ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μελέτη της μόνιμης λειτουργίας και μεταβατικής ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση λογισμικού

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Τσάλας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

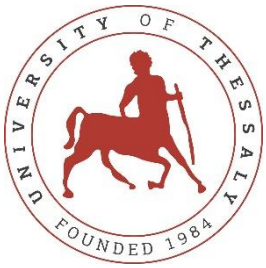
Μελέτη της μόνιμης λειτουργίας και μεταβατικής ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση λογισμικού

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Τσάλας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Steady state and transient stability analysis of power systems using software

Diploma Thesis

George Tsalas

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

Volos 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και να πω ένα μεγάλο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ σε όλους εκείνους τους ανθρώπους που τα τελευταία πέντε ολόκληρα χρόνια στάθηκαν δίπλα μου, όχι μόνο στις ευχάριστες στιγμές αλλά και στις δυσάρεστες.

Μέσα από τα βάθη τις καρδιάς μου θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου και τον μεγαλύτερο αδερφό μου Γιάννη, οι οποίοι σε όλη τη διάρκεια της πανεπιστημιακής μου πορείας, ήταν και συνεχίζουν να είναι δίπλα μου εμψυχώνοντάς με, σε οποιοδήποτε βήμα που κάνω. Χωρίς αυτούς είναι σίγουρο ότι το ταξίδι μου στην πανεπιστημιακή κοινότητα δεν θα είχε καν ξεκινήσει.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τα μέλη της τριμελούς επιτροπής παρακολούθησης και εξέτασης της Διπλωματικής Εργασίας οι οποίοι με εμπιστεύτηκαν και αφιέρωσαν πολύτιμο χρόνο στην εκπόνησή της. Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου έδωσε.

Κλείνοντας, θα ήθελα να πω ένα ευχαριστώ στους φίλους μου, τη δεύτερη οικογένειά μου, καθώς δεν ήταν λίγες οι φορές που ξημερωβραδιάζαμε στους υπολογιστές μας προσπαθώντας να ολοκληρώσουμε και να παραδώσουμε κάποια εργασία.

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

Γεώργιος Τσάλας

Ημερομηνία:

Στον αδερφό μου Γιάννη και

τους γονείς μου Κρυσταλλία και Κώστα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία ενδελεχής προσέγγιση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μελέτη τόσο θεωρητική όσο και πρακτική στις εξής λειτουργίες ενός ΣΗΕ:

1. Ανάλυση της ροής φορτίου.
2. Μελέτη βραχυκυκλωμάτων.
3. Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας.
4. Μελέτη προστασίας ενός ΣΗΕ.
5. Προσομοίωση του συστήματος των 9 ζυγών της IEEE.

Αναλυτικότερα, στο 1^{ο} Κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά παρουσιάζονται γεγονότα σταθμοί που συντέλεσαν στην ανάπτυξη και επέκταση τόσο του ελληνικού όσο και του παγκόσμιου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Έπειτα, αναλύεται η δομή και οι βασικές λειτουργίες ενός τέτοιου συστήματος.

Το 2^{ο} Κεφάλαιο αφορά τη θεωρητική ανάλυση της ροής φορτίου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά παρουσιάζεται η θεωρητική απόδειξη των εξισώσεων ροής φορτίου και στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά η επίλυση τους χρησιμοποιώντας τις δύο πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους (Gauss – Seidel και Newton – Raphson).

Στο 3^{ο} Κεφάλαιο γίνεται μελέτη όλων των ειδών βραχυκυκλωμάτων, συμμετρικών και μη. Για κάθε περίπτωση βραχυκυκλώματος αποδεικνύεται μαθηματικά η τιμή που παίρνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς και πόση ενδέχεται να είναι η πτώση της τάσης σε κάθε ζυγό του δικτύου. Όσον αφορά την περίπτωση των μη συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων, οι αποδείξεις αυτές προκύπτουν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών των ακολουθιακών δικτύων.

Στο 4^{ο} Κεφάλαιο μελετάται η μεταβατική ευστάθεια ενός δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι μέθοδοι με βάση τις οποίες εξετάζεται εάν ένα σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του μετά την εμφάνιση διαταραχής σε οποιοδήποτε σημείο του.

Το 5^{ο} Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην προστασία ενός ΣΗΕ. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι ηλεκτρονόμων οι οποίοι επιτηρούν αδιάκοπα ένα δίκτυο και ενεργοποιούνται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, απομονώνοντας την πληγείσα περιοχή έως ότου εκκαθαριστεί το σφάλμα.

Στο 6^{ο} και τελευταίο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από την ανάλυση ενός συστήματος 9 ζυγών της IEEE, μέσω του προγράμματος της SIEMENS PSS®E. Αυτά καλύπτουν τον σχεδιασμό, την ανάλυση ροής φορτίου, τη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων που ενδέχεται να προκύψουν, καθώς και την εύρεση των κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης των σφαλμάτων του δικτύου.

ABSTRACT

The present Diploma Thesis presents a detailed approach of an electric power system. More specifically, both theoretical and practical studies of the following subjects of a power system are analyzed:

1. Power flow analysis
2. Study of short circuits
3. Study of transient stability
4. Study of protection of an electric power system
5. Simulation of the 9-buses system of IEEE.

More analytically, the 1st Chapter comprises an introduction to the systems of electric power. Initially, there is a presentation of the historical landmarks that have contributed to the growth and development of both the Greek and the universal network of electric power. Afterwards, the structure and the basic functions of such a system are analyzed.

The 2nd Chapter concerns the theoretical analysis of the power flow of a system of electric power. At first the theoretical proof of the equations of the power flow is presented and subsequently their solution is treated thoroughly with the use of the two most widespread arithmetic methods (Gauss-Seidel and Newton – Raphson).

The 3rd Chapter deals with a study of all kinds of short circuits, symmetric or not. For each case of a short circuit, the value that the short circuit current takes is proved mathematically along with the voltage drop in each network bus. As far as the case of non symmetric short circuits is concerned, the above proofs result from the use of the method of symmetric components of the sequence networks.

The transient stability of a network is studied in the 4th Chapter. More specifically, we analyze the methods on the basis of which, we examine if a system preserves its stability (or not), after the appearance of disturbance to any point.

The 5th Chapter focuses on the protection of an electric power system. Different kinds of relays that incessantly supervise a network and are activated in case of a short circuit, by isolating the disaster area until the fault is cleared, are presented.

The 6th and final Chapter presents the results arisen from the analysis of a 9-buses system of IEEE through the program of Siemens PSS®E. The specific results cover the design, the analysis of power flow, the study of short circuits that might rise, along with the finding of fault cleaning critical times.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ vii
ABSTRACT ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 14
1.1 Ιστορική αναδρομή 14
1.2 Το Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 17
1.3 Βασικές λειτουργίες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ 25
2.1 Εισαγωγή 25
2.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου 26
2.2.1 Ταξινόμηση μεταβλητών των Εξισώσεων Ροής Φορτίου (ΕΡΦ) 29
2.2.2 Είδη Ζυγών 29
2.2.3 Συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούν οι μεταβλητές των ΕΡΦ 30
2.3 Επίλυση των ΕΡΦ 30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ 33
3.1 Εισαγωγή 33
3.2 Συνέπειες σφαλμάτων 34
3.3 Αντιμετώπιση Σφαλμάτων 34
3.4 Ανάλυση Συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος 34
3.5 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα 35
3.5.1 Συμμετρικές Συνιστώσες 35
3.5.2 Ακολουθιακά δίκτυα Γεννητριών 39
3.5.3 Ακολουθιακά Δίκτυα Μετασχηματιστών 40
3.5.4 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς τη γη (SLG) 41
3.5.5 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και τη γη Double Line to Ground (DLG) 42
3.5.6 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων Line to Line (LL) 44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 46
4.1 Εισαγωγή 46
4.1.2 Κατηγορίες ευστάθειας ενός ΣΗΕ 47
4.2 Συγχρονισμός και λειτουργίας γεννήτριας σε άπειρο ζυγό 51
4.3 Έλεγχος ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 55
4.4 Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής ευστάθειας 57
4.5 Μέθοδος των ίσων εμβαδών 58
4.5.1 Θεωρητική απόδειξη 58

4.5.2 Μαθηματική απόδειξη 59
4.6 Εφαρμογές της μεθόδου των ίσων εμβαδών 60
4.6.1 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής 61
4.6.2 Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή 63
4.7 Έμμεση λύση 64
4.8 Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η μεταβατική ευστάθεια 66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 68
5.1 Εισαγωγή 68
5.2 Είδη διατάξεων προστασίας 69
5.2.1 Ενεργητικές διατάξεις 69
5.2.2 Παθητικές διατάξεις 70
5.3 Πρωτεύουσα και βοηθητική προστασία 71
5.3.1 Πρωτεύουσα προστασία 71
5.3.2 Προστασία υποστήριξης (βοηθητική προστασία) 73
5.4 Δομή ενός δικτύου προστασίας 74
5.5 Βλάβες στις μονάδες προστασίας 76
5.6 Ηλεκτρονόμοι προστασίας 77
5.6.1 Εισαγωγή 77
5.6.2 Ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι 78
5.7 Χρόνος απόκρισης ηλεκτρονόμων 83
5.8 Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης 84
5.9 Ηλεκτρονόμοι απόστασης 87
5.9.1 Εισαγωγή 87
5.9.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας 88
5.9.3 Συνδυασμός ηλεκτρονόμων απόστασης και κατεύθυνσης 90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 9 ΖΥΓΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ PSSE 94
6.1 Εισαγωγή 94
6.2 Δεδομένα του συστήματος των 9 ζυγών 95
6.3 Ροή φορτίου στο σύστημα των 9 ζυγών 97
6.4 Προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος 99
6.5 Κρίσιμοι χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος 110
6.5.1 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 κοντά του ζυγού 6 111
6.5.2 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 κοντά του ζυγού 4 114
6.5.3 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 κοντά του ζυγού 9 118

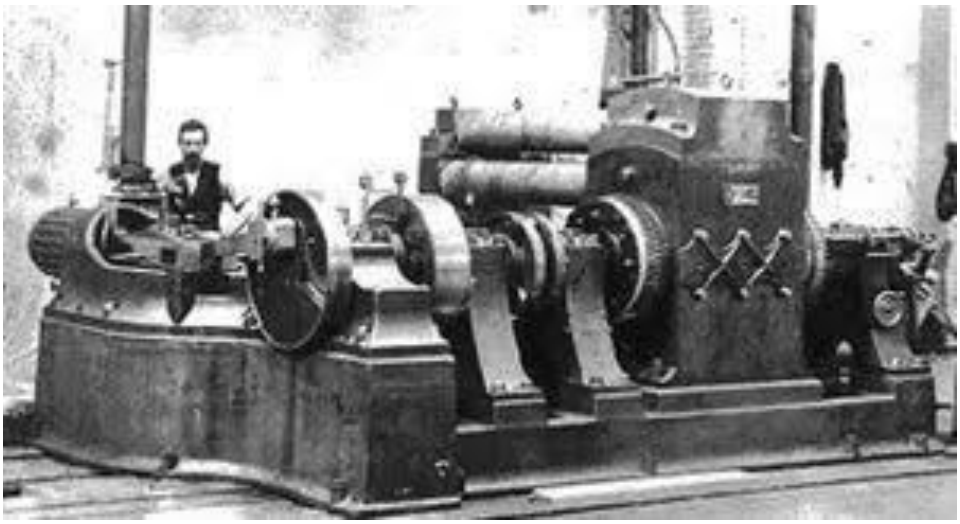
6.5.4 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά του ζυγού 7 122
6.5.5 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά του ζυγού 8 126
6.5.6 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 κοντά του ζυγού 9 130
6.5.8 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων 134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ 136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 137

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Μέχρι τα τέλη του $19^{ου}$ αιώνα οι γνώσεις γύρω από τον ηλεκτρισμό αφορούσαν κυρίως το φαινόμενου του ηλεκτρομαγνητισμού και δεν είχαν ακόμη πρακτική εφαρμογή. Η πρώτη εμπορική χρήση του ηλεκτρισμού, η οποία μάλιστα αποτελεί σημείο σταθμό για την τεχνολογική εξέλιξη του ανθρώπου, έγινε το 1870 όπου χρησιμοποιήθηκαν οι πρώτοι λαμπτήρες τόξου για να φωτιστούν οικίες και οδοί τοπικών περιοχών. Το πρώτο πλήρες ηλεκτρικό σύστημα κατασκευάστηκε το 1882 από τον αμερικανό εφευρέτη Thomas Edison (1847-1931μ.Χ.) στην Νέα Υόρκη. Ο σταθμός Pearl Street, όπως ονομάστηκε, αποτελούνταν από γεννήτρια, καλώδιο, ασφάλεια, μετρητή και φορτία. Το ηλεκτρικό αυτό σύστημα δούλευε με συνεχές (dc) ρεύμα και με λαμπτήρες πυράκτωσης, σε μια τάση της τάξεως των 110V και περιείχε μία ατμομηχανή (Porter-Allen) η οποία έθετε σε κίνηση μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος και τροφοδοτούσε σε ακτίνα 1,5 χιλιομέτρων, 59 καταναλωτές. Στο Σχήμα 1.1 που τραβήχτηκε το 1882 φαίνεται ο Thomas Edison δίπλα στη πρώτη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Pearl Street.

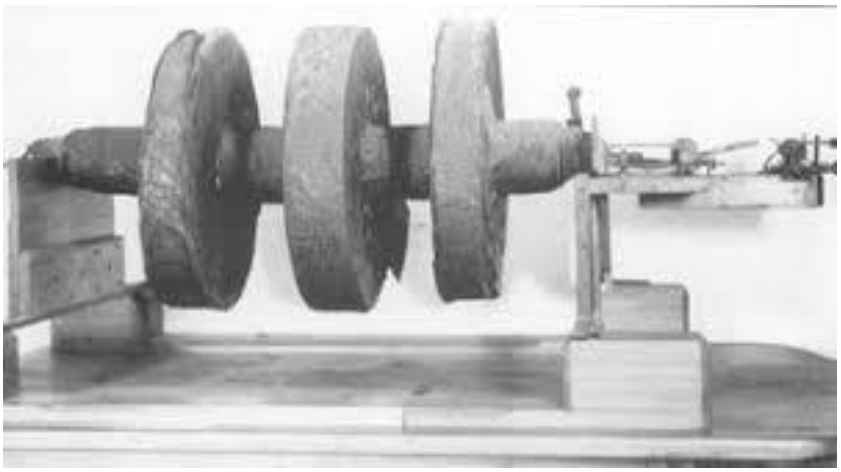


Σχήμα 1.1: Η πρώτη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργεια της Pearl Street

Στα χρόνια που ακολούθησαν κατασκευάστηκαν και άλλα παρόμοια συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σύντομα όμως και ύστερα από την ιστορική διαμάχη Tesla-Edison, τα συστήματα αυτά άρχισαν να αντικαθίστανται από άλλα που χρησιμοποιούσαν εναλλασσόμενο ρεύμα (ac) αντί για συνεχές (dc). Η αιτία για την αλλαγή αυτή έγκειται

στο γεγονός ότι τα συστήματα συνεχούς ρεύματος δεν μπορούσαν να μεταφέρουν ισχύ σε μεγάλες αποστάσεις καθώς οι πτώσεις τάσης και οι απώλειες θερμότητας $Q=RI^2$ ήταν μεγάλες, και απαιτούσαν υψηλές τάσεις στους σταθμούς παραγωγής που εκείνη την εποχή δεν μπορούσαν να παραχθούν.

Η λύση λοιπόν στο πρόβλημα παραγωγής υψηλών τάσεων, βρισκόταν στο μετασχηματισμό των υψηλών τάσεων μέσω μιας συσκευής σε χαμηλότερες τιμές προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιείται από τους καταναλωτές. Η συσκευή αυτή ονομάστηκε μετασχηματιστής (transformer) (Σχήμα 1.2) και κατασκευάστηκε το 1836 από τον Ιρλανδό κληρικό Νίκολας Κάλαν (Nicholas Callan).



Σχήμα 1.2: Το πηνίο επαγωγής του Callan

Έτσι στις αρχές του $20^{ου}$ αιώνα ήταν πλέον αδιαμφισβήτητη η επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι του συνεχούς για τους εξής λόγους:

1. Ο μετασχηματιστής έλυνε πλέον το πρόβλημα της μετατροπής των υψηλών τάσεων σε χαμηλές με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η μεταφορά της ισχύος καλύπτοντας μεγαλύτερες αποστάσεις.
2. Η κατασκευή των γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος (ac) ήταν απλούστερη σε σχέση με αυτές του συνεχούς ρεύματος (dc).
3. Η κατασκευή των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (ac) ήταν απλούστερη και φθηνότερη σε σχέση με αυτές του συνεχούς ρεύματος (dc).

Έτσι, με την κυριαρχία του εναλλασσόμενου ρεύματος, ξεκίνησε η δημιουργία μικρών σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας, που στη συνέχεια επεκτάθηκαν και διασυνδέθηκαν μεταξύ τους προκειμένου να καλύπτουν τις ανάγκες μεγαλύτερων φορτίων τα οποία δεν θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν μόνοι τους.

Προκειμένου όμως να συνδεθούν μεταξύ τους τα συστήματα αυτά έπρεπε πρώτα να τυποποιηθεί η συχνότητά τους, καθώς μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν ήταν σταθερή αλλά κυμαινόταν μεταξύ των 25 και 133 Hz. Έτσι, στην Ευρώπη, όπως και στην χώρα μας, αποφασίστηκε ότι θα χρησιμοποιείται η συχνότητα των 50 Hz ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες, στον Καναδά, στην Ιαπωνία και σε άλλες χώρες η συχνότητα των 60 Hz.

Με την πάροδο του χρόνου τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας άρχισαν να γίνονται ολοένα και μεγαλύτερα αλλά και πολυπλοκότερα, εξαιτίας της αυξανόμενης ανάγκης για μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις. Κατ' επέκταση, έπρεπε να μεγαλώσουν και τα επίπεδα της τάσης που χρησιμοποιούνταν.

Έτσι, ενώ αρχικά τα επίπεδα αυτά ανερχόταν στα 12,44 και 60 kV στη συνέχεια αυξήθηκαν με ταχύτατους ρυθμούς και έφτασαν το 1966 τα 765 kV. Στον Πίνακα 1.1 φαίνονται αναλυτικά με χρονολογική σειρά, οι μεταβολές που υπέστησαν τα επίπεδα της τάσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 1.1: Αλλαγές στα επίπεδα της τάσης σε βάθος χρόνου

ΕΤΟΣ	ΤΑΣΗ (kV)
1890	12
1922	165
1923	220
1935	287
1953	350
1965	500
1966	765

Προκειμένου η τάση να μην αυξάνεται απεριόριστα, αποφασίστηκαν ορισμένα τυποποιημένα επίπεδα τάσεων τα οποία πρέπει να ακολουθούν όλες οι χώρες του

κόσμου. Όσον αφορά την Ελλάδα, την Ευρώπη αλλά και τις Η.Π.Α τα επίπεδα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2. [1,2,3]

Πίνακας 1.2 Τυποποιημένα επίπεδα τάσεων σε Ελλάδα Ευρώπη και Η.Π.Α.

Είδος Τάσης	Ελλάδα	Ευρώπη	Η.Π.Α.
Χαμηλή Τάση Low Voltage (V)	230/400	220/380/650/1000	120/208/600
Μέση Τάση Medium Voltage (kV)	6,6/15/20/66	5/11/22/33/66	2,4/6,9/12,5 23/34,5/69
Υψηλή Τάση High Voltage (kV)	150	110/132/156/220	115/138/161/230
Υπερυψηλή τάση Extreme High Voltage (kV)	400	275/380/400 750/800	287/345/500 750/765
Εξαιρετικά Υψηλή Τάση Ultra High Voltage (kV)	-	1000/1100	1100/1500

1.2 Το Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Στην χώρα μας το αποκλειστικό δικαίωμα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας έχει δοθεί από το 1950 στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες ημερομηνίες ορόσημα οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη του συστήματος της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.

- ✓ 1953: Αρχίζει η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην ηπειρωτική Ελλάδα με αρχική παραγόμενη ισχύ 212,5 MVA την οποία μεταφέρουν καλώδια υψηλής τάσης 150 kV μήκους 326 χιλιομέτρων.
- ✓ 1968: Η Κρήτη αρχίζει και τροφοδοτείται μέσω υποθαλάσσιων αγωγών με ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, αρχίζει η λειτουργία των πρώτων υποβρύχιων διασυνδέσεων της τάξεως των 150 kV μεταξύ Κάλαμου-Αμάρυνθου και των 66 kV ανάμεσα σε Ηγουμενίτσα-Κέρκυρα.
- ✓ 1972: Τοποθετούνται στο δίκτυο οι πρώτοι διακόπτες εξαφθοριούχου θείου (SF6).
- ✓ 1973: Τίθεται σε λειτουργία το σύστημα μεταφοράς με επίπεδα τάσης 400 kV.

- ✓ 1977: Λειτουργεί για πρώτη φορά ο πρώτος κλειστός υποσταθμός 150 kV GIS (Gas Insulated Switchgear) στην Θεσσαλονίκη.
- ✓ 1995: Χρησιμοποιείται για πρώτη φορά καλώδιο με μόνωση από πολυαιθυλένιο (XLPE) σε γραμμή τάσης 150 kV στη Θεσσαλονίκη.
- ✓ 1998: Στο Λαύριο τίθεται σε λειτουργία ο πρώτος κλειστός υποσταθμός GIS τάσης 400 kV.
- ✓ 1999: Τίθεται σε ισχύ ο Νόμος 2773/1999 για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα δημιουργείται η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και ο ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΔΕΣΜΗΕ). Επίσης, ορίζεται η ΔΕΗ ως η αρμόδια εταιρία για το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ 2002: Διασυνδέεται η Ελλάδα με την Ιταλία μέσω εναέριας αλλά και υποθαλάσσιας γραμμής συνεχούς ρεύματος (High-Voltage-DC or HVDC).
- ✓ 2004: Τοποθετούνται οι πρώτοι πυκνωτές 150 kV με ελεγχόμενη ζεύξη στην Παλλήνη, και στις Αχαρνές.
- ✓ 2007: Αναβαθμίζεται το ηλεκτρικό δίκτυο μεταξύ Ελλάδας και Σκοπίων από τάση της τάξεως των 150 kV σε 400 kV. Επιπλέον τοποθετείται υποθαλάσσια γραμμή 150 kV μεταξύ της Ηγουμενίτσας και της Κέρκυρας.
- ✓ 2008: Ολοκληρώνεται η διασύνδεση του δικτύου Ελλάδας-Τουρκίας με την κατασκευή Γραμμών Μεταφοράς 400 kV.
- ✓ 2010: Κατασκευάζεται ατμοηλεκτρικό εργοστάσιο στην Θίσβη Βοιωτίας χωρητικότητας 410 MWe χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το φυσικό αέριο.
- ✓ 2015: Ολοκλήρωση του έργου «Νέα Μάκρη - Πολυπόταμος και Δίκτυο Υψηλής Τάσης Ν. Ευβοίας».
- ✓ 2016: Υπογραφή Μνημονίου Συνεργασίας μεταξύ της ΔΕΗ-CMEC για την κατασκευή της $2^{ης}$ υπερσύγχρονης λιγνιτικής μονάδας στον ΑΗΣ Μελίτη της Φλώρινας.
- ✓ 2017: Πώληση από τη ΔΕΗ στη ΔΕΣ ΑΔΜΗΕ του 25% των μετοχών του ΑΔΜΗΕ.
- ✓ 2018: Ολοκλήρωση της κατασκευής του νέου Κέντρου Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στη Ρόδο.

- ✓ 2019: Ξεκινά η ηλεκτρική διασύνδεση της Σκιάθου στο σύστημα των 150 kV μέσω της Εύβοιας (Μαντούδι).

Πέρα από τα έργα τα οποία έχουν υλοποιηθεί από το 1950 – 2019, στον Πίνακα 1.3 παραθέτονται ορισμένα μελλοντικά σχέδια τα οποία αφορούν την κατασκευή νέων υποσταθμών και κέντρων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 1.3: Μελλοντικοί υποσταθμοί και κέντρα διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Ονομασία	Εγκατεστημένη ισχύς (MVA)	Προβλεπόμενος χρόνος ολοκλήρωσης
Κέντρο Διανομής Χανίων ΙΙ	2x40/50	2020
Κέντρο Διανομής Κερατέας	2x40/50	2022
Κέντρο Διανομής Ιλίου	2x100	2022
Υποσταθμός Νάξου	2x40/50	2021
Υποσταθμός Μαστιχαρίου	2x40/50 (ανύψωσης)	2022
Υποσταθμός Κώ	2x40/50	2022

Συνεχίζοντας, από το 1953 μέχρι και σήμερα τοποθετούνται στον Ελληνικό χώρο εναέριες γραμμές μεταφοράς και υποθαλάσσια καλώδια, προκειμένου να μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια υψηλής ποιότητας σε όλη την Ελλάδα. Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζονται τα μήκη που καταλαμβάνουν οι γραμμές αυτές.

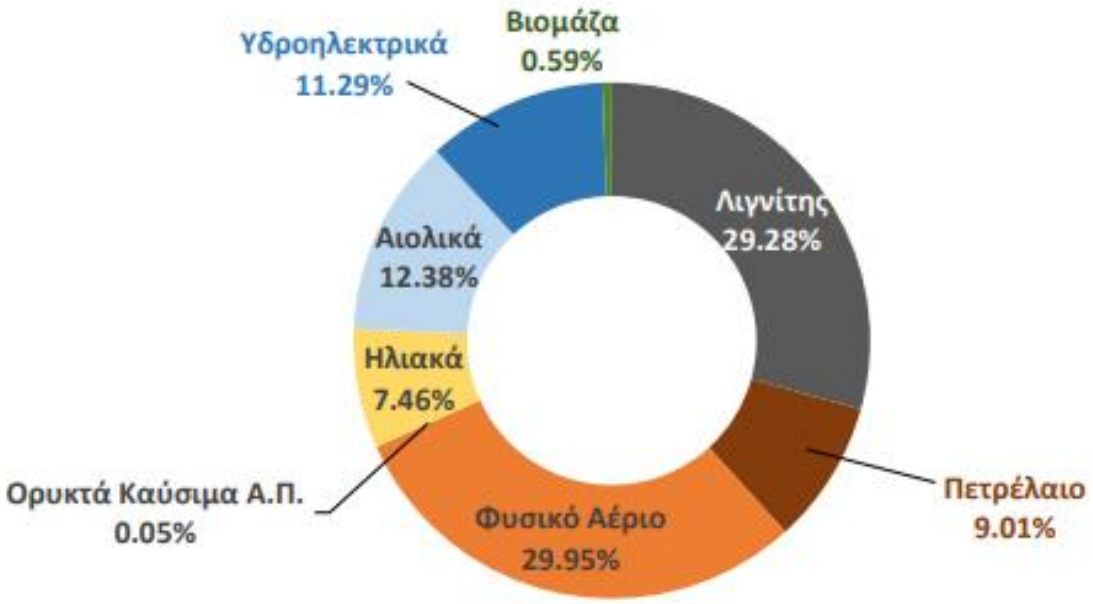
Πίνακας 1.4 Μήκη Γραμμών Μεταφοράς στον Ελλαδικό χώρο

Επίπεδο Τάσης	400 kV	400 kV (DC)	150 kV	66 kV	Συνολικά
Εναέριες	2535	106	8043	39	10724
Υποβρύχιες	-	160	140	15	315
Υπόγειες	4,5	-	48,5	-	53
Συνολικά	2539,5	267	8231,5	54	11092

Τέλος αξίζει να τονιστεί ότι την τελευταία δεκαετία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας δεν βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στην εξόρυξη του λιγνίτη αλλά αντιθέτως έχουν εισέλθει και άλλες μέθοδοι όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και το φυσικό αέριο.

Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 1.3 έχουν συγκεντρωθεί τα ποσοστά από κάθε πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2019. Αξίζει να τονιστεί ότι, μέσα σε μια δεκαετία τα ποσοστά της εξόρυξης του λιγνίτη έχουν μειωθεί κατά 22.72% (το έτος 2010 το ποσοστό έφτανε το 52%) και δεν καταλαμβάνει πλέον την πρώτη θέση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Την θέση του λιγνίτη έχει πλέον το φυσικό αέριο το οποίο μάλιστα δεν παράγει τόσους ρύπους και είναι επομένως φιλικότερο για το περιβάλλον. Το 2010 το ποσοστό του φυσικού αερίου έφτανε το 20% ενώ σήμερα έχει αυξηθεί κατά 9,95% και φτάνει το ποσοστό του 29,95%. [1,2,8]



Σχήμα 1.3: Ενεργειακό Μείγμα της Ελλάδος για το έτος 2019

1.3 Βασικές λειτουργίες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα πλήθος εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες ισχύος κ.α.) οι οποίες συντελούν στην τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα υποσυστήματα ανάλογα με την τάση λειτουργίας. Ξεκινώντας από το υποσύστημα με την μεγαλύτερη τάση διακρίνουμε τα εξής:

1. Σύστημα Παραγωγής.
2. Σύστημα Μεταφοράς.
3. Σύστημα Υπομεταφοράς.
4. Σύστημα Διανομής.

Ξεκινώντας με το Σύστημα Μεταφοράς, η κύρια διαφορά του υποσυστήματος αυτού σε σχέση με τα άλλα, έγκειται στο γεγονός ότι δομείται σχηματίζοντας ένα βρόγχο προκειμένου να αποστέλλει την ηλεκτρική ενέργεια σε περισσότερες κατευθύνσεις. Από την άλλη πλευρά τα Συστήματα Υπομεταφοράς και Διανομής έχουν ακτινική δομή έτσι ώστε να αποστέλνουν την ηλεκτρική ενέργεια σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις.

Συνεχίζοντας, άλλη μία ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στα συστήματα αυτά αφορά τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά τους. Πιο συγκεκριμένα, το $2^{ο}$ και $3^{ο}$ σύστημα μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια ξεκινώντας από μία πηγή και έχοντας ως τερματικό σημείο τα επιμέρους φορτία. Ένα Υποσύστημα Μεταφοράς όμως, διαχειρίζεται μεγαλύτερες ποσότητες ισχύος και συνδέει τους σταθμούς παραγωγής με όλους τους καταναλωτές.

Επιπρόσθετα, αξίζει να τονιστεί ότι ένα Σύστημα Μεταφοράς δέχεται ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει άμεσα μεγάλους καταναλωτές, κατευθείαν από τους σταθμούς παραγωγής, αφού πρώτα βέβαια περάσει από τους αντίστοιχους μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης.

Όταν κατασκευάζουμε ένα Σύστημα Μεταφοράς πρέπει να έχουμε υπόψιν ορισμένες αρχές και περιορισμούς οι οποίες πρέπει να διέπουν το σύστημά μας:

1. Εάν επεκτείνουμε ένα ήδη κατασκευασμένο σύστημα θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν και όλους τους ήδη υπάρχοντες περιορισμούς.
2. Τη γεωγραφική θέση που βρίσκονται όχι μόνο οι τωρινοί καταναλωτές, αλλά και αυτές που θα αποκτήσουν οι μελλοντικοί καταναλωτές.
3. Οι σταθμοί παραγωγής πρέπει οπωσδήποτε να τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις.

Συνεχίζοντας την ανάλυση με το Σύστημα Υπομεταφοράς, αυτό τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής με τάση η οποία κυμαίνεται ανάμεσα στα 23 kV και 150 kV. Από την άλλη τροφοδοτείται είτε από τους σταθμούς παραγωγής είτε από το Σύστημα Μεταφοράς μέσω υποσταθμών ζεύξεως και μετασχηματισμού.

Όπως και στην περίπτωση του Συστήματος Μεταφοράς έτσι και το Σύστημα Υπομεταφοράς είναι σε θέση να αποστέλλει ενέργεια άμεσα στους μεγάλους καταναλωτές. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει διάκριση ανάμεσα στα δύο υποσυστήματα καθώς σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο, τα παλιά Συστήματα Μεταφοράς μετατρέπονται σε Συστήματα Υπομεταφοράς καθώς το ρόλο τους τον κλέβουν τα καινούργια Συστήματα Μεταφοράς.

Όσον αφορά όμως τον ρόλο των Συστημάτων Υπομεταφοράς, είναι παρόμοιος με αυτόν των Συστημάτων διανομής. Η ειδοποιός διαφορά βρίσκεται στις περισσότερες γραμμές που διαθέτει έναντι του Συστήματος Διανομής αλλά και στο γεγονός ότι καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή μέσα στην οποία τροφοδοτεί τους καταναλωτές με μεγαλύτερα πόσα ισχύος και τάσης.

Συνεχίζοντας με την ανάλυση του Υποσυστήματος Διανομής, πρέπει να τονιστεί ότι σε αυτό χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα τάσης:

- Η πρωτεύουσα τάση ή αλλιώς τάση τροφοδοσίας που ονομάζεται και Μέση Τάση.
- Η δευτερεύουσα τάση ή αλλιώς τάση κατανάλωσης που ονομάζεται και Χαμηλή Τάση.

Τα δύο αυτά δίκτυα σε συνδυασμό με τους μετασχηματιστές διανομής απαρτίζουν το Σύστημα Διανομής. Στο σύστημα αυτό παρέχεται η ενέργεια μέσα από τους

υποσταθμούς διανομής, στους οποίους η υψηλή τάση εισέρχεται και μετατρέπεται σε μεσαία.

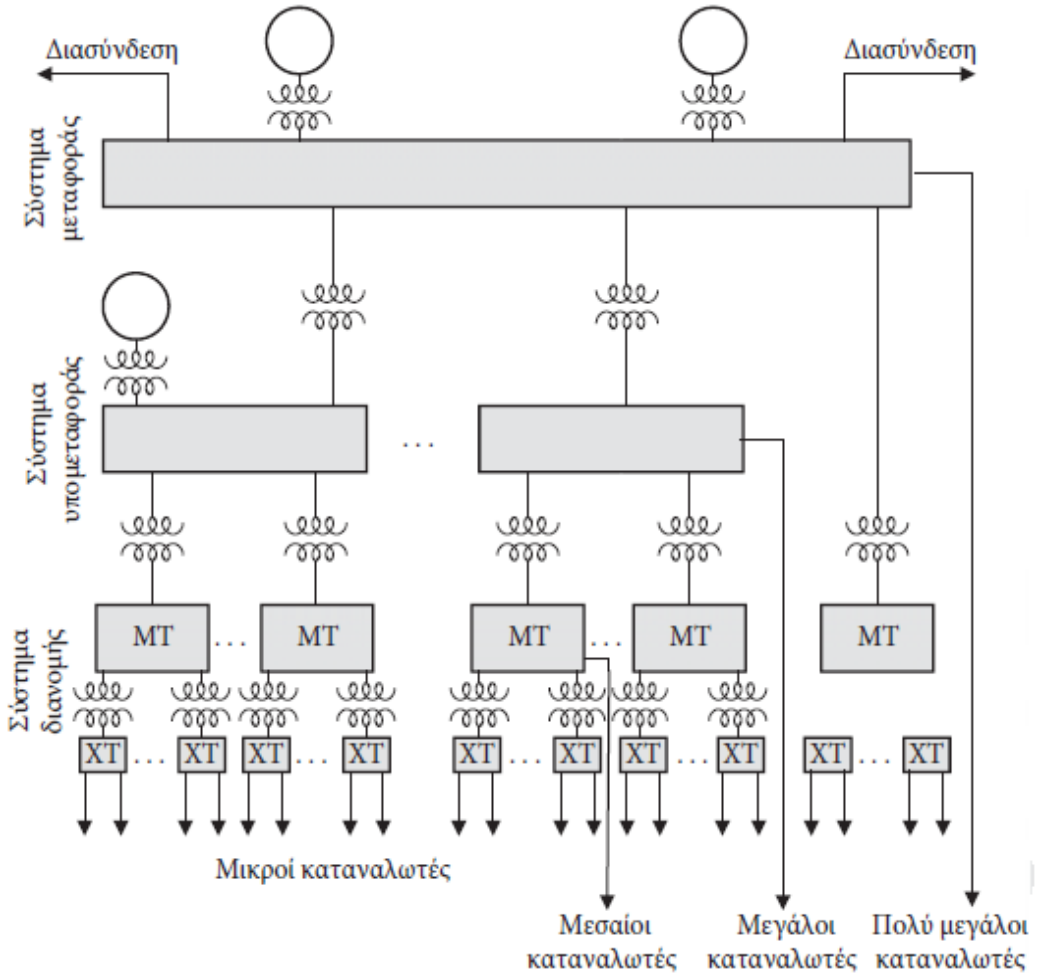
Έπειτα, η τάση αυτή ξαναπερνά μέσα από μετασχηματιστές και μετατρέπεται σε χαμηλή προκειμένου να την λάβουν οι οικιακοί καταναλωτές. Υπάρχει όμως και η περίπτωση η μεσαία αυτή τάση να μην περάσει μέσα από αντίστοιχους μετασχηματιστές αλλά να αποσταλεί κατευθείαν σε μεσαίους καταναλωτές.

Τόσο η εγκατάσταση όσο και η συντήρηση ενός δικτύου διανομής μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή καθώς ελλοχεύουν πολλοί κίνδυνοι οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στον εξοπλισμό ολόκληρου του δικτύου. Για αυτόν ακριβώς το λόγο κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου ενδέχεται να δαπανηθεί ακόμα και το μισό χρηματικό κεφάλαιο προκειμένου να σχεδιαστεί σωστά το σύστημα διανομής.

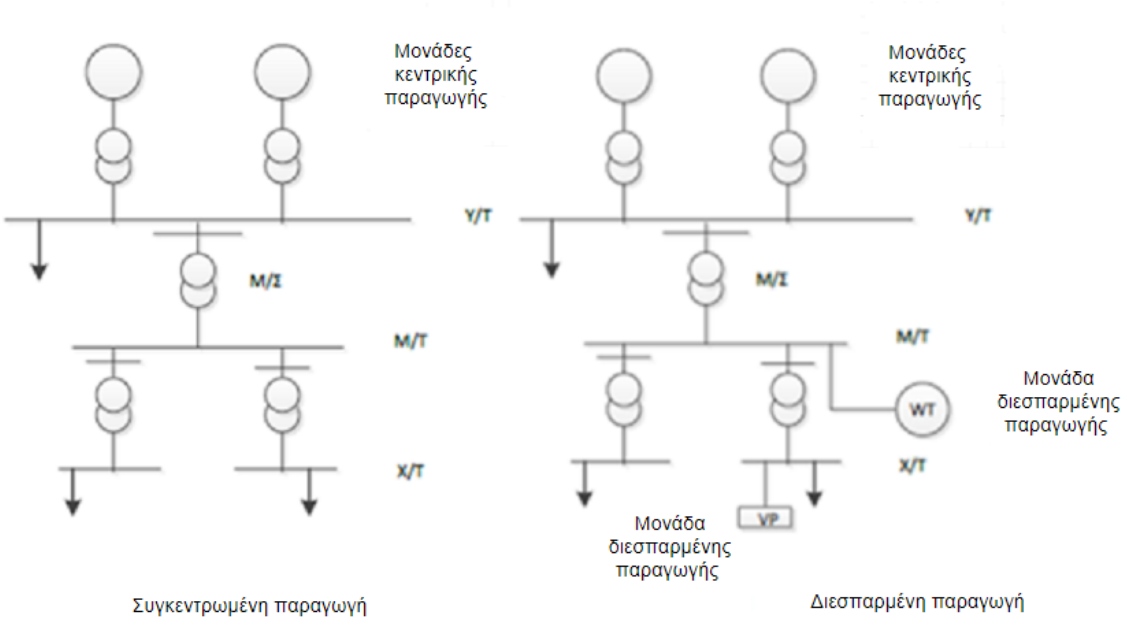
Έχοντας αναλύσει τα τρία από τα τέσσερα υποσυστήματα ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται η δομή ενός ΣΗΕ, από τη μεταφορά έως τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο τα τρία υποσυστήματα συνδέονται μεταξύ τους προκειμένου να τροφοδοτήσουν τους διάφορους καταναλωτές. [1]

Όσον αφορά το σύστημα παραγωγής, αυτό διαχωρίζεται σε δύο μοντέλα, σε αυτό της συγκεντρωμένης και σε αυτό της διεσπαρμένης παραγωγής. Όσον αφορά τη συγκεντρωμένη παραγωγή, η ενέργεια παράγεται σε ειδικούς σταθμούς παραγωγής και στη συνέχεια μεταφέρεται στα υπόλοιπα υποσυστήματα. Στην περίπτωση όμως της διεσπαρμένης παραγωγής, η ενέργεια παράγεται σε μονάδες παραγωγής που είναι τοποθετημένες κοντά στους καταναλωτές.

Στο αριστερό μέρος του Σχήματος 1.5 απεικονίζεται το μοντέλο της συγκεντρωμένης παραγωγής, στο οποίο οι μονάδες κεντρικής παραγωγής συνδέονται με το σύστημα μεταφοράς. Στο δεξί μέρος του Σχήματος 1.5 απεικονίζεται το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής όπου οι μονάδες κεντρικής παραγωγής είναι εγκατεστημένες κοντά στα σημεία κατανάλωσης.



Σχήμα 1.4: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 1.5: Συγκεντρωμένη παραγωγή και Διεσπαρμένη παραγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται ευρέως όταν μελετάμε τη συμπεριφορά ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Χάρις την ανάλυση ροής φορτίου ο μηχανικός μπορεί να υπολογίσει μεγέθη όπως: οι τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου, οι ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς (ΓΜ) και τους μετασχηματιστές. Επίσης, η ανάλυση ροής φορτίου συμβάλλει καθοριστικά, μέσα από δοκιμές, στην επιλογή εκείνου του ΣΗΕ με τη βέλτιστη λειτουργία.

Η ανάλυση ροής φορτίου παράλληλα, παίζει μείζονα ρόλο κατά το σχεδιασμό μεταβολών ή μελλοντικών επεκτάσεων σε ένα ήδη υπάρχον ΣΗΕ όπως:

- Ανάπτυξη καινούργιων μονάδων παραγωγής.
- Σύνδεση με άλλα δίκτυα.
- Τοποθέτηση καινούργιων Γραμμών Μεταφοράς.
- Τροφοδοσία νέων φορτίων.

Πριν την υλοποίηση των παραπάνω μεταβολών θα πρέπει να εξετάσουμε διεξοδικά τις συνέπειες που θα επιφέρουν στο δίκτυό μας.

Τέλος η μελέτη ροής φορτίου είναι σημαντική προκειμένου να εντοπίσουμε κάτω από ποιες συνθήκες το σύστημά μας λειτουργεί υπό τον βέλτιστο τρόπο όταν τεθούν εκτός λειτουργίας ορισμένες Γραμμές Μεταφοράς, μονάδες παραγωγής καθώς επίσης και για την εύρεση αρχικών τιμών που χρειάζονται για άλλες μελέτες πχ: μελέτη βραχυκυκλωμάτων.

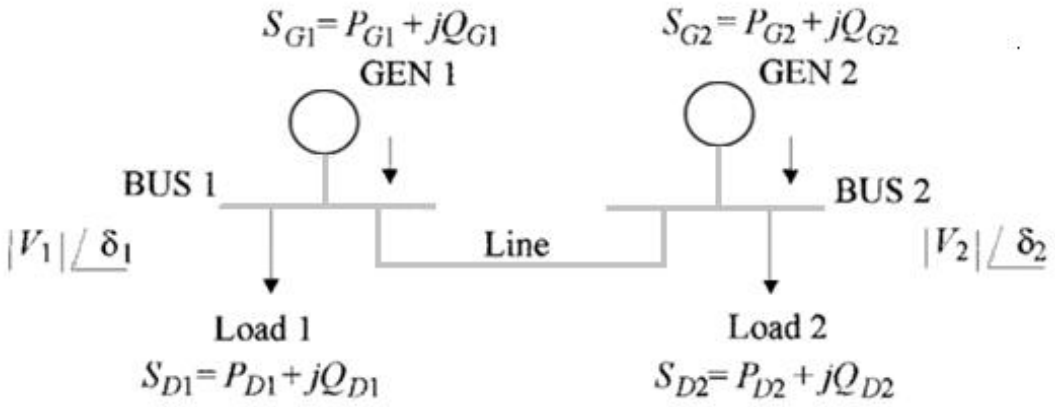
Για τη μελέτη της ροής του φορτίου έχουν κατασκευαστεί ορισμένες μη γραμμικές εξισώσεις η επίλυση των οποίων γίνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Οι ποιο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι είναι οι: η Gauss – Seidel και η Newton – Raphson.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οποιαδήποτε επαναληπτική μέθοδο και εάν εφαρμόσει ο μηχανικός, πρέπει οι υπολογισμοί του να τηρούν τους εξής περιορισμούς:

- Να αποφεύγεται η υπέρβαση των οριακών τιμών των πηγών αέργου ισχύος και των ορίων λήψης των μετασχηματιστών ελέγχου.
- Να αποφεύγεται η υπερφόρτιση των Γραμμών Μεταφοράς καθώς και των Μετασχηματιστών.
- Να παραμένουν οι τάσεις των ζυγών εντός ορισμένων ορίων 0.95p.u.-1.05p.u. (tolerance ± 5%). [2]

2.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

Προκειμένου να σχεδιάσουμε τις Εξισώσεις Ροής Φορτίου ας δούμε πρώτα τι γίνεται σε ένα (σχετικά απλό) σύστημα 2 ζυγών, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.

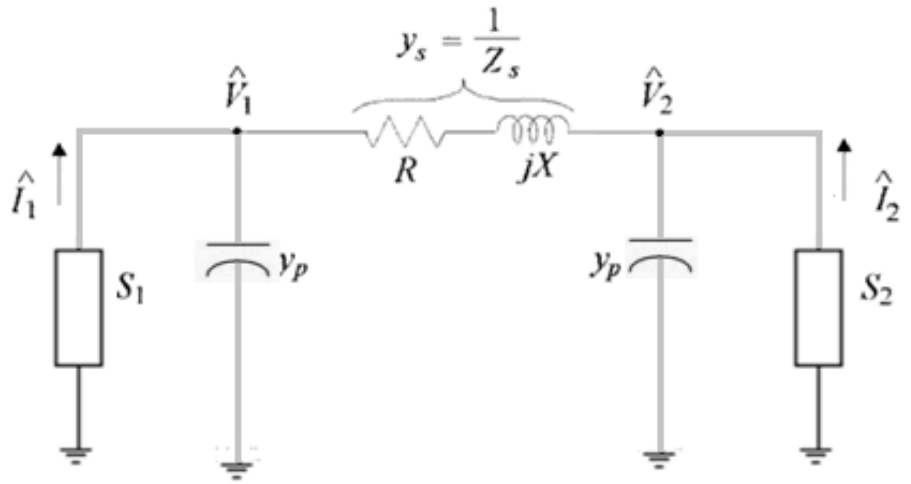


Σχήμα 2.1: Σύστημα 2 ζυγών

Όπου:

- G: παραγωγή (generation)
- D: ζήτηση (demand)
- S_G: παραγωγή μιγαδικής ισχύος
- P_G: παραγωγή πραγματικής ισχύος
- Q_G: παραγωγή άεργου ισχύος
- S_D: ζήτηση μιγαδικής ισχύος
- P_D: ζήτηση πραγματικής ισχύος
- Q_D: ζήτηση άεργου ισχύος
- V_i:τάση του i-οστού ζυγού
- δ_i: γωνία της αντίστοιχης V_i

Προκειμένου να μελετήσουμε τη ροή φορτίου του Σχήματος 2.1 σύστημα παίρνουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.2.



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα 2 ζυγών

Όπου:

- $Y = \frac{1}{Z}$
- Y_s=Αγωγιμότητα σε σειρά (Series Impedance)
- Y_p=Εγκάρσια αγωγιμότητα (Parallel Impedance)
- $S_1 = S_{g1} - S_{d1}$ (καθαρή ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο από το ζυγό 1)
- $S_2 = S_{g2} - S_{d2}$ (καθαρή ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο από το ζυγό 2)

Ισχύει ότι:

$S_1=P_1+jQ_1=S_{g1}-S_{d1}=P_{g1}+jQ_{g1}-P_{d1}-jQ_{d1} \Leftrightarrow S_{1=}(P_{g1}-P_{d1})+j(Q_{g1-}Q_{d1})$ (2.1)

Εφαρμόζουμε το 1^o νόμο του Kirchoff στον κόμβο 1 του Σχήματος 2.2:

$I_1=I_{1,2}+I_{1,0}=(V_1-V_2)Y_S+(V_1-0)Y_p$ (2.2)

Εφαρμόζουμε το 1^o νόμο του Kirchoff στον κόμβο 2 του Σχήματος 2.2:

$I_2=(V_2-V_1)Y_S+(V_2-0)Y_p$ (2.3)

Όμως $S_1^*=I_1V_1^*=[(V_1-V_2)Y_S+V_1Y_p]V_1^*$

Και $S_2^*=I_2V_2^*=[(V_2-V_1)Y_S+V_2Y_p]V_2^*$

Συνεχίζοντας: $S_1^*=[V_1Y_S-V_2Y_S]V_1^*+V_1V_1^*Y_p \Leftrightarrow S_1^*=(Y_S+Y_p)V_1V_1^*-V_1^*V_2Y_S$

Έστω $Y_{11}=Y_{S+}Y_p$ και $Y_{12}= -Y_S= Y_{21}$ Τότε :

$S_1^*= P_1-jQ_1= Y_{11}\ V_1V_1^*+ V_1^*V_2\ Y_{12}$ (2.4)

Ομοίως: $S_2^*= P_2-jQ_2= Y_{12}\ V_1V_2^*+ V_2^*V_2\ Y_{22}$ (2.5)

Με: $Y_{22}=Y_{S+}Y_p$

Παρατήρηση:

- Y_{11}=Άθροισμα αγωγιμοτήτων που συνδέονται στο ζυγό 1
- Y_{22}=Άθροισμα αγωγιμοτήτων που συνδέονται στο ζυγό 2
- Y_{12}=Το αντίθετο της αγωγιμότητας μεταξύ ζυγού 1-2
- Y_{21}=Το αντίθετο της αγωγιμότητας μεταξύ ζυγού 2-1

Οι εξισώσεις 2.4, 2.5 αποτελούν τις εξισώσεις ροής φορτίου για το δίκτυο 2 ζυγών και μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$P_1-jQ_1= V_1^*\sum_1^2 Y_{1k}V_k$ (2.6)

$P_2-jQ_3= V_2^*\sum_1^2 Y_{2k}V_k$ (2.7)

Κατ' επέκταση για σύστημα n ζυγών οι εξισώσεις ροής φορτίου διαμορφώνονται ως ακολούθως:

$P_i-jQ_i= V_i^*\sum_1^n Y_{ik}V_k$ i = 1, 2, …, n (2.8)

Όπου $Vi = |Vi\ |\angle\delta i$ και $Yik = |Yik|\angle\gamma_{ik}$

Η εξίσωση (7) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$Pi - jQi = \sum_1^n |\mathrm{Vi}\,||\mathrm{Vk}\,||\mathrm{Yik}|e^{j(\delta\kappa-\delta i+yik)}$ i = 1, 2, …, n (2.9)

Αν εξισώσω τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη στην (2.8) προκύπτει:

$$\boldsymbol{P_i=\sum_1^n |Vi\,||Vk\,||Yik|\cos(\delta_\kappa-\delta_i+y_{ik})} \quad \textbf{(2.10)}$$

$$\boldsymbol{Q_i=-\sum_1^n |Vi\,||Vk\,||Yik|\sin(\delta_\kappa-\delta_i+y_{ik})} \quad \text{i = 1, 2, …, n} \quad \textbf{(2.11)}$$

Η εξίσωση 2.9 αντιστοιχεί στην μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου ενώ οι 2.10, 2.11 είναι οι πραγματικές εξισώσεις ροής φορτίου ως προς P και Q.

2.2.1 Ταξινόμηση μεταβλητών των Εξισώσεων Ροής Φορτίου (ΕΡΦ)

Η συμπεριφορά του κάθε ζυγού ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τις τιμές που παίρνουν οι εξής έξι μεταβλητές: P_{Gi}, $Q_{Gi,}$ $|V_i|$, δ_i, P_{Di}, Q_{Di}. Οι μεταβλητές αυτές ταξινομούνται ανάλογα με το εάν μπορούν ή όχι, να τεθούν υπό τον έλεγχο του χειριστή ενός ΣΗΕ, στις εξής τρεις κατηγορίες:

1. Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής: Δεν γίνεται να τεθούν υπό τον έλεγχο του χειριστή του ΣΗΕ (P_{Di}, Q_{Di}).
2. Μεταβλητές ελέγχου: Βρίσκονται υπό τον έλεγχο του χειριστή του ΣΗΕ (P_{Gi}, Q_{Gi}).
3. Μεταβλητές κατάστασης: Αλλάζουν καθώς αλλάζουμε τις μεταβλητές ελέγχου (P_{Gi}, Q_{Gi}). Σε αυτήν τη κατηγορία ανήκουν τα μέτρα των τάσεων των ζυγών $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i.

2.2.2 Είδη Ζυγών

Τις μη ελέγξιμες μεταβλητές (P_{Di}, Q_{Di}) τις γνωρίζει ο χειριστής του ΣΗΕ καθώς προκύπτουν από ιστορικά στοιχεία και μετρήσεις. Επομένως, απομένουν τέσσερις άγνωστες μεταβλητές ανά ζυγό, συνολικά δηλαδή για n ζυγούς, 4n μεταβλητές. Όπως όμως αποδείχθηκε στο υποκεφάλαιο 2.2 οι εξισώσεις που υπάρχουν είναι 2 ανά ζυγό ή εάν έχουμε ένα σύστημα n ζυγών, 2n. Συνεπώς, ο μόνος τρόπος προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα αυτό είναι προκαθορίζοντας δύο από τις τέσσερις μεταβλητές, ανά ζυγό. Ανάλογα με ποιες από τις τιμές των P_{Gi}, $Q_{Gi,}$ $|V_i|$, δ_i θεωρούνται γνωστές, υπάρχουν τρία είδη ζυγών που παραθέτονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με όλα τα είδη των ζυγών

Είδος ζυγού	Γνωστές Ποσότητες	Άγνωστες Ποσότητες	Πλήθος Ζυγών
Ζυγός Αναφοράς	$\|V_i\|$=1 p.u. δ_i=0 P_{di}, Q_{di}	P_{gi}, Q_{gi}	1
Ζυγός Φορτίου	P_{gi}=0, Q_{gi}=0 P_{di}, Q_{di}	$\|V_i\|$, δ_i	85%
Ζυγός με ελεγχόμενη Τάση	P_{gi}, P_{di}, Q_{di}, $\|V_i\|$	Q_{gi}, δ_i	15%

2.2.3 Συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούν οι μεταβλητές των ΕΡΦ

1. Οι τιμές των τάσεων πρέπει να βρίσκονται ανάμεσα στο ±(5-10)% των ονομαστικών τους τιμών $|V_i|_{min} < |V_i| < |V_i|_{max}$.
2. Υπάρχει ένα άνω όριο για τη γωνία ισχύος και κατ' επέκταση μια μέγιστη τιμή πραγματικής ισχύος που δύναται να μεταφερθεί από τη Γραμμή Μεταφοράς $|\delta_i - \delta_j| < (\delta_i - \delta_j)_{max}$.
3. Η παραγωγή πραγματικής και άεργης ισχύος βρίσκεται ανάμεσα σε ορισμένα όρια δηλαδή: $P_{Gi,\ min} < P_{Gi} < P_{Gi,\ max}$ και $Q_{Gi,\ min} < Q_{Gi} < Q_{Gi,\ max}$. Οι ζυγοί φορτίου δεν έχουν παραγωγή πραγματικής και άεργης ισχύος $P_{Gi}=0$, $Q_{Gi}=0$.

2.3 Επίλυση των ΕΡΦ

Καθώς οι ΕΡΦ είναι μη γραμμικές εξισώσεις η επίλυσή τους βασίζεται στην επαναληπτική μέθοδο. Οι πλέον διαδεδομένοι επαναληπτικοί αλγόριθμοι είναι οι Gauss – Seidel και Newton – Raphson. Στη συνέχεια, δίνονται αναλυτικά τα βήματα για την υλοποίηση των αλγορίθμων αυτών.

Gauss – Seidel

Η μέθοδος Gauss – Seidel (1823) αποτελεί μία σχετικά απλή επαναληπτική μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου (ΕΡΦ). Αρχικά χρησιμοποιούταν ευρέως, αλλά στη συνέχεια λόγω της απόκλισης που έδιναν οι λύσεις της αντικαταστάθηκε από άλλες πιο ακριβείς μεθόδους όπως είναι η Newton – Raphson.

Στάδια Επίλυσης της μεθόδου Gauss – Seidel

1. Θέτουμε $|V_i|=1$ και $\delta_i=0$ για τον ζυγό αναφοράς αλλά και για τους υπόλοιπους ζυγούς.
2. Ορίζουμε τον πίνακα Y_{bus} που είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου.
3. Για τους ζυγούς φορτίου βρίσκουμε την τάση χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

   $$V_i^{(\nu+1)} = \frac{1}{Yii}\left(\frac{Pi - jQi}{Vi(\nu)*} - \sum_{k=1,k\neq i}^{n} Y_{ik} V_k^{(\nu)}\right)$$

   Ο υπολογισμός του αντίστοιχου V_i σταματάει όταν η διαφορά δύο διαδοχικών υπολογισμών του είναι μικρότερη της προκαθορισμένης ανοχής ε δηλαδή:

   $|V_i^{(\nu+1)} - V_i^{\nu}| < \varepsilon$ όπου $\varepsilon \leq 10^{-4}$.

4. Για τους ζυγούς με ελεγχόμενη τάση βρίσκουμε την τιμή του Q_i από την σχέση:

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

   Όπου $|V_i|^{(v)} = |V_i|_{spec}$ με $|V_i|_{spec}$ η προεπιλεγμένη τιμή της τάσης του ζυγού.

   Επίσης και εδώ ελέγχεται ο περιορισμός $|V_i^{(v+1)} - V_i^{v}| < \varepsilon$ όπου $\varepsilon \leq 10^{-4}$.

5. Τέλος υπολογίζονται οι άγνωστες ποσότητες του ζυγού αναφοράς (P_g, Q_g) μέσω των Εξισώσεων Ροής Φορτίου (σχέσεις 2.10, 2.11)

Newton – Raphson (N – R)

Η μέθοδος Newton – Raphson (1685) αποτελεί μία από τις καλύτερες επαναληπτικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου. Χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι και σήμερα για την επίλυση μεγάλων ενεργειακών συστημάτων, παρόλο που οι μαθηματικές πράξεις που απαιτούνται είναι πολύπλοκες. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής έναντι της μεθόδου Gauss – Seidel είναι ότι συγκλίνει εξίσου γρήγορα και για μικρά αλλά και για πολυπλοκότερα συστήματα .

Στάδια Επίλυσης της μεθόδου Newton – Raphson

1. Ορίζουμε τον πίνακα Y_{bus} που είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου.
2. Θεωρούμε γνωστές τις τάσεις στους ζυγούς των φορτίων καθώς και τις φασικές γωνίες των ζυγών με ελεγχόμενη τάση και των ζυγών φορτίων.
3. Υπολογίζουμε τα $P_{i,spec}$ και $Q_{i,spec}$ των ζυγών φορτίου καθώς και τα $P_{i,spec}$ των ζυγών με ελεγχόμενη τάση σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

   $P_{i,spec} = P_{gi} - P_{Li}$ (2.12)

   $Q_{i,spec} = Q_{gi} - Q_{Li}$ (2.13)

4. Βρίσκουμε τα P_i και Q_i των ζυγών φορτίου και P_i των ζυγών παραγωγής σύμφωνα με τις σχέσεις 2.10, 2.11
5. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα ΔP_i και ΔQ_i σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

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

   $\Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,} - Q_i^{(v)}$ για i=1, 2, 3, …, n

6. Ελέγχουμε όπως και στη Gauss-Seidel αν ισχύει: $|V_i^{v+1} - V_i^{v}| < \varepsilon$ όπου $\varepsilon \leq 10^{-4}$. Εάν η λύση μας είναι αποδεκτή τότε βρίσκουμε για το ζυγό αναφοράς τα P_i, Q_i σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.10, 2.11.

7. Εάν όμως η λύση μας δεν είναι αποδεκτή (λόγω παραβίασης του περιορισμού $|V_i^{(v+1)} - V_i^v| < \varepsilon$ τότε βρίσκουμε για το επόμενο ν τα νέα δ, |V| ως εξής:

$$\begin{pmatrix} \delta(\nu+1) \\ |V|(\nu+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta(\nu) \\ |V|(\nu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H(\nu) & \mathrm{N}(\nu) \\ \mathrm{M}(\nu) & L(\nu) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P(\nu) \\ \Delta Q(\nu) \end{pmatrix}$$

8. Επιστροφή στο 2^o βήμα και συνέχεια της ίδιας διαδικασίας έως ότου στο 7^o βήμα να μην παραβιάζεται ο περιορισμός $|V_i^{(v+1)} - V_i^v| < \varepsilon$. [2,7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Με τον όρο βραχυκύκλωμα ορίζουμε οποιαδήποτε μη προγραμματισμένη διαταραχή του δικτύου μας η οποία μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες όπως οι πτώσεις κεραυνών, τα ανθρώπινα λάθη, η καταστροφή των μονωτικών υλικών και οδηγεί στη σύνδεση μέρους του δικτύου μας με τη γη.

Στην περίπτωση που εμφανίζεται στο δίκτυο ένα βραχυκύκλωμα, παρατηρείται μεγάλη αύξηση του ρεύματος ενώ παράλληλα απότομη μείωση της τάσης. Η αλλαγή αυτή στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου, μπορεί να οδηγήσει σε καταστρεπτικά αποτελέσματα, καθώς υπάρχει περίπτωση καταστροφής του εξοπλισμού αλλά και απώλειας ανθρωπίνων ζωών εξαιτίας των υπερτάσεων που αναπτύσσονται. Με μία αξιόπιστη όμως σχεδίαση από το χειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τέτοια φαινόμενα τείνουν να εκλείψουν.

Υπάρχουν διάφορα είδη βραχυκυκλώματος τα οποία ενδέχεται να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος ανά πάσα στιγμή. Τα βραχυκυκλώματα αυτά είναι συνήθως μεταβατικής φύσεως και τις περισσότερες φορές απομονώνονται και εκκαθαρίζονται δίχως να χαθεί η τροφοδοσία, με το άνοιγμα όσο το δυνατό λιγότερων διακοπτών ισχύος.

Συνεχίζοντας, αξίζει να τονιστεί ότι τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα συμμετρικά και στα μη συμμετρικά. Τα βραχυκυκλώματα της $1^{ης}$ κατηγορίας αποτελούν τη δυσχερέστερη περίπτωση σφάλματος και αφορούν το 5% των βραχυκυκλωμάτων. Από την άλλη, τα μη συμμετρικά βραχυκυκλώματα καλύπτουν το υπόλοιπο 95%. Τα ποιο σημαντικά μη συμμετρικά βραχυκυκλώματα είναι τα εξής:

- Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς τη γη (Single-Line-to-Ground fault or SLG).
- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και τη γη (Double-Line-to-Ground fault or DLG).
- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο οποιοδήποτε φάσεων (Line-to-Line fault or LL). [2]

3.2 Συνέπειες σφαλμάτων

Σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν ποικίλα αίτια τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε ένα σφάλμα. Οι κυριότερες αιτίες αφορούν τις καιρικές συνθήκες καθώς και την αστοχία του υλικού. Τα σφάλματα που προκαλούνται εξαιτίας των αιτιών αυτών έχουν δυσμενείς συνέπειες για το αντίστοιχο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει ένα βραχυκύκλωμα στο δίκτυο.

- Βύθιση (πτώση) των τάσεων
- Διακοπή Τροφοδοσίας
- Μείωση παραγωγής από τις γεννήτριες
- Ταλαντώσεις
- Πάρα πολύ υψηλά ρεύματα
- Αποσυγχρονισμός των γεννητριών

3.3 Αντιμετώπιση Σφαλμάτων

Όσο σημαντική είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές τόσο σημαντική είναι και η προστασία του δικτύου μας από τυχόν μελλοντικές βλάβες που ενδέχεται να προκύψουν. Η προστασία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι ένας σημαντικός τομέας ο οποίος ειδικεύεται στην έγκαιρη αλλά και αποτελεσματική αντιμετώπιση ενός βραχυκυκλώματος. Οι δύο πιο διαδεδομένοι τρόποι αντιμετώπισης ενός σφάλματος είναι οι εξής:

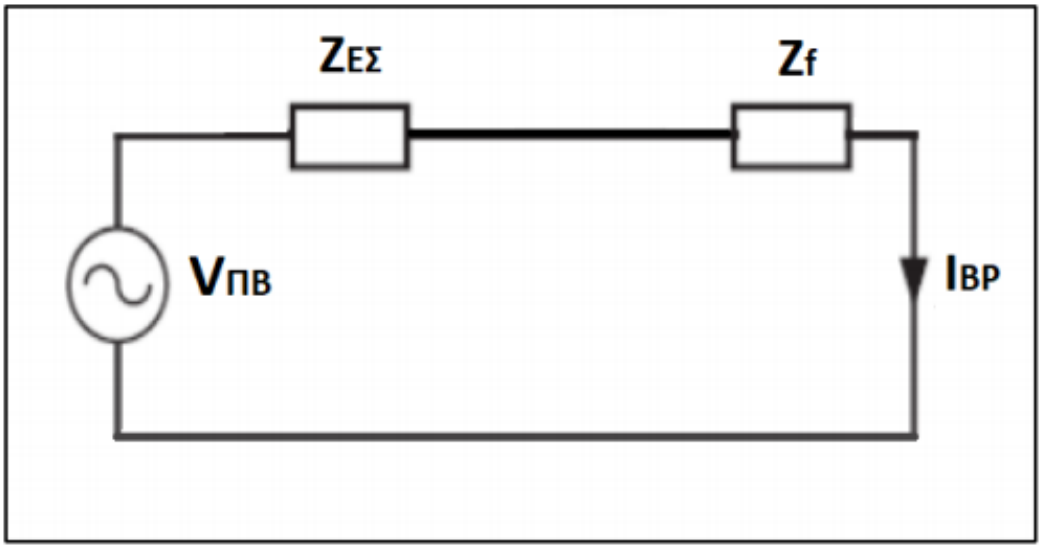
1. Μέσω κατάλληλου σχεδιασμού του δικτύου μας.

2. Εξυγίανση του τμήματος του δικτύου μας μέσω διακοπτικών συσκευών (breakers) οι οποίοι αποκόπτουν το τμήμα στο οποίο συνέβη το σφάλμα μέχρι την αποκατάστασή του. [2]

3.4 Ανάλυση Συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος

Στο Σχήμα 3.1 εμφανίζεται ένα συμμετρικό βραχυκύκλωμα όπου: $Z_{ΕΣ}$ είναι η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin του κυκλώματος, Z_f η αντίσταση σφάλματος, η οποία εάν ισούται με το 0 (Z_f=0) τότε το βραχυκύκλωμα ονομάζεται στερεό, I_{BP} το ρεύμα βραχυκύκλωσης το

οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το ρεύμα κανονικής λειτουργίας και $V_{ΠΒ}$ η προσφαλματική τάση στο σημείο του βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 3.1: Συμμετρικό βραχυκύκλωμα

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ωhm στο Σχήμα 3.1 προκύπτει: $V_{ΠΒ}=I_{ΒΡ}(Z_{ΕΣ}+Z_f)$. (3.1)

Επιλύνοντας ως προς $\mathbf{I_{ΒΡ}}$ προκύπτει ότι $\mathbf{I_{ΒΡ}}=\frac{\text{VΠΒ}}{ZE\Sigma+Zf}$. (3.2)

Στο στερεό βραχυκύκλωμα Z_f=0 και κατ' επέκταση: $\mathbf{I_{ΒΡ}}=\frac{\text{VΠΒ}}{ZE\Sigma}$. (3.3)

Επίσης στο στερεό βραχυκύκλωμα η τάση $V_{f,}$ εξαιτίας της απουσίας αντίστασης σφάλματος και της σύνδεσης με τη γη, ισούται με 0 (V_f=0).

Έχοντας υπολογίσει τα ρεύματα και τις τάσεις βραχυκύκλωσης για τη μία φάση, επεκτείνουμε την ανάλυσή μας στο τριφασικό σύστημα έχοντας υπόψη ότι οι τιμές των μέτρων των ρευμάτων και των τάσεων είναι ίδιες, ενώ όσον αφορά τις φάσεις διαφέρουν κατά 120^o.

3.5 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα

3.5.1 Συμμετρικές Συνιστώσες

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα πέραν των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων υπάρχουν και τα μη συμμετρικά βραχυκυκλώματα. Για την ανάλυση των μη συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων χρησιμοποιούμε μία διαφορετική μέθοδο, αυτή των συμμετρικών

συνιστωσών. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή κάθε μη συμμετρικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε τρία συμμετρικά μεταξύ τους δίκτυα τα λεγόμενα ακολουθιακά δίκτυα. Υπάρχουν τρία είδη ακολουθιακών δικτύων τα οποία είναι τα εξής:

1. Δίκτυο Θετικής Ακολουθίας (Positive Sequence Network).
2. Δίκτυο Αρνητικής Ακολουθίας (Negative Sequence Network).
3. Δίκτυο Μηδενικής Ακολουθίας (Zero Sequence Network).

Σημείωση: για ευκολία έστω ότι τα στοιχεία της μηδενικής ακολουθίας τα συμβολίζω με δείκτη 0 πχ I_0 της θετικής ακολουθίας με δείκτη 1 πχ I_1 και της αρνητικής ακολουθίας με δείκτη 2 πχ I_2.

- Στο Δίκτυο της θετικής ακολουθίας τα τρία διανύσματα που την απαρτίζουν έχουν το ίδιο μέτρο ενώ οι γωνίες τους διαφέρουν κατά 120^o (a, b, c ακολουθία).
- Στο Δίκτυο της αρνητικής ακολουθίας τα τρία διανύσματα που την απαρτίζουν έχουν το ίδιο μέτρο ενώ οι γωνίες τους διαφέρουν κατά 120^o (a, c, b ακολουθία).
- Στο Δίκτυο της μηδενικής ακολουθίας τα διανύσματα a, b, c έχουν το ίδιο μέτρο και είναι και συμφασικά.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται τα τρία ακολουθιακά δίκτυα με τα οποία μπορούμε να αναπαραστήσουμε ένα μη συμμετρικό βραχυκύκλωμα καθώς και τα αθροίσματα των συμμετρικών συνιστωσών:

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.2 τα αρχικά ασύμμετρα διανύσματα a, b, c ισούνται με το άθροισμα των αντίστοιχων συνιστωσών τους δηλαδή:

$$I_a = I_{a+} + I_{a-} + I_{ao}$$

$$I_b = I_{b+} + I_{b-} + I_{bo} \qquad (3.4)$$

$$I_c = I_{c+} + I_{c-} + I_{co}$$

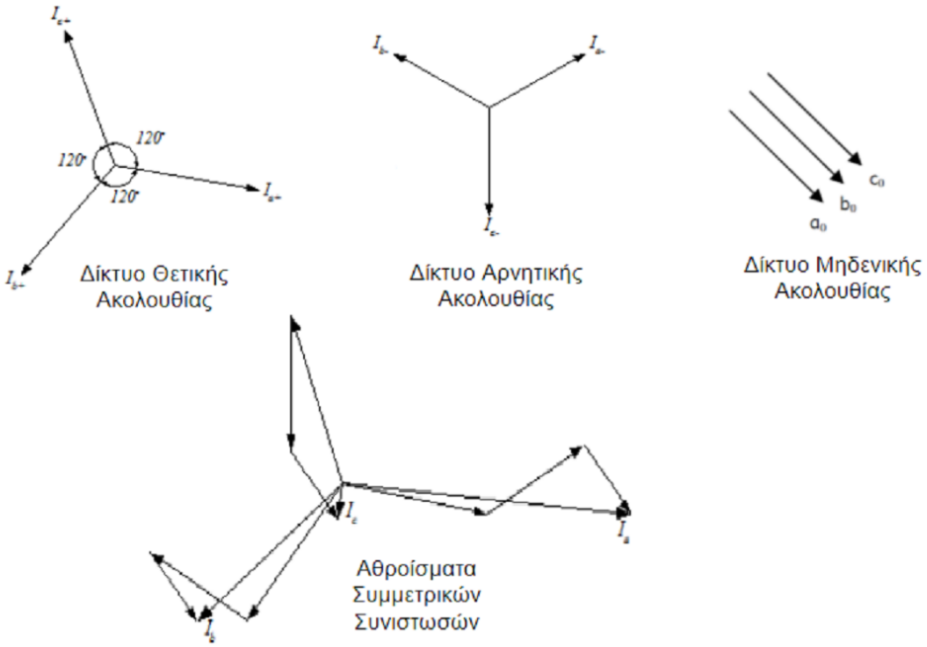
Επίσης, για διευκόλυνση των πράξεων χρησιμοποιείται το σύμβολο:

$$\alpha = e^{120^0 j} = \cos(120^o) + j\sin(120^o) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0{,}5 + 0{,}866j \quad (3.5)$$

Ομοίως προκύπτει:

$$\alpha^2 = e^{240^0 j} = e^{-120^0 j} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0{,}5 - 0{,}866j \quad (3.6)$$

$$\alpha^3 = 1 \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση ακολουθιακών δικτύων

Επίσης, για διευκόλυνση των πράξεων χρησιμοποιείται το σύμβολο:

$$\alpha = e^{120^0 j} = \cos(120^o) + j\sin(120^o) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0{,}5 + 0{,}866j \quad (3.5)$$

Ομοίως προκύπτει:

$$\alpha^2 = e^{240^0 j} = e^{-120^0 j} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0{,}5 - 0{,}866j \quad (3.6)$$

$$\alpha^3 = 1 \quad (3.7)$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.2 προκύπτουν οι εξής σχέσεις μεταξύ των συμμετρικών συνιστωσών:

$$I_{b+} = \alpha^2 I_{a+} \qquad I_{c+} = \alpha I_{a+}$$

$$I_{b-} = \alpha I_{a-} \qquad I_{c-} = \alpha^2 I_{a-} \tag{3.8}$$

$$I_{bo} = I_{co} = I_{ao}$$

Στη συνέχεια κάνοντας αντικατάσταση των σχέσεων (3.8) στις σχέσεις (3.4) προκύπτει:

$$I_a = I_{ao} + I_{a+} + I_{a-}$$

$$I_b = I_{ao} + \alpha^2 I_{a+} + \alpha I_{a-} \tag{3.9}$$

$$I_c = I_{ao} + \alpha I_{a+} + \alpha^2 I_{a-}$$

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των σχέσεων (3.9) δημιουργείται ο εξής πίνακας Τ:

$$\mathrm{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \text{ με } \mathrm{T}^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Γράφοντας την εξίσωση (3.9) με τη βοήθεια των πινάκων Τ και T^{-1} προκύπτουν οι σχέσεις (3.11) και (3.12) με βάση τις οποίες υπολογίζονται τα ασύμμετρα τριφασικά διανύσματα όταν είναι γνωστές οι συμμετρικές τους συνιστώσες και αντίστροφα, οι συμμετρικές συνιστώσες όταν είναι γνωστά τα ασύμμετρα διανύσματα:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{\alpha 0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

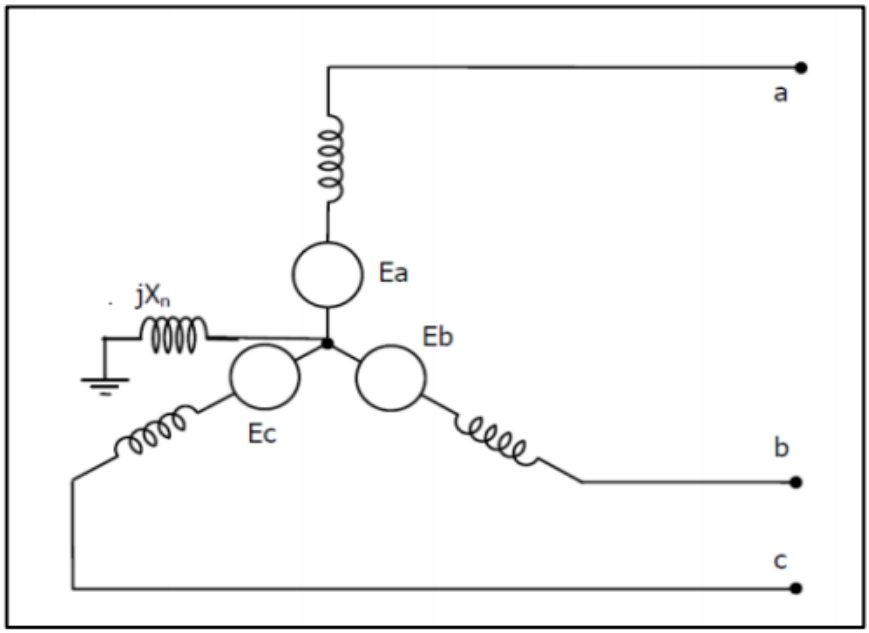
$$\begin{bmatrix} I_{\alpha 0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Παρατηρήσεις:

1. Εξαιτίας της συμμετρίας των συνιστωσών, χρειάζεται η γνώση μόνο μίας συνιστώσας για τον υπολογισμό των υπολοίπων.
2. Οι ίδιες σχέσεις που αποδείχθηκαν προηγουμένως, ισχύουν και μεταξύ των φασικών και ακολουθιακών τάσεων ενός βραχυκυκλώματος.

3.5.2 Ακολουθιακά δίκτυα Γεννητριών

Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται μία αφόρτιστη γεννήτρια όπου a, b, c οι τρεις φάσεις E_a, E_b, E_c οι πηγές κάθε φάσεις και jX_n η αντίδραση του ουδετέρου.

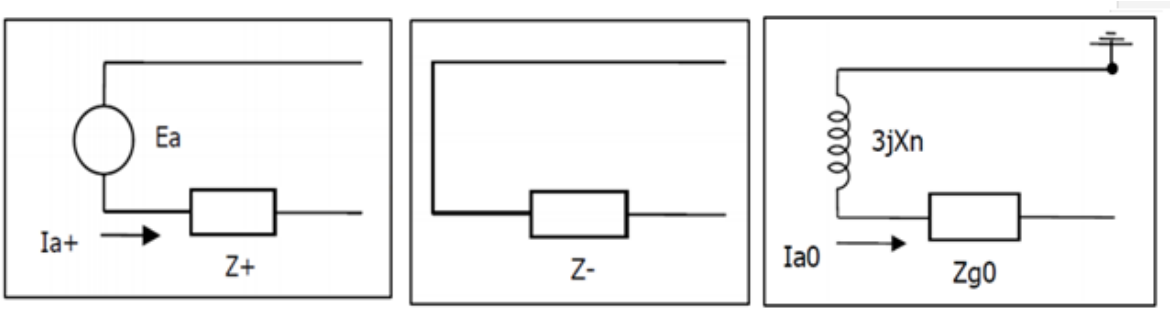


Σχήμα 3.3: Αφόρτιστη Γεννήτρια

Οι γεννήτριες δεν αναπαρίστανται με τον ίδιο τρόπο στα ακολουθιακά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα:

1. Μόνο στο δίκτυο θετικής ακολουθίας σχεδιάζουμε την πηγή τάσης.
2. Εξ' αιτίας του γεγονότος ότι οι πηγές είναι ενεργά στοιχεία διαφορετική αντίδραση σχεδιάζεται τόσο στο δίκτυο θετικής όσο και στο δίκτυο αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.
3. Επιλύνοντας την εξίσωση 3.12 ως προς $I_{αο}$ προκύπτει: $\mathrm{I}_{\alpha o} = \frac{1}{3}(\mathrm{I}_a + \mathrm{I}_b + \mathrm{I}_c) = \frac{1}{3} I_n = \frac{1}{3} I_{\alpha o}$. Το ρεύμα του ουδετέρου δηλαδή είναι τρεις φορές μεγαλύτερο από το $I_{αο}$ και κατ' επέκταση η πτώση τάσης που αναπτύσσεται ισούται με $3jX_n I_{\alpha o}$. Έτσι αποδεικνύεται ότι στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας λαμβάνουμε υπόψη και το τριπλάσιο της αντίδρασης του ουδετέρου $3jX_n$.

Η σύνοψη των παραδοχών αυτών συνοψίζεται στο Σχήμα 3.4:



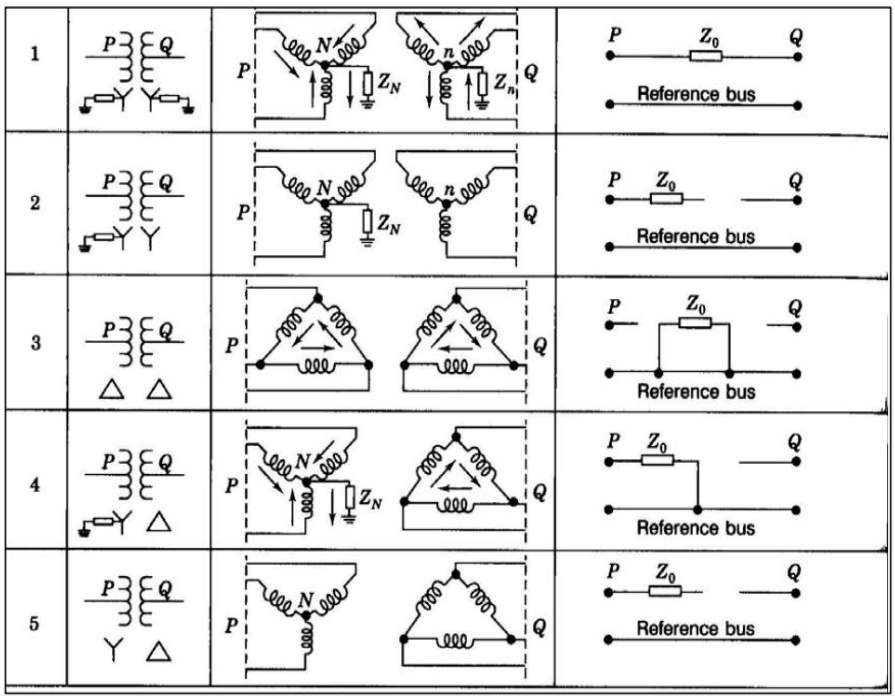
Σχήμα 3.4: Κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

3.5.3 Ακολουθιακά Δίκτυα Μετασχηματιστών

Οι σύνθετες αντιστάσεις ενός Μετασχηματιστή στη μόνιμη κατάσταση ταυτίζεται με τη σύνθετη αντίσταση της θετικής και αρνητικής του ακολουθίας δηλαδή ($Z_1=Z_2=Z_{\text{μόνιμης κατάστασης}}$).

Όσον αφορά τη μηδενική ακολουθία ενός Μετασχηματιστή το ακολουθιακό ρεύμα I_o ρέει μέσα από τη γη. Σε αυτή τη περίπτωση μας ενδιαφέρει ο τρόπος που συνδέονται τα τυλίγματα ενός Μετασχηματιστή εάν δηλαδή συνδέονται σε αστέρα ή σε τρίγωνο και εάν ο ουδέτερος αγωγός του αστέρα συνδέεται με κάποια γείωση (διαρρέεται από το ακολουθιακό ρεύμα I_o) ή όχι (δεν διαρρέεται από το ακολουθιακό ρεύμα I_o).

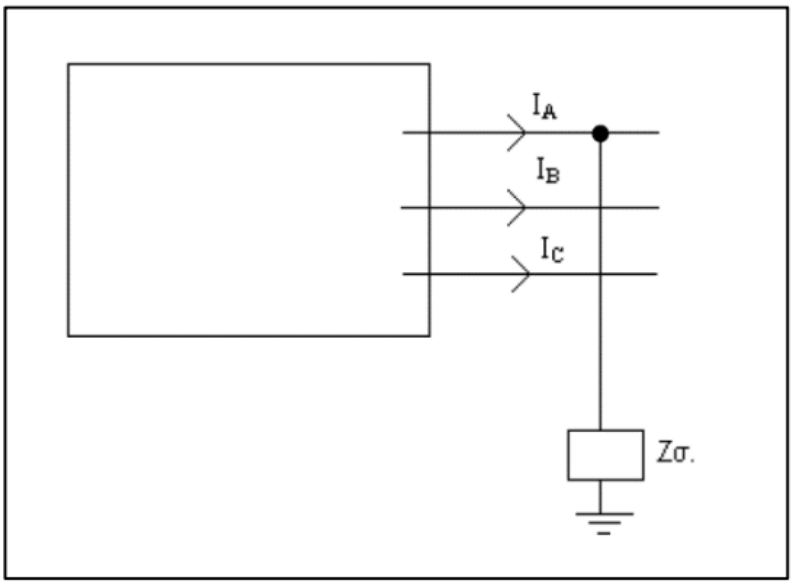
Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται όλες οι περιπτώσεις Μετασχηματιστών καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αναπαρίστανται στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας. [2,7]



Σχήμα 3.5: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας Μετασχηματιστών

3.5.4 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς τη γη (SLG)

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.6 μόνο η φάση Α συμμετέχει στο βραχυκύκλωμα. Επομένως τα ρεύματα σφάλματος για τις φάσεις Β, C είναι μηδενικά και οι φάσεις αυτές παραμένουν υγιείς και μετά το σφάλμα. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι οι αντιστάσεις σφάλματος των φάσεων Β, C διατηρούνται και για αυτό το λόγο προκύπτει ότι $Z_{\sigma\ SLG}=3*Z\sigma$. (3.13)



Σχήμα 3.6: Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς τη γη μέσω σύνθετης αντίστασης Z_σ

Συνεχίζοντας, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.7 τα τρία ακολουθιακά δίκτυα συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και με την αντίσταση $3Z_\sigma$. Έτσι προκύπτει ότι:

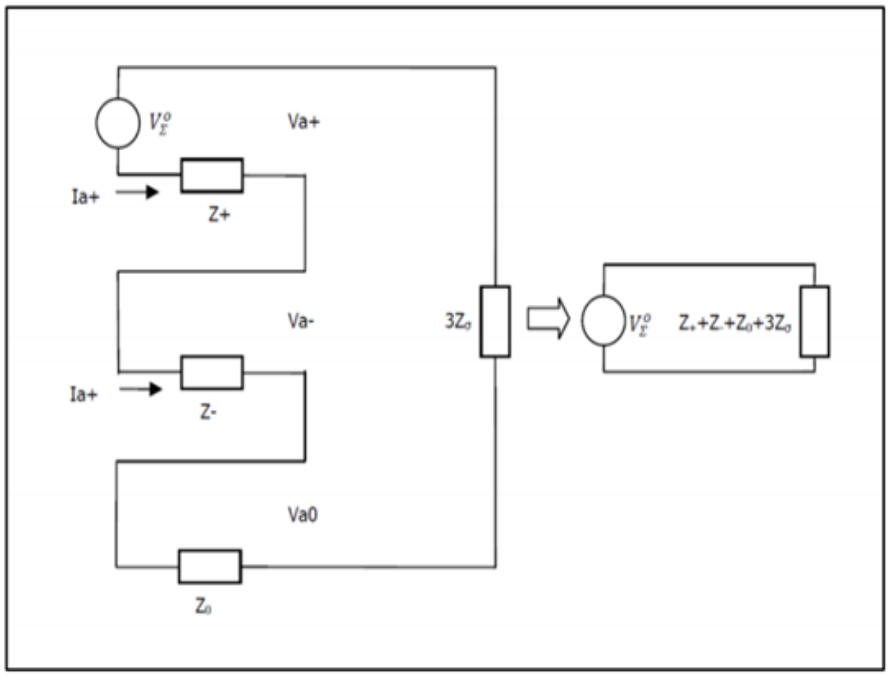
$$I_\alpha^{+}=I_\alpha^{-}=I_\alpha^{o}=\frac{V_\Sigma}{Z_1+Z_2+Z_O+3Z_\sigma} \quad (3.14)$$

$$V_1=V_\Sigma-I_\alpha^{+}Z_1 \quad (3.15)$$

$$V_2=-I_a^{-}Z_2 \quad (3.16)$$

$$V_o=-I_a^{o}Z_o \quad (3.17)$$

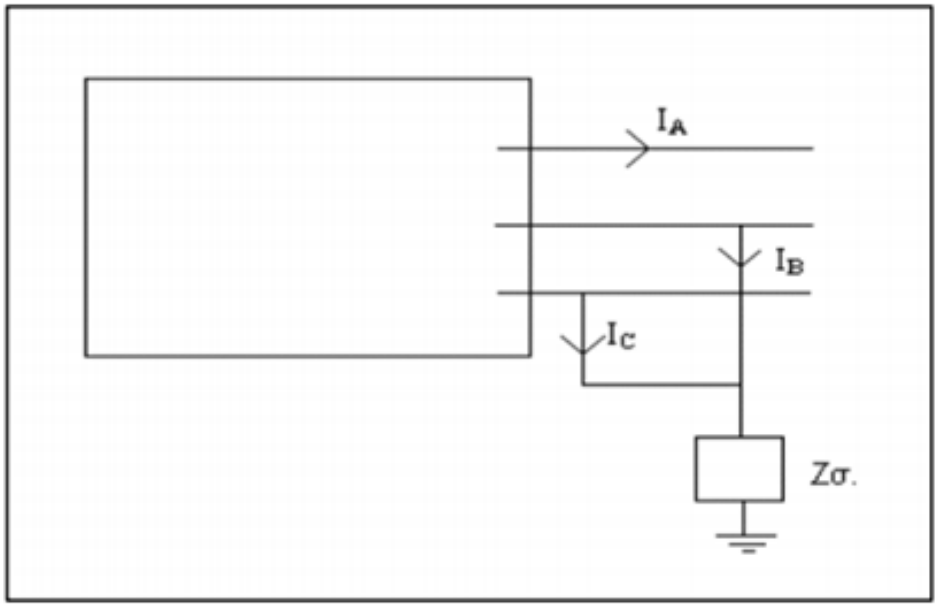
Με τον τρόπο αυτό υπολογίζω τα ακολουθιακά ρεύματα και τάσεις όταν συμβαίνει ένα SLG βραχυκύκλωμα. Στη συνέχεια με βάση τις σχέσεις 3.11 και 3.12 υπολογίζω τα φασικά ρεύματα και τάσεις.



Σχήμα 3.7: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για SLG βραχυκύκλωμα

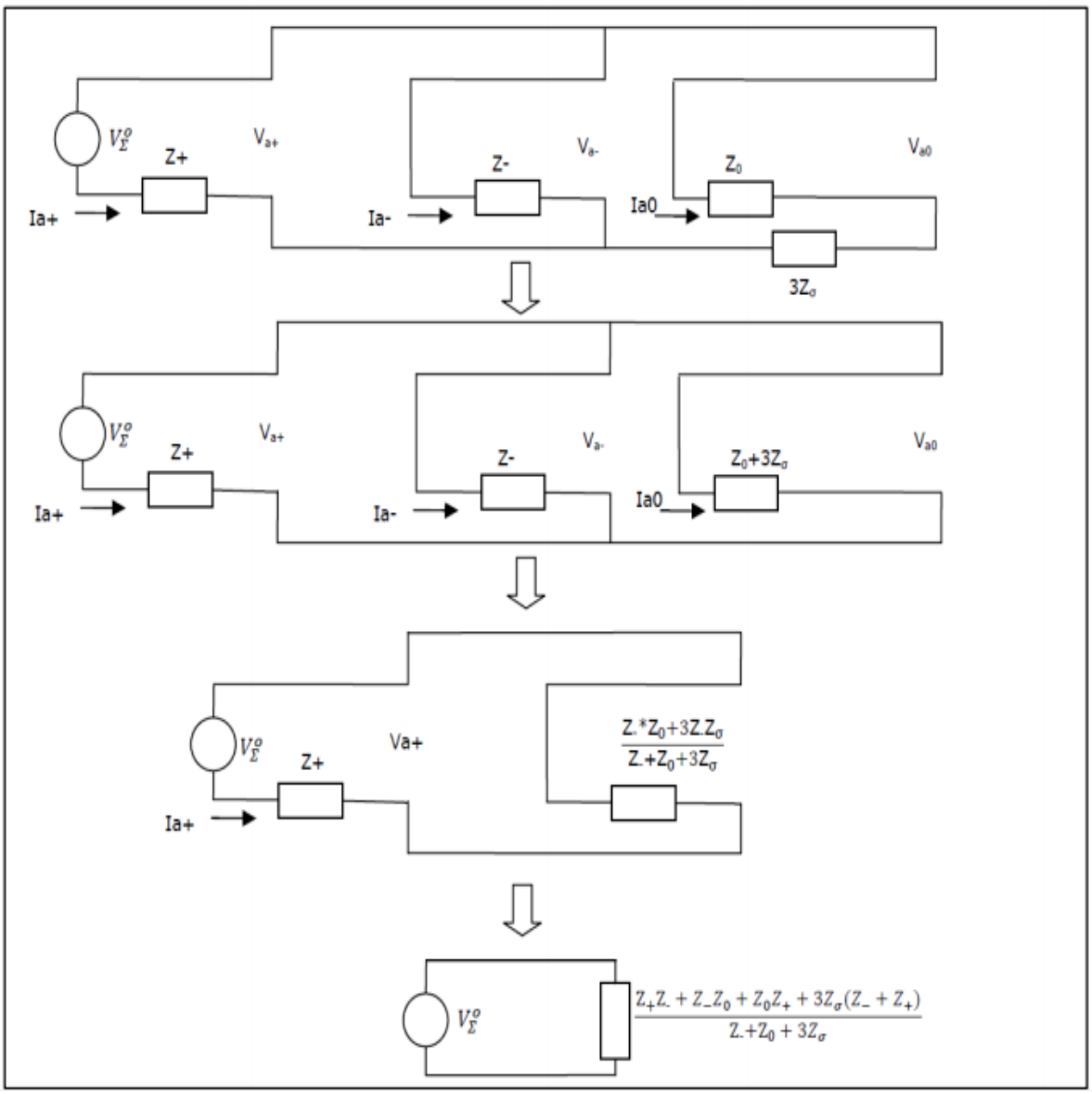
3.5.5 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και τη γη Double Line to Ground (DLG)

Σε αυτού του είδους το σφάλμα (Σχήμα 3.8) δύο οποιεσδήποτε φάσεις ενώνονται μεταξύ τους και με τη γη, έστω οι B, C. Το ρεύμα σφάλματος που διαπερνά την σύνθετη αντίσταση $3*Z_\sigma$ ισούται με $I_\sigma = I_B + I_C$. Όπως είναι εύλογο μία φάση παραμένει υγιής και έχει μηδενικό ρεύμα σφάλματος.



Σχήμα 3.8: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και της γης μέσω σύνθετης αντίστασης Z_f

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.9 τα τρία ακολουθιακά δίκτυα συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους και το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας σε σειρά με την αντίσταση $3Z_σ$.



Σχήμα 3.9: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για DLG βραχυκύκλωμα

Έτσι προκύπτει ότι:

$Z_{ολικο}$=[(Z_o+3$Z_σ$) // Z_2]+Z_1 (Το άθροισμα των Z_o και 3$Z_σ$ είναι παράλληλο με τη Z_2 και όλο αυτό σε σειρά με τη Z_1) (3.18)

$$I_α^1 = \frac{Vσ}{Zολικό}$$ (3.19)

$V_a^1 = V_a^2$ (3.20)

$I_\alpha^2 = - -\frac{V\alpha 2}{Z2}$ (3.21)

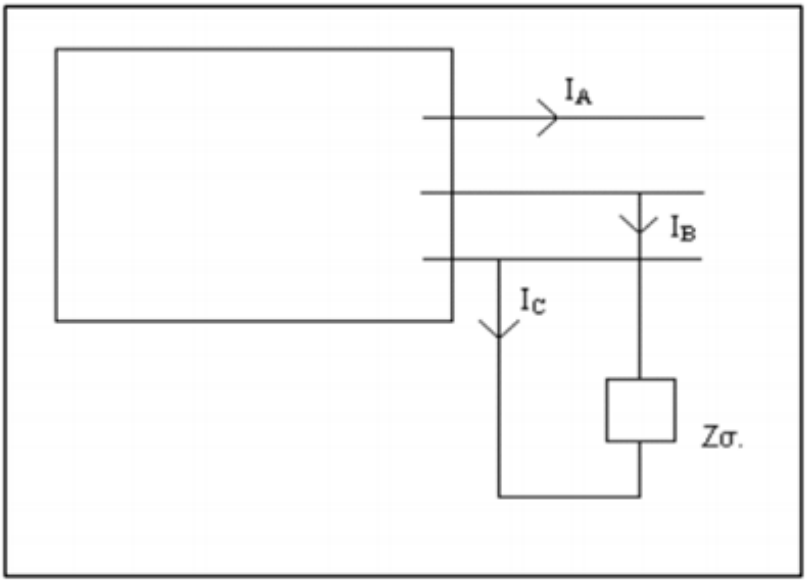
Νόμο ρευμάτων Kirchhoff: $I_\alpha^o = - I_\alpha^1 - I_\alpha^2$ (3.22)

$V_a^o = - I_a^o \, Z^o$ (3.23)

Με τον τρόπο αυτό υπολογίζω τα ακολουθιακά ρεύματα και τάσεις όταν συμβαίνει ένα DLG βραχυκύκλωμα. Στη συνέχεια με βάση τις σχέσεις 3.11 και 3.12 υπολογίζω τα φασικά ρεύματα και τάσεις. [2,5]

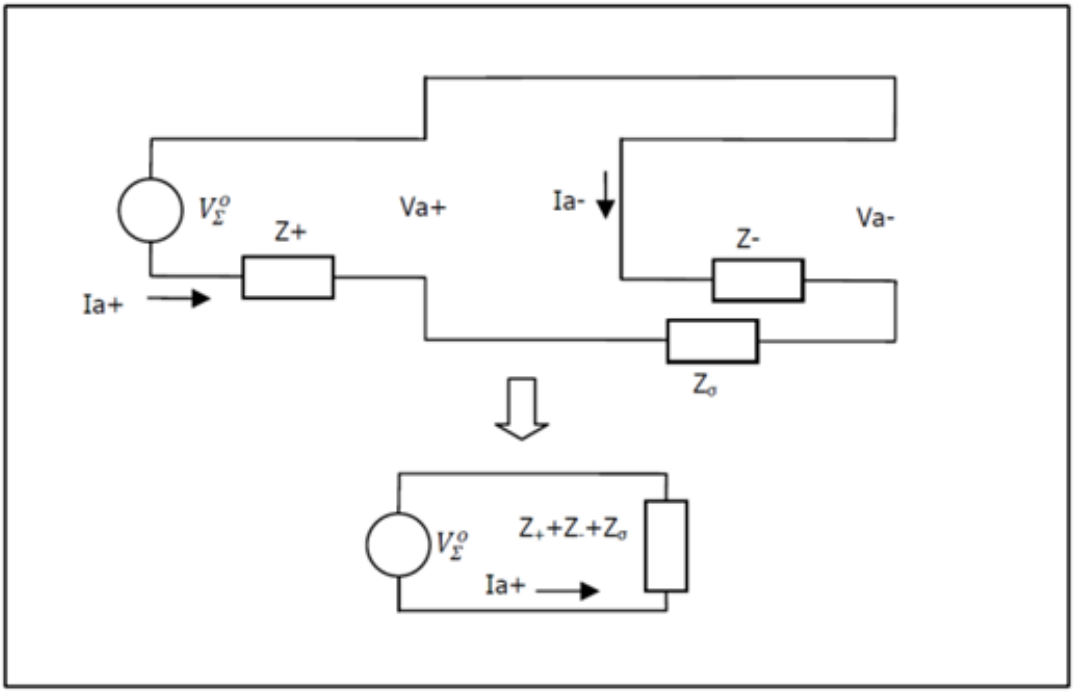
3.5.6 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων Line to Line (LL)

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.10, σε αυτού του είδους το σφάλμα δύο οποιεσδήποτε φάσεις ενώνονται μεταξύ τους, έστω οι B, C. Το ρεύμα σφάλματος που διαπερνά την σύνθετη αντίσταση Z_σ ισούται με $I_\sigma = I_B = -I_C$. Όπως είναι εύλογο μία φάση παραμένει υγιής και έχει μηδενικό ρεύμα σφάλματος.



Σχήμα 3.10: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων μέσω σύνθετης αντίστασης Z_f

Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων (LL) το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας δεν συμμετέχει στο σφάλμα. Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται η σύνδεση των δικτύων θετικής και αρνητικής ακολουθίας όταν συμβαίνει ένα σφάλμα τύπου LL.



Σχήμα 3.11: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για LL βραχυκύκλωμα

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.11 το δίκτυο θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους έχοντας ενδιάμεσά τους τοποθετημένη την αντίσταση σφάλματος Z_σ ενώ το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας δεν συμμετέχει στο σφάλμα. Έτσι προκύπτει ότι:

$$Z_{ολικό}=Z_1+Z_2+Z_\sigma \quad (3.24)$$

$$I_\alpha^{\,1}=\frac{Vσ}{Zολικό} \quad (3.25)$$

$$I_\alpha^{\,2}=-I_\alpha^{\,1} \quad (3.26)$$

$$I_\alpha^{\,o}=0 \quad (3.27)$$

$$V_a^{\,1}=V_\sigma-I_\alpha^{\,1}Z_1 \quad (3.28)$$

$$V_a^{\,2}=-I_\alpha^{\,2}Z_2 \quad (3.29)$$

$$V_a^{\,o}=0 \quad (3.30)$$

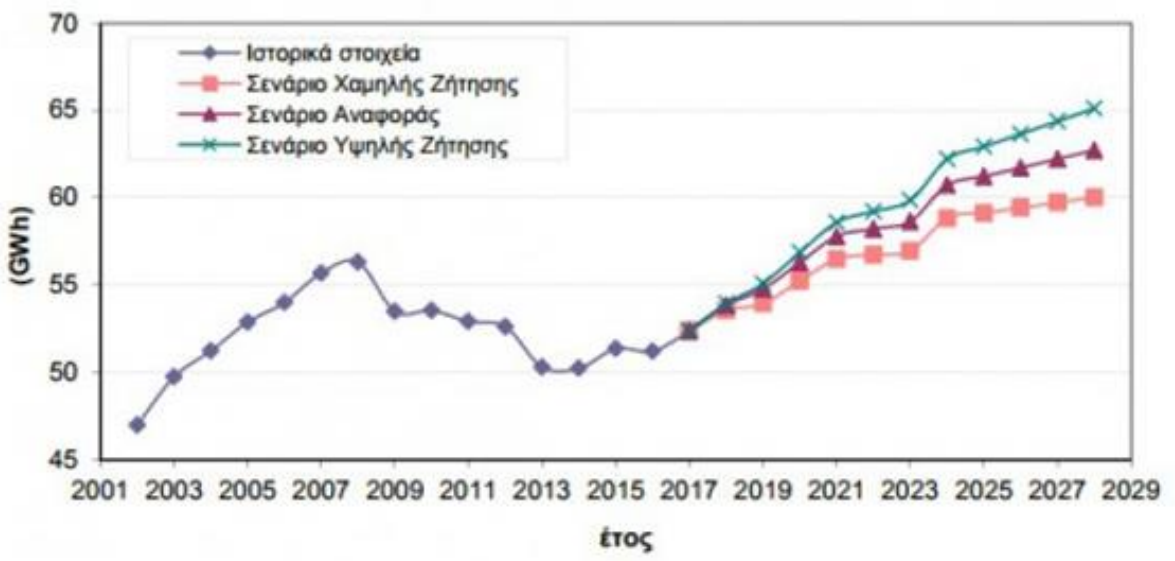
Με τον τρόπο αυτό υπολογίζω τα ακολουθιακά ρεύματα και τάσεις όταν συμβαίνει ένα LL βραχυκύκλωμα. Στη συνέχεια με βάση τις σχέσεις 3.11 και 3.12 υπολογίζω τα φασικά ρεύματα και τάσεις.[2,5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία 20 χρόνια έχει παρατηρηθεί στη χώρα μας μια αλματώδη αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως του 76%. Ποιο συγκεκριμένα, τόσο στην χώρα μας όσο και στις υπόλοιπες ανεπτυγμένες χώρες κάθε χρόνο η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται κατά 1,5%. Στις χώρες δε της Ασίας και της Αφρικής η κατανάλωση αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη καθώς περίπου 1,2 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση στον ηλεκτρισμό. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ζήτησης της ενέργειας της Ελλάδος καθώς και ορισμένες μελλοντικές προβλέψεις έως το έτος 2030.



Σχήμα 4.1 Η εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας στην Ελλάδα

Για να καλυφθεί επομένως αυτή η ραγδαία αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας έγιναν περισσότερο πολύπλοκα και μεγαλύτερα σε μέγεθος. Ένα σημερινό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας λόγω αυτής της πολυπλοκότητας που το διέπει πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα.

Δυστυχώς μέχρι και σήμερα είναι αδύνατη η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η αδυναμία αυτή καθώς και οι ημερήσιες μεταβολές που προκύπτουν στο φορτίο, οι διαταραχές που οφείλονται στη πτώση κεραυνών και τα συμμετρικά και ασύμμετρα βραχυκυκλώματα οδηγούν στην συνεχή μεταβολή της παραγωγής με βάση το εκάστοτε φορτίο.

Η ικανότητα αυτή του δικτύου να διατηρεί την τάση του και τη συχνότητά του στις ονομαστικές τιμές (συγχρονισμός) μετά από τις παραπάνω διαταραχές ονομάζεται Ευστάθεια ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (Power System Stability).

Οι διαταραχές αυτές μπορεί να είναι μικρές και αργές, δηλαδή η χρονική τους διάρκεια να είναι μεγάλη συγκρίνοντάς την με τις σταθερές του πεδίου αλλά και των συστημάτων ελέγχου, αλλά και απότομες με μεγάλη διάρκεια. Εάν συμβεί μία ξαφνική διαταραχή τότε καταστρέφεται η ισορροπία μεταξύ της ισχύς εισόδου-εξόδου των ηλεκτρικών μηχανών πράγμα που προκαλεί μηχανικές ταλαντώσεις στο ρότορα της μηχανής και ενδεχομένως αποσυγχρονισμό και αστάθεια.

Όσον αφορά τις μικρότερες διαταραχές, χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι η μεταβολή του φορτίου των καταναλωτών. Το δίκτυο στην περίπτωση αυτή είναι ικανό να αυτορυθμιστεί στις νέες απαιτήσεις και να τροφοδοτήσει τους καταναλωτές με το νέο επιθυμητό φορτίο. [3]

4.1.2 Κατηγορίες ευστάθειας ενός ΣΗΕ

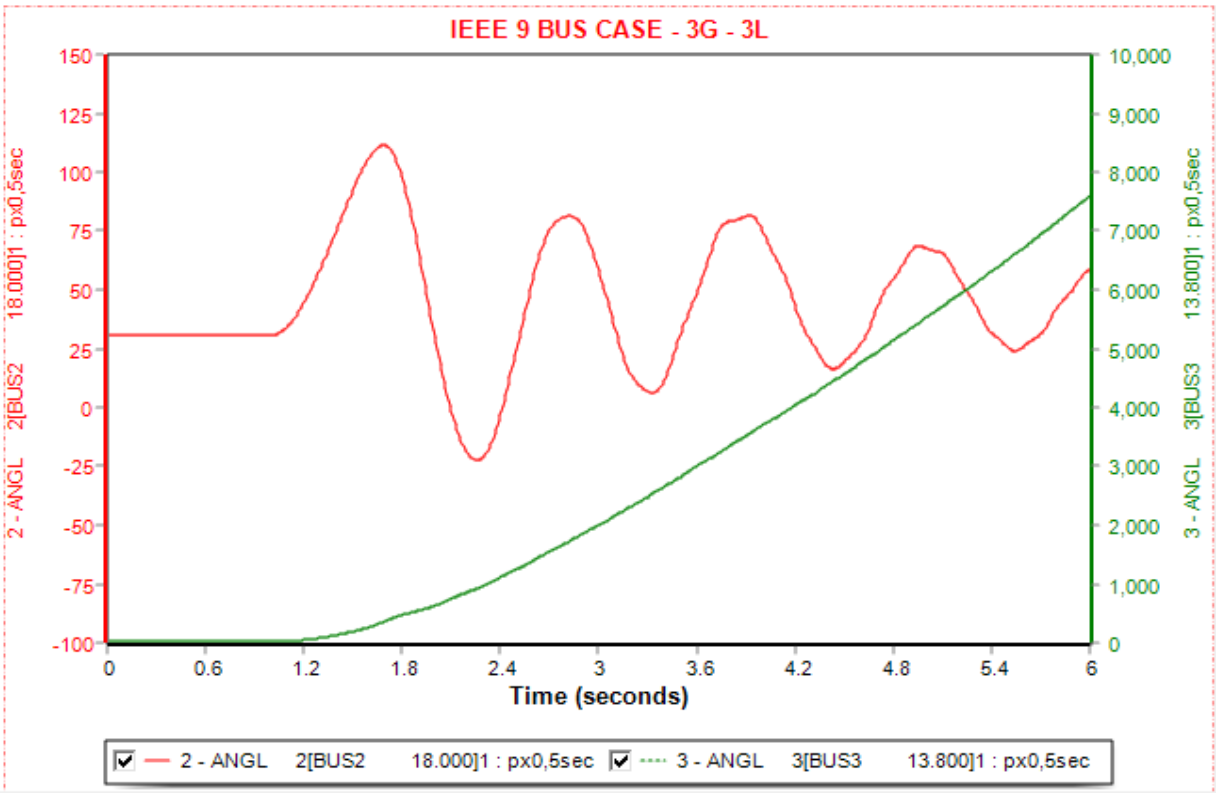
Η Ευστάθεια ενός ΣΗΕ κατηγοριοποιείται ανάλογα με το είδος της σε ευστάθεια γωνίας δρομέα, ευστάθεια τάσης και ευστάθεια συχνότητας. Επίσης ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της διαταραχής μπορεί να χαρακτηριστεί ως βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη.

- Οι γεννήτριες ενός δικτύου οι οποίες διατηρούν την ονομαστική τους ταχύτητα σταθερή ακόμα και μετά από μία διαταραχή (πχ αύξηση ενός φορτίου) χαρακτηρίζονται από την ευστάθεια της γωνίας του δρομέα τους. Πιο συγκεκριμένα μετά από μία διαταραχή οι γωνίες των μηχανών αυτών

πραγματοποιούν μηχανικές ταλαντώσεις οι οποίες εάν δεν είναι αποσβυνόμενες μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα σε αστάθεια που είναι μια κατάσταση μη επιθυμητή.

Αυτό το είδος της ευστάθειας χωρίζεται σε δύο κατηγορίες με βάση τη σοβαρότητα της διαταραχής α) Για σοβαρές διαταραχές όπως τα βραχυκυκλώματα (συμμετρικά είτε ασύμμετρα) ονομάζεται μεταβατική ευστάθεια, που είναι και αυτή που θα μελετήσουμε στη συνέχεια. β) Για μικρότερες και πιο ασήμαντες μεταβολές ονομάζεται ευστάθεια μικρών διαταραχών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής είναι οι μεταβολές στο φορτίο των καταναλωτών.

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται ένα σφάλμα το οποίο δε μπόρεσε να το διαχειριστεί το σύστημα και οδηγήθηκε σε αστάθεια καθώς υπάρχει σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος της γεννήτριας 3.

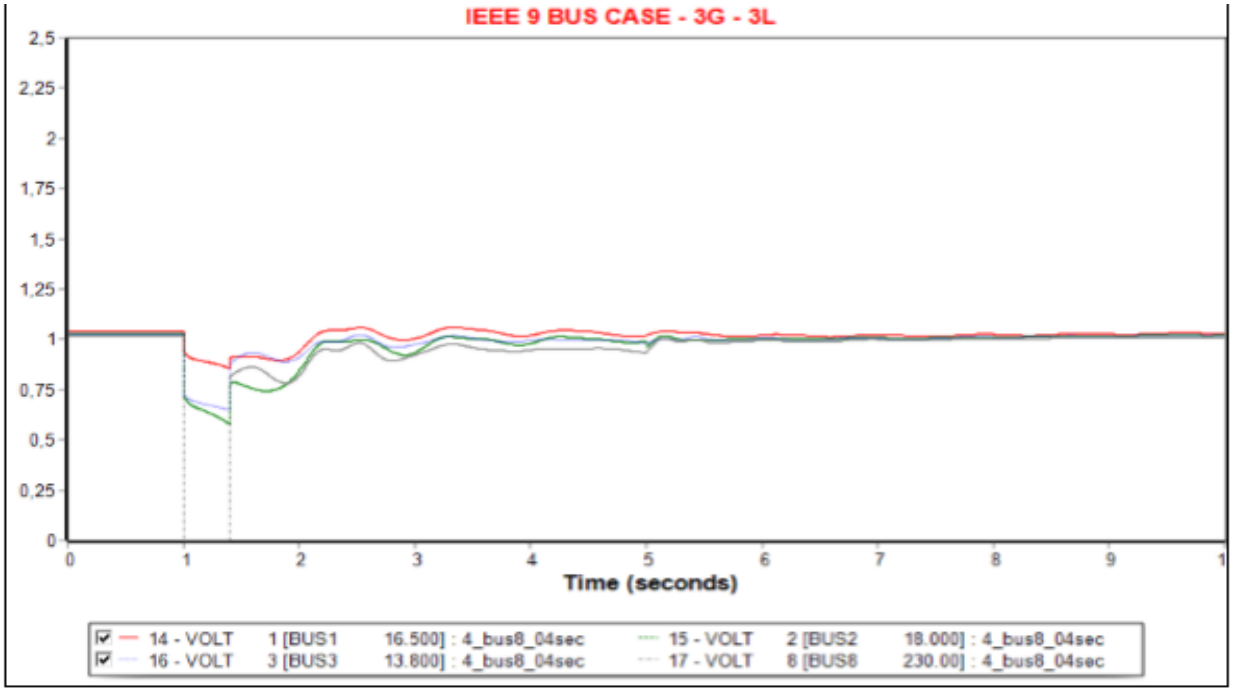


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα δ-t μετά από αστάθεια

- Όσον αφορά την ευστάθεια τάσης είναι η ικανότητα του δικτύου να διατηρεί τις τάσεις των ζυγών του στα επιτρεπτά όρια όχι μόνο κατά την μόνιμη λειτουργία αλλά και όταν εμφανίζεται διαταραχή στο δίκτυο. Ενδεικτικά οι επιτρεπτές p.u. τιμές της τάσης ανέρχονται σε ποσοστό 5%. Ακόμα αξίζει να τονιστεί ότι, κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής η πραγματική τιμή της ισχύος της γεννήτριας μειώνεται απότομα ενώ η άεργος αυξάνεται πράγμα που οδηγεί και στη πτώση της τάσης του ζυγού.

Όπως και στη περίπτωση της ευστάθειας γωνίας δρομέα έτσι και εδώ υπάρχουν δύο είδη ευστάθειας: α) τάσεις μεγάλων διαταραχών όπως είναι οι πτώσεις κεραυνών και τα βραχυκυκλώματα. β) μικρών διαταραχών όπως είναι μεταβολές στην παραγωγή.

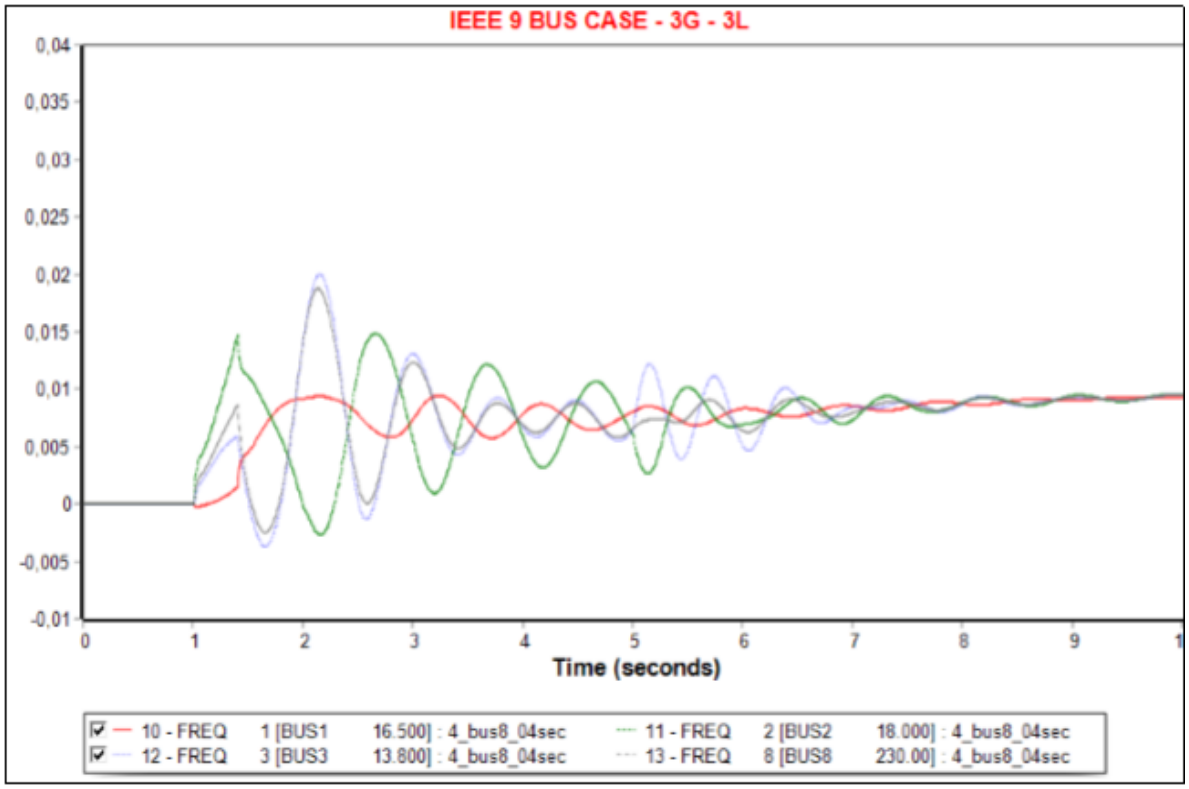
Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η μεταβολή της τάσης του δικτύου πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το βραχυκύκλωμα. Όπως αναφέραμε και στη θεωρία η τελική τιμή της τάσης ενός ευσταθούς συστήματος είναι πολύ κοντά στη αρχική p.u. τιμή.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα v-t για τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα

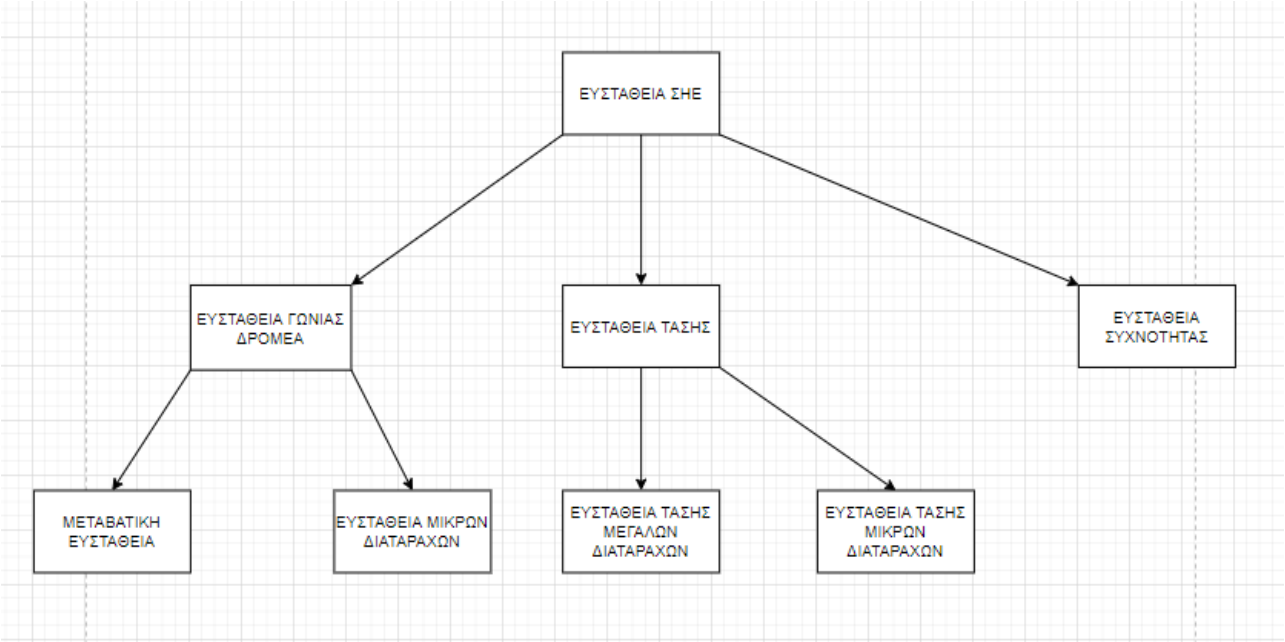
- Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν στην μόνιμη κατάστασή τους υπό σταθερή συχνότητα (50Hz για την Ελλάδα). Κατά τη διάρκεια όμως ενός σφάλματος η συχνότητα του δικτύου τείνει να μεταβληθεί. Προκειμένου ένα σύστημα να χαρακτηριστεί ως ευσταθές ως προς τη συχνότητα πρέπει μετά τη μεταβολή να επιστρέψει σε μία τιμή πολύ κοντά στην ονομαστική (επιτρεπτή απόκλιση ±0,3Hz).

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το βραχυκύκλωμα. Όπως αναφέραμε και στη θεωρία η τελική τιμή της συχνότητας ενός ευσταθούς συστήματος είναι πολύ κοντά στη αρχική p.u. τιμή.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα f-t για τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα

Στο Σχήμα 4.5 παρατίθεται το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται όλες οι κατηγορίες ευστάθειας ενός ΣΗΕ. [3,9,10]



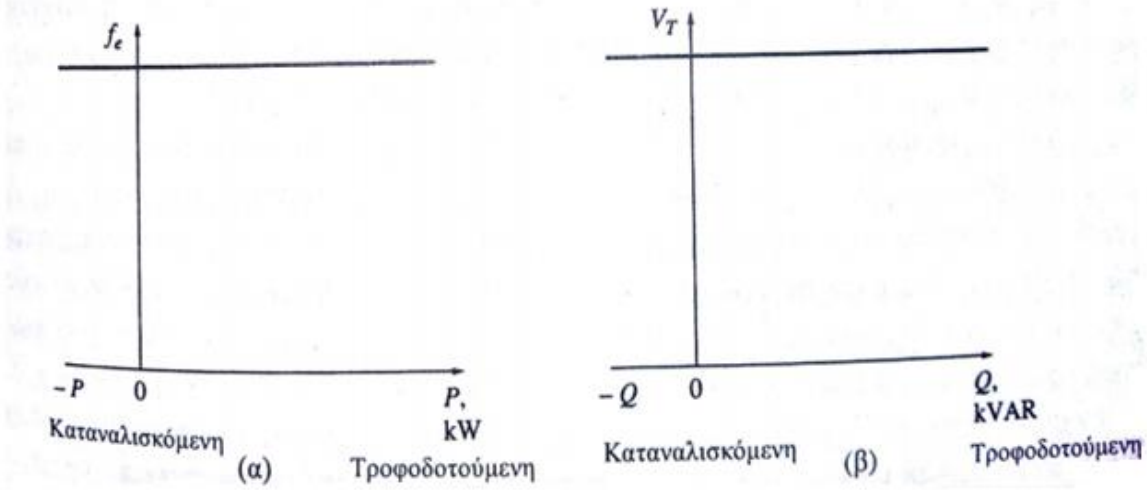
Σχήμα 4.5: Κατηγορίες ευστάθειας ενός ΣΗΕ

4.2 Συγχρονισμός και λειτουργίας γεννήτριας σε άπειρο ζυγό

Προκειμένου να αναλύσουμε την έννοια της ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει πρώτα να διευκρινίσουμε δύο έννοιες: αυτή του συγχρονισμού και του άπειρου ζυγού.

1. Με τον όρο άπειρο ζυγό, ορίζουμε ένα μεγάλο σύστημα ισχύος του οποίου η συχνότητα και η τάση δεν μεταβάλλονται ανεξάρτητα από την ενεργό ισχύ P ή την άεργο ισχύ Q με την οποία τροφοδοτείται ή παράγει αντίστοιχα το δίκτυο.

   Στην πράξη παρατηρείται δηλαδή συχνά το φαινόμενο σύνδεσης μίας σύγχρονης γεννήτριας σε ένα μεγάλο δίκτυο (άπειρος ζυγός) χωρίς την αλλαγή της συχνότητας αλλά και της τάσης του δικτύου (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Σχέσεις f-P, V_T–Q στην περίπτωση σύνδεσης γεννήτριας σε δίκτυο

2. Στη σημερινή εποχή η αυτόνομη λειτουργία μιας γεννήτριας σπανίζει. Τις περισσότερες φόρες περισσότερες από μία γεννήτριες συνδέονται εν παραλλήλω προκειμένου να καλύψουν τις απαιτήσεις ενός φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι η παράλληλη σύνδεση των γεννητριών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι της αυτόνομης λειτουργίας μίας γεννήτριας, πιο συγκεκριμένα:

- Περισσότερες γεννήτριες μπορούν να τροφοδοτήσουν μεγαλύτερο φορτίο από ότι μία μεμονωμένη γεννήτρια.
- Αυξάνεται η αξιοπιστία του δικτύου, καθώς εάν συμβεί κάποια διαταραχή όπως ένα βραχυκύκλωμα σε κάποια γεννήτρια, οι υπόλοιπες μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις του φορτίου. Επεκτείνοντας την παρατήρηση αυτή, ο χειριστής ενός ΣΗΕ μπορεί να αποσυνδέσει μία σύγχρονη γεννήτρια προκειμένου να προβεί σε τροποποιήσεις της ή συντήρησή της χωρίς να επηρεάζει την εύρυθμη λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου.
- Τέλος η αυτόνομη λειτουργία μίας και μοναδικής γεννήτριας πρέπει να πραγματοποιείται σε συνθήκες πλήρους φόρτισης ενώ η απόδοσή της είναι μέτρια. Στην περίπτωση όμως παράλληλης λειτουργίας περισσότερων γεννητριών λειτουργούν μεν σε πλήρη φόρτιση αλλά η απόδοσή τους είναι πολύ καλύτερη.

Η σύνδεση όμως μίας γεννήτριας στο δίκτυο, απαιτεί πολύ προσοχή και πρέπει να γίνει κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, ειδάλλως το δίκτυο μπορεί να υποστεί σοβαρές βλάβες. Αυτό προκύπτει καθώς οι αγωγοί που συνδέονται μεταξύ τους έχουν διαφορετικές τάσεις με αποτέλεσμα η διαφορά αυτή του δυναμικού να δημιουργεί πολύ μεγάλα ρεύματα τα οποία μπορούν να αποβούν μοιραία για το σύστημα.

Προκειμένου να αποφευχθεί η κατάσταση αυτή οι τάσεις και των τριών φάσεων της γεννήτριας θα πρέπει να είναι ακριβώς ίσες σε μέτρο και σε φάση με αυτές που θα συνδεθούν. Η παράλληλη αυτή σύνδεση μιας γεννήτριας σε δίκτυο όπου υπάρχουν κάποιες άλλες γεννήτριες ονομάζεται συγχρονισμός.

Αναλυτικότερα, οι προϋποθέσεις οι οποίες πρέπει να επαληθεύονται προκειμένου να αναπτύσσεται το φαινόμενο του συγχρονισμού είναι οι εξής:

1. Η συχνότητα του δικτύου και της γεννήτριας πρέπει να είναι ίσες.
2. Να έχουν την ίδια ακολουθία φάσεων.
3. Να έχουν την ίδια φασική γωνία.
4. Να έχουν ίδιο μέτρο τάσεων δηλαδή $|E|=|V_a|$

Οι προϋποθέσεις αυτές πληρούνται με τη βοήθεια μιας κινητήριας μηχανής η οποία αυξάνει τις στροφές της γεννήτριας μέχρι να φτάσουν τον σύγχρονο αριθμό στροφών, καθώς και τη διεγείρει με την ονομαστική τάση του δικτύου.

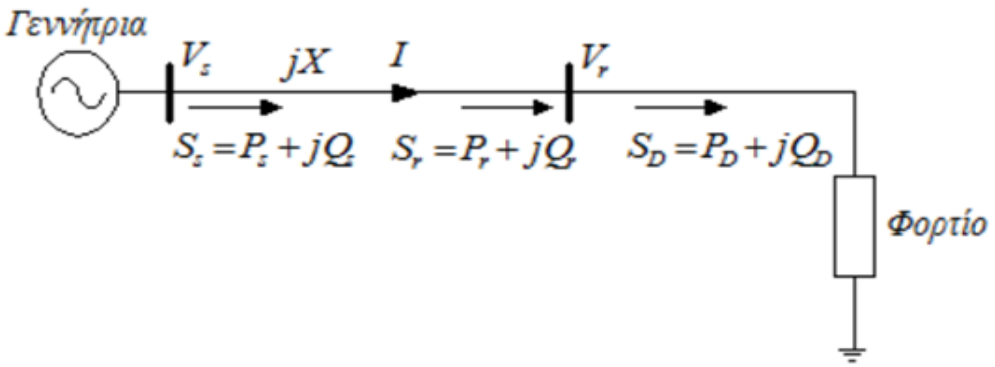
Εφόσον συγχρονιστεί η σύγχρονη γεννήτρια με το υπόλοιπο δίκτυο κλείνει ο διακόπτης και συνδέεται η γεννήτρια με το δίκτυο. Λόγω όμως του συγχρονισμού η φασική γωνία της γεννήτριας και του δικτύου είναι ίδιες. Από τη σχέση $\delta= \angle E_a - \angle V_a$ (4.1) εύλογα προκύπτει ότι $\delta=0$ όπου δ η γωνία ισχύος.

Η πραγματική όμως καθώς και η άεργος ισχύς της γεννήτριας εξαρτάται από τη γωνία ισχύος δ σύμφωνα με τις σχέσεις: $P_G = \frac{|E||V|}{Xs}\sin\delta$, $Q_G=\frac{|V|\,(|E|cos\delta-|V|)}{Xs}$ (4.2, 4.3)

Εφόσον $\delta=0$, $|E|=|V|$ προκύπτει: $P_G=Q_G=0$. Για να παράγει η γεννήτρια ισχύ, αυξάνεται η μηχανική ροπή και κατ' επέκταση η γωνία ισχύος άρα και η P_G. Έπειτα, έχοντας σταθερή τη μηχανική ισχύ, παρατηρείται αύξηση του ρεύματος διέγερσης και κατ' επέκταση της τιμής του $|E|$ άρα και της Q_G. Η γεννήτρια είναι τώρα έτοιμη να τροφοδοτήσει το δίκτυο.

Απόδειξη των σχέσεων 4.2 και 4.3

Έστω το σύστημα των δύο ζυγών του Σχήματος 4.7 στο οποίο αγνοούνται οι ωμικές απώλειες (R=0), η τάση εισόδου ισούται: $V_S=|V_S|<\delta$ και ως τάση αναφοράς παίρνουμε την τάση του φορτίου: $V_r=|V_r|<0$. [3,6]



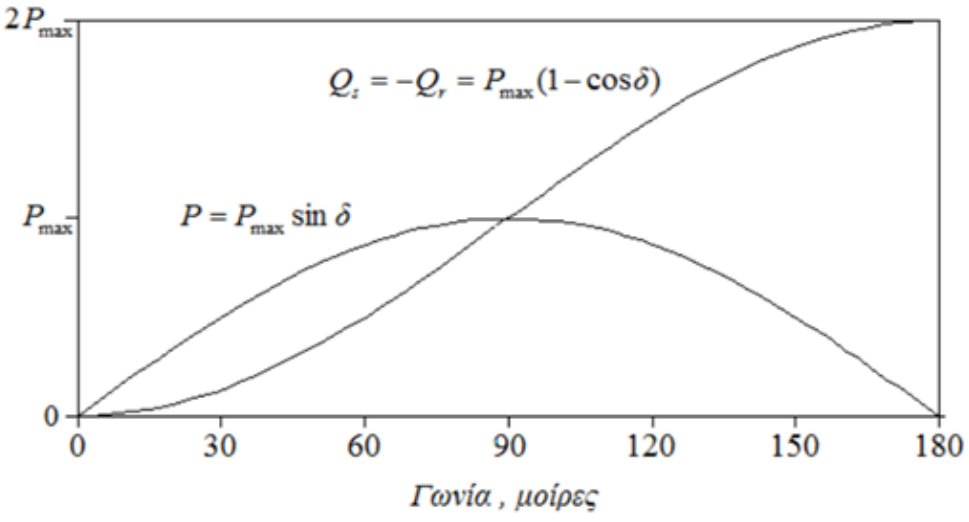
Σχήμα 4.7: Φορτίο τροφοδοτούμενο μέσω γραμμής μικρού μήκους

$S_r=P_r+jQ_r=V_rI^*= V_r(\frac{V_s-V_r}{jX})^* \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow S_r=|V_r|(\frac{|Vs|cos\delta+j|Vs|sin\delta-|Vr|}{jX})^*=\frac{|Vs||Vr|}{X}\sin\delta+j(\frac{|Vs||Vr|cos\delta-|Vr|^2}{X})$

Επομένως:

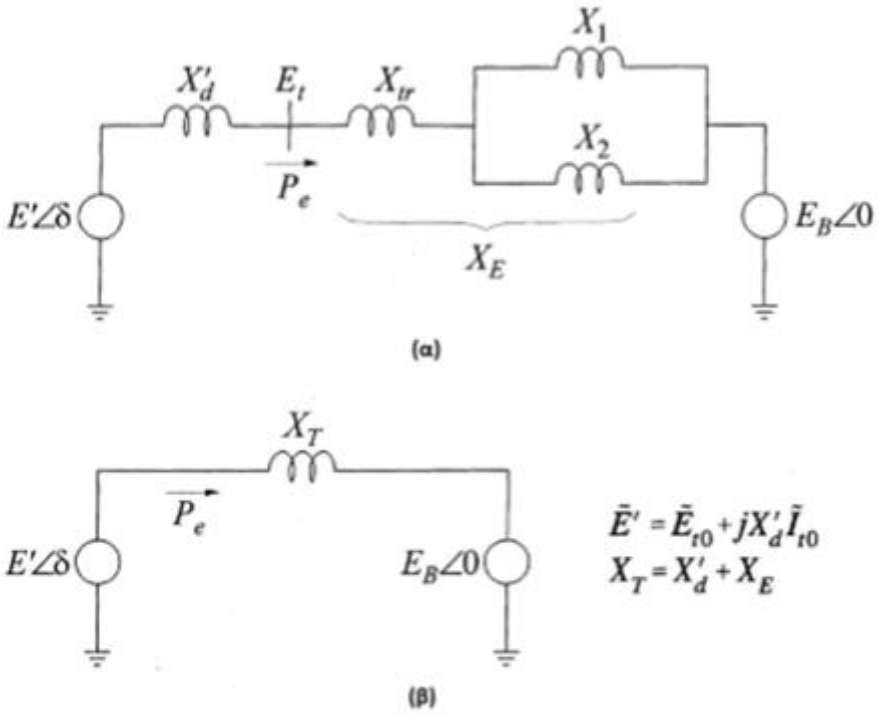
$$P_r=\frac{|V_S||V_r|}{X}\sin\delta \quad (4.2), \qquad Q_r=\frac{|Vr|\,(|Vs|cos\delta-|Vr|)}{Xs} \quad (4.3).$$



Σχήμα 4.8: Γραφική Παράσταση P-δ, Q-δ για $|V_r|=|V_s|$

4.3 Έλεγχος ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Έστω το δίκτυο του Σχήματος 4.9 όπου η γεννήτρια αναπαρίσταται από μια πηγή τάσης $E'<\delta^o$ και ο άπειρος ζυγός ως $E_B<0^o$. X'_d είναι η μεταβατική αντίδραση της γεννήτριας, X_{tr} ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης ενώ X_1, X_2 αντιδράσεις τη Γραμμής Μεταφοράς που συνδέονται παράλληλα.



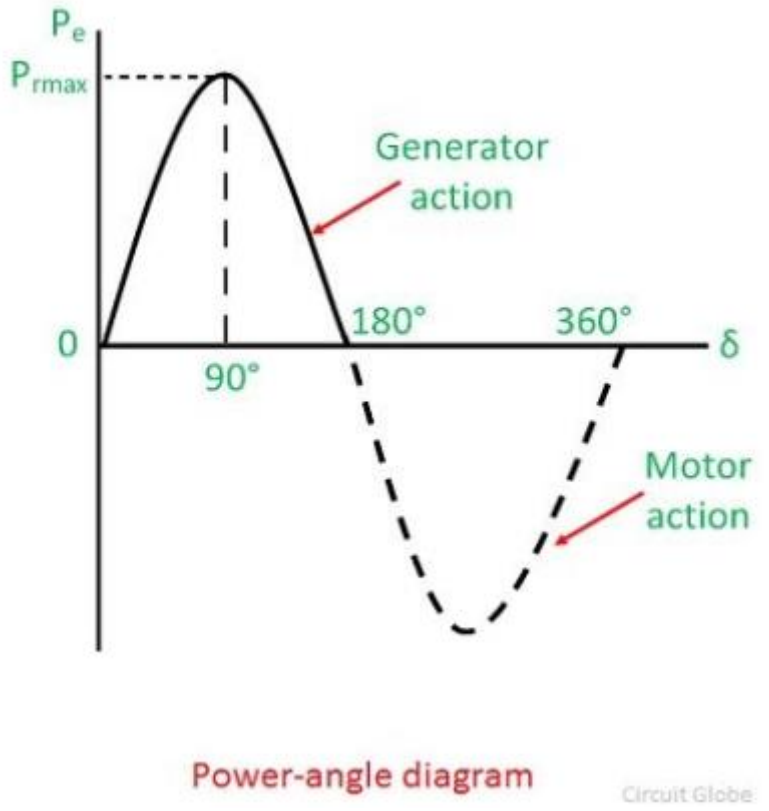
Σχήμα 4.9: α) Ισοδύναμο κύκλωμα β) Απλοποιημένο Ισοδύναμο κύκλωμα

- Έστω ότι το σύστημα του Σχήματος 4.9 λειτουργεί αρχικά στη μόνιμη κατάσταση και ότι η γωνία ισχύος δ είναι μικρότερη των 90^o. Έπειτα παρατηρείται μία βηματική αύξηση του φορτίου του κινητήρα. Στιγμιαία η ισχύς εισόδου του κινητήρα δεν μεταβάλλεται παρότι η έξοδός του αυξάνεται. Εξαιτίας αυτής της ανισορροπίας εισόδου-εξόδου δημιουργείται μία ροπή στον κινητήρα που δρα επιβραδυντικά με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητάς του. Εφόσον όμως $n_{κινητήρα}\downarrow\downarrow$ η γωνία $\delta\uparrow\uparrow$ και κατ' επέκταση σύμφωνα με τη σχέση 4.2 η ισχύς που εισέρχεται στον κινητήρα αυξάνει και αυτή μέχρι να γίνει ίση με την ισχύς στην έξοδο του κινητήρα. Έτσι βλέπουμε ότι το σύστημά μας αντέδρασε κατάλληλα στη μεταβολή του φορτίου δίχως να χάσει την ευστάθειά του. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην προηγούμενη ανάλυση η ταχύτητα της γεννήτριας έμεινε

σταθερή πράγμα που δεν συμβαίνει στη πραγματικότητα. Πρακτικά η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας θα μειωθεί λίγο προκειμένου ο ρυθμιστής ταχύτητας που υπάρχει στην είσοδό της να αυξήσει την ισχύ στην είσοδό της έτσι ώστε να ισορροπήσει με την έξοδο.

- Έστω τώρα ότι το δίκτυό μας λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση όταν η γωνία ισχύος $\delta=90^{o}$. Εάν συμβεί μία αύξηση στο φορτίο η γωνία ισχύος θα αυξηθεί όπως και προηγουμένως, με τη διαφορά ότι θα μειωθεί η ισχύς εισόδου καθώς τώρα το $\sin\delta<0$. Έτσι δημιουργείται μεγαλύτερη ανισορροπία μεταξύ εισόδου-εξόδου στον κινητήρα καθώς στην είσοδο έχουμε μείωση της ισχύος ενώ στην έξοδο αύξηση. Κατ' επέκταση ο κινητήρας επιβραδύνεται ακόμα περισσότερο και τελικά σταματά, πράγμα που οδηγεί στον οριστικό αποσυγχρονισμό του δικτύου.

Σύμφωνα με τις δύο προηγούμενες παρατηρήσεις, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα τα οποία επαληθεύονται και από το Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Πραγματική ισχύς μηχανής ως συνάρτηση της γωνίας ισχύος

Συμπεράσματα:

- ✓ Η τιμή P_{rmax} είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί από μία γεννήτρια προς το υπόλοιπο δίκτυο. Η τιμή αυτή ονομάζεται όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης και εάν για κάποιο λόγο προσπαθήσουμε να μεταφέρουμε περισσότερη ισχύς το δίκτυό μας θα αποσυγχρονιστεί.
- ✓ Κατά τη μόνιμη λειτουργία υπάρχει ένα μέγιστο επιτρεπτό φορτίο στο οποίο λειτουργεί ο κινητήρας το οποίο ονομάζεται όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης. Το όριο αυτό είναι πάντα μικρότερο από το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης. Οι τιμές του όμως ποικίλλουν καθώς εξαρτώνται από τη φύση και το μέγεθος τις διαταραχής π.χ στιγμιαία αύξηση του φορτίου, βραχυκύκλωμα, αποσύνδεση παράλληλων γραμμών. [3]

4.4 Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής ευστάθειας

Υπάρχουν δύο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας:

- ❖ Η μέθοδος της έμμεσης λύσης, σύμφωνα με την οποία τόσο οι αλγεβρικές όσο και οι διαφορικές εξισώσεις του δικτύου λύνονται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων μέσα από προσομοίωση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Με βάση τη μέθοδο της έμμεσης λύσης, εξετάζεται η μορφή που έχει η γραφική παράσταση της ταλάντωσης με σκοπό να εξεταστεί η ευστάθεια του δικτύου. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική, το PSSE της SIEMENS χρησιμοποιεί τη μέθοδο της έμμεσης λύσης για τους υπολογισμούς του.
- ❖ Οι μέθοδοι της απευθείας ανάλυσης. Οι μέθοδοι αυτές είναι πιο θεωρητικές καθώς δεν επιλύνουν εξισώσεις αλλά μελετάνε τις καμπύλες ταλαντώσεις P, δ του δικτύου. Οι δύο ποιο δημοφιλείς μέθοδοι της κατηγορίας αυτής είναι η μέθοδος Liapunov καθώς και αυτή των ίσων εμβαδόν, την οποία θα αναλύσουμε και στη συνέχεια.

4.5 Μέθοδος των ίσων εμβαδών

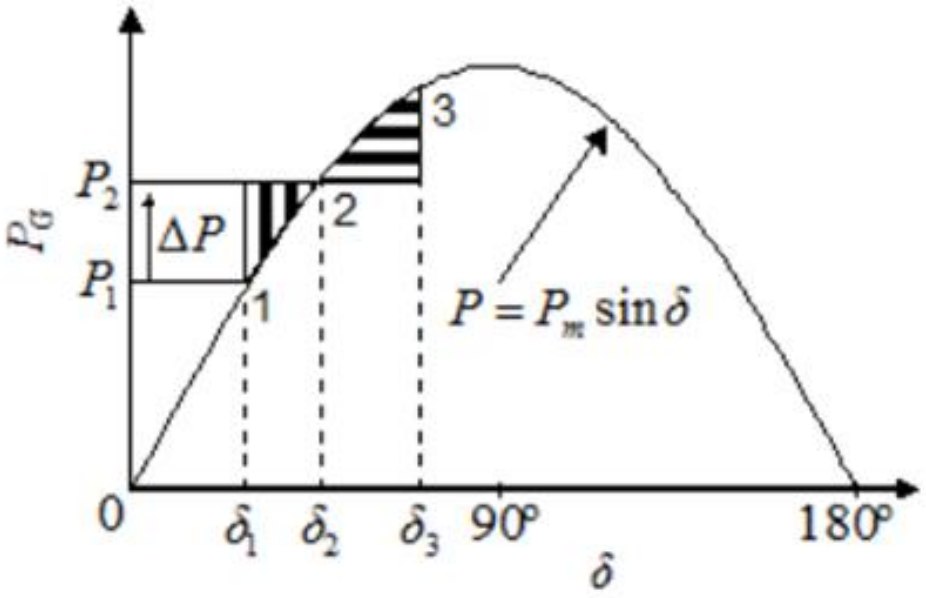
4.5.1 Θεωρητική απόδειξη

Αρχικά, θα πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος αυτή εξαιτίας της απλότητάς της, χρησιμοποιείται για την θεωρητική κατανόηση του φαινομένου της μεταβατικής ευστάθειας και όχι για την πρακτική προσέγγισή της.

Αναλυτικότερα, αρκεί να διαπιστωθεί εάν η γωνία ταλάντωσης της μηχανής δ ταλαντεύεται γύρω από μία συγκεκριμένη θέση ισορροπίας προκειμένου να υπάρξει ευστάθεια, ή εάν υπάρχει μια σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος της γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή διαπιστώνεται ότι το σύστημα είναι ασταθές.

Το δίκτυο στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος των ίσων εμβαδών περιέχει μια γεννήτρια με σταθερή ΗΕΔ Ε’ και μεταβατική αντίδραση X_d' η οποία συνδέεται σε έναν άπειρο ζυγό.

Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του συστήματος (θέση 1), το σημείο εκείνο όπου η γωνία δ γίνεται δ_2, όπου $n_r > n_s$ (θέση 2) και το σημείο στο οποίο το σύστημα έχει δώσει πίσω όλη την απορροφούμενη κινητική ενέργεια (θέση 3).



Σχήμα 4.11: Κριτήριο ίσων εμβαδών για βηματική αύξηση του P_T

Έστω ότι στο δίκτυο συμβαίνει μία αύξηση της μηχανικής ισχύος της γεννήτριας. Έστω P_T η αύξηση αυτή η οποία οδηγεί το σύστημα από την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του στη θέση 2 που προαναφέρθηκε.

Μέσα σε αυτό το διάστημα εξαιτίας της αύξησης της μηχανικής ισχύος ο ρότορας της γεννήτριας απορροφά κινητική ενέργεια έστω K_r προκειμένου να αυξήσει τη ταχύτητά του $n_{r\uparrow\uparrow}$.

Κατ' επέκταση όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.11 η γωνία δ αυξάνει στη τιμή δ_2. Τη στιγμή εκείνη $n_r>n_{sync}$ οπότε $\delta_{\uparrow\uparrow}$. Προκειμένου όμως το σύστημα να παραμείνει ευσταθές πρέπει να μειώσει την ταχύτητα του ρότορα ώστε να φτάσει τη σύγχρονη.

Στη θέση 3 η ισχύς επιβράδυνσης του δρομέα έχει αναγκάσει την ταχύτητα του δρομέα να φτάσει την σύγχρονη δηλαδή: $n_r=n_{sync}$. Στη θέση εκείνη έχει δοθεί πίσω ολόκληρη η κινητική ενέργεια Kr.

4.5.2 Μαθηματική απόδειξη

Αγνοώντας την ισχύ απόσβεσης από την $P_2 - P_G = \frac{H}{\pi f^0}\frac{d^2\delta}{dt^2} + D\frac{d\delta}{dt}\ pu\cdot \mathrm{MW}$ (4.4)

Έχουμε: $\frac{\pi f^0}{H}(P_2 - P_G) = \frac{d^2\delta}{dt^2}$ (4.5)

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της 4.5 με $\frac{d\delta}{dt}$ προκύπτει:

$$\frac{d\delta}{dt}\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{\pi f^0}{H}(P_2 - P_G)\frac{d\delta}{dt} \quad (4.6)$$

Ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2\pi f^0}{H}\int_{\delta 1}^{\delta}(P_2 - P_G)d\delta \quad (4.7)$$

Η γωνία ισχύος γίνεται μέγιστη όταν $\frac{d\delta}{dt}=0$ δηλαδή όταν $\int_{\delta 1}^{\delta}(P_2 - P_G)dt = 0$ (4.8)

Το ολοκλήρωμα αυτό έχει δύο τιμές, μία θετική και μία αρνητική η οποίες απεικονίζουν τα εμβαδά του Σχήματος 4.11. Το ολοκλήρωμα αυτό ισούται με μηδέν όταν τα δύο εμβαδά γίνουν ίσα. Επιπροσθέτως, τα εμβαδά της επιτάχυνσης και επιβράδυνσης είναι αντίστοιχα ίσα με τις εξισώσεις (4.9), (4.10):

$$A_{επιτάχυνσης} = \int_{\delta 1}^{\delta 2} (P_2 - P_m \sin\delta) d\delta = P_2(\delta_2 - \delta_1) + P_m(\cos\delta_2 - \cos\delta_1)$$

$$\mathrm{A}_{επιβράδυνσης} = \int_{\delta 2}^{\delta 3} (P_m \sin\delta - P_2) d\delta = P_m(\cos\delta_2 - \cos\delta_3) - P_2(\delta_3 - \delta_2)$$

Εάν τα εμβαδά είναι ίσα από τις (4.9), (4.10) προκύπτει:

$$P_2(\delta_3 - \delta_1) = P_m(\cos\delta_1 - \cos\delta_3) \qquad (4.11)$$

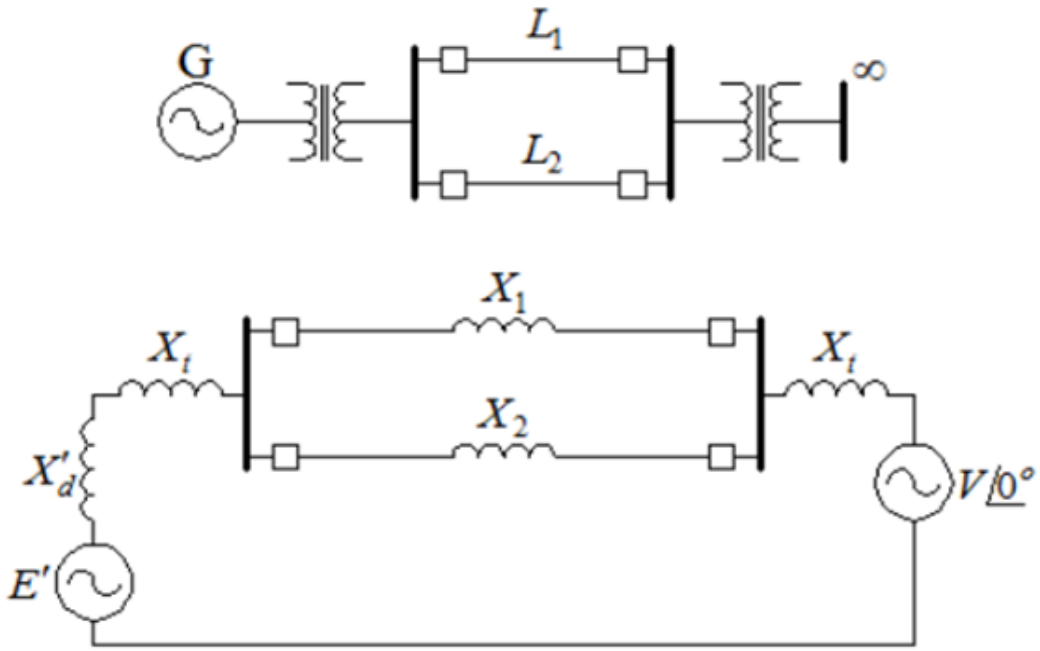
με δ_1, δ_2, δ_3 σε rad. Ξέροντας τα δ_1, δ_2 από την (4.11) χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους μπορούμε να βρούμε τη γωνία ισχύος δ_3. [7,3]

4.6 Εφαρμογές της μεθόδου των ίσων εμβαδών

Η μέθοδος των ίσων εμβαδών μπορεί να εξηγήσει όλα τα είδη των σφαλμάτων που μπορούν να συμβούν σε ένα δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει μία σύγχρονη γεννήτρια η οποία συνδέεται σε άπειρο ζυγό. Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση αποσύνδεσης παράλληλης γραμμής με το ταυτόχρονο άνοιγμα των διακοπτών της, καθώς και η περίπτωση εμφάνισης ενός τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος σε μία παράλληλη γραμμή με την οποία η γεννήτρια τροφοδοτεί τον άπειρο ζυγό. [7]

4.6.1 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής

Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα της θετικής ακολουθίας μίας γεννήτριας $V_G=|E'|<\delta$ η οποία συνδέεται μέσω δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς με ένα άπειρο ζυγό τάσης $V=|V|<0$.



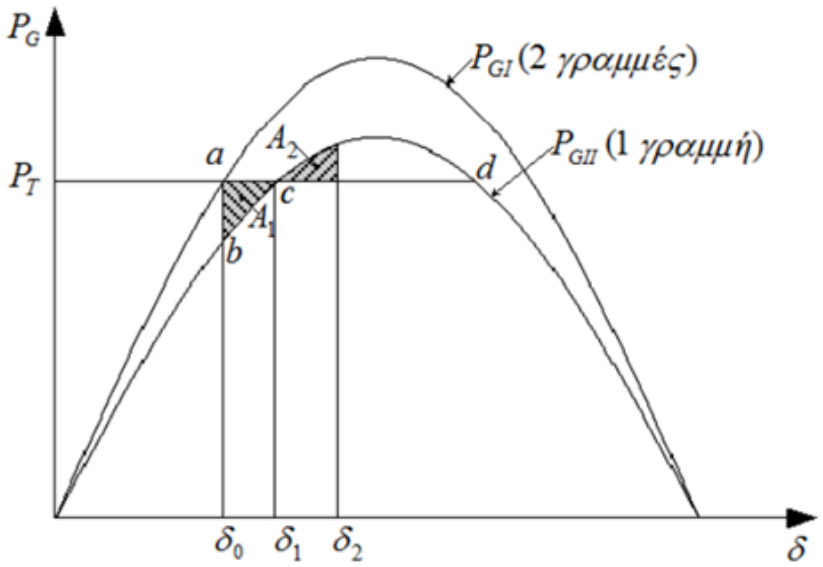
Σχήμα 4.12: Σύνδεση γεννήτριας με δύο παράλληλες γραμμές

Ας υποθέσουμε ότι αποσυνδέεται η γραμμή μεταφοράς L_2. Σύμφωνα με την εξίσωση (4.3) η ισχύς εξόδου της γεννήτριας πριν τη διαταραχή ισούται με:

$$P_{GI} = \frac{|E'||V|}{X'_d + 2X_t + (X_1 \parallel X_2)} \sin\delta \qquad (4.12)$$

Με το άνοιγμα όμως της Γραμμής ο όρος $X_1 \parallel X_2$ του παρονομαστή αυξάνεται σε X_1.

Άρα η ισχύς μειώνεται. Δηλαδή: $$P_{GII} = \frac{|E'||V|}{X'_d + 2X_t + X_1} \sin\delta \qquad (4.13)$$



Σχήμα 4.13: Κριτήριο ίσων εμβαδών για αποσύνδεση παράλληλης γραμμής

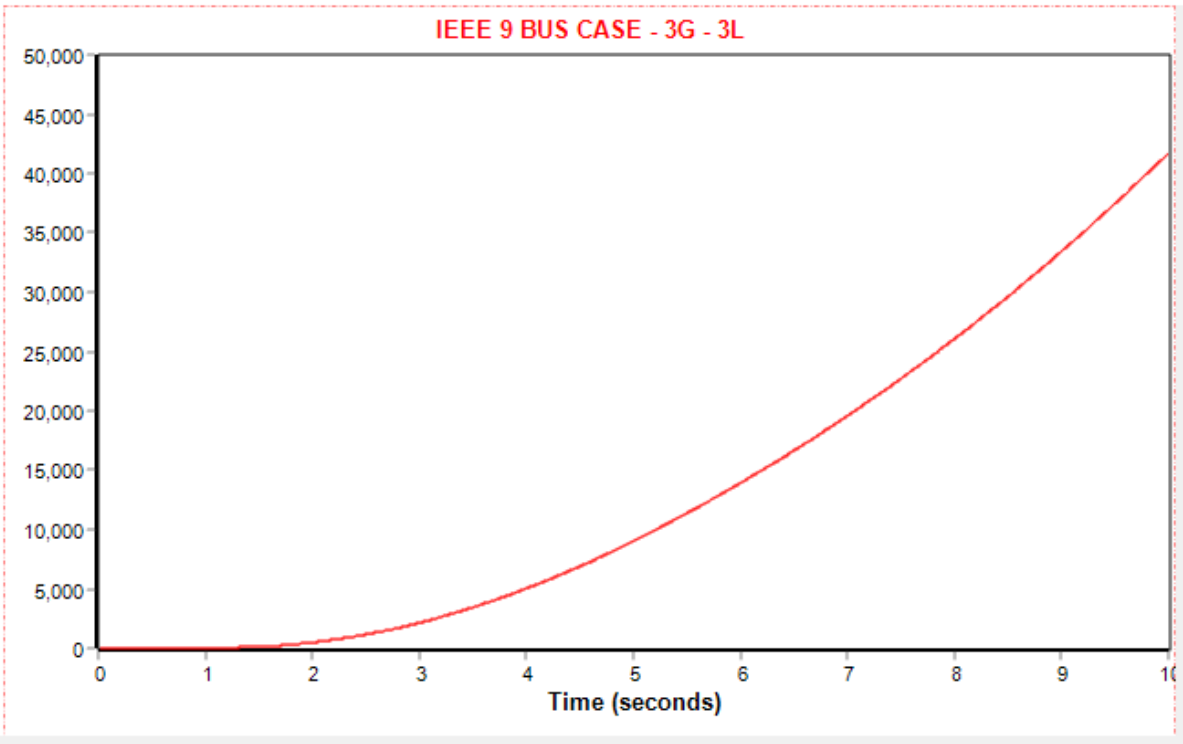
Παρατηρήσεις: Αρχική ισχύς εξόδου $P_G=P_T$, αρχική γωνία ισχύος δ_o, μηχανική ισχύς εισόδου γεννήτριας P_T=σταθερή.

Αμέσως μετά την διαταραχή αποσυνδέεται η γραμμή L_2 και σύμφωνα με την εξίσωση (4.13) η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μειώνεται και φτάνει στο σημείο b του Σχήματος 4.13. Στο σημείο εκείνο εφόσον η μηχανική ισχύς του στροβίλου P_T παραμένει σταθερή ενώ μειώνεται η ηλεκτρικής ισχύς εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας προκύπτει μία επιταχύνουσα ροπή ανάλογη του εμβαδόν A_1 η οποία αυξάνει και τη γωνία ισχύος από δ_o σε δ_1.

Έτσι το δίκτυο οδηγείται σε ένα καινούργιο σημείο λειτουργίας c όπου η ροπή επιτάχυνσης μηδενίζεται και η γωνία $\delta=\delta_1$. Έπειτα, αναλαμβάνει δράση η ροπή επιβράδυνσης η οποία οδηγεί τη γωνία ισχύος στο σημείο $\delta=\delta_2$ όπου έχει επιστραφεί πίσω όλη η κινητική ενέργεια που απορρόφησε στην αρχή το σύστημα. [3,7]

4.6.2 Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή

Υποθέτουμε τώρα ότι εμφανίζεται ένα στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή μεταφοράς L_2. Το βραχυκύκλωμα αυτό δημιουργεί μεγάλα επαγωγικά ρεύματα. Ως εκ τούτου η ηλεκτρικής ισχύς εξόδου της γεννήτριας μηδενίζεται και το δίκτυό μας τροφοδοτείτε μόνο με άεργο ισχύ. Εάν το βραχυκύκλωμα διατηρηθεί, η επιταχύνουσα ροπή που δημιουργείται θα επιταχύνει πάρα πολύ τη σύγχρονη γεννήτρια με αποτέλεσμα να προκύψει μια σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος της γεννήτριας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.14.

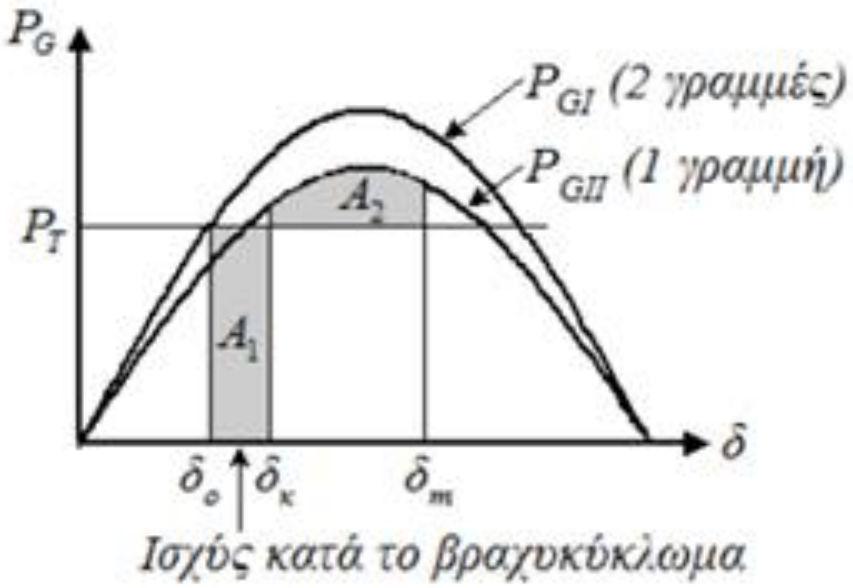


Σχήμα 4.14: Γραφική παράσταση δ-t για τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή

Τη στιγμή που θα εκκαθαριστεί το 3φ βραχυκύκλωμα και θα κοπεί η γραμμή L_2 θα αρχίσει να τροφοδοτείται ο άπειρος ζυγός με ισχύ. Το διάγραμμα ισχύος-γωνίας εκείνη τη στιγμή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.15 με την καμπύλη P_{GII}. Εάν $\delta<=\delta_κ$ τότε το σφάλμα εκκαθαρίζεται επιτυχώς και το δίκτυο διατηρεί την ευστάθειά του.

Εάν όμως $\delta>\delta_κ$ τότε το σύστημα γίνεται ασταθές. Ο χρόνος t_k δηλαδή που απαιτείται για να γίνει η γωνία $\delta=\delta_κ$ ονομάζεται κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης και πέραν αυτού το

σύστημα χάνει την ευστάθειά του. Η αντίστοιχη γωνία δ ονομάζεται κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση και όχι με τη μέθοδο των ίσων εμβαδών. [3,7,9]



Σχήμα 4.15 Κριτήριο των ίσων εμβαδών για τριφασικό βραχυκύκλωμα και απομόνωσή του με αποσύνδεση παράλληλης γραμμής

4.7 Έμμεση λύση

Παρόλο που η μέθοδος των ίσων εμβαδών μας βοηθάει προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα την έννοια της ευστάθειας ισχύει μόνο για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία διαθέτουν μέχρι δύο μηχανές. Για πολυπλοκότερα συστήματα απαιτείται η βοήθεια των υπολογιστών οι οποίοι λύνουν πολύ γρήγορα πολύπλοκους αριθμητικούς υπολογισμούς.

Κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου η ονομαστική τιμή της συχνότητας μπορεί να αυξομειωθεί κατά ±1-2 Hz η οποία είναι πολύ μικρή για αυτό το λόγο θεωρούμε ότι τα παθητικά στοιχεία των ΣΗΕ κατά τη μεταβατική λειτουργία λειτουργούν στην ονομαστική συχνότητα.

Η πιο εύχρηστη μέθοδος για τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας πολύπλοκων ΣΗΕ είναι η επίλυση αριθμητικών και διαφορικών εξισώσεων με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, η λεγόμενη έμμεση λύση. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η διαφορική εξίσωση

ταλάντωσης 2ης τάξης μετατρέπεται σε δύο διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης εισάγοντας τις μεταβλητές χ_1, χ_2 τις λεγόμενες μεταβλητές κατάστασης:

$$x = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta \\ \delta^{\bullet} \end{vmatrix} \qquad (4.14)$$

όπου:

- δ η γωνιακή θέση του ρότορα σε rad.
- δ’ η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα σε rad/sec .

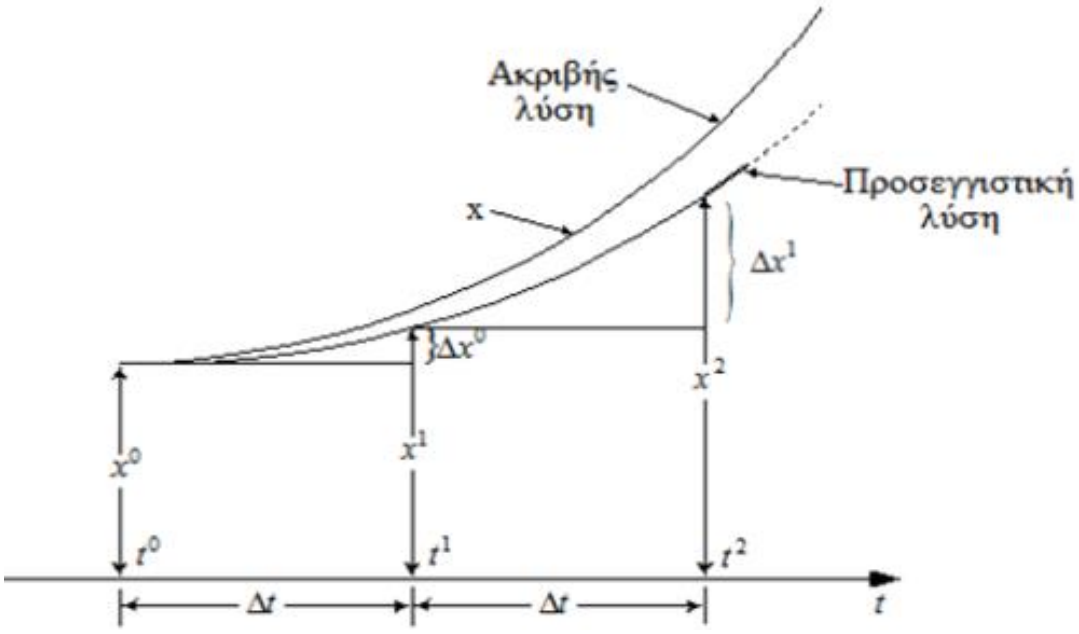
$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} = \delta^{\bullet}$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεταβλητές η εξίσωση ταλάντωσης γράφεται:

$$x_1 = x_2$$

$$x_2 = \frac{\pi f^{\,0}}{H}(P_T - P_G - Dx_2)$$

Έστω ότι αυτές οι διαφορικές εξισώσεις λύνονται με τη μέθοδο του Euler. Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται η γραφική αναπαράσταση της λύσης τους.



Σχήμα 4.16: Γραφική εξήγηση της μεθόδου του Euler

Η χρονική διάρκεια της λύσης χωρίζεται σε χρονικές στιγμές $t^o, t^1, t^2,$ οι οποίες δεν είναι απαραίτητα ίσες. Όσο πιο κοντά είναι αυτές οι χρονικές στιγμές τόσο πιο ακριβής είναι η λύση.

Έστω τώρα η εξίσωση:

$$\dot{x} = f(x)$$

Για t=t^o προκύπτει από το Σχήμα 4.16

$$x^0 = f(x^0) = \frac{\Delta x^0}{\Delta t} \quad \text{ή} \quad \Delta x^0 = f(x^0)\Delta t$$

και κατ' επέκταση προκύπτει ότι: $x^1 \approx x^0 + f(x^0)\Delta t$

Επεκτείνοντας το σύστημα για ν=0, 1, 2... : $x^{\nu+1} \approx x^{\nu} + f(x^{\nu})\Delta t$ (4.15)

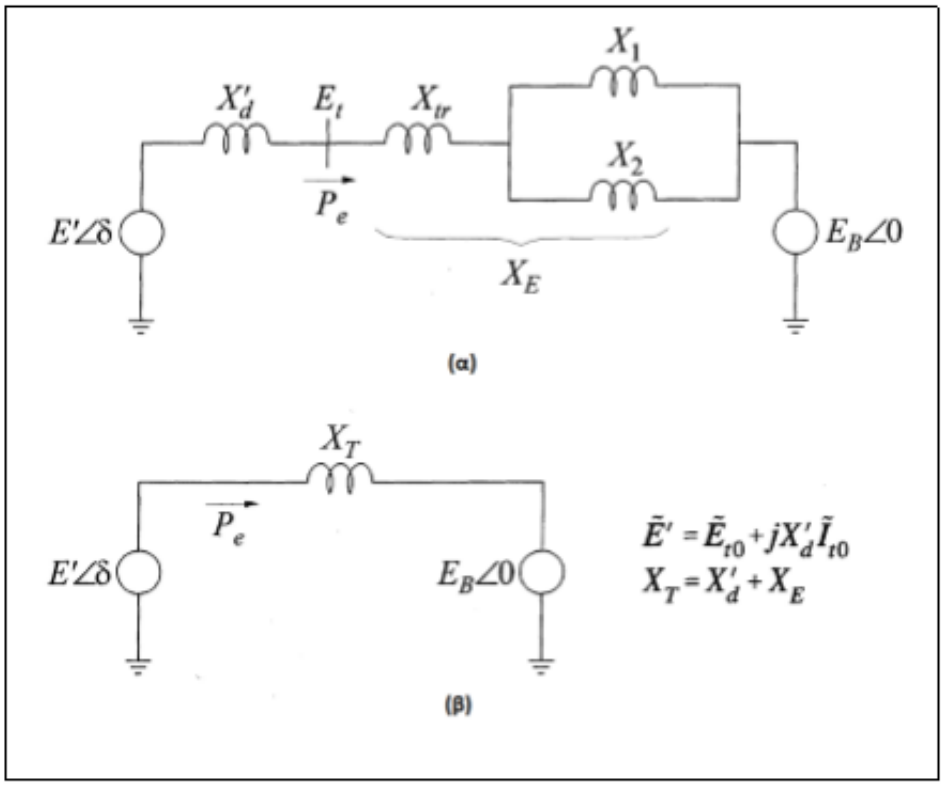
Ο αλγόριθμος αυτός δουλεύει και για συστήματα διαφορικών εξισώσεων n-οστής τάξης της μορφής: $\dot{x} = f(x)$ Για την i-οστή συνιστώσα του διανύσματος x ισχύει:

$$x^{\nu+1} \approx x^{\nu} + f_i({x_1}^{\nu}, x_2^{\nu}, ...x_n^{\nu})\Delta t \quad \text{για i=1, 2, ...n.} \qquad (4.16)$$

Η ακρίβεια της μεθόδου του Euler βελτιώνεται εάν χρησιμοποιήσουμε την τροποποιημένη μέθοδο Euler, η οποία χρησιμοποιεί το ημιάθροισμα των παραγώγων στα άκρα του διαστήματος. Κατά το πρώτο στάδιό της, χρησιμοποιείται η απλή μέθοδος Euler και από εκεί και πέρα η τροποποιημένη. [3,7]

4.8 Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η μεταβατική ευστάθεια

Η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία πολύ σημαντική ικανότητα η οποία πρέπει να διέπει το εκάστοτε δίκτυο, όπως αυτό του Σχήματος 4.17.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβατική ευστάθεια ενός δικτύου είναι οι εξής:

- Από τον χρόνο που χρειάζεται το δίκτυο για να εξαλείψει το σφάλμα καθώς και από την αντίδρασή του.
- Από την τάση E_B του άπειρου ζυγού.
- Από την τάση E' της γεννήτριας.
- Από την ηλεκτρική ισχύ εξόδου της γεννήτριας P_G τη στιγμή που εμφανίζεται το σφάλμα
- Από το είδος και τη θέση του βραχυκυκλώματος.
- Από την αντίδραση X'_G της γεννήτριας καθώς όσο $X'_G\downarrow\downarrow$ => $\delta_o\downarrow\downarrow$, $P_m\uparrow\uparrow$ όπου P_m είναι το όριο της μεταβατικής ευστάθειας. [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Η προστασία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από τα διάφορα βραχυκυκλώματα που ενδέχεται να προκύψουν είναι ένα θέμα μείζονος σημασίας, εξαιτίας των υπέρογκων χρημάτων που δαπανούνται για τη παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Πιο συγκεκριμένα, η εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος δημιουργεί τόσο μεγάλα ρεύματα στο δίκτυο τα οποία μπορούν να έχουν καταστρεπτικές συνέπειες. Με μία προσεκτική όμως σχεδίαση του δικτύου τέτοια σφάλμα μπορούν να εμφανίζονται πολύ σπάνια.

Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται τόσο από τον ίδιο τον άνθρωπο τόσο και από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως είναι η πτώση ενός κεραυνού. Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας αλληλεπιδρούν με ορισμένα βοηθητικά συστήματα προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία τους.

Τα πιο δημοφιλή βοηθητικά συστήματα είναι τα συστήματα προστασίας (Protection Systems) τα οποία συμβάλλουν τόσο στην προστασία ανθρώπινων ζωών όσο και στην εκκαθάριση των σφαλμάτων που προκύπτουν. Τα συστήματα προστασίας χρησιμοποιούν αυτόματες ενέργειες οι οποίες δρουν σε μικρό χρόνο προκειμένου να απομονώσουν και να εκκαθαρίσουν ένα σφάλμα.

Η απομόνωση της συνιστώσας του δικτύου η οποία θα αποκοπεί από το υπόλοιπο δίκτυο προκειμένου να εκκαθαριστεί το σφάλμα, πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή και να μην επηρεάζει την εύρυθμη λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου. Παραδείγματος χάρη, η απομόνωση μιας ολόκληρης περιοχής εξαιτίας της υπερθέρμανσης ενός μετασχηματιστή δεν αποτελεί σωστή ενέργεια από το χειριστή του δικτύου.

Η σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού θα ήταν η μεταφορά της ζήτησης του φορτίου σε έναν δεύτερο μετασχηματιστή και μετέπειτα η απομόνωση και η επιδιόρθωση του προβληματικού μετασχηματιστή.

Οι κύριες συσκευές που χρησιμοποιούνται για την προστασία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ηλεκτρονόμοι. Αυτοί επιτηρούν ορισμένες ποσότητες (π.χ. μέτρο και φασική γωνία ρεύματος και τάσης) οι οποίες όταν αποκλίνουν από τις επιτρεπτές τους τιμές, δρουν προκειμένου να εξαλείψουν την διαταραχή, ενεργοποιώντας τους αντίστοιχους διακόπτες ισχύος, οι οποίοι και απομονώνουν την πληγείσα περιοχή.

Υπάρχουν πολλά είδη ηλεκτρονόμων οι οποίοι ελέγχουν διαφορετικές παραμέτρους. Όλοι όμως οι ηλεκτρονόμοι διέπονται από ορισμένες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν:

- Επιλεκτικότητα
- Υψηλό βαθμό αξιοπιστίας
- Ικανοποιητική ευαισθησία, η οποία ορίζεται ως το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος που θέτει σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο, όταν το σφάλμα εμφανίζεται στη ζώνη προστασίας.
- Ταχύτατη απόκριση του ηλεκτρονόμου προκειμένου να μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις του σφάλματος και να αποφευχθεί η αστάθεια του συστήματος. [5,4]

5.2 Είδη διατάξεων προστασίας

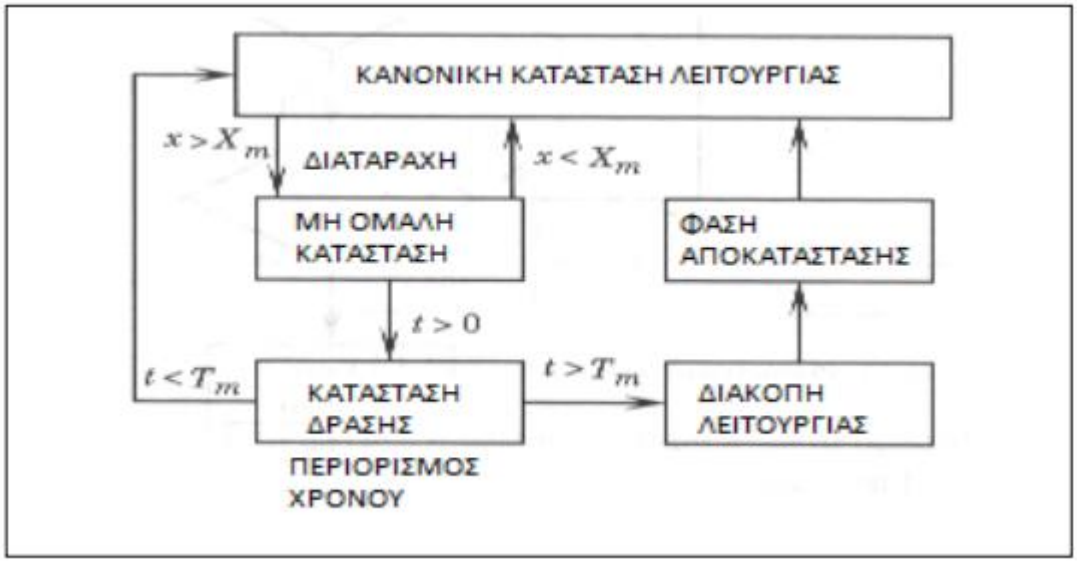
Οι διατάξεις προστασίας διαφοροποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο των μέσων προστασίας που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Οι δύο κατηγορίες διατάξεων προστασίας είναι οι εξής:

1. Διατάξεις απόφασης – δράσης (Ενεργητικές διατάξεις).
2. Κατασταλτικές διατάξεις προστασίας (Παθητικές διατάξεις).

5.2.1 Ενεργητικές διατάξεις

Οι διατάξεις αυτές εντοπίζουν επικίνδυνες καταστάσεις οι οποίες εμφανίζονται σε ένα δίκτυο, όπως παραδείγματος χάρη σφάλμα σε ένα ζυγό του δικτύου, υπερτάσεις λόγω πτώσης κεραυνού κ.α. και δρουν άμεσα εκτελώντας προκαθορισμένες εντολές προκειμένου να τις επιλύσουν. Οι προκαθορισμένες αυτές εντολές, συνήθως αφορούν την απομόνωση του τμήματος στο οποίο εμφανίστηκε η διαταραχή προκειμένου να μην εξαπλωθεί και στο υπόλοιπο δίκτυο. Το σύστημα προστασίας το οποίο διαθέτει

ενεργητικές διατάξεις πρέπει να είναι αξιόπιστο και να αντιδρά άμεσα σε κάθε διαταραχή. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται το πλήρες μοντέλο του συστήματος απόφασης-δράσης (ενεργητική διάταξη).



Σχήμα 5.1: Πλήρες μοντέλο συστήματος απόφασης-δράσης

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.1 το σύστημα βρίσκεται αρχικά στη κανονική κατάσταση λειτουργίας του (μόνιμη κατάσταση). Το σύστημα προστασίας ελέγχει την τιμή της αντίδρασης x η οποία εάν υπερβεί την τιμή X_m στέλνει ειδοποίηση η οποία υποδεικνύει ότι έχει συμβεί μία διαταραχή στο κύριο δίκτυο. Επειδή όμως η διαταραχή αυτή μπορεί να είναι παροδική περιμένει για χρόνο t (κατάσταση δράσης).

Εαν $t<T_m$ το σύστημα προστασίας αγνοεί την διαταραχή και επιτρέπει στο κύριο σύστημα να επιστρέψει στη μόνιμη κατάστασή του. Εάν όμως $t>T_m$ το σύστημα προστασίας αναγκάζεται να διακόψει τη λειτουργία του τμήματος στο οποίο συνέβη η διαταραχή. Έτσι το κύριο σύστημα μεταβαίνει σε μία νέα κατάσταση τη λεγόμενη φάση αποκατάστασης, στην οποία το σύστημα προσπαθεί να επανέλθει στην αρχική του, δίχως διαταραχή κατάσταση.

5.2.2 Παθητικές διατάξεις

Οι διατάξεις αυτές θέτονται σε λειτουργία προκειμένου να αλλάξουν τις συνθήκες που επικρατούν στις γειτονικές περιοχές του σφάλματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διατάξεων αποτελούν οι ψεκαστήρες νερού, τα συστήματα ψύξης των μηχανών και οι συσκευές που ανιχνεύουν μεταβολές στην ένταση και τάση του δικτύου.

Οι διατάξεις αυτές ανιχνεύουν άμεσα τη διαταραχή και εφαρμόζουν αποτελεσματικά μέτρα, όπως η διακοπή της λειτουργίας της πληγείσας περιοχής ή αποστέλλουν ένα σήμα κινδύνου στο χειριστή του δικτύου ο οποίος ανάλογα με τη διαταραχή λαμβάνει τα απαραίτητα μέτρα.

Επίσης σε περιπτώσεις ένδειξης πυρκαγιάς, ενεργοποιούνται οι ψεκαστήρες νερού και το σύστημα πυρόσβεσης, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η πυρκαγιά πριν εξαπλωθεί και καταστραφεί ο εξοπλισμός του δικτύου. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι παθητικές διατάξεις χρησιμοποιούνται ευρέως στους σταθμούς παραγωγής. Το πιο γνωστό παράδειγμα χρήσης τέτοιων διατάξεων αφορά τα συστήματα ψύξης των πυρηνικών αντιδραστήρων. [5]

5.3 Πρωτεύουσα και βοηθητική προστασία

Τα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι ηλεκτρονόμοι προστασίας να ενεργοποιούνται μόνο κατά την περίπτωση εμφάνισης μιας διαταραχής. Μερικοί ηλεκτρονόμοι ακολουθούν το μοντέλο της προστασίας της μονάδας (Protection Unit), θέτονται δηλαδή σε λειτουργία μόνο όταν συμβεί ένα σφάλμα στη δική τους ζώνη προστασίας. Κάποιοι άλλοι, ενεργοποιούνται ακόμα και όταν εμφανίζεται μία διαταραχή σε γειτονικές ζώνες, δρώντας έτσι ως εφεδρικοί ηλεκτρονόμοι.

Ανεξάρτητα από το είδος του ηλεκτρονόμου προστασίας που χρησιμοποιείται, κύριο μέλημα αποτελεί η απομόνωση της εκάστοτε διαταραχής. Για αυτό ακριβώς το λόγο, κάθε συσκευή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας πρέπει να ελέγχεται τόσο από την πρωτεύουσα προστασία όσο και από τη βοηθητική προστασία, σε περίπτωση που αποτύχει η πρώτη.

5.3.1 Πρωτεύουσα προστασία

Ο μηχανισμός της πρωτεύουσας προστασίας ενεργοποιείται όταν εμφανίζεται μια διαταραχή στο δίκτυο, και προστατεύει τις ευαίσθητες συσκευές του δικτύου όπως παραδείγματος χάρη τους ζυγούς και τις Γραμμές Μεταφοράς, αποκόπτοντας την πληγείσα περιοχή. Αξίζει να τονιστεί ότι ένα στοιχείο του δικτύου μπορεί να προστατεύεται από περισσότερους από έναν ηλεκτρονόμους πρωτεύουσας προστασίας.

Παρόλα αυτά επιτυχημένη θεωρείται η προστασία εκείνη του δικτύου, η οποία χρησιμοποιεί τον ελάχιστο αριθμό ηλεκτρονόμων προκειμένου να απομονωθεί το ελάχιστο δυνατό τμήμα του δικτύου. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι οι συσκευές της πρωτεύουσας προστασίας δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στο ίδιο σημείο με τα στοιχεία του δικτύου που οφείλουν να προστατεύσουν.

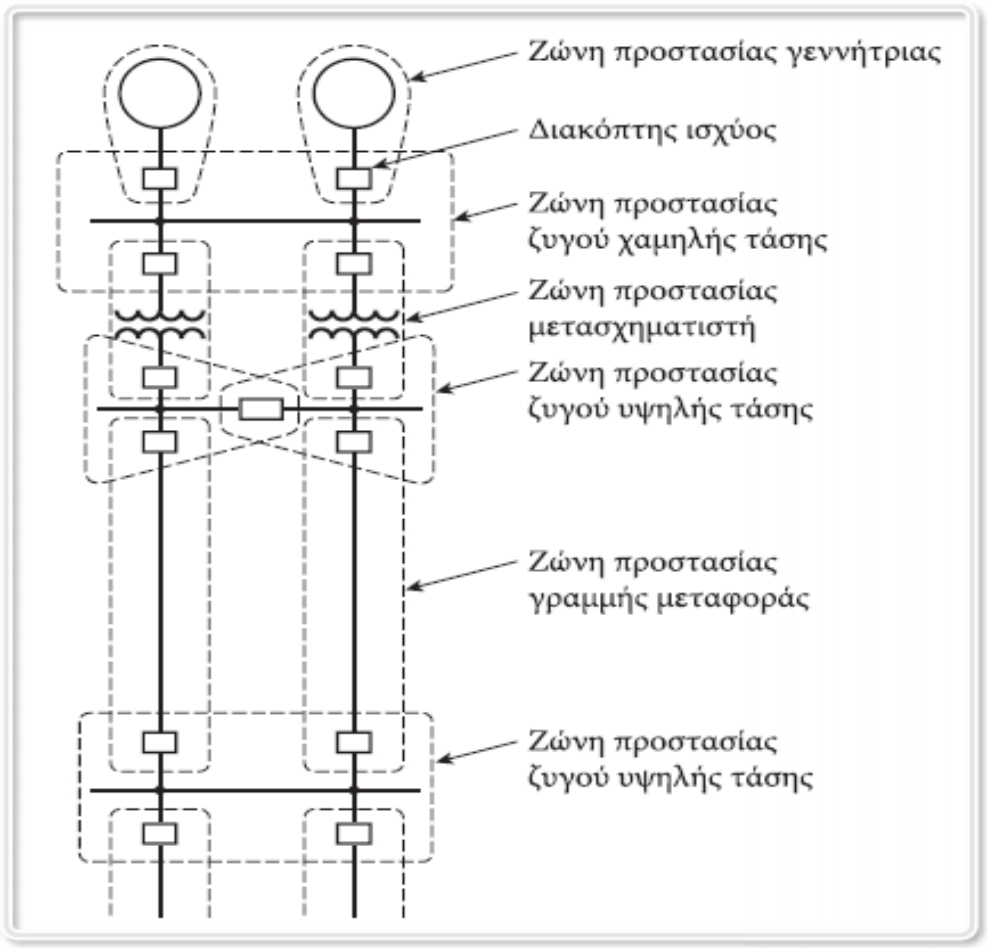
Μπορούν παραδείγματος χάρη να βρίσκονται και σε διαφορετικό υποσταθμό. Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το μονοφασικό διάγραμμα ενός τμήματος δικτύου με το οποίο μπορούμε να επεξηγήσουμε το μηχανισμό της πρωτεύουσας προστασίας.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.2 στην πρωτεύουσα προστασία, οι διακόπτες ισχύος τοποθετούνται στο σημείο σύνδεσης δύο ηλεκτρικών συσκευών όπως παραδείγματος χάρη ενός μετασχηματιστή, μιας Γραμμής Μεταφοράς, μιας γεννήτριας κ.α. Έτσι αποκόπτεται μόνο η συσκευή στην οποία εμφανίστηκε η διαταραχή.

Υπάρχει όμως περίπτωση, προκειμένου να μειωθεί το κόστος, ο διακόπτης ισχύος να μην τοποθετηθεί σε αυτή τη θέση. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, τότε σε περίπτωση σφάλματος σε μία εκ των δύο συσκευών θα πρέπει να απομονωθούν και οι δύο. Ακόμα, γύρω από κάθε στοιχείο του δικτύου δημιουργείται μία ζώνη προστασίας.

Αυτό συμβαίνει διότι εάν συμβεί ένα σφάλμα σε μία ζώνη, ενεργοποιούνται μόνο οι διακόπτες της ζώνης αυτής. Βέβαια εάν συμβεί ένα σφάλμα στην περιοχή εκείνη όπου επικαλύπτονται δύο ζώνες θα ενεργοποιηθούν οι διακόπτες και των δύο περιοχών, που είναι περισσότεροι από ότι χρειάζονται προκειμένου να απομονωθεί το σφάλμα.

Εάν όμως δεν υπήρχε η επικάλυψη, η οποία καλύπτει ένα ελάχιστο μέρος του δικτύου, και συνέβαινε ένα βραχυκύκλωμα στην περιοχή αυτή δε θα ενεργοποιούταν οι διακόπτες ισχύος, πράγμα που θα είχε καταστροφικές συνέπειες για το σύστημα. Η τελευταία παρατήρηση που εξάγεται από το Σχήμα 5.2 είναι ότι η περιοχή επικάλυψης δύο ζωνών προστασίας περιέχει ένα διακόπτη προστασίας, καθώς σε περίπτωση σφάλματος εκτός της περιοχής αυτής πρέπει να ενεργοποιούνται οι ελάχιστοι δυνατοί διακόπτες.



Σχήμα 5.2: Μονοφασικό διάγραμμα ενός τμήματος ηλεκτρικού συστήματος που διασαφηνίζει την κύρια προστασία

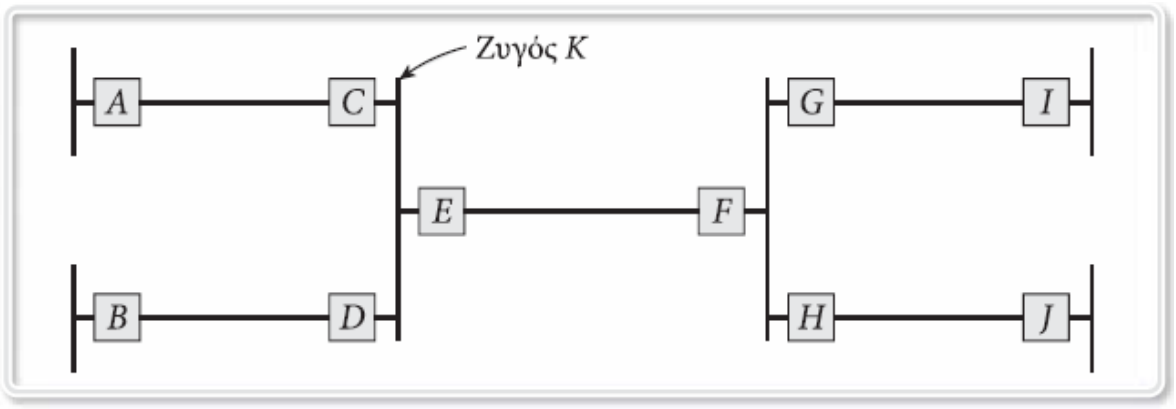
5.3.2 Προστασία υποστήριξης (βοηθητική προστασία)

Η προστασία υποστήριξης ή αλλιώς βοηθητική προστασία, ενεργοποιείται μόνο όταν στο δίκτυο εμφανίζονται σφάλματα από βραχυκυκλώματα καθώς για τα υπόλοιπα είδη σφαλμάτων το κόστος είναι ασύμφορο.

Η βοηθητική προστασία όπως δείχνει και το όνομά της, ενεργοποιείται όταν αποτύχει η πρωτεύουσα προστασία να εκκαθαρίσει το σφάλμα. Όπως είναι προφανές, η προστασία υποστήριξης καθυστερεί χρονικά της πρωτεύουσας προστασίας. Η βοηθητική προστασία πρέπει να είναι ανεξάρτητη της πρωτεύουσας.

Για το λόγο αυτό, τοποθετείται σε διαφορετικό σταθμό από ότι η πρωτεύουσα προστασία. Επιπλέον, η προστασία υποστήριξης λειτουργεί ως πρωτεύουσα προστασία

όταν επιδιορθώνεται ή συντηρείται η πρωτεύουσα προστασία. Στο Σχήμα 5.3 παρατίθεται ένα παράδειγμα λειτουργίας της βοηθητικής προστασίας προκειμένου να διασαφηνιστεί ο τρόπος λειτουργίας της.



Σχήμα 5.3: Παράδειγμα προστασίας υποστήριξης για τη γραμμή EF

Η προστασία υποστήριξης για τη γραμμή EF ρυθμίζεται έτσι ώστε να ελέγχει τους διακόπτες A, B, I, J. Έστω ότι εξαιτίας ενός βραχυκυκλώματος στη γραμμή EF, ο διακόπτης E δεν λειτούργησε. Σε αυτή την περίπτωση αναλαμβάνει δράση η βοηθητική προστασία και ενεργοποιούνται οι διακόπτες που ανήκουν στον κοντινότερο ζυγό του K, δηλαδή οι διακόπτες A, B.

Οι διακόπτες A, B εφόσον ανήκουν σε διαφορετικό ζυγό από τον E είναι απίθανο να επηρεαστούν από την ίδια αιτία που έκανε τον διακόπτη ισχύος E να μην λειτουργήσει. Ο διακόπτης F ανήκει και αυτός στη βοηθητική προστασία της γραμμής EF.

Έστω τώρα ότι συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς BD. Όπως και πριν έτσι και τώρα θα ενεργοποιηθούν με μία μικρή καθυστέρηση, οι ηλεκτρονόμοι υποστήριξης της γραμμής BD, δηλαδή οι A, F. [5,4]

5.4 Δομή ενός δικτύου προστασίας

Ένα δίκτυο προστασίας ενός ΣΗΕ απαρτίζεται από τρία κύρια μέρη:

1. Από τους αυτόματους διακόπτες ισχύος (circuit breakers) οι οποίοι παίρνουν την εντολή από τους ηλεκτρονόμους προκειμένου να ανοίξουν τις επαφές τους σε περίπτωση σφάλματος και να τις ξανακλείσουν μόλις επανέλθει το τμήμα του δικτύου στη μόνιμη κατάστασή του. Όλη αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνεται μέσα σε μερικά ms.

2. Από τους ηλεκτρονόμους προστασίας (relays), που αναγνωρίζουν τη διαταραχή και θέτουν σε λειτουργία τους αυτόματους διακόπτες ισχύος προκειμένου να διορθωθεί το σφάλμα.
3. Από τους μετατροπείς σήματος (signal transformers) οι οποίοι είναι ουσιαστικά μετασχηματιστές τάσης και ρεύματος που ειδοποιούν τους ηλεκτρονόμους όταν εμφανίζεται η διαταραχή. Οι ειδικοί αυτοί μετασχηματιστές υποβιβάζουν το ρεύμα του σφάλματος καθώς και την τάση σε μικρότερες τιμές και με τις τιμές αυτές ειδοποιούν τους ηλεκτρονόμους.

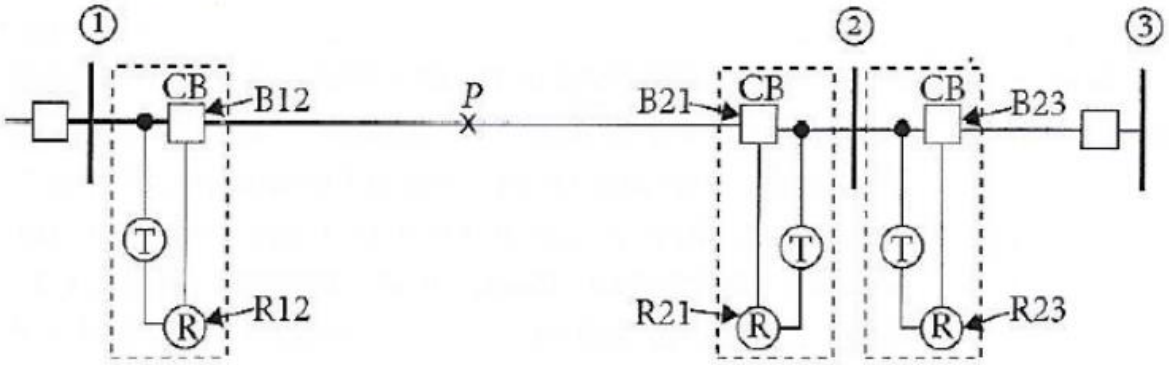
Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται πως οι τρεις αυτές μονάδες προστασίας αλληλεπιδρούν προκειμένου να εξαλείψουν την διαταραχή. Οι μονάδες αυτές προστασίας χαρακτηρίζονται από διπλή αρίθμηση. Ο πρώτος αριθμός δηλώνει το ζυγό στον οποίο ανήκει η εκάστοτε μονάδα προστασίας ενώ ο συνδυασμός και των δύο αριθμών υποδεικνύει τον προσανατολισμό της προστασίας.

Παραδείγματος χάρη ο διακόπτης ισχύος B21 και ο ηλεκτρονόμος R21 βρίσκονται στο ζυγό 2 και είναι υπεύθυνοι για τη προστασία της γραμμής μεταφοράς 2-1. Οι διακόπτες μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Ας δείξουμε τώρα με ένα παράδειγμα πως λειτουργούν αρμονικά αυτές οι τρεις μονάδες προστασίας.

Έστω τώρα το βραχυκύκλωμα στο σημείο P του Σχήματος 5.4, το οποίο ανιχνεύεται από τους ποιο κοντινούς ηλεκτρονόμους τους R21 και R12 δηλαδή. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί αντιλαμβάνονται τη διαταραχή από τους αντίστοιχους μετατροπείς σήματος T. Έπειτα οι ηλεκτρονόμοι αυτοί θέτουν σε λειτουργία τους διακόπτες B21 και B12 που ανοίγουν τις επαφές τους και απομονώνουν έγκαιρα το σφάλμα. Οι διακόπτες ισχύος B21 και B12 σταματούν το ρεύμα μόλις το ρεύμα βραχυκύκλωσης που διαπερνά τις επαφές τους γίνει μηδέν (I=0), προκειμένου να αποσβεστεί το τόξο που δημιουργείται. Το χρονικό διάστημα που διαπερνά από τη στιγμή που εντοπίζεται το σφάλμα μέχρι τη στιγμή που οι διακόπτες ισχύος απομονώνουν τη γραμμή είναι της τάξεως των 100 ms.

Τέλος αξίζει να τονιστεί ότι ο ηλεκτρονόμος προστασίας R23 αντιλαμβάνεται και αυτός την αύξηση του ρεύματος και τη μείωση της τάσης που συμβαίνει από τον αντίστοιχο μετατροπέα σήματος που τον τροφοδοτεί. Δεν θέτεται σε λειτουργία όμως παρά μόνο

στην περίπτωση που αποτύχουν να ενεργοποιηθούν οι άλλοι δύο ηλεκτρονόμοι καθώς ανήκει στην βοηθητική προστασία της γραμμής. [4,5]



Σχήμα 5.4: Μονάδες προστασίας ενός δικτύου

5.5 Βλάβες στις μονάδες προστασίας

Υπάρχουν πολλές αιτίες στις οποίες μπορεί να οφείλεται η μη λειτουργία των διακοπτών ισχύος καθώς και των ηλεκτρονόμων προστασίας. Στις περιπτώσεις αυτές λαμβάνει δράση η βοηθητική προστασία η οποία αφού περάσει ένα μικρό χρονικό διάστημα ενεργοποιείται και επαναφέρει το σύστημα στη φυσιολογική του κατάσταση. Οι λόγοι για τους οποίους ένας ηλεκτρονόμος μπορεί να μην λειτουργήσει είναι:

- Να συμβεί ένα σφάλμα στον μετατροπέα σήματος, με αποτέλεσμα να μην ενημερωθεί ο ηλεκτρονόμος για την διαταραχή.
- Βλάβη στους ίδιους τους ηλεκτρονόμους.
- Βλάβη στις βοηθητικές διατάξεις.

Οι αιτίες για τις οποίες ενδέχεται να μην λειτουργήσουν οι διακόπτες ισχύος είναι:

- Οι διακόπτες ισχύος σταματούν να τροφοδοτούνται από DC τάση.
- Μηχανική βλάβη στον ίδιο τον διακόπτη.
- Καταστροφή των επαφών του διακόπτη διότι δεν έγινε επιτυχημένα η απόσβεση του ηλεκτρικού τόξου.
- Βραχυκύκλωμα στο πηνίο ενεργοποίησης (trip coil). [5]

5.6 Ηλεκτρονόμοι προστασίας

5.6.1 Εισαγωγή

Η κύρια λειτουργία ενός ηλεκτρονόμου προστασίας είναι να εποπτεύει συνεχώς ορισμένες ηλεκτρικές μεταβλητές του δικτύου, προκειμένου να ελέγξει εάν αυτές αποκλίνουν από τις επιτρεπτές τους τιμές.

Εάν οι ποσότητες αυτές ξεπεράσουν ορισμένα όρια τότε ο αντίστοιχος ηλεκτρονόμος θέτει σε λειτουργία τους διακόπτες ισχύος που ελέγχει, έτσι ώστε να αποκοπεί το αντίστοιχο τμήμα του δικτύου.

Οι ηλεκτρονόμοι λειτουργίας μόλις εντοπίσουν μία μη φυσιολογική τιμή στο ρεύμα ή στην τάση από την οποία τροφοδοτούνται, ενεργοποιούν τους αντίστοιχους διακόπτες ισχύος, οι οποίοι απομονώνουν το κομμάτι του δικτύου για το οποίο είναι υπεύθυνοι. Ανάλογα με τον τύπο του βραχυκυκλώματος (3φ, SLG, LL, DLG) καθώς και το σημείο όπου σημειώθηκε υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις στις τιμές που μπορούν να πάρουν το ρεύμα και η τάση.

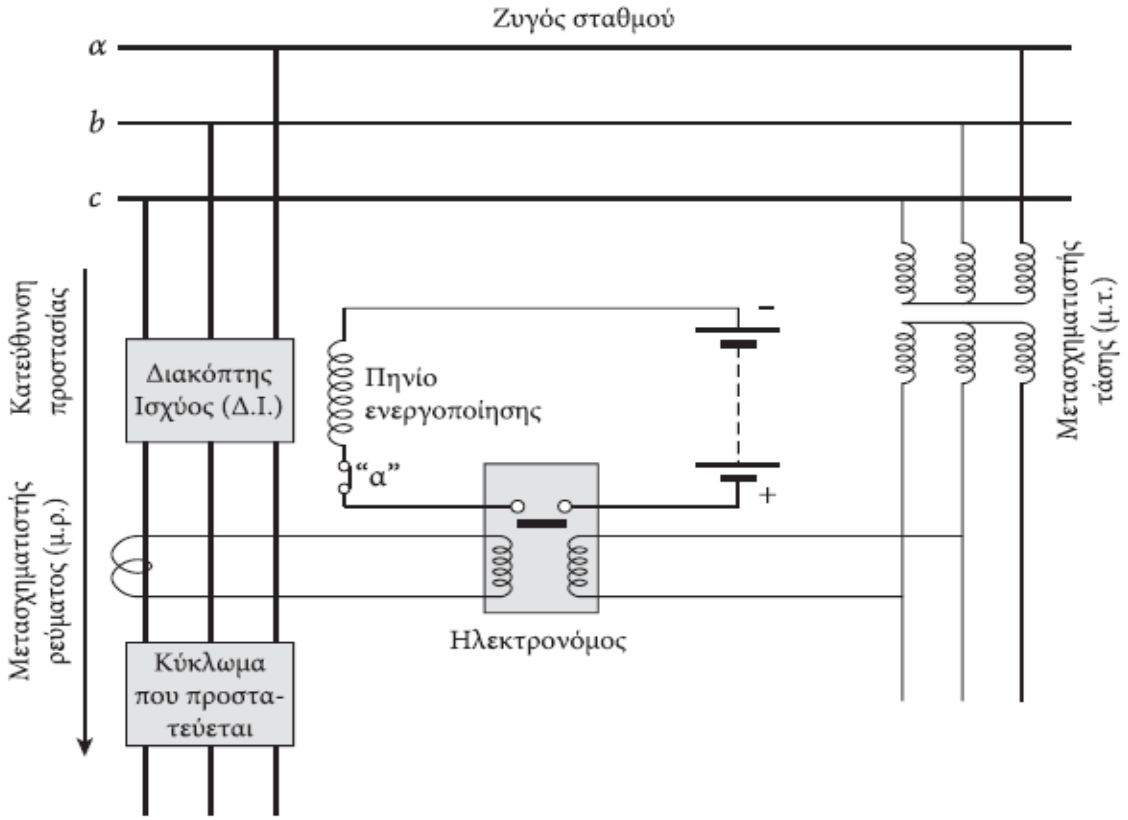
Εξαιτίας, αυτών των πολλών διαφοροποιήσεων κατασκευάστηκαν και πολλά είδη ηλεκτρονόμων τα οποία εντοπίζουν τις αλλαγές που συμβαίνουν. Οι διαφοροποιήσεις αυτές βρίσκονται στα εξής μεγέθη:

1. Συχνότητα.
2. Μέτρο.
3. Γωνία φάσης.
4. Ρυθμό Μεταβολής.
5. Διάρκεια.
6. Κυματομορφή ή αρμονικές.
7. Διεύθυνση ή διαδοχή των μεταβολών.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.5 μόλις εμφανιστεί ένα σφάλμα σε αυτό το τμήμα του δικτύου κλείνουν οι επαφές του ηλεκτρονόμου και επιτρέπεται η ροή DC ρεύματος μέσα από το πηνίο ενεργοποίησης. Εξαιτίας της μεγάλης σταθεράς χρόνου, που διαθέτει το πηνίο ενεργοποίησης, $\frac{L}{R}$ το ρεύμα ενεργοποίησης ακολουθεί εκθετική αύξηση.

Έπειτα θέτεται σε λειτουργία ο διακόπτης ισχύος, προτού όμως το πηνίο ενεργοποίησης φορτιστεί πλήρως. Για αυτό το λόγο το παρόλο που το πηνίο ενεργοποίησης φορτίζεται πλήρως στα 30Α οι επαφές των ηλεκτρονόμων δέχονται μικρότερα ρεύματα της τάξεως των 1 ή 5Α.

Αφού τεθεί σε λειτουργία ο διακόπτης ισχύος ανοίγει ο βοηθητικός διακόπτης α, αποδιεγείρεται ο ηλεκτρονόμος και το κύκλωμα επιστρέφει στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του. [4]

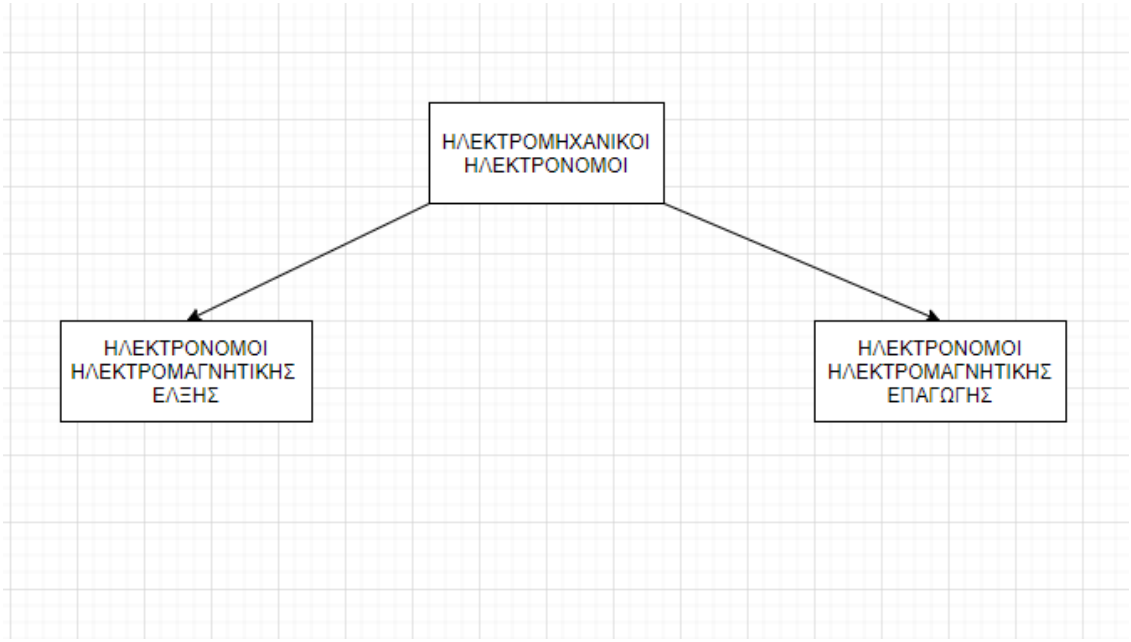


Σχήμα 5.5: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμου προστασίας

5.6.2 Ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι

Μία από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες ηλεκτρονόμων προστασίας αποτελούν οι ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι. Η πλειοψηφία των ηλεκτρομηχανικών ηλεκτρονόμων που συναντώνται σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Οι ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6:

1. Στους ηλεκτρονόμους ηλεκτρομαγνητικής έλξης.
2. Στους ηλεκτρονόμους ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 5.6: Κατηγορίες ηλεκτρομηχανικών ηλεκτρονόμων

Οι ηλεκτρονόμοι ηλεκτρομαγνητικής έλξης αποτελούνται από ένα σωληνοειδές πηνίο μέσα στο οποίο βρίσκεται ένα στέλεχος που έλκεται από το πηνίο αυτό. Οι ηλεκτρονόμοι ηλεκτρομαγνητικής έλξης μπορούν να αποτελούνται και από έναν οπλισμό ο οποίος έλκεται από τους πόλους ενός ισχυρού ηλεκτρομαγνήτη.

Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί τροφοδοτούνται είτε με συνεχές είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα. Από την άλλη μεριά η λειτουργία των ηλεκτρονόμων ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής βασίζεται στον επαγωγικό κινητήρα. Κατ' επέκταση, ονομάζονται και επαγωγικού τύπου και τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα.

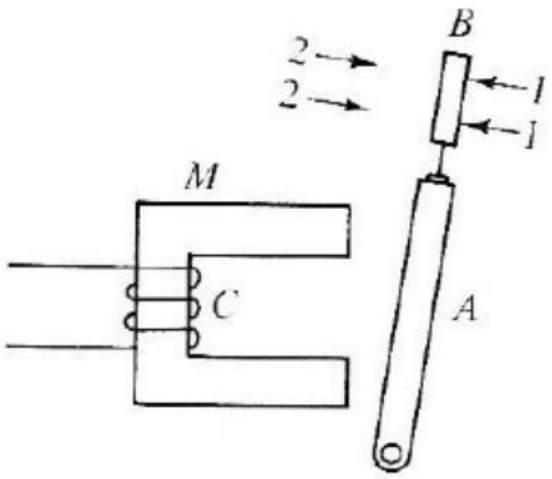
5.6.2.1 Ηλεκτρονόμος κινούμενου οπλισμού

Ο ηλεκτρονόμος κινούμενου οπλισμού (moving-armature relay) αποτελείται από ένα πηνίο C το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από σιδηρομαγνητικό υλικό M και από ένα κινητό οπλισμό A (Σχήμα 5.7). Όταν δεν περνάει ρεύμα μέσα από το πηνίο C, ο οπλισμός A

εξαιτίας της βαρύτητας έχει μία κλίση προς τα δεξιά με αποτέλεσμα να κλείνουν οι επαφές 1-1.

Όταν όμως συμβεί ένα σφάλμα, εμφανίζονται αυξανόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης τα οποία αφού περάσουν από ειδικούς μετασχηματιστές φτάνουν και στο πηνίο C. Εξαιτίας της ύπαρξης ρεύματος στο πηνίο δημιουργείται μία δύναμη που είναι μεγαλύτερη από αυτή της βαρύτητας και έλκει τον οπλισμό A προς τα αριστερά με αποτέλεσμα να κλείνουν οι επαφές 2-2 και να ανοίγουν οι 1-1.

Η μικρότερη τιμή που απαιτείται να πάρει το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο προκειμένου να στρίψει τον οπλισμό προς τα αριστερά ονομάζεται ρεύμα επιλογής (pick-up current).

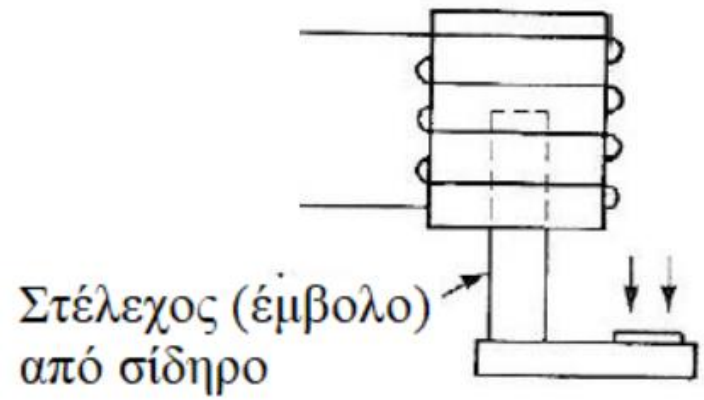


Σχήμα 5.7: Ηλεκτρονόμος κινούμενου οπλισμού

5.6.2.2 Ηλεκτρονόμος σωληνοειδούς

Οι ηλεκτρονόμοι σωληνοειδούς (solenoid relay) αποτελούνται από έναν οπλισμό, που μπορεί να είναι ένα έμβολο είτε ένα στέλεχος, ο οποίος περιβάλλεται από ένα σωληνοειδές πηνίο (Σχήμα 5.8). Όπως και πριν όταν δε περνάει ρεύμα μέσα από το πηνίο, ο οπλισμός λόγω της δράσης της βαρύτητας τραβιέται προς τα κάτω με αποτέλεσμα να ανοίγουν οι επαφές του.

Όταν όμως περάσει ρεύμα ο οπλισμός έλκεται από το πηνίο και εισέρχεται στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα να κλείνουν οι επαφές του. Η δύναμη αυτή που έλκει τον οπλισμό είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.

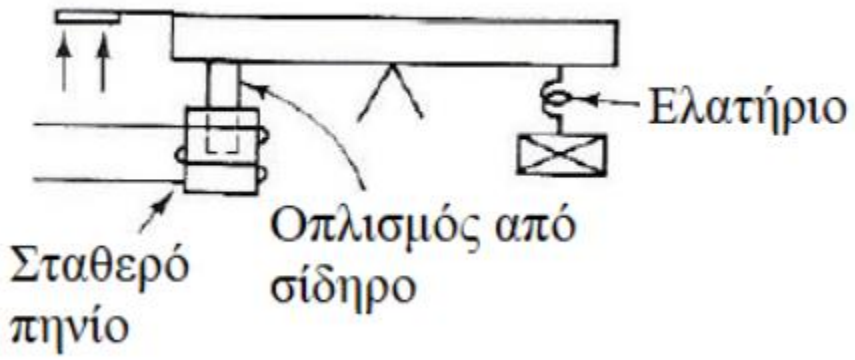


Σχήμα 5.8: Ηλεκτρονόμος σωληνοειδούς

5.6.2.3 Ηλεκτρονόμος με ζυγό ισορροπίας

Οι ηλεκτρονόμοι με ζυγό ισορροπίας αποτελούνται από μία ράβδο στο αριστερό άκρο της οποίας κρέμεται ένας μεταλλικός οπλισμός από σίδηρο ο οποίος είναι τυλιγμένος από ένα σωληνοειδές πηνίο. Στην δεξιά μεριά της ράβδου υπάρχει ένα ελατήριο επαναφοράς (Σχήμα 5.9).

Υπό την προϋπόθεση ότι το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα η δύναμη του ελατηρίου στρέφει τη ράβδο προς τα δεξιά αφήνοντας τις επαφές του ηλεκτρονόμου ανοικτές. Όταν όμως το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς δημιουργεί μία δύναμη στο αριστερό άκρο της ράβδου που υπερνικά του ελατηρίου. Έτσι η ράβδος στρέφεται προς τα αριστερά και οι επαφές του ηλεκτρονόμου κλείνουν.



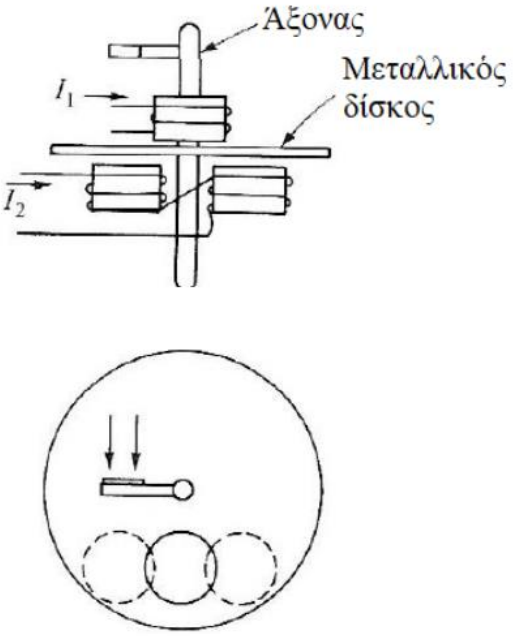
Σχήμα 5.9: Ηλεκτρονόμος με ζυγό ισορροπίας

5.6.2.4 Επαγωγικός ηλεκτρονόμος με μεταλλικό δίσκο ή κύλινδρο

Ο επαγωγικός ηλεκτρονόμος με μεταλλικό δίσκο ή κύλινδρο (induction disk or cup relay) βασίζει τη λειτουργία του στην αρχή του επαγωγικού κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας της διαφοράς φάσης που αναπτύσσεται μεταξύ των ρευμάτων I_1, I_2 του Σχήματος 5.10 αναπτύσσεται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο μέσω του φαινομένου της επαγωγής δημιουργεί ρεύματα πάνω στο μεταλλικό δίσκο τα οποία τον περιστρέφουν.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.10 διαφορετικά ρεύματα I_1, I_2 διαρρέουν κάθε πηνίο. Η ροπή που εμφανίζεται επάνω στο δίσκο, στην οποία οφείλεται και η περιστροφή του δίσκου δίνεται από την εξής σχέση: $T = K_D I_1 I_2 \sin\theta$ (5.1). Όπου θ η διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων I_1, I_2. Με την περιστροφή του δίσκου κλείνουν οι επαφές του ηλεκτρονόμου.

Η χρονική διάρκεια που απαιτείται για να κλείσουν οι επαφές του ηλεκτρονόμου εξαρτάται από την ροπή Τ και ταχύτητα u με την οποία περιστρέφεται. Όσο περισσότερο ρεύμα τον διαπερνά τόσο πιο γρήγορα κλείνουν οι επαφές του, χρόνος και ρεύμα δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογα ποσά. [5,7]



Σχήμα 5.10: Επαγωγικός ηλεκτρονόμος με μεταλλικό δίσκο ή κύλινδρο

5.7 Χρόνος απόκρισης ηλεκτρονόμων

Χρόνος ενεργοποίησης ή απόκρισης ονομάζεται ο χρόνος εκείνος που απαιτείται από τη στιγμή που το ρεύμα επιλογής εισέρχεται στον αντίστοιχο ηλεκτρονόμο μέχρι και τη χρονική στιγμή εκείνη που κλείνουν οι διακόπτες του. Όπως είναι προφανές, κάθε είδος ηλεκτρονόμου δεν δύναται να έχει τον ίδιο χρόνο απόκρισης.

Επομένως, χρειάζεται αλληλοβοήθεια μεταξύ των ηλεκτρονόμων ενός δικτύου προκειμένου να απομονώσουν τη πληγείσα περιοχή του δικτύου. Υπάρχουν τρείς διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να ρυθμίζεται ο χρόνος ενεργοποίησης ενός Ηλεκτρονόμου.

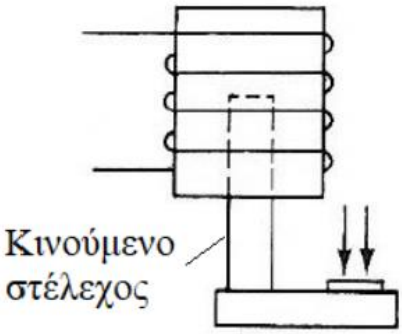
1. Ηλεκτρονόμοι στιγμιαίου χρόνου. Σε αυτού του είδους τους ηλεκτρονόμους δεν υπάρχει καμία χρονική καθυστέρηση, καθώς ενεργοποιούνται μόλις το ρεύμα επιλογής από το μετατροπέα σήματος φτάσει στο πηνίο του ηλεκτρονόμου.

2. Ηλεκτρονόμοι σταθερού χρόνου. Σε αυτού του είδους τους ηλεκτρονόμους ο χρόνος απόκρισης είναι σταθερός και ορίζεται από τον χειριστή του δικτύου. Το κλείσιμο των επαφών τους επιτυγχάνεται εφόσον τόσο ο χρόνος ενεργοποίησης όσο και το ρεύμα λάβουν αποδεκτές τιμές.

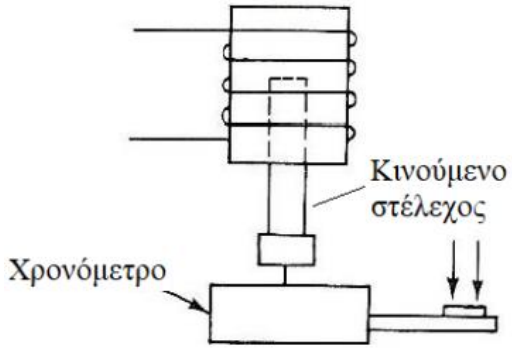
3. Ηλεκτρονόμοι αντιστρόφου χρόνου. Σε αυτού του είδους τους ηλεκτρονόμους ο χρόνος απόκρισης υπολογίζεται με βάση το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο. Πιο συγκεκριμένα, όσο περισσότερο είναι το ρεύμα που διαπερνά το πηνίο τόσο πιο γρήγορα πρέπει να τεθεί σε λειτουργία ο ηλεκτρονόμος.

   Προκειμένου να υλοποιηθούν οι ηλεκτρονόμοι αντιστρόφου χρόνου, τοποθετούνται υδραυλικοί μηχανισμοί επιβράδυνσης οι οποίοι εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της τριβής επιβραδύνουν την κίνηση του στελέχους που βρίσκεται μέσα στο πηνίο.

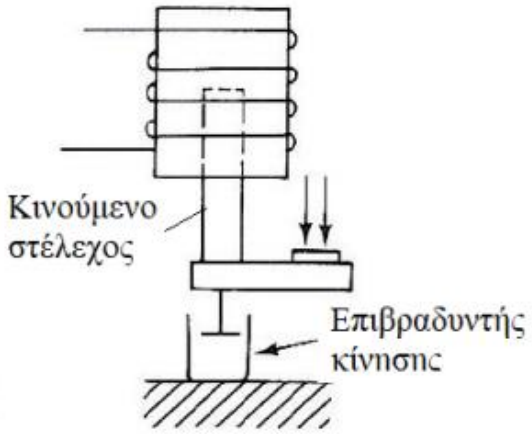
Παρακάτω απεικονίζεται ένα ηλεκτρονόμος σωληνοειδούς ο οποίος ύστερα από κατάλληλες τροποποιήσεις λειτουργεί στην πρώτη περίπτωση ως ηλεκτρονόμος στιγμιαίου χρόνου, στη δεύτερη περίπτωση ως σταθερού χρόνου και στην τρίτη ως αντιστρόφου χρόνου.



Ηλεκτρονόμος στιγμιαίου χρόνου



Ηλεκτρονόμος σταθερού χρόνου



Ηλεκτρονόμος αντιστρόφου χρόνου

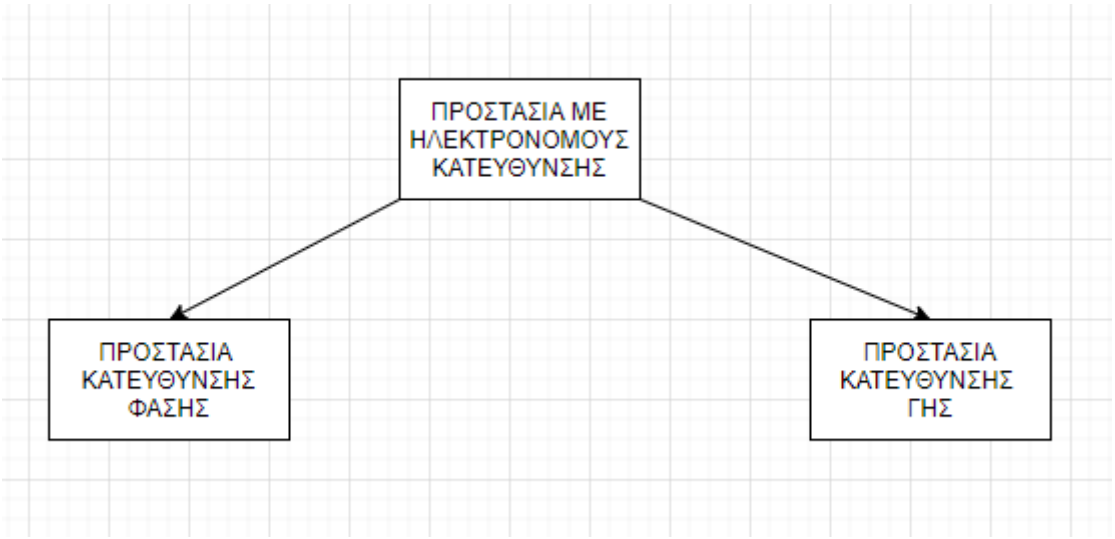
5.8 Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης

Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης ονομάζονται εκείνοι οι ηλεκτρονόμοι οι οποίοι ενεργοποιούνται μόνο προς τη μία κατεύθυνση από τη θέση του ηλεκτρονόμου. Η προστασία της αντίστοιχης ζώνης προστασίας είναι δηλαδή μονόδρομη και όχι αμφίδρομη. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί συναντώνται κυρίως σε δίκτυα υψηλής τάσης (High Voltage 150 kV), είτε σε υπερυψηλής τάσης (Extreme High Voltage 400 kV). Οι εφαρμογές των ηλεκτρονόμων αυτού του είδους απαντώνται σε:

- Γεννήτριες (generators) στις οποίες η ισχύς είναι θετική ρέει δηλαδή προς το υπόλοιπο δίκτυο. Στην περίπτωση των γεννητριών εάν συμβεί ένα σφάλμα η ισχύς θα έχει αντίθετη κατεύθυνση και θα λειτουργεί ως κινητήρας. Την αντιστροφή αυτή της ισχύος την αντιλαμβάνεται ο ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης ο οποίος θέτεται σε λειτουργία κλείνοντας τις επαφές του, προκειμένου να απομονώσει το σφάλμα.
- Σε συστήματα με πολλές πηγές.
- Σε συστήματα κλειστού βρόγχου ή παράλληλων καλωδίων.
- Σε συστήματα με επανδρωμένο ουδέτερο για την ανάδραση των χωρητικών ρευμάτων.

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης αναγνωρίζουν την ισχύ που ρέει στο δίκτυο, το γινόμενο δηλαδή του ρεύματος επί της τάσης. Στην περίπτωση όπου η κατεύθυνση του ρεύματος και η κατεύθυνση ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου ταυτίζονται, η ποσότητα $V^{*}I$ είναι μεγαλύτερη του μηδενός με αποτέλεσμα ο ηλεκτρονόμος να αντιλαμβάνεται το σφάλμα και να κλείνει τις επαφές του.

Εάν όμως $V^{*}I<0$ δηλαδή τα δύο μεγέθη έχουν διαφορά φάσης 180^{o} παραμένουν ανοικτές οι επαφές του. Υπάρχουν δύο είδη προστασίας χρησιμοποιώντας ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης, η προστασία κατεύθυνσης φάσης και η προστασία κατεύθυνσης γης (Σχήμα 5.11). [4]

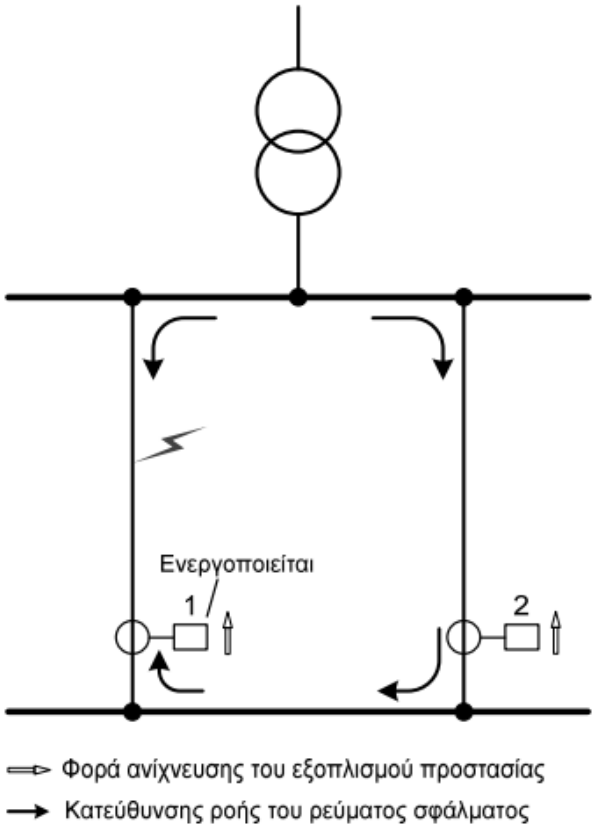


Σχήμα 5.11: Κατηγορίες ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης

- Η προστασία κατεύθυνσης φάσης είναι υπεύθυνη για την προστασία των παράλληλων συνδέσεων ενός κλειστού βρόγχου ή τμήματος ενός δικτύου που συνδέεται με δύο πηγές ισχύος.

- Η προστασία κατεύθυνσης γης ελέγχει τον προσανατολισμό του ρεύματος, εάν το ρεύμα δηλαδή κατευθύνεται προς ή από τη γη. Αυτό το είδος της προστασίας είναι απαραίτητο όταν υπάρχουν περισσότερες από μία γειώσεις και το ρεύμα φάσης γείωσης αναγκάζεται να διαχωριστεί.

Το Σχήμα 5.12 διασαφηνίζει τη λειτουργία ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης που δημιουργείται δημιουργεί αμφίδρομη ροή μέσα στο τμήμα του δικτύου πράγμα που αντιλαμβάνεται ο ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης και ενεργοποιείται απομονώνοντας το βραχυκύκλωμα. [7]



Σχήμα 5.12: Λειτουργία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης

5.9 Ηλεκτρονόμοι απόστασης

5.9.1 Εισαγωγή

Έστω μία γραμμή μεταφοράς η οποία διαρρέεται από ρεύμα I και περιέχει μία σύνθετη αντίσταση Z. Η πτώση τάσης που αναπτύσσεται ισούται με V=Z*I. Κύριο μέλημα ενός ηλεκτρονόμου απόστασης (distance relay) είναι να συσχετίσει το ρεύμα I με την τάση V και να ενεργοποιηθεί όταν ισχύει V<Z*I.

Ελέγχει ουσιαστικά δηλαδή την τιμή της σύνθετης αντίστασης Z, η οποία είναι ηλεκτρικά ανάλογη του μήκους της γραμμής, για αυτό και ονομάζεται και ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης.

Οι ηλεκτρονόμοι απόστασης χρησιμοποιούνται κυρίως για τη προστασία ενός δικτύου υψηλής τάσης (ΥΤ). Αναλυτικότερα, εποπτεύουν την τιμή του κλάσματος της διαφοράς δυναμικού δύο φάσεων προς τη διαφορά των ρευμάτων αυτών των φάσεων, δηλαδή

$$\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = Z \qquad (5.2)$$

Προκειμένου να ανιχνευτούν όλα τα είδη σφαλμάτων (SLG, DLG, LL, 3φ στερεά και μη) χρησιμοποιούνται τρείς ηλεκτρονόμοι απόστασης, που τοποθετούνται ένας σε κάθε φάση.

Στην περίπτωση του ηλεκτρονόμου απόστασης με σύνθετη αντίσταση δημιουργούνται δύο είδη ροπών: μία θετική ροπή ή αλλιώς ενεργοποίησης, η οποία προέρχεται από το ρεύμα κυκλοφορίας και μία αρνητική ή αλλιώς επαναφοράς, η οποία προέρχεται από τη τάση που δημιουργείται.

Όπως είναι εύλογο, στην γενική εξίσωση της ροπής αυτού του είδους ηλεκτρονόμου το ρεύμα θα έχει θετικό "+" πρόσημο ενώ η τάση θα έχει αρνητικό πρόσημο "−". Έτσι λαμβάνοντας υπόψην και την αντιροπή που προκαλείται από τη δύναμη του ελατηρίου προκύπτει η εξίσωση:

$$T = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_3 \qquad (5.3)$$

όπου:

- I, V: η ενεργός τιμή του ρεύματος και της τάσης.
- K_3: η ροπή του ελατηρίου.

Στο σημείο ισορροπίας ισχύει T=0 και η σχέση 5.3 μετατρέπεται στην εξής σχέση:

$$K_2 V^2 = K_1 I^2 - K_3 \quad (5.4)$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με $K_2 I^2$ προκύπτει:

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2} \quad \text{ή} \quad \frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}} \quad (5.5)$$

Επειδή όμως το ελατήριο συνεισφέρει μόνο στην περίπτωση που το ρεύμα κυκλοφορίας είναι μικρό, πράγμα που συμβαίνει σπάνια, μπορούμε να το παραλείψουμε. Άρα K_3=0 και προκύπτει:

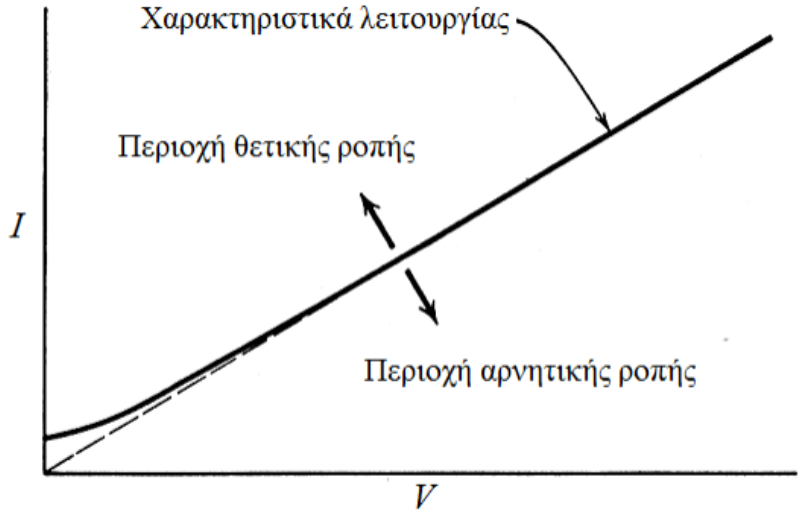
$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = \text{σταθερά} \quad (5.6)$$

5.9.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Προτού συνεχιστεί η ανάλυση των Ηλεκτρονόμων απόστασης, πρέπει πρώτα να επεξηγηθεί ο όρος λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρονόμου. Ο όρος λειτουργικά χαρακτηριστικά αναφέρεται στη διαχωριστική καμπύλη που δημιουργείται ανάλογα με την εκάστοτε τιμή του Z.

Η καμπύλη αυτή διαχωρίζει το διάγραμμα σε δύο περιοχές, την περιοχή θετικής ροπής και τη περιοχή αρνητικής ροπής. Ανάλογα και με το είδος του ηλεκτρονόμου απόστασης η γραφική αυτή παράσταση μεταβάλλεται. Στο Σχήμα 5.13 απεικονίζεται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης.

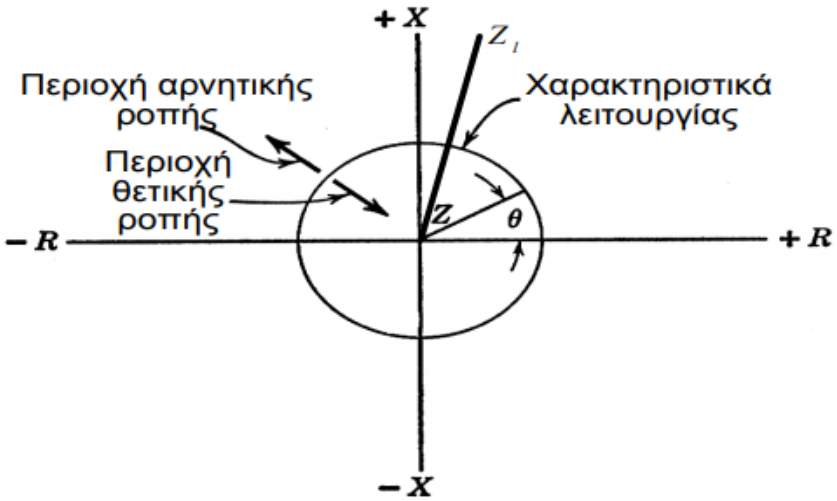
Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.13, τα διανύσματα των ρευμάτων που η κεφαλή τους βρίσκεται στη περιοχή θετικής λειτουργίας είναι και αυτά που ενεργοποιούν τον ηλεκτρονόμο προστασίας για αυτό και ονομάζονται και διανύσματα ενεργοποίησης. Το μικρότερο διάνυσμα ενεργοποίησης ονομάζεται ελάχιστο ρεύμα επιλογής (minimum current choice).



Σχήμα 5.13: Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης

Ένας άλλος και πιο διαδεδομένος, τρόπος αναπαράστασης των χαρακτηριστικών λειτουργίας είναι το διάγραμμα σύνθετης αντίστασης ή αλλιώς διάγραμμα αξόνων R-x, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 5.14. Το διάγραμμα αυτό αναπαρίσταται με έναν κύκλο με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνας $Z_B = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$ (5.7)

Τα διανύσματα τα οποία βρίσκονται εντός του κύκλου ανήκουν στην θετική περιοχή και εάν το Z ανήκει σε αυτά δηλαδή $Z<Z_B$ κλείνουν οι επαφές του ηλεκτρονόμου και τίθεται σε λειτουργία, ενώ αυτά που είναι απέξω από τον κύκλο, δηλαδή $Z>Z_B$ ανήκουν στην αρνητική περιοχή και αφήνουν ανοικτές τις επαφές του ηλεκτρονόμου. [4]

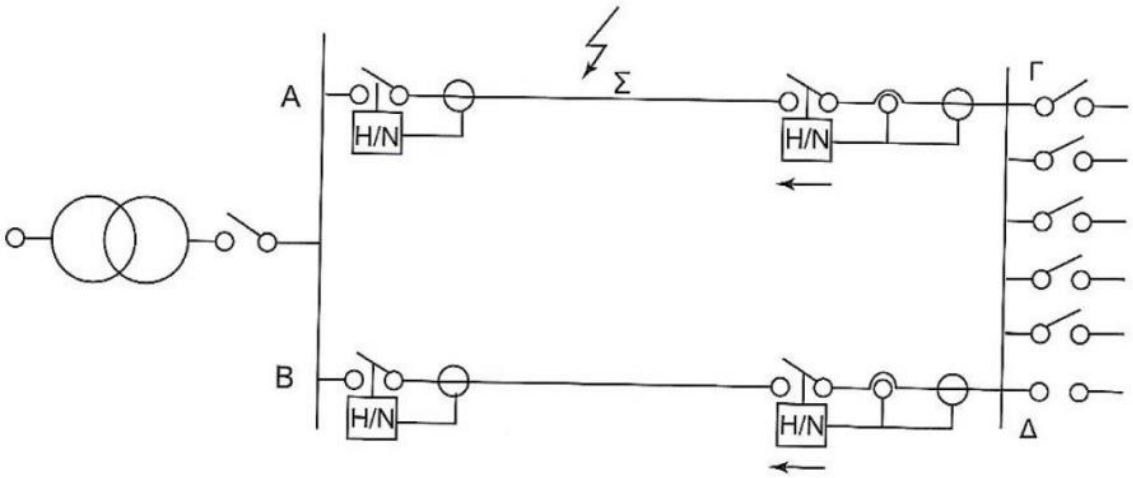


Σχήμα 5.14: Χαρακτηριστικά λειτουργίας ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης στο R-x

5.9.3 Συνδυασμός ηλεκτρονόμων απόστασης και κατεύθυνσης

Τις περισσότερες φορές αυτού του είδους οι ηλεκτρονόμοι συνδυάζονται με τους ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης και δημιουργούν τους ηλεκτρονόμους με προστασία κατεύθυνσης και απόστασης ή αλλιώς ηλεκτρονόμους αγωγιμότητας mho (directional distance relays or mho relays).

Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται μία συνιστώσα του δικτύου η οποία προστατεύεται τόσο από ηλεκτρονόμους απόστασης (Α, Β) όσο και από ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης (Γ, Δ). Το βραχυκύκλωμα στο σημείο Σ της γραμμής απομονώνεται με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των διακοπτών ισχύος που ελέγχονται από τους ηλεκτρονόμους Α και Γ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.15: Συνδυασμός ηλεκτρονόμων απόστασης και κατεύθυνσης

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών λειτουργίας, ενός ηλεκτρονόμου απόστασης και ενός κατεύθυνσης, στο R-x διάγραμμα.

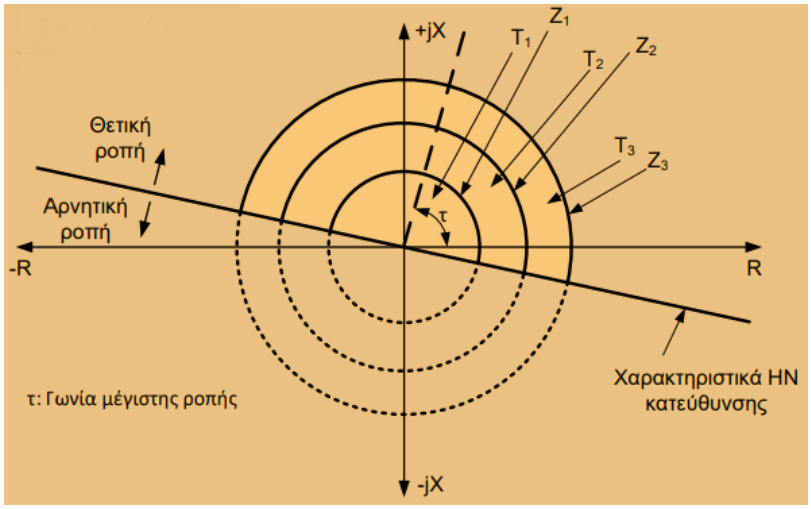
Με Z_1, Z_2, Z_3 αναπαριστώνται οι τιμές των σύνθετων αντιστάσεων των τριών φάσεων, οι οποίες θέτονται σε λειτουργία τις χρονικές στιγμές T_1, T_2, T_3 αντίστοιχα. Επίσης, απεικονίζεται και η χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης ως μία κεκλιμένη ευθεία ε.

Στην περίπτωση που $Z<Z_1$ κλείνουν οι επαφές και των τριών φάσεων. Μόλις κλείσουν οι επαφές της σύνθετης αντίστασης Z_1 θέτεται αμέσως σε λειτουργία και η μονάδα

κατεύθυνσης (direction unit) η οποία ειδοποιεί τον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος προκειμένου να ανοίξει τις επαφές του σε χρόνο T_1.

Εάν για κάποιο λόγο αποτύχει, λαμβάνουν δράση οι μονάδες προστασία Z_2, Z_3 που ενεργοποιούνται σε χρόνο T_2, T_3 αντίστοιχα όπου $T_1< T_2<T_3$. Εάν $Z_1<Z<Z_2$ τότε κλείνουν οι επαφές των δύο φάσεων. Μόλις κλείσουν οι επαφές της Z_2, ενεργοποιείται αμέσως η αντίστοιχη μονάδα κατεύθυνσης που ειδοποιεί τον διακόπτη ισχύος έτσι ώστε να ανοίξει τις επαφές του σε χρόνο T_2. Εάν δε συμβεί αυτό, τότε ενεργοποιείται η προστασία της μονάδας Z_3 σε χρόνο T_3 ($T_2<T_3$).

Τέλος, εάν $Z_2<Z<Z_3$ κλείνουν οι επαφές της Z_3 και ενεργοποιείται αμέσως η μονάδα κατεύθυνσης η οποία ειδοποιεί τον διακόπτη ισχύος προκειμένου να ανοίξει τις επαφές του τη χρονική στιγμή T_3.



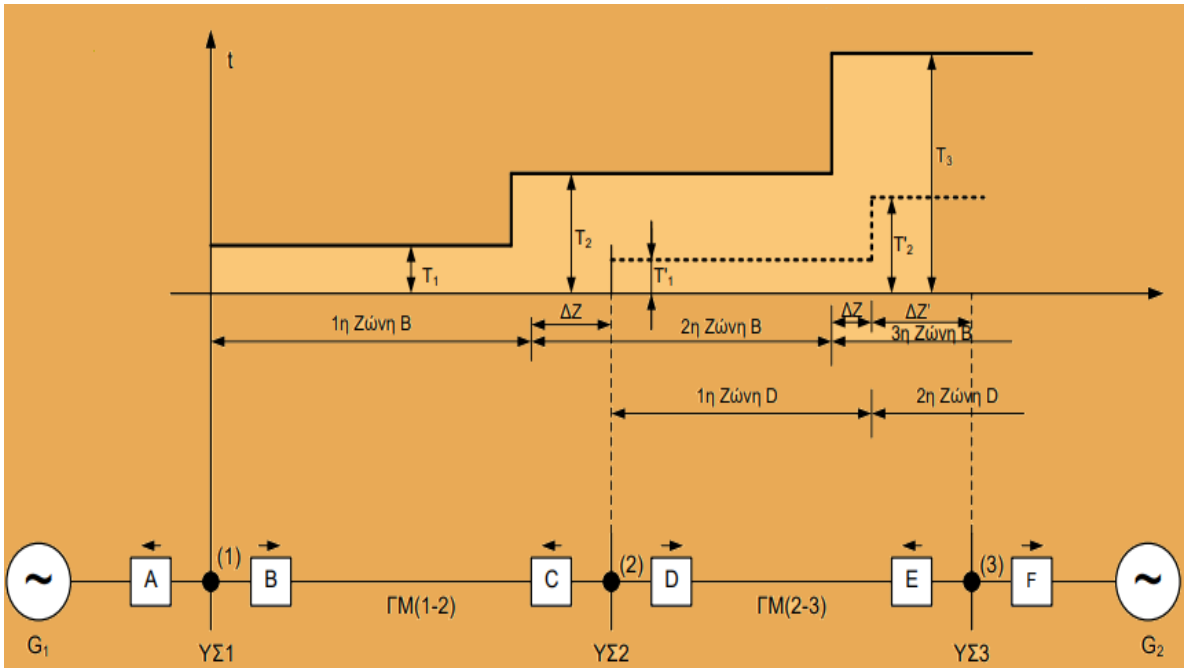
Σχήμα 5.16: Χαρακτηριστικά λειτουργίας ηλεκτρονόμων απόστασης και κατεύθυνσης

Υπάρχει όμως και ένας εναλλακτικός πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης των χαρακτηριστικών λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου με προστασία κατεύθυνσης και απόστασης. Αυτός είναι με κλιμακούμενους χρόνους εντολής ανοίγματος των διακοπτών ισχύος από τους ηλεκτρονόμους προστασίας.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.17, έστω ότι εμφανίζεται ένα σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς 1-2 ανάμεσα δηλαδή των υποσταθμών $ΥΣ_1$ και $ΥΣ_2$. Ο ηλεκτρονόμος προστασίας Β αναγνωρίζει τη διαταραχή και στέλνει εντολή στον διακόπτη ισχύος που ελέγχει προκειμένου να απομονώσει το σφάλμα σε χρόνο T_1.

Εάν τώρα το σφάλμα παρουσιαστεί στη γραμμή 2-3 ανάμεσα στους υποσταθμούς $ΥΠ_2$ και $ΥΠ_3$ ο ηλεκτρονόμος D λειτουργεί όπως ακριβώς λειτούργησε και ο ηλεκτρονόμος B προηγουμένως. Εάν όμως για κάποιο λόγο δεν λειτουργήσει ο ηλεκτρονόμος D, τότε λαμβάνει δράση η δευτερεύουσα προστασία και συγκεκριμένα ο ηλεκτρονόμος B σε χρόνο T_2 όπου $T_{2>} T_1$.

Επίσης, η προστασία τρίτης ζώνης ενεργοποιείται σε περίπτωση που δεν τεθούν σε λειτουργία οι ηλεκτρονόμοι D και F μέσα σε χρόνο T_3 όπου $T_3 > T_2 > T_1$. Η ίδια λογική ισχύει και εάν το σφάλμα ρυθμιζόταν από τους ηλεκτρονόμους C και E.



Σχήμα 5.17: Εναλλακτική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών λειτουργίας ηλεκτρονόμων απόστασης και κατεύθυνσης

Υπάρχει όμως περίπτωση να γίνει λάθος στην αναγνώριση του σημείου του σφάλματος. Παραδείγματος χάρη, έστω ένα σφάλμα που συμβαίνει στη γραμμή 3-2 ανάμεσα των υποσταθμών ΥΣ3 και ΥΣ2.

Λόγω λάθους αναγνωρίζεται ότι συνέβη στη γραμμή 2-1 ανάμεσα των υποσταθμών ΥΣ2 και ΥΣ1, και ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος C αντί του E, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η επιλεκτικότητα και η αξιοπιστία του συστήματος προστασίας. Για αυτό ακριβώς το λόγο έχουν οριοθετηθεί κάποια όρια απόστασης μέσα στα οποία δρα κάθε ζώνη προστασίας.

Η πρώτη ζώνη καλύπτει το 75%-85% για φασικούς ηλεκτρονόμους και το 75% για ηλεκτρονόμους γης με χρόνο απόκρισης περίπου ίσο με T_1=20ms. Η δεύτερη ζώνη αρχίζει από εκεί που τελείωσε η πρώτη, δηλαδή από το 85% και φτάνει μέχρι το 50% της επόμενης γραμμής, με την προϋπόθεση όμως ότι δεν υπερβαίνει την πρώτη ζώνη προστασίας της γειτονικής γραμμής.

Όσον αφορά την καθυστέρηση που υπάρχει αυτή είναι της τάξεως των 0,25sec + $t_{neighbour}$ ≈0,3-0,6 sec, όπου + $t_{neighbour}$ ο χρόνος ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος της γειτονικής γραμμής. Τέλος, η τρίτη ζώνη προστασίας παρέχει υποστήριξη σε περίπτωση σφάλματος στη γειτονική γραμμή μεταφοράς με χρόνο λειτουργίας της τάξεως του 1-2 sec. [4,5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 9 ΖΥΓΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ PSSE

6.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να καλυφθούν οι ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται ολοένα και πιο πολύπλοκα καθώς και μεγαλύτερα. Η μελέτη όμως αυτών των ολοένα και πολυπλοκότερων συστημάτων γίνεται ολοένα και πιο απαιτητική καθώς η ανάλυσή τους απαιτεί την επίλυση πολύπλοκων διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων.

Ευτυχώς, οι σημερινοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές παρέχουν την δυνατότητα επίλυσης των εξισώσεων αυτών σε πολύ μικρό χρόνο μέσα από πλήθος λογισμικών τα οποία χρησιμοποιούν διάφορες αριθμητικές μεθόδους όπως η μέθοδος των Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Euler κτλ.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι το Power System Simulator for Engineering (PSS®E το οποίο γράφεται και ως PSS/E).

Το πρόγραμμα αυτό δημιουργήθηκε το 1976 από την γερμανική εταιρία SIEMENS και σήμερα χρησιμοποιείται από πάνω από 140 χώρες. Από το 1976 που ξεκίνησε ως ένα απλό command line interface έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό. Τόσο πολύ μάλιστα, που σήμερα είναι σε θέση να αναλύει, προσομοιώνει και να βελτιστοποιεί την απόδοση ενός ηλεκτρικού συστήματος.

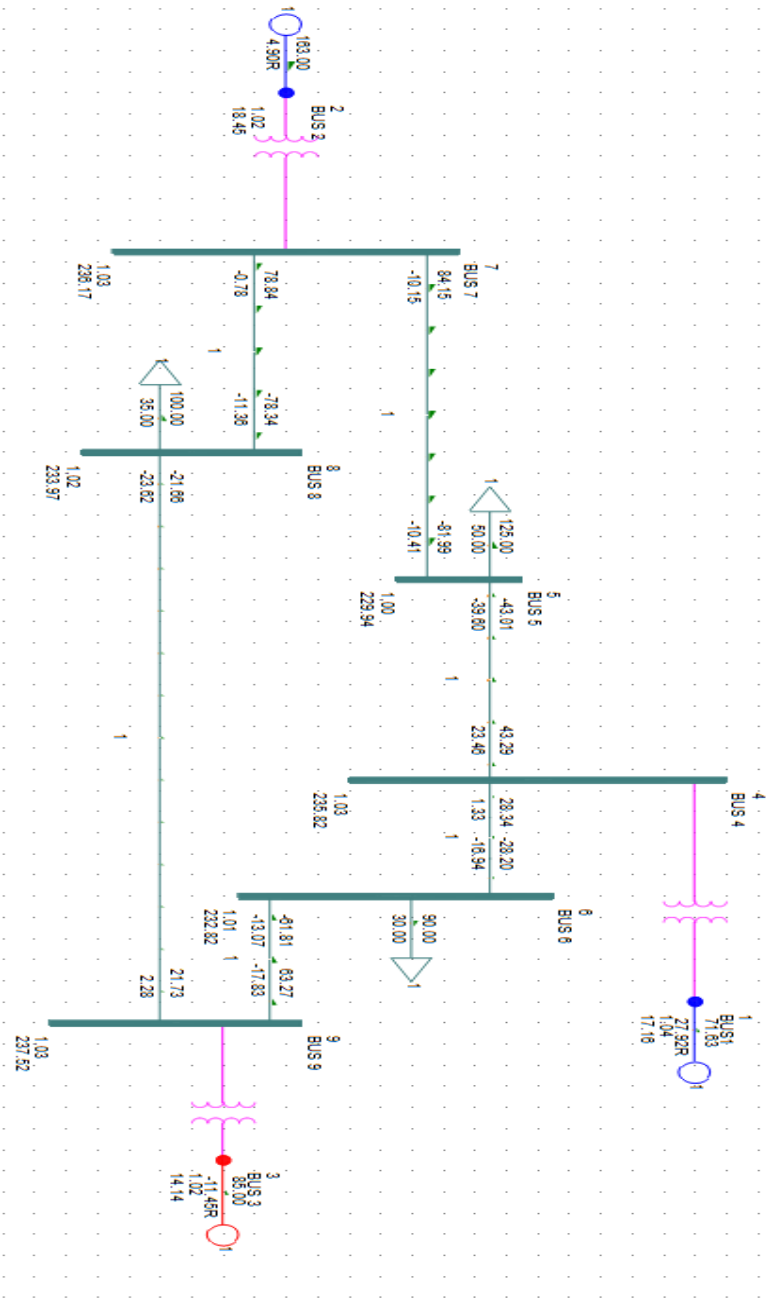
Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα PSS®E αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο σύνολο προγραμμάτων για μελέτες του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τόσο κατά τη μόνιμη λειτουργία του συστήματος όσο και κατά τη μεταβατική του λειτουργία. Ορισμένες από τις αναλύσεις που μπορεί να κάνει το PSS/E περιλαμβάνουν:

1. Ανάλυση ροής φορτίου.
2. Βέλτιστη ροή ισχύος.
3. Προσομοίωση συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων.
4. Μελέτη μεταβατικής ευστάθεια.
5. Κατασκευή ισοδύναμων δικτύων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το PSS/E για την προσομοίωση του συστήματος 9 ζυγών της IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) τόσο κατά τη μόνιμη όσο και κατά τη μεταβατική της λειτουργία. [9,10]

6.2 Δεδομένα του συστήματος των 9 ζυγών

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.1 το σύστημα των 9 ζυγών που μελετάμε διαθέτει τρεις γεννήτριες και τρία τροφοδοτούμενα φορτία. Ο ζυγός αναφοράς του συστήματος αυτού (slack bus) επιλέχθηκε να είναι ο ζυγός 1.



Σχήμα 6.1: Σύστημα 9 ζυγών της IEEE

Στον Πίνακα 6.1 βρίσκονται συγκεντρωμένα τα ονομαστικά στοιχεία όλων των ζυγών. Αυτά αφορούν τη ζώνη, την περιοχή, τον ιδιοκτήτη και την τιμή της $V_{βάσης}$ σε kV.

Πίνακας 6.1: Ονομαστικά στοιχεία Ζυγών

ΖΥΓΟΣ	ΖΩΝΗ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ	$V_{βάσης}$ (kV)
1	1	1	1	16,5
2	2	2	1	18
3	3	2	1	13,8
4	1	1	1	230
5	4	1	2	230
6	5	1	2	230
7	2	2	1	230
8	6	2	2	230
9	3	2	1	230

Στον Πίνακα 6.2 βρίσκονται συγκεντρωμένα τα ονομαστικά στοιχεία όλων των φορτίων. Αυτά αφορούν τον ίδιο το ζυγό, την πραγματική Ισχύ P, την άεργη ισχύ Q και την τιμή της $V_{βάσης}$ σε kV.

Πίνακας 6.2: Ονομαστικά στοιχεία Φορτίων

ΖΥΓΟΣ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ P (MW)	ΑΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ Q (MVAR)	$V_{βάσης}$ (kV)
5	125	50	230
6	90	30	230
8	100	35	230

Στον Πίνακα 6.3 βρίσκονται συγκεντρωμένα τα ονομαστικά στοιχεία όλων των γεννητριών. Αυτά αφορούν τον ίδιο το ζυγό, την αντίσταση R, την αντίδραση X, την τιμή της $V_{βάσης}$ σε kV, την ισχύ βάσης S_b καθώς και την p.u. τιμή της V_{gen}.

Πίνακας 6.3: Ονομαστικά στοιχεία Γεννητριών

ΖΥΓΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R (p.u.)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ X (p.u.)	ΙΣΧΥΣ ΒΑΣΗΣ S_b	$V_{βάσης}$ (kV)	V_{gen} (p.u.)
1	0,0001	0,1	260	16,5	1.04
2	0,0001	0,21	310	18	1.025
3	0,0001	0,21	280	13.8	1.025

Στον Πίνακα 6.4 βρίσκονται συγκεντρωμένα τα ονομαστικά στοιχεία όλων των Γραμμών Μεταφοράς. Αυτά αφορούν την ίδια την γραμμή, την αντίσταση R, την αντίδραση X, την p.u. τιμή της B καθώς και την τιμή της $V_{βάσης}$ σε kV.

Πίνακας 6.4: Ονομαστικά στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς

ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R (p.u.)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ X (p.u.)	B(p.u.)	$V_{βάσης}$ (kV)
4-5	0.01	0.085	0.176	230
4-6	0.017	0.092	0.158	230
5-7	0.032	0.161	0.306	230
6-9	0.039	0.17	0.358	230
7-8	0.0085	0.072	0.149	230
8-9	0.0119	0.1008	0.209	230

Στον Πίνακα 6.5 βρίσκονται συγκεντρωμένα τα ονομαστικά στοιχεία όλων των Μετασχηματιστών. Αυτά αφορούν τον ίδιο τον μετασχηματιστή, τα άκρα των ζυγών στους οποίους συνδέεται κάθε μετασχηματιστής, την τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του κάθε μετασχηματιστή καθώς και την αντίδραση X σε p.u.

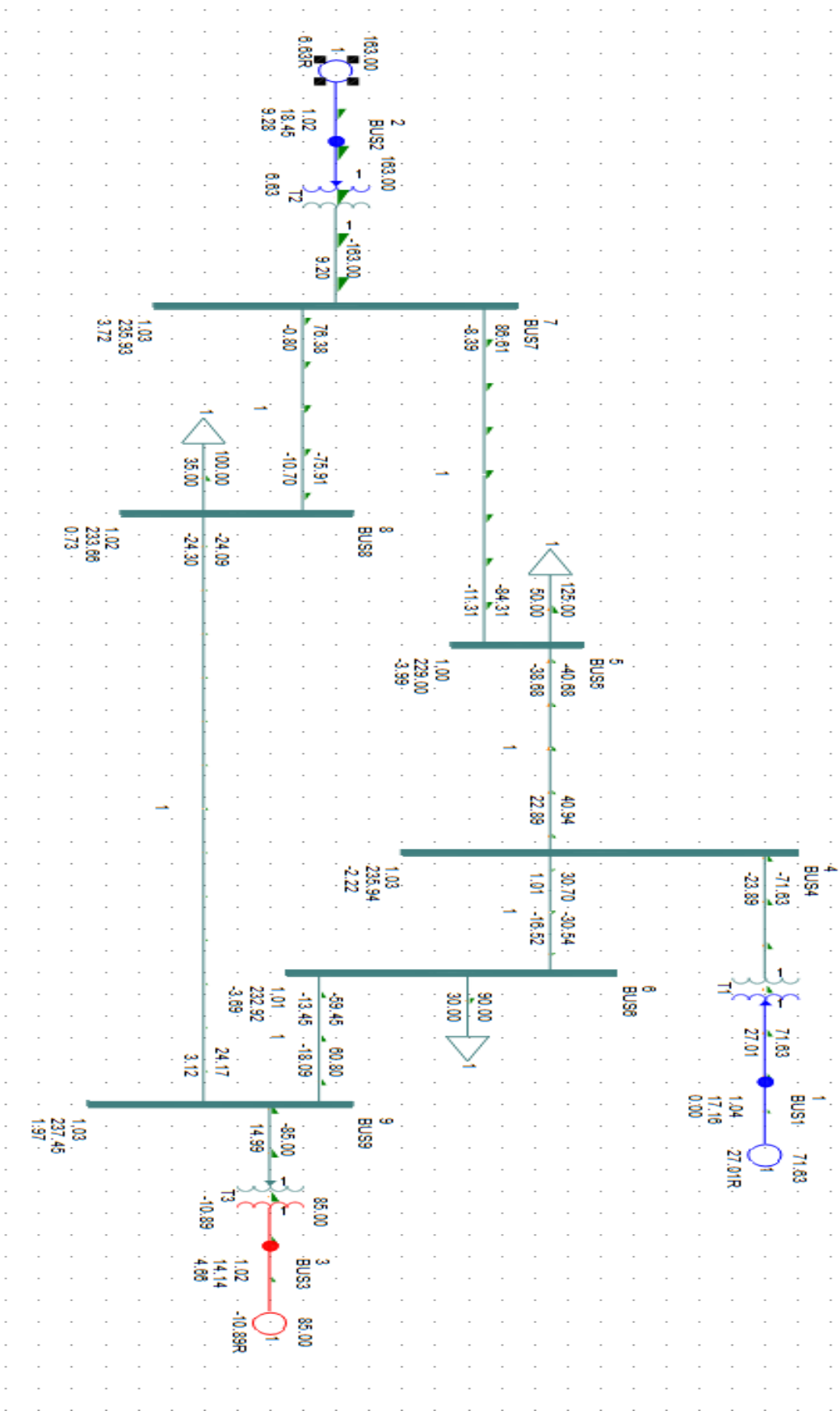
Πίνακας 6.5: Ονομαστικά στοιχεία Μετασχηματιστών

ΖΥΓΟΙ	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	ΤΑΣΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΟΥ (kV)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ X (p.u.)
1-4	T1	16,5/230	0,0576
2-7	T2	18/230	0,625
3-9	T3	13,8/230	0,0586

6.3 Ροή φορτίου στο σύστημα των 9 ζυγών

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από τη ροή του φορτίου στο σύστημα των 9 ζυγών. Επάνω στις γραμμές μεταφοράς αναγράφονται οι τιμές της πραγματικής και άεργου ισχύος σε MW και Mvar αντίστοιχα. Στις γεννήτριες οι τιμές P_{gen}, Q_{gen} σε MW και Mvar αντίστοιχα.

Στους ζυγούς αναγράφονται οι τάσεις τους τόσο σε p.u. τιμή όσο και σε kV καθώς και η αντίστοιχη γωνία τους ϕ_v. Τέλος τόσο σους μετασχηματιστές όσο και στα τροφοδοτούμενα φορτία αναγράφονται οι τιμές της πραγματικής και άεργου ισχύος σε MW και Mvar αντίστοιχα. [9]



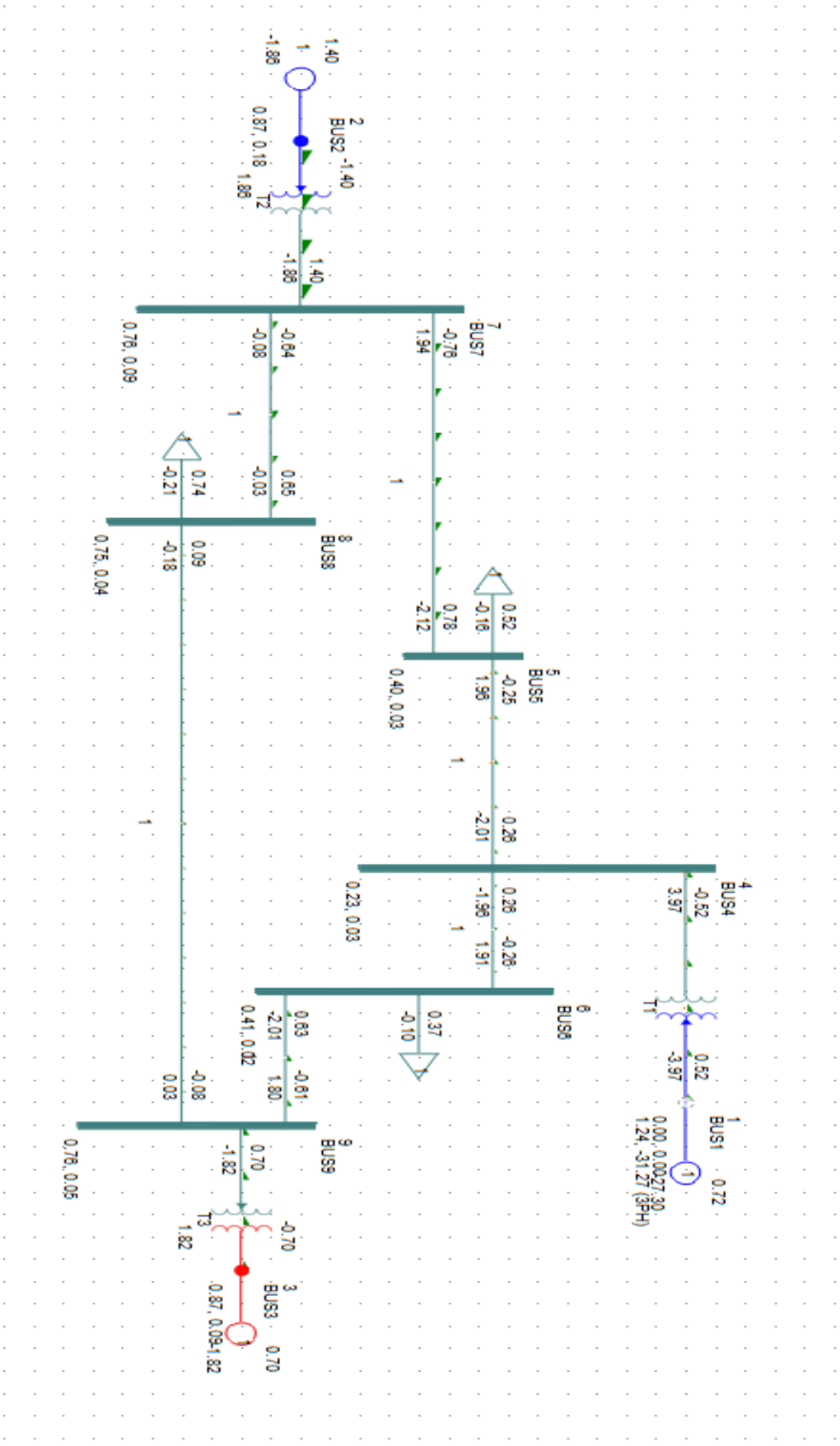
Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο σύστημα των 9 ζυγών της IEEE

6.4 Προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος

Η προσομοίωση ενός βραχυκυκλώματος, συμμετρικού ή μη, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη διαδικασία προκειμένου να μπορέσει ο μηχανικός, που χειρίζεται το δίκτυο, να υπολογίσει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης τα οποία ενδέχεται να προκύψουν στο δίκτυο. Έτσι μπορεί και προστατεύει το σύστημα από τυχόν μελλοντικές βλάβες έγκαιρα και αποτελεσματικά. Στο σύστημα των 9 ζυγών της IEEE που εμείς εξετάζουμε, εισάγουμε τριφασικά στερεά βραχυκυκλώματα σε όλους τους ζυγούς προκειμένου να υπολογίσουμε:

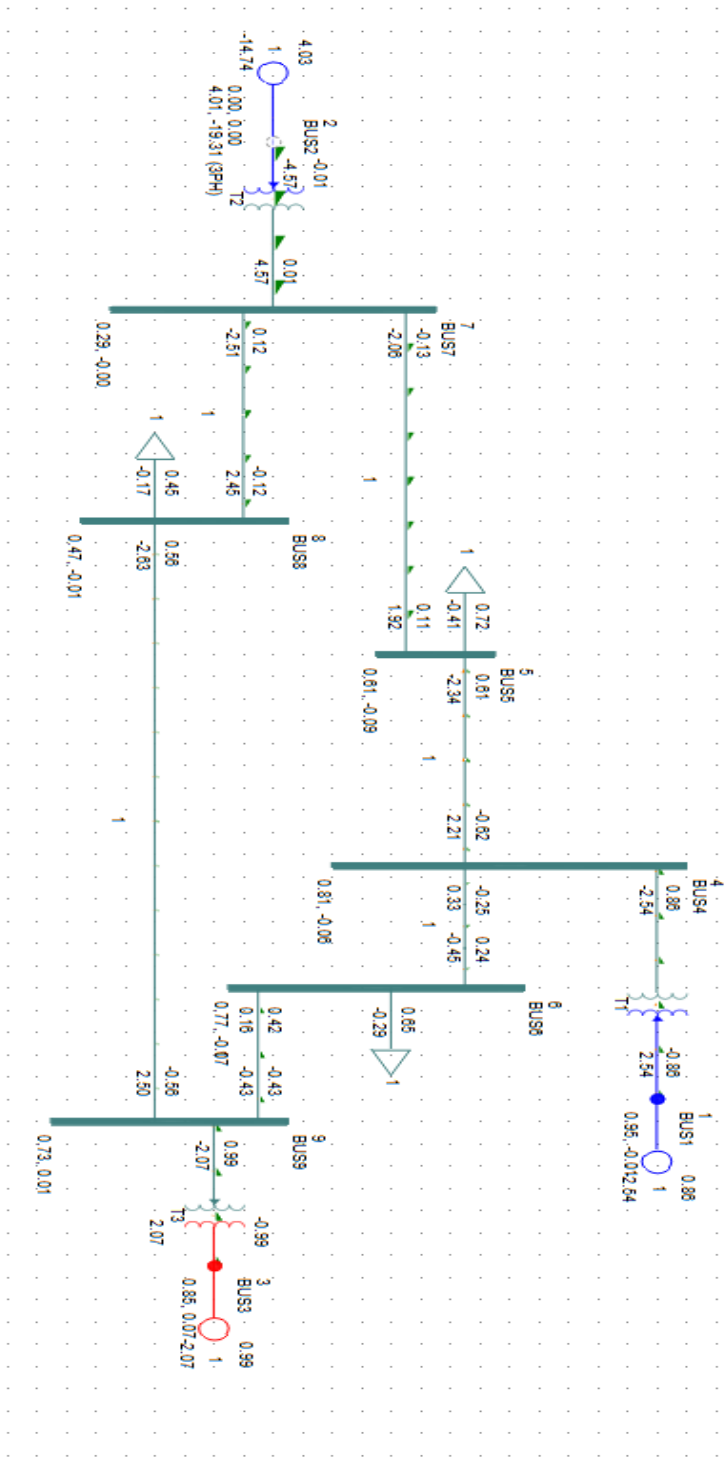
- Τα ρεύματα σφάλματος που εμφανίζονται σε κάθε ζυγό.
- Τις αντίστοιχες τάσεις των ζυγών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος.
- Τα ρεύματα που εμφανίζονται στις γραμμές Μεταφοράς κατά τη διάρκεια του τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος.

Στο Σχήμα 6.3 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 1 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 1 το οποίο ισούται με $1{,}2389 - 31{,}2701j = 31{,}294 < -87{,}73$ Α.



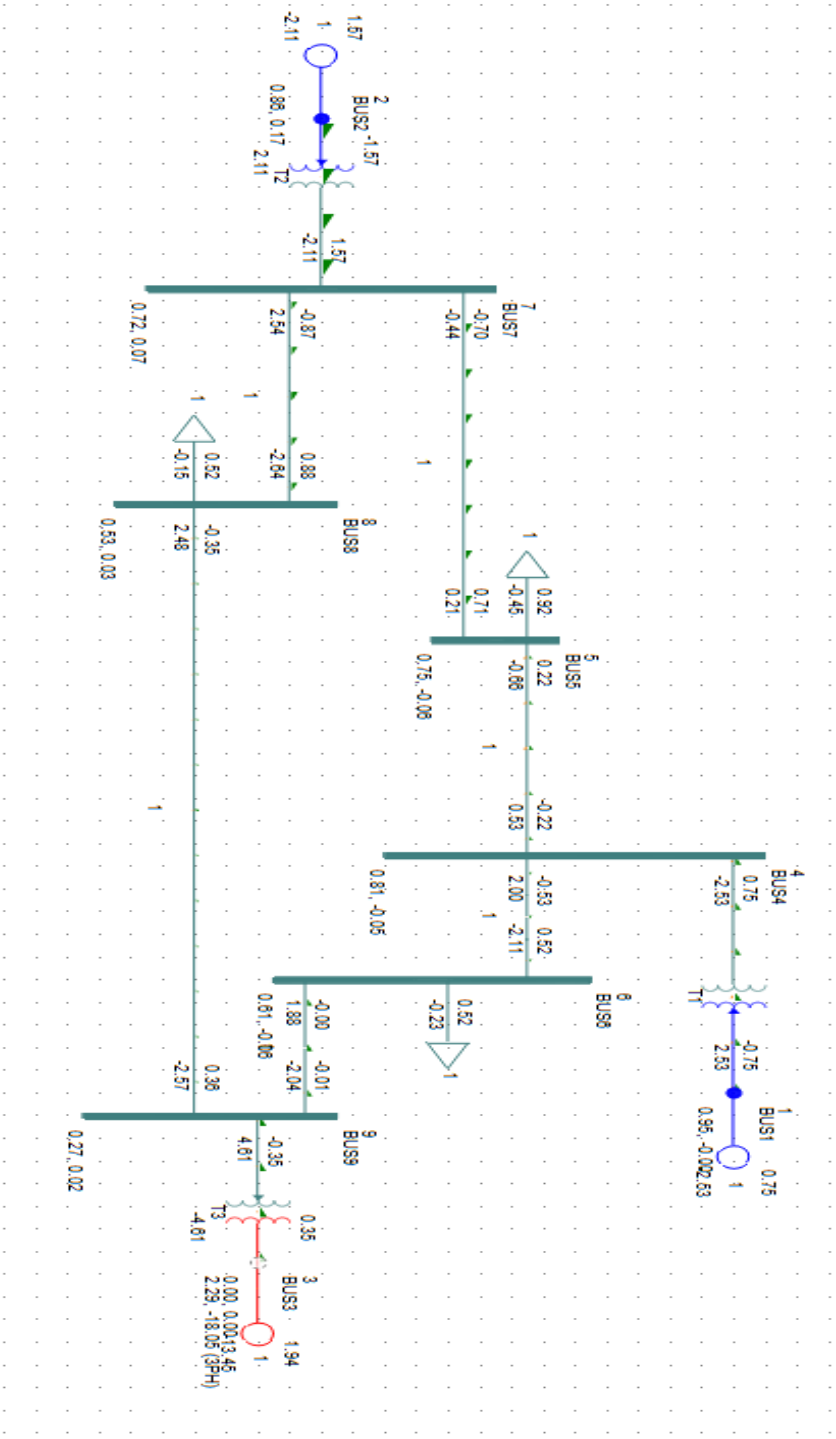
Σχήμα 6.3: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

Στο Σχήμα 6.4 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 2 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 2 το οποίο ισούται με 4,0141 – 19,3083j = 19,721 < -78,25 A.



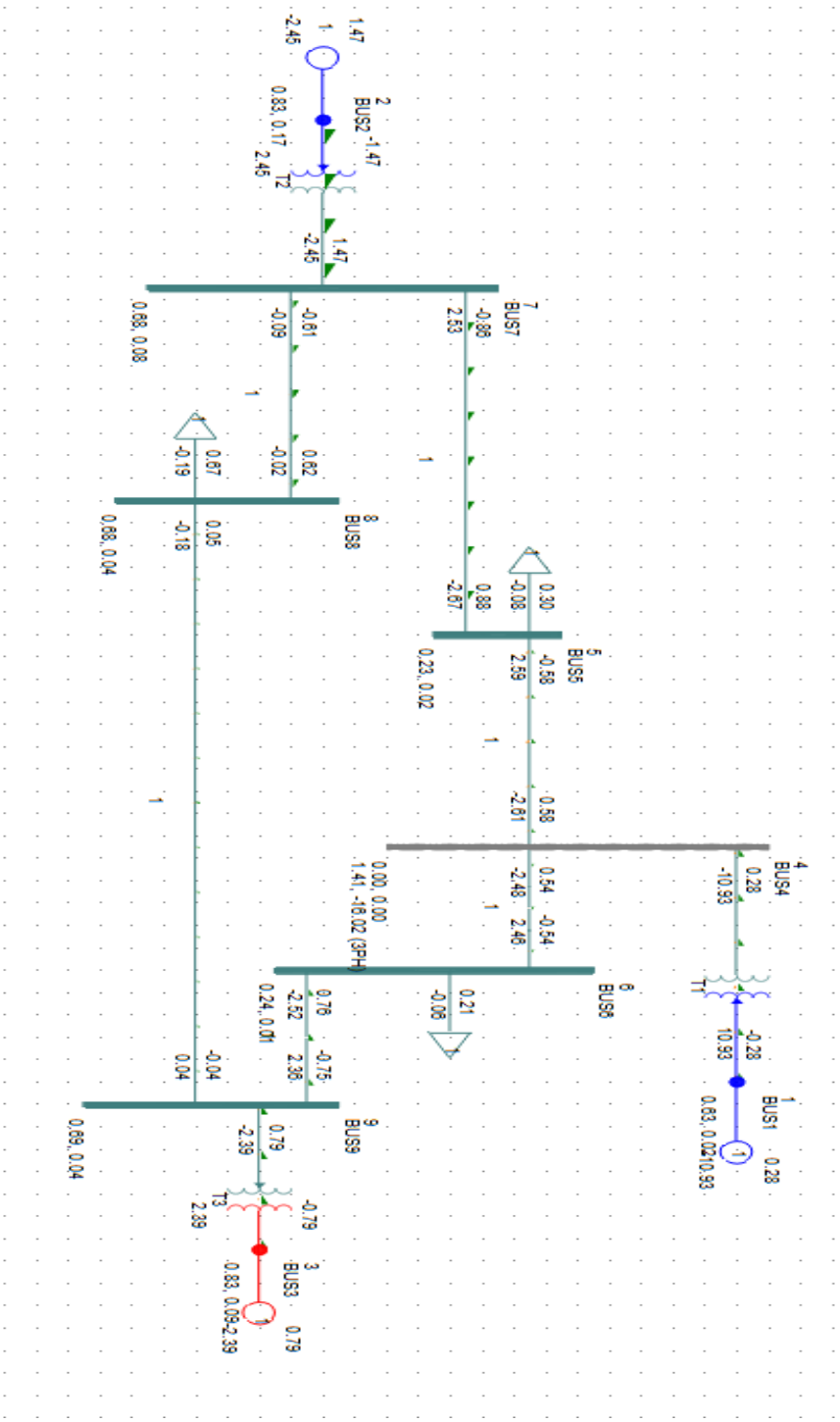
Σχήμα 6.4: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

Στο Σχήμα 6.5 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 3 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 3 το οποίο ισούται με 2,2889 – 18,0539j = 18,198 < -82,77 A.



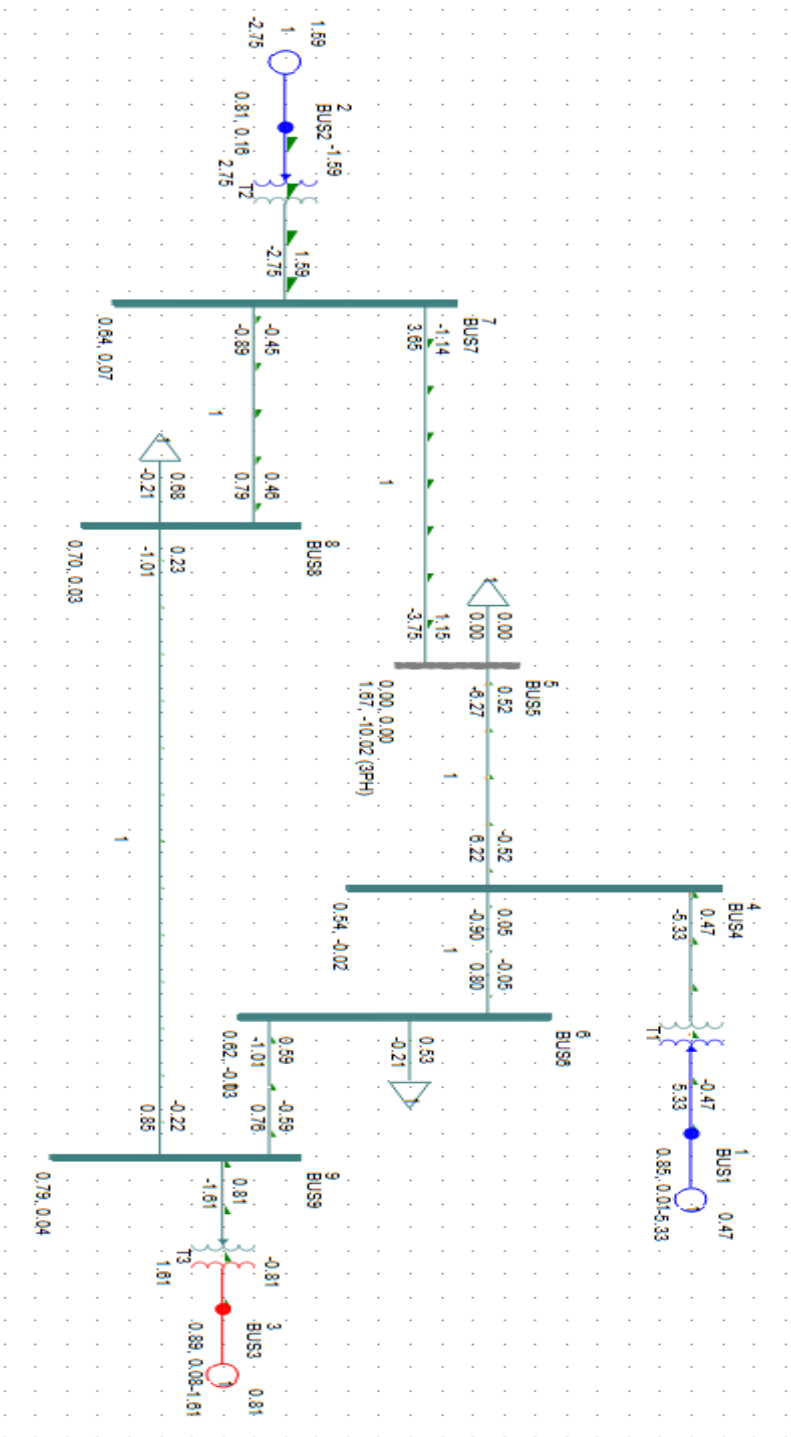
Σχήμα 6.5: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 3

Στο Σχήμα 6.6 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 4 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 4 το οποίο ισούται με 1,4091 – 16,0169j = 16,078 < -84,97 Α.



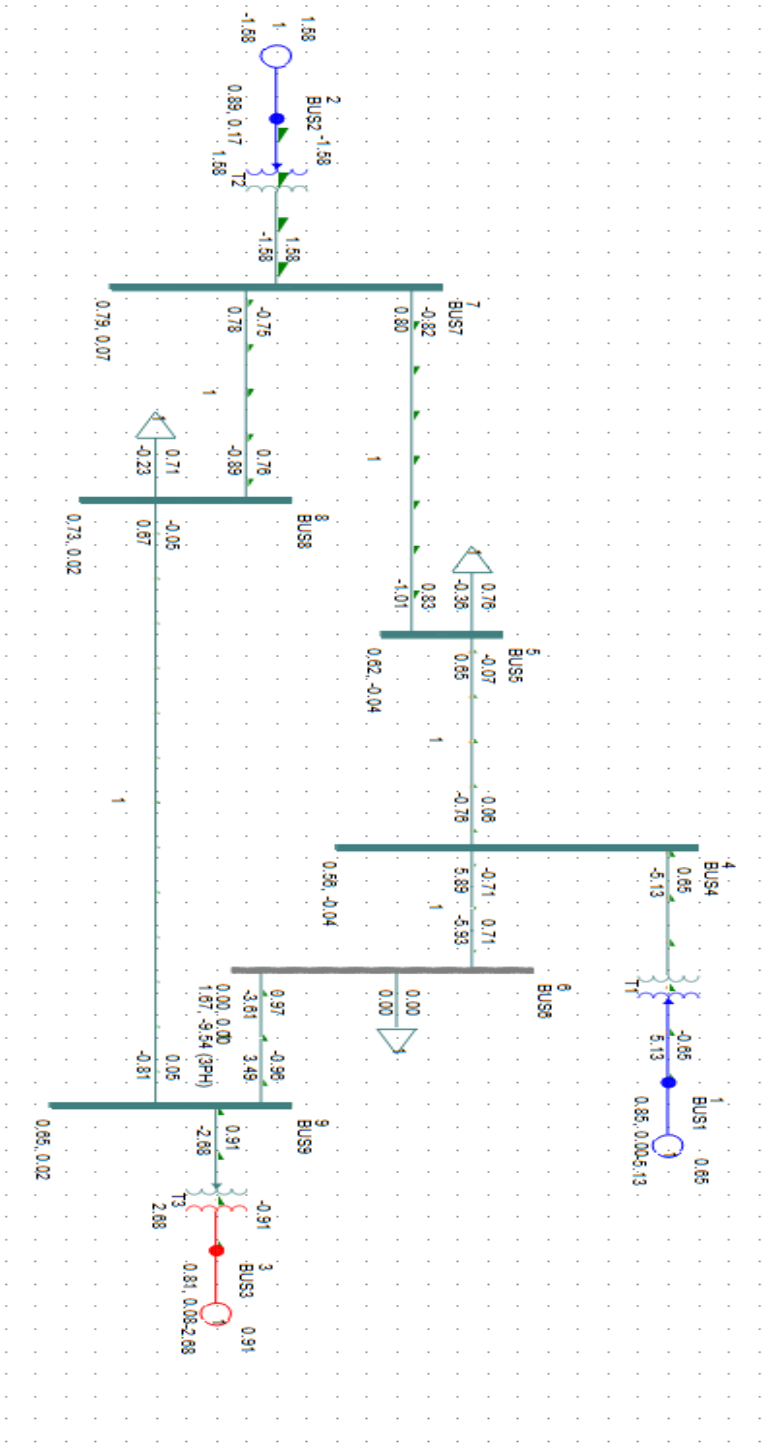
Σχήμα 6.6: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 4

Στο Σχήμα 6.7 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 5 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 5 το οποίο ισούται με 1,6693 – 10,0169j = 10,155 < -80,53 Α.



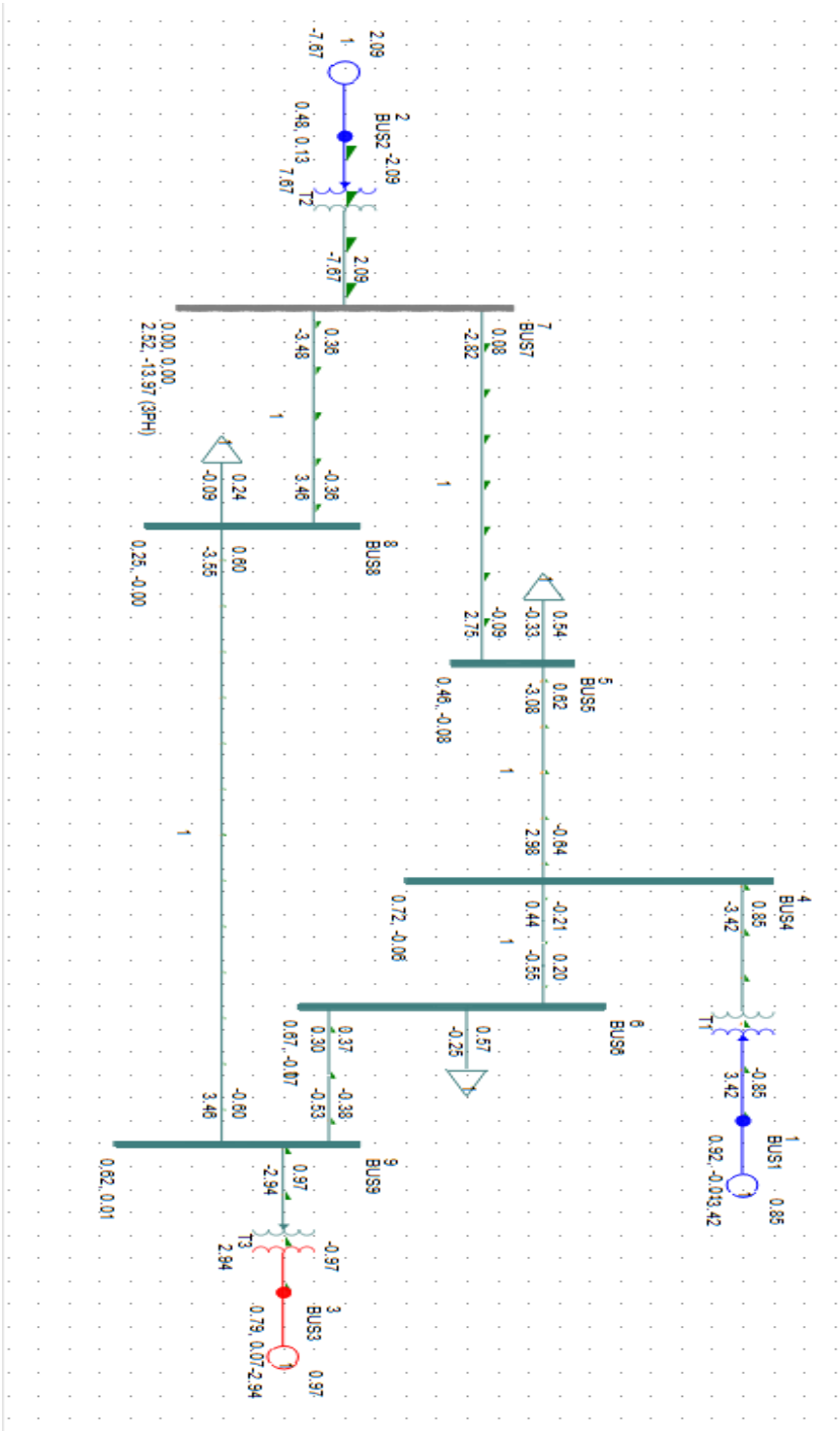
Σχήμα 6.7: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

Στο Σχήμα 6.8 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 6 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 6 το οποίο ισούται με 1,6723 - 9,5350j = 9,68 < -80,05 A.



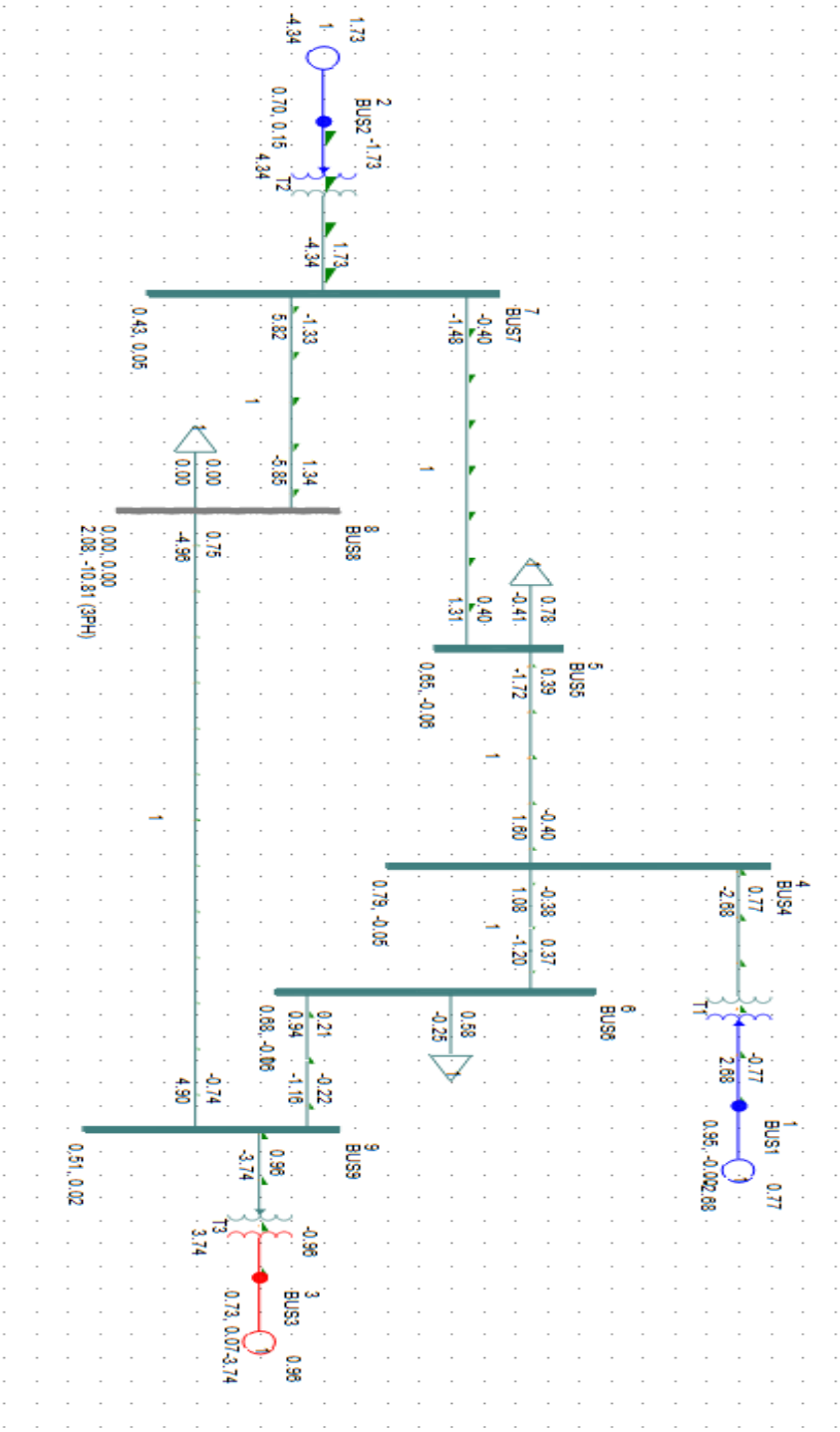
Σχήμα 6.8: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

Στο Σχήμα 6.9 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 7 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 7 το οποίο ισούται με 2,5234 – 13,9713j = 14,197 < - 79,76 Α.



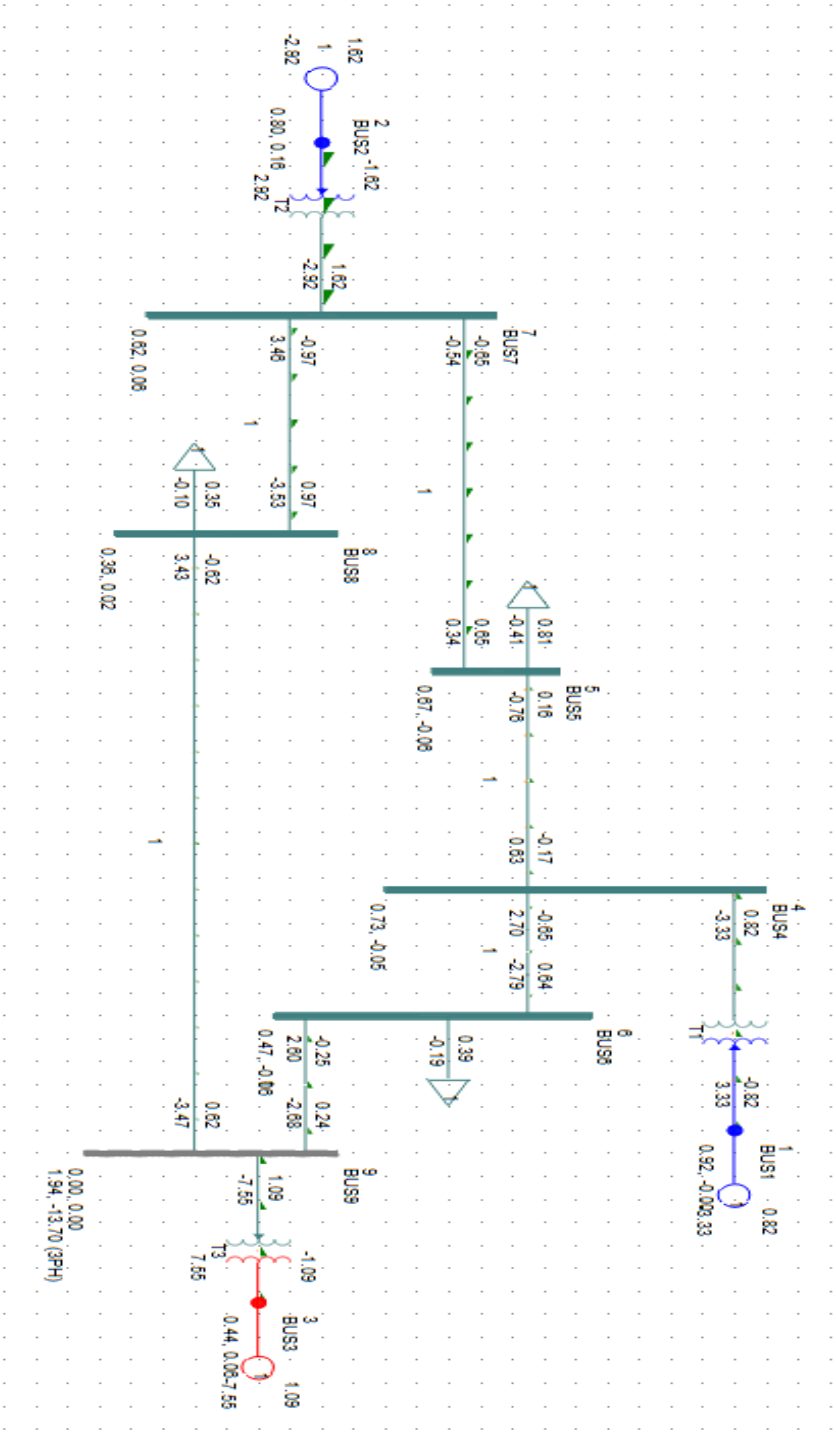
Σχήμα 6.9: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 7

Στο Σχήμα 6.10 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 8 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 8 το οποίο ισούται με 2,0835 – 10,8096j = 11 < - 79,09 A.



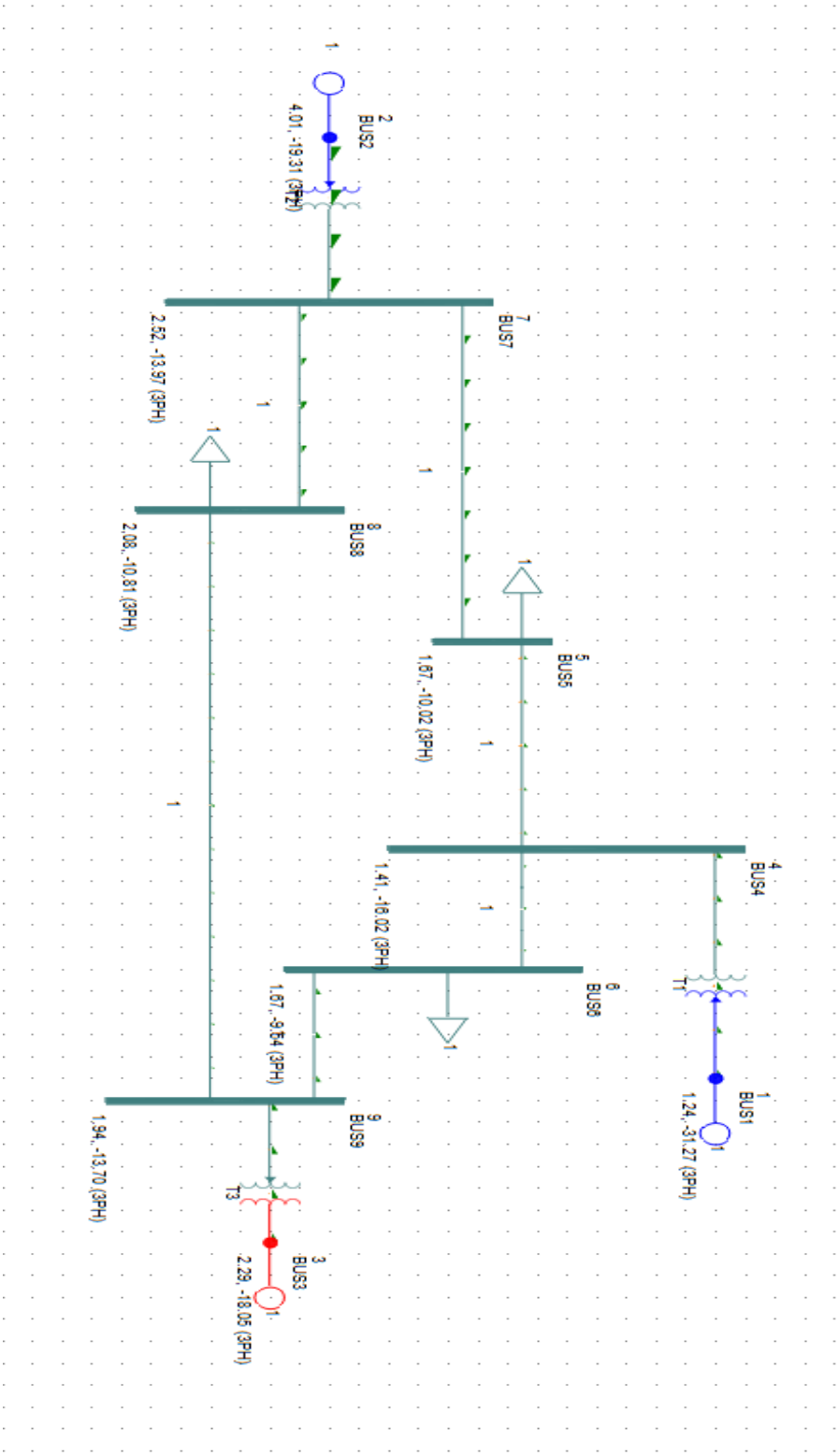
Σχήμα 6.10: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 8

Στο Σχήμα 6.11 αναγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοιώσης ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται στον ζυγό 9 του συστήματος της IEEE. Πιο συγκεκριμένα αναγράφονται οι τάσεις όλων των ζυγών, τα ρεύματα που προκύπτουν στις Γραμμές Μεταφοράς καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ζυγό 9 το οποίο ισούται με 1,9440 – 13,7044j = 13,84 < - 81,92 A.



Σχήμα 6.11: Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 9

Στο Σχήμα 6.12 αναγράφονται τα συγκεντρωτικά ρεύματα ενός τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος το οποίο εμφανίζεται σε όλους τους ζυγούς.



Σχήμα 6.12: Συγκεντρωτικά ρεύματα 3φ στερεού βραχυκυκλώματος σε όλους τους ζυγούς

Έχοντας συλλέξει τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις των προηγούμενων σεναρίων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6 τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που εμφανίζονται σε κάθε ζυγό όταν συμβαίνει ένα τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα. [9]

Πίνακας 6.6: Ρεύματα Βραχυκύκλωσης σε κάθε Ζυγό

ΖΥΓΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ
1	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	1.2389 - 31.2701j = 31,294 < -87,73 A
2	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	4.0141 - 19.3083j = 19,721 < -78,25 A
3	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	2.2889 - 18.0539j = 18,198 < -82,77 A
4	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	1.4091 - 16.0169j = 16,078 < -84,97 A
5	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	1.6693 - 10.0169j = 10,155 < -80,53 A
6	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	1.6723 - 9.5350j = 9,68 < -80,05 A
7	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	2.5234 - 13.9713j = 14,197< - 79,76 A
8	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	2.0835 - 10.8096j = 11 < - 79,09 A
9	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΤΕΡΕΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ	1.9440 - 13.7044j = 13,84 < - 81,92 A

6.5 Κρίσιμοι χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος

Η εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης ενός σφάλματος είναι μία αρκετά σημαντική διαδικασία καθώς από αυτήν εξαρτάται η ευστάθεια του δικτύου. Στη συνέχεια παραθέτονται 6 παραδείγματα εύρεσης κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης ενός 3φ στερεού σφάλματος στο σύστημα των 9 ζυγών της IEEE.

- Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 κοντά του ζυγού 6.
- Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 κοντά του ζυγού 4.
- Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 κοντά του ζυγού 9.
- Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά του ζυγού 7.
- Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά του ζυγού 8.
- Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 κοντά του ζυγού 9.

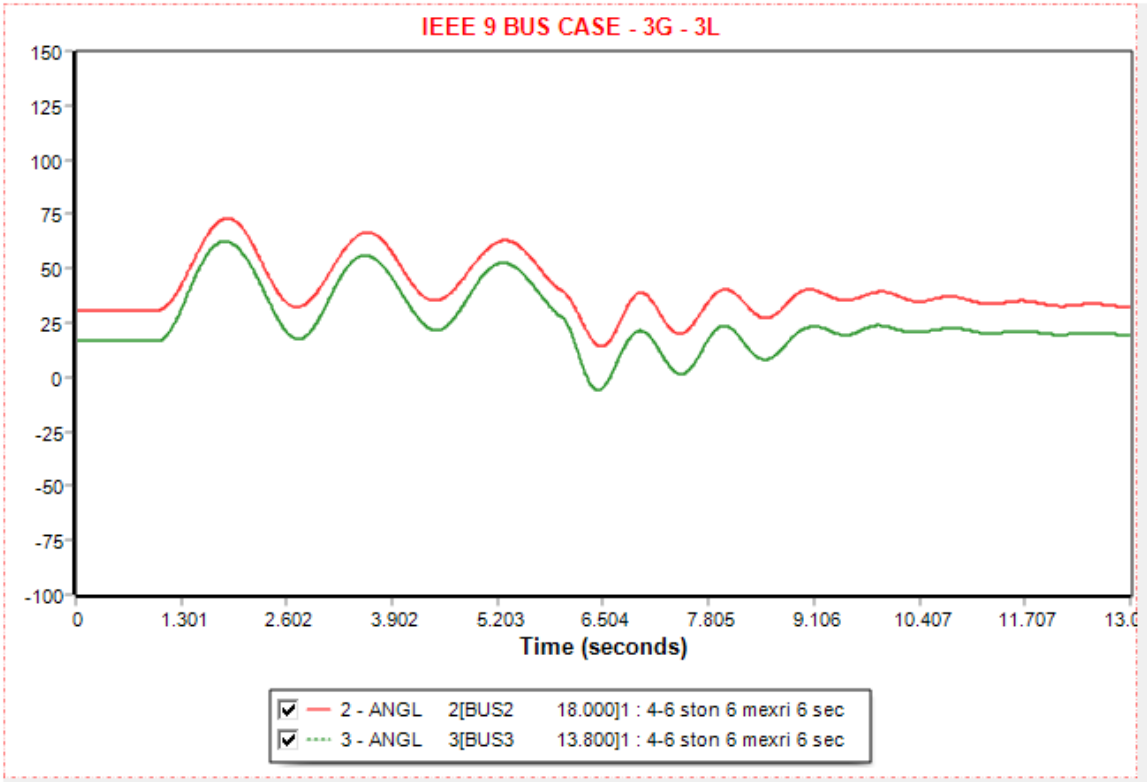
6.5.1 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 κοντά του ζυγού 6

Το δίκτυο των 9 ζυγών λειτουργεί στη μόνιμη κατάστασή του μέχρι τη χρονική στιγμή t_1=1sec. Την χρονική στιγμή t_1=1sec εφαρμόζω 3φ στερεό σφάλμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 κοντά στο ζυγό 6. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο trial and error βρίσκω ότι ο μέγιστος χρόνος για την αποφυγή του αποσυγχρονισμού ισούται με t=5sec. Επομένως, ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος ισούται με t_{crit}=4sec. Έπειτα, συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος και το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 4-6.

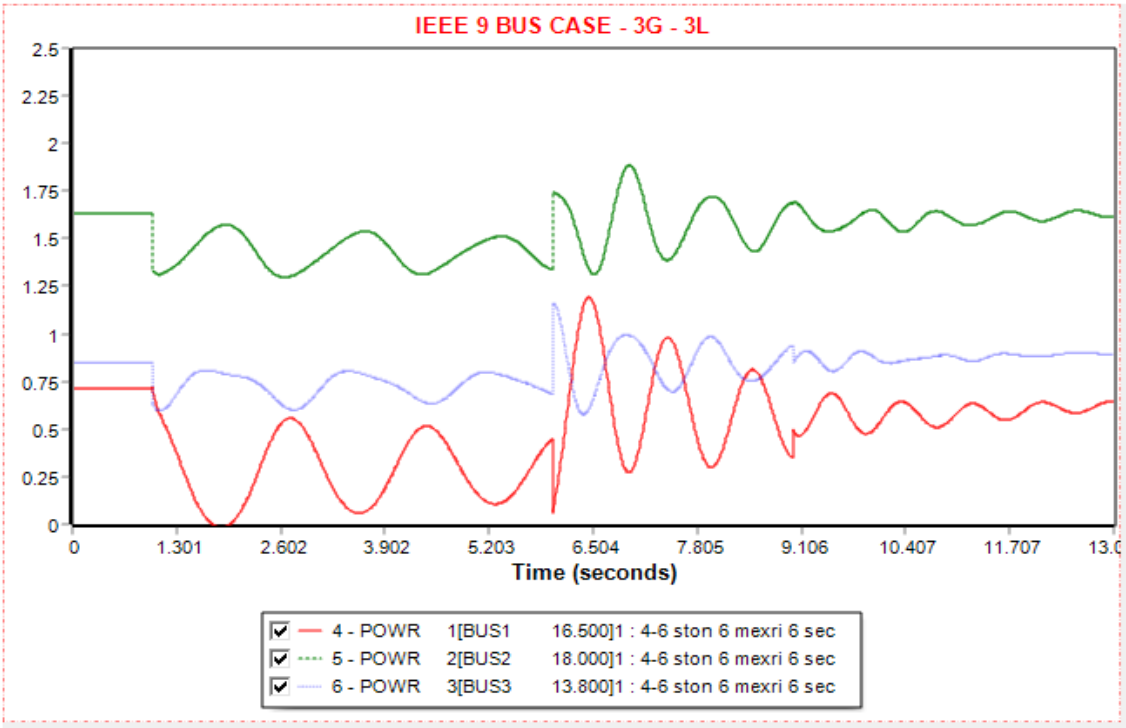
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_2=10sec. Στη συνέχεια, από την χρονική στιγμή t_2=10sec και μέχρι την t_3=13sec επαναφέρεται η Γραμμή Μεταφοράς 4-6 και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα γωνίας - χρόνου από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του παρά τη μεταβολή, καθώς εκτελεί αποσβυνόμενες ταλαντώσεις οι οποίες καταλήγουν στη αρχική τιμή της γωνίας δ.

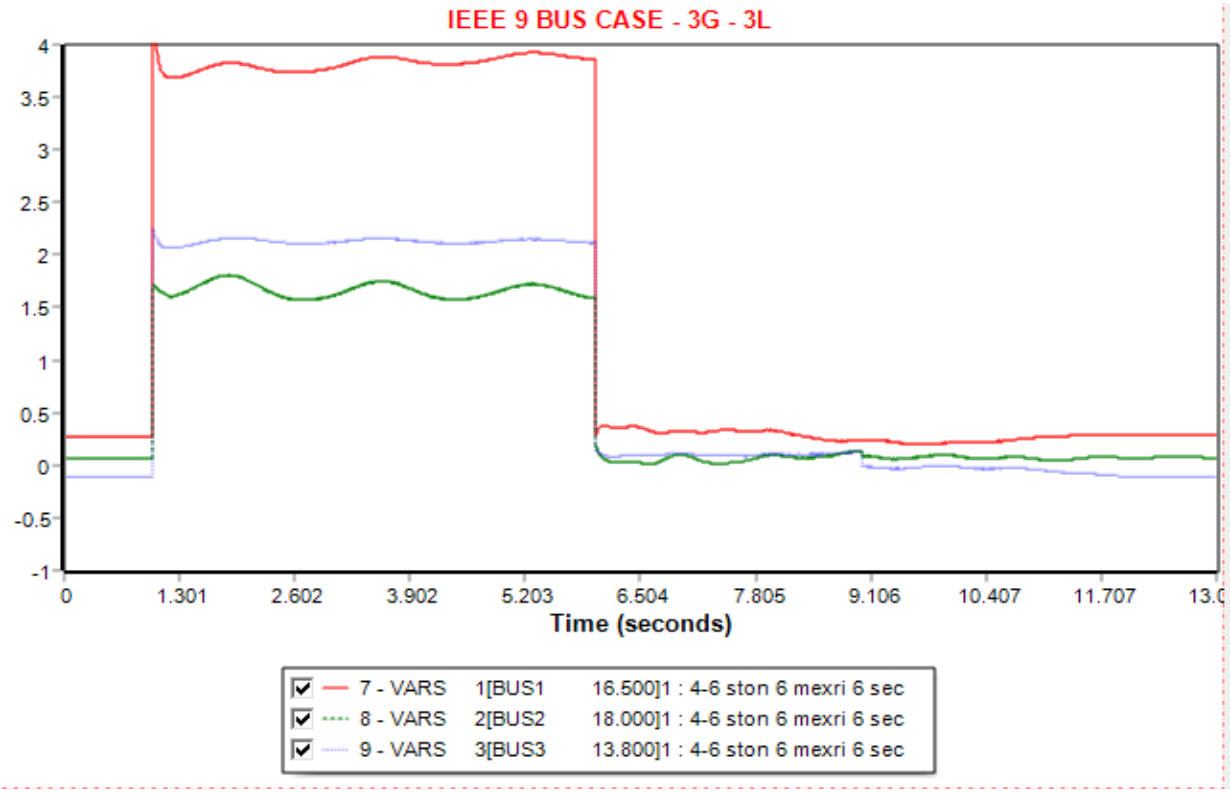
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και στις γραφικές παραστάσεις P-t, Q-t, V-t, F-t, δηλαδή στα Σχήματα 6.14 - 6.17, το σύστημα παρά τη μεταβολή διατηρεί μέσα σε κάποια όρια, σχεδόν την ίδια τελική κατάσταση όπως ήταν η αρχική, πράγμα που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η γεννήτρια 1 ελήφθη ως γεννήτρια αναφοράς. [9]



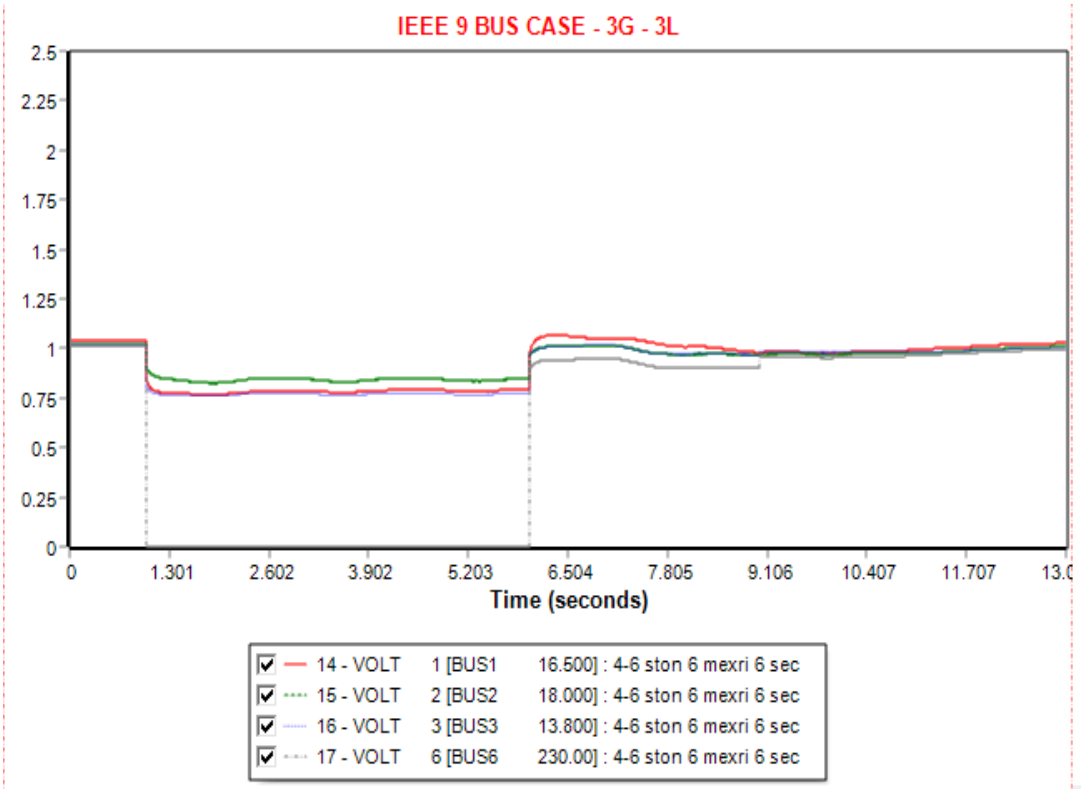
Σχήμα 6.13: Σχετική γωνία ισχύος ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς



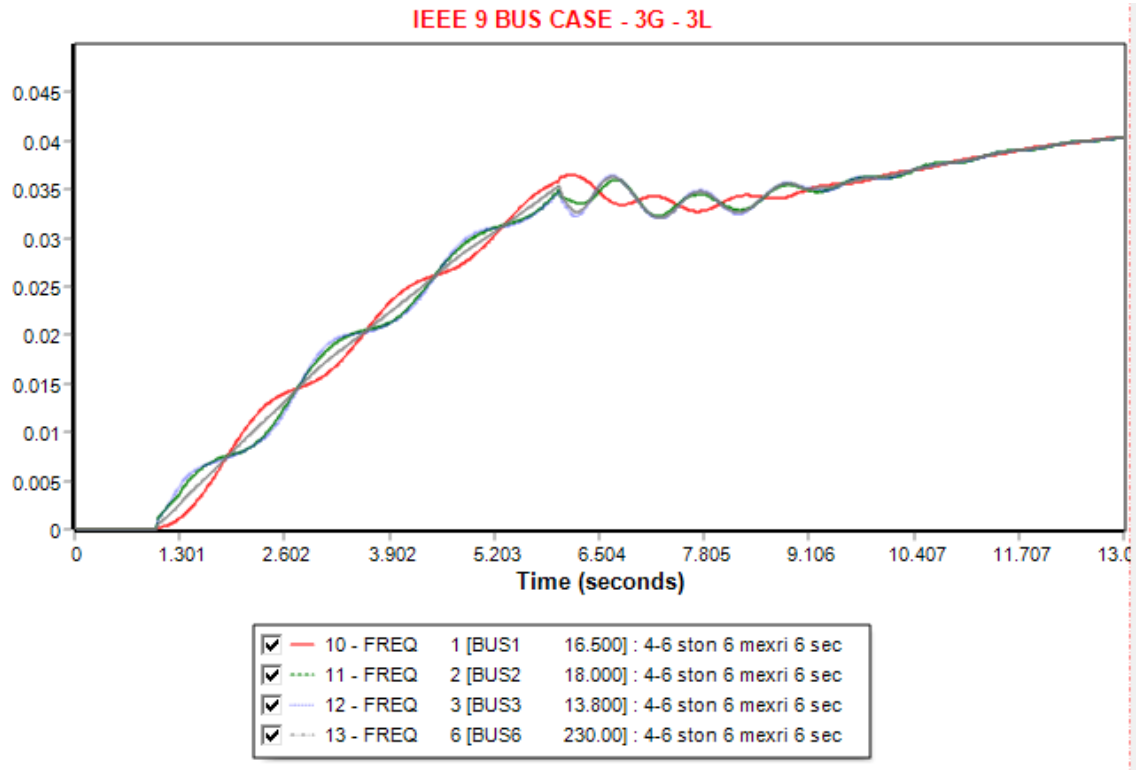
Σχήμα 6.14: Γραφική αναπαράσταση P-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 πλησίον του Ζυγού 6



Σχήμα 6.15: Γραφική αναπαράσταση Q-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 πλησίον του Ζυγού 6



Σχήμα 6.16: Γραφική αναπαράσταση V-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 πλησίον του Ζυγού 6



Σχήμα 6.17: Γραφική αναπαράσταση F-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 4-6 πλησίον του Ζυγού 6

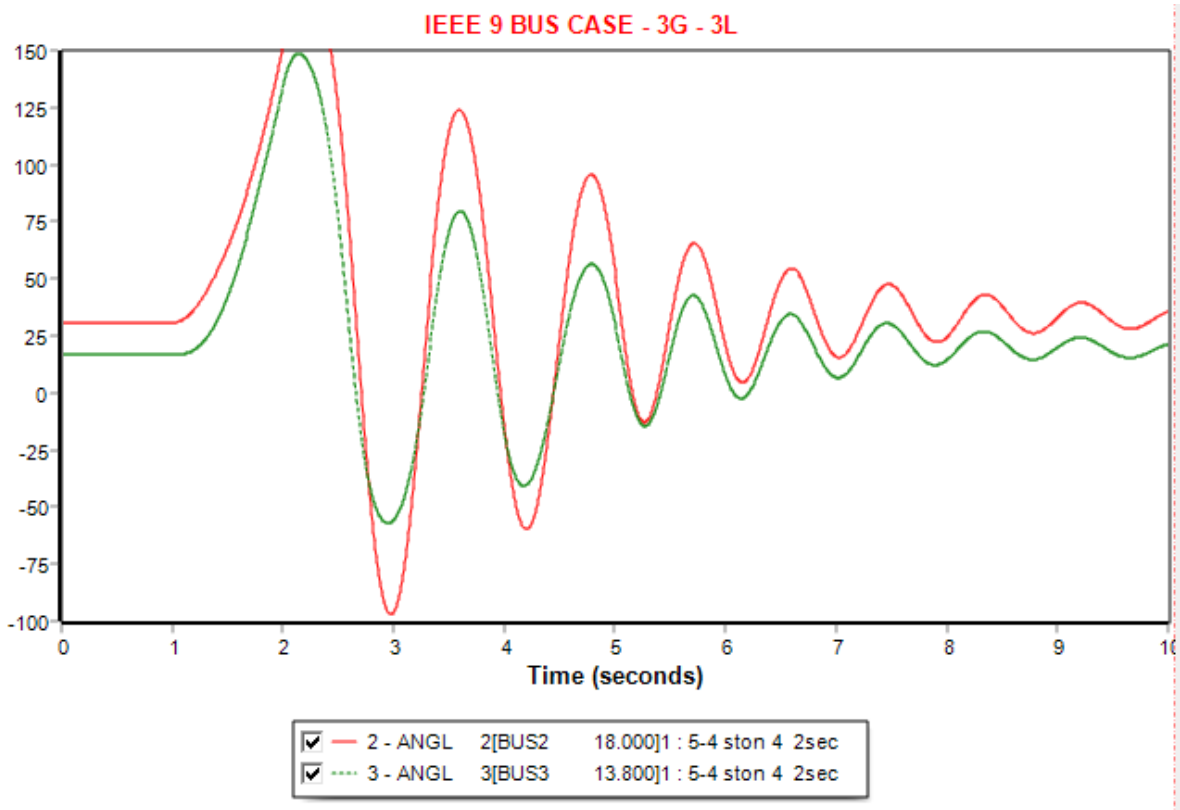
6.5.2 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 κοντά του ζυγού 4

Το δίκτυο των 9 ζυγών λειτουργεί στη μόνιμη κατάστασή του μέχρι τη χρονική στιγμή t_1=1sec. Την χρονική στιγμή t_1=1sec εφαρμόζω 3φ στερεό σφάλμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 κοντά στο ζυγό 4. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο trial and error βρίσκω ότι ο μέγιστος χρόνος για την αποφυγή του αποσυγχρονισμού ισούται με t=2sec. Επομένως, ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος ισούται με t_{crit}=1sec. Έπειτα, συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος και το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 5-4.

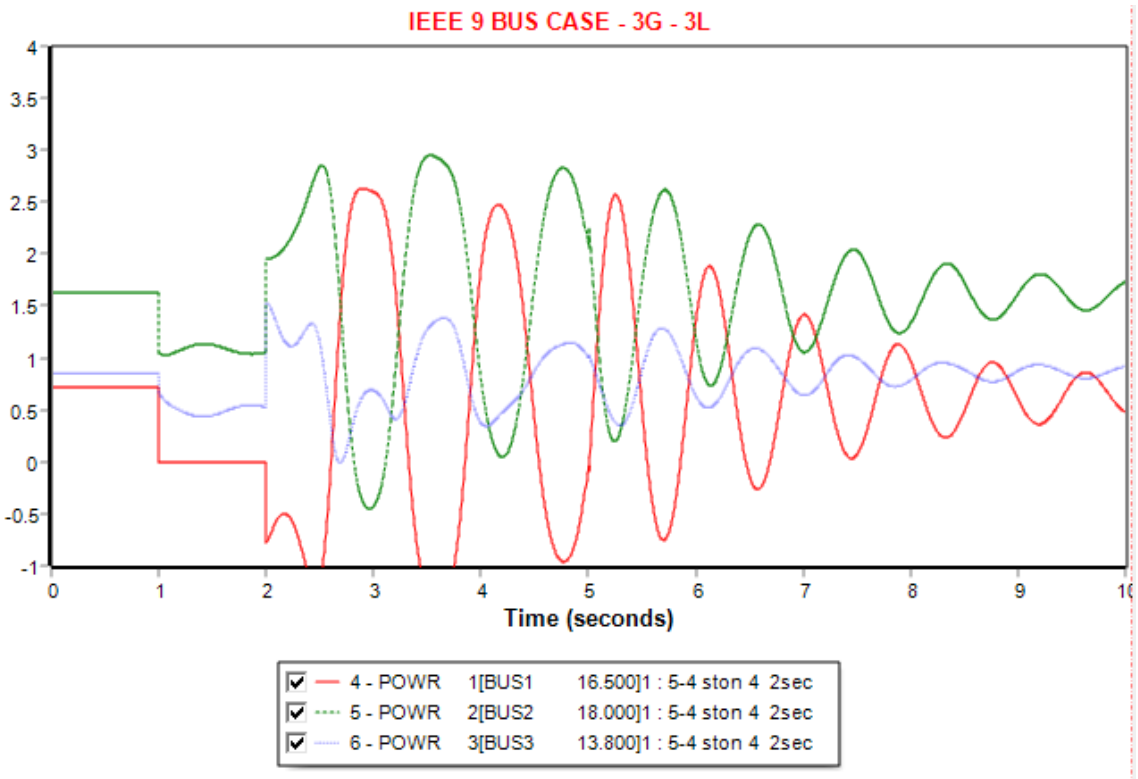
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_2=5sec. Στη συνέχεια, από την χρονική στιγμή t_2=5sec και μέχρι την t_3=10sec επαναφέρεται η Γραμμή Μεταφοράς 5-4 και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα γωνίας - χρόνου από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του παρά τη μεταβολή, καθώς εκτελεί αποσβυνόμενες ταλαντώσεις οι οποίες καταλήγουν στη αρχική τιμή της γωνίας δ.

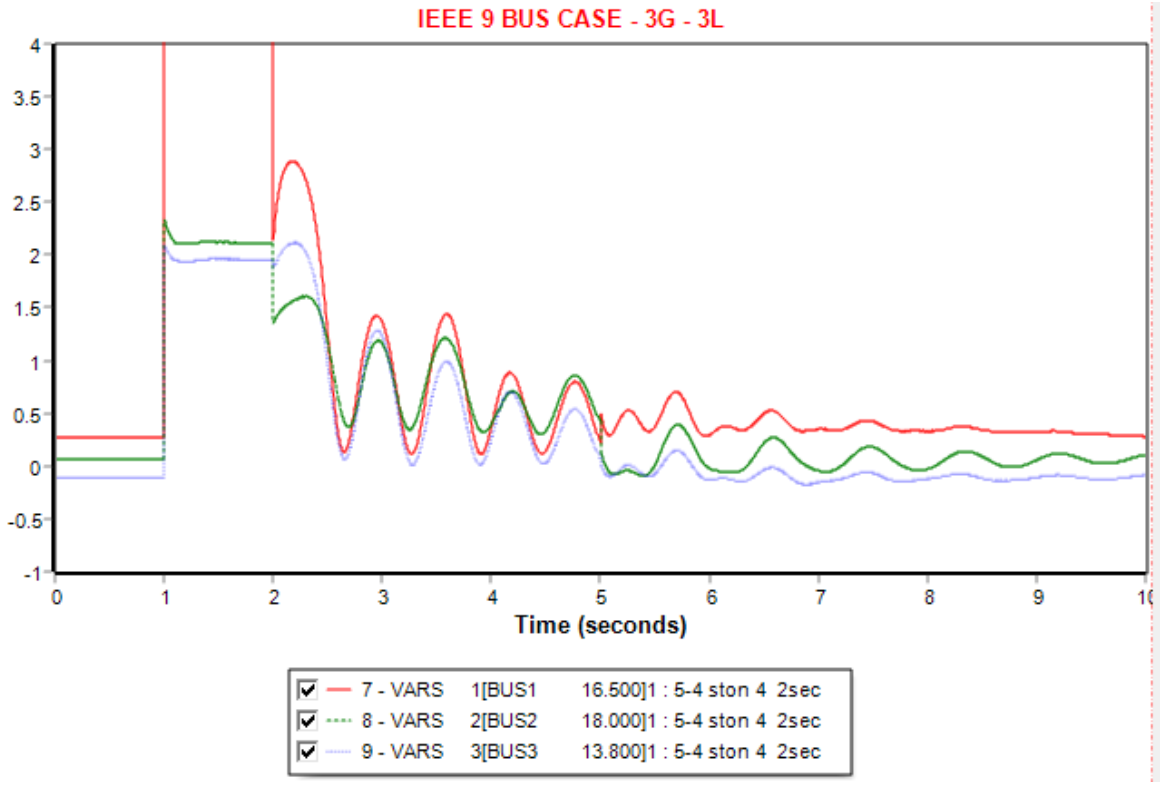
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και στις γραφικές παραστάσεις P-t, Q-t, V-t, F-t, δηλαδή στα Σχήματα 6.19 - 6.22, το σύστημα παρά τη μεταβολή διατηρεί μέσα σε κάποια όρια, σχεδόν την ίδια τελική κατάσταση όπως ήταν η αρχική, πράγμα που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η γεννήτρια 1 ελήφθη ως γεννήτρια αναφοράς. [9]



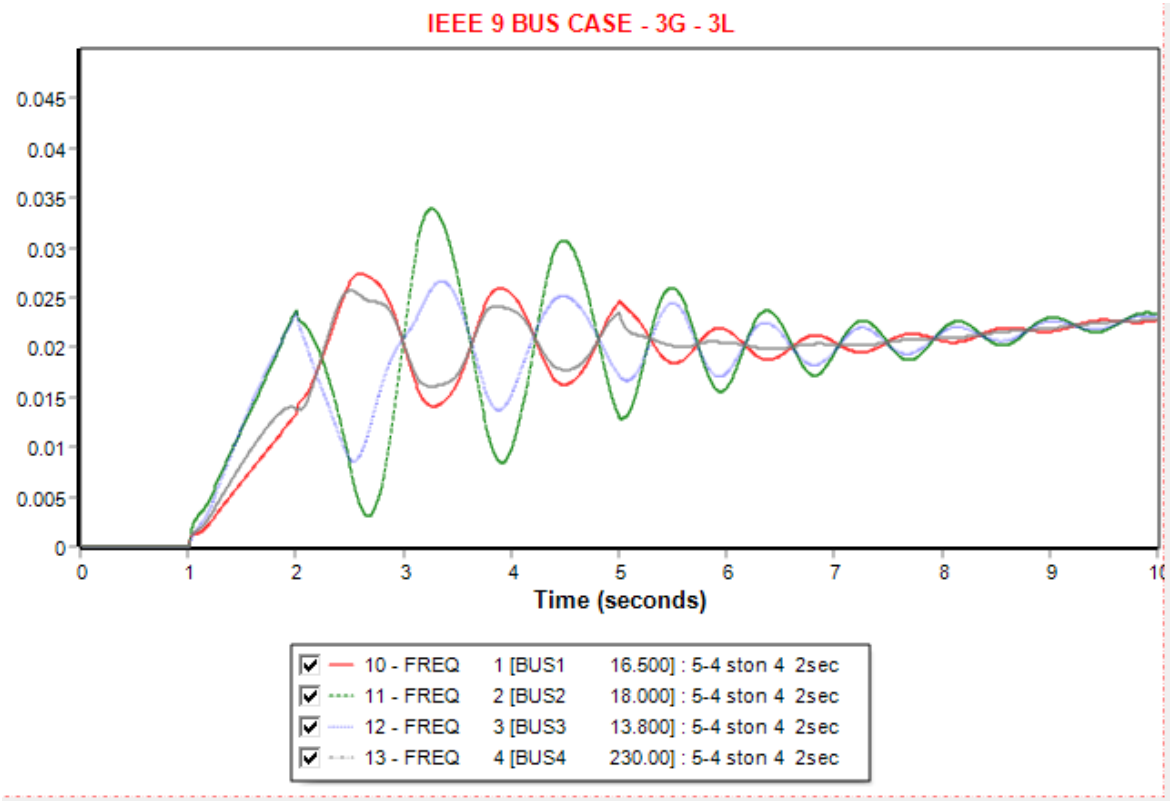
Σχήμα 6.18: Σχετική γωνία ισχύος ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς



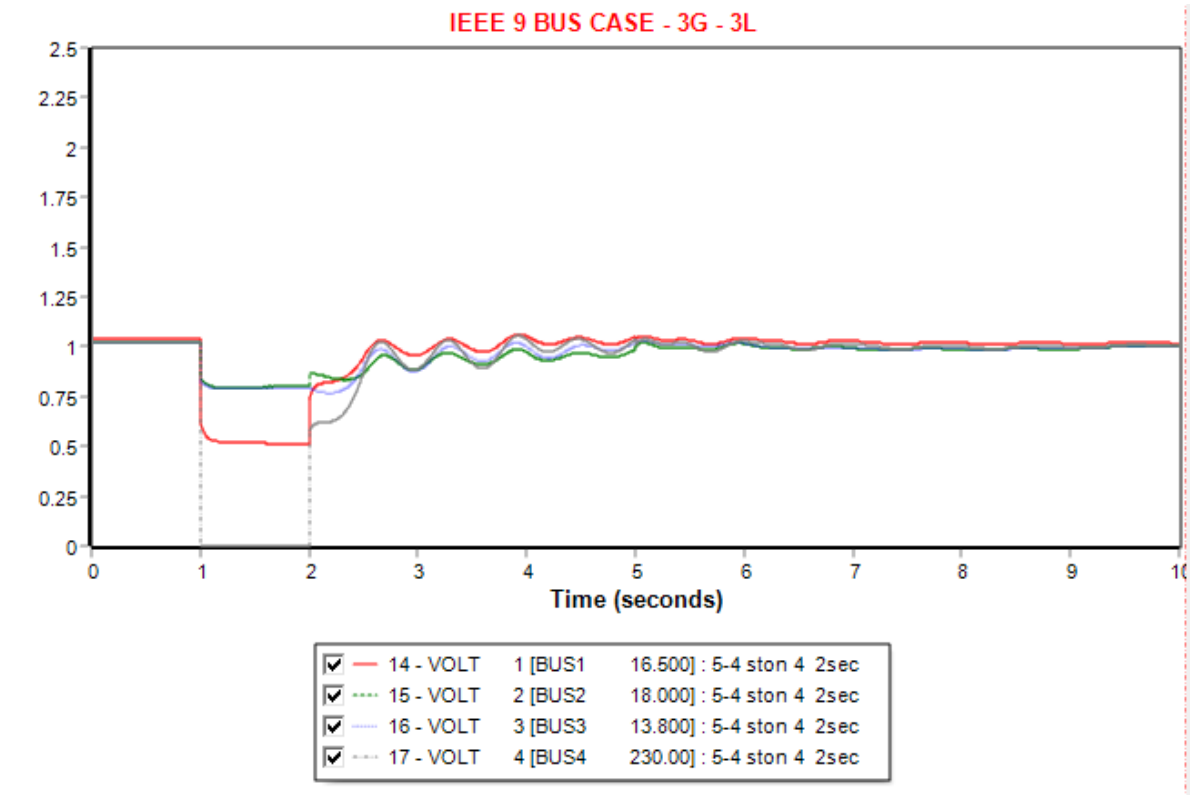
Σχήμα 6.19: Γραφική αναπαράσταση P-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 πλησίον του Ζυγού 4



Σχήμα 6.20: Γραφική αναπαράσταση Q-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 πλησίον του Ζυγού 4

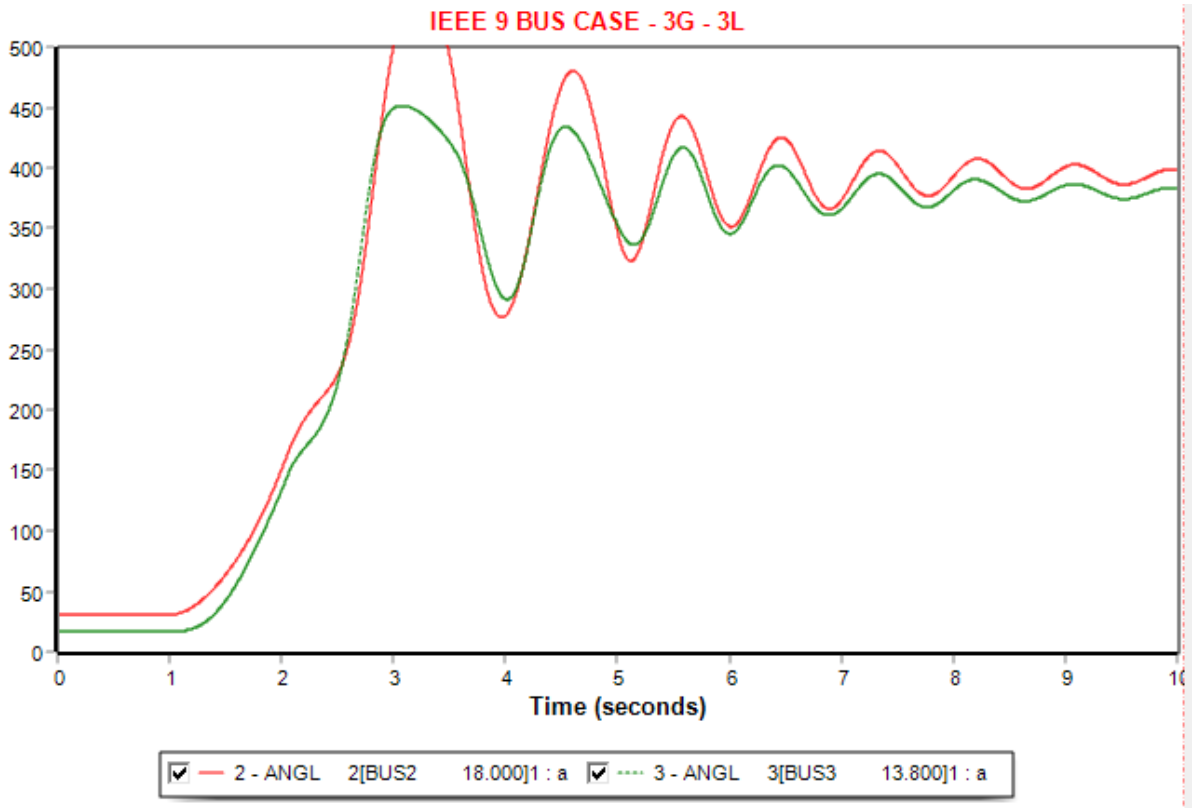


Σχήμα 6.21: Γραφική αναπαράσταση f-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 πλησίον του Ζυγού 4



Σχήμα 6.22: Γραφική αναπαράσταση V-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 5-4 πλησίον του Ζυγού 4

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.23, το σφάλμα διήρκησε μέχρι τη χρονική στιγμή t=2,05sec. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα δ-t στην περίπτωση αυτή το σύστημα δεν μπόρεσε να διατηρήσει την ευστάθειά του καθώς η τελική τιμή της γωνίας των γεννητριών 2 και 3 δεν ισούται με την αρχική.



Σχήμα 6.23: Παράδειγμα αστάθειας στην περίπτωση που το σφάλμα διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή t=2,05sec

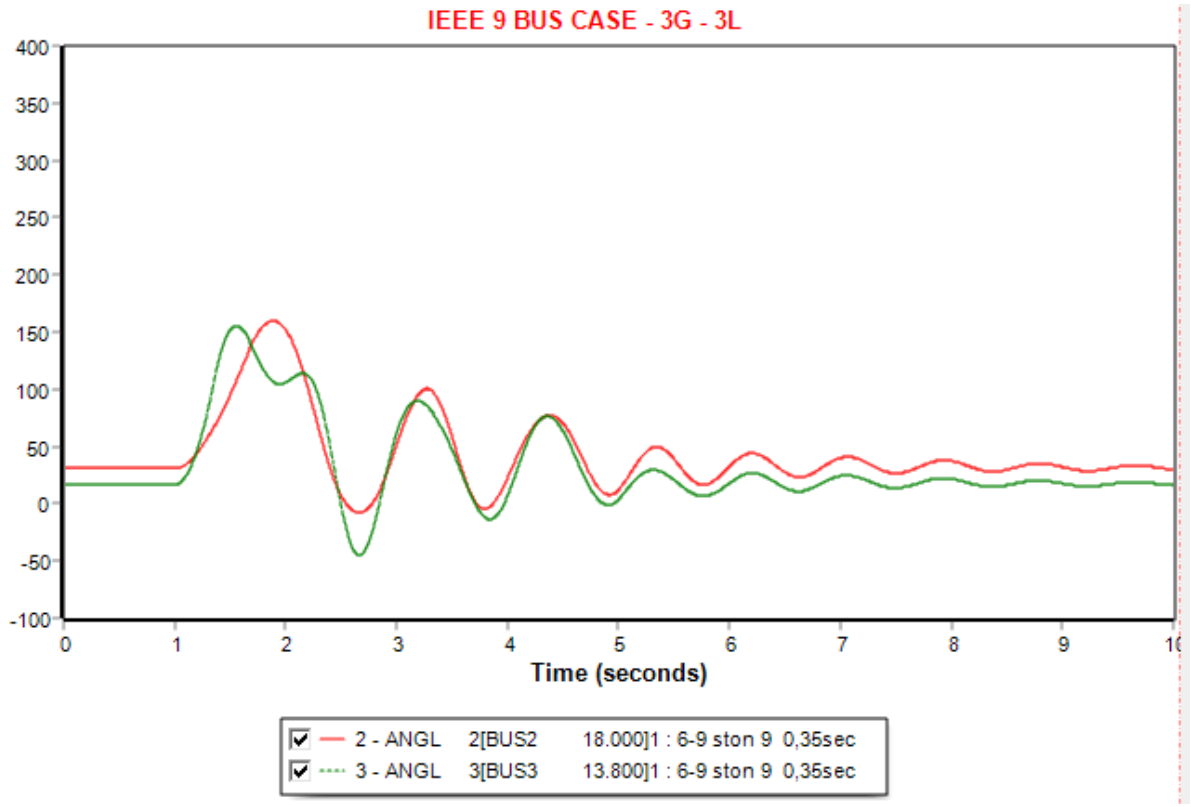
6.5.3 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 κοντά του ζυγού 9

Το δίκτυο των 9 ζυγών λειτουργεί στη μόνιμη κατάστασή του μέχρι τη χρονική στιγμή t_1=1sec. Την χρονική στιγμή t_1=1sec εφαρμόζω 3φ στερεό σφάλμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 κοντά στο ζυγό 9. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο trial and error βρίσκω ότι ο μέγιστος χρόνος για την αποφυγή του αποσυγχρονισμού ισούται με t=1,35sec. Επομένως, ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος ισούται με t_{crit}=0,35sec. Έπειτα, συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος και το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 6-9.

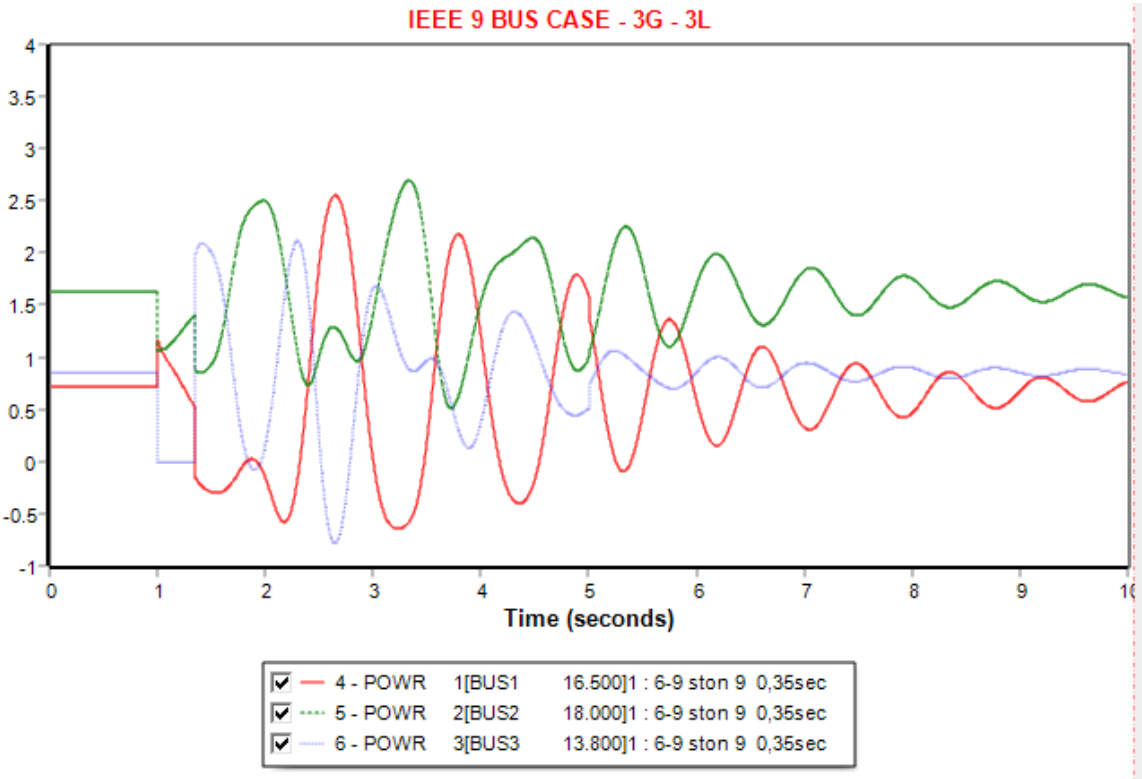
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_2=5sec. Στη συνέχεια, από την χρονική στιγμή t_2=5sec και μέχρι την t_3=10sec επαναφέρεται η Γραμμή Μεταφοράς 6-9 και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζεται το διάγραμμα γωνίας - χρόνου από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του παρά τη μεταβολή, καθώς εκτελεί αποσβυνόμενες ταλαντώσεις οι οποίες καταλήγουν στη αρχική τιμή της γωνίας δ.

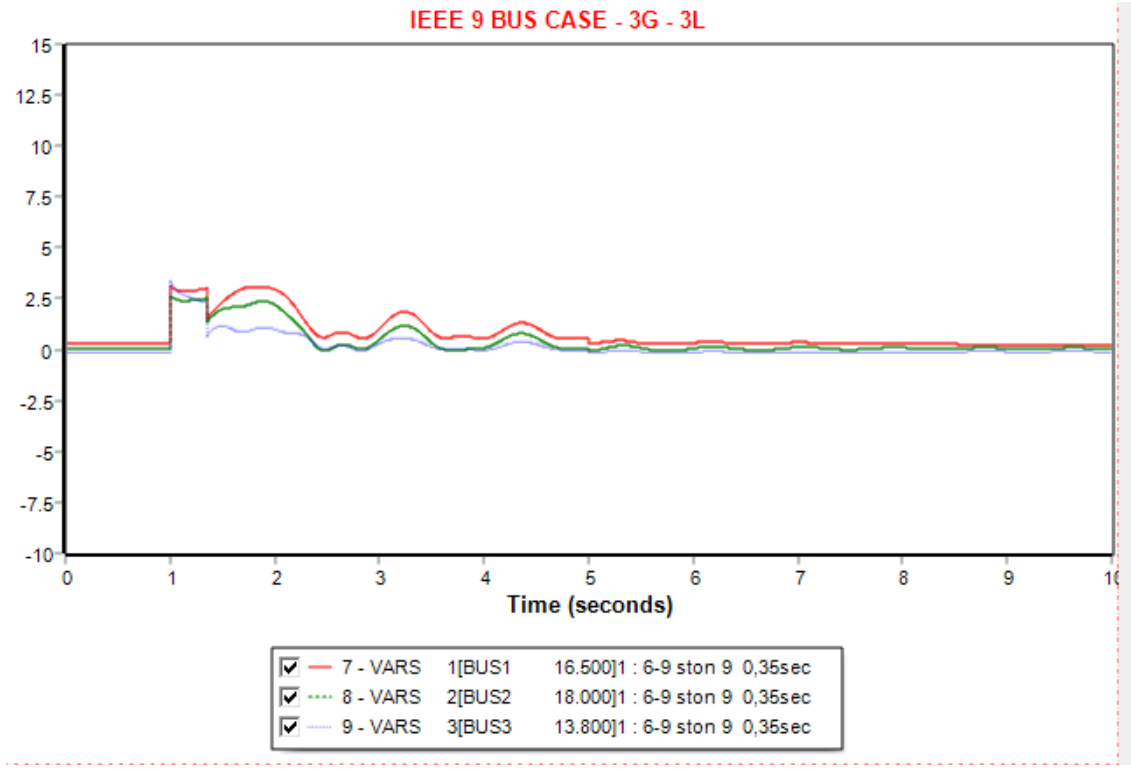
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και στις γραφικές παραστάσεις P-t, Q-t, V-t, F-t, δηλαδή στα Σχήματα 6.25 - 6.28, το σύστημα παρά τη μεταβολή διατηρεί μέσα σε κάποια όρια, σχεδόν την ίδια τελική κατάσταση όπως ήταν η αρχική, πράγμα που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η γεννήτρια 1 ελήφθη ως γεννήτρια αναφοράς. [9]



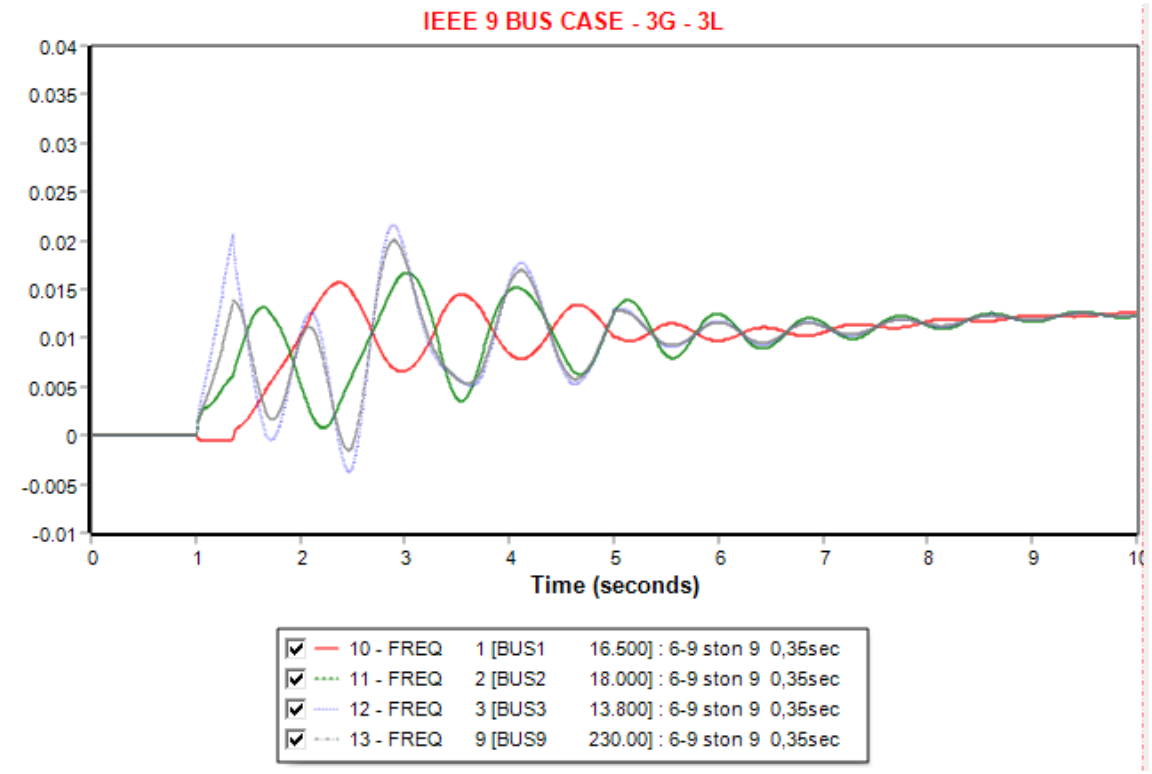
Σχήμα 6.24: Σχετική γωνία ισχύος ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς



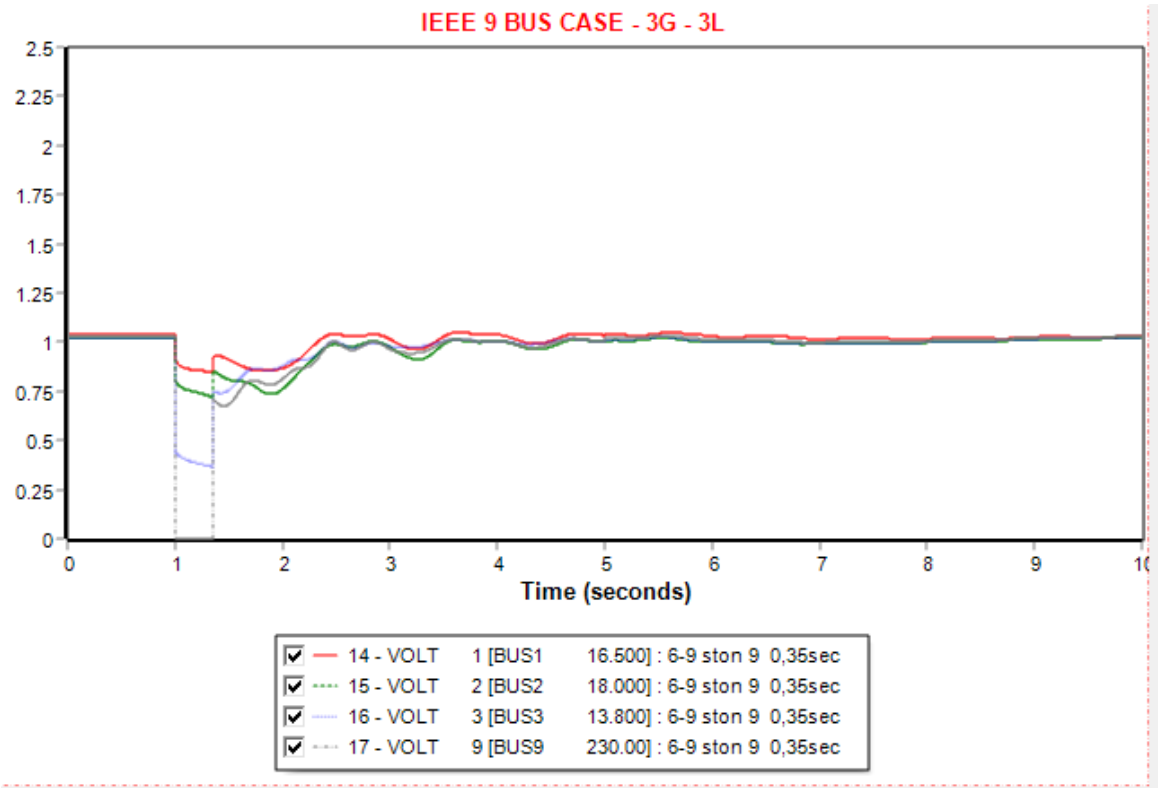
Σχήμα 6.25: Γραφική αναπαράσταση P-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 πλησίον του Ζυγού 9



Σχήμα 6.26: Γραφική αναπαράσταση Q-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 πλησίον του Ζυγού 9

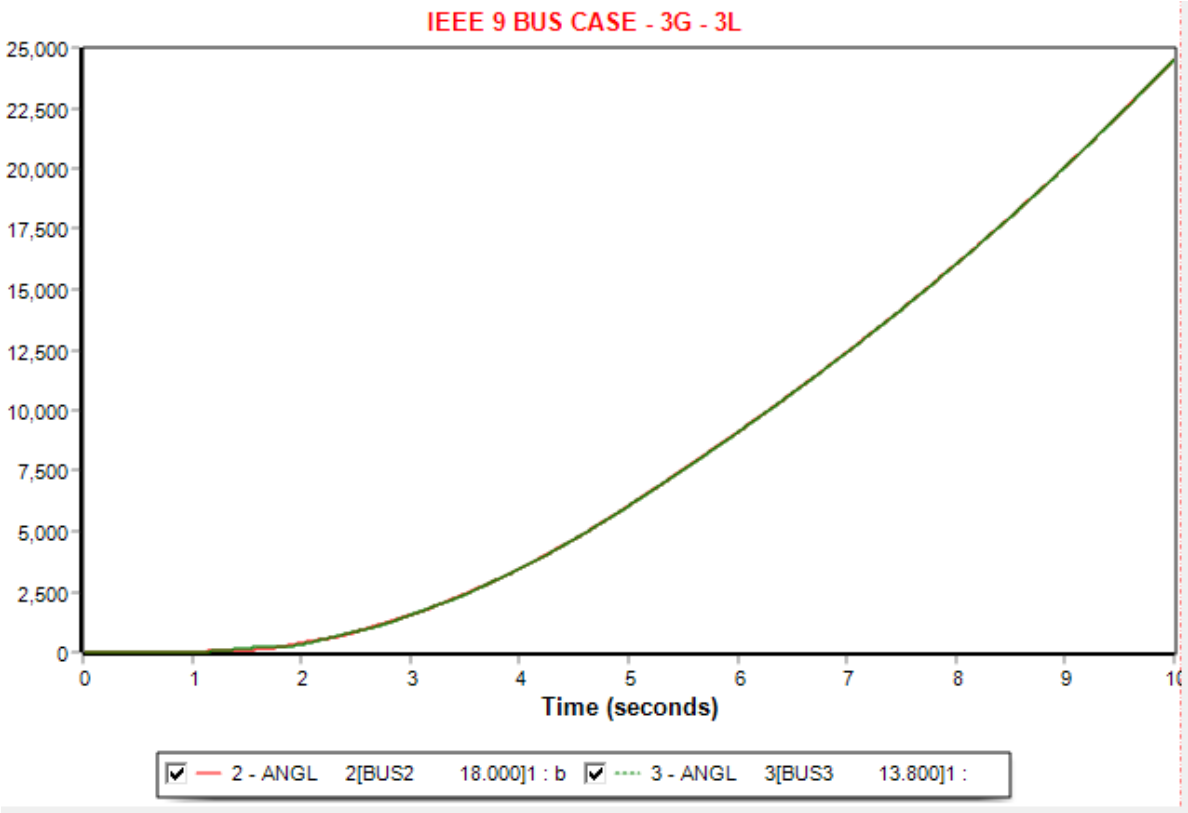


Σχήμα 6.27: Γραφική αναπαράσταση f-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 πλησίον του Ζυγού 9



Σχήμα 6.28: Γραφική αναπαράσταση V-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 6-9 πλησίον του Ζυγού 9

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.29, το σφάλμα διήρκησε μέχρι τη χρονική στιγμή t=1,4sec. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα δ-t στην περίπτωση αυτή το σύστημα δεν μπόρεσε να διατηρήσει την ευστάθειά του καθώς προέκυψε μια σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος των γεννητριών 2 και 3.



Σχήμα 6.29: Παράδειγμα αστάθειας στην περίπτωση που το σφάλμα διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή t=1,4sec

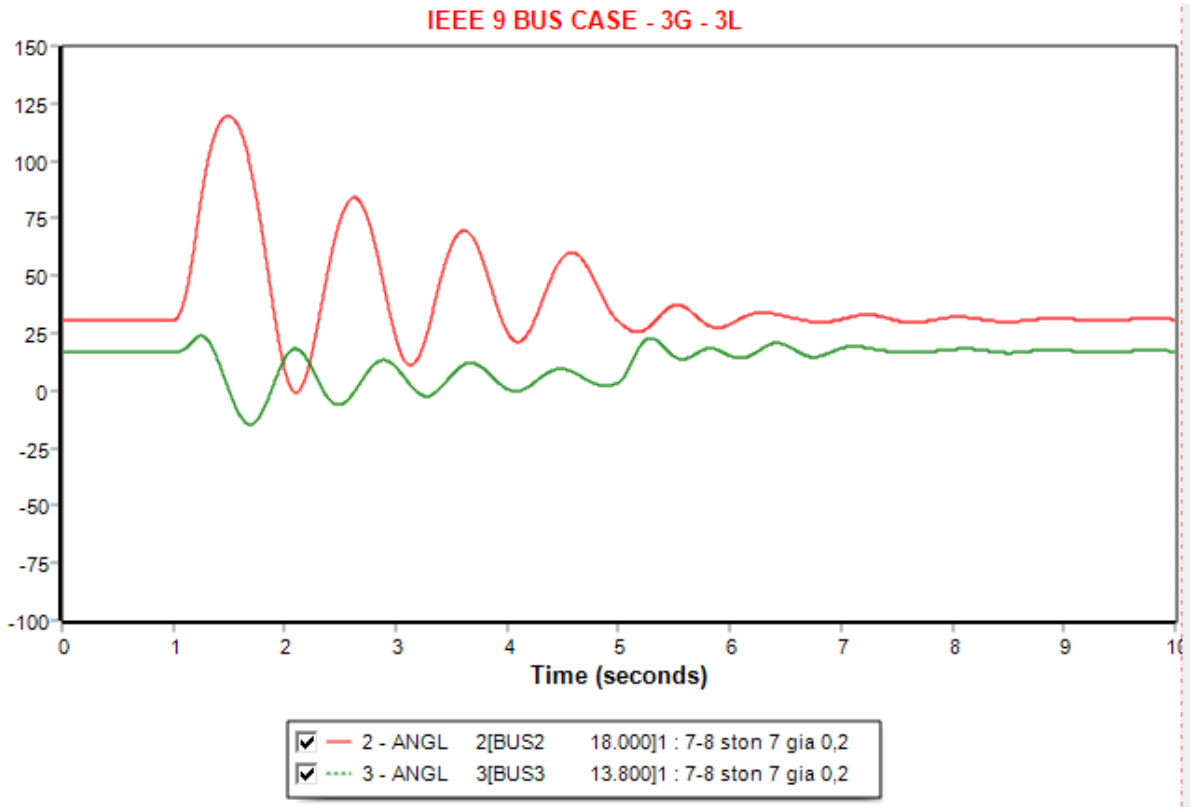
6.5.4 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά του ζυγού 7

Το δίκτυο των 9 ζυγών λειτουργεί στη μόνιμη κατάστασή του μέχρι τη χρονική στιγμή t_1=1sec. Την χρονική στιγμή t_1=1sec εφαρμόζω 3φ στερεό σφάλμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά στο ζυγό 7. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο trial and error βρίσκω ότι ο μέγιστος χρόνος για την αποφυγή του αποσυγχρονισμού ισούται με t=1,2sec. Επομένως, ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος ισούται με t_{crit}=0,2sec. Έπειτα, συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος και το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 7-8.

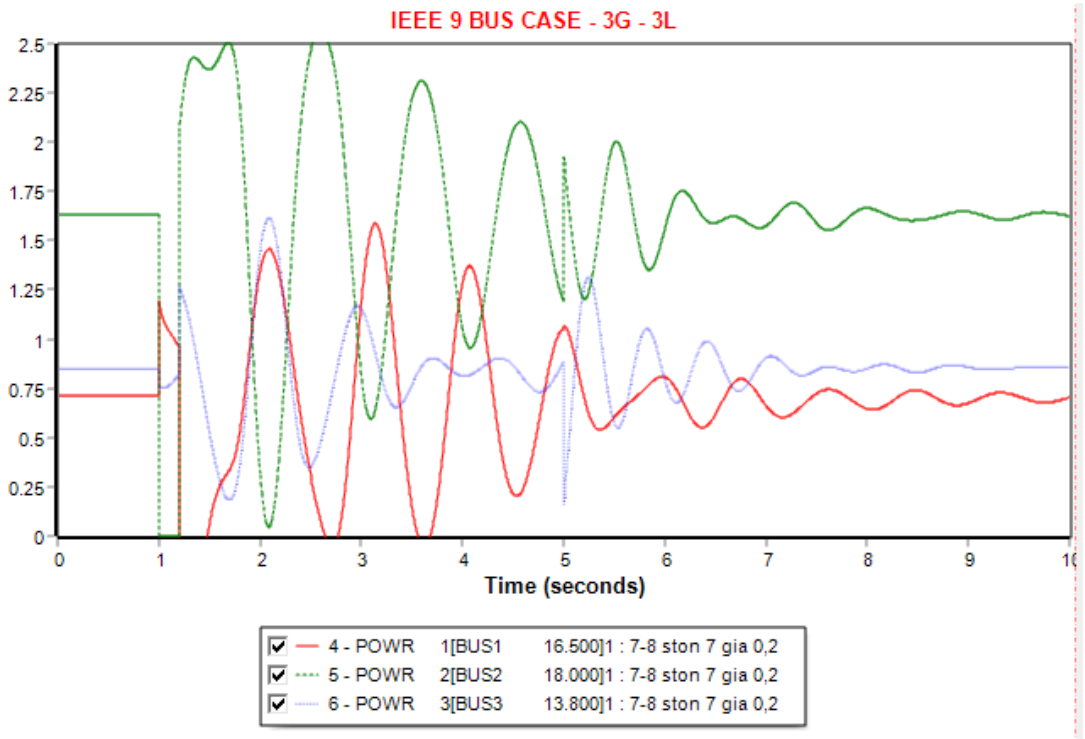
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_2=5sec. Στη συνέχεια, από την χρονική στιγμή t_2=5sec και μέχρι την t_3=10sec επαναφέρεται η Γραμμή Μεταφοράς 7-8 και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 6.30 παρουσιάζεται το διάγραμμα γωνίας - χρόνου από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του παρά τη μεταβολή, καθώς εκτελεί αποσβυνόμενες ταλαντώσεις οι οποίες καταλήγουν στη αρχική τιμή της γωνίας δ.

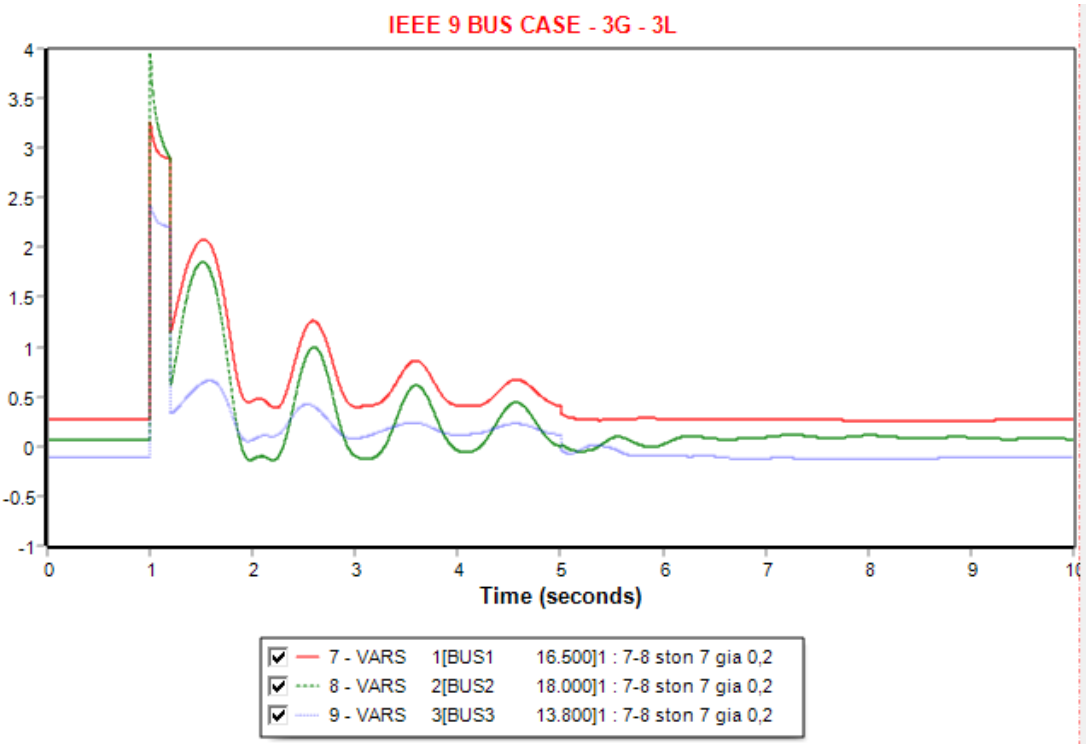
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και στις γραφικές παραστάσεις P-t, Q-t, V-t, F-t, δηλαδή στα Σχήματα 6.31 - 6.34, το σύστημα παρά τη μεταβολή διατηρεί μέσα σε κάποια όρια, σχεδόν την ίδια τελική κατάσταση όπως ήταν η αρχική, πράγμα που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η γεννήτρια 1 ελήφθη ως γεννήτρια αναφοράς. [9]



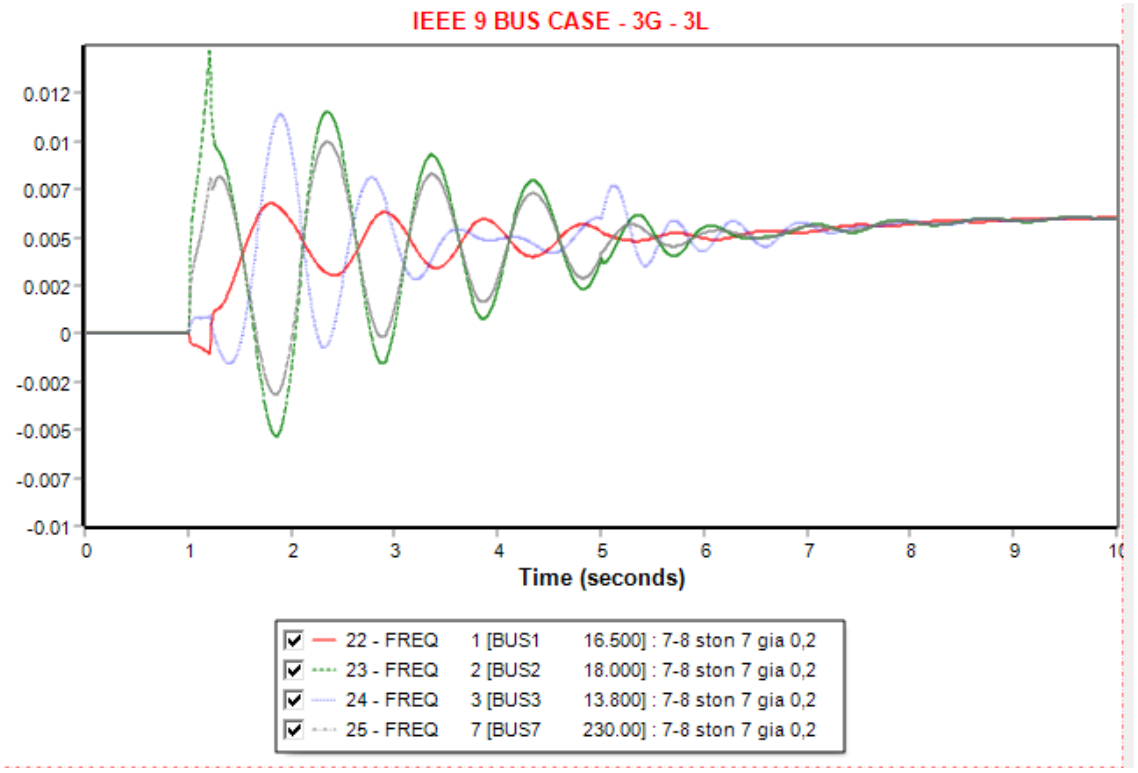
Σχήμα 6.30: Σχετική γωνία ισχύος ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς



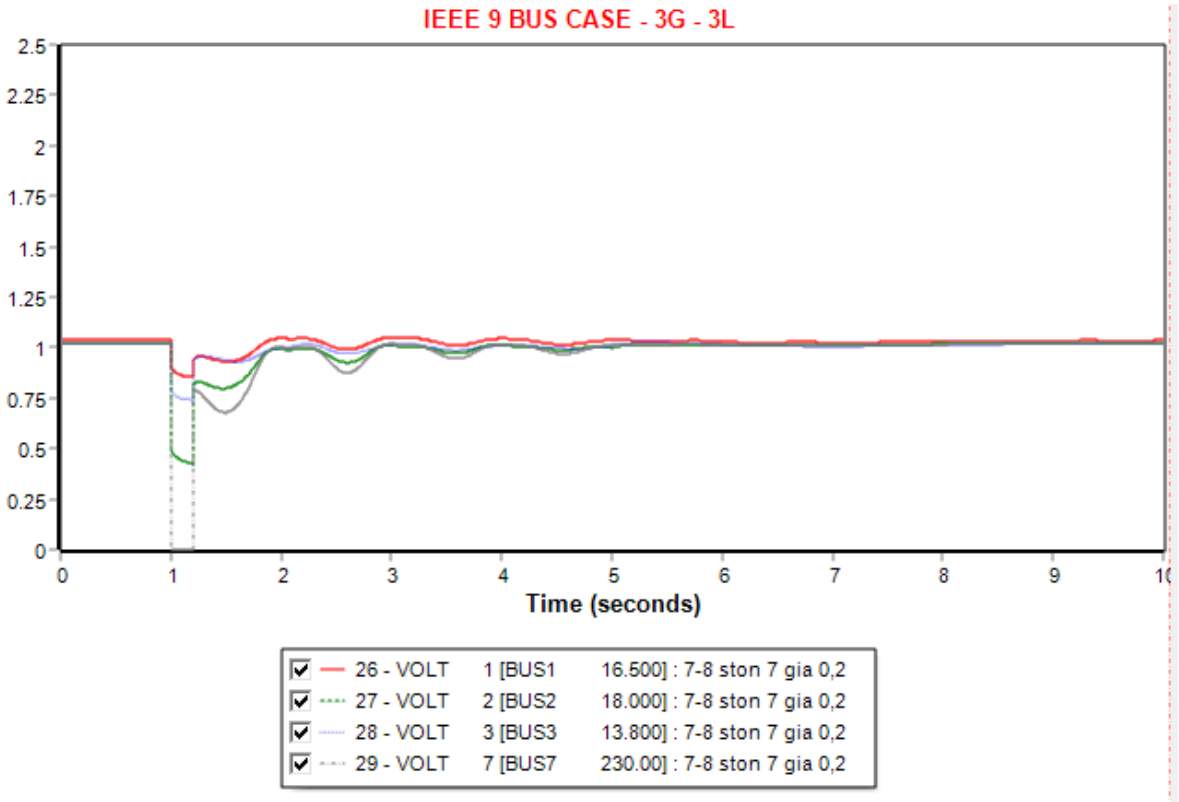
Σχήμα 6.31: Γραφική αναπαράσταση P-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 7



Σχήμα 6.32: Γραφική αναπαράσταση Q-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 7

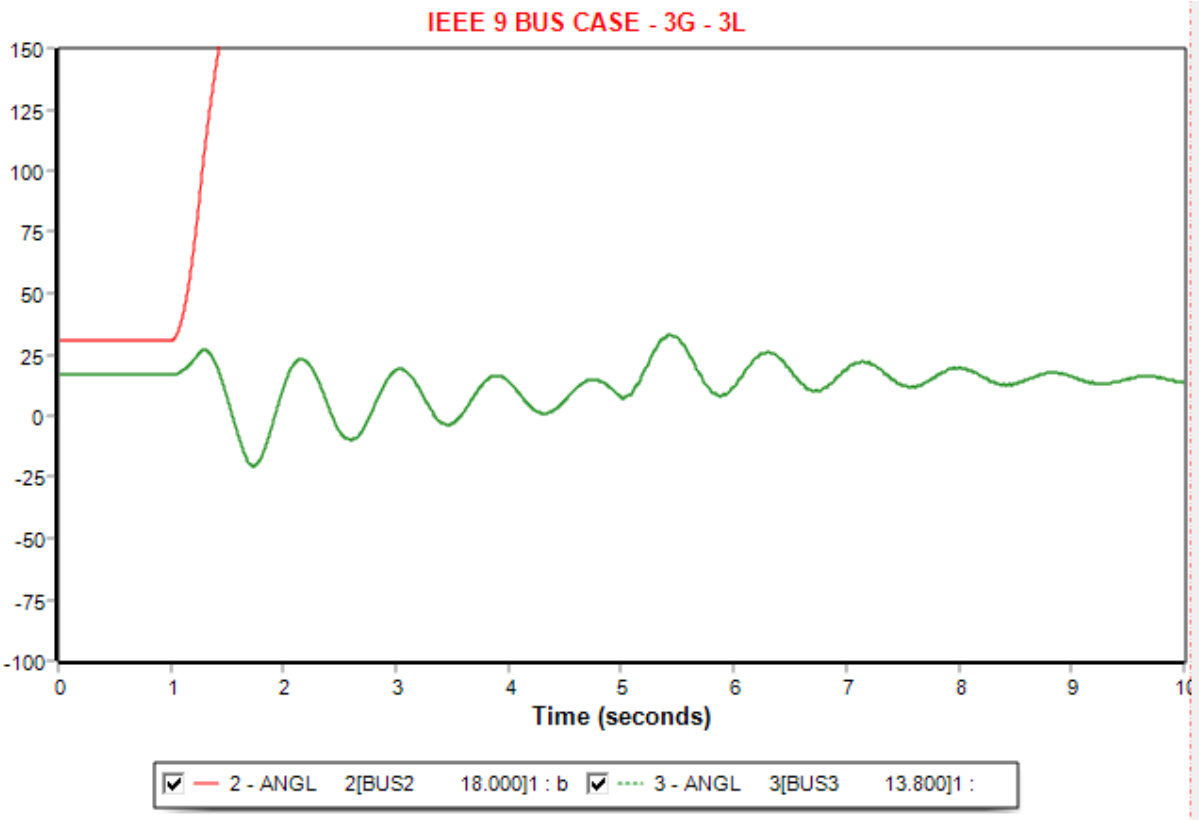


Σχήμα 6.33: Γραφική αναπαράσταση f-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 7



Σχήμα 6.34: Γραφική αναπαράσταση V-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 7

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.35, το σφάλμα διήρκησε μέχρι τη χρονική στιγμή t=1,25sec. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα δ-t στην περίπτωση αυτή το σύστημα δεν μπόρεσε να διατηρήσει την ευστάθειά του καθώς προέκυψε μια σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος της γεννήτριας 2.



Σχήμα 6.35: Παράδειγμα αστάθειας στην περίπτωση που το σφάλμα διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή t=1,25sec

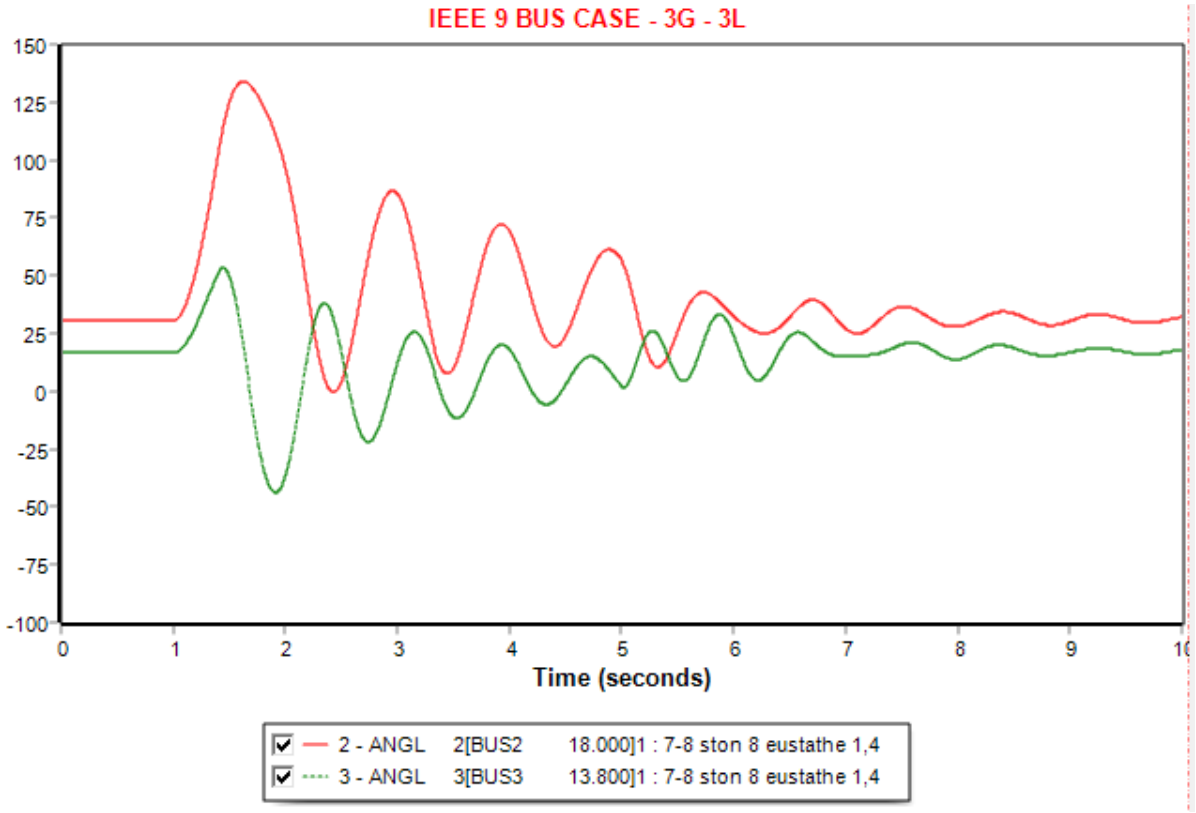
6.5.5 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά του ζυγού 8

Το δίκτυο των 9 ζυγών λειτουργεί στη μόνιμη κατάστασή του μέχρι τη χρονική στιγμή t_1=1sec. Την χρονική στιγμή t_1=1sec εφαρμόζω 3φ στερεό σφάλμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο trial and error βρίσκω ότι ο μέγιστος χρόνος για την αποφυγή του αποσυγχρονισμού ισούται με t=1,4sec. Επομένως, ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος ισούται με t_{crit}=0,4sec. Έπειτα, συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος και το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 7-8.

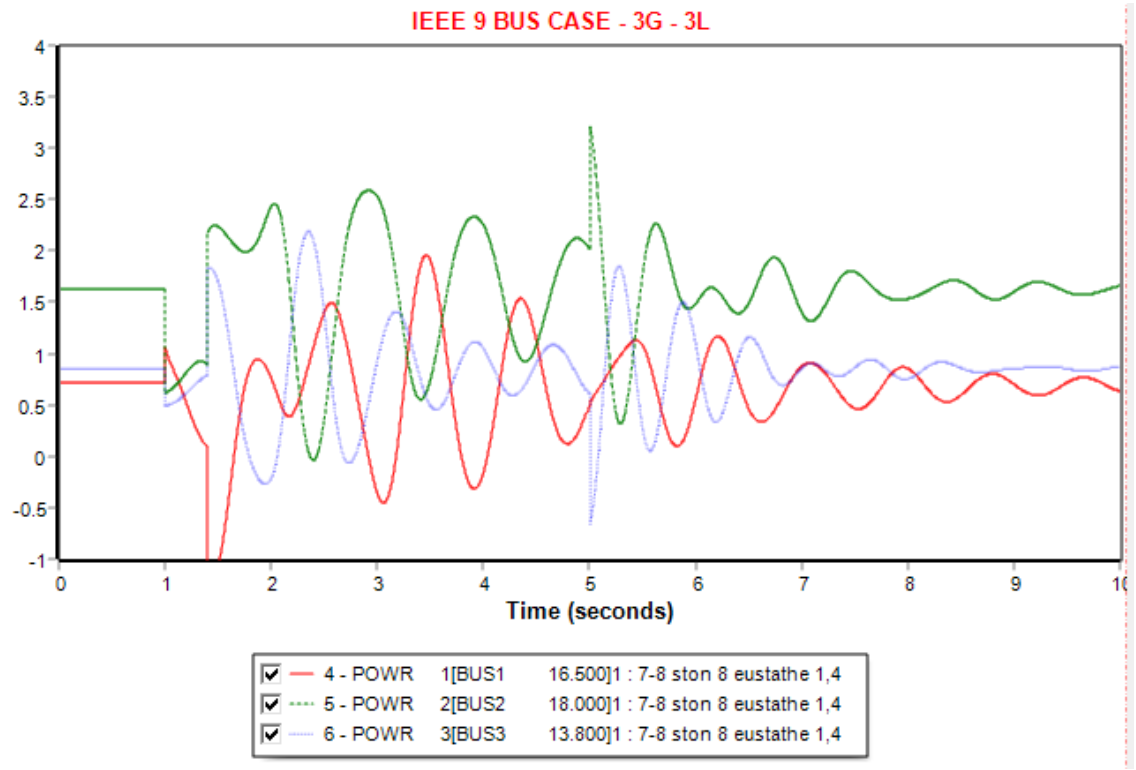
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_2=5sec. Στη συνέχεια, από την χρονική στιγμή t_2=5sec και μέχρι την t_3=10sec επαναφέρεται η Γραμμή Μεταφοράς 7-8 και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 6.36 παρουσιάζεται το διάγραμμα γωνίας - χρόνου από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του παρά τη μεταβολή, καθώς εκτελεί αποσβυνόμενες ταλαντώσεις οι οποίες καταλήγουν στη αρχική τιμή της γωνίας δ.

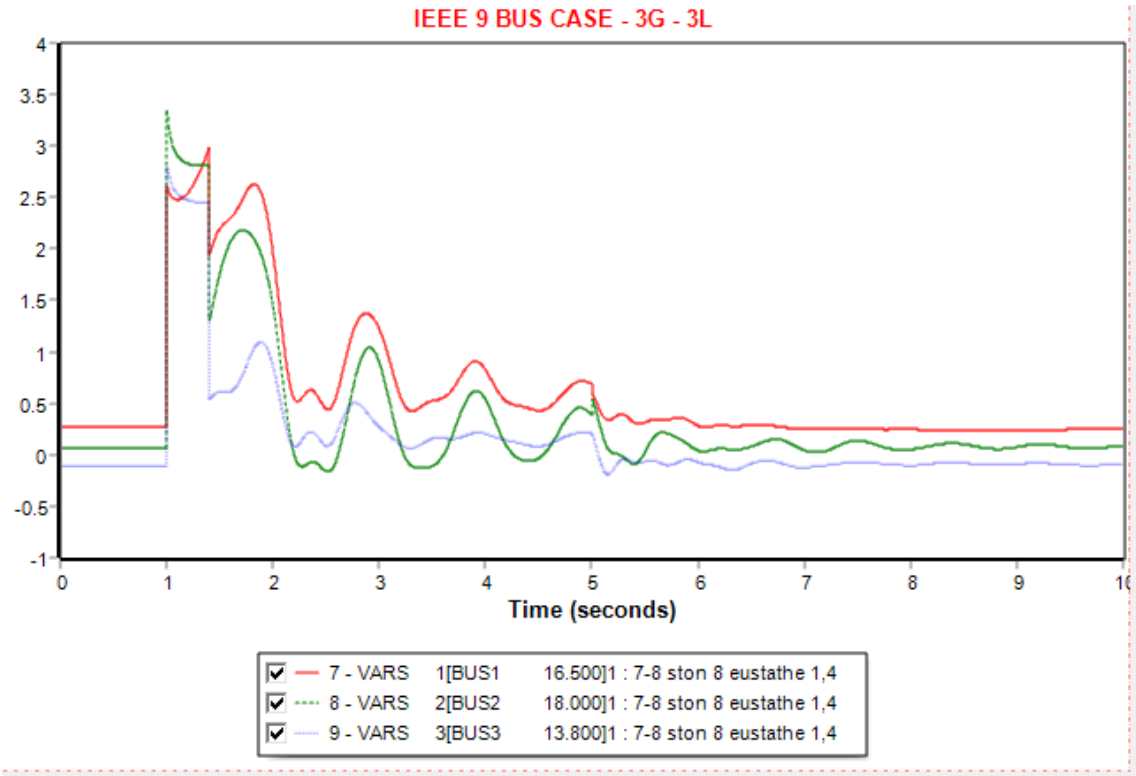
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και στις γραφικές παραστάσεις P-t, Q-t, V-t, F-t, δηλαδή στα Σχήματα 6.37 - 6.40, το σύστημα παρά τη μεταβολή διατηρεί μέσα σε κάποια όρια, σχεδόν την ίδια τελική κατάσταση όπως ήταν η αρχική, πράγμα που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η γεννήτρια 1 ελήφθη ως γεννήτρια αναφοράς. [9]



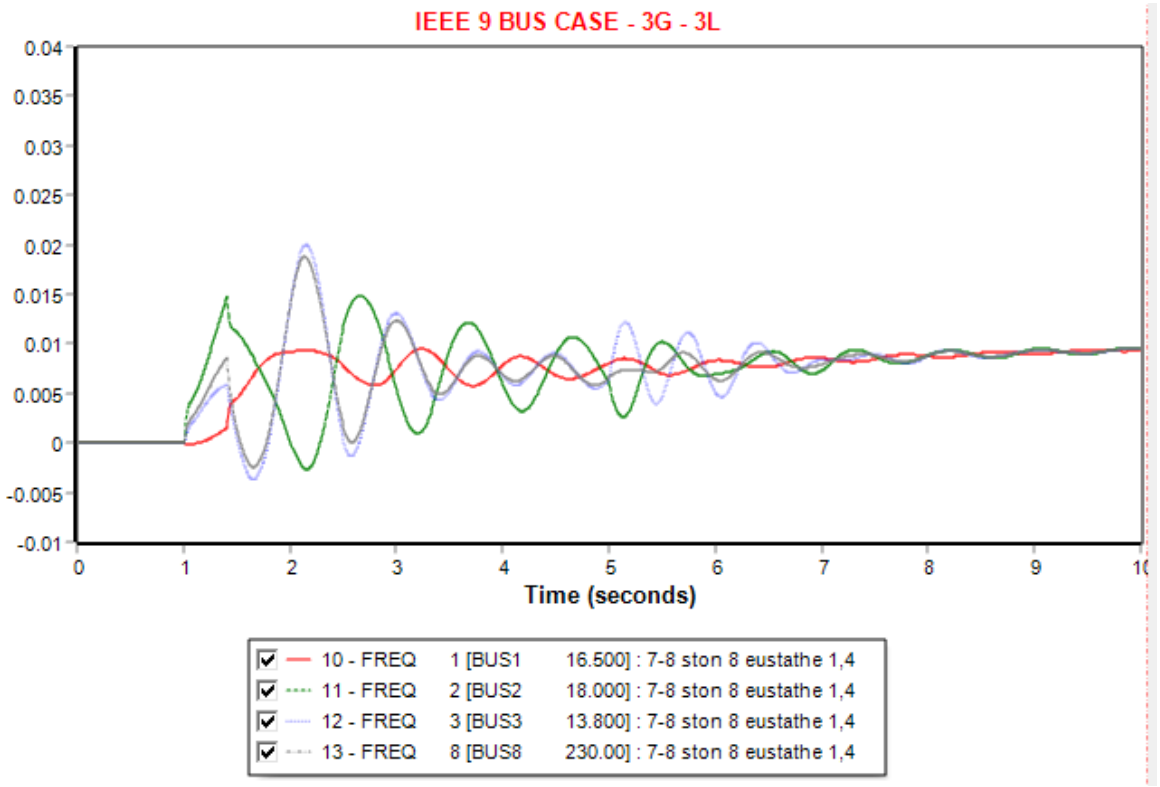
Σχήμα 6.36: Σχετική γωνία ισχύος ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς



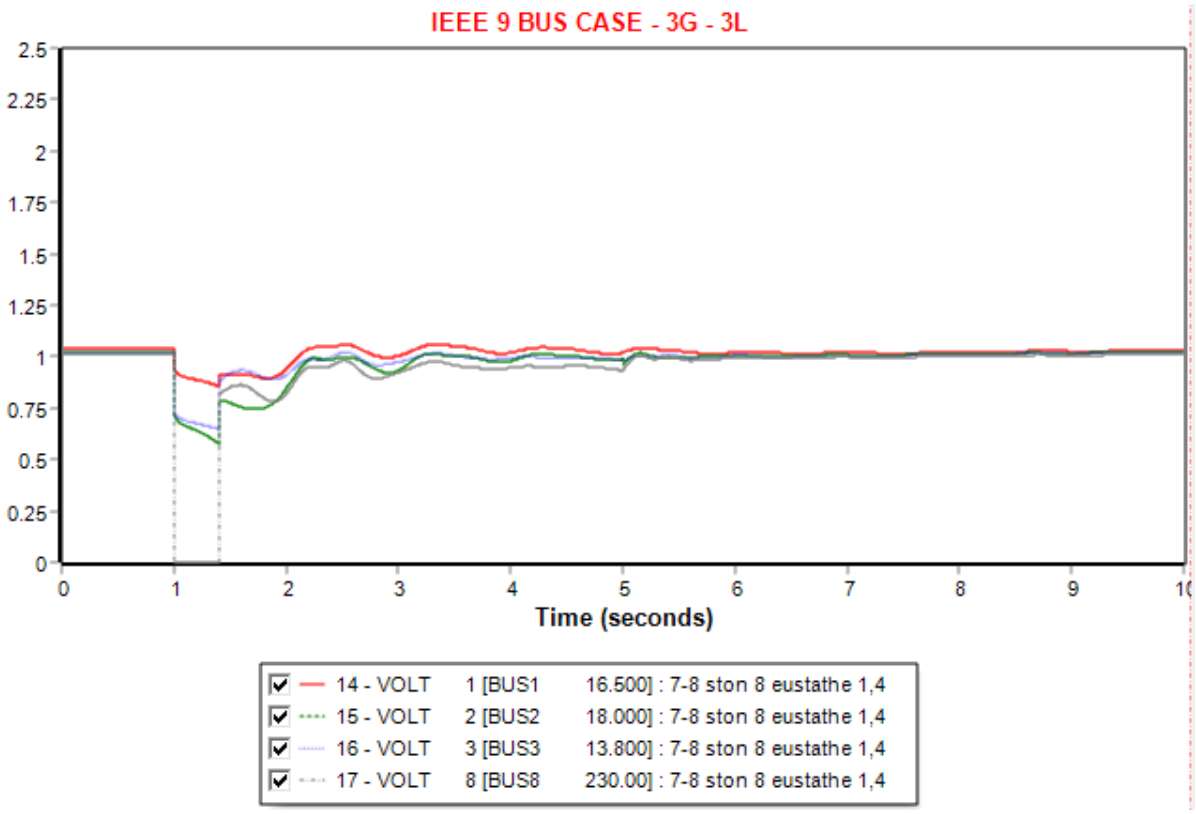
Σχήμα 6.37: Γραφική αναπαράσταση P-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 8



Σχήμα 6.38: Γραφική αναπαράσταση Q-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 8

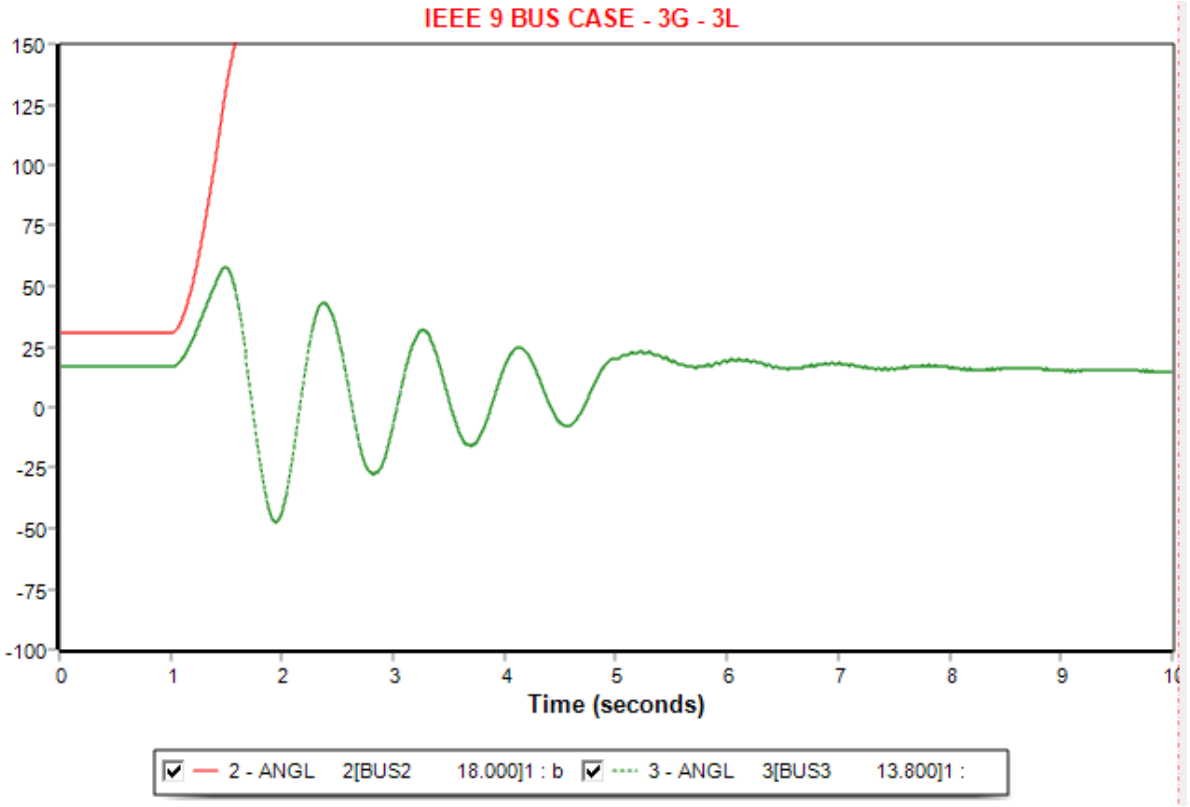


Σχήμα 6.39: Γραφική αναπαράσταση F-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 8



Σχήμα 6.40: Γραφική αναπαράσταση V-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 7-8 πλησίον του Ζυγού 8

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.41, το σφάλμα διήρκησε μέχρι τη χρονική στιγμή t=1,45sec. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα δ-t στην περίπτωση αυτή το σύστημα δεν μπόρεσε να διατηρήσει την ευστάθειά του καθώς προέκυψε μια σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος της γεννήτριας 2.



Σχήμα 6.41: Παράδειγμα αστάθειας στην περίπτωση που το σφάλμα διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή t=1,45sec

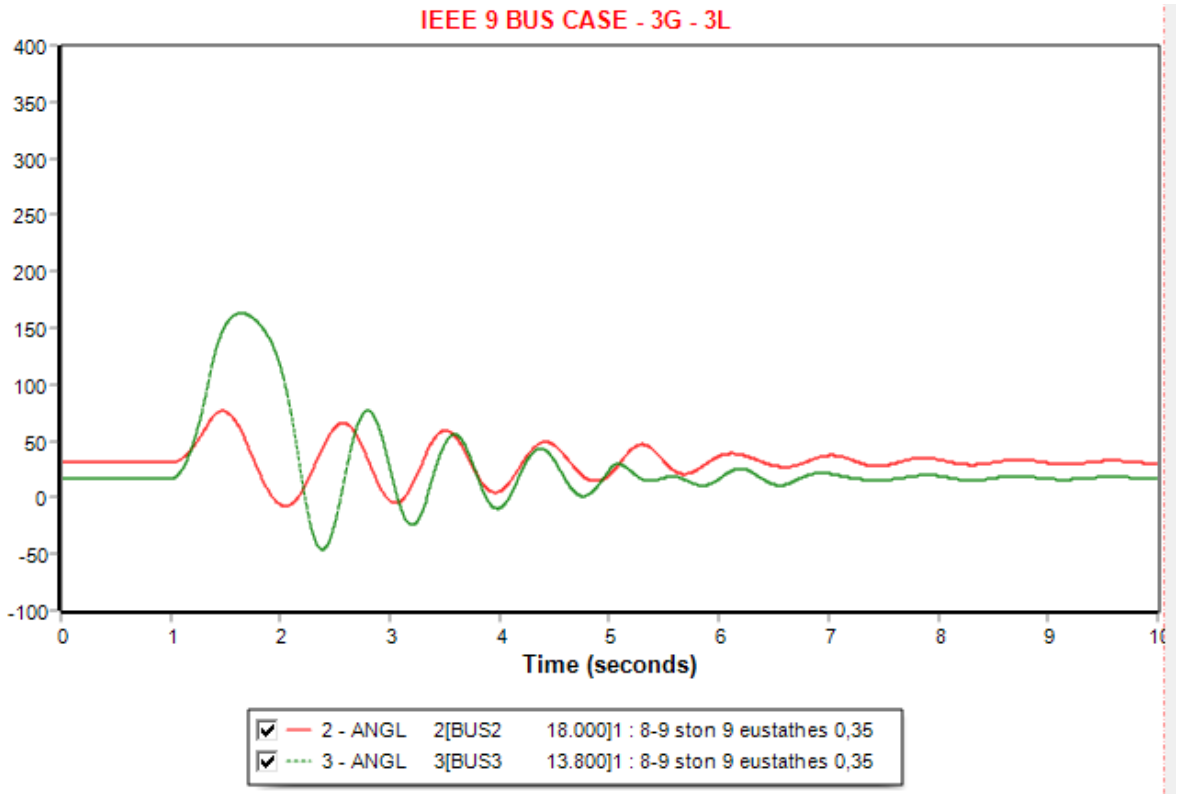
6.5.6 Στερεό 3φ βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 κοντά του ζυγού 9

Το δίκτυο των 9 ζυγών λειτουργεί στη μόνιμη κατάστασή του μέχρι τη χρονική στιγμή t_1=1sec. Την χρονική στιγμή t_1=1sec εφαρμόζω 3φ στερεό σφάλμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 κοντά στο ζυγό 9. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο trial and error βρίσκω ότι ο μέγιστος χρόνος για την αποφυγή του αποσυγχρονισμού ισούται με t=1,35sec. Επομένως, ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος ισούται με t_{crit}=0,35sec. Έπειτα, συμβαίνει η εκκαθάριση του σφάλματος και το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 8-9.

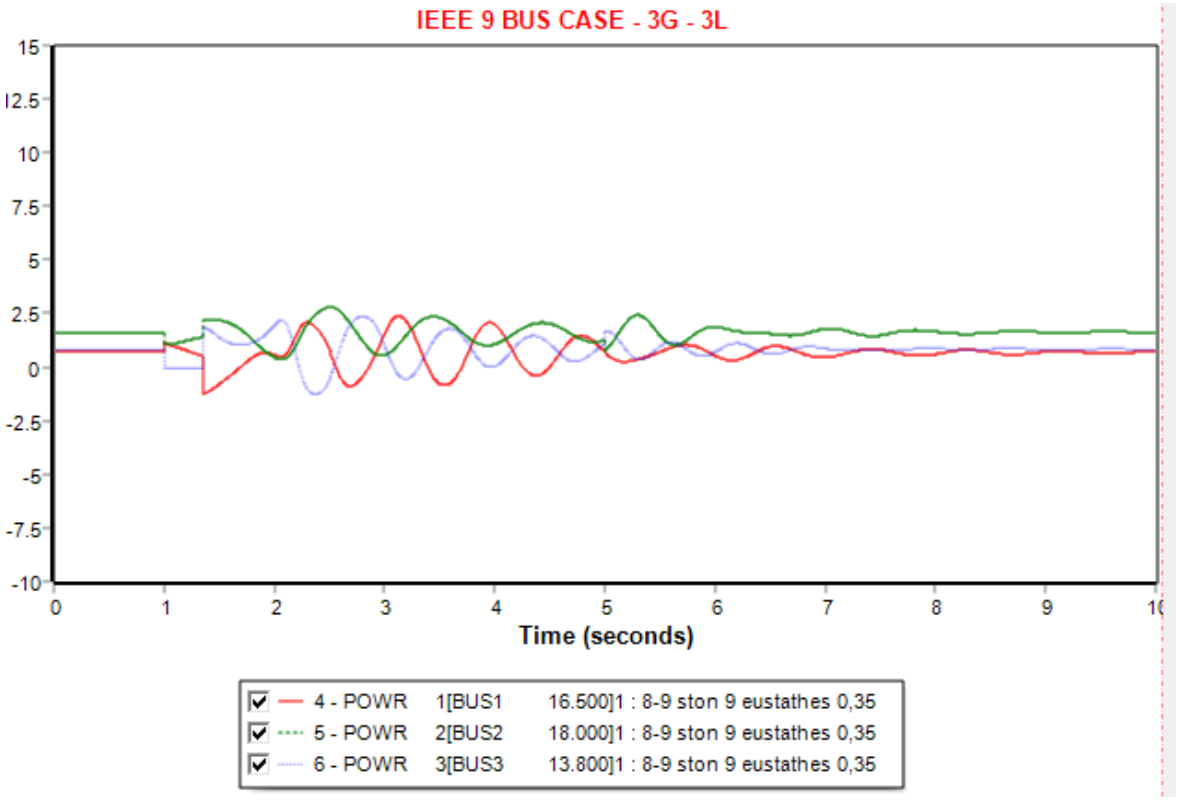
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_2=5sec. Στη συνέχεια, από την χρονική στιγμή t_2=5sec και μέχρι την t_3=10sec επαναφέρεται η Γραμμή Μεταφοράς 8-9 και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 6.42 παρουσιάζεται το διάγραμμα γωνίας - χρόνου από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του παρά τη μεταβολή, καθώς εκτελεί αποσβυνόμενες ταλαντώσεις οι οποίες καταλήγουν στη αρχική τιμή της γωνίας δ.

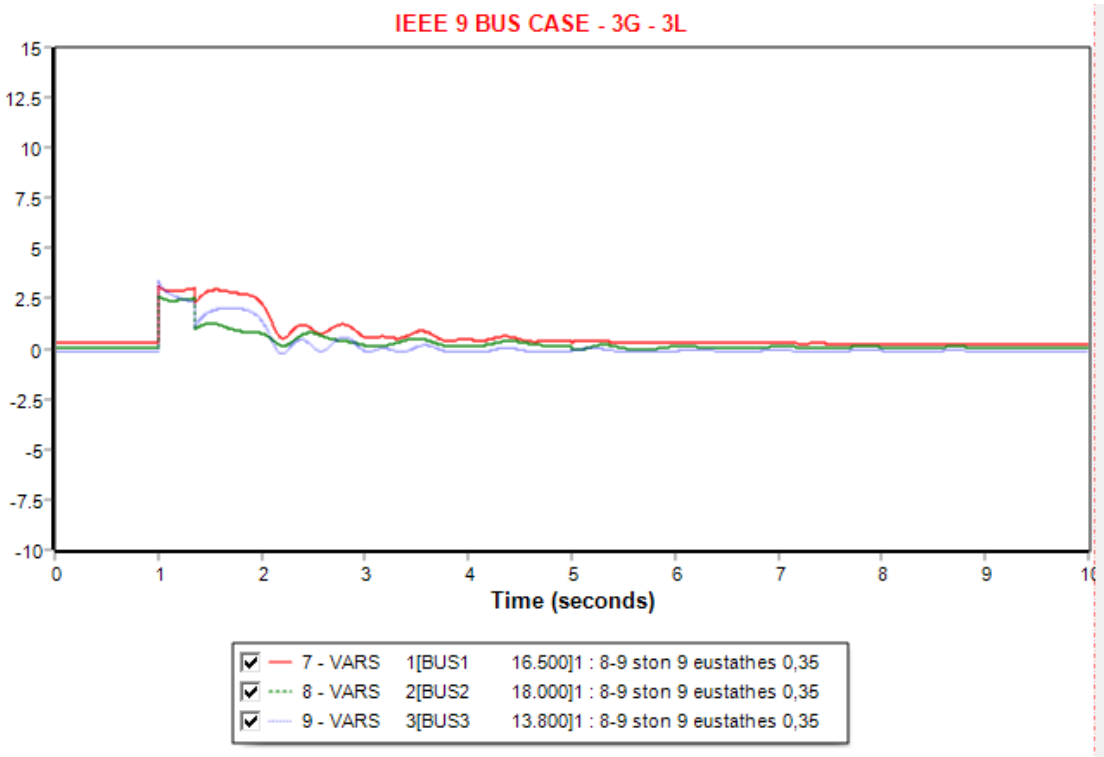
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και στις γραφικές παραστάσεις P-t, Q-t, V-t, F-t, δηλαδή στα Σχήματα 6.43 - 6.46, το σύστημα παρά τη μεταβολή διατηρεί, μέσα σε κάποια όρια, σχεδόν την ίδια τελική κατάσταση όπως ήταν η αρχική, πράγμα που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η γεννήτρια 1 ελήφθη ως γεννήτρια αναφοράς. [9]



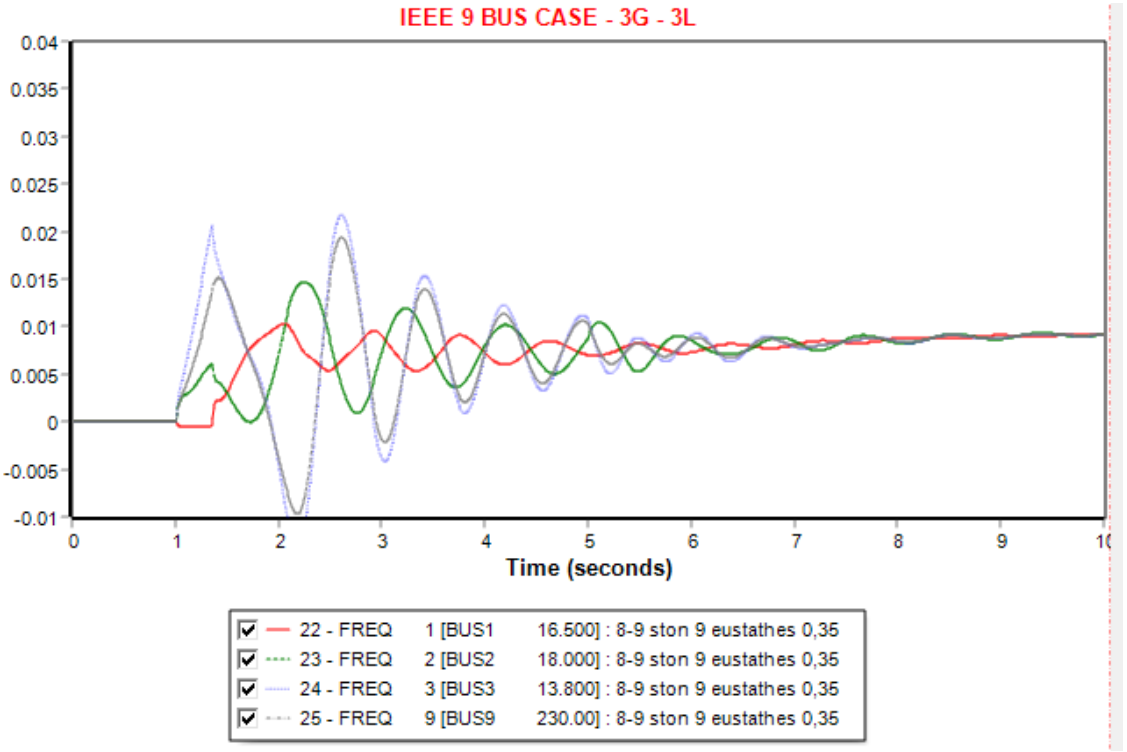
Σχήμα 6.42: Σχετική γωνία ισχύος ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς



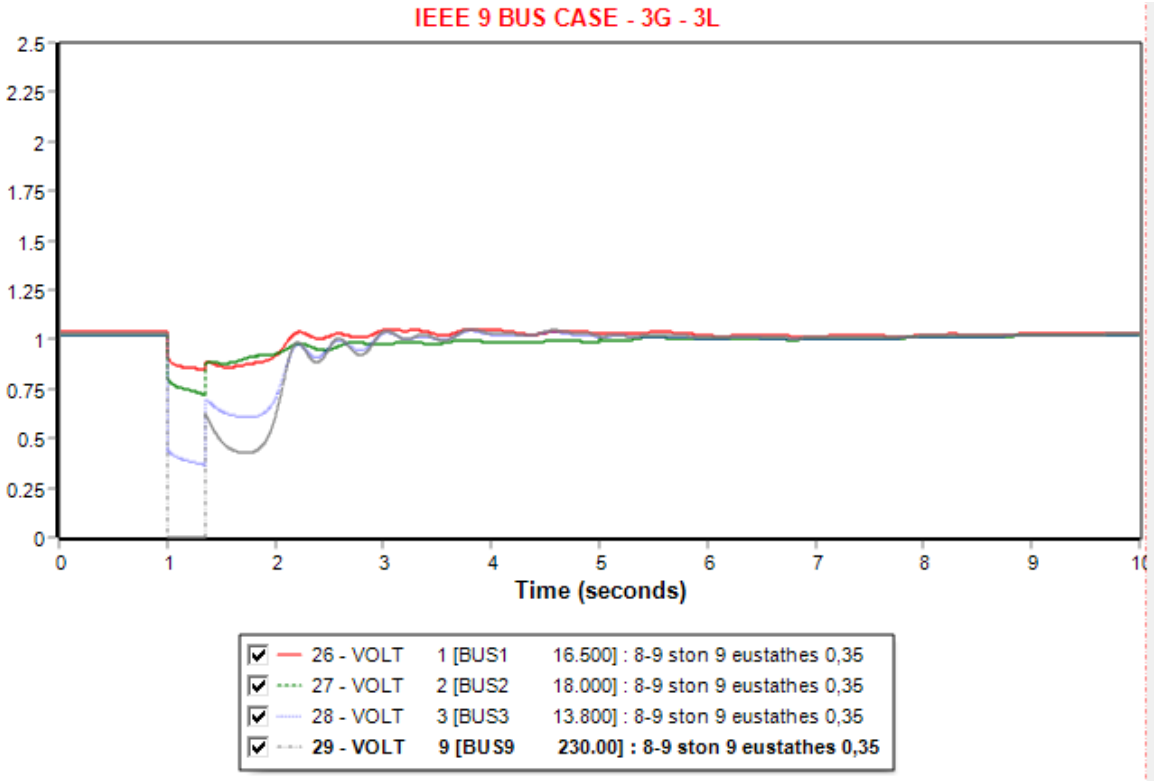
Σχήμα 6.43: Γραφική αναπαράσταση P-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 πλησίον του Ζυγού 9



Σχήμα 6.44: Γραφική αναπαράσταση Q-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 πλησίον του Ζυγού 9

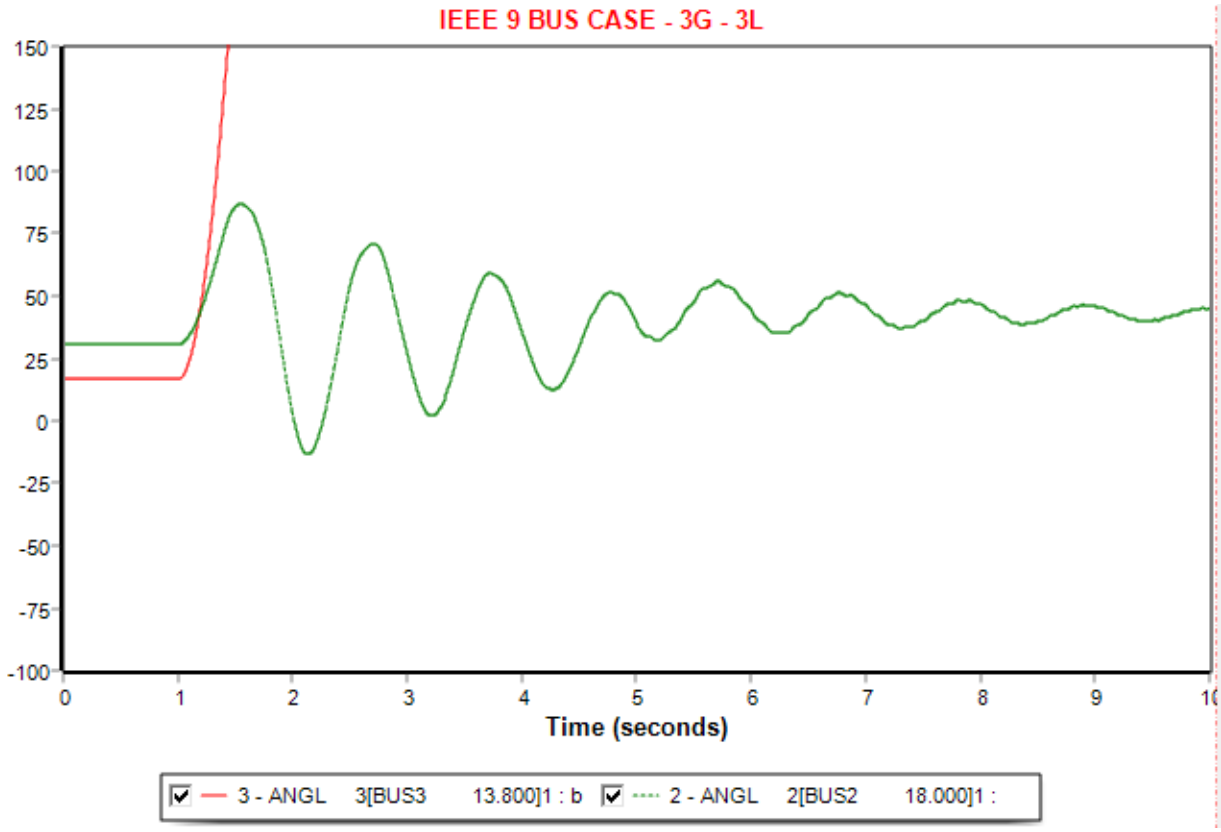


Σχήμα 6.45: Γραφική αναπαράσταση f-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 πλησίον του Ζυγού 9



Σχήμα 6.46: Γραφική αναπαράσταση V-t για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη Γραμμή Μεταφοράς 8-9 πλησίον του Ζυγού 9

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.47, το σφάλμα διήρκησε μέχρι τη χρονική στιγμή t=1,4sec. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα δ-t στην περίπτωση αυτή το σύστημα δεν μπόρεσε να διατηρήσει την ευστάθειά του καθώς προέκυψε μια σταθερή και αυξανόμενη απόκλιση της σχετικής γωνίας ισχύος της γεννήτριας 3.



Σχήμα 6.47: Παράδειγμα αστάθειας στην περίπτωση που το σφάλμα διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή t=1,4sec

6.5.8 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 6.7 παραθέτονται συνοπτικά όλα τα σενάρια των προσομοιώσεων τα οποία διεξήχθηκαν στο δίκτυο των 9 ζυγών της IEEE μέσα από το πρόγραμμα της SIEMENS PSS®E. Ο πίνακας αυτός περιγράφει σε ποια Γραμμή Μεταφοράς έγινε το σφάλμα, κοντά σε ποιο ζυγό, και ποιος είναι ο κρίσιμος χρόνος του συστήματος. [9]

Πίνακας 6.7: Κρίσιμοι χρόνοι όλων των προσομοιώσεων στο δίκτυο των 9 Ζυγών της IEEE

Γραμμή Μεταφοράς	3Φ Βραχυκύκλωμα	$t_{critical}$ (sec)
4-6	Πλησίον του ζυγού 6	4
5-4	Πλησίον του ζυγού 4	1
6-9	Πλησίον του ζυγού 9	0,35
7-8	Πλησίον του ζυγού 7	0,2
7-8	Πλησίον του ζυγού 8	0,4
8-9	Πλησίον του ζυγού 9	0,35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελεί το δίαυλο μέσα από τον οποίο μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια από την παραγωγή στους καταναλωτές, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το βιοτικό επίπεδο αλλά και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Με την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας, δόθηκε η ευκαιρία για την επέκταση των συστημάτων αυτών, καθώς έγινε δυνατή η κατασκευή ολοένα και πιο αξιόπιστου εξοπλισμού ο οποίος εγκαθίσταται σε κάθε γωνιά του δικτύου. Κατ' επέκταση, γίνονται ολοένα και πιο πολύπλοκες μελέτες οι οποίες αφορούν τόσο τη μόνιμη λειτουργία όσο και την μεταβατική. Αυτές οι μελέτες γίνονται από έμπειρους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και αφορούν τον κατάλληλο σχεδιασμό και επέκταση του εκάστοτε δικτύου, την ανάλυση της ροής των φορτίων και των σφαλμάτων που εμφανίζονται, τη μεταβατική ευστάθεια καθώς και την προστασία του συστήματος χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους ηλεκτρονόμους προστασίας. Η πολυπλοκότητα αυτή που χαρακτηρίζει τα σημερινά ΣΗΕ οδήγησε στην κατάστρωση ακόμη πιο πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων προκειμένου να εξηγηθούν τα φαινόμενα που ενδέχεται να συμβούν. Οι εξισώσεις αυτές δεν δύναται να επιλυθούν στο χαρτί, αντίθετα χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα προγράμματα προσομοίωσης τα οποία αναπαριστούν παραστατικά, το περιβάλλον και τις συνθήκες που εκάστοτε συστήματος. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν το PSS®E της SIEMENS το οποίο έδωσε ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα, που αφορούσαν την ανάλυση ενός συστήματος 9 ζυγών της IEEE. Κλείνοντας, ελπίζω η έρευνα μου να αποτελέσει πρόσφορο έδαφος για μελλοντικούς Μηχανικούς, οι οποίοι θα τη διευρύνουν τόσο για τη δική τους πνευματική καλλιέργεια όσο και για την βελτίωση των μελλοντικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Γιαννακόπουλος Γαβριήλ, Βοβός Νικόλαος, Εκδόσεις Ζήτη, 2008.

[2] Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βοβός Νικόλαος, Γιαννακόπουλος Γαβριήλ, Εκδόσεις Ζήτη, 2019.

[3] Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βοβός Νικόλαος, Γιαννακόπουλος Γαβριήλ, Εκδόσεις Ζήτη, 2017 Β' Έκδοση.

[4] Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Βοβός Νικόλαος, Εκδόσεις Ζήτη, 2009.

[5] Power System Protection & Switchgear, Badri Ram, D.N Viswakarma, TMH Publications, 2011.

[6] Power System Stability & Control, Prabha Kundur, McGraw-Hill, 1st Edition 1994.

[7] Power System Analysis & Design, J.D Glover, M.S Sarma, Brooks/Cole, 2002.

[8] Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας Ετήσια Έκθεση 2019, Δημήτρης Μεζαρτάσογλου, Κ. Ν. Σταμπολής, Ι. Χατζηβασιλειάδης, ΙΕΝΕ 2019.

[9] Power System Simulation User's Manual.

[10] Power System Simulation Wikipedia.