

Νικόλαος Α. Βοβός

Καθ. Πανεπιστημίου

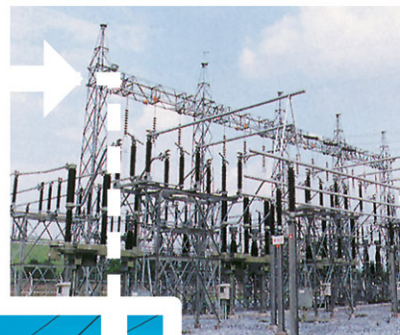
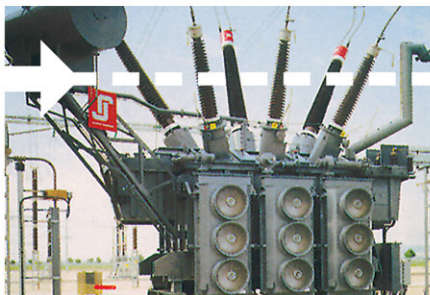
Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος

Καθ. Πανεπιστημίου

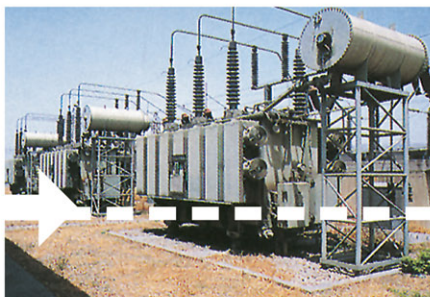
Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

# Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας



**B'**  
ΕΚΔΟΣΗ



ISBN 978-960-456-485-9

© Copyright: Βοβός Ν., Γιαννακόπουλος Γ., Εκδόσεις Ζήτη, Ιούλιος 2008

Ανατύπωση διορθωμένη: Οκτώβριος 2013

2η Έκδοση Βελτιωμένη: Σεπτέμβριος 2017

---

*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 ΙΚΕ**

18° 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**

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

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

e-mail: sales@ziti.gr

**www.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](http://www.ziti.gr)

## Πρόλογος

Σκοπός του παρόντος βιβλίου είναι να διερευνήσει τη λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) υπό την επίδραση διαταραχών. Καλύπτει την ύλη του μαθήματος «Έλεγχος και Ευστάθεια ΣΗΕ», που διδάσκεται στους φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Η λειτουργία των ΣΗΕ στη μόνιμη κατάσταση είναι αντικείμενο άλλου μαθήματος.

Η έννοια του συστήματος προσδιορίζει τον τρόπο ανάπτυξης των θεμάτων με έμφαση στην ποιοτική και φυσική κατανόηση των προβλημάτων και των λύσεών τους, ώστε να γίνουν κατανοητά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ΣΗΕ. Το βιβλίο καλύπτει κλασσικά και σύγχρονα θέματα που συναντώνται στη μελέτη και εξάσκηση της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού, γι' αυτό είναι χρήσιμο για νέους αλλά και έμπειρους ηλεκτρολόγους μηχανικούς.

Ιδιαίτερη προσπάθεια κατεβλήθη να παρουσιασθούν για πρώτη φορά σε προπτυχιακό επίπεδο τα σύγχρονα θέματα ελέγχου της πραγματικής και της αέργου ισχύος με τη χρήση μετατροπών, που χρησιμοποιούν διακοπτικά στοιχεία στερεάς κατάστασης. Η αξιοποίηση αυτών των μετατροπών οδήγησε στην τάση για ανάπτυξη των «Αποδοτικότερων Δικτύων Μεταφοράς» και των «Ευέλικτων Συστημάτων Διανομής». Αν και η έμφαση του βιβλίου είναι στην κατανόηση και ανάλυση των βασικών προβλημάτων στα ΣΗΕ, επειδή το μέγεθος των ΣΗΕ απαιτεί για την επίλυση των πραγματικών προβλημάτων τους ευρεία χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (Η/Υ), απαραίτητο συμπλήρωμα στην ανάπτυξη των θεμάτων είναι η περιγραφή της μεθοδολογίας ανάλυσης των ΣΗΕ με Η/Υ. Με ιδιαίτερη προσοχή επελέγησαν τα αριθμητικά Παραδείγματα, που αποτελούν απαραίτητο συμπλήρωμα στην κατανόηση των θεμάτων που αναπτύσσονται. 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.

Η ύλη του βιβλίου περιλαμβάνει επτά κεφάλαια.

Μετά τη σύντομη εισαγωγή του κεφαλαίου 1 εξετάζονται τα συστήματα ελέγχου πραγματικής ισχύος-συχνότητας και αέργου ισχύος-τάσης στα κεφάλαια 2 και 3 αντίστοιχα. Για την ανάλυση και σχεδίασή τους αξιοποιήθηκαν κλασσικές αλλά και σύγχρονες μεθοδολογίες ελέγχου. Η χρήση μετατροπών με διακοπτικά στοιχεία στερεάς κατάστασης για τον έλεγχο της ροής πραγματικής και αέργου ισχύος περιγράφεται σε αυτά τα κεφάλαια.

Το κεφάλαιο 4 ασχολείται με τη μεταβατική ευστάθεια των ΣΗΕ. Το κριτήριο των ίσων εμβαδών χρησιμοποιείται για τη διασαφήνιση της έννοιας της μεταβατικής ευστάθειας, ενώ αναπτύσσεται ο αλγόριθμος επίλυσης της μεταβατικής ευστάθειας μεγάλων ΣΗΕ.

Η διαδικασία με την οποία αποκτούμε την *καλύτερη εκτίμηση* των μεταβλητών κατάστασης των ΣΗΕ, χρησιμοποιώντας μετρήσεις που γνωρίζουμε ότι έχουν λάθη και είναι πλεονασματικές, γνωστή ως *εκτίμηση κατάστασης* αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 5.

Η έννοια των *Αποδοτικότερων Δικτύων Μεταφοράς* και των *Ευέλικτων Συστημάτων Διανομής* καθώς και οι συσκευές με τις οποίες επιτυγχάνεται η δημιουργία τους περιγράφονται στο κεφάλαιο 6.

Τα ποικίλα τεχνοοικονομικά προβλήματα από την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι θετικές και αρνητικές επιπτώσεις και οι παράγοντες που θα τις διαμορφώσουν, σύμφωνα με τις διεθνείς εμπειρίες, παρουσιάζονται σύντομα στο κεφάλαιο 7.

Στους γιους μου Παναγή και Ανέστη Βοβό επιθυμώ να εκφράσω θερμές ευχαριστίες για την εκπόνηση των σχημάτων και στον Παναγή που φιλοτέχνησε το εξώφυλλο του βιβλίου.

Θερμές ευχαριστίες οφείλουμε να εκφράσουμε και προς τις οικογένειές μας για τη συνεχή συμπαράσταση και κατανόησή τους κατά τη συγγραφή του βιβλίου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2017

Νικόλαος Α. Βοβός  
Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

|               |    |
|---------------|----|
| Εισαγωγή..... | 13 |
|---------------|----|

## Κεφάλαιο 2

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ - ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Εισαγωγή.....  | 17 |
| 2.2 Κέντρο κατανομής φορτίου.....  | 18 |
| 2.3 Δομή ψηφιακού συστήματος.....  | 21 |
| 2.3.1 Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος.....                                    | 24 |
| 2.4 Έλεγχος αυτόματης παραγωγής σε ηλεκτρικά συστήματα.....                                    | 25 |
| 2.5 Λειτουργία χωρίς κεντρικό έλεγχο.....  | 26 |
| 2.6 Δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ βρόχων $p-f$ και $Q-V$ .....                                 | 28 |
| 2.7 Δυναμικές μεταβλητές κατάστασης διαφορών.....  | 29 |
| 2.8 Αυτόματος έλεγχος φορτίου – συχνότητας γεννητριών.....                                     | 30 |
| 2.9 Μαθηματικό μοντέλο του ρυθμιστή ταχύτητας.....   | 33 |
| 2.10 Μαθηματικό μοντέλο του στροβίλου.....   | 35 |
| 2.11 Διαίρεση φορτίου μεταξύ γεννητριών.....   | 39 |
| 2.12 Διαίρεση του συστήματος σε περιοχές ελέγχου.....  | 42 |
| 2.13 Ισορροπία μεταβολών ισχύος σε περιοχή ελέγχου.....  | 43 |
| 2.14 Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου.....   | 46 |
| 2.15 Έλεγχος ισχύος - συχνότητας απομονωμένης περιοχής ελέγχου.....                            | 49 |
| 2.16 Εντολή ελέγχου $\Delta P_c = 0$ .....   | 50 |
| 2.17 Εντολή ελέγχου $\Delta P_c \neq 0$ .....  | 54 |
| 2.18 Σύστημα δυο περιοχών ελέγχου.....   | 60 |
| 2.19 Νέα μόνιμη κατάσταση συστήματος δυο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$ ..... | 62 |
| 2.20 Χρονική απόκριση συστήματος δυο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$ .....     | 64 |
| 2.21 Σύστημα δυο περιοχών ελέγχου με $\Delta P_c \neq 0$ .....                                 | 68 |

|   |    |
|---|----|
| 2.22 Έλεγχος $p$ - $f$ για σύστημα $n$ -περιοχών ελέγχου .....    | 71 |
| 2.23 Βέλτιστη ρύθμιση παραμέτρων .....                            | 71 |
| 2.24 Κατανομή της παραγωγής στις γεννήτριες .....                 | 74 |
| 2.25 Βέλτιστος έλεγχος ΣΗΕ .....                                  | 75 |
| 2.26 Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για σύστημα δυο περιοχών ..... | 76 |
| 2.27 Βέλτιστη στρατηγική ελέγχου .....                            | 80 |
| 2.28 Περίληψη .....   | 84 |
| <i>Προβλήματα</i> .....   | 85 |
| <i>Αναφορές</i> .....   | 89 |

### Κεφάλαιο 3

#### ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ - ΤΑΣΗΣ

|   |     |
|---|-----|
| 3.1 Εισαγωγή .....  | 91  |
| 3.2 Σύστημα ελέγχου τάσης γεννητριών .....                | 92  |
| 3.3 Διάγραμμα αυτόματου ρυθμιστή τάσης γεννητριών .....   | 94  |
| 3.4 Απλή παράσταση γεννήτριας .....                       | 98  |
| 3.5 Κύκλωμα σταθεροποίησης του ρυθμιστή τάσης .....       | 98  |
| 3.6 Καμπύλες λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας .....       | 100 |
| 3.7 Καμπύλες γεννήτριας $Q$ - $V$ .....                   | 106 |
| 3.8 Εξάρτηση της τάσης ζυγών από την άεργο ισχύ .....     | 107 |
| 3.9 Μέθοδοι ελέγχου της τάσης ζυγών .....                 | 110 |
| 3.10 Χωρητική αντιστάθμιση σειράς .....                   | 110 |
| 3.11 Εγκάρσια χωρητική ή επαγωγική αντιστάθμιση .....     | 116 |
| 3.11.1 Βασικές αρχές λειτουργίας TSC και TCR .....        | 122 |
| 3.12 Σύγχρονος αντισταθμιστής .....                       | 124 |
| 3.13 Έλεγχος της τάσης με μετασχηματιστή .....            | 127 |
| 3.13.1 Μετασχηματιστής αντιστάθμισης .....                | 128 |
| 3.13.2 Μετασχηματιστές με στατικό - ηλεκτρονικό LTC ..... | 130 |
| 3.14 Αστάθεια τάσης .....                                 | 132 |
| 3.14.1 Ανάλυση φαινομένου της αστάθειας τάσης .....       | 133 |
| 3.14.2 Χρονική διάρκεια της αστάθειας τάσης .....         | 139 |
| 3.15 Περίληψη .....                                       | 141 |
| <i>Προβλήματα</i> .....                                   | 142 |
| <i>Αναφορές</i> .....                                     | 145 |

## Κεφάλαιο 4

### ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.1    | Εισαγωγή.....  | 147 |
| 4.2    | Συγχρονισμός γεννήτριας σε άπειρο ζυγό .....   | 148 |
| 4.3    | Απλό σύστημα δυο μηχανών .....   | 152 |
| 4.4    | Ορισμοί και επεξήγηση των όρων.....  | 155 |
| 4.5    | Τύποι αστάθειας.....   | 159 |
| 4.6    | Μεταβατική ευστάθεια – Βασικές έννοιες.....  | 161 |
| 4.7    | Εξίσωση ταλάντωσης .....   | 162 |
| 4.8    | Μεταβατική ισχύς στροβίλου.....  | 165 |
| 4.9    | Μεταβατική ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας.....  | 165 |
| 4.10   | Απλή παράσταση σύγχρονης γεννήτριας.....   | 173 |
| 4.11   | Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής ευστάθειας .....   | 174 |
| 4.12   | Κριτήριο ίσων εμβαδών για μεταβατική ευστάθεια .....                                     | 174 |
| 4.13   | Άλλες εφαρμογές του κριτηρίου των ίσων εμβαδών .....                                     | 178 |
| 4.13.1 | Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής.....   | 178 |
| 4.13.2 | Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή.....                                   | 180 |
| 4.14   | Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ταλάντωσης (έμμεση λύση) .....                          | 190 |
| 4.15   | Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας με τη βοήθεια υπολογιστών.....                             | 193 |
| 4.15.1 | Περιγραφή του συστήματος.....  | 193 |
| 4.15.2 | Λύση του προβλήματος .....   | 194 |
| 4.16   | Διάγραμμα ροής για την επίλυση του προβλήματος .....                                     | 199 |
| 4.17   | Αποτελέσματα με χρήση υπολογιστή .....   | 202 |
| 4.18   | Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβατική ευστάθεια .....                                  | 203 |
| 4.19   | Επίδραση των συστημάτων ελέγχου συχνότητας και τάσης στη μετα-<br>βατική ευστάθεια ..... | 204 |
| 4.20   | Επίδραση του βρόχου ελέγχου συχνότητας .....   | 205 |
| 4.21   | Επίδραση του βρόχου ελέγχου τάσης.....   | 207 |
| 4.22   | Σχέση μεταξύ τάσης διέγερσης και αντιηλεκτρεγερτικής τάσης .....                         | 209 |
| 4.23   | Συγκέντρωση των εξισώσεων.....   | 209 |
| 4.24   | Περίληψη.....  | 210 |
|        | Προβλήματα.....  | 212 |
|        | Αναφορές.....  | 215 |

## Κεφάλαιο 5

### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5.1 | Εισαγωγή.....  | 217 |
| 5.2 | Εκτιμητής κατάστασης από τη ροή ισχύος γραμμών.....                    | 220 |
| 5.3 | Γενικές παρατηρήσεις.....  | 229 |
| 5.4 | Δείκτης συμπεριφοράς για μετρήσεις με θόρυβο.....                      | 230 |
| 5.5 | Παρακολούθηση του συστήματος.....                                      | 233 |
| 5.6 | Εντοπισμός εσφαλμένων δεδομένων.....                                   | 234 |
| 5.7 | Προσδιορισμός του $\Sigma_v$ για την κανονικοποίηση των μετρήσεων..... | 236 |
| 5.8 | Βελτίωση της εκτίμησης κατάστασης με την πρόσθεση μετρήσεων.....       | 242 |
| 5.9 | Περίληψη.....  | 246 |
|     | Προβλήματα.....  | 247 |
|     | Αναφορές.....  | 250 |

## Κεφάλαιο 6

### ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.1   | Εισαγωγή.....   | 251 |
| 6.2   | Δράση των ηλεκτρονικών ελεγκτών ισχύος στα facts.....           | 254 |
| 6.2.1 | Αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής.....                         | 256 |
| 6.2.2 | Ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας.....           | 259 |
| 6.2.3 | Ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος.....                          | 260 |
| 6.3   | Διαταραχές που επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος.....              | 262 |
| 6.4   | Εξοπλισμός για τη δημιουργία ευέλικτων συστημάτων διανομής..... | 264 |
| 6.5   | Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης.....                  | 267 |
| 6.6   | Εγκάρσιοι και σειριακοί ρυθμιστές.....                          | 271 |
| 6.7   | Μελλοντικές τάσεις και προοπτικές.....                          | 275 |
|       | Αναφορές.....   | 278 |

## Κεφάλαιο 7

### ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ

|     |               |     |
|-----|---------------|-----|
| 7.1 | Εισαγωγή..... | 279 |
|-----|---------------|-----|



|  |  |         |
|--|--|---------|
| 7.2  | Μορφές απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....                      | 281     |
| 7.3  | Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ .....                    | 283     |
| 7.4  | Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη Βρετανία .....                | 286     |
| 7.5  | Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη Νορβηγία.....                 | 288     |
| 7.6  | Προβλήματα και επιπτώσεις από την απελευθέρωση της αγοράς<br>ηλεκτρισμού ..... | 289     |
| 7.7  | Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα .....                 | 292     |
| 7.8  | Συμπεράσματα.....  | 294     |
| 7.9  | Η βιομηχανία ηλεκτρισμού τον 21 <sup>ο</sup> αιώνα .....                       | 295     |
| 7.10   | Περίληψη.....  | 297     |
|  | Αναφορές.....  | 298     |
| <br><b>Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 2</b> |  |         |
|  | Έλεγχος Πραγματικής Ισχύος - Συχνότητας .....                                  | 299     |
| <br><b>Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 3</b> |  |         |
|  | Έλεγχος Αέργου Ισχύος – Τάσης .....  | 323     |
| <br><b>Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 4</b> |  |         |
|  | Μεταβατική Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας .....                     | 337     |
| <br><b>Προβλήματα και Λύσεις του Κεφαλαίου 5</b> |  |         |
|  | Εκτίμηση Κατάστασης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας .....                      | 353     |
|  | <br><b>Ευρετήριο Όρων</b> .....  | <br>299 |



## Κεφάλαιο

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας των 20<sup>ο</sup> αιώνα είχε μια αλματώδη αύξηση, αλλά των 21<sup>ο</sup> αιώνα εκτιμάται ότι η αύξηση αυτή θα πολλαπλασιαστεί. Μέχρι το 2020 εκτιμάται ότι θα έχουμε μια αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 76% σε σχέση με το 1997. Η ετήσια αύξηση για τα ανεπτυγμένα κράτη εκτιμάται σε 1.5%, ενώ η αύξηση στις υπό ανάπτυξη χώρες της Ασίας, Αφρικής και της Κεντρικής και Νότιας Αμερικής θα είναι πολύ μεγαλύτερη, δεδομένου ότι εκτιμάται ότι περίπου 1.5 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση στον ηλεκτρισμό.

Για να καλυφθεί η ραγδαία αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν απαραίτητη μια δραστική αύξηση σε μέγεθος και πολυπλοκότητα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Στην αύξηση του μεγέθους των ΣΗΕ και τη δυσκολία λειτουργίας τους συνέβαλε σημαντικά και το γεγονός ότι συνήθως οι διαθέσιμες ενεργειακές πηγές για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απομακρυσμένες από τα κέντρα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη λειτουργία ενός τόσο εκτεταμένου και πολύπλοκου συστήματος απαραίτητη ήταν η άμεση χρήση και αξιοποίηση όλων των σύγχρονων τεχνολογικών ανακαλύψεων. Με την εφαρμογή τους είχαμε μια συνεχή βελτίωση στην αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των μεθόδων και των εξοπλισμών που χρησιμοποιούνταν στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την ευσταθεί και αξιόπιστη λειτουργία των ΣΗΕ.

Μεγάλη δυσκολία στην επίτευξη αξιόπιστης λειτουργίας των ΣΗΕ είναι η μέχρι σήμερα αδυναμία αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η αδυναμία σε συνδυασμό με τις ημερήσιες μεταβολές του φορτίου επιβάλλει τη συνεχή προσαρμογή της παραγωγής στο κυμαινόμενο φορτίο, με διατήρηση της τάσης και της συχνότητας στις ονομαστικές τους τιμές. Το δύσκολο αυτό

έργο αναλαμβάνουν να εκτελέσουν ο τοπικός και κεντρικός έλεγχος των ΣΗΕ που θα μελετηθούν στα πρώτα κεφάλαια του βιβλίου.

Επιπρόσθετα προβλήματα στη λειτουργία των ΣΗΕ προκαλούν και οι σημαντικές διαταραχές που προκαλούνται σε αυτό από την πτώση κεραυνών, τις διακοπτικές λειτουργίες και τα βραχυκυκλώματα (συμμετρικά και ασύμμετρα). Ακόμα και μετά από αυτές τις διαταραχές σε πολύ ζωτικά σημεία τους τα ΣΗΕ πρέπει να συνεχίζουν την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία τους. Οι μηχανικοί των ΣΗΕ υπολογίζουν την ικανότητα ενός δικτύου να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από σημαντικές διαταραχές (μελέτη μεταβατικής ευστάθειας) και αν αυτό δεν είναι δυνατόν προτείνουν δομικές αλλαγές του ή αποφυγή λειτουργικών καταστάσεων που οδηγούν σε αστάθεια τα ΣΗΕ.

Η ταχεία ανάπτυξη των ΣΗΕ για την κάλυψη της ραγδαίας αύξησης των ηλεκτρικών φορτίων απαιτεί την επέκταση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής. Αυτό, σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι συχνά δύσκολο να επιτευχθεί, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων αντιδράσεων, που οφείλονται κύρια στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των γραμμών μεταφοράς και των σταθμών. Αυτός ο λόγος μαζί με την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάπτυξη νέων ημιαγωγών στοιχείων στερεάς κατάστασης, οδήγησαν τη δεκαετία του 80 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, στην ανάπτυξη συστημάτων μεταφοράς που ονομάστηκαν «Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος» (Flexible AC Transmission Systems (FACTS)). Αυτή η τεχνολογία μπορεί να αυξήσει το βαθμό χρησιμοποίησης της εγκατεστημένης ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς ευστάθειας, ελέγχου πραγματικής και άεργου ισχύος και ελέγχου του μέτρου και της γωνίας της τάσης. Με τη βοήθειά της επεκτάθηκε η χρήση των γραμμών εναλλασσόμενου ρεύματος και σε περιπτώσεις που προηγουμένως δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για τεχνοοικονομικούς λόγους.

Εντωμεταξύ, από το τέλος της δεκαετίας του 1970, άρχισε η αναμόρφωση ή κατ' άλλους απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που στο τελικό της στάδιο φιλοδοξεί να δώσει τη δυνατότητα σε κάθε καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας να επιλέγει τον προμηθευτή του. Οι υποστηρικτές αυτής της ιδέας πιστεύουν ότι η βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας και η ελάττωση του κόστους της μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τον ανταγωνισμό στην παραγωγή και τη διανομή της, δηλαδή να υπάρχουν πολλές εταιρίες παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και να αναπτύσσεται μεταξύ τους ανταγωνισμός. Η απελευθέρωση όμως της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τα πιο σύνθετα

τεχνοοικονομικά προβλήματα, γιατί η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται και διανέμεται μέσω του δικτύου χωρίς να έχει συγκεκριμένες διευθύνσεις. Συνεπώς, αφ' ενός για να γίνει δυνατή η επιλογή του προμηθευτή από τον καταναλωτή πρέπει να εξευρεθούν και να εφαρμοστούν συμπληρωματικές λειτουργίες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, αφ' ετέρου η ποιότητα του ηλεκτρισμού και οι φυσικοί περιορισμοί του συστήματος επιβάλλουν αυστηρές προδιαγραφές για την ασφαλή λειτουργία του. Η δυνατότητα ανταγωνισμού στην παραγωγή έγινε δυνατή με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των στροβίλων και την πτώση των τιμών φυσικού αερίου. Αυτοί οι λόγοι κατέστησαν τις σχετικά μικρές μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου ανταγωνιστικές των μεγάλων θερμικών μονάδων και ανέτρεψαν τη φιλοσοφία κατασκευής μεγάλων μονάδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής.



Κεφάλαιο

## ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ – ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειτουργία των ΣΗΕ άρχισε το 1880 και από τότε μέχρι σήμερα είχαν μια μεγάλη αύξηση στο μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους. Οι μέθοδοι και οι συσκευές τους για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας βελτιώνονται συνέχεια σε απόδοση και αξιοπιστία. Ο έλεγχος των ΣΗΕ είναι απαραίτητος για να διατηρεί μια συνεχή ισορροπία μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού φορτίου, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρούν τις ονομαστικές τους τιμές η συχνότητα και οι τάσεις των ζυγών με εξασφαλισμένη την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Επί πλέον, επιδιώκεται το κόστος παραγωγής να είναι ελάχιστο. Όταν για την κάλυψη της μεταβολής του φορτίου δεν είναι αρκετή η διαθέσιμη ισχύς μιας μονάδας παραγωγής, η κατανομή του φορτίου μεταξύ των σταθμών παραγωγής είναι μια σημαντική λειτουργία, η οποία ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλίζει ελάχιστο κόστος και να επιλύεται συνέχεια. Ευτυχώς, οι μεταβολές της συχνότητας του συστήματος είναι μια ένδειξη των ανισορροπιών μεταξύ φορτίου και παραγωγής και χρησιμοποιούνται για το γρήγορο έλεγχο της παραγωγής.

Σήμερα η λειτουργία των ΣΗΕ σε μορφή διασυνδεδεμένων δικτύων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η ανταλλαγή ισχύων μεταξύ ηλεκτρικών περιοχών βελτιώνει την αντιστάθμιση των διαταραχών φορτίου με ταυτόχρονη μείωση της απαιτούμενης θερμής εφεδρείας. Επίσης, μια μείωση της εφεδρικής ισχύος κάθε διασυνδεδεμένου συστήματος είναι δυνατή, σαν αποτέλεσμα της αμοιβαίας βοήθειας σε περίπτωση σοβαρών σφαλμάτων.

## 2.2 ΚΕΝΤΡΟ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το μεγάλο πλήθος σε γραμμές, υποσταθμούς, μετασχηματιστές, διακόπτες ισχύος κ.λ.π. έκανε τον έλεγχο της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πολύπλοκο. Κατά συνέπεια, έγινε απαραίτητη η ταυτόχρονη παρακολούθηση της λειτουργίας όλου του συστήματος από ένα συγκεκριμένο χώρο, που ονομάζεται **Κέντρο Κατανομής Φορτίου (ΚΚΦ)**. Σκοπός του ΚΚΦ είναι να αυξάνει την αξιοπιστία και να επιτυγχάνει οικονομική λειτουργία του συστήματος, αλλά η λειτουργία του συστήματος είναι δυνατή και χωρίς το κέντρο κατανομής φορτίου. Δηλαδή στην πράξη είναι δυνατή η διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ όλων των συσκευών και του κέντρου κατανομής φορτίου, χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Για να επιτύχουν αυτό το είδος λειτουργίας τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα διατηρούν και δίνουν προτεραιότητα στον τοπικό έλεγχο σε σχέση με τον κεντρικό έλεγχο. Π.χ. τα τοπικά συστήματα προστασίας εκκαθαρίζουν βραχυκυκλώματα με το άνοιγμα των διακοπών ισχύος, μια λειτουργία που πραγματοποιείται μέσα σε μερικούς κύκλους της βασικής συχνότητας, ενώ οι ίδιοι διακόπτες ισχύος μπορούν να ελέγχονται και από το κέντρο κατανομής φορτίου αλλά βραδύτερα. Επίσης, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διατηρούν το συγχρονισμό τους με το σύστημα και ελέγχουν την ισχύ εξόδου τους χωρίς να δέχονται κανένα σήμα από το κέντρο κατανομής φορτίου.

Το ΚΚΦ συντονίζει την απόκριση των συσκευών του συστήματος στις κανονικές αλλά και στις επικίνδυνες καταστάσεις λειτουργίας. Ο ψηφιακός υπολογιστής του ΚΚΦ δέχεται το σύνολο των δεδομένων, που στέλνονται απ' όλες τις συσκευές, ανακαλύπτει ανωμαλίες και ειδοποιεί τους χειριστές με το άναμμα λυχνιών, ηλεκτρικών κουδουνιών ή εμφάνιση σημάτων στις τερματικές οθόνες. Ο έλεγχος του συστήματος σε κανονικές συνθήκες ή ακίνδυνες ανώμαλες καταστάσεις γίνεται από το ψηφιακό υπολογιστή, ενώ οι αποφάσεις για τη διόρθωση επικίνδυνων καταστάσεων παίρνονται από το **χειριστή (dispatcher)**. Σε εξαιρετικά επικίνδυνες καταστάσεις, όπως η απώλεια μιας μεγάλης γεννήτριας, ενεργοποιούνται πολλά σήματα κινδύνου και ο χειριστής δέχεται πλήθος πληροφοριών, αλλά δεν έχει διάγνωση για την αιτία που προκάλεσε την ανωμαλία. Με τη σημερινή οργάνωση των ΚΚΦ, ο ψηφιακός υπολογιστής κάνει μια πρώτη προσπάθεια για τη διάγνωση της αιτίας, που προκάλεσε την ενεργοποίηση των σημάτων κινδύνου, αλλά ο χειριστής είναι υπεύθυνος για την τελική εντολή διόρθωσης του λάθους.

Το Σχ. 2.1 είναι μια φωτογραφία του εσωτερικού χώρου του ΚΚΦ της ΔΕΗ. Οι

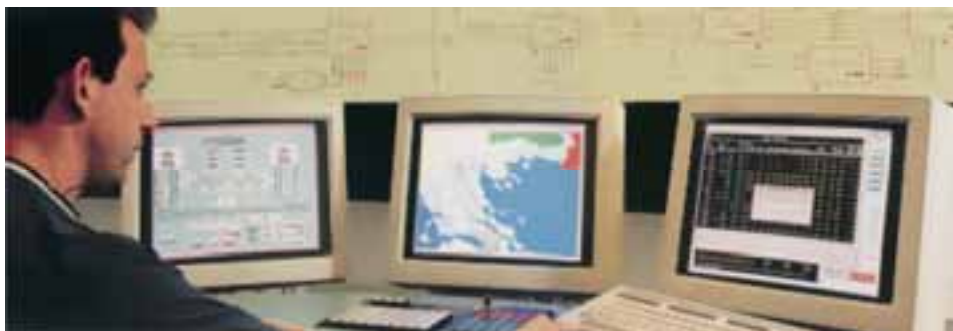


**Σχ. 2.1** Εσωτερικό του ΚΚΦ της ΔΕΗ. Ο χειριστής κάθεται σε ένα παρατηρητήριο, όπου υπάρχουν τερματικές οθόνες, πληκτρολόγια και τηλεφωνικές γραμμές. Στον τοίχο υπάρχει το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος με ενδεικτικές λυχνίες (Φωτογραφία ΔΕΗ).

συσκευές με τις οποίες συνήθως ο χειριστής επικοινωνεί με τον υπολογιστή είναι:

1. Τερματικές οθόνες για την παρουσίαση των δικτύων μεταφοράς, υποσταθμών, σύνοψη δεδομένων, δείκτες δυνατών ενεργειών κ.λ.π. Η επιλογή των διαφόρων δυνατοτήτων γίνεται με τη χρήση κουμπιού για την **αλλαγή σελίδας** στο τερματικό και την ενεργοποίηση εντολών και περιοχών της οθόνης με ποικίλους τρόπους.
2. Πληκτρολόγια για την αλλαγή παραμέτρων και συνθηκών λειτουργίας του συστήματος.
3. Πληκτρολόγια ειδικών συναρτήσεων για την αυξομείωση του λόγου μετασχηματιστών, διακοπτική σύνδεση ή αποσύνδεση πυκνωτών γραμμής, κ.λ.π.
4. Γραφίδες φωτός (light-pen) για απ' ευθείας δράση στα **σημεία ψηλάφησης** της τερματικής οθόνης, για έλεγχο των διακοπών ή άλλες λειτουργίες. Στο Σχ. 2.2 φαίνεται ένας χειριστής, που στις οθόνες του μπορεί να παρακολουθεί κάθε στιγμή την κατάσταση του ΣΗΕ της Ελλάδας.

Επίσης στη διάθεση των χειριστών είναι ενδεικτικές λυχνίες, ηχητικά σήματα, ειδικές τηλεφωνικές επικοινωνίες με τους σταθμούς παραγωγής και τους υποσταθμούς μεταφοράς και τηλεφωνικές συνδέσεις με γειτονικές ηλεκτρικές εταιρείες. Οι απαντήσεις σε επιλεγμένες ερωτήσεις ή τα προειδοποιητικά σήματα



**Σχ. 2.2** Στα ΚΚΦ η επικοινωνία ανθρώπου-μηχανής βασίζεται σε πλήρη γραφικά συστήματα απεικόνισης. (Φωτογραφία ΔΕΗ).

μπορούν να εμφανίζονται ταυτόχρονα στις τερματικές οθόνες και στο μεγάλο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος μεταφοράς, που βρίσκεται στον τοίχο μπροστά στο παρατηρητήριο του χειριστή.

Στο Σχ. 2.2, στην οθόνη του χειριστή παρουσιάζεται ένα τμήμα του δικτύου μεταφοράς. Στην οθόνη παρουσιάζονται οι τάσεις ζυγών, οι ροές ισχύος γραμμών και οι καταστάσεις των διακοπών ισχύος, μετασχηματιστών και άλλων συσκευών. Με την πίεση ενός κουμπιού αλλάζει το περιεχόμενο της οθόνης και γίνεται η παρουσίαση άλλων τμημάτων του ηλεκτρικού δικτύου. Με το πληκτρολόγιο ή το ποντίκι γίνεται η επιλογή κάποιας συσκευής του συστήματος, π.χ., ενός διακόπτη και είναι δυνατή η αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας του, αν ο χειριστής δώσει την κατάλληλη εντολή. Η διαδικασία ενός τέτοιου μακρινού χειρισμού πρέπει να ολοκληρωθεί μέσα σε έναν περιορισμένο χρόνο, που καθορίζεται από τον κύκλο σάρωσης του υπολογιστή. Μερικές ακόμα δυνατότητες ελέγχου που έχει ο χειριστής είναι:

- 1. Εντολές συστήματος:** Ο χειριστής μπορεί να επιλέγει την μέθοδο με την οποία ο υπολογιστής ελέγχει ολόκληρο το σύστημα, δηλαδή μπορούμε να έχουμε έλεγχο με σκοπό ή τη βέλτιστη οικονομική λειτουργία ή τον αυτόματο έλεγχο της παραγωγής, που έχει στόχο τη διατήρηση της ονομαστικής συχνότητας και των προδιαγραφών ισχύος στις διασυνδεδετικές γραμμές.
- 2. Μονάδες:** Επιλέγει τη χειροκίνητη ρύθμιση ή τη βάση για τον τρόπο φόρτισης όλων των γεννητριών, που τροφοδοτούν ισχύ στο σύστημα.
- 3. Εισαγωγή δεδομένων για τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής:** Επιτρέπει στο χειριστή να καθορίζει μια νέα ισχύ εξόδου μόνιμης κατάστασης για μια γεννήτρια.
- 4. Ανάγνωση δεδομένων:** Από το πληκτρολόγιο είναι δυνατή η εισαγωγή δε-



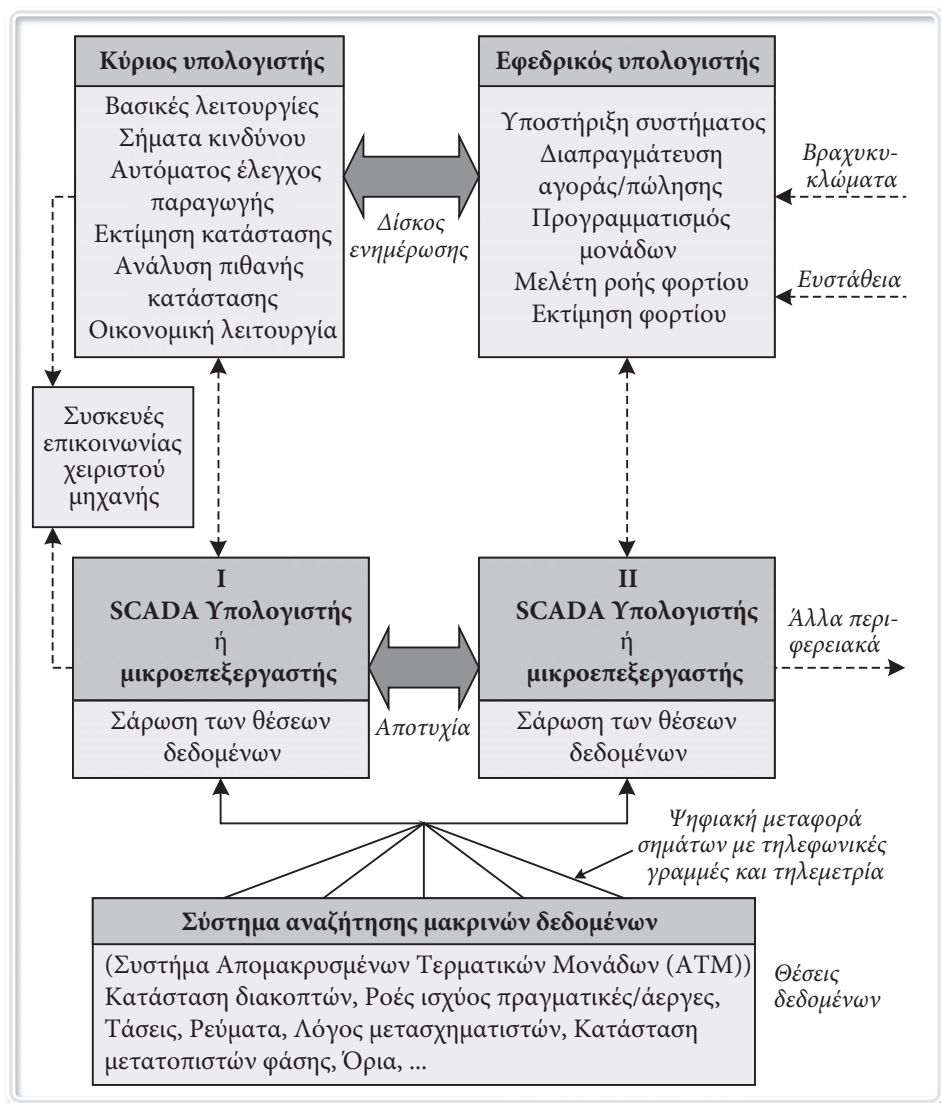
δομένων, που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από το πρόγραμμα του ψηφιακού υπολογιστή.

5. **Σήματα κινδύνου:** Επιτρέπει στο χειριστή να βρει την αιτία που προκαλεί το σήμα κινδύνου.
6. **Επιλογή σταθμών/υποσταθμών:** Επιτρέπει στο χειριστή να επιλέξει και να παρουσιάσει στην οθόνη την κατάσταση λειτουργίας ορισμένου σταθμού ή υποσταθμού.
7. **Ειδικές λειτουργίες:** Επιτρέπει εισαγωγή δεδομένων, που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο του συστήματος ισχύος.
8. **Έλεγχος εξόδου:** Κατευθύνει την έξοδο σε διαφορετικές τερματικές οθόνες ή εκτυπωτές.
9. **Έλεγχος κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU):** Επιτρέπει την επιλογή οποιουδήποτε από τους δύο υπολογιστές για χρησιμοποίησή του στον έλεγχο πραγματικού χρόνου (on-line) και τη χρήση του άλλου υπολογιστή για την επεξεργασία προγραμμάτων δευτερεύουσας σημασίας.

## 2.3 ΔΟΜΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για λόγους αυξημένης αξιοπιστίας, τα ΚΚΦ χρησιμοποιούν δύο ψηφιακούς υπολογιστές για έλεγχο αναζήτησης μακρινών δεδομένων, ενεργειακή διαχείριση και ασφάλεια του συστήματος. Κάθε υπολογιστής έχει τη δική του μνήμη και ελέγχει ένα μεγάλο αριθμό συσκευών εισόδου-εξόδου, δηλαδή εκτυπωτές, τηλετυπα, μαγνητικούς δίσκους, ταινίες κ.λ.π. Συνήθως ο ένας υπολογιστής χρησιμοποιείται για παρακολούθηση και έλεγχο του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ενώ ο άλλος είναι εφεδρικός και χρησιμοποιείται για εκτέλεση προγραμμάτων, όπως πρόβλεψη φορτίου, κατανομή της ισχύος μεταξύ των θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών κ.λ.π. Ο υπολογιστής που ελέγχει το σύστημα, περιοδικά (περίπου κάθε τριάντα δευτερόλεπτα), ενημερώνει ένα δίσκο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από τους δύο υπολογιστές, ώστε να μπορεί να αναλάβει τον έλεγχο του συστήματος και ο εφεδρικός υπολογιστής αν αυτό ζητηθεί. Στο Σχ. 2.3 φαίνεται μια διαγραμματική παράσταση του διπλού συστήματος υπολογιστών.

Όλες οι περιφερειακές μονάδες επικοινωνούν με τους υπολογιστές με τη βοήθεια μικροεπεξεργαστών εισόδου-εξόδου. Οι μικροεπεξεργαστές αυτοί δεν χρησιμεύουν μόνο για την επικοινωνία, αλλά έχουν προγραμματιστεί για την προεπεξεργασία των αναλογικών πληροφοριών, ελέγχουν τα όρια, μετατρέπουν τα δεδο-



**Σχ. 2.3** Τυπικός έλεγχος ψηφιακού υπολογιστή και παρακολούθηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): Εποπτικός έλεγχος και αναζήτηση δεδομένων.

μένα σε ένα άλλο σύστημα μονάδων κ.λ.π. Οι μικροεπεξεργαστές μπορούν να εισάγουν ή να εξάγουν δεδομένα από τη μνήμη του υπολογιστή χωρίς να διακόπτουν την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Συχνά υπάρχουν και εφεδρικοί μικροεπεξεργαστές, που αναλαμβάνουν τη λειτουργία σε περίπτωση βλάβης του κύ-



**Σχ. 2.4** Αίθουσα υπολογιστών και μικροεπεξεργαστών για την επικοινωνία των υπολογιστών με τα κανάλια τηλεμετρίας (Φωτογραφία ΔΕΗ).

ριου μικροεπεξεργαστή. Στο Σχ. 2.4 φαίνεται μια αίθουσα κεντρικού υπολογιστή, που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση των χειριστών και άλλες βοηθητικές εργασίες.

Αποτέλεσμα όλων αυτών των προφυλακτικών μέτρων είναι να υπάρχει μια εξασφάλιση για την εκτέλεση όλων των κρίσιμων λειτουργιών μεγαλύτερη από 99.8%. Επίσης, η εκτέλεση των προγραμμάτων εφαρμογών συνεχίζει ή επαναρχίζει αυτόματα σε περίπτωση κάποιας μηχανικής βλάβης μιας συσκευής και ανάληψης της λειτουργίας της από την εφεδρική της. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα του υπολογιστικού συστήματος είναι ότι πραγματοποιεί τις βασικές λειτουργίες ακόμα και κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Επίσης, νέες ψηφιακές μέθοδοι για τον έλεγχο του συστήματος μπορούν να συμβολομεταφράζονται και να δοκιμάζονται στον εφεδρικό υπολογιστή και κατόπιν να μεταφέρονται για χρήση σε πραγματικό χρόνο στον κύριο υπολογιστή.

Ο υπολογιστής εκτελεί περιοδικά ορισμένες λειτουργίες. Οι πιο σοβαρές λειτουργίες έχουν το μικρότερο περιοδικό χρόνο εκτέλεσης.

Τυπικά κάθε 2 δευτερόλεπτα εκτελούνται οι εξής λειτουργίες: Ελέγχεται η κατάσταση διαφόρων συσκευών, όπως των διακοπών (ανοικτοί ή κλειστοί), των πυκνωτών, των φορτίων και των τάσεων των υποσταθμών και οι ρυθμίσεις των μετασχηματιστών. Οι ισχύεις στις διασυνδετικές γραμμές και οι προδιαγεγραμμέ-

νες ανταλλαγές ισχύος. Τα φορτία των γεννητριών, τα όρια λειτουργίας και η ισχύς των λεβήτων. Τηλεμετρική επιβεβαίωση για την ανακάλυψη σφαλμάτων στα τηλεπικοινωνιακά κανάλια μεταξύ του υπολογιστή και των απομακρυσμένων συσκευών.

- Κάθε τέσσερα δευτερόλεπτα είναι δυνατόν να γίνονται ρυθμίσεις στην ισχύ εξόδου των γεννητριών για την ανάληψη των μεταβολών των φορτίων. Αυτές οι ρυθμίσεις γίνονται με βάση την ικανότητα απόκρισης κάθε μονάδας στις μεταβολές ισχύος σε MW/λεπτό.
- Κάθε τριάντα δευτερόλεπτα γίνεται η εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος και η ενεργειακή διαχείριση.
- Κάθε τρία λεπτά γίνεται μελέτη ροής φορτίου και ο υπολογισμός πιθανών καταστάσεων.
- Κάθε πέντε λεπτά ο υπολογιστής εκτελεί ένα πρόγραμμα βέλτιστης οικονομικής διαχείρισης για την τελική ρύθμιση της ισχύος εξόδου κάθε γεννήτριας.
- Κάθε μία ώρα ο υπολογιστής εκτελεί πολλά άλλα προγράμματα του συστήματος, που δεν θεωρούνται κρίσιμα, όπως η καταγραφή του φορτίου, πρόβλεψη του φορτίου, προσδιορισμός των γεννητριών που πρέπει να εκκινήσουν ή να σταματήσουν κ.λ.π

Τα περισσότερα μικρής προτεραιότητας προγράμματα (αυτά που εκτελούνται σπάνια) μπορούν να εκτελούνται όταν το ζητήσει ο χειριστής για την εκτέλεση μελετών ή για την εκκίνηση του συστήματος ισχύος. Επίσης ο χειριστής μπορεί να αλλάξει τα δεδομένα κατά την εκτέλεση των προγραμμάτων, αν αλλάξει κάποια παράμετρος του συστήματος. Για παράδειγμα, η MW/λεπτό ικανότητα μιας μονάδας παραγωγής αλλάζει, αν για λόγους συντήρησης αφαιρεθεί μια από τις βαλβίδες ατμού, οπότε η ανάληψη φορτίου από τη μονάδα πρέπει να μειωθεί ανάλογα. Οι συμβολομεταφραστές του υπολογιστή και οι επεξεργαστές δεδομένων είναι ευέλικτοι και έτοιμοι να δεχθούν εντολές από το χειριστή.

### 2.3.1 Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος

Το σύστημα ελέγχου παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος αποτελείται από ένα Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΕΚΕΕ) και δύο Περιφερειακά Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας (ΠΚΕΕ), μέσω των οποίων το ΕΚΕΕ συνδέεται με τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς μεταφοράς του διασυνδεδεμένου συστήματος της Ελλάδος. Το βόρειο ΠΚΕΕ είναι εγκατεστημένο στη Πτολεμαΐδα και το νότιο ΠΚΕΕ στον Άγιο Στέ-

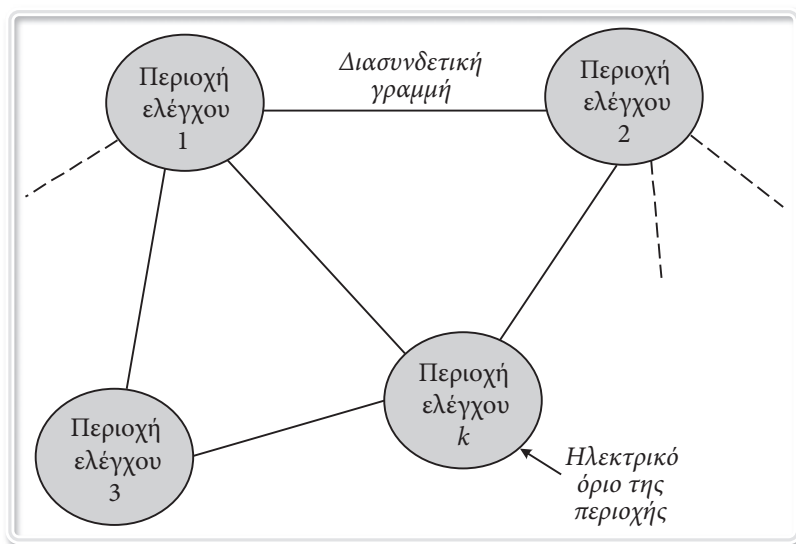
φανο Αττικής μαζί με το ΕΚΕΕ. Το βόρειο ΠΚΕΕ μπορεί να αναλάβει βασικές λειτουργίες του ΕΚΕΕ, αν αυτό επιβληθεί από έκτακτες ανάγκες λειτουργίας. Αυτή η διάταξη και οργάνωση του ΚΕΕ επελέγη λόγω της ιδιομορφίας του Ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος, όπου το 68% της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στο βορρά ενώ το 33% του ηλεκτρικού φορτίου βρίσκεται στην Αττική. Η εμπορική λειτουργία του Συστήματος Ελέγχου Ενέργειας (ΣΕΕ) άρχισε το Νοέμβριο του 1994, ανέλαβε τον πλήρη έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος στις αρχές του 1996 και στοίχισε 36.7 εκατομμύρια ευρώ. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τον ηλεκτρομηχανολογικό και ηλεκτρικό εξοπλισμό των δύο κτιρίων, την επίπλωσή τους, τις επεκτάσεις κτιρίων σε 17 υποσταθμούς, τον περιφερειακό εξοπλισμό 87 υποσταθμών και σταθμών παραγωγής καθώς και τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό ΟΤΕ. Το ΣΕΕ χρησιμοποιεί υπολογιστές VAX 6000 και περιλαμβάνει 93 απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (ATM), ενώ μπορεί να διαχειριστεί 240 ATM που μπορούν να συλλέξουν 15.000 αναλογικές μετρήσεις, 47.500 ψηφιακές σημάνσεις, 550 μετρήσεις ενέργειας και 11.400 εντολές τηλεχειρισμού. Η επικοινωνία μεταξύ των ΠΚΕΕ και των ATM γίνεται μέσω κύριων και εφεδρικών οδεύσεων σε ταχύτητες 300, 600 και 1200 bps. Οι ταχύτητες σάρωσης είναι κάθε 2 sec, 4 sec και 10 sec, ενώ κάθε 600 sec γίνεται μια γενική σάρωση.

## 2.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής και η βέλτιστη οικονομική λειτουργία είναι δύο βασικές λειτουργίες, που σχετίζονται με τον έλεγχο παραγωγής σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος και ο σκοπός τους είναι πολύ διαφορετικός, αλλά και οι δύο δρουν στη γεννήτρια ελέγχοντας τη μηχανική ισχύ και μεταβάλλοντας την παραγωγή σχετικά αργά.

Συνήθως γειτονικά ηλεκτρικά συστήματα διασυνδέονται με μια ή περισσότερες ηλεκτρικές γραμμές, που ονομάζονται **διασυνδετικές γραμμές (tie lines)**, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5. Οι ηλεκτρικές **περιοχές** που δείχνονται στο Σχ. 2.5 είναι ανεξάρτητα ηλεκτρικά συστήματα.

Ο **έλεγχος αυτόματης παραγωγής** είναι ένας έλεγχος σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση υπολογιστή, που σκοπός του είναι να διατηρεί την ονομαστική συχνότητα σε ολόκληρο το σύστημα και να κρατάει την ισχύ στις διασυνδετικές γραμ-



Σχ. 2.5 Διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα.

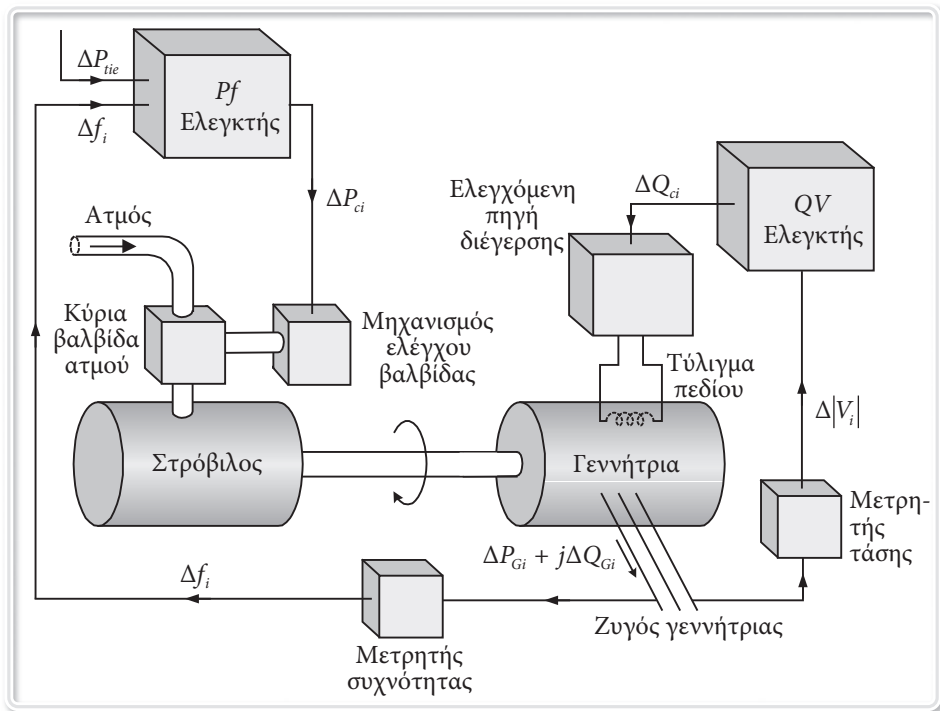
μές ίση με την προδιαγεγραμμένη τιμή. Στην πράξη, ο έλεγχος παραγωγής γίνεται σε αποκεντρωμένη βάση, δηλαδή κάθε ηλεκτρική περιοχή προσπαθεί να διατηρεί την ανταλλασσόμενη ισχύ στην προδιαγεγραμμένη τιμή.

Η **βέλτιστη οικονομική λειτουργία** είναι επίσης ένας έλεγχος σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση υπολογιστή, που σκοπός του είναι να τροφοδοτεί το φορτίο από όλες τις γεννήτριες που λειτουργούν με τον πιο οικονομικό τρόπο, επιτυγχάνοντας δηλαδή ελάχιστο κόστος καυσίμου.

## 2.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΧΩΡΙΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ

Πρέπει να τονίσουμε ότι τα ηλεκτρικά συστήματα είναι ικανά να εργάζονται χωρίς κεντρικό έλεγχο. Αυτό επιτυγχάνεται με τα δύο συστήματα ελέγχου που διαθέτει κάθε στροβιλογεννήτρια, δηλαδή τον έλεγχο πραγματικής ισχύος-συχνότητας  $P-f$  και τον έλεγχο άεργου ισχύος-τάσης  $Q-V$ , που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι προηγούμενοι έλεγχοι μαζί με τη φυσική ρύθμιση του φορτίου εξαναγκάζουν τις γεννήτριες μιας περιοχής να μοιράζονται το φορτίο. Στο Σχ. 2.6 φαίνονται παραστατικά οι δύο βρόχοι ελέγχου.

Σκοπός του ελέγχου πραγματικής ισχύος-συχνότητας  $P-f$  είναι να ελέγχει τη συχνότητα και την ισχύ στις διασυνδετικές γραμμές. Η μεταβολή της συχνότη-



Σχ. 2.6 Βρόχοι ελέγχου στροβιλογεννήτριας.

τας  $\Delta f_i$  και της ισχύος στις διασυνδετικές γραμμές  $\Delta P_{tie}$ , που δίνει έμμεση πληροφορία για τη μεταβολή της διαφοράς των γωνιών των τάσεων στα άκρα τους,  $\Delta\delta$ , αφού ενισχυθούν μετατρέπονται σε ένα σήμα ρύθμισης της μηχανικής ισχύος, που τροφοδοτείται στη γεννήτρια,  $\Delta P_{ci}$ . Αποτέλεσμα αυτής της ρύθμισης είναι μια μεταβολή στην πραγματική ισχύ εξόδου της γεννήτριας  $\Delta P_{Gi}$ , που σκοπό έχει να μεταβάλει την αρχική κατάσταση του συστήματος.

Σκοπός του ελέγχου άεργου ισχύος-τάσης  $Q-V$  είναι να ελέγχει το μέτρο της τάσης  $|V_i|$ . Αρχικά εκτιμάται το σφάλμα τάσης  $\Delta|V_i|$  και αυτό τα σφάλμα μετατρέπεται σε ένα σήμα μεταβολής της άεργου ισχύος  $\Delta Q_{ci}$ , που τροφοδοτείται στην πηγή διέγερσης. Το αποτέλεσμα είναι μια μεταβολή στο ρεύμα πεδίου του δρομέα, που μεταβάλλει την παραγωγή άεργου ισχύος  $\Delta Q_{Gi}$  και την τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας.

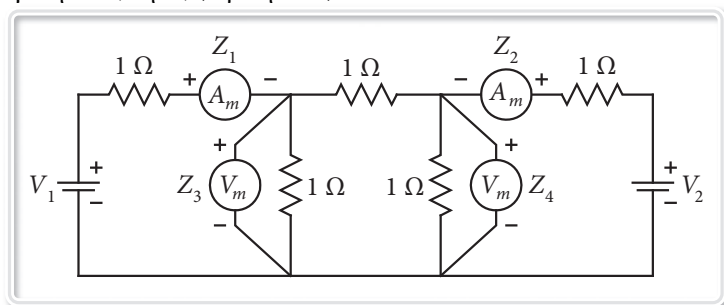
Η διαίρεση στους πιο πάνω βρόχους ελέγχου στηρίζεται στις ιδιότητες ευαισθησίας των ΣΗΕ που βρίσκονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι ιδιότητες αυτές προέκυψαν από μελέτες ροής φορτίου και τη στατική μελέτη ευαισθησίας συστημάτων και είναι οι εξής:

## ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΥΣΕΙΣ

### 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- 5.1 Στο κύκλωμα ΣΡ του Σχήματος τα όργανα μετρούν  $z_1=9.01$  A,  $z_2=3.02$  A,  $z_3=6.98$  V και  $z_4=5.01$  V. Η διασπορά του θορύβου των οργάνων είναι  $r_{11}=0.01$ ,  $r_{22}=0.01$ ,  $r_{33}=0.02$ , και  $r_{44}=0.02$ , αντίστοιχα. Υπολογίστε:
- Τις βέλτιστες τιμές τάσεων πηγών  $V_1$  και  $V_2$ , που αντιστοιχούν στις μετρήσεις μας.
  - Τις εκτιμώμενες τιμές των μετρήσεων και τις διαφορές τους από τις μετρούμενες τιμές (σφάλματα).



Λύση:

Επειδή το κύκλωμα είναι ΣΡ, η έκφραση των μετρούμενων μεγεθών συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης  $V_1$  και  $V_2$  του συστήματος γίνεται με γραμμικές σχέσεις. Θα βρούμε αυτή τη σχέση με τη μέθοδο των βρόχων (βλέπε σχήμα):

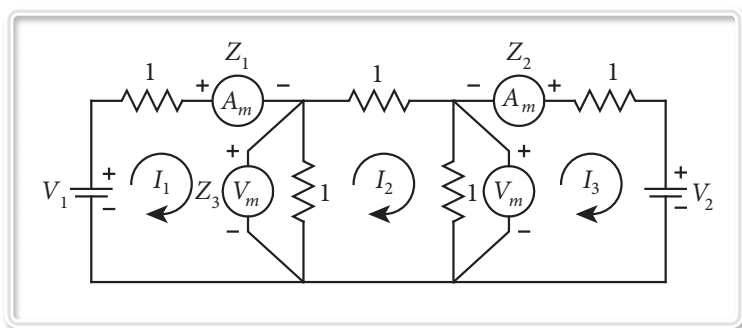
$$V_1 = I_1 + I_1 - I_2 = 2I_1 - I_2 \Rightarrow I_1 = 0.5V_1 + 0.5V_2 \quad (1)$$

$$0 = I_2 - I_1 + I_2 + I_2 - I_3 = 3I_2 - I_1 - I_3 \quad (2)$$

$$-V_2 = I_3 - I_2 + I_3 = 2I_3 - I_2 \Rightarrow I_3 = -0.5V_2 + 0.5I_2 \quad (3)$$

Τα  $I_1$  και  $I_3$  από τις εξ. 1 και 3 αντικαθιστούμε στην εξ. 2:





$$3I_2 - 0.5V_1 - 0.5I_2 + 0.5V_2 - 0.5I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = 0.25(V_1 - V_2) \quad (4)$$

Την εξ. 4 αντικαθιστούμε στις εξ. 1 και 3.

$$I_1 = 0.5V_1 + 0.5(0.25(V_1 - V_2)) = 0.625V_1 - 0.125V_2 = z_1 \quad (5)$$

$$I_3 = -0.5V_2 + 0.5(0.25(V_1 - V_2)) = 0.125V_1 - 0.625V_2 = -z_2$$

Άρα:

$$z_2 = -0.125V_1 + 0.625V_2 \quad (6)$$

$$z_3 = I_1 - I_2 = 0.625V_1 - 0.125V_2 - 0.25V_1 + 0.25V_2 = 0.375V_1 + 0.125V_2 \quad (7)$$

$$z_4 = I_2 - I_3 = 0.25(V_1 - V_2) - 0.125V_1 + 0.625V_2 = 0.125V_1 + 0.375V_2 \quad (8)$$

Τις εξ. 5, 6, 7 και 8 γράφουμε υπό μορφή μητρών:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 \\ -0.125 & 0.625 \\ 0.375 & 0.125 \\ 0.125 & 0.375 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \Rightarrow [\hat{\mathbf{Z}}_Y] = [\mathbf{H}][\hat{\mathbf{X}}] \quad (\text{εξ. 5.29})$$

δηλαδή λόγω της γραμμικότητας, τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών κατάστασης  $\hat{\mathbf{X}}$  μπορούμε να τις υπολογίσουμε από την εξ. 5.33, όπου:

$$[\mathbf{R}]^{-1} = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}$$

Έχουμε:

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} &= \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 & 0.375 & 0.125 \\ -0.125 & 0.625 & 0.125 & 0.375 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 62.50 & -12.50 & 18.75 & 6.25 \\ -12.50 & 62.50 & 6.25 & 18.75 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Επίσης:

$$[\mathbf{G}] = [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} [\mathbf{H}] = \begin{bmatrix} 48.4375 & -10.9375 \\ -10.9375 & 48.4375 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{G}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0218 & 0.0049 \\ 0.0049 & 0.0218 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{C}] = [\mathbf{G}]^{-1} [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.2982 & 0.0351 & 0.4386 & 0.2281 \\ 0.0351 & 1.2982 & 0.2281 & 0.4386 \end{bmatrix}$$

Με χρήση της εξ. 5.33 παίρνουμε:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [\mathbf{G}]^{-1} [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} \begin{bmatrix} 9.01 \\ 3.02 \\ 6.98 \\ 5.01 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16.0072 \\ 8.0261 \end{bmatrix} V$$

Με τη χρήση των βέλτιστων μεταβλητών κατάστασης, οι εκτιμώμενες μετρήσεις από την εξ. 5.29 είναι:

$$\begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{z}_3 \\ \hat{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 \\ -0.125 & 0.625 \\ 0.375 & 0.125 \\ 0.125 & 0.375 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 16.0072 \\ 8.0261 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.00123 & A \\ 3.01544 & A \\ 7.00596 & V \\ 5.01070 & V \end{bmatrix}$$

και τα σφάλματα μεταξύ μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών είναι:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e}_3 \\ \hat{e}_4 \end{bmatrix} = [\mathbf{Z}_M] - [\hat{\mathbf{Z}}_Y] = \begin{bmatrix} 9.01 \\ 3.02 \\ 6.98 \\ 5.01 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 9.00123 \\ 3.01544 \\ 7.00596 \\ 5.01070 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00877 & A \\ 0.00456 & A \\ -0.02596 & V \\ -0.00070 & V \end{bmatrix}$$

Παρατηρούμε πολύ καλή προσέγγιση των μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών γεγονός που αποδεικνύει ότι πρέπει να έχουμε εμπιστοσύνη στην εκτιμώμενη κατάσταση του συστήματος.

- 5.2** Για το Πρόβλημα 5.1 θεωρούμε ότι όλα τα δεδομένα είναι ίδια εκτός από την  $z_4 = 4.4$  V Υπολογίστε:
- Τις βέλτιστες τιμές τάσεων πηγών  $V_1$  και  $V_2$ , που αντιστοιχούν στο νέο σύνολο μετρήσεων.
  - Θεωρούμε ότι μια μέτρηση είναι κακή, αν η πιθανότητά της να είναι κακή είναι μεγαλύτερη από 0.9974. Υπάρχουν τέτοιες μετρήσεις στα δεδομένα μας και ποιες;
  - Απομακρύνετε την πιο κακή μέτρηση και ξαναυπολογίστε τις μεταβλητές κατάστασης  $V_1$  και  $V_2$ .
  - Είναι αποδεκτές αυτές οι μεταβλητές κατάστασης; Συγκρίνατε με τ' αποτελέσματα του Προβλήματος 5.1.

Λύση:

- α)** Από την εξ. 5.33 έχουμε:

$$[\hat{\mathbf{X}}] = [\mathbf{C}][\mathbf{Z}_M]$$

όπου το  $[\mathbf{C}]$  είναι το ίδιο με αυτό που υπολογίσαμε στο πρόβλημα 5.1. Άρα:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2982 & 0.0351 & 0.4386 & 0.2281 \\ 0.0351 & 1.2982 & 0.2281 & 0.4386 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.01 \\ 3.02 \\ 6.98 \\ 4.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15.8679 \\ 7.7588 \end{bmatrix} \text{ V}$$

Παρατηρούμε ότι οι μεταβλητές κατάστασης διαφοροποιούνται από τις τιμές του προβλήματος 5.1.

- β)** Από τον Πίνακα 5.1 βλέπουμε ότι για να έχουμε πιθανότητα μεγαλύτερη από 0.9974 ότι μια μέτρηση είναι κακή, πρέπει το κανονικοποιημένο υπόλοιπό της να είναι μεγαλύτερο του 3. Θα υπολογίσουμε τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα των μετρήσεων για να δούμε αν ισχύει αυτή η συνθήκη. Θα υπολογίσουμε πρώτα την τυπική απόκλιση  $\Sigma_v$  κάθε μέτρησης  $v$ , με χρήση της εξ. 5.38, δηλαδή:

$$\Sigma^2 = [\mathbf{R}] - [\mathbf{H}]([\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} [\mathbf{H}])^{-1} [\mathbf{H}]^T = [\mathbf{R}] - [\mathbf{H}][\mathbf{G}]^{-1} [\mathbf{H}]^T$$

( $[\mathbf{G}]$  συμβολισμός Προβλ. 5.1)

Για να εκμεταλλευτούμε τις πράξεις που έγιναν στο Πρόβλημα 5.1, την προηγούμενη εξίσωση τη γράφουμε στη μορφή:

$$\Sigma^2 = ([\mathbf{I}] - [\mathbf{H}][\mathbf{G}]^{-1}[\mathbf{H}]^T[\mathbf{R}]^{-1})[\mathbf{R}]$$

Αλλά σύμφωνα με το Πρόβλημα 5.1:

$$\begin{aligned} [\mathbf{H}][\mathbf{G}]^{-1}[\mathbf{H}]^T[\mathbf{R}]^{-1} &= \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 \\ -0.125 & 0.625 \\ 0.375 & 0.125 \\ 0.125 & 0.375 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.2982 & 0.0351 & 0.4386 & 0.2281 \\ 0.0351 & 1.2982 & 0.2281 & 0.4386 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0.8070 & X & X & X \\ X & 0.8070 & X & X \\ X & X & 0.1930 & X \\ X & X & X & 0.1930 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

όπου έχουμε υπολογίσει μόνο τα διαγώνια στοιχεία, που χρειαζόμαστε για τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων. Άρα:

$$\begin{aligned} \Sigma^2 &= \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.8070 & X & X & X \\ X & 0.8070 & X & X \\ X & X & 0.1930 & X \\ X & X & X & 0.1930 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1.93 \times 10^{-3} & X & X & X \\ X & 1.93 \times 10^{-3} & X & X \\ X & X & 16.14 \times 10^{-3} & X \\ X & X & X & 16.14 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Από την εξ. 5.29 έχουμε:

$$[\hat{\mathbf{Z}}_Y] = [\mathbf{H}][\hat{\mathbf{X}}] = \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 \\ -0.125 & 0.625 \\ 0.375 & 0.125 \\ 0.125 & 0.375 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 15.8679 \\ 7.7588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.9476 \\ 2.8658 \\ 6.9203 \\ 4.8930 \end{bmatrix}$$

Άρα έχουμε τα εξής κανονικοποιημένα υπόλοιπα:

$$Y_1 = \frac{9.01 - 8.9476}{\sqrt{1.93 \times 10^{-3}}} = 1.42 \quad Y_2 = \frac{3.02 - 2.8658}{\sqrt{1.93 \times 10^{-3}}} = 3.51$$

$$Y_3 = \left| \frac{6.98 - 6.9203}{\sqrt{16.14 \times 10^{-3}}} \right| = 0.4699 \quad Y_4 = \left| \frac{4.4 - 4.8930}{\sqrt{16.14 \times 10^{-3}}} \right| = 3.88$$

Άρα τη συνθήκη πληρούν οι μετρήσεις  $Z_2$  και  $Z_4$ .

- γ) Απορρίπτουμε τη μέτρηση  $Z_4$ , που έχει το μεγαλύτερο κανονικοποιημένο υπόλοιπο. Για τις υπόλοιπες τρεις μετρήσεις, έχουμε τις ακόλουθες αναθεωρημένες μήτρες:

$$[\mathbf{H}] = \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 \\ -0.125 & 0.625 \\ 0.375 & 0.125 \end{bmatrix} \quad [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} = \begin{bmatrix} 62.50 & -12.50 & 18.75 \\ -12.50 & 62.50 & 6.25 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{G}] = [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} [\mathbf{H}] = \begin{bmatrix} 47.65625 & -13.28125 \\ -13.28125 & 41.40625 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{G}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.023043 & 0.007391 \\ 0.007391 & 0.026522 \end{bmatrix}$$

Με χρήση της εξ. 5.33:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} &= [\mathbf{G}]^{-1} [\mathbf{H}]^T [\mathbf{R}]^{-1} [\mathbf{Z}_M] = \begin{bmatrix} 1.34783 & 0.17391 & 0.47826 \\ 0.13044 & 1.56522 & 0.30435 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.01 \\ 3.02 \\ 6.98 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 16.0074 \\ 8.0265 \end{bmatrix} V \end{aligned}$$

- δ) Παρατηρούμε ότι οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης στην ερώτηση γ είναι πολύ πλησίον στις τιμές που υπολογίσαμε στο Πρόβλημα 5.1. Με χρήση των τιμών αυτών υπολογίζουμε τις τρεις μετρούμενες ποσότητες και έχουμε (εξ. 5.34):

$$[\hat{\mathbf{Z}}_Y] = [\mathbf{H}] [\hat{\mathbf{X}}] = \begin{bmatrix} 0.625 & -0.125 \\ -0.125 & 0.625 \\ 0.375 & 0.125 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 16.0074 \\ 8.0265 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.0013 \text{ A} \\ 3.0157 \text{ A} \\ 7.0061 \text{ V} \end{bmatrix}$$

που δίνουν σφάλματα:

$$[\mathbf{Z}_M] - [\hat{\mathbf{Z}}_Y] = [0.0087 \quad 0.0043 \quad 0.0261]^T$$

## Ευρετήριο Όρων

### Αγγλικών Όρων

#### A

Area Control Error (ACE) 56, 60

#### B

Booster 128

#### C

Custom power 253

#### D

Dispatcher 18

Droop 39

Dynamic Voltage Regulator ή restorer  
(DVR) 130, 265-267, 274

#### E

Energy policy act (EPA) 282-283

#### F

Flexible Distribution System (FDS) 253,  
263, 275, 277

Flexible AC Transmission Systems  
(FACTS) 252, 275, 277, 295

Flicker ή fluctuations 263

Floating 150

Frequency variation 263

#### G

Gate turn-off thyristor (GTO) 115, 275-  
276

Generating Unit Controllers (GUCs) 75

Governor droop 39, 41, 53

#### H

Harmonic distortion 263

#### I

Independent System Operator (ISO) 284-  
285, 292

Insulated- Gate Bipolar Transistor (IGBT)  
115, 275

Integrated-Gate Commutated Thyristor  
(IGCT ή GCT) 115, 275-276

Interruption ή outage 263

#### L

Latching device (θυρίστορ) 276

Load Tap Changer (LTC) 127, 129-130,  
136-138, 140, 260

#### M

Maximum Available Power (MAP) 135

MOS Controlled Thyristor (MCT) 276

MOS turn-off thyristor (MOT) 276

#### N

Non-latching device (τρανζίστορ) 276

#### O

Observability 220, 242

Observable 242

Observer 83

Overvoltage ή swell 263

**P**

Participation factors 74

Phase unbalance 263

Power pool 287-289, 291

- quality ή Custom power 253

Public utilities regulatory policy act (PURPA) 279, 282-283

Pulse With Modulation (PWM) 272-273, 275

**S**

SCADA 22

Snubber 268, 275

Solid State Breaker (SSB) 270

- – Current Limiter (SSCL) 267-268
- – Current Limiter Breaker (SSCLB) 269
- – Transfer Switch (SSTS) 265-266, 271

Speed governor 31

Spot market 285, 287, 289, 291

Stalling 147

Stranded cost 283-284

Static Synchronous Compensator (SSC ή STATCOM) ή Static Condenser (STATCON) ή Advanced Static Var Compensator (ASVC) 120-122, 256, 261, 265-266, 271-272

- Synchronous Series Compensator (SSSC) 114-115, 255
- Var Compensator (SVC) 117-118, 121, 126, 255-256, 271-272
- Var System (SVS) 117

Subsynchronous resonance 114

Surge Impedance Loading (SIL) 111-112, 255

**T**

Third-party acces 280

Thyristor Switched Capacitor (TSC) 116, 118, 122, 255

- Controlled Series Reactor (TCSR) 114
- Controlled Reactor (TCR) 116-118, 124, 255-256
- Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR) 259
- Controlled Series Capacitor (TCSC) 113, 255
- Switched Series Capacitor (TSSC) 113, 254

Tie lines 25, 42, 44, 152

Transient overvoltages ή impulse 263

**U**

Unbundling 280

Unified Power Flow Controller (UPFC) 261

**V**

Voltage dip ή sag 263

- flicker or fluctuations 263
- frequency variation 263
- harmonics distortion 263
- interruption or outage 263
- phase unbalance 263
- Source Inverter (VSI) 114, 121, 261, 266, 272, 275

## Ελληνικών Όρων

### A

Αγορά με χρονικές ζώνες, 285, 287, 289, 291  
 Αναλαμπές ή Διακυμάνσεις τάσης δεσ  
   Διαταραχές τάσης  
 Αναπόφευκτο κόστος, 283-284  
 Ανεξάρτητος διαχειριστής μεταφοράς  
   ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), 292-  
   293  
 Ανεξάρτητος χειριστής του συστήματος  
   (ISO), 284-285, 292  
 Ανεξέλεγκτο όριο ροής ισχύος, 251  
 Ανισορροπία φάσης τάσης δεσ Διαταρα-  
   χές τάσης  
 Ανταγωνισμός στη λιανική, 283  
   – στη χονδρική πώληση, 283  
 Αντιπρόσωπος αγοράς, 282  
 Αντιστάθμιση άεργου ισχύος, 109:  
   – παθητική, 110:  
     – εγκάρσια, 110-111, 116  
     – σειράς, 110-112, 114  
   – ενεργή, 110:  
     – εγκάρσια, 116-118, 120, 124  
     – σειράς, 110, 113-115, 118  
 Αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής  
   δεσ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης  
   ισχύος  
 Αντιστροφέας πηγής τάσης (VSI), 114,  
   121, 261, 266, 272, 275  
 Απελευθέρωση αγοράς ηλεκτρικής ενέρ-  
   γειας, 280-283, 286, 288-289, 292, 297  
 Απευθείας λύση μεταβατικής ευστάθειας  
   δεσ Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής κα-  
   τάστασης  
 Απλή παράσταση σύγχρονης γεννήτριας,  
   173  
 Απόκριση συστήματος:  
   – μόνιμης κατάστασης, 50, 62, 68  
   – χρονική, 51, 59, 64, 67, 69, 70  
 Απώλεια στήριξης, 147

Αρχικό διάστημα αστάθειας, 160  
 Αστάθεια ή κατάρρευση τάσης, 127, 132-  
   133, 136-139:  
   – μεγάλου χρόνου, 140  
   – μέσου χρόνου ή μεταμεταβατική,  
     140  
   – μεταβατική, 139  
 Αστάθεια δυναμική, 160  
   – μεταβατικής κατάστασης, 159  
   – μόνιμης κατάστασης, 159  
 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης (APT), 93-  
   95, 97

### B

Βαθμός αντιστάθμισης δεσ Συντελεστής ή  
   Βαθμός αντιστάθμισης  
 Βασικό σημείο, 74  
 Βέλτιστη οικονομική λειτουργία, 26  
 Βέλτιστος έλεγχος δεσ Έλεγχος  
 Βύθισμα τάσης δεσ Διαταραχές τάσης

### Γ

Γενικός διευθυντής, 287, 291  
 Γεννήτρια, 98  
 Γεωμετρικοί τόποι σύγχρονης γεννήτριας:  
   – τόπος  $|I_a|$ , 101-102  
   – τόπος  $E_i$ , 101-102, 151  
   – τόπος MVA, 102  
   – τόπος Mvar, 102  
   – τόπος MW, 102  
 Γωνία έναυσης  $\alpha$ , 124  
   – ισχύος, 168  
   – μετατόπισης ή θέσης  $\delta$ , 153-156,  
     162-163, 165, 167-168  
 Γωνιακή ροπή (στροφορμή), 164  
   – συχνότητα απόσβεσης, 65-66

### Δ

Δείκτης συμπεριφοράς, 222, 224, 231, 233,  
   237



Διάγραμμα ροής για την επίλυση της μεταβατικής ευστάθειας, 199

Διακοπή τάσης δεσ Διαταραχές τάσης

Διακόπτες στερεάς κατάστασης, 116:

- MOS ελεγχόμενο θυρίστορ (MCT), 276
- διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT), 275
- θυρίστορ με δυνατότητα μεταγωγής ολοκληρωμένης πύλης (IGCT ή GCT), 275
- θυρίστορ με δυνατότητα σβέσης (GTO), 115, 275
- θυρίστορ με ενσωματωμένα στην πύλη τρανζίστορ για σβέση (MOT), 276

Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης, 267:

- διακόπτης μεταφοράς στερεάς κατάστασης (SSTS), 265-266, 270-271
- διακόπτης στερεάς κατάστασης (SSB), 270
- περιοριστής ρεύματος στερεάς κατάστασης (SSCL), 267-268
- στερεάς κατάστασης διακόπτης με περιορισμό ρεύματος (SSCLB), 269

Διαμόρφωση πλάτους παλμών (PWM), 272-273, 275

Διάνυσμα μεταβλητών διαταραχής δεσ  
Μεταβλητές

Διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου δεσ Μεταβλητές

Διασπορά, 231, 238

Διασυνδετικές γραμμές, 25, 42, 152:

- ασθενείς, 42

Διαταραχές τάσης, 263:

- αναλαμπές ή διακυμάνσεις, 263
- ανισορροπία φάσης, 263
- βύθισμα τάσης, 263
- διακοπή, 263
- μεταβατικές υπερτάσεις, 263
- μεταβολή συχνότητας, 263

- παραμόρφωση αρμονικών, 263

- υπέρταση, 263

Διαχειριστής ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ), 292-293

Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ), 292

Διέγερση σύγχρονης γεννήτριας:

- κανονική, 102
- υπερδιέγερση, 102, 104, 124
- υποδιέγερση, 102, 104, 125

Διεγέρτρια, 93, 95-97

Διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) δεσ Διακόπτες στερεάς κατάστασης

Δυναμική αστάθεια, 160

Δυναμικό:

- κριτήριο βέλτιστου ελέγχου, 80
- μοντέλο μεταβλητών κατάστασης, 78, 79

Δυναμικός ρυθμιστής τάσης (DVR) δεσ Εξοπλισμός για ευέλικτα συστήματα διανομής

## Ε

Εγκάρσια χωρητική ή επαγωγική αντιστάθμιση (TSC ή TCR), 116, 118, 122, 255-256

Εγκάρσιοι και σειριακοί ρυθμιστές ευέλικτων συστημάτων διανομής, 271:

- στατικός αντισταθμιστής var (SVC), 271-272
- στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM), 271-272

Εκτίμηση κατάστασης, 217

Εκτιμητές κατάστασης, 217, 219-220, 222, 226

Ελεγκτές μονάδων παραγωγής, 75

Ελεγχόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα, 42

Ελεγχόμενο θυρίστορ MOS (MCT) δεσ Διακόπτες στερεάς κατάστασης

Ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας (TCPAR) δεσ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Έλεγχος:

- άεργου ισχύος-τάσης Q-V, 27, 91-92
- αυτόματης παραγωγής, 25, 75
- βέλτιστος, 75, 81, 83
- κλασσικός, 75, 83
- πραγματικής ισχύος-συχνότητας P-f, 26, 30:
- - απομονωμένης περιοχής, 49
- - δύο περιοχών, 60
- υποβέλτιστος, 82-83

Ελεύθερη δράση του ρυθμιστή ταχύτητας δεσ Ρυθμιστής

Ελεύθερη κίνηση, 150

Έμμεση λύση μεταβατικής ευστάθειας δεσ Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής κατάστασης

Ενδιάμεσο διάστημα αστάθειας, 160

Ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (UPFC) δεσ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Εντολές ελέγχου ΚΚΦ:

- ειδικές λειτουργίες, 21
- εισαγωγή δεδομένων, 20
- έλεγχος CPU, 21
- έλεγχος εξόδου, 21
- εντολές συστήματος, 20
- επιλογή σταθμών, 21
- μονάδες, 20
- σήματα κινδύνου, 21

Εντολή εισόδου, 32, 50, 54, 62, 64, 68-69, 71, 75

Εντοπισμός κακών δεδομένων, 234

Εξάρτηση της τάσης από το φορτίο, 107, 109

Εξίσωση Riccati, 81

- ταλάντωση, 162, 191

Εξοπλισμός για ευέλικτα συστήματα διανομής, 264:

- διακόπτης μεταφοράς στερεάς κατάστασης (SSTS), 265, 267, 271
- δυναμικός ρυθμιστής ή αποκαταστάτης τάσης (DVR), 130, 265, 267, 274
- στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM), 265-266, 272

Επαγωγή σειράς ελεγχόμενη με θυρίστορ (TCSR) δεσ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Επικουρικές υπηρεσίες, 285, 288

Επιφάνεια κόστους, 73

Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς EP (FACTS), 252, 275, 277, 295

Ευέλικτο σύστημα διανομής (FDS), 253, 264, 275, 277

Ευρωπαϊκή οδηγία για την ενέργεια, 280

Ευστάθεια SHE, 155, 161, 174

## Θ

Θερμικό όριο, 251

Θόρυβος λευκός, 230

Θυρίστορ (latching device), 276

- με δυνατότητα μεταγωγής ολοκληρωμένης πύλης (IGCT ή GCT) δεσ Διακόπτες στερεάς κατάστασης
- με ενσωματωμένα στην πύλη τρανζίστορ για σβέση (MOT) δεσ Διακόπτες στερεάς κατάστασης

## Ι

Ισχύς καταναλωτών, 253

## Κ

Καμπύλες γεννήτριας Q-V, 106

- λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας, 100, 103-105
- χαρακτηριστικών P-V, 134

Καμπύλη ισχύος-γωνίας, 153, 154, 170

- κόρου, 95

Κανονική διέγερση δεσ Διέγερση σύγχρονης γεννήτριας

Κανονική ή τυπική απόκλιση, 231, 243

Κατάσταση:

- κρίσιμη, 58-59
- υπερκρίσιμη, 57, 59
- υποκρίσιμη, 58-59

Κέντρα ελέγχου ενέργειας (ΚΕΕ):

- εθνικό, 24
- περιφερειακά, 24

Κέντρο κατανομής φορτίου (ΚΚΦ), 18, 74

Κοινή αγορά ή κοινοπραξία (pool) ισχύος, 287-288, 289, 291

Κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης, 181, 183, 186

- κατάσταση δες Κατάσταση
- τάση, 135

Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, 181

Κριτήριο ίσων εμβαδών, 174, 176, 179, 181, 183

Κύκλωμα περιορισμού υπερτάσεων, 268

## Λ

Λειτουργός αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΛΑΓΗΕ), 292-293

## Μ

Μαθηματικό μοντέλο στροβίλου, 35

Μέγιστη διαθέσιμη ισχύ (MAP), 135

Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής κατάστα-

- σης:
- απευθείας ανάλυσης, 174
- έμμεσης λύσης, 174, 190, 193
- μέθοδος των ίσων εμβαδών, 174

Μέθοδος απαλοιφής Kron, 197

Μέση τιμή, 237

Μεταβατικές υπερτάσεις δες Διαταραχές τάσης

Μεταβατική ευστάθεια, 147

- ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας, 165, 171
- ισχύς στροβίλου, 165

Μεταβλητές:

- ελέγχου, 77
- διαταραχής, 77

- κατάσταση, 76, 82, 222:

- - δευτερεύουσες, 30
- - δυναμικές, 30, 191, 205, 207, 209, 210
- - κύριες, 30
- - στατικές, 29

Μεταβολή συχνότητας τάσης δες Διαταραχές τάσης

Μετασχηματιστής αντιστάθμισης, 128

Μήτρα:

- κατανομής διαταραχών, 77
- κατανομής εισόδων, 77
- κέρδους, 81, 82
- συστήματος, 77, 78, 81

Μηχανισμός αλλαγής στροφών, 39

Μόνιμο βύθισμα συχνότητας, 50, 53

Μονοπώλιο, 281

Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης, 78, 211

Μορφές απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, 281

## Ο

Οδηγός βαλβίδα, 32

Ολοκληρωτικό κέρδος, 56, 68:

- κρίσιμη τιμή, 57, 59
- υπερκρίσιμη τιμή, 57
- υποκρίσιμη τιμή, 58

Ορθογώνιο διάνυσμα, 243

Όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστα-

- σης, 157-158, 180, 251
- - μόνιμης κατάστασης, 155

## Π

Παρακολούθηση συστήματος, 233

Παραμόρφωση αρμονικών τάσης δες Διαταραχές τάσης

Παρατηρητές, 83

Παρατηρητικότητα ή παρατηρησιμότητα, 220, 242

Περιοριστής ρεύματος στερεάς κατάστασης (SSCL) δες Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης

Περιοχή ελέγχου, 42, 46, 49

Πήδημα πόλων, 149

Ποιότητα ισχύος ή Ισχύς καταναλωτών, 253

Πυκνωτής σειράς ελεγχόμενος με θυρίστορ (TCSC) δεξ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Πυκνωτής σειράς συνδεδεμένος με θυρίστορ (TSSC) δεξ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

## P

Ροπή αδράνειας, 164

Ρυθμιστής:

- ταχύτητας, 31, 33-34, 40
- - ελεύθερη δράση, 41
- - ρύθμιση ταχύτητας, 34, 39, 41, 53
- - στατικό κέρδος, 34
- - συνάρτηση μεταφοράς, 34
- - χρονική σταθερά, 34
- Watt, 31

Ρυθμιστική αρχή ενέργειας (PAE), 292

## Σ

Σταθερά αδράνειας, 46, 164

Σταθεροποιητής, 94-96, 98, 100

Στατικό όριο μεταφοράς ισχύος, 45

- σύστημα var (SVS) δεξ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος
- αντισταθμιστής var (SVC) δεξ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (SSC ή STATCOM ή STATCON ή ASVC) δεξ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Στατικός σύγχρονος σειριακός αντισταθμιστής (SSSC) δεξ Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος

Στατισμός, 39

Στερεάς κατάστασης διακόπτης με περιορισμό ρεύματος (SSCLB) δεξ Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης

Συγχρονισμός, 148-149

Σύγχρονος αντισταθμιστής, 121, 124

Συναρτήσεις κόστους, 71-72, 80, 84, 222, 224, 232

Συνάρτηση κόρου, 95

- πυκνότητας πιθανότητας, 230, 235

Συντελεστές:

- βαρύτητας, 68-69, 72, 80, 82-83, 221-222, 224, 227, 231-232
- συμμετοχής, 74

Συντελεστής ή Βαθμός αντιστάθμισης, 111:

- εγκάρσιας, 112
- σειράς, 112

Συντελεστής:

- αυτορρύθμισης φορτίου, 43, 53
- ηλεκτρικής σκληρότητας ή συγχρονισμού, 45

Συσκευές αντιστάθμισης άεργης ισχύος και ανάπτυξης FACTS:

- αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής, 256
- ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας (TCPAR), 259
- ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (UPFC), 260-261
- επαγωγή σειράς ελεγχόμενη με θυρίστορ (TCSR), 114
- πυκνωτής σειράς ελεγχόμενος με θυρίστορ (TCSC), 113, 255
- πυκνωτής σειράς συνδεδεμένος με θυρίστορ (TSSC), 113
- στατικό σύστημα var (SVS), 116-117
- στατικός αντισταθμιστής var (SVC), 117-118, 121, 255-256, 271

- στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (SSC ή STATCOM ή STATCON ή ASVC), 120-122, 126, 256, 261, 265-266, 271-272
  - στατικός σύγχρονος σειριακός αντισταθμιστής (SSSC), 114, 255
- Σύστημα διέγερσης, δεξ. Αυτόματος ρυθμιστής τάσης
- ελέγχου ενέργειας (ΣΕΕ), 24
- Συστήματα αυτόματης ρύθμισης φορτίου (ΣΑΡΦ, LTC), 127, 129-132, 136-138, 140, 260
- Σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ ή ACE), 56, 60, 68, 71
- μετρητικών οργάνων, 232

**T**

Τελικό διάστημα αστάθειας, 160

Τρανζίστορ (non-latching device), 276

**Υ**

Υπερδιέγερση δεξ. Διέγερση σύγχρονης γεννήτριας

Υπερκρίσιμη κατάσταση δεξ. Κατάσταση Υπέρταση δεξ. Διαταραχές τάσης

Υποβέλτιστη στρατηγική δεξ. Έλεγχος

Υποδιέγερση δεξ. Διέγερση σύγχρονης γεννήτριας

Υποκρίσιμη κατάσταση δεξ. Κατάσταση

Υποσύγχρονος συντονισμός, 114, 122, 254

**Φ**

Φίλτρα Kalman, 83

Φυσική ή φόρτιση κυματικής αντίστασης (SIL), 111-112, 255

**Χ**

Χαρακτηριστική απόκριση συχνότητας περιοχής (ΧΑΣΠ), 51, 63

Χειριστής, 18

Χρονική ζώνη τιμών δεξ. Αγορά με χρονικές ζώνες

Χωρητική αντιστάθμιση σειράς, 110, 112