



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστημάτων

Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Μπέσιος Σωτήριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2019



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Συστημάτων

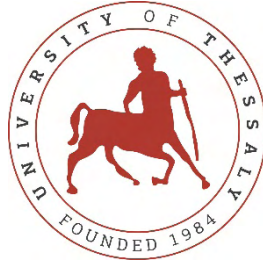
Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Μπέσιος Σωτήριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2019



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Power Systems Static

Security Analysis

Diploma Thesis

Besios Sotirios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

Volos 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, Δημήτριο Μπαργιώτα για την πολύτιμη βοήθειά του αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ελευθέριο Τσουκαλά ως συνεπιβλέποντα αυτής της διπλωματικής.

Τέλος, εκ βάθος καρδιάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς ήταν πάντα δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

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

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει 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. 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

Μπέσιος Σωτήριος

02 Ιουλίου 2019

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η έννοια της αξιοπιστίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στο κομμάτι της στατικής ασφάλειάς τους και γίνεται μια σύντομη περιγραφή μιας τέτοιας μελέτης ενός ΣΗΕ.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Γίνεται μια αναφορά σε όλες τις συνιστώσες τους καθώς και μια περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της καθεμίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή στην Ανάλυση Ροής Φορτίου και στη χρησιμότητά της όσον αφορά την ανάλυση των ΣΗΕ. Δείχνεται ο τρόπος κατασκευής των εξισώσεων ροής φορτίου αλλά και οι πλέον χρησιμοποιούμενοι τρόποι για την επίλυσή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην έννοια της αξιοπιστίας των ΣΗΕ, η οποία αναλύεται στις επιμέρους έννοιες της. Ακόμη, γίνεται μια αναφορά στους δείκτες και στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια μελέτη στατικής ασφάλειας ενός ΣΗΕ. Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιείται ένα πρότυπο σύστημα στο οποίο εφαρμόζονται διάφορα σενάρια διαταραχών.

Abstract

This diploma thesis is analyzing the concept of power systems reliability. Specifically, emphasis is placed on power systems static security and a brief description of a static security study is made.

In the first chapter there is an introduction to Power Systems. It describes all the components of a power system and the key features of each one.

The second chapter describes the Power Flow Analysis and how this analysis used to Power System Analysis. It describes how Power Flow Equations are made and what are the most used solving methods.

The third chapter is about power systems reliability which is analysed in its individual concepts. In addition, a reference is made to the indexes and methods used to evaluate the reliability of a power system.

Last but not least, the fourth chapter is about a static security study of a Power System. A model system in which various disturbance scenarios are applied is used for the needs of this project.

Πίνακας Περιεχομένων

<i>Περίληψη</i>	<i>vi</i>
<i>Abstract</i>	<i>vii</i>
<i>Πίνακας Περιεχομένων</i>	<i>viii</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	12
Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
1.1 Βασικές έννοιες Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
1.2 Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	13
1.3 Απλοποίηση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	14
1.3.1 Παράσταση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	14
1.3.2 Το σύστημα ανά μονάδα	15
1.4 Συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	17
1.4.1 Η Σύγχρονη Γεννήτρια.....	17
1.4.1.1 Μεταβατική συμπεριφορά γεννήτριας	22
1.4.2 Ο Μετασχηματιστής	25
1.4.2.1 Τριφασικός μετασχηματιστής.....	28
1.4.3 Γραμμές Μεταφοράς	30
1.4.3.1 Επαγωγή και χωρητικότητα γραμμών μεταφοράς.....	32
1.4.3.2 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς.....	33
1.4.4 Φορτία	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	38
Ανάλυση Ροής Φορτίου	38
2.1 Εξισώσεις ροής φορτίου	39
2.1.1 Εξισώσεις ροής φορτίου για σύστημα n ζυγών	40
2.2 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου	42
2.3 Ανάλυση ροής φορτίου με την μέθοδο Gauss-Seidel (G-S)	44

2.3.1 Η μέθοδος Gauss-Seidel.....	44
2.3.2 Η χρήση της μεθόδου στην επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου	44
2.3.3 Ο αλγόριθμος Gauss-Seidel	45
2.4 Ανάλυση ροής φορτίου με την μέθοδο Newton-Raphson (N-R).....	47
2.4.1 Η μέθοδος Newton-Raphson	47
2.4.2 Η χρήση της μεθόδου στην επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου	48
2.4.3 Ο αλγόριθμος Newton-Raphson.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	52
Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	52
3.1 Βασικές έννοιες	52
3.2 Επάρκεια ΣΗΕ	53
3.3 Μελέτη επάρκειας ΣΗΕ	56
3.3.1 Μελέτη συστήματος παραγωγής (Μελέτη επιπέδου ιεραρχίας 1).....	56
3.3.2 Μελέτη συστήματος μεταφοράς (Μελέτη επιπέδου ιεραρχίας 2)	57
3.3.3 Μελέτη συστήματος διανομής (Μελέτη επιπέδου ιεραρχίας 3)	59
3.4 Εκτίμηση επάρκειας ΣΗΕ	59
3.4.1 Δείκτες επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 1.....	60
3.4.2 Δείκτες επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 2.....	61
3.4.3 Δείκτες επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 3.....	64
3.5 Ασφάλεια ΣΗΕ	65
3.6 Ανάλυση στατικής ασφάλειας ΣΗΕ	67
3.6.1 Μέθοδοι επιλογής διαταραχών.....	69
3.7 Ιεράρχηση διαταραχών.....	70
3.7.1 Αλγόριθμος για την ανάλυση διαταραχών.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	76
Μελέτη Στατικής Ασφάλειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	76
4.1 Εισαγωγή.....	76

4.2 Ανάλυση στατικής ασφάλειας συστήματος 9 ζυγών IEEE (IEEE 9 bus system).....	76
4.3 Ονομαστικά δεδομένα.....	77
4.4 Σενάρια ανάλυσης στατικής ασφάλειας συστήματος.....	83
4.4.1 Αφαίρεση γραμμής 4-5.....	84
4.4.2 Αφαίρεση γραμμής 4-6.....	87
4.4.3 Αφαίρεση γραμμής 5-7.....	90
4.4.4 Αφαίρεση γραμμής 6-9.....	93
4.4.5 Αφαίρεση γραμμής 7-8.....	96
4.4.6 Αφαίρεση γραμμής 8-9.....	99
4.4.7 Αφαίρεση γεννήτριας 1	102
4.4.8 Αφαίρεση γεννήτριας 2	105
4.4.9 Αφαίρεση γεννήτριας 3	108
4.5 Αξιολόγηση σεναρίων και εύρεση χειρότερης περίπτωσης.....	111
4.5.1 Εύρεση χειρότερης περίπτωσης ως προς τις τάσεις ζυγών.....	111
4.5.2 Εύρεση χειρότερης περίπτωσης ως προς την φόρτιση γραμμών και γεννητριών.....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	118
Συμπεράσματα.....	118
Βιβλιογραφία.....	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Βασικές έννοιες Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως **Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)** ορίζεται ένα σύνολο από εγκαταστάσεις και εξοπλισμό που αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, σταθμούς παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Όλα αυτά χρησιμοποιούνται έτσι ώστε ένας μεγάλος αριθμός πολιτών να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει τις καθημερινές του ανάγκες οι οποίες συνεχώς μεταβάλλονται.

Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται η παρουσία τριών θεμελιωδών χαρακτηριστικών:

- **Σταθμοί Παραγωγής:** Οι οποίοι παράγουν φορτίο ικανό να καλύψει τις ανάγκες των καταναλωτών.
- **Γραμμές Μεταφοράς:** Οι οποίες μεταφέρουν τις ποσότητες φορτίου από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης.
- **Δίκτυο Διανομής:** Τα οποία διανέμουν το φορτίο στους καταναλωτές.

Κύριος σκοπός ενός ΣΗΕ είναι η πρακτικότητα του. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει το ΣΗΕ να τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια τους καταναλωτές όποτε αυτοί το ζητήσουν πάντοτε όμως με γνώμονα την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την οικονομία.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνιστάται από τρεις βασικές λειτουργίες, **την παραγωγή, τη μεταφορά και την διανομή** ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους **σταθμούς παραγωγής**. Οι σταθμοί ανάλογα με το είδος της τροφοδοσίας τους διακρίνονται σε: **Ατμοηλεκτρικούς (ΑΗΣ), Υδροηλεκτρικούς (ΥΗΣ) και Πυρηνικούς (ΠΣ)**.

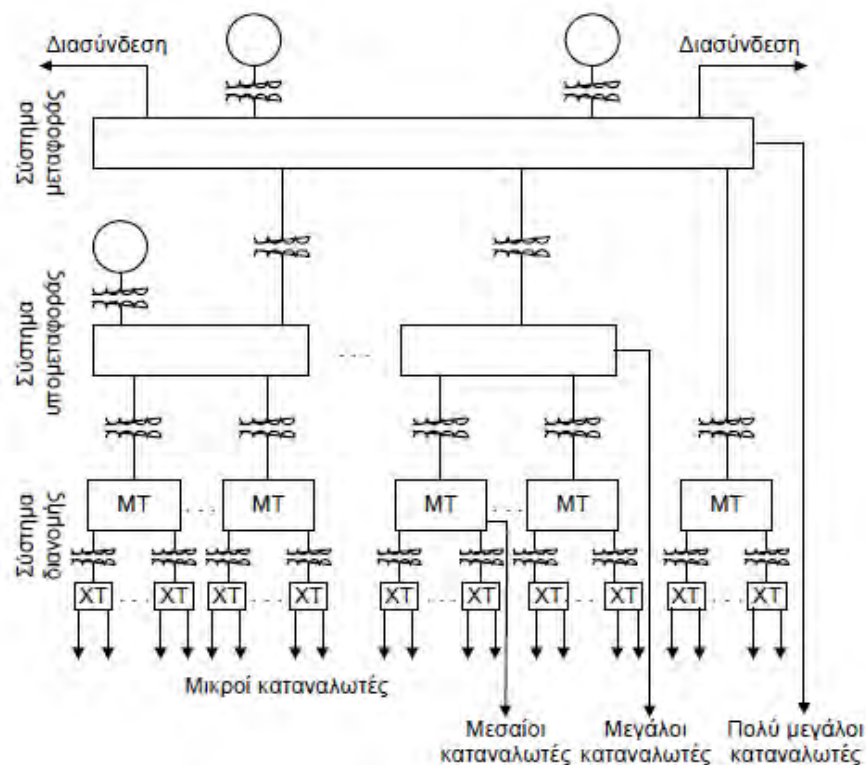
Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τις **γραμμές μεταφοράς**. Οι γραμμές μεταφοράς μπορεί να είναι **εναέριες** ή **υπόγειες**, να βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων και να έχουν διαφορετική χωρητικότητα.

Τέλος, η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές γίνεται μέσω ενός **δικτύου διανομής**. Το δίκτυο αυτό μπορεί να είναι μέσης ή χαμηλής τάσης. [1]

1.2 Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Παρά τις διαφορές που έχουν τα ΣΗΕ μεταξύ τους ως προς το μέγεθός τους ή τον τρόπο με τον οποίο δομούνται παρουσιάζουν ένα κοινό στον τρόπο που εργάζονται στο εσωτερικό τους. Έχουν αρκετά διαφορετικά επίπεδα τάσης τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με **μετασχηματιστές**. Οι μετασχηματιστές χωρίζουν το ΣΗΕ σε τρία μικρότερα συστήματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1:

- Το σύστημα **μεταφοράς**
- Το σύστημα **υπομεταφοράς**
- Το σύστημα **διανομής**



Σχήμα 1.1 - Δομή ενός ΣΗΕ

Το σύστημα μεταφοράς έχει **μορφή βρόχου**. Συνδέει όλα τα κέντρα παραγωγής με όλα τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης αλλά και τους μεγάλους καταναλωτές μεταξύ τους μέσω της δυνατότητας που έχει να διαχειρίζεται αρκετά μεγάλα ποσά ισχύος και

να μεταφέρει την ενέργεια σε πάρα πολλά μέρη του ΣΗΕ με τον πλέον βέλτιστο τρόπο. Επιπλέον, μπορεί να συνδέσει ένα ΣΗΕ με άλλα γειτονικά μέσω διασυνδεδειγμένων γραμμών.

Το σύστημα υπομεταφοράς έχει **ακτινική μορφή ή μορφή βρόχου**. Έχει περισσότερες γραμμές από το σύστημα μεταφοράς αλλά έχουν μικρότερο μήκος και διαχειρίζεται λιγότερα ποσά ισχύος. Η ενέργεια που μεταφέρει μπορεί να προέρχεται είτε από σταθμούς παραγωγής είτε από υποσταθμούς που υπάρχουν στο σύστημα μεταφοράς. Δίνει τα ποσά ενέργειας που μεταφέρει είτε σε μικρότερους υποσταθμούς διανομής είτε σε κάποιους μεγάλους καταναλωτές.

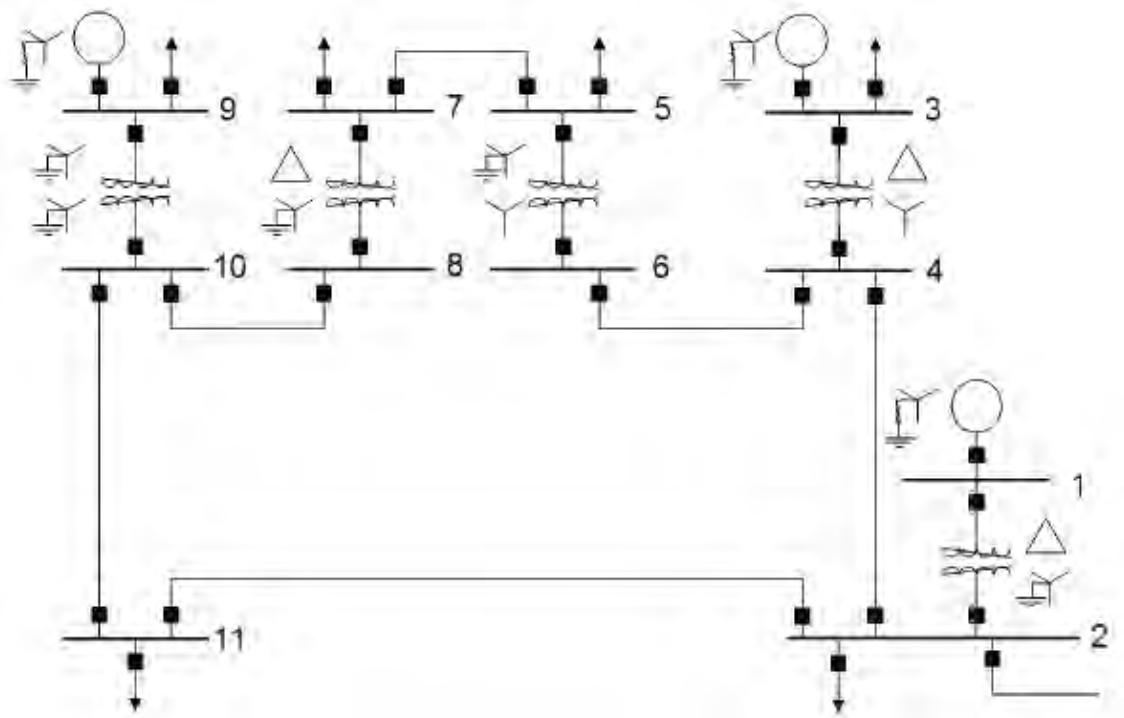
Το σύστημα διανομής έχει συνήθως **ακτινική μορφή**. Αποτελεί το κομμάτι του ΣΗΕ στο οποίο καταναλίσκεται το μεγαλύτερο μέρος των χρημάτων είτε σε επενδύσεις είτε σε συντήρηση. Λειτουργεί σε δύο επίπεδα τάσης, στην **τάση τροφοδοσίας ή πρωτεύουσα (μέση τάση)** και την **τάση κατανάλωσης ή δευτερεύουσα (χαμηλή τάση)**. Λαμβάνει ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής και τη δίνει σε μεσαίους ή μικρούς καταναλωτές. Σε πυκνοκατοικημένες συνήθως το σύστημα διανομής είναι υπόγειο ενώ σε πιο αραιοκατοικημένες είναι εναέριο. [1]

1.3 Απλοποίηση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.3.1 Παράσταση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Βασικό χαρακτηριστικό των ΣΗΕ είναι η πολυπλοκότητα. Αυτό γιατί ο αριθμός των γεννητριών, των γραμμών μεταφοράς, των μετασχηματιστών (και των επιπέδων τάσης που δημιουργούν) και των φορτίων συνήθως είναι αρκετά μεγάλος. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται και άλλο αν ληφθεί υπόψη και ότι τα ΣΗΕ είναι τριφασικά.

Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το **μονογραμμικό διάγραμμα** (Σχήμα 1.2). Δείχνει τη μορφή του συστήματος με μια γραμμή. Όλες οι συνιστώσες του συστήματος όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές, φορτία και λοιπός εξοπλισμός αναπαρίστανται με σύμβολα. [1]



Σχήμα 1.2 - Μονογραμμικό διάγραμμα ενός ΣΗΕ

1.3.2 Το σύστημα ανά μονάδα

Πρόκειται για ένα σύστημα στο οποίο οι μονάδες δεν εκφράζονται απευθείας με τις τιμές τους αλλά υπό κλίμακα. Παρόλο που οι υπολογιστές σήμερα παίζουν καθοριστικό ρόλο το ανά μονάδα σύστημα χρησιμοποιείται ακόμα σε μεγάλο βαθμό και αυτό γιατί παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως :

- Την σχετική τιμή της ποσότητας ως προς όμοιες ποσότητες.
- Την πιο εύκολη ανίχνευση λαθών.
- Την αποφυγή σύγχυσης ανάμεσα σε φασικά και πολικά μεγέθη.
- Την απλοποίηση των ΣΗΕ λόγω απαλοιφής των ιδανικών μετασχηματιστών.
- Τη μείωση του φόρτου των υπολογισμών.

Παρόλα αυτά όμως το ανά μονάδα σύστημα παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα όπως :

- Την τροποποίηση των ισοδύναμων κυκλωμάτων.
- Την τροποποίηση μερικών εξισώσεων μέσω απόκρυψης παραγόντων.

$$\text{Ανά μονάδα τιμή} = \frac{\text{Πραγματική Τιμή}}{\text{Τιμή Βάσης}} \quad \text{ή} \quad X_{pu} = \frac{X}{|X_b|}$$

Τα δύο βασικά μεγέθη που χρειάζεται να υπολογιστούν οι βάσεις είναι:

- Η τάση $|V_b| = |Z_b| * |I_b| \Rightarrow V_{pu} = \frac{V}{|V_b|} * \frac{I}{|I_b|} = Z_{pu} * I_{pu}$
- Η ισχύς $|S_b| = |V_b| * |I_b| \Rightarrow S_{pu} = \frac{V}{|V_b|} * \frac{I^*}{|I_b|} = V_{pu} * I_{pu}^*$
 - Αν $Z_{pu} = \frac{Z}{|Z_b|} = \frac{R+jX}{|Z_b|} = R_{pu} + jX_{pu}$ τότε
 $S_{pu} = \frac{S}{|S_b|} = \frac{P+jQ}{|S_b|} = P_{pu} + jQ_{pu}$

Όσον αφορά την ένταση και την αντίσταση μπορούν εύκολα να υπολογιστούν ως συναρτήσεις των άλλων δύο.

- $|I_b| = \frac{|S_b|}{|V_b|}, |Z_b| = \frac{|V_b|}{|I_b|} = \frac{|V_b|^2}{|S_b|}$

Κάποιες φορές κρίνεται απαραίτητο να μεταφερθεί μια αντίσταση από ένα σύστημα βάσεων σε ένα άλλο, οπότε χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} * \frac{|Z_b^{old}|}{|Z_b^{new}|} = Z_{pu}^{old} * \frac{|V_b^{old}|^2}{|V_b^{new}|^2} * \frac{|S_b^{new}|}{|S_b^{old}|}$$

Όσον αφορά τα τριφασικά συστήματα η βάση έντασης και αντίστασης δίνονται από τους εξής τύπους:

- $|I_b|_{3\phi} = \frac{|S_b|_{3\phi}}{\sqrt{3} * |V_b|_{3\phi}}, |Z_b|_{3\phi} = \frac{|V_b|_{3\phi}^2}{|S_b|_{3\phi}}$
- $|I_b^{\Delta}|_{3\phi} = \frac{|I_b|_{3\phi}}{\sqrt{3}}, |Z_b^{\Delta}|_{3\phi} = \frac{|Z_b|}{3}$

Όταν όμως είναι συμμετρικά μπορούν να τα αναλυθούν κατά φάση. Οπότε προκύπτουν οι τύποι: [1]

- $|I_b^{\Delta}|_{3\phi} = \frac{|I_b|_{3\phi}}{\sqrt{3}}$
- $|Z_b^{\Delta}|_{3\phi} = \frac{|Z_b|}{3}$
- $|I_b|_{1\phi} = \frac{|S_b|_{1\phi}}{|V_b|_{1\phi}} = \frac{\frac{|S_b|_{3\phi}}{3}}{\frac{|V_b|_{3\phi}}{\sqrt{3}}} = \frac{|S_b|_{3\phi}}{\sqrt{3} \cdot |V_b|_{3\phi}} = |I_b|_{3\phi}$
- $|Z_b|_{1\phi} = \frac{|V_b|_{1\phi}^2}{|S_b|_{1\phi}} = \frac{\frac{|V_b|_{3\phi}^2}{3}}{\frac{|S_b|_{3\phi}}{3}} = \frac{|V_b|_{3\phi}^2}{|S_b|_{3\phi}} = |Z_b|_{3\phi}$

1.4 Συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.4.1 Η Σύγχρονη Γεννήτρια

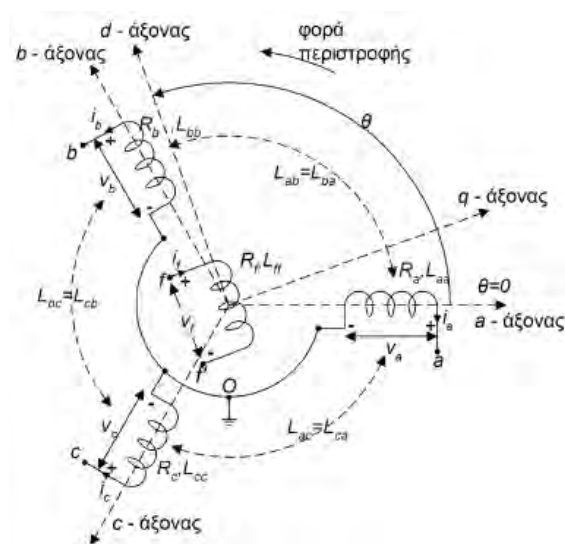
Η σύγχρονη γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη: **τον στάτη**, ο οποίος αποτελεί το ακίνητο μέρος της, και **τον δρομέα (ή ρότορα)**, ο οποίος αποτελεί το κινούμενο μέρος της και περιστρέφεται από έναν στρόβιλο.

Το σταθερό μέρος της μηχανής περιέχει τον πυρήνα του στάτη. Είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό και έχει κυκλικό σχήμα. Είναι μια κοίλη κατασκευή. Στο εσωτερικό του περιέχει **οδοντώσεις (αυλάκια)** για την τοποθέτηση του τυλίγματος του στάτη και είτε είναι κυλινδρικός είτε έχει **μαγνητικούς πόλους**, οι οποίοι προεξέχουν. Τα τυλίγματα του στάτη τοποθετούνται στα αυλάκια συμμετρικά ώστε να απέχουν μεταξύ τους 120° . Ο στάτης έχει τρεις ακίνητους άξονες (ένας λαμβάνεται ως άξονας αναφοράς) καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε ένα τύλιγμα και είναι κάθετος σε αυτό.

Το κινούμενο μέρος της μηχανής περιέχει τον πυρήνα του δρομέα. Είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό. Είναι μια συμπαγής κατασκευή. Στο εσωτερικό του περιέχει είτε **οδοντώσεις (αυλάκια)** για την τοποθέτηση του τυλίγματος του δρομέα είτε **μαγνητικούς πόλους**, οι οποίοι προεξέχουν. Το τύλιγμα του δρομέα (ή **τύλιγμα πεδίου**) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Συνδέεται με μια πηγή, την **διεγέρτρια**, η οποία είτε βρίσκεται στον ίδιο άξονα με το τύλιγμα είτε συνδέεται με αυτό μέσω των ψυχτρών. Ο κυλινδρικοί δρομείς χρησιμοποιούνται για γεννήτριες υψηλής ταχύτητας και

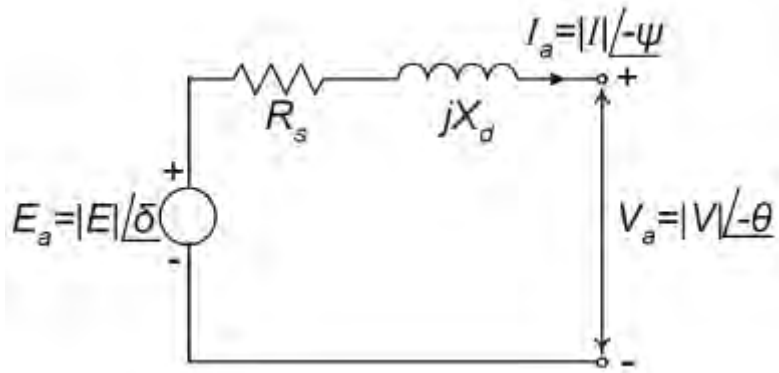
περιστρέφονται ως προς τον οριζόντιο άξονα, ενώ οι δρομείς με προεξέχοντες μαγνητικούς πόλους χρησιμοποιούνται για γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας περιστρέφονται ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

Ο στάτης και ο δρομέας σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο κάθε φορά έτσι ώστε να σχηματίζεται στην έξοδο μια τριφασική πηγή. Αυτό θα γίνει όταν ο δρομέας κινείται με μια σταθερή ταχύτητα και παράγεται σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη μια τάση, η οποία να έχει ίδιο μέτρο και συχνότητα με τις υπόλοιπες αλλά να διαφέρει κατά 120° από την επόμενη. Η τομή μιας σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 - Σύγχρονη γεννήτρια

Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται το ισοδύναμο, ανά φάση, κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας.

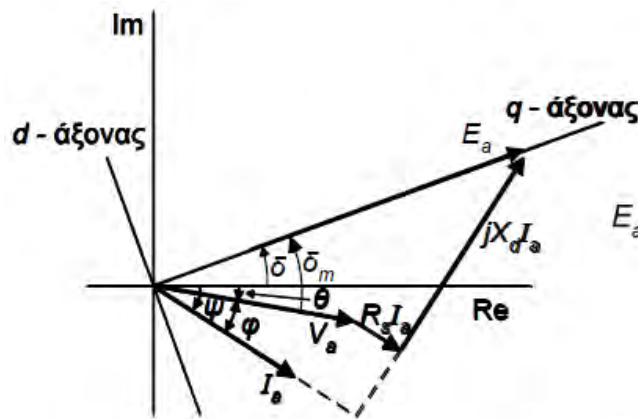


Σχήμα 1.4 - Ισοδύναμο κύκλωμα (ανά φάση) σύγχρονης γεννήτριας

Η γωνία δ ονομάζεται **γωνία ισχύος** και δίνεται από τον τύπο:

$$\delta_m = \angle E_a - \angle V_a = \delta + \theta_v. \text{ Είναι θετική όταν το } E_a \text{ προηγείται του } V_a.$$

Για τις τάσεις E_a , V_a ισχύει ότι $E_a = V_a + R_s * I_a + j * X_d * I_a$ και έτσι προκύπτει το ακόλουθο διανυσματικό διάγραμμα (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5 - Διανυσματικό διάγραμμα (φάσης α)

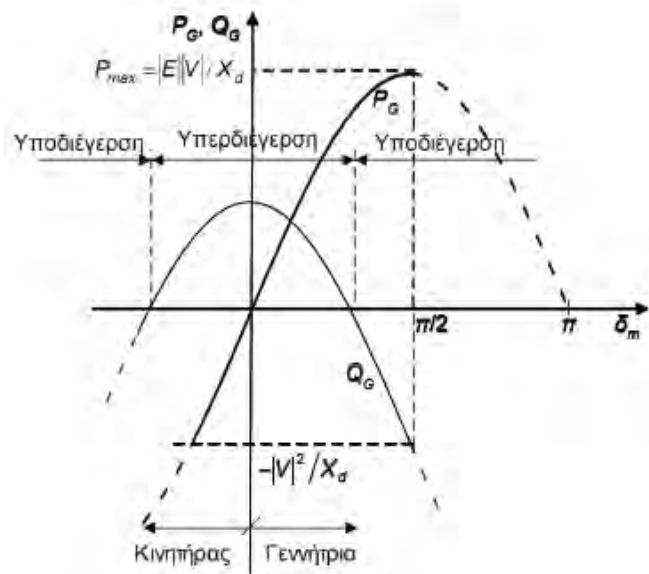
Η μιγαδική ισχύς που παρέχει η γεννήτρια ανά φάση είναι:

$$S_g = P_g + j * Q_g = V_a * I_a^* = |V| * |I| \angle \varphi = |V| * |I| * \cos \varphi + j * |V| * |I| * \sin \varphi$$

Το ρεύμα που εξέρχεται από τη γεννήτρια και καταναλώνεται στο φορτίο ορίζεται θετικό δίνεται από τη σχέση: $I_a = \frac{E_a \sin \delta}{X_d} - j * \frac{E_a \cos \delta}{X_d}$. Άρα η ισχύς που παράγει η γεννήτρια διαμορφώνεται ως εξής: $P_g = \frac{|E|*|V|}{X_d} * \sin \delta$, $Q_g = \frac{|V|(|E| \cos \delta - |V|)}{X_d}$.

Γενικά, σε μια ηλεκτρική μηχανή όταν το P_g είναι **θετικό** (όταν η γωνία ισχύος είναι θετική) τότε πρόκειται για **γεννήτρια**. Αντίθετα, όταν είναι αρνητικό (όταν η γωνία ισχύος είναι αρνητική) τότε πρόκειται για κινητήρα. Όταν η γωνία ισχύος γίνει ίση με 90 μοίρες τότε η γεννήτρια δίνει την μέγιστη ισχύ της και φτάνει στο **όριο ευστάθειας**. Αν η γωνία ξεπεράσει αυτή την τιμή τότε η γεννήτρια οδηγείται σε **αποσυγχρονισμό** από το δίκτυο.

Καμπύλες που δείχνουν την σχέση της πραγματικής και άεργου ισχύος με την γωνία ισχύος φαίνονται στο Σχήμα 1.6



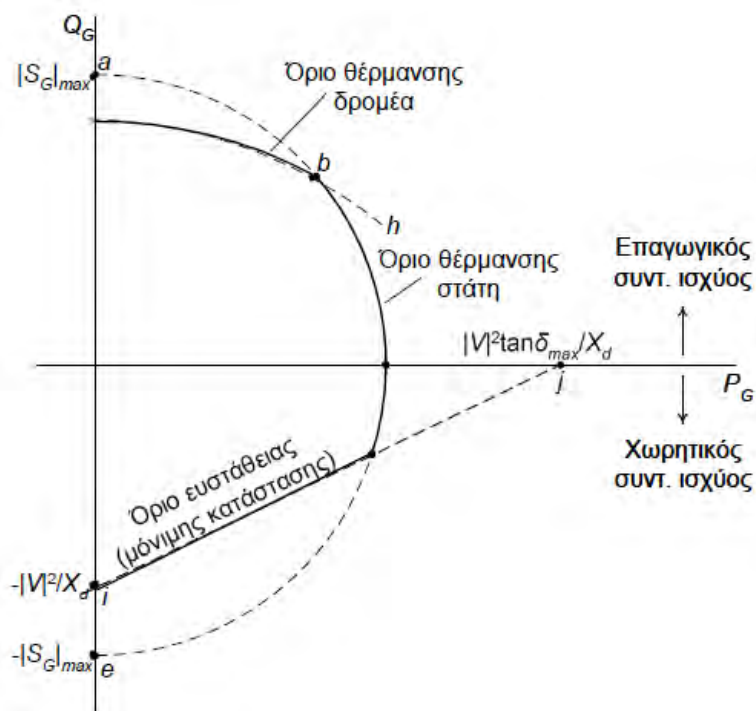
Σχήμα 1.6 - Διάγραμμα πραγματικής και άεργου ισχύος για μηχανή με κυλινδρικό δρομέα

Κάθε σύγχρονη γεννήτρια έχει μια καμπύλη φόρτισης. Πρόκειται για μια καμπύλη, ξεχωριστή για κάθε γεννήτρια, η οποία δείχνει την περιοχή στην οποία μπορεί αυτή να λειτουργεί. Κάθε γεννήτρια δεν μπορεί να παράγει απεριόριστη ισχύ αλλά μέχρι ενός ορίου το οποίο καθορίζεται από παράγοντες όπως: **η θέρμανση του στάτη και του δρομέα λόγω των ρευμάτων που τους διαρρέουν και η γωνία ισχύος.**

Κατά τη λειτουργία μιας γεννήτριας παράγεται θερμότητα απωλειών. Παρόλα τα συστήματα ψύξης του στάτη όμως πρέπει η ένταση του ρεύματος να μην υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή ούτως ώστε να προστατευθούν τα τυλίγματα από τυχών καταστροφές. Εφόσον υπάρχει μια μέγιστη ένταση ρεύματος θα υπάρχει και μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει η γεννήτρια για μια δεδομένη τάση εξόδου. Για την εύρυθμη λειτουργία της γεννήτριας πρέπει πάντα η ισχύς εξόδου να είναι μικρότερη σε σχέση με την μέγιστη που μπορεί να παράγει.

Για κάθε γεννήτρια υπάρχει ένα προκαθορισμένο όριο λειτουργίας το οποίο αν το ξεπεράσει θα οδηγηθεί σε αποσυγχρονισμό. Το όριο αυτό εξαρτάται από την τιμή της γωνίας ισχύος. Η γωνία αυτή δεν επιτρέπεται να αυξηθεί πέραν της μέγιστης τιμής της.

Οι παραπάνω περιορισμοί φαίνονται στο επίπεδο μέσω του Σχήματος 1.7.



Σχήμα 1.7 - Καμπύλη ικανότητας φόρτισης γεννήτριας

Η σύνδεση της γεννήτριας σε ένα δίκτυο είναι μια διαδικασία η οποία για να γίνει πρέπει να προηγηθεί η διαδικασία του **συγχρονισμού**, αλλά και να γίνουν οι

απαραίτητες ρυθμίσεις στις **μεταβλητές ελέγχου** δηλαδή η ροπή στον άξονά της και το ρεύμα διέγερσης της.

Για να υπάρξει συγχρονισμός θα πρέπει η **τάση E** της γεννήτριας και η **τάση V** του συστήματος:

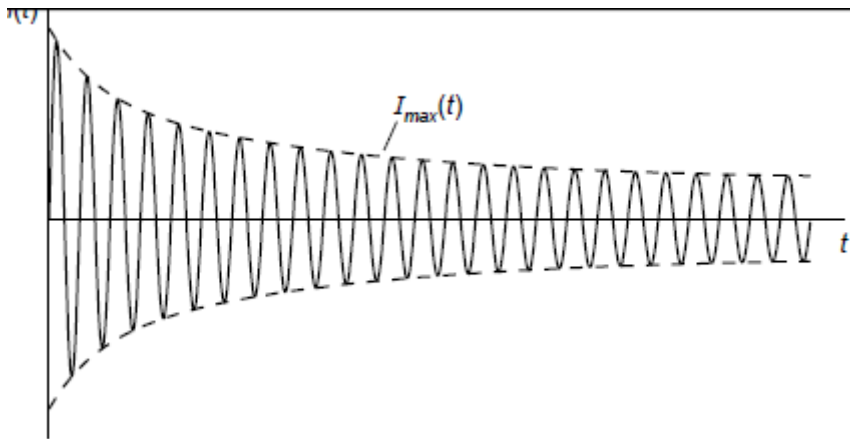
- Να έχουν την ίδια συχνότητα
- Να έχουν ίδια ακολουθία τάσεων
- Να έχουν ίσο μέτρο
- Να έχουν ίσες γωνίες

Για να ρυθμιστούν κατάλληλα οι μεταβλητές ελέγχου θα πρέπει:

- Αρχικά, να εφαρμοστεί όλο και μεγαλύτερη ροπή στην είσοδο ώστε να παραχθεί κατάλληλο ποσό πραγματικής ισχύος.
- Εφόσον η ισχύς εισόδου είναι σταθερή, να αυξηθεί το ρεύμα διέγερσης ώστε να παραχθεί κατάλληλο ποσό άεργου ισχύος. [1]

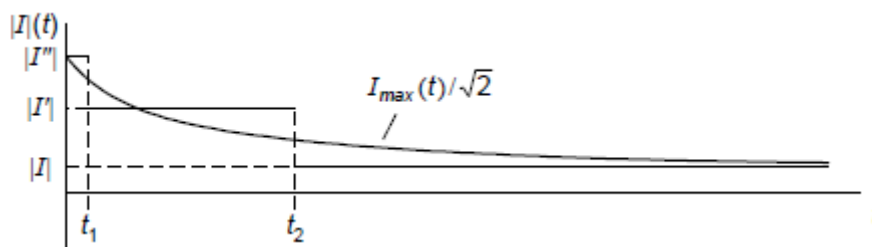
1.4.1.1 Μεταβατική συμπεριφορά γεννήτριας

Η γεννήτρια λειτουργεί σε **μόνιμη κατάσταση**. Όμως, στην περίπτωση ενός σφάλματος θα πρέπει να λειτουργήσει σε **υπομεταβατική** ή και **μεταβατική κατάσταση**. Ακόμα και σε αυτές τις δύο καταστάσεις όμως η λειτουργία της γεννήτριας έχει **ημιτονοειδή μορφή με μεταβατικό χαρακτήρα** (Σχήμα 1.8).



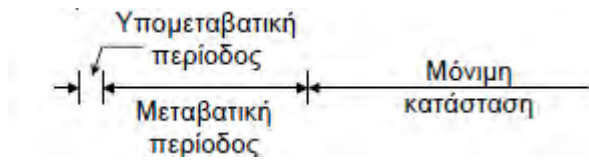
Σχήμα 1.8 - Ρεύμα στάτη μετά από βραχυκύκλωμα

Στην ανάλυση της συμπεριφοράς της γεννήτριας στη μεταβατική περίοδο θα πρέπει να θεωρηθεί ότι η **τάση E** ή η **αντίσταση Z** ή και οι δύο μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο. Για απλούστευση μπορεί να θεωρηθεί ότι η **τάση E** είναι σταθερή. Θεωρείται ότι η **αντίσταση** μεταβάλλεται σε τρία βήματα και έτσι το **ρεύμα** μπορεί να προσεγγιστεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα τα οποία ονομάζονται **υπομεταβατικό** ($|I''|$), **μεταβατικό** ($|I'|$) και **μόνιμης κατάστασης** ($|I|$). Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται η μεταβολή της ενεργού τιμής του ρεύματος.



Σχήμα 1.9 - Βηματική προσέγγιση ρεύματος (rms)

Οι αντίστοιχες χρονικές περίοδοι, όπως διακρίνονται στο Σχήμα 1.10, ονομάζονται **υπομεταβατική** (0 - 0.1 sec), **μεταβατική** (0.1 - 6 sec) και **μόνιμης κατάστασης** (> 6 sec).

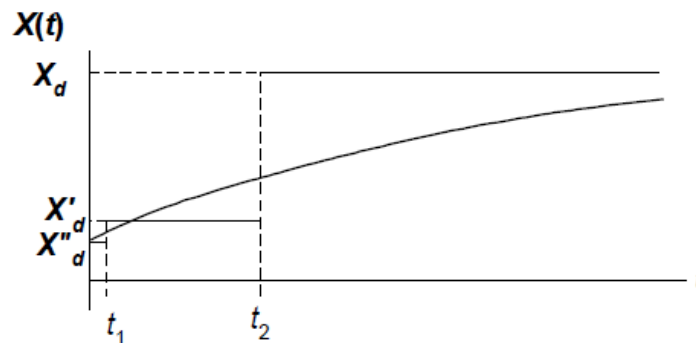


Σχήμα 1.10 - Χρονικές περιόδους

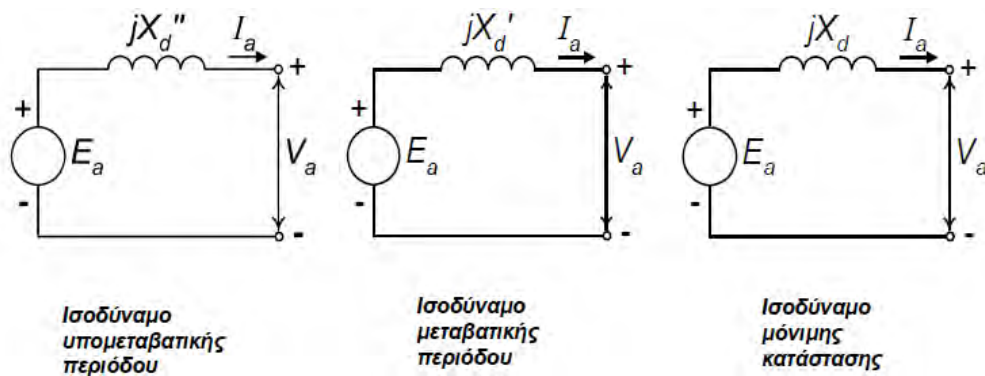
Οι αντίστοιχες αντιδράσεις είναι:

- $X''_d = \frac{|E|}{|I''|}$, υπομεταβατική
- $X'_d = \frac{|E|}{|I'|}$, μεταβατική
- $X_d = \frac{|E|}{|I|}$, μόνιμης κατάστασης

Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται μια βηματική προσέγγιση της αντίδρασης και στο Σχήμα 1.12 τα ισοδύναμα, ανά φάση, κυκλώματα της μηχανής μετά από βραχυκύκλωμα. [1]



Σχήμα 1.11 - Βηματική προσέγγιση αντίδρασης



Σχήμα 1.12 - Ισοδύναμο ανά φάση κυκλώματα μηχανής μετά από βραχυκύκλωμα

1.4.2 Ο Μετασχηματιστής

Σε ένα ΣΗΕ ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται κυρίως για την σύνδεση των διαφόρων επιπέδων τάσης που υπάρχουν (**μετασχηματιστής ισχύος**) αλλά και για να ελέγχει την τάση και τη ροή ισχύος του συστήματος (**μετασχηματιστής ρύθμισης τάσης**).

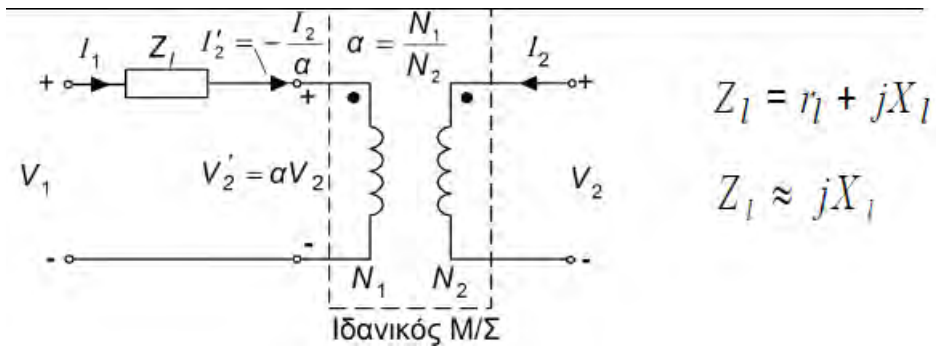
Ανάλογα με τη λειτουργία τους μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- **Μετασχηματιστές γεννήτριας:** Χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από το επίπεδο της παραγωγής στο επίπεδο της μεταφοράς. Η ισχύς τους μπορεί να είναι από λίγα μέχρι και πάνω από 1000 MVA.
- **Μετασχηματιστές μεταφοράς:** Χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των τμημάτων ενός ΣΗΕ τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης αλλά και για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ τους. Η ισχύς τους μπορεί να είναι από λίγα μέχρι και πάνω από 1000 MVA.
- **Μετασχηματιστές διανομής:** Χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης από το επίπεδο της μεταφοράς στο επίπεδο της διανομής, στο οποίο βρίσκονται οι περισσότεροι καταναλωτές. Η ισχύς τους μπορεί να είναι από λίγα MVA.

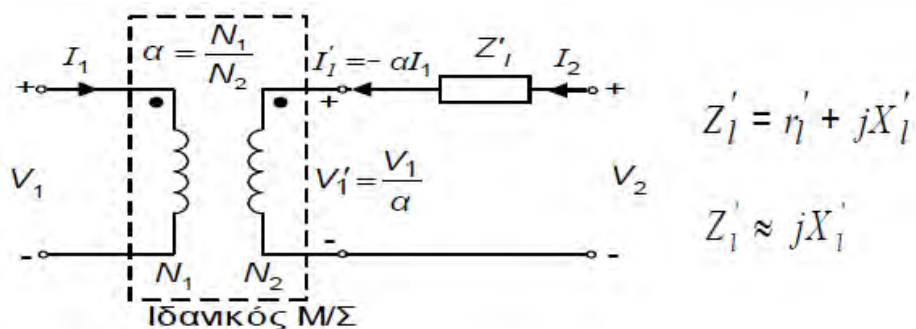
Η λειτουργία του κάθε μετασχηματιστή παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο θα συνδεθούν τα τυλίγματά του. Οι πιθανές συνδεσμολογίες είναι:

- **Υ-Υ (αστέρας-αστέρας):** Σύνηθες τρόπος σύνδεσης τυλιγμάτων μετασχηματιστών μεταφοράς.
- **Υ-Δ (αστέρας-τρίγωνο):** Σύνηθες τρόπος σύνδεσης τυλιγμάτων μετασχηματιστών διανομής.
- **Δ-Υ (τρίγωνο - αστέρας):** Σύνηθες τρόπος σύνδεσης τυλιγμάτων μετασχηματιστών γεννήτριας.
- **Δ-Δ (τρίγωνο - τρίγωνο)**

Στα Σχήματα 1.13 και 1.14 παριστάνονται τα απλοποιημένα ισοδύναμα κυκλώματα του μετασχηματιστή ανοιγμένα στο πρωτεύον και δευτερεύον αντίστοιχα.



Σχήμα 1.13 - Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή (πρωτεύον)



Σχήμα 1.14 - Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή (δευτερεύον)

Οι τάσεις και τα ρεύματα των παραπάνω κυκλωμάτων συνήθως εκφράζονται στο **ανά μονάδα** σύστημα. Η βάση ισχύος λαμβάνεται κοινή και στις δύο πλευρές οπότε ισχύουν τα εξής:

$$|V_{b1}|_{1\phi} = a * |V_{b2}|_{1\phi} .$$

$$\text{Άρα } |I_{b1}|_{1\phi} = \frac{|S_b|_{1\phi}}{|V_{b1}|_{1\phi}} = \frac{|S_b|_{1\phi}}{a*|V_{b2}|_{1\phi}} = \frac{|I_{b2}|_{1\phi}}{a} \text{ και}$$

$$|Z_{b1}|_{1\phi} = \frac{|V_{b1}|_{1\phi}^2}{|S_b|_{1\phi}} = \frac{\alpha^2 * |V_{b2}|_{1\phi}^2}{|S_b|_{1\phi}} = \alpha^2 * |Z_{b2}|_{1\phi}$$

$$\text{Τότε προκύπτει ότι } V_{2pu} = \frac{V_2}{|V_{b2}|_{1\phi}} = \frac{a*V_2}{a*|V_{b2}|_{1\phi}} = \frac{V'_2}{|V_{b1}|_{1\phi}} = V'_{2pu}$$

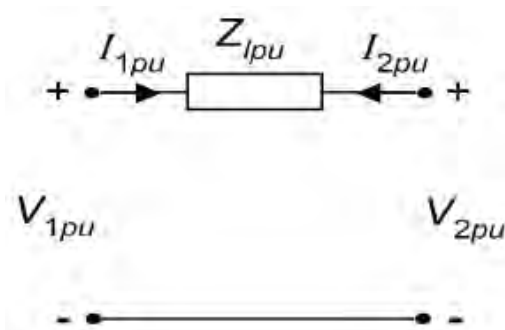
$$I_{2pu} = \frac{I_2}{|I_{b2}|_{1\phi}} = \frac{\frac{I_2}{a}}{\frac{|I_{b2}|_{1\phi}}{a}} = \frac{-I'_2}{|I_{b1}|_{1\phi}} = -I'_{2pu}$$

$$\text{Όμοια, προκύπτει } V_{1pu} = V'_{1pu} , I_{1pu} = -I'_{1pu}$$

Επίσης, η αντίσταση είναι ίδια είτε εκφραστεί ως προς τη βάση της πλευράς που

$$\text{ανήκει ή που αναφέρεται. } Z_{lpu} = \frac{Z_l}{|Z_{b1}|_{1\phi}} = \frac{Z_l}{\alpha^2 * |Z_{b2}|_{1\phi}} = \frac{Z'_l}{|Z_{b2}|_{1\phi}} = Z'_{lpu}$$

Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή μπορεί να αλλάξει και να γίνει όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15. [1]

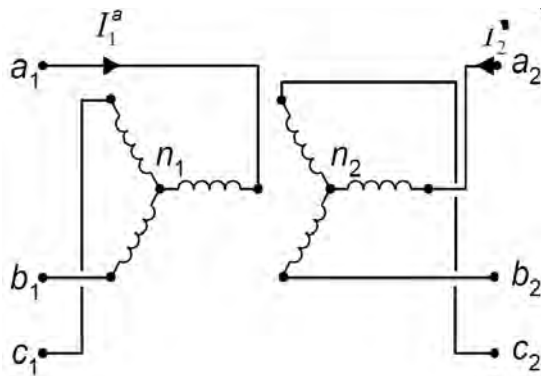


Σχήμα 1.15- Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή (ανά μονάδα)

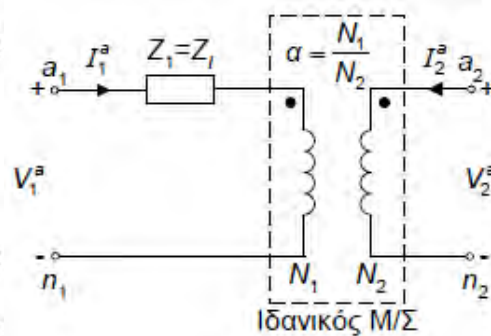
1.4.2.1 Τριφασικός μετασχηματιστής

Οι τέσσερις πιθανοί τρόποι σύνδεσης των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή και τα αντίστοιχα ισοδύναμά τους παραθέτονται στα Σχήματα 1.16 – 1.23.

Υ-Υ Συνδεσμολογία

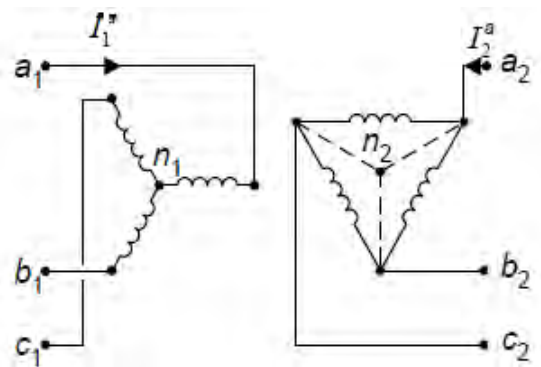


Σχήμα 1.16 - Συνδεσμολογία Υ-Υ

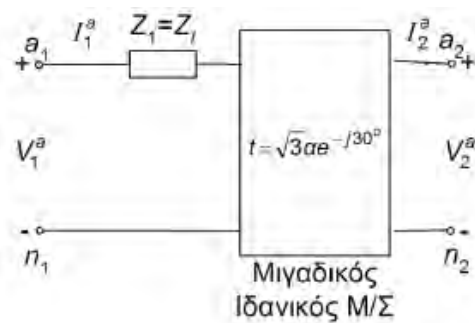


Σχήμα 1.17 - Συνδεσμολογία Υ-Υ (1Φ)

Υ-Δ Συνδεσμολογία

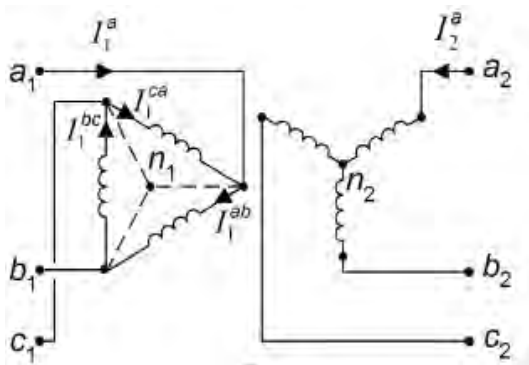


Σχήμα 1.18 - Συνδεσμολογία Υ-Δ

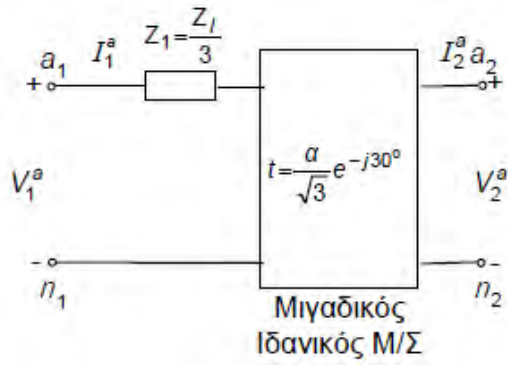


Σχήμα 1.19 - Συνδεσμολογία Υ-Δ (1Φ)

Δ-Υ Συνδεσμολογία

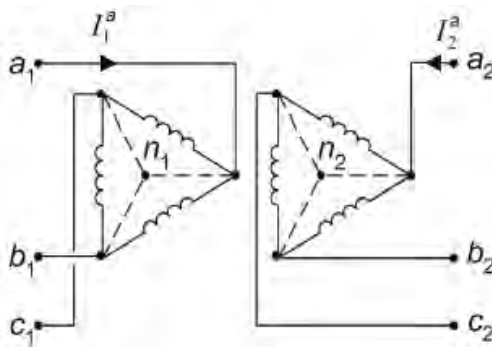


Σχήμα 1.20 - Συνδεσμολογία Δ -Υ

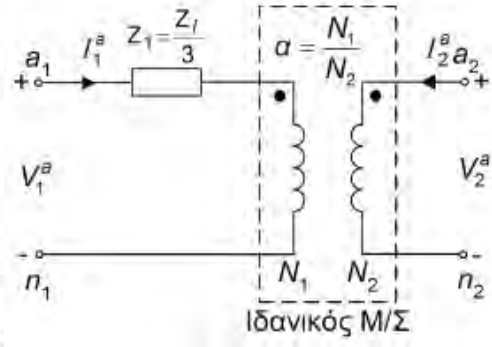


Σχήμα 1.21 - Συνδεσμολογία Δ -Υ (1Φ)

Δ-Δ Συνδεσμολογία



Σχήμα 1.22 - Συνδεσμολογία Δ -Δ



Σχήμα 1.23 - Συνδεσμολογία Δ -Δ (1Φ)

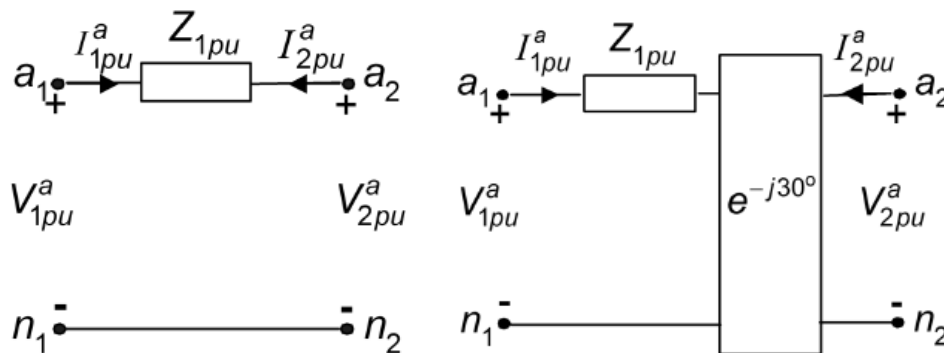
Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι λόγοι των τάσεων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος τυλίγματος $t = \frac{V_1^a}{V_2^a}$ για όλες τις συνδεσμολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 1.1 – Λόγος φασικών τάσεων, t , ισοδύναμων συνδεσμολογιών

Συνδεσμολογία Μετασχηματιστή	$t = \frac{V_1^a}{V_2^a}$
Υ-Υ	$N_1 : N_2 = a$
Υ-Δ	$\left(N_1 : \frac{N_2}{\sqrt{3}}\right) * e^{-i30} = \sqrt{3} * a * e^{-i30}$
Δ-Υ	$\left(\frac{N_1}{\sqrt{3}} : N_2\right) * e^{-i30} = \frac{a}{\sqrt{3}} * e^{-i30}$
Δ-Δ	$\left(\frac{N_1}{\sqrt{3}} : \frac{N_2}{\sqrt{3}}\right) = a$

Για τα ανά μονάδα ισοδύναμα κυκλώματα ισχύει ότι: $\frac{|V_{b1}|_{1\phi}}{|V_{b2}|_{1\phi}} = \begin{cases} a, \text{Υ-Υ και Δ-Δ} \\ \sqrt{3} * a, \text{Υ-Δ} \\ \frac{a}{\sqrt{3}}, \text{Δ-Υ} \end{cases}$

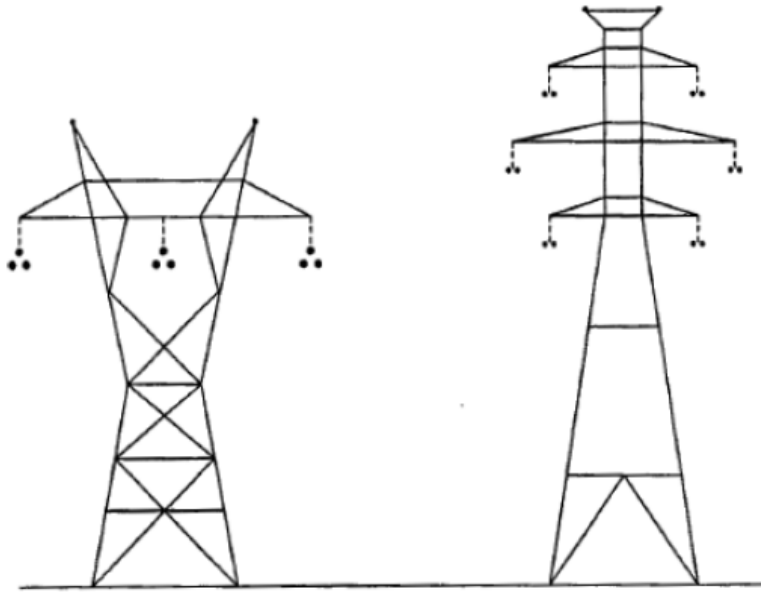
Με βάση τον παραπάνω λόγο τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις διάφορες συνδεσμολογίες του μετασχηματιστή φαίνονται στα Σχήματα 1.24 – 1.25. [1]



Σχήμα 1.24 – Ισοδύναμο κύκλωμα Υ-Δ, Δ-Δ Σχήμα 1.25 – Ισοδύναμο κύκλωμα Υ-Δ, Δ-Υ

1.4.3 Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από αγωγούς φάσεων, μονωτήρες και αγωγούς προστασίας. Τοποθετούνται πάνω σε πύργους/πυλώνες μεταφοράς οι οποίοι μπορεί να φέρουν ένα ή δύο κυκλώματα (Σχήμα 1.26).



Σχήμα 1.26 – Πύργοι τοποθέτησης γραμμών μεταφοράς

Το υλικό κατασκευής των αγωγών είναι το αλουμίνιο. Αντικατέστησε τον χαλκό που χρησιμοποιούνταν πριν λόγω του ότι για μια τιμή αντίστασης το αλουμίνιο ως υλικό είναι φθηνότερο και οι αγωγοί ελαφρύτεροι. Υπάρχουν διάφορα είδη αγωγών αλουμινίου όπως οι αγωγοί εξ' ολοκλήρου από κράματα αλουμινίου, οι αγωγοί εξ' ολοκλήρου από αλουμίνιο, οι αγωγοί με αλουμίνιο και ενίσχυση με χάλυβα ή κράμα.

Η τιμή αντίστασης της γραμμής δίνεται από τον τύπο: $R = \rho * \frac{l}{s}$, όπου

ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού και εξαρτάται από τη θερμοκρασία

l : το μήκος της γραμμής

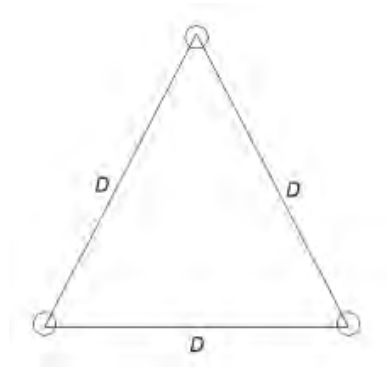
s : η διατομή του αγωγού

Η αντίσταση του αγωγού αυξάνεται στην περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος αλλά και στην περίπτωση που ο αγωγός είναι συνεστραμμένος. [1]

1.4.3.1 Επαγωγή και χωρητικότητα γραμμών μεταφοράς

Γραμμές με ισαπέχουσες φάσεις

Τέτοιες γραμμές θεωρούνται αυτές στις οποίες οι αγωγοί βρίσκονται στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου πλευράς D , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.27.



Σχήμα 1.27 – Γραμμή με ισαπέχουσες φάσεις

Η **επαγωγή** της γραμμής δίνεται από τον τύπο

$$L_a = L_b = L_c = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{D}{r'} \text{ H/m}$$

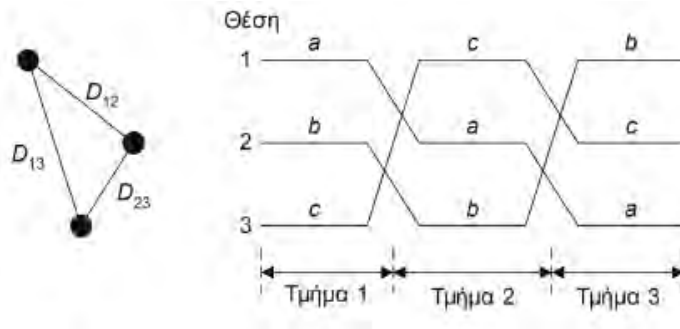
Η **χωρητικότητα** της γραμμής δίνεται από τον τύπο

$$C_a = C_b = C_c = \frac{2 * \pi * \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \text{ F/m}$$

Όπου r : η ακτίνα του αγωγού, D : η απόσταση των αγωγών, r' : η μέση γεωμετρική ακτίνα του αγωγού

Γραμμές με αντιμετάθεση φάσεων

Πρόκειται για μη συμμετρικές γραμμές στις οποίες ο κάθε αγωγός καταλαμβάνει και τις τρεις πιθανές θέσεις ανά ίσα διαστήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.28. Αυτό συμβαίνει για να μην υπάρχουν ασυμμετρίες όπως διαφορετικές πτώσεις τάσης εξ επαγωγής.



Σχήμα 1.28 – Γραμμή με αντιμετάθεση φάσεων

Η **επαγωγή** της γραμμής δίνεται από τον τύπο

$$L_a = L_b = L_c = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{D}{r'} \text{ H/m}$$

Η **χωρητικότητα** της γραμμής δίνεται από τον τύπο

$$C_a = C_b = C_c = \frac{2 * \pi * \epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{r}} \text{ F/m}$$

Όπου r : η ακτίνα του αγωγού, D_{12} , D_{23} , D_{31} : η απόσταση των αγωγών,

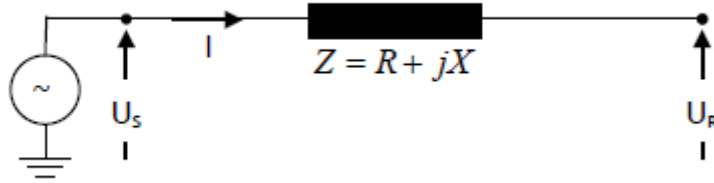
$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{31}}, r': \text{ η μέση γεωμετρική ακτίνα του αγωγού [1]}$$

1.4.3.2 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς

Ανάλογα με το **μήκος** της γραμμής καθορίζεται και η **χωρητική αντίδρασή** της. Αυτό έχει ως επακόλουθο οι γραμμές να χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, καθεμιά από τις οποίες αντιμετωπίζεται διαφορετικά. Ανάλογα με το μήκος οι γραμμές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- **Γραμμές μικρού μήκους (μήκος < 80 km):** Οι απώλειες ρεύματος είναι αμελητέες και έτσι η χωρητικότητα της γραμμής αγνοείται και λαμβάνεται υπόψη μόνο η επαγωγή της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.29.

$$U_s = U_R + I * Z$$

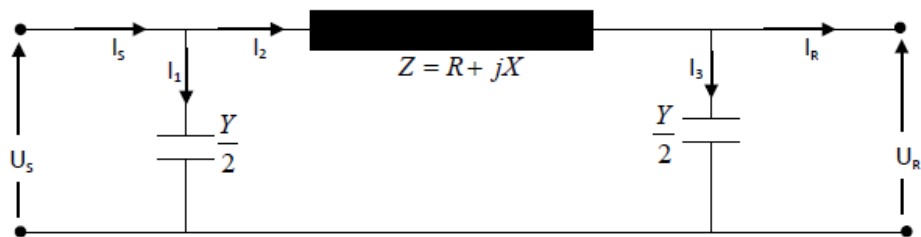


Σχήμα 1.29 – Γραμμή μικρού μήκους

- **Γραμμές μεσαίου μήκους (80 < μήκος < 240 km):** Οι απώλειες ρεύματος εδώ είναι σημαντικές και δεν μπορούν να αγνοηθούν. Ανάλογα με την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα από τα παρακάτω ισοδύναμα:
 - ο **Π-Ισοδύναμο:** Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.30, η χωρητική αντίδραση κατανέμεται στα δύο άκρα της γραμμής και η επαγωγική είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο της. Αν U_R, I_R γνωστά τότε:

$$U_S = \left(\frac{Z * Y}{2} + 1 \right) * U_R + I_R * Z$$

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

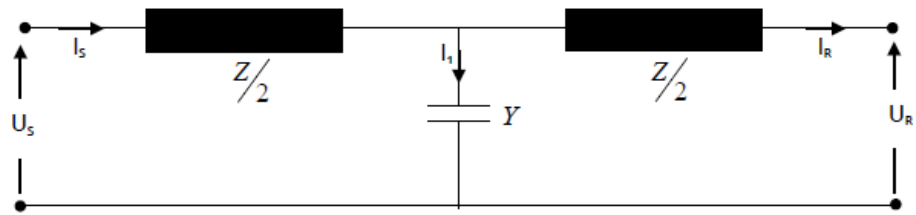


Σχήμα 1.30 – Π-Ισοδύναμο

- ο **T-Ισοδύναμο:** Σύμφωνα με το Σχήμα 1.31, η επαγωγική αντίδραση κατανέμεται στα δύο άκρα της γραμμής και η χωρητική είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο της. Αν U_R, I_R γνωστά τότε:

$$U_S = \left(1 + \frac{Y * Z}{2} \right) * U_R + \left(1 + \frac{Z * Y}{4} \right) * Z * I_R$$

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

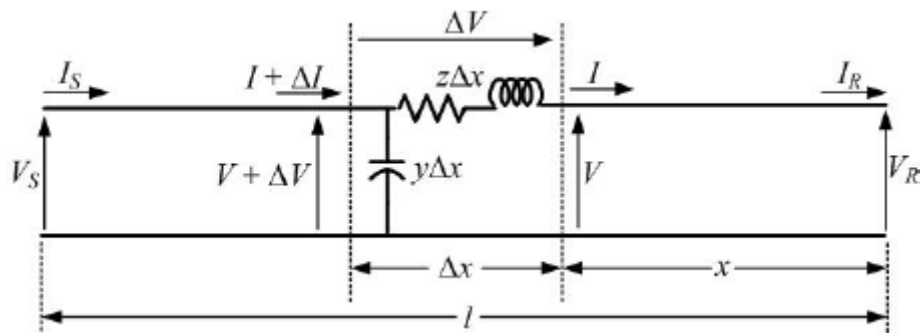


Σχήμα 1.31 – T-ισοδύναμο

- **Γραμμές μεγάλου μήκους (μήκος > 240 km):** Αυτή η κατηγορία γραμμών απαιτεί ειδικό χειρισμό. Δεν μπορεί να αναπαρασταθεί με κάποιο ισοδύναμο κύκλωμα. Κάθε τμήμα της έχει επαγωγική και χωρητική αντίδραση. Ένα ισοδύναμο μιας τέτοιας γραμμής φαίνεται στο Σχήμα 1.32.

$$V_S = V_R * \cosh(\gamma * l) + Z_C * I_R * \sinh(\gamma * l)$$

$$I_S = V_R * \frac{\sinh(\gamma * l)}{Z_C} + I_R * \cosh(\gamma * l)$$



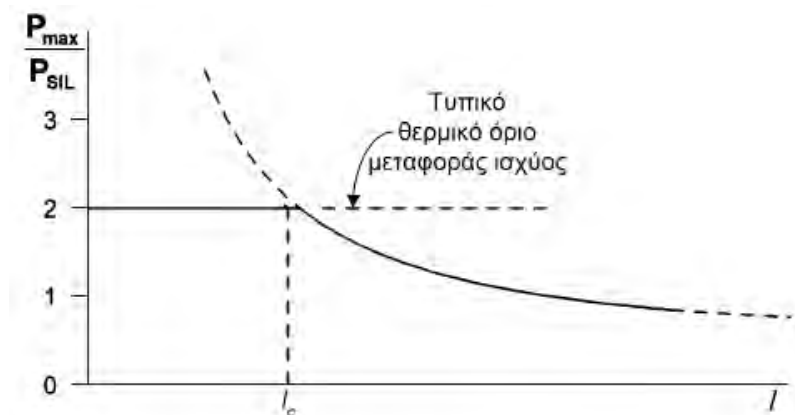
Σχήμα 1.32 – Γραμμή μεγάλου μήκους

Μια γραμμή μεταφοράς δεν μπορεί να διακινήσει οποιοδήποτε ποσό ενέργειας, αλλά υπάρχει ένα όριο με το οποίο λειτουργεί (ή φορτίζεται), η **ικανότητα φόρτισης** όπως ονομάζεται. Για **γραμμές μικρού μήκους** αυτό το όριο εξαρτάται από την **θερμική**

αντοχή των αγωγών. Για **γραμμές μεγάλου μήκους** εξαρτάται από τη **σύνθετη αντίσταση** της γραμμής.

Κατά τη λειτουργία των γραμμών παράγεται θερμότητα, η οποία αυξάνει την θερμοκρασία των αγωγών. Για να αποτραπεί η καταστροφή τους ορίζεται ένα όριο μέγιστης έντασης ρεύματος με την οποία μπορούν να φορτιστούν οι γραμμές. Επίσης, οι γραμμές έχουν ένα όριο όσον αφορά την τάση λειτουργίας τους καθώς σχεδιάζονται για συγκεκριμένα επίπεδα τάσης. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει και ένα αντίστοιχο όριο στην ισχύ που μπορεί να μεταφέρει μια γραμμή και δίνεται από τον εξής τύπο: $|S_{3\phi}|_{rated} = \sqrt{3} * |V_L|_{rated} * |I_L|_{rated}$ MVA.

Το όριο ευστάθειας σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής φαίνεται στο Σχήμα 1.33. Για γραμμές μικρού μήκους ($l < l_c$) η μεταφερόμενη ισχύς καθορίζεται από τα θερμικά όρια των αγωγών ενώ για γραμμές μεγάλου μήκους ($l > l_c$) από το όριο ευστάθειας. Σε πρακτικές εφαρμογές το όριο φόρτισης της γραμμής, ανεξάρτητα από το μήκος της, εξαρτάται μόνο από το όριο ευστάθειας και βρίσκεται πάντα κάτω από αυτό. [1]



Σχήμα 1.33 – Καμπύλη φόρτισης γραμμής μεταφοράς

1.4.4 Φορτία

Το μέγεθος και το είδος του φορτίου χωρίζουν τους καταναλωτές σε κατηγορίες και καθορίζουν την κατηγορία στην οποία θα ανήκει ο καθένας. Οι καταναλωτές μπορεί να είναι: **βιομηχανικοί, εμπορικοί, αγροτικοί, οικιακοί.**

Το ημερήσιο φορτίο διακρίνεται στις εξής κατηγορίες:

- **Φορτίο βάσης:** Ζητείται όλη την ημέρα και καλύπτεται με μονάδες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σχετικά μικρό κόστος.
- **Κυμαινόμενο φορτίο:** Μεταβάλλεται σχεδόν σε όλη την περίοδο που εξετάζεται. Εξαρτάται από παράγοντες όπως η ημέρα, ο καιρός, περίοδος του έτους κ.λπ.
- **Φορτίο Αιχμής:** Έχει μικρή διάρκεια (συνήθως κάποιες ώρες μέσα στη μέρα) και απότομες μεταβολές. Καλύπτεται με μονάδες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με μεγάλο κόστος.

Μια προσπάθεια μείωσης των μεταβολών του φορτίου αλλά και της εγκατεστημένης ισχύος είναι ο **συντελεστής ισχύος**. Ως συντελεστής ισχύος ορίζεται το πηλίκο: $\text{συντελεστής ισχύος} = \frac{\text{Άθροισμα αιχμών φορτίων}}{\text{Αιχμή συνολικού φορτίου}}$. Χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν δύο και περισσότερα διαφορετικά φορτία και εκφράζει τον ετεροχρονισμό μεταξύ τους. Όσο μεγαλύτερος της μονάδας είναι τόσο πιο ομαλό είναι το συνολικό φορτίο και τόσο μικρότερη ισχύ χρειάζεται. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάλυση Ροής Φορτίου

Η **ανάλυση ροής φορτίου** μπορεί να ληφθεί ως ένα μαθηματικό πρόβλημα, του οποίου η λύση προσδιορίζει την συμπεριφορά ενός ΣΗΕ για μια συγκεκριμένη φόρτισή του στην **μόνιμη κατάσταση λειτουργίας** του. Για να γίνει αυτό υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης όπως οι **τάσεις των ζυγών και οι ροές ισχύος στις γραμμές και στους μετασχηματιστές**.

Έχει αρκετά μεγάλο ρόλο στην λειτουργία ενός ΣΗΕ καθώς μπορεί να προσφέρει αρκετές λύσεις όταν πρέπει:

- Να μελετηθούν επεκτάσεις ή μεταβολές σε ένα ΣΗΕ (νέες μονάδες παραγωγής, νέες γραμμές μεταφοράς, νέα φορτία, νέες συνδέσεις με άλλα ΣΗΕ). Μέσω της ροής φορτίου μπορούν να βρεθούν οι επιπτώσεις που έχουν αυτές οι αλλαγές, να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις και να επιλεγεί η αποτελεσματικότερη.
- Να μελετηθούν οι επιπτώσεις μιας διαταραχής, όπου γίνεται μια σύγκριση της κατάστασης του συστήματος πριν και μετά από αυτή.
- Να προγραμματιστεί η κατανομή του φορτίου μέσα στο ΣΗΕ ώστε να μειωθούν οι απότομες μεταβολές της ζήτησης του φορτίου.
- Να γίνουν ενέργειες σε περίπτωση απώλειας γραμμής ή σταθμού παραγωγής (**contingency analysis**).

Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο παραγόντων:

- Της **μαθηματικής περιγραφής**, στην οποία καταστρώνονται και τροποποιούνται κατάλληλα οι εξισώσεις κόμβων.
- Της **χρήσης επαναληπτικών μεθόδων**, οι οποίες βοηθούν στην λύση των μη γραμμικών εξισώσεων του προηγούμενου βήματος. [2]

2.1 Εξισώσεις ροής φορτίου

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται μια απλοποιημένη περίπτωση για την κατασκευή των εξισώσεων ροής ισχύος. Πρόκειται για δύο ζυγούς παραγωγής οι οποίοι συνδέονται με μια γραμμή μεταφοράς. Βέβαια, στα πραγματικά μοντέλα δεν είναι όλοι οι ζυγοί παραγωγής. Οι ζυγοί τροφοδοτούνται με ισχύ S_{G1} , S_{G2} και τα φορτία τους τροφοδοτούνται με ισχύ S_{D1} , S_{D2} . Η διαφορά της ισχύος που τροφοδοτεί η γεννήτρια τον ζυγό και της ισχύος που καταναλώνει το κάθε φορτίο συνιστά την **ισχύ ζυγού**.

Η ισχύς κάθε ζυγού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, δίνεται από τον τύπο

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j * (Q_{G1} - Q_{D1}),$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j * (Q_{G2} - Q_{D2})$$



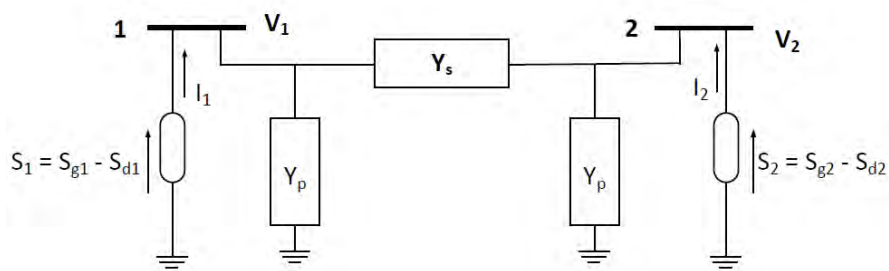
Σχήμα 2.7 - Ισχύς στους ζυγούς παραγωγής

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται το διάγραμμα αγωγιμοτήτων για την απλοποιημένη περίπτωση των δύο ζυγών. Η γραμμή μεταφοράς αναπαρίσταται από το **π-ισοδύναμό** της, οι γεννήτριες κάθε ζυγού έχουν αντικατασταθεί από την **ισχύ ζυγού** και τα φορτία αναπαριστώνται με τη μορφή αγωγιμοτήτων.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.2, το ρεύμα κάθε ζυγού δίνεται από τον τύπο

$$I_1 = I_{G1} - I_{D1}$$

$$I_2 = I_{G2} - I_{D2}$$



Σχήμα 2.2 – Ρεύματα σε ένα σύστημα ζυγών

$$I_1 = Y_{11} * V_1 + Y_{12} * V_2, I_2 = Y_{21} * V_1 + Y_{22} * V_2, \text{ όπου}$$

Y_{11} : το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στο ζυγό 1 ($y_p + y_s$)

Y_{12} : το αντίθετο της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών 1,2 ($-y_s$)

Y_{21} : το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στο ζυγό 2 ($y_p + y_s$)

Y_{22} : το αντίθετο της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών 2,1 ($-y_s$)

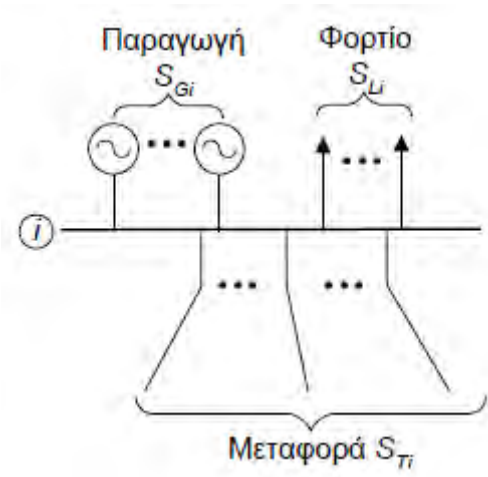
Σε μορφή πινάκων (για δύο ζυγούς)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Γενικά, για τα ρεύματα και τις τάσεις ισχύει η σχέση: $I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus}$. [2]

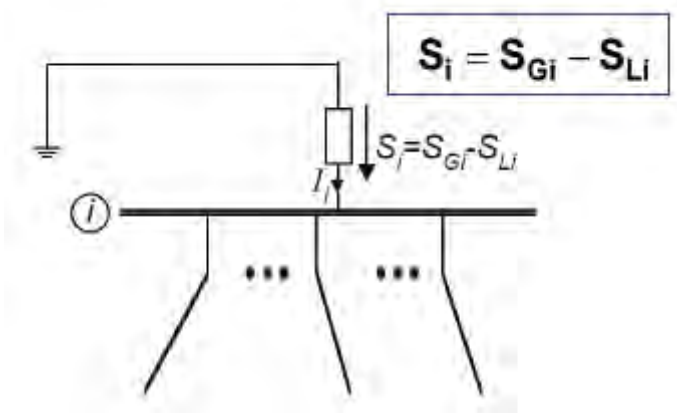
2.1.1 Εξισώσεις ροής φορτίου για σύστημα n ζυγών

Έστω ένας ζυγός i του συστήματος. Η γενική του μορφή φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Οι γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες σε αυτόν τον τροφοδοτούν με ισχύ S_{Gi} , τα φορτία καταναλώνουν ισχύ S_{Li} και οι γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν ισχύ S_{Ti} . Οι ισχύεις ικανοποιούν την σχέση: $S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti}$.



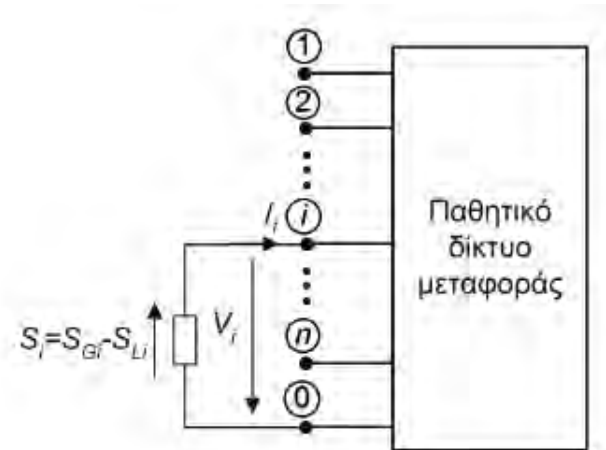
Σχήμα 2.3 – Γενική μορφή ζυγού

Μια ισοδύναμη αναπαράσταση του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Το S_i ορίζεται ως την **καθαρή ισχύ** που υπάρχει στο ζυγό και είναι η διαφορά μεταξύ των ισχύων της παραγωγής και του φορτίου. Η ισχύς αυτή θεωρείται ότι παρέχεται από μια ισοδύναμη πηγή ισχύος.



Σχήμα 2.4 – Γενική μορφή ζυγού με ισοδύναμη πηγή ισχύος

Κάνοντας χρήση αυτής της ισοδυναμίας το σύστημα μπορεί να παρασταθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Σε κάθε ζυγό αντιστοιχεί ένας ακροδέκτης ο οποίος ανήκει στο **παθητικό τμήμα** του συστήματος (γραμμές μεταφοράς και φορτία).



Σχήμα 2.5 – Σύστημα n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το δίκτυο διαμορφώνονται ως εξής:

$$I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \vdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \vdots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Όπου I_{bus} το διάνυσμα ρευμάτων που εισέρχονται στους ζυγούς, Y_{bus} ο πίνακας αγωγιμοτήτων και V_{bus} το διάνυσμα τάσεων των ζυγών μετρούμενες ως προς τον ζυγό αναφοράς.

Το ρεύμα του κάθε ζυγού δίνεται από τον τύπο: $I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j$

Η ισχύς S_{Ti} που μεταφέρουν οι γραμμές μεταφοράς είναι: $S_{Ti} = V_i^* * (\sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j)^*$

Τέλος, η ισχύς του κάθε ζυγού είναι: $P_i - j * Q_i = V_i^* * \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j$,

όπου $P_i = P_{Gi} - P_{Li}$ και $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$. [2]

2.2 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου

Κάθε ζυγός σχετίζεται με 6 μεταβλητές: το μέτρο της τάσης του ($|V|$), την γωνία της τάσης (δ), την ενεργό και άεργο ισχύ ζήτησης (P_d, Q_d), την ενεργό και άεργο ισχύ παραγωγής (P_g, Q_g).

Η ενεργός και η άεργος ισχύς κάθε ζυγού μπορούν να δοθούν από τους τύπους: $P_i = \text{Re}(V_i * \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j), i = 1, 2, \dots$

$$Q_i = -\text{Im}(V_i * \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j), i = 1, 2, \dots$$

Για ένα σύστημα n ζυγών προκύπτουν $2n$ εξισώσεις και $6n$ μεταβλητές. Για να μπορέσει το σύστημα αυτό να έχει λύσει πρέπει να καθοριστούν οι τιμές $4n$ μεταβλητών. Σε αυτή τη διαδικασία βοηθάει ο Πίνακας 2.1 .

Πίνακας 2.1 – Προσδιορισμός τύπων ζυγών

Τύπος ζυγού	Προκαθορισμένες μεταβλητές	Άγνωστες μεταβλητές
Αναφοράς (slack-swing)	$ V , \delta, P_d, Q_d$	P_g, Q_g
Ελέγχου Τάσης	$ V , P_g, P_d, Q_d$	δ, Q_g
Φορτίου	P_g, Q_g, P_d, Q_d	$ V , \delta$

Για την σωστή επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι οι οποίες είναι ανεκτικές στη μη γραμμικότητα και στον αρκετά μεγάλο αριθμό των εξισώσεων, έχουν αρκετή ακρίβεια και σχετικά μικρό χρόνο εκτέλεσης.

Οι μέθοδοι αυτοί κάνουν χρήση κάποιων αρχικών, προκαθορισμένων εκτιμήσεων για να παράγουν μια νέα πιο ακριβή εκτίμηση του αποτελέσματος.

Αρχικές εκτιμήσεις είναι η **τάση του ζυγού αναφοράς ($1 \leq 0$ pu)** και τα **μέτρα των τάσεων στους ζυγούς ελέγχου τάσης**. Εκτιμήσεις γίνονται για τις **φασικές γωνίες στους ζυγούς στους οποίους δεν υπάρχει έλεγχος τάσης και τα μέτρα των τάσεων και οι φασικές γωνίες στους ζυγούς φορτίου**. [2]

2.3 Ανάλυση ροής φορτίου με την μέθοδο Gauss-Seidel (G-S)

2.3.1 Η μέθοδος Gauss-Seidel

Είναι μία από τις πιο απλές επαναληπτικές μεθόδους. Στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε αρκετά για την ανάλυση ροής φορτίου. Σήμερα χρησιμοποιείται περισσότερο για μικρά ΣΗΕ ή και για τον υπολογισμό μιας αρχικής εκτίμησης που θα δοθεί ως είσοδος στην μέθοδο Newton-Raphson, την οποία θα δούμε στη συνέχεια.

Μια εξίσωση της μορφής $f(x) = 0$ μπορεί μέσω της Gauss-Seidel να μετατραπεί σε μια εξίσωση της μορφής $x = g(x)$. Οι προσεγγίσεις της λύσης γίνονται με τον τύπο $x^{(n+1)} = g(x^n)$. Η διαδικασία σταματά όταν η διαφορά δύο διαδοχικών προσεγγίσεων γίνει μικρότερη από μια ανοχή $|x^{(n+1)} - x^n| < \varepsilon$.

2.3.2 Η χρήση της μεθόδου στην επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου

Οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι της μορφής:

$$P_i - j * Q_i = V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j = Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j$$

Λύνοντας τη σχέση ως προς V_i προκύπτει:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} * \left[\frac{P_i - j * Q_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \right].$$

$$\text{Και σε αλγοριθμική μορφή: } V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} * \left[\frac{P_i - j * Q_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \right]$$

$$\text{Επίσης, } P_i = \text{Re} [Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j],$$

$$Q_i = -\text{Im} [Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j]. \quad [2]$$

2.3.3 Ο αλγόριθμος Gauss-Seidel

1. Υπολογισμός και κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων (Y_{bus})

Τα στοιχεία του έχουν αναχθεί στο ανά μονάδα σύστημα

2. Ανάθεση αρχικών συνθηκών

$$|V| = 1, \delta = 0$$

3. Εύρεση V_i

$$\text{Για ζυγούς φορτίου: } V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} * \left[\frac{P_{i-j} * Q_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \right]$$

Για ζυγούς ελέγχου τάσης:

$$\text{Πρώτα } Q_i^{(v+1)} = -Im \left[Y_{ii} * V_i^{(v)} * V_i^{*(v)} + V_i^{*(v)} * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j^{(v)} \right]$$

$$\text{και μετά } V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} * \left[\frac{P_{i-j} * Q_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \right]$$

Επειδή το μέτρο της τάσης συνήθως είναι υπολογισμένο για ζυγούς τάσης

$$\text{ισχύει: } V_i^{(v+1)} = |V_{i,calc}| * (\delta_{i,calc}^{(v+1)})$$

Για ταχύτερη σύγκλιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας **παράγοντας επιτάχυνσης α** στους ζυγούς φορτίου. Δηλαδή

$$V_{i,acc}^{(v+1)} = V_{i,acc}^{(v)} + \alpha * (V_i^{(v)} - V_{i,acc}^{(v)})$$

4. Έλεγχος σύγκλισης

Ελέγχονται ως προς την ορθότητά τους οι παρακάτω δύο συνθήκες :

$$Re[V_i^{(v+1)}] - Re[V_i^{(v)}] \leq \epsilon, |Im[V_i^{(v+1)}] - Im[V_i^{(v)}]| \leq \epsilon$$

Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη της **ανοχής ϵ** τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 3. Αν είναι μικρότερη τότε η λύση προσεγγίστηκε αρκετά και ο αλγόριθμος πάει στο βήμα 5.

5. Εύρεση ενεργού και άεργου ισχύος παραγωγής του ζυγού αναφοράς

Κάνοντας χρήση των εξής εξισώσεων:

$$P_i = Re[Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j].$$

$$Q_i = -Im[Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j].$$

6. Εύρεση όλων των ροών ισχύος σε όλες τις γραμμές

Το ρεύμα γραμμής από τον ζυγό i στον ζυγό j δίνεται από τον τύπο:

$$I_{ij} = I_s + I_{pi} * (V_i - V_j)_{ys} + V_i * Y_{pi}$$

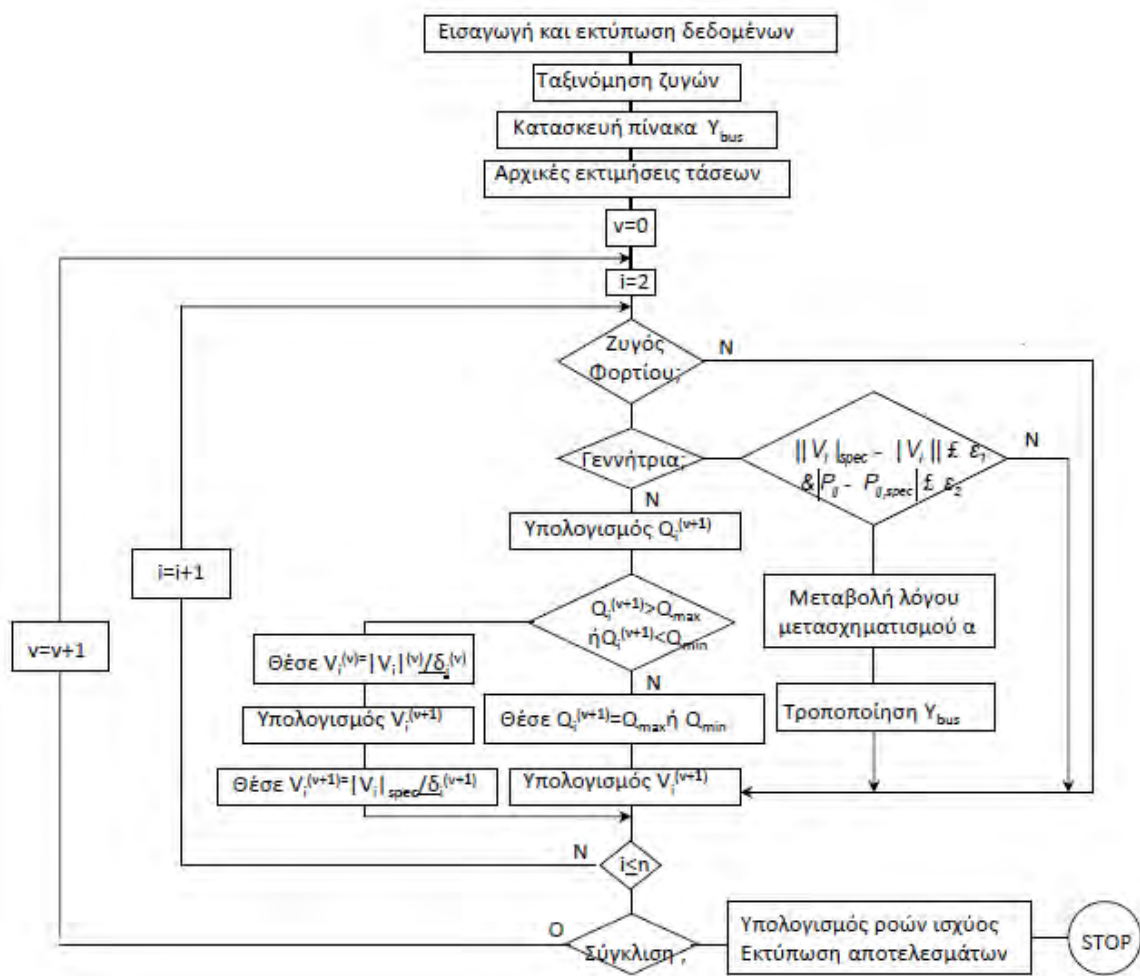
Η ισχύεις των ζυγών l,j αντίστοιχα στην γραμμή ij δίνονται από τους τύπους:

$$S_{ij} = P_{ij} + j * Q_{ij} = V_i * I_{ij}^* = V_i * (V_i^* - V_j^*) * Y_s^* + |V_i|^2 * Y_{pi}^*$$

$$S_{ji} = P_{ji} + j * Q_{ji} = V_j * I_{ji}^* = V_j * (V_j^* - V_i^*) * Y_s^* + |V_j|^2 * Y_{pi}^*$$

Η ισχύς απωλειών στην γραμμή δίνεται από τον τύπο: $S_{L,ij} = S_{ij} + S_{ji}$. [2]

Τα παραπάνω βήματα φαίνονται με τη μορφή διαγράμματος ροής στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.6 – Διάγραμμα ροής μεθόδου Gauss-Seidel

2.4 Ανάλυση ροής φορτίου με την μέθοδο Newton-Raphson (N-R)

2.4.1 Η μέθοδος Newton-Raphson

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται περισσότερο από την Gauss-Seidel λόγω του ότι έχει μικρότερο χρόνο εκτέλεσης και γρηγορότερη σύγκλιση.

Βασίζεται στη μέθοδο του αναπτύγματος Taylor. Το ανάπτυγμα Taylor μιας συνάρτησης με μια μεταβλητή γύρω από το $(x - a)$ δίνεται από τον τύπο:

$$f(x) = f(a) + (x - a) * \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x=a)} + \frac{(x - a)^2}{2!} * \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{(x=a)} + \dots + \frac{(x - a)^n}{n!} * \left. \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \right|_{(x=a)} + K_n$$

Η σειρά συγκλίνει όταν $\lim_{n \rightarrow \infty} K_n = 0$

Αν $(x - a) \ll 1$ τότε οι υψηλόβαθμοι όροι παραλείπονται, δηλαδή:

$$f(x) \approx f(a) + (x - a) * \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x=a)}$$

Το ανάπτυγμα Taylor μιας συνάρτησης με περισσότερες μεταβλητές γύρω από το

$(x_1 - a_1), (x_2 - a_2), \dots, (x_k - a_k), k = 1, 2, \dots, n$ δίνεται από τον τύπο:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(a_1, a_2, \dots, a_n) + (x_1 - a_1) * \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{(x_1=a)} + (x_2 - a_2) * \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{(x_2=a)} + \dots + (x_n - a_n) * \left. \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|_{(x_n=a)} + K_n$$

Έστω ότι υπάρχει ένα σύνολο με μη γραμμικές εξισώσεις με n μεταβλητές η καθεμία:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2$$

...

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n$$

ή

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_k, k = 1, 2, \dots, n$$

Έστω αρχικές τιμές $x_k^{(0)}$ και ένας αριθμός Δx_k , ο οποίος αν προστεθεί στο $x_k^{(0)}$ δίνει το $x_k^{(1)}$. Το ανάπτυγμα Taylor διαμορφώνεται ως εξής:

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_k(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1 * \left. \frac{\partial f_k}{\partial x_1} \right|_{(x_1^{(0)} = a)} + \Delta x_2 * \left. \frac{\partial f_k}{\partial x_2} \right|_{(x_2^{(0)} = a)} + \dots + \Delta x_n * \left. \frac{\partial f_k}{\partial x_n} \right|_{(x_n^{(0)} = a)} = y_k, k = 1, 2, \dots, n$$

Σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(x_1^{(0)} = a)} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{(x_2^{(0)} = a)} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_{(x_n^{(0)} = a)} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{(x_1^{(0)} = a)} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{(x_2^{(0)} = a)} & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_{(x_n^{(0)} = a)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_{(x_1^{(0)} = a)} & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_{(x_2^{(0)} = a)} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_{(x_n^{(0)} = a)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}$$

$$\text{ή } [\Delta U]^{(0)} = [J]^{(0)} * [\Delta X]^{(0)} \Rightarrow [\Delta X]^{(0)} = ([J]^{(0)})^{-1} * [\Delta U]^{(0)},$$

όπου $[J]$ ο Ιακωβιανός πίνακας.

Η επόμενη προσέγγιση δίνεται από τον τύπο: $[X]^{(1)} = [X]^{(0)} + [\Delta X]^{(0)}$.

Γενικά ισχύει $[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [\Delta X]^{(k)}$. [2]

2.4.2 Η χρήση της μεθόδου στην επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου

Εφαρμόζεται στην πραγματική μορφή των εξισώσεων ροής φορτίου

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| * |j| * |V_{ij}| * \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = f_{ip}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| * |j| * |V_{ij}| * \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = f_{iq}, i = 1, 2, \dots, n$$

Όλοι οι ζυγοί εκτός από τον ζυγό 1 (αναφοράς) είναι ζυγοί φορτίου άρα οι άγνωστοι είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων (n-1 πλήθος).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{2p}}{\partial \delta_2} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{2p}}{\partial \delta_n} |^{(0)} & \frac{\partial f_{2p}}{\partial |V_2|} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{2p}}{\partial |V_n|} |^{(0)} \\ \vdots & H & \vdots & \vdots & N & \vdots \\ \frac{\partial f_{np}}{\partial \delta_2} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{np}}{\partial \delta_n} |^{(0)} & \frac{\partial f_{np}}{\partial |V_2|} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{np}}{\partial |V_n|} |^{(0)} \\ \frac{\partial f_{2q}}{\partial \delta_2} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{2q}}{\partial \delta_n} |^{(0)} & \frac{\partial f_{2q}}{\partial |V_2|} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{2q}}{\partial |V_n|} |^{(0)} \\ \vdots & M & \vdots & \vdots & L & \vdots \\ \frac{\partial f_{nq}}{\partial \delta_2} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{nq}}{\partial \delta_n} |^{(0)} & \frac{\partial f_{nq}}{\partial |V_2|} |^{(0)} & \dots & \frac{\partial f_{nq}}{\partial |V_n|} |^{(0)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ |\Delta V_2|^{(0)} \\ \vdots \\ |\Delta V_n|^{(0)} \end{bmatrix}$$

ή $\Delta U^{(0)} = J^{(0)} * \Delta X^{(0)}$, όπου $\Delta U^{(0)}$: το διάνυσμα με τις λάθος προβλέψεις στις ισχύεις, $J^{(0)}$: ο ιακωβιανός πίνακας, $\Delta X^{(0)}$: το διάνυσμα λάθους στην μηδενική επανάληψη. [2]

2.4.3 Ο αλγόριθμος Newton-Raphson

1. Υπολογισμός και κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων (Y_{bus})

Τα στοιχεία του έχουν αναχθεί στο ανά μονάδα σύστημα

2. Ανάθεση αρχικών συνθηκών

$$|V| = 1, \delta = 0$$

3. Καθορισμός διανύσματος αστοχιών ΔU για την k-οστή επανάληψη

4. Καθορισμός ιακωβιανού για την k-οστή επανάληψη

5. Καθορισμός διανύσματος λάθους ΔX

$$\text{Κάνοντας χρήση του τύπου: } \Delta U^{(0)} = J^{(0)} * \Delta X^{(0)}$$

Για την k+1 επανάληψη γίνεται χρήση του τύπου: $X^{(k+1)} = X^{(k)} * \Delta X^{(0)}$.

Ελέγχονται οι αστοχίες στις προβλέψεις ισχύος. Αν είναι στα όρια της **ανοχής** τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 3. Αν όχι τότε η λύση προσεγγίστηκε αρκετά και ο αλγόριθμος πάει στο βήμα 6.

6. Εύρεση ενεργού και άεργου ισχύος παραγωγής του ζυγού αναφοράς

Κάνοντας χρήση των εξής εξισώσεων:

$$P_i = \text{Re}[Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j]$$

$$Q_i = -\text{Im} \left[Y_{ii} * V_i * V_i^* + V_i^* * \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} * V_j \right]$$

7. Εύρεση όλων των ρών ισχύος σε όλες τις γραμμές

Το ρεύμα γραμμής από τον ζυγό i στον ζυγό j δίνεται από τον τύπο:

$$I_{ij} = I_s + I_{pi} * (V_i - V_j)_{y_s} + V_i * Y_{pi}$$

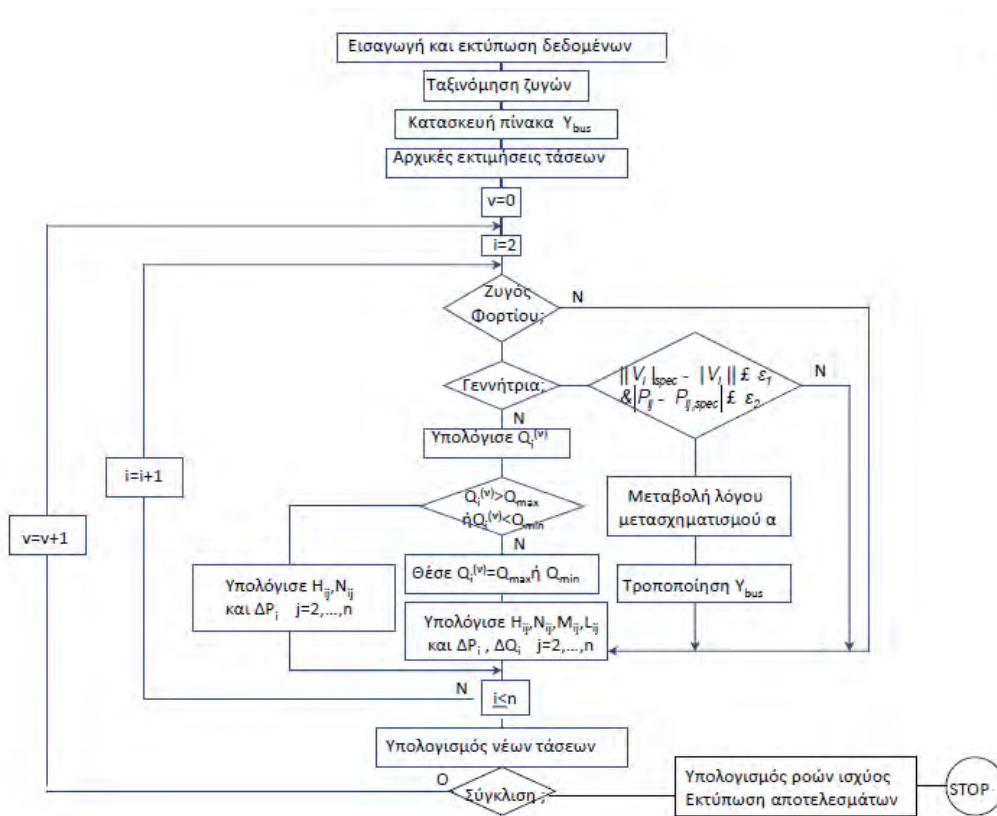
Η ισχύεις των ζυγών i, j αντίστοιχα στην γραμμή ij δίνονται από τους τύπους:

$$S_{ij} = P_{ij} + j * Q_{ij} = V_i * I_{ij}^* = V_i * (V_i^* - V_j^*) * Y_s^* + |V_i|^2 * Y_{pi}^*$$

$$S_{ji} = P_{ji} + j * Q_{ji} = V_j * I_{ji}^* = V_j * (V_j^* - V_i^*) * Y_s^* + |V_j|^2 * Y_{pj}^*$$

Η ισχύς απωλειών στην γραμμή δίνεται από τον τύπο: $S_{L,ij} = S_{ij} + S_{ji}$. [2]

Τα παραπάνω βήματα φαίνονται με τη μορφή διαγράμματος ροής στο Σχήμα 2.4



Σχήμα 2.7 – Διάγραμμα ροής μεθόδου Newton-Raphson

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

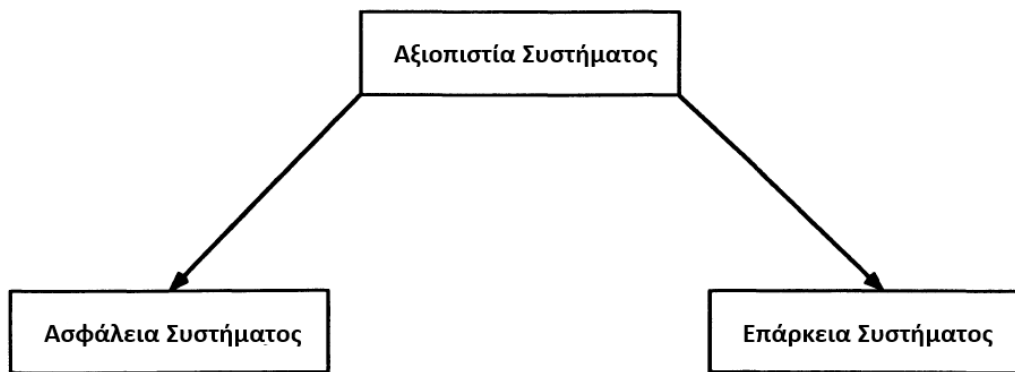
Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Βασικές έννοιες

Τα σύγχρονα ΣΗΕ αποτελούν μια μορφή πεπλεγμένου δικτύου από γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, φορτία κ.λπ. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας τόσο στη μορφή τους όσο και στον εξοπλισμό τους, η λειτουργία τους αλλά και η ανάπτυξη τους έχει γίνει αρκετά περίπλοκη. Οποιοδήποτε σφάλμα σε κάποιο σημείο τους θα μπορούσε να τα οδηγήσει σε μια απροσδόκητη κατάσταση.

Τα περισσότερα ΣΗΕ σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε τα μέτρα των τάσεων και των ισχύων των μονάδων τους να μένουν μέσα σε κάποια όρια και στην περίοδο κανονικής λειτουργίας αλλά και σε μια κατάσταση σφάλματος. Σε αυτό συμβάλλει ο αποτελεσματικός συνδυασμός αρκετών κριτηρίων, αποτελεί τον βασικό στόχο της διαδικασίας ελέγχου λειτουργίας ενός ΣΗΕ και συνιστά τη μελέτη **αξιοπιστίας του συστήματος**.

Ως όρος η **αξιοπιστία** δεν έχει έναν μοναδικό ορισμό αλλά συχνά στην βιβλιογραφία ορίζεται ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται. Στην γενικότερη περίπτωση όμως ως **αξιοπιστία ΣΗΕ** ορίζεται μια κατάσταση του συστήματος η οποία έχει να κάνει με μια περίοδο του χρόνου, συνήθως μεγάλη. Αξιολογείται με βάση την απόδοση αλλά και την ικανότητα που έχει το σύστημα ή μια μονάδα του στο να κάνει όλες τις λειτουργίες για τις οποίες έχει σχεδιαστεί. Ένα σύστημα θεωρείται αξιόπιστο όταν όλες οι συνιστώσες του δουλεύουν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η απαραίτητη παραγωγή. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, η αξιοπιστία μπορεί να χωριστεί σε δύο υποκατηγορίες, **την επάρκεια και την ασφάλεια**.



Σχήμα 3.1 – Υποκατηγορίες αξιοπιστίας ΣΗΕ

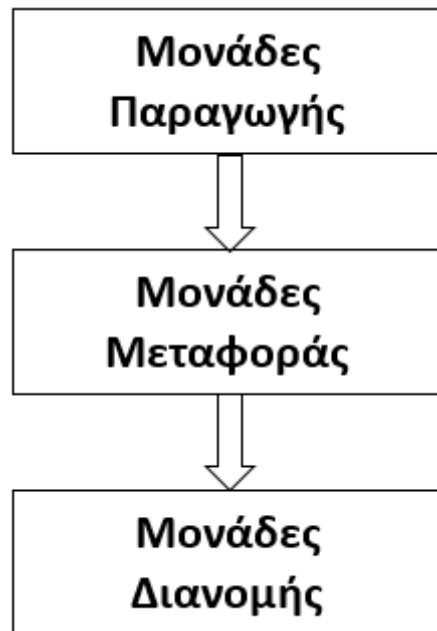
Ως **επάρκεια ΣΗΕ** ορίζεται η ικανότητα που έχει το σύστημα να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις σε φορτίο που έχουν οι καταναλωτές του, αλλά και τα επιθυμητά όρια λειτουργίας του. Αυτό επιτυγχάνεται αν οι μονάδες παραγωγής δίνουν την απαραίτητη ενέργεια στο σύστημα και αν οι μονάδες μεταφοράς τη μεταφέρουν χωρίς προβλήματα στους καταναλωτές. Η επάρκεια ενός συστήματος αφορά τη στατική κατάστασή του και δεν περιλαμβάνει μεταβατικές ή δυναμικές διαταραχές.

Ως **ασφάλεια ΣΗΕ** ορίζεται μια κατάσταση του συστήματος η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο. Αξιολογείται με βάση την απόδοση ενός ΣΗΕ κάτω από ορισμένες συνθήκες αλλά και την ικανότητα που έχει να λειτουργεί με ασφάλεια χωρίς να παραβιάζει κάποιο από τα όρια λειτουργίας του. Ένα σύστημα θεωρείται ασφαλές όταν μπορεί και λειτουργεί σωστά κατά τη διάρκεια απότομης μεταβολής του φορτίου και της παραγωγής (προβλέψιμες αλλαγές) αλλά και κατά τη διάρκεια διαταραχών (απρόβλεπτες αλλαγές). [3], [4]

3.2 Επάρκεια ΣΗΕ

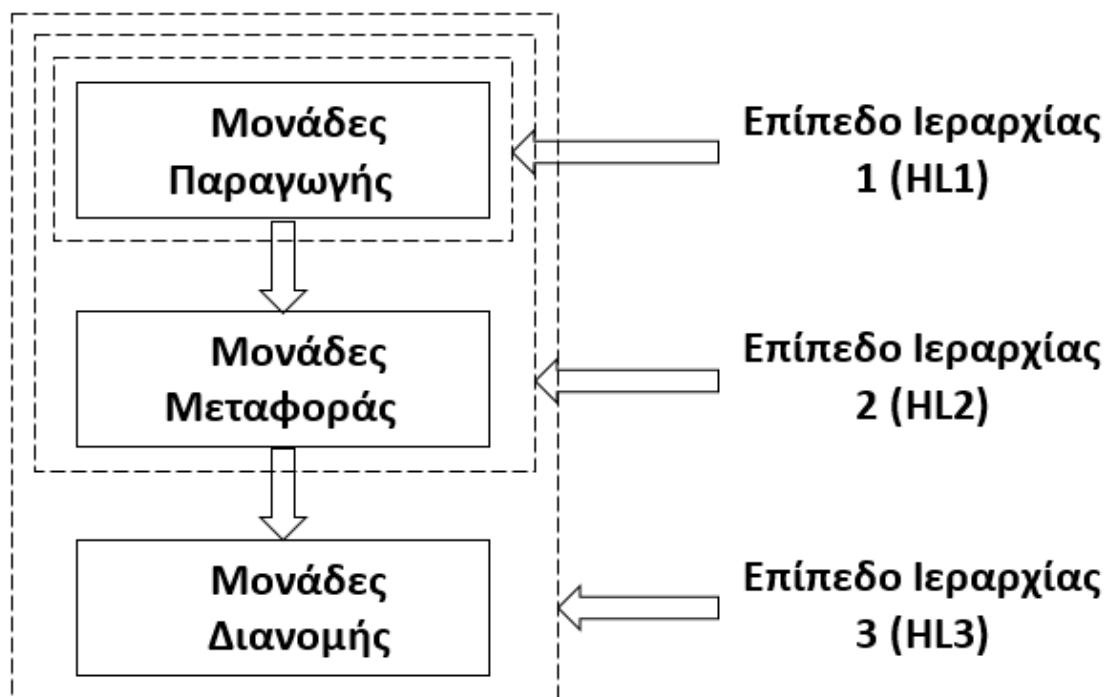
Για τον υπολογισμό της επάρκειας ενός συστήματος χρησιμοποιούνται κάποιες τεχνικές οι οποίες, ανάλογα με τη χρήση τους, μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες που αποτελούνται από τα επιμέρους τμήματα του συστήματος. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται **ζώνες λειτουργίας** και όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 οι ζώνες αυτές είναι

η ζώνη παραγωγής, η ζώνη μεταφοράς και η ζώνη διανομής. Ο χωρισμός αυτός είναι αρκετά σημαντικός γιατί τα περισσότερα εργαλεία του συστήματος κατατάσσονται σε αυτές τις ζώνες είτε γιατί είναι υπεύθυνα για τις λειτουργίες που αυτές περιγράφουν είτε για λόγους οργάνωσης, λειτουργίας ή ανάλυσης. Οι μελέτες για την επάρκεια ενός συστήματος γίνονται και στις τρεις ζώνες.



Σχήμα 3.2 – Ζώνες λειτουργίας

Οι ζώνες λειτουργίας αν συνδυαστούν μπορούν να δώσουν τα λεγόμενα **επίπεδα ιεραρχίας**, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3.3, και χρησιμοποιούνται και αυτά για τον υπολογισμό της επάρκειας ενός συστήματος. Τα επίπεδα ιεραρχίας είναι το **επίπεδο ιεραρχίας 1 (Hierarchy Level 1 – HL 1)** το οποίο περιλαμβάνει μόνο τις μονάδες παραγωγής, το **επίπεδο ιεραρχίας 2 (Hierarchy Level 2 – HL 2)**, το οποίο περιλαμβάνει τις μονάδες παραγωγής και μεταφοράς και το **επίπεδο ιεραρχίας 3 (Hierarchy Level 3 – HL 3)**, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις ζώνες λειτουργίας για τον υπολογισμό της επάρκειας του φορτίου που δίνεται στους καταναλωτές.



Σχήμα 3.3 – Επίπεδα ιεραρχίας

Σε ένα πραγματικό σύστημα οι μελέτες οι οποίες περιλαμβάνουν τα επίπεδα ιεραρχίας δεν γίνονται σε όλο το σύστημα λόγω του μεγέθους του. Συνήθως γίνονται σε κάποιες μικρότερες περιοχές για να εξεταστούν οι επιπτώσεις που θα έχουν στην αξιοπιστία κάποιες συγκεκριμένες αλλαγές στον εξοπλισμό ή στην τοπολογία. Οι περιοχές αυτές βρίσκονται σε σημεία του συστήματος υπομεταφοράς ή διανομής που έχουν μικρή επιρροή από τις μονάδες παραγωγής.

Όσον αφορά το επίπεδο ιεραρχίας 3 οι μελέτες γίνονται μόνο σε μικρές περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχει κάποια σαφήνεια για το πόσο αξιόπιστες ή όχι είναι. Στο επίπεδο ιεραρχίας 2 μελετάται μια περιοχή και με αυτό τον τρόπο βγαίνουν αποτελέσματα για όλο το σύστημα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ρεαλιστικά καθώς μια μεταβολή στο επίπεδο της μεταφοράς μπορεί μεν να επηρεάσει την αξιοπιστία μιας μικρής περιοχής του συστήματος κοντά στο σημείο της μεταβολής αλλά δεν έχει κάποιο αντίκτυπο στην αξιοπιστία μιας περιοχής μακριά από αυτό το σημείο. Παρόλα αυτά η μεταβολή αυτή μπορεί να σημαίνει αρκετά για την αξιοπιστία της περιοχής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τοπική ενίσχυση ενός ΣΗΕ. Αν μελετηθεί η

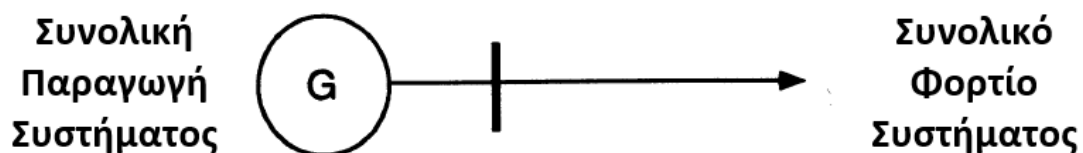
αξιοπιστία όλου του συστήματος τότε το αποτέλεσμα μπορεί να είναι ότι δεν είναι επιτρεπτή η προσθήκη κάποιας μονάδας. Σε αυτή την περίπτωση περιορίζεται η περιοχή που πρέπει να μελετηθεί. [4]

3.3 Μελέτη επάρκειας ΣΗΕ

Για να γίνει μια πλήρης μελέτη της επάρκειας ενός συστήματος θα πρέπει να ικανοποιούνται κάποιες προϋποθέσεις όπως η μελέτη επάρκειας καθενός από τα τρία επίπεδα ιεραρχίας που ορίστηκαν παραπάνω.

3.3.1 Μελέτη συστήματος παραγωγής (Μελέτη επιπέδου ιεραρχίας 1)

Σε αυτή τη μελέτη διαπιστώνεται αν μπορεί η συνολική παραγωγή του συστήματος να καλύψει τις συνολικές απαιτήσεις φορτίου. Συχνά συναντάται με τον όρο **Μελέτη Αξιοπιστίας Ικανότητας Παραγωγής**. Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 – Μοντέλο επιπέδου ιεραρχίας 1

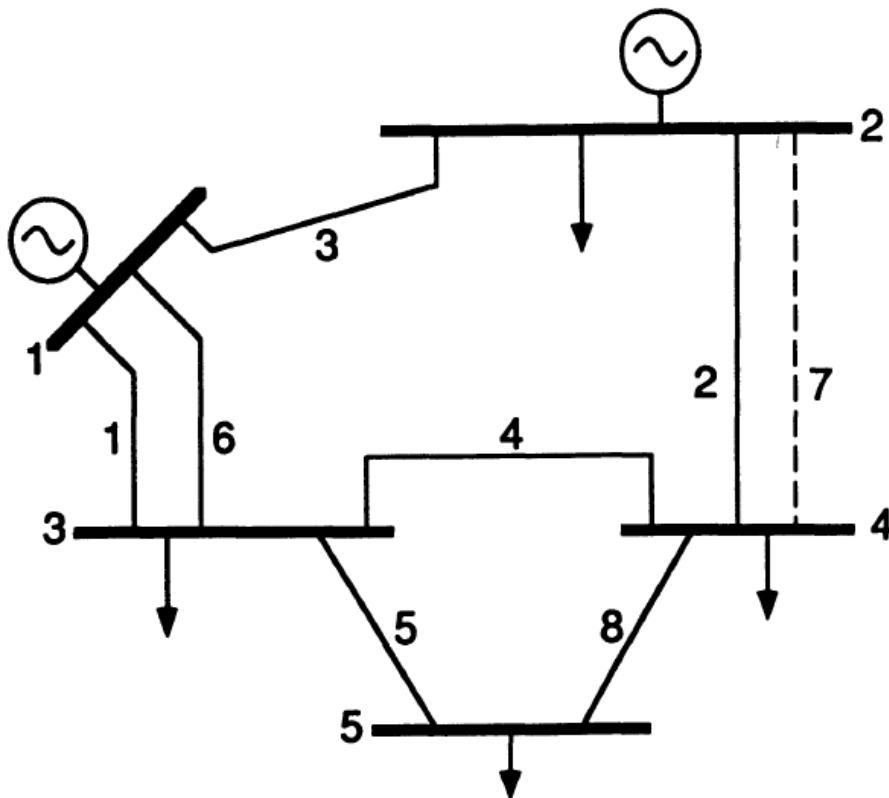
Το βασικό σημείο της μελέτης αυτής είναι ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος που χρειάζεται για να καλυφθούν οι ανάγκες του συστήματος αλλά και οι ανάγκες πρόληψης και διόρθωσης σφαλμάτων. Η πιο διαδεδομένη τεχνική υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύος στο παρελθόν ήταν η λεγόμενη **μέθοδος ποσοστού αποθεματικού**. Σύμφωνα με αυτή το αποθεματικό ήταν ένα σταθερό ποσοστό της εγκατεστημένης παραγωγής ή του απαιτούμενου φορτίου. Πολλές φορές το

αποθεματικό θεωρούνταν ως ίσο με τη μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής. Σήμερα τέτοιες μέθοδοι έχουν σταματήσει να εφαρμόζονται και έχουν δώσει τη θέση τους σε πιθανοτικές μεθόδους.

Το σύστημα μεταφοράς και οι δυνατότητές του στο να μεταφέρει ισχύ στα απαιτούμενα σημεία δε λαμβάνονται υπ' όψη σε αυτή τη μελέτη εκτός από τις γραμμές που συνδέουν απομακρυσμένες εγκαταστάσεις και συστήματα. Ονομάζεται **Μελέτη Επάρκειας Συστήματος Παραγωγής Πολλών Περιοχών** και περιλαμβάνονται μόνο οι συνδέσεις των συστημάτων και όχι οι εσωτερικές διασυνδέσεις. Σε αυτή την περίπτωση η μελέτη αξιοπιστίας του απομακρυσμένου συστήματος αποτελείται στην ουσία από τη μελέτη αξιοπιστίας της γραμμής διασύνδεσης. Για τη μελέτη συστημάτων που εκτείνονται σε πολλές περιοχές χρησιμοποιείται ευρέως η μέθοδος της **ροής ισχύος**. [4]

3.3.2 Μελέτη συστήματος μεταφοράς (Μελέτη επιπέδου ιεραρχίας 2)

Η μελέτη αυτή συνήθως ορίζεται ως **μελέτη αξιοπιστίας σύνθετου συστήματος ή συστήματος μεγάλου όγκου**. Χρησιμοποιεί ένα μοντέλο σαν και αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.5 το οποίο αποτελεί μια επέκταση του προηγούμενου μοντέλου ώστε να περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά του συστήματος απαραίτητα για την μεταφορά ενέργειας.



Σχήμα 3.5 – Μοντέλο για την μελέτη του επιπέδου ιεραρχίας 2

Βοηθάει στο να εκτιμηθεί η επάρκεια ενός συστήματος αλλά και το αντίκτυπο που θα έχουν κάποιες αλλαγές στο επίπεδο παραγωγής και μεταφοράς. Για την εκτίμηση αυτών των αλλαγών χρησιμοποιούνται δύο κατηγορίες δεικτών, τους **δείκτες μεμονωμένων ζυγών (φορτία)** και τους **γενικούς δείκτες συστήματος**. Οι δείκτες μεμονωμένων ζυγών αφορούν συγκεκριμένους ζυγούς και δίνουν αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη επάρκειας του συστήματος διανομής ενώ οι γενικοί δείκτες δίνουν αποτελέσματα για όλο το σύστημα. Και οι δύο κατηγορίες μπορούν να χωριστούν στους **ετήσιους δείκτες**, οι οποίοι υπολογίζονται με βάση όλες τις μεταβολές του φορτίου μέσα στο χρόνο αλλά και **δείκτες ανοιγμένους σε ετήσια βάση**, οι οποίοι υπολογίζονται με βάση ένα επίπεδο του φορτίου (συνήθως η αιχμή του) και εκφράζονται σε ετήσια βάση. Οι ετήσιοι δείκτες δίνουν μια πιο ρεαλιστική εικόνα όταν υπολογίζονται οι επιπτώσεις της έλλειψης αξιοπιστίας σε ένα σύστημα ενώ οι ανοιγμένοι δείκτες σε ετήσια βάση όταν συγκρίνονται μεταξύ τους διάφορα σενάρια αλλαγών του συστήματος.

Παρόλα αυτά όμως αυτοί οι δείκτες απλά δείχνουν την ικανότητα του συστήματος να ικανοποιήσει μερικά πιθανά σενάρια. Δεν δείχνουν πως μπορεί το σύστημα να αντιδράσει σε μεταβατικές ή δυναμικές αλλαγές. [4]

3.3.3 Μελέτη συστήματος διανομής (Μελέτη επιπέδου ιεραρχίας 3)

Σε πραγματικά συστήματα η μελέτη του επιπέδου ιεραρχίας 3 γίνεται αρκετά περίπλοκη καθώς αρχίζει από τους σταθμούς παραγωγής και τελειώνει στην κατανάλωση του φορτίου. Γι' αυτό τον λόγο η ζώνη διανομής μελετάται ξεχωριστά. Οι δείκτες επάρκειας που αφορούν αυτό το επίπεδο υπολογίζονται μέσω των δεικτών του επιπέδου ιεραρχίας 2 που αφορούν τους ζυγούς.

Ένα σύστημα διανομής μπορεί να είναι σε **μορφή βρόχου** ή σε **ακτινική μορφή**. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα με μορφή βρόχου είναι περίπου ίδιες με αυτές των σύνθετων συστημάτων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα με ακτινική μορφή βασίζονται στην λεγόμενη **ανάλυση αστοχίας λειτουργίας** και περιλαμβάνουν όλες τις πιθανές περιπτώσεις δυσλειτουργίας και αποκατάστασης.

Η αξιολόγηση της επάρκειας στα συστήματα διανομής αλλά και σε συγκεκριμένους καταναλωτές γίνεται μέσω των **δεικτών επιπέδου ιεραρχίας 3 (HL3)**. Στα περισσότερα συστήματα υπάρχουν προβλήματα επάρκειας λόγω προβλημάτων στο σύστημα διανομής. [4]

3.4 Εκτίμηση επάρκειας ΣΗΕ

Για την εκτίμηση της επάρκειας ενός συστήματος υπάρχουν αρκετοί δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι δείκτες διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο ιεραρχίας, την γεωγραφική περιοχή ή τον εξοπλισμό. Οι τιμές αυτές δεν είναι καθοριστικές για το σύστημα, απλά αποτελούν μια μέση τιμή για ένα φαινόμενο που μελετάται. [4]

3.4.1 Δείκτες επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 1

Σε αυτό το επίπεδο υπάρχουν τέσσερις βασικοί δείκτες, ο δείκτης **Εκτίμησης Απώλειας Φορτίου (Loss Of Load Expectation - LOLE)**, ο δείκτης **Εκτίμησης Απώλειας Ενέργειας (Loss Of Energy Expectation - LOEE)**, ο δείκτης **Συχνότητας Απώλειας Φορτίου (Loss Of Load Frequency - LOLF)** και ο δείκτης **Διάρκειας Απώλειας Φορτίου (Loss Of Load Duration - LOLD)**. Οι δείκτες αυτοί δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

1. LOLE (μέρες/έτος ή ώρες/έτος)

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i * T$$

Όπου p_i η πιθανότητα του συστήματος να βρίσκεται στην κατάσταση i και S το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων όπου υπάρχει απώλεια φορτίου. Δείχνει το μέσο όρο των ημερών ή των ωρών στις οποίες η αιχμή του φορτίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την διαθέσιμη παραγωγή. Όταν είναι σε μέρες/έτος εξαρτάται από την ημερήσια αιχμή φορτίου και τη διαθέσιμη παραγωγή ενώ όταν είναι σε ώρες/έτος εξαρτάται από την ωριαία αιχμή φορτίου και τη διαθέσιμη παραγωγή.

2. LOEE (MWh/έτος)

$$LOEE = \sum_{i \in S} 8760 * C_i * p_i$$

Όπου C_i η απώλεια φορτίου του συστήματος στην κατάσταση i . Δείχνει την ενέργεια που δεν μπορεί να δοθεί στο σύστημα λόγω της υπερβολικής ζήτησης φορτίου. Αυτός ο δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο στο μέλλον λόγω της εισχώρησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ΣΗΕ. Το ποσό της ενέργειας που δίνεται στο σύστημα μπορεί να διαιρεθεί με το ποσό της συνολικής ενέργειας και να δώσει ένα δείκτη, ο οποίος ονομάζεται **Δείκτης Ενεργειακής Αξιοπιστίας (Energy Index of Reliability - EIR)** και χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της επάρκειας ανάμεσα σε συστήματα που διαφέρουν πολύ στο μέγεθος.

3. LOLF (διαταραχές/έτος)

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

Όπου F_i η συχνότητα της κατάστασης i που παρεκκλίνει το σύστημα και f_i το τμήμα της F_i που είναι εκτός ορίων που ορίζουν οι καταστάσεις *απώλειας φορτίου* και *μη απώλειας φορτίου*.

4. LODL (ώρα/διαταραχή)

$$LODL = \frac{LOLE}{LOLF}$$

Παρόλο που η διάρκεια και η συχνότητα των διαταραχών χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς ο δείκτης αυτός δεν χρησιμοποιείται αρκετά στις μελέτες αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής. [4]

3.4.2 Δείκτες επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 2

Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στο επίπεδο 1 μπορούν να επεκταθούν ώστε να χρησιμοποιηθούν και σε αυτό το επίπεδο. Ωστόσο, χρειάζονται περισσότεροι δείκτες για να αναλυθούν πλήρως όλα τα χαρακτηριστικά του επιπέδου. Οι δείκτες φαίνονται παρακάτω:

1. Πιθανότητα Αποκοπής Φορτίου (Probability of Load Curtailments - PLC)

$$PLC = \sum_{i \in S} p_i$$

Όπου p_i η πιθανότητα του συστήματος να βρίσκεται στην κατάσταση i και S το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων όπου υπάρχουν περικοπές φορτίου.

2. Αναμενόμενη Συχνότητα Αποκοπής Φορτίου (Expected Frequency of Load Curtailments – EFLC) (διαταραχές/έτος)

Ο δείκτης αυτός έχει την ίδια σημασία που έχει ο δείκτης **LOFL** στο επίπεδο 1. Στο σύστημα μεταφοράς όμως είναι δύσκολο να υπολογιστεί ο δείκτης συχνότητας καθώς για κάθε περίπτωση θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη όλες οι πιθανές αποκοπές. Ο δείκτης αυτός συχνά αντικαθίσταται από τον δείκτη

Αναμενόμενων Αριθμών Αποκοπών Φορτίου (Expected Number of Load Curtailments – ENLC), ο οποίος δίνεται από τον τύπο:

$$ENLC = \sum_{i \in S} F_i$$

Πρόκειται για ένα άνω όριο του πραγματικού δείκτη συχνότητας. Μπορεί να υπάρξουν διαφορές ανάμεσα στους δείκτες EFLC, ENLC με την έννοια ότι ο δεύτερος μπορεί να υπερεκτιμήσει την πραγματική συχνότητα, κάτι που δεν είναι και αρκετά σημαντικό γιατί σε αυτές τις μελέτες δε λαμβάνεται υπ' όψη η ακρίβεια. Η συχνότητα F_i μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον παρακάτω τύπο: $F_i = p_i * \sum_{k \in N} \lambda_k$, όπου λ_k ο βαθμός απόκλισης μιας συνιστώσας της κατάστασης συστήματος i και N το σύνολο όλων των βαθμών αποκλίσεων που αφορούν την κατάσταση i .

3. Αναμενόμενη Διάρκεια Αποκοπής Φορτίου (Expected Duration of Load Curtailments – EDLC) (ώρα/έτος)

$$EDLC = PLC * 8760$$

4. Μέση Διάρκεια Αποκοπής Φορτίου (Average Duration of Load Curtailments – ADLC) (ώρα/διαταραχή)

Ο δείκτης αυτός έχει την ίδια σημασία με τον δείκτη **LOLD** στο επίπεδο 1.

$$ADLC = \frac{EDLC}{EFLC}$$

5. Αναμενόμενες Αποκοπές Φορτίου (Expected Load Curtailments – ELC) (MW/έτος)

$$ELC = \sum_{i \in S} C_i * F_i$$

Όπου C_i η αποκοπή φορτίου στην κατάσταση i .

6. Αναμενόμενη Μη Παρεχόμενη Ζήτηση (Expected Demand Not Supplied - EDNS) (MW)

$$EDNS = \sum_{i \in S} C_i * p_i$$

7. Αναμενόμενη Μη Παρεχόμενη Ενέργεια (Expected Energy Not Supplied - EENS) (MWh/έτος)

$$EENS = \sum_{i \in S} C_i * F_i * D_i = \sum_{i \in S} 8760 * C_i * p_i$$

Όπου D_i είναι η διάρκεια της κατάστασης i του συστήματος. Ο δείκτης αυτός έχει την ίδια σημασία με τον δείκτη **LOEE** στο επίπεδο 1.

8. Δείκτης Μαζικής Διακοπής Ισχύος (Bulk Power Interruption Index - BPII) (MW/MW-έτος)

$$BPII = \sum_{i \in S} \frac{C_i * F_i}{L}$$

Όπου L η ετήσια αιχμή φορτίου.

9. Δείκτης Αποκοπής Μαζικής Ισχύος/Ενέργειας (Bulk Power/Energy Curtailment Index - BPECI) (MWh/MW-έτος)

$$BPECI = \frac{EENS}{L}$$

10. Δείκτης Αποκοπής Μέσης Μαζικής Ισχύος (Bulk Power Average Curtailment Index - BPACI) (MW/διαταραχή)

$$BPACI = \frac{ELC}{EFLC}$$

11. Τροποποιημένος Δείκτης Αποκοπής Μαζικής Ισχύος (Modified Bulk Power Curtailment Index - MBPCI) (MW/MW)

$$MBPCI = \frac{EDNS}{L}$$

12. Δείκτης Σοβαρότητας (Severity Index - SI) (λεπτά/έτος)

$$SI = BPECI * 60$$

Ο δείκτης αυτός μπορεί να ερμηνευτεί ως η διάρκεια (σε λεπτά) απώλειας όλου του φορτίου σε συνθήκες αιχμής φορτίου.

Οι δείκτες 1 έως 7 αποτελούν τους βασικούς δείκτες και μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε ένα ζυγό είτε σε όλο το σύστημα. Οι δείκτες 8 έως 12 υπολογίζονται από τους βασικούς και μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε όλο το σύστημα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συγκριθεί η επάρκεια συστημάτων με διαφορετικό μέγεθος. [4]

3.4.3 Δείκτες επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 3

Στη μελέτη επάρκειας του επιπέδου διανομής υπάρχουν τρεις βασικοί δείκτες, το ποσοστό αποτυχίας φορτίου λ , η διάρκεια διακοπής φορτίου r και η ετήσια μη διαθεσιμότητα φορτίου U . Οι δείκτες ισχύος του συστήματος υπολογίζονται με βάση αυτούς και αφορούν την επίδοση του συστήματος τόσο στο παρελθόν όσο και στο μέλλον. Οι δείκτες είναι οι εξής:

1. Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών Συστήματος (System Average Interruption Frequency Index - SAIFI) (διακοπές/καταναλωτή/έτος)

$$SAIFI = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i * N_i}{\sum_{i \in R} N_i}$$

Όπου λ_i , N_i το ποσοστό αποτυχίας και ο αριθμός των καταναλωτών που σχετίζονται με ένα φορτίο και R το σύνολο των φορτίων στο σύστημα.

2. Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών Συστήματος (System Average Interruption Duration Index - SAIDI) (ώρα/καταναλωτή/έτος)

$$SAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i * N_i}{\sum_{i \in R} N_i}$$

Όπου U_i η ετήσια μη διαθεσιμότητα ή χρόνος διακοπής (ώρα/έτος) του φορτίου i .

3. Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών Καταναλωτή (Customer Average Interruption Frequency Index - CAIFI) (διακοπές/καταναλωτής που επηρεάζεται /έτος)

$$CAIFI = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i * N_i}{\sum_{i \in R} M_i}$$

Όπου M_i ο αριθμός των καταναλωτών που επηρεάζονται από το φορτίο i . Ο κάθε καταναλωτής προσμετράτε μια φορά ανεξάρτητα από τις διακοπές που συνέβησαν. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται όταν πρέπει να συγκριθούν δύο έτη στα οποία οι καταναλωτές δεν είχαν τον ίδιο αριθμό διακοπών.

4. Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών Καταναλωτή (Customer Average Interruption Duration Index - CAIDI) (ώρα/διακοπή καταναλωτή)

$$CAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i * N_i}{\sum_{i \in R} \lambda_i * N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

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

$$ASAI = \frac{\sum_{i \in R} 8760 * N_i - \sum_{i \in R} U_i * N_i}{\sum_{i \in R} 8760 * N_i}$$

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

$$ASUI = \frac{\sum_{i \in R} U_i * N_i}{\sum_{i \in R} 8760 * N_i}$$

7. Μη Παρεχόμενη Ενέργεια (Energy Not Supplied - ENS) (kWh/έτος)

$$ENS = \sum_{i \in R} P_{ai} * U_i$$

Όπου P_{ai} η μέση ισχύς του φορτίου (kW) και U_i ο ετήσιος χρόνος διακοπών (ώρα/έτος)

8. Μέση Μη Παρεχόμενη Ενέργεια (Average Energy Not Supplied - AENS) (kWh/καταναλωτή/έτος)

$$AENS = \frac{ENS}{\sum_{i \in R} N_i}$$

9. Δείκτης Μέσης Αποκοπής Καταναλωτή (Average Customer Curtailment Index - ACCI)

$$ACCI = \frac{ENS}{\sum_{i \in R} M_i}$$

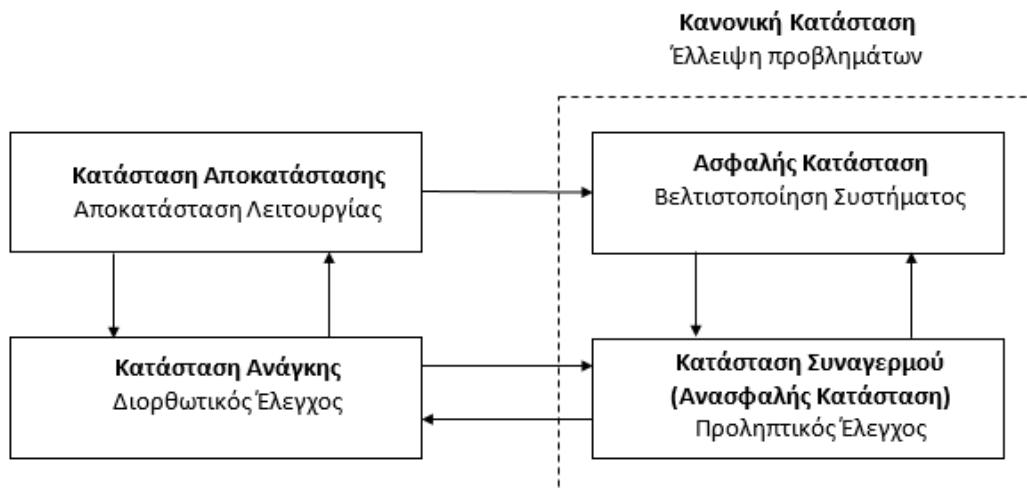
[4]

3.5 Ασφάλεια ΣΗΕ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 η ασφάλεια ενός ΣΗΕ ανάλογα με το βαθμό της μπορεί να το ταξινομήσει σε επιμέρους καταστάσεις λειτουργίας:

- **Την κατάσταση ασφαλείας:** στην οποία ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια ασφαλείας, η απαιτούμενη ζήτηση και οι μονάδες δουλεύουν εντός των προκαθορισμένων ορίων τους

- **Την κατάσταση συναγερμού (ανασφαλής κατάσταση):** στην οποία εξακολουθούν οι μονάδες δουλεύουν εντός των προκαθορισμένων ορίων τους αλλά δεν ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια ασφαλείας
- **Την κατάσταση ανάγκης:** στην οποία παραβιάζονται τα όρια λειτουργίας ορισμένων μονάδων του συστήματος. Για να έρθει το σύστημα ξανά σε κατάσταση ασφαλείας θα πρέπει να γίνουν κάποιες απαραίτητες ενέργειες.
- **Την κατάσταση αποκατάστασης:** στην οποία λόγω κάποιου σφάλματος τα ασφαλιστικά μέσα ή οι μηχανικοί του συστήματος διακόπτουν κάποια φορτία από την παροχή τους για να αποφύγουν σοβαρότερες καταστάσεις (απόρριψη φορτίων).



Σχήμα 3.6 – Καταστάσεις λειτουργίας ενός ΣΗΕ

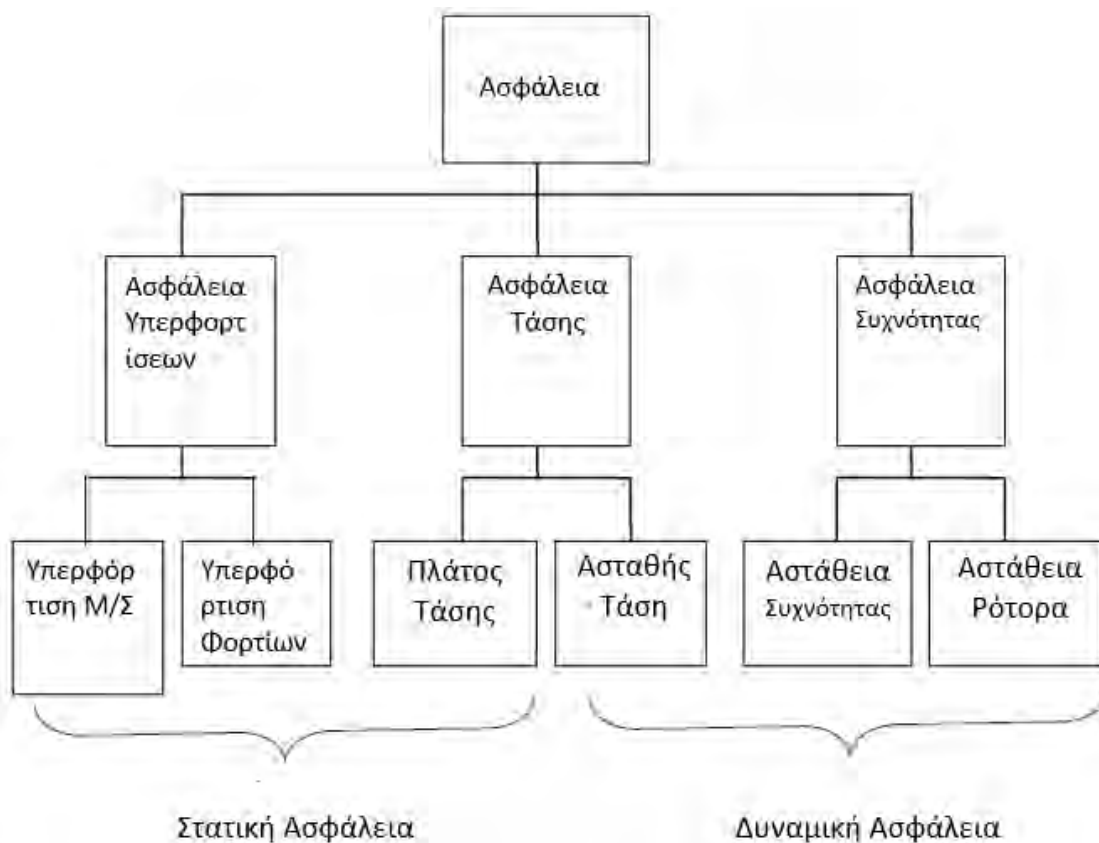
Ο έλεγχος του συστήματος εξαρτάται από προτεραιότητες, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από την κατάσταση που βρίσκεται το σύστημα. Πρώτη προτεραιότητα αποτελεί η **ασφάλεια**. Δηλαδή, αρχικά πρέπει να γίνουν όλες οι απαραίτητες ενέργειες ώστε το σύστημα να επιστρέψει στην **κατάσταση ασφαλείας** ή ακόμα και στην **ανασφαλή κατάσταση**. Όταν όλα τα κριτήρια ασφαλείας ικανοποιηθούν ξανά και όλες οι μονάδες λειτουργούν στα επιτρεπτά όρια τότε προτεραιότητα γίνεται η

οικονομική λειτουργία. Δηλαδή, το κόστος παραγωγής ελαχιστοποιείται με τη διανομή μεγάλου μέρους της παραγωγής στις πιο οικονομικές μονάδες. [5]

3.6 Ανάλυση στατικής ασφάλειας ΣΗΕ

Η ανάλυση ασφάλειας ενός ΣΗΕ μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες (Σχήμα 3.7):

- στη **ανάλυση στατικής ασφάλειας**, η οποία είναι περισσότερο γνωστή ως **ανάλυση διαταραχών (contingency analysis)**, στην οποία γίνεται εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος όταν έχει επανέλθει σε σταθερότητα μετά από κάποια διαταραχή χωρίς, ωστόσο, να λαμβάνεται υπόψη η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος
- στη **ανάλυση μεταβατικής ασφάλειας**, στην οποία μελετάται η κατάσταση του συστήματος αμέσως μετά από μια διαταραχή



Σχήμα 3.7 – Ανάλυση ασφάλειας ΣΗΕ

Πιο συγκεκριμένα, η **ανάλυση διαταραχών** μπορεί να είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ κατά τη διακοπή λειτουργίας ή την υπερφόρτιση μιας γεννήτριας, μιας γραμμής ή ενός μετασχηματιστή ή όταν τα επίπεδα τάσης στους ζυγούς του συστήματος είναι ανεπαρκή. Περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- **Ορισμός διαταραχών**, ο οποίος περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός συνόλου από πιθανά απρόοπτα γεγονότα σε ένα σύστημα με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς του.
- **Επιλογή διαταραχών**, η οποία περιλαμβάνει τη μελέτη και την αξιολόγηση καθεμιάς από αυτές τις διαταραχές για την εύρεση προβλημάτων και δυσλειτουργιών στο σύστημα αλλά και για την σοβαρότητα αυτών. Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούνται οι **αιτιοκρατικές μέθοδοι**, οι **πιθανοτικές μέθοδοι** και οι **μέθοδοι προσομοίωσης**. Για τη σοβαρότητα των διαταραχών υπολογίζονται και χρησιμοποιούνται **δείκτες απόδοσης**.
- **Αξιολόγηση διαταραχών**, η οποία περιλαμβάνει τις δράσεις που πρέπει να γίνουν τόσο σε επίπεδο ελέγχου όσο και σε επίπεδο ασφάλειας ώστε το σύστημα να επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα λειτουργίας.

Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται ορισμένα κριτήρια ασφαλείας όπως:

- **Κριτήριο ασφαλείας N-1**: Πρόκειται για μια απλή διακοπή λειτουργίας ενός στοιχείου του συστήματος όπως π.χ. μια γεννήτρια, ένας μετασχηματιστής, μια γραμμή μεταφοράς.
- **Κριτήριο ασφαλείας N-2**: Πρόκειται για μια ταυτόχρονη διακοπή δύο στοιχείων του συστήματος. Χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα συστήματα και όπου τα κριτήρια ασφαλείας είναι ιδιαίτερα απαιτητικά.
- **Κριτήριο διακοπής μεγαλύτερης γεννήτριας**: Πρόκειται για την ταυτόχρονη διακοπή της μεγαλύτερης γεννήτριας σε μια περιοχή και μιας από τις γραμμές που τη συνδέουν με το υπόλοιπο σύστημα.

Ακόμη, όταν πρόκειται για μια πιο λεπτομερή ανάλυση (**ανάλυση αξιοπιστίας**) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα τα δύο πρώτα κριτήρια σε συνδυασμό με τις βλάβες των συσκευών και τον αντίστοιχο χρόνο επισκευής τους.

Ουσιαστικά, η ανάλυση διαταραχών περιλαμβάνει μια ροή ισχύος για κάθε διαταραχή ώστε να βρεθούν οι συνέπειες της στο σύστημα. Θέλει ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο με τον οποίο επιλέγονται ώστε τα αποτελέσματα που θα βγουν να είναι ρεαλιστικά. [3], [5]

3.6.1 Μέθοδοι επιλογής διαταραχών

Όπως αναφέρθηκε για την μελέτη και την αξιολόγηση των διαταραχών χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι: οι **αιτιοκρατικές, οι πιθανοτικές και οι μέθοδοι προσομοίωσης.**

Οι **αιτιοκρατικές μέθοδοι** χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στα ΣΗΕ που χρησιμοποιούν συμβατικά μέσα για την παραγωγή ενέργειας. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως **ένα προκαθορισμένο ποσοστό εφεδρείας ή η ύπαρξη ισότητας μεταξύ εφεδρείας και μεγαλύτερης μονάδας παραγωγής.**

Αυτές οι μέθοδοι είναι σχετικά απλές και εύκολα εφαρμόσιμες στα συστήματα ενώ οι μηχανικοί ελέγχου μπορούν να αντιδράσουν άμεσα σε μια σοβαρή κατάσταση. Συχνά, χρησιμοποιούνται σε μικρά και απομονωμένα ΣΗΕ.

Παρόλα αυτά όμως δεν μπορούν να προβλέψουν σωστά τυχαίες βλάβες που μπορεί να προκληθούν στα συστήματα, τη διαρκώς μεταβαλλόμενη ζήτηση φορτίου από τους καταναλωτές. Ακόμη, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα στα οποία η παραγωγή γίνεται εξ' ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από την τυχαιότητα των καιρικών συνθηκών.

Οι **πιθανοτικές μέθοδοι** μπορούν να ξεπεράσουν όλα τα προβλήματα που έχουν οι αιτιοκρατικές μέθοδοι. Μπορούν να υπολογίζουν τις τυχαίες παραμέτρους ενός προβλήματος και να κάνουν μια πιο σωστή πρόβλεψη των βλαβών που μπορεί να προκύψουν. Παρουσιάζουν, όμως, μια δυσκολία στον υπολογισμό μεταβολών που μπορεί να παρουσιάσουν διάφορες πηγές αλλά και στον υπολογισμό κατανομών πυκνότητας πιθανότητας που χρειάζεται για τον υπολογισμό δεικτών αξιοπιστίας. Προς το παρόν οι περισσότερες μέθοδοι αυτής της κατηγορίας

Οι **μέθοδοι προσομοίωσης** μπορούν να υπολογίσουν τους διάφορους δείκτες αξιοπιστίας με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Αυτό γιατί μπορούν να προσομοιώσουν τα γεγονότα σε πραγματικό χρόνο περιλαμβάνοντας κάθε τυχαίο συμβάν που μπορεί να συμβεί. Αυτές οι μέθοδοι ονομάζονται συχνά **προσομοιώσεις Monte Carlo**. Μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- **Διαδοχικές μέθοδοι**, οι οποίες χρησιμοποιούν όλα τα χρονικά διαστήματα της προσομοίωσης με χρονολογική σειρά.
- **Μη διαδοχικές μέθοδοι**, οι οποίες δε λαμβάνουν υπ' όψη τα διάφορα χρονικά διαστήματα της προσομοίωσης, αλλά τα θεωρούν ως ένα, και έτσι δεν μπορούν να δείξουν τις εξαρτήσεις που έχουν διάφορα γεγονότα.

Σε αντίθεση με τις πιθανοτικές μεθόδους, οι οποίες υπολογίζουν μόνο τις τιμές των δεικτών αξιοπιστίας, οι μέθοδοι προσομοίωσης μπορούν να υπολογίσουν και τις μεταβολές αυτών των τιμών ανάλογα με τον χρόνο παρέχοντας έτσι πληροφορίες για την μέση τιμή τους. Παρόλα αυτά όμως οι μέθοδοι προσομοίωσης παρουσιάζουν ένα μειονέκτημα όσον αφορά τον μεγάλο τους υπολογιστικό χρόνο, κάτι που σιγά σιγά εξαλείφεται με την ταχεία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων. [6]

3.7 Ιεράρχηση διαταραχών

Στην ανάλυση αξιοπιστίας εξετάζονται αρκετές διαταραχές. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται επιθυμητή η ταξινόμησή τους ώστε να δοθεί περαιτέρω σημασία στις σοβαρότερες. Για την σοβαρότητα και την ιεράρχηση των διαταραχών χρησιμοποιείται μια μέθοδος γνωστή ως **μέθοδος δεικτών απόδοσης (PI)**. Τέτοιοι δείκτες είναι ο **δείκτης ενεργού ισχύος (PI_P)** και ο **δείκτης τάσης (PI_V)**. Όσο μεγαλύτερες οι τιμές των δεικτών τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαταραχή.

Ο **δείκτης ενεργού ισχύος (PI_P)** δείχνει ότι ορισμένα κυκλώματα είναι υπερφορτισμένα και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

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

Όπου P_i, P_i^{max} : η ισχύς και η χωρητικότητα της γραμμής αντίστοιχα,

N_L : ο αριθμός των γραμμών του συστήματος,

W : ένας μη αρνητικός παράγοντας βάρους,

n : συνάρτηση λάθους.

Η χωρητικότητα (P_i^{max}) της γραμμής δίνεται από τον τύπο: $P_i^{max} = \frac{V_i * V_j}{X}$, όπου V_i, V_j οι τάσεις δύο ζυγών στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς και X η αντίδραση της γραμμής.

Ο **δείκτης τάσης (PI_V)** δείχνει ότι η τάση ορισμένων ζυγών είναι εκτός των επιθυμητών ορίων και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

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

Όπου V_i , η τάση του ζυγού i ,

V_i^{sp} : η επιθυμητή τάση του ζυγού i ,

ΔV_i^{lim} : το όριο απόκλισης τάσης,

N_B : ο αριθμός των ζυγών του συστήματος,

W : ένας μη αρνητικός παράγοντας βάρους,

n : συνάρτηση λάθους.

Η τάση των ζυγών εξαρτάται και από την **άεργο ισχύ** των γεννητριών. Παρόλα αυτά όμως ο δείκτης τάσης δείχνει τη σοβαρότητα της διαταραχής μόνο όταν η άεργος ισχύς είναι εντός ορίων. Όταν η άεργος ισχύς των γεννητριών φεύγει εκτός των καθορισμένων ορίων η τάση των ζυγών υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν αυτή τη διαταραχή. Σε αυτή την περίπτωση ο τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

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

Όπου P_i , η ισχύς του ζυγού i ,

P_i^{max} : το όριο της ισχύος του ζυγού i ,

N_G : ο αριθμός των γεννητριών του συστήματος.

Όταν ένα σύστημα λειτουργεί στις κανονικές του συνθήκες θα πρέπει να ισχύουν οι εξής περιορισμοί:

- $\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D + P_L$
- $\sum_{i=1}^n Q_{Gi} = Q_D + Q_L$

Όπου P_{Gi} , Q_{Gi} είναι η πραγματική και άεργος ισχύς στους ζυγούς των γεννητριών, P_D , Q_D η πραγματική και άεργος ισχύς ζήτησης και P_L , Q_L η πραγματική και άεργος ισχύς απωλειών.

- $V_{min} < V_i < V_{max}, i = 1, 2, \dots, N_B$
- $S_L < S_{L,max}, i = 1, 2, \dots, N_L$
- $P_{Gi,min} < P_{Gi} < P_{Gi,max}, i = 1, 2, \dots, N_G$
- $Q_{Gi,min} < Q_{Gi} < Q_{Gi,max}, i = 1, 2, \dots, N_G$

Όπου V_i η τάση του ζυγού i , S_L η ισχύς της γραμμής L και N_B, N_L, N_G ο αριθμός των ζυγών, των γραμμών και των γεννητριών αντίστοιχα.

Οι προηγούμενοι δείκτες ανάλογα με την τιμή που έχουν μπορούν να ορίσουν τρία επίπεδα ασφαλείας για το σύστημα:

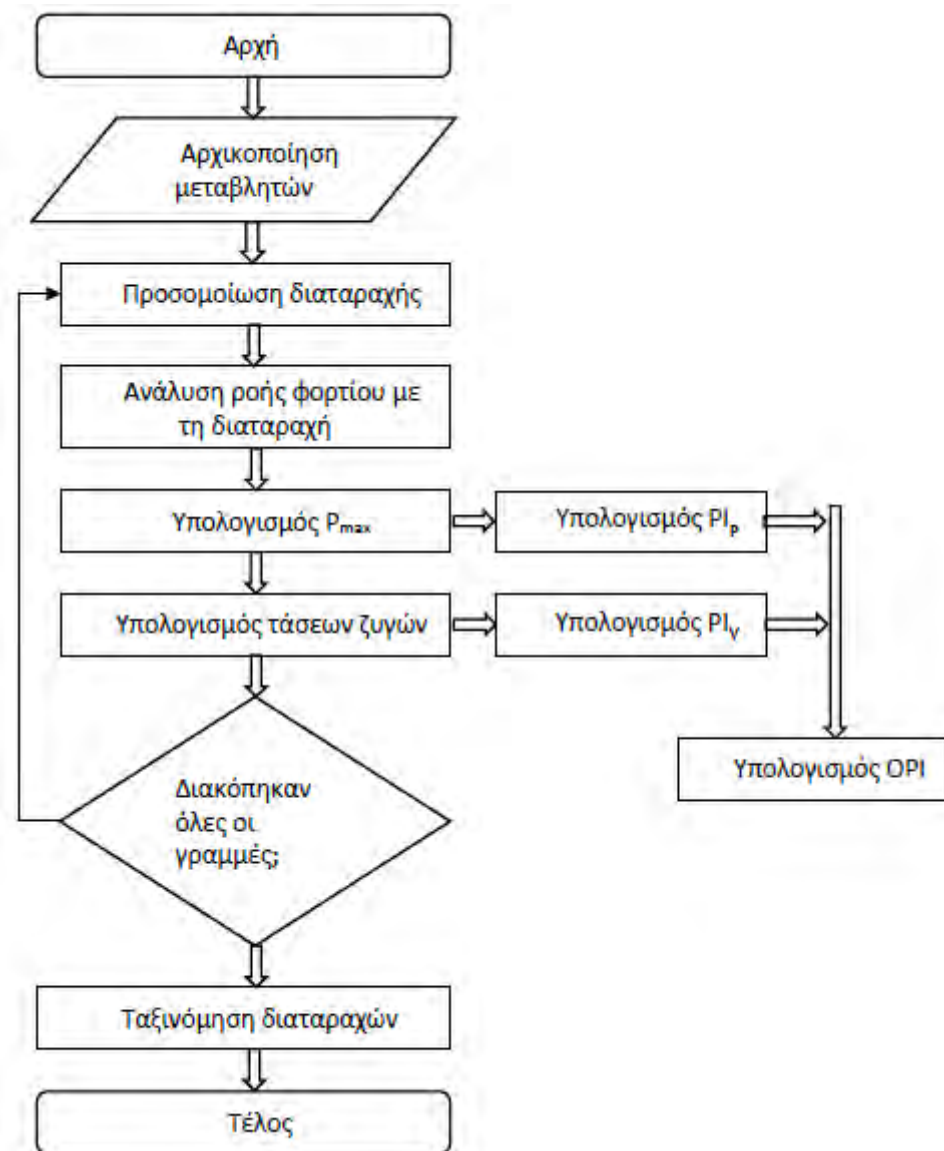
- **Επίπεδο 1 (Πολύ κρίσιμο)**, στο οποίο το σύστημα δεν είναι καθόλου ασφαλές σε καμία από τις περιπτώσεις και χρειάζονται άμεσες ενέργειες για την αποκατάστασή του.

- **Επίπεδο 2 (Κρίσιμο)**, στο οποίο το σύστημα δεν είναι ασφαλές μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις οι οποίες και πρέπει να ελεγχθούν.
- **Επίπεδο 3 (Μη κρίσιμο)**, στο οποίο το σύστημα είναι ασφαλές σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις. [3], [7]

3.7.1 Αλγόριθμος για την ανάλυση διαταραχών

1. **Ανάγνωση όλων των δεδομένων του συστήματος.** Αφορά ζυγούς και γραμμές.
2. **Ανάλυση ροής φορτίου.** Δεν λαμβάνεται υπόψη κάποια διαταραχή.
3. **Προσομοίωση μιας διαταραχής.** Π.χ. αποκοπή μιας γραμμής.
4. **Ανάλυση ροής φορτίου μετά τη διαταραχή και υπολογισμός P_{max} .**
5. **Υπολογισμός του δείκτη ενεργής ισχύος (PI_P),** ο οποίος δείχνει την παραβίαση του ορίου ενεργής ισχύος στο δοθέν σύστημα.
6. **Υπολογισμός επιπτώσεων της διαταραχής,** όπου υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών του συστήματος.
7. **Υπολογισμός του δείκτη τάσης (PI_V),** ο οποίος δείχνει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών στο δοθέν σύστημα.
8. **Υπολογισμός του συνολικού δείκτη απόδοσης(OPI),** οποίος προκύπτει από το άθροισμα του δείκτη ενεργής ισχύος και του δείκτη τάσης.
9. **Επανάληψη των βημάτων 3 έως 8,** όπου γίνεται διακοπή όλων των γραμμών του συστήματος για τον υπολογισμό όλων των δεικτών ενεργής ισχύος και τάσης.
10. **Ταξινόμηση των διαταραχών με βάση τη σοβαρότητά τους,** η οποία γίνεται συγκρίνοντας τους συνολικούς δείκτες απόδοσης.
11. **Ανάλυση ροής ισχύος για τη δυσμενέστερη περίπτωση και εξέταση των αποτελεσμάτων.**

Τα βήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 3.3 με τη μορφή διαγράμματος ροής. [7]



Σχήμα 3.8 – Διάγραμμα ροής για την ιεράρχηση διαταραχών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μελέτη Στατικής Ασφάλειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

4.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη της στατικής ασφάλειας των ΣΗΕ χρησιμοποιούνται λογισμικά ανάλυσης ροής ισχύος. Το πιο γνωστό και συχνά χρησιμοποιούμενο στη βιομηχανία είναι το **Siemens PSS/E (Power System Simulator for Engineering)**.

Το PSS/E είναι ένα λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται από μηχανικούς συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, συμβούλους, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα σε περισσότερες από 140 χώρες του κόσμου. Βοηθά στην προσομοίωση συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τόσο σε σταθερές συνθήκες όσο και σε μεταβατικές σε μια κλίμακα από λίγα δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά. Περιλαμβάνει εργαλεία που βοηθούν στην ανάλυση ροής ισχύος, στη δυναμική ανάλυση, στην ανάλυση σφαλμάτων, στην ανάλυση αξιοπιστίας, στη βέλτιστη ροή ισχύος. [8], [9]

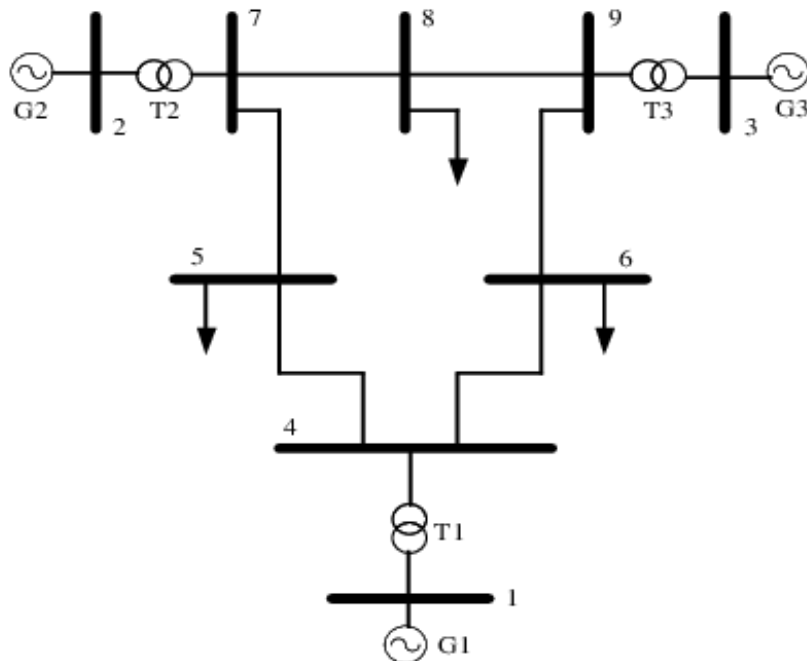
4.2 Ανάλυση στατικής ασφάλειας συστήματος 9 ζυγών IEEE (IEEE 9 bus system)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το σύστημα το οποίο είναι μια προσέγγιση του **Western System Coordinating Council** σε ένα ισοδύναμο σύστημα με 3 γεννήτριες και 9 ζυγούς. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα μοντέλο του συστήματος. Τα επίπεδα βάσεων τάσεων είναι 13.8 kV, 16.5 kV, 18 kV και 230 kV. Το σύστημα είναι χωρισμένο σε **δύο περιοχές**:

- Στην περιοχή 1, όπου ανήκουν οι ζυγοί 2,3,7,8,9
- Στην περιοχή 2, όπου ανήκουν οι ζυγοί 1,4,5,6.

Και σε έξι ζώνες:

- Στην ζώνη 1, όπου ανήκουν οι ζυγοί 1,4 (Ζυγός γεννήτριας και μετασχηματιστή)
- Στη ζώνη 2, όπου ανήκουν οι ζυγοί 2,7 (Ζυγός γεννήτριας και μετασχηματιστή)
- Στη ζώνη 3, όπου ανήκουν οι ζυγοί 3,9 (Ζυγός γεννήτριας και μετασχηματιστή)
- Στη ζώνη 4, όπου ανήκει ο ζυγός 5 (Ζυγός φορτίου)
- Στη ζώνη 5, όπου ανήκει ο ζυγός 6 (Ζυγός φορτίου)
- Στη ζώνη 6, όπου ανήκει ο ζυγός 8 (Ζυγός φορτίου).



Σχήμα 4.1 – Το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της εργασίας

4.3 Ονομαστικά δεδομένα

Τα ονομαστικά στοιχεία των γεννητριών, των μετασχηματιστών, των γραμμών μεταφοράς και των ζυγών του συστήματος φαίνονται στους Πίνακες 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.1 – Ονομαστικά στοιχεία γεννητριών

Γεννήτρια	Ζυγός	MVA	kV	R (pu)	X (pu)
1	1 (Swing)	260	16.5	0.0001	0.1
2	2	310	18	0.0001	0.21
3	3	280	13.8	0.0001	0.21

Πίνακας 4.2 – Ονομαστικά στοιχεία μετασχηματιστών

Μετασχηματιστής	kV	X (pu)
T1	16.5/230	0.0576
T2	18/230	0.0625
T3	13.8/230	0.0586

Πίνακας 4.3 – Ονομαστικά στοιχεία γραμμών μεταφοράς

Γραμμή Μεταφοράς	kV	R (pu)	X (pu)	B (pu)
4-5	230	0.01	0.085	0.176
4-6	230	0.017	0.092	0.158
5-7	230	0.032	0.161	0.306
6-9	230	0.039	0.17	0.358
7-8	230	0.0085	0.072	0.149
8-9	230	0.0119	0.1008	0.209

Πίνακας 4.4 – Ονομαστικά στοιχεία ζυγών

Ζυγός	V (pu)
1 (Swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.01287
5	0.97952
6	0.99224
7	0.1846
8	0.00520
9	0.01762

Για τα παρακάτω λειτουργικά στοιχεία των γεννητριών και των φορτίων (Πίνακες 4.5 και 4.6 αντίστοιχα) γίνεται μια ανάλυση ροής φορτίου για να βρεθούν οι αρχικές συνθήκες του συστήματος.

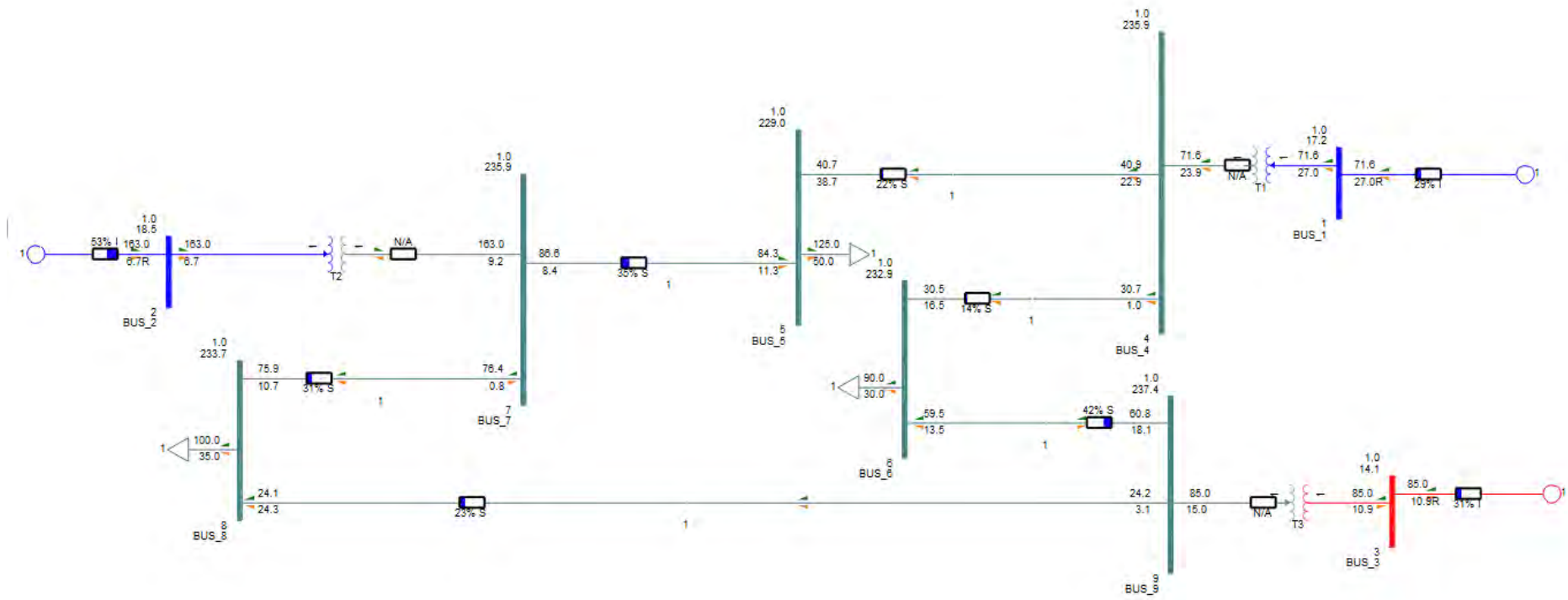
Πίνακας 4.5 – Λειτουργικά στοιχεία γεννητριών

Γεννήτρια	Ζυγός	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1 (Swing)	Βρίσκεται στον ζυγό αναφοράς	
2	2	163	18.699
3	3	85	14.935

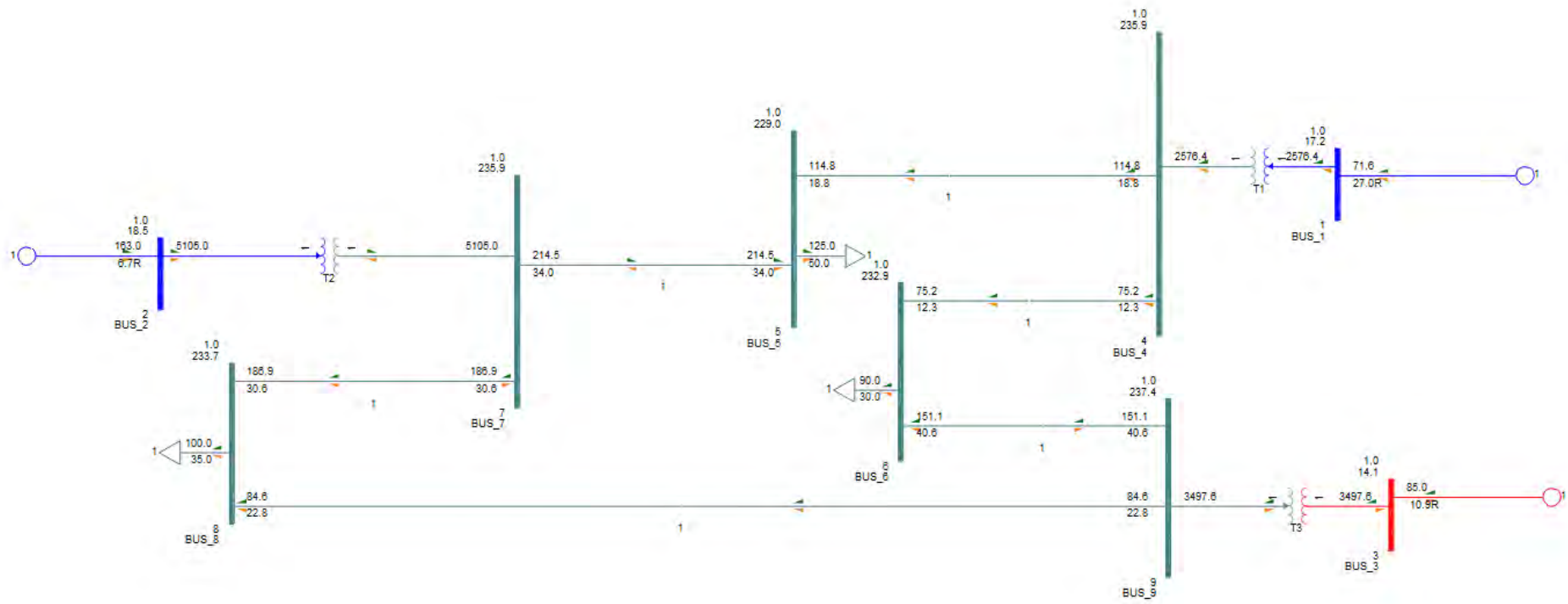
Πίνακας 4.6 – Λειτουργικά στοιχεία φορτίων

Φορτίο	Ζυγός	P (MW)	Q (MVA _r)
5	5	125	50
6	6	90	30
8	8	100	35

Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου φαίνονται στα Σχήματα 4.2 και 4.3. Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται οι ροές ισχύος του και οι φορτίσεις γραμμών του συστήματος ενώ στο Σχήμα 4.3 φαίνονται τα ρεύματα των γραμμών.



Σχήμα 4.2 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών του συστήματος



Σχήμα 4.3 – Ρεύματα γραμμών του συστήματος

Μετά την ανάλυση ροής ισχύος προκύπτουν οι ακόλουθες τάσεις ζυγών (Πίνακας 4.7)

Πίνακας 4.7 – Τάσεις ζυγών στην κανονική λειτουργία

Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	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

4.4 Σενάρια ανάλυσης στατικής ασφάλειας συστήματος

Για να γίνει μια μελέτη της στατικής ασφάλειας πρέπει να αναλυθούν κάποια σενάρια διαταραχών. Τα σενάρια αυτά επιλέγονται με βάση το κριτήριο N-1. Στο παρόν σύστημα, λόγω του μικρού μεγέθους, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή του κριτηρίου N-2, αλλά και κάποιων σεναρίων του κριτηρίου N-1 καθώς μέρη του συστήματος οδηγούνται σε νησιδοποίηση. Σε κάθε περίπτωση μια γραμμή μεταφοράς ή μια γεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας, γίνεται μια ανάλυση ροής φορτίου, μελετώνται όλες οι μεταβλητές του συστήματος και η περίπτωση αυτή κρίνεται ως προς τη σοβαρότητά της.

Τα σενάρια που αναλύονται είναι τα εξής:

1. Αφαίρεση γραμμής 4-5
2. Αφαίρεση γραμμής 4-6
3. Αφαίρεση γραμμής 5-7
4. Αφαίρεση γραμμής 6-9
5. Αφαίρεση γραμμής 7-8
6. Αφαίρεση γραμμής 8-9

7. Αφαίρεση γεννήτριας 1

8. Αφαίρεση γεννήτριας 2

9. Αφαίρεση γεννήτριας 3

4.4.1 Αφαίρεση γραμμής 4-5

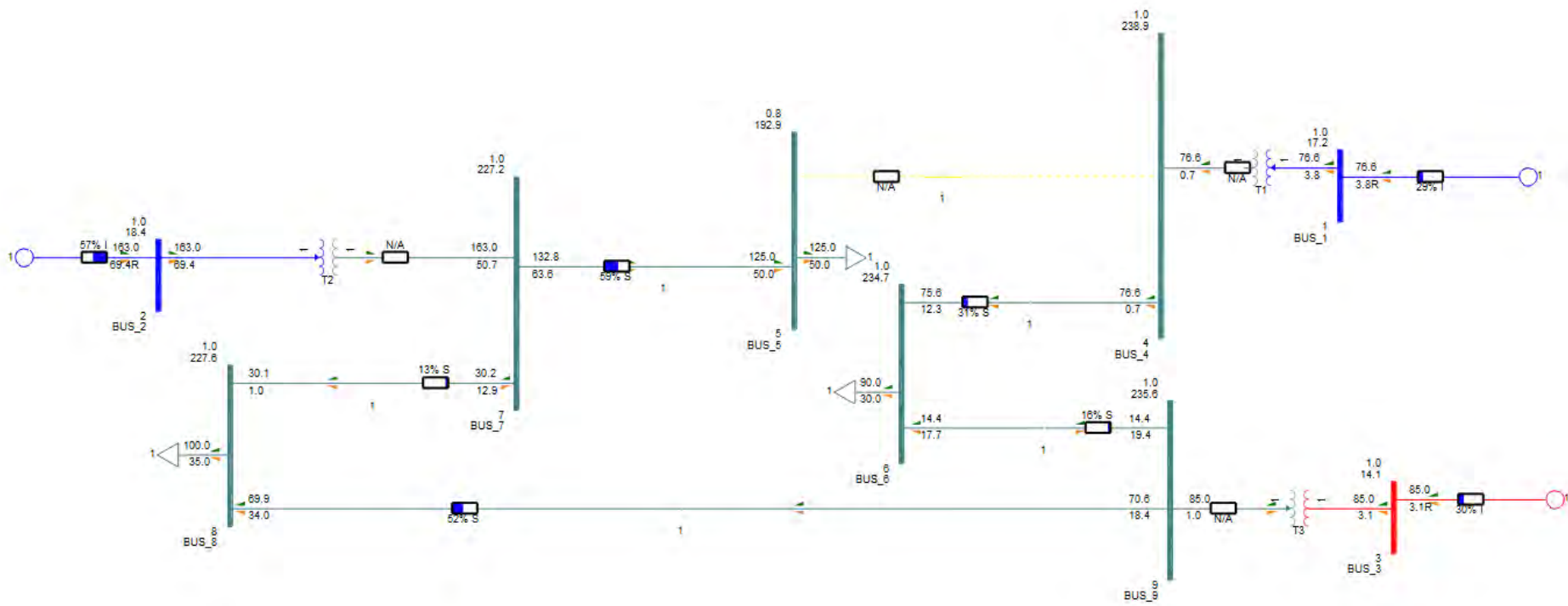
Εφόσον το σύστημα έχει έρθει στις κανονικές του συνθήκες αφαιρείται η διασυνδεδετική γραμμή μεταξύ των ζυγών 4 και 5 και πραγματοποιείται μια ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.8 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.8 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-5

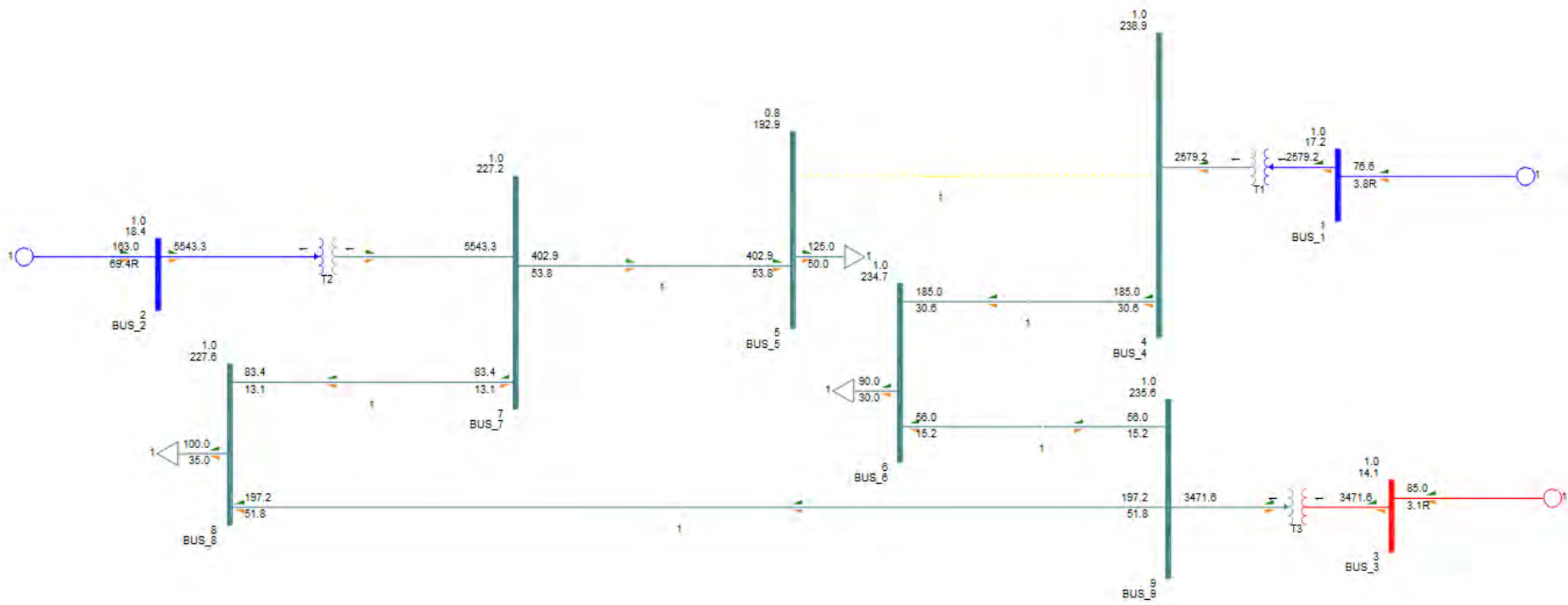
Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.0388
5	0.8389
6	1.0203
7	0.9878
8	0.9895
9	1.0244

Η τάση στο ζυγό 5 παίρνει την τιμή **0.8389 pu** η οποία είναι αρκετά χαμηλότερη από το επιτρεπόμενο κάτω όριο των **0.95 pu**. Φαίνεται ότι η αφαίρεση της γραμμής 4-5 είχε κάποιο αντίκτυπο στο σύστημα, το οποίο χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Στους υπόλοιπους ζυγούς παρατηρείται μια μεταβολή της τάσης χωρίς ωστόσο να είναι ανησυχητική.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι ροές ισχύος και οι φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς ενώ στο Σχήμα 4.5 φαίνονται τα ρεύματα των γραμμών. Η γραμμή 4-5 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.4 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-5



Σχήμα 4.5 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-5

4.4.2 Αφαίρεση γραμμής 4-6

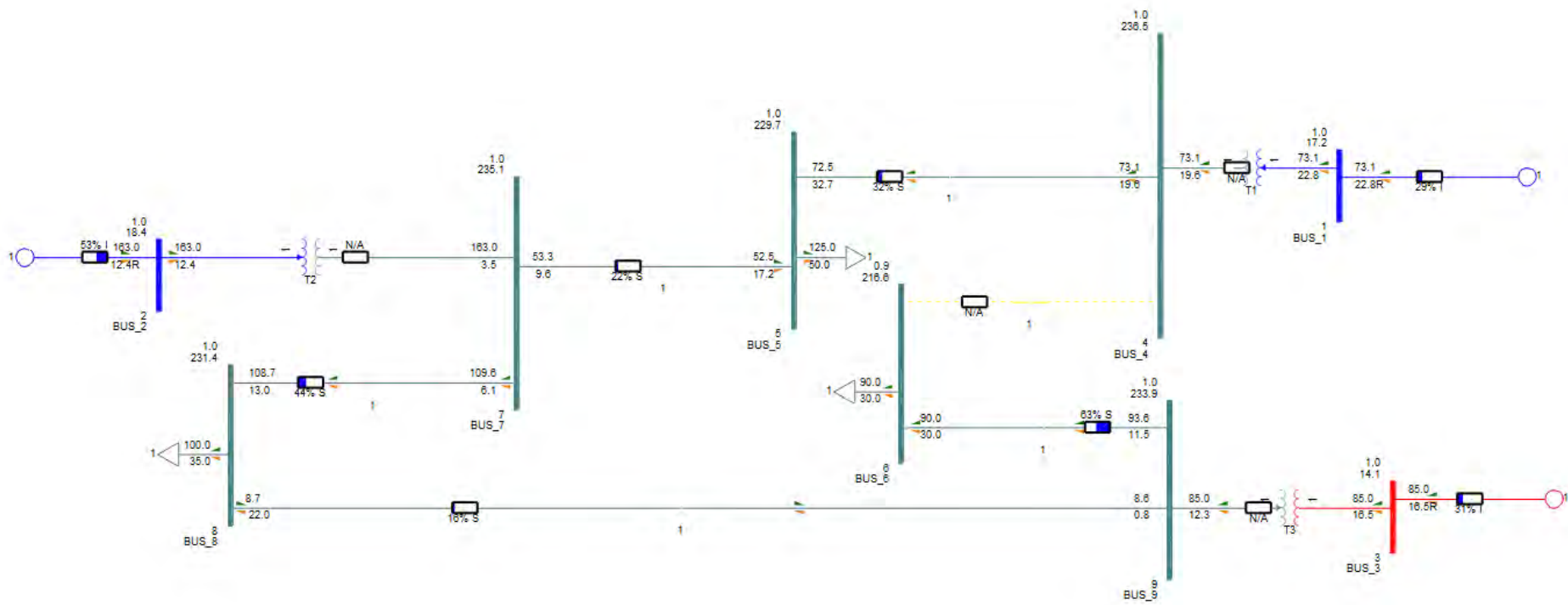
Το σύστημα επαναφέρεται στις κανονικές του συνθήκες, αφαιρείται η διασυνδεδετική γραμμή μεταξύ των ζυγών 4 και 6 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.9 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.9 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-6

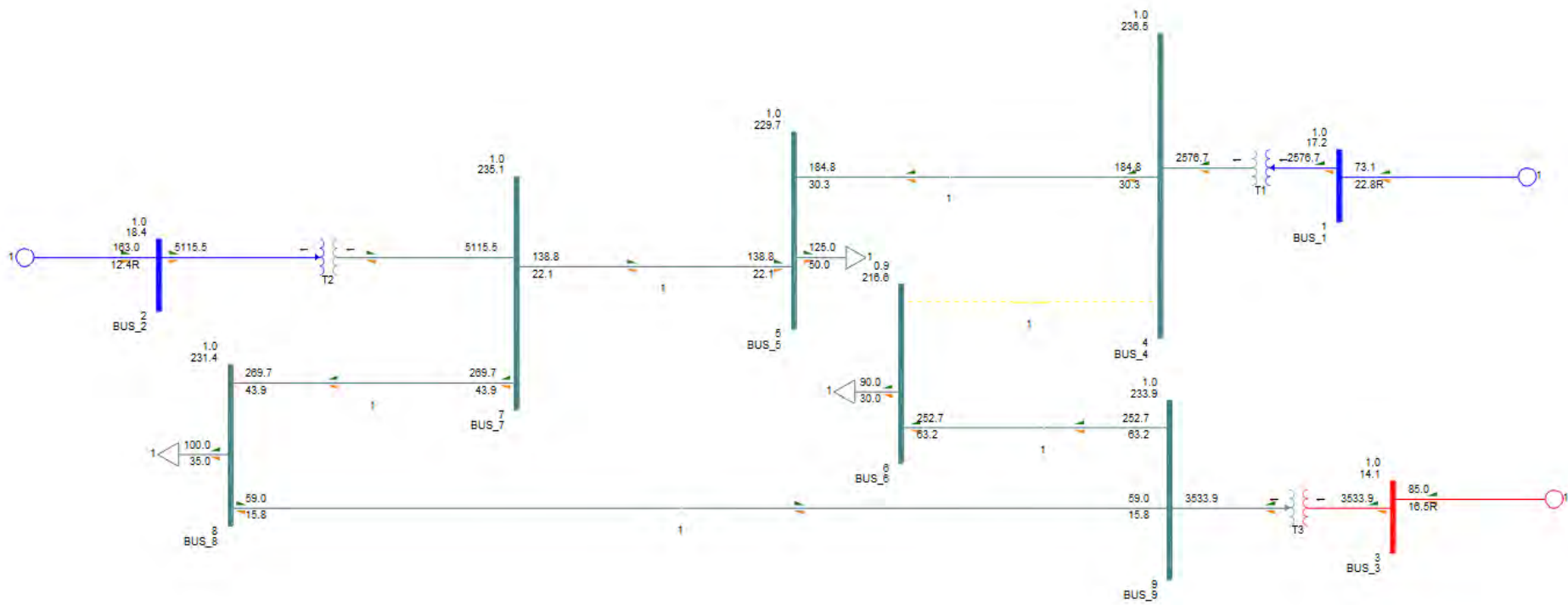
Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.0282
5	0.9988
6	0.9418
7	1.0223
8	1.0063
9	1.0167

Παρατηρείται ότι στο ζυγό 6 η τάση έχει πέσει στα **0.9418 pu**, τιμή χαμηλότερη του κάτω ορίου των **0.95 pu**. Φαίνεται ότι και η αφαίρεση της γραμμής 4-6 είχε κάποιο αντίκτυπο στο σύστημα το οποίο όμως είναι μικρότερο από αυτό της προηγούμενης περίπτωσης. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μια μεταβολή στις τάσεις των υπόλοιπων ζυγών χωρίς ωστόσο να είναι ανησυχητική.

Οι ροές ισχύος και οι φορτίσεις των γραμμών φαίνονται στο Σχήμα 4.6 και τα ρεύματα των γραμμών στο Σχήμα 4.7. Η γραμμή 4-6 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.6 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-6



Σχήμα 4.7 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-6

4.4.3 Αφαίρεση γραμμής 5-7

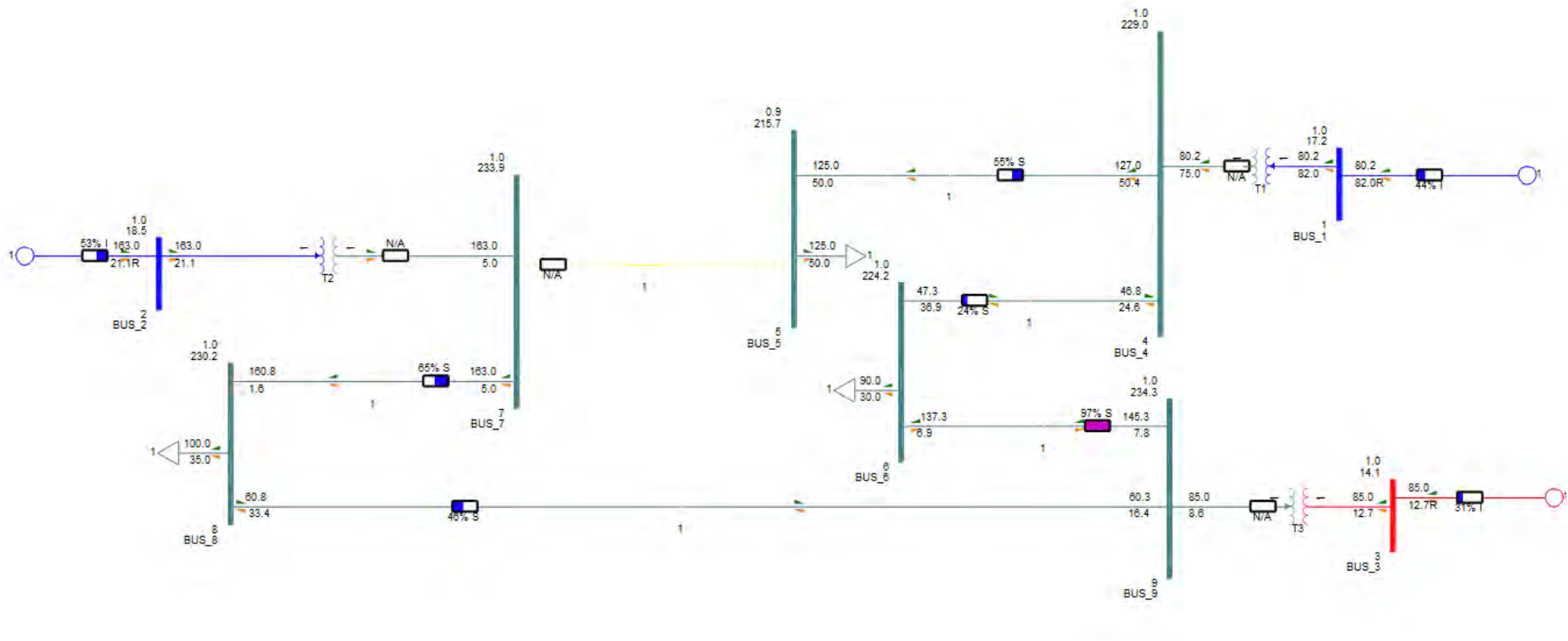
Μετά την επανασύνδεση της γραμμής 4-6, αφαιρείται η διασυνδεδετική γραμμή μεταξύ των ζυγών 5 και 7 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.10 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.10 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γραμμής 5-7

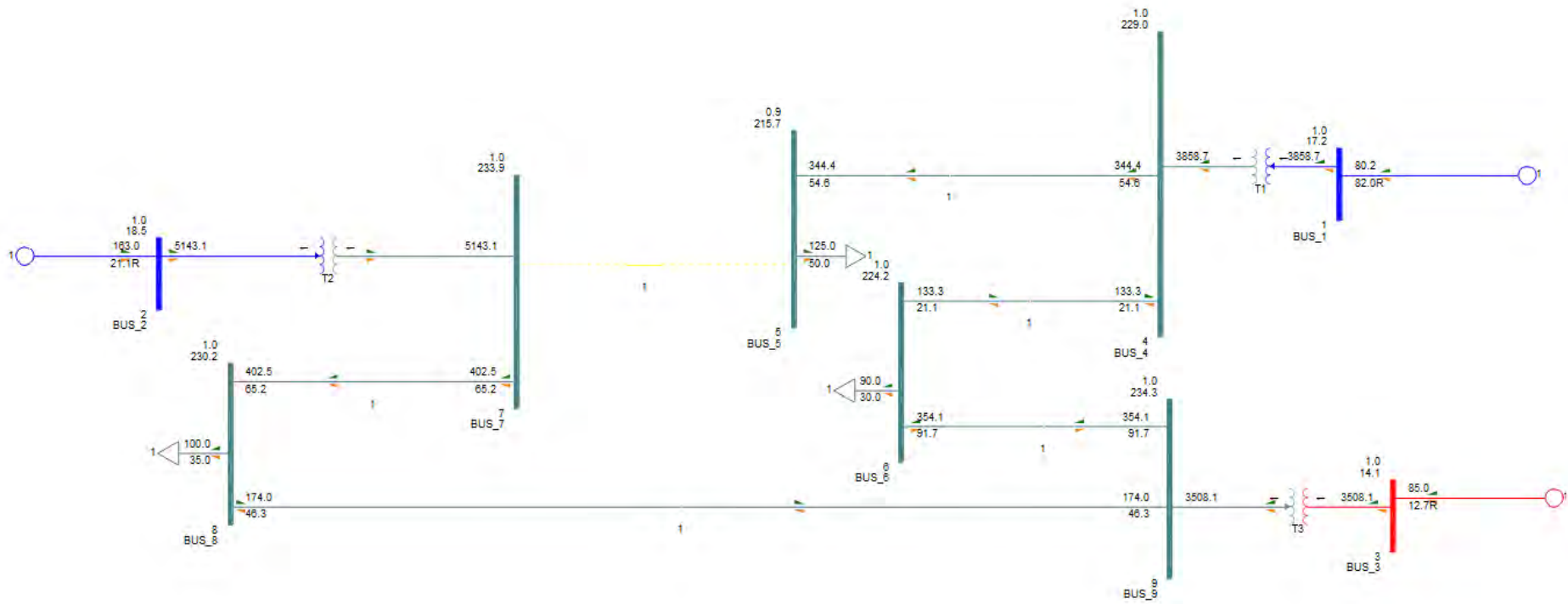
Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	0.9956
5	0.938
6	0.9748
7	1.017
8	1.001
9	1.0189

Στο ζυγό 5 παρατηρείται μια πτώση τάσης στα **0.938 pu** η οποία είναι μικρότερη των **0.95 pu** και οδηγεί το σύστημα σε μια κατάσταση όπου χρειάζεται άμεση αποκατάσταση. Οι τάσεις στους υπόλοιπους ζυγούς παρουσιάζουν μια μεταβολή η οποία όμως δεν ξεφεύγει από τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας.

Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται οι ροές ισχύος και στο Σχήμα 4.9 τα ρεύματα των γραμμών μεταφοράς του συστήματος. Η γραμμή 5-7 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή. Παρατηρείται μια υπερφόρτιση της γραμμής 6-9 καθώς έχει φορτιστεί στο **97%** και χρειάζεται άμεση αντιμετώπιση.



Σχήμα 4.8 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 5-7



Σχήμα 4.9 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 5-7

4.4.4 Αφαίρεση γραμμής 6-9

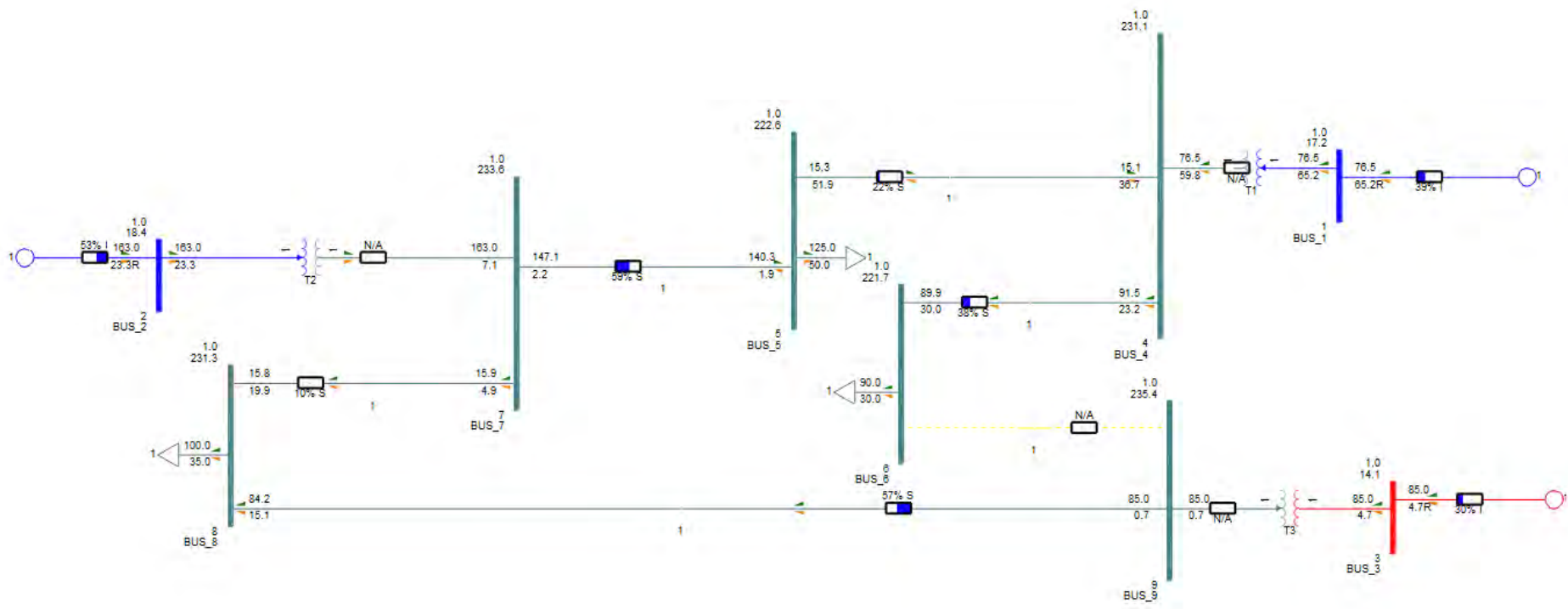
Αφαιρείται η διασυνδεδετική γραμμή μεταξύ των ζυγών 6 και 9 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.11 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.11 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γραμμής 6-9

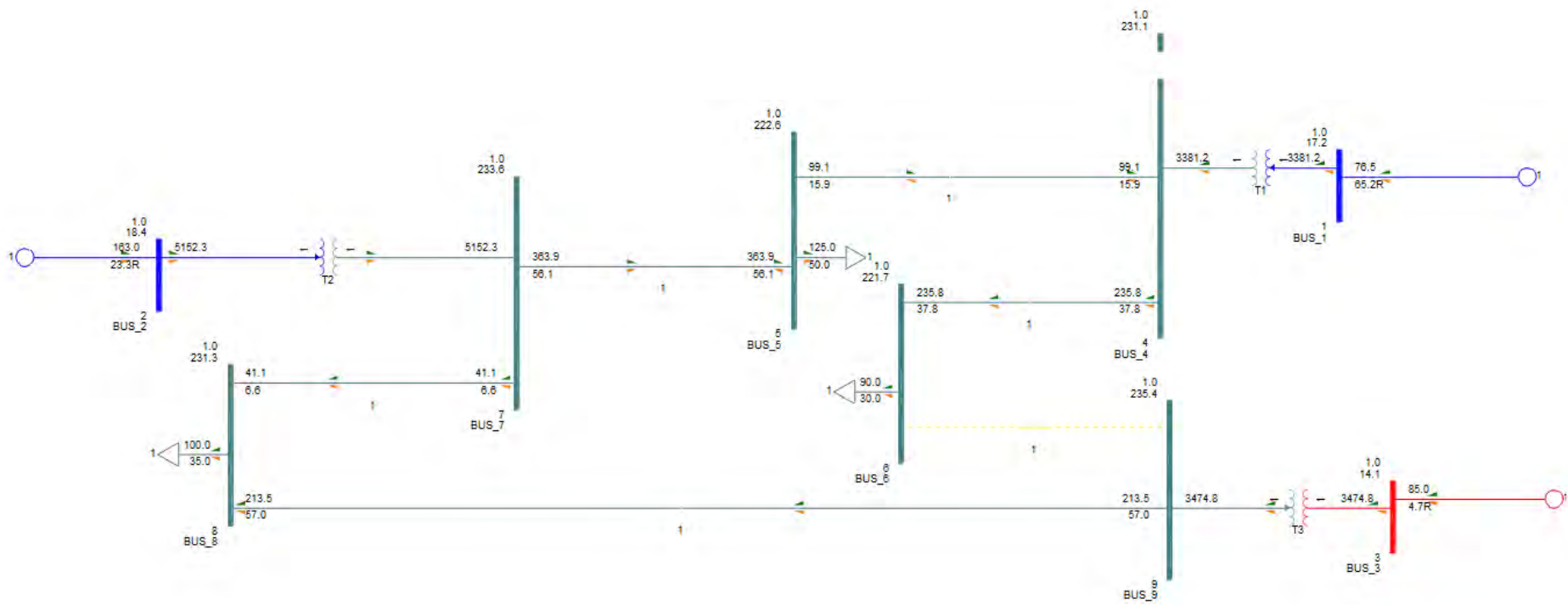
Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.0047
5	0.9678
6	0.9639
7	1.0156
8	1.0054
9	1.0234

Σε αυτή την περίπτωση οι τάσεις των ζυγών παρουσιάζουν μια μικρή μεταβολή αλλά δεν εκτείνονται εκτός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Οι ροές ισχύος και τα ρεύματα γραμμών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.10 και 4.11 αντίστοιχα. Η γραμμή 6-9 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.10 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 6-9



Σχήμα 4.11 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 6-9

4.4.5 Αφαίρεση γραμμής 7-8

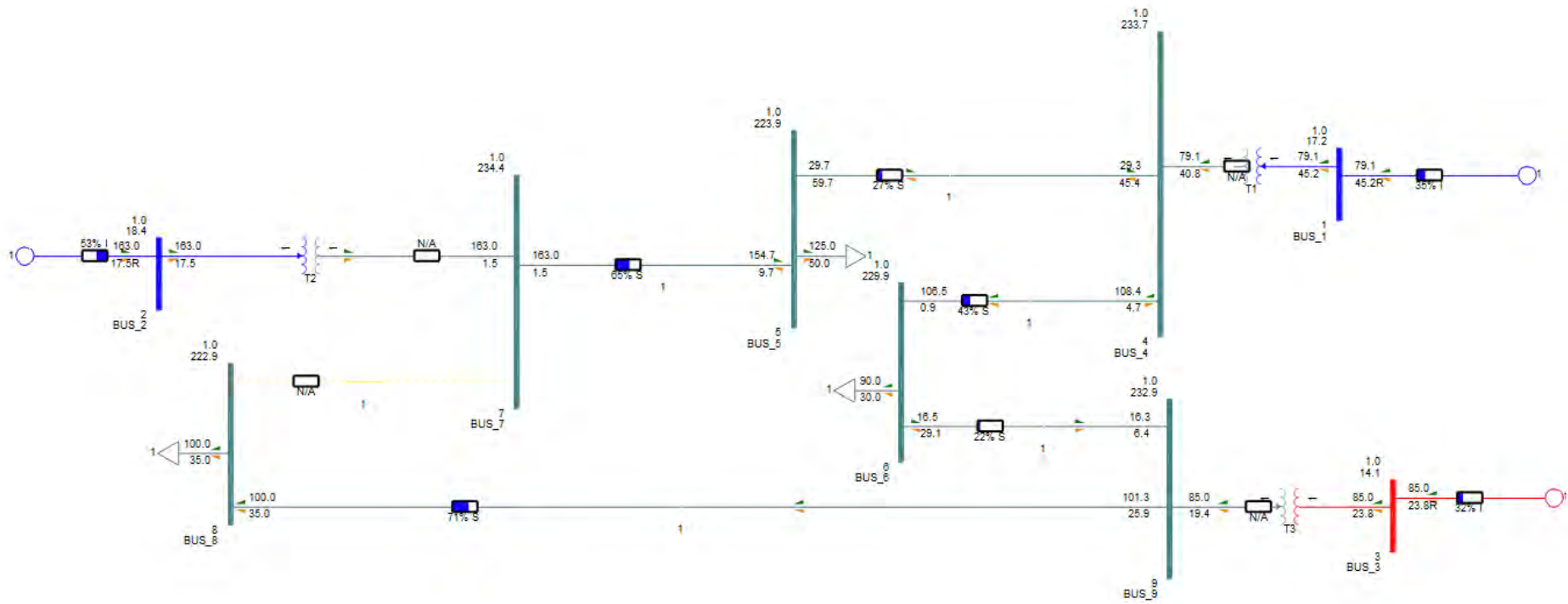
Σε αυτή την περίπτωση αφαιρείται η διασυνδετική γραμμή μεταξύ των ζυγών 7 και 8 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.12 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.12 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γραμμής 7-8

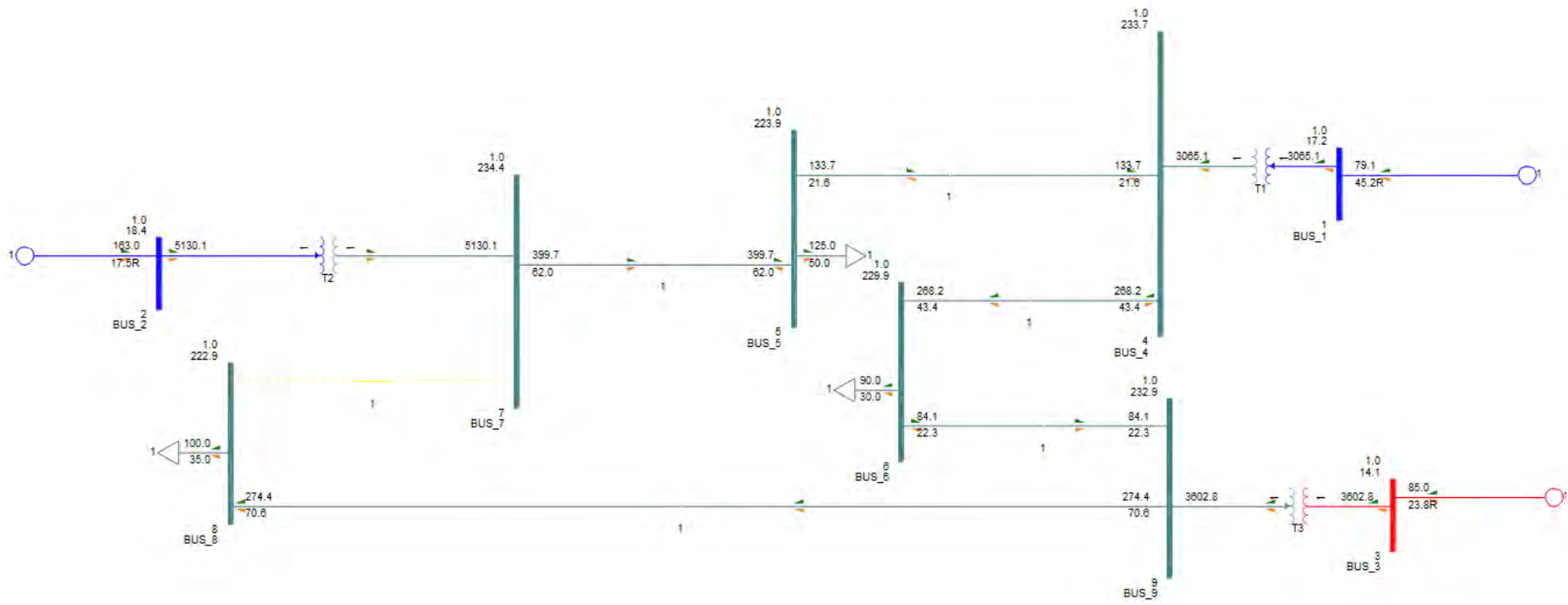
Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.0159
5	0.9736
6	0.9994
7	1.0192
8	0.969
9	1.0126

Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην προηγούμενη οι τάσεις των ζυγών παρουσιάζουν μια μικρή μεταβολή. Παρόλα αυτά δεν εκτείνονται εκτός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας αλλά πολύ κοντά στο **1 pu**.

Οι ροές ισχύος και τα ρεύματα γραμμών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.12 και 4.13 αντίστοιχα. Η γραμμή 7-8 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή. Η γραμμή 8-9 φορτίζεται επιπλέον κατά **50%**, παρόλα αυτά όμως παραμένει στην κανονική λειτουργία της.



Σχήμα 4.12 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 7-8



Σχήμα 4.13 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 7-8

4.4.6 Αφαίρεση γραμμής 8-9

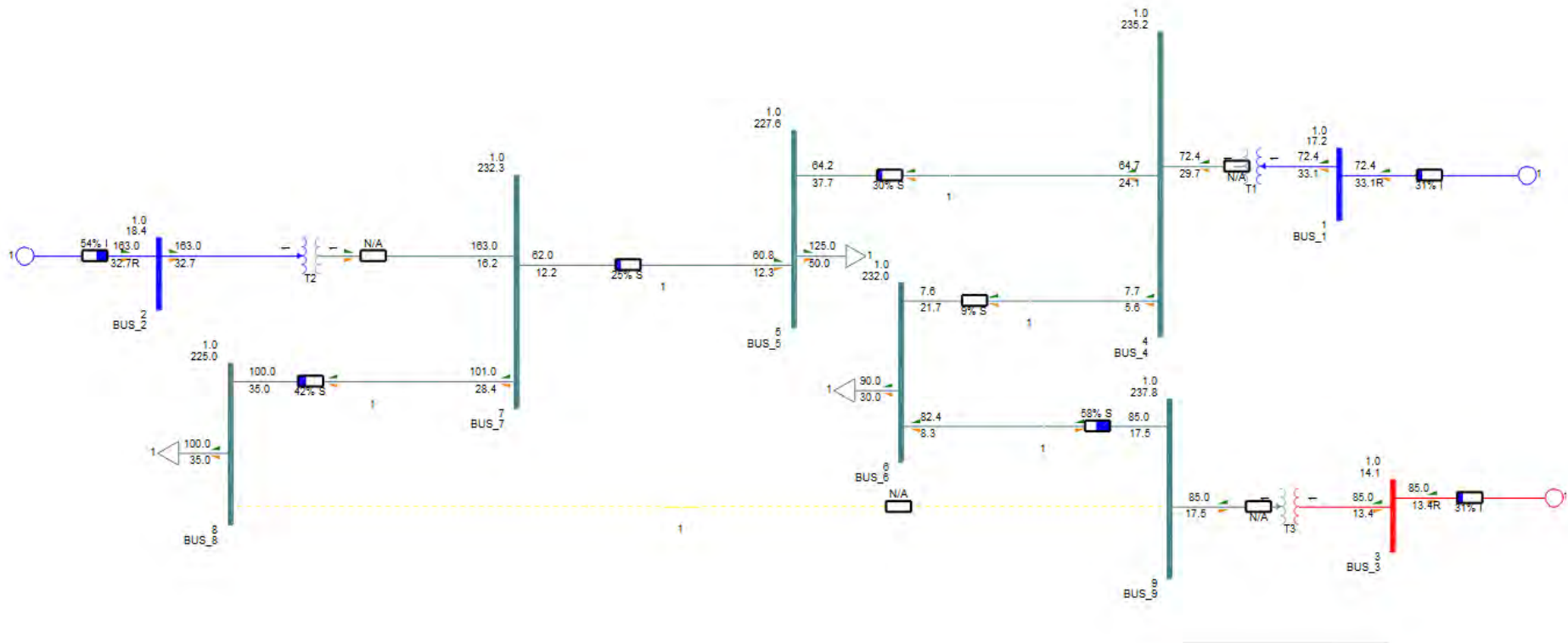
Αυτή η περίπτωση είναι η τελευταία περίπτωση αφαίρεσης γραμμών. Αφαιρείται η διασυνδεδετική γραμμή μεταξύ των ζυγών 8 και 9 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.13 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.13 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γραμμής 8-9

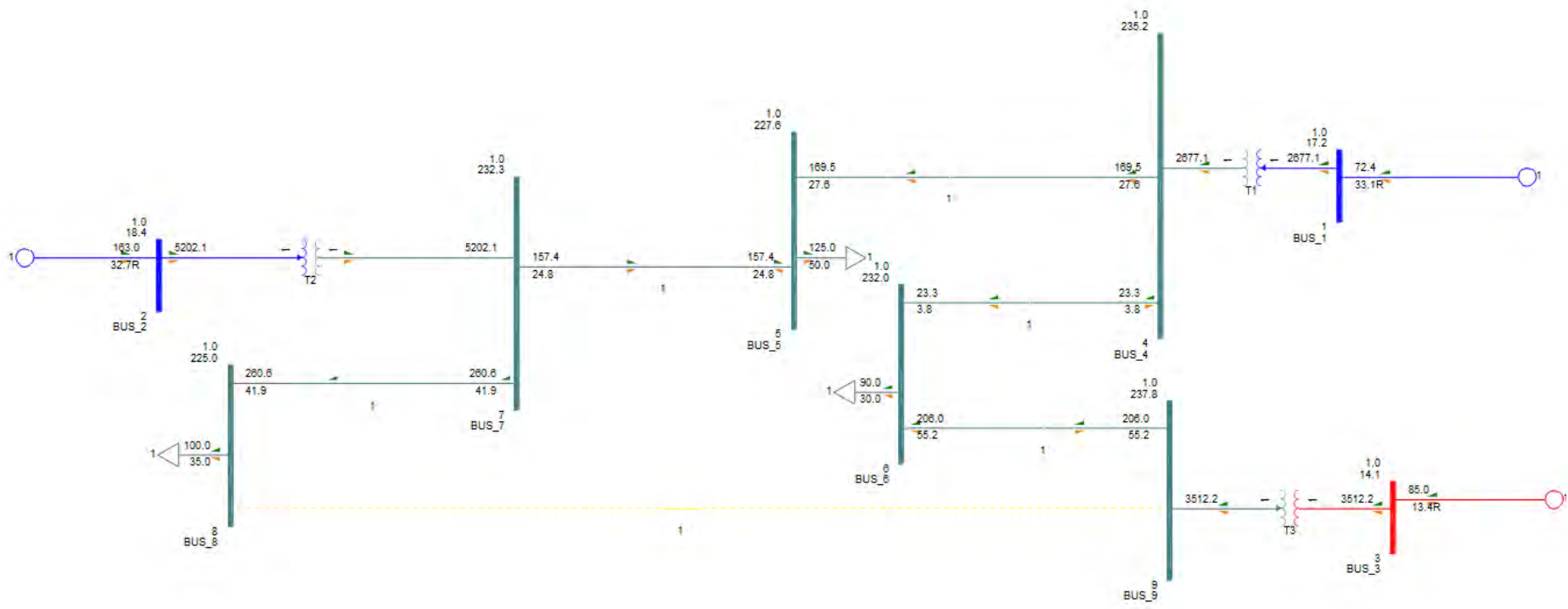
Ζυγός	V (pu)
1 (swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.0224
5	0.9897
6	1.0087
7	1.01
8	0.9783
9	1.0338

Και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές των τάσεων των ζυγών παρά τη μεταβολή που παρουσιάζουν βρίσκονται πολύ κοντά στο **1 pu**.

Οι ροές ισχύος και τα ρεύματα γραμμών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.14 και 4.15 αντίστοιχα. Η γραμμή 8-9 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.14 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 8-9



Σχήμα 4.15 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 8-9

4.4.7 Αφαίρεση γεννήτριας 1

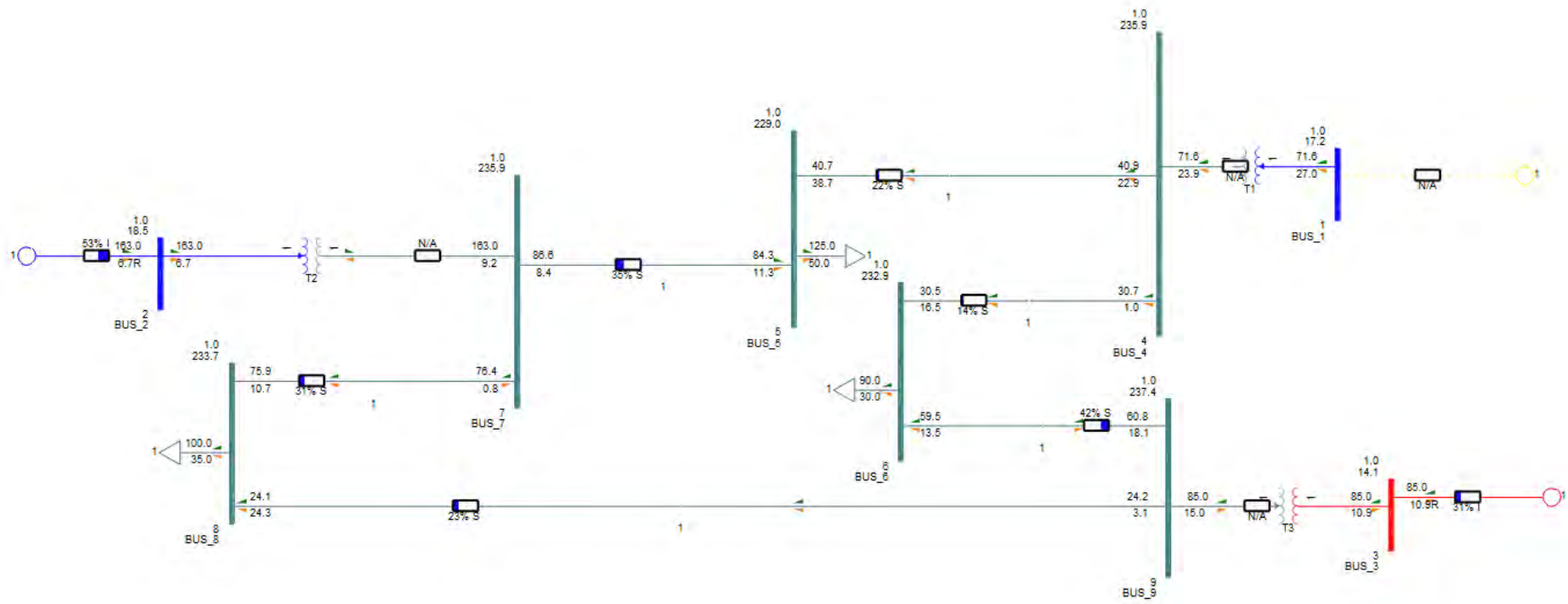
Σε αυτή την περίπτωση τίθεται εκτός λειτουργίας η γεννήτρια 1 η οποία είναι συνδεδεμένη στον ζυγό 1 (ζυγός αναφοράς) και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.14 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.14 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 1

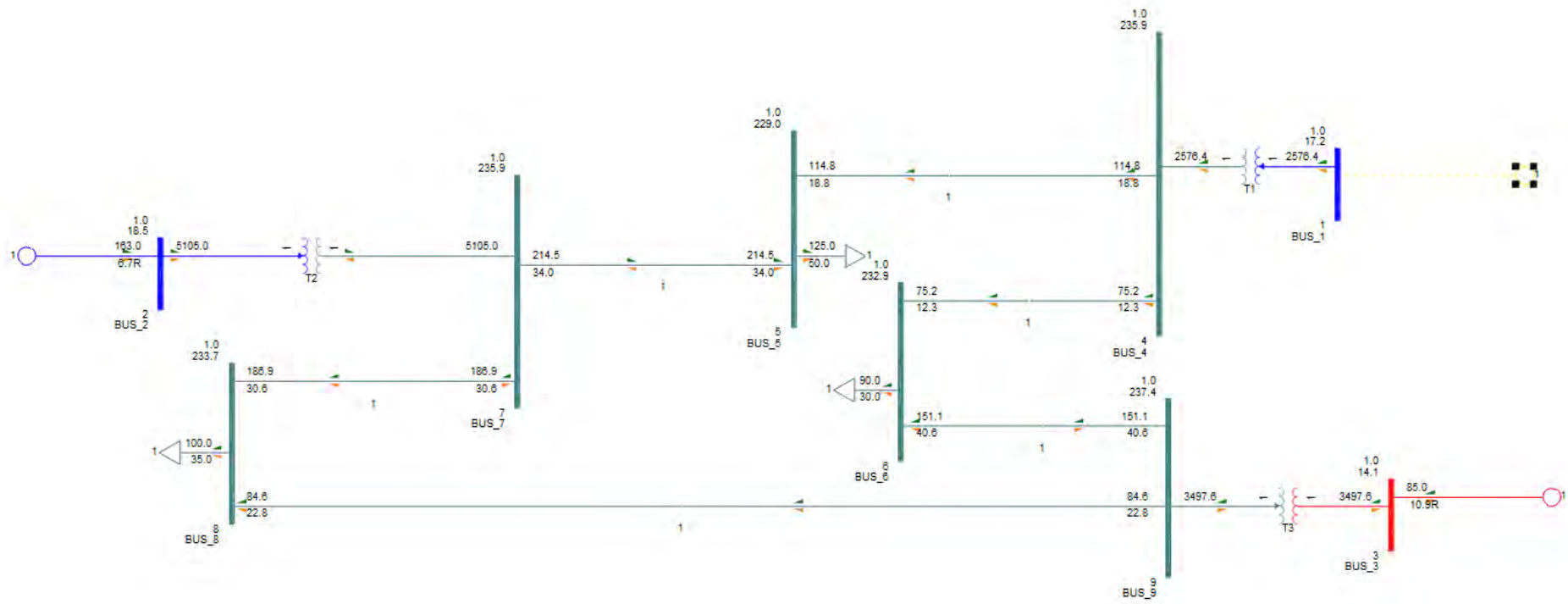
Ζυγός	V (pu)
1 (Swing)	1.04
2	1.025
3	1.025
4	1.0258
5	0.9956
6	1.0127
7	1.0258
8	1.0159
9	1.0324

Και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές των τάσεων των ζυγών παρά τη μεταβολή που παρουσιάζουν βρίσκονται πολύ κοντά στο **1 pu**.

Οι ροές ισχύος και τα ρεύματα γραμμών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.16 και 4.17 αντίστοιχα. Η γεννήτρια 1 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.16 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 1



Σχήμα 4.17 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας

4.4.8 Αφαίρεση γεννήτριας 2

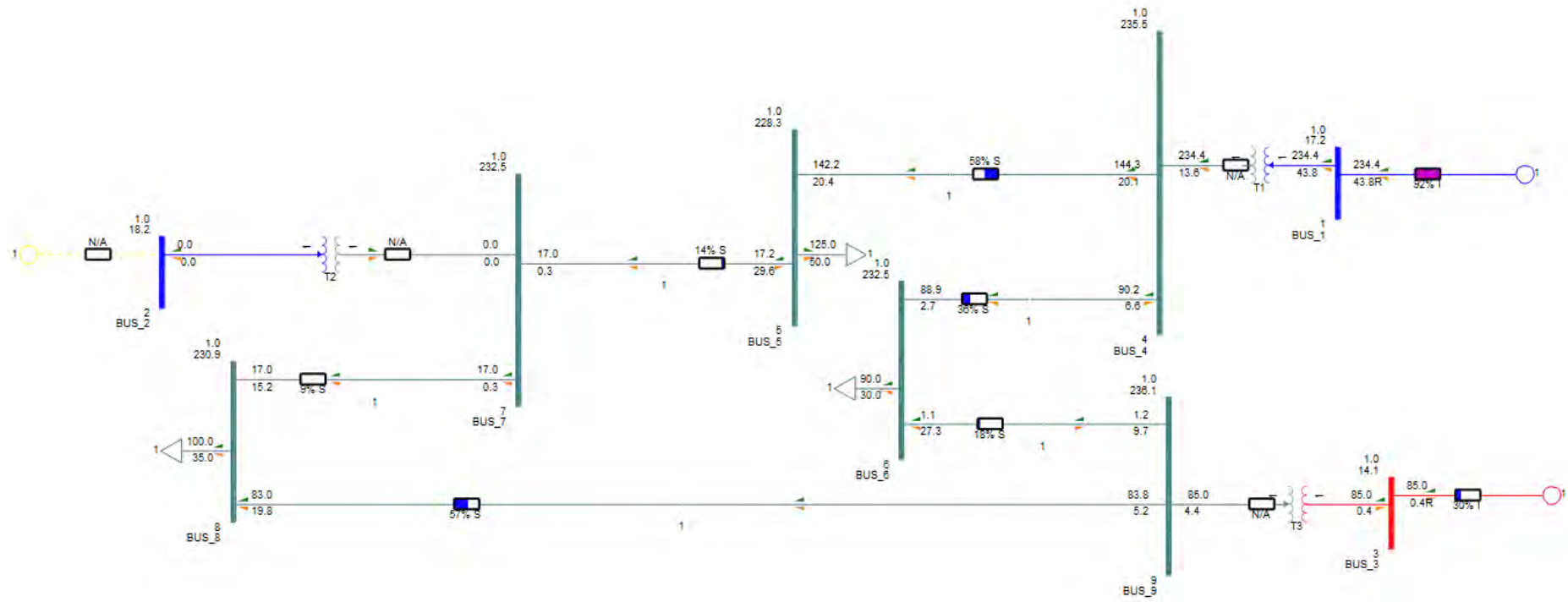
Σε αυτή την περίπτωση τίθεται εκτός λειτουργίας η γεννήτρια 2 η οποία είναι συνδεδεμένη στον ζυγό 2 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.15 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.15 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 2

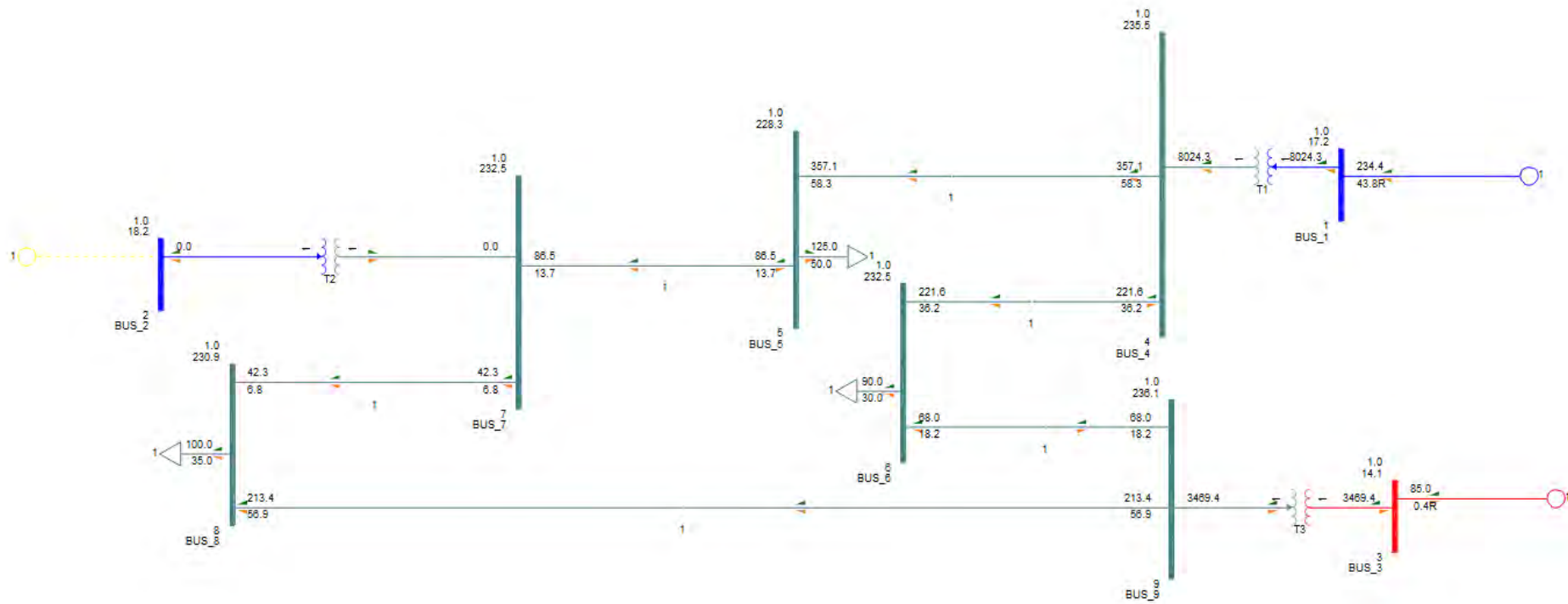
Ζυγός	V (pu)
1	1.04
2	1.0109
3	1.025
4	1.024
5	0.9924
6	1.0107
7	1.0109
8	1.0039
9	1.0264

Οι τιμές των τάσεων των ζυγών παρά τη μεταβολή που παρουσιάζουν βρίσκονται πολύ κοντά στο **1 pu**.

Οι ροές ισχύος και τα ρεύματα γραμμών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.18 και 4.19 αντίστοιχα. Η γεννήτρια 2 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή. Σε αυτή την περίπτωση η φόρτιση της γεννήτριας 1 φτάνει το **92%** και χρειάζεται άμεση αντιμετώπιση.



Σχήμα 4.18 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 2



Σχήμα 4.19 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 2

4.4.9 Αφαίρεση γεννήτριας 3

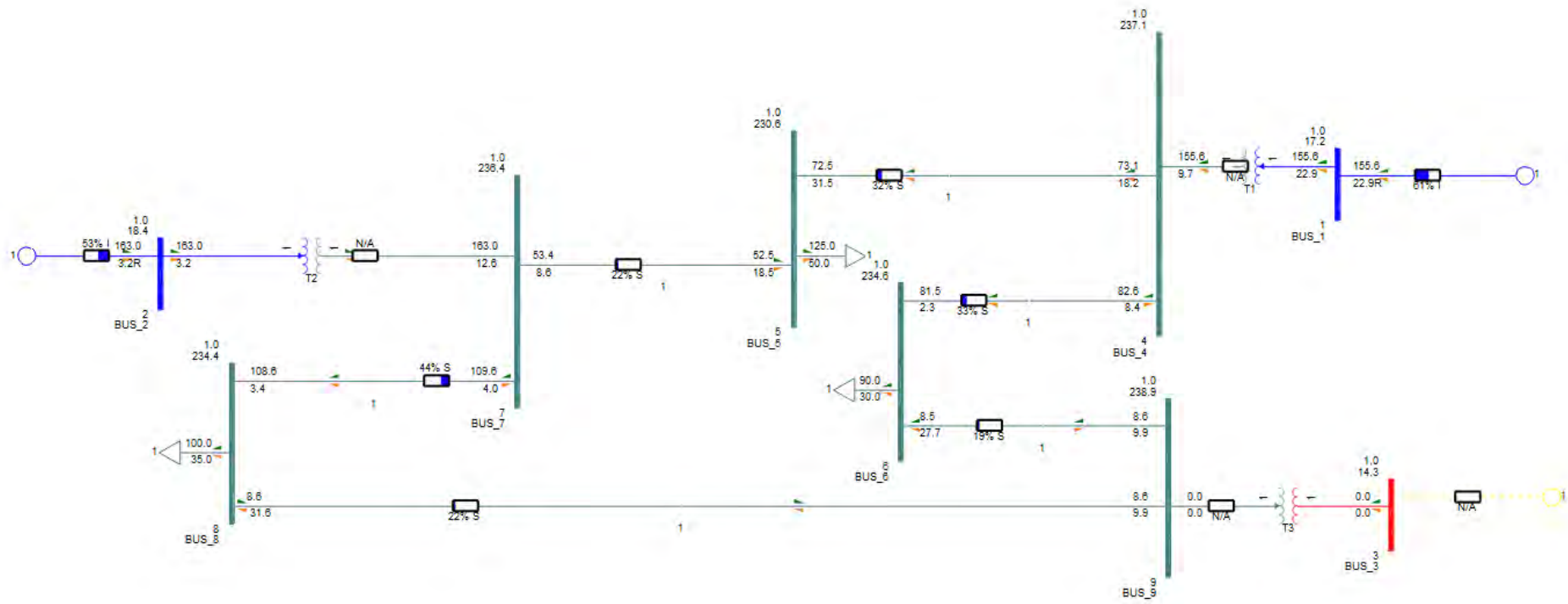
Σε αυτή την περίπτωση τίθεται εκτός λειτουργίας η γεννήτρια 3 η οποία είναι συνδεδεμένη στον ζυγό 3 και πραγματοποιείται μια νέα ανάλυση ροής φορτίου. Οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 4.16 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.16 – Τάσεις ζυγών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 3

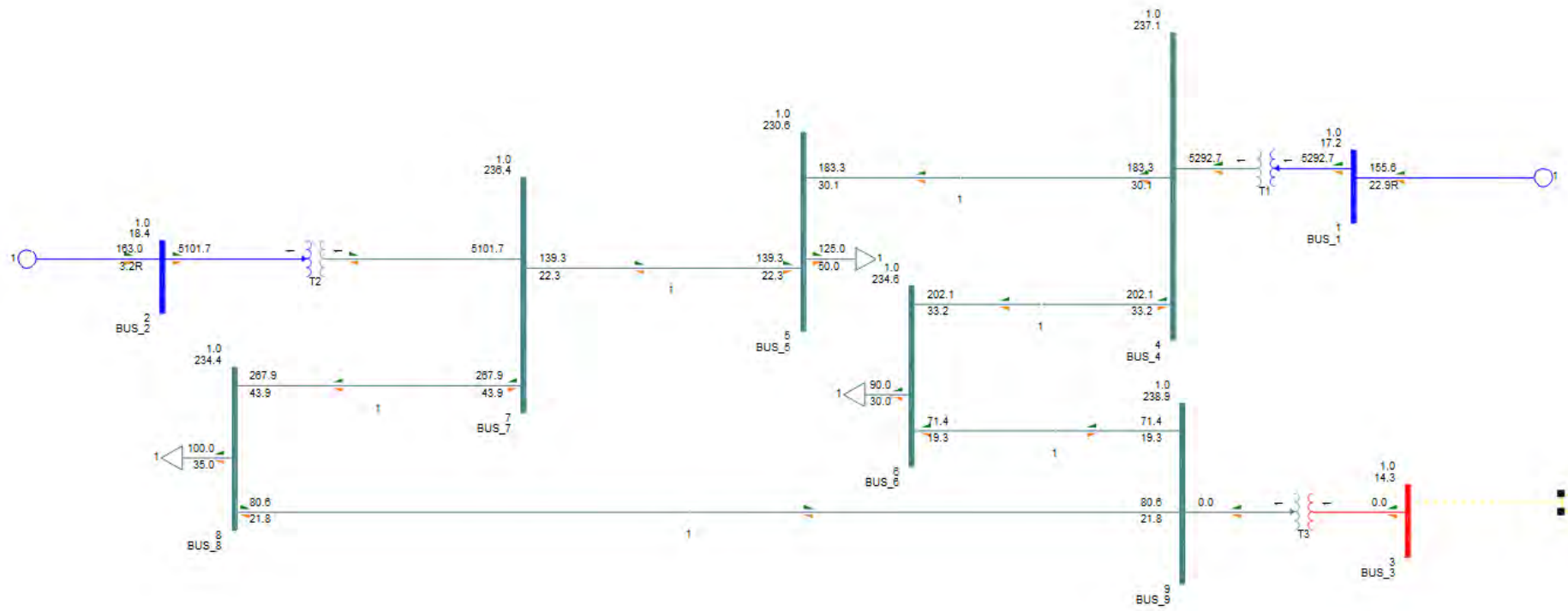
Ζυγός	V (pu)
1 (Swing)	1.04
2	1.025
3	1.0385
4	1.0309
5	1.0028
6	1.02
7	1.0279
8	1.019
9	1.0385

Οι τιμές των τάσεων των ζυγών παρά τη μεταβολή που παρουσιάζουν βρίσκονται πολύ κοντά (στη συγκεκριμένη περίπτωση ελάχιστα πάνω) στο **1 pu**.

Οι ροές ισχύος και τα ρεύματα γραμμών σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.20 και 4.21 αντίστοιχα. Η γεννήτρια 3 αναπαρίσταται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.20 – Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 3



Σχήμα 4.21 – Ρεύματα γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 3

4.5 Αξιολόγηση σεναρίων και εύρεση χειρότερης περίπτωσης

Εφόσον έχουν συλλεχθεί όλα τα δεδομένα για όλα τα σενάρια το τελικό στάδιο είναι η αξιολόγηση του καθενός και η εύρεση της χειρότερης περίπτωσης ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την προστασία, την επάρκεια και την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Η χειρότερη περίπτωση μπορεί να αξιολογηθεί με βάση την τάση του κάθε ζυγού σε κάθε σενάριο ή τη φόρτιση της κάθε γραμμής, το οποίο συναντάται και πιο συχνά στις αναλύσεις στατικής ευστάθειας συστημάτων

4.5.1 Εύρεση χειρότερης περίπτωσης ως προς τις τάσεις ζυγών

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζονται οι τάσεις όλων των ζυγών σε όλα τα πιθανά σενάρια διαταραχών και ως χειρότερη περίπτωση θεωρείται το σενάριο στο οποίο υπάρχει η μεγαλύτερη πτώση ή άνοδος τάσης σε έναν ζυγό. Οι τάσεις των ζυγών για όλα τα πιθανά σενάρια παρουσιάζονται στον πίνακα 4.17 ανοιγμένες στο ανά μονάδα σύστημα.

Πίνακας 4.17 – Τάσεις ζυγών για όλα τα σενάρια

Διαταραχή	Τάσεις ζυγών								
	Ζυγός 1	Ζυγός 2	Ζυγός 3	Ζυγός 4	Ζυγός 5	Ζυγός 6	Ζυγός 7	Ζυγός 8	Ζυγός 9
Αρχική Κατάσταση	1.04	1.025	1.025	1.0258	0.9956	1.0127	1.0258	1.0159	1.0324
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	1.04	1.025	1.025	1.0388	0.8389	1.0203	0.9878	0.9895	1.0244
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	1.04	1.025	1.025	1.0282	0.9988	0.9418	1.0223	1.0063	1.0167
Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	1.04	1.025	1.025	0.9956	0.938	0.9748	1.017	1.001	1.0189
Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	1.04	1.025	1.025	1.0047	0.9678	0.9639	1.0156	1.0054	1.0234
Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	1.04	1.025	1.025	1.0159	0.9736	0.9994	1.0192	0.969	1.0126
Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	1.04	1.025	1.025	1.0224	0.9897	1.0087	1.01	0.9783	1.0338
Αφαίρεση ΓΕΝ_1	1.04	1.025	1.025	1.0388	0.8389	1.0203	0.9878	0.9895	1.0244
Αφαίρεση ΓΕΝ_2	1.04	1.0109	1.025	1.024	0.9924	1.0107	1.0109	1.0039	1.0264
Αφαίρεση ΓΕΝ_3	1.04	1.025	1.0385	1.0309	1.0028	1.02	1.0279	1.019	1.0385

Στον πίνακα 4.18 φαίνονται οι μέγιστες τιμές ανόδου τάσης ανά σενάριο και η μέγιστη άνοδος τάσης που παρατηρείται σε όλα τα σενάρια διαταραχών. Οι τιμές του πίνακα που αφορούν την τάση είναι η διαφορά της **τελικής τάσης** μετά την διαταραχή από την **αρχική τάση** στην κανονική λειτουργία. Η στήλη **περίπτωση** αφορά την αφαίρεση ενός στοιχείου του συστήματος.

Πίνακας 4.18 – Μέγιστες τιμές ανόδου τάσης

Διαταραχή	Μέγιστη άνοδος τάσης (pu)	Ζυγός
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	0.013	4
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	0.0032	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	0	1
Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	0	1
Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	0	1
Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	0.0014	9
Αφαίρεση GEN_1	0.013	4
Αφαίρεση GEN_2	0	1
Αφαίρεση GEN_3	0.0135	3

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα η μέγιστη άνοδος τάσης παρατηρείται στο **ζυγό 3** στην περίπτωση που **αφαιρείται η γεννήτρια 3 από το σύστημα**. Η τάση ανεβαίνει κατά **0.0135 pu** σε σχέση με την αρχική της.

Στον Πίνακα 4.18 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές πτώσης τάσης σε όλα τα σενάρια αλλά και η μεγαλύτερη τιμή πτώσης τάσης που παρουσιάστηκε. Και σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές του πίνακα που αφορούν την τάση είναι η διαφορά της **τελικής τάσης** μετά την διαταραχή από την **αρχική τάση** στην κανονική λειτουργία.

Πίνακας 4.19 – Μέγιστες τιμές πτώσης τάσης

Διαταραχή	Μέγιστη πτώση τάσης (pu)	Ζυγός
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	-0.1567	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	-0.0709	6
Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	-0.0576	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	-0.0488	6
Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	-0.0469	8
Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	-0.0376	8
Αφαίρεση GEN_1	-0.1567	5
Αφαίρεση GEN_2	-0.0149	7
Αφαίρεση GEN_3	0	1

Η μέγιστη πτώση τάσης παρατηρείται στο **ζυγό 5** στην περίπτωση που **αφαιρείται η γραμμή 4-5** από το σύστημα. Η τάση μεταβάλλεται κατά **0.1567 pu** σε σχέση με την αρχική της.

Στον Πίνακα 4.20 φαίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες μεταβολές της τάσης σε όλα τα σενάρια και η μεγαλύτερη μεταβολή τάσης που παρουσιάστηκε. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές του πίνακα που αφορούν την τάση είναι η **απόλυτη τιμή** της διαφοράς της **τελικής τάσης** μετά την διαταραχή από την **αρχική τάση** στην κανονική λειτουργία.

Η μέγιστη μεταβολή τάσης παρατηρείται στον **ζυγό 5** στην περίπτωση που **αφαιρείται η γραμμή 4-5** από το σύστημα. Η τάση μεταβάλλεται κατά **0.1567 pu** σε σχέση με την αρχική της.

Πίνακας 4.20 – Μέγιστες τιμές μεταβολής τάσης

Διαταραχή	Μέγιστη μεταβολή τάσης (pu)	Ζυγός
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	0.1567	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	0.0709	6
Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	0.0576	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	0.0488	6
Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	0.0469	8
Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	0.0376	8
Αφαίρεση GEN_1	0.1567	5
Αφαίρεση GEN_2	0.0149	7
Αφαίρεση GEN_3	0.0135	3

Ο Πίνακας 4.21 προκύπτει από τον Πίνακα 4.20 και δείχνει ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά όλες τις μέγιστες μεταβολές τάσης σε κάθε περίπτωση. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εύκολα διακριτό ποια είναι η χειρότερη περίπτωση αλλά και πως ταξινομούνται όλα τα σενάρια διαταραχών **με βάση την τάση των ζυγών**.

Πίνακας 4.21 – Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών όσον αφορά τις τάσεις ζυγών

Διαταραχή	Μέγιστη μεταβολή τάσης (pu)	Ζυγός
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	0.1567	5
Αφαίρεση ΓΕΝ_1	0.1567	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	0.0709	6
Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	0.0576	5
Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	0.0488	6
Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	0.0469	8
Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	0.0376	8
Αφαίρεση ΓΕΝ_2	0.0149	7
Αφαίρεση ΓΕΝ_3	0.0135	3

4.5.2 Εύρεση χειρότερης περίπτωσης ως προς την φόρτιση γραμμών και γεννητριών

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται το ποσοστό φόρτισης των γραμμών μεταφοράς και των γεννητριών σε όλα τα πιθανά σενάρια διαταραχών και ως χειρότερη περίπτωση θεωρείται το σενάριο στο οποίο υπάρχει η μεγαλύτερη φόρτιση σε μια συνιστώσα του συστήματος. Τα μέγιστα ποσοστά φόρτισης για τις γραμμές και τις γεννήτριες για όλα τα πιθανά σενάρια παρουσιάζονται στον πίνακα 4.22.

Πίνακας 4.22 – Μέγιστα ποσοστά φόρτισης

Διαταραχή	Μέγιστη φόρτιση (%)	Σημείο Εμφάνισης
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	59	Γ.Μ. 5--7
Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	63	Γ.Μ. 6--9
Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	97	Γ.Μ. 6--9
Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	59	Γ.Μ. 5--7
Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	71	Γ.Μ. 8--9
Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	58	Γ.Μ. 6--9
Αφαίρεση ΓΕΝ_1	53	ΓΕΝ_2
Αφαίρεση ΓΕΝ_2	92	ΓΕΝ_1
Αφαίρεση ΓΕΝ_3	61	ΓΕΝ_1

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα βγαίνει το συμπέρασμα ότι η χειρότερη περίπτωση όσον αφορά τη φόρτιση των γραμμών και των γεννητριών είναι η **αφαίρεση της γραμμής 5-7**, λόγω του ότι η γραμμή 6-9 φορτίζεται κατά **97%**.

Ο Πίνακας 4.23 προκύπτει από τον Πίνακα 4.22 και δείχνει ταξινομημένα κατά φθίνουσα σειρά όλα τα μέγιστα ποσοστά φόρτισης σε κάθε περίπτωση αλλά και που παρουσιάζονται ακριβώς στο σύστημα. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εύκολα διακριτό ποια είναι η χειρότερη περίπτωση αλλά και πως ταξινομούνται όλα τα σενάρια διαταραχών με τη φόρτιση των γραμμών και των γεννητριών.

Πίνακας 4.23– Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών όσον αφορά τα ποσοστά φόρτισης

A/A	Διαταραχή	Φόρτιση (%)	Σημείο Εμφάνισης
1	Αφαίρεση Γ.Μ. 5--7	97	Γ.Μ. 6--9
2	Αφαίρεση ΓΕΝ_2	92	ΓΕΝ_1
3	Αφαίρεση Γ.Μ. 7--8	71	Γ.Μ. 8--9
4	Αφαίρεση Γ.Μ. 4--6	63	Γ.Μ. 6--9
5	Αφαίρεση ΓΕΝ_3	61	ΓΕΝ_1
6	Αφαίρεση Γ.Μ. 4--5	59	Γ.Μ. 5--7
7	Αφαίρεση Γ.Μ. 6--9	59	Γ.Μ. 5--7
8	Αφαίρεση Γ.Μ. 8--9	58	Γ.Μ. 6--9
9	Αφαίρεση ΓΕΝ_1	53	ΓΕΝ_2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε παρουσίαση της ανάλυσης στατικής ασφάλειας των ΣΗΕ. Κύριος σκοπός ήταν να οπτικοποιηθούν με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα αποτελέσματα που είχαν στο σύστημα οι διάφορες διαταραχές. Με άλλα λόγια να γίνει μια παράσταση των αποτελεσμάτων της ροής φορτίου που εκτελούνταν μετά από κάθε διαταραχή.

Οι διαταραχές που συνέβησαν στο σύστημα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία δημιούργησαν κάποιες μεταβολές στις τάσεις των ζυγών ή τις φορτίσεις των γραμμών, οι οποίες σε ορισμένα σενάρια ήταν εκτός των επιτρεπόμενων ορίων. Παρόλα αυτά όμως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι τάσεις και οι φορτίσεις έμειναν εντός των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

Λόγω του μικρού μεγέθους του συστήματος η μελέτη του δεν ήταν σχετικά δύσκολη διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι αρχικά, η κάθε ανάλυση ροής φορτίου δεν ήταν μια χρονοβόρα διαδικασία αλλά το σύστημα συνέκλινε μετά από έναν μικρό αριθμό επαναλήψεων και δεύτερον ότι τα αποτελέσματα που προκύπταν μπορούσαν να αναλυθούν σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.

Σήμερα η πολυπλοκότητά των ΣΗΕ αυξάνεται όλο και περισσότερο. Επίσης κρίνεται απαραίτητη η πρόληψη και κατ' επέκταση η έγκαιρη αποκατάσταση όλων πιθανών διαταραχών που μπορούν να προκύψουν ώστε το σύστημα να καλύψει με αρκετά μεγάλη επιτυχία τις ανάγκες όλων των καταναλωτών του και ποιοτικά αλλά και οικονομικά. Επομένως, για την ανάλυση και τη μελέτη των σύγχρονων ΣΗΕ κρίνεται απαραίτητη η βοήθεια των υπολογιστικών συστημάτων και των λογισμικών ανάλυσης ροής ισχύος.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Β. Γιαννακόπουλος και Ν. Α. Βοβός, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2008.
- [2] Ν. Α. Βοβός και Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2008.
- [3] S. Sreekumaran, L. Nair και H. Nagesh, «Power System Security Assessment and Contingency Analysis Using Supervised Learning Approach,» *International Journal of Advance Engineering and Research*, p. 10, 2015.
- [4] R. Billinton και W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, New York: Springer US, 1994.
- [5] Π. Σ. Γεωργιάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.
- [6] Σ. Ε. Μπάλλα, Ανάλυση Αξιπιστίας Απομονωμένων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταικά, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.
- [7] A. A. Abdulrazzaq, "Contingency ranking of power systems using a performance index," *International Research Journal of Engineering and Technology*, p. 4, 2015.
- [8] Siemens AG, "Siemens PSS/E Webpage," Siemens, [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software/pss-e.html>.
- [9] I. Siemens Industry, PSS/E Documentation, New York: Siemens Industry, 2016.