

Νικόλαος Α. Βοβός
Καθ. Πανεπιστημίου

Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος
Καθ. Πανεπιστημίου

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας



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 μετατροπέων, που χρησιμοποιούν διακοπτικά στοιχεία στερεάς κατάστασης. Η αξιοποίηση αυτών των μετατροπέων 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 συμβάλλει σημαντικά και η επίλυση των Προβλημάτων (υπάρχουν οι απαντήσεις τους) που συνοδεύουν τα κεφάλαια.

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 μετατροπέων 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 τεchnοοικονομικά 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, Μάιος 2008

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 και 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 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- 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 τερματικής 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 Σ_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 ηλεκτρισμού.....	289
7.7	Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	292
7.8	Συμπεράσματα.....	293
7.9	Η βιομηχανία ηλεκτρισμού τον 21 ^ο αιώνα	293
7.10	Περίληψη.....	296
	Αναφορές.....	296

1^ο

Κεφάλαιο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας των 20^ο αιώνα είχε μια αλματώδη αύξηση, αλλά των 21^ο 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 αέργου 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.