

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΒΟΒΟΣ

Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Τεχνολογίας Υπολογιστών
Πανεπιστημίου Πατρών

ΑΝΑΛΥΣΗ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Πρόλογος

Σκοπός του παρόντος βιβλίου είναι να διερευνήσει τη λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) υπό την επίδραση διαταραχών. Καλύπτει την ύλη των μαθημάτων «Ανάλυση ΣΗΕ ΙΙ» και «Έλεγχος και Ευστάθεια ΣΗΕ», που διδάσκονται 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 τ' αριθμητικά Παραδείγματα, που αποτελούν απαραίτητο συμπλήρωμα στην κατα-

νόηση 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 δέκα κεφάλαια.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο 1 παρέχονται γενικές γνώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, πιθανούς τρόπους αποθήκευσης της, τα ηλεκτρικά φορτία και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα κυματικά φαινόμενα στα ΣΗΕ και η ανάλυση συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων με τη βοήθεια των συμμετρικών συνιστωσών εξετάζονται στα κεφάλαια 2, 3 και 4.

Τα συστήματα ελέγχου πραγματικής ισχύος–συχνότητας και αέργου ισχύος–τάσης εξετάζονται στα κεφάλαια 5 και 6 αντίστοιχα. Για την ανάλυση και σχεδιάσή 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 7 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 8.

Η έννοια των *Αποδοτικότερων Δικτύων Μεταφοράς* και των *Ενέλικτων Συστημάτων Διανομής* καθώς και οι συσκευές με τις οποίες επιτυγχάνεται η δημιουργία τους περιγράφονται στο κεφάλαιο 9.

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 10.

Για την επιμελημένη εργασία τους θερμές ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω στο μεταπτυχιακό φοιτητή Νικόλαο Αντωνίου, για τη δακτυλογράφηση του βιβλίου, στους γιους μου Παναγή και Ανέστη για την εκπόνηση των σχημάτων και τον Παναγή που φιλοτέχνησε το εξώφυλλο του βιβλίου.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω και προς την οικογένειά μου και τους γονείς μου για τη συνεχή συμπαράσταση και κατανόησή τους κατά τη συγγραφή του βιβλίου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2004

Νικόλαος Α. Βοβός

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΗΕ

1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΗΕ.....	2
1.3	ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	8
1.3.1	Συμπαράγωγη.....	12
1.4	ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	12
1.5	ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	13
1.6	ΝΤΙΖΕΛΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	14
1.7	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	15
1.7.1	Παλινρροιακοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί.....	20
1.8	ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	21
1.9	ΜΑΓΝΗΤΟΎΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΜΥΔ).....	25
1.10	ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	26
1.11	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	28
1.12	ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	29
1.13	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ.....	32
1.14	ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	33
1.15	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	34
1.16	ΦΟΡΤΙΑ.....	38
1.17	ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	40
1.18	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ.....	40
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	43
2.2	ΥΠΕΡΤΑΧΕΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ-ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	43
2.3	ΜΕΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ-ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.....	44
2.4	ΒΡΑΔΕΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ-ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	46
2.5	ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	47
2.6	ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	50
2.6.1	Παράσταση γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους.....	56
2.7	ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΛΟΓΩ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ.....	57
2.8	ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.....	59

2.8.1	Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC).....	60
2.8.2	Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με το θεώρημα του Thevenin.....	61
2.9	ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....	66
2.9.1	Ρεύματα βραχυκύκλωσης σε εναλλακτήρα.....	66
2.9.2	Επαγωγικές αντιστάσεις σύγχρονων μηχανών.....	69
2.10	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	73
2.11	ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ....	77
2.12	ΔΙΕΥΚΡΙΝΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ..	81
2.12.1	Πορεία της λύσης.....	82
2.12.2	Κατασκευή του ισοδυνάμου κυκλώματος.....	82
2.12.3	Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων.....	85
2.12.4	Ρεύματα και τάσεις μετά το βραχυκύκλωμα.....	89
2.13	ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	90
2.14	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	95
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	96
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΚΑΙ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	102
3.2	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ.....	102
3.3	ΡΕΥΜΑ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ.....	106
3.4	ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ.....	107
3.5	ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΕΣ.....	108
3.6	ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	113
3.7	ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	114
3.8	ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	118
3.9	ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	122
3.10	ΦΑΣΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΕ ΕΝΑ Υ/Δ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....	129
3.11	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	136
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	137
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	139

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	140
4.2	ΚΛΑΣΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	141
4.3	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΑΣΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ-ΤΟΣ.....	142
4.3.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών.....	142
4.3.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	143
4.3.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές μεταφοράς.....	145
4.4	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΦΑΣΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ.....	146
4.4.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών.....	146
4.4.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	148
4.4.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές μεταφοράς.....	149
4.5	ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	152
4.5.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών.....	152

4.5.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	154
4.5.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές.....	155
4.6	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	156
4.6.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών.....	157
4.6.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	158
4.6.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές.....	159
4.7	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΑΣΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	161
4.7.1	Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων γεννητριών.....	161
4.7.2	Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς.....	163
4.7.3	Βραχυκυκλώματα δια μέσου συνθέτων αντιστάσεων στις γραμμές.....	163
4.8	ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ Z_{bus}	180
4.9	ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	181
4.9.1	Ακολουθιακά δίκτυα.....	181
4.10	ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	183
4.11	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	192
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	192
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	196

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	197
5.2	ΚΕΝΤΡΟ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	198
5.3	ΔΟΜΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	201
5.3.1	Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος.....	204
5.4	ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	205
5.5	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΧΩΡΙΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ.....	206
5.6	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΒΡΟΧΩΝ P - f ΚΑΙ Q - V	208
5.7	ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.....	209
5.8	ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	210
5.9	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	213
5.10	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	215
5.11	ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	219
5.12	ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	222
5.13	ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	223
5.14	ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	226
5.15	ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	230
5.16	ΕΝΤΟΛΗ ΕΛΕΓΧΟΥ $\Delta P_c = 0$	230
5.17	ΕΝΤΟΛΗ ΕΛΕΓΧΟΥ $\Delta P_c \neq 0$	236
5.18	ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	242
5.19	ΝΕΑ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$	243
5.20	ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$	245
5.21	ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ $\Delta P_c \neq 0$	249
5.22	ΕΛΕΓΧΟΣ P - f ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ n -ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	251
5.23	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	253
5.24	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΙΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	255
5.25	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΗΕ.....	257
5.26	ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ.....	257
5.27	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	261

5.28 ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	265
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	265
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	269

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ-ΤΑΣΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	270
6.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	271
6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	273
6.4 ΑΠΛΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	276
6.5 ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ.....	277
6.6 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	278
6.7 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ $Q-V$	284
6.8 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΕΡΓΟ ΙΣΧΥ.....	285
6.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΩΝ.....	288
6.10 ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕΙΡΑΣ.....	289
6.11 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ.....	294
6.11.1 Βασικές αρχές λειτουργίας TSC και TCR.....	300
6.12 ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΗΣ.....	302
6.13 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....	304
6.13.1 Μετασχηματιστής αντιστάθμισης.....	306
6.13.2 Μετασχηματιστές με στατικό-ηλεκτρονικό LTC.....	307
6.14 ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ.....	309
6.14.1 Ανάλυση φαινομένου της αστάθειας τάσης.....	311
6.14.2 Χρονική διάρκεια της αστάθειας τάσης.....	316
6.15 ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	318
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	319
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	321

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	322
7.2 ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΠΕΙΡΟ ΖΥΓΟ.....	323
7.3 ΑΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	327
7.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΩΝ.....	329
7.5 ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	333
7.6 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ- ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	336
7.7 ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ.....	337
7.8 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	339
7.9 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΞΟΔΟΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	340
7.10 ΑΠΛΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	348
7.11 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	349
7.12 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΙΣΩΝ ΕΜΒΑΔΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	349
7.13 ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΤΩΝ ΙΣΩΝ ΕΜΒΑΔΩΝ.....	353
7.13.1 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής.....	354
7.13.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή.....	356
7.14 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ (ΕΜΜΕΣΗ ΛΥΣΗ).....	366
7.15 ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ.....	368
7.15.1 Περιγραφή του συστήματος.....	369
7.15.2 Λύση του προβλήματος.....	370

7.16 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	375
7.17 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ.....	377
7.18 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	379
7.19 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	380
7.20 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	381
7.21 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ.....	383
7.22 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΑΣΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	384
7.23 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	385
7.24 ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	386
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	388
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	391

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	392
8.2 ΕΚΤΙΜΗΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΓΡΑΜΜΩΝ.....	395
8.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	405
8.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΘΟΡΥΒΟ.....	406
8.5 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	409
8.6 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	410
8.7 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ Σ_v ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	412
8.8 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΕΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	418
8.9 ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	423
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	423
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	425

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	427
9.2 ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ FACTS.....	430
9.2.1 Αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής.....	432
9.2.2 Ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας.....	435
9.2.3 Ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος.....	435
9.3 ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ.....	437
9.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	439
9.5 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	442
9.6 ΕΓΚΑΡΣΙΟΙ ΚΑΙ ΣΕΙΡΙΑΚΟΙ ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ.....	446
9.7 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	449
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	452

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ

10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	454
10.2 ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	456

10.3	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΗΠΑ.....	459
10.4	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΒΡΕΤΑΝΙΑ.....	461
10.5	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΝΟΡΒΗΓΙΑ.....	464
10.6	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ.....	465
10.7	ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	468
10.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	469
10.9	Η ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΤΟΝ 21 ^{ΟΝ} ΑΙΩΝΑ.....	469
10.10	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	472
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	472

Κεφάλαιο 1

ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΗΕ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των ειδικών προβλημάτων, που σχετίζονται κυρίως με τη λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο θα ασχοληθούμε, χωρίς λεπτομέρειες, με προβλήματα που ξεπερνούν το καθαρά ηλεκτρικό τμήμα των ΣΗΕ. Οι γνώσεις αυτές, που σχετίζονται και με συγγενείς επιστήμες προς την επιστήμη του ηλεκτρολόγου μηχανικού, θεωρούνται απαραίτητες επειδή συχνά γίνεται αναφορά σε αυτές σε επόμενα κεφάλαια και οφείλει έστω και γενικά να γνωρίζει ο ηλεκτρολόγος μηχανικός. Τα θέματα που θα μας απασχολήσουν σχετίζονται με τις μεθόδους παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, πιθανούς τρόπους αποθήκευσής της, ηλεκτρικά φορτία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κυρίως σε θερμικούς σταθμούς, που χρησιμοποιούν ατμοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους ή συνδυασμό των δύο (σταθμοί συνδυασμένου κύκλου), σε νηξελιοηλεκτρικούς σταθμούς, που χρησιμοποιούν εμβολοφόρους κινητήρες ντίζελ και σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν συμβατικές πηγές ενέργειας (σε αυτές περιλαμβάνεται και η πυρηνική ενέργεια). Η ανάγκη για την επιμήκυνση του χρόνου εξάντλησης των γεωλογικών καυσίμων και μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος οδήγησε στη χρήση των ήπιων πηγών ενέργειας στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ αέρας, ήλιος, παλιρροιακά κύματα, βιομάζα, γεωθερμία). Το 1999 η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς παγκοσμίως έφτασε τα 9615 MW, εκ των οποίων τα 2035 MW εγκαταστάθηκαν το 1998.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΗΕ

Το 1882 ο Edison εγκαινίασε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (ΗΠΑ) τον πρώτο κεντρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που τροφοδοτούσε 400 λάμπες των 83 W η κάθε μια. Την ίδια εποχή ο σταθμός παραγωγής Halborn Viaduct του Λονδίνου, με ισχύ 60 KW και τάση 100 V συνεχούς ρεύματος (ΣΡ), ήταν ο πρώτος σταθμός γενικού φορτίου. Ο πρώτος σημαντικός σταθμός παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ) στη Βρετανία ήταν στο Deptford. Αυτός χρησιμοποιούσε μηχανές των 10000 hp και με τάση 10 KV μετέφερε την ισχύ στο Λονδίνο. Αυτή την εποχή κορυφωνόταν η διαμάχη μεταξύ των υποστηρικτών της χρήσης ΕΡ και των οπαδών της χρήσης ΣΡ. Κυρίως όμως η ανακάλυψη του μετασχηματιστή, αλλά και τα πολλά πλεονεκτήματα των μηχανών ΕΡ, οδήγησαν γρήγορα στην επικράτηση των σταθμών παραγωγής ΕΡ. Σταθερά, άρχισε η ανάπτυξη τοπικών σταθμών παραγωγής και κάθε μεγάλη πόλη ή κέντρο φορτίου απέκτησε το δικό της σταθμό παραγωγής, σε όλες τις περιοχές του πλανήτη μας.

Όμως η τοπική ανάπτυξη σταθμών παραγωγής δεν ήταν δυνατόν να αντιμετωπίσει με βέλτιστο τρόπο τα προβλήματα που σχετίζονταν: 1) Με τη συνεχή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. 2) Την ανάγκη για αξιοποίηση των διατιθέμενων ενεργειακών πηγών, που συνήθως βρίσκονταν μακριά από τα κέντρα ηλεκτρικού φορτίου. 3) Την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που ήταν συνάρτηση της αύξησης του μεγέθους των σταθμών παραγωγής και της λειτουργίας τους κοντά στην ονομαστική τους ισχύ. 4) Τη δυσανάλογα μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ, για την κάλυψη του μεγίστου φορτίου και την εξασφάλιση μιας λογικής αξιοπιστίας τροφοδοσίας του φορτίου. Οι προηγούμενοι λόγοι οδήγησαν πολύ σύντομα στη δημιουργία των διασυνδεδεμένων ΣΗΕ, ενώ δεν άργησε και η ανάπτυξη των διεθνών διασυνδέσεων, που άρχισαν ήδη από την πρώτη δεκαετία του αιώνα μας (1906). Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με δίκτυα υψηλής τάσης, λόγω της ανάγκης μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με τις μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες. Το 1929 η Βρετανία με μια νομοθετική ρύθμιση δημιούργησε το Κεντρικό Συμβούλιο Ηλεκτρισμού (Central Electricity Board), με στόχο τη διασύνδεση των 500 πιο αποδοτικών σταθμών παραγωγής με ένα δίκτυο υψηλής τάσης. Η ανάγκη για την ανάπτυξη μεγάλου μεγέθους συστημάτων μεταφοράς και σταθμών παραγωγής, καθώς και η ηλεκτροδότηση αγροτικών περιοχών και η αξιοποίηση εγχώριων ενεργειακών πηγών, απαιτούσε κολοσσιαία κεφάλαια, τα οποία δεν απέφεραν τ' αναμενόμενα κέρδη. Αυτές οι επενδύσεις για λόγους κοινωνικής πολιτικής ανελήφθησαν από τις κυβερνήσεις των κρατών, οι ηλεκτρι-

κές εταιρίες κρατικοποιήθηκαν και συνήθως σε μονοπωλιακή μορφή ανέλαβαν την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας ή αν υπήρχαν διαφορετικές εταιρίες διανομής, αυτές προμηθεύονταν την ηλεκτρική ενέργεια από ένα προμηθευτή.

Η Βρετανική εταιρία ηλεκτρισμού εθνικοποιήθηκε το 1948 και δημιουργήθηκαν δύο οργανισμοί: 1) Τα 12 γεωγραφικά κατανεμημένα συμβούλια περιοχής (area boards), που ασχολούνταν με τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. 2) Το κεντρικό συμβούλιο παραγωγής ηλεκτρισμού (Central Electricity Generating Board), που είχε την ευθύνη παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην Ελλάδα η ίδρυση του φορέα Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) έγινε τον Αύγουστο του 1950. Σε αυτόν τον ιδρυτικό νόμο προβλέπονταν και η συνέχιση της λειτουργίας των ΣΗΕ, που ήδη υπήρχαν και ανήκαν σε ιδιώτες ή δήμους ή κοινότητες, με την προϋπόθεση ότι θα ακολουθούσαν τις τεχνολογικές εξελίξεις. Επειδή όμως ο εκσυγχρονισμός αυτός δεν πραγματοποιήθηκε, κυρίως λόγω των μεγάλων επενδύσεων που απαιτούσε, με το νόμο που ψηφίστηκε το 1956 δρομολογήθηκε η εξαγορά αυτών των επιχειρήσεων. Μέχρι το 1964 εξαγοράστηκαν 405 τέτοιες επιχειρήσεις, δύο ακόμα μικρές επιχειρήσεις εξαγοράστηκαν το 1965 και τελευταία εξαγοράστηκε η εταιρία “ΓΛΑΥΚΟΣ” των Πατρών το 1968. Για τις εξαγορές δαπανήθηκαν συνολικά 1.69 εκατομμύρια ευρώ και η πλέον σημαντική εξαγορά αφορούσε την ΗΕ-ΑΠ, που έγινε το 1960. Βασικός σύμβουλος της ΔΕΗ κατά την πενταετία 1950-55 ήταν η αμερικάνικη εταιρία EBASCO, που είχε την ευθύνη οργάνωσης και λειτουργίας της ΔΕΗ, καθώς και της εκτέλεσης του ενεργειακού προγράμματος. Με βάση το πρόγραμμα αυτό άρχισε η κατασκευή του ατμοηλεκτρικού σταθμού (ΑΗΣ) Αλιβερίου (1953), του υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ) Άγρα (1954), του ΥΗΣ Λούρου (1954) και του ΥΗΣ Λάδωνα (1955). Το 1957 σχεδόν όλοι αυτοί οι σταθμοί λειτουργούσαν. Σήμερα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 9693 MW και αναλύεται στο είδος μονάδων, που φαίνεται στον πίνακα.

Είδος μονάδων	MW	%
Λιγνιτικές μονάδες	4850	50
Πετρελαϊκές μονάδες	1919	20
Υδροηλεκτρικές μονάδες	2924	30
Σύνολο	9693	100

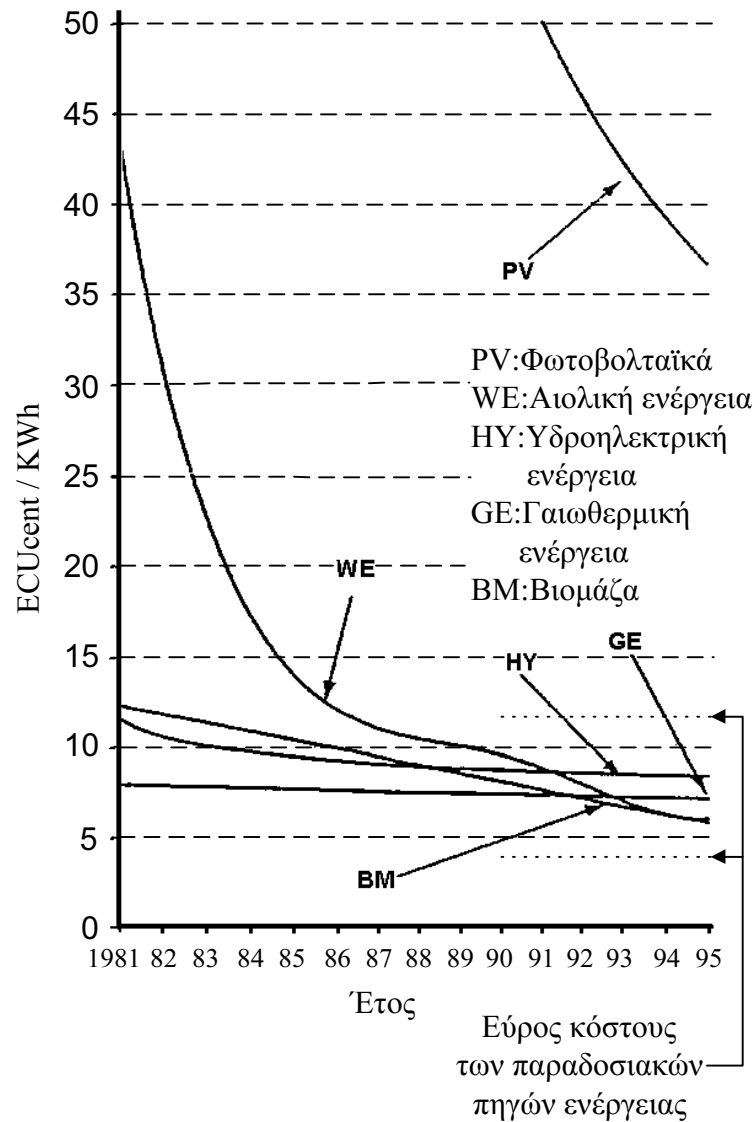
Την δεκαετία του 1950 κάποιοι τεχνικοί περιορισμοί και οικονομικοί λόγοι οδήγησαν τους μηχανικούς να ξανασκεφτούν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέρ-

γειας με ΣΡ και υψηλή τάση (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ). Αυτές οι διασυνδέσεις αποτελούνται από δύο μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ, που διασυνδέονται με μια γραμμή ΣΡ εναέρια ή καλωδιακή. Η πρώτη διασύνδεση αυτού του τύπου λειτούργησε το 1954 και μετέφερε στη νήσο Gotland 20 MW, στα 100 KV και σε μια απόσταση 100 χιλιομέτρων με υποθαλάσσιο καλώδιο. Αυτή η τεχνολογία σταδιακά καθιερώθηκε και σήμερα λειτουργούν πάνω από 60 διασυνδέσεις ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ, ενώ το 1992 έφτασαν την ισχύ των 52 GW. Μεταξύ Ελλάδας-Ιταλίας λειτουργεί από το 2002 μονοπολική διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ, με ΣΡ υποθαλάσσιο καλώδιο 163 Km και εναέρια γραμμή 110 Km, ισχύος 500 MW, 400 KV. Το κόστος του έργου ανήλθε στα 340 Μ€ και υπάρχει δυνατότητα μετατροπής του σε διπολική διασύνδεση ισχύος 1000 MW.

Τη δεκαετία του 1970, η μεγάλη αύξηση της τιμής του πετρελαίου προκάλεσε δραματικές αλλαγές στον τρόπο εξασφάλισης της απαραίτητης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυβερνήσεις προσανατολίστηκαν εντονότερα στην αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας, παραβλέποντας πολλές φορές το υψηλότερο κόστος, επιταχύνθηκε η ανάπτυξη πυρηνικών σταθμών και δόθηκαν σημαντικά κεφάλαια στην ανάπτυξη της τεχνολογίας για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας (υδροηλεκτρισμός, αιολική ενέργεια, φωτοβολταϊκά, γεωθερμική ενέργεια, βιομάζα). Στο Σχ. 1.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη του κόστους παραγωγής μιας KWh, από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Παρά την επίτευξη ανταγωνιστικών τιμών κόστους σε ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής ένωσης για υπερδιπλασιασμό του ποσοστού συμμετοχής τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμα και τον 21ον αιώνα αναμένεται ότι η παραγωγή της θα βασίζεται κυρίως στο κάρβουνο και την πυρηνική ενέργεια, ιδιαίτερα λόγω της αναμενόμενης εξάντλησης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου.

Για την εξυπηρέτηση των γρήγορα αυξανόμενων ηλεκτρικών φορτίων, απαιτείται η επέκταση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η κατασκευή νέων σταθμών. 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 πραγ-



Σχ. 1.1 Εξέλιξη του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ματικής και αέργου ισχύος και ελέγχου του μέτρου και της γωνίας της τάσης. Με τη βοήθειά της επεκτάθηκε η χρήση των γραμμών ΕΡ 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 ανταγω-

νισμό 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 τεchnοοικονομικά 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.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής η νομοθετική ρύθμιση του 1978 (Public Utilities Regulator Policy Act (PURPA)) εισήγαγε την ιδέα του ανταγωνισμού στην παραγωγή και η νομοθετική ρύθμιση του 1992 (EPA) επέβαλε ομοσπονδιακά και τον ανταγωνισμό στη διανομή. Η Καλιφόρνια από το 1998 έδωσε την δυνατότητα στους καταναλωτές να επιλέγουν τον προμηθευτή τους. Ο νόμος περί ηλεκτρισμού το 1989 οδήγησε σε νέα δομή το ηλεκτρικό δίκτυο της Αγγλίας και Ουαλίας και σταδιακά επέτρεψε σε όλο και μικρότερους καταναλωτές να έχουν δυνατότητα επιλογής του προμηθευτή τους. Αυτή η δυνατότητα δόθηκε σε όλους τους καταναλωτές το 1998. Οι χώρες της Λατινικής Αμερικής, στην προσπάθειά τους για προσέλκυση κεφαλαίων με στόχο τον εκσυγχρονισμό των ηλεκτρικών τους δικτύων, προχώρησαν στην ιδιωτικοποίηση των ηλεκτρικών τους συστημάτων, που στη Χιλή επισημοποιήθηκε το 1982 με τον αντίστοιχο νόμο περί ηλεκτρισμού. Ο ενεργειακός νόμος του 1991 στη Νορβηγία διεχώρησε τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας σε τρεις συνιστώσες: την παραγωγή, που ήταν απελευθερωμένη, το δίκτυο μεταφοράς και διανομής, που ρυθμίζονται σαν φυσικά μονοπώλια και τη διανομή, όπου εισήχθη ο ανταγωνισμός.

Από την πλευρά της Ευρωπαϊκής Ένωσης η ολοκλήρωση της ανταγωνιστικής ηλεκτρικής αγοράς είναι ένα σημαντικό βήμα για την ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς ενέργειας. Στα πλαίσια αυτά, μετά από εννέα χρόνια προσπαθειών για να ευρεθεί ένας συμβιβασμός, θεσπίστηκε η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την ενέργεια στις 19 Φεβρουαρίου του 1997, που έπρεπε να υιοθετηθεί από τις εθνικές νομοθεσίες μέσα σε δύο χρόνια. Οι βασικές αρχές της είναι:

- Κάθετα οργανωμένες ηλεκτρικές εταιρείες, δηλαδή εταιρείες που καλύπτουν και τους τρεις τομείς παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να ανεξαρτητοποιήσουν αυτούς τους τομείς (unbundling).
- Αποκλειστικά δικαιώματα εταιρειών να καταργηθούν
- Όλοι οι πελάτες, ανεξάρτητοι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας και οποιοσδήποτε παράγει ή εμπορεύεται ηλεκτρική ενέργεια να έχει πρόσβαση στο δίκτυο μεταφοράς ή τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας (third – party access).

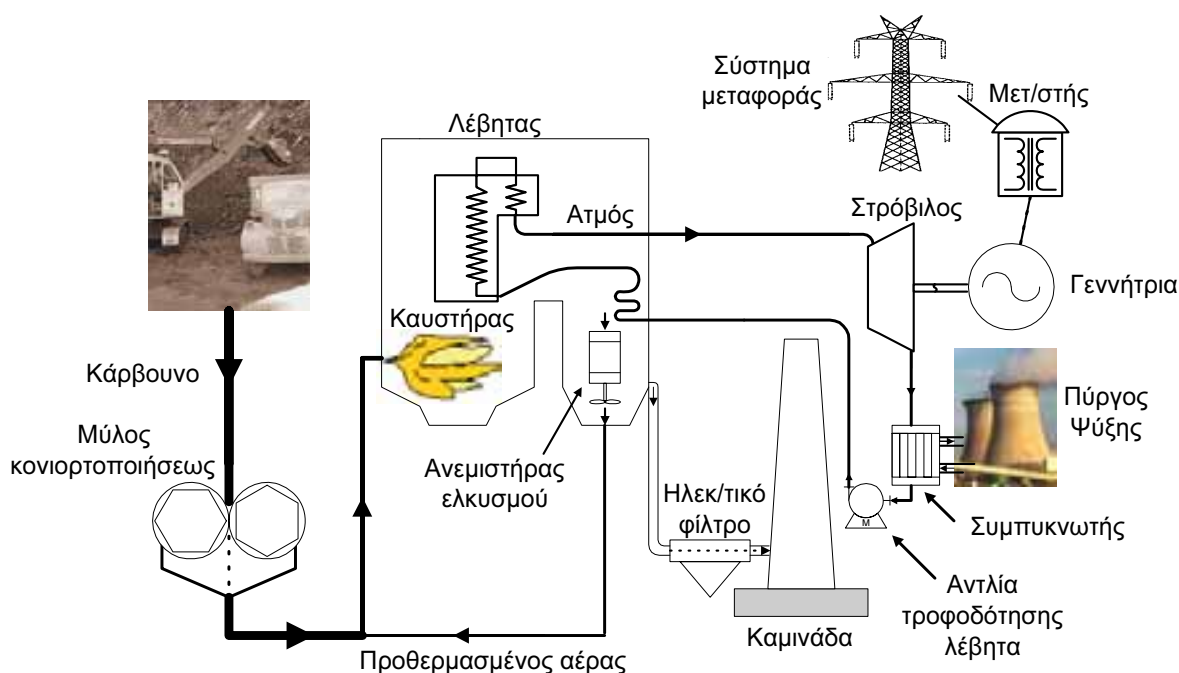
Για την περίπτωση της Ελλάδας ισχύουν ειδικές ρυθμίσεις. Η απελευθέρωση του 28% περίπου της αγοράς άρχισε τη 19^η Φεβρουαρίου του 2001 και θα διευρυνθεί στο 33% περίπου το 2003, με βάση τα σημερινά δεδομένα. Το 2006 θα αποφασιστούν τα περαιτέρω βήματα απελευθέρωσης της αγοράς με βάση τη μέχρι τότε εμπειρία.

Η τελευταία εξέλιξη των ΣΗΕ αφορά την ανάπτυξη της τεχνολογίας για τη βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας, που τροφοδοτείται στους καταναλωτές. Οι συσκευές, που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό, είναι γνωστές με την ονομασία «συσκευές εξασφάλισης της ποιότητας ισχύος των καταναλωτών» (Custom Power ή Power Quality). Η αλλαγή των χαρακτηριστικών των φορτίων, που τα έκαναν ευάλωτα στις μικροδιαταραχές της τάσης, είναι η κύρια αιτία που επέβαλε την ανάπτυξη αυτών των συσκευών. Στις χώρες, που προχώρησαν στην απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η σχεδόν ανεξέλεγκτη εισαγωγή μονάδων παραγωγής, οδήγησε εκτός των άλλων και σε προβλήματα ελέγχου και ευστάθειας της τάσης. Επίσης, η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, που τροφοδοτείται από τις ανεμογεννήτριες, είναι πολύ κακή (μεταβαλλόμενη ισχύ, μεταβολές τάσης και συχνότητας, αρμονικές). Αλλά και η ανεξαρτητοποίηση του τομέα διανομής, δημιούργησε την ανάγκη για ανεξάρτητο έλεγχο της αέργου ισχύος στο επίπεδό της. Η αντιμετώπιση των προηγούμενων προβλημάτων μπορεί να γίνει με την αξιοποίηση της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, που προσφέρει τη δυνατότητα για φθηνότερη και περισσότερο αποδοτική αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Έτσι, οι εταιρείες διανομής, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν αναβαθμισμένης ποιότητας και αξιοπιστίας ηλεκτρική ενέργεια στους βιομηχανικούς και εμπορικούς τους πελάτες. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτών των ηλεκτρονικών ισχύος και η αντιμετώπιση της ευστάθειας τάσης είναι τα πιο πρόσφατα πεδία ερευνητικής δραστηριότητας στα ΣΗΕ.

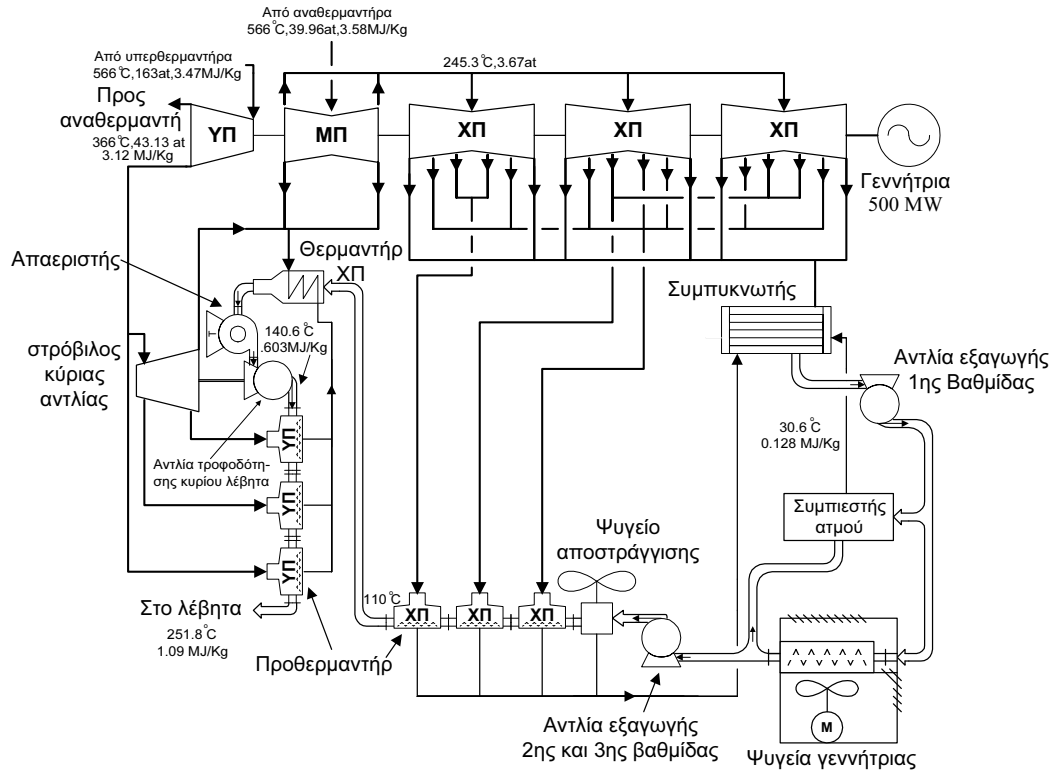
1.3 ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Η καύση γαιάνθρακα (λιθάνθρακες, λιγνίτης, τύρφη) ή πετρελαίου (ντίζελ, μαζούτ) ή φυσικού αερίου στους λέβητες παράγει ατμό υψηλής θερμοκρασίας ($\approx 540\text{-}570^\circ\text{C}$) και πίεσης ($\approx 160\text{at}$), που τροφοδοτεί τους ατμοστροβίλους. Επίσης, η θερμική ενέργεια, που προκύπτει από την πυρηνική σχάση, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού για τους ατμοστροβίλους. Συνηθισμένος είναι ο τύπος στροβίλου με αξονική ροή και διαφορετικά κελύφη και στροφεία στον ίδιο άξονα.

Ο κύκλος του Rankine αξιοποιείται στη λειτουργία των ατμοηλεκτρικών σταθμών, τροποποιημένος όμως ώστε να περιλαμβάνει και υπέρθερμο ατμό, τροφοδοσία θερμού νερού και αναθέρμανση ατμού. Αύξηση της θερμικής απόδοσης επιτυγχάνεται με τη χρήση ατμού στην υψηλότερη δυνατή πίεση και θερμοκρασία. Το κόστος κεφαλαίου ελαττώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος των στροβίλων, γι' αυτό κατασκευάζονται σήμερα στροβίλοι 500 MW και μεγαλύτεροι. Η απόδοσή τους αυξάνει με αναθέρμανση του ατμού, από εξωτερική πηγή θερμότητας, αφού προηγουμένως έχει εκτονωθεί μερικώς στην πρώτη βαθμίδα. Ο αναθερμασμένος ατμός κατόπιν ανατροφοδοτείται στο στροβίλο και εκτονώνεται στις τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου. Το σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού με καύσιμο λιγνίτη φαίνεται στο Σχ. 1.2. Η ροή θερμικής ενέργειας σε ένα σύγχρονο ατμοηλεκτρικό σταθμό φαίνεται στο Σχ. 1.3.

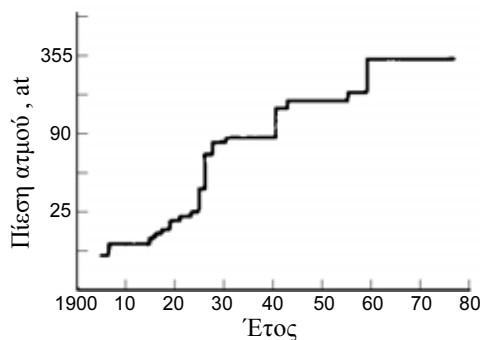


Σχ. 1.2 Σχηματική παράσταση λειτουργίας λιγνιτικής μονάδας.

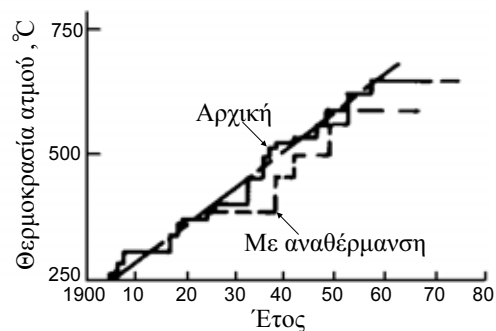


Σχ. 1.3 Διάγραμμα ροής θερμικής ενέργειας για μια στροβιλογεννήτρια 500 MW.

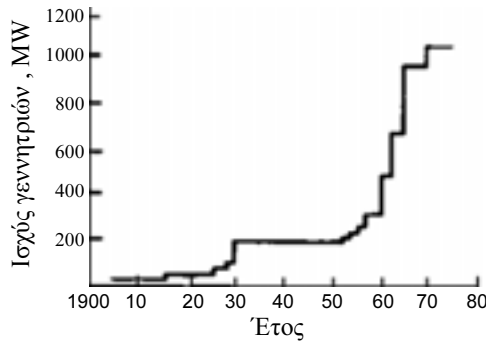
Παρά τη συνεχή βελτίωση των υλικών και της σχεδίασης των λεβήτων, η φύση του θερμικού κύκλου είναι τέτοια, ώστε η απόδοση είναι σχετικά μικρή, περίπου 40% για τις μεγάλες μονάδες, ενώ μεγάλες ποσότητες θερμότητας χάνονται στο συμπυκνωτή. Η εξέλιξη στη βελτίωση της απόδοσης των στροβίλων με αύξηση της πίεσης ατμού και της θερμοκρασίας φαίνεται στα Σχήματα 1.4 και 1.5 αντίστοιχα. Η αύξηση του μεγέθους των στροβιλογεννητριών με το χρόνο φαίνεται στο Σχ. 1.6 και η ελάττωση του βάρους του κάρβουνου, που απαιτείται για την παραγωγή μιας KWh, φαίνεται στο Σχ.1.7. Η ψυχρή εκκίνηση και ανάληψη ονομαστικού φορτίου μεγάλων λιγνιτικών μονάδων της Ελλάδος διαρκεί μέχρι 8 ώρες.



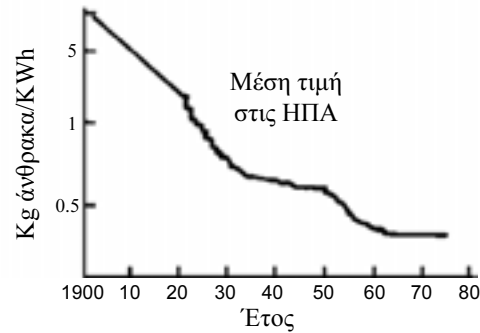
Σχ. 1.4 Η επιτευχθείσα μέγιστη πίεση ατμού με το χρόνο.



Σχ. 1.5 Η επιτευχθείσα μέγιστη θερμοκρασία ατμού με το χρόνο.



Σχ.1.6 Η επιτευχθείσα μέγιστη ισχύς στροβιλογεννήτριας με το χρόνο.



Σχ.1.7 Μέσο βάρος άνθρακα για την παραγωγή μιας kWh στις Η.Π.Α. (1 Kg άνθρακα 3150 Kcal).

Στους σταθμούς που χρησιμοποιούν κάρβουνο, αυτό κονιοποιείται με ειδικούς μύλους σε κόκκους συγκεκριμένων διαστάσεων. Το κονιοποιημένο καύσιμο καίγεται στον καυστήρα, αφού αναμιχθεί με προθερμασμένο αέρα. Ο ατμός στην έξοδο της βαθμίδας χαμηλής πίεσης (ΧΠ) του στροβίλου συμπυκνώνεται σε νερό $\approx 35^{\circ}\text{C}$ στο συμπυκνωτή, που χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού ή νερού ποταμών αν υπάρχουν. Για την αποβολή της θερμότητας που δεν χρησιμοποιήθηκε, χρησιμοποιούνται μεγάλοι πύργοι ψύξης, που αποβάλλουν τη θερμότητα στο περιβάλλον. Μια στροβιλογεννήτρια 660 MW για τη ψύξη της κυκλοφορεί νερό με ρυθμό $15 \text{ m}^3/\text{sec}$ και για την αναπλήρωση του νερού που εξατμίζεται στο πύργο ψύξης απαιτούνται $25000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ νερό. Στο Σχ. 1.8 έχουμε τη γενική άποψη ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού. Ο άξονας του στροβίλου με τα στρεφόμενα πτερύγια (στροφέιο) της 4ης μονάδας στη Μεγαλόπολη, ισχύος 300 MW, που είναι από τις πιο σύγχρονες του Ελληνικού ΣΗΕ φαίνεται στο Σχ. 1.9. Στο Σχ. 1.10α φαίνεται ένας μύλος κονιοποίησης λιγνίτη με το στροφέιο και τις σφύρες κονιοποίησης, ενώ στο Σχ. 1.10β φαίνεται μια τομή του μύλου.

Τα αέρια καύσης των γαιανθράκων περιέχουν οξείδια του θείου σε ποσοστό όγκου 0.2 - 0.3% και ρυπαίνουν το περιβάλλον. Ιδιαίτερα στη Μεγαλόπολη ο χρησιμοποιούμενος λιγνίτης έχει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες θείου, γι' αυτό στην 4η μονάδα εγκαταστάθηκαν ειδικά ηλεκτροστατικά φίλτρα κατακράτησης θείου, συνολικής αξίας 88 εκατομμυρίων ευρώ περίπου. Η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία τους είναι περίπου 10 MW, ενώ οι υπόλοιπες συνολικές απώλειες της μονάδας είναι άλλα 30 MW. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα αποτελούνται από εναλλάξ διατεταγμένες πλάκες και πλαίσια συρμάτων στα οποία εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση 40 – 85 KV. Λόγω του ηλεκτρι-



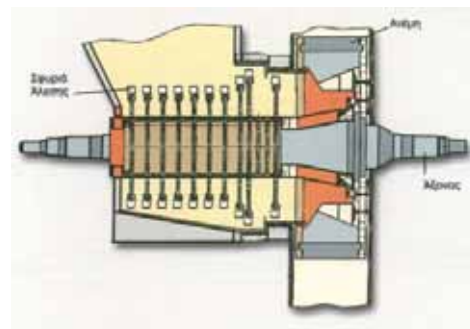
Σχ. 1.8 Γενική άποψη ατμοηλεκτρικού σταθμού στη Μεγαλόπολη.



Σχ. 1.9 Άξονας του στροβίλου με τα στρεφόμενα πτερύγια.



(α)



(β)

Σχ. 1.10 α) Σφύρες του στροφείου κονιοποίησης των μύλων.
β) Τομή μύλου λιγνίτη.

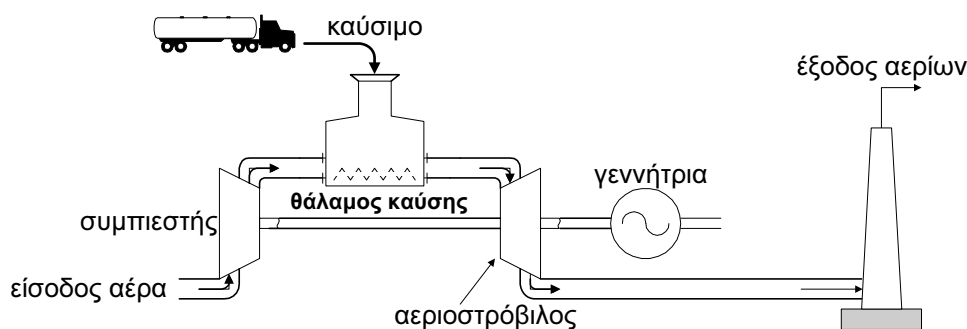
κού πεδίου που δημιουργείται, τα σωματίδια της τέφρας ηλεκτρίζονται και συγκεντρώνονται στις πλάκες των φίλτρων. Περιοδικά, μια διάταξη σφυριών κτυπάει τις πλάκες, τινάζοντας την τέφρα, που συγκεντρώνεται στις χοάνες των φίλτρων και μεταφέρεται με ρεύμα αέρος στα σιλό της τέφρας.

1.3.1 Συμπαγωγή

Η εκμετάλλευση των τεράστιων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας, που απελευθερώνονται στο περιβάλλον από τους θερμικούς σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας, οδήγησε στην ταυτόχρονη παραγωγή και ατμού (ή θερμού νερού) για βιομηχανική ή οικιακή χρήση (θέρμανση χώρου, ζεστό νερό κ.λ.π) από τον ίδιο σταθμό (γνωστή ως τηλεθέρμανση). Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται για αρκετά χρόνια στο εξωτερικό και πρόσφατα εφαρμόστηκαν και στην Πτολεμαΐδα, Αμύνταιο, Κοζάνη, Φλώρινα και Μεγαλόπολη. Αλλά και βιομηχανικές μονάδες που χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες ατμού (όπως χημικές, χαρτιού, υφασμάτων, διυλιστήρια, κ.λ.π), μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την απόδοσή τους αξιοποιώντας την αποβαλλόμενη θερμότητα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για δική τους χρήση ή και τροφοδοσία στο δίκτυο. Με την ιδιοπαραγωγή, αυτές οι βιομηχανίες, εκτός των άλλων επιτυγχάνουν και αδιάλειπτη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι απαραίτητη για αυτές τις βιομηχανικές μονάδες.

1.4 ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Οι αεριοστροβιλικές μονάδες αποτελούνται από ένα στρόβιλο, που στρέφει τη γεννήτρια, ένα θάλαμο καύσης και ένα συμπιεστή, που κινείται επίσης από το στρόβιλο, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.11. Ο συμπιεσμένος αέρας (≈ 10 bar) τροφοδοτείται στο θάλαμο καύσης, όπου εξασφαλίζεται η συνεχής καύση του τροφοδοτούμενου καυσίμου (πετρέλαιο ή φυσικό αέριο). Τα θερμά αέρια ($\approx 850^\circ\text{C}$) της καύσης χρησιμοποιούνται για να κινήσουν τον αεριοστρόβιλο, αλλά και μετά τη χρήση τους διατηρούν σημαντική θερμική ενέργεια ($\approx 600^\circ\text{C}$). Η απώλεια αυτής της ενέργειας μαζί με την ενέργεια που χρησιμοποιείται στο συμπιεστή, μειώνουν το συντελεστή απόδοσης της μονάδας στο 25-30%. Σε κανονική λειτουργία οι αεριοστροβιλικοί σταθμοί



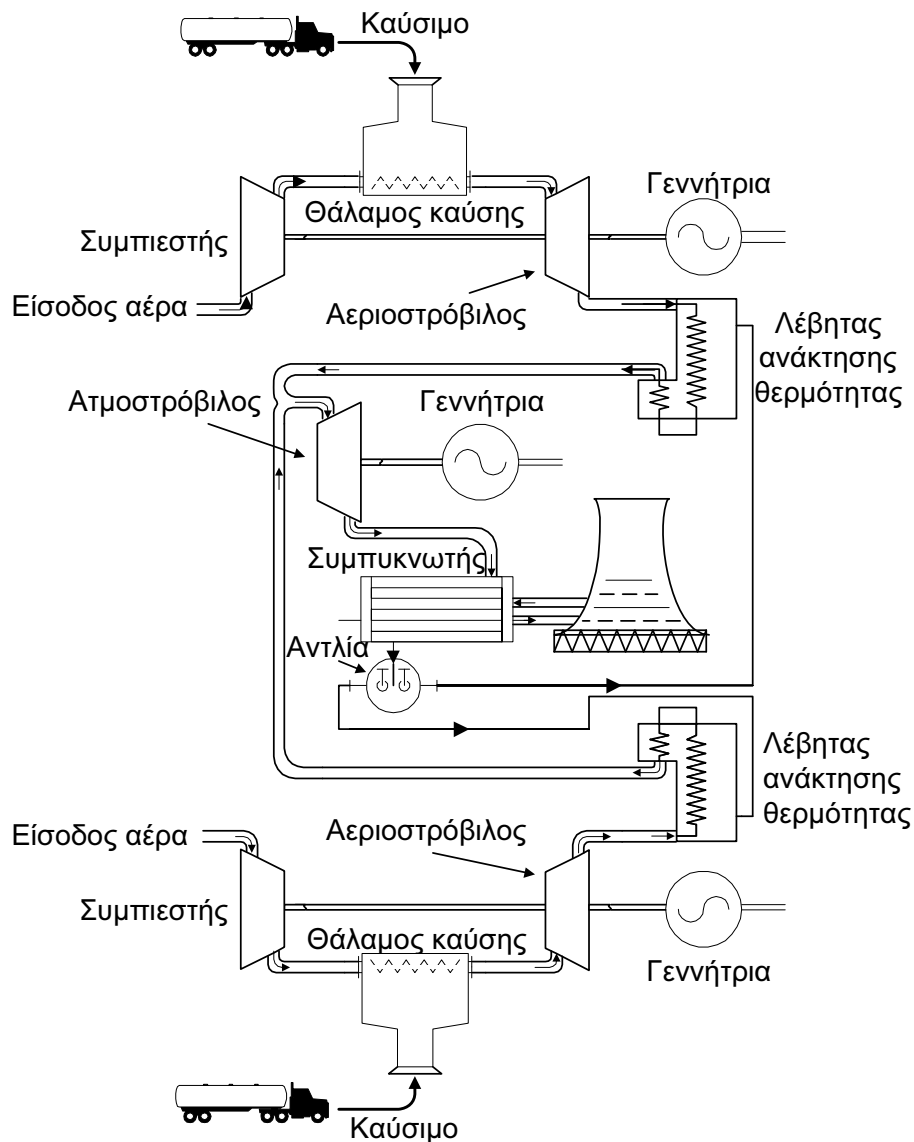
Σχ. 1.11 Σχηματική παράσταση αεριοστροβιλικού σταθμού.

είναι αντιοικονομικοί συγκρινόμενοι με τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η χρησιμότητά τους όμως οφείλεται στην ικανότητα που έχουν για γρήγορη εκκίνηση και ανάληψη φορτίου, που είναι περίπου 4 λεπτά. Έτσι μπορούν να τροφοδοτούν τις αιχμές φορτίου, ενώ πολλές φορές για την ικανοποίηση ξαφνικών αιχμών είναι οικονομικότερη η εκκίνηση από στασιμότητα των αεριοστροβιλικών σταθμών, από τη θερμή εφεδρεία των ατμοηλεκτρικών σταθμών. Οι αεριοστροβιλικές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν σύγχρονοι αντισταθμιστές για τη διατήρηση της ονομαστικής τάσης στο δίκτυο. Παγκοσμίως υπάρχουν αρκετοί αεριοστροβιλικοί σταθμοί ισχύος 100 MW.

1.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΤΑΘΜΟΙ

Η ανάγκη για εκμετάλλευση της μεγάλης θερμικής ενέργειας που διαφεύγει στο περιβάλλον στους αεριοστροβιλικούς σταθμούς, οδήγησε στην κατασκευή σταθμών συνδυασμένου κύκλου. Σε αυτούς, τα θερμά αέρια από την έξοδο των αεριοστροβίλων, διοχετεύονται σε ειδικούς λέβητες **ανάκτησης θερμότητας** για την παραγωγή ατμού, που χρησιμοποιείται από ατμοστρόβιλο. Με αυτή τη μέθοδο ο συνολικός βαθμός απόδοσης του σταθμού φτάνει το 60%, υψηλότερος του 40% των μεγάλων ατμοηλεκτρικών σταθμών και χωρίς την απαίτηση για πολύ μεγάλες μονάδες, με ένα κόστος κατασκευής περίπου 35% του κόστους κατασκευής των ατμοηλεκτρικών σταθμών. Φυσικά το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι χρησιμοποιούν για καύσιμο πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Λόγω της μεσολάβησης του ατμοστροβίλου, η εκκίνησή τους και ανάληψη του φορτίου τους γίνεται βραδύτερα από τους αεριοστροβιλικούς σταθμούς. Στο Σχ. 1.12 τα θερμά αέρια στην έξοδο των δύο αεριοστροβίλων αξιοποιούνται από τους αντίστοιχους λέβητες για την παραγωγή ατμού, που κινεί τον ατμοστρόβιλο.

Η μονάδα παραγωγής συνδυασμένου κύκλου Μικρό Λαύριο συγκροτείται από δύο αεριοστροβίλους, που είχαν εγκατασταθεί από το 1980 και τώρα μπορούν να χρησιμοποιούν και φυσικό αέριο, ονομαστικής ισχύος 57 MW ο καθένας με τις ηλεκτρογεννήτριές τους, από δύο νέους λέβητες ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων και από έναν ατμοστρόβιλο με την ηλεκτρογεννήτριά του, προερχόμενο από τη μονάδα Νο 7 του ατμοηλεκτρικού σταθμού Αγίου Γεωργίου. Η μονάδα συνδυασμένου κύκλου Μεγάλο Λαύριο 570 MW απαρτίζεται από τρεις αεριοστροβίλους ισχύος 122 MW ο καθένας, που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, τρεις λέβητες ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων και έναν ατμοστρόβιλο ισχύος 204 MW. Ο συνολικός βαθμός καθαρής απόδοσης είναι περίπου 51%.



Σχ. 1.12 Σχηματική παράσταση σταθμού συνδυασμένου κύκλου.

Η ετήσια συνολική εγκαθιστώμενη ισχύ σταθμών συνδυασμένου κύκλου από το 1995 ξεπέρασε την αντίστοιχη ισχύ των ατμοηλεκτρικών σταθμών και έγινε η κύρια νέα πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Το αυξημένο ενδιαφέρον για αυτά τα συστήματα προέκυψε από το μικρό κεφάλαιο εγκατάστασης σε συνδυασμό με τον υψηλό βαθμό απόδοσης, που μπορεί να φτάσει το 65%.

1.6 ΝΤΙΖΕΛΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Στους ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς για την περιστροφή των γεννητριών χρησιμοποιούνται εμβολοφόροι ντιζελοκινητήρες, που χρησιμοποιούν για καύσιμο ποικίλους τύπους πετρελαίου, ανάλογα με το μέγεθός τους. Η από-

δοσή τους φτάνει το 50% και στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται μόνο στα αυτόνομα δίκτυα κάποιων νησιών (π.χ. Κρήτης, Ρόδου).

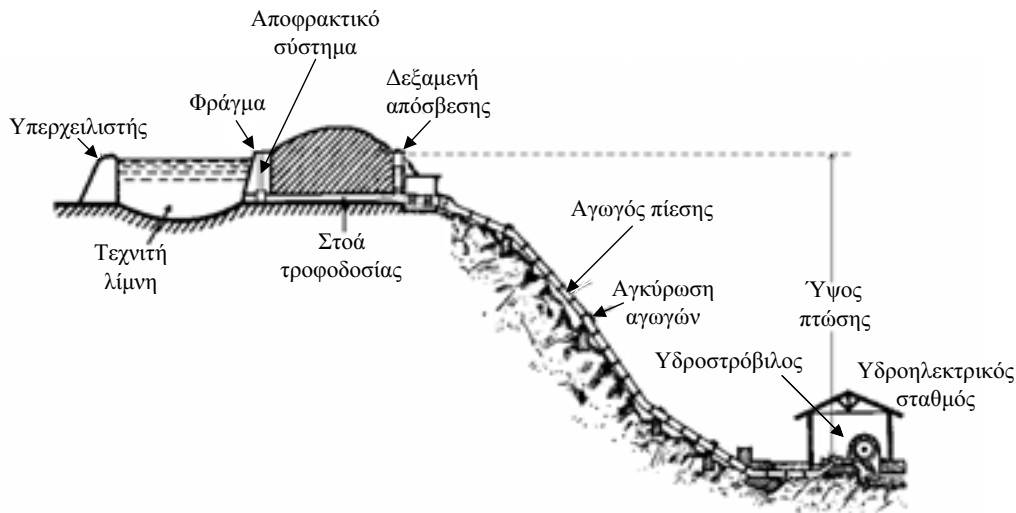
1.7 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Η δυναμική ενέργεια των υδάτων είναι από τις παλαιότερες μορφές ενέργειας, που μετετράπησαν σε άλλες μορφές ενέργειας για να αξιοποιηθούν και ήταν φυσικό να χρησιμοποιηθεί και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ) η ηλεκτρική ενέργεια αποκτάται χωρίς σημαντικό λειτουργικό κόστος και χωρίς ρύπανση για το περιβάλλον. Αυτά τα ελκυστικά χαρακτηριστικά όμως αντισταθμίζονται από το υψηλό κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού, που απαιτούν αυτοί οι σταθμοί. Επίσης η σχεδίαση και κατασκευή τους απαιτεί πέντε ως οκτώ χρόνια, ενώ των ατμοηλεκτρικών σταθμών τέσσερα ως έξη χρόνια. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, συνήθως, σχεδιάζονται ώστε να εξυπηρετούν πολλούς σκοπούς, όπως έλεγχο της ροής του ποταμού, αποθήκευση νερού για άρδευση και πόση και διευκόλυνση της ναυσιπλοΐας του ποταμού. Δυστυχώς, οι κατάλληλες εδαφικές συνθήκες για την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών δεν υπάρχουν πάντοτε. Επιπλέον οικολογικοί και βιολογικοί συντελεστές θέτουν στενά όρια για την αξιοποίηση των υδάτινων πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αναπτυγμένες χώρες οι υδροηλεκτρικές πηγές έχουν αξιοποιηθεί στο έπακρον, ενώ στις υπανάπτυκτες χώρες υπάρχουν περιθώρια αξιοποίησης, που σίγουρα θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη του γρήγορα αυξανόμενου φορτίου τους.

Η υψομετρική διαφορά h , μεταξύ της επιφάνειας του νερού στη δεξαμενή αποθήκευσης και του στροβίλου, παρέχει κινητική ενέργεια στο νερό που μεταδίδεται στον υδροστρόβιλο, που περιστρέφει τη γεννήτρια. Ένα απλό σχηματικό διάγραμμα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού με δεξαμενή αποθήκευσης (ταμιευτήρας) φαίνεται στο Σχ. 1.13. Όταν προκαλούμε γρήγορες αλλαγές της ηλεκτρικής ισχύος των ΥΗΣ, αυτές προκαλούν γρήγορες μεταβολές της ροής του νερού στους σωλήνες προσαγωγής νερού, που δημιουργούν κρουστικά κύματα (υδραυλικό πλήγμα), που είναι δυνατόν να καταστρέψουν τους σωλήνες. Γι' αυτό χρησιμοποιείται η δεξαμενή εκτόνωσης κύματος.

Υπάρχουν τρεις κυρίως τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών:

- α) **Μεγάλου h ή μεγάλης δεξαμενής αποθήκευσης:** η δεξαμενή γεμίζει σε περισσότερες από 400 ώρες
- β) **Μέσου h ή μικρής δεξαμενής αποθήκευσης:** η δεξαμενή γεμίζει σε 200 με 400 ώρες.



Σχ. 1.13 Σχηματικό διάγραμμα υδροηλεκτρικού σταθμού με δεξαμενή αποθήκευσης.

γ) **Ροής ποταμών:** χρησιμοποιούν τα νερά των ποταμών όπως ρέουν, ενώ είναι δυνατόν να δημιουργείται h από 3 – 5 m και μικρές δεξαμενές, που γεμίζουν σε λιγότερο από 2 ώρες.

Το φράγμα ενός μεγάλου ΥΗΣ στη Βενεζουέλα με τους υπερχειλιστές σε λειτουργία φαίνεται στο Σχ. 1.14.

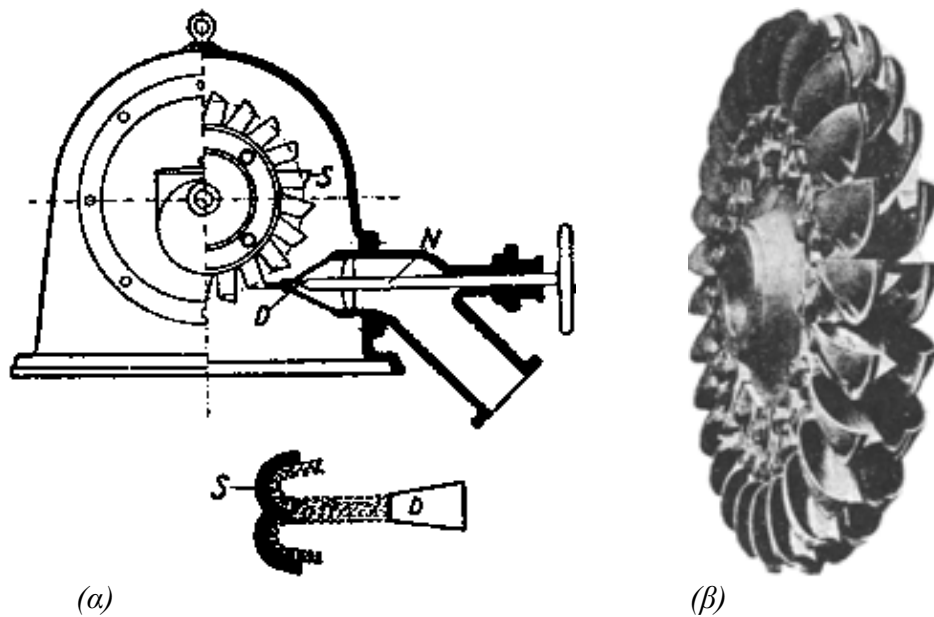


Σχ. 1.14 Φράγμα και δεξαμενή αποθήκευσης ΥΗΣ Guri II Βενεζουέλα (5×805 MVA).

Ανάλογα με την τιμή της υψομετρικής διαφοράς h , χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι στρόβιλων:

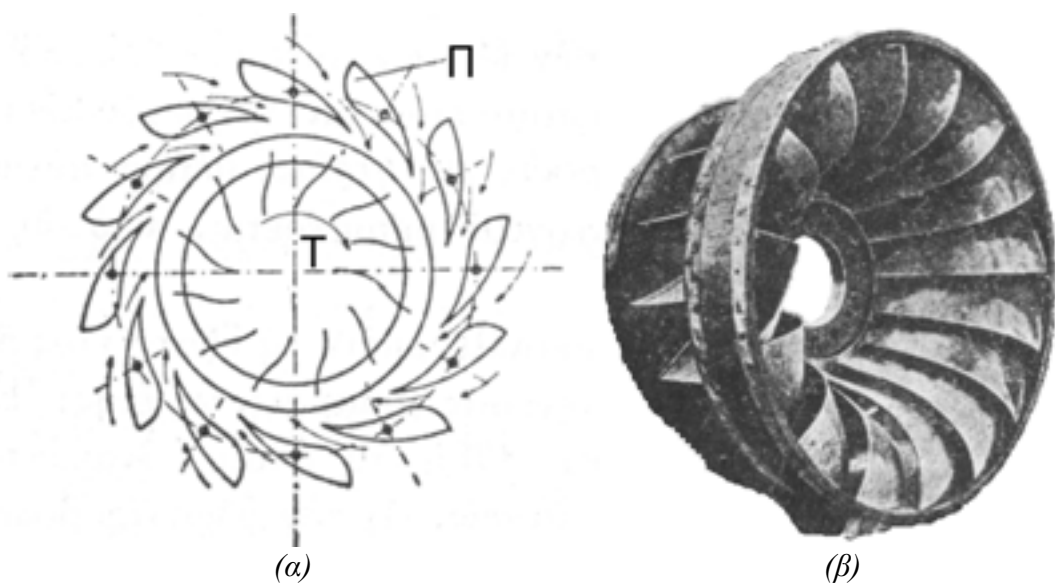
α) **Pelton:** Χρησιμοποιείται για h από 184 – 1840 m και αποτελείται από έναν υδραυλικό τροχό με σκαφίδια, στον οποίο κατευθύνεται με μεγάλη ταχύτητα το νερό με ρυθμιζόμενης ροής ακροφύσια (Σχ 1.15), είναι δηλα-

δή υδροστροβίλος δράσης στον οποίο το νερό φθάνει αποκλειστικά με κινητική ενέργεια, μέσω αγωγών πίεσης (όπως στο Σχ. 1.13).



Σχ. 1.15 α) Σχηματικό διάγραμμα υδροστροβίλου Pelton.
β) Τροχός υδροστροβίλου Pelton.

β) **Francis:** Χρησιμοποιείται για h από 37 – 490 m και είναι υδροστροβίλος αντίδρασης, δηλαδή το νερό έχει μικρή ταχύτητα και μεγάλη πίεση και κατά τη ροή του από τον τροχό T (Σχ. 1.16) μειώνεται η πίεση και αυξάνεται η ταχύτητα. Η αντίδραση, που προκαλείται από τη μεταβολή της ταχύτητας, περιστρέφει τον τροχό. Γύρω από τον τροχό υπάρχει ο ακίνητος μεριστής, δηλαδή ένας αριθμός πτερυγίων Π, που κατευθύνουν το νε-



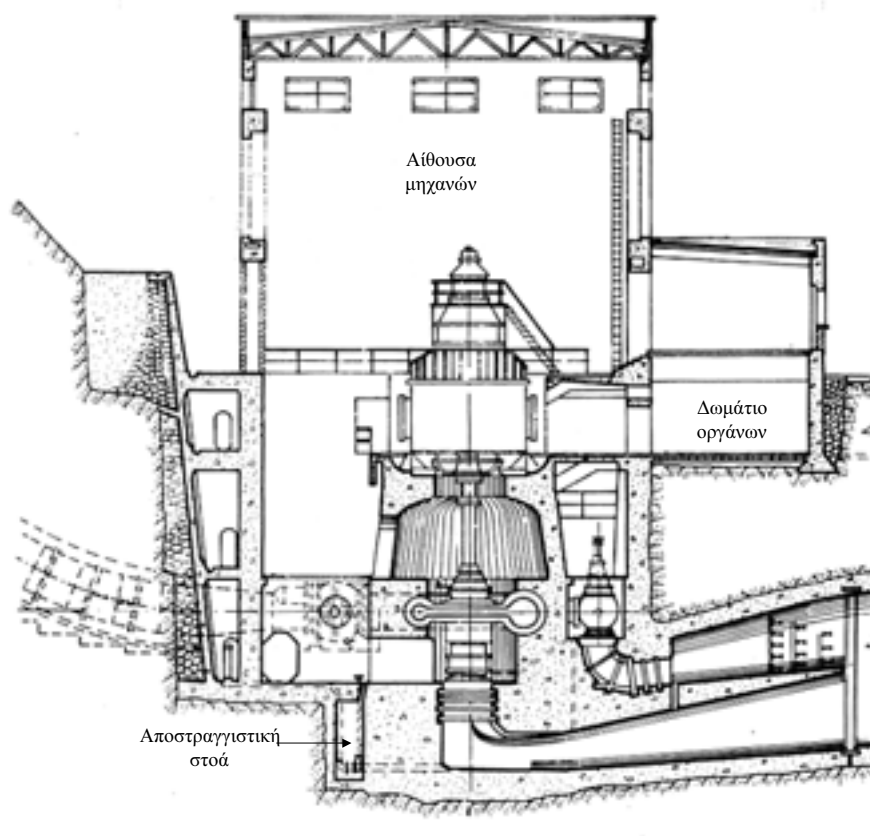
Σχ 1.16 α) Σχηματική παράσταση υδροστροβίλου Francis.
β) Τροχός στροβίλου Francis.

ρό από τα πλάγια στα πτερύγια του τροχού. Το νερό μεταφέρεται από τη δεξαμενή με υπόγειες σήραγγες. Στο Σχ. 1.17 φαίνεται το εσωτερικό του ΥΗΣ



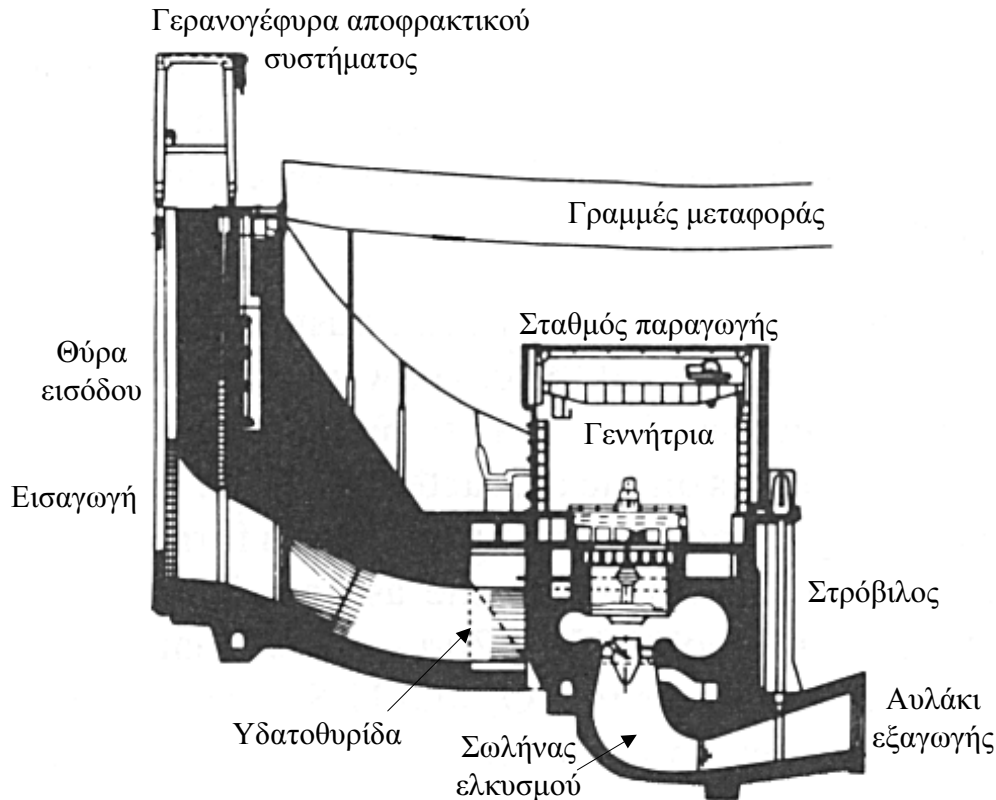
Σχ 1.17 ΥΗΣ Λάδωνα – εσωτερικό.

Λάδωνα και στο Σχ. 1.18 μια κατακόρυφη τομή του. Ο ΥΗΣ Λάδωνα έχει δύο στροβίλους Francis, ισχύος 34 MW, 428 στροφών/λεπτό, έχει $h=239\text{m}$ και δεξαμενή μικτής αποθηκευτικής ικανότητας 57.6 Mm^3 .



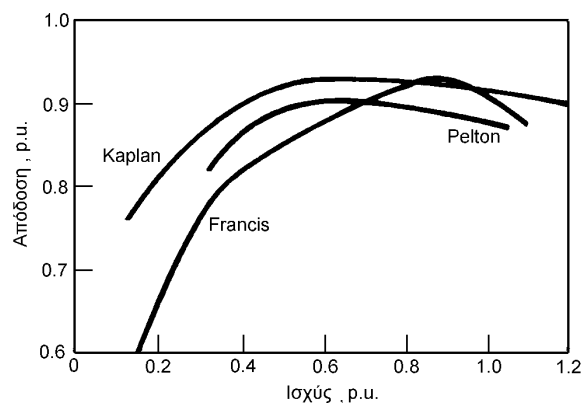
Σχ. 1.18 Κατακόρυφη τομή μέσω ενός στροβίλου Francis.

γ) **Kaplan:** Είναι κατάλληλος για να λειτουργεί με τη φυσική ροή ποταμών και μικρές δεξαμενές αποθήκευσης, με h μέχρι και 61m. Αυτός ο τύπος στροβίλου έχει στροφείο, που χρησιμοποιεί αξονική ροή νερού και μεταβλητό βήμα πτερυγίων (Σχ. 1.19).



Σχ. 1.19 Κατακόρυφη τομή μέσω ενός στροβίλου Kaplan.

Τυπικές καμπύλες απόδοσης για τους προαναφερθέντες υδροστροβίλους δείχνονται στο Σχ. 1.20. Οι ΥΗΣ έχουν την ικανότητα να εκκινούν γρήγορα και να αναλαμβάνουν φορτίο σε περίπου 2 λεπτά, γι' αυτό όταν συνεργάζονται με θερμικούς σταθμούς είναι κατάλληλοι για την τροφοδοσία των φορτίων αιχμής.



Σχ. 1.20 Τυπικές καμπύλες απόδοσης υδροστροβίλων.

Σε ορισμένες περιόδους, όταν το νερό είναι λίγο ή το ηλεκτρικό φορτίο είναι μικρό και η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ΑΗΣ βάσης μικρού κόστους, είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε τη γεννήτρια του ΥΗΣ ως κινητήρα και να αντλήσουμε νερό από την έξοδο του υδροστροβίλου και να το μεταφέρουμε στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτό φυσικά για να γίνει χρειάζεται να προβλέψουμε μια δεξαμενή στην έξοδο του υδροστροβίλου (που είναι επίσης χρήσιμη για τον έλεγχο των αρδεύσεων) και ο υδροστροβίλος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αντλιοστρόβιλος, δηλαδή ανάλογα με τη φορά περιστροφής του να μπορεί να αντλεί νερό ή να κινείται από το νερό. Η αλλαγή από τη μια κατάσταση στην άλλη συνήθως μπορεί να γίνει μέσα σε 4 λεπτά, ενώ η συνολική απόδοση είναι περίπου 60 – 70%. Αυτοί οι ΥΗΣ σταθμοί ονομάζονται υδροαντλητικοί σταθμοί. Σε αυτά τα σχήματα η σύγχρονη μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν σύγχρονος αντισταθμιστής της αέργου ισχύος του ΣΗΕ.

Η διαθέσιμη ισχύς ενός ΥΗΣ δίνεται από τη σχέση:

$$P = n_t 9.81 q h \quad \text{KW} \quad (1.1)$$

όπου: n_t η συνολική απόδοση του ΥΗΣ (με τιμές από 0.75 έως 0.92)

q είναι η ροή νερού στο στρόβιλο σε m^3/s

h η υψομετρική διαφορά μετρημένη σε m.

1.7.1 Παλιρροιακοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί.

Για πολλά χρόνια, η χρησιμοποίηση της ενέργειας που υπάρχει στη παλιρροιακή ροή των καναλιών, υπήρξε το αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας. Ακόμα και σήμερα όμως οι τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες δεν ξεπεράστηκαν. Ένας παλιρροιακός σταθμός ισχύος έχει κατασκευαστεί στην εκβολή La Rance της βόρειας Γαλλίας, όπου η διαφορά ύψους των νερών μεταξύ της πλημμυρίδας και της άμπωτης είναι $h=9.2$ m και η ροή της παλίρροιας εκτιμάται ότι είναι $18000 \text{ m}^3/\text{s}$.

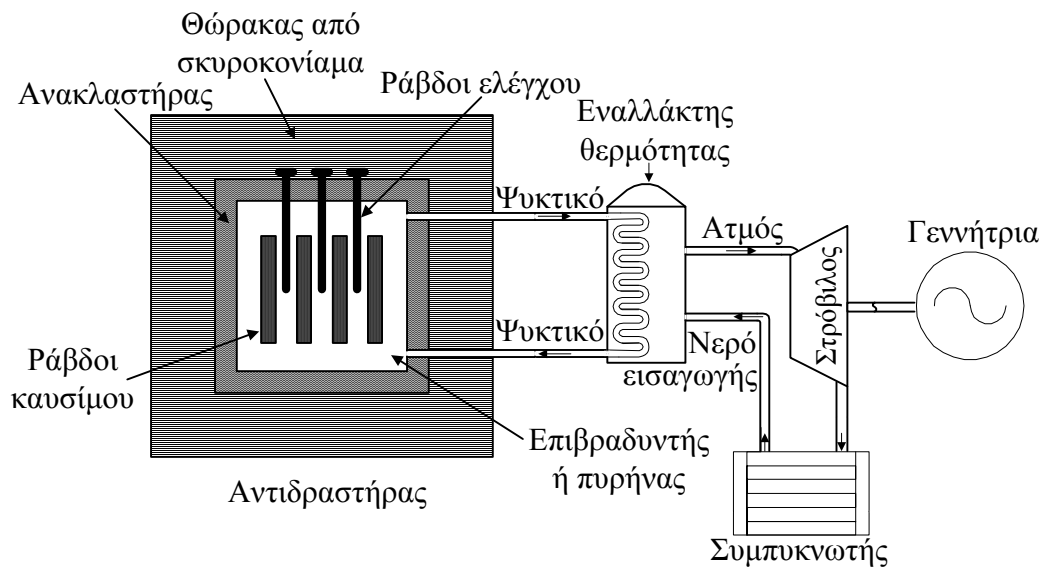
Ένας αποτελεσματικός τρόπος για την εκμετάλλευση της παλίρροιας είναι κατά τη διάρκεια της πλημμυρίδας να διοχετεύουμε τα νερά σε μία δεξαμενή μέσω στροβίλων και κατά την άμπωτη να απελευθερώνουμε τα νερά της δεξαμενής, πάλι μέσω στροβίλων. Έτσι εξασφαλίζεται συνεχή λειτουργία, αν και οι στρόβιλοι πρέπει να είναι ικανοί να εργάζονται με μεταβαλλόμενη υψομετρική διαφορά των νερών.

1.8 ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Αν λάβουμε υπ' όψην μας ότι σε μερικές δεκάδες χρόνια αναμένεται η εξάντληση του πετρελαίου και λίγο αργότερα των γαιανθράκων, η μόνη διαθέσιμη πρακτική πηγή ενέργειας, για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρισμού, είναι η πυρηνική. Μέχρι σήμερα η πυρηνική ενέργεια παράγεται από την πυρηνική σχάση, αλλά το πρόβλημα θα λυθεί οριστικά, όταν γίνει κατορθωτή η παραγωγή της από την πυρηνική σύντηξη. Όταν το ουράνιο (U) 235 βομβαρδίζεται με βραδέως κινούμενα νετρόνια, ο πυρήνας του διασπάται σε δύο μεγάλα και περίπου ίσα τεμάχια, ενώ ταυτόχρονα παράγονται και μερικά δευτερογενή νετρόνια και κινητική ενέργεια ίση με 3×10^{-11} J. Τα δευτερογενή παραγόμενα νετρόνια αφού επιβραδυνθούν μέχρι μια κρίσιμη τιμή ταχύτητας (που αντιστοιχεί στη θερμική τους κίνηση), μπορούν να προκαλέσουν άλλες σχάσεις, οπότε έχουμε μια αλυσιδωτή αντίδραση.

Αν η ποσότητα του σχάσιμου υλικού είναι τόση, ώστε ένα τουλάχιστο νετρόνιο από τα παραγόμενα σε κάθε σχάση, να προκαλεί μια νέα σχάση, τότε η αντίδραση αυτοσυντηρείται χωρίς να απαιτείται συνεχής βομβαρδισμός με νετρόνια απ' έξω. Η ποσότητα αυτή του υλικού ονομάζεται **κρίσιμος** και είναι τόσο μικρότερη όσο καθαρότερο είναι το υλικό. Στους συμβατικούς αντιδραστήρες για την επιβράδυνση των νετρονίων χρησιμοποιείται ο **επιβραδυντής** ή **πυρήνας**, που είναι υλικό μικρού ατομικού βάρους (π.χ γραφίτης, βαρύ ύδωρ ή και κοινό νερό). Για τον έλεγχο του ρυθμού των διασπάσεων στον αντιδραστήρα, χρησιμοποιούνται κινητές πλάκες καδμίου ή βορείου, που απορροφούν κάποιο ποσοστό των παραγόμενων νετρονίων. Για να περιοριστούν οι απώλειες των νετρονίων στο περιβάλλον, ο πυρήνας του αντιδραστήρα περιβάλλεται με τον **ανακλαστήρα**, που είναι υλικό μικρού ατομικού βάρους (π.χ γραφίτης) και επαναφέρει στο εσωτερικό του αντιδραστήρα μεγάλο ποσοστό των εξερχόμενων νετρονίων. Για την προστασία των χειριστών του αντιδραστήρα, αυτός περιβάλλεται από ένα παχύ στρώμα σκυροκονιάματος. Η κινητική ενέργεια των θραυσμάτων της σχάσης μετατρέπεται μέσα στη μάζα του ουρανίου σε θερμότητα, που μεταφέρεται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας με το πρωτεύον ψυκτικό (π.χ. CO₂, βαρύ ύδωρ, υγρό νάτριο κ.λ.π). Ο ατμός παράγεται στον εναλλάκτη θερμότητας και χρησιμοποιείται με το συμβατικό τρόπο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ατμοστροβίλων. Το σχηματικό διάγραμμα ενός πυρηνικού σταθμού φαίνεται στο Σχ. 1.21.

Το μέταλλευμα του φυσικού ουρανίου αποτελείται κυρίως από δύο ισότοπα, δηλαδή το ²³⁸U (99.3% σε βάρος) και ²³⁵U (0.7%). Σχάσιμο υλικό είναι μόνο



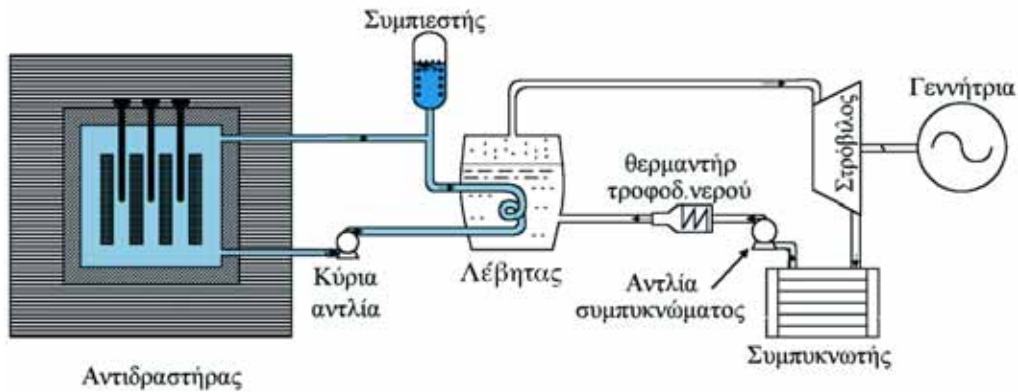
Σχ. 1.21 Σχηματικό διάγραμμα πυρηνικού σταθμού.

το ^{235}U . Όταν στον αντιδραστήρα χρησιμοποιείται σαν καύσιμο φυσικό ουράνιο σε μεταλλική μορφή, επειδή η ποσότητα του ^{235}U είναι πολύ μικρή, απαιτείται ένας καλός **επιβραδυντής**, ώστε να εκμεταλλευόμαστε κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα ελάχιστα διαθέσιμα νετρόνια (το μεγάλο ποσοστό των νετρονίων ενσωματώνεται στο ^{238}U). Όταν ως καύσιμο χρησιμοποιείται **εμπλουτισμένο ουράνιο**, δηλαδή ουράνιο με αυξημένη ποσότητα ^{235}U , τότε οι απαιτήσεις από τον επιβραδυντή είναι περιορισμένες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνηθισμένο νερό, που μπορεί να είναι και το ψυκτικό υλικό. Όταν οι απαιτήσεις για τη μεταφορά της θερμότητας από τον αντιδραστήρα είναι αυξημένες, χρησιμοποιούμε υγρά μέταλλα (δηλαδή κράμα νατρίου και καλίου, που είναι υγρό σε συνήθη θερμοκρασία ή νάτριο, που τήκεται μόλις αυξηθεί λίγο η θερμοκρασία του). Έτσι έχουν αναπτυχθεί διαφορετικοί αντιδραστήρες ανάλογα με το καύσιμο και το ψυκτικό υλικό που χρησιμοποιούν.

Ο Βρετανικός αντιδραστήρας Magnox χρησιμοποιεί φυσικό ουράνιο σε μορφή ράβδων εντός δοχείων από κράμα μαγνησίου και ο επιβραδυντής ή πυρήνας είναι κατασκευασμένος από τούβλα καθαρού γραφίτη. Η θερμότητα μεταφέρεται με CO_2 , που διοχετεύεται σε αγωγούς κατακόρυφα τοποθετημένους στον πυρήνα. Σε ένα πιο σύγχρονο αντιδραστήρα (*advanced gas – cooled reactor (AGR)*) χρησιμοποιείται για καύσιμο εμπλουτισμένο διοξείδιο του ουρανίου σε μορφή δισκίων, κλεισμένων σε ανοξείδωτα δοχεία, ενώ για ψυκτικό υλικό χρησιμοποιείται CO_2 σε υψηλότερη πίεση από το Magnox.

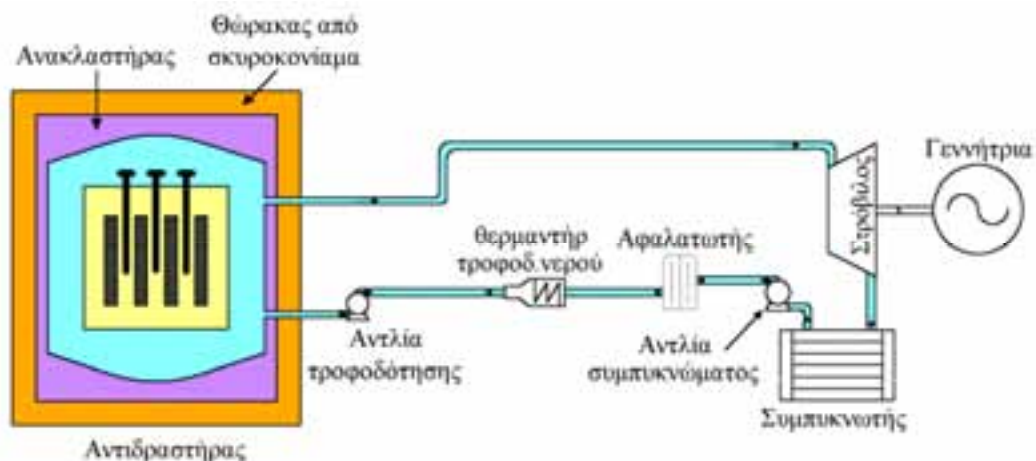
Στις ΗΠΑ χρησιμοποιούνται οι αντιδραστήρες *πεπιεσμένου νερού* και *βράζοντος νερού*. Στον τύπο *πεπιεσμένου νερού* το νερό τροφοδοτείται στον αντι-

δραστήρα και δρα σαν επιβραδυντής και ψυκτικό υλικό. Το νερό θερμαίνεται στους 315°C και η μέγιστη πίεσή του είναι 167 bar (≈ 170 at), που περιορίζει την απόδοσή του στο 30%. Το καύσιμο είναι διοξείδιο του ουρανίου σε μορφή δισκίων σε δέσμες ανοξείδωτων σωληνώσεων (Σχ 1.22). Ο τύπος αντι-



Σχ. 1.22 Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα με πεπιεσμένο νερό.

δραστήρα βράζοντος νερού αναπτύχθηκε αργότερα και χρησιμοποιείται πολύ. Μέσα στον αντιδραστήρα η θερμότητα μεταφέρεται στο βράζον νερό υπό πίεση 69 bar (≈ 70 at). Η απόδοσή του σε απορρόφηση θερμότητας βελτιώνεται αξιοποιώντας τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Ο παραγόμενος ατμός τροφοδοτείται απευθείας στο στρόβιλο και υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης ραδιενέργειας στο στρόβιλο (Σχ 1.23). Το καύσιμο και στους δύο



Σχ. 1.23 Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα με βράζον νερό.

τύπους αντιδραστήρων είναι εμπλουτισμένο με 1.44% ^{235}U . Αυτοί οι αντιδραστήρες είναι φθηνότεροι, αλλά ο παραγόμενος ατμός είναι κορεσμένος, αν και εξετάζεται η δυνατότητα για παραγωγή υπέρθερμου ατμού.

Στον Καναδά αναπτύχθηκε ο αντιδραστήρας CANDU, που χρησιμοποιεί φυσικό ουράνιο (σε μορφή οξειδίου) και βαρύ ύδωρ υπό πίεση για επιβραδυ-

ντή. Στον αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας ο στρόβιλος τροφοδοτείται με ατμό 540°C και πίεση 100 bar και η θερμική του απόδοση φτάνει το 35%. Το καύσιμο είναι εμπλουτισμένο με 13.8% ^{235}U , ο επιβραδυντής είναι γραφίτης και ως ψυκτικό υλικό χρησιμοποιείται αέριο ήλιο.

Ταχέως αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (Fast Breeder Reactors (FBR)).

Σε ένα γραμμάριο φυσικού ουρανίου μόνο το 0.7% είναι ^{235}U και από αυτό μόνο το ένα χιλιοστό της μάζας του εξαφανίζεται και μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Επίσης κατά τη σχάση παράγονται και άλλοι πυρήνες (π.χ. Sr, Xe, Ba κ.λ.π), που απορροφούν νετρόνια και εμποδίζουν την πλήρη εκμετάλλευση του καυσίμου. Για τους προηγούμενους λόγους μπορεί να γίνει εκμετάλλευση μόνο του 5% του καυσίμου υλικού και για περαιτέρω εκμετάλλευση πρέπει να γίνει χημικός διαχωρισμός των ξένων στοιχείων. Έτσι ένα γραμμάριο φυσικού ουρανίου παράγει πρακτικά την ίδια ενέργεια με 125 τόνους άνθρακα. Με αυτή την απόδοση και την τρέχουσα εκμετάλλευση υπολογίζεται ότι τα κοιτάσματα ουρανίου επαρκούν για περίπου 50 χρόνια. Εν τούτοις, κατά την σχάση του ^{235}U κάποια νετρόνια απορροφούνται από το ^{238}U και το μετατρέπουν σε πλουτώνιο (^{239}U), που είναι σχάσιμο υλικό και μπορεί να αναληφθεί από το άχρηστο καύσιμο των αντιδραστήρων. Κατόπιν το πλουτώνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους αντιδραστήρες και με αυτή τη διαδικασία τα πυρηνικά ενεργειακά αποθέματα γίνονται δεκαπλάσια των γαιανθρακικών αποθεμάτων. Οι ταχέως αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες παράγουν σημαντικές ποσότητες νέου καυσίμου (πλουτώνιο) κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, ενώ παράλληλα παράγουν και την επιθυμητή θερμότητα. Στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες δεν χρησιμοποιείται επιβραδυντής, επειδή δεν επιδιώκεται επιβράδυνση των νετρονίων και έχουν μικρό πυρήνα, επειδή η παραγόμενη ισχύς ανά χιλιόγραμμα καυσίμου υλικού είναι μεγάλη. Χρησιμοποιούν για ψυκτικό υλικό υγρό νάτριο, που φτάνει τους 650°C στον αντιδραστήρα και βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Η θερμότητα μεταφέρεται με ένα δεύτερο κύκλωμα υγρού νατρίου στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου παράγεται ατμός 540°C . Το καύσιμο υλικό στους FBR αποτελείται από 20% πλουτώνιο και 8% οξείδιο ουρανίου. Έντονες αντιδράσεις υπάρχουν για τους FBR επειδή χρησιμοποιούν πλουτώνιο, που είναι πολύ τοξικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή ατομικής βόμβας.

Για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων των διαφόρων αντιδραστήρων σχάσης, αναφέρουμε ότι η τυπική πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα όγκου του πυρήνα τους σε MW/m^3 είναι: 0.53 για ψυκτικό υλικό αέριο, 7.75 για υψηλής θερμοκρασίας ψυκτικό υλικό αέριο, 18 για βαρύ ύδωρ, 29 για βράζον νερό, 54.75 για νερό υπό υψηλή πίεση και 760 για FBR.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πυρηνικών σταθμών σε σχέση με τους θερμικούς σταθμούς είναι:

Πλεονεκτήματα:

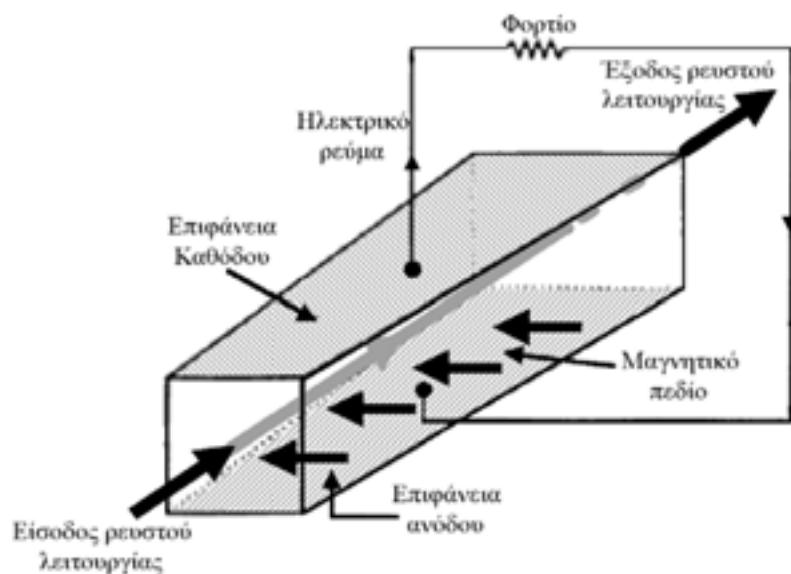
1. Οι πυρηνικοί σταθμοί δεν μολύνουν τον ατμοσφαιρικό αέρα όπως οι θερμικοί σταθμοί.
2. Το βάρος και ο όγκος του καύσιμου υλικού τους είναι ασυγκρίτως μικρότερα από αυτά των θερμικών σταθμών και γι' αυτό η κατασκευή τους δεν είναι απαραίτητο να γίνεται κοντά στα ορυχεία εξαγωγής του καυσίμου τους.

Μειονεκτήματα:

1. Οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν ραδιενεργά απόβλητα, που η διάθεσή τους προκαλεί σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους.
2. Ο ρυθμός της πυρηνικής αντίδρασης ελέγχεται σε στενά όρια, γι' αυτό και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ μεταβάλλεται πολύ λίγο σε σχέση με το πλήρες φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει η σύνδεσή τους με το δίκτυο να είναι πάντα εξασφαλισμένη, γιατί ξαφνική αποσύνδεση μιας γραμμής τους μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα, μέχρι διακοπή της λειτουργίας τους με όλες τις συνέπειες (για πολλούς λόγους το μέγεθος αυτών των σταθμών είναι της τάξης των 1000 MW).
3. Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής τους και του χαμηλού κόστους λειτουργίας τους, πρέπει πάντα να λειτουργούν σαν σταθμοί βάσης. Η συνεργασία τους, όπου είναι δυνατόν, με υδροηλεκτρικούς σταθμούς βοηθάει στην καλύτερη εκμετάλλευσή τους.
4. Σοβαρές αμφιβολίες έχουν εκφραστεί για την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών, παρά τα πολλαπλά μέτρα ασφάλειας που έχουν θεσπιστεί. Έχουν καταγραφεί περί τα 150 πολύ σοβαρά ατυχήματα, από τα οποία τα πιο γνωστά είναι το ατύχημα στο νησί των τριών μιλίων στις ΗΠΑ και του Chernobyl στην πρώην ΕΣΣΔ.

1.9 ΜΑΓΝΗΤΟΪΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΜΥΔ)

Στους θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρώτα η θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια με τους στρόβιλους και κατόπιν η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική στις γεννήτριες. Έτσι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουμε δύο ενεργειακές μετατροπές και μικρή απόδοση. Στη ΜΥΔ μέθοδο, αέρια 2500°C διέρχονται μέσω θαλάμου στον οποίο αναπτύσσεται ισχυρό μαγνητικό πεδίο (Σχ. 1.24). Τα αέρια στην υψηλή αυτή θερμοκρασία ιονίζονται και γίνονται ελαφρώς ηλεκτρικά αγωγά (εμπλουτίζονται με κάλλιο για τη βελτίωση της αγωγιμότητας), οπότε σχηματίζουν



Σχ. 1.24 Αρχή λειτουργίας της ΜΥΔ παραγωγής.

έναν αγωγό κινούμενο σε μαγνητικό πεδίο. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την εμφάνιση μιας ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης (τάσης), που εμφανίζεται σε κατάλληλα ηλεκτρόδια. Υπολογίζεται ότι η απόδοση της ΜΥΔ γεννήτριας μπορεί να φτάσει το 50%, αν η λειτουργία της μπορεί να συνδυασθεί με τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμικού σταθμού. Στην πρώην ΕΣΣΔ λειτούργησε ένας ΜΥΔ σταθμός 25 MW, που χρησιμοποιούσε για καύσιμο φυσικό αέριο. Υπάρχουν όμως σοβαρές αμφιβολίες για την οικονομική βιωσιμότητα αυτής της μορφής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις για σχεδίαση συνιστωσών και σύνδεση (CDIF) στο Butte, Montana των ΗΠΑ, παρέχουν τα μέσα για την ανάπτυξη και δοκιμή των διαφόρων τμημάτων ενός ΜΥΔ σταθμού παραγωγής [1].

1.10 ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Επειδή τα διαθέσιμα γεωλογικά καύσιμα συνεχώς μειώνονται, αλλά και λόγω της αυξανόμενης πίεσης των περιβαλλοντικών οργανώσεων για προστασία του περιβάλλοντος, υπάρχει μια αξιόλογη διεθνής προσπάθεια στην ανάπτυξη μη συμβατικών (ή ανανεώσιμων ή νέων ή εναλλακτικών ή καθαρών) πηγών ενέργειας. Οι περισσότερες από τις νέες μορφές ενέργειας (μερικές από αυτές ήταν γνωστές και χρησιμοποιούνταν εδώ και πολλούς αιώνες) είναι αποτέλεσμα της δράσης της ηλιακής ενέργειας, π.χ ο αέρας, τα κύματα των θαλασσών, η θερμοκρασιακή διαφορά των θαλασσών κ.λ.π. Η μέση ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης, είναι 600 W/m^2 , αλλά φυσικά η πραγματική τιμή διαφέρει πολύ, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση αλλά και άλλους παράγοντες. Πρόσφατα δημοσιεύτηκε η Πράσινη Βίβλος

(κείμενο προς συζήτηση) με θέμα «**Ενέργεια για το μέλλον. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**», όπου καθορίζεται η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) σε ενεργειακά θέματα. Σκοπός της ΕΕ είναι η επίτευξη μιας ισορροπημένης χρήσης των καυσίμων, όπου όλες οι πηγές ενέργειας να διαδραματίζουν τον κατάλληλο ρόλο, ώστε να συμβάλουν στην αειφόρο οικονομική ανάπτυξη. Θεωρείται ότι η μη συμβατικές μορφές ενέργειας είναι ανομοιόμορφα και ανεπαρκώς αξιοποιημένες στην ΕΕ (λιγότερο από 6% της συνολικής ενέργειας) και απαιτείται σημαντική αύξηση της χρήσης τους (12% της συνολικής ενέργειας το 2010). Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική εγχώρια κατανάλωση ενέργειας των χωρών της ΕΕ (περιλαμβάνεται η υδροηλεκτρική ενέργεια και η ενέργεια από βιομάζα). Στον Πίνακα 1.2 αναλύεται η συμμετοχή κάθε ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στην ΕΕ. Στις ΗΠΑ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν το 12% του συνολικού τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού φορτίου και εκτιμάται ότι αυτό το ποσοστό θα παραμείνει το ίδιο μέχρι το 2010. Περιλαμβάνει 10% υδροηλεκτρική παραγωγή, 1% παραγωγή από βιομάζα και στερεά απόβλητα των δήμων και 1% οι υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (γεωθερμική, ανέμου, ήλιου). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται συνοπτικά οι διαφορετικές μέθοδοι αξιοποίησης των μη συμβατικών πηγών ενέργειας.

Πίνακας 1.1 Συμμετοχή % ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στη συνολική ενέργεια των χωρών της ΕΕ.

	1990	1994
Αυστρία	22.1	24.1
Βέλγιο	1.0	0.8
Δανία	6.3	7.0
Φιλανδία	18.4	19.3
Γαλλία	6.4	7.2
Γερμανία	1.7	1.9
Ελλάδα	7.1	7.2
Ιρλανδία	1.6	2.2
Ιταλία	5.3	6.4
Λουξεμβούργο	1.3	1.3
Ολλανδία	1.3	1.4
Πορτογαλία	17.6	17.5
Ισπανία	6.7	6.2
Σουηδία	24.7	24.0
Μεγάλη Βρετανία	0.5	0.6
Ευρωπαϊκή Ένωση	5.0	5.4

Πίνακας 1.2 Συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην ΕΕ.

	ΕΕ 12 1991	ΕΕ 12 1994	ΕΕ 15 1991	ΕΕ 15 1994
Ποσοστό % των ΑΠΕ στη συνολική κατανομή ενέργειας στην ΕΕ	3.7	3.9	5.2*	5.4
Ισχύς Υδροηλεκτρική (MW)	57303	57932	87303	88331
Ισχύς Ανεμογεννητριών (MW)	645.5	1626.7	652.5	1671.7
Ισχύς Φωτοβολταϊκών (KWp)	8726	29143	Μ.Δ.	Μ.Δ.
Ισχύς Γεωθερμικών (MW)	530	509	Μ.Δ.	Μ.Δ.
Ηλεκτρική ενέργεια όλων των ΑΠΕ (GWh)	174364	205613	290513	324232
Από την οποία (%):				
Υδροηλεκτρική	92.8	91.5	91.7	91.1
Ανεμογεννητριών	0.6	1.6	0.4	1.1
Φωτοβολταϊκών	0.0	0.0	Μ.Δ.	Μ.Δ.
Γεωθερμικών	1.8	1.6	Μ.Δ.	Μ.Δ.
Βιομάζας	4.8	5.3	6.8	6.8
Παραγωγή Βιοκαυσίμων (Ktoe)	Μ.Δ.	257.6	Μ.Δ.	Μ.Δ.

Πηγή: Eurostat

* 1992

Μ.Δ.= Μη Διαθέσιμο

1.11 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η εκμετάλλευση του ανέμου από τον άνθρωπο άρχισε πριν από χιλιάδες χρόνια. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι όμως έκαναν την εμφάνισή τους στη μέση ανατολή γύρω στο 10^ο αιώνα. Από το 1940 άρχισαν οι πρώτες προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση του ανέμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάπτυξη των ανεμογεννητριών συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Από τις ανεμογεννήτριες των 50 KW του 1980 φτάσαμε στις ανεμογεννήτριες με μετατροπείς ισχύος 500 ως 1000 KW δέκα χρόνια αργότερα. Λόγω της συνεχούς βελτίωσης των υλικών, της σχεδίασης και κατασκευής και του ηλεκτρονικού ελέγχου, «**πάρκα**» μεγάλων ανεμογεννητριών με υψηλό δυναμικό ανέμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με κόστος μόνο 3,5 Λ€/KWh. Σήμερα, η εκτιμώμενη συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών είναι περίπου 7.6 GW με 30000 ανεμογεννήτριες σε λειτουργία.

Ο άνεμος σαν πηγή ενέργειας έχει τα πλεονεκτήματα ότι είναι άφθονος, ανεξάντλητος και δεν μολύνει ούτε αυξάνει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, έχει όμως το μειονέκτημα ότι είναι μεταβλητός, με αποτέλεσμα για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος να απαιτείται ο

συνδυασμός της με άλλες πηγές ενέργειας. Σήμερα, οι πλέον αναπτυγμένες ανεμογεννήτριες είναι η οριζοντίου άξονα με δύο ή τρία πτερύγια. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει τον πύργο στήριξης, τον ανεμοκινητήρα και την άτρακτο, όπου βρίσκονται ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης, η γεννήτρια και το σύστημα σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο. Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα στην άτρακτο υπάρχει και το σύστημα προσανατολισμού τους, ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου. Στο Σχ. 1.25 φαίνονται οι κύριες συνιστώσες μιας σύγχρονης ατράκτου. Επίσης έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί κατάλληλα συστήματα ελέγχου και μετατροπείς ισχύος, ώστε να είναι δυνατή η αυτόματη εκκίνηση ή παύση της ανεμογεννήτριας, όταν η ταχύτητα του ανέμου περάσει κάποιες τιμές και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σταθερής συχνότητας με μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου.

Η θεωρητική ισχύς ροής ανέμου δίνεται από την εξίσωση:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{W} \quad (1.2)$$

όπου: ρ = η πυκνότητα του αέρα (1.201 Kg/m^3)

A = η επιφάνεια σάρωσης (m^2)

v = η μέση ταχύτητα του αέρα (m/s)

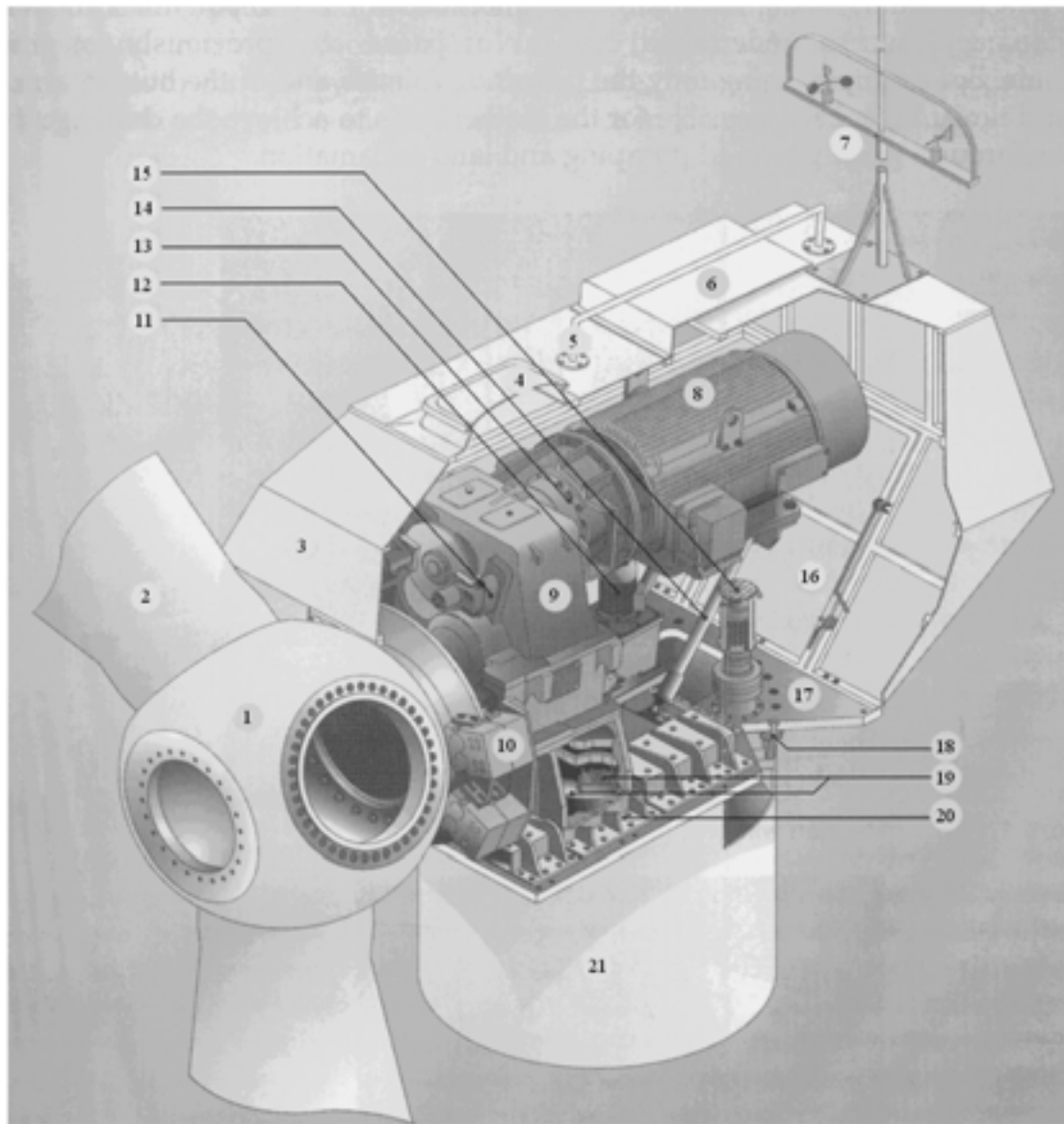
Την ισχύ αυτή την πολλαπλασιάζουμε με το συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης C_p του ανεμοκινητήρα, για να υπολογίσουμε το μηχανικό έργο που αποδίδει. Η μέγιστη τιμή του C_p είναι 59% και καλείται όριο του Betz, ενώ οι πρακτικές τιμές του είναι μικρότερες του 40%. Ένας ανεμοκινητήρας με μήκος πτερυγίων 8.5m και $C_p=0.4$, σε μια μέση ταχύτητα ανέμου 8m/s (ή 28.8Km/h) αποδίδει ισχύ περίπου 28 KW.

1.12 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η μέση προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 600 W/m^2 , αλλά η πραγματική της τιμή εξαρτάται πολύ από τη γεωγραφική θέση της περιοχής. Έχει το πλεονέκτημα ότι δεν έχει κόστος, είναι ανεξάντλητη και δεν μολύνει το περιβάλλον, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι έχει μικρή ένταση ανά μονάδα επιφάνειας, είναι διαθέσιμη μόνο ένα μέρος της ημέρας και εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Οι προηγούμενοι λόγοι καθιστούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας δύσκολο τεχνολογικά πρόβλημα. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με:

α) Μετατροπή της σε θερμική ενέργεια.

β) Απευθείας μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια.



- | | |
|---|---|
| 1. Πλήμνη δρομέα | 12. Υδραυλική |
| 2. Πτερύγια δρομέα | 13. Ελαστικός σύνδεσμος |
| 3. Κάλυμμα ατράκτου | 14. Αναρτήσεις γεννήτριας |
| 4. Φωταγωγός | 15. Σύστημα προσανατολισμού |
| 5. Ράβδος ασφαλείας | 16. Θυρίδα επισκόπησης |
| 6. Εξαγωγή αέρα | 17. Εξέδρα |
| 7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου | 18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού |
| 8. Γεννήτρια | 19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού |
| 9. Κιβώτιο ταχυτήτων | 20. Αποξέκτης θορύβου |
| 10. Δισκόφρενο δρομέα | 21. Πύργος |
| 11. Εφεδρικό φρένο | |

Σχ. 1.25 Ατράκτος μιας ανεμογεννήτριας 600 KW.

Μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική.

Επιτυγχάνεται:

- α) Σε επίπεδο καταναλωτών με χρήση ηλιακών συλλεκτών για θέρμανση χώρου ή νερού. Οι ηλιακοί συλλέκτες απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, εκτός της υπερύθρου που την αντανακλούν και την αποδίδουν συνήθως σε ένα ψυκτικό υγρό, με ένα συντελεστή απόδοσης της τάξης του 40–50%, που είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων. Αυτή η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας ελαττώνει το ηλεκτρικό φορτίο, αλλά οι ηλεκτρικές εταιρείες οφείλουν να διαθέτουν επαρκή εφεδρική ισχύ για να καλύπτουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών, όταν λόγω καιρικών συνθηκών δεν παράγεται ηλιακή ενέργεια.
- β) Σε επίπεδο ηλεκτρικών σταθμών, όπου η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται με φακούς ή κάτοπτρα (ηλιοστάτες) μεγάλης επιφάνειας, τον ανακλαστήρα και τροφοδοτείται σε μια μικρότερη επιφάνεια, τον απορροφητή. Για υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 580°C) χρησιμοποιείται μόνο ένας δέκτης (λέβητας στη κορυφή του πύργου, Σχ. 1.26α), ενώ για χαμηλότερες θερμοκρασίες (μέχρι 400°C) ο δέκτης είναι ένας σωλήνας στη θέση της γραμμικής εστίας (με νερό ή υγρό νάτριο), που τροφοδοτεί το λέβητα, Σχ. 1.26β. Οι ανακλαστήρες πα-



Σχ. 1.26α 10 MW ηλιακός σταθμός, στο Barstow της Καλιφόρνιας.



Σχ. 1.26β 30 MW ηλιακός σταθμός, στο Kramer Junction της Καλιφόρνιας.

ρακολουθούν την εποχιακή ή ημερήσια μετακίνηση του ήλιου. Ο σταθμός του Σχ. 1.26α χρησιμοποιεί περίπου 2000 ρυθμιζόμενους ηλιοστάτες και λέβητα σε ύψος 90m με υγρό νάτριο, που θερμαίνεται στους 575°C. Ο σταθμός του Σχ. 1.26β χρησιμοποιεί παραβολικά κοίλα κάτοπτρα και φυσικό αέριο για συμπληρωματική πηγή ενέργειας σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγωγής. Υπάρχουν εννέα παρόμοια εργοστάσια, συνολικής ισχύος 345 MW.

Απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Επιτυγχάνεται με τα ηλιακά κύτταρα, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο πραγματοποιείται σε ένα λεπτό στρώμα κατάλληλου υλικού, π.χ. πυριτίου, όπου ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων δημιουργούνται από την πρόσπτωση ηλιακών φωτονίων, ενώ η ασυνέχεια του δυναμικού του κυττάρου διαχωρίζει τις οπές από τα ηλεκτρόνια και δημιουργεί διαφορά δυναμικού. Ενώ η θεωρητική απόδοση είναι 25%, οι πρακτικές τιμές είναι περίπου 15%, αν και κοντά στο Tempe της Αριζόνα κατασκευάστηκε φωτοβολταϊκός σταθμός 20 KW με πρωτοποριακά ηλιακά κύτταρα από κρυσταλλικό πυρίτιο στηριγμένα κάτω από ακρυλικούς συγκεντρωτικούς φακούς, απόδοσης 20%. Δυναμικά εισέρχεται στην αγορά και η πρωτοποριακή τεχνολογία λεπτών στρωμάτων άμορφου πυριτίου (που είναι πολύ φθηνότερη από την τεχνολογία του κρυσταλλικού πυριτίου), που προμήθευσε τα τελευταία δύο χρόνια ηλιακά κύτταρα ισχύος 25 MW, ενώ εκτιμάται ότι η συνολική ισχύς των κυττάρων πλησιάζει τα 150 MW (1998). Η μεγαλύτερη απόδοση, περίπου 22%, επετεύχθη με κύτταρα γαλλίου – αρσενίου, αλλά η τοξικότητα του αρσενίου και οι υπάρχουσες μικρές ποσότητες γαλλίου δεν επιτρέπουν την εμπορική εκμετάλλευση αυτών των κυττάρων.

1.13 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ

Τα υπολείμματα φυτών και τ' απορρίμματα ζωικών οργανισμών ονομάζονται βιομάζα, που μπορεί με κατάλληλες χημικές ή βιολογικές διεργασίες να παράγει τα **βιοκαύσιμα**. Κύριες πηγές της βιομάζας είναι τα υπολείμματα της γεωργικής παραγωγής, των βιομηχανιών επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων και παραγωγής τροφίμων, παραπροϊόντα κτηνοτροφίας, παραπροϊόντα επεξεργασίας ξύλου, στερεά απορρίμματα νοικοκυριών, φυτομάζα από κλάδεμα δενδροκαλλιεργειών, αυτοφυών βοηθητικών φυτών (βοσκιές, καλαμιές) και αναξιοποίητης δασικής ύλης αλλά και οι πρότυπες ενεργειακές καλλιέργειες. Η βιομάζα αξιοποιείται με την καύση για την παραγωγή θερμότητας ή με την παραγωγή υγρών και αερίων καυσίμων (κύρια αιθανόλη, υδρογονάνθρακες, μεθάνιο, υδρογόνο, υδρόθειο και μονοξείδιο του άνθρακα). Στις ΗΠΑ κά-

ποιο είδος σόγιας χρησιμοποιείται στη παραγωγή βιοντίζελ, για την κίνηση γεωργικών μηχανημάτων, ενώ το 5% της παραγωγής του καλαμποκιού μετατρέπεται σε 3.8×10^9 λίτρα αιθανόλης, που προστίθεται στη βενζίνη για καθαρότερη καύση. Περίπου 2 εκατομμύρια αμερικανών θερμαίνονται με την καύση ξύλου. Σήμερα η βιομάζα καλύπτει το 3.2% των ενεργειακών αναγκών στις ΗΠΑ, κυρίως με τη χρήση της στην παραγωγή θερμότητας και χαρτοπολτού. Το μεγάλο ενδιαφέρον πολλών ηλεκτρικών εταιριών στη χρήση της βιομάζας οφείλεται στη δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης της σαν συμπληρωματικό καύσιμο στους ηλεκτρικούς σταθμούς, που χρησιμοποιούν γεωλογικά καύσιμα, με ταυτόχρονη ελάττωση των οξειδίων θείου και αζώτου (κυρίως με χρήση υπολειμμάτων ξύλου). Αλλά ισχυρά είναι και τα κοινωνικά κίνητρα των εταιριών, όταν με την επιλογή τους αυτή επιλύουν το πρόβλημα διάθεσης των απορριμμάτων των πελατών τους και διευκολύνουν την οικονομική ανάπτυξη της περιοχής (ιδίως με τη δυνατότητα ανάπτυξης ενεργειακών καλλιεργειών, αλλά και με την παραγωγή υποπροϊόντων, όπως είναι οι ζωοτροφές, ο χαρτοπολτός και η αιθανόλη).

1.14 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια των πετρωμάτων της γης και γενικά η εκμετάλλευσή της είναι αντισυμβατική. Υπάρχουν όμως περιοχές της γης (ονομαζόμενες γεωθερμικά πεδία), που εμφανίζεται επιφανειακά, υπό μορφή ζεστού νερού (60° - 100° C), υγρού ατμού (νερό με πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και θερμοκρασία μεγαλύτερη των 100° C) ή κεκορεσμένου ξηρού ατμού και μπορεί να αξιοποιηθεί σε βιομηχανίες, θερμοκήπια και θέρμανση κατοικιών. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η θερμική ενέργεια των πετρωμάτων της γης απορροφάται με τροφοδότηση αλμυρού νερού σε γεώτρηση βάθους 500-3000m και με άντλησή του από άλλη κοντινή γεώτρηση. Αν το γεωθερμικό πεδίο διαθέτει ξηρό ατμό, τροφοδοτείται απευθείας ένας ατμοστρόβιλος χαμηλής πίεσης, ενώ αν διαθέτει υγρό ατμό τροφοδοτείται ένας εναλλάκτης θερμότητας, που προσδίδει τη θερμότητα σε δευτερεύοντα υγρά εργασίας (π.χ. φρέον) για να κινήσουν το στρόβιλο. Παγκοσμίως, η εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρικών σταθμών, που χρησιμοποιούν γεωθερμική ενέργεια, είναι περίπου 500 MW, ενώ δυνατότητες υπάρχουν για επέκταση μόνο μέχρι 2000 MW. Το απολήψιμο γεωθερμοηλεκτρικό δυναμικό στη χώρα μας εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 200 και 300 MW και βρίσκεται κυρίως στις νήσους Μήλο, Νίσυρο, και Λέσβο, όπου η σύνθλιψη των λιθοσφαιρικών πλακών στην περιοχή του Αιγαίου δημιούργησε το ομώνυμο ηφαιστειακό τόξο. Η απόδοση αυτών των σταθμών είναι μικρότερη των σταθμών που χρησιμοποιούν γεωλογικά καύσιμα, αλλά το κόστος κατασκευής τους είναι μικρότερο και φυσικά το καύσιμο είναι δωρεάν.

1.15 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί οικονομικός τρόπος για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο, προκαλεί σημαντική οικονομική επιβάρυνση στη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων. Οι υδροαντλητικοί σταθμοί είναι ο πλέον διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, κατά τις νυχτερινές ώρες χαμηλού φορτίου και η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες μεγίστου φορτίου. Άλλες μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα σε υπόγεια σπήλαια ή η θέρμανση νερού και η αξιοποίησή της τις ώρες μεγίστου φορτίου έχουν περιορισμένη εφαρμογή.

Η σημερινή όμως μορφή των ηλεκτρικών φορτίων, που περιλαμβάνει αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής ή εργαλεία μηχανών, ρομπότ, ηλεκτρονικά ισχύος, προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές και τροφοδοσίες υπολογιστών, απαιτεί αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας παροχή ηλεκτρικής ισχύος. Οι απαιτήσεις αυτές, περιορισμένες κατά το παρελθόν λόγω των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρομηχανικών συσκευών και της μικρότερης αυτοματοποίησης της παραγωγής και χρήσης των συστημάτων πληροφορικής, σήμερα εμφανίζονται εντονότερες, λόγω και της εξελισσόμενης απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για την εξασφάλιση όμως της τροφοδοσίας ευαίσθητων φορτίων κατά τη διάρκεια μικρών διακοπών της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, αλλά και την εξάλειψη ποικίλων διαταραχών τάσης, απαραίτητη είναι η αποθήκευση, τοπικά, μικρών σχετικά ποσοτήτων ενέργειας και η ελεγχόμενη παροχή της στο φορτίο στη διάρκεια των διαταραχών. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με τις **συσκευές εξασφάλισης τροφοδοσίας πελατών**, γνωστές με τον Αγγλικό όρο **custom power**, προς τις οποίες έχει στραφεί το ερευνητικό ενδιαφέρον και έχουμε ένα αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτού του τύπου οι διαταραχές αποτελούν σήμερα ένα από τα μεγάλα προβλήματα λειτουργίας των σύγχρονων βιομηχανιών. Σε μια σφυγμομέτρηση, που έγινε στην Αγγλία μεταξύ καταναλωτών με φορτίο μεγαλύτερο του 1MW, ευρέθη ότι το 69% αντιμετώπισε προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας και εξ αυτών το 50% είχε διακοπή της παραγωγικής τους διαδικασίας μετά την εμφάνιση αυτών των προβλημάτων. Από καταγραφές, που έγιναν στις ΗΠΑ, προκύπτει ότι η πλειοψηφία των βυθίσεων τάσης, που οφείλονται στις διαταραχές του συστήματος, είναι μικρότερες του 40% της ονομαστικής τάσης και η διάρκειά τους είναι της τάξης των 160 msec. Για τη λειτουργία τους αυτές οι συσκευές αξιοποιούν την ενέργεια που αποθηκεύεται σε πυκνωτές, μπαταρίες, υπεραγωγίμα πηνία αλλά και σφονδύλους. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να κα-

λύπτει το φορτίο από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι μερικά λεπτά.

Μπαταρίες: Η αύξηση της σημασίας τους την τελευταία δεκαετία οφείλεται κυρίως στην επιβολή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου για περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά και την εξομάλυνση της τροφοδοσίας ισχύος από αιολικές και ηλιακές πηγές ενέργειας. Οι διαδεδομένες μπαταρίες μολύβδου-οξέος, αν και έχουν λογικό κόστος, έχουν μικρή πυκνότητα ενέργειας (15 Wh/Kg), ενώ στην εξελιγμένη τους μορφή έχουν πυκνότητα ενέργειας 35-40 Wh/Kg και κόστος 8.8-13.2 €/KWh. Για την τροφοδοσία ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχουν αναπτυχθεί μπαταρίες Νικελίου- υδρογονοούχου μετάλλου (NiMH) με 50-60 Wh/Kg και κόστος 26.4-35.2 €/KWh, μπαταρίες ιόντων Λιθίου με 80-90 Wh/Kg και Λιθίου με ηλεκτρολύτη πολυμερή με 100 Wh/Kg, αν και όλα αυτά τα νούμερα ανακοινώνονται από τους κατασκευαστές και θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή.

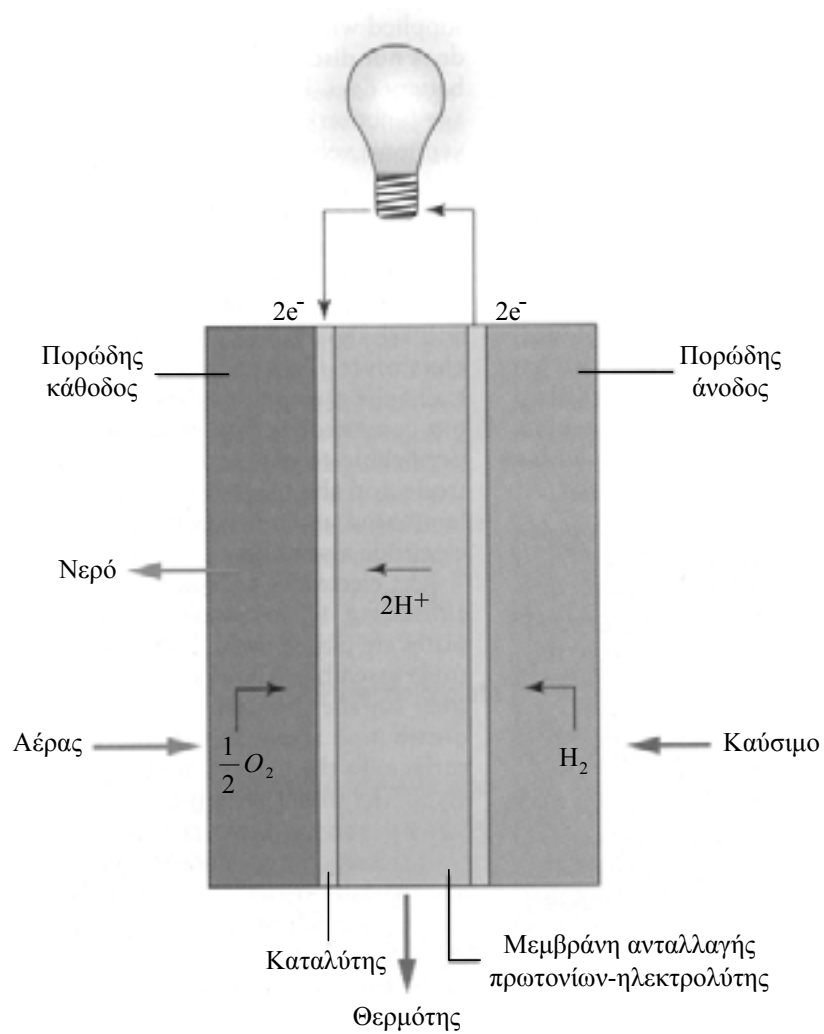
Υπεραγωγίμα πηνία: Μαγνητική ενέργεια αποθηκευμένη σε υπεραγωγίμα πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)) χρησιμοποιείται όταν χρειαζόμαστε μεγάλη ισχύ (της τάξης των MW) για μικρό χρονικό διάστημα της τάξης μερικών δευτερολέπτων (30 MJ υπεραγωγίμα πηνία διατίθενται στο εμπόριο). Η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα ηλεκτρομαγνήτη, που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγωγίμα υλικά. Για να διατηρηθεί σε υπεραγωγίμη κατάσταση το πηνίο εμβαπτίζεται σε υγρό ήλιο σε θερμοκρασία 4.2° K , που περιέχεται σε ένα κρυογενητικό δοχείο με μόνωση κενού (για συσκευές 30 MJ η επαγωγή του πηνίου είναι 2.6 H, το ονομαστικό ρεύμα 5 KA και το μέγιστο μαγνητικό πεδίο 3T). Η φόρτιση και η εκφόρτιση του υπεραγωγίμου πηνίου επιτυγχάνεται με ελεγχόμενους μετατροπείς ισχύος.

Σφόνδυλοι: Ταχέως περιστρεφόμενοι δίσκοι ή κύλινδροι χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση κινητικής ενέργειας, που μετατρέπεται εύκολα σε ηλεκτρική με τη σύζευξή τους σε μια γεννήτρια. Ο περιοριστικός παράγοντας για την αποθήκευση της ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα ήταν οι απώλειες στα έδρανα στήριξης του σφονδύλου. Πρόσφατα όμως, η ανάπτυξη της **υπεραγωγίμης έδρασης**, υπόσχεται να ελαττώσει την τριβή κατά δύο τάξεις μεγέθους, για αποθήκευση ενέργειας στη περιοχή των 10 KWh.

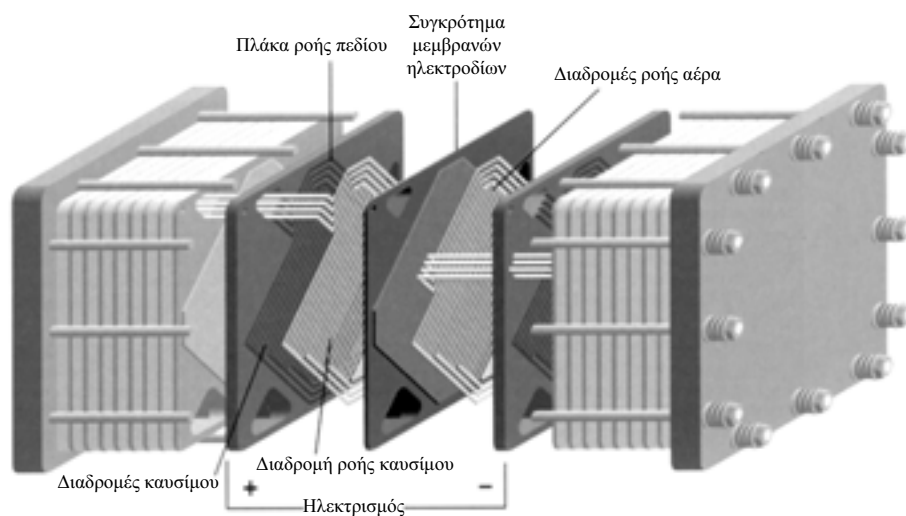
Στην απλούστερή της μορφή η **υπεραγωγίμη έδραση** αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη, αιωρούμενο σε μια σταθερή θέση πάνω από ένα υπεραγωγό. Οι υπεραγωγοί έχουν την ιδιότητα να αποκλείουν τη δίοδο της μαγνητι-

κής ροής από το εσωτερικό τους, δρώντας ως διαμαγνητικά υλικά. Αυτή η ιδιότητα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση βορείου πόλου όταν σε αυτόν πλησιάζουμε το βόρειο πόλο ενός μόνιμου μαγνήτη, γιατί στον υπεραγωγό εμφανίζονται ρεύματα με τέτοια φορά ώστε να αποκλείουν τη δίοδο της μαγνητικής ροής από το εσωτερικό τους. Έτσι αναπτύσσεται μια απωστική δύναμη μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του υπεραγωγού, που αυξάνει όσο μικραίνει η απόστασή τους. Αυτό δημιουργεί μια ευσταθή κατάσταση αιώρησης κατά τον κατακόρυφο άξονα, αν η διεύθυνση μαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη είναι κατακόρυφη. Για να επιτύχουμε και οριζόντια ευστάθεια, ο υπεραγωγός δημιουργεί κοιλότητα μέσα στην οποία εισέρχεται ο μόνιμος μαγνήτης, ώστε να περιβάλλεται από κατακόρυφα υπεραγωγίμα τοιχώματα. Κρυσταλλικές ανωμαλίες στον υπεραγωγό, δημιουργούν περιοχές που δεν έχουν την υπεραγώγιμη ιδιότητα και στις οποίες παγιδεύονται μαγνητικές γραμμές. Αυτή την ιδιότητα την εκμεταλλευόμαστε για την ανάπτυξη δυνάμεων συγκράτησης του μόνιμου μαγνήτη και του υπεραγωγού, γιατί οι μαγνητικές γραμμές δρουν σαν ελατήρια σύνδεσης μεταξύ τους. Όσο η κατανομή της μαγνητικής ροής δεν αλλάζει στον υπεραγωγό, η περιστροφή του μόνιμου μαγνήτη δεν συναντά αντίσταση. Όμως κατακόρυφες ή οριζόντιες μετακινήσεις του μαγνήτη προκαλούν ανακατανομή των μαγνητικών γραμμών και την εμφάνιση του φαινομένου της υστέρησης, που είναι υπεύθυνο για τις μικρές απώλειες της υπεραγώγιμης έδρασης.

Κύτταρα καυσίμου ή ενεργειακά κύτταρα (fuel cells): Η εμπορική τους ανάπτυξη άρχισε πρόσφατα με στόχο την αντικατάσταση των μηχανών εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων και την επικράτηση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Δεν είναι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, αλλά συσκευές ηλεκτροχημικής μετατροπής, που παράγουν ηλεκτρισμό απευθείας με οξείδωση υδρογόνου και απόδοση 40-60%. Κατάλληλα για εφαρμογή σε αυτοκίνητα είναι αυτά που χρησιμοποιούν μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (ΜΑΠ) και έχουν θερμοκρασία λειτουργίας 80°C. Αποτελούνται (Σχ.1.27) από δύο πόρωδη ηλεκτρόδια, που διαχωρίζονται από μια πολυμερή ΜΑΠ. Η μεμβράνη επιτρέπει τη δίοδο πρωτονίων υδρογόνου (H^+), αλλά εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων και αερίων. Το καύσιμο (υδρογόνο) ρέει κατά μήκος της επιφάνειας του ηλεκτροδίου ανόδου, ενώ το οξυγόνο ή ο αέρας ρέουν κατά μήκος του ηλεκτροδίου καθόδου, όπου παράγεται νερό και θερμότητα. Ο καταλύτης βοηθάει τη διάσπαση υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Το 1995, η Καναδική εταιρία Ballard Power Systems Inc. ανακοίνωσε την κατασκευή συστοιχίας κυττάρων καυσίμου ισχύος 30 KW (Σχ.1.28) με πυκνότητα ισχύος 1 KW/lit. Με τη σύνδεση του ηλεκτρικού φορτίου, που αποτελεί το δρόμο κυκλοφορίας των ηλεκτρονίων, αρχίζει η αντίδραση και λειτουργία του κυττάρου, που σταματά αμέσως με την αποσύνδεση του φορτίου.



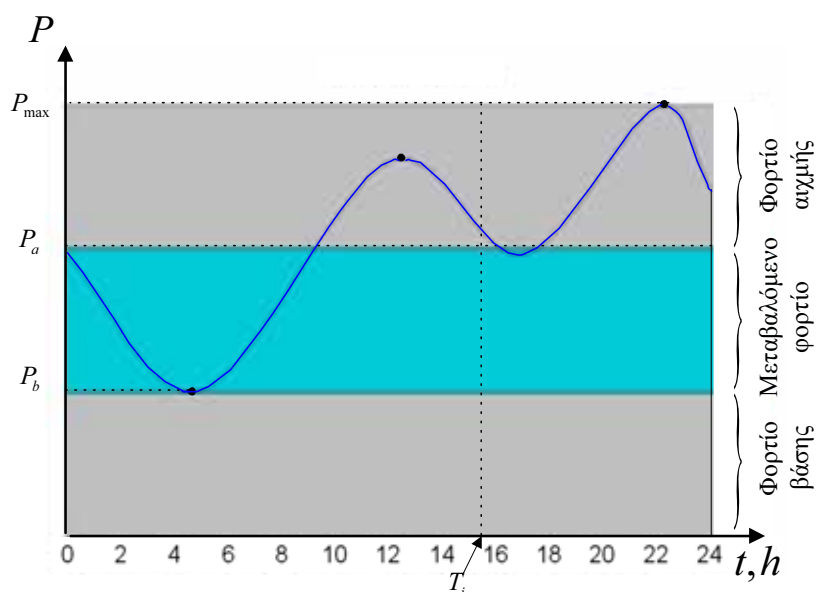
Σχ.1.27 Αρχή λειτουργίας κυττάρου καυσίμου με ΜΑΠ.



Σχ.1.28 Συστοιχία κυττάρων καυσίμου. Η μια πλευρά της πλάκας ηλεκτροδίου χρησιμεύει σαν άνοδος για το ένα κύτταρο, ενώ η άλλη σαν κάθοδος του διπλανού κυττάρου.

1.16 ΦΟΡΤΙΑ

Ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του φορτίου τους οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, δηλαδή τους βιομηχανικούς, τους οικιακούς, τους εμπορικούς και τους αγροτικούς καταναλωτές, με διαφορετικό τιμολόγιο χρέωσης ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε κατηγορία. Στην Ελλάδα έχει ηλεκτροδοτηθεί το 99.9% του πληθυσμού, με μέση ετήσια κατανάλωση ανά κάτοικο 3300 KWh το 1994, από 80 KWh που ήταν το 1950. Κάθε χρονική στιγμή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι ίση με το φορτίο και να υπάρχει επαρκής εφεδρεία για την κάλυψη των διαταραχών, επειδή δεν υπάρχει οικονομικά αποδεκτός τρόπος αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεγάλη δυσκολία στην εξασφάλιση αυτής της ισορροπίας είναι η συνεχής μεταβολή του φορτίου. Η γραφική παράσταση της ζητούμενης ισχύος (φορτίου), ως συνάρτηση του χρόνου, ονομάζεται καμπύλη φορτίου. Η ημερήσια καμπύλη φορτίου ενός συστήματος (Σχ. 1.29) αποτελείται από τρεις συνιστώσες: α) Μια σταθερή συνιστώσα, γνωστή ως φορτίο βάσης, που διαρκεί όλη μέρα και καλύπτεται από μονάδες παραγωγής, που παράγουν με μικρό κόστος την ηλεκτρική ενέργεια (στην Ελλάδα είναι οι λιγνιτικές μονάδες και ονομάζονται μονάδες βάσης). β) Μια μεταβαλλόμενη συνιστώσα της οποίας οι τιμές εξαρτώνται από το χρονικό διάστημα της ημέρας που αναφερόμαστε, από τις καιρικές συνθήκες, από την εποχή του έτους, ιδιαίτερες εκδηλώσεις της ημέρας, κ.λ.π. γ) Μια μικρή σχετικά συνιστώσα, που διαρκεί λίγο διάστημα της ημέρας, ονομάζεται φορτίο αιχμής και καλύπτεται από μονάδες παραγωγής με ταχεία ανάληψη φορτίου και μεγάλο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχ 1.29 Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου.

Αν τη χρονική περίοδο T μιας ημέρας, η καταναλωθείσα από το φορτίο ενέργεια είναι E (ίση με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του Σχ. 1.29), ορίζουμε τα εξής μεγέθη:

$$\begin{aligned}
 \text{Ελάχιστο φορτίο βάσης} & : P_b \\
 \text{Αιχμή φορτίου} & : P_{\max} \\
 \text{Μέσο φορτίο} & : P_a = \frac{E}{T} \\
 \text{Ιδεατή διάρκεια φορτίου} & : T_i = \frac{E}{P_{\max}} \\
 \text{Συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου} & : m_u = \frac{P_b}{P_{\max}} \\
 \text{Συντελεστής φορτίου} & : m = \frac{E}{P_{\max} T} = \frac{P_a}{P_{\max}} = \frac{T_i}{T}
 \end{aligned}$$

Επιθυμητό είναι ο συντελεστής φορτίου να είναι μεγάλος, οπότε βελτιώνεται ο βαθμός εκμετάλλευσης των μονάδων παραγωγής και μειώνεται το κόστος της KWh. Για τη βελτίωσή του παρέχονται τιμολογιακά κίνητρα στους καταναλωτές (όπως το οικιακό νυκτερινό τιμολόγιο, με σκοπό τη μετακίνηση φορτίων από τις ώρες αιχμής στις ώρες ελαχίστου φορτίου). Ανά κατηγορία φορτίου έχουμε διαφορετικούς συντελεστές φορτίου, π.χ. για καθαρό φορτίο φωτισμού είναι περίπου 12%, για βιομηχανικό φορτίο ξεπερνά το 90%. Στην Ελλάδα μια ενδεικτική τιμή του συντελεστή φορτίου είναι 70%.

Για περισσότερα του ενός διαφορετικά φορτία ορίζουμε το **συντελεστή ετεροχρονισμού**, που είναι ο λόγος του αθροίσματος των αιχμών των διαφόρων φορτίων προς την αιχμή του συνολικού φορτίου. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τον ετεροχρονισμό εμφάνισης των μεγίστων των φορτίων και όσο μεγαλύτερος είναι της μονάδας, τόσο πιο εξομαλυσμένο είναι το συνολικό φορτίο και μικρότερη η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής.

Επειδή η μελέτη και κατασκευή των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μια χρονική διάρκεια από τέσσερα έως οκτώ χρόνια, η μακροχρόνια πρόβλεψη της απαίτησης του φορτίου σε ενέργεια και ισχύ είναι κρίσιμη. Ενώ υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολύπλοκες πιθανοθεωρητικές μέθοδοι [10] για την πρόβλεψη των φορτίων, η απλή μέθοδος **επέκτασης** βασισμένη στα φορτία προηγούμενων ετών και διορθωμένη με κάποιους συντελεστές, όπως είναι η οικονομική ανάπτυξη, μεγάλα νέα φορτία και καιρικές

προβλέψεις, είναι επαρκής για τη μακροχρόνια πρόβλεψη του φορτίου. Επειδή οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν πολύ περισσότερο το οικιακό φορτίο απ' ό,τι το βιομηχανικό, ίσως είναι καλύτερα να γίνεται πρόβλεψη ανά κατηγορία φορτίου και κατόπιν να υπολογίζεται το συνολικό φορτίο.

1.17 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι σταθμοί παραγωγής, οι γραμμές μεταφοράς και το σύστημα διανομής είναι οι κύριες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σταθμοί παραγωγής και το σύστημα διανομής συνδέονται με γραμμές μεταφοράς, οι οποίες συνδέουν μεταξύ τους και διαφορετικά ηλεκτρικά συστήματα. Με τη λέξη μεταφορά εννοούμε τη διακίνηση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές υψηλής τάσης. Το σύστημα διανομής συνδέει όλα τα φορτία με τις γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιώντας χαμηλή τάση. Για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους, μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα οργανώνονται σε μορφή ηλεκτρικά συνδεδεμένων περιοχών, που συνδέονται μεταξύ τους και αποτελούν το εθνικό δίκτυο.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος αποτελείται από το διασυνδεδεμένο σύστημα της ηπειρωτικής χώρας και τα ανεξάρτητα συστήματα της Κρήτης, Ρόδου και των υπόλοιπων μικρότερων νησιών. Η τάση εξόδου των γεννητριών είναι από 11 – 25 KV και αυξάνεται στην τάση μεταφοράς με τους μετασχηματιστές. Στην Ελλάδα για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται τάση 400 KV (περιλαμβάνει εναέριες γραμμές μήκους 1937 Km), 150 KV (περιλαμβάνει εναέριες γραμμές μήκους 7697 Km, καλώδια 24.5 Km και υποβρύχια καλώδια 85 Km) και 66 KV (με εναέριες γραμμές 230 Km), που χρησιμοποιείται στα ανεξάρτητα ηλεκτρικά συστήματα των νησιών. Επιπλέον το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί και 23 μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές και διασυνδέει το Ελληνικό δίκτυο με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά συστήματα της πρώην Γιουγκοσλαβίας, Βουλγαρίας και Αλβανίας με γραμμές 400 KV και 150 KV. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει γραμμές μέσης τάσης, κυρίως στα 20 KV και 15 KV και ένα μικρό αριθμό γραμμών στα 22 KV και 6.6 KV στην περιοχή της Αττικής και χαμηλής τάσης 380/220 V. Η διανομή τροφοδοτεί περίπου 6.000.000 καταναλωτές με γραμμές μήκους περίπου 170.000 Km.

1.18 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Για την επίλυση των ποικίλων προβλημάτων, που σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ΕΡ

και ΣΕ αναλυτές δικτύων, που αναπτύχθηκαν το 1930. ΕΡ αναλυτές χρησιμοποιήθηκαν για μελέτες ροής φορτίου και μεταβατικής ευστάθειας, ενώ ΣΡ αναλυτές για μελέτες βραχυκυκλωμάτων. Οι αναλογικοί υπολογιστές αναπτύχθηκαν το 1940 και σε συνεργασία με τους αναλυτές ΕΡ χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ΣΗΕ. Το 1950 αναπτύχθηκαν αναλογικές συσκευές για τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της συχνότητας και της ροής ισχύος σε διασυνδετικές γραμμές.

Το 1950 αρχίζει η ανάπτυξη των ψηφιακών υπολογιστών με τους οποίους επιλύθηκε το πρώτο πρόβλημα μελέτης ροής φορτίου το 1956. Οι μελέτες ΣΗΕ με υπολογιστή παρέχουν μεγάλη ευελιξία, ακρίβεια, ταχύτητα και οικονομία. Μέχρι το 1970 είχε ολοκληρωθεί η χρήση των υπολογιστών στην επίλυση του συνόλου των προβλημάτων των ΣΗΕ. Έκτοτε, η αύξηση των δυνατοτήτων των προσωπικών υπολογιστών έκανε δυνατή τη χρήση τους για την ανάλυση των ΣΗΕ και σήμερα όλων των τύπων υπολογιστές χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ΣΗΕ και στην επίλυση προβλημάτων για εφαρμογές σε πραγματικό ή όχι πραγματικό χρόνο.

Εκτός πραγματικού χρόνου εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διερεύνηση και εκτίμηση της απόκρισης των ΣΗΕ και επεξεργασία δεδομένων. Εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο περιλαμβάνουν συλλογή και επεξεργασία δεδομένων για την εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος, έλεγχο συχνότητας και ισχύος στις γραμμές διασύνδεσης και επίτευξη οικονομικής λειτουργίας των ΣΗΕ. Αυτές οι λειτουργίες επιτυγχάνονται μέσω των Κέντρων Κατανομής Φορτίου ή Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας, ενώ τοπικοί επεξεργαστές αναλαμβάνουν τον έλεγχο ρύθμισης της παραγωγής ή τον έλεγχο της διαδικασίας εκκίνησης γεννητριών ή και ψυχρής εκκίνησης των ατμοηλεκτρικών σταθμών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. P. Wood, P. Pityk and F. Johnson, “Design philosophy for a 3.5 MW DC to AC converter in the CDIF MHD test Facility”, IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No 5, May 1981, pp. 2524-2528.
2. H.B. Püttgen, et. al., “Realization of Alternative Energy Generation and Storage”, IEEE Power Engineering Review, May 1998, pp 5-18.
3. “Technologies for Tomorrow”, IEEE Power Engineering Review, September 1998, pp 5-8.
4. J.R. Hull, “Flywheels on a roll”, IEEE Spectrum, July 1997, pp 20-25.
5. H.J. Boenig and J.F Hauer, “Commissioning tests of the Bonneville Power

- Administration 30 MJ superconducting magnetic energy storage unit”, IEEE Trans. on PAS, vol. 104, No 2, February 1985, pp. 302-312.
6. T. Gilchrist, “Fuel cells to the fore”, IEEE Spectrum, November 1998, pp 35-40
 7. T. Moore, “Harvesting the benefits of biomass”, EPRI Journal, May/June 1996, Vol 21, No 3, pp 16- 25.
 8. B.M. Weedy, “Electric Power System”, J. Wiley and Sons, Third Edition 1979.
 9. I.J. Nagrath and D.P. Kothari, “Modern Power System Analysis”, Tata Mc Graw-Hill, New Delhi, Second Edition 1989.
 10. M.S. Sachdev, et. al., “Representative Bibliography on Load Forecasting”, IEEE Trans. on PAS, Vol 96, No 2, March/April 1977, pp. 697-700.