



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Χωροθέτηση Αιολικού Πάρκου και  
Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας  
Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Αντώνενας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Σεπτέμβριος 2021





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Χωροθέτηση Αιολικού Πάρκου και  
Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας  
Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

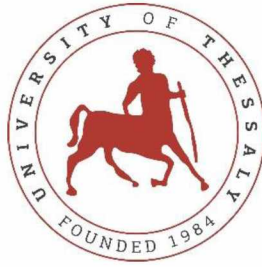
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Αντώνενας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Σεπτέμβριος 2021





**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**Wind Farm Placement and  
Power Systems Static Security Analysis**

MSc Thesis

Vasileios Antonenas

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

September 2021

v



Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

**Δημήτριος Μπαργιώτας**

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

**Ελευθέριος Τσουκαλάς**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

**Ασπασία Δασκαλοπούλου**

Επίκουρος Καθηγήτρια, 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

Βασίλειος Αντώνενας



## **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

Vasileios Antonenas



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της Διπλωματικής μου Εργασίας, Δημήτριο Μπαργιώτα, καθώς και τα μέλη της Επιτροπής Εξέτασης, Ελευθέριο Τσουκαλά και Ασπασία Δασκαλοπούλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Χωροθέτηση Αιολικού Πάρκου και  
Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας  
Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Βασίλειος Αντώνενας

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάται η Χωροθέτηση Αιολικών Πάρκων στο δίκτυο, βάσει απωλειών ισχύος, καθώς και η Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, παρουσία Αιολικών Πάρκων, τόσο από άποψη της αντίστοιχης θεωρίας, όσο και μέσω του λογισμικού Siemens PSS/E, εκτελώντας σχετικά σενάρια προσομοίωσης.

Το 1ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη των βασικών συνιστωσών που απαρτίζουν ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, δηλαδή τις σύγχρονες γεννήτριες, τις γραμμές μεταφοράς, τους μετασχηματιστές ισχύος και τα φορτία, ενώ γίνεται αναφορά και στη μελέτη μέσω του ανά μονάδα συστήματος ( $r_{pu}$ ).

Το 2ο Κεφάλαιο πραγματεύεται την Ανάλυση Ροής Φορτίου, από την κατάστροψη των αντίστοιχων εξισώσεων, μέχρι την επίλυσή τους με τις αριθμητικές μεθόδους Gauss – Seidel και Newton – Raphson, με επεξήγηση των αντίστοιχων αλγορίθμων.

Το 3ο Κεφάλαιο αφορά την Αξιοπιστία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, των σχετικών με αυτήν εννοιών της Επάρκειας και της Ασφάλειας, καθώς και των δεικτών που αξιοποιούν οι αντίστοιχες μελέτες. Αναφορικά με την Ασφάλεια, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην Στατική Ασφάλεια ή Ανάλυση Διαταραχών, καθώς στους δείκτες που αυτή αξιοποιεί για την ιεράρχηση των διαταραχών.

Το 4ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στις Ανεμογεννήτριες. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι βασικές τους συνιστώσες, οι τύποι γεννητριών, οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, τα

συστήματα ελέγχου, καθώς και τα χαρακτηριστικά των 4 βασικών μοντέλων ανεμογεννητριών, που χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχες μελέτες και στα λογισμικά προσομοίωσης.

Το 5ο Κεφάλαιο πραγματεύεται τις τεχνικές προδιαγραφές σύνδεσης των αιολικών πάρκων με το δίκτυο και τη συμπεριφορά των 4 βασικών μοντέλων. Εν συνεχεία, επικεντρώνεται στη μελέτη της μόνιμης κατάστασης ενός συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου, με έμφαση στην επιλογή σημείου σύνδεσης στο δίκτυο βάσει απωλειών ισχύος και στην ανάλυση στατικής ασφάλειας.

Στο 6ο Κεφάλαιο χρησιμοποιείται το λογισμικό Siemens PSS/E για την επιλογή ζυγού σύνδεσης, βάσει των μικρότερων απωλειών ισχύος, ενός αιολικού πάρκου με το σύστημα 9 ζυγών του IEEE. Η μελέτη περιλαμβάνει δύο σενάρια, με ισχύ αιολικού πάρκου 15% και 30% της πραγματικής ζήτησης φορτίου του συστήματος.

Τέλος, στο 7ο Κεφάλαιο, πραγματοποιείται, μέσω του λογισμικού Siemens PSS/E, ανάλυση στατικής ασφάλειας για τα τελικά συστήματα που προκύπτουν των δύο σεναρίων του 6ου Κεφάλαιο. Μέσω της ανάλυσης διαταραχών καταγράφονται οι μεταβολές στις τάσεις των ζυγών και οι φορτίσεις των στοιχείων του μελετώμενου συστήματος, που προκαλούνται εξαιτίας σεναρίων N-1, εντοπίζοντας έτσι, όχι μόνο τις δυσμενέστερες διαταραχές, αλλά και τον αντίκτυπο της ενσωμάτωσης του αιολικού πάρκου στο σύστημα.

#### **Λέξεις-κλειδιά:**

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανάλυση Ροής Φορτίου, Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας, Ανάλυση Διαταραχών, Ανεμογεννήτριες, Αιολικά Πάρκα, Απώλειες Ισχύος, Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης Αιολικού Πάρκου, Siemens PSS/E.



# Wind Farm Placement and Power Systems Static Security Analysis

Vasileios Antonenas

## ABSTRACT

In this Diploma Thesis the placement of Wind Farms in the power system, based on power losses, as well as Power System Static Security Analysis in the presence of Wind Farms are examined, both in terms of theory and simulation, using Siemens PSS/E software to perform simulation scenarios.

The 1st Chapter focuses on the study of the basic components of a Power System, namely synchronous generators, power lines and transformers and loads. A reference to per unit study is also made.

The 2nd Chapter deals with Power Flow Analysis, from the development of the corresponding equations, to their solution, using either Gauss – Seidel or Newton – Raphson numerical methods, explaining the corresponding algorithms.

The 3rd Chapter deals with Power Systems Reliability and its related concepts of Adequacy and Security, as well as the indicators used by the respective studies. Regarding Security, special emphasis is given to Static Security Analysis or Contingency Analysis, as well as to its indicators, that used to rank the contingencies.

The 4th Chapter focuses on Wind Turbines and more specifically on their basic components, generator types, power electronics circuits, control systems, as well as the characteristics of the 4 generic models of wind turbine generators, used in respective studies and in simulation software.

The 5th Chapter deals with the technical specifications of the integration of wind farms in the power system and the behavior of the 4 generic wind turbine generators models.

Subsequently, the Chapter focuses on steady state system studies in the presence of a wind farm, with emphasis in the selection of the integration bus, based on power losses, and static security analysis.

In 6th Chapter, Siemens PSS/E software is used for the selection of the connection bus of a wind farm to the IEEE 9 bus system, based on the minimum power losses. The corresponding study includes two scenarios, one with a wind farm with a power of 15% of real load demand, and one of 30% respectively.

Finally, in the 7th Chapter, static security analysis for the two final systems resulting from the two scenarios of the 6th Chapter is performed by Siemens PSS/E software. Through contingency analysis, changes in bus voltages values and the loads of system components, caused by N-1 scenarios, are recorded, thus identifying not only the most unfavorable disturbances, but also the impact of the wind farm integration in the power system.

**Keywords:**

Power Systems, Power Flow Analysis, Power Systems Reliability, Static Security Analysis, Contingency Analysis, Wind Turbines, Wind Farms, Power Losses, Selection of Wind Farm Connection Bus, Siemens PSS/E.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|  |      |
|--|------|
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....   | xiii |
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....  | xv   |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | xvii |
| <b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....  | xix  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....  | 1    |
| <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....                     | 1    |
| <b>1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας</b> .....                        | 1    |
| <b>1.2 Σύγχρονες Γεννήτριες</b> .....  | 4    |
| 1.2.1 Περιγραφή σύγχρονης γεννήτριας.....                                    | 4    |
| 1.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα, πραγματική & άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας..... | 7    |
| 1.2.3 Συγχρονισμός γεννήτριας στο δίκτυο.....                                | 10   |
| 1.2.4 Ικανότητα φόρτισης γεννητριών.....                                     | 11   |
| 1.2.5 Μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας.....                       | 12   |
| <b>1.3 Γραμμές Μεταφοράς</b> .....   | 15   |
| 1.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς.....                        | 15   |
| 1.3.2 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς.....                             | 17   |
| 1.3.3 Ικανότητα φόρτισης γραμμών μεταφοράς.....                              | 19   |
| <b>1.4 Μετασχηματιστές Ισχύος</b> .....                                      | 20   |
| 1.4.1 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών ισχύος.....                             | 20   |
| 1.4.2 Ισοδύναμα κυκλώματα μετασχηματιστών.....                               | 23   |
| 1.4.3 Μετασχηματιστές ως συσκευές ελέγχου.....                               | 24   |
| <b>1.5 Φορτία</b> .....  | 26   |
| <b>1.6 Ανά Μονάδα σύστημα (Per Unit – PU)</b> .....                          | 27   |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....  | 31   |

|  |    |
|--|----|
| <b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ</b> .....                                  | 31 |
| <b>2.1 Εισαγωγή</b> .....  | 31 |
| <b>2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου</b> .....                            | 32 |
| 2.2.1 Κατάσπρωση εξισώσεων ροής φορτίου .....                      | 32 |
| 2.2.2 Χαρακτηριστικά εξισώσεων ροής φορτίου .....                  | 35 |
| 2.2.3 Κατάταξη μεταβλητών συστήματος .....                         | 36 |
| <b>2.3 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου</b> .....                    | 36 |
| 2.3.1 Μέθοδος Gauss – Seidel (G – S).....                          | 38 |
| 2.3.2 Μέθοδος Newton – Raphson (N – R).....                        | 40 |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....  | 43 |
| <b>ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....            | 43 |
| <b>3.1 Εισαγωγή</b> .....  | 43 |
| <b>3.2 Επάρκεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας</b> .....          | 44 |
| 3.2.1 Εισαγωγή .....   | 44 |
| 3.2.2 Μελέτη Επιπέδου Ιεραρχίας 1 .....                            | 46 |
| 3.2.3 Μελέτη Επιπέδου Ιεραρχίας 2 .....                            | 47 |
| 3.2.4 Μελέτη Επιπέδου Ιεραρχίας 3 .....                            | 48 |
| 3.2.5 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδων Ιεραρχίας .....                   | 49 |
| 3.2.6 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 1 .....                 | 49 |
| 3.2.7 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 2 .....                 | 51 |
| 3.2.8 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 3 .....                 | 54 |
| <b>3.3 Ασφάλεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας</b> .....          | 57 |
| 3.3.1 Εισαγωγή .....   | 57 |
| 3.3.2 Καταστάσεις Λειτουργίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας..... | 58 |
| 3.3.3 Είδη Διαταραχών και Επιπτώσεις .....                         | 60 |
| 3.3.4 Στατική Ανάλυση Ασφάλειας .....                              | 61 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.5 Δείκτες Ιεράρχησης Διαταραχών .....  | 62        |
| 3.3.6 Αλγόριθμος Ανάλυσης Διαταραχών μέσω της μεθόδου Newton – Raphson ....                  | 65        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>  | <b>67</b> |
| <b>ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....</b>  | <b>67</b> |
| 4.1 Εισαγωγή .....   | 67        |
| 4.2 Βασικές συνιστώσες ανεμογεννήτριας.....  | 68        |
| 4.3 Γεννήτρια .....  | 70        |
| 4.3.1 Ασύγχρονες Γεννήτριες .....  | 70        |
| 4.3.2 Σύγχρονες Γεννήτριες.....  | 74        |
| 4.4 Διατάξεις Ηλεκτρονικών Ισχύος.....   | 76        |
| 4.4.1 Ομαλός Εκκινήτης .....   | 76        |
| 4.4.2 Συστοιχίες Πυκνωτών.....   | 77        |
| 4.4.3 Μετατροπέας Συχνότητας .....   | 77        |
| 4.5 Συστήματα Ελέγχου .....  | 78        |
| 4.5.1 Έλεγχος Ισχύος .....   | 79        |
| 4.5.2 Έλεγχος Ταχύτητας Δρομέα Γεννήτριας.....   | 80        |
| 4.6 Μοντέλα Ανεμογεννητριών.....   | 82        |
| 4.6.1 Γενικά περί Μοντέλων Ανεμογεννητριών .....   | 82        |
| 4.6.2 Τύπος 1 – Επαγωγική Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.....                    | 84        |
| 4.6.3 Τύπος 2 – Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα με μεταβλητή αντίσταση δρομέα ..... | 86        |
| 4.6.4 Τύπος 3 – Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας .....                                 | 88        |
| 4.6.5 Τύπος 4 – Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος .....                                   | 90        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>  | <b>93</b> |
| <b>ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....</b>  | <b>93</b> |
| 5.1 Εισαγωγή .....   | 93        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>5.2 Τεχνικές Προδιαγραφές Ενσωμάτωσης Αιολικών Πάρκων στο Δίκτυο</b> .....      | 95  |
| 5.2.1 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας έπειτα από σφάλμα.....                     | 96  |
| 5.2.2 Έλεγχος Πραγματικής Ισχύος – Συχνότητας.....                                 | 97  |
| 5.2.3 Έλεγχος Άεργου Ισχύος – Τάσης .....  | 98  |
| <b>5.3 Συμπεριφορά Μοντέλων Ανεμογεννητριών</b> .....                              | 100 |
| 5.3.1 Έλεγχος Τάσης & Διαχείριση Άεργου Ισχύος .....                               | 101 |
| 5.3.2 Απόκριση Συχνότητας & Διαχείριση Πραγματικής Ισχύος .....                    | 102 |
| 5.3.3 Δυναμική Συμπεριφορά σε Σφάλματα .....                                       | 103 |
| <b>5.4 Μελέτη Μόνιμης Κατάστασης παρουσία Αιολικού Πάρκου</b> .....                | 104 |
| 5.4.1 Αιολικά Πάρκα στη Μόνιμη Κατάσταση.....                                      | 104 |
| 5.4.2 Μοντέλα Ανεμογεννητριών στη Μόνιμη Κατάσταση στο Siemens PSS/E .....         | 105 |
| 5.4.3 Επιλογή Σημείου Σύνδεσης στο Δίκτυο βάσει Απωλειών .....                     | 107 |
| 5.4.4 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας παρουσία Αιολικού Πάρκου .....                    | 109 |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> .....  | 111 |
| <b>ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΥΓΟΥ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΒΑΣΕΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ</b>       |     |
| <b>ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIEMENS PSS/E</b> .....  | 111 |
| <b>6.1 Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Η/Υ</b> .....              | 111 |
| <b>6.2 Σύστημα 9 ζυγών IEEE</b> .....  | 112 |
| 6.2.1 Στοιχεία Συστήματος .....  | 112 |
| 6.2.2: Ανάλυση Ροής Φορτίου .....  | 115 |
| <b>6.3 Χαρακτηριστικά Αιολικού Πάρκου</b> .....                                    | 118 |
| <b>6.4 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης Αιολικού Πάρκου Ισχύος 15% της Ζήτησης Φορτίου..</b> | 119 |
| 6.4.1 Περιγραφή Προβλήματος .....  | 119 |
| 6.4.2 Σύνδεση στον Ζυγό 4.....   | 120 |
| 6.4.3 Σύνδεση στον Ζυγό 5.....   | 123 |
| 6.4.4 Σύνδεση στον Ζυγό 6.....   | 126 |

|  |            |
|--|------------|
| 6.4.5 Σύνδεση στον Ζυγό 7.....   | 129        |
| 6.4.6 Σύνδεση στον Ζυγό 8.....   | 132        |
| 6.4.7 Σύνδεση στον Ζυγό 9.....   | 135        |
| 6.4.8 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης .....   | 138        |
| <b>6.5 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης Αιολικού Πάρκου Ισχύος 30% της Ζήτησης Φορτίου..</b> | <b>140</b> |
| 6.5.1 Περιγραφή Προβλήματος .....  | 140        |
| 6.5.2 Σύνδεση στον Ζυγό 4.....   | 141        |
| 6.5.3 Σύνδεση στον Ζυγό 5.....   | 144        |
| 6.5.4 Σύνδεση στον Ζυγό 6.....   | 147        |
| 6.5.5 Σύνδεση στον Ζυγό 7.....   | 150        |
| 6.5.6 Σύνδεση στον Ζυγό 8.....   | 153        |
| 6.5.7 Σύνδεση στον Ζυγό 9.....   | 156        |
| 6.5.8 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης .....   | 159        |
| <b>6.6 Σχολιασμοί και Συμπεράσματα.....</b>  | <b>161</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....</b>  | <b>165</b> |
| <b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΗΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ</b>            |            |
| <b>ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIEMENS PSS/E.....</b>   | <b>165</b> |
| <b>7.1 Περιγραφή Προβλήματος.....</b>  | <b>165</b> |
| <b>7.2 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Αρχικού Συστήματος .....</b>                     | <b>166</b> |
| 7.2.1 Αρχικό σύστημα χωρίς διαταραχή.....  | 166        |
| 7.2.2 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5 .....                                       | 169        |
| 7.2.3 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6.....  | 172        |
| 7.2.4 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7 .....                                       | 175        |
| 7.2.5 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9.....  | 178        |
| 7.2.6 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8.....  | 181        |
| 7.2.7 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9.....  | 184        |

|   |            |
|---|------------|
| 7.2.8 Αφαίρεση Γεννήτριας G2 .....  | 187        |
| 7.2.9 Αφαίρεση Γεννήτριας G3 .....  | 190        |
| 7.2.10 Αξιολόγηση Διαταραχών – Εύρεση Χειρότερης Περίπτωσης.....  | 193        |
| <b>7.3 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστήματος παρουσία Αιολικού Πάρκου, ισχύος<br/>15% της ζήτησης, συνδεδεμένου στον Ζυγό 5 .....</b> | <b>202</b> |
| 7.3.1 Σύστημα χωρίς διαταραχή .....   | 202        |
| 7.3.2 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5 .....  | 206        |
| 7.3.3 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6 .....  | 210        |
| 7.3.4 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7 .....  | 213        |
| 7.3.5 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9 .....  | 216        |
| 7.3.6 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8 .....  | 219        |
| 7.3.7 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9 .....  | 222        |
| 7.3.8 Αφαίρεση Γεννήτριας G2 .....  | 225        |
| 7.3.9 Αφαίρεση Γεννήτριας G3 .....  | 228        |
| 7.3.10 Αξιολόγηση Διαταραχών – Εύρεση Χειρότερης Περίπτωσης.....  | 231        |
| <b>7.4 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστήματος παρουσία Αιολικού Πάρκου, ισχύος<br/>30% της ζήτησης, συνδεδεμένου στον Ζυγό 6 .....</b> | <b>241</b> |
| 7.4.1 Σύστημα χωρίς διαταραχή .....   | 241        |
| 7.4.2 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5 .....  | 245        |
| 7.4.3 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6 .....  | 248        |
| 7.4.4 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7 .....  | 251        |
| 7.4.5 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9 .....  | 254        |
| 7.4.6 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8 .....  | 257        |
| 7.4.7 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9 .....  | 260        |
| 7.4.8 Αφαίρεση Γεννήτριας G2 .....  | 263        |
| 7.4.9 Αξιολόγηση Διαταραχών – Εύρεση Χειρότερης Περίπτωσης.....   | 266        |



|   |            |
|---|------------|
| <b>7.5 Συμπεράσματα Ανάλυσης Διαταραχών .....</b> | <b>276</b> |
| 7.5.1 Μεταβολές Τάσεων Ζυγών .....                | 276        |
| 7.5.2 Φορτίσεις Στοιχείων.....                    | 279        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 .....</b>                           | <b>281</b> |
| <b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>                         | <b>281</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>                          | <b>283</b> |



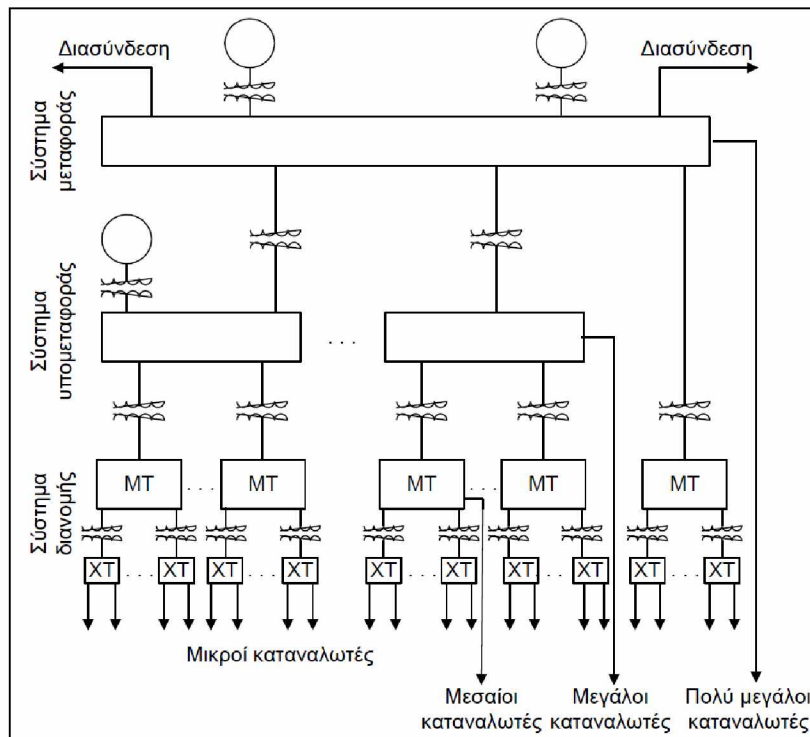
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Σκοπός των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι η ασφαλής, αξιόπιστη, φιλική στο περιβάλλον και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ισχύος στα φορτία των καταναλωτών, με τη χαμηλότερη, το δυνατόν, τιμή.

Οι τρεις βασικές συνιστώσες που απαρτίζουν ένα ΣΗΕ, είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η τυπική διάρθρωση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, από την Παραγωγή, μέχρι τους Καταναλωτές.



Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι διακρίνονται σε Ατμοηλεκτρικούς (ΑΗΣ), Υδροηλεκτρικούς (ΥΗΣ) και Πυρηνικούς

σταθμούς (ΠΣ), ανάλογα με τη μορφή της πρωτογενούς ενέργειας που αξιοποιούν, μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική. Στους Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς, η χημική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), μετατρέπεται, μέσω της καύσης, σε θερμική, που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νερού, και κατ' επέκταση την παραγωγή ατμού σε έναν λέβητα. Ο ατμός, στη συνέχεια, περιστρέφει έναν ατμοστρόβιλο, στον άξονα του οποίου είναι συνδεδεμένη μια γεννήτρια. Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί αξιοποιούν τη δυναμική ενέργεια του νερού που πέφτει από μεγάλο ύψος, για την κίνηση υδροστροβίλων, συνδεδεμένων με γεννήτριες. Τέλος, στους Πυρηνικούς Σταθμούς, η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του ατμού, παρέχεται, μέσω πυρηνικών αντιδράσεων σχάσης, από έναν ελεγχόμενο πυρηνικό αντιδραστήρα. Τα τελευταία χρόνια, αξιοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αιολική και ηλιακή ενέργεια, καθώς και η γεωθερμία, με το ποσοστό διεξόδυσής τους, όμως, να μην είναι αντίστοιχο των μεγάλων μονάδων παραγωγής που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες του σύγχρονου κόσμου, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη για τον περιορισμό των αερίων ρύπων, έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση και αξιοποίηση πηγών ενέργειας πιο φιλικών στο περιβάλλον, με ταυτόχρονη την προσπάθεια για απεξάρτηση από ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται στους σταθμούς, μεταφέρεται στη συνέχεια, μέσω του Συστήματος Μεταφοράς, στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης. Το Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, καθώς και τους υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού. Οι υποσταθμοί ανύψωσης βρίσκονται κοντά στις μονάδες παραγωγής και χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης, από τα 20kV – 30kV στους ακροδέκτες των γεννητριών, στα επίπεδα τάσης του συστήματος μεταφοράς. Οι τυποποιημένες τάσεις που χρησιμοποιούνται στα ανά τον κόσμο συστήματα μεταφοράς διαμορφώνονται στα 115, 132, 138, 150, 161, 230 και 275kV για την υψηλή τάση, και στα 345, 400, 500 και 765kV για την υπερυψηλή τάση. Η υψηλότερη τάση μεταφοράς που έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ, ήταν τα 1150kV στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Τα τυπικά επίπεδα τάσης για το ελληνικό σύστημα μεταφοράς είναι τα 150kV και τα 400kV. Οι γραμμές που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικές εναλλασσόμενου ρεύματος, κατά πλειοψηφία εναέριες και σπανιότερα υπόγειες, ενώ σε ειδικές εφαρμογές, όπως στα υποθαλάσσια καλώδια, δύναται να χρησιμοποιηθεί και Συνεχές Ρεύμα Υψηλής Τάσης (HVDC). Η ανάπτυξη του δικτύου

μεταφοράς έχει, κυρίως, δομή βρόχου, παρέχοντάς του έτσι τη δυνατότητα να διοχετεύει την ηλεκτρική ενέργεια σε έναν μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων. Ανάμεσα στα εθνικά συστήματα μεταφοράς των κρατών αναπτύσσονται διασυνδεδετικές γραμμές, δημιουργώντας, έτσι, ένα ενιαίο δίκτυο, η λειτουργία του οποίου ορίζεται από αντίστοιχες διακρατικές συμφωνίες. Όλα τα παραπάνω προσδίδουν στο εκάστοτε σύστημα μεταφοράς αξιοπιστία, στιβαρότητα και αντοχή σε τυχόν διαταραχές. Μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές δύνανται να συνδεθούν απευθείας με το δίκτυο υψηλής τάσης, μέσω κατάλληλων υποσταθμών. Οι γραμμές μεταφοράς καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού στα κέντρα μεγάλης κατανάλωσης, όπως οι πόλεις και οι βιομηχανίες, όπου η τάση υποβιβάζεται στα επίπεδα του δικτύου διανομής, συνήθως στα 15kV – 20kV και σπανιότερα στα 6kV. Ανάλογα με τη βιβλιογραφία, οι χαμηλότερες τάσεις του συστήματος μεταφοράς, 23kV – 150 kV, διαμορφώνουν το σύστημα υπομεταφοράς, το οποίο χαρακτηρίζεται από περισσότερες γραμμές, μικρότερου μήκους και ισχύος. Ο ρόλος του είναι αντίστοιχος με αυτόν του συστήματος διανομής, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, με τη διαφορά ότι καλύπτει μεγαλύτερες γεωγραφικά περιοχές, σε υψηλότερες τιμές τάσης και ισχύος, και δύναται να αναπτυχθεί και ακτινικά. Σε πολλές περιπτώσεις ΣΗΕ, η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και υπομεταφοράς, δεν είναι πάντοτε εμφανής.

Συνεχίζοντας, το επόμενο και τελευταίο στάδιο της πορείας της ηλεκτρικής ενέργειας, από την παραγωγή προς τους καταναλωτές, είναι το Σύστημα Διανομής. Παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς υποβιβασμού Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης και στη συνέχεια τη διανέμει προς τους τελικούς καταναλωτές. Το σύστημα διανομής χωρίζεται σε δύο επίπεδα τάσεων, στην Πρωτεύουσα Διανομή (Μέση Τάση, ΜΤ) και στη Δευτερεύουσα Διανομή (Χαμηλή Τάση, ΧΤ). Στη Μέση Τάση συνδέονται παροχές μεγάλης ισχύος, άνω των 100kW, όπως βιοτεχνίες και βιομηχανίες, ενώ η Χαμηλή Τάση τροφοδοτεί μικρότερους καταναλωτές, κυρίως οικιακούς, με μονοφασικές ή τριφασικές παροχές. Στο ελληνικό ΣΗΕ, η Μέση Τάση βρίσκεται στα 20kV (παλιότερα στα 15kV), και η Χαμηλή Τάση στα 400V ή στα 230V στη μία φάση. Τα δίκτυα διανομής σχεδιάζονται και αναπτύσσονται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, ακολουθώντας ακτινική-δενδροειδή ή βροχοειδή μορφή. Στα αστικά κέντρα, για παράδειγμα, αναπτύσσονται κυρίως υπόγεια δίκτυα, στην ύπαιθρο εναέρια, ενώ σε ημιαστικές περιοχές αναπτύσσονται ως συνδυασμός εναερίων και υπόγειων δικτύων. Το σύστημα διανομής χαρακτηρίζεται από

μεγάλη πολυπλοκότητα, ως προς τη λειτουργία, τον έλεγχο και τη συντήρησή του, ενώ, πλέον, δύνανται να συνδεθούν σε αυτό, εκτός από φορτία καταναλωτών, και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, που αξιοποιούν ανανεώσιμες ή άλλες πηγές ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, σκοπός των ΣΗΕ είναι η αδιάλειπτη και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ισχύος στα φορτία των καταναλωτών. Είναι αρκετά σημαντικό, κάθε χρονική στιγμή, όχι μόνο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να είναι ίση με το φορτίο, αλλά και να έχει εξασφαλιστεί επαρκής εφεδρεία για την κάλυψη τυχόν διαταραχών. Η δυσκολία στην εξασφάλιση της παραπάνω ανάγκης έγκειται στο γεγονός ότι, η μεταβολή του φορτίου των καταναλωτών είναι συνεχής. Το ημερήσιο φορτίο ενός ΣΗΕ, μπορεί να χωριστεί σε τρεις συνιστώσες: το φορτίο βάσης, το μεταβαλλόμενο φορτίο και το φορτίο αιχμής. Το φορτίο βάσης είναι μια σταθερή συνιστώσα, που διαρκεί όλη την ημέρα, το οποίο και καλύπτεται από μεγάλες μονάδες παραγωγής, με μικρό κόστος λειτουργίας, γνωστές και ως μονάδες βάσης (π.χ. λιγνιτικές, πυρηνικές). Το μεταβαλλόμενο φορτίο αποτελεί μια συνιστώσα, οι τιμές της οποίας είναι συνάρτηση του χρονικού διαστήματος της ημέρας, την εποχή, τις καιρικές συνθήκες, αλλά και από άλλους παράγοντες. Τέλος, το φορτίο αιχμής, που αποτελεί μια μικρή σχετικά συνιστώσα του ημερήσιου φορτίου, διαρκεί ένα μικρό διάστημα της ημέρας και καλύπτεται από μονάδες παραγωγής με ταχεία αντίδραση στην ανάληψη φορτίου, αλλά με μεγάλο κόστος λειτουργίας. Πρέπει να επισημανθεί ότι, οι ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών, στο παρόν αλλά και μελλοντικά, έχουν μεγάλη σημασία, όχι μόνο για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, αλλά και για τις μελλοντικές προοπτικές αναβάθμισης και επέκτασής του. [1, 2, 3]

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, θα αναλυθούν περαιτέρω οι τρεις βασικές συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας: η σύγχρονη γεννήτρια, ο τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος και η γραμμή μεταφοράς.

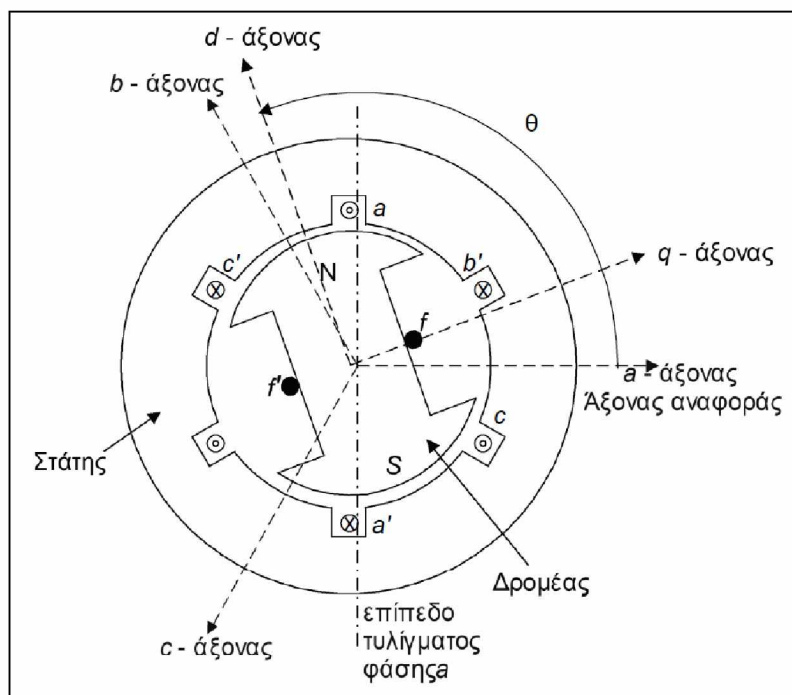
## **1.2 Σύγχρονες Γεννήτριες**

### **1.2.1 Περιγραφή σύγχρονης γεννήτριας**

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι, σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα, σύγχρονες γεννήτριες, καθώς αποτελούν ένα αποδοτικό και αξιόπιστο μέσο για τη μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε

ηλεκτρική. Το εύρος της ονομαστικής ισχύος των γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα σύγχρονα ΣΗΕ κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες, μέχρι και πάνω από χίλια MVA. Ο όρος «σύγχρονη» απορρέει από το γεγονός ότι, στη μόνιμη κατάσταση, η μηχανή λειτουργεί υπό σταθερή ταχύτητα και συχνότητα.

Μια σύγχρονη γεννήτρια αποτελείται από δύο βασικά μέρη: τον στάτη, που είναι ακίνητος, και τον δρομέα, που αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής. Ο δρομέας δύναται να περιστραφεί από έναν στρόβιλο ατμού, ύδατος ή αερίου. Η σχηματική παράσταση τομής μιας σύγχρονης γεννήτριας παρατίθεται στη συνέχεια:



Σχήμα 1.2: Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης γεννήτριας

Ο στάτης είναι μια κοίλη κυλινδρική κατασκευή, φτιαγμένη από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων. Στην εσωτερική του επιφάνεια, μέσα σε αυλάκια, τοποθετούνται τα τρία τυλίγματα του στάτη, ένα για κάθε φάση. Τα τρία αυτά τυλίγματα (a-a', b-b', c-c') διευθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους στο χώρο κατά 120°. Για κάθε τύλιγμα φάσης του στάτη, αντιστοιχεί ένας άξονας, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο του αντίστοιχου τυλίγματος και είναι ακίνητος. Ως άξονας αναφοράς, θεωρείται πάντα ο άξονας του τυλίγματος a.

Ο δρομέας, που είναι και αυτός κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό, τοποθετείται στον άξονα της γεννήτριας και περιστρέφεται εντός του στάτη. Το τύλιγμά του ονομάζεται Τύλιγμα Πεδίου ή Διέγερσης και σκοπός του είναι η παραγωγή ενός ισχυρού

μαγνητικού πεδίου. Τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Η διεγέρτρια δύναται να είναι μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, τοποθετημένη στον ίδιο άξονα με αυτόν της σύγχρονης γεννήτριας ή μια ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος, συνδεδεμένη στο τύλιγμα πεδίου μέσω ψηκτρών. Το τύλιγμα πεδίου των μεγάλων γεννητριών τροφοδοτείται, συνήθως, από πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω κατάλληλης ανορθωτικής διάταξης. Λόγω της παρουσίας του τυλίγματος αυτού, δημιουργούνται στο δρομέα δύο μαγνητικοί πόλοι N και S (Σχήμα 1.2). Ο άξονας των μαγνητικών πόλων ονομάζεται ευθύς άξονας (d – άξονας), ενώ ο κάθετος ως προς αυτόν εγκάρσιος άξονας (q – άξονας). Η γωνία  $\theta$  καθορίζει κάθε στιγμή τη θέση του d – άξονα του δρομέα ως προς τον ακίνητο άξονα αναφοράς του τυλίγματος  $a$  του στάτη.

Κατασκευαστικά, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι για τους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών: ο κυλινδρικός δρομέας, που είναι ουσιαστικά δρομέας με δύο πόλους, και ο δρομέας με έκτυπους πόλους. Γεννήτριες δρομέα με έκτυπους πόλους χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς οι υδροστρόβιλοι λειτουργούν αποδοτικότερα σε χαμηλές ταχύτητες, με τον δρομέα να περιστρέφεται ως προς κατακόρυφο άξονα. Οι γεννήτριες με κυλινδρικό δρομέα χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς οι ατμοστρόβιλοι λειτουργούν αποδοτικότερα σε υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση αυτή, ο δρομέας περιστρέφεται ως προς οριζόντιο άξονα. Οι γεννήτριες δρομέα με έκτυπους πόλους, για τη μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων του δρομέα, που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων (π.χ. εκκίνηση, μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας), διαθέτουν τυλίγματα απόσβεσης από βραχυκυκλωμένες ράβδους χαλκού, τοποθετημένες κατά μήκος της επιφάνειας των πόλων του δρομέα.

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στο νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Ο σχεδιασμός στάτη και δρομέα είναι τέτοιος ώστε, για σταθερή ταχύτητα του δρομέα, να παράγεται τάση ημιτονοειδούς μορφής σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη. Οι τάσεις αυτές χαρακτηρίζονται από ίδιο μέτρο και συχνότητα, και παρουσιάζουν φασική διαφορά  $120^\circ$  η μία απ' την άλλη, σχηματίζοντας έτσι μια τριφασική πηγή.

Η σχέση για τον υπολογισμό της συχνότητας της παραγόμενης ημιτονοειδούς τάσης της γεννήτριας είναι η ακόλουθη:

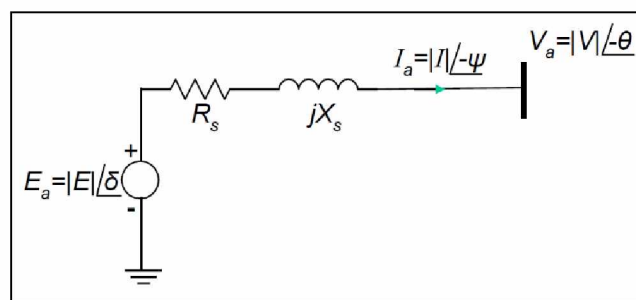


$$f = \frac{P}{2} \frac{N}{60} = \frac{P}{2} f_m \text{ Hz} \quad (1.1)$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων και N η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές/min, ενώ ως  $f_m = N/60$  ορίζεται η μηχανική συχνότητα σε στροφές/sec. Για παράδειγμα, για την παραγωγή τάσης συχνότητας 50Hz, μια γεννήτρια δύο πόλων περιστρέφεται στις 3000 στροφές/min, ενώ μια γεννήτρια τεσσάρων πόλων στις 1500 στροφές/min. [1, 2]

### 1.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα, πραγματική & άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας

Μελετώντας τη σύγχρονη γεννήτρια στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και υπό συμμετρική φόρτιση, διαπιστώνεται ότι παρουσιάζει τριφασική συμμετρία. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη μελέτη της ανά φάση, χρησιμοποιώντας το μονοφασικό ισοδύναμό της. Για μια σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση, το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα είναι το ακόλουθο (Σχήμα 1.3):



Σχήμα 1.3: Ανά Φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

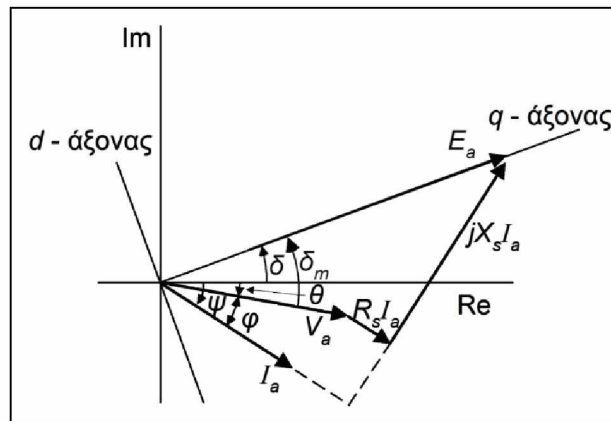
Αποτελείται από μια πηγή τάσης  $E_a$ , συνδεδεμένη σε σειρά μια αντίσταση ( $R_s$ ) και μια αντίδραση ( $X_s$ ). Η αντίσταση  $R_s$  αντιστοιχεί στην ανά φάση αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη, ενώ η αντίδραση  $X_s$  στη σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη ροή που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη. Το μέτρο  $|E|$  της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ)  $E_a$  της γεννήτριας, είναι ανάλογο του ρεύματος διέγερσης του δρομέα, και αντιπροσωπεύει τη φασική τάση ανοικτού κυκλώματος, δηλαδή την τάση των τυλιγμάτων του στάτη, όταν η γεννήτρια λειτουργεί χωρίς φορτίο. Η ΗΕΔ  $E_a$  και η φασική τάση ακροδεκτών  $V_a$  συνδέονται με τη σχέση:

$$E_a = V_a + R_s I_a + jX_s I_a \quad (1.2)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (Σχήμα 1.4), μπορεί να σχεδιαστεί αξιοποιώντας την παραπάνω σχέση. Η γωνία  $\delta_m$  που σημειώνεται στο διάγραμμα και υπολογίζεται ως:

$$\delta_m = \angle E_a - \angle V_a = \delta + \theta \quad (1.3)$$

ονομάζεται γωνία ισχύος και είναι θετική όταν το  $E_a$  προηγείται του  $V_a$ . Όταν μια σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, η γωνία ισχύος είναι θετική ( $\delta_m > 0$ ), ενώ όταν λειτουργεί ως κινητήρας λαμβάνει αρνητική τιμή ( $\delta_m < 0$ ).



Σχήμα 1.4: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Σε μια πραγματική σύγχρονη γεννήτρια ισχύει γενικότερα  $R_s \ll X_s$ , οπότε για την απλοποίηση των υπολογισμών, μπορεί να θεωρηθεί ότι  $R_s = 0$ .

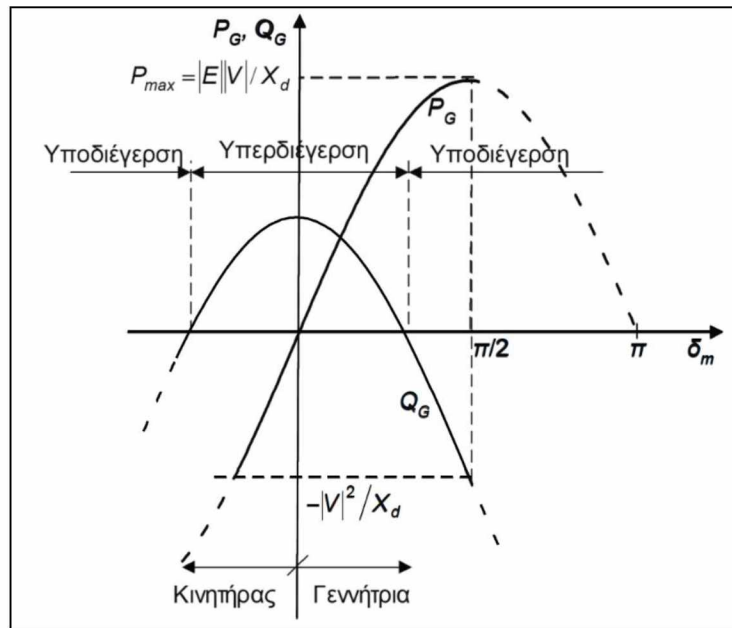
Οι σχέσεις για τον υπολογισμό των τιμών της πραγματικής και της άεργου ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα, είναι οι ακόλουθες:

$$P_G = \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta_m \quad (1.4)$$

$$Q_G = \frac{|V| (|E| \cos \delta_m - |V|)}{X_s} \quad (1.5)$$

Μια γεννήτρια είναι συνήθως συνδεδεμένη σε ένα «άπειρο δίκτυο», δηλαδή σε ένα δίκτυο μεγάλου μεγέθους. Σε αυτήν την περίπτωση, το μέτρο της τάσης  $|V|$  είναι σταθερό. Αν, επίσης, θεωρηθεί ότι το ρεύμα διέγερσης είναι σταθερό, τότε και η τιμή της ΗΕΔ  $|E|$  της γεννήτριας είναι και αυτή σταθερή. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συνθήκες, και από τις δύο προαναφερθείσες σχέσεις για την πραγματική και την άεργο ισχύ, προκύπτει ότι οι τιμές τους είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας ισχύος  $\delta_m$ . Για μια γεννήτρια

κυλινδρικού δρομέα, το διάγραμμα πραγματικής και άεργου ισχύος συναρτήσει της γωνίας ισχύος  $\delta_m$ , απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5:



Σχήμα 1.5: Πραγματική & Άεργος Ισχύς μηχανής κυλινδρικού δρομέα συναρτήσει της γωνίας ισχύος  $\delta_m$

Από το παραπάνω διάγραμμα και τη σχέση για την  $P_G$ , προκύπτει ότι αυτή μεγιστοποιείται για  $\delta_m = 90^\circ$ , δηλαδή:

$$P_{max} = \frac{|E||V|}{X_s} \quad (1.6)$$

Αύξηση της παραγόμενης πραγματικής ισχύος πέραν της τιμής της μέγιστης τιμής  $P_{max}$ , που αποτελεί όριο ευστάθειας, οδηγεί στον αποσυγχρονισμό της γεννήτριας από το δίκτυο. Γενικότερα, οι γεννήτριες λειτουργούν σε μικρές γωνίες ισχύος, κοντά στις  $20^\circ$ .

Παρατηρώντας τη σχέση υπολογισμού της άεργου ισχύος της γεννήτριας  $Q_G$ , γίνεται φανερό ότι η τιμή της εξαρτάται από την τιμή του αριθμητή, δηλαδή της ποσότητας  $|E| \cos \delta_m - |V|$ . Όταν η ποσότητα αυτή γίνει θετική, δηλαδή  $|E| \cos \delta_m > |V|$ , η γεννήτρια παράγει άεργο ισχύ ( $Q_G > 0$ ). Στην περίπτωση αυτή, βρίσκεται σε υπερδιέγερση και αντιμετωπίζεται από το δίκτυο ως εγκάρσιος πυκνωτής. Αντίθετα, όταν  $|E| \cos \delta_m < |V|$ , η γεννήτρια βρίσκεται σε υποδιέγερση, καταναλώνει δηλαδή άεργο ισχύ ( $Q_G < 0$ ) και αντιμετωπίζεται από το δίκτυο ως εγκάρσιο πηνίο. Η κατάσταση της υπερδιέγερσης, δηλαδή η παραγωγή άεργου ισχύος από μια σύγχρονη μηχανή, αξιοποιείται στους λεγόμενους σύγχρονους αντισταθμιστές, μηχανές στις οποίες είναι δυνατός ο έλεγχος της  $Q_G$ . Ένας σύγχρονος

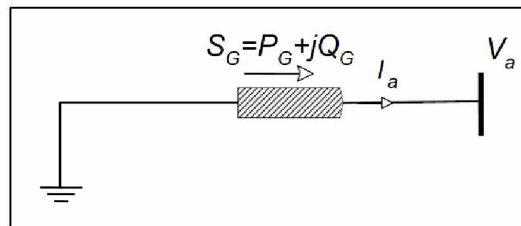
αντισταθμιστής δεν παράγει πραγματική ισχύ ( $P_G = 0$ ), κατά συνέπεια η γωνία ισχύος είναι μηδενική ( $\delta_m = 0$ ). Η παρεχόμενη άεργος ισχύς  $Q_G$ , που υπολογίζεται απ' τη σχέση

$$Q_G = \frac{|V| (|E| - |V|)}{X_s} \quad (1.7)$$

δύναται να ελεγχθεί μέσω της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης  $i_f$ , που με τη σειρά του μεταβάλλει την τιμή  $|E|$ .

Η συμπεριφορά μιας γεννήτριας είναι δυνατόν να ελεγχθεί μέσω της μεταβολής του ρεύματος πεδίου  $i_{fi}$  και της μηχανικής ροπής στον άξονα της γεννήτριας  $\tau_{mi}$ . Οι μεταβλητές αυτές καλούνται δυνάμεις ελέγχου ή είσοδοι και όταν μια ή και οι δύο μεταβληθούν, τότε οι τιμές των  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $|V_i|$  και  $f$ , που χαρακτηρίζουν τη γεννήτρια, θα μεταβληθούν και αυτές.

Η γνώση των τιμών της πραγματικής και της άεργου ισχύος που παράγει μια σύγχρονη γεννήτρια, είναι αρκετά σημαντική για τη μελέτη ροής φορτίου, που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς σε αυτήν την περίπτωση η γεννήτρια μοντελοποιείται ως μια πηγή πραγματικής ( $P_G$ ) και άεργου ισχύος ( $Q_G$ ) (Σχήμα 1.6). [1, 2]



Σχήμα 1.6: Μονοφασικό ισοδύναμο γεννήτριας για χρήση σε μελέτη ροής φορτίου

### 1.2.3 Συγχρονισμός γεννήτριας στο δίκτυο

Για τη σύνδεση μιας γεννήτριας σε ένα μεγάλο δίκτυο, είναι απαραίτητο να έχει πραγματοποιηθεί νωρίτερα η διαδικασία του συγχρονισμού. Αρχικά, η γεννήτρια λειτουργεί αποκομμένη από το υπόλοιπο δίκτυο, δηλαδή εν κενώ. Προκειμένου να συνδεθεί με το δίκτυο, πρέπει να εξασφαλιστούν οι παρακάτω προϋποθέσεις (συνθήκες συγχρονισμού), μεταξύ της τάσης του δικτύου ( $V$ ) και της τάσης της γεννήτριας κατά την εν κενώ λειτουργία της ( $E$ ).  $E$  και  $V$  πρέπει, δηλαδή, να έχουν:

1. Ίδια συχνότητα
2. Ίδια φασική ακολουθία
3. Ίδιο μέτρο, δηλαδή  $|E| = |V|$
4. Ίδιες φασικές γωνίες

Στην κατάσταση αυτή, ο στρόβιλος παρέχει πολύ μικρή ισχύ στη γεννήτρια, όση απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών περιστροφής.

Όταν ικανοποιηθούν οι παραπάνω προϋποθέσεις, ο διακόπτης, που συνδέει τη γεννήτρια με το υπόλοιπο δίκτυο, μπορεί να κλείσει, και η γεννήτρια να συνδεθεί στο σύστημα. Επειδή όμως, αμέσως μετά τη σύνδεση, ισχύει  $|E| = |V|$  και  $\delta_m = 0$ , δηλαδή η γεννήτρια δεν παράγει ούτε πραγματική ούτε άεργο ισχύ στο δίκτυο ( $S_G = 0$ ), είναι απαραίτητο να ρυθμιστούν κατάλληλα οι μεταβλητές ελέγχου, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (ρεύμα διέγερσης και μηχανική ροπή στον άξονα), προκειμένου η γεννήτρια να δώσει στο δίκτυο την απαιτούμενη μιγαδική ισχύ  $S_G$ . Η μηχανική ροπή αυξάνεται μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής πραγματικής ισχύος  $P_G$ . Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερή τη μηχανική ροπή, αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης, μέχρι την εξασφάλιση της επιθυμητής άεργου ισχύος  $Q_G$ .

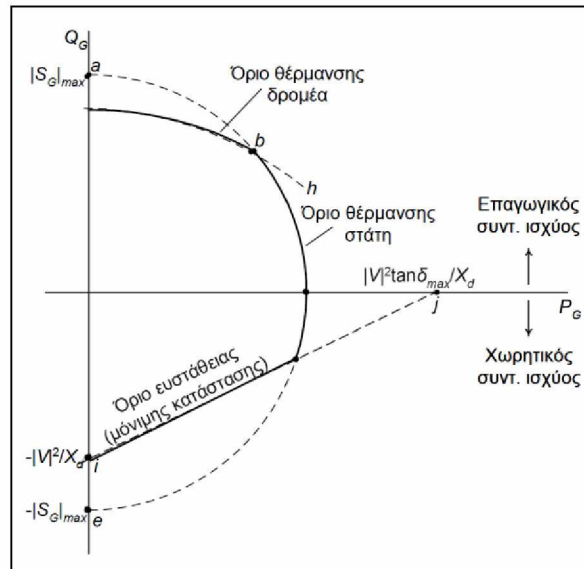
Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι μια γεννήτρια να λειτουργεί παράλληλα με άλλες, συνδεδεμένη σε ένα μεγάλο δίκτυο. Λόγω του μεγάλου μεγέθους και της στιβαρότητας του δικτύου, ο ζυγός που συνδέεται η γεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί «άπειρος ζυγός», δηλαδή ζυγός με σταθερή τάση και συχνότητα. [1]

#### 1.2.4 Ικανότητα φόρτισης γεννητριών

Η πραγματική και η άεργος ισχύς που μια γεννήτρια παρέχει στο δίκτυο, υπό συγκεκριμένη τάση στους ακροδέκτες της, δεν είναι απεριόριστη, αλλά περιορίζεται εντός συγκεκριμένου εύρους, το οποίο καθορίζεται από λειτουργικούς και κατασκευαστικούς παράγοντες της γεννήτριας. Οι τρεις πιο σημαντικοί από αυτούς τους παράγοντες, είναι:

1. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στάτη (θερμικό όριο)
2. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα δρομέα (θερμικό όριο)
3. Η μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία ισχύος

Αρκετά σημαντικοί είναι, επίσης, οι περιορισμοί που άπτονται των ορίων ευστάθειας της γεννήτριας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει η P – Q καμπύλη ικανότητας φόρτισης, που για γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα, είναι η ακόλουθη:



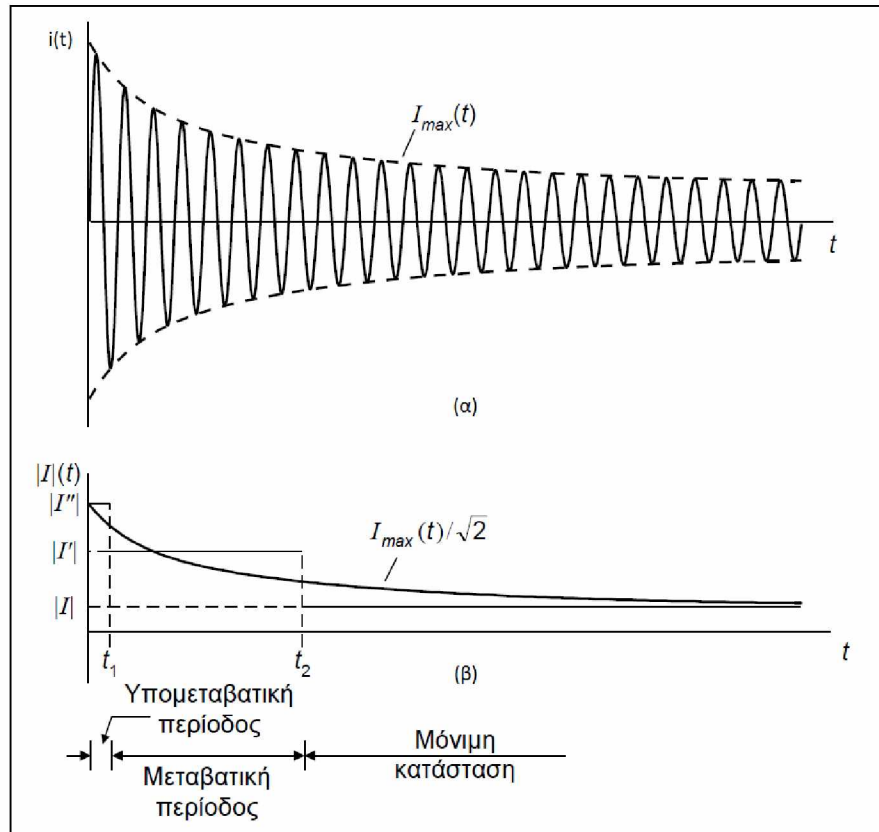
Σχήμα 1.7: Καμπύλη ικανότητας φόρτισης σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα

Επί του διαγράμματος, σημειώνονται οι καμπύλες που εκφράζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η καμπύλη της ικανότητας φόρτισης, που στο διάγραμμα απεικονίζεται με μαύρη συνεχή γραμμή (fbcdi), οροθετείται από τα σημεία τομής των καμπυλών αυτών, με τη γεννήτρια να πρέπει να λειτουργεί εντός της περιοχής που αυτή ορίζει. Ο περιορισμός της λειτουργίας μιας γεννήτριας εντός των ορίων της καμπύλης φόρτισής της, δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με παρέμβαση χειριστή, είτε αυτόματα, είτε με συνδυασμό και των δύο. [1]

### 1.2.5 Μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας

Μια σύγχρονη μηχανή, είτε είναι γεννήτρια είτε κινητήρας, λειτουργεί ως επί το πλείστον υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Η πιθανή, όμως, εμφάνιση σφαλμάτων, όπως αυτά που οφείλονται σε αιφνίδια βραχυκυκλώματα, οδηγούν στην εμφάνιση μεταβατικών συνθηκών λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, παρόλο που η μηχανή που μελετάται δεν βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η συμπεριφορά της εξακολουθεί να είναι ημιτονοειδούς μορφής, έχοντας, όμως, μεταβατικό χαρακτήρα.

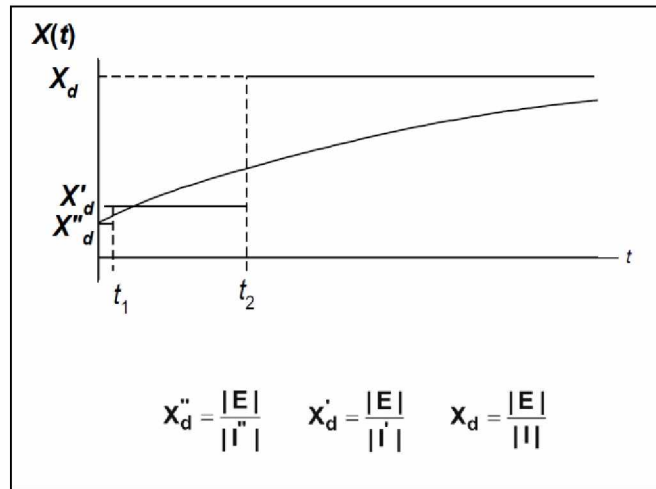
Το στιγμιαίο ρεύμα του σάτη μετά από βραχυκύκλωμα, απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8α. Η περιβάλλουσα, που σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή, δείχνει τη μεταβολή της μέγιστης τιμής του ρεύματος  $I_{max}(t)$ . Διαιρώντας με  $\sqrt{2}$ , διαμορφώνεται η κυματομορφή του Σχήματος 1.8β, που απεικονίζει τη μεταβολή της ενεργού τιμής του ρεύματος του σάτη  $|I|(t)$ .



Σχήμα 1.8: (α) Ρεύμα σάτη μετά από βραχυκύκλωμα

(β) Μεταβολή της ενεργούς τιμής του ρεύματος με τον χρόνο, με βηματική προσέγγιση

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης της μόνιμης ημιτονοειδούς για την περιγραφή της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας, η μεταβολή του ρεύματος  $|I|(t)$ , οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είτε η ΗΕΔ  $|E|$ , είτε η αντίσταση  $|Z_s|$ , ή και οι δύο μαζί, μεταβάλλονται με τον χρόνο. Επειδή η  $|E|$  μεταβάλλεται πολύ λιγότερο, συγκριτικά με την  $|Z_s|$ , μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Για την  $|Z_s|$ , όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.2.2, θεωρείται ότι  $|Z_s| = X$ . Με βάση όλα τα παραπάνω, η χρονικά μεταβαλλόμενη ενεργός τιμή του ρεύματος  $|I|(t)$ , οφείλεται στη μεταβολή με τον χρόνο της αντίδρασης  $X(t)$ . Η μεταβολή αυτή της αντίδρασης παρατίθεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Μεταβολή της σύγχρονης αντίδρασης με τον χρόνο, με βηματική προσέγγιση

Η προσέγγιση της μεταβολής της αντίδρασης  $X(t)$  πραγματοποιείται με βηματικό τρόπο, χωρίζοντας το διάστημα μεταβολής της σε τρία βήματα, οδηγώντας και σε αντίστοιχη προσέγγιση για τη μεταβολή του ρεύματος  $|||(t)$ . Έτσι, διαμορφώνονται τρία διακριτά επίπεδα ρεύματος:  $||''|$  (υπομεταβατικό),  $||'|$  (μεταβατικό),  $|||$  (μόνιμης κατάστασης). Στις περισσότερες περιπτώσεις μηχανών, η υπομεταβατική περίοδος διαρκεί από 0 έως 0,1 sec και η μεταβατική από 0,1 έως 6 sec. Στη μόνιμη κατάσταση, από περίπου τα 6 sec και έπειτα, τα μεταβατικά φαινόμενα έχουν πλέον αποσβεστεί.

Οι τιμές της αντίδρασης για καθεμιά από αυτές τις περιόδους είναι:

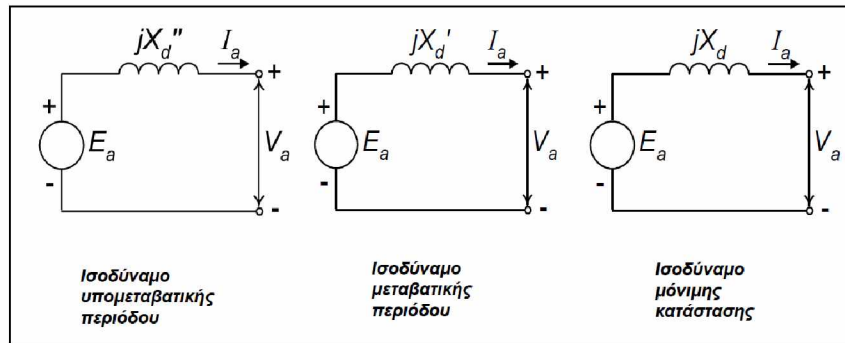
- $X''_d = \frac{|E|}{|I'''|}$ , για την υπομεταβατική περίοδο (1.8)

- $X'_d = \frac{|E|}{|I'|}$ , για τη μεταβατική περίοδο (1.9)

- $X_d = \frac{|E|}{|I|}$ , για τη μόνιμη κατάσταση (1.10)

Οι τιμές των αντιδράσεων αυτών παρέχονται από τον κατασκευαστή της εκάστοτε μηχανής. Τα ανά φάση αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα παρατίθενται στο Σχήμα 1.10 και χρησιμοποιούνται για τη μελέτη καθεμίας από τις περιόδους μετά από ένα βραχυκύκλωμα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και φαίνεται και στο σχήμα, η τιμή της ΗΕΔ  $|E|$  είναι η ίδια σε όλες τις περιόδους. [1, 2]



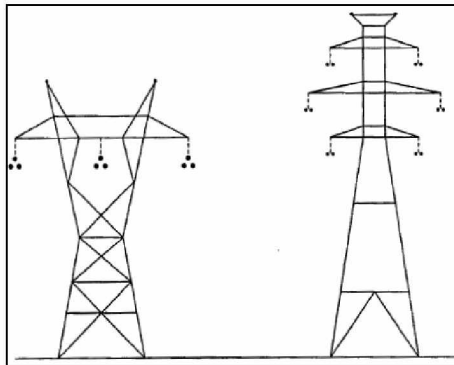


Σχήμα 1.10: Ανά φάση ισοδύναμα κυκλώματα μηχανής μετά από βραχυκύκλωμα

### 1.3 Γραμμές Μεταφοράς

#### 1.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς είναι από τις σημαντικότερες συνιστώσες που συγκροτούν ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, έχοντας ως σκοπό τη μεταφορά, με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες, της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής, στα κέντρα κατανάλωσης, τα οποία συνήθως απέχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Οι αγωγοί των τριών φάσεων είναι αναρτημένοι σε μονωτήρες πάνω σε πύργους, οι οποίοι δύναται να είναι απλού ή διπλού κυκλώματος (Σχήμα 1.11). Μια γραμμή μεταφοράς περιλαμβάνει, επίσης, και αγωγούς προστασίας για την αντιμετώπιση τυχόν σφαλμάτων.



Σχήμα 1.11: Πύργοι γραμμών μεταφοράς απλού (αριστερά) και διπλού κυκλώματος (δεξιά)

Στην πλειονότητα των εναερίων γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούνται αγωγοί κατασκευασμένοι από αλουμίνιο, υλικό που χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλό βάρος. Το χαμηλό κόστος και βάρος που τους χαρακτηρίζει, καθώς η μικρή ένταση ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται γύρω τους, ήταν οι λόγοι που οι αγωγοί αλουμινίου επικράτησαν των αντίστοιχων από χαλκό, που χρησιμοποιούνταν νωρίτερα. Υπάρχουν τέσσερεις κυριότεροι τύποι αγωγών αλουμινίου που

χρησιμοποιούνται ευρέως στις γραμμές μεταφοράς: εξ' ολοκλήρου από αλουμίνιο (AAC), εξ' ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου (AAAC), ενισχυμένοι με χάλυβα (ACSR) και ενισχυμένοι με κράμα (ACAR). Κατά κανόνα χρησιμοποιούνται πολύκλωνοι αγωγοί, με τους κλώνους τους να περιελίσσονται ελικοειδώς σε αλληπάλληλες στρώσεις, παρουσιάζοντας έτσι ευκαμψία και αντοχή σε καταπονήσεις.

Μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές ηλεκτρικές παραμέτρους:

1. Την εν σειρά αντίσταση  $r$  ( $\Omega/m$ )
2. Την εν σειρά επαγωγή  $L$  ( $H/m$ )
3. Την εγκάρσια χωρητικότητα  $C$  ( $F/m$ )

Από τις μονάδες των παραμέτρων αυτών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι εξαρτώνται άμεσα από το μήκος της μελετώμενης γραμμής.

Η εν σειρά αντίσταση  $R$  ενός αγωγού από ομοιόμορφο υλικό και διατομή, που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, εκφράζεται από τη σχέση

$$R_{dc} = \rho * \frac{l}{A} \quad (1.11)$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού σε  $\Omega \text{ mm}^2/m$ ,  $l$  το μήκος σε  $m$  και  $A$  η διατομή του αγωγού σε  $\text{mm}^2$ . Η ειδική αντίσταση του αγωγού εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε θερμοκρασία. Για το εναλλασσόμενο ρεύμα, η αντίσταση του αγωγού είναι αυξημένη κατά 3% με 5% λόγω της ανομοιομορφίας που παρουσιάζει στην κατανομή του στον αγωγό. Επιπλέον επαύξηση της αντίστασης σειράς, της τάξης του 1% με 2%, οφείλεται στους συνεστραμμένους αγωγούς των πολύκλωνων αγωγών, καθώς το μήκος των κλώνων είναι μεγαλύτερο από το μήκος του αγωγού.

Η εν σειρά επαγωγή  $L$  οφείλεται στην τάση που επάγεται στους αγωγούς λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τα μαγνητικά πεδία που τους περιβάλλουν. Η εμφάνιση των μαγνητικών πεδίων οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα, δημιουργείται εντός αυτού, αλλά και στον περιβάλλοντα χώρο, μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η εν σειρά επαγωγή και αντίσταση διαμορφώνουν την εν σειρά σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς, με την επαγωγή να κατέχει σημαντικότερο ρόλο, όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς της γραμμής, κυρίως λόγω της διαπίστωσης  $\omega L \gg$

R. Ο υπολογισμός των επαγωγικών χαρακτηριστικών μιας γραμμής εξαρτάται από τη γεωμετρία της, καθώς απαιτείται ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής κάθε αγωγού της.

Τέλος, όσον αφορά την παράμετρο της εγκάρσιας χωρητικότητας C, αυτή οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών της γραμμής μεταφοράς, προκαλώντας τη φόρτισή τους, όπως συμβαίνει με τους οπλισμούς ενός πυκνωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ροή εγκάρσιου ρεύματος διαρροής μεταξύ των αγωγών, ρεύμα το οποίο προκαλεί πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, επηρεάζει την απόδοση και τον συντελεστή ισχύος της, έχοντας αντίκτυπο στην ευστάθεια του συστήματος που η γραμμή ανήκει. Η εγκάρσια χωρητικότητα εξαρτάται άμεσα από το μήκος της γραμμής, αλλά και από την απόσταση που έχουν οι αγωγοί της μεταξύ τους. Έτσι για μικρού μήκους γραμμές, μικρότερες δηλαδή των 80km, αυτή μπορεί να αγνοηθεί. Επειδή, για τη μελέτη των ΣΗΕ χρησιμοποιείται η ανά φάση ανάλυση, για μια γραμμή, υπολογίζεται η χωρητικότητα της φάσης ως προς τον ουδέτερο ή ως προς κάποιο άλλο σημείο με μηδενικό δυναμικό, που ορίζεται ως σημείο αναφοράς, μέσω της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ τους. [1, 2]

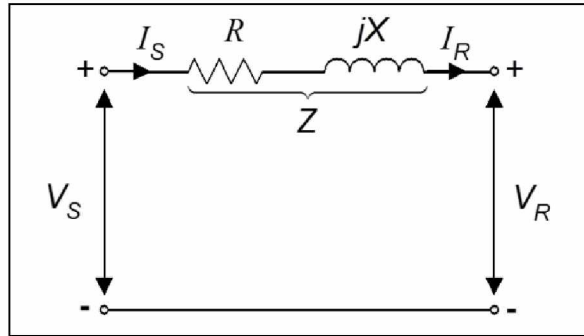
### 1.3.2 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς

Για την ευκολότερη μελέτη και ανάλυση των ΣΗΕ, οι γραμμές μεταφοράς, όπως και οι υπόλοιπες συνιστώσες του, μοντελοποιούνται μέσω ισοδύναμων κυκλωμάτων. Θεωρώντας ότι παρουσιάζεται τριφασική συμμετρία, μια γραμμή δύναται να μελετηθεί ανά φάση και να παρασταθεί μέσω ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος.

Βασικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος μιας γραμμής, είναι το μήκος της, καθώς καθορίζει αν οι ηλεκτρικές παράμετροί της είναι κατανεμημένες σε όλο της το μήκος ή συγκεντρωμένες σε ένα σημείο, καθώς και το μέγεθος των απωλειών ρεύματος προς τη γη. Ταυτόχρονα, καθορίζει την αγνόηση, ενδεχομένως, κάποιων από τις παραμέτρους, που δεν είναι σημαντικές στην εκάστοτε περίπτωση. Έτσι, ανάλογα με το μήκος τους, οι γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε:

- Γραμμές μικρού μήκους (<80km)
- Γραμμές μεσαίου μήκους (80km – 250km)
- Γραμμές μεγάλου μήκους (>250km)

Στις γραμμές μικρού μήκους (Σχήμα 1.12), οι απώλειες ρεύματος είναι αμελητέες, επιτρέποντας έτσι την αγνόηση της εγκάρσιας χωρητικότητας, χωρίς αυτό να επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών. Μια τέτοια γραμμή παριστάνεται από την ανά φάση συνολική αντίσταση  $R = r \cdot l$  και επαγωγή  $X = j\omega l$  σειράς, όπου  $l$  είναι το μήκος της γραμμής. Η αφετηρία της συμβολίζεται με  $S$ , ενώ η άφιξή της με  $R$ .

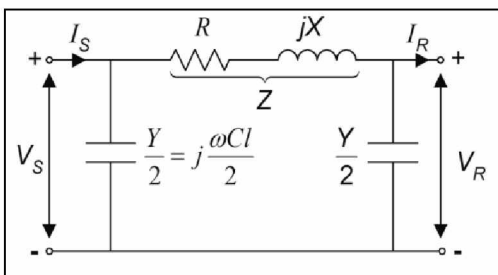


Σχήμα 1.12: Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μικρού μήκους

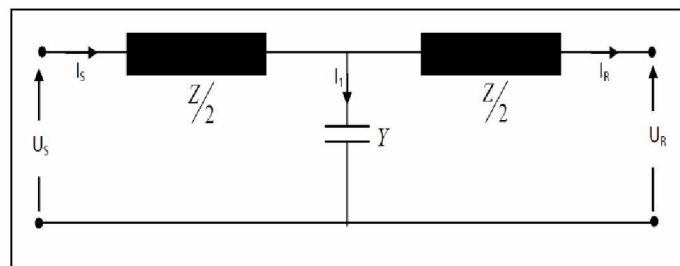
Η σχέση για τον υπολογισμό της τάσης  $V_S$  στην είσοδο της γραμμής, είναι:

$$V_S = V_R + IZ \quad (1.12)$$

Στις γραμμές μεσαίου μήκους, οι απώλειες ρεύματος είναι σημαντικές, και δε μπορεί να αγνοηθεί η επίδραση της εγκάρσιας χωρητικότητας. Ένας τρόπος αναπαράστασής τους είναι το  $\pi$  – ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 1.13), στο οποίο η χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής  $Y = j\omega Cl$  κατανέμεται σε δύο ίσα τμήματα, που τοποθετούνται στην αναχώρηση ( $S$ ) και την άφιξη ( $R$ ) της γραμμής. Στο  $\tau$  – ισοδύναμο (Σχήμα 1.14), η αντίδραση  $R+jX$  της γραμμής ισοκατανέμεται στα άκρα της, ενώ η χωρητικότητα είναι συγκεντρωμένη στο μέσο της.



Σχήμα 1.13:  $\pi$  – ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεσαίου μήκους



Σχήμα 1.14:  $T$  – ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεσαίου μήκους

Για το  $\pi$  – ισοδύναμο, οι σχέσεις της τάσης ( $V_S$ ) και του ρεύματος εισόδου ( $I_S$ ), διαμορφώνονται:

$$V_S = \left(\frac{Z*Y}{2} + 1\right) V_R + I_R Z \quad (1.13)$$

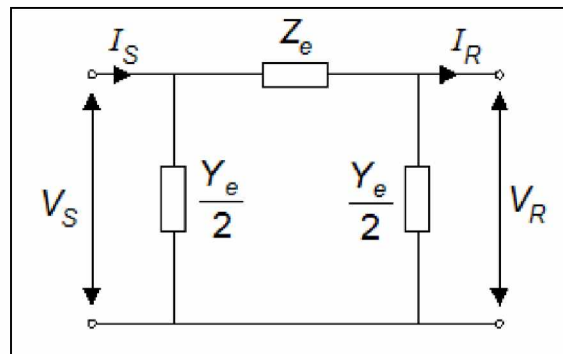
$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{Z*Y}{4}\right) + \left(1 + \frac{Z*Y}{2}\right) I_R \quad (1.14)$$

Αντίστοιχα, για το  $\tau$  – ισοδύναμο:

$$V_S = \left(1 + \frac{Y*Z}{2}\right) V_R + \left(1 + \frac{Y*Z}{4}\right) Z I_R \quad (1.15)$$

$$I_S = Y V_R + \left(1 + \frac{Y*Z}{2}\right) I_R \quad (1.16)$$

Τέλος, οι παράμετροι των γραμμών μεγάλου μήκους δεν θεωρούνται συγκεντρωμένες σε ένα σημείο, όπως συμβαίνει στις αντίστοιχες μικρού και μεσαίου μήκους, αλλά είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα σε όλο το μήκος της γραμμής. Ουσιαστικά, κάθε σημείο της παρουσιάζει αντίσταση, επαγωγική και χωρητική αντίδραση. Υπολογίζοντας τις ενεργές τιμές και τις φασικές γωνίες τάσης και ρεύματος σε κάθε σημείο της γραμμής, συναρτήσει της απόστασης τους από την άφιξη (R) της, δύναται να βρεθεί η κατάλληλη εν σειρά σύνθετη αντίσταση και η εγκάρσια αγωγιμότητα, για τη μοντελοποίηση της γραμμής μέσω ενός  $\pi$  – ισοδύναμου κυκλώματος (Σχήμα 1.15). [1, 2]



Σχήμα 1.15:  $\pi$  – ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεγάλου μήκους

### 1.3.3 Ικανότητα φόρτισης γραμμών μεταφοράς

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των γραμμών μεταφοράς, που είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση και τη μελέτη ενός ΣΗΕ, είναι η ικανότητα φόρτισής τους, δηλαδή το μέγιστο όριο της ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή. Για εναέριες γραμμές σχετικά μικρού μήκους, αλλά και σε υπόγεια καλώδια, το όριο αυτό καθορίζεται ως επί το πλείστο από τα θερμικά όρια των αγωγών της γραμμής. Η θερμική αντοχή

των αγωγών μιας γραμμής αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, καθώς για τις μεν εναέριες γραμμές, υπέρβαση αυτού του ορίου μη αναστρέψιμο τέντωμα των αγωγών, για δε τα υπόγεια καλώδια ενδέχεται να προκαλέσει καταπόνηση της μόνωσής τους, με συνέπεια την καταστροφή τους, λόγω της περιορισμένης δυνατότητας απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας. Για τις εναέριες γραμμές μεγάλου μήκους, το όριο φόρτισής τους καθορίζεται κυρίως από τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής, η οποία και επιβάλλει περιορισμούς στη μεταφερόμενη ισχύ, πολύ πριν η ισχύς πλησιάσει το όριο θερμικής αντοχής των αγωγών. Η μέγιστη μεταφερόμενη, από τη γραμμή, πραγματική ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της επαγωγικής αντίδρασης  $X$ . Ο σχεδιασμός των γραμμών μεταφοράς γίνεται για λειτουργία υπό ορισμένο επίπεδο τάσης, το οποίο και καθορίζει το μέγεθος και τη γεωμετρία των αγωγών, την απόσταση μεταξύ των φάσεων, καθώς και την επιλογή της μόνωσης. [1]

## 1.4 Μετασχηματιστές Ισχύος

### 1.4.1 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών ισχύος

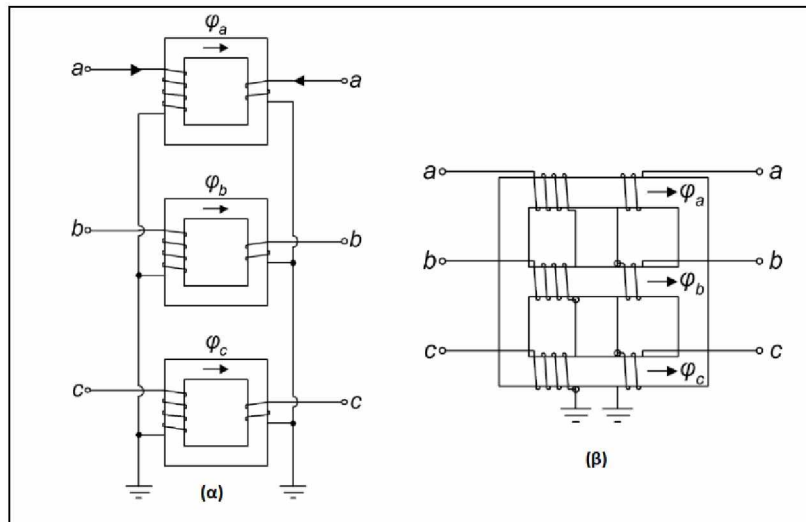
Όπως έγινε φανερό ήδη από την ενότητα 1.1, τα ΣΗΕ δεν λειτουργούν υπό ενιαίο επίπεδο τάσης. Στους σταθμούς παραγωγής, η τάση στους ακροδέκτες των γεννητριών κυμαίνεται μεταξύ 11kV με 25kV, στο σύστημα μεταφοράς χρησιμοποιούνται υψηλές τάσεις από 150kV μέχρι και 765kV, ενώ η διανομή πραγματοποιείται σε χαμηλότερα επίπεδα τάσεων. Οι μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται προκειμένου να συνδέσουν τις επιμέρους συνιστώσες ενός ΣΗΕ, που λειτουργούν υπό διαφορετικά επίπεδα τάσεων, ανυψώνοντας ή υποβαθμίζοντας την τάση, ανάλογα με την περίπτωση.

Έτσι, ανάλογα με τη λειτουργία τους, οι μετασχηματιστές ισχύος διακρίνονται σε:

- Μετασχηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης της γεννήτριας στα επίπεδα του συστήματος μεταφοράς, π.χ. από τα 20kV στα 150kV ή τα 400kV.
- Μετασχηματιστές μεταφοράς, για την εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων επιπέδων υψηλής τάσης που χρησιμοποιεί το σύστημα μεταφοράς. Η ισχύς τους, όπως και των μετασχηματιστών γεννήτριας, κυμαίνεται από μερικές δεκάδες MVA μέχρι και πάνω από 1000MVA.

- Μετασχηματιστές διανομής, για τον υποβιβασμό της τάσης στα επίπεδα που τροφοδοτούνται οι καταναλωτές, π.χ. στα 20kV της μέσης τάσης ή στα 400V της χαμηλής τάσης. Η ισχύς τους είναι της τάξεως των μερικών kVA.

Οι πολύ μεγάλης ισχύος τριφασικοί μετασχηματιστές συγκροτούνται, συνήθως, από τρεις ξεχωριστούς μονοφασικούς μετασχηματιστές (Σχήμα 1.16α), ενώ οι μικρότερης ισχύος από μια ολοκληρωμένη τριφασική κατασκευή με ενιαίο πυρήνα και για τις τρεις φάσεις (Σχήμα 1.16β). Η πρώτη διάταξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευκολότερη μεταφορά και την ευκολία στην επισκευή, ενώ η δεύτερη παρουσιάζει μεν λιγότερες απώλειες, από την άλλη δε σε περίπτωση σφάλματος απαιτείται η αντικατάσταση ολόκληρου του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.16: Διατάξεις τριφασικών μετασχηματιστών

(α): Συγκρότηση από τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές

(β): Τριφασικός μετασχηματιστής ενιαίου πυρήνα

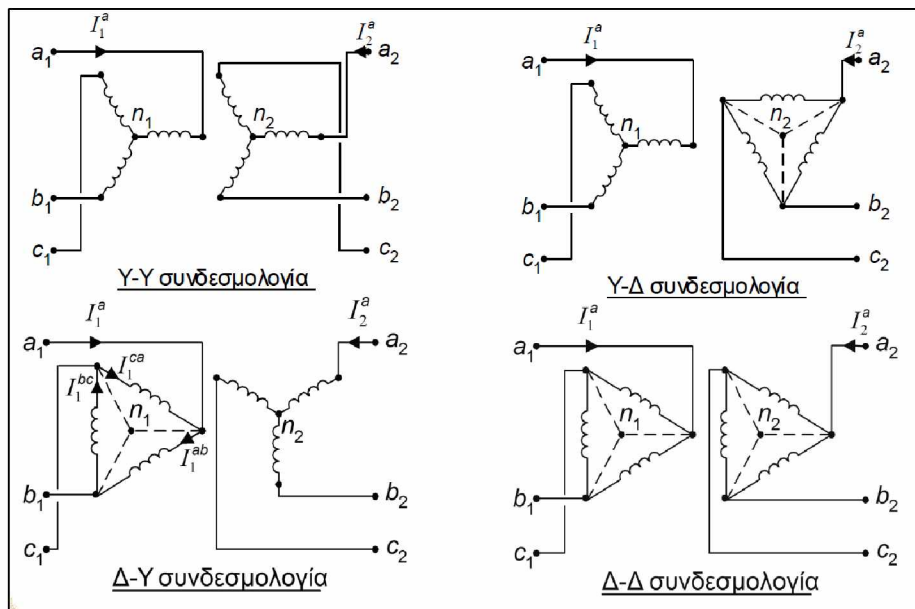
Ανάλογα με τη λειτουργία που πρόκειται να επιτελέσει ένας τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος, τα τυλίγματα του δύνανται να συνδεθούν με τέσσερις δυνατές συνδεσμολογίες: Υ – Υ (αστέρας – αστέρας), Υ – Δ (αστέρας – τρίγωνο), Δ – Υ (τρίγωνο – αστέρας), Δ – Δ (τρίγωνο – τρίγωνο) (Σχήμα 1.17), με καθεμιά να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Οι μετασχηματιστές γεννήτριας συνδέονται συνήθως με τη συνδεσμολογία Δ – Υ, με τον ουδέτερο γειωμένο. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης, συνδεδεμένο σε Δ, αποτελεί διέξοδο για τα ρεύματα που προκαλούνται από ασύμμετρη φόρτιση του μετασχηματιστή. Γεννήτριες μεγάλης ισχύος, από 200 – 500 MW και άνω, έχουν η καθεμιά τον δικό της

μετασχηματιστή ανύψωσης, συγκροτημένο από τρεις μονοφασικούς, ενώ σε σταθμούς παραγωγής με γεννήτριες μικρότερης ισχύος, δύο γεννήτριες δύνανται να είναι σε συνδεδεμένες σε κοινό μετασχηματιστή ανύψωσης, συνήθως ενιαίου πυρήνα.

Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στο σύστημα μεταφοράς είναι συνήθως συνδεδεμένοι κατά Υ-Υ, με γειωμένους ουδετέρους. Συχνά, τοποθετείται και ένα τύλιγμα Δ χαμηλότερης ισχύος, γνωστό και ως τριτεύον τύλιγμα, το οποίο αποτελεί δίοδο για την απαγωγή ρευμάτων που προκαλούνται από ασύμμετρη φόρτιση του τυλίγματος της υψηλής τάσης.

Τέλος, οι μετασχηματιστές διανομής συνδέονται συνήθως κατά Υ-Δ, με το τύλιγμα Δ στη χαμηλότερη τάση, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ασυμμετρίας στην τροφοδότηση των φορτίων. [1, 2]

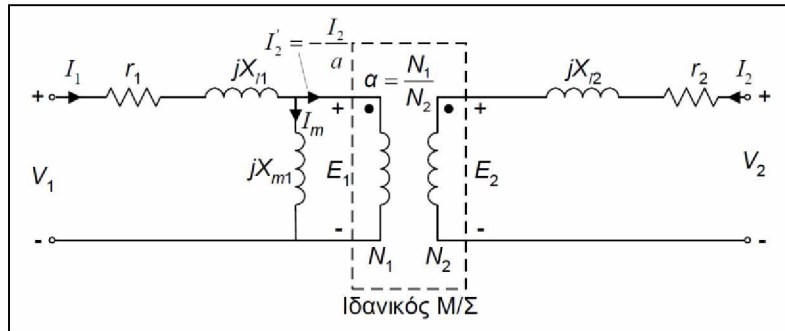


Σχήμα 1.17: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών



#### 1.4.2 Ισοδύναμα κυκλώματα μετασχηματιστών

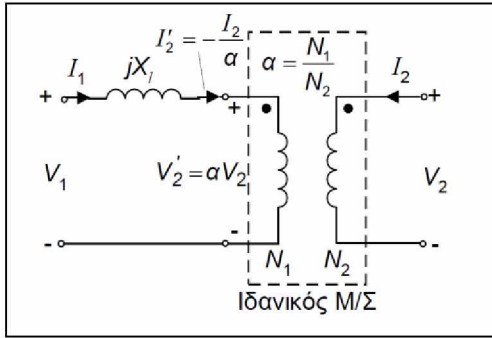
Όπως είναι γνωστό, η διάταξη του μετασχηματιστή αξιοποιεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, που περιέγραψε ο Faraday, για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος. Για έναν μονοφασικό μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων, το βασικό ισοδύναμο κύκλωμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, είναι το ακόλουθο:



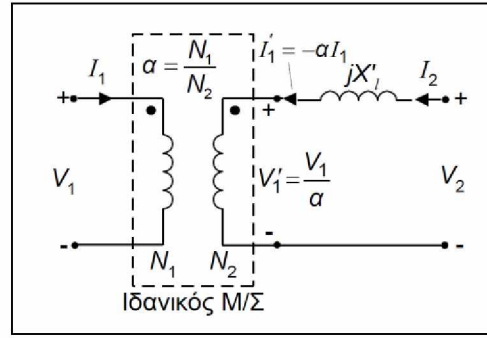
Σχήμα 1.18: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή

όπου  $r_1$  και  $r_2$  οι αντιστάσεις τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα,  $X_{11}$  και  $X_{22}$  οι αντιδράσεις σκέδασης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα και  $X_{m1}$  η αντίδραση μαγνήτισης αναφερόμενη στο πρωτεύον τύλιγμα.

Για τους μετασχηματιστές ισχύος που χρησιμοποιούνται στα ΣΗΕ, το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα δύναται να απλοποιηθεί περαιτέρω. Καθότι συγκριτικά πολύ μικρότερο σε σχέση με το ρεύμα φορτίου, το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  μπορεί να αγνοηθεί, με αποτέλεσμα και την αγνόηση του εγκάρσιου κλάδου. Είναι, επίσης, δυνατόν να αμεληθούν οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων, καθώς είναι πολύ μικρότερες από τις αντιδράσεις σκέδασης ( $r_1 \ll X_{11}$  και  $r_2 \ll X_{22}$ ). Έτσι, προκύπτουν τα απλοποιημένα ισοδύναμα κυκλώματα, αναφερόμενα στο πρωτεύον (Σχήμα 1.19) και στο δευτερεύον (Σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.19: Απλοποιημένο κύκλωμα μετασχηματιστή αναφερόμενο στο πρωτεύον



Σχήμα 1.20: Απλοποιημένο κύκλωμα μετασχηματιστή αναφερόμενο στο δευτερεύον

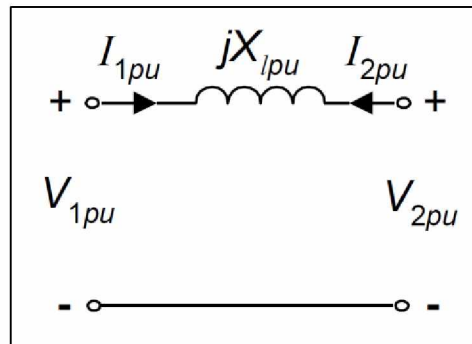
Η συνολική αντίδραση σκέδασης, αναφερόμενη στο πρωτεύον τύλιγμα, διαμορφώνεται ως:

$$X_l = X_{l1} + a^2 X_{l2} \quad (1.17)$$

ενώ για το δευτερεύον:

$$X_l' = X_l/a^2 = X_{l1}/a^2 + X_{l2} \quad (1.18)$$

Όταν γίνεται χρήση του ανά μονάδα συστήματος (per unit, PU) για τη μελέτη ενός ΣΗΕ, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, χρησιμοποιείται το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 1.21: Ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Με αυτή την επιλογή  $X_{lpu} = X_{lpu}'$ , δηλαδή η ανά μονάδα τιμή της αντίδρασης σκέδασης του είναι η ίδια ανεξαρτήτως της πλευράς του μετασχηματιστή που αυτή είναι ανηγμένη. [1,2]

#### 1.4.3 Μετασχηματιστές ως συσκευές ελέγχου

Ο βασικός ρόλος των μετασχηματιστών ισχύος σε ένα ΣΗΕ είναι η ανύψωση ή ο υποβιβασμός της τάσης, ανάμεσα στα διάφορα επίπεδα του συστήματος, από τους σταθμούς

παραγωγής μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Μετασχηματιστές, όμως, δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές ελέγχου σε άλλες εφαρμογές ενός ΣΗΕ, όπως ο έλεγχος της τάσης και της ροής ισχύος. Τέτοιοι είναι οι:

- Μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού
- Μετασχηματιστές ρύθμισης μέτρου ή/και φασικής γωνίας τάσης

Οι μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού διατηρούν την τάση στο δευτερεύον τύλιγμά τους σταθερή και ανεξάρτητη τυχόν διακυμάνσεων της μεταφοράς, καθώς είναι εφοδιασμένοι με λήψεις, επιτρέποντας έτσι τη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού υπό φορτίο. Η μεταβολή αυτή πραγματοποιείται συνήθως μέσω κινητήρων, που λαμβάνουν εντολές από ειδικούς ανιχνευτές του επιπέδου τάσης, οι οποίοι προσθέτουν ή αφαιρούν σπείρες στο πρωτεύον τύλιγμα. Η τάση του δευτερεύοντος συγκρίνεται, δηλαδή, με μια επιθυμητή τιμή αναφοράς και αναλόγως δίνεται η κατάλληλη εντολή για τη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού. Τέτοιοι μετασχηματιστές, χρησιμοποιούνται στους υποσταθμούς υποβιβασμού από την υψηλή στη μέση τάση του δικτύου διανομής, με τις μεταβλητές λήψεις στο τύλιγμα υψηλής τάσης, καθώς η τάση του δευτερεύοντος πρέπει να παραμένει εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών εκατέρωθεν της ονομαστικής.

Οι μετασχηματιστές ρύθμισης της τάσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στο επίπεδο μεταφοράς, για τη μεταβολή, συνήθως κατά μικρά  $\Delta V$ , της τάσης σε κάποιο σημείο του συστήματος. Η μεταβολή αυτή δύναται να ελεγχθεί και ως προς το μέτρο και ως προς τη φασική γωνία της τάσης. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ροή ισχύος μιας γραμμής, στην οποία παρεμβάλλεται ένας τέτοιος μετασχηματιστής. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της μεταβολής του μέτρου της τάσης ελέγχεται η ροή της άεργου ισχύος, καθώς αυτή ρέει από τον ζυγό υψηλότερης τάσης προς αυτόν της χαμηλότερης, ενώ μέσω της φασικής γωνίας ελέγχεται η ροή της πραγματικής ισχύος, η οποία ρέει από τον ζυγό με τη μεγαλύτερη φασική γωνία προς αυτόν με τη μικρότερη. [1, 2]

## 1.5 Φορτία

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό απ' όλα τα παραπάνω, η όλη οργάνωση και διάρθρωση ενός ΣΗΕ γίνεται με κριτήριο την ομαλή και ποιοτική τροφοδότηση των φορτίων των καταναλωτών.

Έστω ότι ένα φορτίο τροφοδοτείται υπό τάση  $V\angle\phi_V$  και ρεύμα  $I\angle\phi_I$ . Ως μιγαδική ισχύς  $S = VI^*$ , με μονάδα τα VA, ορίζεται η ισχύς που καταναλώνει ένα φορτίο. Αναλύοντας περαιτέρω την προηγούμενη σχέση, προκύπτει:

$$S = VI^* = V\angle\phi_V * I\angle-\phi_I = VI\angle(\phi_V - \phi_I) = VI\angle\phi = |S|\angle\phi \quad (1.19)$$

όπου  $\phi$  η γωνία που η τάση προηγείται του ρεύματος και  $|S|$  η φαινόμενη ισχύς σε VA.

Συνεχίζοντας,

$$S = VI \cos \phi + VI \sin \phi = P + jQ \quad (1.20)$$

Από την παραπάνω σχέση, η πραγματική ισχύς  $P$  (Watt) που καταναλώνει το φορτίο, ορίζεται ως:

$$P = VI \cos \phi = |S| \cos \phi \quad (1.21)$$

και η άεργος  $Q$  (VAR):

$$Q = VI \sin \phi = |S| \sin \phi \quad (1.22)$$

Ο συντελεστής ισχύος (power factor – pf) ενός φορτίου ορίζεται ως το συνημίτονο της γωνίας  $\phi$ :

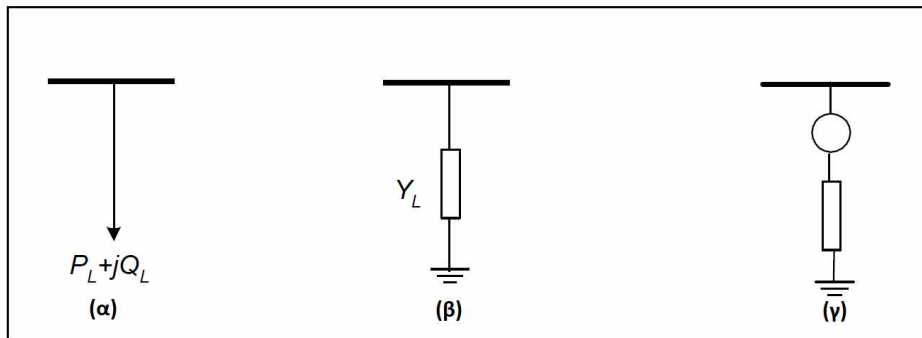
$$pf = \cos \phi \quad (1.23)$$

και εξαρτάται από το είδος του φορτίου και η τιμή του να κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Χαρακτηρίζεται «επαγωγικός» όταν το ρεύμα του φορτίου έπεται της τάσης, δηλαδή η γωνία  $\phi$  είναι θετική ( $\phi_V > \phi_I$ ), ή «χωρητικός» όταν το ρεύμα προηγείται της τάσης, με τη γωνία  $\phi$  να είναι αρνητική ( $\phi_I > \phi_V$ ). Σε ένα ωμικό φορτίο,  $V$  και  $I$  είναι συμφασικά ( $\phi = 0$ ), με συνέπεια ο συντελεστής ισχύος να ισούται με τη μονάδα ( $pf = 1$ ). Ένα επαγωγικό φορτίο απορροφά θετική άεργο ισχύ  $Q$ , ενώ ένα χωρητικό αρνητική, ή όπως αναφέρεται διαφορετικά, το επαγωγικό καταναλώνει και το χωρητικό παράγει άεργο ισχύ.

Τέλος, η παράσταση των φορτίων ενός ΣΗΕ εξαρτάται από το είδος της μελέτης που επιτελείται. Στις μελέτες ροής φορτίου παριστάνονται ως η πραγματική ( $P_L$ ) και η άεργος ισχύς ( $Q_L$ ) που απορροφούν (Σχήμα 1.22α), ενώ στις μελέτες βραχυκυκλωμάτων και ευστάθειας ως μια σύνθετη αγωγιμότητα μεταξύ του ζυγού που είναι συνδεδεμένα και της γης (Σχήμα 1.22β). Αν  $|V|$  το μέτρο της τάσης του ζυγού, η αγωγιμότητα αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Y_L = \frac{S_L^*}{|V|^2} = \frac{P_L - jQ_L}{|V|^2} \quad (1.24)$$

Στην περίπτωση, δε, που το φορτίο είναι μια περιστρεφόμενη μηχανή, στις μελέτες βραχυκυκλωμάτων και ευστάθειας, παριστάνεται ως μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση (Σχήμα 1.22γ). [1, 2]



Σχήμα 1.22: Μοντέλα για την παράσταση φορτίων

### 1.6 Ανά Μονάδα σύστημα (Per Unit – PU)

Κατά τη μελέτη των ΣΗΕ, είναι αρκετά πιο βολικό οι διάφορες ηλεκτρικές ποσότητες που το χαρακτηρίζουν, όπως τάσεις, ρεύματα, αντιστάσεις και ισχύες, να εκφράζονται όχι απευθείας στις αντίστοιχες μονάδες τους, αλλά σε ανά μονάδα (per unit) τιμές, δηλαδή υπό κλίμακα. Αυτή η μέθοδος υπολογισμών ονομάζεται ανά μονάδα σύστημα και καθιερώθηκε για την απλοποίηση των πράξεων. Έτσι, η τιμή ενός μεγέθους σε pu μπορεί να οριστεί ως:

$$per\ unit = \frac{\text{πραγματική τιμή}}{\text{τιμή βάσης}} \quad (1.25)$$

και αφορά μόνο το μέτρο του αντίστοιχου μεγέθους, όχι τη γωνία. Δίδεται ως δεκαδικός αριθμός ή σε % ποσοστό.

Οι ποσότητες που επιλέγονται ως βάση είναι η ισχύς  $|S_B|$ , η τάση  $|V_B|$ , το ρεύμα  $|I_B|$  και η αντίσταση  $|Z_B|$ . Από αυτές, καθορίζονται δύο, με τις υπόλοιπες δύο να υπολογίζονται συναρτήσει αυτών. Συνήθως, ορίζονται αρχικά η βάση της ισχύος  $S_B$  και η βάση της τάσης  $V_B$ . Οι γνωστές σχέσεις της ανάλυσης κυκλωμάτων, όπως οι νόμοι του Kirchhoff και Ohm, αλλά και το θεώρημα Thevenin, ισχύουν και κατά την pu ανάλυση ενός ΣΗΕ.

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

$$|I_B|_{3\phi} = \frac{|S_B|_{3\phi}}{\sqrt{3}|V_B|_{3\phi}} \quad (1.26)$$

$$|Z_B|_{3\phi} = \frac{|V_B|_{3\phi}^2}{|S_B|_{3\phi}} \Omega \quad (1.27)$$

Η βάση ισχύος  $|S_B|_{3\phi}$  ορίζεται η ίδια για όλο το μελετώμενο σύστημα. Η μετατροπή των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς σε pu τιμές, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την κατάλληλη βάση αντίστασης για το τμήμα του συστήματος που βρίσκεται η γραμμή.

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

Συνεχίζοντας, τα δεδομένα των σύνθετων αντιστάσεων γεννητριών και μετασχηματιστών δίνονται, κυρίως, από τους κατασκευαστές σε pu τιμές, λαμβάνοντας ως βάσεις την ονομαστική τους ισχύ και τάση. Σε περίπτωση που οι αντίστοιχες βάσεις της περιοχής του δικτύου, που βρίσκεται η γεννήτρια ή ο μετασχηματιστής, διαφέρουν από τις αντίστοιχες ονομαστικές, τότε οι ανά μονάδα τιμές των σύνθετων αντιστάσεών τους θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν στις νέες βάσεις. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με την παρακάτω σχέση:

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{|V_B^{old}|^2}{|V_B^{new}|^2} \frac{|S_B^{new}|}{|S_B^{old}|} \quad (1.28)$$

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

Τέλος, αποδεικνύεται ότι οι ανά μονάδα τιμές πολικής και της αντίστοιχης φασικής τάσης, αλλά και της τριφασικής και της αντίστοιχης μονοφασικής ισχύος, είναι ίδιες. Έτσι, αξιοποιώντας την τριφασική συμμετρία, κάνοντας χρήση των παραπάνω σχέσεων, υπολογίζονται οι τιμές των μονοφασικών ισοδυνάμων των στοιχείων, επιτρέποντας έτσι την κατάστροψη του ανά μονάδα μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος του μελετώμενου συστήματος. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να επιλυθεί πολύ εύκολα, χρησιμοποιώντας τις παραδοσιακές μεθόδους ανάλυσης κυκλωμάτων, μετατρέποντας στη συνέχεια τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, στις αντίστοιχες πραγματικές τιμές τους, μέσω της σχέσης ορισμού του ανά μονάδα συστήματος. [1, 2]





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

#### 2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεί τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, υπό συγκεκριμένη φόρτιση, στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας του. Μέσω της ανάλυσης αυτής, καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός των τάσεων όλων των ζυγών του συστήματος, καθώς και των ροών ισχύος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές. Η συμβολή της, στην ανάλυση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, είναι καθοριστική, καθώς αποτελεί τη βάση για την εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας του εκάστοτε μελετώμενου συστήματος.

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι απαραίτητη για τη μελέτη των μεταβολών ή των μελλοντικών επεκτάσεων ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως:

- Ανάπτυξη/τοποθέτηση νέων μονάδων παραγωγής
- Τροφοδοσία νέων φορτίων
- Αναβάθμιση ή τοποθέτηση νέων γραμμών μεταφοράς
- Διασύνδεση με άλλα δίκτυα

καθώς, πριν κάποιες από τις προαναφερθείσες αλλαγές υλοποιηθούν, πρέπει να μελετηθούν οι επιπτώσεις που αυτές θα έχουν στη λειτουργία του υπάρχοντος συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, συγκρίνονται, ως προς την αποτελεσματικότητά τους, οι διάφορες λύσεις αναβάθμισης που προτείνονται, ούτως ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη για το σύστημα. Η ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται, επίσης, για την εκτίμηση της ομαλής λειτουργίας ενός συστήματος, όταν τεθούν εκτός μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς, για τον προσδιορισμό των επιδράσεων των διαφόρων συνθηκών φόρτισής του, καθώς και για τον υπολογισμό των απαραίτητων αρχικών συνθηκών του, που απαιτούνται για τη διενέργεια μελετών βραχυκυκλωμάτων και μεταβατικής ευστάθειας.

Για τη δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου ανάλυσης ροής φορτίου, είναι απαραίτητη η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, μέσω εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές είναι κατάλληλα διαμορφωμένες για κάθε ζυγό του συστήματος και χαρακτηρίζονται από απουσία γραμμικότητας, γεγονός που απαιτεί κατάλληλη επαναληπτική αριθμητική

μέθοδο για την επίλυσή τους. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η Gauss – Seidel και η Newton – Raphson, η καθεμιά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Τέλος, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου, επιβάλλεται:

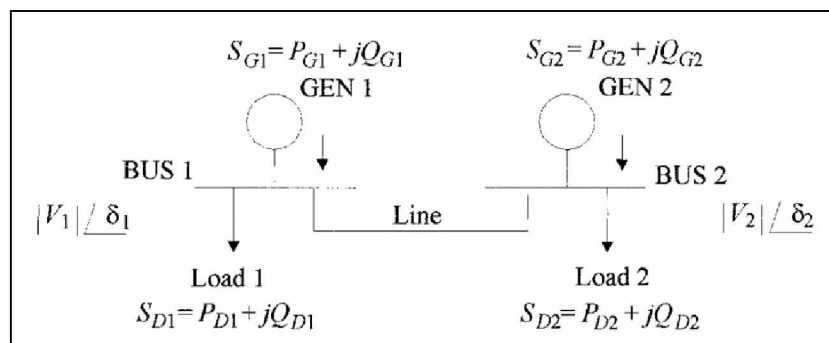
- Οι τάσεις των ζυγών να παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων (ανοχή  $\pm 5\%$ , δηλαδή από  $0,95\text{pu}$  έως  $1,05\text{pu}$ ).
- Η συχνότητα  $f$  του συστήματος να είναι ίση με την ονομαστική.
- Η φόρτιση γραμμών, μετασχηματιστών και γεννητριών να μην υπερβαίνει τα επιτρεπόμενα όρια.
- Να μη γίνεται υπέρβαση των ορίων λήψης των μετασχηματιστών ελέγχου.

Είναι σημαντικό, οι παραπάνω περιορισμοί είναι απαραίτητο να τηρούνται, όχι μόνο κάτω από συνθήκες μέγιστου φορτίου, αλλά και κατά τη διάρκεια αιφνίδιων μεταβολών της κατάστασης του συστήματος. [2, 4]

## 2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου

### 2.2.1 Κατάστρωση εξισώσεων ροής φορτίου

Για την απλοποίηση της διαδικασίας κατάστρωσης των εξισώσεων ροής φορτίου, θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα του Σχήματος 2.1, που αποτελείται από δύο ζυγούς, που έχουν παραγωγή και κατανάλωση ισχύος, ενωμένους με μια γραμμή μεταφοράς.

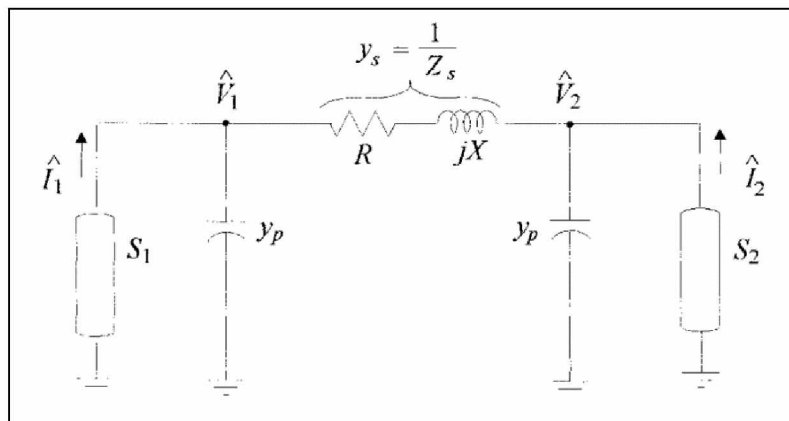


Σχήμα 2.1: Σύστημα δύο ζυγών

Κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεγέθη:

- $P_D$ : κατανάλωση πραγματικής ισχύος
- $P_G$ : παραγωγή πραγματικής ισχύος
- $Q_D$ : κατανάλωση άεργου ισχύος
- $Q_G$ : παραγωγή άεργου ισχύος
- $|V|$ : μέτρο τάσης
- $\delta$ : γωνία τάσης

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.2, γεννήτριες και φορτία έχουν αντικατασταθεί από την ισχύ του αντίστοιχου ζυγού ( $S_i$ ), η οποία είναι η διαφορά της ισχύος του φορτίου από την παρεχόμενη ισχύ της γεννήτριας. Για τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται το π – ισοδύναμο, με τα μεγέθη της να εκφράζονται μέσω των αγωγιμοτήτων τους ( $Y$ ).



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών, για τη μελέτη ροής φορτίου

Η ισχύς των ζυγών 1 και 2 ορίζεται αντίστοιχα:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (2.1)$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (2.2)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα ρεύμα που σημειώνονται στο Σχήμα 2.2. Όλες οι ποσότητες εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές (pu).

$$S_1 = V_1 I_1^* \Rightarrow I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = V_1 Y_P + (V_1 - V_2) Y_S$$

$$\Rightarrow I_1 = (Y_P + Y_S) V_1 - Y_S V_2 \quad (2.3)$$

$$S_2 = V_2 I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = V_2 Y_P + (V_2 - V_1) Y_S$$

$$\Rightarrow I_2 = -Y_S V_1 + (Y_P + Y_S) V_2 \quad (2.4)$$

Έστω:

$$Y_{11} = Y_P + Y_S \quad Y_{12} = -Y_S$$

$$Y_{22} = Y_P + Y_S \quad Y_{21} = -Y_S$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στις Σχέσεις 2.3 και 2.4 προκύπτει:

$$I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (2.5)$$

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \Rightarrow I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.7)$$

Ο πίνακας  $Y_{bus}$  ονομάζεται πίνακας αγωγιμοτήτων. Τα διαγώνια στοιχεία του αντιστοιχούν στο άθροισμα των αγωγιμοτήτων που καταλήγουν στον αντίστοιχο κόμβο, ενώ τα μη διαγώνια είναι το αντίθετο της αγωγιμότητας που βρίσκεται μεταξύ των κόμβων  $i$  και  $j$  του συστήματος.

Συνεχίζοντας, οι Σχέσεις 2.5 και 2.6, μπορούν να εκφραστούν και ως:

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (2.8)$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \quad (2.9)$$

Έτσι, λύνοντας ως προς  $S_1^*$  και  $S_2^*$  τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν οι εξισώσεις ροής φορτίου του συστήματος του Σχήματος 2.1:

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = Y_{11} V_1 V_1^* + Y_{12} V_2 V_1^* \quad (2.10)$$

$$S_2^* = P_2 - jQ_2 = Y_{21} V_1 V_2^* + Y_{22} V_2 V_2^* \quad (2.11)$$

Το παραπάνω παράδειγμα των δύο ζυγών μπορεί πολύ εύκολα να επεκταθεί και για μεγαλύτερα συστήματα.

Η Σχέση 2.10, για ένα σύστημα  $n$  ζυγών, διαμορφώνεται:

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* I_1 = V_1^* \sum_{k=1}^n Y_{1k} V_k \quad (2.12)$$

Έτσι, για έναν οποιοδήποτε ζυγό  $i$  του συστήματος, προκύπτει:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

Όπου  $V_i = |V_i| \angle \delta_i$  και  $Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \gamma_{ik}$

$$\Rightarrow P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| e^{j(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik})} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

Εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη στη Σχέση 2.14, προκύπτουν οι γενικές εξισώσεις ροής φορτίου για ένα σύστημα  $n$  ζυγών [2, 4]:

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \triangleq f_{ip} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \triangleq f_{iq} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

### 2.2.2 Χαρακτηριστικά εξισώσεων ροής φορτίου

Οι εξισώσεις ροής φορτίου παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Είναι μη γραμμικές
2. Η ισορροπία πραγματικής ισχύος εκφράζεται από την άθροιση των εξισώσεων της Σχέσης 2.15. Έτσι, για το σύστημα των δύο ζυγών προκύπτει:

$$P_1 + P_2 = f_{1p} + f_{2p} \Rightarrow$$

$$P_{G1} + P_{G2} = P_{D1} + P_{D2} + f_{1p} + f_{2p} = P_{D1} + P_{D2} + P_L \quad (2.17)$$

Δηλαδή, η παραγόμενη πραγματική ισχύς πρέπει να εξισορροπεί τη ζήτηση του συστήματος  $P_D$ , καθώς και τις απώλειες  $P_L$ , οι οποίες είναι το άθροισμα  $f_{1p}$  και  $f_{2p}$ .

3. Η ισορροπία άεργου ισχύος εκφράζεται από την άθροιση των εξισώσεων της σχέσης 2.16. Έτσι, για το σύστημα των δύο ζυγών:

$$Q_1 + Q_2 = f_{1q} + f_{2q} \Rightarrow$$

$$Q_{G1} + Q_{G2} = Q_{D1} + Q_{D2} + f_{1q} + f_{2q} = Q_{D1} + Q_{D2} + Q_L \quad (2.18)$$

Οι απώλειες  $Q_L$  είναι η διαφορά της άεργου ισχύος που παράγεται στις εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής, από την άεργο ισχύ που καταναλώνεται στην εν σειρά επαγωγική αντίδρασή της.

4. Οι ποσότητες  $f_{ip}$  και  $f_{iq}$  εξαρτώνται μόνο από τις τιμές των διανυσμάτων των τάσεων. Η ίδια εξάρτηση υφίσταται και για τις απώλειες.

$$P_L = P_L(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_n|, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (2.19)$$

$$Q_L = Q_L(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_n|, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (2.20)$$

5. Συνήθως, οι φασικές γωνίες  $\delta_1$  και  $\delta_2$  εμφανίζονται ως διαφορά  $\delta_1 - \delta_2$ . [2, 4]

### 2.2.3 Κατάταξη μεταβλητών συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας 2.2.1, κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεταβλητές:  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ ,  $|V_i|$ ,  $\delta_i$ . Έτσι, θεωρώντας ένα σύστημα  $n$  ζυγών, θα υπάρχουν  $6n$  μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής: Είναι οι μεταβλητές που δεν δύναται να ελεγχθούν, δηλαδή οι πραγματικές και άεργες καταναλώσεις των φορτίων ( $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ ).
- Μεταβλητές ελέγχου ή Ανεξάρτητες: Είναι οι μεταβλητές που υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθούν. Αυτές είναι η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος ( $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ).
- Μεταβλητές κατάστασης ή Εξαρτημένες: Είναι οι μεταβλητές που επηρεάζονται από τη μεταβολή των μεταβλητών ελέγχου  $P_{Gi}$  και  $Q_{Gi}$ . Αυτές είναι τα μέτρα των τάσεων  $|V_i|$  και οι φασικές γωνίες  $\delta_i$ , που ελέγχονται από το  $Q_{Gi}$  και  $P_{Gi}$  αντίστοιχα. [2, 4]

### 2.3 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου

Έστω ένα σύστημα  $n$  ζυγών. Έτσι, εφόσον κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεταβλητές, αυτές θα είναι συνολικά  $6n$ . Από τις Σχέσεις ροής φορτίου 2.15 και 2.16, προκύπτει ότι θα υπάρχουν  $2n$  εξισώσεις που θα πρέπει να επιλυθούν. Επειδή, στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να υπάρξει λύση,  $4n$  μεταβλητές πρέπει να προκαθοριστούν. Ανάλογα με το είδος του ζυγού, οι προκαθορισμένες και οι άγνωστες μεταβλητές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση μεταβλητών συστήματος ανάλογα με το είδος του ζυγού

| Τύπος Ζυγού    | Προκαθορισμένες<br>Μεταβλητές | Άγνωστες Μεταβλητές |
|----------------|-------------------------------|---------------------|
| Αναφοράς       | $ V , \delta, P_D, Q_D$       | $P_G, Q_G$          |
| Ελέγχου Τάσεως | $ V , P_G, P_D, Q_D$          | $\delta, Q_G$       |
| Φορτίου        | $P_G, Q_D, P_D, Q_D$          | $ V , \delta$       |

Το 80% έως 90% των ζυγών ενός συστήματος ανήκουν στην κατηγορία των ζυγών φορτίου. Το υπόλοιπο είναι ζυγοί ελέγχου τάσεως και ένας είναι ο ζυγός αναφοράς. Η τάση του ζυγού αναφοράς ορίζεται  $V = 1\angle 0^\circ$ . Οι γεννήτριες συνδέονται συνήθως στους ζυγούς ελέγχου τάσεως, γι' αυτό συχνά ονομάζονται και ζυγοί παραγωγής.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της αριθμητικής μεθόδου, είναι απαραίτητο να γίνει μια αρχική εκτίμηση των άγνωστων μεταβλητών τάσης και γωνία  $\delta$ . Συνήθως αυτό πραγματοποιείται μέσω flat start, όπου όλες οι τάσεις τίθεται ίσες με  $1\angle 0^\circ$ .

Οι πιο δημοφιλείς αριθμητικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου, είναι η Gauss – Seidel και η Newton – Raphson. Οι μέθοδοι αυτές θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Μετά την ολοκλήρωση της αριθμητικής μεθόδου, απαιτούνται επιπλέον ο υπολογισμός της παραγόμενης πραγματικής και άεργου ισχύος στο ζυγό αναφοράς, μέσω των Σχέσεων 2.15 και 2.16, καθώς και ο υπολογισμός της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς.

Για τον υπολογισμό των ροών ισχύος μεταξύ δύο ζυγών (Σχήμα 2.3), αρχικά υπολογίζεται το ρεύμα  $I_{ij}$  της γραμμής που τους συνδέει:

$$I_{ij} = I_s + I_{pi} = (V_i - V_j)Y_s + V_i Y_{pi} \quad (2.21)$$

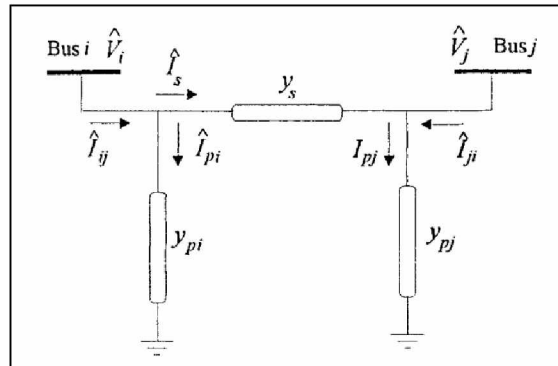
Έτσι, οι ροές ισχύος στις γραμμές διαμορφώνονται:

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i (V_i^* - V_j^*) Y_s^* + |V_i|^2 Y_{pi}^* \quad (2.22)$$

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j (V_j^* - V_i^*) Y_s^* + |V_j|^2 Y_{pj}^* \quad (2.23)$$

Οι απώλειες στη γραμμή είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ρών ισχύος, που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις 2.12 και 2.13 [2, 4]:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.3: Σύστημα δύο ζυγών, για τον υπολογισμό ρών ισχύος στη γραμμή

### 2.3.1 Μέθοδος Gauss – Seidel (G – S)

Η Gauss – Seidel είναι μια από απλούστερες επαναληπτικές μεθόδους. Παλαιότερα, χρησιμοποιούταν εκτεταμένα για την ανάλυση ροής φορτίου των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πλέον, με τη Newton – Raphson να έχει επικρατήσει, η χρήση της περιορίζεται στην ανάλυση μικρών ενεργειακών συστημάτων. Δύναται, επίσης, να χρησιμοποιηθεί και σε μεγάλα συστήματα, κυρίως για τον υπολογισμό προσεγγιστικής λύσης, η οποία θα αξιοποιηθεί ως αρχική από τη μέθοδο Newton – Raphson.

Ο αλγόριθμος Gauss – Seidel για τη ροή φορτίου, ενός συστήματος η ζυγών, είναι ο ακόλουθος:

1. Αρχικά κατασκευάζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων  $Y_{bus}$  του συστήματος, εκφρασμένος σε ανά μονάδα σύστημα (pu).
2. Ορίζονται  $|V_i|=1,0$  και  $\delta_i=0^\circ$  για τους ζυγούς με άγνωστα μέτρα τάσεων και φασικές γωνίες.
3. Για τους ζυγούς φορτίων, η τάση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k^{(v)} \right] \quad (2.25)$$



Όπου  $v$  ο αριθμός της επανάληψης. Για γρηγορότερη σύγκλιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συντελεστής επιτάχυνσης  $a$  (Acceleration Factor - ACC):

$$V_{i,acc}^{(v+1)} = V_{i,acc}^{(v)} + a(V_i^{(v)} - V_{i,acc}^{(v)}) \quad (2.26)$$

Για τους ζυγούς ελέγχου τάσης υπολογίζεται πρώτα η παραγόμενη άεργος ισχύς:

$$Q_i^{(v+1)} = -|V_i|_{spec} \left[ \sum_{k=1}^{i-1} |V_k|^{(v+1)} |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v+1)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) + \sum_{k=i}^n |V_k|^{(v)} |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) \right] \quad (2.27)$$

όπου  $|V_i|_{spec}$  το προκαθορισμένο μέτρο της τάσης του ζυγού. Ο υπολογισμός της παραγόμενης άεργου ισχύος, κατά την επανάληψη  $v+1$ , γίνεται με βάση τις τιμές των τάσεων στην επανάληψη  $v$  ή στην επανάληψη  $v+1$ , για όσες έχουν ήδη υπολογιστεί. Στη συνέχεια, από τη Σχέση 2.25, υπολογίζεται η φασική γωνία της τάσης  $\delta_i$ .

4. Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος της σύγκλισης. Για να προχωρήσει η μέθοδος στο επόμενο στάδιο, πρέπει η απόλυτη τιμή της διαφοράς του πραγματικού μέρους της τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερη μιας ανοχής  $\varepsilon$ :

$$\left| \operatorname{Re}(V_i^{(v+1)}) - \operatorname{Re}(V_i^{(v)}) \right| \leq \varepsilon \quad (2.28)$$

Το ίδιο πρέπει να ισχύει και για τα φανταστικά μέρη των τάσεων:

$$\left| \operatorname{Im}(V_i^{(v+1)}) - \operatorname{Im}(V_i^{(v)}) \right| \leq \varepsilon \quad (2.29)$$

Η ανοχή  $\varepsilon$  είναι, συνήθως, της τάξης  $\varepsilon \leq 10^{-4}$ .

Σε αντίθετη περίπτωση, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο προηγούμενο βήμα.

5. Υπολογίζεται η παραγωγή πραγματικής ( $P_G$ ) και άεργου ισχύος ( $Q_G$ ) στο ζυγό αναφοράς, από τις Σχέσεις 2.15 και 2.16.
6. Υπολογίζονται όλες οι ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, μέσω των Σχέσεων 2.22 και 2.23.

Η μέθοδος Gauss – Seidel χαρακτηρίζεται από ταχύτητα στην εκτέλεση και ευκολία στον προγραμματισμό της. Παρόλα αυτά, συγκλίνει αργά, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αποκλίσεις σε μεγάλα συστήματα, ενώ ο προγραμματισμός της απαιτεί τη χρήση μιγαδικών αριθμών. [2, 4]

### 2.3.2 Μέθοδος Newton – Raphson (N – R)

Όπως αναφέρθηκε, η σύγκλιση της μεθόδου Gauss – Seidel είναι αργή, γεγονός που γίνεται περισσότερο εμφανές σε μεγάλα ενεργειακά συστήματα. Η Newton – Raphson αντίθετα, συγκλίνει εξίσου γρήγορα και για μικρά και για μεγάλα συστήματα, γεγονός που οδήγησε στην επικράτησή της στην ανάλυση ροής φορτίου, παρόλο που αλγοριθμικά είναι πιο σύνθετη από την Gauss – Seidel. Μερικές επαναλήψεις της αρκούν, συνήθως, για την επίτευξη σύγκλισης στο μελετώμενο σύστημα.

Ο αλγόριθμος Newton – Raphson για τη ροή φορτίου, ενός συστήματος  $n$  ζυγών, είναι ο ακόλουθος:

1. Έστω ότι είναι γνωστή μια αρχική σειρά τιμών για τις τάσεις των ζυγών των φορτίων. Οι τάσεις του ζυγού αναφοράς και των ελέγχου τάσης θεωρούνται δεδομένες. Δίνονται, επίσης, οι αρχικές τιμές των φασικών γωνιών  $\delta$  για των ζυγών φορτίων και ελέγχου τάσης.
2. Υπολογίζονται η πραγματική ισχύς ( $P_i$ ) των ζυγών παραγωγής και ελέγχου τάσης, καθώς και η άεργος ισχύς ( $Q_i$ ) των ζυγών ελέγχου τάσης, από τις Σχέσεις 2.15 και 2.16 αντίστοιχα.
3. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι αποκλίσεις  $\Delta P$  και  $\Delta Q$ . Τα στοιχεία των διανυσμάτων  $\Delta P^{(v)}$  και  $\Delta Q^{(v)}$  ορίζονται ως εξής:

$$\Delta P_i^{(v)} = P_{i,spec} - P_i^{(v)} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.30)$$

$$\Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,spec} - Q_i^{(v)} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.31)$$

Τα  $P_i^{(v)}$  και  $Q_i^{(v)}$  υπολογίζονται από τις παρακάτω επαναληπτικές σχέσεις:

$$P_i^{(v)} = \sum_{k=1}^n |V_i|^{(v)} |V_k|^{(v)} |Y_{ik}| \cos(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.32)$$

$$Q_i^{(v)} = - \sum_{k=1}^n |V_i|^{(v)} |V_k|^{(v)} |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.33)$$

4. Υπολογίζεται η Ιακωβιανή μήτρα:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta Q_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(v)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(v)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_2^{(v)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(v)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & H & & | & \vdots & N & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(v)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(v)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_n^{(v)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(v)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & & | & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_2^{(v)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(v)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_2^{(v)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(v)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & M & & | & \vdots & L & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(v)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(v)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n^{(v)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(v)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta |V_2|^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(v)} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

5. Μετά τον υπολογισμό των  $\Delta P^{(v)}$  και  $\Delta Q^{(v)}$  εξετάζεται το κριτήριο σύγκλισης. Αν ικανοποιείται, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα. Στην αντίθετη περίπτωση, προχωρά σε επόμενη επανάληψη (v+1), μετατρέποντας το σύστημα των εξισώσεων ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^{(v)} \\ \Delta|V|^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Με τον τρόπο αυτόν, υπολογίζονται οι νέες τιμές των τάσεων και των γωνιών. Ο αλγόριθμος επιστρέφει στο 2<sup>ο</sup> βήμα και επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρις ότου να επιτευχθεί σύγκλιση.

6. Εφόσον το κριτήριο σύγκλισης (Σχέσεις 2.28 και 2.29) ικανοποιείται, υπολογίζεται η πραγματική P (Σχέση 2.15) και η άεργος ισχύς Q (Σχέση 2.16) του ζυγού αναφοράς, καθώς και οι ροές ισχύος και οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς (Σχέσεις 2.22 και 2.23).

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι ότι η εφαρμογή της μέσω flat start δεν είναι πάντοτε εφικτή, καθώς η λύση ενδέχεται να ταλαντώνεται, χωρίς να συγκλίνει. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτός ο περιορισμός, η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιείται αρχικά μέσω της μεθόδου Gauss – Seidel, και μετά από μερικές επαναλήψεις του, συνεχίζεται μέσω Newton – Raphson. [2, 4]

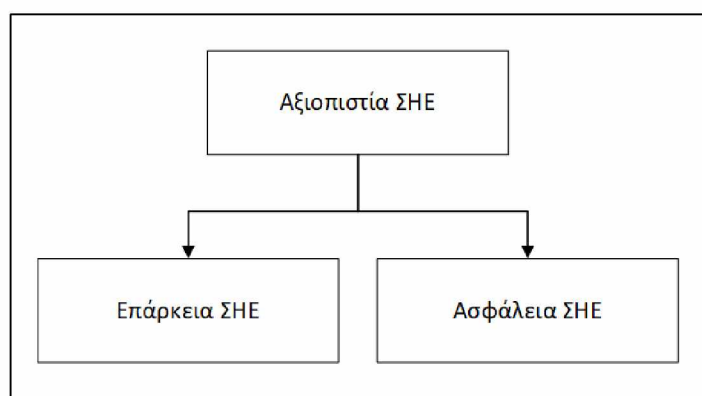
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα, τόσο εξαιτίας της δομής και της διάρθρωσής τους, όσο και της πληθώρας στοιχείων που απαρτίζονται. Σαν αποτέλεσμα, μια ενδεχόμενη απώλεια οποιουδήποτε από τα στοιχεία, εξαιτίας σφάλματος, δύναται να οδηγήσει το μελετώμενο ΣΗΕ σε μια απροσδόκητη κατάσταση λειτουργίας, με άμεσο αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία του. Ταυτόχρονα, οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες της σύγχρονης εποχής έχουν καταστήσει, πλέον, απαραίτητη την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος προς τους καταναλωτές. Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητη η μελέτη και εξασφάλιση της Αξιοπιστίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission – IEC), ως Αξιοπιστία (Reliability) ορίζεται η ικανότητα ενός ΣΗΕ να ικανοποιεί επαρκώς τη ζήτηση, υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Η Αξιοπιστία χωρίζεται σε δύο επιμέρους έννοιες, την Επάρκεια και την Ασφάλεια (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Αξιοπιστία ΣΗΕ και οι υποκατηγορίες της

Ως Επάρκεια (Adequacy), κατά IEC, ορίζεται η ικανότητα ενός ΣΗΕ να παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ και ενέργεια, δίχως την υπέρβαση των ονομαστικών τιμών και των ορίων λειτουργίας του συστήματος, με τις τάσεις των ζυγών και τη συχνότητα του συστήματος να παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις προγραμματισμένες, όσο και τις μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας των

συνιστωσών του συστήματος. Οι μελέτες επάρκειας περιλαμβάνουν τόσο τις μονάδες παραγωγής, όσο και το σύστημα μεταφοράς και διανομής και σχετίζονται με τη μόνιμη κατάσταση του μελετώμενου συστήματος, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη μεταβατικές ή δυναμικές διαταραχές.

Ως Ασφάλεια (Security), κατά IEC, ορίζεται η ικανότητα αντοχής ενός ΣΗΕ σε μια κρίσιμη διαταραχή, χωρίς απώλεια φορτίου, υπερφόρτωση των στοιχείων του συστήματος ή αποκλίσεις των τιμών τάσης και συχνότητας από τα επιτρεπόμενα όρια. Οι διαταραχές αυτές είναι, συνήθως, τοπικές ή εκτεταμένες, και περιλαμβάνουν απότομες απώλειες στην παραγωγή ή/και στο σύστημα μεταφοράς. Η μελέτη της Ασφάλειας ενός ΣΗΕ κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα παραπάνω δύνανται να το οδηγήσουν σε δυναμική ή μεταβατική αστάθεια ή σε αστάθεια τάσης.

Στις ενότητες που ακολουθούν, γίνεται αρχικά αναφορά στην Μελέτη Επάρκειας των ΣΗΕ και στους δείκτες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμησή της, ενώ, στη συνέχεια, αναλύεται η Μελέτη Ασφάλειας, δίνοντας έμφαση στη Στατική Ασφάλεια και στους δείκτες που αξιοποιεί για την ιεράρχηση των διαταραχών. [5, 6, 7, 8]

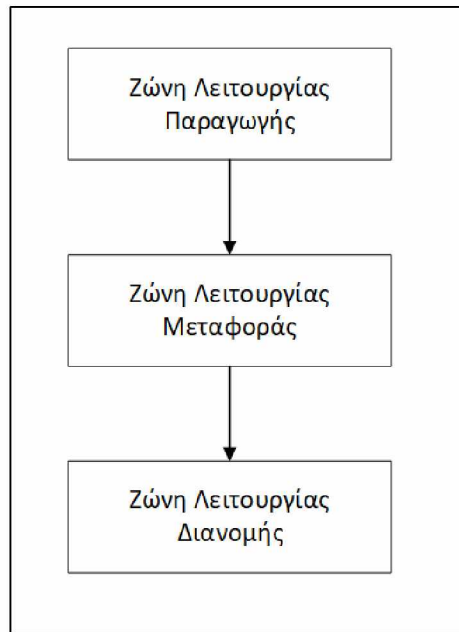
## **3.2 Επάρκεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

### **3.2.1 Εισαγωγή**

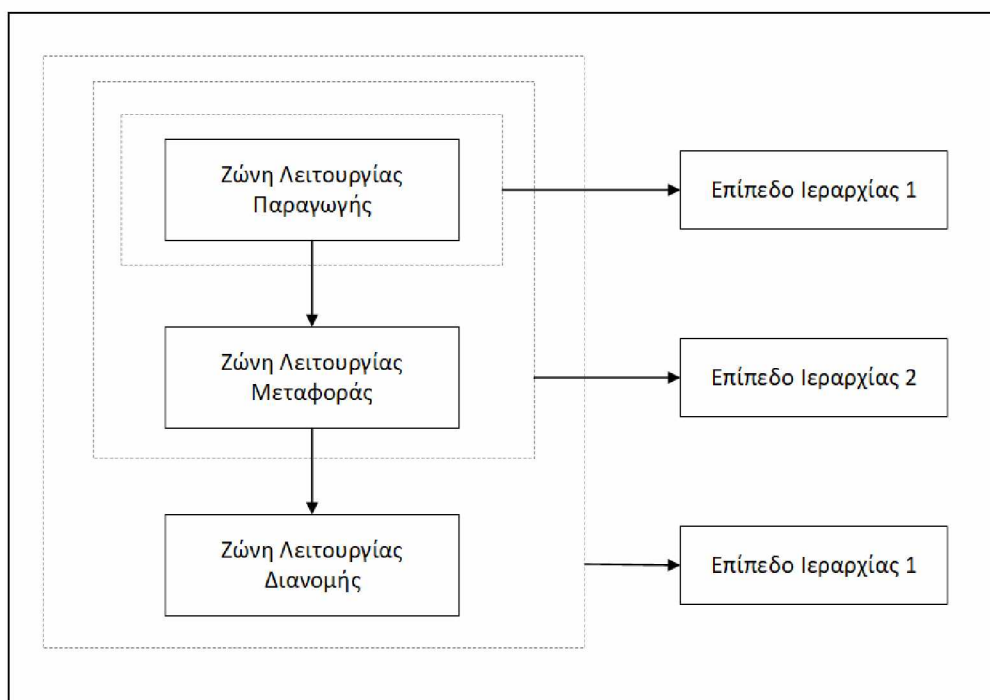
Οι μελέτες εκτίμησης της επάρκειας κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις ζώνες του μελετώμενου ΣΗΕ που επικεντρώνονται. Έτσι, διαμορφώνονται τρεις Ζώνες Λειτουργίας, που περιλαμβάνουν τους τομείς της Παραγωγής, της Μεταφοράς και της Διανομής αντίστοιχα (Σχήμα 3.2), διαχωρισμός ο οποίος εφαρμόζεται και στις περισσότερες μελέτες ανάλυσης των ΣΗΕ. Οι προαναφερθείσες ζώνες λειτουργίας δύνανται να συνδυαστούν, δημιουργώντας έτσι τρία Επίπεδα Ιεραρχίας (Σχήμα 3.3), τα οποία βρίσκουν, επίσης, χρήση στις μελέτες επάρκειας:

1. Επίπεδο Ιεραρχίας 1 (Hierarchical Level 1 – HL1): Περιλαμβάνει τον τομέα παραγωγής.
2. Επίπεδο Ιεραρχίας 2 (Hierarchical Level 1 – HL2): Περιλαμβάνει τους τομείς παραγωγής και μεταφοράς.

3. Επίπεδο Ιεραρχίας 3 (Hierarchical Level 1 – HL3): Περιλαμβάνει τους τομείς παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας που τις χαρακτηρίζει, Μελέτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 3 σε πραγματικά ΣΗΕ συνήθως αποφεύγονται.



Σχήμα 3.2: Βασικές Ζώνες Λειτουργίας ΣΗΕ



Σχήμα 3.3: Επίπεδα Ιεραρχίας ΣΗΕ

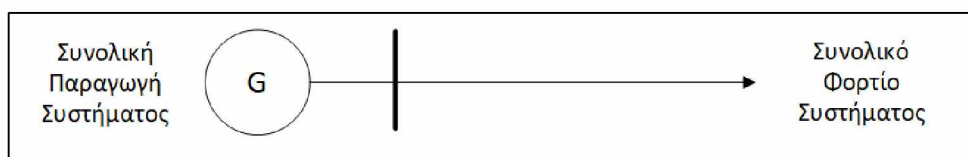
Στις Μελέτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 2 συστημάτων με σύνθετο σύστημα μεταφοράς, συνήθως δεν μελετάται το σύστημα εξ' ολοκλήρου, αλλά συγκεκριμένοι τομείς του και στη συνέχεια τα αποτελέσματα ανάγονται για όλο το σύστημα. Με τον τρόπο αυτό, τα

εξαγόμενα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά, συγκριτικά με αυτά που θα προέκυπταν από τον μελέτη ολόκληρου του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο ότι τυχόν μεταβολές στο επίπεδο της Μεταφοράς επηρεάζουν μεν την αξιοπιστία μιας μικρής περιοχής, αλλά ο αντίκτυπός τους, δε, στην αξιοπιστία απομακρυσμένων τμημάτων του συστήματος είναι περιορισμένος. Ιδιαίτερα στις μελέτες ενίσχυσης τμημάτων ενός ΣΗΕ, η επιλογή ολόκληρου του συστήματος, για μελέτη αξιοπιστίας, δύναται να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα ως προς τις αποφάσεις που θα μπορούσαν να ληφθούν.

Σε πραγματικά ΣΗΕ, είναι σύνηθες οι μελέτες επάρκειας να πραγματοποιούνται σε επίπεδο Ζωνών Λειτουργίας, παρά Επιπέδων Ιεραρχίας, λόγω του μεγέθους και της πολυπλοκότητας που τα χαρακτηρίζει. Συνήθως, επιλέγονται προς μελέτη μικρότεροι τομείς του συστήματος, κυρίως στο Σύστημα Υπομεταφοράς ή Διανομής, τομείς με μικρή επιρροή από τις μονάδες παραγωγής, προκειμένου να εξεταστεί ο αντίκτυπος στην επάρκεια του ΣΗΕ από συγκεκριμένες μεταβολές στον εξοπλισμό και την τοπολογία. [8]

### 3.2.2 Μελέτη Επιπέδου Ιεραρχίας 1

Σκοπός των Μελετών Επιπέδου Ιεραρχίας 1 είναι να διαπιστωθεί η επάρκεια της συνολικής παραγωγής του συστήματος, αναφορικά με την κάλυψη των συνολικών απαιτήσεων φορτίου. Οι μελέτες αυτές αναφέρονται επίσης και ως Μελέτες Αξιοπιστίας Ικανότητας Παραγωγής. Το μοντέλο που αντιπροσωπεύει το μελετώμενο σύστημα στο Επιπέδου Ιεραρχίας 1 απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Μοντέλο Συστήματος Επιπέδου Ιεραρχίας 1

Βασικός στόχος είναι να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς που απαιτείται, ούτως ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση των καταναλωτών, αλλά και να είναι δυνατές τυχόν παρεμβάσεις διόρθωσης και συντήρησης των μονάδων παραγωγής. Κατά το παρελθόν, η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιούταν ήταν Μέθοδος Ποσοστού Αποθεματικού, σύμφωνα με την οποία η απαιτούμενη εφεδρεία αποτελεί καθορισμένο ποσοστό είτε της εγκατεστημένης ισχύος είτε του συνολικού φορτίου του συστήματος. Πλέον, τέτοιες μέθοδοι

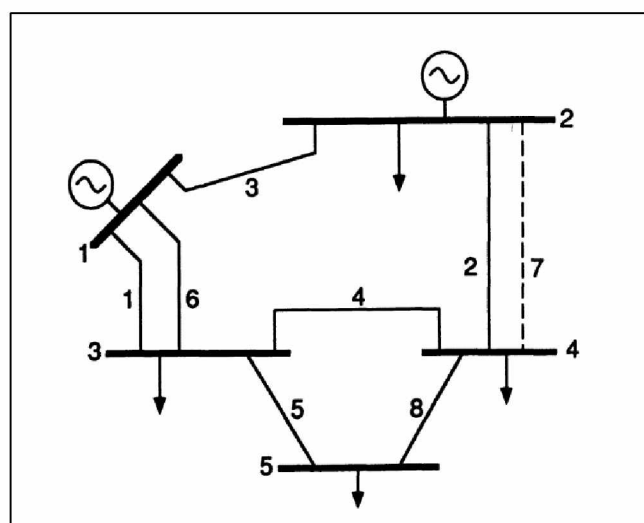


έχουν αντικατασταθεί από πιθανοτικές μεθόδους, οι οποίες μοντελοποιούν πιο αποτελεσματικά τους παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του μελετώμενου συστήματος.

Κατά τη διενέργεια Μελετών Αξιοπιστίας Ικανότητας Παραγωγής δεν λαμβάνονται υπόψη τόσο το Σύστημα Μεταφοράς, όσο και η ικανότητά του να μεταφέρει την παραγόμενη ισχύ στα φορτία των καταναλωτών. Παρόλα αυτά, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στη μελέτη τόσο οι απομακρυσμένες μονάδες παραγωγής, όσο και τα διασυνδεδεμένα συστήματα, μέσω της μοντελοποίησης των διασυνδετικών γραμμών μεταξύ τους. Για τη μελέτη συστημάτων με παραγωγή σε πολλές περιοχές, χρησιμοποιούνται μέθοδοι που αξιοποιούν τη ροή φορτίου. [8]

### 3.2.3 Μελέτη Επιπέδου Ιεραρχίας 2

Όπως προαναφέρθηκε, το Επίπεδο Ιεραρχίας 2 αποτελεί ουσιαστικά επέκταση του Επιπέδου 1, καθώς συμπεριλαμβάνει και το σύστημα μεταφοράς. Το αντίστοιχο μοντέλο που χρησιμοποιείται, στο οποίο περιλαμβάνονται τόσο οι μονάδες παραγωγής, όσο και το σύστημα μεταφοράς, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Οι μελέτες Επιπέδου Ιεραρχίας 2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αξιοπιστίας τόσο υπάρχοντων συστημάτων, όσο και συστημάτων που βρίσκονται ακόμα στο στάδιο του σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν σενάρια αναβάθμισης και ενίσχυσης στους τομείς της παραγωγής και της μεταφοράς. Χαρακτηρίζονται και ως μελέτη αξιοπιστίας σύνθετου ή μεγάλου όγκου συστήματος.



Σχήμα 3.5: Ενδεικτικό μοντέλο συστήματος Επιπέδου Ιεραρχίας 2

Οι μελέτες αυτές αξιοποιούν δείκτες δύο ειδών:

- Δείκτες Μεμονωμένων Ζυγών (Φορτία)
- Γενικοί Δείκτες Συστήματος

Οι Γενικοί Δείκτες Συστήματος χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος, ενώ οι Δείκτες Μεμονωμένων Ζυγών, όπως το μαρτυρά και το όνομά τους, για την εκτίμηση της αξιοπιστίας συγκεκριμένων ζυγών. Επιπλέον, οι τελευταίοι δύναται να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, χρήσιμων για τυχόν Μελέτες Επιπέδου Ιεραρχίας 3, στο δίκτυο διανομής.

Οι προαναφερθείσες κατηγορίες δεικτών, κατηγοριοποιούνται, επίσης, σε:

- Δείκτες ανηγμένους σε Ετήσια Βάση
- Ετήσιους Δείκτες

Οι ανηγμένοι σε Ετήσια Βάση Δείκτες υπολογίζονται μέσω της επιλογής ενός επιπέδου της τιμής του φορτίου, συνήθως το φορτίο αιχμής του συστήματος, το οποίο στη συνέχεια ανάγεται σε βάθος ενός έτους. Οι Ετήσιοι Δείκτες, απ' την άλλη, υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μεταβολές των τιμών του φορτίου σε βάθος ενός έτους. Γενικότερα, οι ανηγμένοι σε Ετήσια Βάση Δείκτες αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμοι κατά τη σύγκριση μελετών αξιοπιστίας με διαφορετικά σενάρια ενισχύσεων και αναβαθμίσεων, ενώ οι Ετήσιοι Δείκτες εκφράζουν πιο ρεαλιστικά και αντιπροσωπευτικά την επάρκεια ενός συστήματος. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι παρόλο που οι παραπάνω δείκτες εμπεριέχουν και το σύστημα μεταφοράς, παραμένουν δείκτες επάρκειας και δεν εκφράζουν την αντίδραση του συστήματος κατά τη διάρκεια διαταραχών. [8]

### 3.2.4 Μελέτη Επιπέδου Ιεραρχίας 3

Οι Μελέτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 3 χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα, για την πλειονότητα των ΣΗΕ, καθώς σε αυτές περιλαμβάνονται και τις τρεις Ζώνες Λειτουργίας (παραγωγή, μεταφορά, διανομή), δηλαδή καλύπτουν όλο το εύρος από τις μονάδες παραγωγής, έως και τα φορτία των καταναλωτών. Για τον λόγο αυτό, η ζώνη λειτουργίας της διανομής δύναται να μελετηθεί ξεχωριστά. Οι δείκτες του Επιπέδου

Ιεραρχίας 3 προκύπτουν από τους αντίστοιχους του επιπέδου 2, που αφορούν τους ζυγών φορτίων του συστήματος.

Τα δίκτυα διανομής διαρθρώνονται είτε υπό μορφή βρόχου, είτε υπό ακτινική μορφή. Για τα βροχοειδή δίκτυα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τις μελέτες επάρκειας ομοιάζουν με αυτές των σύνθετων συστημάτων. Από την άλλη, στα ακτινικά δίκτυα, εφαρμόζονται τεχνικές που βασίζονται στην ανάλυση αστοχίας λειτουργίας, δηλαδή περιλαμβάνουν όλες τις πιθανές δυσλειτουργίες που ενδέχεται να προκύψουν, καθώς και τις αντίστοιχες ενέργειες για την αποκατάστασή τους.

Οι Μελέτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 3 είναι ιδιαίτερως σημαντικές, καθώς, μέσω αυτών, εκφράζεται η επάρκεια του συστήματος σε επίπεδο καταναλωτή, καθώς, στα περισσότερα ΣΗΕ, η μη επάρκεια στους καταναλωτές οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη λειτουργία του δικτύου διανομής. [8]

### 3.2.5 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδων Ιεραρχίας

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, οι μελέτες εκτίμησης της επάρκειας ενός ΣΗΕ αξιοποιούν κατάλληλους δείκτες. Οι δείκτες αυτοί διαφοροποιούνται και επηρεάζονται όχι μόνο από το επίπεδο ιεραρχίας, αλλά και από τη διαθεσιμότητα στοιχείων του δικτύου, τα χαρακτηριστικά και την αβεβαιότητα των φορτίων, καθώς και από τη διαμόρφωση και τις καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου. Οι τιμές που λαμβάνουν οι δείκτες δεν είναι ντετερμινιστικές, αλλά αποτελούν ουσιαστικά την μακροπρόθεσμη μέση τιμή των παραμέτρων του μελετώμενου συστήματος. Στις ενότητες που ακολουθούν, θα παρουσιαστούν οι δείκτες εκτίμησης της επάρκειας για τα επίπεδα ιεραρχίας 1,2 και 3. [8]

### 3.2.6 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 1

Οι τέσσερις βασικοί δείκτες επάρκειας του Επιπέδου Ιεραρχίας 1 είναι οι ακόλουθοι:

1. Δείκτης Εκτίμησης Απώλειας Φορτίου (*Loss Of Load Expectation – LOLE*)

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i T \quad (3.1)$$

Όπου  $p_i$  η πιθανότητα να βρεθεί το σύστημα στην κατάσταση  $i$  και  $S$  το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων απώλειας φορτίου του συστήματος. Εκφράζεται σε μέρες/έτος ή ώρες/έτος. Ο δείκτης LOLE εκφράζει τον μέσο όρο των ημερών/ωρών σε μια χρονική περίοδο (συνήθως σε βάθος έτους), στις οποίες η ημερήσια αιχμή του φορτίου ή το ωριαίο φορτίο αναμένεται να είναι μεγαλύτερο από τη διαθέσιμη παραγωγή του συστήματος. Όταν ο δείκτης LOLE εκφράζεται σε μέρες/έτος συσχετίζει την ημερήσια αιχμή του φορτίου με τη διαθέσιμη παραγωγή, ενώ όταν εκφράζεται σε ώρες/έτος το ωριαίο φορτίο με τη διαθέσιμη παραγωγή.

## 2. Δείκτης Εκτίμησης Απώλειας Ενέργειας (*Loss Of Energy Expectation – LOEE*)

$$LOEE = \sum_{i \in S} 8760 C_i p_i \quad (3.2)$$

Όπου  $P_i$  η απώλεια φορτίου στην κατάσταση  $i$ ,  $C_i$  και  $S$  όπως ορίστηκαν παραπάνω. Εκφράζεται σε MWh/έτος την ενέργεια την οποία οι μονάδες παραγωγής αδυνατούν να παρέχουν στο σύστημα, όταν η ζήτηση φορτίου ξεπερνά τη διαθέσιμη παραγωγή του συστήματος. Ο δείκτης LOEE βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα με παρουσία μονάδων ΑΠΕ στην παραγωγή ισχύος. Μέσω της διαίρεσης της ενέργειας που εν τέλει παρέχεται στο σύστημα με την συνολική ζήτηση ενέργειας, προκύπτει ο Δείκτης Ενεργειακής Αξιοπιστίας (*Energy Index of Reliability – EIR*). Μέσω της χρήσης του EIR δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης της επάρκειας συστημάτων που διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους ως προς το μέγεθος.

## 3. Δείκτης Συχνότητας Απώλειας Φορτίου (*Loss Of Load Frequency - LOLF*)

$$LOLF = \sum_{i \in S} (F_i - f_i) \quad (3.3)$$

Όπου  $F_i$  η συχνότητα εμφάνισης της αποκλίνουσας κατάστασης  $i$  του συστήματος και  $f_i$  το τμήμα εκείνο της  $F_i$  που βρίσκεται εκτός των ορίων που ορίζονται από τις καταστάσεις απώλειας και μη απώλειας φορτίου. Εκφράζεται σε συμβάντα/έτος.

#### 4. Δείκτης Διάρκειας Απώλειας Φορτίου (*Loss Of Load Duration – LOLD*)

$$LOLD = \frac{LOLE}{LOLF} \quad (3.4)$$

Εκφράζεται σε ώρα/διαταραχή και αποτελεί μια επέκταση του δείκτη LOLE, συνδυάζοντας τη συχνότητα εμφάνισης με τη διάρκεια μιας διαταραχής επάρκειας. Παρόλα αυτά η χρήση του δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στις μελέτες αξιολόγησης των συστημάτων παραγωγής, παρόλο που η συχνότητα και η διάρκεια εμφάνισης μιας διαταραχής είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε συστήματα μεταφοράς και σύνθετα συστήματα. [8]

#### 3.2.7 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 2

Η χρήση των δεικτών επάρκειας του Επιπέδου Ιεραρχίας 1, που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δύνανται να επεκταθεί και για τη μελέτη επάρκειας του Επιπέδου 2. Επιπρόσθετα με αυτούς, χρησιμοποιούνται και άλλοι δείκτες, οι οποίοι εκφράζουν αποτελεσματικότερα την πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει το σύστημα μεταφοράς.

Οι κυριότεροι δείκτες επάρκειας του Επιπέδου Ιεραρχίας 2 είναι οι ακόλουθοι:

##### 1. Πιθανότητα Περικοπής Φορτίου (*Probability of Load Curtailments – PLC*)

$$PLC = \sum_{i \in S} p_i \quad (3.5)$$

Όπου  $p_i$  η πιθανότητα να βρεθεί το σύστημα στην κατάσταση  $i$  και  $S$  το σύνολο όλων των καταστάσεων του συστήματος που εμφανίζεται περικοπή φορτίου.

##### 2. Αναμενόμενη Συχνότητα Περικοπής Φορτίου (*Expected Frequency of Load Curtailments – EFLC*)

Εκφράζεται σε συμβάντα/έτος και ορίζεται ομοίως με τον δείκτη LOLF του Επιπέδου Ιεραρχίας 1. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι στις μελέτες επάρκειας που συμπεριλαμβάνεται και το σύστημα μεταφοράς ο υπολογισμός του δείκτη της συχνότητας είναι σύνθετη διαδικασία, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι καταστάσεις περικοπής φορτίου για κάθε κατάσταση  $i$ . Για τον λόγο αυτό, η χρήση

του είναι περιορισμένη και έχει αντικατασταθεί από τον Δείκτη Αναμενόμενου Αριθμού Περικοπής Φορτίου (Expected Number of Load Curtailments – ENLC), ο οποίος ορίζεται ως:

$$ENLC = \sum_{i \in S} F_i \quad (3.6)$$

Ο ENLC αποτελεί το άθροισμα των συμβάντων περικοπής φορτίου, όντας ουσιαστικά το άνω όριο του πραγματικού συντελεστή συχνότητας. Οι τιμές των EFLC και ENLC ενδέχεται να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, με τον ENLC να υπερεκτιμά την πραγματική συχνότητα. Το γεγονός αυτό, συνήθως, δεν δημιουργεί προβλήματα, καθώς στις περισσότερες μελέτες επάρκειας Επιπέδου 2 δεν απαιτείται απόλυτη ακρίβεια. Η συχνότητα εμφάνισης μιας κατάστασης περικοπής φορτίου  $F_i$  δύναται να υπολογιστεί, συναρτήσει της πιθανότητας εμφάνισης  $p_i$  της κατάστασης, απ' τη σχέση:

$$F_i = p_i \sum_{k \in S} \lambda_k \quad (3.7)$$

Όπου  $\lambda_k$  ο βαθμός απόκλισης της συνιστώσας  $k$  του συστήματος, για την κατάσταση  $i$ , και  $N$  το σύνολο όλων των πιθανών βαθμών απόκλισης που αφορούν την κατάσταση  $i$ .

### 3. Αναμενόμενη Διάρκεια Περικοπής Φορτίου (Expected Duration of Load Curtailments – EDLC)

$$EDLC = PLC * 8 \quad (3.8)$$

Εκφράζεται σε ώρες/έτος.

### 4. Μέση Διάρκεια Περικοπής Φορτίου (Average Duration of Load Curtailments – ADLC)

$$ADLC = EDLC/EFLC \quad (3.9)$$

Εκφράζεται σε ώρες/διαταραχές και είναι όμοιος με τον δείκτη LOLD του Επιπέδου Ιεραρχίας 1.

5. Αναμενόμενες Περικοπές Φορτίου (*Expected Load Curtailments – ELC*)

$$ELC = \sum_{i \in S} C_i F_i \quad (3.10)$$

Όπου  $C_i$  η περικοπή φορτίου στην κατάσταση  $i$  του συστήματος. Εκφράζεται σε MW/έτος.

6. Αναμενόμενη Μη Παρεχόμενη Ζήτηση (*Expected Demand Not Supplied – EDNS*)

$$EDNS = \sum_{i \in S} C_i p_i \quad (3.11)$$

Εκφράζεται σε MW.

7. Αναμενόμενη Μη Παρεχόμενη Ενέργεια (*Expected Energy Not Supplied – EENS*)

$$EENS = \sum_{i \in S} C_i F_i D_i = \sum_{i \in S} 8760 C_i p_i \quad (3.12)$$

Όπου  $D_i$  η διάρκεια της κατάστασης  $i$  του συστήματος. Εκφράζεται σε MWh/έτος. Είναι όμοιος με τον δείκτη LOEE του Επιπέδου Ιεραρχίας 1, αποτελώντας έναν πολύ σημαντικό δείκτη για την εκτίμηση επάρκειας σύνθετων συστημάτων.

8. Δείκτης Μαζικής Διακοπής Ισχύος (*Bulk Power Interruption Index – BPPI*)

$$BPPI = \sum_{i \in S} C_i F_i / L \quad (3.13)$$

Όπου  $L$  η ετήσια αιχμή του φορτίου σε MW. Εκφράζεται σε MW/MW-έτος.

9. Δείκτης Αποκοπής Μαζικής Ισχύος/Ενέργειας (*Bulk Power/Energy Curtailment Index – BPECI*)

$$BPECI = EENS / L \quad (3.14)$$

Εκφράζεται σε MWh/MW-έτος.

10. Δείκτης Περικοπής Μέσης Μαζικής Παροχής Ισχύος (*Bulk Power-Supply Average MW Curtailment Index – BPACI*)

$$BPACI = ELC / EFLC \quad (3.15)$$

Εκφράζεται σε MW/διαταραχή.

11. Τροποποιημένος Δείκτης Αποκοπής Μαζικής Ισχύος (*Modified Bulk Power Curtailment Index – MBPCI*)

$$MBPCI = EDNS / L \quad (3.16)$$

Εκφράζεται σε MW/MW.

12. Δείκτης Σοβαρότητας (*Severity Index – SI*)

$$SI = BPECI * 60 \quad (3.17)$$

Εκφράζεται σε min/έτος. Ο δείκτης αυτός αποτελεί ουσιαστικά τη διάρκεια σε min της απώλειας όλου του φορτίου, κατά τη διάρκεια καταστάσεων αιχμής του φορτίου. Μια ενδεχόμενη ολοκληρωτική απώλεια φορτίου του συστήματος, κατά τη διάρκεια αιχμής, συνεισφέρει με τη διάρκειά της σε min στη διαμόρφωση του δείκτη SI.

Συνοψίζοντας, οι δείκτες (1) έως (7) αποτελούν ουσιαστικά τους βασικούς που χρησιμοποιούνται στις μελέτες επάρκειας του Επιπέδου Ιεραρχίας 2, με τους δείκτες (8) έως (12) να προκύπτουν μέσω αυτών. Οι δείκτες (8) έως (12) έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση επάρκειας μεταξύ συστημάτων με διαφορετικό μέγεθος το καθένα. Οι (1) έως (7) εφαρμόζονται είτε σε όλο το μελετώμενο σύστημα, είτε σε ένα μεμονωμένο ζυγό, ενώ οι (8) έως (12) αποκλειστικά στο σύνολο του συστήματος. [8]

### 3.2.8 Δείκτες Επάρκειας Επιπέδου Ιεραρχίας 3

Οι τρεις βασικοί δείκτες επάρκειας στο επίπεδο του δικτύου διανομής είναι οι ακόλουθοι:

- Ποσοστό Αποτυχίας Φορτίου: λ



- Διάρκεια Διακοπής Φορτίου στον Ζυγό Φορτίου:  $r$
- Ετήσια Μη Διαθεσιμότητα Φορτίου:  $U$

Όλοι οι υπόλοιποι δείκτες υπολογίζονται κάνοντας χρήση των τριών παραπάνω. Στη συνέχεια της ενότητας, παρουσιάζονται οι κυριότεροι δείκτες εκτίμησης επάρκειας που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο του δικτύου διανομής.

1. Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών Συστήματος (*System Average Interruption Frequency Index – SAIFI*)

$$SAIFI = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad (3.18)$$

Όπου  $\lambda_i$  το ποσοστό αποτυχίας,  $N_i$  ο αριθμός των καταναλωτών στον ζυγό φορτίου  $i$  του δικτύου και  $R$  το σύνολο των ζυγών φορτίου του συστήματος. Εκφράζεται σε διακοπές/καταναλωτή/έτος.

2. Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών Συστήματος (*System Average Interruption Duration Index – SAIDI*)

$$SAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad (3.19)$$

Όπου  $U_i$  η ετήσια μη διαθεσιμότητα φορτίου ή χρόνος διακοπής (h/έτος) στον ζυγό φορτίου  $i$ . Εκφράζεται σε h/καταναλωτή συστήματος/έτος.

3. Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών Καταναλωτή (*Customer Average Interruption Frequency Index – CAIFI*)

$$CAIFI = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} M_i} \quad (3.20)$$

Όπου  $M_i$  ο αριθμός των καταναλωτών που επηρεάζονται στον ζυγό φορτίου  $i$ . Εκφράζεται σε διακοπές/καταναλωτή που επηρεάζεται/έτος. Κάθε καταναλωτής που επηρεάζεται πρέπει να προσμετράται μόνο μια φορά, ανεξαρτήτως των διακοπών που ενδέχεται να τον επηρεάσουν μέσα στο έτος. Ο δείκτης CAIFI είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για συγκρίσεις μεταξύ δύο ημερολογιακών ετών.

4. Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών Καταναλωτή (*Customer Average Interruption Duration Index – CAIDI*)

$$CAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3.21)$$

Εκφράζεται σε η/διακοπή καταναλωτή.

5. Δείκτης Μέσης Διαθεσιμότητας Υπηρεσιών (*Average Service Availability Index – ASAI*)

$$ASAI = \frac{\sum_{i \in R} 8760 N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i} \quad (3.22)$$

6. Δείκτης Μέσης Μη Διαθεσιμότητας Υπηρεσιών (*Average Service Unavailability Index – ASUI*)

$$ASUI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i} \quad (3.23)$$

7. Μη Παρεχόμενη Ενέργεια (*Energy Not Supplied – ENS*)

$$ENS = \sum_{i \in R} P_{ai} U_i \quad (3.24)$$

Όπου  $P_{ai}$  η μέση ισχύς του φορτίου που τροφοδοτεί ο ζυγός  $i$  (σε kW) και  $U_i$  ο ετήσιος χρόνος διακοπών (σε η/έτος) στον ζυγό  $i$ . Εκφράζεται σε kWh/έτος.

8. Μέση Μη Παρεχόμενη Ενέργεια (*Average Energy Not Supplied – AENS*)

$$AENS = \frac{ENS}{\sum_{i \in R} N_i} \quad (3.25)$$

Εκφράζεται σε kWh/καταναλωτή/έτος.

9. Δείκτης Μέσης Περικοπής Καταναλωτή (Average Customer Curtailment Index – ACCI)

$$ACCI = \frac{ENS}{\sum_{i \in R} M_i} \quad (3.26)$$

Εκφράζεται σε kWh/καταναλωτή που επηρεάζεται/έτος. [8]

### 3.3 Ασφάλεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν τα σύγχρονα ΣΗΕ, σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτηση φορτίου από τη μεριά των καταναλωτών, έχουν κάνει πλέον επιτακτική τη διασφάλιση και διαφύλαξη της Ασφάλειας του εκάστοτε μελετώμενου συστήματος. Η Ασφάλεια ενός ΣΗΕ εκφράζει την ικανότητά του να παρέχει αδιάλειπτα ισχύ στα φορτία των καταναλωτών, παρά τις διαταραχές που ενδέχεται να προκύψουν, διατηρώντας ταυτόχρονα τα μέτρα των τάσεων και των ροών ισχύος εντός των προκαθορισμένων ορίων, χωρίς να παραβιάζονται τα επιβαλλόμενα όρια λειτουργίας και ασφάλειας. Τέτοιες διαταραχές είναι, συνήθως, η αποκοπή μιας γραμμής μεταφοράς, γεννήτριας ή μετασχηματιστή από το δίκτυο, καθώς και ξαφνικές αλλαγές στην παραγόμενη ισχύ ή τη ζήτηση του φορτίου των καταναλωτών. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο οι διαταραχές αυτές να ληφθούν υπόψη από τους διαχειριστές των ΣΗΕ, μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλων μέσων προληπτικού ελέγχου, διασφαλίζοντας έτσι, όχι μόνο την ακεραιότητα του συστήματος, αλλά και την αδιάλειπτη παροχή ισχύος.

Η ανάλυση ασφάλειας δύναται να χωριστεί σε δύο επιμέρους κατηγορίες: την ανάλυση στατικής και την ανάλυση μεταβατικής ασφάλειας. Η ανάλυση στατικής ασφάλειας, γνωστή και ως Ανάλυση Διαταραχών (Contingency Analysis), αφορά στην αξιολόγηση της νέας μόνιμης κατάστασης, που προκύπτει μετά την εκδήλωση μιας διαταραχής, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος. Οι μελέτες μεταβατικής ασφάλειας, από την άλλη, καλύπτουν αξιολογούν το σύστημα ακριβώς μετά την εκδήλωση της διαταραχής. Η παρούσα ενότητα θα επικεντρωθεί αποκλειστικά στην ανάλυση της στατικής ασφάλειας των ΣΗΕ.

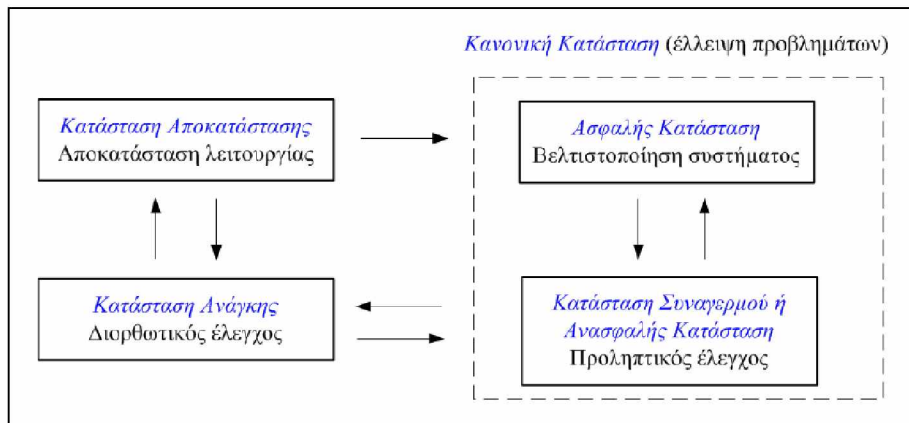
Κλείνοντας, οι μελέτες ασφάλειας των ΣΗΕ δίνουν πολύτιμες πληροφορίες στους διαχειριστές ενός συστήματος αναφορικά με τις επιπτώσεις των διαταραχών σε αυτό και κατ' επέκταση στους καταναλωτές που τροφοδοτεί, όπως υπερφόρτωση γεννητριών και γραμμών μεταφοράς ή πτώσεις τάσης των ζυγούς του συστήματος. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν, συνήθως, πλήθος σεναρίων διαταραχών, τα οποία στη συνέχεια αξιολογούνται και ταξινομούνται, μέσω κατάλληλων μεθόδων, ανάλογα με τη σοβαρότητά τους. Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται μέθοδοι που αξιοποιούν την Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. [9, 10, 11]

### 3.3.2 Καταστάσεις Λειτουργίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι μελέτες ασφάλειας των ΣΗΕ προϋποθέτουν την ταξινόμηση των πιθανών καταστάσεων, που μπορεί να βρεθεί το μελετώμενο σύστημα, ανάλογα με τον βαθμό ασφαλείας που χαρακτηρίζονται. Οι τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 3.6):

- *Ασφαλής Κατάσταση:* Στην κατάσταση αυτή ικανοποιούνται τόσο η ζήτηση φορτίου των καταναλωτών, όσο και οι περιορισμοί λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, οι γεννήτριες και ο υπόλοιπος εξοπλισμός βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας, ενώ τηρούνται όλα τα προβλεπόμενα κριτήρια ασφαλείας.
- *Κατάσταση Συναγερμού – Ανασφαλής Κατάσταση:* Στην κατάσταση αυτή δεν ικανοποιούνται τα προβλεπόμενα κριτήρια ασφαλείας, χωρίς, όμως, να παραβιάζονται τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας.
- *Κατάσταση Ανάγκης:* Στην κατάσταση αυτή έχουν παραβιαστεί κάποια από τα όρια λειτουργίας του συστήματος (π.χ. υπερφόρτωση κάποιας γεννήτριας ή γραμμής μεταφοράς, πτώση τάσης ζυγών), εξαιτίας της εκδήλωσης κάποιας διαταραχής ή απροσδόκητης μεταβολής της ζήτησης φορτίου από τους καταναλωτές. Στην περίπτωση που το μελετώμενο σύστημα περιέλθει σε Κατάσταση Ανάγκης, είναι απαραίτητη η διενέργεια διορθωτικών ενεργειών από τον διαχειριστή, για την εξάλειψη των παραβιάσεων των ορίων λειτουργίας, ούτως ώστε αυτό να επανέλθει στην Ασφαλή Κατάσταση.

- *Κατάσταση Αποκατάστασης*: Στην κατάσταση αυτή, μετά την εκδήλωση μιας διαταραχής, ο διαχειριστής του συστήματος ή τα μέσα προστασίας, διακόπτουν την τροφοδοσία κάποιων φορτίων καταναλωτών, προκειμένου να αποτρέψουν την εκδήλωση σοβαρότερων προβλημάτων στο σύστημα, όπως απόρριψη φορτίου. Η νέα αυτή κατάσταση που έχει διαμορφωθεί, πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα από τον διαχειριστή, για την αποκατάσταση του συστήματος και τη μετάβασή του στην Ασφαλή Κατάσταση.



Σχήμα 3.6: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Οι Διορθωτικές Ενέργειες (Remedial Action Schemes – RAS) των διαχειριστών είναι άμεσα συνδεδεμένες με την εκάστοτε κατάσταση που έχει περιέλθει το σύστημα. Πρώτη και σημαντικότερη προτεραιότητα των διορθωτικών ενεργειών, όταν το σύστημα βρίσκεται σε Κατάσταση Ανάγκης, είναι η μετάβαση σε μια κανονική κατάσταση, είτε Ασφαλή είτε Ανασφαλή, με την οικονομική λειτουργία του συστήματος να παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Όταν πλέον, το σύστημα και οι συνιστώσες του βρεθούν εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας, τότε προτεραιότητα για τους διαχειριστές αποτελεί πλέον η οικονομική λειτουργία του συστήματος, δηλαδή η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και η κατανομή της συνολικής παραγωγής μεταξύ των πλέον οικονομικών μονάδων. Η επιλογή των κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών γίνεται πάντα συναρτήσει της ασφάλειας και της οικονομίας του συστήματος, χωρίς να είναι πάντοτε εύκολο να εξασφαλιστούν και τα δύο ταυτοχρόνως. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η διαρκής αξιολόγηση των καταστάσεων του συστήματος και η διαμόρφωση προτεραιοτήτων για τις αποφάσεις που θα ληφθούν, προκειμένου να επιλέγεται κάθε φορά η βέλτιστη διορθωτική ενέργεια για το σύστημα. Πολλές φορές, εξαιτίας της παροδικότητας των διαταραχών, η ενεργοποίηση των συστημάτων ασφαλείας του συστήματος, όπως το άνοιγμα και το κλείσιμο των διακοπών ισχύος,

δύναται να είναι αρκετό για την εκκαθάριση του σφάλματος και την αντιμετώπιση της διαταραχής, χωρίς να είναι απαραίτητη η λήψη διορθωτικών ενεργειών από τους διαχειριστές του δικτύου. [9, 11]

### 3.3.3 Είδη Διαταραχών και Επιπτώσεις

Οι κυριότερες μορφές διαταραχών που εμφανίζονται στα ΣΗΕ είναι αποσυνδέσεις γεννητριών, γραμμών μεταφοράς ή μετασχηματιστών. Οι επιπτώσεις τους στο σύστημα είναι οι ακόλουθες:

- *Παραβιάσεις Ορίων Τάσεων:* Εμφανίζονται στους ζυγούς του συστήματος. Το επιτρεπτό εύρος της τιμής της τάσης ενός ζυγού ορίζεται, συνήθως μεταξύ 0,95 – 1,05pu. Για τιμές τάσεων μικρότερες των 0,95pu, ο μελετώμενος ζυγός παρουσιάζει προβλήματα πτώσης τάσης (υπόταση), ενώ για τιμές άνω των 1,05pu, προβλήματα ανύψωσης τάσης (υπέρταση). Οι μεταβολές στις τιμές των τάσεων των ζυγών συνδέονται άμεσα με την άεργο ισχύ του συστήματος. Ως εκ τούτου, σε περιπτώσεις πτώσης της τάσης ενός ζυγού, παρέχεται σε αυτόν άεργος ισχύς προς ανύψωση του μέτρου της τάσης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις που εμφανίζεται υπέρταση σε έναν ζυγό, πρέπει να καταναλωθεί άεργος ισχύς σε αυτόν, ούτως ώστε να ελαττωθεί η τιμή της τάσης του.
- *Παραβιάσεις Ορίων Ισχύος (Θερμικών Ορίων) Γραμμών Μεταφοράς:* Διαταραχές τέτοιου τύπου παρουσιάζονται εξαιτίας της αύξησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει μια γραμμή μεταφοράς, οδηγώντας στην υπέρβαση του ονομαστικού ορίου ισχύος (δίνεται σε MVA) της γραμμής. Οι γραμμές μεταφοράς είναι, συνήθως, σχεδιασμένες να αντέχουν φόρτιση έως και 125% της ονομαστικής τους τιμής ισχύος. Παρόλα αυτά, τιμές έντασης ρεύματος γραμμής της τάξεως του 80% - 90% της ονομαστικής, συνήθως λογίζονται ως κατάσταση συναγερμού από τους διαχειριστές των δικτύου. [11]

### 3.3.4 Στατική Ανάλυση Ασφάλειας

Η Στατική Ανάλυση Ασφάλειας ή Ανάλυση Διαταραχών (Contingency Analysis) μπορεί να ερμηνευτεί ως η ασφάλεια έναντι ενός συνόλου εκ των προτέρων καθορισμένων διαταραχών, χωρίς να λαμβάνει υπόψη θέματα δυναμικής ασφάλειας και μεταβατικών φαινομένων. Η εκδήλωση των διαταραχών αυτών είναι, συνήθως, μη προβλέψιμη και δύναται να προξενήσει καταπονήσεις σε ολόκληρο το σύστημα ή σε τμήματά του εξοπλισμού του, εξαιτίας των παραβιάσεων των ορίων ασφαλούς λειτουργίας, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.3.3. Συνεπώς, η ανάλυση της στατικής ασφάλειας ενός ΣΗΕ είναι ιδιαίτερως σημαντική για τους διαχειριστές των δικτύων, καθώς συμβάλει όχι μόνο στην παροχή χρήσιμων πληροφοριών αναφορικά με τις επιπτώσεις των διαταραχών στο σύστημα, αλλά και στη λήψη των κατάλληλων κάθε φορά αποφάσεων για την αντιμετώπισή τους.

Τα τρία βασικά στάδια της ανάλυσης στατικής ασφάλειας ενός ΣΗΕ είναι τα ακόλουθα:

- *Ορισμός Διαταραχών:* Ορίζονται όλες οι πιθανές διαταραχές που δύνανται να εμφανιστούν στο μελετώμενο ΣΗΕ.
- *Επιλογή Διαταραχών:* Εντοπίζονται οι πιο κρίσιμες διαταραχές και στη συνέχεια ταξινομούνται βάσει της σοβαρότητάς τους. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται κατάλληλες μέθοδοι διαλογής και ταξινόμησης, καθώς και ειδικοί δείκτες απόδοσης, για τον προσδιορισμό της σοβαρότητας εκάστης διαταραχής.
- *Αξιολόγηση Διαταραχών:* Λαμβάνονται οι απαραίτητες ενέργειες αναφορικά με τον έλεγχο και την ασφάλεια του συστήματος, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις των διαταραχών και το σύστημα να επανέλθει σε μια ασφαλή κατάσταση λειτουργίας.

Οι μελέτες στατικής ασφάλειας αξιοποιούν, κυρίως, τα παρακάτω κριτήρια ασφαλείας για τον καθορισμό των διαταραχών που εκδηλώνονται στο μελετώμενο ΣΗΕ:

- *Κριτήριο Ασφαλείας N-1:* Απλή διακοπή ενός οποιουδήποτε στοιχείου του συστήματος, όπως γεννήτρια, γραμμή μεταφοράς, μετασχηματιστής.
- *Κριτήριο Ασφαλείας N-2:* Ταυτόχρονη διακοπή δύο οποιονδήποτε στοιχείων του συστήματος. Πρόκειται για κριτήριο που χρησιμοποιείται σε ιδιαίτερως απαιτητικές μελέτες ασφάλειας ΣΗΕ.

- *Ταυτόχρονη διακοπή των γραμμών μεταφοράς διπλού κυκλώματος:* Εφαρμόζεται σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, που μοιράζονται τους ίδιους πυλώνες, σε σημαντικό τμήμα της διαδρομής της επιλεγόμενης γραμμής.
- *Κριτήριο διακοπής της μεγαλύτερης γεννήτριας:* Διακοπή της μεγαλύτερης γεννήτριας μιας περιοχής του συστήματος, καθώς και οποιασδήποτε από τις διασυνδετικές της με το υπόλοιπο σύστημα γραμμές.

Επιπρόσθετα, στις μελέτες ανάπτυξης των ΣΗΕ, γίνεται συχνά χρήση της ανάλυσης αξιοπιστίας συστήματος, η οποία είναι ιδιαιτέρως ενδεδειγμένη, καθώς περιλαμβάνει τη μελέτη τόσο απλών, όσο και πολλαπλών διαταραχών, σε συνδυασμό με τις πιθανότητες των αντίστοιχων βλαβών και των χρόνων επισκευής. Ουσιαστικά, για καθεμιά από τις πιθανές διαταραχές, εκτελείται μια πλήρης ροή φορτίου, ούτως ώστε να προσδιοριστεί η νέα κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ, όπως οι τάσεις των ζυγών, οι ροές πραγματικής και άεργου ισχύος, οι φορτίσεις γραμμών μεταφοράς, γεννητριών, μετασχηματιστών κ.α.

Συνοψίζοντας, η Στατική Ανάλυση Ασφάλειας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τους διαχειριστές των δικτύων, τόσο στη φάση του σχεδιασμού, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Ιδιαίτερα, στο ζήτημα του προγραμματισμού της ετήσιας συντήρησης των δικτύων, αποδεικνύεται ιδιαιτέρως χρήσιμη για την κατάρτιση του χρονοδιαγράμματος των προγραμματισμένων διακοπών του εκάστοτε ΣΗΕ. [9, 10, 11, 12]

### 3.3.5 Δείκτες Ιεράρχησης Διαταραχών

Όπως αναμενόταν, εξαιτίας της πολυπλοκότητας και της σύνθετης διάρθρωσης που παρουσιάζουν τα σύγχρονα ΣΗΕ, το πλήθος το πιθανών διαταραχών δύναται να είναι εξαιρετικά μεγάλο, γεγονός που μπορεί να καταστήσει εξαιρετικά χρονοβόρα οποιαδήποτε μελέτη στατικής ασφάλειας. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η επιλογή των διαταραχών με τις πιο σοβαρές επιπτώσεις στο σύστημα, ούτως ώστε να μελετηθούν λεπτομερέστερα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται Ιεράρχηση Διαταραχών και πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων Δεικτών Απόδοσης (Performance Index – PI). Οι δύο κυριότεροι δείκτες απόδοσης, που χρησιμοποιούνται σε μελέτες στατικής ασφάλειας των ΣΗΕ είναι οι ακόλουθοι:

- Δείκτης Απόδοσης Ενεργού Ισχύος ( $PI_p$ )
- Δείκτης Απόδοσης Τάσης ( $PI_v$ )



Για κάθε διαταραχή υπολογίζονται οι δύο αυτοί δείκτες και εν συνεχεία, βάσει αυτών, οι διαταραχές ταξινομούνται. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή των δεικτών, τόσο μεγαλύτερη είναι η σοβαρότητα της εκάστοτε μελετώμενης διαταραχής.

Ξεκινώντας, ο Δείκτης Απόδοσης Ενεργού Ισχύος ( $PI_p$ ) εκφράζει την υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς του μελετώμενου συστήματος. Δίνεται από τον τύπο:

$$PI_p = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\frac{W}{2n}\right) * \left(\frac{P_i}{P_i^{max}}\right)^{2n} \quad (3.27)$$

Όπου:

- $P_i$  και  $P_i^{max}$  η ροή ισχύος και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφέρει η γραμμή μεταφοράς  $i$  αντίστοιχα.
- $N_L$  ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς του συστήματος.
- $W$  ένας πραγματικός μη αρνητικός συντελεστής στάθμισης.
- $n$  η συνάρτηση ποινής.

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφέρει μια γραμμή μεταφοράς  $i$  ( $P_i^{max}$ ), δίνεται απ' τη σχέση:

$$P_i^{max} = \frac{V_i V_j}{X} \quad (3.28)$$

Όπου:

- $V_i$  και  $V_j$  οι τάσεις των ζυγών  $i$  και  $j$  που συνδέει η γραμμή.
- $X$  η αντίδραση της γραμμής.

Μεγάλες τιμές του Δείκτη Απόδοσης Ενεργού Ισχύος συνεπάγονται ότι μία ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς είναι υπερφορτισμένες.

Συνεχίζοντας, ο Δείκτης Απόδοσης Τάσης ( $PI_V$ ) εκφράζει τις παραβιάσεις των ορίων στις τιμές των τάσεων των ζυγών. Δίνεται από τον τύπο:

$$PI_V = \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{W}{2n}\right) * \left(\frac{|V_i| - |V_i^{sp}|}{\Delta V_i^{lim}}\right)^{2n} \quad (3.29)$$

Όπου:

- $V_i$  η τάση του ζυγού  $i$ .
- $V_i^{sp}$  η προβλεπόμενη τιμή της τάσης του ζυγού  $i$ .
- $\Delta V_i^{lim}$  το όριο απόκλισης της τάσης του ζυγού  $i$ .
- $n$  η συνάρτηση ποιικής.
- $N_B$  ο αριθμός των ζυγών του μελετώμενου συστήματος.
- $W$  ένας πραγματικός μη αρνητικός συντελεστής στάθμισης.

Μεγάλες τιμές του Δείκτη Απόδοσης Τάσης συνεπάγονται ότι οι τάσεις ενός ή περισσότερων ζυγών του συστήματος βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων.

Όπως είναι γνωστό, οι τάσεις των ζυγών ενός ΣΗΕ επηρεάζεται άμεσα από την παραγόμενη άεργο ισχύ των μονάδων παραγωγής του συστήματος. Ο Δείκτης Απόδοσης Τάσης ( $PI_V$ ) παρέχει έγκυρες πληροφορίες, αναφορικά με τις εκτός ορίων τάσεις ζυγών, μόνο όσο η άεργος ισχύς είναι εντός των επιτρεπτών ορίων. Για τους λόγους αυτούς, έχει εισαχθεί ο δείκτης  $PI_{VQ}$ , που αποτελεί ουσιαστικά τροποποίηση του  $PI_V$ , ο οποίος λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς και τα όρια άεργου ισχύος των γεννητριών και χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που αυτά παραβιάζονται. Ο δείκτης  $PI_{VQ}$  δίνεται απ' τη σχέση:

$$PI_{VQ} = \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{W}{2n}\right) * \left(\frac{|V_i| - |V_i^{sp}|}{\Delta V_i^{lim}}\right)^{2n} + \sum_{i=1}^{N_G} \left(\frac{W}{2n}\right) * \left(\frac{Q_i}{Q_i^{max}}\right)^{2n} \quad (3.30)$$

Όπου:

- $Q_i$  η άεργος ισχύς στον ζυγό  $i$ .
- $Q_i^{max}$  το όριο της άεργου ισχύος στον ζυγό  $i$ .
- $N_G$  ο αριθμός των μονάδων παραγωγής του μελετώμενου συστήματος.
- $W$  ένας πραγματικός μη αρνητικός συντελεστής στάθμισης.

Το άθροισμα των δεικτών  $PI_p$  και  $PI_V$  ορίζει τον *Συνολικό Δείκτη Απόδοσης (Overall Performance Index – OPI)*, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση των πιθανών διαταραχών, βάσει της σοβαρότητάς τους. Κάνοντας χρήση των προαναφερθέντων δεικτών, το εκάστοτε μελετώμενο ΣΗΕ δύναται να ενταχθεί σε ένα από τα τρία παρακάτω Επίπεδα Ασφαλείας:

- *Επίπεδο Ασφαλείας 1 (Πολύ Κρίσιμες Διαταραχές):* Το σύστημα χαρακτηρίζεται ως μη ασφαλές σε όλα τα σενάρια πιθανών διαταραχών και απαιτείται η λήψη κατάλληλων ενεργειών για την αποκατάστασή του.
- *Επίπεδο Ασφαλείας 2 (Κρίσιμες Διαταραχές):* Το σύστημα χαρακτηρίζεται μη ασφαλές σε κάποια από τα σενάρια πιθανών διαταραχών, λόγω της παραβίασης κάποιων από τους περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος, γεγονός που επιβάλλει τη λήψη κατάλληλων προληπτικών ενεργειών ελέγχου.
- *Επίπεδο Ασφαλείας 3 (Μη Κρίσιμες Διαταραχές):* Το σύστημα χαρακτηρίζεται ασφαλές για όλα τα σενάρια πιθανών διαταραχών. [9, 10, 12, 13, 14]

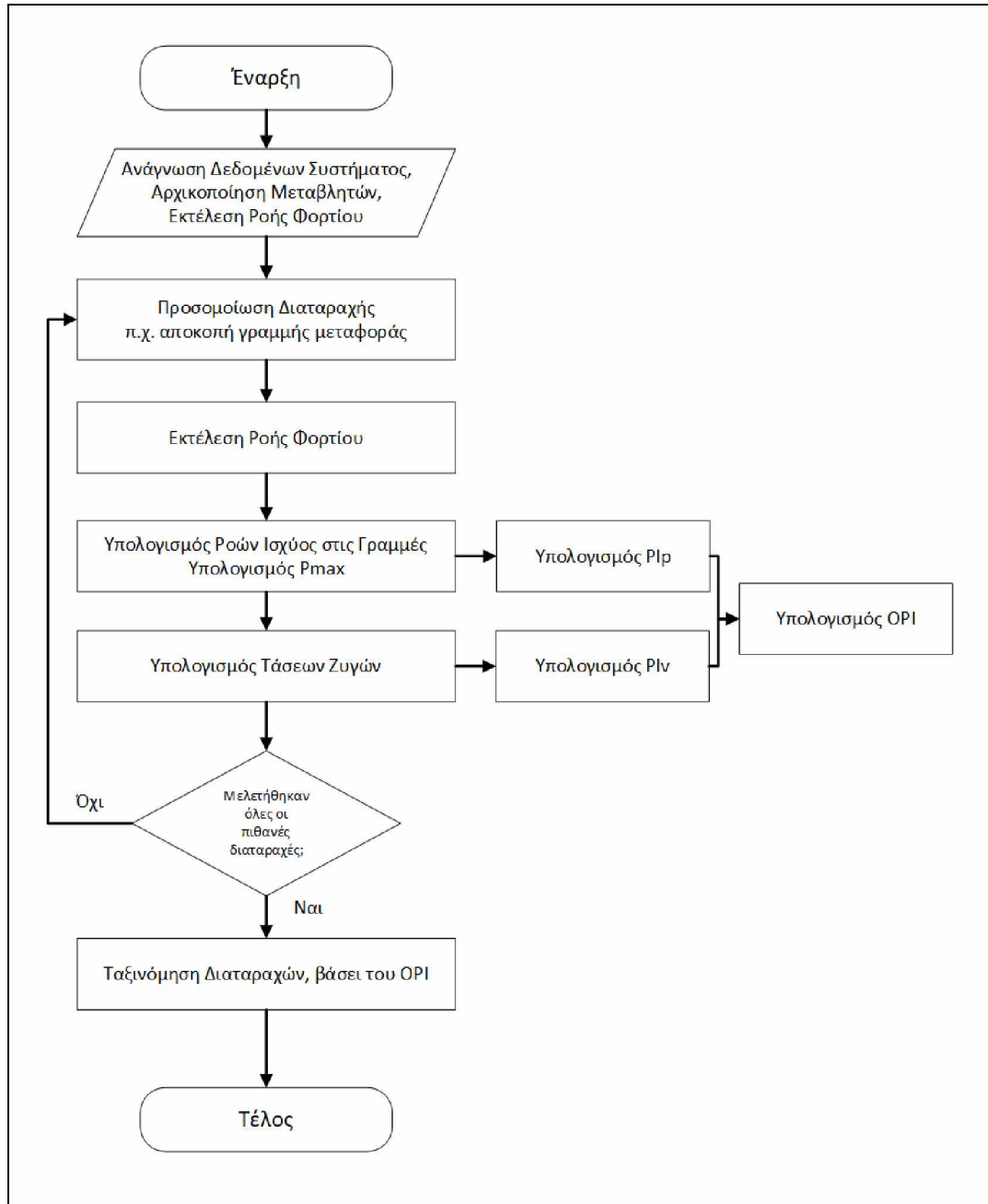
### 3.3.6 Αλγόριθμος Ανάλυσης Διαταραχών μέσω της μεθόδου Newton – Raphson

Ο αλγόριθμος ανάλυσης διαταραχών μέσω της μεθόδου Newton – Raphson είναι ο ακόλουθος:

1. Ανάγνωση των δεδομένων του μελετώμενου συστήματος (ζυγοί, γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς κ.α.).
2. Εκτέλεση του αλγορίθμου ροής φορτίου (Newton – Raphson) για την αρχική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή χωρίς την ύπαρξη κάποιας διαταραχής.
3. Προσομοίωση κάποιας διαταραχής, π.χ. αποκοπή κάποιας γραμμής μεταφοράς.
4. Εκτέλεση του αλγορίθμου ροής φορτίου για την διαταραχή αυτή και υπολογισμός της τιμής του  $P^{\max}$ .
5. Υπολογισμός του Δείκτη Απόδοσης Ενεργού Ισχύος ( $PI_P$ ), ο οποίος εκφράζει τις παραβιάσεις του ορίου της ενεργής ισχύος στο μελετώμενο σύστημα.
6. Υπολογισμός των τάσεων όλων των ζυγών του συστήματος, παρουσία της διαταραχής.
7. Υπολογισμός του Δείκτη Απόδοσης Τάσης ( $PI_V$ ), ο οποίος εκφράζει τις παραβιάσεις των ορίων των τάσεων των ζυγών του συστήματος, εξαιτίας της διαταραχής.
8. Υπολογισμός του Συνολικού Δείκτη Απόδοσης (OPI) του συστήματος, ο οποίος προκύπτει από το άθροισμα των  $PI_P$  και  $PI_V$ .
9. Επανάληψη των Βημάτων 3 έως 8 για όλες τις πιθανές διαταραχές του συστήματος (αποκοπή κατά σειρά όλων των γραμμών μεταφοράς, όλων των γεννητριών κτλ.). Καταγραφή των  $PI_P$  και  $PI_V$  κάθε σεναρίου.

10. Ταξινόμηση των διαταραχών βάσει της σοβαρότητάς τους, μέσω του OPI.
11. Εκτέλεση του αλγορίθμου ροής φορτίου για τη δυσμενέστερη διαταραχή και καταγραφή των αποτελεσμάτων. [14]

Το διάγραμμα ροής του παραπάνω αλγόριθμου απεικονίζεται στη συνέχεια (Σχήμα 3.7):



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα Ροής Αλγόριθμου Ανάλυσης Διαταραχών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

#### 4.1 Εισαγωγή

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, δηλαδή της ενέργειας του ανέμου, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη και εδραιωμένη μέθοδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία εντάσσεται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ιδιαίτερα, λόγω του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, καθώς και της ανάγκης για σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, με μετάβαση σε φιλικότερες προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας, η αιολική ενέργεια έχει πλέον καταστεί μια από τις πιο δημοφιλείς Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, με το ποσοστό διείσδυσής της στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να αυξάνεται διαρκώς.

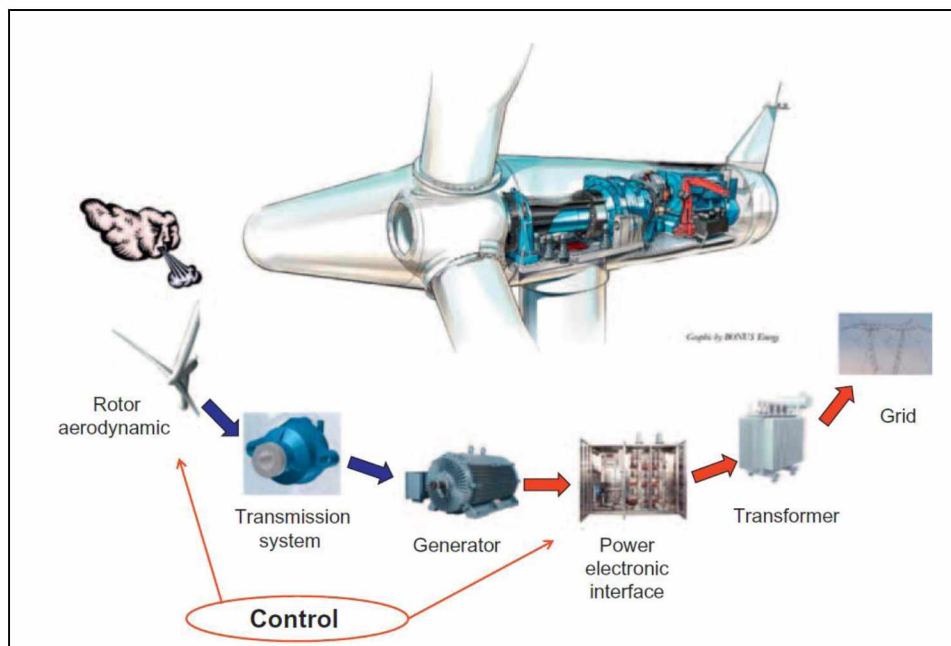
Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται διατάξεις που ονομάζονται Ανεμογεννήτριες (Α/Γ – Wind Turbines), οι οποίες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια πρώτα σε κινητική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα σύνθετη, καθώς αποτελεί συνδυασμό πολλών και διαφορετικών τομέων, όπως αεροδυναμική, μηχανολογία, κατασκευές, μετεωρολογία, καθώς και η επιστήμη του ηλεκτρολόγου μηχανικού, αναφορικά με την παραγωγή και μεταφορά της ενέργειας και την ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πρόκειται για μια διαρκώς εξελισσόμενη τεχνολογία στον τομέα των ΑΠΕ, με σημαντικό υπόβαθρο στην έρευνα, έχοντας πλέον καταστεί ιδιαίτερα αξιόπιστη και αποτελεσματική, ξεπερνώντας, σταδιακά, τα προβλήματα που αντιμετώπιζε στα πρώιμα στάδιά της. Από ανεμογεννήτριες των μερικών kW στις αρχές της δεκαετία του '80, πλέον κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται αντίστοιχες πολλών MW, που ενσωματώνουν νέες τεχνολογίες στην αεροδυναμική και στα μηχανολογικά συστήματα, σύγχρονα συστήματα ελέγχου και ηλεκτρονικά ισχύος, με σκοπό όχι μόνο τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής, αλλά και την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωσή τους στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τις αρνητικές επιδράσεις στο δίκτυο.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, γίνεται αρχικά μια γενική περιγραφή των βασικών συνιστωσών μιας ανεμογεννήτριας, ενώ στη συνέχεια αναλύονται οι τύποι των γεννητριών, οι

διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και τα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται. Τέλος, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά των τεσσάρων βασικών μοντέλων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες εφαρμογές, καθώς και στη μοντελοποίησή τους από το λογισμικό Siemens PSS/E. [15]

#### 4.2 Βασικές συνιστώσες ανεμογεννήτριας

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από έναν πύργο και ένα ατρακτίδιο, το οποίο είναι τοποθετημένο στην κορυφή του πύργου. Εντός του ατρακτιδίου βρίσκονται οι βασικές συνιστώσες της ανεμογεννήτριας, οι οποίες, ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν, συμβάλλουν στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι βασικές συνιστώσες που απαρτίζουν μια ανεμογεννήτρια είναι οι ακόλουθες: αεροδυναμικός δρομέας, σύστημα μετάδοσης (κιβώτιο ταχυτήτων), γεννήτρια, διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, μετασχηματιστής, σύνδεση στο δίκτυο, καθώς κατάλληλο σύστημα ελέγχου, για την εύρυθμη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Βασικές συνιστώσες ανεμογεννήτριας

Ξεκινώντας, ο Αεροδυναμικός Δρομέας ή στροφέιο μετατρέπει, ουσιαστικά, την αιολική ενέργεια σε κινητική. Αποτελείται από έναν άξονα, στον οποίο είναι στερεωμένα αεροδυναμικά πτερύγια, συνήθως δύο ή τρία τον αριθμό, κατασκευασμένα από υαλοβάμβακα και πολυεστέρα. Σε παλαιότερα μοντέλα ανεμογεννητριών, τα πτερύγια είναι σταθερά

συνδεδεμένα με τον άξονα, ενώ σε νεότερα δύνανται να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ούτως ώστε να εκμεταλλεύονται κατά το βέλτιστο τις διακυμάνσεις και τις μεταβολές του αιολικού δυναμικού.

Το Σύστημα Μετάδοσης είναι ένα μηχανολογικό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της κινητικής ενέργειας από τον αεροδυναμικό δρομέα στη γεννήτρια και αποτελείται από τον άξονα του αεροδυναμικού δρομέα (χαμηλής ταχύτητας), σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων και τον άξονα της γεννήτριας (υψηλής ταχύτητας). Με τη βοήθεια του κιβωτίου ταχυτήτων, η χαμηλή ταχύτητα του άξονα του αεροδυναμικού δρομέα ανυψώνεται στον άξονα υψηλής ταχύτητας, που είναι συνδεδεμένη η γεννήτρια. Η ανύψωση αυτή της ταχύτητας είναι απαραίτητη, προκειμένου η ταχύτητα περιστροφής της να είναι συμβατή τόσο με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας, όσο και με τη συχνότητα του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Βασικά κριτήρια για την επιλογή του κιβωτίου ταχυτήτων είναι η διάρκεια ζωής, ο βαθμός απόδοσης, καθώς και ο θόρυβος λειτουργίας. Γενικότερα, τα κρουστικά φορτία που καλείται να αντιμετωπίσει το κιβώτιο ταχυτήτων, εξαιτίας των διαρκών μεταβολών της ισχύος του ανέμου, οδηγούν στην καταπόνηση και την πρόωρη φθορά του υλικού του, με άμεση συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Για το λόγο αυτό, νεότερα μοντέλα ανεμογεννητριών δε διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς για την προσαρμογή της ταχύτητας αξιοποιούν πολυπολικές γεννήτριες. Το σύστημα πέδησης είναι απαραίτητο για τον περιορισμό της κίνησης του αεροδυναμικού δρομέα για την αποφυγή βλαβών, σε περιπτώσεις που η ταχύτητά του υπερβεί τα όρια, καθώς και ανάγκες συντήρησης της ανεμογεννήτριας.

Μέσω της γεννήτριας, η κινητική ενέργεια, του άξονα υψηλής ταχύτητας, μετατρέπεται σε ηλεκτρική, η οποία, μέσω κατάλληλων διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, διοχετεύεται εν συνεχεία στο δίκτυο. Τα συστήματα ελέγχου φροντίζουν, όχι μόνο για την ομαλή λειτουργία και συνεργασία όλων των υποσυστημάτων, αλλά και για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και την εξέλιξη των αιολικών φαινομένων.

Οι ηλεκτρικής φύσεως συνιστώσες μιας ανεμογεννήτριας, δηλαδή η γεννήτρια και οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και τα συστήματα για τον έλεγχό της, θα αναλυθούν περαιτέρω στις ενότητες που ακολουθούν. [15]

### 4.3 Γεννήτρια

Η γεννήτρια είναι μια ηλεκτρομηχανική διάταξη, η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άξονα υψηλής ταχύτητας σε ηλεκτρική. Αποτελείται από δύο βασικά μέρη: τον στάτη που είναι ακίνητος, και τον δρομέα, που αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής. Στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη τοποθετούνται τα τυλίγματα των τριών φάσεων. Ο δρομέας περιστρέφεται εντός του στάτη και είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας, μέσω μόνιμου μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη. Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα, επάγοντας τάση στα τυλίγματα του στάτη. Όταν τα μαγνητικά πεδία δρομέα και στάτη συμπορεύονται, η γεννήτρια χαρακτηρίζεται ως σύγχρονη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ως ασύγχρονη ή επαγωγική. Γενικότερα, λόγω της ανάπτυξης των μετατροπέων (converters), που βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος, κάθε τύπος τριφασικής γεννήτριας δύναται να χρησιμοποιηθεί, με τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες γεννήτριες αποτελούν τις δύο κυριότερες κατηγορίες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών.

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας θα μελετηθούν οι δύο κυριότερες κατηγορίες γεννητριών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες – επαγωγικές, καθώς και οι επιμέρους υποκατηγορίες τους. [15]

#### 4.3.1 Ασύγχρονες Γεννήτριες

Η Ασύγχρονη ή Επαγωγική Γεννήτρια (Asynchronous/Induction Generator) είναι η συνηθέστερη κατηγορία γεννήτριας που απαντάται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, καθώς παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως αντοχή, απλότητα στην κατασκευή, καθώς και παραγωγή σε μεγάλες ποσότητες, με χαμηλή τιμή. Το κυριότερο μειονέκτημά της, έναντι της σύγχρονης, είναι ότι ο στάτης απαιτείται άεργη ισχύ μαγνήτισης για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου. Καθότι η ασύγχρονη γεννήτρια δεν διαθέτει κάποιο σύστημα για τη διέγερσή της, καταναλώνει μεγάλα ποσά άεργου ισχύος, η οποία παρέχεται είτε απ' το δίκτυο, είτε από κατάλληλες διατάξεις αντιστάθμισης με ηλεκτρονικά ισχύος. Το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας, δηλαδή, δημιουργείται μόνο όταν αυτή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο.



Στην ασύγχρονη γεννήτρια, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στον στάτη περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων των τυλιγμάτων, καθώς και από τη συχνότητα. Έτσι, αν ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα που ξεπερνά τη σύγχρονη, επάγεται ηλεκτρικό πεδίο στον δρομέα, εξαιτίας του στρεφόμενου πεδίου του στάτη. Αυτή η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα και του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη, ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης, και έχει ως αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα. Έτσι, η αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στον δρομέα, με το αντίστοιχο πεδίο του στάτη, οδηγεί στην εμφάνιση ροπής στον δρομέα.

Όταν ο στάτης της επαγωγικής ανεμογεννήτριας τροφοδοτηθεί με τριφασικό ρεύμα διέγερσης, καθώς ο άνεμος αρχίζει να πνέει, η γεννήτρια τίθεται σε λειτουργία, αυξάνοντας σταδιακά την ταχύτητά της προς τη σύγχρονη. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής, ώστε η ταχύτητα του δρομέα να ξεπεράσει τη σύγχρονη ταχύτητα, αναπτύσσεται ροή ρεύματος στον στάτη της και η γεννήτρια ξεκινά να τροφοδοτεί με ισχύ το δίκτυο.

Οι δύο βασικές κατηγορίες ασύγχρονων γεννητριών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, είναι:

- *Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού (Squirrel – Cage Induction Generator – SCIG):* Χαρακτηρίζεται από απλότητα στην κατασκευή, υψηλή απόδοση, καθώς και από χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Μέσα σε αυλάκια στον δρομέα της, είναι τοποθετημένες αγώγιμες ράβδοι, οι οποίες και βραχυκυκλώνονται και στα δύο άκρα του δρομέα, μέσω δακτυλίων, γεγονός που δεν επιτρέπει τον έλεγχο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του δρομέα από εξωτερικά μέσα. Είναι μια γεννήτρια που χαρακτηρίζεται από στιβαρότητα και σταθερότητα, με την ταχύτητά της να αλλάζει κατά μικρό ποσοστό, καθώς η ολίσθησή της μεταβάλλεται ανάλογα με τις αλλαγές της συμπεριφοράς του ανέμου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, υπό την παρουσία κιβωτίου ταχυτήτων, για τη βέλτιστη προσαρμογή της ταχύτητας του αεροδυναμικού δρομέα σε αυτή της γεννήτριας. Συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων διατάξεων, τόσο ομαλού εκκινήτη (soft-starter), όσο και αντιστάθμισης. Πιο συγκεκριμένα, οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού χαρακτηρίζονται από απότομη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών, με αποτέλεσμα οι

διακυμάνσεις του ανέμου να μεταφέρονται εν συνεχεία στο δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο κατά τη διάρκεια σύνδεσης της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο, όπου αναπτύσσονται ρεύματα, προς το δίκτυο, έως επτά και οκτώ φορές του ονομαστικού, γεγονός που σε αδύναμα δίκτυα προκαλεί διαταραχές στην τάση. Τα παραπάνω κάνουν απαραίτητη την ύπαρξη του ομαλού εκκινητή, προκειμένου η ανεμογεννήτρια να συνδεθεί σταδιακά στο δίκτυο και να μειωθούν οι τιμές του ρεύματος. Όσον αφορά την κατανάλωση άεργου ισχύος, αυτή εξαρτάται άμεσα από τις εκάστοτε συνθήκες των αιολικών φαινομένων και την ιδιαίτερη σχέση που υπάρχει μεταξύ πραγματικής και άεργου ισχύος, τάσης ακροδεκτών και ταχύτητας δρομέα. Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγάλη, η ανεμογεννήτρια θα παράγει περισσότερη πραγματική ισχύ, μόνον αν τροφοδοτηθεί με περισσότερη άεργο ισχύ. Για τον λόγο αυτό, η απαιτούμενη κάθε φορά άεργος ισχύς παρέχεται μέσω τοπικών διατάξεων αντιστάθμισης, με πυκνωτές ή μετατροπείς ισχύος, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν διαταραχές και αστάθειες στο υπόλοιπο δίκτυο, στην περίπτωση που η άεργος ισχύος παρεχόταν αποκλειστικά απ' αυτό.

- *Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα (Wound Rotor Induction Generator – WRIG):* Τα τυλίγματα του δρομέα της δύνανται να συνδεθούν, μέσω δακτυλίων και ψηκτρών, με κυκλώματα ή διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, με σκοπό τον εξωτερικό έλεγχο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του δρομέα, όπως η τάση του. Κάνοντας χρήση μετατροπών ισχύος, δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής ή εξαγωγής ισχύος στον δρομέα, με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας να μπορεί να δημιουργηθεί είτε από τα τυλίγματα του δρομέα είτε από του στάτη. Γενικότερα, μια επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα είναι πιο ακριβή και σύνθετη και λιγότερο στιβαρή, συγκριτικά με μια επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Οι δύο κυριότερες υποκατηγορίες, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, είναι οι ακόλουθες:

- *Επαγωγική Γεννήτρια OptiSlip ή FlexiSlip:* Τα τυλίγματα του δρομέα της είναι συνδεδεμένα με εξωτερικές μεταβλητές αντιστάσεις, ελεγχόμενες από μετατροπέα ισχύος, ενώ ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Μέσω της μεταβολής των αντιστάσεων, γίνεται εφικτή η ρύθμιση της ταχύτητας της γεννήτριας (περιορισμένο εύρος, μεταξύ 10% με 16%), με την εξασφάλιση της βέλτιστης ταχύτητας, με ταυτόχρονη εξομάλυνση των διακυμάνσεων

της ισχύος προς το δίκτυο. Γενικότερα χαρακτηρίζεται από απλή κατασκευή και βελτιωμένο εύρος μεταβολής της ταχύτητας. Παρόλα αυτά, η ταχύτητα της είναι άμεσα εξαρτημένη από την τιμή των μεταβλητών αντιστάσεων, ο έλεγχος πραγματικής και άεργου ισχύος είναι περιορισμένος, εμφανίζονται απώλειες στις εξωτερικές αντιστάσεις, ενώ πρέπει να επισημανθεί ότι απαιτείται η ύπαρξη συστήματος αντιστάθμισης άεργου ισχύος.

- *Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας (Doubly – Fed Induction Generator):* Τα τυλίγματα του στάτη της είναι συνδεδεμένα με ένα σταθερής συχνότητας δίκτυο, ενώ ο δρομέας συνδέεται και αυτός στο δίκτυο, μέσω ενός back-to-back μετατροπέα ισχύος. Ο όρος «διπλής τροφοδοσίας» υποδεικνύει ότι η τάση στα τυλίγματα του στάτη οφείλεται στο δίκτυο, ενώ η τάση στα τυλίγματα του δρομέα στον μετατροπέα ισχύος. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει τη μεταβολή της ταχύτητας της γεννήτριας εντός ενός μεγάλου, αλλά σαφώς καθορισμένου, εύρους, από περίπου 40% κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα έως 20% πάνω από αυτήν. Ουσιαστικά, η συμπεριφορά της γεννήτριας στη μόνιμη, αλλά και στη μεταβατική κατάσταση, ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος του δρομέα, ο οποίος τροφοδοτεί τον δρομέα με ρεύμα μεταβλητής συχνότητας. Ο μετατροπέας αποτελείται ουσιαστικά από δύο μετατροπείς αμφίδρομης ροής, οι οποίοι συνδέονται με DC link και ελέγχονται ανεξάρτητα, με τον μετατροπέα από τη μεριά του δρομέα να είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο πραγματικής και άεργου ισχύος, καθώς και του συγχρονισμού μεταξύ μαγνητικών πεδίων δρομέα και στάτη, ενώ ο αντίστοιχος από τη μεριά του δικτύου να είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του DC link και τη διατήρηση μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς δύναται να ρέει είτε από το δρομέα προς το δίκτυο είτε προς την αντίθετη κατεύθυνση: σε ταχύτητες μεγαλύτερες της σύγχρονης η ισχύς ρέει από το δρομέα, μέσω του μετατροπέα, στο δίκτυο, ενώ σε χαμηλότερες από τη σύγχρονη ταχύτητες από το δίκτυο προς το δρομέα. Και στις δύο περιπτώσεις, ο στάτης τροφοδοτεί το δίκτυο με ισχύ. Οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως ο έλεγχος πραγματικής και άεργου ισχύος, μέσω του ελέγχου του ρεύματος διέγερσης του δρομέα, καθώς και η

δυνατότητα διέγερσης της γεννήτριας και από τα τυλίγματα του δρομέα, όχι μόνο από του στάτη. Το μέγεθος του μετατροπέα εξαρτάται άμεσα από το επιθυμητό εύρος ελέγχου της ταχύτητας, με το κόστος του να αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος αυτό. [15, 16]

#### 4.3.2 Σύγχρονες Γεννήτριες

Η Σύγχρονη Γεννήτρια (Synchronous Generator) λειτουργεί στη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία υπαγορεύεται από τη συχνότητα του δικτύου και είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της ροπής που ασκείται στον άξονά της. Στις γεννήτριες με μεταβλητό αριθμό πόλων, η ταχύτητα δύναται, επίσης, να ρυθμιστεί και μέσω του αριθμού των πόλων τους, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για χρήση με μεταβλητή ταχύτητα και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Το μαγνητικό πεδίο των σύγχρονων γεννητριών δημιουργείται είτε μέσω κατάλληλων τυλιγμάτων διέγερσης στο δρομέα είτε με τη χρήση μόνιμων μαγνητών. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επισημανθεί ότι, για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου δεν απαιτείται η παροχή άεργης ισχύος μαγνήτισης από το δίκτυο, με αποτέλεσμα την απουσία περαιτέρω βοηθητικών διατάξεων για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.

Σε εφαρμογές ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες, η σύνδεσή τους πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων μετατροπέων ισχύος (power electronic converters), για τον πλήρη έλεγχο της ισχύος τους. Ο μετατροπέας χρησιμοποιείται αφενός για την απομόνωση μεταξύ ανεμογεννήτριας – δικτύου, τόσο εξαιτίας της στοχαστικότητας των αιολικών φαινομένων, όσο και για προστασία από προερχόμενες από το δίκτυο διαταραχές, αφετέρου για τον έλεγχο της διέγερσης της γεννήτριας, καθώς και τη διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ γεννήτριας και δικτύου.

Γενικότερα, οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πολύ πιο ακριβές και μηχανολογικά σύνθετες, συγκριτικά με ασύγχρονες γεννήτριες της ίδιας ισχύος. Παρόλα αυτά, η απουσία ανάγκης παροχής άεργης ισχύος μαγνήτισης για τη διέγερσή της, από το δίκτυο, αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημά τους έναντι των ασύγχρονων.

Οι δύο βασικές κατηγορίες σύγχρονων γεννητριών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, είναι:

- *Σύγχρονη Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator – WRSG)*: Αποτελεί την κινητήρια δύναμη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελεί το είδος γεννήτριας που χρησιμοποιείται επί δεκαετίες στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και ως εκ τούτου η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Η διέγερση πραγματοποιείται μέσω συνεχούς ρεύματος, που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα, δημιουργώντας έτσι το μαγνητικό πεδίο, το οποίο και περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Οι σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα δεν απαιτούν την ύπαρξη βοηθητικών διατάξεων αντιστάθμισης για τη ρύθμιση της άεργου ισχύος τους, η σύνδεσή τους με το δίκτυο πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου μετατροπέα πλήρους ισχύος, ενώ δύνανται να χρησιμοποιηθούν και χωρίς την παρουσία κιβωτίου ταχυτήτων.
- *Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG)*: Ο στάτης της είναι δακτυλιοφόρος, ενώ στο δρομέα είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα και βαθμό απόδοσης, καθώς η διέγερσή της επιτυγχάνεται χωρίς την παροχή ενέργειας. Η χρήση μόνιμων μαγνητών για τη διέγερση της γεννήτριας επιβάλλει τη χρήση πλήρους ισχύος μετατροπέα για τη σύνδεσή της με το δίκτυο, προκειμένου η τάση και η συχνότητά της να είναι εναρμονισμένες με τις αντίστοιχες του δικτύου. Ένα από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι, η ισχύς μπορεί να παραχθεί σε οποιαδήποτε ταχύτητα, ώστε να ταιριάζει στις τρέχουσες συνθήκες κάθε φορά. Παρόλα αυτά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μόνιμων μαγνητών, είναι ακριβά και δύσκολα στην κατασκευή τους, ενώ εμφανίζουν ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που επιβάλλει την ύπαρξη συστημάτων επιτήρησης της θερμοκρασίας τους, καθώς και για την ψύξη τους. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη είναι πιθανό να παρουσιάσουν, επίσης, προβλήματα κατά την εκκίνηση, τον συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης, καθώς δεν παρέχουν εύκολα σταθερή τάση. Γενικότερα χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα και κόστος, αλλά με μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης. Η πρώτη τους εμφάνιση, σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, έγινε σε υπεράκτια αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος. [15, 16]

#### 4.4 Διατάξεις Ηλεκτρονικών Ισχύος

Η παραγόμενη από τη γεννήτρια ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο, μέσω κατάλληλων διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, που παρεμβάλλονται ανάμεσα σε γεννήτρια και δίκτυο. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο, οι διατάξεις αυτές να ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά τόσο της γεννήτριας, όσο και του δικτύου. Είναι σημαντικό να εξασφαλίζονται κάθε στιγμή, τόσο η απορρόφηση της μέγιστης ισχύος ανέμου, μέσω της διαρκούς ρύθμισης της ταχύτητας του δρομέα, όσο και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς του διαχειριστή του δικτύου, αναφορικά με τον έλεγχο πραγματικής και άεργου ισχύος, τάσης και συχνότητας, ανεξάρτητα από την εκάστοτε ταχύτητα του ανέμου. Οι συνηθέστερες διατάξεις που απαντώνται, σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, είναι ο ομαλός εκκινητής, οι συστοιχίες πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος, καθώς και οι μετατροπείς συχνότητας.

Γενικότερα, τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ένας διαρκώς αναπτυσσόμενος τομέας, καθώς τα ηλεκτρονικά στοιχεία να μπορούν, πλέον, να διαχειριστούν ολοένα και υψηλότερα ρεύματα και τάσεις, οι απώλειες ισχύος μειώνονται, με τις διατάξεις που τα αξιοποιούν να έχουν καταστεί ιδιαίτερα αξιόπιστες. Γι' αυτούς τους λόγους, η χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, στις ανεμογεννήτριες, είναι αρκετά εκτεταμένη, ιδιαίτερα από τη δεκαετία του '80 και έπειτα, προσφέροντας μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, καθώς όχι μόνο συμβάλλουν στην αύξηση της απόδοσης και της παραγωγής και στη μείωση της μηχανικής καταπόνησης, αλλά επιπροσθέτως παρέχουν προχωρημένες δυνατότητες ελέγχου, καθιστώντας τις ανεμογεννήτριες ενεργητικά στοιχεία στο δίκτυο, με συμπεριφορά παρόμοια με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. [15, 16]

##### 4.4.1 Ομαλός Εκκινητής

Ο Ομαλός Εκκινητής (Soft Starter) είναι μια απλή και φθηνή διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστο σε ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού (SCIG), για την εξομάλυνση των υψηλών ρευμάτων που αναπτύσσονται κατά τη σύνδεσή τους στο δίκτυο. Χωρίς τη χρήση Ομαλού Εκκινητή, τα ρεύματα αυτά, που δύνανται να είναι έως επτά και οκτώ φορές μεγαλύτερα του ονομαστικού, είναι ικανά να προκαλέσουν σημαντικές αστάθειες τάσης στο δίκτυο, με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Αποτελείται από συνολικά έξι θυρίστορ, ανά δύο αντιπαράλληλα σε

κάθε φάση, με την ομαλή σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο να επιτυγχάνεται μέσω της σταδιακής ρύθμισης της γωνίας έναυσής τους. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, τα θυρίστορ του Ομαλού Εκκινήτη βραχυκυκλώνονται, με την ανεμογεννήτρια να συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. [15, 16]

#### 4.4.2 Συστοιχίες Πυκνωτών

Οι Συστοιχίες Πυκνωτών (Capacitor Banks) χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες με ασύγχρονες γεννήτριες, με σκοπό την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Η απαιτούμενη, δηλαδή, για τη λειτουργία της γεννήτριας, άεργος ισχύς παρέχεται τοπικά από τις συστοιχίες των πυκνωτών, περιορίζοντας έτσι την σχετική εξάρτηση από το δίκτυο και τις πιθανές διαταραχές που ενδέχεται να διαταράξουν την ευστάθειά του. Η προσθαφαίρεση πυκνωτών στο σύστημα αντιστάθμισης γίνεται με μηχανικό τρόπο, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες της γεννήτριας σε άεργο ισχύ σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, οι οποίες και υπαγορεύονται από τη συμπεριφορά και την εξέλιξη των αιολικών φαινομένων. Έτσι, το σύστημα προσθαφαίρεσης πυκνωτών δύναται να ενεργοποιηθεί πάρα πολλές φορές, προκειμένου να ικανοποιεί τις προκύπτουσες κάθε φορά ανάγκες. Οι συστοιχίες πυκνωτών τοποθετούνται συνήθως είτε στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας, είτε εντός του ατρακτιδίου. Σε περιπτώσεις υπερτάσεων, οι συστοιχίες πυκνωτών είναι πιθανό από το να υπερφορτιστούν έως να καταστραφούν, ανεβάζοντας έτσι το κόστος συντήρησης της ανεμογεννήτριας. [15, 16]

#### 4.4.3 Μετατροπέας Συχνότητας

Οι Μετατροπείς Συχνότητας (Frequency Converters) είναι διατάξεις που επιτρέπουν τη διασύνδεση δύο ηλεκτρικών συστημάτων, που το καθένα έχει τη δικιά του ανεξάρτητη συχνότητα. Έτσι, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος και η μεταβολή της συχνότητας και της τάσης της γεννήτριας, γεγονός που προσδίδει τη δυνατότητα συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας ως ενεργό στοιχείο του δικτύου. Για τον λόγο αυτό, η χρήση τους στις ανεμογεννήτριες είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, ήδη από το 2000.

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες Μετατροπέων Συχνότητας, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, με τον “Back-to-Back” να αποτελεί την ευρέως

χρησιμοποιούμενη κατηγορία. Πρόκειται για έναν αμφίδρομη διάταξη που αποτελείται από δύο επιμέρους μετατροπείς, συνδεδεμένους μέσω DC link. Ο μετατροπέας που συνδέεται στο δίκτυο είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της τάσης του DC link σε μια σταθερή τιμή, ενώ ο μετατροπέας που συνδέεται στη γεννήτρια για τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου της και της επιθυμητής ταχύτητας του δρομέα.

Όπως έγινε φανερό και από την ενότητα 3.3, που κάλυψε τον τομέα των γεννητριών, μετατροπείς συχνότητας χρησιμοποιούνται τόσο σε ασύγχρονες/επαγωγικές, όσο και σε σύγχρονες γεννήτριες, στις επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG), καθώς και στις σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG) και μόνιμου μαγνήτη (PMSG) αντίστοιχα. [15, 16]

#### **4.5 Συστήματα Ελέγχου**

Μια ανεμογεννήτρια διαθέτει κατάλληλα συστήματα ελέγχου, τα οποία εξασφαλίζουν την ορθή και εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργία της, με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής, αλλά και την ελαχιστοποίηση της καταπόνησης των μηχανικών τμημάτων της. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, το σύστημα ελέγχου πρέπει να εξασφαλίζει την παραγωγή της βέλτιστης ισχύος, με τη μέγιστη αποδοτικότητα, ενώ σε ταχύτητες ανέμου υψηλότερες της ονομαστικής, την μείωση της παραγόμενης ισχύος στην ονομαστική της τιμή, ούτως ώστε να αποτρέψει την καταπόνηση των συστημάτων της ανεμογεννήτριας.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, αξιοποιούνται τόσο παθητικά όσο και ενεργητικά μέσα ελέγχου. Τα παθητικά μέσα ελέγχου ενεργοποιούνται μέσω φυσικών δυνάμεων, ενώ τα ενεργητικά μέσα ελέγχου αξιοποιούν κατάλληλα ηλεκτρικά, μηχανολογικά, υδραυλικά και πνευματικά μέσα για την εποπτεία διαφόρων μεγεθών, η συμπεριφορά των οποίων καθορίζει τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν. Τα κυριότερα μεγέθη που εποπτεύονται είναι η ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του δρομέα, η πραγματική και η άεργος ισχύς, η τάση και η συχνότητα στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο. Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό, το σύστημα ελέγχου να έχει τη δυνατότητα να ακινητοποιεί την ανεμογεννήτρια, όποτε οι συνθήκες το απαιτήσουν.

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας θα παρουσιαστούν τα βασικά συστήματα ελέγχου της παραγόμενης ισχύος που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, καθώς



και οι δυνατότητες που προσφέρονται αναφορικά με τον έλεγχο της ταχύτητας του δρομέα των γεννητριών. [15, 16]

#### 4.5.1 Έλεγχος Ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν κατάλληλα συστήματα για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος τους, μέσω του ελέγχου των δυνάμεων που ασκούνται στον αεροδυναμικό δρομέα της ανεμογεννήτριας, κατά την εξέλιξη των αιολικών φαινομένων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι, σε περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική, τα συστήματα αυτά θα λειτουργήσουν με τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη ισχύς να μειωθεί, για την αποφυγή μιας ενδεχόμενης καταστροφής της ανεμογεννήτριας. Τα τρία βασικά συστήματα που χρησιμοποιούνται, για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, είναι:

- *Παθητικός Έλεγχος Επιβράδυνσης (Passive Stall Control)*: Αποτελεί την απλούστερη και φθηνότερη μέθοδο για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος. Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι σταθερά συνδεδεμένα πάνω στο δρομέα, με τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου να είναι καθορισμένη. Έτσι, σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια επιτρεπτή τιμή, ο συγκεκριμένος αεροδυναμικός σχεδιασμός αναγκάζει το δρομέα να επιβραδύνει, μειώνοντας έτσι την παραγόμενη ισχύ. Απαντάται σε ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους, έως 1MW. Χαρακτηρίζεται από χαμηλή αποδοτικότητα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.
- *Ενεργητικό Σύστημα Ελέγχου Βήματος Πτερυγίων (Active Pitch Control)*: Στο σύστημα αυτό, τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας περιστρέφονται, ταχύτατα, αντίθετα ή προς τη διεύθυνση του ανέμου, όταν η ταχύτητά του είναι πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή αντίστοιχα. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μεταβολή της γεωμετρίας του αεροδυναμικού δρομέα, ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση. Προκειμένου η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας να παραμένει σταθερή, το σύστημα ελέγχου του βήματος μεταβάλλει τη γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων κατά κλάσματα της μοίρας κάθε φορά, σε αντιστοιχία με την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Η μεταβολή του βήματος των πτερυγίων δύναται να υλοποιηθεί είτε μέσω υδραυλικού συστήματος, ελεγχόμενου από ηλεκτρονικό υπολογιστή, είτε μέσω ηλεκτρονικά ελεγχόμενου ηλεκτρικού κινητήρα. Η ύπαρξη τόσο του μηχανισμού όσο και

του αντίστοιχου συστήματος για τον έλεγχο του, ανεβάζει το κόστος, συγκριτικά με τον παθητικό έλεγχο επιβράδυνσης. Προσφέρει ευκολία στην εκκίνηση και την ακινητοποίηση της ανεμογεννήτριας, ενώ χαρακτηρίζεται από αποδοτικότητα στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος, καθώς σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η ισχύς εξόδου διαμορφώνεται κοντά στην ονομαστική της γεννήτριας.

- *Ενεργός Έλεγχος Επιβράδυνσης (Active Stall Control)*: Στη μέθοδο αυτή, όπως υποδεικνύει και το όνομά της, η επιβράδυνση του δρομέα της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται μέσω της ενεργητικού ελέγχου των πτερυγίων. Ουσιαστικά, η διαφορά έγκειται στο ότι, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ονομαστική τιμή της γεννήτριας, αντί για μείωση της γωνίας πρόσπτωσης των πτερυγίων, γίνεται αύξηση, ώστε να προκληθεί επιβράδυνση. Σε ταχύτητες χαμηλότερες της ονομαστικής, ακολουθείται παρόμοια συμπεριφορά με το ενεργητικό σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων, για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης. Γενικότερα, αυτός ο τύπος ελέγχου έχει τη δυνατότητα να αντισταθμίζει ευκολότερα τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, ενώ προσφέρει ευκολία τόσο στην ακινητοποίηση σε περίπτωση ανάγκης, όσο και στην εκκίνηση μιας ανεμογεννήτριας. [15, 16]

#### 4.5.2 Έλεγχος Ταχύτητας Δρομέα Γεννήτριας

Ανάλογα με τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας του δρομέα τους, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις ανεμογεννήτριες σταθερών και μεταβλητών στροφών.

- *Ανεμογεννήτριες Σταθερών Στροφών (Fixed – Speed Wind Turbines)*: Αποτελεί τον τύπο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούνταν εκτεταμένα κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90. Στην κατηγορία αυτή, η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή, ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου, και δεν δύναται να μεταβληθεί, καθώς καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγο μετατροπής του κιβωτίου ταχυτήτων και τον σχεδιασμό της γεννήτριας. Ο τύπος γεννήτριας που αξιοποιούν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών είναι η ασύγχρονη – επαγωγική, συνήθως βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG), απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, συνεπικουρούμενη από ομαλό εκκινητή, καθώς και συστοιχίες πυκνωτών, για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος, ώστε η μέγιστη αποδοτικότητα επιτυγχάνεται σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου,

συνήθως των αιολικών δυναμικών της περιοχής που πρόκειται να τοποθετηθούν. Γενικότερα, χαρακτηρίζονται για την απλότητα στην κατασκευή τους και την αξιοπιστία τους, ενώ το κόστος των εξαρτημάτων τους είναι χαμηλό. Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όπως η μη ελεγχόμενη κατανάλωση άεργου ισχύος, μηχανική καταπόνηση, καθώς και έλλειψη δυνατοτήτων ελέγχου της ποιότητας της ισχύος. Επιπρόσθετα, ο όποιος διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μετατρέπονται σε διαταραχές της ισχύος προς το δίκτυο, οι οποίες, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αδύναμων δικτύων, δύνανται να οδηγήσουν σε μεγάλες αστάθειες τάσης.

- *Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών (Variable – Speed Wind Turbines):* Αποτελεί την κυρίαρχη κατηγορία ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται σήμερα, με τον σχεδιασμό της να επιτρέπει την επίτευξη της μέγιστης αποδοτικότητας, εντός ενός εκτεταμένου εύρους ταχυτήτων ανέμου. Ουσιαστικά, η δυνατότητα λειτουργίας με μεταβλητή ταχύτητα επιτρέπει τη διαρκή προσαρμογή της ταχύτητας του δρομέα με την ταχύτητα του ανέμου, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε στιγμή να επιτυγχάνεται η μέγιστη αποδοτικότητα. Η δυνατότητα αυτή υλοποιείται μέσω της «αποσύνδεσης» της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου, από τη μηχανική συχνότητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, κάνοντας χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Ο τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται δύναται να είναι είτε ασύγχρονη – επαγωγική είτε σύγχρονη, συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω κατάλληλου μετατροπέα ισχύος. Η ταχύτητα του δρομέα ελέγχεται μέσω του μετατροπέα και έτσι οι όποιες μεταβολές στην ισχύ εξαιτίας των διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου, αντιμετωπίζονται μέσω της μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι η αυξημένη δυνατότητα εκμετάλλευσης των αιολικών δυναμικών, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος, καθώς και μειωμένη μηχανική καταπόνηση των εξαρτημάτων. Ταυτόχρονα, επιτρέπουν τον ευκολότερο έλεγχο πραγματικής και άεργου ισχύος, ενώ παρουσιάζουν καλύτερη αλληλεπίδραση με το δίκτυο, γεγονός ιδιαίτερος σημαντικό για τις προοπτικές ενσωμάτωσης μεγάλων αιολικών πάρκων. Από την άλλη, τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν, οι απώλειες λόγω της χρήσης διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και το αυξημένο κόστος, εξαιτίας κυρίως των διατάξεων αυτών.

Όσον αφορά τα συστήματα ελέγχου της παραγόμενης ισχύος, που αναλύθηκαν στην Ενότητα 3.5.1, οι Ανεμογεννήτριες Σταθερών Στροφών δύνανται να χρησιμοποιήσουν και τους τρεις τύπους ελέγχου (παθητικό σύστημα επιβράδυνσης, ενεργητικό σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων, ενεργητικός έλεγχος επιβράδυνσης). Αναφορικά με το παθητικό σύστημα επιβράδυνσης, μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90 που η ισχύς των ανεμογεννητριών ήταν ακόμα κάτω από 1 MW, αποτελούσε την επικρατέστερη μέθοδος ελέγχου για τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Το ενεργητικό σύστημα ελέγχου βήματος, από την άλλη, δεν χρησιμοποιείται ευρέως, εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων της παραγόμενης ισχύος, στις υψηλές ταχύτητες ανέμου, ενώ δεν χαρακτηρίζεται από ταχύτητα στην αντίδραση του αναφορικά με ξαφνικές ριπές σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Ο ενεργητικός έλεγχος επιβράδυνσης χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα κατά τη δεκαετία του '90, εξαιτίας του ομαλού και σταδιακού περιορισμού της παραγόμενης ισχύος.

Αναφορικά με τις Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών, το ενεργητικό σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων αποτελεί την πιο εκτεταμένα χρησιμοποιούμενη μέθοδο, ειδικά για ισχύ άνω του 1 MW, αποτελώντας το μόνο από τα τρία συστήματα ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιείται. Το παθητικό σύστημα επιβράδυνσης, καθώς και ο ενεργητικός έλεγχος επιβράδυνσης δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα συστήματα, εξαιτίας της αδυναμίας τους για ταχεία μείωση της παραγόμενης ισχύος και της έλλειψης ευαισθησίας σε ξαφνικές ριπές ανέμου σε υψηλές ταχύτητες, οδηγώντας σε ανεξέλεγκτες καταστάσεις. [15, 16]

## **4.6 Μοντέλα Ανεμογεννητριών**

### **4.6.1 Γενικά περί Μοντέλων Ανεμογεννητριών**

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μια τεχνολογία διαρκώς αναπτυσσόμενη μέσα στα χρόνια, με αισθητές διαφοροποιήσεις και παραλλαγές στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές. Ανάλογα με το είδος της ηλεκτρικής γεννήτριας, των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και των δυνατοτήτων ελέγχου ταχύτητας και παραγόμενης ισχύος, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Τύπος 1 – Επαγωγική Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
2. Τύπος 2 – Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα με μεταβλητή αντίσταση δρομέα.

3. Τύπος 3 – Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας.
4. Τύπος 4 – Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος.

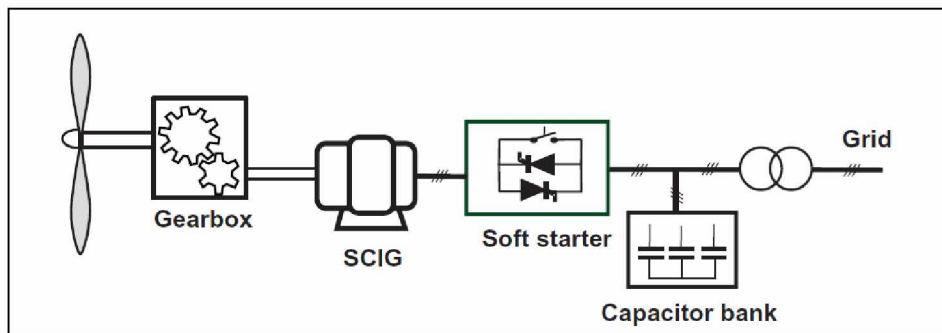
Οι τύποι 3 και 4 αποτελούν τις δύο πιο δημοφιλείς τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται σήμερα ανά τον κόσμο, με όλους τους μεγαλύτερους κατασκευαστές του τομέα να παρέχουν μοντέλα και των δύο τύπων. Οι τύποι 1 και 2 χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα παλαιότερα, με τη μοντελοποίηση τους να κρίνεται απαραίτητη, καθώς μεγάλος αριθμός βρίσκεται ακόμα εν λειτουργία.

Η μελέτη της συμπεριφοράς καθενός από τους παραπάνω τέσσερις τύπους, τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση, είναι πολύ σημαντική για την ορθή ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο, με όσο το δυνατόν λιγότερες διαταραχές στη λειτουργία του συστήματος. Για το λόγο αυτό έχουν καταρτιστεί «γενικά» μοντέλα, για καθεμιά από τις τέσσερις παραπάνω κατηγορίες, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μέσω κατάλληλων λογισμικών Η/Υ, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς πληθώρας εμπορικών ανεμογεννητριών. Ο όρος «γενικά» σημαίνει ότι τα πρότυπα αυτά είναι ελεύθερα διαθέσιμα και δεν αντιπροσωπεύουν κάποια συγκεκριμένα εμπορικά μοντέλα ανεμογεννητριών, αλλά ότι μέσω κατάλληλης ρύθμισης των παραμέτρων τους, δίνουν τη δυνατότητα μοντελοποίησης ενός μεγάλου εύρους των διαθέσιμων μοντέλων της αγοράς. Έτσι, μέσω του συνδυασμού των προτύπων αυτών και κατάλληλων λογισμικών προσομοίωσης, οι μελέτες μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης (μεταβατική ευστάθεια, ευστάθεια τάσης και συχνότητας) με την παρουσία ανεμογεννητριών, συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και συμπεριφοράς, καθίστανται ευκολότερες και ακριβέστερες, βοηθώντας στην ομαλότερη ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στο δίκτυο. Ένας από τους οργανισμούς που ασχολούνται με την τυποποίηση των μοντέλων αυτών, είναι το Western Electricity Coordinating Council (WECC).

Στις ενότητες που ακολουθούν θα μελετηθούν οι τέσσερις βασικοί τύποι ανεμογεννητριών, τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που παρουσιάζουν. [15, 16, 17, 18, 19]

#### 4.6.2 Τύπος 1 – Επαγωγική Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο

Ο Τύπος 1 αποτελεί το παλαιότερο μοντέλο ανεμογεννήτριας. Αξιοποιεί μια Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού (SCIG), σταθερών στροφών, που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, μέσω μετασχηματιστή. Ο άξονας της γεννήτριας συνδέεται στον αεροδυναμικό δρομέα της ανεμογεννήτριας μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων πολλαπλών σχέσεων. Ο Τύπος 1 περιλαμβάνει, επίσης, ομαλό εκκινήτη για την ομαλότερη σύνδεση στο δίκτυο, καθώς και συστοιχίες πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος (Σχήμα 4.2). Καθότι η Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού είναι γεννήτρια σταθερών στροφών, λειτουργεί με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, κοντά στη σύγχρονη, ανεξαρτήτως απ' την ταχύτητα του ανέμου. Σε κάποια από τα εμπορικά μοντέλα, για την αύξηση της απόδοσης, δύναται να χρησιμοποιηθούν γεννήτριες με μεταβλητό αριθμό πόλων, συνήθως με ένα τύλιγμα 8 πόλων για χαμηλές ταχύτητες αέρα και ένα 4 ή 6 πόλων για μεσαίες και υψηλές ταχύτητες ανέμου.



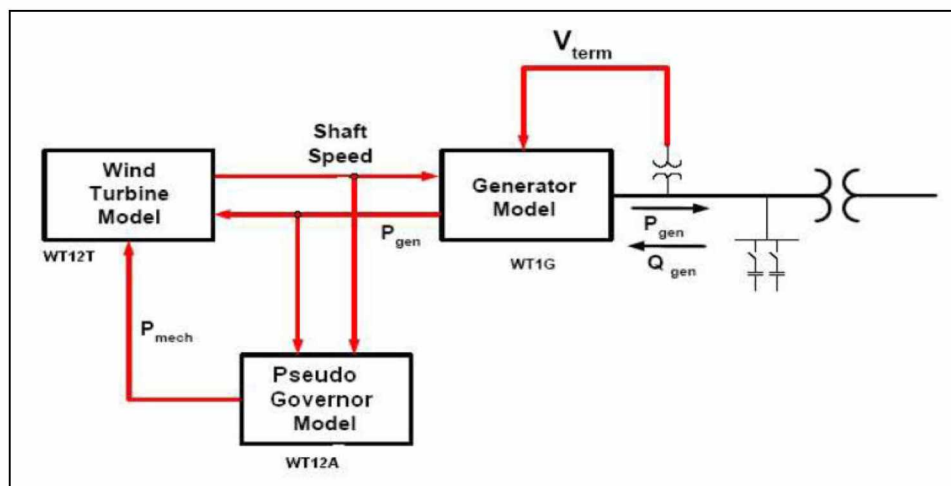
Σχήμα 4.2: Τύπος 1 – Επαγωγική Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο

Οι ανεμογεννήτριες Τύπου 1 χαρακτηρίζονται από απλότητα και στιβαρότητα στην κατασκευή, καθώς και από χαμηλή τιμή. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της γεννήτριας σταθερών στροφών που χρησιμοποιούν, οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, μετατρέπονται σε μεταβολές της μηχανικής ισχύος του άξονα και εν τέλει σε μεταβολές της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς το δίκτυο. Το γεγονός δύναται να προκαλέσει όχι μόνο αστάθεια τάσης στο σημείο σύνδεσης της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο, αλλά και καταπόνηση στα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Επιπρόσθετα, οι ανάγκες της γεννήτριας για άεργο ισχύ, αν δεν καλυφθούν τοπικά από συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης, καλύπτονται από το δίκτυο, με κίνδυνο αστάθειας τάσης και απωλειών στις γραμμές μεταφοράς. Γενικότερα, ο Τύπος 1 χαρακτηρίζεται από περιορισμένο έλεγχο της ποιότητας ισχύος, καθώς και από απουσία ελέγχου της ταχύτητας και της κατανάλωσης άεργου ισχύος.

Στο λογισμικό προσομοίωσης Siemens PSS/E, οι Ανεμογεννήτριες Τύπου 1 απαρτίζονται από τρεις μονάδες:

- WT1G: μονάδα γεννήτριας.
- WT12T: μονάδα αεροδυναμικού δρομέα.
- WT12A: μονάδα ψευδο-ρυθμιστή ταχύτητας.

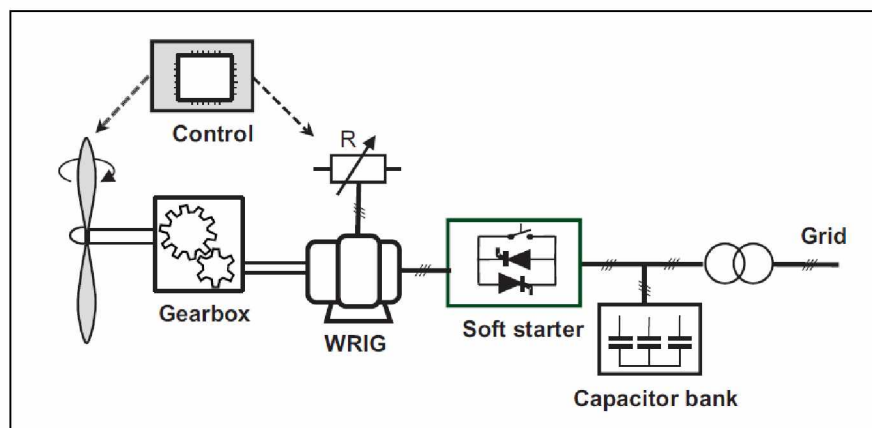
Η διασύνδεση των τριών αυτών μονάδων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Η Μονάδα Επαγωγικής Γεννήτριας WT1G αποτελεί μια ελαφρώς τροποποιημένη εκδοχή του αντίστοιχου δυναμικού μοντέλου του PSS/E για την επαγωγική μηχανή. Κατά την αρχικοποίηση, τυχόν αναντιστοιχίες μεταξύ της άεργου ισχύος που υπολογίστηκε από δυναμικό μοντέλο, βάσει της κατανομής του φορτίου στο σύστημα και της τάσης των ακροδεκτών της ανεμογεννήτριας, και της άεργου ισχύος από την ροή φορτίου, καλύπτονται μέσω συστήματος αντιστάθμισης στους ακροδέκτες του μοντέλου της ανεμογεννήτριας. Οι σχετικοί με τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας υπολογισμοί (π.χ. κιβώτιο ταχυτήτων), εκφράζονται μέσω της Μονάδας Αεροδυναμικού Δρομέα WT12T, ενώ το σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων και άλλες αεροδυναμικές παράμετροι των πτερυγίων μοντελοποιούνται μέσω της μονάδας ψευδο-ρυθμιστή ταχύτητας WT12A. [15, 16, 18, 19, 20]



Σχήμα 4.3: Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Τύπου 1 στο λογισμικό Siemens PSS/E

#### 4.6.3 Τύπος 2 – Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα με μεταβλητή αντίσταση δρομέα

Ο Τύπος 2 χρησιμοποιείται από τα μέσα της δεκαετίας του '90. Το είδος γεννήτριας που αξιοποιεί είναι η Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα (WRIG), συνήθως OptiSlip, ο στάτης της οποίας συνδέεται απευθείας, μέσω μετασχηματιστή, στο δίκτυο. Τα τυλίγματα του δρομέα της γεννήτριας είναι συνδεδεμένα σε σειρά με μεταβλητές αντιστάσεις, η τιμή των οποίων ελέγχεται δυναμικά μέσω διάταξης ηλεκτρονικών ισχύος. Μέσω της μεταβολής της τιμής της αντίστασης των τυλιγμάτων του δρομέα, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητάς του, συνήθως σε ένα εύρος 0 – 10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Για το λόγο αυτό, οι ανεμογεννήτριες Τύπου 2 χαρακτηρίζονται και ως περιορισμένου ελέγχου ταχύτητας. Λόγω της χρήσης επαγωγικής γεννήτριας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη διατάξεων αντιστάθμισης άεργου ισχύος, καθώς και ομαλού εκκινήτη, για την εξομάλυνση των υψηλών ρευμάτων κατά την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα ελέγχου απαρτίζεται ο έλεγχος της τιμής της μεταβλητής αντίστασης του δρομέα, καθώς και το σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων. Μια τυπική διάταξη των ανεμογεννητριών Τύπου 2 απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Τύπος 2 – Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα με μεταβλητή αντίσταση δρομέα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο Τύπος 2 είναι η απλότητα της όλης διάταξης, καθώς και ο βελτιωμένος έλεγχος ταχύτητας, συγκριτικά με τον Τύπο 1, γεγονός που οδηγεί όχι μόνο στον καλύτερο έλεγχο της παραγόμενης ισχύος, αλλά και στον περιορισμό των καταπονήσεων των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας και των όποιων διαταραχών προς το δίκτυο. Παρόλα αυτά, το εύρος ελέγχου της ταχύτητας είναι εξαιρετικά περιορισμένο, καθώς εξαρτάται άμεσα από την τιμή της αντίστασης του δρομέα, η ύπαρξη

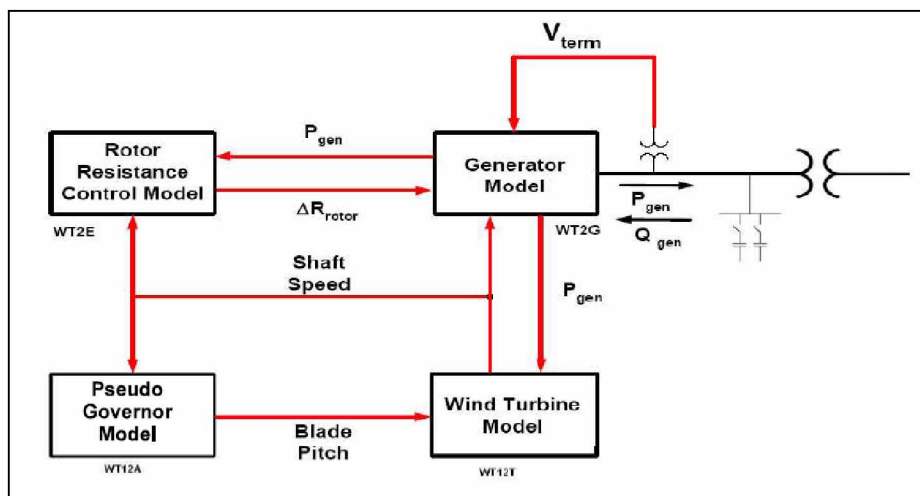


των οποίων οδηγεί σε θερμικές απώλειες ισχύος. Επιπρόσθετα, περιορισμένος είναι και ο έλεγχος της πραγματικής και της άεργου ισχύος της ανεμογεννήτριας. Γενικότερα, ο Τύπος 2 αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο προς τη μετάβαση στις ανεμογεννήτριες με δυνατότητες ελέγχου της ταχύτητάς τους, που κυριαρχούν σήμερα στην αγορά.

Στο λογισμικό προσομοίωσης Siemens PSS/E, οι Ανεμογεννήτριες Τύπου 2 απαρτίζονται από τέσσερις μονάδες:

- WT2G: μονάδα γεννήτριας.
- WT2E: μονάδα ελέγχου αντιστάσεων δρομέα.
- WT12T: μονάδα αεροδυναμικού δρομέα.
- WT12A: μονάδα ψευδο-ρυθμιστή ταχύτητας.

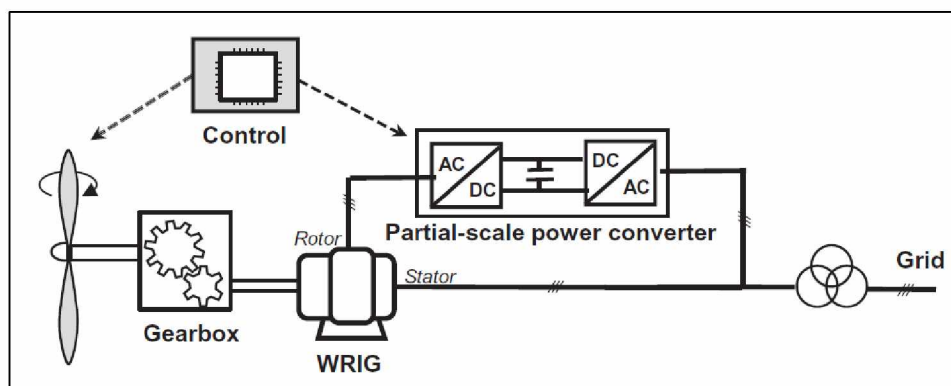
Η διασύνδεση των τριών αυτών μονάδων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5. Η Μονάδα Επαγωγικής Γεννήτριας WT2G αποτελεί μια ελαφρώς τροποποιημένη εκδοχή του αντίστοιχου δυναμικού μοντέλου του PSS/E για την επαγωγική μηχανή. Κατά την αρχικοποίησή της, υπολογίζει με όμοιο τρόπο με την WT1G του Τύπου 1 τις ανάγκες της γεννήτριας σε άεργο ισχύ, καθώς και την τιμή της αντίστασης του δρομέα, μέσω της πραγματικής ισχύος που παράγει η γεννήτρια. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η τιμή της αντίστασης του δρομέα ελέγχεται από την μονάδα WT2E, λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του δρομέα και την ισχύ. Η δομή των μονάδων WT12T και WT12A, για τους υπολογισμούς των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας και των αεροδυναμικών παραμέτρων αντίστοιχα, είναι όμοια με τις αντίστοιχες μονάδες του μοντέλου του Τύπου 1. [15, 16, 18, 19, 20]



Σχήμα 4.5: Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Τύπου 2 στο λογισμικό Siemens PSS/E

#### 4.6.4 Τύπος 3 – Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας

Οι ανεμογεννήτριες Τύπου 3 είναι η κατηγορία που κυριαρχεί στην αγορά. Το είδος γεννήτρια που αξιοποιούν είναι η Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας (DFIG), που αποτελεί υποκατηγορία της Επαγωγικής Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα (WRIG). Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα με έναν μετατροπέα ισχύος (back-to-back), με ισχύ περίπου το 30% της ονομαστικής της γεννήτριας. Ο μετατροπέας ισχύος «αποσυνδέει» ουσιαστικά τη μηχανική συχνότητα του δρομέα από την ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου, επιτρέποντας έτσι τη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα, μέσω της ρύθμισης της συχνότητάς του. Το εύρος μεταβολής της ταχύτητας κυμαίνεται από -40% έως +30% της σύγχρονης ταχύτητας και εξαρτάται άμεσα από την ισχύ του μετατροπέα ισχύος. Εκτός από τη ρύθμιση της ταχύτητας, ο μετατροπέας ισχύος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της πραγματικής και άεργου ισχύος, καθώς και για την ομαλότερη σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Για τον λόγο αυτό, οι ανεμογεννήτριες Τύπου 3 δεν απαιτούν επιπρόσθετα συστήματα αντιστάθμισης και ομαλό εκκινητή. Επιπλέον, η παραγόμενη ισχύς στο δρομέα δύναται να διοχετευτεί, μέσω του μετατροπέα, στο δίκτυο. Ουσιαστικά, η ύπαρξη του μετατροπέα ισχύος, καθιστά τις ανεμογεννήτριες Τύπου 3 ενεργητικά και ελεγχόμενα στοιχεία του δικτύου, μέσω της συμμετοχής τους στον δυναμικό έλεγχο τάσης – άεργου ισχύος. Το σύστημα ελέγχου απαρτίζουν ο έλεγχος του μετατροπέα ισχύος, καθώς και το σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων, για τον περιορισμό της παραγόμενης ισχύος, σε περίπτωση που αυτή υπερβεί την ονομαστική τιμή της γεννήτριας. Μια τυπική διάταξη των ανεμογεννητριών Τύπου 3 απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Τύπος 3 – Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας

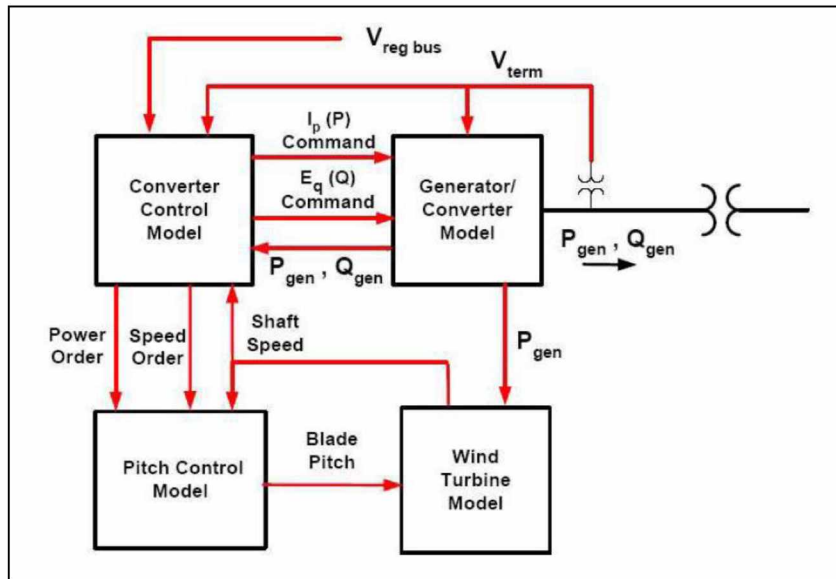
Γενικότερα, οι ανεμογεννήτριες Τύπου 3 είναι ακριβότερες και πιο σύνθετες, συγκριτικά με τις αντίστοιχες Τύπου 1 και 2. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητάς τους τις έχει καταστήσει ιδιαίτερα δημοφιλείς, με το εύρος μεταβολής της ταχύτητας που προσφέρουν, να είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των ανεμογεννητριών Τύπου 2. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι ανάγκη ύπαρξης κατάλληλων μέσων προστασίας για τον μετατροπέα ισχύος από σφάλματα, καθώς και η σύνδεση του μετατροπέα στα τυλίγματα του δρομέα μέσω δακτυλίων, γεγονός που δύναται να οδηγήσει σε απώλειες και αστοχίες, ενώ απαιτεί συχνή συντήρηση.

Στο λογισμικό προσομοίωσης Siemens PSS/E, οι Ανεμογεννήτριες Τύπου 3 απαρτίζονται από τέσσερις μονάδες:

- WT3G: μονάδα γεννήτριας και μετατροπέα ισχύος.
  - WT3G1
  - WT3G2: βελτιωμένη έκδοση του WT3G1.
- WT3E: μονάδα ελέγχου μετατροπέα ισχύος.
- WT3T: μονάδα αεροδυναμικού δρομέα.
- WT3P: μονάδα συστήματος ελέγχου βήματος πτερυγίων.

Η διασύνδεση των τριών αυτών μονάδων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7. Υπάρχουν δύο διαθέσιμα μοντέλα για την μονάδα της γεννήτριας και του μετατροπέα ισχύος, WT3G1 και WT3G2, με το WT3G2 να αποτελεί βελτιωμένη έκδοχή του WT3G1. Καθότι οι μετατροπείς ισχύος έχουν περιορισμούς όσον αφορά τις τιμές του ρεύματος, το μοντέλο περιλαμβάνει, επίσης, κατάλληλες μεθόδους για την προστασία τους, αναφορικά με τον περιορισμό του ρεύματος, καθώς και πρόβλεψη για την αύξηση του ορίου του παρεχόμενου ρεύματος κατά τη διάρκεια διαταραχών. Μια Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας έχει τη δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης πραγματικής και άεργου ισχύος, μέσω του ελέγχου του ενεργού ρεύματος και της τάσης μαγνήτισης του ρεύματος του δρομέα. Έτσι, αναφορικά με τον έλεγχο της άεργου ισχύος, είναι διαθέσιμες οι εξής τρεις επιλογές:

- Έλεγχος Τάσης Απομακρυσμένου Ζυγού.
- Έλεγχος Συντελεστή Ισχύος.
- Έλεγχος Άεργου Ισχύος. [15, 16, 18, 19, 20]

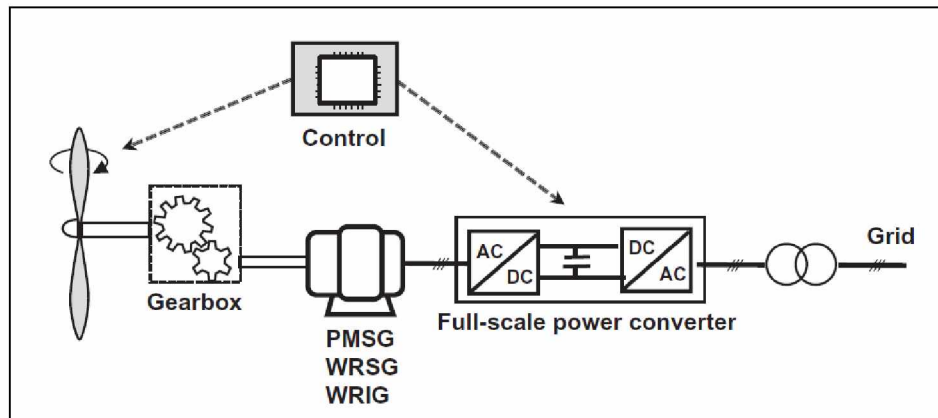


Σχήμα 4.7: Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Τύπου 3 στο λογισμικό Siemens PSS/E

#### 4.6.5 Τύπος 4 – Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος

Η διάταξη των ανεμογεννητριών Τύπου 4 αποτελείται από μια γεννήτρια μεταβλητών στροφών, που δύναται να είναι είτε Σύγχρονη Δακτυλιοφόρου Δρομέα (WRSG), είτε Επαγωγική Δακτυλιοφόρου Δρομέα (WRIG), είτε Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG), η οποία συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα ισχύος, που την απομονώνει πλήρως από αυτό. Ο μετατροπέας καθιστά δυνατό τον έλεγχο της ταχύτητας της γεννήτριας, εντός ενός μεγάλου εύρους, ενώ χρησιμοποιείται, επίσης, για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και για την ομαλή σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Επίσης, σε περιπτώσεις διαταραχών του δικτύου, η ανεμογεννήτρια επηρεάζεται σε ελάχιστο βαθμό, ενώ δύναται να συνεισφέρει στο δίκτυο, μέσω του μετατροπέα της και των συστημάτων ελέγχου του. Ουσιαστικά, η ύπαρξη του μετατροπέα ισχύος, καθιστά τις ανεμογεννήτριες Τύπου 4 ενεργητικά και ελεγχόμενα στοιχεία του δικτύου, μέσω της συμμετοχής τους στον δυναμικό έλεγχο τάσης – άεργου ισχύος. Όπως και στις Τύπου 3 ανεμογεννήτριες, το σύστημα ελέγχου εποπτεύει τον μετατροπέα ισχύος, για τον έλεγχο της πραγματικής και της άεργου ισχύος, καθώς και το σύστημα ελέγχου βήματος των πτερυγίων, για τον περιορισμό της ταχύτητας, όταν αυτή υπερβεί την ονομαστική τιμή της γεννήτριας. Είναι σημαντικό να επισημανθεί, επίσης, ότι δεν έχουν όλες οι ανεμογεννήτριες Τύπου 4 κιβώτιο ταχυτήτων. Στην περίπτωση απουσίας κιβωτίου ταχυτήτων, χρησιμοποιούνται γεννήτριες μεγάλης διαμέτρου με μεταβλητό αριθμό πόλων, που συνδέονται

απευθείας με τον αεροδυναμικό δρομέα. Μια τυπική διάταξη των ανεμογεννητριών Τύπου 4 απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8, με το κιβώτιο ταχυτήτων να σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή, εξαιτίας της δυνατότητας χρήσης του ή μη.



Σχήμα 4.8: Τύπος 4 – Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος

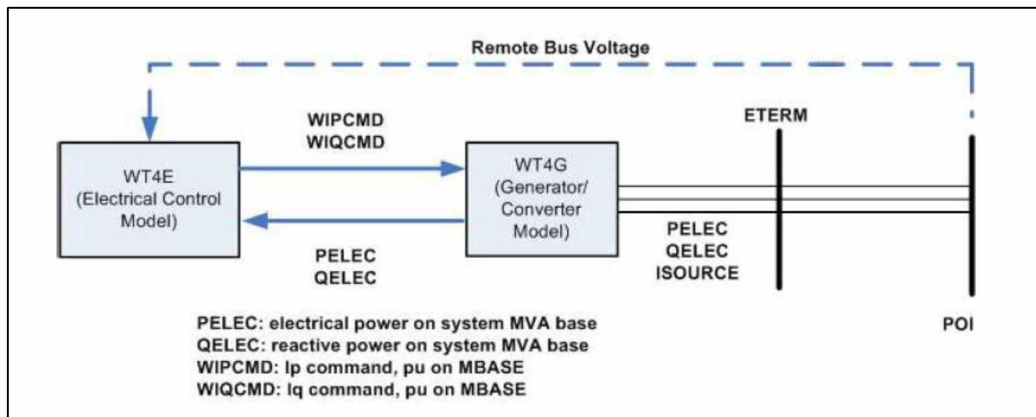
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες Τύπου 4, συγκριτικά με τις Τύπου 3, είναι η καλύτερη απόδοση, η έλλειψη δακτυλίων σύνδεσης στο δρομέα, το απλούστερο κιβώτιο ταχυτήτων ή η απουσία του, ο πλήρης έλεγχος ισχύος και ταχύτητας, καθώς και η καλύτερη αλληλεπίδραση ανεμογεννήτριας – δικτύου, τόσο στη μόνιμη κατάσταση, όσο και κατά τη διάρκεια διαταραχών. Η απουσία του κιβωτίου ταχυτήτων συνεπάγεται περιορισμό των απωλειών, καθώς και αυξημένη αξιοπιστία, εξαιτίας της απουσίας σύνθετων μηχανικών μερών. Παρόλα αυτά, τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι το αυξημένο κόστος του πλήρους μετατροπέα ισχύος (ισχύς ίση με την ονομαστική, έναντι 30% της ονομαστικής στις Τύπου 3), καθώς και οι αυξημένες απώλειες που παρατηρούνται σε αυτόν, εξαιτίας ότι όλη η παραγόμενη ισχύς διοχετεύεται στο δίκτυο μέσω αυτού.

Στο λογισμικό προσομοίωσης Siemens PSS/E, οι Ανεμογεννήτριες Τύπου 4 απαρτίζονται από δύο μονάδες:

- WT4G: μονάδα γεννήτριας και μετατροπέα ισχύος.
- WT4E: μονάδα ελέγχου μετατροπέα ισχύος.

Η διασύνδεση των δύο αυτών μονάδων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9. Η μονάδα της γεννήτριας και του μετατροπέα ισχύος WT4G υπολογίζει το ρεύμα προς το δίκτυο, μέσω κατάλληλων εντολών για την πραγματική και την άεργο ισχύ από τη μονάδα ελέγχου του μετατροπέα ισχύος WT4E. Όπως και στο αντίστοιχο μοντέλο για τις ανεμογεννήτριες Τύπου 3,

περιλαμβάνονται, επίσης, κατάλληλες μέθοδοι για την προστασία του μετατροπέα ισχύος, αναφορικά με την τιμή του ρεύματος. [15, 16, 18, 19, 20]



Σχήμα 4.9: Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Τύπου 4 στο λογισμικό Siemens PSS/E

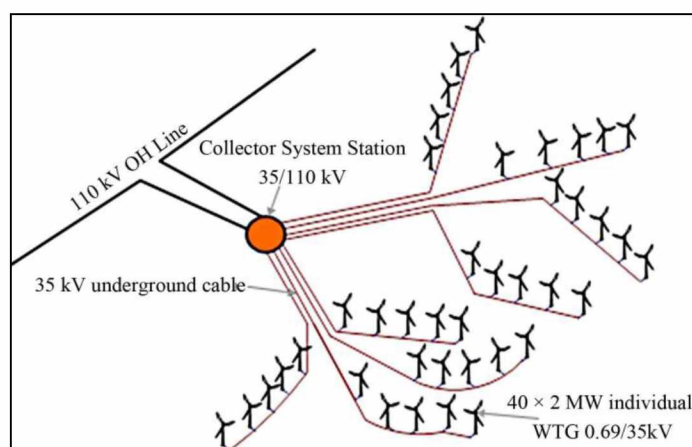
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

#### 5.1 Εισαγωγή

Οι ανεμογεννήτριες, που εντάσσονται στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οργανώνονται, ως επί το πλείστο, υπό τη μορφή αιολικών πάρκων (Wind Power Plant – WPP), χερσαίων ή υπεράκτιων. Ένα αιολικό πάρκο συγκροτείται από έναν μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών (έως και εκατοντάδες μονάδες), ονομαστικής ισχύος από 1MW έως 5MW η καθεμία, οι οποίες είναι τοποθετημένες εντός μιας μεγάλης έκτασης.

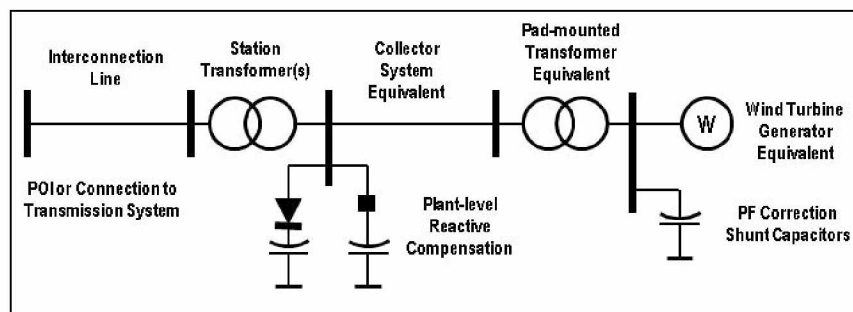
Μια τυπική διάταξη ενός αιολικού πάρκου, συνδεδεμένου στο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Η σύνδεση των ανεμογεννητριών στο Εσωτερικό Δίκτυο του αιολικού πάρκου (Collector System Network) πραγματοποιείται μέσω μετασηματιστών ανύψωσης. Το εσωτερικό δίκτυο είναι συνήθως χωρισμένο σε τομείς (sections), με συγκεκριμένο αριθμό ανεμογεννητριών ανά τομέα. Οι τομείς συνδέονται, εν συνεχεία, μέσω γραμμών, στον ζυγό του υποσταθμού του αιολικού πάρκου (Collector System Station). Εκεί, μέσω μετασηματιστή ανύψωσης και διασυνδετικής γραμμής, πραγματοποιείται η σύνδεση του αιολικού πάρκου με το δίκτυο.



Σχήμα 5.1: Τυπική διάταξη αιολικού πάρκου

Γενικότερα, στις μελέτες που αφορούν τη σύνδεση αιολικών πάρκων με το δίκτυο, καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους, αναφορικά με τη μόνιμη και τη μεταβατική λειτουργία, η λεπτομερής απεικόνιση του αιολικού πάρκου κρίνεται ως σύνθετη και μη πρακτική. Για τους λόγους αυτούς, σε τέτοιες μελέτες, ένα αιολικό πάρκο μοντελοποιείται ως το ισοδύναμο μίας γεννήτριας (Single – Machine Equivalent Representation), απεικόνιση που χαρακτηρίζεται επαρκής για τη συντριπτική πλειοψηφία των αιολικών πάρκων,

ανεξαρτήτως ισχύος και διαμόρφωσης. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.2, η απεικόνιση αυτή περιλαμβάνει τόσο το ισοδύναμο όλων των ανεμογεννητριών, των μετασχηματιστών ανύψωσής τους και των διατάξεων διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, όσο και του εσωτερικού δίκτυο του αιολικού πάρκου, του υποσταθμού σύνδεσης με το δίκτυο, καθώς των διατάξεων αντιστάθμισης έργου ισχύος. Στην περίπτωση που το μελετώμενο αιολικό πάρκο περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες διαφορετικών τύπων ή κάποιες από τις διασυνδεδεμένες γραμμές του εσωτερικού δικτύου παρουσιάζουν τιμές ισοδύναμης αντίστασης διαφορετικές από τις υπόλοιπες, το αιολικό πάρκο μοντελοποιείται με ανάλογο αριθμό ισοδύναμων μίας γεννήτριας.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση αιολικού πάρκου ως ισοδύναμο μίας γεννήτριας

Γενικότερα, η μεταβαλλόμενη και διακοπτόμενη φύση των αιολικών δυναμικών, που οδηγεί σε διακυμάνσεις στην παραγωγή ισχύος, σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες έναντι των συμβατικών σταθμών, καθώς και η ολοένα αυξανόμενη διεύθυνση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο, έχουν καταστήσει, πλέον, αναγκαία την ύπαρξη και τήρηση αυστηρών προδιαγραφών για τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο σύστημα. Η τήρηση των προδιαγραφών αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ομαλότερη λειτουργία του δικτύου και την ελαχιστοποίηση των διαταραχών που ενδέχεται να προκαλέσει η ύπαρξη αιολικών πάρκων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα μελετηθούν αρχικά οι τεχνικές προδιαγραφές για την ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στο δίκτυο, καθώς και η συμπεριφορά των τεσσάρων μοντέλων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται, ενώ, στη συνέχεια, θα αναλυθεί η μελέτη μόνιμης κατάστασης ενός συστήματος παρουσία αιολικών πάρκων, με έμφαση στην ανάλυση στατικής ασφάλειας μέσω του κριτηρίου N-1, καθώς και στην επιλογή σημείου σύνδεσης του πάρκου, βάσει απωλειών. [18, 21, 22]



## 5.2 Τεχνικές Προδιαγραφές Ενσωμάτωσης Αιολικών Πάρκων στο Δίκτυο

Γενικότερα, η ένταξη στο δίκτυο νέων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όπως τα αιολικά πάρκα, δύναται να δημιουργήσει μια σειρά προβλημάτων και περιορισμών, αναφορικά με τις ροές ισχύος, τα επίπεδα των τάσεων, τα ρεύματα μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης, την ευστάθεια του συστήματος, τη λειτουργία των συστημάτων προστασίας κ.α.. Για τους λόγους αυτούς, καθώς και εξαιτίας της διαρκώς αυξανόμενης διείσδυσης των αιολικών πάρκων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, σε συνδυασμό με τη σύνθετη συμπεριφορά τους και τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν έναντι των συμβατικών μονάδων παραγωγής, έχουν καταρτιστεί ειδικές τεχνικές προδιαγραφές ενσωμάτωσης από τους διαχειριστές των δικτύων, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η ευστάθεια του δικτύου. Οι προδιαγραφές αυτές επεκτείνονται σε πολλούς τομείς, αναφορικά με τη μόνιμη και τη μεταβατική λειτουργία των ανεμογεννητριών, με τους κυριότερους να είναι οι ακόλουθοι:

- Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας έπειτα από σφάλμα.
- Έλεγχος Πραγματικής Ισχύος – Συχνότητας.
- Έλεγχος Άεργου Ισχύος – Τάσης.

Τα παραπάνω μελετώνται και ελέγχονται ως προς την ορθότητά τους στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το σύστημα μεταφοράς (Point of Common Coupling – PCC), δηλαδή στους ακροδέκτες Υψηλής Τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού του αιολικού πάρκου.

Ανάλογα με τη χώρα και το μελετώμενο δίκτυο, δύναται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις προδιαγραφές καθενός από τους παραπάνω τομείς, ούτως ώστε να υποστηρίζουν κατά τον βέλτιστο τρόπο τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του κάθε Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Επίσης, με την πάροδο του χρόνου, αναθεωρούνται και προσαρμόζονται, βάσει των νέων δεδομένων που προκύπτουν.

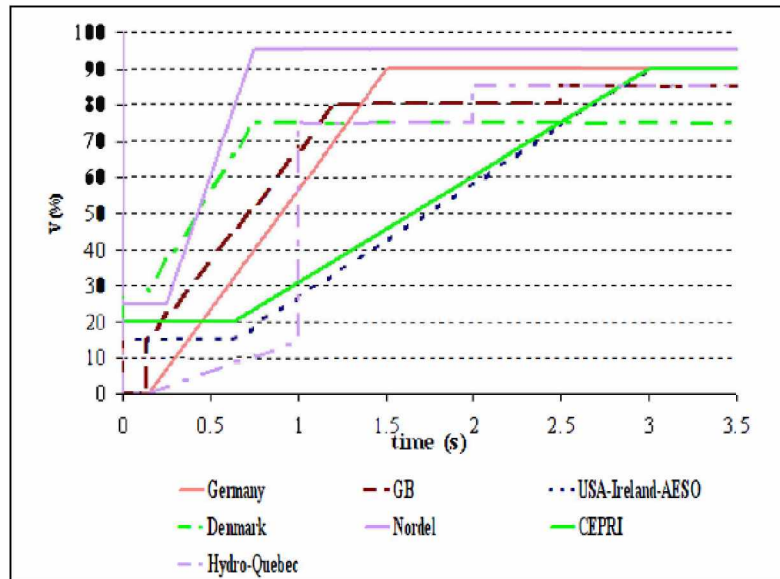
Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας, θα μελετηθεί καθένας από τους παραπάνω τρεις τομείς ξεχωριστά, παραθέτοντας, επιπρόσθετα, και στοιχεία από τους κανονισμούς διαφόρων χωρών. [22, 23, 24]

### 5.2.1 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας έπειτα από σφάλμα

Σφάλματα, από παροδικά μέχρι μόνιμα, συμβαίνουν αρκετά συχνά στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, επηρεάζοντας την εύρυθμη λειτουργία τους. Κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος αναπτύσσονται ρεύματα πολύ υψηλότερα του ονομαστικού, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή μέρους του εξοπλισμού του δικτύου, σε ελάχιστο χρόνο. Έτσι, για την αποφυγή μιας γενικευμένης καταστροφής του δικτύου, είναι απαραίτητη η ταχεία αποσύνδεση του τμήματος εκείνου που εμφανίστηκε το σφάλμα.

Η συμπεριφορά ενός αιολικού πάρκου, τόσο κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, όσο και μετά την εκκαθάρισή του, είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς είναι απαραίτητο να παραμείνει συνδεδεμένο στο δίκτυο και να το τροφοδοτεί με ισχύ, συνεισφέροντας, έτσι, στο ρεύμα βραχυκύκλωσης και στη διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος του συστήματος. Τα προαναφερθέντα ορίζουν την Ικανότητα Αδιάλειπτης Λειτουργίας έπειτα από Σφάλμα (Fault Ride Through – FRT) ενός αιολικού πάρκου, η οποία περιγράφεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη Τάσης (V) – Χρόνου (t), που εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή ενός αιολικού πάρκου έναντι διαταραχών. Οι τεχνικές προδιαγραφές ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων σε κάποιες χώρες υπαγορεύουν την αύξηση της παραγόμενης άεργου ισχύος του αιολικού πάρκου, κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, δρώντας έτσι υποστηρικτικά προς την τάση του δικτύου, συμπεριφορά που ομοιάζει με την αντίστοιχη των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών κατά τη λειτουργία υπερδιέγερσης.

Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζονται οι καμπύλες των απαιτήσεων FRT επτά διαχειριστών μεταφοράς, αναφορικά με την αδιάλειπτη λειτουργία αιολικών πάρκων έπειτα από σφάλμα, που προκαλεί βύθιση της τάσης (Low Voltage Ride Through – LVRT) [22]. Οι απαιτήσεις αυτές καθορίζονται τόσο από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου, όσο και από τα συστήματα προστασία που χρησιμοποιούνται. Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς της Κίνας (CEPRI), για παράδειγμα, υπαγορεύει ότι το όριο της ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου, είναι έως και 20% της ονομαστικής τιμής της τάσης του σημείου σύνδεσης, για μια περίοδο 0,625sec. [22, 24, 25]



Σχήμα 5.3: Καμπύλες απαιτήσεων FRT Διαχειριστών Μεταφοράς Γερμανίας, Ηνωμένου Βασιλείου, ΗΠΑ, Δανίας, Σκανδιναβίας, Κίνας και Καναδά [22].

### 5.2.2 Έλεγχος Πραγματικής Ισχύος – Συχνότητας

Η συχνότητα αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Μέσω της διατήρησης, στο επίπεδο της μεταφοράς, του ισοζυγίου παραγωγής – κατανάλωσης, είναι εφικτή η διατήρηση της συχνότητας εντός ενός μικρού εύρους, κοντά στην ονομαστική της τιμή.

Ο Έλεγχος Πραγματικής Ισχύος – Συχνότητας ενός αιολικού πάρκου επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης της παραγόμενης ισχύος του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, είτε μέσω της αποσύνδεσης κάποιων ανεμογεννητριών, είτε μέσω του Συστήματος Ελέγχου Βήματος των πτερυγίων. Με τον τρόπο αυτό, τα αιολικά πάρκα συμμετέχουν στη διατήρηση του ισοζυγίου παραγωγής – κατανάλωσης, ούτως ώστε η συχνότητα του συστήματος να παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι σχετικές τεχνικές προδιαγραφές της Γερμανίας, του σκανδιναβικού δικτύου, της Δανίας και της Κίνας [22], αναφορικά με τον ρυθμό μεταβολής της παραγόμενης ισχύος των αιολικών πάρκων:

- *Γερμανία*: ρυθμός μεταβολής 10% της χωρητικότητας σύνδεσης με το δίκτυο ανά λεπτό. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που η συχνότητα του δικτύου ξεπεράσει τα

50,2 Hz, τα αιολικά πάρκα πρέπει να μειώσουν την παραγωγή ισχύος τους με ρυθμό 40% της διαθέσιμης ισχύος ανά Hz.

- *Σκανδιναβικό Δίκτυο*: ρυθμός μεταβολής 10% της ονομαστικής ισχύος ανά λεπτό.
- *Δανία*: ρυθμός μεταβολής 10 – 100% της ονομαστικής ισχύος ανά λεπτό.
- *Κίνα*: ρυθμός μεταβολής 6 – 30 MW ανά λεπτό.

Είναι υποχρεωτικό τα αιολικά πάρκα να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διαταραχών τάσης ή/και συχνότητας, είτε εντός, είτε πάνω από τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Όμως, η λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας άνω των επιτρεπτών της ορίων, δε μπορεί να γίνει για μεγάλο χρονικό διάστημα και συχνά συνοδεύεται από μείωση της παραγόμενης ισχύος. Για τον λόγο αυτό, στις τεχνικές προδιαγραφές ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων σε κάποια δίκτυα, δεν ορίζεται μόνο το εύρος της συχνότητας, εντός του οποίου οι ανεμογεννήτριες πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο, αλλά και το χρονικό διάστημα που μπορούν να παραμείνουν συνδεδεμένες υπό συγκεκριμένη συχνότητα.

Γενικότερα, ο έλεγχος και η διατήρηση της συχνότητας του συστήματος, τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση, εξαρτώνται άμεσα από τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών σταθμών παραγωγής και τα συστήματα ελέγχου της ταχύτητάς τους. Στους σύγχρονους τύπους ανεμογεννητριών, όπως οι Τύποι 3 και 4 (Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας και Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος αντίστοιχα) που αξιοποιούν μετατροπείς ισχύος, η μηχανική συχνότητα του δρομέα είναι ανεξάρτητη από την ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου. Τυχόν αστοχίες στον μετατροπέα ισχύος δύνανται να διαταράξουν την ικανότητα ελέγχου της συχνότητας του συστήματος. [22, 24, 25]

### 5.2.3 Έλεγχος Άεργου Ισχύος – Τάσης

Ο έλεγχος της άεργου ισχύος είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον έλεγχο της τάσης, καθώς μέσω αυτού, η τάση δύνανται να διατηρηθεί εντός ενός επιθυμητού εύρους. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνικές προδιαγραφές ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων υπαγορεύουν την ικανότητα ελέγχου της άεργου ισχύος, ούτως ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Για παράδειγμα, σε μια περίπτωση βύθισης της τάσης στο σημείο σύνδεσης, το αιολικό πάρκο θα διοχετεύσει προς το δίκτυο άεργο ισχύ, για την επαναφορά της τάσης στην ονομαστική τιμή της.

Οι απαιτήσεις ελέγχου της άεργου ισχύος έχουν άμεση εξάρτηση από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου και του σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου με αυτό, καθώς η επίδραση της άεργου ισχύος, που το αιολικό πάρκο θα εγχύσει στο δίκτυο, στο επίπεδο της τάσης, εξαρτάται άμεσα από την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου στο σημείο σύνδεσης. Καθώς οι δυνατότητες παροχής άεργου ισχύος ποικίλουν, ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας, οι περισσότεροι διαχειριστές μεταφοράς ορίζουν, επίσης, στις τεχνικές προδιαγραφές τους και τα αντίστοιχα επιτρεπτά εύρη άεργου ισχύος, ανάλογα με το μοντέλο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται.

Στον Πίνακα 5.1 [24] παρατίθενται οι απαιτήσεις άεργου ισχύος οκτώ επιλεγμένων διαχειριστών μεταφοράς, αναφορικά με το επιτρεπόμενο εύρος, το  $\cos\phi$ , καθώς και το σημείο του δικτύου που ορίζονται τα προηγούμενα:

Πίνακας 5.1: Απαιτήσεις Άεργου Ισχύος επιλεγμένων διαχειριστών μεταφοράς [24]

| Διαχειριστής Μεταφοράς  | Σημείο Ενδιαφέροντος/Ορισμού* | Εύρος Q (p.u.)   | $\cos\phi$  |
|-------------------------|-------------------------------|------------------|---|
| Αυστραλία (AEMO)        | Σημείο σύνδεσης               | 0,395 (αυτόματα) | 0,9 – 0,95  |
| Αυστραλία (WP)          | Ακροδέκτες Α/Γ                | 0,484            | 0,8–0,9 (σύγχρονες γεννήτριες)<br>0,95–0,95 (ασύγχρονες γεννήτριες) |
| Καναδάς (HydroQuebec)   | Ακροδέκτες ΥΤ Υ/Σ             | -0,33 – 0,33     | 0,95 – 0,95   |
| Δανία (Energinet)       | Σημείο Λειτουργίας Σταθμού    | -0,33 – 0,33     | 0,95 – 0,95   |
| Γερμανία (Tennet)       | Σημείο σύνδεσης               | -                | 0,95 – 0,925  |
| Ιρλανδία (EirGrid)      | Σημείο σύνδεσης               | -0,33 – 0,33     | 0,95 – 0,95   |
| Ισπανία (REE)           | -                             | -0,33 – 0,33     | -   |
| Ηνωμένο Βασίλειο (NGET) | Σημείο Σύνδεσης               | -                | 0,95 – 0,95   |

\*Τα Σημεία Ενδιαφέροντος ορίζονται βάσει τοπικών προδιαγραφών.

Ένας άλλος παράγοντας, σχετικός με την τάση, που λαμβάνεται υπόψη στις τεχνικές προδιαγραφές ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων είναι οι εκπομπές flicker. Οι εκπομπές flicker είναι μικρές και ταχείες διακυμάνσεις στην τάση ακροδεκτών των ανεμογεννητριών, που οφείλονται στις μεταβολές της παραγόμενης ισχύος εξόδου. Η ύπαρξη των εκπομπών flicker επηρεάζει την ποιότητα της ισχύος και της τάσης, γεγονός που έχει καταστήσει αναγκαία την κατάρτιση σχετικών κανόνων από τους διαχειριστές των δικτύων. Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών παρέχουν τους συντελεστές των εκπομπών flicker, τόσο κατά

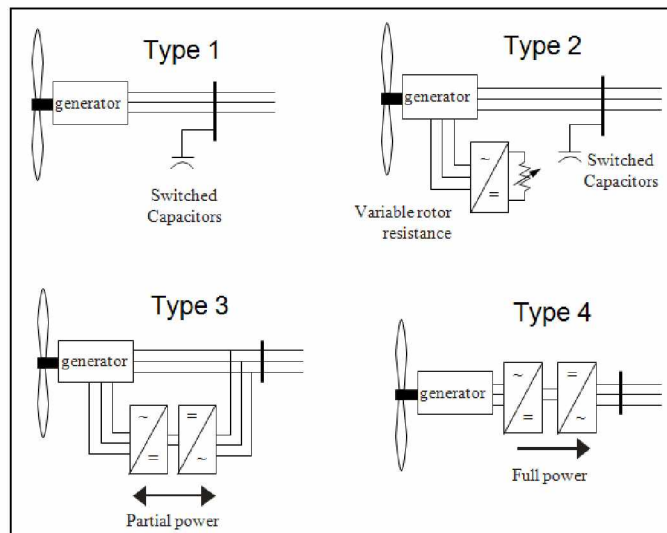
τη συνεχή, όσο και κατά τη διακοπτική λειτουργία. Οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται, εν συνεχεία, στις μελέτες ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων στο δίκτυο, για την αξιολόγηση του κατά πόσο οι προσδοκώμενες εκπομπές flicker σε κάθε πιθανό σημείο σύνδεσης είναι εντός των επιτρεπτών ορίων, που έχει θέσει ο διαχειριστής του συστήματος. [22,23, 24,25]

### **5.3 Συμπεριφορά Μοντέλων Ανεμογεννητριών**

Στην Ενότητα 4.6 μελετήθηκαν τα τέσσερα βασικά μοντέλα ανεμογεννητριών, αναφορικά με την τοπολογία τους και τη μοντελοποίησή τους από το λογισμικό Siemens PSS/E. Η ενότητα που ακολουθεί πραγματεύεται τη συμπεριφορά των μοντέλων αυτών ως στοιχείων του δικτύου, δηλαδή τις δυνατότητες τους όσον αφορά τον έλεγχο τάσης – άεργου ισχύος, συχνότητας – πραγματικής ισχύος, καθώς και τη συμπεριφορά τους παρουσία σφαλμάτων. Η γνώση και η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου ανεμογεννήτριας ανάλογα με την εφαρμογή, όσο και για τη σωστή διαστασιολόγησή της στα λογισμικά προσομοίωσης ΣΗΕ, επιτυγχάνοντας έτσι την ευκολότερη και αποτελεσματικότερη ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο. [18]

Υπενθυμίζεται ότι οι τέσσερις βασικές κατηγορίες ανεμογεννητριών είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 5.4):

1. Τύπος 1 – Επαγωγική Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
2. Τύπος 2 – Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα με μεταβλητή αντίσταση δρομέα.
3. Τύπος 3 – Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας.
4. Τύπος 4 – Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 5.4: Μοντέλα Ανεμογεννητριών

### 5.3.1 Έλεγχος Τάσης & Διαχείριση Άεργου Ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες Τύπου 1 και 2 αξιοποιούν επαγωγικές γεννήτριες, οι οποίες, όπως είναι γνωστό, απαιτούν κατά τη λειτουργία τους την παροχή άεργου ισχύος από το δίκτυο. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής ισχύος που έχουν στη μόνιμη κατάσταση είναι χωρητικός, με τιμή περίπου 0,9. Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος, δηλαδή η διατήρησή του κοντά στη μονάδα στη μόνιμη κατάσταση, επιτυγχάνεται μέσω συστοιχιών πυκνωτών, τοποθετημένων στους ακροδέκτες της γεννήτριας, οι οποίες προσθαφαιρούν πυκνωτές ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες σε άεργο ισχύ. Παρόλα αυτά, οι Τύποι 1 και 2 στερούνται της δυνατότητας δυναμικού ελέγχου της άεργου ισχύος. Για το λόγο αυτό, σε αιολικά πάρκα που περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες Τύπου 1 ή 2, χρησιμοποιούνται, σε επίπεδο πάρκου, διατάξεις STATCOM ή SVC για την αντιστάθμιση των απωλειών άεργου ισχύος, που δημιουργούνται στις γραμμές και τους μετασχηματιστές του εσωτερικού δικτύου. Έτσι, με τον τρόπο αυτό, ικανοποιούνται τα κριτήρια και οι προδιαγραφές ελέγχου της άεργου ισχύος στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο.

Από την άλλη, οι ανεμογεννήτριες Τύπου 3 και 4 έχουν τη δυνατότητα τόσο να παράγουν, όσο και να απορροφούν άεργο ισχύ. Ουσιαστικά, οι ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου ακολουθούν έναν συντελεστή ισχύος αναφοράς, τον οποίο ορίζει δυναμικά ένας κεντρικός ελεγκτής, επιτυγχάνοντας έτσι τον έλεγχο άεργου ισχύος – τάσης στο σημείο διασύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Επιπρόσθετα, κάθε ανεμογεννήτρια δύναται

να είναι εφοδιασμένη με ελεγκτές ταχείας αντίδρασης, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα να αγνοηθεί ο συντελεστής ισχύος αναφοράς, σε περιπτώσεις που το ρεύμα στον μετατροπέα ισχύος και η τάση στους ακροδέκτες ξεπεράσουν τις ονομαστικές τιμές.

Γενικότερα, ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη διάταξη του αιολικού πάρκου, αλλά και σε περιπτώσεις αδύναμων διασυνδέσεων, ενδέχεται να απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος, ούτως ώστε να τηρούνται οι προδιαγραφές άεργου ισχύος – τάσης.

Η ορθή μοντελοποίηση του ελέγχου άεργου ισχύος – τάσης των ανεμογεννητριών, στα μοντέλα προσομοιώσεων σε μελέτες αιολικών πάρκων, είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική λειτουργία. Αν, για παράδειγμα, οι ανεμογεννήτριες δεν συμμετέχουν στον δυναμικό έλεγχο της τάσης, τότε στο αντίστοιχο μοντέλο τους, θα έχουν σταθερό συντελεστή ισχύος. Στα πρότυπα μοντέλα του WECC, οι ανεμογεννήτριες Τύπου 3 και 4 ενσωματώνουν τη λειτουργία του δυναμικού ελέγχου άεργου ισχύος – τάσης, ενώ οι ανεμογεννήτριες Τύπου 1 και 2 προσομοιώνονται ως συμβατικές επαγωγικές μηχανές. [18]

### 5.3.2 Απόκριση Συχνότητας & Διαχείριση Πραγματικής Ισχύος

Είναι γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες έχουν περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά τον έλεγχο της πραγματικής ισχύος που παράγουν, με προτεραιότητα να αποτελεί η παραγόμενη πραγματική ισχύς να είναι όσο τον δυνατόν κοντά στην ονομαστική της γεννήτριας. Για ταχείες αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου, ένας αυξητικός ρυθμός στην παραγωγή ισχύος δύναται να αντιμετωπιστεί ευκολότερα και με λιγότερες απώλειες, συγκριτικά με έναν μειωτικό ρυθμό. Επιπλέον, σε περιπτώσεις που η συχνότητα του συστήματος έχει υπερβεί την ονομαστική της τιμή, ένα αιολικό πάρκο έχει τη δυνατότητα να μειώσει την παραγόμενη πραγματική ισχύ, είτε αποσυνδέοντας κάποιες από τις ανεμογεννήτριες, είτε ορίζοντας, προσωρινά, την παραγωγή τους κάτω από τις ονομαστικές τιμές.

Γενικότερα, είναι γνωστό ότι τυχόν ηλεκτρικής φύσεως διαταραχές δύνανται να οδηγήσουν σε μια ανισορροπία μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας, η αντιμετώπιση της οποίας εξαρτάται άμεσα, τόσο από τον τύπο της ανεμογεννήτριας, όσο και από συστήματα ελέγχου της. Οι ανεμογεννήτριες Τύπου 1 και 2, καθότι απευθείας συνδεδεμένες στο



δίκτυο, έχουν τη δυνατότητα μιας περιορισμένης συνεισφοράς στην αδράνεια του συστήματος έναντι διαταραχών. Οι Τύποι 3 και 4, αν και δεν διαθέτουν εκ φύσεως τη δυνατότητα αυτή, εξαιτίας του μετατροπέα ισχύος, που ουσιαστικά απομονώνει τη γεννήτρια από το υπόλοιπο δίκτυο, δύνανται να προσφέρουν στην αδράνεια του συστήματος, μέσω κατάλληλης ρύθμισης των παραμέτρων ελέγχου του μετατροπέα ισχύος.

Με το ξέσπασμα μιας διαταραχής στο σύστημα, η παραγόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών Τύπου 1 και 2 τείνει να εμφανίσει ταλαντώσεις, καθότι η ταχύτητα του δρομέα συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα του δικτύου. Από την άλλη, στις ανεμογεννήτριες Τύπου 3 και 4, ο μετατροπέας ισχύος απομονώνει τη συμπεριφορά του δρομέα της γεννήτριας από το υπόλοιπο δίκτυο, με αποτέλεσμα η αλληλεπίδραση αυτή να είναι περιορισμένη. Γενικότερα, έχει παρατηρηθεί στις περισσότερες περιπτώσεις ότι, η ύπαρξη ανεμογεννητριών Τύπου 3 και 4 δύνανται να συμβάλει στην εξομάλυνση των ταλαντώσεων πραγματικής ισχύος και συχνότητας σε τοπικό επίπεδο. [18]

### 5.3.3 Δυναμική Συμπεριφορά σε Σφάλματα

Η συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας στη μεταβατική κατάσταση, δηλαδή κατά τη διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων και διαταραχών, είναι ιδιαίτερα σημαντική και εξαρτάται άμεσα από τον τύπο στον οποίο εντάσσεται.

Γενικότερα, σε όλους τους τύπους ανεμογεννητριών πλην του Τύπου 1, τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και αμέσως μετά από κάποιο σφάλμα, τα οποία δύνανται να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες βυθίσεις της τάσης στους ακροδέκτες της ανεμογεννήτριας, ενεργοποιούνται κατάλληλα συστήματα ελέγχου ταχείας αντίδρασης. Ειδικότερα, σε κάποιες από τις ανεμογεννήτριες που εντάσσονται στον Τύπο 3, υπάρχει η δυνατότητα βραχυκύκλωσης του μετατροπέα ισχύος που βρίσκεται στην πλευρά του δρομέα, ή η ενεργοποίηση της δυναμικής πέδης, προκειμένου να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη υπέρταση στον πυκνωτή του DC link. Όταν ενεργοποιηθεί η δυνατότητα αυτή, η γεννήτρια λειτουργεί ουσιαστικά σαν επαγωγικός κινητήρας. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες Τύπου 3 και 4 έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο κατά τη διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων, προκειμένου να συνεισφέρουν στο βραχυκύκλωμα, μέσω του ελέγχου του μέτρου και της γωνίας

του ρεύματος που παρέχουν στο δίκτυο. Σε περιπτώσεις σοβαρών βυθίσεων τάσης, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τυχόν ηλεκτρικοί και μηχανικοί περιορισμοί.

Κλείνοντας, πρέπει να επισημανθεί ότι είναι αρκετά σύνθετη η μοντελοποίηση και η ενσωμάτωση στα πρότυπα μοντέλα προσομοιώσεων ανεμογεννητριών, όλων των διαθέσιμων λειτουργιών ελέγχου, που άπτονται της δυναμικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Για το λόγο αυτό, γίνονται προσπάθειες για τη διαρκή βελτίωση των πρότυπων μοντέλων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την λειτουργικότητα και πολυπλοκότητα των ανεμογεννητριών, όσο και την ελεύθερη και γενική φύση των πρότυπων μοντέλων. [18]

## **5.4 Μελέτη Μόνιμης Κατάστασης παρουσία Αιολικού Πάρκου**

### **5.4.1 Αιολικά Πάρκα στη Μόνιμη Κατάσταση**

Η σύνδεση ενός αιολικού πάρκου στο δίκτυο μεταφοράς προϋποθέτει τη διενέργεια κατάλληλων μελετών, προκειμένου να διευκρινιστούν:

- Οι επιπτώσεις στην ασφάλεια και την αξιοπιστία του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Ο σχεδιασμός των υποδομών διασύνδεσης αιολικού πάρκου – δικτύου, όπως γραμμές μεταφοράς, υποσταθμός, συστήματα προστασίας και αντιστάθμισης έργου ισχύος κ.α.
- Ο καθορισμός και σχεδιασμός των απαραίτητων ενισχύσεων του δικτύου μεταφοράς, για τη βέλτιστη ενσωμάτωση του αιολικού πάρκου.

Για τον προσδιορισμό των παραπάνω, απαιτούνται η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος, παρουσία του αιολικού πάρκου, τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική κατάσταση, δηλαδή υπό την επήρεια διαταραχών. Η παρούσα ενότητα θα επικεντρωθεί στη μόνιμη λειτουργία συστήματος – αιολικού πάρκου, καθώς και στις επιμέρους μελέτες της, αναφορικά με την αξιοπιστία και την επιλογή σημείου σύνδεσης στο δίκτυο βάσει απωλειών.

Η μελέτη της μόνιμης κατάστασης του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου, προϋποθέτει την εκτέλεση κάποιου αλγόριθμου ροής φορτίου για τον προσδιορισμό των ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές, καθώς και των τάσεων των

ζυγών του συστήματος. Ο υπολογισμός των παραπάνω κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός για τη σύνδεση ενός αιολικού πάρκου με το δίκτυο, καθώς συμβάλλει στον προσδιορισμό των απαιτήσεων άεργου ισχύος και των απωλειών του συστήματος, στον εντοπισμό τυχόν υπερφορτίσεων στοιχείων, αλλά και στον σχεδιασμό των απαιτούμενων ενισχύσεων του δικτύου, για την αντιμετώπισή τους, όπως νέες γραμμές μεταφοράς και συστήματα ελέγχου τάσης – άεργου ισχύος. Είναι, ουσιαστικά, απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι η παρουσία του αιολικού πάρκου δε θα οδηγήσει άλλα στοιχεία του συστήματος, όπως γραμμές μεταφοράς και γεννήτριες, σε υπερφόρτιση, με τις τάσεις των ζυγών του συστήματος να παραμένουν κοντά στις ονομαστικές τους τιμές. Η μελέτη ροής φορτίου δύναται, επίσης, να πραγματοποιηθεί και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η αναλυτική απεικόνιση του αιολικού πάρκου, για τον προσδιορισμό των τάσεων και των ροών ισχύος του εσωτερικού του δικτύου.

Υποκατηγορίες της μελέτης μόνιμης κατάστασης αποτελούν οι μελέτες ανάλυσης διαταραχών (π.χ. κριτήριο N-1) και υπολογισμού των απωλειών ισχύος, απαραίτητες για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του συστήματος, καθώς και για την εύρεση του βέλτιστου ζυγού σύνδεσης αντίστοιχα. Οι μελέτες στατικής ασφάλειας και υπολογισμού απωλειών, παρουσία αιολικού πάρκου, καθώς και η μοντελοποίηση των τεσσάρων βασικών κατηγοριών ανεμογεννητριών στη μόνιμη κατάσταση από το λογισμικό Siemens PSS/E, θα εξεταστούν στη συνέχεια της παρούσας ενότητας. [26, 27, 28, 29]

#### 5.4.2 Μοντέλα Ανεμογεννητριών στη Μόνιμη Κατάσταση στο Siemens PSS/E

Στις μελέτες αιολικών πάρκων μέσω του λογισμικού Siemens PSS/E, είτε αφορούν τη μόνιμη, είτε τη μεταβατική λειτουργία, απαιτείται από τον χρήστη η κατάλληλη ρύθμιση και διαστασιολόγηση του ισοδυναμού μιας γεννήτριας, ανάλογα με τον τύπο ανεμογεννήτριας που αποτελείται το μελετώμενο αιολικό πάρκο.

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις αναφορικά με τη μόνιμη λειτουργία, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ο αριθμός των μονάδων που θα αποτελούν το αιολικό πάρκο, ούτως ώστε να διαστασιολογηθεί κατάλληλα η ισοδύναμη απεικόνισή του. Για ένα αιολικό πάρκο N μονάδων, όπου η κάθε μονάδα έχει βάση ισχύος  $S_{base-WTG}$ , η βάση ισχύος του,  $S_{base-WPP}$ , υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$S_{base-WPP} = S_{base-WTG} * N \quad (5.1)$$

Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, είναι τα χαρακτηριστικά του εσωτερικού δικτύου του αιολικού πάρκου, καθώς και των μετασχηματιστών ανύψωσης, για τον υπολογισμό της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Z. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι, μια ισοδύναμη απεικόνιση περιλαμβάνει πάντα ανεμογεννήτριες του ίδιου τύπου.

Ανάλογα με την κατηγορία των ανεμογεννητριών που απαρτίζουν το μελετώμενο αιολικό πάρκο, οι Ρυθμίσεις Ελέγχου (Wind Control Mode) στο λογισμικό Siemens PSS/E, για τη μόνιμη λειτουργία, διαμορφώνονται:

- *Τύπος 1 – Επαγωγική Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο:* Επιλέγεται η λειτουργία ελέγχου “3 – Fixed Q based on WPF”, δηλαδή η ανεμογεννήτρια λειτουργεί υπό ορισμένη πραγματική ισχύ, με την άεργου ισχύ της να είναι καθορισμένη από τον Συντελεστή Ισχύος της (Power Factor – WPF). Ο Συντελεστής Ισχύος είναι απαραίτητο να οριστεί με αρνητική τιμή, ούτως ώστε να ερμηνευτεί ως χωρητικός, δηλαδή η ανεμογεννήτρια, κατά τη λειτουργία της, παράγει πραγματική ισχύ, ενώ απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο. Η πλειονότητα των ανεμογεννητριών αυτού του τύπου περιλαμβάνουν συστήματα συστοιχιών πυκνωτών αντιστάθμισης, για τη διατήρηση του συντελεστή ισχύος, στη μόνιμη κατάσταση, εντός ενός συγκεκριμένου εύρους. Τα συστήματα αυτά είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη, μέσω της τοποθέτησης κατάλληλα διαστασιολογημένου Fixed Shunt στο ζυγό του αιολικού πάρκου.
- *Τύπος 2 – Επαγωγική Γεννήτρια Δακτυλιοφόρου Δρομέα με μεταβλητή αντίσταση δρομέα:* Ομοίως με τον Τύπο 1, η λειτουργία ελέγχου “3 – Fixed Q based on WPF”.
- *Τύπος 3 – Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας:* Επιλέγεται η λειτουργία ελέγχου “2 - +, - Q limits based on WPF”, δηλαδή η ανεμογεννήτρια ελέγχει την τάση ενός απομακρυσμένου ζυγού, εντός ενός ορισμένου εύρους άεργου ισχύος [ $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ].
- *Τύπος 4 – Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ισχύος:* Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 4.6.5, οι ανεμογεννήτριες Τύπου 4 συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα ισχύος, ο οποίος, ουσιαστικά, τις απομονώνει από το υπόλοιπο δίκτυο. Στις μελέτες ροής φορτίου, ο μετατροπέας ισχύος αντιμετωπίζεται, στην

πραγματικότητα, σαν γεννήτρια. Επιλέγεται η λειτουργία ελέγχου “2 - +, - Q limits based on WPF”, δηλαδή η ανεμογεννήτρια ελέγχει την τάση ενός απομακρυσμένου ζυγού, εντός ενός ορισμένου εύρους άεργου ισχύος [ $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ]. [20]

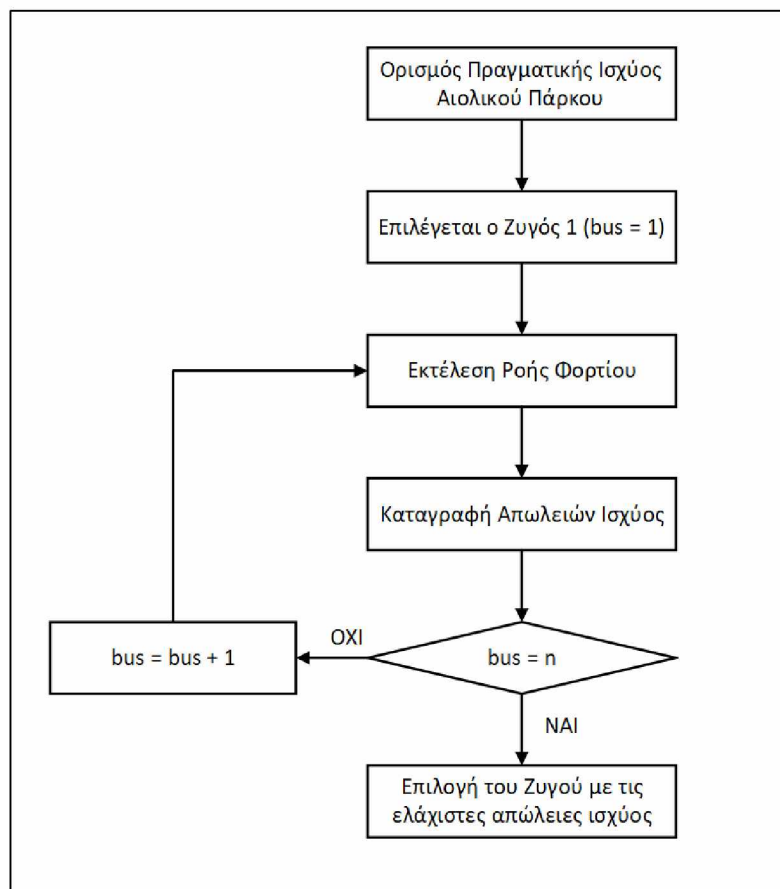
#### 5.4.3 Επιλογή Σημείου Σύνδεσης στο Δίκτυο βάσει Απωλειών

Η επιλογή του σημείου σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου με το δίκτυο έχει μεγάλη σημασία, τόσο για το ίδιο το αιολικό πάρκο, όσο και για το δίκτυο και την ομαλή λειτουργία του. Το σημείο σύνδεσης έχει άμεση επίρεια στη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος, στην ευστάθεια τάσης, καθώς και στην ποιότητα της ισχύος, τόσο εξαιτίας της τυχαιότητας των αιολικών φαινομένων, όσο και λόγω των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών. Η τάση στο σημείο σύνδεσης εξαρτάται άμεσα από την ανάγκες του αιολικού πάρκου σε άεργο ισχύ, και σαν αποτέλεσμα τυχόν διακυμάνσεις στις τιμές της τάσης και της άεργου ισχύος δύνανται να οδηγήσουν το σύστημα σε αστάθεια. Πιο συγκεκριμένα, όταν στο σημείο σύνδεσης παρατηρούνται διακυμάνσεις στην τιμή της τάσης, η διασύνδεση αιολικού πάρκου – δικτύου χαρακτηρίζεται ως ασθενής, κατάσταση που χρήζει κατάλληλης αντιμετώπισης. Για τον λόγο αυτό, τα αιολικά πάρκα είναι απαραίτητο να συνδέονται σε ζυγούς που χαρακτηρίζονται από στιβαρότητα, ούτως ώστε όχι μόνο να μην επηρεάζεται η ευστάθεια του συστήματος, αλλά και να καταστεί δυνατή μια περαιτέρω αύξηση της ενσωμάτωσης ανεμογεννητριών στο σύστημα.

Στις μελέτες για τον σχεδιασμό μεγάλων αιολικών πάρκων είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ο αντίκτυπος της ενσωμάτωσής τους στις απώλειες ισχύος, τόσο του συστήματος, όσο και του εσωτερικού δικτύου του αιολικού πάρκου, καθώς και πώς αυτές σχετίζονται με τη βέλτιστη επιλογή του ζυγού σύνδεσης με το δίκτυο. Μέσω της μελέτης απωλειών δύνανται να αποσαφηνιστούν τόσο η συμβολή της αντιστάθμισης της άεργου ισχύος στο δίκτυο, όσο και οι συνέπειες της λειτουργίας του δικτύου κοντά στα όριά του. Στη ροή φορτίου, ένα αιολικό πάρκο διοχετεύει πραγματική ισχύ στο δίκτυο και απορροφά άεργο ισχύ από αυτό, γεγονός που αναπροσαρμόζει όχι μόνο τις ροές ισχύος, αλλά και την παραγωγή των υπόλοιπων γεννητριών. Έτσι, κάθε γεννήτρια στο σύστημα μειώνει αυτόματα την παραγωγή πραγματικής ισχύος, αλλά ταυτόχρονα καλείται να παράγει μέρος της άεργου ισχύος που απαιτεί το αιολικό πάρκο για την λειτουργία του. Γενικότερα, οι απώλειες ισχύος του δικτύου, παρουσία του αιολικού πάρκου, οφείλονται κατά κύριο λόγο στη

διάρθρωση και τα χαρακτηριστικά του δικτύου, καθώς και στην επιλογή του σημείου σύνδεσης. Ιδιαίτερα, η ένταξη αιολικών πάρκων σε κορεσμένα δίκτυα, οδηγεί σε αυξημένες απώλειες ισχύος, με την ύπαρξη κατάλληλης αντιστάθμισης άεργου ισχύος να επιδρά σημαντικά στη μείωσή τους.

Μια μέθοδος εύρεσης του βέλτιστου σημείου σύνδεσης με το δίκτυο, βάσει των απωλειών ισχύος, είναι η ακόλουθη: Το αιολικό πάρκο συνδέεται διαδοχικά σε όλους τους υποψήφιους ζυγούς του συστήματος και εκτελείται κάποιος αλγόριθμος ροής φορτίου για τον υπολογισμό των απωλειών ισχύος. Όταν εξεταστούν όλοι οι πιθανοί ζυγοί, τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους και επιλέγεται ο ζυγός με τις λιγότερες απώλειες ισχύος, ο οποίος και χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη απόδοση. Το διάγραμμα ροής του παραπάνω αλγορίθμου, για ένα σύστημα  $n$  ζυγών, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Υπενθυμίζεται ότι, οι ροές ισχύος μεταξύ δύο ζυγών, που συνδέονται με γραμμή μεταφοράς, καθώς και οι απώλειες, υπολογίζονται μέσω των Σχέσεων 2.22, 2.23 και 2.24 αντίστοιχα, που διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 2. [30, 31]



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επιλογής βέλτιστου ζυγού σύνδεσης, βάσει απωλειών, για σύστημα  $n$  ζυγών

#### 5.4.4 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας παρουσία Αιολικού Πάρκου

Όταν μια γεννήτρια, γραμμή μεταφοράς ή μετασχηματιστής συνδέεται ή αποσυνδέεται από το σύστημα, οι ροές ισχύος στα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου αναδιατάσσονται, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια νέα μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ενσωμάτωση αιολικών πάρκων και τη διαφορετική φύση λειτουργίας τους, επιβάλλει τη διενέργεια ανάλυσης διαταραχών N-1 στο μελετώμενο σύστημα, ούτως ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία του συστήματος, μέσω του εντοπισμού των δυσμενέστερων καταστάσεων λειτουργίας. Μέσω των μελετών αυτών μπορεί να αποσαφηνιστεί τόσο η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων, που μπορεί να διαχειριστεί το δίκτυο, όσο και οι απαραίτητες ενισχύσεις που θα χρειαστούν, για τη διασφάλιση ή και την αύξηση της ασφάλειας του δικτύου.

Η μελέτη ξεκινά από την αρχική κανονική κατάσταση N, όπου όλα τα στοιχεία του δικτύου είναι συνδεδεμένα. Στη συνέχεια, εξετάζονται διάφορα σενάρια διαταραχών N-1, όπου αποσυνδέεται ένα στοιχείο του δικτύου ανά σενάριο, καταγράφονται οι φορτίσεις γραμμών μεταφοράς, μετασχηματιστών και γεννητριών, καθώς και οι τάσεις των ζυγών, και συγκρίνονται με την αρχική κατάσταση N. Στο τέλος, προκύπτει το δυσμενέστερο σενάριο N-1 για το μελετώμενο σύστημα και προτείνονται οι κατάλληλες λύσεις για την αντιμετώπισή του.

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται, συνήθως, υπό τις εξής συνθήκες:

- Μέγιστη παραγωγή αιολικών πάρκων με τη μέγιστη ζήτηση φορτίου ( $P_{max}/D_{max}$ ).
- Μέγιστη παραγωγή αιολικών πάρκων με την ελάχιστη ζήτηση φορτίου ( $P_{max}/D_{min}$ ).

για τη μελέτη όλων των πιθανών καταστάσεων λειτουργίας του δικτύου.

Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι, η σύνδεση ενός αιολικού πάρκου δε θα οδηγήσει άλλα στοιχεία του δικτύου σε υπερφόρτιση, καθώς και τις τιμές των τάσεων των ζυγών εκτός του επιτρεπτού εύρους τους, τόσο στην αρχική κατάσταση N, όσο και στα σενάρια N-1. Τα πιο συνηθισμένα προβλήματα που εντοπίζονται, κατά τη διενέργεια των μελετών αυτών, είναι η υπερφόρτιση γραμμών μεταφοράς και η αστάθεια στις τιμές των τάσεων. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητο να προταθούν οι κατάλληλες λύσεις για την αντιμετώπισή τους. Ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση, προκρίνονται λύσεις όπως η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς απλού ή διπλού κυκλώματος, η τοποθέτηση

διατάξεων αντιστάθμισης άεργου ισχύος και ελέγχου τάσης, η αναβάθμιση μετασχηματιστών, η συντήρηση συμβατικών σταθμών παραγωγής και η σύνδεσή τους σε υψηλότερα επίπεδα τάσεων του συστήματος μεταφοράς, με σκοπό την αποσυμφόρηση του δικτύου κ.α. Όπως είναι αναμενόμενο, οι λύσεις που προτείνονται συνοδεύονται και από το αντίστοιχο κόστος και χρόνο για την υλοποίησή τους, και γι' αυτό είναι απαραίτητο να επιλεγεί η πιο συμφέρουσα, λαμβάνοντας υπόψη τα υπάρχοντα δεδομένα.

Συμπερασματικά, η διενέργεια Μελετών Στατικής Ασφάλειας παρουσία αιολικού πάρκου, κάνοντας χρήση του κριτηρίου N-1, κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική, ιδιαιτέρως εξαιτίας της διαρκώς αυξανόμενης ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων στο δίκτυο. Μέσω των αποτελεσμάτων που εξάγονται και των λύσεων ενίσχυσης του δικτύου που προτείνονται, καθίσταται δυνατή η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών πάρκων, καθώς και η ομαλότερη λειτουργία και ασφάλεια του συστήματος. [32, 33, 34, 35]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΥΓΟΥ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

#### ΒΑΣΕΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

#### ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIEMENS PSS/E

##### 6.1 Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Η/Υ

Τα σημερινά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, εκτός από μεγάλα μεγέθη, χαρακτηρίζονται και από μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωσή τους μέσω κατάλληλων λογισμικών Ηλεκτρονικού Υπολογιστή αποτελεί την μοναδική μέθοδο που χρησιμοποιείται, όχι μόνο κατά το στάδιο του σχεδιασμού τους, αλλά και κατά τη μετέπειτα λειτουργία τους. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, τα λογισμικά αυτά αξιοποιούν μαθηματικές μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, ενώ η χρήση τους επεκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως στους τομείς της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και σε εφαρμογές βιομηχανικής φύσεως. Οι κυριότερες λειτουργίες που προσφέρονται είναι:

- Μελέτη ροής φορτίου.
- Ανάλυση σφαλμάτων και βραχυκυκλωμάτων.
- Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας.
- Επιλογή και ρύθμιση διακοπτικών συσκευών και συστημάτων προστασίας.
- Ανάλυση ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος.
- Μελέτη βέλτιστης ροής ισχύος.

Ανάλογα με τη χρήση που προορίζονται, εμπορική ή ακαδημαϊκή, διατίθενται πολλά πακέτα λογισμικών προσομοίωσης με πληθώρα δυνατοτήτων. Ένα από αυτά είναι το PSS/E (Power System Simulation for Engineering) της Siemens, το οποίο χρησιμοποιείται από ηλεκτρολόγους μηχανικούς, σε πάνω από 140 χώρες του κόσμου, για την προσομοίωση συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1976 και πλέον αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο προγραμμάτων, με δυνατότητες μελετών:

- Ροής φορτίου.
- Συμμετρικών & ασύμμετρων σφαλμάτων.

- Μεταβατικής ευστάθειας, για κλίμακες χρόνου από κλάσματα του δευτερολέπτου έως δεκάδες δευτερόλεπτα.
- Κατασκευής ισοδυνάμων δικτύων.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, θα χρησιμοποιηθεί το PSS/E για την μελέτη επιλογής του βέλτιστου ζυγού σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου, βάσει των απωλειών ισχύος, στο σύστημα των 9 ζυγών του IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), για ισχύ αιολικού πάρκου 15% και 30% της ζήτησης φορτίου. [36, 37]

## 6.2 Σύστημα 9 ζυγών IEEE

### 6.2.1 Στοιχεία Συστήματος

Το σύστημα 9 ζυγών του IEEE (Σχήμα 6.1) αποτελεί μια απλή προσέγγιση του Western System Coordinating Council (WSCC), μέσω ενός ισοδυνάμου συστήματος τριών γεννητριών και εννέα ζυγών.

Το σύστημα χωρίζεται σε δύο περιοχές (areas):

- Περιοχή 1: Ζυγοί 1, 4, 5, 6.
- Περιοχή 2: Ζυγοί 2, 3, 7, 8, 9.

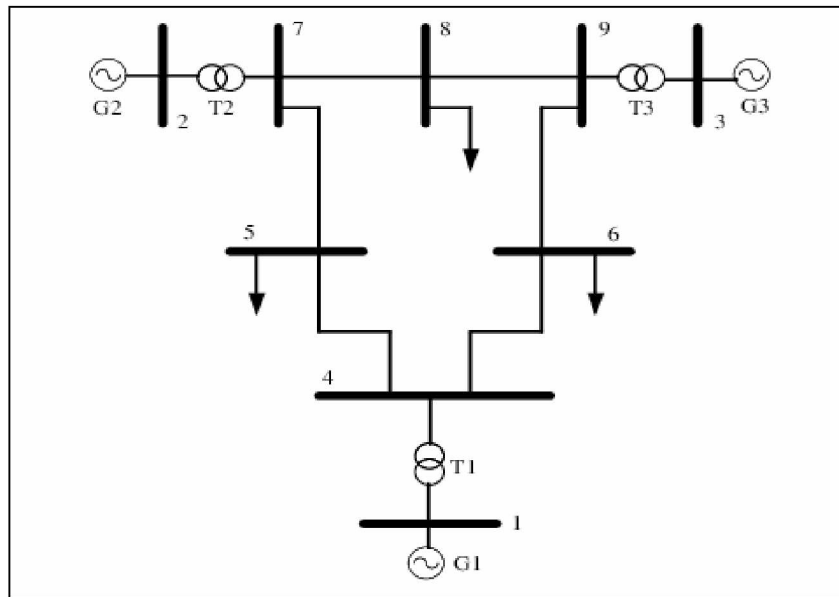
Και σε έξι ζώνες (zones):

- Ζώνη 1: Ζυγοί 1 και 4 (Ζυγοί γεννήτριας και μετασχηματιστή ανύψωσης).
- Ζώνη 2: Ζυγοί 2 και 7 (Ζυγοί γεννήτριας και μετασχηματιστή ανύψωσης).
- Ζώνη 3: Ζυγοί 3 και 9 (Ζυγοί γεννήτριας και μετασχηματιστή ανύψωσης).
- Ζώνη 4: Ζυγός 5 (Ζυγός φορτίου).
- Ζώνη 5: Ζυγός 6 (Ζυγός φορτίου).
- Ζώνη 6: Ζυγός 8 (Ζυγός φορτίου).

Ανάλογα με τον ζυγό, οι βάσεις τάσης διαμορφώνονται:

- 13,8kV: Ζυγός 3.
- 16,5kV: Ζυγός 1.
- 18kV: Ζυγός 2.
- 230kV: Ζυγοί 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Ο ζυγός 1 του συστήματος ορίζεται ως Ζυγός Αναφοράς (Swing Bus).



Σχήμα 6.1: Σύστημα 9 ζυγών IEEE

Τα ονομαστικά στοιχεία των Γεννητριών είναι:

Πίνακας 6.1: Ονομαστικά στοιχεία Γεννητριών

| ΖΥΓΟΣ | kV   | MVA | R (pu)   | X (pu)   |
|-------|------|-----|----------|----------|
| 1     | 16,5 | 260 | 0,000100 | 0,100000 |
| 2     | 18,0 | 310 | 0,000100 | 0,210000 |
| 3     | 13,8 | 280 | 0,000100 | 0,210000 |

Τα ονομαστικά στοιχεία των Μετασχηματιστών είναι:

Πίνακας 6.2: Ονομαστικά στοιχεία Μετασχηματιστών

| ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ | ΖΥΓΟΙ | kV           | X (pu)   |
|-----------------|-------|--------------|----------|
| T1              | 1 - 4 | 16,5 / 230,0 | 0,057600 |
| T2              | 2 - 7 | 18,0 / 230,0 | 0,062500 |
| T3              | 3 - 9 | 13,8 / 230,0 | 0,058600 |

Τα ονομαστικά στοιχεία των Γραμμών Μεταφοράς είναι:

Πίνακας 6.3: Ονομαστικά στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς

| ΓΡΑΜΜΗ<br>ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ | kV  | R (pu)   | X (pu)   | B (pu)   |
|---------------------|-----|----------|----------|----------|
| 4 - 5               | 230 | 0,010000 | 0,085000 | 0,176000 |
| 4- 6                | 230 | 0,017000 | 0,092000 | 0,158000 |
| 5 - 7               | 230 | 0,032000 | 0,161000 | 0,306000 |
| 6 - 9               | 230 | 0,039000 | 0,170000 | 0,358000 |
| 7 - 8               | 230 | 0,008500 | 0,072000 | 0,149000 |
| 8 - 9               | 230 | 0,011900 | 0,100800 | 0,209000 |

Τέλος, το σύστημα τροφοδοτεί φορτία, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6.4: Στοιχεία Φορτίων

| ΖΥΓΟΣ | kV  | P (MW)        | Q (MVAR)        |
|-------|-----|---------------|-----------------|
| 5     | 230 | 125           | 50              |
| 6     | 230 | 90            | 30              |
| 8     | 230 | 100           | 35              |
|       |     | <b>315 MW</b> | <b>115 MVAR</b> |

### 6.2.2: Ανάλυση Ροής Φορτίου

Εκτελώντας τη λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E, οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται:

Πίνακας 6.5: Τάσεις Ζυγών Συστήματος

| <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV)</b> | <b>ΤΑΣΗ (pu)</b> | <b>ΓΩΝΙΑ (°)</b> |
|--------------|------------------------|------------------|------------------|
| 1            | 16,5                   | 1,04             | 0                |
| 2            | 18                     | 1,025            | 9,28             |
| 3            | 13,8                   | 1,025            | 4,66             |
| 4            | 230                    | 1,0258           | -2,22            |
| 5            | 230                    | 0,9956           | -3,99            |
| 6            | 230                    | 1,0127           | -3,69            |
| 7            | 230                    | 1,0258           | 3,72             |
| 8            | 230                    | 1,0159           | 0,73             |
| 9            | 230                    | 1,0324           | 1,97             |

Η Παραγωγή στις γεννήτριες διαμορφώνεται:

Πίνακας 6.6: Παραγωγή Πραγματικής και Άεργου Ισχύος Γεννητριών Συστήματος

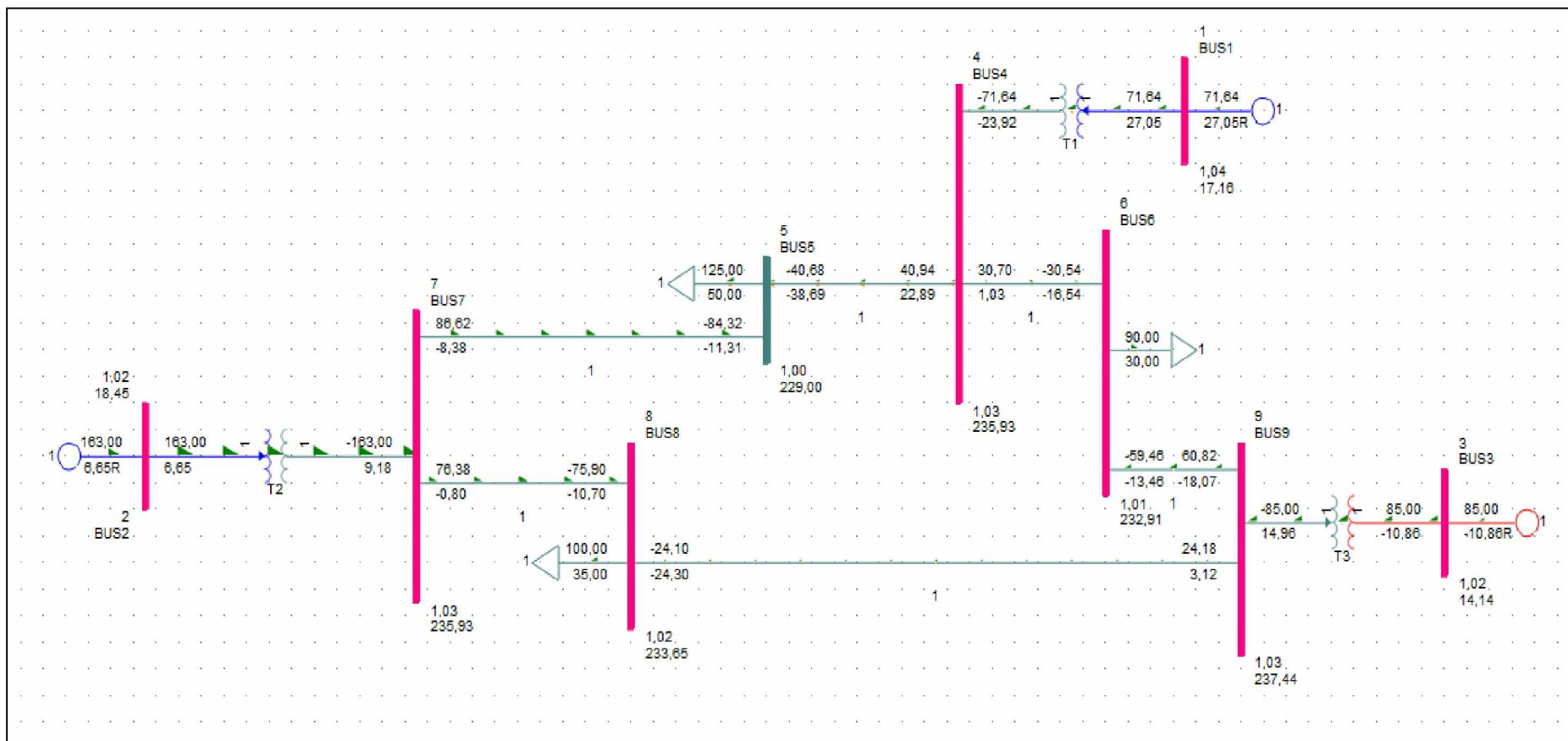
| <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>Pgen (MW)</b> | <b>Qgen (MVAR)</b> |
|--------------|------------------|--------------------|
| 1            | 71,6             | 27                 |
| 2            | 163              | 6,7                |
| 3            | 85               | -10,9              |
|              | <b>319,6 MW</b>  | <b>22,8 MVAR</b>   |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.6, οι Πραγματικές και Άεργες Απώλειες Ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 319,6 - 315 \\ Q_{losses} = 22,8 - 115 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 4,6 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -92,2 MVAR} \end{cases}$$

Η αρνητική τιμή των απωλειών άεργου ισχύος  $Q_{losses}$  υποδεικνύει ότι το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης των φορτίων σε άεργο ισχύ παρέχεται από τις εγκάρσιες χωρητικότητες που χαρακτηρίζουν τις γραμμές μεταφοράς, παρά από τις ίδιες τις γεννήτριες, λόγω του μεγάλου μήκους των γραμμών μεταφοράς του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.2). Σε κάθε ζυγό σημειώνεται η τάση του εκφρασμένη σε kV και pu, στις γεννήτριες η παραγωγή πραγματικής (MW) και άεργου ισχύος (MVAR) και στις γραμμές μεταφοράς η ισχύς που διακινείται (MW και MVAR). Τέλος, στα φορτία του συστήματος, σημειώνονται οι καταναλώσεις τους (MW και MVAR).



Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος.

### 6.3 Χαρακτηριστικά Αιολικού Πάρκου

Τα ονομαστικά στοιχεία του Αιολικού Πάρκου, που πρόκειται να συνδεθεί στο σύστημα, παρατίθενται στον Πίνακα 6.7. Στις μελέτες, των ενοτήτων που θα ακολουθήσουν, το αιολικό πάρκο θα αναπαρίσταται ως το ισοδύναμο μιας γεννήτριας. Για την σύνδεσή του ορίζεται νέος ζυγός με αριθμό 10.

Πίνακας 6.7: Ονομαστικά Στοιχεία Αιολικού Πάρκου

| <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>kV</b> | <b>MVA</b> | <b>R (pu)</b> | <b>X (pu)</b> |
|--------------|-----------|------------|---------------|---------------|
| 10           | 13,8      | 280        | 0,000100      | 0,210000      |

Στις Ρυθμίσεις Ελέγχου (Control Mode) στο PSS/E επιλέγεται η λειτουργία “2 - +, - Q limits based on WPF”, η οποία αντιστοιχεί σε ανεμογεννήτριες Τύπου 3 (Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας) ή Τύπου 4 (Γεννήτρια με Πλήρη Μετατροπέα Ισχύος). Ο Συντελεστής Ισχύος (Power Factor – WPF) του αιολικού πάρκου ορίζεται ίσος με 0,9.

Το αιολικό πάρκο συνδέεται, εν συνεχεία, μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης με το υπόλοιπο δίκτυο. Η επιλογή του ζυγού σύνδεσης του τυλίγματος υψηλής τάσης του μετασχηματιστή με το δίκτυο θα μελετηθεί στις Ενότητες που ακολουθούν. Τα ονομαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 6.8: Ονομαστικά Στοιχεία Μετασχηματιστή Ανύψωσης Αιολικού Πάρκου

| <b>ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ</b> | <b>ΖΥΓΟΙ</b>     | <b>kV</b>    | <b>X (pu)</b> |
|------------------------|------------------|--------------|---------------|
| T4                     | 10 – προς μελέτη | 13,8 / 230,0 | 0,058600      |



## 6.4 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης Αιολικού Πάρκου Ισχύος 15% της Ζήτησης Φορτίου

### 6.4.1 Περιγραφή Προβλήματος

Στην Ενότητα αυτή, το 15% της πραγματικής ζήτησης φορτίου, δηλαδή  $0,15 \cdot 315\text{MW} = 47,25\text{MW} \approx 48\text{MW}$ , θα καλυφθεί από ένα αιολικό πάρκο αντίστοιχης ισχύος. Τα 48MW του αιολικού πάρκου θα αφαιρεθούν από την γεννήτρια G2, η παραγωγή της οποίας ορίζεται στα  $163\text{MW} - 48\text{MW} = 115\text{MW}$ . Η παραγωγή της γεννήτριας G3 παραμένει στα 85MW. Η παραγωγή της γεννήτριας G1 θα καθοριστεί από την Ανάλυση Ροής Φορτίου, καθότι είναι συνδεδεμένη με τον ζυγό αναφοράς του συστήματος (Ζυγός 1).

Εξαιτίας της Ρύθμισης Ελέγχου “2 - +, - Q limits based on WPF” του PSS/E και του Συντελεστή Ισχύος 0,9, τα όρια άεργου ισχύος του αιολικού πάρκου ορίζονται:  $-23,2475 \text{ MVAR} < Q < 23,2475 \text{ MVAR}$ .

Το αιολικό πάρκο τοποθετείται διαδοχικά στους υποψήφιους ζυγούς σύνδεσης 4, 5, 6, 7, 8 και 9 και, εν συνεχεία, γίνεται καταγραφή των απωλειών ισχύος του συστήματος. Στο τέλος, επιλέγεται ο ζυγός με τις μικρότερες απώλειες ισχύος ως ο βέλτιστος για τη σύνδεση του αιολικού πάρκου με το σύστημα των 9 ζυγών του IEEE.

Συνοψίζοντας, η παραγωγή πραγματικής ισχύος των σταθμών παραγωγής του συστήματος, για το δεδομένο σενάριο, διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Παραγωγή Πραγματικής Ισχύος P μονάδων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 15% της ζήτησης.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)                       |
|---------------|---------------------------------|
| G1            | Καθορίζεται από την Ροή Φορτίου |
| G2            | 115                             |
| G3            | 85                              |
| Αιολικό Πάρκο | 48                              |

#### 6.4.2 Σύνδεση στον Ζυγό 4

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 4 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 4, ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 3,37      |
| 3     | 13,8            | 1,025     | 2,07      |
| 4     | 230             | 1,0191    | -2,18     |
| 5     | 230             | 0,9934    | -5,44     |
| 6     | 230             | 1,0086    | -4,59     |
| 7     | 230             | 1,0251    | -0,55     |
| 8     | 230             | 1,0151    | -2,85     |
| 9     | 230             | 1,0311    | -0,63     |
| 10    | 13,8            | 1,0051    | -0,61     |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.11.

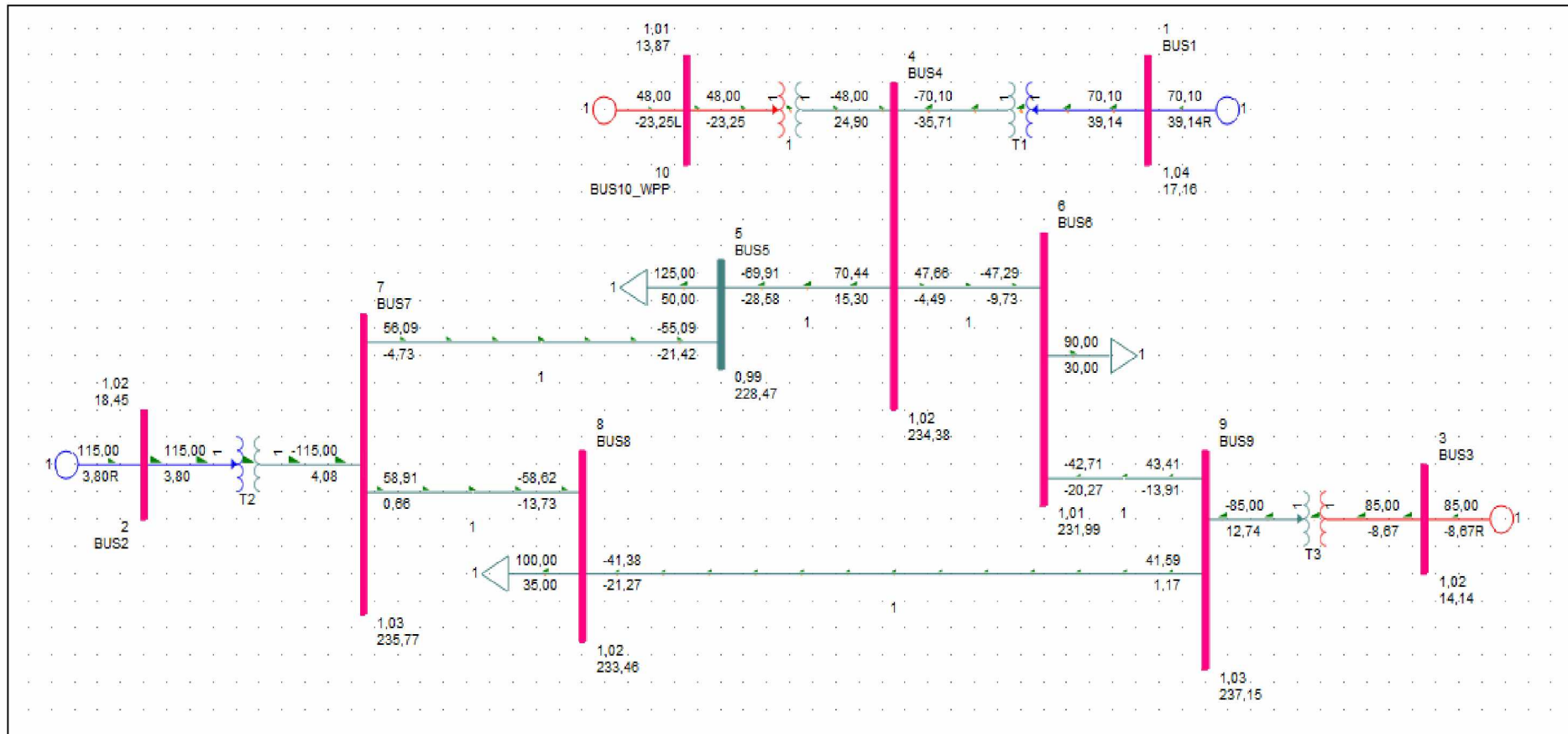
Πίνακας 6.11: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 4, ισχύος 48MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)    |
|---------------|-----------------|----------------|
| G1            | 70,1            | 39,1           |
| G2            | 115             | 3,8            |
| G3            | 85              | -8,7           |
| Αιολικό Πάρκο | 48              | -23,2          |
|               | <b>318,1 MW</b> | <b>11 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.11, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 318,1 - 315 \\ Q_{losses} = 11 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P_{losses} = \mathbf{3,1 MW} \\ Q_{losses} = \mathbf{-104 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 4, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.3). Σε κάθε ζυγό σημειώνεται η τάση του εκφρασμένη σε kV και ρμ, στις γεννήτριες η παραγωγή πραγματικής (MW) και άεργου ισχύος (MVAR) και στις γραμμές μεταφοράς η ισχύς που διακινείται (MW και MVAR). Τέλος, στα φορτία του συστήματος, σημειώνονται οι καταναλώσεις τους (MW και MVAR).



Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW (15% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 4.

### 6.4.3 Σύνδεση στον Ζυγό 5

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 5 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.12: Τάση ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 5, ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 4,95      |
| 3     | 13,8            | 1,025     | 3,08      |
| 4     | 230             | 1,0289    | -2,15     |
| 5     | 230             | 1,0027    | -3,31     |
| 6     | 230             | 1,0158    | -4,18     |
| 7     | 230             | 1,0275    | 1,04      |
| 8     | 230             | 1,0174    | -1,48     |
| 9     | 230             | 1,0332    | 0,39      |
| 10    | 13,8            | 1         | -1,7      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.13.

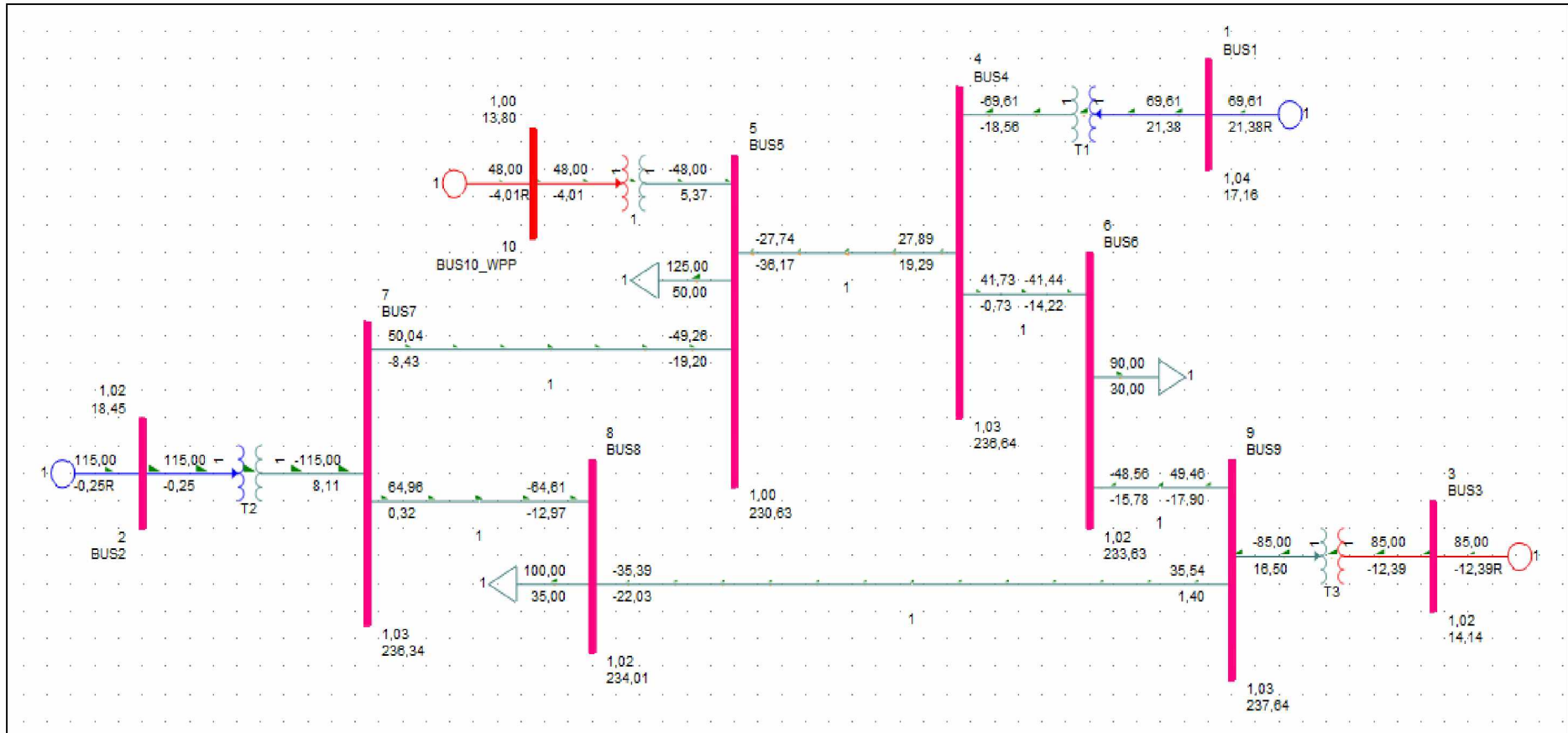
Πίνακας 6.13: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 5, ισχύος 48MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)     |
|---------------|-----------------|-----------------|
| G1            | 69,6            | 21,4            |
| G2            | 115             | -0,2            |
| G3            | 85              | -12,4           |
| Αιολικό Πάρκο | 48              | -4              |
|               | <b>317,6 MW</b> | <b>4,8 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.13, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 317,6 - 315 \\ Q_{losses} = 4,8 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 2,6 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -110,2 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 5, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW (15% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 5.

#### 6.4.4 Σύνδεση στον Ζυγό 6

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 6 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.14.

Πίνακας 6.14: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 6, ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ kV | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|---------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5          | 1,04      | 0         |
| 2     | 18            | 1,025     | 4,37      |
| 3     | 13,8          | 1,025     | 3,71      |
| 4     | 230           | 1,0246    | -2,16     |
| 5     | 230           | 0,9971    | -5,06     |
| 6     | 230           | 1,009     | -2,3      |
| 7     | 230           | 1,026     | 0,45      |
| 8     | 230           | 1,0156    | -1,58     |
| 9     | 230           | 1,0312    | 1,01      |
| 10    | 13,8          | 1         | -0,7      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.15.

Πίνακας 6.15: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 6, ισχύος 48MW.

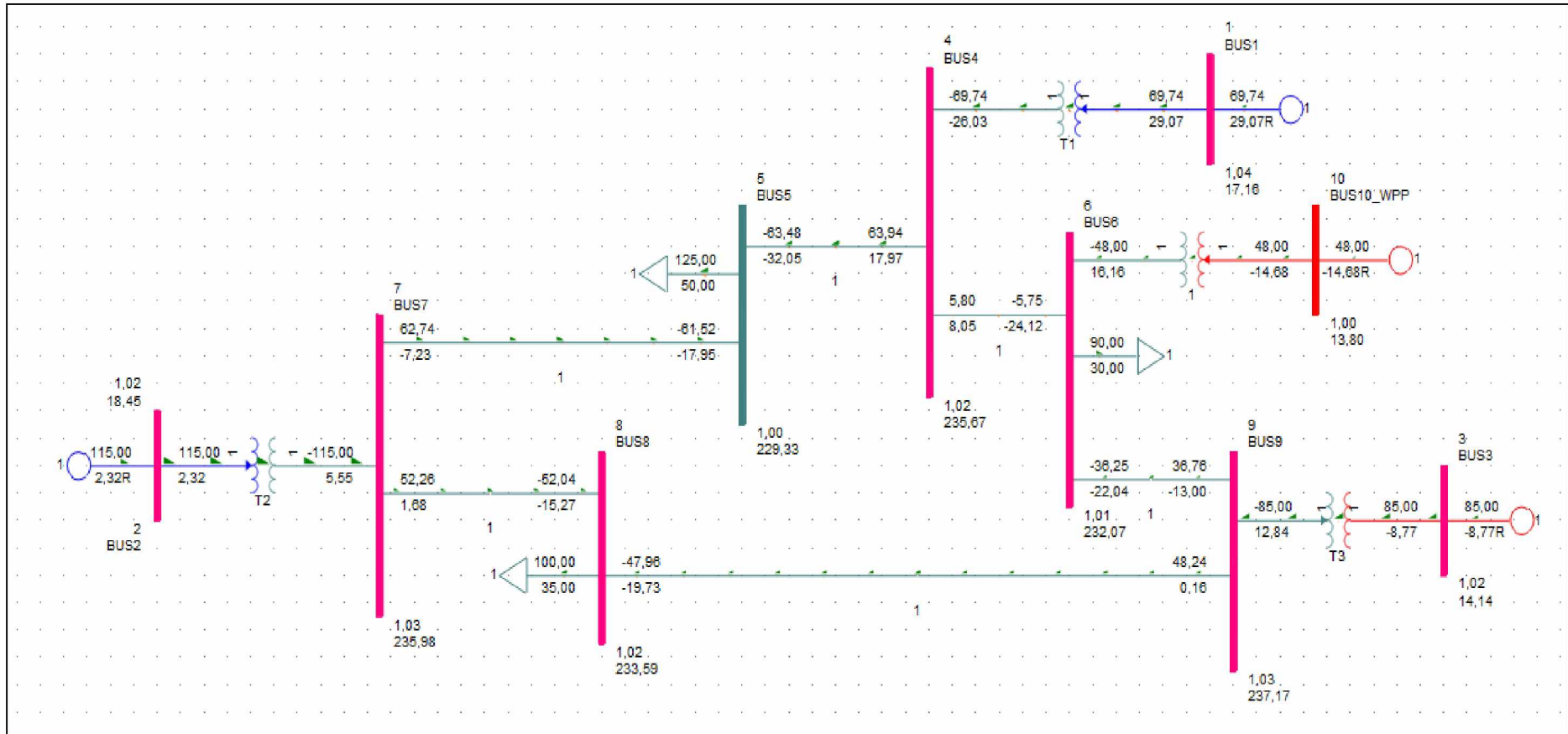
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)     |
|---------------|-----------------|-----------------|
| G1            | 69,7            | 29,1            |
| G2            | 115             | 2,3             |
| G3            | 85              | -8,8            |
| Αιολικό Πάρκο | 48              | -14,7           |
|               | <b>317,7 MW</b> | <b>7,9 MVAR</b> |



Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.15, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 317,7 - 315 \\ Q_{losses} = 7,9 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 2,7 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -107,1 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 6, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW (15% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 6.

#### 6.4.5 Σύνδεση στον Ζυγό 7

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 7 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.16.

Πίνακας 6.16: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 7, ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 7,81      |
| 3     | 13,8            | 1,025     | 4,71      |
| 4     | 230             | 1,0237    | -2,22     |
| 5     | 230             | 0,9908    | -4        |
| 6     | 230             | 1,0104    | -3,69     |
| 7     | 230             | 1,0166    | 3,85      |
| 8     | 230             | 1,0093    | 0,79      |
| 9     | 230             | 1,03      | 2         |
| 10    | 13,8            | 1,0026    | 5,43      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.17.

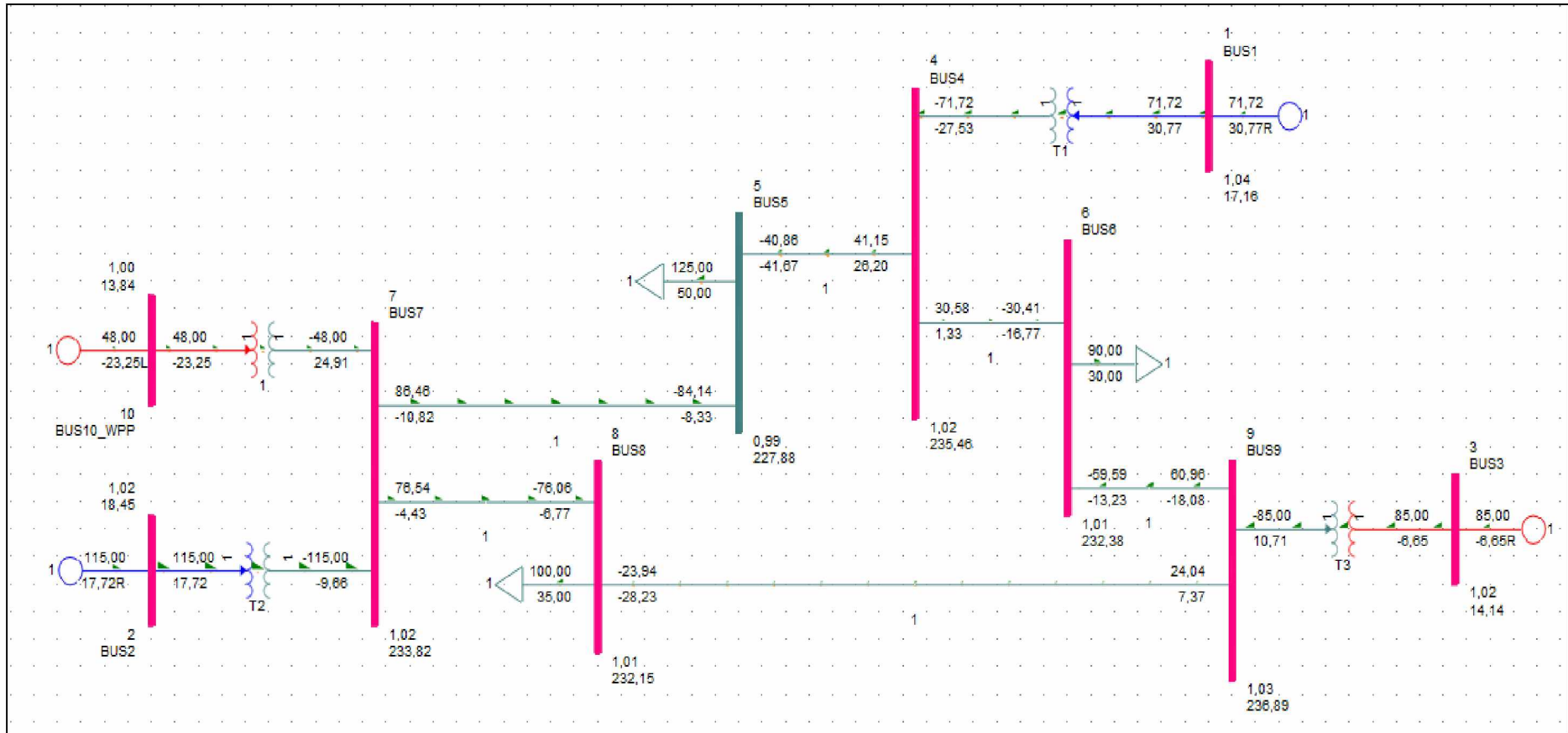
Πίνακας 6.17: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 7, ισχύος 48MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 71,7            | 30,8             |
| G2            | 115             | 17,7             |
| G3            | 85              | -6,7             |
| Αιολικό Πάρκο | 48              | -23,2            |
|               | <b>319,7 MW</b> | <b>18,6 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.17, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 319,7 - 315 \\ Q_{losses} = 18,6 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 4,7 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -96,4 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 7, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW (15% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 7.

#### 6.4.6 Σύνδεση στον Ζυγό 8

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 8 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.18.

Πίνακας 6.18: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 8, ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 7,03      |
| 3     | 13,8            | 1,025     | 5,48      |
| 4     | 230             | 1,0248    | -2,21     |
| 5     | 230             | 0,9945    | -4,21     |
| 6     | 230             | 1,0107    | -3,41     |
| 7     | 230             | 1,0231    | 3,1       |
| 8     | 230             | 1,0093    | 1,85      |
| 9     | 230             | 1,03      | 2,78      |
| 10    | 13,8            | 1         | 3,45      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.19.

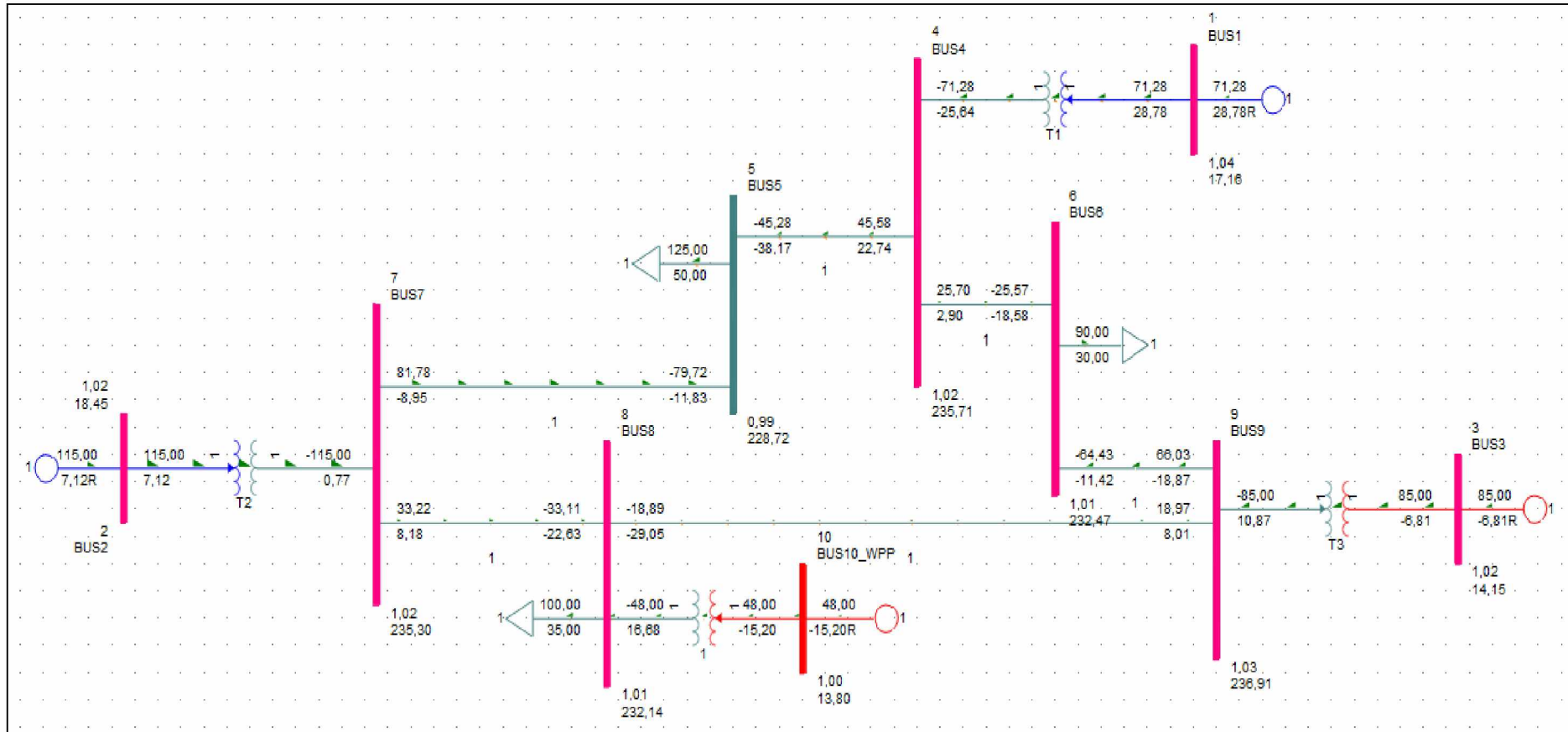
Πίνακας 6.19: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 8, ισχύος 48MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 71,3            | 28,8             |
| G2            | 115             | 7,1              |
| G3            | 85              | -6,8             |
| Αιολικό Πάρκο | 48              | -15,2            |
|               | <b>319,3 MW</b> | <b>13,9 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.19, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 319,3 - 315 \\ Q_{losses} = 13,9 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 4,3 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -101,1 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 8, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW (15% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 8.



#### 6.4.7 Σύνδεση στον Ζυγό 9

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 9 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.20.

Πίνακας 6.20: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 9, ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 6,01      |
| 3     | 13,8            | 1,025     | 6,59      |
| 4     | 230             | 1,0237    | -2,22     |
| 5     | 230             | 0,9946    | -4,56     |
| 6     | 230             | 1,007     | -3,07     |
| 7     | 230             | 1,0238    | 2,08      |
| 8     | 230             | 1,0109    | 0,55      |
| 9     | 230             | 1,0236    | 3,86      |
| 10    | 13,8            | 1,0097    | 5,42      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.21.

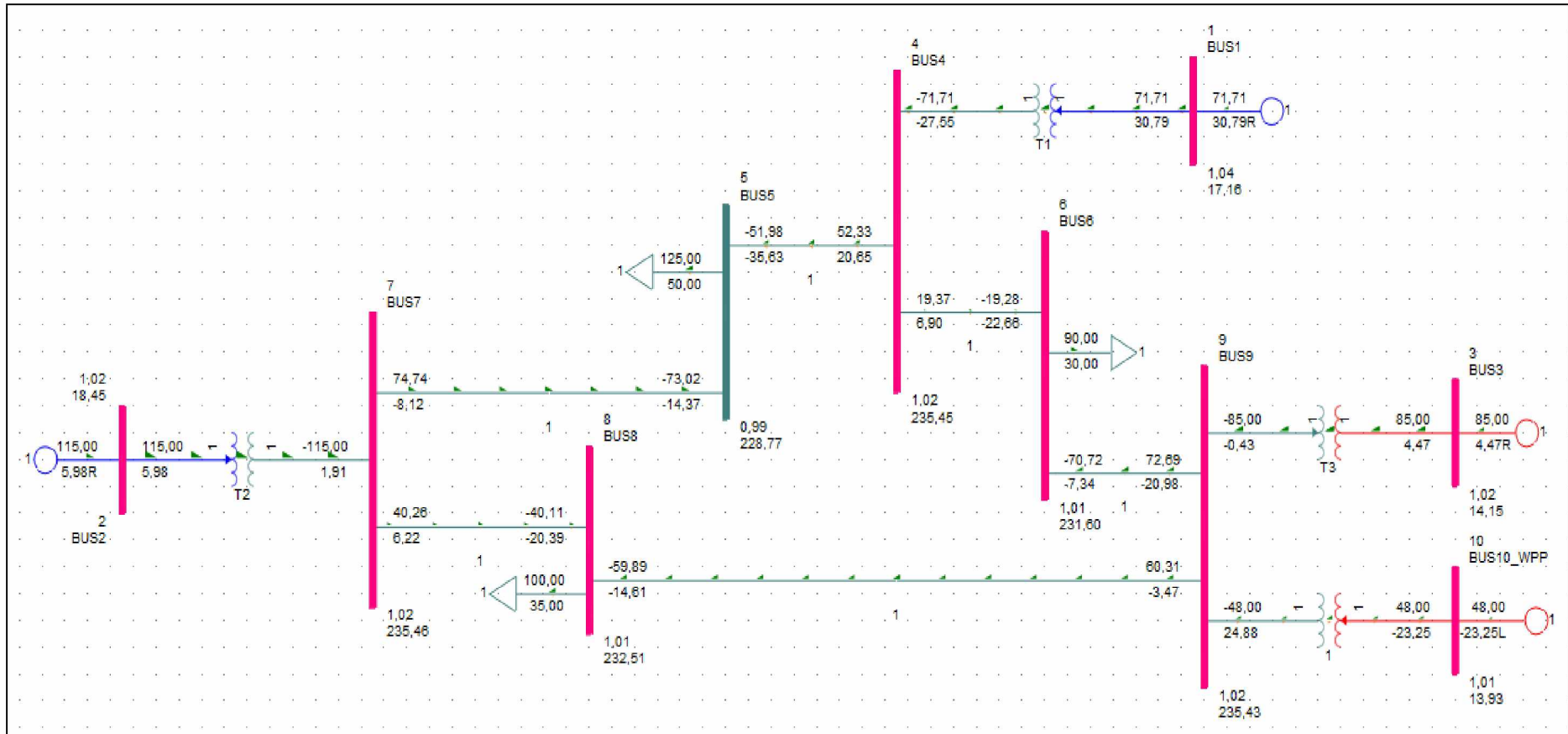
Πίνακας 6.21: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 9, ισχύος 48MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 71,7            | 30,8             |
| G2            | 115             | 6                |
| G3            | 85              | 4,5              |
| Αιολικό Πάρκο | 48              | -23,2            |
|               | <b>319,7 MW</b> | <b>18,1 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.21, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 319,7 - 315 \\ Q_{losses} = 18,1 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 4,7 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -96,9 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 9, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.8: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW (15% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 9.

#### 6.4.8 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης

Από τους Πίνακες καταγραφής των τάσεων των ζυγών του συστήματος προκύπτει ότι, σε κανένα από τα σενάρια τοποθέτησης του αιολικού πάρκου, δεν παρατηρούνται τιμές τάσεων που να παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια ασφαλείας ( $0,95 \text{ pu} < V < 1,05 \text{ pu}$ ).

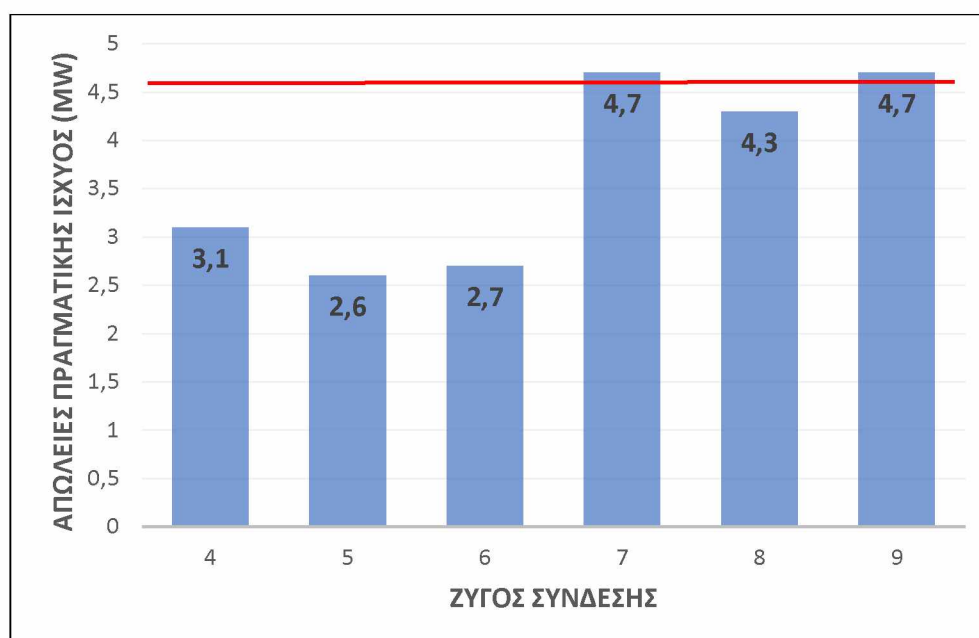
Αναφορικά με τις απώλειες ισχύος, οι αρνητικές τιμές των απωλειών άεργου ισχύος, στο σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων, φανερώνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης των φορτίων σε άεργο ισχύ παρέχεται από τις εγκάρσιες χωρητικότητες που χαρακτηρίζουν τις γραμμές μεταφοράς, παρά από τις ίδιες τις γεννήτριες, λόγω του μεγάλου μήκους των γραμμών μεταφοράς του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του βέλτιστου ζυγού σύνδεσης του αιολικού πάρκου θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές απώλειες ισχύος, αγνοώντας τις άεργες.

Ο συγκεντρωτικός πίνακας Απωλειών Πραγματικής Ισχύος του συστήματος για όλα τα σενάρια ζυγών σύνδεσης (Πίνακας 6.22) καθώς και το σχετικό ραβδόγραμμα (Σχήμα 6.9) παρατίθενται στη συνέχεια. Η ύπαρξη του αιολικού πάρκου συμβάλει στη μείωση των απωλειών πραγματικής ισχύος του συστήματος, όταν αυτό συνδεθεί στους ζυγούς 4, 5, 6 ή 8, καθώς οι σχετικές τιμές απωλειών είναι μικρότερες των αντίστοιχων του αρχικού συστήματος χωρίς το αιολικό πάρκο, οι οποίες και διαμορφώνονται στα 4,6MW. Αντίθετα στους ζυγούς 7 και 9, στους οποίους είναι συνδεδεμένες οι γεννήτριες G2 και G3 αντίστοιχα, οι απώλειες παρουσιάζουν μια ελαφριά αύξηση.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο βέλτιστος ζυγός σύνδεσης του αιολικού πάρκου 48MW (15% της ζήτησης φορτίου), βάσει των μικρότερων απωλειών πραγματικής ισχύος, είναι ο Ζυγός 5. Οι απώλειες, στην περίπτωση αυτή, διαμορφώνονται στα 2,6MW.

Πίνακας 6.22: Συγκεντρωτικός πίνακας απωλειών πραγματικής ισχύος συστήματος για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης αιολικού πάρκου ισχύος 48MW.

| ΖΥΓΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ | ΑΠΩΛΕΙΕΣ Ρ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (MW) |
|--------------------------------|----------------------------|
| 4                              | 3,1                        |
| <b>5</b>                       | <b>2,6</b>                 |
| 6                              | 2,7                        |
| 7                              | 4,7                        |
| 8                              | 4,3                        |
| 9                              | 4,7                        |



Σχήμα 6.9: Ραβδόγραμμα απωλειών πραγματικής ισχύος συστήματος για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης αιολικού πάρκου ισχύος 48MW.

Με κόκκινη γραμμή σημειώνονται οι απώλειες του αρχικού συστήματος, χωρίς το αιολικό πάρκο (4,6MW).

## 6.5 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης Αιολικού Πάρκου Ισχύος 30% της Ζήτησης Φορτίου

### 6.5.1 Περιγραφή Προβλήματος

Στην Ενότητα αυτή, το 30% της πραγματικής ζήτησης φορτίου, δηλαδή  $0,30 \cdot 315\text{MW} = 94,50\text{MW} \approx 95\text{MW}$ , θα καλυφθεί από ένα αιολικό πάρκο αντίστοιχης ισχύος. Το αιολικό πάρκο θα αντικαταστήσει την παραγωγή της γεννήτριας G3, που είχε οριστεί στα 85MW στο αρχικό σύστημα, η οποία και τίθεται πλέον εκτός συστήματος. Η παραγωγή της γεννήτριας G2 παραμένει στα 163MW. Η παραγωγή της γεννήτριας G1 θα καθοριστεί από την Ανάλυση Ροής Φορτίου, καθότι είναι συνδεδεμένη με τον ζυγό αναφοράς του συστήματος (Ζυγός 1).

Εξαιτίας της Ρύθμισης Ελέγχου “2 - +, - Q limits based on WPF” του PSS/E και του Συντελεστή Ισχύος 0,9, τα όρια άεργου ισχύος του αιολικού πάρκου ορίζονται:  $-46,0106 \text{ MVAR} < Q < 46,0106 \text{ MVAR}$ .

Το αιολικό πάρκο τοποθετείται διαδοχικά στους υποψήφιους ζυγούς σύνδεσης 4, 5, 6, 7, 8 και 9 και, εν συνεχεία, γίνεται καταγραφή των απωλειών ισχύος του συστήματος. Στο τέλος, επιλέγεται ο ζυγός με τις μικρότερες απώλειες ισχύος ως ο βέλτιστος για τη σύνδεση του αιολικού πάρκου με το σύστημα των 9 ζυγών του IEEE.

Συνοψίζοντας, η παραγωγή πραγματικής ισχύος των σταθμών παραγωγής του συστήματος, για το δεδομένο σενάριο, διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.23.

Πίνακας 6.23: Παραγωγή Πραγματικής Ισχύος P μονάδων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 30% της ζήτησης.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)                       |
|---------------|---------------------------------|
| G1            | Καθορίζεται από την Ροή Φορτίου |
| G2            | 163                             |
| G3            | 0                               |
| Αιολικό Πάρκο | 95                              |

### 6.5.2 Σύνδεση στον Ζυγό 4

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 4 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.24.

Πίνακας 6.24: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 4, ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 4,92      |
| 3     | 13,8            | 1,0298    | -5,59     |
| 4     | 230             | 1,0175    | -1,89     |
| 5     | 230             | 0,9919    | -5,29     |
| 6     | 230             | 1,0077    | -6,15     |
| 7     | 230             | 1,0235    | -0,65     |
| 8     | 230             | 1,0126    | -4,99     |
| 9     | 230             | 1,0298    | -5,59     |
| 10    | 13,8            | 1         | 1,24      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.25.

Πίνακας 6.25: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 4, ισχύος 95MW.

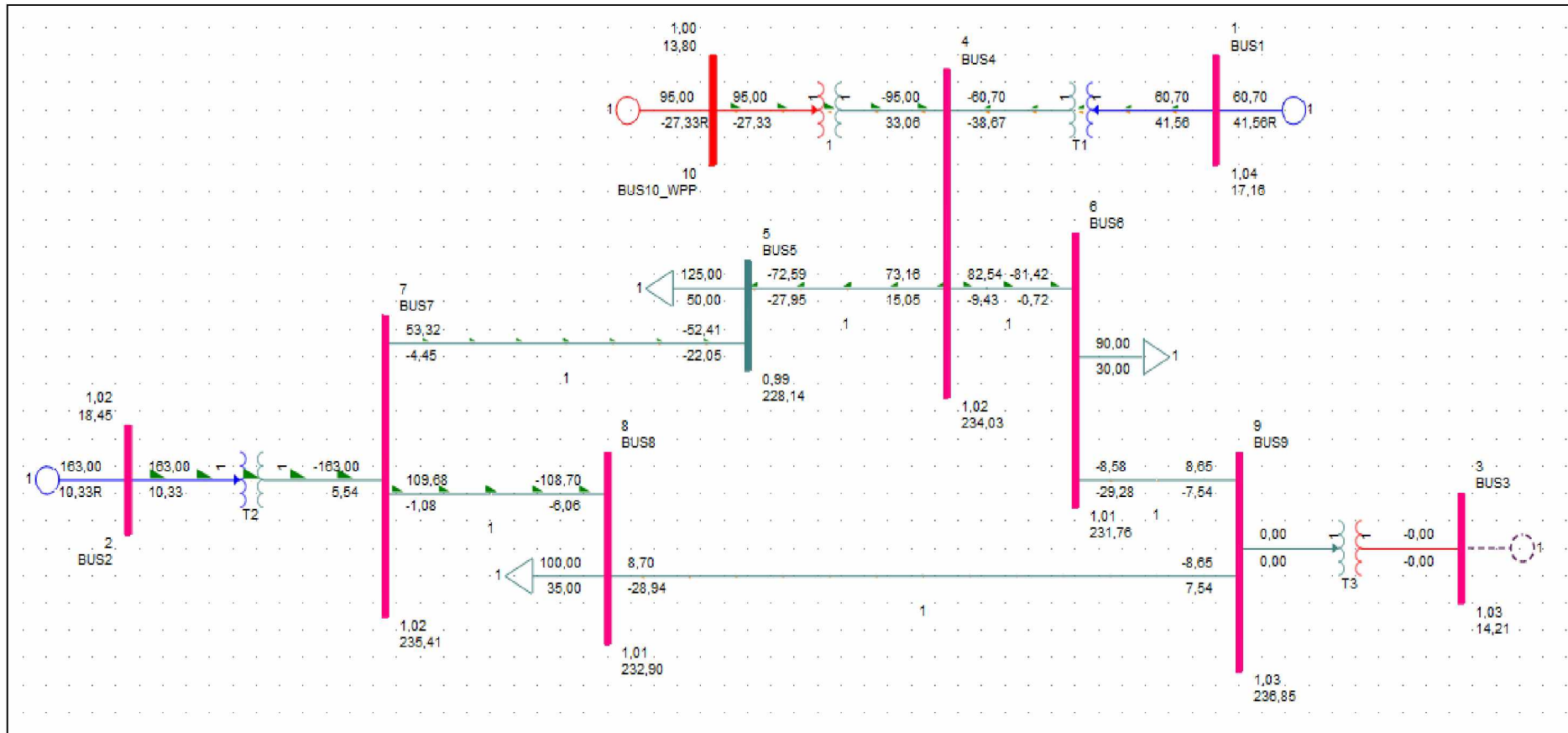
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 60,7            | 41,6             |
| G2            | 163             | 10,3             |
| G3            | 0               | 0                |
| Αιολικό Πάρκο | 95              | -27,3            |
|               | <b>318,7 MW</b> | <b>24,6 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.25, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 318,7 - 315 \\ Q_{losses} = 24,6 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 3,7 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -90,4 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 4, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.10).





Σχήμα 6.10: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW (30% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 4. Η γεννήτρια G3 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

### 6.5.3 Σύνδεση στον Ζυγό 5

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 5 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.26.

Πίνακας 6.26: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 5, ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 7,94      |
| 3     | 13,8            | 1,0387    | -3,65     |
| 4     | 230             | 1,0306    | -1,85     |
| 5     | 230             | 1,0048    | -1,16     |
| 6     | 230             | 1,0199    | -5,38     |
| 7     | 230             | 1,0277    | 2,39      |
| 8     | 230             | 1,0185    | -2,39     |
| 9     | 230             | 1,0387    | -3,65     |
| 10    | 13,8            | 1         | 2,01      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.27.

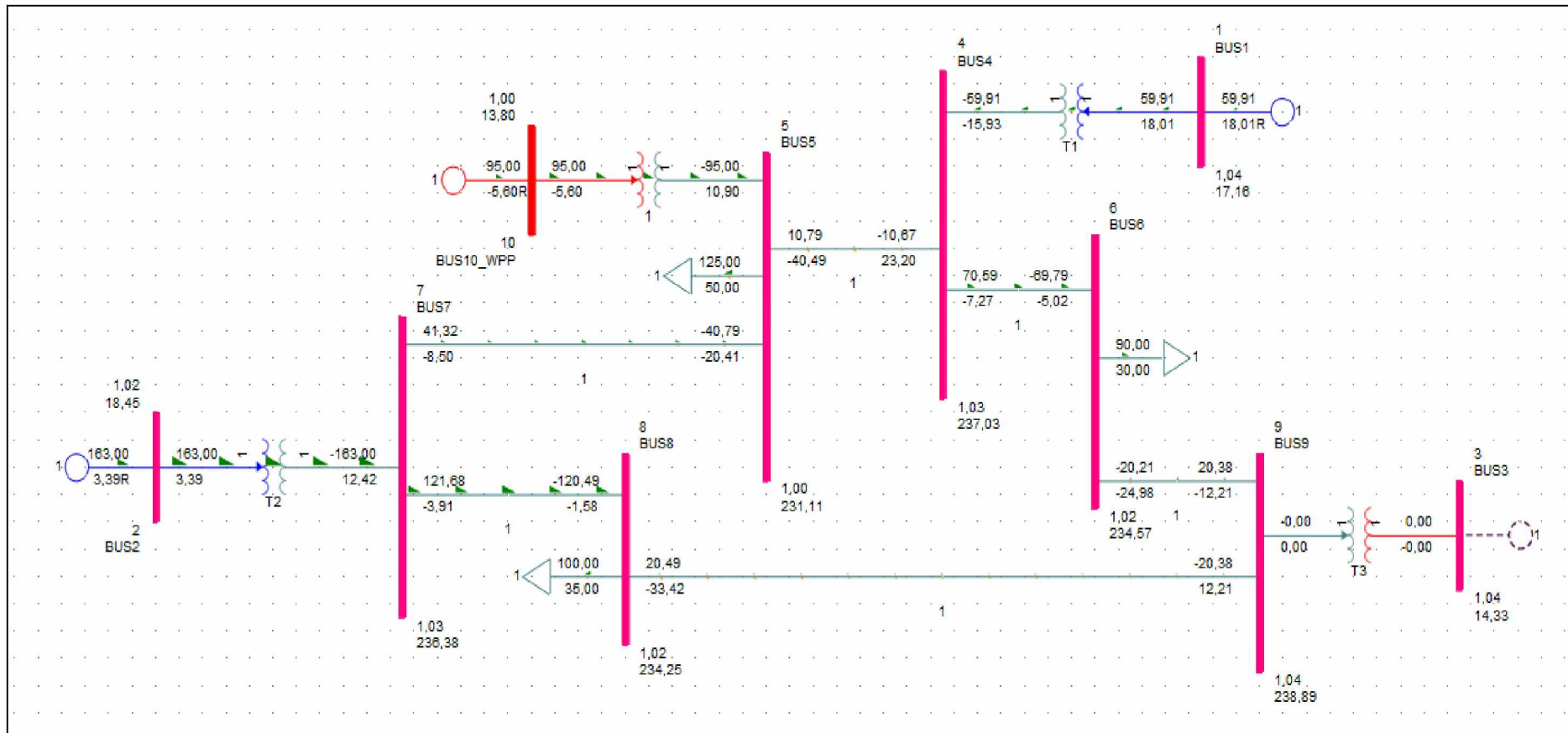
Πίνακας 6.27: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 5, ισχύος 95MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 59,9            | 18               |
| G2            | 163             | 3,4              |
| G3            | 0               | 0                |
| Αιολικό Πάρκο | 95              | -5,6             |
|               | <b>317,9 MW</b> | <b>15,8 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.27, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 317,9 - 315 \\ Q_{losses} = 15,8 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 2,9 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -99,2 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 5, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW (30% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 5. Η γεννήτρια G3 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

#### 6.5.4 Σύνδεση στον Ζυγό 6

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 6 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.28.

Πίνακας 6.28: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 6, ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 6,86      |
| 3     | 13,8            | 1,0326    | -2,37     |
| 4     | 230             | 1,0253    | -1,85     |
| 5     | 230             | 0,9972    | -4,56     |
| 6     | 230             | 1,0123    | -1,68     |
| 7     | 230             | 1,0258    | 1,3       |
| 8     | 230             | 1,0156    | -2,5      |
| 9     | 230             | 1,0326    | -2,37     |
| 10    | 13,8            | 1         | 1,47      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.29.

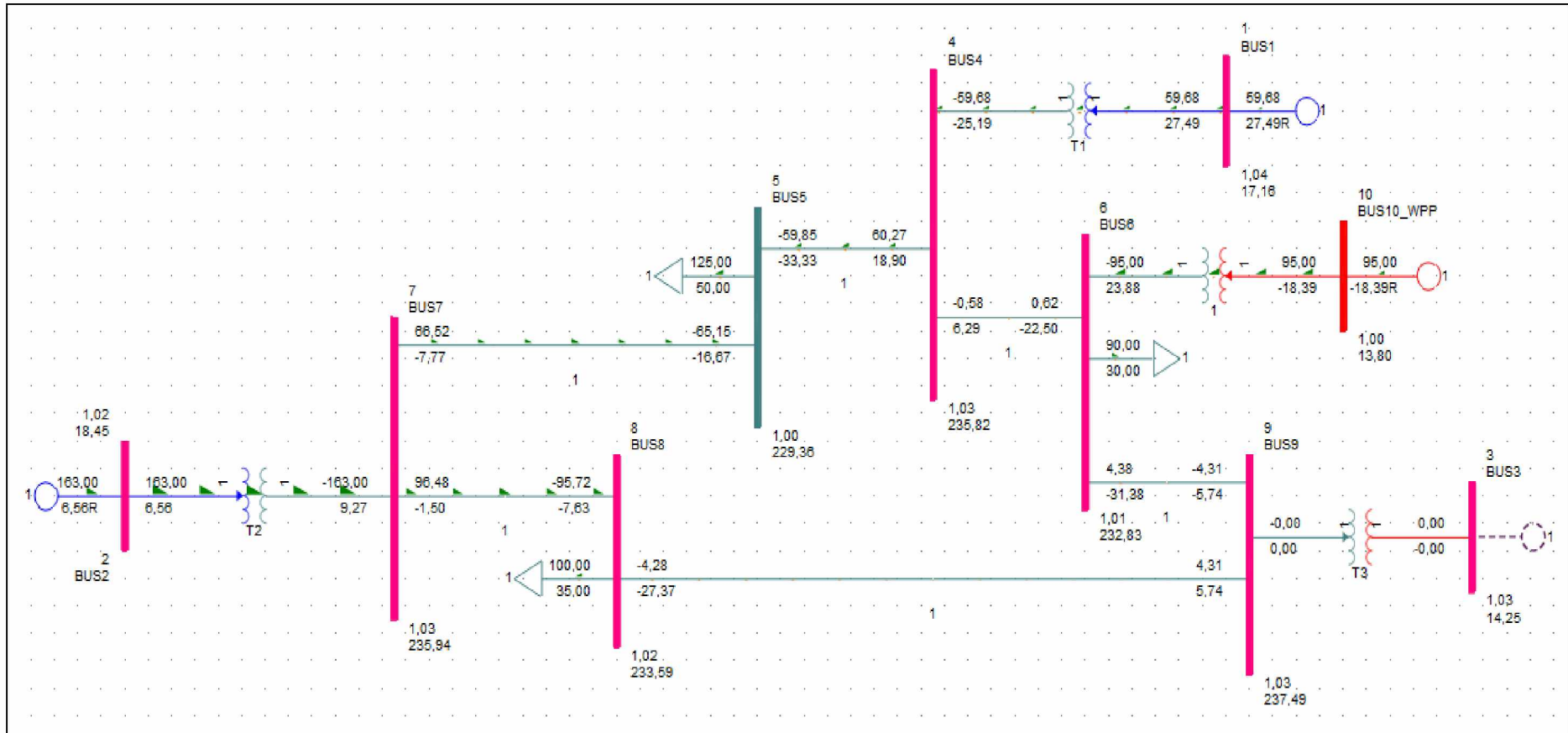
Πίνακας 6.29: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 6, ισχύος 95MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 59,7            | 27,5             |
| G2            | 163             | 6,6              |
| G3            | 0               | 0                |
| Αιολικό Πάρκο | 95              | -18,4            |
|               | <b>317,7 MW</b> | <b>15,7 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.29, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 317,7 - 315 \\ Q_{losses} = 15,7 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 2,7 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -99,3 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 6, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.12).



Σχήμα 6.12: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW (30% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 6. Η γεννήτρια G3 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

### 6.5.5 Σύνδεση στον Ζυγό 7

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 7 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.30.

Πίνακας 6.30: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 7, ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 13,6      |
| 3     | 13,8            | 1,023     | -0,46     |
| 4     | 230             | 1,0208    | -2        |
| 5     | 230             | 0,9836    | -2,51     |
| 6     | 230             | 1,0069    | -4,43     |
| 7     | 230             | 1,0123    | 7,97      |
| 8     | 230             | 1,0012    | 2,11      |
| 9     | 230             | 1,023     | -0,46     |
| 10    | 13,8            | 1         | 11,12     |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.31.

Πίνακας 6.31: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 7, ισχύος 95MW.

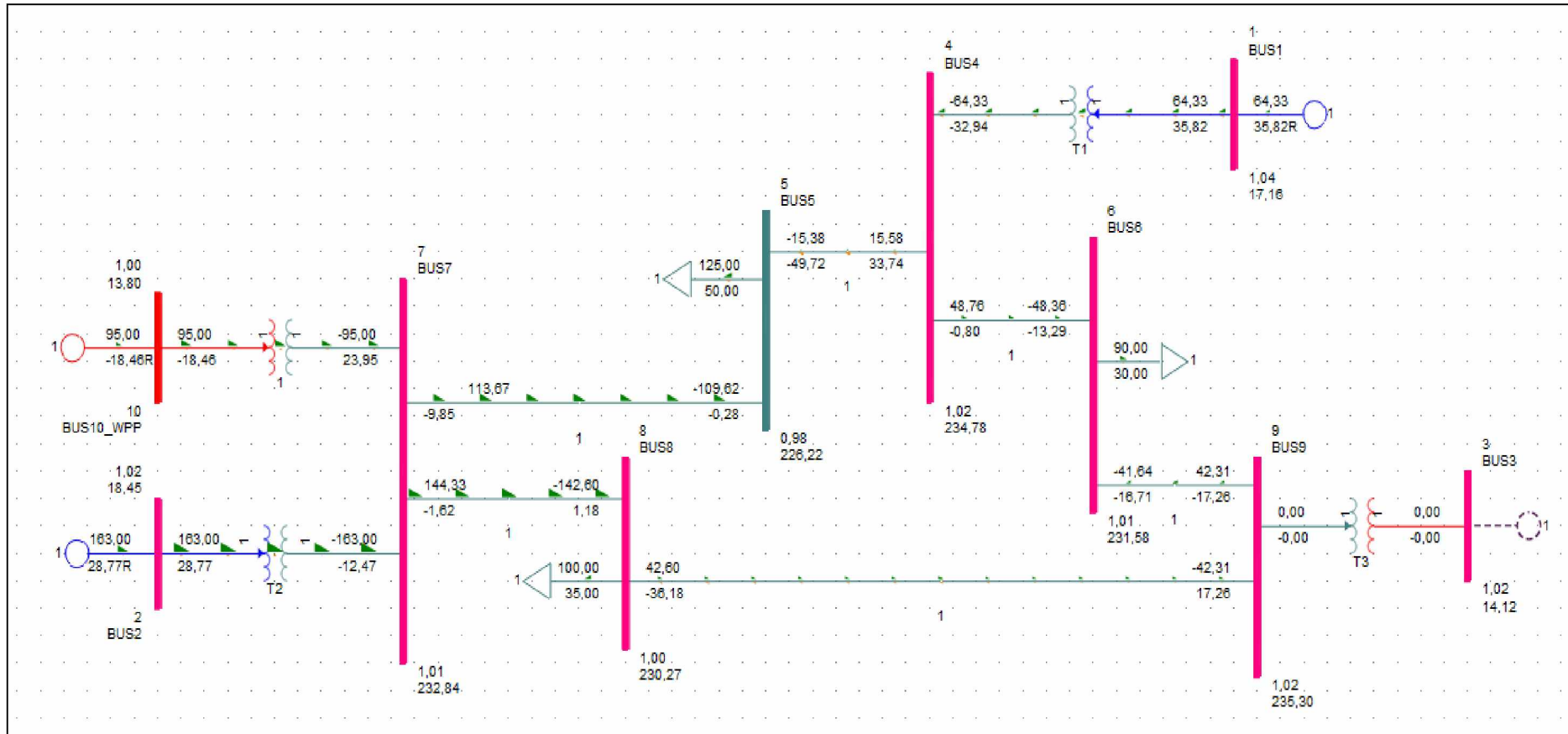
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 64,3            | 35,8             |
| G2            | 163             | 28,8             |
| G3            | 0               | 0                |
| Αιολικό Πάρκο | 95              | -18,5            |
|               | <b>322,3 MW</b> | <b>46,1 MVAR</b> |



Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.31, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 322,3 - 315 \\ Q_{losses} = 46,1 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 7,3 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -68,9 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 7, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW (30% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 7. Η γεννήτρια G3 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

### 6.5.6 Σύνδεση στον Ζυγό 8

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 8 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.32.

Πίνακας 6.32: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 8, ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 12,1      |
| 3     | 13,8            | 1,0296    | 1,11      |
| 4     | 230             | 1,0239    | -1,94     |
| 5     | 230             | 0,9908    | -2,89     |
| 6     | 230             | 1,0108    | -3,82     |
| 7     | 230             | 1,0222    | 6,52      |
| 8     | 230             | 1,0093    | 4,24      |
| 9     | 230             | 1,0296    | 1,11      |
| 10    | 13,8            | 1         | 7,4       |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.33.

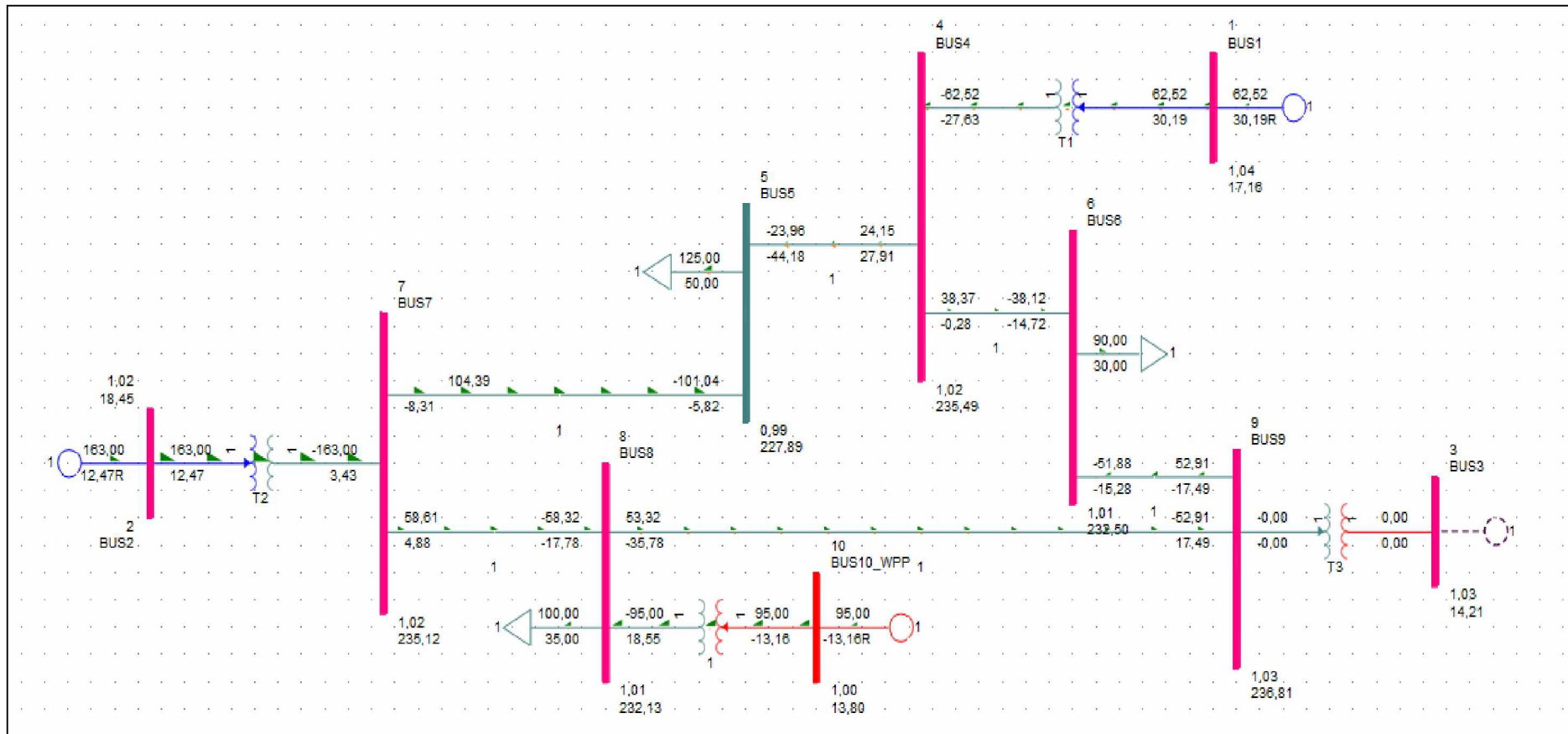
Πίνακας 6.33: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 8, ισχύος 95MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)      |
|---------------|-----------------|------------------|
| G1            | 62,5            | 30,2             |
| G2            | 163             | 12,5             |
| G3            | 0               | 0                |
| Αιολικό Πάρκο | 95              | -13,2            |
|               | <b>320,5 MW</b> | <b>29,5 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.33, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 320,5 - 315 \\ Q_{losses} = 29,5 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 5,5 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -85,5 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 8, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW (30% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 8. Η γεννήτρια G3 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

### 6.5.7 Σύνδεση στον Ζυγό 9

Το Αιολικό Πάρκο συνδέεται στον Ζυγό 9 του συστήματος και εκτελείται η λειτουργία Ροής Φορτίου του PSS/E.

Οι Τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.34.

Πίνακας 6.34: Τάσεις ζυγών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 9, ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ | ΒΑΣΗ ΤΑΣΗΣ (kV) | ΤΑΣΗ (pu) | ΓΩΝΙΑ (°) |
|-------|-----------------|-----------|-----------|
| 1     | 16,5            | 1,04      | 0         |
| 2     | 18              | 1,025     | 10,26     |
| 3     | 13,8            | 1,0142    | 3,41      |
| 4     | 230             | 1,021     | -1,93     |
| 5     | 230             | 0,9899    | -3,52     |
| 6     | 230             | 1,0021    | -3,08     |
| 7     | 230             | 1,0205    | 4,67      |
| 8     | 230             | 1,005     | 1,84      |
| 9     | 230             | 1,0142    | 3,41      |
| 10    | 13,8            | 1         | 6,55      |

Η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος στις γεννήτριες του συστήματος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.35.

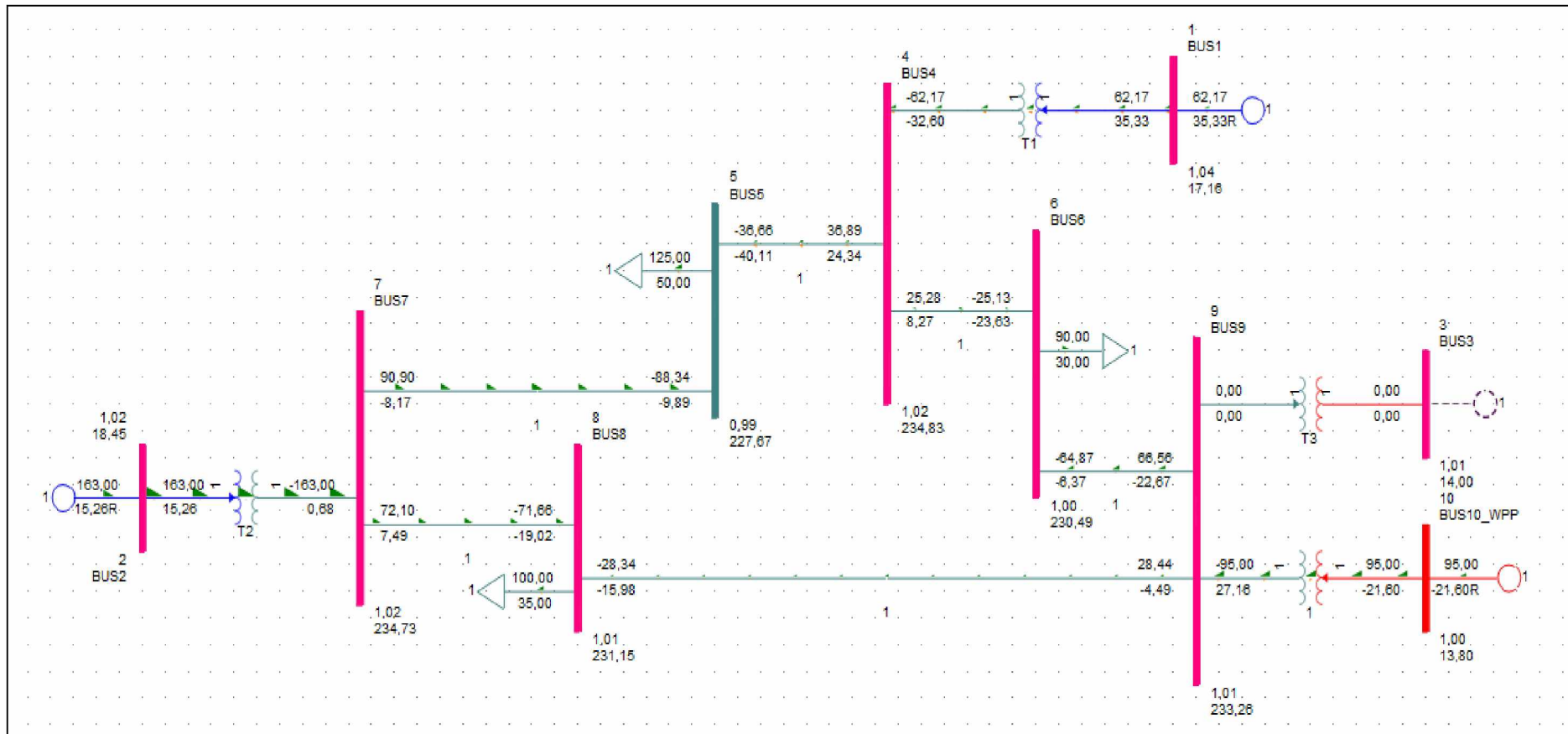
Πίνακας 6.35: Παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος γεννητριών συστήματος παρουσία αιολικού πάρκου στο ζυγό 9, ισχύος 95MW.

| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ     | Pgen (MW)       | Qgen (MVAR)    |
|---------------|-----------------|----------------|
| G1            | 62,2            | 35,3           |
| G2            | 163             | 15,3           |
| G3            | 0               | 0              |
| Αιολικό Πάρκο | 95              | -21,6          |
|               | <b>320,2 MW</b> | <b>29 MVAR</b> |

Βάσει των Πινάκων 6.4 και 6.35, οι απώλειες ισχύος του συστήματος διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} P_{losses} = P_G - P_D \\ Q_{losses} = Q_G - Q_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{losses} = 320,2 - 315 \\ Q_{losses} = 29 - 115 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{P_{losses} = 5,2 MW} \\ \mathbf{Q_{losses} = -86 MVAR} \end{cases}$$

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου, παρουσία του αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο ζυγό 9, απεικονίζονται και στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, που εξάγει το PSS/E (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW (30% της ζήτησης), συνδεδεμένου στο ζυγό 9. Η γεννήτρια G3 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.



#### 6.5.8 Επιλογή Ζυγού Σύνδεσης

Από τους Πίνακες καταγραφής των τάσεων των ζυγών του συστήματος προκύπτει ότι, σε κανένα από τα σενάρια τοποθέτησης του αιολικού πάρκου, δεν παρατηρούνται τιμές τάσεων που να παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια ασφαλείας ( $0,95 \text{ pu} < V < 1,05 \text{ pu}$ ).

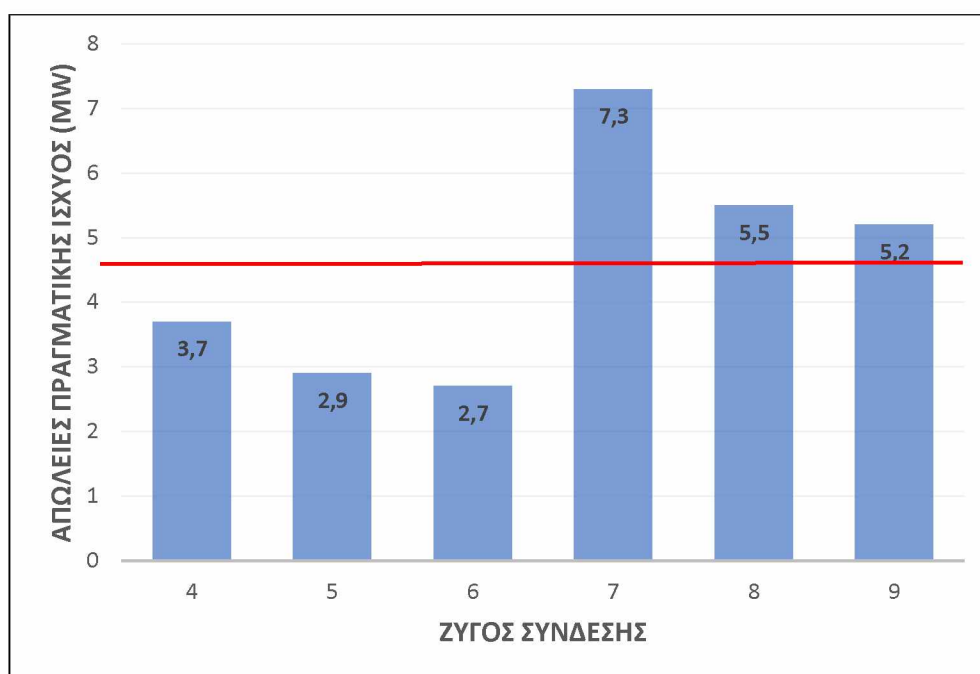
Αναφορικά με τις απώλειες ισχύος, οι αρνητικές τιμές των απωλειών άεργου ισχύος, στο σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων, φανερώνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης των φορτίων σε άεργο ισχύ παρέχεται από τις εγκάρσιες χωρητικότητες που χαρακτηρίζουν τις γραμμές μεταφοράς, παρά από τις ίδιες τις γεννήτριες, λόγω του μεγάλου μήκους των γραμμών μεταφοράς του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του βέλτιστου ζυγού σύνδεσης του αιολικού πάρκου θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές απώλειες ισχύος, αγνοώντας τις άεργες.

Ο συγκεντρωτικός πίνακας Απωλειών Πραγματικής Ισχύος του συστήματος για όλα τα σενάρια ζυγών σύνδεσης (Πίνακας 6.36) καθώς και το σχετικό ραβδόγραμμα (Σχήμα 6.16) παρατίθενται στη συνέχεια. Η ύπαρξη του αιολικού πάρκου συμβάλει στη μείωση των απωλειών πραγματικής ισχύος του συστήματος, όταν αυτό συνδεθεί στους ζυγούς 4, 5 ή 6, καθώς οι σχετικές τιμές απωλειών είναι μικρότερες των αντίστοιχων του αρχικού συστήματος χωρίς το αιολικό πάρκο, οι οποίες και διαμορφώνονται στα 4,6MW. Αντίθετα στους ζυγούς 7, 8 και 9, οι απώλειες παρουσιάζουν αύξηση, ιδιαίτερα στην περίπτωση του ζυγού 7, όπου αυτές είναι ιδιαίτερος αυξημένες. Υπενθυμίζεται ότι στον ζυγό 7 είναι συνδεδεμένη, μέσω του μετασχηματιστή της, και η γεννήτρια G2.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο βέλτιστος ζυγός σύνδεσης του αιολικού πάρκου 95MW (30% της ζήτησης φορτίου), βάσει των μικρότερων απωλειών πραγματικής ισχύος, είναι ο Ζυγός 6. Οι απώλειες, στην περίπτωση αυτή, διαμορφώνονται στα 2,7MW.

Πίνακας 6.36: Συγκεντρωτικός πίνακας απωλειών πραγματικής ισχύος συστήματος για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης αιολικού πάρκου ισχύος 95MW.

| ΖΥΓΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ | ΑΠΩΛΕΙΕΣ Ρ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (MW) |
|--------------------------------|----------------------------|
| 4                              | 3,7                        |
| 5                              | 2,9                        |
| <b>6</b>                       | <b>2,7</b>                 |
| 7                              | 7,3                        |
| 8                              | 5,5                        |
| 9                              | 5,2                        |



Σχήμα 6.16: Ραβδόγραμμα απωλειών πραγματικής ισχύος συστήματος για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης αιολικού πάρκου ισχύος 95MW.

Με κόκκινη γραμμή σημειώνονται οι απώλειες του αρχικού συστήματος, χωρίς το αιολικό πάρκο (4,6MW).

## 6.6 Σχολιασμοί και Συμπεράσματα

Τα συνολικά δεδομένα απωλειών πραγματικής ισχύος, για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης, για ποσοστά ενσωμάτωσης 15% (σενάριο 15%) και 30% (σενάριο 30%), παρατίθενται στον Πίνακα 6.37 και στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 6.17. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, σε όλους τους υποψήφιους ζυγούς σύνδεσης, πλην του 6, η αύξηση του ποσοστού της ζήτησης που καλύπτεται απ' το αιολικό πάρκο από 15% σε 30%, συνοδεύεται και από αύξηση των απωλειών πραγματικής ισχύος. Στον ζυγό 6, οι απώλειες παραμένουν σταθερές στα 2,7 MW και στις δύο περιπτώσεις.

Συνεχίζοντας, είναι σημαντικό να αναφερθεί η συμπεριφορά των απωλειών του συστήματος, όταν το αιολικό πάρκο συνδεθεί στους ζυγούς 4, 7 ή 9, όπου συνδέονται μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης οι γεννήτριες G1, G2 και G3 αντίστοιχα. Η σύνδεση στον ζυγό 4 παρουσιάζει τις χαμηλότερες απώλειες ισχύος από τους υπόλοιπους, με μικρή αύξηση από το σενάριο 15% στο 30%, ενώ απ' την άλλη, οι υψηλότερες απώλειες καταγράφονται κατά τη σύνδεση στον ζυγό 7, ιδιαίτερα στο σενάριο 30%. Στη σύνδεση με τον ζυγό 9, οι απώλειες ταυτίζονται με αυτές του ζυγού 7 στο σενάριο του 15%, ενώ στο σενάριο του 30%, που η γεννήτρια G3 είναι πλέον εκτός συστήματος, παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση. Οι απώλειες ισχύος στη σύνδεση με τον ζυγό 4 είναι λιγότερες από τις αντίστοιχες του αρχικού συστήματος χωρίς το αιολικό πάρκο στα σενάρια 15% και 30%, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει κατά τη σύνδεση με τους 7 και 9.

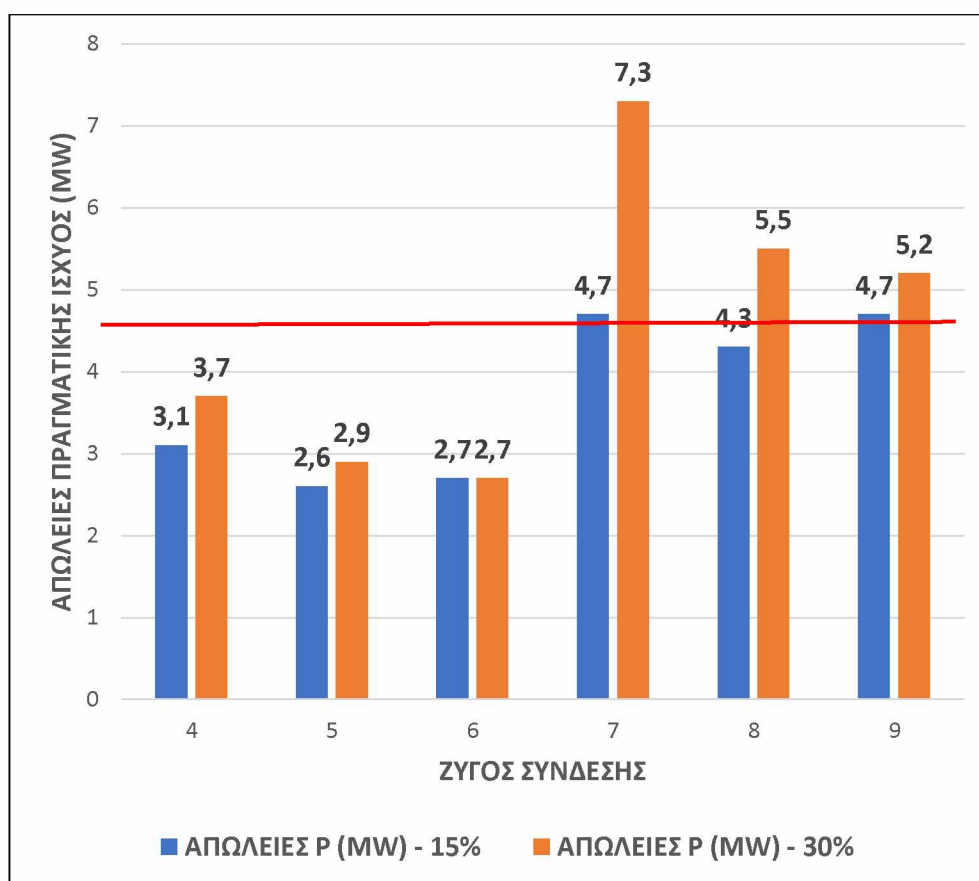
Όσον αφορά τη σύνδεση του αιολικού πάρκου σε ζυγούς φορτίων, δηλαδή στους 5, 6 και 8, στην περίπτωση των 5 και 6, οι απώλειες παρουσιάζονται μειωμένες και μικρότερες του αρχικού συστήματος, χωρίς το αιολικό πάρκο και για τα δύο σενάρια 15% και 30%. Κατά τη σύνδεση με τον ζυγό 8, στο σενάριο 15% οι απώλειες είναι μικρότερες του αρχικού συστήματος, ενώ στο 30% τις ξεπερνούν. Εν τέλει, βέλτιστοι ζυγοί σύνδεσης με τις λιγότερες απώλειες ισχύος, για το μελετώμενο σύστημα, αποδεικνύονται οι ζυγοί φορτίου 5 και 6 για τα σενάρια 15% και 30% αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, γίνεται φανερό ότι η εύρεση και επιλογή του βέλτιστου βάσει απωλειών ισχύος ζυγού σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου εξαρτάται κυρίως από την ισχύ του, αλλά και από την τοπολογία και διάρθρωση του μελετώμενου ΣΗΕ, καθώς αυτές επηρεάζουν άμεσα τις απώλειες ισχύος του συστήματος. [30]

Στο Κεφάλαιο 7 που ακολουθεί, θα πραγματοποιηθεί Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας του συστήματος των 9 ζυγών του ΙΕΕΕ, παρουσία αιολικού πάρκου, συνδεδεμένου στους βέλτιστους βάσει απωλειών ισχύος ζυγούς, για τα σενάρια 15% και 30% που προέκυψαν απ' τις μελέτες του παρόντος Κεφαλαίου.

Πίνακας 6.37: Απώλειες πραγματικής ισχύος συστήματος για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης αιολικού πάρκου, ισχύος 15% και 30% της ζήτησης. Με μπλε σημειώνονται οι βέλτιστοι ζυγοί σύνδεσης για κάθε %.

| ΖΥΓΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ | ΑΠΩΛΕΙΕΣ P (MW) - 15% | ΑΠΩΛΕΙΕΣ P (MW) - 30% |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 4                              | 3,1                   | 3,7                   |
| 5                              | <b>2,6</b>            | 2,9                   |
| 6                              | 2,7                   | <b>2,7</b>            |
| 7                              | 4,7                   | 7,3                   |
| 8                              | 4,3                   | 5,5                   |
| 9                              | 4,7                   | 5,2                   |



Σχήμα 6.17: Απώλειες πραγματικής ισχύος συστήματος για όλους τους πιθανούς ζυγούς σύνδεσης αιολικού πάρκου, ισχύος 15% και 30% της ζήτησης. Με κόκκινη γραμμή σημειώνονται οι απώλειες του αρχικού συστήματος, χωρίς το αιολικό πάρκο (4,6MW).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΗΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIEMENS PSS/E

#### 7.1 Περιγραφή Προβλήματος

Στις Ενότητες που ακολουθούν θα μελετηθεί η στατική ασφάλεια, έναντι ορισμένων διαταραχών, του συστήματος 9 ζυγών του ΙΕΕΕ, με και χωρίς την παρουσία αιολικού πάρκου.

Τα προς μελέτη συστήματα είναι τα ακόλουθα:

1. Αρχικό σύστημα 9 ζυγών.
2. Σύστημα 9 ζυγών με αιολικό πάρκο ισχύος 48MW (15% της ζήτησης φορτίου), το οποίο είναι συνδεδεμένο στον ζυγό 5 του συστήματος.
3. Σύστημα 9 ζυγών με αιολικό πάρκο ισχύος 95MW (30% της ζήτησης φορτίου), το οποίο είναι συνδεδεμένο στον ζυγό 6 του συστήματος.

Τα Συστήματα 2 και 3 έχουν προκύψει από τις μελέτες του Κεφαλαίου 6, αναφορικά με την επιλογή ζυγού σύνδεσης αιολικού πάρκου με τις ελάχιστες απώλειες ισχύος, για διαφορετικά ποσοστά ενσωμάτωσης αιολικής παραγωγής.

Τα σενάρια διαταραχών (N-1) είναι τα ακόλουθα:

1. Αφαίρεση της Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5.
2. Αφαίρεση της Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6.
3. Αφαίρεση της Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7.
4. Αφαίρεση της Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9.
5. Αφαίρεση της Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8.
6. Αφαίρεση της Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9.
7. Αφαίρεση της Γεννήτριας G2.
8. Αφαίρεση της Γεννήτριας G3.

Αναφορικά με το σενάριο 8, αυτό παραλείπεται στο Σύστημα 3 με 30% ενσωμάτωση αιολικής παραγωγής, καθώς το αιολικό πάρκο αντικαθιστά τη γεννήτρια G3.

Δε θα μελετηθεί σενάριο αφαίρεσης της γεννήτριας G1, καθώς αυτή συνδέεται στον ζυγό 1, που είναι ο ζυγός αναφοράς του συστήματος.

## 7.2 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Αρχικού Συστήματος

### 7.2.1 Αρχικό σύστημα χωρίς διαταραχή

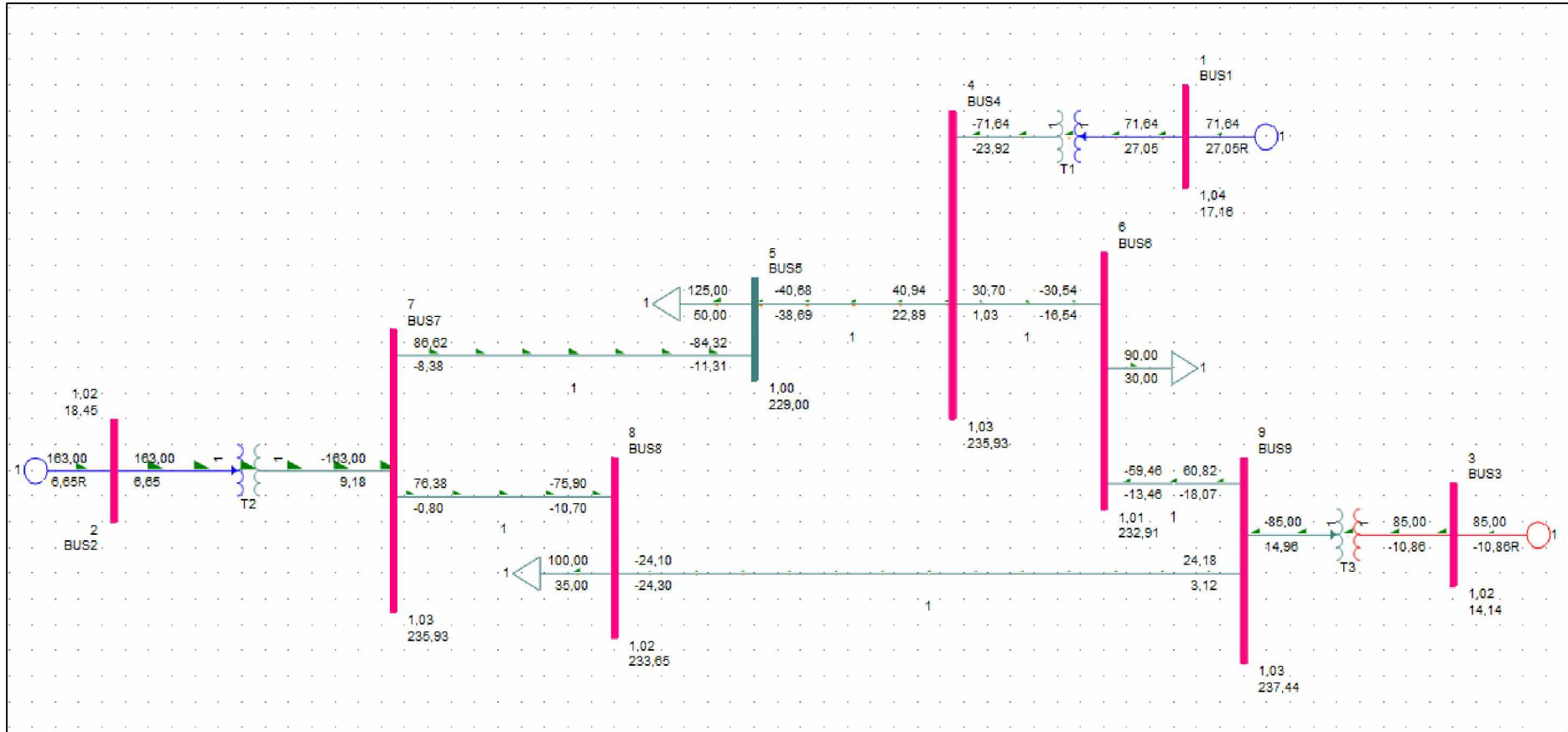
Για το αρχικό σύστημα, χωρίς την παρουσία κάποιας διαταραχής, μετά την εκτέλεση της λειτουργίας της Ροής Φορτίου, τα μέτρα των τάσεων των ζυγών στο ανά μονάδα σύστημα (pu) διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, χωρίς την παρουσία διαταραχής.

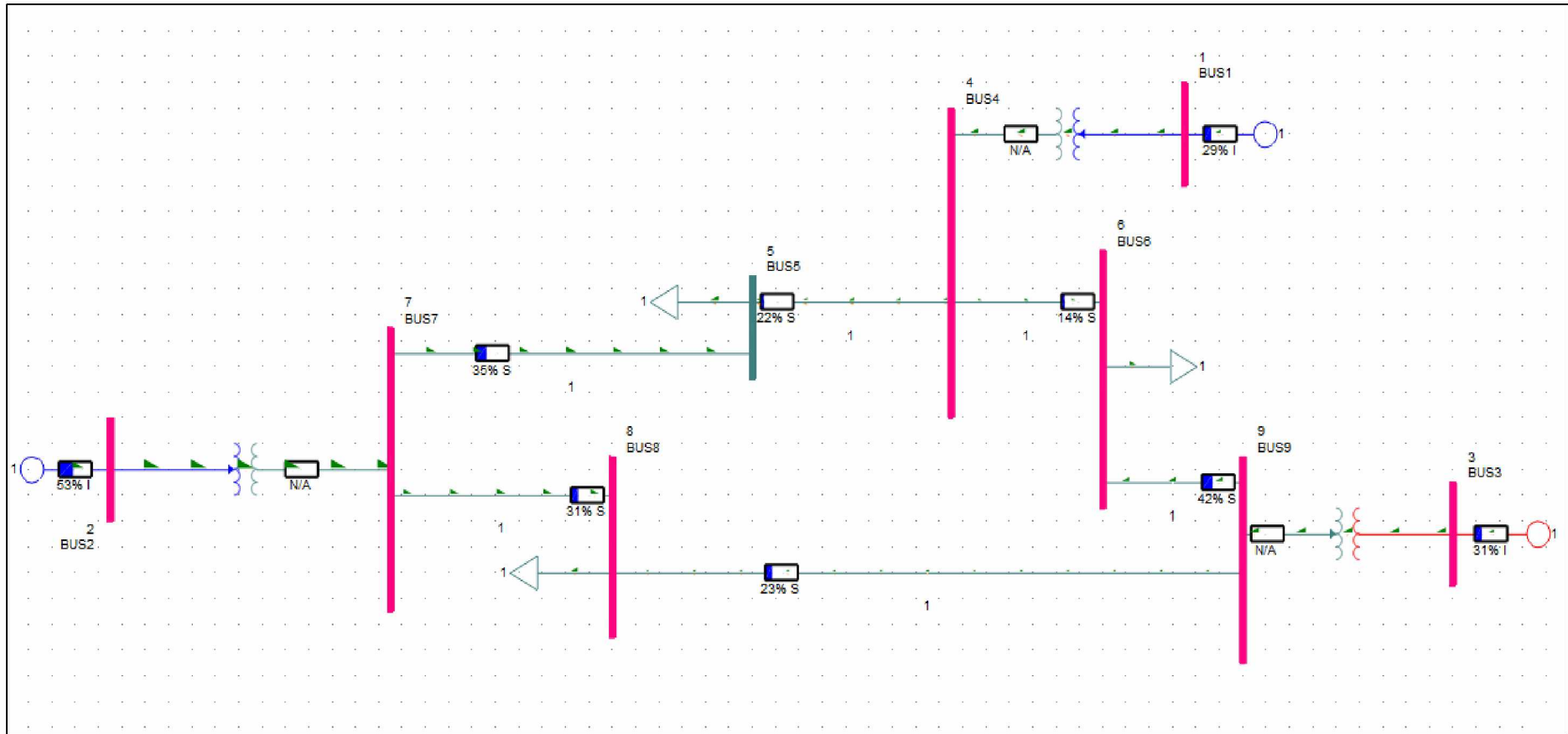
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0258           |
| 5     | 0,9956           |
| 6     | 1,0127           |
| 7     | 1,0258           |
| 8     | 1,0159           |
| 9     | 1,0324           |

Οι ροές ισχύος, καθώς και οι τάσεις των ζυγών, απεικονίζονται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 7.1, ενώ οι φορτίσεις των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς του συστήματος στο Σχήμα 7.2. Όπως γίνεται φανερό, τα μέτρα των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ), ενώ κανένα από τα στοιχεία του συστήματος δεν είναι υπερφορτισμένο.





Σχήμα 7.1: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, χωρίς την παρουσία διαταραχής.



Σχήμα 7.2: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, χωρίς την παρουσία διαταραχής.

### 7.2.2 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5

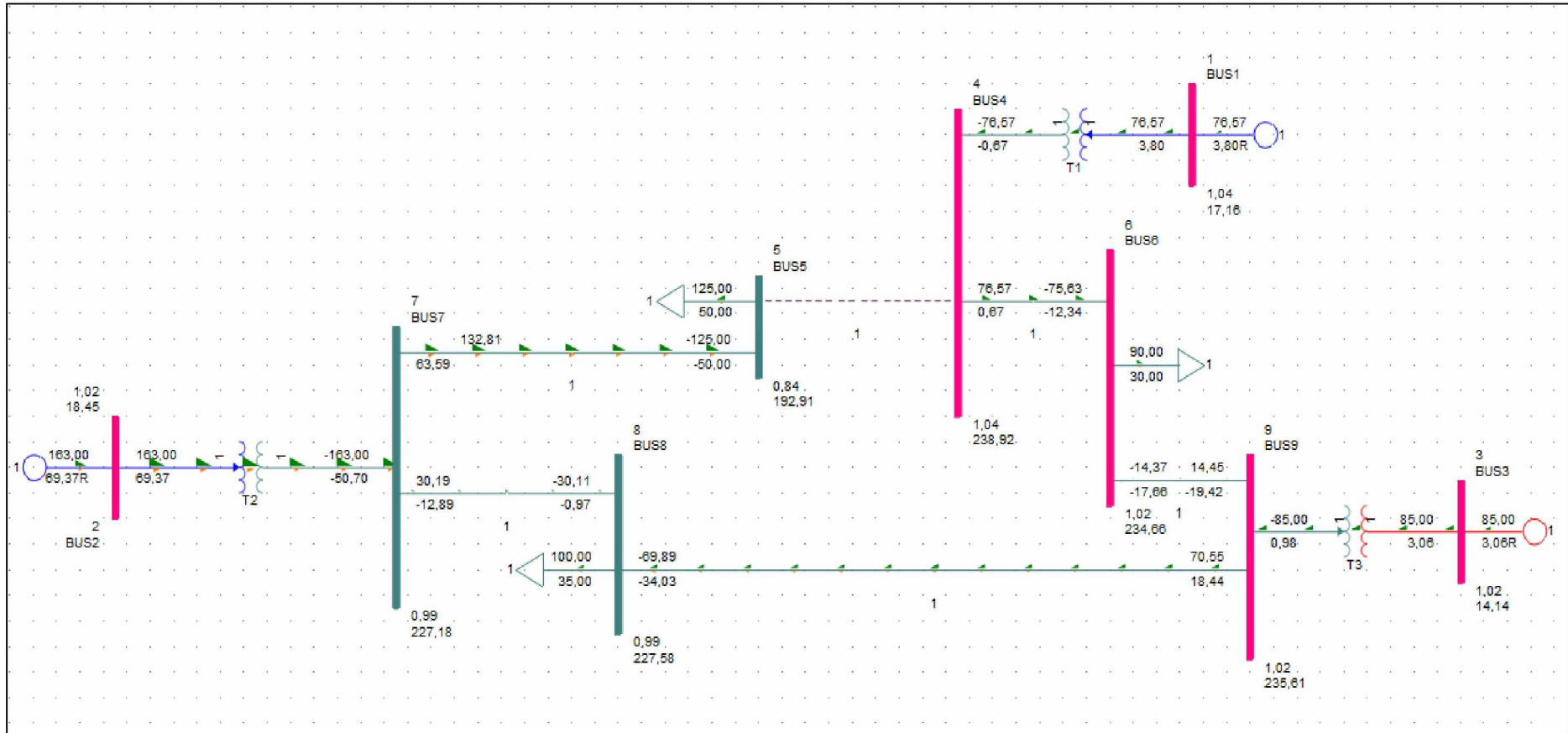
Η γραμμή μεταφοράς 4 – 5 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5.

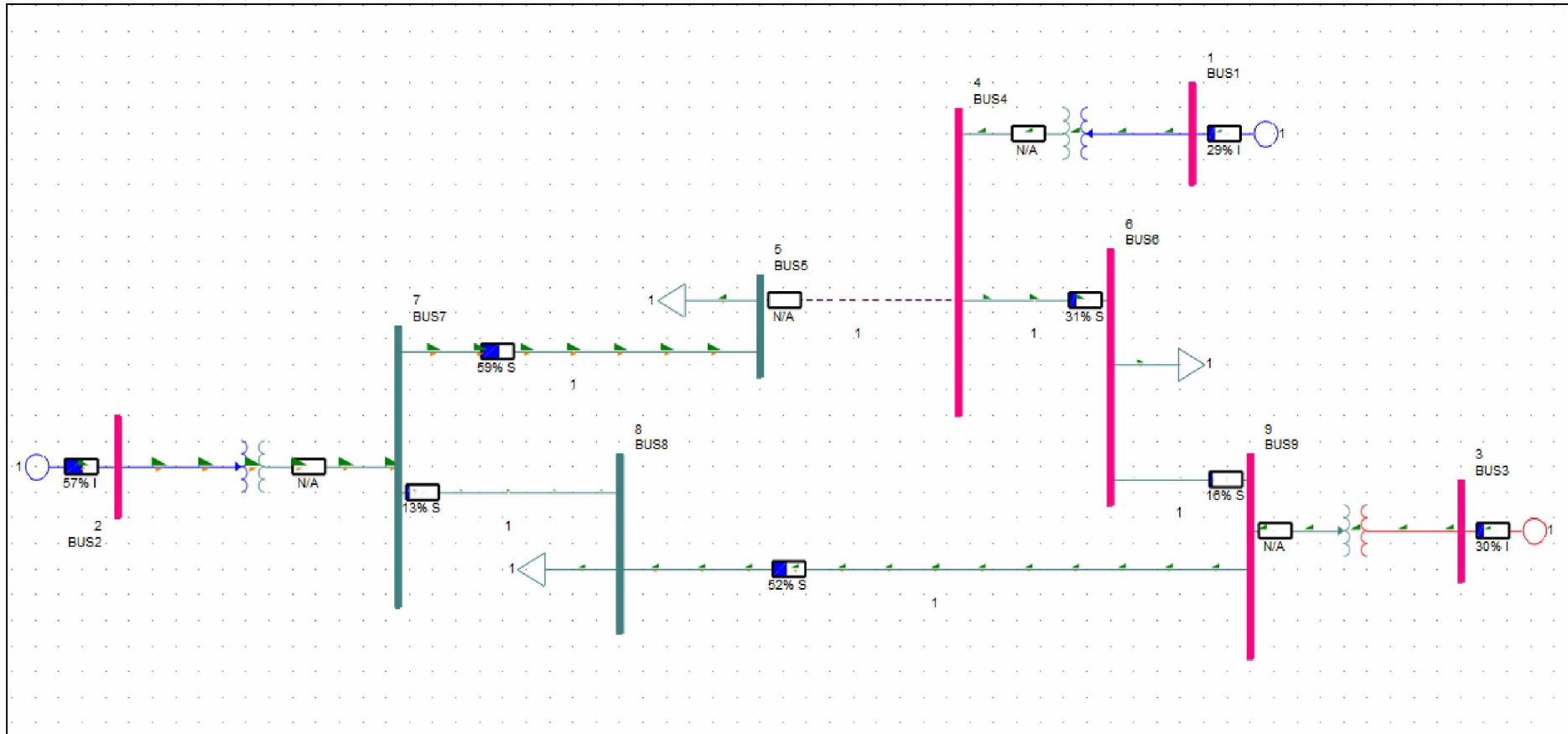
| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| 3        | 1,025            |
| 4        | 1,0388           |
| <b>5</b> | <b>0,8388</b>    |
| 6        | 1,0203           |
| 7        | 0,9877           |
| 8        | 0,9895           |
| 9        | 1,0244           |

Η τάση του ζυγού 5 διαμορφώνεται στα 0,8388pu, τιμή η οποία είναι μικρότερη του κατώτατου ορίου των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση της τάσης του ζυγού 5 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.4 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.4 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 5 – 7, η οποία διαμορφώνεται στο 59% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.



Σχήμα 7.3: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.4: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.2.3 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6

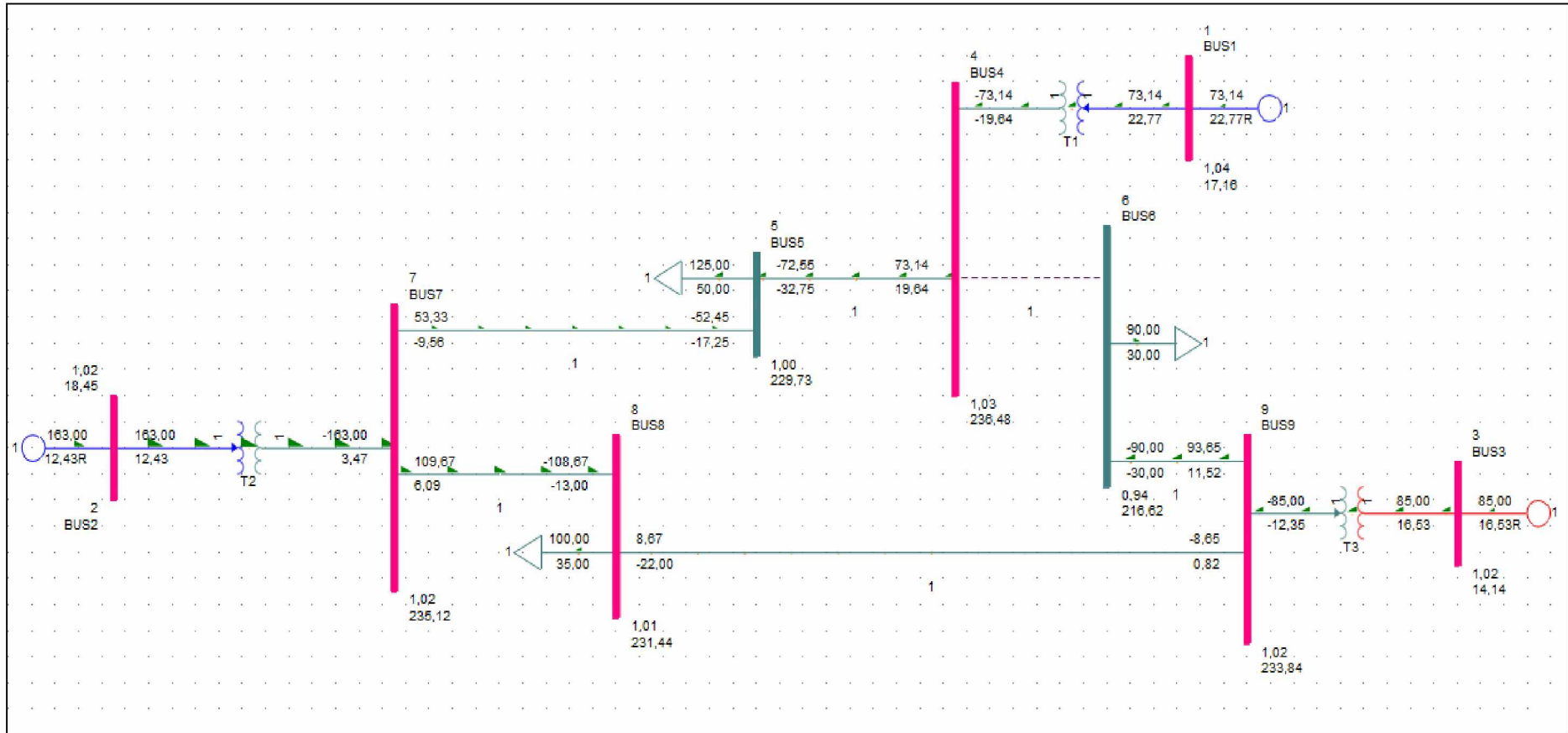
Η γραμμή μεταφοράς 4 – 6 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6.

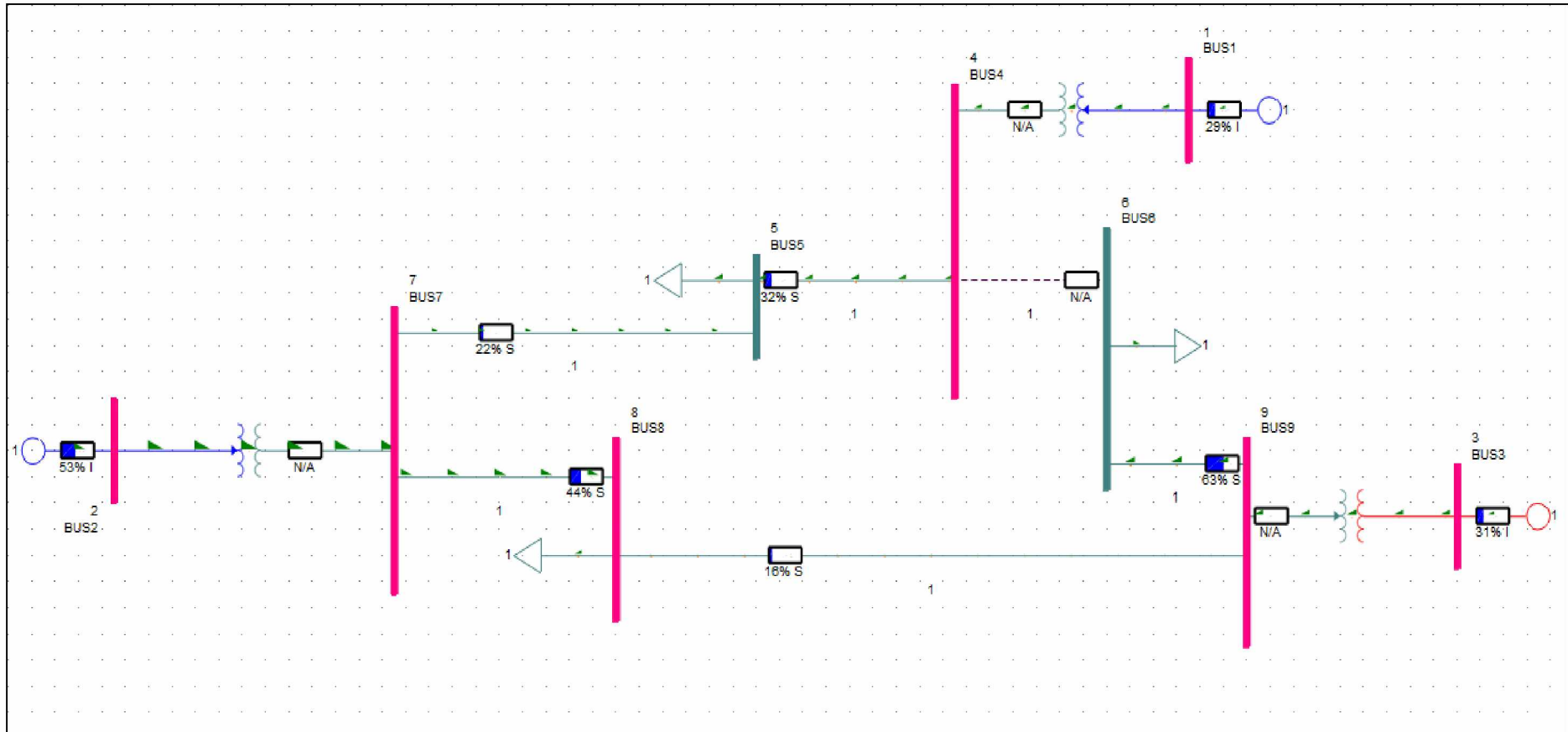
| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| 3        | 1,025            |
| 4        | 1,0282           |
| 5        | 0,9988           |
| <b>6</b> | <b>0,9419</b>    |
| 7        | 1,0223           |
| 8        | 1,0063           |
| 9        | 1,0167           |

Η τάση του ζυγού 6 διαμορφώνεται στα 0,9419pu, τιμή η οποία παρουσιάζει μικρή απόκλιση από το κατώτατο όριο των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση της τάσης του ζυγού 6 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.5 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.6 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.6 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 6 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 63% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.



Σχήμα 7.5: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.6: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



#### 7.2.4 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7

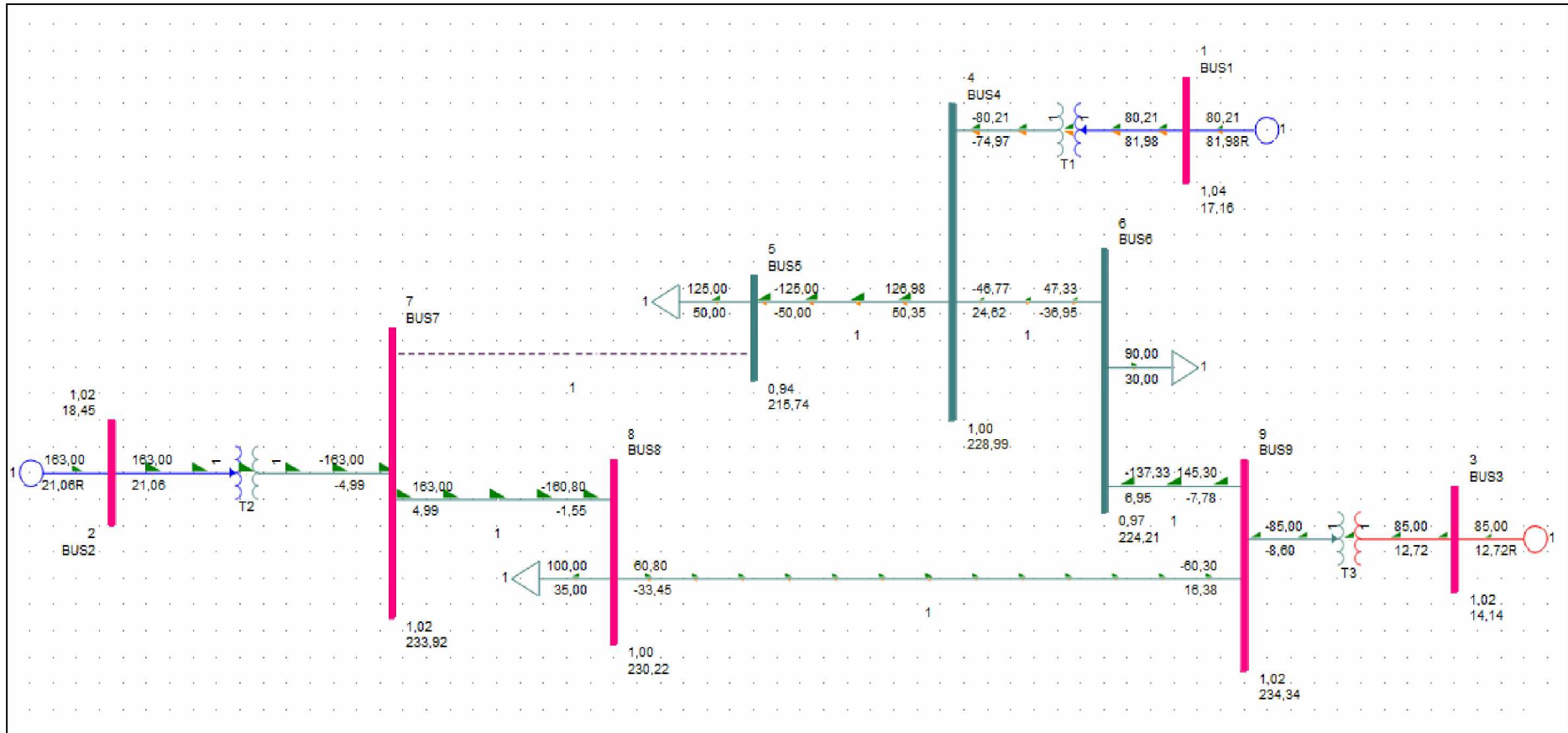
Η γραμμή μεταφοράς 5 – 7 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7.

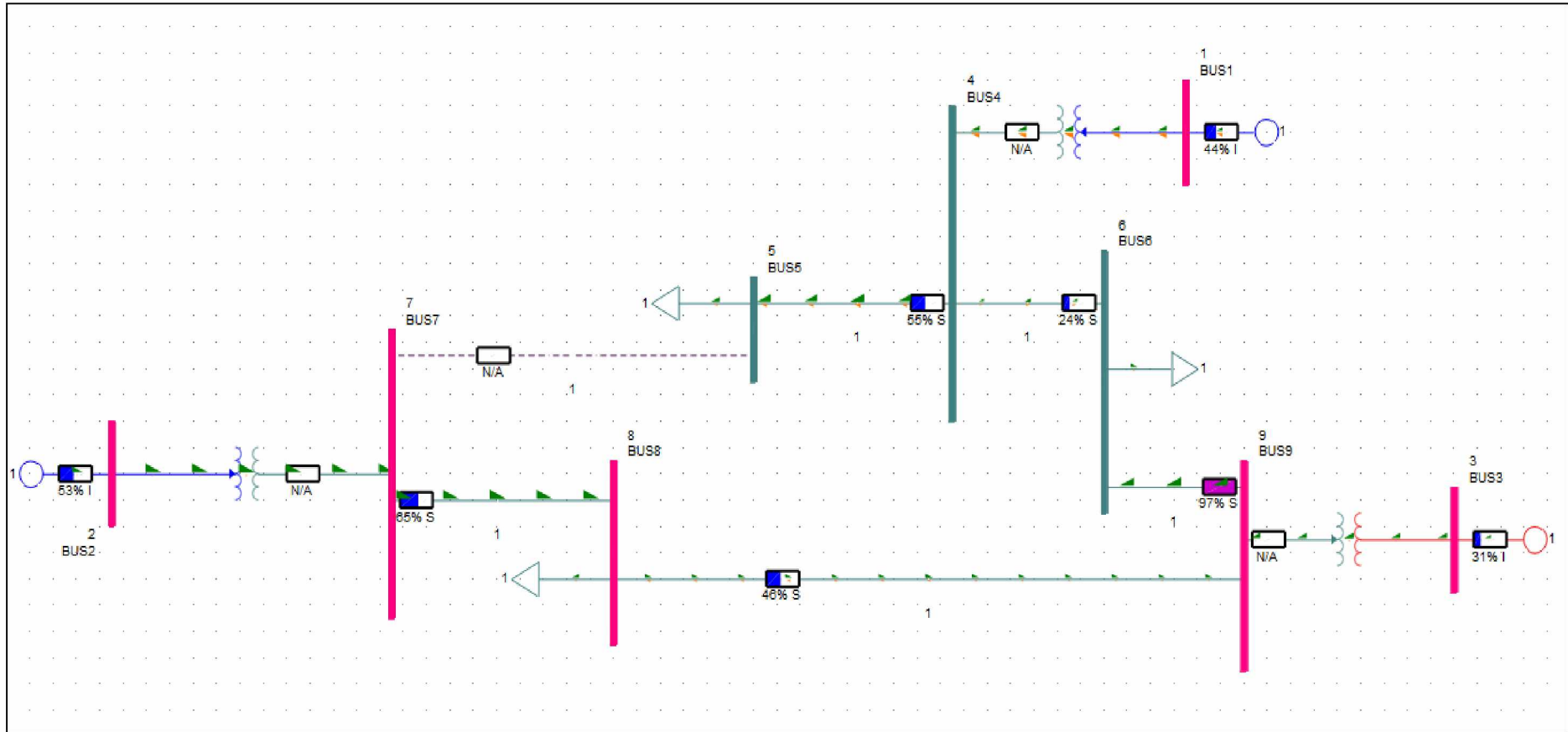
| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| 3        | 1,025            |
| 4        | 0,9956           |
| <b>5</b> | <b>0,938</b>     |
| 6        | 0,9748           |
| 7        | 1,017            |
| 8        | 1,001            |
| 9        | 1,0189           |

Η τάση του ζυγού 5 διαμορφώνεται στα 0,938pu, τιμή η οποία είναι μικρότερη του κατώτατου ορίου των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση της τάσης του ζυγού 5 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.7 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.8 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.8 παρατηρείται η φόρτιση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 στο 97%, γεγονός που χρήζει άμεσης αντιμετώπισης.



Σχήμα 7.7: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.8: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.2.5 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9

Η γραμμή μεταφοράς 6 – 9 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.5.

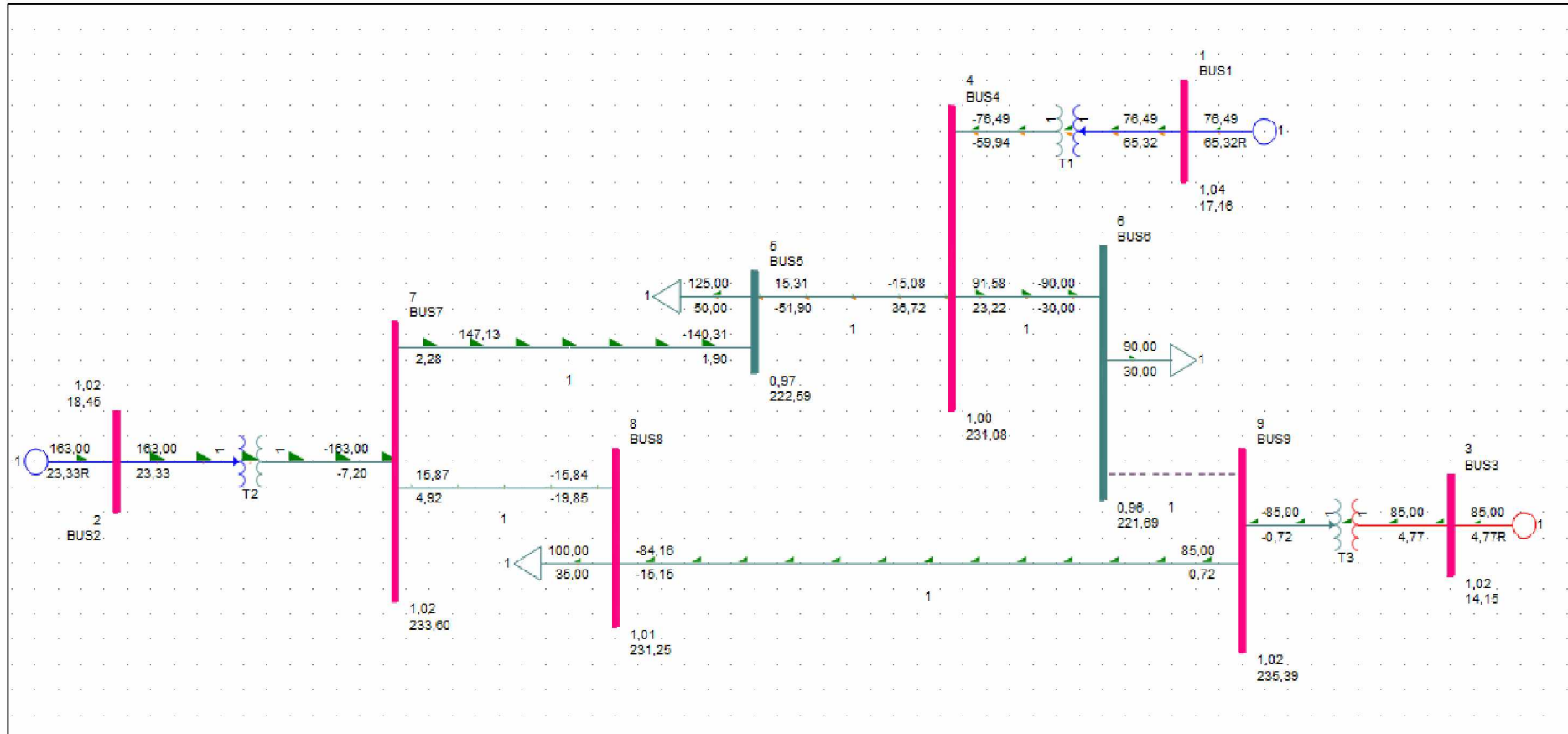
Πίνακας 7.5: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0047           |
| 5     | 0,9678           |
| 6     | 0,9639           |
| 7     | 1,0156           |
| 8     | 1,0054           |
| 9     | 1,0234           |

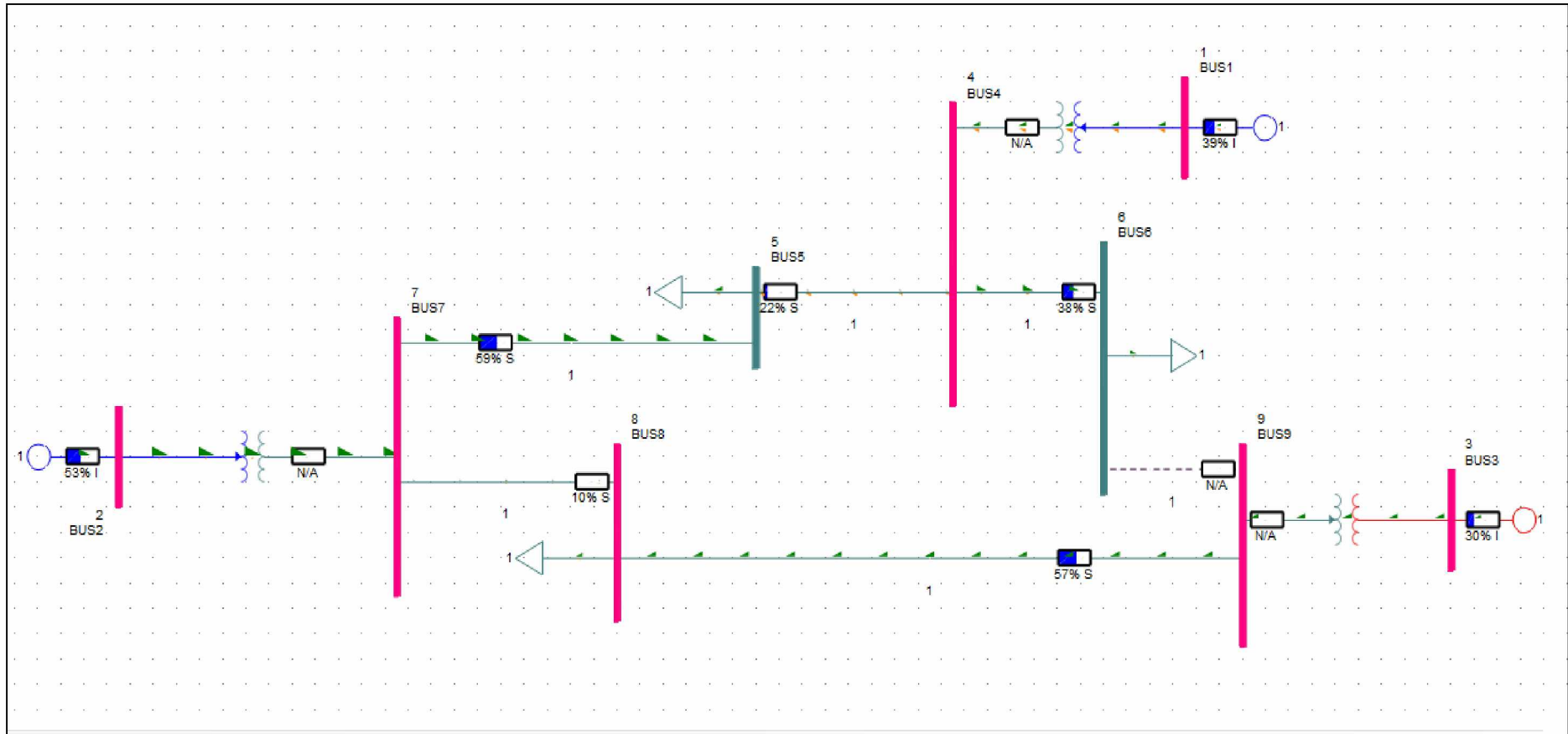
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.9 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.10 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.10 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 5 – 7, η οποία διαμορφώνεται στο 59% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.9: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.10: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.2.6 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8

Η γραμμή μεταφοράς 7 – 8 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.6.

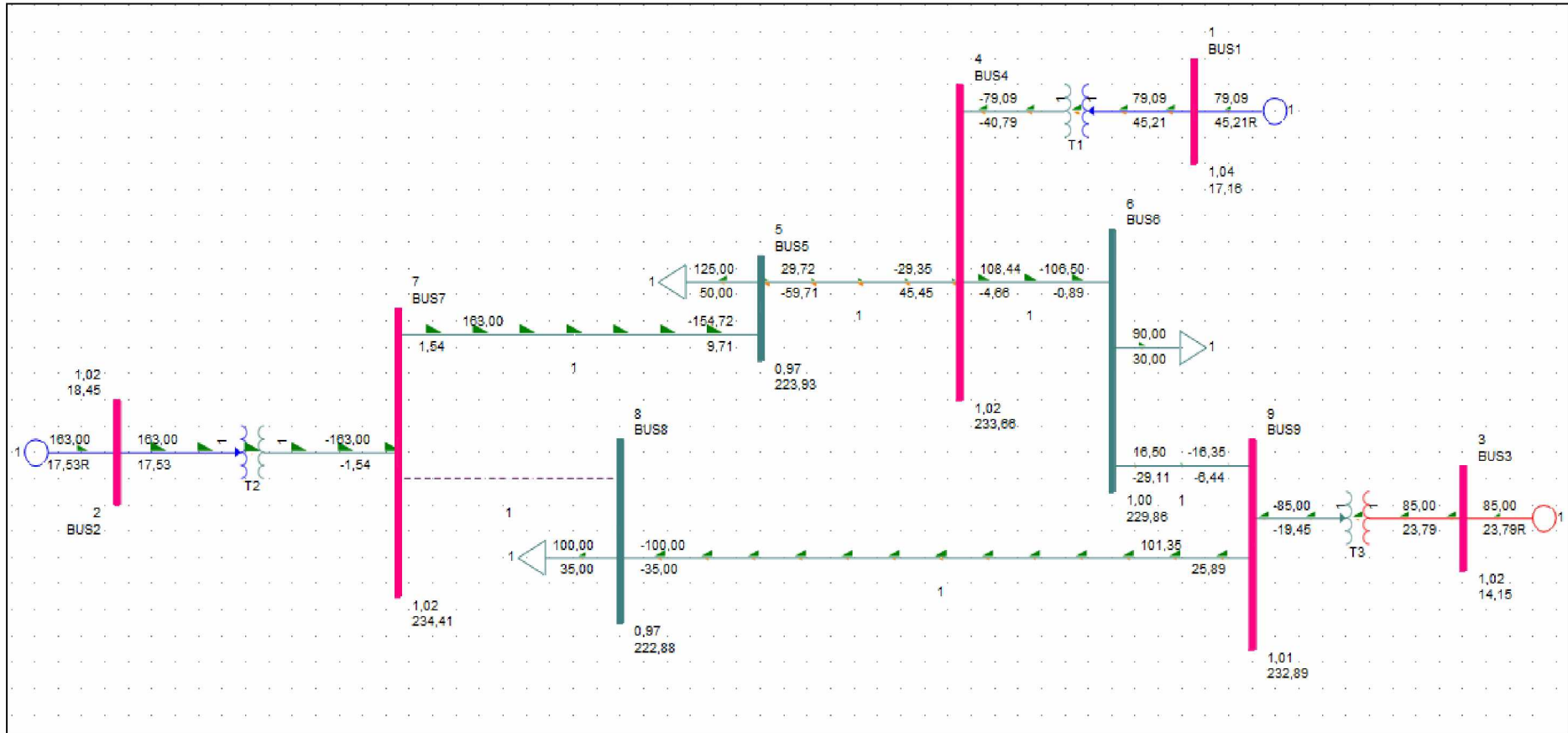
Πίνακας 7.6: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0159           |
| 5     | 0,9736           |
| 6     | 0,9994           |
| 7     | 1,0192           |
| 8     | 0,969            |
| 9     | 1,0126           |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

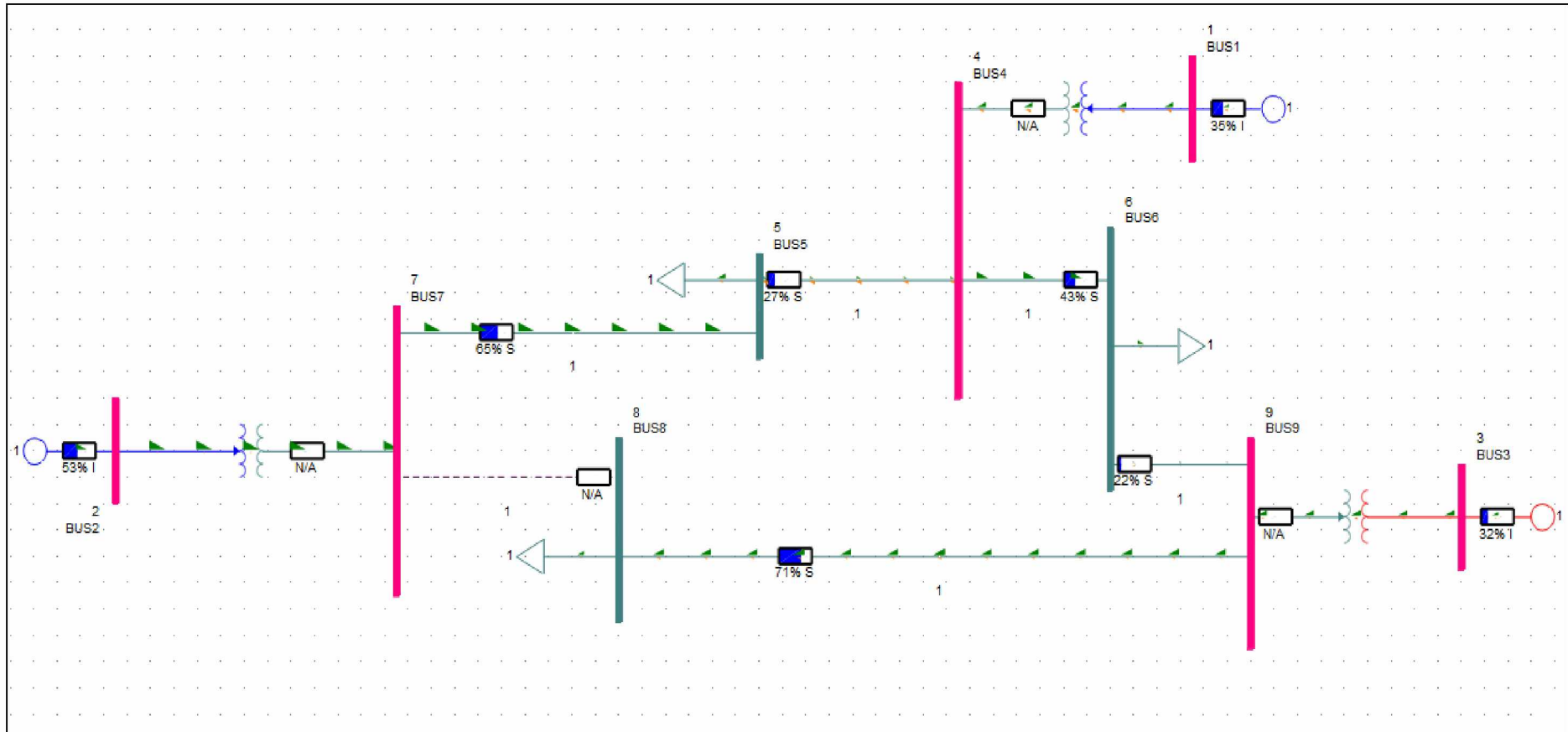
Στο Σχήμα 7.11 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.12 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.12 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 8 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 71% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.11: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).





Σχήμα 7.12: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.2.7 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9

Η γραμμή μεταφοράς 8 – 9 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.7.

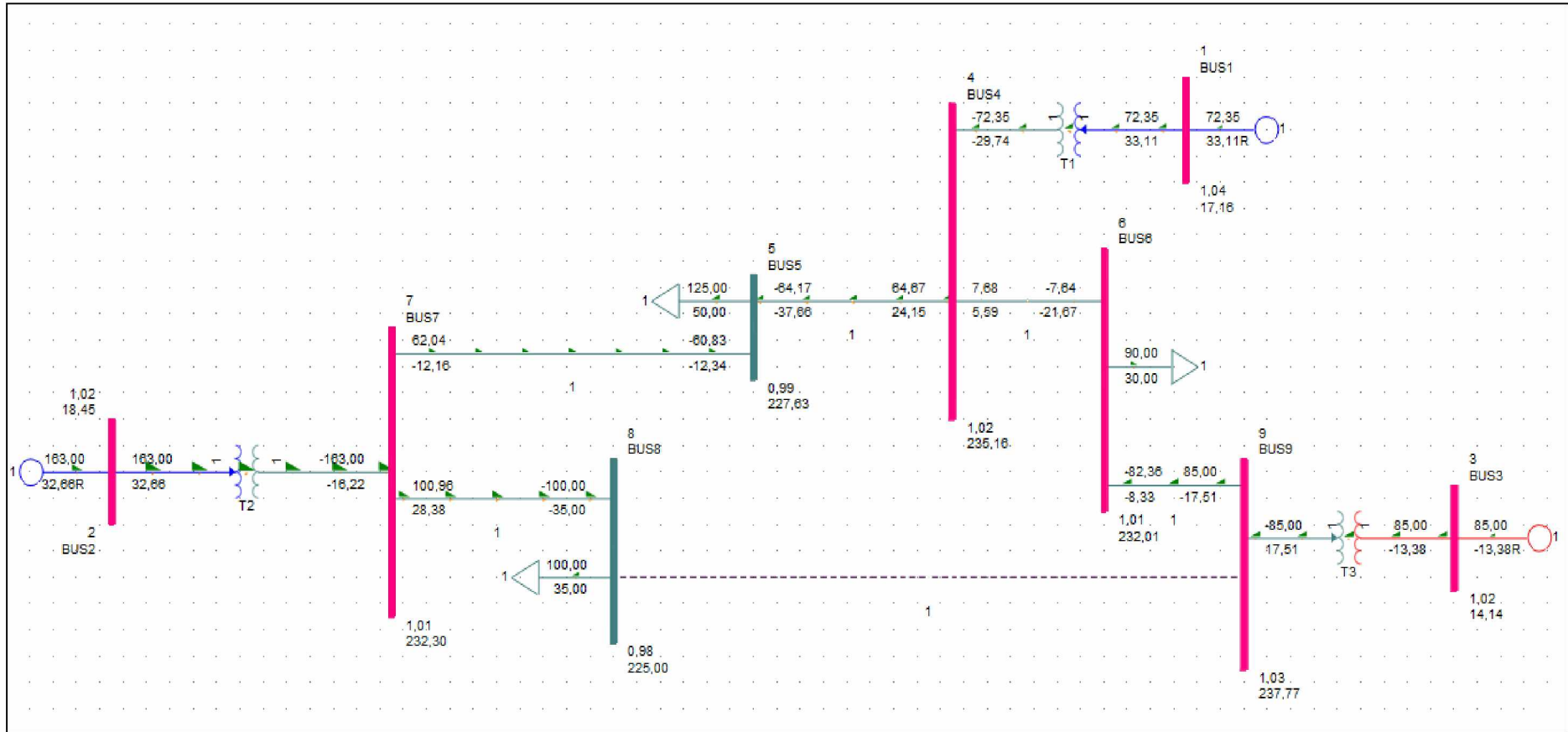
Πίνακας 7.7: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0224           |
| 5     | 0,9897           |
| 6     | 1,0087           |
| 7     | 1,01             |
| 8     | 0,9783           |
| 9     | 1,0338           |

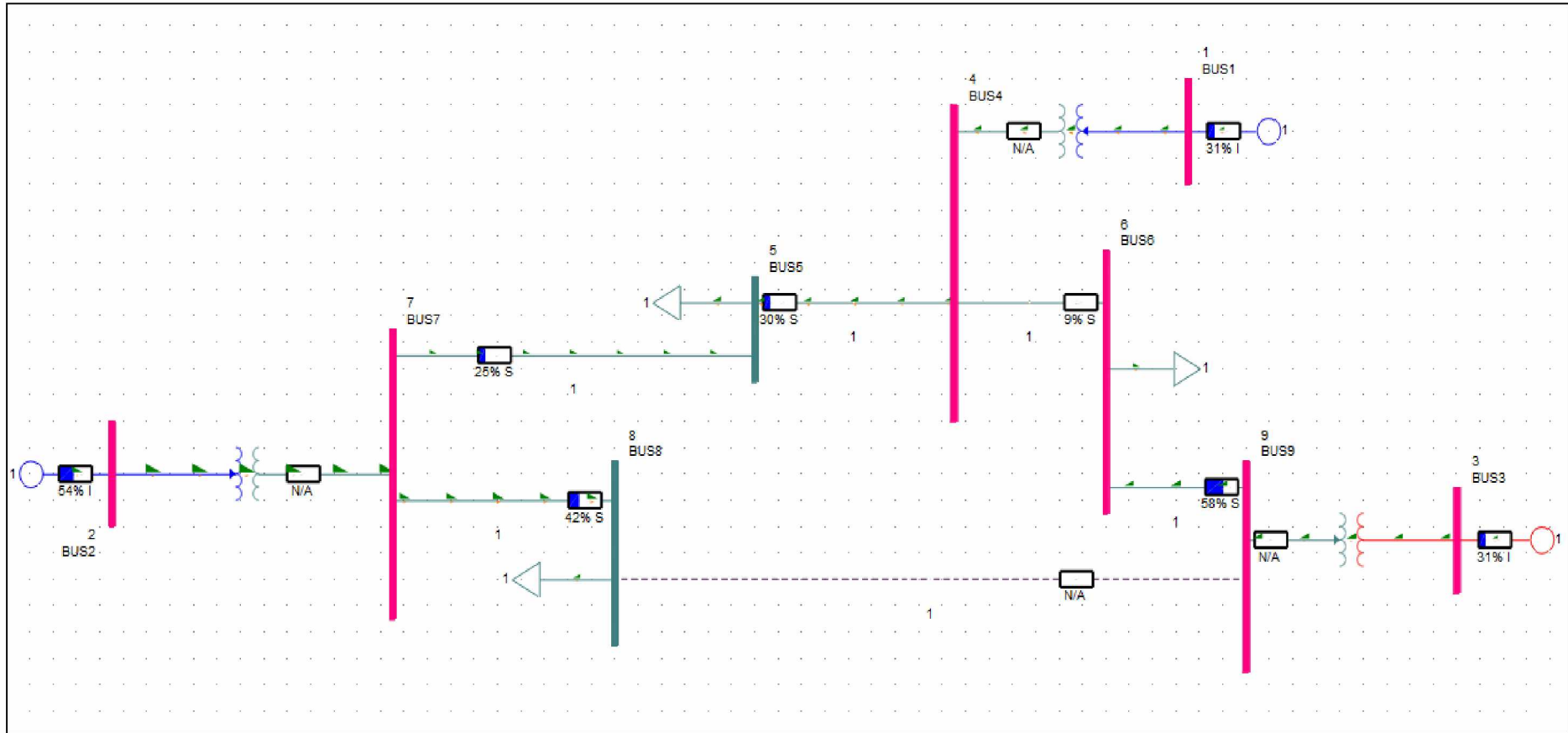
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.13 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.14 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.14 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 6 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 58% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.13: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.14: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.2.8 Αφαίρεση Γεννήτριας G2

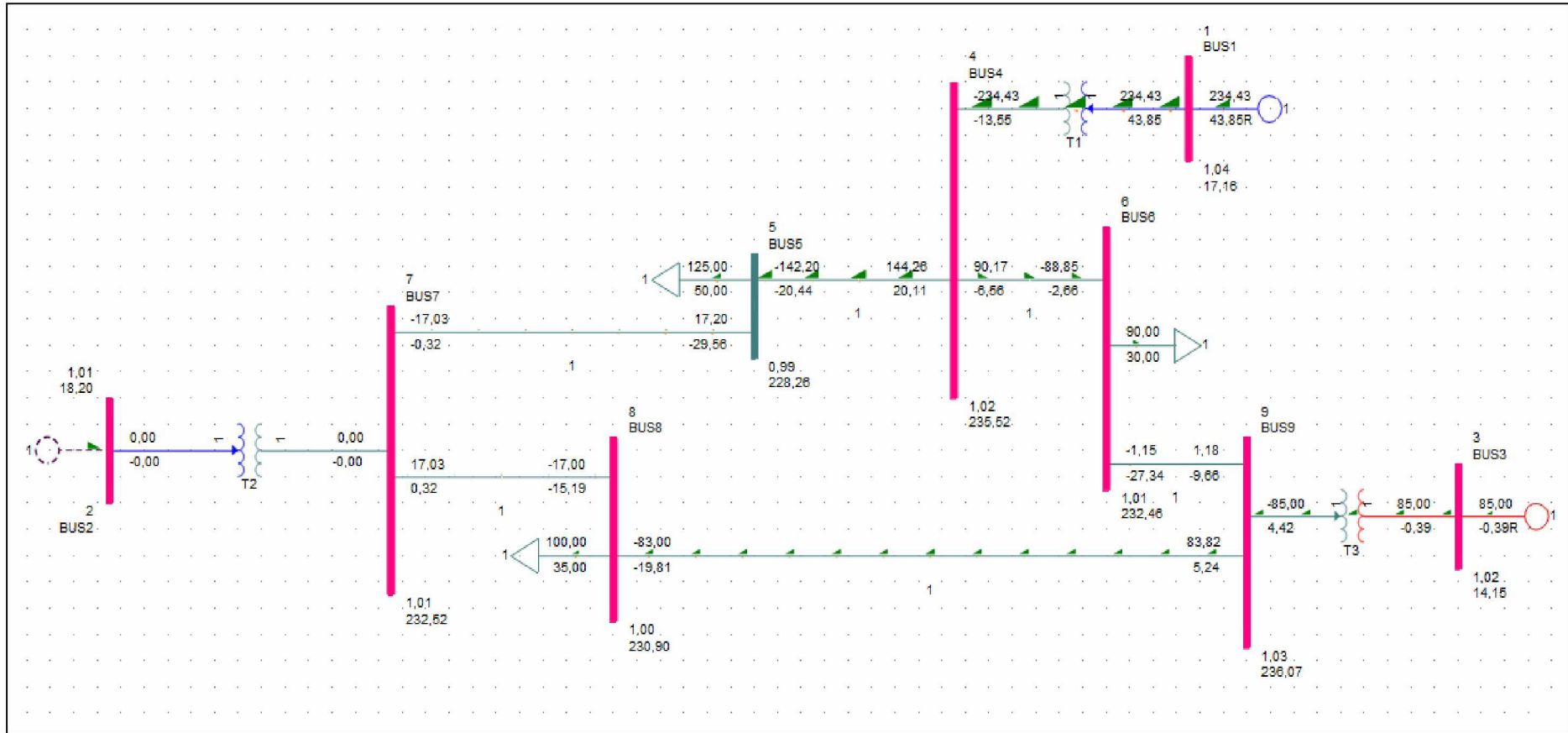
Η γεννήτρια G2 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.8.

Πίνακας 7.8: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2.

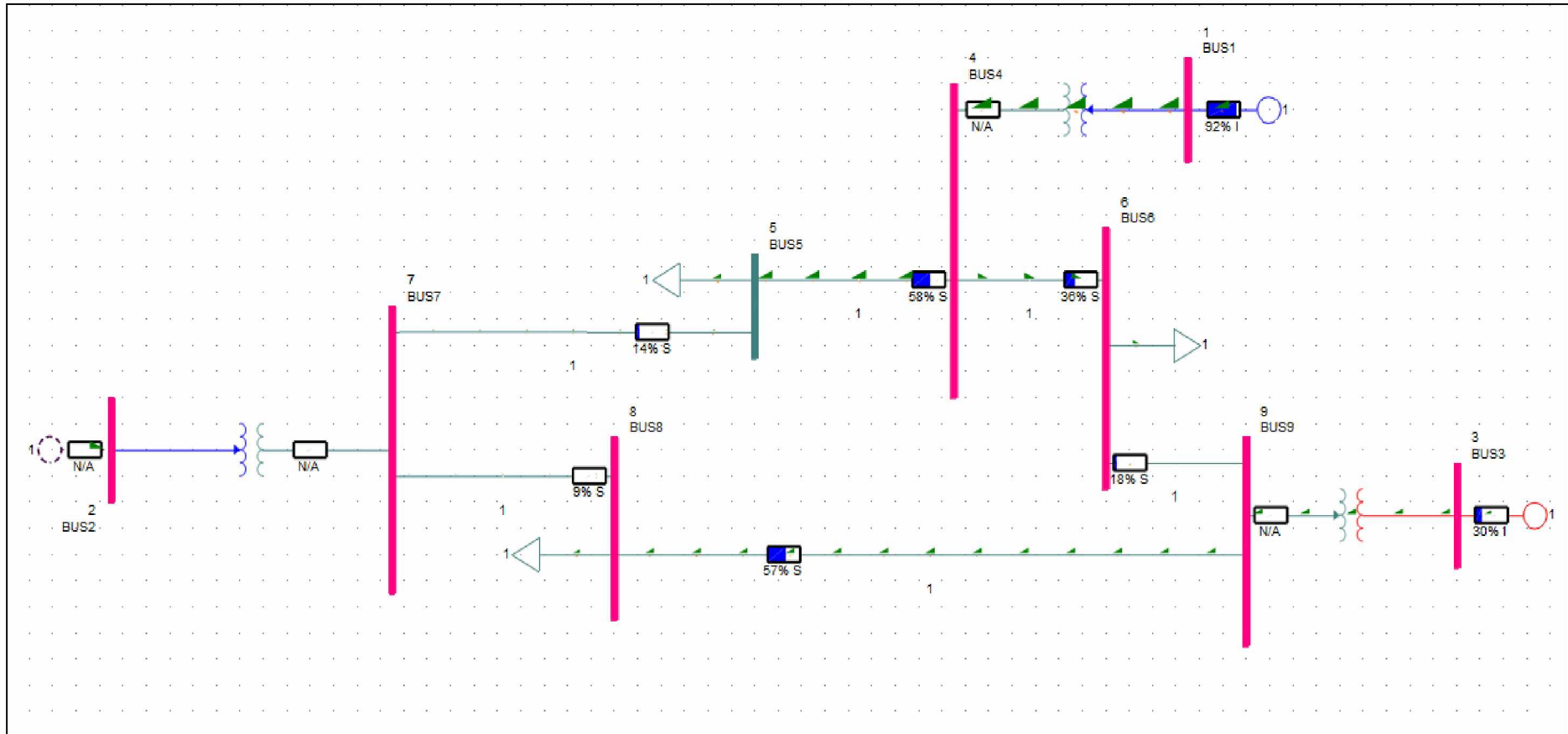
| <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)</b> |
|--------------|-------------------------|
| 1            | 1,04                    |
| 2            | 1,0109                  |
| 3            | 1,025                   |
| 4            | 1,024                   |
| 5            | 0,9924                  |
| 6            | 1,0107                  |
| 7            | 1,0109                  |
| 8            | 1,0039                  |
| 9            | 1,0264                  |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.15 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.16 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.16 παρατηρείται η φόρτιση της γεννήτριας G1 στο 92% (γεννήτρια συνδεδεμένη στον ζυγό αναφοράς 1), γεγονός που χρήζει άμεσης αντιμετώπισης.



Σχήμα 7.15: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.16: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.2.9 Αφαίρεση Γεννήτριας G3

Η γεννήτρια G3 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.9.

Πίνακας 7.9: Τάσεις ζυγών αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G3.

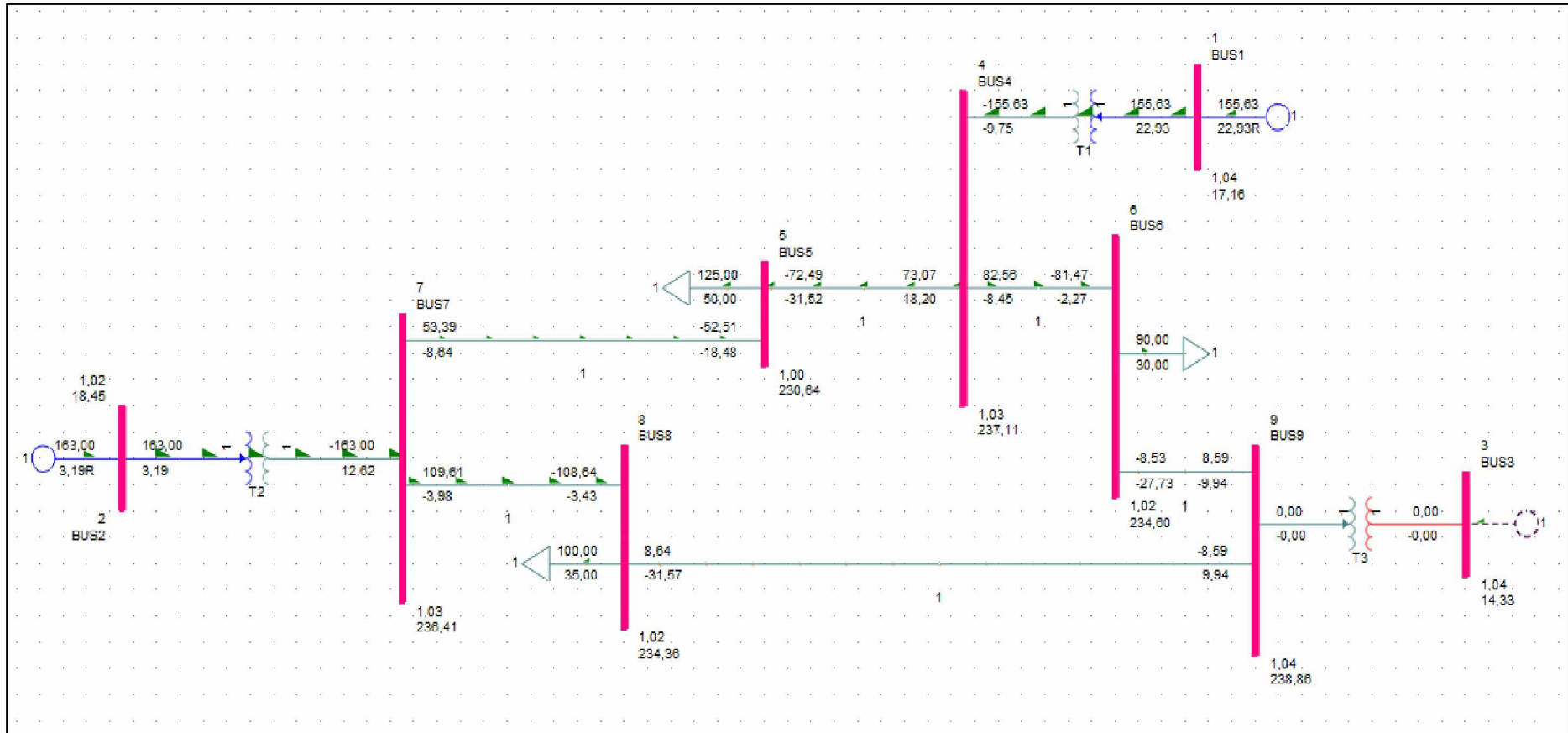
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,0385           |
| 4     | 1,0309           |
| 5     | 1,0028           |
| 6     | 1,02             |
| 7     | 1,0279           |
| 8     | 1,019            |
| 9     | 1,0385           |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

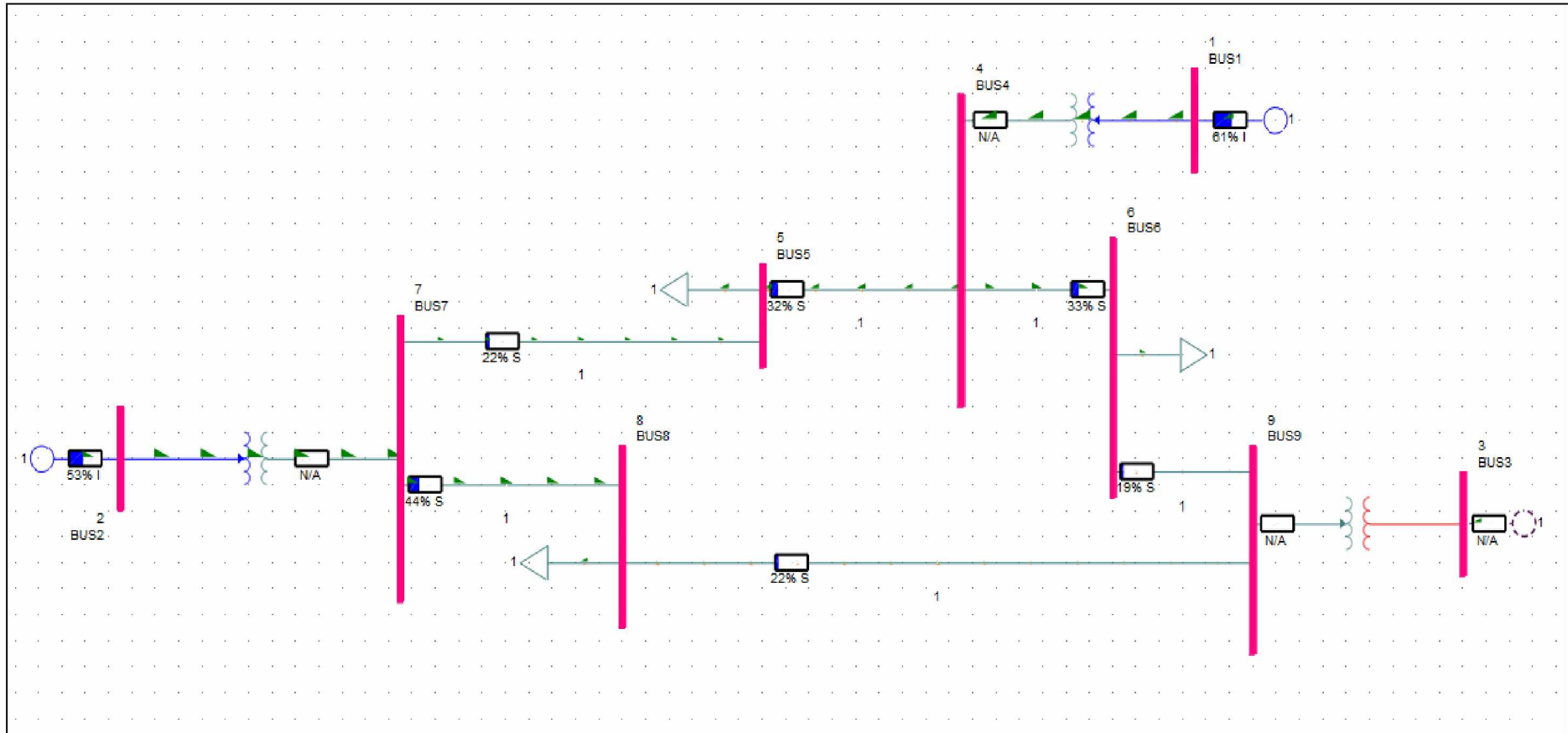
Στο Σχήμα 7.17 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.18 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.18 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G1 (γεννήτρια συνδεδεμένη στον ζυγό αναφοράς 1), η οποία διαμορφώνεται στο 61% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γεννήτριας G3 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.





Σχήμα 7.17: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος για το αρχικό σύστημα, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G3 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.18: Φορτίσεις στοιχείων αρχικού συστήματος, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G3 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.2.10 Αξιολόγηση Διαταραχών – Εύρεση Χειρότερης Περίπτωσης

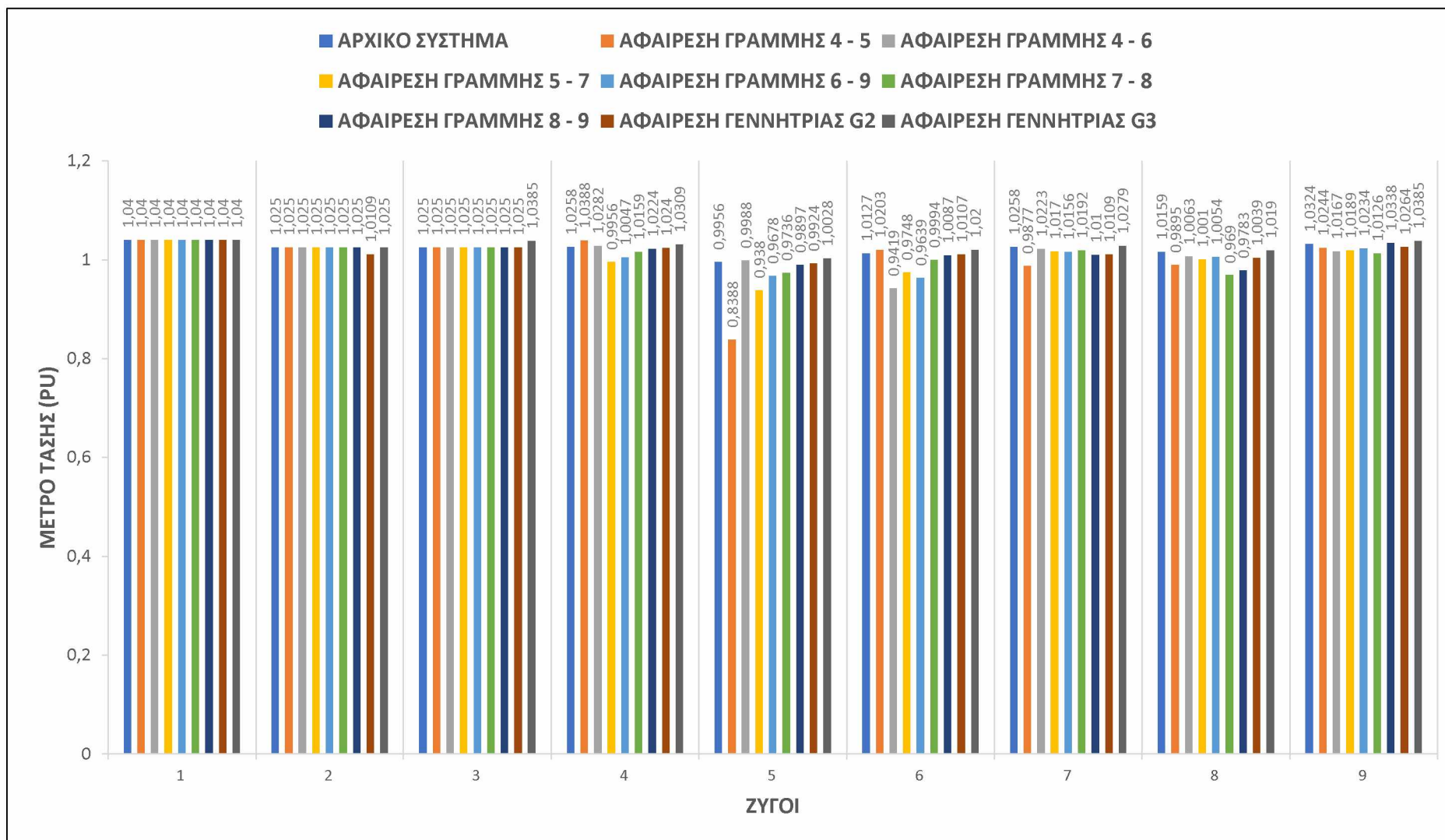
Μετά την προσομοίωση των διαταραχών, τη συλλογή και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ποια από τις διαταραχές αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση για το μελετώμενο σύστημα, ούτως ώστε να προσδιοριστούν τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του. Η αξιολόγηση αυτή των διαταραχών γίνεται τόσο βάσει των τάσεων των ζυγών του συστήματος, όσο και βάσει των φορτίσεων των διαφόρων συνιστωσών του.

Οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, καταγράφονται στον Πίνακα 7.10 και απεικονίζονται γραφικά στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.19.

Οι μεταβολές στις τιμές των τάσεων των ζυγών του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, καταγράφονται στον Πίνακα 7.11 και απεικονίζονται γραφικά στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.20.

Πίνακας 7.10: Τάσεις ζυγών συστήματος για όλα τα σενάρια διαταραχών.

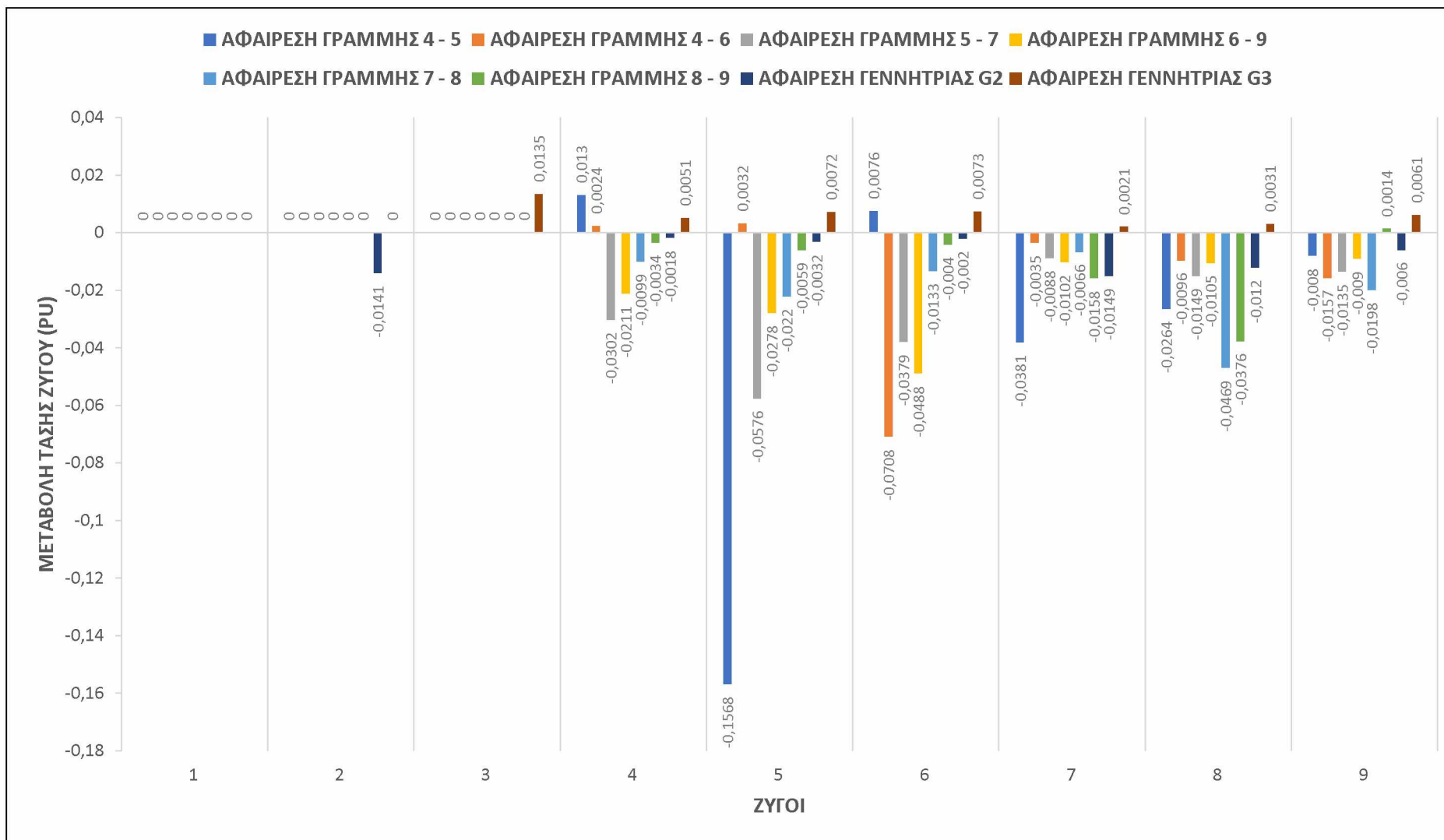
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)  |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|-------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|       | ΑΡΧΙΚΟ<br>ΣΥΣΤΗΜΑ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3 |
|       | 1                 | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         |
| 2     | 1,025             | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,0109                       | 1,025                        |
| 3     | 1,025             | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,0385                       |
| 4     | 1,0258            | 1,0388                       | 1,0282                       | 0,9956                       | 1,0047                       | 1,0159                       | 1,0224                       | 1,024                        | 1,0309                       |
| 5     | 0,9956            | 0,8388                       | 0,9988                       | 0,938                        | 0,9678                       | 0,9736                       | 0,9897                       | 0,9924                       | 1,0028                       |
| 6     | 1,0127            | 1,0203                       | 0,9419                       | 0,9748                       | 0,9639                       | 0,9994                       | 1,0087                       | 1,0107                       | 1,02                         |
| 7     | 1,0258            | 0,9877                       | 1,0223                       | 1,017                        | 1,0156                       | 1,0192                       | 1,01                         | 1,0109                       | 1,0279                       |
| 8     | 1,0159            | 0,9895                       | 1,0063                       | 1,001                        | 1,0054                       | 0,969                        | 0,9783                       | 1,0039                       | 1,019                        |
| 9     | 1,0324            | 1,0244                       | 1,0167                       | 1,0189                       | 1,0234                       | 1,0126                       | 1,0338                       | 1,0264                       | 1,0385                       |



Σχήμα 7.19: Ραβδόγραμμα τάσεων ζυγών συστήματος για όλα τα σενάρια διαταραχών.

Πίνακας 7.11: Μεταβολή μέτρου τάσης ζυγών συστήματος για όλα τα σενάρια διαταραχών.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΟΥ ( $\rho_u$ ) |                     |                     |                     |                     |                     |                        |                        |
|-------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
|       | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ                      | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ |
|       | 4 - 5                                    | 4 - 6               | 5 - 7               | 6 - 9               | 7 - 8               | 8 - 9               | G2                     | G3                     |
| 1     | 0  | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                      | 0                      |
| 2     | 0  | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -0,0141                | 0                      |
| 3     | 0  | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                      | 0,0135                 |
| 4     | 0,013                                    | 0,0024              | -0,0302             | -0,0211             | -0,0099             | -0,0034             | -0,0018                | 0,0051                 |
| 5     | -0,1568                                  | 0,0032              | -0,0576             | -0,0278             | -0,022              | -0,0059             | -0,0032                | 0,0072                 |
| 6     | 0,0076                                   | -0,0708             | -0,0379             | -0,0488             | -0,0133             | -0,004              | -0,002                 | 0,0073                 |
| 7     | -0,0381                                  | -0,0035             | -0,0088             | -0,0102             | -0,0066             | -0,0158             | -0,0149                | 0,0021                 |
| 8     | -0,0264                                  | -0,0096             | -0,0149             | -0,0105             | -0,0469             | -0,0376             | -0,012                 | 0,0031                 |
| 9     | -0,008                                   | -0,0157             | -0,0135             | -0,009              | -0,0198             | 0,0014              | -0,006                 | 0,0061                 |



Σχήμα 7.20: Ραβδόγραμμα μεταβολών μέτρου τάσης ζυγών συστήματος για όλα τα σενάρια διαταραχών.

Παρατηρώντας το ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.20, η μεγαλύτερη πτώση τάσης καταγράφεται στον ζυγό 5, κατά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (-0,1568pu). Από την άλλη, η μεγαλύτερη αύξηση τάσης εντοπίζεται στον ζυγό 3, κατά την αφαίρεση της γεννήτριας G3 (0,0135pu).

Για καθεμία από τις διαταραχές, επιλέγεται ο ζυγός με τη μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή της τάσης. Στη συνέχεια, τα σενάρια των διαταραχών ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά μεταβολής τάσης, διαμορφώνοντας έτσι τον Πίνακα 7.12.

Πίνακας 7.12: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τη μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή της τάσης ζυγού.

| ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                         | ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ | ΖΥΓΟΣ    |
|-----------------------------------|------------------------|----------|
| <b>ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br/>4 - 5</b> | <b>0,1568</b>          | <b>5</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6         | 0,0708                 | 6        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7         | 0,0576                 | 5        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9         | 0,0488                 | 6        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8         | 0,0469                 | 8        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9         | 0,0376                 | 8        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2         | 0,0149                 | 7        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3         | 0,0135                 | 3        |

Από τον Πίνακα 7.12 προκύπτει ότι η χειρότερη διαταραχή, όσον αφορά τη μεταβολή της τάσης, είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5, καθώς οδηγεί στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 5 κατά 0,1568pu. Η δεύτερη χειρότερη διαταραχή είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6, η οποία οδηγεί στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 6 κατά 0,0708pu.

Τέλος, οι φορτίσεις των στοιχείων του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, παρατίθενται στον Πίνακα 7.13:



Πίνακας 7.13: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος για το σύνολο των διαταραχών.

| ΣΤΟΙΧΕΙΟ     | ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (%) |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|--------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|              | ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ      | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 5 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G2 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G3 |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1 | 29%                   | 29%                    | 29%                    | 44%                    | 39%                    | 35%                    | 31%                    | <b>92%</b>             | <b>61%</b>             |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2 | 53%                   | 57%                    | 53%                    | 53%                    | 53%                    | 53%                    | 54%                    | X                      | 53%                    |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G3 | 31%                   | 30%                    | 31%                    | 31%                    | 30%                    | 32%                    | 31%                    | 30%                    | X                      |
| ΓΡΑΜΜΗ 4 - 5 | 22%                   | X                      | 32%                    | 55%                    | 22%                    | 27%                    | 30%                    | 58%                    | 32%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 4 - 6 | 14%                   | 31%                    | X                      | 24%                    | 38%                    | 43%                    | 9%                     | 36%                    | 33%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7 | 35%                   | <b>59%</b>             | 22%                    | X                      | <b>59%</b>             | 65%                    | 25%                    | 14%                    | 22%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9 | 42%                   | 16%                    | <b>63%</b>             | <b>97%</b>             | X                      | 22%                    | <b>58%</b>             | 18%                    | 19%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 7 - 8 | 31%                   | 13%                    | 44%                    | 65%                    | 10%                    | X                      | 42%                    | 9%                     | 44%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9 | 23%                   | 52%                    | 16%                    | 46%                    | 57%                    | <b>71%</b>             | X                      | 57%                    | 22%                    |

Από τον Πίνακα 7.13, για κάθε διαταραχή, εντοπίζεται το στοιχείο που παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό (%) φόρτισης. Έτσι, διαμορφώνεται ο Πίνακας 7.14:

Πίνακας 7.14: Στοιχεία συστήματος με το μέγιστο ποσοστό (%) φόρτισης για όλα τα σενάρια διαταραχών.

| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>          | <b>ΣΤΟΙΧΕΙΟ<br/>ΜΕ ΤΗ<br/>ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ</b> | <b>ΦΟΡΤΙΣΗ (%)</b> |
|---------------------------|---|--------------------|
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7                                  | 59%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 63%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 97%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7                                  | 59%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                                  | 71%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 58%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                                  | 92%                |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                                  | 61%                |

Στη συνέχεια, οι διαταραχές του Πίνακα 7.14 ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά φόρτισης, διαμορφώνοντας τον Πίνακα 7.15:

Πίνακας 7.15: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τα ποσοστά (%) φόρτισης.

| ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                         | ΣΤΟΙΧΕΙΟ<br>ΜΕ ΤΗ<br>ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ | ΦΟΡΤΙΣΗ (%) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| <b>ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br/>5 - 7</b> | <b>ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9</b>                  | <b>97%</b>  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                         | 92%         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8         | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                         | 71%         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6         | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                         | 63%         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                         | 61%         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5         | ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7                         | 59%         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9         | ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7                         | 59%         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9         | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                         | 58%         |

Από τον Πίνακα 7.15 προκύπτει ότι η χειρότερη διαταραχή, όσον αφορά τις φορτίσεις στοιχείων του συστήματος, είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7, καθώς οδηγεί στη φόρτιση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 στο 97%. Η δεύτερη χειρότερη διαταραχή είναι η αφαίρεση της γεννήτριας G2, η οποία οδηγεί την γεννήτρια G1 σε φόρτιση 92%.

### 7.3 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστήματος παρουσία Αιολικού Πάρκου, ισχύος 15% της ζήτησης, συνδεδεμένου στον Ζυγό 5

#### 7.3.1 Σύστημα χωρίς διαταραχή

Όπως προέκυψε από τις μελέτες της Ενότητας 6.4, για το σύστημα των 9 ζυγών του IEEE, ο ζυγός σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου ισχύος 15% της πραγματικής ζήτησης φορτίου (48MW), ο οποίος παρουσιάζει τις ελάχιστες απώλειες πραγματικής ισχύος για το σύστημα, είναι ο ζυγός 5. Υπενθυμίζεται ότι το αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο στον ζυγό 10, όπου μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης συνδέεται με τον ζυγό 5 και κατ' επέκταση με το υπόλοιπο σύστημα.

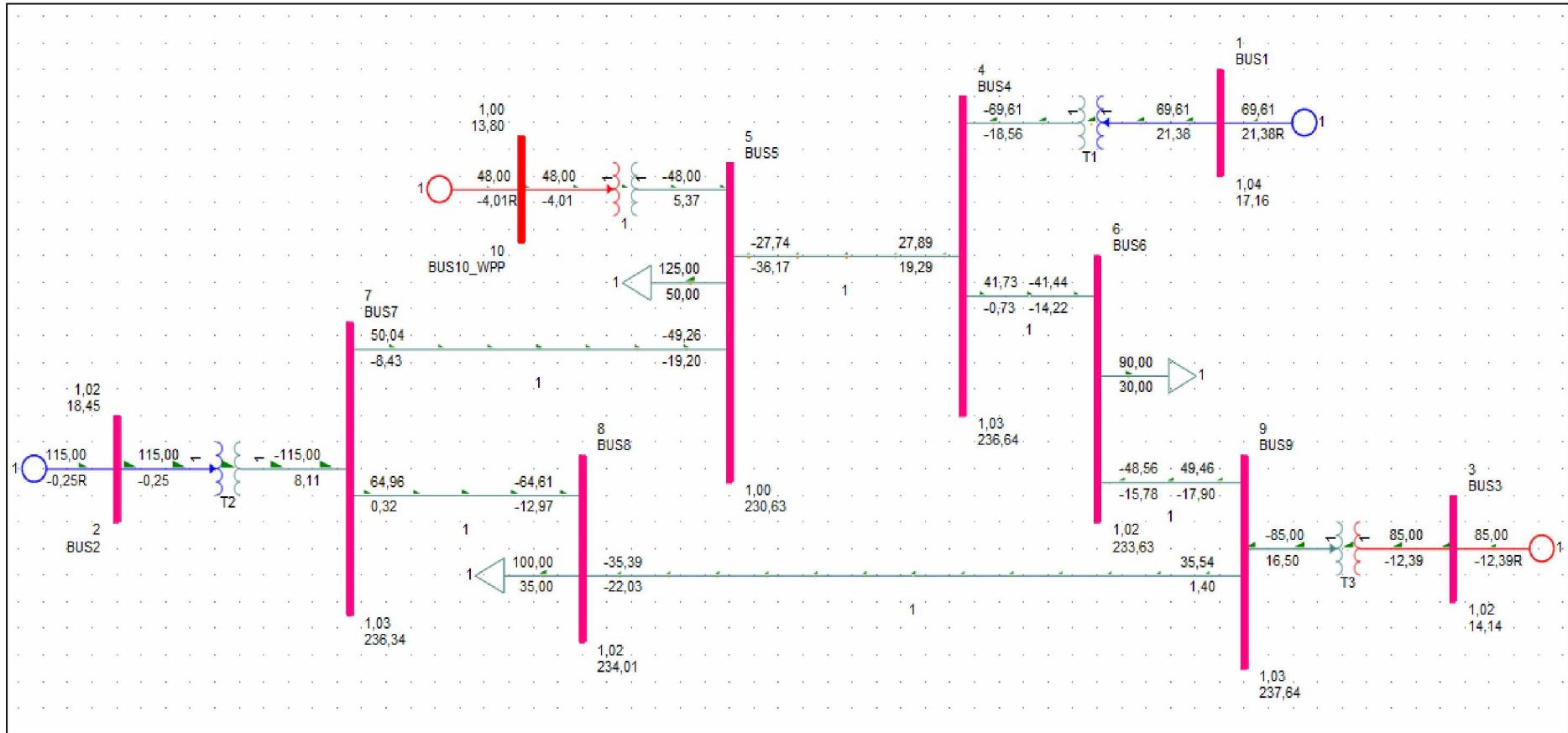
Για το σύστημα αυτό, χωρίς την παρουσία κάποιας διαταραχής, εκτελείται η λειτουργία της Ροής Φορτίου. Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών στο ανά μονάδα σύστημα (pu) διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.16.

Πίνακας 7.16: Τάσεις ζυγών συστήματος, με αιολικό πάρκο ισχύος 48MW συνδεδεμένο στον ζυγό 5, χωρίς την παρουσία διαταραχής.

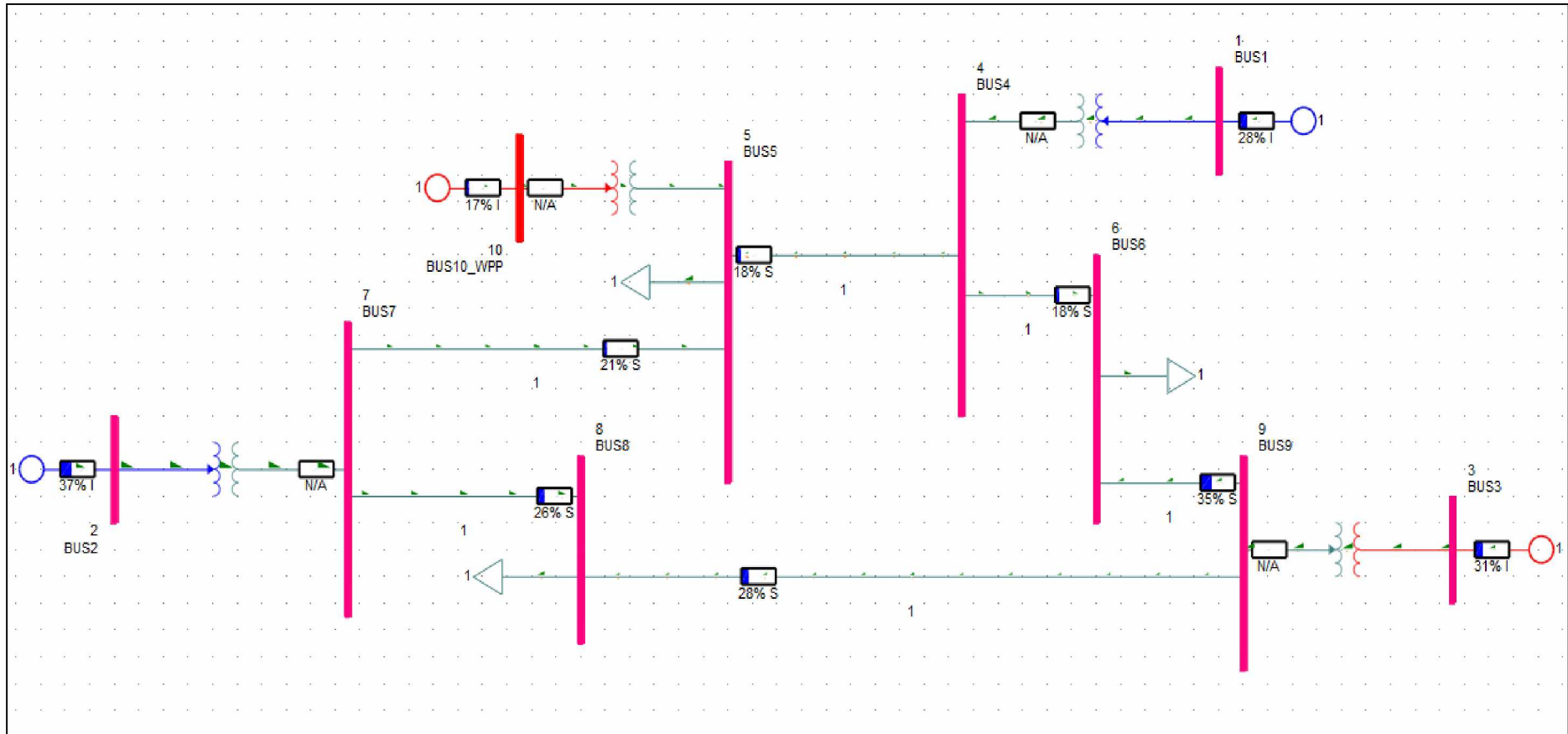
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0289           |
| 5     | 1,0027           |
| 6     | 1,0158           |
| 7     | 1,0275           |
| 8     | 1,0174           |
| 9     | 1,0332           |
| 10    | 1                |

Οι ροές ισχύος, καθώς και οι τάσεις των ζυγών, απεικονίζονται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 7.21, ενώ οι φορτίσεις των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς του συστήματος στο Σχήμα 7.22. Όπως γίνεται φανερό, τα μέτρα των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ), ενώ κανένα από τα στοιχεία του

συστήματος δεν είναι υπερφορτισμένο. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-4,01 MVAR).



Σχήμα 7.21: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, χωρίς την παρουσία διαταραχής.



Σχήμα 7.22: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, χωρίς την παρουσία διαταραχής.

### 7.3.2 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5

Η γραμμή μεταφοράς 4 – 5 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.17.

Πίνακας 7.17: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0399           |
| 5     | 0,9605           |
| 6     | 1,0237           |
| 7     | 1,0179           |
| 8     | 1,0108           |
| 9     | 1,0318           |
| 10    | 0,974            |

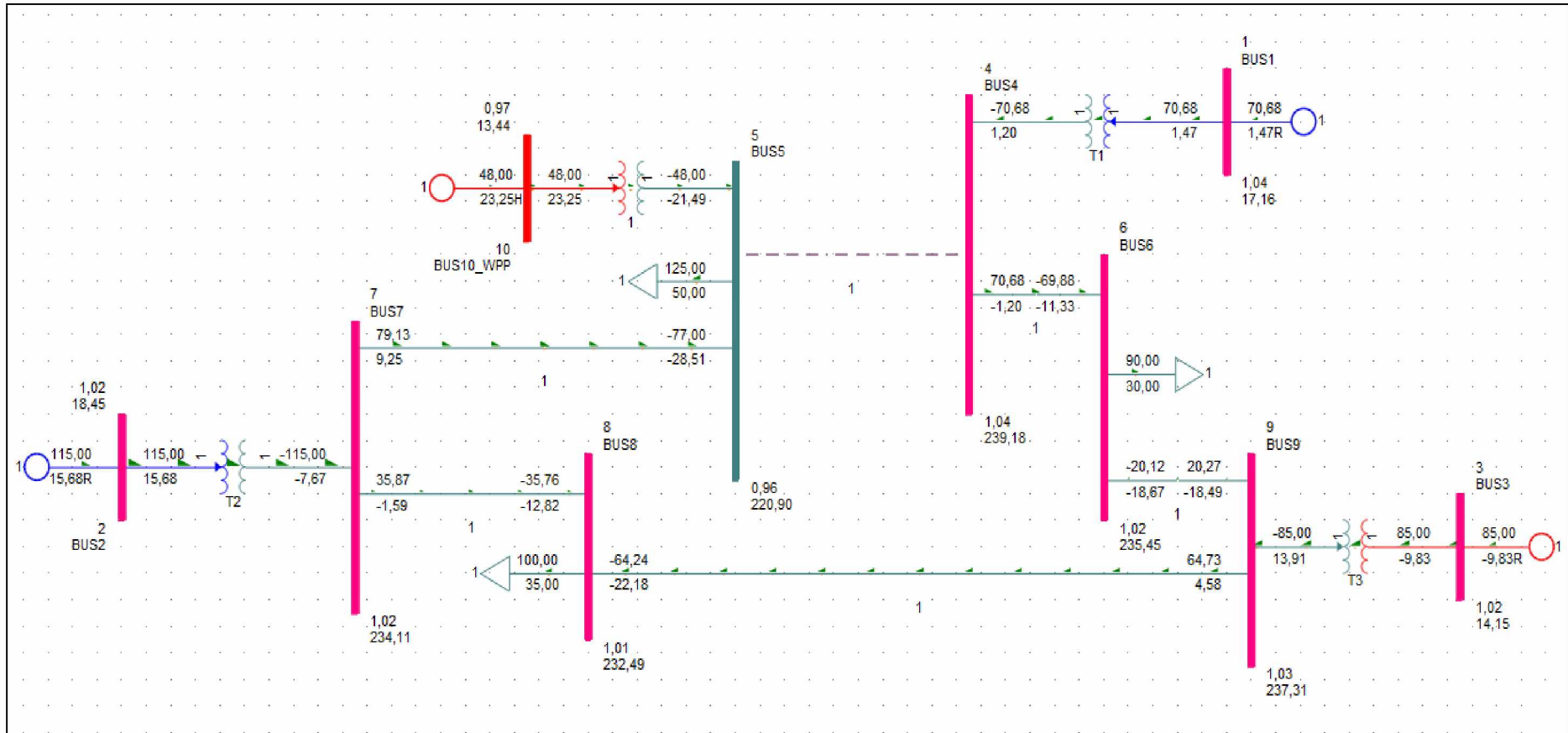
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95pu < V < 1,05pu$ ).

Στο Σχήμα 7.23 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.24 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 προκαλεί πτώση της τάσης του ζυγού 5 (σημειώνεται με πορτοκαλί στον Πίνακα 7.17), λόγω της μεγάλης συμβολής της στην παροχή έργου ισχύος προς αυτόν πριν την διαταραχή. Για τον λόγο αυτό, μετά την αφαίρεσή της, το αιολικό πάρκο παρέχει έργο ισχύος προς τον ζυγό 5 και το δίκτυο, κατά το μέγιστο μάλιστα των δυνατοτήτων του (23,25MVAR), γεγονός που οδηγεί στην πτώση της τάσης του ζυγού 10 (σημειώνεται με πορτοκαλί στον Πίνακα 7.17). Παρόλα αυτά, οι τιμές των τάσεων των ζυγών 5 και 10 παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

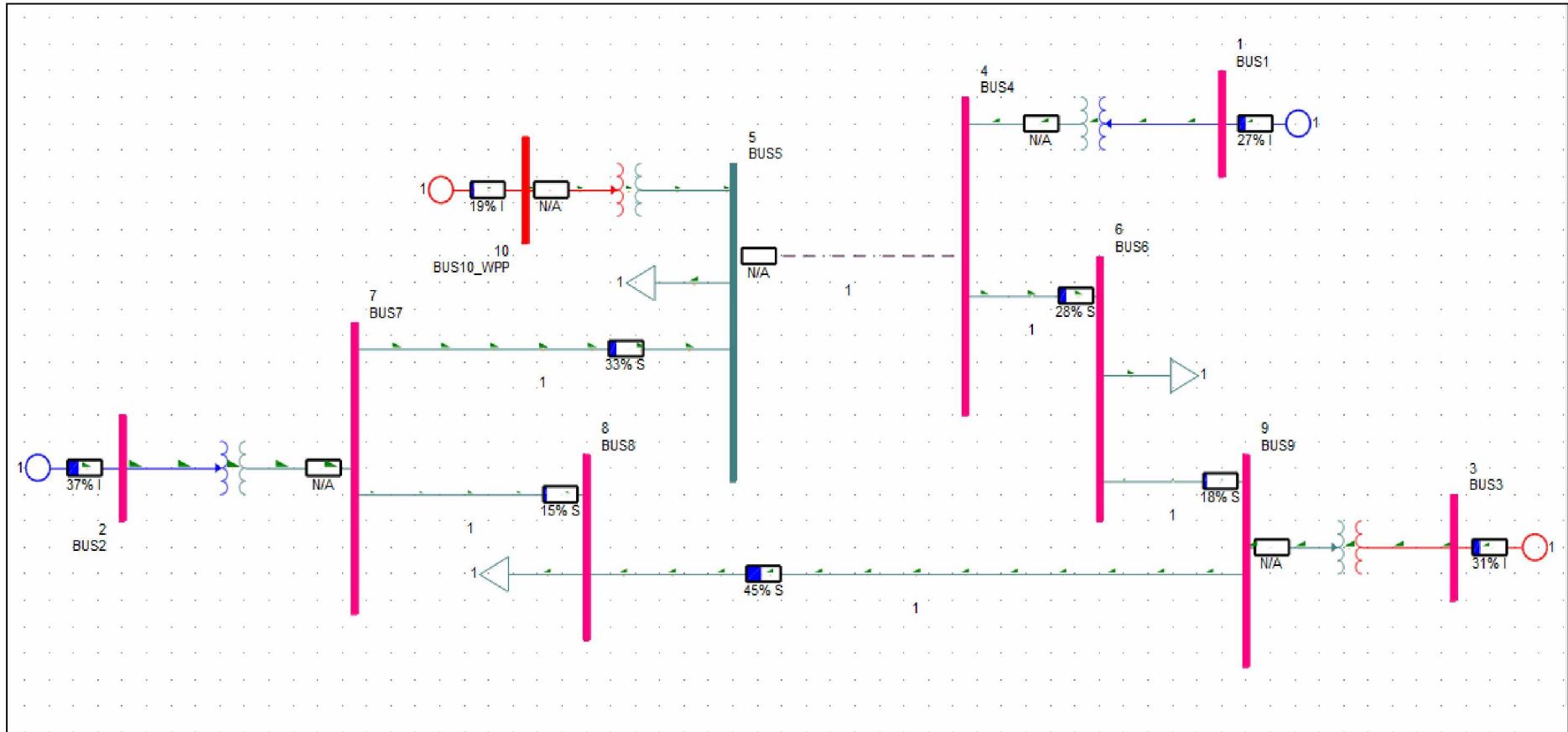


Από το Σχήμα 7.24 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 8 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 45% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Παρόλα αυτά, κρίνεται απαραίτητη η λήψη μέτρων για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος του ζυγού 5, για την επαναφορά της τάσης του στα επίπεδα πριν την διαταραχή.



Σχήμα 7.23: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.24: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.3 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6

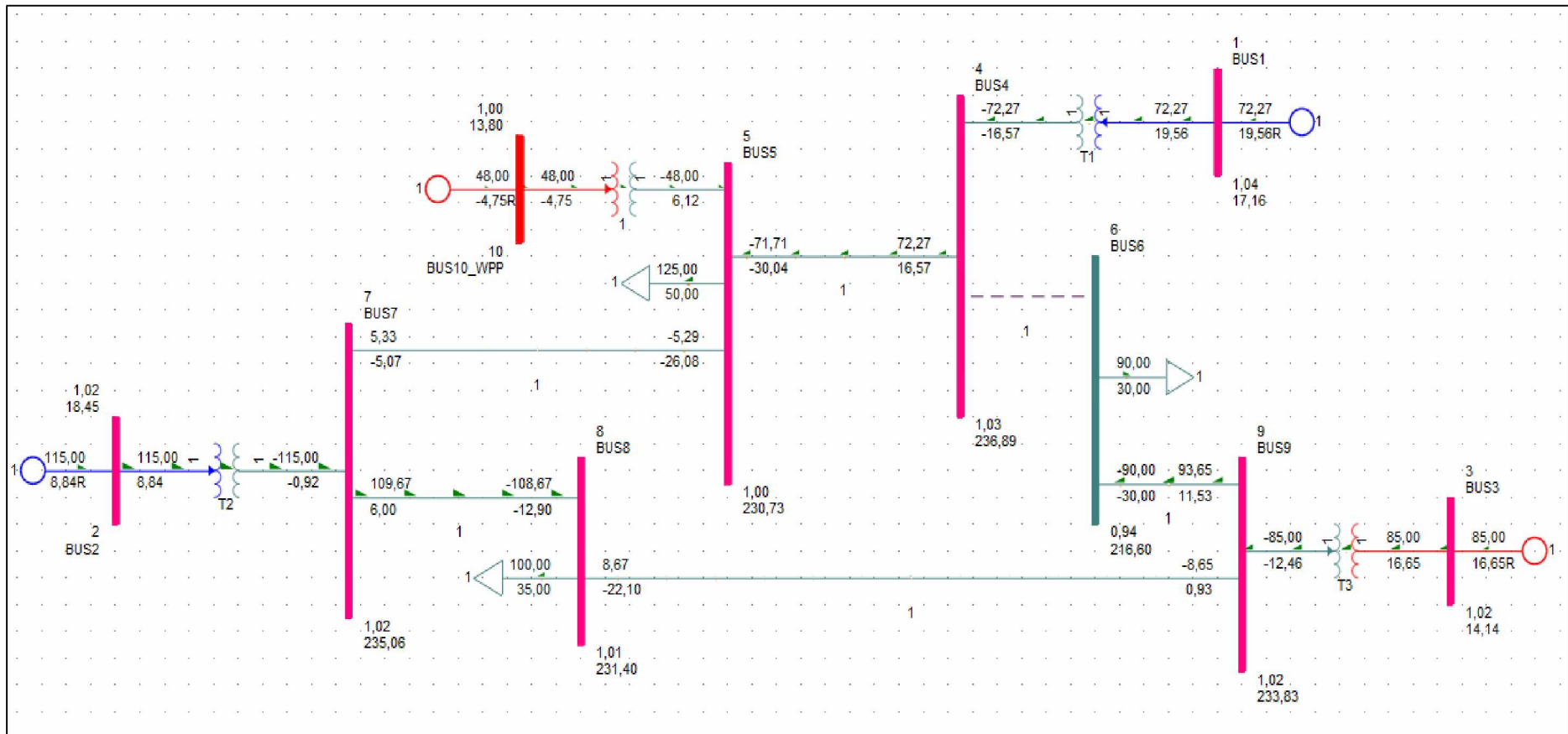
Η γραμμή μεταφοράς 4 – 6 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.18.

Πίνακας 7.18: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6.

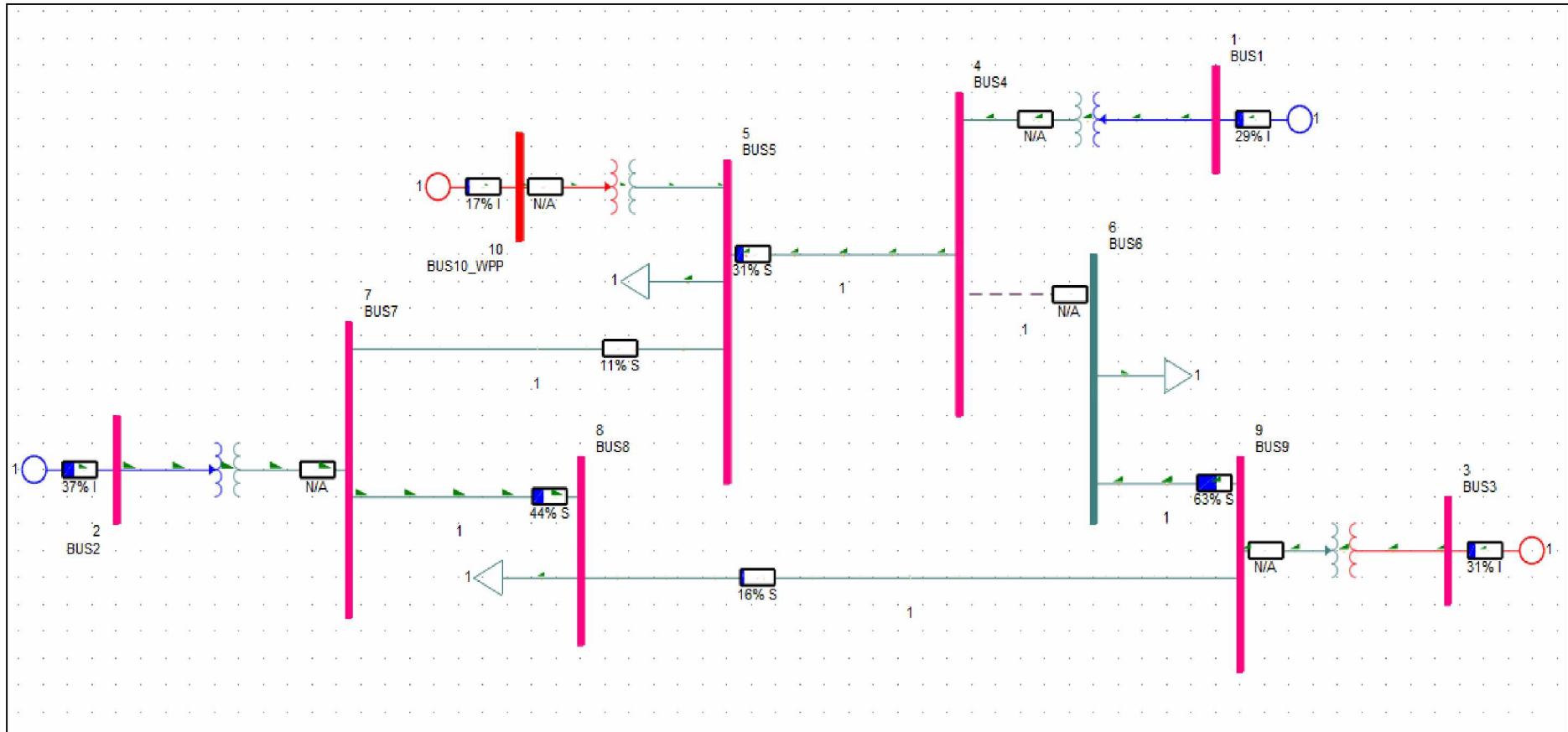
| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| 3        | 1,025            |
| 4        | 1,0299           |
| 5        | 1,0032           |
| <b>6</b> | <b>0,9417</b>    |
| 7        | 1,022            |
| 8        | 1,0061           |
| 9        | 1,0166           |
| 10       | 1                |

Η τάση του ζυγού 6 διαμορφώνεται στα 0,9417pu, τιμή η οποία είναι μικρότερη του κατώτατου ορίου των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση της τάσης του ζυγού 6 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.25 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.26 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.26 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 6 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 63% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-4,75 MVAR).



Σχήμα 7.25: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.26: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.4 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7

Η γραμμή μεταφοράς 5 – 7 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.19.

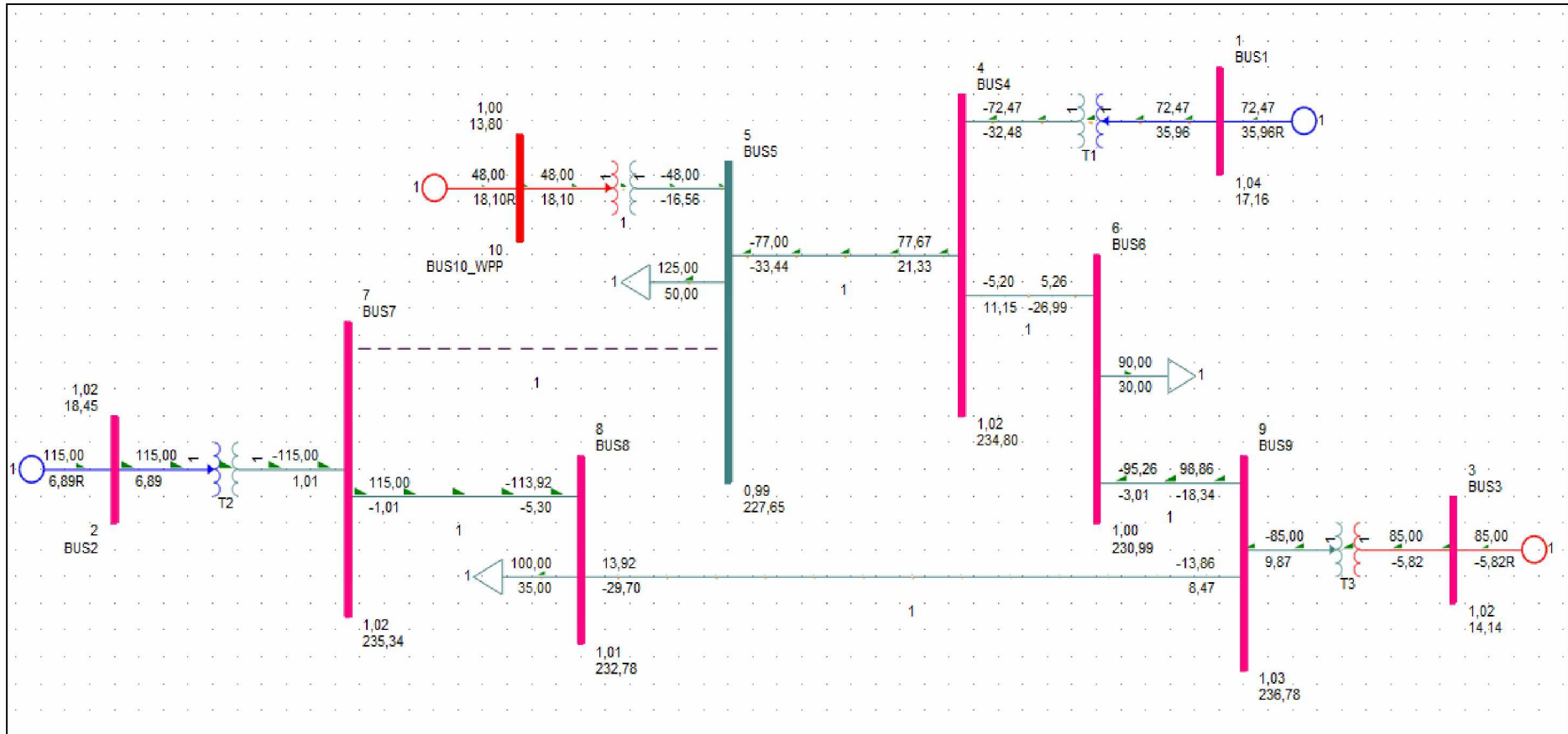
Πίνακας 7.19: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0209           |
| 5     | 0,9898           |
| 6     | 1,0043           |
| 7     | 1,0232           |
| 8     | 1,0121           |
| 9     | 1,0295           |
| 10    | 1                |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

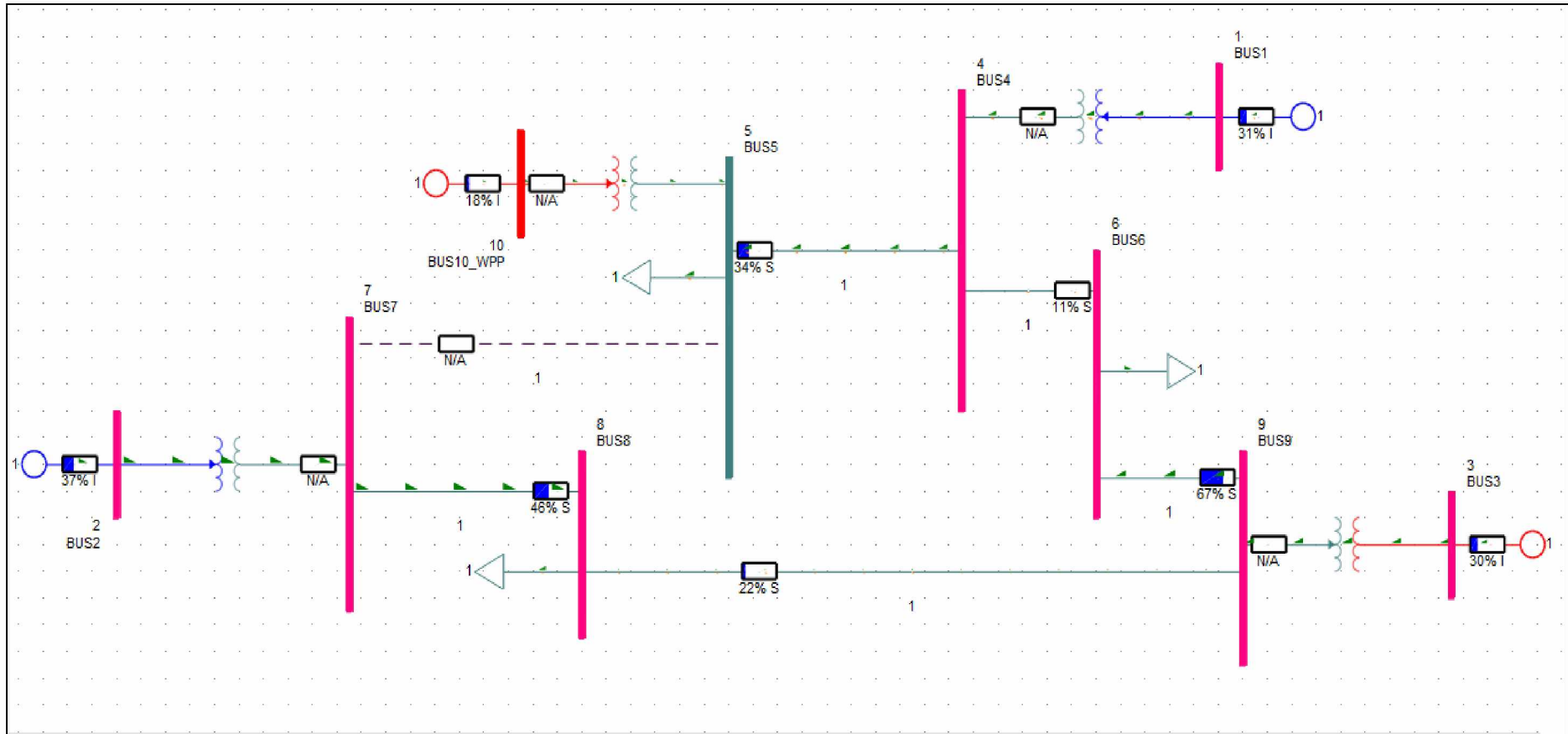
Στο Σχήμα 7.27 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.28 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.28 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 6 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 67% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (18,10 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.27: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).





Σχήμα 7.28: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.5 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9

Η γραμμή μεταφοράς 6 – 9 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.20.

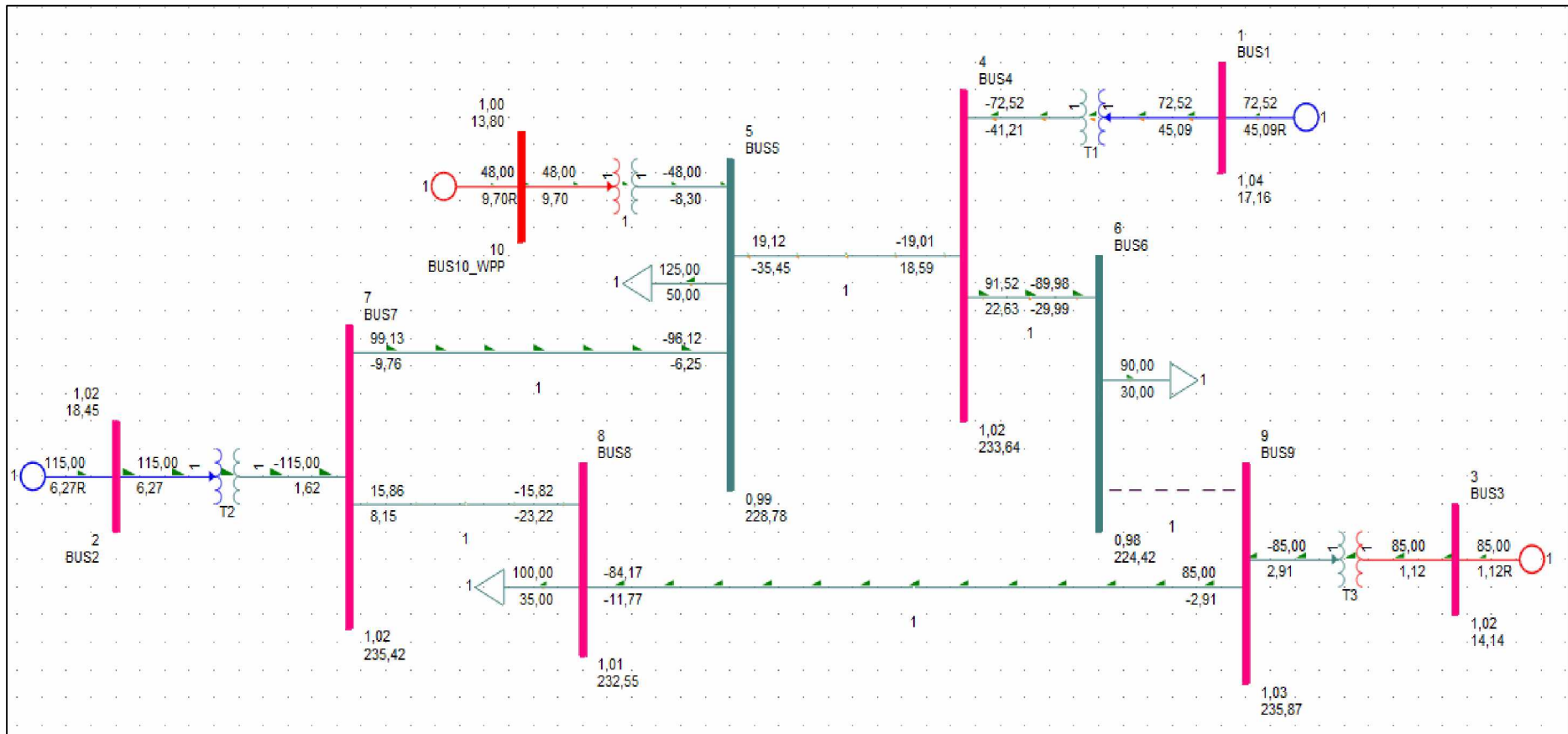
Πίνακας 7.20: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0158           |
| 5     | 0,9947           |
| 6     | 0,9757           |
| 7     | 1,0236           |
| 8     | 1,0111           |
| 9     | 1,0255           |
| 10    | 1                |

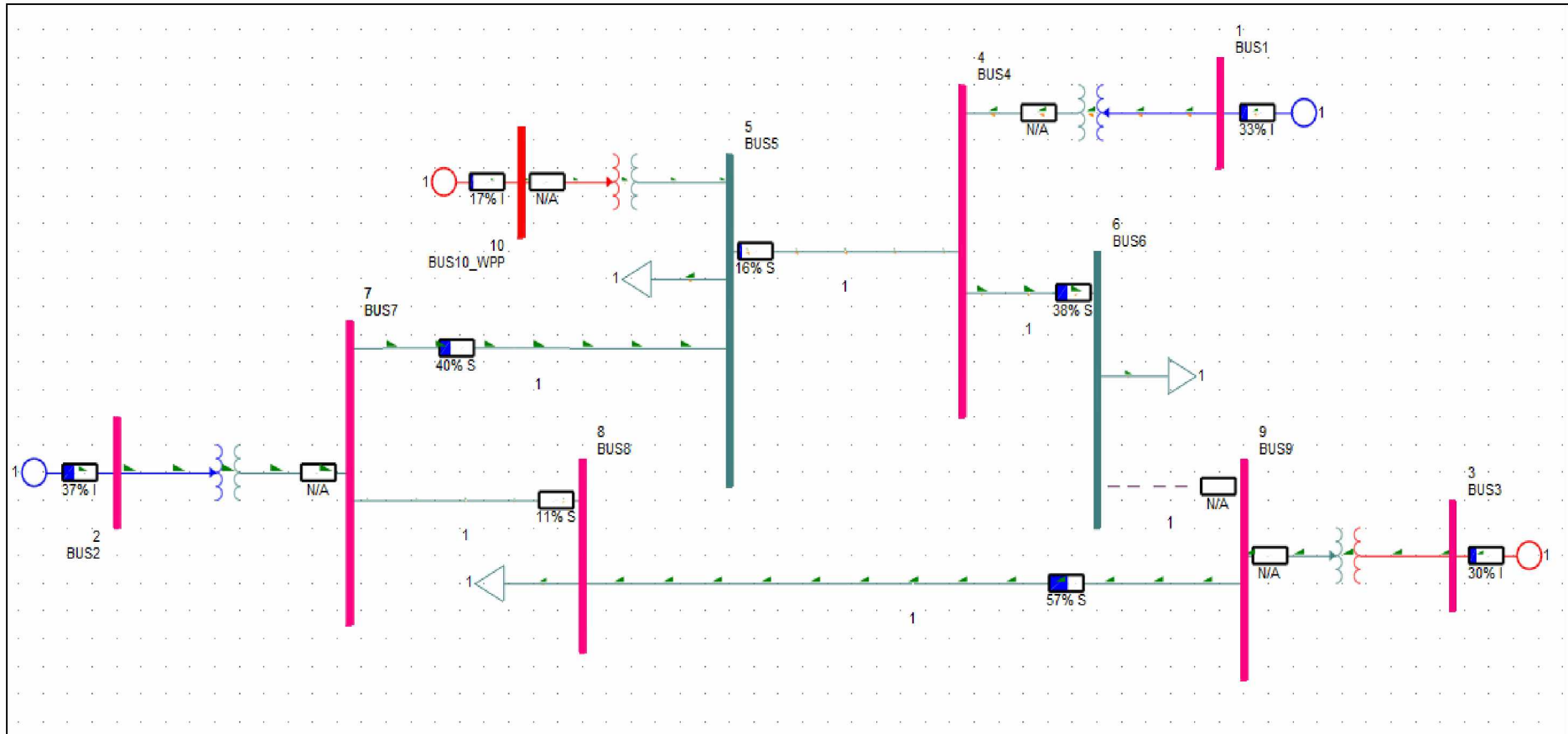
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.29 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.30 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.30 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 8 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 57% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (9,70 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.29: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.30: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.6 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8

Η γραμμή μεταφοράς 7 – 8 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.21.

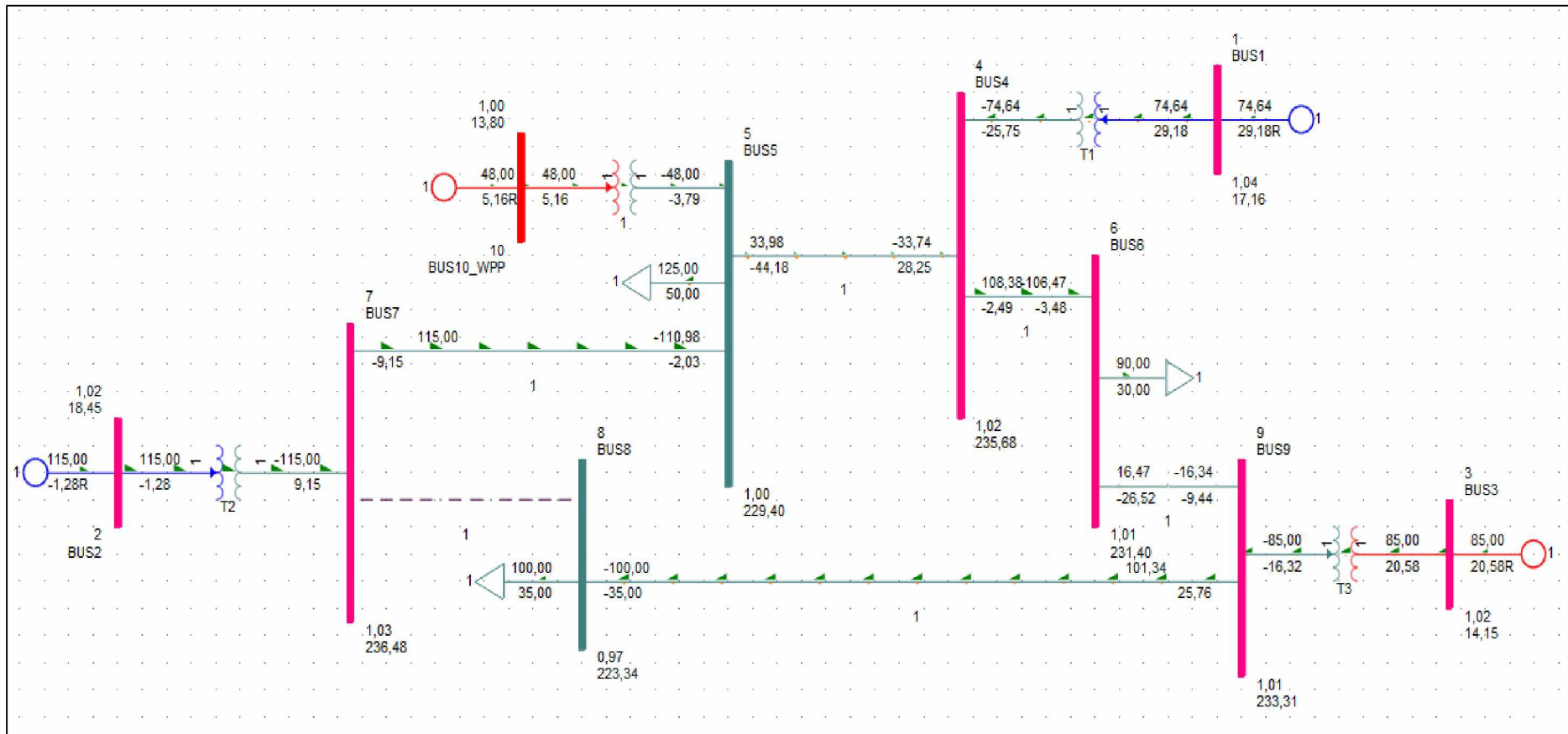
Πίνακας 7.21: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0247           |
| 5     | 0,9974           |
| 6     | 1,0061           |
| 7     | 1,0282           |
| 8     | 0,971            |
| 9     | 1,0144           |
| 10    | 1                |

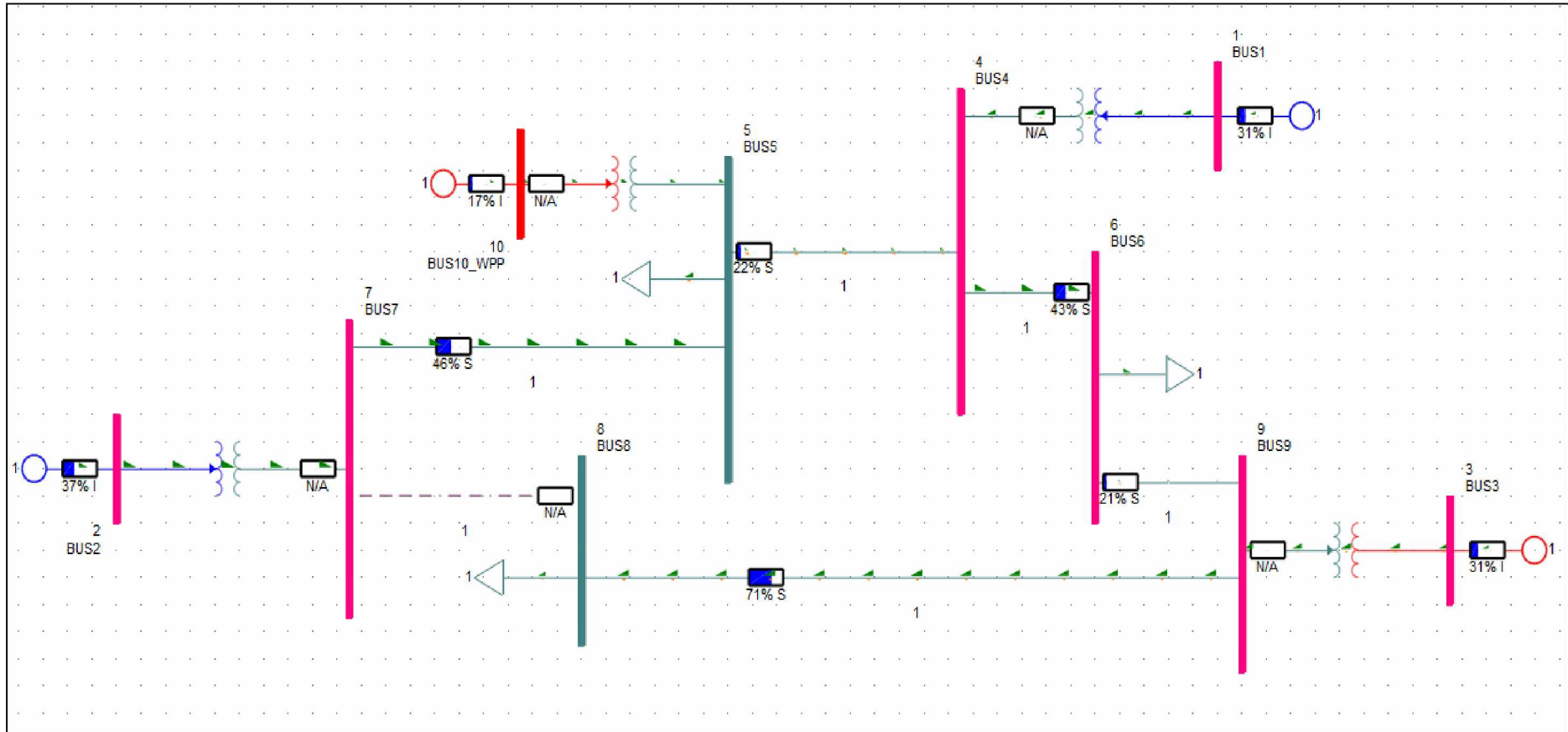
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.31 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.32 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.32 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 8 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 71% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (5,16 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.31: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.32: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.7 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9

Η γραμμή μεταφοράς 8 – 9 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.22.

Πίνακας 7.22: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9.

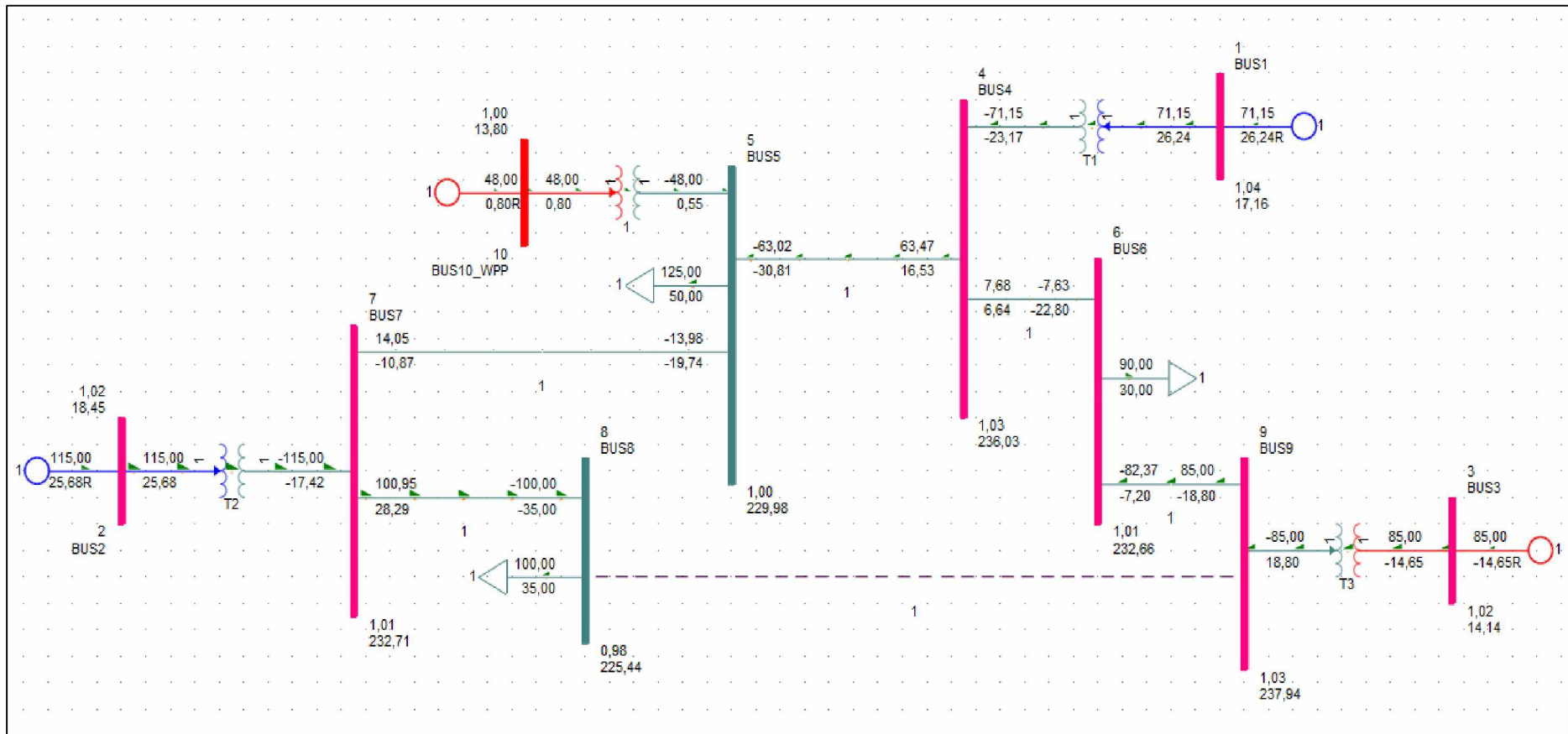
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0262           |
| 5     | 0,9999           |
| 6     | 1,0115           |
| 7     | 1,0118           |
| 8     | 0,9802           |
| 9     | 1,0345           |
| 10    | 1                |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

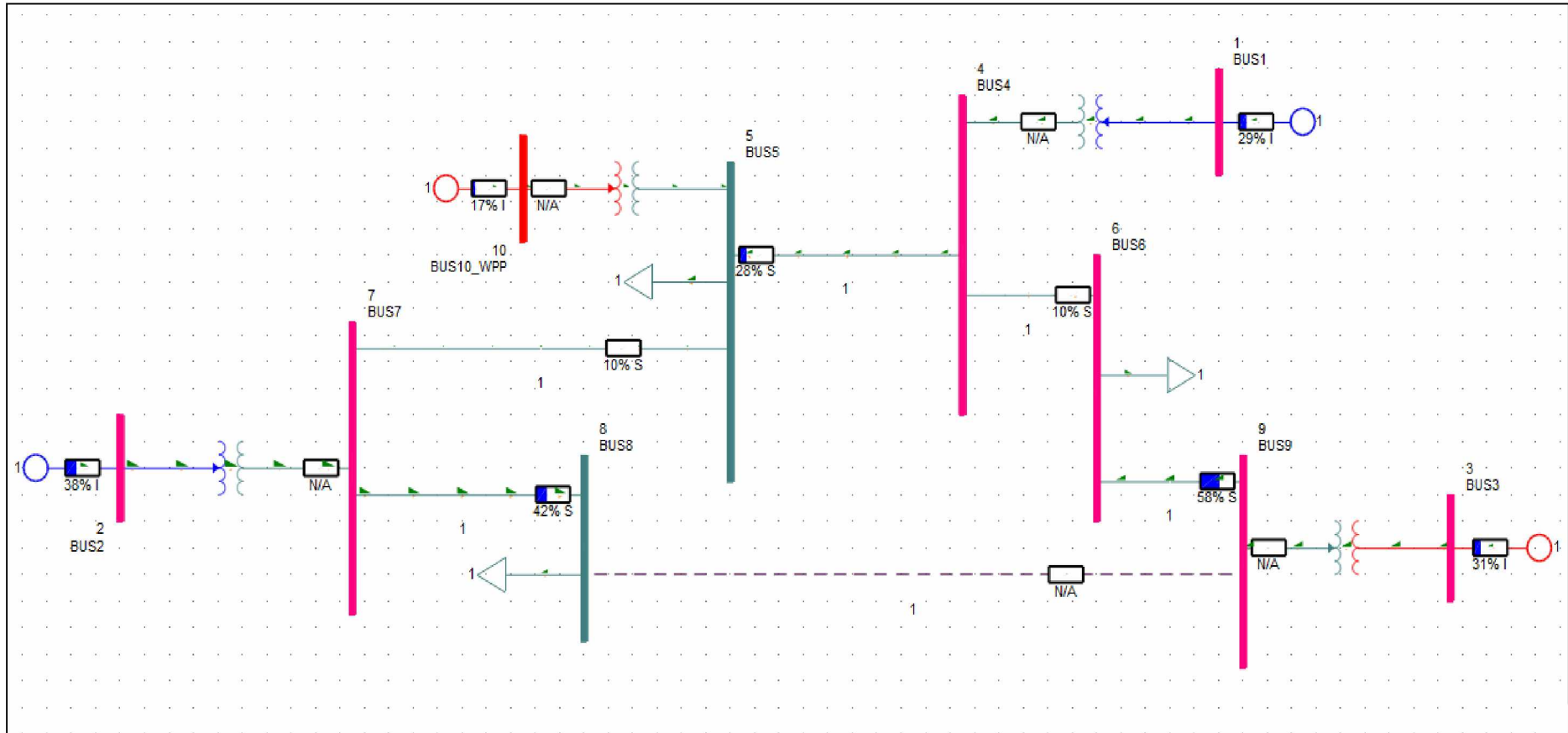
Στο Σχήμα 7.33 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.34 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.34 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 6 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 58% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (0,80 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.





Σχήμα 7.33: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.34: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.8 Αφαίρεση Γεννήτριας G2

Η γεννήτρια G2 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.23.

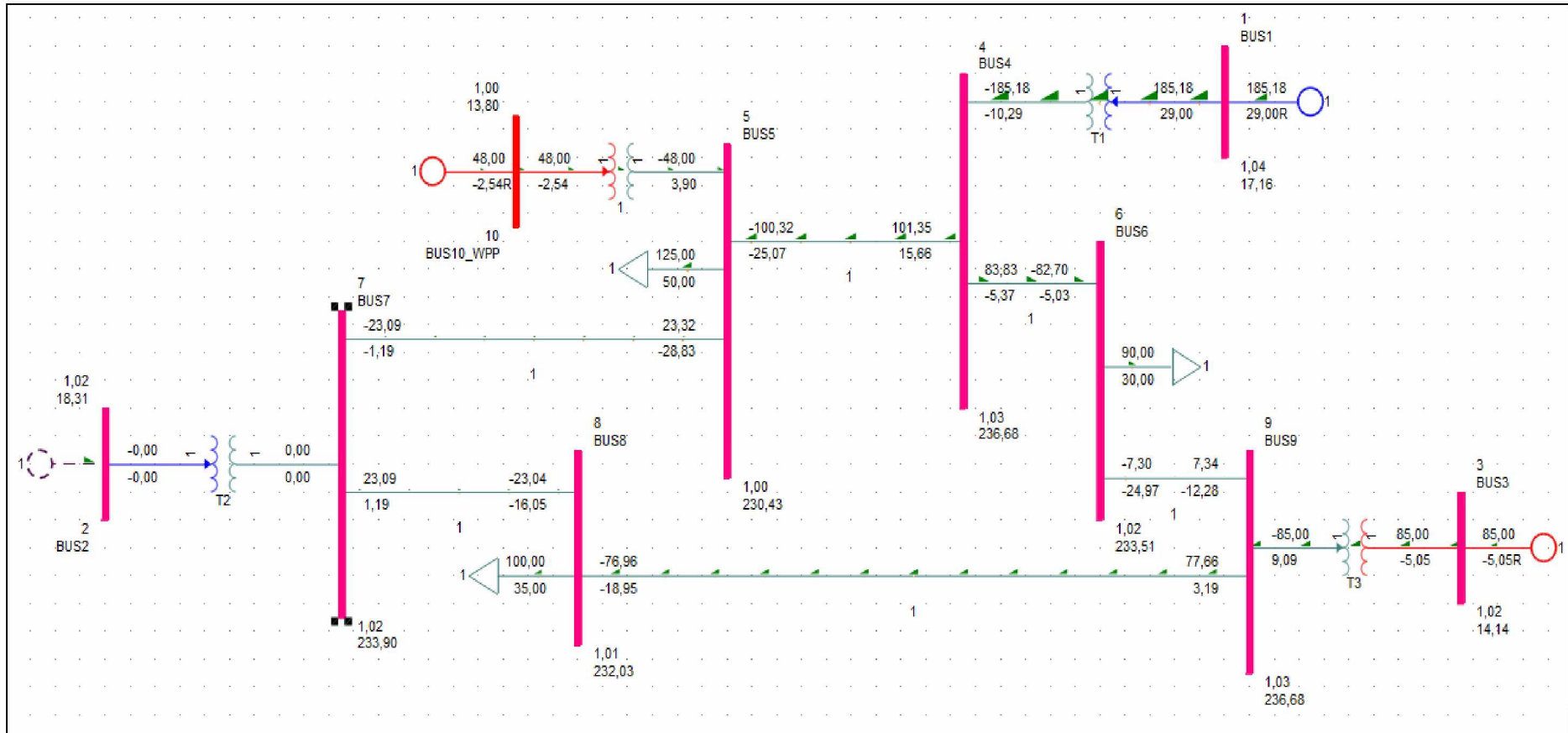
Πίνακας 7.23: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,0169           |
| 3     | 1,025            |
| 4     | 1,0291           |
| 5     | 1,0019           |
| 6     | 1,0153           |
| 7     | 1,0169           |
| 8     | 1,0088           |
| 9     | 1,029            |
| 10    | 1                |

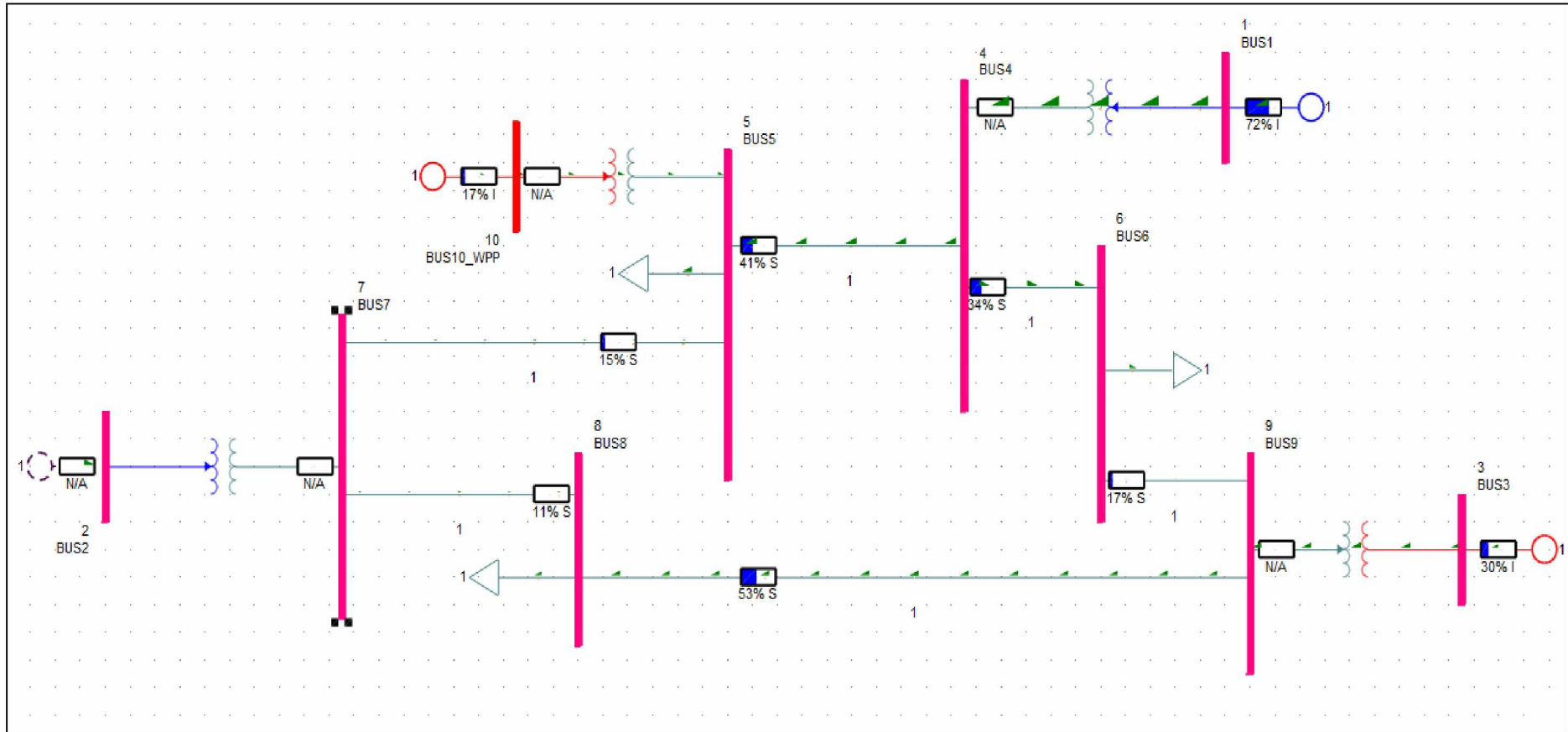
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.35 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.36 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.36 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G1, η οποία διαμορφώνεται στο 72% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-2,54 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γεννήτριας G2 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.35: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.36: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

### 7.3.9 Αφαίρεση Γεννήτριας G3

Η γεννήτρια G3 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.24.

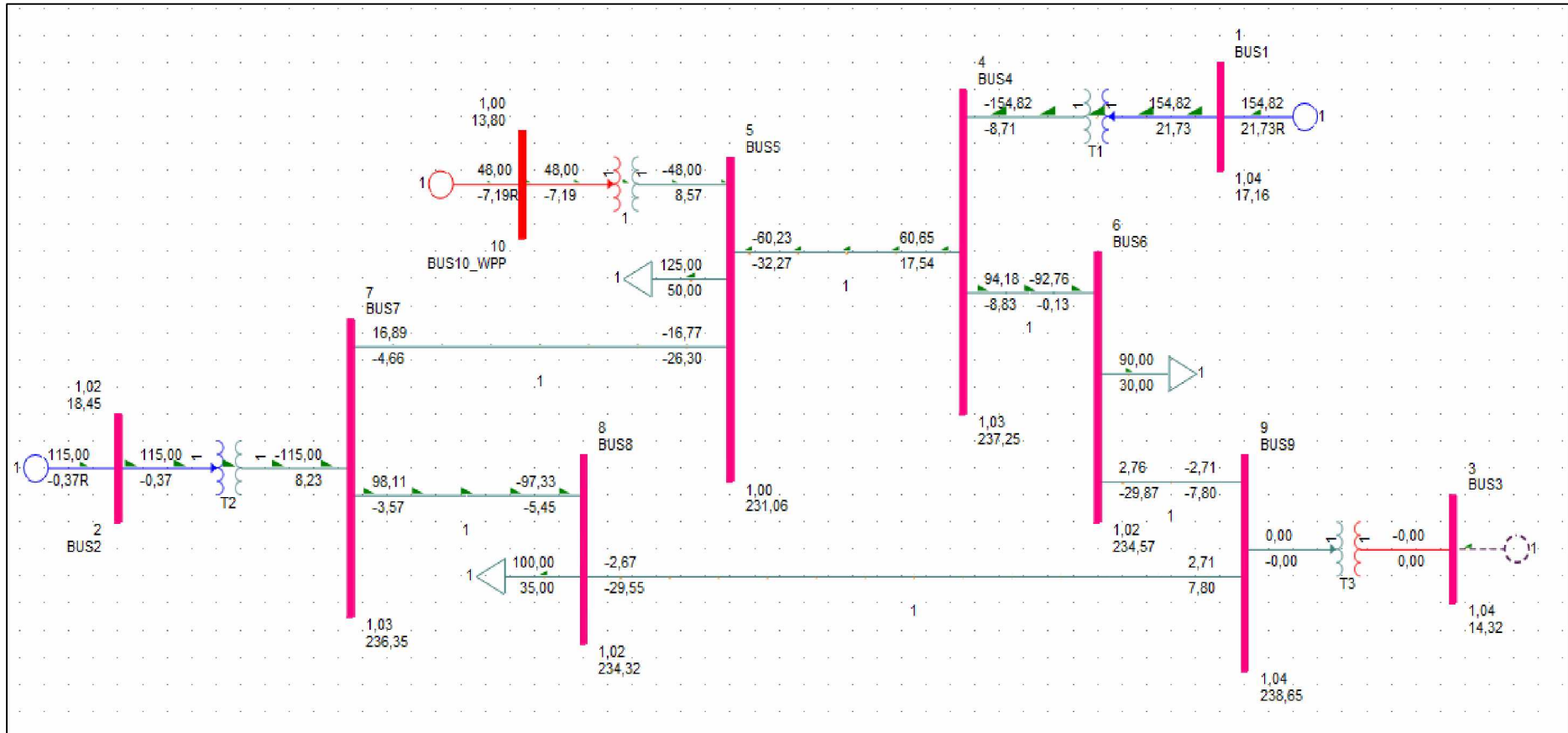
Πίνακας 7.24: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G3.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,0376           |
| 4     | 1,0315           |
| 5     | 1,0046           |
| 6     | 1,0199           |
| 7     | 1,0276           |
| 8     | 1,0188           |
| 9     | 1,0376           |
| 10    | 1                |

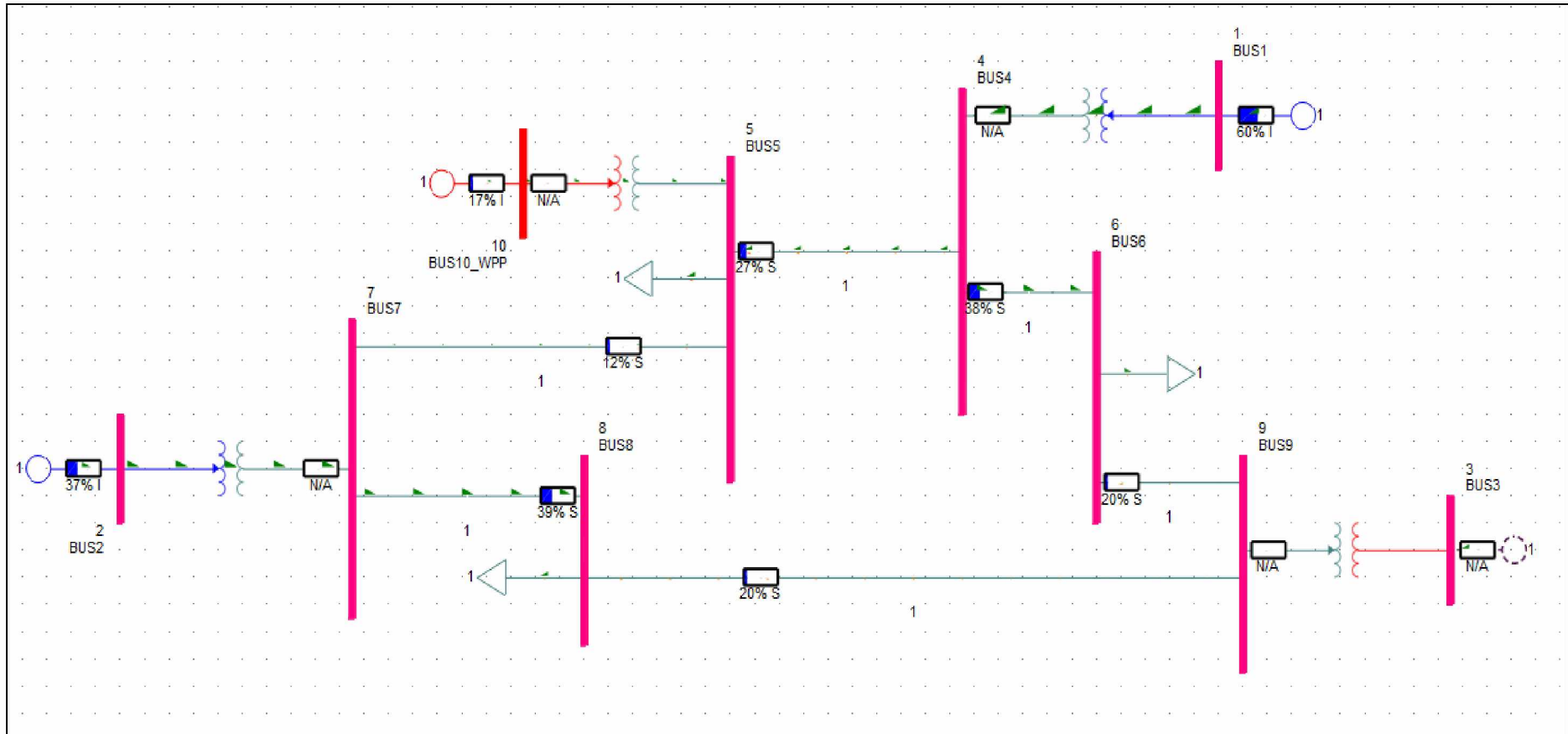
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.37 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.38 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.38 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G1, η οποία διαμορφώνεται στο 60% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-7,19 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γεννήτριας G3 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.37: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G3 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.38: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G3 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



### 7.3.10 Αξιολόγηση Διαταραχών – Εύρεση Χειρότερης Περίπτωσης

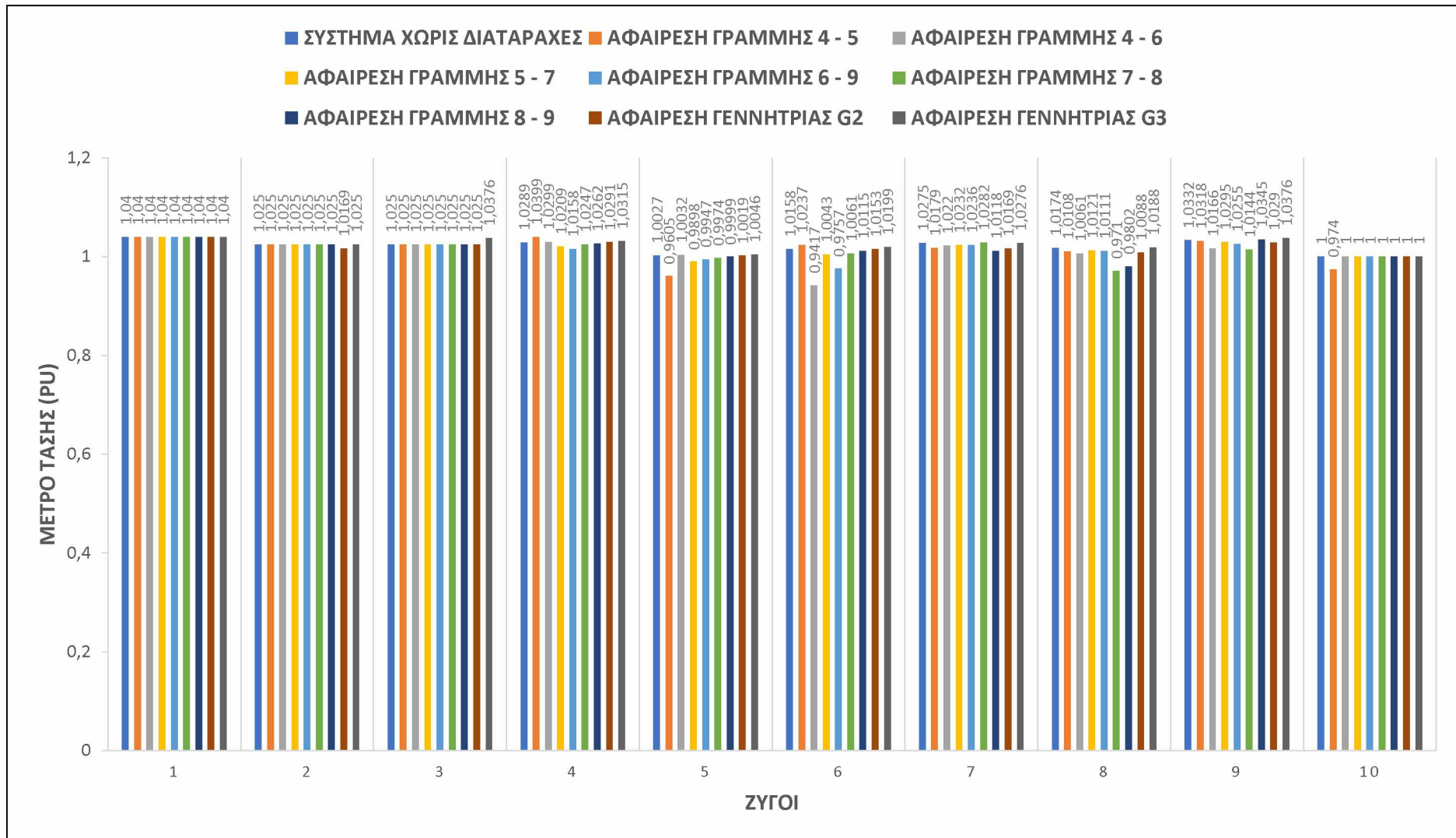
Μετά την προσομοίωση των διαταραχών, τη συλλογή και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ποια από τις διαταραχές αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση για το μελετώμενο σύστημα, ούτως ώστε να προσδιοριστούν τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του. Η αξιολόγηση αυτή των διαταραχών γίνεται τόσο βάσει των τάσεων των ζυγών του συστήματος, όσο και βάσει των φορτίσεων των διαφόρων συνιστωσών του.

Οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, καταγράφονται στον Πίνακα 7.25 και απεικονίζονται γραφικά στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.39.

Οι μεταβολές στις τιμές των τάσεων των ζυγών του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, καταγράφονται στον Πίνακα 7.26 και απεικονίζονται γραφικά στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.40.

Πίνακας 7.25: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

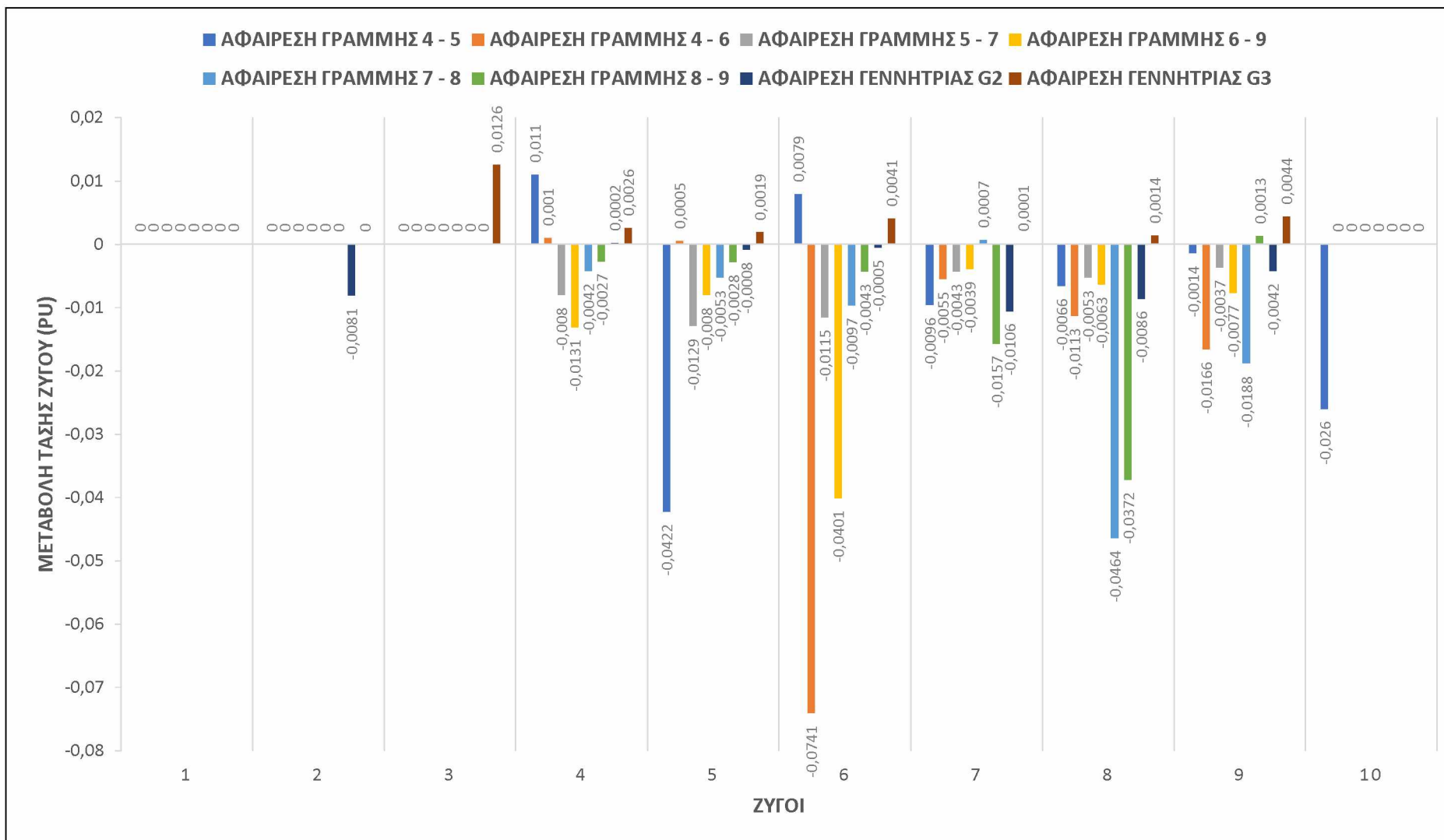
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)               |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|-------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|       | ΣΥΣΤΗΜΑ<br>ΧΩΡΙΣ<br>ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3 |
| 1     | 1,04                           | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         |
| 2     | 1,025                          | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,0169                       | 1,025                        |
| 3     | 1,025                          | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,0376                       |
| 4     | 1,0289                         | 1,0399                       | 1,0299                       | 1,0209                       | 1,0158                       | 1,0247                       | 1,0262                       | 1,0291                       | 1,0315                       |
| 5     | 1,0027                         | 0,9605                       | 1,0032                       | 0,9898                       | 0,9947                       | 0,9974                       | 0,9999                       | 1,0019                       | 1,0046                       |
| 6     | 1,0158                         | 1,0237                       | 0,9417                       | 1,0043                       | 0,9757                       | 1,0061                       | 1,0115                       | 1,0153                       | 1,0199                       |
| 7     | 1,0275                         | 1,0179                       | 1,022                        | 1,0232                       | 1,0236                       | 1,0282                       | 1,0118                       | 1,0169                       | 1,0276                       |
| 8     | 1,0174                         | 1,0108                       | 1,0061                       | 1,0121                       | 1,0111                       | 0,971                        | 0,9802                       | 1,0088                       | 1,0188                       |
| 9     | 1,0332                         | 1,0318                       | 1,0166                       | 1,0295                       | 1,0255                       | 1,0144                       | 1,0345                       | 1,029                        | 1,0376                       |
| 10    | 1                              | 0,974                        | 1                            | 1                            | 1                            | 1                            | 1                            | 1                            | 1                            |



Σχήμα 7.39: Ραβδόγραμμα τάσεων ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

Πίνακας 7.26: Μεταβολή μέτρου τάσης ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

|       | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΟΥ (pu) |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|-------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| ΖΥΓΟΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5     | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3 |
| 1     | 0                                | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            |
| 2     | 0                                | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | -0,0081                      | 0                            |
| 3     | 0                                | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0,0126                       |
| 4     | 0,011                            | 0,001                        | -0,008                       | -0,0131                      | -0,0042                      | -0,0027                      | 0,0002                       | 0,0026                       |
| 5     | -0,0422                          | 0,0005                       | -0,0129                      | -0,008                       | -0,0053                      | -0,0028                      | -0,0008                      | 0,0019                       |
| 6     | 0,0079                           | -0,0741                      | -0,0115                      | -0,0401                      | -0,0097                      | -0,0043                      | -0,0005                      | 0,0041                       |
| 7     | -0,0096                          | -0,0055                      | -0,0043                      | -0,0039                      | 0,0007                       | -0,0157                      | -0,0106                      | 0,0001                       |
| 8     | -0,0066                          | -0,0113                      | -0,0053                      | -0,0063                      | -0,0464                      | -0,0372                      | -0,0086                      | 0,0014                       |
| 9     | -0,0014                          | -0,0166                      | -0,0037                      | -0,0077                      | -0,0188                      | 0,0013                       | -0,0042                      | 0,0044                       |
| 10    | -0,026                           | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            | 0                            |



Σχήμα 7.40: Ραβδόγραμμα μεταβολών μέτρου τάσης ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

Παρατηρώντας το ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.40, η μεγαλύτερη πτώση τάσης καταγράφεται στον ζυγό 6, κατά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (-0,0741pu). Από την άλλη, η μεγαλύτερη αύξηση τάσης εντοπίζεται στον ζυγό 3, κατά την αφαίρεση της γεννήτριας G3 (0,0126pu).

Για καθεμία από τις διαταραχές, επιλέγεται ο ζυγός με τη μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή της τάσης, διαμορφώνοντας έτσι τον Πίνακα 7.27:

Πίνακας 7.27: Μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή τάσης ζυγού, για κάθε σενάριο διαταραχής, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5.

| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>          | <b>ΜΕΓΙΣΤΗ<br/>ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΑΣΗΣ</b> | <b>ΖΥΓΟΣ</b> |
|---------------------------|------------------------------------|--------------|
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | 0,0422                             | 5            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | 0,0741                             | 6            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | 0,0129                             | 5            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | 0,0401                             | 6            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | 0,0464                             | 8            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | 0,0372                             | 8            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | 0,0106                             | 7            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3 | 0,0126                             | 3            |

Στη συνέχεια, τα σενάρια των διαταραχών ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά μεταβολής τάσης, διαμορφώνοντας έτσι τον Πίνακα 7.28:

Πίνακας 7.28: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τη μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή της τάσης ζυγού, για σύστημα παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5.

| ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                         | ΜΕΓΙΣΤΗ<br>ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ | ΖΥΓΟΣ    |
|-----------------------------------|---------------------------|----------|
| <b>ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br/>4 - 6</b> | <b>0,0741</b>             | <b>6</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8         | 0,0464                    | 8        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5         | 0,0422                    | 5        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9         | 0,0401                    | 6        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9         | 0,0372                    | 8        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7         | 0,0129                    | 5        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3         | 0,0126                    | 3        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2         | 0,0106                    | 7        |

Από τον Πίνακα 7.28 προκύπτει ότι η χειρότερη διαταραχή, όσον αφορά τη μεταβολή της τάσης, είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6, καθώς οδηγεί στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 6 κατά 0,0741pu. Η δεύτερη χειρότερη διαταραχή είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8, η οποία οδηγεί στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 8 κατά 0,0464pu.

Τέλος, οι φορτίσεις των στοιχείων του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, παρατίθενται στον Πίνακα 7.29:

Πίνακας 7.29: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5, για το σύνολο των διαταραχών.

| ΣΤΟΙΧΕΙΟ      | ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (%) |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|---------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|               | ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ      | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 5 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G2 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G3 |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1  | 28%                   | 27%                    | 29%                    | 31%                    | 33%                    | 31%                    | 29%                    | <b>72%</b>             | <b>60%</b>             |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2  | 37%                   | 37%                    | 37%                    | 37%                    | 37%                    | 37%                    | 38%                    | X                      | 37%                    |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G3  | 31%                   | 31%                    | 31%                    | 30%                    | 30%                    | 31%                    | 31%                    | 30%                    | X                      |
| ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ | 17%                   | 19%                    | 17%                    | 18%                    | 17%                    | 17%                    | 17%                    | 17%                    | 17%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 4 - 5  | 18%                   | X                      | 31%                    | 34%                    | 16%                    | 22%                    | 28%                    | 41%                    | 27%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 4 - 6  | 18%                   | 28%                    | X                      | 11%                    | 38%                    | 43%                    | 10%                    | 34%                    | 38%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7  | 21%                   | 33%                    | 11%                    | X                      | 40%                    | 46%                    | 10%                    | 15%                    | 12%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9  | 35%                   | 18%                    | <b>63%</b>             | <b>67%</b>             | X                      | 21%                    | <b>58%</b>             | 17%                    | 20%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 7 - 8  | 26%                   | 15%                    | 44%                    | 46%                    | 11%                    | X                      | 42%                    | 11%                    | 39%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9  | 28%                   | <b>45%</b>             | 16%                    | 22%                    | <b>57%</b>             | <b>71%</b>             | X                      | 53%                    | 20%                    |



Από τον Πίνακα 7.29, για κάθε διαταραχή, εντοπίζεται το στοιχείο που παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό (%) φόρτισης. Έτσι, διαμορφώνεται ο Πίνακας 7.30:

Πίνακας 7.30: Στοιχεία συστήματος με το μέγιστο ποσοστό (%) φόρτισης για όλα τα σενάρια διαταραχών, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5.

| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>          | <b>ΣΤΟΙΧΕΙΟ<br/>ΜΕ ΤΗ<br/>ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ</b> | <b>ΦΟΡΤΙΣΗ</b> |
|---------------------------|---|----------------|
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                                  | 45%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 63%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 67%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                                  | 57%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                                  | 71%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 58%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                                  | 72%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                                  | 60%            |

Στη συνέχεια, οι διαταραχές του Πίνακα 7.30 ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά φόρτισης, διαμορφώνοντας τον Πίνακα 7.31:

Πίνακας 7.31: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τα ποσοστά (%) φόρτισης για σύστημα παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 48MW συνδεδεμένου στον ζυγό 5.

| ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                         | ΣΤΟΙΧΕΙΟ<br>ΜΕ ΤΗ<br>ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ | ΦΟΡΤΙΣΗ    |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|
| <b>ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br/>G2</b> | <b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1</b>                  | <b>72%</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8         | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                         | 71%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7         | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                         | 67%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6         | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                         | 63%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G3         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                         | 60%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9         | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                         | 58%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9         | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                         | 57%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5         | ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9                         | 45%        |

Από τον Πίνακα 7.31 προκύπτει ότι η χειρότερη διαταραχή, όσον αφορά τις φορτίσεις στοιχείων του συστήματος, είναι η αφαίρεση της γεννήτριας G2, καθώς οδηγεί στη φόρτιση της γεννήτριας G1 στο 72%. Η δεύτερη χειρότερη διαταραχή είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8, η οποία οδηγεί τη γραμμή μεταφοράς 8 – 9 σε φόρτιση 71%.

## 7.4 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστήματος παρουσία Αιολικού Πάρκου, ισχύος 30% της ζήτησης, συνδεδεμένου στον Ζυγό 6

### 7.4.1 Σύστημα χωρίς διαταραχή

Όπως προέκυψε από τις μελέτες της Ενότητας 6.5, για το σύστημα των 9 ζυγών του IEEE, ο ζυγός σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου ισχύος 30% της πραγματικής ζήτησης φορτίου (95MW), ο οποίος παρουσιάζει τις ελάχιστες απώλειες πραγματικής ισχύος για το σύστημα, είναι ο ζυγός 6. Υπενθυμίζεται ότι το αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο στον ζυγό 10, όπου μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης συνδέεται με τον ζυγό 5 και κατ' επέκταση με το υπόλοιπο σύστημα.

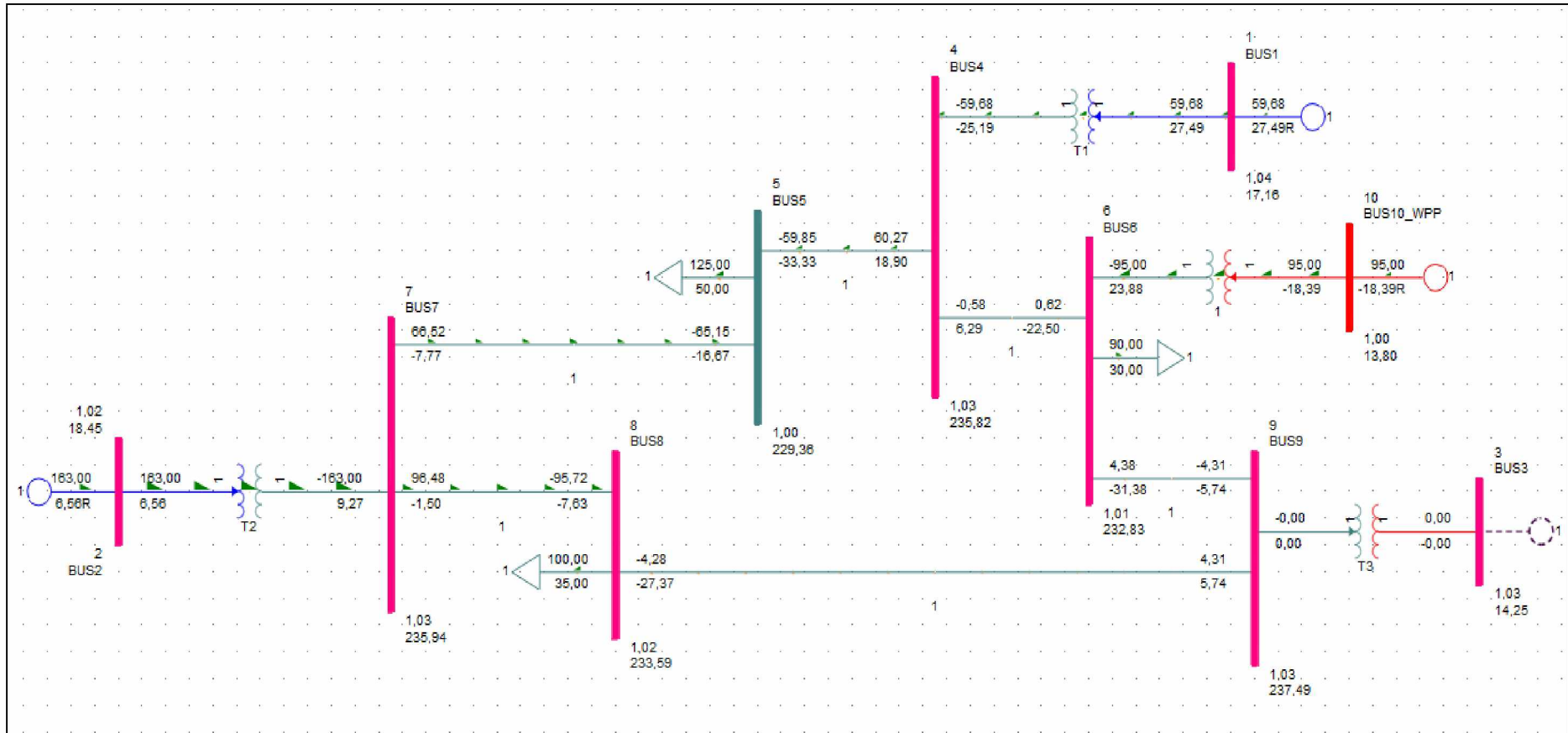
Για το σύστημα αυτό, χωρίς την παρουσία κάποιας διαταραχής, εκτελείται η λειτουργία της Ροής Φορτίου. Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών στο ανά μονάδα σύστημα (pu) διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.32.

Πίνακας 7.32: Τάσεις ζυγών συστήματος, με αιολικό πάρκο ισχύος 95MW συνδεδεμένο στον ζυγό 6, χωρίς την παρουσία διαταραχής.

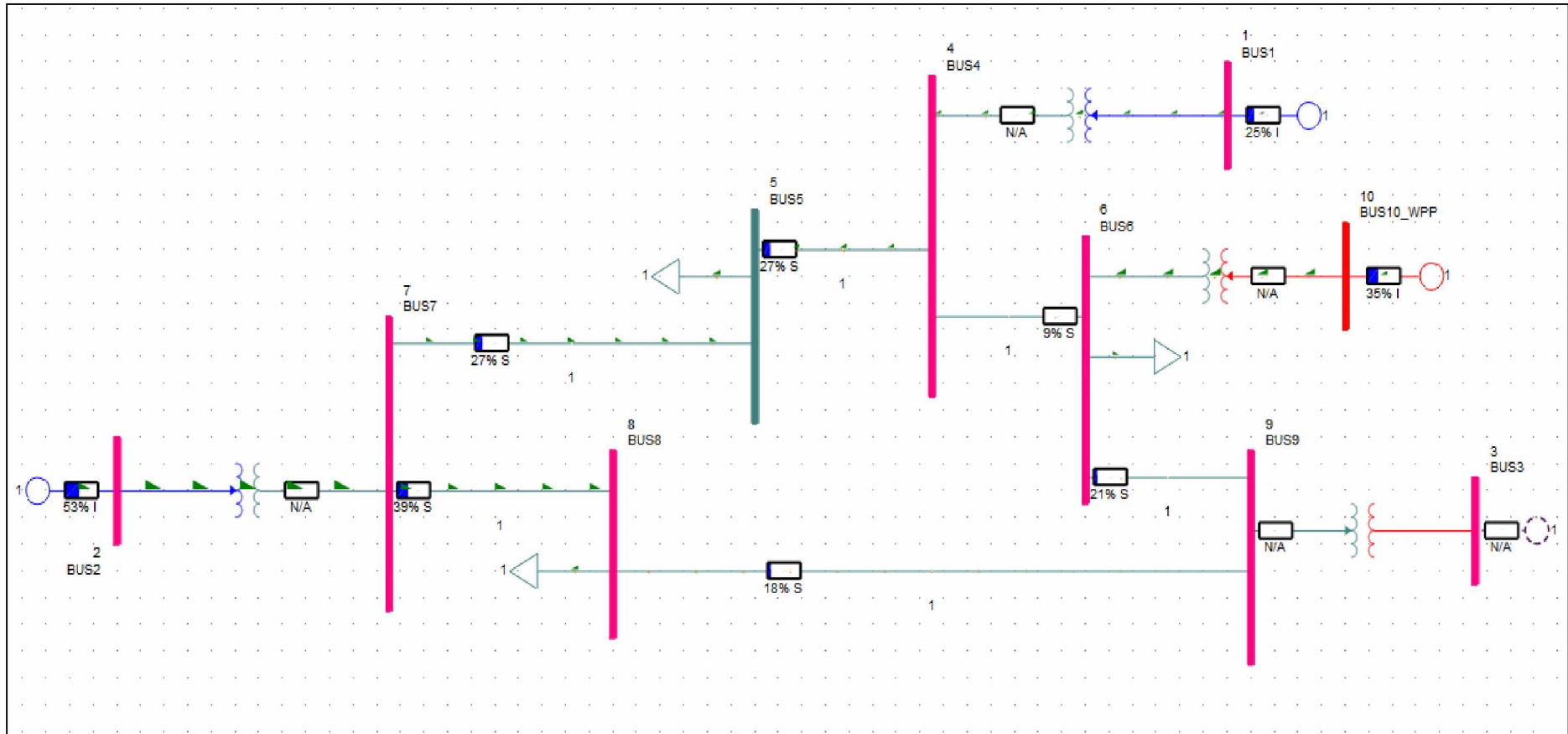
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,0326           |
| 4     | 1,0253           |
| 5     | 0,9972           |
| 6     | 1,0123           |
| 7     | 1,0258           |
| 8     | 1,0156           |
| 9     | 1,0326           |
| 10    | 1                |

Οι ροές ισχύος, καθώς και οι τάσεις των ζυγών, απεικονίζονται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 7.41, ενώ οι φορτίσεις των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς του συστήματος στο Σχήμα 7.42. Όπως γίνεται φανερό, τα μέτρα των τάσεων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ), ενώ κανένα από τα στοιχεία του

συστήματος δεν είναι υπερφορτισμένο. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-18,39 MVAR).



Σχήμα 7.41: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, χωρίς την παρουσία διαταραχής.



Σχήμα 7.42: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, χωρίς την παρουσία διαταραχής.

#### 7.4.2 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 5

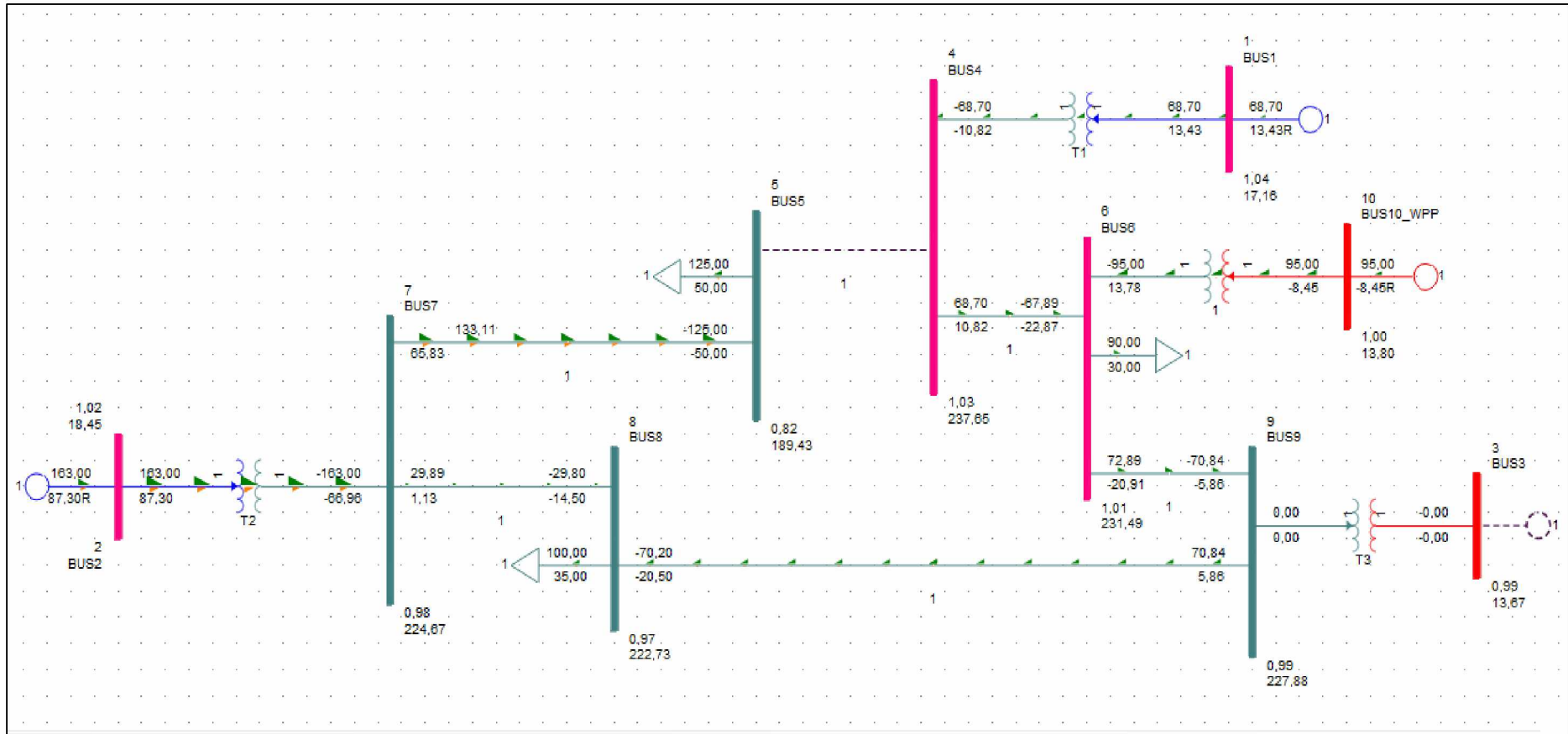
Η γραμμή μεταφοράς 4 – 5 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.33.

Πίνακας 7.33: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5.

| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| 3        | 0,9908           |
| 4        | 1,0333           |
| <b>5</b> | <b>0,8236</b>    |
| 6        | 1,0065           |
| 7        | 0,9768           |
| 8        | 0,9684           |
| 9        | 0,9908           |
| 10       | 1                |

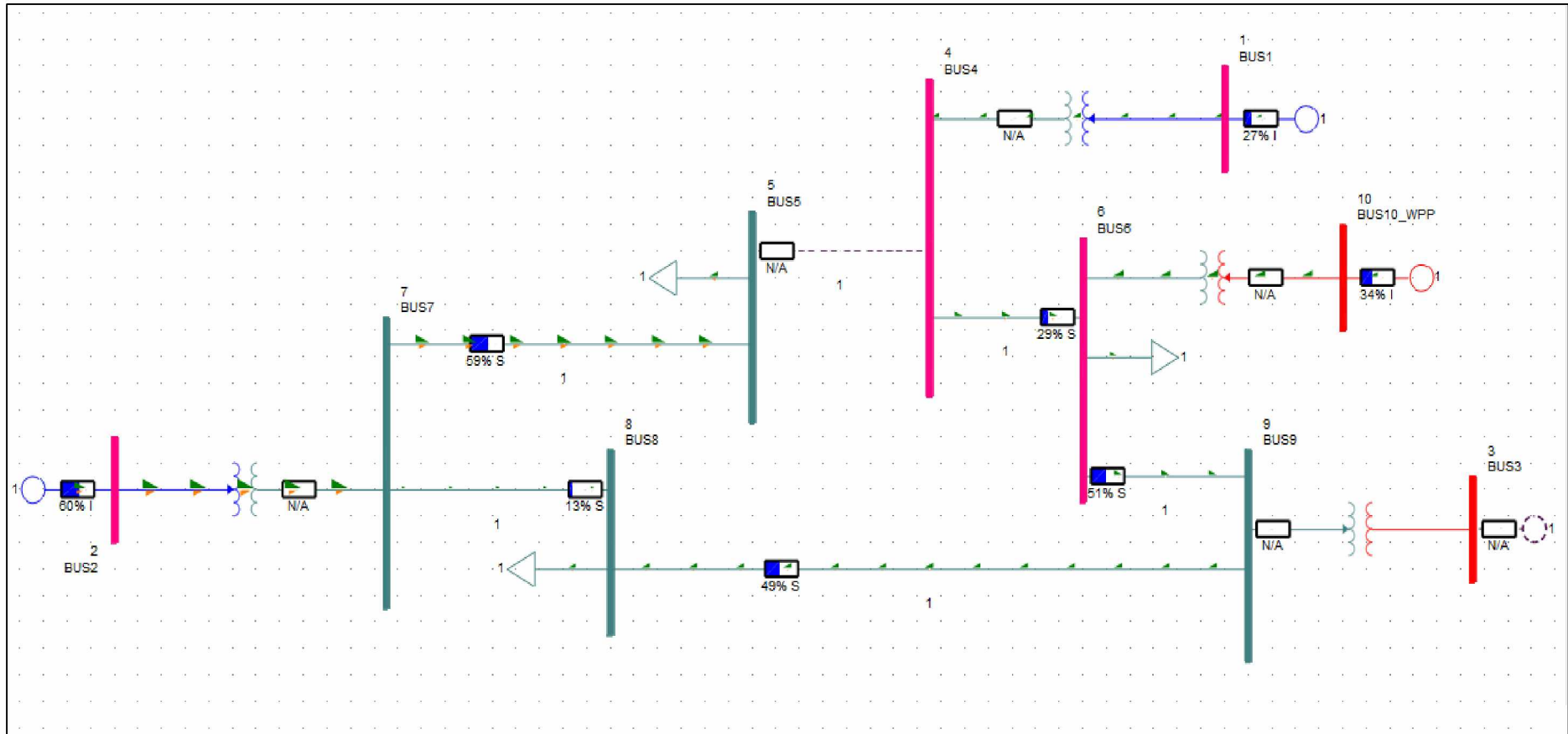
Η τάση του ζυγού 5 διαμορφώνεται στα 0,8236pu, τιμή η οποία είναι μικρότερη του κατώτατου ορίου των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση της τάσης του ζυγού 5 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.43 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.44 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.44 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G2, η οποία διαμορφώνεται στο 60% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-8,45 MVAR).



Σχήμα 7.43: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).





Σχήμα 7.44: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.4.3 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 4 – 6

Η γραμμή μεταφοράς 4 – 6 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.34.

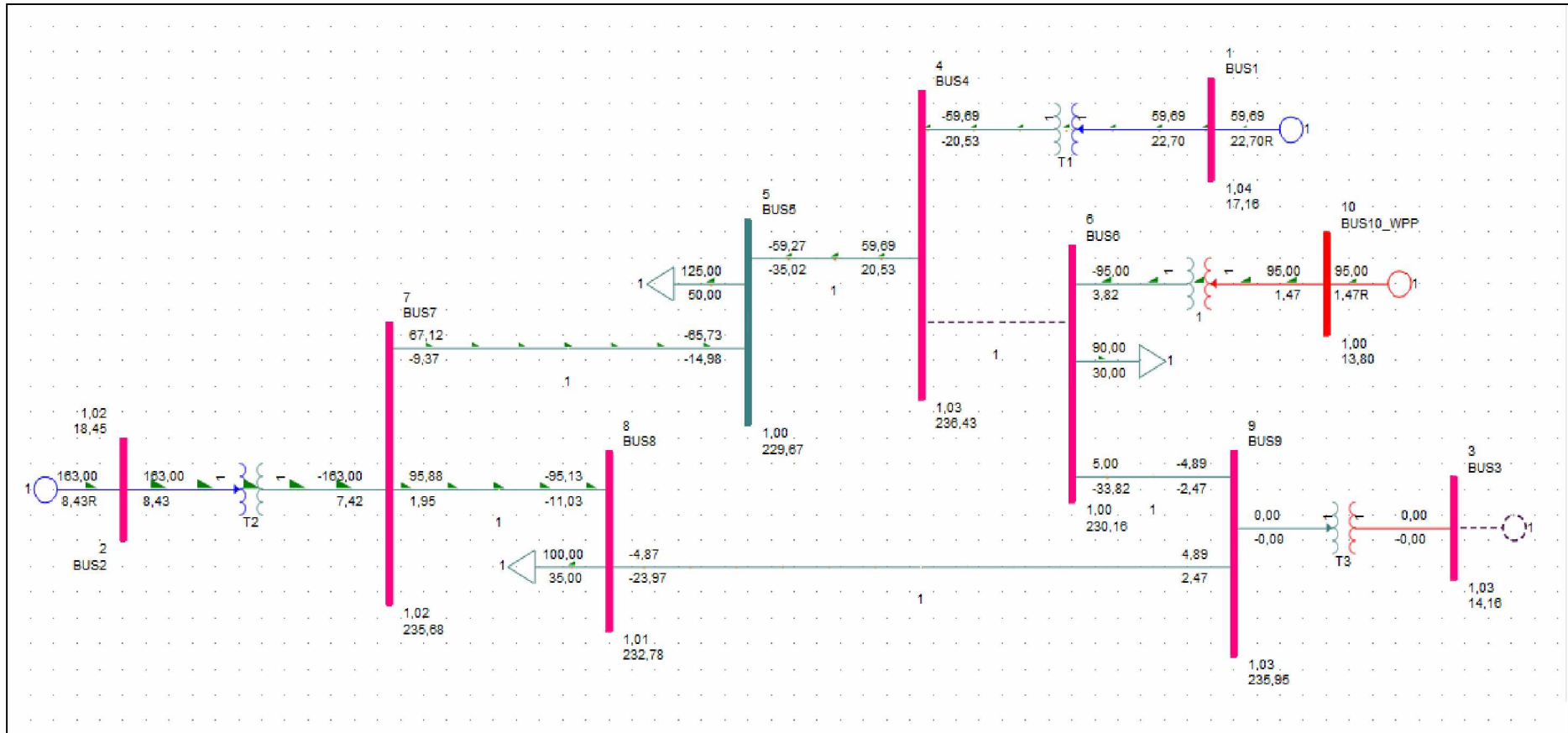
Πίνακας 7.34: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,0259           |
| 4     | 1,028            |
| 5     | 0,9986           |
| 6     | 1,0007           |
| 7     | 1,0247           |
| 8     | 1,0121           |
| 9     | 1,0259           |
| 10    | 1                |

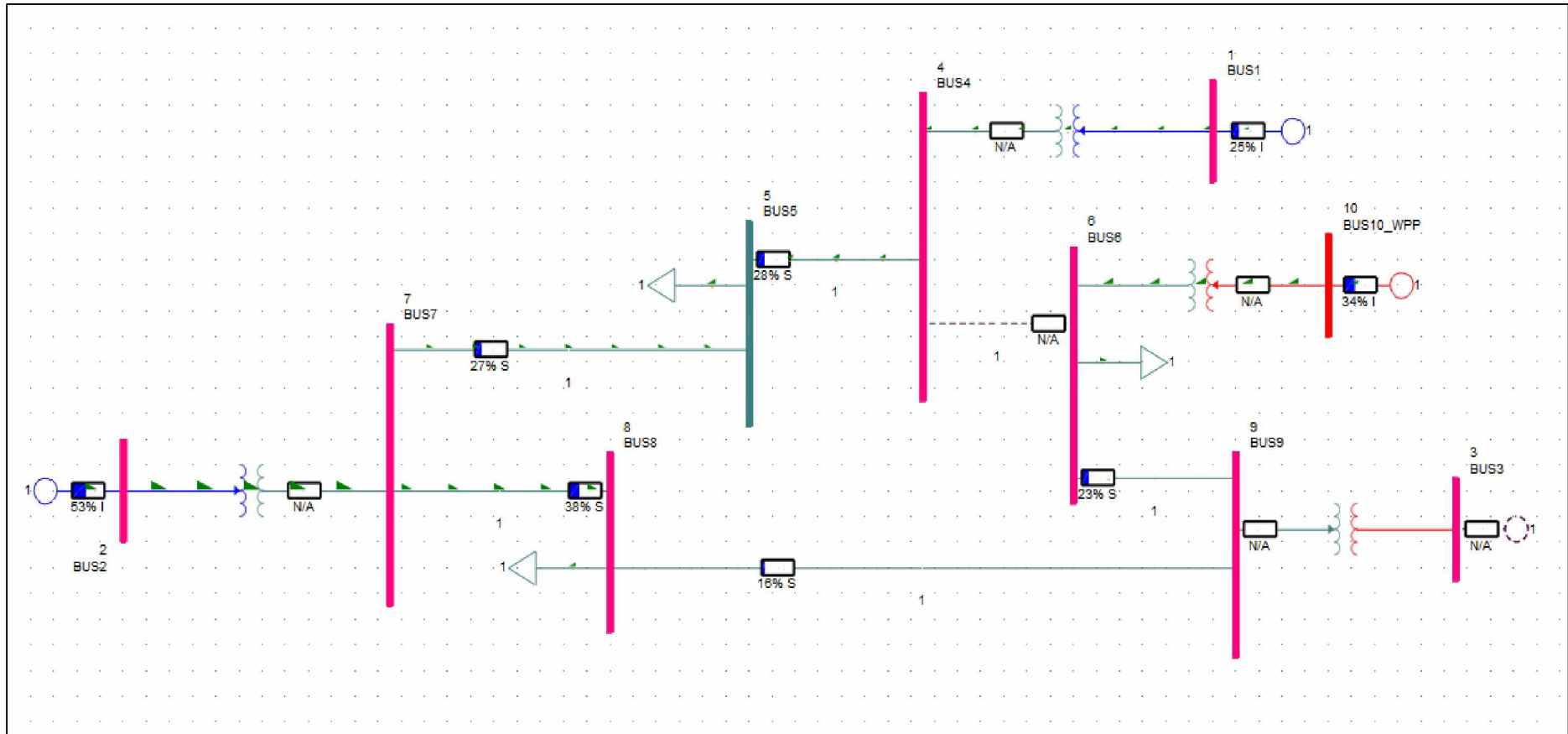
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.45 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.46 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.46 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G2, η οποία διαμορφώνεται στο 53% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (1,47 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.45: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.46: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 6 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.4.4 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 5 – 7

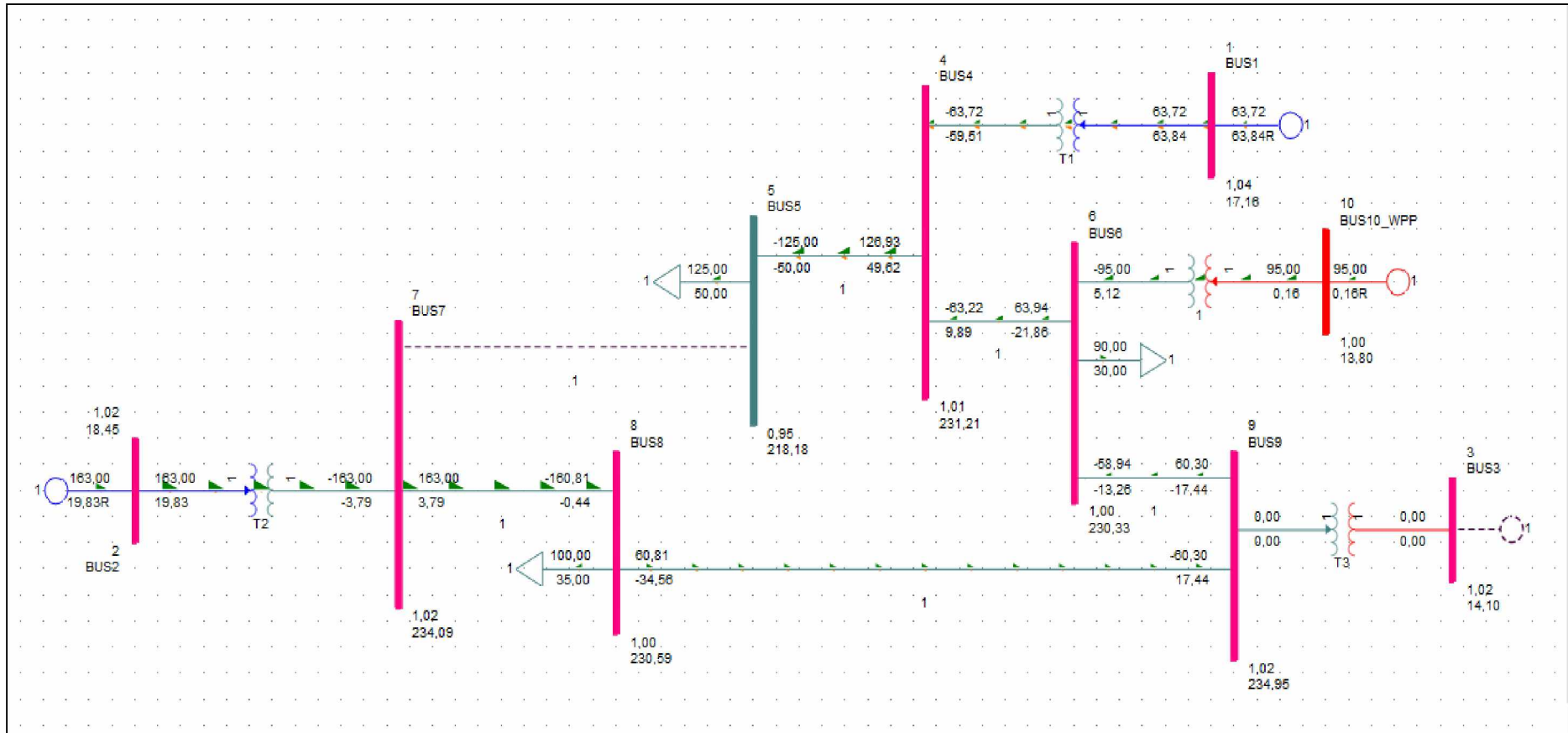
Η γραμμή μεταφοράς 5 – 7 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.35.

Πίνακας 7.35: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7.

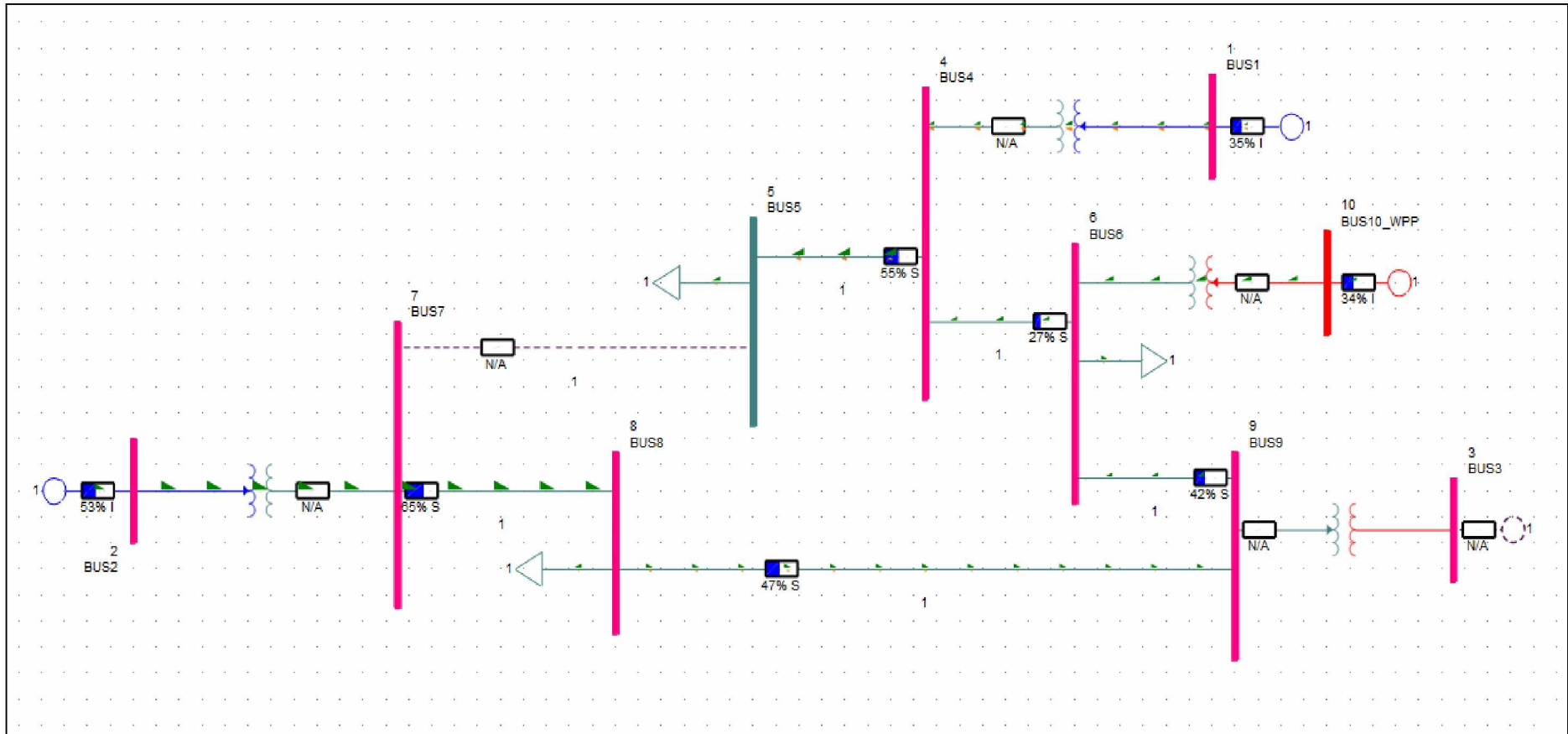
| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| 3        | 1,0215           |
| 4        | 1,0053           |
| <b>5</b> | <b>0,9486</b>    |
| 6        | 1,0015           |
| 7        | 1,0178           |
| 8        | 1,0026           |
| 9        | 1,0215           |
| 10       | 1                |

Η τάση του ζυγού 5 διαμορφώνεται στα 0,9486pu, τιμή η οποία είναι μικρότερη του κατώτατου ορίου των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση της τάσης του ζυγού 5 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.47 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.48 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.48 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 7 – 8, η οποία διαμορφώνεται στο 65% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (0,16 MVAR).



Σχήμα 7.47: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.48: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 5 – 7 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.4.5 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 6 – 9

Η γραμμή μεταφοράς 6 – 9 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.36.

Πίνακας 7.36: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9.

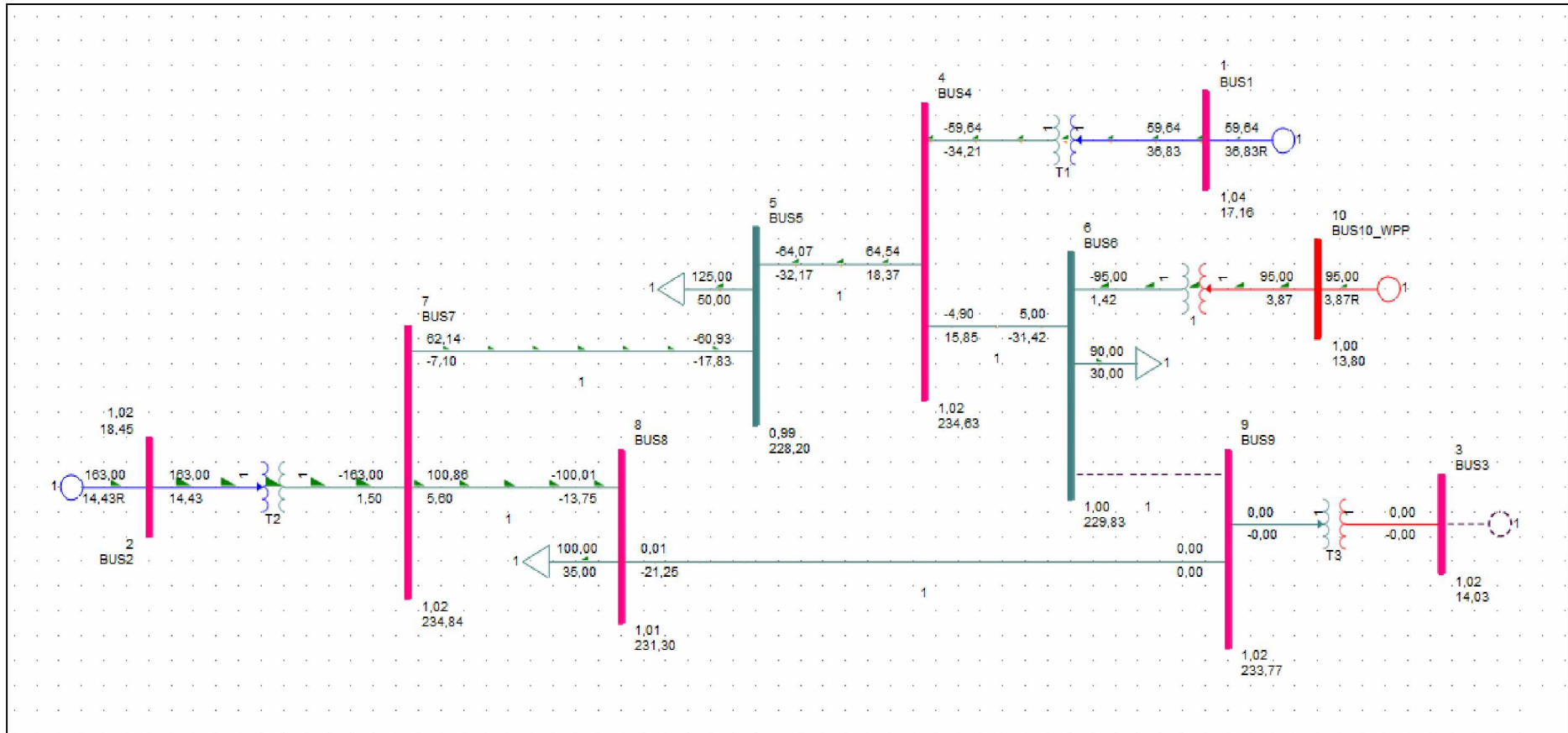
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,0164           |
| 4     | 1,0201           |
| 5     | 0,9922           |
| 6     | 0,9993           |
| 7     | 1,0211           |
| 8     | 1,0057           |
| 9     | 1,0164           |
| 10    | 1                |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95pu < V < 1,05pu$ ).

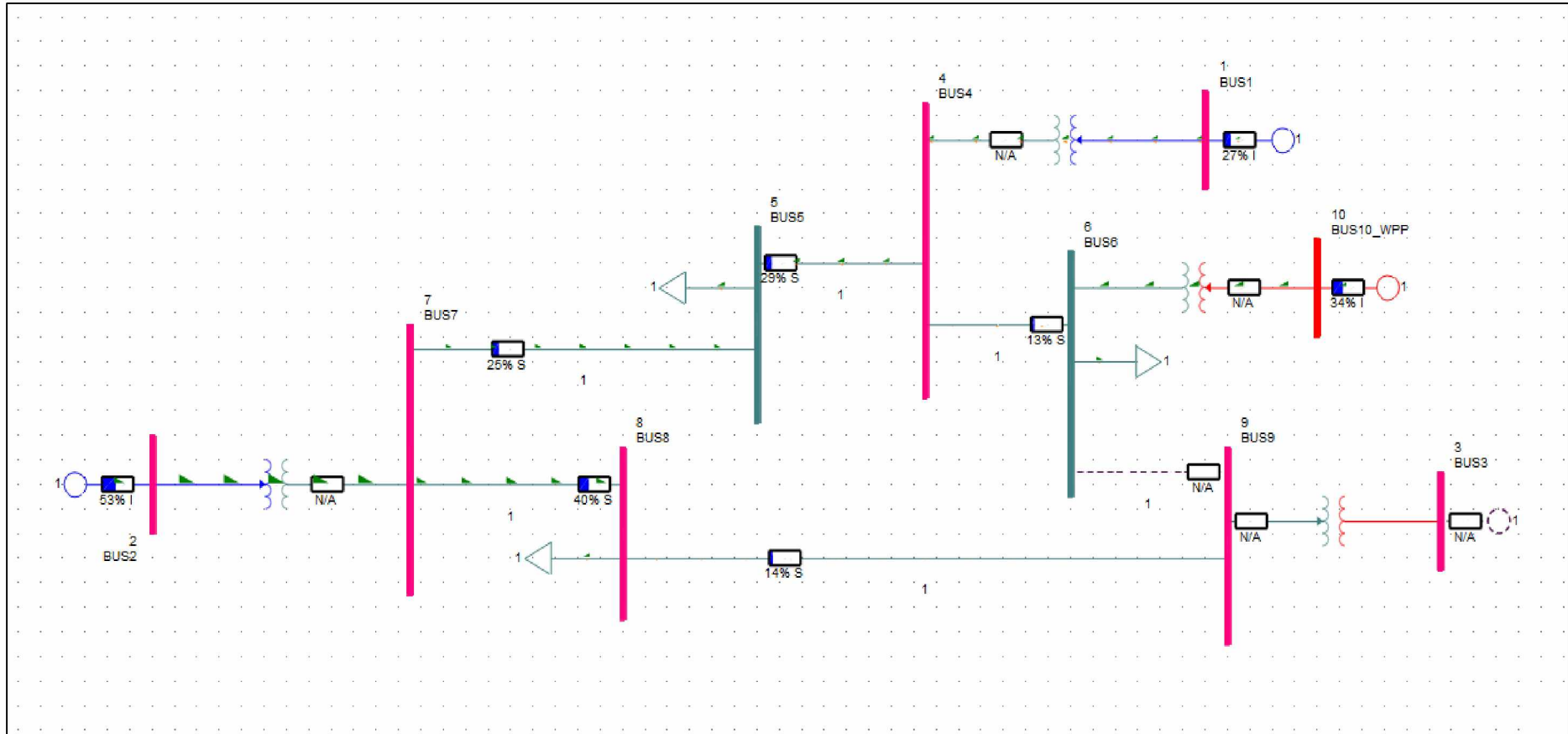
Στο Σχήμα 7.49 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.50 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.50 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G2, η οποία διαμορφώνεται στο 53% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (3,87 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.





Σχήμα 7.49: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.50: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 6 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.4.6 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 7 – 8

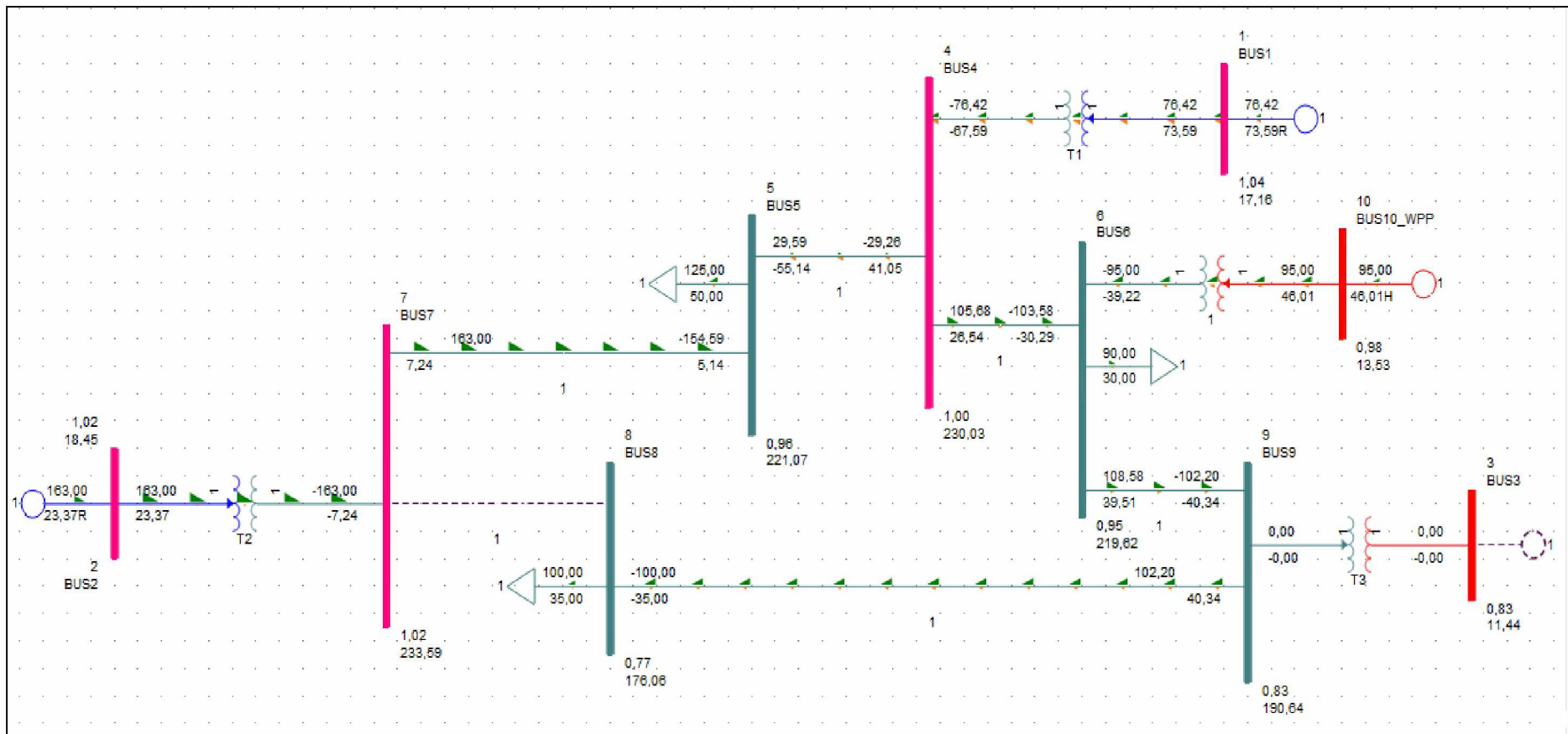
Η γραμμή μεταφοράς 7 – 8 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.37.

Πίνακας 7.37: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8.

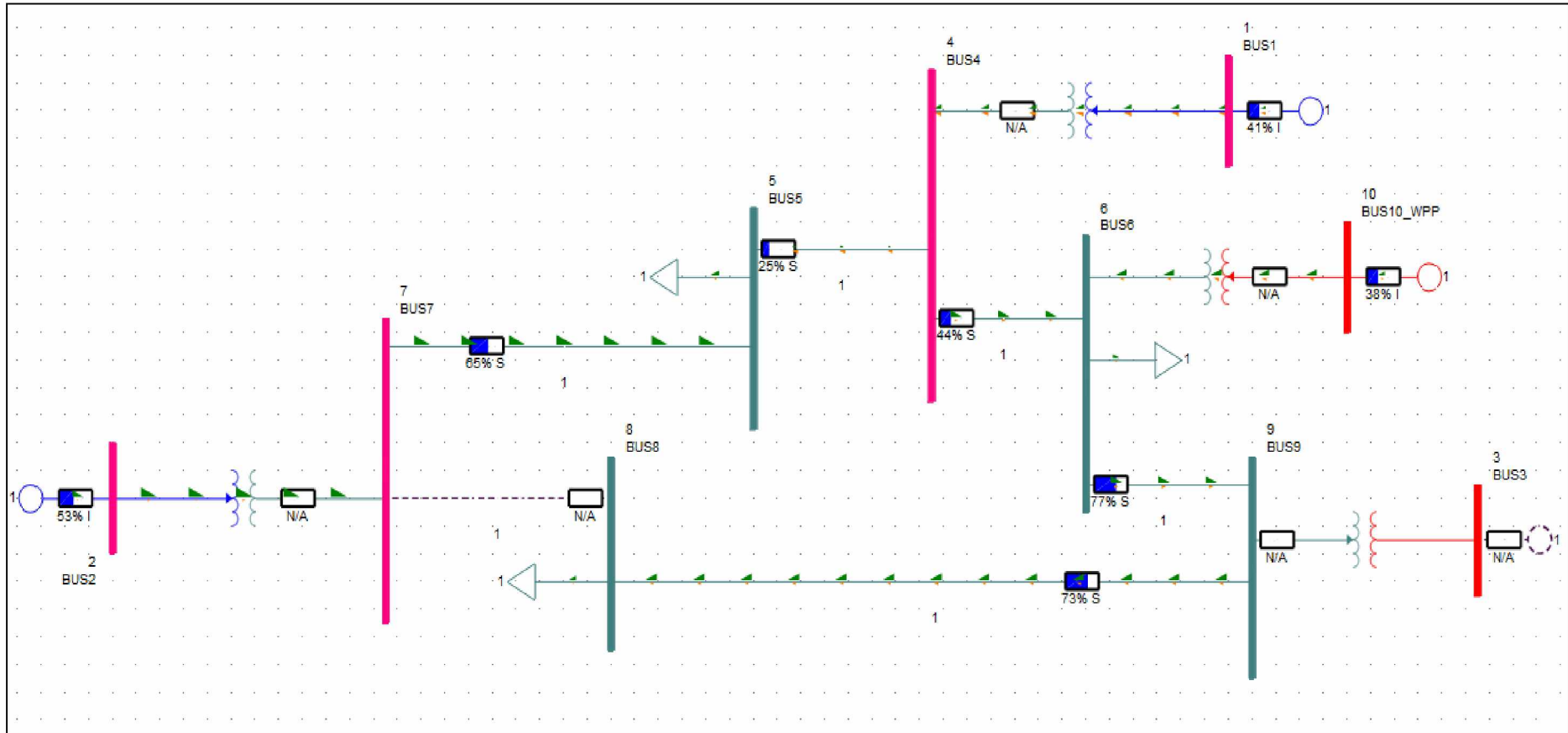
| ΖΥΓΟΣ    | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|----------|------------------|
| 1        | 1,04             |
| 2        | 1,025            |
| <b>3</b> | <b>0,8289</b>    |
| 4        | 1,0001           |
| 5        | 0,9612           |
| 6        | 0,9549           |
| 7        | 1,0156           |
| <b>8</b> | <b>0,7655</b>    |
| <b>9</b> | <b>0,8289</b>    |
| 10       | 0,9807           |

Η τάση του ζυγού 3 διαμορφώνεται στα 0,8289pu, του ζυγού 8 στα 0,7655pu και του ζυγού 9 στα 0,8289pu, τιμές οι οποίες είναι μικρότερες του κατώτατου ορίου των 0,95pu. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική τη λήψη μέτρων, για την αποκατάσταση των τάσεων των ζυγών 3, 8 και 9 εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος παρουσιάζουν μεταβολές, αλλά παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Στο Σχήμα 7.51 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.52 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.52 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γραμμή μεταφοράς 6 – 9, η οποία διαμορφώνεται στο 77% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο και μάλιστα κατά το μέγιστο των δυνατοτήτων του (46,01 MVAR), γεγονός που οδηγεί στην πτώση της τάσης του ζυγού 10.



Σχήμα 7.51: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.52: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.4.7 Αφαίρεση Γραμμής Μεταφοράς 8 – 9

Η γραμμή μεταφοράς 8 – 9 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.38.

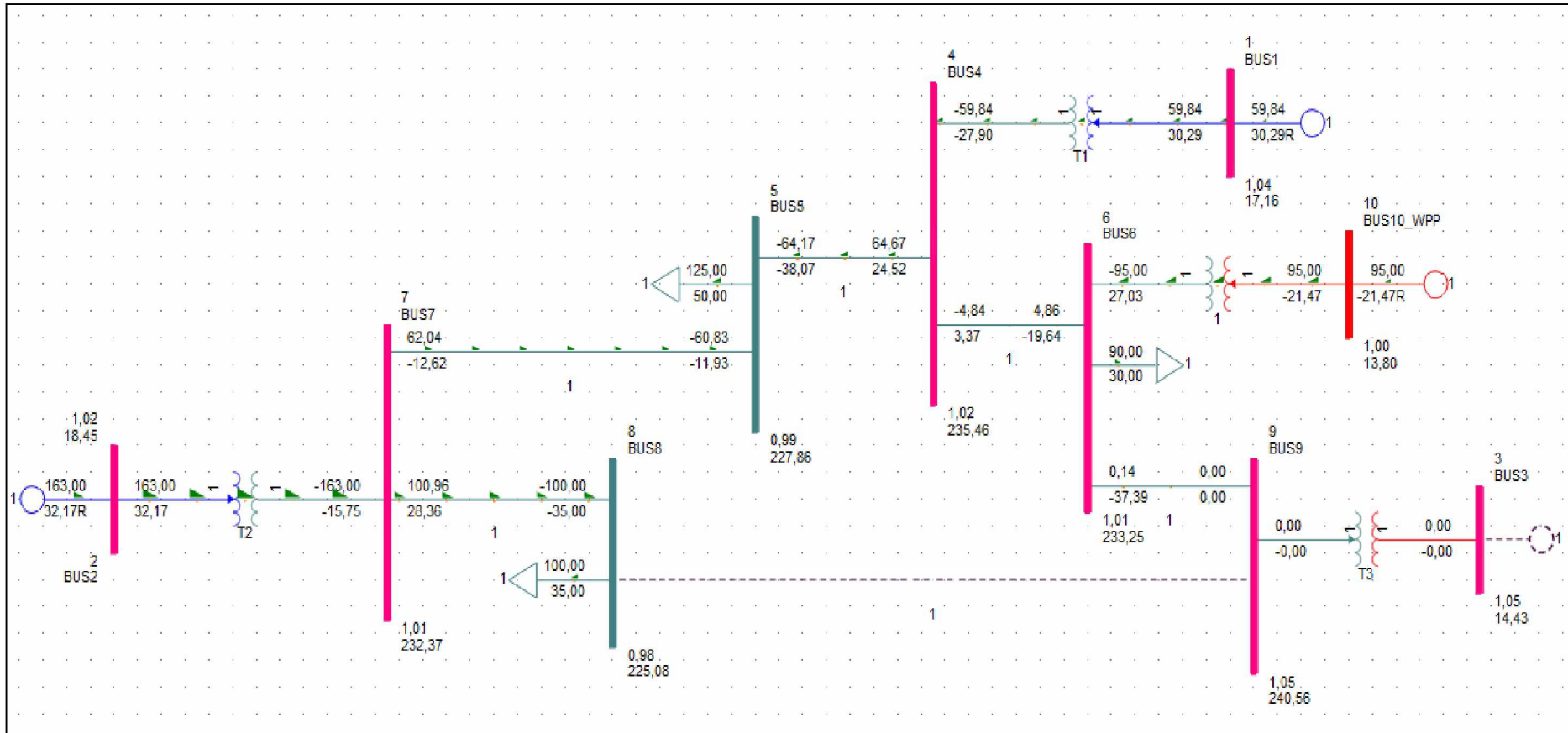
Πίνακας 7.38: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 1,025            |
| 3     | 1,0459           |
| 4     | 1,0238           |
| 5     | 0,9907           |
| 6     | 1,0141           |
| 7     | 1,0103           |
| 8     | 0,9786           |
| 9     | 1,0459           |
| 10    | 1                |

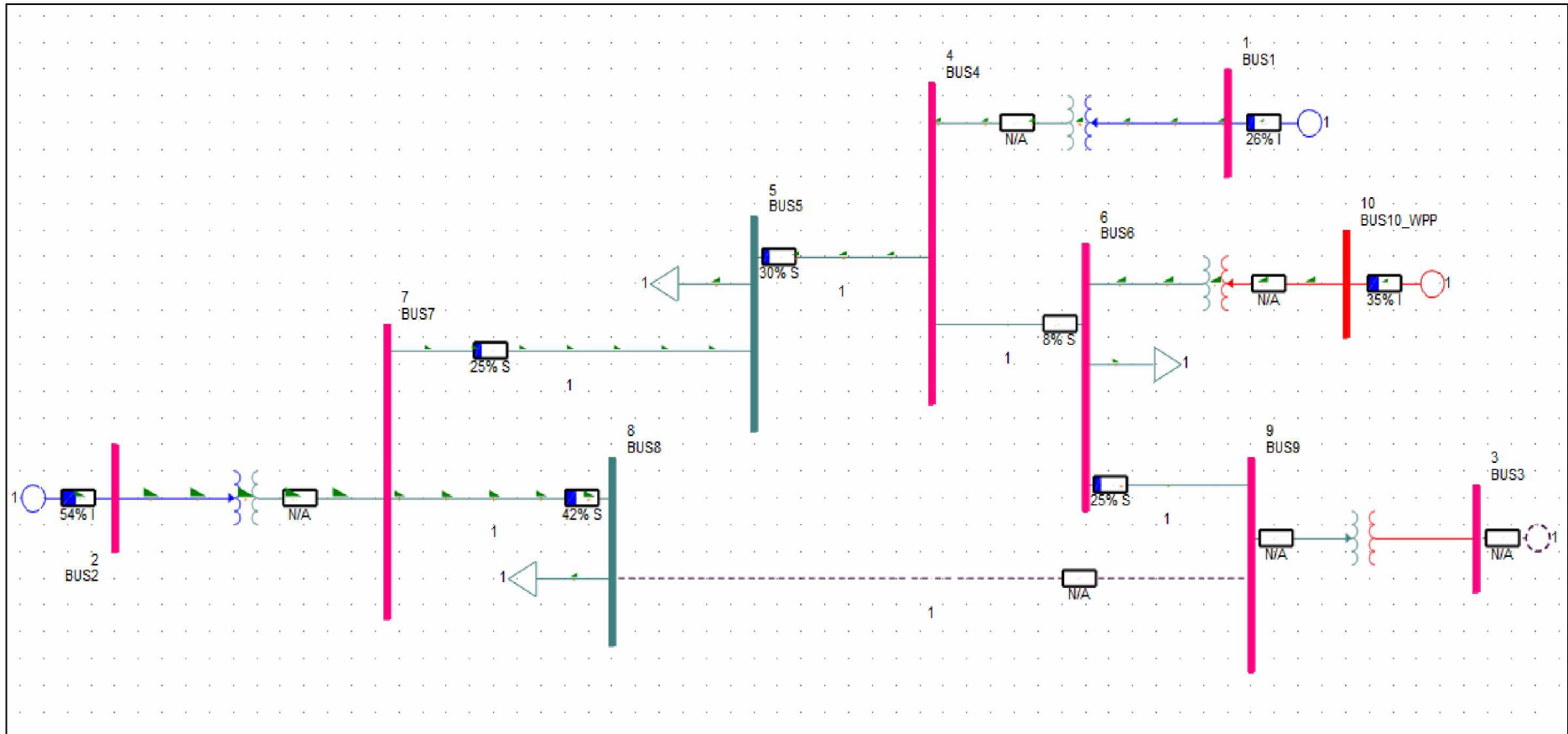
Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ).

Στο Σχήμα 7.53 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.54 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.54 δεν προκύπτει η υπερφόρτωση κάποιου στοιχείου του συστήματος. Η μέγιστη φόρτιση στοιχείου καταγράφεται στη γεννήτρια G2, η οποία διαμορφώνεται στο 54% και βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο (-21,47 MVAR).

Συμπερασματικά, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.53: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.54: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



#### 7.4.8 Αφαίρεση Γεννήτριας G2

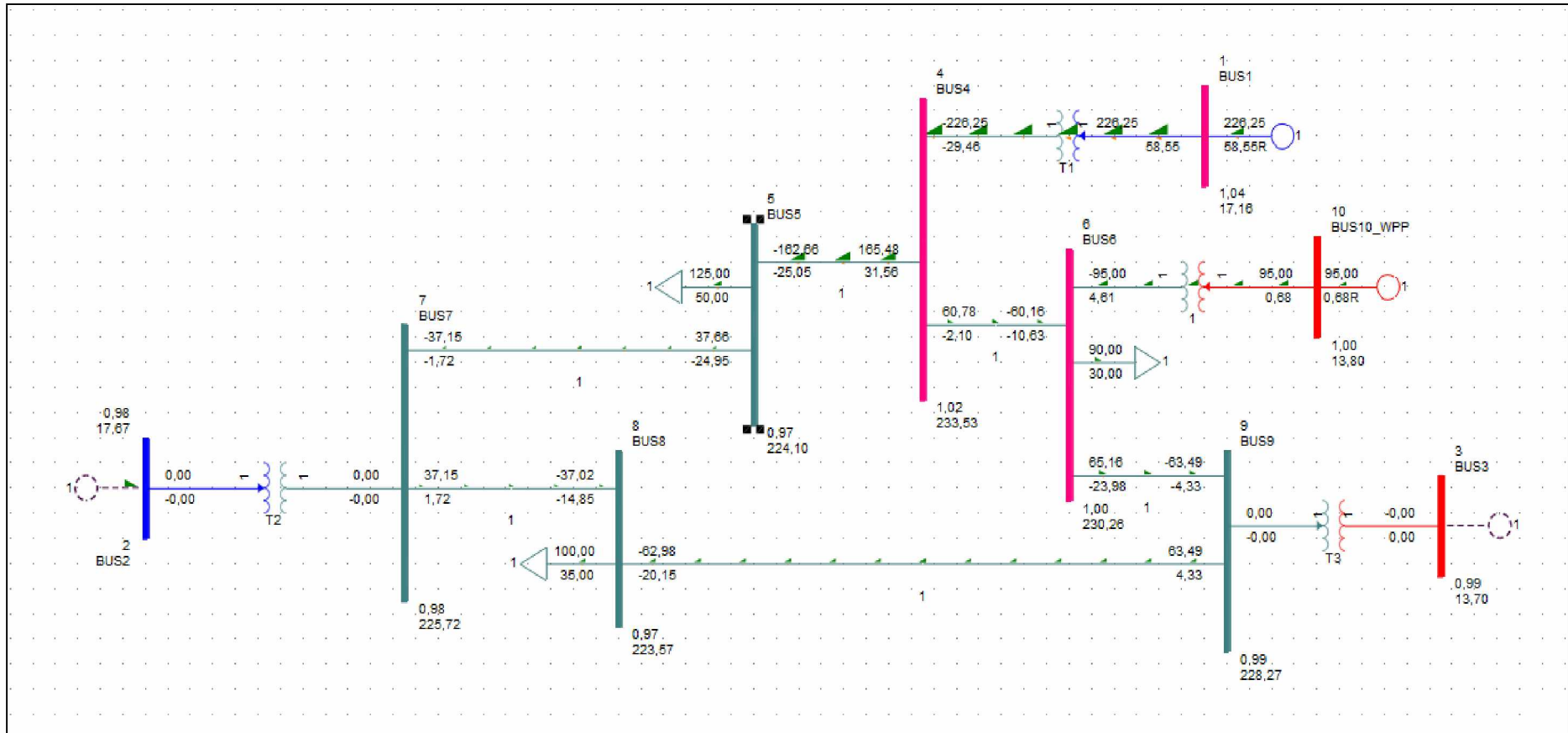
Η γεννήτρια G2 τίθεται εκτός συστήματος και εκτελείται η λειτουργία ροής φορτίου. Στη νέα μόνιμη κατάσταση, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.39.

Πίνακας 7.39: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στο ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2.

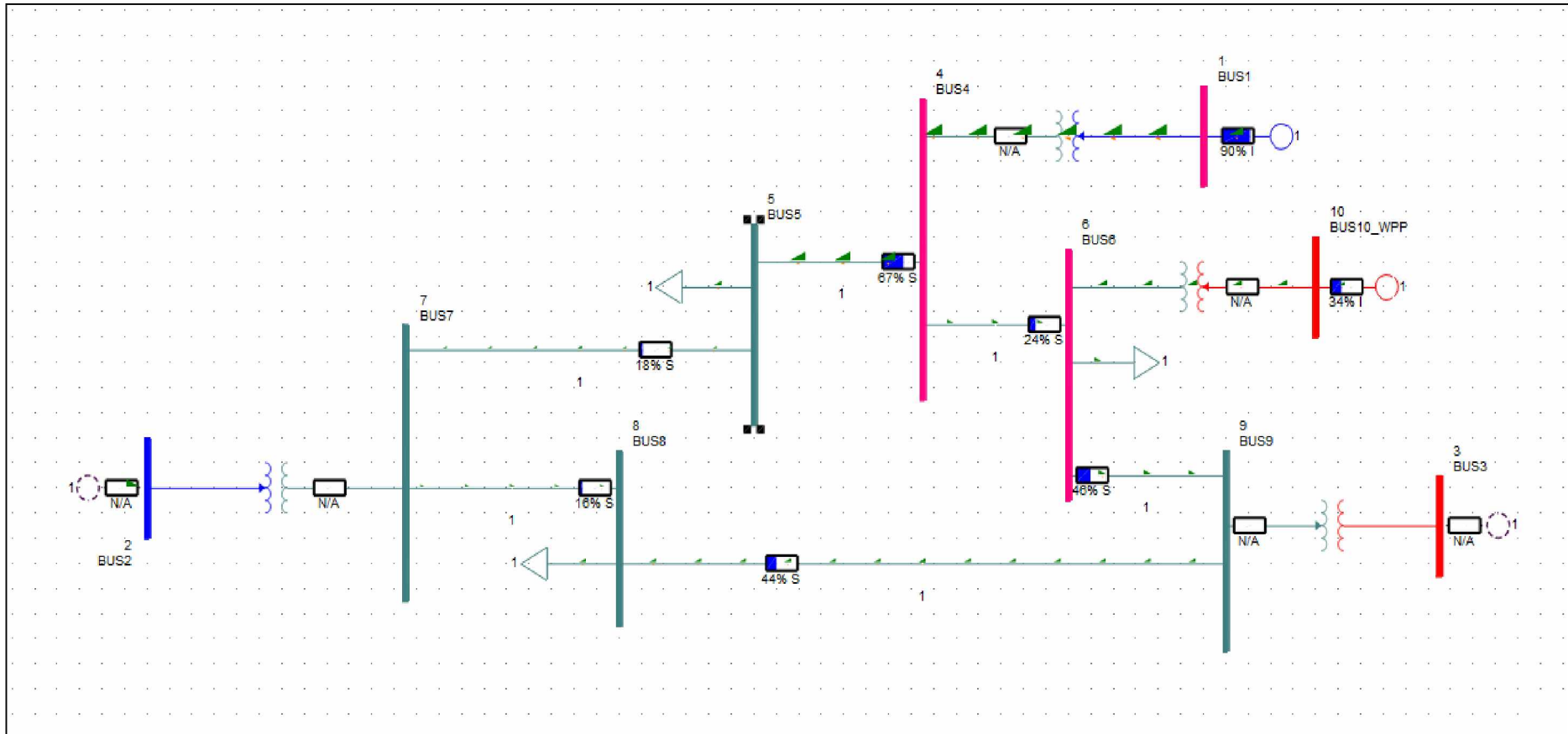
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu) |
|-------|------------------|
| 1     | 1,04             |
| 2     | 0,9814           |
| 3     | 0,9925           |
| 4     | 1,0153           |
| 5     | 0,9744           |
| 6     | 1,0011           |
| 7     | 0,9814           |
| 8     | 0,972            |
| 9     | 0,9925           |
| 10    | 1                |

Παρά τις μεταβολές στις τιμές τους, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95pu < V < 1,05pu$ ).

Στο Σχήμα 7.55 απεικονίζονται οι ροές ισχύος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.56 οι φορτίσεις των στοιχείων του. Από το Σχήμα 7.56 παρατηρείται η φόρτιση της γεννήτριας G1 στο 90% (γεννήτρια συνδεδεμένη στον ζυγό αναφοράς 1), γεγονός που χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Στην κατάσταση αυτή, το αιολικό πάρκο παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο (0,68 MVAR).



Σχήμα 7.55: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 7.56: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, μετά την αφαίρεση της γεννήτριας G2 (σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή).

#### 7.4.9 Αξιολόγηση Διαταραχών – Εύρεση Χειρότερης Περίπτωσης

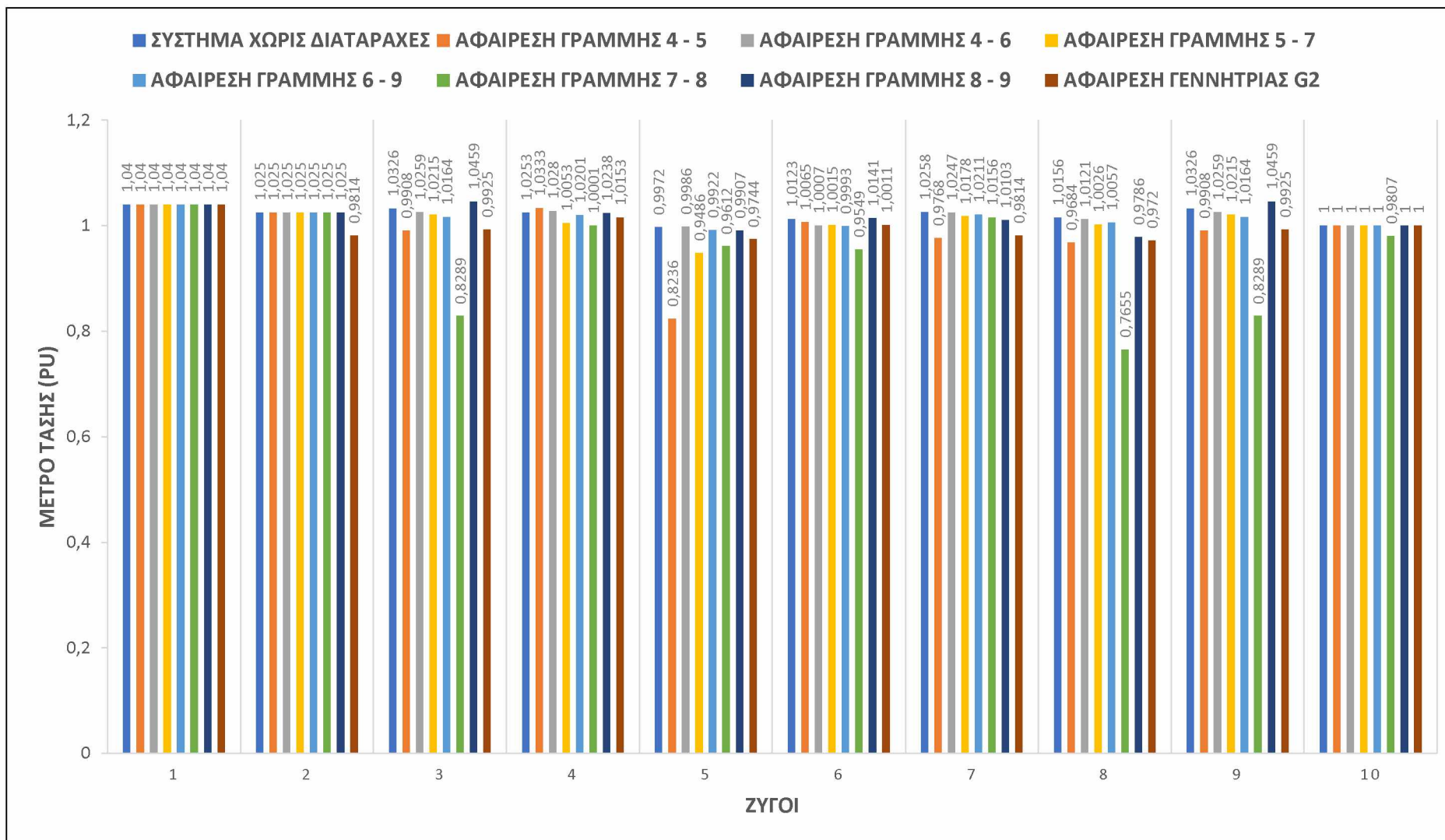
Μετά την προσομοίωση των διαταραχών, τη συλλογή και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ποια από τις διαταραχές αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση για το μελετώμενο σύστημα, ούτως ώστε να προσδιοριστούν τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του. Η αξιολόγηση αυτή των διαταραχών γίνεται τόσο βάσει των τάσεων των ζυγών του συστήματος, όσο και βάσει των φορτίσεων των διαφόρων συνιστωσών του.

Οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, καταγράφονται στον Πίνακα 7.40 και απεικονίζονται γραφικά στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.57.

Οι μεταβολές στις τιμές των τάσεων των ζυγών του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, καταγράφονται στον Πίνακα 7.41 και απεικονίζονται γραφικά στο ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.58.

Πίνακας 7.40: Τάσεις ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

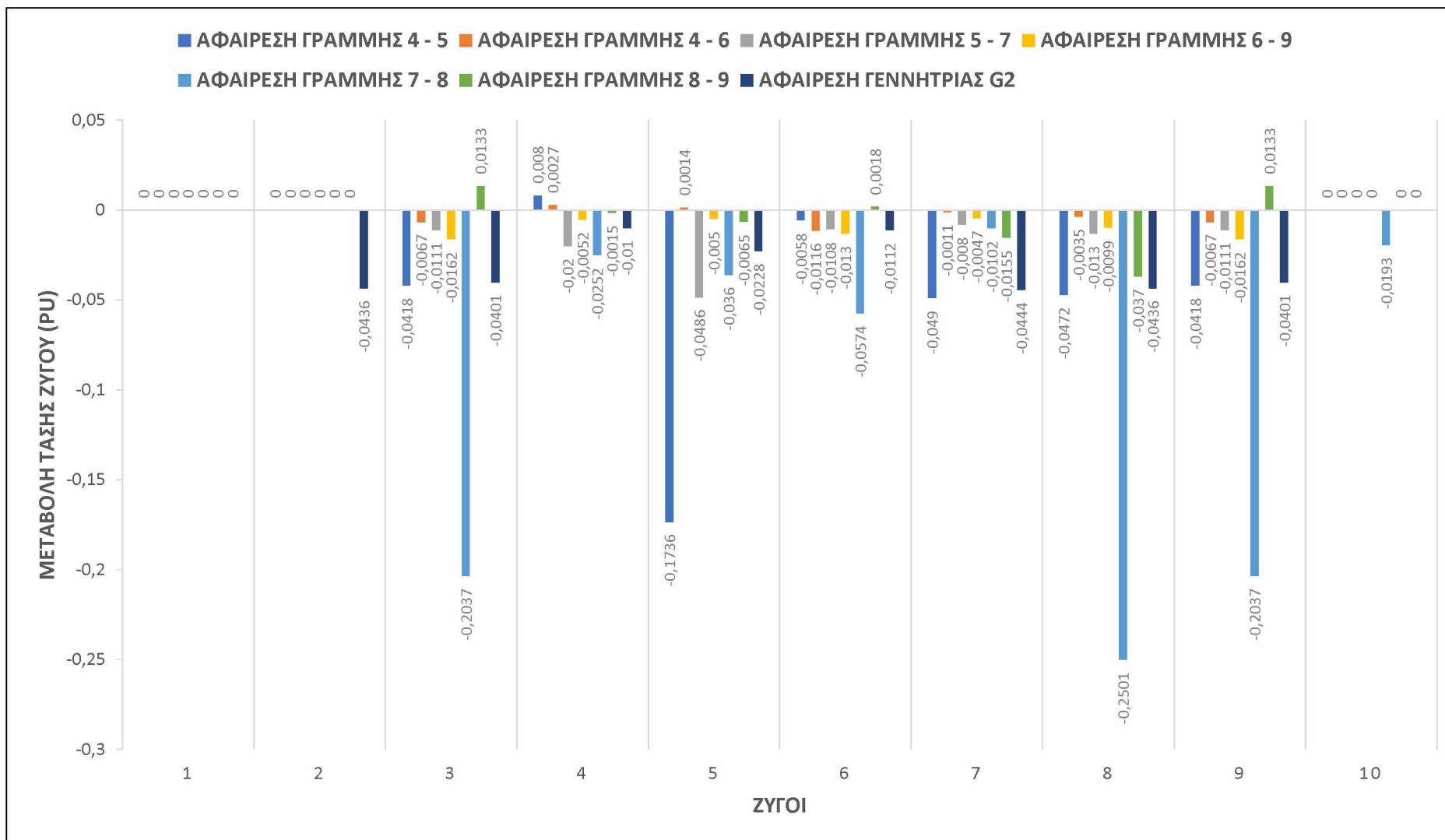
| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)               |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|-------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|       | ΣΥΣΤΗΜΑ<br>ΧΩΡΙΣ<br>ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 |
| 1     | 1,04                           | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         | 1,04                         |
| 2     | 1,025                          | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 1,025                        | 0,9814                       |
| 3     | 1,0326                         | 0,9908                       | 1,0259                       | 1,0215                       | 1,0164                       | 0,8289                       | 1,0459                       | 0,9925                       |
| 4     | 1,0253                         | 1,0333                       | 1,028                        | 1,0053                       | 1,0201                       | 1,0001                       | 1,0238                       | 1,0153                       |
| 5     | 0,9972                         | 0,8236                       | 0,9986                       | 0,9486                       | 0,9922                       | 0,9612                       | 0,9907                       | 0,9744                       |
| 6     | 1,0123                         | 1,0065                       | 1,0007                       | 1,0015                       | 0,9993                       | 0,9549                       | 1,0141                       | 1,0011                       |
| 7     | 1,0258                         | 0,9768                       | 1,0247                       | 1,0178                       | 1,0211                       | 1,0156                       | 1,0103                       | 0,9814                       |
| 8     | 1,0156                         | 0,9684                       | 1,0121                       | 1,0026                       | 1,0057                       | 0,7655                       | 0,9786                       | 0,972                        |
| 9     | 1,0326                         | 0,9908                       | 1,0259                       | 1,0215                       | 1,0164                       | 0,8289                       | 1,0459                       | 0,9925                       |
| 10    | 1                              | 1                            | 1                            | 1                            | 1                            | 0,9807                       | 1                            | 1                            |



Σχήμα 7.57: Ραβδόγραμμα τάσεων ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

Πίνακας 7.41: Μεταβολή μέτρου τάσης ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, για όλα τα σενάρια διαταραχών.

| ΖΥΓΟΣ | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΟΥ (pu) |                     |                     |                     |                     |                     |                        |
|-------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
|       | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ              | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΡΑΜΜΗΣ | ΑΦΑΙΡΕΣΗ<br>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ |
|       | 4 - 5                            | 4 - 6               | 5 - 7               | 6 - 9               | 7 - 8               | 8 - 9               | G2                     |
| 1     | 0                                | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                      |
| 2     | 0                                | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -0,0436                |
| 3     | -0,0418                          | -0,0067             | -0,0111             | -0,0162             | -0,2037             | 0,0133              | -0,0401                |
| 4     | 0,008                            | 0,0027              | -0,02               | -0,0052             | -0,0252             | -0,0015             | -0,01                  |
| 5     | -0,1736                          | 0,0014              | -0,0486             | -0,005              | -0,036              | -0,0065             | -0,0228                |
| 6     | -0,0058                          | -0,0116             | -0,0108             | -0,013              | -0,0574             | 0,0018              | -0,0112                |
| 7     | -0,049                           | -0,0011             | -0,008              | -0,0047             | -0,0102             | -0,0155             | -0,0444                |
| 8     | -0,0472                          | -0,0035             | -0,013              | -0,0099             | -0,2501             | -0,037              | -0,0436                |
| 9     | -0,0418                          | -0,0067             | -0,0111             | -0,0162             | -0,2037             | 0,0133              | -0,0401                |
| 10    | 0                                | 0                   | 0                   | 0                   | -0,0193             | 0                   | 0                      |



Σχήμα 7.58: Ραβδόγραμμα μεταβολών μέτρου τάσης ζυγών συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, για όλα τα σενάρια διαταραχών.



Παρατηρώντας το ραβδόγραμμα του Σχήματος 7.58, η μεγαλύτερη πτώση τάσης καταγράφεται στον ζυγό 8, κατά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 (-0,2501pu). Από την άλλη, η μεγαλύτερη αύξηση τάσης εντοπίζεται στους ζυγούς 3 και 9, κατά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 8 – 9 (0,0133pu).

Για καθεμία από τις διαταραχές, επιλέγεται ο ζυγός με τη μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή της τάσης, διαμορφώνοντας έτσι τον Πίνακα 7.42:

Πίνακας 7.42: Μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή τάσης ζυγού, για κάθε σενάριο διαταραχής, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6.

| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>          | <b>ΜΕΓΙΣΤΗ<br/>ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ</b> | <b>ΖΥΓΟΣ</b> |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------|
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | 0,1736                            | 5            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | 0,0116                            | 6            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | 0,0486                            | 5            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | 0,0162                            | 3, 9         |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | 0,2501                            | 8            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | 0,037                             | 8            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | 0,0444                            | 7            |

Στη συνέχεια, τα σενάρια των διαταραχών ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά μεταβολής τάσης, διαμορφώνοντας έτσι τον Πίνακα 7.43:

Πίνακας 7.43: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τη μέγιστη, κατ' απόλυτο τιμή, μεταβολή της τάσης ζυγού, για σύστημα παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6.

| ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                         | ΜΕΓΙΣΤΗ<br>ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ | ΖΥΓΟΣ    |
|-----------------------------------|---------------------------|----------|
| <b>ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br/>7 - 8</b> | <b>0,2501</b>             | <b>8</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5         | 0,1736                    | 5        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7         | 0,0486                    | 5        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2         | 0,0444                    | 7        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9         | 0,037                     | 8        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9         | 0,0162                    | 3, 9     |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6         | 0,0116                    | 6        |

Από τον Πίνακα 7.43 προκύπτει ότι η χειρότερη διαταραχή, όσον αφορά τη μεταβολή της τάσης, είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8, καθώς οδηγεί στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 8 κατά 0,2501pu. Η δεύτερη χειρότερη διαταραχή είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4 – 5, η οποία οδηγεί στη μεταβολή της τάσης του ζυγού 5 κατά 0,1736pu.

Τέλος, οι φορτίσεις των στοιχείων του συστήματος, για το σύνολο των διαταραχών, παρατίθενται στον Πίνακα 7.44:

Πίνακας 7.44: Φορτίσεις στοιχείων συστήματος, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6, για το σύνολο των διαταραχών.

| ΣΤΟΙΧΕΙΟ      | ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (%) |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|---------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|               | ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ      | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 5 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 6 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 5 - 7 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 6 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 - 8 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 8 - 9 | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G2 |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1  | 25%                   | 27%                    | 25%                    | 35%                    | 27%                    | 41%                    | 26%                    | 90%                    |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2  | 53%                   | 60%                    | 53%                    | 53%                    | 53%                    | 53%                    | 54%                    | X                      |
| ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G3  | 0%                    | 0%                     | 0%                     | 0%                     | 0%                     | 0%                     | 0%                     | 0%                     |
| ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ | 35%                   | 34%                    | 34%                    | 34%                    | 34%                    | 38%                    | 35%                    | 34%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 4 - 5  | 27%                   | X                      | 28%                    | 55%                    | 29%                    | 25%                    | 30%                    | 67%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 4 - 6  | 9%                    | 29%                    | X                      | 27%                    | 13%                    | 44%                    | 8%                     | 24%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 5 - 7  | 27%                   | 59%                    | 27%                    | X                      | 25%                    | 65%                    | 25%                    | 18%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9  | 21%                   | 51%                    | 23%                    | 42%                    | X                      | 77%                    | 25%                    | 46%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 7 - 8  | 39%                   | 13%                    | 38%                    | 65%                    | 40%                    | X                      | 42%                    | 16%                    |
| ΓΡΑΜΜΗ 8 - 9  | 18%                   | 49%                    | 16%                    | 47%                    | 14%                    | 73%                    | X                      | 44%                    |

Από τον Πίνακα 7.44, για κάθε διαταραχή, εντοπίζεται το στοιχείο που παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό (%) φόρτισης. Έτσι, διαμορφώνεται ο Πίνακας 7.45:

Πίνακας 7.45: Στοιχεία συστήματος με το μέγιστο ποσοστό (%) φόρτισης για όλα τα σενάρια διαταραχών, παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6.

| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>          | <b>ΣΤΟΙΧΕΙΟ<br/>ΜΕ ΤΗ<br/>ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ</b> | <b>ΦΟΡΤΙΣΗ</b> |
|---------------------------|---|----------------|
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                                  | 60%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                                  | 53%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΓΡΑΜΜΗ 7 - 8                                  | 65%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                                  | 53%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8 | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                                  | 77%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                                  | 54%            |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br>G2 | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1                                  | 90%            |

Στη συνέχεια, οι διαταραχές του Πίνακα 7.45 ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά φόρτισης, διαμορφώνοντας τον Πίνακα 7.46:

Πίνακας 7.46: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τα ποσοστά (%) φόρτισης για σύστημα παρουσία αιολικού πάρκου ισχύος 95MW συνδεδεμένου στον ζυγό 6.

| ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                         | ΣΤΟΙΧΕΙΟ<br>ΜΕ ΤΗ<br>ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ | ΦΟΡΤΙΣΗ    |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|
| <b>ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ<br/>G2</b> | <b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1</b>                  | <b>90%</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>7 - 8         | ΓΡΑΜΜΗ 6 - 9                         | 77%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7         | ΓΡΑΜΜΗ 7 - 8                         | 65%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 5         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                         | 60%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>8 - 9         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                         | 54%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>4 - 6         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                         | 53%        |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>6 - 9         | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G2                         | 53%        |

Από τον Πίνακα 7.46 προκύπτει ότι η χειρότερη διαταραχή, όσον αφορά τις φορτίσεις στοιχείων του συστήματος, είναι η αφαίρεση της γεννήτριας G2, καθώς οδηγεί στη φόρτιση της γεννήτριας G1 στο 90%. Η δεύτερη χειρότερη διαταραχή είναι η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8, η οποία οδηγεί τη γραμμή μεταφοράς 6 – 9 σε φόρτιση 77%.

## 7.5 Συμπεράσματα Ανάλυσης Διαταραχών

Μετά την εκτέλεση και αξιολόγηση όλων των σεναρίων διαταραχών N-1, τόσο στο αρχικό σύστημα των 9 ζυγών χωρίς αιολικό πάρκο, όσο και στα δύο συστήματα που προέκυψαν μετά την ενσωμάτωση αιολικού πάρκου, ισχύος 15% (48MW) και 30% (95MW) της ζήτησης ισχύος, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ποιο από τα τρία αυτά συστήματα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή έναντι διαταραχών (μεταβολές τάσεων ζυγών, φορτίσεις στοιχείων), καθώς και ποιος είναι ο αντίκτυπος της ενσωμάτωσης αιολικής παραγωγής.

### 7.5.1 Μεταβολές Τάσεων Ζυγών

Αναφορικά με τις μεταβολές των τιμών των τάσεων των ζυγών, στον Πίνακα 7.47 παρατίθενται, κατά φθίνουσα σειρά απόλυτης τιμής μεταβολής της τάσης, οι διαταραχές εκείνες που προκαλούν τη μεγαλύτερη μεταβολή τάσης ζυγού, για καθένα από τα μελετώμενα συστήματα:

Πίνακας 7.47: Ταξινόμηση διαταραχών με τη μεγαλύτερη μεταβολή τάσης ζυγού για καθένα από τα μελετώμενα συστήματα.

| ΣΥΣΤΗΜΑ                  | ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ              | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ | ΖΥΓΟΣ |
|--------------------------|------------------------|----------------|-------|
| ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ 95MW (30%) | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 – 8 | 0,2501         | 8     |
| ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ           | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 – 5 | 0,1568         | 5     |
| ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ 48MW (15%) | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 – 6 | 0,0741         | 6     |

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι, η διαταραχή που προκαλεί τη μεγαλύτερη τιμή μεταβολής τάσης ζυγού εντοπίζεται στο σύστημα με αιολικό πάρκο ισχύος 95MW, με το αρχικό σύστημα και το σύστημα με αιολικό πάρκο 48MW να ακολουθούν. Μάλιστα, η τιμή της μεταβολή στο σύστημα με το αιολικό πάρκο των 48MW είναι σημαντικά μικρότερη, συγκριτικά με των άλλων δύο συστημάτων.

Συνεχίζοντας, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το πλήθος των διαταραχών, για κάθε σύστημα, που προκαλούν μεταβολές στις τάσεις των ζυγών εκτός των επιτρεπτών ορίων ( $0,95\text{pu} < V < 1,05\text{pu}$ ). Έτσι, διαμορφώνονται οι Πίνακες 7.48, 7.49 και 7.50, για το Αρχικό

Σύστημα και τα Συστήματα παρουσία Αιολικού Πάρκου ισχύος 48MW και 95MW αντίστοιχα:

Πίνακας 7.48: Διαταραχές με τάσεις ζυγών εκτός επιτρεπτών ορίων στο αρχικό σύστημα.

| <b>ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ</b>  |              |                         |
|------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>       | <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 – 5 | 5            | 0,8388                  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 – 6 | 6            | 0,9419                  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 5 – 7 | 5            | 0,938                   |

Πίνακας 7.49: Διαταραχές με τάσεις ζυγών εκτός επιτρεπτών ορίων στο σύστημα με αιολικό πάρκο ισχύος 48MW (15% της ζήτησης φορτίου).

| <b>ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ 48MW (15%)</b> |              |                         |
|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>                | <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 6          | 6            | 0,9417                  |

Πίνακας 7.50: Διαταραχές με τάσεις ζυγών εκτός επιτρεπτών ορίων στο σύστημα με αιολικό πάρκο ισχύος 95MW (30% της ζήτησης φορτίου).

| <b>ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ 95MW (30%)</b> |              |                         |
|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ</b>                | <b>ΖΥΓΟΣ</b> | <b>ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)</b> |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 4 - 5          | 5            | 0,8236                  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 5 - 7          | 5            | 0,9486                  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 - 8          | 3            | 0,8289                  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 - 8          | 8            | 0,7655                  |
| ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 7 - 8          | 9            | 0,8289                  |

Από τους παραπάνω Πίνακες γίνεται φανερό ότι το σύστημα με αιολικό πάρκο ισχύος 15% της ζήτησης φορτίου (48MW) παρουσιάζει μόλις μια διαταραχή η οποία θέτει κάποιον από τους ζυγούς του εκτός των επιτρεπτών ορίων τάσης. Από την άλλη, το σύστημα με το

αιολικό πάρκο των 95MW (30% της ζήτησης φορτίου), αν και έχει τον ίδιο αριθμό διαταραχών που προκαλούν προβλήματα τάσης με το αρχικό σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή, εντούτοις η εκδήλωση συγκεκριμένων διαταραχών προκαλεί όχι μόνο μεγαλύτερες πτώσεις τάσεων, συγκριτικά με τα άλλα δύο συστήματα, αλλά επηρεάζει τις τάσεις μεγάλου αριθμού ζυγών του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 7 – 8 προκαλεί ραγδαία πτώση τάσης στους ζυγούς 3, 8 και 9, με τη μεγαλύτερη πτώση να εντοπίζεται στον ζυγό 8.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, το σύστημα με το αιολικό πάρκο των 48MW (15% της ζήτησης φορτίου) παρουσιάζει μεγαλύτερη στιβαρότητα έναντι του αρχικού συστήματος χωρίς αιολική παραγωγή, όσον αφορά μεταβολές των τιμών των τάσεων των ζυγών του λόγω διαταραχών. Κάτι ανάλογο δεν φαίνεται, όμως, να ισχύει για την ενσωμάτωση του αιολικού πάρκου των 95MW (30% της ζήτησης του φορτίου), καθώς το σύστημα που προκύπτει αποδεικνύεται πιο ευάλωτο, όχι μόνο συγκριτικά με το έτερο σύστημα με το αιολικό πάρκο των 48MW, αλλά και με το αρχικό σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή.

Συμπερασματικά, η κάλυψη του 15% της ζήτησης πραγματικής ισχύος του συστήματος των 9 ζυγών μέσω ενός αιολικού πάρκου 48MW συνδεδεμένου στο ζυγό 5, “θωρακίζει” το σύστημα έναντι πτώσεων τάσεων ζυγών που προκαλούνται λόγω της εκδήλωσης σεναρίων διαταραχών N-1.



### 7.5.2 Φορτίσεις Στοιχείων

Αναφορικά με τις φορτίσεις των στοιχείων, στον Πίνακα 7.51 παρατίθενται κατά φθίνουσα σειρά ποσοστού (%) φόρτισης, οι διαταραχές εκείνες, οι οποίες προκαλούν τη μέγιστη φόρτιση στοιχείου, για καθένα από τα μελετώμενα συστήματα:

Πίνακας 7.51: Ταξινόμηση διαταραχών με τη μεγαλύτερη φόρτιση στοιχείου για καθένα από τα μελετώμενα συστήματα.

| ΣΥΣΤΗΜΑ                      | ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ                 | ΣΤΟΙΧΕΙΟ        | ΦΟΡΤΙΣΗ (%) |
|------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------|
| ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ               | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ<br>5 - 7 | ΓΡΑΜΜΗ<br>6 - 9 | 97%         |
| ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ<br>95 MW (30%) | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G2    | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1    | 90%         |
| ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ<br>48 MW (15%) | ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ G2    | ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ G1    | 72%         |

Από τον παραπάνω Πίνακα προκύπτει ότι η διαταραχή με τη μεγαλύτερη φόρτιση στοιχείου εντοπίζεται στο Αρχικό Σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή, με τα συστήματα παρουσία αιολικού πάρκου 95MW και 48MW να ακολουθούν. Σε κανένα από τα τρία συστήματα δεν εντοπίζεται διαταραχή που να οδηγεί στη φόρτιση κάποιου στοιχείου τους άνω του 100%. Για το Αρχικό Σύστημα και το Σύστημα με Αιολικό Πάρκο 95MW, οι φορτίσεις παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες και χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης, σε αντίθεση με το Σύστημα με Αιολικό Πάρκο 48MW, όπου η μέγιστη φόρτιση στοιχείου παραμένει σε επιτρεπτά επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα δύο συστήματα που περιλαμβάνουν αιολικό πάρκο, η αφαίρεση της γεννήτριας G2 οδηγεί την γεννήτρια G1 στη μεγαλύτερη φόρτιση. Υπενθυμίζεται ότι η γεννήτρια G1 είναι συνδεδεμένη στον ζυγό 1, που είναι ο ζυγός αναφοράς του συστήματος.

Συμπερασματικά, το σύστημα παρουσία αιολικού πάρκου 48MW (15% της ζήτησης ισχύος) συνδεδεμένου στο ζυγό 5, αποτελεί το βέλτιστο σύστημα συγκριτικά με τα άλλα δύο που μελετήθηκαν, καθώς η μέγιστη φόρτιση στοιχείου που παρατηρείται, εξαιτίας της εκδήλωσης κάποιας διαταραχής N-1, βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων, χωρίς το

σχετιζόμενο στοιχείο να υπερφορτίζεται, με όποιες συνέπειες αυτό συνεπάγεται, αναφορικά με την λειτουργία και την ασφάλεια του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας, με μια διαρκώς αυξανόμενη τάση ενσωμάτωσής της στον τομέα της παραγωγής των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, εξαιτίας της ανάγκης μετάβασης σε φιλικότερες προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας και σταδιακής απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Αιολικά πάρκα μεγάλης ισχύος κατασκευάζονται και συνδέονται στα ανά τις χώρες εθνικά δίκτυα, συνεισφέροντας σημαντικά στο ενεργειακό μείγμα. Όπως είναι αναμενόμενο, η τεχνολογία των ανεμογεννητριών, και των αιολικών πάρκων κατ' επέκταση, εξελίσσονται διαρκώς, τόσο μηχανολογικά, όσο και ηλεκτρολογικά, εκμεταλλευόμενη κατά το βέλτιστο τρόπο το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό. Η ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο αποτελεί, παρόλα αυτά, μια σύνθετη διαδικασία, λόγω της διαφορετικής φύσης και συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών έναντι των συμβατικών γεννητριών των σταθμών παραγωγής, κάνοντας αναγκαία την διατύπωση και εφαρμογή κατάλληλων προδιαγραφών σύνδεσης και λειτουργίας, οι οποίες και συντελούν, στην κατά το βέλτιστο λειτουργία, όχι μόνο του αιολικό πάρκου, αλλά και του υπόλοιπου συστήματος. Όπως είναι αναμενόμενο, πριν ακόμα την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου και τη σύνδεσή του με το δίκτυο, είναι απαραίτητη η διενέργεια πλήθους μελετών, τόσο για τη μόνιμη, όσο και για τη μεταβατική του λειτουργία. Μια από τις μελέτες αυτές είναι η επιλογή του ζυγού σύνδεσης στο δίκτυο, που παρουσιάζει τις ελάχιστες απώλειες ισχύος. Η μελέτη η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στο να αποσαφηνιστούν, τόσο η συμβολή της αντιστάθμισης της άεργου ισχύος στο δίκτυο, όσο και οι συνέπειες της λειτουργίας του δικτύου κοντά στα όριά του. Όταν πια έχει επιλεγεί ο ζυγός σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο, οι μελέτες στατικής ασφάλειας ή ανάλυσης διαταραχών, παρουσία του αιολικού πάρκου, δίνουν στους μηχανικούς μια σαφή εικόνα για τις επιπτώσεις στο σύστημα, σχετικά με τις μεταβολές των τάσεων και τις φορτίσεις των διαφόρων στοιχείων του, από διαταραχές όπως η αφαίρεση μιας γραμμής μεταφοράς ή μιας γεννήτριας. Ταυτόχρονα, αποσαφηνίζουν τόσο τη μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ αιολικών πάρκων, που μπορεί να διαχειριστεί το δίκτυο, όσο και τις απαραίτητες ενισχύσεις που θα χρειαστούν, για τη διασφάλιση ή και την αύξηση της ασφάλειας του δικτύου. Συμπερασματικά, η διενέργεια των προαναφερθέντων μελετών κρίνεται αυστηρώς απαραίτητη για την ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο, καθώς παρέχει

χρήσιμες πληροφορίες και βοηθά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος, συντελώντας στην αξιοποίηση κατά το βέλτιστο των δυνατοτήτων των αιολικών πάρκων και της αιολικής ενέργειας γενικότερα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Βοβός Νικόλαος Α., Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2015
- [2] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2016
- [3] Λαμπρίδης Δ., Ντοκόπουλος Π., Παπαγιάννης Γ., Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Τόμος Α', Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2007
- [4] Chowdhury Badrul H., Load-Flow Analysis in Power Systems, Electrical & Computer Engineering Department, University of Missouri-Rolla
- [5] Service Reliability (692-01-14), International Electrotechnical Commission (IEC), <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=692-01-14>
- [6] System Adequacy (692-01-05), International Electrotechnical Commission (IEC), <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=692-01-05>
- [7] System Security (692-01-11), International Electrotechnical Commission (IEC), <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=692-01-11>
- [8] Roy Billinton, Wenyuan Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Chapter 2, Springer Science + Business Media, New York, 1994
- [9] Γεωργιάκης Πάυλος Σ., Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Κεφάλαιο 6, ΣΕΑΒ, Αθήνα, 2015
- [10] Sreedevi Sreekumaran, Lekshmi Nair, H. Nagesh, Power System Assessment and Contingency Analysis using Supervised Learning Approach, Volume 2 – Issue 4, International Journal of Advance Engineering and Research Development, April 2015
- [11] Veenavati Jagadishprasad Mishra, Manisha D. Khardennis, Contingency Analysis of Power System, 2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, IEEE, 2012

- [12] Jothy Venkateswaran, Vinothini. K, B. T. Monisha Shree, Pragathi Manohar, Dr.R.Jayabarathi, Contingency analysis of an IEEE 30 bus system, 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT-2018), IEEE, 2018
- [13] Mellynda Dwi Marda Putri, Arif Nur Afandi, Performance Index Analysis (PIA) for N-1 Contingency Transmission in 150 kV Electricity System, IEEE, 2019
- [14] Ali Abdulwahhab Abdulrazzaq, Contingency ranking of power systems using a performance index, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2015
- [15] Letcher Trevor M., Wind Energy Engineering – A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines, Chapter 8, Academic Press, Elsevier Inc, 2017
- [16] Ackermann Thomas, Wind Power in Power Systems, Chapter 4, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2005
- [17] P. Pourbeik, A. Ellis, J. Sanchez-Gasca, Y. Kazachkov, E. Muljadi, J. Senthil and D. Davies, Generic Stability Models for Type 3 & 4 Wind Turbine Generators for WECC, Working Group Joint Report – WECC Renewable Energy Modeling Task Force & IEEE Working Group on Dynamic Performance of Wind Power Generation, IEEE, 2013
- [18] A. Ellis, E. Muljadi, J. Sanchez-Gasca, Y. Kazachkov, Generic Models for Simulation of Wind Power Plants in Bulk System Planning Studies, IEEE, 2011
- [19] Ping-Kwan Keung, Yuriy Kazachkov, J. Senthil, Generic Models of Wind Turbines for Power System Stability Studies, IEEE, 2009
- [20] PSS/E 34.2 – Program Application Guide: Volume II, Chapter 22, Generic Wind Models, PSS/E Documentation, Siemens, 2017
- [21] Ali Gashi, Gazmend Kabashi, Skender Kabashi, Skender Ahmetaj, Valon Veliu, Simulation the Wind Grid Code Requirements for Wind Farms Connection in Kosovo Transmission Grid, Energy and Power Engineering, Scientific Research, November 2012

- [22] Meiqi Yao, Liangzhong Yao, Integration of large scale wind farm into electrical grids, 2010 China International Conference on Electricity Distribution, IEEE, 2010
- [23] D. Dragomir, N. Golovanov, P. Postolache, C. Toader, The connection to the grid of wind turbines, IEEE Bucharest Power Tech Conference, IEEE, 2009
- [24] Hasmina Tari Mokui, Mohammad A.S. Masoum, Mansour Mohseni, Review on Australian Grid Codes for Wind Power Integration in Comparison with International Standards, Australasian Universities Power Engineering Conference, IEEE, 2014
- [25] Li Yan, Chi Yongning, Tang Haiyan, Tian Xinshou, Zhang Zhankui, Jiao Jianqing, Common Focus and New Requirement on Technical Standards of Renewable Energy Grid Integration, IEEE, 2019
- [26] G.Kabashi, K.Kadriu, A.Gashi, S.Kabashi, G.Pula, V.Komoni, Wind farm modeling for steady state and dynamic analysis, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011
- [27] I. Isaac, J. Gonzalez, J. Areiza, H. Biechl, H. Cardona, G. Lopez, Large Scale Integration of Wind Energy in Colombia: Electrical Analysis-Part I, 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE, 2010
- [28] J. W. Feltes, B. S. Fernandes, P. K. Keung, Case Studies of Wind Park Modeling, IEEE, 2011
- [29] R.Jayashri, R.P.Kumudini Devi, Steady State Analysis of Wind Turbine Generators Interconnected to the Grid, IEEE, 2006
- [30] Ismael Molina-Moreno, Aurelio Medina, Rafael Cisneros-Magaña, Methodology for Optimal Bus Placement to Integrate Wind Farm Optimizing Power Flows, ROPEC 2015 - Advances on Renewable Energy, IEEE, 2015
- [31] J. Wiik, J. O. Gjerde, T. Gjengedal, M. Gustafsson, Steady state power system issues when planning large wind farms, IEEE, 2002
- [32] Arechkik Ameer, Asmae Berrada, Khalid Loudiyi, Mohammed Aggour, Analysis of renewable energy integration into the transmission network, The Electricity Journal 32 (2019) 106676, Elsevier, 2019

- [33] O. Tšernobrovkin, J. Kilter, A. Reinson, E. Ülavere, Wind Power Integration in Estonia Under Planning Contingencies, IEEE, 2008
- [34] Mario Klaric, Igor Kuzle, Grid integration of wind power plants in congested line, IEEE, 2009
- [35] Daphne Schwanz, Regis E. Henke, Roberto Chouhy Leborgne, Wind Power Integration in Southern Brazil: Steady-State Analysis, IEEE, 2012
- [36] Wikipedia, Power system simulation, [https://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_system\\_simulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_system_simulation)
- [37] PSS/E 34.2 – Program Operation Manual (POM), PSS/E Documentation, Siemens, 2071