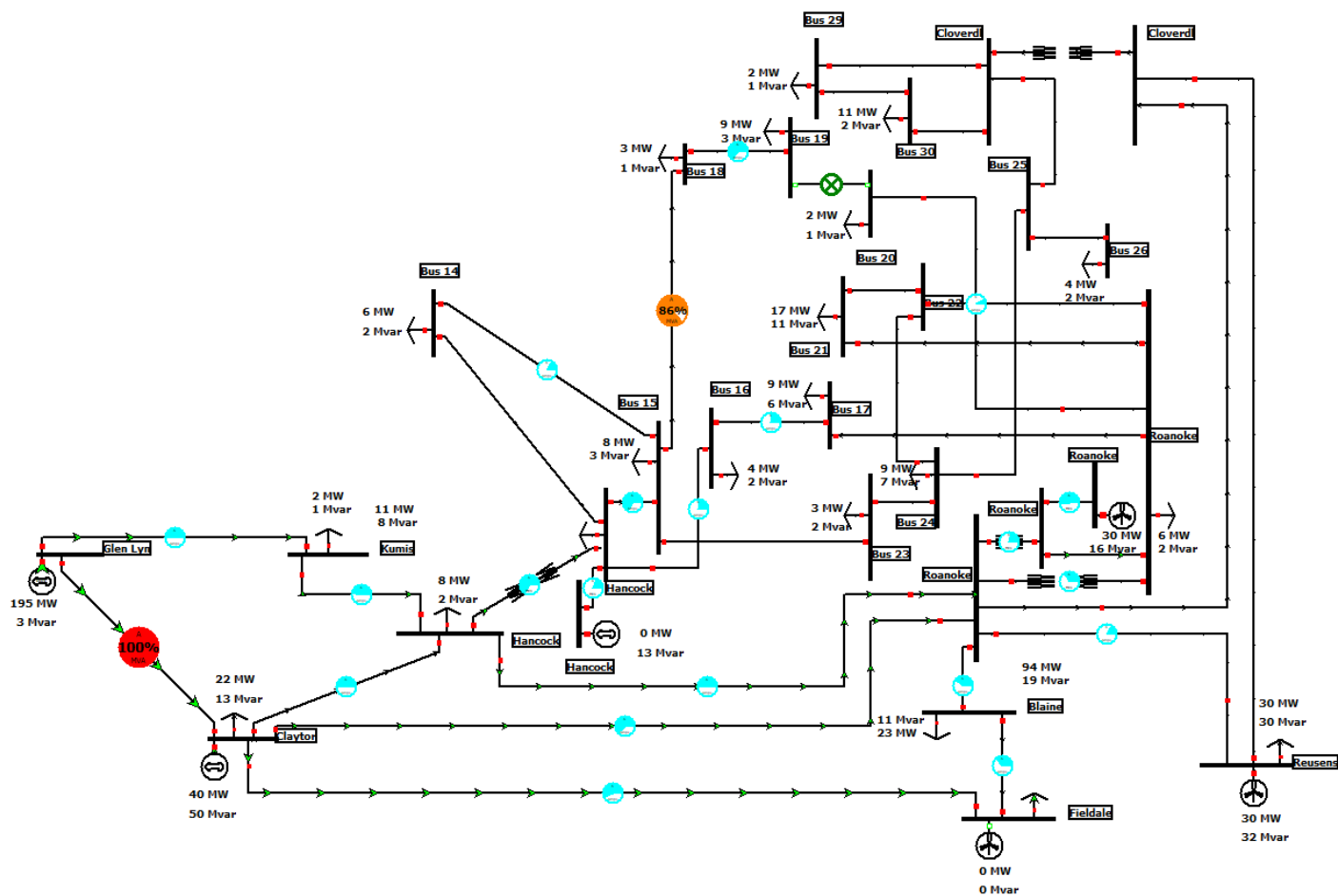
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 17^η</i>		
1	2	97,9
1	3	52,1
2	4	56,1
2	5	46,1
2	6	72,3
3	4	48,6
4	6	53,4
4	12	69,5
5	7	17,7
6	7	22,4
6	8	17,8
6	9	43,5
6	10	51,6
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	0
10	17	0
10	20	32,5
10	21	0
10	22	0

12	13	20,1
12	14	0
12	15	81,8
12	16	58,2
14	15	40,7
15	18	35
15	23	0
16	17	33,4
18	19	14,6
19	20	49,7
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 28 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 10,15.

5.3.22 Διαταραχή 18η (Δ18): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 5 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 19-20 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 19-20. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 29. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 37: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 5 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 19-20 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 18^η)

Πίνακας 29: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 18

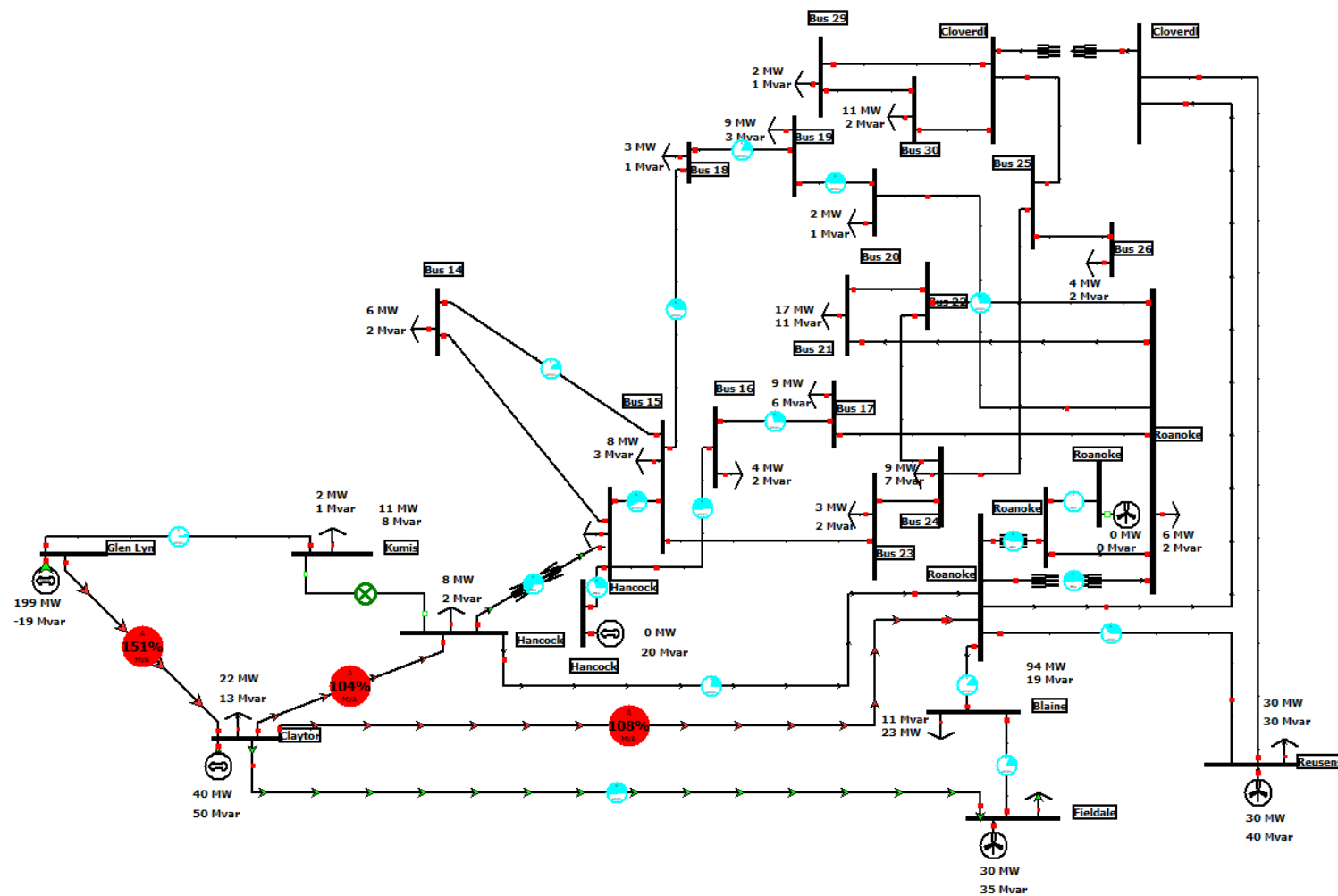
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 18^η</i>		
1	2	100,2
1	3	50,4
2	4	49,4
2	5	58
2	6	64,4
3	4	47
4	6	49
4	12	66,3
5	7	35,6
6	7	38,6
6	8	16
6	9	21
6	10	33,9
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	52,3
10	17	0
10	20	7,2
10	21	0
10	22	0

12	13	20,4
12	14	0
12	15	69,9
12	16	25
14	15	16,3
15	18	86,4
15	23	0
16	17	23,8
18	19	63,7
19	20	0
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 29 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 9,948.

5.3.23 Διαταραχή 19η (Δ19): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 11 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 3-4 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 3-4. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 30. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 38: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 3-4 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 19^η)

Πίνακας 30: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 19

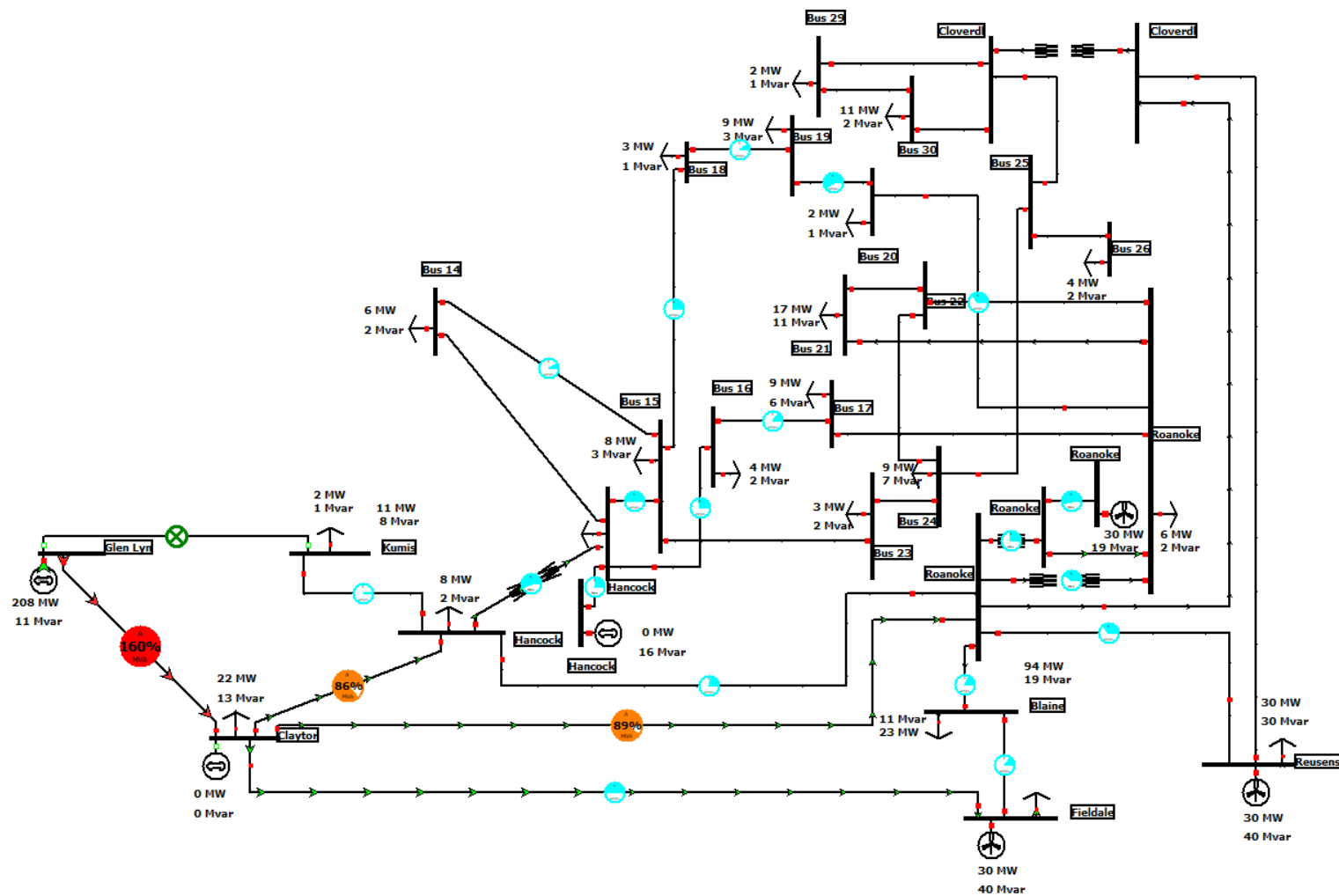
Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 19^η</i>		
1	2	151,5
1	3	3,2
2	4	103,5
2	5	54,5
2	6	107,9
3	4	0
4	6	21,4
4	12	65,6
5	7	19,7
6	7	14,5
6	8	35,7
6	9	44,4
6	10	52,5
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	0
10	17	0
10	20	30,8
10	21	0
10	22	0

12	13	30,8
12	14	0
12	15	59,8
12	16	53,7
14	15	12,1
15	18	39,8
15	23	0
16	17	31,1
18	19	20,2
19	20	46,5
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 30 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 9,992.

5.3.24 Διαταραχή 20η ($\Delta 20$): Αφαίρεση γεννήτριας συνδεδεμένης στο ζυγό 2 και αφαίρεση γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-3 του ΣΗΕ

Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται το ΣΗΕ όταν έχει τεθεί εκτός λειτουργίας η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 και η γραμμή μεταφοράς που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 1-3. Αφού γίνει ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή τα δεδομένα για τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 31. Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης PI_{MVA} , για τη διαταραχή που μελετήθηκε.



Εικόνα 39: Σύστημα 30 ζυγών IEEE, με παρουσία αιολικών πάρκων, όταν η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 και η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1-3 τίθενται εκτός λειτουργίας (Διαταραχή 20^η)

Πίνακας 31: Ποσοστά φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς για τη Διαταραχή 20

Γραμμή μεταφοράς (Από)	Γραμμή μεταφοράς (Προς)	% of MVA Limit (Max)
<i>Διαταραχή 20^η</i>		
1	2	160
1	3	0
2	4	86,2
2	5	50,5
2	6	89,2
3	4	2,1
4	6	21,2
4	12	55,4
5	7	16,7
6	7	18,5
6	8	35,7
6	9	24,7
6	10	39,2
6	28	0
8	28	0
9	10	0
9	11	54,5
10	17	0
10	20	37,8
10	21	0
10	22	0

12	13	24,4
12	14	0
12	15	50,4
12	16	30,2
14	15	8
15	18	25,7
15	23	0
16	17	16,3
18	19	8,8
19	20	59,9
21	22	0
22	24	0
23	24	0
24	25	0
25	26	0
25	27	0
28	27	0
27	29	0
27	30	0
29	30	0

Από τον Πίνακα 31 υπολογίζεται ότι ο δείκτης PI_{MVA} είναι ίσος με 9,154.

5.3.25 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων – Κατάταξη των διαταραχών

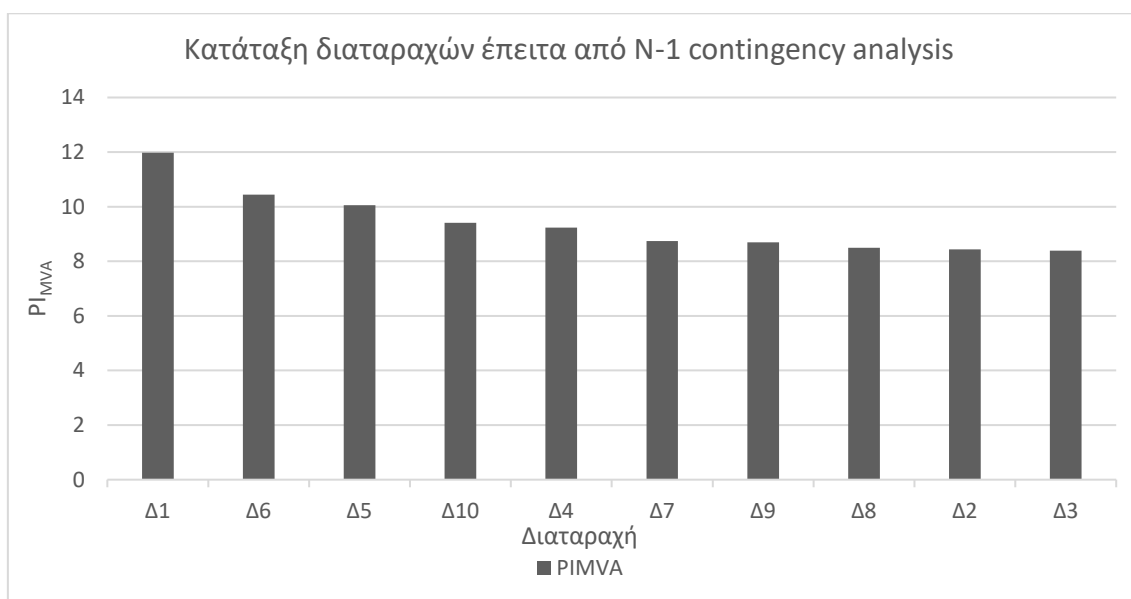
Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε μελέτη contingency analysis, εφαρμόζοντας διαταραχές N-1 και N-1-1, πάνω στο σύστημα 30 ζυγών της IEEE με παρουσία αιολικών πάρκων στου ζυγούς 5, 8 και 11. Για κάθε περίπτωση εφαρμόστηκε ανάλυση ροής φορτίου, μετά τη διαταραχή και υπολογίστηκε ο PI_{MVA} , ώστε να γίνει κατάταξη των διαταραχών. Σύμφωνα με τον τελευταίο, όσο μεγαλύτερη είναι μία διαταραχή για το ΣΗΕ, τόσο μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει ο δείκτης. Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν και παρουσιάζονται συνοπτικά:

- Πίνακας 32, για τις διαταραχές N-1 με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA} (Διάγραμμα 2)
- Πίνακας 33, για τις διαταραχές N-1-1 με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA} (Διάγραμμα 3)
- Πίνακας 34, για όλες τις διαταραχές με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA} (Διάγραμμα 4)

Πίνακας 32: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα contingency analysis για τις N-1 διαταραχές που μελετήθηκαν

N-1 Contingency Analysis

Διαταραχή	PI _{MVA}	Κατάταξη
Δ1	11,976	1 ^η
Δ2	8,439	9 ^η
Δ3	8,384	10 ^η
Δ4	9,238	5 ^η
Δ5	10,056	3 ^η
Δ6	10,441	2 ^η
Δ7	8,742	6 ^η
Δ8	8,496	8 ^η
Δ9	8,689	7 ^η
Δ10	9,414	4 ^η



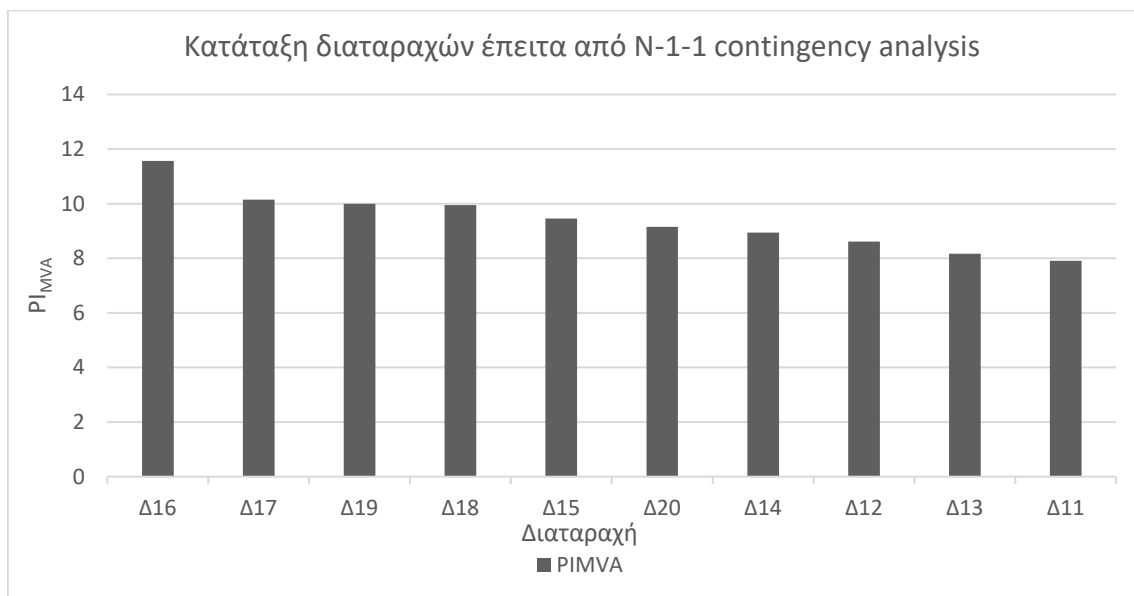
Διάγραμμα 2: Διαταραχές N-1 με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA}

Από τον Πίνακα 32 και το Διάγραμμα 2, είναι φανερό ότι για τη N-1 contingency analysis, η πιο επικίνδυνη διαταραχή στο σύστημα είναι η 1^η, δηλαδή η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4-12, με παρουσία μετασχηματιστή. Στην περίπτωση αυτή, δύο γραμμές μεταφοράς υπερφορτίζονται σε επικίνδυνο βαθμό, ενώ μία βρίσκεται σε κατάσταση συναγερμού. Η αμέσως επόμενη πιο επικίνδυνη διαταραχή, είναι η 6^η, δηλαδή η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 2-5. Αντίστοιχα, σε αυτή την περίπτωση εντοπίζονται δύο γραμμές μεταφοράς σε κατάσταση συναγερμού για το ΣΗΕ.

Πίνακας 33: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα contingency analysis για τις N-1-1 διαταραχές που μελετήθηκαν

N-1-1 Contingency Analysis

Διαταραχή	PI _{MVA}	Κατάταξη
Δ11	7,905	10 ^η
Δ12	8,607	8 ^η
Δ13	8,164	9 ^η
Δ14	8,945	7 ^η
Δ15	9,453	5 ^η
Δ16	11,573	1 ^η
Δ17	10,150	2 ^η
Δ18	9,948	4 ^η
Δ19	9,992	3 ^η
Δ20	9,154	6 ^η



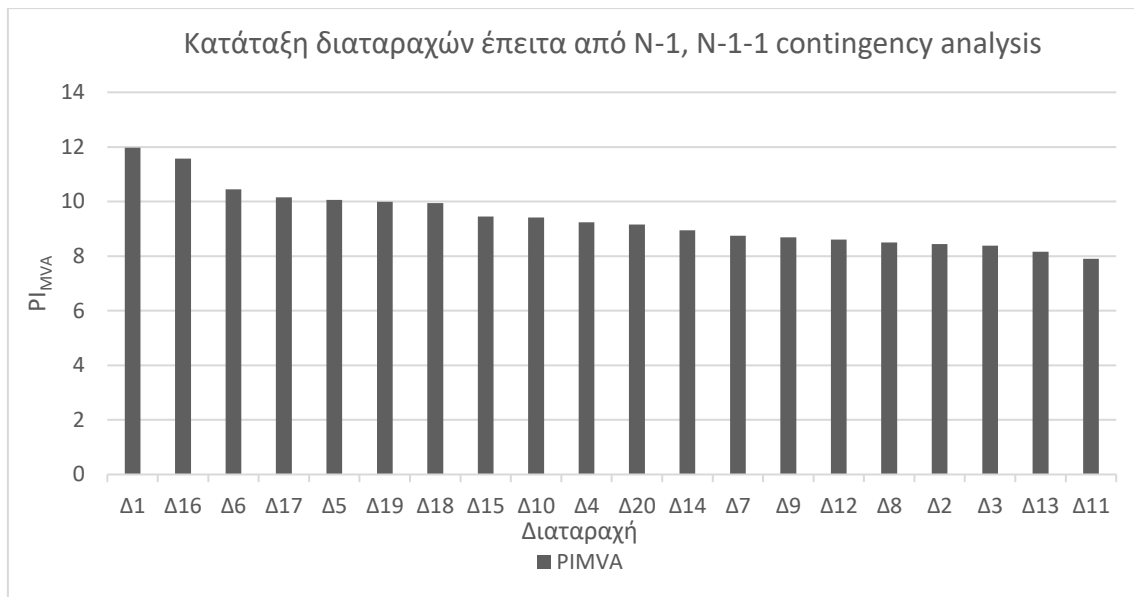
Διάγραμμα 33: Διαταραχές N-1-1 με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA}

Από τον Πίνακα 33 και το Διάγραμμα 3, είναι φανερό ότι για τη N-1-1 contingency analysis, η πιο επικίνδυνη διαταραχή στο σύστημα είναι η 16^η, δηλαδή η αφαίρεση της γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 8 και της γραμμής μεταφοράς 10-17. Στην περίπτωση αυτή, μία γραμμή μεταφοράς υπερφορτίζεται σε επικίνδυνο βαθμό, ενώ δύο βρίσκονται σε κατάσταση συναγερμού. Η αμέσως επόμενη πιο επικίνδυνη διαταραχή, είναι η 17^η, δηλαδή η αφαίρεση της γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 11 και της γραμμής μεταφοράς 12-14. Αντίστοιχα, σε αυτή την περίπτωση εντοπίζεται μία γραμμή μεταφοράς σε κατάσταση συναγερμού για το ΣΗΕ.

Πίνακας 34: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα contingency analysis για όλες τις διαταραχές που μελετήθηκαν

N-1 και N-1-1 Contingency Analysis

Διαταραχή	PI _{MVA}	Κατάταξη
Δ1	11,976	1 ^η
Δ2	8,439	17 ^η
Δ3	8,384	18 ^η
Δ4	9,238	10 ^η
Δ5	10,056	5 ^η
Δ6	10,441	3 ^η
Δ7	8,742	13 ^η
Δ8	8,496	16 ^η
Δ9	8,689	14 ^η
Δ10	9,414	9 ^η
Δ11	7,905	20 ^η
Δ12	8,607	15 ^η
Δ13	8,164	19 ^η
Δ14	8,945	12 ^η
Δ15	9,453	8 ^η
Δ16	11,573	2 ^η
Δ17	10,15	4 ^η
Δ18	9,948	7 ^η
Δ19	9,992	6 ^η
Δ20	9,154	11 ^η



Διάγραμμα 4: Σύνολο διαταραχών με φθίνουσα σειρά ως προς την κρισιμότητα βάσει του PI_{MVA}

Από τον Πίνακα 34 και το Διάγραμμα 4, είναι φανερό ότι από όλες τις διαταραχές που μελετήθηκαν, η πιο επικίνδυνη στο σύστημα είναι η 1^η, δηλαδή η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4-12 με παρουσία μετασχηματιστή. Η αμέσως επόμενη πιο επικίνδυνη διαταραχή είναι η 16^η, δηλαδή η αφαίρεση της γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 8 και της γραμμής μεταφοράς 10-17. Παρόλο που στις N-1-1 διαταραχές εφαρμόζονται ταυτόχρονα δύο διαταραχές, στο σύστημα που μελετήθηκε υπογραμμίζεται ότι η πιο επικίνδυνη είναι μία ανεξάρτητη N-1 διαταραχή. Επίσης, σημειώνεται ότι στην κατάταξη των διαταραχών, στις δύο από τις τρεις πρώτες θέσεις βρίσκονται περιπτώσεις από τη N-1 contingency analysis. Αυτό σημαίνει ότι μία διαταραχή μπορεί να είναι περισσότερο επιζήμια για το ΣΗΕ, από δύο ταυτόχρονες διαταραχές. Οι Δ1, Δ6 περιλαμβάνουν αφαιρέσεις γραμμών μεταφοράς που βρίσκονται κοντά στη γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2 του δικτύου. Επομένως, η συνεισφορά τους στο διαμοιρασμό της ισχύος, είναι υψίστης σημασίας για το ΣΗΕ. Σε ότι έχει να κάνει με τη Δ16, η αφαίρεση του αιολικού πάρκου που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 8 και της γραμμής μεταφοράς 10-17 που βρίσκεται στο μέσο του δικτύου, προκαλεί μεγάλη σύγχυση καθώς η πορεία που ακολουθεί η ισχύς προκειμένου να καλύψει τα φορτία, είναι η αιτία για την υπερφόρτιση μίας γραμμής μεταφοράς και την πρόκληση της κατάσταση συναγερμού σε άλλες δύο.

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά

Η τεράστια και συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια μέχρι τώρα καλυπτόταν κυρίως μέσω της καύσης των ορυκτών καυσίμων και της θερμότητας που απελευθέρωναν αυτά. Η αδιάκοπη εκμετάλλευση των τελευταίων δημιουργεί πολλά ερωτήματα και ανησυχίες, σχετικά με τα προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη περιβαλλοντική ρύπανση. Επιπλέον, η βιωσιμότητα της παραγωγής και η απόκριση στη ζήτηση ενέργειας, από τους περιορισμένους αυτούς πόρους δεν αποτελεί καθυστερημένη επιλογή για την ενεργειακή παραγωγή.

Υποσχόμενη λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελούν οι ΑΠΕ. Οι ΑΠΕ αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καθαρό, βιώσιμο τρόπο και παράλληλα μηδενικούς ρύπους προς το περιβάλλον. Επίσης, η χρήση τους καθίσταται ελκυστική από τις κυβερνήσεις ανά τον κόσμο, οι οποίες υιοθετούν ευνοϊκές ενεργειακές πολιτικές. Ωστόσο, η χρήση των ΑΠΕ δημιουργεί πολλές τεχνικές προκλήσεις κατά την ενσωμάτωση τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περισσότερες έχουν να κάνουν με προβλήματα αστάθειας που προκαλούνται και με τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών για το ΣΗΕ. Παρόλα αυτά, η συμμετοχή τους στο σύστημα κρίνεται απαραίτητη και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης από την επιστημονική κοινότητα και τους μηχανικούς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε το σύστημα 30 ζυγών της IEEE. Εξετάσθηκαν τρία σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δύο εκ των οποίων αφορούσαν τη συμμετοχή αιολικών πάρκων. Το πρώτο Σενάριο (Σενάριο Α) από τα τρία αφορούσε την ανάλυση ροής ισχύος στο ήδη υπάρχον σύστημα. Το ποσοστό διείσδυσης των τελευταίων ήταν διαφορετικό και η σύνδεση τους έγινε σε ενδεικτικούς ζυγούς του συστήματος. Από τις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν, επιλέχθηκε η τοποθεσία εγκατάστασης των αιολικών πάρκων, να γίνει στους ζυγούς όπου οι απώλειες πραγματικής ισχύος του συστήματος ήταν οι λιγότερες συγκριτικά. Έπειτα, η περίπτωση αυτή μελετήθηκε και εφαρμόστηκε N-1, N-1-1 contingency analysis. Από τις διαταραχές που εξετάσθηκαν στο σύστημα, με βάση το δείκτη PI_{MVA} , προέκυψε η πιο επιβλαβής για το δίκτυο.

Παρόλο που εφαρμόστηκαν δύο ταυτόχρονες διαταραχές (contingency analysis N-1-1) στο δίκτυο, η πιο επικίνδυνη αφορούσε την αφαίρεση μίας γραμμής μεταφοράς με την παρουσία μετασχηματιστή, η οποία βρισκόταν κοντά σε μία γεννήτρια μεγάλης παραγωγής ισχύος. Αυτό αντικατοπτρίζει τη σημασία αυτής της γραμμής μεταφοράς για το διαμοιρασμό της ισχύος στο σύστημα. Παράλληλα, υπογραμμίζεται ότι μία ανεξάρτητη N-1 διαταραχή, μπορεί να είναι πιο επιβλαβής για το δίκτυο, συγκριτικά με δύο ταυτόχρονες N-1-1 διαταραχές όταν η πρώτη αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη λειτουργία του ΣΗΕ. Ο εντοπισμός της πιο επιβλαβούς διαταραχής, έρχεται σε συμφωνία με τη δημοσίευση [4], παρόλο που στην τελευταία εξετάσθηκαν μόνο περιπτώσεις μη ταυτόχρονων διαταραχών.

Ο κύριοι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εγκατάσταση αιολικών πάρκων στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE και η μελέτη διαταραχών υπό την παρουσία των ανεμογεννητριών. Προκειμένου να εγκατασταθούν τα αιολικά πάρκα στο ΣΗΕ, ήταν απαραίτητη η εξέταση δύο ενδεικτικών σεναρίων ενσωμάτωσης με ποσοστό 15% και 30% αντίστοιχα, συνοδευόμενα από μελέτη πραγματικών απωλειών του δικτύου. Αφού έγινε εύρεση της τοποθεσίας εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, εφαρμόστηκαν ανεξάρτητες N-1 και ταυτόχρονες διαταραχές N-1-1 στο σύστημα και κατάταξη τους με βάση το δείκτη PI_{MVA} .

Η μελέτη επιπλέον σεναρίων, με διαφορετικό ποσοστό ενσωμάτωσης θα αποτελούσε ποιοτική αναφορά για μελλοντική έρευνα. Παράλληλα, η εξέταση περισσότερων διαταραχών αποτελεί σημαντική προσθήκη για την απόκτηση και σύγκριση δεδομένων πάνω στο ΣΗΕ. Η παρούσα διπλωματική εργασία, εστίασε στην εξέταση δύο σεναρίων ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων σε τέσσερις ενδεικτικούς ζυγούς του συστήματος και εξετάσθηκαν είκοσι διαταραχές, εξαιτίας των περιορισμών λόγω όγκου συγγραφής.

Βιβλιογραφία

- [1] Prabha, K. (1994). Power system stability and control.
- [2] Safiuddin, M. (2013). Foundations of Smart Grid-History of the Electric Grid.
- [3] Γιαννακόπουλος, Γ. Β., & Βοβός, Ν. Α. (2008). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ.
- [4] Glover, J. D., & Sarma, M. S. (2012). Power system analysis and design (5th ed). Cengage Learning.
- [5] Taft, J D, & A Becker-Dippmann. (2015). Grid Architecture. US DEPARTMENT OF ENERGY.
- [6] Πολυζάκης, Α. (2017). Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (1st edition.). Power Heat Cool
- [7] Saadat, H. (1999). Power system analysis. Wcb/mcgraw-hill.
- [8] Farooq, M. K., & Kumar, S. (2013). An assessment of renewable energy potential for electricity generation in Pakistan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 240–254.
- [9] Μαλατέστας, Π. (2019). ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- [10] Ghardash Khani, N., Abedi, M., Gharehpetian, G. B., & Riahy, G. H. (2015). Analyzing the effect of wind farm to improve transmission line stability in contingencies. Indian Journal of Science and Technology, 8(11).
- [11] Shankareppagol, L. (2018). Power System Contingency Analysis Using Artificial Neural Network.
- [12] Venkateswaran, J. (2018). Contingency analysis of an IEEE 30 bus system. 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT-2018), MAY 18th & 19th 2018.
- [13] Abdulrazzaq, A. A. (2015). Contingency ranking of power systems using a performance index.
- [14] Burada, S. (2016). Contingency Analysis of Power System by using Voltage and Active Power Performance Index. 1st IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016).

- [15] Power system contingency analysis by using voltage and active power performance index. (2020). International Journal for Modern Trends in Science and Technology, 6(7), 52–60.
- [16] Mishra, V. J. (2012). Contingency analysis of power system. 2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science.
- [17] Radha Rani, K. (2011). Contingency Analysis under Deregulated Power Systems.
- [18] Adejumobi, I. A. (2017). Evaluation of Power System Contingency Using Performance Index.
- [19] Habiyasi, B. N. (2020). Contingency analysis of a 10-bus power system using power world simulator.
- [20] Gope, S. (2011). Contingency Constraint Corrective Rescheduling with the Presence of Wind Farm. Second International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System (SEISCON 2011).
- [21] Subramani, C. (2009). Line Outage Contingency Screening and Ranking for Voltage Stability Assessment. 2009 Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, INDIA December 27-29.
- [22] Alsaif, A. K. (2017). Challenges and Benefits of Integrating the Renewable Energy Technologies into the AC Power System Grid.
- [23] IRENA. (2015). Renewable Energy Integration in Power Grids.
- [24] Shahzad, U. (2015). The Need For Renewable Energy Sources.
- [25] Fathy, A. (2019). Problem of interconnecting of renewable energy to the power grid.
- [26] Ayadi , F. (2020). Impacts of Renewable Energy Resources in Smart Grid. 8th IEEE International Conference on Smart Grid, France.
- [27] Anees, A. S. (2012). Grid Integration of Renewable Energy Sources: Challenges, Issues and Possible Solutions.
- [28] Shahzad, U. (2016). A Quantitative Comparison of Wind and Solar Energy.
- [29] Durdhavale, S. R. (2016). Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System
- [30] Shafiullah, G. (2015). Analysis of Harmonics with Renewable Energy Integration into the Distribution Network.

- [31] Eroğlu, H., Cuce, E., Mert Cuce, P., Gul, F., & Iskenderoğlu, A. (2021). Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101566.
- [32] Ogunyemi, O. (χ.χ.). Power System Harmonics. <https://doi.org/10.7176/JETP>
- [33] Rangelov, Y. (χ.χ.). Overview on Harmonics in the Electrical Power System. International Scientific Symposium 'Electrical Power Engineering 2014', 11-13.09.2014, Varna, Bulgaria.
- [34] Yadav, A. (2018). Harmonic Reduction in Nonlinear Load using STATCOM.
- [35] Babu, V. (2015). Total harmonic distortion reduction for power quality improvement: A review.
- [36] Kadandani, N. B. (2015). Harmonics Mitigation and Power Quality Improvement in Grid Connected Wind Power Plant Using STATCOM. The Proceedings of Second International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Clean Energy and Green Computing, Konya, Turkey, 2015.
- [37] Arshad, M., & O'Kelly, B. (2019). Global status of wind power generation: Theory, practice, and challenges. *International Journal of Green Energy*, 16(14), 1073–1090. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1597369>
- [38] IRENA. (2019). FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects.
- [39] GWEC. (χ.χ.). GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2022.
- [40] Akpınar, E. K., & Akpınar, S. (2005). An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), 1848–1867. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.012>
- [41] Bakhsh, F. I., Munawar Shees, M., & Jamil Asghar, M. S. (2014). Performance of wound rotor induction generators with the combination of input voltage and slip power control. *Russian Electrical Engineering*, 85(6), 403–417. <https://doi.org/10.3103/S1068371214060042>
- [42] Bertsiou, M. M., Theochari, A. P., & Baltas, E. (2021). Multi-criteria analysis and Geographic Information Systems methods for wind turbine siting in a North Aegean island. *Energy Science & Engineering*, 9(1), 4–18. <https://doi.org/10.1002/ese3.809>

- [43] Ahmed, S. D., Al-Ismail, F. S. M., Shafiullah, M., Al-Sulaiman, F. A., & El-Amin, I. M. (2020). Grid integration challenges of wind energy: A review. *IEEE Access*, 8, 10857–10878.
- [44] Georgilakis, P. S. (2008). Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 852–863.
- [45] http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm