

Δ. Λαμπρίδης • Π. Νικοκόπουλος • Γ. Παπαγιάννης

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τόμος **Α'**



ISBN set 960-456-019-0

ISBN T.A' 960-456-020-4

© Copyright: Δ. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Γ. Παπαγιάννης,
Εκδόσεις Ζήτη, Αύγουστος 2006, Θεσσαλονίκη

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



**Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση**

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

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

Τηλ.: 23920 72.222 (10 γραμ.) - Fax: 23920 72.229

e-mail: info@ziti.gr

Βιβλιοπωλείο

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 2310 203.720, Fax 2310 211.305

e-mail: sales@ziti.gr

www.ziti.gr

Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό αποτελεί τον πρώτο τόμο ενός δίτομου εισαγωγικού έργου στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και έχει γραφεί για να καλύψει τις απαιτήσεις προπτυχιακών μαθημάτων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ.

Η νέα αυτή έκδοση αποτελεί ριζική αναθεώρηση και επέκταση προηγούμενης έκδοσης με τίτλο “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Τόμος 1 και 2, του κ. Π. Ντοκόπουλου.

Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο εκδόσεων συνίστανται στα εξής:

- έχουν προστεθεί αρκετά νέα κεφάλαια,
- έχουν ληφθεί υπόψη οι νέες συνθήκες της απελευθερωμένης αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας,
- έχει ληφθεί υπόψη η διείσδυση τη διανεμημένης παραγωγής στα συμβατικά ΣΗΕ,
- έχει γίνει επικαιροποίηση στοιχείων, προδιαγραφών και βιβλιογραφίας, και
- έχουν ληφθεί υπόψη οι νέες διεθνείς συνθήκες (Κιότο, Στοκχόλμης) στο βαθμό που επηρεάζουν τη λειτουργία και τα κατασκευαστικά στοιχεία ενός ΣΗΕ.

Η παρουσίαση των αντικειμένων του κάθε κεφαλαίου ακολουθεί μια συγκεκριμένη κλιμάκωση, έτσι ώστε το βιβλίο να είναι μια χρήσιμη αναφορά και για τον επαγγελματία Ηλεκτρολόγο Μηχανικό.

Στο τέλος του βιβλίου παρατίθεται μια εκτενής βιβλιογραφία, την οποία μπορεί να συμβουλευτεί ο αναγνώστης που θέλει να εμβαθύνει περισσότερο.

Στη συγγραφή του βιβλίου αυτού οι συγγραφείς προσπάθησαν να εκμεταλλευτούν την πολυετή διδακτική και ερευνητική τους εμπειρία, αλλά παράλληλα βρήκαν σημαντική βοήθεια από πολλούς. Ιδιαίτερη όμως ονομαστική αναφορά

πρέπει να γίνει στους συναδέλφους, φίλους και συνεργάτες κ.κ. Μ. Αλεξιάδη, Γ. Ανδρέου, Χ. Δημουλιά, Π. Μικρόπουλο, Α. Μπακιρτζή, Α. Νταγκούμα, Α. Μαρινόπουλο, Ι. Μπαξεβάνο, Θ. Παπαδόπουλο, Ι. Παπαϊωάννου, και Δ. Τσιαμήτρο.

Την έκδοση του παρόντος ανέλαβε ο οίκος "Εκδόσεις Ζήτη". Μεγάλη συμβολή για την τελική εμφάνιση του βιβλίου είχε ο κ. Ν. Ζήτης και η κ. Άννα Παναγοπούλου, τους οποίους οι συγγραφείς επίσης ευχαριστούν.

Θεσσαλονίκη, 2006

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1	Ιστορική εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	11
1.2	Συγκρότηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
1.3	Ορισμοί, Συμβολισμοί, Συμβάσεις	20
1.3.1	Ονομαστική τάση	20
1.3.2	Δίκτυα, συχνότητα	21
1.3.3	Συμβολισμοί μεγεθών	21
1.3.4	Παράσταση ημιτονοειδών μεγεθών με φασικά διανύσματα (phasors) και μιγαδικούς αριθμούς.....	22
1.3.5	Τάσεις σε τριφασικά συστήματα με ουδέτερο.....	23
1.3.6	Φάση αναφοράς.....	23
1.3.7	Μονάδες φυσικών μεγεθών	24
1.3.8	Συμβολισμοί μεγεθών	24
1.4	Φορές Αναφοράς Τάσεων, Ρευμάτων, Ισχύος.....	24

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία Υπολογισμών Κυκλωμάτων

2.1	Παράσταση Ημιτονοειδών Μεγεθών με Φασικά Διανύσματα.....	31
2.1.1	Φασικά διανύσματα	31
2.1.2	Μετασχηματισμός διαφορικών εξισώσεων κυκλωμάτων. Σύνθετες αντιστάσεις.....	34
2.2	Τριφασικά Συστήματα και Συμμετρικές Συνιστώσες.....	38
2.3	Ανάλυση Κυκλωμάτων με Συμμετρικές Συνιστώσες.....	50
2.4	Μετρήσεις των Συμμετρικών Συνιστωσών της Τάσης και της Έντασης ...	55
2.4.1	Μέτρηση της ομοπολικής συνιστώσας	55

2.4.2	Μέτρηση της ορθής και αντίστροφης συνιστώσας	57
2.5	Σύνθετες Αντιστάσεις Δικτύων και Μετρήσεις τους στις Συμμετρικές Συνιστώσες	58
2.5.1	Ισοδύναμο Thevenin	58
2.5.2	Σύνθετες αντιστάσεις γραμμών μεταφοράς στις συμμετρικές συνιστώσες	60
2.6	Υπολογισμός Ασύμμετρης Λειτουργίας και Σφαλμάτων με Συμμετρικές Συνιστώσες	63
2.7	Ο Υπολογισμός Ισχύος	77
2.7.1	Μονοφασικά συστήματα	77
2.7.2	Η ισχύς τριφασικών συστημάτων	86
2.8	Το ανηγμένο ή ανά μονάδα σύστημα (per-unit system)	91
2.8.1	Γενικά	91
2.8.2	Παραδείγματα μετατροπής στο σύστημα per unit	91
2.8.3	Τριφασικά δίκτυα	93
2.8.4	Μετασχηματιστές	94
2.8.5	Αλλαγή βάσεων	95

Κεφάλαιο 3

Οικονομική Διάθεση Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1	Χαρακτηριστικά της Κατανάλωσης και της Παραγωγής	107
3.1.1	Χαρακτηριστικά της κατανάλωσης	107
3.1.2	Χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων παραγωγής-μεταφοράς	113
3.2	Κόστος της Ηλεκτρικής Ενέργειας	114
3.3	Οικονομική αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων	116
3.4	Υπολογισμός του Ετήσιου Κόστους Ισχύος	121
3.5	Κόστος Ενέργειας	123
3.6	Αξιολόγηση Απωλειών	125
3.7	Τιμολόγηση Ηλεκτρικής Ενέργειας	129

Κεφάλαιο 4

Το Ελληνικό Ηλεκτρικό Σύστημα

4.1	Οι Επιχειρήσεις Ηλεκτρισμού στην Ελλάδα	137
4.2	Η Σύνθεση της Παραγωγής	140

4.3	Δίκτυα Μεταφοράς και Διασυνδέσεις	146
4.4	Κατανάλωση	148
4.5	Η απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.....	150
4.5.1	Γενικά	150
4.5.2	Το σημερινό θεσμικό πλαίσιο. Τα αίτια των αλλαγών	151
4.5.3	Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα	152
4.5.4	Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας	153
4.5.5	Δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	153
4.5.6	Δυνατότητα προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας.....	155
4.5.7	Διαχείριση και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας	155
4.5.8	Προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες	157
4.5.9	Το χρηματιστήριο ενέργειας.....	158
4.5.10	Σύστημα συναλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας και σύμβαση συναλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας	159
4.5.11	Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (HEΠ)	160
4.5.12	Παρατηρήσεις από τη λειτουργία της απελευθερωμένης αγοράς ΗΕ στην Ελλάδα.....	164

Κεφάλαιο 5

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος

5.1	Γενικά για την Παραγωγή και ιδιαίτερα στο Ελληνικό Σύστημα	169
5.2	Συγκρότηση Ατμοηλεκτρικών Σταθμών	175
5.2.1	Ο κύκλος του ατμού.....	177
5.2.2	Κύκλωμα γεννήτριας	181
5.3	Αεριοστροβιλικόι Σταθμοί	181
5.4	Ο ατμοστρόβιλος.....	184
5.5	Θερμικές Διεργασίες και Ροή Ισχύος σε Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς.....	187
5.5.1	Γενικά, ορισμοί από την θερμοδυναμική	187
5.5.2	Το τεχνικό έργο	190
5.5.3	Ο ατμός και ο θερμοδυναμικός του κύκλος	191
5.5.4	Βελτίωση του βαθμού απόδοσης.....	197
5.5.5	Ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ενός ΑΗΣ	204
5.6	Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	212
5.6.1	Γενικά	212
5.6.2	Υδροστρόβιλοι.....	218
5.6.3	Συγκρότηση υδροηλεκτρικών σταθμών	230
5.7	Τροφοδότηση των Σταθμών Παραγωγής, Ιδιοκατανάλωση	235
5.8	Ρύθμιση και Έλεγχος Ισχύος και Στροφών σε Σταθμούς Παραγωγής.....	243

5.8.1	Οι ρυθμίσεις στο θερμικό μέρος ενός ΑΗΣ	245
5.8.2	Αυτόματος έλεγχος ισχύος και συχνότητας του ζεύγους στροβίλου-γεννήτριας	249
5.8.3	Ρυθμίσεις σε σφάλματα	254
5.8.4	Έλεγχος της ανταλλαγής ισχύος μεταξύ δικτύων	255
5.9	Ρύπανση του Περιβάλλοντος από τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	263
5.10	Το πρωτόκολλο του Κιότο	266
5.10.1	Η εξέλιξη του Πρωτοκόλλου	267
5.10.2	Ευρωπαϊκή Ένωση και Ελληνική πραγματικότητα	271
5.10.3	Το Εθνικό Πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010	272
5.10.4	Το Πρωτόκολλο του Κιότο: είναι αρκετό;	273
5.11	Διανεμημένη παραγωγή	274
5.11.1	Οι τεχνολογίες των συστημάτων διανεμημένης παραγωγής	277

Κεφάλαιο 6

Γεννήτριες στο Δίκτυο

6.1	Γενικά περί Γεννητριών Ισχύος	287
6.2	Το Πεδίο των Ρευμάτων του Στάτη	294
6.3	Το Πεδίο του Δρομέα και του Διακένου	305
6.4	Συμπεριφορά Γεννητριών στην Ισοζυγισμένη Λειτουργία	307
6.5	Επίδραση μη Ημιτονοειδών Τυλιγμάτων	308
6.6	Συμπεριφορά Γεννητριών στην Ασύμμετρη Φόρτιση	313
6.7	Τάση και Ισχύς Στροβιλογεννητριών στη Στάσιμη Κατάσταση Λειτουργίας	315
6.8	Σχέσεις και Ισοζύγιο Μηχανικής και Ηλεκτρικής Ισχύος	321
6.9	Ευστάθεια, Συγχρονισμός	324
6.10	Διάγραμμα Λειτουργίας και Όρια των Γεννητριών	328
6.11	Γεννήτριες Εκτύπων Πόλων	340
6.11.1	Το πεδίο των γεννητριών εκτύπων πόλων	340
6.11.2	Η εξίσωση τάσεων στις γεννήτριες εκτύπων πόλων	344
6.11.3	Ισχύς γεννητριών εκτύπων πόλων	346
6.12	Μεταβατική Συμπεριφορά των Γεννητριών	352
6.13	Διέγερση των Σύγχρονων Γεννητριών	360
6.13.1	Διέγερση με διόδους και τριφασική γεννήτρια	361
6.13.2	Διέγερση με θυρίστορες	363

6.14	Ρύθμιση και Έλεγχος της Τάσης στις Σύγχρονες Γεννήτριες	364
6.14.1	Γενικά, σκοπός του ελέγχου της τάσης.....	364
6.14.2	Έλεγχος τάσης-άεργης ισχύος σύγχρονου πυκνωτή.....	365
6.15	Χαρακτηριστικά Μεγέθη μιας Γεννήτριας	373
6.15.1	Καμπύλες κενού και βραχυκύκλωσης, κορεσμός	373
6.15.2	Σύγχρονη αντίδραση και λόγος βραχυκύκλωσης	375
6.15.3	Λειτουργικές χαρακτηριστικές στάσιμης κατάστασης	377
6.16	Παραλληλισμός Γεννητριών με το Δίκτυο	379
6.17	Ισοζύγιο Ισχύος στις Γεννήτριες, Απώλειες	381

Κεφάλαιο 7

Μετασηματιστές στο Δίκτυο

7.1	Στοιχεία της Θεωρίας Μετασηματιστών	385
7.1.1	Γενικά	385
7.1.2	Μορφή των τριφασικών μετασηματιστών	388
7.1.3	Τα ισοδύναμα κυκλώματα ενός μετασηματιστή.....	391
7.1.4	Το ισοδύναμο κύκλωμα μετασηματιστών ισχύος.....	396
7.1.5	Επίδραση της τάσης και της συχνότητας στους μετασηματιστές.....	397
7.2	Προσδιορισμός των Σύνθετων Αντιστάσεων ενός Μετασηματιστή.....	399
7.2.1	Δοκιμή μετασηματιστή εν κενώ	399
7.2.2	Δοκιμή βραχυκύκλωσης μετασηματιστή	402
7.3	Μεταβολή της Τάσης κατά την Φόρτιση Μετασηματιστών	406
7.4	Είδη Μετασηματιστών, Μετασηματιστές Ισχύος και Μετρήσεων.....	411
7.4.1	Μετασηματιστές ισχύος	412
7.4.2	Μετασηματιστές τάσης	413
7.4.3	Μετασηματιστές ρεύματος	416
7.5	Οι Συνδεσμολογίες των Τριφασικών Μετασηματιστών	419
7.5.1	Παραδείγματα συνδεσμολογιών τριφασικών ΜΣ.....	425
7.5.2	Η σημασία των συνδέσεων τριγώνου, ζιγκ-ζαγκ και αστέρα στην λειτουργία με ομοπολική συνιστώσα τάσης	428
7.6	Υπολογισμός Κυκλωμάτων με Τριφασικούς Μετασηματιστές.....	435
7.7	Μετασηματιστές τριών Τυλιγμάτων	451
7.8	Αυτομετασηματιστές	458
7.9	Μετασηματιστές για Ειδική Χρήση	463
7.9.1	Μετασηματιστές ρύθμισης της διαμήκους και εγκάρσιας τάσης των δικτύων	463

7.9.2	Μετασχηματιστές πολλαπλασιασμού και υποπολλαπλασιασμού των φάσεων	466
7.10	Παράλληλη Ζεύξη Μετασχηματιστών.....	469
7.11	Αλλαγή της Τάσης σε Μετασχηματιστές	472
7.12	Απώλειες Ισχύος σε Μετασχηματιστές.....	474
7.13	Κατασκευαστικές Απόψεις επί των Μετασχηματιστών	479
7.13.1	Χαλκός και Σίδηρος	479
7.13.2	Ψύξη των μετασχηματιστών.....	480
7.13.3	Υλικά Μόνωσης και Κατασκευή των Μετασχηματιστών.....	482
7.13.4	Αντοχή των μετασχηματιστών σε υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα, δοκιμές	485

Παράρτημα

Πίνακες

.....	489
-------	-----

Βιβλιογραφία	507
--------------------	-----

1

Εισαγωγή

Με τον όρο *σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)* ή σύστημα ηλεκτρικής ισχύος χαρακτηρίζεται ένα σύνολο εξοπλισμού, που αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός του συστήματος είναι η τροφοδότηση ηλεκτρικών καταναλωτών με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια αξιόπιστα, με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά και με χαμηλό κόστος.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν σήμερα αποκλειστικά με εναλλασσόμενες τριφασικές τάσεις και με συχνότητες 50 Hz ή 60 Hz. Η ιδιότητα των εναλλασσόμενων τάσεων να ανυψώνονται ή να υποβιβάζονται με τους μετασχηματιστές, επιτρέπει την επιλογή του βέλτιστου επιπέδου τάσης σε κάθε επιμέρους τμήμα ενός ΣΗΕ. Έτσι οι γεννήτριες στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν σε τάσεις 10-30 kV, οι καταναλωτές στα 400 V και η μεταφορά από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης γίνεται με πολύ υψηλές τάσεις 110 kV έως και 735 kV, ελαχιστοποιώντας έτσι το ρεύμα και τις απώλειες μεταφοράς.

1.1 Ιστορική εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Το αν από απλή σύμπτωση ή συστηματική παρατήρηση οδηγήθηκε ο Θαλής ο Μιλήσιος στην ανακάλυψη του ηλεκτροστατικού πεδίου, είναι άγνωστο. Εκείνο που έχει σημασία είναι, ότι αυτός πρώτος τον 7^ο π.Χ. αιώνα αναφέρθηκε στην ιδιότητα που έχει το ήλεκτρο (ορυκτή ρητίνη, κοινώς κεχριμπάρι) να έλκει ελαφρά σώματα εάν προηγουμένως τριφτεί πάνω σε στεγνό μάλλινο ύφασμα.

Σχεδόν 23 αιώνες αργότερα ασχολείται κάποιος ξανά με τα φαινόμενα αυτά

και ονομάζει το σχετικό φαινόμενο *ηλεκτρισμό*. Πρόκειται για τον Άγγλο πρακτικό γιατρό William Gilbert (1600 μ.Χ). Το 1660 ο γνωστός και ως ‘Δήμαρχος του Μαγδεμβούργου’ Otto von Guericke κατασκεύασε την πρώτη ηλεκτροστατική μηχανή. Στα χρόνια που ακολουθούν, κατά τους 18^ο και 19^ο αιώνα, η μια ανακάλυψη διαδέχεται την άλλη, διατυπώνονται οι πρώτοι νόμοι του ηλεκτρισμού και κατασκευάζονται οι πρώτες ηλεκτρικές μηχανές.

Ο Benjamin Franklin (1706-1790), χαρακτήρισε τα ηλεκτρικά φορτία που εμφανίζονται πάνω στο γυαλί θετικά και εκείνα που εμφανίζονται επάνω στον εβονίτη αρνητικά. Ο ίδιος εφευρίσκει και το αλεξικέραυνο. Οι εργασίες του B. Franklin εμπνέουν τους νεώτερους Michael Faraday, Luigi Galvani, Alessandro Volta, Andre-Marie Ampere και Georg Simon Ohm να διατυπώσουν τους βασικούς νόμους που διέπουν φαινόμενα που σχετίζονται με τον ηλεκτρισμό. Ο James Clerk Maxwell (1833-1879) διατύπωσε τους ομώνυμους νόμους, εκφράζοντας τις σχέσεις ανάμεσα στα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη. Η μαθηματική έκφραση των σχέσεων αυτών, οι γνωστές εξισώσεις του Maxwell, αποτελούν τη θεωρητική βάση όλων των ενεργειακών συστημάτων που στηρίζονται στις ιδιότητες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Παράλληλα με τους πρωτοπόρους της θεωρητικής έρευνας, εμφανίζονται και οι πρώτες πειραματικές διατάξεις που έχουν στόχο την αξιοποίηση της νέας αυτής μορφής ενέργειας. Έτσι το 1866 προτείνεται από τον Werner von Siemens η πρώτη στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή. Την ίδια εποχή ο Heinrich Göbel κατορθώνει μετά από πολλά πειράματα να κατασκευάσει την πρώτη λυχνία για ηλεκτρικό φωτισμό. Οι Willis Whitnew και Thomas Edison βελτιώνουν στη συνέχεια την κατασκευή αυτή, αντικαθιστώντας το μεταλλικό νήμα με νήμα από βολφράμιο και αυξάνοντας τη φωτεινή απόδοση της ηλεκτρικής λυχνίας.

Γύρω στα 1878-1884 ο εμπορικός και ιδιωτικός τομέας αρχίζουν να ενδιαφέρονται για την ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλεκτρικό φως πλημμυρίζει τις πλατείες και αποτελεί πλέον μέσο διαφήμισης και ένδειξη πολυτέλειας. Οι πρώτες αξιόλογες εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται ταυτόχρονα στη Νέα Υόρκη, στην Pearl Street και στο Λονδίνο το 1882. Είναι εγκαταστάσεις φωτισμού 60 kW με συνεχές ρεύμα τάσης 110 V. Το 1889 στο Βερολίνο εγκαταστάθηκαν 702 kW με συνεχή τάση 100 V. Το 1887 ο N. Tesla κατοχυρώνει 7 διπλώματα ευρεσιτεχνίας για εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος. Η κινητήρια δύναμη των πρώτων εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ατμομηχανές, οι γεννήτριες είναι συνεχούς ρεύματος, η τάση στην έξοδό τους είναι της τάξης των 100 V και οι ελάχιστοι καταναλωτές μένουν σε μικρή απόσταση από

το εργοστάσιο παραγωγής. Στους καταναλωτές δεν τοποθετούνται μετρητές κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις ΗΠΑ δημιουργούνται οι πρώτες εταιρείες παραγωγής και εκμετάλλευσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την τελευταία δεκαετία του 19^{ου} αιώνα και ταχύτατα συνεργάζονται με τις αντίστοιχες της Ευρώπης, ξεκινώντας με γοργούς ρυθμούς τον εξηλεκτισμό του Δυτικού Κόσμου.

Ο ηλεκτρισμός αλλάζει σταδιακά την όψη της καθημερινής ζωής των ανθρώπων καθώς φέρνει την επανάσταση στην παραγωγή αγαθών, στις μεταφορές, στις επικοινωνίες και στην οργάνωση της οικιακής ζωής. Η προώθηση των εφαρμογών του στο χώρο της επιστήμης και της τεχνολογίας, με θαυμαστά αποτελέσματα, θα τον καταστήσουν πρωταρχική προϋπόθεση του σύγχρονου πολιτισμού.

Η διαμάχη για τη χρήση συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης έληξε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς η μορφή αυτή επέτρεπε τη χρήση μετασχηματιστών. Η εφαρμογή των μετασχηματιστών επέτρεψε τη χρήση υψηλότερων τάσεων και την οικονομική μεταφορά της νέας ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Το 1885 η τάση μεταφοράς ήταν της τάξης των 200 V και η απόσταση μεταφοράς περιοριζόταν σε μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η πρώτη τριφασική εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας έγινε το 1891 στο Lauffen της Γερμανίας. Η γεννήτρια ήταν μια υδροηλεκτρική μονάδα 138 kW, η ισχύς μεταφέρονταν με τάση 25 kV στη Φρανκφούρτη σε απόσταση 175 km. Την ίδια περίοδο (1890) εμφανίζονται και οι πρώτες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στην Ελλάδα.

Το 1924 στο San Francisco των ΗΠΑ η χρησιμοποιούμενη τάση έχει φτάσει στα 220 kV και η απόσταση μεταφοράς στα 100 km. Παράλληλα αναπτύσσεται η τεχνολογία και επεκτείνεται η εφαρμογή ατμοστροβίλων, υδροστροβίλων, γεννητριών και συστημάτων μετασχηματισμού τάσης.

Μετά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο η ανάπτυξη εκτεταμένων και αξιόπιστων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε απαραίτητο έργο υποδομής. Σήμερα κατασκευάζονται μονάδες παραγωγής μεγάλης ισχύος με στόχο την ελάττωση του κόστους της παραγόμενης kWh. Η ενέργεια αυτή για να μεταφερθεί στα κέντρα κατανάλωσης απαιτεί υψηλές τάσεις μεταφοράς. Παράλληλα λόγοι οικονομικής λειτουργίας αλλά και ασφάλειας επιβάλλουν τη διασύνδεση των δικτύων. Έτσι όλες σχεδόν οι χώρες της Ευρώπης είναι σήμερα διασυνδεδεμένες ηλεκτρικά, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία των εγκαταστάσεων και δίνει την δυνατότητα ανταλλαγών και αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην Ελλάδα, η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ιδρύεται το

1889 στην Αθήνα από τη Γενική Εταιρεία Εργοληψιών. Τα ανάκτορα είναι το πρώτο κτίριο που θα ηλεκτροφωτισθεί.

Δέκα χρόνια αργότερα κάνει την εμφάνισή της η αμερικανική πολυεθνική εταιρεία Thomson-Houston, η οποία θα εξαγοράσει τη Γενική Εταιρεία Εργοληψιών και με τη συμμετοχή της Εθνικής Τράπεζας θα ιδρύσει την Ελληνική Ηλεκτρική Εταιρεία, που θα αναλάβει την ηλεκτροδότηση και άλλων μεγάλων ελληνικών πόλεων. Μέχρι το 1929 θα ηλεκτροδοτηθούν 250 πόλεις της Ελλάδας με πληθυσμό πάνω από 5.000 κατοίκους από περίπου ισάριθμα εργοστάσια παραγωγής. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο το πετρέλαιο ή ο γαιάνθρακας. Η μεγάλη κατάρτηση της παραγωγής έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, σε επίπεδα τριπλάσια μέχρι και πενταπλάσια των αντίστοιχων τιμών στην Ευρώπη. Το 1950 ιδρύεται η ΔΕΗ με στόχο την ενοποίηση όλων των τοπικών παραγωγών και την προώθηση του έργου του εξηλεκτισμού. Κατά την ίδρυση της ΔΕΗ υπήρχαν 385 εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την επικράτεια, από τις οποίες οι 327 ήταν ιδιωτικές και οι 58 κοινοτικές ή δημοτικές.

Η ίδρυση της ΔΕΗ αποτελεί ένα σημαντικότερο βήμα της μεταπολεμικής οικονομίας της χώρας. Με το νόμο 3523/56 η ΔΕΗ αναλαμβάνει την εξαγορά όλων των μεμονωμένων επιχειρήσεων και την εφαρμογή ενιαίας ενεργειακής πολιτικής στη χώρα. Η πολιτική αυτή δίνει έμφαση στην εντατική χρήση των εγχώριων πρώτων υλών, στη δημιουργία εθνικού διασυνδεδεμένου δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και στην προώθηση του εξηλεκτισμού στις πλέον απόμακρες περιοχές.

Από το Φεβρουάριο του 2001 η ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας άνοιξε προς τον ελεύθερο ανταγωνισμό, δηλαδή απελευθερώθηκε από το μονοπωλικό σχήμα λειτουργίας, σύμφωνα με την οδηγία 96/92/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Δημιουργήθηκαν νέοι ανεξάρτητοι ενεργειακοί φορείς, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και ο Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ) για την επίβλεψη της τήρησης των κανόνων ανταγωνισμού. Παρόλα αυτά ο κυρίαρχος ρόλος της ΔΕΗ Α.Ε. στα ελληνικά ενεργειακά πράγματα προβλέπεται να διατηρηθεί για αρκετά ακόμη χρόνια.

Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη στο μέγεθος των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Η ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης. Έτσι τα συστήματα μεταφοράς εξελίχθηκαν πολύ σύντομα σε σχέση με τα επίπεδα των τάσεων λειτουργίας. Επιπλέον για μεγάλες αποστάσεις ή σε περιπτώσεις υποθαλάσσιας

μεταφοράς με καλώδια είναι προτιμότερη η χρήση συνεχούς ρεύματος. Για το λόγο αυτό παράλληλα με τα τριφασικά συστήματα υπερυψηλής τάσης αναπτύχθηκαν και συστήματα μεταφοράς ισχύος υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC). Ο Πίνακας 1.2 παρουσιάζει συνοπτικά την αντίστοιχη εξέλιξη στα επίπεδα των τάσεων του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 1.1

Τεχνολογική εξέλιξη μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Έτος	1930	1950	1960	1975	σήμερα
Ισχύς άξονα (MW)	50	100	600	1200	2000
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	30	30	40	40	45
Πίεση ατμού (bar)	30	130	250	250	300
Θερμοκρασία ατμού (°C)	400	500	545	550	620

Πίνακας 1.2

Τεχνολογική εξέλιξη συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

		Τάση (kV)	Απόσταση (km)
1890	Lauffen Γερμανία	25	175
1912	Lauchhammer Γερμανία	110	100
1924	San Francisco ΗΠΑ	220	400
1952	Hallsberg Σουηδία	380	800
1961	Μάγχη	±100 dc	–
1963	ΗΠΑ και ΕΣΣΔ	500	–
1965	Καναδάς	735	600
1974	Αφρική - Μοζαμβίκη	±533 dc	1500
1980	Βραζιλία	±600 dc	800
1980	Ρωσία	1200	1500

1.2 Συγκρότηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

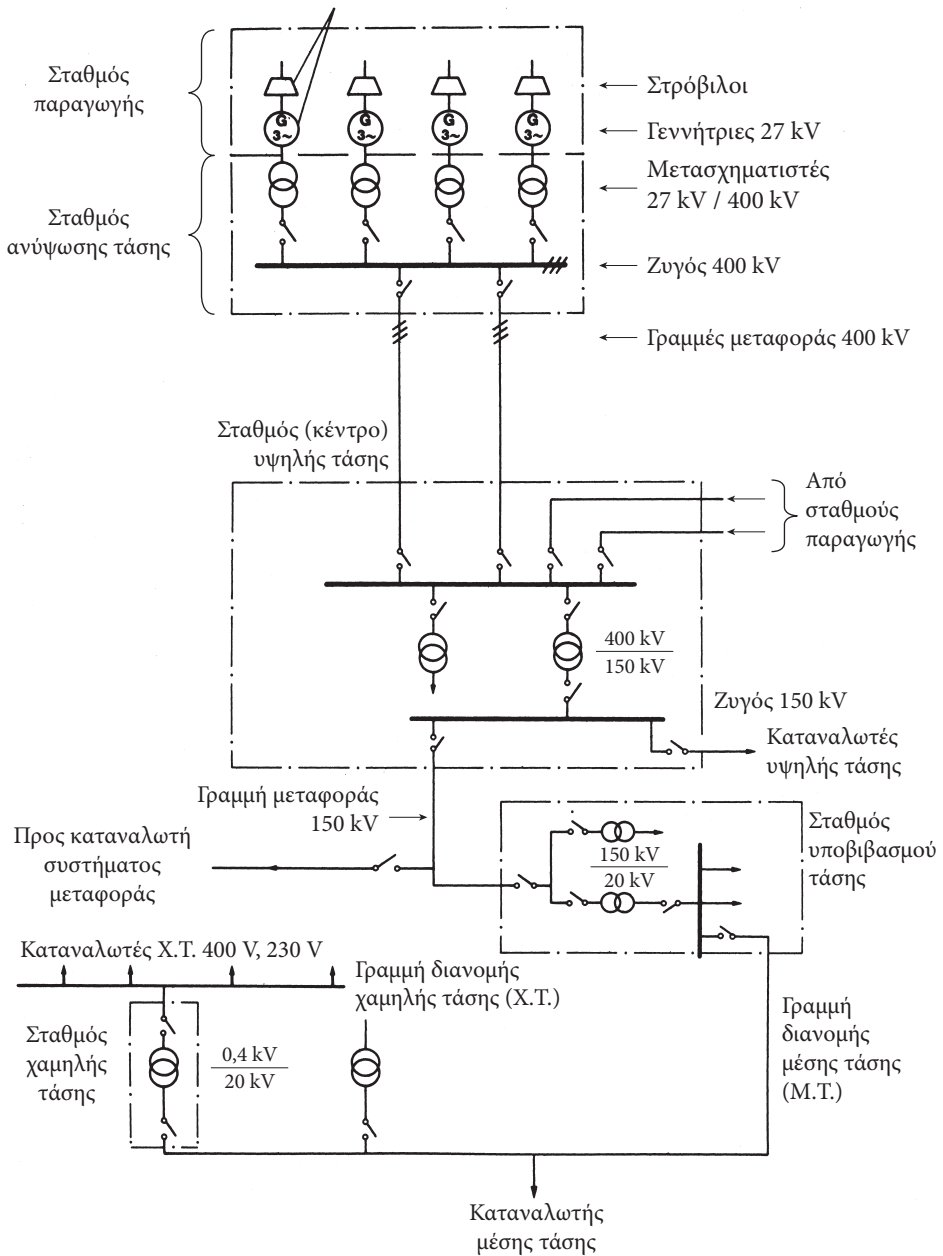
Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των συνεργαζόμενων εγκαταστάσεων της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός των ΣΗΕ είναι η αδιάλειπτη τροφοδότηση των καταναλωτών με λογική αξιοπιστία, με καλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύ και με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η αξιοπιστία αναφέρεται όχι μόνο στην ποσοτική κάλυψη των συνολικών αναγκών των καταναλωτών, αλλά και στην ικανοποίηση των χρονικών και τοπικών διακυμάνσεων του φορτίου. Η ποιότητα αναφέρεται στην τήρηση θεσμοθετημένων ορίων διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, τα οποία συνήθως είναι 5% και 0,5% αντίστοιχα.

Η εξασφαλισμένη τροφοδοσία με ηλεκτρική ισχύ είναι μια από τις βασικές προϋποθέσεις για την σύγχρονη ζωή. Ελλιπής ή διακεκομμένη τροφοδότηση μπορεί να επιφέρει τεράστιες ζημιές στην οικονομία και στην κοινωνική τάξη. Αρκεί εδώ χαρακτηριστικά να σημειωθεί ότι η καθολική διακοπή του ρεύματος, που λέγεται και ολική σβέση (black out), η οποία έγινε το 1977 για 53 λεπτά στη Νέα Υόρκη των ΗΠΑ στοίχισε τότε μερικά δισεκατομμύρια δολάρια.

Η σημασία των ΣΗΕ ως οικονομικού κλάδου στην Ελλάδα μπορεί να εκτιμηθεί από το γεγονός ότι η αξία της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας ήταν περίπου 3 δισεκατομμύρια Ευρώ το 2003, ενώ ο συνολικός κύκλος εργασιών της ΔΕΗ Α.Ε. για την ίδια περίοδο ήταν 7,5 δισεκατομμύρια Ευρώ. Επιπλέον η ΔΕΗ και ο ευρύτερος ενεργειακός τομέας απασχολούν άμεσα περίπου 30.000 εργαζόμενους ενώ σημαντικός είναι και ο αριθμός των εργαζομένων που απασχολείται σε ιδιωτικές εργολαβίες ενεργειακών έργων.

Ένα τυπικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από τις εξής επιμέρους συνιστώσες, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1.

Σταθμοί παραγωγής: Είναι οι εγκαταστάσεις στις οποίες μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η πρωτογενής μορφή ενέργειας είναι κυρίως θερμότητα, που προέρχεται από την καύση συμβατικών καυσίμων ή από πυρηνική σχάση, ή κινητική ενέργεια, που προέρχεται από υδατοπτώσεις ή από τον άνεμο. Η θέση εγκατάστασης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τεχνικοοικονομικούς παράγοντες. Έτσι οι λιγνιτικοί σταθμοί κατασκευάζονται δίπλα στο πεδίο εξόρυξης, οι υδροηλεκτρικοί και οι αιολικοί σταθμοί όπου υπάρχει εκμεταλλεύσιμο υδραυλικό ή αιολικό δυναμικό. Μεγαλύτερη ευελιξία υπάρχει στη χωροθέτηση των σταθμών φυσικού αερίου και πετρελαίου, καθώς τα καύσιμα αυτά έχουν μεγάλη θερμογόνο δύναμη και η



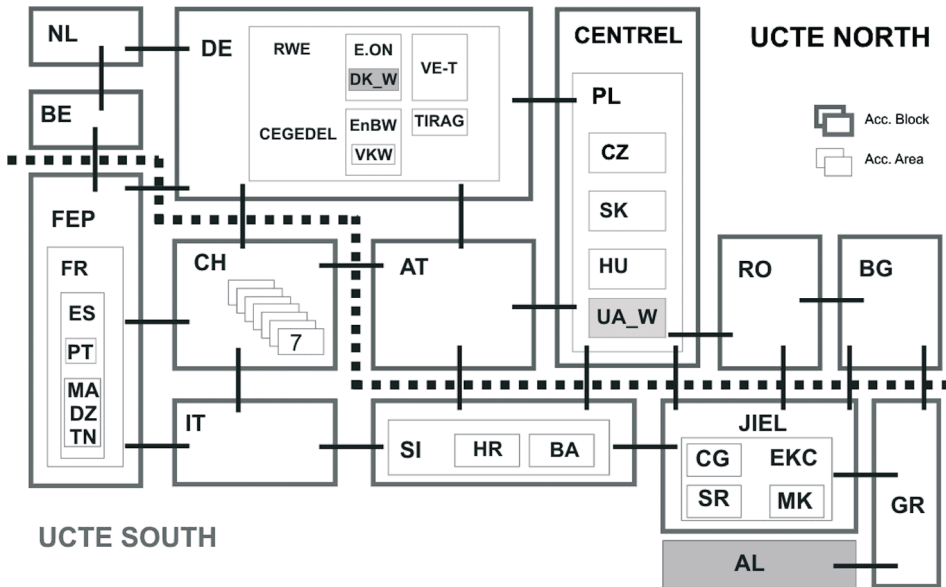
Σχ. 1.1 Τυπική διάταξη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

μεταφορά τους δεν επιβαρύνει σημαντικά το κόστος παραγωγής. Τέλος ένας σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της θέσης ενός θερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαθεσιμότητα του απαιτούμενου νερού για τη λειτουργία των κυκλωμάτων ψύξης.

Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας: Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπερυψηλής τάσης και τους υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού. Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε σπανιότερες περιπτώσεις και κυρίως για διασυνδέσεις με υποθαλάσσια καλώδια, χρησιμοποιείται το συνεχές ρεύμα. Τυπικά επίπεδα τάσης για το δίκτυο της μεταφοράς είναι, για το Ελληνικό δίκτυο τα 150 kV και τα 400 kV ενώ στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται και τα 220 kV. Οι υψηλότερες τάσεις μεταφοράς σε χρήση σήμερα είναι τα 1200 kV για το τριφασικό σύστημα και τα ± 600 kV για το συνεχές ρεύμα. Στους σταθμούς ή κέντρα μετασχηματισμού τάσης η τάση των ακροδεκτών των γεννητριών των σταθμών παραγωγής, η οποία είναι συνήθως 20 kV - 30 kV ανυψώνεται στα επίπεδα των τάσεων του συστήματος μεταφοράς. Στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, οι γραμμές μεταφοράς τερματίζουν σε αντίστοιχους υποσταθμούς, όπου οι τάσεις υποβιβάζονται στο επίπεδο των τάσεων του συστήματος διανομής, δηλαδή συνήθως στα 15 kV - 20 kV και σπάνια στα 6 kV.

Σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας: Αποτελεί τη συνέχεια του συστήματος μεταφοράς προς την κατεύθυνση της κατανάλωσης. Αποτελείται και αυτό από το σύνολο των εναέριων γραμμών και υπόγειων καλωδίων, καθώς και των υποσταθμών υποβιβασμού της τάσης. Η έκταση του συστήματος διανομής είναι πολλαπλάσια του αντίστοιχου της μεταφοράς, ενώ οι τάσεις λειτουργίας του χωρίζονται σε δυο επίπεδα, τη μέση τάση (MT) και τη χαμηλή τάση (XT). Στο ελληνικό δίκτυο διανομής η μέση τάση είναι 15 kV και συνηθέστερα 20 kV, ενώ η χαμηλή τάση είναι 0,4 kV. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει και τα φορτία, δηλαδή τους καταναλωτές της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά μπορεί να είναι οικιακοί και μικροί βιοτεχνικοί καταναλωτές ή μεγαλύτεροι βιομηχανικοί πελάτες. Ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του καταναλωτή μεταβάλλεται η τάση και ο τρόπος της τροφοδοσίας του π.χ. μεμονωμένοι καταναλωτές ισχύος μέχρι 5,3 kW τροφοδοτούνται με μονοφασική τροφοδότηση στα 230 V. Καταναλωτές μικρής ισχύος π.χ. 50 kW έχουν τριφασική τροφοδότηση 0,4 kV, ενώ βιομηχανίες από π.χ. 100 kW και πάνω συνδέονται στη MT, δηλαδή στα 15 kV ή 20 kV. Ένας μικρός αριθμός ηλεκτροβόρων βιομηχανικών καταναλωτών συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μεταφοράς στα 150 kV.

Η μαζική αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ΣΗΕ είναι πολυδάπανη και δύσκολη. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η συνεχής προσαρμογή της παραγωγής στη ζήτηση. Καθώς αυτό δεν είναι πάντα τεχνικά εφικτό ή και οικονομικά βέλτιστο, έχει καθιερωθεί η διασύνδεση (interconnection, Verbundbetrieb) των εθνικών ΣΗΕ με γραμμές μεταφοράς κατάλληλης μεταφορικής ικανότητας. Μέσα από τις διασυνδέσεις αυτές γίνονται προγραμματισμένες αγοραπωλησίες ηλεκτρικής ενέργειας και παράλληλα προσφέρεται η δυνατότητα υποστήριξης γειτονικών δικτύων σε περιπτώσεις ανωμαλιών.



Σχ. 1.2 Σχηματική παράσταση των διασυνδεδεμένων δικτύων μεταφοράς και των τοπικών περιοχών ελέγχου της UCTE.

Μέλη: AT: Αυστρία, BA: Βοσνία Ερζεγοβίνη, BE: Βέλγιο, BG: Βουλγαρία, CH: Ελβετία, CS: Σερβία, Μαυροβούνιο, CZ: Τσεχία, DE: Γερμανία, ES: Ισπανία, FR: Γαλλία, GR: Ελλάδα, HR: Κροατία, HU: Ουγγαρία, IT: Ιταλία, LU: Λουξεμβούργο, MK: FYROM, NL: Ολλανδία, PL: Πολωνία, PT: Πορτογαλία, SI: Σλοβενία, SK: Σλοβακία, RO: Ρουμανία, DK_W: Δ. Δανία * (έκτακτο μέλος).

Μη μέλη: AL: Αλβανία, AD: Ανδόρα, BY: Λευκορωσία, DK: Δανία, DK_E A. Δανία, GB: Μ. Βρετανία, MA: Μαρόκο, MD: Μολδαβία, NO: Νορβηγία, SE: Σουηδία, TR: Τουρκία, UA_W: Δ. Ουκρανία.

Ειδικές περιοχές: CENT: CENTREL, SIHR: Σλοβενία και Κροατία, YUGO: Πρώην Γιουγκοσλαβία.

Η διασύνδεση σε Ευρωπαϊκό επίπεδο γίνεται μέσω της UCTE (*Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity – Ένωση για το συντονισμό της μεταφοράς ηλεκτρισμού*). Η UCTE είναι το συντονιστικό όργανο των διαχειριστών των συστημάτων μεταφοράς της ηπειρωτικής Ευρώπης, που διασφαλίζει εδώ και 50 χρόνια την αξιόπιστη ηλεκτροδότηση, προσφέροντας ασφαλείς και επαρκείς διασυνδέσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Η UCTE ως ένωση περιλαμβάνει (2005) 34 διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς ΗΕ, καλύπτει 23 Ευρωπαϊκές χώρες και 500 εκατομμύρια καταναλωτές, διαθέτει μια συνολική εγκατεστημένη ισχύ 530 MW με μέση ετήσια κατανάλωση 2300 TWh, από τις οποίες το 12% μέσα από τις διασυνδέσεις των δικτύων, ενώ το συνολικό μήκος των γραμμών μεταφοράς που διαθέτει ξεπερνά τα 210000 km. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται σχηματικά η διασύνδεση των δικτύων μεταφοράς των ευρωπαϊκών χωρών.

1.3 Ορισμοί, Συμβολισμοί, Συμβάσεις

1.3.1 Ονομαστική τάση

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων ΗΕ είναι η ονομαστική τους τάση. Είναι η τάση για την οποία έχουν κατασκευαστεί και στη συνεχή καταπόνηση της οποίας αντέχουν τα ηλεκτρικά δίκτυα και ο εξοπλισμός των.

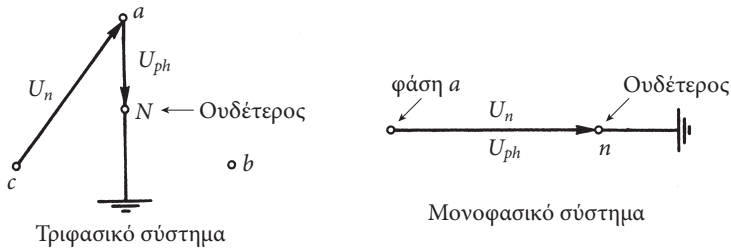
Σε ένα τριφασικό ή γενικά n -φασικό σύστημα ορίζεται ως *ονομαστική τάση* U_n η ενεργή τιμή της τάσης μεταξύ δύο φάσεων. Αυτή λέγεται και *πολική τάση*. *Φασική τάση* U_{ph} είναι η τάση μεταξύ αγωγού και ουδέτερου. Έχουμε για τριφασικά συμμετρικά συστήματα, σχ. 1.3:

$$U_{\text{πολική}} = U_n = \text{ονομαστική τάση} = \sqrt{3}U_{ph}$$

Στο μονοφασικό σύστημα είναι $U_n = U_{ph}$.

Στις συσκευές δεν χρησιμοποιείται ο όρος ονομαστική τάση, αλλά κατά IEC ο όρος *τάση διαστασιολόγησης, rated voltage, U_r* . Επιπλέον χρησιμοποιείται και η *μέγιστη διαρκώς επιτρεπόμενη τάση* U_m και η *τάση λειτουργίας* $U_b \approx U_n (0,9 \dots 1,1)$. Η μέγιστη διαρκώς επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας είναι συνήθως $1,2U_n$.

Δηλαδή αν μια 3-φασική συσκευή έχει $U_r = 20 \text{ kV}$, αυτό σημαίνει ότι η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των *ακροδεκτών φάσεων* είναι 20 kV και η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση είναι 24kV. Η τάση μεταξύ ακροδέκτη και *ουδέτερου* είναι $20/\sqrt{3} = 11,5 \text{ kV}$.



Σχ. 1.3 Ονομαστικές τάσεις σε τριφασικό και σε μονοφασικό σύστημα.

Σε μια μονοφασική συσκευή των $U_r = 230 \text{ V}$, η τάση μεταξύ φάσης και ουδέτερου είναι 230 V . Οι χρονικά μέγιστες τιμές των παραπάνω τάσεων είναι κατά $\sqrt{2}\sqrt{a^2 + b^2}$ μεγαλύτερες.

Οι τρεις φάσεις του δικτύου έχουν συνήθως ονομασία, σύμφωνα με τους κανονισμούς της IEC: ($L1, L2, L3$) ή (A, B, C) ή (a, b, c). Η παλαιότερη ονομασία των φάσεων ήταν (R, S, T) ή (r, s, t). Παρόμοια, οι ακροδέκτες των πηνίων μηχανών φέρουν συχνά την παλαιά ονομασία ($U/X, V/Y, W/Z$) για την υψηλή τάση (ΥΤ) και ($u/x, v/y, w/z$) για τη χαμηλή τάση (ΧΤ). Όπου όμως ήταν τεχνικά δυνατό, προτιμήθηκε η νέα ονομασία ($U1/U2, V1/V2, W1/W2$) και ($u1/u2, v1/v2, w1/w2$) για την ΥΤ και ΧΤ αντίστοιχα ακροδεκτών τυλιγμάτων, η οποία είναι κατά IEC και χρησιμοποιείται σε τεχνικά έντυπα.

1.3.2 Δίκτυα, συχνότητα

Αν δεν γίνεται ιδιαίτερη αναφορά, κάθε δίκτυο που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύγγραμμα θεωρείται ότι είναι τριφασικό με συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$ ή αντίστοιχα γωνιακή ταχύτητα $\omega = 2\pi f = 314,1593 \text{ s}^{-1}$.

1.3.3 Συμβολισμοί μεγεθών

Χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη συμβολίζονται με μικρά γράμματα, π.χ. τάση $u(t)$. Μιγαδικά μεγέθη συμβολίζονται με μια γραμμή πάνω από το αντίστοιχο κεφαλαίο γράμμα, π.χ. τάση \bar{U} , ενεργές (ή ενδεικνύμενες ή rms) τιμές χαρακτηρίζονται με κεφαλαία, π.χ. U . Μέγιστες τιμές ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους, π.χ. του $u(t)$ παριστάνονται με την ένδειξη $\hat{\quad}$ πάνω στο σύμβολο ή στο αντίστοιχο κεφαλαίο σύμβολο π.χ. \hat{u} , \hat{U} .

- $u(t)$: χρονικά μεταβαλλόμενη τάση,
 \bar{U} : μιγαδικό διάνυσμα της τάσης,
 U : ενεργή τιμή,
 \hat{U} ή \hat{u} : μέγιστη τιμή.

Πίνακες ή διανύσματα συμβολίζονται με έντονα γράμματα π.χ. $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_3]$.

Μεγέθη εκφρασμένα στο ανά μονάδα σύστημα pu (per unit system) συμβολίζονται με μικρά γράμματα. Π.χ. $u = 1$ pu για τάση ίση με μονάδα, ή αντίστοιχα για μιγαδικά μεγέθη $\bar{u} = 0,86 + j0,30$.

1.3.4 Παράσταση ημιτονοειδών μεγεθών με φασικά διανύσματα (phasors) και μιγαδικούς αριθμούς

Ένα ημιτονοειδώς χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος, π.χ. η τάση:

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u)$$

μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα ισοδύναμο στρεφόμενο διάνυσμα με μέτρο ίσο με την ενεργή τιμή U και το οποίο, με κέντρο το σημείο τομής των αξόνων ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, περιστρέφεται αριστερόστροφα με γωνιακή ταχύτητα ω . Το διάνυσμα αυτό καλείται και *φασικό διάνυσμα* (*phasor*). Για την παράσταση ενός φασικού διανύσματος χρησιμοποιείται η παρακάτω μαθηματική σύμβαση,

$$\bar{U} = U \angle \varphi_u$$

όπου φ_u είναι η γωνία του διανύσματος από τον άξονα των x τη χρονική στιγμή $t = 0$. Εάν θεωρηθεί ότι το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων αντικαθίσταται από ένα μιγαδικό επίπεδο, με τον άξονα των πραγματικών αριθμών κατά τα x και τον άξονα των φανταστικών αριθμών κατά τα y , τότε το φασικό διάνυσμα παριστάνει ένα μιγαδικό αριθμό με πραγματικό και φανταστικό μέρος που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\bar{U} = Ue^{j\varphi_u} = \text{Re}(\bar{U}) + j\text{Im}(\bar{U}) = U \cos(\varphi_u) + jU \sin(\varphi_u) = U \angle \varphi_u$$

Αντίστοιχα, η αντίστροφη διαδικασία ορίζεται ως:

$$u(t) = \sqrt{2} \text{Re}\left(Ue^{j(\omega t + \varphi_u)}\right) = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u)$$

Η παράσταση ημιτονοειδών μεγεθών με φασικά διανύσματα παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

1.3.5 Τάσεις σε τριφασικά συστήματα με ουδέτερο

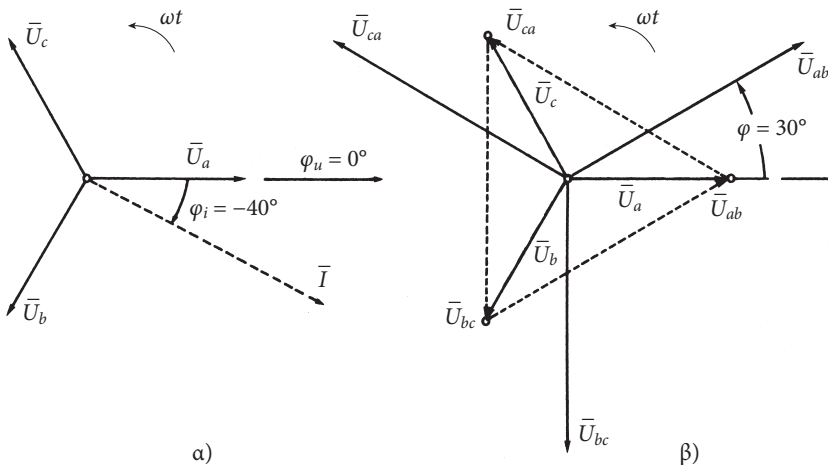
Οι πολικές τάσεις σε ένα 3-φασικό σύστημα abc ορίζονται ως εξής:

$$\text{Πρώτη τάση: } \bar{U}_{ab} = \bar{U}_a - \bar{U}_b$$

$$\text{Δεύτερη τάση: } \bar{U}_{bc} = \bar{U}_b - \bar{U}_c$$

$$\text{Τρίτη τάση: } \bar{U}_{ca} = \bar{U}_c - \bar{U}_a$$

Αν οι $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ συνιστούν ένα ορθό σύστημα, δηλαδή αν η σειρά διαδοχής τους είναι $\bar{U}_a \rightarrow \bar{U}_c \rightarrow \bar{U}_b$, τότε και οι τάσεις $\bar{U}_{ab}, \bar{U}_{bc}, \bar{U}_{ca}$ έχουν τη σειρά διαδοχής $\bar{U}_{ab} \rightarrow \bar{U}_{ca} \rightarrow \bar{U}_{bc}$.



Σχ. 1.4 α) Διάνυσμα αναφοράς ενός τριφασικού συστήματος είναι πάντα η πρώτη φάση a .
β) Διανυσματικά διαγράμματα φασικών και πολικών τάσεων.

1.3.6 Φάση αναφοράς

Ως φάση αναφοράς σε ένα τριφασικό σύστημα ορίζεται η πρώτη φάση, η φάση a . Έτσι εάν π.χ. ένα ρεύμα δοθεί με γωνία $-40^\circ (I/\underline{-40^\circ})$, αυτό θα πει ότι έπεται

της τάσης \bar{U}_a κατά 40° . Αν δοθεί η τάση ενός τριφασικού συστήματος σαν μιγαδικός, τότε αυτή θεωρείται ότι είναι η τάση της φάσης a . Αν λείπει ο δείκτης a σε μια τάση, τότε υπονοείται ότι αυτή είναι η πρώτη φάση του δικτύου.

1.3.7 Μονάδες φυσικών μεγεθών

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι εκείνες του συστήματος SI (Système International), όπως παρουσιάζονται στα παραρτήματα Π 1.1 και Π 1.2: π.χ. kg, m, s, A, V. Για τη δύναμη και το έργο έχουμε:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{g} = 9,81 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ A} \cdot \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ Joule}$$

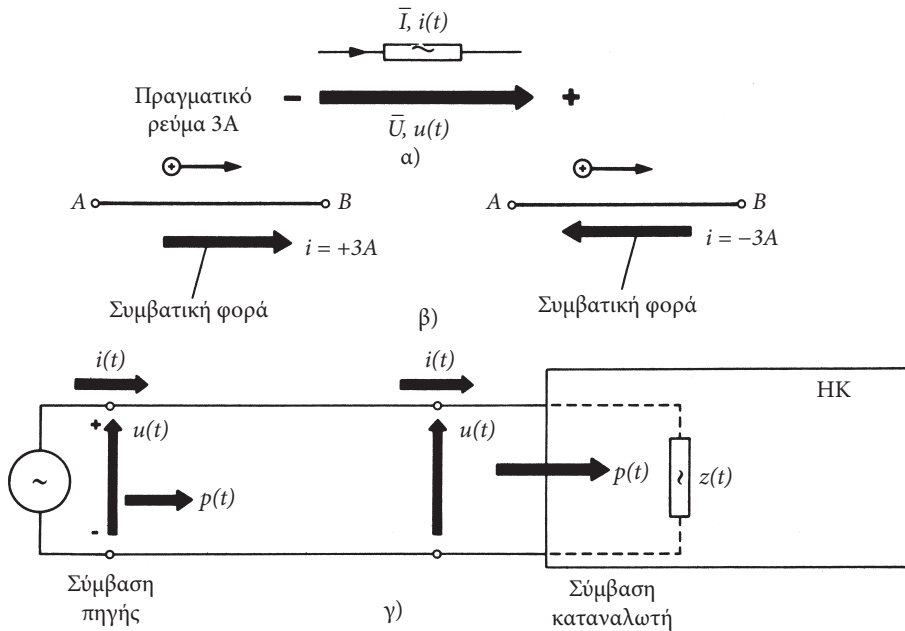
1.3.8 Συμβολισμοί μεγεθών

Όλα τα σύμβολα των μαθηματικών σχέσεων και των μεγεθών είναι σύμφωνα με τα ηλεκτροτεχνικά πρότυπα IEC 60027-1, IEC 60027-2, IEC 60050 καθώς και με τα διεθνή πρότυπα ISO 31-2, ISO 31-5. Τα σύμβολα συσκευών είναι σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 60617 και ISO 81714. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα σύμβολα και οι μονάδες τους στο διεθνές σύστημα (SI) δίνονται στο παράρτημα Π. 1.3 στο τέλος του παρόντος συγγράμματος.

1.4 Φορές Αναφοράς Τάσεων, Ρευμάτων, Ισχύος

Τα μεγέθη *ρεύμα*, *τάση*, *ροή ισχύος* ορίζονται πλήρως από έναν αριθμό και μια κατεύθυνση. Η *κατεύθυνση* (φορά) ορίζεται με ένα *πρόσημο* και μια *συμβατική φορά*. Η *συμβατική φορά* μπορεί να είναι *αυθαίρετη* τόσο για το ρεύμα όσο και για την πτώση τάσης. Για παράδειγμα, αν το ρεύμα $3A$ ρέει από A στο B , τότε η συμβατική φορά μπορεί να θεωρηθεί ως ροή θετικών φορτίων. Αν η πραγματική και η συμβατική φορά ροής του ρεύματος συμπίπτουν, τότε το ρεύμα έχει θετικό πρόσημο (+), άλλως το αντίθετο, σχ. 1.5.

Με βέλος υποδηλώνεται και η κατεύθυνση ανόδου της τάσης, δηλαδή το σημείο με την υψηλότερη τάση. Ισχύει $u(t) = z(t)i(t)$. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην ισχύ (ενεργή ισχύς P ,

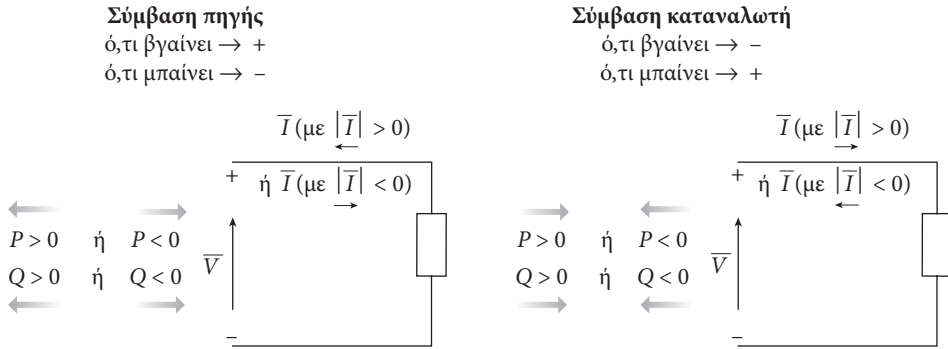


Σχ. 1.5 Φορές αναφοράς α) τάσης, β) ρεύματος, γ) σύμβαση αναφοράς καταναλωτή και πηγής.

άεργη ισχύς Q , φαινόμενη ισχύς S) και όχι τόσο στις τάσεις ή τα ρεύματα. Οι ισχύεις είναι βαθμωτά μεγέθη. Η φορά όμως της ροής της ισχύος σε ένα κύκλωμα είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των στοιχείων εκείνων που λειτουργούν σαν πηγές, παράγοντας ηλεκτρική ισχύ και εκείνων που λειτουργούν σαν φορτία, καταναλώνοντας ηλεκτρική ισχύ. Στα ενεργειακά συστήματα οι πηγές και τα φορτία είναι συνήθως προσδιορισμένα και διακριτά. Έτσι πηγή σε ένα ενεργειακό σύστημα μπορεί να είναι μια γεννήτρια σε ένα σταθμό παραγωγής, ένας μετασχηματιστής σε έναν υποσταθμό, ένας κόμβος του δικτύου, ένας ρευματοδότης. Αντίστοιχα φορτίο μπορεί να είναι ένα παθητικό κυκλωματικό στοιχείο, μια ηλεκτρική συσκευή, μια κατοικία, μια βιομηχανία ή ακόμη και μια ολόκληρη περιοχή.

Ορίζονται στη συνέχεια δυο συμβάσεις, η σύμβαση της πηγής ή γεννήτριας (ΣΠ) και η σύμβαση του καταναλωτή (ΣΚ). Αν ένα κύκλωμα θεωρείται πηγή, τότε κατά τη σύμβαση της πηγής, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς όταν βγαίνουν από το κύκλωμα αυτό θεωρούνται θετικά. Αντίθετα τα εισερχόμενα μεγέθη θεωρούνται αρνητικά.

Στην περίπτωση που ένα κύκλωμα θεωρείται καταναλωτής, ισχύουν ακριβώς



Σχ. 1.6 Συμβάσεις πηγής και καταναλωτή

τα αντίστροφα κατά τη σύμβαση του καταναλωτή. Έτσι, θετικά θεωρούνται τα ρεύματα και οι ισχύεις που εισέρχονται στον καταναλωτή και απορροφούνται από αυτόν, ενώ αρνητικά αυτά που εξέρχονται από αυτόν προς το υπόλοιπο κύκλωμα.

Οι παραπάνω συμβάσεις καλύπτουν επιπλέον και τις απαιτήσεις της αρχής της διατήρησης της ενέργειας, δηλαδή της συνεχούς ισότητας της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενεργής και άεργης ισχύος σε ένα κύκλωμα. Οι συμβάσεις που ορίστηκαν παραπάνω, φαίνονται παραστατικά στο σχήμα 1.6.

Εξετάζεται στη συνέχεια η περίπτωση ενός επαγωγικού καταναλωτή \bar{Z} . Επιλέγεται η σύμβαση καταναλωτή.

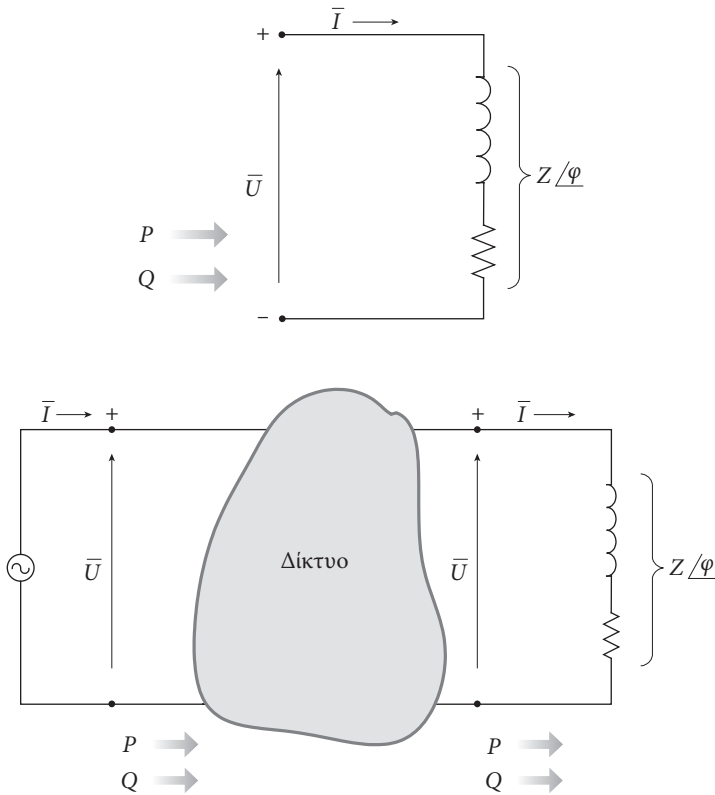
Ισχύει: $P > 0$ διότι είναι καταναλωτής και $Q > 0$ διότι είναι επαγωγικός καταναλωτής, οπότε απορροφά άεργη ισχύ εξ ορισμού. Έστω ότι $\bar{U} = U \angle 0$ $\bar{I} = I \angle \varphi$. Τότε:

$$\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^* \Rightarrow \bar{I}^* = \frac{\bar{S}}{\bar{U}} \Rightarrow \bar{I} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{U}^*} = \frac{(P + jQ)^*}{\bar{U}^*} = \frac{P - jQ}{U} = I \angle \varphi$$

όπου $\varphi \angle 0$, αφού $\text{Im}(\bar{I}) \angle 0$.

Συνεπώς, προκύπτει ότι σε **επαγωγικό καταναλωτή** το φασικό διάνυσμα του ρεύματος έπεται του αντίστοιχου της τάσης κατά θετική γωνία φ .

Έστω ότι αυτός ο καταναλωτής πρέπει να συνδεθεί με κάποια πηγή. Η πηγή αυτή θα παρέχει την απαιτούμενη ενεργή και άεργη ισχύ, P και Q αντίστοιχα, του επαγωγικού καταναλωτή. Θεωρώντας τη σύμβαση της πηγής, θα ισχύει:



$P > 0$, καθώς είναι πηγή και δίνει P

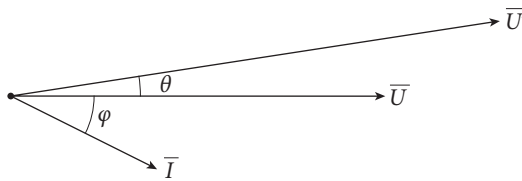
$Q > 0$, καθώς είναι πηγή και δίνει Q

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{U}' \cdot \bar{I}^* \Rightarrow \bar{I}^* = \frac{\bar{S}}{\bar{U}'} \Rightarrow \bar{I} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{U}'^*} = \frac{P - jQ}{U'} = I/\underline{\varphi} \quad \text{με } \varphi < 0$$

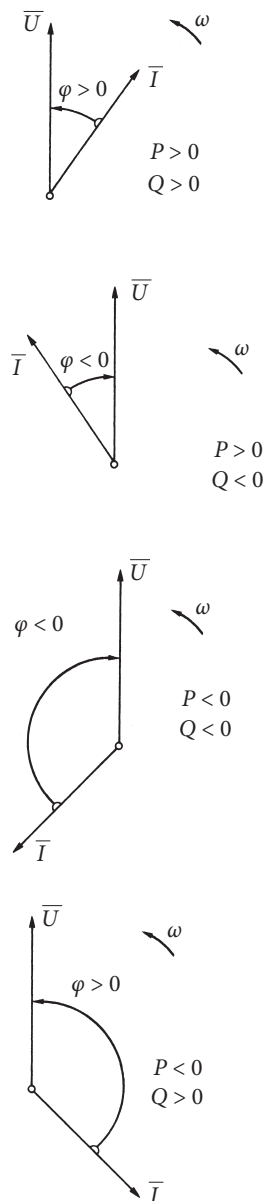
Άρα στην περίπτωση της πηγής που δίνει άεργη ισχύ προκύπτει $\varphi < 0$ και το φασικό διάνυσμα του ρεύματος έπεται του αντίστοιχου της τάσης, σύμφωνα και με το παρακάτω σχήμα 1.7. Ενώ όμως ο καταναλωτής που απορροφά άεργη ισχύ ορίζεται ως επαγωγικός δεν υπάρχει αντίστοιχος ορισμός για μια πηγή που δίνει άεργη ισχύ. Για το λόγο αυτό, υιοθετείται στη συνέχεια ο προσδιορισμός της λειτουργίας αυτής, ως πηγής με το ρεύμα να έπεται της τάσης (*lagging*). Ο προσδιορισμός αυτός καλύπτει και την περίπτωση της άεργης ισχύος και την περίπτωση του συντελεστή ισχύος, δηλαδή ισχύει ο προσδιορισμός πηγή με συντελεστή ισχύος 0,85 με το ρεύμα να έπεται της τάσης.

Με παρόμοιο τρόπο προκύπτει ότι για χωρητικό καταναλωτή το ρεύμα προηγείται της τάσης. Αντίστοιχα, για πηγή που απορροφά Q προκύπτει ότι το φασικό διάνυσμα του ρεύματος προηγείται του αντίστοιχου της τάσης. Η λειτουργία αυτή χαρακτηρίζεται σαν λειτουργία πηγής με το ρεύμα να προηγείται της τάσης (*leading*), δηλαδή ισχύει ο προσδιορισμός ότι η πηγή έχει συντελεστή ισχύος 0,85 με το ρεύμα να προηγείται της τάσης.

Το παρακάτω σχήμα 1.7 συνοψίζει τις διάφορες δυνατές λειτουργικές καταστάσεις συνδυασμών πηγών και καταναλωτών.



Σχ. 1.7 Διανυσματικό διάγραμμα επαγωγικού καταναλωτή και πηγής που δίνει άεργη ισχύ.



Σύμβαση καταναλωτή: Το ηλεκτρικό κύκλωμα (ΗΚ) συμπεριφέρεται **επαγωγικά** και απορροφά ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q .

Σύμβαση πηγής: Η πηγή παράγει ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q . Λειτουργία πηγής με το ρεύμα να έπεται της τάσης (lagging).

Σύμβαση καταναλωτή: Το ΗΚ συμπεριφέρεται **χωρητικά**, απορροφά ενεργή ισχύ P και παράγει άεργο ισχύ Q .

Σύμβαση πηγής: Η πηγή παράγει ενεργή ισχύ P και καταναλώνει άεργη ισχύ Q . Λειτουργία πηγής με το ρεύμα να προηγείται της τάσης (leading).

Σύμβαση καταναλωτή: Το ΗΚ συμπεριφέρεται **χωρητικά** και **παράγει** ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q .

Σύμβαση πηγής: Η πηγή **απορροφά** ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q από το ΗΚ. Λειτουργία πηγής με το ρεύμα να προηγείται της τάσης (leading).

Σύμβαση καταναλωτή: Το ΗΚ συμπεριφέρεται **επαγωγικά**, **παράγει** ενεργή ισχύ P και καταναλώνει άεργη ισχύ Q .

Σύμβαση πηγής: Η πηγή **απορροφά** ενεργή ισχύ P και παράγει άεργη ισχύ Q . Λειτουργία πηγής με το ρεύμα να έπεται της τάσης (lagging).

Σχ. 1.8 Δυνατές θέσεις διανυσμάτων τάσης και ρεύματος σε μονοφασικό σύστημα και ροές ισχύος στις συμβάσεις καταναλωτή και πηγής του σχήματος 1.6.