

Νικόλαος Α. Βοβός
Καθ. Πανεπιστημίου

Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος
Καθ. Πανεπιστημίου

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας



ISBN 978-960-456-517-7

© Copyright: Βοβός Ν., Γιαννακόπουλος Γ., Εκδόσεις Ζήτη,
2η έκδοση Μάιος 2019

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη και συγγραφέα κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία

Εκτύπωση

Βιβλιοδεσία

Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ Ι.Κ.Ε.

18^ο χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς

Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΖΗΤΗ**

www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310-203.720 • Fax 2310-211.305

e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:

Χαριλάου Τρικούπη 22 - Τ.Κ. 106 79, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210-3816.650

e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό καλύπτει την ύλη του μαθήματος «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας» που διδάσκεται στους φοιτητές του Δ' έτους του κύκλου σπουδών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Το βιβλίο πραγματεύεται όλο εκείνο το υλικό που είναι απαραίτητο για να δημιουργηθεί το μοντέλο ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και να εκτιμηθεί η λειτουργία του στη μόνιμη κατάσταση και υπό την επίδραση βραχυκυκλωμάτων.

Η ύλη του βιβλίου χωρίζεται σε επτά κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών μελετών που απαιτούνται για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στη μόνιμη όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο 2 συνοψίζονται τα μαθηματικά μοντέλα των βασικών συνιστωσών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή της σύγχρονης μηχανής, του μετασχηματιστή ισχύος και της γραμμής μεταφοράς και περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίον δημιουργείται το μοντέλο του συνολικού συστήματος από τη σύνθεση των μοντέλων των επί μέρους συνιστωσών.

Στο κεφάλαιο 3 αναφερόμαστε στο μοντέλο σύνθετης αγωγιμότητας του συστήματος, δηλαδή στην μέθοδο των κόμβων που χρησιμοποιούμε για την περιγραφή της συμπεριφοράς του δικτύου και στον πίνακα συνθέτων αγωγιμοτήτων ζυγών Y_{bus} που περιέχει όλη την πληροφορία για τα παθητικά στοιχεία του δικτύου και αποτελεί έναν συστηματικό τρόπο έκφρασης των εξισώσεων κόμβων.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος της ανάλυσης ροής φορτίου. Σκοπός της παρουσίασης είναι να γίνει πλήρως κατανοητό το πρόβλημα, η λύση του και οι σχετικές εφαρμογές. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην εξήγηση των υπολογιστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται.

Στο κεφάλαιο 5, εξετάζονται τα κυματικά φαινόμενα και αναλύονται τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα. Τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα δεν αλλάζουν την τριφασική συμμετρία των ΣΗΕ και γι αυτό στην ανάλυσή τους χρησιμοποιούμε

τη μονοφασική παράστασή τους. Στηριζόμενη σε αυτή την παράσταση και στο θεώρημα Thevenin η ανάλυση συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων επιτυγχάνεται πολύ εύκολα.

Στο κεφάλαιο 6 αναπτύσσεται η θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών και των ακολουθιακών δικτύων. Με τη βοήθεια αυτής της θεωρίας γίνεται η ανάλυση ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, κατά τη διάρκεια των οποίων παύει να ισχύει η τριφασική συμμετρία των ΣΗΕ και άρα δεν μπορεί να αξιοποιηθεί η μονοφασική παράστασή τους.

Στο κεφάλαιο 7 αναλύονται τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα. Με τη χρήση των ακολουθιακών δικτύων η ανάλυση ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων καταλήγει και πάλι στην ανάλυση ενός μονοφασικού δικτύου με όλα τα πλεονεκτήματα που συνοδεύουν αυτή τη παράσταση.

Καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε όλο το υλικό που παρουσιάζεται στο βιβλίο να συνοδεύεται από αντιπροσωπευτικά αριθμητικά παραδείγματα, ώστε αφενός να διευκρινίζονται τα θεωρητικά θέματα αφετέρου να τονίζονται τα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος τεχνικά θέματα. Προς την κατεύθυνση αυτή συμβάλλουν σημαντικά τα προβλήματα και οι λύσεις τους που υπάρχουν στα κατάλληλα κεφάλαια. Για να έχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα ο μελετητής του βιβλίου πρέπει να ανατρέχει στη λύση των προβλημάτων μόνο για να επιβεβαιώσει την ορθότητα της δικής του λύσης ή αν δεν ήταν επιτυχείς οι δικές του προσπάθειες για τη λύση. Τα προβλήματα που επιλύονται, έχουν επιλεγεί, ώστε να διευκρινίζουν τα σημαντικά θέματα που ανακύπτουν κατά την λύση των δύσκολων προβλημάτων των ΣΗΕ. Στόχος τους είναι να μεταδώσουν στο μηχανικό τη μεθοδολογία σκέψης για την επίλυση των προβλημάτων με παραδοσιακές και σύγχρονες μεθόδους.

Στα μέλη της οικογένειάς μας, ιδιαίτερα στις συζύγους μας, οφείλονται ευχαριστίες για την κατανόηση και ενθάρρυνσή τους κατά τη διάρκεια ετοιμασίας αυτού του βιβλίου. Στο γιο μου Παναγή Βοβό θερμές ευχαριστίες γιατί φιλοτέχνησε το εξώφυλλο του βιβλίου.

Πάτρα, Μάιος 2019

Νικόλαος Α. Βοβός
Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

..... 11

Κεφάλαιο 2

ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Γενικά	17
2.2	Οι σύγχρονες γεννήτριες	17
2.3	Οι μετασχηματιστές.....	23
2.3.1	Ισοδύναμα κυκλώματα μετασχηματιστή δυο τυλιγμάτων	24
2.3.2	Π-ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δυο τυλιγμάτων	25
2.3.3	Ανά μονάδα μονοφασικά ισοδύναμα τριφασικών μετασχηματιστών.....	26
2.3.4	Ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού	28
2.4	Οι γραμμές μεταφοράς	34
2.5	Τα φορτία.....	37
2.6	Ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος.....	42
	Αναφορές.....	47

Κεφάλαιο 3

ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1	Εισαγωγή.....	49
3.2	Εξισώσεις κόμβων – Πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων ζυγών	50
3.3	Σχηματισμός του Y_{bus} με χρήση του πίνακα πρόσπτωσης ζυγών	53
3.4	Αλγοριθμική μέθοδος σχηματισμού του πίνακα Y_{bus}	59
3.5	Η μέθοδος της διαδοχικής απαλοιφής.....	64
3.6	Απαλοιφή κόμβων.....	71
3.7	Τριγωνική παραγοντοποίηση.....	73
	Αναφορές.....	82

Κεφάλαιο 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.1	Εισαγωγή	83
4.2	Στατικές εξισώσεις ροής φορτίου	85
4.3	Το πρόβλημα της ροής φορτίου	89
4.4	Κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών Y_{bus}	94
4.5	Η υπολογιστική πλευρά του προβλήματος ροής φορτίου	103
4.6	Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss - Seidel	106
4.6.1	Η μέθοδος Gauss - Seidel	106
4.6.2	Εφαρμογή της μεθόδου G-S για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου	110
4.7	Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton – Raphson	119
4.7.1	Η μέθοδος Newton – Raphson	120
4.7.2	Εφαρμογή της μεθόδου N-R για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου	124
4.8	Αποξευγμένη μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου	138
	Αναφορές	144

Κεφάλαιο 5

ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

5.1	Εισαγωγή	145
5.2	Υπερταχεία μεταβατικά - κυματικά φαινόμενα	145
5.3	Μέσης ταχύτητας μεταβατικά φαινόμενα - βραχυκυκλώματα	146
5.4	Βραδεία μεταβατικά φαινόμενα – Μεταβατική ευστάθεια	148
5.5	Διάδοση κυμάτων στις γραμμές μεταφοράς	149
5.6	Ανακλάσεις κύματος	152
5.6.1	Παράσταση γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους	157
5.7	Μεταβατικά φαινόμενα λόγω λειτουργίας διακοπών	159
5.8	Συμμετρικά βραχυκυκλώματα	161
5.8.1	Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC)	162
5.8.2	Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με το θεώρημα του Thevenin	163
5.9	Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές	167
5.9.1	Ρεύματα βραχυκύκλωσης σε εναλλακτήρα	168
5.9.2	Επαγωγικές αντιστάσεις σύγχρονων μηχανών	171
5.10	Προσεγγίσεις στην ανάλυση βραχυκυκλωμάτων	174
5.11	Εσωτερικές τάσεις φορτισμένων μηχανών σε μεταβατικές συνθήκες	178

5.12 Διευκρινιστικό παράδειγμα για την ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών	183
5.12.1 Πορεία της λύσης	183
5.12.2 Κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος	184
5.12.3 Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων	187
5.12.4 Ρεύματα και τάσεις μετά το βραχυκύκλωμα	190
5.13 Συστηματικός υπολογισμός βραχυκυκλώματος	191
5.14 Περίληψη	196
<i>Προβλήματα</i>	197
<i>Αναφορές</i>	202

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΚΑΙ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

6.1 Εισαγωγή	205
6.2 Μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών	205
6.3 Ρεύμα ουδέτερου	209
6.4 Τριφασική ισχύς συναρτήσει συμμετρικών συνιστωσών	210
6.5 Διαμήκεις σύνθετες αντιστάσεις ασύμμετρες	210
6.6 Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις και ακολουθιακά δίκτυα	215
6.7 Ακολουθιακά δίκτυα αφόρτιστων γεννητριών	216
6.8 Σύνθετες ακολουθιακές αντιστάσεις μετασχηματιστών	220
6.9 Σύνθετες ακολουθιακές αντιστάσεις γραμμών μεταφοράς	225
6.10 Φασική μετατόπιση σε ένα Υ/Δ μετασχηματιστή	231
6.11 Περίληψη	238
<i>Προβλήματα</i>	238
<i>Αναφορές</i>	240

Κεφάλαιο 7

ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή	243
7.2 Κλασικός τρόπος μελέτης ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων	244
7.3 Συνθήκες φασικών ποσοτήτων ανάλογα με τον τύπο βραχυκυκλώματος	245
7.3.1 Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών	245
7.3.2 Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς	247
7.3.3 Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές μεταφοράς	248

7.4	Μετατροπή των φασικών συνθηκών βραχυκυκλώματος στις συμμετρικές τους συνιστώσες.....	250
7.4.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών	250
7.4.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	252
7.4.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές μεταφοράς.....	252
7.5	Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων.....	255
7.5.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών	256
7.5.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	257
7.5.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές.....	258
7.6	Υπολογισμός ΣΣ ρευμάτων και τάσεων στη θέση του βραχυκυκλώματος.....	260
7.6.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών	260
7.6.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	262
7.6.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές.....	262
7.7	Υπολογισμός των φασικών τιμών ρευμάτων και τάσεων βραχυκυκλώματος.....	263
7.7.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών	264
7.7.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	265
7.7.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων στις γραμμές.....	266
7.8	Ψηφιακός υπολογισμός ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων με χρήση της Z_{bus}	281
7.9	Επιλογή μοντέλου δικτύου	281
7.9.1	Ακολουθιακά δίκτυα	282
7.10	Συστηματικός υπολογισμός ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων.....	283
7.11	Περίληψη	291
	Προβλήματα	292
	Αναφορές	297
Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 5		
	Κυματικά Φαινόμενα και Ανάλυση Συμμετρικών Βραχυκυκλωμάτων.....	299
Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 6		
	Συμμετρικές Συνιστώσες και Ακολουθιακά Δίκτυα	319
Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 7		
	Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα	331
	Ευρετήριο Όρων.....	355

1^ο

Κεφάλαιο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για να μπορέσει ο μηχανικός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας να σχεδιάσει σωστά ένα σύστημα, να το λειτουργήσει αξιόπιστα, να προτείνει λύσεις για τη μελλοντική του *βελτίωση, επέκταση ή τροποποίηση* και να το εξοπλίσει με τα κατάλληλα συστήματα *προστασίας και ελέγχου*, πρέπει να κάνει μία σειρά μελετών που θα του δώσουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να φέρει σε πέρας αυτόν το σκοπό, όπως *μελέτες ροής φορτίου, μελέτες σφαλμάτων και μελέτες μεταβατικής ευστάθειας*.

Για την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος, εξάλλου, είναι απαραίτητες μελέτες *οικονομικής λειτουργίας* που θα καθορίσουν τον τρόπο με τον οποίον πρέπει να κατανεμηθεί η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των διαφόρων μονάδων παραγωγής, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί κατά το βέλτιστο οικονομικά τρόπο.

Το σύνολο των μελετών που προαναφέρθηκαν, μέσω των οποίων εκτιμάται η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στη μόνιμη όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας, χαρακτηρίζονται με τον όρο «*ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας*».

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε με δυο λόγια τη φύση αυτών των μελετών, τις πληροφορίες που αντλούμε από αυτές και τον τρόπο που χρησιμοποιούμε αυτές τις πληροφορίες για τη *σχεδίαση* και τη *λειτουργία* ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Μελέτη ροής φορτίου

Με τη μελέτη ροής φορτίου υπολογίζουμε τη συμπεριφορά ενός συστήματος

ηλεκτρικής ενέργειας, που υφίσταται συγκεκριμένη φόρτιση, στη *μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*. Οι ποσότητες που υπολογίζονται από τη ροή φορτίου είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων σε κάθε ζυγό του συστήματος. Γνωρίζοντας τις ποσότητες αυτές μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις άλλες ποσότητες του συστήματος, όπως τις ροές πραγματικής και αέργου ισχύος, τα ρεύματα, τις πτώσεις τάσης, τις απώλειες ισχύος κ.λ.π.

Οι μελέτες ροής φορτίου είναι πολύ χρήσιμες:

- ♦ Για τη σχεδίαση της μελλοντικής ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε θέλουμε να γνωρίζουμε την *επίδραση* που τυχόν θα έχουν σε αυτό, προτού ακόμα εγκατασταθούν, διασυνδέσεις άλλων συστημάτων, νέων φορτίων, νέων μονάδων παραγωγής και νέων γραμμών μεταφοράς. Η γνώση αυτής της επίδρασης είναι σημαντική για να πετύχουμε ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος δοκιμάζοντας την *αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα διαφόρων εναλλακτικών λύσεων*.
- ♦ Για τον προσδιορισμό της *βέλτιστης διαδικασίας* που πρέπει να ακολουθήσουμε για τη λειτουργία του συστήματος. Καθώς τα φορτία που τροφοδοτεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας ή από μέρα σε μέρα, πρέπει να γνωρίζουμε από ποιες μονάδες τροφοδοτούνται τα φορτία, ώστε να πετύχουμε την καλύτερη ρύθμιση τάσης στους ζυγούς και τη βέλτιστη οικονομικά λειτουργία.
- ♦ Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδικασίας λειτουργίας όταν για κάποιους λόγους τεθούν εκτός λειτουργίας μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς.
- ♦ Για την εύρεση αρχικών τιμών που είναι απαραίτητες για άλλες μελέτες, όπως μελέτες βραχυκυκλωμάτων, μεταβατικής ευσταθείας κ.λ.π.

Οικονομική λειτουργία συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η *οικονομική λειτουργία* ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών (ηλεκτρικό φορτίο) ικανοποιείται ελαχιστοποιώντας το κόστος παραγωγής (δηλαδή όταν επιτυγχάνουμε το μικρότερο κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας (KWh)). Για να οδηγηθεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε οικονομική λειτουργία πρέπει να επιλυθούν τα εξής προβλήματα:

- ♦ Το πρόβλημα της *οικονομικής κατανομής φορτίου*, του προσδιορισμού, δηλα-

δή, της ισχύος εξόδου των εν λειτουργία θερμικών μονάδων, έτσι ώστε να καλυφθεί η τρέχουσα ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών με το ελάχιστο συνολικό κόστος λειτουργίας των θερμικών μονάδων του συστήματος.

- ▶ Το πρόβλημα της *υδροθερμικής συνεργασίας*, του προσδιορισμού, δηλαδή, του προγράμματος λειτουργίας των θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών ενός συστήματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου.
- ▶ Το πρόβλημα του *προγραμματισμού των ανταλλαγών ή αγορών/πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας* ενός συστήματος με τα γειτονικά διασυνδεδεμένα συστήματα.

Μελέτες σφαλμάτων

Με τις μελέτες σφαλμάτων προσδιορίζουμε τα ρεύματα που ρέουν στις γραμμές ενός ενεργειακού δικτύου και τις τάσεις που επικρατούν στους ζυγούς αυτού κατά τη διάρκεια διαφόρων τύπων *βραχυκυκλωμάτων* που συμβαίνουν σε διάφορες θέσεις του συστήματος. Λέμε ότι συμβαίνει βραχυκύκλωμα ή σφάλμα όταν *διακοπεί* η μόνωση του συστήματος σε κάποιο σημείο ή όταν κάποιο αγωγίμο αντικείμενο έλθει σε επαφή με γυμνό αγωγό. Οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα είναι πολλές, όπως κεραυνοί, δυνατοί άνεμοι, πτώσεις δένδρων σε γραμμές, καταστροφές στύλων από συγκρούσεις οχημάτων, διείσδυση μικρών ζώων σε διακοπτικούς μηχανισμούς κ.λ.π. Τα σφάλματα, κατά σειρά συχνότητας στην εμφάνιση, είναι: το μονοφασικό προς γη, το διφασικό, το διφασικό προς γη, και το συμμετρικό τριφασικό. Οι τρεις πρώτοι τύποι σφαλμάτων οδηγούν σε έντονα *ασύμμετρες* καταστάσεις λειτουργίας.

Τα ρεύματα που ρέουν στις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αμέσως μετά από ένα σφάλμα είναι *πολλαπλάσια* των κανονικών ρευμάτων φορτίου που ρέουν πριν να συμβεί το σφάλμα, προκαλούν *δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις* και αν δεν διακοπούν από τις συσκευές προστασίας, δηλαδή τους διακόπτες, θα προκαλέσουν καταστροφή του εξοπλισμού. Το σύστημα προστασίας, λοιπόν, του ενεργειακού δικτύου πρέπει να *αναγνωρίζει* την ύπαρξη των σφαλμάτων και να θέτει σε λειτουργία τις κατάλληλες *διακοπτικές διαδικασίες* ώστε, με την ελάχιστη δυνατή διακοπή των υπηρεσιών που παρέχονται στην κατανάλωση, να *αποσυνδέονται* τα σφαλμένα μέρη του δικτύου και να αποφεύγεται, έτσι, η καταστροφή τους.

2.6 ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στις προηγούμενες ενότητες αναφερθήκαμε στα ισοδύναμα κυκλώματα των βασικών συνιστωσών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ενότητα αυτή θα δούμε πως από τη σύνθεση των ισοδύναμων κυκλωμάτων των επί μέρους συνιστωσών θα προκύψει το ισοδύναμο κύκλωμα του *συνολικού συστήματος*.

Όταν μελετούμε τριφασικά συστήματα που είναι ισοζυγισμένα επιλύουμε συνήθως τη μία φάση και τα αποτελέσματα των άλλων φάσεων τα υπολογίζουμε εκμεταλλευόμενοι την τριφασική συμμετρία. Η παράσταση, συνεπώς, που από πλευράς ανάλυσης συστήματος πρωτίστως μας ενδιαφέρει είναι το *μονοφασικό ή ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα*. Αυτό προκύπτει από το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος αν αντικαταστήσουμε κάθε μία συνιστώσα με το μονοφασικό της ισοδύναμο.

Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες επίλυσης αυτού του κυκλώματος, που οφείλονται στα πολλά επίπεδα τάσης που συνήθως υπάρχουν σε ένα σύστημα, τα μονοφασικά ισοδύναμα των διαφόρων συνιστωσών εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές οπότε οι υπολογισμοί γίνονται στο ανά μονάδα σύστημα. Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει χρησιμοποιώντας ανά μονάδα τιμές λέγεται *ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα*.

Για το σχηματισμό του ανά μονάδα μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ως βάσεις ισχύος και τάσης μονοφασική ισχύ σε MVA και φασική τάση σε kV. Τα δεδομένα, όμως, ισχύος και τάσης των διαφόρων συνιστωσών των ενεργειακών συστημάτων δίνονται συνήθως σε τριφασικά MVA και σε πολική τάση. *Επειδή οι ανά μονάδα τιμές για την ισχύ και την τάση είναι ίδιες είτε χρησιμοποιούμε μονοφασικά MVA και φασική τάση είτε χρησιμοποιούμε τριφασικά MVA και πολική τάση*, είναι διευκόλυνση να χρησιμοποιούμε ως βάσεις ισχύος και τάσης απ' ευθείας όπως ακριβώς δίνονται τα τριφασικά αυτά δεδομένα.

Για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα του ανά μονάδα συστήματος, η επιλογή των βάσεων ισχύος και τάσης γίνεται ως εξής :

- ◆ Επιλέγεται μια βάση ισχύος (τριφασική ισχύς) που είναι *η ίδια* για όλο το σύστημα.
- ◆ Οι βάσεις τάσης (πολικές τάσεις) για τμήματα του δικτύου που συνδέονται μεταξύ τους με μετασχηματιστή λαμβάνονται να *έχουν λόγο ίδιο με το λόγο των ονομαστικών πολικών τάσεων στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή*.

Με αυτήν την επιλογή των βάσεων, η ανά μονάδα τιμή μιας αντίστασης θα είναι η ίδια είτε εκφράζεται ως προς τη βάση αντίστασης της πλευράς στην οποία ανήκει, είτε αναφέρεται στην άλλη πλευρά του μετασχηματιστή και εκφράζεται ως προς τη βάση αντίστασης αυτής της πλευράς. Ακολουθώντας, συνεπώς, αυτήν την αρχή για τον καθορισμό των βάσεων, εξαλείφεται η τμηματικοποίηση του δικτύου που προκαλείται από τους μετασχηματιστές και μπορούμε να συνδυάσουμε σε ένα διάγραμμα τις ανά μονάδα τιμές των συνθέτων αντιστάσεων που προσδιορίζουμε σε διαφορετικά τμήματα του συστήματος.

Τα δεδομένα συνθέτων αντιστάσεων των γεννητριών και των μετασχηματιστών δίνονται συνήθως από τους κατασκευαστές σε ανά μονάδα τιμές με βάσεις την ονομαστική τους ισχύ και την ονομαστική τους τάση. Αν οι βάσεις ισχύος και τάσης που έχουν επιλεγεί για το τμήμα του δικτύου όπου συνδέονται αυτές οι συνιστώσες διαφέρουν από τις ονομαστικές αυτές τιμές, τότε οι ανά μονάδα τιμές των συνθέτων αντιστάσεών τους θα πρέπει να αναφερθούν στις νέες βάσεις χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση μετατροπής:

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{|V_b^{old}|^2 |S_b^{new}|}{|V_b^{new}|^2 |S_b^{old}|} \quad (2.17)$$

όπου με τον δείκτη *old* και *new* συμβολίζουμε τις παλιές (ονομαστικές) και τις νέες (επιλεγείσες) βάσεις αντίστοιχα.

Οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς εκφράζονται κατά κανόνα σε Ω. Για να μετατραπούν σε ανά μονάδα τιμές πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την κατάλληλη βάση αντίστασης. Αν $|S_b|_{3\Phi}$ είναι η βάση ισχύος σε MVA που επελέγη για όλο το σύστημα και $|V_{bi}|_{3\Phi}$ η βάση τάσης σε kV που επελέγη για το *i* τμήμα του δικτύου που βρίσκεται η υπόψη γραμμή μεταφοράς, τότε για αυτό το τμήμα του δικτύου η βάση αντίστασης δίνεται από την εξίσωση:

$$|Z_{bi}|_{3\Phi} = \frac{|V_{bi}|_{3\Phi}^2}{|S_b|_{3\Phi}} \Omega \quad (2.18)$$

Η βάση ρεύματος για το ίδιο τμήμα του δικτύου δίνεται από την εξίσωση:

$$|I_{bi}|_{3\Phi} = \frac{|S_b|_{3\Phi}}{\sqrt{3} |V_{bi}|_{3\Phi}} \text{ kA} \quad (2.19)$$

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον σχηματισμό του ανά μονάδα μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος ενός δικτύου διευκρινίζεται πλήρως με το παράδειγμα που ακολουθεί.

όλων των άλλων τμημάτων αφού, σύμφωνα με όσα αναφέραμε, αυτές εκατέρωθεν ενός μετασχηματιστή θα πρέπει να έχουν λόγο ίσο με τον λόγο των αντίστοιχων πολικών τάσεων αυτού. Οι βάσεις τάσης για τα υπόλοιπα πέντε τμήματα του δικτύου υπολογίζονται διαδοχικά ως εξής:

- ♦ *Τμήμα 2:* Αφού η βάση τάσης στην πλευρά υψηλής τάσης του Μ/Σ T_1 είναι 138 kV, η βάση τάσης στην πλευρά χαμηλής τάσης αυτού θα είναι:

$$|V_{b2}|_{3\Phi} = |V_{b1}|_{3\Phi} \times \frac{13.8}{138} = 138 \times \frac{13.8}{138} = 13.8 \text{ kV}$$

- ♦ *Τμήμα 3:* Αφού η βάση τάσης στην πλευρά υψηλής τάσης του Μ/Σ T_2 είναι 138 kV, η βάση τάσης στην πλευρά χαμηλής τάσης αυτού θα είναι:

$$|V_{b3}|_{3\Phi} = |V_{b1}|_{3\Phi} \times \frac{13.8}{138} = 138 \times \frac{13.8}{138} = 13.8 \text{ kV}$$

- ♦ *Τμήματα 4, 5:* Αφού οι βάσεις τάσης στις πλευρές χαμηλής τάσης των μετασχηματιστών T_3 και T_4 είναι 13.8 kV, οι βάσεις τάσης στις πλευρές υψηλής τάσης αυτών θα είναι αντίστοιχα:

$$|V_{b4}|_{3\Phi} = |V_{b2}|_{3\Phi} \times \frac{138}{13.8} = 13.8 \times \frac{138}{13.8} = 138 \text{ kV}$$

$$|V_{b5}|_{3\Phi} = |V_{b3}|_{3\Phi} \times \frac{138}{13.8} = 13.8 \times \frac{138}{13.8} = 138 \text{ kV}$$

- ♦ *Τμήμα 6:* Οι Υ-Δ μετασχηματιστές T_4 και T_5 αποτελούνται από μονοφασικές μονάδες. Οι πολικές τους τάσεις, συνεπώς, έχουν λόγο $79.67\sqrt{3} \text{ Y}/6.9 \Delta = 138 \text{ Y}/6.9 \Delta$. Αφού η βάση τάσης στην πλευρά υψηλής τάσης του Μ/Σ T_4 είναι 138 kV, η βάση τάσης στην πλευρά χαμηλής τάσης αυτού θα είναι:

$$|V_{b6}|_{3\Phi} = |V_{b4}|_{3\Phi} \times \frac{6.9}{138} = 138 \times \frac{6.9}{138} = 6.9 \text{ kV}$$

Οι βάσεις τάσης όλων των τμημάτων του δικτύου αναγράφονται εντός παρενθέσεων κάτω από τα αντίστοιχα τετραγωνίδια στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχ. 2.18.

Επειδή οι βάσεις τάσης σε όλα τα τμήματα του δικτύου που υπάρχουν γραμμές μεταφοράς είναι ίδιες ($|V_{b1}|_{3\Phi} = |V_{b4}|_{3\Phi} = |V_{b5}|_{3\Phi} = 138 \text{ kV}$), ίδιες είναι και οι βάσεις αντίστασης και έχουν, σύμφωνα με την εξ. 2.18, τιμή $(138)^2/50 = 380 \Omega$. Οι ανά μονάδα αντιδράσεις των γραμμών μεταφοράς, συνεπώς, προκύπτουν:

- Για τη γραμμή των 40 Ω: $j40/380 = j0.105$ pu
- Για τις γραμμές των 20 Ω: $j20/380 = j0.0525$ pu

Οι αντιδράσεις των μετασχηματιστών και των μηχανών δίνονται ήδη επί τοις εκατό με βάσεις την ονομαστική ισχύ και ονομαστική τάση κάθε συσκευής. Μετατρέποντας, με τη βοήθεια της εξ. 2.17, αυτές τις τιμές ως προς τις νέες επιλεγείσες βάσεις, έχουμε:

- Για τους Υ-Υ μετασχηματιστές: $j0.1 \times \frac{13.8^2}{13.8^2} \times \frac{50}{20} = j0.25$ pu.
- Για τους Υ-Δ μετασχηματιστές: Επειδή οι Υ-Δ μετασχηματιστές είναι μονοφασικοί, η συνολική τριφασική ισχύς καθενός από αυτούς είναι $3 \times 5 = 15$ MVA.

Η ανά μονάδα αντίδραση σκέδασης, συνεπώς, αυτών των μετασχηματιστών

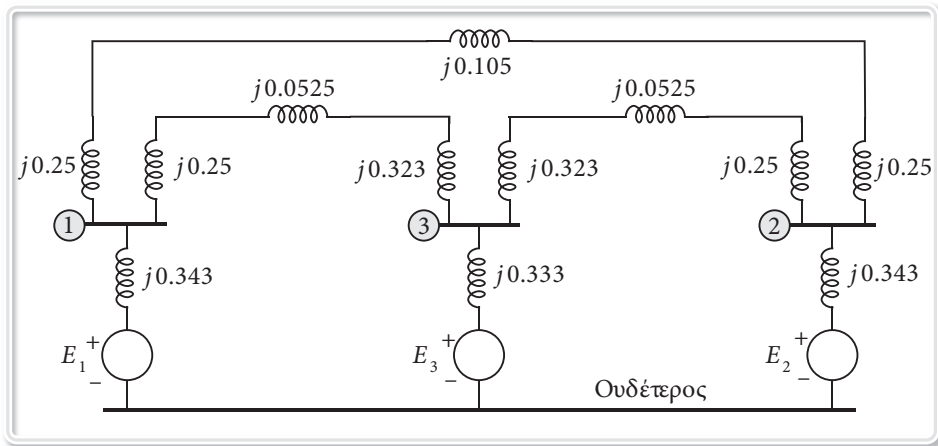
προκύπτει: $j0.1 \times \frac{6.9^2}{6.9^2} \times \frac{50}{15} = j0.323$ pu.

- Για τις γεννήτριες 1 και 2 : $j0.15 \times \left(\frac{13.2}{13.8}\right)^2 \times \left(\frac{50}{20}\right) = j0.343$ pu.
- Για τον κινητήρα 3 : $j0.20 \times \frac{6.9^2}{6.9^2} \times \frac{50}{30} = j0.333$ pu.

Το δίκτυο του Σχ. 2.18 έχει παράλληλους δρόμους. Για να μην κυκλοφορούν κυκλικά ρεύματα θα πρέπει σε κάθε παράλληλο δρόμο το γινόμενο των μιγαδικών λόγων μετασχηματισμού να είναι το ίδιο. Στον επάνω δρόμο έχουμε ύψωση της τάσης κατά συντελεστή 10 λόγω του μετασχηματιστή T_1 και μείωση αυτής κατά τον ίδιο συντελεστή λόγω του μετασχηματιστή T_2 . Το γινόμενο των λόγων μετασχηματισμού από αριστερά προς τα δεξιά είναι $(13.8/138) \times (138/13.8) = 1$. Στον κάτω δρόμο, όπου παρεμβάλλονται οι μετασχηματιστές T_3 , T_4 , T_5 και T_6 , το γινόμενο των λόγων μετασχηματισμού προς την ίδια κατεύθυνση είναι $\left(\frac{13.8}{138}\right) \times \left(\frac{138}{6.9} / 30^\circ\right) \times \left(\frac{6.9}{138} / -30^\circ\right) \times \left(\frac{138}{13.8}\right) = 1$. Λόγω του ότι τα γινόμενα των μιγαδικών λόγων μετασχηματισμού των δύο παράλληλων δρόμων είναι ίσα, δεν κυκλοφορούν κυκλικά ρεύματα.

Επειδή οι φασικές μετατοπίσεις που εισάγουν οι Υ-Δ μετασχηματιστές ακυρώνουν η μία την άλλη, τα μέτρα των τάσεων και των ρευμάτων καθώς και οι ροές μιγαδικής ισχύος δεν επηρεάζονται από αυτές. Μπορούν, συνεπώς, να αγνοηθούν και να προκύψει έτσι, μετά την αντικατάσταση των ανά μονάδα

αντιδράσεων που υπολογίστηκαν, το ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο Σχ. 2.19.



Σχ. 2.19 Το ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου του Σχ. 2.18

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

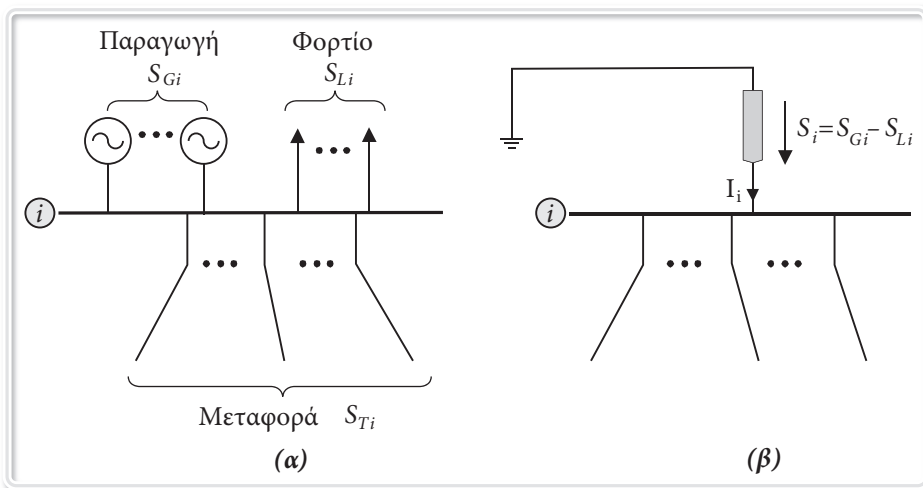
1. Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλου, Νικολάου Α. Βοβού, «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις Ζήτη, 2008
2. Stevenson William D., “Elements of Power Systems Analysis”, McGraw-Hill Co., 1975.
3. Elgerd Olle I., “Electric Energy Systems Theory: An Introduction”, McGraw-Hill Co., 1971.

4.2 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Επειδή τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι στη μόνιμη κατάσταση συνήθως ισοζυγισμένα, στην ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιούμε το μονοφασικό τους ισοδύναμο. Οι ποσότητες, συνεπώς, που εμπλέκονται στους υπολογισμούς που ακολουθούν είναι ποσότητες ανά φάση οι ισχύεις, δηλαδή, είναι μονοφασικές ισχύεις και οι τάσεις είναι φασικές τάσεις.

Θεωρούμε το ζυγό i ενός συστήματος n ζυγών. Αν θεωρήσουμε ότι ο ζυγός έχει την πιο γενική μορφή, τότε σε αυτόν το ζυγό συνδέονται, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1α, γεννήτριες που τροφοδοτούν μιγαδική ισχύ S_{Gi} , φορτία που καταναλώνουν μιγαδική ισχύ S_{Li} , και γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν εκτός του ζυγού μιγαδική ισχύ S_{Ti} . Οι ισχύεις αυτές συνδέονται με τη σχέση:

$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti} \quad (4.1)$$



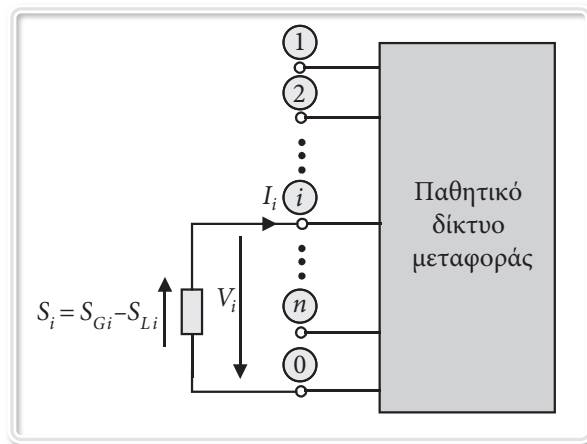
Σχ. 4.1 α) Γενική μορφή ζυγού.

β) Αντικατάσταση παραγωγής και κατανάλωσης με ισοδύναμη πηγή ισχύος.

Οι υπολογισμοί ροής φορτίου γίνονται, ως γνωστόν, για συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης του δικτύου. Το φορτίο S_{Li} , συνεπώς, που συνδέεται σε κάθε ζυγό i είναι γνωστό. Η παραγωγή S_{Gi} προσδιορίζεται από το χειριστή του ΣΗΕ έτσι ώστε να επιτευχθεί αποδεκτή κατάσταση λειτουργίας και άρα θεωρείται δεδομένη για τη μελέτη ροής φορτίου. Η μεταφερόμενη, όμως, εκτός του ζυγού ισχύς

S_{Ti} δεν μπορεί να εκφραστεί άμεσα διότι για τον προσδιορισμό της απαιτείται η γνώση των τάσεων ζυγών. Θα δούμε στη συνέχεια με ποιόν τρόπο μπορούμε να την εκφράσουμε.

Ορίζοντας τη διαφορά μεταξύ των ισχύων παραγωγής και φορτίου $S_{Gi} - S_{Li} = S_i$ ως την *καθαρή ισχύ* που χύνεται στο ζυγό i και θεωρώντας ότι αυτή παρέχεται από *ισοδύναμη πηγή ισχύος*, ο ζυγός μπορεί να παρασταθεί ισοδύναμα όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1β. Με βάση αυτήν την παράσταση το σύστημα των n ζυγών διευθετείται κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 4.2. Το παθητικό τμήμα, δηλαδή, του δικτύου (γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές) παριστάνεται με σύστημα n ακροδεκτών, που αντιστοιχούν στους ζυγούς, σε κάθε έναν από τους οποίους γίνεται έγχυση ρεύματος I_i που αντιστοιχεί στην ισχύ $S_i = S_{Gi} - S_{Li}$.



Σχ. 4.2 Παράσταση συστήματος n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των κόμβων, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του δικτύου του Σχ. 4.2 γράφονται ως εξής:

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (4.2)$$

όπου: I_{bus} : το διάνυσμα των ρευμάτων I_i που εισέρχονται τους ζυγούς, διαστάσεων $n \times 1$.

V_{bus} : το διάνυσμα των τάσεων ζυγών που μετρούνται ως προς το ζυγό αναφοράς, διαστάσεων $n \times 1$, με στοιχεία της μορφής $V_i = |V_i| \angle \delta_i$.

Y_{bus} : ο πίνακας αγωγιμοτήτων ζυγών, διαστάσεων $n \times n$, με στοιχεία της μορφής $y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$.

Ως ζυγός αναφοράς για το σχηματισμό του Y_{bus} λαμβάνεται η γη, οπότε κατά την κατασκευή της λαμβάνονται υπ' όψιν και τα εγκάρσια στοιχεία που συνδέονται προς τη γη, όπως στατικοί πυκνωτές και εγκάρσιοι κλάδοι των ισοδύναμων κυκλωμάτων των μετασχηματιστών και των γραμμών.

Από την εξ. 4.2 διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα I_i που εισέρχεται στο ζυγό i μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των στοιχείων του πίνακα Y_{bus} και των τάσεων ζυγών ως εξής:

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad (4.3)$$

Η ισχύς S_{Ti} , συνεπώς, προκύπτει:

$$S_{Ti} = V_i I_i^* = V_i \left(\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \right)^* \quad (4.4)$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η ισχύς S_{Ti} μπορεί να αντικατασταθεί μέσω της εξ. 4.4 με τις τάσεις V_i . Η εξ. 4.4 δείχνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος ροής φορτίου, αφού η ισχύς S_{Ti} που μεταφέρεται εκτός του ζυγού i είναι συνάρτηση των τάσεων όλων των άλλων ζυγών του συστήματος.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξ. 4.4, η εξ. 4.1 γίνεται:

$$S_{Gi} - S_{Li} = V_i \left(\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \right)^* \quad (4.5)$$

Αν λάβουμε τις συζυγείς παραστάσεις αμοτέρων των μελών και θέσουμε $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$ και $S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$, η εξ. 4.5 γίνεται:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left(\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \right) \quad (4.6)$$

όπου: $P_i = P_{Gi} - P_{Li}$ και $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$.

Εξισώσεις της μορφής 4.6 μπορούν να γραφτούν για όλους τους ζυγούς του δικτύου. Οι εξισώσεις αυτές εκφράζουν το *ισοζύγιο μιγαδικής ισχύος* σε κάθε ζυγό του δικτύου. Στο εξής θα αναφέρονται ως *στατικές εξισώσεις ροής φορτίου (ΣΕΡΦ) υπό μιγαδική μορφή*.

Χρησιμοποιώντας *πολικές* συντεταγμένες για τις τάσεις και τις αγωγιμότητες,

δηλαδή $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ και $y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$, οι μιγαδικές εξ. 4.6 μπορούν να διασπαστούν, εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, σε $2n$ πραγματικές εξισώσεις, ως εξής:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (4.7\alpha)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (4.7\beta)$$

Οι εξ. 4.7 εκφράζουν το ισοζύγιο πραγματικής και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου και είναι βασικής σημασίας για την παραπέρα ανάλυση. Στο εξής θα αναφέρονται ως *στατικές εξισώσεις ροής φορτίου υπό πραγματική μορφή*.

Σχετικά με τις εξ. 4.7 μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

1. Είναι εξισώσεις *αλγεβρικές* διότι περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
2. Είναι εξισώσεις *μη γραμμικές*. Αυτό σημαίνει ότι είναι δύσκολο να έχουμε *αναλυτικές* λύσεις. Γι' αυτό καταφεύγουμε σε *αριθμητικές* λύσεις που μπορούν να ληφθούν εύκολα με ψηφιακό υπολογιστή.
3. Συνήθως στην ανάλυση δικτύων, οι εξισώσεις συσχετίζουν τάσεις και ρεύματα. Οι εξ. 4.7 συσχετίζουν *τάσεις* και *ισχύεις*, επειδή σε πρώτη φάση δεν ενδιαφερόμαστε για τα ρεύματα.
4. Πουθενά στις εξισώσεις αυτές δεν εμφανίζεται η συχνότητα f , παρόλο που αυτή υπεισέρχεται στις αντιδράσεις $X_L = 2\pi fL$ και $X_C = 1/2\pi fC$ των στοιχείων του δικτύου, διότι υποθέτουμε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή *σταθερή συχνότητα*.
5. Το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος, που συζητήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά προσθέτοντας όλες τις εξ. 4.7α, δηλαδή:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = \sum_{i=1}^n P_{Li} + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \right] \quad (4.8)$$

Αυτή η σχέση δηλώνει ότι το σύνολο της παραγόμενης πραγματικής ισχύος ισούται με το σύνολο της καταναλισκόμενης συν τις πραγματικές απώλειες P_L . Ο όρος των απωλειών είναι συνήθως μικρός και ανέρχεται σε μερικές μονάδες επί τοις εκατό της συνολικής κατανάλωσης.

6. Τα ισοζύγιο αέργου ισχύος εκφράζεται ανάλογα προσθέτοντας όλες τις εξ. 4.7β, δηλαδή:

$$\sum_{i=1}^n Q_{Gi} = \sum_{i=1}^n Q_{Li} + \sum_{i=1}^n \left[- \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| \gamma_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \right] \quad (4.9)$$

Ο τρίτος όρος παριστάνει τις άεργες απώλειες Q_L και την παραγωγή αέργου ισχύος στις εγκάρσιες αγωγιμότητες των γραμμών.

7. Για δοσμένο ενεργειακό σύστημα (Y_{bus} : γνωστός) οι όροι των απωλειών είναι συναρτήσεις μόνο των μέτρων και των φασικών γωνιών των τάσεων ζυγών. Μπορούμε, δηλαδή, να γράψουμε:

$$P_L = P_L(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_n|, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (4.10\alpha)$$

$$Q_L = Q_L(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_n|, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (4.10\beta)$$

8. Οι φασικές γωνίες δ_i των τάσεων ζυγών δεν εμφανίζονται ποτέ μόνες τους, αλλά πάντα σαν διαφορές $\delta_i - \delta_j$. Το γεγονός αυτό θα αποδειχθεί μεγάλης σημασίας στη συνέχεια.

4.3 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Με κάθε ζυγό i ενός δικτύου σχετίζονται έξι μεταβλητές: $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Li}, Q_{Li}, |V_i|$ και δ_i . Οι μεταβλητές αυτές είναι δυνατόν να ταξινομηθούν ως εξής:

- α) **Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής:** αυτές είναι οι μεταβλητές που δεν μπορούμε να ελέγξουμε, δηλαδή οι πραγματικές και άεργες καταναλώσεις P_{Li} και Q_{Li} . Οι μεταβλητές αυτές συνιστούν το **διάνυσμα διαταραχής p** , που ορίζεται ως εξής:

$$p = [P_{L1} \ Q_{L1} \ P_{L2} \ Q_{L2} \ \dots \ P_{Ln} \ Q_{Ln}]^T \quad (4.11)$$

- β) **Μεταβλητές ελέγχου:** είναι εκείνες οι μεταβλητές που έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε, δηλαδή οι παραγωγές πραγματικής και αέργου ισχύος P_{Gi} και Q_{Gi} . Αυτές οι μεταβλητές συνιστούν το **διάνυσμα ελέγχου u** , που ορίζεται ως εξής:

$$u = [P_{G1} \ Q_{G1} \ P_{G2} \ Q_{G2} \ \dots \ P_{Gn} \ Q_{Gn}]^T \quad (4.12)$$

- γ) **Μεταβλητές κατάσταση:** είναι οι μεταβλητές τις οποίες επηρεάζουμε μεταβάλλοντας τις μεταβλητές ελέγχου P_{Gi} και Q_{Gi} , δηλαδή τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i αντίστοιχα. Οι μεταβλητές αυτές συνιστούν το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} , που ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{x} = [|V_1| \ \delta_1 \ |V_2| \ \delta_2 \dots |V_n| \ \delta_n]^T \quad (4.13)$$

Με βάση τους ορισμούς που προηγήθηκαν, οι $2n$ εξισώσεις ροής φορτίου της μορφής 4.7, που γράφονται για το σύνολο των n ζυγών ενός δικτύου, μπορούν να τεθούν υπό τη γενική μορφή:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (4.14)$$

Δύο από τις έξι μεταβλητές κάθε ζυγού, οι καταναλώσεις, δηλαδή, πραγματικές και αέργου ισχύος P_{Li} και Q_{Li} , είναι γνωστές από ιστορικά στοιχεία, προβλέψεις φορτίου ή μετρήσεις. Συχνά στην πράξη είναι γνωστή μόνο η πραγματική κατανάλωση P_{Li} και η άεργος υπολογίζεται υποθέτοντας έναν τυπικό συντελεστή ισχύος, 0.85 ή υψηλότερο. Απομένουν, συνεπώς, για προσδιορισμό τέσσερις μεταβλητές ανά ζυγό $(P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i|, \delta_i)$, δηλαδή σύνολο $4n$ μεταβλητές. Οι εξισώσεις όμως που έχουμε στη διάθεσή μας είναι $2n$. Δεν είναι, συνεπώς, δυνατόν να προχωρήσουμε στην επίλυση του συστήματος των $2n$ εξ. 4.14 παρά μόνο *ελαττώνοντας* τον αριθμό των αγνώστων. Αυτό μπορεί να γίνει *προκαθορίζοντας* τις τιμές για άλλες δύο μεταβλητές ανά ζυγό, ώστε τελικά οι άγνωστοι να γίνουν τόσοι όσες και οι εξισώσεις. Φυσικά μπορούμε να προκαθορίσουμε τις τιμές μόνο μεταβλητών τις οποίες μπορούμε να *ελέγξουμε*. Η επιλογή των μεταβλητών τις τιμές των οποίων θα προκαθορίσουμε εξαρτάται από το είδος των συσκευών που συνδέονται στον αντίστοιχο ζυγό.

Ανάλογα με το ποιες από τις τέσσερις ποσότητες $P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i|$, και δ_i προκαθορίζονται, διακρίνουμε τρεις τύπους ζυγών.

1. **Ζυγοί φορτίου:** είναι οι ζυγοί στους οποίους δεν υπάρχει παραγωγή, οπότε P_{Gi} και Q_{Gi} είναι μηδέν και άρα προκαθορισμένες. Στους ζυγούς αυτούς υπάρχουν μόνο φορτία και αυτός είναι ο λόγος που ονομάζονται ζυγοί φορτίου. Ο ζυγός φορτίου είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ζυγού. Περίπου το 85% του συνόλου των ζυγών ενός δικτύου είναι ζυγοί φορτίου. Οι ποσότητες που υπολογίζονται από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου σε αυτούς τους ζυγούς είναι το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης $|V_i|$ και δ_i .
2. **Ζυγοί με ελεγχόμενη τάση:** είναι οι ζυγοί στους οποίους ελέγχεται το μέτρο της τάσης $|V_i|$ ώστε να κρατείται σταθερό σε μια προκαθορισμένη τιμή

$|V_i|_{spec}$. Συνήθως είναι ζυγοί στους οποίους συνδέονται γεννήτριες και γι' αυτό συχνά ονομάζονται και *ζυγοί παραγωγής*. Επειδή οι δύο ποσότητες που απ' ευθείας ελέγχονται σε μία γεννήτρια είναι η παραγόμενη πραγματική ισχύς P_{Gi} (ρυθμίζοντας τη μηχανική ισχύ στην είσοδο του στροβίλου) και το μέτρο της τάσης $|V_i|$ (ρυθμίζοντας το ρεύμα διέγερσης), είναι δυνατόν σε αυτούς τους ζυγούς αυτές οι δύο ποσότητες να προκαθοριστούν. Από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου θα προκύψουν τα Q_{Gi} και δ_i .

Έλεγχος του μέτρου της τάσης είναι δυνατόν να έχουμε και σε ζυγούς στους οποίους δεν συνδέονται γεννήτριες. Αυτοί είναι ζυγοί φορτίου (δηλ. $P_{Gi}=0$ και $Q_{Gi}=0$) και ο έλεγχος τάσης γίνεται ή με μετασχηματιστές που έχουν μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού ή με μετασχηματιστές ελέγχου τάσης (δές παράγραφο 2.3.4). Στην περίπτωση αυτή υπεισέρχεται ακόμα μια μεταβλητή στις εξισώσεις ροής φορτίου, ο λόγος μετασχηματισμού a . Λεπτομέρειες για τον τρόπο με τον οποίον αντιμετωπίζεται αυτή η περίπτωση θα αναφερθούν στη συνέχεια.

3. **Ζυγός αναφοράς:** ο ζυγός αυτός είναι ένας ζυγός παραγωγής, τον οποίον όμως αντιμετωπίζουμε με διαφορετικό τρόπο από ότι τους άλλους ζυγούς παραγωγής. Ο λόγος για τον οποίον γίνεται αυτό εξηγείται στη συνέχεια.

Η συνολική παραγωγή σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ισούται με τη συνολική ζήτηση συν τις απώλειες μεταφοράς. Το ισοζύγιο αυτό εκφράζεται από τις εξ. 4.8 και 4.9 για πραγματική και άεργο ισχύ αντίστοιχα. Επειδή οι απώλειες μεταφοράς δεν μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων (διότι, σύμφωνα με τις εξ. 4.10, είναι συναρτήσεις των αγνώστων ακόμα μεταβλητών κατάστασης x), η παραγωγή που απαιτείται για την τροφοδοσία συγκεκριμένου φορτίου του δικτύου δεν είναι δυνατόν να προκαθοριστεί στο σύνολό της. Αν γινόταν κάτι τέτοιο, τότε θα προκαθορίζαμε έμμεσα τις απώλειες. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα, σε ένα ζυγό στον οποίο συνδέεται γεννήτρια δεν προκαθορίζουμε τις παραγωγές πραγματικής και αέργου ισχύος, αλλά τις αφήνουμε ως αγνώστους και τις υπολογίζουμε, μετά την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου, από τις εξ. 4.8 και 4.9 ως διαφορές μεταξύ των προκαθορισμένων ισχύων που εισέρχονται στο σύστημα στους άλλους ζυγούς παραγωγής και του συνολικού φορτίου του συστήματος συν τις απώλειες.

Σε αυτόν το ζυγό, λοιπόν, το ζυγό αναφοράς ή και ζυγό ταλάντωσης όπως ονομάζεται, προκαθορίζουμε το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης. Είναι συνήθης πρακτική να θέτουμε το μέτρο της τάσης αυτού του ζυγού ίσο με 1 pu (αν και αρκετές φορές για να επιτύχουμε αποδεκτή κατάσταση λειτουργίας επι-

λέγουμε διαφορετική τιμή) και τη φασική γωνία της τάσης ίση με 0° . Με αυτήν την επιλογή μεταβλητών λύνουμε ταυτόχρονα και το πρόβλημα του υπολογισμού των φασικών γωνιών των τάσεων των ζυγών, οι οποίες θα ήταν διαφορετικά αδύνατο να προκύψουν αφού δεν εμφανίζονται στις εξισώσεις ροής φορτίου ποτέ μόνες τους, αλλά πάντα σαν διαφορές. Η φασική γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς, δηλαδή, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις φασικές γωνίες των τάσεων όλων των άλλων ζυγών.

Ο ζυγός αναφοράς, λοιπόν, που είναι ένας στο σύστημα, είναι πάντοτε ζυγός παραγωγής. Για να υπάρχει ευελιξία στους υπολογισμούς επιλέγεται συνήθως αυτός με τη μεγαλύτερη παραγωγή πραγματικής ισχύος. Για λόγους διευκόλυνσης αριθμείται πρώτος μεταξύ των ζυγών ενός δικτύου, έτσι ώστε:

$$V_1 = |V_1| \angle \delta_1 = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

Στον Πίνακα 4.1 συνοψίζονται οι τρεις τύποι ζυγών που ορίζονται για τις ανάγκες της ανάλυσης ροής φορτίου.

Πίνακας 4.1 Τύποι ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου.

Τύπος ζυγού	Γνωστές ποσότητες που προκαθορίζονται	Άγνωστες ποσότητες που υπολογίζονται	Πλήθος ζυγών
Ζυγός αναφοράς	$ V_1 , \delta_1$	P_{G1}, Q_{G1}	1
Ζυγός φορτίου	P_{Gi}, Q_{Gi}	$ V_i , \delta_i$	85%
Ζυγός με ελεγχόμενη τάση	$P_{Gi}, V_i $	Q_{Gi}, δ_i	15%

Αν από τη λύση των εξισώσεων ροής φορτίου προκύψουν τιμές των $4n$ μεταβλητών κατάστασης και ελέγχου που πληρούν τις προδιαγραφές του ΣΗΕ, τότε αυτή η κατάσταση λειτουργίας μπορεί να γίνει αποδεκτή από το χειριστή του συστήματος και το ΣΗΕ να λειτουργήσει σε αυτή την κατάσταση. Διαφορετικά επαναλαμβάνονται οι επιλογές (προκαθορισμός των μεταβλητών στους ζυγούς παραγωγής) ώστε οι μεταβλητές που θα προκύψουν από τη λύση να πληρούν τις προδιαγραφές.

Οι μεταβλητές κατάστασης $|V_i|$ θα πρέπει να ικανοποιούν τις ανισότητες:

$$|V_i|_{\min} < |V_i| < |V_i|_{\max}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.15)$$

Αυτό σημαίνει ότι τα μέτρα των τάσεων για να είναι αποδεκτά θα πρέπει να βρίσκονται εντός μιας στενής ζώνης τιμών, για παράδειγμα 5-10% γύρω από τις ονομαστικές τιμές.

Μερικές μεταβλητές κατάστασης δ_i πρέπει να ικανοποιούν την ανισότητα:

$$|\delta_i - \delta_j| < (\delta_i - \delta_j)_{\max} \quad (4.16)$$

Αυτή η ανισότητα απλώς καθορίζει μια μέγιστη γωνία ισχύος και συνεπώς μια μέγιστη τιμή πραγματικής ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί ασφαλώς από τη γραμμή μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς i και j .

Λόγω των πρακτικών περιορισμών που αφορούν τις πηγές πραγματικής και αέργου ισχύος, οι μεταβλητές ελέγχου P_{Gi} και Q_{Gi} θα πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς:

$$P_{Gi, \min} < P_{Gi} < P_{Gi, \max} \quad (4.17\alpha)$$

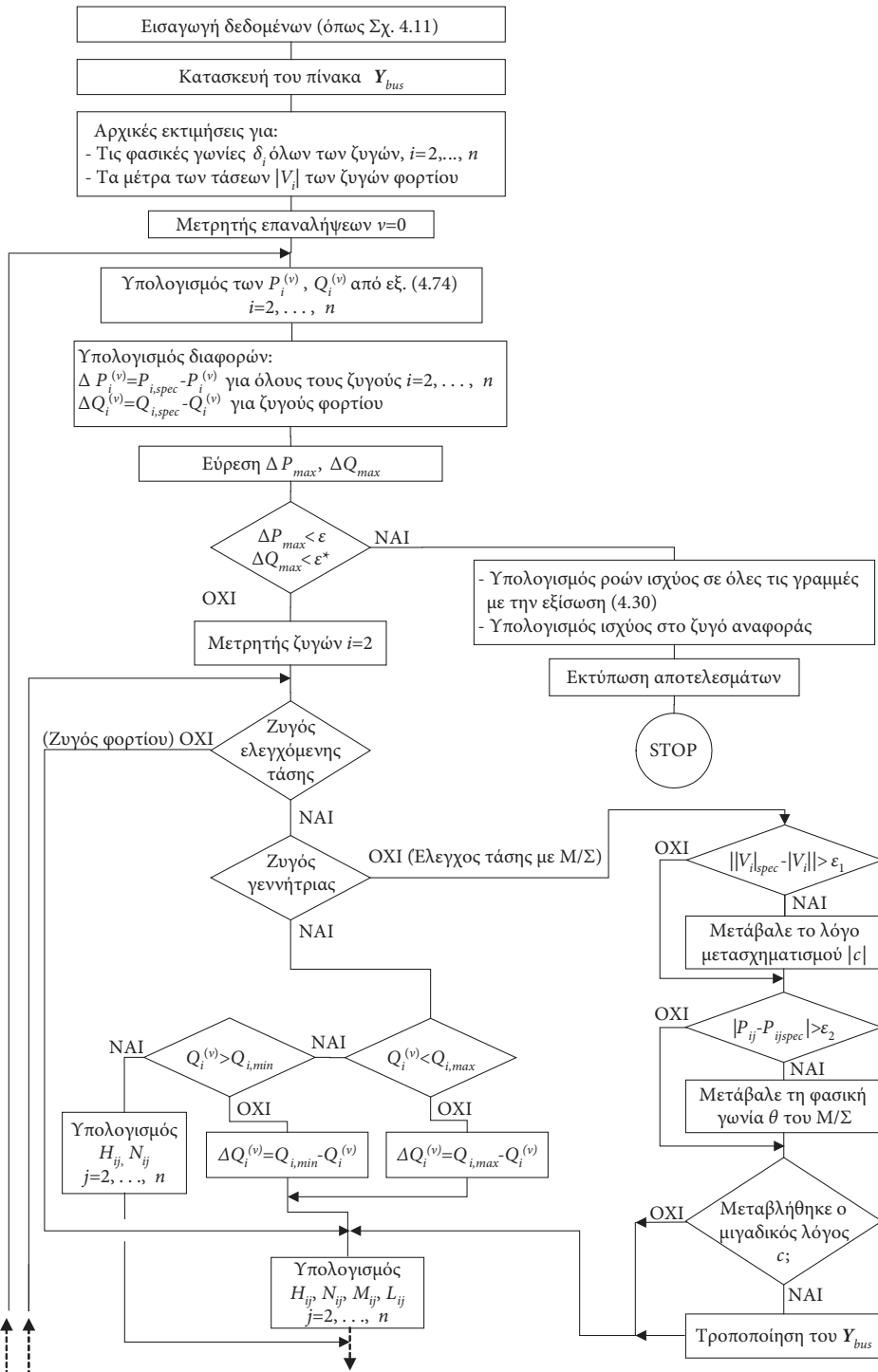
$$Q_{Gi, \min} < Q_{Gi} < Q_{Gi, \max} \quad (4.17\beta)$$

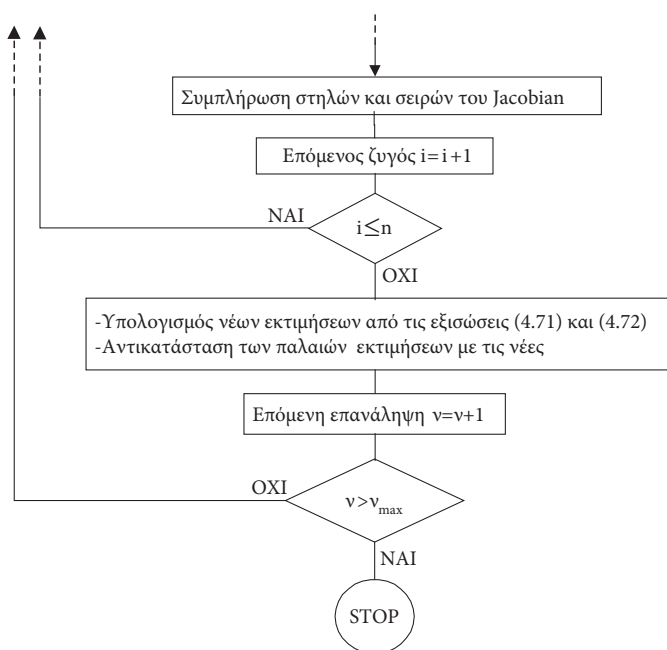
Αν ορισμένοι ζυγοί δεν έχουν παραγωγή πραγματικής ή/και αέργου ισχύος, τότε γι' αυτούς τους ζυγούς θα έχουμε $P_{Gi} = 0$ ή/και $Q_{Gi} = 0$.

Οι εξ. 4.8 και 4.9 μας πληροφορούν ότι η συνολική παραγωγή πραγματικής και αέργου ισχύος πρέπει να ισούται με τη συνολική ζήτηση συν τις απώλειες. Οι εξισώσεις αυτές, όμως, δεν μας δίνουν καμία πληροφορία για τον τρόπο με τον οποίον η συνολική παραγωγή *κατανέμεται* μεταξύ των γεννητριών. Αν το σύστημα πρόκειται να λειτουργήσει κατά κάποιο *βέλτιστο οικονομικά τρόπο* ο καταμερισμός του φορτίου στις γεννήτριες θα πρέπει να γίνει κατά ένα *συγκεκριμένο* τρόπο. Πέραν των περιορισμών που προαναφέρθηκαν, συνεπώς, υπάρχουν και πρόσθετοι περιορισμοί στις μεταβλητές ελέγχου που επιβάλλονται από λόγους *οικονομικής λειτουργίας του συστήματος*.

Συνοψίζοντας τα προαναφερθέντα, το πρόβλημα της ροής φορτίου ή *ροής ισχύος* διατυπώνεται ως εξής:

Δοθέντος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με γνωστό πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{bus} , γνωστή φόρτιση και συγκεκριμένους περιορισμούς όσον αφορά τις μεταβλητές κατάστασης και ελέγχου, να επιλυθούν οι $2n$ εξισώσεις ροής φορτίου 4.14 ως προς τις άγνωστες ποσότητες του Πίνακα 4.1 θεωρώντας γνωστές τις ποσότητες του ίδιου πίνακα που προκαθορίζονται.





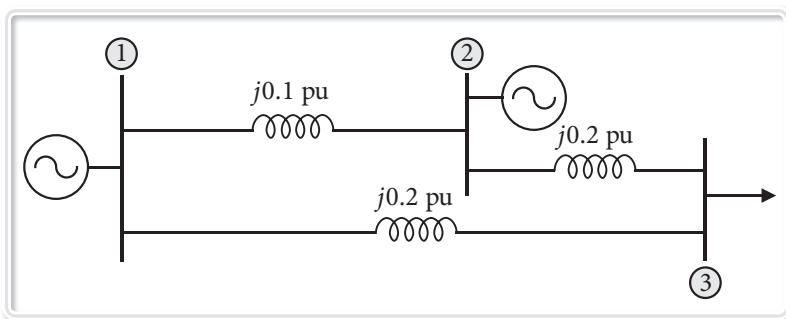
Σχ. 4.14 Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας για επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου με τη μέθοδο N-R.

Παράδειγμα 4.4

Θεωρούμε το δίκτυο τριών ζυγών του Σχ. 4.15. Οι γραμμές μεταφοράς έχουν αντιδράσεις σε pu αυτές που δείχνονται στο σχήμα. Τα δεδομένα ισχύος και τάσης των ζυγών του δικτύου σε pu συνοψίζονται στον Πίνακα 4.4. Αφού ληφθεί ο ζυγός 1 ως ζυγός αναφοράς, να γραφτεί η επαναληπτική σχέση της μεθόδου N-R και να υπολογιστούν οι τιμές των τάσεων μετά από μία επανάληψη.

Πίνακας 4.4 Τα δεδομένα ισχύος και τάσης του παραδείγματος 4.4.

Ζυγός	Φορτίο		Παραγωγή		Τάση	Όρια	
	P_L	Q_L	P_G	Q_G		$Q_{G,min}$	$Q_{G,max}$
1	0	0	–	–	$1.0 \angle 0^\circ$	–	–
2	0	0	5.32	–	$ V_2 = 1.1$	0	5.32
3	3.64	0.53	0	0	–	–	–



Σχ. 4.15 Το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος του παραδείγματος 4.4.

Λύση:

Ο ζυγός 2 είναι ζυγός παραγωγής, άρα η άγνωστη ποσότητα σε αυτόν το ζυγό είναι η φασική γωνία δ_2 . Ο ζυγός 3 είναι ζυγός φορτίου, οπότε οι άγνωστες ποσότητες σε αυτόν είναι το μέτρο $|V_3|$ και η φασική γωνία δ_3 . Η επαναληπτική σχέση της μεθόδου N-R, συνεπώς, είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(v)} \\ \Delta\delta_3^{(v)} \\ \frac{\Delta|V_3|^{(v)}}{|V_3|^{(v)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22}^{(v)} & H_{23}^{(v)} & N_{23}^{(v)} \\ H_{32}^{(v)} & H_{33}^{(v)} & N_{33}^{(v)} \\ M_{32}^{(v)} & M_{33}^{(v)} & L_{33}^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(v)} \\ \Delta P_3^{(v)} \\ \Delta Q_3^{(v)} \end{bmatrix}$$

οπότε:

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(v+1)} \\ \delta_3^{(v+1)} \\ \frac{|V_3|^{(v+1)}}{|V_3|^{(v)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(v)} \\ \delta_3^{(v)} \\ \frac{|V_3|^{(v)}}{|V_3|^{(v)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(v)} \\ \Delta\delta_3^{(v)} \\ \frac{\Delta|V_3|^{(v)}}{|V_3|^{(v)}} \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας Y_{bus} του δικτύου είναι:

$$Y_{bus} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -j15 & j10 & j5 \\ j10 & -j15 & j5 \\ j5 & j5 & -j10 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 15/\underline{-90^\circ} & 10/\underline{90^\circ} & 5/\underline{90^\circ} \\ 10/\underline{90^\circ} & 15/\underline{-90^\circ} & 5/\underline{90^\circ} \\ 5/\underline{90^\circ} & 5/\underline{90^\circ} & 10/\underline{-90^\circ} \end{bmatrix}$$

Για να ξεκινήσουμε την επαναληπτική διαδικασία χρησιμοποιούμε τις εξής αρχικές τιμές:

$$V_1^{(0)} = |V_1|^{(0)} \angle \delta_1^{(0)} = 1 \angle 0^\circ$$

$$V_2^{(0)} = |V_2|^{(0)} \angle \delta_2^{(0)} = 1.1 \angle 0^\circ$$

$$V_3^{(0)} = |V_3|^{(0)} \angle \delta_3^{(0)} = 1 \angle 0^\circ$$

Οι προκαθορισμένες τιμές πραγματικής και αέργου ισχύος στους ζυγούς 2 και 3 είναι:

$$P_{2,spec} = P_{G2} - P_{L2} = 5.32 - 0 = 5.32$$

$$P_{3,spec} = P_{G3} - P_{L3} = 0 - 3.64 = -3.64$$

$$Q_{3,spec} = Q_{G3} - Q_{L3} = 0 - 0.53 = -0.53$$

Από τις εξ. 4.74 υπολογίζουμε τις ποσότητες $P_2^{(0)}, P_3^{(0)}$ και $Q_3^{(0)}$. Έχουμε λοιπόν:

$$\begin{aligned} P_2^{(0)} &= |V_2|^{(0)} \left\{ |V_1|^{(0)} |y_{21}| \cos(\delta_1^{(0)} - \delta_2^{(0)} + \gamma_{21}) + |V_2|^{(0)} |y_{22}| \cos(\gamma_{22}) \right. \\ &\quad \left. + |V_3|^{(0)} |y_{23}| \cos(\delta_3^{(0)} - \delta_2^{(0)} + \gamma_{23}) \right\} \\ &= 1.1 \{ 1 \times 10 \times \cos(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) + 1.1 \times 15 \times \cos(-90^\circ) \\ &\quad + 1 \times 5 \times \cos(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) \} = 0 \\ P_3^{(0)} &= |V_3|^{(0)} \left\{ |V_1|^{(0)} |y_{31}| \cos(\delta_1^{(0)} - \delta_3^{(0)} + \gamma_{31}) + |V_2|^{(0)} |y_{32}| \cos(\delta_2^{(0)} - \delta_3^{(0)} + \gamma_{32}) \right. \\ &\quad \left. + |V_3|^{(0)} |y_{33}| \cos(\gamma_{33}) \right\} \\ &= 1 \{ 1 \times 5 \times \cos(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) + 1.1 \times 5 \times \cos(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) \\ &\quad + 1 \times 10 \times \cos(-90^\circ) \} = 0 \\ Q_3^{(0)} &= -|V_3|^{(0)} \left\{ |V_1|^{(0)} |y_{31}| \sin(\delta_1^{(0)} - \delta_3^{(0)} + \gamma_{31}) + |V_2|^{(0)} |y_{32}| \sin(\delta_2^{(0)} - \delta_3^{(0)} + \gamma_{32}) \right. \\ &\quad \left. + |V_3|^{(0)} |y_{33}| \sin(\gamma_{33}) \right\} \\ &= -1 \{ 1 \times 5 \times \sin(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) + 1.1 \times 5 \times \sin(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) \\ &\quad + 1 \times 10 \times \sin(-90^\circ) \} = -0.5 \end{aligned}$$

οπότε:

$$\Delta P_2^{(0)} = P_{2,spec} - P_2^{(0)} = 5.32 - 0 = 5.32$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_{3,spec} - P_3^{(0)} = -3.64 - 0 = -3.64$$

$$\Delta Q_3^{(0)} = Q_{3,spec} - Q_3^{(0)} = -0.53 - (-0.5) = -0.03$$

Τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα προκύπτουν από τις εξ. 4.76 έως 4.79 ως εξής:

$$\begin{aligned} H_{22}^{(0)} &= -Q_2^{(0)} - \left(|V_2|^{(0)} \right)^2 b_{22} \\ &= |V_2|^{(0)} \left\{ |V_1|^{(0)} |y_{21}| \sin(\delta_1^{(0)} - \delta_2^{(0)} + \gamma_{21}) + |V_2|^{(0)} |y_{22}| \sin(\gamma_{22}) \right. \\ &\quad \left. + |V_3|^{(0)} |y_{23}| \sin(\delta_3^{(0)} - \delta_2^{(0)} + \gamma_{23}) \right\} - \left(|V_2|^{(0)} \right)^2 b_{22} \\ &= 1.1 \{ 1 \times 10 \times \sin(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) + 1.1 \times 15 \times \sin(-90^\circ) \\ &\quad + 1 \times 5 \times \sin(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) \} - (1.1)^2 \times (-15) = 16.5 \end{aligned}$$

$$H_{33}^{(0)} = -Q_3^{(0)} - \left(|V_3|^{(0)} \right)^2 b_{33} = 0.5 - 1^2 \times (-10) = 10.5$$

$$\begin{aligned} H_{23}^{(0)} &= -|V_2|^{(0)} |V_3|^{(0)} |y_{23}| \sin(\delta_3^{(0)} - \delta_2^{(0)} + \gamma_{23}) = \\ &= -1.1 \times 1 \times 5 \times \sin(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) = -5.5 \end{aligned}$$

$$H_{32}^{(0)} = -|V_3|^{(0)} |V_2|^{(0)} |y_{32}| \sin(\delta_2^{(0)} - \delta_3^{(0)} + \gamma_{32}) = -5.5$$

$$\begin{aligned} M_{32}^{(0)} &= -|V_3|^{(0)} |V_2|^{(0)} |y_{32}| \cos(\delta_2^{(0)} - \delta_3^{(0)} + \gamma_{32}) = \\ &= -1 \times 1.1 \times 5 \times \cos(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) = 0 \end{aligned}$$

$$M_{33}^{(0)} = P_3^{(0)} - |V_3|^{(0)} g_{33} = 0 - 1^2 \times 0 = 0$$

$$N_{23}^{(0)} = |V_2|^{(0)} |y_{23}| \cos(\delta_3^{(0)} - \delta_2^{(0)} + \gamma_{23}) = 1.1 \times 5 \times \cos(0^\circ - 0^\circ + 90^\circ) = 0$$

$$N_{33}^{(0)} = \frac{P_3^{(0)}}{|V_3|^{(0)}} + |V_3|^{(0)} g_{33} = \frac{0}{1} + 1 \times 0 = 0$$


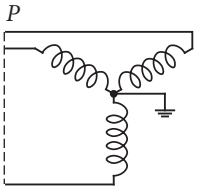
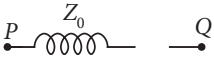

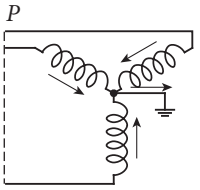
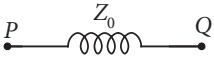

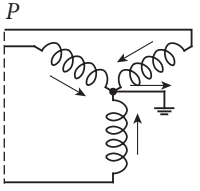
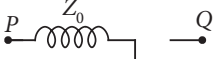

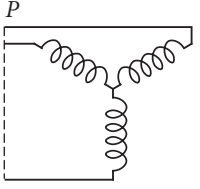
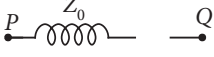

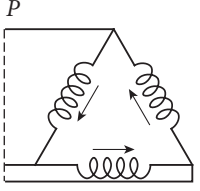
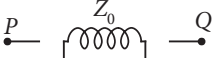
$$L_{33}^{(0)} = \frac{Q_3^{(0)}}{|V_3|^{(0)}} - |V_3|^{(0)} b_{33} = \frac{-0.5}{1} - 1 \times (-10) = 9.5$$

Η επαναληπτική σχέση της μεθόδου N-R, συνεπώς, δίνει:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta|V_3|^{(0)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{22}^{(0)} & H_{23}^{(0)} & N_{23}^{(0)} \\ H_{32}^{(0)} & H_{33}^{(0)} & N_{33}^{(0)} \\ M_{32}^{(0)} & M_{33}^{(0)} & L_{33}^{(0)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 16.5 & -5.5 & 0 \\ -5.5 & 10.5 & 0 \\ 0 & 0 & 9.5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 5.32 \\ -3.64 \\ -0.03 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0.0734 & 0.0384 & 0 \\ 0.0384 & 0.1154 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1053 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5.32 \\ -3.64 \\ -0.03 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0.2507 \text{ rad} \\ -0.2157 \text{ rad} \\ -0.0031 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14.364^\circ \\ -12.358^\circ \\ -0.0031 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

οπότε:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_3|^{(1)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \delta_2^{(0)} \\ \delta_3^{(0)} \\ |V_3|^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta|V_3|^{(0)} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 14.364^\circ \\ -12.358^\circ \\ -0.0031 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14.364^\circ \\ -12.358^\circ \\ 0.9969 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Τύπος	Διάγραμμα Σύνδεσης	Κύκλωμα 0 ακολουθίας
 Y		 Z_0 Ζυγός αναφοράς
 Y		 Z_0 Ζυγός αναφοράς
 Y		 Z_0 Ζυγός αναφοράς
 Y		 Z_0 Ζυγός αναφοράς
 Δ		 Z_0 Ζυγός αναφοράς

Σχ. 6.9 Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας για διάφορες συνδέσεις τριφασικών μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων.

6.9 ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας: Οι γραμμές μεταφοράς, όπως και οι μετασχηματιστές, είναι στατικές συσκευές, γι' αυτό έχουν ταυ-

τοτικές αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας.

Σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας: Τα ρεύματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας, που κυκλοφορούν σε μια γραμμή μεταφοράς, δεν χρειάζονται δρόμο επιστροφής, γιατί το αλγεβρικό τους άθροισμα είναι πάντοτε μηδέν.

Όταν τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας ρέουν σε μια γραμμή μεταφοράς, μπορούν να επιλέξουν για επιστροφή οποιοδήποτε διαθέσιμο δρόμο. Μερικά επιστρέφουν μέσω γης και άλλα μέσω των εναέριων γραμμών γείωσης. Οι γραμμές γείωσης συνήθως γειώνονται σε αρκετούς πύργους και συνεπώς το ρεύμα επιστροφής σε αυτούς μπορεί να μην είναι ομοιόμορφο κατά μήκος της γραμμής. Κατά συνέπεια η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας της γραμμής πρέπει να συμπεριλαμβάνει και το τριπλάσιο της αντίστασης γείωσης.

Για τους παραπάνω λόγους, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας έχει διάφορες τιμές, ανάλογα με τον πραγματικό δρόμο επιστροφής. Επειδή η αντίσταση της γης εξαρτάται πολύ από το είδος του εδάφους, την υγρασία και άλλους εμπειρικούς παράγοντες, είναι συνηθισμένο να κάνουμε μερικές απλοποιητικές παραδοχές για την πραγματική κατανομή του ρεύματος.

Όταν δεν υπάρχουν πιο λεπτομερείς πληροφορίες, χρησιμοποιούμε τις παρακάτω εμπειρικές τιμές Z_0 :

1. Για γραμμή απλού κυκλώματος:

$$\frac{Z_0}{Z_+} = 3.5 \quad \text{αν δεν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

$$\frac{Z_0}{Z_+} = 2 \quad \text{αν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

2. Για γραμμή διπλού κυκλώματος:

$$\frac{Z_0}{Z_+} = 5.5 \quad \text{αν δεν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

$$\frac{Z_0}{Z_+} = 3 \quad \text{αν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

3. Για υπόγεια καλώδια

$$\frac{Z_0}{Z_+} = 1 \quad \text{έως } 1.25 \quad \text{για απλό πυρήνα}$$

$$\frac{Z_0}{Z_+} = 3 \quad \text{έως } 5 \quad \text{για τριπλό πυρήνα}$$

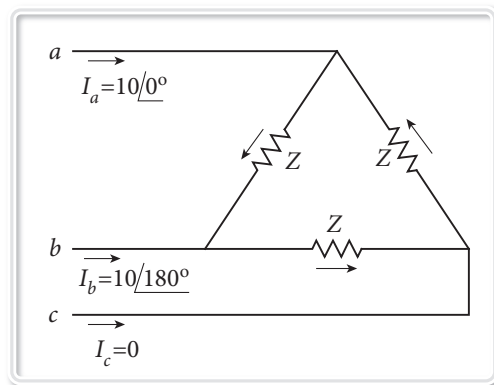
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΥΣΕΙΣ

6^ο Κεφάλαιο

ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΚΑΙ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

- 6.1** Ο αγωγός c μίας τριφασικής γραμμής είναι ανοικτοκυκλωμένος. Το ρεύμα που ρέει στο Δ συνδεδεμένο φορτίο μέσω της γραμμής a είναι 10 A. Με αναφορά αυτό το ρεύμα υπολογίστε τις συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων γραμμής.

Λύση:



Τα ρεύματα γραμμής είναι:

$$I_a = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \quad I_b = 10 \angle 180^\circ \text{ A} \quad I_c = 0 \text{ A}$$

Με εφαρμογή της εξ. 6.8 παίρνουμε:

$$I_{a+} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}(10 + 10\angle 300^\circ + 0) = 5 - j2.89 = 5.78 \angle -30.03^\circ \text{ A}$$

$$I_{a-} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}(10 + 10\angle 420^\circ + 0) = 5 + j2.89 = 5.78 \angle 30.03^\circ \text{ A}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}(10 + 10\angle 180^\circ + 0) = 0 \text{ A}$$

6.2 Με τη χρήση συμμετρικών συνιστωσών υπολογίστε την ισχύ που απορροφά το φορτίο του Παραδείγματος 6.5 και επιβεβαιώστε το αποτέλεσμα.

Λύση:

Με εφαρμογή της εξ. 6.18 για pu τιμές τάσεων και ρευμάτων, που έχουν υπολογισθεί στο Παράδειγμα 6.5 παίρνουμε:

$$S = V_{a+} I_{a+}^* + V_{a-} I_{a-}^* + V_{a0} I_{a0}^* = 0.985 \angle 43.6^\circ \times 0.985 \angle -43.6^\circ + \\ + 0.235 \angle 250.3^\circ \times 0.235 \angle -250.3^\circ + 0 = 1.026 \text{ pu}$$

$$\text{ή } S = 1.026 \times 500 \text{ KW} = 513 \text{ KW}$$

Επιβεβαίωση: Οι αντιστάσεις του Y φορτίου είναι 1 pu, δηλαδή:

$$R_Y = \frac{2.3^2}{0.5} = 10.58 \Omega$$

Αν μετασχηματίσουμε τον Y σε Δ θα έχουμε τις αντιστάσεις:

$$R_\Delta = 3R_Y = 31.74 \Omega$$

Από τις δοθείσες πολικές τάσεις στο Παράδειγμα 6.5 παίρνουμε:

$$S = \frac{|V_{ab}|^2}{R_\Delta} + \frac{|V_{bc}|^2}{R_\Delta} + \frac{|V_{ca}|^2}{R_\Delta} = \frac{(1.84)^2 + (2.76)^2 + (2.3)^2}{31.74} \text{ MW} = 513.33 \text{ KW}$$

6.3 Μία γεννήτρια έχει ανοικτοκυκλωμένη τη φάση a και βραχυκυκλωμένες τις φάσεις b και c με τη γη. Αν οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων είναι: $I_+ = 600 \angle -90^\circ \text{ A}$, $I_- = 250 \angle 90^\circ \text{ A}$ και $I_0 = 350 \angle 90^\circ \text{ A}$, υπολογίστε τα ρεύματα στις φάσεις και το ρεύμα που τροφοδοτείται στη γη.

Λύση:

$$I_a = I_+ + I_- + I_0 = -j600 + j250 + j350 = 0 \text{ A}$$

$$I_b = a^2 I_+ + a I_- + I_0 = 600 \angle 150^\circ + 250 \angle 210^\circ + 350 \angle 90^\circ = \\ = -519.6 + j300 - 216.5 - j125 + 0 + j350 = \\ = -736.1 + j525 = 904.1 \angle 144.5^\circ \text{ A}$$

$$I_c = a I_+ + a^2 I_- + I_0 = 600 \angle 30^\circ + 250 \angle 330^\circ + 350 \angle 90^\circ = \\ = 519.6 + j300 + 216.5 - j125 + 0 + j350 = \\ = 736.1 + j525 = 904.1 \angle 35.5^\circ \text{ A}$$

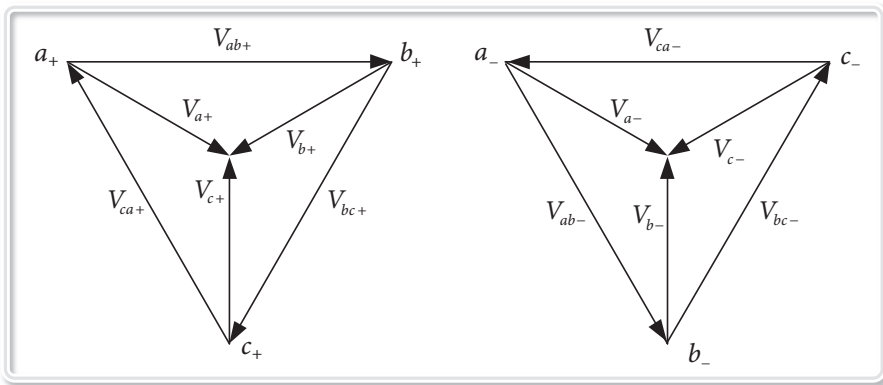
$$I_n = I_b + I_c = -736.1 + j525 + 736.1 + j525 = j1050 \text{ A}$$

$$\text{ή } I_n = 3I_0 = 3 \times j350 = j1050 \text{ A}$$

6.4 Οι τάσεις στους ακροδέκτες ενός συμμετρικού φορτίου, που αποτελείται από τρεις ωμικές αντιστάσεις 10Ω συνδεδεμένες σε αστέρα (Y) είναι: $V_{ab} = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$, $V_{bc} = 80.8 \angle -121.44^\circ \text{ V}$ και $V_{ca} = 90 \angle 130^\circ \text{ V}$. Αν ο ουδέτερος του φορτίου δεν συνδέεται με τη γη, υπολογίστε τα ρεύματα γραμμής.

Λύση:

Το ανυσματικό διάγραμμα φασικών και πολικών τάσεων, θετικής και αρνητικής ακολουθίας, που δίνεται στο Σχ. 6.17 του βιβλίου και επαναλαμβάνεται εδώ είναι:



Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_{a+} = \frac{V_{ab+}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ, \quad V_{a-} = \frac{V_{ab-}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ. \quad \text{Δεν υπάρχει μηδενική ακολουθία.}$$

Για τον υπολογισμό λοιπόν των συμμετρικών συνιστωσών των φασικών τάσεων, από τις οποίες θα υπολογίσουμε τα ζητούμενα ρεύματα, χρειάζονται οι συμμετρικές συνιστώσες των πολικών τάσεων. Έχουμε:

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{V}_p$$

Άρα:

$$\begin{aligned} V_{ab+} &= \frac{1}{3}(V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}) = \frac{1}{3}(100 + 80.8 \angle -1.44^\circ + 90 \angle 370^\circ) = \\ &= \frac{1}{3}(100 + 80.77 - j2.03 + 88.63 + j15.63) = 89.8 + j4.53 = 89.91 \angle 2.89^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΥΣΕΙΣ

7^ο Κεφάλαιο

ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

- 7.1** Μία σύγχρονη γεννήτρια 37.5 MVA, 33 kV συνδέεται σε εναέρια γραμμή στην οποία συμβαίνει μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο άκρο του φορτίου. Οι ακολουθιακές επαγωγικές αντιστάσεις της γεννήτριας είναι 18%, 12% και 10% και της γραμμής 6.3 Ω/φ, 6.3 Ω/φ και 12.6 Ω/φ. Υπολογίστε το ρεύμα βραχυκύκλωσης και τις φασικές τάσεις στους ακροδέκτες της γεννήτριας, που είναι στερεά γειωμένη.

Λύση:

$$Z_b = \frac{33^2}{37.5} = 29.04 \, \Omega$$

$$X_{l+} = X_{l-} = \frac{6.3}{29.04} = 0.217 \, \text{pu}$$

$$X_{l0} = \frac{12.6}{29.04} = 0.434 \, \text{pu}$$

Τα τρία ακολουθιακά δίκτυα για μονοφασικό βραχυκύκλωμα συνδέονται εν σειρά και η συνολική αντίσταση Thevenin είναι:

$$X_t = j(0.18 + 0.217) + j(0.12 + 0.217) + j(0.1 + 0.433) = j1.267 \, \text{pu}$$

$$I_{a+} = \frac{1}{j1.267} = -j0.789 \, \text{pu}$$

Το ρεύμα σφάλματος είναι:

$$I^{\sigma} = 3 \times I_{a+} = 3 \times (-j0.789) \, \text{pu} = -j2.368 \, \text{pu}$$

$$I_{base} = \frac{37.5}{\sqrt{3} \times 33} = 0.656 \, \text{KA}$$

Άρα: $|I^{\sigma}| = 2.368 \times 0.659 \text{ KA} = 1.553 \text{ KA}$

Οι ακολουθιακές συνιστώσες των φασικών τάσεων της γεννήτριας είναι:

$$V_{a+} = 1 - (-j0.789)(j0.18) = 0.858 \text{ pu}$$

$$V_{a-} = -(-j0.789)(j0.12) = -0.0947 \text{ pu}$$

$$V_{a0} = -(-j0.789)(j0.1) = -0.0789 \text{ pu}$$

Οι φασικές τάσεις είναι:

$$V_a = V_{a+} + V_{a-} + V_{a0} = 0.6844 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} V_b &= a^2 V_{a+} + a V_{a-} + V_{a0} = 0.858 \angle 240^\circ - 0.0947 \angle 120^\circ - 0.0789 = \\ &= -0.429 - j0.743 + 0.04735 - j0.082 - 0.0789 = \\ &= -0.46055 - j0.825 = 0.9448 \angle -119.17^\circ \end{aligned}$$

$$V_c = a V_{a+} + a^2 V_{a-} + V_{a0} = 0.9448 \angle 119.17^\circ$$

$$V_{b,\varphi} = \frac{33}{\sqrt{3}} \text{ KV} = 19.052 \text{ KV}$$

Άρα:

$$|V_a| = 0.6844 \times 19.052 \text{ KV} = 13.04 \text{ KV}$$

$$|V_b| = |V_c| = 0.9448 \times 19.052 = 18 \text{ KV}$$

7.2 Για διφασικό βραχυκύκλωμα στο σύστημα του Προβλήματος 7.1 υπολογίστε το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση της υγιούς γραμμής στο σημείο του βραχυκυκλώματος.

Λύση:

Για διφασικό βραχυκύκλωμα υπάρχουν μόνο τα ακολουθιακά κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας, που συνδέονται παράλληλα. Η συνολική αντίσταση Thevenin είναι:

$$X_t = j(0.18 + 0.217 + 0.12 + 0.217) = j0.734 \text{ pu}$$

$$I_{a+} = \frac{1}{j0.734} = -j1.362 \text{ pu} = -I_{a-}$$

Άρα:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -j\sqrt{3} I_{a+} = -j\sqrt{3} (-j1.362) = -2.359 \text{ pu}$$

$$\text{ή } |I_b| = 2.359 \times 0.656 \text{ KA} = 1.547 \text{ KA}$$

Στο σημείο του βραχυκυκλώματος:

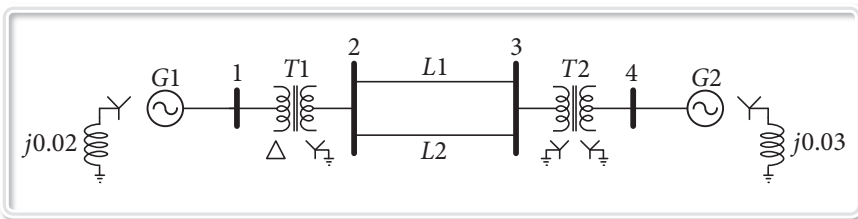
$$V_{a+} = 1 - (-j1.362)(j0.18 + j0.217) = 0.459 \text{ pu} = V_{a-} \text{ και } V_{a0} = 0$$

Άρα:

$$V_a = V_{a+} + V_{a-} = 2 \times 0.459 \text{ pu} = 0.918 \text{ pu}$$

$$\text{ή } |V_a| = 0.918 \times 19.052 = 17.5 \text{ KV}$$

7.3 Για το δίκτυο του Σχήματος δίνονται τα ακόλουθα δεδομένα:



G1: 100 MVA, 11 KV, $X_+ = X_- = 25\%$, $X_0 = 5\%$

G2: 100 MVA, 11 KV, $X_+ = X_- = 20\%$, $X_0 = 5\%$

T1: 100 MVA, 11/220 KV, $X = 6\%$

T2: 100 MVA, 11/220 KV, $X = 7\%$

L1: 100 MVA, 220 KV, $X_+ = X_- = 10\%$, $X_0 = 30\%$

L2: 100 MVA, 220 KV, $X_+ = X_- = 10\%$, $X_0 = 30\%$

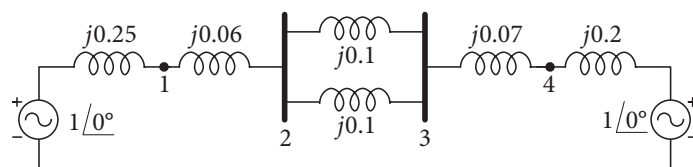
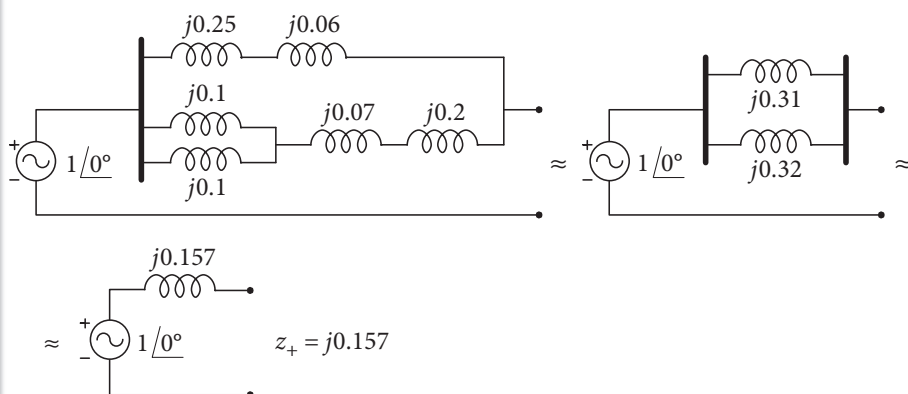
Για στερεό μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 του δικτύου υπολογίστε:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης.
- Τις φασικές τάσεις στο σημείο του βραχυκυκλώματος.
- Ρεύματα και τάσεις στους ακροδέκτες των γεννητριών.

Λύση:

Βάσεις: 100 MVA, 11 KV στις G1 και G2, 220 KV στις γραμμές.

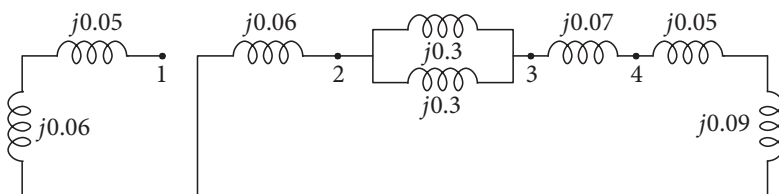
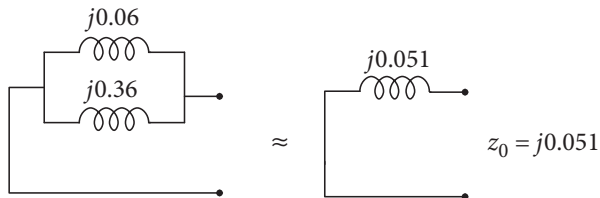
Όλα τα δεδομένα είναι σ' αυτό το σύστημα βάσεων:

Θετικής ακολουθίας**Ισοδύναμο Thevenin για βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2**

Σχ. α

Αρνητικής ακολουθίας

Όμοιο με θετικής ακολουθίας, αλλά χωρίς πηγή τάσης: $z_- = j0.157$

Μηδενικής ακολουθίας**Ισοδύναμο Thevenin για βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2**

Σχ. β