



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ,**  
**ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

---

Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

**«Αξιολόγηση Κυκλωματικών Μοντέλων για την  
Προσομοίωση του Ηλεκτρικού Δικτύου»**

**ΙΩΑΝΝΗΣ Μ. ΞΙΦΑΡΑΣ**

Επιβλέπων: **Γ. Σταμούλης**

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Ιούνιος 2014





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Η/Υ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ,**  
**ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

---

Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

**«Αξιολόγηση Κυκλωματικών Μοντέλων για την  
Προσομοίωση του Ηλεκτρικού Δικτύου»**

**ΙΩΑΝΝΗΣ Μ. ΞΙΦΑΡΑΣ**

Επιβλέπων: **Γ. Σταμούλης**

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Εγκρίθηκε από την τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Γ. Σταμούλης  
Καθηγητής

Π. Τσομπανοπούλου  
Αν. Καθηγήτρια

Ν. Ευμορφόπουλος  
Αν. Καθηγητής

Βόλος, Ιούνιος 2014



.....

Ιωάννης Μ. Ξιφαράς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Δ.Π.Θ.

.....

Copyright © Ιωάννης Μ. Ξιφαράς, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## *Περιεχόμενα*

<b>Ορισμοί Βασικών Εννοιών .....</b>	<b>11</b>
<b>Κεφάλαιο 1ο.....</b>	<b>12</b>
<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Δημοφιλή Προγράμματα Προσομοίωσης .....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Το Πρόγραμμα Προσομοίωσης στην παρούσα Εργασία .....	16
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> .....</b>	<b>18</b>
<b>Μοντελοποίηση των Στοιχείων στα ΣΗΕ .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Κατηγοριοποίηση Γραμμών Μεταφοράς .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Μοντελοποίηση Γραμμών Μεταφοράς .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Μοντελοποίηση με χρήση Συγκεντρωμένων Παραμέτρων.....	19
2.2.2 Οι Διαφορικές Εξισώσεις στις Γραμμές Μεταφοράς .....	22
2.2.3 Το Π-ισοδύναμο στις Γραμμές Μεγάλου Μήκους.....	24
2.2.4 Μοντελοποίηση Γραμμών με Αντιμετάθεση Φάσεων .....	26
<b>2.3 Μοντελοποίηση Μετασχηματιστών .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 Ο Ιδανικός Μετασχηματιστής .....	27
2.3.2 Ισοδύναμα Κυκλώματα Πραγματικών Μετασχηματιστών .....	28
<b>2.4 Αντιστάθμιση Ισχύος .....</b>	<b>36</b>
2.4.1 Βασικές Αρχές Αντιστάθμισης Ισχύος.....	37
2.4.2 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (FACTS) .....	39
<b>2.5 Βραχυκυκλώματα.....</b>	<b>48</b>
2.5.1 Είδη Βραχυκυκλωμάτων .....	48
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> .....</b>	<b>54</b>
<b>Μέθοδοι Υπολογιστικής Επίλυσης της Ροής Φορτίου .....</b>	<b>54</b>
<b>3.1 Εξισώσεις Δικτύου .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2 Το Πρόβλημα της Ροής Φορτίου .....</b>	<b>55</b>

<b>3.3 Επαναληπτικές Μέθοδοι Επίλυσης .....</b>	<b>57</b>
3.3.1 Η Μέθοδος Gauss – Seidel στη Ροή Φορτίου .....	58
3.3.2 Η Μέθοδος Newton - Raphson στη Ροή Φορτίου .....	60
3.3.3 Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδος (FDLF) .....	63
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> .....</b>	<b>65</b>
<b>Προσομοίωση του Συστήματος Μεταφοράς της Κρήτης.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 Η Προσομοίωση .....</b>	<b>69</b>
5.1.1 Προσομοίωση με τη Μέθοδο Gauss - Seidel .....	74
5.1.2 Προσομοίωση με τη Μέθοδο Newton - Raphson.....	79
5.1.3 Προσομοίωση με την Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδο .....	82
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> .....</b>	<b>93</b>
<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>93</b>
<b>5.1 Συμπεράσματα .....</b>	<b>93</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>95</b>



Σχήμα 1: Αναπαράσταση της ΓΜ ως δίθυρο.....	19
Σχήμα 2: Ισοδύναμο κύκλωμα ΓΜ μικρού μήκους.....	19
Σχήμα 3: Π-ισοδύναμο κύκλωμα για ΓΜ μεσαίου μήκους.....	20
Σχήμα 4: Τ-ισοδύναμο κύκλωμα για ΓΜ μεσαίου μήκους.....	21
Σχήμα 5: Αναπαράσταση ΓΜ μήκους Δx.....	22
Σχήμα 6: Π-ισοδύναμο για ΓΜ μεγάλου μήκους.....	25
Σχήμα 7: Πλήρης Αντιμετάθεση Φάσεων σε 3φασική Γραμμή Μεταφοράς Υψηλής Τάσης.....	26
Σχήμα 8: Μοντελοποίηση με π-ισοδύναμα κυκλώματα Γραμμής Μεταφοράς με πλήρη Αντιμετάθεση Φάσεων.....	26
Σχήμα 9: Ισοδύναμο Κύκλωμα Ιδανικού Μετασχηματιστή.....	27
Σχήμα 10: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων.....	29
Σχήμα 11: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων με τα μεγέθη του δευτερεύοντος ανοιγμένα στο πρωτεύον.....	30
Σχήμα 12: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων στο σύστημα per unit.....	30
Σχήμα 13: Πυρήνας και Πηνία σε Μετασχηματιστή Υ-Δ και διάγραμμα φασικών διανυσμάτων.....	31
Σχήμα 14: Ισοδύναμο per unit Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων.....	33
Σχήμα 15: Μοντέλο μετασχηματιστή ρύθμισης.....	35
Σχήμα 16: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης.....	35
Σχήμα 17: Σύστημα Μεταφοράς: (α) απλοποιημένο μοντέλο, (β) διάγραμμα φάσεων.....	36
Σχήμα 18: Σύστημα μεταφοράς με παράλληλη αντιστάθμιση: (α) απλοποιημένο μοντέλο, (β) διάγραμμα φάσεων, (γ) καμπύλη ισχύος-φασικής γωνίας.....	37
Σχήμα 19: Σύστημα μεταφοράς με αντιστάθμιση σε σειρά: (α) απλοποιημένο μοντέλο, (β) διάγραμμα φάσεων, (γ) καμπύλη ισχύος-φασικής γωνίας.....	38
Σχήμα 20: Η διάταξη TCR.....	40
Σχήμα 21: Συνδεσμολογία TCR σε τριφασική γραμμή σε τρίγωνο (Δ).....	40
Σχήμα 22: Διάταξη Στατικού Αντισταθμιστή (SVC).....	41
Σχήμα 23: (α) Τυπικό μοντέλο SVC, (β) Σύστημα Ελέγχου SVC.....	42
Σχήμα 24: Σύστημα με Στατικό Αντισταθμιστή VAR (SVC).....	43
Σχήμα 25: (α) Διάταξη Ελεγχόμενης Αντιστάθμισης Σειράς (TCSC), (β) Φαινομένη Αντίδραση TCSC.....	44

Σχήμα 26:Χαρακτηριστικές Τάσης και ρεύματος στο TCSC στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.	45
Σχήμα 27:Διάταξη Στατού Πυκνωτή (STATCOM) .....	46
Σχήμα 28: Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC) .....	46
Σχήμα 29: Είδη βραχυκυκλωμάτων (α) Τριφασικό, (β) Διφασικό, (γ) Μονοφασικό ως προς γη, (δ) Διφασικό ως προς γη.....	48
Σχήμα 30: Σύνθεση συμμετρικού βραχυκυκλώματος(α), σε τυπική εγκατάσταση(β). .....	49
Σχήμα 31: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει κοντά σε σύγχρονη γεννήτρια [ Άνω περιβάλλουσα(1), κάτω περιβάλλουσα(2) ] .....	50
Σχήμα 32: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει μακριά από σύγχρονη γεννήτρια ή άλλη στρεφόμενη μηχανή [Άνω περιβάλλουσα (1), κάτω περιβάλλουσα (2)] .....	50
Σχήμα 33: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης έχει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, κοντά σε σύγχρονη γεννήτρια .....	52
Σχήμα 34: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης έχει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, μακριά από σύγχρονες γεννήτριες ή άλλες στρεφόμενες μηχανές..	52
Σχήμα 35: Μετατροπή των πηγών τάσης σε πηγές ρεύματος για την εφαρμογή των εξισώσεων κόμβων (NPK). .....	54
Σχήμα 36: Πραγματική και Άεργος Ισχύς σε ζυγό k. G: Γεννήτρια - L: Φορτίο .....	56
Σχήμα 37:Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Επίλυσης Ροής Φορτίου βασισμένο στη μέθοδο Gauss – Seidel.....	59
Σχήμα 38: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Επίλυσης Ροής Φορτίου βασισμένο στη μέθοδο Newton – Raphson.....	62
Σχήμα 39: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Επίλυσης Ροής Φορτίου βασισμένο στη Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδο. ....	64
Σχήμα 40:Το Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης στην παρούσα κατάσταση.....	67
Σχήμα 41:Απλοποιημένο Μονογραμμικό της Διασύνδεσης της Κρήτης σύμφωνα με το Σενάριο Β. ....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Σχήμα 42:Μελλοντική Ανάπτυξη του Συστήματος Μεταφοράς της Κρήτης. ....	68
Σχήμα 43: Μονογραμμικό του Παρόντος Συστήματος της Κρήτης. Οι διακεκομμένες γραμμές αφορούν μελλοντικές επεκτάσεις του συστήματος. ....	71
Σχήμα 44:Λεπτομέρεια του Μονογραμμικού. Ετικέτες με τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου. ....	70
Σχήμα 45: Τα μεγέθη που εμφανίζονται στις ετικέτες των στοιχείων.....	70
Σχήμα 46:Αρχείο τύπου *.raw στο PSSE. ....	72

Σχήμα 47:Χρωματική Αναπαράσταση σχετικά με την Τάση και την Ισχύ στο μονογραμμικό διάγραμμα. ....	69
Σχήμα 48: Αναφορά σχετικά με τη Χρωματική Αναπαράσταση για την Τάση και την Ισχύ στο υπόμνημα του μονογραμμικού διαγράμματος. ....	69
Σχήμα 49: Μονογραμμικό Διάγραμμα Υψηλής και Μέσης Τάσης του δικτύου της Κρήτης. ....	73
Σχήμα 50: Οι επιλογές για την επίλυση ροής φορτίου με τους δυο αλγορίθμους. ....	74
Σχήμα 51: Οι ρυθμίσεις στην επίλυση της Newton - Raphson.....	79
Σχήμα 52:Οι επιλογές στην επίλυση της Επαναληπτικής ταχείας Αποζευγμένης Μεθόδου .....	82
Σχήμα 53: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 1 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Gauss – Seidel. ....	85
Σχήμα 54: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 2 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Gauss – Seidel. ....	86
Σχήμα 55: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 1 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson.. ....	87
Σχήμα 56: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 2 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson.. ....	88
Σχήμα 57: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 3 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson.. ....	89
Σχήμα 58: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 4 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson.. ....	90
Σχήμα 59: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 5 <sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson.. ....	91
Σχήμα 60: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 1 <sup>η</sup> επίλυση με τη Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδο. ....	92
Σχήμα 61: Καμπύλη Ταχύτητας Σύγκλισης των Εξετασθέντων Μεθόδων Επίλυσης Ροής Φορτίου. ....	94

## *Ευχαριστίες*

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Σταμούλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, καθώς και για τη συνεργασία που είχαμε όλη αυτή την περίοδο.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την Πρόεδρο του ΤΕΙ Χαλκίδας Αν. Καθηγήτρια κα. Αφροδίτη Κτενά, χωρίς τη συνδρομή της οποίας η παρούσα εργασία δε θα είχε πραγματοποιηθεί. Η συμβολή της ήταν εξίσου σημαντική τόσο στη διαμόρφωση του θέματος όσο και στην ολοκλήρωσή του.

Επίσης ευχαριστώ την κα Ευσταθίου Σταματίνα, τομεάρχη του Τομέα Μελετών Συστήματος του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας για την παροχή δεδομένων σχετικά με το ελληνικό σύστημα μεταφοράς και το δίκτυο της Κρήτης.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και την οικογένειά μου για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την περίοδο της συγγραφής της διπλωματικής μου.

# Ορισμοί Βασικών Εννοιών

**Μοντελοποίηση:** Η γραφική, μαθηματική (συμβολική), φυσική ή προφορική αναπαράσταση, ή η απλοποιημένη εκδοχή του σχεδίου μιας ενός φαινομένου, μιας δομής, ενός συστήματος ή μιας πτυχής του πραγματικού κόσμου. Οι στόχοι ενός μοντέλου περιλαμβάνουν:

- την κατανόηση του εν λόγω συστήματος, εξαλείφοντας τα περιττά συστατικά
- τη διευκόλυνση στη λήψη αποφάσεων μέσα από την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων
- την πρόβλεψη και τον έλεγχο μελλοντικών γεγονότων με βάση παρελθοντικές παρατηρήσεις.

Δεδομένης της πολυπλοκότητας των συστημάτων που μοντελοποιούνται, με σκοπό την πλήρη κατανόηση του συστήματος στο σύνολό του, τα μοντέλα περιέχουν μόνο τα χαρακτηριστικά που είναι πρωταρχικής σημασίας για την κατασκευή και λειτουργία του εν λόγω συστήματος. Η διακύμανση των ειδών των μοντέλων είναι μεγάλη, εφόσον μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ένα απλό σκίτσο, αλλά και ένα υπολογιστικό πρόγραμμα χιλιάδων γραμμών κώδικα.

Τα μοντέλα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση το βαθμό της αφαίρεσης:

- **Εικονικό μοντέλο:** λιγότερο αφηρημένο, με φυσική όψη, όπως ένα μοντέλο ενός αεροπλάνου ή ενός τρένου.
- **Ανάλογο μοντέλο:** πιο αφηρημένο, αλλά έχει κάποια ομοιότητα με το σύστημα ή τη δομή που αντιπροσωπεύει. Τέτοιο μοντέλο μπορεί να αποτελεί ένα γράφημα, ένα διάγραμμα ή ένας χάρτης.
- **Συμβολικό μοντέλο:** αφηρημένο μοντέλο χωρίς καμία φυσική ομοιότητα με το πραγματικό σύστημα, με σκοπό την προσέγγιση αυτού που αντιπροσωπεύει σε επίπεδο μαθηματικών εξισώσεων. [ 1 ]

**Προσομοίωση:** Η μίμηση μιας πραγματικής ή πιθανής κατάστασης ή ενός γεγονότος, με σκοπό την εύρεση μιας παρελθοντικής αιτίας ή την πρόβλεψη μιας μελλοντικής συμπεριφοράς. Η προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί μέσω:

- της επίλυσης μιας σειράς εξισώσεων, δηλαδή μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου
- της κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου σε κλίμακα
- σταδιακών δοκιμών
- φυσικών αναπαραστάσεων διαφόρων δραστηριοτήτων (όπως στα στρατιωτικά γυμνάσια)
- γραφικών υπολογιστικών μοντέλων όπως είναι τα διαγράμματα ροής. [ 1 ]

# Κεφάλαιο 1ο

## Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ανέκαθεν παρουσίαζαν μια πολυπλοκότητα τέτοια, ώστε να είναι αναγκαία η μελέτη της συμπεριφοράς τόσο των υφισταμένων εγκαταστάσεων, όσο και των μελλοντικών κατασκευών σε αυτά, με σκοπό τη βέλτιστη και ασφαλή λειτουργία τους. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της διασύνδεσης των δικτύων (π.χ. διασυνδεδεμένο ευρωπαϊκό δίκτυο) και της ένταξης νέων τεχνολογιών σε αυτά (νέες ΑΠΕ, εξελιγμένα ηλεκτρονικά ισχύος, τελευταίας τεχνολογίας τηλεπικοινωνιακά συστήματα) προκύπτουν ολοένα και μεγαλύτερα, καθώς και πιο σύνθετα συστήματα. Ως εκ τούτου, η όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου αποτελεί μια αναπόφευκτη ανάγκη.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του δικτύου σχετίζονται με την ασφαλή, οικονομική και βέλτιστη λειτουργία του. Μερικά από τα χαρακτηριστικά οφέλη από την επιτυχή προσομοίωση του δικτύου είναι τα εξής:

- κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος
- δημιουργία ενός ευέλικτου συστήματος
- δυνατότητα μείωσης του κόστους λειτουργίας του συστήματος
- δυνατότητα ανάπτυξης της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος με τον πιο αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο
- αποφυγή της παρενόχλησης του συστήματος από εσωτερικούς ή εξωτερικούς παράγοντες
- επίσπευση της διαδικασίας της μελέτης του συστήματος, και άρα της βελτιστοποίησής του
- ελαχιστοποίηση του κινδύνου σε περίπτωση ανάγκης άμεσης εφαρμογής μιας απόφασης
- προαγωγή της ομαδικής εργασίας μέσω της διευκόλυνσης της επικοινωνίας

Παρόλα αυτά, η προσομοίωση, ως πειραματική μέθοδος εξαρτάται πολύ από την πιστότητα του μοντέλου του συστήματος που χρησιμοποιείται, καθώς και από την επιλογή εκείνων των παραμέτρων που απαιτούνται για την εξαγωγή αξιόπιστων και χρήσιμων συμπερασμάτων. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι για την επιτυχή προσομοίωση ενός συστήματος ή μιας δομής δεν αρκεί μόνο να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία της προσομοίωσης – ο αλγόριθμος του προγράμματος στην προκειμένη περίπτωση – αλλά και να χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα κυκλωματικά μοντέλα που αναπαριστούν τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος.

Η προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τα **προγράμματα προσομοίωσης για τη σταθερή κατάσταση** του δικτύου, που εξετάζουν τη ροή φορτίου (power flow) στο δίκτυο,
- τα **προγράμματα προσομοίωσης των ταχέων μεταβατικών φαινομένων (transient stability)**, όπως είναι τα σφάλματα (π.χ. υπερτάσεις) και οι μεταβολές κατά τη διακοπτική λειτουργία του δικτύου, και

- τα **προγράμματα προσομοίωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (power market)**, που χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση λειτουργιών της αγοράς όπως η διαμόρφωση των τιμών κόστους της παραγόμενης ενέργειας κλπ.

## 1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής

Για την πλήρη πρόγνωση της συμπεριφοράς του δικτύου, είναι αναπόφευκτο πέρα από την προσομοίωση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, να ελεγχθούν και διάφορα σενάρια κατά τα οποία εμφανίζονται σφάλματα στο δίκτυο. Όμως, οι διαφορές ανάμεσα στα δύο είδη προσομοίωσης είναι αρκετές και η έκταση του αντικειμένου αρκετά μεγάλη. Η κυριότερη διαφορά είναι πως τα προγράμματα ροής φορτίου επιλύουν το σύστημα ως προς το χρόνο, ενώ τα προγράμματα που προσομοιώνουν μεταβατικά φαινόμενα επιλύουν ως προς τη συχνότητα, άρα τα μοντέλα σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετικά.

Στην παρούσα εργασία βασικός σκοπός είναι η χαρτογράφηση και αξιολόγηση των κυκλωματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ροής φορτίου του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και η αξιολόγηση των βασικών αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων τέτοιας φύσεως, όπως αυτοί εφαρμόζονται από τα ευρέως διαδεδομένα προγράμματα προσομοίωσης. Τα βασικά κριτήρια της αξιολόγησης σχετίζονται με την αξιοπιστία των εξερχομένων αποτελεσμάτων και τους χρόνους επίλυσης του προβλήματος.

## 1.2 Δημοφιλή Προγράμματα Προσομοίωσης

Τα προγράμματα προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάλυση, τον σχεδιασμό και την λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί πως, πέρα από την κατηγοριοποίηση των προγραμμάτων προσομοίωσης όπως έγινε στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχει άτυπα κι ένας διαχωρισμός τους σε προγράμματα εμπορικής και προγράμματα ακαδημαϊκής χρήσης. Η βασική διαφορά είναι πως στα προγράμματα εμπορικής χρήσης, σπάνια ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει στον κώδικα. Επιπλέον, στην περίπτωση των εμπορικών προγραμμάτων, σε ορισμένες περιπτώσεις η “all-in-one” φιλοσοφία τους δε διευκολύνει την κατανόηση για επιμέρους βασικά στοιχεία του δικτύου.

Παρακάτω αναφέρονται, με μια σύντομη για το καθένα περιγραφή, μερικά δημοφιλή προγράμματα προσομοίωσης.

**Simpow:** Είναι ένα λογισμικό για την προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Επικεντρώνεται κυρίως στην δυναμική προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου και την ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας. Διαθέτει μια ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού με την οποία ο χρήστης μπορεί να κατασκευάσει τα δικά του μοντέλα και μεθόδους. Χρησιμοποιείται από το 1977, σε πολλά σχέδια και μελέτες αλληλεπίδρασης συστημάτων συνεχούς τάσης και σταθμών αιολικής ενέργειας. Το πρόγραμμα παραμένει ενεργό μέχρι και σήμερα και αξιοποιείται κυρίως από τις βιομηχανίες χάλυβα, τις χαρτοβιομηχανίες και τις βιομηχανίες παραγωγής πετρελαίου. [ 2 ]

**InterPSS:** Πρόκειται για ένα σύστημα προσομοίωσης της ηλεκτρικής ενέργειας του οποίου το βασικό χαρακτηριστικό είναι πως οι χρήστες του προγράμματος μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους εφόσον κυκλωματικά μοντέλα που έχει σχεδιάσει κάποιος χρήστης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάποιον άλλο. Στόχος του είναι να αποτελέσει ένα θεμέλιο για την δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων εκτελώντας προσομοιώσεις συστημάτων ενέργειας παράλληλα, κάνοντας χρήση φθηνών υπολογιστών, σε ένα τοπικό δίκτυο, και να ενημερώνει μέσω του community τους χρήστες του για τυχόν ενημερώσεις. [ 3 ]

**Neplan:** Είναι ένα εργαλείο, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση, το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και διαχείριση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Πλεονέκτημα του προγράμματος αποτελεί η χρήση της τεχνολογίας cloud computing, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται ο χρήστης να διαθέτει ένα ακριβό σύστημα με μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Εκτελεί διεργασίες που σχετίζονται με τη ροή φορτίου σε ένα δίκτυο, τη χωρητική αντιστάθμιση σε συστήματα μεταφοράς καθώς και τον υπολογισμό του κόστους της υπό μελέτη εγκατάστασης. [ 4 ]

**SimPowerSystems:** Είναι μια επέκταση του Simulink (περιβάλλον προσομοίωσης) που διαθέτει εργαλεία για την μοντελοποίηση και προσομοίωση της παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος. Οι εκδόσεις που παρέχονται είναι δύο, μία έκδοση για χρήστες και μία για προγραμματιστές, με βασική διαφορά ότι στη δεύτερη έκδοση υπάρχει δυνατότητα για παρεμβάσεις στον κώδικα, που είναι γραμμένος στη γλώσσα C. [ 5 ]

**AEPS SystemPlanning:** Είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης ηλεκτρικών συστημάτων ενέργειας, με έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική. Επιτρέπει την γραφική μοντελοποίηση, ενώ προσαρμόζεται ώστε να αντανάκλα το σύνολο των ηλεκτρικών συσκευών του κτιρίου στο οποίο είναι εγκατεστημένο το μικροδίκτυο. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου προγράμματος είναι ότι μπορεί να δημιουργήσει το λεπτομερές καταναλωτικό προφίλ του χρήστη. [ 6 ]

**PSAF:** Αποτελεί μια σειρά από προγράμματα λογισμικού που εκτελούν προσομοιώσεις και αναλύσεις σχετικά με τη μεταφορά ενέργειας καθώς και διαφόρων βιομηχανικών συστημάτων, με σκοπό τη διευκόλυνση του ηλεκτρολόγου μηχανικού της βιομηχανίας. Μπορεί να εφαρμοστεί είτε πρόκειται για την ισχύ ενός τυπικού καταναλωτή, είτε την τριφασική παροχή της βιομηχανίας. Διαθέτει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη σχετικά τον εξοπλισμό ενώ προσομοιώνει το δίκτυο και σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας αλλά και για λειτουργία παρουσία σφάλματος. [ 7 ]

**Microtran:** Είναι μια εταιρία που ιδρύθηκε το 1987 με σκοπό την ανάπτυξη και την εμπορία ηλεκτρομαγνητικών προγραμμάτων ανάλυσης. Είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από παροδικές συνθήκες και ουσιαστικά αποτελεί μια διαφοροποίηση του προγράμματος EMTP με το οποίο θα ασχοληθούμε εκτενώς στη συνέχεια από το University of British Columbia. [ 8 ]

**Agora:** Πρόκειται για ένα εργαλείο σχεδιασμού, αποκατάστασης και παρακολούθησης του δικτύου. Λειτουργεί ενισχύοντας το υπάρχον σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων διαχείρισης ενέργειας που μπορεί να είναι ήδη διαθέσιμο ( SCADA ). Όπως είναι αναμενόμενο από ένα πρόγραμμα που σχετίζεται με την εποπτεία του δικτύου, χρησιμοποιεί δεδομένα πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, συνδράμει στην βελτίωση των υφιστάμενων επενδύσεων μέσω του ακριβούς σχεδιασμού των νέων εγκαταστάσεων και της ανάλυσης κινδύνου για το νέο σύστημα που θα προκύψει. [ 9 ]

**V&R EnergySystem:** Αποτελεί ένα σύνολο συστημάτων για την βελτίωση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος. Προσφέρει ένα ευρύ φάσμα προηγμένων υπηρεσιών παροχής συμβουλών, εξελιγμένες επιστημονικές έρευνες και περιεκτικές προγραμματιστικές εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για περιεκτικές αναλύσεις, όσον αφορά το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο χρησιμοποιώντας δεδομένα παρελθοντικών μετρήσεων, όσο και σε πραγματικό χρόνο. [ 10 ]

**Fendi:** Είναι μια γραφική διεπαφή χρήστη για προγράμματα προσομοίωσης ενός συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Είναι ένα ανοιχτό πηγαίο πρόγραμμα με ανοιχτή αρχιτεκτονική που βασίζεται σε plugins. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλών ειδών μηχανές προσομοίωσης για AC υπολογισμούς βραχυκυκλώματος, μέτρηση αντίστασης, σταθερότητα ροής φορτίου και παροδικές προσομοιώσεις. [ 11 ]



**PSAT:** Το όνομα του προγράμματος προέρχεται από τα αρχικά Power System Analysis Toolbox. Η ομάδα που ανέπτυξε το PSAT έχει κατασκευάσει και τα UWPFLOW και SRLS, τα οποία όμως είναι χαμηλότερου επιπέδου από το διάδοχό τους. Πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα, έχει σκοπό την κατανόηση του δικτύου και είναι κατασκευασμένο με αμιγώς ακαδημαϊκά κριτήρια. Η βάση των υπολογισμών του προγράμματος γίνεται στο Matlab, όπως σε μια σειρά από προγράμματα προσομοίωσης του ηλεκτρικού δικτύου. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα εκτελεί πλήθος διεργασιών προσομοίωσης όπως προσομοίωση της ροής φορτίου ή προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Παρόλα αυτά, δεν προσομοιώνει μεταβατικά φαινόμενα. [ 12 ]

*Πίνακας 1: Προγράμματα Προσομοίωσης Ηλεκτρικών Δικτύων που βασίζονται στο Matlab. [12]*

Package	PF	CPF	OPF	SSA	TD	EMT	GUI	GNE
EST	✓			✓	✓			✓
MatEMTP					✓	✓	✓	✓
MatPower	✓		✓					
PAT	✓			✓	✓			✓
PSAT	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
PST	✓	✓		✓	✓			
SPS	✓			✓	✓	✓	✓	✓
VST	✓	✓		✓	✓		✓	

**PowerFactory:** Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που έχει κατασκευαστεί από τη DigSILENT και προσομοιώνει προβλήματα ροής φορτίου στο δίκτυο ενώ χρησιμοποιείται και για τεchnοοικονομικές μελέτες που αφορούν την επέκταση του δικτύου. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα της τοπολογικής απεικόνισης μέσω της δημιουργίας γεωγραφικών διαγραμμάτων, εκμεταλλευόμενο ήδη υπάρχοντες χάρτες. [ 13 ]

**Gridlab-D:** Το Gridlab-D αναπτύχθηκε στο Pacific Northwest National Laboratory του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. σε συνεργασία με τη βιομηχανία και πανεπιστήμια από όλο τον κόσμο. Είναι ένας ευέλικτος προσομοιωτής που μοντελοποιεί τη συμπεριφορά των στοιχείων ενός δικτύου με την πάροδο του χρόνου, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες στο διαχειριστή του συστήματος και τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Ο πυρήνας του προγράμματος συντονίζει την επικοινωνία όλων των ενοτήτων με τέτοιο τρόπο που μπορεί να προσομοιώσει εκατομμύρια ανεξάρτητων συσκευών. Ο λόγος που δε χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική είναι ότι δεν είναι ξεκάθαρος ο κυκλωματικός χαρακτήρας του δικτύου, αλλά εμπλέκει τα μεγέθη του δικτύου σε μεγάλο βαθμό με την οικονομική διάσταση του προβλήματος. [ 14 ]

**PowerWorld Simulator:** Το PowerWorld Simulator είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης συστημάτων ισχύος με δυνατότητα επίλυσης ροών ισχύος και προβλημάτων οικονομικής κατανομής. Με την κατάλληλη χρήση γραφικών μέσων, πέρα από χρήσιμο εργαλείο για τους μηχανικούς που το χρησιμοποιούν, είναι δημοφιλές και για ακαδημαϊκούς σκοπούς, για την κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς από τους φοιτητές πολυτεχνικών σχολών. Η ικανότητα επίλυσης του συγκεκριμένου προγράμματος ανταποκρίνεται για συστήματα μέχρι και 100.000 ζυγών. [ 15 ]

**EMTP ATP-Draw:** Το ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα ψηφιακής προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπτύχθηκε με σκοπό την προσομοίωση ταχέως μεταβατικών φαινομένων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, και παρά το γεγονός ότι δεν είναι τόσο σύγχρονο όσο άλλα προαναφερθέντα προγράμματα, στην προσομοίωση σφαλμάτων αποτελεί μέτρο σύγκρισης. Παρόλα αυτά, το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και

για την ανάλυση κυκλωμάτων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και περιλαμβάνει μεθόδους επίλυσης του ηλεκτρικού δικτύου στο πεδίο του χρόνου (time domain) και στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain), χωρίς όμως να προτιμάται για προβλήματα ροής φορτίου. [ 16 ]

Το ATP Draw είναι ένας γραφικός προ-επεξεργαστής που δημιουργεί αρχεία \*.atp. Με το ATP Draw ο χρήστης κατασκευάζει με τη χρήση γραφικών το προς προσομοίωση ηλεκτρικό δίκτυο, επιλέγοντας στοιχεία από μια εκτεταμένη παλέτα. Μέσα από το πρόγραμμα αναπαρίσταται με τη μορφή δομικών στοιχείων το κυκλωματικό σχέδιο του κυκλώματος ή ηλεκτρικού δικτύου, ορίζονται οι απαραίτητες παράμετροι με σχετικά εύκολο και απλό τρόπο προκειμένου να προχωρήσει ο μελετητής στην ανάλυση με το ATP – EMTP. Η έξοδος του προγράμματος είναι τα εισαγόμενα στο ATP – EMTP αρχείο, \*.atp [ 17 ]. Η συγκεκριμένη λογική ως προς τη δημιουργία δεδομένων εισόδου στον αλγόριθμο χρησιμοποιείται στα περισσότερα, αν όχι σε όλα τα προγράμματα προσομοίωσης ηλεκτρικών δικτύων, με βασική διαφορά ότι στα πιο σύγχρονα εμπορικά πακέτα που κάνουν χρήση γραφικών, δεν είναι τόσο προφανής η διαφορά ανάμεσα στο σχεδιαστικό μέρος του προγράμματος και τον compiler.

Τέλος, αξίζει να αναφερθούν τα *DOE-2, EnergyPlus, Energy-10, ENER-WIN και HOT2000 Software*, τα οποία προσομοιώνουν τις ωριαίες καταναλώσεις ενέργειας και το ενεργειακό κόστος των κτιρίων. Σχετίζονται όμως με την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού και κατάλληλου σχεδιασμού του υφιστάμενου κτιρίου, οπότε δεν αποτελούν αντικείμενο έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 1.2.1 Το Πρόγραμμα Προσομοίωσης στην παρούσα Εργασία

Το υπολογιστικό πακέτο PSS/E (Power System Simulator for Engineering) παρέχει πλήθος ενεργειών που απαιτούνται για τη μελέτη και ανάλυση φαινομένων που παρατηρούνται στα συνεχώς αναπτυσσόμενα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αποτελεί ένα πλήρες εργαλείο προσομοίωσης το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο και την επιλογή απαραίτητων ενεργειών για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Η επιλογή του υπολογιστικού πακέτου SIEMENS PTI PSS/E™ (Power System Simulator for Engineering) βασίστηκε κυρίως στη δυνατότητα της επιλογής του αλγορίθμου με τον οποίο επιθυμούμε επιλυθεί το πρόβλημα ροής φορτίου στο υπό ανάλυση σύστημα, ώστε να καταλήξουμε σε ασφαλή συγκριτικά συμπεράσματα για τους υπό εξέταση αλγορίθμους. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο έπαιξε η διεθνής εμπειρία σχετικά με τη χρήση του προγράμματος. Είναι χαρακτηριστικό ότι η πλειονότητα των Διαχειριστών του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας των Ευρωπαϊκών χωρών χρησιμοποιούν στις μελέτες τους, μεταξύ άλλων, το PSS/E, ενώ στην ελληνική αγορά το ΚΑΠΕ και ο ΑΔΜΗΕ το χρησιμοποιούν ως βασικό εργαλείο προσομοίωσης. Τα κυριότερα υποσυστήματα που περιλαμβάνει είναι:

- **Ανάλυση Ροής Φορτίου.** Είναι το βασικό σύστημα ανάλυσης του PSS/E. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση ροής φορτίου εφαρμόζοντας τεχνικές επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων. Παράλληλα χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων του συστήματος καθώς επίσης και για την εισαγωγή νέων.
- **Βέλτιστη Ροή Φορτίου.** Το σύστημα αυτό επεκτείνει τη λογική της παραδοσιακής ροής φορτίου προς την κατεύθυνση βελτίωσης του προφίλ του συστήματος μεταφοράς. Αναζητεί την βέλτιστη κατεύθυνση προς την οποία το σύστημα βελτιώνει την απόδοσή του (π.χ. μείωση απωλειών γραμμών, ικανοποιητικότερα επίπεδα τάσεων, βέλτιστη παραγωγή μονάδων). Σκοπός της λειτουργίας αυτής είναι η αναζήτηση της λύσης εκείνης που θα ικανοποιεί τους περιορισμούς του συστήματος και ταυτόχρονα θα αυξάνει την αποδοτικότητά του ή θα μειώνει το κόστος λειτουργίας του.
- **Ανάλυση Σφαλμάτων** (Συμμετρικές-Ασύμμετρες καταστάσεις). Ουσιαστικά αποτελεί μια επέκταση της ροής φορτίου και χρησιμοποιείται για την μελέτη της δυναμικής απόκρισης

του συστήματος κατά την εκδήλωση σφαλμάτων, όπως βραχυκυκλώματα σε γραμμές (μονοφασικά, διφασικά, τριφασικά), άνοιγμα γραμμών και γενικά περίπλοκα ταυτόχρονα γεγονότα σε πολλαπλούς ζυγούς ή σημεία του συστήματος μεταφοράς.

- **Δυναμική προσομοίωση.** Το PSS/E διαθέτει μια ευρεία γκάμα μοντέλων διάφορων στοιχείων του συστήματος (γεννήτριες, φορτία, συστήματα διέγερσης, σταθεροποιητές) που απαιτούνται για την μελέτη της δυναμικής του απόκρισης. Κάθε διαταραχή μπορεί να προσομοιωθεί (απώλεια μονάδων, σφάλματα, εκκίνηση κινητήρων, απώλεια συγχρονισμού), ενώ όλα τα μεγέθη που εμπλέκονται στα φαινόμενα μπορούν να παρακολουθούνται και να αναπαρίστανται σε διαγράμματα για περαιτέρω μελέτη και συγκρίσεις. [ 18 ]

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση της έκδοσης 30.3 του PSSE. Η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα γίνεται μέσω δύο αρχείων. Στο ένα αρχείο, που είναι αρχείου τύπου \*.sld, απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, ενώ στο άλλο, που είναι αρχείου τύπου \*.raw, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του συστήματος, τα οποία αποτελούν δεδομένα εισόδου στους αλγόριθμους επίλυσης του συστήματος. Τα μονογραμμικά διαγράμματα μπορούν να σχεδιαστούν απευθείας σε ειδικό σχεδιαστικό περιβάλλον, ενώ μπορούν να αντιγραφούν και να εξαχθούν σε εξωτερικές εφαρμογές.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

# Μοντελοποίηση των Στοιχείων στα ΣΗΕ

## 2.1 Κατηγοριοποίηση Γραμμών Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν σε υψηλή ή υπερυψηλή τάση, με αποτέλεσμα γύρω από αυτές να δημιουργούνται έντονα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, τα οποία είναι επικίνδυνα για τους ζωντανούς οργανισμούς αλλά και το περιβάλλον με το οποίο αλληλοεπιδρούν (π.χ. τηλεπικοινωνίες). Προς αποφυγή λοιπόν δυσάρεστων επιπλοκών, οι γραμμές τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειώνεται η όποια αλληλεπίδρασή τους με πρόσωπα και γύρω εγκαταστάσεις στο ελάχιστο, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. διατήρηση παραδοσιακής αρχιτεκτονικής) ρόλο παίζουν και οι αισθητικοί παράγοντες.

Ως εκ τούτου, προκύπτουν 3 είδη γραμμών:

- Οι **εναέριας** γραμμές μεταφοράς
- Οι **υπόγειες και υποβρύχιες** γραμμές μεταφοράς
- Οι γραμμές με πρόβλεψη κατάλληλου **περιβλήματος** των αγωγών.

Οι υποβρύχιες και οι υπόγειες γραμμές εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά, για αυτό και μπαίνουν στην ίδια κατηγορία. Η υπόγεια ή εναέρια διασύνδεση γίνεται μέσω καλωδίων με ειδικό περίβλημα για την προστασία των αγωγών που εσωκλείουν, ενώ στις εναέριας γραμμές η διασύνδεση γίνεται μέσω αγωγών. Η μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά είδη, όσον αφορά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, είναι ότι τα καλώδια εμφανίζουν μεγάλη χωρητική αντίδραση, ενώ οι εναέριας γραμμές παρουσιάζουν επαγωγικά φορτία.

Οι γραμμές με πρόβλεψη κατάλληλου περιβλήματος τοποθετούνται μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις, όπου τα καλώδια οδεύουν μέσω σηράγγων και οχετών. Συνήθως, τέτοιες γραμμές υπάρχουν εκεί που γίνεται μετατροπή μιας εναέριας γραμμής σε υπόγεια ή το αντίστροφο.

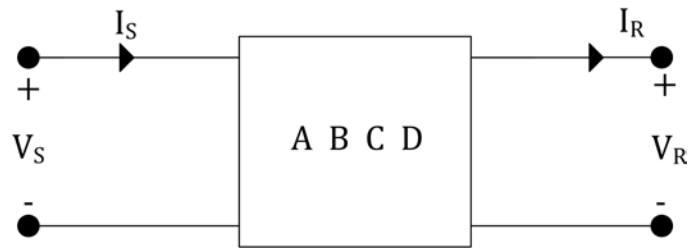
Επιπλέον, οι ΓΜ χωρίζονται σε 3 ακόμη κατηγορίες, ανάλογα με το μήκος τους. Αυτές είναι οι:

- Γραμμές **μικρού** μήκους, όπου το μήκος τους δεν ξεπερνά τα 80 km.
- Γραμμές **μεσαίου** μήκους, οι οποίες κυμαίνονται από 80 έως και 240 km.
- Γραμμές **μεγάλου** μήκους, οι οποίες εκτείνονται σε μήκος μεγαλύτερο των 240 km.

## 2.2 Μοντελοποίηση Γραμμών Μεταφοράς

Για τη μοντελοποίηση των εναερίων και υπογείων γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα κυκλωματικά μοντέλα, για την ανάλυση των οποίων εισάγονται οι παράμετροι **A**, **B**, **C** και **D**. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται άμεσα από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς (**R**, **L**, **C** και **G**).

Οι γραμμές μεταφοράς απεικονίζονται ως δίθυρα κυκλώματα (σχήμα 1) με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της τάσης και του ρεύματος, τόσο από τη μεριά της παραγωγής, όσο και της κατανάλωσης.



Σχήμα 1: Αναπαράσταση της ΓΜ ως δίθυρο.

Για την ανάλυση των στοιχείων της γραμμής χρησιμοποιούνται **οι νόμοι του Kirchhoff** για την τάση και την ένταση (NTK, NPK). Έτσι, γενικά ισχύει:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad \text{volts} \quad (2.1)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad A \quad (2.2)$$

ή με τη μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

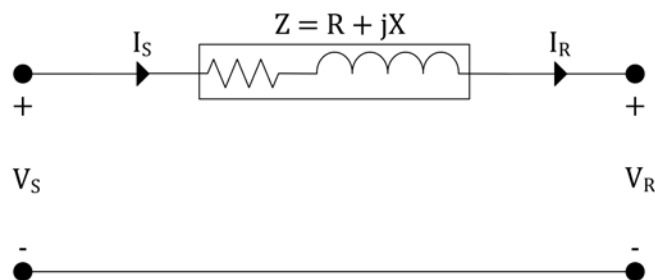
Οι παράμετροι  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , και  $D$  αποτελούν μιγαδικούς αριθμούς. Πιο συγκεκριμένα οι  $A$  και  $D$  εκφράζουν αδιάστατα μεγέθη, η  $B$  εκφράζεται σε ohms (αντίσταση), ενώ η  $C$  μετριέται σε mho (αγωγιμότητα). Επιπλέον, σύμφωνα με τη θεωρία δικτύων [ 19 ], στα γραμμικά, παθητικά δίθυρα, ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$AD - BC = 1 \quad (2.4)$$

## 2.2.1 Μοντελοποίηση με χρήση Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

### 2.2.1.1 Γραμμές Μεταφοράς Μικρού Μήκους

Σε αυτό το είδος γραμμών η χωρητική αντίδραση, λόγω του μικρού μήκους τους, θεωρείται αμελητέα. Ως εκ τούτου, στο ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο (σχήμα 2) λαμβάνεται υπόψιν μόνο η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Το παρακάτω κυκλωματικό ισοδύναμο ισχύει στην περίπτωση μονοφασικών γραμμών μεταφοράς και σε τριφασικές γραμμές με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, ο ρόλος της οποίας αναλύεται σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 2: Ισοδύναμο κύκλωμα ΓΜ μικρού μήκους.

Από τους NTK και NPK προκύπτει ότι:

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (2.5)$$

$$I_S = I_R \quad (2.6)$$

Γράφοντας τις παραπάνω σχέσεις με τη μορφή πινάκων, έχουμε:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Εύκολα προκύπτει ότι:

$$A = D = 1$$

$$B = Z \quad (2.8)$$

$$C = 0$$

Για την πολύ ειδική περίπτωση που  $l \ll 80$ , όπου  $l$  το μήκος της γραμμής μεταφοράς, τότε δε λαμβάνεται υπόψη η ωμική αντίσταση, οπότε για τη σύνθετη αντίσταση ισχύει  $Z = jX$ .

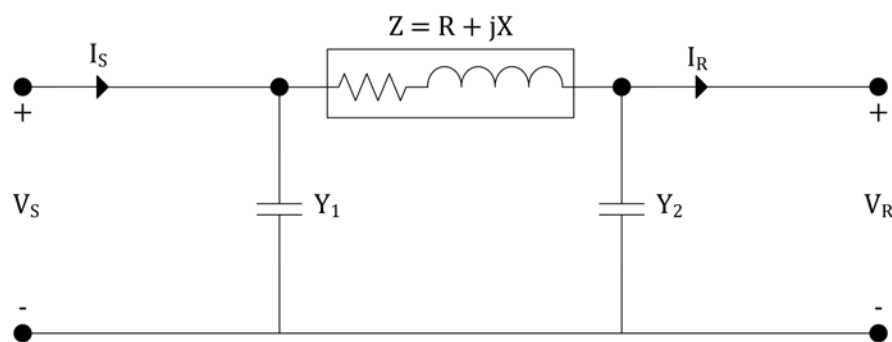
### 2.2.1.2 Γραμμές Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους

Στις γραμμές μεσαίου μήκους, λόγω του αυξημένου μήκους της γραμμής, λαμβάνεται υπόψη η χωρητική αντίδραση. Τα μοντέλα που συνήθως χρησιμοποιούνται σε αυτά τα μήκη γραμμών είναι:

- το *π-ισοδύναμο*
- το *τ-ισοδύναμο*.

#### Π – Ισοδύναμο

Στο π-ισοδύναμο (σχήμα 3) θεωρείται ότι η χωρητική αντίδραση ισοκατανέμεται στα δύο άκρα της γραμμής.



Σχήμα 3: Π-ισοδύναμο κύκλωμα για ΓΜ μεσαίου μήκους.

Για το παραπάνω κύκλωμα, δεδομένου ότι  $Y_1 = Y_2 = \frac{Y}{2}$ , οι NTK και NPK έχουν ως εξής:

$$V_S = V_R + Z \left( I_R + \frac{V_R Y}{2} \right) = \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + ZI_R \quad (2.9)$$

$$I_S = I_R + \frac{V_R Y}{2} + \frac{V_S Y}{2} \quad (2.10)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.10) στη (2.11) προκύπτει ότι:

$$I_S = I_R + \frac{V_R Y}{2} + \left[ \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \right] \frac{Y}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_S = Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (2.11)$$

Με τη μορφή πινάκων, οι παραπάνω σχέσεις, γράφονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Συγκρίνοντας τους πίνακες (2.13) και (2.3), συμπεραίνουμε ότι:

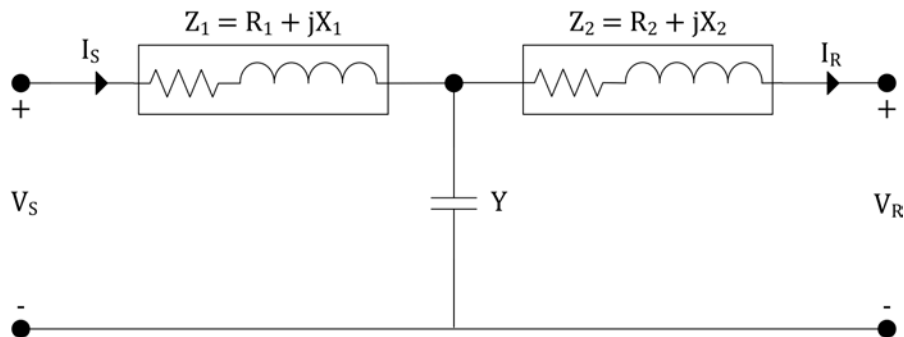
$$A = D = 1 + \frac{YZ}{2}$$

$$B = Z$$

$$C = Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) \quad (2.13)$$

### Τ – Ισοδύναμο

Στο τ-ισοδύναμο (σχήμα 4) η αντίδραση της γραμμής ισοκατανέμεται στα δύο άκρα της, ενώ η χωρητική αντίδραση είναι συγκεντρωμένη στο μέσον της γραμμής.



Σχήμα 4: Τ-ισοδύναμο κύκλωμα για ΓΜ μεσαίου μήκους.

Για το παραπάνω κύκλωμα, δεδομένου ότι  $Z_1 = Z_2 = \frac{Z}{2}$ , οι ΝΤΚ και ΝΡΚ έχουν ως εξής:

$$V_S = \frac{Z}{2} I_S + \frac{Z}{2} I_R + V_R \quad (2.14)$$

$$I_S = I_R + Y \left( V_R + \frac{Z}{2} I_R \right) = Y V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (2.15)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.15) στη (2.14) προκύπτει ότι:

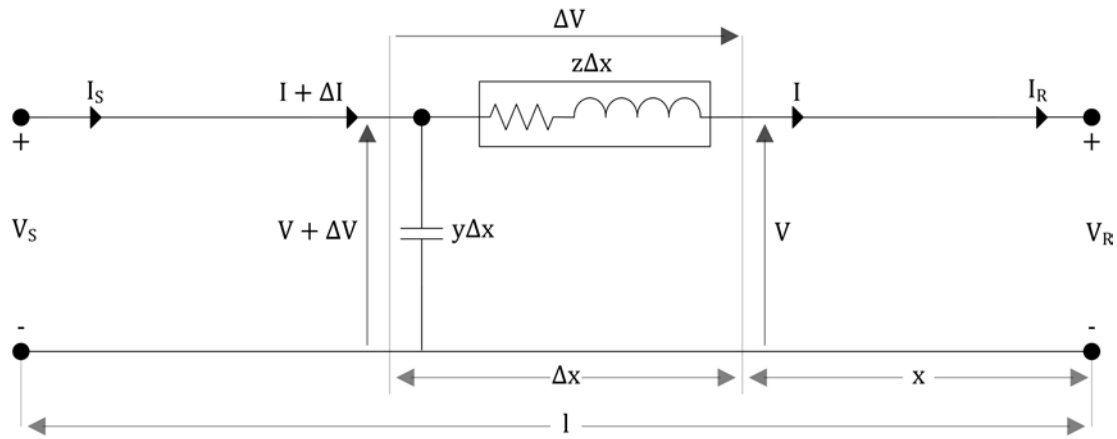
$$V_S = \frac{Z}{2} \left[ Y V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \right] + \frac{Z}{2} I_R + V_R \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) ZI_R \quad (2.16)$$

Με τη μορφή πινάκων, οι παραπάνω σχέσεις, γράφονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) \\ Y & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.2.2 Οι Διαφορικές Εξισώσεις στις Γραμμές Μεταφοράς



Σχήμα 5: Αναπαράσταση ΓΜ μήκους  $\Delta x$ .

Οι γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους (σχήμα 5) δεν αναπαρίστανται με τη χρήση συγκεντρωμένων παραμέτρων. Για την ανάλυσή τους, λαμβάνεται υπόψιν ότι κάθε στοιχειώδες τμήμα της γραμμής παρουσιάζει αντίσταση, επαγωγική και χωρητική αντίδραση. Με δεδομένο μήκος γραμμής  $l$ , και κάνοντας την παραδοχή ότι η αντίδραση ανά μονάδα μήκους της γραμμής είναι  $z$  ( $\Omega/\text{km}$ ) και η εγκάρσια αγωγιμότητα  $y$  ( $\text{mho}/\text{km}$ ), έχουμε ότι:

$$Z = z \times l \quad \text{και} \quad Y = y \times l \quad (2.18)$$

Για ένα τυχαίο τμήμα της γραμμής με στοιχειώδες μήκος  $\Delta x$ , που απέχει απόσταση  $x$  από το τέλος της γραμμής, παρουσιάζει αντίδραση  $z\Delta x$  σε σειρά και εγκάρσια αγωγιμότητα  $y\Delta x$ , ισχύει ότι:

$$\Delta V = Iz \Delta x \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta x} = Iz \quad (2.19)$$

Για  $\Delta x \rightarrow 0$ , η (2.19) γίνεται:

$$\frac{dV}{dx} = Iz \quad (2.20)$$

Για το ρεύμα  $\Delta I$  λοιπόν, προκύπτει:

$$\Delta I = (V + \Delta V)y\Delta x = Vy\Delta x + \Delta Vy\Delta x \quad (2.21)$$

Εφόσον τα  $\Delta V$  και  $\Delta x$  αφορούν πολύ μικρές ποσότητες, το γινόμενο  $\Delta Vy\Delta x$  στη (2.21) παραλείπεται. Για  $\Delta x \rightarrow 0$ , από τη (2.21) προκύπτει:



$$\frac{dI}{dx} = Vy \quad (2.22)$$

Παραγωγίζοντας τη (2.20) ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{dV}{dx} \right) = z \left( \frac{dI}{dx} \right) \quad (2.23)$$

Από τις σχέσεις (2.22) και (2.23) έχουμε:

$$\frac{d^2V}{dx^2} - yzV = 0 \quad (2.24)$$

Η (2.24) είναι μια διαφορική εξίσωση, η γενική λύση της οποίας είναι της μορφής:

$$V = A_1 e^{x\sqrt{yz}} + A_2 e^{-x\sqrt{yz}} \quad (2.25)$$

Παραγωγίζοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς  $x$ , καταλήγουμε στην:

$$\frac{dV}{dx} = A_1 \sqrt{yz} e^{x\sqrt{yz}} + A_2 \sqrt{yz} e^{-x\sqrt{yz}} \quad (2.26)$$

Από τις σχέσεις (2.20) και (2.26), προκύπτει:

$$I = \frac{1}{z} \left( \frac{dV}{dx} \right) = \frac{A_1}{\sqrt{\frac{z}{y}}} e^{x\sqrt{yz}} - \frac{A_2}{\sqrt{\frac{z}{y}}} e^{x\sqrt{yz}} \quad (2.27)$$

Ορίζουμε ως:

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \Omega \quad , \text{τη χαρακτηριστική αντίδραση της γραμμής} \quad (2.28)$$

και

$$\gamma = \sqrt{yz} \quad , \text{τη σταθερά μετάδοσης} \quad (2.29)$$

Ως εκ τούτου, οι σχέσεις (2.25) και (2.27) μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$V = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (2.30)$$

και

$$I = \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \quad (2.31)$$

Από τις αμέσως παραπάνω σχέσεις, για  $x = 0$ ,  $V = V_R$  και  $I = I_R$ , έχουμε:

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (2.32)$$

και

$$I_R = \frac{A_1}{Z_c} - \frac{A_2}{Z_c} \quad (2.33)$$

Λύνοντας το παραπάνω σύστημα, βρίσκονται οι τιμές των  $A_1$  και  $A_2$ :

$$A_1 = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} \quad \text{και} \quad A_2 = \frac{V_R - Z_C I_R}{2} \quad (2.34)$$

Αντικαθιστώντας όπου  $l = x$ ,  $V = V_S$ , και  $I = I_S$  στα  $A_1$  και  $A_2$  και εισάγοντας τις τιμές αυτές στις (2.30) και (2.31), προκύπτει:

$$V_S = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\gamma l} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\gamma l} \quad (2.35)$$

$$I_S = \frac{\frac{V_R}{Z_C} + I_R}{2} e^{\gamma l} - \frac{\frac{V_R}{Z_C} - I_R}{2} e^{-\gamma l} \quad (2.36)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι:

$$\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} = \sinh(\gamma l)$$

και (2.37)

$$\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} = \cosh(\gamma l)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω, στις (2.35) και (2.36):

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + Z_C I_R \sinh(\gamma l) \quad (2.38)$$

$$I_S = V_R \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} + I_R \cosh(\gamma l) \quad (2.39)$$

Γράφοντας τις παραπάνω με τη μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_C \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Άρα, για δεδομένο μήκος  $l$ , από τη σύγκριση των (2.3) και (2.40), προκύπτει ότι:

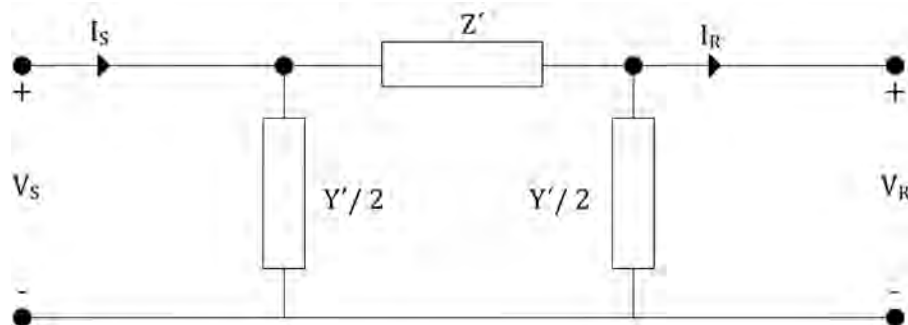
$$\begin{aligned} A &= D = \cosh \gamma l \\ B &= Z_C \sinh \gamma l \\ C &= \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} \end{aligned} \quad (2.41)$$

### 2.2.3 Το Π-ισοδύναμο στις Γραμμές Μεγάλου Μήκους

Πολλά υπολογιστικά προγράμματα σχεδίασης και ανάλυσης του ηλεκτρικού δικτύου θεωρούν κυκλωματικά μοντέλα για την αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη δημιουργίας ενός ισοδύναμου κυκλωματικού μοντέλου για την ανάλυση των γραμμών μεταφοράς.

Το κύκλωμα του σχήματος 6 αποτελεί το π-ισοδύναμο για τις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους. Ουσιαστικά, είναι ένα κύκλωμα πανομοιότυπο με το αντίστοιχο για τις γραμμές μεσαίου

μήκους, με μόνη διαφορά ότι αντί για τις παραμέτρους  $Z$  και  $Y$  εδώ έχουμε τις  $Z'$  και  $Y'$ . Στόχος είναι ο συσχετισμός των παραμέτρων  $A, B, C, D$  της κατανεμημένης γραμμής με τις παραμέτρους  $Z'$  και  $Y'$  του π-ισοδύναμου. Σε αντιστοιχία με τις εξισώσεις (2.13) του π-ισοδύναμου για τις γραμμές μεσαίου μήκους προκύπτει ότι:



Σχήμα 6: Π-ισοδύναμο για ΓΜ μεγάλου μήκους.

$$A = D = 1 + \frac{Y'Z'}{2} \quad \text{per unit}$$

$$B = Z' \quad \Omega \quad (2.42)$$

$$C = Y' \left( 1 + \frac{Y'Z'}{4} \right) \quad S$$

$$Z' = Z_C \sinh(\gamma l) = Z F_1 = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (2.43)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{Z_C} = \frac{Y}{2} F_2 = \frac{Y}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} \quad (2.44)$$

Από τις (2.41) και (2.42):

$$Z' = Z_C \sinh(\gamma l) = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh(\gamma l) \quad (2.45)$$

Για  $Z = z l$  η παραπάνω εξίσωση έχει ως εξής:

$$Z' = z l \left[ \sqrt{\frac{z}{Y}} \frac{\sinh(\gamma l)}{z l} \right] = z l \left[ \frac{\sinh(\gamma l)}{\sqrt{z Y l}} \right] = Z F_1 \quad \Omega \quad (2.46)$$

όπου,

$$F_1 = \frac{\sinh(\gamma l)}{z l} \quad \text{per unit} \quad (2.47)$$

Ομοίως,

$$1 + \frac{Y'Z'}{2} = \cosh(\gamma l) \Rightarrow \frac{Y'}{2} = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z'} \quad (2.48)$$

Από τη (2.45) και χρησιμοποιώντας την ταυτότητα  $\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\sinh(\gamma l)}$ , προκύπτει:

$$\frac{\gamma'}{2} = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z_C \sinh(\gamma l)} = \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{Z_C} = \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{\sqrt{\frac{Z}{Y}}} \quad (2.49)$$

Για  $Z = z l$  η παραπάνω εξίσωση έχει ως εξής:

$$\frac{\gamma'}{2} = \frac{\gamma l}{2} \left[ \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{\sqrt{\frac{z \gamma l}{Y}}} \right] = \frac{\gamma l}{2} \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{\sqrt{z Y} \frac{l}{2}} = \frac{Y}{2} F_2 \quad S \quad (2.50)$$

όπου,

$$F_2 = \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{\frac{\gamma l}{2}} \quad \text{per unit} \quad (2.51)$$

Από τις εξισώσεις (2.47) και (2.51) προκύπτουν οι συντελεστές διόρθωσης  $F_1$  και  $F_2$ , οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του π-ισοδύναμου στη μοντελοποίηση και ανάλυση των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους.

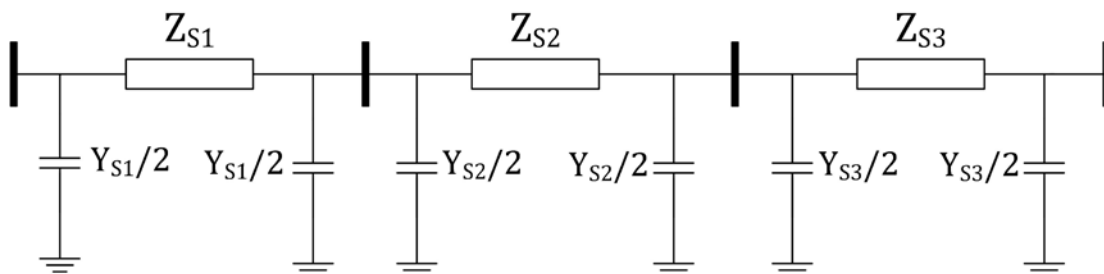
## 2.2.4 Μοντελοποίηση Γραμμών με Αντιμετάθεση Φάσεων

Στις γραμμές υψηλής τάσης, ιδίως στην περίπτωση που πρόκειται για μεγάλο μήκος γραμμής, είναι πολύ συχνό φαινόμενο να προκύπτουν γεωμετρικές ασυμμετρίες στις γραμμές με αποτέλεσμα στο τέλος της γραμμής οι φασικές τάσεις να μην είναι σε ισορροπία μεταξύ τους. Για την εξισορρόπηση των αντιδράσεων ανά φάση μέχρι και το τέλος της γραμμής εφαρμόζεται η μέθοδος της αντιμετάθεσης των φάσεων, η οποία πραγματοποιείται εντός των υποσταθμών από τους οποίους περνά η γραμμή.

Στο σχήμα 7 απεικονίζεται μια πλήρης αντιμετάθεση φάσεων σε τριφασική γραμμή μεταφοράς. Στο σχήμα 8 γίνεται η μοντελοποίηση της γραμμής του σχήματος 7 με τη χρήση π-ισοδυνάμων κυκλωμάτων.



Σχήμα 7: Πλήρης Αντιμετάθεση Φάσεων σε 3φασική Γραμμή Μεταφοράς Υψηλής Τάσης.



Σχήμα 8: Μοντελοποίηση με π-ισοδύναμα κυκλώματα Γραμμής Μεταφοράς με πλήρη Αντιμετάθεση Φάσεων.

Εναλλακτικά, στην περίπτωση που κάθε τομέας είναι εκφρασμένος με συγκεντρωτικές παραμέτρους, τότε μπορεί να προκύψει ένα ισοδύναμο αποτέλεσμα για το σύνολο της γραμμής πολλαπλασιάζοντας τα επιμέρους στοιχεία [ 20 ].

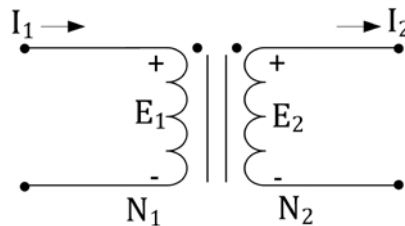
$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ -I_R \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

## 2.3 Μοντελοποίηση Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ισχύος είναι ένα βασικό στοιχείο των ΣΗΕ που συνεισφέρει στην οικονομική λειτουργία του συστήματος μεταφοράς ενέργειας, λειτουργώντας με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Ο ρόλος των μετασχηματιστών είναι να ρυθμίζουν την τάση στα επίπεδα που ευνοούν τη λειτουργία του συστήματος σε επίπεδο παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και κατανάλωσης.

### 2.3.1 Ο Ιδανικός Μετασχηματιστής

Στο σχήμα 9 αναπαρίσταιται ένας ιδανικός μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων. Ο ιδανικός μετασχηματιστής δεν υφίσταται στην πραγματικότητα, αποτελεί όμως μια κατάλληλη εισαγωγή στην κατανόηση των βασικών εννοιών και λειτουργιών των μετασχηματιστών, ώστε να προκύψουν με σχετική ευκολία τα ισοδύναμα μοντέλα των πραγματικών μετασχηματιστών.



Σχήμα 9: Ισοδύναμο Κύκλωμα Ιδανικού Μετασχηματιστή

Τα ιδιαίτερα γνωρίσματα του ιδανικού μετασχηματιστή είναι ότι:

1. τα τυλίγματά του έχουν μηδενική αντίσταση, και άρα δεν υπάρχουν απώλειες ( $P_{\alpha\pi} = I^2 R$ ).
2. η διαπερατότητα  $\mu_c$  του πυρήνα είναι άπειρη.
3. η μαγνητική ροή είναι εξ ολοκλήρου περιορισμένη εντός του πυρήνα.
4. δεν υπάρχει απώλεια ισχύος στον πυρήνα.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά μερικών βασικών εννοιών που αφορούν τον ιδανικό ενισχυτή καθώς και των κυκλωματικών εξισώσεων που περιγράφουν τις βασικές λειτουργίες του.

Σε κάθε μετασχηματιστή ισχύει ότι:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R_c \Phi_c \quad (2.53)$$

Η παραπάνω εξίσωση καλείται συχνά ως «νόμος του Ohm» για ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα, όπου  $N_1 I_1 - N_2 I_2$  η ηλεκτρεγερτική δύναμη του κυκλώματος, όπου η αντίσταση του πυρήνα  $R_c$  ορίζεται ως:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad (2.54)$$

Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή, όπου η μαγνητική ροή  $\mu_c$  τείνει στο άπειρο, για την αντίσταση στον πυρήνα ισχύει  $R_c = 0$ . Άρα η για τη σχέση (2.53) στους ιδανικούς ενισχυτές ισχύει:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \quad (2.55)$$

Επίσης, σύμφωνα με το *νόμο του Faraday*, ισχύει ότι:

$$E_1 = N_1(j\omega)\Phi_c \quad (2.56)$$

$$E_2 = N_2(j\omega)\Phi_c \quad (2.57)$$

Διαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις κατά μέλη, προκύπτει ότι:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.58)$$

ή αλλιώς

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \quad (2.59)$$

Ακόμη, ο βαθμός απόδοσης ενός μετασχηματιστή ισούται με το λόγο των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος προς το δευτερεύον. Δηλαδή:

$$a_t = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.60)$$

Από τις (2.59) και (2.60) προκύπτει ότι:

$$E_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) E_2 = a_t E_2 \quad (2.61)$$

$$I_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) I_2 = \frac{I_2}{a_t} \quad (2.62)$$

Επιπλέον, στον ιδανικό μετασχηματιστή η φαινομένη ισχύς του πρωτεύοντος είναι ίση με εκείνη του δευτερεύοντος:

$$S_1 = E_1 I_1^* = (a_t E_2) \left(\frac{I_2}{a_t}\right)^* = E_2 I_2^* = S_2 \quad (2.63)$$

## 2.3.2 Ισοδύναμα Κυκλώματα Πραγματικών Μετασχηματιστών

### 2.3.2.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο Τυλιγμάτων

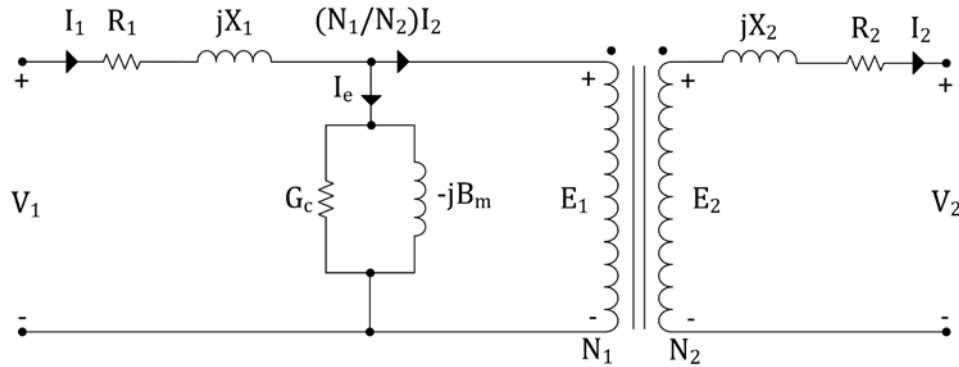
Το σχήμα 10 αναπαριστά το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού πραγματικού μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων. Το εν λόγω κύκλωμα «χτίζεται» με βάση εκείνο του ιδανικού μετασχηματιστή και διαφέρει από αυτόν ως εξής:

1. τα τυλίγματα του Μ/Σ έχουν αντίσταση.
2. η διαπερατότητα  $\mu_c$  του πυρήνα είναι πεπερασμένη.
3. η μαγνητική ροή δεν περιορίζεται εξ ολοκλήρου στον πυρήνα.
4. στον πυρήνα εμφανίζεται ισχύς απωλειών.

Η αντίσταση  $R_I$  είναι η *αντίσταση του πρωτεύοντος*. Μέσω της  $R_I$  υπολογίζονται οι απώλειες  $I^2 R$  του πρωτεύοντος. Η αντίδραση  $X_I$ , που ονομάζεται *αντίδραση διαρροής του πρωτεύοντος*, χρησιμεύει στον υπολογισμό της ροής διαρροής του πρωτεύοντος.

Διαιρώντας με  $N_1$  το «νόμο του Ohm» για τα ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα (2.55) και χρησιμοποιώντας το νόμο του Faraday (2.56), έχουμε:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{R_c}{N_1} \Phi_c = \frac{R_c}{N_1} \frac{E_1}{j\omega N_1} = -j \frac{R_c}{\omega N_1^2} E_1 \quad (2.64)$$



Σχήμα 10: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων.

Ο όρος στο δεξιό σκέλος της ισότητας ορίζεται ως **ρεύμα μαγνήτισης του πυρήνα**, και συμβολίζεται με  $I_m$ . Είναι προφανές ότι το ρεύμα μαγνήτισης έπαιται της τάσης  $E_1$  κατά  $90^\circ$  και αναπαρίσταται με ένα παράλληλο πηνίο με αγωγιμότητα:

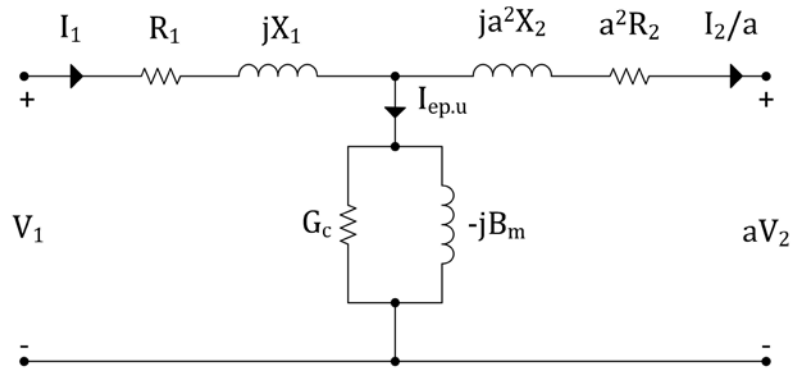
$$B_m = \frac{R_c}{\omega N_1^2} \quad (2.65)$$

Παρόλα αυτά, στην πραγματικότητα υπάρχει ένας ακόμα παράλληλος κλάδος, που αναπαρίσταται με μία ωμική αντίσταση  $G_c$ , η οποία διαρρέεται από το ρεύμα  $I_c$ , που ονομάζεται **ρεύμα διαρροής του πυρήνα**. Το ρεύμα διαρροής του πυρήνα, λόγω του ότι η αντίσταση που διαρρέει είναι καθαρό ωμικό φορτίο, είναι σε φάση με την τάση του πρωτεύοντος  $E_1$ .

Εκφράζοντας την (2.64) συναρτήσει των ρευμάτων μαγνήτισης και διαρροής του πυρήνα, προκύπτει ότι:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_c + I_m = (G_c - jB_m) E_1 \quad (2.66)$$

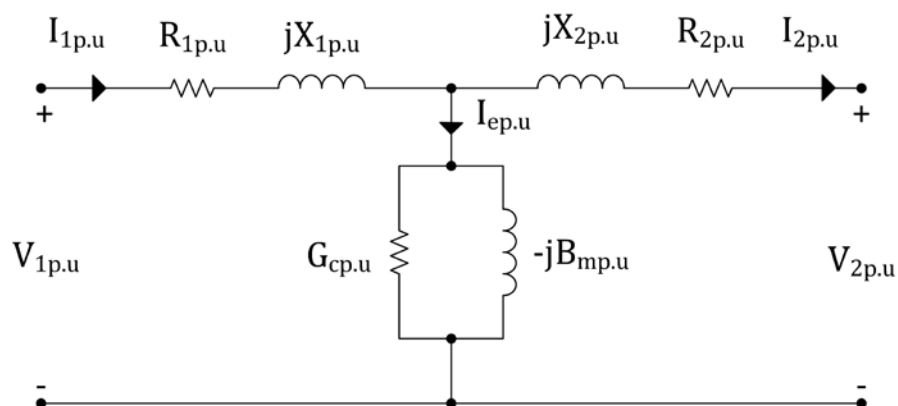
Ένας επιπλέον τρόπος για να παρασταθεί ένας μονοφασικός μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων είναι όπως στο σχήμα 11, όπου έχουμε ανάγκη τις τιμές των στοιχείων του δευτερεύοντος στις τιμές του πρωτεύοντος (ή και αντίστροφα) με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα πιο απλό κύκλωμα.



Σχήμα 11: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων με τα μεγέθη του δευτερεύοντος ανοιγμένα στο πρωτεύον.

### 2.3.2.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο Τυλιγμάτων στο Σύστημα Per Unit

Στην ανάλυση των ηλεκτρικών δικτύων είθισται τα μεγέθη που εκφράζουν τάση, ισχύ ή αντίδραση να εκφράζονται συχνά στο σύστημα per unit. Σε αυτή την περίπτωση, για ένα ζυγό που διαρρέεται από τάση 380 kV σε μια γραμμή μεταφοράς στα 400 kV, η τάση είναι ίση με  $(380/400) = 0.95$  per unit ή 95%. Στο σχήμα 12 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων στο σύστημα per unit.



Σχήμα 12: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων στο σύστημα per unit.

Όπως είναι προφανές από το παραπάνω σχήμα, το ισοδύναμο κύκλωμα στο σύστημα per unit σχηματικά δεν παρουσιάζει κάποια διαφορά σε σχέση με εκείνο του σχήματος 11, παρά μόνο ότι οι τιμές είναι εκφρασμένες έχοντας ως τιμή αναφοράς τις τιμές βάσης του συστήματος που μελετάμε (σύστημα per unit).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που τα μεγέθη εκφράζονται στο per unit σύστημα, ισχύει ότι:

$$E_{1p.u} = E_{2p.u} \quad (2.67)$$

Για την απόδειξη της (2.67) αρκεί να αναφερθεί ότι:

$$E_{1p.u} = \frac{E_1}{V_{base1}} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{E_2}{V_{base1}} \quad (2.68)$$

και



$$\frac{V_{base1}}{V_{base2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.69)$$

Από τις (2.68) και (2.69) εύκολα αποδύκνεται η (2.67) αφού προκύπτει ότι:

$$E_{1p.u} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{E_2}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)V_{base2}} = \frac{E_2}{V_{base2}} = E_{2p.u}$$

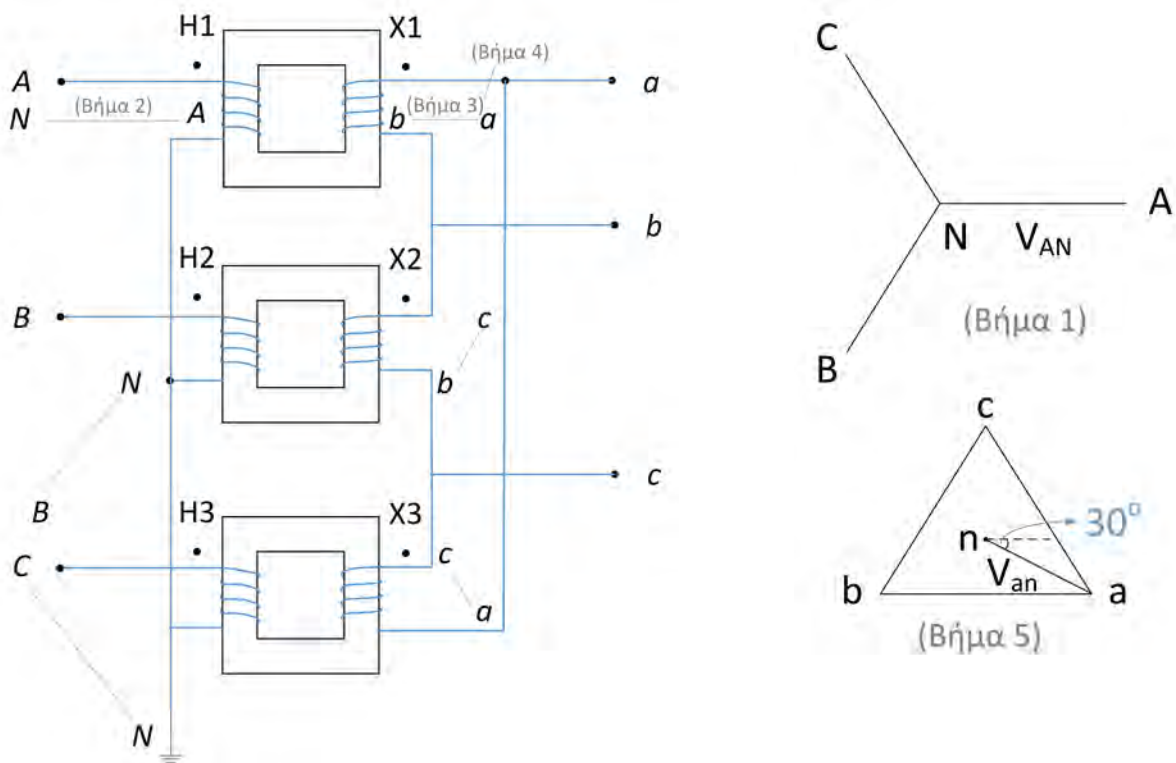
Ομοίως, ισχύει ότι:

$$I_{1p.u} = I_{2p.u} \quad (2.70)$$

Ουσιαστικά, το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 12 προκύπτει εφόσον με την παραπάνω μεθοδολογία μετατρέψουμε τις τιμές όλων των στοιχείων του κυκλώματος στο σύστημα per unit.

### 2.3.2.3 Ισοδύναμο Κυκλώματα Τριφασικών Μετασχηματιστών στο Σύστημα Per Unit

Οι τριφασικοί μετασχηματιστές προκύπτουν από την σύνδεση των τυλιγμάτων της κάθε πλευράς των μονοφασικών μετασχηματιστών. Οι τρόποι διασύνδεσης είναι δύο, η **σύνδεση σε σχηματισμό κατά αστέρα Y** και η **σύνδεση σε σχηματισμό κατά τρίγωνο Δ**. Προκύπτουν λοιπόν μετασχηματιστές με τέσσερα είδη σύνδεσης ανάμεσα στο πρωτεύον και το δευτερεύον (Y-Y, Δ-Δ, Y-Δ και Δ-Y).



Σχήμα 13: Πυρήνας και Πηνία σε Μετασχηματιστή Y-Δ και διάγραμμα φασικών διανυσμάτων.

Στην περίπτωση μετασχηματιστών με ίδια διασύνδεση σε πρωτεύον και δευτερεύον (Y-Y και Δ-Δ) οι φάσεις έχουν ίδια μεταξύ τους γωνία έναυσης και το μόνο που αλλάζει είναι το μέτρο της τάσης, η οποία αναλόγως υποβιβάζεται ή ενισχύεται. Σε ένα κύκλωμα με τάσεις  $V_a$ ,  $V_b$  και  $V_c$  για τη μία πλευρά του μετασχηματιστή και  $V_A$ ,  $V_B$  και  $V_C$  για την άλλη πλευρά, ορίζουμε ότι η χαμηλή τάση

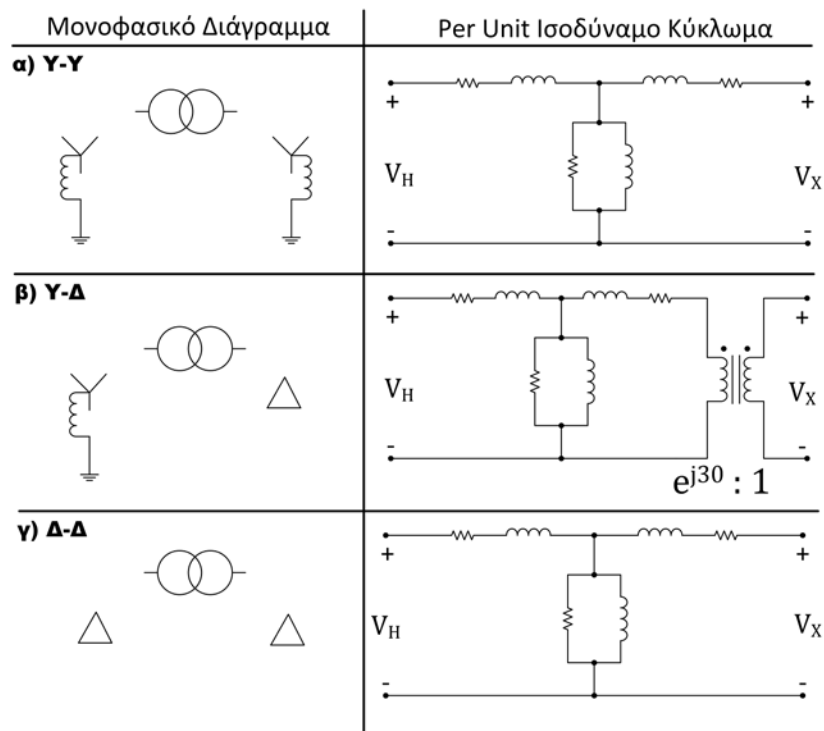
θα εκφράζεται από τα μικρά γράμματα και η υψηλή από τα κεφαλαία. Επιπλέον, στα παραδείγματα αυτής της παραγράφου, οι ακροδέκτες των μετασχηματιστών στη μεριά της υψηλής τάσης συμβολίζονται με  $H$ , ενώ στη χαμηλή τάση συμβολίζονται με  $X$ .

Στην περίπτωση (σχήμα 13) που η διασύνδεση των τυλιγμάτων ανάμεσα σε πρωτεύον και δευτερεύον είναι διαφορετική ( $Y-\Delta$  και  $\Delta-Y$ ), τότε οι τάσεις ανάμεσα στα δύο αυτά κυκλώματα δεν είναι σε φάση.

Έστω ότι σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα δίνεται ως δεδομένο εισόδου το διάγραμμα του σχήματος 13 όπου το πρωτεύον που είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα. Για τον υπολογισμό της γωνίας των φασικών τάσεων στο δευτερεύον από το πρόγραμμα ακολουθούνται τα εξής βήματα.

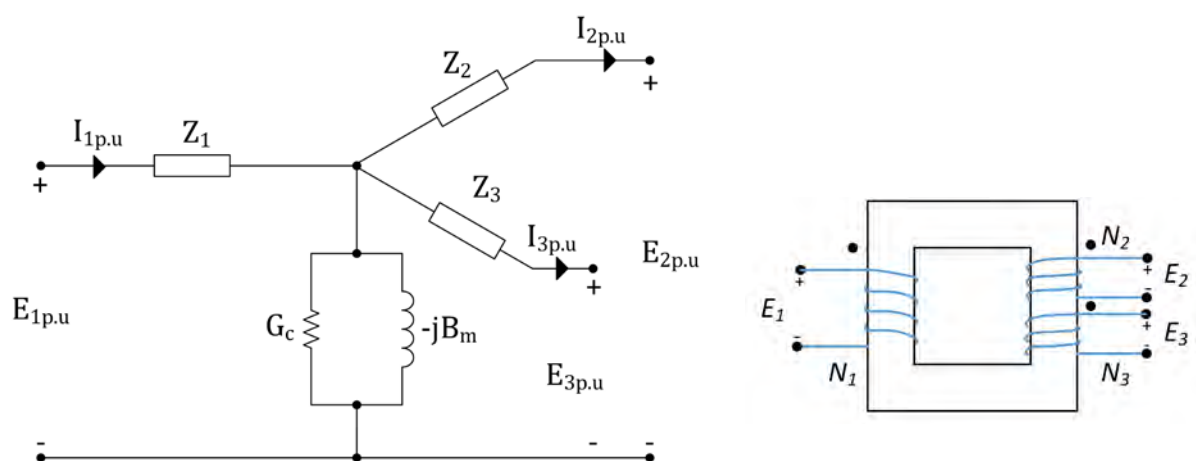
- BHMA 1** Υπό την προϋπόθεση ότι οι φασικές τάσεις στην πλευρά του πρωτεύοντος βρίσκονται σε ισορροπία, σχεδιάζεται το διάγραμμα των φασικών τάσεων.
- BHMA 2** Το διάνυσμα  $AN$  της φάσης  $A$  μετακινείται δίπλα στον ακροδέκτη  $AN$  του σχήματος 13. Ομοίως συμβαίνει και με τα διανύσματα  $BN$  και  $CN$  που μετακινούνται δίπλα στους αντίστοιχους ακροδέκτες.
- BHMA 3** Για κάθε μονοφασικό μετασχηματιστή, η τάση στη μεριά της χαμηλής τάσης πρέπει να βρίσκεται σε φάση με την τάση στην άλλη μεριά, υποθέτοντας πως πρόκειται για έναν ιδανικό μετασχηματιστή. Ως εκ τούτου, σχεδιάζεται ένα ευθύγραμμο τμήμα στη μεριά της χαμηλής τάσης, παράλληλο με το αντίστοιχο στην υψηλή τάση.
- BHMA 4** Τα άκρα των ευθυγράμμων τμημάτων ονομάζονται ανάλογα με τη σήμανση της πολικότητας. Αναλυτικότερα: η φάση  $A$  είναι συνδεδεμένη στον ακροδέκτη  $HI$ , και το  $A$  εμφανίζεται στη δεξιά μεριά του ευθυγράμμου τμήματος  $AN$ . Ως αποτέλεσμα, η φάση  $a$ , που είναι συνδεδεμένη στον ακροδέκτη  $XI$ , πρέπει να βρίσκεται στη δεξιά μεριά του ευθυγράμμου τμήματος  $αβ$ . Ομοίως και για τις υπόλοιπες φάσεις.
- BHMA 5** Τα τρία ευθύγραμμα τμήματα που έχουν προκύψει στο προηγούμενο βήμα συνδέονται με τον κατάλληλο τρόπο ώστε να σχηματιστεί το φασικό διάγραμμα κατά τρίγωνο στο δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Πίνακας 2: Ισοδύναμο per unit Κυκλώματα Τριφασικών Μετασχηματιστών.



Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τριφασικοί μετασχηματιστές αντιμετωπίζονται ως συνδεδεμένοι μονοφασικοί μετασχηματιστές. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται οι τα per unit μεγέθη των στοιχείων των μετασχηματιστών όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο (2.3.2.2) ενώ τα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα που αναπαριστούν τους τριφασικούς μετασχηματιστές, ανάλογα τον τρόπο διασύνδεσης τους, φαίνονται στον πίνακα 2.

#### 2.3.2.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετασχηματιστών Τριών Τυλιγμάτων στο Σύστημα Per Unit



Σχήμα 14: Ισοδύναμο per unit Κύκλωμα Μονοφασικού Μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων.

Μεταφέροντας τις σχέσεις (2.55) και (2.59) για τους ιδανικούς μετασχηματιστές δύο τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων χωρίς απώλειες, προκύπτει ότι:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_3 I_3 \quad (2.71)$$

και

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} = \frac{E_3}{N_3} \quad (2.72)$$

Οι σχέσεις (2.71) και (2.72) στο σύστημα per unit είναι:

$$I_{1p.u} = I_{2p.u} + I_{3p.u} \quad (2.73)$$

και

$$E_{1p.u} = E_{2p.u} = E_{3p.u} \quad (2.74)$$

εφόσον για κάθε τύλιγμα η φαινομένη ισχύς βάσης  $S_{base}$  είναι κοινή και οι τάσεις βάσεις των τυλιγμάτων είναι ανάλογες του λόγου των τυλιγμάτων. Οι σχέσεις (2.73) και (2.74) ικανοποιούν το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 14.

Όταν σε ένα μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων ανοιχτοκυκλώσουμε ένα από τα τρία κυκλώματα, τότε αυτός συμπεριφέρεται όπως οι μετασχηματιστές δύο τυλιγμάτων. Ως εκ τούτου, ανοίγοντας ένα εκ των τριών κυκλωμάτων, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σύνθετη αντίσταση που εμφανίζεται στα άλλα δύο. Πιο συγκεκριμένα:

$Z_{12}$  = η per unit αντίδραση διαρροής όπως έχει μετρηθεί στο κύκλωμα 1, με το κύκλωμα 2 βραχυκυκλωμένο και το κύκλωμα 3 ανοιχτό.

$Z_{13}$  = η per unit αντίδραση διαρροής όπως έχει μετρηθεί στο κύκλωμα 1, με το κύκλωμα 3 βραχυκυκλωμένο και το κύκλωμα 2 ανοιχτό.

$Z_{23}$  = η per unit αντίδραση διαρροής όπως έχει μετρηθεί στο κύκλωμα 2, με το κύκλωμα 3 βραχυκυκλωμένο και το κύκλωμα 1 ανοιχτό.

Όπως προκύπτει από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος ??, για τη μέτρηση με το κύκλωμα 2 βραχυκυκλωμένο και το κύκλωμα 3 ανοιχτό, αγνοώντας τον κλάδο μαγνήτισης, ισχύει:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 \quad (2.75)$$

Ομοίως,

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3 \quad (2.76)$$

και

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 \quad (2.77)$$

Επιλύοντας το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων (2.75) – (2.77), παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \quad (2.78)$$

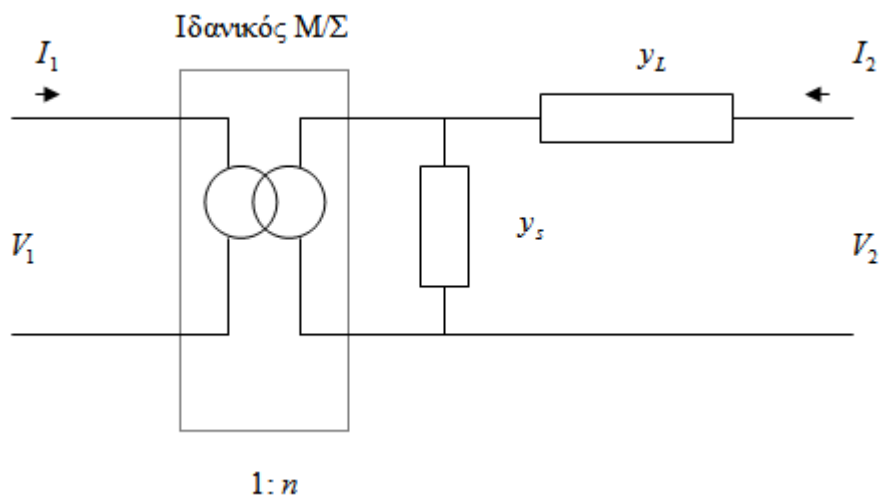
$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}) \quad (2.79)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}) \quad (2.80)$$

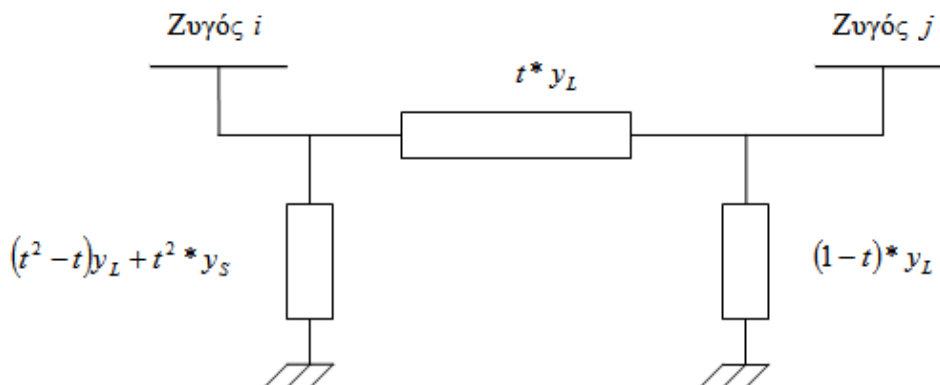
Οι παραπάνω τιμές των εν σειρά αντιδράσεων των κυκλωμάτων του ισοδυνάμου του σχήματος 14. Ένα σημείο το οποίο χρειάζεται προσοχή στην περίπτωση αυτών των μετασχηματιστών είναι πως, επειδή υπάρχει η πιθανότητα να μην έχει το κάθε κύκλωμα την ίδια φαινομένη ισχύ, πρέπει πρώτα οι τιμές να μετατραπούν στο σύστημα per unit με κοινή φαινομένη ισχύς βάσης  $S_{base}$ , πριν γίνει χρήση των εξισώσεων (2.75) – (2.80).

#### 2.3.2.5 4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετασχηματιστών Ρύθμισης Τάσης

Αντίστοιχα οι μετασχηματιστές ρύθμισης παριστάνονται με το ακόλουθο μοντέλο, όπου ο λόγος μετασχηματισμού είναι μιγαδικός, ώστε να είναι δυνατόν να εξεταστεί είτε ο μετασχηματιστής ρύθμισης μέτρου τάσης, είτε ο μετασχηματιστής ρύθμισης φάσης.



Σχήμα 15: Μοντέλο μετασχηματιστή ρύθμισης



Σχήμα 16: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης

Για το παραπάνω μοντέλο ισχύει :

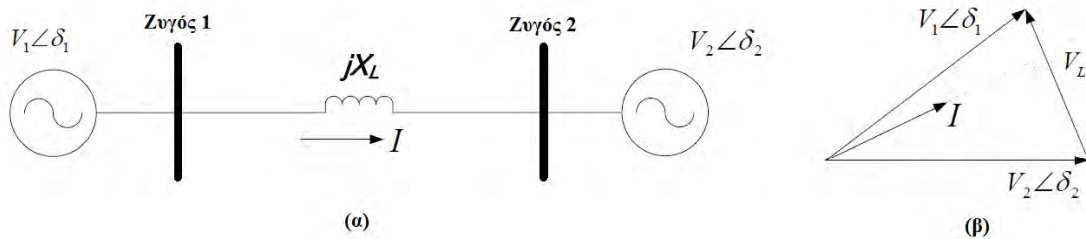
$$\tilde{I}_1 = |n|^2 (y_L + y_s) * \tilde{V}_1 - n * y_L * \tilde{V}_2 \quad (2.81)$$

$$\tilde{I}_2 = y_L * \tilde{V}_2 - n * y_L * \tilde{V}_1 \quad (2.82)$$

Ισοδύναμο κύκλωμα – Π ( αν  $n \in \mathbb{R}$  ) :

## 2.4 Αντιστάθμιση Ισχύος

Η εικόνα (α) απεικονίζει ένα απλοποιημένο σύστημα μεταφοράς, το οποίο αποτελείται από δύο επιμέρους δίκτυα που συνδέονται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες, η οποία αναπαρίσταται με την αντίδραση  $X_L$ . Οι φασικές τάσεις των δύο δικτύων βρίσκονται υπό γωνία  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ . Το αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων φαίνεται στο σχήμα (β).



Σχήμα 17: Σύστημα Μεταφοράς: (α) απλοποιημένο μοντέλο, (β) διάγραμμα φάσεων

Η ένταση του ρεύματος στην παραπάνω γραμμή ισούται με:

$$I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2|}{X_L} \quad (2.83)$$

Ενεργά και άεργα ρεύματα

$$I_{d1} = \frac{V_2 \sin \delta}{X_L} \quad \text{και} \quad I_{q1} = \frac{V_1 - V_2 \cos \delta}{X_L} \quad (2.84)$$

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι αντίστοιχα:

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \quad \text{και} \quad Q_1 = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_L} \quad (2.85)$$

Με την ίδια λογική προκύπτουν τα αντίστοιχα μεγέθη και για το δεύτερο δίκτυο:

$$I_{d2} = \frac{V_1 \sin \delta}{X_L} \quad \text{και} \quad I_{q2} = \frac{V_2 - V_1 \cos \delta}{X_L} \quad (2.86)$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \quad \text{και} \quad Q_2 = \frac{V_2 (V_2 - V_1 \cos \delta)}{X_L} \quad (2.87)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις γίνεται προφανές ότι η ενεργή και η άεργος ισχύς ρυθμίζεται ελέγχοντας τις γωνιακές τάσεις και τις αντιδράσεις της γραμμής μεταφοράς. Από την καμπύλη γωνίας – ισχύος του διαγράμματος (γ) φαίνεται ότι η ροή ενεργού ισχύος γίνεται μέγιστη για γωνία  $\delta = 90^\circ$ . Πρακτικά, για την αποφυγή ταλαντώσεων στο σύστημα, η γωνία αυτή πρέπει να είναι μικρή.

Σε γενικές γραμμές, η αντιστάθμιση στις γραμμές μεταφοράς χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

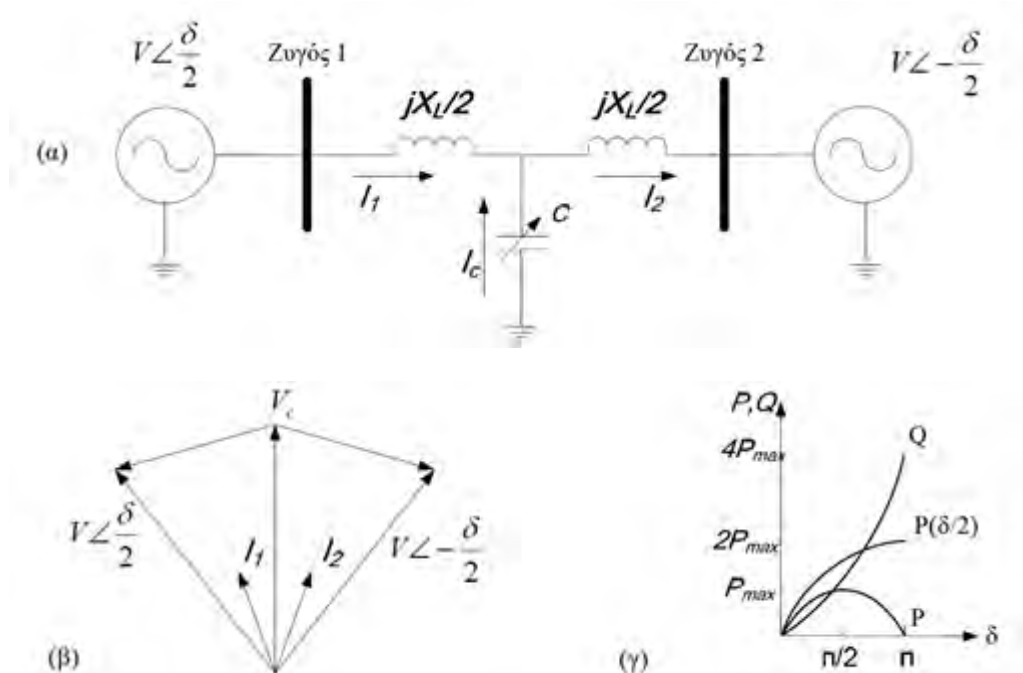
- παράλληλη αντιστάθμιση
- αντιστάθμιση σε σειρά

## 2.4.1 Βασικές Αρχές Αντιστάθμισης Ισχύος

### 2.4.1.1 Παράλληλη Αντιστάθμιση

Η παράλληλη αντιστάθμιση ισχύος, και κυρίως η χωρητική αντιστάθμιση, χρησιμοποιείται ευρέως στο σύστημα μεταφοράς για τον έλεγχο της ποιότητας και του μεγέθους της τάσης, με σκοπό την ενίσχυση της ευρωστίας του συστήματος.

Στο σχήμα (α) απεικονίζεται μια γραμμή μεταφοράς στην οποία εφαρμόζεται παράλληλη χωρητική αντιστάθμιση. Η γραμμή ενώνει δύο δίκτυα με ίση μεταξύ τους τάση  $V$  και γωνία  $\delta$ . Για τη γραμμή γίνεται η παραδοχή ότι είναι χωρίς απώλειες και αναπαρίσταται από την αντίδραση  $X_L$ . Στο μέσο της γραμμής συνδέεται παράλληλα ένας πυκνωτής. Το μέγεθος της τάσης στο σημείο της διασύνδεσης του πυκνωτή παραμένει  $V$ .



Σχήμα 18: Σύστημα μεταφοράς με παράλληλη αντιστάθμιση: (α) απλοποιημένο μοντέλο, (β) διάγραμμα φάσεων, (γ) καμπύλη ισχύος-φασικής γωνίας

Όπως προκύπτει από τις εξισώσεις () και (), η ενεργή ισχύς στους δύο ζυγούς είναι ίση.

$$P_1 = P_2 = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.88)$$

Η εγχεόμενη στο σύστημα άεργη ισχύς στο σημείο διασύνδεσης υπολογίζεται από τον τύπο:

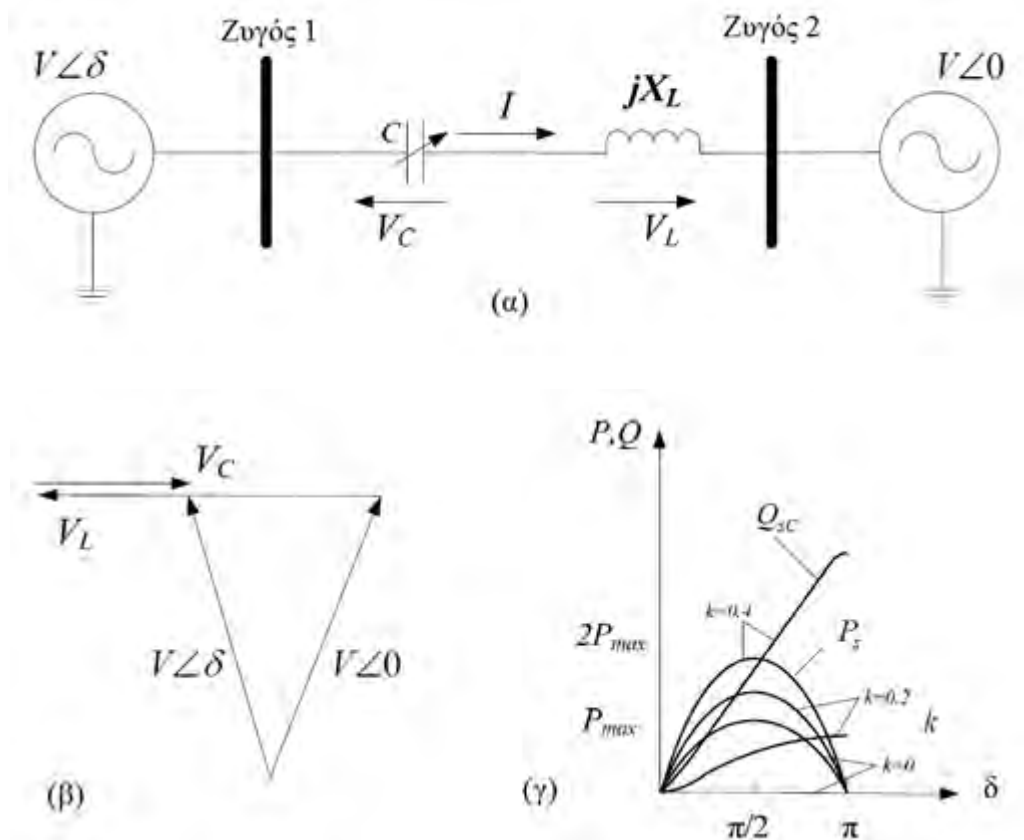
$$Q_C = 4 \frac{V^2}{X_L} \left( 1 - \cos \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.89)$$

Από την καμπύλη στο διάγραμμα ισχύος – γωνίας ( $\gamma$ ), η μεταφερόμενη ισχύς αυξάνεται, και το σημείο μεγιστοποίησης μετατοπίζεται από  $\delta = 90^\circ$  σε  $\delta = 180^\circ$ . Έτσι, το εύρος της λειτουργίας του συστήματος και η ευστάθειά του επεκτείνονται μέσω της παράλληλης αντιστάθμισης. The voltage support function of the midpoint compensation can easily be extended to the voltage support at the end of the radial transmission, which will be proven by the system simplification analysis in a later section. The reactive power compensation at the end of the radial line is especially effective in enhancing voltage stability

#### 2.4.1.2 Αντιστάθμιση σε Σειρά

Η αντιστάθμιση σε σειρά στοχεύει στον απευθείας έλεγχο της συνολικής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς. Παρατηρώντας τις εξισώσεις ( ) – ( ), η μετάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος περιορίζεται κυρίως από την αντίδραση της γραμμής μεταφοράς. Η συνδεσμολογία σε σειρά μπορεί να προσθέσει τάση ίση με την πτώση τάσης της γραμμής, μειώνοντας την αντίδραση της γραμμής.

Στο σχήμα (α) απεικονίζεται δίκτυο που εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνο της προηγούμενης παραγράφου (2.4.1 Παράλληλη Αντιστάθμιση), ώστε να γίνουν εμφανείς οι διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Η μόνη διαφορά είναι ότι εδώ ο πυκνωτής είναι συνδεδεμένος στη γραμμή μεταφοράς σε σειρά. Οι γωνιακές φάσεις στους δύο ζυγούς αφενός δεν είναι ίδιες, αφετέρου η μεταξύ τους διαφορά, που είναι εκείνη που μας αφορά είναι πάλι  $\delta$ .



Σχήμα 19: Σύστημα μεταφοράς με αντιστάθμιση σε σειρά: (α) απλοποιημένο μοντέλο, (β) διάγραμμα φάσεων, (γ) καμπύλη ισχύος-φασικής γωνίας

Προσδιορίζοντας τη χωρητικότητα του πυκνωτή  $C$  ως κλάσμα της αντίδρασης της γραμμής:

$$X_C = kX_L \quad (2.90)$$



Η συνολική αντίδραση της γραμμής είναι:

$$X = X_L - X_C = (1 - k)X_L \quad (2.91)$$

Η μεταφερόμενη πραγματική ισχύς είναι:

$$P = \frac{V^2}{(1-k)X_L} \sin \delta \quad (2.92)$$

Η παρεχόμενη από τον πυκνωτή άεργος ισχύς ισούται με:

$$Q_c = 2 \frac{V^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (2.93)$$

Το διάγραμμα (γ) δείχνει πως διαμορφώνεται η καμπύλη ισχύος καθώς μεταβάλλεται η μεταφερόμενη πραγματική ισχύς μεταβάλλοντας το  $k$ .

## 2.4.2 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (FACTS)

Η λειτουργία των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος βασίζεται στη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και άλλων στατικών ελεγκτικών μηχανισμών για την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος των γραμμών μεταφοράς [ 21 ]. Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος στο σύστημα μεταφοράς δίνει τη δυνατότητα της άμεσης έγχυσης πραγματικής ή άεργης ισχύος στο δίκτυο, με αποτέλεσμα την εγκαθίδρυση των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Η αντιστάθμιση ισχύος στα ευέλικτα συστήματα έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο της αυξομείωσης στην τάση του συστήματος έτσι, ώστε ο έλεγχος της ροής φορτίου του συστήματος να είναι αρκετά ικανοποιητικός.

Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, όπως φαίνεται στο διάγραμμα (), χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Δυναμικές συσκευές και συσκευές σταθερής χωρητικότητας.**

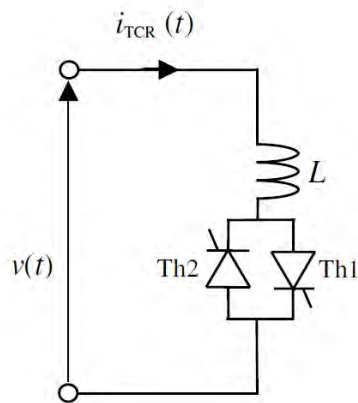
Οι μηχανισμοί αυτοί εμφανίζονται στην πρώτη γενιά ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος. Με εξαίρεση τη σύνδεση πυκνωτών σε σειρά, οι υπόλοιποι μηχανισμοί βασίζονται σε δυναμικές συσκευές (στην ουσία πρόκειται για μηχανές). Στην πλειοψηφία τους ελέγχονται από τη μεριά της παραγωγής του δικτύου, ενώ το κόστος λειτουργίας τους είναι μεγάλο.

- **Αντιστάθμιση στατικής κατάστασης.**

Πρόκειται για τη δεύτερη γενιά ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: τις συσκευές που βασίζουν τη λειτουργία τους σε θυρίστορ και τις πλήρως ελεγχόμενες συσκευές αντιστάθμισης. Στη συγκεκριμένη ομάδα περιλαμβάνεται και το σύστημα αντιστάθμισης τύπου SVC, που συναντάται σε αρκετές περιπτώσεις στις σύγχρονες εφαρμογές αντιστάθμισης στο ελληνικό και ευρωπαϊκό σύστημα.

### 2.4.2.1. Βαθμίδες Πηνίων Ελεγχόμενων μέσω Θυρίστορ (TCR)

Ο εν λόγω μηχανισμός, που αρχικά προτάθηκε το 1982 [ 22 ], και φαίνεται στο σχήμα 20, ουσιαστικά αποτελείται από ένα ζεύγος αντιπαράλληλων θυρίστορ σε σειρά με ένα πηνίο. Κάθε ένα από τα θυρίστορ άγει εναλλάξ στο έκαστο μισό μιας περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος..

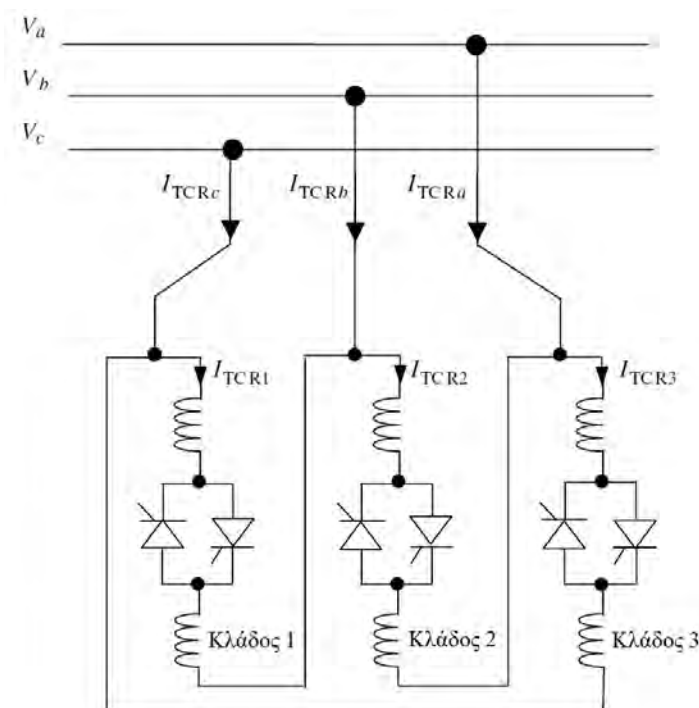


Σχήμα 20: Η διάταξη TCR

Η λογική της λειτουργίας του TCR είναι η ελεγχόμενη επίδραση του πηνίου της διάταξης στην αγωγιμότητα της γραμμής, μέσω της αυξομείωσης της γωνίας έναυσης  $\alpha$  των θυρίστορ. Παρόλα αυτά, η διαδικασία αντιμετωπίζει κάποια προβλήματα, διότι το TCR επιτυγχάνει σταθερή λειτουργία στο σύστημα σε τέτοια συχνότητα ώστε να εμφανίζεται θόρυβος υπό τη μορφή αρμονικών ταλαντώσεων.

Στην περίπτωση διασύνδεσης της διάταξης TCR σε τριφασική γραμμή, προτιμάται η συνδεσμολογία του τριγώνου ( $\Delta$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα 21, ώστε οι αρμονικές που εμφανίζονται εξαιτίας των θυρίστορ να κυκλοφορούν στο τρίγωνο και να μην παρουσιάζονται στο ρεύμα των φάσεων του δικτύου.

Επιπλέον, πρέπει να δίνεται σημασία στις γωνίες έναυσης των θυρίστορ, οι οποίες θα πρέπει να είναι ίσες, διαφορετικά θα παρουσιαστούν επιπλέον αρμονικές και συνεχή ρεύματα, ενώ η θερμική καταπόνηση των θυρίστορ θα είναι άνιση.

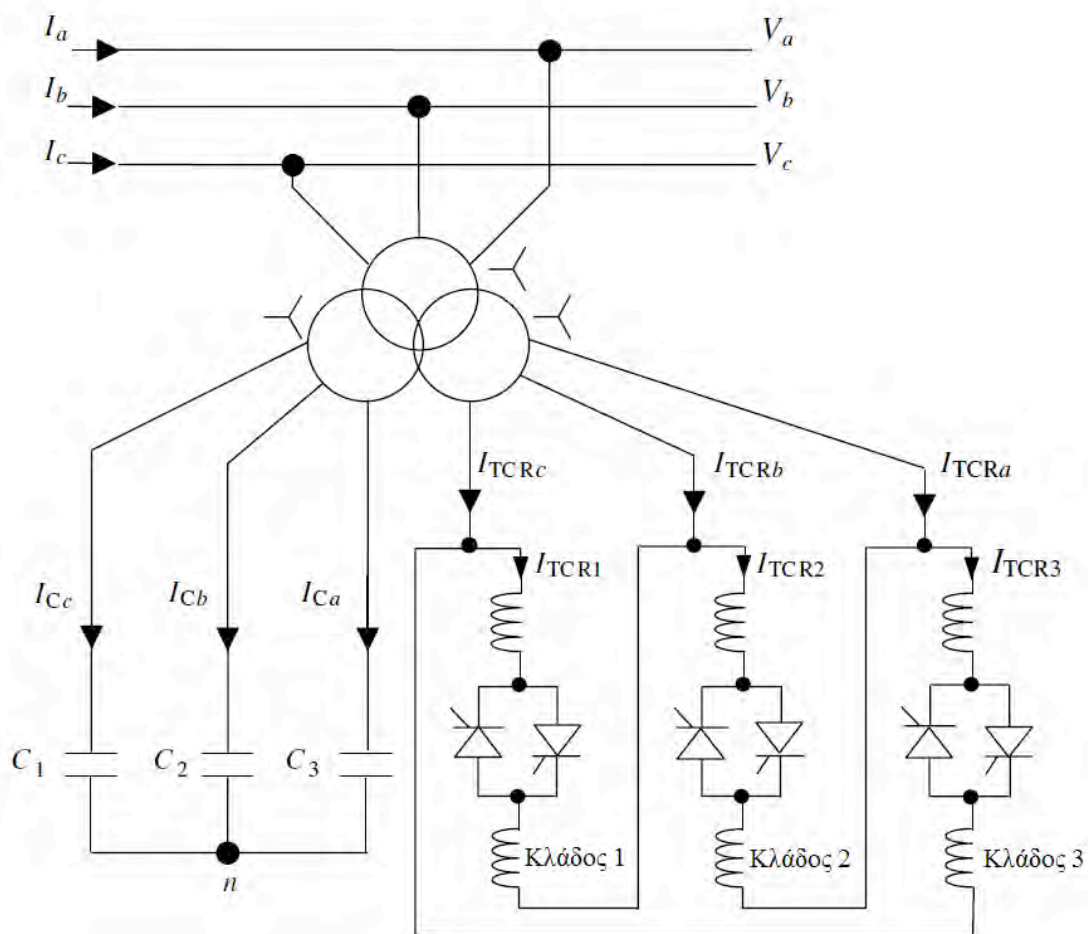


Σχήμα 21: Συνδεσμολογία TCR σε τριφασική γραμμή σε τρίγωνο ( $\Delta$ )

#### 2.4.2.2. Στατικός Αντισταθμιστής Ισχύος (SVC)

Η συγκεκριμένη διάταξη (σχήμα 22) χρησιμοποιείται κυρίως για ρύθμιση της τάσης και έλεγχο της αέργου ισχύος του δικτύου και τοποθετείται σαν εγκάρσιο κύκλωμα. Διαθέτει κάποια ικανότητα ελέγχου της ευστάθειας, όχι όμως και τον έλεγχο της ροής πραγματικής ισχύος. Σαν ελεγχόμενο εγκάρσιο στοιχείο μπορεί να προσφέρει και άλλες υπηρεσίες, όπως:

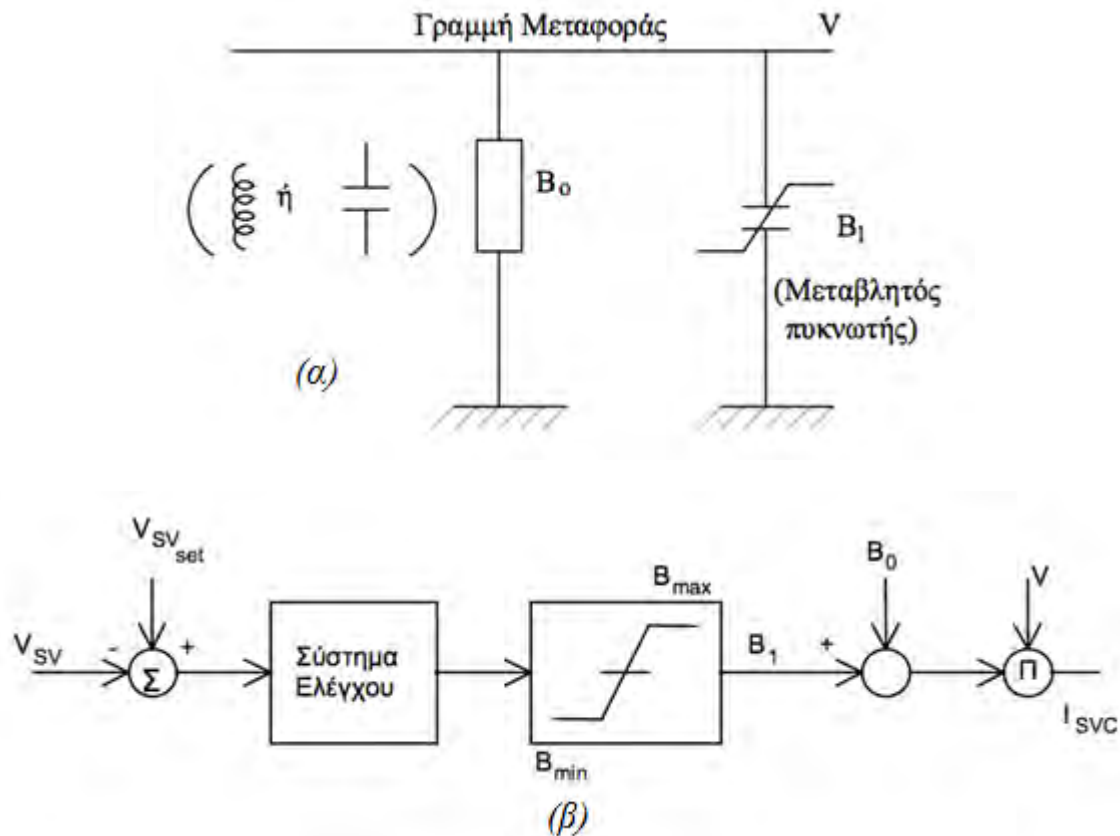
- Σταθεροποίηση λειτουργίας ως αποτέλεσμα βελτίωσης των μεταβατικών χαρακτηριστικών μεταφοράς.
- Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των συνδέσεων του δικτύου.
- Απόσβεση των διακυμάνσεων της πραγματικής ισχύος με κατάλληλη ρύθμιση της αέργου που εγχέεται στο δίκτυο.
- Απόσβεση των υποσύγχρονων συντονισμών.



Σχήμα 22: Διάταξη Στατικού Αντισταθμιστή (SVC)

Οι γραμμές μεταφοράς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει, για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους, να λειτουργούν με την υψηλότερη δυνατή τάση που θα πρέπει επίσης να είναι σταθερή, δεδομένου ότι υπό αυτές τις συνθήκες μεγιστοποιείται η ικανότητα μεταφοράς και ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

Ο SVC χρησιμοποιεί διάταξη θυρίστορ για να συνδέει και αποσυνδέει ταχύτατα εγκάρσια πηνία και/ή πυκνωτές, συχνά σε συνεργασία με μηχανικά ελεγχόμενα πηνία και/ή πυκνωτές. Βασικό γνώρισμα ενός SVC είναι η ύπαρξη και πηνίων και πυκνωτών. Ένα τυπικό μοντέλο SVC με σταθερό στοιχείο αντιστάθμισης B (επαγωγικό ή χωρητικό) και μεταβλητό ελεγχόμενο πυκνωτή B (με άνω και κάτω όρια) παριστάνεται στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23: (α) Τυπικό μοντέλο SVC, (β) Σύστημα Ελέγχου SVC

Το σύστημα ελέγχου της διάταξης (β) έχει μια προκαθορισμένη στάθμη τάσης  $V_{SV}$  και μετρούμενη ανάδραση  $V_{SV}$ . Το σφάλμα  $\Delta V$  ενεργοποιεί το σύστημα ελέγχου, το οποίο εισάγει την απαιτούμενη άεργο ισχύ αντιστάθμισης του μεταβλητού πυκνωτή. Ο συνδυασμός σταθερής και μεταβλητής αγωγιμότητας συγκρίνεται με την τάση λειτουργίας και δίνει το άεργο ρεύμα  $I_{SVC}$ , το οποίο εγχέεται θετικά ή αρνητικά στη γραμμή. Οι σχετικές εξισώσεις λειτουργίας είναι:

$$\tilde{I}_{\epsilon\gamma\chi} = -\tilde{V}\tilde{Y} \quad (2.94)$$

$$\tilde{Y} = 0 + jB_1 \quad (2.95)$$

$$\tilde{S} = \tilde{V}\tilde{I}_{SVC}^* \quad (2.96)$$

$$Q = |\tilde{V}|^2 (B_1 + B_0) \quad (2.97)$$

Μια εφαρμογή διατάξεων SVC παρατίθεται στο Σχήμα 24. Στο σύστημα του σχήματος, η τάση ελέγχεται στη θέση C (στο κέντρο της γραμμής μεταφοράς I-II) και το σύστημα I είναι πολύ μεγαλύτερο από το II.

Ισχύς  $P$  MW μεταφέρεται από το σύστημα II στο I. Ο SVC μπορεί να διατηρήσει την τάση πρακτικά σταθερή, χωρίς χρονική καθυστέρηση. Μεταβολές της τάσης, οφειλόμενες σε χειρισμούς των διακοπών μπορούν επίσης να αντισταθμιστούν. Για παράδειγμα, χωρίς SVC, μια διακοπή του ενός κυκλώματος της διπλής γραμμής AC μπορεί να επιφέρει ανύψωση της τάσης περίπου 10%, η οποία να χρειαστεί πολύ χρόνο μέχρι να αποσβεστεί. Με τον SVC η υπέρταση περιορίζεται πολύ (ίσως όχι πάνω από 3% σε πολύ μικρή χρονική περιοχή) και η απόσβεσή της επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα. Μια τέτοια περίπτωση χειρισμού είναι η απόρριψη φορτίου, με άνοιγμα των διακοπών της διπλής γραμμής AC στο A, οπότε η τάση χωρίς SVC αναπηδά σημαντικά υψηλότερα, από ό,τι με την

Η επίδραση του SVC, θα είναι επίσης πολύ σημαντική στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος στο δίκτυο μετά την ανωτέρω διακοπή. Το σήμα εισόδου του ελεγχόμενου SVC είναι η εκτιμώμενη κατά προσέγγιση φυσική απόκλιση μεταξύ των συστημάτων I και II, η οποία μπορεί να είναι γνωστή από μια ανάλυση ροών φορτίου.

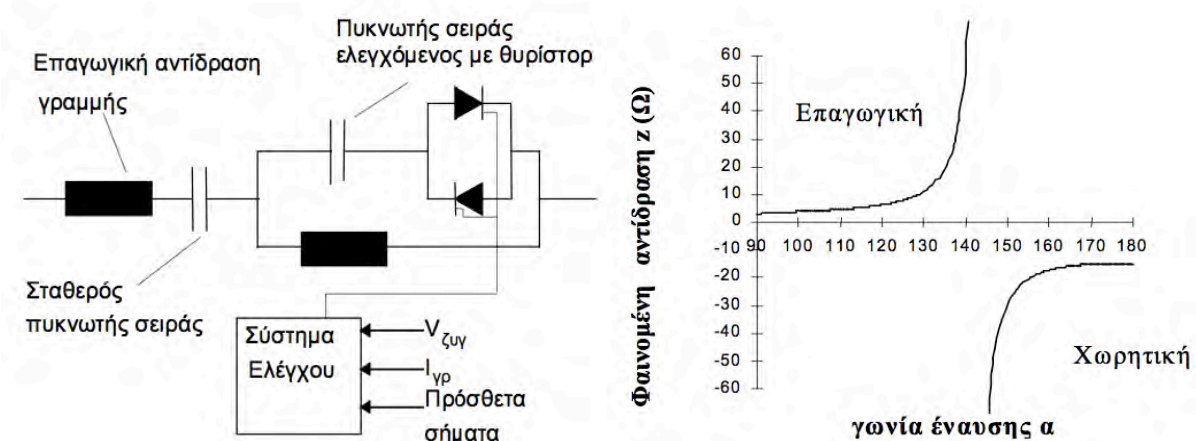
#### 2.4.2.3 Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (TCSC)

Η αντιστάθμιση σειράς, έχει αποδειχθεί από την δεκαετία του '50 ότι είναι ένα αποδοτικό μέσο για τη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου [ 23 ]. Αυξάνει τη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής, βελτιώνει τη μορφή της τάσης, ενώ με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης [ 24, 25 ]. Ιστορικά, η κύρια εφαρμογή της αντιστάθμισης σειράς, ήταν στη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Με την πρόσφατη ανάπτυξη των ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς, έχουν δημιουργηθεί νέες δυνατότητες εφαρμογών στον έλεγχο της ροής ισχύος σε διασυνδεδεμένα δίκτυα και στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος σε διασυνδετικές γραμμές.

$$P = \frac{v_1 v_2}{x_{12} - x_c} \sin \delta_{12} \quad (2.98)$$

43

$X_C$ : η μεταβλητή χωρητική αντίδραση της TCSC.



Σχήμα 25: (α) Διάταξη Ελεγχόμενης Αντιστάθμισης Σειράς (TCSC), (β) Φαινόμενη Αντίδραση TCSC

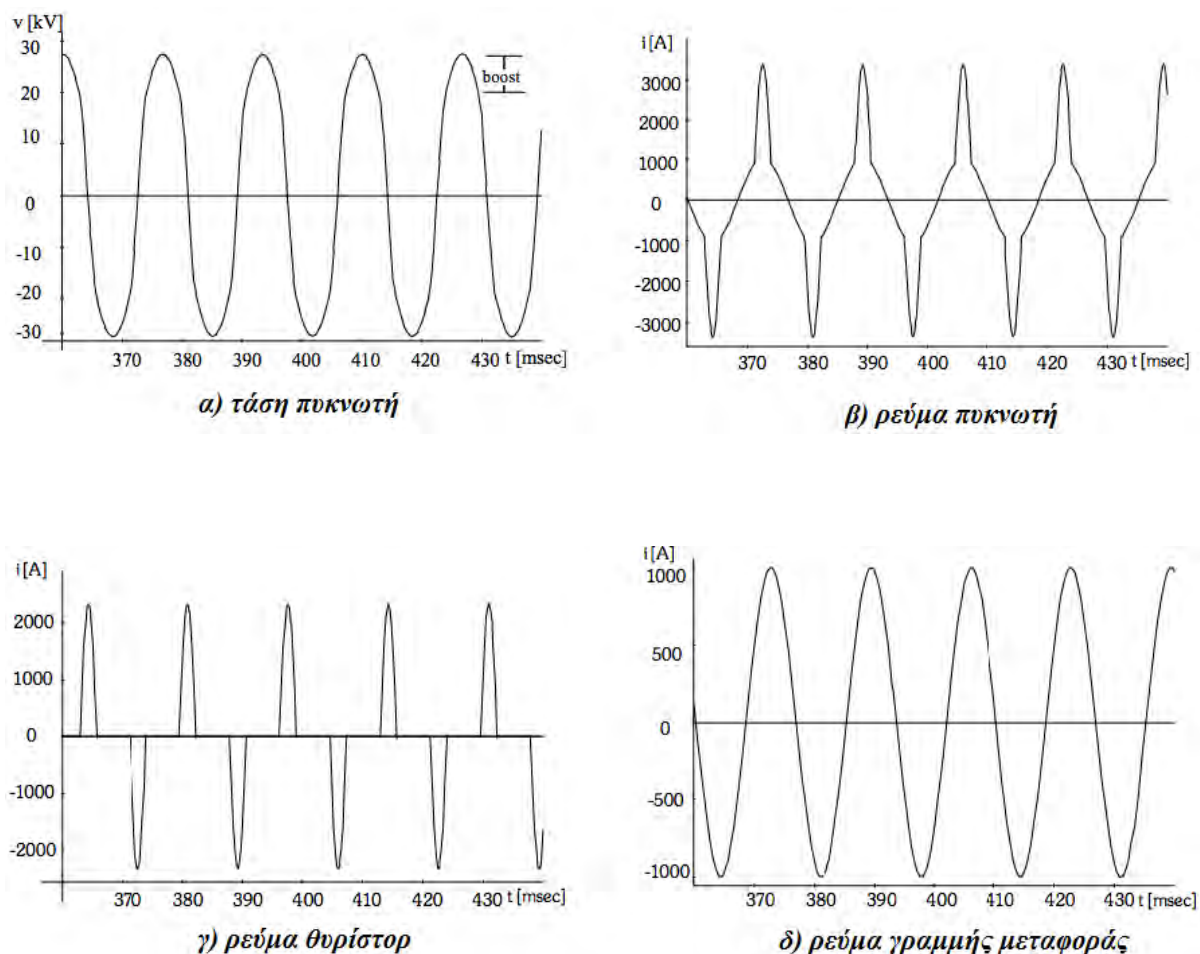
Ο ελεγχόμενος με θυρίστορ πυκνωτής σειράς αποτελείται από ένα συμβατικό πυκνωτή παράλληλα με ένα ελεγχόμενο με αντιπαράλληλα θυρίστορ πηνίο (Σχήμα 25α). Ανάλογα με τη γωνία έναυσης των θυρίστορ, το ρεύμα που κυκλοφορεί στο κλειστό κύκλωμα μπορεί να έχει την ίδια ή αντίθετη φορά με το ρεύμα της γραμμής, με αποτέλεσμα η διάταξη να παρουσιάζει χωρητική ή επαγωγική μεταβλητή φαινόμενη αντίδραση (Σχήμα 25β) [ 26 ]. Για γωνία έναυσης ίση με 180° συμπεριφέρεται σαν συμβατικός πυκνωτής. Στην περίπτωση της χωρητικής συμπεριφοράς, το ρεύμα που κυκλοφορεί προκαλεί μία αύξηση της τάσης (voltage boost) στα άκρα του πυκνωτή, η οποία οδηγεί στην αύξηση της φαινόμενης χωρητικής αντίδρασης της διάταξης, ως προς το σύστημα (Σχήμα 6). Λόγω της δυνατότητας συνεχούς ελέγχου της φαινόμενης αντίδρασης της TCSC, μπορεί να συμβάλει, μέσω της περιγραφείσας λειτουργίας, στον έλεγχο της ροής της ισχύος, στην απόσβεση των υποσύγχρονων ταλαντώσεων ισχύος, στην αύξηση της μεταβατικής ευστάθειας, στην προσαρμογή χαρακτηριστικών της προστασίας και στον έλεγχο των υπερφορτίσεων.

Με την εισαγωγή ενός πρόσθετου σήματος, όπως είναι η μεταβολή της ενεργού ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς, η αντιστάθμιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος του δικτύου.

Ένας ιεραρχικός έλεγχος ενός διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς με TCSC καταναμεμένα στις γραμμές μεταφοράς, επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων και βελτιστοποιημένων καταστάσεων φόρτισης, με διάφορα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως να διατηρούν αυτόματα το επιθυμητό προφίλ τάσης, ή ελαχιστοποιημένες συνολικές απώλειες στο σύστημα [ 27, 28 ]. Ο έλεγχος των θυρίστορ μιας τέτοιας διάταξης μπορεί να γίνει εξ αποστάσεως μέσω συστήματος SCADA.

Γνωστές τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν σε μεγάλες ηλεκτρικές επιχειρήσεις των ΗΠΑ, όπως την American Electric Power Co. του Ohio, στη Western Area Power Administration του Colorado και στη Bonneville Power Administration στο Oregon.





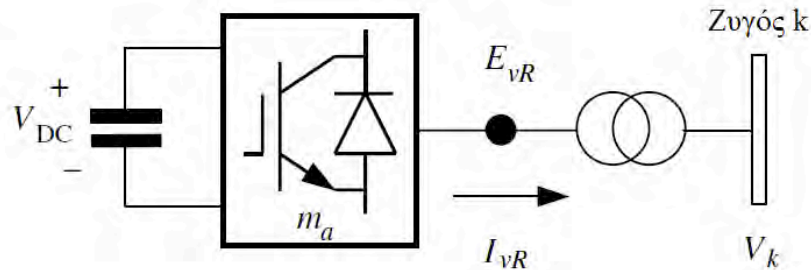
Σχήμα 26: Χαρακτηριστικές Τάσης και ρεύματος στο TCSC στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.

#### 2.4.2.4 Στατός Πυκνωτής (STATCOM)

Ο στατικός αντισταθμιστής VAR (SVC), που περιεγράφηκε στα προηγούμενα αποτελεί ήδη σήμερα μια καθιερωμένη τεχνική ελέγχου της τάσης. Φαίνεται, εντούτοις, ότι πολύ σύντομα στο μέλλον θα ξεπεραστεί από μια νέα διάταξη, το στατό πυκνωτή (STATCOM), η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 10. Η διάταξη αυτή στην ουσία είναι ένας τριφασικός μετατροπέας, ενεργοποιούμενος από την τάση κατά μήκος ενός πυκνωτή φόρτισης ΣΡ, του οποίου οι τρεις τάσεις εξόδου είναι σε φάση με τις τάσεις ΕΡ του συστήματος. Όταν οι τάσεις εξόδου είναι υψηλότερες (ή χαμηλότερες) από τις τάσεις ΕΡ του συστήματος, η ροή του ρεύματος προπορεύεται (ή επιπορεύεται) και η διαφορά στα μεγέθη της τάσης καθορίζει το μέγεθος του ρεύματος. Ο πυκνωτής, δηλαδή, μπορεί να φορτιστεί κατά μια πολικότητα, μέσω του μετατροπέα να μείνει φορτισμένος ( $V > V$ ) και να εκφορτιστεί μέσω των ελεγχόμενων GTO, παρέχοντας χωρητική ισχύ στο σύστημα ( $V > V$ ). Με τον τρόπο αυτό, η άεργος ισχύς κατά μέγεθος και πολικότητα μπορεί να ελεγχθεί, μέσω ελέγχου της τάσης.

Η υπεροχή του STATCOM έναντι της παραδοσιακής και εγκάρσιας αντιστάθμισης έγκειται στην αποδιδόμενη ισχύ. Η μέγιστη άεργος ισχύς, την οποία μπορεί να αποδώσει στο σύστημα ο STATCOM, ισούται με το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα, ενώ στην περίπτωση του SVC είναι  $V^2 \omega C$ . Συνεπώς, εάν η τάση μειωθεί ο STATCOM μπορεί ακόμη να αποδώσει μεγάλες ποσότητες αέργου ισχύος, κάνοντας χρήση της ικανότητας υπερφόρτισής του. Από την άλλη μεριά, με τον SVC η άεργος ισχύς μειώνεται δραστικά, ως συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης, ακριβώς τότε που κυρίως χρειάζεται. Επομένως, ανάλογα με την εφαρμογή, η απαιτούμενη ονομαστική ισχύς του στατού πυκνωτή θα είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ ενός αντίστοιχου SVC. Εντούτοις, ο στατός

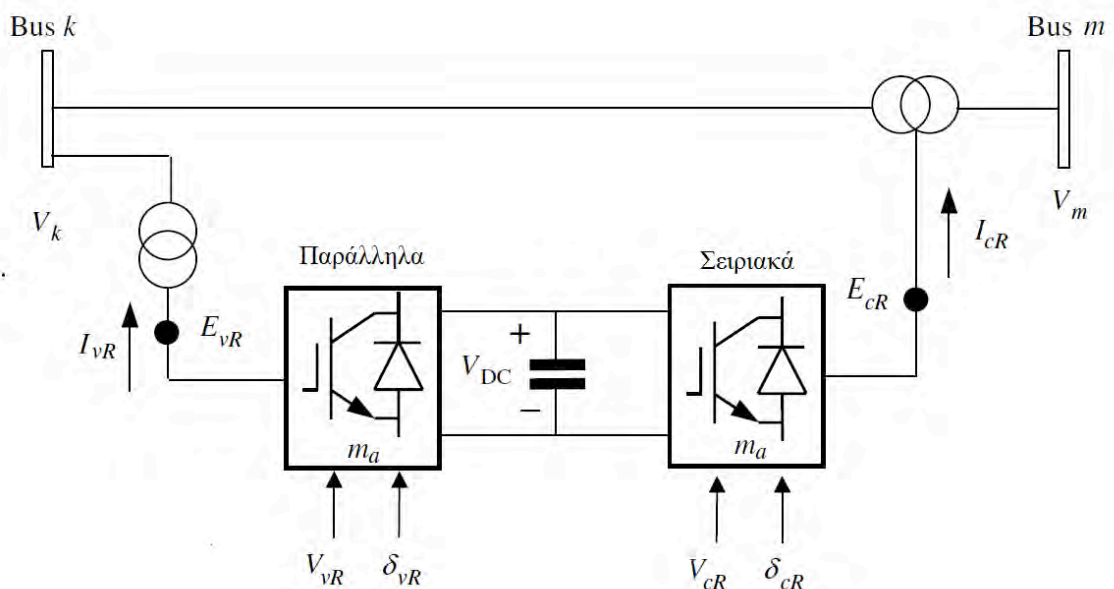
πυκνωτής απαιτεί τη χρησιμοποίηση GTO θυρίστορ, τα οποία προς το παρόν είναι πολύ δαπανηρά και έχουν περισσότερες απώλειες και μικρότερες ικανότητες τάσης και ρεύματος. Έτσι, ενώ η τρέχουσα τεχνολογία των θυρίστορ έχει φθάσει τα 8 kV, 4000 A (32 MW αιχμής διακοπής/εναύσεως ανά στοιχείο) η τεχνολογία των GTO βρίσκεται στα 4,5 kV, 3000A (13,5 MW αιχμής διακοπής/εναύσεως ανά στοιχείο).



Σχήμα 27: Διάταξη Στατού Πυκνωτή (STATCOM)

#### 2.4.2.5 Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC)

Η διάταξη αποτελείται από δύο μετατροπείς ελεγχόμενους από θυρίστορ και συνδεδεμένους με ένα κοινό σύνδεσμο ΣΡ, ο οποίος περιλαμβάνει ένα πυκνωτή φόρτισης (Σχ. 28). Ένας μετατροπέας είναι συνδεδεμένος εν σειρά στη γραμμή και επιτελεί την κύρια λειτουργία της UPFC, εισάγοντας μια τάση  $E_P$ , με ελεγχόμενο μέγεθος και γωνία. Ο δεύτερος μετατροπέας συνδέεται εγκάρσια στη γραμμή και η βασική του λειτουργία είναι να παρέχει, ή να απορροφά την ενεργό ισχύ, η οποία ζητείται από το μετατροπέα σειράς, μέσω του κοινού συνδέσμου ΣΡ. Και οι δύο μετατροπείς έχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν, ανεξάρτητα ο καθένας, άεργο ισχύ με το σύστημα. Η UPFC εγγείει ένα διάνυσμα τάσεως, με μεταβλητό μέγεθος και γωνία, στη γραμμή, εν σειρά προς τη φασική τάση, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό έναν ακριβή έλεγχο της ροής ενεργού και αέργου ισχύος στη γραμμή.



Σχήμα 28: Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC)



Η ισχύς των μετατροπών είναι ανάλογη προς το ποσοστό της τάσης που αντιπροσωπεύει το προστιθέμενο διάνυσμα, σε σχέση με την τάση της γραμμής, δηλ. δεν είναι μεγάλη.

Στη διάταξη αυτή, ένα διάνυσμα τάσης EP,  $\tilde{V}_{pq}$  με μεταβλητό μέγεθος και γωνία, παραγόμενο από ένα μετατροπέα θυρίστωρ εγχέεται στη γραμμή, εν σειρά προς τη φασική τάση,  $\tilde{V}$ . Η συνισταμένη τάση  $\tilde{V}' = \tilde{V} + \tilde{V}_{pq}$ , συνεπώς μπορεί να ρυθμίζεται ανάλογα και να μεταβάλλεται κατά μέγεθος και γωνία. Έτσι, η UPFC είναι η πρώτη διάταξη FACTS η οποία μπορεί να ρυθμίζει και τις τρεις παραμέτρους ροής της ισχύος, δηλ. τάσης, γωνίας και σύνθετης αντίστασης, ταυτόχρονα.

Ένας ρυθμιστής τάσης ή μετασχηματιστής με μεταβολή τάσης υπό φορτίο μπορεί μόνο να μεταβάλει το μέγεθος της τάσης. Ένας πυκνωτής σειράς, μεταβάλλει την επαγωγική αντίδραση της γραμμής και μέσω αυτής το ρεύμα ροής, πράγμα που αντιστοιχεί με την έγχυση μιας τάσης κάθετης προς το διάνυσμα του ρεύματος. Η φασική απόκλιση της τάσης επιτυγχάνεται συνήθως μέσω ενός μετασχηματιστή φάσης, με την προσθήκη ενός διανύσματος κάθετου προς το διάνυσμα της αρχικής τάσης, διατηρώντας πρακτικά το μέγεθός της. Σε αντίθεση με τις μονοσήμαντες αυτές ρυθμίσεις, η Ενοποιημένη Διάταξη παρέχει μια πολυσήμαντη ρύθμιση, μεταβάλλοντας όλες αυτές τις παραμέτρους, δεδομένου ότι η τάση  $\tilde{V}_{pq}$ , την οποία εισάγει μπορεί να μεταβάλλεται κατά μέγεθος και γωνία, ελέγχοντας κατά βούληση τόσο την ενεργό, όσο και την άεργο ισχύ. Επιπρόσθετα, η UPFC μπορεί να ανταποκριθεί ταχύτατα (σε ένα τέταρτο της περιόδου, περίπου) για να αποσβέσει ταλαντώσεις ισχύος, όπως τις υποσύγχρονες ταλαντώσεις συντονισμού και συνεπώς να ενισχύσει την καθολική ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Οι δυνατότητες αυτές ανοίγουν μια καινούργια προοπτική δυνατότητας ελέγχου των ροών ισχύος, τόσο σε τοπικό επίπεδο, όσο και σε κεντρικό, μέσω του αυτόματου συστήματος ελέγχου μιας εταιρίας ηλεκτρισμού.

Η Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος, θεωρείται τρίτη γενιά των ρυθμιστών και έχει μελετηθεί και αναπτυχθεί από κοινού από την EPRI και την Westinghouse Corp.

*Πίνακας 3: Οι κυριότερες διατάξεις FACTS.*

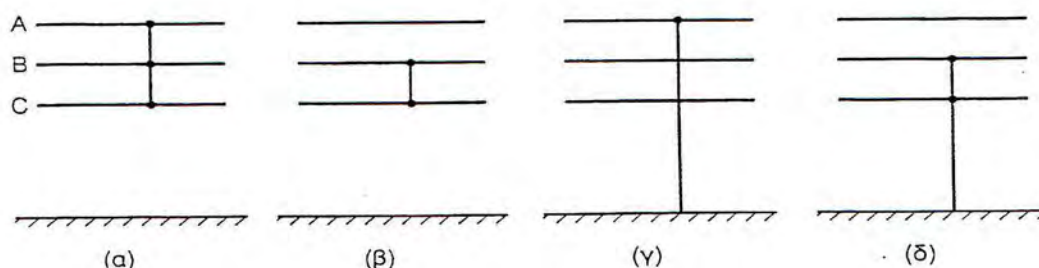
	Διάταξη Ελέγχου	Λειτουργία
1	(TCR)	
2	Στατικός Αντισταθμιστής Ισχύος (SVC)	Έλεγχος Τάσης Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος Απόσβεση Ταλαντώσεων Μεταβατική Ευστάθεια Ευστάθεια Τάσης
3	Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (TCSC)	Έλεγχος Σύνθετης Αντίστασης Έλεγχος Μεταφερόμενης Ισχύος Απόσβεση Ταλαντώσεων Μεταβατική Ευστάθεια Μείωση Ρεύματος Σφάλματος
4	Στατός Πυκνωτής (STATCOM)	Έλεγχος Τάσης Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος Απόσβεση Ταλαντώσεων Ευστάθεια Τάσης
5	Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC)	Έλεγχος Μεταφερόμενης Πραγματικής & Αέργου Ισχύος Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος Έλεγχος Τάσης Απόσβεση Ταλαντώσεων Μεταβατική Ευστάθεια Μείωση Ρεύματος Σφάλματος

## 2.5 Βραχυκυκλώματα

Τα βραχυκυκλώματα, που είναι πιθανό να συμβούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, αποτελούν μεταβατικά φαινόμενα και είναι ηλεκτρικής φύσης και δυναμικής μορφής. Τα περισσότερα βραχυκυκλώματα συμβαίνουν στα εκτεθειμένα μέρη του δικτύου (εναέριες γραμμές, ακροδέκτες εξοπλισμού), και είναι τα πιο ανώδυνα, ενώ οι σπανιότερες περιπτώσεις, όπου βραχυκύκλωμα συμβαίνει στο εσωτερικό μιας συσκευής (π.χ. μετασχηματιστή ή καλωδίου), είναι και οι πιο καταστρεπτικές. Όταν εκδηλωθεί ένα βραχυκύκλωμα, έχουμε ως αποτέλεσμα την απότομη μεταβολή της κατάστασης του συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται στιγμιαίος μηδενισμός ή βύθιση της τάσης, σε διαφορετικό βαθμό για κάθε ζυγό, ανάλογα με το σημείο όπου συμβαίνει το βραχυκύκλωμα. Αυτό συνεπάγεται την απότομη μείωση της εξερχόμενης ισχύος των γεννητριών με σταθερή τη μηχανική ισχύ των στροβίλων. Παράγεται λοιπόν ένα περίσσειμα κινητήριας ισχύος που δημιουργεί ένα ζεύγος επιτάχυνσης με συνέπειες στην ευστάθεια του συστήματος. Παράλληλα, η αύξηση των εντάσεων που προκαλείται από το βραχυκύκλωμα, αν οι διακόπτες δε λειτουργήσουν άμεσα, ενδέχεται να προκαλέσει μόνιμες βλάβες στα στοιχεία του συστήματος, κυρίως τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές. Η μελέτη βραχυκυκλωμάτων αναφέρεται πρώτιστα στον προσδιορισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, που ενδιαφέρουν τα μέσα διακοπής και προστασίας. Συγκεκριμένα η ικανότητα διακοπής των διακοπών αναφέρεται στη δυσμενέστερη περίπτωση βραχυκυκλώματος, ενώ η αποτελεσματικότητα του συστήματος προστασίας σχετίζεται με το μέγεθος και τη φορά κατεύθυνσης των ρευμάτων βραχυκύκλωσης [29, 30].

### 2.5.1 Είδη Βραχυκυκλωμάτων

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να είναι συμμετρικά ή ασύμμετρα. Τα συμμετρικά είναι εκείνες οι μεταβατικές καταστάσεις στις οποίες βρίσκεται το σύστημα όταν λόγω βλάβης σε ένα σημείο έρχονται σε επαφή μεταξύ τους οι τρεις φάσεις. Αυτά είναι και οι πιο σοβαρές περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων. Συμμετρικά είναι τα τριφασικά βραχυκυκλώματα. Τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα από την άλλη είναι αρκετά συνηθέστερα, αλλά όχι τόσο σοβαρά. Τα μονοφασικά και διφασικά είναι ασύμμετρα βραχυκυκλώματα. Στο σχήμα 3.10 φαίνονται τα διάφορα είδη βραχυκυκλωμάτων. Συγκεκριμένα, στο 29(α) φαίνεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα, στο 29(β) το διφασικό, στο 29(γ) το μονοφασικό ως προς γη, (δ) διφασικό

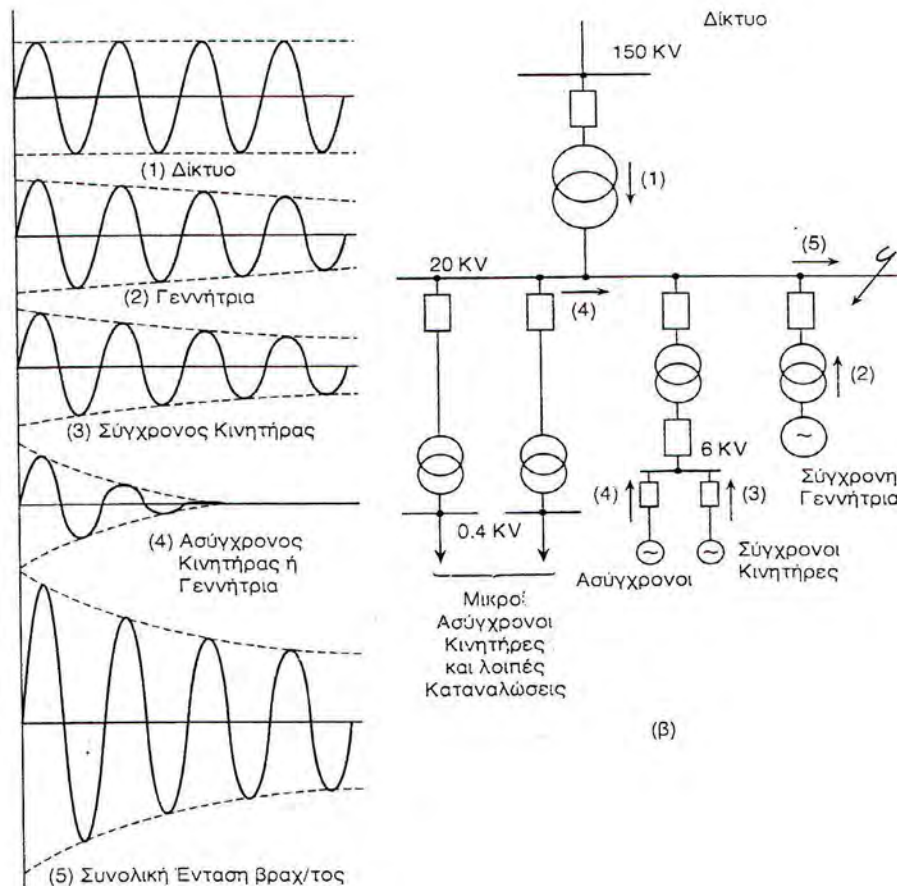


Σχήμα 29: Είδη βραχυκυκλωμάτων (α) Τριφασικό, (β) Διφασικό, (γ) Μονοφασικό ως προς γη, (δ) Διφασικό ως προς γη

#### 2.5.1.1 Βασικά μεγέθη τριφασικού βραχυκυκλώματος και υπολογισμοί

Καταρχήν το βραχυκύκλωμα θεωρείται πλήρες, αγνοείται δηλαδή η αντίσταση σφάλματος. Το βραχυκύκλωμα τροφοδοτείται από κάθε πηγή του συστήματος. Η τάση στο ζυγό του σφάλματος μηδενίζεται, ενώ μειώνεται στους άλλους ζυγούς, ανάλογα με το πόσο ισχυρός είναι ο κάθε ένας. Προς το σφάλμα ρέουν ρεύματα βραχυκύκλωσης από κάθε κατεύθυνση στην οποία υπάρχει πηγή. Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης στη θέση του σφάλματος (με τιμή γενικά πολλαπλάσια από τα συνήθη ρεύματα φορτίων) είναι το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων των επιμέρους στοιχείων του συστήματος, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα 30, για ένα συμμετρικό ρεύμα

βραχυκύκλωσης. Η ισχύς ή στάθμη βραχυκύκλωσης ορίζεται ως το γινόμενο του μέτρου της τάσης του ζυγού πριν συμβεί το σφάλμα, και του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η ισχύς αυτή μπορεί να αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη θέση ή και σε όλο το σύστημα, και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο ισχυρότερο θεωρείται το σύστημα, αφού τόσο μικρότερη θα είναι η αντίσταση του δικτύου όπως φαίνεται από το θεωρούμενο ζυγό. Η αύξηση της ισχύος όμως, εκτός από το θετικό αποτέλεσμα της σταθεροποίησης της τάσης, έχει και δυσμενείς συνέπειες. Συγκεκριμένα, συνεπάγεται αυξημένες θερμικές και δυναμικές καταπονήσεις για τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις του δικτύου και απαίτηση για αυξημένη ικανότητα διακοπής των διακοπών ισχύος [9].

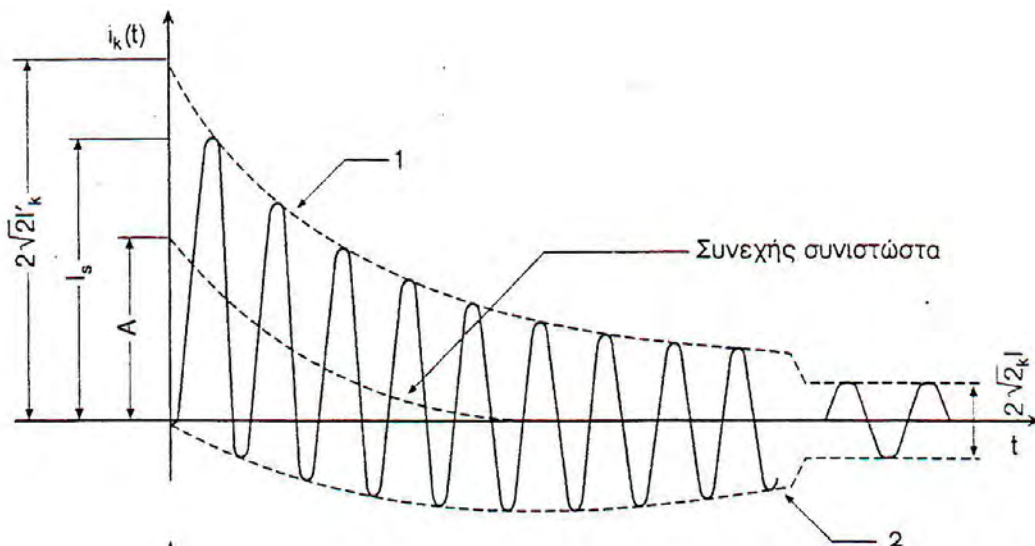


Σχήμα 30: Σύνθεση συμμετρικού βραχυκυκλώματος(α), σε τυπική εγκατάσταση(β).

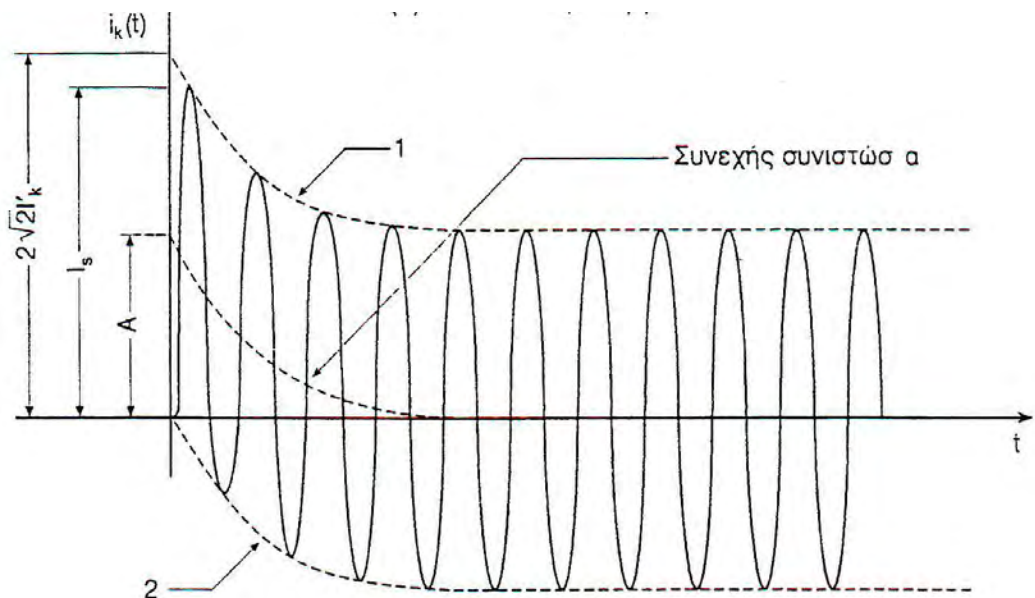
### 2.5.1.2 Ρεύματα βραχυκύκλωσης

Στο σχήμα 31 δίνεται η μεταβολή της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης:

- α:** Στην περίπτωση όπου το βραχυκύκλωμα συμβαίνει κοντά σε σύγχρονη γεννήτρια (και αντίστοιχα κοντά στο σημείο όπου η στιγμιαία τιμή της τάσης είναι μηδενική). Εδώ, ενώ το ρεύμα περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, μια συνεχή και μια εναλλασσόμενη, η ενδεικνύμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας ελαττώνεται βαθμιαία.
- β:** Στην περίπτωση όπου το βραχυκύκλωμα συμβαίνει μακριά από σύγχρονες γεννήτριες (ή άλλες στρεφόμενες μηχανές). Σ' αυτή την περίπτωση, το ρεύμα περιλαμβάνει και πάλι δύο συνιστώσες, μια συνεχή και μια εναλλασσόμενη, αλλά τώρα η ενδεικνύμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας παραμένει σταθερή.



Σχήμα 31: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει κοντά σε σύγχρονη γεννήτρια [ Άνω περιβάλλουσα(1), κάτω περιβάλλουσα(2) ]



Σχήμα 32: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει μακριά από σύγχρονη γεννήτρια ή άλλη στρεφόμενη μηχανή [Άνω περιβάλλουσα (1), κάτω περιβάλλουσα (2)]

Ορίζονται τα διάφορα ρεύματα βραχυκύκλωσης, τα οποία παρατηρούνται και στο σχήμα 32 :

**Ρεύμα βραχυκύκλωσης  $i_k(t)$ :** το ρεύμα που ρέει κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος

**Εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $i_{k-}(t)$ :** η συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης που έχει τη συχνότητα του δικτύου. Η ενδεικνύμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας συμβολίζεται με  $I_k$ .

**Υπομεταβατικό (ή αρχικό) ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_K''$ :** η ενδεικνύμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα.

**Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_S$ :** η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η μέγιστη τιμή του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης παρατηρείται όταν και η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος αποκτά τη μέγιστη τιμή της  $A \approx \sqrt{2}I_K''$ .

**Μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_K$ :** η ενδεικνύμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που παραμένει μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων.

**Υπομεταβατική ένταση βραχυκύκλωσης  $I_K'$ .** Ισχύει πάντα  $I_K'' \geq I_K' \geq I_K$ .

Για τις σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται συχνά οι παρακάτω αναλυτικές εκφράσεις.

Συνιστώσα εναλλασσόμενου ρεύματος  $I_{EP}(t)$ :

$$I_{EP}(t) = (I_K'' - I_K')e^{\frac{-t}{T_d''}} + (I_K' - I_K)e^{\frac{-t}{T_d'}} + I_K, \quad (2.99)$$

όπου  $T_d''$ ,  $T_d'$  η υπομεταβατική και η μεταβατική χρονική σταθερά αντίστοιχα.

Συνιστώσα συνεχούς ρεύματος  $I_{SP}(t)$ :

$$I_{SR}(t) = \sqrt{2}I_K'' e^{\frac{-t}{T_a}} \sin a, \quad (2.100)$$

όπου  $T_a$  η χρονική σταθερά τυλίγματος στάτη και  $a$  η φασική γωνία τη στιγμή του βραχυκυκλώματος.

Ενδεικνύμενη τιμή ασύμμετρου ρεύματος  $I_a(t)$ :

$$I_a(t) = \sqrt{I_{EP}^2(t) + I_{SP}^2(t)} \quad (2.101)$$

Η μείωση που παρατηρείται σταδιακά στις εντάσεις βραχυκύκλωσης οφείλεται στις αποσβέσεις στα επιμέρους τυλίγματα των μηχανών. Φυσικά, όταν έχουμε βραχυκύκλωμα μακριά από σύγχρονες γεννήτριες ή άλλες στρεφόμενες μηχανές, δεν έχουμε αποσβέσεις στα τυλίγματα των γεννητριών, άρα θα ισχύει  $I_K'' = I_K' = I_K$ .

Για τον υπολογισμό των εντάσεων βραχυκύκλωσης των γεννητριών αποδεχόμαστε ότι κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος η εσωτερική ΗΕΔ  $E_i$  παραμένει σταθερή αν η διέγερση της γεννήτριας παραμένει κι αυτή σταθερή. Έτσι, οι εντάσεις υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$I_K'' = \frac{E_i}{x_d''} \quad (2.102)$$

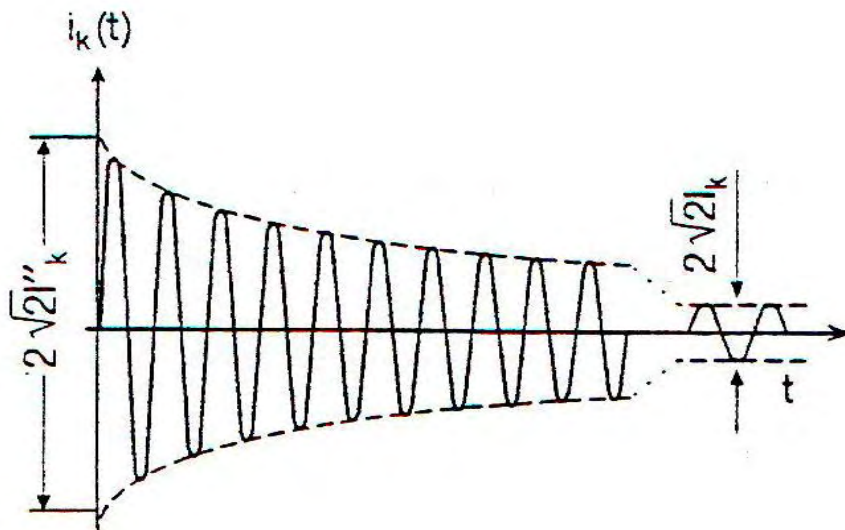
$$I_K' = \frac{E_i}{x_d'} \quad (2.103)$$



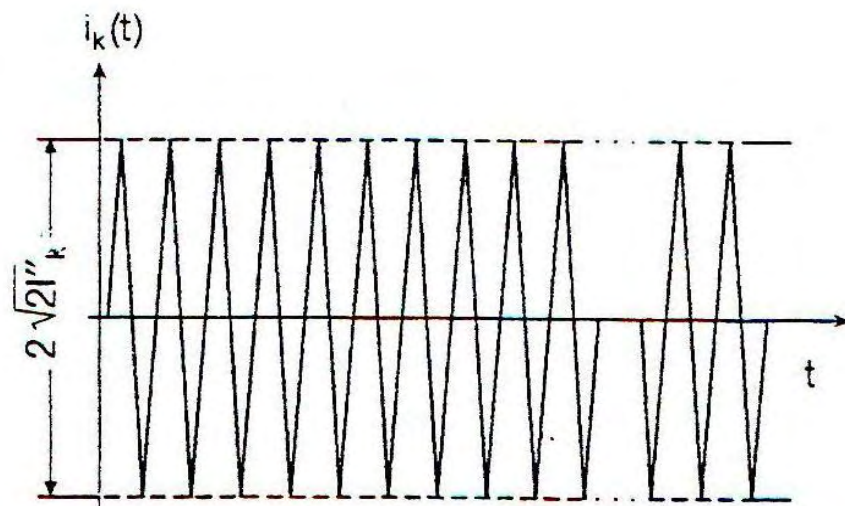
$$I_K = \frac{E_i}{x_d} \quad (2.104)$$

Σημειώνουμε τέλος ότι οι τιμές των αντιδράσεων  $x_d'', x_d', x_d$ , ανηγμένες στα βασικά μεγέθη των γεννητριών, παρουσιάζουν μικρές διαφορές για παρόμοιες γεννήτριες.

Στο σχήμα 33 βλέπουμε τη μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης έχει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις (κοντά ή μακριά από σύγχρονες γεννήτριες). Η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος μιας φάσης δεν προκύπτει μόνο όταν κατά τη στιγμή του βραχυκυκλώματος η τάση τροφοδότησης έχει μέγιστη ή ελάχιστη τιμή. Παίρνει όμως τη μέγιστη τιμή της αν το βραχυκύκλωμα συμβεί τη στιγμή που η τάση τροφοδότησης διέρχεται από το μηδέν.



Σχήμα 33: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης έχει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, κοντά σε σύγχρονη γεννήτρια



Σχήμα 34: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης έχει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, μακριά από σύγχρονες γεννήτριες ή άλλες στρεφόμενες μηχανές

### 2.5.1.3 Υπολογισμοί

Οι μεταβλητές που απαιτείται να προσδιοριστούν σε μια μελέτη βραχυκύκλωμάτων, είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο ζυγό όπου συνέβη το σφάλμα, η ισχύς βραχυκύκλωσης του ίδιου ζυγού, οι ροές ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε όλους τους κλάδους του συστήματος και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος τις πρώτες περιόδους μετά το βραχυκύκλωμα. Γνωστές θεωρούνται οι τάσεις των ζυγών του συστήματος, πριν το βραχυκύκλωμα, από τη μελέτη ροών φορτίου. Συνήθως θεωρούνται οι τάσεις αυτές ίσες με 1.1 pu και τα ρεύματα ίσα με το μηδέν (παραδοχή αποδεκτή καθώς τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι πολλαπλάσια των ρευμάτων φορτίου και σχεδόν επαγωγικά, ενώ του φορτίου σχεδόν ωμικά), επειδή δεν είναι πάντα διαθέσιμες οι αρχικές τιμές. Η επίλυση του προβλήματος αναφέρεται στον υπολογισμό των ρευμάτων και των τάσεων του δικτύου που προκάλεσαν το βραχυκύκλωμα και στην επαλληλία των ρευμάτων και των τάσεων αυτών με τα αρχικά ρεύματα και τάσεις για τον προσδιορισμό των συνολικών ρευμάτων και τάσεων μετά το σφάλμα. Ακόμα, γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι πηγές έχουν την ίδια εσωτερική τάση. Οι αντιστάσεις του δικτύου είναι ανηγμένες στα βασικά μεγέθη τάσεως και ισχύος, για τη διευκόλυνση των υπολογισμών. Οι αντιστάσεις των διαφόρων στοιχείων του δικτύου θεωρούνται γνωστές. Έτσι υπολογίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης, με αντικατάσταση όλων των πηγών με μια ισοδύναμη τάση που θεωρείται ότι επενεργεί στο σημείο του σφάλματος (κατά προσέγγιση 1.1 pu.). Δε λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των μικρών κινητήρων, ενώ οι μετασχηματιστές θεωρείται ότι λειτουργούν στην ονομαστική σχέση μετασχηματισμού. Οι υπολογισμοί γίνονται για την υπομεταβατική περίοδο, καθώς είναι η πιο δυσμενής, μπορούν όμως εύκολα να εφαρμοστούν και στη μεταβατική.

Με βάση λοιπόν το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, όπως αυτό φαίνεται από τη θέση του σφάλματος, η ΗΕΔ προσεγγιστικά θα είναι:

$$E_i = 1.1 \frac{V_n}{\sqrt{3}} \quad (2.105)$$

Η αντίσταση του κυκλώματος  $Z_i$ , είναι ίση με την ισοδύναμη αντίσταση που προκύπτει αν όλες οι πηγές βραχυκυκλωθούν.

Έτσι, η αρχική ένταση βραχυκύκλωσης θα είναι :

$$I_i = \frac{E_i}{Z_i} \quad (2.106)$$

και η ισχύς βραχυκύκλωσης :

$$S_i = \sqrt{3} V_n I_i \quad (2.107)$$

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

# Μέθοδοι Υπολογιστικής Επίλυσης της Ροής Φορτίου

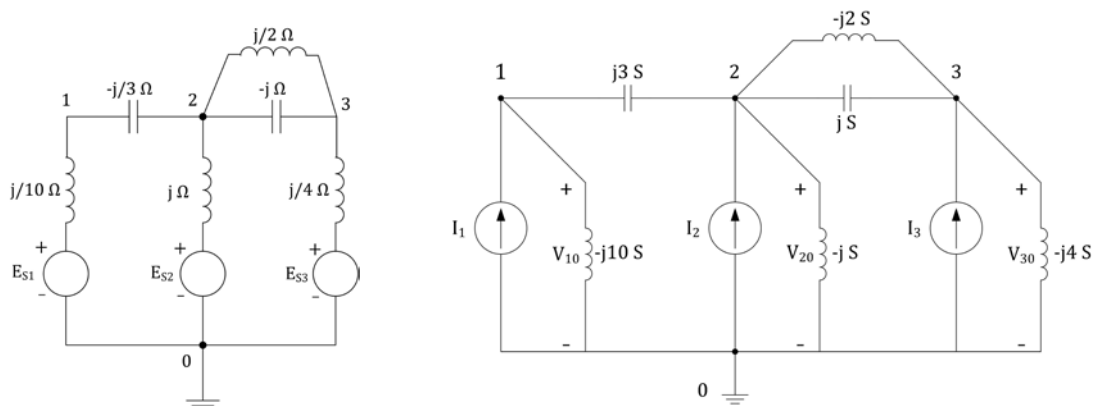
### 3.1 Εξισώσεις Δικτύου

Για τα κυκλώματα που λειτουργούν σε κανονικές συνθήκες υπό ημιτονοειδή τάση, οι νόμοι του Kirchhoff για την τάση και το ρεύμα μπορούν να εφαρμοστούν και για τις φασικές τάσεις και τα φασικά ρεύματα. Ως εκ τούτου, το άθροισμα των φασικών ρευμάτων σε ένα κόμβο καθώς και το άθροισμα των φασικών τάσεων σε ένα βρόχο είναι μηδέν. Οι τεχνικές ανάλυσης κυκλωμάτων που βασίζονται στους νόμους του Kirchhoff, όπως το θεώρημα Thevenin, το θεώρημα της υπέρθεσης ή ο μετασχηματισμός πηγών είναι πολύ χρήσιμες για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τέτοιου είδους δίκτυα.

Πολλά υπολογιστικά προγράμματα βασίζονται τις τεχνικές επίλυσής τους στη μετατροπή των κυκλωμάτων με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιλύεται με τη χρήση εξισώσεων κόμβων. Στο παράδειγμα που ακολουθεί αναφέρεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάλυση τέτοιων κυκλωμάτων από τα προγράμματα προσομοίωσης.

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Δεχόμαστε ως δεδομένο ότι το κύκλωμα του σχήματος 35 λειτουργεί υπό ημιτονοειδή τάση σε κανονικές συνθήκες. Για τη δημιουργία των εξισώσεων κόμβων ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:



Σχήμα 35: Μετατροπή των πηγών τάσης σε πηγές ρεύματος για την εφαρμογή των εξισώσεων κόμβων (NPK).

**ΒΗΜΑ 1** Για κύκλωμα με  $(N+1)$  κόμβους ( η αρίθμηση των κόμβων γίνεται ξεκινώντας από το 0 ), επιλέγεται ένας κόμβος ως κόμβος αναφοράς και οι τάσεις στους απομεινάντες κόμβους



εκφράζονται σε σχέση με την τάση του κόμβου αναφοράς. Στο κύκλωμα του σχήματος ?? παρουσιάζονται τέσσερις κόμβοι και γίνεται επιλογή του κόμβου 0 ως κόμβου αναφοράς. Έτσι, οι τάσεις στο επόμενο κύκλωμα θα έχουν σημείο αναφοράς τον κόμβο 0 ( $V_{10}$ ,  $V_{20}$ ,  $V_{30}$ ).

**ΒΗΜΑ 2** Κάθε πηγή τάσης σε σειρά με επαγωγική αντίδραση μετατρέπεται σε πηγή ρεύματος με την επαγωγική αντίδραση παράλληλα. Επιπλέον, στο νέο κύκλωμα αναφέρονται αγωγιμότητες και όχι αντιστάσεις. Η τιμή της πηγής ρεύματος προκύπτει αν διαιρέσουμε την τιμή της αρχικής πηγής τάσης με την τιμή της εν σειρά στην πηγή αντίστασης. Με την ολοκλήρωση του 2<sup>ου</sup> βήματος προκύπτει το σχήμα 15.

Για το κύκλωμα του παραδείγματος είναι:

$$I_1 = \frac{E_{S1}}{j\frac{1}{10}} \text{ και } I_2 = \frac{E_{S2}}{j} \text{ και } I_3 = \frac{E_{S3}}{j\frac{1}{4}}$$

**ΒΗΜΑ 3** Γράφουμε τις εξισώσεις κόμβων με τη μορφή πίνακα όπως τον παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ \vdots \\ V_{N0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Με τη χρήση γραφικών συμβόλων η παραπάνω εξίσωση γράφεται

$$YV = I \quad (3.2)$$

όπου  $Y$  είναι ο διαστάσεων  $N \times N$  πίνακας αγωγιμοτήτων,  $V$  είναι ο πίνακας μιας στήλης με τις τάσεις των  $N$  κόμβων και  $I$  ο πίνακας μίας στήλης με τα ρεύματα στους  $N$  κόμβους. Για τα στοιχεία  $Y_{kn}$  του πίνακα αγωγιμοτήτων  $Y$  ισχύει,

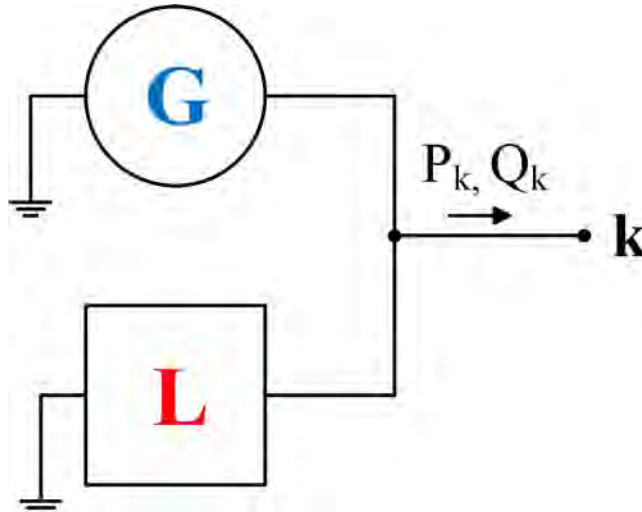
$$\text{στη διαγώνιο του πίνακα:} \quad Y_{kk} = \text{άθροισμα αγωγιμοτήτων στον κόμβο } k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (3.3)$$

$$\text{εκτός διαγώνιου:} \quad Y_{kn} = -(\text{άθροισμα αγωγιμοτήτων ανάμεσα στους κόμβους } k \text{ και } n) \quad (k \neq n) \quad (3.4)$$

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σχετική ευκολία από προγράμματα υπολογιστών, τόσο για τη δημιουργία του πίνακα  $Y$ , όσο και για την επίλυση της εξίσωσης (3.1) ως προς τον πίνακα  $V$ . Εφόσον οριστεί ο κόμβος αναφοράς και αναγνωριστούν οι υπόλοιποι κόμβοι, από τις αγωγιμότητες του κυκλώματος και τους τύπους (3.3) και (3.4) προκύπτουν τα στοιχεία του πίνακα  $Y$ . Από το 2<sup>ο</sup> βήμα της μεθοδολογίας που προαναφέρθηκε γίνεται γνωστός και ο πίνακας  $I$ , και το μόνο που μένει είναι η επίλυση της (3.1).

## 3.2 Το Πρόβλημα της Ροής Φορτίου

Το πρόβλημα της ροής φορτίου είναι ο υπολογισμός του διανύσματος της τάσης σε κάθε ζυγό ενός τριφασικού ΣΗΕ υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Με τη χρήση των κυκλωματικών μοντέλων που έχουν προαναφερθεί στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η ροή φορτίου μπορεί να υπολογιστεί από υπολογιστικά προγράμματα κατάλληλα για την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου.



Σχήμα 36: Πραγματική και Άεργος Ισχύς σε ζυγό  $k$ .  $G$ : Γεννήτρια -  $L$ : Φορτίο

Η αρχική προσέγγιση του προβλήματος γίνεται μέσω του μονογραμμικού σχεδίου του συστήματος, από το οποίο προκύπτουν τα δεδομένα προς επεξεργασία στο υπολογιστικό πρόγραμμα. Τα δεδομένα εισόδου αφορούν τους ζυγούς, τις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές.

Όπως προκύπτει και από το σχήμα 36, οι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν έναν τυχαίο κόμβο  $k$ , είναι η εξής:

- το μέτρο της τάσης  $V_k$
- η γωνία της φάσης  $\delta_k$
- η πραγματική ισχύς στο ζυγό  $P_k$ , και
- η άεργη ισχύς στο ζυγό  $Q_k$ .

Σε κάθε ζυγό, δυο από τα παραπάνω μεγέθη είναι γνωστά, αποτελούν δηλαδή δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα, ενώ τα άλλα δύο προκύπτουν μέσω υπολογισμών από το πρόγραμμα. Στην περίπτωση του συστήματος που απεικονίζει το σχήμα 36, η ισχύς του ζυγού  $k$  χωρίζεται ανάμεσα στη μεριά της παραγωγής και τη μεριά της κατανάλωσης. Έτσι, προκύπτει ότι:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk}$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (3.5)$$

Οι ζυγοί ομαδοποιούνται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

1. **ζυγούς αναφοράς:** Για κάθε σύστημα που αναλύεται από το πρόγραμμα προσομοίωσης, υπάρχει ένας μοναδικός ζυγός αναφοράς, ο οποίος συνήθως για λόγους ευκολίας αριθμείται ως ο ζυγός 1. Για το ζυγό αναφοράς δίνεται ως δεδομένο εισόδου η τάση  $V_1 \angle \delta_1 = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$ . Το πρόγραμμα ροής φορτίου υπολογίζει τα  $P_1$  και  $Q_1$ . Ο ζυγός αναφοράς συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία και ως **χαλαρός ζυγός** ή **ζυγός ταλάντωσης** [ 29 ].
2. **ζυγούς ισχύος:** Για τους ζυγούς ισχύος δεδομένα εισόδου αποτελούν τα  $P_k$  και  $Q_k$ . Το πρόγραμμα ροής φορτίου υπολογίζει το μέτρο του διανύσματος της τάσης  $V_k$  καθώς και τη γωνία αυτού  $\delta_k$  στο ζυγό. Οι ζυγοί ισχύος είναι οι πιο συνηθισμένοι στην ανάλυση ροής φορτίου. Ο ζυγός ισχύος συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία και ως **ζυγός φορτίου** ή **ζυγός PQ** [ 29 ].
3. **ζυγούς ρύθμισης τάσης:** Εδώ, τα δεδομένα εισόδου είναι τα  $P_k$  και  $V_k$ . Η άεργος ισχύς  $Q_k$  και η γωνία  $\delta_k$  του διανύσματος της τάσης υπολογίζονται από το κύκλωμα. Τέτοιου είδους

ζυγοί είναι συνήθως εκείνοι στους οποίους γίνεται χωρητική αντιστάθμιση (στρεφόμενοι πυκνωτές και συστοιχίες πυκνωτών). Ο ζυγός ρύθμισης τάσης συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία και ως *ζυγός παραγωγής ή ζυγός PV* [ 29 ].

Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με π-ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα, όπως αυτά στα σχήματα 3, 6 και 8. Η αναπαράσταση των μετασχηματιστών, γίνεται με κάποιο από τα μοντέλα που έχουν ήδη προταθεί στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, ανάλογα το είδος τους.

Για τις γραμμές μεταφοράς, δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα αποτελούν η εν σειρά αντίδραση  $Z'$  και η εγκάρσια αγωγιμότητα  $Y'$  του π-ισοδυνάμου κυκλώματος, οι εκατέρωθεν ζυγοί στους οποίους είναι συνδεδεμένη η γραμμή και η μέγιστη φαινομένη ισχύς. Ομοίως, για τους μετασχηματιστές δεδομένα εισόδου αποτελούν η εν σειρά αντίδραση  $Z$ , η εγκάρσια αγωγιμότητα  $Y$  του δευτερεύοντος κυκλώματος, οι ζυγοί που είναι συνδεδεμένοι με το μετασχηματιστή και η μέγιστη φαινομένη ισχύς.

Από τις εξισώσεις (3.3) και (3.4) προκύπτει ο πίνακας αγωγιμοτήτων  $Y$ , με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να γράψουμε την (3.2) από την οποία προκύπτουν οι εξισώσεις των ρευμάτων στους ζυγούς. Για τον  $k$  ζυγό, η  $k$ -οστη εξίσωση της (3.2) θα είναι:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (3.6)$$

Η φαινομένη ισχύς στο ζυγό  $k$  θα είναι:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (3.7)$$

Η επίλυση του προβλήματος της ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss – Seidel βασίζεται στη δημιουργία των εξισώσεων στους ζυγούς (3.6), όπου το ρεύμα  $I_k$  στον ζυγό  $k$  υπολογίζεται από την (3.7). Αντικαθιστώντας την (3.6) στην (3.7) προκύπτει η:

$$P_k + jQ_k = V_k [\sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n]^* \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.8)$$

Με τις παρακάτω αντικαταστάσεις,

$$V_n = V_n e^{j\delta_n} \quad (3.9)$$

$$Y_{kn} = Y_{kn} e^{j\theta_{kn}} = G_{kn} + jB_{kn} \quad k, n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.10)$$

η (3.8) γίνεται:

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})} \quad (3.11)$$

Χωρίζοντας το πραγματικό από το φανταστικό μέρος της παραπάνω εξίσωσης, έχουμε τις:

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (3.12)$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (3.13)$$

Στην επίλυση των δύο τελευταίων εξισώσεων, οι οποίες είναι μη γραμμικές, υπαισέρχεται η μέθοδος των Newton – Raphson.

### 3.3 Επαναληπτικές Μέθοδοι Επίλυσης

Γνωρίζοντας το πρόβλημα ροής φορτίου, όπως αυτό αναλύεται στην παράγραφο 3.2, προκύπτουν τα χαρακτηριστικά που πρέπει να ικανοποιεί η μέθοδος επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί από τα

διάφορα υπολογιστικά προγράμματα. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος επιτάσσει μια λύση που θα παρουσιάζει τα εξής:

- να μπορεί να χειριστεί μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις
- να μπορεί να χειριστεί συστήματα με μεγάλο αριθμό ζυγών
- να μην περιορίζεται σε συστήματα χωρίς απώλειες
- να έχει επαρκή ακρίβεια
- να είναι γρήγορη
- να μπορεί να χειρίζεται μιγαδικούς αριθμούς, εφόσον η τυπική εξίσωση ροής φορτίου (3.11) είναι μιγαδική.

Οι τρεις μέθοδοι που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι:

- η επαναληπτική μέθοδος **Gauss**
- η μέθοδος **Gauss - Seidel**
- η μέθοδος **Newton – Raphson**
- η **Επαναληπτική Ταχεία Αποξευγμένη(FDLF)** μέθοδος

Η μέθοδος Gauss είναι η απλούστερη από τις μεθόδους που προτείνονται, με αποτέλεσμα να μην απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Παρόλα αυτά, για την επίλυση του συστήματος με τη χρήση αυτής της μεθόδου, απαιτείται να τεθούν κάποιοι περιορισμοί, όπως όπως η επίλυση απουσία ζυγών ρύθμισης τάσης. Επειδή όμως η τεχνολογία των υπολογιστών έχει εξελιχθεί αρκετά από τότε που ξεκίνησε προσπάθεια της προσομοίωσης των ηλεκτρικών δικτύων, η μεγάλη ευκολία που προσφέρει υπολογιστικά η μέθοδος Gauss (αν και συνήθως απαιτεί μικρότερο αριθμό επαναλήψεων από τη μέθοδο Gauss – Seidel) δεν αποτελεί πλεονέκτημα. Αντιθέτως, οι περιορισμοί που δημιουργεί αποτελούν μεγάλο μειονέκτημα και η μέθοδος Gauss είναι πλέον ξεπερασμένη.

### 3.3.1 Η Μέθοδος Gauss – Seidel στη Ροή Φορτίου

Οι εξισώσεις των ζυγών  $\mathbf{I} = \mathbf{YV}$  είναι γραμμικές εξισώσεις, όμοιες με εκείνες που προκύπτουν από την επίλυση για  $\mathbf{y} = \mathbf{Ax}$ . Για την επίλυση των εξισώσεων αυτών είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το ρεύμα  $I_k$  στον εκάστοτε ζυγό. Όμως, για κανένα από τα παραπάνω είδη ζυγών που αναφέρθηκαν παραπάνω (αναφοράς, ισχύος και ρύθμισης τάσης) δε θεωρείται το ρεύμα ως δεδομένο εισόδου, και άρα θα πρέπει να υπολογιστεί. Για τον υπολογισμό του  $I_k$  χρησιμοποιείται ο τύπος

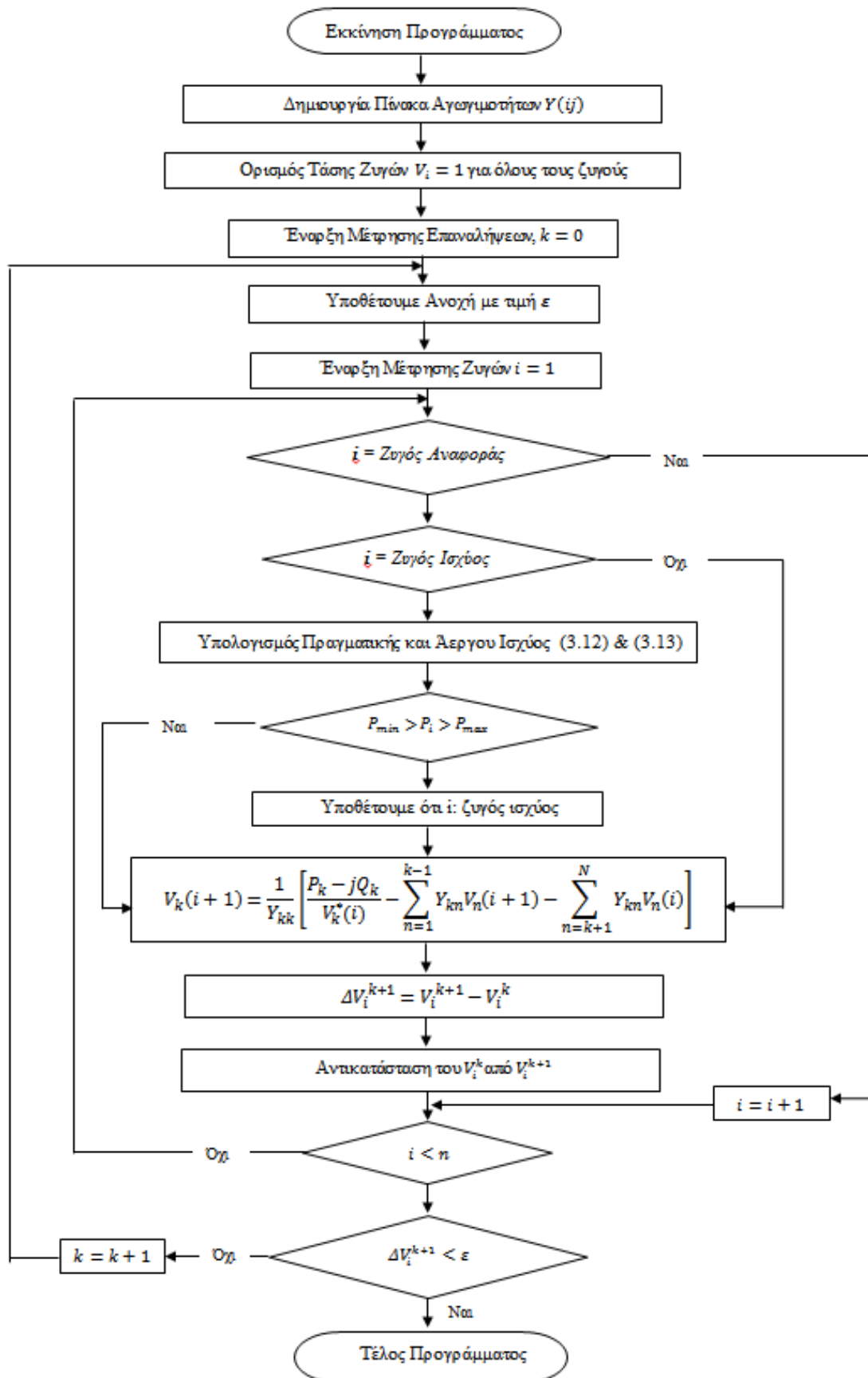
$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (3.14)$$

Από το γενικό τύπο επίλυσης για τη μέθοδο Gauss – Seidel για  $\mathbf{y} = \mathbf{Ax}$ , έχουμε:

$$x_k(i+1) = \frac{1}{A_{kk}} \left[ y_k - \sum_{n=1}^{k-1} A_{kn} x_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^N A_{kn} x_n(i) \right] \quad (3.15)$$

Ομοίως, για  $\mathbf{I} = \mathbf{YV}$ , ισχύει:

$$V_k(i+1) = \frac{1}{Y_{kk}} \left[ \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*(i)} - \sum_{n=1}^{k-1} Y_{kn} V_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^N Y_{kn} V_n(i) \right] \quad (3.16)$$



Σχήμα 37: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Επίλυσης Ροής Φορτίου βασισμένο στη μέθοδο Gauss – Seidel.

Η εξίσωση (3.16) μπορεί να εφαρμοστεί δύο φορές για κάθε επανάληψη στους ζυγούς ισχύος, αρχικά χρησιμοποιώντας το  $V_k^*(i)$  και μετά αντικαθιστώντας το με  $V_k^*(i+1)$  στο δεξί μέρος της ισότητας.

Για τους ζυγούς ρύθμισης της τάσης, η ισχύς απωλειών  $Q_k$  στο ζυγό είναι άγνωστη. Ο υπολογισμός της προκύπτει από τον τύπο:

$$Q_k = V_k(i) \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n(i) \sin(\delta_k(i) - \delta_n(i) - \theta_{kn}(i)) \quad (3.17)$$

Επιπλέον, ισχύει από την (3.5) ότι:

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk}$$

Αν η υπολογισθείσα τιμή για την ισχύ απωλειών του ζυγού  $k$  στη μεριά της παραγωγής  $Q_{Gk}$  δεν υπερβαίνει επιτρεπτά όρια, η ισχύς απωλειών του ζυγού  $Q_k$ , χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $V_k^*(i+1) = V_k(i+1) \sqrt{\delta_k(i+1)}$  στην (3.16). Έπειτα, το μέγεθος  $V_k(i+1)$  μετατρέπεται σε  $V_k$ , και αποτελεί δεδομένο εισόδου για το ζυγό ρύθμισης τάσης. Έτσι, η σχέση (3.16) στους ζυγούς ρύθμισης τάσης, χρησιμεύει μόνο στον υπολογισμό της γωνίας  $\delta_k(i+1)$ .

Αν η ισχύς απωλειών στη γεννήτρια υπερβαίνει την τιμή  $Q_{Gkmax}$  ή  $Q_{Gkmin}$ , για οποιαδήποτε επανάληψη, τότε ο ζυγός ρύθμισης τάσης αντιμετωπίζεται ως ζυγός ισχύος με την ισχύ απωλειών της γεννήτριας στο ζυγό να ορίζεται στην οριακή της τιμή. Υπό αυτές τις συνθήκες, η διάταξη ελέγχου της τάσης (στρεφόμενοι πυκνωτές, συστοιχίες πυκνωτών, κ.ο.κ.) δε δύναται να διατηρήσει την τάση  $V_k$  στο ζυγό όπως έχει οριστεί από τα δεδομένα εισόδου και το πρόγραμμα υπολογίζει εκ νέου την τιμή  $V_k$ .

Για το ζυγό αναφοράς, που έχει δηλωθεί ως ζυγός 1, η τάση  $V_1$  και η γωνία  $\delta_1$  αποτελούν δεδομένα εισόδου. Έτσι, για το ζυγό αναφοράς δε χρειάζεται καμία επαναληπτική διαδικασία και τα  $P_1$  και  $Q_1$  υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.12) και (3.13).

### 3.3.2 Η Μέθοδος Newton - Raphson στη Ροή Φορτίου

Οι εξισώσεις (3.12) και (3.13) που αφορούν την πραγματική και την άεργο ισχύ στο ζυγό  $k$  είναι εξισώσεις μη γραμμικές, της μορφής  $y = f(x)$ , και ως εκ τούτου επιλύονται με τη χρήση της μεθόδου Newton - Raphson. Ορίζουμε τους μονοδιάστατους πίνακες  $x$ ,  $y$  και  $f(x)$  ως εξής:

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2 \\ \vdots \\ P_N \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} \quad f(x) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2(x) \\ \vdots \\ P_N(x) \\ Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_N(x) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

όπου τα μεγέθη της τάσης  $V$ , της πραγματικής ισχύος  $P$  και της αέργου ισχύος  $Q$  είναι εκφρασμένες στο per unit σύστημα ενώ η φασική γωνία  $\delta$  είναι δοσμένη σε ακτίνια. Στις εξισώσεις (3.18) παραλείπεται ο ζυγός αναφοράς, εφόσον τα δεδομένα του είναι ήδη γνωστά. Οι εξισώσεις (3.12) και (3.13) είναι της μορφής:

$$y_k = P_k = P_k(x) = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (3.19)$$

$$y_{k+N} = Q_k = Q_k(x) = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (3.20)$$

$$k = 2, 3, \dots, N$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας θα είναι της μορφής:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots & & & \vdots & & \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots & & & \vdots & & \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Ο παραπάνω πίνακας χωρίζεται σε τέσσερις ιακωβιανούς υποπίνακες:

$$J = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}, \text{ όπου}$$

$$J1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & & \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{bmatrix} \quad J2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots & & \\ \frac{\partial P_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \end{bmatrix} \quad J3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & & \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} \end{bmatrix} \quad J4 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots & & \\ \frac{\partial Q_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{bmatrix}$$

Παρακάτω δίνονται οι μερικές παράγωγοι που προκύπτουν από τις (3.19) και (3.20):

$$J1_{kn} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = V_k Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

$$J2_{kn} = \frac{\partial P_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

$$J3_{kn} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -V_k Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

$$J4_{kn} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{για } n \neq k,$$

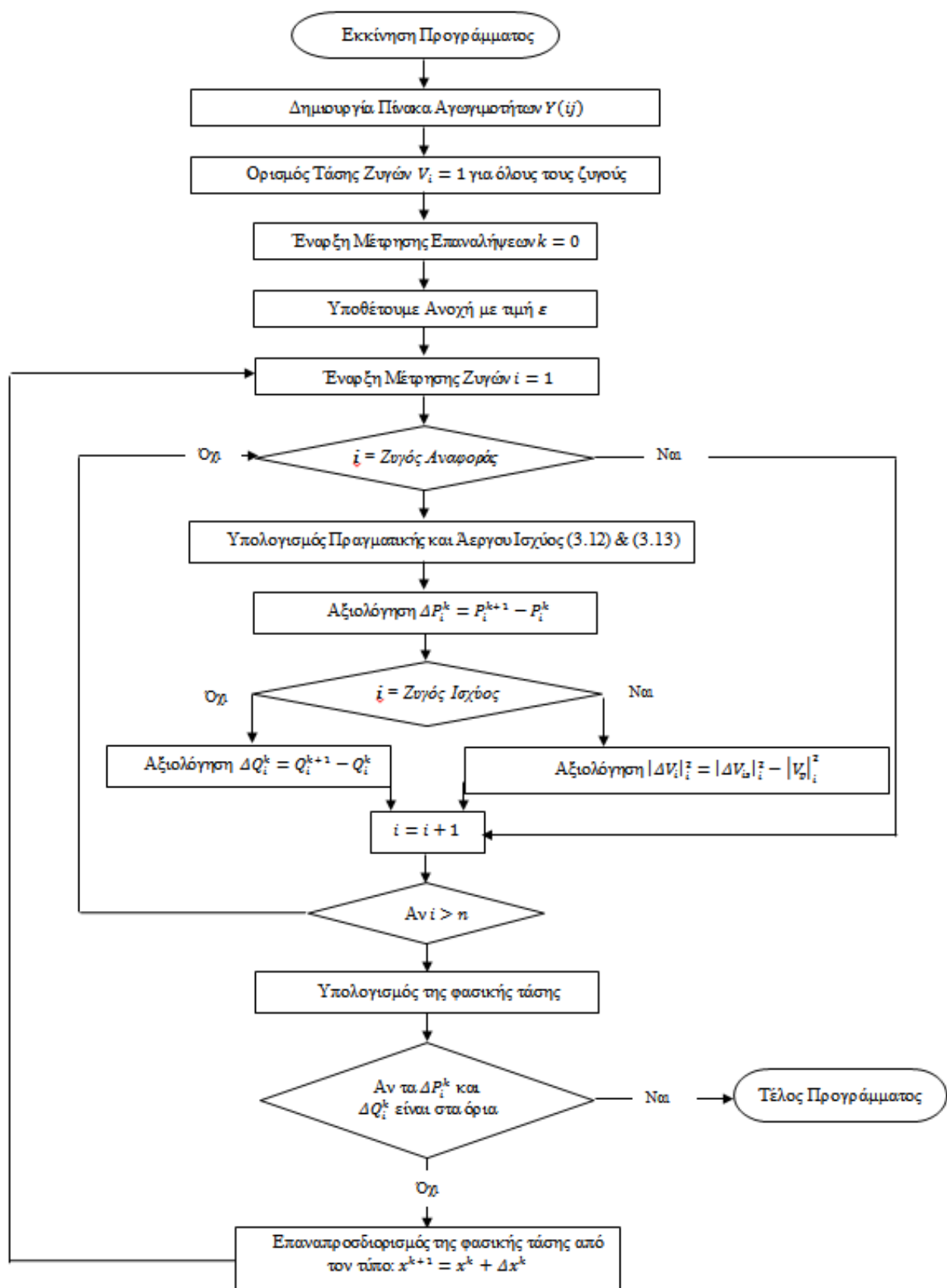
$$J2_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

$$J4_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{για } n = k,$$

και

$$J1_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

$J3_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$ , για  $n = k$  εκτός από τα στοιχεία εντός του πίνακα.



Σχήμα 38: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Επίλυσης Ροής Φορτίου βασισμένο στη μέθοδο Newton – Raphson..



Η μέθοδος Newton – Raphson, ξεκινώντας με  $x(i) = \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix}$ , για την  $i$ -οστή επανάληψη, εφαρμόζεται σε τέσσερα βήματα:

**ΒΗΜΑ 1** Χρησιμοποιούμε τις (3.19) και (3.20) για να υπολογιστεί ο πίνακας

$$\Delta y(i) = \begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - P[x(i)] \\ Q - Q[x(i)] \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

**ΒΗΜΑ 2** Με τη βοήθεια των μερικών παραγώγων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας.

**ΒΗΜΑ 3** Με τη χρήση της απαλοιφής Gauss και την προς τα πίσω αντικατάσταση επιλύεται η παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} J1(i) & J2(i) \\ J3(i) & J4(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

**ΒΗΜΑ 4** Υπολογίζεται η

$$x(i+1) = \begin{bmatrix} \delta(i+1) \\ V(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

### 3.3.3 Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδος (FDLF)

Ο αλγόριθμος αυτός προκύπτει από τη μέθοδο Newton-Raphson κάνοντας ορισμένες παραδεκτές απλουστεύσεις.

Αρχικά, μπορούν να αγνοηθούν οι ασθενείς συνδέσεις που υπάρχουν αφ' ενός μεταξύ της ενεργού ισχύος  $P$  και του μέτρου της τάσης  $V$  και αφ' ετέρου μεταξύ της άεργου ισχύος  $Q$  και της γωνίας της τάσης  $\delta$ . Με τον τρόπο αυτό αγνοούνται οι ιακωβιανοί υποπίνακες  $[J2]$ ,  $[J3]$ .

Στη συνέχεια, μπορούν να γίνουν οι εξής παραδοχές:

$$\cos(\delta_i - \delta_j) \approx 1 \quad (3.25)$$

$$G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) \ll B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.26)$$

$$Q_i \ll B_{ij} \cdot (V_i)^2 \quad (3.27)$$

Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις και έπειτα από κατάλληλες προσαρμογές και πράξεις προκύπτει το προς επίλυση σύστημα εξισώσεων:

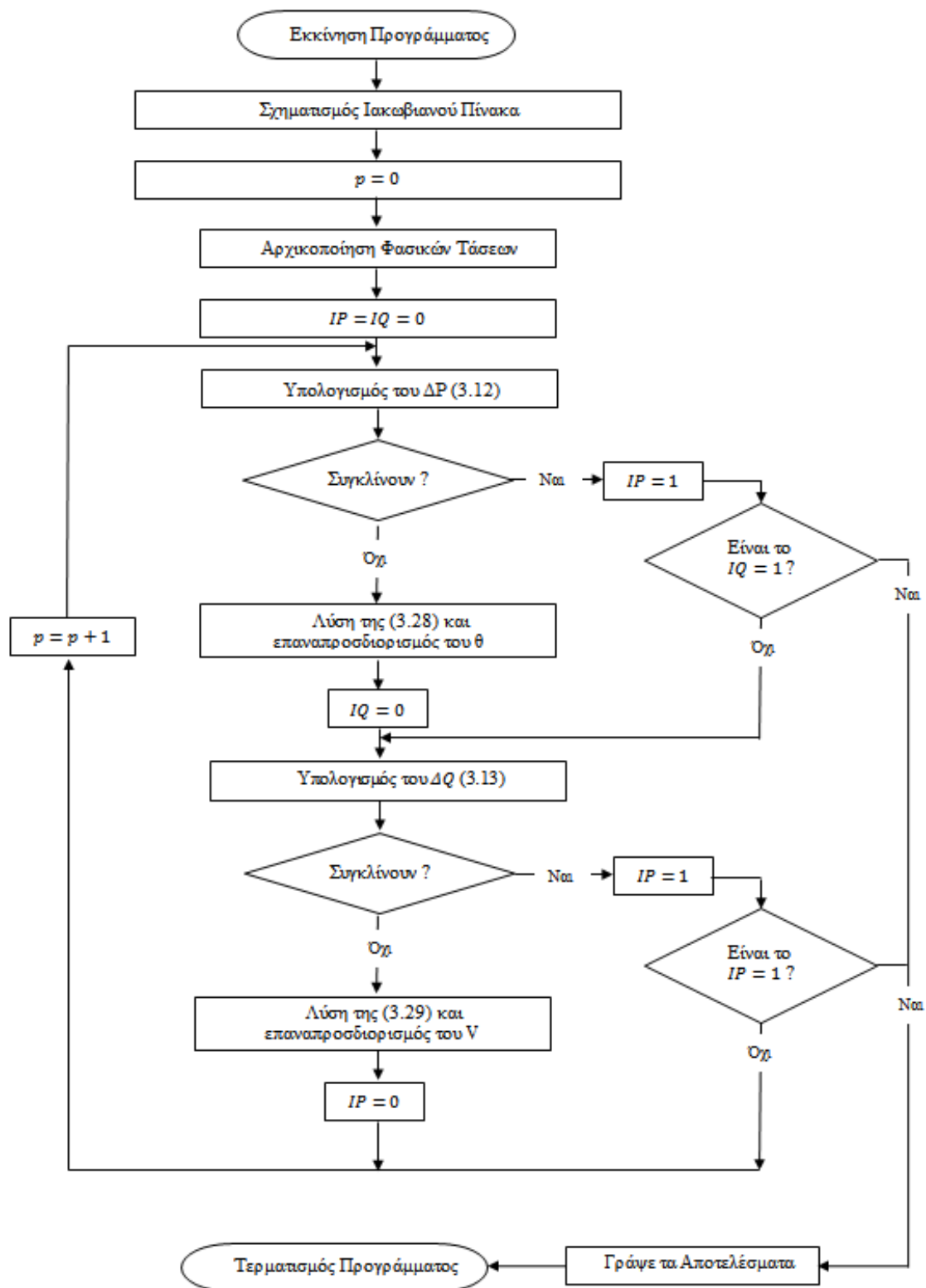
$$\left[ \frac{\Delta P^{(n)}}{V^{(n)}} \right] = -[B'] \cdot [\Delta \delta^{(n+1)}] \Rightarrow [\delta^{(n+1)}] = [\delta^{(n)}] - [B']^{-1} \cdot \left[ \frac{\Delta P^{(n)}}{V^{(n)}} \right] \quad (3.28)$$

$$\left[ \frac{\Delta Q^{(n)}}{V^{(n)}} \right] = -[B^n] \cdot [\Delta V^{(n+1)}] \Rightarrow [V^{(n+1)}] = [V^{(n)}] - [B^n]^{-1} \cdot \left[ \frac{\Delta Q^{(n)}}{V^{(n)}} \right] \quad (3.29)$$

όπου:

$$[B^n] = [B_{ij}], i, j \in \{Zυγοί PV \text{ και } PQ\} \text{ με διαστάσεις πίνακα } (n-1) \times (n-1)$$

$[B^n] = [B_{ij}], i, j \in \{\text{Ζυγοί } PQ\}$  με διαστάσεις πίνακα  $(m) \times (m)$



Σχήμα 39: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Επίλυσης Ροής Φορτίου βασισμένο στη Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδο.

## *Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>*

# *Προσομοίωση του Συστήματος Μεταφοράς της Κρήτης*

Στην παρούσα εργασία, έχοντας ως στόχο να γίνουν εμφανή τα οφέλη που προκύπτουν από την προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου καθώς και να γίνει σύγκριση ανάμεσα στις μεθόδους προσομοίωσης, ήταν απαραίτητο να επιλυθεί η ροή φορτίου σε ένα δίκτυο, κατά προτίμηση υπαρκτό, με ένα εμπορικό πακέτο προσομοίωσης.

Το σύστημα της Κρήτης, κυρίως λόγω της τοπολογίας του, καθίσταται ιδανικό για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τις μεθόδους επίλυσης. Αρχικά, πρόκειται για το δίκτυο ενός νησιού, άρα είναι απομονωμένο από το διασυνδεδεμένο σύστημα της ηπειρωτικής Ελλάδας, οπότε δεν συναντάται κάποια σοβαρή δυσκολία στη μοντελοποίηση και το σχεδιασμό του. Επιπλέον, το μέγεθος της έκτασής του είναι τέτοιο, εφόσον πρόκειται για ένα μεγάλο νησί με τουρισμό και πρωτογενή παραγωγή - άρα και κατανάλωση ενέργειας, που να επιτρέπει την εμφάνιση των εκάστοτε αδυναμιών στους υπό εξέταση αλγόριθμους. Ταυτόχρονα, παρουσιάζει ικανοποιητική εναλλαγή ανάμεσα σε θερμικούς σταθμούς παραγωγής και ΑΠΕ, με αναλογία μάλιστα πολύ κοντινή σε αυτή που στοχεύει να πετύχει η Ευρώπη, και κατ' επέκταση η Ελλάδα μέχρι το 2020.

Στο σχήμα 41 απεικονίζεται το σύστημα μεταφοράς της Κρήτης στην παρούσα μορφή του. Η πράσινη διαγράμμιση παρουσιάζει τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (150 kV), τα τρίγωνα φανερώνουν την ύπαρξη υποσταθμών διανομής YT/MT ή υποσταθμών ανύψωσης MT/YT για την εξυπηρέτηση κυρίως αιολικών, αλλά και φωτοβολταϊκών παραγωγών, και τα σκιασμένα τετράγωνα αντικατοπτρίζουν τους μεγάλους θερμικούς σταθμούς παραγωγής που υπάρχουν στο νησί.

Σύμφωνα με το τελευταίο πλάνο της Μελέτης Ανάπτυξης του Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ) από τον ΑΔΜΗΕ, το οποίο έχει βάθος σχεδιασμού μια δεκαετία, προκύπτει το σχήμα 42 που παρουσιάζει το σύστημα μεταφοράς της Κρήτης έπειτα από τη διασύνδεσή του με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς. Στο πλάνο της διασύνδεσης του νησιού έχουν επικρατήσει τρία σενάρια:

- Σενάριο Α:** Ισχύς ΑΠΕ 1.000 MW (εκ των οποίων 800 MW Α/Π) τα οποία εγκαθίστανται μέχρι το 2025.
- Σενάριο Β:** Ισχύς ΑΠΕ 1.535 MW (εκ των οποίων 1.200 MW Α/Π) τα οποία εγκαθίστανται μέχρι το 2025.
- Σενάριο Γ:** Ισχύς ΑΠΕ 2.135 MW (εκ των οποίων 1.600 MW Α/Π) τα οποία εγκαθίστανται μέχρι το 2025.

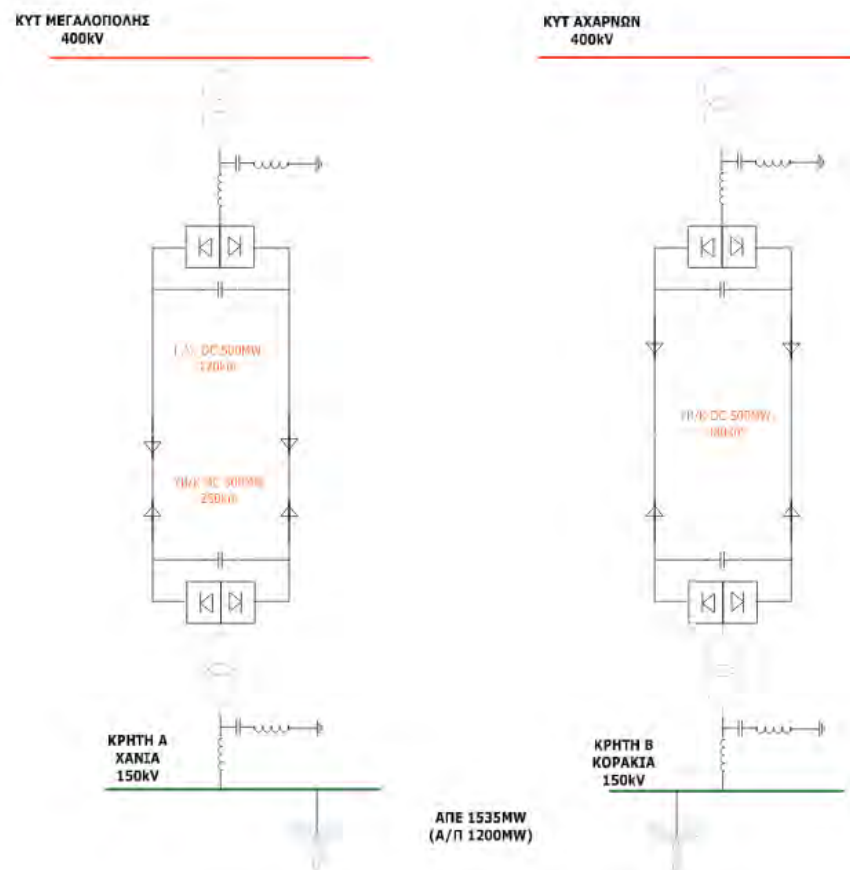
Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η διασύνδεση της Κρήτης θα γίνει είτε μέσω του KYT της Μεγαλόπολης στην Πελοπόννησο είτε μέσω του KYT Κουμουνδούρου στην, μέσω υποθαλάσσιας διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος. Στην τρίτη περίπτωση, λόγω της αυξημένης εγκατεστημένης ισχύος στο νησί, και άρα τη μεταφορά επιπλέον ενέργειας από το υψηλό αιολικό και ηλιακό δυναμικό του νησιού, είναι προτιμότερη η διασύνδεση του συστήματος από δύο διαφορετικά σημεία για λόγους

εξισορρόπησης του συστήματος. Με δεδομένο λοιπόν ότι η μωβ διαγράμμιση αποτυπώνει τις εναέριες γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος, γίνεται προφανές ότι το σχήμα 42 αφορά το μελλοντικό σύστημα της Κρήτης σύμφωνα με το Σενάριο Γ του ΜΑΣΜ 2014-2023.

Το σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης, σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της ΔΕΗ, έχει σήμερα τρεις κύριους σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας:

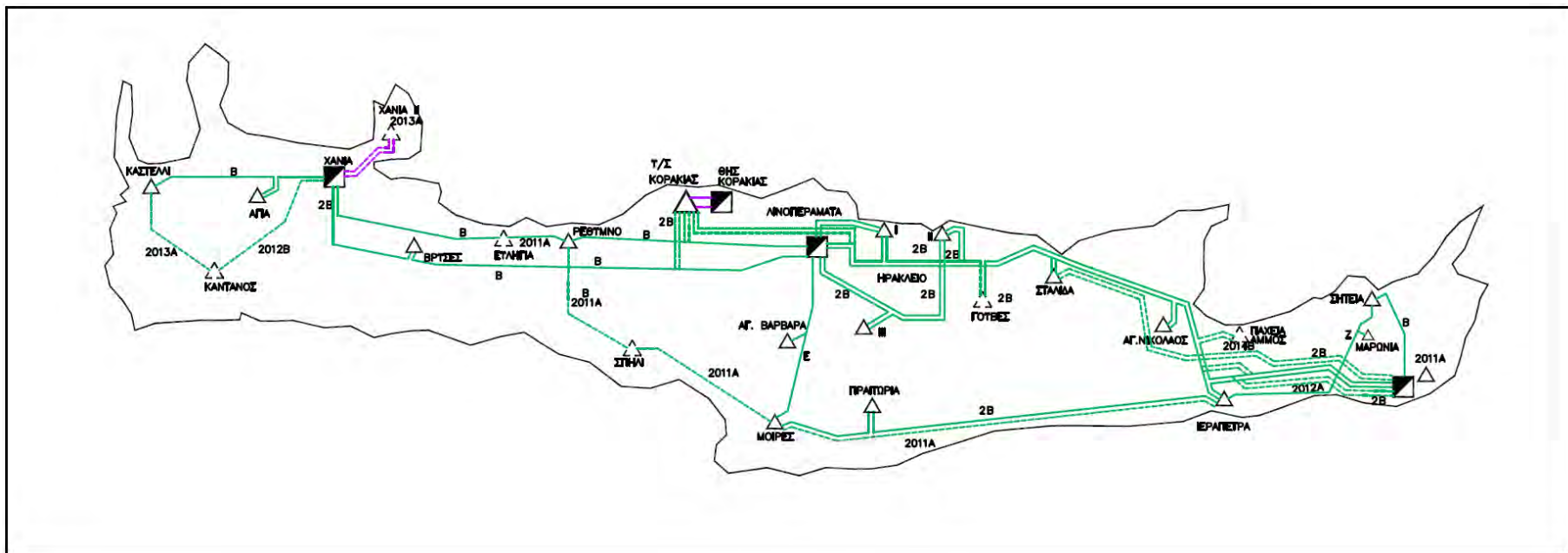
- **Λινοπεράματα**, στο νομό Ηρακλείου, με 6 ατμομονάδες, 4 μονάδες diesel και 5 αεριοστρόβιλους και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 265 MW.
- **Ξυλοκαμάρα**, στο νομό Χανίων, με 5 αεριοστρόβιλους και 1 συνδυασμένο κύκλο και εγκατεστημένη ισχύ 348 MW.
- **Αθρινόλακκος**, στο νομό Λασιθίου με 4 μονάδες diesel και 2 ατμομονάδες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ τα 200 MW, ενώ έχει ήδη δρομολογηθεί επέκταση με 2 νέες μονάδες diesel των 100 MW.

Συνεπώς, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο νησί φθάνει τα περίπου 800 MW από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, ενώ παράλληλα εκκρεμεί το ζήτημα της εγκατάστασης ενός εργοστασίου παραγωγής στη θέση Κορακιά. Πέρα όμως από την παραγωγή μέσω θερμικών, ένα σημαντικό μερίδιο της παραγωγής καλύπτεται και από αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, η εγκατεστημένη ισχύς των οποίων είναι στα 280 MW και 136 MW αντίστοιχα. [32]



Σχήμα 40: Απλοποιημένο Μονογραμμικό της Διασύνδεσης της Κρήτης σύμφωνα με το Σενάριο Β.





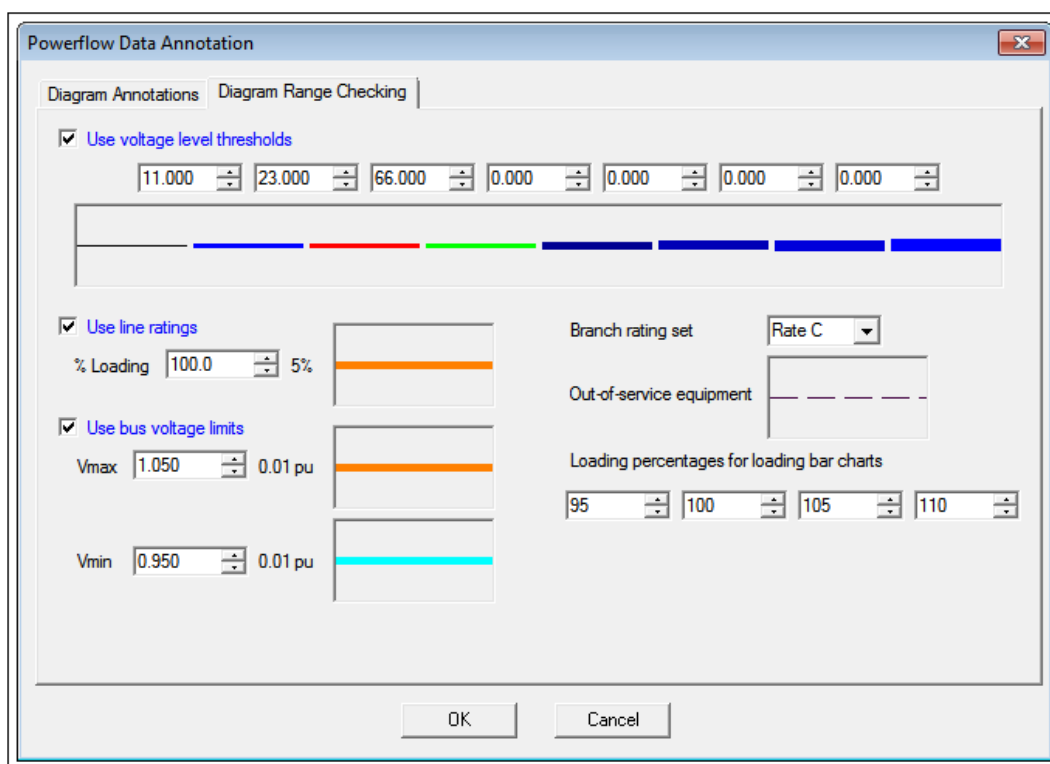
Σχήμα 42:Μελλοντική Ανάπτυξη του Συστήματος Μεταφοράς της Κρήτης.

## 5.1 Η Προσομοίωση

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερο είναι το υπό εξέταση σύστημα, η δυσκολία επίλυσής του αυξάνει. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, για την ακριβέστερη δοκιμασία των μεθόδων επίλυσης, η προσομοίωση έγινε στο δίκτυο υψηλής και μέσης τάσης της Κρήτης (σχήμα 50).

Για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε χρωματική αναπαράσταση για διάφορες καταστάσεις του δικτύου (υπερφορτίσεις, υπερτάσεις κλπ) όπως φαίνεται στα σχήματα 43 και 44, ενώ τα μεγέθη που αναφέρονται επάνω στο μονογραμμικό σχέδιο φαίνονται στα σχήματα 45 και 46. Στο σχήμα 47 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου, όπως αναφέρονται στο αρχείο τύπου \*.raw.

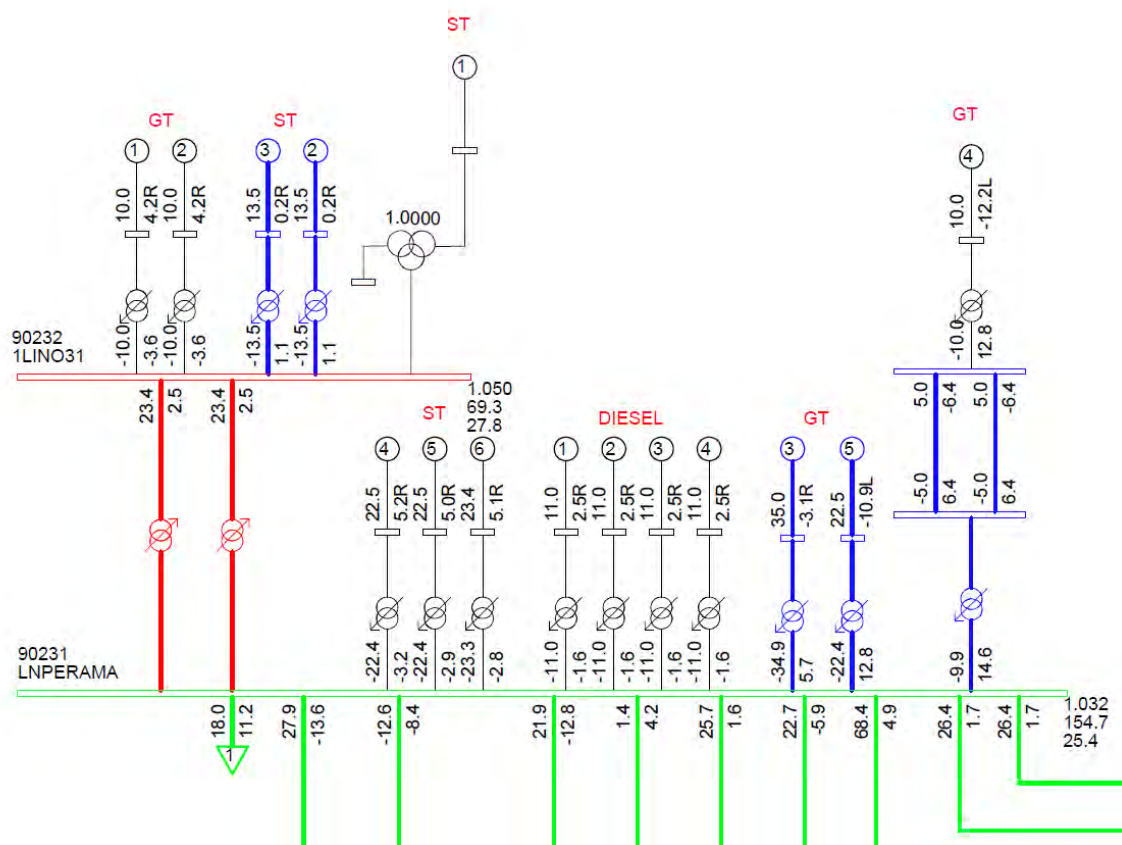
Η προσομοίωση του δικτύου έγινε με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν θεωρητικά σε προηγούμενα κεφάλαια. Στις επόμενες παραγράφους φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε μια μέθοδο ξεχωριστά.



Σχήμα 43: Χρωματική Αναπαράσταση σχετικά με την Τάση και την Ισχύ στο μονογραμμικό διάγραμμα.

Bus - VOLTAGE (KV/PU)/ANGLE	
Branch - MW/MVAR	
Equipment - MW/MVAR	
100.0%	RATEC
1.0500V	0.9500V
KV: <=11.000	<=23.000 <=66.000 >66.000

Σχήμα 44: Αναφορά σχετικά με τη Χρωματική Αναπαράσταση για την Τάση και την Ισχύ στο υπόμνημα του μονογραμμικού διαγράμματος.



Σχήμα 42: Λεπτομέρεια του Μονογραμμικού. Ετικέτες με τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου.

Powerflow Data Annotation

Diagram Annotations | Diagram Range Checking

**Branch annotation**

- ☒ MW/MVAR Flow
- ☐ MVA Flow
- ☐ MVA/% Rating
- ☐ Amps/PU Current
- ☐ MW/% Rating
- ☐ Amps/% Rating
- ☐ None

**Bus annotation**

Identification

- ☒ Numbers
- ☒ Names

Voltage

- ☒ Magnitude (PU)
- ☒ Magnitude (KV)
- ☒ Angle (Degrees)

**Equipment annotation**

- ☒ MW/MVAR
- ☐ MVA
- ☐ None

**Flow direction**

- ☒ Signs
- ☐ Arrows

**Loading basis for % Rating**

- ☐ Current for transformers and non-transformer branches
- ☒ MVA for transformers and non-transformer branches
- ☐ MVA for transformers, Current for non-transformer branches

Diagram title: SYSTEM OF CRETE

OK Cancel

Σχήμα 43: Τα μεγέθη που εμφανίζονται στις ετικέτες των στοιχείων.



PSS/E - [CRETE\_750MW\_NO RES\_CURRENT.raw - Network data - Buses]

File Edit View Diagram Power Flow Fault QPF Trans Access Subsystem Misc I/O Control Tools Window Help

100%

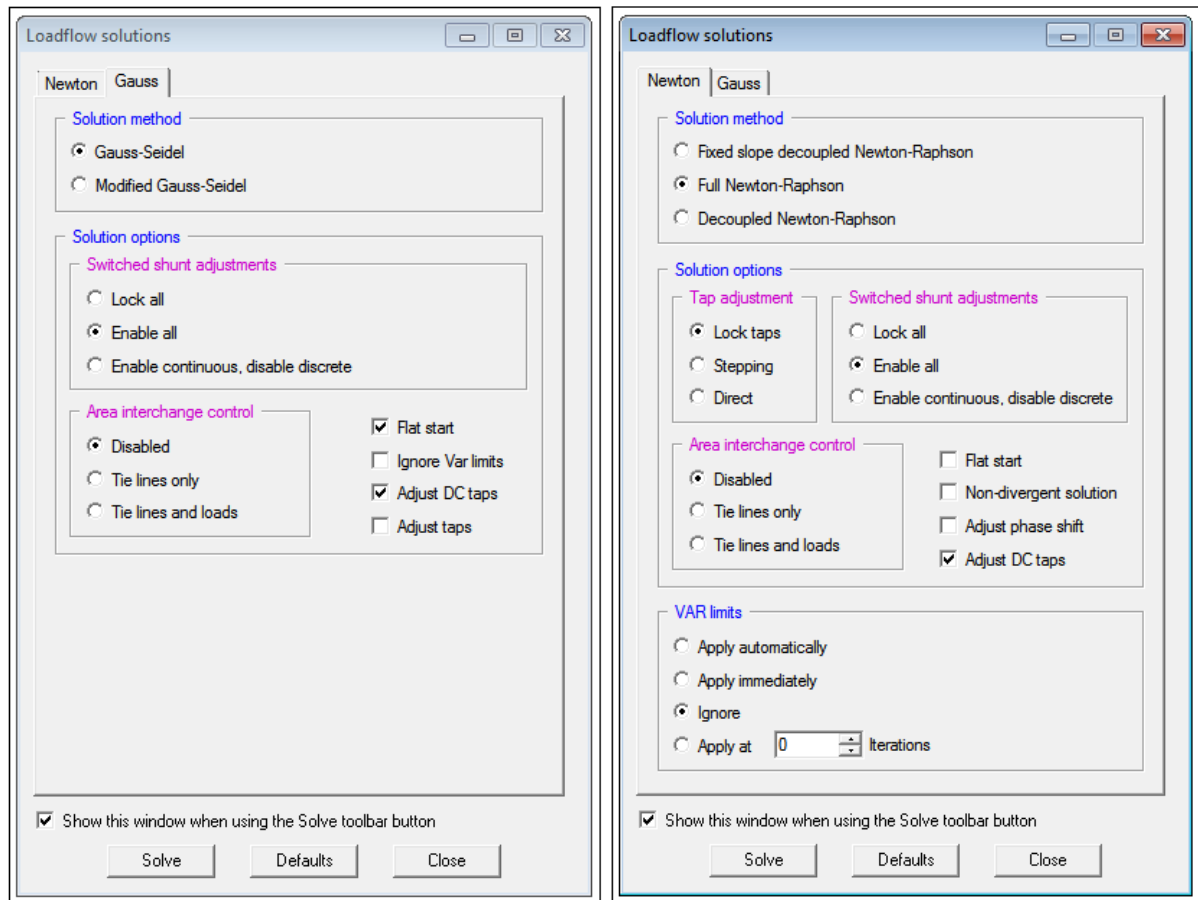
Bus Number	Bus Name	Base kV	Area Number/Name	Zone Number/Name	Owner Number/Name	Code	G-Shunt (MW)	B-Shunt (MVAR)	Voltage (pu)	Angle (deg)	G-Neg (pu)	B-Neg (pu)	G-Zero (pu)	B-Zero (pu)
131	KASTE31	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0463	-0.84				
151	KASTE51	21.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	0.9834	-36.39				
152	KASTE52	21.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	0.9834	-36.39				
231	CHAN31	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0463	-0.05				
232	CHAN32	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	-2	0.00	0.00	1.0463	-0.05				
233	CHAN33	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0463	-0.05				
234	CHAN34	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0463	-0.05				
235	CHAN35	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0463	-0.05				
251	CHAN51	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0237	-35.12				
252	CHAN52	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0237	-35.12				
253	CHAN53	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0237	-35.12				
254	CHAN54	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
256	CHAN56	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
257	CHAN57	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
258	CHAN58	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
259	CHAN59	15.8	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0229	-34.26				
261	CHAN61	11.5	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
262	CHAN62	11.5	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
266	CHAN66	11.5	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
267	CHAN67	11.5	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
270	CHAN70	0.4	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
271	CHAN71	0.4	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
272	CHAN72	0.4	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
273	CHAN73	0.4	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
276	CHAN76	0.4	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
277	CHAN77	0.4	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
278	CHAN78	6.3	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
279	CHAN79	6.3	110 WEST	139 AUXILIAR	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
291	CHAN91	6.3	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
292	CHAN92	11.5	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	2	0.00	0.00	1.0000	-25.73				
293	CHAN93	11.5	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	2	0.00	0.00	1.0000	-25.75				
294	CHAN94	11.0	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
295	CHAN95	11.0	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	4	0.00	0.00	1.0000	0.00				
296	CHAN96	11.5	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	2	0.00	0.00	1.0000	-25.04				
297	CHAN97	11.5	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	2	0.00	0.00	1.0000	-25.04				
298	CHAN98	11.5	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	2	0.00	0.00	1.0000	-24.63				
299	CHAN99	11.5	110 WEST	132 OIL	131 PPC-THER	2	0.00	0.00	1.0000	-26.09				
331	RETH31	150.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	1.0202	-1.18				
351	RETH51	21.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	0.9836	-43.06				
352	RETH52	21.0	110 WEST	120 DISTRIB.	120 PPC-DIST	1	0.00	0.00	0.9836	-43.06				

Area Interchanges Buses Branches FACTS Devices Impedance tables Inter-area Transfers Loads Machines Multi-section lines Mutual Couplings Owners Plants Switched Shunts 2 Winding Trans Zones DC Lines VSC DC Lines Multi-Term DC Lines 3 Winding Trans

Σχήμα 47: Αρχείο τύπου \*.raw στο PSSE. Μονογραμμικό του Παρόντος Συστήματος της Κρήτης. Οι διακεκομμένες γραμμές αφορούν μελλοντικές επεκτάσεις του συστήματος.







Σχήμα 45: Οι επιλογές για την επίλυση ροής φορτίου με τους 2 δυο αλγορίθμους.

Στην πρώτη προσπάθεια επίλυσης του συστήματος για κάθε μέθοδο επίλυσης είναι πάντα ενεργοποιημένη η επιλογή “flat start”, ώστε η επίλυση να γίνεται από την αρχική κατάσταση του συστήματος.

### 5.1.1 Προσομοίωση με τη Μέθοδο Gauss - Seidel

#### 1<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAV/TOL	X-----	AT BUS	-----X	REAL(DELTAV)	IMAG(DELTAV)
1	10783.005	351	[RETHI51	21.000]	-0.3858E+00	-0.1007E+01
2	6332.750	1451	[MARON51	21.000]	-0.2055E+00	-0.5990E+00
3	4573.292	4651	[PAMMO51	20.000]	0.1246E+00	0.4400E+00
4	2720.042	3251	[PLAST51	21.000]	0.7499E-01	0.2615E+00
5	1792.422	3652	[ENVIT52	15.750]	0.6341E-01	0.1677E+00
6	1185.197	1791	[OASIT91	0.6900]	-0.1899E-01	0.1170E+00
7	1127.113	3291	[PLAST91	0.6900]	0.3304E-01	-0.1078E+00
8	779.288	3251	[PLAST51	21.000]	-0.3782E-01	-0.6813E-01
9	659.350	1691	[2TOPL91	0.6900]	0.6531E-01	-0.9025E-02
10	462.946	1691	[2TOPL91	0.6900]	0.1616E-01	-0.4338E-01
11	367.009	551	[2LINO51	20.000]	-0.2287E-01	-0.2870E-01
12	341.725	551	[2LINO51	20.000]	-0.1987E-01	-0.2781E-01
13	321.033	1791	[OASIT91	0.6900]	-0.3145E-01	0.6431E-02
14	293.331	551	[2LINO51	20.000]	-0.1408E-01	-0.2573E-01
15	271.186	551	[2LINO51	20.000]	-0.1135E-01	-0.2463E-01
16	250.883	551	[2LINO51	20.000]	-0.8766E-02	-0.2351E-01
17	232.650	551	[2LINO51	20.000]	-0.6345E-02	-0.2238E-01

18	216.596	551	[2LINO51	20.000]	-0.4096E-02	-0.2127E-01
19	202.693	551	[2LINO51	20.000]	-0.2028E-02	-0.2017E-01
20	190.789	551	[2LINO51	20.000]	-0.1493E-03	-0.1908E-01
21	180.652	551	[2LINO51	20.000]	0.1539E-02	-0.1800E-01
22	172.003	551	[2LINO51	20.000]	0.3041E-02	-0.1693E-01
23	164.565	551	[2LINO51	20.000]	0.4362E-02	-0.1587E-01
24	158.067	551	[2LINO51	20.000]	0.5510E-02	-0.1482E-01
25	152.278	551	[2LINO51	20.000]	0.6495E-02	-0.1377E-01
26	147.002	551	[2LINO51	20.000]	0.7328E-02	-0.1274E-01
27	142.082	551	[2LINO51	20.000]	0.8018E-02	-0.1173E-01
28	137.399	551	[2LINO51	20.000]	0.8576E-02	-0.1074E-01
29	132.860	551	[2LINO51	20.000]	0.9012E-02	-0.9762E-02
30	128.409	551	[2LINO51	20.000]	0.9337E-02	-0.8815E-02
31	124.001	551	[2LINO51	20.000]	0.9560E-02	-0.7898E-02
32	119.614	551	[2LINO51	20.000]	0.9690E-02	-0.7013E-02
33	115.230	551	[2LINO51	20.000]	0.9736E-02	-0.6163E-02
34	110.847	551	[2LINO51	20.000]	0.9707E-02	-0.5351E-02
35	106.466	551	[2LINO51	20.000]	0.9611E-02	-0.4579E-02
36	102.093	551	[2LINO51	20.000]	0.9456E-02	-0.3849E-02
37	97.736	551	[2LINO51	20.000]	0.9248E-02	-0.3162E-02
38	93.403	551	[2LINO51	20.000]	0.8994E-02	-0.2520E-02
39	89.108	551	[2LINO51	20.000]	0.8701E-02	-0.1921E-02
40	84.862	551	[2LINO51	20.000]	0.8375E-02	-0.1368E-02
41	80.674	551	[2LINO51	20.000]	0.8022E-02	-0.8594E-03
42	76.554	551	[2LINO51	20.000]	0.7645E-02	-0.3944E-03
43	72.518	551	[2LINO51	20.000]	0.7252E-02	0.2661E-04
44	68.570	551	[2LINO51	20.000]	0.6845E-02	0.4053E-03
45	64.720	551	[2LINO51	20.000]	0.6429E-02	0.7427E-03
46	60.980	551	[2LINO51	20.000]	0.6009E-02	0.1040E-02
47	57.353	551	[2LINO51	20.000]	0.5586E-02	0.1300E-02
48	53.846	551	[2LINO51	20.000]	0.5165E-02	0.1523E-02
49	50.469	551	[2LINO51	20.000]	0.4748E-02	0.1711E-02
50	47.224	551	[2LINO51	20.000]	0.4338E-02	0.1867E-02
51	44.116	551	[2LINO51	20.000]	0.3936E-02	0.1992E-02
52	41.149	551	[2LINO51	20.000]	0.3545E-02	0.2089E-02
53	38.329	551	[2LINO51	20.000]	0.3168E-02	0.2158E-02
54	35.658	551	[2LINO51	20.000]	0.2803E-02	0.2204E-02
55	33.138	551	[2LINO51	20.000]	0.2454E-02	0.2227E-02
56	30.773	551	[2LINO51	20.000]	0.2121E-02	0.2229E-02
57	28.561	551	[2LINO51	20.000]	0.1805E-02	0.2213E-02
58	26.506	551	[2LINO51	20.000]	0.1507E-02	0.2181E-02
59	24.608	551	[2LINO51	20.000]	0.1226E-02	0.2134E-02
60	22.864	551	[2LINO51	20.000]	0.9632E-03	0.2074E-02
61	21.274	551	[2LINO51	20.000]	0.7188E-03	0.2002E-02
62	19.839	551	[2LINO51	20.000]	0.4927E-03	0.1922E-02
63	18.551	551	[2LINO51	20.000]	0.2844E-03	0.1833E-02
64	17.408	551	[2LINO51	20.000]	0.9375E-04	0.1738E-02
65	16.400	551	[2LINO51	20.000]	-0.7935E-04	0.1638E-02
66	15.522	551	[2LINO51	20.000]	-0.2356E-03	0.1534E-02
67	14.760	551	[2LINO51	20.000]	-0.3754E-03	0.1427E-02
68	14.108	551	[2LINO51	20.000]	-0.4993E-03	0.1320E-02
69	13.546	551	[2LINO51	20.000]	-0.6081E-03	0.1210E-02
70	13.070	551	[2LINO51	20.000]	-0.7026E-03	0.1102E-02
71	12.660	551	[2LINO51	20.000]	-0.7832E-03	0.9947E-03
72	12.302	551	[2LINO51	20.000]	-0.8506E-03	0.8888E-03
73	11.991	551	[2LINO51	20.000]	-0.9059E-03	0.7855E-03
74	11.712	551	[2LINO51	20.000]	-0.9497E-03	0.6854E-03
75	11.455	551	[2LINO51	20.000]	-0.9829E-03	0.5884E-03
76	11.214	551	[2LINO51	20.000]	-0.1006E-02	0.4952E-03
77	10.981	551	[2LINO51	20.000]	-0.1020E-02	0.4064E-03
78	10.754	551	[2LINO51	20.000]	-0.1026E-02	0.3222E-03
79	10.526	551	[2LINO51	20.000]	-0.1024E-02	0.2423E-03
80	10.293	551	[2LINO51	20.000]	-0.1016E-02	0.1672E-03
81	10.057	551	[2LINO51	20.000]	-0.1001E-02	0.9718E-04
82	9.815	551	[2LINO51	20.000]	-0.9809E-03	0.3195E-04
83	9.564	551	[2LINO51	20.000]	-0.9560E-03	-0.2832E-04
84	9.306	551	[2LINO51	20.000]	-0.9269E-03	-0.8345E-04



85	9.041	551	[2LINO51	20.000]	-0.8942E-03	-0.1337E-03
86	8.772	551	[2LINO51	20.000]	-0.8587E-03	-0.1793E-03
87	8.495	551	[2LINO51	20.000]	-0.8204E-03	-0.2203E-03
88	8.219	551	[2LINO51	20.000]	-0.7808E-03	-0.2567E-03
89	7.938	551	[2LINO51	20.000]	-0.7396E-03	-0.2883E-03
90	7.655	551	[2LINO51	20.000]	-0.6972E-03	-0.3160E-03
91	7.372	551	[2LINO51	20.000]	-0.6540E-03	-0.3401E-03
92	7.090	551	[2LINO51	20.000]	-0.6108E-03	-0.3599E-03
93	6.808	551	[2LINO51	20.000]	-0.5674E-03	-0.3762E-03
94	6.533	551	[2LINO51	20.000]	-0.5249E-03	-0.3890E-03
95	6.261	551	[2LINO51	20.000]	-0.4827E-03	-0.3986E-03
96	5.992	551	[2LINO51	20.000]	-0.4413E-03	-0.4054E-03
97	5.733	551	[2LINO51	20.000]	-0.4011E-03	-0.4096E-03
98	5.479	551	[2LINO51	20.000]	-0.3624E-03	-0.4109E-03
99	5.232	551	[2LINO51	20.000]	-0.3247E-03	-0.4103E-03
100	4.992	551	[2LINO51	20.000]	-0.2886E-03	-0.4073E-03

# **TERMINATED AFTER 100 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: 32.11 MW -9.12 MVAR 33.38 MVA AT BUS 2731**  
**[AGBAR31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 123.58 MVA**

## **SWING BUS SUMMARY:**

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231	KORAK31	150.00	352.6	500.0	-500.0	-22.5	250.0	-250.0		

## **2<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης**

ITER	DELTAV/TOL	X-----	AT BUS	-----X	REAL(DELTAV)	IMAG(DELTAV)
1	6.180	3191	[DIETH91	0.4000]	0.6180E-03	-0.9060E-05
2	6.038	3191	[DIETH91	0.4000]	0.6038E-03	-0.8774E-05
3	5.904	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5903E-03	-0.7868E-05
4	5.776	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5775E-03	-0.7534E-05
5	5.647	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5647E-03	-0.7534E-05
6	5.516	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5516E-03	-0.7010E-05
7	5.393	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5393E-03	-0.6819E-05
8	5.272	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5272E-03	-0.6199E-05
9	5.154	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5154E-03	-0.6008E-05
10	5.040	3191	[DIETH91	0.4000]	0.5040E-03	-0.5674E-05
11	4.923	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4923E-03	-0.5436E-05
12	4.814	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4814E-03	-0.5293E-05
13	4.710	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4710E-03	-0.5054E-05
14	4.606	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4606E-03	-0.4435E-05
15	4.501	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4500E-03	-0.4482E-05
16	4.402	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4402E-03	-0.3958E-05
17	4.303	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4303E-03	-0.4292E-05
18	4.205	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4205E-03	-0.3767E-05
19	4.109	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4108E-03	-0.3290E-05
20	4.020	3191	[DIETH91	0.4000]	0.4020E-03	-0.3242E-05
21	3.931	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3931E-03	-0.3004E-05
22	3.844	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3844E-03	-0.3052E-05
23	3.755	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3755E-03	-0.2718E-05
24	3.672	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3672E-03	-0.2289E-05
25	3.597	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3597E-03	-0.2241E-05
26	3.512	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3512E-03	-0.2050E-05
27	3.431	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3431E-03	-0.2241E-05
28	3.359	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3359E-03	-0.1764E-05
29	3.280	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3280E-03	-0.1860E-05
30	3.207	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3207E-03	-0.1431E-05
31	3.140	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3139E-03	-0.1287E-05
32	3.069	3191	[DIETH91	0.4000]	0.3069E-03	-0.1431E-05
33	2.997	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2997E-03	-0.1097E-05

34	2.934	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2934E-03	-0.1097E-05
35	2.871	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2871E-03	-0.8583E-06
36	2.804	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2804E-03	-0.5722E-06
37	2.745	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2745E-03	-0.8106E-06
38	2.681	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2681E-03	-0.8106E-06
39	2.618	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2618E-03	-0.7153E-06
40	2.561	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2561E-03	-0.2384E-06
41	2.508	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2508E-03	-0.4768E-07
42	2.451	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2451E-03	-0.1431E-06
43	2.396	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2396E-03	-0.2384E-06
44	2.342	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2342E-03	-0.9537E-07
45	2.289	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2289E-03	0.4768E-07
46	2.241	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2241E-03	0.2384E-06
47	2.195	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2195E-03	0.4768E-06
48	2.143	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2143E-03	0.1907E-06
49	2.098	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2098E-03	0.3338E-06
50	2.050	3191	[DIETH91	0.4000]	0.2050E-03	0.2861E-06
51	1.999	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1999E-03	0.5245E-06
52	1.956	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1956E-03	0.4768E-06
53	1.915	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1915E-03	0.5722E-06
54	1.870	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1870E-03	0.5245E-06
55	1.832	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1832E-03	0.1144E-05
56	1.791	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1791E-03	0.8583E-06
57	1.754	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1754E-03	0.6676E-06
58	1.711	3091	[MOIR91	0.4000]	0.1711E-03	0.1287E-05
59	1.674	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1674E-03	0.9537E-06
60	1.638	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1638E-03	0.1144E-05
61	1.601	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1601E-03	0.1001E-05
62	1.565	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1565E-03	0.8106E-06
63	1.531	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1531E-03	0.1049E-05
64	1.497	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1497E-03	0.1097E-05
65	1.468	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1468E-03	0.1144E-05
66	1.436	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1436E-03	0.1049E-05
67	1.402	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1402E-03	0.1097E-05
68	1.369	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1369E-03	0.1240E-05
69	1.334	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1334E-03	0.1097E-05
70	1.312	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1312E-03	0.1287E-05
71	1.280	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1280E-03	0.1144E-05
72	1.255	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1255E-03	0.1192E-05
73	1.226	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1225E-03	0.1335E-05
74	1.199	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1199E-03	0.1431E-05
75	1.173	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1173E-03	0.1574E-05
76	1.145	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1145E-03	0.1287E-05
77	1.122	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1122E-03	0.1144E-05
78	1.091	3091	[MOIR91	0.4000]	0.1091E-03	0.1478E-05
79	1.068	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1068E-03	0.1478E-05
80	1.049	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1049E-03	0.1335E-05
81	1.022	3191	[DIETH91	0.4000]	0.1022E-03	0.1335E-05
82	0.999	3191	[DIETH91	0.4000]	0.9985E-04	0.1383E-05

# **REACHED TOLERANCE IN 82 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: -1.89 MW -9.00 MVAR 9.20 MVA AT BUS 2731**  
**[AGBAR31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 32.54 MVA**

## **SWING BUS SUMMARY:**

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	385.7	500.0	-500.0	-19.8	250.0	-250.0

### 3<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

```
ITER DELTAV/TOL X----- AT BUS -----X REAL(DELTA) IMAG(DELTA)
1      0.980      3191 [DIETH91      0.4000]      0.9794E-04      0.1335E-05
```

**REACHED TOLERANCE IN 1 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: -1.85 MW -8.79 MVAR 8.99 MVA AT BUS 2731**  
**[AGBAR31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 31.89 MVA**

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	385.7	500.0	-500.0	-19.9	250.0	-250.0

### 4<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

```
ITER DELTAV/TOL X----- AT BUS -----X REAL(DELTA) IMAG(DELTA)
1      0.956      3091 [MOIR91      0.4000]      0.9556E-04      0.1574E-05
```

**REACHED TOLERANCE IN 1 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: -1.81 MW -8.61 MVAR 8.80 MVA AT BUS 2731**  
**[AGBAR31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 31.22 MVA**

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	385.7	500.0	-500.0	-20.1	250.0	-250.0

### 5<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

```
ITER DELTAV/TOL X----- AT BUS -----X REAL(DELTA) IMAG(DELTA)
1      0.935      3191 [DIETH91      0.4000]      0.9346E-04      0.1621E-05
```

**REACHED TOLERANCE IN 1 ITERATIONS**

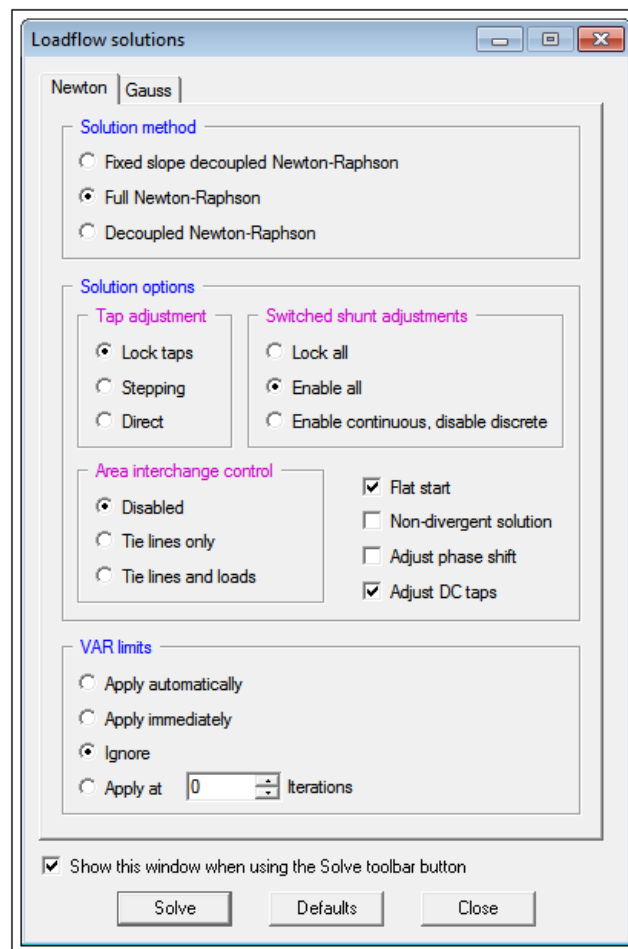
**LARGEST MISMATCH: -1.77 MW -8.40 MVAR 8.59 MVA AT BUS 2731**  
**[AGBAR31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 30.46 MVA**

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	385.6	500.0	-500.0	-20.3	250.0	-250.0



## 5.1.2 Προσομοίωση με τη Μέθοδο Newton - Raphson



Σχήμα 46: Οι ρυθμίσεις στην επίλυση της Newton - Raphson

### 1<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS	DELTAANG	BUS
0	16.8879	231	3.6767	231	0.99000	3091	0.58036	3091

#### BLOWN UP AFTER 1 ITERATIONS

**LARGEST MISMATCH: -505.20 MW 114.48 MVAR 518.01 MVA AT BUS 2632**  
**[ATHER32 150.00]**

**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 14981.62 MVA**

#### SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231	KORAK31	150.00			55.1	500.0	-500.0	-167.4	250.0	-250.0

### 2<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS
DELTAANG	BUS					
0	14.8045	231	3.3864	231	0.99000	1791
0.94269	1791					
1	10.0546	231	2.6727	231	0.99000	2291
0.47583	2291					
2	7.2626	231	2.0158	231	0.91198	1791
0.62028	3591					
3	0.3939	2631	0.5916	231	0.96111	3591
0.41336	2191					
4	0.1277	1051	0.0458	1051	0.99000	3692
0.29672	3692					
5	0.0255	1251	0.5412	2693	0.99000	3692
0.11822	1591					
6	0.0484	1251	0.1133	2693	0.99000	1591
0.24135	1551					
7	0.1151	1251	0.0645	1251	0.99000	3692
0.16997	1591					
8	0.0492	1231	0.0325	1051	0.99000	1151
0.48368	1151					

### BLOWN UP AFTER 9 ITERATIONS

LARGEST MISMATCH: 24.34 MW 15.47 MVAR 28.84 MVA AT BUS 1151  
 [IERAP51 21.000]  
 SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 311.19 MVA

#### SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	467.7	500.0	-500.0	394.9*	250.0	-250.0

### 3<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS
DELTAANG	BUS					
0	0.4868	1151	0.3094	1151	0.99000	2991
0.30053	1151					
1	0.0937	1231	0.4644	2693	0.99000	3692
0.11170	2692					
2	0.0645	1251	0.0634	2693	0.99000	1591
0.27528	3191					
3	0.2745	1251	0.1638	1251	0.99000	3491
0.22115	3191					
4	0.0967	1231	0.0305	1051	0.99000	1591
0.28173	1151					
5	0.1769	1051	0.1000	1151	0.99000	3691
0.17584	1151					
6	0.0561	1131	0.0292	1151	0.99000	1891
0.19805	3091					
7	0.1713	1251	0.0995	1251	0.99000	3491
0.18668	3091					
8	0.0639	1231	0.0284	1051	0.99000	1151
0.48858	1151					

### BLOWN UP AFTER 9 ITERATIONS

LARGEST MISMATCH: -13.87 MW -5.00 MVAR 14.74 MVA AT BUS 1131  
 [IERAP31 150.00]  
 SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 133.48 MVA

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	504.3*	500.0	-500.0	839.7*	250.0	-250.0

#### 4<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS
DELTAANG	BUS					
0	0.2774	1131	0.1097	1051	0.99000	1051
0.41451	1051					
1	0.4026	1031	0.3405	2693	0.99000	3692
0.23946	2692					
2	0.0449	2631	0.0412	2693	0.99000	3491
0.08243	2692					
3	0.0166	2451	0.0102	2451	0.99000	3692
0.05599	2451					
4	0.0144	2451	0.0076	2451	0.99000	3251
0.07468	2451					
5	0.0270	2451	0.0154	2451	0.99000	3251
0.52657	3291					
6	0.0137	2451	0.0080	2451	0.99000	3191
0.32039	3291					
7	0.0043	2451	0.0021	2451	0.99000	3151
0.35844	3191					
8	0.0039	2451	0.0022	2451	0.99000	1891
0.06691	3191					
9	0.0040	2451	0.0022	2451		

TERMINATED AFTER 10 ITERATIONS--SINGULAR JACOBIAN AT ROW  
8 BUS 3692

LARGEST MISMATCH: -0.20 MW -0.11 MVAR 0.23 MVA AT BUS 2451  
[PRETO51 21.000]  
SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 0.71 MVA

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	386.3	500.0	-500.0	976.8*	250.0	-250.0

#### 5<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS
DELTAANG	BUS					
0	0.0040	2451	0.0022	2451		

TERMINATED AFTER 1 ITERATIONS--SINGULAR JACOBIAN AT ROW  
8 BUS 3692

VOLTAGE CONTROLLED BUSES WHOSE VOLTAGES DIFFER FROM THEIR SCHEDULED  
VOLTAGES BY MORE THAN 0.000010 PU

\* IF BY MORE THAN 0.000010 PU  
X----- VOLTAGE CONTROLLED BUS -----X X----- VOLTAGE CONTROLLING  
EQUIPMENT -----X

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	VOLTAGE	V-SCHED	QACTUAL	QHIG	QLOW	BUS#	X--	NAME
--X	BASKV	X-	TYPE	-X								

296 CHANI96	11.500	0.99617*1.00000	27.8	27.8	-9.2	296 CHANI96
11.500 GENERATION						
297 CHANI97	11.500	0.99617*1.00000	27.8	27.8	-9.2	297 CHANI97
11.500 GENERATION						
2691 ATHER91	13.800	0.64831*1.00000	37.3	37.3	-12.4	2691 ATHER91
13.800 GENERATION						
2692 ATHER92	13.800	0.64841*1.00000	37.3	37.3	-12.4	2692 ATHER92
13.800 GENERATION						
2693 ATHER93	11.000	0.62132*1.00000	32.4	32.4	-10.8	2693 ATHER93
11.000 GENERATION						
2694 ATHER94	11.000	0.62206*1.00000	32.4	32.4	-10.8	2694 ATHER94
11.000 GENERATION						

WARNING: 6 VOLTAGE CONTROLLED BUSES WHOSE VOLTAGES DIFFER FROM  
THEIR SCHEDULED VOLTAGES BY MORE THAN 0.000010 PU

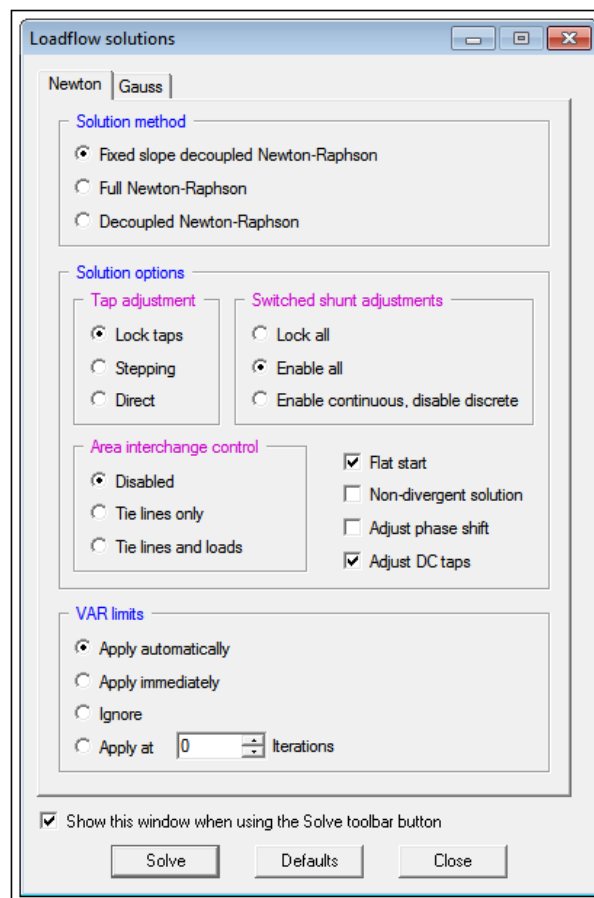
LARGEST MISMATCH: -0.20 MW -0.11 MVAR 0.23 MVA AT BUS 2451 [PRETO51  
21.000]

SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 0.71 MVA

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	386.3	500.0	-500.0	976.8*	250.0	-250.0

### 5.1.3 Προσομοίωση με την Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδο



Σχήμα 47: Οι επιλογές στην επίλυση της Επαναληπτικής ταχείας Αποζευγμένης Μεθόδου

## 1<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTA	BUS	DELTA	BUS	DELTA/V	BUS
DELTAANG	BUS					
0.0	16.8879	231	3.6767	231	0.00000	
0.81253	3251					
0.5	1.6339	231	1.5061	231	0.07773	2051
0.00000						
1.0	1.4970	231	0.0160	231	0.00000	
0.17323	2091					
1.5	0.0927	231	0.2203	231	0.05906	2091
0.00000						
2.0	0.0546	231	0.0030	351	0.00000	
0.01124	2091					
2.5	0.0040	1231	0.0088	231	0.00381	351
0.00000						
3.0	0.0048	331	0.0008	351	0.00000	
0.00105	351					
3.5	0.0006	1231	0.0013	351	0.00084	351
0.00000						
4.0	0.0009	331	0.0002	351		

**REACHED TOLERANCE IN 4 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: -0.09 MW 0.00 MVAR 0.09 MVA AT BUS 331**  
**[RETHI31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 0.45 MVA**

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231	KORAK31	150.00			383.5	500.0	-500.0	-27.8	250.0	-250.0

## 2<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTA	BUS	DELTA	BUS	DELTA/V	BUS
DELTAANG	BUS					
0.0	0.0009	331	0.0002	351	0.00000	
0.00022	351					
0.5	0.0001	1231	0.0003	351	0.00018	351
0.00000						
1.0	0.0002	331	0.0000	351		

**REACHED TOLERANCE IN 1 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: -0.02 MW 0.00 MVAR 0.02 MVA AT BUS 331**  
**[RETHI31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 0.06 MVA**

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231	KORAK31	150.00			383.4	500.0	-500.0	-27.8	250.0	-250.0

## 3<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης

ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS
DELTAANG	BUS					
0.0	0.0002	331	0.0000	351	0.00000	
0.00005	351					
0.5	0.0000	331	0.0001	351	0.00004	351
0.00000						
1.0	0.0000	331	0.0000	351		

**REACHED TOLERANCE IN 1 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: 0.00 MW 0.00 MVAR 0.00 MVA AT BUS 331**  
**[RETHI31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 0.01 MVA**

SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	383.4	500.0	-500.0	-27.8	250.0	-250.0

#### **4<sup>η</sup> Προσπάθεια Επίλυσης**

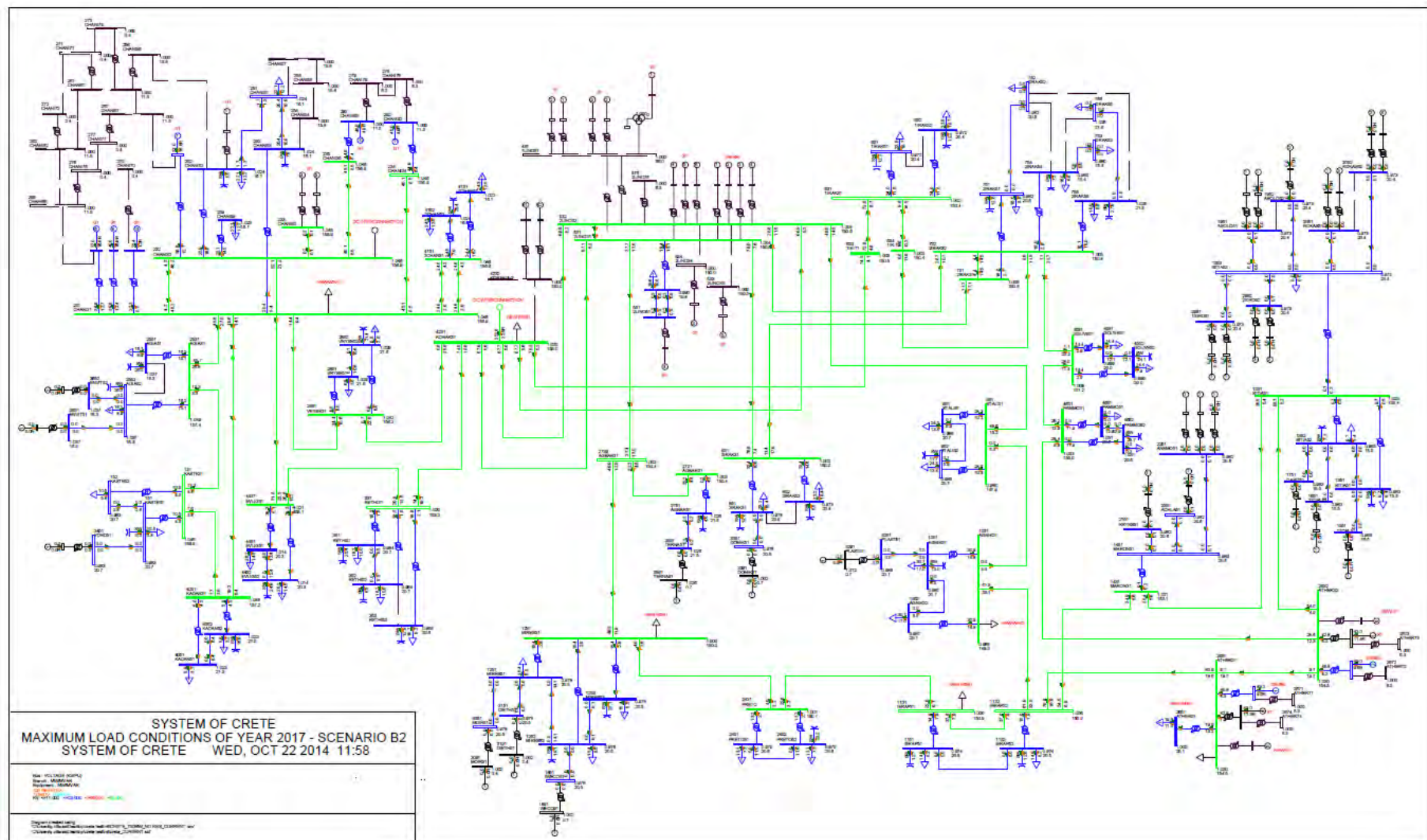
ITER	DELTAP	BUS	DELTAQ	BUS	DELTA/V/	BUS
DELTAANG	BUS					
0.0	0.0000	331	0.0000	351	0.00000	
0.00001	351					
0.5	0.0000	331	0.0000	351	0.00001	351
0.00000						
1.0	0.0000	331	0.0000	351		

**REACHED TOLERANCE IN 1 ITERATIONS**

**LARGEST MISMATCH: 0.00 MW 0.00 MVAR 0.00 MVA AT BUS 331**  
**[RETHI31 150.00]**  
**SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 0.00 MVA**

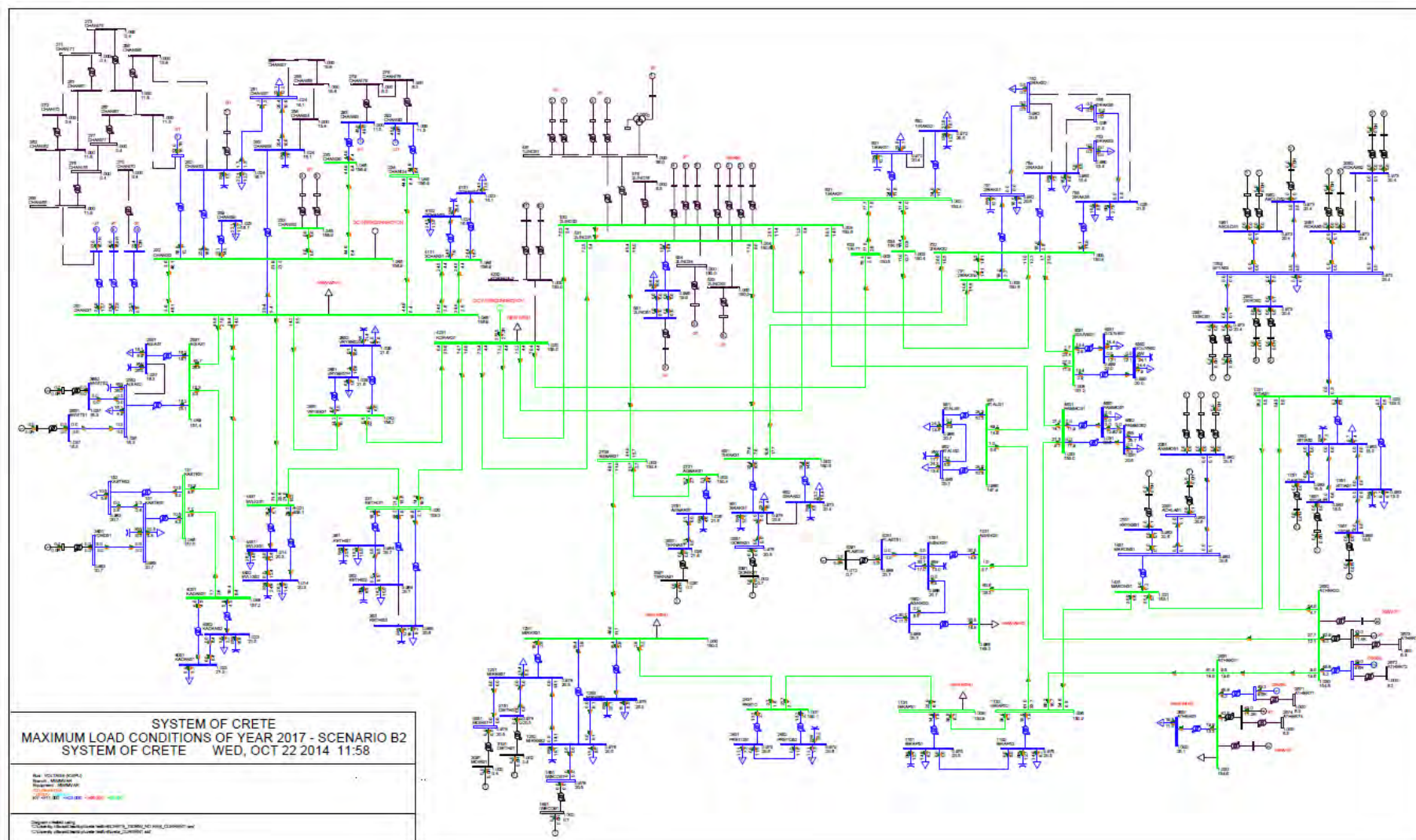
SWING BUS SUMMARY:

BUS#	X--	NAME	--X	BASKV	PGEN	PMAX	PMIN	QGEN	QMAX	QMIN
4231		KORAK31		150.00	383.4	500.0	-500.0	-27.8	250.0	-250.0



Σχήμα 48: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 1<sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Gauss – Seidel.





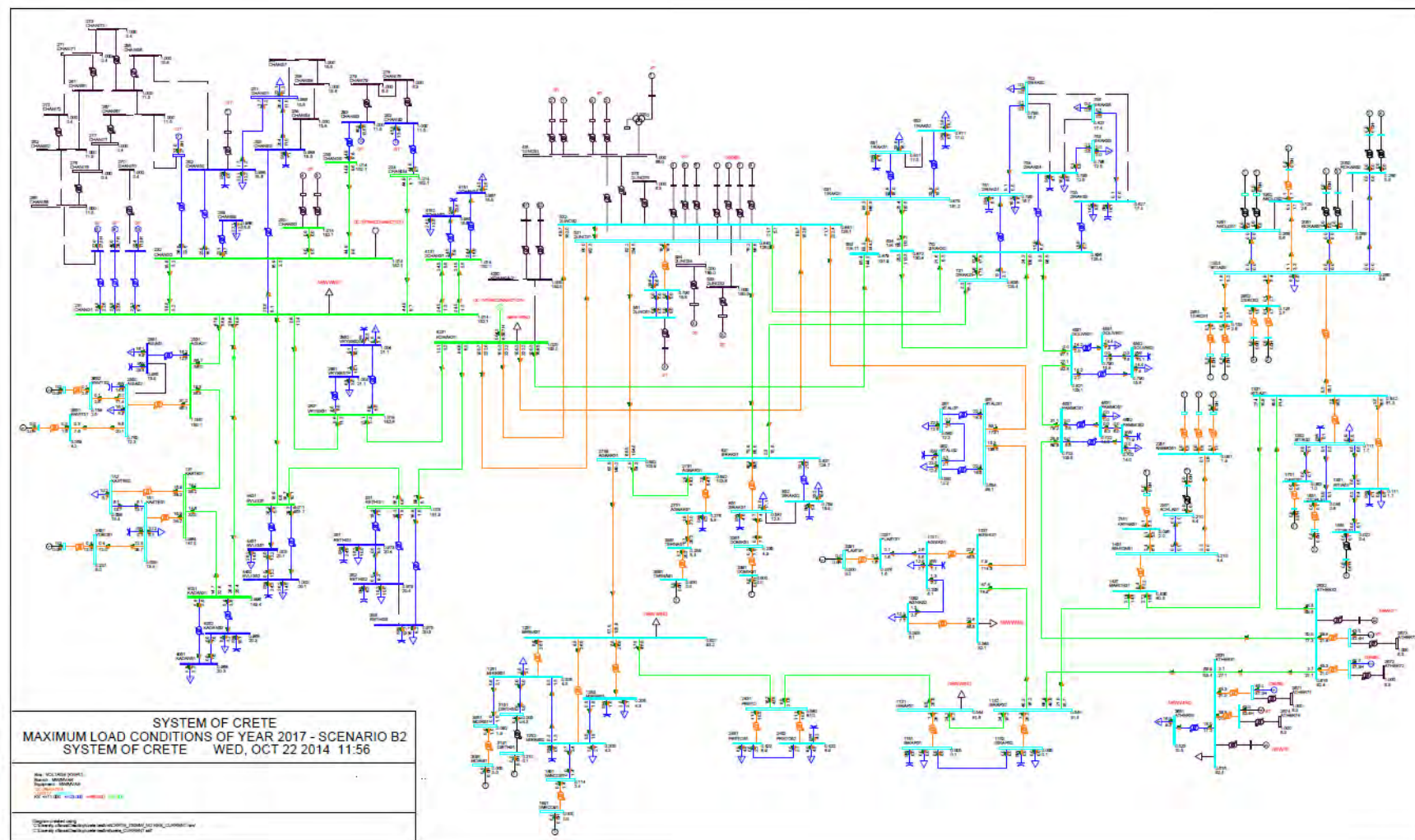
Σχήμα 49: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 2<sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Gauss – Seidel.



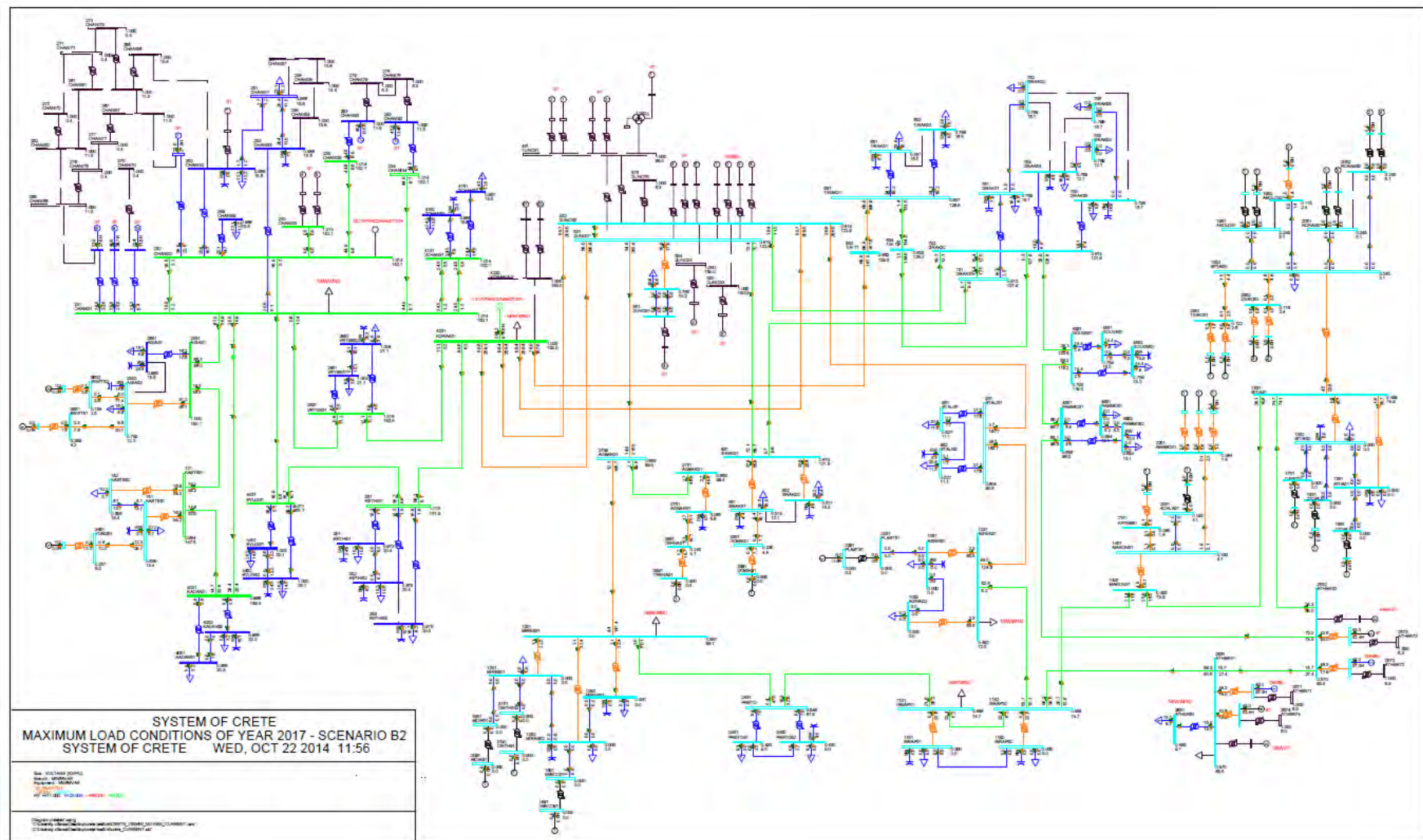






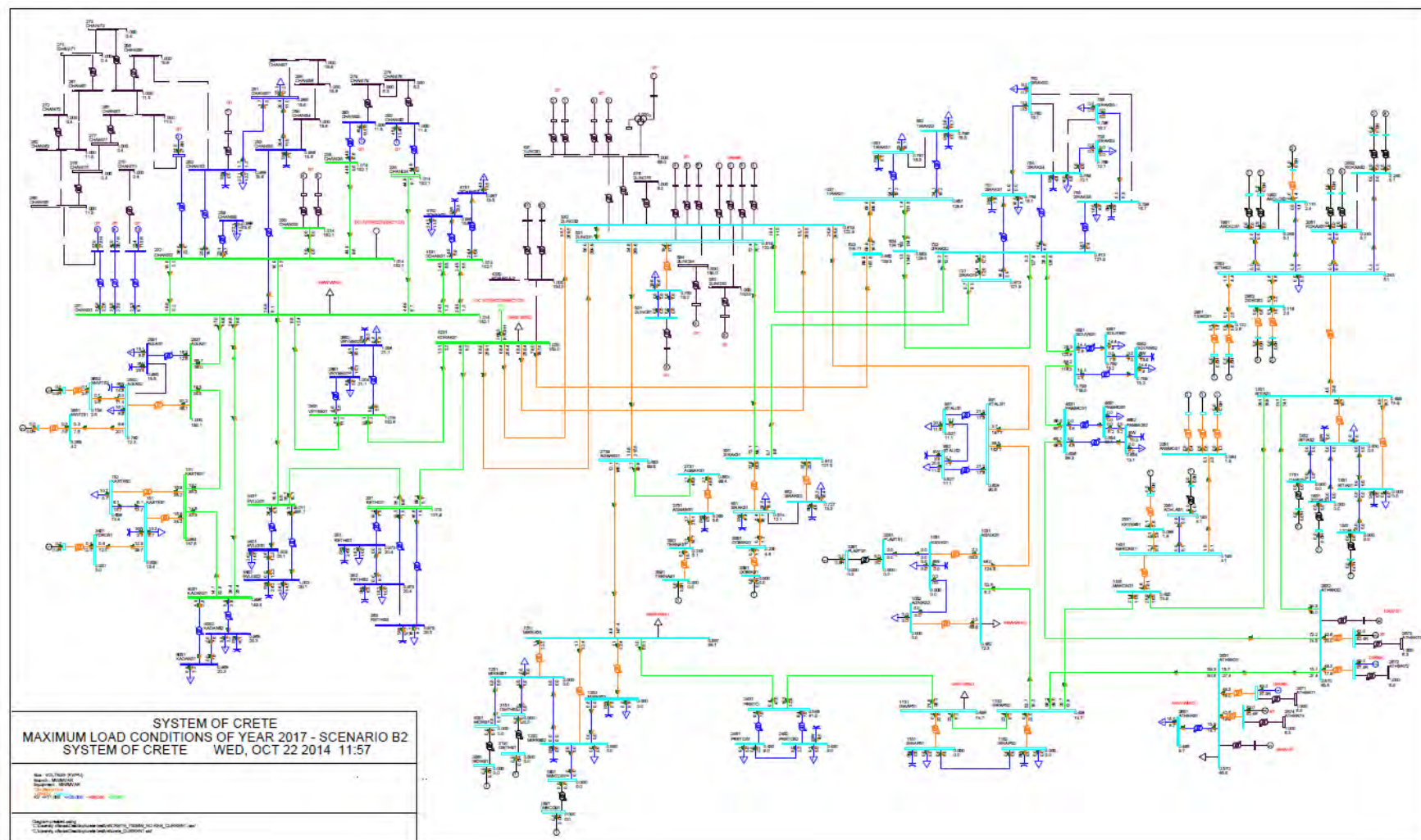


Σχήμα 52: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 3<sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson..

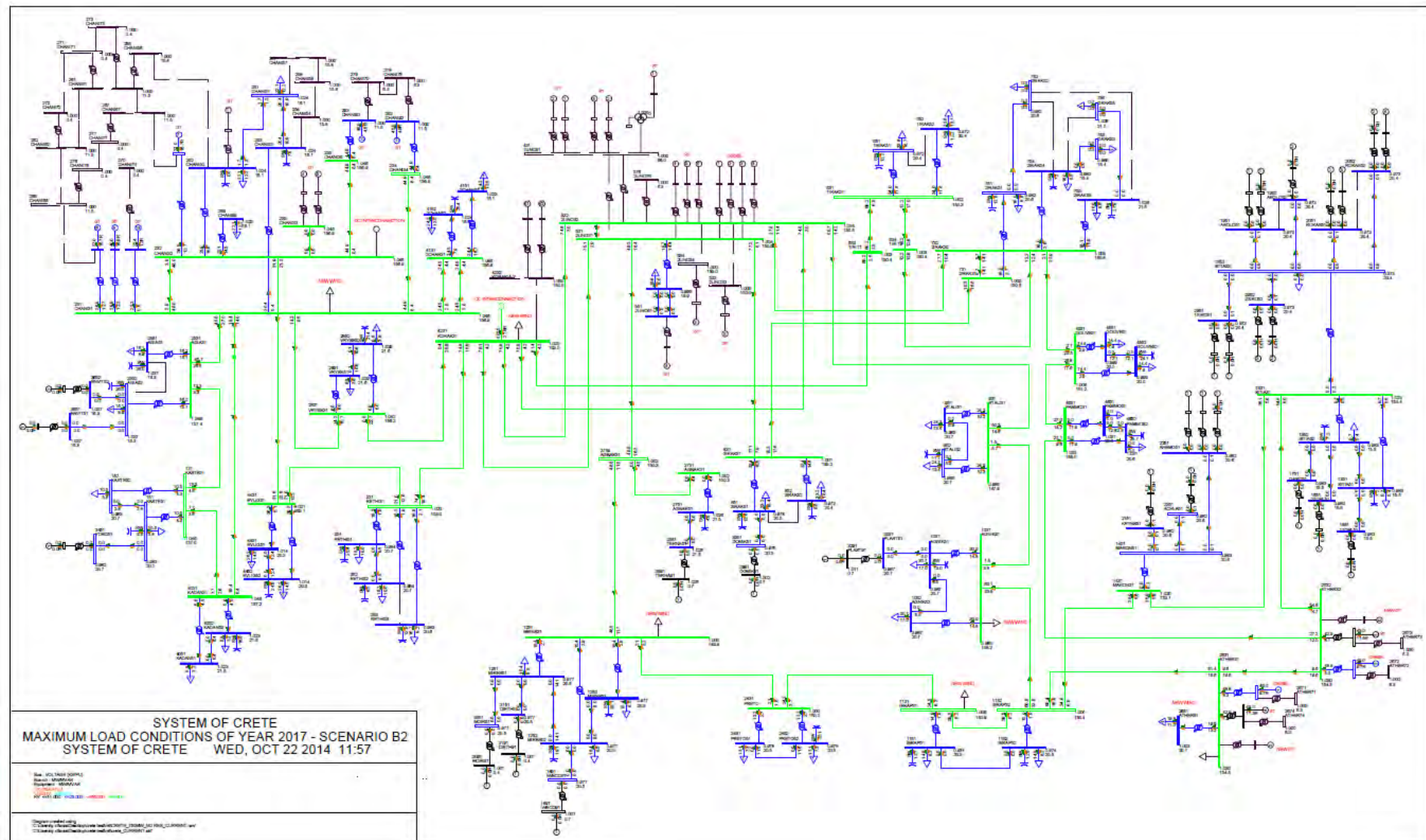


Σχήμα 53: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 4<sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson..





Σχήμα 54: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 5<sup>η</sup> επίλυση με τη μέθοδο Newton – Raphson..



Σχήμα 55: Το Μονογραμμικό Διάγραμμα στην 1<sup>η</sup> επίλυση με τη Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδο.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

#### 5.1 Συμπεράσματα

Η ασφαλής σύγκριση των μεθόδων που αναπτύχθηκαν για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου απαιτεί την εξέταση των παρακάτω παραμέτρων:

- ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για τη διαμόρφωση (π.χ. μετασχηματισμός πηγών) και εισαγωγή των δεδομένων εισόδου του προγράμματος
- οι απαιτήσεις μνήμης της εκάστοτε μεθόδου
- ο χρόνος επίλυσης της επαναληπτικής διαδικασίας.

Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των μεθόδων που έχουν ήδη αναλυθεί. Η σειρά που έχει ακολουθηθεί είναι από τη μέθοδο με τον πιο γρήγορο ρυθμό σύγκλισης και τη μέγιστη απαίτηση μνήμης προς την πιο αργή αλλά με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα.

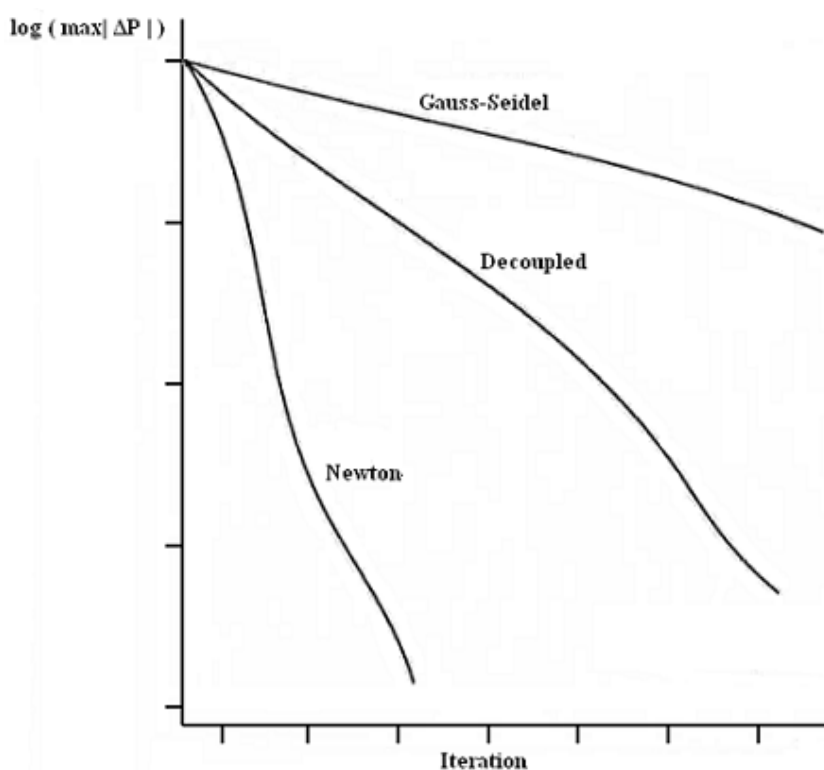
Η μέθοδος Newton-Raphson είναι κατά κανόνα η ταχύτερη ως προς τη σύγκλιση μέθοδος και είναι αρκετά ασφαλής ως προς την αποτελεσματικότητά της. Ωστόσο, είναι πιο σύνθετη από την μέθοδο Gauss-Seidel και απαιτεί σημαντική μνήμη στον υπολογιστή, αφού είναι αναγκαία η διαμόρφωση και αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας σε κάθε ανακύκλωση. Όμως, ο χρόνος που απαιτεί η μέθοδος για την επίλυση του συστήματος είναι τελικά μικρότερος από το χρόνο της Gauss – Seidel.

Η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος εξοικονομεί χρόνο και μνήμη έναντι της μεθόδου Newton-Raphson, επειδή οι μήτρες  $[B]$ ,  $[B']$  είναι σταθερές και με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η κατάστρωση και αντιστροφή της Ιακωβιανής σε κάθε ανακύκλωση. Συγκεκριμένα, απαιτείται μία μόνο φορά η αντιστροφή των  $[B]$ ,  $[B']$  καθ' όλη την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης. Επιπλέον, η λύση που προκύπτει είναι εξίσου ακριβής και ασφαλής όσο και αυτής της Newton-Raphson. Παρόλα αυτά μειονεκτεί στο γεγονός ότι απαιτούνται περισσότερες επαναλήψεις από την Newton-Raphson για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια και επιπλέον μπορεί να μη συγκλίνει καθόλου σε συστήματα που στις γραμμές μεταφοράς δεν υπερισχύει η αγωγιμότητα [20]. Ωστόσο, ο αργότερος ρυθμός σύγκλισης αντισταθμίζεται πλήρως από την αύξηση της ταχύτητας υπολογισμών.

Τέλος, η μέθοδος Gauss-Seidel πλεονεκτεί όσον αφορά την απαίτηση μικρής υπολογιστικής ισχύος και οι υπολογισμοί ανά ανακύκλωση είναι σχετικά περιορισμένοι. Ωστόσο, έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: συγκλίνει με πολύ αργό ρυθμό και ο ρυθμός σύγκλισης εξαρτάται από τις σχετικές τιμές των διαγώνιων στοιχείων  $Y_{ii}$  του πίνακα σύνθετων αγωγιμοτήτων και την επιλογή του ζυγού αναφοράς. Ωστόσο, η σύγκλιση δύναται να επιταχυνθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές επιταχύνσεως.

Πίνακας 4:Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Βασικών Μεθόδων σε συνάρτηση με τον τύπο του προβλήματος.

Τύπος Προβλήματος	Gauss - Seidel	Newton - Raphson
Σύστημα με μεγάλο φορτίο	Συνήθως δεν επιλύει συστήματα με διαφορά φάσης μεγαλύτερη από $70^\circ$	Επιλύει συστήματα με διαφορά φάσης πάνω από $90^\circ$
Συστήματα με αρνητικές αντιδράσεις όπως Μ/Σ τριών τυλιγμάτων ή πυκνωτές σε σειρά με τις γραμμές	Ανικανότητα επίλυσης	Ευκολία στην επίλυση
Συστήματα με ζυγό αναφοράς σε συγκεκριμένη θέση	Συχνά απαιτεί μέθοδο δοκιμής και λάθους για εντοπισμό της θέσης του ζυγού αναφοράς που θα οδηγήσει σε λύση	Περισσότερο ανεκτική στη θέση του ζυγού αναφοράς
Μικρές και μεγάλες γραμμές που τερματίζουν στους ίδιους ζυγούς	Συνήθως δεν επιλύει αν ο λόγος μήκους είναι μεγαλύτερος από 1000:1	Δυνατότητα επίλυσης για κάθε ζυγό μέχρι και για λόγο μήκους της τάξεως 1000000:1
Ακτινικό σύστημα μεγάλου μήκους	Δυσκολία επίλυσης	Επιλύει μια ευρεία περιοχή τέτοιων συστημάτων
Συντελεστές επιτάχυνσης	Ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται από την επιλογή του συντελεστή	Δεν απαιτούνται



Σχήμα 56: Καμπύλη Ταχύτητας Σύγκλισης των Εξετασθέντων Μεθόδων Επίλυσης Ροής Φορτίου.



## Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.businessdictionary.com>
- [2] [www.stri.se](http://www.stri.se)
- [3] [sites.google.com/a/interpss.org](http://sites.google.com/a/interpss.org)
- [4] [www.neplan.ch](http://www.neplan.ch)
- [5] <http://www.mathworks.com>
- [6] <http://www.alteps.com>
- [7] [www.cyme.com](http://www.cyme.com)
- [8] <http://www.microtran.com>
- [9] [www.elequant.com](http://www.elequant.com)
- [10] <http://www.vrenergy.com>
- [11] [www.martinole.org/Fendi/](http://www.martinole.org/Fendi/)
- [12] An Open Source Power System Analysis Toolbox, Federico Milano, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005
- [13] <http://www.digsilent.de>
- [14] [www.sourceforge.net](http://www.sourceforge.net)
- [15] <http://www.powerworld.com>
- [16] Electromagnetic Transient Program Rule Book, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982.
- [17] ATP-Draw\_ \_version\_ 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP Users' Manual
- [18] [w3.siemens.com](http://w3.siemens.com)
- [19] W. H. Hayt, Jr., and J. E. Kemmerly, Engineering Circuit Analysis, 7th ed. (New York: McGraw-Hill, 2006).
- [20] M. P. Bahrman and B. K. Johnson, "The ABCs of HVDC Transmission Technologies" IEEE Power & Energy Magazine, 5, 2 (March/April 2007):
- [21] IEEE FACTS Terms & Definitions Task Force of the FACTS Working Group of the DC and FACTS subcommittee, "Proposed terms and definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1848-1853, Oct. 1997.
- [22] Miller, T.J.E., 1982, *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley Interscience, Chichester.
- [23] E.W. Kimbark, "Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors", IEEE Trans., PAS-85, Feb. 1966, p.378-386
- [24] Α. Λεωνιδάκη, Ν.Δ. Χατζηαργυρίου, Γ.Ι. Γεωργαντζής, "Επιδράσεις Σειριακής Αντιστάθμισης στη Λειτουργία Γραμμών Μεταφοράς", Ελληνική Επιτροπή CIGRE, Σύνοδος Αθήνα '95.
- [25] G. J. Georgantzis, N.D.Hatziargyriou, E.A. Leonidaki, "Transient Simulation of Series Compensated EHV Transmission Lines for Short-circuit Studies", IEEE MELECON '96, p. 1584-1587, Bari, Italy, May 1996
- [26] E.A. Leonidaki, B.C. Papadimas, N.D. Hatziargyriou, S. Giorgas, G.J. Georgantzis, "A Physical Laboratory Model of a Thyristor Controlled Series Capacitor", Proceedings of the 33nd Universities Power Engineering Conference (UPEC'98), p. 138-141, Edinburgh, UK, 8-10 Sept. 1998
- [27] G.J. Georgantzis, E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, J.G. Vlachogiannis, "Investigation of the Effect of FACTS Devices on the Steady-state Operation of the Hellenic Transmission System", CIGRE Symposium "Working Plant and Systems Harder", London, UK, 7-9 June 1999.
- [28] E.A. Leonidaki, B.C. Papadimas, N.D. Hatziargyriou, J.G. Vlachogiannis, G.J. Georgantzis, "Application of Thyristor Controlled Series Capacitor to Load-Flow Redistribution in the Hellenic Transmission System", Paper BPT99-149-44, Proceedings of the IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug 29 - Sept 2, 1999

- [29] Β.Κ. Παπαδιά, «Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ - Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις», ΕΜΠ, Αθήνα 1985
- [30] [9] Μ.Π. Παπαδόπουλος, «Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [31] Σημειώσεις Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αν. Καθηγήτρια Α. Σαφιογιάννη, Εκδόσεις ΔΠΘ, Ξάνθη 2007
- [32] Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά Για το έτος 2014