

Νικόλαος Α. Βοβός
Καθ. Πανεπιστημίου

Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος
Καθ. Πανεπιστημίου

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας



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 οποίο 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 ασύμμετρών 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 θεωρητικά θέματα αφετέρου να τονίζονται ιδιαίτερου ενδιαφέροντος τεχνικά θέματα. Προς την κατεύθυνση αυτή συμβάλλει σημαντικά και η επίλυση των Προβλημάτων (υπάρχουν οι απαντήσεις τους) που συνοδεύουν τα κεφάλαια.

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 2008

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 Αποξενυγμένη μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου	138
Αναφορές	144

Κεφάλαιο 5

ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή	145
5.2 Υπερταχέα 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

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 καταναμηθεί 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.

Οι μελέτες βραχυκυκλωμάτων είναι χρήσιμες:

- ◆ Για τη σχεδίαση του κατάλληλου συστήματος προστασίας του ενεργειακού συστήματος.
- ◆ Για τη σωστή επιλογή των διακοπών του συστήματος προστασίας, διότι δύο από τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σωστή επιλογή τους είναι το ρεύμα που ρέει αμέσως μετά το σφάλμα και το ρεύμα που πρέπει αυτοί να διακόψουν.
- ◆ Για τον προσδιορισμό των αναγκαίων διακοπτικών λειτουργιών καθενός διακόπτη του συστήματος.
- ◆ Για τον καθορισμό των ρυθμίσεων των *ηλεκτρονόμων* που ελέγχουν τους διακόπτες.

Μελέτες μεταβατικής ευστάθειας

Οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας, τέλος, γίνονται για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά των γεννητριών του συστήματος μετά από *διαταραχές* που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο, όπως σφάλματα ζυγών, αιφνίδιες μεταβολές φορτίου, απώλειες παραγωγής, βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς κ.λ.π. Οι διαταραχές αυτές, που είναι πολύ συνηθισμένες σε μεγάλα ενεργειακά συστήματα, προκαλούν ισχυρές μεταβολές στα χαρακτηριστικά του συστήματος, *ανακατανομή* της ροής ισχύος και συνεπώς *ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις* στους δρομείς των γεννητριών. Κάποιες από τις γεννήτριες του συστήματος (είτε διότι οδηγήθηκαν αφ' εαυτές σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας, είτε διότι απομακρύνθηκε εγκαίρως το αίτιο που προκάλεσε τη διαταραχή) ξεπερνούν εύκολα αυτές τις ταλαντώσεις και παραμένουν *συγχρονισμένες* στο δίκτυο. Κάποιες άλλες, όμως, από τις γεννήτριες οδηγούνται λόγω αυτών των ταλαντώσεων σε *αποσυγχρονισμό*. Όταν δε μία γεννήτρια αποσυγχρονίζεται προκαλούνται μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, τα ρεύματα και τις τάσεις της, με αποτέλεσμα το σύστημα προστασίας να την *απομονώνει* από το υπόλοιπο σύστημα. Αν μετά από μία διαταραχή το σύστημα μπορέσει να παραμείνει σε συγχρονισμό και να καταλήξει σε μία νέα *κατάσταση ισορροπίας*, τότε λέμε ότι είναι *μεταβατικά ευσταθές*. Αν, όμως, συμβούν νέες διαταραχές σαν επακόλουθο της πρώτης, αποσυγχρονιστεί και καταρρεύσει, τότε λέμε ότι είναι *μεταβατικά ασταθές*.

Σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, λοιπόν, θα πρέπει μετά από κάθε διαταραχή να τίθενται *εγκαίρως* σε λειτουργία οι διακοπτικές εκείνες διαδικασίες που θα απομακρύνουν το αίτιο της διαταραχής, αλλά και τις

γεννήτριες που οδηγούνται σε αποσυγχρονισμό, ώστε το υπόλοιπο σύστημα να διατηρείται σε ευσταθή κατάσταση λειτουργίας.

Οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας είναι απαραίτητες:

- ◆ Για να γίνει η σχεδίαση του ενεργειακού συστήματος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε αυτό να παραμένει σε κατάσταση ευστάθειας μετά από κάθε διαταραχή.
- ◆ Για να καθοριστεί το πόσο γρήγορα πρέπει να δράσουν οι διακοπτικές διαδικασίες, ώστε να απομονωθεί *εγκαιρώς* το τμήμα του συστήματος που βρίσκεται σε κατάσταση σφάλματος.
- ◆ Για να καθοριστούν οι χρόνοι *ενεργοποίησης* των διακοπών καθώς επίσης και οι χρόνοι *επανακλεισίματός* τους, διότι από το σωστό υπολογισμό τους εξαρτάται η δυνατότητα του συστήματος να διατηρήσει την ευστάθειά του μετά από μια διαταραχή.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η συνεισφορά των *υπολογιστών* για την ταχύτερη, ακριβέστερη και οικονομικότερη διεκπεραίωση αυτών των μελετών υπήρξε καθοριστική. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε εφαρμογές δύο τύπων: *ανεξάρτητες* από τη λειτουργία (off-line) και *συμβαδίζουσες* με τη λειτουργία (on-line).

Στον πρώτο τύπο εφαρμογών, που χρειάζονται όταν σχεδιάζουμε και αναλύουμε τη συμπεριφορά του συστήματος, περιλαμβάνονται οι μελέτες ροών φορτίου, σφαλμάτων και μεταβατικής ευστάθειας. Από πολύ νωρίς οι μηχανικοί των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κατέφυγαν στους υπολογιστές για την εκτέλεση αυτών των μελετών, επειδή αυτές ήταν πολύπλοκες και απαιτούσαν πλήθος υπολογισμών λόγω του μεγέθους των ενεργειακών συστημάτων. Τους αρχικά χρησιμοποιηθέντες προς τούτο *αναλογικούς υπολογιστές* αντικατέστησαν πολύ γρήγορα οι *ψηφιακοί υπολογιστές*. Χάρis στις προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές που εν τω μεταξύ αναπτύχθηκαν, τα σύγχρονα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρουν πολύ μεγάλες δυνατότητες στο χρήστη ενεργειακό μηχανικό.

Στο δεύτερο τύπο εφαρμογών, οι υπολογιστές είναι *μέρος* του συστήματος, δέχονται πληροφορίες κατευθείαν από το σύστημα και εκτελούν μία συγκεκριμένη εργασία που τους έχει ανατεθεί στα πλαίσια λειτουργίας του συστήματος. Παραδείγματα τέτοιου τύπου εφαρμογών είναι ο έλεγχος της συχνότητας του συστήματος, η κατανομή της παραγωγής για οικονομική λειτουργία του συστήματος κ.λ.π.

Για να γίνουν οι μελέτες που προαναφέρθηκαν, θα πρέπει προηγουμένως να δημιουργηθούν τα κατάλληλα κάθε φορά *μαθηματικά μοντέλα* του συστήματος.

Για τη δημιουργία αυτών των μοντέλων χρησιμοποιούνται τα επί μέρους μοντέλα των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος (γεννητριών, μετασχηματιστών, γραμμών μεταφοράς κ.λ.π.). Εκτεταμένο αντικείμενο, συνεπώς, της ανάλυσης συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η ανάπτυξη των μοντέλων των συνιστωσών του συστήματος, τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με το είδος της μελέτης στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και την επιθυμητή ακρίβεια της παράστασης.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα συνοψίσουμε τα μοντέλα των βασικών συνιστωσών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και θα δούμε πως από τη σύνθεση των μοντέλων επί μέρους συνιστωσών θα προκύψει το μοντέλο του *συνολικού συστήματος*.