



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Πέτρος Ρούμελης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

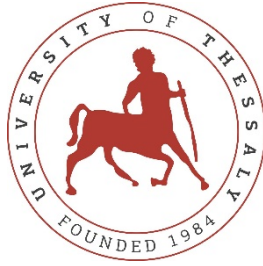
**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

*Διπλωματική Εργασία*

Πέτρος Ρούμελης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF  
POWER SYSTEMS**

Diploma Thesis

Petros Roumelis

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

Volos 2020

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στον επιβλέποντα της Διπλωματικής Εργασίας, καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα, για την καθολική στήριξη, όπως αυτή αποδόθηκε συνολικά στα ακαδημαϊκά έτη.

Σε όλους τους καθηγητές μου για το εκπαιδευτικό τους έργο και για τις γνώσεις που απέκτησα.

Στην οικογένεια μου, η οποία με στήριζε 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

(Υπογραφή)

Πέτρος Ρούμελης  
Ιούλιος 2020

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο, ο κύριος στόχος από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση είναι η εξασφάλιση της αξιοπιστίας ισχύος και η συνεχής λειτουργία αυτού. Κατά αυτόν τον τρόπο το ηλεκτρικό δίκτυο παραμένει συνεχώς στη μόνιμη λειτουργία, όμως αρκετές φορές συμβαίνουν μεταβατικά φαινόμενα. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται αναφορά στα βραχυκυκλώματα είτε αυτά συμβούν σε γραμμές μεταφοράς είτε σε ένα ζυγό του συστήματος. Ένα σφάλμα δύναται να δημιουργήσει πολύ υψηλά ρεύματα και να επιφέρει πτώση τάσης, γεγονότα που προκαλούν απότομες ταλαντώσεις στις μεταβλητές που χαρακτηρίζουν ένα ΣΗΕ, όπως τη συχνότητα, την ισχύ κ.λπ. Ο κίνδυνος είναι ότι το δίκτυο τείνει να ξεφύγει τελείως από τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και έτσι οι νέες συνθήκες να το οδηγήσουν σε αστάθεια. Για να αποφευχθεί αυτό, πρέπει το σύστημα να ανοίξει άμεσα τους διακόπτες του τμήματος, στο οποίο εφαρμόστηκε το σφάλμα, εντός ορισμένου κρίσιμου χρόνου. Εάν ξεπεραστεί ο κρίσιμος χρόνος και το βραχυκυκλωμένο τμήμα εξακολουθεί να είναι σε σύνδεση με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο, τότε επέρχεται πλήρης αποσυγχρονισμός. Βέβαια ο κρίσιμος χρόνος αυτός, αν και εντοπίζεται μέσω της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας, αφορά άμεσα και το δίκτυο προστασίας του ΣΗΕ, καθώς πρέπει να επιλεγούν οι κατάλληλες μονάδες για να υπηρετήσουν με σεβασμό τη χρονική απαίτηση. Με τον σωστό προγραμματισμό των ηλεκτρικών μονάδων της προστασίας επιτυγχάνεται το σημαντικότερο βήμα για την επίτευξη της χρονικής συνέπειας. Τέλος, όλα τα παραπάνω αφορούν ξεχωριστά συστήματα μελετών και μέσω διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων, εντοπίζεται η ιδανική επίλυση και εκκαθάριση των μεταβατικών φαινομένων, ώστε να καταλήξει το σύστημα στη νέα μόνιμη κατάσταση.

## ABSTRACT

In the modern electricity grid, the main goal between production and consumption, is to ensure the power reliability and the continuous operation. This is the way that the electrical network remains in a constant state, but in several times transient phenomena occur. Into this diploma thesis, there is a comprehensive analysis to short circuits, whether it happens on transmission lines or on a system bus. A short circuit can generate overcurrent and voltage drop, which cause these abrupt oscillations to the variables that characterize an electricity system, such as frequency, electrical power, etc. The main danger is that the electrical network tends to escape completely by the constant mode of operation and thus the new conditions can almost lead to a permanent instability. In order to avoid this, the system must immediately turn on the switches of the matched section, in which the fault has been applied, within a critical time. By the time that this critical moment is exceeded, if the short-circuit section is still connected to the remainder of the power system, a complete desynchronization occurs. This critical time, although certified through the study of transient stability, it is promptly related with the protection network of the system, because the appropriate units must be selected properly to serve this time requirement with respect. Within the accurate programming of the electrical protection units, the most significant step to the time consistency gets achieved. Finally, the above mentions concern separate system studies and through the different mathematical models, the ideal solution can be certified and the transient phenomena can be liquidated, so the system will result into the new constant state.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>xii</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>1</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Ιστορική αναδρομή στην ανάπτυξη του δικτύου</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Βασικά στοιχεία του δικτύου</b> .....	<b>3</b>
1.2.1 Δομή και κύρια λειτουργία του δικτύου.....	3
1.2.2 Το ελληνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	5
<b>1.3 Κεντρικός έλεγχος του δικτύου</b> .....	<b>6</b>
1.3.1 Το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας.....	7
1.3.3 Το ελληνικό σύστημα ελέγχου.....	11
<b>1.4 Ανάγκη μελέτης της ευστάθειας</b> .....	<b>12</b>
<b>1.5 Η ανάγκη χρήσης του υπολογιστή στα σύγχρονα ΣΗΕ</b> .....	<b>14</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>16</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Γενική ιδέα</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών και ζυγών ροής φορτίου</b> .....	<b>20</b>
2.3.1 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών.....	20
2.3.2 Κατηγοριοποίηση ζυγών.....	21
<b>2.4 Περιορισμοί στο πρόβλημα της ροής φορτίου</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5 Λύση των εξισώσεων ροής φορτίου με Gauss-Seidel</b> .....	<b>22</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>25</b>



<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Είδη σφαλμάτων .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Στερεό συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα – SCC.....	26
3.2.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα μέσω θεωρήματος Thevenin.....	27
<b>3.3 Συμμετρικές συνιστώσες και ακολουθιακά δίκτυα.....</b>	<b>29</b>
3.3.1 Συμμετρικές συνιστώσες .....	29
3.3.2 Ακολουθιακά δίκτυα .....	30
<b>3.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με τη χρήση των ακολουθιακών δικτύων.....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα .....</b>	<b>34</b>
3.5.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα .....	34
3.5.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη.....	34
3.5.3 Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα .....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>36</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Βασικές έννοιες της ευστάθειας .....</b>	<b>36</b>
4.1.1 Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης.....	36
4.1.2 Μεταβατική ευστάθεια .....	39
4.1.3 Δυναμική ευστάθεια στα σύγχρονα ΣΗΕ.....	40
4.1.4 Χρονικά διαστήματα της μεταβατικής περιόδου .....	42
<b>4.2 Εξίσωση ταλάντωσης.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Η μόνιμη κατάσταση στα σύγχρονα ΣΗΕ .....</b>	<b>45</b>
<b>4.4 Μελέτη της ευστάθειας .....</b>	<b>46</b>
4.4.1 Αντικείμενα της μελέτης .....	46
4.4.2 Μέθοδοι της μελέτης.....	48
<b>4.5 Κριτήριο ίσων εμβαδών και εφαρμογές .....</b>	<b>48</b>
4.5.1 Μείωση φορτίου.....	51
4.5.2 Αποσύνδεση φορτίου .....	52

4.5.3 Τριφασικό σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς.....	53
<b>4.6 Μέθοδος ολοκλήρωσης του Euler.....</b>	<b>55</b>
<b>4.7 Τρόποι βελτίωσης της ευστάθειας στα σύγχρονα ΣΗΕ .....</b>	<b>57</b>
4.7.1 Μείωση της συνολικής επαγωγικής αντίδρασης.....	58
4.7.2 Κατάλληλο σύστημα διέγερσης .....	59
4.7.3 Δυναμική πέδηση .....	60
4.7.4 Χρήση SVC .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>63</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 Εισαγωγή στο σύστημα προστασίας.....</b>	<b>63</b>
5.1.1 Ζώνες προστασίας .....	64
5.1.2 Βασικές έννοιες ηλεκτρονόμων .....	66
5.1.3 Μετασχηματιστές μετρήσεων .....	68
5.1.4 Διακόπτες ΣΗΕ.....	69
<b>5.2 Είδη ηλεκτρονόμων .....</b>	<b>70</b>
<b>5.3 Διακόπτες ισχύος .....</b>	<b>73</b>
<b>5.4 Περιγραφή ηλεκτρονόμων υπερέντασης .....</b>	<b>74</b>
5.4.1 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονόμου .....	75
5.4.3 Επίπεδο επιλογής ηλεκτρονόμου.....	77
<b>5.5 Τύποι ηλεκτρονόμων υπερέντασης .....</b>	<b>78</b>
5.5.1 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης στιγμιαίου χρόνου.....	78
5.5.2 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου .....	79
5.5.3 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ορισμένου χρόνου.....	79
<b>5.6 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης με μονάδα κατεύθυνσης .....</b>	<b>81</b>
5.6.1 Μονάδα κατεύθυνσης.....	81
5.6.2 Χρήση της μονάδας κατεύθυνσης στην προστασία .....	82
<b>5.7 Σύνδεση της προστασίας με τη μεταβατική ευστάθεια .....</b>	<b>83</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>85</b>

<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ POWERWORLD ...</b>	<b>85</b>
<b>6.1 Στοιχεία δικτύου και μελέτη ροής φορτίου.....</b>	<b>85</b>
6.1.1 Στοιχεία δικτύου.....	85
6.1.2 Ροή φορτίου.....	87
<b>6.2 Μελέτη σφαλμάτων.....</b>	<b>91</b>
6.2.1 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 4.....	92
6.2.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα, SLG, στο ζυγό 4.....	92
6.2.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη, DLG, στο ζυγό 4 .....	93
6.2.4 Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα, LL στο ζυγό 4.....	93
<b>6.3 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας .....</b>	<b>94</b>
6.3.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα, SLG, στη γραμμή 8-9 προς το ζυγό 9.....	95
6.3.2 Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα, LL, στη γραμμή 4-6 προς το ζυγό 4.....	101
6.3.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη, DLG, στη γραμμή 5-7 προς το ζυγό 7 .....	106
6.3.4 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα, 3-PHASE, στη γραμμή 4-5 προς το ζυγό 4.....	112
6.3.5 Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας.....	117
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....</b>	<b>119</b>
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ PSS@CAPE .....</b>	<b>119</b>
<b>7.1 Στοιχεία συστήματος προστασίας.....</b>	<b>119</b>
<b>7.2 Μελέτη προστασίας.....</b>	<b>120</b>
7.2.1 Μονοφασικό σφάλμα, SLG, στη γραμμή 8 - 9 κοντά στο ζυγό 9.....	121
7.2.2 Απλό διφασικό σφάλμα, LL, στη γραμμή 4 - 6 κοντά στο ζυγό 4.....	123
7.2.3 Διφασικό σφάλμα ως προς τη γη, DLG, στη γραμμή 5 - 7 κοντά στο ζυγό 7 .....	124
7.2.4 Στερεό τριφασικό σφάλμα 3PHASE, στη γραμμή 4 - 5 κοντά στο ζυγό 4.....	126
<b>7.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....</b>	<b>127</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....</b>	<b>129</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>129</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>131</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 1.1: Συνολικά χιλιόμετρα γραμμών μεταφοράς στην Ελλάδα [4, 6].</i>	<i>6</i>
<i>Πίνακας 2.1: Κατηγορίες ζυγών του προβλήματος της ροής φορτίου [7].</i>	<i>21</i>
<i>Πίνακας 6.1: Στοιχεία όλων των ζυγών [25].</i>	<i>85</i>
<i>Πίνακας 6.2: Στοιχεία γραμμών μεταφοράς [25].</i>	<i>86</i>
<i>Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα στους ζυγούς με ελεγχόμενη τάση.</i>	<i>88</i>
<i>Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα στους ζυγούς φορτίου.</i>	<i>88</i>
<i>Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα στους υπόλοιπους ζυγούς.</i>	<i>89</i>
<i>Πίνακας 6.6: Στοιχεία μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας.</i>	<i>95</i>
<i>Πίνακας 6.7: Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης ευστάθειας.</i>	<i>118</i>
<i>Πίνακας 7.1: Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης προστασίας.</i>	<i>128</i>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Δομή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [1].....	4
Σχήμα 1.2: Διάγραμμα ελέγχου ΣΗΕ [2].....	9
Σχήμα 1.3: Ο χάρτης του δικτύου μεταφοράς του ΑΔΜΗΕ [6]. ....	11
Σχήμα 2.1: Εξίσωση ισχύος ζυγού $i$ σε σύστημα $n$ ζυγών [7]. ....	18
Σχήμα 3.1: Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού $Z$ στο μοντέλο του τριφασικού βραχυκυκλώματος με ισοδύναμη αντίσταση $Z_{TH}$ [10]. ....	28
Σχήμα 3.2: Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας για τις διαφορετικές συνδέσεις ΜΣ.....	31
Σχήμα 3.3: Δίκτυο θετικής ακολουθίας.....	32
Σχήμα 3.4: Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας .....	32
Σχήμα 3.5: Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας .....	32
Σχήμα 4.1: Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού [8]. ....	37
Σχήμα 4.2: Χαρακτηριστική καμπύλη $P$ - $\delta$ της σύγχρονης γεννήτριας [5]. ....	38
Σχήμα 4.3: Ρυθμιστές ελέγχου σύγχρονης γεννήτριας [12].....	40
Σχήμα 4.4: Εσωτερική αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας [2]. ....	43
Σχήμα 4.5: Διαχωρισμός της μελέτης ευστάθειας των ΣΗΕ [2]. ....	47
Σχήμα 4.6: Καμπύλη $P$ - $\delta$ για κριτήριο ίσων εμβαδόν, εφαρμοσμένο .....	49
στο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού [8].....	49
Σχήμα 4.7: Κριτήριο ίσων εμβαδόν, εφαρμοσμένο στο μοντέλο .....	51
σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού για μείωση φορτίου [8].....	51
Σχήμα 4.8: Κριτήριο ίσων εμβαδόν, εφαρμοσμένο στο μοντέλο .....	52
σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού για αποσύνδεση φορτίου [8]. ....	52
Σχήμα 4.9: Κριτήριο ίσων εμβαδόν, εφαρμοσμένο στο μοντέλο .....	54
Σχήμα 4.10: Καμπύλη ακριβείας έμμεσης μεθόδου του Euler [5]. ....	56
Σχήμα 4.11: Σύγκριση γεννητριών με PSS και με διόδους [2].....	60
Σχήμα 5.1: Πρωτεύουσες ζώνες προστασίας [18].....	65
Σχήμα 5.2: Σύνδεση ηλεκτρονόμου (Relay), με διακόπτη ισχύος (Circuit breaker), και μετασχηματιστή ρεύματος (CT) [19].....	67
Σχήμα 5.3: Μετασχηματιστής ρεύματος, CT, σε γραμμή μεταφοράς [20].....	68
Σχήμα 5.4: Ζώνες προστασίας σε ΗΝ απόστασης σε ακτινικό δίκτυο [2].....	72
Σχήμα 5.5: Εσωτερικό διακόπτη με trip σε σφάλμα υπερέντασης.....	74
Σχήμα 5.6: Δομή ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης [22].....	75
Σχήμα 5.7: Τα τρία είδη ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινωτό δίκτυο [16].....	80

Σχήμα 5.8: Ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης-υπερέντασης [24].	81
Σχήμα 6.1: Δίκτυο 9 ζυγών (IEEE) και ροή φορτίου.	87
Σχήμα 6.2: Νέα μόνιμη κατάσταση με αύξηση φορτίου του ζυγού 5.	89
Σχήμα 6.3: Νέα μόνιμη κατάσταση με μείωση φορτίου του ζυγού 5.	90
Σχήμα 6.4: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για στερεό τριφασικό σφάλμα.	92
Σχήμα 6.5: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για μονοφασικό σφάλμα ως προς τη γη.	92
Σχήμα 6.6: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για διφασικό σφάλμα ως προς τη γη.	93
Σχήμα 6.7: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για απλό διφασικό σφάλμα.	93
Σχήμα 6.8: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το SLG στη γραμμή 8-9.	96
Σχήμα 6.9: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το SLG στη γραμμή 8-9.	97
Σχήμα 6.10: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για SLG στη γραμμή 8-9.	98
Σχήμα 6.11: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για SLG στη γραμμή 8-9.	98
Σχήμα 6.12: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για SLG στη γραμμή 8-9.	99
Σχήμα 6.13: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για SLG στη γραμμή 8-9.	99
Σχήμα 6.14: Καμπύλη ευστάθειας $P$ ισχύος για SLG στη γραμμή 8-9.	100
Σχήμα 6.15: Καμπύλη ευστάθειας $Q$ ισχύος για SLG στη γραμμή 8-9.	100
Σχήμα 6.16: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το LL στη γραμμή 4-6.	101
Σχήμα 6.17: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το LL στη γραμμή 4-6.	102
Σχήμα 6.18: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για LL στη γραμμή 4-6.	103
Σχήμα 6.19: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για LL στη γραμμή 4-6.	104
Εμφανίζονται οι καμπύλες τόσο των γεννητριών,	104
Σχήμα 6.20: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για LL στη γραμμή 4-6.	104
Σχήμα 6.21: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για LL στη γραμμή 4-6.	105
Σχήμα 6.22: Καμπύλη ευστάθειας $P$ ισχύος για LL στη γραμμή 4-6.	105
Σχήμα 6.23: Καμπύλη ευστάθειας $Q$ ισχύος για LL στη γραμμή 4-6.	106
Σχήμα 6.24: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το DLG στη γραμμή 7-5.	107
Σχήμα 6.25: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το DLG στους ζυγούς 7-5.	108
Σχήμα 6.26: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για DLG στη γραμμή 5-7.	109
Σχήμα 6.27: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για DLG στη γραμμή 5-7.	109
Σχήμα 6.28: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για DLG στη γραμμή 5-7.	110
Σχήμα 6.29: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για DLG στη γραμμή 5-7.	110
Σχήμα 6.30: Καμπύλη ευστάθειας $P$ ισχύος για DLG στη γραμμή 5-7.	111
Σχήμα 6.31: Καμπύλη ευστάθειας $Q$ ισχύος για DLG στη γραμμή 5-7.	111

Σχήμα 6.32: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	112
Σχήμα 6.33: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	113
Σχήμα 6.34: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	114
Σχήμα 6.35: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	115
Σχήμα 6.36: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	115
Σχήμα 6.37: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	116
Σχήμα 6.38: Καμπύλη ευστάθειας $P$ ισχύος για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	116
Σχήμα 6.39: Καμπύλη ευστάθειας $Q$ ισχύος για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.....	117
Σχήμα 7.1: Μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου προστασίας 9 ζυγών της IEEE.....	119
Σχήμα 7.2: Ρύθμιση HN για $I_{MIN-OC}$ στο SLG στη γραμμή 8 – 9, κοντά στο ζυγό 9.....	122
Σχήμα 7.3: Ρύθμιση HN για $I_{MAX-OC}$ στο SLG στη γραμμή 8 – 9, κοντά στο ζυγό 9.....	122
Σχήμα 7.4: Ρύθμιση HN για $I_{MIN-OC}$ στο LL στη γραμμή 4 – 6, κοντά στο ζυγό 4.....	123
Σχήμα 7.5: Ρύθμιση HN για $I_{MAX-OC}$ στο LL στη γραμμή 4 – 6, κοντά στο ζυγό 4.....	124
Σχήμα 7.6: Ρύθμιση HN για $I_{MIN-OC}$ στο DLG στη γραμμή 5 – 7, κοντά στο ζυγό 7.....	125
Σχήμα 7.7: Ρύθμιση HN για $I_{MAX-OC}$ στο DLG στη γραμμή 5 – 7, κοντά στο ζυγό 7.....	125
Σχήμα 7.8: Ρύθμιση HN για $I_{MIN-OC}$ στο 3PHASE στη γραμμή 4 – 5, κοντά στο ζυγό 4.....	126
Σχήμα 7.9: Ρύθμιση HN για $I_{MAX-OC}$ στο 3PHASE στη γραμμή 4 – 5, κοντά στο ζυγό 4. ...	127

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.1 Ιστορική αναδρομή στην ανάπτυξη του δικτύου

Η επαφή του ανθρώπου με τον ηλεκτρισμό ξεκινάει ήδη από τους πρώτους ανεπτυγμένους πολιτισμούς της αρχαιότητας. Από την εποχή του ψαρέματος στην περιοχή του Νείλου, πηγές αναφέρουν την αναισθησία που προκαλεί συγκεκριμένο είδος ψαριών στον άνθρωπο, εννοώντας την ηλεκτροπληξία. Αρκετούς αιώνες μετά, ο Θαλής ο Μιλήσιος περιγράφει πρώτος την παραγωγή ηλεκτρισμού από την τριβή στο κεχριμπάρι. Μάλιστα προσπάθησε να το συνδέσει με τη δημιουργία του μαγνητικού φαινομένου, για το οποίο χρειάστηκε να παρέλθει διάστημα χιλιετιών, μέχρι να αποδειχτεί ότι είχε δίκιο. Μέχρι τα μισά του 19<sup>ου</sup> αιώνα, όμως, ο άνθρωπος δεν μπορούσε να χρησιμοποιήσει τον ηλεκτρισμό σε μαζική παραγωγή και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πρώτη παραγωγή επετεύχθη τον ιστορικό Σεπτέμβρη του 1882, μήνας που σηματοδότησε τη λειτουργία του πρώτου σταθμού συνεχούς ρεύματος DC<sup>1</sup>. Όφειλε τη δημιουργία του στον Thomas Edison, επιστήμονα που γνώριζε σε πρωτοπόρο βαθμό την εφαρμογή του συνεχούς ρεύματος. Βέβαια, το συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν μικρό, σε ακτίνα μόλις 1,5 χιλιομέτρων. Τροφοδοτούσε μόνο 59 καταναλωτές και αυτό γινόταν από μία ατμοηλεκτρική γεννήτρια. Η περιοχή ήταν η Pearl Street της Νέας Υόρκης, καθώς η ανοδική βιομηχανική επανάσταση των ΗΠΑ απαιτούσε νέες μορφές ενέργειας. Το 1884 λύθηκαν τα πρώτα προβλήματα του συστήματος αυτού, αφού έγινε η εισαγωγή του κινητήρα από τον Frank Sprague. Τα κύρια προβλήματα αφορούσαν την ισορροπία παραγωγής και ζήτησης, διότι το δίκτυο τις πρωινές ώρες δεν είχε καμία κατανάλωση και έμενε ανενεργό.

Το δεύτερο και εξίσου σημαντικό πρόβλημα ήταν το θέμα της μικρής ακτίνας που κάλυπτε η παραγωγή. Οι μηχανικοί από τότε καταλάβαιναν ότι η κατασκευή γεννήτριας πολύ μεγαλύτερης ισχύος ήταν πρακτικά αδύνατη. Πρώτοι από όλους στο Τορίνο της Ιταλίας το 1884, παρουσίασαν τον πρώτο μετασχηματιστή εναλλασσόμενου ρεύματος οι Gaulard και Gibbs. Στις ΗΠΑ ο ΜΣ<sup>2</sup> ισχύος ήρθε όταν αγόρασε τα σχέδια ο G. Westinghouse. Ο βοηθός

---

<sup>1</sup> DC: διεθνής όρος για το συνεχές ρεύμα από τα αρχικά Direct Current.

<sup>2</sup> ΜΣ: συντομογραφία του μετασχηματιστή.



του, ονόματι W. Stanley χρησιμοποίησε τα σχέδια και κατασκεύασε, το 1886, το πρώτο AC<sup>3</sup> δίκτυο με μετασχηματιστή ισχύος στο σταθμό Great Barrington στη Μασαχουσέτη. Τρία χρόνια μετά, κατασκευάστηκε μία γραμμή που συνέδεε το Όρεγκον με το Πόρτλαντ σε μήκος 20 χιλιομέτρων, ενώ μέχρι τότε, το 1888 ο N. Tesla που θεωρείται δικαίως ο «προστάτης» του σύγχρονου ηλεκτρισμού, κατάφερε να σχεδιάσει με πλήρη τεκμηρίωση την αποδοτικότερη μεταφορά του ρεύματος στο τριφασικό κύκλωμα. Η γραμμή των 20 χιλιομέτρων σηματοδότησε μία μεγάλη διαμάχη μεταξύ DC που εγκαταστάθηκε από τον Edison, και AC που παραδόθηκε από τον Westinghouse. Ο Tesla με το τριφασικό σύστημα έδωσε τέλος στη διαμάχη αυτή με την ολοκλήρωση της πρώτης τριφασικής εναλλασσόμενης γραμμής το 1893 στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ.

Η Αμερική ήταν αυτή, που εντός ελάχιστου χρονικού διαστήματος, έδειξε το δρόμο, ο οποίος οδήγησε σε μία νέα εποχή για την ανθρωπότητα. Συνοπτικά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα περιορίζεται στο 1922 στα 165 kV, στο 1923 στα 220 kV, στο 1953 στα 350 kV και στο 1965 που έφτασε για πρώτη φορά η μεταφορά γραμμής την τάση των 500 kV. Μάλιστα, το 1965 είναι ιστορικό, γιατί επεσήμανε μία σημαντική αύξηση στην τάση των γραμμών μεταφοράς, αφού ένα χρόνο μετά ξεκίνησε η κατασκευή γραμμής μεταφοράς άνω των 500 kV, η οποία παραδόθηκε το 1969 στα 765 kV. Η αύξηση της τάσης ήταν αυτή που οδήγησε αυτόματα και στην αύξηση των αποστάσεων των γραμμών μεταφοράς.

Η πρώτη διαμάχη μεταξύ AC και DC στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα βρήκε νικητή το εναλλασσόμενο ρεύμα, γιατί υπήρχε απαίτηση για αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος και της χιλιομετρικής κάλυψης, ώστε ένας σταθμός παραγωγής να αρκεί για την τροφοδότηση περισσότερων καταναλωτών από τους κατοίκους μόνο μίας πόλης. Ωστόσο, η μεταφορά συνεχούς ρεύματος ξαναήρθε στο προσκήνιο στα μισά του 20<sup>ου</sup> αιώνα, χάρη στην ανεπτυγμένη τεχνολογία που εφαρμόστηκε στα ΣΗΕ<sup>4</sup>. Συγκεκριμένα, εφευρέθηκε μία βαλβίδα τόξου υδραργύρου (mercury-arc valve), για να μετατρέπει το AC σε DC. Βέβαια το 1970 ανακαλύφθηκαν οι βαλβίδες θυρίστορ (thyristor valves), και στη συνέχεια τα συστήματα μετατροπών CCC<sup>5</sup> και VSC<sup>6</sup>. Μπορεί το AC να «κέρδισε» το DC, αλλά μερικά από τα πλεονεκτήματα του DC είναι:

---

<sup>3</sup> AC: διεθνής όρος για το εναλλασσόμενο ρεύμα από τα αρχικά Alternative Current.

<sup>4</sup> ΣΗΕ: τα αρχικά των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ένα οποιοδήποτε τέτοιο σύστημα διαθέτει παραγωγή, μεταφορά και κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος.

<sup>5</sup> CCC: μετατροπείς με χρήση πυκνωτών από τα αρχικά Capacitor-Commutated Converters.

<sup>6</sup> VSC: μετατροπείς με πηγή τάσης από τα αρχικά Voltage-Source Converters.

- A. Η μεταφορά ισχύος σε αποστάσεις ανώτερες των 400 km, όπου το εναλλασσόμενο ρεύμα εμφανίζει μεγάλες απώλειες ισχύος, σε αντίθεση με το συνεχές.
- B. Η μεταφορά ισχύος σε υπόγειες συνδέσεις ή σε υποθαλάσσιες διασυνδέσεις, μεταξύ νησιών, είναι αδύνατη στο AC, διότι προκύπτουν θέματα ευστάθειας για μεγάλες γραμμές.
- Γ. Είναι απαραίτητη η χρήση του στις ΑΠΕ<sup>7</sup>.
- Δ. Απαιτεί λιγότερους αγωγούς ένα σύστημα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος. Συγκεκριμένα μόνο δύο αγωγούς σε αντίθεση με το AC που απαιτεί τρεις ή έξι.

Συνολικά, η ιστορία δείχνει ότι τα δεδομένα ολοένα και αλλάζουν στη μεταφορά ισχύος. Οπότε, οι νέες τεχνολογίες είναι αυτές που κάνουν τον μηχανικό να προσαρμόζεται σε αυτές για να εξελίσσονται τα ΣΗΕ όλο και περισσότερο [1, 2, 3].

## 1.2 Βασικά στοιχεία του δικτύου

### 1.2.1 Δομή και κύρια λειτουργία του δικτύου

Το σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο, με όλες τις τεχνολογικές επινοήσεις, εξελίχθηκε τόσο πολύ, που για να συνυπάρξουν αυτές οι μονάδες μεταξύ τους, έπρεπε αναγκαστικά να τεθούν συγκεκριμένα όρια, ώστε να καθοριστεί μία σειρά στο δίκτυο.

Πρακτικά, το επίπεδο της ονομαστικής τάσης σχηματοποιεί το δίκτυο του Σχήματος 1.1 με τα εξής συστήματα από την ΥΤ<sup>8</sup> προς τη ΧΤ<sup>9</sup> [1]:

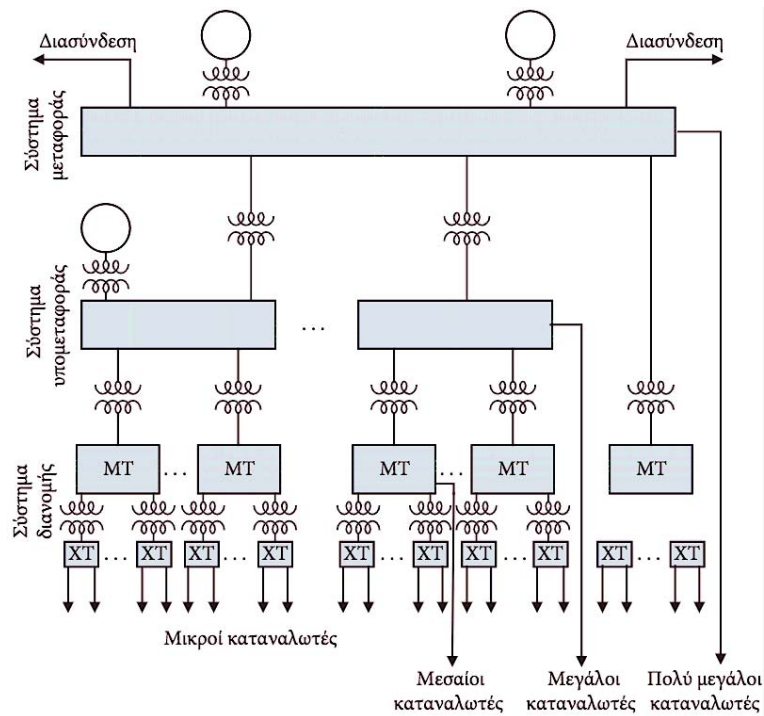
- Μεταφορά.
- Υπομεταφορά.
- Διανομή.

---

<sup>7</sup> ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

<sup>8</sup> ΥΤ: Υψηλή Τάση.

<sup>9</sup> ΧΤ: Χαμηλή Τάση.



Σχήμα 1.1: Δομή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Τα τρία συστήματα της διανομής, της υπομεταφοράς και της μεταφοράς διακρίνονται στην αριστερή πλευρά του σχήματος. Στο επάνω μέρος του σχήματος αποτυπώνεται το σύστημα μεταφοράς, το οποίο είναι το ανώτατο σύστημα που υπάρχει στο δίκτυο. Συνδέει τους περισσότερους σταθμούς παραγωγής του δικτύου μέσω των μετασχηματιστών. Το σύστημα μεταφοράς διαθέτει την ισχύ που παράγεται στους σταθμούς ΠΗΕ<sup>10</sup>, στα συστήματα υπομεταφοράς και διανομής ή άμεσα στους μεγαλύτερους καταναλωτές του δικτύου. Η ονομαστική τάση του συστήματος διαχωρίζεται από την υπομεταφορά και φτάνει τα 400 kV στην Ελλάδα.

Το σύστημα υπομεταφοράς βρίσκεται κάτω από το σύστημα μεταφοράς και με τον υποβιβασμό της τάσης τροφοδοτεί τους σταθμούς διανομής μέσης ή χαμηλής τάσης. Το επίπεδο τάσης της υπομεταφοράς κυμαίνεται από τα 20 kV της ΜΤ<sup>11</sup> έως τα 150 kV της ΥΤ. Οι υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ έχουν μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι της ροής του σχήματος προς τη διανομή. Παρατηρείται, επίσης, ότι σταθμοί ΠΗΕ δύνανται να συνδεθούν άμεσα στο σύστημα υπομεταφοράς, με κατάλληλη ανύψωση της τάσης μέσω ΜΣ.

<sup>10</sup> ΠΗΕ: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.

<sup>11</sup> ΜΤ: Μέση Τάση.

Ένα κοινό σημείο που υπάρχει μεταξύ της διανομής και της υπομεταφοράς, είναι ότι και αυτό διαμοιράζεται σε δύο επίπεδα τάσης στους αγωγούς του. Τα δύο επίπεδα τάσης αυτών των αγωγών είναι η χαμηλή και η μέση τάση. Το σύστημα διανομής είναι το τελικό σύστημα που είναι υπεύθυνο να τροφοδοτεί τον καταναλωτή. Η διανομή μέσης τάσης αφορά βιομηχανικούς καταναλωτές στα 20 kV ενώ η διανομή χαμηλής τάσης αφορά οικιακούς και εμπορικούς καταναλωτές με τάση κατώτερης του 1 kV, δηλαδή στα 220 ή 380 V. Τα δίκτυα της μεταφοράς και της υπομεταφοράς καλύπτουν τεράστιες εκτάσεις συγκριτικά με το σύστημα της διανομής, καθώς όσο αυξάνεται η τάση τόσο μεγαλώνει η γεωγραφική ακτίνα του δικτύου.

Συνοψίζοντας, η παραπάνω δομή χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και να καθορίσει τον τρόπο λειτουργίας του. Αναλυτικά, υπάρχουν οι σταθμοί ΠΗΕ, που συνδέονται σε μεταφορά και υπομεταφορά και τα κέντρα διανομής ή αλλιώς υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ που συγκεντρώνουν την ισχύ, ώστε να την αποδώσουν στους καταναλωτές. Εκτός από τους μετασχηματιστές, που φαίνονται στο σχήμα και είναι απαραίτητοι για το μετασχηματισμό της τάσης στα διάφορα επίπεδα, όλη η διασύνδεση γίνεται μέσω γραμμών μεταφοράς πάνω σε πυλώνες ΧΤ, ΜΤ ή ΥΤ [1, 2].

### 1.2.2 Το ελληνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Κρίνεται αναγκαίο, πριν δοθούν περαιτέρω ηλεκτρολογικά στοιχεία, να επεξηγηθεί η βάση του ελληνικού δικτύου. Προφανώς, τεχνολογικά το ελληνικό δίκτυο στο σύνολο του αναπτύχθηκε σε πολύ πιο αργό ρυθμό από δίκτυα του εξωτερικού, όπως είναι αυτό των ΗΠΑ. Η αιτία είναι ότι η βιομηχανική ανάπτυξη στην Ελλάδα καθυστέρησε αρκετά για οικονομικούς λόγους.

Αρχικά, η Ελλάδα ηλεκτροδοτήθηκε στο κέντρο της Αθήνας, για πρώτη φορά το 1889. Μέχρι το 1929, η εταιρεία Thomson – Houston ολοκλήρωσε τις περισσότερες ηλεκτροδοτήσεις συνολικά σε 250 ελληνικές πόλεις. Το 1950 ιδρύθηκε η ΔΕΗ<sup>12</sup>, η δημόσια εταιρεία, που μέχρι σήμερα αποτελεί το μεγαλύτερο πάροχο ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα. Μέχρι τότε, το βασικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στους σταθμούς παραγωγής ήταν το εισαγόμενο πετρέλαιο. Εν τέλει με την αλλαγή της νομοθεσίας το 1956, όλοι οι

---

<sup>12</sup> ΔΕΗ: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού.

μέχρι τότε σταθμοί παραγωγής κρατικοποιήθηκαν και αποκτήθηκαν από τη ΔΕΗ σε βάθος 20ετίας, κάνοντας χρήση νέων υλικών. Το 1953 ξεκινάει η κατασκευή ατμοηλεκτρικού σταθμού στο Αλιβέρι της Χαλκίδας, ενώ μέχρι το 1957 παραδόθηκαν σε πλήρη λειτουργία οι 3 πρώτοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί σε Λούρο, Άγρα και Λάδωνα, γεγονότα που σήμαναν την αρχή της εκμετάλλευσης φυσικών πόρων της χώρας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ΔΕΗ πλέον, σύμφωνα με τα στοιχεία του 2018, διαθέτει 11,3 GW εγκατεστημένης ισχύος<sup>13</sup>, το οποίο αποτελεί το 54,3% της συνολικής ισχύος που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής. Η ισχύς αυτή προέρχεται από λιγνιτικούς σταθμούς (40,6%), μονάδες φυσικού αερίου (23,2%), υδροηλεκτρικούς σταθμούς (18,5%), μονάδες πετρελαίου (16,8%), και ΑΠΕ (0,9%). Η έλλειψη των ΑΠΕ από το δίκτυο και η ανάγκη για τη χρήση τους οδήγησε τελικά στην απελευθέρωση της αγοράς το Δεκέμβριο του 1999. Το γεγονός αυτό αύξησε την εγκατεστημένη ισχύ από ιδιώτες, για άλλα 9 GW, εκ των οποίων τα 2/3 είναι ΑΠΕ. Στον Πίνακα 1.1 φαίνονται όλα τα στοιχεία απόστασης του δικτύου μέχρι το 2013, όπως αυτά προκύπτουν από τη ΔΕΗ και τον ΑΔΜΗΕ<sup>14</sup> [1, 4, 6].

Πίνακας 1.1: Συνολικά χιλιόμετρα γραμμών μεταφοράς στην Ελλάδα [4, 6].

**ΓΡΑΜΜΕΣ      400 kV AC    400 kV DC    150 kV AC    66 kV AC    ΣΥΝΟΛΟ**  
**ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

<b>ΕΝΑΕΡΙΕΣ</b>	2647 km	107 km	8152 km	39 km	10.945 km
<b>ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ</b>	0,58 km	160 km	140 km	15 km	315 km
<b>ΥΠΟΓΕΙΕΣ</b>	30 km	-	101 km	-	131 km
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	2.677 km	267 km	8.393 km	54 km	11.392 km

### 1.3 Κεντρικός έλεγχος του δικτύου

Η ιστορική παράθεση όλων αυτών των στοιχείων έγινε για να βοηθήσει στην κατανόηση των προβλημάτων του ηλεκτρικού δικτύου. Από το 1882 με το πρώτο δίκτυο συνεχούς

<sup>13</sup> Το συγκεκριμένο ποσό σημειώνεται χωρίς να συνυπολογίζεται η εγκατεστημένη ισχύς σταθμών παραγωγής που ιδιωτικοποιήθηκαν, κατά τα έτη 2017-2018.

<sup>14</sup> ΑΔΜΗΕ: Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς της Ηλεκτρικής Ενέργειας.

ρεύματος μέχρι και σήμερα, όλα τα ηλεκτρικά δίκτυα αντιμετωπίζουν συχνά θέματα. Ο στόχος για μεγάλη ακτίνα ηλεκτροδότησης από έναν σταθμό παραγωγής, ενώ επετεύχθη, αύξησε τις απώλειες της παραγόμενης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Επίσης, η αποθήκευση ενέργειας δεν έγινε ποτέ εφικτή για μεγάλα ποσά για την αποφυγή των απωλειών.

Πότε κατάλαβαν οι μηχανικοί ότι ο συνεχής έλεγχος των ΣΗΕ είναι απαραίτητος; Στο πρώτο δίκτυο της Pearl Street της Νέας Υόρκης, το 1882, υπήρχε το βασικό πρόβλημα ισορροπίας παραγωγής και ζήτησης, καθώς το δίκτυο κατασκευάστηκε μόνο για φορτία λαμπτήρων, άρα την ημέρα δεν είχε καμία κατανάλωση. Η λύση ήρθε με τον κινητήρα το 1884, αλλά δεν αρκούσε. Ο λόγος, που ο έλεγχος του δικτύου κρίνεται αναγκαίος, είναι ότι σήμερα υπάρχει μεγάλος όγκος καταναλισκόμενης ισχύος. Για αυτό απαιτείται δομημένος έλεγχος των συστημάτων μεταφοράς, υπομεταφοράς και διανομής.

Δύο πράγματα, που μπορεί να σκεφτεί κανείς για τον έλεγχο των ΣΗΕ, είναι το ισοζύγιο παραγωγής - ζήτησης και το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, στα ΣΗΕ υπάρχει η μόνιμη και η μεταβατική λειτουργία. Η πρώτη αφορά την κανονική λειτουργία του συστήματος, ενώ η δεύτερη αφορά την περίπτωση που συμβεί μεγάλη διαταραχή, όπως είναι ένα σφάλμα. Στόχος του ελέγχου είναι οι συνθήκες του δικτύου να διατηρούνται ίδιες χωρίς να προκύπτουν πολλές αλλαγές, γιατί αλλιώς οποιαδήποτε ηλεκτρική μονάδα, (π.χ. γεννήτρια), απορρυθμίζεται. Μόνο με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζονται η επιθυμητή ποιότητα ισχύος και οι κατάλληλες προϋποθέσεις για να ρυθμίζεται το ισοζύγιο και η οικονομικότερη λειτουργία [2, 5].

### 1.3.1 Το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας

Απόρροια των παραπάνω ήταν να οριστεί ένα κέντρο, που να ελέγχει το δίκτυο συνολικά. Η βασική λειτουργία έπρεπε να επιτυγχάνεται χωρίς τη μεσολάβηση του κέντρου. Σε πρακτικό επίπεδο έπρεπε να βοηθάει το ΣΗΕ, ως προς την αξιοπιστία και την οικονομική λειτουργία του. Αυτό προκύπτει με τον βασικό ρόλο να δίνεται στους χειριστές-ελεγκτές του κάθε σταθμού παραγωγής και στη συνέχεια αυτοί να τροφοδοτούν συνεχώς τον κεντρικό έλεγχο. Αυτός ο έλεγχος δόθηκε στο ΚΕΕ<sup>15</sup>, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον πλήρη

---

<sup>15</sup> ΚΕΕ: Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας.

και τελευταίο έλεγχο που συμβαίνει στο δίκτυο. Ποιος είναι όμως ο πλήρης έλεγχος; Οι λειτουργίες αυτές συνοψίζονται ως εξής:

- α. Εισαγωγή και λήψη δεδομένων.
- β. Χειρισμός μονάδων, δηλαδή χειρισμός ή ρύθμιση κάθε συσκευής που βρίσκεται στο δίκτυο.
- γ. Χειρισμός σημάτων κινδύνου, όπου συνήθως υπάρχει διάγνωση της αιτίας σε τέτοιες καταστάσεις.
- δ. Εντολές συστήματος, όπου ο μηχανικός μπορεί να δώσει στο ΣΗΕ συγκεκριμένες εντολές, οι οποίες αποσκοπούν σε κάποια αλλαγή, (π.χ. για τη διατήρηση της συχνότητας σε ένα ζυγό).
- ε. Χειρισμός υποσταθμών, όπου ο χειριστής έρχεται σε συνεννόηση με το τοπικό κέντρο ελέγχου του υποσταθμού κ.ά.

Τα ψηφιακά μέρη του ΚΕΕ, που χειρίζεται ένας χειριστής για όλα τα παραπάνω, είναι:

- I. Η τερματική οθόνη, μέσα από την οποία ο χειριστής επιβλέπει όλο το δίκτυο και τα στοιχεία του.
- II. Τα πληκτρολόγια, που χρησιμοποιούνται για την οποιαδήποτε αλλαγή σε συνθήκες, ή ακόμη πιο ειδικά σε μία προσθήκη πυκνωτών σειράς.
- III. Οι γραφίδες φωτός, για πιο άμεση επαφή με την τερματική οθόνη.
- IV. Τα τηλέφωνα, ώστε να έχει επαφή ο χειριστής του ΚΕΕ με κάποιο τοπικό κέντρο ελέγχου ενός σταθμού.
- V. Οι διάφορες λυχνίες και οι ηχητικές ειδοποιήσεις, για να υπάρχει άμεση αφύπνιση όλων των μηχανικών σε περίπτωση που προκύψει έκτακτη ανάγκη.

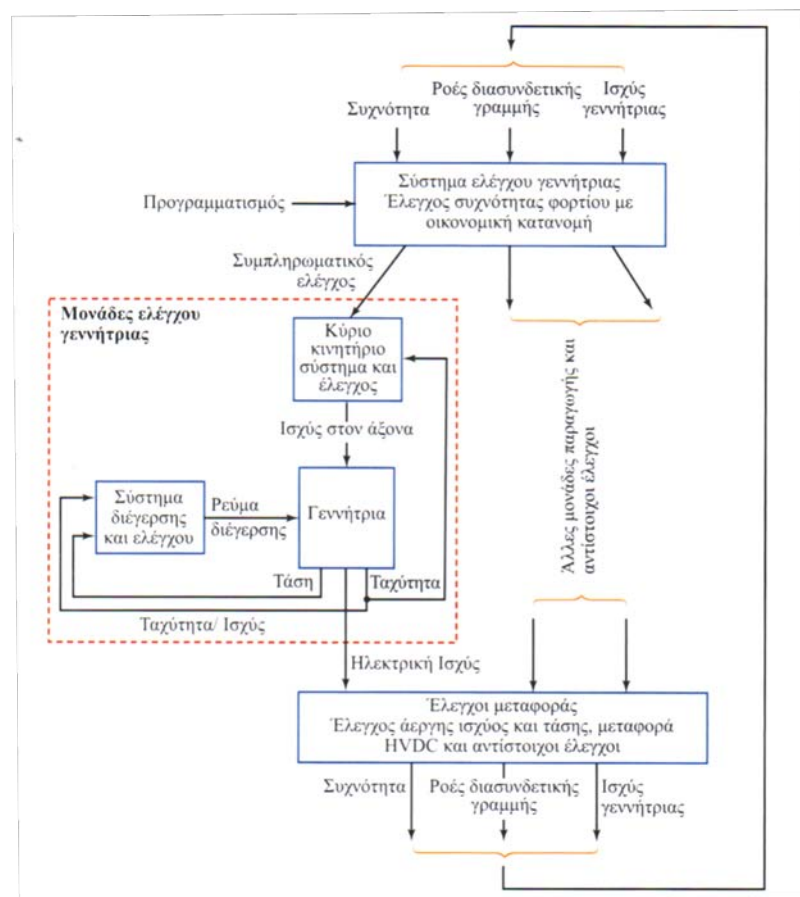
Στην περίπτωση έκτακτης ανάγκης τονίζεται ότι, εάν συμβεί κάποιο σφάλμα, η διακοπή πρέπει να γίνει άμεσα από τον τοπικό ελεγκτή, χωρίς οπωσδήποτε να χρειαστεί να εμπλακεί το ΚΕΕ [5].

### 1.3.2 Διαβάθμιση ελέγχου

Οι έλεγχοι ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δεν γίνονται ποτέ τυχαία. Υπάρχει συγκεκριμένη σειρά και συνεργασία των επιμέρους συστημάτων, που θα δοθούν εδώ, ώστε

να υπάρχει η βεβαιότητα ότι ο έλεγχος είναι ακριβής και έγκυρος για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου.

Ο πρώτος έλεγχος, λοιπόν, αφορά τη ρύθμιση της παραγωγής. Αρχικά, το επίπεδο της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου, ρυθμίζεται από τον προγραμματισμό που γίνεται για κάθε σταθμό παραγωγής. Έπειτα, οι έλεγχοι που απαρτίζουν το σύστημα της παραγωγής είναι δύο. Ο ένας γίνεται στο κινητήριο σύστημα της γεννήτριας και μέσω της πραγματικής ισχύος του άξονα, ρυθμίζεται η ταχύτητα της γεννήτριας. Ο άλλος είναι στο σύστημα διέγερσης, μέσα από το οποίο ρυθμίζονται η τάση και η άεργος ισχύς της γεννήτριας. Το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος του άξονα με την ηλεκτρική ισχύ εξόδου είναι αυτό που θα απασχολήσει πολύ περισσότερο παρακάτω. Όλα αυτά φαίνονται στο Σχήμα 1.2 στη διακεκομμένη διαγράμμιση της γεννήτριας.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα ελέγχου ΣΗΕ [2].

Ο δεύτερος έλεγχος αφορά τους ελέγχους μεταφοράς, που φαίνονται στο κάτω μέρος του σχήματος. Είναι μία μεγάλη σειρά ρυθμίσεων, που συμβαίνουν στις γραμμές μεταφοράς, ούτως ώστε να παραμένουν κοντά στις ονομαστικές τους τιμές οι βασικές μεταβλητές του



δικτύου, (όπως η άεργος ισχύς, η συχνότητα, η τάση, κ.λπ.). Κάποιες από τις πρακτικές ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Μετασχηματιστές με μεταγωγέα τάσης,
- Διατάξεις πηνίων,
- Αντισταθμιστές άεργης ισχύος,
- Σύγχρονοι πυκνωτές, κ.ά.

Στο εσωτερικό του ΚΕΕ υπάρχει ιεραρχία. Οι χειρισμοί συγκεντρώνονται σε ένα σύστημα υπολογιστών, το οποίο διαχωρίζεται σε κάποια βασικά μέρη. Αρχικά, τα δεδομένα που εισάγονται είναι ονομαστικά οι τάσεις των ζυγών, τα ρεύματα των γραμμών, η ροή ισχύος του ΣΗΕ, ο λόγος των μετασχηματιστών κ.λπ. Τα δεδομένα εισάγονται σε δύο μικροεπεξεργαστές ξεχωριστούς και αυτοί με τη σειρά τους ενημερώνουν συνεχώς δύο κεντρικούς Η/Υ. Οι μικροεπεξεργαστές του ΚΕΕ είναι γνωστοί με τον όρο SCADA<sup>16</sup>. Το SCADA είναι ανεξάρτητο των δύο υπολογιστών και της λειτουργίας του καθενός, αλλά είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των δεδομένων και την τροφοδότηση των υπολογιστών με τα κατάλληλα στοιχεία, ούτως ώστε να μην υπάρχει υπερφόρτωση του δικτύου του ΚΕΕ.

Η απάντηση στην ερώτηση γιατί χρειάζονται οι δύο διαφορετικές μονάδες Η/Υ, είναι απλή, αφού έτσι εξασφαλίζεται η εφεδρική υποστήριξη. Βέβαια, το γεγονός ότι ο ένας υπολογιστής είναι ο εφεδρικός του άλλου, δεν σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος παραμένει αδρανής, καθώς εκτελούνται διαφορετικές λειτουργίες στον καθένα ξεχωριστά. Ο πρώτος υπολογιστής είναι υπεύθυνος για το συνεχή έλεγχο του δικτύου και για την οικονομική λειτουργία του. Σε αυτόν τον υπολογιστή, οι λειτουργίες εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο. Ο δεύτερος υπολογιστής είναι υπεύθυνος για τον περιοδικό έλεγχο του δικτύου ώστε να ολοκληρώνονται μελέτες ροής φορτίου, να ρυθμίζονται οι συσκευές του και να υπάρχει ανταπόκριση σε τυχόν σφάλματα ή διαταραχές. Η υποστηρικτική λειτουργία του δεύτερου υπολογιστή θα αναλυθεί στα παρακάτω κεφάλαια, όπου θα επεξηγηθούν οι μελέτες σφαλμάτων και μεταβατικής ευστάθειας [2, 5].

---

<sup>16</sup> SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition ή στα ελληνικά «εποπτικός έλεγχος και συλλογή δεδομένων»

### 1.3.3 Το ελληνικό σύστημα ελέγχου

Το σύστημα ελέγχου ΣΕΕ<sup>17</sup> στην Ελλάδα διαχωρίζεται οργανωτικά στα διάφορα κέντρα ελέγχου ενέργειας. Όλα τα ΚΕΕ ανήκουν στον ΑΔΜΗΕ, ο οποίος μέχρι το 2017 ανήκε στην ΔΕΗ Α.Ε. και πλέον έχει αναλάβει εξ ολοκλήρου τον ρόλο του διαχειριστή του ελληνικού συστήματος μεταφοράς. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται ο χάρτης του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς, το οποίο καλύπτει σχεδόν όλη τη χώρα.



Σχήμα 1.3: Ο χάρτης του δικτύου μεταφοράς του ΑΔΜΗΕ [6].

<sup>17</sup> ΣΕΕ: Σύστημα Ελέγχου Ενέργειας.

Το βασικό κέντρο ελέγχου είναι το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας, ΕΚΕΕ, όπου βρίσκεται στο Κρυονέρι του νομού Αττικής. Αποτελεί το κεντρικό ΚΕΕ που συγκεντρώνει τον έλεγχο άλλων μικρότερων κέντρων, των περιφερειακών. Αξίζει να τονιστεί εδώ, ότι ο συνεχής διαχωρισμός του ελέγχου και η αποφυγή συνολικής συγκέντρωσής του σε ένα μεγάλο ΚΕΕ, βοηθάει στην επιδιωκόμενη αποσυμφόρηση.

Για τη συνέχεια της αποκέντρωσης, τα περιφερειακά ΚΕΕ είναι τρία:

- 1) Το ΝΠΚΕΕ, ανήκει και αυτό στο Κρυονέρι και αποτελεί το νότιο περιφερειακό κέντρο, που συγκεντρώνει τον έλεγχο στη νότια Ελλάδα.
- 2) Το ΒΠΚΕΕ, βρίσκεται στην Πτολεμαΐδα του νομού Κοζάνης και αποτελεί το βόρειο περιφερειακό κέντρο, που συγκεντρώνει τον έλεγχο στη βόρεια Ελλάδα.
- 3) Το ΠΚΕΕΘ, βρίσκεται στη Θεσσαλονίκη και αποτελεί το δεύτερο κέντρο ελέγχου στη βόρεια Ελλάδα.

Έτσι από γεωγραφική άποψη, ο ΑΔΜΗΕ μοιράζεται τον έλεγχο βόρεια και νότια, γεγονός που βοηθάει στην εποπτική διαχείριση, ακόμα και των πιο απομακρυσμένων γραμμών μεταφοράς από το ΕΚΕΕ. Πρακτικά, το βόρειο κέντρο ελέγχου μπορεί να γίνει διαχειριστής σε μία έκτακτη περίπτωση, εάν αυτή συμβεί στη δική του περιοχή ελέγχου [5, 6].

#### **1.4 Ανάγκη μελέτης της ευστάθειας**

Εφόσον επεξηγήθηκε ο έλεγχος, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη συνεχή και σωστή λειτουργία ενός ΣΗΕ, είναι ανάγκη σε αυτό το σημείο να παρατεθούν ορισμένα στοιχεία για τις μελέτες που πραγματοποιούνται στο σύγχρονο δίκτυο. Κάθε ηλεκτρολόγος μηχανικός οφείλει να εκπονήσει μία σειρά μελετών, ώστε να ρυθμίσει κατάλληλα το δίκτυο, προβλέποντας τις περισσότερες δυνατές καταστάσεις στις οποίες δύναται να βρεθεί. Τέτοιες μελέτες είναι:

1. Μελέτη ροής φορτίου,
2. Μελέτη βραχυκυκλωμάτων,
3. Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας,
4. Μελέτη προστασίας, κ.ά.

Αυτές οι μελέτες συμβαίνουν σε κάθε υποσταθμό μεταφοράς ή σταθμό παραγωγής του δικτύου, πριν αυτοί δοθούν σε λειτουργία. Στη συνέχεια υποβάλλονται σε συνεχείς

δοκιμασίες υπό διαφορετικές συνθήκες από τις ονομαστικές, έτσι ώστε να εξεταστεί όλος ο εξοπλισμός και αφού ολοκληρωθεί θετικά η διαδικασία, τότε παραδίδονται στη μόνιμη κατάσταση. Εκτός από αυτές τις μελέτες υπάρχει και εκείνη της βέλτιστης οικονομικής λειτουργίας, για να προσδιοριστεί το κόστος κάθε ηλεκτρικής μονάδας και το δίκτυο να λειτουργεί υπό τις οικονομικότερες συνθήκες. Βέβαια, αυτή η μελέτη δεν ανήκει στο ερευνητικό πεδίο της μεταβατικής ευστάθειας, οπότε δεν αναλύεται περαιτέρω [1].

Το αντικείμενο μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας έχει να κάνει περισσότερο με την ικανότητα διατήρησης των ονομαστικών τιμών του δικτύου, μετά από πρόκληση σοβαρής διαταραχής σε αυτό. Οπότε, όλες οι παραπάνω αριθμημένες μελέτες, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι αυτής της εργασίας. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της ανάγκης μελέτης της ευστάθειας και του πόσο διαφορετικά θα ήταν τα πράγματα σε βάθος χρόνου, εάν αυτή δεν γινόταν.

Κατ' αρχάς, ένα οποιοδήποτε δίκτυο αποτελεί ένα υποδίκτυο διασυνδεδεμένο με το υπόλοιπο ΣΗΕ. Αυτό επιτρέπει την ανταλλαγή ποσοτήτων ισχύος από ένα ζυγό σε έναν άλλο, απορρίπτοντας κάθε πιθανή αμεταβλητότητα των ποσοτήτων του υποδικτύου στο χρόνο. Εκτός από τη μεταφερόμενη ροή ισχύος που συμβαίνει σε ένα δίκτυο, υπάρχουν και σφάλματα τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, προκαλούν μία μεταβατική κατάσταση. Στη μεταβατική κατάσταση, το δίκτυο προσπαθεί να συνέλθει από το σφάλμα, ενώ επικρατούν μεγάλα ρεύματα και συνθήκες ανεπίτρεπτες για την αδιάκοπη λειτουργία του. Οπότε πρέπει να ανοίξουν οι κατάλληλοι διακόπτες σε μικρό χρόνο, πράγμα που εξετάζεται από τις μελέτες μεταβατικής ευστάθειας και προστασίας. Εάν δεν συμβεί αυτό, τότε το σφάλμα επεκτείνεται σε επόμενους ζυγούς και γραμμές με καταστροφική πορεία για όλη την έκταση του ΣΗΕ. Μία τέτοια συνέπεια καθιστά το δίκτυο επικίνδυνο και αναγκαστικά επηρεάζεται μέρος των καταναλωτών του, διότι η ποιότητα ισχύος που λαμβάνουν, έχει υποβαθμιστεί.

Σε κάθε δίκτυο συνήθως συμβαίνουν τα εξής φαινόμενα:

- Απώλεια φορτίου, χωρίς να υπάρχει κάποιο βραχυκύκλωμα.
- Μονοφασικό σφάλμα, το οποίο να μην έχει γρήγορη εκκαθάριση λόγω σφάλματος του διακόπτη.
- Μονοφασικό σφάλμα σε διακόπτη ισχύος, το οποίο να έχει γρήγορη εκκαθάριση.
- Τριφασικό σφάλμα, το οποίο να έχει έγκαιρη εκκαθάριση.

Τι θα μπορούσε να συμβεί όμως σε ένα δίκτυο εάν δεν υπάρχει μελέτη μεταβατικής ευστάθειας ή αλλιώς μελέτη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος;

- Όλα τα σφάλματα να μην εκκαθαριστούν έγκαιρα, (το μόνιμο τριφασικό σφάλμα είναι καταστροφικό).
- Ζημιά σε εξοπλισμό, ειδικά στις γραμμές και στις μονώσεις τους.
- Απώλεια της σύνδεσης με το δίκτυο ΥΤ της μεταφοράς, δηλαδή απώλεια του υποσταθμού.
- Μόνιμη απώλεια φορτίου ή μονάδων.
- Απώλεια σταθμού παραγωγής.

Για να κλείσει εδώ ο κύκλος αναφοράς στις μελέτες, όλα τα τελευταία δεν υπάγονται μόνο σε πρόβλημα ποιότητας ισχύος, αλλά συγχρόνως έχουν καταστροφικό οικονομικό κόστος και έτσι η μελέτη οικονομικής λειτουργίας αποκτά δευτερεύουσα σημασία, διότι τμήμα του δικτύου αποσυνδέεται αναγκαστικά. Είναι καταστάσεις από τις οποίες ζημιώνονται παραγωγός και καταναλωτές και, για να αποφευχθούν, απαιτούνται όλες οι παραπάνω μελέτες [2].

### **1.5 Η ανάγκη χρήσης του υπολογιστή στα σύγχρονα ΣΗΕ**

Η ανάγκη για τη χρήση του υπολογιστή στο δίκτυο ξεκίνησε από τη διαρκή άνοδο της ονομαστικής τάσης. Το 1923 στις ΗΠΑ παραδόθηκε σε λειτουργία η πρώτη γραμμή άνω των 220 kV, περίπου τετραπλάσια σε τιμή από την ονομαστική τάση του πρώτου δικτύου το 1882. Οι μελέτες, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, απαιτούν έναν σύνθετο μαθηματικό ορισμό. Επειδή η επίλυση των μελετών αποτελεί ένα μη γραμμικό μαθηματικό μοντέλο, με την προσθήκη ενός ζυγού μπορούν να προκύψουν πολλές διασυνδέσεις και το δίκτυο γίνεται ολοένα και πιο σύνθετο. Επομένως, η αύξηση της τάσης οδήγησε αφενός σε μοντέλα που δεν λύνονταν εύκολα και αφετέρου έκανε μεγαλύτερη την ανάγκη για έλεγχο, χωρίς όμως να υπάρχουν τα σημερινά ψηφιακά μέσα.

Η πρώτη συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αναλυτής ενέργειας δικτύου. Η χρήση του προέρχεται από την ανακάλυψη του διαφορικού αναλυτή το 1930 από τον Vannevar Bush. Σήμερα χρησιμοποιείται σε ψηφιακή μορφή και μπορεί να τοποθετηθεί σε πίνακες AC και DC. Στα πρώτα συστήματα, οι αναλυτές AC χρησιμοποιήθηκαν για τις μελέτες ροής φορτίου και μεταβατικής ευστάθειας. Όσον αφορά τις μελέτες βραχυκυκλωμάτων και

προστασίας, έγινε χρήση των αναλυτών DC. Η πρώτη φορά που εμφανίστηκε αναλογικός υπολογιστής στα ΣΗΕ ήταν το 1947, ο οποίος κατασκευάστηκε από τον John Mauchly στο Πανεπιστήμιο της Πενσιλβάνια των ΗΠΑ. Ο πρώτος υπολογιστής ονομαζόταν ENIAC.

Σήμερα, όλα τα συστήματα που χρησιμοποιούνται, δεν έχουν καμία σχέση με τα πρώτα, τα οποία είχαν διαφορετικό αναλυτή και αναλογικό υπολογιστή. Η τεχνολογική εξέλιξη οδήγησε στην ψηφιοποίηση του δικτύου. Ο υπολογιστής στα ΣΗΕ έχει πλέον δύο χρήσεις. Η μία είναι πραγματικού χρόνου και συναντάται στα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Τροφοδοτείται συνεχώς με πληροφορία από κάθε σταθμό παραγωγής ή υποσταθμό μεταφοράς του δικτύου, ώστε να έχει τον πλήρη εποπτικό έλεγχο σε μία οθόνη ο μηχανικός που τον χειρίζεται. Ο δεύτερος τρόπος χρήσης είναι αυτός που σε περιοδικό χρόνο εκτελεί τις παραπάνω μελέτες.

Στη συγκεκριμένη εργασία, οι μελέτες που θα αναλυθούν είναι αυτές της ροής φορτίου, των βραχυκυκλωμάτων, της μεταβατικής ευστάθειας και της προστασίας. Αφού επεξηγηθούν θεωρητικά και οριστούν με μαθηματικό μοντέλο, θα γίνει κατανοητό ότι στο σύγχρονο δίκτυο δεν είναι απλό να λυθεί ένα τόσο μεγάλο σύστημα. Οπότε, η χρήση του υπολογιστή γίνεται για την:

1. Ακριβή επίλυση των μελετών.
2. Περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων της κάθε μελέτης.

Τα προγράμματα, που θα χρησιμοποιηθούν, είναι το PowerWorld Simulation για τις μελέτες ροής φορτίου, σφαλμάτων και ευστάθειας, και το PSS@CAPE της Siemens για τη μελέτη προστασίας. Και στα δύο προγράμματα το δίκτυο είναι αυτό των 9 ζυγών της IEEE. Στα Κεφάλαια 6 και 7, γίνεται εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων των μελετών, ενώ προηγείται το θεωρητικό πλαίσιο στα Κεφάλαια 2, 3, 4 και 5 [1, 3].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

#### 2.1 Γενική ιδέα

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε μελέτη απαιτεί ορισμό του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιεί και τρόπο επίλυσής του. Στο πρόβλημα της ροής φορτίου μπορούν να προκύψουν πολλές διαφορετικές λύσεις. Ο χειριστής - μηχανικός είναι αυτός που καταλήγει σε πολύ συγκεκριμένες λύσεις, οι οποίες υποχρεούνται να τηρούν τους κανόνες που θα δοθούν παρακάτω. Σε μία απλή περιγραφή του προβλήματος, ο μηχανικός περιορίζεται μαθηματικά ανάλογα με την επιθυμητή πραγματική παραγόμενη ισχύ και την επιθυμητή τάση στους ζυγούς. Μάλιστα, τα προβλήματα στη μόνιμη κατάσταση, αφορούν και την αυστηρή σύγκλιση όλων των μεταβλητών, στις ονομαστικές τους τιμές. Μεγάλες αποκλίσεις είναι ανεπίτρεπτες και το δίκτυο πρέπει να επιστρέφει στην κατάσταση που ορίστηκε. Τέλος, αναφέρθηκε και πριν ότι κοντινή μελέτη σε αυτή της ροής φορτίου, είναι αυτή της οικονομικής λειτουργίας των ΣΗΕ. Έτσι, η λύση δύναται να περιοριστεί ακόμα περισσότερο, καθώς αναζητείται η βέλτιστη, στην οποία το δίκτυο λειτουργεί υπό το μικρότερο κόστος.

Αρχικά, για τον ορισμό του μαθηματικού μοντέλου στην ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται η μέθοδος κόμβων με ελάχιστες διαφοροποιήσεις. Δεδομένα αποτελούν όλα τα στοιχεία του κυκλώματος, (φορτία, γεννήτριες, κινητήρες κ.λπ.) εκφρασμένα σε μιγαδικές ποσότητες και ζητούμενη είναι η τάση σε κάθε ζυγό, με βάση την οποία δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των ρευμάτων, των απωλειών, των ροών ισχύος και άλλων ποσοτήτων. Βέβαια, όλες οι ποσότητες οφείλουν να συμβαδίζουν με τους νόμους του Kirchhoff ως εξής:

- ~ 1<sup>ος</sup> νόμος Kirchhoff ή νόμος εντάσεων: η ένταση των ρευμάτων που εισέρχονται σε ένα κόμβο του κυκλώματος πρέπει να είναι ίση με την ένταση των ρευμάτων που εξέρχονται από αυτόν. Με αυτόν τον νόμο αποφεύγονται οι υπερεντάσεις.
- ~ 2<sup>ος</sup> νόμος Kirchhoff ή νόμος τάσεων: η συνολική αθροιστική τάση κατά μήκος ενός κλειστού βρόγχου του κυκλώματος πρέπει να ισούται με μηδέν. Με αυτόν τον νόμο αποφεύγονται οι υπερτάσεις.

Η επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων δύναται να γίνει με τη χρήση των επαναληπτικών μεθόδων, δηλαδή με Gauss-Seidel ή με Newton-Raphson [1, 7]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέγεται να γίνει επίλυση μόνο με τη μέθοδο Gauss-Seidel, καθώς ο στόχος της ενότητας αυτής ικανοποιείται πλήρως με την επεξήγηση μίας εκ των δύο μεθόδων, καθότι αποτελεί μέρος της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας.

## 2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου

Κατ' αρχάς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο στάδιο της μελέτης ροής φορτίου, ανήκει στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση. Για κάθε ζυγό ισχύει ότι η ισχύς της παραγωγής ισούται με το άθροισμα της ισχύος του φορτίου του ζυγού και της ισχύος που απομακρύνεται από το ζυγό μέσω γραμμών μεταφοράς. Δηλαδή για έναν ζυγό  $i$  η ισχύς που παράγεται,  $S_{G_i}$  ισούται με την ισχύ που καταναλώνεται άμεσα στο ζυγό αυτό,  $S_{D_i}$  και την ισχύ που απομακρύνεται από αυτόν μέσω των γραμμών μεταφοράς,  $S_{T_i}$ . Συγκεκριμένα:

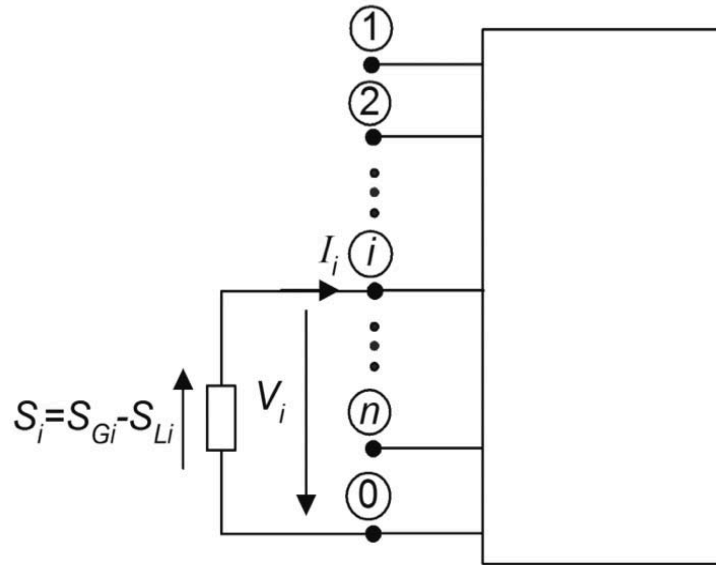
$$S_{G_i} = S_{D_i} + S_{T_i} \quad (2.1)$$

Από αυτές τις τρεις ισχύς που αναγράφονται στη σχέση (2.1), οι ισχύες της παραγωγής και του φορτίου είναι γνωστές για κάθε ζυγό, αλλά αυτή που ζητείται να προσδιοριστεί είναι η ισχύς που μεταφέρεται από το ζυγό αυτό, δηλαδή η  $S_{T_i}$ . Επιπλέον, η καθαρή ισχύς είναι η διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, δηλαδή ως εξής:

$$S_i = S_{G_i} - S_{D_i} \quad (2.2)$$

Για την πλήρη κατανόηση του περιεχομένου της συγκεκριμένης υποενότητας δίνεται το Σχήμα 2.1, που δείχνει τον καθένα ζυγό  $i$  σε σύνδεση με το δίκτυο.





Σχήμα 2.1: Εξίσωση ισχύος ζυγού  $i$  σε σύστημα  $n$  ζυγών [7].

Επίσης, φαίνεται η αναγραφόμενη εξίσωση πάνω σε μία σύνθετη αντίσταση για έναν οποιοδήποτε ζυγό  $i$  σε ένα δίκτυο  $n$  ζυγών. Κάθε αριθμημένος ακροδέκτης δηλώνει ένα συγκεκριμένο ζυγό από το δίκτυο αυτό. Χαρακτηριστικό είναι το ρεύμα, που εισέρχεται στο ζυγό  $i$ , το οποίο επιβεβαιώνει και την χαρακτηριστική εξίσωση  $S_i = V_i I_i^*$ . Το γεγονός ότι η αντίσταση “εισάγεται” στην αναπαράσταση του δικτύου, υποδηλώνει ότι το ρεύμα της κάθε αντίστασης είναι αυτό που εισέρχεται στον κάθε ζυγό. Επομένως, προκύπτει η εξής εξίσωση πινάκων:

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (2.3)$$

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων  $Y_{BUS}$  προέρχεται από την αντιστροφή του πίνακα αντιστάσεων  $Z_{BUS}$ .

Πρώτον, η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της αντίστασης, δηλαδή  $Y = \frac{1}{Z}$  ανεξαρτήτως του πίνακα. Ο  $Y_{BUS}$ , λοιπόν, στη διαγώνιο του, δηλαδή στα στοιχεία  $Y_{ii}$ , έχει το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που εφάπτονται σε κάθε ζυγό  $i$ . Σε κάθε άλλη θέση του πίνακα  $Y_{ij}$ , έχει την αρνητική αγωγιμότητα μεταξύ ζυγού  $i$  και  $j$ , δηλαδή το  $-\frac{1}{Z_{ij}}$ . Συνοπτικά, μία μορφή του πίνακα αγωγιμοτήτων είναι η εξής για κάθε ζυγό  $i$  σε σύνδεση με το ζυγό  $j$ :

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{Z_{ii}} + \frac{1}{Z_{ij}}\right) & \cdots & -\frac{1}{Z_{ij}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{Z_{ij}} & \cdots & \left(\frac{1}{Z_{ii}} + \frac{1}{Z_{ij}}\right) \end{bmatrix}$$

Άρα, το ζυγό  $i$  τον καθορίζει η συγκεκριμένη εξίσωση:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.4)$$

Συνεπώς, με αντικατάσταση του ρεύματος, χρησιμοποιώντας την εξίσωση  $S_{T_i} = V_i I_i^*$ , προκύπτει η (2.5):

$$S_{T_i} = V_i \left( \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right)^* \quad (2.5)$$

Μέσω όμως της (2.2), η (2.5) καταλήγει στη συγκεκριμένη μορφή:

$$\begin{aligned} S_{G_i} - S_{D_i} &= P_{G_i} + jQ_{G_i} - P_{D_i} - jQ_{D_i} = (P_{G_i} - P_{D_i}) + j(Q_{G_i} - Q_{D_i}) = \\ &= P_i - jQ_i = V_i \left( \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right)^* \end{aligned} \quad (2.6)$$

Από εδώ και στο εξής οι τάσεις και οι αγωγιμότητες θα εκφράζονται σε πολική μορφή, ώστε να επακολουθήσουν οι ολοκληρωμένες εξισώσεις ροής φορτίου. Κάθε ποσότητα του συστήματος θεωρείται στην πολική μορφή ότι έχει μέτρο και φάση. Δηλαδή, η τάση για ένα ζυγό  $i$  θα θεωρείται η  $V_i \angle \delta_i$  και η αγωγιμότητα μεταξύ ζυγών  $i$  και  $j$ , η  $Y_{ij} \angle \gamma_{ij}$ . Βάσει αυτών των εκφράσεων, προκύπτουν στην τελική τους μορφή τα παρακάτω αθροίσματα, τα οποία αποτελούν εκτός από τις εξισώσεις ροής φορτίου, και το ισοζύγιο πραγματικής και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό στο σύστημα.

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) \quad (2.7.a)$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) \quad (2.7.β)$$

Για να εκφραστεί ολοκληρωμένα το ισοζύγιο πραγματικής και αέργου ισχύος για το σύνολο του δικτύου γίνεται χρήση των σχέσεων  $P_{G_i} = P_{D_i} - P_i$  και  $Q_{G_i} = Q_{D_i} - Q_i$ . Έτσι, ακολουθούν οι εξισώσεις (2.8.a) για το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος και (2.8.β) για το ισοζύγιο αέργου ισχύος.

$$\sum_{i=1}^n P_{G_i} = \sum_{i=1}^n P_{D_i} + \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) \right] \quad (2.8.a)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{Gi} = \sum_{i=1}^n Q_{Di} + \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) \right] \quad (2.8.\beta)$$

Παρατηρήσεις πάνω στη ροή φορτίου [7]:

- ◇ Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές. Είναι ημιτονοειδείς.
- ◇ Κάθε ζυγός δίνει μία μιγαδική ή δύο πραγματικές εξισώσεις.
- ◇ Συνοψίζοντας, λοιπόν, είναι έξι οι μεταβλητές ανά ζυγό και συγκεκριμένα αυτές είναι:  $P_{Gi}$ ,  $P_{Di}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $Q_{Di}$ ,  $|V_i|$  και  $\delta_i$ .
- ◇ Σε ένα δίκτυο  $n$  ζυγών, υπάρχουν  $6n$  μεταβλητές ανά ζυγό, οπότε για την επίλυσή τους απαιτείται αναγκαστικά ο προκαθορισμός των  $4n$  εξισώσεων (2.7.α), (2.7.β).
- ◇ Στις εξισώσεις ροής φορτίου οι γωνίες  $\delta_i$ ,  $\delta_j$ , εμφανίζονται ως η διαφορά  $\delta_i - \delta_j$  ή  $\delta_j - \delta_i$ .

### 2.3 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών και ζυγών ροής φορτίου

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της παραπάνω παραγράφου, δίνεται η δυνατότητα να διαχωριστούν οι μεταβλητές και οι ζυγοί που συναντώνται στο πρόβλημα της ροής φορτίου. Αυτό το βήμα κρίνεται απαραίτητο για τη συνέχεια, καθώς διαχωρίζονται καλύτερα τα δεδομένα και τα ζητούμενα όλων των τμημάτων του δικτύου.

#### 2.3.1 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών

Υπάρχουν τρία είδη μεταβλητών στην ανάλυση ροής φορτίου και αναλυτικότερα [7]:

1. Οι μη ελέγξιμες μεταβλητές ή οι μεταβλητές διαταραχής: η πραγματική και η άεργη κατανάλωση  $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ .
2. Οι ελέγξιμες μεταβλητές: η πραγματική και η άεργη παραγωγή  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ .
3. Οι μεταβλητές κατάστασης: οι τάσεις  $|V_i|$  μαζί με τις γωνίες  $\delta_i$ .

Οι μεταβλητές διαταραχής είναι εντελώς ακαθόριστες, και ο μηχανικός πρέπει να υπολογίζει το μέγεθός τους μέσα από μία πρόβλεψη φορτίου ή μετρήσεις. Οι ελέγξιμες μεταβλητές προσδιορίζονται πριν ή μέσα στο πρόβλημα, όπως φάνηκε στις εξισώσεις (2.8.α) και (2.8.β). Αντίθετα, οι μεταβλητές κατάστασης είναι αυτές που η τιμή τους πρακτικά καθορίζεται μέσα από τις ελέγξιμες μεταβλητές.

### 2.3.2 Κατηγοριοποίηση ζυγών

Στον Πίνακα 2.1 διαχωρίζονται οι ζυγοί του ΣΗΕ στη ροή φορτίου. Προσδιορίζονται πλέον οι  $4n$  προκαθορισμένες μεταβλητές του συστήματος, ανάλογα με το είδος του ζυγού. Έτσι, προκύπτουν κάθε φορά οι 2 μεταβλητές που τίθενται προς υπολογισμό μέσα στο πρόβλημα.

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες ζυγών του προβλήματος της ροής φορτίου [7].

<b>ΕΙΔΟΣ ΖΥΓΟΥ</b>	<b><math>4n</math> ΠΡΟΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ</b>	<b><math>2n</math> ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΡΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ</b>
<b>ΖΥΓΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ</b>	$P_{Gi}=0, Q_{Gi}=0, P_{Di}, Q_{Di}$	$ V_i , \delta_i$
<b>ΖΥΓΟΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ</b>	$P_{Gi}, P_{Di}, Q_{Di},  V_i $	$Q_{Gi}, \delta_i$
<b>ΖΥΓΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ<sup>18</sup></b>	$P_{Di}, Q_{Di},  V_i =1\text{p.u.}$ $\delta_i=0$	$P_{Gi}, Q_{Gi}$

### 2.4 Περιορισμοί στο πρόβλημα της ροής φορτίου

Βάσει της λύσης που προκύπτει για ένα σύστημα, εάν οι μεταβλητές προς υπολογισμό τηρούν τις προδιαγραφές, τότε η λύση αντιπροσωπεύει τη μόνιμη λειτουργία του ΣΗΕ. Εάν όχι, η λύση πρέπει να επαναπροσδιοριστεί με γνώμονα συγκεκριμένους περιορισμούς, οι οποίοι είναι οι εξής [7]:

---

<sup>18</sup> Ζυγός αναφοράς (Slack Bus): Είναι ένας στο δίκτυο. Είναι ζυγός παραγωγής και για να διευκολυνθεί ο μηχανικός στους υπολογισμούς, επιλέγεται ως ζυγός αναφοράς, αυτός με τη μεγαλύτερη πραγματική παραγωγή ισχύος. Ο ζυγός αναφοράς συνήθως αριθμείται ως πρώτος, με  $|V_1|, \delta_1$ , διότι έτσι θεωρείται η «αρχή» του δικτύου.

- i. *Περιορισμοί Παραγωγής:*  $P_{Gi,\min} < P_{Gi} < P_{Gi,\max}$  και  $Q_{Gi,\min} < Q_{Gi} < Q_{Gi,\max}$ , για κάθε ζυγό  $i$ . Ζυγοί που δεν έχουν παραγωγή πραγματικής και αέργου ισχύος, θεωρούνται ζυγοί φορτίου, δηλαδή  $P_{Gi}=0$ ,  $Q_{Gi}=0$ .
- ii. *Περιορισμοί Τάσης:*  $|V_i|_{\min} < |V_i| < |V_i|_{\max}$ , για κάθε ζυγό  $i$ . Αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές είναι επιτρεπτές σε μικρό ποσοστό, της τάξεως του 5 με 10%.
- iii. *Περιορισμοί Γωνιών:*  $|\delta_i - \delta_j| < (\delta_i - \delta_j)_{\max}$ . Η ανισότητα αυτή αποτελεί έναν περιορισμό της μέγιστης γωνίας ισχύος, που μπορεί να μεταφερθεί μέσω των γραμμών μεταφοράς, που συνδέουν του ζυγούς  $i$  και  $j$ .

## 2.5 Λύση των εξισώσεων ροής φορτίου με Gauss-Seidel

Αφού οι εξισώσεις μαζί με τον πίνακα αγωγιμοτήτων δόθηκαν παραπάνω και το μαθηματικό μοντέλο ορίστηκε, ακολουθεί η διαδικασία λύσης των εξισώσεων για την εύρεση της βέλτιστης εξ αυτών. Επειδή οι εξισώσεις είναι ημιτονοειδείς και όχι γραμμικές, η λύση δεν μπορεί να βρεθεί με ακρίβεια. Ωστόσο, η βέλτιστη θα πλησιάζει την ακριβή λύση μέσω των μεθόδων της επαναληπτικής αντικατάστασης. Ένα παράδειγμα μεθόδου επαναληπτικής αντικατάστασης είναι ο αλγόριθμος Gauss-Seidel. Αποτελεί μία μέθοδο, που μπορεί να εξηγηθεί με βάσει μία οποιαδήποτε εξίσωση αναφοράς  $f(x)=0$ . Πριν εφαρμοστεί το πρώτο βήμα, πρέπει η εξίσωση να έρθει στη μορφή  $x=F(x)$ , η οποία είναι ένας εναλλακτικός τρόπος διατύπωσης της  $f(x)=0$ . Το επόμενο βήμα μετά το  $v$ , είναι το  $v+1$  και γράφεται ως  $x^{v+1} = F(x^v)$ .

Η μέθοδος, στην περίπτωση αυτή, πρέπει να εφαρμοστεί για ένα σύστημα  $n$  εξισώσεων, αφού στόχος είναι η συνολική περιγραφή του δικτύου. Έτσι, λοιπόν, για τις εξισώσεις αυτές ισχύει:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

...

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Το σύστημα μετατρέπεται στη συγκεκριμένη μορφή:

$$x_1 = F_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

...

$$x_n = F_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Για καλύτερο και γρηγορότερο αποτέλεσμα για το  $x^{v+1} = F(x^v)$ , επιλέγεται τέτοια διαμόρφωση ώστε η  $x_i$  μεταβλητή στο  $v+1$  βήμα μέχρι και την  $i-1$  επανάληψη, να χρησιμοποιεί το  $v+1$  υπολογισμό. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} x_1^{v+1} &= F_1(x_1^v, \dots, x_1^v, \dots, x_n^v) \\ &\dots \\ x_i^{v+1} &= F_i(x_1^{v+1}, \dots, x_{i-1}^{v+1}, x_i^v, \dots, x_n^v) \\ &\dots \\ x_n^{v+1} &= F_n(x_1^{v+1}, \dots, x_{i-1}^{v+1}, x_i^{v+1}, \dots, x_{n-1}^{v+1}, x_n^v) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Η διαδικασία διακόπτεται μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων όταν, μεταξύ δύο διαδοχικών, η απόκλιση των μεταβλητών τους είναι μικρότερη από την ανοχή  $\epsilon$ . Οπότε, η ανισότητα που εκφράζει τη συνθήκη τερματισμού της μεθόδου είναι η εξής:

$$|x_i^{v+1} - x_i^v| < \epsilon, \text{ όπου } i = \{1, \dots, n\}$$

Το πρόβλημα του Gauss-Seidel θα επεξηγηθεί τώρα για τη μελέτη ροής φορτίου. Πριν γίνει η οποιαδήποτε επίλυση, χρειάζονται όλα τα δεδομένα των γραμμών και τα φορτία των ζυγών, για να δημιουργηθεί ο πίνακας  $Y_{BUS}$ . Επιπροσθέτως, ο ζυγός αναφοράς με βάση τον Πίνακα 2.1, λαμβάνεται ως  $V_1 \angle \delta_1 = 1 \angle 0^\circ$ . Αρχικά θα γίνει η ανάλυση για τους ζυγούς φορτίου. Θα θεωρείται δεδομένη η ισχύς κατανάλωσης  $S_{Di}$  και θα υπολογίζεται η τάση  $V_i$ . Χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.6) για να γίνει το βήμα αυτό και προκύπτει η εξής εξίσωση για τους  $n-1$  ζυγούς, εκτός από τον ζυγό αναφοράς:

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

Όπως έγινε αντιληπτό, όλα τα αποτελέσματα αναλύονται στη μορφή  $x^{v+1} = F(x^v)$ , επομένως εκφράζοντας την αμέσως προηγούμενη σχέση, ως προς τη ζητούμενη τάση, η εξίσωση (2.10) γράφεται ως:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \right] \quad (2.10)$$

Σύμφωνα με τη (2.9), για τους ζυγούς φορτίου ο Gauss-Seidel καταλήγει σε αυτή τη μορφή:

$$V_i^{v+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(v)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{v+1} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^v \right] \quad (2.11)$$

Η διαδικασία διακόπτεται για τη (2.11) όταν η διαφορά δύο διαδοχικών βημάτων είναι μικρότερη από το προκαθορισμένο σφάλμα  $\varepsilon$ . Συγκεκριμένα:

$$|V_i^{v+1} - V_i^v| < \varepsilon, \text{ όπου } i = \{1, \dots, n\} \text{ και } \varepsilon \cong 10^{-4} \text{ p.u.}$$

Για τους ζυγούς με ελεγχόμενη τάση θεωρούνται δεδομένες η ενεργός ισχύς  $P$ , η άεργος καταναλισκόμενη ισχύς  $Q_D$  και το μέτρο της τάσης  $|V_i|$ . Ζητούνται η παραγόμενη άεργος ισχύς  $Q_{Gi}$  και το όρισμα του καθενός  $\delta_i$ . Η τάση του κάθε ζυγού  $i$  με ελεγχόμενη τάση είναι δεδομένη, οπότε μένει σταθερή. Επίσης, πάντα τηρείται η εξίσωση (2.9) στον αλγόριθμο αυτό και έτσι προκύπτει:

$$Q_i^{v+1} = -|V_i|_0 \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{i-1} [ |V_j|^{v+1} |Y_{ij}| \sin(\delta_j^{v+1} - \delta_i^v + \gamma_{ij}) ] + \\ \sum_{j=i}^n [ |V_j|^v |Y_{ij}| \sin(\delta_j^v - \delta_i^v + \gamma_{ij}) ] \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

Η εξίσωση (2.12) προσδιορίζει μία τιμή της αέργου ισχύος στη  $v+1$  επανάληψη, με προκαθορισμένο το μέτρο τάσης του ζυγού  $i$ ,  $|V_i|_0$ . Για να θεωρηθεί αποδεκτή η λύση, χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί παραγωγής, όπως αυτοί αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.4. Δηλαδή, πρέπει  $Q_{Gi, \min} < Q_i^{v+1} < Q_{i, \max}$ . Σε κάθε άλλη περίπτωση, αποκλείεται η  $|V_i|_0$  να εκφράζει την τάση του ζυγού  $i$  και με γνωστή την  $Q_i^{v+1}$ , ο  $i$  θεωρείται ζυγός φορτίου. Συνεπώς, το επόμενο βήμα θα είναι να υπολογιστεί εκ νέου η τάση του ζυγού από την εξίσωση (2.11), συνεχίζοντας μέχρι την τελική λύση που θα σέβεται τόσο το συγκεκριμένο κανόνα όσο και τον περιορισμό της (2.11) [7].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Είδη σφαλμάτων

Με βάση τη μελέτη ροής φορτίου, προκύπτει η βέλτιστη λειτουργία του κυκλώματος ενός ΣΗΕ. Ωστόσο, σε ένα δίκτυο θεωρείται εύκολο να προκύψει σφάλμα, είτε από φυσικά αίτια, (π.χ. πτώση κεραυνού), είτε από ανθρώπινα λάθη, (π.χ. σφάλματα χειρισμών). Όλων των ειδών τα σφάλματα, ανεξαρτήτως της αιτίας από την οποία προκλήθηκαν, ανήκουν στα μεταβατικά φαινόμενα. Δηλαδή, ένα βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς προκαλεί μία σειρά καταστροφικών συμβάντων για το δίκτυο. Τέτοια συμβάντα είναι η πιθανή αλλαγή της αρχικής συχνότητας του δικτύου, η υπέρταση στη γραμμή (ίσως και παραπέρα), η υπερένταση στα κοντινότερα «σημεία» του δικτύου ως προς τη γραμμή του βραχυκυκλώματος κ.ά.

Αρχικά, το μεγαλύτερο ποσοστό των βραχυκυκλωμάτων, που σημειώνονται σε ένα οποιοδήποτε ηλεκτρικό δίκτυο, συναντάται στα «αδύναμα» σημεία των γραμμών. Αυτά τα σημεία χαρακτηρίζονται από την έντονη καταπόνηση των ηλεκτρικών μονώσεων ανάμεσα σε δύο τμήματα, τα οποία λειτουργούν ονομαστικά υπό διαφορετική τάση. Τι προκαλείται, όμως, από τη διάσπαση της μόνωσης και ως συνέπεια από τα βραχυκυκλώματα σε αυτά τα σημεία; Άμεση εμφάνιση είναι η «βύθιση» των τάσεων όλων των διασυνδεδεμένων ζυγών με το τμήμα του σφάλματος. Αυτό με τη σειρά του, οδηγεί σε μία απότομη μείωση της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος των ζυγών αυτών και επομένως την ανικανότητα στο να καλυφθούν οι ανάγκες των διασυνδεδεμένων φορτίων, αφού «παγώνει» η μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από την παραγωγή στην κατανάλωση [8]. Από εκεί και πέρα, ο τρόπος με τον οποίο «σβήνουν» αυτές οι ανισοροπίες του δικτύου, θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, το οποίο αφορά τη μεταβατική κατάσταση μετά από τέτοιου είδους διαταραχές.

Μετά από αυτή την σύντομη επεξήγηση των γεγονότων που συνοδεύουν τα σφάλματα στα σύγχρονα ΣΗΕ, είναι εύκολο να γίνει ο διαχωρισμός τους για την διευκόλυνση του μηχανικού στην εν λόγω μελέτη. Τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [7]:

- *Στερεό συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα.* Ο χαρακτηρισμός του συμμετρικού τριφασικού οφείλεται στις ίσες αντιστάσεις  $Z_f$  μεταξύ των τριών φάσεων ως προς τη γη. Ο χαρακτηρισμός του στερεού οφείλεται στο γεγονός ότι  $Z_f = 0$ .



- ο Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη. Οι δύο φάσεις (υποθέτουμε οι b και c), συμμετέχουν στο σφάλμα. Χάριν ευκολίας, θα γίνεται χρήση του όρου DLG<sup>19</sup> για το διφασικό ως προς τη γη.
- ο Διφασικό βραχυκύκλωμα. Υποθέτουμε ότι συμμετέχουν μόνο οι b και c φάσεις του δικτύου. Χρησιμοποιείται ο όρος LL<sup>20</sup> για το απλό διφασικό.
- ο Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη. Σε αυτή την περίπτωση, συμμετέχει μόνο μία φάση στο σφάλμα (υποθέτουμε η a). Χάριν ευκολίας, χρησιμοποιείται ο όρος SLG<sup>21</sup> για αυτό το σφάλμα.

Από αυτά τα σφάλματα, μόνο η πρώτη κατηγορία θεωρείται συμμετρικό βραχυκύκλωμα. Τα άλλα τρία είδη βραχυκυκλωμάτων θεωρούνται ασύμμετρα. Πρώτα, λοιπόν, θα παρουσιαστεί το συμμετρικό βραχυκύκλωμα, καθώς οι υπολογισμοί είναι πιο απλοί, και στη συνέχεια θα αναλυθούν τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα.

### 3.2 Στερεό συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα

Όπως προαναφέρθηκε, το συμμετρικό βραχυκύκλωμα μπορεί να αφορά μόνο τα σφάλματα των οποίων οι αντιστάσεις, μεταξύ των τριών φάσεων προς τη γη, είναι ίσες. Αυτό προφανώς δηλώνει αυτόματα ότι γίνεται λόγος για τριφασικό βραχυκύκλωμα. Άρα, οι όροι «συμμετρικό» και «τριφασικό» μπορούν να ανήκουν μόνο στην πρώτη κατηγορία από τα παραπάνω είδη σφαλμάτων.

#### 3.2.1 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα – SCC

Ως άμεση εμφάνιση γεγονότος κατά το οποιοδήποτε βραχυκύκλωμα, ορίστηκε η πτώση της ονομαστικής τάσης των ζυγών που διασυνδέονται με το σημείο του σφάλματος. Η «βύθιση» αυτή καθορίζεται από έναν παράγοντα που ονομάζεται αντοχή σε βραχυκύκλωμα ή για λόγους συντομίας SCC<sup>22</sup>. Η SCC αντοχή εκφράζει το πόσο αντέχει το δίκτυο να χάσει την

---

<sup>19</sup> DLG: διεθνής όρος για το διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη από τα αρχικά **D**ouble **L**ine-to-**G**round.

<sup>20</sup> LL: διεθνής όρος για το απλό διφασικό βραχυκύκλωμα από τα αρχικά **L**ine-to-**L**ine.

<sup>21</sup> SLG: διεθνής όρος για το μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη από τα αρχικά **S**ingle **L**ine-to-**G**round.

<sup>22</sup> SCC: **S**hort **C**ircuit **C**apacity δηλαδή αντοχή σε βραχυκύκλωμα.

ονομαστική του τάση, συνεπώς το πόσο «ισχυρό» είναι το βραχυκύκλωμα. Ορίζεται, λοιπόν, σε ένα ζυγό ως SCC το μέτρο του γινομένου της προσφασματικής τάσης  $V_{PRE-FAULT}$  πολλαπλασιασμένης με το μετασφασματικό ρεύμα  $I_{AFTER-FAULT}$ . Δηλαδή:

$$SCC = |V_{PRE-FAULT}| |I_{AFTER-FAULT}| puMVA \quad (3.1)$$

Με μία θεωρητική ματιά, συνήθως ισχύει ότι  $|V_{PRE-FAULT}|=1 pu$ . Οπότε, προσεγγιστικά λαμβάνεται ότι ισχύει:

$$SCC = |I_{AFTER-FAULT}| puMVA \quad (3.2)$$

Η εξίσωση (3.2) είναι αυτή που εκφράζει το πραγματικό μέτρο της αντοχής στο βραχυκύκλωμα [7].

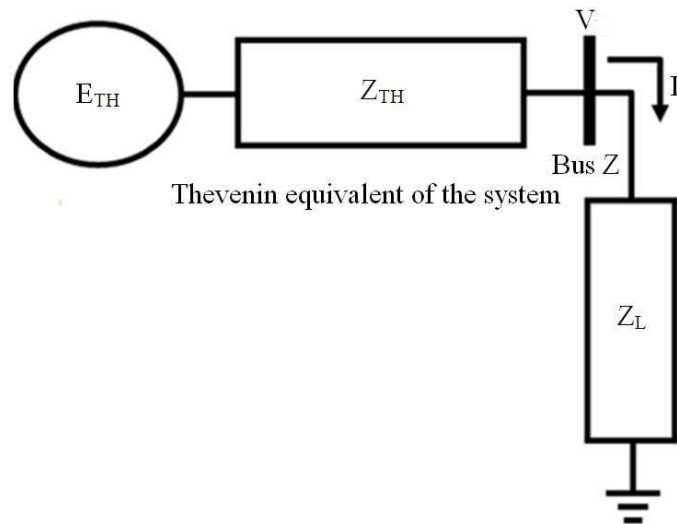
### 3.2.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα μέσω θεωρήματος Thevenin

Το πιο βασικό βήμα για όλους τους επακόλουθους υπολογισμούς είναι η εύρεση της ισοδύναμης αντίστασης στο σημείο που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα. Αυτή η αντίσταση απορρέει από το θεώρημα Thevenin, το οποίο την ορίζει ως την ισοδύναμη αντίσταση όλων των αντιστάσεων του δικτύου, μέσω του μηδενισμού όλων των πηγών του κυκλώματος. Με την ισοδύναμη αντίσταση και την τάση, που επικρατεί αμέσως πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα, προκύπτει το ρεύμα σφάλματος με δεδομένα, πλέον, την αντίσταση  $Z_{TH}$  και την προσφασματική τάση  $V_f$ , το οποίο διαμορφώνεται από το νόμο Ohm [9]:

$$V_f = Z_{TH} I_f \quad (3.3)$$

Αναλυτικά, ο ορισμός του θεωρήματος αναφέρει ότι κάθε μεταβολή των τάσεων και των ρευμάτων ενός δικτύου είναι ίδια με την τάση ή το ρεύμα που θα προκαλούνταν από μία πηγή τάσης (με ίσο μέτρο και ίδια πολικότητα με την προσφασματική μεταξύ δύο κόμβων), σε σειρά με τη συνολική σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος, η οποία λαμβάνεται με τη βραχυκύκλωση των πηγών τάσης και το ανοιχτό κύκλωμα στις πηγές ρεύματος [7].

Το Σχήμα 3.1 χρησιμοποιείται για να βοηθήσει στην επεξήγηση των τύπων που χρειάζονται για όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς σε ένα τριφασικό σφάλμα στο ζυγό της γεννήτριας. Τονίζεται, εκ νέου, ότι το στερεό βραχυκύκλωμα υποδηλώνει ότι η αντίσταση  $Z_L$ , που συνδέεται με το ζυγό του σφάλματος, είναι μηδέν. Ωστόσο, για να γίνει η αρχή θα χρησιμοποιηθεί στον παρακάτω τύπο, ώστε να σχηματιστεί η πλήρης εικόνα.



Σχήμα 3.1: Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού  $Z$  στο μοντέλο του τριφασικού βραχυκυκλώματος με ισοδύναμη αντίσταση  $Z_{TH}$  [10].

Με εφαρμογή του θεωρήματος Thevenin, η τάση  $V_Z$  αποτελεί την προσφαλματική τάση του άπειρου ζυγού και θα γράφεται για αυτό το λόγο  $V^0$ . Το υπόλοιπο δίκτυο αγνοείται ούτως ή άλλως. Με εφαρμογή του θεωρήματος το ισοδύναμο κύκλωμα γράφεται ως:

$$I_f = \frac{V^0}{Z_{\text{εσωτ.}} + Z_L} = \frac{V^0}{Z_{TH} + Z_L} \xrightarrow{Z_f=0} I_f = \frac{V^0}{Z_{TH}} \quad (3.4)$$

Βέβαια, μόνο σε περίπτωση στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος ισχύει η απλοποίηση της (3.4). Με νόμο Ohm όπως στην εξίσωση (3.3), από την (3.4) προκύπτει ότι:

$$Z_{TH} = \frac{V^0}{I_f} \quad (3.5)$$

Στο σημείο αυτό, ορίζεται και η αντοχή στο στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα, με  $V^0 = 1 \text{ pu}$ , ως:

$$SCC = |I_f| = \frac{1}{|Z_{TH}|} \quad (3.6)$$

Από τη στιγμή που στο στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις, γίνεται αντιληπτό ότι η αντίσταση σφάλματος  $Z_{TH}$  είναι μία και κοινή για όλες τις φάσεις, ορισμένη από την εξίσωση (3.5) [7, 9, 10].

Βέβαια, μπορεί οι υπολογισμοί που δόθηκαν στις παραπάνω εξισώσεις, να αρκούν για τον υπολογισμό των βασικών στοιχείων ενός τριφασικού σφάλματος, αλλά μέσω των συμμετρικών συνιστωσών και των ακολουθιακών δικτύων που ακολουθούν, δίνεται το

βήμα για τον υπολογισμό όλων των απαιτούμενων στοιχείων ενός οποιουδήποτε συμμετρικού ή ασύμμετρου σφάλματος.

### 3.3 Συμμετρικές συνιστώσες και ακολουθιακά δίκτυα

Σε ένα οποιοδήποτε συμμετρικό τριφασικό δίκτυο ένα ασύμμετρο βραχυκύκλωμα προκαλεί ασυμμετρία στα ρεύματα και στις τάσεις. Η ανάλυση των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων απαιτεί μία διαφορετική προσέγγιση από αυτή που χρησιμοποιήθηκε για το συμμετρικό τριφασικό σφάλμα. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη ανάλυση βασίζεται στις συμμετρικές συνιστώσες και παρουσιάζεται παρακάτω.

#### 3.3.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Αρχικά η θεωρία των ακολουθιακών δικτύων είναι απαραίτητη για την ανάλυση των μη συμμετρικών σφαλμάτων. Αυτόν τον τρόπο ανάλυσης τον πρότεινε ο Fortescue το 1918 και κάνει χρήση των συμμετρικών συνιστωσών σε κάθε ασύμμετρο διάνυσμα τάσης ή ρεύματος. Συγκεκριμένα, ο Fortescue πρότεινε τη χρήση  $n$  συμμετρικών διανυσμάτων, που μπορούν να εκφράσουν ένα σύστημα  $n$  ασύμμετρων διανυσμάτων. Έτσι σε ένα τριφασικό σύστημα οι συμμετρικές συνιστώσες είναι [7]:

- A. Θετικής ακολουθίας, με τρία διανύσματα ίσου μέτρου, φασικής μετατόπισης ίσης με  $120^\circ$  και ακολουθίας a-b-c. Σύμβολο είναι το 1 (ή +).
- B. Αρνητικής ακολουθίας, με τρία διανύσματα ίσου μέτρου, φασικής μετατόπισης ίσης με  $120^\circ$  και ακολουθίας a-c-b. Σύμβολο είναι το 2 (ή -).
- Γ. Μηδενικής ακολουθίας, με τρία διανύσματα ίσου μέτρου, φασικής μετατόπισης ίσης με  $0^\circ$  και ακολουθίας a-b-c. Σύμβολο είναι το 0.

Επομένως προκύπτει ότι οι φασικές τάσεις είναι οι:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ενώ τα φασικά ρεύματα είναι τα:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή την παράγραφο για τους υπολογισμούς το σύμβολο  $a$  ως εξής:

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -1/2 + j\sqrt{3}/2$$

Μαθηματικά θα υπάρξουν οι χρήσεις:

- $a^2 = e^{j240^\circ} = -1/2 - j\sqrt{3}/2$
- $a^3 = e^{j0^\circ} = 1$
- $1 + a^2 + a = 0$

Με αυτές τις εφαρμογές τα συστήματα (3.7) και (3.8) γράφονται αντίστοιχα και με αυτόν τον τρόπο [7]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{V}_{+-0} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \\ a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{I}_{+-0} \quad (3.10)$$

Για να βρεθούν οι συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας χρειάζεται ο

αντίστροφος πίνακας από τον  $\mathbf{T}$ . Οπότε, για  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$  προκύπτει ο αντίστροφος

$$\mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \text{ Άρα:}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{abc} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{I}_{abc} \quad (3.12)$$

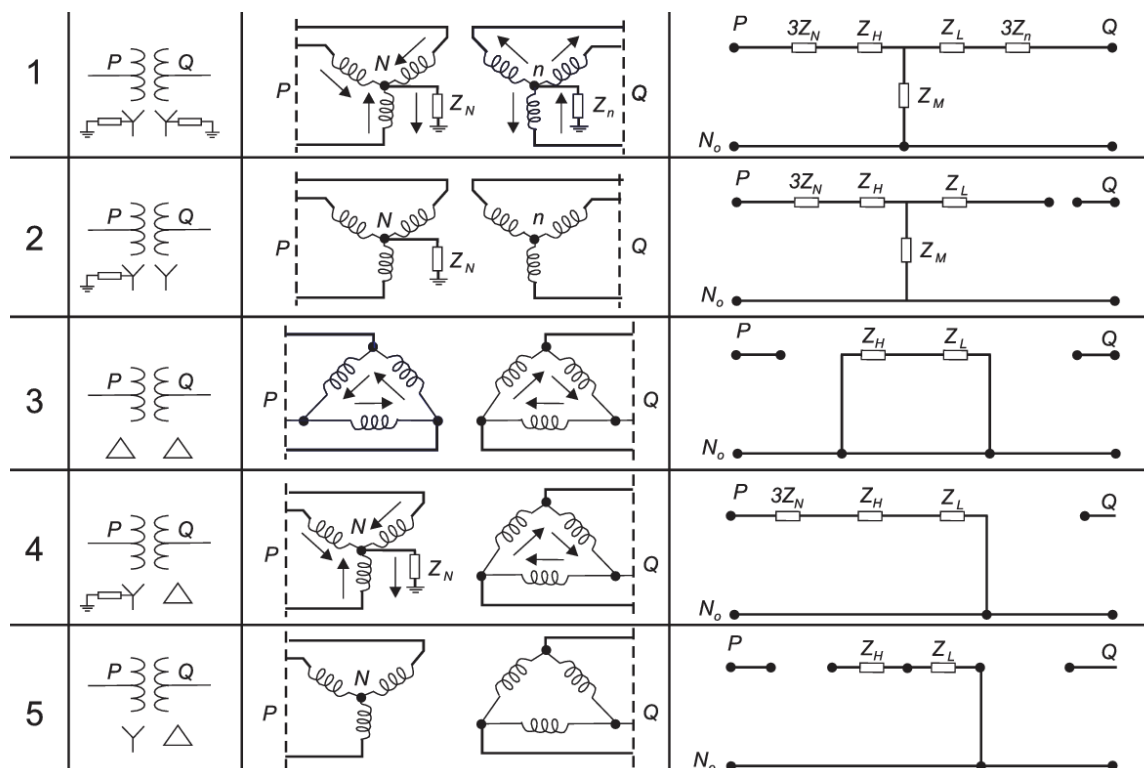
### 3.3.2 Ακολουθιακά δίκτυα

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι κάθε συμμετρική συνιστώσα ορίζει ένα ακολουθιακό δίκτυο. Αυτό εξάγεται, σαν συμπέρασμα, από τον ορισμό των  $n$  συνιστωσών που μπορούν να

περιγράψουν  $n$  διανύσματα σε  $n$  συστήματα κ.ο.κ. Ως εκ τούτου, τα ακολουθιακά δίκτυα είναι τρία και είναι τα εξής [7]:

- I. Δίκτυο θετικής ακολουθίας (ίδιο με το μονογραμμικό διάγραμμα αντιστάσεων της ανάλυσης ροής φορτίου) – Σύμβολο: 1 (ή +).
- II. Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας (χωρίς να σχεδιάζονται οι γεννήτριες του κυκλώματος του μονογραμμικού διαγράμματος) – Σύμβολο: 2 (ή -).
- III. Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας (χωρίς να σχεδιάζονται οι γεννήτριες του κυκλώματος του μονογραμμικού διαγράμματος) – Σύμβολο: 0.

Σε κάθε ακολουθιακό δίκτυο εφαρμόζονται συγκεκριμένοι κανόνες, για να βρεθεί η ισοδύναμη Thevenin αντίσταση. Για το δίκτυο θετικής ακολουθίας, λαμβάνονται υπόψη τόσο η γεννήτρια, όσο και όλες οι αντιστάσεις κανονικά, όπως δίνονται από τα δεδομένα του ΣΗΕ. Για το δίκτυο αρνητικής ακολουθίας σχεδιάζονται μόνο όλες οι αντιστάσεις, ενώ για το δίκτυο μηδενικής συμβαίνει το ίδιο με το δίκτυο αρνητικής, αλλά πρέπει να τηρείται πάντα η ανάλογη σύνδεση των μετασχηματιστών ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 [11]:

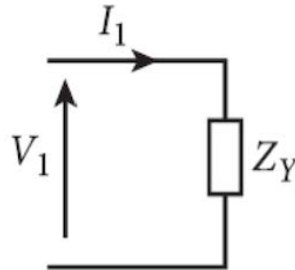


Σχήμα 3.2: Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας για τις διαφορετικές συνδέσεις ΜΣ

– με  $Z_H$  συμβολίζεται η αντίσταση υψηλής τάσης

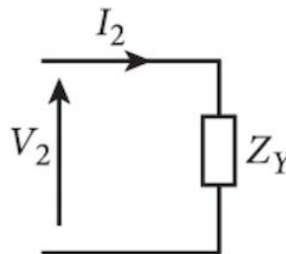
και με  $Z_L$  η αντίσταση χαμηλής τάσης των δύο τυλιγμάτων του ΜΣ [11].

Επιπρόσθετα, στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας λαμβάνεται υπόψη και η αντίσταση γείωσης,  $Z_N$ , των γεννητριών. Στο ισοδύναμο μηδενικό κύκλωμα χρησιμοποιείται το τριπλάσιο μέγεθος της εν λόγω αντίστασης, δηλαδή  $3Z_N$ . Έτσι, προκύπτουν οι συγκεκριμένοι σχεδιασμοί για τα ακολουθιακά δίκτυα, μέσω του θεωρήματος Thevenin, στα Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5:



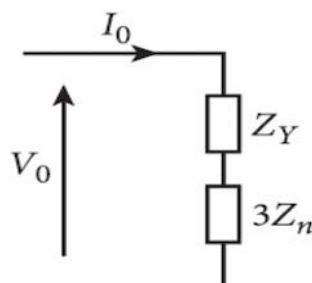
Σχήμα 3.3: Δίκτυο θετικής ακολουθίας

χωρίς την εμφάνιση του συμβόλου της γεννήτριας.



Σχήμα 3.4: Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας

που είναι ίδιο με αυτό της θετικής, απλά χωρίς τη γεννήτρια.



Σχήμα 3.5: Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας

στην οποία προστίθεται η τριπλάσια αντίσταση γείωσης  $Z_n$ .

Μέσω αυτών των ακολουθιακών δικτύων μπορούν να υπολογιστούν τα ρεύματα και οι τάσεις όλων των ακολουθιών με εφαρμογές των εξισώσεων της αμέσως προηγούμενης παραγράφου. Τα ρεύματα και οι τάσεις αυτών των δικτύων χρησιμοποιούνται για την επίλυση των διανυσμάτων των ασύμμετρων σφαλμάτων, που θα περιγραφούν σε επόμενη παράγραφο [7, 11]. Προς το παρόν, θα δοθεί επεξήγηση του τριφασικού σφάλματος με τη χρήση των ακολουθιακών δικτύων, καθώς οι συμμετρικές συνιστώσες αποτελούν αναπόσπαστο μαθηματικό μοντέλο όλου του μεταβατικού τριφασικού δικτύου και όχι μόνο των ασύμμετρων σφαλμάτων.

### 3.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με τη χρήση των ακολουθιακών δικτύων

Το τριφασικό βραχυκύκλωμα είναι το μόνο, στο οποίο συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις του δικτύου στο σφάλμα και αυτό καθιστά πολύ απλό τον υπολογισμό τόσο του ρεύματος σφάλματος, όσο και των φασικών τάσεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτό συμβαίνει γιατί καμία φάση δεν εξαιρείται, επομένως το ρεύμα σφάλματος θα έχει τα ίδια ρυ μέτρα σε κάθε φάση. Το ίδιο ισχύει και για τις τάσεις. Ωστόσο, στο τριφασικό βραχυκύκλωμα υπάρχει μόνο το δίκτυο θετικής ακολουθίας και κανένα άλλο ακολουθιακό κύκλωμα. Ακολουθώντας τον συμβολισμό των δικτύων, το σφάλμα από την εξίσωση (3.4) και από το Σχήμα 3.3 απλοποιείται στις εξής εξισώσεις:

$$I_1 = \frac{E_G}{Z_1 + Z_f} \quad \text{και} \quad I_2 = I_0 = 0 \quad (3.13)$$

Στο σημείο του βραχυκυκλώματος το δίκτυο θετικής ακολουθίας συμπερασματικά έχει τάση  $V_1 = 0$ . Ωστόσο, επειδή συμμετέχουν όλες οι φάσεις στο συγκεκριμένο σφάλμα ισχύει και ότι  $V_0 = V_2 = 0$ . Επομένως όλες οι ακολουθιακές τάσεις είναι μηδέν, όπως και οι φασικές.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Οπότε γίνεται κατανοητό πως προκύπτει μοναδική συμμετοχή του δικτύου θετικής ακολουθίας στο τριφασικό σφάλμα. Τέλος, όλες οι φάσεις του ρεύματος έχουν ίδιο μέτρο, το οποίο είναι ίσο με την τιμή που δίνει η εξίσωση (3.13) [7].



### 3.5 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

#### 3.5.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα (SLG – Single Line to Ground), έχει συμμετοχή μόνο μία φάση του τριφασικού δικτύου και επιλέγεται να είναι η a. Τυπικά, θεωρούνται οι b, c αμέτοχες στο σφάλμα. Ενώ καμία άλλη φάση δεν εμπλέκεται στο σφάλμα, και τα τρία ακολουθιακά δίκτυα συμμετέχουν σε αυτό με αντίσταση σφάλματος  $3Z_f$ . Επομένως, τα τρία δίκτυα συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και αυτά σε σειρά με την αντίσταση σφάλματος. Έτσι προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E_G}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_G - I_1 Z_1 \\ -I_2 Z_2 \\ -I_0 Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Η εξίσωση 3.15 ισχύει για κάθε ασύμμετρο σφάλμα. Ο υπολογισμός των φασικών τάσεων και ρευμάτων γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων (3.9) και (3.10) αντίστοιχα [7].

#### 3.5.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη

Στο διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη (DLG – Double Line to Ground), έχουν συμμετοχή μόνο δύο φάσεις του δικτύου και από επιλογή αυτές είναι οι b και c. Οι δύο φάσεις οδηγούνται σε κοινό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_f = I_b + I_c$ , το οποίο διέρχεται από την αντίσταση σφάλματος  $Z_f$ . Και σε αυτήν την περίπτωση συμμετέχουν και τα τρία ακολουθιακά δίκτυα στο σφάλμα. Συγκεκριμένα, εδώ, υπάρχει παράλληλη σύνδεση των τριών ακολουθιακών δικτύων. Μόνο το δίκτυο της μηδενικής ακολουθίας «έρχεται» σε σειρά με την  $3Z_f$ . Έτσι προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$I_1 = \frac{E_G}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_0 + Z_2 + 3Z_f}}$$

$$\text{και με διαιρέτη ρεύματος οι εξισώσεις } I_2 = -I_1 \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_0 + Z_2 + 3Z_f} \text{ και } I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2 + 3Z_f} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_G - I_1 Z_1 \\ -I_2 Z_2 \\ -I_0 Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Με αντικατάσταση στους τύπους (3.9) και (3.10) των χαρακτηριστικών ακολουθιακών σχημάτων, υπολογίζονται οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα, όπως έχει ειπωθεί παραπάνω [7].

### 3.5.3 Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα

Το διφασικό βραχυκύκλωμα (LL – Line to Line), έχει συμμετοχή μόνο δύο φάσεων του δικτύου. Από επιλογή αυτές οι φάσεις είναι οι b και c, οι οποίες έχουν κοινό ρεύμα  $I_b = -I_c$ , διερχόμενο από την αντίσταση σφάλματος  $Z_f$ . Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει συμμετοχή μόνο δύο εκ των τριών ακολουθιακών δικτύων και συγκεκριμένα μόνο του δικτύου θετικής και του δικτύου αρνητικής ακολουθίας. Άρα, γίνεται παράλληλη σύνδεση των δύο δικτύων αυτών και ανάμεσα τους βρίσκεται η αντίσταση σφάλματος  $Z_f$  και όχι η  $3Z_f$ . Προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$I_1 = -I_2 = \frac{E_G}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad \text{και} \quad I_0 = 0 \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_G - I_1 Z_1 \\ -I_2 Z_2 \\ -I_0 Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Έτσι προκύπτουν τα φασικά ρεύματα με αντικατάσταση των ακολουθιακών ρευμάτων στην εξίσωση (3.10). Οι ακολουθιακές τάσεις με αντικατάσταση στην εξίσωση (3.9) δίνουν τις φασικές τάσεις [7].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

#### 4.1 Βασικές έννοιες της ευστάθειας

Ένα οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γεννήτριας – φορτίου θεωρείται ευσταθές, όταν υπάρχει μόνιμη και αδιάκοπη ισορροπία ανάμεσα στη μηχανική ισχύ εισόδου και στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Ωστόσο, σε κάθε ΣΗΕ μπορεί να προκύψουν μεγάλες ή απότομες αλλαγές, όπως ένα βραχυκύκλωμα, που να διακόψουν τη συγκεκριμένη ισορροπία ισχύων εισόδου και εξόδου. Οι αλλαγές αυτές με τη σειρά τους ορίζουν μία νέα κατάσταση, τη μεταβατική. Μέχρι και το Κεφάλαιο 3, αναλύθηκαν θεωρητικά η μόνιμη κατάσταση ενός δικτύου και ο τρόπος με τον οποίο το δίκτυο δέχεται ένα πιθανό σφάλμα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθεί η έννοια της μεταβατικής περιόδου μετά από το σφάλμα και ο τρόπος με τον οποίο το δίκτυο μπορεί να επιστρέψει σε μία νέα αποδεκτή κατάσταση λειτουργίας [5, 8].

##### 4.1.1 Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης

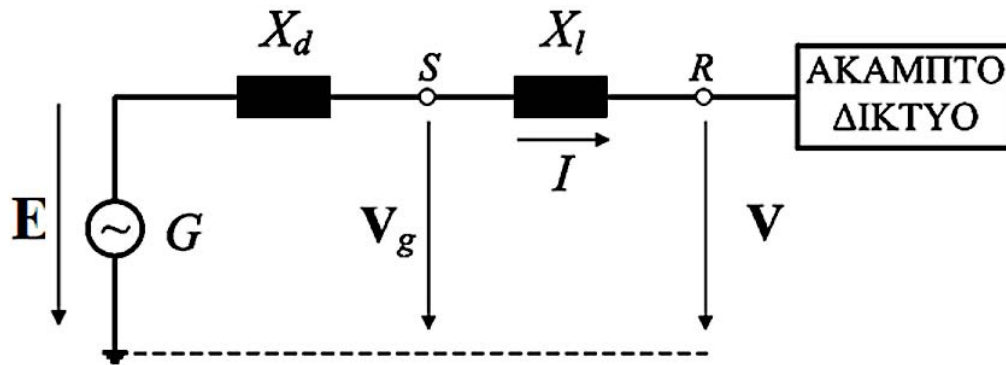
Γενικά, ως ευστάθεια ορίζεται η κατάσταση στην οποία οι σύγχρονες μηχανές AC ενός ΣΗΕ, βρίσκονται σε συγχρονισμό. Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια του συγχρονισμού, ορίζεται ένα σύστημα ενός διακόπτη ανάμεσα σε μία γεννήτρια και έναν διασυνδεδεμένο άπειρο ζυγό. Για να κλείσει ο ανοικτός διακόπτης και να συνδεθούν η γεννήτρια με το ζυγό, πρέπει να βρίσκονται σε συντονισμό, δηλαδή να έχουν [5]:

- Ίδια συχνότητα,
- Ίδια τάση, (μέτρο και φάση),
- Ίδια φασική ακολουθία.

Τότε και μόνο τότε, επιτυγχάνεται συγχρονισμός μεταξύ των δύο τμημάτων του δικτύου και μπορεί να κλείσει ο διακόπτης. Συνεπώς, επιτυχής συγχρονισμός σημαίνει και επίτευξη της επιθυμητής ευστάθειας στη μόνιμη κατάσταση.

Πότε κινδυνεύει, όμως, το σύστημα από έναν πιθανό αποσυγχρονισμό μεταξύ των διασυνδεδεμένων γεννητριών; Συνεχίζοντας, στο Σχήμα 4.1 με το παράδειγμα της γεννήτριας συνδεδεμένης με άπειρο ζυγό ή αλλιώς με άκαμπτο δίκτυο, παρατηρείται ότι η

ισχύς που προσφέρεται από τη γεννήτρια στο ζυγό, δίνεται από τη σχέση που χαρακτηρίζει το σύστημα γεννήτριας – κινητήρα.



Σχήμα 4.1: Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού [8].

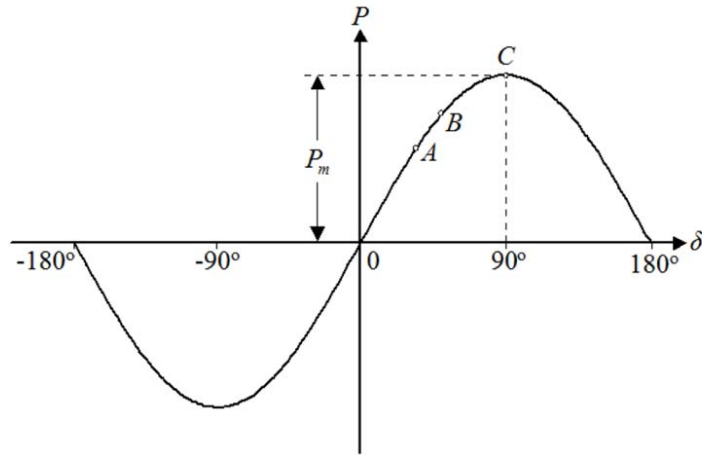
Δηλαδή:

$$P = \frac{|E| |V|}{X_d + X_l} \sin \delta \quad (4.1)$$

όπου:

- $E = |E| \angle \delta$  αποτελεί την ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας,
- $V_g$  αποτελεί την τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας,
- $V = |V| \angle 0$  αποτελεί την τάση του άπειρου ζυγού,
- $X_d$  είναι η αντίδραση της γεννήτριας,
- $X_l$  είναι η αντίδραση της διασυνδετικής γραμμής μεταφοράς,
- $\delta$  είναι η γωνία του δρομέα της γεννήτριας (γωνία ισχύος).

Σχεδιάζοντας την καμπύλη της συγκεκριμένης μαθηματικής εξίσωσης, προκύπτει ότι η μέγιστη πραγματική ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από τη γεννήτρια στο ζυγό, συμβαίνει στη γωνία  $\delta=90^\circ$ . Ο καθορισμός της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στον άπειρο ζυγό οφείλεται στην ημιτονοειδή μορφή της. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκε ένα σημαντικό βήμα για να οριστεί το όριο ευστάθειας της μόνιμης κατάστασης. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος με τη γωνία, P- $\delta$  [5].



Σχήμα 4.2: Χαρακτηριστική καμπύλη P-δ της σύγχρονης γεννήτριας [5].

Συνεπώς για τη γωνία  $\delta = 90^\circ$ :

$$P_m = \frac{|E| |V|}{X_d + X_l} \quad (4.2)$$

Με βάση την ημιτονοειδή μορφή της (4.1), η εξίσωση (4.2) ορίζει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να δώσει η γεννήτρια στον άπειρο ζυγό. Λαμβάνοντας υπόψη το γενικό ορισμό που δόθηκε στην αρχή, ευστάθεια σημαίνει ισορροπία ανάμεσα στην μηχανική ισχύ εισόδου και στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών, το όριο ευστάθειας στάσιμης ή μόνιμης κατάστασης καθορίζεται από τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ εξόδου της γεννήτριας,  $P_m$ , (steady-state stability limit), διότι σε οποιαδήποτε απόπειρα μεταφοράς μεγαλύτερης ισχύος από αυτή, δεν θα μπορεί η μηχανική ισχύς εισόδου να ισοφαρίσει τη μετάβαση. Δηλαδή για κάθε  $P_{OUT} > P_m$  ή αλλιώς για κάθε φασική διαφορά ανώτερη των  $90^\circ$ , επέρχεται αποσυγχρονισμός του συστήματος και αστάθεια.

Η υπέρβαση του ορίου ευστάθειας στάσιμης κατάστασης δεν είναι ο μοναδικός λόγος που μπορεί να προκληθεί αστάθεια. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διατηρεί την ευστάθεια μόνιμης κατάστασης, εάν μετά από μία μικρή και αργή διαταραχή, μπορέσει να επανακτήσει τον συγχρονισμό του. Αν προκληθεί, για παράδειγμα απότομη διακύμανση στο φορτίο του κινητήρα, τότε η μηχανική ισχύς εισόδου μπορεί να χάσει τη «μόνιμη ισορροπία» με την ηλεκτρική ισχύ εξόδου και πιθανά το σύστημα θα οδηγηθεί τελικά σε απώλεια του συγχρονισμού [5, 8].

#### 4.1.2 Μεταβατική ευστάθεια

Στην προηγούμενη παράγραφο, επεξηγήθηκε η έννοια της μόνιμης ευστάθειας στο σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού. Ως πολυσύνθετο αντικείμενο μελέτης, η επιζητούμενη ευστάθεια επιτυγχάνεται στη μόνιμη κατάσταση με σταθερό φορτίο. Ωστόσο, με μία «γενναία» αλλαγή του φορτίου το σύστημα κινδυνεύει να τεθεί σε κατάσταση αστάθειας. Προσαρμοσμένο σε μεταβατικά φαινόμενα, ορίζεται ως όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης, (transient stability limit), το μέγιστο δυνατό φορτίο, που μπορεί να υποστηρίξει η παραγωγή ενός συστήματος πριν από μία μεγάλη και απότομη διαταραχή, ώστε να μην οδηγηθεί σε αποσυγχρονισμό. Δηλαδή, το όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης πρέπει να είναι οπωσδήποτε μικρότερο από αυτό της μόνιμης, για να διατηρείται η ευστάθεια σε ένα ΣΗΕ κάτω από τέτοιες διαταραχές [5].

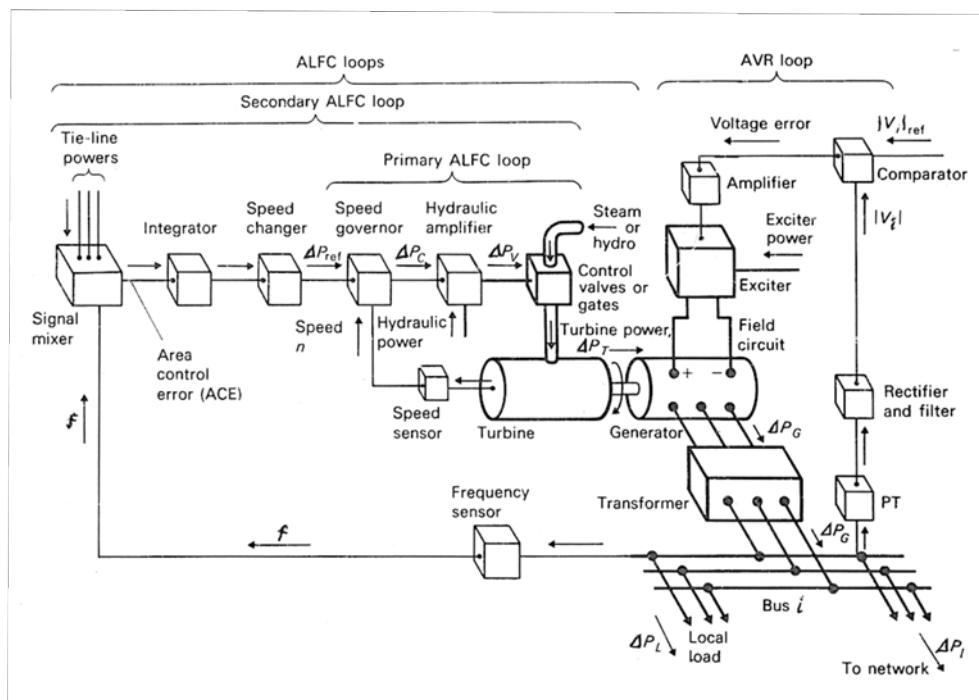
Τι είδους διαταραχή, όμως, θα μπορούσε να προκαλέσει τόσο μεγάλη «ζημιά» στην ορθή λειτουργία ενός ΣΗΕ; Μία τόσο ισχυρή ταλάντωση των μηχανών σε όλα τα επίπεδα, μπορεί να προκληθεί τόσο από χειρισμούς, ζεύξεις ή αποζεύξεις γεννητριών, φορτίων, γραμμών, όσο και από βραχυκυκλώματα σε ζυγούς και γραμμές του δικτύου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι ειδικά στα βραχυκυκλώματα διαπιστώνεται σημαντική μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ γεννητριών και φορτίων ενός κυκλώματος, οπότε όσο μικρότερη σε ποσό και σε χρονική διάρκεια είναι η μεταφορά αυτή, τόσο πιο εύκολα διατηρείται η ευστάθεια. Εάν το ποσό της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ισχύος ξεπεράσει μία ορισμένη τιμή, το κύκλωμα οδηγείται σε μεταβατική αστάθεια. Συνεπώς, το μέγιστο ποσό της μεταφερόμενης ισχύος, που επιτρέπεται να ανταλλαχθεί σε τέτοια φαινόμενα, είναι το όριο μεταβατικής ευστάθειας [5, 8].

Συνεχίζοντας, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη συμπερασμάτων ως προς την επίδραση των βραχυκυκλωμάτων πάνω στα σύγχρονα ΣΗΕ, καθώς αποτελούν την πιο σοβαρή διαταραχή. Βέβαια, αν δεν ξεπεραστεί το όριο της μεταβατικής ευστάθειας, πιθανότατα το κύκλωμα θα παραμείνει σε συγχρονισμό ακόμα κι αν διαρκέσει αρκετά δευτερόλεπτα το σφάλμα. Το πόσο εύκολα χάνεται η ευστάθεια των ΣΗΕ, μετά από σφάλμα, έχει να κάνει με το σημείο, το είδος, το «μέγεθος», το χρόνο εκκαθάρισης του κ.ά. Παρακάτω, θα γίνει αναλυτική μελέτη επί της μεταβατικής ευστάθειας για όλα τα είδη βραχυκυκλωμάτων, που μπορούν να συμβούν σε διάφορα σημεία στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE.

### 4.1.3 Δυναμική ευστάθεια στα σύγχρονα ΣΗΕ

Η πραγματική λειτουργία των συστημάτων της ευστάθειας περιλαμβάνει και άλλα συστήματα. Αρχικά, για να εξηγηθεί θεωρητικά η δυναμική ευστάθεια, γίνεται η υπόθεση ότι το δίκτυο έχει υποστεί μεγάλη διαταραχή, (π.χ. μέσω σφάλματος), και έχει παρέλθει το διάστημα της μεταβατικής περιόδου.

Τα συστήματα που εισάγονται, ως νέες έννοιες, είναι οι ρυθμιστές ελέγχου πραγματικής ισχύος – συχνότητας, P-f, καθώς και οι ρυθμιστές ελέγχου αέργου ισχύος – τάσης, Q-V. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας περιλαμβάνει δύο ρυθμιστές που βοηθούν στους παραπάνω ελέγχους. Στο σημείο αυτό, θα γίνει πλήρης ανάλυση των ρυθμίσεων του Σχήματος 4.3.



Σχήμα 4.3: Ρυθμιστές ελέγχου σύγχρονης γεννήτριας [12].

Ο πρώτος ρυθμιστής είναι ο αυτόματος ελεγκτής συχνότητας φορτίου (Automatic Load Frequency Controller), που χωρίζεται σε δύο λειτουργικά μέρη. Το πρωταρχικό μέρος (Primary ALFC Loop), περιλαμβάνει το ρυθμιστή στροφών (Turbine Governor), ο οποίος καθορίζει τη ροπή στον άξονα στροβίλου-γεννήτριας και συνεπώς τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  (Speed governor). Αυτό το «γρήγορο» μέρος του ελεγκτή, οδηγείται στο ρυθμιστή της ροής ατμού, με στόχο την προσαρμογή της μηχανικής ισχύος του στροβίλου στις διάφορες διακυμάνσεις του φορτίου. Το δεύτερο μέρος (Secondary ALFC Loop), αφορά μικρές

ρυθμίσεις της συχνότητας του δικτύου (frequency sensor), καθώς και τη διατήρηση της πραγματικής ισχύος στις διασυνδεδεμένες γραμμές (Tie-line powers). Λαμβάνοντας υπόψη, ανά ορισμένα λεπτά, τη φασική διαφορά μεταξύ των τάσεων μετά την περιοχή ελέγχου (Area control error), η πληροφορία αυτή τροφοδοτείται στο ρυθμιστή στροφών του πρωταρχικού μέρους. Έτσι, κλείνει ο κύκλος του ελεγκτή και με την ένωση των δύο βρόχων επιτυγχάνεται ο έλεγχος πραγματικής ισχύος – συχνότητας, P-f [12].

Ο δεύτερος ελεγκτής είναι ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης (Automatic Voltage Regulator), ο οποίος καθορίζει την συνεχή τάση του δρομέα,  $|V_i|$ , με βάση μία επιλεγόμενη τάση αναφοράς,  $|V_{ref}|$ . Η διαμορφωμένη τάση μετά τη σύγκριση, αφού «περάσει» από έναν ενισχυτή (amplifier), καταλήγει ως είσοδος του διεγέρτη (exciter). Αυτή η τάση εξόδου του διεγέρτη αποτελεί, τελικά, την τάση πεδίου της γεννήτριας. Για να μην τείνει το παραπάνω σύστημα σε αστάθεια, η τάση πεδίου της γεννήτριας ελέγχεται συνεχώς από έναν σταθεροποιητή (stabilizer), η λειτουργία του οποίου θα επεξηγηθεί σε επόμενη παράγραφο. Αυτό το σύστημα, αναλαμβάνει και τον έλεγχο της αέργου ισχύος Q, κυρίως γιατί κάθε διαφοροποίησή της μεταξύ εισόδου και εξόδου ενός ζυγού, τείνει να προκαλεί έντονες μεταβολές στην τάση του. Μετά τη σύγκριση, η προαναφερθείσα διαφορά τάσης σηματοδοτεί τη μεταβολή της αέργου ισχύος, η οποία αποστέλλεται στο διεγέρτη. Κατά αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα πεδίου του δρομέα μεταβάλλεται, οδηγώντας στον έλεγχο της παραγόμενης αέργου ισχύος και της συνεχούς τάσης  $|V_i|$ . Έτσι, κλείνει ο κύκλος του ρυθμιστή αέργου ισχύος – τάσης, Q-V [12].

Στην περίπτωση του σφάλματος, λοιπόν, υπήρχε η ανάγκη για επιστροφή στην αρχική κατάσταση μετά την πρώτη διαταραχή. Οι προαναφερόμενοι ρυθμιστές ελέγχου στα σύγχρονα ΣΗΕ μέχρι να ενεργοποιηθούν, καθυστερούν για κάποια δευτερόλεπτα. Άρα, η ανώμαλη επιστροφή στην αρχική κατάσταση μετά τη μεταβατική περίοδο, έχει να κάνει με την αργή «αφύπνιση» των ρυθμιστών ελέγχου. Πρακτικά, ορίζεται ως δυναμική ευστάθεια, η διατήρηση του συγχρονισμού μετά την περίοδο της μεταβατικής ευστάθειας, μέχρι την επιστροφή στην μόνιμη θέση. Κλείνοντας, η διατήρηση του συγχρονισμού προϋποθέτει τη γρήγορη αντίδραση των ρυθμιστών.



#### 4.1.4 Χρονικά διαστήματα της μεταβατικής περιόδου

Μετά από το διαχωρισμό των ειδών ευστάθειας ως προς το χρόνο, είναι εύκολο να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά διαστήματα της μεταβατικής περιόδου. Τα τρία αυτά διαστήματα είναι τα εξής [8]:

- I. Το αρχικό διάστημα, που αφορά το δευτερόλεπτο αφού συμβεί το βραχυκύκλωμα. Τα μόνα συστήματα, που προλαβαίνουν να δράσουν εντός του δευτερολέπτου, είναι συνήθως τα χειριστικά, δηλαδή διακόπτες ισχύος, πυκνωτές, κλπ.
- II. Το ενδιάμεσο διάστημα, που έπεται του αρχικού και διαρκεί σχεδόν 5 δευτερόλεπτα. Σε αυτά τα 5 δευτερόλεπτα, ξεκινούν να δρουν οι ρυθμιστές ελέγχου.
- III. Το τελικό διάστημα, που έπεται του ενδιάμεσου και διαρκεί για κάποια λεπτά. Περιλαμβάνει όλα τα συστήματα που απαιτούν παραπάνω δευτερόλεπτα για να δράσουν, για παράδειγμα τα συστήματα ατμού.

Στη συγκεκριμένη μελέτη θα γίνει επιλεκτική αναφορά κυρίως στα δύο πρώτα διαστήματα.

#### 4.2 Εξίσωση ταλάντωσης

Βασικός σκοπός, για να μελετηθεί η ευστάθεια, είναι να εκφραστούν η μόνιμη και η μεταβατική κατάσταση με ένα μαθηματικό μοντέλο σε μία μόνο γεννήτρια. Πρακτικά, λοιπόν, προκύπτει μία εξίσωση ταλάντωσης η οποία θα αναπαριστά αποκλειστικά την κατάσταση, που επικρατεί στη γεννήτρια σε όλη τη διάρκεια ενός σφάλματος.

Καταρχάς, στο μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας επικρατεί ότι η ισχύς εισόδου είναι η μηχανική,  $P_{in} = P_{sh}$ , και ότι η ισχύς εξόδου είναι η ηλεκτρική,  $P_{out} = P_e$ . Στη στάσιμη κατάσταση, αγνοώντας της απώλειες, το σύστημα ισορροπεί βάσει του ισοζυγίου  $P_{in} = P_{out}$ , δηλαδή  $P_{sh} = P_e$ . Για τη συγκεκριμένη μελέτη, η μηχανική γωνιακή ταχύτητα,  $\omega_{sh}$ , θεωρείται σταθερή, χωρίς να παίζει κάποιο ρόλο στην ταλάντωση της γεννήτριας. Ενώ, για την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα, παρατηρείται σταθερότητα μόνο πριν τη διαταραχή. Επομένως, η αρχική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα θα εκφραστεί ως:  $\omega^0 = \pi f^0$ , για συχνότητα  $f^0$  ίση με την αρχική του δικτύου [5].

Αν, όμως, δεν ισχύει το ισοζύγιο, τότε η διαφορά  $P_{sh} - P_e$ , χρησιμοποιείται για:

- Την αλλαγή της κινητικής ενέργειας.

- Την επικράτηση επί της κάθε ροπής που εμποδίζει την περιστροφή του δρομέα, όπως της ροπής των πηνίων απόσβεσης, της τριβής στο δρομέα κ.ά.

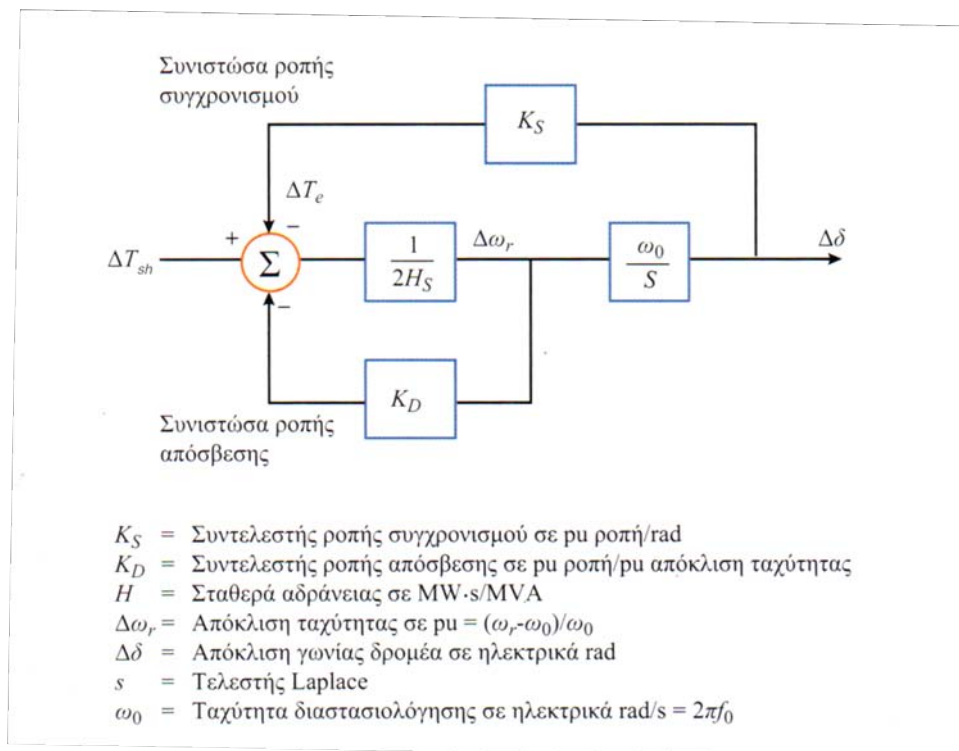
Σε μία γενικευμένη μορφή, λοιπόν, το ισοζύγιο εκφράζεται με κύριο όρο την επιταχυνόμενη ή επιβραδυνόμενη ισχύ  $P_a$ , εξαρτώμενη από το πρόσημο της διαφοράς των δύο ισχύων. Η εξίσωση, αρχικά, γράφεται ως εξής [5]:

$$P_a = P_{sh} - P_e = \frac{d(W_{kin})}{dt} + P_{damping} \text{ MW} \quad (4.3)$$

Αναλύοντας τον όρο  $\frac{d(W_{kin})}{dt}$  προκύπτει το συμπέρασμα ότι, εφόσον η κινητική ενέργεια αποτελεί το ρυθμό μεταβολής της θέσης του δρομέα, ο ρυθμός μεταβολής της κινητικής ενέργειας, περιλαμβάνει ως βασικό όρο τη δεύτερη παράγωγο, (δηλ. επιτάχυνση), της γωνιακής θέσης του,  $\delta$ . Άρα [5]:

$$\frac{d(W_{kin})}{dt} = \frac{W_{kin}^0}{\omega^0} \frac{d^2\delta}{dt^2} \text{ MW} \quad (4.4)$$

Για να αναπτυχθεί περαιτέρω η εξίσωση αυτή, θα γίνει μία εσωτερική αναπαράσταση της γεννήτριας. Χαρακτηριστικά το σύστημα γεννήτριας – ζυγού αναπαρίσταται εκ νέου στο Σχήμα 4.4:



Σχήμα 4.4: Εσωτερική αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας [2].

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω σχήμα, συνδυαστικά μπορεί να προκύψει η ηλεκτρική ροπή αγνοώντας την εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας [2]:

$$T_e = P_e = \frac{E_g E \sin \delta}{x_l} \quad (4.5)$$

Αναλαμβάνοντας την πάνω πλευρά του σχήματος, η μεταβολή της ηλεκτρικής ροπής ισούται με [2]:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{E_g E \cos \delta_0}{x_l} \Delta \delta = K_S \Delta \delta \quad (4.6)$$

Ως  $K_S$  ορίζεται ο συντελεστής ροπής συγχρονισμού. Η εξίσωση κίνησης του δρομέα αγνοώντας την αποσβενόμενη ροπή και με βάση την εξίσωση (4.4) γράφεται ως [2]:

$$T_{sh} - T_e = 2H \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{2H}{\omega^0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} pu \quad (4.7)$$

Η εξίσωση (4.7) χρησιμοποιείται με τέτοιο τρόπο, που η  $W_{kin}^0$  γράφεται ανάλογη της  $H$ , η οποία είναι η σταθερά αδράνειας της μονάδας, με μονάδα μέτρησης το 1second.

Ως προς τον όρο  $P_{damping}$ , η ισχύς των πηνίων απόσβεσης έχει να κάνει αποκλειστικά με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Όσο ο δρομέας αλλάζει θέση από το πεδίο του στάτη, παρατηρείται επαγωγή ρευμάτων στο δρομέα. Τα ρεύματα αυτά, προκαλούν ροπές πέδησης, οπότε και αποσβένουν την ταλάντωση μετά τη διαταραχή, καθώς το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται, είναι αντίθετης κατεύθυνσης από το αρχικό [8]. Κατά τη συγκεκριμένη λογική, η μεταβολή της γωνιακής θέσης θεωρείται ανάλογη των ροπών πέδησης, στο κύκλωμα απόσβεσης του δρομέα. Έτσι, με τη χρήση του συντελεστή  $K_D$  δίνεται ο όρος  $P_{damping}$  ως εξής [5]:

$$P_{damping} = K_D \frac{d\delta}{dt} \quad (4.8)$$

Επομένως, η εξίσωση (4.3) σε MW γράφεται ολοκληρωμένα στη μορφή [5]:

$$P_a = \frac{W_{kin}^0}{\omega^0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + K_D \frac{d\delta}{dt} MW \quad (4.9)$$

Έτσι, με βάση την εξίσωση (4.7), προσθέτοντας και τον όρο της απόσβεσης προκύπτει ότι η διαφορά της μηχανικής με την ηλεκτρική ροπή είναι [2]:

$$T_{sh} - T_e = \frac{2H}{\omega^0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + K_D \frac{d\delta}{dt} pu \quad (4.10)$$

Μάλιστα, υπάρχει η δυνατότητα ώστε η εξίσωση (4.9) να εκφραστεί και σε puMW αφού είναι ίδια με την εξίσωση (4.10) [5].

$$P_a = \frac{2H}{\omega^0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + K_D \frac{d\delta}{dt} \text{ puMW} \quad (4.11)$$

### 4.3 Η μόνιμη κατάσταση στα σύγχρονα ΣΗΕ

Η προηγούμενη παράγραφος αφιερώθηκε στο μαθηματικό μοντέλο της μελέτης της ευστάθειας. Ωστόσο, η πραγματική ρύθμιση ενός ΣΗΕ στη μόνιμη κατάσταση διαφέρει από αυτή του συστήματος γεννήτριας – άπειρου ζυγού. Η ρύθμιση του τελευταίου για την επίτευξη της μόνιμης ευστάθειας απαιτεί [8]:

- α. Την αύξηση της μηχανικής ισχύος εισόδου στον ίδιο ρυθμό με την αύξηση της ηλεκτρικής, που δίνεται στο φορτίο. Ρυθμίζεται από τον προαναφερόμενο αυτόματο ρυθμιστή συχνότητας-φορτίου ALFC.
- β. Τη διατήρηση της τάσεως στη διεγέρτρια μονάδα της γεννήτριας, η οποία ρυθμίζεται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης AVR.

Τα δύο συστήματα ρυθμιστών περιγράφηκαν παραπάνω. Αυτές οι δύο ρυθμίσεις, όμως, αφορούν μόνο την καθεμία γεννήτρια του συστήματος ξεχωριστά. Για τη συνολική ρύθμιση ενός δικτύου, χρειάζονται ρύθμιση και τα υπόλοιπα στοιχεία του.

Σχολιάζοντας πρώτα τις γραμμές, η οποιαδήποτε αύξηση του φορτίου προκαλεί πτώση της τάσης στους ζυγούς. Αυτό εκφράζεται στο ισοζύγιο μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος των γεννητριών, συναρτήσει της τάσης των ζυγών. Εντούτοις, στο πρόβλημα της ροής φορτίου λαμβάνεται υπόψη μία αιχμή της ροής φορτίου, η οποία συνήθως εμφανίζεται μετά από χρόνια και έτσι υπολογίζονται οι τάσεις στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της μόνιμης ευστάθειας ενός ΣΗΕ είναι [8]:

- α. Η αύξηση της γωνίας φόρτισης  $\delta_0$  για λίγες μοίρες στην κάθε γεννήτρια ξεχωριστά. Ο συγχρονισμός θα πρέπει να επιστρέψει σε όλες. Δηλαδή η μεταβολή της ηλεκτρικής ροπής  $\frac{\partial T_e}{\partial \delta}$  της καθεμιάς, πρέπει να συγκλίνει προς την απόσβεση της αρχικής ταλάντωσης. Από την εξίσωση (4.6) θα προκύψει θετικός συντελεστής συγχρονισμού  $K_s$  [2].
- β. Η αύξηση του φορτίου σε ένα ζυγό του δικτύου. Κάθε διασυνδεδεμένη γεννήτρια θα πρέπει να οδηγηθεί σε αύξηση της μεταβολής της ηλεκτρικής ροπής ως προς τη

γωνία του δρομέα  $\frac{\partial T_e}{\partial \delta}$ , ώστε να επιτευχθεί θετικός συντελεστής συγχρονισμού  $K_s$  [2].

Με τα παραπάνω βήματα, σε διάφορα σημεία του δικτύου ελέγχεται η ρύθμιση εξετάζοντας το λόγο μεταβολής της ηλεκτρικής ροπής  $\frac{\partial T_e}{\partial \delta}$  και εάν επιτευχθεί θετικός συντελεστής συγχρονισμού  $K_s$ , η ρύθμιση ενός ολοκληρωμένου δικτύου στη μόνιμη κατάσταση έχει ολοκληρωθεί [2, 5, 8].

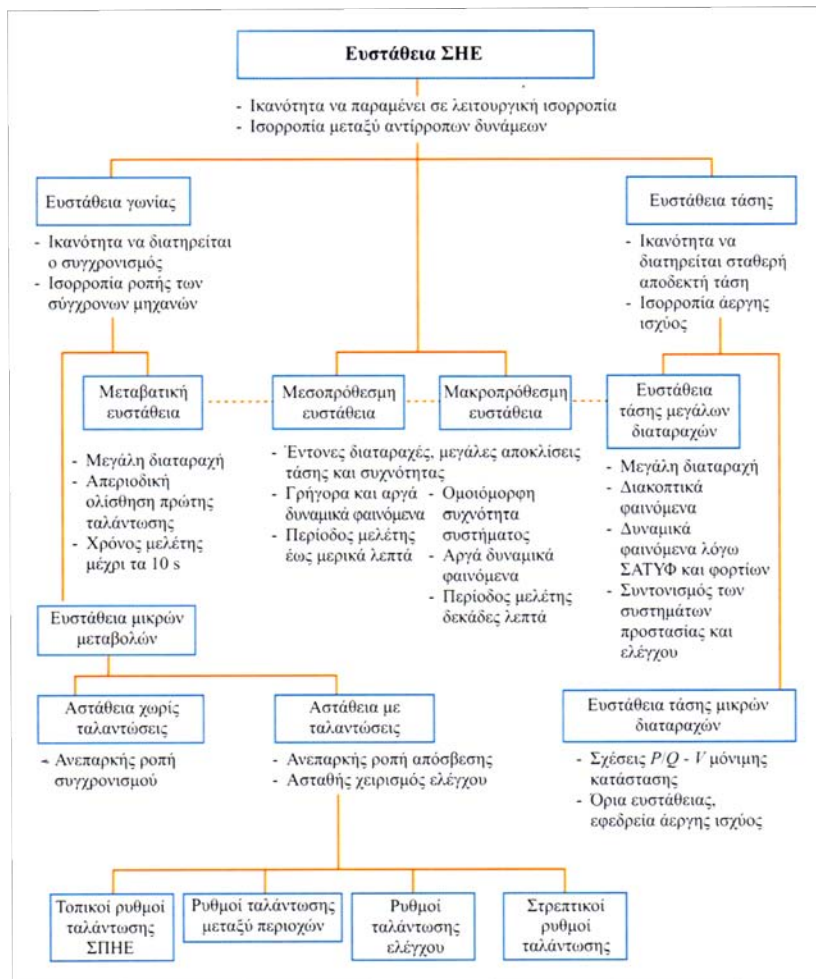
#### 4.4 Μελέτη της ευστάθειας

##### 4.4.1 Αντικείμενα της μελέτης

Σε προηγούμενη παράγραφο έγινε ο διαχωρισμός της ευστάθειας, ανάλογα με το χρόνο και το είδος της διαταραχής. Πλέον με τη βοήθεια της εξίσωσης ταλάντωσης, δύναται να σημειωθούν οι κυριότεροι όροι που ελέγχονται για τη διατήρηση του συγχρονισμού. Με βάση την εξίσωση (4.9), είναι ευπροσδιόριστη η βασική μεταβλητή αλλαγής, δηλαδή η γωνιακή θέση του δρομέα  $\delta$ . Η ευστάθεια της γωνίας του δρομέα (generator's rotor angle stability), αφορά την ισορροπία στον όρο αυτό πριν και μετά από μία διαταραχή [12]. Όταν προκαλείται αποσυγχρονισμός, τότε η ηλεκτρική γωνία επηρεάζει άμεσα το ισοζύγιο (4.3), όπως αυτό αποδεικνύεται από τις εξισώσεις (4.7) και (4.8). Σε τέτοια περίπτωση, η αστάθεια που προκαλείται διαχωρίζεται σε αστάθεια ηλεκτρικής γωνίας μικρών μεταβολών και σε μεταβατική αστάθεια ηλεκτρικής γωνίας [2]. Από την ευστάθεια γωνίας του δρομέα, μπορούν να προκύψουν άλλα είδη ευστάθειας, όπως αυτό της γωνιακής ταχύτητας, (generator's speed stability), κ.ά.

Επίσης, άλλο ένα θεμελιώδες ηλεκτρικό μέγεθος που συμμετέχει στην ευστάθεια, είναι η τάση (voltage stability). Ανάλογα με το είδος της διαταραχής που προκύπτει, διακρίνεται σε αστάθεια τάσης είτε μικρής είτε μεγάλης διακύμανσης. Σε μεγάλες διαταραχές, όπως είναι τα βραχυκυκλώματα, η τιμή της τάσης σε όλους τους ζυγούς ενός διασυνδεδεμένου δικτύου μειώνεται αρκετά κάτω από το 1 p.u, γεγονός που κρίνει καθοριστική τη μελέτη της για την παραμονή του συγχρονισμού [2]. Τέλος, βάσει του ελεγκτή Q-V που υπάρχει σε κάθε σύγχρονη γεννήτρια, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1.3, αλληλοσυνδέεται άμεσα και με την άεργο ισχύ της γεννήτριας Q (generator's reactive power stability).

Η ευστάθεια της συχνότητας (frequency stability), αποτελεί αναπόσπαστο αντικείμενο μελέτης της ευστάθειας ενός ΣΗΕ, παρόλο που δεν φαίνεται ως ξεχωριστή κατηγορία στο επόμενο σχήμα. Στο σύγχρονο δίκτυο της ΔΕΗ, η ονομαστική τιμή της συχνότητας είναι τα 50 Hz, (Hertz). Μία σημαντική διαταραχή, μεσοπρόθεσμη ή μεγαλύτερη σε διάρκεια, μπορεί να επιφέρει αλλαγές στην αρχική τιμή της συχνότητας και να χάσει τον συγχρονισμό της οριστικά. Βάσει του ελεγκτή P-f, προστίθεται ως αντικείμενο μελέτης η ενεργός ισχύς P κάθε γεννήτριας (generator's active power stability) και αφορά την ηλεκτρική ισχύ  $P_e$  της γεννήτριας, η οποία εξετάζεται ως προς το συγχρονισμό σε συνδυασμό με την τάση [2, 12]. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται αναλυτικά ο διαχωρισμός των αντικειμένων της ευστάθειας [2]. Οι επεξηγήσεις ηλεκτρολογικών όρων ΣΑΤΥΦ<sup>23</sup> και ΣΠΗΕ<sup>24</sup> δίνονται παρακάτω.



Σχήμα 4.5: Διαχωρισμός της μελέτης ευστάθειας των ΣΗΕ [2].

<sup>23</sup> ΣΑΤΥΦ: προκύπτει από τα αρχικά των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο.

<sup>24</sup> ΣΠΗΕ: προκύπτει από τα αρχικά των Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

#### 4.4.2 Μέθοδοι της μελέτης

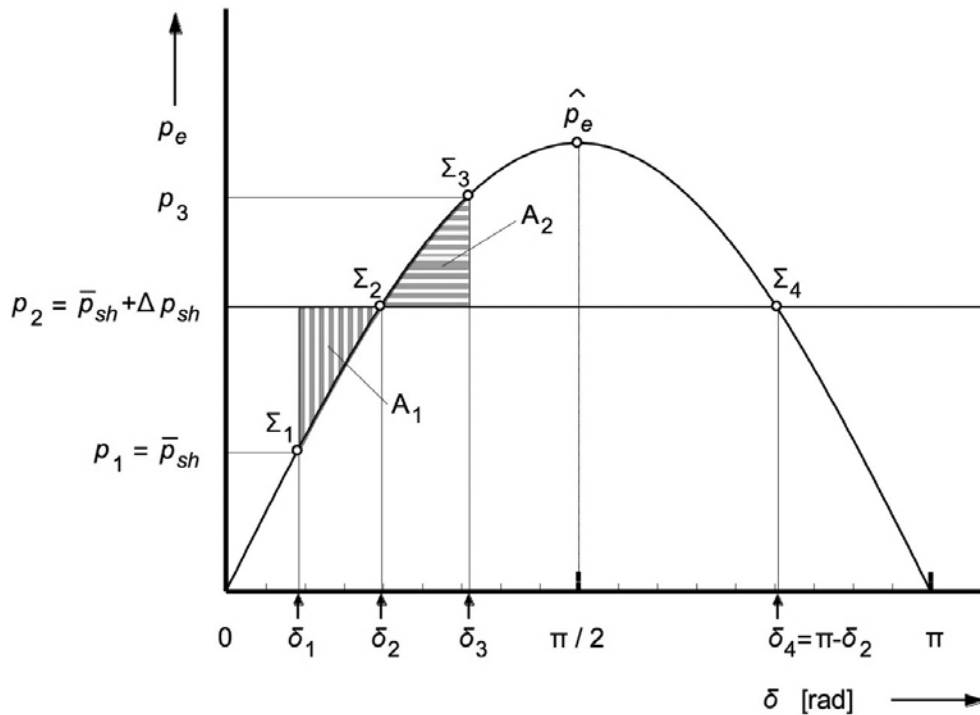
Το ισοζύγιο μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος αποδεικνύει ότι για την ακριβή μελέτη ενός προβλήματος ευστάθειας, απαιτείται επίλυση της διαφορικής εξίσωσης ταλάντωσης. Μάλιστα, η ημιτονοειδής χρονική μεταβολή της γωνίας του δρομέα,  $\sin\delta \neq \delta$ , επιβεβαιώνει ότι το πρόβλημα δεν γραμμικοποιείται [8]. Στην πραγματικότητα, λοιπόν, υπάρχουν δύο τρόποι για την εκτίμηση της ευστάθειας στη μεταβατική κατάσταση. Συγκεκριμένα [5]:

1. Με μεθόδους άμεσης ανάλυσης (direct analysis), στις οποίες δεν λύνεται κάποιο σύστημα διαφορικών εξισώσεων, αλλά εφαρμόζονται αναγνωρισμένες μαθηματικές προσεγγίσεις του προβλήματος. Η πιο γνωστή είναι η μέθοδος Liapunov, η οποία έχει εφαρμοστεί περισσότερο σε μικρά πρότυπα δίκτυα. Έντονο μαθηματικό ενδιαφέρον παρουσιάζει το κριτήριο των ίσων εμβαδών, το οποίο δεν εφαρμόζεται σε μεγάλα ΣΗΕ, παρά μόνο στο σύστημα μίας γεννήτριας διασυνδεδεμένης με άπειρο ζυγό.
2. Με μεθόδους έμμεσης ανάλυσης (indirect analysis), στις οποίες τα συστήματα των διαφορικών εξισώσεων λύνονται πλέον σε ψηφιακούς υπολογιστές. Ο μηχανικός αφού εισάγει τα δεδομένα στο ενδεδειγμένο πρόγραμμα του υπολογιστή, εφαρμόζει το σφάλμα και παρατηρεί στην οθόνη το αποτέλεσμα της εξίσωσης ταλάντωσης σε μία καμπύλη ως προς το χρόνο  $t$ . Η μορφή της καμπύλης φανερώνει εάν το ΣΗΕ διατηρεί την ευστάθεια μετά το εφαρμοσμένο σφάλμα. Για την επίλυση του διαφορικού συστήματος χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα, όπως είναι αυτό του Euler, τα οποία προσδιορίζουν την πιο ακριβή αποτύπωση των ταλαντώσεων στην οθόνη του Η/Υ.

Μπορεί οι υπολογισμοί των διαφορικών εξισώσεων να είναι μία σύνθετη διαδικασία που δεν βοηθάει στη γρήγορη μελέτη της ευστάθειας, όμως έχουν αναπτυχθεί άμεσες μέθοδοι, οι οποίες είναι αρκετά αποδοτικές και γρήγορες. Όπως επισημάνθηκε, μία από τις άμεσες μεθόδους, είναι το κριτήριο ίσων εμβαδών, για το οποίο ακολουθεί ειδική αναφορά.

#### 4.5 Κριτήριο ίσων εμβαδών και εφαρμογές

Η συγκεκριμένη μέθοδος στη μελέτη ευστάθειας ΣΗΕ, εφαρμόζεται με την καμπύλη  $P_e - \delta$  στο σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού. Ως ημιτονοειδής συνάρτηση της γωνίας, η ενεργός ηλεκτρική ισχύς  $P_e = |P_e| \sin\delta$ , αναπαρίσταται στο Σχήμα 4.6:



Σχήμα 4.6: Καμπύλη P-δ για κριτήριο ίσων εμβαδών, εφαρμοσμένο στο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού [8].

Τα 5 σημεία που επισημαίνονται είναι:

- ◇ Σ1:  $P_1 = P_{sh}$ , γωνία  $\delta_1$ , όπου η ηλεκτρική ισχύς στη μόνιμη κατάσταση θεωρείται ίση με τη μηχανική. Η γωνία  $\delta_1$  θεωρείται η αρχική γωνία φόρτισης.
- ◇ Σ2:  $P_2 = P_{sh} + \Delta P_{sh}$ , γωνία  $\delta_2 > \delta_1$ , όπου η μηχανική ισχύς αυξάνεται κατά  $\Delta P_{sh}$ . Μέχρι το σημείο αυτό, η μηχανική ισχύς ήταν μεγαλύτερη της ηλεκτρικής, γεγονός που προκάλεσε επιτάχυνση στο δρομέα από το σημείο Σ1 και αύξηση της γωνίας  $\delta_1$  σε  $\delta_2$ . Στο Σ2, παρατηρείται νέα ισορροπία μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος, σε νέα γωνία φόρτισης  $\delta_2$ .
- ◇ Σ3:  $P_3 > P_2$ , γωνία  $\delta_3 > \delta_2$ , όπου η ηλεκτρική ισχύς ξεπερνά κατά πολύ την αύξηση της μηχανικής ισχύος. Επειδή ο δρομέας άρχισε να επιβραδύνεται από το σημείο Σ2 και μετά, η γωνιακή ταχύτητα μειώθηκε μέχρι να φτάσει στην αρχική  $\omega^0$  στο σημείο Σ3.
- ◇ Σmax:  $P_{e-MAX} > P_3$ , γωνία  $\delta_M = \pi/2$ , όπου η επιβράδυνση έγινε αρνητική από το σημείο Σ3 και έπειτα, μέχρι να φτάσει η ηλεκτρική ισχύς στο μέγιστο  $|P_e|$ , για  $\delta = \pi/2$ , καθώς το  $\sin\delta = 1$ . Η γωνιακή ταχύτητα έχει φτάσει στην κατώτατη αρνητική της τιμή



και έτσι η γωνία φόρτισης θα μειωθεί. Το σημείο αυτό είναι το όριο ευστάθειας της μόνιμης κατάστασης του συστήματος.

- ◇ Σ4:  $P_4 = P_2 < P_3$ , γωνία  $\delta_4 = \pi - \delta_2$ , όπου σταματάει η επιβράδυνση καθώς υπάρχει ξανά ισορροπία μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος. Από εδώ και πέρα, η μηχανική ισχύς θα αρχίσει να υπερβαίνει την ηλεκτρική, κι έτσι η γωνία φόρτισης θα μειωθεί κι άλλο, μέχρι να ολοκληρώσει τον πλήρη κύκλο της ταλάντωσης για  $\delta = \pi$ , όπου το σύστημα βραχυκυκλώνεται. Το σημείο αυτό είναι το όριο ευστάθειας της μεταβατικής κατάστασης του συστήματος. Ονομάζεται και κρίσιμο σημείο.

Με βάση τα παραπάνω σημεία, παρατηρούνται 2 εμβαδά. Το εμβαδόν  $A_1$  οφείλεται στην επιτάχυνση του δρομέα, ενώ το εμβαδόν  $A_2$  στην επιβράδυνσή του. Στο εμβαδόν  $A_1$  από την εξίσωση (4.7), προκύπτει ότι η γωνιακή επιτάχυνση του δρομέα είναι σταθερή ως προς το χρόνο ως εξής [13]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega^0}{2H} (P_2 - P_1) pu \quad (4.12)$$

Έτσι προκύπτει η νέα γωνιακή θέση ισορροπίας  $\delta_2$  από την ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης [13]:

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{\omega^0}{2H} (P_2 - P_1) t^2 pu$$

Στο εμβαδόν  $A_2$  από την εξίσωση (4.7) προκύπτει ότι [13]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega^0}{2H} (P_3 - P_2) pu$$

Αντίστοιχα, η μέγιστη γωνιακή θέση  $\delta_3$  δίνεται από την ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης [13]:

$$\delta_3 = \delta_2 + \frac{\omega^0}{2H} (P_3 - P_2) t^2 pu$$

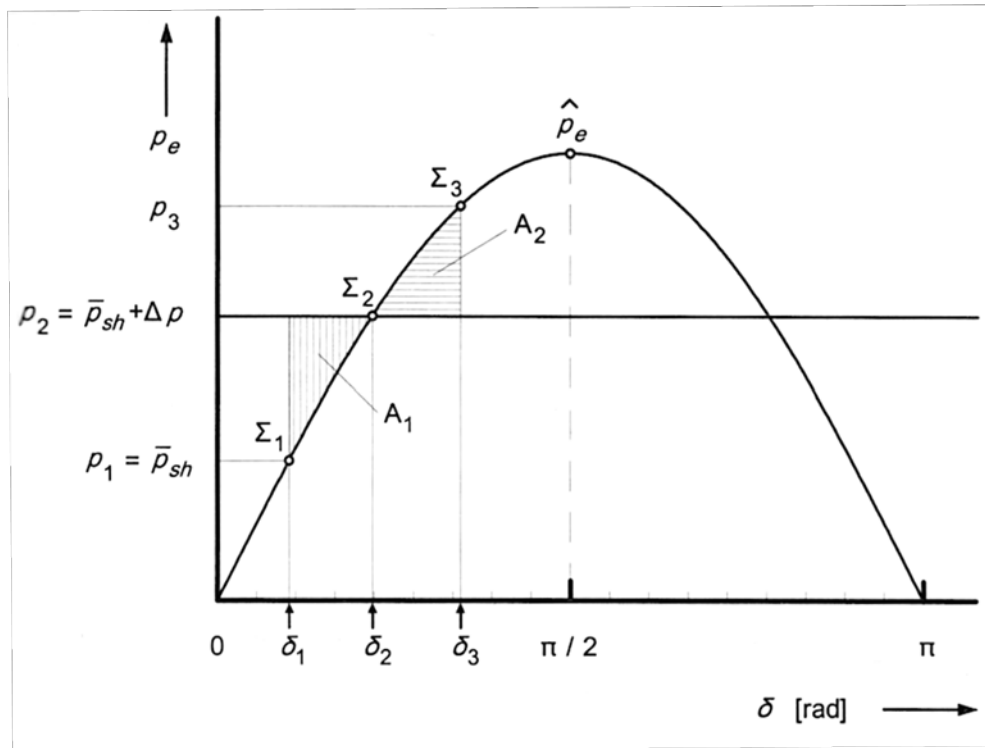
Αυτή η ταλάντωση μεταξύ του  $\delta_1$  και του μέγιστου  $\delta_3$ , όσο περνάει ο χρόνος, θα πρέπει να έχει φθίνουσα πορεία για να θεωρηθεί ευσταθές το σύστημα. Επομένως, ο δρομέας θα πρέπει να ισορροπεί ως προς τη γωνία  $\delta_2$ . Επίσης, η γωνία  $\delta_3$  δεν πρέπει να ξεπερνάει την οριακή γωνία  $\pi - \delta_2$ , καθώς κατά αυτόν τον τρόπο ο δρομέας θα επιταχύνεται συνεχώς με οριστική αστάθεια. Τελικά, προκύπτει το κριτήριο ίσων εμβαδών ως η ισότητα [5]:

$$A_1 = A_2 \implies \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_a d\delta = \int_{\delta_2}^{\delta_3} P_a d\delta \quad (4.13)$$

Το κριτήριο ίσων εμβαδών στο σύστημα γεννήτριας-άπειρου ζυγού βρίσκει τρεις εφαρμογές, οι οποίες αναλύονται επεξηγηματικά αμέσως μετά.

#### 4.5.1 Μείωση φορτίου

Με βάση το Σχήμα 4.7 σχολιάζονται τα εξής σημεία:



Σχήμα 4.7: Κριτήριο ίσων εμβαδών, εφαρμοσμένο στο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού για μείωση φορτίου [8].

$\Sigma 1$ : Μόνιμη κατάσταση στην οποία γίνεται μείωση ενός φορτίου, που οδηγεί σε απότομη αύξηση της μηχανικής ισχύος. Ακολουθεί επιταχυνόμενη κίνηση του δρομέα με αύξηση της γωνίας.

$\Sigma 2$ : Νέο σημείο ισοροπίας μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος με νέα γωνία φόρτισης  $\delta_2$ . Ακολουθεί επιβραδυνόμενη κίνηση του δρομέα.

$\Sigma 3$ : Τελικό σημείο, στο οποίο η γωνιακή ταχύτητα ισοφαρίζει την ονομαστική.

Σ1-Σ2:

$$A_1 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_a d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_2 - |P_e| \sin\delta) d\delta = P_2(\delta_2 - \delta_1) + |P_e|(\cos\delta_2 - \cos\delta_1)$$

Σ2-Σ3:

$$A_2 = \int_{\delta_2}^{\delta_3} P_a d\delta = \int_{\delta_2}^{\delta_3} (|P_e| \sin\delta - P_2) d\delta = -|P_e|(\cos\delta_3 - \cos\delta_2) - P_2(\delta_3 - \delta_2)$$

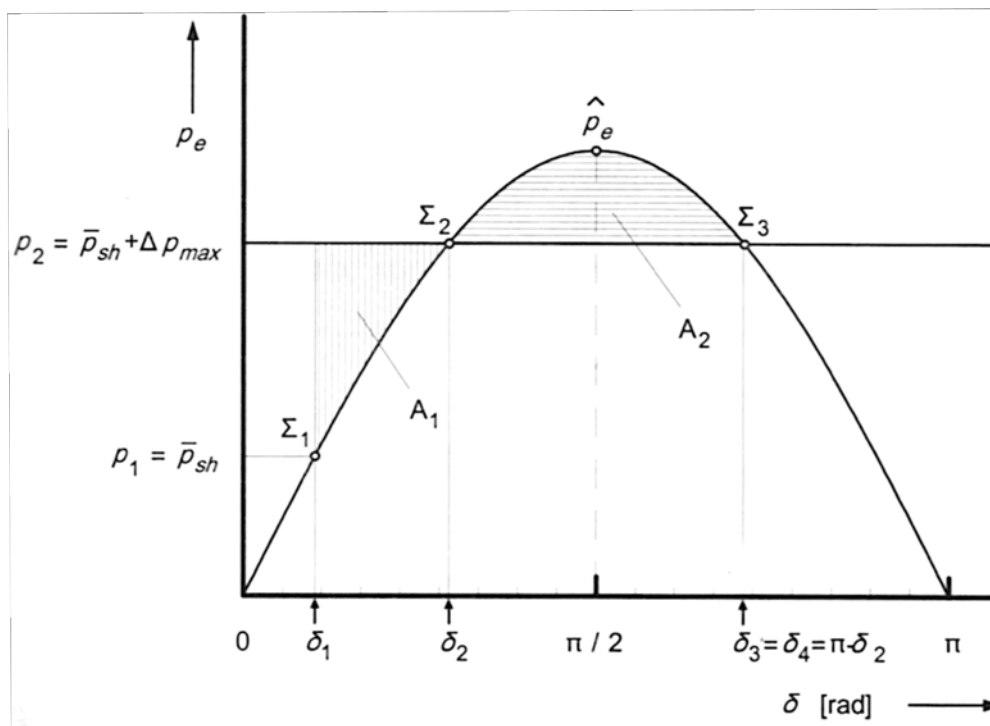
Εφαρμόζοντας το κριτήριο προκύπτει ότι:

$$A_1 = A_2 \Rightarrow (\cos\delta_1 - \cos\delta_3) - \sin\delta_2(\delta_3 - \delta_1) = 0$$

Με γνωστά το αρχικό φορτίο και τη μεταβολή του, τίθεται προς υπολογισμό η μέγιστη γωνία  $\delta_3$  [5, 8].

#### 4.5.2 Αποσύνδεση φορτίου

Με βάση το Σχήμα 4.8 σχολιάζονται τα εξής σημεία:



Σχήμα 4.8: Κριτήριο ίσων εμβαδών, εφαρμοσμένο στο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού για αποσύνδεση φορτίου [8].

Σ1: Μόνιμη κατάσταση στην οποία γίνεται ολική αποσύνδεση φορτίου, που οδηγεί στη μέγιστη αύξηση της μηχανικής ισχύος. Ακολουθεί επιταχυνόμενη κίνηση του δρομέα με αύξηση της γωνίας.

Σ2: Μέγιστη αλλαγή μηχανικής ισχύος. Υπάρχει νέα ισορροπία μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος με νέα γωνία φόρτισης  $\delta_2$ . Ακολουθεί επιβραδυνόμενη κίνηση του δρομέα.

Σ3: Τελικό σημείο, στο οποίο η γωνιακή ταχύτητα ισοφαρίζει την ονομαστική. Μέγιστη δυνατή τιμή της γωνίας  $\delta_3$  είναι η  $\pi - \delta_2$ .

Σ1-Σ2:

$$A_1 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_a d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_2 - |P_e| \sin\delta) d\delta = P_2(\delta_2 - \delta_1) + |P_e|(\cos\delta_2 - \cos\delta_1)$$

Σ2-Σ3:

$$A_2 = \int_{\delta_2}^{\delta_3} P_a d\delta = \int_{\delta_2}^{\pi - \delta_2} (|P_e| \sin\delta - P_2) d\delta = 2|P_e| \cos\delta_2 - P_2(\pi - 2\delta_2)$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο προκύπτει ότι:

$$A_1 = A_2 \implies (\cos\delta_1 + \cos\delta_2) - \sin\delta_2(\pi - \delta_2 - \delta_1) = 0$$

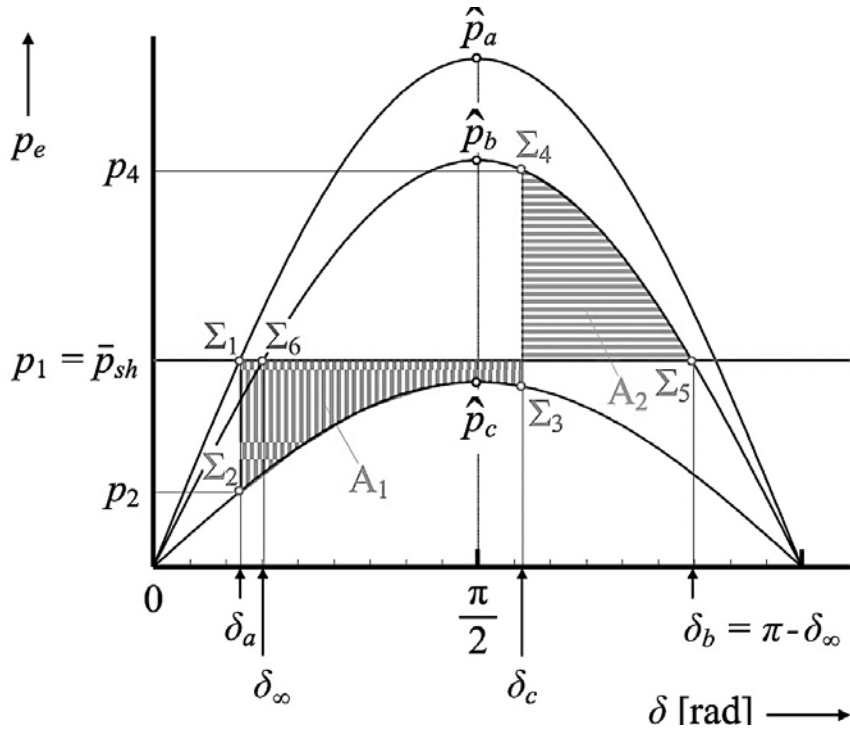
Με γνωστό το αρχικό φορτίο, τίθεται προς υπολογισμό η οριακή γωνία  $\delta_2$  [5, 8].

#### 4.5.3 Τριφασικό σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς

Έστω, λοιπόν,  $x_a$  πριν το σφάλμα,  $x_c$  κατά το σφάλμα,  $x_b$  μετά την εκκαθάριση, με σχέση  $x_a \leq x_b < x_c$ , τότε ισχύει:

$$p_a \geq p_b > p_c$$

Άρα, με βάση το Σχήμα 4.9 σχολιάζονται τα ακόλουθα σημεία:



Σχήμα 4.9: Κριτήριο ίσων εμβαδόν, εφαρμοσμένο στο μοντέλο

σύγχρονης γεννήτριας-άπειρου ζυγού για τριφασικό σφάλμα στη γραμμή [8].

Σχεδιάστηκαν τρεις καμπύλες: 1)  $p_a$ , πριν το σφάλμα,

2)  $p_c$ , κατά το σφάλμα, 3)  $p_b$ , μετά το σφάλμα.

Σ1: Μόνιμη κατάσταση με ισορροπία μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος. Γωνία φόρτισης  $\delta_a$ .

Σ2: Τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή. Η μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρική. Επομένως υπάρχει ρήξη της ισορροπίας μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος. Ακολουθεί η επιταχυνόμενη κίνηση του δρομέα.

Σ3: Άνοιγμα των διακοπών στο σημείο του σφάλματος. Νέα γωνία φόρτισης  $\delta_c$ .

Σ4: Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος ακολουθεί η επιβραδυνόμενη κίνηση του δρομέα μέχρι το σημείο Σ5.

Σ5: Τελικό σημείο, με οριακή γωνία  $\delta_b$ .

Σ2-Σ3:

$$A_1 = \int_{\delta_a}^{\delta_c} (P_{sh} - |P_e| \sin \delta) d\delta = |P_{sh}|(\delta_c - \delta_a) + |P_c|(\cos \delta_c - \cos \delta_a)$$

Σ4-Σ5:

$$A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_b} (|P_e| \sin \delta - P_{sh}) d\delta = -|P_b|(\cos \delta_b - \cos \delta_c) - |P_{sh}|(\delta_b - \delta_c)$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο προκύπτει ότι:

$$A_1 = A_2 \Rightarrow |P_b|(\cos \delta_c - \cos \delta_b) - |P_c|(\cos \delta_c - \cos \delta_a) - |P_{sh}|(\delta_b - \delta_a) = 0$$

Με γνωστό το αρχικό φορτίο και τα στοιχεία της γραμμής, τίθεται προς υπολογισμό η οριακή γωνία  $\delta_c$  [5, 8].

#### 4.6 Μέθοδος ολοκλήρωσης του Euler

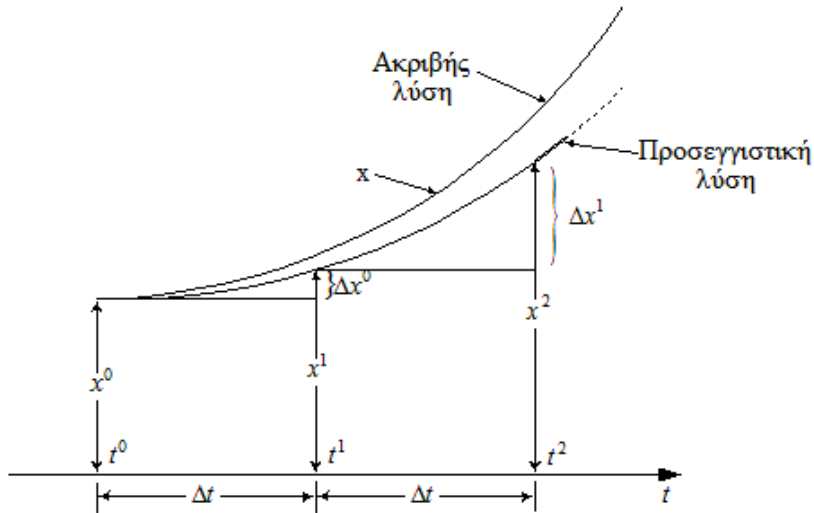
Οι μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται σε πρακτικό επίπεδο στους υπολογιστές, είναι οι έμμεσες. Μία από αυτές είναι η μέθοδος του Euler, η οποία καταλήγει στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (4.9). Η διαφορική εξίσωση 2<sup>ου</sup> βαθμού καταλήγει σε σύστημα δύο διαφορικών εξισώσεων 1<sup>ου</sup> βαθμού, με τη χρήση της γωνίας  $\delta$  του δρομέα. Δηλαδή [5]:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \delta' \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Με αντικατάσταση από την (4.9), η (4.14) γράφεται ως:

$$x' = \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta' \\ \delta'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta' \\ \frac{\omega^0 (P_{sh} - P_e - D x_2)}{H} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Στο διάγραμμα x-t που ακολουθεί στο Σχήμα 4.10, φαίνεται η ακρίβεια της μεθόδου ολοκλήρωσης του Euler.



Σχήμα 4.10: Καμπύλη ακριβείας έμμεσης μεθόδου του Euler [5].

Στον οριζόντιο άξονα ο χρόνος χωρίζεται σε διάφορες στιγμές  $t^0-t^n$ . Η ακρίβεια αυξάνει όσο το  $\Delta t$  μικραίνει. Όπως φαίνεται και στις καμπύλες του σχήματος, όσο μικραίνουν οι αποστάσεις μεταξύ των στιγμών αυτών, τόσο η προσεγγιστική λύση του Euler πλησιάζει την ακριβή λύση.

Με την προσέγγιση των συστημάτων (4.14) και (4.15) προκύπτει μαθηματικά ένα διαφορικό μοντέλο, που γενικεύεται ως:  $x' = f(x)$ , αφού  $x'_1 = \frac{dx_1}{dt}$  και  $x'_2 = f(\frac{dx_2}{dt})$ . Εάν, ληφθεί υπόψη το κάθε χρονικό διάστημα,  $t^v$ , ξεχωριστά τότε θα προκύψει το σύστημα, που αναγράφεται και στο σχήμα. Δηλαδή [5]:

$$\begin{aligned}
 & x^0 \\
 & x'^0 = f(x^0) \\
 x^1 &= x^0 + x'^0(t^1 - t^0) \\
 & x'^1 = f(x^1) \\
 x^2 &= x^1 + x'^1(t^2 - t^1) \\
 & x'^2 = f(x^2) \\
 & \dots \\
 & x'^v = f(x^v) \\
 x^{v+1} &= x^v + x'^v(t^v - t^{v-1})
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Από τη στιγμή που το σύστημα (4.15) είναι δευτέρης τάξης, τότε η καθεμία μεταβλητή βρίσκει λύση από την γενικευμένη εξίσωση [5]:

$$x_i^{v+1} = x_i^v + f_i(x_1^v, x_2^v)\Delta t, \quad i = 1,2 \tag{4.17}$$

Εφαρμόζοντας κάποιες παραδοχές στην εξίσωση (4.17), όπως ότι  $x_i^0 = \delta_i^0 = \angle E'_{Gi}$ , αλλά και τη σταθερότητα της μηχανικής ισχύος σε ισορροπία με την ηλεκτρική, τη χρονική στιγμή

$t^0$ , δηλαδή  $P_{Ti} = P_{Gi}^0$ , προκύπτει η ζητούμενη στη συγκεκριμένη περίπτωση, καμπύλη δ-t, η οποία συσχετίζει επακριβώς το κρίσιμο σημείο μίας ταλάντωσης με τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισής της.

#### 4.7 Τρόποι βελτίωσης της ευστάθειας στα σύγχρονα ΣΗΕ

Γενικά από τη θεωρητική ανάλυση της ευστάθειας προκύπτει μια σειρά συμπερασμάτων, που οδηγεί στα ανάλογα μέτρα για τη βέλτιστη διατήρησή της στο δίκτυο. Τα μέτρα αυτά οδηγούν κατά ένα συγκεκριμένο τρόπο στη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος. Πιο αναλυτικά, οδηγούν αρχικά σε μία μείωση της διάρκειας ή της «ισχύος» του βραχυκυκλώματος, άρα σε μία ομαλοποίηση των ταλαντώσεων της διαταραχής. Δεύτερον, δημιουργείται η «τάση» για μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή συγχρονισμού  $K_s$ . Σε επόμενο στάδιο, η μεταβολή της κινητικής ενέργειας ως προς το χρόνο  $\frac{d(W_{κλυ})}{dt}$ , μειώνεται με τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος εισόδου των γεννητριών και την εφαρμογή τεχνητού φορτίου στην έξοδο. Ποια μέτρα είναι αυτά που οδηγούν στα επιζητούμενα αποτελέσματα; Τέτοια μέτρα είναι τα εξής:

1. Κατάλληλη ρύθμιση των προστατευτικών μέσων (δηλ. διακοπών ισχύος, μετρητών και ηλεκτρονόμων), ώστε να λειτουργούν για την ταχύτερη εκκαθάριση των βραχυκυκλωμάτων, που αποσκοπεί στη διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας. Θα αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 5 η ρύθμιση του συστήματος προστασίας.
2. Μείωση της συνολικής επαγωγικής αντίδρασης μεταφοράς.
3. Μεγάλη τάση και μεγάλο ρεύμα διέγερσης, ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν πιο υψηλό όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης.
4. Υιοθέτηση συστημάτων διέγερσης ταχείας απόκρισης για μεταβατικά φαινόμενα.
5. Εγκάρσια αντιστάθμιση. Επιτυγχάνεται με στρεφόμενους πυκνωτές ή με στατικούς αντισταθμιστές άεργης ισχύος, SVC<sup>25</sup>. Είναι απαραίτητη για μεγάλες γραμμές μεταφοράς, ειδικά για αυτές που ξεπερνούν το μήκος των 400 km.
6. Δυναμική πέδηση.
7. Χρήση βαλβίδων αμοστροβίλου ταχείας απόκρισης.
8. Απόζευξη γεννήτριας.

---

<sup>25</sup> SVC: στατικός αντισταθμιστής άεργης ισχύος από τα αρχικά Static VAR Compensator.



## 9. Αποσύνδεση φορτίου.

Κάποια από τα παραπάνω θα επεξηγηθούν στη συνέχεια της παραγράφου.

### 4.7.1 Μείωση της συνολικής επαγωγικής αντίδρασης

Μέσω της μείωσης της επαγωγικής αντίδρασης στο σύστημα, η ισχύς συγχρονισμού αυξάνεται. Σε πιο πρακτικό επίπεδο για να επιτευχθεί αυτό, δίνεται συνοπτικά η σειρά των διαδικασιών, που λαμβάνει ο μηχανικός για την επίτευξη της μείωσης [2, 8]:

- Χρήση πολύκλωνων αγωγών ανά φάση. Αυξάνεται ο αριθμός των καλωδίων και κατά αυτό τον τρόπο μειώνεται η επαγωγική αντίδραση.
- Προτίμηση σε αυτομετασχηματιστές αντί για τους συμβατικούς μετασχηματιστές. Οι πρώτοι έχουν μικρότερες αντιδράσεις σκέδασης από τους δεύτερους.
- Σύνδεση πυκνωτών σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς.

Είναι προφανές ότι εάν αυξηθεί ο αριθμός των αγωγών ανά φάση της γραμμής μεταφοράς, τότε υπάρχουν περισσότερες διασυνδέσεις, που μπορούν να στηρίζουν το δίκτυο σε μία απότομη αύξηση της ροής ισχύος κατά το σφάλμα. Με αυτόν τον τρόπο μοιράζεται το πλεόνασμα ισχύος, καθώς η καταπόνηση των καλωδίων είναι μικρότερη [2].

Για τους αυτομετασχηματιστές ισχύει ότι η ωμική αντίσταση των απωλειών του πυρήνα και η επαγωγική αντίδραση υπολογίζονται μέσα από δοκιμή σε κενό φορτίο στο συμβατικό μετασχηματιστή, ανηγμένο στο δευτερεύον τύλιγμά του. Κατά τη συγκεκριμένη δοκιμή, μειώνεται αρκετές φορές η  $r_{pu}$  τιμή της αντίδρασης [14]. Όμως, στην περίπτωση που επιλεγεί ο τυπικός μετασχηματιστής, τότε σε συνεννόηση με τον κατασκευαστή επιτυγχάνεται η μικρότερη δυνατή τιμή της επαγωγικής αντίδρασης.

Τέλος, η σύνδεση πυκνωτών σειράς με τη γραμμή οδηγεί αυτόματα σε αύξηση της χωρητικής αντίδρασης της γραμμής, γεγονός που αντισταθμίζει τον επαγωγικό παράγοντα. Για καλύτερη αντίδραση του συστήματος σε ένα σφάλμα, κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος αποσυνδέονται οι πυκνωτές και επανασυνδέονται αμέσως μετά το άνοιγμα των διακοπών. Η ταχύτητα με την οποία γίνεται η επανασύνδεση, διαδραματίζει τεράστιο ρόλο στην ευστάθεια [15]. Γι' αυτό το λόγο η καλύτερη κατηγορία πυκνωτών είναι οι αποξεύξιμοι πυκνωτές σειράς (switched capacitors series), οι οποίοι συνδέονται στη

γραμμή στον ελάχιστο χρόνο, αρκεί η τάση στο ζυγό να είναι η μέγιστη, δηλαδή όταν δεν υπάρχουν μεταβατικά φαινόμενα [2, 8, 14, 15].

#### 4.7.2 Κατάλληλο σύστημα διέγερσης

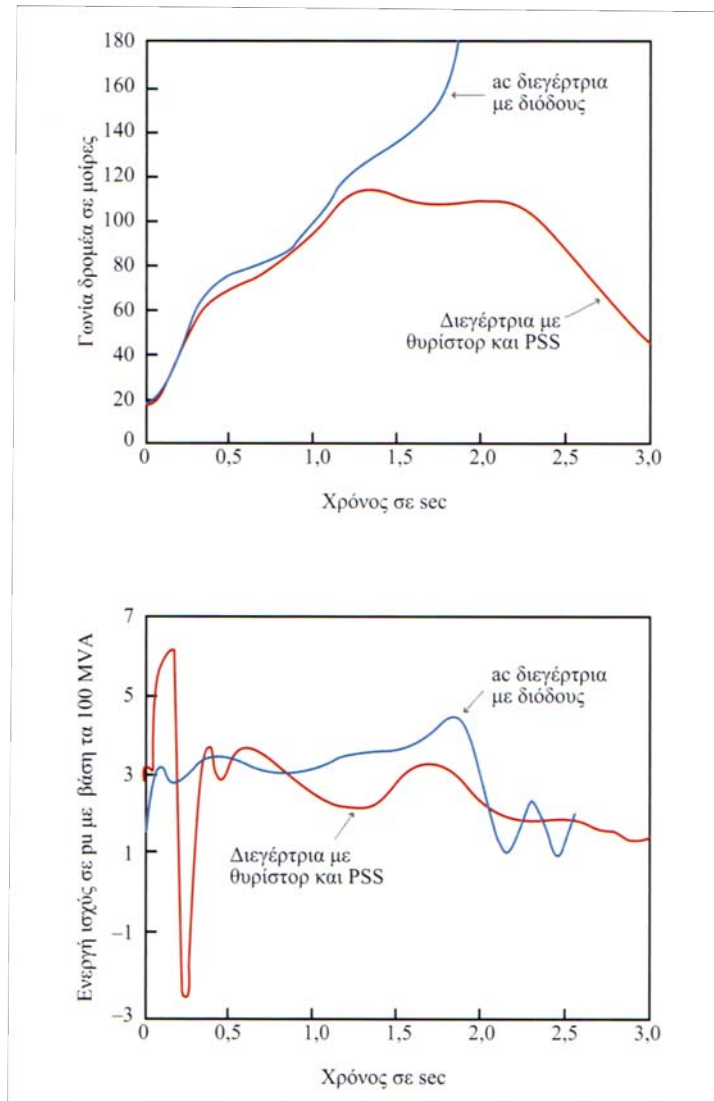
Στα μεταβατικά φαινόμενα είναι ξεκάθαρο, ότι υπάρχει πτώση τάσης σε όλους τους ζυγούς, που είναι διασυνδεδεμένοι με το ζυγό του σφάλματος. Στα παραπάνω μέτρα 3 και 4, δηλώθηκε ότι εκτός από την ταχύτητα που πρέπει να διέπει το σύστημα διέγερσης, είναι απαραίτητα τα υψηλά επίπεδα τάσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση της διεγέρτριας μονάδας της γεννήτριας, τόσο αυξάνεται η ισχύς συγχρονισμού. Δηλαδή, ο έλεγχος AVR, ο οποίος σχολιάστηκε στην παράγραφο 4.1.3, ανιχνεύει την πτώση τάσης από το σφάλμα και προσπαθεί να αυξήσει στον ελάχιστο χρόνο την τάση του διεγέρτη.

Επίσης, το σύστημα διέγερσης χρειάζεται ένα σταθεροποιητή (stabilizer). Η κύρια δουλειά του είναι να ελέγχει το διεγέρτη της γεννήτριας και να αποσβένει τις ταλαντώσεις του δρομέα, που προκύπτουν κατά τη μεταβατική διαταραχή. Έτσι, δημιουργείται το κατάλληλο περιβάλλον για την σταθεροποίηση των ακραίων συνθηκών και την ταχεία απόκριση του συστήματος διέγερσης. Χωρίς το σταθεροποιητή ή εν συντομία το PSS<sup>26</sup>, η γεννήτρια θα ταλαντωνόταν στους ρυθμούς του σφάλματος και η γρήγορη απόκριση του διεγέρτη θα οδηγούσε σε επιπλέον αύξηση της τάσης, με καταστροφικά αποτελέσματα ως προς την ευστάθεια.

Στο Σχήμα 4.11 γίνεται εμφανής η σημασία, που έχει η χρήση του σταθεροποιητή σε μία περίπτωση μεταβατικής ευστάθειας. Χωρίς αυτόν, το σύστημα διέγερσης δεν έχει κάποιο σύστημα περιορισμού των ταλαντώσεων και η γωνία του δρομέα οδηγείται σε οριστική αστάθεια. Στην ενεργό ισχύ υπάρχει μία «τάση» προς απόσβεση των μεγάλων ταλαντώσεων, αλλά είναι φανερό, ότι χωρίς το PSS δεν υπάρχει ομαλοποίηση της κατάστασης.

---

<sup>26</sup>PSS: σταθεροποιητής ΣΗΕ από τα αρχικά Power System Stabilizer.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση γεννητριών με PSS και με διόδους [2].

Τέλος, εκτός από το σταθεροποιητή, το σύστημα διέγερσης συμπληρώνει ένας περιοριστής τάσης. Αυτός έχει συμπληρωματικό ρόλο ως προς το αδύναμο σημείο του σταθεροποιητή. Δηλαδή, επειδή η γρηγορότερη απόκριση του διεγέρτη είναι απαραίτητη, ο σταθεροποιητής καθυστερεί το σύστημα και για να μην προκληθεί ολική αστάθεια από την αύξηση της τάσης του διεγέρτη, αναλαμβάνει ο περιοριστής εξόδου. Στόχος αυτού είναι να μην ξεπερνάει η τελική τάση τα 1,1 pu, εμποδίζοντας έτσι οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση [2].

#### 4.7.3 Δυναμική πέδηση

Η στρατηγική βελτίωσης της ευστάθειας δεν εκμεταλλεύεται μόνο τα στοιχεία του δικτύου, αλλά απαιτεί ακόμα και την εισαγωγή τεχνητού φορτίου. Αυτό το είδος στρατηγικής

ονομάζεται δυναμική πέδηση και έχει στόχο τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, μέσα από την αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου.

Πως επιτυγχάνεται αυτή η αύξηση στην ηλεκτρική ισχύ μίας γεννήτριας; Το φρένο του μηχανικού άξονα επέρχεται με μία εγκάρσια σύνδεση αντιστάσεων, αμέσως μετά από μία εμφάνιση βραχυκυκλώματος. Συνήθως, η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στις πιο κοντινές γεννήτριες ως προς τη θέση του βραχυκυκλώματος. Βέβαια, επιφέρει μεγάλη καταπόνηση στον άξονα της μηχανής, οπότε εξετάζεται προσεκτικά ως προς τη διάρκεια λειτουργίας ενός τέτοιου μέτρου. Ένας εξίσου συνηθισμένος τρόπος είναι η εν σειρά σύνδεση αντιστάσεων, η οποία μειώνει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, απορροφώντας μηχανική ισχύ, η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος της γεννήτριας. Αυτή η περίπτωση συναντάται σε τριφασικά συστήματα γειωμένου αστέρα, στα οποία υπάρχει διακόπτης παράκαμψης. Όταν ο διακόπτης ανιχνεύσει σφάλμα, ανοίγει τις επαφές του από το κύκλωμα και συνδέονται οι αντιστάσεις σε σειρά.

Γενικά, πρόκειται για μία τεχνική, που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια ως προς το χρόνο εφαρμογής και η προσθήκη των αντιστατών πρέπει να διέπεται από συνέπεια στη σύνδεση και στην αποσύνδεση, ώστε να μη χαθεί οριστικά η ευστάθεια του κυκλώματος μετά από διαταραχή [2].

#### 4.7.4 Χρήση SVC

Το SVC ορίζεται ως το σύστημα, που χρησιμοποιεί στατικούς αντισταθμιστές αέργου ισχύος, για να συμπληρώσει τον πρώτο έλεγχο της τάσης με μία μεγαλύτερη απόσβεση ταλαντώσεων. Επομένως η απόσβεση των μεγάλων ταλαντώσεων αφορά κυρίως την άεργο ισχύ  $Q$ . Ποια είναι τα σημαντικότερα στοιχεία SVC, που συναντώνται στα ΣΗΕ; Ονομαστικά [2]:

- Ελεγχόμενο πηνίο με θυρίστορ, TCR.
- Αποξέυξιμο πηνίο με θυρίστορ, TSR.
- Κορεσμένο πηνίο, SR.
- Αποξέυξιμος πυκνωτής με θυρίστορ, TSC.
- Ελεγχόμενος μετασχηματιστής με θυρίστορ, TCT.

Το πρόβλημα με αυτή τη στρατηγική βελτίωσης της ευστάθειας είναι δυσεπίλυτο και αφορά τη θέση, που εγκαθίσταται το SVC. Ο λόγος δυσκολίας έχει να κάνει με την αναζήτηση του

σημείου της μέγιστης ευαισθησίας του δικτύου. Εντούτοις, όπως έχει γίνει ήδη ξεκάθαρο από την εισαγωγή, ο μηχανικός πλέον χρησιμοποιεί το κατάλληλο λογισμικό στον υπολογιστή, ούτως ώστε να ξεφύγει από τα προβλήματα αυτά και να εντοπίσει με εγκυρότητα την ακριβή θέση εγκατάστασης.

Η επιλογή κάποιου, από τα παραπάνω στοιχεία, δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα, καθότι συνήθως σε κάθε υποδίκτυο επιλέγεται ο επιθυμητός συνδυασμός. Τέλος, ανεξάρτητα με το είδος διάταξης SVC, που επιλέγεται, κρίνεται πολύ σημαντική η χρήση της στα σύγχρονα ΣΗΕ. Επειδή, μετά το άνοιγμα του κατάλληλου διακοπτικού υλικού σε ένα σφάλμα, είναι μία από τις λίγες στρατηγικές, που λειτουργεί με τέτοιο διαρκή ρυθμό απόσβεσης στη μεταβατική και δυναμική ταλάντωση [2].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

#### 5.1 Εισαγωγή στο σύστημα προστασίας

Το σύστημα προστασίας που επιλέγεται, ανεξαρτήτως μεγέθους ή αριθμού των χαρακτηριστικών μονάδων του δικτύου, όπως είναι οι κινητήρες ή τα μεγάλα φορτία που το επιβαρύνουν, παρουσιάζει ένα βασικό κοινό χαρακτηριστικό. Συγκεκριμένα, όπως έχει γίνει κατανοητό και από τις προηγούμενες ενότητες των σφαλμάτων και της μεταβατικής ευστάθειας, απαιτείται υψηλή «ταχύτητα» λειτουργίας του, ώστε να εξασφαλιστεί η διατήρηση τόσο της ισορροπίας όλων των τμημάτων του δικτύου, όσο και της απαραίτητης ασφάλειας. Παραδείγματος χάρη, στα βραχυκυκλώματα επικρατούν υπερυψηλά ρεύματα με σχεδόν μηδενική τάση, σε ακαριαίο χρόνο από την στιγμή που συμβαίνουν, το οποίο δηλώνει το πόσο αναγκαίο είναι να ανοίξει το δίκτυο στο σημείο αυτό, ώστε να απελευθερωθεί από τη βλάβη που προκαλείται στον εξοπλισμό. Με λίγα λόγια, γρήγορη εκκαθάριση σημαίνει γρήγορο άνοιγμα των διακοπτικών μέσων, για την απομόνωση του σημείου του σφάλματος και για την προστασία του υπόλοιπου δικτύου. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι καλώδια, γραμμές και λοιποί αγωγοί θα αποσυνδεθούν, όμως η καταπόνηση θα είναι η ελάχιστη, γεγονός που επιτρέπει την επαναχρησιμοποίησή τους.

Οι συσκευές που απαρτίζουν ένα τέτοιο σύστημα, είναι σε σύνδεση με το «κυρίως» δίκτυο, αλλά λειτουργούν ξεχωριστά από αυτό. Αναλυτικότερα, αυτές είναι:

- i. Διακόπτες ισχύος<sup>27</sup>, κυρίως αυτόματοι, Α.Δ.Ι. ή Δ.Ι.
- ii. Ηλεκτρονόμοι προστασίας ή ρελέ<sup>28</sup>, ΗΝ.
- iii. Μετασχηματιστές μετρήσεων τάσης και ρεύματος<sup>29</sup>, ΜΣ.Τ. και ΜΣ.Ρ.

Εν συντομία το σύστημα προστασίας ξεκινάει από τους μετασχηματιστές και καταλήγει στο χειρισμό των διακοπών. Για να γίνει κατανοητό, οι μετασχηματιστές μετρήσεων χρησιμοποιούνται έτσι, που μετατρέπουν τις υψηλές τιμές μέτρησης σε χαμηλά σήματα, για να ενημερώσουν τους ηλεκτρονόμους. Αυτοί με τη σειρά τους «διαβάζουν» τις τιμές των μετρητών και με το που προκύψει μία ένδειξη στα σήματα, εκτός του επιτρεπτού ορίου

---

<sup>27</sup> Circuit breakers – CB.

<sup>28</sup> Relays.

<sup>29</sup> Voltage Transformers – VT για την τάση, Current Transformers – CT για το ρεύμα.

ακριβείας, διακόπτουν το κύκλωμα μέσω των σχετικών Δ.Ι. Οι διακόπτες, λοιπόν, αφού πάρουν την κατάλληλη εντολή (CB trip circuit), ανοίγουν τις επαφές τους ώστε να διακοπεί η τροφοδότηση του τμήματος σφάλματος. Όλες αυτές οι συσκευές πρέπει να συνεργαστούν για να ανιχνεύσουν τί έχει συμβεί σε ένα τμήμα του δικτύου, είτε αυτό αποτελεί μία μικρή διαταραχή, που αποσβένεται μόνο με τα συστήματα ελέγχου, είτε ένα βραχυκύκλωμα, το οποίο απαιτεί ταχύτατο συγχρονισμό τους για την εκκαθάριση. Συγκεκριμένα, η συνεργασία των προστατευτικών συσκευών σε ένα δίκτυο αποσκοπεί στα εξής [17]:

- Προστασία μίας εγκατάστασης και των μηχανικών, που βρίσκονται σε αυτή.
- Ακαριαία ανίχνευση του σημείου του σφάλματος και σωστή ρύθμιση τους, ώστε να αποσυνδεθεί το ελάχιστο δυνατό τμήμα δικτύου.
- Ελαχιστοποίηση της επίδρασης του βραχυκυκλώματος στα υπόλοιπα τμήματα, (η επίδραση αυτή έχει να κάνει με την ευστάθεια του κυκλώματος).
- Εξασφάλιση ελάχιστης καταπόνησης στον εξοπλισμό.
- Εξασφάλιση επαρκούς στήριξης από άλλο διακόπτη, σε περίπτωση αποτυχίας λειτουργίας του κατάλληλου.
- Πλήρης παροχή ελέγχου στους χειριστές, ώστε να επαναλειτουργήσει όλο το δίκτυο κανονικά στη νέα μόνιμη κατάσταση.
- Επίτευξη ενός ωφέλιμου συμβιβασμού μεταξύ της αξιοπιστίας, της απλότητας και του λειτουργικού κόστους του δικτύου προστασίας.

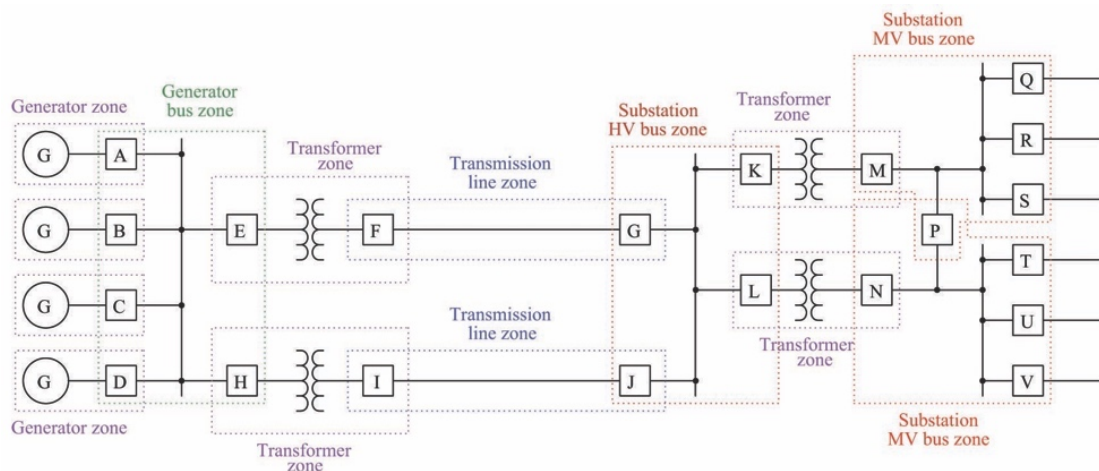
Συνοψίζοντας, το κάθε τμήμα του δικτύου, στο οποίο μπορεί να προκύψει σφάλμα, προϋποθέτει ότι θα ανοίξουν οι κατάλληλοι διακόπτες ισχύος. Αυτοί οι διακόπτες δεν ορίζονται τυχαία, αλλά βάσει ενός μοντέλου, που κάνει τα ΣΗΕ απολύτως ασφαλή. Έτσι, το δίκτυο προστασίας χωρίζεται σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα προστασία, ούτως ώστε να έχει «διπλή κάλυψη». Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η σιγουριά, ότι δεν γίνεται να παρεμποδιστεί η λειτουργία κάποιου μέσου προστασίας και να αποτύχει το σύστημα προστασίας [16, 17].

#### 5.1.1 Ζώνες προστασίας

Ως βασικός στόχος της προστασίας ορίστηκε η αποσύνδεση του τμήματος, όπου συμβαίνει το βραχυκύκλωμα. Για να είναι ένας μηχανικός απόλυτα σίγουρος, ότι το σύστημα προστασίας είναι αρκετό για να προστατευθούν όλα τα τμήματα από πιθανά σφάλματα,

πρέπει να έχει εξασφαλίσει εκτός από το κύριο σύστημα, ένα εφεδρικό που δεν απέχει πολύ από το αρχικό. Για αυτό το λόγο, αποφασίστηκε το σύστημα προστασίας να χωριστεί σε δύο ζώνες προστασίας.

Αρχικά, στην πρωτεύουσα προστασία η ζητούμενη αποσύνδεση αφορά μόνο το τμήμα, στο οποίο έχει συμβεί το σφάλμα. Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί, κάθε γράμμα συμβολίζει ένα ξεχωριστό δίδυμο διακόπτη-ηλεκτρονόμο. Ο κάθε ηλεκτρονόμος είναι ρυθμισμένος έτσι ώστε στην πρωτεύουσα προστασία να επιβλέπει τόσο το ζυγό στον οποίο ανήκει, όσο και τη γραμμή του. Στην πρωτεύουσα προστασία κάθε ηλεκτρονόμος «βλέπει» μόνο το κοντινότερο τμήμα στο οποίο ανήκει, είτε αυτό το τμήμα είναι ένας ζυγός, είτε είναι γεννήτρια/φορτίο ή γραμμή, στην οποία τοποθετείται. Μάλιστα, κάθε γεννήτρια ή φορτίο σε αυτό το είδος προστασίας, προστατεύεται μόνο από ένα διακόπτη, όπως το δείχνει η ζώνη της γεννήτριας (generator zone) [18].



Σχήμα 5.1: Πρωτεύουσες ζώνες προστασίας [18].

Παρ' όλα αυτά, είναι εμφανές ότι αυτό το σύστημα δεν έχει καμία κάλυψη, και αν αποτύχει παραδείγματος χάρη ο διακόπτης A, τότε ένα βραχυκύκλωμα στην πρώτη γεννήτρια θα επεκτεινόταν στο διασυνδεδεμένο ζυγό και θα δημιουργούσε ενδεχομένως πολλαπλές βλάβες στον εξοπλισμό. Αυτό είναι εντελώς ανεπιθύμητο και αποφεύγεται με τη θέσπιση μίας δεύτερης ζώνης προστασίας του κάθε τμήματος.

Η δεύτερη ζώνη προστασίας ονομάζεται εφεδρική. Έχει σημασία να ξεκαθαριστεί, ότι χρησιμοποιείται κυρίως για σφάλματα, που προκύπτουν από κάποιο βραχυκύκλωμα, για οικονομικούς λόγους. Άλλωστε, κάθε άλλο σφάλμα δεν έχει τόσο καταστροφικές συνέπειες εάν «εισχωρήσει» και σε άλλα σημεία του δικτύου. Συνοψίζοντας, λοιπόν, ορίζεται ως εφεδρική προστασία η καθυστερημένη προστασία του τμήματος, στο οποίο συμβαίνει το

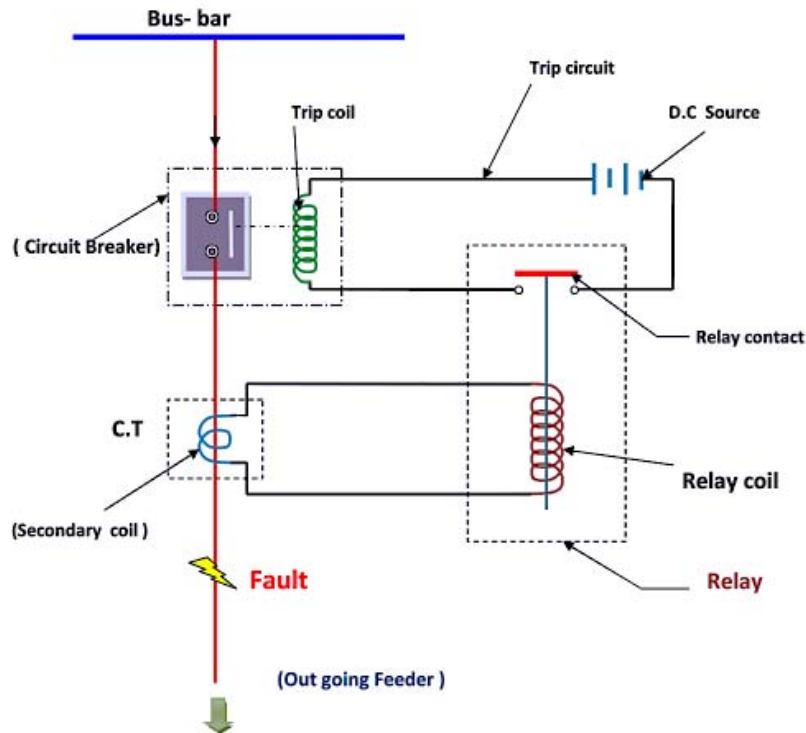


βραχυκύκλωμα, μόνο εάν δεν λειτουργήσει η πρωτεύουσα προστασία στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης [16].

Πρακτικά, είναι απαραίτητο να τοποθετείται σε άλλο ζυγό η δευτερεύουσα προστασία από την πρωτεύουσα, για να αποφεύγεται η επικάλυψη, αλλά και να έχει ουσιώδες νόημα ο παραπάνω ορισμός. Σε παράδειγμα σφάλματος του ζυγού υψηλής τάσης (HV bus), για πρωτεύουσα προστασία διατίθενται οι διακόπτες, που ανήκουν πάνω στο ζυγό σε όλες τις διασυνδεδεμένες γραμμές του, ενώ για εφεδρική οι διακόπτες F, I, M και N. Σε άλλο παράδειγμα η δευτερεύουσα προστασία λειτουργεί για τον αποτυχημένο διακόπτη K, με τη λογική ότι οι F, I και P ενεργοποιούνται να ανοίξουν, καθώς ανήκουν σε άλλο ζυγό και «κοιτούν» προς το διακόπτη K. Και στα δύο παραδείγματα διατηρούνται οι ζητούμενες αποστάσεις μεταξύ των διακοπών, ώστε να μην υπάρχει συμφόρηση του συστήματος προστασίας [16, 18].

#### 5.1.2 Βασικές έννοιες ηλεκτρονόμων

Αφού παραπάνω δόθηκαν οι συσκευές και οι ζώνες, που απαρτίζουν το σύστημα προστασίας, σκοπός είναι να προσδιοριστούν τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρονόμων. Οι ηλεκτρονόμοι ενεργοποιούνται από τη στιγμή, που η τιμή εισόδου ξεπεράσει το επίπεδο επιλογής. Η ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων σημαίνει ότι η ροπή λειτουργίας τους ξεπερνάει τη σταθερή ροπή αναχαίτισης, κλείνοντας έτσι τις επαφές τους. Ανεξαρτήτως του διαφορετικού τρόπου λειτουργίας, όλοι οι ηλεκτρονόμοι έχουν έναν συγκεκριμένο τρόπο ενεργοποίησης των διακοπών [16]. Ως εισόδους διαθέτουν σήματα, όπως αυτά προέρχονται από τους μετασχηματιστές μετρήσεων. Ακολουθεί μία αναπαράσταση της συνδεσιμότητας ενός ηλεκτρονόμου με τέτοιο μετασχηματιστή στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Σύνδεση ηλεκτρονόμου (Relay), με διακόπτη ισχύος (Circuit breaker), και μετασχηματιστή ρεύματος (CT) [19].

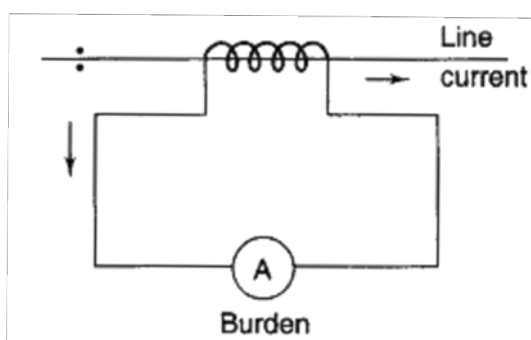
Με το που συμβεί σφάλμα, το ρεύμα στο πηνίο ενεργοποίησης αυξάνεται εκθετικά και έτσι ο διακόπτης (C.B.), ανοίγει πριν τη μέγιστη τιμή του ρεύματος. Η βοηθητική επαφή (relay contact), θα ανοίξει μαζί με τον Δ.Ι. Έτσι ο ηλεκτρονόμος επιστρέφει στην αρχική του θέση, μόνο κατά το μηδενισμό του ρεύματος ενεργοποίησης, γιατί σε αντίθετη περίπτωση προκαλείται φθορά.

Όμως, για να λειτουργεί ικανοποιητικά το σύστημα προστασίας που περιγράφηκε παραπάνω, πρέπει οι ηλεκτρονόμοι να διέπονται από την αρχή της επιλεκτικότητας. Με απλά λόγια, ο κάθε ηλεκτρονόμος πρέπει να διεγείρεται από το επίπεδο επιλογής για ένα σφάλμα, που συμβαίνει στη δική του περιοχή, εκτός εάν χρειαστεί να ενεργοποιηθεί μόνο για εφεδρική προστασία. Βέβαια, αυτή η διέγερση πρέπει να γίνεται σε διάστημα μικρότερο του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος. Επομένως, ο ηλεκτρονόμος διέπεται και από την βασικότερη αρχή της υψηλής ακρίβειας ως προς το χρόνο και το επίπεδο επιλογής του. Έτσι, ορίζεται ως χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, το διάστημα που περνάει από τη στιγμή, που θα ξεπεραστεί το επίπεδο επιλογής, μέχρι η ροπή λειτουργίας να υπερνικήσει τη ροπή αναχαίτισης και να κλείσουν οι επαφές [16, 19].

### 5.1.3 Μετασχηματιστές μετρήσεων

Επειδή οι ηλεκτρονόμοι είναι ευαίσθητα όργανα, δεν μπορούν να δέχονται ως είσοδο τα ρεύματα ή την τάση του δικτύου. Ο μετασχηματιστής μέτρησης είναι το «κλειδί» στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Με τον υποβιβασμό της πραγματικής μέτρησης, τροφοδοτεί τον ΗΝ με ασφαλή τρόπο, έτσι που δεν μπορεί να προκληθεί καμία βλάβη και το δίκτυο προστασίας να ολοκληρώσει τη λειτουργία του. Όπως προαναφέρθηκε το συγκεκριμένο όργανο χωρίζεται σε δύο είδη, ανάλογα με τη μέτρηση. Για έναν ηλεκτρονόμο που τροφοδοτείται με ρεύμα, επιλέγεται ο μετασχηματιστής ρεύματος, CT, ενώ για έναν ηλεκτρονόμο που τροφοδοτείται με τάση επιλέγεται ο μετασχηματιστής τάσης, VT [16].

Για την πρώτη κατηγορία των μετασχηματιστών προστασίας, υπάρχει το πρόβλημα της ακρίβειας, καθώς ο λόγος μετασχηματισμού δεν παραμένει σταθερός. Η βασική τους λειτουργία είναι να μετρούν το ρεύμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3 με το αμπερόμετρο και να το υποβαθμίζουν όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη μαθηματική σταθερότητα [20].



Σχήμα 5.3: Μετασχηματιστής ρεύματος, CT, σε γραμμή μεταφοράς [20].

Ο λόγος μετασχηματισμού εξαρτάται απόλυτα από την σύνθετη αντίσταση του ΗΝ και των συνδέσεών του. Επομένως, όσο μικρότερη είναι αυτή η αντίσταση, τόσο πιο μικρός είναι ο μετασχηματιστής ρεύματος λόγω λιγότερων τυλιγμάτων στο εσωτερικό του. Οι δύο τύποι CT, που κυκλοφορούν στο σύγχρονο δίκτυο είναι [16]:

- i. Ο δακτυλιοειδής, με μία σπείρα στο πρωτεύον.
- ii. Ο κλασικός, με πολλές σπείρες στο πρωτεύον τους.

Τέλος, εκτός από τη διαφορετικότητα στο πρωτεύον τύλιγμα, όλοι οι μετασχηματιστές ρεύματος πρέπει να διαθέτουν συστήματα ελέγχου και διακοπτικό υλικό, ώστε να μην ανοιχτοκυκλώνεται το δευτερεύον τους τύλιγμα προκαλώντας υπερτάσεις.

Εντούτοις, για τη δεύτερη κατηγορία μετασχηματιστών προστασίας τα πράγματα είναι αρκετά πιο απλά. Ο λόγος μετασχηματισμού τους μένει σταθερός με μία μικρή επιφύλαξη στις χαμηλές τάσεις. Συνήθως χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο με αυτό των τυπικών μετασχηματιστών του δικτύου και οι τρεις τύποι είναι οι εξής [16]:

- i. Ο κλασικός, αλλά στις μικρές τάσεις έχει θέμα με την ακρίβεια.
- ii. Η δακτυλιοειδής συσκευή.
- iii. Η σύζευξη πυκνωτών.

Γενικότερα, οι μετασχηματιστές της προστασίας απασχολούν πολύ ως προς το θέμα της ακρίβειας. Προφανώς, αυτό συμβαίνει διότι το επίπεδο ενεργοποίησης του ΗΝ εκφράζει στην πραγματικότητα μία πολύ υψηλότερη τιμή στο σημείο, που έχει συμβεί το σφάλμα. Για αυτό το λόγο στη συγκεκριμένη κατηγορία μετασχηματιστών υπάρχει γαλβανική απόζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, ούτως ώστε να αποφευχθεί η πρόκληση ζημιάς στα υπόλοιπα όργανα προστασίας [16, 20].

#### 5.1.4 Διακόπτες ΣΗΕ

Το τελευταίο όργανο, που συμπληρώνει το σύστημα προστασίας, είναι ο διακόπτης. Ο διακόπτης είναι το όργανο, το οποίο αφορά όλους τους χειρισμούς, που γίνονται για την απομόνωση ενός μέρους ή τη σύνδεση δύο τμημάτων του δικτύου, όποτε αυτοί κρίνονται απαραίτητοι.

Στην αποσύνδεση ή αλλιώς στην απόζευξη οι δύο επαφές ενός διακόπτη ανοίγουν και μετά από λίγο χρόνο διακόπτεται πλήρως η σύνδεση των δύο τμημάτων. Βέβαια, χρειάζεται προσοχή, ώστε να μη δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ανοιχτών επαφών και προκύψει επανασύνδεσή τους, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει αρκετά προβλήματα. Στη σύνδεση ή αλλιώς ζεύξη, οι δύο επαφές του διακόπτη κλείνουν. Εδώ όσο κλείνει η απόσταση μεταξύ των επαφών, εν μέσω συνεχούς τροφοδοσίας είναι πιθανό να δημιουργηθεί τόξο. Το διάκενο διασπάται και γίνεται ιδιαίτερα αγώγιμο, δηλαδή οι επαφές αντί να έχουν το ονομαστικό ρεύμα δικτύου, λίγα δευτερόλεπτα πριν κλείσουν, διαπερνώνται από υπερυψηλό ρεύμα.

Ποια είναι τα είδη διακοπών που συναντώνται σε ένα ΣΗΕ; Τα είδη διακοπών είναι τα εξής τρία [8]:

- **Αποζεύκτης**  
Ο αποζεύκτης είναι ένας διακόπτης, που δύναται να λειτουργεί εν κενώ. Δηλαδή, ανοίγει και κλείνει, μονάχα όταν το σχετικό τμήμα έχει απομακρυνθεί από το υπόλοιπο δίκτυο.
- **Διακόπτης φορτίου**  
Ο διακόπτης φορτίου είναι ένας διακόπτης, που μπορεί να λειτουργεί σε κανονικές συνθήκες δικτύου. Επειδή, όμως, δεν είναι εν κενώ η σύνδεση ή η αποσύνδεση, για ασφάλεια συνδυάζεται με έναν αποζεύκτη στο σχετικό τμήμα του δικτύου.
- **Διακόπτης ισχύος**  
Ο διακόπτης ισχύος είναι ο πιο ισχυρός διακόπτης, που συναντάται σε ένα ΣΗΕ. Μπορεί να λειτουργήσει τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική κατάσταση μετά από σφάλμα. Τοποθετημένος ανάμεσα σε δύο τροφοδοτούμενα τμήματα, επιλέγεται για ασφάλεια ο συνδυασμός με δύο αποζεύκτες, ένας σε κάθε τμήμα.

Επειδή θα γίνει λόγος για προστασία από βραχυκυκλώματα, η μόνη θεωρία που χρειάζεται είναι αυτή των διακοπών ισχύος. Για αυτό το λόγο, θα συνεχιστεί σε επόμενη παράγραφο η ανάλυση του συγκεκριμένου διακοπτικού μέσου, που χρησιμοποιείται στη μελέτη προστασίας.

## 5.2 Είδη ηλεκτρονόμων

Αφού έγινε μία βασική εισαγωγή στον τρόπο, που λειτουργεί ένα σύστημα προστασίας, σε αυτό το σημείο πρέπει να χωριστούν τα είδη των ηλεκτρονόμων, που επιλέγονται για να το υπηρετήσουν. Γενικά, οι λόγοι που καθορίζουν την επιλογή του κατάλληλου ΗΝ είναι [2]:

- Το είδος του τμήματος, (γραμμή, ζυγός μετασχηματιστής, κ.ά.)
- Το είδος του σφάλματος και ο απαιτούμενος χρόνος εκκαθάρισης.
- Οι ανώτερες απαιτήσεις ευστάθειας, όπου και αυτές εξαρτώνται από το σφάλμα.

Το κριτήριο με το οποίο επιλέγεται να χωριστούν σε κατηγορίες οι ΗΝ, είναι το βασικό τους χαρακτηριστικό, αυτό της επιλεκτικότητας. Με βάση αυτό, οι ηλεκτρονόμοι είναι οι εξής [2, 16]:

#### α. Χρόνου - υπερέντασης

Όπως προκύπτει και από το όνομα, οι ΗΝ αυτής της κατηγορίας έχουν την ένταση  $I$ , του ρεύματος, αντιστρόφως ανάλογη ως προς το χρόνο  $t$ . Στη συγκεκριμένη κατηγορία, το ρεύμα των γειτονικών περιοχών συγκεντρώνεται στο σημείο του σφάλματος. Άρα, ο πλησιέστερος ΗΝ στο σημείο του σφάλματος διαθέτει τη μεγαλύτερη ένταση ρεύματος και ενεργοποιείται στο μικρότερο χρόνο από όλους. Με αυτόν τον τρόπο περιγράφεται η συνεργασία όλων των ηλεκτρονόμων αυτής της κατηγορίας σε ένα οποιοδήποτε δίκτυο. Η λειτουργία αυτών θα αναλυθεί στη συνέχεια, καθώς αποτελούν την πιο ενδιαφέρουσα κατηγορία ΗΝ για μελέτη.

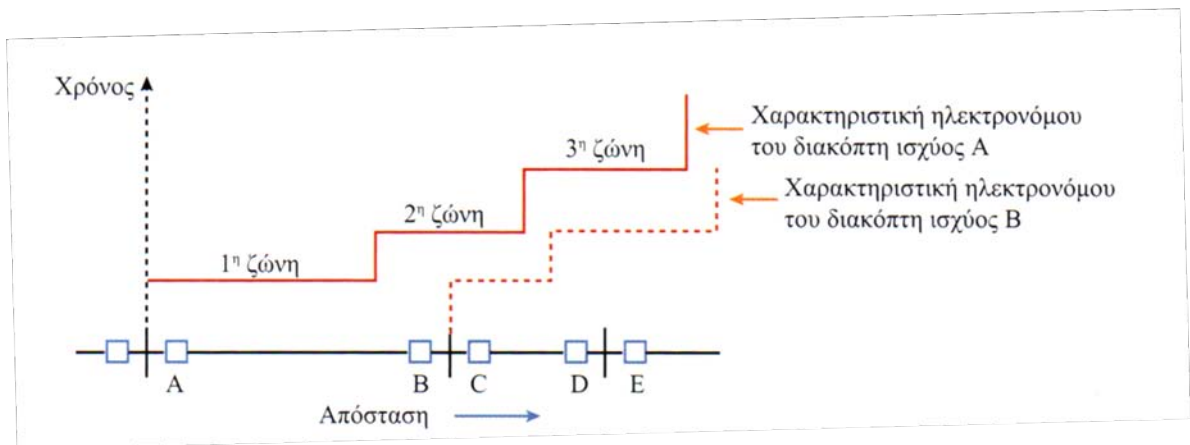
#### β. Κατεύθυνσης

Σε μία αντίστροφη κατάσταση από την παραπάνω κατηγορία, ειδικά αν το σφάλμα έχει γίνει σε κάποια μηχανή του δικτύου, υπάρχει κατεύθυνση του ρεύματος από το σημείο του σφάλματος προς το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτή η κατάσταση είναι ανεπιθύμητη, οπότε ο ΗΝ κατεύθυνσης ενεργοποιείται με το που προκύψει αυτή η ροή. Παρακάτω, ακολουθεί αναλυτική επεξήγηση της λειτουργίας της μονάδας κατεύθυνσης.

#### γ. Απόστασης

Στην προστασία των ΣΗΕ δεν είναι δεδομένο, ότι υπάρχει άνεση για τον καθορισμό του χρόνου ενεργοποίησης με βάση ένα ορισμένο επίπεδο επιλογής. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι ΗΝ απόστασης, όπου αντλούν την ονομασία από το βασικό τους χαρακτηριστικό, τη σύνθετη αντίσταση  $Z$ . Αυτή θεωρείται ότι είναι ένα μέτρο της απόστασης της γραμμής μεταφοράς [2]. Από τη σύγκριση της συνεχούς τάσης σε ένα τμήμα του δικτύου, με την προσφαλματική,  $V_{\text{προσφ.}} = I Z_{\text{προσφ.}}$ , εάν προκύψει  $V < V_{\text{προσφ.}}$ , προκύπτει η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου απόστασης. Στα μεγάλα δίκτυα προτιμάται ο ΗΝ απόστασης από αυτόν της υπερέντασης, επειδή δεν επηρεάζεται από τις συνεχείς μεταβολές του ρεύματος και εξαρτάται κυρίως από τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.4 διακρίνονται οι τρεις ζώνες προστασίας, που υπάρχουν στο συγκεκριμένο είδος ηλεκτρονόμου. Εδώ οι δύο πρώτες ανήκουν στην πρωτεύουσα προστασία, ενώ η τρίτη ανήκει στην εφεδρική.



Σχήμα 5.4: Ζώνες προστασίας σε HN απόστασης σε ακτινικό δίκτυο [2].

Με μαθηματική ακρίβεια, η πρώτη ζώνη καλύπτει μέχρι το 80% της πρώτης γραμμής του HN με μηδενική χρονική λειτουργία και η δεύτερη ζώνη καλύπτει μέχρι το 120%, φτάνοντας στη γειτονική γραμμή με μικρή καθυστέρηση. Η τρίτη ζώνη καλύπτει το 200%, παρέχοντας εφεδρική προστασία στη γειτονική γραμμή, με σημαντικό χρόνο καθυστέρησης. Έτσι, υπάρχει συνέπεια ως προς το χρόνο και ως προς την απόσταση, που καλύπτουν οι ζώνες αυτές στο δίκτυο.

#### δ. Ενιαίας προστασίας

Ήδη από το όνομα της συγκεκριμένης κατηγορίας, γίνεται κατανοητό ότι η προστασία αφορά συνολικά μονάδες του δικτύου, και όχι χωριστά τμήματα αυτών. Ποιος είναι ο τρόπος, που επιτυγχάνεται η προστασία αυτών των μονάδων; Απαραίτητη θεωρείται η σύγκριση της εισόδου της ενιαίας μονάδας με την έξοδο αυτής. Άρα, η ζώνη προστασίας, που αποτελείται κάθε φορά από τη μονάδα, καθορίζεται από την τοποθέτηση των μετρητών στο δίκτυο. Αυτό το γεγονός κάνει την επιλεκτικότητα πιο απλή. Η πιο γνωστή εφαρμογή αυτού του είδους της προστασίας των ΣΗΕ, είναι αυτή της διαφορικής προστασίας που αφορά ολόκληρες συσκευές, (π.χ. μετασχηματιστές). Οι HN, που ανήκουν στο δίκτυο της διαφορικής προστασίας, ονομάζονται διαφορικοί και οφείλουν να ενεργοποιούνται όταν η διαφορά εισόδου-εξόδου ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο όριο.

#### ε. Ισορροπημένου ρεύματος

Ενδέχεται να είναι το λιγότερο «σημαντικό» είδος ηλεκτρονόμου, καθώς οι παραπάνω τύποι είναι αυτοί, που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς το χρόνο λειτουργίας τους και το κρίσιμο επίπεδο επιλογής τους. Αυτή η κατηγορία HN αφορά

τα ρεύματα παράλληλων γραμμών. Θα μπορούσε να θεωρηθεί «κομμάτι» του ελέγχου, καθώς ένας ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται όταν ανιχνευθεί σημαντική διαφορά μεταξύ δύο γραμμών, μετά από κάποιο σφάλμα [2, 16].

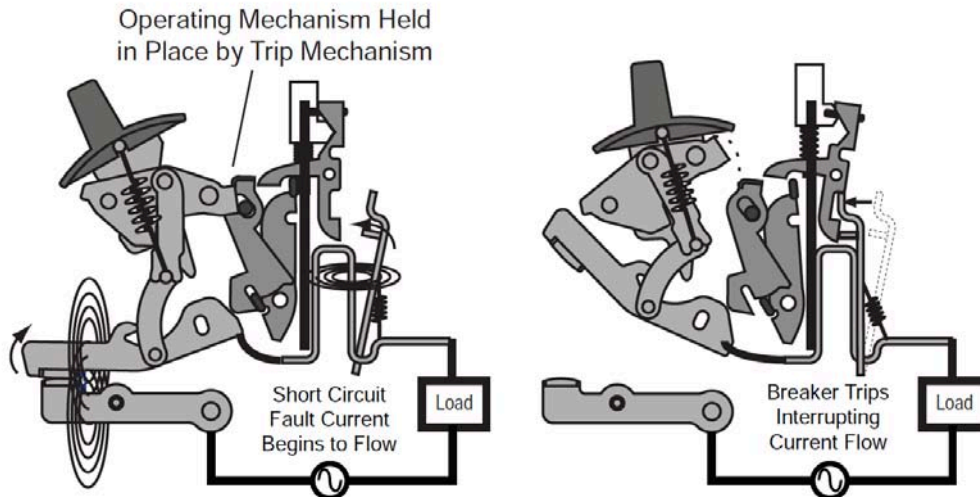
### 5.3 Διακόπτες ισχύος

Η βασική χρήση τους εξηγήθηκε προηγουμένως. Το πλεονέκτημα που προσφέρουν στο σύστημα προστασίας οι Δ.Ι., είναι ότι μπορούν να επαναχρησιμοποιούνται υπό νέα ρύθμιση αφού ανοίξουν, σε αντίθεση με τις ασφάλειες που χρειάζονται αλλαγή. Κύρια δουλειά των διακοπών είναι να ανοίγουν και να κλείνουν το κύκλωμα όποτε τους δοθεί το ανάλογο σήμα από τους διασυνδεδεμένους ηλεκτρονόμους. Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται με δύο θέσεις, “on” για όταν είναι κλειστός και “off” για όταν είναι ανοικτός.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους, δεν αρκεί η απλοϊκή περιγραφή των δύο θέσεων λειτουργίας, καθώς εμφανίζονται συνθετότητες. Ο διακόπτης εσωτερικά διαθέτει ένα πηνίο, το οποίο ασκεί δύναμη στο μηχανισμό εναλλαγής θέσης, όταν αυτός κλείνει. Για να ανοίξει ο Δ.Ι., ακολουθείται ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία. Αξίζει να επισημανθεί στο σημείο αυτό, ότι ο μηχανισμός εναλλαγής θέσης ή αλλιώς ο μοχλός των επαφών του, χρονικά δεν επιβαρύνει καθόλου το σύστημα προστασίας, επειδή η τάση, που τους ασκείται από το πλήρως φορτισμένο πηνίο, είναι η μέγιστη.

Επιπρόσθετα, ο διακόπτης στα ΣΗΕ διαθέτει μία μονάδα διακοπής (trip unit). Αυτή η μονάδα διακοπής καθορίζει το πότε θα ανοίξει ο διακόπτης. Στην πραγματικότητα, η μονάδα διακοπής κρατάει κλειστές τις επαφές, αλλά όταν έρθει το σήμα για διακοπή, τότε η ίδια τις ανοίγει. Κατά μία έννοια, η trip μονάδα αποτελεί την ενδιάμεση κατάσταση ανάμεσα στις δύο κύριες θέσεις του διακόπτη. Στο Σχήμα 5.5 γίνεται αναπαράσταση της λειτουργίας της μονάδας αυτής, για ένα σφάλμα που οδηγεί σε υπερένταση.





Σχήμα 5.5: Εσωτερικό διακόπτη με trip σε σφάλμα υπερέντασης.

Διακρίνονται οι δύο μηχανικές επαφές και η μονάδα trip, που διαχειρίζεται το μηχανισμό εναλλαγής θέσης [21].

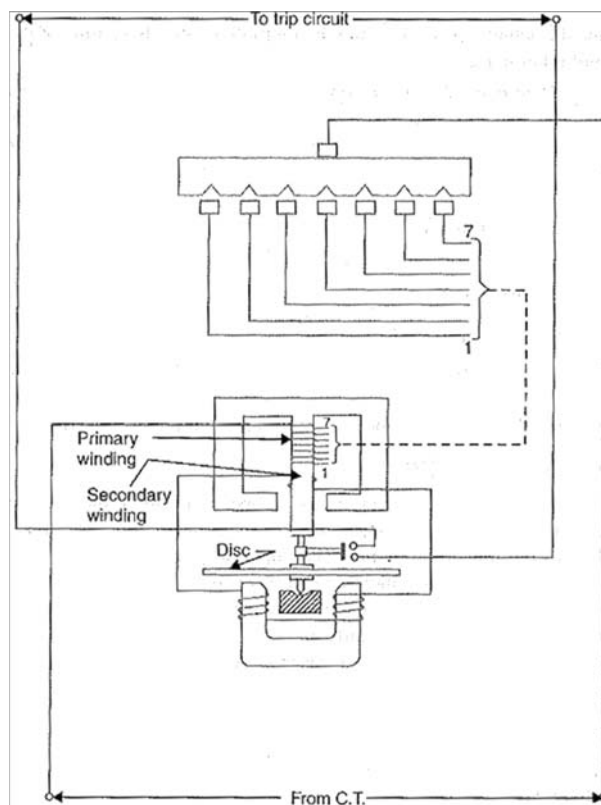
Τέλος, με το άνοιγμα των επαφών εμφανίζεται τόξο ανάμεσα σε αυτές και ο αέρας γίνεται ιδιαίτερα αγωγίμος με αυξημένη τάση. Επειδή το φαινόμενο αυτό είναι ανεξέλεγκτο και επικίνδυνο, χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα μονωτικά υλικά, όπως είναι ο αέρας υπό πίεση, το λάδι ή το εξαφθοριούχο θείο, SF<sub>6</sub>, που παρασκευάζεται τεχνητά για αυτό το σκοπό. Η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων απαιτεί προσοχή, καθώς οι υπερτάσεις τους δύνανται να αποβούν μοιραίες σε λανθασμένους χειρισμούς [21].

#### 5.4 Περιγραφή ηλεκτρονόμων υπερέντασης

Γνωστοί ως οι πιο φθηνοί και απλοί ηλεκτρονόμοι, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δόμηση ενός συστήματος προστασίας, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης είναι αυτοί που επιλέγονται σε σχέση με τους υπόλοιπους, για ανάλυση σε αυτό το κεφάλαιο. Βέβαια, στα σύγχρονα ΣΗΕ η εγκατάστασή τους είναι πολλές φορές ασύμφορη, καθώς η ρύθμισή τους είναι προσαρμοστική στα δεδομένα του δικτύου, οπότε με οποιαδήποτε αλλαγή αυτών, πρέπει να ρυθμίζονται και οι ΗΝ υπερέντασης εκ νέου.

#### 5.4.1 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονόμου

Σε γενικές γραμμές, το βασικότερο στοιχείο όλων είναι ότι ο χρόνος λειτουργίας των ΗΝ υπερέντασης είναι αντιστρόφως ανάλογος του ρεύματος στο πηνίο λειτουργίας τους. Άλλωστε, αυτό φαίνεται και στη χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου, η οποία αναπαριστά το επίπεδο επιλογής σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας τους [16]. Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζονται τα κύρια εσωτερικά στοιχεία, που απαρτίζουν έναν ηλεκτρονόμο υπερέντασης επαγωγικού τύπου.



Σχήμα 5.6: Δομή ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης [22].

Ο ΗΝ ενεργοποιείται όταν ασκείται ροπή στο δίσκο τέτοια, που είναι ικανή να τον περιστρέψει και να κλείσει την επαφή του. Για αρχή, είναι εύκολο να οριστεί ο χρόνος λειτουργίας ενός ΗΝ υπερέντασης, καθώς αυτός διαγράφεται από τη στιγμή, που ξεκινά η επίδραση της ασκούμενης ροπής στο δίσκο, μέχρι το κλείσιμο της επαφής. Επίσης, είναι εμφανές το πηνίο λειτουργίας με τα τυλίγματά του. Ισχυρή ροπή στο δίσκο σημαίνει μεγάλο ρεύμα στο πηνίο, καθώς αυτό είναι που δημιουργεί το επιδιωκόμενο μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή, όσο πιο μεγάλο το ρεύμα, τόσο πιο γρήγορα κλείνουν οι επαφές του ΗΝ.

Η αναλογία με τη ροπή και το ρεύμα, επιτρέπει και τη λογική αναλογία ροπής με τις αμπεροστροφές του πηνίου λειτουργίας. Άρα, αν η ροπή αναχαιτίσης θεωρηθεί ως η ροπή,

η οποία ασκείται σταθερά στο δίσκο από την αντίθετη πλευρά, η ροπή λειτουργίας είναι αυτή, που δημιουργείται από το ρεύμα πεδίου στο πηνίο και ασκείται στο δίσκο προς το κλείσιμο των επαφών. Αυτό το ρεύμα πεδίου είναι το επίπεδο επιλογής του HN.

Ωστόσο, ο HN υπερέντασης μπορεί να έχει διαφορετικά επίπεδα επιλογής, όπως αυτά διακρίνονται σε μία χαρακτηριστική του. Τα διαφορετικά επίπεδα επιλογής επιλέγονται με τη βοήθεια μίας «γέφυρας»<sup>30</sup>, η οποία φαίνεται στο σχήμα πάνω από το πηνίο. Αυτή η «γέφυρα» ή αλλιώς ο βοηθητικός διακόπτης με ακέραιες ξεχωριστές θέσεις (1-7), αποτελεί τις ενδιάμεσες λήψεις, που λαμβάνει το πηνίο με διαφορετικό αριθμό στροφών κάθε φορά. Για να γίνει ακόμα πιο ξεκάθαρο, οι στροφές αλλάζουν τις αμπεροστροφές του πηνίου και αυτές με τη σειρά τους αλλάζουν την ασκούμενη ροπή στο δίσκο, με αποτέλεσμα την προσαρμογή στα διαφορετικά επίπεδα επιλογής [16, 22].

#### 5.4.2 Χρόνος λειτουργίας ηλεκτρονόμου

Ως χρόνος λειτουργίας ορίστηκε η χρονική διαφορά μεταξύ του σημείου, που αρχίζει να ασκείται η ροπή στο δίσκο και του σημείου, που κλείνει η επαφή. Το τελικό σημείο επιτυγχάνεται, εφόσον ο δίσκος έχει διανύσει μία πλήρη περιστροφή 180°. Επομένως, η ρύθμιση του χρόνου λειτουργίας έχει να κάνει μόνο με την ταχύτητα, που εκτελείται αυτή η περιστροφή.

Ανατρέχοντας στο Σχήμα 5.6, παρατηρείται το φρένο του HN πίσω από το δίσκο. Ανάλογα με την απόσταση, που τοποθετείται το φρένο ως προς το δίσκο, ρυθμίζεται αντίστοιχα και ο χρόνος λειτουργίας του HN. Δηλαδή, όσο μεγαλώνει η απόσταση, τόσο αυξάνει ο χρόνος και το αντίστροφο. Για μαθηματικοποιημένο ορισμό της ρύθμισης αυτής, εισάγεται ως έννοια ο πολλαπλασιαστής ρύθμισης χρόνου<sup>31</sup>, ο οποίος διαχωρίζει την έννοια του χρόνου σε διακριτά επίπεδα με αρχικό το 0,5 ή το 1, έως το τελικό 10. Το TMS βοηθάει στην κατανόηση της χρονικής επιλεκτικότητας. Για να θεωρηθεί ένα δίκτυο προστασίας σωστό πρέπει ο πιο απομακρυσμένος HN, να λειτουργεί στον ελάχιστο χρόνο (TMS=0,5) και όσο πλησιάζει ο μηχανικός προς τη γεννήτρια να αυξάνει το TMS, για την περαιτέρω αύξηση του χρόνου λειτουργίας.

---

<sup>30</sup> «Γέφυρα»: ο πραγματικός όρος είναι PSB από τα αρχικά **Plug Setting Bridge**.

<sup>31</sup> Πολλαπλασιαστής ρύθμισης χρόνου: TMS από τα αρχικά **T**ime **M**ultiplier **S**etting.

Επιπλέον παρατηρείται, ότι ακριβώς κάτω από το δίσκο βρίσκεται ένας μαγνήτης, ο οποίος λειτουργεί και αυτός επιβραδυντικά στην περιστροφή του. Η κατάλληλη τοποθέτηση αυτού του μαγνήτη, αποτελεί επίσης «κομμάτι» της ρύθμισης του χρόνου [16, 17, 22, 23].

#### 5.4.3 Επίπεδο επιλογής ηλεκτρονόμου

Το επίπεδο επιλογής έχει πολλαπλές διαφορές στη ρύθμιση ανάλογα με το σημείο του ΗΝ στο δίκτυο, αλλά και με τον τύπο του. Προηγουμένως, αναφέρθηκε ότι ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης είναι συνήθως επαγωγικού τύπου. Έγινε εμφανές, ότι το πηνίο είναι αυτό που καθορίζει το ρεύμα πεδίου, άρα και το επίπεδο επιλογής. Οπότε η σχέση πηνίου λειτουργίας - επιπέδου επιλογής είναι αυτή που δίνει την απάντηση.

Όπως προαναφέρθηκε, οι ενδιάμεσες λήψεις είναι 7, όπως αυτές διακρίνονται στη βοηθητική «γέφυρα». Για τους ΗΝ ελέγχου φάσεων, η ρύθμιση του επιπέδου επιλογής γίνεται από 25% έως 200% του αρχικού, όπως αυτό προέρχεται από το CT, με βήματα 25%. Τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του ΗΝ τροφοδοτούνται από το CT. Πολλαπλασιάζοντας το επίπεδο λήψης με το ρεύμα του ανάλογου τυλίγματος, προκύπτουν τα ρεύματα των δύο τυλιγμάτων του ηλεκτρονόμου. Εδώ, για να οριστεί το νέο επίπεδο επιλογής από το ονομαστικό, εισάγεται η έννοια του πολλαπλασιαστή επιπέδου επιλογής<sup>32</sup>, η οποία προκύπτει από τη διαίρεση του ρεύματος σφάλματος  $I_{sc}$  με το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος  $I^1$ . Με απλά λόγια, το επίπεδο επιλογής είναι το ρεύμα του πρωτεύοντος  $I^1$ , όπως αυτό προκύπτει από το πηλίκο του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης με τον επιλεγμένο πολλαπλασιαστή PSM. Δηλαδή:

$$PSM = \frac{I_{sc}}{I^1} \quad (5.1)$$

Άρα τα επίπεδα επιλογής κατανέμονται ως 1 – 50%, 2 – 75%, 3 – 100%, 4 – 125%, 5 – 150%, 6 – 175%, 7 – 200%, όπως αυτά αποτυπώνονται από αριστερά προς τα δεξιά στη χαρακτηριστική του ΗΝ. Για ΗΝ ελέγχου φάσης με γη, η ρύθμιση γίνεται από 25% έως 80% με βήματα 10%. Αυτή αποτελεί σημαντική υποβοήθηση στην εκκαθάριση των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων, αλλά θα επεξηγηθεί παρακάτω.

---

<sup>32</sup> Πολλαπλασιαστής επιπέδου επιλογής – PSM: προκύπτει από τα αρχικά του Plug Setting Multiplier.

Συνοψίζοντας, στη λήψη 1 το πηνίο λειτουργίας διαθέτει το μέγιστο αριθμό σπειρών, άρα το επίπεδο επιλογής είναι το ελάχιστο. Αντιθέτως, στη λήψη 7 το πηνίο λειτουργίας διαθέτει το μικρότερο δυνατό αριθμό σπειρών, έτσι το επίπεδο επιλογής είναι το μέγιστο. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο επιλογής, τόσο πιο σημαντική είναι η γρήγορη εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος, καθώς ο ΗΝ ενεργοποιείται άμεσα με την μικρότερη χρονική ρύθμιση [16, 17, 22, 23].

## 5.5 Τύποι ηλεκτρονόμων υπερέντασης

### 5.5.1 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης στιγμιαίου χρόνου

Η συγκεκριμένη κατηγορία ηλεκτρονόμων είναι αυτή, που αποτελεί την απλούστερη εφαρμογή και ρύθμιση σε ένα σύστημα προστασίας. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί, ρυθμίζονται μονάχα ως προς το επίπεδο επιλογής με τη διαδικασία, που ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Με το που ξεπεραστεί το επίπεδο επιλογής, τότε σε χρόνο που θεωρείται αμελητέος, κλείνουν οι επαφές του ηλεκτρονόμου και δίνεται η εντολή να ανοίξει ο σχετικός διακόπτης.

Γιατί επιλέγονται ηλεκτρονόμοι τέτοιου τύπου, που ρυθμίζονται μόνο ως προς το ρεύμα επιλογής; Έχει ήδη αναφερθεί, ότι η επιλογή του τύπου του ηλεκτρονόμου εξαρτάται από το είδος του σφάλματος. Συγκεκριμένα, ο ΗΝ στιγμιαίου χρόνου είναι κατάλληλος, ειδικά στις περιπτώσεις, όπου το βραχυκύκλωμα συμβαίνει σε γραμμή πλησίον ενός ζυγού και το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι παραπάνω από το τριπλάσιο του αντίστοιχου ρεύματος στο τέλος της εν λόγω γραμμής. Το επίπεδο επιλογής πρέπει να ρυθμιστεί έτσι, ώστε να βρίσκεται αρκετά πάνω από το ρεύμα βραχυκυκλώματος στο τέλος της γραμμής. Με αυτόν τον τρόπο καλύπτεται και η μεταβατική «φάση» του σφάλματος.

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα από όλα έγκειται, ότι η χρήση στιγμιαίου ΗΝ βοηθάει στην εξοικονόμηση χρόνου και για τους υπόλοιπους ηλεκτρονόμους. Δηλαδή, σε ένα ακτινωτό δίκτυο η χρήση στιγμιαίων ηλεκτρονόμων συνίσταται ειδικά στους πιο απομακρυσμένους ΗΝ από τη γεννήτρια. Κατά τη συγκεκριμένη στρατηγική, οι πιο απομακρυσμένοι διακόπτες ανοίγουν ταχύτατα, προσφέροντας επιπλέον επικερδή χρόνο στο υπόλοιπο σύστημα προστασίας, ώστε να απορροφήσει τους κραδασμούς, προστατεύοντας έτσι και την ευστάθεια μετά από το σφάλμα [16].

### 5.5.2 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου

Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου λειτουργούν στο μοντέλο της προστασίας, που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.1.1. Επειδή τα επίπεδα ρύθμισης είναι δύο, τόσο ως προς το επίπεδο επιλογής, όσο και ως προς το χρόνο λειτουργίας, πρέπει να αποσαφηνιστούν οι εξής δύο κανόνες λειτουργίας. Ένας ηλεκτρονόμος αντιστρόφου χρόνου πρέπει να παρέχει πρωτεύουσα προστασία στη γραμμή που ανήκει και δευτερεύουσα προστασία στη διπλανή γραμμή του.

Διαθέτοντας ως βασικό χαρακτηριστικό την επιλεκτικότητα, οι ηλεκτρονόμοι πρέπει να συνεργάζονται άψογα στα δύο επίπεδα ρύθμισης. Αρχικά, για το επίπεδο επιλογής στην πρωτεύουσα προστασία, πρέπει οι ΗΝ να είναι όσο το δυνατόν πιο ευαίσθητοι κοντά στο σφάλμα. Δηλαδή, το επίπεδο επιλογής των ΗΝ από το σημείο του σφάλματος προς τα έξω, να ορίζεται από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο. Σε δεύτερο βαθμό, επιβάλλεται στους ΗΝ δευτερεύουσας προστασίας να ρυθμίζονται για μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος στο σημείο του σφάλματος της διπλανής γραμμής και μέγιστο ρεύμα φορτίου στη γραμμή. Γιατί και στις δύο περιπτώσεις επιδιώκεται η ρύθμιση στο μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος; Η απάντηση κρύβεται στο ότι εάν η επιλεκτικότητα επιτυγχάνεται για το μέγιστο δυνατό ρεύμα, τότε επιτυγχάνεται και για τα υπόλοιπα μικρότερα ρεύματα.

Σε αυτό το σημείο, απομένει να ρυθμιστεί και ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου αυτής της κατηγορίας. Σε παρόμοιο μοντέλο με το παραπάνω, πρέπει ο ηλεκτρονόμος της πρωτεύουσας προστασίας να ενεργοποιείται ταχύτερα από αυτόν της δευτερεύουσας,  $t_1 < t_2$ . Αυτό εξειδικεύεται στην εξίσωση (5.2):

$$t_2 = t_1 + t_{CB} + t_{delay} \quad (5.2)$$

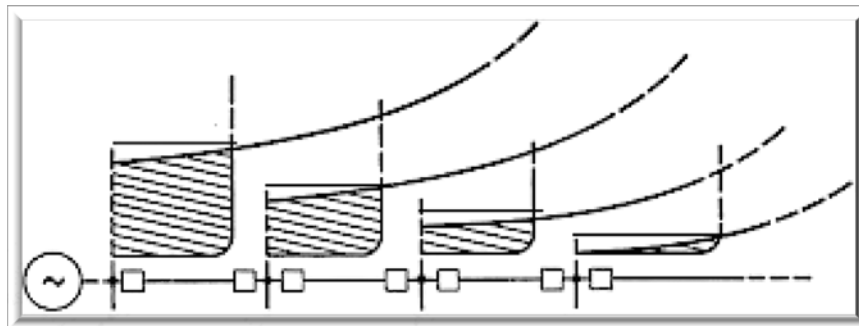
Ο χρόνος καθυστέρησης  $t_{delay}$  υπολογίζεται στο περίπου στα 0,3 sec. και οφείλεται σε έναν χρόνο ασφαλείας συν ένα χρόνο που χρειάζεται ο δίσκος για να κινηθεί εκ νέου [16].

### 5.5.3 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ορισμένου χρόνου

Η λειτουργία αυτών των ηλεκτρονόμων δεν φέρει πολλές διαφορές από τους ηλεκτρονόμους στιγμιαίου χρόνου. Ο ΗΝ ορισμένου χρόνου ρυθμίζεται μόνο ως προς το επίπεδο επιλογής. Η διαφορά βρίσκεται στο χρόνο λειτουργίας του, ο οποίος εδώ ενεργοποιείται σε έναν ορισμένο χρόνο που έχει «περαστεί» στη μνήμη.

Χρησιμοποιούνται όταν το ρεύμα σφάλματος ταλαντώνεται έντονα, με μέγιστα και ελάχιστα, σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του δικτύου. Έτσι, για τον κάθε ηλεκτρονόμο ορισμένου χρόνου δίνονται οι δύο τιμές του χρόνου και του ρεύματος επιλογής και μόνο όταν ξεπεραστούν αυτές, τότε ενεργοποιείται. Για να διατηρηθεί η επιλεκτικότητα μεταξύ των ηλεκτρονόμων, πρέπει να τηρούνται οι αρχές που ξεκαθαρίστηκαν στην παράγραφο του αντιστρόφου χρόνου. Για το επίπεδο επιλογής, ισχύει ότι όσο ο ΗΝ βρίσκεται πιο κοντά στο σφάλμα, τόσο μικραίνει, ώστε να εξασφαλίζει ολοένα και περισσότερη ευαισθησία. Όσον αφορά το χρόνο, αυτός πρέπει να προκαθορίζεται με ολοένα και μικρότερους χρόνους ενεργοποίησης, όσο πλησιάζει ο μηχανικός προς το σημείο του σφάλματος. Βέβαια, πρέπει να επισημανθεί ότι η εξίσωση (5.2) παραμένει η ίδια στους ΗΝ ορισμένου χρόνου. Όμως, αλλάζει ότι  $t_{CB} + t_{delay} \cong 0,4 - 0,6 \text{ sec}$ . Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται, συγκριτικά με τους ΗΝ αντιστρόφου χρόνου, ο χρόνος λειτουργίας από γραμμή σε γραμμή, όσο απομακρύνεται ο μηχανικός από το σφάλμα, γεγονός που δικαιολογεί την περιορισμένη χρήση αυτού του τύπου. Έτσι, στον τελευταίο ηλεκτρονόμο κοντά στη γεννήτρια και στη μεγαλύτερη απόσταση από το σφάλμα, η καταστροφή του εξοπλισμού μπορεί να αποφευχθεί με καλή ρύθμιση, αλλά η προστασία από καταπονήσεις και η διατήρηση της ευστάθειας δεν είναι δεδομένες.

Συνοψίζοντας, τα τρία είδη των ηλεκτρονόμων υπερέντασης συγκρίνονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Τα τρία είδη ηλεκτρονόμων υπερέντασης σε ακτινωτό δίκτυο [16].

Γίνεται η υπόθεση ότι το σφάλμα συμβαίνει στο τέρμα της γραμμής μακριά από τη γεννήτρια. Ο χρόνος λειτουργίας βρίσκεται στον άξονα  $y$  και το επίπεδο επιλογής στον άξονα των  $x$ . Οι ηλεκτρονόμοι ορισμένου χρόνου διακρίνονται στη ανώτατη ευθεία γραμμή πάνω από κάθε γραμμοσκιασμένο τμήμα. Ακριβώς κάτω από τη γραμμή αυτή, βρίσκεται μία καμπύλη που έχει αύξουσα εκθετική πορεία και συμβολίζει τον ηλεκτρονόμο

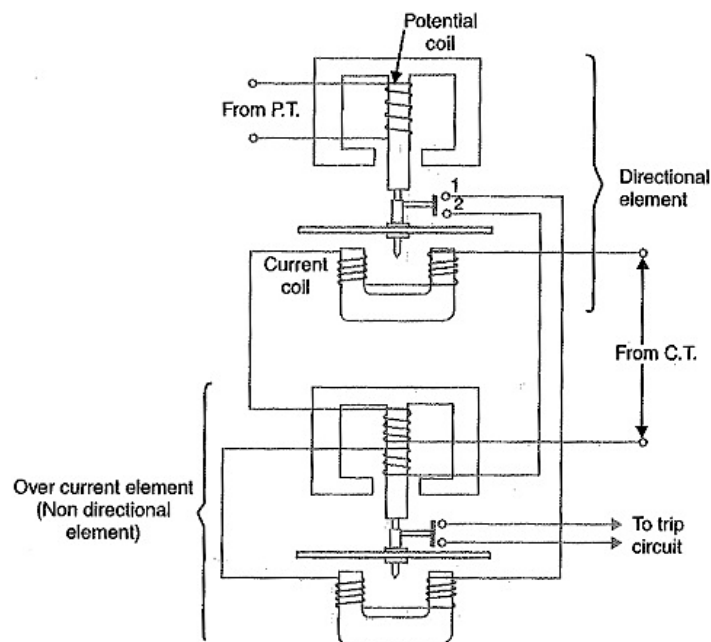
αντιστρόφου χρόνου. Τέλος, η κατώτατη καμπύλη, που ολοκληρώνει τη γραμμοσκιασμένη περιοχή, ανήκει στον ηλεκτρονόμο στιγμιαίου χρόνου.

Τα συμπεράσματα, που προκύπτουν, είναι αφενός ότι οι ηλεκτρονόμοι ορισμένου χρόνου ξεφεύγουν των χρονικών περιθωρίων και αφετέρου ότι οι ηλεκτρονόμοι στιγμιαίου χρόνου προσφέρουν τεράστιο χρονικό πλεονέκτημα στο δίκτυο προστασίας. Από το προηγούμενο σχήμα, επιβεβαιώνεται ότι οι δύο πιο συνηθισμένοι ηλεκτρονόμοι στα σύγχρονα ΣΗΕ είναι οι ΗΝ αντιστρόφου χρόνου και οι ΗΝ στιγμιαίου χρόνου [16].

## 5.6 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης με μονάδα κατεύθυνσης

### 5.6.1 Μονάδα κατεύθυνσης

Τελικά τι είδους ηλεκτρονόμο χρησιμοποιεί ο μηχανικός και ποια είναι η προστασία που του εξασφαλίζει; Η αλήθεια είναι ότι συγκεκριμένη απάντηση δεν υπάρχει και αναλόγως την περίπτωση και το είδος του σφάλματος, επιλέγεται μία ειδική κατηγορία ηλεκτρονόμου. Αυτό που δεν έχει αναλυθεί μέχρι στιγμής, είναι ότι ένας ηλεκτρονόμος μπορεί να διαθέτει και μία μονάδα κατεύθυνσης, η οποία αλλάζει κατά πολύ τη λειτουργία του. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται, ότι στον προηγούμενο ηλεκτρονόμο του Σχήματος 5.6 προστίθεται μία μονάδα κατεύθυνσης.



Σχήμα 5.8: Ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης-υπερέντασης [24].



Αυτή αποτελείται από ένα κύριο πηνίο. Η τάση του επάνω πηνίου (potential coil), είναι αυτή ενός μετασχηματιστή τάσης. Το ρεύμα στο κάτω πηνίο (current coil), τροφοδοτείται από το ρεύμα, που μετράει το CT. Χαρακτηριστικές είναι οι επαφές 1 και 2, οι οποίες συνδέονται εν σειρά στο μηχανισμό της υπερέντασης. Αυτό δηλώνει, ότι ο μηχανισμός της κατεύθυνσης προηγείται του μηχανισμού υπερέντασης, αφού οι επαφές 1 και 2 αναλόγως αν γίνει trip, θα επιτρέψουν εξ ολοκλήρου το χειρισμό στο υπόλοιπο μέρος του HN [24].

#### 5.6.2 Χρήση της μονάδας κατεύθυνσης στην προστασία

Πρακτικά, ένας ηλεκτρονόμος για την προστασία μίας γραμμής δεν φτάνει. Αυτό συμβαίνει, διότι χρειάζονται τρεις HN υπερέντασης, (ένας για κάθε φάση), για προστασία σφαλμάτων μεταξύ φάσεων και ένας ακόμη, ώστε να συνδέει το σύστημα αυτό με τη γη, για προστασία σφαλμάτων με τη γη. Για οικονομικούς λόγους έχει διαπιστωθεί, ότι το σύστημα προστασίας δουλεύει σωστά και με δύο HN υπερέντασης για τα φασικά σφάλματα, αρκεί να δημιουργηθούν οι κατάλληλες προϋποθέσεις.

Αρχικά, θα αναλυθεί ο λόγος, για τον οποίο οι HN υπερέντασης χωρίς μονάδα κατεύθυνσης, δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε αυτό το πιο φθινό μοντέλο προστασίας. Για τα φασικά σφάλματα, εάν το ρεύμα βραχυκυκλώματος,  $I_{sc}$ , δεν είναι πολύ μεγαλύτερο του ονομαστικού ρεύματος γραμμής, όπως αυτό υπολογίστηκε στη ροή φορτίου, τότε η πρόσθεσή του από τη μία φάση σε μία άλλη, που υπάρχει ηλεκτρονόμος, προκαλεί προβλήματα στη μέχρι τώρα ρύθμιση. Επίσης, εάν είναι υπερβολικά μεγάλο το ρεύμα  $I_{sc}$ , τότε κανένας από τους άλλους δύο ηλεκτρονόμους δεν δύναται να το αντέξει. Συνεπώς, υπάρχει διπλός περιορισμός στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, εάν το φασικό σφάλμα συμβαίνει στη φάση, που δεν έχει HN. Αυτός ο περιορισμός φτάνει για να καταφύγει ο μηχανικός στη λύση ενός μη κατευθυντικού HN υπερέντασης σε κάθε φάση.

Στην περίπτωση, που χρησιμοποιείται HN με μονάδα κατεύθυνσης, πρέπει το δίκτυο να είναι γειωμένο. Όταν το σύστημα είναι γειωμένο, δε χρειάζονται τρεις ηλεκτρονόμοι φάσης, αλλά μόνο δύο, για τους εξής λόγους:

1. Καθένας HN από τους δύο, ρυθμίζεται κατευθυντικά ως προς τη φάση που ελέγχει. Οπότε υπάρχει η δυνατότητα να αντέξει και μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκύκλωσης, γιατί προηγείται της μονάδας υπερέντασης.
2. Η λειτουργία με 3 HN κατεύθυνσης δε λύνει το πρόβλημα της γείωσης.

3. Το πηνίο τάσης, το οποίο ανήκει στη μονάδα κατεύθυνσης του ΗΝ, λειτουργεί ως πηνίο υποβαθμιστή τάσης ή αλλιώς πηνίο αναχαίτισης της τάσης, γεγονός που αποτρέπει τον ευαίσθητο ΗΝ να ενεργοποιείται στη μόνιμη κατάσταση.

Ουσιαστικά, η μονάδα κατεύθυνσης προσδίδει μία επιπρόσθετη εξασφάλιση προστασίας λόγω του κύριου πηνίου τάσης. Έτσι, κρατάει ισορροπία ανάμεσα στην υπερευαισθησία, που πρέπει να διακρίνει τον ΗΝ κατεύθυνσης δύο φάσεων και στην υπερφόρτιση λόγω του τεράστιου ρεύματος βραχυκύκλωσης, που δέχεται. [16, 24].

### **5.7 Σύνδεση της προστασίας με τη μεταβατική ευστάθεια**

Αφού, επεξηγήθηκαν όλες οι συσκευές, που απαρτίζουν ένα βασικό σύστημα προστασίας, κρίνεται αναγκαίο να ξεκαθαριστεί η σχέση, που έχουν δύο τόσο κοντινές μελέτες, αυτή της ευστάθειας και αυτή της προστασίας. Ένα σύστημα προστασίας έχει κύριο μέλημα την έγκαιρη διακοπή του κυκλώματος, όταν συμβεί ένα μεταβατικό φαινόμενο ή αλλιώς μία μεγάλη διαταραχή, που μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση ή καταστροφή τμήματος του δικτύου. Ο εξοπλισμός είναι ακριβός και εκτός αυτού το «πληγωμένο» σύστημα συνολικά αποσπάται από το δίκτυο για να ανασυγκροτηθεί. Η ευστάθεια είναι μελέτη, η οποία αφορά το δίκτυο όπως αυτό προέρχεται από τη μόνιμη κατάσταση και τείνει να το διατηρήσει σε αυτή, ανεξάρτητα από το είδος της διαταραχής. Πως μπορούν αυτά τα δύο να συνδυαστούν;

Στο Κεφάλαιο 4 έγινε μία παράθεση των αποφάσεων, που πρέπει να λάβει ένας μηχανικός, για να βελτιώσει τη διατήρηση της ευστάθειας ενός σύγχρονου ΣΗΕ. Μία από τις βασικότερες, ήταν η κατάλληλη ρύθμιση των προστατευτικών μέσων, ώστε να ανοίγουν οι σωστοί διακόπτες όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Αναλυτικότερα, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος, στον οποίο καταλήγει η μελέτη μεταβατικής ευστάθειας, είναι ο χρόνος, που απαιτείται αθροιστικά για την ανίχνευση του σφάλματος από τους μετρητές, την ενεργοποίηση των ΗΝ και το άνοιγμα των διακοπών. Επίσης, στην εξίσωση 5.2 αυτού του κεφαλαίου, δόθηκε η σχέση του χρόνου ενεργοποίησης των ΗΝ εφεδρικής προστασίας με τον αντίστοιχο αυτών της πρωτεύουσας. Όλα αυτά δείχνουν, ότι ο κάθε χρόνος ξεχωριστά πρέπει να επιτυγχάνει την ταχύτερη δυνατή ενεργοποίηση, ώστε ο χρόνος εκκαθάρισης να μειώνεται στο ελάχιστο δυνατό κι έτσι να μπορεί να επανέλθει το δίκτυο. Έτσι, κατά αυτό τον τρόπο εισάγεται σαν φαινόμενο ο κρίσιμος χρόνος της μεταβατικής ευστάθειας, στην προστασία των ΣΗΕ. Επιπλέον, ο κάθε ΗΝ του δικτύου πρέπει να είναι σε θέση να ξεχωρίζει

μία οποιαδήποτε κατάσταση μικρής διαταραχής από μία κατάσταση βραχυκυκλώματος. Κανένας HN της προστασίας δεν πρέπει να ανοίγει, παρά μόνο σε σοβαρή περίπτωση βραχυκυκλώματος. Αντιθέτως, μία αποσύνδεση γραμμών, φορτίων ή γεννητριών, θα προκαλούσε πιθανότατα οριστική αστάθεια στο κύκλωμα [2, 5, 8, 16].

Στο Κεφάλαιο 7 ανήκει η αναλυτική προσομοίωση ενός συστήματος προστασίας και η ρύθμιση, που επιλέγεται για τους HN υπερέντασης σε κάθε είδος σφάλματος στο δίκτυο των 9 ζυγών της IEEE.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ POWERWORLD

#### 6.1 Στοιχεία δικτύου και μελέτη ροής φορτίου

##### 6.1.1 Στοιχεία δικτύου

Για να αναλυθεί περαιτέρω το πρόβλημα της ροής φορτίου, θα επεξηγηθεί η διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, κάνοντας χρήση του προγράμματος PowerWorld. Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχεται η δυνατότητα να αναλύσουμε το σύστημα τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση. Με το πρόγραμμα αυτό έγινε ανάλυση ενός δικτύου εννέα ζυγών της IEEE, με τρεις γεννήτριες και τρία φορτία. Στους Πίνακες 6.1 και 6.2 δίνονται τα δεδομένα του κάθε ζυγού και των γραμμών μεταφοράς:

Πίνακας 6.1: Στοιχεία όλων των ζυγών [25].

<i><b>ΖΥΓΟΣ</b></i>	<i><b>ΤΑΣΗ (pu)</b></i>	<i><b>ΓΩΝΙΑ</b></i>	<i><b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ</b></i>	<i><b>ΦΟΡΤΙΟ</b></i>
1	1,04	0	P = 72MW Q = 28MVAR	_ <sup>33</sup>
2	1,025	ZHTOYMENO <sup>34</sup>	P = 163MW Q = 5MVAR	-
3	1,025	ZHTOYMENO	P = 85MW Q = -11MVAR	-
4	ZHTOYMENO	ZHTOYMENO	-	-

<sup>33</sup> Παύλα «-» : Σημαίνει την απουσία είτε φορτίου είτε γεννήτριας.

<sup>34</sup> «ΖΗΤΟΥΜΕΝΟ»: Η ποσότητα υπολογίζεται μέσα από την επίλυση της ροής φορτίου.

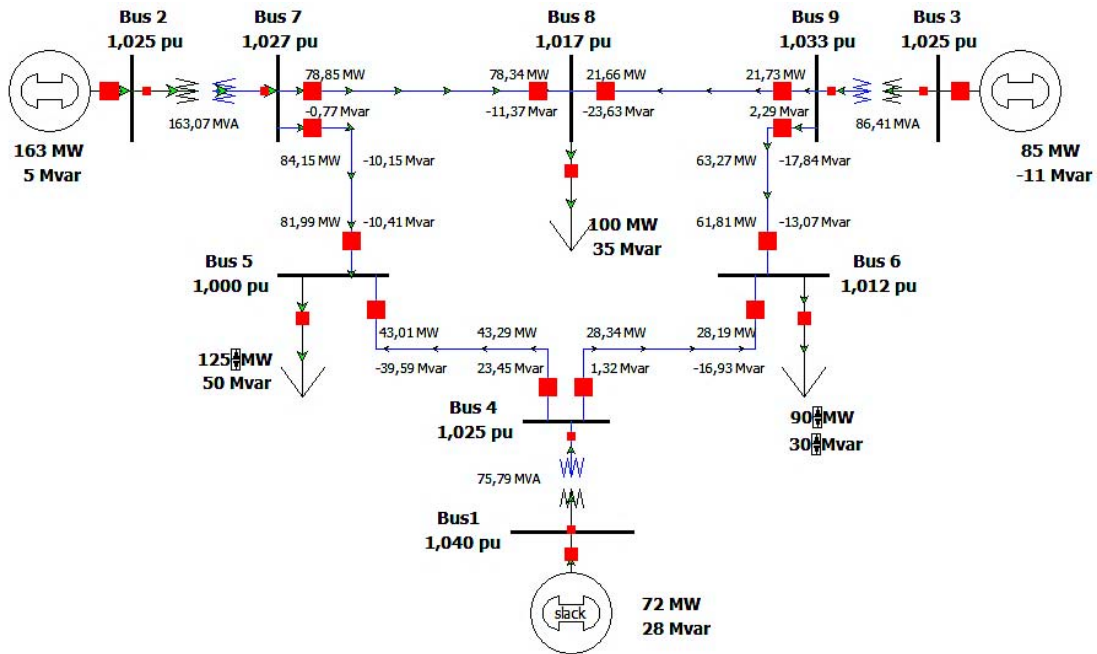
5	ZHTOYMENO	ZHTOYMENO	-	P = 125MW Q = 50MVAR
6	ZHTOYMENO	ZHTOYMENO	-	P = 90MW Q = 30MVAR
7	ZHTOYMENO	ZHTOYMENO	-	-
8	ZHTOYMENO	ZHTOYMENO	-	P = 100MW Q = 35MVAR
9	ZHTOYMENO	ZHTOYMENO	-	-

Πίνακας 6.2: Στοιχεία γραμμών μεταφοράς [25].

<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ</b> <b>(pu)</b>	<b>ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ</b> <b>(pu)</b>	<b>ΕΠΙΔΕΙΚΤΙΚΟΤΗΤΑ</b> <b>(pu)</b>
ZΥΓΟΙ 4-6	0,017	0,092	0,158
ZΥΓΟΙ 6-9	0,039	0,1738	0,358
ZΥΓΟΙ 9-3 (M/Σ)	0	0,0586	0
ZΥΓΟΙ 9-8	0,0119	0,1008	0,209
ZΥΓΟΙ 8-7	0,0085	0,0576	0,149
ZΥΓΟΙ 7-2 (M/Σ)	0	0,0625	0
ZΥΓΟΙ 7-5	0,032	0,161	0,306
ZΥΓΟΙ 5-4	0,01	0,068	0,176
ZΥΓΟΙ 1-4 (M/Σ)	0	0,0576	0

### 6.1.2 Ροή φορτίου

Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται το δίκτυο των 9 ζυγών, με τις τρεις γεννήτριες να βρίσκονται στους ζυγούς 1, 2 και 3, ενώ τα φορτία βρίσκονται στους ζυγούς 5, 6 και 8. Οι τρεις μετασχηματιστές της εικόνας είναι μετασχηματιστές ισχύος, οι οποίοι χωρίζουν το δίκτυο σε χαμηλή τάση στην πλευρά των γεννητριών και σε υψηλή τάση στην πλευρά των γραμμών μεταφοράς. Επιπλέον, απεικονίζεται η ροή ισχύος  $P$  (πραγματικής ισχύος σε MW), και  $Q$  (άεργης ισχύος σε MVAR), στην αρχή και στο τέλος κάθε γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα 6.1: Δίκτυο 9 ζυγών (IEEE) και ροή φορτίου.

Ακολουθούν πίνακες, που αφορούν όλους τους υπολογισμούς, που προκύπτουν μέσω της μελέτης ροής φορτίου. Στον Πίνακα 6.3 δίνονται όλα τα αποτελέσματα για τους ζυγούς που έχουν γεννήτριες, όπως αυτά υπολογίζονται από το πρόγραμμα. Οι ζυγοί 1, 2 και 3 είναι ζυγοί με ελεγχόμενη τάση, καθώς διαθέτουν γεννήτρια και το μέτρο της τάσης τους είναι προκαθορισμένο. Υπολογίζεται η άεργος ισχύς της παραγωγής  $Q_G$ , καθώς και η γωνία του καθενός ζυγού  $\delta$ .

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα στους ζυγούς με ελεγχόμενη τάση.

<b>ZYΓΟΣ</b> - <b>BUS</b>	<b>ΟΝΟΜ.</b> <b>ΤΑΣΗ</b> $V_{\text{NOMINAL}}$ <b>(kV)</b>	<b>ΤΑΣΗ  V </b> <b>(pu)</b>	<b>ΤΑΣΗ  V </b> <b>(kV)</b>	<b>ΓΩΝΙΑ <math>\delta</math></b> <b>(μοίρες)</b>	<b><math>P_G</math></b> <b>(MW)</b>	<b><math>Q_G</math></b> <b>(MVAR)</b>
1	16,5	1,04	17,16	$0,00^\circ$	71,63	27,91
2	18	1,025	18,45	$9,35^\circ$	163,00	4,9
3	13,8	1,025	14,145	$5,14^\circ$	85	-11,45

Στον Πίνακα 6.4 δίνονται όλα τα αποτελέσματα των ζυγών φορτίου, όπως υπολογίζονται από το πρόγραμμα. Οι ζυγοί 5, 6 και 8 είναι οι ζυγοί φορτίου, οι οποίοι έχουν για είσοδο τα μέτρα των ισχύων κατανάλωσης ( $P_D$ ,  $Q_D$ ), και οι μεταβλητές που υπολογίζονται, είναι το μέτρο της τάσης  $|V|$  και η φάση τους  $\delta$ .

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα στους ζυγούς φορτίου.

<b>ZYΓΟΣ</b> - <b>BUS</b>	<b>ΟΝΟΜ.</b> <b>ΤΑΣΗ</b> $V_{\text{NOMINAL}}$ <b>(kV)</b>	<b>ΤΑΣΗ  V </b> <b>(pu)</b>	<b>ΤΑΣΗ  V </b> <b>(kV)</b>	<b>ΓΩΝΙΑ <math>\delta</math></b> <b>(μοίρες)</b>	<b><math>P_D</math></b> <b>(MW)</b>	<b><math>Q_D</math></b> <b>(MVAR)</b>
5	230	0,99972	229,936	$-3,68^\circ$	125	50
6	230	1,01225	232,819	$-3,57^\circ$	90	30
8	230	1,01727	233,971	$1,34^\circ$	100	35

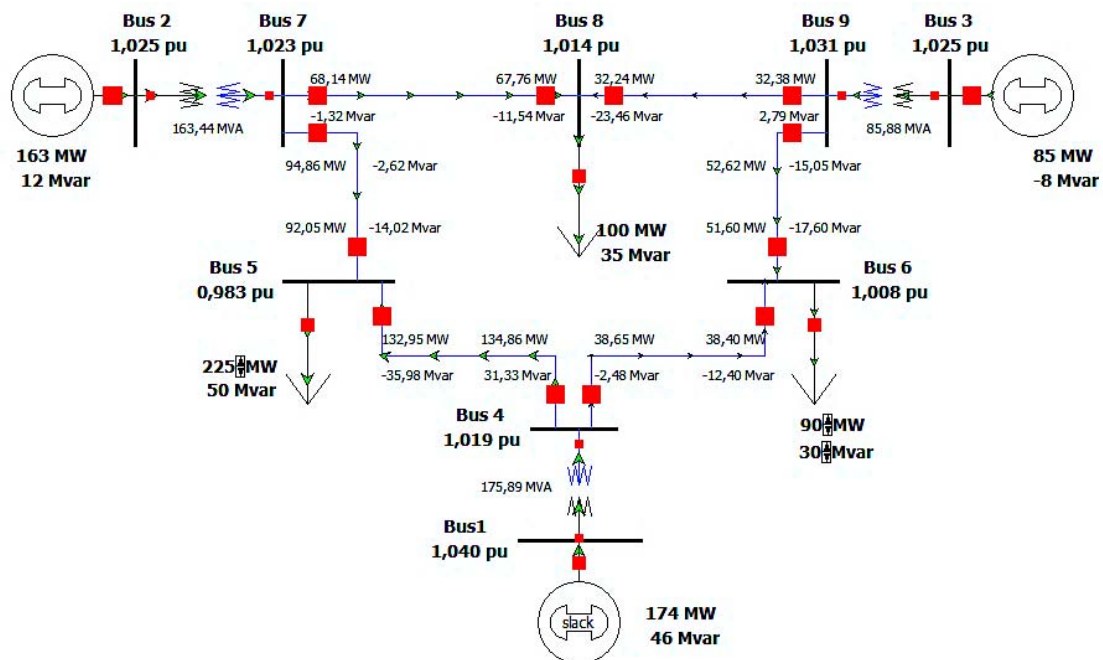
Τέλος, στον Πίνακα 6.5 δίνονται όλα τα στοιχεία των υπόλοιπων ζυγών μαζί με τα στοιχεία τους. Δεν αναγράφεται προφανώς, καμία ισχύς στους ζυγούς αυτούς, καθώς δεν διαθέτουν γεννήτρια ή φορτίο για να έχουν παραγόμενη ή καταναλισκόμενη ισχύ.

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα στους υπόλοιπους ζυγούς.

ΖΥΓΟΣ - BUS	ΟΝΟΜ. ΤΑΣΗ $V_{NOMINAL}$ (kV)	ΤΑΣΗ  V  (pu)	ΤΑΣΗ  V  (kV)	ΓΩΝΙΑ $\delta$ (μοίρες)
4	230	1,02531	235,821	-2,22°
7	230	1,02683	236,171	3,80°
9	230	1,03269	237,519	2,44°

Εάν προκύψουν αλλαγές στο δίκτυο, τότε συμβαίνουν αλλαγές στη ροή φορτίου, η οποία αναγράφεται στις γραμμές μεταφοράς και στις γεννήτριες. Αυτές οι αλλαγές, όσο μεγαλύτερες είναι, τόσο μεταβάλλονται τα νούμερα της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς του δικτύου, αλλά και όχι μόνο. Άλλωστε, όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο της ευστάθειας, κάθε «γενναία» αλλαγή του φορτίου, προκαλεί μετάβαση από τη μόνιμη κατάσταση, σε μία νέα. Συγκεκριμένα τα Σχήματα 6.2 και 6.3 δείχνουν την αλλαγή στη ροή ισχύος, που προκύπτει από μία αλλαγή στο φορτίο του ζυγού 5 ως εξής:

- 1) Αύξηση του φορτίου ζυγού 5 από τα 125 MW στα 225 MW

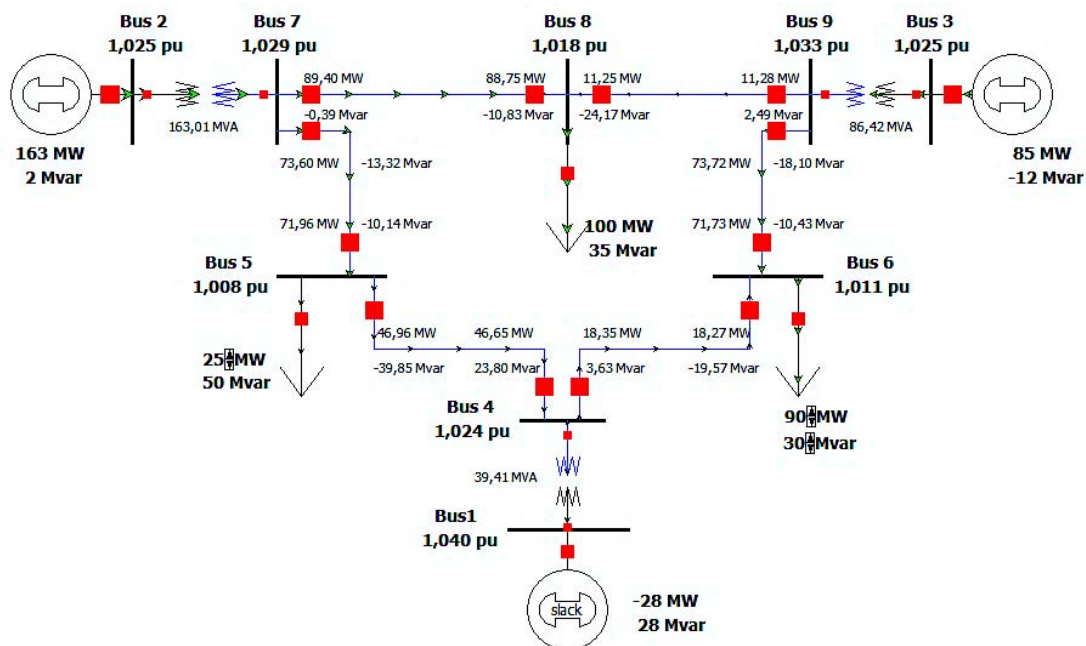


Σχήμα 6.2: Νέα μόνιμη κατάσταση με αύξηση φορτίου του ζυγού 5.



Ο ζυγός Slack παρουσιάζει αλλαγή στην πραγματική ισχύ, αφού είναι ο ζυγός αναφοράς του δικτύου. Παρατηρείται μετά την αλλαγή φορτίου, ότι οι ζυγοί 2 και 3 έχουν σταθερή ενεργό ισχύ P, αλλά διαφορετική άεργο ισχύ Q. Αυτό συμβαίνει καθώς, ως ζυγοί με ελεγχόμενη τάση, οι ζυγοί 2 και 3 έχουν μόνο δύο μεταβλητές προς υπολογισμό, την παραγόμενη άεργο ισχύ  $Q_G$ , και τη γωνία  $\delta$ , του ζυγού. Για να διατηρηθεί η τάση των ζυγών αυτών σταθερή, επαναπροσδιορίζεται μία νέα τιμή της άεργου ισχύος τους. Επιπλέον, η σταθερότητα της τάσης των ζυγών 2 και 3 είναι αυτή που ανεξαρτητοποιεί την πραγματική τους ισχύ P, από μία αλλαγή φορτίου. Οι υπόλοιποι ζυγοί παρουσιάζουν αλλαγή στην τάση, (σε μέτρο και γωνία). Τέλος, η ροή της πραγματικής ισχύος προς το ζυγό 5 αυξάνεται, όπως αυτή διακρίνεται στις γραμμές μεταφοράς.

## 2) Μείωση του φορτίου ζυγού 5, από τα 125 MW στα 25 MW



Σχήμα 6.3: Νέα μόνιμη κατάσταση με μείωση φορτίου του ζυγού 5.

Ο ζυγός 1, ως ζυγός αναφοράς του δικτύου, παρουσιάζει και πάλι αλλαγή στην ενεργό ισχύ. Όπως και πριν, παρατηρείται μετά την αλλαγή φορτίου, ότι οι ζυγοί 2 και 3 διατηρούν σταθερή την ενεργό ισχύ P, αλλά έχουν διαφορετική άεργο ισχύ Q. Ως ζυγοί με ελεγχόμενη τάση, οι ζυγοί 2 και 3 για να διατηρήσουν την τάση σταθερή, επαναρυθμίζουν την τιμή της άεργου ισχύος. Με σταθερή την τάση τους, οι ζυγοί ελέγχου τάσης δεν εμφανίζουν καμία αλλαγή στην ενεργό ισχύ, μετά από αλλαγή φορτίου. Οι υπόλοιποι ζυγοί παρουσιάζουν αλλαγή στην τάση, (σε μέτρο και γωνία). Τέλος, η ροή της πραγματικής ισχύος προς το ζυγό 5 μειώνεται, όπως αυτή διακρίνεται στις γραμμές μεταφοράς.

Συνολικές παρατηρήσεις επί του προγράμματος για την ανάλυση ροής φορτίου:

- ◇ Ο ζυγός Slack επαναπροσδιορίζεται ως προς τα P, Q, μετά από κάθε αλλαγή φορτίου, με γωνία  $0^\circ$  και μέτρο τάσης 1,04 pu. Θεωρείται ο ζυγός αναφοράς του δικτύου και αυτό φαίνεται γιατί παρουσιάζει τη μέγιστη αλλαγή ισχύος σε κάθε περίπτωση.
- ◇ Οι ζυγοί 2 και 3 είναι ζυγοί με ελεγχόμενη τάση, καθότι επαναπροσδιορίζονται μόνο τα  $Q_G$  και  $\delta$ , μετά από κάθε αλλαγή φορτίου.
- ◇ Οι ζυγοί 5, 6 και 8 θεωρούνται ζυγοί φορτίου, αφού μετά από κάθε πιθανή αλλαγή του φορτίου σε οποιοδήποτε ζυγό επαναπροσδιορίζεται η τάση τους, (σε μέτρο και φάση).
- ◇ Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι δεδομένες, είτε εφαρμόζεται αύξηση, είτε εφαρμόζεται μείωση του φορτίου σε κάθε ζυγό φορτίου.

## 6.2 Μελέτη σφαλμάτων

Στη συγκεκριμένη μελέτη παρατίθενται οι υπολογισμοί σε πίνακες από τη δοκιμή σφάλματος, που έγινε στο δίκτυο των 9 ζυγών. Εφαρμόζονται όλοι οι τύποι σφαλμάτων για βραχυκύκλωμα στο ζυγό 4. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στο Κεφάλαιο 3 σημειώθηκαν όλες οι εξισώσεις των τάσεων και των ρευμάτων των δικτύων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας για τα διάφορα είδη σφαλμάτων. Μάλιστα, δόθηκαν και οι τύποι που συνδέουν τα ακολουθιακά δίκτυα με τα φασικά ρεύματα και τις φασικές τάσεις, μέσω του τελεστή  $a = e^{j120}$ . Για αυτό το λόγο, κρίνεται απαραίτητο να παρατηρηθούν κυρίως αυτά τα φασικά μεγέθη για την πλήρη ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων. Στα Σχήματα 6.4, 6.5, 6.6 και 6.7 σημειώνονται οι φασικές τάσεις σε μέτρο pu και σε γωνία, ενώ ακολουθούν και τα φασικά ρεύματα του κάθε σφάλματος σε μονάδες pu.

### 6.2.1 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 4

Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
Bus1	0,24648	0,24648	0,24648	7,18	-112,82	127,18
Bus 2	0,47882	0,47882	0,47882	32,68	-87,32	152,68
Bus 3	0,36730	0,36730	0,36730	32,20	-87,80	152,20
Bus 4	0,00000	0,00000	0,00000	173,24	53,24	-66,76
Bus 5	0,10538	0,10538	0,10538	27,28	-92,72	147,28
Bus 6	0,10857	0,10857	0,10857	27,27	-92,73	147,27
Bus 7	0,36544	0,36544	0,36544	28,49	-91,51	148,49
Bus 8	0,34486	0,34486	0,34486	26,68	-93,32	146,68
Bus 9	0,31961	0,31961	0,31961	28,80	-91,20	148,80

Σχήμα 6.4: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για στερεό τριφασικό σφάλμα.

Τα φασικά ρεύματα σφάλματος είναι:

$$\begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,757 \angle -71,55 \\ 6,757 \angle 168,45 \\ 6,757 \angle 48,45 \end{bmatrix} p. u.$$

### 6.2.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα, SLG, στο ζυγό 4

Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
Bus1	1,61283	1,00155	1,38561	-18,40	-139,82	123,52
Bus 2	1,37052	0,91117	1,29803	-11,21	-125,41	128,97
Bus 3	1,47040	0,92331	1,34331	-16,25	-132,71	125,78
Bus 4	0,00000	2,52344	3,11888	119,75	176,47	141,77
Bus 5	0,37334	2,68158	3,26780	158,21	173,30	141,35
Bus 6	0,41678	2,74340	3,34983	154,97	172,73	141,24
Bus 7	0,96819	2,81890	3,62672	139,50	172,04	143,34
Bus 8	0,99632	2,89940	3,65626	143,20	170,86	142,58
Bus 9	0,93854	2,88803	3,67863	140,57	171,33	142,83

Σχήμα 6.5: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για μονοφασικό σφάλμα ως προς τη γη.

Τα φασικά ρεύματα σφάλματος είναι:

$$\begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,999 \angle 64,61 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} p. u.$$

### 6.2.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη, DLG, στο ζυγό 4

Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
Bus1	1,14123	0,57372	0,64279	-2,75	-161,25	158,15
Bus 2	1,08959	0,51637	0,81906	6,10	-127,99	159,18
Bus 3	1,10567	0,47792	0,76499	1,72	-143,28	160,72
Bus 4	1,73773	0,00000	0,00000	-5,46	7,43	-32,86
Bus 5	1,76980	0,16623	0,09048	-6,95	-33,12	52,11
Bus 6	1,80379	0,18380	0,09337	-7,07	-33,68	44,32
Bus 7	1,87369	0,54066	0,16303	-3,41	-48,32	69,31
Bus 8	1,88515	0,52133	0,18547	-5,02	-45,88	59,29
Bus 9	1,89875	0,49818	0,14832	-4,34	-46,14	58,07

Σχήμα 6.6: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για διφασικό σφάλμα ως προς τη γη.

Τα φασικά ρεύματα σφάλματος είναι:

$$\begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6,628 \angle -150,28 \\ 5,363 \angle 4,44 \end{bmatrix} p.u.$$

### 6.2.4 Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα, LL στο ζυγό 4

Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
Bus1	1,04000	0,53687	0,58626	0,00	-156,77	158,82
Bus 2	1,02500	0,51605	0,77647	9,35	-123,10	159,98
Bus 3	1,02500	0,46425	0,71564	5,14	-137,26	161,82
Bus 4	1,02531	0,51265	0,51265	-2,22	177,78	177,78
Bus 5	0,99972	0,45962	0,55238	-3,68	-173,88	168,18
Bus 6	1,01225	0,46500	0,56017	-3,57	-173,57	168,15
Bus 7	1,02683	0,47748	0,70677	3,80	-139,18	159,79
Bus 8	1,01727	0,46674	0,69135	1,34	-143,33	158,36
Bus 9	1,03269	0,46510	0,68566	2,44	-145,33	161,24

Σχήμα 6.7: Φασικές τάσεις στο ζυγό 4 για απλό διφασικό σφάλμα.

Τα φασικά ρεύματα σφάλματος είναι:

$$\begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5,851 \angle -161,55 \\ 5,851 \angle 18,45 \end{bmatrix} p.u.$$

Συνολικές παρατηρήσεις επί του προγράμματος για την δοκιμή όλων των σφαλμάτων:

- ◇ Το συμμετρικό τριφασικό σφάλμα, σε οποιοδήποτε ζυγό εφαρμόζεται, δίνει φασικές τάσεις ίσες με το 0 και διαφορά ορίσματος στα ρεύματα -120 μοίρες από φάση σε φάση.
- ◇ Το μονοφασικό σφάλμα σε οποιοδήποτε ζυγό εφαρμόζεται, δίνει φασική τάση  $a$  ίση με το 0 και φασικά ρεύματα  $b$  και  $c$  ίσα με το 0.

- ◇ Το διφασικό σφάλμα ως προς τη γη, σε οποιοδήποτε ζυγό εφαρμόζεται, δίνει φασικές τάσεις  $b$  και  $c$  ίσες με το 0, και φασικό ρεύμα  $a$  ίσο με το 0.
- ◇ Το απλό διφασικό σφάλμα, σε οποιοδήποτε ζυγό εφαρμόζεται, δίνει ίδιες τιμές στις φασικές τάσεις  $b$  και  $c$ , και φασικό ρεύμα  $a$  ίσο με το 0.

### 6.3 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας

Πρακτικά, ο ενδεδειγμένος τρόπος για να ελεγχθεί η μεταβατική ευστάθεια, είναι η ερμηνεία των καμπυλών του δικτύου μετά την εφαρμογή κάποιου σφάλματος. Ο συγκεκριμένος τρόπος μελέτης, όπως προαναφέρθηκε, ανήκει στην έμμεση ανάλυση και εξασφαλίζει μέγιστη ακρίβεια, καθώς το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων λύνεται από το λογισμικό της επιλογής του μηχανικού. Στη συνέχεια, το λογισμικό εμφανίζει τις καμπύλες των αντικειμένων που εξετάζονται ως προς τις ταλαντώσεις τους (δηλαδή τάση, συχνότητα, ταχύτητα του δρομέα κ.λπ.), πριν, κατά και μετά την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος. Έχει γίνει, πλέον, ξεκάθαρο ότι ένα οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ευσταθές, όταν επιστρέφει στο συγχρονισμό μετά από μία διαταραχή. Δηλαδή, μετά την οποιαδήποτε μεταβατική ταλάντωση το κάθε αντικείμενο μελέτης οφείλει να καταλήγει σε μία νέα μόνιμη κατάσταση. Στη συγκεκριμένη μελέτη αναζητείται ο κρίσιμος χρόνος, στον οποίο θα εκκαθαριστεί ένα σφάλμα, ώστε το σύστημα να μπορέσει να μη χάσει εντελώς το συγχρονισμό. Θα συγκριθούν όλα τα σφάλματα, που θα πραγματοποιηθούν σε διάφορα σημεία του δικτύου των 9 ζυγών, ως προς την ικανότητα διατήρησης της ευστάθειας [26, 27].

Για τη μεταβατική φάση τα σφάλματα δεν θα συμβούν σε ζυγό, αλλά στις γραμμές μεταφοράς. Γι' αυτό, ο όρος εκκαθάριση του σφάλματος σημαίνει ταυτόχρονο άνοιγμα των δύο διακοπτικών μέσων της εκάστοτε γραμμής. Όπως έγινε αντιληπτό από την προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων, τα σφάλματα με φθίνουσα σειρά σοβαρότητας βάσει του συνολικού ρεύματος βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$ , του καθενός, κατατάσσονται ως εξής:

- i. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα – 3-PHASE,
- ii. Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη – DLG,
- iii. Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα – LL,
- iv. Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη – SLG.

Γενικά η μελέτη της ευστάθειας στα ΚΕΕ αφορά κυρίως το πρώτο και το τέταρτο σφάλμα στην παραπάνω λίστα. Αυτό συμβαίνει διότι, παρά τη φθίνουσα σειρά σοβαρότητας, το μονοφασικό σφάλμα δέχεται όλο το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε μία φάση, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα σφάλματα. Έτσι, το μέγιστο φασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης συναντάται στο SLG, το οποίο είναι μεγαλύτερο από τα φασικά ρεύματα, που επικρατούν στα άλλα βραχυκυκλώματα. Στη συγκεκριμένη μελέτη, με την αντίστροφη σειρά θα αναλυθούν τα εξής σφάλματα:

- 1) SLG στη γραμμή 8-9 προς το ζυγό 9,
- 2) LL στη γραμμή 4-6 προς το ζυγό 4,
- 3) DLG στη γραμμή 5-7 προς το ζυγό 7,
- 4) 3-PHASE στη γραμμή 4-5 προς το ζυγό 4.

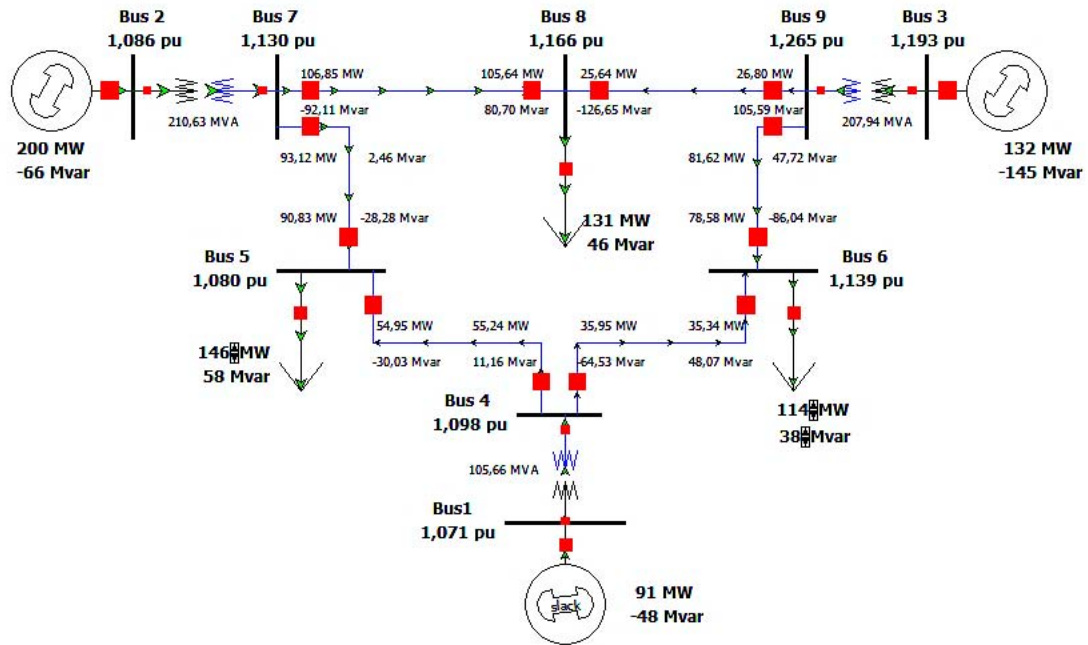
Το χρονικό βήμα είναι πολύ μικρό (0,005 sec.). Αναλυτικά, όλες οι ρυθμίσεις της μελέτης ευστάθειας δίνονται στον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Στοιχεία μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας.

<b>ΣΦΑΛΜΑΤΑ</b>	Time step (seconds)	Time step (time cycles)	Time start (seconds)	Time start (time cycles)	Time end (seconds)	Time end (time cycles)
<b>SLG 8-9</b>	0,005	0,25	2	100	12	600
<b>LL 4-6</b>	0,005	0,25	2	100	12	600
<b>DLG 5-7</b>	0,005	0,25	2	100	12	600
<b>3-PHASE 4-5</b>	0,005	0,25	2	100	12	600

### 6.3.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα, SLG, στη γραμμή 8-9 προς το ζυγό 9

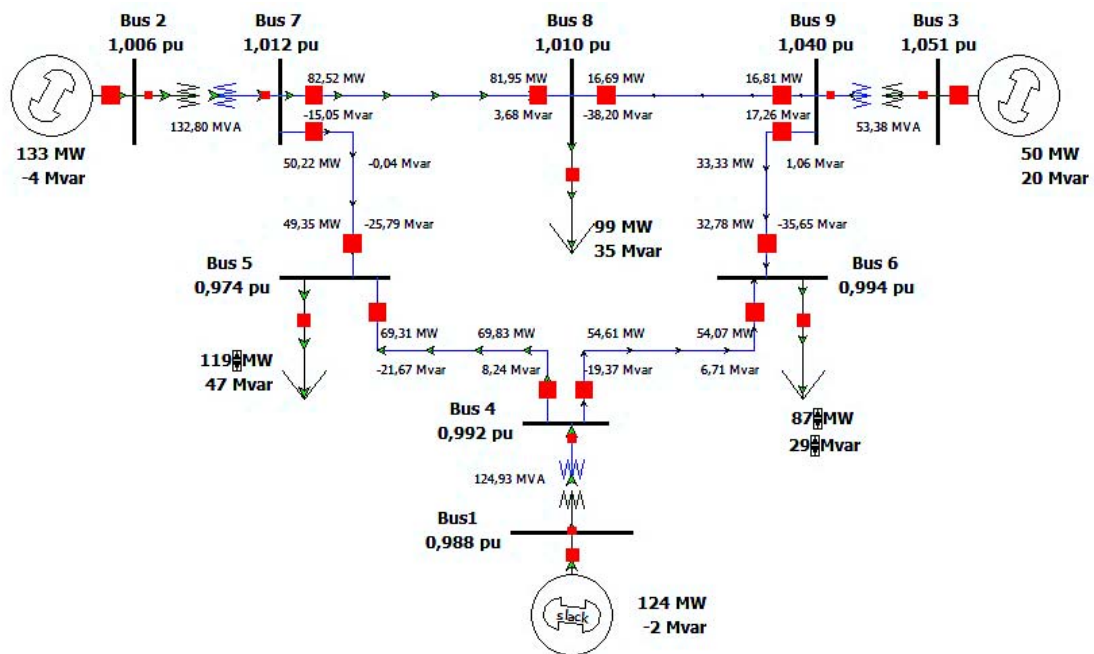
Τη στιγμή  $t=2,005$  sec. το δίκτυο των 9 ζυγών έχει τη μορφή του Σχήματος 6.8. Το βραχυκύκλωμα μόλις έχει εφαρμοστεί στο 2<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο πάνω στη γραμμή κοντά στο ζυγό 9. Δηλαδή, στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται το δίκτυο την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή από τη στιγμή που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα.



Σχήμα 6.8: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το SLG στη γραμμή 8-9.

Το συγκεκριμένο δίκτυο ενώ βρίσκεται στη μεταβατική κατάσταση, για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι δύο διακόπτες της γραμμής 8-9 για  $t_{\text{κρίσιμος}}=1,73 \text{ sec}$ . Δηλαδή τη στιγμή  $t=3,74 \text{ sec}$ ., εάν το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 8-9, τότε η αστάθεια θα ήταν οριστική.

Τη στιγμή  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=3,735 \text{ sec}$ . το δίκτυο έχει τη μορφή του Σχήματος 6.9. Η πτώση τάσης σε όλους του ζυγούς είναι γεγονός και ειδικά στο ζυγό 9. Επίσης φαίνεται ότι χρειάζεται ακόμα χρόνος, ώστε να επανέλθει ισορροπία σε όλες τις γεννήτριες του δικτύου και να μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση των μειωμένων φορτίων. Παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις για περαιτέρω σχολιασμό.



Σχήμα 6.9: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το SLG στη γραμμή 8-9.

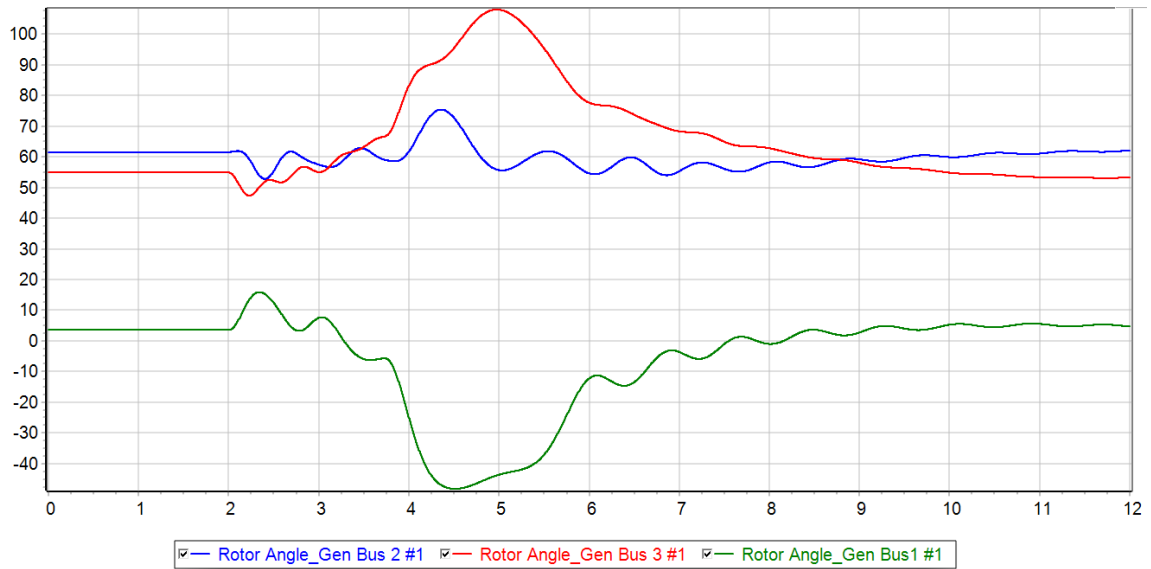
Γραφικές Παραστάσεις:

Στα Σχήματα 6.10 - 6.15 προκύπτει απότομη ταλάντωση στο  $t_{\text{start}}=2 \text{ sec.}$ , και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από  $t_{\text{κρίσιμος}}=1,73 \text{ sec.}$ , ανοίγουν οι διακόπτες και εμφανίζεται εντονότερη ταλάντωση στην τάση και στην ισχύ, η οποία με το χρόνο αποσβένει. Μέχρι  $t=8 \text{ sec.}$ , η τάση και η ενεργός ισχύς δεν έχουν επιστρέψει στα κανονικά επίπεδα στους ζυγούς των γεννητριών 1, 2 και 3, όπως αυτό διακρίνεται στα Σχήματα 6.12 και 6.14 αντίστοιχα.

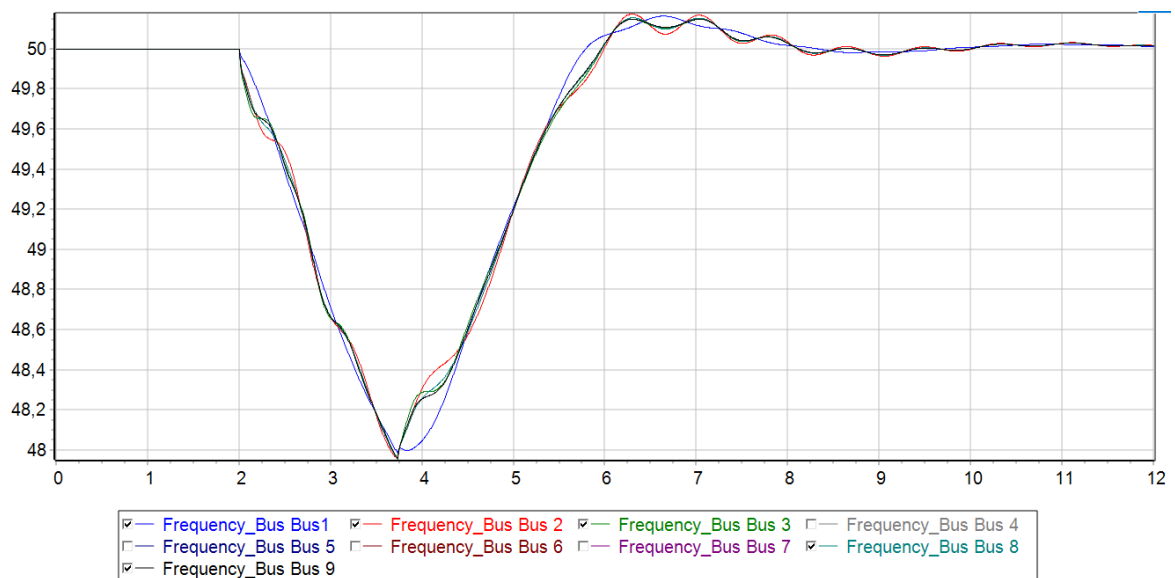
Ο ζυγός 3 είναι αυτός που μεταβάλλεται περισσότερο, αφού βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο του σφάλματος. Αυτό επιβεβαιώνεται κυρίως από τα Σχήματα 6.10 και 6.12, διότι τόσο η γωνία του δρομέα  $\delta$ , όσο και η τάση  $V$ , παρουσιάζουν τη μέγιστη καμπυλότητα. Αξίζει να τονιστεί, ότι ο ζυγός 1 - Slack ή αλλιώς ο ζυγός αναφοράς εμφανίζει τις πιο απότομες αλλαγές πραγματικής και αέργου ισχύος στα Σχήματα 6.14 και 6.15. Τέλος, όπως αναμενόταν η συχνότητα των ζυγών 8 και 9 του σφάλματος στο Σχήμα 6.11, ακολουθεί την «πορεία» της καμπύλης του ζυγού 3, αποτυπώνοντας με ακρίβεια το χρονικό σημείο στο οποίο συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος. Η καμπύλη της ταχύτητας στο Σχήμα 6.13 είναι παρόμοια με αυτή της συχνότητας. Η επαναφορά της συχνότητας κάθε ζυγού κοντά στην αρχική,  $f^0 = 50 \text{ Hz}$ , γίνεται στα  $8,5 \text{ sec.}$ , οπότε επιβεβαιώνεται ότι χρειάζονται περίπου  $4,75 \text{ sec.}$  μετά την εκκαθάριση, για να επανέλθει πλήρως το δίκτυο. Οι συγκεκριμένοι χρόνοι



προέκυψαν μέσω προσαρμοσμένης μελέτης στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, από το λογισμικό του PowerWorld.

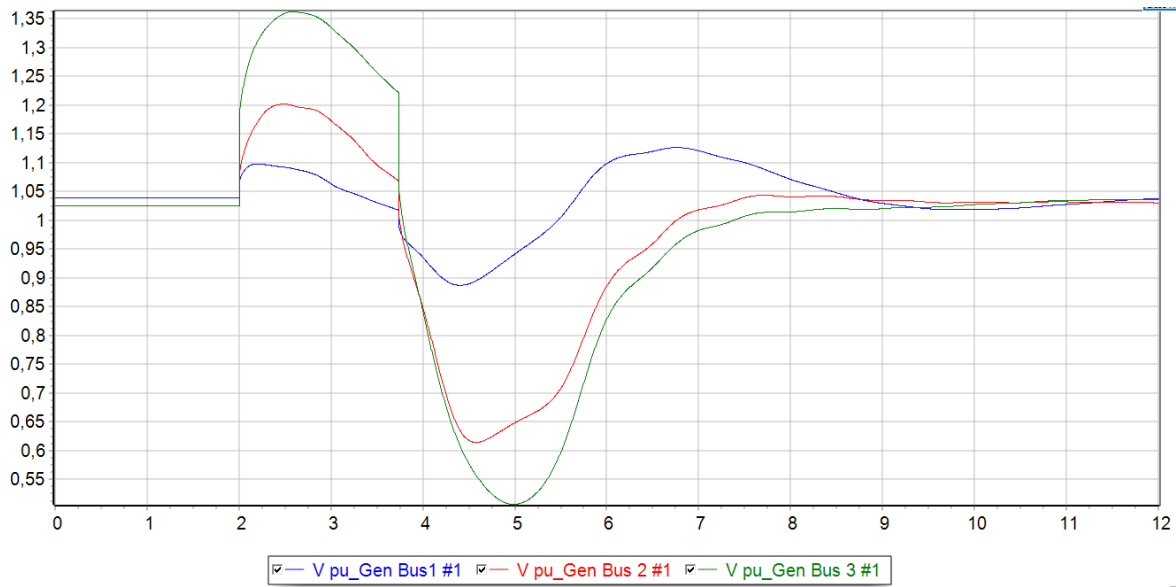


Σχήμα 6.10: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για SLG στη γραμμή 8-9.

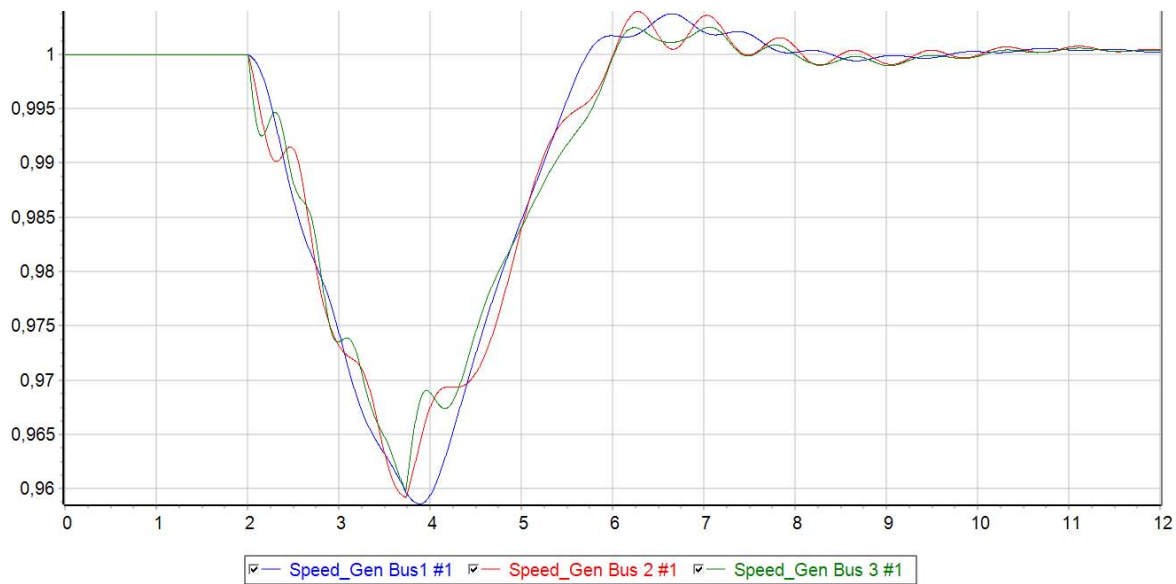


Σχήμα 6.11: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για SLG στη γραμμή 8-9.

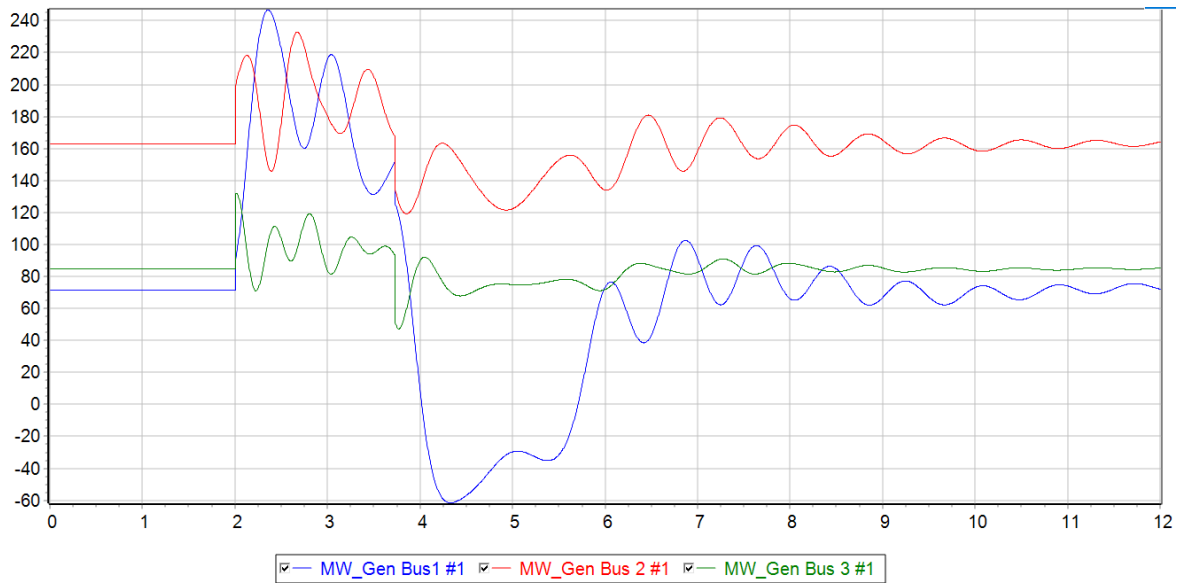
Εμφανίζονται οι καμπύλες τόσο των γεννητριών,  
όσο και των ζυγών του σφάλματος.



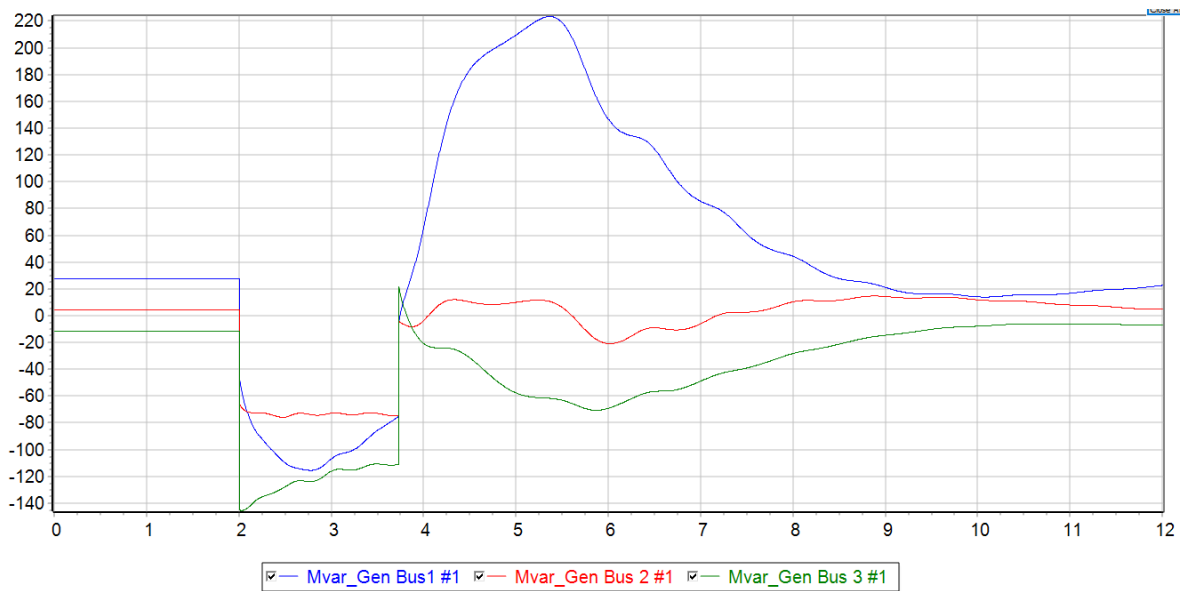
Σχήμα 6.12: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για SLG στη γραμμή 8-9.



Σχήμα 6.13: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για SLG στη γραμμή 8-9.



Σχήμα 6.14: Καμπύλη ευστάθειας P ισχύος για SLG στη γραμμή 8-9.



Σχήμα 6.15: Καμπύλη ευστάθειας Q ισχύος για SLG στη γραμμή 8-9.

### Αποτέλεσμα μονοφασικού σφάλματος - SLG:

Χρόνος εφαρμογής σφάλματος:  $t_{start}=2$  sec.

Χρόνος ανοίγματος διακοπών:  $t_{εκκαθάρισης}=3,73$  sec.

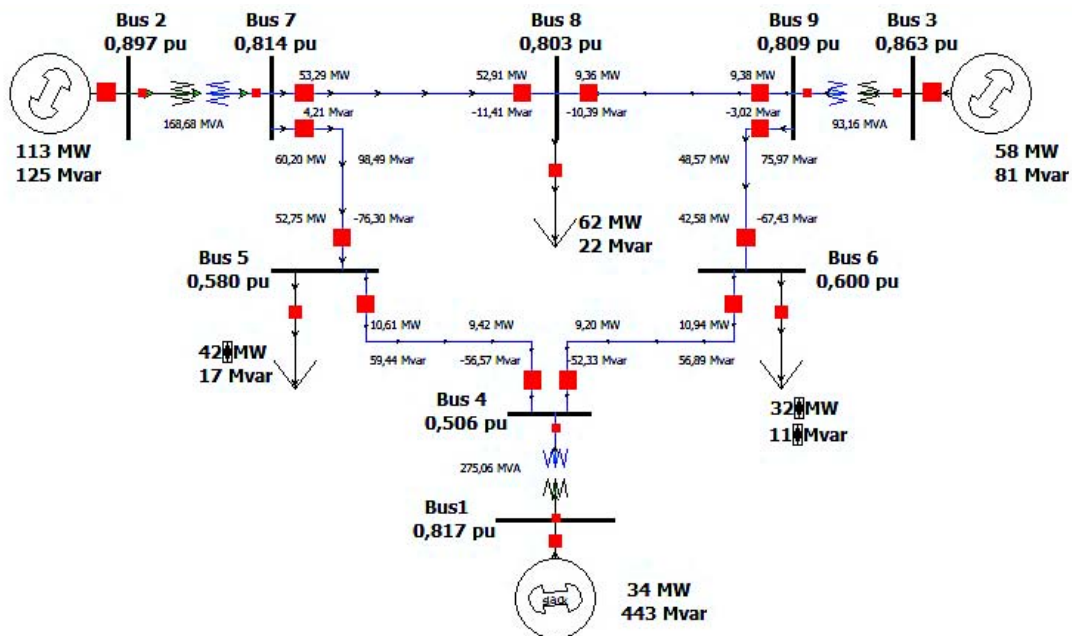
Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος:  $t_{κρίσιμος}=1,73$  sec.

Ζυγός παραγωγής με τη μέγιστη επιρροή: Ζυγός 3.

Χρόνος πλήρους επαναφοράς του δικτύου:  $t=4,75$  sec. μετά την εκκαθάριση.

### 6.3.2 Απλό διφασικό βραχυκύκλωμα, LL, στη γραμμή 4-6 προς το ζυγό 4

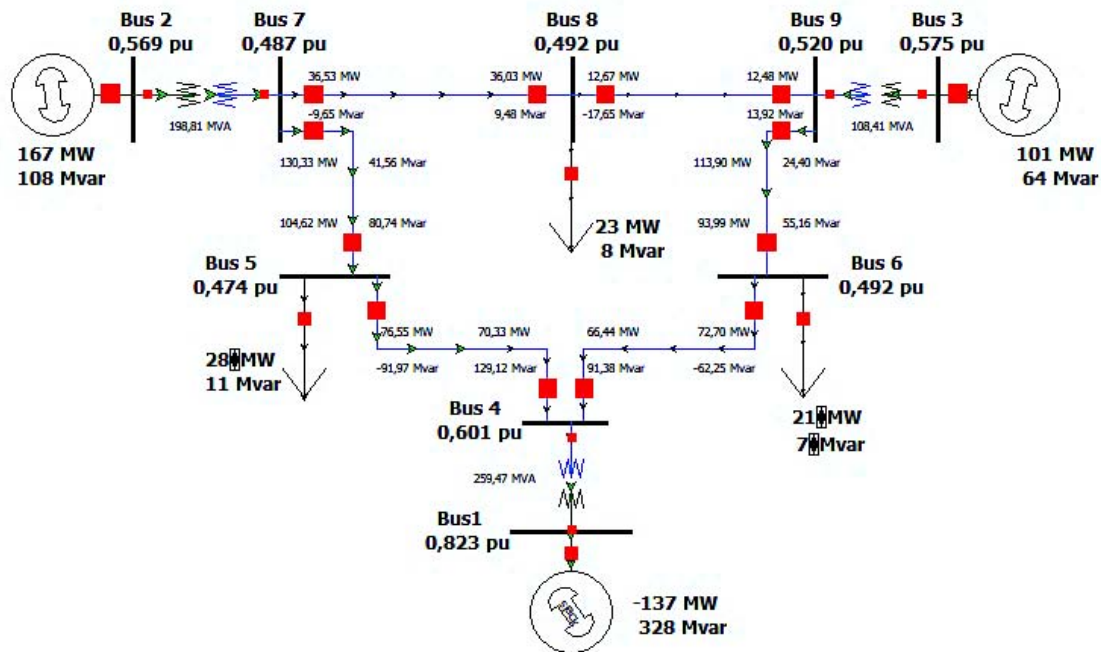
Τη χρονική στιγμή  $t=2,005$  sec. το δίκτυο των 9 ζυγών έχει τη μορφή του Σχήματος 6.16. Το βραχυκύκλωμα μόλις έχει εφαρμοστεί πάνω στη γραμμή κοντά στο ζυγό 4. Επομένως, στο Σχήμα 6.16 απεικονίζεται το δίκτυο την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, από τη στιγμή που εφαρμόζεται το απλό διφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6.



Σχήμα 6.16: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το LL στη γραμμή 4-6.

Το δίκτυο ενώ βρίσκεται στη μεταβατική φάση, ανοίγουν οι δύο διακόπτες της γραμμής 4-6 για την εκκαθάριση του σφάλματος, την  $t_{κρίσιμος}=0,75$  sec. Άρα, τη στιγμή  $t=2,76$  sec., στην περίπτωση που το δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 4-6, η αστάθεια θα ήταν οριστική.

Τη στιγμή  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=2,755 \text{ sec.}$  το δίκτυο έχει τη μορφή του Σχήματος 6.17. Η πτώση τάσης σε όλους του ζυγούς και ειδικά στο ζυγό 4 δεν φαίνεται να έχει επιλυθεί. Εκτός από τους διασυνδεδεμένους ζυγούς 5 και 6, οι ζυγοί 2, 3, 7, 8 και 9 παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες ισχύος. Επίσης, η αρνητική ενεργός ισχύς του Slack ζυγού 1 δείχνει ότι, το δίκτυο δεν έχει επανέλθει. Η μεταβατική ταλάντωση μέχρι τη νέα μόνιμη κατάσταση πρέπει να αποσβεστεί. Παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις για περαιτέρω σχολιασμό.



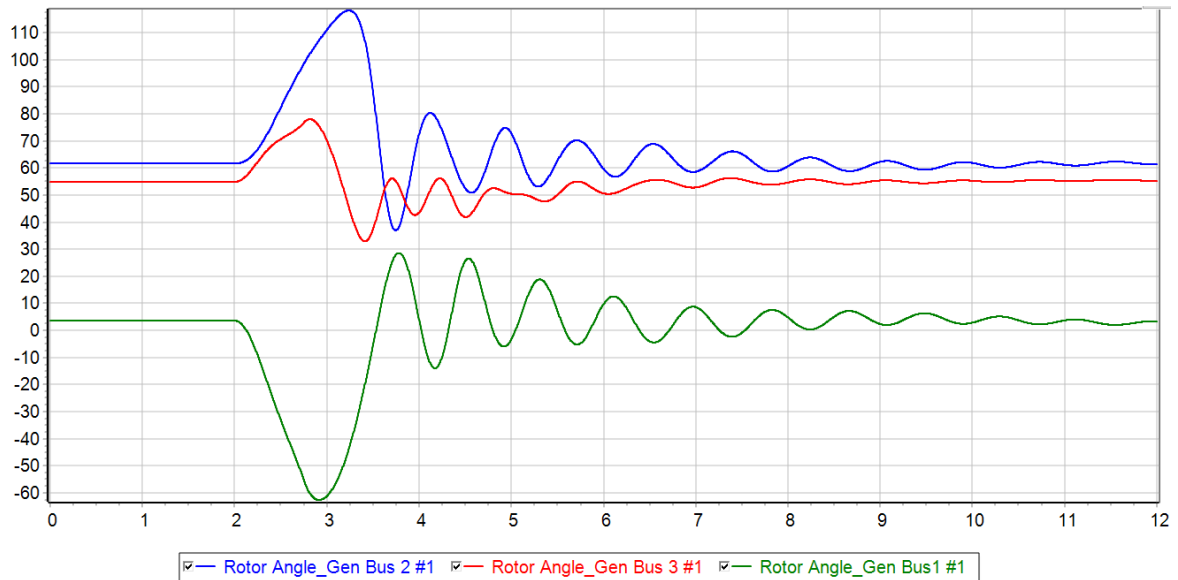
Σχήμα 6.17: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το LL στη γραμμή 4-6.

Γραφικές Παραστάσεις:

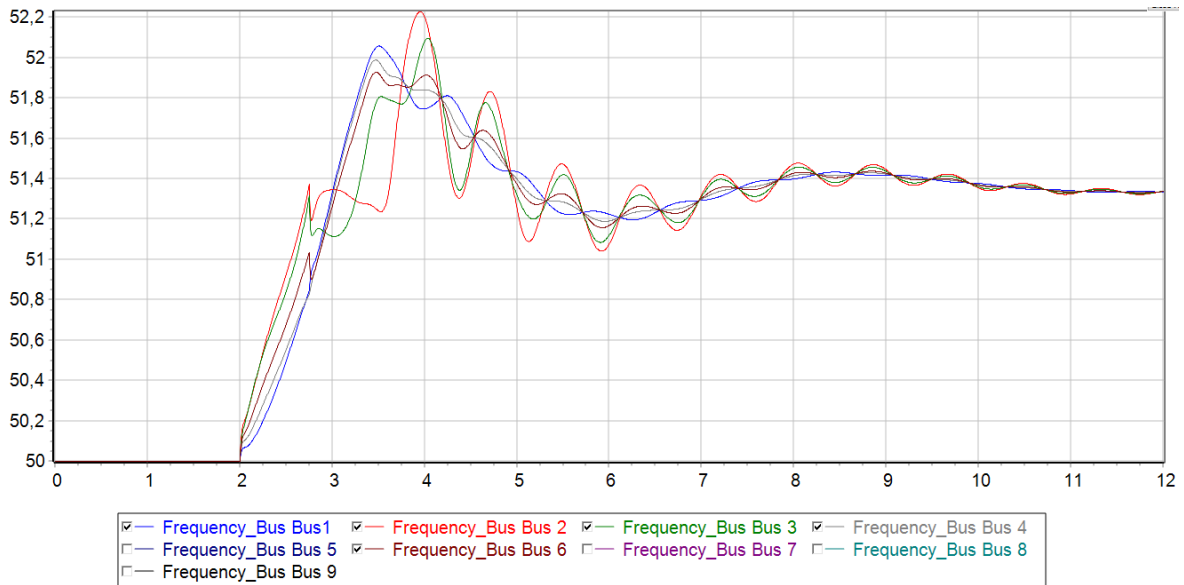
Στα Σχήματα 6.18 - 6.23 προκύπτει ταλάντωση στο  $t_{\text{start}}=2 \text{ sec.}$ , και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,75 \text{ sec.}$ , ανοίγουν οι διακόπτες και εμφανίζεται μεγαλύτερη ταλάντωση στα σχήματα αυτά, η οποία αποσβένει. Μέχρι  $t=8,5 \text{ sec.}$ , η τάση και η ενεργός ισχύς δεν έχουν επιστρέψει στα κανονικά επίπεδα στους ζυγούς των γεννητριών 1, 2 και 3, όπως αυτό διακρίνεται στα Σχήματα 6.20 και 6.22 αντίστοιχα.

Ο ζυγός 1 είναι αυτός που μεταβάλλεται εντονότερα, αφού βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο του σφάλματος. Η επιβεβαίωση έρχεται από τα Σχήματα 6.18 και 6.20, διότι η γωνία του δρομέα  $\delta$  και η τάση  $V$ , παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη καμπυλότητα από αυτές των άλλων δύο ζυγών της παραγωγής. Η καμπύλη της ταχύτητας του δρομέα στο Σχήμα 6.21, είναι παρόμοια με την καμπύλη της συχνότητας στο Σχήμα 6.19. Στα Σχήματα 6.22 και 6.23 παρατηρείται, ότι ο ζυγός μέγιστης επιρροής, σε ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα, είναι ο

ζυγός αναφοράς 1. Η συχνότητα των ζυγών 4 και 6 του σφάλματος, ακολουθεί την «πορεία» της καμπύλης του πλησιέστερου ζυγού 1. Η επαναφορά της συχνότητας κάθε ζυγού στην αρχική,  $f^0 = 50\text{Hz}$ , δεν δείχνει εφικτή. Ωστόσο, στο  $t=8,5 \text{ sec.}$  σταθεροποιείται κοντά στα  $51,3\text{Hz}$ , οπότε χρειάζονται περίπου  $5,75 \text{ sec.}$  μετά την εκκαθάριση, για να επανέλθει πλήρως το δίκτυο. Οι χρόνοι αυτοί προέκυψαν μέσω της προσαρμοσμένης μελέτης, στο απλό διφασικό βραχυκύκλωμα που εφαρμόζεται γραμμή 4-6, από το λογισμικό του PowerWorld.



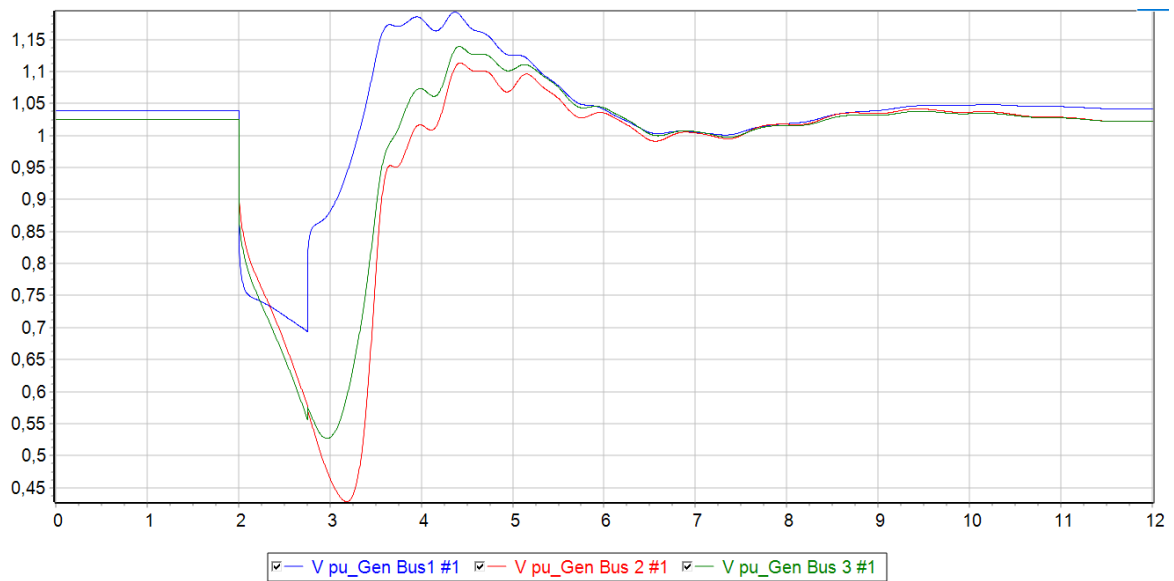
Σχήμα 6.18: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για LL στη γραμμή 4-6.



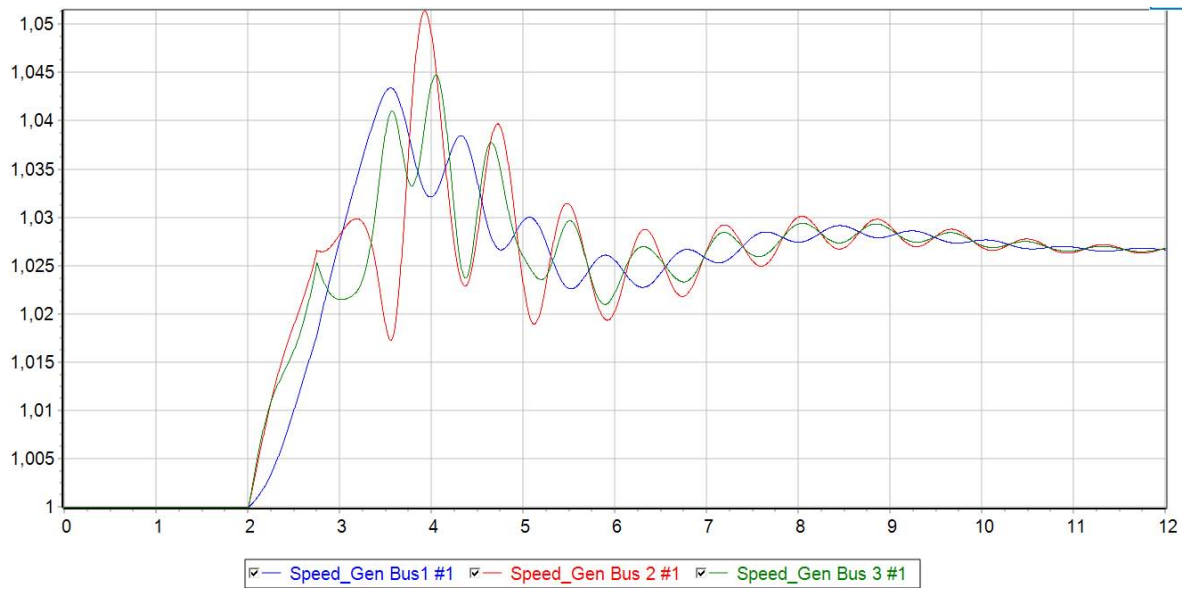
Σχήμα 6.19: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για LL στη γραμμή 4-6.

Εμφανίζονται οι καμπύλες τόσο των γεννητριών,

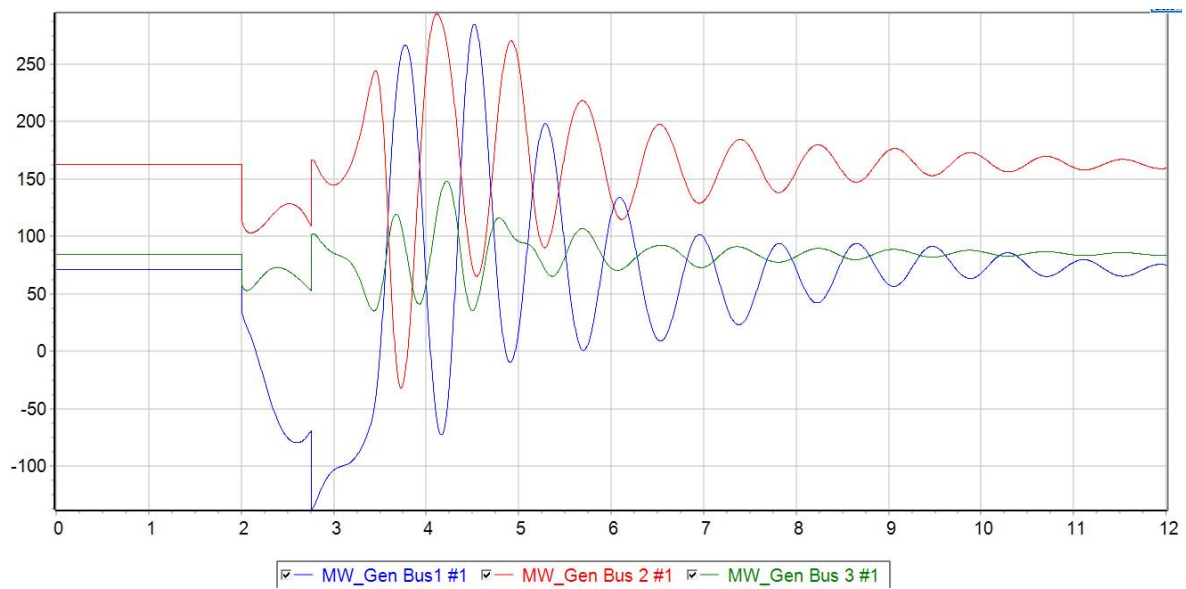
όσο και των ζυγών του σφάλματος.



Σχήμα 6.20: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για LL στη γραμμή 4-6.

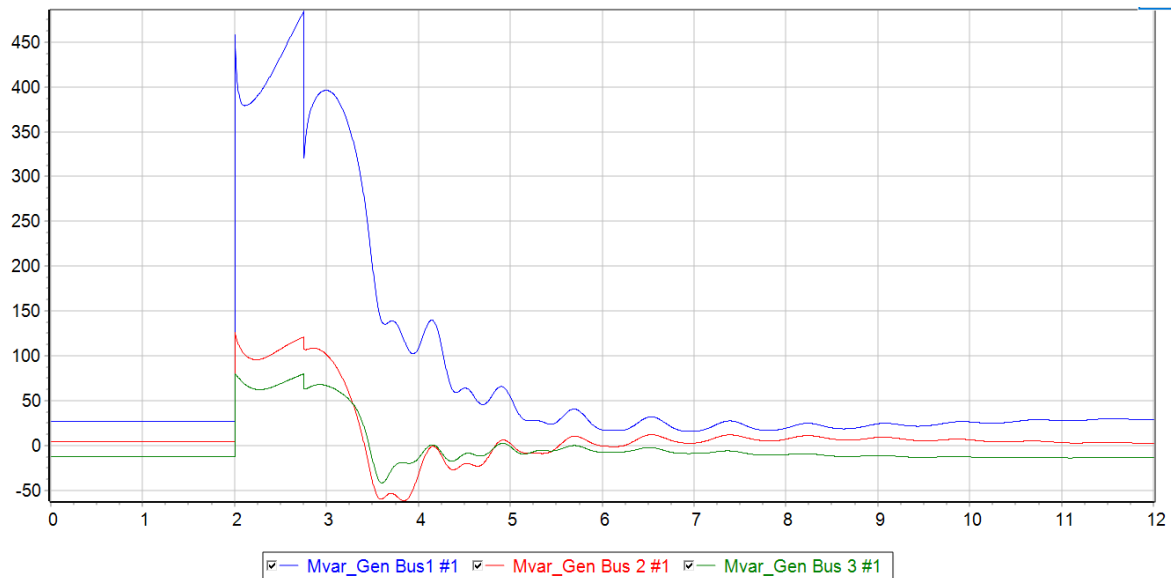


Σχήμα 6.21: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για LL στη γραμμή 4-6.



Σχήμα 6.22: Καμπύλη ευστάθειας P ισχύος για LL στη γραμμή 4-6.





Σχήμα 6.23: Καμπύλη ευστάθειας Q ισχύος για LL στη γραμμή 4-6.

#### Αποτέλεσμα απλού διφασικού σφάλματος - LL:

Χρόνος εφαρμογής σφάλματος:  $t=2\text{sec}$ .

Χρόνος ανοίγματος διακοπών:  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=2,75\text{sec}$ .

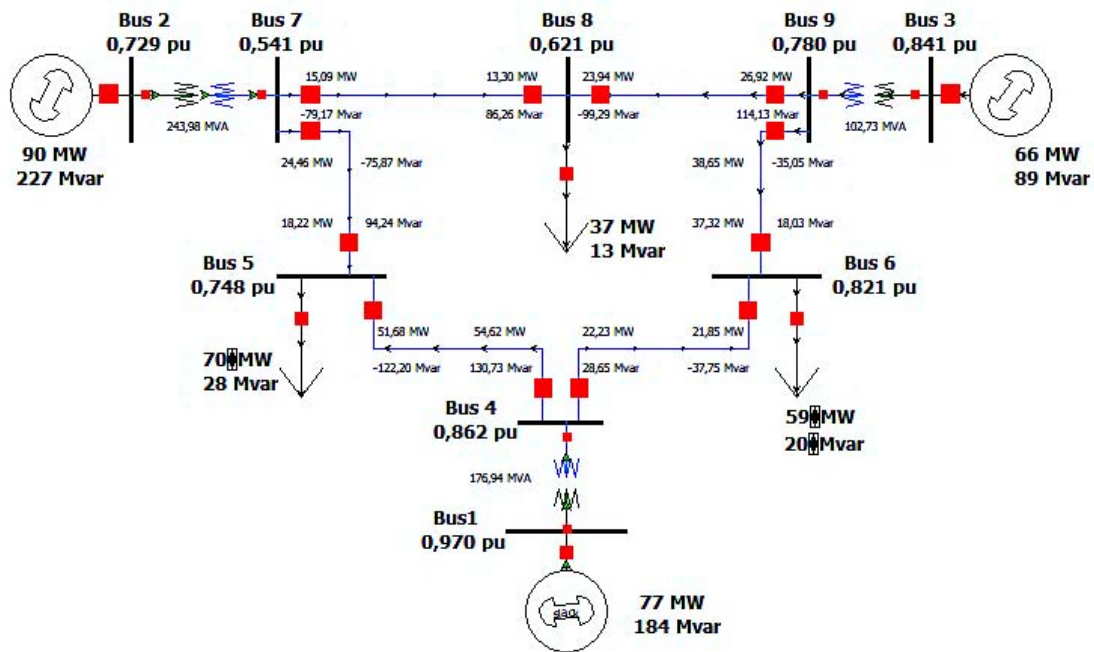
Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος:  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,75\text{sec}$ .

Ζυγός παραγωγής με τη μέγιστη επιρροή: Ζυγός 1.

Χρόνος πλήρους επαναφοράς του δικτύου:  $t=5,75\text{ sec}$  μετά την εκκαθάριση.

#### 6.3.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη, DLG, στη γραμμή 5-7 προς το ζυγό 7

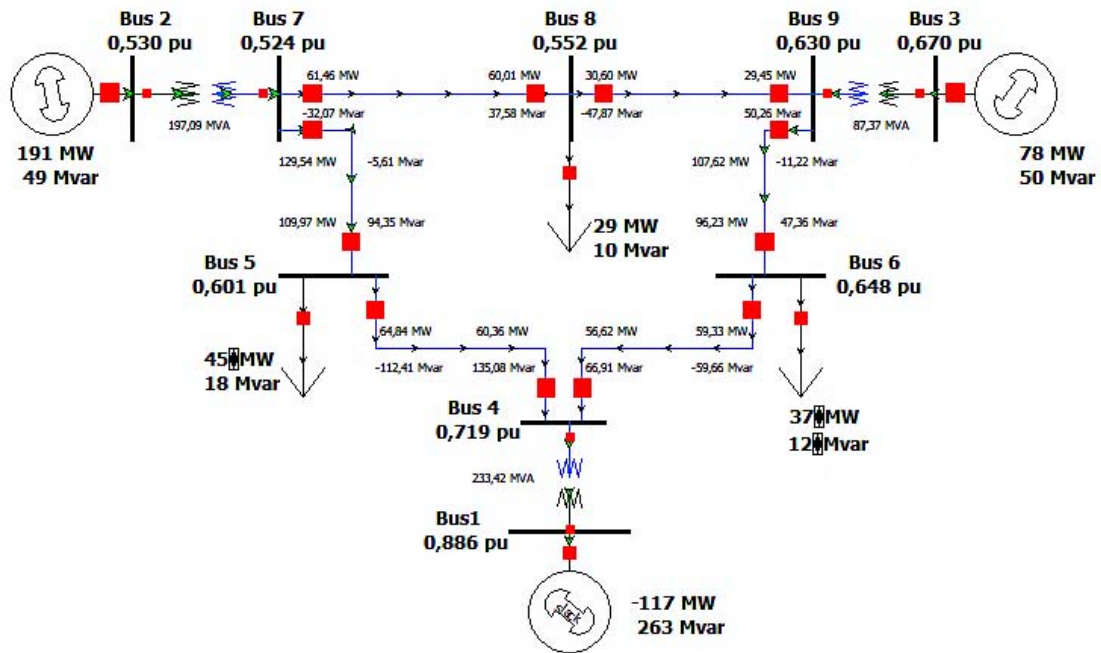
Τη στιγμή  $t=2,005\text{ sec}$ , το δίκτυο των 9 ζυγών έχει τη μορφή του Σχήματος 6.24. Το βραχυκύκλωμα μόλις έχει συμβεί πάνω στη γραμμή κοντά στο ζυγό 7. Επομένως, στο Σχήμα 6.24 απεικονίζεται το δίκτυο την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, από τη στιγμή που εφαρμόζεται το διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη στη γραμμή 5-7.



Σχήμα 6.24: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το DLG στη γραμμή 7-5.

Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, οι δύο διακόπτες της γραμμής 5-7 ανοίγουν την  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,46 \text{ sec}$ . Δηλαδή τη στιγμή  $t=2,47 \text{ sec}$ ., εάν το δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 5-7, τότε η αστάθεια θα ήταν οριστική.

Τη στιγμή  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=2,465 \text{ sec}$ . το δίκτυο έχει τη μορφή του Σχήματος 6.25. Η πτώση τάσης σε όλους του ζυγούς και ειδικά στο ζυγό 7, είναι σοβαρή. Όπως και στο LL, η αρνητική ενεργός ισχύς του Slack ζυγού 1, δείχνει ότι το δίκτυο χρειάζεται χρόνο για να επανέλθει. Παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις για περαιτέρω σχολιασμό.



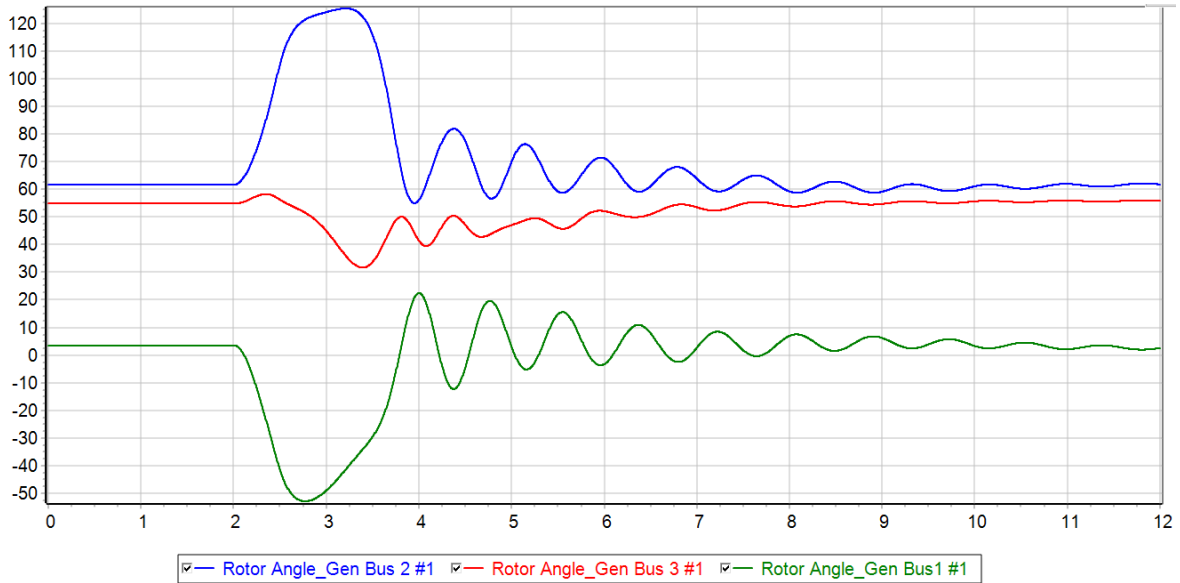
Σχήμα 6.25: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το DLG στους ζυγούς 7-5.

#### Γραφικές Παραστάσεις:

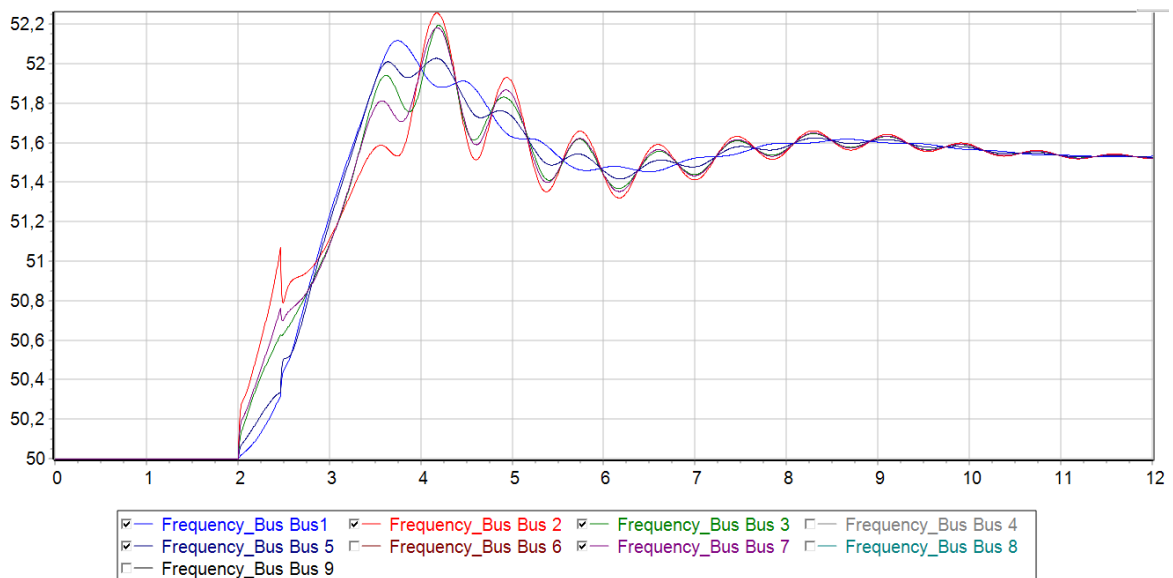
Στα Σχήματα 6.26 - 6.31 προκύπτει απότομη ταλάντωση στο  $t_{\text{start}}=2 \text{ sec.}$ , και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,46 \text{ sec.}$ , ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία αποσβένει. Μέχρι  $t=9 \text{ sec.}$ , η τάση και η ενεργός ισχύς δεν έχουν επιστρέψει στα κανονικά επίπεδα στους ζυγούς των γεννητριών 1, 2 και 3, όπως αυτό διακρίνεται στα Σχήματα 6.28 και 6.30 αντίστοιχα.

Ο πλησιέστερος ζυγός στο σημείο του σφάλματος μεταβάλλεται πιο έντονα. Αυτός είναι ο ζυγός 2. Η επιβεβαίωση έρχεται από τα Σχήματα 6.26 και 6.28, διότι η γωνία του δρομέα  $\delta$ , και η τάση  $V$ , παρουσιάζουν τη μέγιστη καμπυλότητα στο ζυγό 2. Πάντως, στα σχήματα της συχνότητας (Σχήμα 6.27), και της ταχύτητας (Σχήμα 6.29), φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη σε διάρκεια και εύρος ταλάντωση, από αυτές των προηγούμενων βραχυκυκλωμάτων. Στα Σχήματα 6.30 και 6.31, που αφορούν την ενεργό και άεργο ισχύ των τριών γεννητριών, ο ζυγός αναφοράς 1 του δικτύου σημειώνει τη μέγιστη ταλάντωση, μέχρι να επανέλθει σε ισορροπία. Η συχνότητα των ζυγών 5 και 7 του σφάλματος, ακολουθεί την πορεία της καμπύλης του κοντινότερου ζυγού 2. Η επαναφορά της συχνότητας κάθε ζυγού στην αρχική,  $f^0 = 50 \text{ Hz}$ , δεν δείχνει ούτε εδώ εφικτή. Ωστόσο για  $t=9 \text{ sec.}$ , σταθεροποιείται λίγο παραπάνω από τα 51,5 Hz, οπότε επιβεβαιώνεται ότι

χρειάζονται περίπου 6,55 sec. μετά την εκκαθάριση, για να επανέλθει πλήρως το δίκτυο. Σημειώνεται ότι, όλοι οι χρόνοι προέκυψαν μέσω της προσαρμοσμένης μελέτης στο διαφοσικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη στη γραμμή 5-7, από το λογισμικό του PowerWorld.

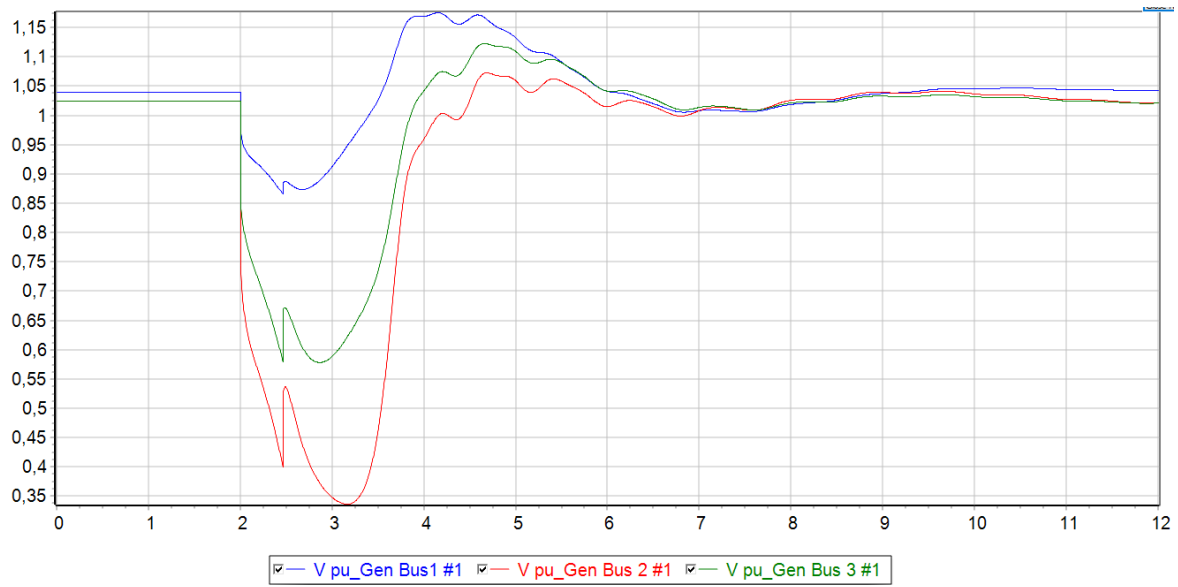


Σχήμα 6.26: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για DLG στη γραμμή 5-7.

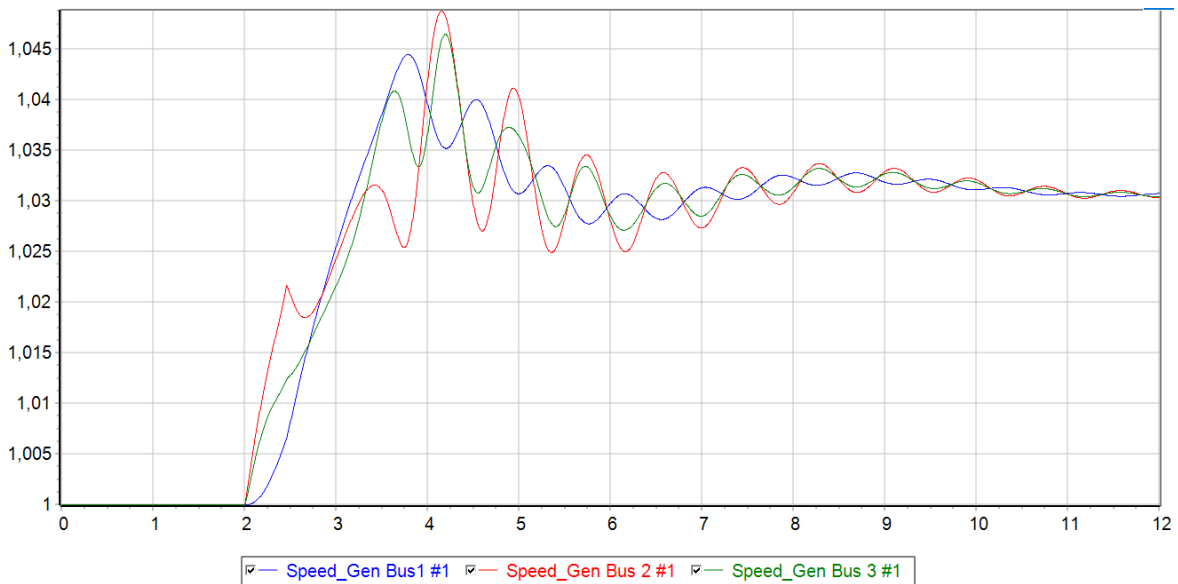


Σχήμα 6.27: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για DLG στη γραμμή 5-7.

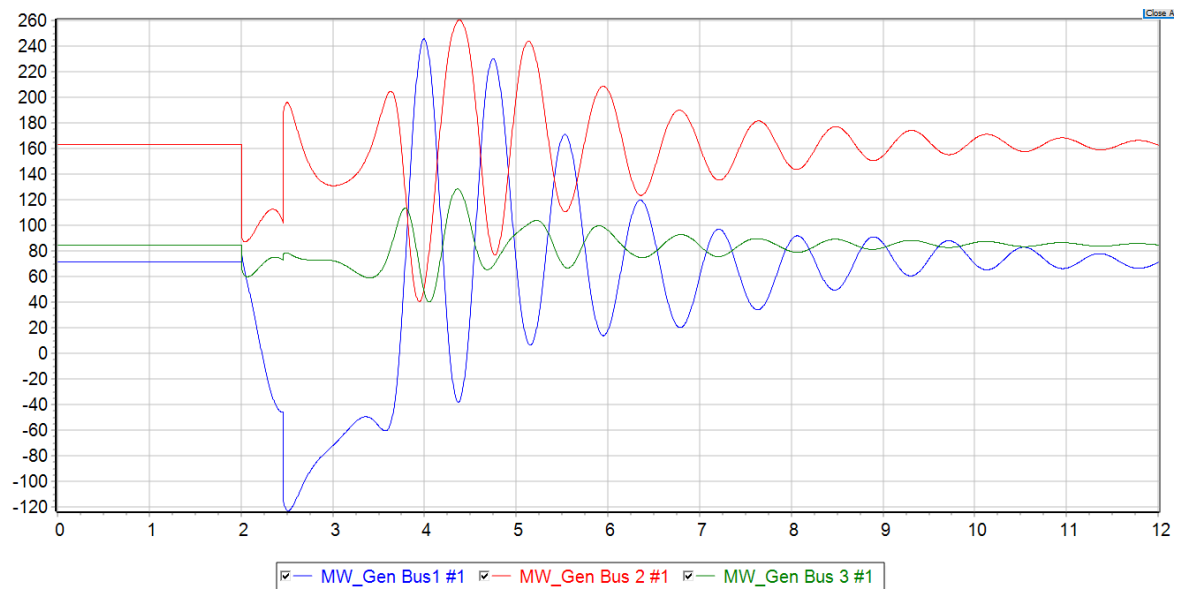
Εμφανίζονται οι καμπύλες τόσο των γεννητριών,  
όσο και των ζυγών του σφάλματος.



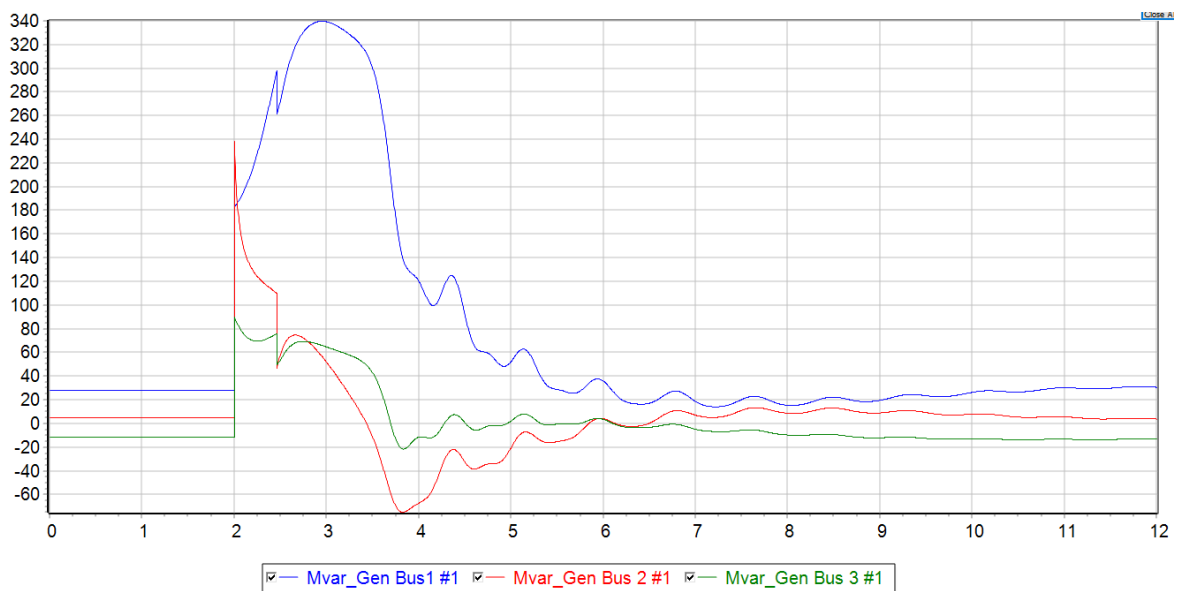
Σχήμα 6.28: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για DLG στη γραμμή 5-7.



Σχήμα 6.29: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για DLG στη γραμμή 5-7.



Σχήμα 6.30: Καμπύλη ευστάθειας P ισχύος για DLG στη γραμμή 5-7.



Σχήμα 6.31: Καμπύλη ευστάθειας Q ισχύος για DLG στη γραμμή 5-7.

### Αποτέλεσμα διφασικού σφάλματος ως προς τη γη - DLG:

Χρόνος εφαρμογής σφάλματος:  $t=2$  sec.

Χρόνος ανοίγματος διακοπών:  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=2,46$  sec.

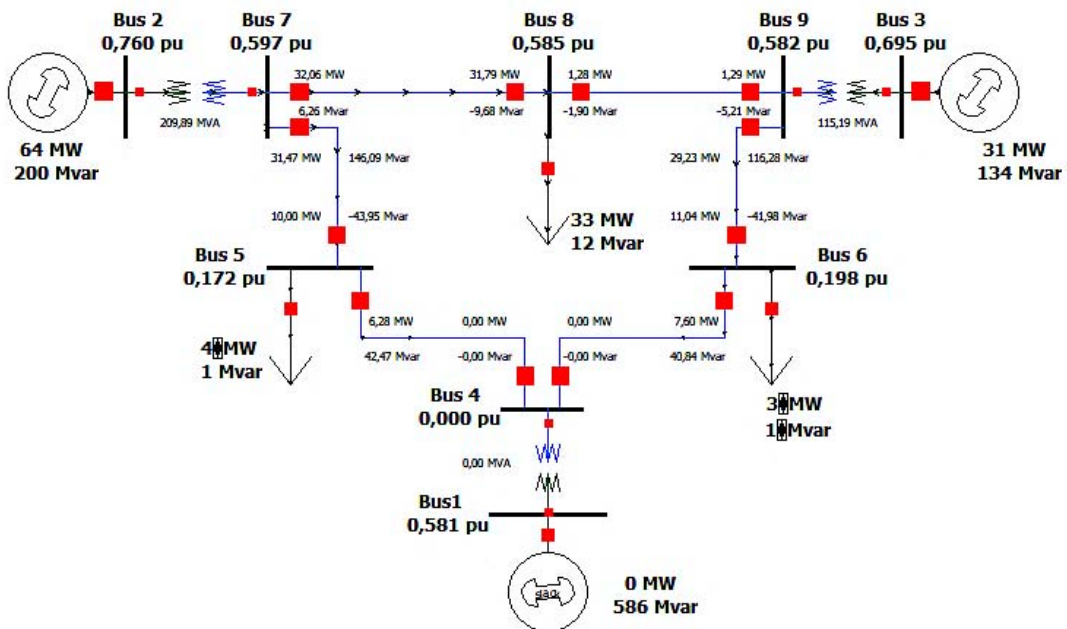
Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος:  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,46$  sec.

Ζυγός παραγωγής με τη μέγιστη επιρροή: Ζυγός 2.

Χρόνος πλήρους επαναφοράς του δικτύου:  $t=6,55$  sec μετά την εκκαθάριση.

#### 6.3.4 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα, 3-PHASE, στη γραμμή 4-5 προς το ζυγό 4

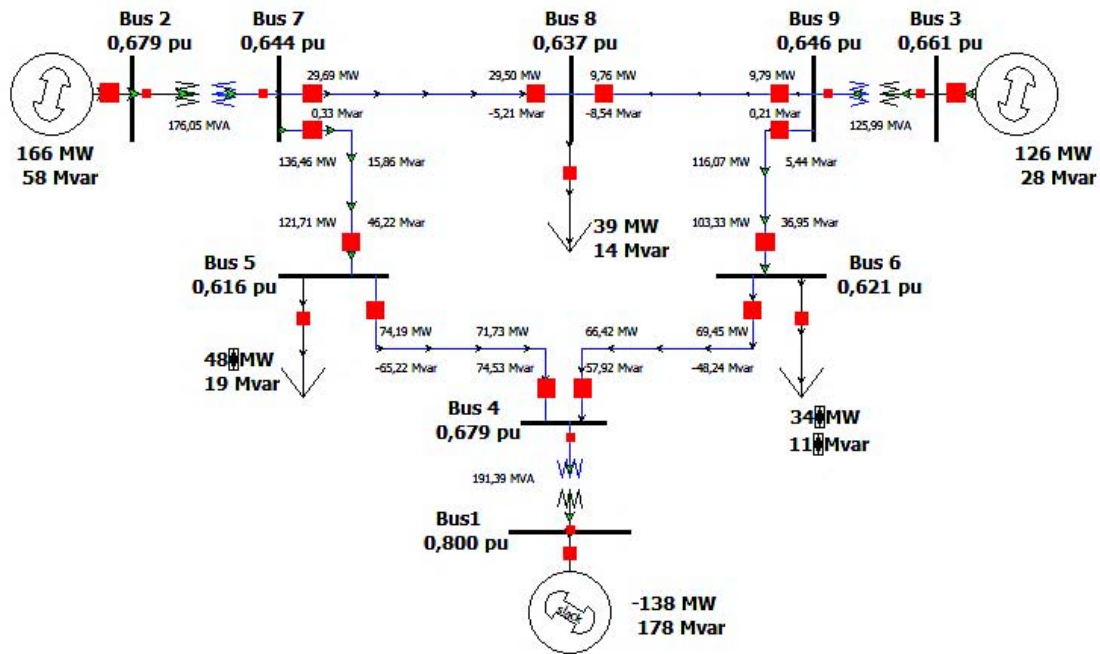
Τη στιγμή  $t=2,005$  sec. το δίκτυο των 9 ζυγών έχει τη μορφή του Σχήματος 6.32. Το βραχυκύκλωμα μόλις έχει εφαρμοστεί πάνω στη γραμμή κοντά στο ζυγό 4, ο οποίος εμφανίζει μηδενική τάση p.u. Δηλαδή, στο Σχήμα 6.32 απεικονίζεται το δίκτυο την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, από τη στιγμή που εφαρμόζεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα.



Σχήμα 6.32: Το δίκτυο τη στιγμή που εφαρμόζεται το 3-PHASE στη γραμμή 4-5.

Το συγκεκριμένο δίκτυο ενώ βρίσκεται στη μεταβατική φάση, ανοίγουν οι δύο διακόπτες της γραμμής 4-5 για  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,26$  sec, ώστε να εκκαθαριστεί το σφάλμα. Δηλαδή τη στιγμή  $t=2,27$  sec., στην περίπτωση που το δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 4-5, τότε η αστάθεια θα ήταν οριστική.

Τη στιγμή  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=2,265 \text{ sec.}$  το δίκτυο έχει τη μορφή του Σχήματος 6.33. Η πτώση τάσης σε όλους του ζυγούς και ειδικά στο ζυγό 4, δείχνει να μειώνεται. Η ταλάντωση αυτή μέχρι τη νέα μόνιμη κατάσταση, ενδέχεται να είναι η μεγαλύτερη σε διάρκεια, αφού δεν έχει σημειωθεί σε κανένα από τα προηγούμενα παραδείγματα τέτοια ποσότητα αρνητικής ενεργού ισχύος στον πλησιέστερο ζυγό. Παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις για περαιτέρω σχολιασμό.



Σχήμα 6.33: Το δίκτυο τη στιγμή που εκκαθαρίζεται το 3-PHASE στη γραμμή 4-5.

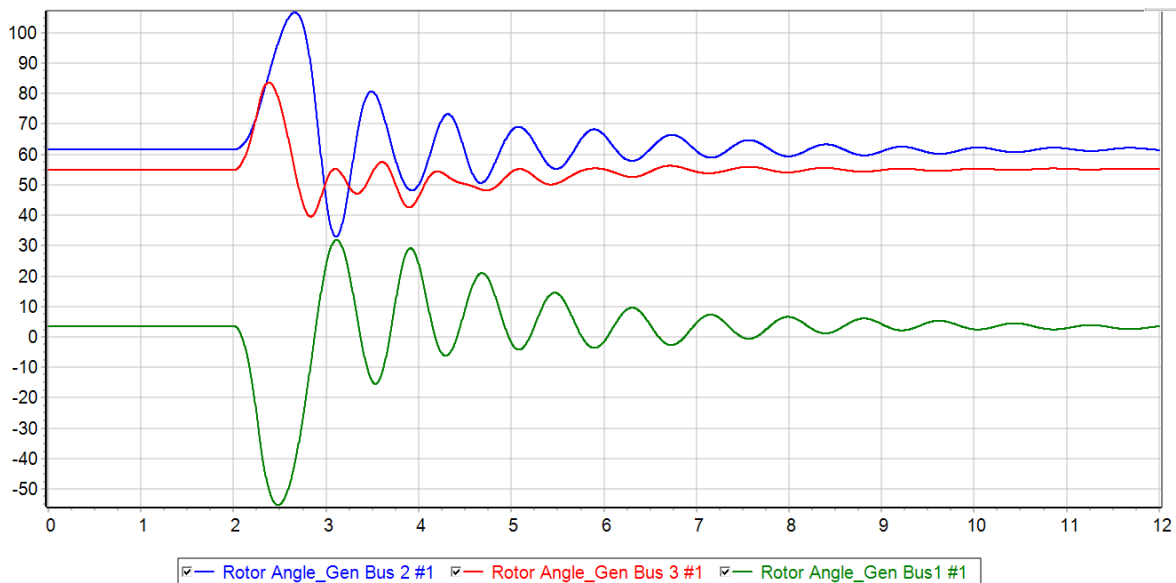
Γραφικές Παραστάσεις:

Στα Σχήματα 6.34 - 6.39 προκύπτει απότομη ταλάντωση στο  $t_{\text{start}}=2 \text{ sec.}$ , και η σταθερότητα χάνεται. Τη χρονική στιγμή  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,26 \text{ sec.}$ , ανοίγουν οι διακόπτες για την εκκαθάριση του σφάλματος. Από εκείνη τη στιγμή, προκύπτει ακόμα μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία αποσβένει με το χρόνο. Μέχρι  $t=9,5 \text{ sec.}$ , η τάση και η ενεργός ισχύς δεν έχουν επιστρέψει στα κανονικά επίπεδα στους ζυγούς των γεννητριών 1, 2 και 3, όπως αυτό διακρίνεται στα Σχήματα 6.36 και 6.38 αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για γρήγορη απόσβεση του σφάλματος, αλλά η μεταβατική περίοδος για την πλήρη απόσβεση των ταλαντώσεων «φτάνει» σε μεγαλύτερο διάστημα από τα προηγούμενα σφάλματα.

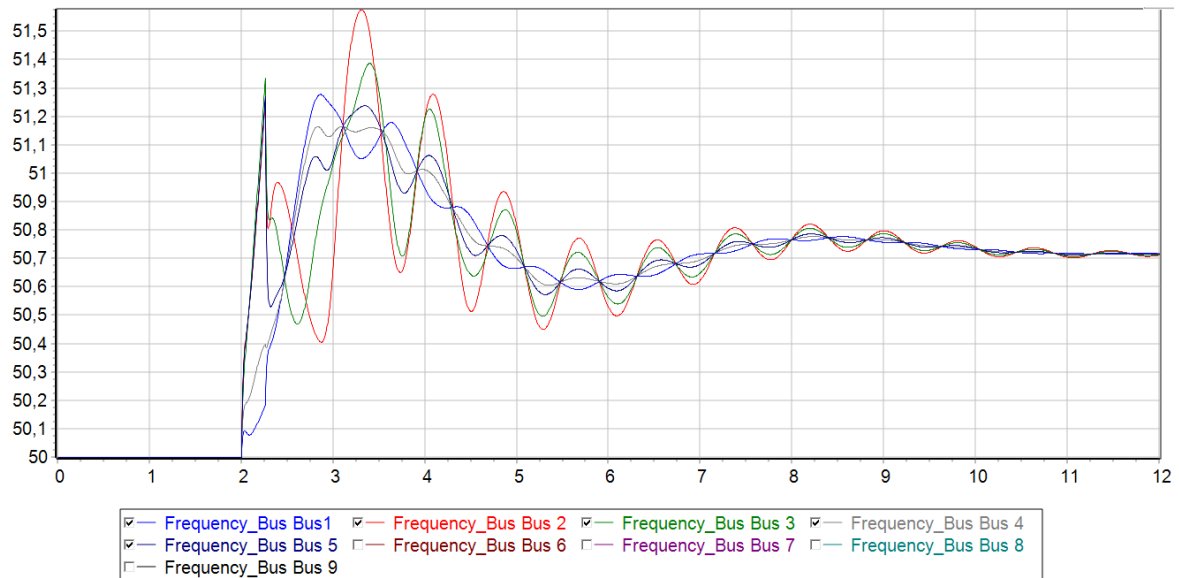
Ο ζυγός 1 είναι αυτός που μεταβάλλεται εντονότερα, όπως και στο LL βραχυκύκλωμα των ζυγών 4-6. Το συμπέρασμα αυτό «πηγάξει» πάλι από τα Σχήματα 6.34 και 6.36, διότι τόσο



η γωνία του δρομέα  $\delta$ , όσο και η τάση  $V$ , παρουσιάζουν την πιο έντονη καμπυλότητα. Η καμπύλη της ταχύτητας στο Σχήμα 6.37 δείχνει να ταυτίζεται σχεδόν με αυτή της συχνότητας στο Σχήμα 6.35. Ομοίως με όλες τις παραπάνω περιπτώσεις σφαλμάτων, η συχνότητα των ζυγών 4 και 5 του σφάλματος ακολουθεί την καμπύλη του πλησιέστερου ζυγού 1. Το Σχήμα 6.38 της πραγματικής ισχύος και το Σχήμα 6.39 της αέργου, παρουσιάζουν μέγιστη ταλάντωση στο ζυγό 1, καθώς όπως έχει αποσαφηνιστεί, είναι ο ζυγός αναφοράς. Η επαναφορά της συχνότητας κάθε ζυγού στην αρχική,  $f^0 = 50$  Hz, αποτυγχάνει. Ωστόσο, στο  $t=9,5$  sec. σταθεροποιείται λίγο παραπάνω από τα 50,75 Hz, οπότε επιβεβαιώνεται ότι χρειάζονται περίπου 7,25 sec. μετά την εκκαθάριση, για να βρει τη νέα ισορροπία του το δίκτυο. Όλοι οι χρόνοι προέκυψαν μέσω της προσαρμοσμένης μελέτης στο τριφασικό στη γραμμή 4-5, από το λογισμικό του PowerWorld.

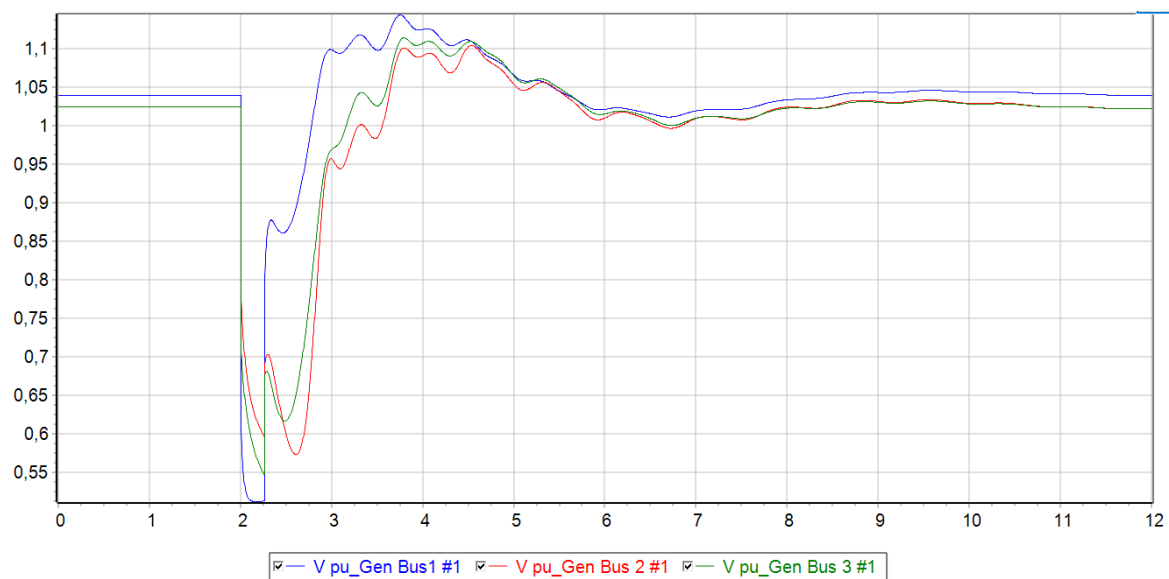


Σχήμα 6.34: Καμπύλη ευστάθειας γωνίας δρομέα για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.

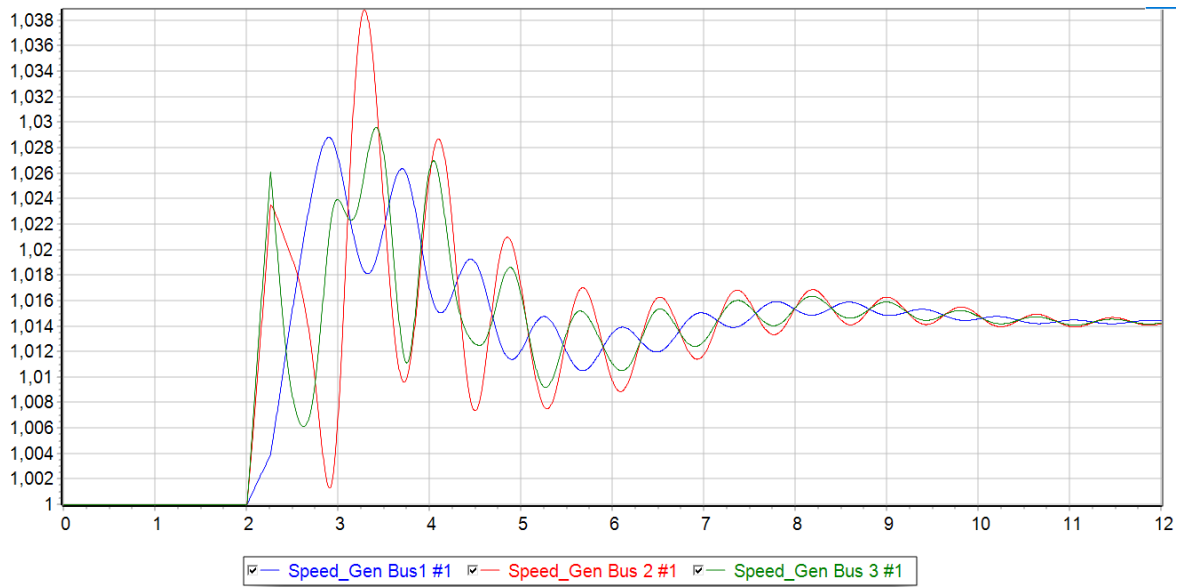


Σχήμα 6.35: Καμπύλη ευστάθειας συχνότητας για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.

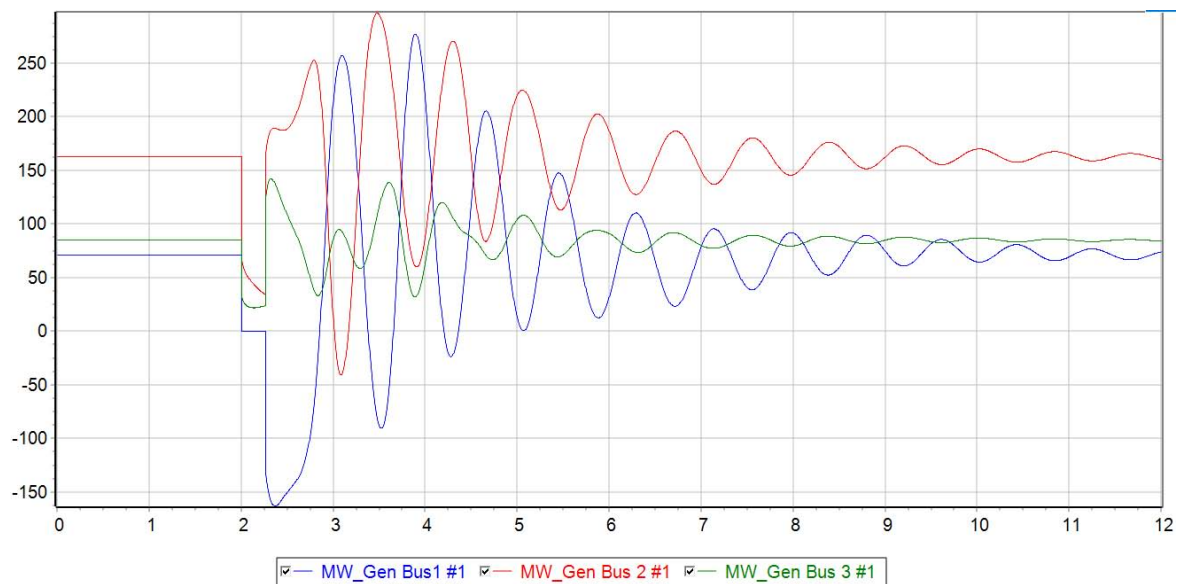
Εμφανίζονται οι καμπύλες τόσο των γεννητριών,  
όσο και των ζυγών του σφάλματος.



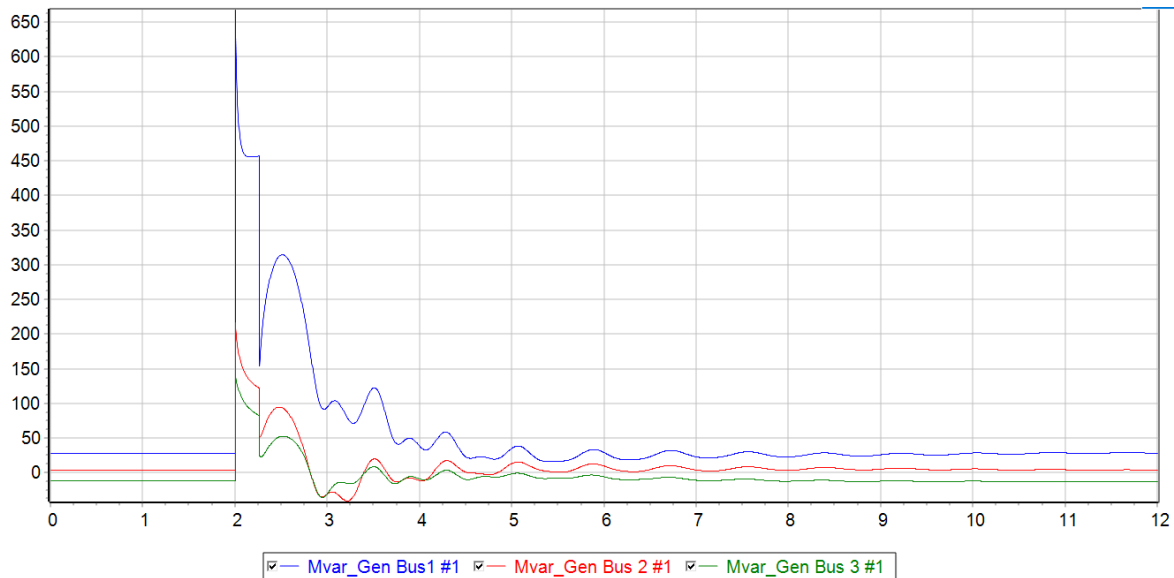
Σχήμα 6.36: Καμπύλη ευστάθειας τάσης για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.



Σχήμα 6.37: Καμπύλη ευστάθειας ταχύτητας για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.



Σχήμα 6.38: Καμπύλη ευστάθειας P ισχύος για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.



Σχήμα 6.39: Καμπύλη ευστάθειας Q ισχύος για 3-PHASE στη γραμμή 4-5.

#### Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος – 3-PHASE:

Χρόνος εφαρμογής σφάλματος:  $t=2$  sec.

Χρόνος ανοίγματος διακοπών:  $t_{\text{εκκαθάρισης}}=2,26$  sec.

Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος:  $t_{\text{κρίσιμος}}=0,26$  sec.

Ζυγός παραγωγής με τη μέγιστη επιρροή: Ζυγός 1.

Χρόνος πλήρους επαναφοράς του δικτύου:  $t=7,25$  sec μετά την εκκαθάριση.

#### 6.3.5 Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας

Στον Πίνακα 6.7 φαίνονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για το σχολιασμό της προσομοίωσης της μεταβατικής ευστάθειας. Ο κρίσιμος χρόνος μειώνεται όσο αυξάνεται η σοβαρότητα μίας μεταβατικής διαταραχής. Άρα η κατάταξη των βραχυκυκλωμάτων ως προς την βαθμιαία απειλή του συγχρονισμού, η οποία δόθηκε στην αρχή της προσομοίωσης, επιβεβαιώνεται από τη στήλη του χρόνου  $t_{\text{κρίσιμος}}$ .

Πίνακας 6.7: Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης ευστάθειας.

ΣΦΑΛΜΑ	ΖΥΓΟΙ	Τ <sub>ΚΡΙΣΙΜΟΣ</sub>	Τ' <sub>ΚΡΙΣΙΜΟΣ</sub>	Τ <sub>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</sub>
SLG	9 - 8	1,73 sec.	86,5 Time Cycles	4,75 sec.
LL	4 - 6	0,75 sec.	37,5 Time Cycles	5,75 sec.
DLG	7 - 5	0,46 sec.	23 Time Cycles	6,55 sec.
3-PHASE	4 - 5	0,26 sec.	13 Time Cycles	7,25 sec.

Η εξασφάλιση της γρήγορης εκκαθάρισης δεν αρκεί. Σε όλα τα σφάλματα, παρατηρήθηκε η έντονη ταλάντωση που ακολουθεί ( $t_{\text{επαναφοράς}} > t_{\text{κρίσιμος}}$ ), μετά το άνοιγμα των διακοπών. Η ταλάντωση, ειδικά στα σχήματα ισχύος, τάσης, ταχύτητας και συχνότητας, εμφανίζει μεγάλη και απότομη καμπυλότητα, γεγονός που σημαίνει τη βασική επίδραση των συστημάτων ελέγχου στο ενδιάμεσο διάστημα. Η επίδραση αυτή οδηγεί σε μία καθυστερημένη απόσβεση των ταλαντώσεων, η οποία χρονικά προσδιορίζεται από το χρόνο  $t_{\text{επαναφοράς}}$ . Επομένως, μικρότερος χρόνος επαναφοράς δηλώνει μικρότερη επίδραση της διαταραχής στο δίκτυο ή πιο εύκολη εκκαθάρισή της, συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

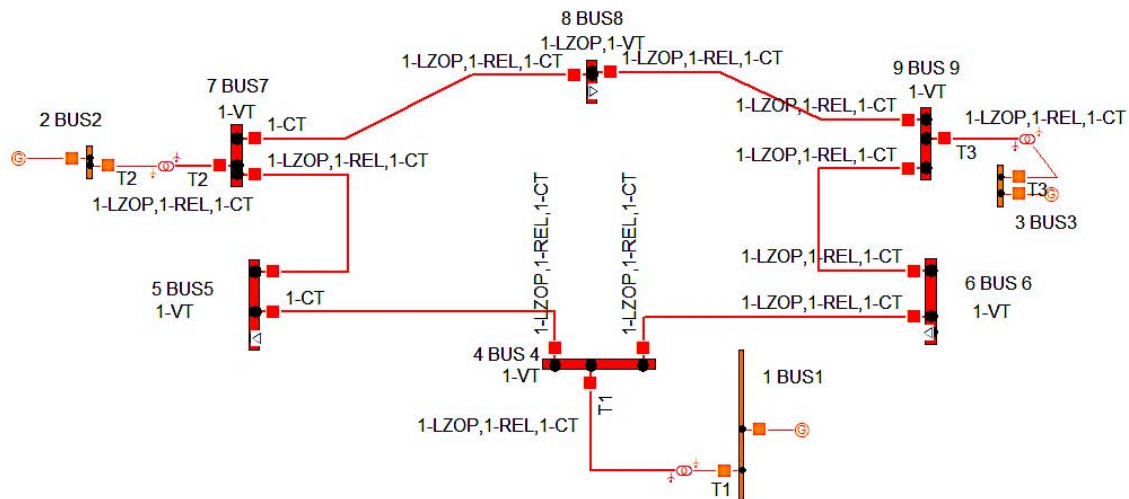
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ PSS@CAPE

#### 7.1 Στοιχεία συστήματος προστασίας

Η προσομοίωση μίας μελέτης προστασίας θα βοηθήσει στη δόμηση ενός αξιόπιστου συστήματος προστασίας, όπως αυτό παρουσιάστηκε θεωρητικά στο Κεφάλαιο 5, αλλά και στη σύνδεσή του με το Κεφάλαιο 4 της μεταβατικής ευστάθειας. Το δίκτυο, που θα χρησιμοποιηθεί, παραμένει ακριβώς το ίδιο με αυτό της προσομοίωσης του PowerWorld. Το μονογραμμικό διάγραμμα του νέου προγράμματος PSS@CAPE της Siemens θα έχει τη μορφή του Σχήματος 6.1.

Στο νέο πρόγραμμα πάνω σε κάθε διακόπτη γραμμής επιλέγεται προστασία κατευθυντικής υπερέντασης. Οι λόγοι, για τους οποίους προτιμάται τελικά το συγκεκριμένο είδος ηλεκτρονόμου, έχουν δοθεί αναλυτικά στην παράγραφο 5.5. Αρχικά, προστίθεται ο μετασχηματιστής ρεύματος, CT με λόγο 200/1 στη γραμμή LZOP<sup>35</sup>, πάνω στο διακόπτη και στη συνέχεια επιλέγεται ο ηλεκτρονόμος REL [28]. Αναλυτικότερα, οι συνδέσεις του δικτύου προστασίας έχουν τη μορφή του Σχήματος 5.2, όπως επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 7.1:



Σχήμα 7.1: Μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου προστασίας 9 ζυγών της IEEE.

<sup>35</sup> LZOP γραμμή: είναι η τοπική γραμμή προστασίας από τα αρχικά **L**ocal **Z**one of **P**rotection **D**ata.

Επιπλέον, η ρύθμιση του καθενός ηλεκτρονόμου εξαρτάται αποκλειστικά από το είδος του σφάλματος. Για την πρωτεύουσα προστασία επιλέγεται ηλεκτρονόμος υπέρντασης διπλής ρύθμισης  $I_{oc}$ ,  $t_{oc}$ . Η ιδανική επιλογή πρωτεύουσας προστασίας είναι ο ηλεκτρονόμος υπέρντασης IRD-9<sup>36</sup>. Η χαρακτηριστική με αριθμό 1 θα συμβολίζει τον στιγμιαίο ηλεκτρονόμο ορισμένου χρόνου ως προς τη ρύθμιση του ρεύματος επιλογής. Η χαρακτηριστική με αριθμό 2 θα συμβολίζει τη ρύθμιση αντιστρόφου χρόνου του ηλεκτρονόμου. Για να λειτουργήσει στο μικρότερο αριθμό ηλεκτρονόμων το δίκτυο, επιλέγεται να προστεθεί και μονάδα κατεύθυνσης σε αυτούς. Για τη δευτερεύουσα προστασία επιλέγεται ο ηλεκτρονόμος να είναι ορισμένου χρόνου με τη μέγιστη ρύθμιση  $I_{oc}$ . Ο ηλεκτρονόμος δευτερεύουσας προστασίας ενεργοποιείται από ένα ρεύμα (πολύ μικρότερο από αυτό της πρωτεύουσας ζώνης), το οποίο θα δώσει το σήμα για να ανοίξει ο διακόπτης. Αυτό συμβαίνει μόνο στην περίπτωση που αποτύχει ο HN της πρωτεύουσας. Για αυτό το λόγο, στη συγκεκριμένη μελέτη δεν θα δοθεί περαιτέρω σχολιασμός για τη δευτερεύουσα προστασία. Βασικός στόχος είναι να αναλυθεί η πρωτεύουσα προστασία και η σημασία της διπλής ρύθμισής της.

Επειδή πρέπει να συσχετιστεί η μελέτη προστασίας με τη μελέτη μεταβατικής ευστάθειας, θα αναλυθούν τα εξής συγκεκριμένα σφάλματα, όπως και στην παράγραφο 6.3:

- 1) SLG στη γραμμή 8-9 προς το ζυγό 9,
- 2) LL στη γραμμή 4-6 προς το ζυγό 4,
- 3) DLG στη γραμμή 5-7 προς το ζυγό 7,
- 4) 3-PHASE στη γραμμή 4-5 προς το ζυγό 4.

## 7.2 Μελέτη προστασίας

Σε κάθε ένα από τα σφάλματα που ακολουθούν, θα δοθούν επιλεκτικές ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων. Αρχικά ο HN προστασίας IRD-9 έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- ◇ Pickup Current – Επίπεδο Επιλογής: 2,5 Relay Amps.
- ◇ Time Dial Setting – TMS – Χρόνος Λειτουργίας: 0,5 Time Cycles.

---

<sup>36</sup> IRD-9: στιγμιαίος κατευθυντικός ηλεκτρονόμος από τα αρχικά **I**nstantaneous **R**elay with **D**irectional unit. Χρησιμοποιεί συνδυασμό ρύθμισης στιγμιαίου και αντιστρόφου χρόνου.

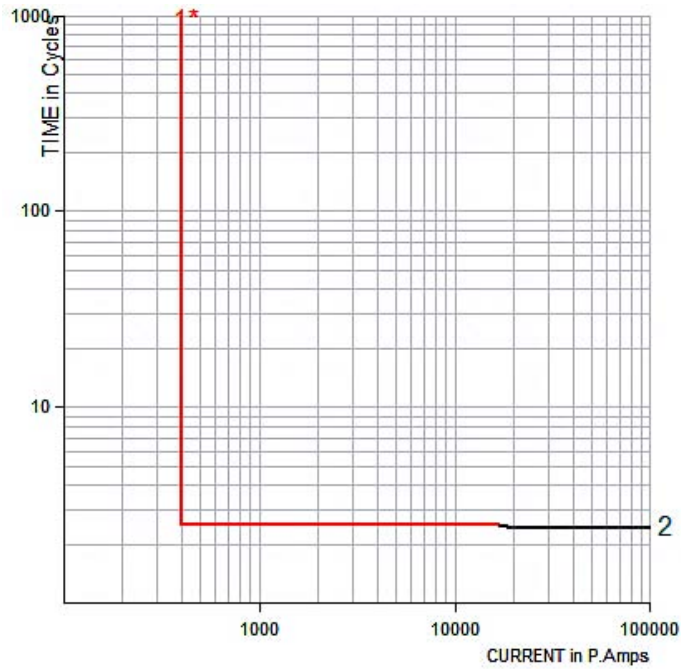
Η ρύθμιση ορίζει ουσιαστικά ένα ρεύμα επιλογής και το μικρότερο επιτρεπόμενο χρόνο λειτουργίας. Ο πλησιέστερος ηλεκτρονόμος υπερέντασης στο σφάλμα πρέπει να εξασφαλίζει επιλεκτικότητα και ως προς το ρεύμα και ως προς το χρόνο. Θα ακολουθηθεί η μέθοδος επιλογής του μικρότερου ρεύματος επιλογής,  $I_{MIN}$ , αλλά και του μέγιστου,  $I_{MAX}$ , συναρτήσει της χαρακτηριστικής ρύθμισης του αντιστρόφου χρόνου, ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα για κάθε σφάλμα.

#### 7.2.1 Μονοφασικό σφάλμα, SLG, στη γραμμή 8 - 9 κοντά στο ζυγό 9

Στο Κεφάλαιο 6 αποδείχθηκε, ότι δεν πρόκειται για ένα εύκολο σφάλμα. Αντιθέτως το βραχυκύκλωμα αυτό αποδείχθηκε αρκετά ισχυρό, ώστε να προκαλέσει ζημιά στον εξοπλισμό, καθώς το ρεύμα βραχυκύκλωσης συσσωρεύεται συνολικά σε μία μόνο φάση. Ως προς την ευστάθεια υπάρχει μία μικρή άνεση χρόνου για την απόσβεσή του. Μένει να εξεταστεί, αν οι χαρακτηριστικές του HN που επιλέχθηκε, το επιβεβαιώνουν αυτό.

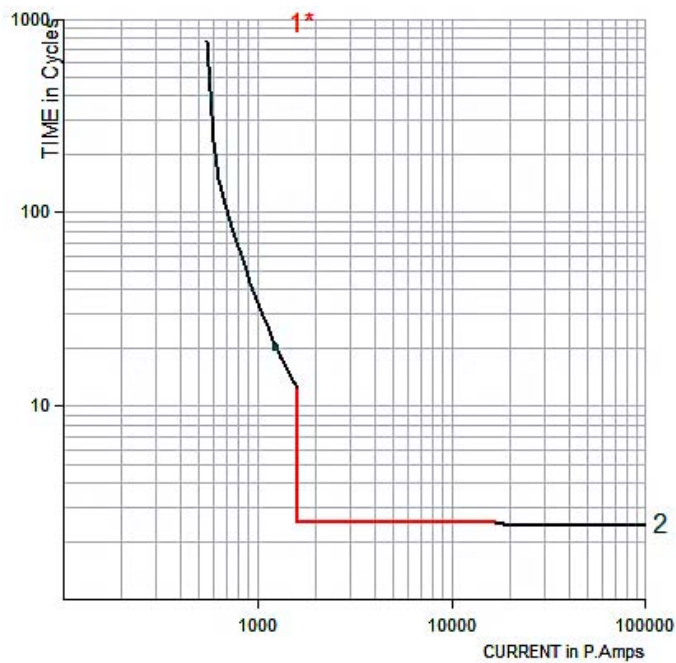
Στο Σχήμα 7.2, που ακολουθεί, φαίνεται η κόκκινη χαρακτηριστική για  $I_{MIN-OC} = 2 \text{ Relay Amps}$ . Η μορφή της χαρακτηριστικής του Σχήματος 7.2 φανερώνει την άνεση χρόνου που υπάρχει, εφόσον ο HN ρυθμίζεται να ενεργοποιηθεί στο ελάχιστο πολλαπλάσιο του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ο ηλεκτρονόμος με το που διαπεραστεί από ρεύμα, που ξεπερνάει την καθορισμένη ρύθμιση  $I_{MIN-OC}$ , δηλαδή από την κάθετη γραμμή κι έπειτα, ενεργοποιείται ακαριαία για την εκκαθάριση του σφάλματος. Μέχρι να δεχτεί ο HN, ρεύμα μεγαλύτερο του ρεύματος ενεργοποίησης  $I_{MIN-OC}$ , μένει αδρανής με ανοιχτές τις επαφές του. Η συγκεκριμένη ρύθμιση φανερώνει, ότι επειδή το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι συσσωρευμένο σε μία φάση, διατίθεται χρόνος για τη διατήρηση της ευστάθειας. Εντούτοις, το σφάλμα εκκαθαρίζεται σε ακαριαίο χρόνο για τη διατήρηση της ασφάλειας σε οποιοδήποτε  $I > I_{MIN-OC}$ .





Σχήμα 7.2: Ρύθμιση HN για  $I_{MIN-OC}$  στο SLG στη γραμμή 8 – 9, κοντά στο ζυγό 9.

Για ρύθμιση στο μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{MAX-OC} = 8 \text{ Relay Amps}$ , η χαρακτηριστική αλλάζει μορφή στο Σχήμα 7.3.



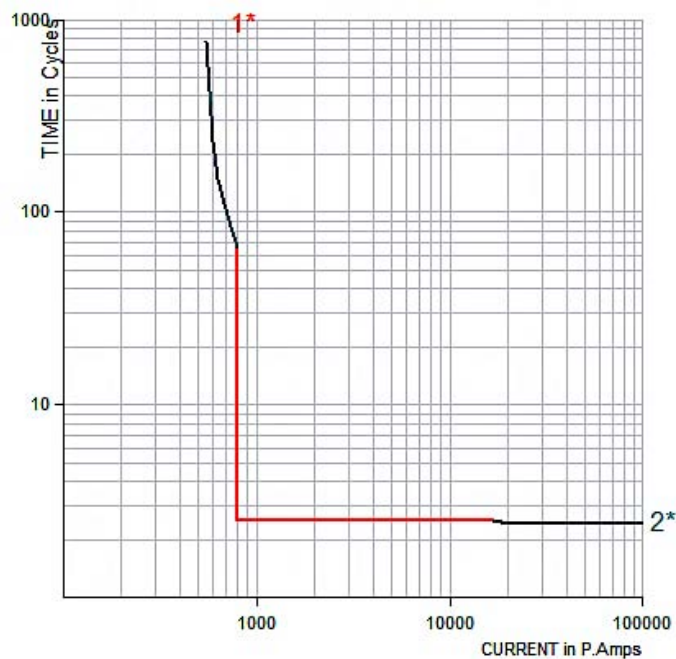
Σχήμα 7.3: Ρύθμιση HN για  $I_{MAX-OC}$  στο SLG στη γραμμή 8 – 9, κοντά στο ζυγό 9.

Χρονικά εξακολουθεί να μην ασκείται σημαντική πίεση στη ρύθμιση του HN, εφόσον ρυθμίζεται στο μέγιστο ρεύμα επιλογής. Πλέον, είναι διακριτή η χαρακτηριστική

αντιστρόφου χρόνου του HN, η οποία δηλώνει την προστασία και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την εκκαθάριση του σφάλματος. Αυτή προκύπτει για μικρότερα ρεύματα από αυτό του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

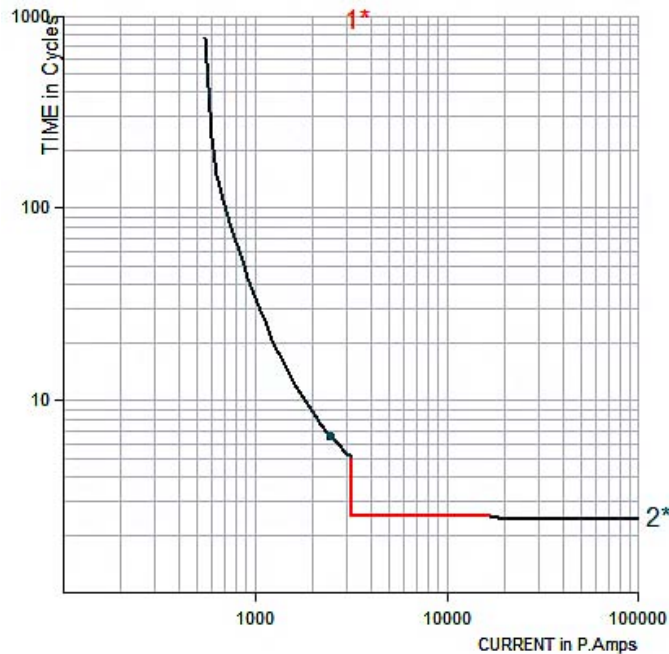
#### 7.2.2 Απλό διφασικό σφάλμα, LL, στη γραμμή 4 - 6 κοντά στο ζυγό 4

Όσον αφορά την ευστάθεια, υπήρχε μικρή άνεση χρόνου και για το LL βραχυκύκλωμα. Στο Σχήμα 7.4 η κατάσταση δεν διαφέρει πολύ από αυτή του SLG, καθώς ο HN πρωτεύουσας προστασίας ενεργοποιείται για  $I_{MIN-OC} = 2 \text{ Relay Amps} = \text{Pickup Current} = 2 \text{ Relay Amps}$ . Στη καμπύλη διακρίνεται η μαύρη χαρακτηριστική ρύθμιση αντιστρόφου χρόνου, από την κόκκινη χαρακτηριστική του στιγμιαίου χρόνου.



Σχήμα 7.4: Ρύθμιση HN για  $I_{MIN-OC}$  στο LL στη γραμμή 4 – 6, κοντά στο ζυγό 4.

Για ρύθμιση στο μέγιστο  $I_{MAX-OC} = 8 \text{ Relay Amps}$ , η χαρακτηριστική αλλάζει μορφή στο Σχήμα 7.5.



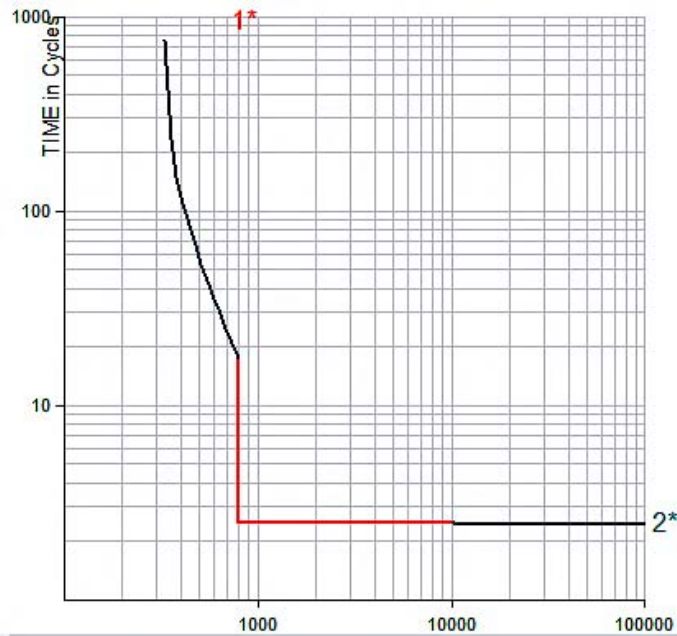
Σχήμα 7.5: Ρύθμιση HN για  $I_{MAX-OC}$  στο LL στη γραμμή 4 – 6, κοντά στο ζυγό 4.

Το  $I_{MAX-OC}$  βρίσκεται ακριβώς πριν το πρώτο μισό του συνολικού μέγιστου ρεύματος στον άξονα Relay Amps. Πλέον η κάθετη γραμμή εκκαθάρισης βρίσκεται κάτω των 10 Time Cycles. Χρονικά επιβεβαιώνεται, ότι με αυτή τη ρύθμιση η εκκαθάριση του απλού διφασικού συμβαίνει νωρίτερα από αυτή του μονοφασικού σφάλματος. Συγκριτικά με το Σχήμα 7.3 επιτυγχάνεται μικρότερος χρόνος λειτουργίας.

### 7.2.3 Διφασικό σφάλμα ως προς τη γη, DLG, στη γραμμή 5 - 7 κοντά στο ζυγό 7

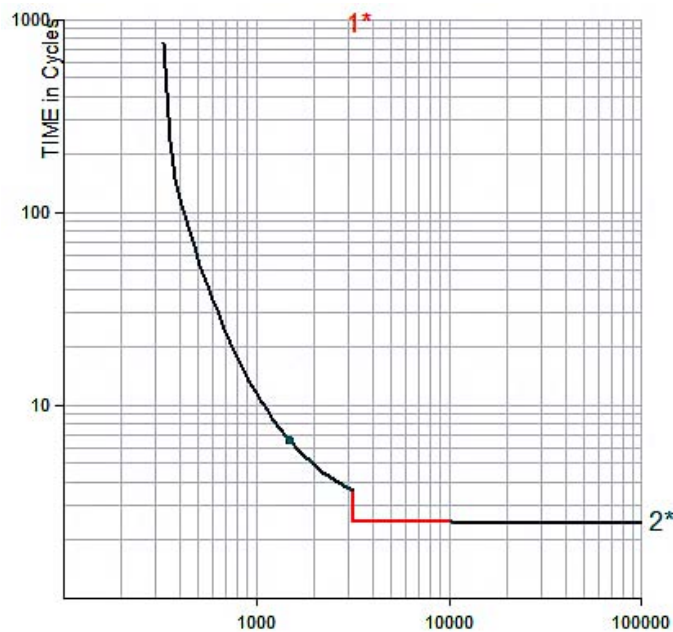
Σε αυτό το σφάλμα μειώνεται σχεδόν στο μισό ο επιθυμητός χρόνος εκκαθάρισης από το απλό διφασικό. Σύμφωνα με τις μετρήσεις του Κεφαλαίου 6, ο χρόνος εκκαθάρισης για τη διατήρηση του συγχρονισμού βρίσκεται πιο κοντά στο στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε νέα μεγάλη ρύθμιση της προστασίας, όπου το Pickup current μειώνεται στα 1,5 Relay Amps.

Στο Σχήμα 7.6 η κατάσταση μοιάζει στην αρχική του LL. Πλέον, ο HN πρωτεύουσας προστασίας ενεργοποιείται για μεγαλύτερο  $I_{MIN-OC} = 4$  Relay Amps  $>$  Pickup Current = 1,5 Relay Amps.



Σχήμα 7.6: Ρύθμιση HN για  $I_{MIN-OC}$  στο DLG στη γραμμή 5 – 7, κοντά στο ζυγό 7.

Ο ηλεκτρονόμος δείχνει ότι ευαισθητοποιείται λίγο περισσότερο από τα προηγούμενα σφάλματα, οπότε στο Σχήμα 7.7 αναμένεται μικρότερος χρόνος λειτουργίας. Για ρύθμιση στο μέγιστο δυνατό  $I_{MAX-OC} = 16$  Relay Amps, η χαρακτηριστική είναι αναμενόμενο να αλλάζει μορφή, όπως αποτυπώνεται στο σχήμα.



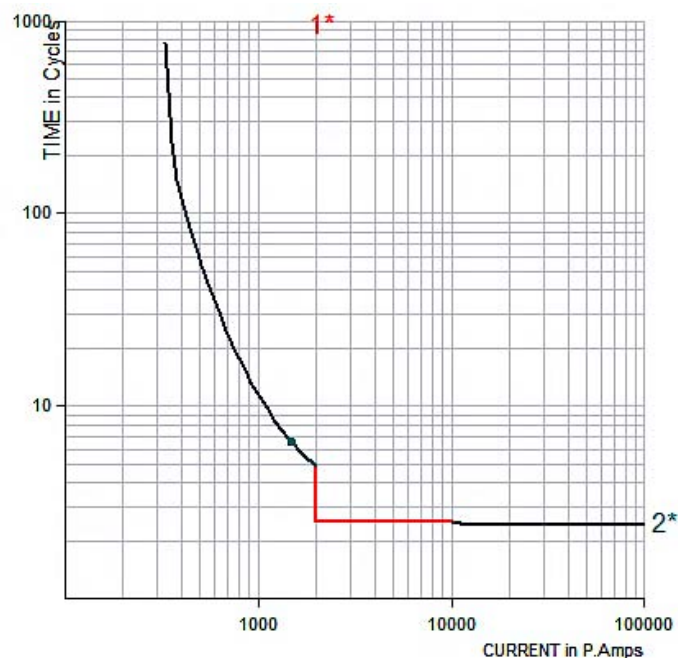
Σχήμα 7.7: Ρύθμιση HN για  $I_{MAX-OC}$  στο DLG στη γραμμή 5 – 7, κοντά στο ζυγό 7.

Η σύγκριση των Σχημάτων 7.7 και 7.5 δίνει την απάντηση. Η κατακόρυφη κόκκινη γραμμή έχει μειωθεί, δηλαδή έχει επιτευχθεί σχεδόν ο μισός χρόνος λειτουργίας του πλησιέστερου HN στο DLG σφάλμα, σε σχέση με το LL.

#### 7.2.4 Στερεό τριφασικό σφάλμα 3PHASE, στη γραμμή 4 - 5 κοντά στο ζυγό 4

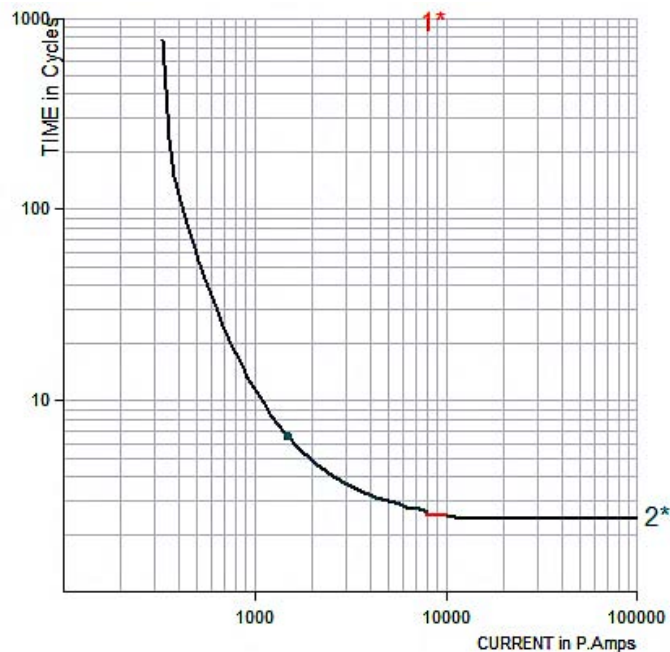
Το στερεό τριφασικό σφάλμα αποτελεί το πιο σοβαρό βραχυκύκλωμα, όπως αυτό αποδείχθηκε στη σύνοψη των αποτελεσμάτων της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας, στην υποενότητα 6.3.5. Απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος. Διατηρείται η ίδια ρύθμιση με το DLG με το Pickup current να βρίσκεται στα 1,5 Relay Amps.

Στο Σχήμα 7.8 ο HN πρωτεύουσας προστασίας ενεργοποιείται για μεγάλο  $I_{MIN-OC} = 10$  Relay Amps > Pickup Current = 1,5 Relay Amps.



Σχήμα 7.8: Ρύθμιση HN για  $I_{MIN-OC}$  στο 3PHASE στη γραμμή 4 – 5, κοντά στο ζυγό 4.

Με τη ρύθμιση του συγκεκριμένου ηλεκτρονόμου επιτυγχάνεται σχεδόν ο μισός χρόνος συγκριτικά με το Σχήμα 7.6. Επομένως, αναμένονται τα ανάλογα αποτελέσματα και για το μεγαλύτερο ρεύμα ρύθμισης στα 40 Relay Amps στο Σχήμα 7.9.



Σχήμα 7.9: Ρύθμιση HN για  $I_{MAX-OC}$  στο 3PHASE στη γραμμή 4 – 5, κοντά στο ζυγό 4.

Σημειώνεται ότι ο ηλεκτρονόμος αποδίδει τόσο καλά, που με το μέγιστο ρεύμα υπερέντασης οι επαφές του ανοίγουν στον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας, σε σχέση με όλα τα προηγούμενα σφάλματα. Άρα, το ζητούμενο επετεύχθη, αφού η κόκκινη γραμμή εκκαθάρισης είναι πολύ μικρή στο σχήμα αυτό.

### 7.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η συσχέτιση της προστασίας και της επιρροής των σφαλμάτων στην ευστάθεια έγινε ξεκάθαρη στην προηγούμενη παράγραφο. Ήδη από το Κεφάλαιο 6 η απαίτηση είναι συγκεκριμένη: από το μονοφασικό μέχρι το στερεό τριφασικό σφάλμα, η αντίδραση του συστήματος προστασίας πρέπει να είναι ολοένα και ταχύτερη.

Όλες οι χαρακτηριστικές των ηλεκτρονόμων στα παραπάνω σχήματα, δείχνουν ότι όσο αυξάνεται το επίπεδο επιλογής, τόσο μειώνεται ο χρόνος λειτουργίας. Επί του πρακτέου, αυτό συμβαίνει λόγω του συνδυασμού ρυθμίσεων υπερέντασης ορισμένου και αντιστρόφου χρόνου. Κατά το παραπάνω σύστημα, το trip στο διακόπτη μειώνεται σε χρόνο, μόνο όταν αυξάνεται το μέγιστο ρεύμα του ηλεκτρονόμου. Επιπλέον, κάθε ηλεκτρονόμος πρέπει να λειτουργεί ταχύτερα από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, οπότε για αυτό το λόγο ισχύει  $T_{OC-MAX} < T_{κρίσιμος}$ . Επίσης, παρατηρείται μία σταθερή διατήρηση του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρονόμων σχεδόν στο 1/5 του συνολικού κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης  $T_{κρίσιμος}$ .

όπως αυτός υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 6. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.1 και επιβεβαιώνονται πλήρως τα αποτελέσματα της μεταβατικής ευστάθειας, με την ευαισθησία να αυξάνει συνεχώς ως εξής:

Πίνακας 7.1: Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης προστασίας.

<b>ΣΦΑΛΜΑ</b>	<b>ZYGOI</b>	<b>I<sub>OC-MIN</sub></b>	<b>T<sub>OC-MIN</sub></b>	<b>I<sub>OC-MAX</sub></b>	<b>T<sub>OC-MAX</sub></b>	<b>T<sub>ΚΡΙΣΙΜΟΣ</sub></b>
<b>SLG</b>	<b>9 - 8</b>	2 Relay Amps	<1000 Time Cycles	8 Relay Amps	11,5 Time Cycles	86,5 Time Cycles
<b>LL</b>	<b>4 - 6</b>	2 Relay Amps	<60 Time Cycles	8 Relay Amps	8 Time Cycles	37,5 Time Cycles
<b>DLG</b>	<b>7 - 5</b>	4 Relay Amps	20 Time Cycles	16 Relay Amps	4,2 Time Cycles	23 Time Cycles
<b>3-PHASE</b>	<b>4 - 5</b>	10 Relay Amps	5 Time Cycles	40 Relay Amps	2,5 Time Cycles	13 Time Cycles

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα εξαιρετικά σύνθετο σύστημα, το οποίο σε μία συγκεκριμένη μελέτη απαιτεί επιλεκτική συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών μονάδων κάθε φορά. Στα Κεφάλαια 6 και 7, έγινε η παράθεση των αποτελεσμάτων των μελετών της ροής φορτίου, των βραχυκυκλωμάτων, της μεταβατικής ευστάθειας και της προστασίας σε ένα πρότυπο ηλεκτρικό δίκτυο 9 ζυγών. Αυτές οι μελέτες ολοκληρώθηκαν ακολουθώντας τα βήματα του σχεδιασμού, της ανάλυσης και της εφαρμογής. Τα τρία παραπάνω βήματα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας και του ελέγχου που εκτελούνται από έναν ηλεκτρολόγο μηχανικό, για την πραγματική λειτουργία ενός δικτύου.

Ο σχεδιασμός αφορά την ταξινόμηση των μονάδων ενός ΣΗΕ σε υψηλή και χαμηλή τάση και τη διασύνδεσή τους σε ένα μονογραμμικό διάγραμμα με γραμμές μεταφοράς, μετασηματιστές κ.ά. Η ανάλυση είναι απαραίτητη, για να δοθούν τα σωστά μαθηματικά δεδομένα, ούτως ώστε να προκύψουν έγκυρα αποτελέσματα στις παραπάνω μελέτες. Τέλος, μέσω του βήματος της εφαρμογής, ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός εκτελεί τις διάφορες μελέτες στο λογισμικό της επιλογής του. Έπεται η εξαγωγή στοιχείων, τα οποία επιβεβαιώνουν τη θεωρία και συσχετίζονται για την ανάπτυξη νέων συμπερασμάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κρίθηκε αναγκαίο να εκτελεστούν και οι 4 προαναφερθείσες μελέτες, για να παρουσιαστεί η ροή των δεδομένων από τη μία στην άλλη. Η μελέτη ροής φορτίου αφορά τη μόνιμη κατάσταση, η οποία είναι η αρχική σε μία μελέτη μεταβατικής ευστάθειας. Επίσης, χωρίς τα στοιχεία των βραχυκυκλωμάτων, η εκπόνηση των μελετών της μεταβατικής ευστάθειας στο Κεφάλαιο 6 και της προστασίας στο Κεφάλαιο 7 θα ήταν πρακτικά αδύνατη. Είναι εμφανές ότι ένα βραχυκύκλωμα απαιτεί ταχύτατη εκκαθάριση για να αποφευχθεί η απώλεια του συγχρονισμού (βλ. Κεφάλαια 4 και 6), και η καταπόνηση του υπόλοιπου εξοπλισμού (βλ. Κεφάλαια 5 και 7). Παρόλο που χρησιμοποιήθηκε μικρό χρονικό βήμα στη μελέτη ευστάθειας του PowerWorld, οι ελάχιστοι χρόνοι εκκαθάρισης φανερώνουν ότι, εάν καθυστερήσει το άνοιγμα των διακοπών για την εξάλειψη του σφάλματος, τότε τα υπερυψηλά ρεύματα που διαπερνούν τις γραμμές, οδηγούν σε πλήρη αποσυγχρονισμό τις γεννήτριες. Βέβαια, στα σύγχρονα ΣΗΕ εγκαθίστανται συστήματα που αναλαμβάνουν την πλήρη εποπτεία γύρω από τέτοια θέματα αστάθειας, όπως εξεξηγήθηκαν στο Κεφάλαιο 4, οπότε οι πραγματικοί κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης είναι αρκετά μεγαλύτεροι από αυτούς στο πειραματικό δίκτυο των 9 ζυγών.



Με λίγα λόγια, στα μεγάλα δίκτυα εισάγεται μία πληθώρα διατάξεων (δηλαδή αντισταθμιστές αέργου ισχύος, πυκνωτές για την αύξηση της χωρητικής αντίδρασης μίας γραμμής κ.ά.), η οποία διατηρεί το δίκτυο σε συγχρονισμό σε μεγαλύτερης διάρκειας σφάλματα, από αυτά που εφαρμόστηκαν στην προσομοίωση του PowerWorld.

Επιπροσθέτως, η συσχέτιση της μεταβατικής ευστάθειας με την προστασία διερευνήθηκε για την περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας του διακοπτικού υλικού, το οποίο αναλαμβάνει την εκκαθάριση ενός βραχυκυκλώματος. Το PSS@CAPE βοήθησε στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού προστασίας, ώστε να εξηγηθούν οι χαρακτηριστικές των ηλεκτρονόμων του δικτύου. Αυτές επιβεβαίωσαν τη σύνδεση των κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης, με τα διαφορετικά είδη σφαλμάτων. Εντούτοις, κανένα βραχυκύκλωμα δεν πρέπει να υποτιμάται, καθώς ακόμα και στο απλούστερο, το δίκτυο επιβαρύνεται αρκετά.

Γενικά, ο ηλεκτρολόγος μηχανικός υπολογίζει τους χρόνους και τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών, ώστε να προσδιορίζει την κατάλληλη ρύθμιση για την απόσβεση τέτοιων μεταβατικών φαινομένων. Οι υποχρεώσεις του ολοκληρώνονται με την παρατήρηση προηγούμενων διαταραχών για την πρόβλεψη νέων προβλημάτων και την επίλυσή τους. Τελικός και ανώτερος στόχος είναι η ανάπτυξη ταχύτερων προστατευτικών μέσων και νέων συστημάτων ελέγχου για την καλύτερη δυνατή υποβοήθηση του συστήματος μεταφοράς. Μόνο κατά αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ποιότητα ισχύος στο μέγιστο βαθμό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιαννακόπουλος Γ. Β. και Βοβός Ν. Α., «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη, 2017.
- [2] Kundur P., “Power System Stability and Control”, Δ. Λαμπρίδης (Επ. Επιμ.), «Ευστάθεια και Έλεγχος Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [3] Wikipedia, *Electricity*.
- [4] ΔΕΗ, *Τεχνικά στοιχεία του συστήματος μεταφοράς*, 2010.
- [5] Βοβός Ν. Α. και Γιαννακόπουλος Γ. Β., «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη, 2017.
- [6] ΑΔΜΗΕ, *Εκσυγχρονισμός υποδομών των Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) του ΑΔΜΗΕ*.
- [7] Βοβός Ν. Α. και Γιαννακόπουλος Γ. Β., «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη, 2016.
- [8] Ντοκόπουλος Π. και Λαμπρίδης Δ., «Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη, 1998.
- [9] Μάργαρης Ν. Ι., «Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα, 2009.
- [10] Goh H. H., Tai C. W., Chua Q. S., Lee S. W., Kok B. C., Goh K. C. and Teo K. T. K., “Comparative Study of Different Kalman Filter Implementations in Power System Stability”, *Science Publications AJAS*, 2014.
- [11] Wang J. and Lascu R., “Zero Sequence Circuit of Three-legged Core Type Transformers”, *IEEE*, 2009.
- [12] Jegatheesan R., “Power System Operation and Control”, *EEE Department SRM University*.
- [13] Abdulraheem B. S. and Gan C. K., “Power System Frequency Stability and Control: Survey”, *Research India Publications*, 2016.
- [14] Μαλατέστας Π. Β., «Ηλεκτρικές Μηχανές», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [15] Gibbard M. J., Pourbeik P. and Volwes D. J., “Small-signal Stability Control and Dynamic Performance of Power Systems”, Adelaide, University of Adelaide Press, 2015.

- [16] Βοβός Ν. Α., «Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη, 2019.
- [17] ABB SACE, Technical Application Papers: “Low Voltage Selectivity with ABB circuit-breakers”, Bergamo - Italy, 2012.
- [18] Control Automation, *Differential Current Protection*.
- [19] Electrical Units, *Protective Relay*.
- [20] Eeeguide, *Current and Voltage Transformer*, 2015.
- [21] Siemens, “Basics of Circuit Breakers”, Berlin – Germany, 2012.
- [22] Eeeguide, *Induction Type Overcurrent Relay*, 2018.
- [23] Eeeguide, *Overcurrent Relay Characteristics*, 2019.
- [24] Eeeguide, *Induction Type Directional Overcurrent Relay*, 2020.
- [25] Carr K., Illinois Center for a Smarter Electric Grid, *WSCC 9-bus System*, University of Illinois, 2013.
- [26] Kumar A. and Bhagat S. K., “Study of Stability Analysis using Lyapunov Function for IEEE-9 Bus System”, *IEEE*, 2019.
- [27] Kaur R. and Kumar E. D., “Transient Stability Analysis of IEEE 9 Bus System in Power World Simulator”, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* - Part 2, vol. 6, Issue 1, pp. 35-39, Jan 2016.
- [28] Shoaib A. S., Solangi A. R. and Aizaz A. S., “Short Circuit Analysis and Overcurrent Relaying Coordination of IEEE 9-Bus System”, *IEEE*, 2018