

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**“Εναέρια δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”**



**Αθήνα 12.2013**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος**

**Σπουδαστής: Αυγούλης Γεώργιος**

AM:31407

**Αθήνα 12.2013**

Copyright © Α. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Α. Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

# Πινάκας Περιεχομένων

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας**

1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	σελ. 1
1.2 Η ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης.....	σελ. 3
1.3 Διασύνδεση συστημάτων.....	σελ. 5
1.4 Το Ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής.....	σελ. 7
1.5 Βασικές απαιτήσεις ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	σελ. 11
1.6 Χαρακτηριστικά επιδρώντα στην παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργεια. ....	σελ. 11
1.7 Ορισμοί, συμβολισμοί, συμβάσεις.....	σελ. 12
1.7.1 Ονομαστική τάση.....	σελ. 12
1.7.2 Συχνότητα.....	σελ. 13
1.7.3 Συμβολισμοί μεγεθών.....	σελ. 13
1.7.4 Μετατροπές ημιτονοειδών μεγεθών σε μιγαδικά μεγέθη.....	σελ. 14
1.7.5 Σε τριφασικό σύστημα με ουδέτερο οι φασικές τάσεις $\bar{U}_R$ , $\bar{U}_S$ , $\bar{U}_T$ νοούνται από την φάση στον ουδέτερο.....	σελ. 14
1.7.6 Φάση αναφοράς.....	σελ. 15
1.7.7 Μονάδες φυσικών μεγεθών.....	σελ. 15
1.7.8 Σύμβολα συσκευών.....	σελ. 15
1.7.9 Σύμβολα τύπων.....	σελ. 15
1.7.10 Φορές αναφοράς τάσεων, ρευμάτων, ισχύος.....	σελ. 15

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Φυσικά στοιχεία εναέριων γραμμών μεταφοράς**

Εισαγωγή.....	σελ.18
2.1 Αγωγοί.....	σελ.20
2.1.1 Η στεμματοειδής εκκένωση (φαινόμενο Corona) στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	σελ.23
2.1.2 Μονοφασική γραμμή με καθαρό και λείο αγωγό.....	σελ.23
2.1.3 Επίδραση της καταστάσεως της επιφάνειας του αγωγού και των καιρικών συνθηκών.....	σελ.24
2.1.4 Απώλειες Corona τριφασικών γραμμών μεταφοράς.....	σελ.25
2.1.5 Διάταξη των αγωγών στο χώρο , αποστάσεις αγωγών.....	σελ.27
2.1.6 Αποστάσεις αγωγών πυλώνων.....	σελ.28
2.2 Μονωτήρες.....	σελ.30
2.2.1 Λειτουργία του μονωτήρα σε ρυπαρό περιβάλλον.....	σελ.31
2.2.2 Μηχανισμός υπερπήδησης ρυπασμένων μονωτήρων.....	σελ.32
2.2.3 Πρότυπο για υπερπήδηση ρυπασμένων μονωτήρων.....	σελ.33
2.2.4 Μετρήσεις και δοκιμές.....	σελ.35
2.2.5 Μέτρηση διαστάσεων μονωτήρα.....	σελ.35
2.2.6 Μέτρηση σοβαρότητας ρύπανση.....	σελ.38
2.2.7 Δοκιμές ρύπανσης.....	σελ.40
2.2.8 Δοκιμή καθαρής ομίχλης.....	σελ.41
2.2.9 Τρόποι άμβλυνσης υπερπήδησης λόγω ρύπανσης.....	σελ.43
2.2.10 Κατηγοριοποίηση μονωτήρων.....	σελ.45
2.2.11 Υλικά κατασκευής των μονωτήρων.....	σελ.45
2.2.12 Πολυμερείς (μη κεραμικοί) μονωτήρες.....	σελ.46
2.2.13 Ταξινόμηση με βάση τον τρόπο σύνδεσης.....	σελ.51
2.2.14 Δοκιμές και προδιαγραφές.....	σελ.56

2.2.15 Επιθεώρηση εν-λειτουργία και τρόποι αστοχίας.....	σελ.57
2.3 Πύργοι (πυλώνες).....	σελ.57
2.3.1 Θεμελιώσεις .πύργων.....	σελ.62
2.3.2 Προσδιορισμός όδευσης (χάραξης) μιας γραμμής μεταφοράς .....	σελ.63
2.3.3 Υπολογισμός βέλους ανάρτησης και δυνάμεων σε εναέριους αγωγούς.....	σελ.63
2.3.4 Οριζόντια ανάρτηση.....	σελ.64
2.3.5 Λοξή ανάρτηση .....	σελ.65
2.3.6 Γενική λύση της εξίσωσης της ανάρτησης , αλυσοειδής καμπύλη.....	σελ.67
2.3.7 Λοξή ανάρτηση .....	σελ.70
2.3.8 Εξισώσεις κατάστασης ενός αναρτημένου αγωγού.....	σελ.71
2.3.9 Υπολογισμός του πρόσθετου φορτίου ανέμου και πάγου.....	σελ.73
2.3.10 Μηχανικές ταλαντώσεις των γραμμών.....	σελ.76
2.3.11 Γειώσεις πύργων εναέριων γραμμών μεταφοράς.....	σελ.77

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών μεταφοράς**

3.1 Ωμική αντίσταση.....	σελ.83
3.2 Επαγωγή γραμμής μεταφοράς.....	σελ.87
3.2.1 Πεπλεγμένη ροή αγωγού που ανήκει σε ομάδα παράλληλων αγωγών – Επαγωγή αγωγών.....	σελ.88
3.2.2 Υπολογισμός του $\lambda_{ε\epsilon i}^P$ .....	σελ.89
3.2.3 Υπολογισμός του $\lambda_{\epsilon\sigma i}$ .....	σελ.90
3.2.4 Υπολογισμός του $\lambda_{ij}^P$ .....	σελ.92
3.2.5 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με ισαπέχουσες φάσεις .....	σελ.94
3.2.6 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις – Αντιμετάθεση φάσεων....	σελ.94
3.2.7 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με ισαπέχουσες φάσεις που αποτελούνται από αγωγούς δέσμης.....	σελ.96

3.2.8 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις που αποτελούνται από αγωγούς δέσμης .....	σελ.98
3.2.9 Επαγωγή τριφασικής γραμμής διπλού κυκλώματος.....	σελ.100
3.3 Χωρητικότητα γραμμής μεταφοράς.....	σελ.102
3.3.1 Δυναμικό αγωγού που ανήκει σε ομάδα παράλληλων αγωγών – Χωρητικότητα αγωγών.....	σελ.103
3.3.2 Επίδραση της γης στην χωρητικότητα αγωγών – Η μέθοδος των ειδώλων.....	σελ.107
3.3.3 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με ισαπέχουσες φάσεις.....	σελ.109
3.3.4 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις.....	σελ.110
3.3.5 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις που αποτελούνται από αγωγούς δέσμης .....	σελ.110
3.3.6 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής διπλού κυκλώματος.....	σελ.112

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ηλεκτρικά μεγέθη εναέριων γραμμών μεταφοράς**

4.1 Εισαγωγή.....	σελ.113
4.2 Κοντές γραμμές, γραμμές με αμελητέο χωρητικό ρεύμα.....	σελ.114
4.2.1 Πτώση τάσης σε κοντές γραμμές .....	σελ.115
4.2.2 Ο συντελεστής ισχύος.....	σελ.116
4.2.3 Πτώση τάσης σε γραμμή με αμελητέα αντίσταση.....	σελ.117
4.2.4 Σχέσεις ισχύος σε κοντές γραμμές.....	σελ.118
4.2.5 Λειτουργικό διάγραμμα μιας κοντής γραμμής.....	σελ.119
4.2.6 Έλεγχος της τάσης.....	σελ.122
4.3 Η ομοιογενής γραμμή.....	σελ.123
4.3.1 Διαφορική εξίσωση της ομοιογενούς γραμμής.....	σελ.123
4.3.2 Φυσικές ερμηνείες των λύσεων.....	σελ.126
4.4 Ειδικές περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς.....	σελ.132
4.4.1 Γραμμές χωρίς απώλειες.....	σελ.132

4.4.2 Γραμμή χωρίς απώλειες, εν κενό.....σελ.133	σελ.133
4.4.3 Γραμμές χωρίς απώλειες με βραχυκυκλωμένο άκρο.....σελ.135	σελ.135
4.4.4 Φόρτιση γραμμής με καταναλωτή ίσο με την κυματική αντίσταση $\bar{Z}_R = \bar{Z}_0$ .....σελ.135	σελ.135
4.4.5 Γραμμή χωρίς απώλειες φοριζόμενη με ωμικό φορτίο .....σελ.137	σελ.137
4.4.6 Γραμμή χωρίς απώλειες με οποιοδήποτε φορτίο.....σελ.138	σελ.138
4.5 Η γραμμή μεταφοράς σαν τετράπολο.....σελ.140	σελ.140
4.5.1 Ισχύς εισόδου και εξόδου μιας γραμμής.....σελ.143	σελ.143
4.5.2 Λειτουργικά διαγράμματα μακρών γραμμών .....σελ.146	σελ.146
4.6 Φόρτιση εναέριων γραμμών και απώλειες.....σελ.150	σελ.150
4.6.1 Υπολογισμός συνεχούς φόρτισης εναέριων αγωγών.....σελ.150	σελ.150
4.6.2 Υπολογισμός επιτρεπόμενου ρεύματος σε βραχυχρόνιες καταπονήσεις .....σελ.152	σελ.152
4.6.3 Απώλειες ισχύος, οικονομική διατομή αγωγών.....σελ.153	σελ.153
4.7 Άεργος Ισχύς και αντιστάθμιση.....σελ.155	σελ.155
4.7.1 Η σημασία της αντιστάθμισης, διόρθωση του συντελεστή ισχύος.....σελ.155	σελ.155
4.7.2 Άεργος ισχύς σε γραμμές μεταφοράς.....σελ.158	σελ.158
4.7.3 Μέσα αντιστάθμισης.....σελ.160	σελ.160
4.7.4 Πυκνωτές.....σελ.160	σελ.160
4.7.5 Αυτεπαγωγές.....σελ.161	σελ.161
4.7.6 Στρεφόμενος ή σύγχρονος πυκνωτής.....σελ.162	σελ.162
4.7.7 Ρυθμιζόμενα συστήματα.....σελ.162	σελ.162
4.7.8 Πυκνωτές σειράς.....σελ.164	σελ.164
4.7.9 Πυκνωτές με παράλληλα πηνία με κορεσμένο πυρήνα .....σελ.165	σελ.165

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υποσταθμοί**

5.1 Υποσταθμοί δικτύου.....σελ.167	σελ.167
5.2 Στοιχεία υποσταθμών.....σελ.171	σελ.171
5.2.1 Αποζεύκτες γειωτές.....σελ.171	σελ.171
5.2.2 Ασφάλειες ισχύος υψηλής τάσης (ΗΗ-ασφάλειες) .....σελ.172	σελ.172



5.2.3 Διακόπτες ισχύος.....σελ.174	σελ.174
5.2.3.1 Διακόπτες λαδιού.....σελ.175	σελ.175
5.2.3.2 Διακόπτες ροής αερίου SF <sub>6</sub> . ....σελ.176	σελ.176
5.2.3.3 Διακόπτες αέρα.....σελ.178	σελ.178
5.2.3.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη διακοπών ισχύος.....σελ.179	σελ.179
5.2.4.1 Μετασχηματιστές ισχύος.....σελ.180	σελ.180
5.2.4.2 Θεωρητική ανάλυση λειτουργίας πραγματικού μονοφασικού μετασχηματιστή.....σελ.182	σελ.182
5.2.4.3 Λόγος των τάσεων στις δυο πλευρές του μετασχηματιστή .....σελ.183	σελ.183
5.2.4.4 Ρεύμα μαγνήτισης ενός ιδανικού μετασχηματιστή.....σελ.186	σελ.186
5.2.4.5 Λόγος ρευμάτων και υπολογισμός της πολικότητας μετασχηματιστή.....σελ.190	σελ.190
5.2.4.6 Τριφασικοί μετασχηματιστές.....σελ.192	σελ.192
5.2.4.7 Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων στους τριφασικούς μετασχηματιστές.....σελ.193	σελ.193
5.2.4.8 Μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων.....σελ.199	σελ.199
5.2.4.9 Απώλειες ισχύος σε μετασχηματιστές.....σελ.202	σελ.202
5.2.4.10 Κατασκευαστικές απόψεις επί των μετασχηματιστών ισχύος.....σελ.204	σελ.204
5.2.4.11 Τυλίγματα μετασχηματιστών και πυρήνας . ....σελ.204	σελ.204
5.2.4.12 Μέτρηση της θερμοκρασίας σε μετασχηματιστές .....σελ.206	σελ.206
5.2.4.13 Ψύξη των μετασχηματιστών.....σελ.207	σελ.207
5.2.4.14 Μόνωση των μετασχηματιστών. ....σελ.209	σελ.209
5.2.4.15 Αντοχή των μετασχηματιστών σε υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα, δοκιμές.....σελ.212	σελ.212
5.2.5 Αυτομετασχηματιστές.....σελ.213	σελ.213
5.2.5.1 Σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων ενός αυτομετασχηματιστή.....σελ.215	σελ.215
5.2.6 Μετασχηματιστές μετρήσεων.....σελ.217	σελ.217
5.2.6.1 Μετασχηματιστές τάσης.....σελ.217	σελ.217
5.2.6.2 Μετασχηματιστές εντάσεως .....σελ.219	σελ.219
5.3 Διατάξεις ζυγών και πυλών σε υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσεις.....σελ.222	σελ.222
5.4 Διατάξεις σταθμών υψηλής τάσης.....σελ.229	σελ.229
5.4.1 Υπαίθριοι υποσταθμοί Υψηλής τάσης.....σελ.229	σελ.229

5.4.2 Σταθμοί υψηλής τάσης με μεταλλικό περίβλημα.....σελ.231
Βιβλιογραφία .....σελ.233

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### “Εισαγωγή στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”

#### 1.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι εγκαταστάσεις τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν συγκεντρωμένη την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε ορισμένα γεωγραφικά σημεία. Η ισχύς ακολούθως μεταφέρεται στις περιοχές κατανάλωσης όπου και διανέμετε μέσω δικτύου. Η ανάπτυξη των συστημάτων αυτών απαίτησε την παράλληλη ανάπτυξη όλων των συναφών συσκευών και γνωστικών αντικειμένων. Από μηχανολογικής πλευράς αναπτύχθηκαν οι κινητήριες θερμικές και υδραυλικές μηχανές. Τέτοιες είναι οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας καυσίμου και λεβήτων, με τους ατμοστροβίλους στα θερμικά εργοστάσια παραγωγής και οι υδραυλικές εγκαταστάσεις με τους υδροστροβίλους στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Από ηλεκτρολογικής πλευράς απαιτήθηκε η ανάπτυξη μεγάλων και φθηνών γεννητριών υψηλής απόδοσης, της τεχνολογίας των εγκαταστάσεων, των τριφασικών συστημάτων και της τεχνολογίας μεταφοράς με υψηλή τάση.

Ενώ ήδη το 1866 προτάθηκε η στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή από τον Werner von Siemens χρειαστήκαν αρκετά χρόνια για να γίνουν οι πρώτες εγκαταστάσεις. Την περίοδο 1873-1878 εμφανιστήκαν σε διάφορες εκθέσεις (π.χ. στην έκθεση της Βιέννης το 1873) απλά συστήματα ισχύος ενός ίππου που λειτουργούσαν με συνεχές ρεύμα 60-120V και ατμομηχανές. Παράλληλα έγιναν προτάσεις για ένα κεντρικό σύστημα παραγωγής και διανομής ισχύος για φωτισμό από τον T. Edison και άλλους και ο N. Tesla κατοχύρωσε το 1887 επτά διπλώματα ευρεσιτεχνίας στα συστήματα με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η αρχική εμπορική εκμετάλλευση του ηλεκτρισμού είχε σαν βάση την παραγωγή συνεχούς ρεύματος. Το συνεχές ρεύμα παραγόταν από γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, από τις οποίες τροφοδοτούνταν άμεσα μικρά ηλεκτρικά φορτία, όπως ο φωτισμός δρόμων, καταστημάτων και θεάτρων. Τον Ιανουάριο του 1882 το εργοστάσιο παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας του Λονδίνου (Holborn Viaduct Generating Station), ένα από τα πρώτα εργοστάσια παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας, περιέλαβε γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ισχύος 60kW, η οποία κινούταν από οριζόντια ατμογεννήτρια. Η συνεχής τάση παραγωγής ήταν 110V. Το ίδιο έτος εγκαταστάθηκε στην πολιτεία της Νέας Υόρκης ένα παρόμοιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Pearl Street), από τον Tomas Edison. Το σύστημα αποτελείτο από μια ατμομηχανή η οποία κινούσε μια γεννήτρια συνεχούς τάσης η οποία με την σειρά της, τροφοδοτούσε με ηλεκτρική ενέργεια 59 καταναλωτές οι οποίοι βρίσκονταν σε μια ακτίνα 1.5 χιλιομέτρου. Τα φορτία τα

οποία ήταν αποκλειστικά λαμπτήρες πυρακτώσεως, τροφοδοτούνταν με συνεχή τάση 110 V διαμέσου υπόγειων καλωδίων. Το 1885 στο Βερολίνο εγκαταστάθηκαν 702 kW σε 6 μονάδες των 117 kW με εμβολοφόρους ατμομηχανές που κινούσαν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος με τάση 100V. Προφανώς αυτή η τάση δεν επέτρεπε μεταφορά μεγάλης ισχύος σε αποστάσεις πάνω από μερικές εκατοντάδες μετρά, με λογικές διατομές καλωδίων.

Αργότερα αποδείχτηκε ότι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με μεγαλύτερη τάση, απαραίτητη για την οικονομική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, δεν ήταν εύκολη με συνεχή τάση, λόγω κυρίως των υψηλών απωλειών ενέργειας που οφείλονται στο φαινόμενο Joule καθώς και στην πτώσεις τάσης. Έτσι δημιουργήθηκαν οι πρώτοι σταθμοί εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίοι είχαν την δυνατότητα να εξυπηρετούν περισσότερα φορτία σε μακρινότερες αποστάσεις.

Η ανάγκη για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενη υψηλή τάση, οδήγησε στην κατασκευή μιας συσκευής η οποία θα μπορούσε να ανυψώσει την τάση ώστε να μεταφερθεί και στην συνέχεια να την υποβιβάσει ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει τους καταναλωτές. Η συσκευή αυτή είναι ο μετασχηματιστής, ο οποίος ακόμη και σήμερα χαίρει καθολικής αποδοχής και χρησιμοποιείται στα ανά τον κόσμο συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφεύρεση του μετασχηματιστή οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος, τα οποία απέκτησαν μεγαλύτερη αίγλη μετά την ανάπτυξη των πολυφασικών συστημάτων μεταφοράς από τον Nikola Tesla.

Η πρώτη τριφασική παραγωγή και μεταφορά έγινε το 1890. Στην πόλη Lauffen της Δ. Γερμανίας εγκαταστάθηκε υδροηλεκτρική μονάδα των 138 kW και η ισχύς μεταφέρθηκε σε απόσταση 175km υπό τάση 25kV στην Φρανκφούρτη της Δ. Γερμανίας.

Η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης γινόταν, αρχικά, από γεννήτριες ισχύος 10000hp, η δε διανομή γινόταν με τάση 10kV και εξυπηρετούσε τα φορτία της πόλης, στην οποία ήταν εγκατεστημένος ο σταθμός παραγωγής. Έτσι, σιγά σιγά, κάθε πόλη εγκαθιστούσε τον δικό της σταθμό παραγωγής για την εξυπηρέτηση των φορτίων της, οι δε σταθμοί αυτοί, μαζί με τις εγκαταστάσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν κυρίως ιδιωτικές επιχειρήσεις.

Τέτοιες ιδιωτικές επιχειρήσεις υπήρχαν και στην χώρα μας με κυριότερη εξ αυτών την αγγλική επιχείρηση ΗΕΑΠ, η οποία εξυπηρετούσε την περιοχή Αθηνών και Πειραιά.

Η εκβιομηχάνιση όμως των κρατών και η, κατά συνέπεια αυτής, αύξηση της ηλεκτρικής ζήτησης των οικιακών καταναλώσεων, οδήγησε στην ενιαία εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας από έναν φορέα, που στις περισσότερες χώρες είναι κρατικός και αυτό για να είναι δυνατή η εφαρμογή προγραμμάτων κοινωνικής πολιτικής, όπως για παράδειγμα η ηλεκτροδότηση μικρών και απομονωμένων χωριών. Τότε ο ενιαίος αυτός κρατικός φορέας ανήκει στις λεγόμενες *επιχειρήσεις κοινής ωφελείας*.

Η αύξηση της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια δημιούργησε και την ανάγκη κατασκευής σταθμών μεγαλύτερης ισχύος και μεταφοράς της ενέργειας με πολύ υψηλή τάση. Έτσι σήμερα στην χώρα μας έχουμε τάση μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος 150 ή 400kV, ενώ σε άλλες χώρες ως τάση μεταφοράς χρησιμοποιείται ακόμα και η τάση των 700 kV. Εκτός αυτών

οι σταθμοί παραγωγής έπαυσαν να τροφοδοτούν μεμονωμένα τις πόλεις, πλησίον των οποίων είχαν εγκατασταθεί, αλλά οι σύγχρονοι σταθμοί παραγωγής διασυνδέονται, ανεξάρτητα από την θέση εγκατάστασης τους, με τρόπο ώστε το δίκτυο μεταφορά και διανομής μιας χώρας να είναι ενιαίο. Εξαίρεση είναι δυνατή στην περίπτωση εξυπηρέτησης φορτίων νησιών στα οποία, λόγω του κόστους μεταφοράς με υπόγεια καλώδια, προτιμάτε η εγκατάσταση αυτόνομων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι πίνακες που ακολουθούν δείχνουν την ανάπτυξη των συστημάτων μεταφοράς.

Έτος	1930	1950	1960	1975
Ισχύς σε MW	50	100	600	1200
Θερμικός βαθμός %	20	30	40	40
Πίεση ατμού σε bar	30	130	250	250
Θερμοκρασία ατμού °C	400	500	545	550

Πίνακας 1.1: Σταθμοί στην ανάπτυξη των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Έτος	Τοποθεσία	Τάση (kV)	Απόσταση (km)
1890	F.R.G. , Lauffen/Nekar-Frankfurt/M	25	175
1912	F.R.G. , Lauchhammer-Riesa	110	100
1924	U.S.A ,San Francisco	220	400
1929	F.R.G. , Brauweiler-Brudenz	220	400
1952	Sweden , Hejlsberg	380	800
1961	England-France	±100 (DC)	
1963	U.S.A. και UDSSR ταυτόχρονα	500	
1965	Canada, Quebec	735	600
1974	Mozambique , Cambora Bassa	±533 (DC)	1500

Πίνακας 1.2: Σταθμοί στην ανάπτυξη των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

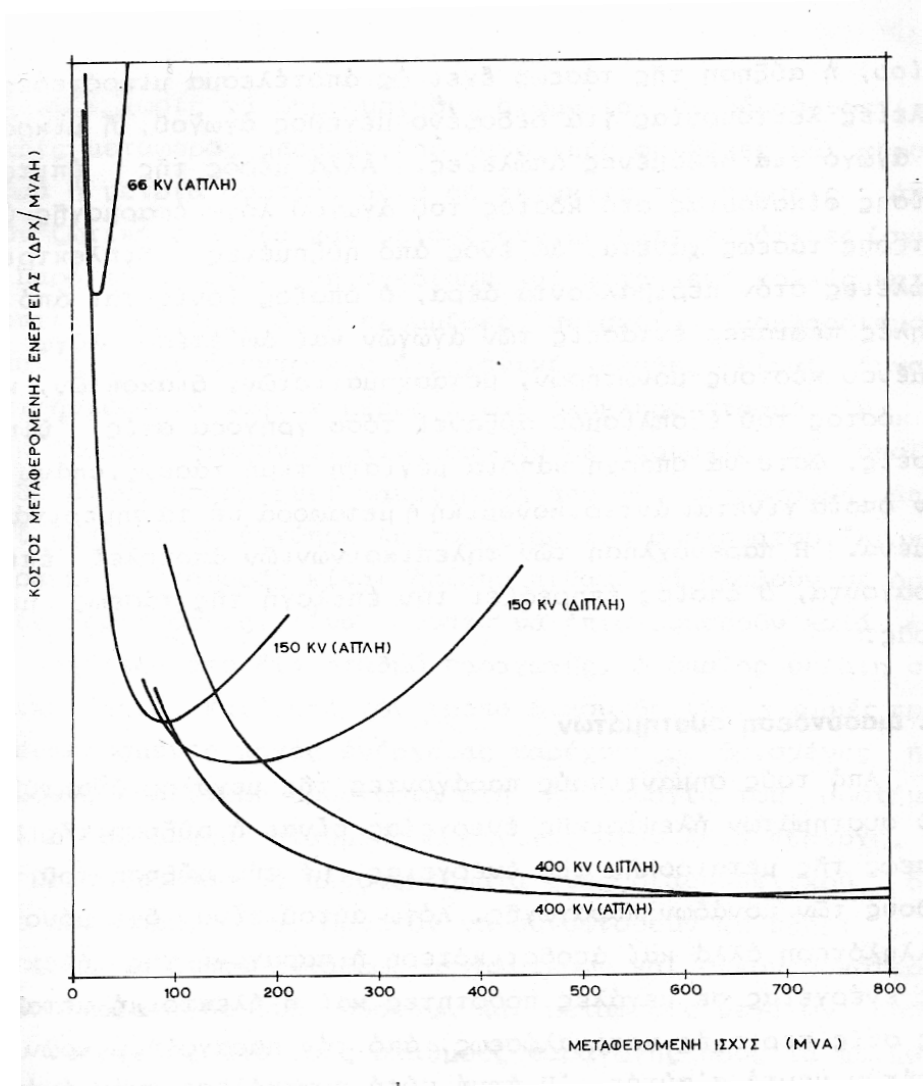
## 1.2 Η ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης

Οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης γραμμών υπερυψηλής τάσης, δηλαδή άνω των 230kV, έγινε σε χώρες, οι οποίες βασίζονταν κυρίως στην υδροηλεκτρική ενέργεια για την βιομηχανική τους ανάπτυξη (Σουηδία, Καναδάς, Ε.Σ.Σ.Δ.). Η πρώτη γραμμή μεταφοράς 400 kV στην Ευρώπη άρχισε να λειτουργεί στην Σουηδία το 1952. Η επιτυχία της γραμμής αυτής συνέτεινε στην υιοθέτηση από τις χώρες της Ευρώπης μιας τάσης 380/400 kV, για την διασύνδεση των δικτύων τους. Η Ρωσία , η οποία δεν υιοθέτησε την τάση των 400 kV, εισήγαγε κατά το 1959 την τάση των 500 kV.

Η σχετική αφθονία των ορυκτών καυσίμων, τα οποία διέθεταν ορισμένες χώρες, τις κατέστησε σχετικά ανεξάρτητες από τις ανάγκες μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Εν τούτης τα οικονομικά και λειτουργικά οφέλη, τα οποία προσφέρει ένα ισχυρό δίκτυο μεταφοράς, είναι αναμφισβήτητα πλέον και συνέτειναν στην αλματώδη ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς μετά

τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Σήμερα βρίσκουμε σε λειτουργία τάσεις μεταφοράς 765 kV και μελετώνται τάσεις 1000-2000 kV για το προσεχές μέλλον.

Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί με μια γραμμή μεταφοράς, είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσης αυτής και επομένως είναι προφανής ο ρόλος της υπερυψηλής τάσης στην επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς. Επιπλέον οι μειωμένες απώλειες, τις οποίες συνεπάγεται η μεταφορά με υπερυψηλή τάση, καθιστούν την λειτουργία με αυτές οικονομικότερη, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 1.1.



Σχήμα 1.1: Το κόστος μεταφοράς με διάφορες τάσεις συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος.

Το διάγραμμα αυτό δίνει το κόστος μεταφοράς σε δραχμές ανά MVA και 100 km γραμμής μεταφοράς απλού και διπλού κυκλώματος του Ελληνικού Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς.

Το κόστος μεταφοράς αποτελεί τη συνισταμένη του κόστους εγκαταστάσεων, απωλειών και συντήρησης της γραμμής. Οι καμπύλες του διαγράμματος δείχνουν σαφώς ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τάση, τόσο χαμηλότερο είναι το κόστος μεταφοράς ενέργειας.

Η εκλογή μιας τάσης μεταφοράς αποτελεί κυρίως θέμα αντισταθμίσεως των αρχικών επενδύσεων στη γραμμή και τον λοιπό εξοπλισμό από το κόστος λειτουργίας. Μέχρι ένα ορισμένο σημείο, η αύξηση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες λειτουργίας για δεδομένο μέγεθος αγωγού. Όταν όμως η τάση αυξηθεί πέραν του σημείου αυτού παρατηρούμε αύξηση των διηλεκτρικών απωλειών του αγωγού λόγω ιονισμού του περιβάλλοντος αέρα, που οφείλονται στις υψηλές πεδιακές εντάσεις και επιπλέον αυξάνει το κόστος των μονωτήρων, μετασχηματιστών, διακοπών κτλ. Η παρενόχληση των τηλεπικοινωνιών λόγω του φαινομένου Corona, δίνει έναν επιπλέον περιορισμό στο ύψος της τάσης των γραμμών μεταφοράς.

### 1.3 Διασύνδεση συστημάτων

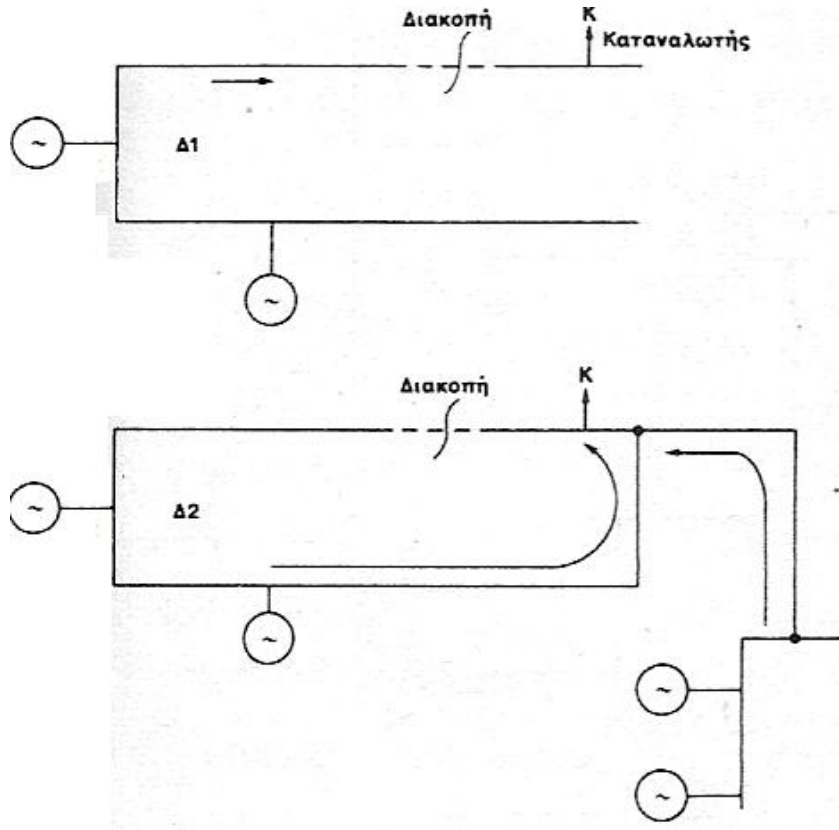
Από τους σημαντικότερους παράγοντες της μεγάλης ανάπτυξης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αύξηση της απόδοσης της μετατροπής ενέργειας, με την αύξηση του μεγέθους των μονάδων παραγωγής. Λόγο αυτού είναι όχι μόνο καταλληλότερη αλλά και αποδοτικότερη η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες και η ηλεκτρική μεταφορά της στις περιοχές καταναλώσεως, από την παραγωγή μικρών ποσοτήτων κοντά σε αυτές. Η αρχή αυτή συντέλεσε στην ανάπτυξη μεγάλων μονάδων παραγωγής και στην διασύνδεση των φορτίων, ώστε οι σταθμοί παραγωγής να μπορούν να εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό μικρών φορτίων. Σήμερα μονάδες της τάξης των 300 MW χρησιμοποιούνται σε μικρά συστήματα και μονάδες μεγαλύτερες των 1000 MW εγκαθίστανται σε μεγάλα συστήματα. Με έναν αριθμό τέτοιων μονάδων στον ίδιο σταθμό παραγωγής, η συνολική ισχύς παραγωγής ενός σύγχρονου σταθμού είναι δυνατόν να κυμαίνεται από 600 έως μερικές χιλιάδες MW. Όταν υφίστανται τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις ισχύος καθίσταται όλο και πιο σημαντική η ύπαρξη διασύνδεσης μεταξύ σταθμών παραγωγής, ώστε σε κατάσταση ανάγκης το φορτίο μιας περιοχής να μπορεί να τροφοδοτείται από πολλές γειτονικές περιοχές μαζί χωρίς να δημιουργείτε ανωμαλία. Οι διασυνδετικές γραμμές μεταφοράς υπό κανονικές συνθήκες φέρουν ελαφρά ή μέτρια φορτία, αλλά σε έκτακτες περιπτώσεις αποκτούν ζωτική σημασία και μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος.

Ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα ενός διασυνδεδεμένου δικτύου μεταφοράς συνοψίζονται ως εξής :

- Δυνατότητα ένταξης μεγαλύτερων και φθηνότερων μονάδων παραγωγής στο σύστημα και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα μείζονα κέντρα φορτίου.
- Μείωση απαιτήσεων εφεδρείας κάθε μιας από τις διασυνδεδεμένες περιοχές ή συστήματα.
- Οικονομία ισχύος με εποχιακές ανταλλαγές ισχύος μεταξύ περιοχών ή συστημάτων που έχουν διαφορετικές ανάγκες κατά τις διάφορες εποχές.
- Οικονομία ισχύος λόγω διαφορών στη ζήτηση ισχύος μεταξύ των διασυνδεδεμένων συστημάτων ή περιοχών κατά την διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

- Δυνατότητα εξυπηρέτησης απρόβλεπτης ζήτησης ισχύος λόγω έκτακτης ανάγκης.

Σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο όπου σχηματίζονται δακτύλιοι λόγω της διασύνδεσης μπορεί, αν διακοπεί μια γραμμή, να γίνει η τροφοδότηση από άλλη διεύθυνση, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα 1.2.

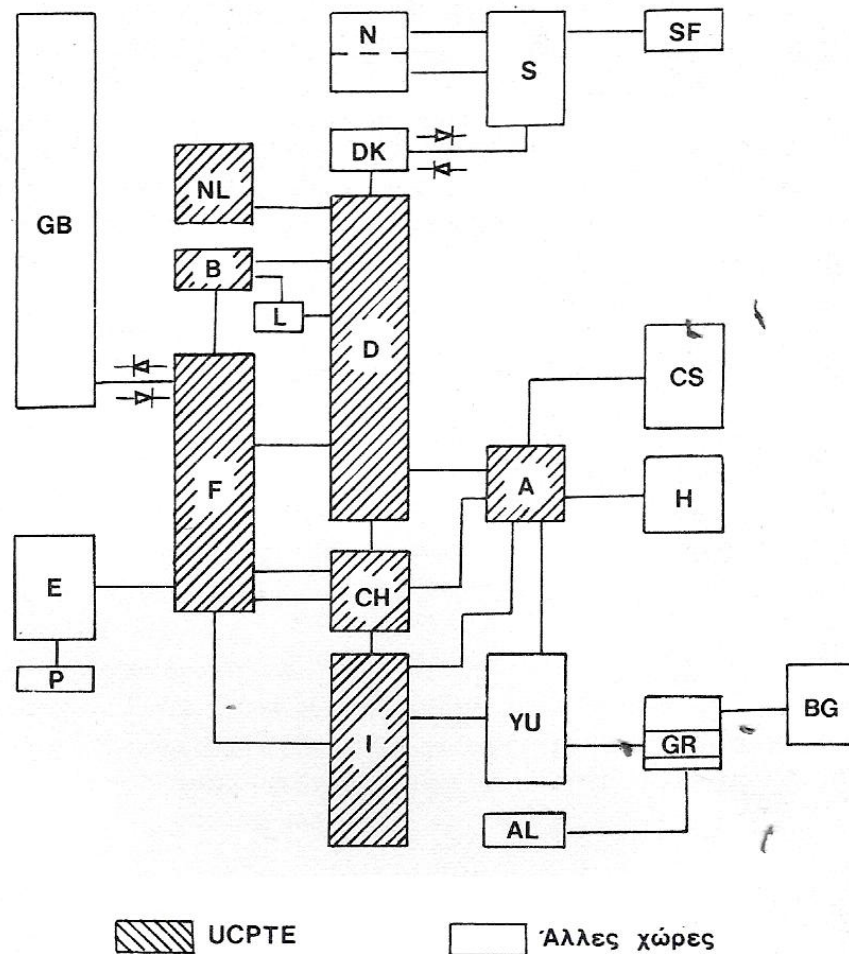


Σχήμα 1.2: Ακτινικό δίκτυο Δ1 και δακτυλοειδές Δ2. Στο δεύτερο δίκτυο Δ2 υπάρχει συνέχεια τροφοδότησης του καταναλωτή K ακόμα και μετά από διακοπή.

Σήμερα σχεδόν όλη η Δ. Ευρώπη είναι διασυνδεδεμένη πράγμα που αυξάνει την αξιοπιστία και δίνει την δυνατότητα ανταλλαγών και αγοραπωλησιών ηλεκτρικής ενέργειας. Ο οργανισμός λέγεται Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l' Electricite ή συντομευμένα UCPTÉ. Εκεί ανήκουν τα κράτη Βέλγιο, Γερμανία, Γαλλία, Ιταλία, Λουξεμβούργο, Ολλανδία, Αυστρία, Ελβετία. Ανάλογες διασυνδέσεις υφίστανται και στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης. Υπάρχουν διασυνδέσεις γειτονικών χωρών, όπως δείχνει το σχήμα 1.3 και με την Ελλάδα μέσω Γιουγκοσλαβίας.

Για να λάβουμε μια ιδέα του τι ισχύς ζητάτε, αναφέρεται ότι η μέγιστη ισχύς το χειμώνα του 1984 ήταν για την Ελλάδα 4,0 GW, Γαλλία 47,4 GW, Δυτική Γερμανία 55,9 GW, ο σύνδεσμος της UCPTÉ είχε 192 GW περίπου. Προφανώς οι ισχύς που μπορούν να δώσουν οι εγκαταστάσεις πρέπει να είναι μεγαλύτερες π.χ. κατά 30-40% από τις παραπάνω ζητούμενες, για λόγους εφεδρείας.





Σχήμα 1.3: A=Αυστρία, AL=Αλβανία, B=Βέλγιο, BL=Βουλγαρία, CH=Ελβετία, CS=Τσεχοσλοβακία, D=Δ.Γερμανία, DK=Δανία, E=Ισπανία, F=Γαλλία, GB=Μ.Βρετανία, GR=Ελλάδα, H=Ουγγαρία, I=Ιταλία, L=Λουξεμβούργο, N=Νορβηγία, NL=Ολλανδία, P=Πορτογαλίας, S=Σουηδία, SF=Φινλανδία, YU=Γιουγκοσλαβία.

#### 1.4 Το Ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το 1889 φτάνει το "ηλεκτρικό" στην Ελλάδα. Η Γενική Εταιρεία Εργοληψιών, κατασκευάζει στην Αθήνα, στην οδό Αριστείδου, την πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Το πρώτο κτίριο που φωτίζεται είναι τα Ανάκτορα και πολύ σύντομα ο ηλεκτροφωτισμός επεκτείνεται στο ιστορικό κέντρο της Πρωτεύουσας. Τον ίδιο χρόνο η τουρκοκρατούμενη Θεσσαλονίκη θα δει κι αυτή το ηλεκτρικό φως καθώς Βελγική Εταιρία αναλαμβάνει απ' τις Τουρκικές αρχές το φωτισμό και την τροchioδρόμηση της πόλης με την κατασκευή εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Δέκα χρόνια αργότερα οι πολυεθνικές εταιρίες ηλεκτρισμού κάνουν την εμφάνισή τους στην Ελλάδα. Η αμερικανική εταιρία Thomson-Houston με τη συμμετοχή της Εθνικής Τράπεζας θα ιδρύσει την Ελληνική Ηλεκτρική Εταιρία που θα αναλάβει την ηλεκτροδότηση κι άλλων

μεγάλων Ελληνικών πόλεων. Μέχρι το 1929 θα ηλεκτροδοτηθούν 250 πόλεις με πληθυσμό πάνω από 5.000 κατοίκους.

Στις πιο απόμακρες περιοχές, που ήταν ασύμφορο για τις μεγάλες εταιρίες να κατασκευάσουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, την ηλεκτροδότηση αναλαμβάνουν ιδιώτες ή δημοτικές και κοινοτικές αρχές κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια.

Το 1950 υπήρχαν στη Ελλάδα 400 περίπου εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιούσαν ήταν το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας που φυσικά εισάγονταν από το εξωτερικό.

Η κατάτμηση αυτή της παραγωγής, σε συνδυασμό με τα εισαγόμενα καύσιμα, εξωθούσε την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στα ύψη (τριπλάσιες ή και πενταπλάσιες τιμές απ' αυτές που ίσχυαν στις Ευρωπαϊκές χώρες). Το ηλεκτρικό λοιπόν ήταν ένα αγαθό πολυτελείας, αν και τις περισσότερες φορές παρεχόταν με ωράριο και οι ξαφνικές διακοπές ήταν σύνηθες φαινόμενο.

Για να εξαπλωθεί η ηλεκτρική ενέργεια ομοιόμορφα σε όλη τη χώρα και για να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο στη βιομηχανία όσο και στην ύπαιθρο, έπρεπε να υπάρξουν οι εξής προϋποθέσεις:

- Αξιοποίηση των εγχώριων πλουτοπαραγωγικών πόρων, που απαιτούσε όμως τεράστιες επενδύσεις, οι οποίες δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν από τους μεμονωμένους βιομηχάνους παραγωγής ενέργειας.
- Ενοποίηση της παραγωγής σε ενιαίο διασυνδεδεμένο δίκτυο, ώστε τα φορτία να επιμερίζονται σε εθνική κλίμακα.
- Ύπαρξη ενιαίου φορέα που θα επέτρεπε τον επιμερισμό του κόστους ανάμεσα στις κερδοφόρες και ζημιωγόνες περιοχές.

Τις προϋποθέσεις αυτές κάλυψε η ΔΕΗ με τον πλέον επιτυχή τρόπο.

Έτσι τον Αύγουστο του 1950 ιδρύεται η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, για να λειτουργήσει "χάριν του δημοσίου συμφέροντος" με σκοπό τη χάραξη και εφαρμογή μιας εθνικής ενεργειακής πολιτικής, η οποία μέσα από την εντατική εκμετάλλευση των εγχώριων πόρων, να κάνει το ηλεκτρικό ρεύμα κτήμα και δικαίωμα του κάθε Έλληνα πολίτη, στη φθηνότερη δυνατή τιμή.

Αμέσως με την ίδρυσή της, η ΔΕΗ στρέφεται προς την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας ενώ ξεκινά και η ενοποίηση των δικτύων σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Τα πλούσια λιγνιτικά κοιτάσματα του ελληνικού υπεδάφους που είχαν νωρίτερα εντοπισθεί, άρχισαν να εξορύσσονται και να χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που δημιουργούσε. Παράλληλα, η Επιχείρηση ξεκίνησε την αξιοποίηση της δύναμης των υδάτων με την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών στα μεγάλα ποτάμια της χώρας.

Αρκετά νωρίς, το 1956, αποφασίστηκε η εξαγορά όλων των ιδιωτικών και δημοτικών επιχειρήσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να υπάρχει ένας ενιαίος φορέας

διαχείρισης. Σιγά-σιγά, η ΔΕΗ εξαγόρασε όλες αυτές τις επιχειρήσεις και ενέταξε το προσωπικό τους στις τάξεις της.

Σ' όλα αυτά τα χρόνια της παρουσίας της, αγωνίστηκε και πέτυχε την ενεργειακή αυτονομία της χώρας και έφερε σε πέρας το σπουδαίο έργο του εξηλεκτρισμού της δημιουργώντας ταυτόχρονα το μεγαλύτερο μέρος της βαριάς ελληνικής βιομηχανίας.

Το ηλεκτρικό ρεύμα έφτασε με επάρκεια σε κάθε άκρη της ελληνικής γης. Από τα μικρά ακριτικά νησιά μας ως τους πιο απόμακρους οικισμούς της ορεινής Ελλάδας.

Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις εναέρια γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV, που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια, κυρίως από το σπουδαιότερο για την χώρα μας ενεργειακό κέντρο παραγωγής, της Δυτικής Μακεδονίας. Στην περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας, που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, που καταναλώνεται περίπου το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας. Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει επιπλέον εναέρια και υπόγειες γραμμές των 400 kV και 150 kV, καθώς επίσης και υποβρύχια καλώδια των 66 kV και 150 kV που συνδέουν την Άνδρο και τα Επτάνησα, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο, ενώ έχει προγραμματιστεί η επέκταση των υποβρύχιων διασυνδέσεων και προς τα μεγαλύτερα νησιά των Κυκλάδων.

Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς, το 2008, αποτελείτο συνολικά από 11.092 km γραμμών μεταφοράς, όπως φαίνεται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Τύπος γραμμής	400 kV/DC	400 kV/AC	150 kV	66 kV	Σύνολο
Εναέρια	107	2535	8044	39	10725
Υποβρύχια	160		140	15	315
Υπόγειες	-	4	48	-	52
Σύνολο	267	2539	8232	54	11092

Πίνακας 1.3: Γραμμές διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς (km)

Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς συνδέεται με τα συστήματα Μεταφοράς της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Π.Γ.Δ.Μ., της Ιταλίας και της Τουρκίας. Η διασύνδεση με τη Βουλγαρία αποτελείται από μία γραμμή των 400 kV, ενώ η διασύνδεση με την Π.Γ.Δ.Μ γίνεται με δύο γραμμές των 400 kV, μετά την πρόσφατη αναβάθμιση της γραμμής των 150 kV σε 400 kV. Η διασύνδεση με την Αλβανία αποτελείται από μία γραμμή των 150 kV και μία των 400 kV. Η συνολική ονομαστική δυναμικότητα αυτών των διασυνδέσεων είναι περίπου 4400 MW. Η διασύνδεση με την Ιταλία αποτελείται από υποβρύχιο καλώδιο και γραμμή συνεχούς ρεύματος (HVDC) ισχύος 500 MW. Η διασύνδεση με την Τουρκία ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2008 με την κατασκευή γραμμής 400 kV απλού κυκλώματος με τρίδικο αγωγό (2000 MVA). Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς επανασυνδέθηκε και λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το Διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα της UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity). Οι παραπάνω διασυνδέσεις σε συνδυασμό με την ενίσχυση των διασυνδέσεων των γειτονικών χωρών στα βόρεια σύνορα της

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ελλάδας συμβάλλουν σημαντικά στην ασφάλεια λειτουργίας του Συστήματος Μεταφοράς και στην ανάπτυξη των εμπορικών ανταλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας με τις χώρες αυτές και την ευρύτερη περιοχή της Ν.Α. Ευρώπης.



Σχήμα 1.4: Γεωγραφικός χάρτης διασυνδεδεμένου συστήματος.

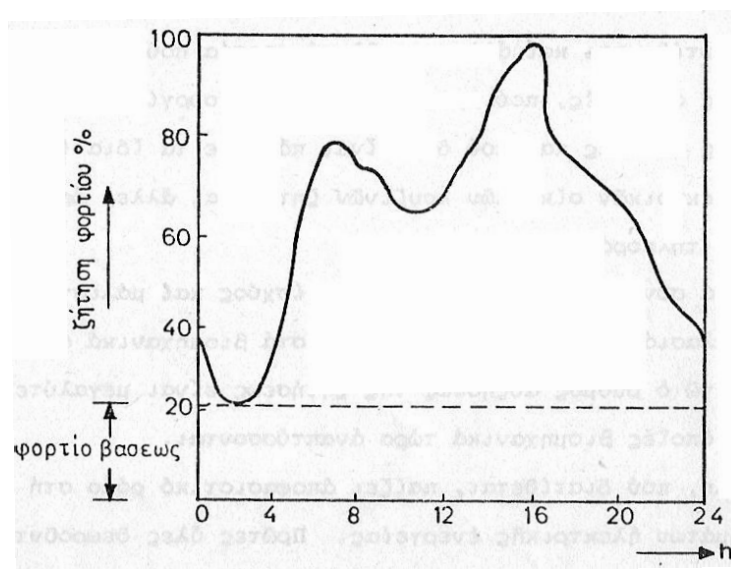
## 1.5 Βασικές απαιτήσεις ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρόλο του ότι η τεχνική ανάλυση στο εν λόγω σύγγραμμα θα περιοριστεί στα κυκλώματα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος και δεν θα συμπεριλάβει τα κυκλώματα διανομής, υπάρχουν ορισμένες γενικές καθολικές απαιτήσεις, οι οποίες πρέπει να ικανοποιούνται από οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο του, είτε αυτό είναι σύστημα μεταφοράς, είτε διανομής. Οι γενικές αυτές απαιτήσεις είναι οι εξής:

- Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση και οι τάσεις των φάσεων να βρίσκονται σε ισορροπία.
- Το κύμα της τάσης πρέπει να έχει ημιτονοειδής μορφή και η συχνότητα να είναι σταθερή.
- Η αποδοτικότητα θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή, η οποία συνεπάγεται ελάχιστο κόστος μεταφοράς.
- Η επίδραση του συστήματος μεταφοράς στις εγκαταστάσεις άλλων κοινωφελών επιχειρήσεων, όπως των τηλεφωνικών ή ραδιοφωνικών, προκαλούμενη από ηλεκτρικές ή μαγνητικές παρεμβολές, θα πρέπει να περιορίζεται μεταξύ παραδεκτών ορίων.

## 1.6 Χαρακτηριστικά επιδρώντα στην παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας

Κατά την σχεδίαση και τον υπολογισμό ενός συστήματος παράγωγης και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:



Σχήμα 1.5: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου.

- Η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι δυνατόν να αποθηκευθεί και συνεπώς είναι εφικτός μόνο πολύ μικρός έλεγχος του ηλεκτρικού φορτίου σε οποιονδήποτε χρόνο. Οι μηχανικοί

ελέγχου προσπαθούν να εξισώσουν την ισχύ εξόδου των γεννητριών με το συνδεδεμένο στα άκρα τους φορτίο υπό τις προδιαγραφόμενες τάση και συχνότητα. Η δυσκολία αυτής της προσπάθειας φαίνεται καθαρά από την μελέτη της *ημερήσιας καμπύλης του ηλεκτρικού φορτίου* η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5, και δείχνει πως μεταβάλλεται η ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά την διάρκεια ενός 24ώρου. Είναι σαφές ότι υπάρχει ένα ηλεκτρικό φορτίο που ζητάτε συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και λέγεται *φορτίο βάσης*, στο οποίο προστίθενται και αλλά μεταβλητά φορτία που εξαρτώνται από της ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και που δεν είναι πάντοτε τα ίδια.

- Υπάρχει μια συνεχής αύξηση της ζήτησης ισχύος και μάλιστα η ζήτηση αυτή έχει παρατηρηθεί να διπλασιάζεται κάθε δέκα χρόνια στα βιομηχανικά ανεπτυγμένα κράτη, ενώ ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης είναι μεγαλύτερος σε χώρες, οι οποίες βιομηχανικά τώρα αναπτύσσονται.

- Η πρώτη ύλη, που διατίθεται, παίζει αποφασιστικό ρόλο στην μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πρώτες ύλες θεωρούνται, ως γνωστών, τα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα και οι υδατοπτώσεις. Το είδος των σταθμών παράγωγης, που πρόκειται να εγκατασταθούν, είναι συνάρτηση της ποσότητας, της ποιότητας και του κόστους των πρώτων υλών, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευσή τους στα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν χώρες, όπως για παράδειγμα η Μ. Βρετανία, πλούσιες σε στερεά καύσιμα και πτωχές σε υδατοπτώσεις, στην περίπτωση αυτή, για την εξυπηρέτηση του φορτίου βάσεως της ημερήσιας ζήτησης, κατασκευάζονται θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παράγωγης, ενώ η καμπύλη των φορτίων αιχμής εξυπηρετείται από υδροηλεκτρικούς ή από αεριοστροβιλικούς σταθμούς. Ακόμα σε πολλά κράτη έχουμε παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μη συμβατικά, πυρηνικά καύσιμα σε πυρηνικούς σταθμούς.

## 1.7 Ορισμοί, συμβολισμοί, συμβάσεις

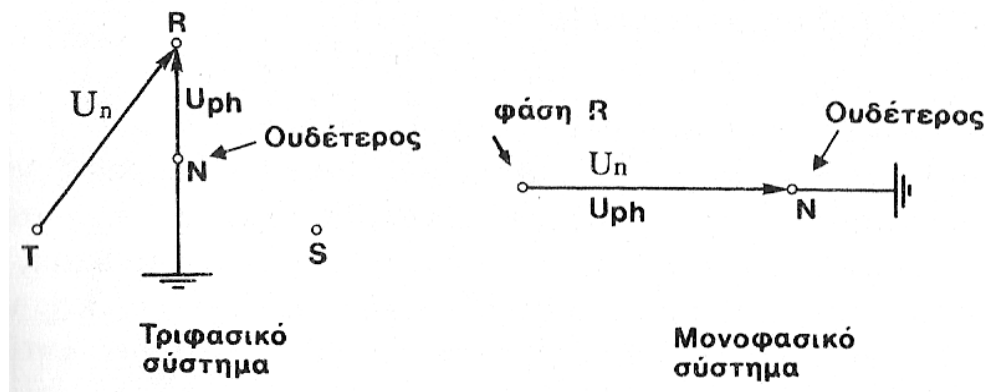
### 1.7.1 Ονομαστική τάση

Τα δίκτυα χαρακτηρίζονται μεταξύ άλλων και από την ονομαστική τους τάση. Είναι η τάση για την οποία έχουν κατασκευαστεί να λειτουργούν και στην καταπόνηση της οποίας πρέπει να αντέχουν συνεχώς.

Σε ένα τριφασικό ή n-φασικό σύστημα ορίζουμε σαν *ονομαστική τάση*  $U_n$  την ενεργό 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, ισοζυγισμένα συστήματα (Σχήμα 1.6).

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

Για το μονοφασικό σύστημα είναι :  $U_n = U_{ph}$



Σχήμα 1.6: Ονομαστικές τάσεις σε τριφασικό και σε μονοφασικό σύστημα.

Σε συσκευές, τα τελευταία χρόνια, δεν χρησιμοποιείτε ο όρος ονομαστική τάση, αλλά κατά IEC ο όρος *τάση υπολογισμού* (rated voltage),  $U_r$ . Πέραν τούτου γίνεται και χρήση της μέγιστης διαρκώς επιτρεπόμενης τάσης  $U_m$  και της τάσης λειτουργίας  $U_b \approx U_n$  (0,9...1,1).

Δηλαδή αν μια τριφασική συσκευή είναι των  $U_r = 20\text{kV}$ , αυτό σημαίνει ότι η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των ακροδεκτών φάσεων είναι 20kV, όποτε η τάση μεταξύ ακροδεκτών και ουδετέρου είναι  $20/\sqrt{3} = 11,5\text{kV}$ . Σε μια μονοφασική συσκευή των  $U_r = 220\text{V}$ , η τάση μεταξύ φάσης και ουδετέρου είναι 220V. Οι χρονικά μέγιστες τιμές των παραπάνω τάσεων είναι κατά  $\sqrt{2}$  μεγαλύτερες.

Οι τρεις φάσεις του δικτύου έχουν συνήθως την ονομασία, σύμφωνα με τους κανονισμούς της IEC και VDE (L1,L2,L2) ή (A,B,C) ή (a,b,c) ακόμα χρησιμοποιούνται και οι παλιές ονομασίες (R,S,T). Παρόμοια, οι ακροδέκτες των μηχανών φέρουν συχνά την παλιά ονομασία (U/X, V/Y, X/Z) για την υψηλή τάση και (u/x, v/y, w/z) για την χαμηλή τάση. Η νέα ονομασία είναι (U1/U2, V1/V2, W1/W2) ή (u1/u2, v1/v2, w1/w2).

### 1.7.2 Συχνότητα

Αν δεν γίνεται ιδιαίτερη μνεία, τα δίκτυα που αναφέρονται στο σύγκραμα αυτό είναι τριφασικά συχνότητας  $f = 50\text{Hz}$ ,  $\omega = 2\pi f = 314,1593 \text{ S}^{-1}$ .

### 1.7.3 Συμβολισμοί μεγεθών

Χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη συμβολίζονται με μικρά γράμματα, π.χ. τάση  $u(t)$ . Μιγαδικά μεγέθη συμβολίζονται με γραμμή πάνω από το αντίστοιχο κεφαλαίο γράμμα, π.χ. τάση  $\bar{U}$ , ενεργές τιμές χαρακτηρίζονται με κεφαλαίο γράμμα π.χ. τάση  $U$ .

Μήτρες ή διανύσματα παριστάνονται με παχιά γράμματα (έντονη γραφή) π.χ.  $\mathbf{I} = (I_1, I_2, I_3)$ .

Μεγέθη εκφρασμένα στο ποσοστιαίο σύστημα pu (per unit system) συμβολίζονται με μικρά γράμματα. π.χ.  $u=1$  pu για τάση ίση με μονάδα, η αντίστοιχα για μιγαδικά μεγέθη  $\bar{u} = 0,86 + i0,30$ .

### 1.7.4 Μετατροπές ημιτονοειδών μεγεθών σε μιγαδικά μεγέθη

Ημιτονοειδή μεγέθη, π.χ. η τάση:

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

μετασχηματίζεται κατά DIN 5475 σε ένα μιγαδικό  $\bar{U}$ . Αν αυτόν τον μετασχηματισμό τον συμβολίσουμε με  $A$  είναι :

$$\bar{U} = A\{u(t)\} = U \cdot e^{i\varphi_u} = U \cdot \cos\varphi_u + iU \cdot \sin\varphi_u = U \left[ \varphi_u \right]$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός, ας τον συμβολίσουμε με  $A^{-1}$ , ορίζετε ως εξής :

$$u(t) = A^{-1}\{\bar{U}\} = \sqrt{2}\text{Re}(\bar{U} \cdot e^{i\omega t}) = \sqrt{2}\text{Re}(U \cdot e^{i\omega t + \varphi_u}) = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u)$$

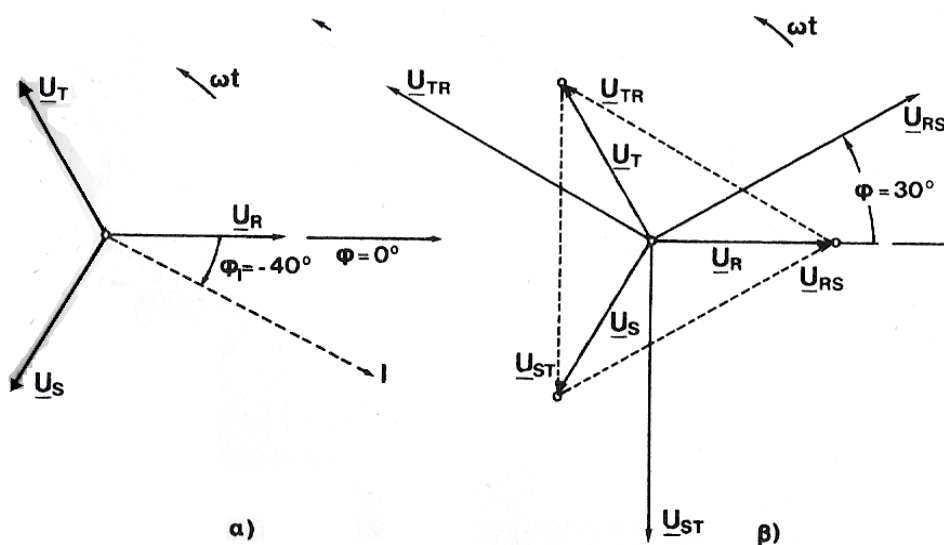
### 1.7.5 Σε τριφασικό σύστημα με ουδέτερο οι φασικές τάσεις $\bar{U}_R, \bar{U}_S, \bar{U}_T$ νοούνται από την φάση στον ουδέτερο.

Οι πολικές τάσεις ορίζονται σε ένα σύστημα ως εξής:

Πρώτη τάση  $\bar{U}_{RS} = \bar{U}_R - \bar{U}_S$

Δεύτερη τάση  $\bar{U}_{ST} = \bar{U}_S - \bar{U}_T$

Τρίτη τάση  $\bar{U}_{TR} = \bar{U}_T - \bar{U}_R$



Σχήμα 1.7: α) Διάνυσμα αναφοράς ενός τριφασικού συστήματος είναι πάντα η πρώτη φάση R. β) Διάγραμμα φασικών και πολικών τάσεων.



Αν οι  $\bar{U}_R, \bar{U}_S, \bar{U}_T$  είναι ένα ορθό σύστημα, δηλαδή αν η σειρά διαδοχής των είναι  $\bar{U}_R \rightarrow \bar{U}_S \rightarrow \bar{U}_T$ , τότε και οι τάσεις  $\bar{U}_{RS}, \bar{U}_{ST}, \bar{U}_{TR}$  έχουν την σειρά διαδοχής  $\bar{U}_{RS} \rightarrow \bar{U}_{ST} \rightarrow \bar{U}_{TR}$ .

### 1.7.6 Φάση αναφοράς

Σαν φάση αναφοράς σε ένα τριφασικό σύστημα ορίζεται η πρώτη φάση, η φάση A ή η φάση R σύμφωνα με τον DIN 13321 . π.χ. αν ένα ρεύμα δοθεί με γωνία  $-40^\circ$  ( $I_{-40^\circ}$ ) αυτό σημαίνει ότι έπεται της τάσης  $\bar{U}_R$  κατά  $40^\circ$ . Αν δοθεί η τάση ενός τριφασικού συστήματος σαν μιγαδικός, τότε πρέπει αυτή να είναι η τάση της φάσης R. Αν λείπει ο δείκτης σε μια τάση τότε υπονοείτε ότι, αυτή είναι η πρώτη φάση του δικτύου.

### 1.7.7 Μονάδες φυσικών μεγεθών

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

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

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

### 1.7.8 Σύμβολα συσκευών

Τα σύμβολα ηλεκτρικών συσκευών είναι σύμφωνα με τα DIN εγχειρίδια 7 και 107. Τα πιο συνήθη σύμβολα είναι στο παράρτημα (π 1.3) στο τέλος του παρόντος συγκράματος.

### 1.7.9 Σύμβολα τύπων

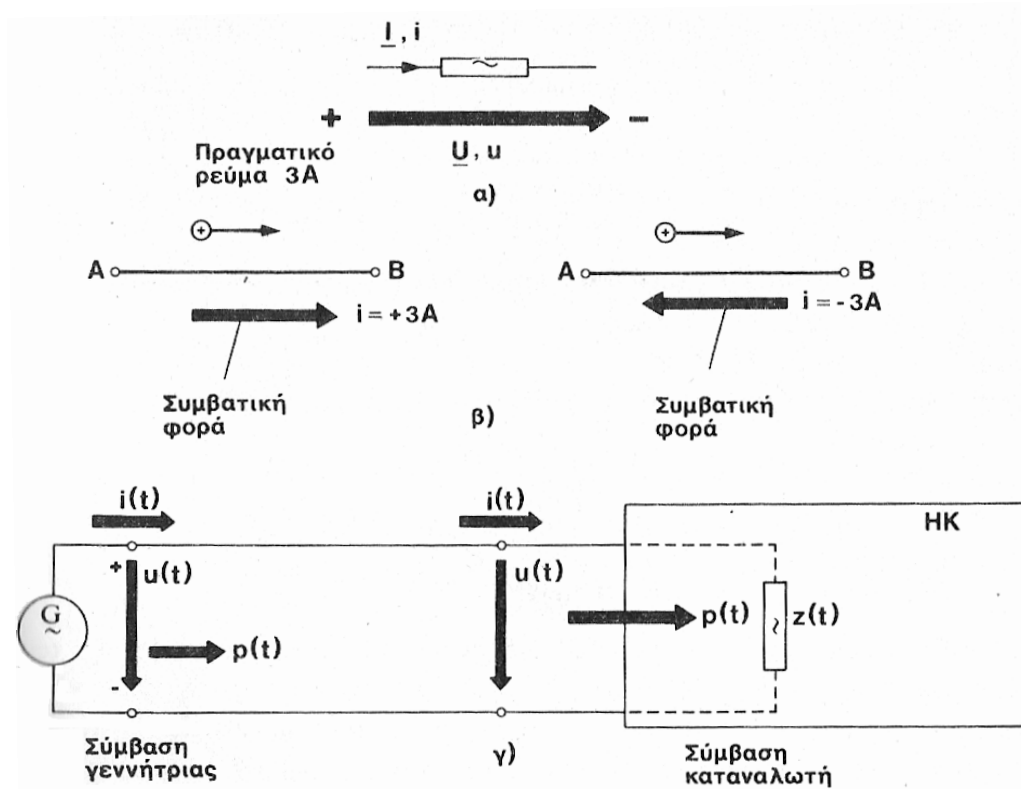
Σύμβολα που χρησιμοποιούνται στους τύπους είναι κατά κανόνα, τα ηλεκτρολογικά κατά DIN 4897, τα μηχανολογικά κατά DIN 40121 και γενικά κατά DIN1304. Ευρίσκονται στα εγχειρίδια DIN, αριθμός 22 και 202.

### 1.7.10 Φορές αναφοράς τάσεων, ρευμάτων, ισχύος.

Τα μεγέθη *ρεύμα*, *τάση*, *ροή* *ισχύος* ορίζονται πλήρως από έναν αριθμό και μια κατεύθυνση. Την κατεύθυνση (ή φορά) την ορίζουμε με ένα πρόσημο και μια *συμβατική φορά*. Η συμβατική φορά είναι αυθαίρετη για το ρεύμα και την πτώση τάσης. Για παράδειγμα αν το ρεύμα 3 A ρέει από A στ B τότε και οι δύο συμβατικές φορές επιτρέπονται. Αν η πραγματική και η συμβατική φορά συμπίπτουν, τότε έχουμε το πρόσημο + αλλιώς το αντίθετο (σχήμα 1.8).

Το βέλος δείχνει την κατεύθυνση που ελαττώνεται (που πέφτει) η τάση.

Ισχύει ότι  $u(t)=z(t)i(t)$ . Σχετικά με τις φορές των ρευμάτων χρησιμοποιούνται, όπως φαίνεται και στο σχήμα, δυο συμβάσεις, η σύμβαση της γεννήτριας αριστερά όπου το ρεύμα εξέρχεται από την γεννήτρια και η σύμβαση του καταναλωτή όπου το ρεύμα εισέρχεται στον καταναλωτή. Δηλαδή θετική ισχύς, π.χ.  $P=100\text{MW}$  σημαίνει την μεν σύμβαση γεννήτριας ότι εξέρχεται από το δίπολο της γεννήτριας, για την δε σύμβαση καταναλωτή ότι εισέρχεται στο δίπολο του καταναλωτή.



Σχήμα 1.8: Φορές αναφοράς α) τάσης β) ρεύματος. Σύμβαση αναφοράς γ) καταναλωτή και δ) γεννήτριας.

Η συμβατική φορά της ισχύος δεν είναι αυθαίρετη αλλά δείχνει την ροή ισχύος που θα πρόεκυπτε αν το ρεύμα και η πτώση τάσης είχαν τις συμβατικές φορές τους (που ελέγχθησαν αυθαίρετα).

Η μιγαδική ισχύς  $\bar{S}$  ορίζεται σε ένα δίπολο τάσης  $\bar{U}$  και ρεύματος  $\bar{I}$  όπως παρακάτω, χρησιμοποιώντας το συζυγές ρεύμα  $\bar{I}^*$ :

$$\bar{S} = P + iQ = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = U(I_w + iI_b), \quad P = U \cdot I_w, \quad Q = U \cdot I_b$$

Όπου:

$P$ = ισχύς (W),

$Q$ = άεργος ισχύς (Var),

$\bar{I} = I_w + iI_b$ = ρεύμα με βάση αναφοράς την τάση,

$I_w$ = ενεργό ρεύμα =  $I \cdot \cos\phi$ ,

$$I_b = \text{άεργο ρεύμα} = I \cdot \sin\varphi,$$

$\varphi =$  γωνία καταναλωτή  $\varphi > 0$  για επαγωγικό και  $\varphi < 0$  για χωρητικό φορτίο,

$$\bar{I} = I \left| \underline{\varphi}_i \right.$$

$$\bar{U} = U \left| \underline{\varphi}_u \right.$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i.$$

Το παρακάτω σχήμα δείχνει, για διάφορες θέσεις των διανυσμάτων τάσης και έντασης, τι πρόσημο έχουν η πραγματική και η άεργος ισχύς και τι σημαίνει το πρόσημο αυτό για την σύμβαση του καταναλωτή και την σύμβαση της γεννήτριας. Η σημασία του πρόσημου είναι διαφορετική στην σύμβαση του καταναλωτή απ' ό,τι στην σύμβαση γεννήτριας.

	<p><i>Σύμβαση καταναλωτή:</i> Το ηλεκτρικό κύκλωμα, ΗΚ, συμπεριφέρεται επαγωγικά και απορροφά ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q.</p> <p><i>Σύμβαση γεννήτριας:</i> Η μηχανή G συμπεριφέρεται χωρητικά και παράγει ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q.</p>
	<p><i>Σύμβαση καταναλωτή:</i> Το ΗΚ, συμπεριφέρεται χωρητικά, απορροφά ενεργή ισχύ P και παράγει άεργη ισχύ Q.</p> <p><i>Σύμβαση γεννήτριας:</i> Η μηχανή G συμπεριφέρεται επαγωγικά και παράγει ενεργή ισχύ P και καταναλώνει άεργη ισχύ Q.</p>
	<p><i>Σύμβαση καταναλωτή:</i> Το ΗΚ, συμπεριφέρεται χωρητικά και παράγει ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q.</p> <p><i>Σύμβαση γεννήτριας:</i> Η μηχανή G συμπεριφέρεται επαγωγικά και απορροφά ενεργή ισχύ P και άεργη ισχύ Q από το ΗΚ.</p>
	<p><i>Σύμβαση καταναλωτή:</i> Το ηλεκτρικό κύκλωμα, ΗΚ, συμπεριφέρεται επαγωγικά παράγει ενεργή ισχύ P και καταναλώνει άεργη ισχύ Q.</p> <p><i>Σύμβαση γεννήτριας:</i> Το ΗΚ, συμπεριφέρεται χωρητικά, απορροφά ενεργή ισχύ P και παράγει άεργη ισχύ Q.</p>

Σχήμα 1.9: δυνατές θέσεις διανυσμάτων τάσης και ρεύματος σε μονοφασικό σύστημα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### “Φυσικά στοιχεία εναέριων γραμμών μεταφοράς”

#### Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η φυσική πλευρά των συστημάτων μεταφοράς και τα βασικά στοιχεία, τα οποία συνθέτουν ένα κύκλωμα μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς λειτουργούν υπό υψηλή τάση και για τον λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για την ανθρώπινη ζωή. Έτσι είναι απαραίτητο να εγκαθίστανται κατά τρόπο ώστε να αποφεύγεται η προσέγγιση ανθρώπων στους αγωγούς των γραμμών, πλην φυσικά του εξουσιοδοτημένου προσωπικού, το οποίο θα πρέπει να λαμβάνει τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Είναι επίσης ουσιώδες να προκαλούν την ελάχιστη δυνατή επίδραση σε άλλες κανονικές δραστηριότητες του περιβάλλοντος. Οι απαιτήσεις αυτές είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν κατά τρεις τρόπους: α) Με την χρησιμοποίηση εναέριων γραμμών, δηλαδή διέλευση των αγωγών πάνω από το έδαφος, σε προκαθορισμένο ύψος ασφαλείας, β) Με την χρησιμοποίηση υπόγειων γραμμών, δηλαδή με την όδευση των γραμμών εντός του εδάφους και γ) Με την χρησιμοποίηση κατάλληλου περιβλήματος για τους αγωγούς. Η τελευταία μέθοδος εφαρμόζεται κατά κανόνα μόνο για μικρές αποστάσεις ή μέσα σε κτήρια, όπου οι γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας οδεύουν μέσα σε οχετούς ή σήραγγες. Ως εκ τούτου, για μεγάλες γενικά αποστάσεις, μόνο οι εναέριες και υπόγειες γραμμές χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εναέριες γραμμές αποτελούν τον απλούστερο και φθηνότερο τρόπο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, εφ' όσον υπάρχει η δυνατότητα στήριξης των αγωγών. Συγκεκριμένα, μέχρι αποστάσεις στήριξης 500m, δεν παρουσιάζονται προβλήματα. Από 1000m και πάνω οι κατασκευές γίνονται πολυδάπανες. Απαγορευτική περίπτωση εφαρμογής εναέριων γραμμών είναι η τροφοδότηση απομακρυσμένων νησιών ή ενδεχομένως διασταύρωση ποταμών ή καναλιών μεγάλου πλάτους.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι εναέριες γραμμές σε σύγκριση με τα υπόγεια καλώδια είναι η δυνατότητα γρήγορης και φθηνής επισκευής και συντήρησης, πράγμα σημαντικό για την λειτουργία ενός δικτύου.

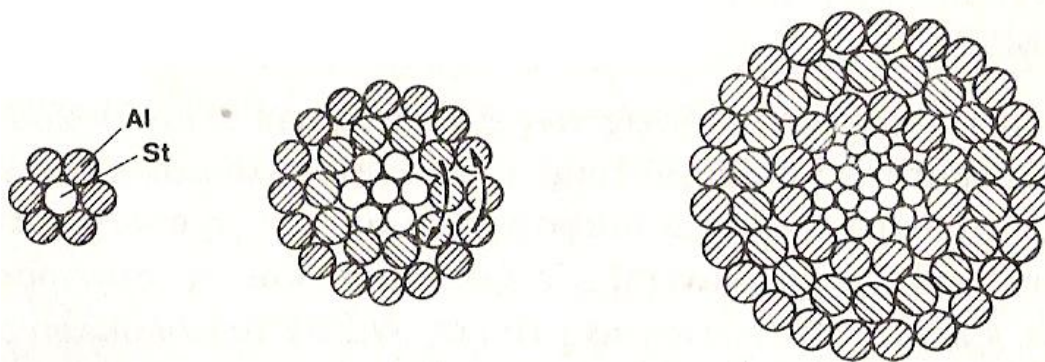
Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Τρεις αγωγούς φάσεων, πιθανόν έναν ή δυο αγωγούς προστασίας κατά των κεραυνών. Οι τρεις αγωγοί των φάσεων μαζί λέγονται *τριφασικό κύκλωμα* ή απλώς *κύκλωμα*.
- Πυλώνες ή πύργους πάνω στους οποίους αναρτώνται ή στηρίζονται οι αγωγοί μέσω μονωτήρων.
- Μονωτήρες ανάρτησης ή στήριξης.
- Στοιχεία σύνδεσης, απόσβεσης μηχανικών ταλαντώσεων και λοιπές αρματώσεις που προστατεύουν τους μονωτήρες από την επίδραση ηλεκτρικών τόξων ή που, ενδεχομένως, ελαττώνουν τις ηλεκτρικές πεδιακές εντάσεις.

## 2.1 Αγωγοί

Για την διαμόρφωση των αγωγών το μέταλλο κυλινδρούται “εν θερμώ ” σε ράβδους κυκλικής διατομής, οι οποίες σύρονται διαδοχικά “εν ψυχρώ” δια μέσου οπών ελλατούμενων διαμέτρων μέχρι να επιτευχθεί η τελική διάμετρος του σύρματος.

Οι κατασκευαζόμενοι κατά τον προηγούμενο τρόπο και αποτελούμενοι από ένα σύρμα αγωγοί λέγονται *μονόκλωνοι*. Στα εναέρια δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί γιατί όταν η διατομή τους είναι μεγαλύτερη από  $16\text{mm}^2$  γίνονται δύσκαμπτοι και επομένως είναι δύσκολη η εγκατάστασή τους, αλλά κυρίως λόγω των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών στα σημεία στήριξής τους, οι οποίες οφείλονται βασικά στην επίδραση του ανέμου, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος θραύσης των αγωγών. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται οι *πολύκλωνοι* αγωγοί οι οποίοι αποτελούνται από περισσότερα σύρματα συστρεφόμενα με τρόπο ώστε να σχηματίζουν έναν πολλαπλό αγωγό σαν συρματόσκοινο εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ευκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 2.1: Πολύκλωνοι αγωγοί εναερίων γραμμών. α) Αγωγός από ηλεκτροτεχνικό αλουμίνιο E-Al ή ηλεκτροτεχνικό χαλκό E-Cu. β, γ) Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ενίσχυση (ACSR).

Ένας πολύκλωνος αγωγός αποτελείται από έναν κεντρικό κλώνο κυκλικής διατομής ο οποίος περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα διαδοχικά στρώματα, αποτελούμενα από κλώνους ίσης διατομής, τα οποία εφάπτονται το ένα στο άλλο και είναι εναλλάξ συνεστραμμένα κατ

αντίθετες φορές. Αν  $n$  είναι ο αριθμός των διαδοχικών στρωμάτων και  $k$  ο συνολικός αριθμός των κλώνων που αποτελούν τον αγωγό, ισχύει η σχέση:

$$k = 1 + 3 \cdot n \cdot (n + 1) \quad [2.1]$$

Επίσης εάν συμβολίσουμε με  $d$  την κοινή διάμετρο του κάθε κλώνου που αποτελεί τον αγωγό και με  $D$  την ονομαστική εξωτερική διάμετρο του αγωγού, έχουμε την σχέση:

$$D = d \cdot (2 \cdot n + 1) \quad [2.2]$$

Η διατομή του αγωγού δεν μπορεί να βρεθεί από την σχέση:

$$s = \pi D^2 / 4 \quad [2.3]$$

Γιατί μεταξύ των συρμάτων (κλώνων) υπάρχουν διάκενα. Πρώτα υπολογίζουμε τη διατομή κάθε σύρματος:

$$s = \pi d^2 / 4 \quad [2.4]$$

και κατόπιν βρίσκουμε την συνολική διατομή:

$$S = k \cdot s \quad [2.5]$$

Από άποψη κόστους, οι πολύκλωνοι αγωγοί είναι αρκετά πιο δαπανηροί από τους μονόκλωνους, γιατί εκτός από το ότι απαιτούν περισσότερο υλικό, επειδή τα σύρματα που τους αποτελούν δεν είναι ευθύγραμμα αλλά έχουν περιστραφεί σε μορφή έλικας, χρειάζονται και περισσότερα εργατικά για την κατασκευή τους. Όμως χρησιμοποιούνται ευρύτερα, γιατί όπως αναφέραμε είναι πιο εύκαμπτοι και παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι αγωγοί είναι τα εξής:

- Χαλκός εφελκυσμένος εν ψυχρώ
- Μπρούτζος (σπάνια)

- Αλουμίνιο και μάλιστα καθαρό αλουμίνιο 99,9%, το οποίο λέγεται αλουμίνιο ηλεκτροτεχνίας E-Al , ή το κράμα αλουμινίου Aldrey με περίπου εκατοστιαία σύνθεση 0,3-0,5 Mg , 0,4-0,7 Si , 0,3 Fe και το λοιπό αλουμίνιο.
- Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου-χάλυβα Al/St. Έχουν και την ονομασία Aluminum Coated Steel Reinforced Conductors ή ACSR αγωγοί.

Ο χαλκός παρουσιάζει τις καλύτερες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή έχει την μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από όλα σχεδόν τα μέταλλα και συγχρόνως, όταν είναι σκληρής ολκήσεως, παρουσιάζει αρκετά μεγάλη μηχανική αντοχή. Το μόνο μέταλλο που έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από τον χαλκό είναι ο άργυρος, αλλά προφανώς είναι εντελώς ασύμφορη η κατασκευή γραμμών από αυτό το μέταλλο. Η αγωγιμότητα του χαλκού μειώνεται όταν έχει ξένες προσμίξεις. Επίσης, μειώνεται λίγο η αγωγιμότητα του όταν κατεργαστεί εν ψυχρώ. Αυτό όμως του δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του χαλκού είναι ότι δεν διαβρώνεται εύκολα και γι αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε δίκτυα που βρίσκονται κοντά στην θάλασσα.

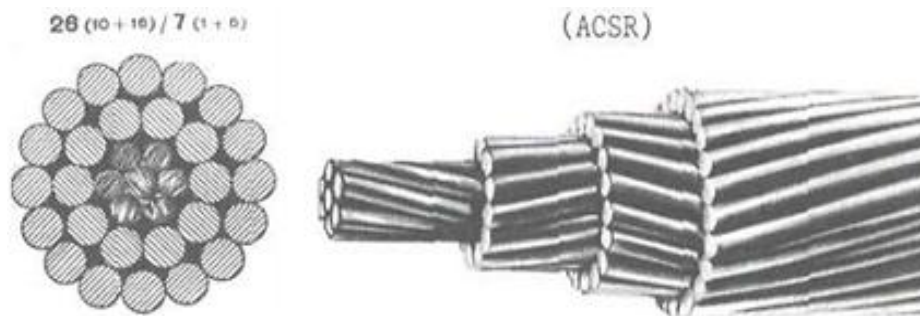
Τα μειονεκτήματα του χαλκού είναι αφ ενός μεν το μεγάλο κόστος του και αφ ετέρου δε το μεγάλο ειδικό βάρος του. Έτσι προκειμένου για τις γραμμές μεταφοράς, που απαιτούν μεγάλες ποσότητες υλικού με όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος, η χρήση του χαλκού έχει σχεδόν τελείως παραμεριστεί.

Το υλικό που αντικατέστησε τον χαλκό στην κατασκευή των γραμμών μεταφοράς είναι το αλουμίνιο το οποίο είναι τρεις φορές ελαφρύτερο και φθηνότερο από τον χαλκό. Τα βασικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι έχει το 1/2 της μηχανικής αντοχής του χαλκού και το 60% περίπου της αγωγιμότητας του. Για την αύξηση της μηχανικής αντοχής κατασκευαστήκαν αγωγοί από κράματα αλουμινίου και έτσι υπερνικώντας το βασικό μειονέκτημα του, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το μικρό βάρος του, πράγμα που έχει μεγάλη σημασία για τα έξοδα κατασκευής μιας γραμμής (στύλοι). Η διαφορά στο ειδικό βάρος είναι τόσο σημαντική, ώστε εξουδετερώνει τελείως το μειονέκτημα του ότι για την ίδια ηλεκτρική ένταση χρειάζεται κατά 60% μεγαλύτερη διατομή αλουμινίου παρά χαλκού.

Το αλουμίνιο υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται επιφανειακά. Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από περαιτέρω οξείδωση. Κοντά στην θάλασσα όμως (σε απόσταση μέχρι 1km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα, σε βάθος μέχρι και 3mm.

Μια ακόμα βελτίωση της μηχανικής αντοχής των αγωγών έγινε με την χρησιμοποίηση των αγωγών αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα ACSR. Στους αγωγούς αυτούς οι κλώνοι χάλυβα, εάν είναι περισσότεροι του ενός, είναι διατεταγμένοι σε στρώματα τα οποία αποτελούν τον πυρήνα ή ψυχή του αγωγού πάνω στην οποία είναι διατεταγμένα τα στρώματα των κλώνων αλουμινίου. Οι κλώνοι είναι συνεστραμμένοι και μάλιστα η διεύθυνση συστροφής είναι αντίθετη σε δυο γειτονικά στρώματα, πράγμα που εξασφαλίζει μια καλή συνοχή του αγωγού.

Ο πυρήνας από χάλυβα χρησιμεύει αποκλειστικά στο να δέχεται τα διάφορα μηχανικά φορτία ενώ επιφορτίζετε με ελάχιστο μόνο ποσοστό της ηλεκτρικής ισχύος του αγωγού λόγο της μικρής αγωγιμότητας που παρουσιάζει ο χάλυβας. Το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος οδεύει μέσω των συρμάτων του αλουμινίου που περιβάλλουν τον πυρήνα σε αλληπάλληλα στρώματα.



Σχήμα 2.2: Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ενίσχυση (ACSR).

Οι αγωγοί αλουμινίου-χάλυβα παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και είναι 20% ελαφρύτεροι από τους αντίστοιχους ισοδύναμης διατομής αγωγούς χαλκού. Χρησιμοποιούνται στις γραμμές υψηλής τάσης γιατί μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερο άνοιγμα των πυλώνων (απόσταση μεταξύ των πυλώνων). Επίσης είναι πιο φθηνοί και παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες λόγω του φαινομένου corona.

Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται κατά DIN ως εξής:

Al/St = διατομή του Al/διατομή του St

Π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με  $185\text{mm}^2$  Al και  $32\text{mm}^2$  St.

Οι διατομές δίνονται, σε αγγλόφωνες χώρες, και σε circular mils (CM). Ένα CM είναι ίσο με επιφάνεια κύκλου διαμέτρου  $1/1000''$  (ενός χιλιοστού της ίντσας). Πολλές φορές, χρησιμοποιείται και το MCM (στην Αμερική) ή το KCM (στην Αγγλία). Είναι:

$$1 \text{ mm}^2 = 1974,5 \text{ CM}$$

$$1 \text{ MCM} = 1 \text{ KCM} = 1000 \text{ CM} = 0,50671 \text{ mm}^2$$



### 2.1.1 Η στεμματοειδής εκκένωση (φαινόμενο Corona) στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Όταν με την αύξηση της τάσεως ή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των αγωγών μιας εναέριας γραμμής υπερβεί μία τιμή, η οποία εξαρτάται από τις επικρατούσες, ατμοσφαιρικές συνθήκες, και από την κατάσταση της επιφάνειας των αγωγών, τότε στο παρά τον αγωγό στρώμα του αέρα γίνεται έναρξη ηλεκτρικών εκκενώσεων, οι οποίες έχουν τις έξης συνέπειες:

- Παράσιτα στους, γειτονικούς ραδιοφωνικούς δέκτες.
- Πρόσθετες απώλειες στη μεταφορά της ενέργειας.
- Χαρακτηριστικό τριγμό, ο οποίος ακούγεται εύκολα.
- Θυσανοειδείς, εκκενώσεις κατά μήκος των αγωγών, ορατές στη διάρκεια της νύκτας.

Οι εκκενώσεις αυτές λέγονται "στεμματοειδείς", διεθνώς δε Korona ή Corona , και έχουν πολύ μεγάλη πρακτική σημασία γιατί, εκτός των άλλων, συνεπάγονται απώλειες και επηρεάζουν για το λόγο αυτό το κόστος μεταφοράς της ενέργειας.

### 2.1.2 Μονοφασική γραμμή με καθαρό και λείο αγωγό

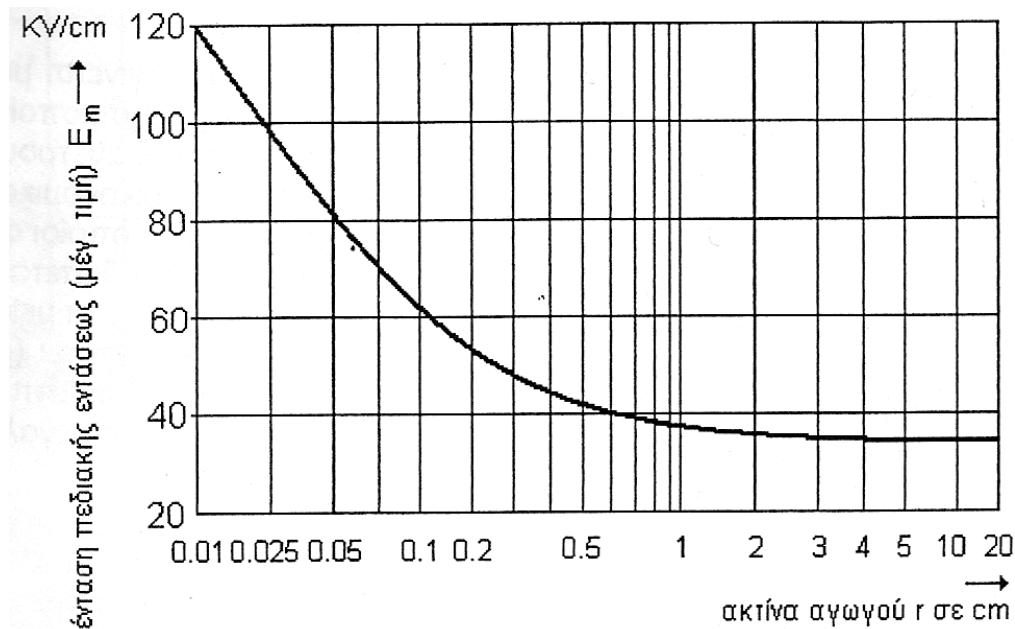
Θα εξετάσουμε πρώτα την περίπτωση μονοφασικής γραμμής με έναν αγωγό, στην οποία το κύκλωμα κλείνει από το έδαφος. Τα φαινόμενα γύρω από τον αγωγό και η διαδοχή τους εξαρτώνται από την κατάσταση της επιφάνειάς του. Έτσι, όταν αυτός, είναι απόλυτα καθαρός και λείος, αρχίζει για μια τιμή της τάσεως ενδεικνυόμενης τιμής  $U_0$ , η οποία καλείται τάση έναρξεως, να καλύπτει τον αγωγό φωτεινή αίγλη, που είναι διανεμημένη ομοιόμορφα γύρω του. Όταν, αντίθετα, ο αγωγός είναι ακάθατος ή οξειδωμένος, όπως συμβαίνει πάντα σχεδόν στην πράξη, τότε αντί της αίγλης εμφανίζονται πρώτα θύσανοι μήκους μερικών χιλιοστών του μέτρου, οι οποίοι προέρχονται από προεξοχές ή ανωμαλίες της επιφάνειας. Η τάση, στην οποία εμφανίζονται, είναι σημαντικά μικρότερη από την  $U_0$ , η αίγλη όμως εμφανίζεται μόνο όταν η τάση φτάσει την  $U_0$ . Η καθαρή αίγλη παρακολουθείται από ομαλό θόρυβο και δεν προκαλεί ραδιοφωνικά παράσιτα, αντίθετα οι θύσανοι συνοδεύονται από τριγμό και γίνονται αιτία ραδιοφωνικών ενοχλήσεων. Ταυτόχρονα με την εμφάνιση της αίγλης αρχίζει ν' αυξάνει και η χωρητικότητα του αγωγού προς τη γη, γιατί αυξάνει η φαινομένη διάμετρος του. Τόσο η αίγλη όσο και οι θύσανοι ενισχύονται με την αύξηση της τάσεως. Οι απώλειες της γραμμής οφείλονται τόσο στους θυσάνους όσο και στην αίγλη και είναι πολύ δύσκολο να τις διακρίνει κανείς. Επειδή όμως η τάση λειτουργίας των γραμμών τηρείται πάντα σχεδόν κάτω από την τάση έναρξεως  $U$ , οι απώλειες οι οφειλόμενες στο φαινόμενο Corona μπορούν να αποδοθούν εξ' ολοκλήρου στους θυσάνους. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  επί του αγωγού της γραμμής σε συνάρτηση με την τάση  $u$  της γραμμής δίδεται από την σχέση:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{2H}{r}} \quad [2.6]$$

Όπου  $r$  η ακτίνα του αγωγού και  $H$  το ύψος του από την επιφάνεια του εδάφους. Προϋποτίθεται, βέβαια, ότι η επιφάνεια του αγωγού είναι λεία και καθαρή αλλιώς, η μέγιστη ένταση υπό την αυτή τάση  $U$ , σε σημεία προεξοχών ή ανωμαλιών της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη. Όταν γνωρίζουμε την ένταση ηλεκτρικού πεδίου ενάρξεως της Corona, στην περίπτωση της απλής, χωρίς θυσάνους, αίγλης μπορούμε, με εφαρμογή της παραπάνω σχέσεως, να υπολογίσουμε την απαιτούμενη τάση της γραμμής. Στο σχήμα 2.3 δίδονται οι αναγκαίες τάσεις ενάρξεως  $E_m$  (μέγιστη τιμή) σε καθαρούς αγωγούς ακτινών  $r$  υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, από το οποίο μπορούμε να βρούμε την αντίστοιχη μέγιστη τιμή  $U_m$  της εναλλασσόμενης τάσεως ενάρξεως. Είναι δηλαδή:

$$U_m = E_m \cdot r \cdot \ln \frac{2H}{r}$$

[2.7]



Σχήμα 2.3: Ένταση πεδίου ενάρξεως  $E_m$  (μέγ. τιμή) κυλινδρικών αγωγών υπό τάση συχνότητας 50 c/s2, συνθηκών πίεσης 760 mmHg και θερμοκρασίας 20°C .

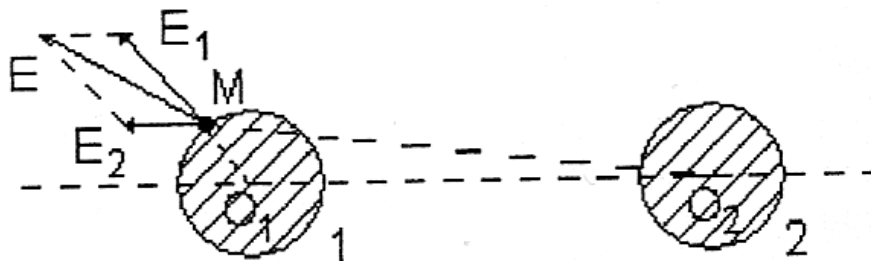
### 2.1.3 Επίδραση της κατάστασης της επιφάνειας του αγωγού και των καιρικών συνθηκών

Οι συνθήκες της προηγούμενης παραγράφου δεν συναντώνται στην πράξη. Στους αγωγούς των γραμμών προκαλούνται κατά την εγκατάστασή τους διάφορες ανωμαλίες, όπως εκδορές και άλλες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα την τοπική μεγέθυνση της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου και την αύξηση των απωλειών Corona . Προεξοχές προκαλούν επίσης ο κονιορτός, τα στρώματα λίπους, η επικάθηση καπνού κλπ. Οι ανωμαλίες αυτές επιφέρουν αύξηση των απωλειών Corona απ' ότι στην περίπτωση καθαρού και λείου αγωγού. Με την πάροδο του χρόνου οι προεξοχές αυτές εξομαλύνονται εν μέρει και τότε λέμε ότι ο αγωγός γηράσκει. Η γήρανση αυτή, η οποία οφείλεται στην επενέργεια του όζοντος της ατμόσφαιρας,

που απανθρακώνει τα οργανικά συστατικά του κονιορτού, είναι προφανώς ευνοϊκή από απόψεως απωλειών.

Οι καιρικές επίσης συνθήκες επηρεάζουν πάρα πολύ τις απώλειες Corona. Σε ασθενή βροχή οι απώλειες ελάχιστα διαφέρουν από τις απώλειες ακάθαρτου αγωγού. Η τιμή τους όμως αυξάνει γρήγορα με την αύξηση της εντάσεως της βροχής και φθάνει έως ένα μέγιστο όριο. Μετά την παύση της βροχής οι αυξημένες απώλειες μειώνονται και μετά περίπου μία ώρα φτάνουν στα επίπεδα που ήταν πριν αρχίσει η βροχή. Εξ' ίσου σοβαρή είναι η αύξηση των απωλειών από την επικάθηση στον αγωγό δροσιάς ή χιονιού.

Για την μεταφορά της ενέργειας με συμφέρουσες τιμές των απωλειών Corona χρησιμοποιούνται αγωγοί με μεγάλη διάμετρο, σε τρόπο ώστε υπό ομαλές συνθήκες να είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια τους μικρότερη από την ένταση ενάρξεως. Η συνεχής αύξηση των τάσεων μεταφοράς ενέργειας, απαίτησε τη χρησιμοποίηση αγωγών διαρκώς μεγαλύτερης διαμέτρου, αλλά η αύξηση της διαμέτρου με σκοπό τη μείωση της επιφανειακής εντάσεως πεδίου γίνεται οικονομικά ασύμφορη. Εισηχθησαν λοιπόν οι λεγόμενοι *πολλαπλοί αγωγοί*, οι οποίοι αποτελούνται από δύο ή και τρεις αγωγούς ανά φάση, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε μικρή μεταξύ τους απόσταση. Μ' αυτόν τον τρόπο πετυχαίνεται μείωση της επιφανειακής εντάσεως χωρίς την ανάγκη αυξήσεως της διαμέτρου (σχήμα 2.4). Οι πολλαπλοί αγωγοί εφαρμόζονται μόνο σε γραμμές τάσεως μεγαλύτερης των 220 kV.



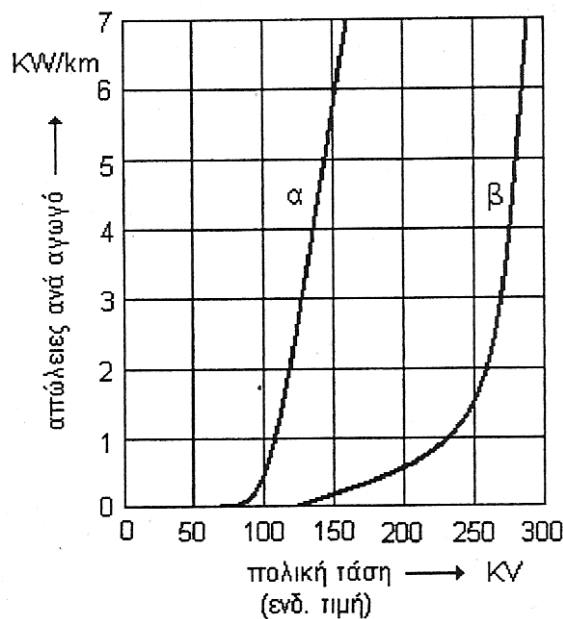
Σχήμα 2.4: Διπλός αγωγός σε γραμμές υψηλής τάσης για μείωση της εντάσεως πεδίου και των απωλειών Corona.

#### 2.1.4 Απώλειες Corona τριφασικών γραμμών μεταφοράς

Στις τριφασικές γραμμές μεταφοράς είναι αδύνατο να επιτευχθεί γεωμετρική συμμετρία (και ηλεκτρική) των τριών αγωγών μεταξύ τους και ταυτόχρονα και με τη γη. Στη συνήθη π.χ. περίπτωση της οριζόντιας διατάξεως τριών αγωγών υφίσταται μεν συμμετρία προς τη γη, όχι όμως και μεταξύ των αγωγών. Αποτέλεσμα αυτής της ασυμμετρίας είναι ότι ο κεντρικός αγωγός εμφανίζει μεγαλύτερη επιφανειακή πεδιακή ένταση απ' ότι οι πλευρικοί. Σε σύγκριση με μονοφασική γραμμή με έναν αγωγό, ο οποίος βρίσκεται υπό τάση προς την γη ίση με τη φασική τάση της υπόψη τριφασικής γραμμής, οι εξωτερικοί αγωγοί της τελευταίας εμφανίζουν

ένταση μεγαλύτερη κατά 10%, ενώ ο κεντρικός κατά 15%. Οι αυξημένες αυτές εντάσεις οφείλονται, προφανώς, στη γειννίαση των δυο άλλων αγωγών. Αποτέλεσμα είναι ότι η απώλεια ενέργειας, η οφειλόμενη στο φαινόμενο Corona, είναι σημαντικά μεγαλύτερη (άνω του τριπλασίου) της εμφανιζόμενης σε μONOΦασική γραμμή υπό την αυτή τάση προς τη γη. Στο σχήμα 2.5 παριστάνεται η μεταβολή των απωλειών τριφασικών γραμμών με αγωγούς διαφόρων διαμέτρων σε τριγωνική διάταξη, σε συνάρτηση με την ενδεικνυόμενη τιμή της πολικής τάσης λειτουργίας.

Παρατηρούμαι ότι οι καμπύλες αποτελούνται από δυο τμήματα, από τα οποία το ένα αυξάνει με την αύξηση της τάσης ενώ το άλλο πολύ γρήγορα. Το πρώτο τμήμα αντιστοιχεί στις απώλειες τις οφειλόμενες στους θυσάνους, οι οποίοι, όπως είπαμε, εμφανίζονται όταν η τάση είναι ακόμη μικρότερη από την τάση ενάρξεως, το δε δεύτερο στις απώλειες της εμφανιζόμενης στην συνέχεια, περί τους αγωγούς, αίγλης. Η τάση λειτουργίας εκλέγεται τέτοια, ώστε η γραμμή να εργάζεται στο πρώτο τμήμα. Σήμερα θεωρούμε δεκτές απώλειες Corona, εάν με αίθριο καιρό κυμαίνονται μεταξύ 0,3 και 1kW/km.



Σχήμα 2.5: Απώλειες Corona τριφασικής γραμμής 50 c/s σε κανονικές συνθήκες. Απόσταση αγωγών σε τριγωνική διάταξη : Διάμετρος αγωγών α) 5,1mm β) 19,6 mm.

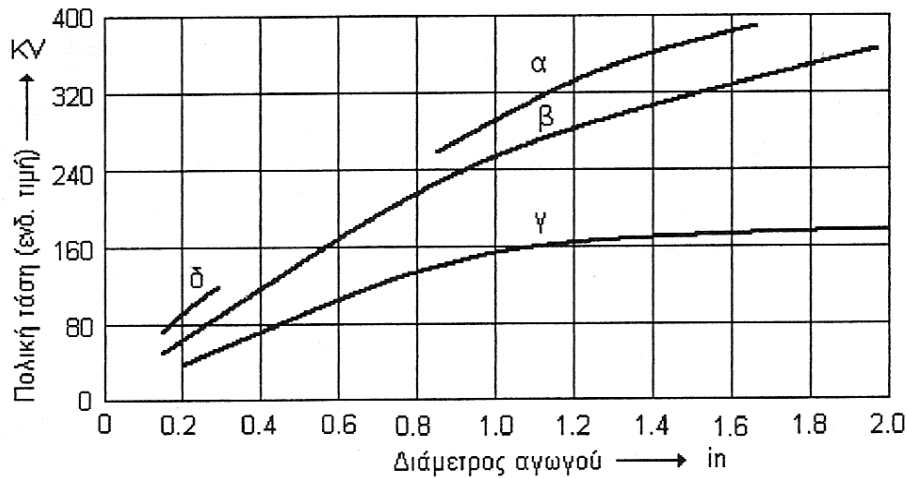
Στο σχήμα 2.6 παρέχονται καμπύλες υπολογισμού της αναγκαίας διαμέτρου τριφασικών γραμμών μεταφοράς με βάση τις δεκτές απώλειες Corona, και σε συνάρτηση με την πολική τάση. Οι καμπύλες του σχήματος αναφέρονται σε οριζόντια διάταξη των αγωγών της γραμμής.

α) Αγωγοί με επιπ. κλώνους. Απώλειες 1KW/mile.

β) Αγωγοί με συγκεντρ. πολύκλωνοι. Απώλειες 1KW/mile.

γ) Αγωγοί με συγκεντρ. πολύκλωνοι. Απώλειες 1KW/mile.

δ) Αγωγοί μονόκλωνοι. Απώλειες 1KW/mile.



Σχήμα 2.6: Καμπύλες υπολογισμού διαμέτρων αγωγών τριφασικών γραμμών βάσει των απωλειών Corona στην επιφάνεια της θάλασσας.

### 2.1.5 Διάταξη των αγωγών στο χώρο, αποστάσεις αγωγών

Για την αποφυγή ηλεκτρικής εκκένωσης από αγωγό προς αγωγό, η διάταξη των αγωγών των φάσεων στο χώρο πρέπει να σχεδιάζεται με βάση τα εξής:

- Την ονομαστική τάση  $U_N$
- Το μέγιστο βύθισμα  $f$  της αλυσοειδούς καμπύλης, που προκύπτει από την ανάρτηση σε θερμοκρασία  $60^{\circ}\text{C}$ , σε μέτρα.
- Το μήκος του μονωτήρα ανάρτησης  $I_k$ , σε μέτρα.
- Την πίεση που ασκεί ο άνεμος η οποία εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, συνήθως όμως, λαμβάνεται περίπου στα  $52,5 \text{ kp/m}^2$ , αντιστοιχούσα σε ταχύτητες  $29 \text{ m/s}$  (10 στην κλίμακα Μποφόρ).

Η απόσταση  $a$  μεταξύ των αγωγών, σε περιοχές με κανονικές συνθήκες δίνετε, σύμφωνα με τους κανονισμούς VDE 0210, από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

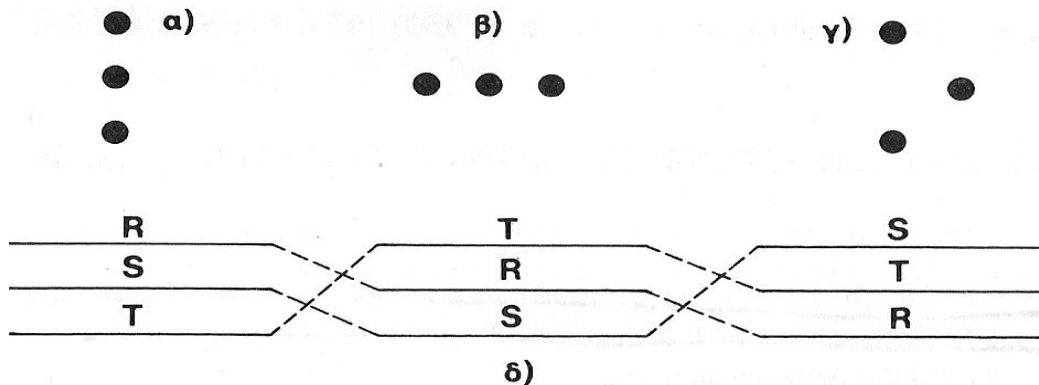
$$a \geq k\sqrt{f + I_k} + \frac{U_N}{150\text{kV}}$$

[2.8]

Όπου  $a$  είναι η απόσταση μεταξύ δυο φάσεων, σε οποιαδήποτε διάταξη και αν είναι αυτές.

Ο πρώτος όρος λαμβάνει υπ' όψη του τη μετάθεση των αγωγών λόγω της πίεσεως του ανέμου, μέσω του συντελεστή  $k=0,6\dots 0,95$ . Ο δεύτερος όρος λαμβάνει υπόψη του την ελάχιστη απόσταση που χρειάζεται για να αποφύγουμε διάσπαση του αέρα (είναι 1m για κάθε 150kV).

Κατά την διάταξη των αγωγών στον χώρο υπάρχει πάντα μια ασυμμετρία. Οι αγωγοί των φάσεων, λόγω της διαφοράς της θέσης τους, δεν έχουν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, πράγμα που εν μέρη διορθώνεται αν σε ορισμένες αποστάσεις, π.χ. κάθε 20 – 40 km, εφαρμόσουμε αντιμετάθεση των αγωγών.



Σχήμα 2.7: Διάταξη των αγωγών φάσεων στον χώρο α) κατακόρυφη, β) οριζόντια, γ) τριγωνική διάταξη, δ) αντιμετάθεση αγωγών.

### 2.1.6 Αποστάσεις αγωγών πυλώνων

Οι αποστάσεις  $x$  μεταξύ αγωγών υπό τάση και μεταλλικών γειωμένων μερών των πύργων, είναι σε μέτρα κατά VDE 0210:

$$x \geq \frac{U_N}{150kV} \text{ (m) \quad τουλάχιστον } 0,15\text{m}$$

[2.9]

Η αποστάσεις πρέπει να διατηρούνται ακόμα και σε συνθήκες ισχυρού ανέμου. Ο έλεγχος των αποστάσεων υπό την πίεση του ανέμου γίνεται με τον παρακάτω τρόπο:

Η πίεση του αέρα  $W$ , που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι για έναν αγωγό ή μονωτήρα:

$$W = c \cdot \left(\frac{1}{2}\gamma u^2\right) \cdot A = (c \cdot A) \cdot \frac{u^2}{1,63} \text{ (N)}$$

[2.10]

Όπου

c Συντελεστής αντίστασης 0,7...2,8

$\gamma$  η ειδική μάζα του αέρα 1,23kg/m<sup>3</sup>,

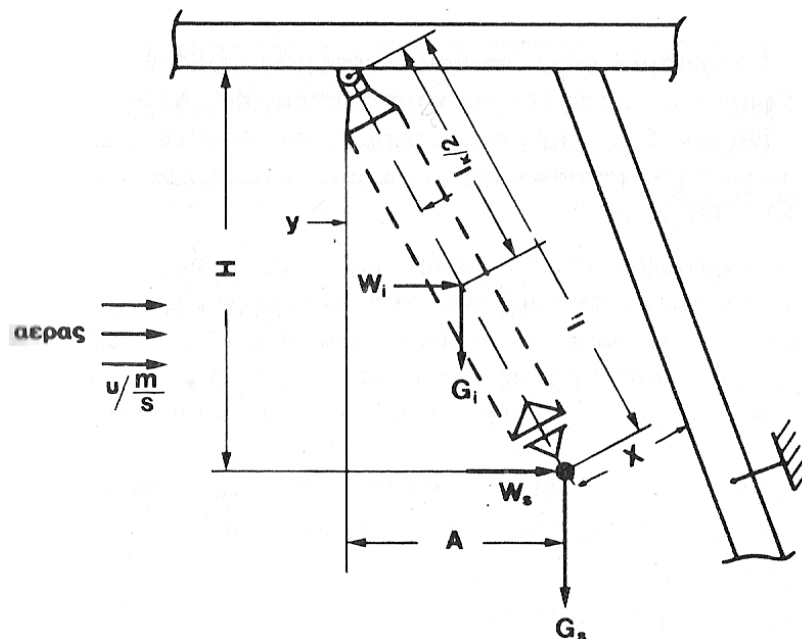
A η επιφάνεια σε m<sup>2</sup> που προβάλλεται στον άνεμο,

u Η ταχύτητα του ανέμου m/s.

Ο συντελεστής αντίστασης δίνεται από τον πίνακα 8.7.

Το σχήμα 2.8 δείχνει την μετατόπιση κατά την γωνία  $\gamma$  ενός αναρτημένου αγωγού λόγω του ανέμου. Πάνω στον μονωτήρα δρουν οι παρακάτω δυνάμεις:

- $G_i$  = το βάρος του μονωτήρα ανάρτησης (δρα στο μέσο του),
- $G_s$  = το συνολικό βάρος του αγωγού,
- $W_i$  = η δύναμη λόγω της πίεσης του ανέμου στον μονωτήρα,
- $W_s$  = η δύναμη λόγω της πίεσης του ανέμου στον αγωγό.



Σχήμα 2.8 : Πλάγια απόκλιση ενός αναρτημένου αγωγού λόγω πίεσης του αέρα .

Παίρνοντας τις ροπές ως προς το σημείο ανάρτησης, προκύπτει η παρακάτω συνθήκη ισοροπίας:

$$A \cdot (G_s + 0,5G_i) = H \cdot (W_s + 0,5W_i)$$

$$\tan \gamma = \frac{A}{H} = \frac{W_s + 0,5W_i}{G_s + 0,5G_i}$$

[2.11]

Η συνολική δύναμη που δρα στο σημείο ανάρτησης του μονωτήρα είναι:

$$F = \sqrt{(W_S + W_i)^2 + (G_S + 0,5G_i)^2}$$

[2.12]

Αυτή είναι και η δύναμη που καλείτε να αντέξει κάθε δίσκος ενός μονωτήρα ανάρτησης (όχι τάνυσης).

Η ταχύτητα άνεμου, που θα λάβουμε υπόψη, καθορίζεται από τις καιρικές συνθήκες. Ο πίνακας (8.5) δείχνει τι ταχύτητες επιβάλουν οι γερμανικοί κανονισμοί VDE 0210, ανάλογα με το ύψος άνωθεν του εδάφους.

Οι ελληνικοί κανονισμοί περί υπαίθριων γραμμών επιβάλουν τρεις διαφορετικές φορτίσεις, όπως δείχνει ο πίνακας (8.4). Από αυτές τις φωτίσεις εκείνη που δίνει την μεγαλύτερη απόκλιση, είναι αυτή που δεν δέχεται πάγο πάνω στον αγωγό αλλά μια μεγάλη πίεση άνεμου  $W_0 = c \cdot u^2 / 1,63 = 392 \text{ N/m}^2$ .

## 2.2 Μονωτήρες

Η βασική παράμετρος μόνωσης στα εναέρια δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, με κυριότερο το μηδενικό κόστος χρήσης. Εκτός όμως από τον ατμοσφαιρικό αέρα, απαιτείται και η χρήση μονωτήρων, δηλαδή διατάξεων από στερεά διηλεκτρικά τα οποία έχουν ως στόχο την διαμόρφωση των απαραίτητων διακένων αέρος, εξασφαλίζοντας την υποστήριξη ή ανάρτηση των αγωγών υψηλής τάσης. Οι μονωτήρες αποτελούν την δεύτερη συνιστώσα του μονωτικού συστήματος, η οποία όμως πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα, δεδομένου ότι αρκεί η αστοχία ενός μόλις μονωτήρα για να τεθεί εκτός λειτουργίας ένα τμήμα ενός δικτύου ή ένα δίκτυο συνολικά. Έτσι για την επιλογή του κατάλληλου μονωτήρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το ηλεκτρικό και μηχανικό έργο του, αλλά και το γεγονός ότι μια υπαίθρια εγκατάσταση είναι εκτεθειμένη στην επίδραση του περιβάλλοντος.

Από ηλεκτρικής απόψεως οι μονωτήρες, θα πρέπει να παρουσιάζουν *μεγάλη ηλεκτρική αντοχή* στη διάσπαση (δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του αγωγού και υποστηρίγματος) υπό την επίδραση της τάσης στην οποία λειτουργούν. Οι μονωτήρες οφείλουν να διατηρούν την διηλεκτρική τους ικανότητα όχι μόνο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας της γραμμής, υπό την ονομαστική τάση, αλλά και σε συνθήκες καταπόνησης αυτής υπό τάσεις πολύ μεγαλύτερες της ονομαστικής (υπερτάσεις), οι οποίες μπορεί να παρουσιαστούν αιφνιδίως λόγω κεραυνικού πλήγματος της γραμμής η χειρισμού των διακοπών του δικτύου. Έτσι απαίτηση μας είναι να μην γίνετε *υπερπήδηση* (flashover) του μονωτήρα, δηλαδή αγωγήμη σύνδεση μεταξύ αγωγού και υποστηρίγματος εξωτερικά του μονωτήρα στο στρώμα του αέρα που τον περιβάλλει, αλλά ούτε βέβαια *διάτρηση* του μονωτικού υλικού, οπότε η αγωγήμη σύνδεση, θα γίνει από το εσωτερικό του μονωτήρα.

Προφανώς είναι προτιμότερη η διάσπαση της μόνωσης του αέρα, η οποία αυτοαποκαθίσταται αμέσως μετά το πέρας της υπερτάσεως και συνεπάγεται μικρή ζημιά για



τον μονωτήρα, σε σχέση με την εκκένωση ρεύματος διαμέσου της μάζας του, φαινόμενο το οποίο εκδηλώνεται όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού και συνεπώς διατρήση του στερεού μονωτικού η οποία αχρηστεύει σχεδόν πάντοτε τον μονωτήρα. Στην πράξη το φαινόμενο της διάτρησης του στερεού μονωτικού είναι πολύ σπάνιο λόγω του ότι η διηλεκτρική αντοχή των υλικών κατασκευής των μονωτήρων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος αέρα και είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο με την επιβολή κρουστικής τάσης μεγάλης τιμής και μεγάλης κλίσεως μετώπου (π.χ. Κεραυνοπληξία).



Σχήμα 2.9 Υπερπήδηση αλυσοειδούς μονωτήρα.

Κατά την εκδήλωση του φαινομένου της υπερπήδησης το ηλεκτρικό τόξο έρχεται σε επαφή με το στερεό μονωτικό, προκαλώντας καταστροφή του υαλώδους επιχρίσματος του. Η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί την υπερπήδηση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπηδήσεις. Με άλλα λόγια, καθορίζεται (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστον 50%) η «οδός διέλευσης» νέου ηλεκτρικού τόξου που ενδεχομένως θα λάβει χώρα στο μέλλον. Για το λόγο αυτό συνήθως εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κρατίδια, με τα οποία «υποδεικνύεται» στο ηλεκτρικό τόξο η «οδός διέλευσής» του, μακριά από το στερεό μονωτικό

Η τάση υπερπήδησης ενός μονωτήρα εξαρτάτε κυρίως από το υλικό κατασκευής του, την γεωμετρική μορφή του και την κατάσταση της επιφάνια του (ρύπανση, εκδορές, υγρασία).

### 2.2.1 Λειτουργία του μονωτήρα σε ρυπαρό περιβάλλον

Το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίσταται ένας μονωτήρας μπορεί να έχει μια σημαντική επίπτωση στην αποδοτικότητα του συγκροτήματος. Όταν οι μονωτήρες τοποθετούνται σε χώρους στους οποίους εκτίθενται σε ρύπανση, η αποδοτικότητά τους μπορεί να ελαττωθεί

αρκετά. Αυτή είναι πιθανόν και η μόνη μεγάλη πρόκληση που συναντάτε στον σχεδιασμό και λειτουργία μόνωσης υποσταθμών και γραμμών μεταφοράς. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι διαδικασίες συσσώρευσης ρύπανσης και ο μηχανισμός υπερπήδησης ρυπασμένων μονωτήρων, μαζί με ορισμένα μέσα και μεθόδους προς αντιμετώπιση του φαινομένου.

Μολονότι το πρόβλημα της ρύπανσης μονωτήρων έχει αναγνωριστεί για πάνω από 50 έτη, η πλειοψηφία των μελετών έχουν διεξαχθεί μέσα στις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Η υπερπήδηση λόγω ρύπανσης έχει γίνει ο πιο σημαντικός και συχνά ο περιοριστικός παράγοντας στον σχεδιασμό υπαίθριων μονώσεων υψηλής τάσης και έτσι, έχει καταστεί αντικείμενο εκτενών μελετών.

Η υπερπήδηση ρύπανσης απαιτεί τόσο ευδιάλυτα άλατα όσο και υγρασία. Εκτενείς διαφορές στην συμπεριφορά μονωτήρων προκύπτουν, λόγω της ποικιλίας των συνθηκών περιβάλλοντος και των περίπλοκων μηχανισμών ύγρανσης. Έτσι η αποδοτικότητα των μονωτήρων σε ρυπασμένο περιβάλλον εξακριβώνεται καλύτερα μέσω δοκιμών υπό φυσικές συνθήκες.

Ωστόσο, για πρακτικούς λόγους απαιτούνται τεχνικές δοκιμές, οι οποίες εκτελούνται σε εργαστήρια ΥΤ. Οι τεχνικές δοκιμές εκτιμούν τους μονωτήρες επί μιας σχετικής βάσης, διότι αυτές δεν μπορούν να υπολογίσουν επακριβώς την επίδραση των χαρακτηριστικών του σχήματος του μονωτήρα στην συλλογή ρύπανσης και στις ιδιότητες αυτοκάθαρσης.

Οι διάφορες πηγές ρύπων που θίγουν την μόνωση των συστημάτων ισχύος συμπεριλαμβάνουν:

- Καθαλάτωση, δηλαδή άλας από την θάλασσα το οποίο διακινείται μέσω του άνεμου στην ξηρά με ταχύτητα 15-30km ή και μεγαλύτερη
- Βιομηχανικά προϊόντα που περιέχουν ευδιάλυτα άλατα.
- Άλατα οδών
- Περιττώματα πτηνών
- Άμμος

### **2.2.2 Μηχανισμός υπερπήδησης ρυπασμένων μονωτήρων**

Οι μονωτήρες εν λειτουργία καλύπτονται με ένα στρώμα ρύπων. Όταν η επιφάνεια είναι ξηρή, οι ρύποι δεν είναι αγωγιμοί. Όταν η επιφάνεια του μονωτήρα υγραίνεται από ελαφριά βροχή, ομίχλη ή άχλη, το στρώμα ρύπανσης γίνεται αγωγίμο με την ακόλουθη διάδοχη συμβάντων:

- Ανάπτυξη αγωγίμου στρώματος
- Σχηματισμός ξέρης ζώνης,
- Μερικός σπινθηρισμός
- Επιμήκυνση του σπινθήρα

- Αναπότρεπτη επέκταση εκκένωσης σε όλο τον μονωτήρα ακολουθούμενη από υπερπήδηση.

Το στρώμα ρύπου γενικά δεν είναι ομοιόμορφο. Κατά την εκκίνηση της αγωγής, τα ρεύματα είναι της τάξης αρκετών mA, επιφέροντας θέρμανση του διαλύματος ηλεκτρολύτη επί της επιφάνια του μονωτήρα. Το ρεύμα διαρροής αρχίζει να ξεραίνει το στρώμα ρύπανσης και η ειδική αντίσταση του στρώματος ανυψώνεται σε ορισμένες περιοχές. Αυτό οδηγεί στον σχηματισμό ξηρής ζώνης, συνήθως σε περιοχές όπου η πυκνότητα ρεύματος είναι μέγιστη. Η ξηρή ζώνη υποβαστάζει την περισσότερη από την εφαρμοζόμενη τάση. Το διάκενο αέρα διασπάται, με το τόξο να συζευγνύει το διάκενο ξηρής ζώνης που είναι σε σειρά με το υγρό τμήμα του μονωτήρα. Το τόξο δύναται να αποσβεστεί στο σημείο μηδέν του ρεύματος και ο μονωτήρας να επιστρέψει στην φυσιολογική κατάσταση λειτουργίας. Ο σχηματισμός ξηρών ζωνών και η επανύγρανση είναι δυνατόν να συνεχιστούν για πολλές ώρες.

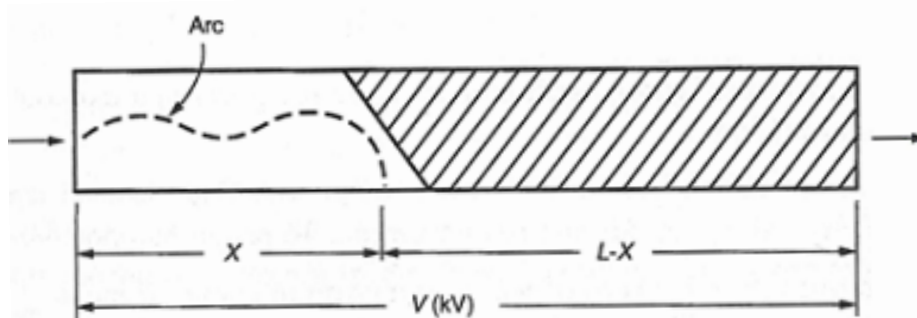
Το ρεύμα που συμπίπτει με την εμφάνιση διάσπασης ξηρής ζώνης είναι τάξης 250mA. Το ρεύμα στην φάση αυτή είναι υπό μορφή κυμάτων και η τάση είναι ανεπηρέαστη.

### 2.2.3. Πρότυπο για υπερπήδηση ρυπασμένων μονωτήρων

Θεωρούμε ένα ομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης με αντίσταση  $r$  kΩ/mm όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Όταν το τόξο δρα σε σειρά με το στρώμα ρύπανσης, η τάση κατά μήκος του μονωτήρα με ένα τόξο που συζευγνύει τμηματικά τον μονωτήρα δίνεται από την σχέση:

$$U = U_{arc}(Ix) + I(L - x)r \quad [2.13]$$

Όπου η συνάρτηση  $U_{arc}(Ix)$  συσχετίζει την τάση τόξου με το ρεύμα  $I$  και το μήκος τόξου  $x$ . Γενικά για μια δεδομένη αντίσταση  $r$ , η καμπύλη που συσχετίζει την  $U$  με τον λόγο  $x/L$  έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.10: Πρότυπο ενός μεμονωμένου τόξου αναπτυσσόμενου επί ρυπασμένης επιφάνια (ομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης).

Για κάθε εφαρμοζόμενη τάση  $U_a$ , ο λόγος  $x/L$  μπορεί να λάβει μέχρι μια μέγιστη τιμή  $x/L_a$ . Η καμπύλη τάσης έναντι του  $x/L$  έχει μια μέγιστη κρίσιμη τιμή  $U_c$ , και για τάσεις ίσες ή μεγαλύτερες από  $U_c$ , ο  $x/L$  μπορεί να έχει τιμές μέχρι την μονάδα. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση  $U_a$  είναι μεγαλύτερη από  $U_c$ , ο  $x/L$  δεν μπορεί να αυξηθεί στην μονάδα και δεν μπορεί να συμβεί υπερπήδηση. Έχουν προταθεί πολυάριθμες εμπειρικές σχέσεις προς επίλυση της 2.13. Για παράδειγμα, για κατακόρυφη διάταξη 33kV και άνω:

$$U_c = 0,067r^{1/3}L_a^{2/3}L_s^{1/3} \text{ kV(rms)} \quad [2.14]$$

Όπου  $L_a$  είναι το ελάχιστο μήκος τόξου (mm) στον μονωτήρα και  $L_s$  είναι το μήκος ερπυσμού (mm) επί της επιφάνειας του μονωτήρα.

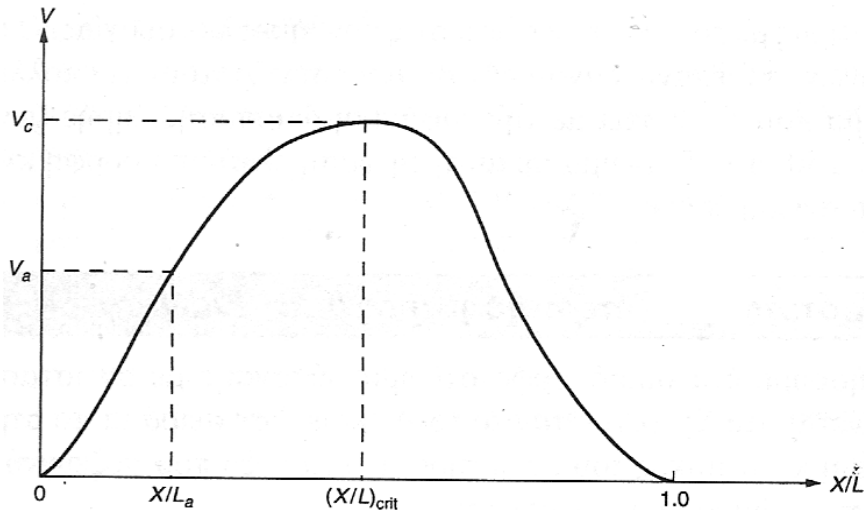
Για αλυσοειδή μονωτήρα τύπου cup-pin ισχύει:

$$U_c = 0,067^{1/3}Nr^{1/3}L_s^{2/3}\lambda^{-1/3} \text{ kV(rms)} \quad [2.15]$$

Όπου  $\lambda$  είναι μια σταθερά και  $N$  είναι το πλήθος των μονωτήρων που αποτελούν την αλυσό. Για έναν δοθέν τύπο μονωτήρα η 2.15 μπορεί να γραφτεί ως:

$$U_c = 0,067^{2/3}kr^{-1/3}L_s \quad [2.16]$$

Όπου  $k$  σταθερά



Σχήμα 2.11: Τάση συναρτήσει του λόγου  $x/L$  για ένα τόξο σε σειρά με ένα στρώμα ρύπανσης σταθερής αντίστασης ανά μονάδα μήκους.

#### 2.2.4 Μετρήσεις και δοκιμές

Η αξιολόγηση της επίδοσης της ρύπανσης στην λειτουργία των μονωτήρων στηρίζεται σε δοκιμές εργαστηρίου και αίθριες, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Μέτρηση διαστάσεων του μονωτήρα.
- Μέτρηση σοβαρότητας ρύπανσης.
- Δοκιμές επί ρυπασμένων μονωτήρων.

#### 2.2.5 Μέτρηση διαστάσεων μονωτήρα

Προκειμένου να αξιολογηθεί αποτελεσματικά ο βαθμός ρύπανσης μιας επιφάνια μονωτήρα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διαστάσεις του. Οι συναφείς διαστάσεις περιλαμβάνουν το μήκος ερπυσμού  $L_s$  και την επιφανειακή βάρθρωση εκφρασμένη σε  $kV/L_s$ , όπου  $L_s$  σε mm (σχήμα 2.12). Οι πτυχώσεις X και Y πληρώνονται με αγωγίμο υλικό.

Το εμβαδό της επιφάνια του μονωτήρα απαιτητέ για τον καθορισμό της ισοδύναμης πυκνότητας εναπόθεσης άλατος σε (ΙΠΕΑ) σε  $mg/cm^2$  (συνήθως μέση επιφάνια βάση του μέγιστου και ελάχιστου εμβαδού).

Η παράμετρος που συσχετίζει την αντίσταση R ενός ρυπασμένου μονωτήρα στον αέρα με την ειδική αντίσταση επιφάνειας  $\sigma$ , είναι γνωστή ως ο *συντελεστής μορφής* F και ορίζεται ως:

$$F = \frac{R}{\sigma}$$

[2.17]

$$F = \int_0^{L_s} \frac{dL_s}{2\pi a}$$

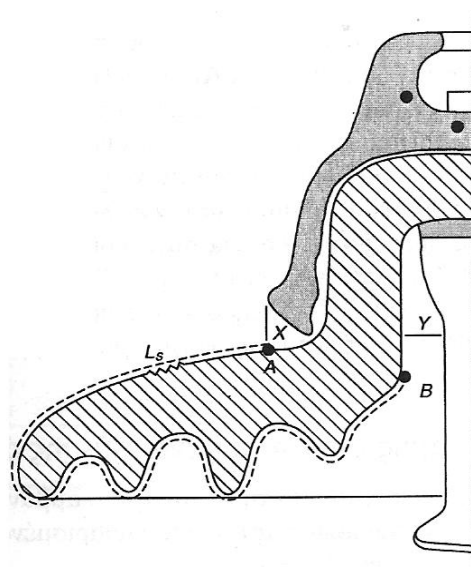
[2.18]

Όπου  $a$  είναι η ακτίνα, η αντιστοιχούσα στο στοιχειώδες μήκος ερπυσμού  $dL_s$

Στο εργαστήριο, η αντίσταση  $R$  μπορεί να μετρηθεί με μια γέφυρα χαμηλής τάσης και η μέση ειδική αντίσταση  $\sigma$  καθορίζεται από τις εξισώσεις σχέση 2.17 και σχέση 2.18. Η μέση τιμή της  $r$  λαμβάνεται ως:

$$r = \frac{R}{L_s}$$

[2.19]



Σχήμα 2.12: Αποτίμηση διαστάσεων μονωτήρα για ένα τυπικό σχήμα.  $L_s$  = μήκος ερπυσμού.

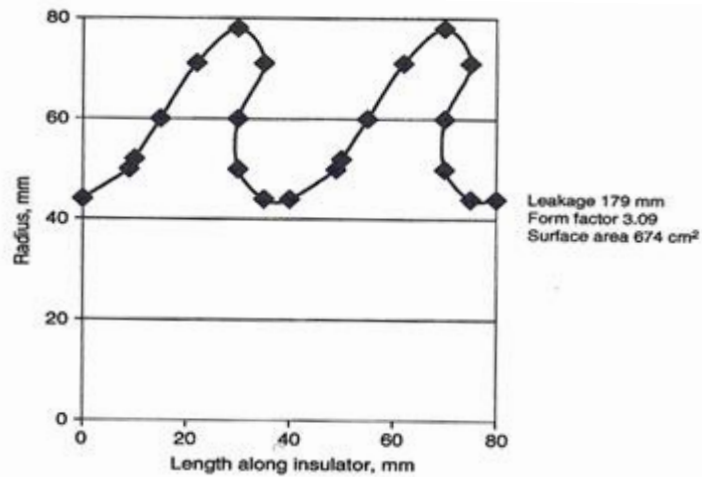
Στο εργαστήριο, η αντίσταση  $R$  μπορεί να μετρηθεί με μια γέφυρα χαμηλής τάσης και η μέση ειδική αντίσταση  $\sigma$  καθορίζεται από τις εξισώσεις σχέση 2.17 και σχέση 2.18. Η μέση τιμή της  $r$  λαμβάνεται ως:

$$r = \frac{R}{L_s}$$

[2.19]

Επομένως η  $\sigma$  μπορεί να συσχετιστεί με την ελάχιστη τάση υπερπήδησης.

Ένα παράδειγμα της διαδικασίας εκτίμησης του περιγράμματος ενός απλού μονωτήρα περιλαμβάνεται στο σχήμα 2.13



Απόσταση (mm)	Ακτίνα (mm)	Στ. μεταβ. ακτίνας	Μέση ακτίνα (avg)	Στ. μεταβ. μήκους (dl)	dl/avg	dl·avg
0	44	6	47	10,81665383	0,230141571	508,3827298
9	50	2	51	2,236067977	0,04384447	114,0394669
10	52	8	56	9,433981132	0,168463949	528,3029434
12	60	11	65,5	13,03840481	0,199059615	854,0155151
22	71	7	74,5	10,63014581	0,142686512	791,9945863
30	78	-7	74,5	8,602325267	0,115467453	640,8732324
35	71	-11	65,5	12,08304597	0,184473984	791,4395113
30	60	-10	55	10	0,181818182	550
30	50	-6	47	7,810249676	0,166175525	367,0817348
35	44	0	44	5	0,113636364	220
40	44	6	47	10,81665383	0,230141571	508,3827298
49	50	2	51	2,236067977	0,04384447	114,0394669
50	52	8	56	9,433981132	0,168463949	528,3029434
55	60	11	65,5	13,03840481	0,199059615	854,0155151

Απόσταση (mm)	Ακτίνα (mm)	Στ. μεταβ. ακτίνας	Μέση ακτίνα (avg)	Στ. μεταβ. μήκους (dl)	dl/avg	dl·avg
62	71	7	74,5	10,63014581	0,142686512	791,9945863
70	78	-7	74,5	8,602325267	0,115467453	640,8732324
75	71	-11	65,5	12,08304597	0,184473984	791,4395113
70	60	-10	55	10	0,181818182	550
70	50	-6	47	7,810249676	0,166175525	367,0817348
75	47	0	44	4,99	0,113636364	219,56
79,9	44	0	44	0,01	0,000227273	0,44
80	44			-	-	-
Άθροισμα				179,301749	3,091535268	10732,16199
				Μήκος ερπυσμού (mm)	Συντελεστής μορφής	Εμβαδον (cm <sup>2</sup> )
				179,301749	3,091535268	674,3210559

Σχήμα 2.13: Παράδειγμα για την εκτίμηση των σχετικών διαστάσεων ενός απλού μονωτήρα.

### 2.2.6 Μέτρηση σοβαρότητας ρύπανσης

Γενικά, η σοβαρότητα της ρύπανσης στην επιφάνια των μονωτήρων ταξινομείται σύμφωνα με την ΙΠΕΑ. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να καθορίσει διάφορες ζώνες σοβαρότητας, βάσει των χαρακτηριστικών της ρύπανσης που είναι παρούσα στο περιβάλλον λειτουργίας των μονωτήρων. Οι κατηγορίες φαίνονται στον πίνακα 2.1. Αυτές χρησιμοποιούνται ως μια κατευθυντήρια γραμμή για την επιλογή του μήκους ερπυσμού συναρτήσει της τάσης συστήματος για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Πρέπει να επισημανθεί ότι τα δεδομένα στον πίνακα προορίζονται για κεραμικούς μονωτήρες, αλλά, απουσία παράλληλης πληροφορίας για συνθετικούς μονωτήρες, χρησιμοποιούνται συχνά ως ένας οδηγός και για εφαρμογές που αφορούν μη κεραμικούς μονωτήρες.

Επίπεδο ρύπανσης (μέγιστη ΙΠΕΑ)	Παραδείγματα τυπικών περιβαλλόντων.	Ελάχιστο μήκος ερπυσμού.
Ι-Ελαφριά (0,06mg/cm <sup>2</sup> )	Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και χαμηλή πυκνότητα οικιών εξοπλισμένων με δίκτυα θέρμανσης.	16mm/kV



<p>1-Ελαφρια (0,06mg/cm<sup>2</sup>)</p>	<p>Περιοχές με χαμηλή πυκνότητα βιομηχανιών ή οικιών, αλλά υποβαλλόμενες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις.</p> <p>Αγροτικές περιοχές (η χρήση λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε ένα υψηλότερο επίπεδο ρύπανσης).</p> <p>Ορεινές περιοχές</p> <p><i>Σημείωση:</i> Όλες αυτές οι περιοχές πρέπει να βρίσκονται σε τουλάχιστον 10 έως 20 km από την θάλασσα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε ανέμους απευθείας από αυτήν.</p>	<p>16mm/kV</p>
<p>2-Μεσαία (0,20mg/cm<sup>2</sup>)</p>	<p>Περιοχές με βιομηχανίες μη-παράγουσες ιδιαίτερα ρυπαρό καπνό και/ή με μέση πυκνότητα οικιών εξοπλισμένων με δίκτυο θέρμανσης.</p> <p>Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών ή οικιών, αλλά υποβαλλόμενες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις.</p> <p>Περιοχές εκτεθειμένες σε άνεμο από την θάλασσα, αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή (τουλάχιστο μερικά χιλιόμετρα απόσταση).</p>	<p>20mm/kV</p>
<p>3-Επαχθής (0,60mg/cm<sup>2</sup>)</p>	<p>Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με υψηλή πυκνότητα δικτύων θέρμανσης που παράγουν ρύπους.</p> <p>Περιοχές κοντά στην θάλασσα ή σε κάθε περίπτωση, εκτιθέμενες σε ισχυρούς ανέμους από την θάλασσα.</p>	<p>25mm/kV</p>
<p>4-Πολύ επαχθής (0,60&gt;mg/cm<sup>2</sup>)</p>	<p>Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης, υποβαλλόμενες σε αγωγίμες σκόνες και σε βιομηχανικό καπνό, τα οποία παράγουν ιδιαίτερα παχιές αγωγίμες εναποθέσεις.</p> <p>Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης, πολύ κοντά στην ακτή και εκτιθέμενες σε θαλάσσιο ψεκασμό ή πολύ ισχυρό και ρυπαρό άνεμο από την θάλασσα.</p> <p>Περιοχές ερήμου χαρακτηριζόμενες από μεγάλα διαστήματα ανομβρίας και εκτιθέμενες σε αμμοθύελλες και ισχυρούς ανέμους μεταφέροντες άλας.</p>	<p>31mm/kV</p>

Πίνακας2.1: Σοβαρότητας ρύπανσης κατά IEC 815.

### **Καθορισμός ισοδύναμης πυκνότητας εναπόθεσης άλατος (NaCl)**

Κατά την διαδικασία αυτή, λαμβάνονται επιχρίσματα από την επιφάνια του μονωτήρα, χρησιμοποιώντας ένα ειδικό προ-καθαρισμένο ύφασμα, σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Μετριέται η αγωγιμότητα αποσταγμένου ύδατος με το καθαρό ύφασμα εμβαπτισμένο.
- Λαμβάνονται επιχρίσματα από τις άνω και κάτω επιφάνειες του μονωτήρα, ανεξάρτητα.
- Το ύφασμα αποπλένεται, αναμετريέται η αγωγιμότητα του και συμβιώνεται η αύξηση.
- Το διάλυμα μεταφέρεται σε ένα τυποποιημένο ογκομετρικό φιαλίδιο.
- Το διάλυμα αραιώνεται με αποσταγμένο νερό, σε όγκο του 0,5 ή ενός λίτρου.
- Η αγωγιμότητα του αραιωμένου διαλύματος μετριέται σε δυο διαφορετικές θερμοκρασίες και η αγωγιμότητα που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία των 20°C υπολογίζεται μέσω μαθηματικής παρεμβολής.
- Η ΙΠΕΑ σε mg/cm<sup>2</sup> υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη έκφραση

$$\text{ΙΠΕΑ} = \frac{0,42 \text{ (όγκος σε ml)}}{\text{επιφάνια σε cm}^2} \cdot (\sigma_{20^\circ\text{C}})^{1,039}$$

[2.20]

#### **2.2.7 Δοκιμές ρύπανσης**

Δοκιμές ρύπανσης μπορούν να πραγματοποιηθούν σε συνθήκες περιβάλλοντος (υπαίθρια) ή σε συνθήκες εργαστηρίου. Αμφότερες θα συζητηθούν παρακάτω.

##### *Υπαίθριες δοκιμές*

Κατά την εκτέλεση των δοκίμων αυτών οι μονωτήρες εκτίθενται σε φυσική ρύπανση στους σταθμούς δοκίμων ενώ υποβάλλονται σε τάση λειτουργίας. Κατά την διάρκεια δοκιμής η αποδοτικότητα τους εποπτεύεται διάμεσου μετρήσεων παραμέτρων όπως η συχνότητα υπερπήδησης καθώς και το επίπεδο, η διάρκεια και ο ρυθμός επανάληψης των ριτών ρεύματος διαρροής. Ακολούθως, οι μονωτήρες μετακινούνται και δοκιμάζονται στο εργαστήριο για τον καθορισμό των επιπέδων υπερπήδησης. Οι τόποι υπαίθριων δοκίμων παρέχουν επίσης μια ευκαιρία για χαρακτηρισμό της ρύπανσης, αφαιρώντας την από τον μονωτήρα και υποβάλλοντας την σε χημική ανάλυση. Τυπικοί ρύποι οι οποίοι μπορούν να βρεθούν σε μονωτήρες περιλαμβάνουν NaCl, CaSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub> και CaCO<sub>4</sub>.

##### *Δοκιμές εργαστηρίου*

Υπάρχουν δυο πρότυπες διαδικασίες δοκίμων εργαστηρίου. Αυτές είναι γνωστές ως δοκιμές ομίχλης άλμης και η δοκιμή καθαρής ομίχλης.

Η μέθοδος ομίχλης άλμης ανακλά τον μηχανισμό ρύπανσης που επικρατεί κατά μήκος παράκτιων περιοχών, Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε ευρωπαϊκές χώρες και την Ιαπωνία.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής αυτής ,ένας καθαρός, στεγνός μονωτήρας ενεργοποιείται στην ύψιστη τάση λειτουργίας του και εκτίθεται σε μια ομίχλη άλμης παραγόμενη μέσω τυποποιημένων αναβρυτήρων. Η ύψιστη αλμυρότητα ομίχλης ( $\text{kg NaCl} / \text{m}^3$  ) την οποία ο μονωτήρας μπορεί να αντέξει, για τρεις εκ των τεσσάρων ωριαίων δοκιμών, χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την αποδοτικότητα του.

Εναλλακτικά, η περιεκτικότητα άλατος σταθεροποιείται στα  $80 \text{ kg/m}^3$  διαλύματος και η τάση ανυψώνεται από το 90 επί τοις εκατό της τάσης υπερπήδησης σε βήματα των 2 έως 3 επί τοις εκατό κάθε 5 λεπτά μέχρι να συμβεί υπερπήδηση.

Οι τυποποιήσεις σε αλμυρότητα ποικίλλουν σε τιμές από χώρα σε χώρα. Για παράδειγμα ο πίνακας 2.2 παρουσιάζει τιμές από τις ιταλικές προδιαγραφές.

Σοβαρότητα ρύπανσης τοποθεσίας	Αλμυρότητα ( $\text{kg/m}^3$ )
Ελαφριά	20-40
Μέτρια	40-80
Επαχθής	80-100
Πολύ επαχθής	100-200

*Πίνακας:2.2 Χαρακτηρισμός της σοβαρότητας ρύπανσης με βάση την αλμυρότητα (ιταλικές προδιαγραφές)*

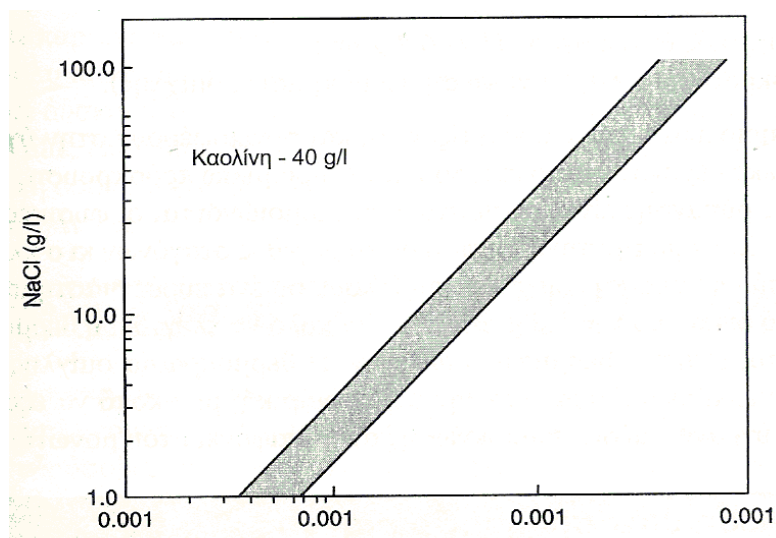
Δοκιμές καθαρής ομίχλης εξομοιώνουν την βιομηχανική ρύπανση που απαντάται σε βιομηχανικές περιοχές και είναι η ποιο διαδεδομένη μέθοδος. Αμφότερες οι μέθοδοι δοκιμών ομίχλης είναι αποδεκτές ως τυποποιήσεις.

Μελέτες δείχνουν ότι, όταν οι συνθήκες ύγρανσης ελέγχονται κατάλληλα, οι πιο κρίσιμες συνθήκες για υπερπήδηση μονωτήρα είναι με την επιφάνια ολοκληρωτικά ρυπασμένη και ικανά νοτισμένη από ομίχλη ή πάχνη.

### **2.2.8 Δοκιμή καθαρής ομίχλης**

*Διαδικασία ρύπανσης για δοκιμή καθαρής ομίχλης*

Ο μονωτήρας εμβαπτίζεται σε διάλυμα αποτελούμενο από καολίνη, νερό και NaCl για να επιτύχουμε την κατάλληλη αγωγιμότητα. Η καολίνη παρέχει την μηχανική μήτρα που δένει το αγώγιμο άλας στον μονωτήρα. Ο μονωτήρας αφήνεται να στεγνώσει και κατόπιν δοκιμάζεται. Εναλλακτικά οι ρύποι μπορούν να εναποτεθούν μέσω ψεκασμού. Αυτή η μέθοδος όμως δίνει φτωχότερη ομοιομορφία από την εμβάπτιση.



Σχήμα 2.14: Σχέση μεταξύ ΙΠΕΑ και συγκέντρωσης NaCl.

Η πυκνότητα εναπόθεσης πρέπει να καταγράφεται για διάφορα τμήματα του μονωτήρα. Η μέθοδος καθαρής ομίχλης είναι εφαρμόσιμη τόσο σε κεραμικούς μονωτήρες τύπου ανάρτησης ή στήριξης, όσο και σε πολυμερούς μονωτήρες. Το σχήμα 2.14 δείχνει την σχέση μεταξύ ΙΠΕΑ και συγκέντρωσης NaCl στο διάλυμα που εμβαπτίζεται ο υπό δοκιμή μονωτήρας.

#### Διαδικασία δοκιμής καθαρής ομίχλης

Οι στεγνοί προρυπασμένοι μονωτήρες ενεργοποιούνται υπό σταθερή τάση και υγραίνονται από καθαρή ομίχλη. Η τάση δοκιμής διατηρείται μέχρι να έχουμε υπερπήδηση ή διάτρηση. Για να επέλθει διάτρηση, η τάση διατηρείται τουλάχιστον τον διπλάσιο χρόνο από τον απαιτούμενο για υπερπήδηση. Ο χρόνος προς τον μέγιστο ρυθμό ύγρανσης προσδιορίζεται εποπτεύοντας το ρεύμα διαρροής. Το μέγιστο ρεύμα διαρροής μετριέται μετά από περίπου 25-30 λεπτά ύγρανσης. Αυτός είναι και ο χρόνος στον οποίο έχουμε την μέγιστη ύγρανση. Κατόπιν, η κρίσιμη τάση υπερπήδησης καθορίζεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυξομείωσης της τάσης.

Άλλες σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την καταγεγραμμένη τάση υπερπήδησης περιλαμβάνουν, το ρεύμα βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή δοκιμής και τον ρυθμό ανύψωσης της θερμοκρασίας ομίχλης. Οι συνιστώμενες ελάχιστες τιμές είναι, ένα ρεύμα βραχυκύκλωσης των 5 A και μια ανύψωση της θερμοκρασίας ομίχλης  $0,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

#### Χαρακτηριστικά ομίχλης

Τα χαρακτηριστικά της ομίχλης που παρέχει την ύγρανση ενός μονωτήρα, έχουν μια επίπτωση στα πειραματικά αποτελέσματα. Η ομίχλη χαρακτηρίζεται από :

- Κατανομή μεγέθους σταγόνων.
- Κλασματικός όγκος υγρού ( $1,8-6,2 \text{ g}/\text{m}^3$ ).

- Θερμοκρασία και ανύψωση θερμοκρασίας ομίχλης.

Τα πρώτα δυο συσχετίζονται και συνεισφέρουν στην ύγρανση της εκτιθέμενης επιφάνια του μονωτήρα μέσω πρόσκρουσης σταγόνων. Για δοκιμές ρύπανσης είναι ουσιαστικό να εξομοιώνονται οι φυσικές συνθήκες. Αμφότερα το μέγεθος σταγόνων και ο κλασματικός όγκος υγρού της φυσικής ομίχλης ποικίλουν σε μεγάλο εύρος. Για έναν κλασματικό όγκο μικρότερο του  $1,8 \text{ g/m}^3$  είναι δύσκολο να ελεγχθεί η θερμοκρασία και η πυκνότητα, εξαιτίας θερμικών απωλειών. Η θερμοκρασία ομίχλης πρέπει να είναι σημαντικά υψηλότερη από την ατμοσφαιρική, με σκοπό να εξασφαλιστεί αποδοτική ύγρανση μέσω συμπύκνωσης στην επιφάνια του μονωτήρα.

### **2.2.9 Τρόποι άμβλυνσης υπερπήδησης λόγω ρύπανσης**

Υπάρχει ένα πλήθος χρησιμοποιούμενων μεθόδων προς μείωση ή εξάλειψη της δυνατότητας υπερπήδησης λόγω ρύπανσης κεραμικών μονωτήρων. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Χρήση μονωτήρων με βέλτιστα σχήματα.
- Περιοδικός καθαρισμός.
- Επάλειψη λίπους.
- Επικάλυψη RTV.
- Ανθεκτικό σμάλτο.

#### *Χρήση μονωτήρων με βέλτιστα σχήματα*

Στους συνήθεις τύπους μονωτήρων η επάνω επιφάνια είναι λεία, ώστε να συμβάλει στην παρεμπόδιση επικαθίσεις ρύπων, ενώ η κάτω επιφάνια τους έχει πτυχώσεις για την αύξηση του μήκους της επιφανειακής διαδρομής μεταξύ άνω και κάτω μεταλλικών μελών και αύξηση του μη εκτεθειμένου στην βροχή τμήματος της, ώστε να παρεμποδίζετε ο σχηματισμός συνεχούς υδάτινης διαδρομής κατά την διάρκεια της βροχής.

#### *Περιοδικός καθαρισμός*

Σε πολλές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται συστήματα υψηλής πίεσης νερού ή βολής κόκκων δημητριακών και  $\text{CO}_2$ , για να καθαριστούν περιοδικά οι ρυπασμένες επιφάνειες των μονωτήρων. Εξ αυτών, ο καθαρισμός με υψηλή πίεση νερού είναι δεσπόζον λόγο του χαμηλότερου κόστους. Όμως ο καθαρισμός με βολή κόκκων δημητριακών και  $\text{CO}_2$  είναι πολύ πιο αποδοτικός στον καθαρισμό κάποιων συγκεκριμένων ρύπων που είναι δύσκολο να απομακρυνθούν με ρίψη νερού. Αυτές οι διαδικασίες εφαρμόζονται, γενικά, σε τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία ορίζονται μετά από μελέτη του ρυθμού εναπόθεσης και της σύστασης της ρύπανσης καθώς και των συνθηκών υγρασίας του περιβάλλοντος στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο μονωτήρας.

*Επάλειψη λίπους υδρογονανθράκων*

Η επάλειψη των μονωτήρων με πετρελαϊκές γέλες ή λίπη υδρογονανθράκων χρησιμοποιούνται σε περιοχές επαχθούς ρυπάνσεις. Αυτές οι επικαλύψεις παρέχουν υδρόφοβες ιδιότητες στην επιφάνια του μονωτήρα καθώς και την ικανότητα εγκλωβισμού του επιφανειακού ρύπου. Το πρώτο χαρακτηριστικό αναλύεται στην ενότητα που αφορά τους μη κεραμικούς μονωτήρες, ενώ το τελευταίο αποτρέπει τους ρύπους από το να εισέρχονται στο διάλυμα ευθύς μετά την έναρξη του μηχανισμού ύγρανσης της επιφάνια. Αυτή η μέθοδος έχει αποδειχτεί αποτελεσματική και έχει τεθεί σε χρήση για πολλά χρόνια. Όπως με την πλύση έτσι και δω έχουμε μια λύση συντήρησης, η οποία πρέπει να επαναλαμβάνεται περιοδικά. Συνήθως η παλιά επίστρωση λίπους αφαιρείται πριν την επίστρωση νέου. Η διαδικασία απομάκρυνσης και επίστρωσης λίπους στην επιφάνια του μονωτήρα είναι χειρονακτικές εργασίες οι οποίες, στις περισσότερες των περιπτώσεων, πραγματοποιούνται με προσωρινή διακοπή ρευματοδότης του κυκλώματος, για λόγους ασφαλείας.

*Επικάλυψη RTV*

Επικάλυψη σιλικόνης βουλκανιζομένης σε θερμοκρασία δωματίου (RTV) εφαρμόζεται με αυξανόμενη συχνότητα σε αμφοτέρους τους μονωτήρες υποσταθμών και γραμμών. Επικάλυψη RTV εφαρμόζετε επί μονωτήρων πορσελάνης και διέλευσης, για να παρέχει υδρόφοβες επιφάνειες. Ο χρόνος ζωής εξαρτάτε από την σύσταση της επικάλυψης, το εφαρμοζόμενο πάχος και φυσικά την σοβαρότητα ρύπανσης. Η επικάλυψη RTV είναι δημοφιλής στο ότι αντιπροσωπεύει μια μακροπρόθεσμη λύση. Αυτή μπορεί να εφαρμοστεί επί υπαρχόντων μονωτήρων μετά από επαρκή καθαρισμό και μάλιστα, πλεονεκτεί στο ότι η διαδικασία επικάλυψης πραγματοποιείτε με το κύκλωμα ρευματοδοτούμενο. Ο μηχανισμός της αντίστασης σε υπερπήδηση λόγο ρύπανσης, οφείλεται στην δημιουργία υδρόφοβης επιφάνια και εγκλωβισμού των ρύπων.

Όπως και στην περίπτωση των μη κεραμικών μονωτήρων, οι επικαλύψεις RTV μπορούν να αλλοιωθούν ταχέως παρουσία ηλεκτρικών εκκενώσεων και έτσι, σε υψηλότερα επίπεδα τάσης πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή του φαινομένου κορώνα.

*Μονωτήρες ανθεκτικού σμάλτου*

Σε περιοχές σφοδρής ρύπανσης χρησιμοποιούνται συχνά μονωτήρες ανθεκτικού σμάλτου προς μετριασμό των φαινομένων υπερπήδησης λόγο ρύπανσης. Οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούν ένα εξειδικευμένο σμάλτο, το οποίο είναι μερικός αγωγίμο. Το σμάλτο είναι μορφοποιημένο έτσι ώστε να παρέχει ροή ρεύματος σταθερής ημιτονοειδούς κατάστασης βιομηχανικής συχνότητας κατά μήκος της επιφάνια του μονωτήρα. Η χρήση του έχει ως αποτέλεσμα μια ομοιόμορφη κατανομή ηλεκτρικού πεδίου και επιφανειακής θέρμανσης. Αυτές οι ιδιότητες συνεισφέρουν στην παρεμπόδιση δημιουργίας στρωμάτων ρύπου στην επιφάνια του μονωτήρα. Η θέρμανση της επιφάνια αποτρέπει την ύγρανση και βοήθα την διαδικασία αφίδρωσης, ενώ η ποιο ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου δρα στον έλεγχο της υπερπήδησης των ξηρών ζωνών. Το ρεύμα αγωγής του σμάλτου σχεδιάζεται να

είναι προσεγγιστικά 1mA και έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του μονωτήρα.

Η βελτίωση της συμπεριφοράς έναντι υπερπήδησης λόγω ρύπανσης με εφαρμογή ανθεκτικού σμάλτου καταδείχτηκε πρώτα στην δεκαετία 1940. Έκτατε, μονωτήρες ανθεκτικού σμάλτου έχουν γίνει δεκτοί με αμφιλεγόμενη επιτυχία κατά την λειτουργία τους. Η τεχνολογία είναι διαθέσιμη από την δεκαετία του 1950. Στην δεκαετία του 1970 εμφανίστηκε παραγωγή μονωτήρων ανθεκτικού σμάλτου τόσο ανάρτησης όσο και στήριξης. Ενώ αμφότεροι παρείχαν μια έξοχη αντίσταση κατά της υπερπήδησης ρύπανσης, παρουσίαζαν προβλήματα λόγω της διάβρωσης του σμάλτου στα σημεία όπου είχε γίνει ηλεκτρική επαφή μεταξύ τμημάτων μετάλλου του μονωτήρα και σμάλτου. Το πρόβλημα ήταν ιδιαίτερα δριμύ στην περίπτωση μονάδων ανάρτησης, στις οποίες υπάρχει μια υψηλή πυκνότητα ρεύματος στην επαφή σμάλτου και χαλύβδινης απόληξης (pin). Η διάβρωση σμάλτου κατέληγε σε ένα ρήγμα της αγωγίμης περιοχής μεταξύ της ηλεκτρικής γραμμής και του γειωμένου άκρου με αποτέλεσμα ο μονωτήρας να χάνει τις αντιρρυπαντικές ιδιότητες του. Με την πάροδο των ετών, το πρόβλημα της διάβρωσης έχει μελετηθεί και η επίδοσή έχει βελτιωθεί. Σήμερα μονωτήρες ανθεκτικού σμάλτου, στήριξης και ανάρτησης, χρησιμοποιούνται με πολύ ικανοποιητικές επιδόσεις σε πολλές εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο, όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι δυσμενείς.

### **2.2.10 Κατηγοριοποίηση μονωτήρων**

Πέραν του γενικού ορισμού περί απομόνωσης των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα, οι μονωτήρες μπορούν να διακριθούν σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με *το υλικό, τον τρόπο σύνδεσης και το χώρο χρήσης.*

### **2.2.11 Υλικά κατασκευής των μονωτήρων**

Τα κυριότερα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται σε μονωτήρες είναι κεραμικά (πορσελάνη ή γυαλί) και πολυμερή. Τόσο τα κεραμικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή άτομα, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών. Το πυρίτιο αποτελεί το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο στην περίπτωση των κεραμικών υλικών και ο άνθρακας στην περίπτωση των πολυμερών.

Οι ισχυροί ομοιοπολικοί δεσμοί πυριτίου-οξυγόνου οι οποίοι συγκροτούν τα κεραμικά υλικά έχουν ως αποτέλεσμα την κακή αγωγιμότητα, το υψηλό σημείο τήξης και την υψηλή αντίσταση στην διάβρωση από χημικά μέσα.

Οι κύριες πρώτες ύλες της πορσελάνης, όπως ο άργιλος (πηλός) και ο χαλαζίας, είναι σχετικά φθηνές και σε εύκολη διάθεση όμως το κόστος βιομηχανικής παρασκευής της πορσελάνης σε συμπαγή τεμάχια είναι υψηλό και περιλαμβάνει πολλά στάδια. Αυτός είναι ο λόγος που οι μονωτήρες πορσελάνης μέσης και υψηλής τάσης κατασκευάζονται συνήθως από περισσότερα τεμάχια που συγκολλούνται με τσιμέντο. Ένα ακόμα βασικό μειονέκτημα των κεραμικών

μονωτήρων είναι ότι είναι εύθραυστοι και υπάρχει ο κίνδυνος να σπάσουν κατά την μεταφορά και την εγκατάσταση τους ή ακόμα και από βανδαλισμό.

Οι μονωτήρες υάλου πλεονεκτούν έναντι των μονωτήρων πορσελάνης στο ότι είναι διαφανείς και διακρίνεται εύκολα αν έχουν υποστεί βλάβη, ότι είναι εύκολος ο εντοπισμός τυχόν ανομοιογένειας στο υλικό τους, ότι ο θερμικός συντελεστής του υάλου είναι μικρότερος του θερμικού συντελεστή της πορσελάνης με συνέπεια να δημιουργούνται μικρότερες μηχανικές τάσεις κατά την αλλαγή της θερμοκρασίας, και τέλος έχουν μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά (10-20kV/mm πάχους) από την διηλεκτρική σταθερά της πορσελάνης (9-15kV/mm πάχους).



Σχήμα 2.15 (αριστερά): Κοινός δισκοειδής μονωτήρας (κωδικός Δ.Ε.Η.: 070). (δεξιά): Κοινός δισκοειδής μονωτήρας υάλου (κωδικός Δ.Ε.Η.: 082).

Όμως οι μονωτήρες υάλου παρουσιάζουν και σοβαρά μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι η επιφάνεια τους προσβάλλεται εύκολα από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα με τρόπο, ώστε να είναι εύκολη η επικάλυψη σκόνης και υγρασίας, πράγμα που, όπως αναφέραμε, ελαττώνει την τάση υπερπήδησης.

### 2.2.12 Πολυμερείς (μη κεραμικοί) μονωτήρες

Πολυμερείς ή μη κεραμικοί μονωτήρες εισήχθησαν πρώτα το 1959. Αυτοί ήταν κατασκευασμένοι από εποξειδικά υλικά και όταν χρησιμοποιούνταν στην ύπαιθρο ή σε ρυπαρά περιβάλλοντα, ήταν ευάλωτοι σε προβλήματα σχετιζόμενα με υπεριώδη ακτινοβολία, διαυλοποίηση και διάβρωση. Πολυμερείς μονωτήρες παράγονταν από διάφορους κατασκευαστές καθ' όλη τη διάρκεια των δεκαετιών 1960 και 1970. Αυτοί οι πρώτοι σχεδιασμοί ήταν κυρίως τύπου ανάρτησης - μη ρευματοφόρων άκρων και στήριξης. Ορισμένες θεμελιώδεις απόψεις των πρώιμων αυτών σχεδίων σχημάτισαν την βάση για τις μονάδες που παράγονται σήμερα. Τα σχέδια αυτά υιοθετούσαν έναν πυρήνα υαλονημάτων κατασκευασμένο με όγκηση διαμέσου ρητίνης, ως σταθερό μέλος. Στον πυρήνα υαλονημάτων παρείχετο προστασία έναντι του περιβάλλοντος, μέσω εγκλεισμού του σε ελαστικό



περίβλημα. Οι μηχανικές συνδέσεις στα άκρα του μονωτήρα γίνονταν χρησιμοποιώντας μια ποικιλία μέσων. Μερικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούσαν κολλημένους συνδέσμους, άλλοι είχαν μια σφηνοειδής προσάρτηση και άλλοι χρησιμοποιούσαν πρεσαριστούς συνδέσμους. Σε όλες τις περιπτώσεις, μεταλλικοί τερματικοί αρμοί συνδέονταν στην ράβδο υαλονημάτων για να προσδώσουν στον μονωτήρα το απαραίτητο από την εφαρμογή μηχανικό σθένος.

Πρώιμοι υπέρμαχοι των μη κεραμικών μονωτήρων ισχυρίζονταν ότι πέτυχαν μείωση βάρους έναντι των κεραμικών ισοδύναμων τους έως και 90%. Αυτοί είχαν ακόμη μεγαλύτερη μηχανική αντίσταση σε φορτία τάνυσης λόγω αστοχίας του αγωγού ή υλικού της γραμμής. Ένα ακόμη πεδίο στο οποίο οι μη κεραμικοί μονωτήρες έδειξαν καλή προοπτική ήταν η ικανότητα τους να ανθίστανται σε βανδαλισμούς. Ένα σημαντικό ποσοστό καταστροφής των κεραμικών μονωτήρων λόγω βανδαλισμού, αφορά την καταστροφή λόγω πυροβολισμών π.χ. από κυνηγούς. Όταν μια σφαίρα πλήξει μια κεραμική μονάδα, αυτή σπάζει ή κατακεραματίζεται. Αντίθετα οι πολυμερείς δεν αστοχούν άμεσα όταν βληθούν, διότι τα συστατικά τους δεν είναι εύθρυπτα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα, το οποίο επικαλούντο οι κατασκευαστές και χρηστές των πρώιμων μη κεραμικών μονωτήρων, είναι ότι αυτοί μπορούσαν να σχεδιαστούν με αρκετά μεγάλο μήκος ερπυσμού, το οποίο μπορούσε εύκολα να βελτιστοποιηθεί ανάλογα τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η πρώιμη χρήση των μη κεραμικών μονωτήρων ήταν περιορισμένη σε μικρού μήκους γραμμές και σε προβληματικές θέσεις. Οι προβληματικές θέσεις σχετίζονταν γενικά με περιοχές υψηλής περιβαλλοντικής ρύπανσης και φθοράς λόγω πυροβολισμών. Η αρχική εμπειρία με αυτές τις εφαρμογές απέδειξε κάτι απογοητευτικό. Η χρήση μη κεραμικών μονωτήρων παρουσίασε κάποια προβλήματα τα οποία δεν αφορούν τους κεραμικούς μονωτήρες. Μεταξύ αυτών ήταν και τα φαινόμενα της διαυλοποίησης και διάβρωσης, της φθοράς από υπεριώδη ακτινοβολία, επικονίαση και ραγίσματα, διαχωρισμός υλικού, ρήγματα λόγω του φαινομένου κορώνα και διείδυση ύδατος. Πολλά από αυτά συσχετιστήκαν με τη χρήση ακατάλληλων υλικών περιβλήματος και κατασκευαστικών τεχνικών, με την φτωχή ποιότητα ράβδων υαλονημάτων και την φτωχή στεγανοποίηση μεταξύ της ράβδου, του περιβλήματος και των συνδέσεων άκρων. Αυτά τα λειτουργικά προβλήματα οδήγησαν σε ένα σημαντικό πλήθος διακοπών ηλεκτροδότησης και πτώσεων γραμμών. Έτσι λόγω της αρχικά φτωχής αποδοτικότητας τους, οι μη κεραμικοί μονωτήρες είχαν περιορισμένη χρήση και, επομένως, παραγωγή.

Μέχρι τη δεκαετία του 1980, η τεχνολογία είχε αρκούντως εξελιχτεί για να επαλειφθεί των ζητημάτων που πρόεκυψαν από την πρώιμη εμπειρία χρήσης σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η κατανόηση των μηχανισμών προηγούμενων αστοχιών, σε συνδυασμό με την βελτιστοποίηση του υλικού κατασκευής, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη των σημερινά διαθέσιμων μη κεραμικών μονωτήρων. Οι σημερινοί μη κεραμικοί μονωτήρες χαρακτηρίζονται από δομή μονοκόμματων γείσων ή περιβλήματος. Αυτό το μονού τεμαχίου εξωτερικό περίβλημα λαμβάνεται μέσω χύτευσης μιας φάσης ή βουλκανισμού μετά την συναρμολόγηση. Η βελτίωση της λειτουργίας έναντι της διαυλοποίησης, της διάβρωσης όπως και της φθοράς λόγω υπεριώδους ακτινοβολίας, έχει αυξηθεί αξιοσημείωτα. Οι περισσότερες βιομηχανικές τυποποιήσεις περιλαμβάνουν δοκιμές διαυλοποίησης και διάβρωσης, και οι περισσότεροι εκ

των μονωτήρων σήμερα χρησιμοποιούν ένα περίβλημα ελαστομερούς βουλκανισμένο σε υψηλές θερμοκρασίες και απαλλαγμένο από αγωγίμους διαύλους. Η σπουδαιότητα στεγανοποίησης του εξωτερικού τμήματος του μονωτήρα έναντι υγρασίας, έχει δικαιολογημένα αναγνωριστεί και λαμβάνεται υπόψη σε όλους τους σχεδιασμούς. Η παρούσα εμπειρία με αυτούς τους μονωτήρες καταδεικνύει ρυθμούς αστοχιών που προσεγγίζουν αυτούς των κεραμικών μονωτήρων.

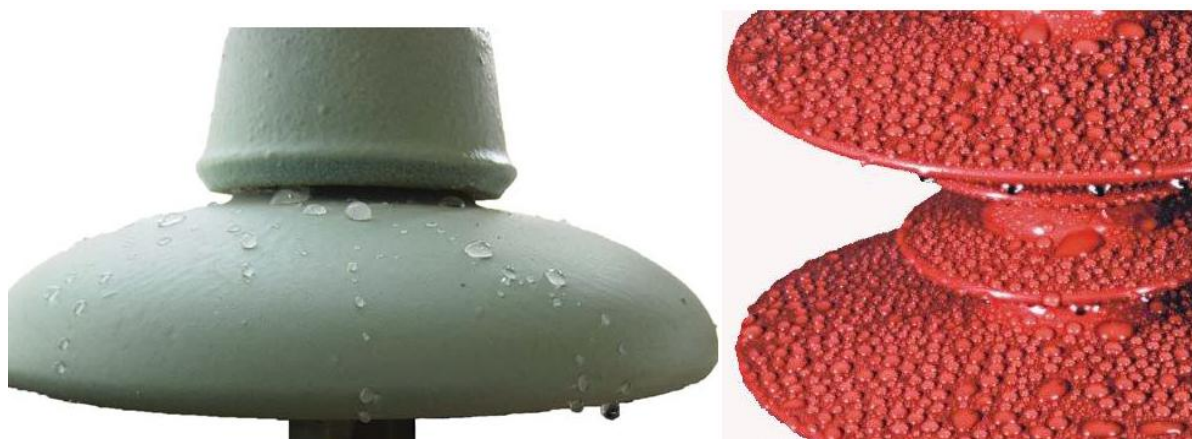
Σήμερα οι μη κεραμικοί μονωτήρες χρησιμοποιούνται ως καθιερωμένα προϊόντα σε πολλά συστήματα παροχής ισχύος σε ολόκληρο τον κόσμο. Η περιοχή λειτουργίας τους, σε συστήματα μεταφοράς και διανομής είναι μέχρι 345 kV. Υπάρχει περιορισμένη χρήση άνω των 345 kV, έως τα 765 kV. Στην συνέχεια θα μελετηθούν οι τεχνικές κατασκευής, τα υλικά και οι ιδιότητες των πολυμερών μονωτήρων.

#### *Υλικό γείσων (περιβλήματος)*

Στις σύγχρονες κατασκευές πολυμερών μονωτήρων, το πιο κοινό υλικό γείσου και περιβλήματος είναι ελαστομερή υδρογονανθράκων και σιλικόνης. Τα ελαστομερή υδρογονανθράκων συμπεριλαμβάνουν ελαστικά αιθυλενίου – προπυλενίου τέτοια όπως, μονομερές αιθυλενίου – προπυλενίου (EPM), μονομερές αιθυλενίου – προπυλενίου – διενίου (EPDM) και ένα συμπολυμερές αιθυλενίου – προπυλενίου και σιλικόνης (ESP). Τα ελαστομερή σιλικόνης περιλαμβάνουν σιλικόνες βουλκανισμού, τόσο υψηλής θερμοκρασίας όσο και θερμοκρασίας δωματίου. Αμφότερες αυτές οι οικογένειες υλικών χρησιμοποιούν τριένυδρη αλουμίνα (ATH) ως πληρωτικό υλικό, το οποίο βελτιώνει την συμπεριφορά του υλικού έναντι διαυλοποίησης. Τα υλικά περιβλήματος από ελαστομερή σιλικόνη και υδρογονάνθρακες έχουν αναπτυχτεί σε τέτοιο στάδιο ώστε η διαυλοποίηση και η υπερϊώδη υποβάθμιση, που συναντώνται σε παλαιότερους σχεδιασμούς, δεν αποτελούν πλέον ζήτημα. Αμφότερα τα δυο υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σε συστήματα μεταφοράς και διανομής. Τα υλικά (EPM) έχουν μεγάλη αποδοτικότητα σε καθαρό περιβάλλον, ενώ τα σιλικονούχα υλικά λειτουργούν καλά τόσο σε καθαρό όσο και σε ρυπαρό περιβάλλον.

Μια από τις βασικότερες ιδιότητες των πολυμερών μονωτήρων στην μείωση των σφαλμάτων λόγω ρύπανση, είναι η δημιουργία υδρόφοβης επιφάνια. Υδροφοβία είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα μιας επιφάνια να “σφαιροποιεί” το νερό που εναποτίθεται επ’ αυτής. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, υπερπήδηση ρύπανσης εξωτερικής μόνωσης εμπλέκει σπινθηρισμό ξυρών ζωνών, ο οποίος αναπτύσσεται λόγω θέρμανσης και εξάτμισης ηλεκτρικά συνεχών υγρών διαύλων, οι οποίοι έχουν σχηματιστεί από την διάλυση ρύπων εντός ενός στρώματος υγρασίας παρόντος στην επιφάνια του μονωτήρα. Όταν μια επιφάνια έχει υψηλό βαθμό υδροφοβίας, το εναποτιθέμενο σε αυτήν υγρό σχηματίζει, μεμονωμένα, σφαιροειδή ή σταγόνες. Αυτός ο σχηματισμός σταγόνων εμποδίζει την εμφάνιση ρευμάτων διαρροής και την συναφή διαδικασία σπινθηρισμού ξηρών ζωνών. Άρα ένας μονωτήρας με μια υψηλά υδρόφοβη επιφάνια χαρακτηρίζεται από σημαντικά καλύτερη επίδοση έναντι υπερπήδησης λόγω ρύπανσης απ’ ότι ένας πανομοιότυπος με μη υδρόφοβη επιφάνια.

Τα πλείστα των περιβλημάτων στους πολυμερείς μονωτήρες είναι υδρόφοβα όταν αυτοί εγκαθίστανται για πρώτη φορά. Έκθεση σε επιφανειακές εκκενώσεις, κορώνας και ορισμένα χημικά (συμπεριλαμβανομένου και του νερού) μειώνει την υδροφοβία των επιφανειών πολυμερών. Τα περιβλήματα βασισμένα σε EPM χάνουν γρήγορα τις υδροφοβικές τους ικανότητες όταν εκτίθενται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτή είναι και η βασική διαφορά μεταξύ των δυο υλικών περιβλήματος. Σε αντίθεση με τα συνθετικά EPM, τα περιβλήματα σιλικόνης έχουν την ικανότητα να ανακτούν ικανοποιητικά την υδροφοβική συμπεριφορά τους, όταν αυτή έχει απολεστεί. Στα χρησιμοποιούμενα υλικά σιλικόνης, αλυσίδες υψηλού και χαμηλού μοριακού βάρους διαρρηγνύονται και επανασυνδέονται αδιάλειπτα. Η αρχική υδρόφοβη κατάσταση του υλικού οφείλεται στην παρουσία ελαίων χαμηλού μοριακού βάρους στην επιφάνεια. Η διαδικασία απώλειας της υδροφοβικής συμπεριφοράς του υλικού οφείλεται στην απομάκρυνση αυτών των ελαίων. Κατά την λειτουργία, αυτό συμβαίνει πρώτιστα μέσω έκθεσης σε επιφανειακό τόξο, το οποίο μπορεί να είναι παρόν όταν οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται σε περιοχές σοβαρής ρύπανσης. Όταν το τόξο καταλαγιάζει, η επιφάνεια καλύπτεται ξανά με έλαιο χαμηλού μοριακού βάρους και η υδροφοβία επανέρχεται. Αυτή η διαδικασία ανάκτησης της υδροφοβίας απαιτεί αρκετό χρόνο που μπορεί να διαρκέσει μερικές μέρες. Το πόσες φορές η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφτεί δεν είναι γνωστό και εξαρτάτε σε μεγάλο βαθμό από το πάχος του υλικού.



Σχήμα 2.16: Υδρόφοβη συμπεριφορά πολυμερών μονωτήρων.

### *Πυρήνας υαλονημάτων*

Η μηχανική αντοχή των πολυμερών μονωτήρων εξασφαλίζεται μέσω της χρήσης ενός πυρήνα υαλονημάτων. Για τον σχεδιασμό μονωτήρων στήριξης υπό τάνυση, μη ρευματοφόρων άκρων και συμπαγούς πυρήνα, η ράβδος υαλονημάτων κατασκευάζεται γενικά μέσω μιας διαδικασίας όλκησης αυτών διαμέσου ρητίνης. Αυτοί οι ράβδοι περιέχουν αξονικά ευθύγραμμες ίνες υάλου ηλεκτρικής κλάσης, εντός μιας μήτρας ρητίνης. Δυο τύποι ρητίνης είναι σε κοινή χρήση. Η εποξειδική ρητίνη είναι κοινός αποδεκτό ότι έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα, ενώ ρητίνη πολυεστέρα είναι μια εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους. Εν δυνάμει προβλήματα που σχετίζονται με αυτούς τους τύπους ράβδων περιλαμβάνουν αξονικά ραγίσματα, λόγω αδέξιου χειρισμού ή φτωχών κατασκευαστικών διαδικασιών, και ρήξη από μηχανική διάβρωση, αλλιώς αποκαλούμενη *ψαθυρή θραύση*. Η ψαθυρή θραύση είναι μια

διαδικασία η οποία οδηγεί σε φυσική απότμηση του μονωτήρα υπό χαμηλή μηχανική φόρτιση και αποτελεί σοβαρό ζήτημα. Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι πλήρως κατανοητός και αποτελεί επί του παρόντος το σημείο εστίασης ενός σημαντικού τμήματος των ερευνών.

#### *Προσάρτηση τερματικών αρμών και εισχώρηση υγρασίας*

Από την αρχή των μη κεραμικών μονωτήρων, έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι προσάρτησης τερματικών αρμών στον συμπαγή πυρήνα τους. Μερικοί από τους αρχικούς σχεδιασμούς περιελάμβαναν τερματικούς συνδέσμους που ήταν συγκολλημένοι στον πυρήνα ενώ άλλοι χρησιμοποιούσαν μια μέθοδο σφηνοειδούς σύνδεσης. Οι τερματικοί αρμοί που προσαρτούνται στους μονωτήρες θα πρέπει να πληρούν δυο πολύ βασικές απαιτήσεις. Πρώτα, θα πρέπει να είναι ικανοί να υποβαστάζουν την μηχανική φόρτιση του μονωτήρα χωρίς να επέλθει ολίσθηση. Δεύτερον, θα πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζετε η αποφυγή εισχώρησης υγρασίας στον πυρήνα υαλονημάτων μέσω της ένωσης του τερματικού συνδέσμου με το υπόλοιπο σώμα του μονωτήρα. Η σπουδαιότητα της πρώτης λειτουργίας είναι προφανής. Ωστόσο, αν θέλουμε να επιτύχουμε μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα, η δεύτερη απαίτηση είναι πιο κρίσιμη. Οι περισσότεροι εκ των τερματικών συνδέσμων που σχεδιάζονται σήμερα είναι είτε πεπλατυσμένου δακτυλίου είτε πρεσσαριστοί. Αυτός ο τύπος σύνδεσης έχει αποδειχτεί ότι δίνει τη βέλτιστη αποδοτικότητα και στην περίπτωση της μηχανικής αντοχής και της στεγανότητας. Στεγανοποίηση έναντι υγρασίας, επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους. Με την χρήση RTV ή άλλων στεγανοποιητικών μέσων κατά μήκος της επαφής του τερματικού συνδέσμου και του περιβλήματος. Στην δεύτερη μέθοδο ο τερματικός σύνδεσμος εγκαθίσταται χρησιμοποιώντας μια σφικτή συναρμογή ή συναρμογή τριβής περί του περιβλήματος, ή το υλικό περιβλήματος μπορεί να εφελκυστεί επί ενός τμήματος του τερματικού συνδέσμου κατά την φάση καλουπώματος της κατασκευαστικής διαδικασίας. Ο τελευταίος εξ αυτών τρόπος είναι και ο πιο αποδοτικός ενώ ο πρώτος έχει αποδειχτεί ελάχιστα αποδοτικός στην αποτροπή εισόδου υγρασίας.

#### *Πολυμερείς μονωτήρες κοίλου πυρήνα*

Μη κεραμικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα (HCNCIs) κατασκευάζονται από νηματοειδείς σωλήνες ινών ύαλου διαποτισμένων με εποξειδική ρητίνη ύαλου. Γενικά, το περίβλημα ελκύεται επί του σωλήνα ινών. Αυτή η διαδικασία όλκισης μπορεί να καταλήξει στην κατασκευή γείσων, ή εναλλακτικά, τα γείσα μπορούν να προσαρμοστούν επί του περιβλήματος και να βουλκανιστούν. Στους υποσταθμούς, οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούν κυρίως ως περιβλήματα για κεραμικούς απαγωγείς και μετασηματιστές, για αποζεύκτες και μονωτήρες διέλευσης τοιχωμάτων. Επίσης, οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες στήριξης σε σταθμούς για την υποστήριξη ζυγών, διακόπτων και λοιπού ηλεκτρικού εξοπλισμού. Σε σύγκριση με συμβατικούς κεραμικούς μονωτήρες, αυτοί παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα. Μεταξύ αυτών είναι και το ότι είναι ελαφρύτεροι, είναι αποδοτικότεροι σε συνθήκες ρύπανσης και παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία κατά την εκδήλωση σεισμού. Ως μονωτήρες διέλευσης, η χρήση τους εξασφαλίζει μια σημαντική αύξηση ασφάλειας στο ότι, σε αντίθεση με τους μονωτήρες διέλευσης πορσελάνης, η αστοχία τους δεν συνοδεύεται από έκρηξη όταν διακριθούν εσωτερικά από τόξα ισχύος. Το

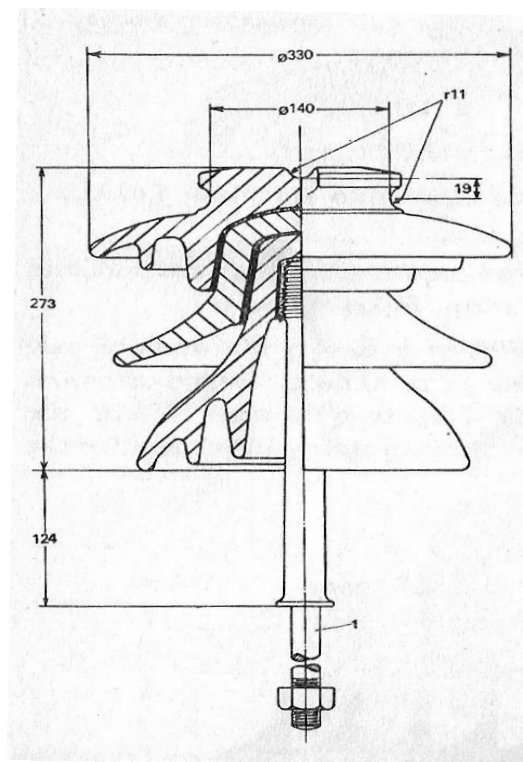
βασικότερο μειονέκτημα των μονωτήρων αυτών είναι το υψηλό κόστος παράγωγης και υλικών κατασκευής η οποία οδηγεί σε αύξηση του κόστους τους.

### 2.2.13 Ταξινόμηση με βάση τον τρόπο σύνδεσης

Ως προς τον τρόπο σύνδεσης τους οι μονωτήρες κατατάσσονται σε:

#### Μονωτήρες στηρίζεως

Αυτός ο τύπος μονωτήρα είναι γνωστός και ως μονωτήρας τύπου κώδωνος ή στελέχους και χρησιμοποιούνται για την στήριξη των αγωγών σε δίκτυα μέσης τάσης 15kV έως 66kV.



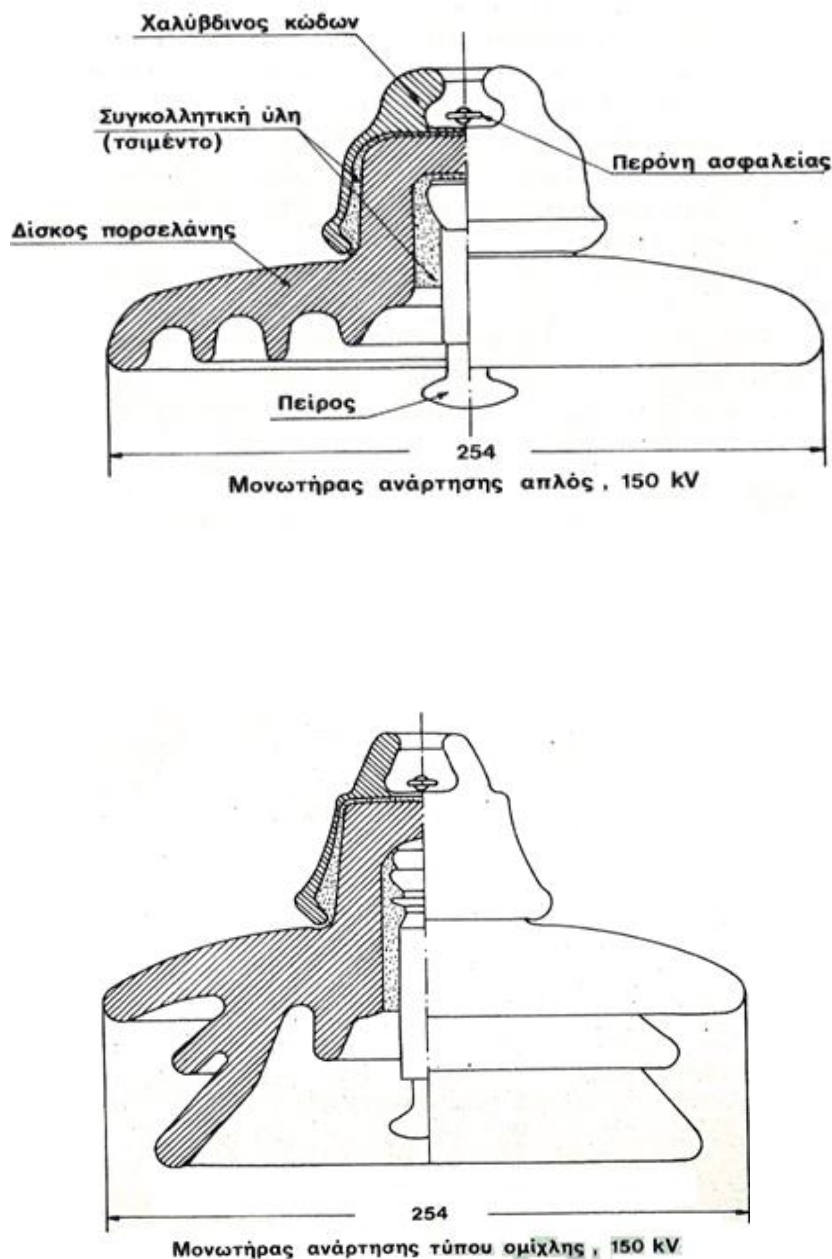
Σχήμα 2.17: Μονωτήρας στήριξης. Δεδομένα: Μήκος ερπυσμού προστατευμένο 419mm, ολικό μήκος ερπυσμού 775mm, κρουστική τάση αντοχής 230kV, ελάχιστη μηχανική αντοχή 10 τόνοι.

#### Μονωτήρες ανάρτησης

Επειδή το κόστος των μονωτήρων στήριξης αυξάνει πολύ με την αύξηση της τάσης των γραμμών, στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης (μεγαλύτερη των 66kV) χρησιμοποιούνται μονωτήρες ανάρτησης. Στην περίπτωση αυτή οι μονωτήρες αποτελούνται από πολλά τεμάχια όμοιων δισκοειδών μονωτήρων, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας κατά κάποιο τρόπο αλυσίδα. Από την διάταξη δε αυτή οι μονωτήρες ανάρτησης καλούνται και αλυσοειδής. Το στοιχείο της αλυσού δηλαδή ο δισκοειδής μονωτήρας αποτελείται από δίσκο κατασκευασμένο από πορσελάνη η γυαλί, με χαλύβδινη

κεφαλή προσαρμοσμένη στο πάνω μέρος του και προεξέχοντα χαλύβδινο πείρο στο κάτω μέρος όπως φαίνετε στο σχήμα 2.18 .

Η σύνδεση των διαδοχικών δίσκων για την συγκρότηση της αλυσίδας γίνεται με την εισδοχή του πείρου κάθε δίσκου στην υποδοχή του επόμενου. Ένας συνήθης τύπος δισκοειδούς μονωτήρα έχει διάμετρο 254mm και ύψος 146mm. Τέτοιοι μονωτήρες χρησιμοποιούνται στις γραμμές των 150kV της Δ.Ε.Η., ενώ δισκοειδείς μονωτήρες διαμέτρου 280mm και ύψους 170mm χρησιμοποιούνται στις γραμμές των 400kV.



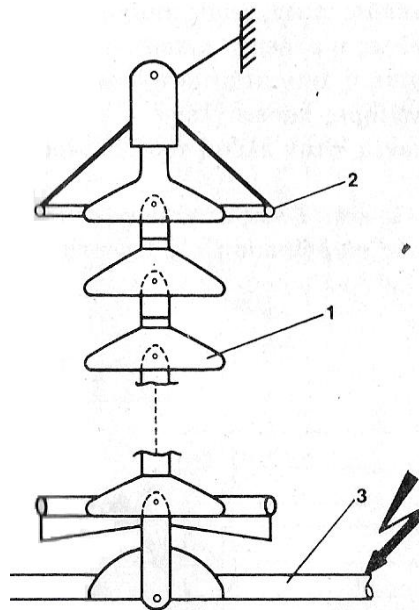
Σχήμα 2.18: Δίσκοι μονωτήρων αλυσίδας 150kV. Πάνω απλός δίσκος και κάτω ομίχλης.

Στα άκρα των μονωτήρων ανάρτησης υπάρχουν <<αρματώσεις>> από έναν δακτύλιο για ελάττωση του ηλεκτροστατικού πεδίου καθώς και κεράτια απαγωγής τόξου με τα οποία το ηλεκτρικό τόξο, που δημιουργείτε κατά την διάρκεια μιας διάσπασης, μετατοπίζεται από την επιφάνια του μονωτήρα στο κενό μεταξύ των ράβδων λόγω μαγνητικών δυνάμεων και ο μονωτήρας δεν καταστρέφεται.

Η σύνδεση των αγωγών στους μονωτήρες ανάρτησης γίνεται μέσω ειδικών διατάξεων πρόσδεσης, όπου καταβάλλεται προσπάθεια να μην δημιουργούνται απότομες κάμψεις των αγωγών στα σημεία πρόσδεσης. Η τελευταία απαίτηση έχει ιδιαίτερη σημασία, όσο αφορά την πρόληψη βλάβης των αγωγών από μηχανικές ταλαντώσεις οι οποίες προκαλούνται από τον άνεμο και τον πάγο.

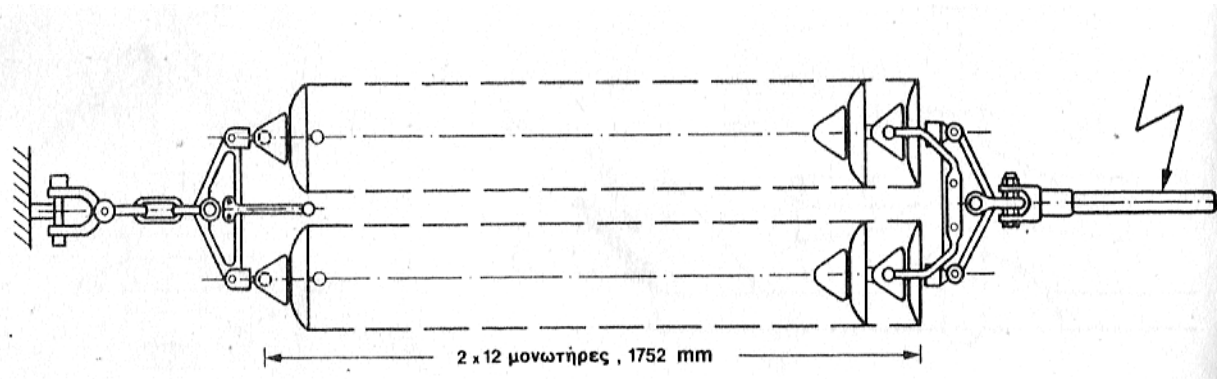
Βασικό πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι ότι μπορούμε εύκολα να προσθέσουμε και να αφαιρέσουμε όσους δίσκους επιθυμούμε και έτσι μπορούμε να αντικαταστήσουμε τους δίσκους εκείνους που τυχόν έχουν υποστεί βλάβη. Ακόμα σε περίπτωση καταστροφής ενός δίσκου δεν τίθεται εκτός λειτουργίας ολόκληρη η διάταξη, γεγονός που θα δημιουργούσε μεγάλο πρόβλημα στο δίκτυο.

Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενο δίσκων σε έναν μονωτήρα ανάρτησης εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής και την επιθυμητή στάθμη μονώσεως αυτής, δηλαδή την επιθυμητή κρουστική αντοχή της. Υπό κανονικές συνθήκες το μέτρο ποικίλει από 10 έως 15kV ανά μονάδα μονωτήρα. Στα δίκτυα μεταφοράς του ελληνικού συστήματος χρησιμοποιούνται στις μεν γραμμές των 150kV συνήθως 10 ή 11 δίσκοι, μεγέθους 250x145mm, ενώ στις γραμμές των 400kV χρησιμοποιούνται 19 δίσκοι μεγέθους 280x170mm.



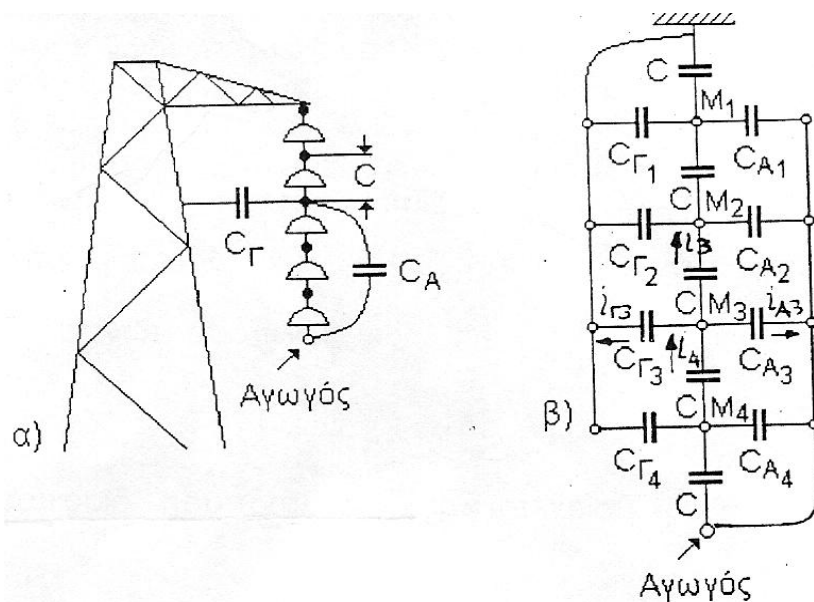
Σχήμα 2.19: Μονωτήρας αλυσίδα. 1 δίσκοι, 2 δακτύλιος εξομάλυνσης του ηλεκτρικού πεδίου προς αποφυγή εκκενώσεων Κορώνα, 3 αγωγός.

Είναι φανερό πως σημαντικό ρόλο στη ηλεκτρική αντοχή του αλυσοειδούς μονωτήρα παίζει ο τρόπος με τον οποίο η συνολική τάση κατανέμεται στους δίσκους του. Φυσικά η πλέον συμφέρουσα είναι η ομοιόμορφη κατανομή, δηλαδή εκείνη κατά την οποία όλοι οι δίσκοι καταπονούνται εξίσου αναλαμβάνοντας το ίδιο ποσοστό της συνολικής τάσης. Τότε μόνο εκμεταλλευόμαστε πλήρως την μονωτική ικανότητα όλων των δίσκων.



Σχήμα 2.20: Μονωτήρας διπλής αλυσίδας 150kV του ελληνικού συστήματος.

Δυστυχώς όμως η πραγματική κατανομή της τάσης διαφέρει σημαντικά της ιδανικής. Στο σχήμα 2.21α δείχνεται η διάταξη γραμμής υψηλής τάσης, στην οποία ο αγωγός κάθε φάσης αναρτάται από γειωμένο μεταλλικό στύλο μέσω αλυσοειδούς μονωτήρα πέντε δίσκων. Στο σχήμα 2.21β δείχνετε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Στο σχήμα αυτό οι σημειούμενοι κόμβοι M παριστάνουν τις μεταλλικές αρθρώσεις των δίσκων μεταξύ των οποίων υπάρχουν ίσες χωρητικότητες C. Εκτός των C υπάρχουν και οι χωρητικότητες  $C_{\Gamma}$  μεταξύ αρθρώσεων και γής και  $C_A$  μεταξύ αρθρώσεως και αγωγού, όπου  $C_{\Gamma} > C_A$  λόγω του όγκου τον οποίο παρουσιάζει η φέρουσα την άλυσσο μεταλλική κατασκευή του στύλου.



Σχήμα 2.21: α) Ανάρτηση αλυσοειδούς μονωτήρα σε μεταλλικό στύλο. β) Ισοδύναμο κύκλωμα.



Είναι προφανές ότι δεν διέρχεται από όλους τους δίσκους το ίδιο ρεύμα. Στον κόμβο  $M_3$ . Για παράδειγμα θα πρέπει να είναι  $i_4 = i_3 + i_{Γ3} + i_{Α3}$ . Είναι όμως  $i_{Γ3} > i_{Α3}$  γιατί αφενός μεν είναι όπως είπαμε  $C_Γ > C_Α$  αφ ετέρου δε η τάση μεταξύ γης και  $M_3$  είναι μεγαλύτερη από την τάση μεταξύ  $M_3$  και αγωγού. Κατά συνέπεια είναι  $i_4 > i_3$ . Συνεπώς η κατανομή της τάσης κατά μήκος της αλυσίδας είναι ανομοιόμορφη και ο μονωτήρας που καταπονείται περισσότερο είναι ο πλησιέστερος στον αγωγό της γραμμής.

Στην περίπτωση που ο αλυσοειδής μονωτήρας αποτελείται από 10 δίσκους ο πρώτος δίσκος δέχεται τα 23/100 της συνολικής τάσης. Έτσι αφού ο μονωτήρας αποτελείται από ομοιόμορφους δίσκους, είμαστε υποχρεωμένοι να τους επιλέξουμε ούτως ώστε ο καθένας από αυτούς να αντέχει στα 23/100 της συνολικής τάσης και όχι στο 1/10 αυτής όπως θα περιμέναμε. Αυτό αυξάνει προφανώς το κόστος του μονωτήρα.

### *Μονωτήρες τέρματος*

Οι μονωτήρες τέρματος χρησιμοποιούνται στα τέρματα των γραμμών, σε διασταυρώσεις δρόμων και σε σημεία στα οποία γίνεται αλλαγή διεύθυνσης της γραμμής. οι μονωτήρες αυτοί κατασκευάζονται ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στην καταπόνηση από της ισχυρές μηχανικές δυνάμεις έλξης που παρουσιάζει η γραμμή στα σημεία αυτά. Ανάλογα την τάση λειτουργίας της γραμμής οι μονωτήρες αυτοί διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, στους μονωτήρες τέρματος χαμηλής και μέσης τάσης οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε γραμμές με τάση λειτουργίας έως 15kV και ,στους μονωτήρες τέρματα υψηλής τάσεις. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στους μονωτήρες τέρματα υψηλής τάσεις είναι πολύ ισχυρές της τάξης των 1,5 έως και 3,5 τόνων. Έτσι προκειμένου να ανταπεξέλθουν στην μηχανική καταπόνηση, μπορούν να τοποθετηθούν δυο, τρεις ή και περισσότεροι μονωτήρες του τύπου αυτού, ανάλογα την δύναμη έλξης που τους ασκείτε. Αυτοί οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται για γραμμές υψηλής τάσης μέχρι 300kV.

### *Μονωτήρες κανονικού τύπου*

Οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαιτερότητα ως αν αφορά τα επίπεδα ρύπανσης και υγρασίας.

### *Μονωτήρες τύπου ομίχλης*

Σε περιοχές στις οποίες οι επικρατούσες συνθήκες διαφέρουν των κανονικών όπως για παράδειγμα σε περιοχές με έντονη βιομηχανική ρύπανση, ύπαρξη αλάτων στην ατμόσφαιρα ή υγρασία, οι μονωτήρες κανονικού τύπου δεν λειτουργούν με ικανοποιητική απόδοση. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάζονται ειδικού τύπου μονωτήρες, γνωστοί με το όνομα μονωτήρες ομίχλης (fog-type insulators), των οποίων η κατασκευαστική διαμόρφωση είναι τέτοια ώστε πρακτικά να αυξάνετε το μήκος ερπυσμού και η διαμόρφωση της εξωτερικής επιφάνια τέτοια ώστε να μην επιτρέπει την επικάλυψη ρύπων. Η κατασκευή των μονωτήρων αυτών είναι πολύ πιο δαπανηρή από τις συνήθεις κατασκευές. Για τον λόγο αυτό οι μονωτήρες ομίχλης πρέπει να τοποθετούνται εκεί, που πραγματικά κρίνεται απαραίτητο.



Σχήμα 2.22: Δισκοειδής μονωτήρες ομίχλης . Πορσελάνης (αριστερά) και υάλου (δεξιά).

#### 2.2.14 Δοκιμές και προδιαγραφές

Όλοι οι μονωτήρες δοκιμάζονται σύμφωνα με πρότυπες διαδικασίες τυποποίησης. Κεραμικοί μονωτήρες πορσελάνης και υάλου δοκιμάζονται μηχανικά και ηλεκτρικά πριν την αποστολή τους. Στην περίπτωση των μη κεραμικών μονωτήρων, πριν αφήσουν το εργαστήριο, κάθε τεμάχιο της παραγωγής υποβάλλεται σε μηχανική αλλά όχι ηλεκτρική δοκιμή επαλήθευσης. Η βασικότερη αιτία για τις επιπλέον δοκιμές επαλήθευσης στους μη κεραμικούς μονωτήρες είναι ότι, οι κεραμικές μονάδες δομούνται από ένα πλήθος μικρότερων μονάδων σε σειρά. Για παράδειγμα, ένας μονωτήρας στήριξης σταθμού των 230kV θα αποτελείται γενικά από δυο μικρότερους, συνδεδεμένους μαζί με κοχλίες για να δώσουν το απαιτούμενο διάκενα για 230kV. Κάτι τέτοιο επιτρέπει επιμέρους δοκιμή μεμονωμένων εξαρτημάτων. Σε μη κεραμικούς, ένας μονωτήρας των 500kV κατασκευάζεται ως ένα μόνο τεμάχιο. Η εκτέλεση ηλεκτρικών δοκιμών επί κάθε μονάδας θα απαιτούσε σημαντικό χρόνο και επένδυση σε ένα ικανών διαστάσεων εργαστήριο δοκιμών υψηλών τάσεων. Επιπρόσθετα με μηχανικές και ηλεκτρικές δοκιμές επαλήθευσης, τα ακατέργαστα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή κεραμικών και μη κεραμικών μονωτήρων δοκιμάζονται σαν ένας έλεγχος της διαδικασίας παραγωγής.

Όσο αφορά στις δοκιμές χαρακτηρισμού και εφαρμογών, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες τυποποιήσεις είναι αυτές που εκδίδονται από τις IEC, ANSI, IEEE, CSA και CEA. Ανάλογα με τον τύπο μονωτήρα, οι ηλεκτρικές δοκιμές περιλαμβάνουν υγρή και ξηρή υπερπήδηση βιομηχανικής συχνότητας, υπερπήδηση κεραμικού κρουστικού παλμού, υπερπήδηση κρουστικού παλμού απότομου μετώπου, δοκιμές τόξου ισχύος και RIV/κορώνα. Μηχανικές δοκιμές περιλαμβάνουν δοκιμή εφελκυσμού, θερμική/μηχανική κυκλική δοκιμή, στρέψης, προβόλου και ηλεκτρομηχανική δοκιμή. Ακόμη εκτελούνται και δοκιμές ρύπανσης όπως αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου αυτού.

### **2.2.15 Επιθεώρηση εν-λειτουργία και τρόποι αστοχίας.**

Οι μονωτήρες συχνά επιθεωρούνται περιοδικά για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους. Για την συνήθη πορσελάνη, αυτό περιλαμβάνει εξ όψεως επιθεώρηση και στην περίπτωση μονάδων ανάρτησης, μια εν λειτουργία ηλεκτρική δοκιμή. Για την ύαλο, η επιτήρηση περιλαμβάνει συνήθως μόνο μια εξ όψεως επιθεώρηση. Αυτές οι απλές ενέργειες είναι συνήθως επαρκής για την ανίχνευση προβλημάτων σε κεραμικούς μονωτήρες. Η εν λειτουργία εποπτεία μη κεραμικών μονωτήρων παρουσιάζει μια μεγάλη πρόκληση. Μέθοδοι όπως υπέρυθη θερμογραφία, ανίχνευση ραδιοθορύβου παρατήρηση κορώνας και εποπτεία ηλεκτρικού πεδίου έχουν σε κάποιο βαθμό αποδειχτεί αποτελεσματικές ως διαγνωστικά εργαλεία για την αξιολόγηση της εν λειτουργία κατάστασης των μη κεραμικών μονωτήρων. Η διαφορά στην προσέγγιση της εποπτείας των μη κεραμικών από τους κεραμικούς έγκειται στους διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχιών που χαρακτηρίζουν τον κάθε τύπο μονωτήρα. Φθορές σε κεραμικούς μονωτήρες είναι γενικά εμφανείς με οπτική παρατήρηση λόγω εμφάνισης ρωγμών στην επιφάνια τους. Σε μονάδες ανάρτησης, μπορεί να υπάρχουν αφανείς ηλεκτρικές διατρήσεις διαμέσου του μονωτήρα στην περιοχή του πώματος (cap) και της καρίνας (pin). Αυτές δεν είναι οπτικά ανιχνεύσιμες, αλλά μπορούν να ανιχνευτούν χρησιμοποιώντας ένα απλό όργανο πεδίου. Με τους μονωτήρες ύαλου, κάθε σημαντική φυσική φθορά καταλήγει συνήθως σε καταστροφή του δίσκου. Στους μη κεραμικούς μονωτήρες μπορεί να προκληθεί φθορά στο εσωτερικό, τους χωρίς καμία εξωτερική ένδειξη. Ο δεσπόζον τρόπος αστοχίας στους μη κεραμικούς μονωτήρες εμπλέκει μηχανική και ηλεκτρική αστοχία, εξαιτίας θραύσης της εσωτερικής ράβδου ή εξωτερικής ή εσωτερικής διαυλοποίησης. Λόγο αυτού, η εποπτεία των μη κεραμικών μονωτήρων είναι μια ποιο σύνθετη διαδικασία.

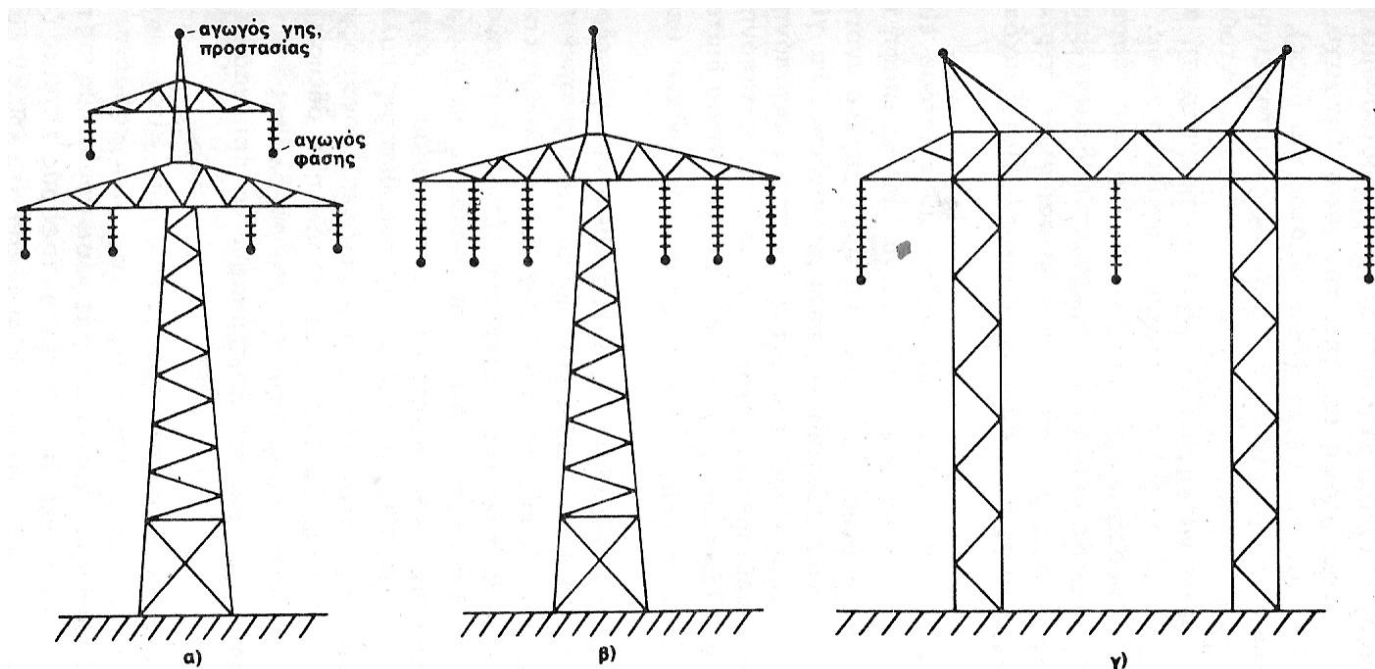
### **2.3 Πύργοι (πυλώνες)**

Οι αγωγοί πρέπει στην διαδρομή τους να στηριχτούν , να τεντωθούν και να οδηγηθούν στην κατάλληλη παρία που έχουμε επιλέξει. Αυτό γίνεται με πύργους (λέγονται και πυλώνες) διαφόρων μορφών. Η στήριξη των αγωγών μπορεί να γίνει σε άνοιγμα των 150m έως 500m και σε περιπτώσεις διασταύρωσης ποταμών, κοιλάδων, υποθαλάσσιων ζωνών, οι αποστάσεις μπορεί να ανέλθουν σε 1200m. Αυξανόμενου του ανοίγματος πρέπει οι πύργοι να γίνουν ισχυρότεροι και οι αγωγοί ανθεκτικότεροι γιατί πύργοι και αγωγοί φέρουν μεγάλο φορτίο. Πρέπει όμως και οι πύργοι να είναι ψιλότεροι, γιατί οι αγωγοί κρέμονται βαθύτερα και πρέπει οπωσδήποτε να τηρηθούν κάποιες αποστάσεις από την γη. Επίσης και οι οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ των αγωγών πρέπει να είναι αυξημένες διότι υπάρχει ο κίνδυνος να ενωθούν οι φάσεις όταν οι αγωγοί ταλαντωθούν.

Συνεπώς μπορεί κανείς, εκεί που το έδαφος το επιτρέπει, να χρησιμοποιήσει ή πολλούς και φθηνούς ή λίγους και ακριβούς. Έτσι, αναζητώντας έναν οικονομικό, βέλτιστο τρόπο στήριξης καταφεύγει κανείς στις παραπάνω αποστάσεις των 100-500m.

Η μορφή ενός πύργου καθορίζετε μετά από τεχνοοικονομικούς υπολογισμούς λαμβάνοντας υπόψη τα εξής: την τάση και την ισχύ μεταφοράς, την διάταξη των αγωγών, τον διαθέσιμο

χώρο (πλάτος και ύψος), τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τις μηχανικές καταπονήσεις και την κίνηση των αγωγών υπό διάφορες συνθήκες. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς, η αυξημένη ροπή που θα ασκηθεί στον πύργο στην περίπτωση που ένας ή περισσότεροι αγωγοί κοπούν. Το σχήμα.23 παρουσιάζει διάφορες μορφές πύργων με ένα έως τέσσερα κυκλώματα. Παρατηρούμε ότι οι αγωγοί μπορεί να είναι διατεταγμένοι σε οριζόντιο επίπεδο, όπως το σχήμα 2.23β και σχήμα 2.23γ, σε περίπου κάθετο επίπεδο όπως στο σχήμα 2.23α ή σε τριγωνική διάταξη, όπως το σχήμα 2.24(δεξιά).

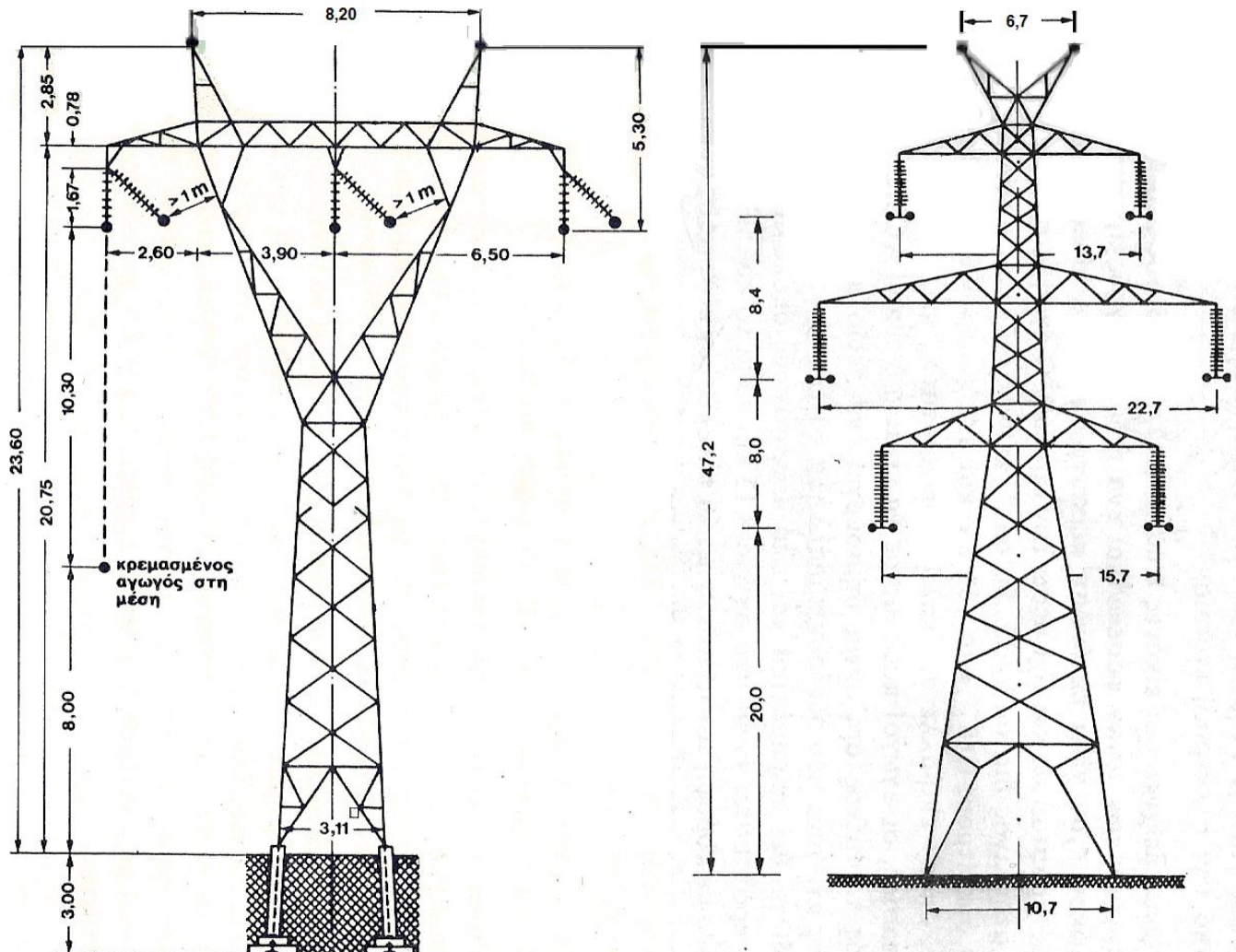


Σχήμα 2.23: Τυπικοί χαλύβδινοι πύργοι ανάρτησης. α) Πυλώνας τύπου Δούναβη, β) πυλώνας οριζώντιας διάταξης δυο κυκλωμάτων, γ) πυλώνας τύπου πύλης.

Η διάταξη των τριών φάσεων επί οριζοντίου επιπέδου είναι κατασκευαστικά απλή. Δεν υπάρχει κίνδυνος να επέλθει επαφή των αγωγών αν ο ένας επιμηκυνθεί. Χρειάζεται όμως μεγάλο άνοιγμα τραβέρσας (μεγάλο πλάτος πύργου) και υπάρχει κίνδυνος οι αγωγοί να έρθουν σε επαφή αν ταλαντωθούν οριζόντια. Επίσης η καταπόνηση του πύργου 2.23β σε στρέψη, είναι μεγαλύτερη από την καταπόνηση του 2.23α. Σε πολύ υψηλές τάσεις π.χ. 750kV, η πιο συμφέρουσα διάταξη είναι η οριζόντια, διότι το ύψος του πύργου αυξάνει υπερβολικά.

Λόγοι όπως η μεταφερόμενη ισχύς, η ευστάθεια και η εφεδρεία επιβάλουν συχνά διπλά ή πολλαπλά κυκλώματα. Αυτά μπορεί να αναρτηθούν σε ξεχωριστούς πύργους ή μαζί, π.χ. 2...6 κυκλώματα μαζί στον ίδιο πύργο. Τα σχήματα 2.23α και 2.23β δείχνουν τέτοιες περιπτώσεις διπλών κυκλωμάτων ανά πύργο. Αυτές οι διατάξεις επηρεάζουν προφανώς, τις αυτεπαγωγές και χωρητικότητες της γραμμής. Πέραν τούτων η τοποθέτηση πολλών παράλληλων κυκλωμάτων στον ίδιο πύργο μειώνει, προφανώς, την αξιοπιστία του συστήματος. Το ίδιο και η παράλληλη όδευση δυο γραμμών η μια κοντά στην άλλη. Στην

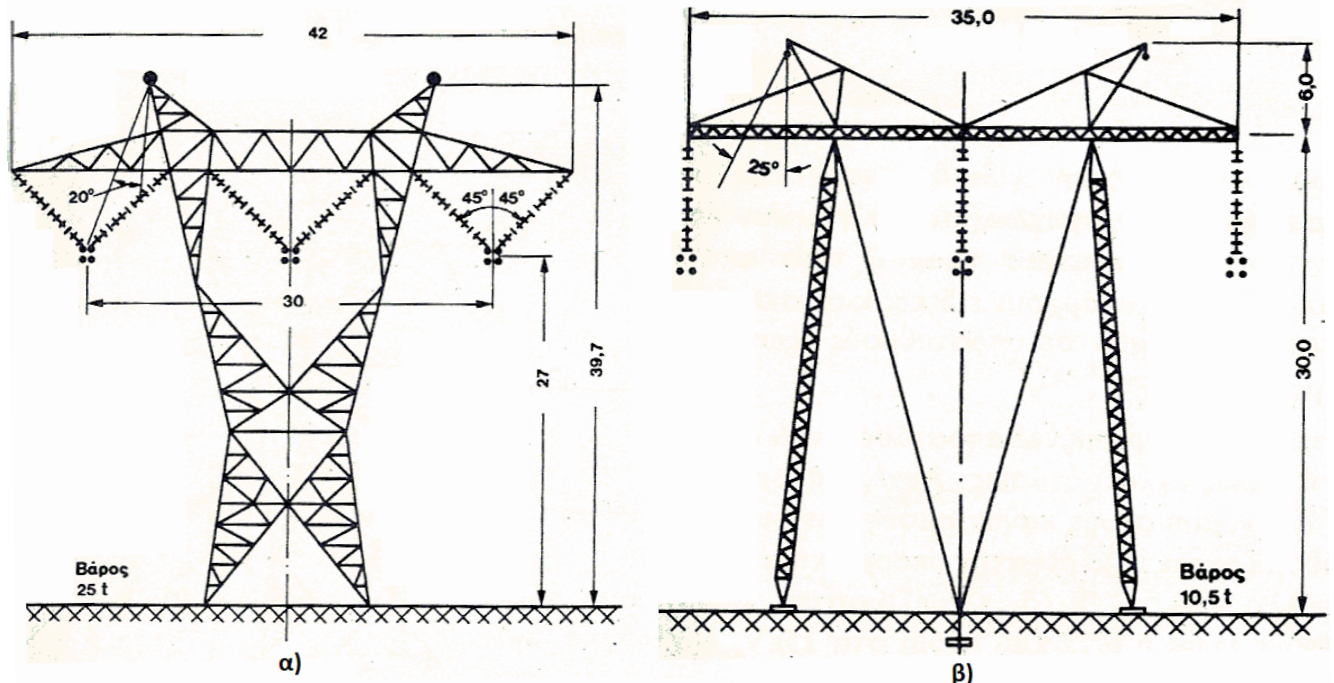
περίπτωση βλάβης του ενός κυκλώματος, δηλαδή της μιας γραμμής, μπορεί να επηρεαστεί το γειτονικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.24 (αριστερά): Πυλώνας γραμμής 150kV απλού κυκλώματος του ελληνικού συστήματος. Υπάρχουν δύο αγωγοί προστασίας. Το σχήμα δείχνει και το βέλος  $f$  του αγωγού ( $f=10,30m$ ). Σχήμα.24 (δεξιά): Πυλώνας διπλού κυκλώματος 400kV με δύο αγωγούς προστασίας, του ελληνικού συστήματος. Δύο αγωγοί ανά φάση.

Επειδή οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια είναι υψηλά ιεραρχημένες, οι ιδιοκτήτες, κτηματίες, οφείλουν να επιτρέπουν την διέλευση γραμμών μεταφοράς μέσω των κτημάτων τους. Η ζώνη εδάφους που απαιτείτε για την διέλευση μιας γραμμής μεταφοράς λέγεται ζώνη διέλευσης ή ζώνη δουλείας και έχει πλάτος 40 μέτρα στα 150kV και 50 μέτρα στα 400kV. Η ζώνη διέλευσης μπορεί να εμπίπτει νομικά ή στο καθεστώς της δουλείας ή εφόσον κριθεί αναγκαίο, η επιχείρηση ηλεκτρισμού μπορεί να γίνει κύριος της ζώνης δηλαδή να την αγοράσει.

Όπως δείχνουν οι εικόνες 2.23 έως 2.26, ένας πύργος φέρει, εκτός των αγωγών των τριών φάσεων και έναν ή δυο αγωγούς προστασίας. Επιδιώκουμε, σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος, η εκκένωση να γίνει μέσω του αγωγού προστασίας και όχι μέσω των φάσεων. Ο αγωγός προστασίας είναι ατσάλινος, διατομής  $35 \dots 90 \text{ mm}^2$ . Στην Ελλάδα οι αγωγοί γης έχουν διαμέτρους  $3/8''$  στα  $150 \text{ kV}$  και  $1/2''$  στα  $400 \text{ kV}$ . Μπορεί όμως, όπου επιβάλλεται καλή αγωγιμότητα, οι αγωγοί προστασίας να είναι του τύπου ACSR. Ένας αγωγός τεταμένος οριζόντια δημιουργεί ένα πεδίο προστασίας για άλλους αγωγούς που οδεύουν παράλληλα κάτω από αυτόν. Το πεδίο προστασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.27 και είναι το καμπυλόγραμμο τρίγωνο με κορυφή τον αγωγό γης. Οι πλευρές του είναι τόξα κύκλων εφαπτόμενων στο έδαφος Η ακτίνα των κύκλων είναι ίση με το απλό ή το διπλάσιο ύψος του αγωγού γης  $h_e$ . Μεταξύ των δύο ακραίων τιμών, η τιμή  $1,5h_e$  είναι η πλέον εφαρμοζόμενη. Κατ' άλλους το πεδίο προστασίας είναι μέσα σε μια γωνία  $\pm 30^\circ$ , εκατέρωθεν της κατακόρυφου. Οι κανονισμοί VDE 101, DIN 57 101, ορίζουν ακτίνα πεδίου προστασίας  $2h_e$ .



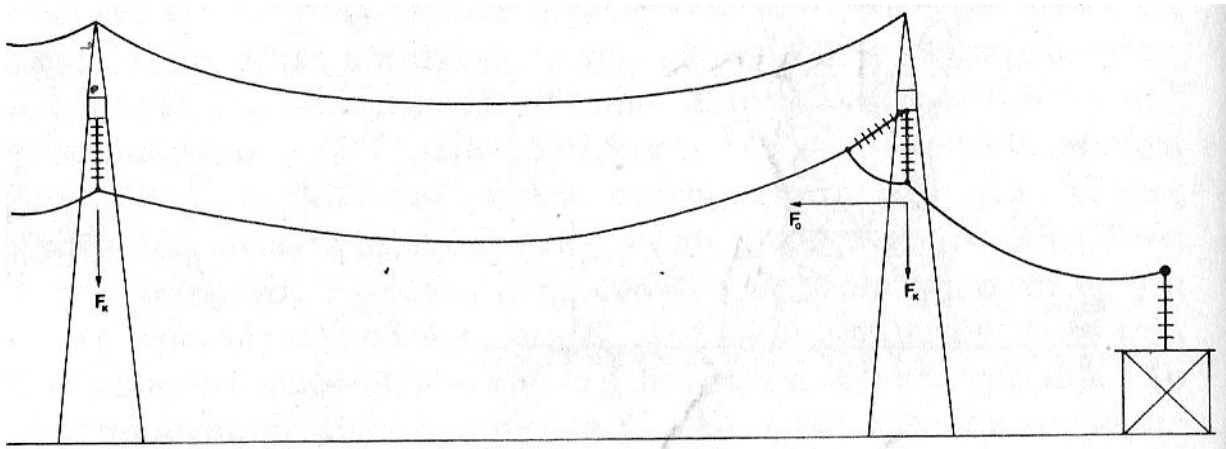
Σχήμα 2.25 α): Πυλώνας  $730 \text{ kV}$  στον Καναδά, βάρος  $25 \text{ t}$ . α): Πυλώνας  $750 \text{ kV}$  στην Σοβιετική Ένωση με επίτονους, βάρος  $10,5 \text{ t}$ , πολύ μικρότερο βάρος από τον πυλώνα του σχήματος α που προορίζετε για την ίδια σχεδόν τάση .

Οι πύργοι κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς διακρίνονται ανάλογα με τα φορτία που φέρουν, στους παρακάτω:

- Πύργοι που φέρουν, υπό κανονικές συνθήκες, κυρίως κατακόρυφα φορτία για παράδειγμα αυτοί που είναι στα ευθύγραμμα τμήματα της γραμμής και φέρουν το βάρος του αγωγού συν το βάρος του επικαθήμενου πάγου και ενδεχομένως δυνάμεις που προκαλούνται από τον άνεμο.
- Πύργοι τάνυσεως των αγωγών. Οι αγωγοί πρέπει να τεντωθούν στα ευθύγραμμα τμήματα. Οι μονωτήρες είναι οριζόντιοι. Οι οριζόντιες δυνάμεις εκατέρωθεν του πύργου τάνυσης, δεν είναι κατ' ανάγκη ίσες. Έτσι, οι πύργοι αυτοί φέρουν και οριζόντια φορτία και

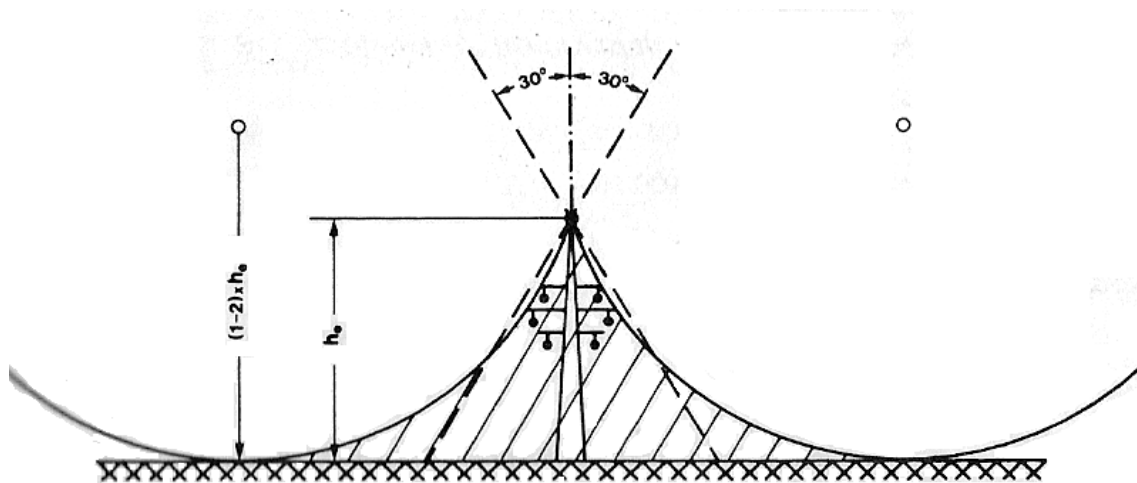
δέχονται μεγάλες ροπές κάμψης. Οι πύργοι αυτοί αποσυμπλέκουν επίσης μηχανικά τα εκατέρωθεν μέρη της γραμμής και δεν μεταδίδονται οι τυχόν ταλαντώσεις.

- Στους πύργους των σημείων κάμψης της γραμμής.



Σχήμα 2.26: Πύργος ανάρτησης (αριστερά) και τάνυσης (δεξιά).

Εκτός των παραπάνω μορφών υπάρχουν και ειδικές κατασκευές που φροντίζουν για την αντιμετάθεση των αγωγών (πύργοι για συνδέσεις καλωδίων που φέρουν τόσο εναέρια γραμμή όσο και τα ατμοκιβώτια των καλωδίων). Επίσης υπάρχουν και ειδικές κατασκευές για τον τερματισμό των εναέριων γραμμών σε υποσταθμούς εξωτερικού χώρου (συνηθίζετε ο όρος *πύλη*).



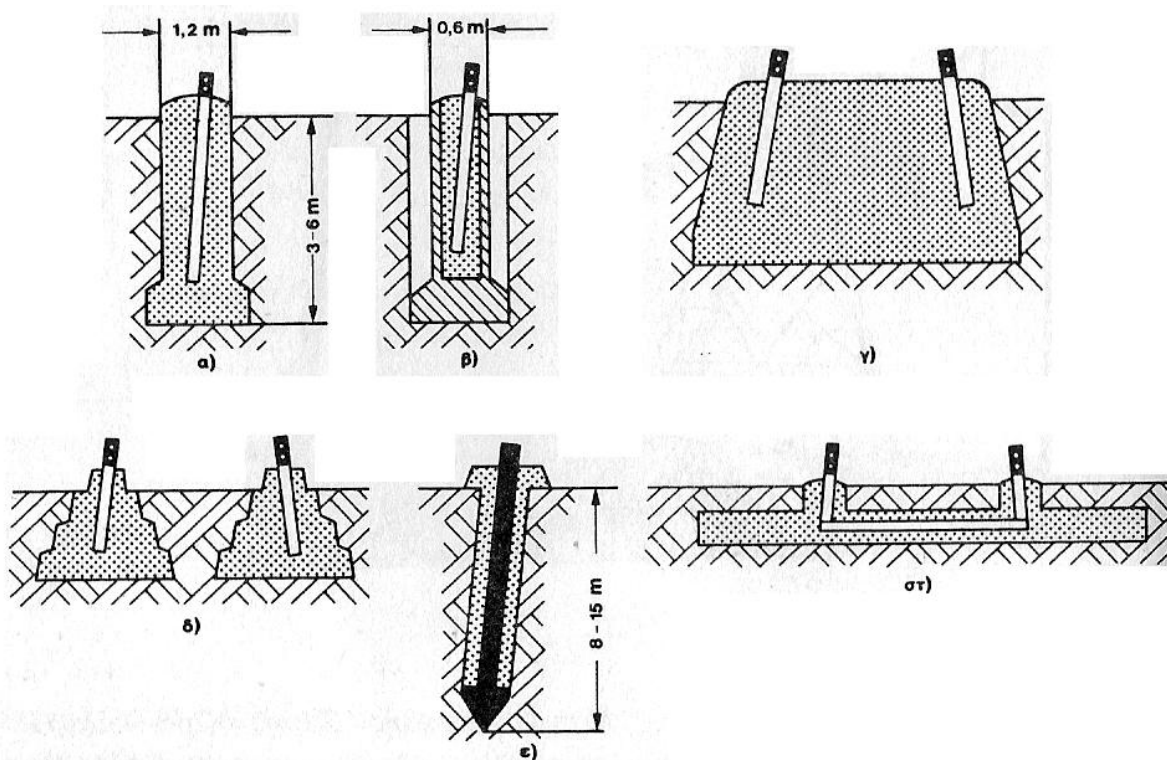
Σχήμα 2.27: Περιοχές προστασίας αγωγού γης κατά κεραυνών. Κατά τους γερμανικούς κανονισμούς VDE/0657 ισχύει ο κύκλος με ακτίνα  $2h_e$ .

Οι πύργοι πρέπει να εξασφαλίζουν ορισμένες αποστάσεις των αγωγών από την γη ή κτίσματα ή άλλες εγκαταστάσεις. Αυτές καθορίζονται για λόγους ασφαλείας δια νόμου στους κανονισμούς των διαφόρων κρατών. Στην Ελλάδα καθορίζονται, εν μέρει, στην υπουργική απόφαση 70201/2874 ΦΕΚ ΙΙ, φύλλο 608, 6/10/67. Οι ελάχιστες κάθετες αποστάσεις αγωγών-εδάφους είναι 6m, 6,75m και 7,75m στα 15kV, 66kV και 150kV αντίστοιχα. Οι αποστάσεις αυτές μπορεί να ανέλθουν σε 10-12m εφόσον αυτό κρίνεται σκόπιμο όπως για

παράδειγμα, κατά την διέλευση ψηλών οχημάτων κάτω από της γραμμές. Οι πινάκες (8.1 και 8.2) δίνουν τις ελάχιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις.

### 2.3.1 Θεμελιώσεις πύργων

Επειδή ο πύργος δέχεται κατακόρυφες δυνάμεις και ροπές ανατροπής, πρέπει να θεμελιώνεται κατάλληλα. Η θεμελίωση εξαρτάται κυρίως από την ροπή ανατροπής, δηλαδή από τα οριζόντια φορτία, το ύψος του πύργου και το έδαφος. Το σχήμα 2.28 δείχνει τους διάφορους τρόπους θεμελίωσης.



Σχήμα 2.28: Θεμελιώσεις πύργων εναέριων γραμμών μεταφοράς. α) Θεμελίωση σε τρύπα, β) θεμελίωση σε τρύπα με προκατασκευασμένο θεμέλιο, γ) μονομπλόκ θεμέλιο, δ) διαβαθμισμένη θεμελίωση, ξεχωριστή για κάθε πόδι, ε) πασσάλωση, στ) θεμέλιο σε πλάκα.

Η πιο απλή θεμελίωση γίνεται με τρυπάνι. Το έδαφος τρυπιέται με ελικοειδές τρυπάνι και το πόδι του πύργου, αφού τοποθετηθεί, περιχύνεται με σκυρόδεμα. Αν υπάρχουν υπόγεια νερά, τοποθετούνται έτοιμα πόδια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Θεμελιώσεις μονομπλόκ, όπου τα 4 πόδια βρίσκονται σε ένα μπλοκ σκυροδέματος, είναι αρκετά δαπανηρές και χρησιμοποιούνται σπάνια. Αντ' αυτόν χρησιμοποιούνται ξεχωριστές θεμελιώσεις για κάθε ένα από τα πόδια των πυλώνων, οι οποίες, για λόγους οικονομίας γίνονται κωνικές.

Θεμελίωση μπορεί να γίνει και με πασσάλωση. πάσσαλοι οδηγούνται στο έδαφος με ειδικά εργαλεία. Οι πάσσαλοι έχουν μια κεφαλή και έτσι όπως πακτώνονται στο έδαφος, το περίξ έδαφος συμπυκνώνεται. Το κενό μεταξύ του πάσαλου και του εδάφους γεμίζει με σκυρόδεμα.



Οι πάσσαλοι είναι ποιο γρήγορος τρόπος και χρησιμοποιείτε όταν έχουμε μεν επιφανειακά μαλακό έδαφος και το συνεκτικό έδαφος αρχίζει σε μεγάλο βάθος. π.χ. κοντά σε λίμνες.

Τέλος η θεμελίωση μπορεί να γίνει και σαν πέδιλο, εκεί που περιμένει κάποιος μετακινήσει στο έδαφος, όπως σε σεισμογενείς περιοχές.

### **2.3.2 Προσδιορισμός όδευσης (χάραξης) μιας γραμμής μεταφοράς**

Η μελέτη της χάραξης μιας γραμμής μεταφοράς πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα παρακάτω:

- Η γραμμή θα πρέπει να είναι καλά προσπελάσιμη και να παρουσιάζει ευχέρεια συντήρησης σε οποιαδήποτε εποχή του έτους.
- Να έχει ελάχιστα σημεία κάμψης και κατά το δυνατόν ελάχιστο μήκος.
- Η δαπάνη για την πληρωμή των αποζημιώσεων λόγω απαλλοτριώσεων να είναι κατά το δυνατόν η ελάχιστη.
- Πρέπει να αναγνωρίζονται και να αποφεύγονται τα εμπόδια στην κατασκευή ή την λειτουργία της γραμμής. Αεροδρόμια, διασταυρώσεις με άλλες γραμμές, περιοχές με ισχυρούς άνεμους, συχνές χιονοπτώσεις ή τακτικές πτώσεις κεραυνών είναι πιθανά εμπόδια. Επίσης περιοχές με ανεμοθύελλες ή μεγάλο βαθμό ρύπανσης επιδρούν αρνητικά στην λειτουργία της γραμμής.
- Παράλληλη όδευση, σε μεγάλες αποστάσεις, γραμμών υψηλής τάσης και τηλεφωνικές γραμμές έχει επίσης αρνητικές επιδράσεις λόγω των αλληλεπιδράσεων των γραμμών. Ζεύξη της τηλεφωνικής γραμμής με την ομοπολική συνιστώσα του ρεύματος σε σφάλματα μπορεί να προκαλέσει ζημιές.

### **2.3.3 Υπολογισμός βέλους ανάρτησης και δυνάμεων σε εναέριους αγωγούς**

Οι δυνάμεις και το βέλος (κρέμασμα ή βύθισμα) σε ένα αγωγό είναι βασικά στοιχεία το οποία προσδιορίζουν την μηχανική αντοχή των αγωγών, των μονωτήρων και των πύργων που αποτελούν ένα εναέριο δίκτυο μεταφοράς ενέργειας. Ακόμα το βέλος ανάρτησης προσδιορίζει το ύψος των πύργων και τις αποστάσεις ανάρτησης. Το ύψος και οι δυνάμεις προσδιορίζουν την απαιτούμενη αντοχή του πύργου.

Θεωρούμε ένα άνοιγμα  $a$ , μεταξύ δυο πύργων με σκοπό να υπολογίσουμε το βύθισμα των αγωγών και τις δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτούς.

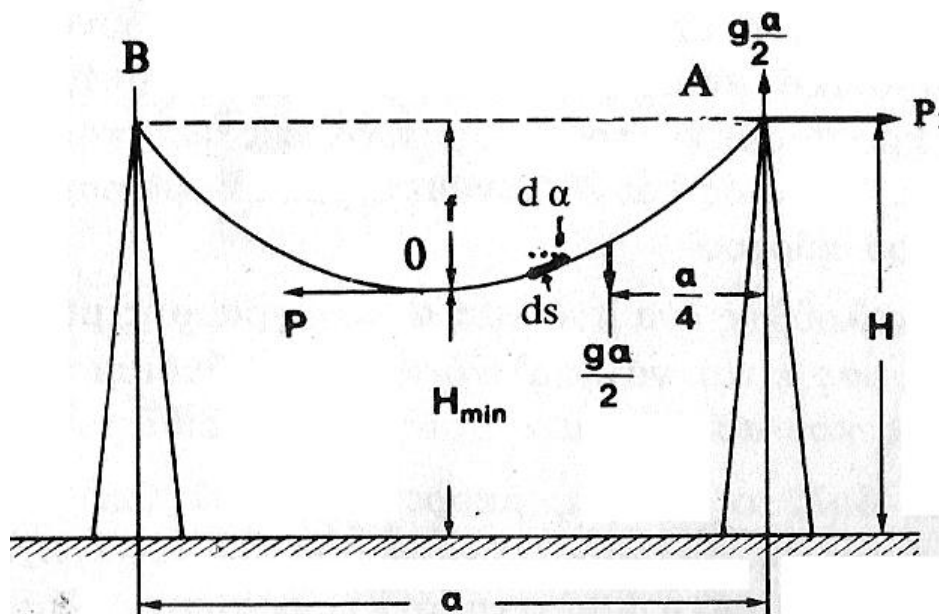
Δεχόμαστε ότι οι αγωγοί είναι εύκαμπτοι δηλαδή, ο αγωγός μπορεί να αναλάβει μόνο εφελκυσμό, όχι θλίψη ή κάμψη. Άρα, η δύναμη τάνυσης του αγωγού είναι εφαπτόμενη στην καμπύλη που σχηματίζει ο αγωγός. Πάνω στον αγωγό ασκούνται κατακόρυφα φορτία, σταθερά ανά μονάδα μήκους, που είναι το βάρος  $g$  του αγωγού ανά μονάδα μήκους ή στην περίπτωση επικάθησης πάγου.

Η προσαύξηση του βάρους του αγωγού γίνεται μόνο όταν θέλουμε να ληφθεί υπόψη η επικάθηση πάγου στον αγωγό, κατά τους ελληνικούς ή γερμανικούς κανονισμούς VDE.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε προσεγγιστικά δύο περιπτώσεις, την οριζόντια και την λοξή ανάρτηση και ακολούθως θα γίνει επακριβής ανάλυση.

### 2.3.4 Οριζόντια ανάρτηση

Όταν τα δύο άκρα ανάρτησης του αγωγού είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο λέμε ότι έχουμε οριζόντια ανάρτηση. Προφανώς, στο μέσον του αγωγού η δύναμη του εφελκυσμού έχει μόνο οριζόντια συνιστώσα  $P$  και σε όλα τα άλλα σημεία έχει οριζόντιες  $P$  και κατακόρυφες  $V$  συνιστώσες. Αν εξετάσει κανείς ένα οποιοδήποτε τμήμα της γραμμής, για παράδειγμα το  $AO$  και προβάλει τις δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό σ' έναν οριζόντιο άξονα, τότε θα διαπιστώσει το εξής: *Η οριζόντια συνιστώσα  $P$  της δύναμης εφελκυσμού ενός εύκαμπτου αναρτημένου αγωγού μένει σταθερή.*



Σχήμα 2.29: Οριζόντια ανάρτηση εύκαμπτου αγωγού.

Πάνω στο τμήμα  $AO$  ασκούνται δυνάμεις εφελκυσμού εκατέρωθεν, η  $P$  στο  $O$ , η  $P_1$  και η  $V$  στο σημείο  $A$ , καθώς και το συνολικό βάρος του αγωγού. Αυτές οι δυνάμεις ισορροπούν, δηλαδή:

$$V \approx \frac{g \cdot a}{2}, P = P_1 = \text{σταθερά ή οριζοντια δύναμη τάνυσης}$$

[2.21]

Ακολουθώντας, θα βγάλουμε με απλές παραδοχές τις σχέσεις που δίνουν το μέγιστο βέλος και την σταθερή οριζόντια δύναμη P. Δεχόμαστε ότι η δύναμη βάρους που ασκείται σε κάθε στοιχείο ds, οριζοντίου προβολής da, είναι g·da, όπου g είναι μια σταθερά σε N/m και είναι το βάρος του αγωγού συν, ενδεχομένως, πάγους. Εδώ έγινε η απλοποίηση ότι, το μήκος του τόξου s του αγωγού είναι ίσο με την προβολή του τόξου πάνω στον οριζόντιο άξονα ds≈ da. Η ισορροπία των ροπών δυνάμεων που ασκούνται στο μισό της γραμμής, έχει ως εξής:

ροπές ως προς A:

$$P \cdot f - \left( g \cdot \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{\alpha}{4} = 0 \quad [2.22]$$

Το μέγιστο βέλος, η δύναμη και η μηχανική τάση του αγωγού στο μέσον προκύπτουν από την παραπάνω σχέση ως εξής:

$$f = \frac{g \cdot \alpha^2}{8P} = \text{βέλος αναρτησης} \quad [2.23]$$

$$P = G \left( \frac{\alpha}{8P} \right) = \frac{g \cdot \alpha^2}{8f} = \text{δύναμη τάνυσης} \quad [2.24]$$

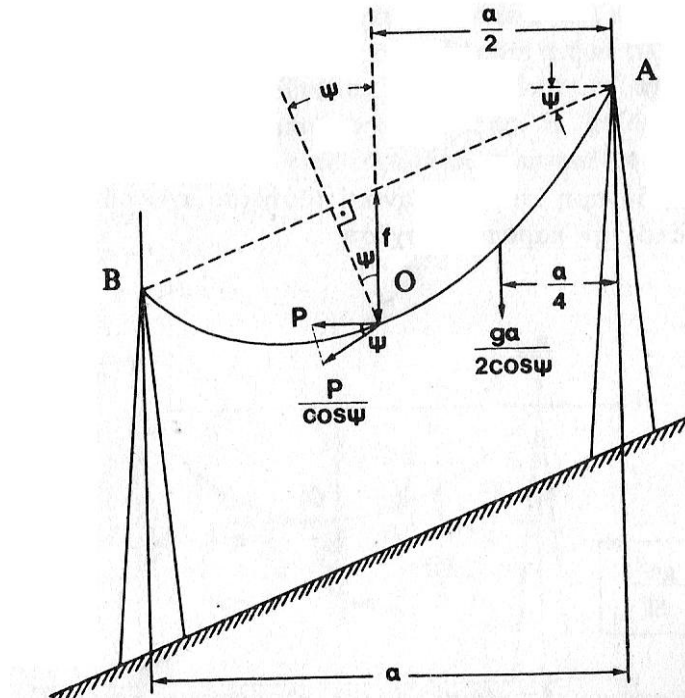
$$\sigma = \frac{P}{q} = \frac{g \cdot \alpha^2}{8qf} = \text{η μέση τάση στο μέσον} \quad [2.25]$$

G= το συνολικό βάρος του αγωγού, f= μέγιστο βέλος, α= άνοιγμα, g≈G/α

Όπου, q η διατομή του αγωγού, δηλαδή σε Al/St αγωγούς το q είναι η διατομή του χάλυβα και του αλουμινίου μαζί.

### 2.3.5 Λοξή ανάρτηση

Έστω ότι τα σημεία ανάρτησης A, B συνδέονται με ευθεία που σχηματίζει γωνία ψ ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η οριζόντια απόστασή τους είναι a. Παραδεχόμαστε ότι, το μέγιστο βέλος f ευρίσκεται στο μέσον της ανάρτησης. Για να υπολογίσουμε το βάρος του αγωγού εξισώνουμε το μήκος του αγωγού με την χορδή του. Έτσι το βάρος του μισού αγωγού είναι ga/2cosψ.



Σχήμα 2.30: Λοξή ανάρτηση εύκαμπτου αγωγού.

Εξετάζουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο ήμισυ της γραμμής AO. Η ισορροπία των ροπών ως προς το σημείο A θα δώσει:

$$\frac{P}{\cos\psi} \cdot f \cdot \cos\psi - \frac{g \cdot \alpha}{2\cos\psi} \cdot \frac{\alpha}{4} = 0$$

[2.26]

Δηλαδή, το μέγιστο βέλος και η δύναμη τάνσης είναι:

$$f = \frac{g \cdot \alpha^2}{8P} \cdot \frac{1}{\cos\psi}$$

$$P = \frac{g \cdot \alpha^2}{8f} \cdot \frac{1}{\cos\psi}$$

[2.27]

Η τάση εφελκυσμού στο μέσον είναι:

$$\sigma = \frac{P}{q} = \frac{g \cdot \alpha^2}{8qf} \cdot \frac{1}{\cos\psi}$$

[2.28]

Τόσο στην οριζόντια, όσο και στην λοξή ανάρτηση, το μέγιστο βέλος εξαρτάται από το τετράγωνο της απόστασης  $a$ . Συνεπώς, αυξάνοντας την απόσταση ανάρτησης, πρέπει το ύψος των πύργων να αυξάνεται με το τετράγωνο του  $a$ , αλλιώς θα ακουμπήσει ο αγωγός στην γη. Για  $a = 1500\text{m}$  προκύπτουν ύψη πύργων 200-300m περίπου, όχι εύκολα στην κατασκευή τους. Συνεπώς θα συναντήσουμε μεγάλες τεχνικές δυσκολίες αν θέλουμε να αναρτήσουμε αγωγούς  $a > 1500\text{m}$ . Για τον λόγο αυτό σε μεγάλες αποστάσεις, π.χ. μεταξύ νησιών χρησιμοποιούνται καλώδια, τα οποία για μεγάλες αποστάσεις, η μεταφορά μεγάλης ισχύος, γίνεται με συνεχές ρεύμα.

### Μεγίστη δύναμη εφελκυσμού

Η δύναμη εφελκυσμού του αγωγού έχει μια οριζόντια συνιστώσα η οποία είναι σταθερή καθ' όλο το μήκος του αγωγού. Η δύναμη εφελκυσμού του αγωγού είναι διαφορετική από σημείο σε σημείο, λόγω του βάρους του αγωγού και εμφανίζει μέγιστα στα σημεία ανάρτησης. Για λοξή ανάρτηση έχουμε, σαν μέγιστη δύναμη, την παρακάτω:

$$F_{\max} = \left[ P^2 + \left( \frac{g \cdot \alpha}{2 \cos \psi} \right)^2 \right]^{1/2} = P \cdot \left[ 1 + \left( \frac{g^2 \cdot \alpha^2}{4P^2 \cdot \cos^2 \psi} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [2.29]$$

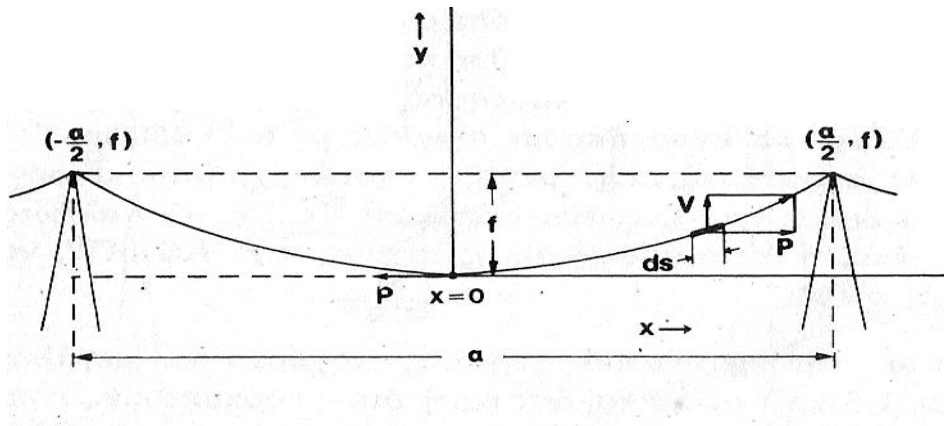
Οι παραπάνω απλοποιημένοι τύποι αρκούν για υπολογισμούς που αφορούν ανοίγματα όπου ο λόγος  $f/a$  είναι μικρός ( $f/a < 0,1$ ). Η ακρίβεια είναι της τάξης μεγέθους 1%. Για μεγαλύτερη ακρίβεια ή για την γενική περίπτωση ισχύουν οι εξισώσεις της αλυσοειδούς καμπύλης οι οποίες θα αναπτυχθούν παρακάτω, βάση του σχήματος 2.30.

### 2.3.6 Γενική λύση της εξίσωσης της ανάρτησης, αλυσοειδής καμπύλη

Η εξίσωση της καμπύλης του αγωγού, θα υπολογιστεί ως προς ένα σύστημα ορθογώνιων συνιστωσών  $x, y$ . Αυτό έχει την αρχή του στο χαμηλότερο σημείο του αγωγού.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη  $y=y(x)$  του αγωγού βγαίνει από την παραδοχή ότι, η ολική δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι εφαπτόμενη στην καμπύλη του αγωγού, εφ' όσον πρόκειται για εύκαμπτο αγωγό. Καλούμε την κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης εφελκυσμού  $V(x)$  και την σταθερή οριζόντια συνιστώσα  $P$ . Η κατακόρυφη δύναμη  $V(x)$  είναι μηδέν στο σημείο  $x=0$  και αυξάνεται αυξανόμενου του  $x$ . Η δύναμη  $V(x)$  είναι το βάρος από 0 ως  $x$ . Αν  $g$  είναι το σταθερό βάρος ανά μονάδα μήκους του τόξου, τότε ισχύει για την  $V(x)$ :

$$V(x) = g \int_0^x \sqrt{(dx^2 + dy^2)} = g \int_0^x \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx \quad [2.30]$$



Σχήμα 2.31: Αλυσσοειδής καμπύλη αναρτημένου αγωγού.

Εκφράζουμε την εφαπτομένη της καμπύλης  $y(x)$  στο σημείο  $x$  κατά τα γνωστά, σαν την παράγωγο  $dy/dx$ . Αυτή είναι ίση με την εφαπτομένη  $(V(x)/P)$  του τριγώνου που σχηματίζει η συνισταμένη δύναμη εφελκυσμού  $F(x)$  με τις συνιστώσες της  $V(x)$  και  $P$ .

$$\frac{V(x)}{P} = \frac{dy}{dx}$$

Εκφράζουμε εδώ το  $V(x)$  με την παραπάνω ευρεθείσα τιμή του, από το ολοκλήρωμα και παραλογίζουμε, οπότε προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$\frac{g}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

Οι αρχικές συνθήκες στο σημείο  $x=0$  είναι:

$$\frac{dy}{dx} = 0, \quad y = 0, \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{g}{P}, \quad x = 0$$

Η γενική λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι οι υπερβολικές συναρτήσεις με όρισμα  $(gx/P)$ :

$$y(x) = A \cosh\left(\frac{gx}{P}\right) + B \sinh\left(\frac{gx}{P}\right) + C$$

Όπου  $A, B, C$  σταθερές που προσδιορίζονται από τις παραπάνω αρχικές συνθήκες.

Μετά από απλές πράξεις έχουμε:

$$A = -C = \frac{P}{g}, \quad B = 0$$

Έτσι, προκύπτει για το βέλος  $y(x)$  σαν συνάρτηση του  $x$ :

$$y(x) = \frac{P}{g} \cdot \left[ \cosh \left( \frac{gx}{P} \right) - 1 \right]$$

[2.31]

Για το μήκος της καμπύλης  $s(x)$  από 0 έως  $x$  προκύπτει:

$$s(x) = \int_0^x \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx = \int_0^x \sqrt{1 + \sinh^2 \left( \frac{gx}{P} \right)} dx = \int_0^x \cosh \left( \frac{gx}{P} \right) dx$$

Η

$$s(x) = \frac{P}{g} \cdot \sinh \left( \frac{gx}{P} \right)$$

[2.32]

Για μικρές αποστάσεις  $x$  ισχύουν για το βέλος  $y(x)$  και το μήκος  $s(x)$ , από την ανάπτυξη των παραπάνω συναρτήσεων κατά Taylor, τα εξής:

$$\cosh z = 1 + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^4}{4!} + \dots, \quad \sinh z = z + \frac{z^3}{3!} + \dots$$

$$y(x) = \frac{g}{2P} x^2 + \frac{g^3}{2P} x^4 + \dots$$

$$s(x) = x + \frac{g^2}{6P^2} x^3 + \dots$$

Θέτοντας στους παραπάνω τύπους  $x=\alpha/2$ , λαμβάνουμε το βέλος  $f$  και το ολικό μήκος  $l$  της γραμμής για την περίπτωση οριζόντιας ανάρτησης:

$$y \left( \frac{\alpha}{2} \right) = f = \frac{P}{g} \cdot \left[ \cosh \left( \frac{g\alpha}{2P} \right) - 1 \right]$$

[2.33]

$$f \approx \frac{g\alpha^2}{8P} \text{ για } \frac{g\alpha}{2P} \rightarrow 0$$

$$l = 2s \cdot \left( \frac{g\alpha}{2P} \right) = 2 \cdot \frac{P}{g} \cdot \sinh \left( \frac{g\alpha}{2P} \right)$$

$$l \approx \alpha \cdot \left[ 1 + \frac{1}{24} \cdot \left( \frac{g\alpha}{2P} \right)^2 \right] = \alpha \cdot \left[ 1 + \frac{8}{3} \cdot \left( \frac{f}{\alpha} \right)^2 \right] \text{ για } \frac{g\alpha}{P} \rightarrow 0$$

[2.34]

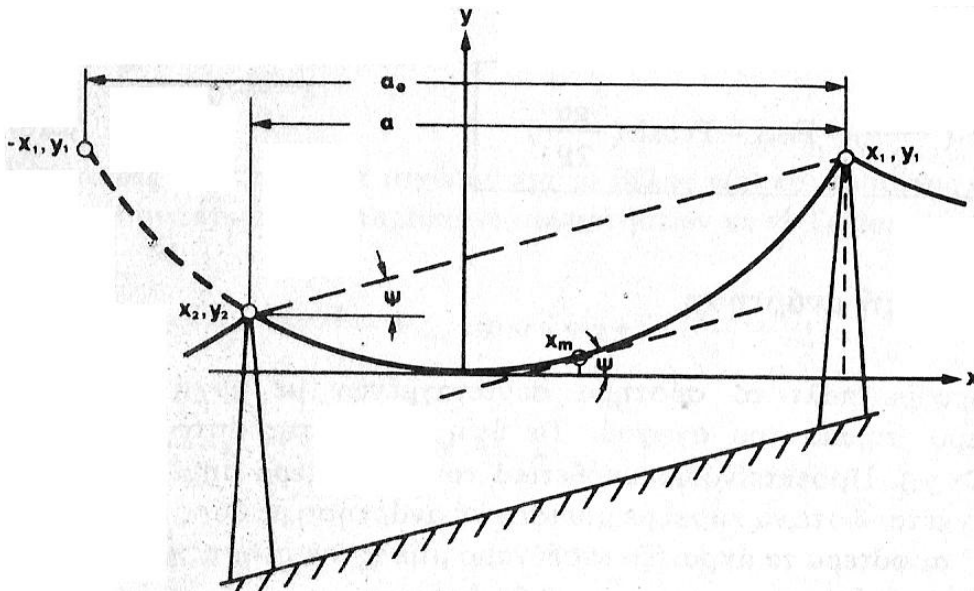
Για την δύναμη εφελκυσμού, σαν συνάντηση του μήκους, έχουμε:

$$F(x) = \sqrt{P^2 + V^2} = \sqrt{P^2 + g^2 s^2(x)} = P \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{gx}{P}\right)} = P \cdot \cosh\left(\frac{gx}{P}\right) \quad [2.35]$$

Άρα για τα σημεία ανάρτησης που έχουμε την μέγιστη δύναμη τάνσης ισχύει :

$$F\left(\frac{\alpha}{2}\right) = F_{\max} = P \cdot \cosh\left(\frac{gx}{P}\right) \quad [2.36]$$

### 2.3.7 Λοξή ανάρτηση



Σχήμα 2.32: Αλυσσοειδής καμπύλη αναρτημένου αγωγού, λοξή ανάρτηση.

Θεωρούμε πάλι το σύστημα συντεταγμένων με αρχή το χαμηλότερο σημείο του αγωγού. Τα ύψη ανάρτησης έστω,  $y_1$  και  $y_2$  ( $y_1 > y_2$ ). Προεκτείνουμε υποθετικά το χαμηλότερο σημείο ανάρτησης  $y_2$ , έτσι ώστε, να έχουμε μια λοξή ανάρτηση, με ύψος ανάρτησης  $y_1$ , σε αμφότερα τα άκρα. Το ισοδύναμο μήκος ανάρτησης  $a_e$ . Με τα σύμβολα του σχήματος 2.32 έχουμε:

$$y_1 - y_2 = c \left[ \cosh\left(\frac{x_1}{c}\right) - \cosh\left(\frac{x_2}{c}\right) \right] \quad [2.37]$$

Όπου,  $c = P/g$  και  $x_1, x_2$  οι τετμημένους των σημείων ανάρτησης.

Αντικαθιστούμε τις διαφορές συνημίτονων με γινόμενα ημιτόνων, οπότε για  $y_1 - y_2 = h$  είναι:



$$y_1 - y_2 = h = 2c \cdot \sinh\left(\frac{x_1 + x_2}{2c}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x_1 - x_2}{2c}\right) \quad [2.38]$$

Ισχύει όμως:

$$x_1 - x_2 = \alpha, \quad (x_1 > 0, x_2 < 0)$$

Και

$$x_1 + x_2 = \alpha_e - \alpha$$

$$\alpha_e = x_1 + x_2 + \alpha$$

Συνεπώς, το εικονικό μήκος  $\alpha_e$  είναι, αν αντικαταστήσουμε  $x_1 - x_2 = \alpha$  στην σχέση 2.38 και λύσουμε ως προς  $x_1 + x_2$  :

$$\alpha_e = \frac{2P}{g} \operatorname{argsinh} \left[ \frac{gh}{2P} \cdot \frac{1}{\sinh(ag/2P)} \right] + \alpha \quad [2.39]$$

Εφ' όσον γνωρίζουμε το εικονικό μήκος  $\alpha_e$ , είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε όλα τα στοιχεία από τις εξισώσεις της οριζόντιας ανάρτησης.

Αν θέλουμε να βρούμε την ελάχιστη απόσταση της αλυσοειδούς από ένα επίπεδο, κλίσης  $\psi$ , αυτή θα είναι στο σημείο  $x_m$  που η παράγωγος της αλυσοειδούς  $dy/dx$  ισούται με την εφαπτομένη της γωνίας  $\psi$ . Για το σημείο του ελάχιστου  $x_m$  έχουμε:

$$\frac{dy}{dx} = c \cdot \cosh\left(\frac{x_m}{c}\right)' = \tan\psi, \quad \sinh\left(\frac{x_m}{c}\right) = \tan\psi$$

$$x_m = c \cdot \operatorname{argsinh}(\tan\psi) \quad [2.40]$$

### 2.3.8 Εξισώσεις κατάστασης ενός αναρτημένου αγωγού

Στις εναέριες γραμμές γίνονται, κατά VDE 0210, υπολογισμοί δυνάμεων και βελών, σε ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίες και μηχανικού φορτίου. Οι υπολογισμοί στοχεύουν στο να ελεγχτεί η μηχανική τάση και το βέλος του αγωγού για  $-5^\circ\text{C}$  με φορτίο πάγου και για  $-20^\circ\text{C}$  χωρίς φορτίο πάγου. Έχει διαπιστωθεί ότι, στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες π.χ. στους  $-20^\circ\text{C}$ , δεν συσσωρεύεται πάγος στις γραμμές, παρά μόνο σε θερμοκρασίες  $-5^\circ\text{C}$  και πάνω.

Για άλλες θεοκρασίες, διαφορετικές από αυτές των υπολογισμών και διαφορετικά φορτία, προκύπτουν διαφορετικές μηχανικές τάσεις και βέλη. Υπάρχει μια εξίσωση που συνδέει δυο διαφορετικές καταστάσεις, την οποία και θα αναλύσουμε. Είναι δυνατόν μ' αυτήν την εξίσωση να διαπιστωθεί τι γίνεται σε όλη την περιοχή καταστάσεων που μας ενδιαφέρουν.

Θεωρούμε έναν αγωγό μήκους  $l_0$  υπό θερμοκρασία  $\theta=0$ , χωρίς μηχανική τάση. Μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $\theta$  θα επιφέρει αύξηση του μήκους κατά  $\Delta l_0$ . Αύξηση της δύναμης εφελκυσμού κατά  $P$  θα επιφέρει μια πρόσθετη επιμήκυνση κατά  $\Delta l_p$ .

Ισχύει:

$$\Delta l_0 = \alpha_\theta \cdot \theta \cdot l_0, \quad \Delta l_p = \frac{P}{qE}$$

[2.41]

Εδώ είναι:

$\alpha_\theta$ = ο θερμοκρασιακός συντελεστής διαστολής

$q$ = η διατομή του αγωγού

$E$ =το μέτρο ελαστικότητας.

Συνεπώς το συνολικό μήκος  $l$  στην θερμοκρασία  $\theta$ , υπό τάση  $P$  είναι :

$$l(\theta, P) = l_0 \left( 1 + \alpha_\theta \cdot \theta + \frac{P}{qE} \right)$$

[2.42]

Αν αυτός ο αγωγός είναι αναρτημένος σε απόσταση  $a$ , με δύναμη εφελκυσμού  $P$ , τότε ισχύει για μήκος  $s$ , με προσέγγιση όρων δεύτερης τάξης:

$$s = a \left( 1 + \frac{\alpha^2 g^2}{24P^2} \right)$$

[2.43]

Προφανώς, πρέπει να ισχύει  $s = l(\theta, P)$ , δηλαδή:

$$\frac{l_0}{a} \cdot \left( \alpha_\theta \cdot \theta + \frac{P}{qE} \right) - \frac{\alpha^2 g^2}{24P^2} = 1 - \frac{l_0}{a} = \text{const}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η ζητούμενη εξίσωση κατάστασης και με την απλοποίηση  $l_0 \approx a$ , μπορεί να γραφτεί:

$$\alpha_{\theta} \cdot \theta + \frac{P}{qE} - \frac{\alpha^2 g^2}{24P^2} = \text{const}$$

[2.44]

Η δύναμη  $P$  είναι συνάρτηση της απόστασης  $\alpha$ , της θερμοκρασίας  $\theta$  και του βάρους ανά μονάδα μήκους  $g$ . Ο έλεγχος των τάσεων γίνεται με δυο περιπτώσεις,  $\theta = -5^{\circ}\text{C}$  με πάγο και  $\theta = -20^{\circ}\text{C}$  χωρίς πάγο. Ανάλογα με το μήκος  $\alpha$  μπορεί να έχουμε στην μια ή την άλλη περίπτωση την μεγαλύτερη μηχανική τάση. Για ένα όμως συγκεκριμένο μήκος  $\alpha = \alpha_{\text{κρ}}$ , το οποίο καλείτε *κρίσιμο μήκος*, οι τάσεις είναι ίσες. Αποδεικνύεται ότι, για μήκη μεγαλύτερα του  $\alpha_{\text{κρ}}$ , η μέγιστη τάση είναι σε θερμοκρασία  $\theta = -5^{\circ}\text{C}$  και φορτίο πάγου. Για μικρότερα μήκη από το  $\alpha_{\text{κρ}}$ , η μέγιστη τάση συμβαίνει για  $\theta = -20^{\circ}\text{C}$  χωρίς πάγο.

Το κρίσιμο μήκος  $\alpha_{\text{κρ}}$  εξάγεται από την παραπάνω σχέση εξισώνοντας τις δυνάμεις  $P$  για τις δυο περιπτώσεις:

$$\alpha_{\theta} \cdot \theta_1 + \frac{P}{qE} - \frac{\alpha_{\text{κρ}}^2 g_1^2}{24P^2} = \alpha_{\theta} \cdot \theta_2 + \frac{P}{qE} - \frac{\alpha_{\text{κρ}}^2 g_2^2}{24P^2}$$

$$\alpha_{\text{κρ}} = \left[ \frac{24P^2 \alpha_{\theta} \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{g_2^2 - g_1^2} \right]^{1/2}$$

[2.45]

### 2.3.9 Υπολογισμός του πρόσθετου φορτίου ανέμου και πάγου

Χιόνι, πάχνη, σε συνδυασμό με διαρκείς χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν στην επικάθηση στρώματος χιονιού ή πάγου στις γραμμές. Έτσι αυξάνει το συνολικό βάρος του αγωγού ανά μονάδα μήκους. Πέραν τούτου, αν φυσάει, τότε δρα και μια αυξημένη δύναμη του αέρα στον αγωγό, λόγω της αύξησης της διατομής του. Το φορτίο λόγω πάγου και ανέμου είναι συνάρτηση των καιρικών συνθηκών. Εδώ γίνονται παραδοχές στους ελληνικούς κανονισμούς ως εξής:

Υπάρχουν τρεις φορτίσεις, η ελαφριά, η μέση και η βαριά. Στην ελαφρά φόρτιση φυσά μεν ισχυρός άνεμος αλλά δεν υπάρχει πάγος στις γραμμές. Στην μέση και βαριά φόρτιση, υπάρχει πάγος στις γραμμές ομοιόμορφα κατανεμημένος γύρο από τον αγωγό. Γίνεται η παραδοχή ότι, έχουμε συμπαγή πάγο, με ιδικό βάρος και μάζα:

$$\rho = 8976 \text{ N/m}^3, \quad \gamma = 915 \text{ kg/m}^3.$$

Η αύξηση του κατακόρυφου φορτίου που δρα στον αγωγό είναι:

$$g_z = \frac{\pi}{4} [(d + 2\Delta r)^2 - d^2] \rho \quad [2.46]$$

Μετά από ανάλυση προκύπτει:

$$g_z = \pi \cdot \rho \cdot \Delta r \cdot (d + \Delta r) \quad (\text{N/m}) \quad [2.47]$$

Η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης του αέρα είναι:

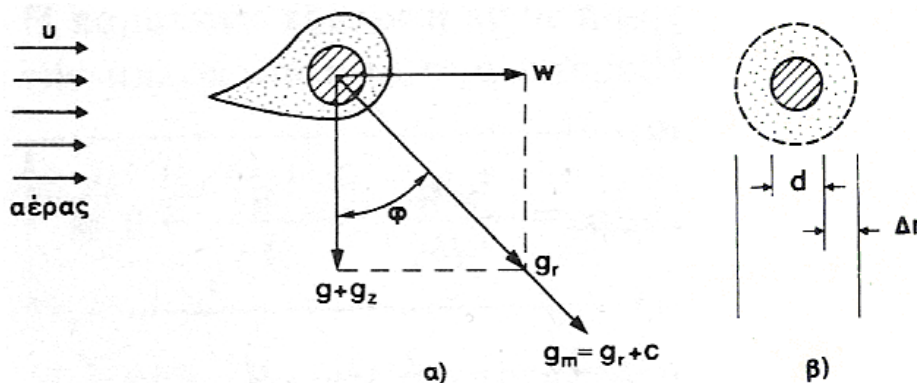
$$w = \Delta r \cdot (d + \Delta r) p \quad (\text{N/m}) \quad [2.48]$$

Όπου,  $p$  είναι η αντίσταση στον αέρα και δίνεται από τον παρατιθέμενο πίνακα 2.7. Συνεπώς, η συνισταμένη των κατακόρυφων και εγκάρσιων φορτίων είναι:

$$g_r = \sqrt{(g + g_z)^2 + w^2} \quad [2.49]$$

Κατά τους ελληνικούς κανονισμούς, η συνισταμένη αυτή επαυξάνεται με μια σταθερά  $c$  και έτσι προκύπτει η μέγιστη φόρτιση:

$$g_m = g_r + c = \sqrt{(g + g_z)^2 + w^2} + c \quad [2.50]$$



Σχήμα 2.33: Αγωγός με επικάθιση πάγου α) Πραγματική περίπτωση επικαθίσεις. β) Ισοδύναμη, τυποποιημένη επικάθιση πάγου.

Ο αγωγός υπό την επίδραση της δύναμης  $g_m$ , παίρνει μια κλίση με γωνία  $\gamma$  ως προς την κατακόρυφο. Στο κεκλιμένο επίπεδο που βρίσκεται ο αγωγός, ισχύουν οι ήδη ευρεθείσες εξισώσεις για τις δυνάμεις και τα βέλη.

Ισχύει :

$$\tan \gamma = \frac{w}{g + g_z}$$

Αυτά σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς.

Κατά τους γερμανικούς κανονισμούς VDE 0210, η επίδραση πάγου στον αγωγό λαμβάνεται, κατά κανόνα, σαν προσαύξηση του βάρους ως εξής:

$$g_z = \left( 0,5 + 0,01 \frac{d}{\text{mm}} \right) 9,81 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

[2.51]

Έτσι η ανά μονάδα μήκους δύναμη του αγωγού είναι:

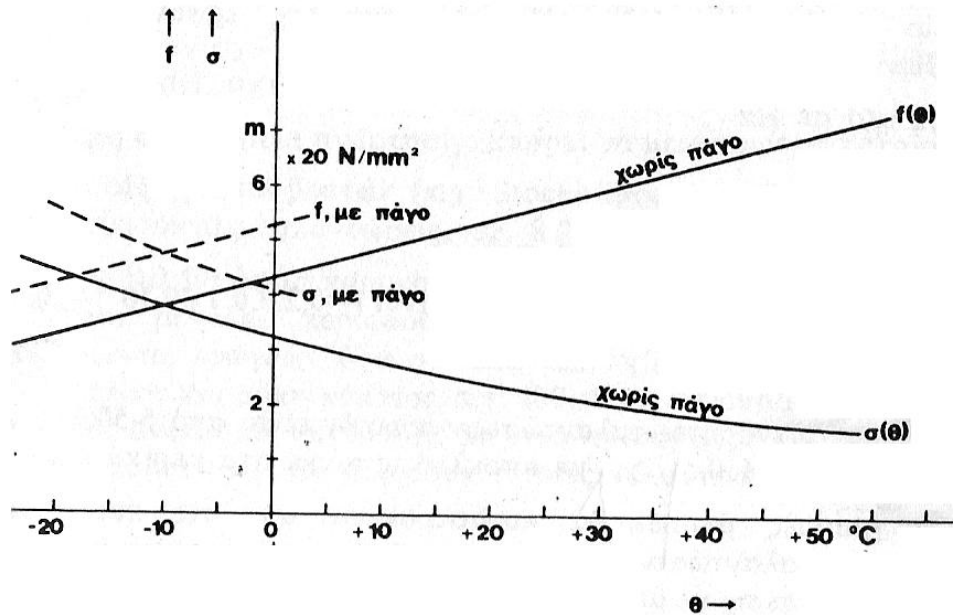
$$g_r = g_z + g$$

[2.52]

Όπου  $g$  είναι το ίδιο βάρος του αγωγού. Εκτός αυτού, μπορεί ο μελετητής να θέσει, κατ' εκτίμηση, ανάλογα με τις συνθήκες, μεγαλύτερες τιμές για το  $g_z$ . Θεωρούμε κατά VDE 0210 ότι, όταν γίνεται έλεγχος μηχανικών τάσεων δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα δυνατός άνεμος, δηλαδή παραλείπεται. Αντίστροφα, όταν γίνεται έλεγχος απόκλισης λόγω άνεμου, παραλείπονται τα φορτία πάγου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, το φορτίο πάγου ή χιονιού είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο. Έχουν διαπιστωθεί, τοπικά, φορτίσεις μέχρι 180 N/m (20 kg/m), ενώ οι αγωγοί έχουν το πολύ 2-3 kg/m ανηγμένη μάζα.

Το βέλος και την μηχανική τάση σε έναν αναρτημένο αγωγό με ή χωρίς πάγο δείχνετε στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.34: Βέλος και τάση σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, σε έναν αναρτημένο αγωγό .

### 2.3.10 Μηχανικές ταλαντώσεις των γραμμών

Μηχανικές ταλαντώσεις στους αγωγούς εναέριων γραμμών δημιουργούνται από τα παρακάτω φαινόμενα:

- Πτώση πάγου ή χιονιού που έχει επικαθίσει πάνω στην γραμμή.
- Από τον άνεμο.
- Από βραχυκυκλώματα που προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις είναι ασήμαντες.

Ιδιαίτερα προβλήματα παρουσιάζονται όταν, ο αέρας προσβάλει την γραμμή υπό γωνία  $90-45^0$  ως προς την διεύθυνση της, με ταχύτητες άνεμου 0,5-8 m/s. Σε αυτές τις συνθήκες δημιουργούνται πίσω από τον αγωγό συστάδες στροβίλων με ορισμένη συχνότητα. Αυτές οι συστάδες ονομάζονται Von Karman vortex street. Στις συστάδες αυτές αποδόθηκε και η καταστροφή της, 837 μέτρων μακριάς, γέφυρας Tacoma Narrows Bridge, στην πολιτεία Washington, USA. Η συχνότητα της εμφάνισης των συστάδων (λέγεται και *Von Karman συχνότητα*) είναι :

$$f_k = 0,2 u/d \text{ σε Hz}$$

Όπου

$u$  = η ταχύτητα του ανέμου σε m/s

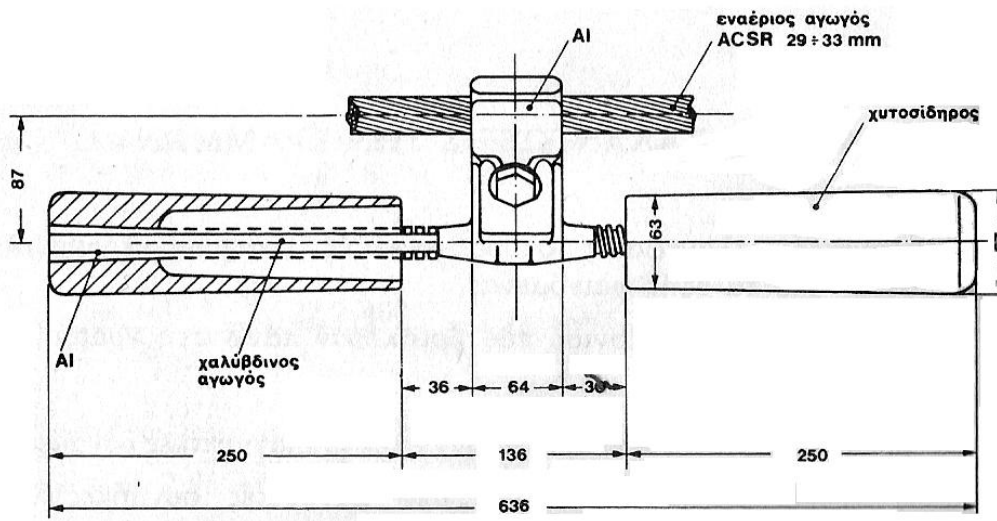
$d$  = η διάμετρος του αγωγού σε m

Τυπική συχνότητα ταλαντώσεων των αγωγών είναι 5-50Hz και μήκος κύματος από 0,5-10m , με απόκλιση γύρω στα μερικά cm.

Οι γραμμές μπορεί να καταστραφούν από τις παραπάνω αναφερθείσες ταλαντώσεις, στα σημεία ανάρτησης, όταν η Von Karman συχνότητα συμπέσει με μια ιδιοσυχνότητα του αγωγού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ιδιοσυχνότητα του αγωγού εξαρτάτε, εκτός άλλων, από την απόσταση ανάρτησης  $a$  και την δύναμη εφελκυσμού.

Μέτρα που λαμβάνονται για να αποφευχθεί θραύση του αγωγού είναι:

- Μείωση της μηχανικής τάσης
- Τοπική ενίσχυση της διατομής του αγωγού στα σημεία ανάρτησης (Armor rods)
- Βάρη στα σημεία ανάρτησης μπορεί να μειώσουν τις ταλαντώσεις
- Διατάξεις αποσβεστών (π.χ. Stockbridge αποσβέστες) μπορεί να αποσβέσουν τις ταλαντώσεις (2.35).



Σχήμα 2.35: Αποσβέστης ταλαντώσεων τύπου Stockbridge.

Οι ταλαντώσεις παρουσιάζουν μερικές φορές, ανεξήγητα μέχρι σήμερα, μεγάλες περιόδους και μήκη κύματος. Ομιλούμαι για *καλπάζοντες αγωγούς*. Εδώ οι ταλαντώσεις είναι τάξης μεγέθους του ενός μέτρου και μήκη κύματος π.χ. 100 μέτρων. Γίνονται υποθέσεις ότι, ο δυνατός άνεμος, σε συνδυασμό με ανισότροπη φόρτιση του αγωγού με πάγο, μπορούν να προκαλέσουν τέτοιες ταλαντώσεις.

### 2.3.10 Γειώσεις πύργων εναέριων γραμμών μεταφοράς

Για να αποφύγουμε κινδύνους σε ανθρώπους και ζημιές στις εγκαταστάσεις απαιτείται μια σωστή γείωση, πράγμα που μπορεί να είναι πολυδάπανο. Γειώσεις πύργων και στύλων προσδιορίζονται στους γερμανικούς κανονισμούς VDE 0141 .

Πύργοι από χάλυβα ή στύλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να γειώνονται. Επίσης, σύρματα ή ταινίες σε ξύλινους στύλους, με εξαίρεση τα μεταλλικά μέρη των μονωτήρων, πρέπει επίσης να γειώνονται.

Η γείωση στους πύργους και στύλους είναι, συνήθως, γείωση προστασίας κατά των κεραυνών. Φυσικά αν πάνω στον πύργο ή στύλο υπάρχουν συσκευές που χρειάζονται γείωση λειτουργίας, τότε ο πύργος ή στύλος φέρει και γείωση λειτουργίας.

Ο προσδιορισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης αντίστασης γείωσης προκειμένου περι προστασίας κατά κεραυνών γίνεται ως εξής. Παραδεχόμαστε ότι το ρεύμα του κεραυνού είναι δεδομένο, όπως ακολουθεί (από VDE 0141).

Ρεύμα $I_k$ (kA)	20	30	40	50	60
% κεραυνοί , με ρεύμα $I_k$ ή μικρότερο	79	91	95	98	99

*Πίνακας 2.3 Στατιστική απεικόνιση συχνότητας πτώσης κεραυνού σε σχέση με το ρεύμα που αυτός μεταφέρει.*

Το ρεύμα, δηλαδή, μεταβάλλετε από κεραυνό σε κεραυνό στατιστικά με την παραπάνω κατανομή.

Αφού πέσει ο κεραυνός στον αγωγό, το ρεύμα του ρέει κυρίως μέσω της αντίστασης γείωσης του πλησιέστερου πυλώνα. Δηλαδή, αμελούμε το ρεύμα που διακλαδίζετε. Η τάση του πυλώνα ως προς την γη είναι:

$$U_{\pi} = I_k \cdot Z_{\Gamma} \quad [2.53]$$

Όπου  $Z_{\Gamma}$  είναι η αντίσταση γείωσης.

Αυτή η τάση καταπονεί επιπρόσθετος και τους μονωτήρες. Δηλαδή, η τάση του κεραυνού υπερτίθεται στην φασική τάση λειτουργίας. Αν παραληφτεί η τάση λειτουργίας σε σύγκριση με την τάση που επάγεται από τον κεραυνό, θα πρέπει η τάση διάσπασης του μονωτήρα να είναι μεγαλύτερη από την τάση  $U_{\pi}$ .

Για παράδειγμα σε δίκτυο με  $U_N = 150\text{kV}$  οι μονωτήρες αντέχουν σε μέση κρουστική, θετική τάση  $915\text{kV}$ . Αν δηχθούμε το ρεύμα κεραυνού  $60\text{kA}$ , πράγμα που θα μας κάλυπτε στις 99% των περιπτώσεων τότε:

$$Z_{\Gamma} < 915\text{kV}/60\text{kA} = 15,25\Omega$$

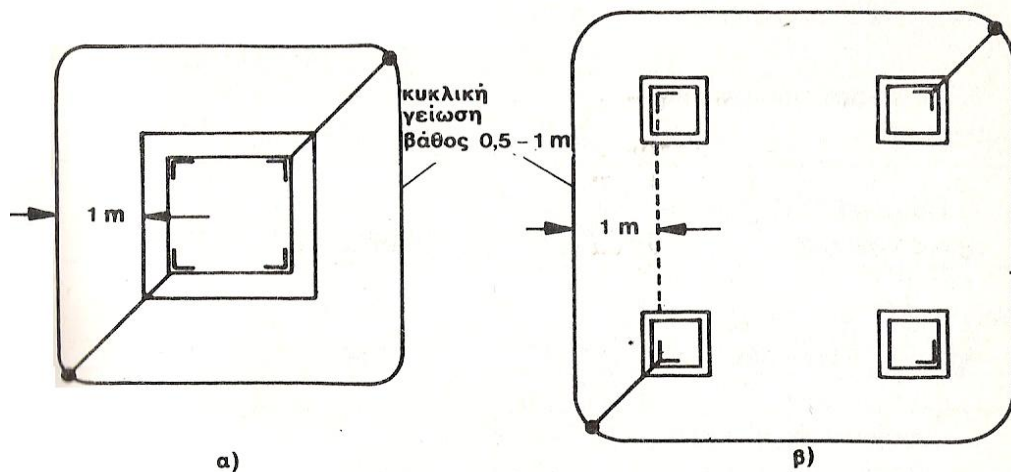
Αυτή η αντίσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς πρόσθετα μέσα, δηλαδή μόνο με την θεμελίωση του πύργου.

Σε μεταλλικούς πύργους γραμμών μεταφοράς ΥΤ πάνω από  $110\text{kV}$ , δηλαδή στα  $150\text{kV}$  και  $400\text{kV}$ , τοποθετούνται περιμετρικά κυκλικοί γειωτές, όπως στο σχήμα 2.36. Οι γειωτές αυτοί τοποθετούνται σε απόσταση  $1\text{m}$  από την βάση του πύργου και έτσι μειώνονται οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις αφής στην περιοχή της θεμελίωσης.



Εφόσον απαιτούνται γειώσεις πρόσθετες, πέραν της ίδιας γείωσης που έχει ένας μεταλλικός πύργος, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε γέλωτες, όπως είναι στο τυπολόγιο του παραρτήματος (π8) . Αυτοί είναι:

- πάσσαλοι γείωσης πακτωμένοι κατακόρυφα,
- πολλοί παράλληλοι πακτωμένοι πάσσαλο (τρίγωνα γείωσης),
- ταινίες γείωσης θαμμένες σε βάθος 0,6-1m , όπου το έδαφος δεν ξεραίνεται,
- αστέρες γείωσης ή αλλιώς ακτινικοί γειωτές,
- πλέγμα γείωσης , με ανοίγματα τετραγωνικά 5x5m-10x10m.



Σχήμα 2.36: Κυκλική γείωση ενός χαλύβδινου πύργου για μείωση των τάσεων αφής και βηματικών τάσεων .

Σε όλους τους γειωτές η αντίσταση είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega/m$ ) Είναι από  $\rho=20 \Omega/m$  σε υγρό οργανικό έδαφος, έως  $3 \text{ k}\Omega/m$  σε βραχώδες έδαφος ή χαλίκια.

Προκειμένου περί ταινιών, αυτές μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος, ελάχιστης διατομής  $100\text{mm}^2$  και ελάχιστου πάχους 3mm. Σε πασσάλους γίνεται χρήση γαλβανισμένων σωλήνων, διαμέτρου 1'' έως 16''. Αντί γαλβανισμένου χάλυβα μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαλκός, ελάχιστης διατομής  $50 \text{mm}^2$ .

Τάση (πολική)	15-50 kV	150 kV	400 kV
Γενικά πάνω από το έδαφος και οικοδομές .	5,25	6,25	8,00
Πάνω από δρόμους με οχήματα.	6,75	7,75	10,25
Πάνω από σιδηροδρομικές γραμμές.	9,25	10,25	12,75
Πάνω από ξένες γραμμές, μέχρι 50kV.	1,2	2,80	5,30
Οριζοντίως ή κατακορύφως από κτίρια.	3,00	4,00	6,50

Πίνακας 2.4: Ελάχιστες αποστάσεις εναέριων γραμμών Υ.Τ. για  $16^\circ\text{C}$ ,σε μέτρα (m). Ελληνικοί κανονισμοί, ΦΕΚ Τ.2,608/67

Οι παραπάνω αποστάσεις ισχύουν μέχρι μέγιστα ανοίγματα στήριξης που εξαρτώνται από τις συνθήκες φόρτισης: βαρεια→53,50m, μεση→76,6m, ελαφριά→106,5m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΥΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Στις περιπτώσεις κτιρίων, ισχύουν οι παραπάνω τιμές για άνοιγμα μέχρι 45,5m. Για μεγαλύτερα ανοίγματα στήριξης οι παραπάνω αποστάσεις αυξάνονται κατά 1,5cm για κάθε μέτρο υπέρβασης, στις βαριές και μέσες συνθήκες και κατά 1,0cm για τις ελαφριές συνθήκες φόρτισης.

Ονομαστική τάση.	$U_N = 0 - 110\text{kV}$	$U_N > 110\text{kV}$
Πάνω από το έδαφος.	6	$6 + \frac{U_N - 110}{150}$
Πάνω από δρόμους με διέλευση οχημάτων .	7	$7 + \frac{U_N - 110}{150}$
Οριζόντια απόσταση από ισούψη εμπόδια .	3	$3 + \frac{U_N - 110}{150}$

Πίνακας 2.5: Ελάχιστες αποστάσεις εναέριων γραμμών Υ.Τ. κατά τους κανονισμούς VDE 0210, για 40°C, σε μέτρα (m).

Τάση λειτουργίας	150kV		400kV	
Τύπος μονωτήρα	κοινός	ομίχλης	κοινός	ομίχλης
Αριθμός δίσκων εν σειρά	10-12	10-12	17-19	18-19
διάμετρος (mm)	254	254	280	280
ύψος (mm)	149	146	170	170
μήκος ερπυσμού (mm)	290	425	370	510
μάζα( kg)	8	8	11	11
Τάση υπερπήδησης				
Ξηρός $U_{eff}$ (kV)	95	95	95	95
υγρός $U_{eff}$ (kV)	50	50	50	50
Κρουστική $\hat{U}$ (kV)	130	130	140	140
Τάση διάσπασης (διάτρησης) $U_{eff}$ (kV)	123	125	130	130
Ελαφρό φορτίο θραύσης (kN)	67	67	167	167

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά δισκοειδών μονωτήρων πορσελάνης. Οι τιμές ισχύουν για έναν δίσκο .

Φόρτιση	Βαρεία φόρτιση	Μέση φόρτιση	Ελαφρά φόρτιση
Αύξηση της ενεργού ακτίνας του αγωγού, ομοιόμορφα, λόγω πάγου $\Delta r$ σε mm.	13	6	-
Οριζόντια πίεση ανέμου στην επιφάνεια του αγωγού + πάγου $p$ ( $\text{N/m}^2$ )	196	196	392
Θερμοκρασία °C	-18	-9,5	-1
Επαύξηση της συνισταμένης ιδίου βάρους			

+ πάγου + ανέμου (N/m)			
Χαλκός, μπρούτζος, γάλυβας ACSR (N/m)	4,2	2,7	0,7
Αλουμίνιο (N/m)	4,5	3,2	0,7
Προστατευμένοι από τον αέρα αγωγοί (N/m)	4,5	3,2	0,5
Ειδική μάζα πάγου (kg/m <sup>3</sup> )	915	915	915

Πίνακας 2.7: Φορτίσεις αγωγών εναέριων γραμμών. Κανονισμοί για την εγκατάσταση και συντήρηση υπαίθριων γραμμών ΦΕΚ Τα.2 608/67.

Ύψος πάνω από το έδαφος (m)	Ταχύτητα (m/s)		Αντίσταση (N/m <sup>2</sup> )	
	Πύργοι , μονωτήρες, τραβέρσες	αγωγοί	Πύργοι , μονωτήρες, τραβέρσες	αγωγοί
0-40	33,5	29,0	687	519
40-100	38,0	32,9	883	667
100-150	43,0	37,0	1128	844
150-200	45,0	39,0	1226	932

Πίνακας 2.8:Ταχύτητες ανέμου για υπολογισμούς σε γραμμές μεταφοράς κατά VDE 0210.

Ταχύτητα ανέμου			Κλίμακα Beaufort	Αντίσταση W <sub>0</sub> (N/m <sup>2</sup> )
Κόμβοι				
(m/s)	N miles/h	km/h		
0,5	1	1,8	1	0,15
1	2	3,6	1	0,62
2	4	7,2	2	2,46
5	10	18	3	15,37
10	19	36	5	61,35
15	29	54	7	138
20	39	72	8-9 θύελλα	246
25	49	90	10 ισχυρή θύελλα	384
30	58	108	11 ισχυρή θύελλα	554
35	68	126	12 τυφόνες	753
40	78	144	13 τυφόνες	983
45	88	162	14 τυφόνες	1245
50	98	180	15 τυφόνες	1536

Πίνακας 2.9: Αντίσταση W<sub>0</sub> επιφάνειας 1m<sup>2</sup> στον αέρα (0,5·γ ·u<sup>2</sup>). Είναι : συνολική απόσταση W=c·W<sub>0</sub>·A, c = 0,3...2,8 A = επιφάνεια προβολής στην κατεύθυνση του ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΥΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Επίπεδα δικτυώματα από προφίλ	1,6
Τετράγωνα δικτυώματα από προφίλ	2,8
Επίπεδα δικτυώματα από σωλήνες στρογγυλούς	1,2
Τετράγωνα δικτυώματα από σωλήνες	2,1
Στύλοι στρογγυλοί	0,7
Στύλοι εξαγωνικοί ή οκταγωνικοί	1,0
Αγωγοί $d = 0 \dots 12,5\text{mm}$	1,2
Αγωγοί $d = 12,5 \dots 15,8\text{mm}$	1,1
Αγωγοί $d > 15,8$	1,0

Πίνακας 2.10: Συντελεστής αντίστασης αέρα  $c$ , για κατασκευές εναέριων γραμμών.  $W = c \cdot A \cdot 0,5 \cdot \gamma \cdot u^2$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### “ Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών μεταφοράς”

#### 3.1 Ωμική αντίσταση

Όπως είναι γνωστό η ωμική αντίσταση τμήματος αγωγού, μήκους  $l$ , ενιαίας διατομής  $s$ , ο οποίος είναι κατασκευασμένος από υλικό ειδικής αντίστασης  $\rho$ , δίνεται από την σχέση:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \text{ (ohm)}$$

[3.1]

Όπου  $\rho$  σε  $\text{ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,  $l$  σε  $\text{m}$  και  $s$  σε  $\text{mm}^2$ . Όπως είναι φανερό η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται όταν αλλάξει η τιμή οποιουδήποτε από τα τρία μεγέθη που την διαμορφώνουν. Θεωρώντας καταρχήν, σταθερό το μήκος και την διατομή του αγωγού που κάθε φορά μας ενδιαφέρει, εξετάζουμε την δυνατότητα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος. η τιμή του  $\rho$ , για κάθε συγκεκριμένο υλικό κατασκευής αγωγού, εξαρτάται από την θερμοκρασία. Η εξάρτηση αυτή είναι γραμμική και σύμφωνα με το σχήμα 2.1 έχουμε:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\Theta + \theta_2}{\Theta + \theta_1}$$

[3.2]

Όπου  $\Theta$  η θερμοκρασία στην οποία θεωρητικά θα ήταν  $\rho=0$ .

Αν  $\rho_0$  είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης για  $\theta=0$  και  $\rho_\theta$  για τυχαία θερμοκρασία από την 3.2 προκύπτει:

$$\frac{\rho_\theta}{\rho_0} = \frac{\Theta + \theta}{\Theta} = 1 + \theta \cdot \frac{1}{\Theta}$$

ή

$$\rho_{\theta} = \rho_0 \left( 1 + \theta \cdot \frac{1}{\Theta} \right)$$

Η ποσότητα  $1/\Theta$  συνήθως συμβολίζεται με  $\alpha_0$  και ονομάζεται <<θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης >> και μετράτε σε  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Έτσι, η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$\rho_{\theta} = \rho_0 (1 + \alpha_0 \cdot \theta)$$

[3.3]

Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής αυτός, με θερμοκρασία αναφοράς τους  $^{\circ}\text{C}$ , είναι για τον καθαρό χαλκό  $1/234,5$  και για το αλουμίνιο  $1/228$   $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Εφαρμόζοντας τον ορισμό που δόθηκε στην 3.2 έχουμε:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1 + \alpha_0 \cdot \theta_2}{1 + \alpha_0 \cdot \theta_1}$$

Και θέτοντας  $\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 \cdot \theta_1}$  προκύπτει τελικά:

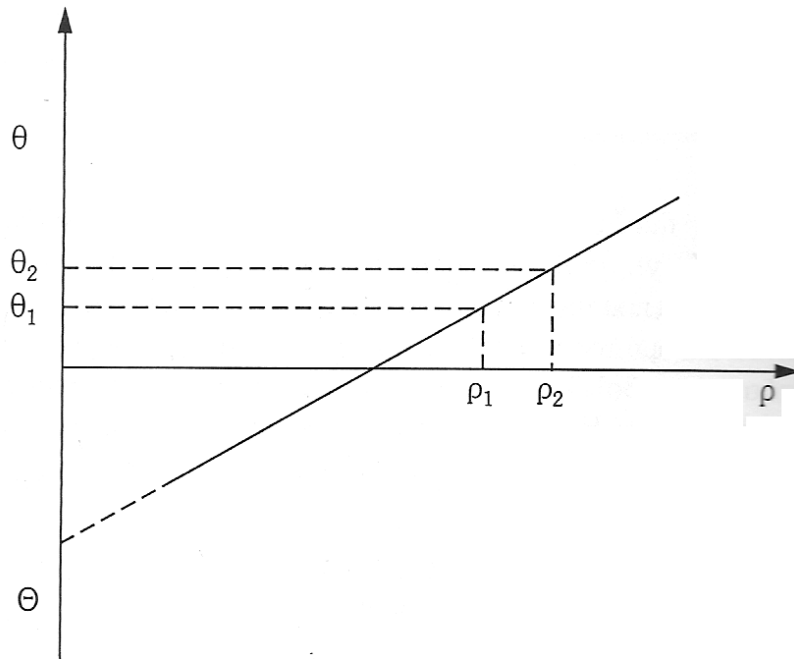
$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1)]$$

[3.4]

Από την σχέση αυτή υπολογίζεται εύκολα η ειδική αντίσταση οποιουδήποτε υλικού, στη θερμοκρασία λειτουργίας του αντίστοιχου κυκλώματος, όταν είναι γνωστή η τιμή της στην θερμοκρασία αναφοράς.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί πως η επίδραση της θερμοκρασίας στις γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού που επηρεάζουν την τιμή της ωμικής αντίστασης, δηλαδή το μήκος και η διατομή, δεν είναι σημαντική και συνήθως θεωρείτε αμελητέα. Η διαπίστωση αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι οι μεταβολές των δυο αυτών μεγεθών αλληλοαναιρούνται σε μεγάλο βαθμό.

Εκτός από την θερμοκρασία, ένας ακόμα παράγοντας επηρεάζει την τιμή της αντίστασης των αγωγών, όπως προκύπτει από την σχέση 3.1.



Σχήμα 3.1: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης με την θερμοκρασία

Πράγματι η ακρίβεια της σχέσης αυτής προϋποθέτει ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος στην διατομή του αγωγού που διαρρέει. Αυτό όμως είναι σωστό μόνο στην περίπτωση του συνεχούς ρεύματος. Στο εναλλασσόμενο η πυκνότητα του ρεύματος δεν είναι σταθερή και μάλιστα αυξάνετε από το κέντρο προς την περιφέρεια, για αγωγούς κυκλικής διατομής με την μέγιστη συγκέντρωση να παρατηρείτε στην επιφάνεια του αγωγού. Η συμπεριφορά αυτή, που είναι γνωστή ως *επιδερμικό φαινόμενο*, γίνεται εντονότερη όσο αυξάνει η συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών. Μια βάση ερμηνείας του φαινομένου αυτού, είναι οι δυνάμεις που οφείλονται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται και που ασκούνται στα ηλεκτρικά φορτία που διαμορφώνουν την ηλεκτρική ένταση.

Ο λεπτομερειακός υπολογισμός της κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος ως συνάρτηση της συχνότητας αλλά και των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού, είναι πολύπλοκος και δεν θεωρείτε σκόπιμη η παράθεση του στο πλαίσιο της εργασίας αυτής. Σημαντικό είναι το συμπέρασμα ότι το επιδερμικό φαινόμενο αυξάνει ουσιαστικά την τιμή της ωμικής αντίστασης του αγωγού αφού μειώνει την <<ενεργό>> διατομή του. Για την ποσοτική εκτίμηση αυτής της αύξησης ο υπολογισμός που προαναφέρθηκε καταλήγει στην θεώρηση του μεγέθους  $\sigma$ , που προκύπτει ως:

$$\sigma = r \sqrt{\frac{\omega \mu}{\rho}}$$

[3.5]

Όπου  $r$  η ακτίνα του κυκλικού αγωγού σε m,  $\omega=2\pi f$  η γωνιακή συχνότητα των εναλλασσομένων μεγεθών,  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε henry/m και  $\rho$  η ειδική αντίσταση του σε  $\text{ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

Θεωρώντας την βασική σχέση:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Όπου  $\mu_r$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητα και  $\mu_0$  η διαπερατότητα του κενού που είναι ίση με  $4\pi \cdot 10^{-7}$  henry/m μπορούμε να δώσουμε στην 3.5 την μορφή:

$$\sigma = r \sqrt{\frac{2\pi f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r}{\rho}}$$

ή

$$\sigma = \sqrt{\frac{2f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r}{\rho/\pi \cdot r^2}} = \sqrt{\frac{25,12 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \mu_r}{1000 \cdot \rho/\pi \cdot r^2}}$$

Και αν τεθεί

$$r_0 = \frac{\rho}{\pi r^2} \cdot 1000 \text{ ohm/km}$$

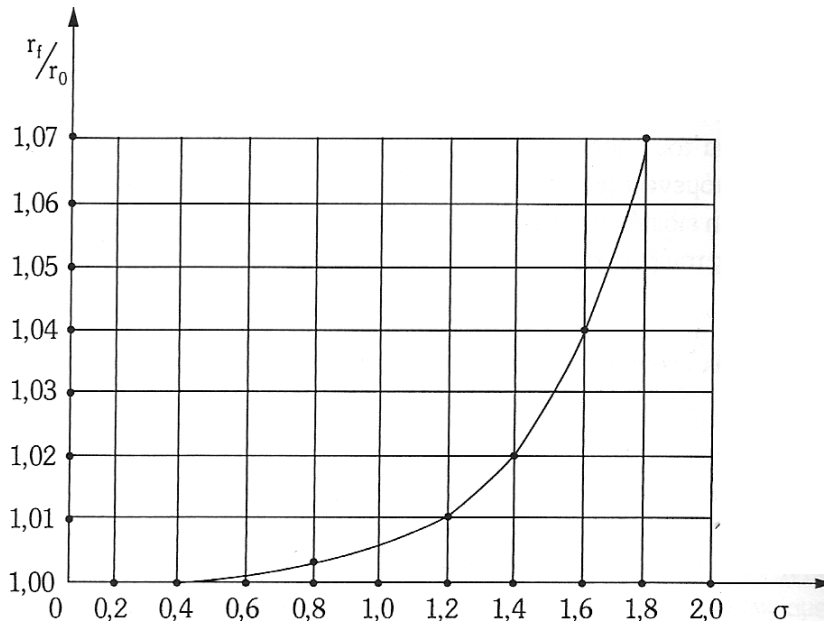
Έχουμε τελικά

$$\sigma = 0,05 \sqrt{\frac{\mu_r \cdot f}{r_0}}$$

[3.6]

Σημειώνεται ότι στην παραπάνω σχέση το μέγεθος  $r_0$  εκφράζει την ανά μονάδα μήκους ωμική αντίσταση του αγωγού στο συνεχές ρεύμα, δηλαδή χωρίς να συνυπολογίζετε το επιδερμικό φαινόμενο. Από την ίδια ανάλυση, που αναφέρθηκε στα προηγούμενα, προκύπτει ότι ο λόγος  $r/r_0$  της ανά μονάδας μήκους ωμικής αντίστασης ενός αγωγού σε εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας  $f$  προς την αντίσταση του αγωγού στο συνεχές ρεύμα είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση του  $\sigma$ . Η γραφική απεικόνιση αυτής της συνάρτησης φαίνεται στο σχήμα [3.2] που ακολουθεί.





Σχήμα 3.2: Μεταβολή της αντίστασης με την συχνότητα

### 3.2 Επαγωγή γραμμής μεταφοράς

Είναι γνωστό από την θεωρία του ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ότι όταν ένας αγωγός διαρρέετε από εναλλασσόμενο ρεύμα, τότε παράγεται εντός αυτού όσο και στον περιβάλλοντα αυτόν χώρο, μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο οι δυναμικές γραμμές του οποίου είναι ομόκεντροι κύκλοι που έχουν ως κέντρο το κέντρο του αγωγού και βρίσκονται σε επίπεδα κάθετα προς τον άξονα του αγωγού. Στην γενική περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι του ενός αγωγοί στον ίδιο χώρο, ο καθένας από αυτούς δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο. Ευρισκόμενοι οι αγωγοί εντός των μαγνητικών αυτών πεδίων, εμπλέκονται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σε αυτούς τάσεις εξ επαγωγής. Τα μέτρα αυτών των τάσεων εξαρτώνται από τα επαγωγικά χαρακτηριστικά των αγωγών, δηλαδή από της ίδιες αυτών επαγωγές καθώς και από τις μεταξύ αυτών αμοιβαίες επαγωγές. *Επαγωγή*, λοιπόν, είναι η παράμετρος μέσω της οποίας λαμβάνεται υπ' όψιν η τάση που επάγεται στους αγωγούς λόγω των μαγνητικών πεδίων που τους περιβάλουν.

Η επαγωγή μιας γραμμής μεταφοράς μαζί με την αντίσταση είναι οι παράμετροι που διαμορφώνουν την εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής. Η επαγωγή είναι η σημαντικότερη παράμετρος της γραμμής καθώς ισχύει  $\omega L \gg R$  άρα επηρεάζει περισσότερο την ικανότητα μεταφοράς της γραμμής, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Επειδή η επαγωγή συσχετίζει πεπλεγμένη ροή με ρεύμα, για την εύρεση των επαγωγικών χαρακτηριστικών μιας γραμμής μεταφοράς απαιτείται ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής που εμπλέκει κάθε αγωγός της γραμμής.

Θα προσπαθήσουμε στην συνέχεια, να προσεγγίσουμε το πρόβλημα της εύρεσης της ροής που εμπλέκει τους αγωγούς μιας γραμμής μεταφοράς θεωρώντας την γενική περίπτωση, που

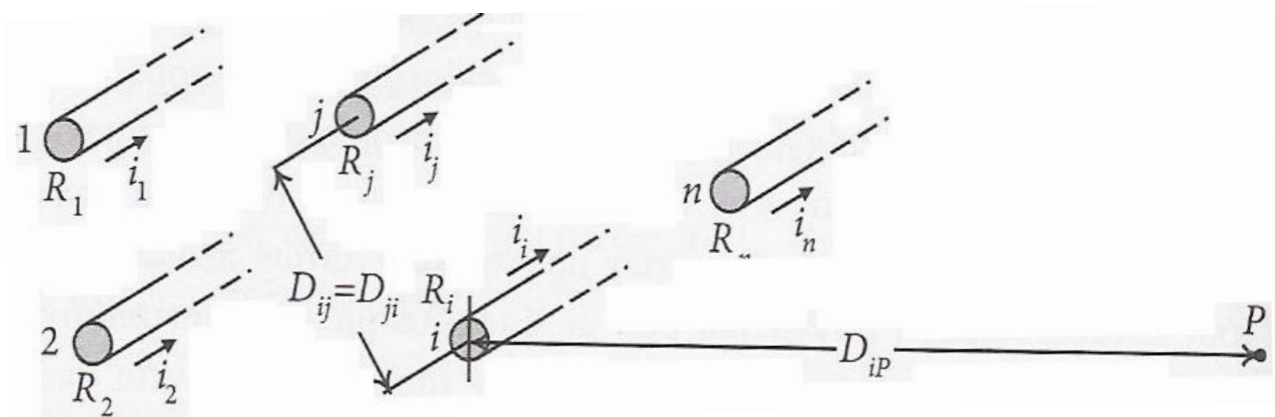
συνήθως συναντάτε στη πράξη, όπου περισσότεροι του ενός αγωγοί συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο.

### 3.2.1 Πεπλεγμένη ροή αγωγού που ανήκει σε ομάδα παράλληλων αγωγών – Επαγωγή αγωγών

Θεωρούμε σύνολο  $n$  παράλληλων αγωγών κυκλικής διατομής και μεγάλου μήκους, που ο καθένας έχει ακτίνα  $R_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  και οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις  $D_{ij}$  ( $i \neq j$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Οι αγωγοί διαρρέονται από ρεύμα  $i_i$  για το οποίο ισχύει  $\sum i_i = 0$ . Δεχόμαστε ότι ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις, που ικανοποιούνται στις περισσότερες από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς:

- Οι μεταξύ των αγωγών αποστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις ακτίνες τους.
- Τα ρεύματα κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη την διατομή των αγωγών .
- Το σύνολο των  $n$  αγωγών δεν επηρεάζεται από εξωτερικά πεδία .

Υπό αυτές της υποθέσεις ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή η συνολική ροή που εμπλέκει κάθε αγωγό μπορεί να ληφθεί ως άθροισμα των επιμέρους πεπλεγμένων ροών που παράγονται από όλους τους αγωγούς του συστήματος.



Σχήμα 3.3: Σύνολο  $n$  παράλληλων αγωγών.

Θα αναφερθούμε αρχικά στο μέρος εκείνο της πεπλεγμένης ροής που εκτείνεται μέχρι ενός απομακρυσμένου μεν, αλλά σε πεπερασμένη απόσταση σημείου  $P$ . Η συνολική πεπλεγμένη ροή θα προκύψει με το να δεχτούμε, στην συνέχεια, ότι το σημείο  $P$  τείνει στο άπειρο.

Με βάση την αρχή της επαλληλίας, η ανά μονάδα μήκους ροή  $\lambda_i^P$  που εμπλέκει τον αγωγό  $i$  και εκτείνεται μέχρι του σημείου  $P$  θα είναι:

$$\lambda_i^P = \lambda_{ii}^P + \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^P \quad j \neq i$$

[3.7]

Όπου  $\lambda_{ii}^P$  η ανά μονάδα μήκους ροή που εμπλέκει τον αγωγό  $i$  και οφείλεται στο ρεύμα που τον διαρρέει και  $\lambda_{ij}^P$  ( $j \neq i$ ) η ανά μονάδα μήκους ροή που εμπλέκει τον αγωγό  $i$  και οφείλεται στο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό  $j$ .

Η ροή  $\lambda_{ii}^P$  μπορεί να χωριστεί σε δυο συνιστώσες. Μια συνιστώσα  $\lambda_{\varepsilon\xi i}^P$  που οφείλετε στην ροή έξω από τον αγωγό και μια συνιστώσα  $\lambda_{\varepsilon\sigma i}$  που οφείλεται στην ροή εντός του αγωγού, δηλαδή:

$$\lambda_{ii}^P = \lambda_{\varepsilon\xi i}^P + \lambda_{\varepsilon\sigma i} \quad [3.8]$$

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε κάθε μια από αυτές τις συνιστώσες ξεχωριστά. Θα στηριχτούμε για αυτό στον νόμο του *Ampere*, σύμφωνα με τον οποίο η εφαπτόμενη συνιστώσα  $H_{\varepsilon\varphi}$  του διανύσματος της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όταν ολοκληρωθεί κατά μήκος ενός κλειστού δρόμου  $\Gamma$  ισούται με το ρεύμα  $i_e$ , σε  $A$ , που περικλείεται από αυτόν το κλειστό δρόμο. Ο νόμος του *Ampere* εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση:

$$\oint_{\Gamma} H_{\varepsilon\varphi} dl = i_e \quad [3.9]$$

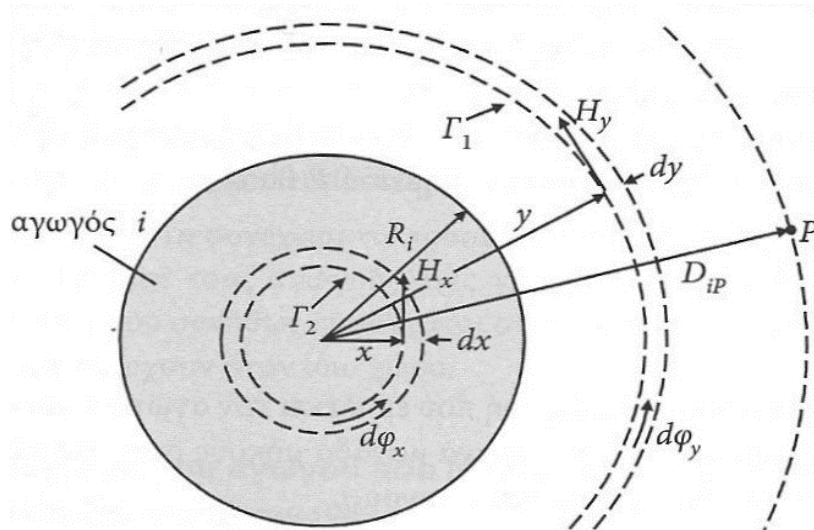
### 3.2.2 Υπολογισμός του $\lambda_{\varepsilon\xi i}^P$

Επειδή η εκτός του αγωγού ροή εμπλέκει όλο το ρεύμα του αγωγού, ο νόμος του *Ampere* εφαρμοζόμενος για τον κλειστό κυκλικό δρόμο  $\Gamma_1$  (σχήμα 3.4), που βρίσκεται έξω από τον αγωγό σε απόσταση  $y$  από το κέντρο του, δίνει:

$$\oint_{\Gamma_1} H_y dl = H_y \cdot 2\pi y = i_i$$

Οπότε

$$H_y = \frac{i_i}{2\pi y} \quad [3.10]$$



Σχήμα 3.4: Για τον υπολογισμό της ροής που εμπλέκει αγωγό  $i$  και οφείλεται στο ίδιο του το ρεύμα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι  $B_y = \mu_0 H_y$ , η στοιχειώδης μαγνητική ροή  $d\phi_y$ , σε κυλινδρικό κέλυφος ακτινικού πάχους  $dy$  και μήκους  $1m$  σε απόσταση  $y$  από το κέντρο του αγωγού, θα είναι:

$$d\phi_y = B_y dy = \mu_0 H_y dy = \frac{\mu_0 I}{2\pi y} dy \quad \text{Wb/m} \quad [3.11]$$

Όπου  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού που ισούται με  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .

Επειδή η ροή  $d\phi_y$  εμπλέκει ολόκληρο τον αγωγό, είναι ίση με την πεπλεγμένη ροή, δηλαδή  $d\phi_y = d\lambda_y$ . Συνεπώς η ανά μονάδα μήκους πεπλεγμένη ροή  $\lambda_{\epsilon\sigma i}^P$  που οφείλετε στην ροή έξω από τον αγωγό, θα είναι:

$$\lambda_{\epsilon\sigma i}^P = \int_{R_i}^{D_{iP}} d\lambda_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{D_{iP}}{R_i} \quad \text{Wb - t/m} \quad [3.12]$$

### 3.2.3 Υπολογισμός του $\lambda_{\epsilon\sigma i}$

Επειδή η εντός του αγωγού ροή εμπλέκει μέρος του ρεύματος δια του αγωγού, ο νόμος του Ampere εφαρμοζόμενος για τον κλειστό κυκλικό δρόμο  $\Gamma_2$  (σχήμα 3.4), που βρίσκεται εντός αγωγού και σε απόσταση  $x$  από το κέντρο του, δίνει:

$$\oint_{\Gamma_2} H_x dl = H_x \cdot 2\pi x = \frac{\pi x^2}{\pi R_i^2} i$$

Οπότε

$$H_x = \frac{x}{2\pi R_i^2} i_i$$

[3.13]

Η στοιχειώδης μαγνητική ροή  $d\phi_x$ , σε κυλινδρικό κέλυφος ακτινικού πλάτους  $dx$  και μήκους  $1m$  σε απόσταση  $x$  από το κέντρο του αγωγού, θα είναι:

$$d\phi_x = B_x dx = \mu H_x dx = \frac{\mu x i_i}{2\pi R_i^2} dx \quad \text{Wb/m}$$

[3.14]

Όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού.

Επειδή η ροή  $d\phi_x$  εμπλέκει μέρος του συνολικού ρεύματος ίσο με το  $x^2/R_i^2$  του συνολικού, η πεπλεγμένη ροή  $d\lambda_x$  θα είναι:

$$d\lambda_x = \frac{x^2}{R_i^2} d\phi_x = \frac{\mu x^3 i_i}{2\pi R_i^4} dx \quad \text{Wb - t/m}$$

[3.15]

Συνεπώς η ανά μονάδα μήκους πεπλεγμένη ροή  $\lambda_{\epsilon\sigma i}$ , που οφείλεται στη ροή στο εσωτερικό του αγωγού, θα είναι:

$$\lambda_{\epsilon\sigma i} = \int_0^{R_i} d\lambda_x = \frac{\mu i_i}{8\pi} \quad \text{Wb - t/m}$$

[3.16]

Είναι δηλαδή ανεξάρτητη από το μέγεθος του αγωγού.

Για μη σιδηρομαγνητισμό αγωγό,  $\mu \approx \mu_0$ , αντικαθιστώντας τις σχέσεις 3.12 και 3.16 στην σχέση 3.8, η ανά μονάδα μήκους πεπλεγμένη ροή  $\lambda_{ii}^p$  προκύπτει:

$$\lambda_{ii}^p = \frac{\mu_0 i_i}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{D_{iP}}{R_i} + \frac{1}{4} \right) = \frac{\mu_0 i_i}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{iP}}{D_{ii}} \quad \text{Wb - t/m}$$

[3.17]

Όπου

$$D_{ii} = R_i' = R_i e^{1/4} = 0.7788R_i \quad [3.18]$$

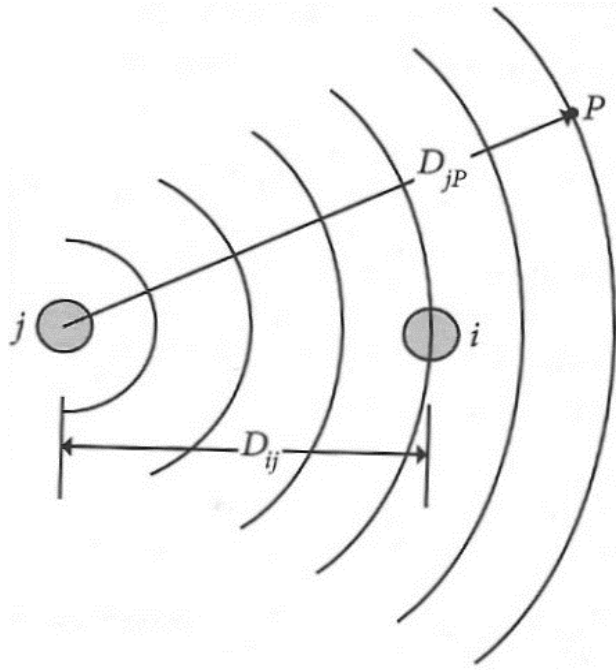
### 3.2.4 Υπολογισμός του $\lambda_{ij}^P$

Από τη συνολική ροή που οφείλεται στο ρεύμα του αγωγού  $j$  μόνο το τμήμα της εξωτερικής ροής που εκτείνεται ανάμεσα σε δυο ομόκεντρους κύκλους με ακτίνες  $D_{ij}$  και  $D_{jp}$  είναι αυτό που εμπλέκει τον αγωγό  $i$  (σχήμα 3.5). Άρα η ανά μονάδα μήκους πεπλεγμένη ροή  $\lambda_{ij}^P$  θα είναι:

$$\lambda_{ij}^P = \frac{\mu_0 i_j}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{jp}}{D_{ij}} \quad \text{Wb} - \text{t/m} \quad [3.19]$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις 3.17 και 3.19, η σχέση 3.7 γίνεται:

$$\lambda_i^P = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_1 \ln \frac{D_{1P}}{D_{i1}} + i_2 \ln \frac{D_{2P}}{D_{i2}} + \dots + i_n \ln \frac{D_{nP}}{D_{in}} \right) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_1 \ln \frac{1}{D_{i1}} + i_2 \ln \frac{1}{D_{i2}} + \dots + i_n \ln \frac{1}{D_{in}} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} (i_1 \ln D_{1P} + i_2 \ln D_{2P} + \dots + i_n \ln D_{nP}) \quad \text{Wb} - \text{t/m} \quad [3.20]$$



Σχήμα 3.5: Για τον υπολογισμό της εξωτερικής ροής που εμπλέκει τον αγωγό  $i$  και που οφείλεται στο ρεύμα του αγωγού  $j$ .

Για να υπολογίσουμε την συνολική ανά μονάδα μήκους ροή που εμπλέκει τον αγωγό  $i$ , το σημείο  $P$  πρέπει να τείνει στο άπειρο. Στην περίπτωση αυτή ισχύει  $D_{1P} \approx D_{2P} \approx \dots \approx D_{nP} = D \rightarrow \infty$ . Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\sum i_i = 0$ , ο δεύτερος όρος της 3.20 δίνει:

$$\lim_{D \rightarrow \infty} (i_1 + i_2 + \dots + i_n) \ln D = 0$$

και η εξίσωση 3.20 παίρνει την μορφή:

$$\lambda_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_1 \ln \frac{1}{D_{i1}} + i_2 \ln \frac{1}{D_{i2}} + \dots + i_n \ln \frac{1}{D_{in}} \right) \text{ Wb} - \text{t/m} \quad [3.21]$$

Τέτοιες εξισώσεις μπορούν να γραφτούν και για τους άλλους αγωγούς. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.21, που γράφονται για όλους τους αγωγούς, σε μια εξίσωση υπό μορφή μητρώων (πινάκων), λαμβάνουμε:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{i} \quad [3.22]$$

όπου  $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n]^T$

$$\mathbf{i} = [i_1 i_2 \dots i_n]^T$$

$\mathbf{L}$ =μήτρα επαγωγών διαστάσεων  $n \times n$

Η μήτρα  $\mathbf{L}$  περιέχει όλη την πληροφορία σχετικά με τα επαγωγικά χαρακτηριστικά των  $n$  αγωγών. Τα διαγώνια στοιχεία  $L_{ii}$  μας δίνουν την ανά μονάδα μήκους ίδια επαγωγή των αντιστοιχών αγωγών και είναι:

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{1}{R_i} \quad i = 1, \dots, n \quad [3.23]$$

Ενώ τα μη διαγώνια στοιχεία  $L_{ij}$  μας δίνουν την ανά μονάδα μήκους αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των αγωγών  $i$  και  $j$  και είναι:

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{1}{D_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad [3.24]$$

Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό της επαγωγής ανά μονάδα μήκους και ανά φάση, μερικών χαρακτηριστικών περιπτώσεων τριφασικών γραμμών μεταφοράς. Θα στηριχτούμε προς τούτο στην σχέση 3.21.

### 3.2.5 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με ισαπέχουσες φάσεις

Θεωρούμε τριφασική γραμμή μεταφοράς της οποίους οι τρεις αγωγοί ακτίνας  $R$ , βρίσκονται στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου πλευράς  $D$ . Η γεωμετρία αυτή των αγωγών δεν χρησιμοποιείται στην πράξη. Αναφέρεται, όμως εδώ διότι αποτελεί μια γεωμετρία ως προς την οποία μπορούν να αναφερθούν ισοδύναμα άλλες πρακτικές γεωμετρίας αγωγών.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.21 για την φάση  $a$ , έχουμε:

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{R'} + i_b \ln \frac{1}{D} + i_c \ln \frac{1}{D} \right) \text{ Wb} - \text{t/m}$$

Δεχόμενοι ότι  $i_a + i_b + i_c = 0$ , οπότε  $i_a = -i_b - i_c$  λαμβάνουμε:

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{R'} - i_a \ln \frac{1}{D} \right) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_a \ln \frac{D}{R'} \text{ Wb} - \text{t/m}$$

Συνεπώς

$$L_a = \frac{\lambda_a}{i_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{R'} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{R'} \text{ H/m}$$

[3.25]

Λόγω της υπάρχουσας συμμετρίας, αντίστοιχη τιμή προκύπτει και για τις επαγωγές των δυο άλλων φάσεων, δηλαδή  $L_a = L_b = L_c$ . Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στη συμμετρική αυτή διάταξη μπορούμε να αναφερόμαστε σε επαγωγή ανά φάση γεγονός που μας δίνει την δυνατότητα να διαμορφώσουμε μονοφασικό ισοδύναμο της γραμμής και φυσικά να χρησιμοποιήσουμε ανά φάση ανάλυση.

### 3.2.6 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις – Αντιμετάθεση φάσεων

Στην πράξη οι αγωγοί μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς δεν είναι συμμετρικά διατεταγμένοι στον χώρο άρα και οι μεταξύ τους αποστάσεις δεν είναι ίσες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι επαγωγές των τριών φάσεων και συνεπώς οι πτώσεις τάσεις εξ επαγωγής, να είναι διαφορετικές ακόμα και στην περίπτωση που τα ρεύματα είναι συμμετρικά. Για να

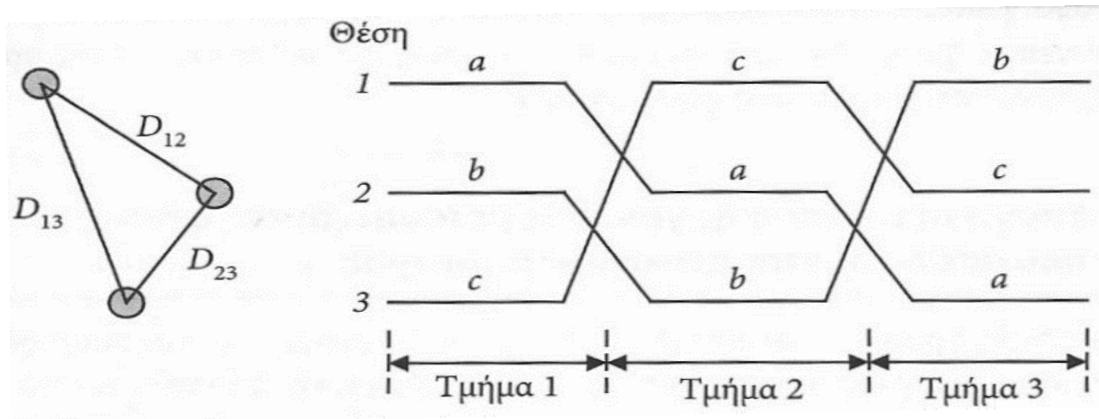


αποφευχθούν τέτοιου είδους ασυμμετρίες στην διάταξη των αγωγών οι γραμμές υφίστανται *αντιμετάθεση*, όπως δείχνετε στο σχήμα 3.6, με αποτέλεσμα κάθε αγωγός να καταλαμβάνει και τις τρεις δυνατές θέσεις για ίσες κατά προσέγγιση αποστάσεις. Η αντιμετάθεση γίνεται όπου αυτό είναι εφικτό για παράδειγμα σε υποσταθμούς. Με την αντιμετάθεση της γραμμής η ανά μονάδα μήκους ροή που εμπλέκει κάθε φάση λαμβάνετε ως ο μέσος όρος των επιμέρους πεπλεγμένων ροών.

Για την φάση a, για παράδειγμα θα έχουμε :

$$\lambda_a = \frac{1}{3} (\lambda_a^{(1)} + \lambda_a^{(2)} + \lambda_a^{(3)}) \quad [3.26]$$

όπου  $\lambda_a^{(i)}$  είναι η ανά μονάδα μήκους πεπλεγμένη ροή για τμήμα i της γραμμής,  $i=1,2,3$ .



Σχήμα 3.6: Αντιμετάθεση αγωγών γραμμής μεταφοράς.

Εφαρμόζοντας τη σχέση 3.21 και για τις τρεις θέσεις της φάσης a έχουμε:

$$\lambda_a^{(1)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{R'} + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \quad Wb - t/m$$

$$\lambda_a^{(2)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{R'} + i_b \ln \frac{1}{D_{23}} + i_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right) \quad Wb - t/m$$

$$\lambda_a^{(3)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{R'} + i_b \ln \frac{1}{D_{13}} + i_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \quad Wb - t/m$$

Αντικαθιστώντας στην 3.26 και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $i_a + i_b + i_c = 0$ , έχουμε:

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{R'} + i_b \ln \frac{1}{D_m} + i_c \ln \frac{1}{D_m} \right) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_a \ln \frac{D_m}{R'} \quad Wb - t/m$$

Όπου  $D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}} = H$  μέση γεωμετρική απόσταση των τριών αποστάσεων  $D_{12}$ ,  $D_{13}$  και  $D_{23}$ .

Η μέση επαγωγή της φάσης  $a$  προκύπτει:

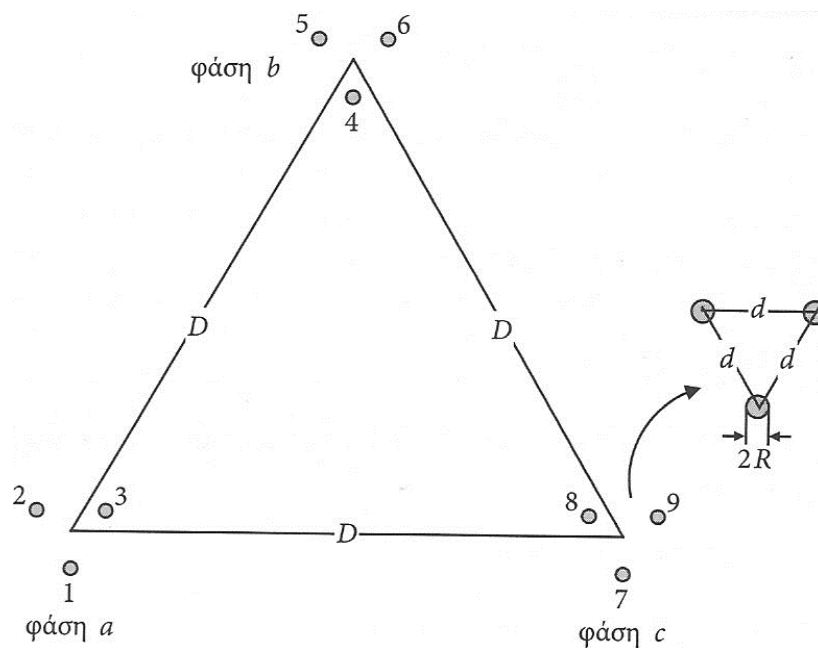
$$L_a = \frac{\lambda_a}{i_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_m}{R'} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{R'} \text{ H/m}$$

[3.27]

Είναι φανερό, λόγω της αντιμετάθεσης, ότι οι μέσες επαγωγές των άλλων δυο φάσεων έχουν την ίδια τιμή δηλαδή  $L_a = L_b = L_c$ . Συνεπώς και στην περίπτωση αυτή μπορούμε να διαμορφώσουμε μονοφασικό μοντέλο της γραμμής και να χρησιμοποιήσουμε ανά φάση ανάλυση.

### 3.3.7 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με ισαπέχουσες φάσεις που αποτελούνται από αγωγούς δέσμης

Σε τριφασικές γραμμές υπερυψηλής τάσης είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται περισσότεροι αγωγοί ανά φάση. Οι αγωγοί αυτοί βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας στον άλλον, σε σύγκριση με την απόσταση μεταξύ των φάσεων και λέγονται *αγωγοί δέσμης*. Οι αγωγοί δέσμης (δύο, τρεις ή τέσσερεις κατά περίπτωση) υποστηρίζονται ανά συγκεκριμένες αποστάσεις με ειδικά πλαίσια ώστε να οδεύουν παράλληλα μεταξύ τους. Το βασικό πλεονέκτημα των αγωγών δέσμης είναι, όπως θα δούμε και στην συνέχεια, ότι προκαλούν μείωση της ανά φάση επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής.



Σχήμα 3.7: Τριφασική γραμμή με τριδύμους αγωγούς.

Θεωρούμε τριφασική γραμμή μεταφοράς της οποίας οι αγωγοί βρίσκονται στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου πλευράς  $D$ . Κάθε φάση αποτελείται από τρεις αγωγούς (*τρίδυμοι αγωγοί*), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Υποθέτουμε ότι το ρεύμα κάθε φάσης μοιράζεται εξίσου σε κάθε έναν από τους τρεις αγωγούς.

Η πεπλεγμένη ροή για τον αγωγό 1 της φάσης a θα είναι:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{i_a}{3} \left( \ln \frac{1}{R'} + \ln \frac{1}{d_{12}} + \ln \frac{1}{d_{13}} \right) \right] + \\ &+ \frac{i_b}{3} \left( \ln \frac{1}{d_{14}} + \ln \frac{1}{d_{15}} + \ln \frac{1}{d_{16}} \right) + \frac{i_c}{3} \left( \ln \frac{1}{d_{17}} + \ln \frac{1}{d_{18}} + \ln \frac{1}{d_{19}} \right) = \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ i_a \ln \frac{1}{\sqrt[3]{R' d_{12} d_{13}}} + i_b \ln \frac{1}{\sqrt[3]{d_{14} d_{15} d_{16}}} + i_c \ln \frac{1}{\sqrt[3]{d_{17} d_{18} d_{19}}} \right] = \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ i_a \ln \frac{1}{D_s} + i_b \ln \frac{1}{D_{1b}} + i_c \ln \frac{1}{D_{1c}} \right] \text{ Wb} - \text{t/m} \end{aligned} \quad [3.28]$$

Όπου:  $D_s = \sqrt[3]{R' d_{12} d_{13}}$  = μέση γεωμετρική ακτίνα των αγωγών δέσμης.

$D_{1b} = \sqrt[3]{d_{14} d_{15} d_{16}}$  = μέση γεωμετρική απόσταση του αγωγού 1 από τους αγωγούς τις φάσης b.

$D_{1c} = \sqrt[3]{d_{17} d_{18} d_{19}}$  = μέση γεωμετρική απόσταση του αγωγού 1 από τους αγωγούς τις φάσης c.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $D_{1b} \approx D_{1c} \approx D$  και υποθέτοντας ότι  $i_a + i_b + i_c = 0$  έχουμε:

$$\lambda_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} i_a \ln \frac{D}{D_s} \text{ Wb} - \text{t/m} \quad [3.29]$$

Το ρεύμα δια του αγωγού 1 είναι  $i_a/3$ , οπότε η επαγωγή ανά μονάδα μήκους θα είναι:

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{i_a/3} = 3 \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{D_s} \text{ H/m} \quad [3.30]$$

Λόγο της υπάρχουσας συμμετρίας και της μικρής απόστασης μεταξύ των αγωγών μιας φάσης σε σύγκριση με την απόσταση μεταξύ των φάσεων, εύκολα συνάγεται ότι και οι επαγωγές των υπολοίπων αγωγών της ίδιας φάσης έχουν ίδια περίπου τιμή, δηλαδή ότι  $L_1 \approx L_2 \approx L_3$ .

Συνδέοντας παράλληλα τις επαγωγές  $L_1$ ,  $L_2$  και  $L_3$  βρίσκουμε την επαγωγή της φάσης  $a$  δηλαδή:

$$L_a \approx \frac{L_1}{3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{D_s} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} \text{ H/m}$$

[3.31]

Ανάλογα εργαζόμενοι διαπιστώνουμε ότι  $L_a=L_b=L_c$ .

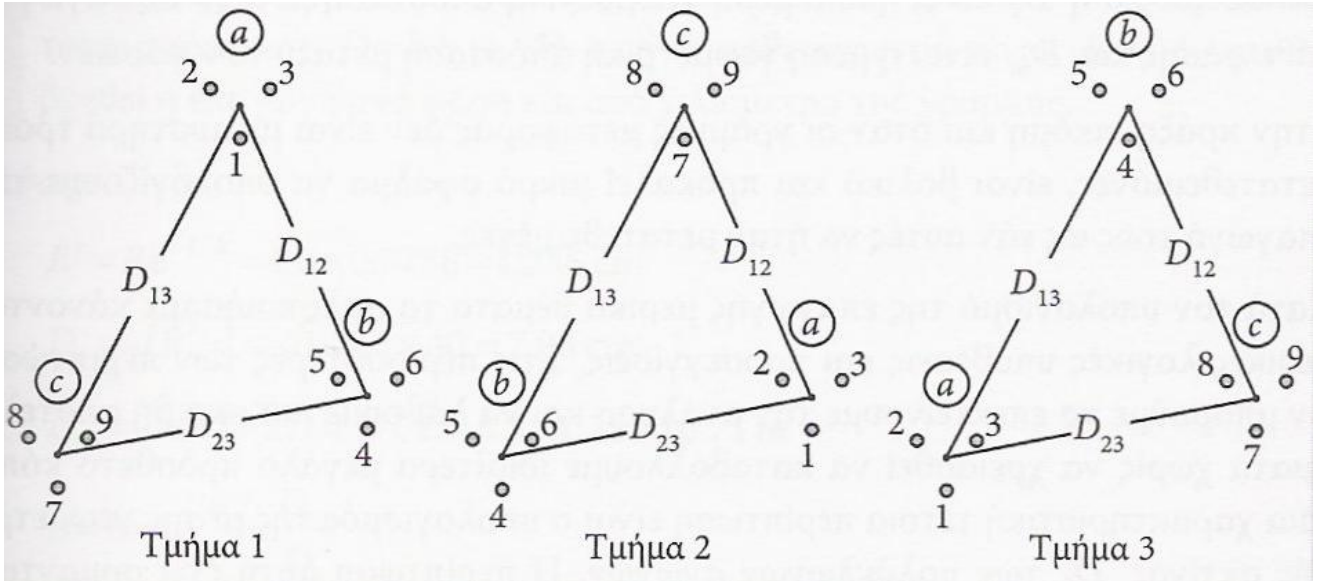
Η σημαντική μείωση της ανά φάση επαγωγικής αντίδρασης μιας γραμμής, που επιτυγχάνεται με την χρήση των αγωγών δέσμης, διαπιστώνεται εύκολα συγκρίνοντας τις σχέσεις 3.25 και 3.31. Πράγματι επειδή  $D_s \gg R'$  η ποσότητα εντός του λογαρίθμου μειώνετε, με συνέπεια την μείωση της επαγωγής ανά φάση. Αν, για παράδειγμα στην διάταξη του σχήματος (6.6) έχουμε  $R=2\text{cm}$  ( $R' = 2e^{-1/4} = 1,56\text{cm}$ ) και  $d=30\text{cm}$ , τότε  $D_s = \sqrt[3]{1,56 \cdot 30 \cdot 30} = 11,2\text{cm}$  άρα  $D_s \gg R'$ .

Στην περίπτωση που εξετάσαμε, οι αγωγοί δέσμης αποτελούνταν από τρεις αγωγούς ανά φάση. Η σχέση 3.31 ισχύει επίσης και για κάθε άλλη διάταξη αγωγών δέσμης στην οποία οι αγωγοί είναι συμμετρικά τοποθετημένοι γύρο από έναν κύκλο και οι αποστάσεις μεταξύ των φάσεων είναι πολύ μεγαλύτερες συγκρινόμενες με τις αποστάσεις μεταξύ των αγωγών εντός κάθε φάσης. Φυσικά η μέση γεωμετρική ακτίνα  $D_s$  πρέπει να οριστεί κατάλληλα. Αν οι αγωγοί δέσμης αποτελούνται εν γένει από  $n$  αγωγούς,  $n \geq 2$ , συμμετρικα τοποθετημένους γύρο από έναν κύκλο, τότε η μέση γεωμετρική ακτίνα ορίζετε ως:

$$D_s = \sqrt[n]{R' d_{12} \dots d_{1n}}$$

### **3.3.8 Επαγωγή τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις που αποτελούνται από αγωγούς δέσμης**

Θωρούμε ότι η μη συμμετρική, μετατιθέμενη, τριφασική γραμμή του σχήματος 3.3 έχει φάσεις που αποτελούνται από τρίδυμους αγωγούς σε διάταξη ανεστραμμένου ισόπλευρου τριγώνου. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η διάταξη των αγωγών για κάθε ένα από τα τρία τμήματα την γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα 3.8: Διάταξη αγωγών σε κάθε τμήμα της μετατιθέμενης γραμμής.

Η ροή που εμπλέκει τον αγωγό 1 της φάσης a στις τρεις θέσεις αυτού κατά μήκος της γραμμής, προκύπτει από την εξίσωση 3.28 ως εξής:

Τμήμα 1: για το τμήμα αυτό ισχύει  $D_{1b} \approx D_{12}$  και  $D_{1c} \approx D_{13}$ , οπότε:

$$\lambda_1^{(1)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{D_s} + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \text{ Wb} - \text{t/m}$$

Τμήμα 2: για το τμήμα αυτό ισχύει  $D_{1b} \approx D_{23}$  και  $D_{1c} \approx D_{12}$ , οπότε:

$$\lambda_1^{(2)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{D_s} + i_b \ln \frac{1}{D_{23}} + i_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right) \text{ Wb} - \text{t/m}$$

Τμήμα 3: για το τμήμα αυτό ισχύει  $D_{1b} \approx D_{13}$  και  $D_{1c} \approx D_{12}$ , οπότε:

$$\lambda_1^{(3)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{D_s} + i_b \ln \frac{1}{D_{13}} + i_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \text{ Wb} - \text{t/m}$$

Ο μέσος όρος των πεπλεγμένων ροών είναι:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{1}{3} (\lambda_1^{(1)} + \lambda_1^{(2)} + \lambda_1^{(3)}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( i_a \ln \frac{1}{D_s} + i_b \ln \frac{1}{D_m} + i_c \ln \frac{1}{D_m} \right) = \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} i_a \ln \frac{D_m}{D_s} \end{aligned}$$

[3.32]

$$\text{Όπου: } D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$$

Για τους λόγους που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο ισχύει:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{(i_a/3)} \approx L_2 \approx L_3$$

Άρα

$$L_a = \frac{L_1}{3} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_m}{D_s} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ H/m}$$

[3.33]

Και στην περίπτωση αυτή ισχύει  $L_a=L_b=L_c$ .

Η εξίσωση 3.33 είναι γενική. Όλες οι άλλες εξισώσεις 3.25, 3.27 και 3.3 αποτελούν ειδικές περιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν από την 3.33. Να υπενθυμίσουμε ότι η  $D_s$  είναι η ίδια μέση γεωμετρική απόσταση μεταξύ των αγωγών κάθε φάσης και  $D_m$  είναι η μέση γεωμετρική απόσταση μεταξύ των φάσεων.

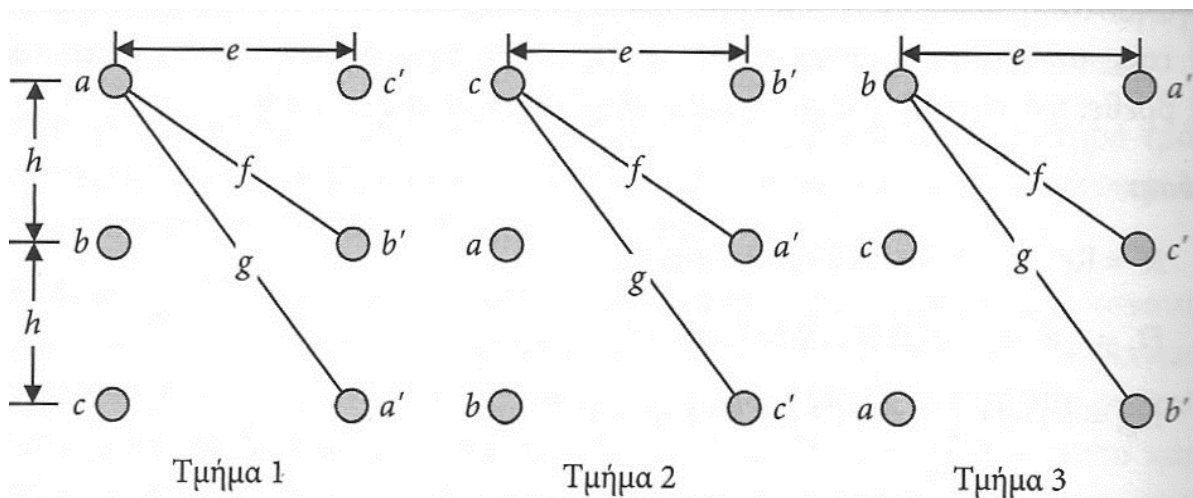
Κατά τον υπολογισμό της επαγωγής μερικά θέματα απλοποιήθηκαν κάνοντας μερικές λογικές υποθέσεις και προσεγγίσεις. Στις περισσότερες των περιπτώσεων μπορούμε να επεκτείνουμε την ανάλυση και να λάβουμε πιο ακριβή αποτελέσματα χωρίς να χιαστεί να καταβάλουμε ιδιαίτερα μεγάλο κόπο. Μια τέτοια χαρακτηριστική περίπτωση είναι ο υπολογισμός της μέσης γεωμετρικής ακτίνας  $D_s$  των πολύκλωνων αγωγών. Η περίπτωση αυτή είναι σημαντική καθώς η συντριπτική πλειονότητα των αγωγών είναι πολύκλωνοι και όχι συμπαγείς. Αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι οι αγωγοί είναι πολύκλωνοι τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σε όλες της σχέσεις που προαναφέραμε την μέση γεωμετρική ακτίνα  $D_s$  και όχι την ποσότητα  $R=0,7788R$  που αντιστοιχεί σε συμπαγείς αγωγούς. Ακόμα όμως και αν αγνοήσουμε το γεγονός ότι οι αγωγοί είναι πολύκλωνοι και κάνουμε τους υπολογισμούς μας υποθέτοντας πως είναι συμπαγείς και κυκλικοί της ίδιας εξωτερικής διαμέτρου, τα αποτελέσματα του θα λάβουμε είναι συνήθως αρκετά ακριβοί.

### 3.2.9 Επαγωγή τριφασικής γραμμής διπλού κυκλώματος

Η τριφασική γραμμή διπλού κυκλώματος διαθέτει δυο παράλληλους αγωγούς σε κάθε φάση. Η χρησιμοποίηση δυο τριφασικών κυκλωμάτων στου ίδιους πυλώνες έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη αξιοπιστία του συστήματος και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς. Αν μάλιστα, τα δυο κυκλώματα απέχουν αρκετά μεταξύ τους, η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των κυκλωμάτων μπορεί να αγνοηθεί και η συνολική επαγωγή να είναι το μισό της επαγωγής των επιμέρους κυκλωμάτων. Στην πράξη βέβαια η απόσταση μεταξύ των κυκλωμάτων δεν είναι

τόσο μεγάλη και η αμοιβαία επαγωγή δεν αγνοείται. Για να επιτευχθεί κατά το δυνατόν μικρότερη επαγωγή ανά φάση (γεγονός που θα οδηγήσει σε αύξηση της ικανότητας μεταφοράς, θα πρέπει ο λόγος  $D_m / D_s$  της μέσης γεωμετρικής απόστασης μεταξύ των φάσεων προς την μέση γεωμετρική ακτίνα μεταξύ των αγωγών των φάσεων, να είναι κατά το δυνατόν μικρότερος. Αυτό επιτυγχάνετε αυξάνοντας το  $D_s$  και μειώνοντας το  $D_m$ .

Στο σχήμα 3.9 φαίνονται τα τρία τμήματα μιας τριφασικής γραμμής διπλού κυκλώματος που υφίστανται αντιμετάθεση. Η φάση a αποτελείται από τους αγωγούς a και a', η φάση b από τους αγωγούς b και b' και η φάση c αποτελείται από τους αγωγούς c και c'. Οι αγωγοί σε δυο από τις φάσεις τοποθετούνται σε διαμετρικά αντίθετες θέσεις ο ένας από τον άλλο, ενώ οι αγωγοί της τρίτης φάσης τοποθετούνται ο ένας απέναντι από τον άλλο. αυτός ο τρόπος ανάρτησης των αγωγών έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη τιμή για το  $D_s$ .



Σχήμα 3.9: Διάταξη αγωγών σε τριφασική γραμμή διπλού κυκλώματος.

Η μέση γεωμετρική ακτίνα των αγωγών της φάσης a (δηλαδή των αγωγών a και a') για κάθε ένα από τα τμήματα της γραμμής θα προκύψει από την σχέση:

$$D_{sa} = \sqrt{R'_a D_{aa}}$$

Εφαρμόζοντας την σχέση αυτή για τα τρία τμήματα έχουμε:

$$D_{sa}^{(1)} = \sqrt{R' \cdot g}$$

$$D_{sa}^{(2)} = \sqrt{R' \cdot e}$$

$$D_{sa}^{(3)} = \sqrt{R' \cdot g}$$

Οπότε

$$D_s = \sqrt[3]{D_{sa}^{(1)} D_{sa}^{(2)} D_{sa}^{(3)}} = (R')^{1/2} \cdot g^{1/3} \cdot e^{1/6} \quad [3.34]$$

Η μέση γεωμετρική απόσταση  $D_m$  μεταξύ των φάσεων υπολογίζεται για ένα από τα τμήματα της γραμμής, για παράδειγμα το τμήμα 1 ως εξής:

$$D_{\lambda} = \sqrt[3]{D_{ab}^{(1)} D_{ac}^{(1)} D_{bc}^{(1)}} \quad [3.35]$$

$$\text{Όπου } D_{ab}^{(1)} = \sqrt[4]{D_{ab} D_{ab'} D_{a'b} D_{a'b'}} = \sqrt[4]{h \cdot f \cdot f \cdot h} = \sqrt{h \cdot f}$$

$$D_{ac}^{(1)} = \sqrt[4]{D_{ac} D_{ac'} D_{a'c} D_{a'c'}} = \sqrt[4]{2h \cdot e \cdot e \cdot 2h} = \sqrt{2h \cdot e}$$

$$D_{bc}^{(1)} = \sqrt[4]{D_{bc} D_{bc'} D_{b'c} D_{b'c'}} = \sqrt[4]{h \cdot f \cdot f \cdot h} = \sqrt{h \cdot f}$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση 3.35 έχουμε:

$$D_m = \sqrt[6]{(hf)(2he)(hf)} = 2^{1/6} h^{1/2} f^{1/3} e^{1/6}$$

Η επαγωγή ανά μονάδα μήκους της φάσης  $a$  (που αποτελείται από τους αγωγούς  $a$  και  $a'$ ) θα είναι:

$$L_a = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left[ 2^{1/6} \left( \frac{h}{R'} \right)^{1/2} \left( \frac{f}{g} \right)^{1/3} \right] \text{ H/m}$$

Και λόγω συμμετρίας ισχύει  $L_a=L_b=L_c$ .

### 3.3 Χωρητικότητα γραμμής μεταφοράς

Οι αγωγοί μιας γραμμής μεταφοράς, ανάμεσα στους οποίους παρεμβάλετε ως διηλεκτρικό ο αέρας, συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως οπλισμοί ενός πυκνωτή. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των αγωγών προκαλεί φόρτιση αυτών κατά τον ίδιο τρόπο που φορτίζονται οι οπλισμοί ενός πυκνωτή όταν μεταξύ αυτών εφαρμοστεί μια διαφορά δυναμικού. Η χωρητικότητα μιας γραμμής μεταφοράς είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των αγωγών, εκφράζεται με το φορτίο ανά μονάδα διαφοράς δυναμικού και είναι ομοιόμορφα κατανομημένη κατά μήκος της γραμμής.

Όταν μια εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται σε μια γραμμή μεταφοράς, Οι συνεχείς αυξομειώσεις της τιμής της προκαλούν αντίστοιχες αυξομειώσεις του ηλεκτρικού φορτίου των αγωγών σε κάθε σημείο τους και αυτές με την σειρά τους προκαλούν ροή εγκάρσιου ρεύματος διαρροής μεταξύ των αγωγών. Το ρεύμα αυτό είναι ανεξάρτητο από την φόρτιση της γραμμής και ρέει ακόμα και στην περίπτωση που η γραμμή είναι ανοικτοκυκλωμένη. Το ρεύμα διαρροής επηρεάζει την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, την απόδοση και τον



συντελεστή ισχύος αυτής καθώς και την ευστάθεια του συστήματος στο οποίο ανήκει η γραμμή.

Η χωρητικότητα της γραμμής αποτελεί την βασική παράμετρο που διαμορφώνει την *εγκάρσια αγωγιμότητα* της γραμμής και παριστάνει στην ουσία έναν δρόμο για την ροή των ρεύματος διαρροής. Επειδή τα ρεύματα αυτά είναι ανάλογα προς την τάση της γραμμής, η χωρητικότητα γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνετε το μέτρο της τάσης λειτουργίας της γραμμής. Πέραν αυτού η χωρητικότητα εξαρτάτε και από το μήκος των αγωγών καθώς και από την μεταξύ τους απόσταση. Σε εναέριες γραμμές μεταφοράς μικρότερες από 80km η επίδραση της χωρητικότητας είναι μικρή και συνήθως αγνοείτε. Αντίθετα, στα καλώδια υψηλής τάσης, όπου οι αγωγοί είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, η επίδραση της χωρητικότητας είναι πολύ σημαντική ακόμα και για μικρού μήκους καλώδια.

Η χωρητικότητα όπως αναφέρθηκε, συσχετίζει ηλεκτρικό φορτίο με διαφορά δυναμικού. Για γραμμή με πολλούς αγωγούς ορίζονται χωρητικότητες για κάθε συνδυασμό αγωγών και για τον προσδιορισμό τους, απαιτείται η εύρεση των διαφορών δυναμικού μεταξύ όλων των αγωγών της γραμμής. Στην πράξη, όμως, επειδή χρησιμοποιούμε κατά φάση ανάλυση και επιδιώκουμε τη διαμόρφωση μονοφασικού ισοδύναμου της γραμμής, μας ενδιαφέρει η χωρητικότητα ανά φάση, δηλαδή η χωρητικότητα, των φάσεων ως προς τον ουδέτερο ή ως προς σημείο που έχει δυναμικό μηδέν. Ως σημείο μηδενικού δυναμικού λαμβάνετε ένα σημείο στο άπειρο που θεωρείτε *σημείο αναφοράς*.

Θα προσπαθήσουμε στη συνέχεια, να προσεγγίσουμε το πρόβλημα της εύρεσης του δυναμικού των αγωγών, θεωρώντας την γενική περίπτωση, που συνήθως συμβαίνει στην πράξη, όπου περισσότεροι του ενός αγωγοί συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο.

### 3.3.1 Δυναμικό αγωγού που ανήκει σε ομάδα παράλληλων αγωγών – Χωρητικότητα αγωγών

Θεωρούμε το σύστημα των  $n$  παράλληλων αγωγών που φαίνετε στο σχήμα 3.3 κάθε αγωγούς  $i$   $C_b/m$ , χαρακτηρίζετε από γραμμική πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου  $q_i$  για την οποία ισχύει  $\sum q_i = 0$ . Το φορτίο που μεταφέρει κάθε αγωγός εγκαθιστά γύρω από αυτόν ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί διαφορά δυναμικού μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους σημείων εντός αυτού. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο σημείων  $a$  και  $b$  που οφείλεται στα φορτία όλων των αγωγών είναι ίση με το άθροισμα των διαφορών δυναμικού που οφείλονται στα φορτία κάθε αγωγού όταν δρουν μονά, τους δηλαδή:

$$v_{ab} = \sum_{k=1}^n v_{ab}^k$$

[3.36]

Όπου  $v_{ab}^k$  είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων  $a$  και  $b$  που οφείλεται στο φορτίο του αγωγού  $k$ .

Υποθέτουμε ότι οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών είναι πολύ μεγαλύτερες από της ακτίνες τους, οπότε το φορτίο κάθε αγωγού κατανέμετε ομοιόμορφα γύρω από την επιφάνια τους. Υπό αυτήν την παραδοχή οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργούνται από το φορτίο κάθε αγωγού, είναι σχεδόν ακτινικές και οι ισοδυναμικές επιφάνειες, ως κάθετες προς τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, είναι ομόκεντροι κύλινδροι που περιβάλλουν τον αγωγό.

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο σημείων είναι αριθμητικός ίση με το έργο σε *joule* που απαιτηθεί για να μετακινηθεί η μονάδα θετικού φορτίου μεταξύ αυτών. Για τον υπολογισμό της διαφοράς δυναμικού  $v_{ab}^k$  μεταξύ των σημείων a και b που οφείλεται στο φορτίο του αγωγού k, θα πρέπει να γνωρίζουμε το νόμο σύμφωνα με τον οποίο μεταβάλλεται η ένταση  $E^k$  του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο αυτού. Αυτό επιτυγχάνετε με τον νόμο του Gauss, σύμφωνα με τον οποίο η ηλεκτρική ροή που εξέρχεται από κλειστή επιφάνεια A ισούται με το φορτίο  $q_i$  που περικλείεται από την επιφάνεια αυτή. Ο νόμος του gauss εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση:

$$\int_A D ds = q_e \quad [3.37]$$

Όπου D η κάθετη συνιστώσα της πυκνότητας ηλεκτρικής ροής σε Cb/m<sup>2</sup> και ds το στοιχειώδες εμβαδόν της επιφάνια A σε m<sup>2</sup>.

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Gauss για μια κυλινδρική επιφάνια ομόκεντρη του αγωγού k, μήκους 1m και σε απόσταση x από το κέντρο του, όπου η κάθετη συνιστώσα της ηλεκτρικής ροής είναι  $D_x^k$ , θα έχουμε:

$$\int_A D_x^k ds = D_x^k \cdot 2\pi x = q_k$$

Οπότε

$$D_x^k = \frac{q_k}{2\pi x} \text{ Cb/m}^2 \quad [3.38]$$

Θεωρώντας το μέσο που περιβάλλει τον αγωγό ομογενές, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση x από το κέντρο του αγωγού δίνεται από την σχέση:

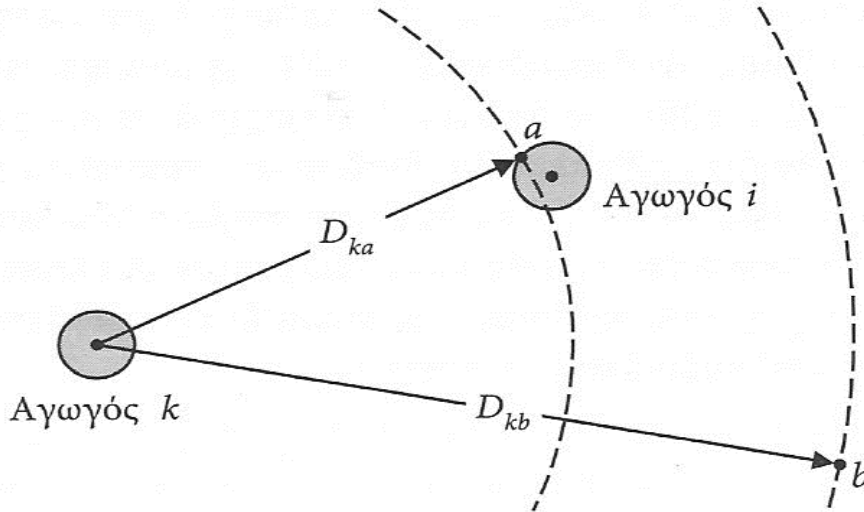
$$E_x^k = \frac{D_x^k}{\epsilon_r \epsilon_0} \approx \frac{q_k}{2\pi \epsilon_0 x} \text{ V/m} \quad [3.39]$$

Όπου  $\epsilon_r \approx 1$  και  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού που είναι ίση με  $\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ F/m}$ .

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο ισοδυναμικών επιφανειών που διέρχονται από τα σημεία a και b (σχήμα 3.10) που βρίσκονται σε απόσταση  $D_{ka}$   $D_{kb}$  από το κέντρο του αγωγού k ( $D_{ka} > D_{kb}$ ) είναι:

$$v_{ab}^k = \int_{D_{ka}}^{D_{kb}} E_x^k dx = \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{kb}}{D_{ka}} V \quad [3.40]$$

Ο συμβολισμός  $v_{ab}^k$  σημαίνει την πτώση τάσης από το σημείο a προς το σημείο b δηλαδή το a έχει θετικότερο δυναμικό από το b. Η πυκνότητα φορτίου  $q_k$  έχει επίσης το δικό της πρόσημο. Αν λοιπόν,  $D_{ka} > D_{kb}$  τότε  $\ln \frac{D_{kb}}{D_{ka}} > 0$ , άρα για θετικό φορτίο  $q_k$  η τάση  $v_{ab}^k$  είναι θετική.



Σχήμα 3.10: Για τον ορισμό της διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Από την σχέση 3.36 η διάφορα δυναμικού  $v_{ab}$ , που οφείλεται στα φορτία όλων των αγωγών, προκύπτει:

$$v_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{D_{kb}}{D_{ka}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[ \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{1}{D_{ka}} + \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln D_{kb} \right] V \quad [3.41]$$

Αν θεωρήσουμε ότι το σημείο b τείνει στο άπειρο, ώστε να έχει δυναμικό μηδέν (δηλαδή  $v_b = 0$ ), τότε, επειδή  $v_{ab} = v_a - v_b = v_a - 0 = v_a$ , η σχέση (3.41) μας δίνει το δυναμικό του

σημείου a. Στην περίπτωση αυτή έχουμε επιπλέον ότι  $D_{kb} \approx D_{kb} \approx \dots \approx D_{kb} \approx D(\rightarrow \infty)$ ,  
 όποτε λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\sum_{k=1}^n q_k = 0$ , ο δεύτερος όρος της εξίσωσης 3.41 δίνει:

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n q_k \ln D_{kb} \approx \ln D \sum_{k=1}^n q_k = 0$$

Και η εξίσωση 3.41 λαμβάνει τελικά την μορφή:

$$v_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{1}{D_{ka}} \quad V \quad [3.42]$$

Αν το σημείο a ληφθεί να βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια του αγωγού i (σχήμα 3.10) τότε το δυναμικό  $v_a$  είναι ίσο με το δυναμικό  $v_i$ . Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $D_{ka} \approx D_{ki}$  και  $D_{ai} \approx R_i$  η εξίσωση 3.42 γράφεται ως εξής:

$$v_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_1 \ln \frac{1}{D_{1i}} + \dots + q_n \ln \frac{1}{D_{ni}} + \dots + q_i \ln \frac{1}{R_i} \right] \quad V \quad [3.43]$$

Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να γραφτούν και για το δυναμικό στις επιφάνειες των άλλων αγωγών. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.43, που έχουν γραφτεί για όλους τους αγωγούς καταλήγουμε σε μια εξίσωση υπό μορφή μήτρας:

$$\mathbf{v} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{q} \quad [3.44]$$

Όπου  $\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T$   
 $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$

Και  $\mathbf{\Phi}$  μήτρα διαστάσεων nxn με στοιχεία γενικής μορφής:

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{D_{ji}} \quad \text{όπου } D_{ii} = R_i$$

Από την σχέση 3.44 προκύπτει:

$$\mathbf{q} = \mathbf{\Phi}^{-1} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{Cv} \quad [3.45]$$

Όπου  $\mathbf{C} = \mathbf{\Phi}^{-1}$  [3.46]

Η μήτρα  $\mathbf{C}$  είναι η *μήτρα χωρητικότητας* των αγωγών με διαστάσεις nxn. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι εν γένει υπάρχουν και αμοιβαίες χωρητικότητες μεταξύ των αγωγών.

ορισμένες προϋποθέσεις η μήτρα αυτή μπορεί να καταστεί διαγώνια. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να αναφερόμαστε σε *χωρητικότητα ανά φάση*.

### 3.3.2 Επίδραση της γης στην χωρητικότητα αγωγών – Η μέθοδος των ειδώλων

Στην ανάλυση που προηγήθηκε, για τον προσδιορισμό της μήτρας χωρητικότητας  $C$ , θεωρήσαμε ότι οι γραμμές οδεύουν σε ελεύθερο χώρο και η επίδραση της γης αγνοήθηκε. Στην πράξη, όμως, οι αγωγοί οδεύουν παράλληλα προς την γη, η οποία συμπεριφέρεται όπως ένας τέλειος αγωγός που έχει την μορφή οριζώντιου επιπέδου με άπειρη έκταση. Η παρουσία της, συνεπώς, μεταβάλλει σημαντικά τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου και τις ισοδυναμικές επιφάνειες, που παύουν πλέον να είναι κύλινδροι, με αποτέλεσμα σημαντική μεταβολή της *ενεργούς χωρητικότητας των αγωγών*. Επειδή στις γραμμές μεταφοράς οι αποστάσεις μεταξύ των φάσεων και μεταξύ φάσεων και γης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, η επίδραση της γης δεν μπορεί να αγνοηθεί και θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν.

Η επίδραση της γης στην χωρητικότητα μιας γραμμής μεταφοράς λαμβάνετε υπόψιν με την *μέθοδο των ειδώλων*. Σύμφωνα με αυτή, η επίδραση της γης στα δυναμικά των αγωγών μπορεί να αντικατασταθεί με την επίδραση *ειδώλων αγωγών*. Αυτοί οι υποθετικοί αγωγοί φέρουν φορτία του ίδιου μεγέθους με τα φυσικά φορτία των πραγματικών αγωγών, αντιθέτου όμως πολικότητας και είναι τοποθετημένοι θεωρητικά κάτω από την γη και σε αποστάσεις ίσες με αυτές που οι αντίστοιχοι πραγματικοί αγωγοί είναι τοποθετημένοι πάνω από την γη. Με την παρουσία των ειδώλων αγωγών το επίπεδο που αντικαθιστά την γη καθίσταται ισοδυναμική επιφάνεια, που λόγω συμμετρίας έχει δυναμικό μηδέν.

Έτσι λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της γης με την μέθοδο των ειδώλων, το δυναμικό κάθε αγωγού θα οφείλεται τώρα στα φορτία όλων των αγωγών πραγματικών και υποθετικών. Αν συμβολίσουμε το είδωλο κάθε αγωγού με το σύμβολο του αντιστοίχου αγωγού αλλά τονούμενο, το δυναμικό  $v_i$  θα δίνεται από την σχέση:

$$v_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \left( q_k \cdot \ln \frac{1}{D_{ki}} + q_{k'} \cdot \ln \frac{1}{D_{k'i}} \right)$$

Και επειδή  $q_{k'} = -q_k$  και  $D_{k'i} = D_{ki}$ , η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$v_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{D_{ki}'}{D_{ki}} \tag{3.47}$$

Ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για το δυναμικό όλων των άλλων αγωγών. οι σχέσεις αυτές γράφονται υπό μορφή μήτρας ως εξής:

$$\mathbf{v} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{q} \tag{3.48}$$

Όπου  $\mathbf{F}$  μήτρα διαστάσεων  $n \times n$  με στοιχεία γενικής μορφής :

$$f_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ji}'}{D_{ji}}$$

Από την σχέση 3.48 προκύπτει :

$$\mathbf{q} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{C}_e \mathbf{v} \quad [3.49]$$

$$\text{Όπου } \mathbf{C}_e = \mathbf{F}^{-1} \quad [3.50]$$

Η μήτρα  $\mathbf{C}_e$  είναι η *μήτρα χωρητικοτήτων* των αγωγών όταν λαμβάνετε υπόψη και η επίδραση της γης. Οι διαστάσεις της είναι  $n \times n$ .

Όταν μεταξύ των αγωγών υπάρχει ουδέτερος, είναι σύνηθες να αναφέρουμε τα δυναμικά των φάσεων  $v_\phi$  ως προς τον ουδέτερο. Αν για παράδειγμα, θεωρηθεί ως ουδέτερος ο αγωγός  $n$  τον οποίο θεωρούμε γειωμένο, η σχέση 3.48 γίνεται :

$$\begin{bmatrix} v_\phi \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\phi\phi} & F_{\phi n} \\ F_{n\phi} & f_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_\phi \\ q_n \end{bmatrix} \quad [3.51]$$

Λύνοντας την εξίσωση 3.51 ως προς  $v_\phi$  και απαλείφοντας το φορτίο  $q_n$  λαμβάνουμε:

$$v_\phi = \left( F_{\phi\phi} - \frac{F_{\phi n} F_{n\phi}}{f_{nn}} \right) q_\phi = F_\phi q_\phi \quad [3.52]$$

$$\text{Όπου } F_\phi = F_{\phi\phi} - \frac{F_{\phi n} F_{n\phi}}{f_{nn}} \quad [3.53]$$

Η  $F_\phi$  είναι μήτρα διαστάσεων  $(n-1) \times (n-1)$  με στοιχεία γενικής μορφής:

$$f'_{ij} = f_{ij} - \frac{f_{in} f_{nj}}{f_{nn}} \quad [3.54]$$

Αντιστρέφοντας την σχέση 3.52 λαμβάνουμε:

$$q_{\Phi} = F_{\Phi}^{-1} \cdot v_{\Phi} = C_{e\Phi} \cdot v_{\Phi} \quad [3.55]$$

Όπου  $C_{e\Phi} = F_{\Phi}^{-1}$

$$[3.56]$$

Η μήτρα  $C_{e\Phi}$  είναι η μήτρα χωρητικότητας των φάσεων ως προς τον ουδέτερο όταν λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της γης. Οι διαστάσεις τις είναι  $(n-1) \times (n-1)$ .

Αν η γραμμή μεταφοράς υφίσταται αντιμετάθεση, τότε ως δυναμικό κάθε αγωγού  $i$  λαμβάνετε ο μέσος όρος των επιμέρους δυναμικών στα τρία τμήματα της γραμμής, δηλαδή:

$$v_i = \frac{1}{3} (v_i^{(1)} + v_i^{(2)} + v_i^{(3)}) \quad [3.57]$$

### 3.3.3 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με ισαπέχουσες φάσεις

Χρησιμοποιώντας την σχέση 3.43, το δυναμικό της φάσης  $a$  μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς, με αγωγούς ακτίνας  $R$  που βρίσκονται στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου  $D$  προκύπτει:

$$v_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_a \ln \frac{1}{R} + q_b \ln \frac{1}{D} + q_c \ln \frac{1}{D} \right] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} q_a \ln \frac{D}{R} \text{ V}$$

Για να προκύψει η δεύτερη ισότητα ελήφθη υπόψη ότι  $q_a + q_b + q_c = 0$  οπότε  $q_b + q_c = -q_a$ .

Η χωρητικότητα, συνεπώς, της φάσης  $a$  ως προς ένα σημείο που έχει δυναμικό μηδέν είναι:

$$C_a = \frac{q_a}{v_a} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{R}} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{R}} \text{ F/m} \quad [3.58]$$

Επειδή ως δυναμικό αναφοράς λαμβάνουμε συνήθως το δυναμικό του ουδέτερου, στην περίπτωση που αυτός είναι γειωμένος (οπότε το δυναμικό του είναι μηδέν) η χωρητικότητα που δίνεται από την σχέση 3.58 είναι η χωρητικότητα ως προς τον ουδέτερο. Λόγο της υπάρχουσας συμμετρίας, αντίστοιχη τιμή προκύπτει και για την χωρητικότητα των άλλων δυο φάσεων.

### 3.3.4 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις

Ο ακριβής υπολογισμός της χωρητικότητας τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις είναι πολύπλοκος. Η χωρητικότητα σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται υποθέτοντας ότι η γραμμή υφίσταται αντιμετάθεση. Δεχόμαστε επίσης ότι η γραμμική πυκνότητα φορτίου κάθε αγωγού παραμένει η ίδια και στις τρεις διαφορετικές θέσεις του κύκλου αντιμετάθεσης της γραμμής.

Αναφερόμενοι στο σχήμα 3.6 το δυναμικό της φάσης a για τις τρεις θέσεις αυτής θα είναι:

$$v_a^{(1)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_a \ln \frac{1}{R} + q_b \ln \frac{1}{D_{12}} + q_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right] V$$

$$v_a^{(2)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_a \ln \frac{1}{R} + q_b \ln \frac{1}{D_{23}} + q_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right] V$$

$$v_a^{(3)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_a \ln \frac{1}{R} + q_b \ln \frac{1}{D_{13}} + q_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right] V$$

Η μέση τιμή του δυναμικού θα είναι:

$$v_{\text{av}} = \frac{1}{3} (v_a^{(1)} + v_a^{(2)} + v_a^{(3)}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_a \ln \frac{1}{R} + q_b \ln \frac{1}{D_m} + q_c \ln \frac{1}{D_m} \right] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot q_a \ln \frac{D_m}{R} V$$

Όπου  $D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$ , είναι η μέση γεωμετρική απόσταση μεταξύ των φάσεων. Η τελευταία ισότητα προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη ότι  $q_a + q_b + q_c = 0$

Συνεπώς η χωρητικότητα της φάσης a ως προς τον ουδέτερο που, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, θεωρείται πώς έχει δυναμικό μηδέν, θα είναι:

$$C_a = \frac{q_a}{v_a} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{R}} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D_m}{R}} \text{ F/m}$$

[3.59]

Λόγο της αντιμετάθεσης των φάσεων, η ίδια τιμή χωρητικότητας έχουν και οι άλλες δυο φάσεις δηλαδή  $C_a = C_b = C_c$ .

### 3.3.5 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με μη ισαπέχουσες φάσεις που αποτελούνται από αγωγούς δέσμης

Θεωρούμε την μη συμμετρική τριφασική γραμμή με φάσεις από τρίδυμους αγωγούς σε διάταξη ανεστραμμένου τριγώνου, που φαίνετε στο σχήμα 3.8. Το φορτίο κάθε φάσης κατανέμετε εξίσου μεταξύ των τριών αγωγών που την αποτελούν.



Χρησιμοποιώντας την σχέση 3.43, το δυναμικό του αγωγού 1 της φάσης a προκύπτει ως άθροισμα εννέα όρων που αντιστοιχούν στις συνεισφορές των φορτίων και των εννέα αγωγών των τριών φάσεων. Για την πρώτη θέση του κύκλου αντιμετάθεσης έχουμε:

$$v_1^{(1)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \frac{q_a}{3} \left( \ln \frac{1}{R} + \ln \frac{1}{d_{12}} + \ln \frac{1}{d_{13}} \right) + \frac{q_b}{3} \left( \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{D_{12}} \right) + \frac{q_b}{3} \left( \ln \frac{1}{D_{13}} + \ln \frac{1}{D_{13}} + \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \right]$$

$$v_1^{(1)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{1}{D_s} + q_b \ln \frac{1}{D_{12}} + q_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) V$$

Όπου  $D_s = \sqrt[3]{R \cdot d_{12} \cdot d_{13}}$ , είναι η μέση γεωμετρική ακτίνα των αγωγών δέσμης.

Για τις άλλες δυο θέσεις του κύκλου αντιμετάθεσης της γραμμής έχουμε:

$$v_1^{(2)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{1}{D_s} + q_b \ln \frac{1}{D_{23}} + q_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right) V$$

$$v_1^{(3)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{1}{D_s} + q_b \ln \frac{1}{D_{13}} + q_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) V$$

Η μέση τιμή του δυναμικού θα είναι:

$$v_1 = \frac{1}{3} (v_1^{(1)} + v_1^{(2)} + v_1^{(3)}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ q_a \ln \frac{1}{D_s} + q_b \ln \frac{1}{D_m} + q_c \ln \frac{1}{D_m} \right] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot q_a \ln \frac{D_m}{D_s} V$$

Όπου  $D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$ .

Η χωρητικότητα του αγωγού 1 ως προς τον ουδέτερο, που θεωρούμε ότι είναι γειωμένος και έχει δυναμικό μηδέν, είναι:

$$C_1 = \frac{\left(\frac{q_a}{3}\right)}{v_1}$$

Λόγο της υπάρχουσας συμμετρίας και της μικρής απόστασης μεταξύ των αγωγών μιας φάσης σε σύγκριση με την απόσταση μεταξύ των φάσεων, εύκολα συνάγουμε ότι και η χωρητικότητα των υπολοίπων αγωγών της ίδιας φάσης έχουν ίδια περίπου τιμή, δηλαδή  $C_1 \approx C_2 \approx C_3$ .

Συνδέοντας παράλληλα τις χωρητικότητες  $C_1$ ,  $C_2$  και  $C_3$  βρίσκουμε την χωρητικότητα της φάσης a ως εξής:

$$C_a \approx 3C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{D_s}} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D_m}{D_s}} \text{ F/m}$$

[3.60]

Και στην περίπτωση αυτή ισχύει  $C_a = C_b = C_c$ .

### 3.3.5 Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής διπλού κυκλώματος

Η γενική σχέση 3.60 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της χωρητικότητας τριφασικής γραμμής διπλού κυκλώματος. Για την τριφασικής γραμμή διπλού κυκλώματος του σχήματος 3.9, για παράδειγμα, όπου, όπως προκύπτει από την σχέση 3.34, έχουμε:

$$D_s = R^{1/2} \cdot g^{1/3} \cdot e^{1/6}$$

$$D_m = 2^{1/6} \cdot h^{1/2} \cdot f^{1/3} \cdot e^{1/6}$$

Η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους και ανά φάση (όπου κάθε φάση αποτελείται από δυο αγωγούς) είναι:

$$C_a = C_b = C_c = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{D_s}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left[ 2^{1/6} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{f}{g}\right)^{1/3} \right]} \text{ F/m}$$

[3.61]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### “Ηλεκτρικά μεγέθη εναέριων γραμμών μεταφοράς”

#### 4.1 Εισαγωγή

Μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος προσδιορίζετε από υπολογισμούς και μελέτες όπου λαμβάνοντα υπόψη, η ισχύς που μεταφέρετε, η απόσταση μεταφοράς, οι τοπικές γεωγραφικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες, το υπάρχον δίκτυο και η φιλοσοφία προστασίας και ασφάλειας του δικτύου. Κυρίως η ισχύς και η απόσταση είναι τα μεγέθη με βάση των οποίων θα προσδιοριστεί, η τάση, ο αριθμός κυκλωμάτων, οι αγωγοί και το κατά πόσο θα εφαρμοστούν αντισταθμίσεις. Οι υπολογισμοί που θα απαιτηθούν αφορούν στα εξής:

- *Μηχανική αντοχή.* Φορτία όπως το ίδιο βάρος, ο άνεμος, ο πάγος σε συνδυασμό με το άνοιγμα της γραμμής (απόσταση μεταξύ πύργων) είναι μεγέθη που θα ληφθούν υπόψη. Τα μεγέθη αυτά αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.
- *Διηλεκτρική αντοχή.* Η τάση λειτουργίας και ενδεχόμενες υπερτάσεις πρέπει να μην προκαλούν υπερπήδηση τόξου μεταξύ των αγωγών και καταστροφές ή διασπάσεις των μονωτικών υλικών.
- *Ηλεκτροτεχνικούς υπολογισμούς επί της μεταφοράς.* Η ισχύς πρέπει να μεταφερθεί χωρίς απaráδεκτα μεγάλη πώση τάσης και παράγωγη ή κατανάλωση έργου ισχύος. Από αυτούς τους υπολογισμούς θα προκύψει, η διατομή του αγωγού και αν ενδεχομένως απαιτείται αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Επίσης πραγματοποιείτε και μελέτη ευστάθειας. Θέματα προστασίας και συντονισμού των μέσων προστασίας εξετάζονται σε σχέση, πάντα με το υπάρχον δίκτυο.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με ηλεκτροτεχνικούς υπολογισμούς. Θα μελετηθούν οι τάσεις, τα ρεύματα, οι ισχύς, οι απώλειες και τα όρια φόρτισης μιας γραμμής. Θα αρχίσουμε με την μελέτη της κοντής γραμμής μεταφοράς, που είναι και συνήθης στην πράξη. Εκεί βάση ενός απλού μοντέλου, θα μελετηθούν βασικά φαινόμενα μεταφοράς. Στην συνέχεια θα γίνει επέκταση σε γραμμές μεγάλου μήκους, δηλαδή, εκεί που η χωρητικότητα της γραμμής φέρει ρεύμα κάπως συγκρίσιμο με το ρεύμα του φορτίου.

Οι γραμμές εξετάζονται στην στάσιμη κατάσταση τους και υποθέτουμε ότι το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο και ημιτονοειδές.

## 4.2 Κοντές γραμμές ,γραμμές με αμελητέο χωρητικό ρεύμα

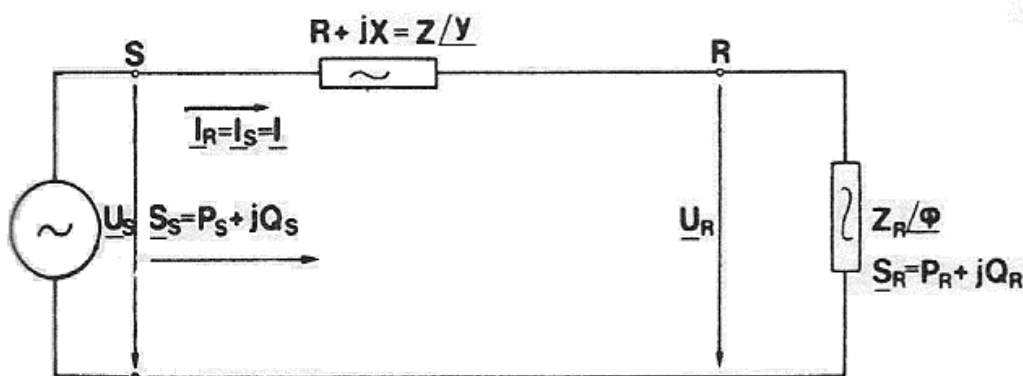
Έστω δύο σταθμοί. Ο σταθμός αποστολής  $S$  και ο σταθμός παραλαβής ισχύος  $R$ , που είναι ένα τριφασικό ισοζυγισμένο φορτίο με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ . Η ενέργεια ρέει από το  $S$  προς το  $R$  μέσω μιας τριφασικής ισοζυγισμένης γραμμής. Θεωρούμε τι ισοδύναμο κύκλωμα του ορθού συστήματος στο σύστημα των συμμετρικών συνιστωσών. Δηλαδή εξετάζουμε μια γραμμή δυο αγωγών.

Κοντή είναι μια γραμμή όπου μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι το ρεύμα στην αρχή  $S$  της γραμμής είναι ίσο με το ρεύμα του φορτίου στο τέρμα  $R$ , δηλαδή τα χωρητικά ρεύματα είναι αμελητέα ( $UC\omega \ll I_R$ ). Τα χωρητικά ρεύματα είναι σε εναέριες γραμμές τα παρακάτω:

Τάση σε kV	Χωρητικό ρεύμα σε A/km
400	0,87
150	0,33
66	0,14
20	0,04

Πίνακας 4.1: χωρητικά ρεύματα εναέριων γραμμών.

Πρέπει εδώ να παρατηρηθεί ότι στην κοντή γραμμή μπορεί να αναχθεί κάθε γραμμή. Όπως θα δούμε, κάθε γραμμή μπορεί να παρασταθεί με ένα ισοδύναμο  $\Pi$ -τετράπολο. Συνεπώς μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα δυο εγκάρσια σκέλη του  $\Pi$ , ανήκουν στην αρχή και στο τέλος. Δηλαδή η αγωγιμότητα του καταναλωτή και της πηγής, προσαυξάνονται με την εγκάρσια αγωγιμότητα του  $\Pi$ -τετράπολο.



Σχήμα 4.1: Κοντή γραμμή μεταφοράς.

Θεωρούμε το μοντέλο του σχήματος 4.1. Προφανώς μεταφορά ισχύος γίνεται μόνο αν υπάρχει ρεύμα, δηλαδή αν  $\bar{U}_S \neq \bar{U}_R$ . Στην πραγματικότητα οι τάσεις  $U_S$  και  $U_R$  διαφέρουν ελάχιστα σε μέτρο, έτσι σ' αυτή την περίπτωση, οι φάσεις τους πρέπει να διαφέρουν για να υπάρχει μεταφορά ενέργειας από  $S$  σε  $R$ . Την κοντή γραμμή περιγράφει η εξίσωση:

$$\bar{U}_S = \bar{U}_R + \bar{I} \cdot \bar{Z}$$

[4.1]

Η διαφορά των μέτρων  $\bar{U}_S - \bar{U}_R$  λέγεται *πτώση τάσης* (Regulation, Spannungsabfall) και θα υπολογιστεί παρακάτω.

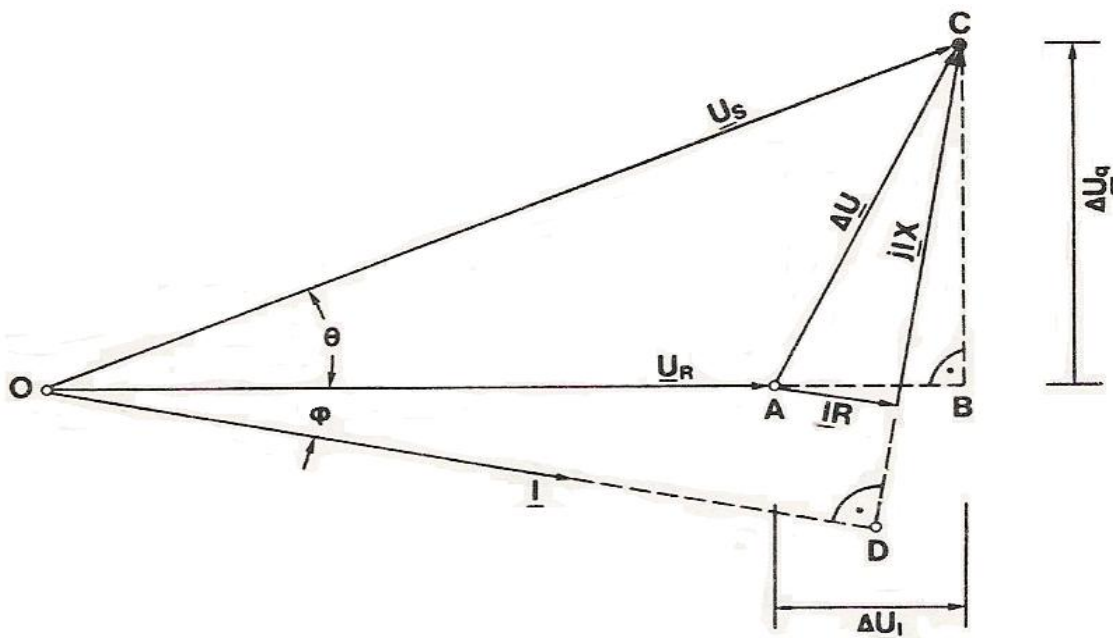
**4.2.1 Πτώση τάσης σε κοντές γραμμές**

Για δεδομένη ενεργό και άεργο ισχύ  $P_R, Q_R$  στο φορτίο, μπορεί να γίνει η παρακάτω ανάλυση για την πτώση τάσης. Ορίζουμε σύμφωνα με το σχήμα 4.1 την διαμήκη πτώση τάσης  $\Delta U_I$  και την εγκάρσια πτώση τάσης  $\Delta U_q$ .

$$\Delta U_I = IR\cos\varphi + IX\sin\varphi = \frac{P_R R + Q_R X}{U_R} \text{ (διαμήκης πτώση τάσης)} \quad [4.2]$$

$$\Delta U_q = IX\cos\varphi - IR\sin\varphi = \frac{P_R X - Q_R R}{U_R} \text{ (εγκάρσια πτώση τάσης)} \quad [4.3]$$

Για να βρούμε τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων  $U_R, U_S$ , δηλαδή και την πτώση τάσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια από τις σχέσεις που προκύπτουν από το διανυσματικό διάγραμμα που παραθέτουμε:



Σχήμα 4.2: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων μιας κοντή γραμμή μεταφοράς.

$$U_S = \left\{ (U_R + \Delta U_I)^2 + (\Delta U_q)^2 \right\}^{1/2}$$

[4.4]

$$U_S = \{(U_R + IR\cos\varphi + IX\sin\varphi)^2 + (IX\cos\varphi - IR\sin\varphi)^2\}^{1/2}$$

[4.5]

$$U_S = \left[ \left( U_R + \frac{P_R R + Q_R X}{U_R} \right)^2 + \left( \frac{P_R X - Q_R R}{U_R} \right)^2 \right]^{1/2}$$

[4.6]

Επειδή η ποσότητα  $(\Delta U_q)^2$  είναι αμελητέα ως προς την ποσότητα  $(U_R + \Delta U_I)^2$ , προκύπτει από την παραπάνω σχέση, η προσέγγιση:

$$U_S \approx U_R + \frac{P_R R + Q_R X}{U_R} = U_R + IR\cos\varphi + IX\sin\varphi$$

[4.7]

Η γωνία  $\theta$ , η διαφορά φάσης μεταξύ  $\bar{U}_R$  και  $\bar{U}_S$  είναι:

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta U_q}{U_S}$$

Η σημασία των όρων <<διαμήκη>> και <<εγκάρσια>> είναι όπως έπεται: Για γωνία  $\theta$  μικρή ( $\cos\theta \approx 1$ ), πράγμα που ισχύει πολλές φορές στην πράξη, η πτώση τάσης ισούται με την κατά μήκος πτώση τάσης:

$$\Delta U_I = U_S \cos\theta - U_R \approx U_S - U_R \text{ για } \theta \rightarrow 0$$

[4.8]

Για γραμμές με αμελητέες απώλειες  $R=0$  προκύπτει από την έκφραση της εγκάρσιας πτώσης τάσης, ότι αυτή είναι ανάλογη της μεταφερόμενης ισχύος:

$$P_R = \frac{U_R}{X} \Delta U_q = \frac{U_R \cdot U_S}{X} \sin\theta$$

[4.9]

#### 4.2.2 Ο συντελεστής ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος στην αρχή της γραμμής είναι προφανώς  $\cos(\theta+\varphi)$ . Είναι διαφορετικός από τον συντελεστή ισχύος στο τέλος της γραμμής και ισχύει η παρακάτω σχέση γι' αυτόν:

$$\frac{P_S}{S_S} = \cos(\varphi + \theta) = \frac{U_R \cos\varphi + I_R R}{U_S}$$

[4.10]

### 4.2.3 Πτώση τάσης σε γραμμή με αμελητέα αντίσταση

Γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (150 ή 400 kV) έχουν κυρίως επαγωγική αντίδραση (X/R) και η αντίσταση R μπορεί σε πρώτη προσέγγιση, να αμεληθεί.

Για τις τάσεις προκύπτει από την σχέση 4.6:

$$\frac{U_S}{U_R} = \left[ \left( 1 + \frac{Q_R X}{U_R^2} \right)^2 + \left( \frac{P_R X}{U_R^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [4.11]$$

Αναλύοντας την παραπάνω σχέση κατά Taylor έχουμε:

$$\frac{U_S}{U_R} = 1 + \frac{Q_R X}{U_R^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{Q_R X}{U_R^2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{P_R X}{U_R^2} \right)^2 + \dots \quad [4.12]$$

Υπενθυμίζετε ότι ισχύει  $(1 + \varepsilon)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}\varepsilon + \dots$ , για  $\varepsilon < 1$ .

Επειδή ο λόγος  $U_S/U_R$  είναι κοντά στην μονάδα, οι όροι  $Q_R X/U_R^2$  και  $P_R X/U_R^2$  είναι συνήθως αρκετά μικρότεροι της μονάδας. Αν παραληφτούν τα τετράγωνα τους, έχουμε ότι η πτώση τάσης της γραμμής με μηδενική αντίσταση είναι:

$$U_S \approx U_R + \frac{Q_R X}{U_R} \quad [4.13]$$

Σε γραμμές με αμελητέες απώλειες η πτώση τάσης είναι ανάλογη του άεργου φορτίου που μεταφέρεται.

Ισχύει δε ότι:

Για επαγωγικό φορτίο  $Q_R > 0$  και  $U_S > U_R$  έχουμε πτώση τάσης στον καταναλωτή

και για χωρητικό φορτίο  $Q_R < 0$  και  $U_S < U_R$  έχουμε ανύψωση τάσης

Από τα παραπάνω μπορούμε να διεξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Η μεταφορά ισχύος, σε μια γραμμή χωρίς σημαντικές απώλειες ολικής αντίδρασης X, γίνεται κυρίως με στροφή του ανύσματος της τάσης κατά  $\theta$  και ισούται με  $U_R U_S \sin\theta / X$ . Το μέγιστο της είναι  $U_R U_S / X$ . Συνήθως η στροφή  $\theta$  είναι πολύ μικρή  $\theta < 10^\circ$
- Για γραμμές υψηλής τάσης με αμελητέες απώλειες, η πτώση τάσης (διαφορά μέτρων των τάσεων) προκαλείται κυρίως από το μεταφερόμενο άεργο φορτίο  $Q_R$ .

- Η εγκάρσια συνιστώσα της πτώσης τάσης είναι ανάλογη της μεταφερόμενης ισχύος, για κοντές γραμμές με αμελητέες απώλειες και  $\theta \rightarrow 0$ .

#### 4.2.4 Σχέσεις ισχύος σε κοντές γραμμές

Η μιγαδική ισχύς  $\bar{S}_R$  του παραλαμβάνοντα άκρου R (σχήμα 4.1) εκφράζεται σαν συνάρτηση των  $\bar{U}_R$ ,  $\bar{U}_S$  και της σύνθετης αντίστασης της γραμμής ως εξής:

$$\bar{S}_R = \bar{U}_R \cdot \bar{I}^* = \frac{\bar{U}_R(\bar{U}_S^* - \bar{U}_R^*)}{\bar{Z}^*} = \frac{\bar{U}_R(\bar{U}_S^* - \bar{U}_R^*)\bar{Z}^*}{Z^2} \quad [4.14]$$

Ο αστερίσκος συμβολίζει το συζυγές ενός μιγαδικού. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει η έκφραση της  $\bar{S}_R$  σαν φασικού διανύσματος ως εξής:

$$\bar{S}_R = \frac{U_R U_S}{Z} \underline{|y - \theta} - \frac{U_R^2}{Z^2} \underline{|y} \quad [4.15]$$

Όπου  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ  $U_R$ ,  $U_S$  και  $y$  είναι η γωνία της σύνθετης αντίστασης της γραμμής  $\bar{Z} = Z \underline{|y}$ .

Η εισερχόμενη ενεργός ή άεργος ισχύς στον καταναλωτή υπολογίζεται από την  $S_R$ , όπως έπεται:

$$P_R = \frac{U_R U_S}{Z} \cos(y - \theta) - \frac{U_R^2}{Z^2} \cos y \quad [4.16]$$

$$Q_R = \frac{U_R U_S}{Z} \sin(y - \theta) - \frac{U_R^2}{Z^2} \sin y \quad [4.17]$$

Για γραμμές χωρίς απώλειες, δηλαδή  $y=90^\circ$ , οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται ως εξής:

$$P_R = \frac{U_R U_S}{X} \sin \theta$$

$$Q_R = \frac{U_R U_S}{X} \cos \theta - \frac{U_R^2}{Z} \quad R \rightarrow 0 \quad [4.18]$$



Με ανάλογους υπολογισμούς προκύπτουν για το άκρο αποστολής S οι σχέσεις:

$$P_S = \frac{U_S^2}{Z} \cos y - \frac{U_S U_R}{Z} \cos(y + \theta) \quad [4.19]$$

$$Q_S = \frac{U_S^2}{Z} \sin y - \frac{U_S U_R}{Z} \sin(y + \theta) \quad [4.20]$$

Και για  $R \rightarrow 0$

$$P_S = \frac{U_S U_R}{X} \sin \theta$$

$$Q_R = \frac{U_R^2}{X} - \frac{U_S U_R}{X} \cos \theta \quad [4.21]$$

Η άεργος ισχύς που καταναλίσκει η γραμμή είναι σε κάθε περίπτωση:

$$Q_{\text{γραμμής}} = 3XI^2 = \frac{P_R^2}{U_N^2 \cos^2 \varphi} \quad [4.22]$$

#### 4.2.5 Λειτουργικό διάγραμμα μιας κοντής γραμμής

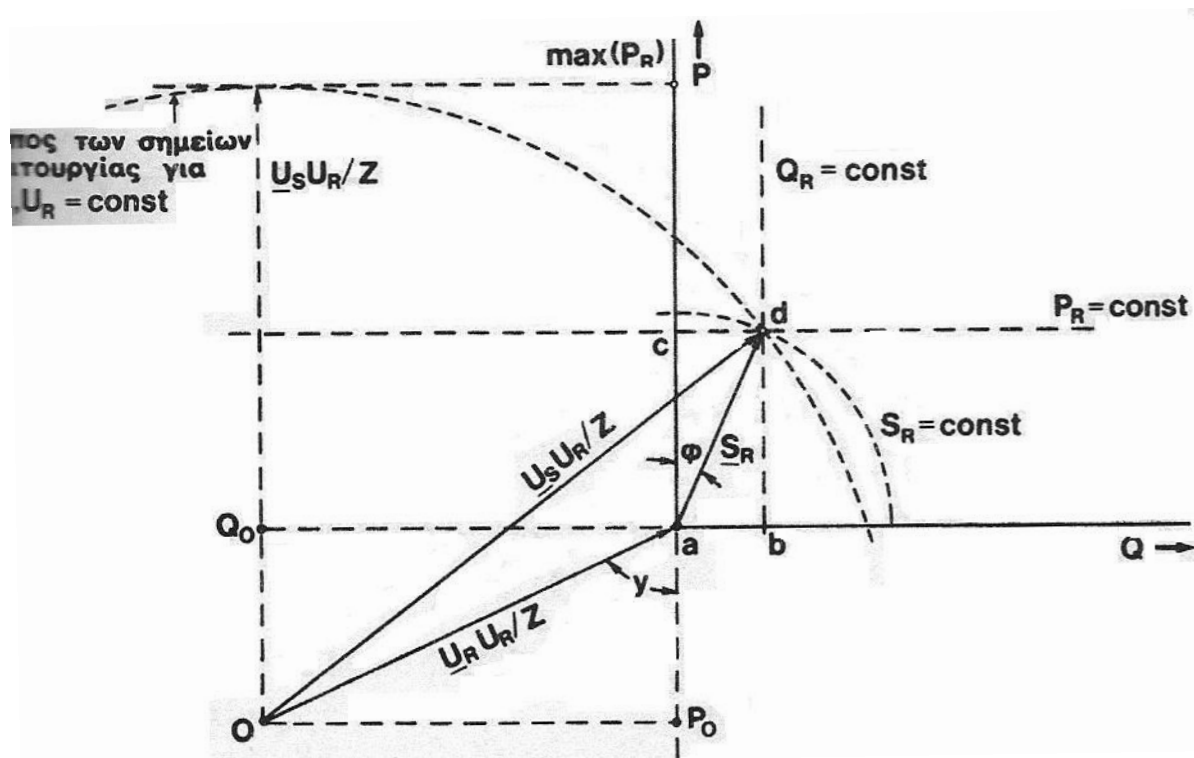
Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με ένα διάγραμμα που χρησιμοποιείτε κυρίως για την μελέτη και εποπτεία των φαινομένων μεταφοράς. Στο σχήμα 4.3 απεικονίζετε το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων, έτσι όπως θα το χρησιμοποιούσαμε αν ξέραμε την τάση  $\bar{U}_R$  και θέλαμε να βρούμε την τάση αποστολής  $\bar{U}_S$ , για διάφορα φορτία  $P_R$  και  $Q_R$ , στην διάταξη του σχήματος 4.1. Αν χαράξουμε έναν άξονα P με γωνία  $\varphi$  ως προς την πτώση τάσης  $\bar{I} \cdot \bar{Z}$ , τότε ο άξονας αυτός θα έχει γωνία ως προς το διάνυσμα  $\bar{U}_R$  ίση προς  $y$ , όπου  $y$  η γωνία της αντίστασης της γραμμής  $y = \arctan(X/R)$ . Αυτό είναι προφανές γιατί το διάνυσμα  $\bar{I} \cdot \bar{Z}$  έχει στραφεί ως προς το  $\bar{I}$  κατά  $y$  και το  $\bar{I}$  ως προς  $\bar{U}_R$  κατά  $\varphi$ . Συνεπώς για σταθερό  $\bar{U}_R$  και διάφορα  $P_R$ ,  $Q_R$  φορτία ο άξονας P είναι σταθερός και σχηματίζει γωνία  $y$  ως προς την τάση  $\bar{U}_R$ . Χαράσσουμε επίσης έναν κάθετο προς τον άξονα P, τον άξονα Q, όπως στο σχήμα 4.4.

Προφανώς, επειδή τα  $\bar{Z}$  και  $\bar{U}_R$  θεωρήθηκαν ότι μένουν σταθερά, θα έχουμε ότι οι προβολές του  $\bar{I} \cdot \bar{Z}$  επί των αξόνων P και Q είναι ανάλογες των  $I \cos \varphi$  και  $I \sin \varphi$  αντίστοιχα, δηλαδή και ανάλογες των  $P_R$  και  $Q_R$ . Το δε μήκος ad είναι ανάλογο της φαινομένης ισχύος  $\bar{S}_R = P_R + iQ_R$ .



$$P_0 = -\frac{U_R^2 \cdot R}{Z^2}, Q_0 = -\frac{U_R^2 \cdot X}{Z^2}, Z^2 = R^2 + X^2$$

[4.24]



Σχήμα 4.4: Γεωμετρικοί τόποι σημείων λειτουργίας κοντή γραμμή.

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί στον καταναλωτή προκύπτει από το σχήμα ως εξής:

$$P_R(\max) = -\frac{U_S U_R}{Z} - P_0 = \frac{U_S U_R}{Z} - \frac{U_R^2}{Z} \cos y$$

[4.25]

Ας δούμε τώρα σε τι βοηθά το λειτουργικό διάγραμμα. Σε κάθε τάση  $U_S$  αντιστοιχεί στο διάγραμμα ένας κύκλος. Έτσι μπορούμε για τα επιτρεπόμενα όρια της πτώσης τάσης να βρούμε τον γεωμετρικό τόπο των σημείων λειτουργίας που είναι ένας δακτύλιος. Παρομοίως για ένα μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φορτίου  $I_{th}$  μπορεί επίσης να βρεθεί ο γεωμετρικός τόπος των σημείων λειτουργίας που είναι ένας κύκλος με ακτίνα  $S_R = \sqrt{3} \cdot I_{th} U_R$ . Στα κυκλικά διαγράμματα τριφασικών γραμμών οι  $U_R$ ,  $U_S$  είναι πολικές τάσεις και οι  $P_R$ ,  $Q_R$  τριφασικές ισχύς. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν  $U_R$ ,  $U_S$ , φασικά μεγέθη και  $P_R$ ,  $Q_R$  ισχύς ανά φάση.

#### 4.2.6 Έλεγχος της τάσης

Η τάση σε καταναλωτές χαμηλής τάσης, δηλαδή σε δίκτυα διανομής ΧΤ πρέπει να βρίσκετε σε ορισμένα όρια, συνήθως  $\pm 5\%$ . Αυτό επιβάλλεται λόγω απαιτήσεων των καταναλωτών. Σε γραμμές μεταφοράς επιτρέπονται και μεγαλύτερες, αλλά περιορισμένες αποκλίσεις που δεν ξεπερνούν τα  $\pm 10\%$ . Η ανοχή της τάσης μεταφοράς προσδιορίζετε από λόγους που επιβάλουν οι συσκευές μεταφοράς. Η τάση στον καταναλωτή μπορεί να διορθωθεί με δυο ενέργειες:

- Προφανώς αλλάζοντας τον λόγο μετασχηματισμού, αλλάζει η τάση. Αυτό γίνεται συνήθως στα όρια του  $\pm 12\%$  με ειδικούς διακόπτες Jansen υπό φορτίο, λέγονται και on load tap changer. Εκτός φορτίου, σε μετασχηματιστές διανομής, γίνεται επίσης ρύθμιση της τάσης με αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού με απλούστερους διακόπτες .
- Η τάση μεταβάλλεται αλλάζοντας το άεργο φορτίο στην θέση του καταναλωτή με αυτεπαγωγή L ή χωρητικότητα C παράλληλα στο φορτίο ή ενδεχομένως με χωρητικότητα C σε σειρά με το φορτίο.

Πρέπει δε από τα προαναφερθέντα να αναμένουμε ότι ,το χωρητικό άεργο φορτίο αυξάνει την τάση ενώ το επαγωγικό φορτίο την ελαττώνει.

Συμπεράσματα:

Για γραμμές με μικρές απώλειες  $R \approx 0$  ισχύουν τα παρακάτω:

- Μικρός συντελεστής ισχύος (άεργο φορτίο) θα προκαλέσει μεγάλη πτώση τάσης.
- Διόρθωση του  $\cos\phi$  με πυκνωτές ελαττώνει την πτώση τάσης ή και αντιστρέφει το πρόσημο της, δηλαδή μπορεί  $U_S < U_R$
- Μεγάλη χωρητικότητα στο τέλος της γραμμής προσκαλεί υπέρταση στον καταναλωτή.

Η κοντή γραμμή του σχήματος 4.2 που εξετάσαμε στο κεφάλαιο αυτό δεν ισχύει προφανώς στην πράξη, σε όλες της περιπτώσεις. Αν όμως μπορούσαμε, όπως αναφέρθηκε στην αρχή, να παραστήσουμε την γραμμή με ένα Π ισοδύναμο κύκλωμα, τότε προσανξάνοντας τον καταναλωτή και το άκρο αποστολής, με της αγωγιμότητες των κάθετων σκελών του Π, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τους παραπάνω τύπους ή συμπεράσματα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε ότι αυτό είναι πάντα δυνατό. Συνήθως δε μέχρι 300km μπορούμε, χωρίς μεγάλο σφάλμα, να πούμε ότι, η διαμήκης αντίδραση του Π συνίσταται από την ολική αυτεπαγωγή και την ολική αντίσταση του αγωγού, οι δε δυο εγκάρσιες αγωγιμότητες είναι ίσες και συνίστανται από την ολική χωρητικότητα και την ολική εγκάρσια αγωγιμότητα. Σε γραμμές μεγαλύτερου μήκους ισχύουν τα παραπάνω με μικρές διορθώσεις.

### 4.3 Η ομοιογενής γραμμή

#### 4.3.1 Διαφορική εξίσωση της ομοιογενούς γραμμής

Υποθέτουμε μια ομοιογενή γραμμή, δυο παράλληλων αγωγών, όπου η μεταφορά ισχύος πραγματοποιείται κατά μήκος της γραμμής και όχι εγκάρσια. Αυτό συμβαίνει σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντιδιαστολή με τις γραμμές διεγερόμενες με τάση υψηλής συχνότητας, όπου μπορεί να έχουμε και εγκάρσια ακτινοβολία ενέργειας. Η αποκλειστικά διαμήκης μεταφορά ενέργειας πραγματοποιείται μόνο όταν η απόσταση  $d$  των δυο αγωγών είναι αμελητέα σε σχέση με το μήκος κύματος  $\lambda$  (6000km για εναέριες γραμμές 50Hz). Η συνθήκη αυτή πληρούται στα κυκλώματα μεταφοράς ισχύος αρκετά ικανοποιητικά.

$$d (=0,6 \dots 15\text{m}) \ll \lambda (=6 \cdot 10^6\text{m})$$

[4.26]

Θεωρούμε ότι για την γραμμή και τον καταναλωτή ισχύουν τα παρακάτω:

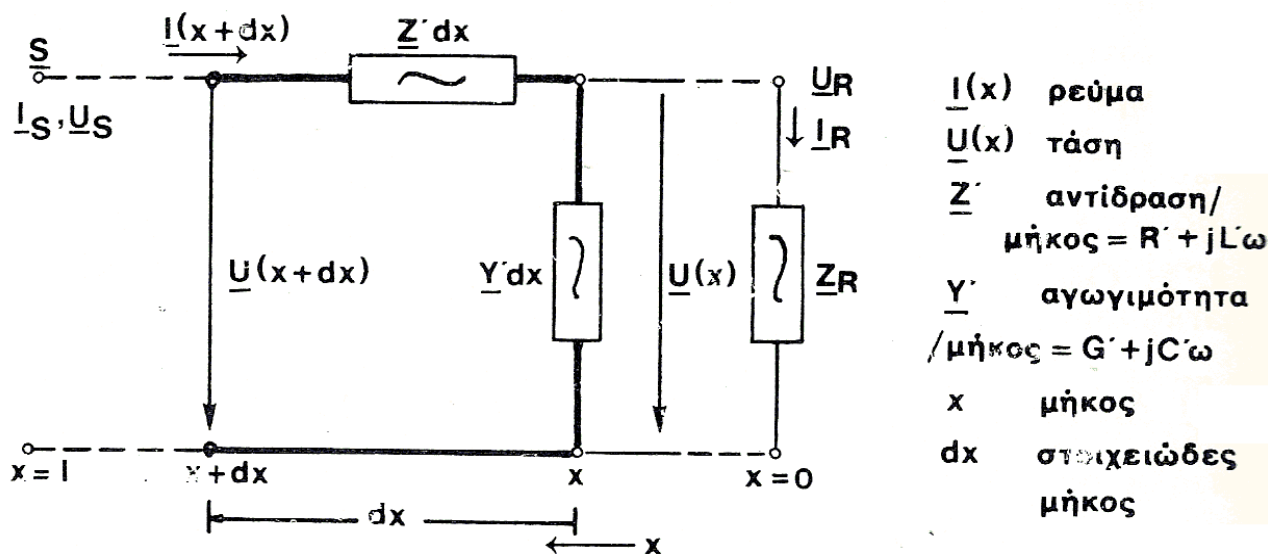
- Οι αντιστάσεις, αυτεπαγωγές και χωρητικότητες ανά μονάδα μήκους είναι σταθερές.
- Η πηγή τροφοδότησης δίνει ημιτονοειδή τάση με σταθερή συχνότητα και εξετάζουμε την στάσιμη κατάσταση.
- Υπάρχουν μόνο διαμήκη κύματα (η ακτινοβολία ενέργειας κάθετα στην γραμμή είναι μηδέν).
- Το σύστημα είναι ισοζυγισμένο στις τρεις φάσεις του και θεωρούμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ορθού συστήματος.

Θεωρούμε δεδομένο καταναλωτή με τάση  $\bar{U}_R$  και ρεύμα  $\bar{I}_R$ . Προσομοιώνουμε κάθε στοιχείο της γραμμής όπως δείχνει το σχήμα 4.5 με έναν διαμήκη κλάδο σύνθετης αντίστασης  $\bar{Z}' dx$  και ένα εγκάρσιο κλάδο σύνθετης αγωγιμότητας  $\bar{Y} dx$ .

Η προσομοίωση αυτή με τα μιγαδικά μεγέθη  $\bar{I}, \bar{U}, \bar{Z}', \bar{Y}'$ , ισχύει για την στάσιμη κατάσταση, δηλαδή ισχύει όταν κάθε μέγεθος μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και έχει σταθερό μέτρο, δηλ. ανεξάρτητο του χρόνου. Σε κάθε στοιχείο της γραμμής υπάρχουν αλλαγές στην τάση  $d\bar{U}$  και στο ρεύμα  $d\bar{I}$  μεταξύ αρχής  $x$  και τέλους  $x+dx$  του στοιχείου και δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις. Η φορά του ρεύματος και του μήκους  $x$  είναι αντίθετα και η αρχή μέτρησης των μηκών  $x=0$  είναι η θέση του καταναλωτή.

$$\frac{d\bar{U}}{dx} = \bar{Z}' \cdot \bar{I}, \quad \frac{d\bar{I}}{dx} = \bar{Y}' \cdot \bar{U}$$

[4.27]



Σχήμα 4.5: Τμήμα στοιχειώδους μήκους  $dx$  μιας μακριάς ομογενούς γραμμής μεταφοράς.

Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση ως προς  $x$  προκύπτουν, μετά από αντικαταστάσεις, οι διαφορικές εξισώσεις της ομοιογενούς γραμμής.

$$\frac{d^2 \bar{U}}{dx^2} = \bar{Z}' \cdot \bar{Y}' \cdot \bar{U} \quad , \quad \frac{d^2 \bar{I}}{dx^2} = \bar{Z}' \cdot \bar{Y}' \cdot \bar{I}$$

[4.28]

Οι οριακές συνθήκες θεωρούνται δεδομένες και είναι ότι οι τάσεις και τα ρεύματα για  $x=0$  εκφράζονται ως εξής:

$$\bar{U}(0) = \bar{U}_R, \quad \bar{I}(0) = \bar{I}_R$$

[4.29]

Η λύση του συστήματος δίνεται από την γενική μορφή:

$$\begin{aligned} \bar{U}(x) &= \bar{A}_1 e^{\bar{\gamma}x} + \bar{A}_2 e^{-\bar{\gamma}x} \\ \bar{I}(x) &= \frac{\bar{A}_1 e^{\bar{\gamma}x} - \bar{A}_2 e^{-\bar{\gamma}x}}{\bar{Z}_0} \end{aligned}$$

[4.30]

όπου:

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}' \cdot \bar{Y}'} = \eta \text{ σταθερά αλλαγής φάσης και απόσβεσης ή σταθερά μετάδοσης,}$$

$$\bar{Z}_0 = \sqrt{\frac{\bar{Z}'}{\bar{Y}'}} = \text{κυματική αντίσταση}$$

$\bar{A}_1, \bar{A}_2$  είναι σταθερές που προσδιορίζονται από τις οριακές συνθήκες. Εφαρμόζοντας τις λύσεις (4.30) για  $x=0$  και προσθαφαιρώντας τις προκύπτουν οι σταθερές:

$$\bar{A}_1 = \frac{1}{2} (\bar{U}(0) + \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}(0)) = \frac{1}{2} (\bar{U}_R + \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_R)$$

$$\bar{A}_2 = \frac{1}{2} (\bar{U}(0) - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}(0)) = \frac{1}{2} (\bar{U}_R - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_R)$$

[4.31]

Αντικαθιστώντας τα  $\bar{A}_1, \bar{A}_2$  στις λύσεις των διαφορικών εξισώσεων και μετά από πράξεις προκύπτουν οι εξισώσεις τάσεων και ρευμάτων της ομοιογενούς γραμμής:

$$\bar{U}(x) = \cosh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{U}_R + \sinh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_R$$

$$\bar{I}(x) = \sinh(\bar{\gamma}x) \cdot \frac{1}{\bar{Z}_0} \cdot \bar{U}_R + \cosh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{I}_R$$

[4.32]

Για το άκρο αποστολής,  $x=l$ , θα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\bar{U}_S = \cosh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{U}_R + \sinh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_R$$

$$\bar{I}_S = \sinh(\bar{\gamma}l) \cdot \frac{1}{\bar{Z}_0} \cdot \bar{U}_R + \cosh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{I}_R$$

[4.33]

Αυτές αντιστρεφόμενες δίνουν:

$$\bar{U}_R = \cosh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{U}_S - \sinh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_S$$

$$\bar{I}_R = -\sinh(\bar{\gamma}l) \cdot \frac{1}{\bar{Z}_0} \cdot \bar{U}_S + \cosh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{I}_S$$

[4.34]

Οι υπερβολικές συναρτήσεις υπολογίζονται με τους παρακάτω τύπους:

$$\cosh(\bar{\gamma}l) = \cosh(al) \cdot \cosh(bl) + i \sinh(al) \cdot \sinh(bl)$$

$$\sinh(\bar{\gamma}l) = \sinh(al) \cdot \cosh(bl) + i \cosh(al) \cdot \sinh(bl)$$

όπου  $\bar{\gamma} = \alpha + i \beta$

### 4.3.2 Φυσικές ερμηνείες των λύσεων

Θα αναλύσουμε αρχικά τις σταθερές  $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{Z}$

Σταθερά μετάδοσης  $\bar{\gamma}$

Η σταθερά μετάδοσης  $\bar{\gamma}$  είναι μιγαδική και συνεπώς έχει ένα πραγματικό μέρος  $\alpha$  και ένα φανταστικό  $\beta$ . Το  $\alpha$  καλείτε *συντελεστής απόσβεσης* και το  $\beta$  *συντελεστής στροφής φάσης* και ισχύει:

$$\begin{aligned}\bar{\gamma} = \alpha + i\beta &= \sqrt{\bar{Z}' \cdot \bar{Y}'} = \sqrt{(R' + iL'\omega) \cdot (G' + iC'\omega)} = \\ &= \sqrt{R'G' - L'C'\omega^2 + i(L'G' + R'C')\omega}\end{aligned}\quad [4.35]$$

Όπου  $\bar{Z}'$ ,  $\bar{Y}'$  η διαμήκης αντίσταση και η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής. Αυτές με την βοήθεια του σχήματος 4.6 μπορούν να αναλυθούν ως εξής:

$$\begin{aligned}\bar{Z}' &= R' + iL'\omega = Z'e^{i(\frac{\pi}{2}-\varepsilon)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow R' &= Z'\cos\left(-\frac{\pi}{2}-\varepsilon\right) \\ \Leftrightarrow L'\omega &= Z'\sin\left(\frac{\pi}{2}-\varepsilon\right)\end{aligned}\quad [4.36]$$

$$\begin{aligned}\bar{Y}' &= G' + iC'\omega = Y'e^{i(\frac{\pi}{2}-\delta)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow G' &= Y'\cos\left(-\frac{\pi}{2}-\delta\right) \\ \Leftrightarrow C'\omega &= Y'\sin\left(\frac{\pi}{2}-\delta\right)\end{aligned}\quad [4.37]$$

Οι γωνίες  $\varepsilon$ ,  $\delta$  λέγονται γωνίες απωλειών και ισχύει:

$$\tan\varepsilon = \frac{R'}{L'\omega}, \quad \tan\delta = \frac{G'}{C'\omega}\quad [4.38]$$





Σχήμα 4.6: Ορισμός γωνιών απωλειών  $\epsilon$ ,  $\delta$  μιας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατόπιν τούτου η σταθερά μετάδοσης γράφεται:

$$\bar{\gamma} = \sqrt{Z' \cdot Y'} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta + \epsilon}{2}\right)} = \frac{\sqrt{L' \cdot C'} \omega}{\sqrt{\cos \epsilon \cdot \cos \delta}} \cdot \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta + \epsilon}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta + \epsilon}{2}\right) \right] \quad [4.39]$$

Συνεπώς τα πραγματικά και φανταστικά μέρη της σταθεράς μετάδοσης γ είναι:

$$\alpha = \beta \cdot \tan\left(\frac{\delta + \epsilon}{2}\right) = \omega \sqrt{L' \cdot C'} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\delta + \epsilon}{2}\right)}{\sqrt{\cos \epsilon \cdot \cos \delta}} \quad [4.40]$$

$$\beta = \omega \sqrt{L' \cdot C'} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\delta + \epsilon}{2}\right)}{\sqrt{\cos \epsilon \cdot \cos \delta}} \quad [4.41]$$

$$\bar{Z}_0 = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{L' \cdot \cos \delta}{C' \cdot \cos \epsilon}} \cdot e^{j\left(\frac{\delta - \epsilon}{2}\right)} = Z_0 e^{j\zeta} \quad [4.42]$$

όπου

$$\zeta = \frac{\delta - \epsilon}{2}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L' \cdot \cos \delta}{C' \cdot \cos \epsilon}}$$

Συνήθως είναι  $\delta < \epsilon$  και  $\zeta < 0$

Για μηδενικές απώλειες  $\varepsilon=\delta=0$  προκύπτουν τα εξής:

$$R' = G' = 0$$

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \omega \sqrt{L' \cdot C'}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

[4.43]

Για γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (>60kV) με μικρές απώλειες, μπορούμε να δεχτούμε τις παρακάτω απλοποιήσεις:

$$\text{Για } \frac{\omega L'}{R} > 10, \frac{\omega C}{G'} > 10$$

$$\alpha = 0,5 \left( \frac{R'}{Z_0 + G'Z_0} \right)$$

$$\beta = \omega \sqrt{L' \cdot C'}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

[4.44]

*Χρονικές συναρτήσεις ρευμάτων και τάσεων*

Οι λύσεις που δίνονται από τις προηγούμενες μιγαδικές εξισώσεις της γραμμής δεν περιέχουν το χρόνο, αλλά δίνουν μόνο τα στρεφόμενα διανύσματα, Αυτά όμως μπορούν να μετατραπούν σε συναρτήσεις χρόνου, αν πολλαπλασιάσουμε τα διανύσματα αυτά με τον στροφέ  $e^{i\omega t}$  και θεωρήσουμε το πραγματικό μέρος του αποτελέσματος. Ο πολλαπλασιασμός της τάσης με τον παραπάνω στροφέα δίνει:

$$\bar{U}(x) \cdot e^{i\omega t} = \bar{A}_1 e^{\gamma x + i\omega t} + \bar{A}_2 e^{-\gamma x + i\omega t} = A_1 e^{\alpha x} \cdot e^{i(\alpha_1 + \omega t + \beta x)} + A_2 e^{-\alpha x} \cdot e^{i(\alpha_2 + \omega t - \beta x)}$$

Παρόμοια θα προκύψει και για το ρεύμα:

$$\bar{I}(x) \cdot e^{i\omega t} = \frac{A_1}{Z_0} e^{\alpha x} \cdot e^{i(\alpha_1 + \omega t + \beta x)} - \frac{A_2}{Z_0} e^{-\alpha x} \cdot e^{i(\alpha_2 + \omega t - \beta x)}$$

Όπου  $\bar{A}_1 = A_1 e^{i\alpha_1}$ ,  $\bar{A}_2 = A_2 e^{i\alpha_2}$ ,  $\bar{Z}_0 = Z_0 e^{i\zeta}$

Βλέπουμε από τα παραπάνω ότι οι στιγμιαίες τιμές της τάσης και του ρεύματος, εξαρτώνται από τον τόπο  $x$  και τον χρόνο  $t$  και θα της συμβολίσουμε με  $u(x, t)$  και  $i(x, t)$  αντίστοιχα. Αυτές ισούνται με τα πραγματικά μέρη των άνω συναρτήσεων:

$$u(x, t) = \text{Re}(\bar{U}(x)e^{i\omega t}) = u_1 e^{\alpha x} \cdot \cos(\alpha_1 + \omega t + \beta x) + u_2 e^{-\alpha x} \cdot \cos(\alpha_2 + \omega t - \beta x) \quad [4.45]$$

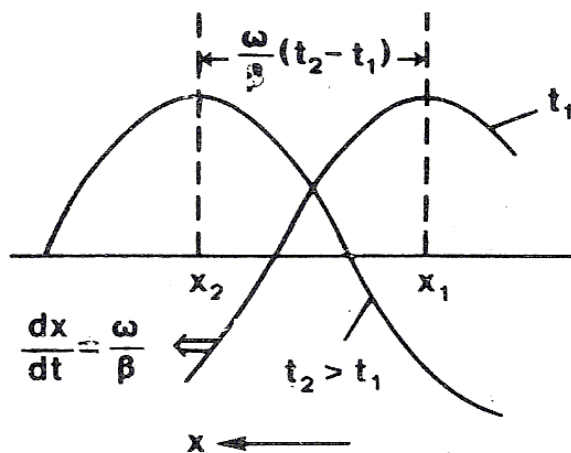
$$i(x, t) = \text{Re}(\bar{I}(x)e^{i\omega t}) = i_1 e^{\alpha x} \cdot \cos(\alpha_1 - \zeta + \omega t + \beta x) - i_2 e^{-\alpha x} \cdot \cos(\alpha_2 - \zeta + \omega t - \beta x) \quad [4.46]$$

Όπου:  $u_1 = A_1$  ,  $u_2 = A_2$  ,  $i_1 = u_1/Z_0$  ,  $i_2 = u_2/Z_0$

Η συνάρτηση  $\cos(\alpha_2 + \omega t - \beta x)$  παριστάνει ένα κύμα, κινούμενο προς τα αυξανόμενα  $x$  με ταχύτητα  $c = \omega/\beta$ . Αυτό εξάγεται αν εξισώσουμε τις φάσεις σε δύο διαφορετικούς χρόνους  $t_1$ ,  $t_2$  με μια ,αυθαίρετα εκλεγμένη, τιμή  $\varphi$  , π.χ.  $\varphi=0^\circ$ .

$$\alpha_2 + \omega t_1 - \beta x_1 = \alpha_2 + \omega t_2 - \beta x_2 = \varphi = \text{const} \quad [4.47]$$

$$\omega(t_2 - t_1) = \beta(x_2 - x_1) \quad [4.48]$$



Σχήμα 4.7 Οδεύον κύμα  $\cos(\omega t - \beta x)$ . Θέση του κύματος για δύο διαφορετικούς χρόνους  $t_1 < t_2$ .

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \cdot \frac{\sqrt{\cos \epsilon \cdot \cos \delta}}{\cos \frac{\epsilon + \delta}{2}} : \text{ταχύτητα όδευσης μιας σταθερής φάσης} \quad [4.49]$$

Η συνάρτηση  $e^{-\alpha x} \cdot \cos(\alpha_2 + \omega t - \beta x)$  παριστάνει κύμα που προχωρεί προς τα αυξανόμενα  $x$  και έχει απόσβεση της μέγιστης τιμής του κατά  $e^{-\alpha x}$ .

Η ταχύτητα όδευσης σημείων μιας σταθερής φάσης  $\varphi$ , είναι σταθερή και ίση με  $dx/dt = \omega/\beta$ .

Ομοίως έχουμε ότι η συνάρτηση  $e^{\alpha x} \cdot \cos(\alpha_2 + \omega t + \beta x)$  παριστάνει κύμα οδεύον προς τα ελαττούμενα  $x$  με απόσβεση  $e^{+\alpha x}$ . Το κύμα έτσι όπως οδεύει προς τα αυξανόμενα ή ελαττούμενα  $x$  αποσβήνεται πάντα με την όδευση κατά  $e^{\pm \alpha x}$ , αντίστοιχα. Η ταχύτητα όδευσης είναι όμως πάντα  $\omega/\beta$ .

Εστί η τάση και το ρεύμα της γραμμής αποτελούνται το καθένα από δυο οδεύοντα κύματα και μάλιστα ημιτονοειδός αποσβιόμενα κατά την διεύθυνση προς την οποία κινούνται. Το ένα κύμα οδεύει από την πηγή προς τον καταναλωτή και το άλλο από τον καταναλωτή προς την πηγή. Από τα κύματα τάσης προκύπτουν τα κύματα ρεύματος αν οι τάσεις διαιρεθούν με της κυματικές αντιστάσεις.

Η σταθερά μετάδοσης  $\bar{\gamma}$ , όπως ελέχθη, δίνει με το πραγματικό της μέρος  $\alpha$  τον συντελεστή απόσβεσης και με το φανταστικό της μέρος  $\beta$  την αλλαγή φάσης ανά μονάδα μήκους.

Αν για ένα από τα κύματα θεωρήσουμε τις τιμές του, για έναν οποιονδήποτε σταθερό χρόνο, δηλαδή αν πάρουμε μια στιγμιαία φωτογραφία, τότε θα δούμε μέγιστα και ελάχιστα τάσης πάνω στην γραμμή, εφ' όσον η γραμμή είναι αρκετά μακριά. Αυτά τα μέγιστα παρουσιάζονται, προφανώς, λόγω των κυκλικών συναρτήσεων. Η απόσταση δυο μέγιστων ή ελάχιστων λέγεται *μήκος κύματος*  $\lambda$  και είναι για μηδενική απόσβεση το εξής:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{L' \cdot C'}} = \frac{1}{f\sqrt{L' \cdot C'}}$$

[4.50]

Για γραμμές δυο παράλληλων κυλινδρικών αγωγών ακτίνας  $r$  σε απόσταση  $D$  ισχύουν, παραλείποντας, την εσωτερική αυτεπαγωγή, τα εξής:

$$L' = \frac{\mu_r \cdot \mu_0}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right)$$

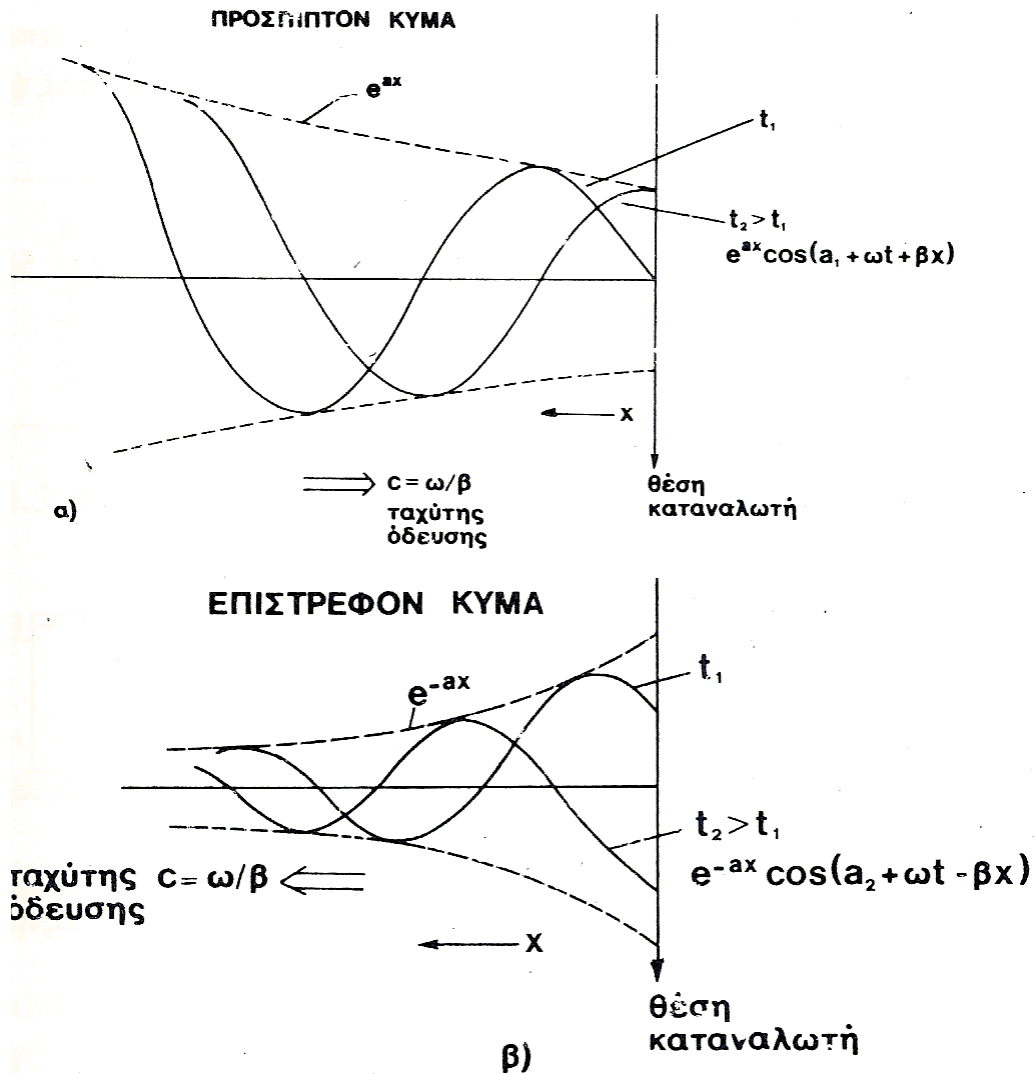
$$C' = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)}$$

[4.51]

Όπου  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$  και  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

Συνεπώς προκύπτει:  $\beta = \omega\sqrt{L' \cdot C'} = 314\sqrt{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} = \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \cdot 0,06^\circ/\text{km}$

$$c = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad \text{Ταχύτητα όδευσης κύματος}$$



Σχήμα 4.8: Προσπίπτον και επιστρέφον κύμα τάσης ή ρεύματος.

Παρόμοιες σχέσεις ισχύουν και για ομοαξονικούς αγωγούς.

Η ταχύτητα φάσης για εναέριες γραμμές,  $\mu_r = \epsilon_r = 1$ , είναι ως εξής:

$$c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{L' \cdot C'} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ m}/\mu\text{s} = 30 \text{ cm/ns}$$

[4.52]

Το μήκος κύματος είναι:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f}$$

Για τις διάφορες συχνότητες που μπορούν να εμφανιστούν στο δίκτυο, λόγο αρμονικών, προκύπτουν τα μήκη κύματος που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

τάξη αρμονικής	f/Hz	Μήκος κύματος εναέριας γραμμής λ/km
1	50	6000
3	150	2000
5	250	1200
9	450	667

Πίνακας 4.1: Συχνότητα και μήκος κύματος αρμονικών στο δίκτυο.

#### 4.4 Ειδικές περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς

##### 4.4.1 Γραμμές χωρίς απώλειες

Στην περίπτωση αμελητέων απωλειών δεν έχουμε απόσβεση και η σταθερά μεταφοράς  $\bar{\gamma}$  είναι φανταστική:

$$\bar{\gamma} = i\beta, \quad \beta = \omega\sqrt{L' \cdot C'} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{360^\circ}{\lambda} \quad [4.53]$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις παρακάτω σχέσεις μεταξύ κυκλικών και υπερβολικών συναρτήσεων

$$\cosh(iy) = \cos y, \quad \sinh(\gamma y) = i \sin y \quad [4.54]$$

Προκύπτει από τις εξισώσεις της γραμμής το σύστημα:

Γραμμή SR χωρίς απώλειες	
$\bar{U}_S = \cos(\beta l) \cdot \bar{U}_R + iZ_0 \cdot \sin(\beta l) \cdot \bar{I}_R$	$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$  $\beta l = 2\pi \frac{1}{\lambda} = 360^\circ \frac{1}{\lambda}$
$\bar{I}_S = i \frac{\sin(\beta l)}{Z_0} \cdot \bar{U}_R + \cos(\beta l) \cdot \bar{I}_R$	
$\bar{U}_R = \cos(\beta l) \cdot \bar{U}_S - iZ_0 \sin(\beta l) \cdot \bar{I}_S$	
$\bar{I}_R = -i \frac{\sinh(\bar{\gamma} l)}{Z_0} \cdot \bar{U}_S + \cos(\beta l) \cdot \bar{I}_S$	

[4.55]

Όπου  $\lambda$  = μήκος κύματος 6000km για εναέριες γραμμές

Ακολουθεί η διερεύνηση των παραπάνω εξισώσεων για διάφορες περιπτώσεις.

#### 4.4.2 Γραμμή χωρίς απώλειες, εν κενό

Εάν δεν υπάρχει κατανάλωση, έχουμε  $I_R = 0$ . Έτσι οι παραπάνω εξισώσεις της γραμμής χωρίς απώλειες δίνουν για τις τάσεις και τα ρεύματα:

$$\bar{U}_S = \bar{U}_R \cdot \cos(\beta l) = \bar{U}_R \cos\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right) \quad [4.56]$$

$$\bar{I}_S = i \frac{\bar{U}_R}{Z_0} \cdot \sin(\beta l) \quad [4.57]$$

Η αντίδραση εισόδου της γραμμής θα είναι:

$$\bar{Z}_S = \frac{\bar{U}_S}{\bar{I}_S} = -iZ_0 \cot(\beta l) \quad [4.58]$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η τάση του άκρου  $U_R$  μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη της τάσης  $U_S$ . Ισχύει για τα μέτρα των τάσεων:

$$\bar{U}_R = \frac{\bar{U}_S}{\cos(\beta l)} \text{ και } U_R > U_S \quad [4.59]$$

Ιδίως δε για ένα κρίσιμο μήκος  $l_k$  που πλήρη την σχέση:

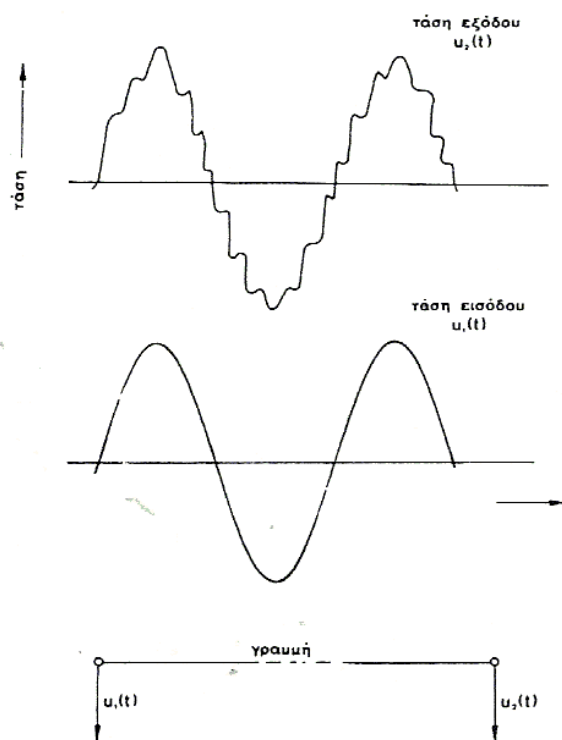
$$\beta l_k = \frac{\pi}{2}, \quad l_k = \frac{\pi}{2\beta} = \frac{\lambda}{4} \quad [4.60]$$

Έχουμε άπειρη ανύψωση της τάσης στο άκρο R της γραμμής και η αντίδραση εισόδου  $Z_S$  της γραμμής είναι άπειρη:

$$\bar{Z}_S = \frac{\bar{U}_S}{\bar{I}_S} = -iZ_0 \cot(\beta l_k) = \infty \quad [4.61]$$

Για εναέριες γραμμές  $\mu_r = \epsilon_r = 1$   $\omega = 314$  ( $f = 50\text{Hz}$ ) είναι  $l_k = 1500\text{km}$

Μια γραμμή εν κενό παρουσιάζει στο κενό άκρο της μια υπέρταση, δηλαδή ο καταναλωτής μπορεί να έχει υψηλότερη τάση από την τάση τροφοδοσίας. Επειδή η υπέρταση εξαρτάται από την συχνότητα, στο κενό άκρο μπορεί να έχουμε μεγάλη ανύψωση του ποσοστού των αρμονικών που περιέχονται σε μια τάση, όπως δείχνει το σχήμα 4.9. Το φαινόμενο αυτό λέγεται και φαινόμενο *Ferranti*.



Σχήμα 4.9: Το φαινόμενο *Ferranti*. Ενίσχυση των αρμονικών τάσης στο άκρο μιας γραμμής μεταφοράς.

Για το ρεύμα έχουμε την προφανή ιδιότητα ότι , για  $\beta l < \pi/2$  είναι χωρητικό. Δηλαδή η γραμμή συμπεριφέρεται σαν μια χωρητικότητα. Η τιμή της χωρητικότητας είναι για μικρά μήκη  $1/\lambda \rightarrow 0$ .

$$C = \frac{\sin(\beta l)}{Z_0 \cdot \omega} \approx \frac{\beta l}{Z_0 \cdot \omega} = lC' \tag{4.62}$$

Το ρεύμα που ρέει στην αρχή της γραμμής έχει ενεργό τιμή:

$$I(l) = \frac{\bar{U}_R}{Z_0} \cdot \sin(\beta l) \approx U_R \cdot C' \cdot \omega \cdot l \tag{4.63}$$



Παρατηρούμε ότι αυξανόμενου του μήκους  $l$  το εν κενό ρεύμα στην αρχή της γραμμής μπορεί να πάρει σημαντικές τιμές.

#### 4.4.3 Γραμμές χωρίς απώλειες με βραχυκυκλωμένο άκρο

Προφανώς, έχουμε  $U_R = 0$  και συνεπώς η τάση και το ρεύμα του αποστέλλοντος άκρου  $S$  είναι:

$$\bar{U}_S = iZ_0 \cdot \sin(\beta l) \cdot \bar{I}_R$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_R \cdot \cos(\beta l)$$

$$\bar{U}_S = iZ_0 \cdot \bar{I}_S \cdot \tan(\beta l)$$

Η αντίσταση εισόδου είναι:

$$\bar{Z}_S = \frac{\bar{U}_S}{\bar{I}_S} = -iZ_0 \tan(\beta l)$$

Για ένα ειδικό μήκος, το κρίσιμο μήκος της γραμμής, που είναι  $l_k = \lambda/4$  ισχύει:

$$\beta l_k = \pi/2, \bar{I}_S = 0$$

Εδώ η γράμμα στο αποστέλλον άκρο  $S$  δεν αντιδρά στο βραχυκύκλωμα και μάλιστα έχουμε, στο σημείο αυτό, άπειρη αντίσταση εισόδου της γραμμής  $Z_S = \infty$ . Εύκολα προκύπτει από την διερεύνηση της αντίστασης εισόδου  $Z_S$  ότι, για γραμμές με διάφορα μήκη  $l$  είναι:

Για  $l < l_k$  η γραμμή συμπεριφέρεται επαγωγικά γιατί  $Z_0 \cdot \tan(\beta l) > 0$

Για  $l > l_k$  η γραμμή συμπεριφέρεται χωρητικά γιατί  $Z_0 \cdot \tan(\beta l) < 0$

#### 4.4.4 Φόρτιση γραμμής με καταναλωτή ίσο με την κυματική αντίσταση $\bar{Z}_R = \bar{Z}_0$

Η περίπτωση αυτή λέγεται προσαρμογή του καταναλωτή στην γραμμή. Οι εξισώσεις της γραμμής για  $Z_R = Z_0$  δίνει τα εξής:

$$\bar{U}_S(x) = \bar{U}_R \cdot e^{i\beta x} \cdot e^{ax}, \quad \bar{I}_S(x) = \bar{I}_R \cdot e^{i\beta x} \cdot e^{ax}$$

Δηλαδή, στην περίπτωση προσαρμογής δεν υπάρχει επιστρέφον κύμα.

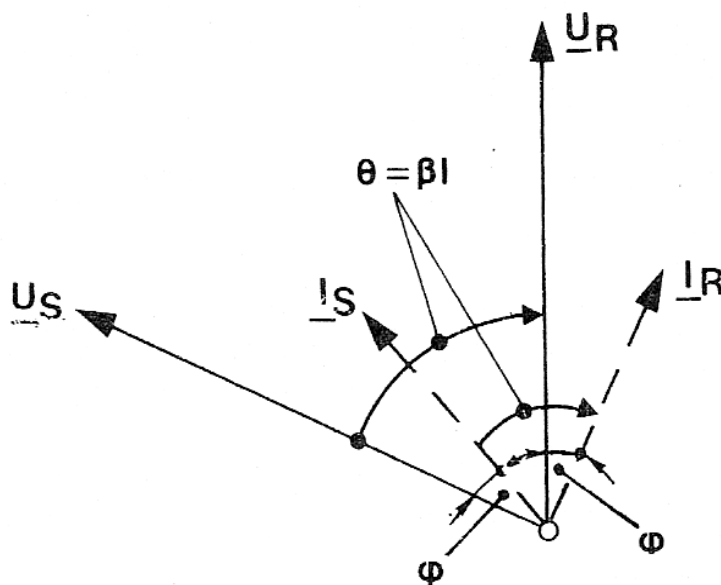
Ιδιαίτερα στην περίπτωση που δεν έχουμε απώλειες στην γραμμή, ισχύει  $a=0$  και συνεπώς:

$$\bar{U}_S(x) = \bar{U}_R \cdot e^{i\beta x}$$

$$\bar{I}_S(x) = \bar{I}_R \cdot e^{i\beta x}$$

[4.64]

Όπου  $\beta = 6^\circ/100 \text{ km}$  για γραμμές υψηλής τάσης.



Σχήμα 4.10: Τάσεις και ρεύματα σε μια γραμμή που μεταφέρει την φυσική της ισχύ. Η στροφή του ανύσματος τάσης είναι  $\beta \cdot l$  με  $\beta = 6^\circ/100 \text{ km}$  για εναέρια γραμμή.

Προφανώς η πτώση τάσης είναι μηδέν. Η τάση και το ρεύμα μένουν κατά μετρό αμετάβλητα ως προς  $x$ , έτσι όπως το κύμα κινείται, πλην όμως στρέφονται ταυτόχρονα κατά γωνία  $\beta x$ .

Ονομαστική τάση $U_N$ σε kV	15	20	60	110	150	220	380
Φυσική ισχύς $P_N$ σε MW ανά τριφασικό κύκλωμα	1,35	2,4	9,6	32	60	180	600

Πίνακας 4.2: Φυσική ισχύς  $P_N$  εναέριων γραμμών σαν συνάρτηση της τάσης τους.

Στην περίπτωση προσαρμογής του καταναλωτή στην γραμμή η μιγαδική ισχύς του καταναλωτή είναι:

$$S_R^* = \frac{U_R^2}{Z_0^*}$$

Η πραγματική ισχύς είναι για την περίπτωση μηδενικών απωλειών ίση με:

$$P_N = \frac{U_R^2}{Z_0}$$

Το μέγεθος  $P_N$  λέγεται φυσική ισχύς και δίνεται από τον πίνακα 4.1. Σε γραμμές με αμελητέες απώλειες, όταν ο καταναλωτής έχει την φυσική ισχύ της γραμμής η πτώση τάσης είναι μηδέν. Επίσης επειδή η γωνία  $\phi$  μεταξύ της τάσης και της έντασης μένει σταθερή η γραμμή δεν παράγει ούτε καταναλίσκει άεργο ισχύ.

#### 4.4.5 Γραμμή χωρίς απώλειες φοριζόμενη με ωμικό φορτίο

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\bar{U}_S = \bar{U}_R \cdot \cos(\beta l) + Z_0 \cdot \bar{I}_R \cdot \sin(\beta l)$$

$$\bar{U}_S = \bar{U}_R \cdot \left[ \cos(\beta l) + i \frac{Z_0}{\bar{Z}_R} \cdot \sin(\beta l) \right]$$

[4.65]

Για φορτίο πραγματικό  $\bar{Z}_R = Z_R$  έχουμε μετά από πράξεις:

$$U_S^2 = U_R^2 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Z_0^2}{Z_R^2} - 1 \right) \cdot \sin^2(\beta l) \right] = U_R^2 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{P_R^2}{P_N^2} - 1 \right) \cdot \sin^2(\beta l) \right]$$

[4.66]

Όπου το μέγεθος  $P_N = U_R^2 / Z_0$  λέγεται φυσική ισχύς και  $P_R$  είναι το φορτίο. Για μικρές γωνίες  $\beta l$  έχουμε τις εξής σχέσεις:

$$\sin^2(\beta l) \approx \beta l^2 \approx \left( \frac{2\pi l}{\lambda} \right)^2$$

$$U_S \approx U_R \cdot \left[ 1 + \left( \frac{P_R^2}{P_N^2} - 1 \right) \cdot \left( \frac{2\pi l}{\lambda} \right)^2 \right]^{1/2}$$

[4.67]

Αν αναπτύξουμε την εξίσωση των τάσεων κατά Newton και παραλείψουμε όρους δεύτερης τάξης προκύπτει:

$$U_S = U_R \cdot \left[ 1 + \left( \frac{P_R^2}{P_N^2} - 1 \right) \cdot \left( \frac{2\pi^2 l^2}{\lambda^2} \right)^2 \right]$$

[4.68]

Συνεπώς μεταφορά ισχύος μεγαλύτερη της φυσικής ισχύος ( $P_R > P_N$ ) προκαλεί πτώση τάσης. Μεταφορά ισχύος μικρότερη της φυσικής ισχύος ( $P_R < P_N$ ) προκαλεί ανύψωση τάσης. Η πτώση τάσης αυξάνεται με το τετράγωνο του μήκους.

Στην συνέχεια θα διερευνήσουμε την άεργο ισχύ στο άκρο αποστολής S για πραγματικό φορτίο στον καταναλωτή. Σχηματίζοντας το γινόμενο  $\bar{S}_S = \bar{U}_S \cdot \bar{I}_S^*$  παίρνουμε από την εξίσωση 4.55, για την τάση  $U_S$ , την μιγαδική ισχύ στο άκρο S εύκολα προκύπτει από την μιγαδική ισχύ ότι, η άεργη ισχύς είναι η παρακάτω:

$$Q_S = \text{Im}(\bar{S}_S) = P_N + \left[ \left( \frac{P_R}{P_N} \right)^2 - 1 \right] \cdot \cos(\beta l) \cdot \sin(\beta l) \quad [4.69]$$

Για  $\beta l \rightarrow 0$  έχουμε  $\cos(\beta l) \cdot \sin(\beta l) \rightarrow \beta l$ , όποτε ισχύει:

$$Q_S \approx P_N + \left[ \left( \frac{P_R}{P_N} \right)^2 - 1 \right] \cdot \beta l \approx 2\pi \left( \frac{1}{\lambda} \right) P_N + \left[ \left( \frac{P_R}{P_N} \right)^2 - 1 \right] \quad [4.70]$$

Δηλαδή για φορτίσεις μεγαλύτερες της φυσικής ισχύος της γραμμής χρειάζεται άεργη ισχύ αλλιώς δίνει άεργο ισχύ. Όμως για  $P_R = P_N$  η άεργη φόρτιση που προέρχεται από την γραμμή είναι μηδέν.

Το ρεύμα του φορτίου  $I_R$  με την αυτεπαγωγή της γραμμής καταναλίσκει άεργη ισχύ  $+I_R^2 L' \omega$  ανά μονάδα μήκους. Από την άλλη πλευρά η χωρητικότητα της γραμμής  $C'$  με την τάση  $U_R$  παράγει άεργη ισχύ  $-U_R^2 C' \omega$ . Προφανώς για  $U_R/I_R = \sqrt{L'/C'}$  δηλαδή, για την περίπτωση προσαρμογής, η από την γραμμή ζητούμενη ισχύ είναι μηδέν.

#### 4.4.6 Γραμμή χωρίς απώλειες με οποιοδήποτε φορτίο

Για φορτίο ενεργό και άεργο,  $\bar{S}_S = P_R + jQ_R$  έχουμε, από την εξίσωση 4.55 της τάσης  $\bar{U}_S$  αν την πολλαπλασιάσουμε με την τάση  $\bar{U}_R^*$ , την σχέση:

$$\bar{U}_S \cdot \bar{U}_R^* = \cos(\beta l) \cdot U_R^2 + j \sin(\beta l) \cdot I_R Z_0 \cdot \bar{S}_R^* \quad [4.71]$$

Αντικαθιστώντας  $\bar{S}_R^* = P_R - jQ_R$  και παίρνοντας τα μετρά από τα δυο μελή της 4.71 έχουμε:

$$U_S^2 \cdot U_R^2 = \left( \cos\beta l \cdot U_R^2 + \sin(\beta l) \cdot Q_R Z_0 \right)^2 + \left( \sin(\beta l) \cdot P_R Z_0 \right)^2 \quad [4.72]$$

Είναι όμως:

$$Z_0 = \frac{U_R^2}{P_N} \quad [4.73]$$

Έτσι η εξίσωση 4.72, μετά από πράξεις, μετασχηματίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$\left(\frac{P_R}{P_N}\right)^2 + \left(\frac{Q_R}{P_N} + \cot(\beta l)\right)^2 = \left(\frac{U_S}{U_R}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^2(\beta l)} \quad [4.74]$$

Για δοσμένες τάσεις και γραμμή έχουμε μέγιστο ισχύος για:

$$Q_S = -P_N \cdot \cot(\beta l)$$

$$P_R = \frac{U_S \cdot P_N}{U_R \cdot \sin(\beta l)} \quad [4.75]$$

Η παραπάνω μέγιστη ισχύς έχει μόνο θεωρητικό χαρακτήρα, γιατί άλλες συνθήκες όπως η ευστάθεια, η πτώση τάσης ή το θερμικό όριο περιορίζουν την μεταφορά ισχύος.

Η πτώση τάσης προκύπτει από την σχέση 4.72 ως εξής:

$$\frac{U_S - U_R}{U_R} \approx \left[ \left(\frac{P_R}{P_N}\right)^2 + \left(\frac{Q_R}{P_N} + \cot(\beta l)\right)^2 \right]^{1/2} \sin(\beta l) - 1 \quad [4.76]$$

Αυτή η σχέση μπορεί να απλοποιηθεί, για γραμμές μικρού μήκους και για  $Q_R < P_N$ , μετά από πράξεις ως εξής:

$$\frac{U_S - U_R}{U_R} \approx 19,7 \cdot \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \cdot \left[ \left(\frac{P_R}{P_N}\right)^2 - 1 + \left(\frac{Q_R}{P_N}\right)^2 \right] + 6,28 \cdot \left(\frac{1}{\lambda}\right) \cdot \frac{Q_R}{P_N} \quad [4.77]$$

Παρατηρούμε ότι η μεταφορά άεργων φορτίων και η απόκλιση από την φυσική ισχύ προκαλούν την πτώση τάσης, σε γραμμές χωρίς ωμικό φορτίο.

Από τα προαναφερθέντα μπορούμε να διεξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Γραμμές φωτιζόμενες με ισχύ μικρότερη της φυσικής τους μπορεί να παρουσιάζουν υπέρταση στον καταναλωτή και να συμπεριφέρονται σαν χωρητικά φορτία, δηλαδή παράγουν άεργο ισχύ.

- Φόρτιση με ισχύ μεγαλύτερη της φυσικής προκαλεί πτώση τάσης αυξανόμενη με το τετράγωνο του μήκους της γραμμής και την κατανάλωση άεργης ισχύος.

### 4.5 Η γραμμή μεταφοράς σαν τετράπολο

Οι εξισώσεις της γραμμής μεγάλου μήκους, γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\bar{U}_S &= \bar{A} \cdot \bar{U}_R + \bar{B} \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_S &= \bar{C} \cdot \bar{U}_R + \bar{D} \cdot \bar{I}_R\end{aligned}\tag{4.78}$$

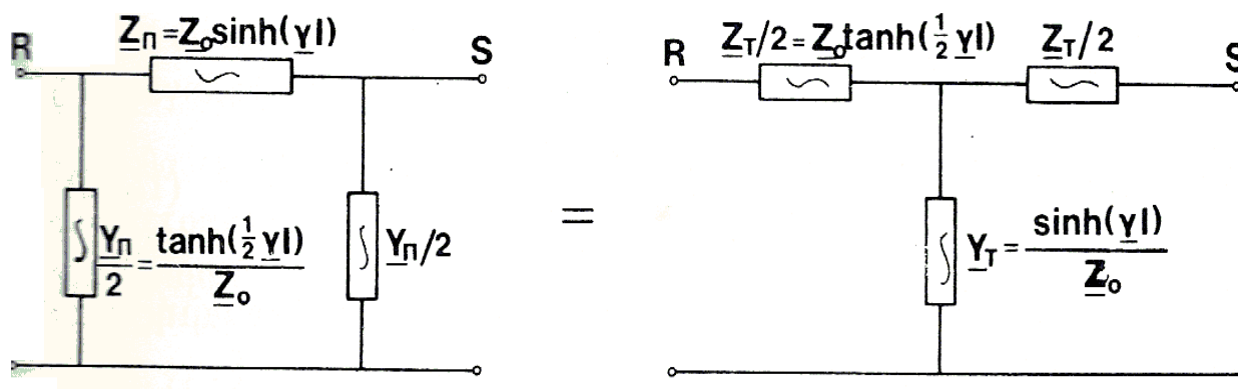
Όπου

$$\bar{A} = \bar{D} = \cos(\bar{\gamma}l), \quad \bar{B} = \bar{Z}_0 \sin(\bar{\gamma}l), \quad \bar{C} = \frac{\sin(\bar{\gamma}l)}{\bar{Z}_0}$$

Από αυτές προκύπτει:

$$\bar{A} \cdot \bar{D} - \bar{B} \cdot \bar{C} = 1\tag{4.79}$$

Προφανώς, οι παραπάνω εξισώσεις ανήκουν σε ένα γραμμικό, παθητικό τετράπολο, το ABCD-τετράπολο, το οποίο μπορεί να προσομοιώσει πλήρως τη γραμμή, ούτως ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί των τερματικών μεγεθών τάσης και έντασης στο R και S. Μπορεί αυτό να είναι στην κατασκευή του ή ένα Π-τετράπολο ή ένα Τ-τετράπολο και μάλιστα συμμετρικό.



Σχήμα 4.11: Ισοδύναμα Π- και Τ- Τετράπολα μιας γραμμής μεταφοράς.

Οι αντιδράσεις και αγωγιμότητες των ισοδύναμων τετραπόλων υπολογίζονται από τις σχέσεις που προκύπτουν από το βραχυκύκλωμα και την εν κενό λειτουργία του τετραπόλου, δηλαδή από τις σχέσεις:

$$U_R = 0 \text{ και } I_R = 0$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι, για το Π-τετράπολο οι αντιδράσεις και αγωγιμότητες δίνονται από τις σχέσεις:

$$\frac{\bar{Y}_\Pi}{2} = \frac{\tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right)}{\bar{Z}_0}, \quad \bar{Z}_\Pi = \bar{Z}_0 \sinh(\bar{\gamma}l) \quad [4.80]$$

Ομοίως προκύπτουν και για το Τ-τετράπολο τα εξής:

$$\frac{\bar{Z}_T}{2} = \bar{Z}_0 \tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right), \quad \bar{Y}_T = \frac{\sinh(\bar{\gamma}l)}{\bar{Z}_0} \quad [4.81]$$

Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για γραμμές οποιουδήποτε μήκους  $l$ . Για ορισμένα μήκη και μάλιστα τέτοια ώστε, τα μέτρα των ορισμάτων των υπερβολικών συναρτήσεων να είναι αρκετά μικρότερα της μονάδος, μπορούν να προκύψουν κάποιες απλοποιήσεις. Ονομάζουμε γραμμή μικρού μήκους εκείνη για την οποία ισχύει. Με μια προσέγγιση όρων 3ης τάξης, μπορεί να γράψει κανείς τις παρακάτω αναπτύξεις των υπερβολικών συναρτήσεων :

$$\sinh(\bar{\gamma}l) = \bar{\gamma}l \left[ 1 + \frac{1}{6}(\bar{\gamma}l)^2 \right] + R_s(3) \quad [4.82]$$

$$\tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right) = \left(\frac{1}{2}\right)\bar{\gamma}l \left[ 1 - \frac{1}{12}(\bar{\gamma}l)^2 \right] + R_t(3) \quad [4.83]$$

Όπου  $R_s(3)$  και  $R_t(3)$  είναι υπόλοιπα με όρους 3<sup>ης</sup> τάξης και πάνω.

Ισχύουν ακόμα οι σχέσεις:

$$\bar{\gamma}\bar{Z}_0 l = R + i\omega L, \quad \frac{\bar{\gamma}l}{\bar{Z}_0} = G + i\omega C \quad [4.84]$$

Όπου οι αντιδράσεις και αγωγιμότητες είναι αυτές της γραμμής και μάλιστα οι συνολικές, όπως ακολουθεί:

$$R + i\omega L = l(R' + i\omega L')$$

$$G + i\omega C = I(G' + i\omega C')$$

Συνεπώς, για τις αντιδράσεις των ισοδύναμων τετραπόλων έχουμε:

$$\bar{Z}_{\Pi} = (R + i\omega L) \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} (\bar{\gamma}l)^2 \right] \quad [4.85]$$

$$\frac{\bar{Y}_{\Pi}}{2} = \frac{1}{2} (G + i\omega C) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{12} (\bar{\gamma}l)^2 \right] \quad [4.86]$$

$$\frac{\bar{Z}_{T}}{2} = \frac{1}{2} (R + i\omega L) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{12} (\bar{\gamma}l)^2 \right] \quad [4.87]$$

$$\bar{Y}_{T} = (G + i\omega C) \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} (\bar{\gamma}l)^2 \right] \quad [4.88]$$

Αν θεωρήσουμε, δηλαδή, τη γραμμή αποτελούμενη από συγκεντρωμένα στοιχεία τα οποία ισομοιράζονται στα σκέλη των  $\Pi$  ή  $T$ -τετραπόλων, τότε κάνουμε ένα σφάλμα τάξης, μεγαλύτερης ή ίσης, του  $|\bar{\gamma}l|^2$ .

*Υπολογισμός σφάλματος που υπεισέρχεται στην προσέγγιση μιας γραμμής, με τα στοιχεία της συγκεντρωμένα.*

Τα τετράπολα που υπολογίσαμε παραπάνω προσομοιώνουν τη γραμμή, με τόσο καλή προσέγγιση, όση έχει και η ακριβής ανάλυση της μακριάς γραμμής διανεμημένων στοιχείων. Τώρα ενδιαφερόμαστε να βρούμε, μέχρι ποιο μήκος γραμμών μπορούμε να υπολογίσουμε τους κλάδους των τετραπόλων, χρησιμοποιώντας τα συγκεντρωμένα στοιχεία της γραμμής, δηλαδή μέχρι ποιο μήκος μπορούν να θεωρηθούν, οι εναέριες γραμμές, ως γραμμές μικρού μήκους. Πρέπει να έχουμε υπόψη ότι το σφάλμα στον προσδιορισμό των  $C'$ ,  $L'$  μπορεί να είναι σημαντικό για παράδειγμα 5%. Σωστό είναι να γίνονται απλοποιήσεις που επιφέρουν ανακρίβειες όχι μεγαλύτερες των ως άνω.

Εδώ θα εκτιμήσουμε το σφάλμα που υπεισέρχεται στον υπολογισμό των τετραπόλων, αν θεωρήσουμε τα στοιχεία συγκεντρωμένα και μάλιστα για γραμμές χωρίς ωμική αντίσταση. Γι' αυτές ισχύει:

$$\bar{\gamma}l = i\sqrt{L' \cdot C'} \omega l = i\frac{\omega}{c}l = i\frac{2\pi l}{\lambda}$$



[4.89]

Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατά μήκος της γραμμής και  $\lambda$  το μήκος κύματος. Έχουμε στα 50Hz για εναέριες γραμμές  $c=3 \cdot 10^5$  km/s,  $\lambda=6000$ km. Ισχύει  $f\lambda=c$  ή  $\omega\lambda=2\pi c$ .

Ορίζουμε τα σφάλματα προσέγγισης  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ , για την προσομοίωση με Π-τετράπολο, ως εξής:

$$\Delta_1 = \frac{|\sinh(\bar{\gamma}l) - \gamma l|}{|\sinh(\bar{\gamma}l)|} = \frac{\sinh(\bar{\gamma}l) - \gamma l}{\sinh(\bar{\gamma}l)}$$

[4.90]

$$\Delta_2 = \frac{\left| \tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right) \right| \cdot -\frac{1}{2}\gamma l}{\left| \tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right) \right|} = \frac{\tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right) \cdot -\frac{1}{2}\gamma l}{\tanh\left(\frac{1}{2}\bar{\gamma}l\right)}$$

[4.91]

$\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  είναι τα ανηγμένα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τον υπολογισμό των διαμηκών και εγκάρσιων κλάδων των Π-τετραπόλων, παρουσιάζονται δε στον παρακάτω πίνακα:

Μήκος $l$ (km)	$\gamma l$ ( $^\circ$ )	Σφάλμα $\Delta_1$ (%)	Σφάλμα $\Delta_2$ (%)
200	$12^\circ$	-0,729	0,367
300	$18^\circ$	-1,66	0,831
400	$24^\circ$	-2,98	1,46
500	$30^\circ$	-4,72	2,29

Πίνακας 4.3: Ανηγμένα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τον υπολογισμό των διαμηκών και εγκάρσιων κλάδων των Π-τετραπόλων

Παρατηρούμε ότι, το σφάλμα σε γραμμές μήκους 200 km είναι ασήμαντο και ήδη μέχρις ενός μήκους 500 km, το σφάλμα παραμένει μικρότερο του 5%.

#### 4.5.1 Ισχύς εισόδου και εξόδου μιας γραμμής

Έστω γραμμή που περιγράφεται με ένα ισοδύναμο τετράπολο ABCD. Ακολούθως, θα δοθούν οι εξισώσεις ισχύος στα δύο άκρα του τετραπόλου και των απωλειών στο τετράπολο.

Ισχύει:

$$\bar{U}_S = \bar{A} \cdot \bar{U}_R + \bar{B} \cdot \bar{I}_R \rightarrow \bar{I}_R = \frac{\bar{U}_S - \bar{A} \cdot \bar{U}_R}{\bar{B}}$$

[4.92]

Η μιγαδική ισχύς στο άκρο R είναι για την μια φάση:

$$\bar{S}_R = \bar{U}_R \cdot \bar{I}_R^* = \frac{\bar{U}_R \cdot \bar{U}_S^* - \bar{A}^* \cdot \bar{U}_R^2}{\bar{B}^*} = P_R + iQ_R \quad [4.93]$$

Ανάλογα έχουμε και για το άκρο αποστολής S την παρακάτω μιγαδική ισχύ:

$$\bar{S}_S = \frac{\bar{A}^* \cdot \bar{U}_S^2 - \bar{U}_S \cdot \bar{U}_R^*}{\bar{B}^*} = P_S + iQ_S \quad [4.94]$$

Ορίζουμε την μιγαδική ισχύ απωλειών ως εξής:

$$\bar{S}_V = \bar{S}_S - \bar{S}_R = \frac{A^*(U_S^2 + U_R^2) - (\bar{U}_S \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_R \cdot \bar{U}_S^*)}{B^*} = P_V + iQ_V \quad [4.95]$$

Αυτή έχει σαν πραγματικό μέρος την ισχύ απωλειών της γραμμής και σαν φανταστικό μέρος την άεργη ισχύ που καταναλίσκει η γραμμή.

$$P_V = P_S - P_R$$

$$Q_V = Q_S - Q_R$$

[4.96]

Αν  $Q_V > 0$  επαγωγική,  $Q_V < 0$  χωρητική

Θέτουμε τους μιγαδικούς στις πολικές τους μορφές:

$$\bar{A} = Ae^{ia}, \quad \bar{B} = Be^{ia}, \quad \bar{U}_S = U_S e^{i\theta_S}, \quad \bar{U}_R = U_R e^{i\theta_R}$$

Ορίζουμε την γωνία  $\theta$  μεταξύ των τάσεων  $\bar{U}_S, \bar{U}_R$ :  $\theta = \theta_S - \theta_R$  οπότε προκύπτει για τις ισχύεις:

$$P_R = \frac{U_R U_S}{B} \cos(b - \theta) - \frac{A U_R^2}{B} \cos(b - a)$$

$$Q_R = \frac{U_R U_S}{B} \sin(b - \theta) - \frac{A U_R^2}{B} \sin(b - a)$$

$$P_S = \frac{A U_S^2}{B} \cos(b - a) - \frac{U_R U_S}{B} \cos(\theta + b)$$

$$Q_S = \frac{AU_S^2}{B} \sin(b - a) - \frac{U_R U_S}{B} \sin(\theta + b) \quad [4.97]$$

Για γραμμές χωρίς απώλειες ισχύει:

$$\bar{A} = \cosh(\bar{\gamma}l) = \cos(\beta l) = \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \rightarrow (a = 0) \quad [4.98]$$

$$\bar{B} = Z_0 \sinh(\bar{\gamma}l) = iZ_0 \sin(\beta l) = iZ_0 \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \rightarrow (b = \frac{\pi}{2}) \quad [4.99]$$

Κατόπιν τούτου, οι ισχύεις εκφράζονται ως εξής:

$$P_R = \frac{U_R U_S \cdot \sin(\theta)}{Z_0 \sin(2\pi l/\lambda)}$$

$$Q_R = \frac{U_R U_S \cos(\theta)}{Z_0 \sin(2\pi l/\lambda)} - \frac{U_R^2 \cos(2\pi l/\lambda)}{Z_0 \sin(2\pi l/\lambda)}$$

$$P_S = \frac{U_R U_S \cdot \sin(\theta)}{Z_0 \sin(2\pi l/\lambda)}$$

$$Q_S = \frac{U_S^2 \cos(2\pi l/\lambda)}{Z_0 \sin(2\pi l/\lambda)} - \frac{U_R U_S \cdot \cos(\theta)}{Z_0 \sin(2\pi l/\lambda)} \quad [4.100]$$

Από τις παραπάνω σχέσεις συνεπάγεται ότι, η μεταφερόμενη ισχύς στο R μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με την γωνία  $\theta$ , για σταθερή τάση στα άκρα της γραμμής. Έχει δε μέγιστο,  $\cos(b - \theta) = 1$  δηλαδή ισχύει για:

$$\theta = b, P_{R \max} = \frac{U_R U_S}{B} - \frac{AU_R^2 \cos(b - a)}{B} \quad [4.101]$$

Η ισχύς  $P_{R\max}$  έχει μόνο θεωρητικό χαρακτήρα.

Στις παραπάνω σχέσεις ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά δυο ομάδες τιμών ισχύος και τάσεων:

- Φασική τάση  $U_S, U_R$  και ισχύεις ανά φάση  $S_S, S_R$ .
- Πολικές τάσεις  $U_S, U_R$ , οπότε οι ισχύεις θα είναι τριφασικές.

#### 4.5.2 Λειτουργικά διαγράμματα μακριών γραμμών

Σε μια γραμμή μεταφοράς ενδιαφέρουν, μεταξύ άλλων, η πραγματική και άεργος ισχύς, η πτώση τάσης, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα και οι απώλειες.

Μια καλή εποπτεία των παραπάνω μεγεθών μπορούμε να έχουμε χρησιμοποιώντας τα λεγόμενα κυκλικά διαγράμματα ή διαγράμματα λειτουργίας, όπως αυτά ορίζονται παρακάτω.

Για μια συγκεκριμένη γραμμή ορίζουμε σε ένα μιγαδικό επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12, τα σημεία λειτουργίας  $B$ , που είναι το άκρο του διανύσματος της ισχύος του καταναλωτή  $\bar{S}_R = \bar{P}_R + i\bar{Q}_R$ , ή μπορεί εναλλακτικά να είναι η ισχύς  $\bar{S}_S$  του αποστέλλοντος άκρου  $\bar{S}_S = \bar{P}_S + i\bar{Q}_S$ . Στη συνέχεια ελέγχουμε που βρίσκονται τα σημεία λειτουργίας, λόγω περιορισμών πτώσης τάσης, μεγίστων ρευμάτων και ευστάθειας της γραμμής.

Η σχέση 4.93, της ισχύος αφίξεως  $\bar{S}_R$ , διαιρούμενη με την σχέση που μας δίνει την φυσική ισχύ  $P_N = U_R^2/Z_0$  δίνει:

$$\frac{\bar{S}_R}{P_N} = -\frac{A^*Z_0}{B^*} + \frac{\bar{U}_R \cdot \bar{U}_S^* Z_0}{U_R^2 B^*} \quad [4.102]$$

Και αντικαθιστώντας τα  $A, B$ , με τις τιμές, τους προκύπτει:

$$\bar{s}_R = -\frac{e^{i\zeta}}{[\tanh(\gamma l)]^*} + \frac{e^{i\zeta}}{[\sinh(\gamma l)]^*} \cdot \frac{\bar{U}_S^*}{\bar{U}_R^*} \quad [4.103]$$

Όπου:

$$\bar{s}_R = \frac{\bar{S}_R}{P_N} = \frac{P_R}{P_N} + i \frac{Q_R}{P_N} = \text{η μιγαδική ισχύς, ανηγμένη στην φυσική ισχύ}$$

$$P_N = \frac{U_R^2}{Z_0}$$

$\zeta$  είναι το όρισμα της κυματικής αντίστασης  $Z_0$  και είναι συνήθως, για γραμμές υψηλής τάσης, περίπου ίσο με το μηδέν.

$$\bar{Z}_0 = Z_0 e^{i\zeta}, \quad \zeta \approx 0$$

Δηλαδή, εδώ χρησιμοποιούμε τις ισχύς, αναγόμενες στην φυσική ισχύ.

Ισχύει επίσης ότι, το ρεύμα της άφιξης  $\bar{I}_R$ , αναγόμενο στο «φυσικό ρεύμα»  $\bar{I}_N = \bar{U}_R / \bar{Z}_0$  ισούται απόλυτα με το μέτρο της ανηγμένης ισχύος  $sR$ . Για την ανηγμένη ισχύ έχουμε:

$$sR = \frac{\bar{U}_R \cdot \bar{I}_R^*}{|\bar{U}_R \cdot \bar{I}_N|} = \frac{\bar{U}_R}{U_R} \cdot \frac{\bar{I}_R^*}{I_N}$$

Και χρησιμοποιώντας τα μέτρα των παραπάνω μιγαδικών ποσοτήτων, προκύπτει η ισότητα:

$$sR = \frac{I_R}{I_N} = iR$$

$iR$  = το ανηγμένο ρεύμα του καταναλωτή.

Η παραπάνω σχέση 4.103 της ανηγμένης μιγαδικής ισχύος μας δείχνει ότι, για σταθερό λόγο τάσης  $U_S / U_R = \lambda$ , ο γεωμετρικός τόπος του άκρου του διανύσματος  $sR$ , είναι κύκλος με κέντρο το σημείο  $O_1$ , ορισμένο από το διάνυσμα:

$$(OO_1) = -\frac{e^{i\zeta}}{[\tanh(\bar{\gamma}l)]^*} \quad [4.104]$$

Η ακτίνα του κύκλου είναι:

$$r_1 = \frac{\lambda}{|\sinh(\bar{\gamma}l)|} \quad [4.105]$$

Το σχήμα 4.12 δείχνει τέτοιους κύκλους.

Ο γεωμετρικός τόπος σταθερού ρεύματος άφιξης είναι κύκλος, με κέντρο την αρχή των αξόνων  $O$  και ακτίνα:

$$r_0 = iR = \frac{I_R}{I_N} = sR \quad [4.106]$$



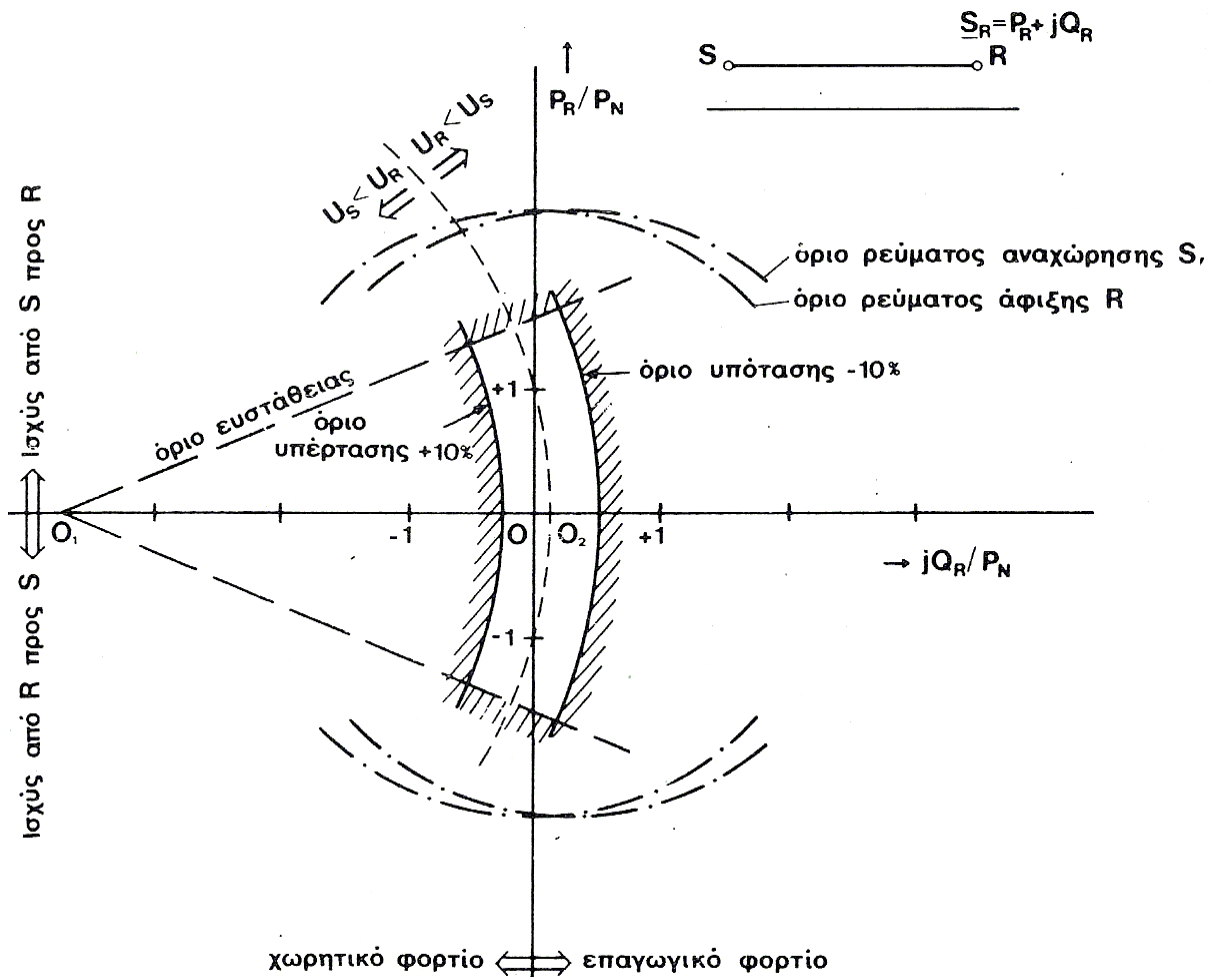
Προφανώς για σταθερό λόγο ρευμάτων  $I_S/I_N$ , το άκρο του διανύσματος ισχύος  $\bar{s}R$  διαγράφει κύκλο κέντρου  $O_2$ , με διάνυσμα θέσης  $-e^{-i\zeta}[\tanh(\bar{\gamma}l)]^*$  άρα έχουμε:

$$(OO_2) = -e^{-i\zeta}[\tanh(\bar{\gamma}l)]^* \tag{4.108}$$

Και ακτίνα:

$$r_2 = \frac{I_S}{I_N |\cosh(\bar{\gamma}l)|} \tag{4.109}$$

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, σταθερής γωνίας στροφής  $\theta$  μεταξύ των  $\bar{U}_R$  και  $\bar{U}_S$ , είναι ευθεία με κέντρο  $O_1$ .



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ισχύος και περιορισμοί του σημείου λειτουργίας μιας γραμμής μεταφοράς, μήκους 250km, χωρίς απώλειες.

Τα σημεία λειτουργίας B, που αντιστοιχούν στην ισχύ άφιξης, δεν μπορεί να ευρισκονται οπουδήποτε, αλλά σε μια περιοχή που καθορίζεται από τους παρακάτω περιορισμούς.

- Η πτώση τάσης  $\bar{U}_S - \bar{U}_R$  πρέπει να είναι στις γραμμές μεταφοράς περιορισμένη, συνήθως  $\pm 10\%$ . Δηλαδή, ο λόγος  $U_S/U_R$  πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0,9 και 1,1. Στο διάγραμμα λειτουργίας, ο γεωμετρικός τόπος των σημείων είναι ο δακτύλιος μεταξύ δυο κύκλων  $K_1, K_2$ , με κέντρο  $O_1$  και ακτίνες  $(1,1/|\tanh(\underline{\gamma}l)|), (0,9/|\tanh(\bar{\gamma}l)|)$ .
- Για λογούς ευστάθειας οι γωνίες των τάσεων  $\bar{U}_S$  και  $\bar{U}_R$  δεν πρέπει να διαφέρουν πάνω από  $25^0$ . Οι γεωμετρικοί τόποι των σημείων είναι το περιεχόμενο μιας γωνίας που περιορίζεται από τις ευθείες  $E_1, E_2$ , που σχηματίζουν γωνία  $\pm 25^0$  με την ευθεία  $(O_1, O)$ .
- Τα ρεύματα της γραμμής δεν πρέπει να υπερβούν τα όρια φόρτισης των αγωγών. Δηλαδή, τόσο το ρεύμα στην αρχή της γραμμής, όσο και το ρεύμα στο τέλος της, πρέπει να είναι μικρότερα του επιτρεπόμενου ρεύματος  $I_e$  φόρτισης. Οι γεωμετρικοί τόποι αυτών των σημείων βρίσκονται μέσα στους κύκλους  $K_0, K_2$  με κέντρα  $O, O_2$  και ακτίνες ίσες με  $I_e/I_N$ .

Τα όρια αυτά έχουν χαραχτεί στο σχήμα 4.13 για την περίπτωση γραμμής 250km, χωρίς απώλειες. Σ' αυτή την περίπτωση, τα κέντρα όλων των κύκλων τάσεων και ρευμάτων βρίσκονται πάνω στον άξονα της αέργου ισχύος  $Q$ .

## 4.6 Φόρτιση εναέριων γραμμών και απώλειες

### 4.6.1 Υπολογισμός συνεχούς φόρτισης εναέριων αγωγών

Το ρεύμα, που επιτρέπεται να διαρρέει έναν αγωγό, περιορίζεται και από την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σ' αυτόν. Είναι δηλαδή, συνάρτηση του τρόπου και του υλικού κατασκευής του αγωγού, καθώς και των συνθηκών ψύξης και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Σε αντιδιαστολή με άλλα όρια φόρτισης των γραμμών (π.χ. ευστάθεια), το παραπάνω ρεύμα λέγεται *θερμικό ρεύμα* ή *θερμικό όριο φόρτισης*. Λόγο του ότι το ρεύμα αυτό εξαρτάτε από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, το καλοκαίρι λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, μπορεί να είναι μικρότερο από ότι τον χειμώνα. Η μέγιστη διαρκώς επιτρεπόμενη θεοκρασία είναι περιορισμένη στους  $85-100^0C$ , για αγωγούς χαλκού ή αλουμινίου. Σε υψηλότερες θεοκρασίες έχει παρατηρηθεί μια αργή ανόπτηση των μετάλλων αυτών. Σε βραχυχρόνιες καταπονήσεις, όπως για παράδειγμα σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία στους αγωγούς είναι  $200^0C$ . Οι κανονισμοί DIN 48204 περιέχουν τις μέγιστες διαρκείς φορτίσεις των διαφόρων υλικών κατασκευής των αγωγών, για θερμοκρασία περιβάλλοντος  $\theta=35^0C$ , τελική θερμοκρασία  $80^0C$  και ταχύτητα άνεμου  $0,6m/s$ . Οι πίνακες 2-7, του παραρτήματος, δίνουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις των αγωγών.

Άσχετα με τις προτάσεις που απορρέουν από τους κανονισμούς που προαναφέραμε, μπορούμε να υπολογίσουμε, στην στάσιμη κατάσταση, το μέγιστο διαρκώς επιτρεπόμενο ρεύμα. Η βάση του υπολογισμού είναι ότι η θερμική ισχύς Joule που παράγεται ισούται με την ισχύ της απαγόμενης θερμότητας, δηλαδή:



$$R I_{th}^2 = \alpha A' \cdot \Delta\theta$$

[4.110]

Όπου :

$I_{th}$  = Το μέγιστο θερμικό ρεύμα (A)

$R'$  = η ωμική αντίσταση ανά μονάδα μήκους (Ω/km)

$A'$  = η επιφάνεια του αγωγού ανά μονάδα μήκους (m<sup>2</sup>/km)

$\Delta\theta$  = η διαφορά μεταξύ μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος

$\alpha$  = ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, με τον οποίο λαμβάνετε υπ' όψη η ακτινοβολία ( $\alpha_r$ ) και η συναγωγή θερμότητας ( $\alpha_c$ ):

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c$$

[4.111]

Η παρούσα ανάλυση ισχύει όχι μόνο για αγωγούς γραμμών μεταφοράς, αλλά και για οποιονδήποτε γυμνό αγωγό απείρου μήκους.

Ο συντελεστής μεταφοράς αποτελείται αθροιστικά από τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, δι' ακτινοβολίας  $\alpha_r$  και τον συντελεστή μετάδοσης δια συναγωγής  $\alpha_c$ .

Ο συντελεστής ακτινοβολίας εξάγεται από το νόμο των Stefan-Boltzmann (VDI-Warmeatlas, Ka 5):

$$\alpha_r = 5,770 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{T_\alpha}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_\pi}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{\Delta\theta} \quad \text{W/m}^2\text{°C}$$

[4.112]

Όπου  $T_\alpha, T_\pi$  είναι οι απόλυτες θερμοκρασίες του αγωγού και του περιβάλλοντος αντίστοιχα και:

$$\Delta\theta = T_\alpha - T_\pi$$

Ο συντελεστής  $\varepsilon$  είναι η σταθερά απορρόφησης και ισχύει για μέλαν σώμα  $\varepsilon=1$  και για αγωγούς  $\varepsilon=0,5$

Εφ' όσον οι διαφορές θερμοκρασίας του αγωγού από το περιβάλλον είναι μικρότερες των απόλυτων θερμοκρασιών, δηλαδή:

$$\Delta\theta = T_\alpha - T_\pi < T_\pi$$

[4.113]

Μπορούμε να απλοποιήσουμε την παραπάνω σχέση 4.112 και να προκύψει για το  $\alpha_r$ :

$$\alpha_r \approx 0,2268 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{T_\pi}{100}\right)^3 \quad [4.114]$$

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος  $35^\circ \text{C}$ , δηλαδή για  $T_\pi = 237^\circ + 35^\circ$  Και  $\varepsilon=0,5$  Προκύπτει:

$\alpha_r \approx 3,313 \text{ W/m}^2\text{C} = \text{O συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, δι' ακτινοβολίας.}$

Ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας,  $\alpha_c$ , έχει υπολογιστεί σαν συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα  $u$  και της διαμέτρου του αγωγού  $d$ . Μπορεί να προσδιοριστεί από πίνακες του VDI-Warheatlas, ή και εξίσου καλά, από τον παρακάτω αριθμητικό τύπο:

$$\alpha_c \approx 2,84 \sqrt{\frac{u(\text{m/s})}{d(\text{m})}} \text{ W/m}^2\text{C} \quad [4.115]$$

Για  $u = 0,6 \text{ (m/s)}$ , προκύπτει ο παρακάτω τύπος και οι αριθμητικές τιμές για διαφόρους διαμέτρους του αγωγού:

$$\alpha_c \approx \frac{2,2}{\sqrt{d(\text{m})}} \text{ W/m}^2\text{C} = \text{O συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, δια συναγωγής.} \quad [4.116]$$

Τελικά, το θερμικό όριο προσδιορίζεται από την σχέση 4.110, ως εξής:

$$I_{th} = \frac{A'(\alpha_r + \alpha_c)\Delta\theta}{R'} \quad [4.117]$$

#### 4.6.2 Υπολογισμός επιτρεπόμενου ρεύματος σε βραχυχρόνιες καταπονήσεις

Κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, λόγω του μικρού χρόνου διάρκειάς του, ο αγωγός δεν προλαβαίνει να αποδώσει στο περιβάλλον θερμότητα. Το σημαντικότερο μέρος της θερμότητας αποδίδεται στο περιβάλλον, δηλαδή επιτελείτε η ψύξη, μετά το βραχυκύκλωμα. Η θερμοκρασία ανυψώνεται σε μια μεγίστη τιμή στο τέλος της χρονικής διάρκειας του βραχυκυκλώματος και μετά πέφτει. Όλη η θερμότητα που παράγεται κατά το βραχυκύκλωμα οδηγεί στην ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού. Ισχύει η σχέση:

$$\frac{I_{th}}{S} \cdot \sqrt{t} = J_{th} \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{c}{\alpha\rho} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_t - 20)}{1 + \alpha(\theta_a - 20)}} \quad [4.118]$$

όπου :

$$I_{th} = \text{η ενεργός τιμή του ρεύματος, } I_{th} = \left[ \frac{1}{t} \cdot \int_0^t i^2 dt \right].$$

S = η διατομή του αγωγού.

t = η χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

$J_{th}$  = η ενεργός τιμή της ρευματικής πυκνότητας.

c = η ειδική θερμοχωρητικότητα κατά όγκο ( $J/mm^3 \text{ } ^\circ C$ ).

$\alpha$  = ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης στους  $20^\circ C$ .

$\theta_w, \theta_\tau$  = οι θερμοκρασίες στην αρχή και στο τέλος του βραχυκυκλώματος.

$\rho$  = η ειδική αντίσταση του αγωγού στους  $20^\circ C$ .

#### 4.6.3 Απώλειες ισχύος, οικονομική διατομή αγωγών

Οι απώλειες σε γραμμές μεταφοράς συνεπάγονται ένα διαρκές κόστος ενέργειας, που επιβαρύνει την επιχείρηση ηλεκτρισμού. Το κόστος αυτό είναι σημαντικό και μπορεί να ελαττωθεί με τους εξής τρόπους:

- Μειώνοντας το ρεύμα με διόρθωση του συντελεστή ισχύος (cosφ),
- Ελαττώνοντας τις απώλειες Κορώνα με διάφορα μέσα, π.χ. με πολλαπλούς αγωγούς ή δακτυλίους που εξομαλύνουν το πεδίο και
- Αυξάνοντας την διατομή q του αγωγού.

Οι απώλειες Κορώνα είναι ασήμαντες για τάσεις μεταφοράς κάτω των 200kV. Για υψηλότερες τάσεις, π.χ. 400kV, φτάνουν και τα 4-10% των συνολικών απωλειών. Οι ωμικές απώλειες W μιας τριφασικής γραμμής ανά έτος εκφράζονται, για ένα τριφασικό σύστημα, ως εξής:

$$W = 3 \frac{l}{\sigma \cdot q} \cdot I_N^2 \cdot \theta \cdot T$$

[4.119]

Με

$$\theta = \frac{l}{I_N^2} \int_0^T I^2 dt$$

[4.120]

Όπου l το μήκος,  $\sigma$  η αγωγιμότητα, q η διατομή του αγωγού,  $I_N$  το ονομαστικό ρεύμα,  $\theta$  ο συντελεστής απωλειών και T η διάρκεια του έτους =8760 h.

Ο συντελεστής  $\theta$  εξαρτάται από την καμπύλη φόρτισης της γραμμής, δηλαδή από την συνάρτηση ρεύματος - χρόνου. Είναι  $\theta=0,4-1$ . Για δίκτυα διανομής μπορεί να ληφθεί  $\theta=0,4$ , ενώ για γραμμές που συνδέουν εργοστάσια βάσης, μπορεί να είναι  $\theta=1$ .

Προσεγγιστικά μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής απωλειών από τον συντελεστή φόρτισης  $m$  κατά δυο τρόπους:

$$\theta \approx 0,3 \cdot m + 0,7 \cdot m^2 \quad \text{ή} \quad \theta \approx m^{1,6}$$

Ας θεωρήσουμε τώρα το ετήσιο κόστος μιας γραμμής. το κεφάλαιο, έστω  $K$ , που απαιτείται για την κατασκευή της γραμμής, εξαρτάται κατά ένα μέρος του, από την διατομή  $q$  και κατά ένα άλλο μέρος είναι ανεξάρτητο αυτής.

Κάθε χρόνο θα έχουμε ένα κόστος απωλειών που θα εξαρτάται από την τιμή της kWh τον χρόνο αυτό. Αν θεωρήσουμε ένα διάστημα  $n$  ετών, τότε μπορούμε να ανάγουμε το κόστος απωλειών του κάθε έτους στο έτος κατασκευής της γραμμής με την μέθοδο της παρούσας αξίας.

Η ολική επιβάρυνση  $K$ , που θα προκύψει για την κατασκευή και τις απώλειες, θα είναι συνάρτηση της διατομής και μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$K = K_1 + K_{2q} + \frac{K_3}{q} \quad [4.121]$$

Όπου  $K_1 + K_{2q}$  το κόστος της κατασκευής και  $\frac{K_3}{q}$  το κόστος απωλειών. Η παραπάνω συνάρτηση ελαχιστοποιήστε για:

$$q = \sqrt{\frac{K_3}{K_2}} \quad [4.122]$$

Προφανώς, γι αυτή την βέλτιστη διατομή το κόστος απωλειών είναι ίσο με το, από την διατομή εξαρτώμενο, κόστος κατασκευής. Το ελάχιστο κόστος θα είναι:

$$\min(K) = K_1 + 2\sqrt{K_2 \cdot K_3} \quad [4.123]$$

Τα αποτελέσματα του παραπάνω τύπου για την βέλτιστη διατομή δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη και άλλα κριτήρια. Ο λόγος είναι ότι στους υπολογισμούς, υπεισέρχονται άγνωστοι παράγοντες, όπως η εξέλιξη του φορτίου και του συντελεστή απωλειών. Πέραν τούτου, το ελάχιστο κόστος δεν μεταβάλλεται σημαντικά όταν απομακρυνθούμε από την ελάχιστη διατομή. Άλλοι λόγοι όμως, όπως η τυποποίηση, επιβάλουν περιορισμούς στον αριθμό των διατομών. Έτσι για παράδειγμα στην Ελλάδα οι

εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης έχουν συνήθως τρεις διατομές αγωγών Al/St (336MCM=170mm<sup>2</sup>, 636MCM=322 mm<sup>2</sup>, 954MCM=483 mm<sup>2</sup>).

## 4.7 Άεργος Ισχύς και αντιστάθμιση

### 4.7.1 Η σημασία της αντιστάθμισης, διόρθωση του συντελεστή ισχύος

Η παραγωγή αέργου ισχύος με άεργα στοιχεία, όπως πυκνωτές αυτεπαγωγές ή σύγχρονους πυκνωτές, χρησιμοποιείται για να αλλάξουμε την άεργο ισχύ του καταναλωτή ή μιας γραμμής, οπότε μιλάμε για *αντιστάθμιση*

Η άεργος ισχύ δεν παράγει άμεσο έργο. Προέρχεται από το γεγονός ότι, στις αυτεπαγωγές ή πυκνωτές, δημιουργούνται περιοδικά πεδία. Δηλαδή, ενέργεια απορροφάτε από το δίκτυο κατά την διάκρια δημιουργίας του πεδίου και αποδίδετε πάλι στο δίκτυο κατά την διάρκεια μείωσης του πεδίου. Σε έναν πυκνωτή C, που τίθεται υπό τάση  $u(t) = \sqrt{2}U\cos\omega t$ , το ρεύμα είναι  $i(t) = \sqrt{2}\omega C \cdot \cos(\omega t + 90^0)$  και η ισχύς είναι χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος, διπλάσιας συχνότητας:

$$p_c(t) = u(t) \cdot i(t) = U^2 \omega C \cdot \cos(2\omega t + 90^0) = W_c \omega \cdot \cos(2\omega t + 90^0) \quad [4.124]$$

Όπου  $W_c$  η μέγιστη ηλεκτροστατική ενέργεια στον πυκνωτή και είναι:

$$W_c = \frac{1}{2} C \cdot (\sqrt{2}U)^2 = CU^2$$

Ομοίως προκύπτουν για μια αυτεπαγωγή, που τίθεται υπό τάση, τα εξής:

$$p_L(t) = \frac{U^2}{\omega L} \cos(2\omega t + 90^0) = W_L \omega \cdot \cos(2\omega t + 90^0) \quad [4.125]$$

Όπου  $W_L$  η μέγιστη μαγνητική ενέργεια στο πηνίο

$$W_L = \frac{1}{2} L \cdot \left(\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\right)^2 = \frac{U^2}{\omega L}$$

Σε μιγαδικές παραστάσεις, ισχύει για της μιγαδικές ισχύεις  $\bar{S}_C$ ,  $\bar{S}_L$  ενός πύκνωση ή μιας αυτεπαγωγής, σε μονοφασικό κύκλωμα, τα εξής:

$$\bar{S}_C = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = iQ_c = - , iU2\omega C = -iW_c\omega$$

$$\bar{S}_L = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = iQ_L = i \frac{U^2}{\omega L} = \langle W_L \omega$$

[4.126]

Τα μεγέθη  $Q_C$  και  $Q_L$  είναι άεργες ισχύεις. Για την σύμβαση φοράς καταναλωτή ισχύει ότι, για χωρητικό καταναλωτή είναι  $Q_C < 0$  και για επαγωγικό  $Q_L > 0$ . Σαν φυσικές έννοιες, τα  $Q_C, Q_L$  είναι η εκάστοτε μέγιστη τιμή της ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής ισχύος, που ρέει στον πυκνωτή ή στην αυτεπαγωγή.

Η άεργος ισχύς μεταβάλλει τα παρακάτω μεγέθη ενός δικτύου:

- Το ρεύμα του φορτίου και της απώλειες των γραμμών που τροφοδοτούν αυτό. Οι απώλειες  $P_V$  είναι ανάλογες της ισχύος  $P$  και αντίστροφα ανάλογες του τετραγώνου του συντελεστή ισχύος:

$$P_V = 3RI^2 = R \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}, R = \text{αντίσταση μιας φάσης}$$

Οι απώλειες ελαχιστοποιούνται για  $\cos \varphi = 1$ , δηλαδή  $\varphi = 0$ .

- Την πτώση τάσης των γραμμών. Η πτώση τάσης στις γραμμές υψηλής τάσης εξαρτάται, κατά ένα μεγάλο μέρος, από το άεργο φορτίο του καταναλωτή.
- Την φυσική αντίδραση της γραμμής. Με μέσα αντιστάθμισης ενεργούμε στις γραμμές μεταφοράς, αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή την διαμήκη αυτεπαγωγή τους ή την εγκάρσια χωρητικότητα τους. Έτσι, μπορούμε να αλλάξουμε την φυσική ισχύ μιας γραμμής και το όριο ευστάθειας ενός συστήματος μεταφοράς.

#### Διόρθωση του συντελεστή ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος  $s'$  ένα τριφασικό ή μονοφασικό καταναλωτή  $\cos \varphi = P/S$  αλλάζει από  $\cos \varphi_1$  σε  $\cos \varphi_2$  βάζοντας, προφανώς, την εξής πρόσθετη άεργο ισχύ  $Q_{II}$  στην θέση του καταναλωτή:

$$Q_{II} = P \tan \varphi_2 - P \tan \varphi_1$$

[4.127]

$Q_{II} < 0$  πυκνωτές

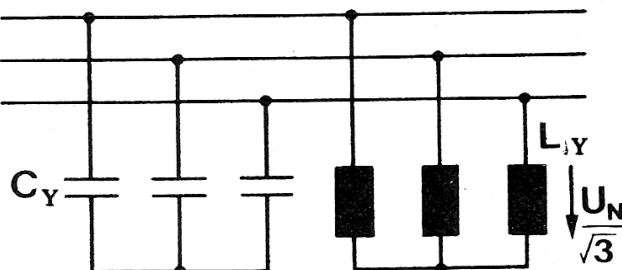
$Q_{II} > 0$  αυτεπαγωγές

Εδώ είναι  $P, Q_{II}$  συνολικές ισχύεις, δηλαδή και για τις τρεις φάσεις στην περίπτωση τριφασικού κυκλώματος. Η γωνία  $\varphi$  είναι η γωνία μεταξύ φασικής τάσης και ρεύματος.

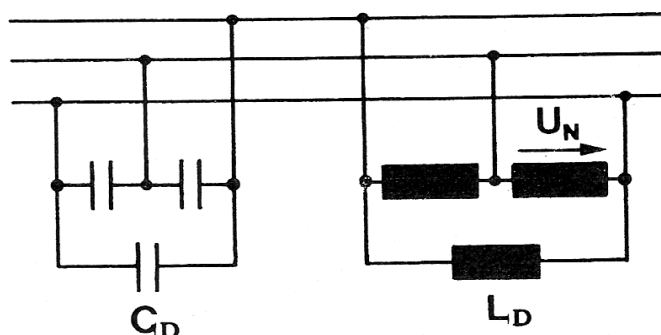
Η γωνία  $\varphi$  ενός φορτίου στο σύστημα φορών του καταναλωτή θεωρείτε θετική, για επαγωγικό καταναλωτή, αλλιώς είναι αρνητική. Αν πρέπει το  $\cos \varphi$ , να κρατηθεί σταθερό πρέπει, όταν

αλλάζει το φορτίο του καταναλωτή, να μεταβληθούν και τα μέσα αντιστάθμισης, δηλαδή επιθυμούμε μια ρύθμιση τους.

Η σύνδεση των στοιχείων αυτεπαγωγών  $L$  ή πυκνωτών  $C$  γίνεται κατά αστέρα ( $Y$ ) μεταξύ φάσεων και ουδετέρου, αλλά και κατά τρίγωνο ( $\Delta$ ) μεταξύ φάσεων.



Σχήμα 4.14: Σύνδεση πυκνωτών και αυτεπαγωγών κατ αστέρα.



Σχήμα 4.15: Σύνδεση πυκνωτών και αυτεπαγωγών κατά τρίγωνο.

αν  $L$ ,  $C$  είναι κάθε μια από τις αυτεπαγωγές ή χωρητικότητες που θα χρησιμοποιηθούν και  $U$  είναι η ενεργός τιμή της πολικής τάσης τότε η άεργος ισχύς είναι για σύνδεση αστέρα ή τρίγωνο, ως εξής:

$$Q_C = -U^2 \omega C_Y, \quad Q_L = \frac{U^2}{\omega L_Y} \quad \text{σύνδεση σε αστέρα}$$

$$Q_C = -3U^2 \omega C_\Delta, \quad Q_L = 3 \frac{U^2}{\omega L_\Delta} \quad \text{σύνδεση σε τρίγωνο}$$

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3}, \quad L_\Delta = 3L_Y \quad \text{σχέσεις αστέρα - τρίγωνου}$$

[4.128]

όπου  $U$  η πολική τάση και  $Q_C, Q_L$  οι τριφασικές ισχύς.

Ενώ και στις δυο συνδεσμολογίες Υ,Δ η ισχύς ανά πυκνωτή είναι η ίδια, διαφέρουν οι τάσεις στους ακροδέκτες και η χωρητικότητα. Σε αστέρα εφαρμόζεται η φασική τάση, ενώ σε τρίγωνο η πολική.

Σε μονοφασικά κυκλώματα έχουμε για την άεργο ισχύ:

$$Q_C = -U^2 \omega C, \quad [4.129]$$

$$Q_L = \frac{U^2}{\omega L} \quad [4.130]$$

Όπου  $U$  η φασική τάση.

Η άεργος ισχύς μπορεί να αντισταθμιστεί τοπικά, ομαδικά ή γενικά.

- *Τοπική αντιστάθμιση* γίνεται για παράδειγμα σε ασύγχρονο κινητήρα ξεχωριστά.
- *Ομαδική αντιστάθμιση* γίνεται σε ομάδες ομοίων συσκευών, για παράδειγμα πολλούς κινητήρες μαζί.
- *Γενική αντιστάθμιση* γίνεται στην είσοδο της ισχύος, δηλαδή στον υποσταθμό του καταναλωτή. Η γενική αντιστάθμιση συνδυάζεται συνήθως και με ρυθμιζόμενους πυκνωτές, με στόχο την διατήρηση ενός, περίπου σταθερού, συντελεστή ισχύος. Χρησιμοποιούνται διακόπτες πυκνωτών. Αυτά τα συστήματα θα αναπτυχτούν στα επόμενα.

#### 4.7.2 Άεργος ισχύς σε γραμμές μεταφοράς

Στις γραμμές μεταφοράς απαιτούνται αντισταθμίσεις αέργου ισχύος, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ή και της πτώσης τάσης. Επίσης για λόγους ευστάθειας, χρησιμοποιούνται πυκνωτές για την τεχνητή επιβράχυνση της γραμμής. Έτσι για παράδειγμα αντί για 500km να εμφανίζονται μόνο 250km.

Αν η τάση της γραμμής είναι  $U$  και το φορτίο  $I$ , τότε η άεργος ισχύς που καταναλίσκετε είναι το άθροισμα της επαγωγικής  $Q_L$ , και της χωρητικής  $Q_C$ , ισχύος της γραμμής:

$$Q = Q_L + Q_C \quad [4.131]$$

$$Q = 3I^2 \omega L - U^2 \omega C \quad [4.132]$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, η φυσική ισχύς, το ρεύμα και η κυματική αντίσταση είναι:



$$P_N = \frac{U^2}{\sqrt{L/C}}, I = \frac{S}{\sqrt{3}U}, Z_0 = \sqrt{L/C}$$

Η άεργος ισχύς της γραμμής δίνεται από την σχέση:

$$Q = U^2 \omega C \left( \frac{S^2}{P_N^2} - 1 \right) = P_N \frac{Z_0}{\omega C} \left( \frac{S^2}{P_N^2} - 1 \right) \quad [4.133]$$

Όπου S η ισχύς μεταφοράς. Για γραμμές εν κενό, S = 0, η ισχύς που παραγάγεται είναι:

$$Q_0 = -U^2 \omega C = -P_N \frac{Z_0}{\omega C} \quad [4.134]$$

Για διάφορες τάσεις ισχύει προσεγγιστικά για τις τρεις φάσεις:

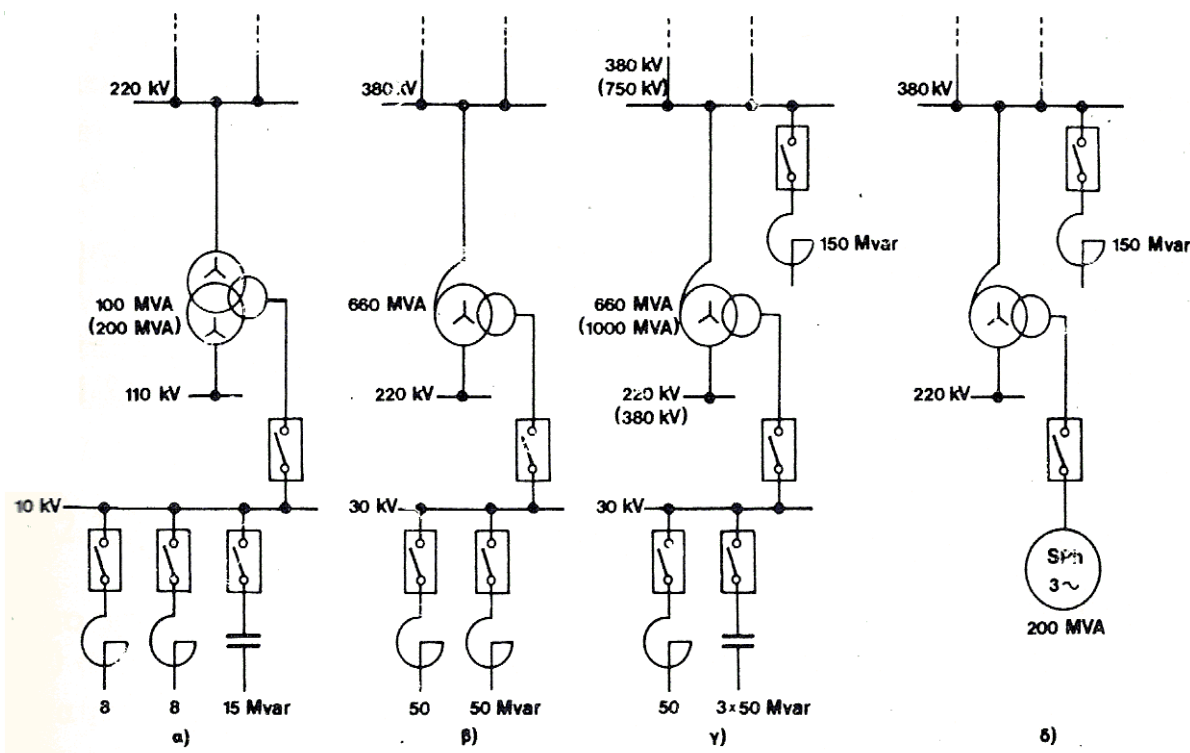
U (kV)	15	20	66	150	400
Q <sub>0</sub> (kVar/km)	0,84	1,5	12	58-65	570

Πίνακας 4.4: Άεργος ισχύς των τριών φάσεων για διάφορες τιμές τάσης.

Η απαιτούμενη άεργος ισχύς στο δίκτυο δίνεται, κυρίως, από τις γεννήτριες των σταθμών παραγωγής. Σε γραμμές μεταφοράς γίνεται χρήση στατών πυκνωτών και σπανίως στρεφόμενων πυκνωτών. Στρεφόμενοι πυκνωτές χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει ανάγκη ρύθμισης ισχύος, σε χρόνο τάξης μεγέθους 0,1-1sec. Όπως για παράδειγμα σε μακριές γραμμές μεταφοράς, l > 400km.

Στην περίπτωση που η γεννήτρια δίνει την άεργο ισχύ τότε, επειδή δουλεύει με αυξημένο ρεύμα, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Πυκνωτές και αυτεπαγωγές έχουν επίσης απώλειες ισχύος. Γενικά, όμως, οι απώλειες σε πυκνωτές και αυτεπαγωγές είναι λιγότερες απ ότι αν η αντιστάθμιση γινόταν με γεννήτριες.

Η αντιστάθμιση στους υποσταθμούς δικτύων υψηλής τάσης, με πυκνωτές ή αυτεπαγωγές, συνδέεται στην τάση των 10-30kV, γιατί συμφέρει οικονομικά. Τα μέσα αντιστάθμισης συνδέονται στο τρίτευόν τύλιγμα του μετασχηματιστή που πρέπει, έτσι κι αλλιώς να υπάρχει. Το σχήμα 4.16 απεικονίζει τέτοιες συνδεσμολογίες.



Σχήμα 4.16: Διατάξεις αντιστάθμισης σε υποσταθμούς του δικτύου.

α, β) Αντιστάθμιση συνδεδεμένη στο τριτεόν τύλιγμα.

γ) Αντιστάθμιση στο τριτεόν τύλιγμα και πρόσθετη αντιστάθμιση με πηνίο στην υψηλή τάση για την εν κενό λειτουργία της γραμμής.

δ) Αντιστάθμιση με σύγχρονο πυκνωτή.

### 4.7.3 Μέσα αντιστάθμισης

#### 4.7.4. Πυκνωτές

Οι πυκνωτές κατασκευάζονται σε στοιχεία μικρής ισχύος και συνδέονται εν σειρά ή εν παράλληλω, για να δημιουργηθούν οι μονάδες που πωλούνται στο εμπόριο. Κάθε στοιχείο πυκνωτή αποτελείται από δυο φύλα αλουμινίου σαν ηλεκτρόδια και με χάρτινες στρώσεις σαν μόνωση, αυτός είναι ο πυκνωτής δυο πλακών. Αφού συνδεθούν τα στοιχεία, τοποθετούνται σε ένα δοχείο και αφού τους αφαιρεθεί η υγρασία εν κενό και σε θερμοκρασία 80°C περίπου, εμποτίζονται με μονωτικό λάδι. Έτσι προκύπτει μια μονάδα, ένας πυκνωτής με δυο πόλους. Με απλές πράξεις προκύπτει ότι, για σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, ίσο με το επιτρεπόμενο πεδίο στο διηλεκτρικό, ο όγκος του πυκνωτή είναι ανάλογος της άεργης ισχύος του. Άρα και η τιμή

της αγοράς, που είναι ανάλογη του όγκου, είναι ανάλογη της άεργης ισχύος, δηλαδή των kVar του πυκνωτή.

$$|Q_C| = U^2 \omega C = (E \cdot d)^2 \cdot \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \right) \cdot \omega$$

[4.135]

$$|Q_C| = E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \omega \cdot V$$

[4.136]

Όπου:

$V$  = ο όγκος του διηλεκτρικού,  $A$  = η επιφάνεια του ηλεκτροδίου,  $E$  = η ενεργός τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης παιδικής έντασης σε (V/m) στο διηλεκτρικό =  $U/d$ ,  $d$  = το πάχος του μονωτικού,  $\epsilon_0, \epsilon_r$  = η διηλεκτρική σταθερά του κενού και η σχετική διηλεκτρική σταθερά,  $\omega = 2\pi f$  η κυκλική συχνότητα.

Οι πυκνωτές παρουσιάζουν και κατανάλωση ενεργού ισχύος  $P_V$ , που εκδηλώνετε σαν θερμότητα. Αυτή οφείλεται στις διηλεκτρικές απώλειες και εξαρτάται από την συχνότητα, την τάση και την θερμοκρασία. Ο χαρακτηρισμός των απωλειών γίνεται με τον συντελεστή απωλειών  $\tan\delta$  και ισχύει:

$$P_V = Q \cdot \tan\delta$$

[4.137]

Όπου η  $Q$  άεργος ισχύς του πυκνωτή. Για πυκνωτές ισχύος, 50Hz, είναι  $\tan\delta = (5 - 10)10^{-3}$

#### 4.7.5 Αυτεπαγωγές

Αυτεπαγωγές για αντιστάθμιση κατασκευάζονται σαν τρία σωληνωτά πηνία, χωρίς σιδερένιο πυρήνα ή και με σιδερένιο πυρήνα. Πηνία χωρίς πυρήνα έχουν μεγάλο πεδίο σκέδασης, που είναι ενοχλητικό για τον περιβάλλον χώρο καθώς προκαλεί δινορεύματα και υπερθέρμανση των πλησίον μεταλλικών αντικειμένων. Πηνία με πυρήνα κατασκευάζονται όπως ένας τριφασικός μετασχηματιστής. Οι πυρήνες, όμως, διακόπτονται με ένα διάκενο μερικών mm, για να εξασφαλιστεί μια σταθερή αυτεπαγωγή και η ισχύς που απαιτείται.

Ο υπολογισμός των σπειρών σε πηνία με πυρήνα, προσδιορίζεται από την τάση και την διατομή του σιδήρου, όπως ακριβώς και σε μετασχηματιστή.

#### 4.7.6 Στρεφόμενος ή σύγχρονος πυκνωτής

Στρεφόμενος πυκνωτής είναι μια σύγχρονη μηχανή που δεν δίνει ή παίρνει ενεργό ισχύ από το δίκτυο, εκτός από αυτή που χρειάζεται για την κάλυψη των απωλειών της. Αν η ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής είναι  $E$  και η σύγχρονη αντίδραση της είναι  $X$  και συνδεθεί με δίκτυο τάσης  $U$ , η άεργος ισχύς της είναι:

$$Q = \frac{(E - U)}{X}$$

[4.138]

$Q > 0$  σημαίνει ότι η μηχανή ενεργεί σαν πυκνωτής, δίνει άεργο ισχύ στο δίκτυο.

$Q < 0$  σημαίνει ότι η μηχανή ενεργεί σαν αυτεπαγωγή, και καταναλώνει άεργο ισχύ από το δίκτυο.

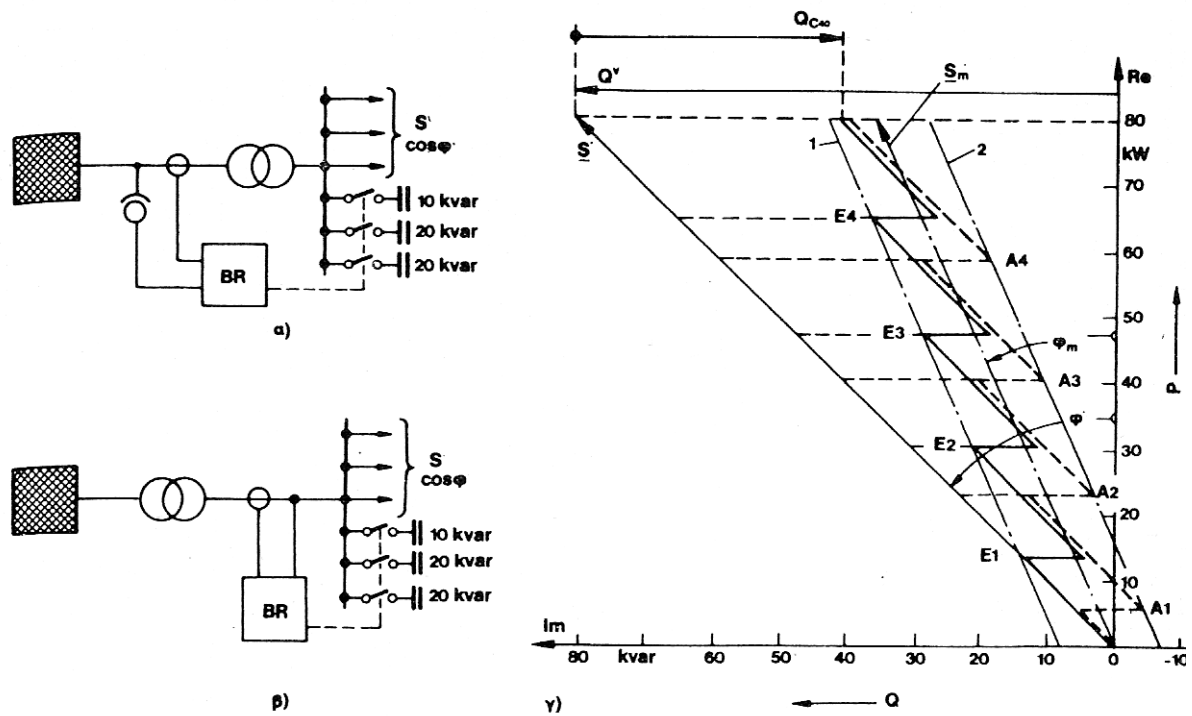
Στον στρεφόμενο πυκνωτή, η ρύθμιση της άεργης ισχύος είναι εύκολη και γρήγορη διαδικασία. Εκεί ρυθμίζετε η τάση της διέγερσης και έτσι μεταβάλετε η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E$ .

#### 4.7.7 Ρυθμιζόμενα συστήματα

##### Ρυθμιζόμενες χωρητικότητες

Εάν δεν έχουμε στρεφόμενους πυκνωτές, η ρύθμιση της άεργης ισχύος μπορεί να γίνει αλλάζοντας την τιμή του  $\eta$ . Η τιμή των χωρητικοτήτων αλλάζει με διακόπτες ή θυρίστορ. Για παράδειγμα, έχουμε πέντε συνδυασμούς πυκνωτών στην διάθεση μας και θέτουμε στο κύκλωμα από μια έως πέντε χωρητικότητες ανοιγοκλείνοντας διακόπτες. Αυτό δεν γίνεται σε έτοιμες συσκευές του εμπορίου, υπάρχουν όργανα που μετρούν το  $\cos\phi$  και θέτουν αυτόματα εντός ή εκτός πυκνωτές ώστε να επιτευχθεί ή απαιτούμενη διόρθωση.

Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται πρέπει να μπορούν να αποξεύξουν χωρητικό φορτίο, (σχήμα 4.18). το σχήμα 4.17 απεικονίζει μια λύση όπου χρησιμοποιούνται τρεις πυκνωτές 10, 20, 20 kVar. Οι τρεις πυκνωτές μπορούν να δώσουν σε συνδυασμούς 10, 20, 30, 40, 50kVar. Ας παρακολουθήσουμε την ρύθμιση αυτή στο διάγραμμα  $P, Q$  του σχήματος 4.17. Εκεί το φορτίο  $P, Q$  μεταβάλλετε πάνω σε μια ευθεία την  $\bar{S}$  που παριστάνει την μιγαδική ισχύ του φορτίου, εφ' όσον ο συντελεστής ισχύος,  $\cos\phi$ , του φορτίου είναι σταθερός. Η ρύθμιση γίνεται με στόχο να έχουμε αντί της ευθείας  $\bar{S}$  την ρυθμιζόμενη τιμή  $\bar{S}_m$  με  $\cos\phi_m$ . Αυτό επιτελείτε ως εξής: Όταν το φορτίο αυξάνεται, προστίθενται πυκνωτές, εφ' όσον υπερβούμε μια ορισμένη απόκλιση  $\bar{A}Q$  από την μέση ισχύ  $\bar{S}_m$ , για παράδειγμα στα σημεία  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ . Όταν το φορτίο μειώνεται (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα), τότε αφαιρούνται πυκνωτές, εφ' όσον η απόκλιση είναι πάλι  $\bar{A}Q$  από την μέση ισχύ  $\bar{S}_m$ , για παράδειγμα στα σημεία  $A_1, A_2, A_3, A_4$  του σχήματος 4.17.

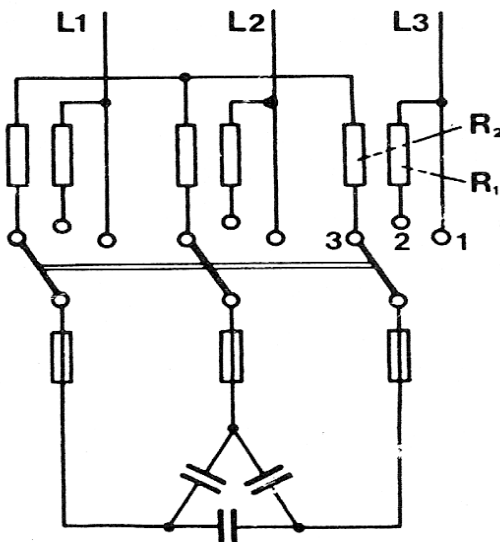


Σχήμα 4.17: Γενική αντιστάθμιση με ρύθμιση αέργου ισχύος. BR=ρυθμιστής αέργου ισχύος.

α) Ρύθμιση του  $\cos \phi$  πριν τον μετασχηματιστή.

β) Ρύθμιση του  $\cos \phi$  μετά τον μετασχηματιστή.

γ) Διάγραμμα ενεργού-αέργου ισχύος.



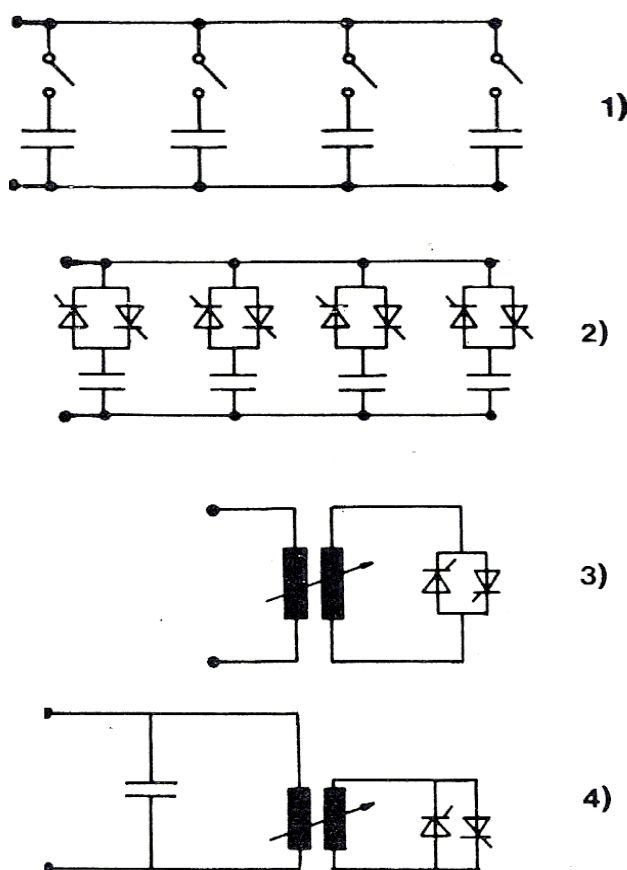
Σχήμα 4.18: Διακόπτης πυκνωτών

1= θέση εντός, 2= παροδική θέση, 3= θέση εκτός.

*Ρυθμιζόμενες αυτεπαγωγές*

Αν πρέπει να καταναλώσουμε άεργη ισχύ, τότε χιάζονται αυτεπαγωγές. Η τιμή της αυτεπαγωγής αλλάζει χρησιμοποιώντας πηνία με ενδιάμεσες λήψεις, που αντιστοιχούν σε διαφορετικό αριθμό σπειρών. Μια συνεχής αλλαγή μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας θυρίστορ, όπως στο σχήμα 4.19. Ελέγχοντας την γωνία ένευσης  $\alpha$  των θυρίστορ από  $\alpha = 90^0$  μέχρι  $180^0$  (αποκοπή φάσης), μπορούμε να ελέγξουμε το άεργο ρεύμα, κατά τα γνωστά από τα ηλεκτρονικά ισχύος, από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή.

Μπορούμε επίσης, να χρησιμοποιήσουμε για συνεχή και γρήγορη ρύθμιση άεργου φορτίου, συστήματα αποτελούμενα από πυκνωτές σταθερούς και αυτεπαγωγές με συνεχώς μεταβαλλόμενο άεργο ρεύμα, μέσω θυρίστορ.

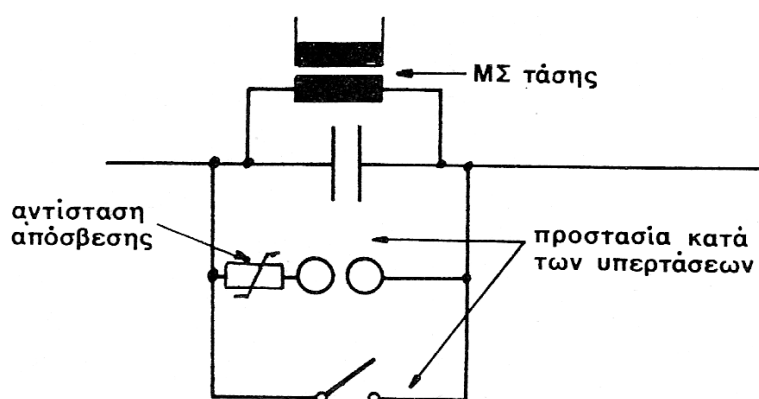


Σχήμα 4.19: Ρυθμιζόμενα συστήματα. 1) πυκνωτές με διακόπτες, 2) πυκνωτές με θυρίστορ, 3) αυτεπαγωγές με θυρίστορ, 4) πυκνωτές με ρυθμιζόμενη αυτεπαγωγή.

**4.7.8 Πυκνωτές σειράς**

Σε γραμμές που θέλουμε να αυξήσουμε την φυσική ισχύ ή την ευστάθεια, χρησιμοποιούμε πυκνωτές σειράς, (σχήμα 4.20). Δηλαδή, οι αγωγοί των φάσεων διακόπτονται και παρεμβάλλονται πυκνωτές, οι οποίοι φέρουν το ρεύμα του φορτίου. Στην ουσία, η διαμήκης αντίδραση μιας γραμμής, μήκους  $l$ , που ήταν  $l \cdot \omega L$ , αλλάζει με έναν πυκνωτή χωρητικότητας  $C$  σε  $l \cdot (L\omega - 1/\omega C)$ . Ιδιαίτερη εφαρμογή βρίσκει αυτό το μέτρο σε μακριές γραμμές, άνω των 500km.

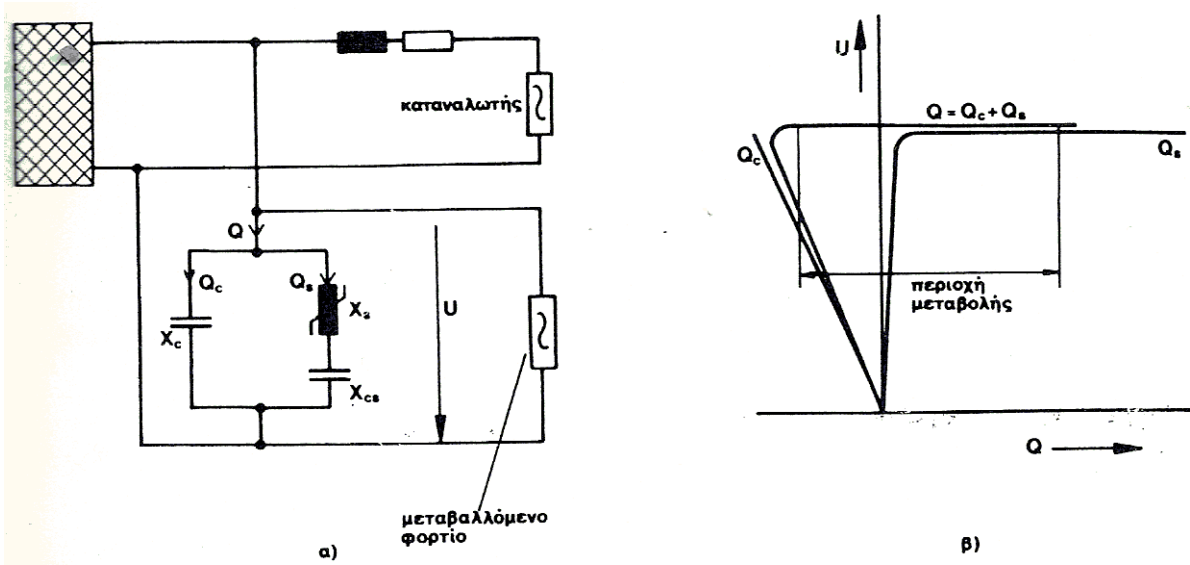
Οι πυκνωτές σειράς έχουν μικρή ονομαστική τάση λειτουργίας στα άκρα τους, για παράδειγμα 10%-20% της τάσης μεταφοράς. Στην περίπτωση όμως βραχυκυκλώματος στο φορτίο, υπάρχει κίνδυνος να εφαρμοστεί στα άκρα του τάση ίση, περίπου, με αυτή του δικτύου. Για να προστατευτούν οι πυκνωτές σειράς έναντι υπερτάσεων, χρησιμοποιούνται σπινθηριστές και διακόπτες, που βραχυκυκλώνουν τους πυκνωτές όταν, παρουσιαστεί βραχυκύκλωμα στο φορτίο.



Σχήμα 4.20: Πυκνωτής σειράς με σύστημα προστασίας.

#### 4.7.9 Πυκνωτές με παράλληλα πηνία με κορεσμένο πυρήνα

Στο φορτία μεταβαλλόμενης αέργου ισχύος, προκαλείται μεταβολή της τάσης. Ένας τρόπος αυτόματης αντιστάθμισης είναι να συνδέσουμε στον καταναλωτή σύστημα αποτελούμενο από έναν πυκνωτή με παράλληλο πηνίο. Το πηνίο αυτό λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού. Αυτή η διάταξη μειώνει σημαντικά την διακύμανση της τάσης. Στο σχήμα 4.21 φαίνεται ότι, ο συνδυασμός πυκνωτή πηνίου δίνει άεργη ισχύ με μικρή διακύμανση της τάσης και συνεπώς, καλύπτονται οι ανάγκες του καταναλωτή σε κυμαινόμενη άεργη ισχύ.



Σχήμα 4.21: Ρύθμιση άεργου ισχύος με πηνίο κορεσμένου σιδήρου, για ταχέως μεταβαλλόμενα φορτία.

α) διάταξη, β) διάγραμμα τάσης – άεργης ισχύος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### “ Υποσταθμοί”

#### 5.1 Υποσταθμοί δικτύου

Στην μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, η σύνδεση των διαφόρων γραμμών και ο υποβιβασμός ή η ανύψωση της τάσης απαιτεί ορισμένες συσκευές και διατάξεις, οι οποίες συγκεντρωμένες σε έναν ανοιχτό ή κλειστό χώρο αποτελούν τους *ηλεκτρικούς σταθμούς* ή *υποσταθμούς* (Substations, Stationen, Schaltanlagen). Παρόμοιοι υποσταθμοί χρησιμοποιούνται για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε καταναλωτές μέσης τάσης ή σε καταναλωτές του συστήματος μεταφοράς. Έτσι συναντάμε τους εξής υποσταθμούς.

- Υποσταθμοί υποβιβασμού ή ανύψωσης τάσης, σε δίκτυα μεταφοράς.
- Υποσταθμοί ζεύξης γραμμών, σε δίκτυα μεταφοράς.
- Μεικτοί υποσταθμοί οι οποίοι περιλαμβάνουν τους δυο προαναφερθέντες τύπους σε δίκτυα μεταφοράς.
- Υποσταθμοί διανομής και υποσταθμοί καταναλωτών.

Ένας υποσταθμός δέχεται εισερχόμενες και εξερχόμενες γραμμές. Η τάση, η ισχύς των μετασχηματιστών και το πλήθος των γραμμών που εξυπηρετεί ο υποσταθμός, αποτελούν μαζί ένα μέτρο για το μέγεθος του.

Οι *υποσταθμοί ανύψωσης τάσης* βρίσκονται κοντά στους σταθμούς παραγωγής. Προορισμός τους είναι η ανύψωση της τάσης παραγωγής στην τάση μεταφοράς. Κοντά στον χώρο του υποσταθμού ανύψωσης βρίσκονται και οι εγκαταστάσεις για την εξασφάλιση των 6kV, 3 kV και 220/380V που χρειάζονται για την τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων του σταθμού παραγωγής. Οι εγκαταστάσεις αυτές αποτελούν τον *υποσταθμό υπηρεσίας*. Ο υποσταθμός αυτός τροφοδοτείται και από την γεννήτρια του σταθμού και από τις γραμμές μεταφοράς με μετασχηματιστή υποβιβασμού 150/15 kV, ώστε σε περίπτωση βλάβης της γεννήτριας να υπάρχει ρεύμα που να τροφοδοτήσει τις βοηθητικές εγκαταστάσεις. Η ισχύς των υποσταθμών ανύψωσης εξαρτάτε από την παραγόμενη ενέργεια στον σταθμό παραγωγής.

Η πτώση τάσης, οι απώλειες ισχύος και γενικά το κόστος της ενέργειας που μεταφέρετε εξαρτάτε από την απόσταση μεταφοράς. Συνεπώς μια ορισμένη τάση μπορεί να εξυπηρετήσω καταναλώσεις που βρίσκονται μέσα σε μια ορισμένη απόσταση. Αν ξεπεράσουμε το όριο αυτό της μέγιστης απόστασης, θα πρέπει να αυξηθούν οι διατομές των γραμμών καθιστώντας την κατασκευή αντισυμβατική. Έτσι η ενέργεια μεταφέρετε με υψηλή τάση (Για το εθνικό Δίκτυο τις Ελλάδος στα 150,400kV) και υποβιβάζετε σε μέση τάση σε *σταθμούς υποβιβασμού*. Κατασκευάζουμε υποσταθμούς 150/20kV πρώτων για την προστασία του δικτύου των γραμμών, δεύτερον επειδή η οικονομική εμβέλεια της μέσης τάσης των 20kV είναι περίπου 70Km και τρίτον για την εξυπηρέτηση μια μεγάλης κατανάλωσης για παράδειγμα μια ηλεκτροβόρου βιομηχανία. Η εκλογή της ακριβούς θέσης του υποσταθμού είναι αποτέλεσμα τεχνοοικονομικής μελέτης. Πάντως οι υποσταθμοί στην Ελλάδα είναι συνήθως υπαίθριου τύπου και βρίσκονται έξω από πόλεις αφενός μεν γιατί εκεί τα οικόπεδα είναι φθηνότερα, αφετέρου μειώνετε ο κίνδυνος για τους κατοίκους από τον υποσταθμό και τις γραμμές υψηλής τάσης που φτάνουν εκεί.

Στοιχεία που απαιτούνται για την λειτουργία ενός υποσταθμού είναι συνήθως:

- Οι αποζεύκτες
- Οι γειωτές
- Οι διακόπτες ισχύος, οι οποίοι αποκαλούνται και *αυτόματοι διακόπτες* στην περίπτωση που η λειτουργία τους οδηγείτε από ειδικές συσκευές, τους *ηλεκτρονόμους*.
- Οι γραμμές
- Οι ζυγοί
- Οι μετασχηματιστές ισχύος
- Οι μετασχηματιστές οργάνων, δηλαδή μετασχηματιστές τάσης και έντασης

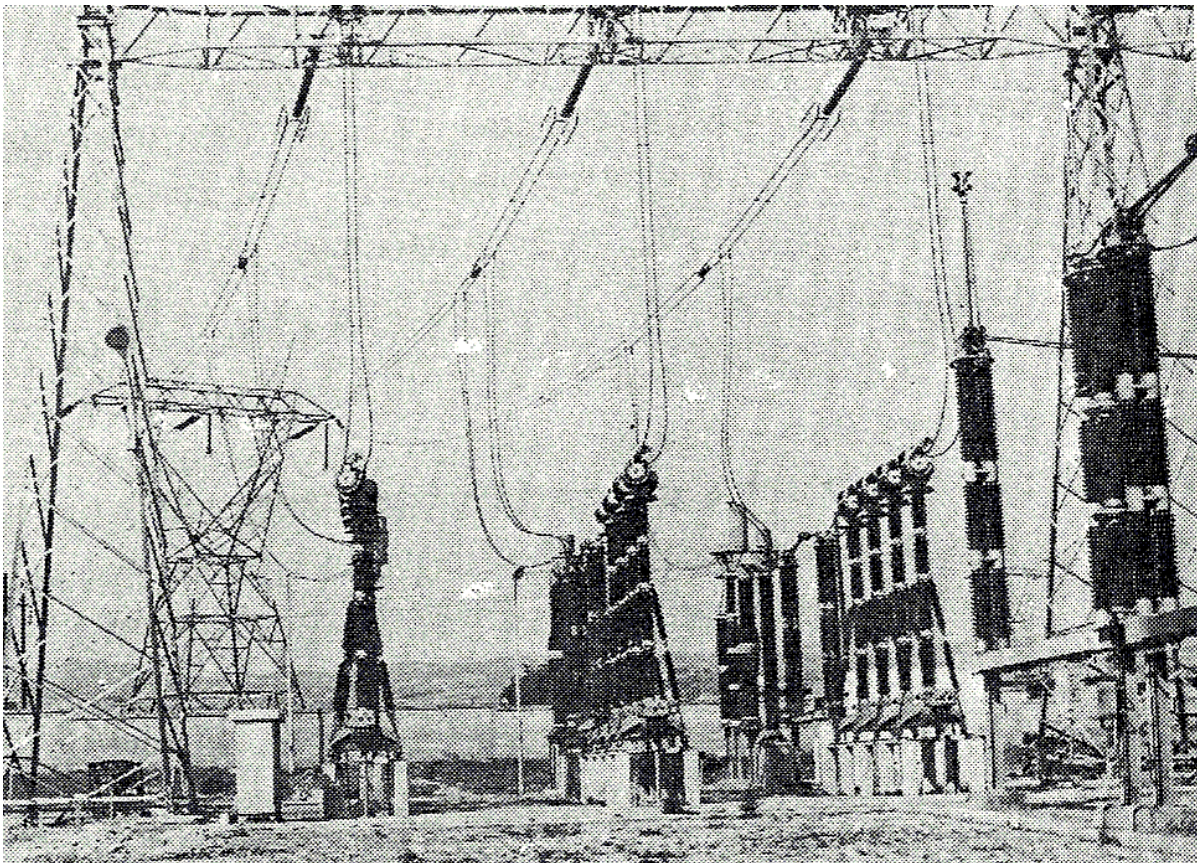
Οι *διακόπτες ισχύος* (Circuit Breaker, Leistungsschalter) μπορούν να διακόψουν τα κυκλώματα υπό οποιοσδήποτε συνθήκες όπως για παράδειγμα σε εκδήλωση βραχυκυκλώματος και να συνδέσουν τα κυκλώματα υπό φορτίο. Αυτοί σε κατάσταση ανοιχτή θεωρούνται ότι δεν μονώνουν πλήρως. Το ρόλο των διακοπών ισχύος μπορούν να τον αναλάβουν ασφάλειες ισχύος υψηλής τάσης. Αυτές περιγράφονται σαν ΗΗ-ασφάλειες (Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen) ή στην χαμηλή τάση σαν ΝΗ-ασφάλειες (Neiderspannungs-Hochleistungs-Sicherungen).

Οι *αποζεύκτες* (Isolators, Trennschalter) χρησιμοποιούνται για να απομονώσουν μια γραμμή, αφού πρώτα το κύκλωμα έχει διακοπεί από τον διακόπτη ισχύος. Οι αποζεύκτες δεν είναι σε θέση να διακόψουν ή να κλείσουν ένα κύκλωμα υπό τάση. Αποζεύκτες τοποθετούνται σε κάθε πλευρά του διακόπτη ισχύος, που τροφοδοτείτε με τάση. Αναλόγως του αν έρχεται η τάση τροφοδοσίας μονόπλευρα ή αμφίπλευρα, μπορούμε να έχουμε έναν διακόπτη ισχύος με έναν ή δυο αποζεύκτες.

Οι *γειωτές* (Earthing Switches, Erder) γειώνουν τα διάφορα τμήματα του υποσταθμού ούτως ώστε να γίνει εφικτή η εκτέλεση εργασιών ή για την αποφυγή της δημιουργίας τάσεως από ηλεκτροστατική επαγωγή. Προφανώς οι γειωτές πρέπει να μανδαλώνουν κατάλληλα, έτσι ώστε, να μην κλείσουν όταν ο διακόπτης ισχύος είναι κλειστός. Ανάλογη μανδάλωση πρέπει να γίνει και για τους αποζεύκτες έτσι ώστε να μην ανοίγουν πριν ανοίξει ο αντίστοιχος διακόπτης ισχύος.

Οι *ζυγοί* (Bus Burs, Sammelschienen) είναι τριάδες αγωγών, ένας αγωγός για κάθε φάση, πάνω στις οποίες καταλήγουν οι γραμμές ή τα κυκλώματα. Αυτοί χαρακτηρίζονται από την έκταση και την τάση τους ,για παράδειγμα οι ζυγοί των 150kV με πέντε αναχωρήσεις. Επίσης, οι ζυγοί χαρακτηρίζονται από τα αν χρησιμοποιούνται συνεχώς, οπότε λέγονται *κύριοι ζυγοί*, η αν γίνετε παροδική χρήση τους ή για εφεδρεία οπότε λέγονται *βοηθητικοί ζυγοί* .

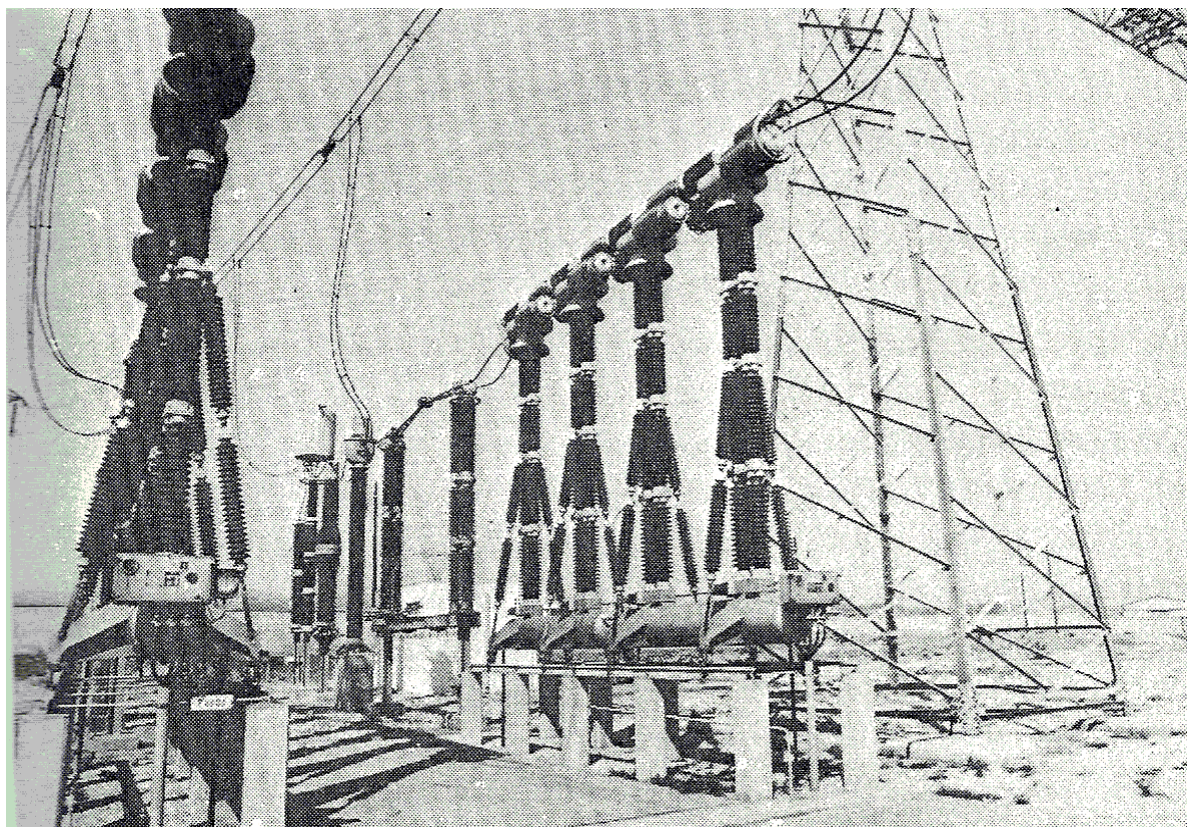
*Πύλη* ή *κυψέλη* λέγεται το σύστημα συσκευών που συνδέει τους ζυγούς με ένα κύκλωμα αναχώρησης (Σχήμα 5.1). Για παράδειγμα, η κυψέλη στους υποσταθμούς μεταφοράς, αποτελείται από τον τερματικό πύργο της γραμμής, τους αποζεύκτες, τους διακόπτες ισχύος, τους γειωτές, τους μετασχηματιστές οργάνων κτλ. που ανήκουν στη συγκεκριμένη γραμμή (Σχήμα 5.2).



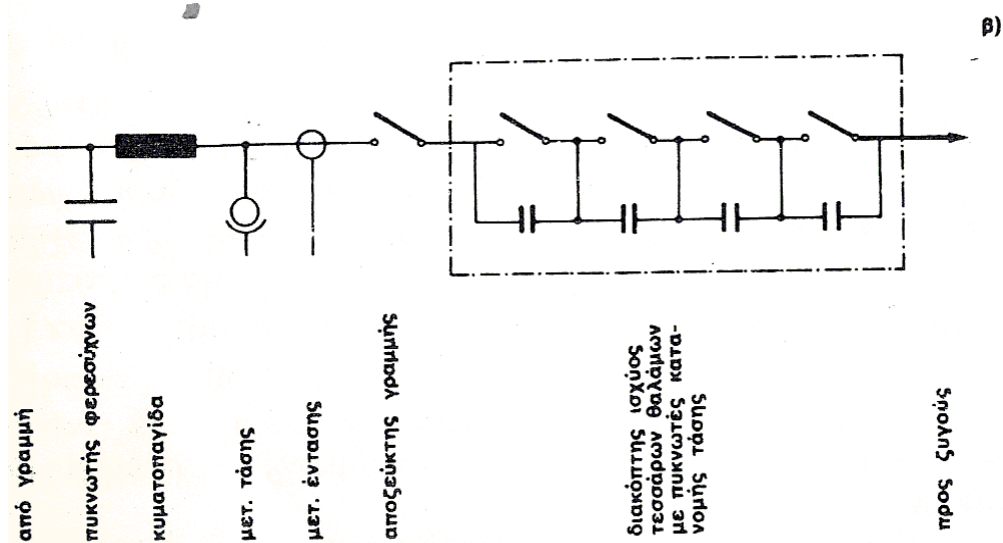
Σχήμα 5.1: Πύλη 400 kV στο Κέντρο Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) Ωραιοκάστρου Θεσσαλονίκης.

Οι υποσταθμοί διαιρούνται ανάλογα με το αν είναι στον ελεύθερο ή σε στεγασμένο χώρο σε υποσταθμούς *εξωτερικού* και *εσωτερικού* ή *στεγασμένου χώρου*. Οι υποσταθμοί στεγασμένου χώρου, μέσης και υψηλής τάσης, μπορεί να είναι και πλήρως μονωμένου τύπου *μεταλλικού*

περιβλήματος (Metal Clad Stations, Vollgekapselte Schaltanlagen). Στους υποσταθμούς του τύπου αυτού, τα φέροντα τάση στοιχεία περιβάλλονται από ένα μεταλλικό μανδύα, ο οποίος στις υψηλές τάσεις περιέχει το αέριο SF<sub>6</sub> (εξαφθοριούχο θείο), για να έχουμε αυξημένη διηλεκτρική αντοχή. Τέτοιες εγκαταστάσεις (metal clad) υπάρχουν σε όλη την περιοχή τάσεις μέχρι 750kV. Σε χαμηλότερες τάσεις για παράδειγμα 30kV γίνεται χρήση και υποσταθμών με στερεά μόνωση εποξειδικών ρητινών.



α)



Σχήμα 5.2α: Μια φάση 400 του KYT Ωραιοκάστρου Θεσσαλονίκης.

Σχήμα 5.2β: Διάγραμμα της πύλης.

Διακρίνονται, με αρχή από το βάθος της εικόνας, ο πυκνωτής φερέσυχων, η κυματοπαγίδα πάνω σε μονωτήρα, ο μετασχηματιστής έντασης, ο αποζεύκτης αναχώρησης, ο διακόπτης ισχύος με τέσσερις θαλάμους σβέσης και τέσσερις πυκνωτές, παράλληλα, για καταμερισμό τάσης.

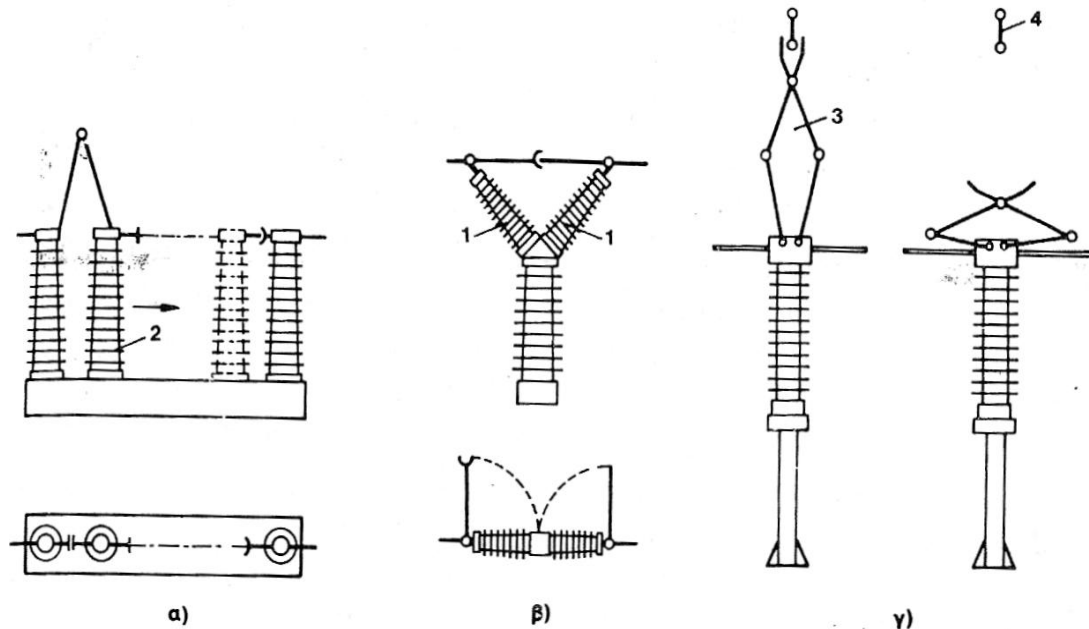
Ακολούθως, θα ανατηχθούν συνοπτικά τα στοιχεία των υποσταθμών και οι διατάξεις τους.

## 5.2 Στοιχεία υποσταθμών

### 5.2.1 Αποζεύκτες γειωτές

Οι διατάξεις αυτές ανοίγουν ή κλείνουν χειροκίνητα ή μέσω ηλεκτροκινητήρα ή με πιεσμένο αέρα. Οι αποζεύκτες δεν περιλαμβάνουν διατάξεις σβέσης τόξου και έτσι δεν μπορούν να αποζεύξουν κυκλώματα, πάνω από ρεύματα τάξης 10-40Α. Για τον λόγο αυτό οι αποζεύκτες ή γειωτές δεν πρέπει να αποκόπτουν ή να συνδέουν φορτία. Άρα αν κάποιος θελήσει να συνδέσει ένα ανοιχτό κύκλωμα (αποζεύκτες και διακόπτες ισχύος ανοιχτοί), θα πρέπει πρώτα να κλείσει τον αποζεύκτη και μετά τον διακόπτη ισχύος. Αντιστρόφως θα πρέπει να εργαστούμε για το άνοιγμα ενός κλειστού κυκλώματος. Στις υψηλές τάσεις, για παράδειγμα στα 150kV το τόξο που θα δημιουργηθεί κατά τον εσφαλμένο άνοιγμα ενός αποζεύκτη υπό φορτίο, μπορεί να ανέλθει σε πολλά μέτρα μήκος και να προκαλέσει σοβαρές ζημιές και πυρκαγιά, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ( $10000^{\circ}\text{K}$ ) του τόξου.

Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 5.3 και Σχήμα 5.4) παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά στοιχεία των αποζευκτών.



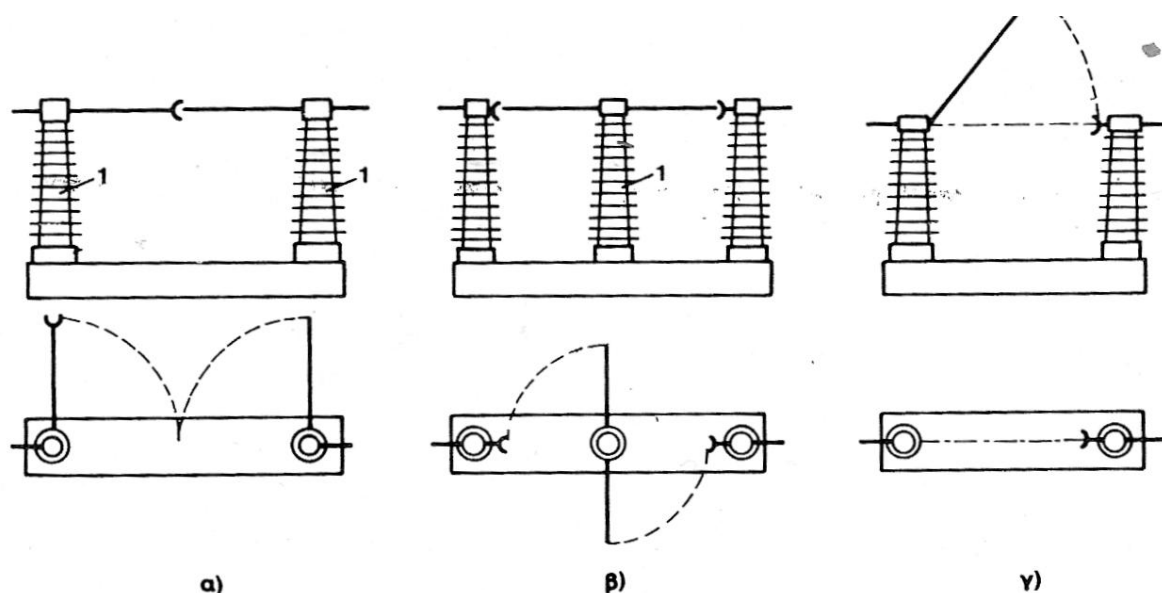
Σχήμα 5.3: Μορφές αποζευκτών σε κατόψεις και πλάγιες όψεις.

α) Τρίστυλος αποζεύκτης με κινούμενο μονωτήρα.

β) Μονόστυλος αποζεύκτης σε σχήμα V.

γ) Μονόστυλος αποζεύκτης, με ψαλιδωτό μηχανισμό.

1 στρεφόμενος μονωτήρας, 2 κινούμενος μονωτήρας 3 ψαλιδωτός μηχανισμός



Σχήμα 5.4: Μορφές αποζευκτών σε κατόψεις και πλάγιες όψεις.

α) Δίστυλος αποζεύκτης με περιστρεφόμενες επαφές.

β) Τρίστυλος αποζεύκτης με περιστρεφόμενες επαφές.

γ) Δίστυλος αποζεύκτης μαχαιρωτός.

1 στρεφόμενος μονωτήρας.

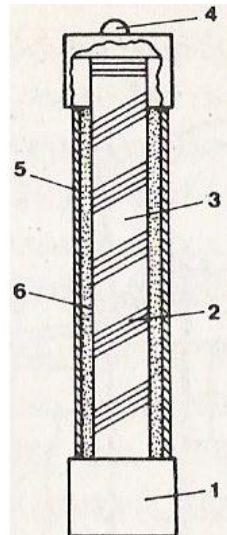
### 5.2.2 Ασφάλειες ισχύος υψηλής τάσης (ΗΗ-ασφάλειες)

Οι ασφάλειες υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται για την διακοπή του κυκλώματος, στο οποίο ανήκουν, κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος ή υπερφόρτισης. Ο χρόνος αποκοπής εξαρτάτε από το ρεύμα  $I$  και τον χρόνο  $t$ . Σε βραχυκυκλώματα σημαντικό ρόλο παίζει το ολοκλήρωμα  $\int I^2 dt$ . Επειδή κατά την τήξη της ασφάλειας η αντίσταση της αυξάνει, έχουμε και σημαντική μείωση του ρεύματος, ήδη προτού διακοπεί το κύκλωμα.

Οι ασφάλειες ΗΗ χαρακτηρίζονται από το ονομαστικό ρεύμα  $I_N$ , την ονομαστική τάση  $V_N$  (πολική τάση), το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στην απόζευξη  $I_K$  και την χαρακτηριστική ρεύματος-χρόνου. Οι χαρακτηριστικές των ασφαλειών διαφοροποιούνται ανάλογα με τον χρόνο τήξης και έτσι έχουμε *ασφάλειες βραδείας ή ταχείας τήξεως* για το ίδιο ονομαστικό ρεύμα.

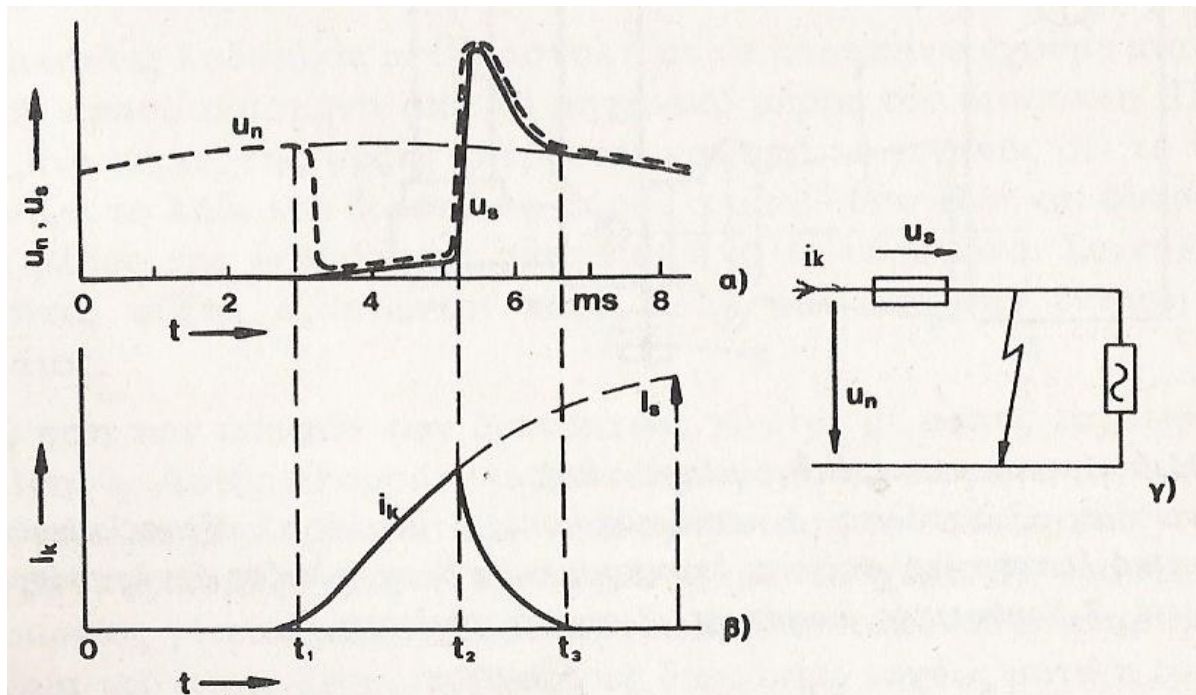
Οι ασφάλειες ισχύος υψηλής τάσης αποτελούνται από συρματίδια ή ταινίες, που λέγονται *τηκτά*, εναποτιθέμενες μέσα σε ψιλή άμμο (σκόνη) από ξηρό χαλαζία. Το ενεργό μέρος της ασφάλειας είναι μέσα σε πορσελάνη με δυο ακροδέκτες. το μήκος της πορσελάνης είναι για παράδειγμα 25-30 cm για  $V_N=20kV$ . Αφού τηχθεί το συρματίδιο, το δημιουργούμενο ηλεκτρικό τόξο ψύχεται, λόγω της επαφής του με την άμμο (σχήμα 5.5 και σχήμα 5.6).

Η ισχύς του ηλεκτρικού τόξου μετατρέπεται σε θερμότητα εντός της ασφάλειας. Συνεπώς, αν η ενέργεια που απορροφά η ασφάλεια από το κύκλωμα είναι μεγαλύτερη των προδιαγραφών της, υπερθερμαίνεται ακαριαία και μπορεί να εκραγεί.



Σχήμα 5.5: Ασφάλεια υψηλής τάσης.

1 κεφαλή, 2 τηκτό, 3 κεραμικός κύλινδρος, 4 δείκτης λειτουργίας σε θέση ένδειξης, 5 κύλινδρος πορσελάνης, 6 άμμος χαλαζία.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα τάσεων εντάσεων σε ασφάλεια υψηλής τάσης.

α) Τάσεις στην ασφάλεια  $u_s$  και στο κύκλωμα  $u_n$ .

β) Ρεύμα δια μέσου της ασφάλειας.  $i_s$  Το μέγιστο ρεύμα που θα αναπτυσσόταν χωρίς ασφάλεια στο κύκλωμα.

γ) κύκλωμα.

$t_1$  = Η αρχή του βραχυκυκλώματος.

$t_2$  = Το σημείο τήξης της ασφάλειας.

$t_3$  = Το τέλος του βραχυκυκλώματος.

Οι ασφάλειες ισχύος υψηλής τάσης εφαρμόζονται στην περιοχή τάσεως μέχρι 40kV γιατί είναι ένας φθηνός τρόπος προστασίας. Έχουν το μειονέκτημα του ότι η ισχύς που μπορούν να διαχειριστούν είναι περιορισμένη και ο χρόνος ανοίγματος τους δεν μπορεί να συντονιστεί εύκολα με άλλα μέσα προστασίας και κυρίως δεν μπορεί να γίνει από εκεί απόζευξη ή ζεύξη υπό φορτίο. Οι ασφάλειες ΗΗ μπορούν να συνδυαστούν και με έναν αποζεύκτη συνιστώντας έναν ασφαλειοαποζεύκτη όπως δείχνει το σχήμα που ακολουθεί.

### 5.2.3 Διακόπτες ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται για την ζεύξη ή την απόζευξη των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ο χειρισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο υπό την ομαλή λειτουργία του δικτύου όσο και σε συνθήκες σφάλματος όπως για παράδειγμα σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, και μάλιστα τόσο σε ζεύξη όσο και σε απόζευξη. Έτσι οι διακόπτες ισχύος πρέπει να είναι σε θέση να σβήνουν το ηλεκτρικό τόξο, που δημιουργείται μεταξύ των επαφών τους, όταν ανοίγουν ένα κύκλωμα. Οι θερμοκρασίες που δημιουργούνται ανέρχονται στους  $10^4$  °C, έτσι η θερμότητα και τα κρουστικά κύματα πίεσης που δημιουργούνται είναι αρκετά για να επιφέρουν την έκρηξη του διακόπτη σε περίπτωση αδυναμίας της λειτουργίας του. Η κίνηση των διακοπτών τους, γίνεται με μέσες ταχύτητες 2 έως 10m/s. Αυτές μπορούν να δοθούν μόνο με πιεσμένο αέρα ή και μέσω ενός προεντεταμένου ελατηρίου. Η προένταση του ελατηρίου γίνεται με πιεσμένο αέρα, κινητήρα ή με το χέρι. Η έναρξη της λειτουργίας γίνεται με ελευθέρωση του προεντεταμένου ελατηρίου και άνοιγμα του αέρα. Στους αυτόματους διακόπτες ισχύος αυτή η έναρξη λειτουργίας γίνεται με έναν ηλεκτρομαγνήτη που διεγείρεται από τάση την οποία δίνει ένας ηλεκτρονόμος. Η διέγερση ενός διακόπτη λέγεται και Tapping. Οι διακόπτες, μετά το άνοιγμα τους, πρέπει να ανακτήσουν, σε χρόνο τάξης μεγέθους microsecond, την μονωτική τους ικανότητα για να αντέξουν στις επιβαλλόμενες τάσεις. Στην υψηλή τάση, για παράδειγμα στα 400kV, δεν μπορεί αυτό να γίνει με ένα ζεύγος επαφών. Για τον λόγο αυτό, συνδέονται πολλά εν σειρά διάκενα επαφών, π.χ. 4 ανά πόλο (φάση) για τα 400kV. Για ανισοκατανομή της τάσης τοποθετούνται, παράλληλα στις επαφές πυκνωτές. Οι διακόπτες ισχύος διακρίνεται με βάση το μέσο που χρησιμοποιούν για την απόσβεση του ηλεκτρικού τόξου στις εξής κατηγορίες:

- Διακόπτες λαδιού (Minimum Oil Circuit Breakers, Olarme Leistungschalter).
- Διακόπτες ροής αερίου SF<sub>6</sub>.
- Διακόπτες αέρος (Air Circuit Breakers, Druckluftschalter).
- Διακόπτες κενού (Vacuum Circuit Breakers, Vakuumschalter).

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ροη αέρα, SF<sub>6</sub> ή λαδιού, εκτός της ψύξης που επιφέρει, βοηθά και στην επιμήκυνση του τόξου και συχνά ο θάλαμος ο οποίος εμπεριέχει τον διακόπτη έχει κατάλληλη διαμόρφωση η οποία συμβάλει στον σκοπό αυτό.



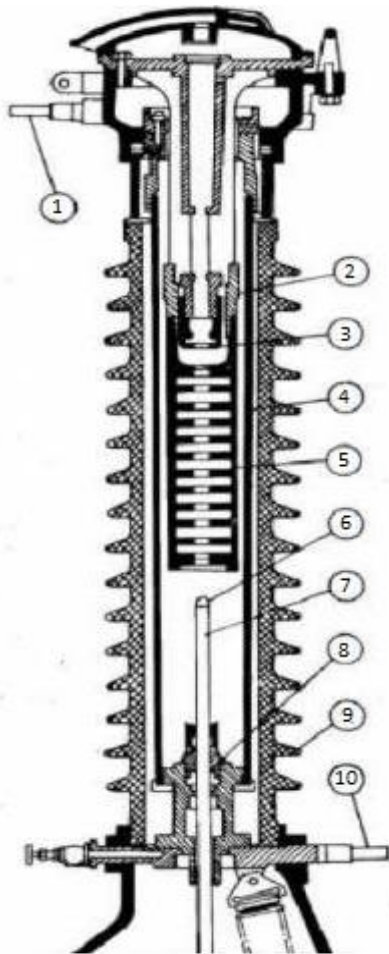
### 5.2.3.1 Διακόπτες λαδιού

Το χαρακτηριστικό των διακοπών αυτών είναι ότι η σβέση του ηλεκτρικού τόξου γίνεται με την έντονη ροή λαδιού γύρω από αυτό. Υπάρχουν διακόπτες που ανοίγουν κάθε φάση ξεχωριστά και ονομάζονται διακόπτες μονοπολικής απόσβεσης και διακόπτες που ανοίγουν ή κλείνουν και τις τρεις φάσεις ταυτόχρονα και ονομάζονται τριπολικής αποζεύξεως.

Οι διακόπτες λαδιού αποτελούνται από τα εξής βασικά μέρη:

- Τον θάλαμο διακοπής
- Το μονωτικό στήριγμα
- Τον μηχανισμό χειρισμών

Ο θάλαμος διακοπής αποτελεί το κύριο μέρος του διακόπτη καθώς εμπεριέχει της επαφές του.



Σχήμα 5.7: θάλαμος διακοπής.

Η είσοδος και η έξοδος, όπως φαίνεται στο σχήμα.7 είναι οι ακροδέκτες (1) και (10) αντίστοιχα. Ολόκληρος ο διακόπτης περικλείεται μέσα σε πορσελάνη (9) η οποία έχει πληρωθεί από μονωτικό λάδι. Στο σχήμα ο διακόπτης είναι ανοικτός γιατί η κινητή επαφή (7), που έχει ηλεκτρική συνέχεια με τον ακροδέκτη (10), απέχει από τον μονωτικό κύλινδρο (4) και από το σύστημα σταθερών επαφών (2), που έχουν ηλεκτρική συνέχεια με τον ακροδέκτη (1). Το σύστημα των σταθερών επαφών στερεώνεται στην απιονιστική εσχάρα, η οποία είναι ένα συγκρότημα κυλινδρικών μονώσεων. Όταν η επαφή (7) βρίσκεται στο συγκρότημα των σταθερών επαφών, ο διακόπτης είναι κλειστός.

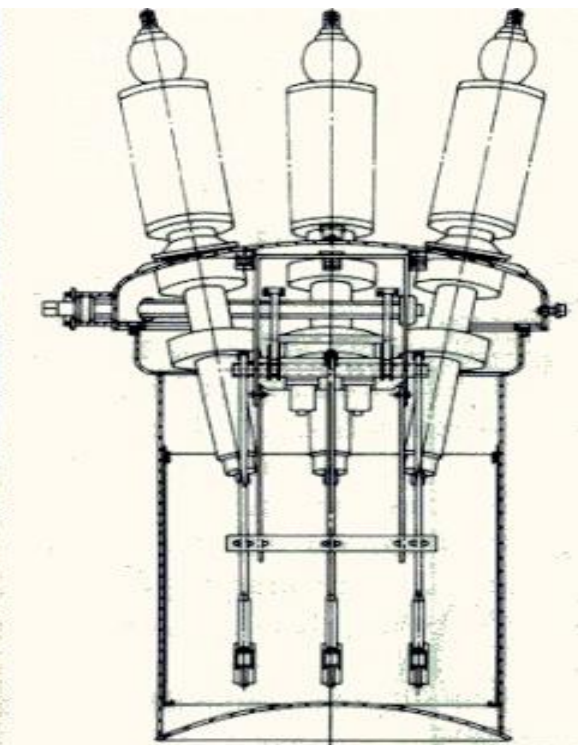
Όταν ο διακόπτης ανοίγει η κινητή επαφή αρχίζει να κατεβαίνει. Εκείνη την στιγμή λαμβάνει χώρα το ηλεκτρικό τόξο, το οποίο επιμηκύνετε όσο η κινητή επαφή απομακρύνετε από την σταθερή.

Για να σβήσει το ηλεκτρικό τόξο, το οποίο προκαλεί εξαέρωση του λαδιού και διάσπαση των μορίων του σε υδρογόνο και άνθρακα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και της πίεσης, πρέπει το μονωτικό λάδι να ανανεωθεί από το λάδι που βρίσκεται έξω από την απιονιστική εσχάρα . Αυτός Είναι και ο ρόλος της εσχάρας , που στην

περιφέρεια της είναι γεμάτη από οπές. Ένα μέρος της ψύξης του τόξου επέρχεται και από την απαγωγή της θερμότητας που επιφέρει το υδρογόνο. Συνεπώς οι συνθήκες ψύξης, στους διακόπτες λαδιού, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση του ρεύματος καθώς αυτή, όπως αναφέρθηκε, είναι υπεύθυνη για την εξάτμιση του λαδιού και την δημιουργία υδρογόνου. Όταν η κινητή επαφή απομακρυνθεί από την εσχάρα το ηλεκτρικό τόξο θα έχει σβήσει.

Ο *μονωτήρας στήριξης* στον οποίο στηρίζετε ο θάλαμος του διακόπτη, έχει σκοπό να μονώσει τον θάλαμο διακοπής από το ικρίωμα στήριξης του διακόπτη και τον μηχανισμό χειρισμών. Ο μονωτήρας στήριξεως είναι από πορσελάνη, κούλος και εμπεριέχει τον θάλαμο διακοπής. Το μήκος της πορσελάνης εξαρτάτε από την τάση στην οποία εργάζεται ο διακόπτης .

Ο *μηχανισμός χειρισμών* είναι το σύστημα μετάδοσης κίνησης των επαφών του διακόπτη. Ο μηχανισμός συνδέετε με κατάλληλο σύστημα μοχλών, με τις κινητές επαφές και των τριών πόλων του διακόπτη για το άνοιγμα και κλείσιμο τους.

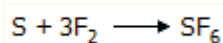


Σχήμα 5.8: Διακόπτης ισχύος λαδιού.

### 5.2.3.2 Διακόπτες ροής αερίου SF<sub>6</sub>

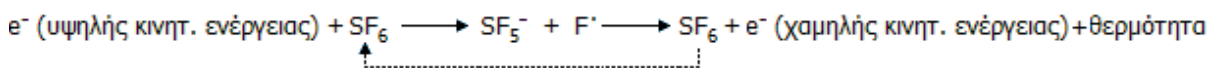
Οι διακόπτες αυτοί βρίσκονται σε σφραγισμένο χώρο και περιέχουν το αέριο SF<sub>6</sub> υπό πίεση για την απόσβεση του ηλεκτρικού τόξου.

Η σύνθεση του εξαφθοριούχου θείου πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1900 από τον Henri Moissan, ο οποίος 15 χρόνια προηγουμένως επέτυχε την απομόνωση του φθορίου με ηλεκτρολυτική μέθοδο, εργασία για την οποία τιμήθηκε με βραβείο Nobel το 1906. Η σύνθεση του SF<sub>6</sub> πραγματοποιείται με απ' ευθείας αντίδραση αερίου φθορίου με θείο σύμφωνα με την αντίδραση:



Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα του SF<sub>6</sub> είναι η μεγάλη του χημική αδράνεια, σε σημείο που δεν αντιδρά ούτε με τηγμένο μεταλλικό νάτριο. Το αέριο είναι τελείως μη τοξικό, άοσμο, άχρωμο, άφλεκτο και αντιδιαβρωτικό. Λόγω του μεγάλου μοριακού βάρους του, το SF<sub>6</sub> είναι περίπου 5 φορές πιο βαρύ από τον αέρα και παραμένει σε ανοικτά δοχεία σαν να ήταν υγρό. Η διηλεκτρική αντοχή του είναι 2 με 3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα για μια ατμόσφαιρα ενώ για πίεση τριών ατμοσφαιρών η διηλεκτρική του αντοχή ταυτίζεται με την διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού των μετασχηματιστών.

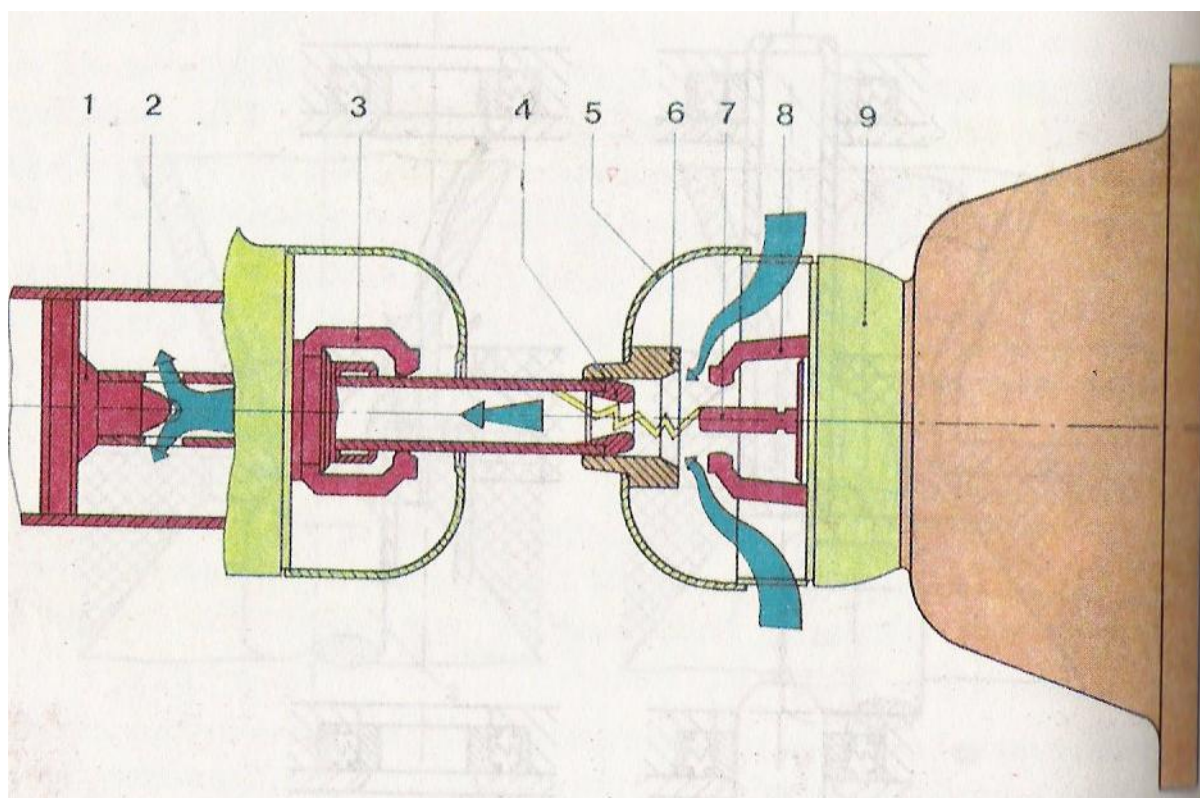
Το ότι το SF<sub>6</sub> είναι περίπου 100 φορές αποτελεσματικότερο από τον αέρα στην απόσβεση ηλεκτρικών τόξων οφείλεται σε συνδυασμό πολλών λόγων. Ένας από αυτούς είναι η μεγάλη διάμετρος πρόσκρουσης του μορίου που εκτιμάται περίπου στα 4,77 Å. Έτσι, αδέσμευτα ηλεκτρόνια μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο απορροφούνται πριν αποκτήσουν αρκετή κινητική ενέργεια για να δημιουργήσουν μέσω προσκρούσεων επιπλέον σωματίδια-φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπλέον, τα προϊόντα πρόσκρουσης μορίων SF<sub>6</sub> με ηλεκτρόνια επανασυνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση και έτσι το SF<sub>6</sub> διατηρείται ουσιαστικά αναλλοίωτο.



Ακόμη, το μόριο του SF<sub>6</sub> απορροφά την ενέργεια του ηλεκτρονίου μεταπίπτοντας σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες και η σχετικά μεγάλη θερμική αγωγιμότητά του διαχέει ταχύτατα την παραγόμενη θερμότητα. Έτσι τα μόρια του SF<sub>6</sub> δρουν ουσιαστικά σαν "αερόσακοι" πρόσκρουσης με τα ηλεκτρόνια διακόπτοντας τις διαδοχικές και ραγδαία αυξανόμενες σε αριθμό προσκρούσεις τους (φαινόμενο "χιονοστιβάδας"), που δημιουργούν συνεχώς περισσότερους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως το ηλεκτρικό τόξο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το SF<sub>6</sub> ανακυκλώνεται με αντλίες ενσωματωμένες στους διακόπτες και υπό κανονικές συνθήκες δεν διαρρέει προς την ατμόσφαιρα. Όπως προαναφέρθηκε η φθορά του SF<sub>6</sub> κατά τη λειτουργία του διακόπτη είναι ελάχιστη, όμως η μακροχρόνια χρήση τους οδηγεί στη συσσώρευση μικροποσοτήτων ανεπιθύμητων ουσιών.

Τα κυριότερα προϊόντα διάσπασης SF<sub>6</sub> ή αντίδρασής του με άλλα υλικά (υδρατμοί, μεταλλικές/κεραμικές επιφάνειες) κατά τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου είναι τα ακόλουθα: HF (κυρίως), SOF<sub>2</sub>, SF<sub>4</sub>, SOF<sub>4</sub>, SiF<sub>4</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> και διάφορες άλλες πτητικές φθοριούχες ενώσεις των μετάλλων που βρίσκονται στα συστήματα αυτά (π.χ. Cu, W). Για να απαλλαγθεί το SF<sub>6</sub> από τις ουσίες αυτές, που επιταχύνουν τη διάβρωση και τη φθορά του διακόπτη, το αέριο κυκλοφορεί μέσω φίλτρων τα οποία περιέχουν κοκκώδη νατράσβεστο (CaO+NaOH) που τις δεσμεύει.



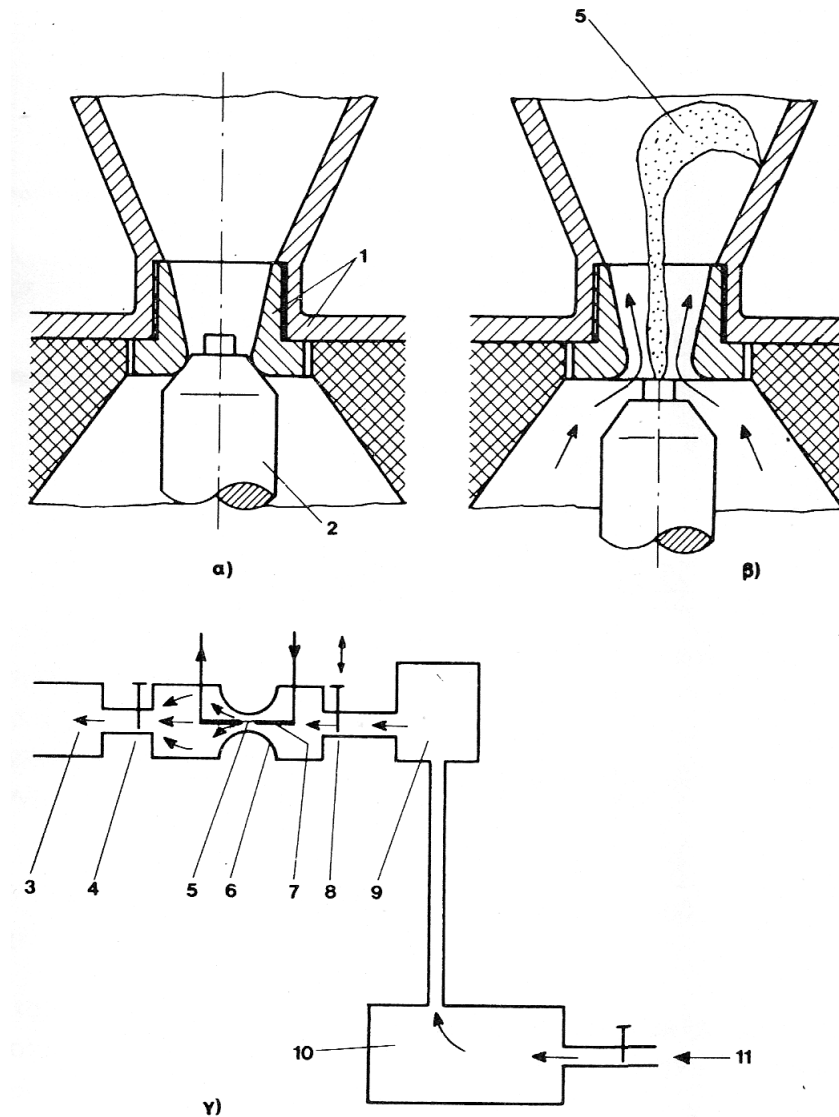
Σχήμα 5.9: Διακόπτης εξαφθοριούχου θείου  $SF_6$ , βεβιασμένης ροής, με αναρρόφηση.

1 εμβολο, 2 κύλινδρος, 3 επαφή, 4 κινούμενο ηλεκτρόδιο, 5, 6 θάλαμος με ακροφύσιο, 7 βοηθητικό ηλεκτρόδιο, 8 επαφή, 9 ηλεκτρόδιο για μείωση της πεδιακής έντασης.

### 5.2.3.3 Διακόπτες αέρα

Οι διακόπτες αέρος χρησιμοποιούν για την σβέση του ηλεκτρικού τόξου τους, αέρα υπό πίεση. Ο αέρας που χρειάζεται για την σβέση του τόξου παράγεται από μια εγκατάσταση παραγωγής αέρα υπό πίεση, που βρίσκεται τοποθετημένη κοντά στο συγκρότημα του αεροδιακόπτη. Η συμπίεση του αέρα επιτυγχάνεται με αεροσυμπιεστές με υψηλή πίεση που φτάνει τις 240 ατμόσφαιρες, με σκοπό να απαλλαγεί ο αέρας από την υγρασία. Ύστερα η υψηλή πίεση υποβιβάζεται σε χαμηλή με κατάλληλο μειωτή και ο αέρας οδηγείται και αποθηκεύεται σε αεροφυλάκιο υπό πίεση 15 ατμόσφαιρες περίπου.

Η εντολή για το άνοιγμα του διακόπτη δίνεται από ένα συγκρότημα χειρισμών και ο αέρας από το αεροφυλάκιο κατευθύνεται στον χώρο διακοπής (θάλαμος σβέσης) του ηλεκτρικού τόξου και επιτυγχάνεται σβέση αυτού μέσω ψύξης. Η ποσότητα πεπιεσμένου αέρα που χρησιμοποιείται για κάθε διακοπή ανέρχεται στα 180 λίτρα περίπου.



Σχήμα 5.10: Διακόπτης πεπιεσμένου αέρα , αρχή λειτουργίας.

α) ανοικτός, β )κλειστός, γ) διάγραμμα ροής αέρα.

1 σταθερό ηλεκτρόδιο, 2 κινητό ηλεκτρόδιο, 3 αποσβεστήρας θορύβου, 4 βαλβίδα εξαγωγής, 5 τόξο, 6 ακροφύσιο, 7 θάλαμος σβέσης, 8 βαλβίδα εισαγωγής, 9 θάλαμος πεπιεσμένου αέρα, υψηλής πίεσης, 10 αεροφυλάκιο, 11 δίκτυο πεπιεσμένου αέρα.

#### 5.2.3.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη διακοπών ισχύος

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη με βάση τα οποία προσδιορίζετε ενός διακόπτη ισχύος είναι τα εξής:

- Η ονομαστική τάση, π.χ. 20kV (πολική τάση).
- Το ονομαστικό ρεύμα, π.χ. 50A (μέγιστο διαρκές ρεύμα).
- Το ονομαστικό ρεύμα απόζευξης, π.χ.  $I_K = 11,5$  kA. (εναλλασσόμενη συνιστώσα)

- Το ονομαστικό ρεύμα ζεύξης, π.χ.  $I_e = 500\text{A}$ . (ενεργός τιμή του στάσιμου ρεύματος άμεσος μετά την ζεύξη).
- Η ονομαστική Ισχύς απόζευξης, π.χ.  $S_K = 250\text{MVA}$ .
- Το ονομαστικό βραχυχρόνιο ρεύμα, π.χ.  $I_{IS} = 200\text{A}$ . (το ρεύμα που αντέχει ο διακόπτης για 1 sec).

Έτσι για τον προσδιορισμό ενός διακόπτη ισχύος θα πρέπει να υπολογιστεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης.  $I_K$  ή η ισχύς βραχυκύκλωσης.  $S_K$  (χρησιμοποιείτε ο όρος Fault Level) ως εξής:

$$I_K = \frac{c \cdot V_N}{\sqrt{3} \cdot Z_K}$$

$$S_K = \sqrt{3} V_N I_K$$

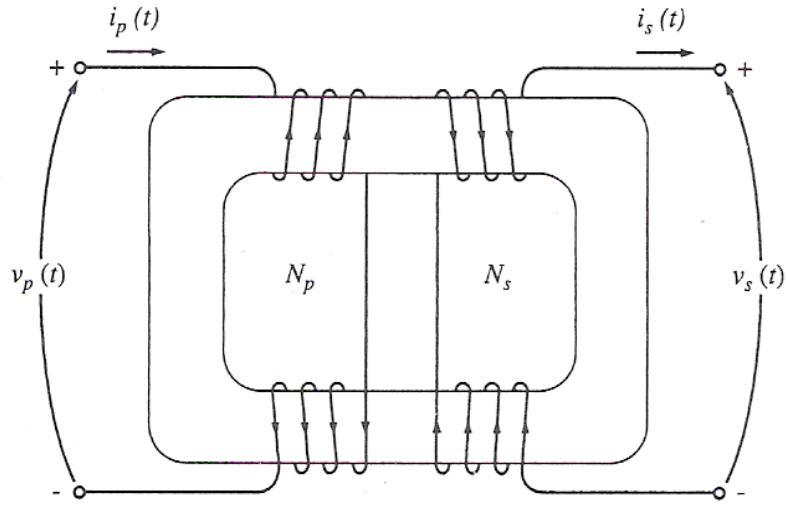
Όπου  $c=1,1$  είναι ο συντελεστής προσαύξησης και  $Z_K$  η συνολική εσωτερική αντίδραση στο ορθό σύστημα.

#### 5.2.4.1 Μετασχηματιστές ισχύος

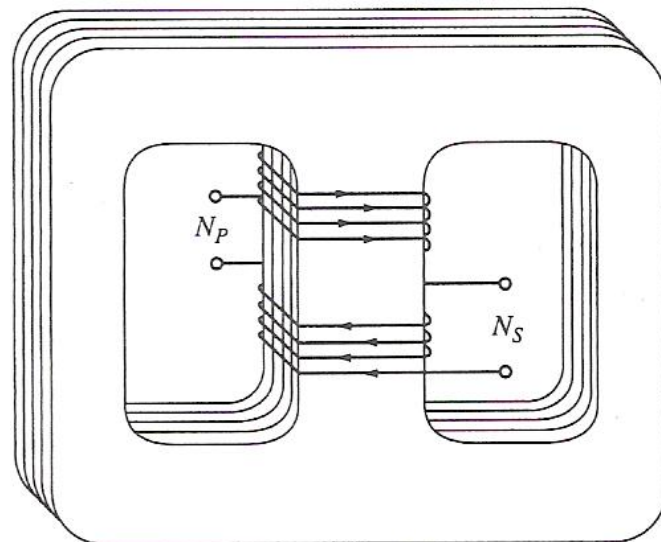
Η βασική αποστολή του μετασχηματιστή ισχύος είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια της ίδιας συχνότητας, αλλά διαφορετικού επιπέδου τάσης.

Δυο είναι οι τρόποι κατασκευής ενός μετασχηματιστή ισχύος. Στον πρώτο τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρο από τις δυο πλευρές ενός ορθογώνιου πυρήνα από φύλλα χάλυβα. Αυτός ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής *τύποι πυρήνα* (core form) και απεικονίζεται στο σχήμα 5.11. Ο άλλος τρόπος κατασκευής του μετασχηματιστή πραγματοποιείται σε έναν πυρήνα με τρία σκέλη. Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος. Αυτός ο τύπος μετασχηματιστή απεικονίζεται στο σχήμα 5.12 και ονομάζεται μετασχηματιστής *τύπου μανδύα* (shell form). Και στους δυο τύπους μετασχηματιστή, ο πυρήνας κατασκευάζεται από λεπτά δυναμοελάσματα. Τα δυναμοελάσματα είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους, με σκοπό την μείωση των δινορρευμάτων. Στους πραγματικούς μετασχηματιστές τα δυο τυλίγματα τοποθετούνται ομόκεντρα, έτσι ώστε το τύλιγμα με το χαμηλότερο επίπεδο τάσης να βρίσκεται στο εσωτερικό του άλλου τυλίγματος. Αυτή η κατασκευή εξυπηρετεί τους δυο παρακάτω σκοπούς.

- Λύνει το πρόβλημα της μόνωσης μεταξύ του πυρήνα και του τυλίγματος υψηλής τάσης .
- Η μαγνητική ροή διαρροής μειώνεται σημαντικά σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο τρόπο κατασκευής.



Σχήμα 5.11: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.



Σχήμα 5.12: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.

Ανάλογα με την λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες. Ο μετασχηματιστής που συνδέεται στην έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο της τάσης εξόδου της (π.χ. στα 110kV), πριν οδηγηθεί στην γραμμή μεταφοράς, ονομάζεται μετασχηματιστής μονάδος (unit transformer). Ο μετασχηματιστής στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει την τάση διανομής στα επίπεδα διανομής (2,3 έως 34,5kV) ονομάζεται μετασχηματιστής διανομής (distribution transformer). Όλοι οι παραπάνω μετασχηματιστές παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους και η βασικότερη από αυτές βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείτε ο καθένας.

### 5.2.4.2 Θεωρητική ανάλυση λειτουργίας πραγματικού μονοφασικού μετασχηματιστή

Έστω ο μετασχηματιστής του σχήματος 5.13, που αποτελείται από δυο πηνία τυλιγμένα στις δυο πλευρές του πυρήνα του. Στα άκρα του πρωτεύοντος πηνίου εφαρμόζετε εναλλασσόμενη τάση, ενώ το δευτερεύον πηνίο είναι ανοιχτό. Στο 5.14, φαίνεται η καμπύλη υστέρησης του μετασχηματιστή.

Ο νόμος του Faraday, που δίνει την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή γράφεται:

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\lambda}{dt} \quad [5.1]$$

Όπου  $\lambda$  είναι η πεπλεγμένη ροή του πηνίου στο οποίο επάγεται η τάση. Η πεπλεγμένη ροή είναι το άθροισμα των ροών που διέρχονται από κάθε μια σπείρα του πηνίου.

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad [5.2]$$

η συνολική πεπλεγμένη ροή δεν είναι απλά ίση με  $N\Phi$  ( $N$  = ο αριθμός των σπειρών), επειδή η ροή που διέρχεται από την κάθε σπείρα δεν είναι η ίδια για όλες τις σπείρες, αλλά διαφέρει ανάλογα με την θέση της κάθε μιας στον πυρήνα.

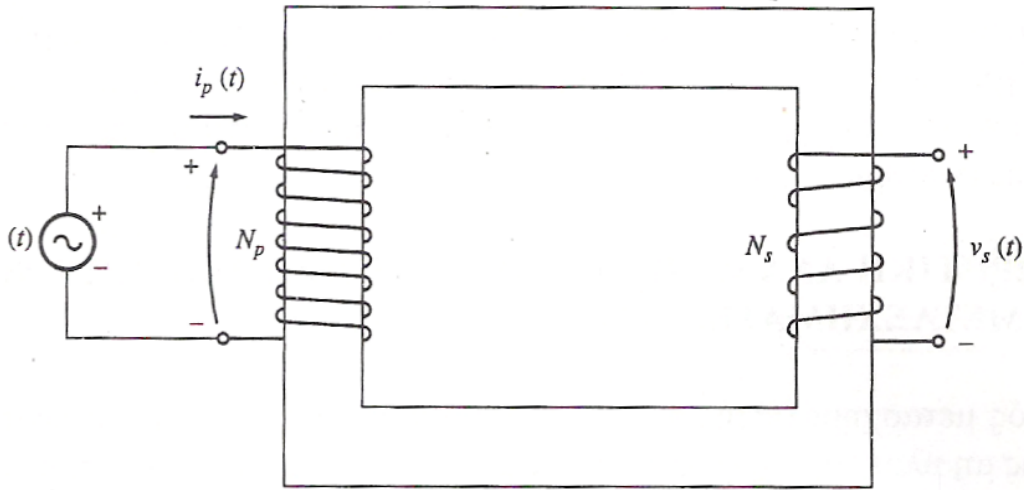
Είναι δυνατός όμως ο ορισμός της μέσης τιμής της ροής ανά σπείρα του πηνίου. Αν η συνολική πεπλεγμένη ροή σ' ολόκληρο το πηνίο είναι  $\lambda$  και ο αριθμός των σπειρών είναι  $N$ , η μέση τιμή της ροής ανά σπείρα του πηνίου δίνεται από την σχέση:

$$\bar{\Phi} = \frac{\lambda}{N} \quad [5.3]$$

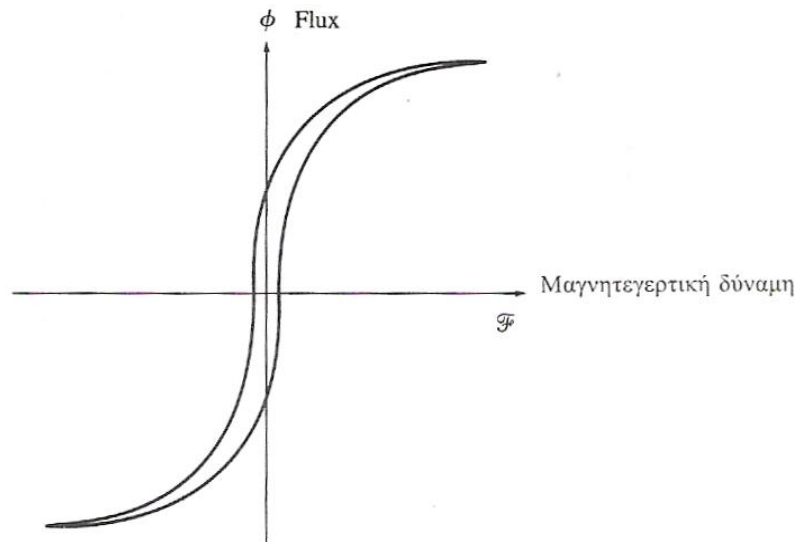
Έτσι ο νόμος του Faraday είναι δυνατόν να γραφτεί ως:

$$e_{\text{ind}} = N \cdot \frac{d\bar{\Phi}}{dt} \quad [5.4]$$





Σχήμα 5.13: Διάγραμμα πραγματικού μετασχηματιστή χωρίς φορτίο στο δευτερεύον.



Σχήμα 5.14: Καμπύλη υστέρησης του μετασχηματιστή.

#### 5.2.4.3 Λόγος των τάσεων στις δυο πλευρές του μετασχηματιστή

Αν η τάση της πηγής του σχήματος 5.13 είναι ίση με  $v_p(t)$ , η τάση που εφαρμόζετε στα άκρα του μετασχηματιστή είναι ακριβώς ίση με  $v_p(t)$ . Ο νόμος του Faraday εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά ο μετασχηματιστής, όταν αυτή η τάση

εφαρμόζετε στο πρωτεύον του. Αν η σχέση 5.4 λυθεί ως προς τη μέση τιμή της ροής που διαρρέει το πρωτεύον του μετασχηματιστή, θα προκύψει:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{N_p} \cdot \int v_p(t) dt$$

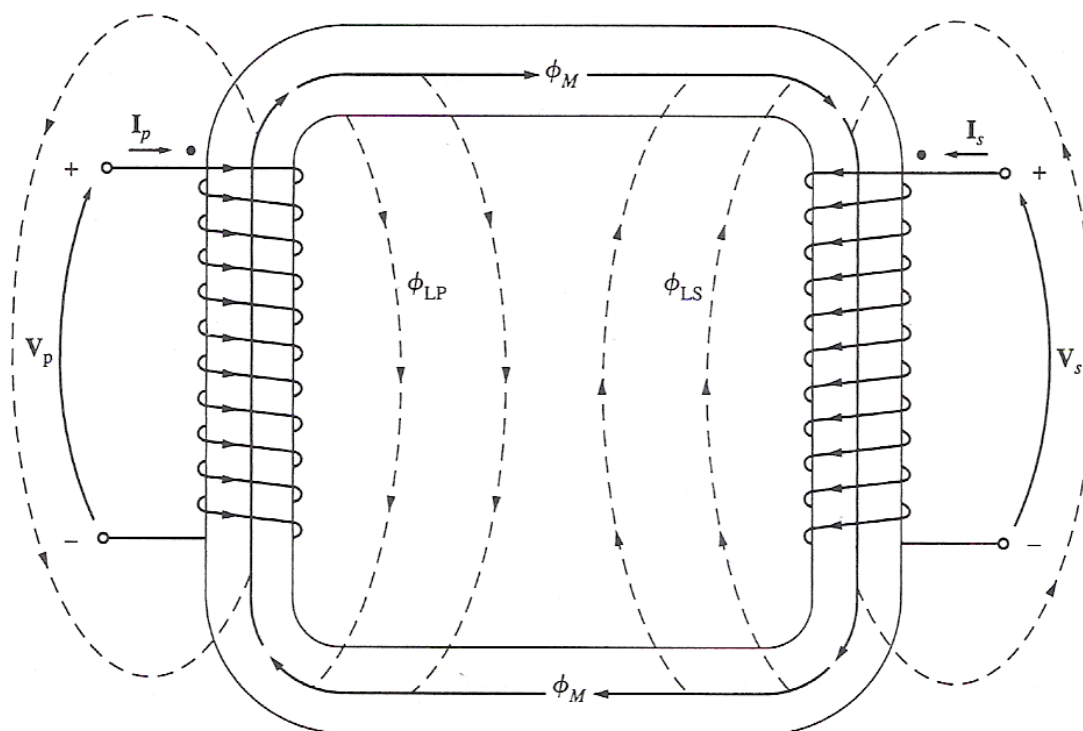
[5.5]

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει ότι η μέση τιμή της ροής που διαρρέει το τύλιγμα είναι ανάλογη του ολοκληρώματος της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του, με συντελεστή αναλογίας το αντίστροφο του αριθμού των σπειρών ( $1/N_p$ ).

Όμως η παραπάνω ροή εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα αυτής της ροής στο δευτερεύον τύλιγμα εξαρτώνται από το ποσοστό της ροής του πρωτεύοντος που μεταφέρεται στο δευτερεύον. Πράγματι, κάποιο ποσοστό της ροής του πρωτεύοντος δεν μεταφέρετε στο δευτερεύον, επειδή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15, μερικές από τις δυναμικές γραμμές του πεδίου ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Το τμήμα της ροής που εμφανίζεται στο ένα από τα τυλίγματα, αλλά δεν μεταφέρετε στο άλλο τύλιγμα ονομάζεται *ροή διαρροής* (leakage flux). Έτσι η ροή του πρωτεύοντος μπορεί να χωριστεί σε δυο τμήματα: την *αμοιβαία ροή* (mutual flux), που παραμένει στον πυρήνα και συνδέει τα δυο τυλίγματα και την ροή διαρροής, που διαρρέει το πρωτεύον αλλά δεν εμφανίζεται στο δευτερεύον.

$$\bar{\Phi}_p = \Phi_M + \Phi_{LP}$$

[5.6]



Σχήμα 5.15: Η αμοιβαία ροή και η ροή διαρροής στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή.

όπου  $\bar{\Phi}_P =$  η συνολική μέση ροή του πρωτεύοντος.

$\Phi_M =$  Το τμήμα της ροής που συνδέει τα δυο τυλίγματα.

$\Phi_{LP} =$  η ροή διαρροής του πρωτεύοντος.

Έντελώς ανάλογος είναι ο τρόπος με τον οποίο διαιρείται σε τμήματα η ροή του δευτερεύοντος. Κι εδώ εμφανίζετε η αμοιβαία ροή και η ροή διαρροής, που διαιρεί το δευτερεύον, αλλά δεν εμφανίζετε στο πρωτεύον επειδή ξεφεύγει στον αέρα.

$$\bar{\Phi}_S = \Phi_M + \Phi_{LS}$$

[5.7]

όπου  $\bar{\Phi}_S =$  η συνολική μέση ροή του δευτερεύοντος.

$\Phi_M =$  Το τμήμα της ροής που συνδέει τα δυο τυλίγματα.

$\Phi_{LS} =$  η ροή διαρροής του δευτερεύοντος.

Μετά την διαίρεση της ροής του πρωτεύοντος σε αμοιβαία ροή και ροή διαρροής, ο νόμος του Faraday για το πρωτεύον γράφεται ως εξής:

$$v_P(t) = N_P \cdot \frac{d\bar{\Phi}_P}{dt} = N_P \cdot \frac{d\Phi_M}{dt} + N_P \cdot \frac{d\Phi_{LP}}{dt}$$

[5.8]

Ο πρώτος όρος της σχέσης μπορεί να γραφτεί ως  $e_P(t)$  και ο δεύτερος  $\square_{LP}(t)$  οπότε η σχέση 5.8 παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$v_P(t) = e_P(t) + e_{LP}(t)$$

[5.9]

Με τον ίδιο τρόπο ο νόμος του Faraday δίνει την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα:

$$v_S(t) = N_S \cdot \frac{d\bar{\Phi}_S}{dt} = N_S \cdot \frac{d\Phi_S}{dt} + N_S \cdot \frac{d\Phi_{LS}}{dt} = e_S(t) + e_{LS}(t)$$

[5.10]

Το τμήμα της τάσης του πρωτεύοντος, που οφείλεται στην αμοιβαία ροή, δίνεται από την σχέση

$$e_P(t) = N_P \cdot \frac{d\Phi_M}{dt}$$

[5.11]

Ενώ το τμήμα της τάσης του πρωτεύοντος, που οφείλεται στην αμοιβαία ροή, δίνεται από την σχέση:

$$e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\Phi_M}{dt} \quad [5.12]$$

Οι δυο τελευταίες σχέσεις συνδυάζονται στην:

$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{d\Phi_M}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$

Οπότε ισχύει :

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad [5.13]$$

Η παραπάνω σχέσεις σημαίνει ότι ο λόγος της τάσης του πρωτεύοντος που οφείλεται στην αμοιβαία ροή προς την τάση του δευτερεύοντος που οφείλεται επίσης στην αμοιβαία ροή είναι ίσος με τον *λόγο μετασχηματισμού*. Όμως, επειδή σε έναν προσεκτικά κατασκευασμένο μετασχηματιστή ισχύει  $\Phi_M \gg \Phi_{LP}$  και  $\Phi_M \gg \Phi_{LS}$ , ο λόγος της συνολικής τάσης του πρωτεύοντος προς την συνολική τάση του δευτερεύοντος δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

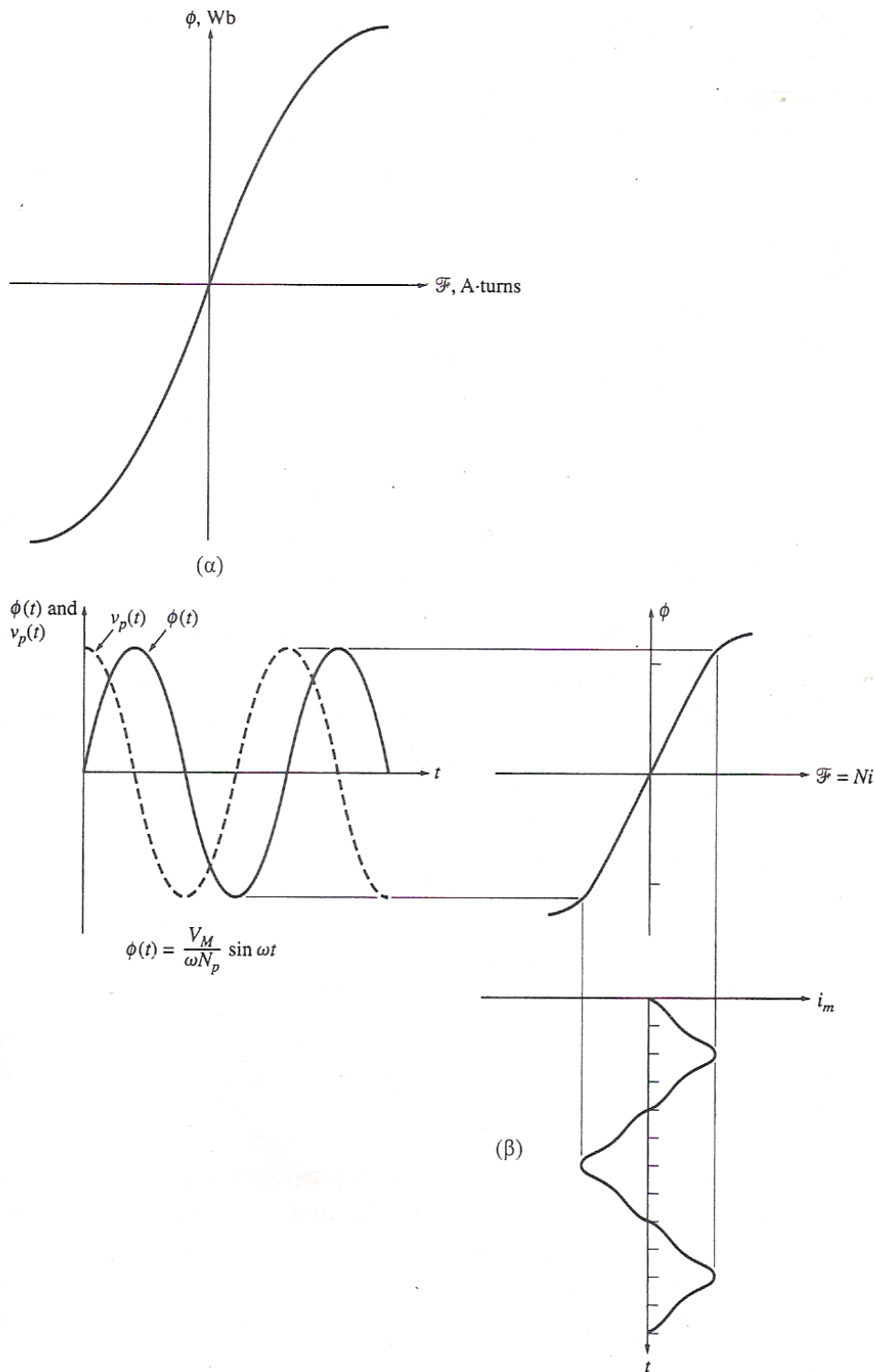
$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad [5.14]$$

Δηλαδή, όσο μικρότερες είναι οι ροές διαρροής του μετασχηματιστή, τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση του λόγου των τάσεων.

#### 5.2.4.4 Ρεύμα μαγνήτισης ενός ιδανικού μετασχηματιστή

Αν στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή εφαρμόσουμε εναλλασσόμενη τάση όπως στο σχήμα 5.13, τότε το τύλιγμα διαρρέετε από ρεύμα, ακόμη και αν στο δευτερεύον του δεν συνδέεται κανένα φορτίο. Αυτό το ρεύμα είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα και αποτελείται από δυο συνιστώσες:

- Το *ρεύμα μαγνήτισης* (magnetization current)  $i_M$ , που είναι η αιτία ανάπτυξης μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα του μετασχηματιστή.
- Το *ρεύμα απωλειών πυρήνα* (core-loss current)  $i_{h+e}$  που αντιστοιχεί στο φαινόμενο υστέρησης (hysteresis) και στα δινορρεύματα (eddy currents) του πυρήνα.



Σχήμα 5.16 (α): Η καμπύλη μαγνήτισης για τον πυρήνα του μετασχηματιστή. (β) Το ρεύμα μαγνήτισης που προκαλεί η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα ενός μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 5.16, φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης του πυρήνα ενός μετασχηματιστή. Αν είναι γνωστή η ροή στο εσωτερικό του πυρήνα, τότε το ρεύμα μαγνήτισης υπολογίζεται από την καμπύλη αυτή.

Έστω ότι στον παραπάνω πυρήνα η ροή διαρροής αγνοείται. Η μέση τιμή της ροής στον πυρήνα θα δίνεται από την:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{N_p} \cdot \int v_p(t) dt \quad [5.15]$$

Αν η τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον δίνεται από την  $v_p(t) = V_M \cdot \cos(\omega t)$  η αντίστοιχη ροή θα είναι:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{N_p} \cdot \int V_M \cdot \cos(\omega t) dt = \frac{V_M}{\omega N_p} \cdot \sin(\omega t) \text{ Wb} \quad [5.16]$$

Οι τιμές του ρεύματος που απαιτούνται για την ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης μαγνητικής ροής στον πυρήνα (σχήμα 5.16(α)) συγκρίνονται με τις τιμές της ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές και δίνουν την κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης του τυλίγματος. Αυτή η κυματομορφή φαίνεται στο σχήμα 5.16(β).

Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν στην κυματομορφή αυτή είναι οι ακόλουθες:

- Το ρεύμα μαγνήτισης του τυλίγματος ενός μετασχηματιστή δεν μεταβάλλεται ημιτονοειδώς. Οι αρμονικές υψηλής συχνότητας που παρουσιάζει η κυματομορφή του οφείλονται στον κορεσμό του πυρήνα.
- Κάθε φορά που η μέγιστη μαγνητική ροή φτάνει στο σημείο κορεσμού του πυρήνα, ακόμα και για μικρή αύξηση της ροής, απαιτείται μεγάλη αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης.
- Η κυματομορφή της βασικής συχνότητας του ρεύματος μαγνήτισης καθυστερεί σε σχέση με την κυματομορφή της τάσης κατά  $90^\circ$ .
- Οι αρμονικές υψηλών συχνοτήτων που παρουσιάζει η κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης, μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες σε πλάτος από την βασική συχνότητα. Γενικότερα όσο πιο κοντά βρίσκεται ο πυρήνας στον κορεσμό, τόσο μεγαλύτερο πλάτος έχουν οι υψηλότερες αρμονικές του ρεύματος μαγνήτισης.

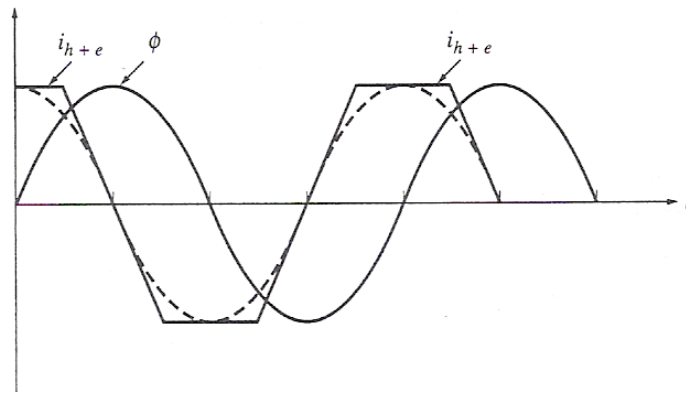
Η δεύτερη συνιστώσα του ρεύματος (ρεύμα απωλειών πυρήνα), που εμφανίζεται στην αφόρτιστη λειτουργία ενός πραγματικού μετασχηματιστή, είναι το ρεύμα που μεταφέρει την ισχύ η οποία καταναλώνεται στον πυρήνα με την μορφή απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Έστω ότι η κυματομορφή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα είναι ημιτονοειδής. Επειδή τα δινορρευματα που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του πυρήνα είναι ανάλογα της ποσότητας  $d\Phi/dt$ , η τιμή τους είναι μέγιστη την στιγμή που η ροή περνά από το μηδέν. Οι απώλειες υστέρησης παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό μη γραμμικότητας αλλά γίνονται και αυτές μέγιστες την στιγμή που η κυματομορφή της ροής περνά από το μηδέν. Στο σχήμα 5.17, φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος απωλειών του πυρήνα.

Στο τμήμα αυτό του ρεύματος του μετασχηματιστή γίνονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Το ρεύμα απωλειών του πυρήνα είναι παραμορφωμένο εξαιτίας της μη γραμμικότητας των απωλειών υστέρησης.
- Η κυματομορφή της βασικής συχνότητας του ρεύματος απωλειών του πυρήνα βρίσκεται σε φάση με την κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στη είσοδο του μετασχηματιστή.
- Το συνολικό ρεύμα στο τύλιγμα του μετασχηματιστή, που εξετάστηκε παραπάνω, ονομάζεται ρεύμα διέγερσης (excitation current) και είναι το άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος απωλειών πυρήνα:

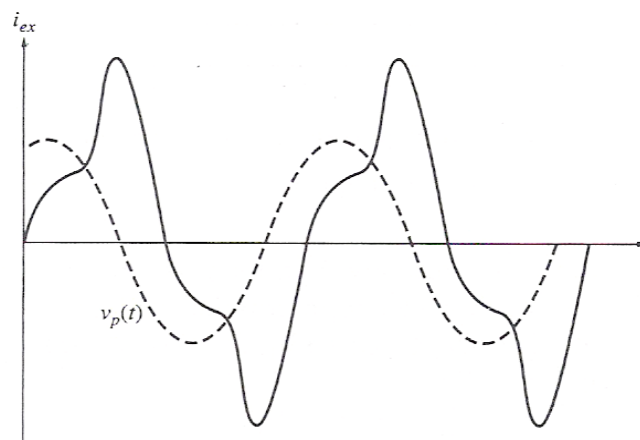
$$i_{ex} = i_m + i_{h+e}$$

[5.17]



Σχήμα 5.17: Το ρεύμα απωλειών πυρήνα ενός μετασχηματιστή.

Η κυματομορφή του ρεύματος διέγερσης ενός συνηθισμένου μετασχηματιστή παρουσιάζεται στο σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18: Το συνολικό ρεύμα διέγερσης ενός μετασχηματιστή.

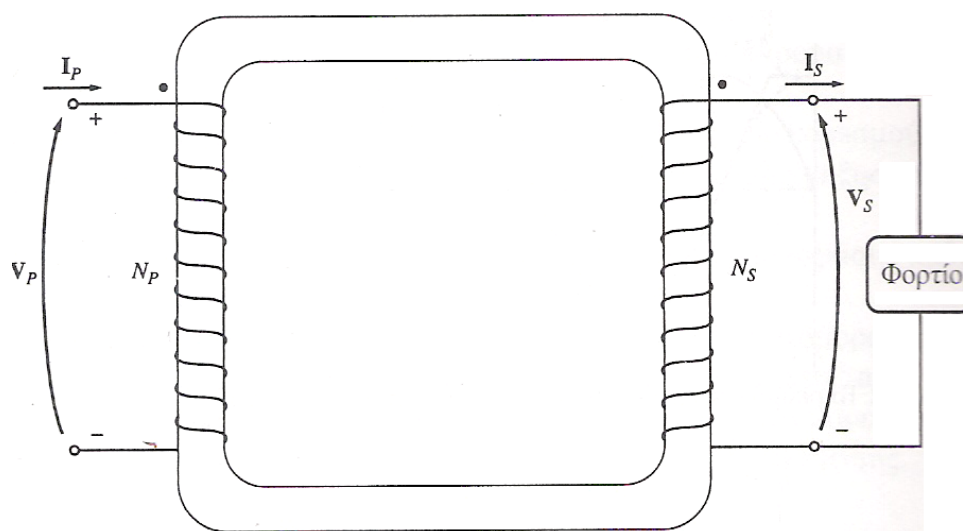
### 5.2.4.5 Λόγος ρευμάτων και υπολογισμός της πολικότητας μετασχηματιστή

Ας υποθέσουμε, ότι κάποιο φορτίο συνδέετε στα άκρα του μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19. Οι τελείες με τις οποίες σημειώνονται τα τυλίγματα του μετασχηματιστή βοηθούν στον εύρεση της πολικότητας των τάσεων και των ρευμάτων στα δυο τυλίγματα. Έτσι ένα ρεύμα που έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του τυλίγματος ,προκαλεί θετική μαγνητεγερτική δύναμη, ενώ το ρεύμα που έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο προκαλεί αρνητική μαγνητεγερτική δύναμη. Οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις που προκαλούνται από δυο ρεύματα με φορές προς τα σημειωμένα άκρα των αντιστοίχων τυλιγμάτων προστίθενται. Αντίθετα, αν το ρεύμα του ενός τυλίγματος έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του και το ρεύμα του άλλου τυλίγματος προς το μη σημειωμένο άκρο του, τότε οι δυο μαγνητεγερτικές δυνάμεις αφαιρούνε μεταξύ τους.

Στο σχήμα 5.19, το ρεύμα του πρωτεύοντος προκαλεί θετική μαγνητεγερτική δύναμη στον πυρίνα  $f_p = N_p \cdot i_p$ , ενώ το ρεύμα του δευτερεύοντος προκαλεί αρνητική μαγνητεγερτική δύναμη  $f_s = N_s \cdot i_s$ . δηλαδή, η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη στον πυρίνα θα έχει την τιμή :

$$f_{\text{net}} = N_p \cdot i_p - N_s \cdot i_s$$

[5.18]



Σχήμα 5.19: Πραγματικός μετασχηματιστής με φορτίο συνδεδεμένο στο δευτερεύον.

Αυτή ακριβώς η μαγνητεγερτική δύναμη παράγει τη συνολική μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα. Είναι, δηλαδή, ίση με:



$$f_{\text{net}} = N_P \cdot i_P - N_S \cdot i_S = \Phi \frac{d}{dt} \quad [5.19]$$

Όπου  $R$  είναι η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα. Όμως στους καλά σχεδιασμένους μετασχηματιστές η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα έχει πολλή μικρή (σχεδόν μηδενική) τιμή, όσο φυσικά ο πυρήνας είναι ακόρεστος. Έτσι η σχέση μεταξύ των ρευμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι προσεγγιστικά η εξής:

$$f_{\text{net}} = N_P \cdot i_P - N_S \cdot i_S \approx 0 \quad [5.20]$$

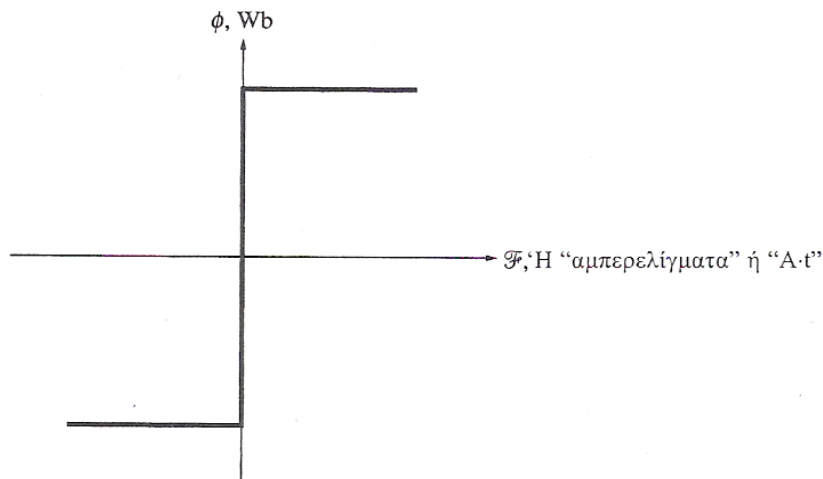
Όσο δηλαδή ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι ακόρεστος, ισχύει:

$$N_P \cdot i_P \approx N_S \cdot i_S$$

ή

$$\frac{i_P}{i_S} \approx \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{a}$$

[5.21]



Σχήμα 5.20: Καμπύλη μαγνήτισης ιδανικού μετασχηματιστή.

Το γεγονός ότι η μαγνητική δύναμη στον πυρήνα είναι σχεδόν μηδενική, οφείλετε στον τρόπο τοποθέτησης των τελειών στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Έτσι το ένα ρεύμα του μετασχηματιστή θα πρέπει να έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του αντίστοιχου τυλίγματος, ενώ το άλλο ρεύμα να έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο του τυλίγματος του. Κατά τον ίδιο τρόπο οι πολικότητες των τάσεων στα δυο τυλίγματα θα πρέπει να είναι ίσες ως προς τα σημειωμένα άκρα, ώστε να παράγονται οι παραπάνω φορές των ρευμάτων. (Στην

περίπτωση που τα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι ορατά, οι πολικότητες των τάσεων μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από τον νόμο του Lenz).

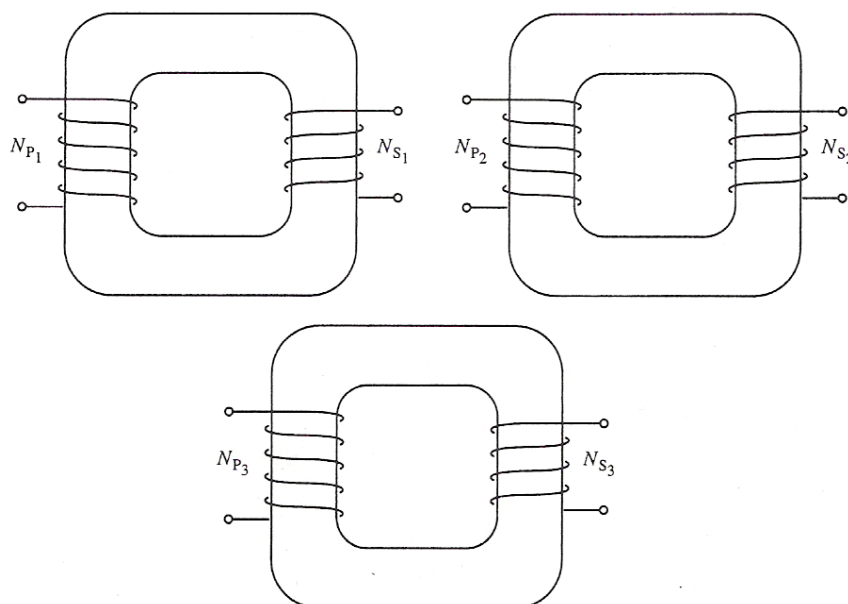
Οι υποθέσεις που πρέπει να γίνουν, ώστε ένας πραγματικός μετασχηματιστής να μετατραπεί στον αντίστοιχο ιδανικό είναι οι εξής:

- Ο πυρήνας του δεν πρέπει να παρουσιάζει απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων.
- Η καμπύλη μαγνήτισης του πυρίνα θα πρέπει να παρουσιάζει την μορφή του σχήματος 5.20 .Δηλαδή όταν ο πυρήνας είναι ακόρεστος, να ισχύει  $f_{\text{net}} = 0$ , ώστε να ισχύει  $N_p \cdot i_p = N_s \cdot i_s$ .
- Η ροή διαρροής του πυρήνα θα πρέπει να είναι μηδενική, ώστε η συνολική ροή να εμφανίζεται και στα δυο τυλίγματα.
- Οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή πρέπει να είναι μηδενικές.

Ένας πραγματικός μετασχηματιστής δεν μπορεί ποτέ να ικανοποιήσει τις παραπάνω απαιτήσεις. Μια καλή σχεδίαση όμως, μπορεί να τους προσφέρει χαρακτηριστικά σχεδόν παρόμοια με αυτά του ιδανικού μετασχηματιστή.

#### 5.2.4.6 Τριφασικοί μετασχηματιστές

Σχεδόν όλα τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος στις μέρες μας είναι τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενης τάσης.



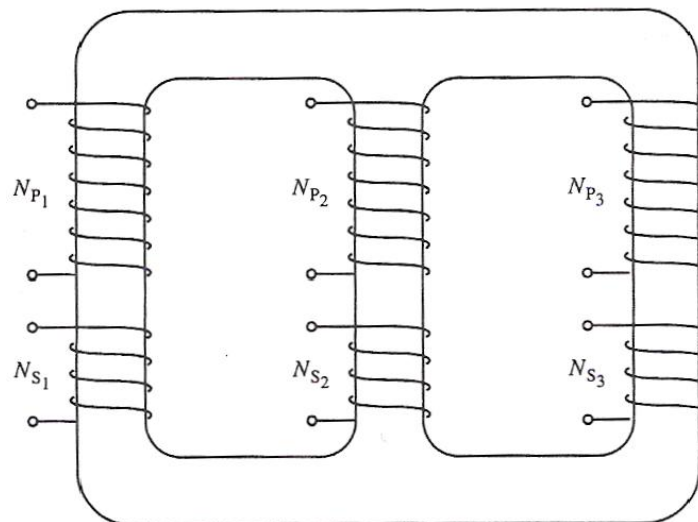
Σχήμα 5.21: Τριφασική συστοιχία μετασχηματιστών που αποτελούνται από ανεξάρτητους μετασχηματιστές.

Οι τριφασικοί μετασχηματιστές κατασκευάζονται με δυο βασικούς τρόπους. Στον πρώτο από αυτούς, τρεις απλοί μονοφασικοί μετασχηματιστές συνδέονται μεταξύ τους σε μια τριφασική συστοιχία (bank). Στη δεύτερη μέθοδο κατασκευής τριφασικών μετασχηματιστών τρία διπλά τυλίγματα τοποθετούνται γύρω από έναν κοινό πυρήνα. Οι δυο παραπάνω τεχνικές παρουσιάζονται στα σχήματα 5.21 και 5.22. Η δεύτερη τεχνική είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά στις μέρες μας, επειδή παρουσιάζει μικρότερο, βάρος και όγκο, είναι φθηνότερη και λειτουργεί με κάπως καλύτερη απόδοση. Ο παλαιότερος τρόπος κατασκευής παρουσίαζε το πλεονέκτημα της ευκολότερης επισκευής για τον καθένα από τους τρεις μετασχηματιστές μιας και η απομάκρυνση του από την συστοιχία ήταν απλούστατη. Όμως τα πλεονεκτήματα του μετασχηματιστή που διαθέτει έναν μόνο πυρήνα είναι περισσότερο σημαντικά. Τελικά, ακόμα και στις μέρες μας, σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές κατασκευασμένη με την πρώτη από τις παραπάνω τεχνικές.

#### 5.2.4.7 Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων στους τριφασικούς μετασχηματιστές

Όπως αναφέρθηκε, ένας μετασχηματιστής αποτελείται από τρεις μετασχηματιστές που είτε λειτουργούν ο καθένας ξεχωριστά είτε συνδέονται όλοι μαζί σε έναν κοινό πυρήνα. Τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα τυλίγματα είναι δυνατόν να συνδέονται τόσο σε αστέρα (Y) όσο και σε τρίγωνο ( $\Delta$ ). Έτσι οι τέσσερις πιθανές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι οι εξής:

- Αστέρας – Αστέρας (Y-Y)
- Αστέρας – Τρίγωνο (Y- $\Delta$ )
- Τρίγωνο – Αστέρας ( $\Delta$ - Y)
- Τρίγωνο – Τρίγωνο ( $\Delta$ - $\Delta$ )

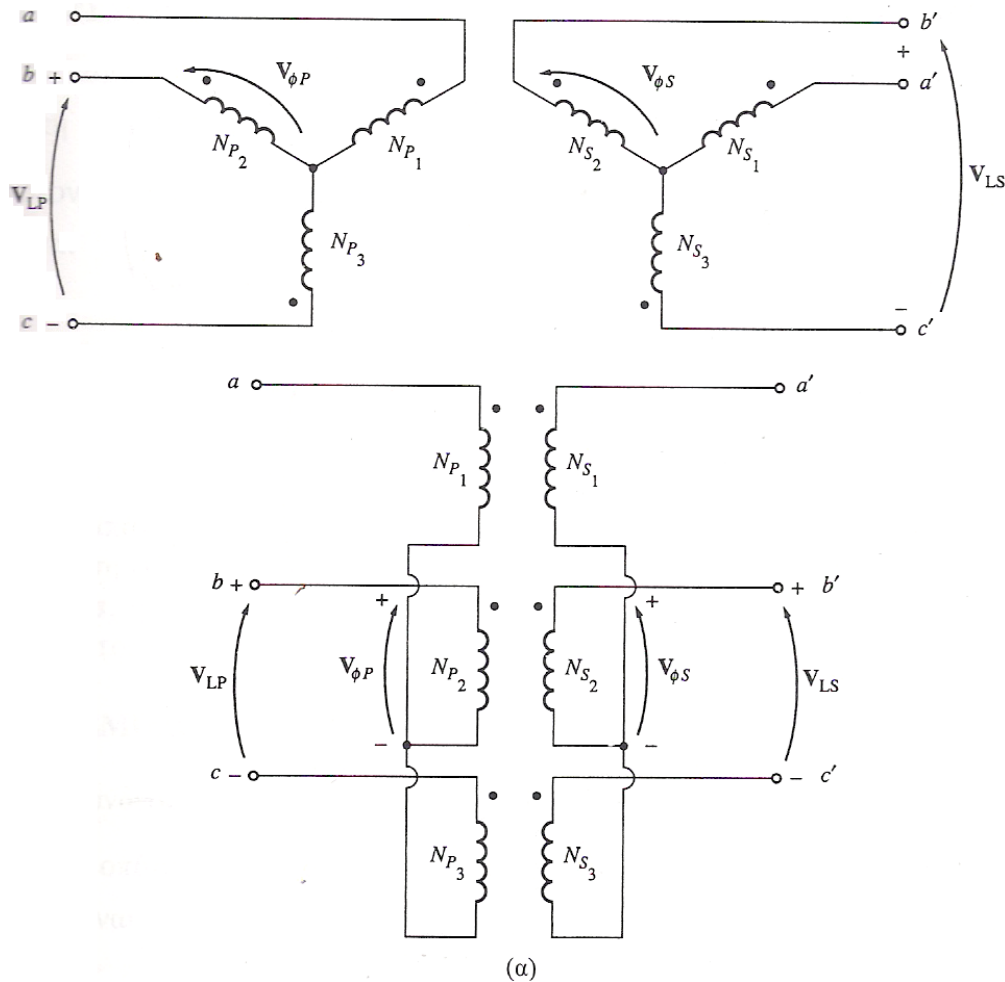


Σχήμα 5.22: Τριφασικός μετασχηματιστής τοποθετημένος πάνω σε πυρήνα με τρία σκέλη.

Ο καθένας από τους επιμέρους μετασχηματιστές που αποτελούν τον τριφασικό μετασχηματιστή συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ο απλός μονοφασικός μετασχηματιστής, που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Έτσι οι υπολογισμοί της σύνθετης αντίστασης, της διακύμανσης τάσης, της απόδοσης και των άλλων ποσοτήτων του τριφασικού μετασχηματιστή, αναφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη τιμή βάσης (pu) και χρησιμοποιούν τις μεθόδους του μονοφασικού μετασχηματιστή.

Στα επόμενα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε συνδεσμολογίας του τριφασικού μετασχηματιστή.

➤ Συνδεσμολογία Αστέρα-Αστέρα



Σχήμα 5.23: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών (α) Συνδεσμολογία Y-Y.

Η συνδεσμολογία Y-Y παρουσιάζετε στο σχήμα 5.23(α) . Εδώ η τάση στα άκρα της κάθε φάσης του μετασχηματιστή δίνετε από την σχέση  $V_{\phi P} = V_{LP}/\sqrt{3}$ . Ο λόγος των φασικών τάσεων στις δυο πλευρές του μετασχηματιστή δίνετε από το λόγο μετασχηματισμού. Επίσης η

σχέση της πολικής τάσης του δευτερεύοντος με την αντίστοιχη φασική τάση είναι  $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\Phi S}$ . Δηλαδή, ο συνολικός λόγος τάσεων σ' αυτό τον τριφασικό μετασχηματιστή θα είναι:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\Phi P}}{\sqrt{3} \cdot V_{\Phi S}} = \alpha \quad (Y - Y)$$

[5.22]

Όμως, η συνδεσμολογία αυτή παρουσιάζει δυο πολύ σημαντικά προβλήματα:

- Αν το τριφασικό φορτίο του μετασχηματιστή δεν είναι συμμετρικό, οι φασικές τάσεις του μετασχηματιστή γίνονται σε μεγάλο βαθμό μη συμμετρικές.
- Οι τάσεις τρίτης αρμονικής μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες.

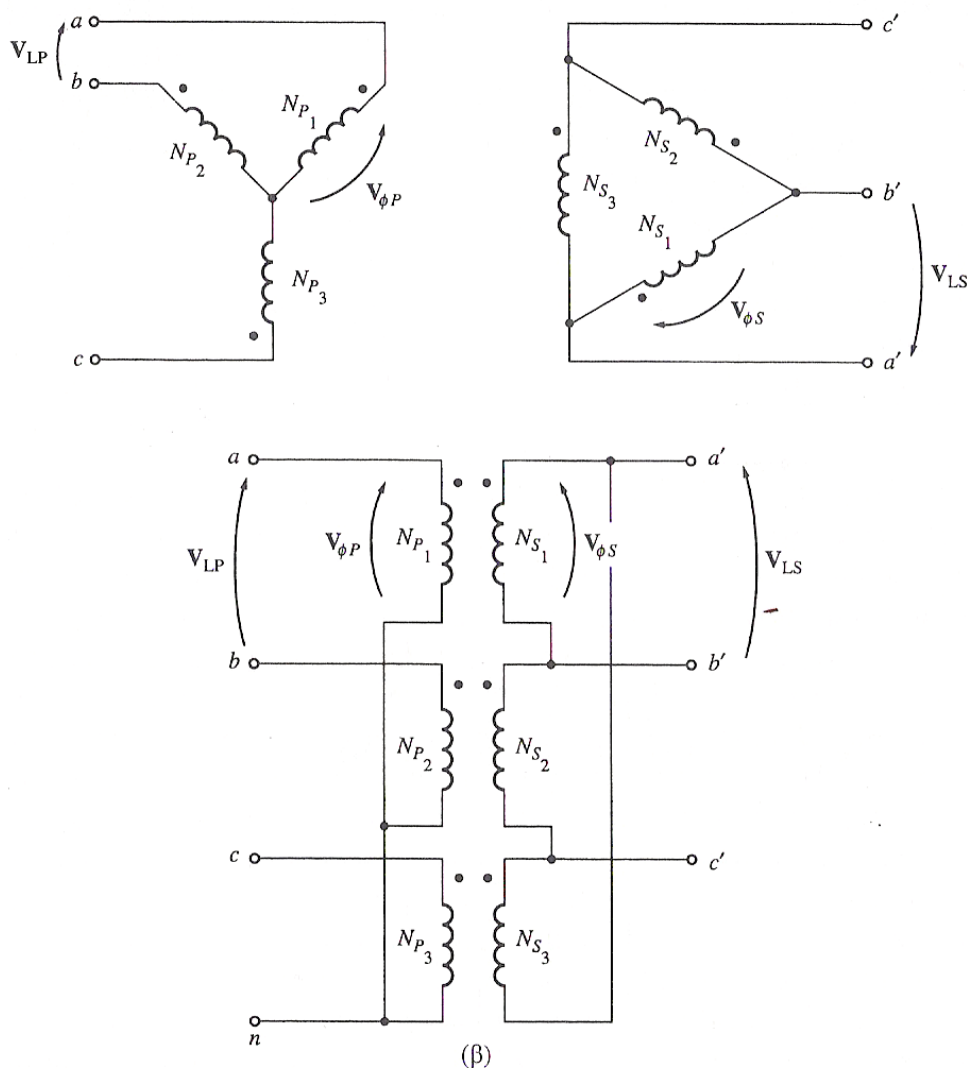
Σε ένα τριφασικό σύστημα η τάση της κάθε φάσης παρουσιάζει διαφορά φάσης  $120^\circ$  από τις άλλες δυο. Όμως η τρίτες αρμονικές της τάσης στο τριφασικό σύστημα δεν παρουσιάζουν διαφορά φάσης μεταξύ τους, επειδή σε τρεις περιόδους της τρίτης αρμονικής αντιστοιχεί μια περίοδος της βασικής αρμονικής. Έτσι κι αλλιώς η τρίτη αρμονική της τάσης είναι παρούσα στους μετασχηματιστές, πράγμα που οφείλετε στην μη γραμμικότητα του πυρήνα τους. Εδώ ειδικά, καθώς οι τρίτες αρμονικές προστίθενται μεταξύ τους και με την βασική αρμονική της τάσης, είναι δυνατόν να προκαλέσουν σ' αυτή ισχυρές παραμορφώσεις που είναι ανάλογες με το πλάτος τους. Μάλιστα σε μερικές περιπτώσεις το πλάτος της τρίτης αρμονικής μπορεί να υπερβαίνει και αυτό της βασικής. Τόσο το πρόβλημα της συμμετρίας των τάσεων, όσο και αυτό της τρίτης αρμονικής της τάσης είναι δυνατόν να λυθούν με τις παρακάτω τεχνικές:

- *Με γείωση των ουδετέρων του μετασχηματιστή*, ιδιαίτερα με την γείωση του ουδετέρου στο πρωτεύον τυλίγαμε. Με τον τρόπο αυτό η τρίτη αρμονική της τάσης αντί να αυξάνει την συνολική τάση του τυλίγματος, προκαλεί κάποιο ρεύμα προς την γη μέσω του ουδετέρου. Ο ουδέτερος, επίσης, προσφέρει μια οδό επιστροφής στα μη συμμετρικά ρεύματα που παράγει το φορτίο.
- *Με την προσθήκη ενός τρίτου τυλίγματος* (τριτεύον) που συνδέετε σε τρίγωνο και τοποθετείτε στο ζύγωμα του μετασχηματιστή. Σ' αυτή την περίπτωση οι τρίτες αρμονικές της τάσης εμφανίζονται στο τριτεύον τύλιγμα και προκαλούν κάποιο παρασιτικό ρεύμα (circulating current) στο εσωτερικό του. Αυτή η μέθοδος λειτουργεί το ίδιο αποτελεσματικά με την γείωση του ουδετέρου του μετασχηματιστή.

Το τριτεύον τύλιγμα που εισέρχεται στην παραπάνω περίπτωση δεν χρησιμοποιείτε γενικά για την τροφοδοσία κάποιου φορτίου, όμως πολύ συχνά αναλαμβάνει την τροφοδοσία του φωτισμού ή και όλων των φορτίων του υποσταθμού στον οποίο είναι τοποθετημένο. Ακόμη το τριτεύον τύλιγμα θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό, ώστε να μην παρουσιάζει προβλήματα με τα αρκετά υψηλά παρασιτικά ρεύματα. Ο πιο συνηθισμένος περιορισμός κατά την επιλογή ενός τέτοιου τυλίγματος είναι να διαθέτει ονομαστική ισχύ ίση με το  $1/3$  της ονομαστικής ισχύς των άλλων δυο τυλιγμάτων.

Κατά την κατασκευή οποιουδήποτε μετασχηματιστή αυτού του είδους είναι αναγκαία η χρήση μιας από τις δυο μεθόδους για την σωστή λειτουργία του. Όμως έτσι κι αλλιώς, η επιλογή ενός μετασχηματιστή σε συνδεσμολογία Υ-Υ είναι πολύ σπάνια, μιας και τις ίδιες ακριβώς απαιτήσεις μπορούν να τις ικανοποιήσουν και οι υπόλοιπες συνδεσμολογίες.

➤ Συνδεσμολογία Αστέρα-Τριγώνου.



Σχήμα 5.23 (β): Συνδεσμολογία Υ-Δ .

Η συνδεσμολογία Υ-Δ παρουσιάζετε στο σχήμα 5.23(β). Εδώ η πολική τάση του πρωτεύοντος συνδέετε με την αντίστοιχη φασική τάση μέσω της σχέσης  $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$ . Επίσης, η πολική τάση του δευτερεύοντος είναι ίση με την φασική του τάση  $V_{LS} = V_{\phi S}$ .

Ακόμα ο λόγος των πολικών τάσεων της μιας πλευράς του τριφασικού μετασχηματιστή προς τις πολικές τάσεις της άλλης πλευράς είναι:

$$\frac{V_{\Phi P}}{V_{\Phi S}} = \alpha$$

Έτσι, ο συνολικός λόγος των πολικών τάσεων της μιας πλευράς του τριφασικού μετασχηματιστή προς τις πολικές τάσης της άλλης πλευράς είναι:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\Phi P}}{V_{\Phi S}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} \cdot \alpha \quad (Y - \Delta)$$

[5.23]

Τα πλεονεκτήματα της συνδεσμολογίας αυτής είναι τα εξής :

- Επειδή το δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι τρίγωνο δεν χρειάζεται πάντοτε ο ουδέτερος αγωγός, εκτός αν έχουμε σοβαρά προβλήματα γείωσης.
- Το τριφασικό σύστημα λειτουργεί ομαλά ακόμα και όταν το φορτίο είναι ασύμμετρο.
- Δεν παρατηρείται παραμόρφωση των τάσεων, γιατί η τρίτη αρμονική κυκλοφορεί στον βρόχο του τριγώνου.
- Το φασικό ρεύμα του δευτερεύοντος παρουσιάζετε κατά  $\sqrt{3}$  μικρότερο από το αντίστοιχο της συνδεσμολογίας Y-Y. Έτσι με την συνδεσμολογία Y-Δ έχουμε οικονομία στον χαλκό επειδή η διατομή των αγωγών στο δευτερεύον θα είναι μικρότερη.

Ειδικά στις Η.Π.Α. πολύ συχνά οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται , ώστε η τάση στο δευτερεύον τους να έπεται της τάσης στο πρωτεύον κατά  $30^\circ$ . Αν και αυτός ο τρόπος κατασκευής έχει ποια τυποποιηθεί, πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη η διάφορα φάσης κατά τον παραλληλισμό μετασχηματιστών που έχουν κατασκευαστεί παλαιότερα.

Στην συνδεσμολογία που φαίνετε στο σχήμα 5.23(β), η τάση του δευτερεύοντος θα καθυστερήσει σε σχέση με την τάση του πρωτεύοντος, αν η διαδοχή των φάσεων είναι η abc. Αν αντίθετα η διαδοχή των φάσεων είναι η acb, η τάση του δευτερεύοντος θα προηγείται της τάσης του πρωτεύοντος κατά  $30^\circ$ .

Η συνδεσμολογία Y-Δ χρησιμοποιείτε στο τέλος γραμμών μεταφοράς ισχύος υψηλής τάσης. Με γειωμένο τον ουδέτερο η τάση στο πρωτεύον μπορεί να είναι πάνω από 100 kV, τάση στο δευτερεύον άνω των 3110 V και ισχύ πάνω από 3,2 MVA .Αν το ουδέτερο σημείο δεν γειωθεί, η τάση του πρωτεύοντος περιορίζετε στα 35 kV.

➤ *Συνδεσμολογία Τριγώνου - Αστέρα.*

Η συνδεσμολογία Δ-Y, απεικονίζετε στο σχήμα 5.23(γ). Εδώ η πολική τάση είναι ίση με την φασική τάση του πρωτεύοντος  $V_{LP} = V_{\Phi P}$ , ενώ οι αντίστοιχες τάσεις του δευτερεύοντος συνδέονται μέσω της σχέσης  $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\Phi S}$ . Έτσι ο λόγος των δυο πολικών τάσεων θα είναι:

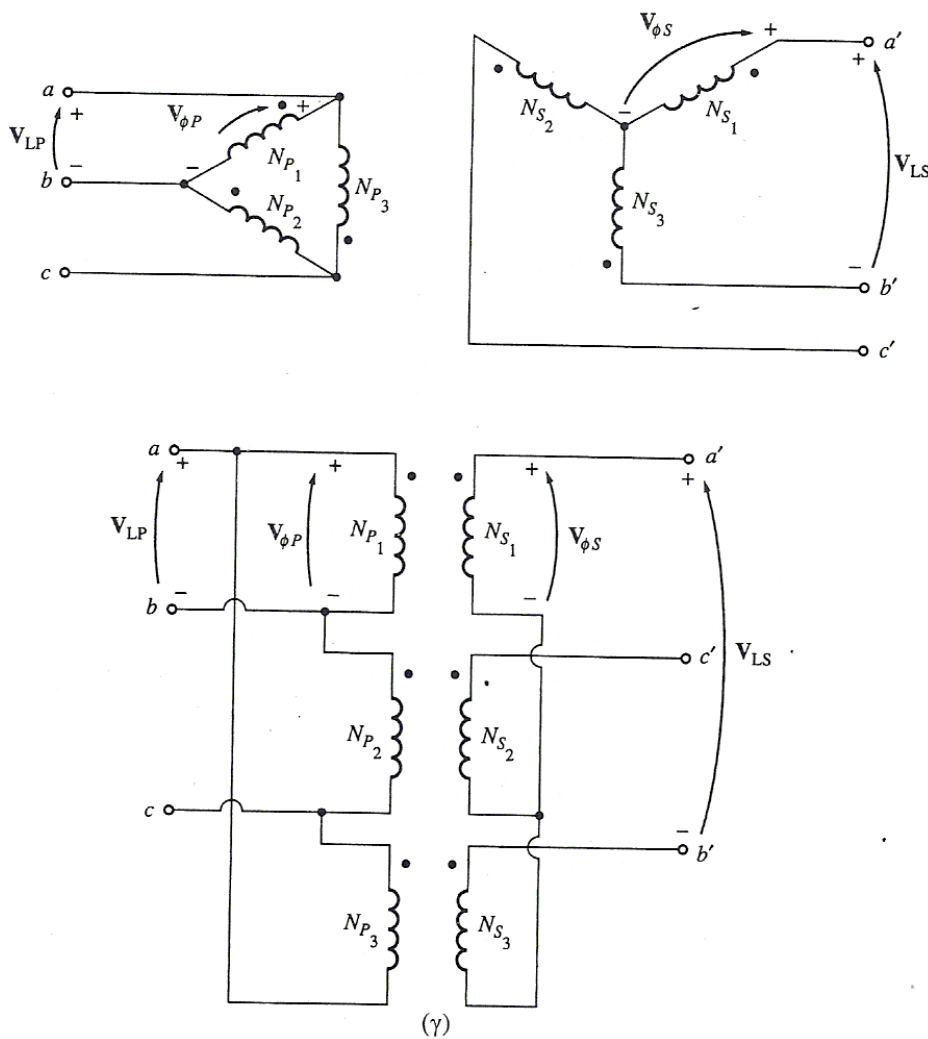
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3} \cdot V_{\phi S}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}}{\alpha} (\Delta - Y)$$

[5.24]

Η παραπάνω συνδεσμολογία παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα με την συνδεσμολογία Y-Δ. Επειδή το πρωτεύον είναι τρίγωνο, η τρίτη αρμονική δεν έχει καμία επίδραση στο φορτίο και δεν παρατηρείτε παραμόρφωση των τάσεων στο δευτερεύον. Στον μετασχηματιστή του σχήματος 5.22(γ) ειδικότερα, η τάση του δευτερεύοντος θα καθυστερεί σε σχέση με την τάση του πρωτεύοντος κατά 30°.

Η συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιείται σε υποσταθμούς παραγωγής μεταξύ των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς. Οι υποσταθμοί αυτοί, όπως έχει αναφερθεί, ανυψώνουν την τάση από τα επίπεδα της παραγωγής (π.χ. 20kV) στα επίπεδα της υψηλής τάσης μεταφοράς (π.χ. 150 kV).



Σχήμα 5.23 (γ): Συνδεσμολογία Δ-Y.



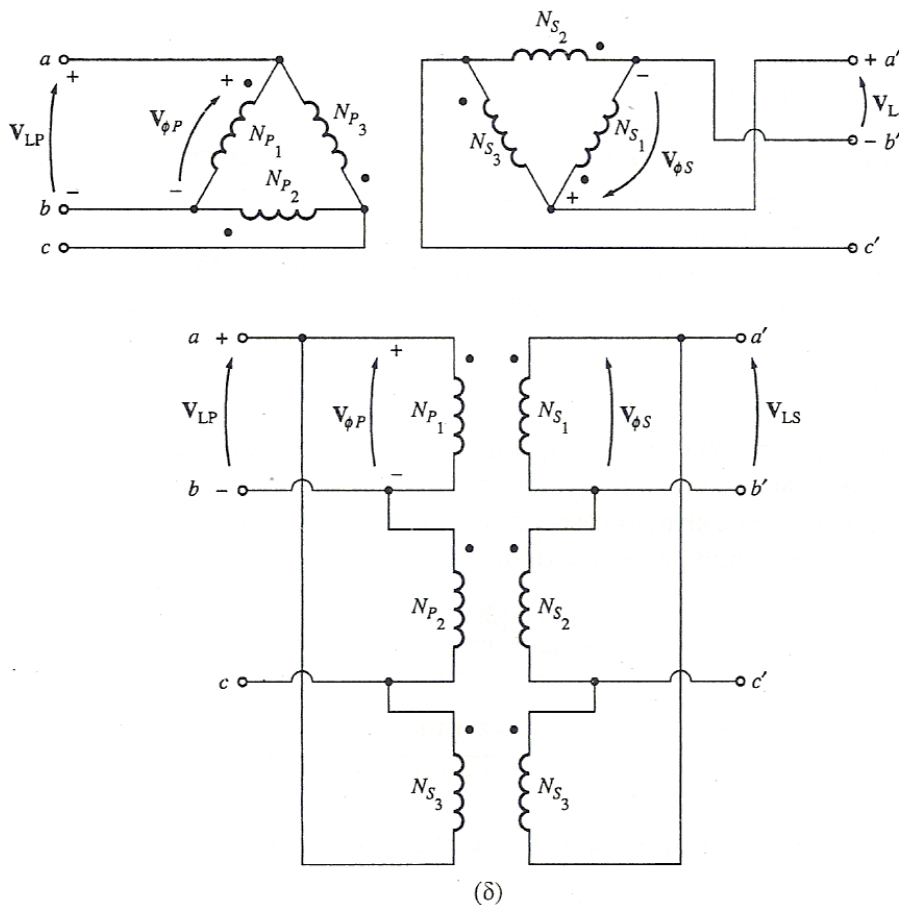
➤ Συνδεσμολογία Τριγώνου -Τριγώνου.

Η συνδεσμολογία Δ - Δ, απεικονίζεται στο σχήμα 5.23(δ). Εδώ η πολική τάση είναι ίση με την φασική τάση του πρωτεύοντος  $V_{LP} = V_{\Phi P}$  και  $V_{LS} = V_{\Phi S}$ . οπότε η σχέση μεταξύ των πολικών τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα είναι:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\Phi P}}{V_{\Phi S}} = \alpha (\Delta - \Delta)$$

[5.25]

Στον μετασχηματιστή αυτό, δεν εμφανίζεται μετατροπή της τάσης του πρωτεύοντος σε σχέση με αυτής του δευτερεύοντος, ενώ επίσης δεν εμφανίζονται τα προβλήματα τις τρίτης αρμονικής και τις ασυμμετρίας. Η σύνδεση Δ-Δ χρησιμοποιείται πολύ σπάνια.



Σχήμα 5.23 (δ): Συνδεσμολογία Δ-Δ.

**5.2.4.8 Μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων**

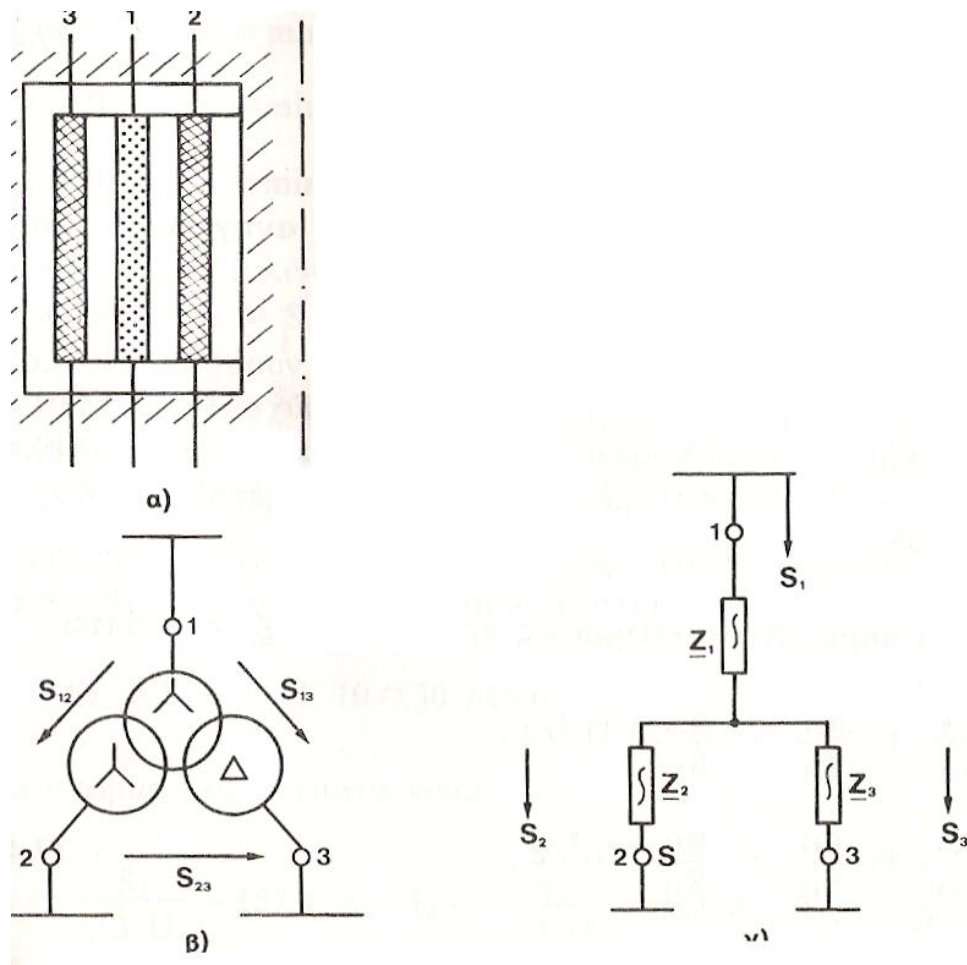
Τρίτο τύλιγμα, (Tertiary Winding, Tertiare Wicklung), συναντούμε συχνά σε μετασχηματιστές ισχύος, για την συμπλέξει τάσεων 400kV/150kV σε υποσταθμούς και σταθμούς παραγωγής.

Το τρίτο τύλιγμα χρησιμοποιείται ή για μεταφορά ισχύος ή για μηδενισμό της ομοπολικής συνιστώσας της τάσης.

Σε σταθμούς παραγωγής ή και υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης πρέπει, συχνά, οι μετασχηματιστές, εκτός της κύριας λειτουργίας τους, του υποβιβασμού ή της ανύψωσης της τάσης, να τροφοδοτούν και τις ίδιες ανάγκες του σταθμού. Εκεί, χρησιμοποιείτε ένα πρόσθετο τύλιγμα ανά φάση, με ικανότητα φόρτισης μικρότερη από τα κύρια τυλίγματα. Σε μετασχηματιστές σύνδεσης δικτύων υψηλής τάσης π.χ. 400kV/150kV, όπου πρέπει, για λόγους μόνωσης, να χρησιμοποιηθεί ζεύξη Y-Y, όπως αναφέρθηκε, επιβάλετε ένα τρίτο τύλιγμα κατά Δ για τον μηδενισμό της ομοπολικής συνιστώσας της τάσης. Πάνω σ' αυτό το τύλιγμα συνδέονται συνήθως και πυκνωτές ή αυτεπαγωγές, για την αντιστάθμιση της αέργου ισχύος.

Διακρίνουμε τρεις πλευρές, 1, 2, 3 σε έναν μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων, όπως δείχνει το σχήμα 5.24. Το ισοδύναμο κύκλωμα έχει τρεις σύνθετες αντιστάσεις,  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3$ .

Σε κάθε μια από τις τρεις πλευρές, ορίζετε μια ονομαστική ισχύ  $\sqrt{3}U_N I_N$  που αντιστοιχεί στην τάση και το ονομαστικό ρεύμα του αντίστοιχου τυλιγματος. Από αυτήν την ισχύ απορρέουν οι ισχύεις διέλευσης.



Σχήμα 5.24: Μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων. α) Διάταξη των τυλιγμάτων. β) Μονογραμμικό διάγραμμα. γ) Ισοδύναμο κύκλωμα στο ορθό σύστημα.

Η ισχύς διέλευσης από την πλευρά 1 στην 2, όταν δεν φορτίζεται η πλευρά 3, είναι έστω  $S_{12}$ . Αυτή ορίζεται από την ονομαστική ισχύ της ασθενέστερης πλευράς, όποια και αν είναι αυτή, η 1 ή η 2. Παρόμοιος ορίζονται και οι ισχύς διέλευσης  $S_{31}$  και  $S_{23}$ . Οι σύνθετες αντιστάσεις του ισοδύναμου κυκλώματος ευρίσκονται από τρία παρόμοια πειράματα βραχυκύκλωσης. Στο πρώτο απ' αυτά βραχυκυκλώνουμε την πλευρά 2, με ανοιχτή την πλευρά 3 και αυξάνουμε την τάση στο 1, έως ότου ένα από τα ρεύματα στην πλευρά 1 ή 2 φτάσει, σαν πρώτο ρεύμα, την ονομαστική τιμή. Την τάση αυτή, ονομάζουμε τάση βραχυκύκλωσης  $U_{12}$ . Παρομοίως διεξάγουμε και τα άλλα δύο πειράματα. Ανάγουμε τις τάσεις βραχυκύκλωσης και τις αντιστάσεις σε μια κοινή τάση, π.χ. την  $U_1$ , την τάση της πλευράς τροφοδότησης, οπότε θα έχουμε:

$$\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 = \bar{u}_{12} \frac{U_1^2}{S_{12}}$$

$$\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 = \bar{u}_{23} \frac{U_1^2}{S_{23}}$$

$$\bar{Z}_3 + \bar{Z}_1 = \bar{u}_{31} \frac{U_1^2}{S_{31}}$$

[5.26]

Όπου τα μεγέθη  $\bar{u}_{12}$ ,  $\bar{u}_{23}$ ,  $\bar{u}_{31}$ , είναι ανηγμένες τάσεις βραχυκύκλωσης.

$$\bar{u}_{12} = r_{12} + ix_{12}$$

$$\bar{u}_{23} = r_{23} + ix_{23}$$

$$\bar{u}_{31} = r_{31} + ix_{31}$$

[5.27]

Λύνοντας το παρακάτω σύστημα ως προς  $\bar{Z}_1$ ,  $\bar{Z}_2$ ,  $\bar{Z}_3$  προκύπτει:

$$\bar{Z}_1 = \left[ \frac{\bar{u}_{12}}{S_{12}} + \frac{\bar{u}_{31}}{S_{31}} - \frac{\bar{u}_{23}}{S_{23}} \right] \frac{U_1^2}{2}$$

$$\bar{Z}_2 = \left[ \frac{\bar{u}_{23}}{S_{23}} + \frac{\bar{u}_{12}}{S_{12}} - \frac{\bar{u}_{31}}{S_{31}} \right] \frac{U_1^2}{2}$$

$$\bar{Z}_3 = \left[ \frac{\bar{u}_{31}}{S_{31}} + \frac{\bar{u}_{23}}{S_{23}} - \frac{\bar{u}_{12}}{S_{12}} \right] \frac{U_1^2}{2}$$

[5.28]

### 5.2.4.9 Απώλειες ισχύος σε μετασχηματιστές

Οι απώλειες ισχύος σε μετασχηματιστές προέρχονται από δυο αιτίες, από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που διαρρέει το σίδηρο (πυρήνας) και από το ρεύμα του φορτίου που διαρρέει τα τυλίγματα. Οι απώλειες αυτές λέγονται αντίστοιχα, *απώλειες σιδήρου* και *απώλειες χαλκού* ή *φορτίου*. Οι απώλειες σιδήρου εξαρτώνται από το μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα δηλαδή από την τάση. Θεωρούνται ανεξάρτητες από τη φόρτιση, δηλαδή υπάρχουν συνέχεια, είναι σταθερές όσο ο μετασχηματιστής ευρίσκετε υπό σταθερή τάση και διακρίνονται σε:

- *Απώλειες υστέρησης*, που εξαρτώνται από το πεδίο και είναι ανάλογες της συχνότητας και
- *Απώλειες δινορρευμάτων*, που εξαρτώνται από το τετράγωνο του πεδίου, δηλαδή από το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης και από το τετράγωνο της συχνότητας.

Οι απώλειες σιδήρου και χαλκού είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους, υπό πλήρες φορτίο, όπου η κάθε μια είναι της τάξης του 1%. Η ισχύς των απωλειών εκφράζεται ως εξής:

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{Fe}} + P_k \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 = P_{\text{Fe}} + P_k \left( \frac{S}{S_N} \right)^2 \quad (\text{W})$$

[5.29]

Ή σε pu-τιμές έχουμε:

$$p_v = p_{\text{Fe}} + p_k \cdot i^2 = p_{\text{Fe}} + p_k \cdot s^2$$

[5.30]

Όπου  $P_{\text{Fe}}$  και  $P_k$  είναι οι ισχύς απωλειών σιδήρου και χαλκού στην εν κενό λειτουργία και στο πείραμα βραχυκύκλωσης, υπό ονομαστικό ρεύμα.  $S$ ,  $I$ , είναι η φαινόμενη ισχύς και ρεύμα και  $S_N$ ,  $I_N$ , οι ονομαστικές τιμές τους. Τα μικρά γράμματα υποδηλώνουν τα αντίστοιχα μεγέθη εκφρασμένα σε pu (per unit) τιμές.

Ο *συντελεστής απόδοσης* (efficiency)  $\eta$ , του μετασχηματιστή, εκφράζεται σαν την εξερχόμενη προς την εισερχόμενη ισχύ ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}} = \frac{S \cdot \cos\phi}{S \cdot \cos\phi + P_{\text{Fe}} + P_k \left( \frac{S}{S_N} \right)^2}$$

[5.31]

Εύκολα μπορούμε να συνάγουμε ότι, για μεταβαλλόμενα φορτίο ο συντελεστής ισχύος έχει μέγιστο για:

$$\cos\varphi = 1, \quad S_{\max} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_k}} \cdot S_N \rightarrow n_{\max} = \frac{1}{1 + 2\sqrt{\frac{P_k \cdot P_{Fe}}{S_N}}} = \frac{S_m}{S_m + 2P_{Fe}} \quad [5.32]$$

Ισχύει για το μέγιστο ότι, η ισχύς απωλειών σιδήρου ισούται με την ισχύ απωλειών χαλκού.

$$P_{Fe} = P_k \left( \frac{S}{S_N} \right)^2 \Leftrightarrow n_{\max} \quad (\text{συνθήκη μέγιστου βαθμού απόδοσης ισχύος}) \quad [5.33]$$

Άρα αν ο μετασχηματιστής έχει ίσες απώλειες σιδήρου και ονομαστικού φορτίου  $P_{Fe} = P_k$ , θα πρέπει για να έχουμε την μέγιστη απόδοση, Να τον λειτουργούμε με την μέγιστη ισχύ του  $S = S_N$ . Συνήθως όμως ισχύει  $S < S_N$  και για τον λόγο αυτό, στους μετασχηματιστές, οι απώλειες σιδήρου εκλέγονται μικρότερες των απωλειών χαλκού.

Η παραπάνω βελτιστοποίηση ισχύει για μια ορισμένη ισχύ δηλαδή για μια ορισμένη χρονική στιγμή. Εκείνο όμως που ενδιαφέρει, από ενεργειακής άποψης, είναι ο μέσος βαθμός απόδοσης  $\bar{n}$  σε μια χρονική περίοδο  $T$ , για παράδειγμα για ένα χρόνο. Ενδιαφέρει δηλαδή η απόδοση ενέργειας.

$$\bar{n} = \frac{W}{W + W_{Fe} + W_{Cu}} = \frac{\text{εξερχομένη ενέργεια}}{\text{εισερχομένη ενέργεια}} \quad [5.34]$$

Όπου  $W = \int_0^T S \cdot \cos\varphi dt$

$$W_{Fe} = P_{Fe} \cdot T$$

$$W_{Cu} = \frac{P_k}{S_N} \int_0^T S^2 dt$$

[5.35]

Για σταθερά  $P_{Fe}$  και  $P_k$  μεταβαλλόμενη ισχύ  $S$ , ο βέλτιστος μέσος βαθμός απόδοσης μπορεί να βρεθεί εφαρμόζοντας την θεωρία των μεταβολών, οπότε αποδεικνύετε ότι προκύπτει:

$$W_{Fe} = W_{Cu}$$

$$P_{Fe} = P_k \cdot \left( \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{S^2}{S_N^2} dt \right) = P_k \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2 dt = P_k \cdot \bar{p}^2$$

$$P_{Fe} = P_k \cdot \bar{p}^2 \quad (\text{συνθήκη μέγιστης απόδοσης ενέργειας})$$

[5.36]

Όπου  $\bar{p}$  η μέση τιμή του τετραγώνου της ισχύος στο pu σύστημα.

Απώλειες ενέργειας ανά έτος, λόγω φόρτισης.

Οι απώλειες ενέργειας ανά έτος δίνονται από την σχέση 5.34. Αν προσεγγίσουμε το ολοκλήρωμα της φαινομένης ισχύος με εμπειρικούς τύπους σαν συνάρτηση του συντελεστή φόρτισης  $m$ , θα έχουμε:

$$\int_0^T S^2 dt \approx S_{\max}^2 \cdot T \cdot (0,3m + 0,7m^2) \text{ ή}$$

$$\int_0^T S^2 dt \approx S_{\max}^2 \cdot T \cdot m^{1,6}$$

[5.37]

Από αυτές προκύπτει:

$$W_{Cu} \approx \frac{P_k \cdot S_{\max}^2 \cdot T}{S_N^2} \cdot (0,3m + 0,7m^2) \approx \frac{P_k \cdot S_{\max}^2 \cdot T}{S_N^2} \cdot m^{1,6}$$

(Ετήσιες απώλειες ενέργειας μετασχηματιστή).

[5.38]

#### 5.2.4.10 Κατασκευαστικές απόψεις επί των μετασχηματιστών ισχύος

##### 5.2.4.11 Τυλίγματα μετασχηματιστών και πυρήνας

Τα τυλίγματα πρέπει να εκπληρώνουν ορισμένες τεχνικές προδιαγραφές. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι εξής:

- Πρέπει να είναι οικονομικά και στο αρχικό κόστος και στην μετέπειτα συντήρηση,
- Η θέρμανση τους κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή δεν θα πρέπει να ξεπερνά ορισμένα επίπεδα επειδή αυτό επιδρά σε μεγάλο βαθμό στην διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή,
- θα πρέπει να έχουν μηχανική σταθερότητα και αντοχή και τέλος
- πρέπει να έχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική αντοχή και μόνωση για το ενδεχόμενο των ηλεκτρικών υπερτάσεων.

Πολλές από τις παραπάνω συνθήκες που αναφέραμε αλληλοσυγκρούονται. Για παράδειγμα αν έχουμε υψηλή πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα σημαίνει ότι πρέπει να έχουμε μικρή διατομή των συρμάτων άρα και μείωση του χαλκού που οδηγεί σε μείωση του κόστους κατασκευής. Ταυτόχρονα όμως σημαίνει αύξηση των απωλειών joule στα τυλίγματα και αύξηση της θερμοκρασίας, επειδή η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων είναι αντιστρόφως

ανάλογη με την διατομή του σύρματος. Η επιλογή των τυλιγμάτων απαιτεί μεγάλη προσοχή για να βρεθεί η προσφορότερη λύση.

Η διατομή των συρμάτων (τυλιγμάτων) εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που τα διαρρέει. Τα σύρματα κατασκευάζονται από χαλκό ηλεκτροτεχνικό (E-Cu), σπάνια δε από αλουμίνιο. Αν επιθυμούμε να προσδιορίσουμε τη διατομή  $A$  του σύρματος και τον αριθμό των σπειρών του  $N$ , για σύρμα με γνωστή ειδική αντίσταση  $\rho$  ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Εφαρμόζουμε μια τάση  $V$  και προσδιορίζουμε τις αμπεροστροφές  $M$  του τυλίγματος. Έστω ότι το μέσω μήκος της σπείρας είναι  $l$ , τότε το ολικό μήκος του τυλίγματος θα είναι:

$$L = N \cdot l \quad [5.39]$$

Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος είναι:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \frac{\rho N l}{A} \quad [5.40]$$

Από τον νόμο του Ohm η ωμική αντίσταση είναι:

$$R = \frac{V}{I} \quad [5.41]$$

Όπου  $I$  είναι το ρεύμα που διαρρέει την περιέλιξη. Εξισώνοντας τις σχέσεις (5.40) και (5.41) και λύνοντας για  $A$  έχουμε:

$$A = \frac{N l \rho I}{V} = \frac{M \rho l}{V} \quad [5.42]$$

Οι ποσότητες  $M$ ,  $\rho$ ,  $l$  και  $V$  είναι όλες γνωστές. Ο υπολογισμός του αριθμού των σπειρών προσδιορίζετε από την σχέση:

$$N = \frac{M}{I} \quad [5.43]$$

Όπου οι ποσότητες  $M$  και  $I$  είναι γνωστές.

Ο πυρήνας των μετασχηματιστών αυτών κατασκευάζεται από ελάσματα χάλυβα πολύ μικρού πάχους. Τα ελάσματα σφίγγονται μεταξύ τους με κοχλίες. Υπάρχει δε μόνωση μεταξύ τους για να μην βραχυκυκλώνουν και οι απώλειες του πυρήνα να διατηρούνται σε επίπεδα χαμηλότερα των 3 Watt ανά χιλιόγραμμα. Στους πυρήνες των μεγάλων μετασχηματιστών υπάρχουν δίαυλοι που επιτρέπουν την κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου (λάδι).

Όλα τα ενεργά μέρη του μετασχηματιστή (πυρήνας - τυλίγματα), καθώς και το ψυκτικό μέσο περικλείονται στο *δοχείο του μετασχηματιστή*. Το δοχείο είναι στεγανό για να μπορεί να κυκλοφορεί το λάδι που είναι απαραίτητο για την ψύξη και την μόνωση του μετασχηματιστή χωρίς να έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Το δοχείο αποτελείται από δυο μέρη, το κάλυμμα και το σώμα. Το κάλυμμα στηρίζεται με κοχλίες πάνω στο σώμα του μετασχηματιστή. Μέσα στο δοχείο τοποθετούνται και διάφορα απαραίτητα εξαρτήματα (ψυγείο λαδιού, σωληνώσεις, μονωτήρες διέλευσης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κ.τ.λ.). Στα τοιχώματα του δοχείου υπάρχουν ανοίγματα με κοχλιωτά καλύμματα που χρησιμοποιούνται σαν θυρίδες για τις επισκέψεις των συντηρητών, των χειρίστων κ.τ.λ. Τα ανοίγματα αυτά κατασκευάζονται από συγκολλητά φύλλα χάλυβα με νευρώσεις για μεγαλύτερη αντοχή και ονομάζονται *ανθρωποθυρίδες*.

Όταν η θεοκρασία του λαδιού το οποίο μονώνει και ψύχει τα τυλίγματα του μετασχηματιστή ανέλθει σε υψηλά επίπεδα, το λάδι διαστέλλεται. Για τον λόγο αυτό σε μεγάλους μετασχηματιστές, στους οποίους η ποσότητα του λαδιού φτάνει τους 30 τόνους, προβλέπεται ειδικό δοχείο για την διαστολή (Buffer Drum) του λαδιού. Το δοχείο διαστολής συγκοινωνεί με το κύριο δοχείο μέσω ενός συστήματος βαλβίδων που επιτρέπει την κίνηση του λαδιού και προς τις δυο κατευθύνσεις. Όταν το λάδι φτάσει στο δοχείο διαστολής ψύχεται και στην συνέχεια επιστρέφει στο κυρίως δοχείο του μετασχηματιστή. Το δοχείο διαστολής διαθέτει στο εσωτερικό του, διάφραγμα το οποίο αποτρέπει την άμεση επαφή αέρα και λαδιού. Έτσι, το μονωτικό λάδι διατηρείται καθαρό χωρίς τον κίνδυνο εισχώρησης υγρασίας και αέρα. Η απομάκρυνση της υγρασίας γίνεται μέσω του αφυγραντή ο οποίος επιτρέπει την «αναπνοή» του μετασχηματιστή, εμποδίζοντας την εισχώρηση υγρασίας από το εξωτερικό περιβάλλον. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τυπική διάταξη του δοχείου διαστολής, καθώς και ο εξοπλισμός σύνδεσης με την κυρίως δεξαμενή του μετασχηματιστή.

#### **5.2.4.12 Μέτρηση της θερμοκρασίας σε μετασχηματιστές**

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με δυο τρόπους:

- Με θερμοαντιστάσεις που τοποθετούνται στα σημεία που θέλουμε να προσδιορίσουμε την θερμοκρασία. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται για μετασχηματιστές μικρής και μεσαίας ισχύος.
- Με θερμικά μοντέλα. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος.

Το θερμικό μοντέλο στην πιο απλή μορφή του αποτελείται από θερμοαντιστάση που τοποθετείται σε ένα ειδικό κοίλωμα στο πάνω μέρος του δοχείου του μετασχηματιστή. Το



κοίλωμα αυτό είναι γεμάτο με λαδί και θερμαίνεται από το ρεύμα που κυκλοφορεί στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ρεύματος. Το πρωτεύον του μετασχηματιστή αυτού βρίσκεται σε σειρά με ένα από τα τυλίγματα του μετασχηματιστή ισχύος και έτσι το ρεύμα του είναι ανάλογο με το ρεύμα του μετασχηματιστή ισχύος. Φυσικά η θερμοκρασία που μετριέται στην θερμοαντίσταση του κοιλώματος είναι ανάλογη με την θερμοκρασία του τυλίγματος του μετασχηματιστή ισχύος. Το θερμικό αυτό μοντέλο ονομάζεται *διάταξη θερμικής εικόνας*.

Η προστασία του μετασχηματιστή από υπερθέρμανση γίνεται με ηλεκτρονόμους. Αν ο μετασχηματιστής είναι μεσαίας ή μικρής ισχύος χρησιμοποιείται θερμικός ηλεκτρονόμος. Σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος η διέγερση του ηλεκτρονόμου γίνεται με τα αέρια που παράγονται στον μετασχηματιστή. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί ονομάζονται ηλεκτρονόμοι Bucholz. Τα αέρια παράγονται στα σημεία που παρατηρείται η υπερθέρμανση και προκαλούνται από την καταστροφή της μόνωσης ή από σπινθηρισμούς που γίνονται μέσα στο λάδι. Οι σπινθηρισμοί αυτοί προκαλούν την αποσύνθεση του λαδιού και την δημιουργία ατμών. Η ποσότητα των αερίων ή ατμών είναι ανάλογη με την σοβαρότητα του σφάλματος. Τα αέρια συγκεντρώνονται σε μια κοιλότητα που διαθέτει ο ηλεκτρονόμος για τον σκοπό αυτό. Ανάλογα με την πίεση που ασκούν σε διάφορα ευαίσθητα σημεία του ηλεκτρονόμου παράγοντα τα απαραίτητα ηλεκτρικά σήματα που θέτουν σε λειτουργία ενδεικτικές λυχνίες ή ηχητικά σήματα και ταυτόχρονα απομονώνουν τον μετασχηματιστή από το δίκτυο.

#### 5.2.4.13 Ψύξη των μετασχηματιστών

Για την ψύξη των μετασχηματιστών, χρησιμοποιούνται οι εξής μέθοδοι:

- Φυσική ψύξη με αέρα,
- Τεχνητή ψύξη με αέρα,
- Φυσική ψύξη λαδιού και
- Τεχνητή ψύξη λαδιού.

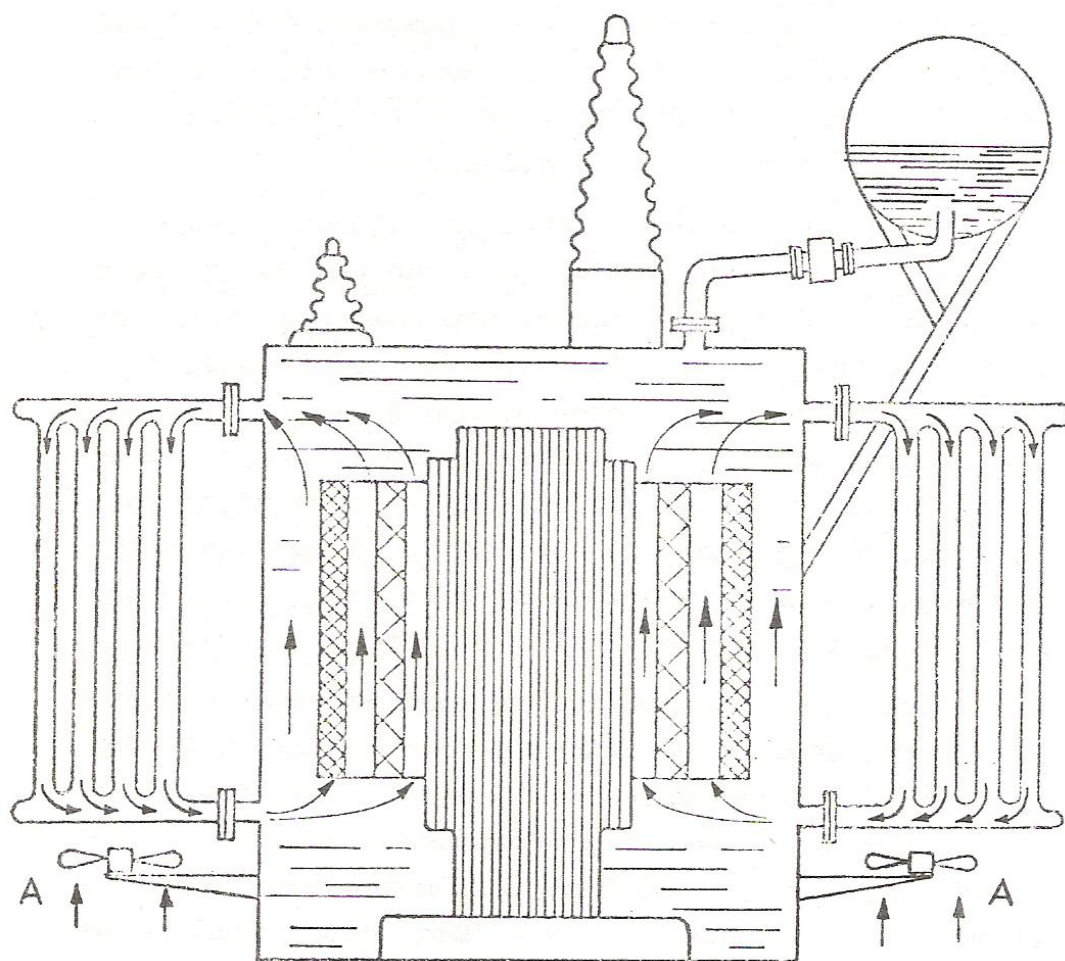
Με την πρώτη μέθοδο ο μετασχηματιστής ψύχεται μόνος του. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν υπερβαίνει τους 40°C και όταν η εξωτερική επιφάνεια του δοχείου είναι μεγάλη (40cm<sup>2</sup> για κάθε watt απωλειών χαλκού και 20 cm<sup>2</sup> για κάθε watt απωλειών σιδήρου).

Για την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου χρησιμοποιείτε ένας ανεμιστήρας ή ένα ζεύγος ανεμιστήρων που κινούν τεχνητά τον αέρα. Ο αέρας κυκλοφορεί στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, δηλαδή στον κενό χώρο που υπάρχει ανάμεσα στα τυλίγματα και στον πυρήνα ή στους διαύλους που έχουν προβλεφτεί για τον σκοπό αυτό. Υπάρχουν διάφοροι εμπειρικοί τύποι που μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε την ροή αέρα στον μετασχηματιστή συναρτήσει των απωλειών του σε watt και της εξωτερικής επιφάνεια του δοχείου (λείο, με ραβδώσεις κ.τ.λ.).

Η τρίτη μέθοδος απαιτεί την χρησιμοποίηση λαδιού. Ο μετασχηματιστής βαπτίζεται μέσα στο λάδι του δοχείου. Το λάδι που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του πυρήνα ή τα τυλίγματα,

απάγει την θερμότητα που δημιουργείτε με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του και μείωση του ειδικού βάρους του. Έτσι το λάδι ανεβαίνει στην επιφάνεια του δοχείου όπου ψύχετε, αυξάνοντας το ειδικό βάρος του. Με τον τρόπο αυτό το λάδι μετακινείτε στο δοχείο ψύχοντας τα μέρη του μετασχηματιστή. Τα λάδια που χρησιμοποιούνται είναι ορυκτέλαια με μεγάλη ρευστότητα, μεγάλη μονωτική αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και πολύ υψηλό σημείο ανάφλεξης.

Η τελευταία μέθοδος ψύξης απαιτεί εκτός από το λάδι και εξωτερική, τεχνητή ψύξη του θερμαινόμενου λαδιού που επιστρέφει στην επιφάνεια. Η ψύξη γίνεται με κρύο νερό που κυκλοφορεί μέσα σε σωλήνες που βρίσκονται στην επιφάνεια του λαδιού.



Σχήμα 5.25: Σύστημα ψύξης μετασχηματιστή.

Το σχήμα 5.25 δείχνει διαγραμματικά ένα τυπικό σύστημα ψύξης μετασχηματιστή υποσταθμού. Για γρηγορότερη ψύξη τοποθετούμε κοντά στα ψυγεία τους ανεμιστήρες που σημειώνονται με το γράμμα Α.

Συχνά στους μεγάλους μετασχηματιστές υποσταθμών, χρησιμοποιούνται και αντλίες λαδιού που με εξαναγκασμένο τρόπο κυκλοφορούν το λάδι με μεγαλύτερη ταχύτητα προς τις ψυχόμενες επιφάνειες και έτσι η θερμοκρασία διατηρείτε σε χαμηλά επίπεδα.

Ο τρόπος ψύξης χαρακτηρίζετε με διάφορα κεφαλαία γράμματα, τα οποία ανήκουν σε έναν κώδικα, ως εξής:

- Μέσα ψύξης

O = λάδι (ορυκτό)

L = Askarel ή Cleopen (λάδι δυσανάφλεκτο)

G = αέριο

A = αέρας

W = νερό

- Κίνηση του ψυκτικού στον εναλλάκτη θερμότητας

N = φυσική ροή

F = εξαναγκασμένη ροή

Για παράδειγμα ONAN=λάδι- φυσική κυκλοφορία, αέρας-φυσική κυκλοφορία.

Αν ή ψύξη δεν επαρκεί, ο μετασχηματιστής μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του υπό ελαττωμένο φορτίο. Συνήθως σε μετασχηματιστές με βεβιασμένοι κυκλοφορία ψυκτικών, δίνετε από τον κατασκευαστή οδηγίες κατά πόσο θα ελαττωθεί η ισχύς αν αντί βεβιασμένης, έχουμε φυσική κυκλοφορία.

Συνήθως, αν ένα σφάλμα οδηγήσει σε καταστροφή του μετασχηματιστής, τότε λόγω του υπάρχοντος ηλεκτρικού τόξου, επίκειται κίνδυνος πυρκαγιάς. Έτσι κατά την εγκατάσταση των μετασχηματιστών πρέπει να λαμβάνετε μέριμνα ούτως ώστε στην περίπτωση που θα έχουμε διαρροή ελαίου και προκληθεί πυρκαγιά, το λάδι να απορροφηθεί από στρώματα χαλικιών ή να διοχετευτεί σε ειδική αποχέτευση ώστε να μην συντηρηθεί, να σβήσει η πυρκαγιά στο λάδι του μετασχηματιστής. Μια εναλλακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση μη αναφλέξιμων μονωτικών υγρών Clofen, Pyranol, Nerdin κτλ τα οποία έχουν και διπλάσια με τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά από τα μονωτικά λάδια. Αυτά είναι συνθετικά λάδια με τοξικές ιδιότητες, γι αυτό και δεν εφαρμόζονται συχνά.

#### **5.2.4.14 Μόνωση των μετασχηματιστών**

Υπάρχου δυο ειδών μονώσεις που μας απασχολούν στους μετασχηματιστές. Η πρώτη αναφέρεται στην θερμοκρασία και η δεύτερη στην μονωτική ικανότητα των υλικών σχετικά με τις ηλεκτρικές τάσης.

Τα μονωτικά θερμοκρασίας διαιρούνται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την ανθεκτικότητα τους στην θερμοκρασία. Τα μονωτικά αυτά χρησιμοποιούνται για την μόνωση των ελασμάτων ή των τυλιγμάτων κ.τ.λ. Η πρώτη κατηγορία φθάνει μέχρι τους 90°C και

περιλαμβάνει το χαρτί και το βαμβάκι γλασσέ. Η δεύτερη κατηγορία φθάνει τους 105°C. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα υλικά της πρώτης κατηγορίας που έχουν ποτιστεί με ένα ειδικό διηλεκτρικό. Επίσης περιλαμβάνονται υλικά σελουλόζης, φενολικού ρετσινιού, μονωτικά βερνίκια και άλλα. Η τρίτη κατηγορία φθάνει τους 130°C. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής είναι ένα ειδικά κατεργασμένο ασβέστη, ή μίκα, το φιμπέρ και άλλα οργανικά υλικά με αυτού του είδους τις μονότοκες ιδιότητες. Η τέταρτη κατηγορία φθάνει τους 180°C και περιλαμβάνει μερικά από τα υλικά της δεύτερης κατηγορίας με πρόσμιξη πυριτίου. Τελευταία κατηγορία είναι για θερμοκρασίες άνω των 180°C. Η μίκα, η πορσελάνη, ο χαλαζίας και το γυαλί είναι υλικά που ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Τα λάδια που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των μετασχηματιστών έχουν άριστες μονωτικές ικανότητες και είναι φθηνά. Τα λάδια αυτά, όπως έχει είδη αναφερθεί, είναι ορυκτά και προέρχονται από την απόσταξη του πετρελαίου μετά από ειδική κατεργασία. Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα *μεθανέλαια* στα οποία κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης.
- Τα *ναφθανέλαια* στα οποία κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες.
- Τα *ναυθαλμεθανέλαια* τα οποία είναι μίγμα των δυο προηγούμενων.

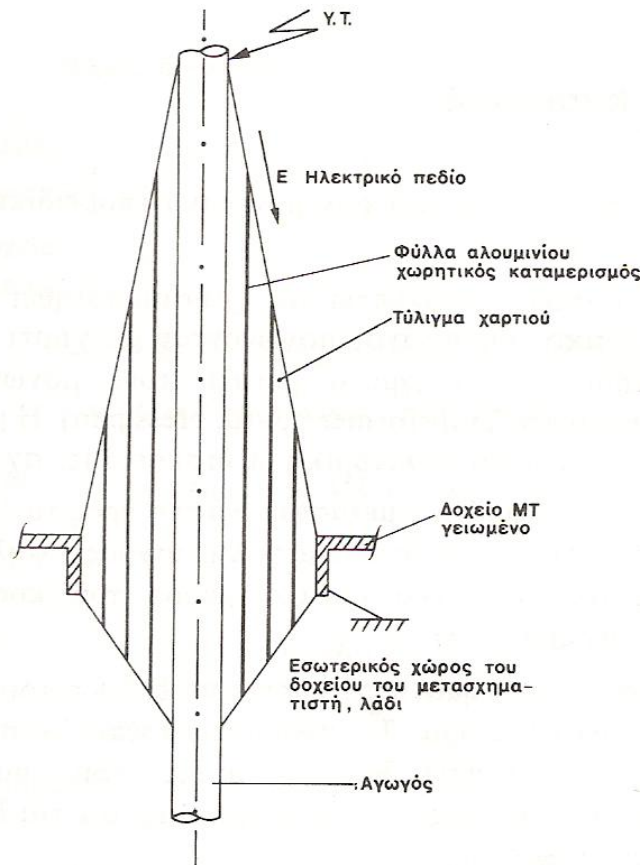
Η θερμοκρασίας ανάφλεξης του μονωτικού ελαίου είναι 130-250°C. Έτσι ως μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους ορίζετε η θερμοκρασία των 90°C.

Τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται με τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Ακόμα η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στην διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού.

Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών λαδιών γίνεται με ειδικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό, καθώς και η διαδικασία δοκιμής, καθορίζονται ανάλογα με τον κανονισμό που θα γίνουν οι δοκιμές (VDE 0370/10 66, B.S.S 148-195, A.S.T.M D870-49, C.E.I 10-1 VI 1953) Γι' αυτό, όταν δίνονται τα αποτελέσματα ενός ελέγχου πρέπει να αναφέρεται ο κανονισμός δοκιμών.

Για ασφάλεια επιλέγουμε τα μονωτικά υλικά, με αντοχή διπλάσια από την μέγιστη τάση του μετασχηματιστή. Μερικές τιμές για τα μονωτικά που προαναφέραμε είναι: Το χαρτί ανάλογα με το πάχος του από 0,01 μέχρι 0,05mm, αντέχει μέχρι 1kV, το φιμπέρ μέχρι τα 3 kV και η σελουλόζη μέχρι 20 kV.

Οι σπείρες που βρίσκονται κοντά στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων κατασκευάζονται με ενισχυμένη μόνωση επειδή η καταπόνηση τους από τις υπερτάσεις του δικτύου είναι μεγαλύτερη. Για τον σκοπό αυτό τα άκρα αυτά, στους μετασχηματιστές υποσταθμών, προστατεύονται από ειδικές κατασκευές που ονομάζονται *μονωτήρες διέλευσης*. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούνται είναι η ηλεκτρική απομόνωση των φάσεων από το δοχείο του μετασχηματιστή που είναι γειωμένο. Οι μονωτήρες διέλευσης συνδέουν τα τυλίγματα (από το εσωτερικό του δοχείου) με το εξωτερικό δίκτυο και απαιτούν ένα μεγάλο μέρος του κόστους του μετασχηματιστή (σχήμα 5.26).



Σχήμα 5.26: Αρχή λειτουργίας μονωτήρα διέλευσης ΥΤ.

Η κατασκευή ενός μετασχηματιστή πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να αντέχει σε ένα βραχυκύκλωμα. Τα τυλίγματα πρέπει να στηριχτούν έτσι ώστε να αντέχουν στις δυνάμεις αυτές, που καμία φορά ανέρχονται σε δεκάδες τόνους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ξύλο, κατά κανόνα αφυδατωμένη οξιά.

Προτού γίνει ο εμποτισμός του μετασχηματιστή με λάδι, ο μετασχηματιστής ξεραίνεται μέσα σε κενό (περίπου 1-10Torr) και υπό θερμοκρασία 80-100°C. Η διαδικασία της ξήρανσης είναι απαραίτητη για να εξαλειφτεί η υγρασία που είναι στο χαρτί και το ξύλο. Η διαδικασία της ξήρανσης μπορεί να διαρκέσει 2-3 ημέρες.

Ειδική μεριμνά πρέπει να ληφθεί για να εξασφαλιστεί η καλή ποιότητα και ποσότητα του λαδιού μέσα στον μετασχηματιστή. Έτσι στην κορυφή του μετασχηματιστή βλέπει κανείς το δοχείο διαστολής λαδιού, το οποίο περιέχει και ανθυγραντικό υγρό για την απορρόφηση της υγρασίας. Σε ορισμένες κατασκευές, χρησιμοποιούνται άζωτο ή ελαστική μεμβράνη στο δοχείο διαστολής, ώστε να εξασφαλίζετε η απομόνωση του λαδιού από τον περιβάλλοντα αέρα.

Η κατασκευή των μετασχηματιστών υποβάλλεται σε περιορισμούς για λόγους μεταφοράς. Έτσι, η ισχύς περιορίζεται περίπου στα 1000-1300MVA, 400kV για λόγους μεταφοράς. Οι μετασχηματιστές ισχύος τάξης μεγέθους 100-400MVA, μεταφέρονται χωρίς τους μονωτήρες διέλευσης, που είναι αρκετά ψηλοί και μπορεί να φτάσουν τα 4-5m για 400kV. Όπου υπάρχουν σιδηροδρομικές συνδέσεις, συμφέρει πολλές φορές να κατασκευαστεί ο

μετασχηματιστής πάνω σε σασσί σιδηροδρομικό και να συνδεθεί προς μεταφορά με συρμό τραίνου.

#### **5.2.4.15 Αντοχή των μετασχηματιστών σε υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα, δοκιμές**

Οι μετασχηματιστές για να ανταποκριθούν στον σκοπό τους πρέπει, όχι μόνο να αντέχουν στις τάσεις και τα ρεύματα της κανονικής λειτουργίας, αλλά και σε ενδεχόμενες υπερτάσεις και υπερρεύματα. Βεβαία υπάρχουν μέσα προστασίας όπως ρεονόμοι και συσκευές προστασίας όπως απαγωγείς τάσεων για υπερτάσεις ή ασφάλειες και διακόπτες ισχύος για υπερρεύματα, αλλά αυτά περιορίζουν (δεν αποκλείουν) την καταπόνηση του μετασχηματιστή.

##### *Υπερτάσεις*

Η μόνωση του μετασχηματιστή αντιστοιχίζεται σε ένα ονομαστικό επίπεδο, στάθμη, μόνωσης (Isolationspegel) σε kV. Συνήθως, υπάρχει σύμπτωση του επιπέδου μόνωσης με την ονομαστική τάση του δικτύου. Μπορεί όμως κάποιος, αν το επιβάλλουν οι συνθήκες εφαρμογών να διαλέξει για παράδειγμα για έναν μετασχηματιστή 20 kV, επίπεδο μόνωσης 30 kV. Σε κάθε επίπεδο μόνωσης αντιστοιχίζεται μια σειρά από δοκιμές υψηλής τάσης, για παράδειγμα στα 20 kV μόνωση αντιστοιχίζεται εναλλασσόμενη τάση δοκιμής 55 kV και κρουστική 95 kV. Η στάθμη μόνωσης φέρει το γράμμα N κατά VDE 0111 μετά τον αριθμό που υποδηλώνει την τάση π.χ. 20N=σταθμη μόνωσης 20 kV, υπό κανονικές συνθήκες υπερτάσεων.

Η μέγιστη συνεχής επιτρεπόμενη ενδεικνυόμενη τιμή της τάσης λειτουργίας ενός μετασχηματιστή είναι περίπου 15% πάνω από την στάθμη μόνωσης. Πέραν αυτού, για να καταλειφθούν οι ενδεχόμενες υπερτάσεις στην κανονική λειτουργία και σε περιπτώσεις χειρισμών, σφαλμάτων και ατμοσφαιρικών φαινομένων, οι κανονισμοί VDE 0532/Teil 1 και IEC Publ.71-1 καθορίζουν τάσεις δοκιμής, που είναι ξεχωριστές για τα τυλίγματα και τους μονωτήρες διέλευσης, όπως δείχνει ο **πίνακας 7.6ντοκοπουλος** του παραρτήματος. Η εναλλασσόμενη τάση δοκιμής είναι διπλάσια περίπου της ονομαστικής και εφαρμόζετε ένα λεπτό (60sec). Η κρουστική τάση δοκιμής είναι 4-6 φορές η ονομαστική και εφαρμόζετε υπό δυο μορφές:

- Σαν πλήρης κρουστικό κύμα 1,2μs/50μs και
- Σαν αποκομμένο κύμα.

Οι τάσεις δοκιμής στον πίνακα αφορούν συστήματα όπου υπάρχει κίνδυνος ατμοσφαιρικών υπερτάσεων και αντιστοιχούν στις ποιο αυστηρές δόκιμες. Ο δείκτης N μετά από την ονομαστική τάση υποδηλώνει την κατηγορία αυτή. Σε συστήματα χωρίς κινδύνους ατμοσφαιρικών υπερτάσεων, μπορούν να εφαρμοστούν ηπιότερες τάσεις δοκιμής (VDE 0111).

Οι τάσεις δοκιμής διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν ο ουδέτερος είναι τέλεια (στερεά) γειωμένος ή όχι. Ορίζετε εκτενεστερά στο κεφάλαιο περί γειώσεων δικτύων, τι θα πει αυτό. Οι τάσεις δοκιμής για καλά γειωμένο σύστημα είναι μικρότερες. Δίκτυα πάνω από 250kV είναι κατά κανόνα στερεά γειωμένα. Μπορεί όμως να είναι έτσι γειωμένα και τα δίκτυα χαμηλότερων τάσεων, π.χ. 125 kV.

### *Υπερρεύματα*

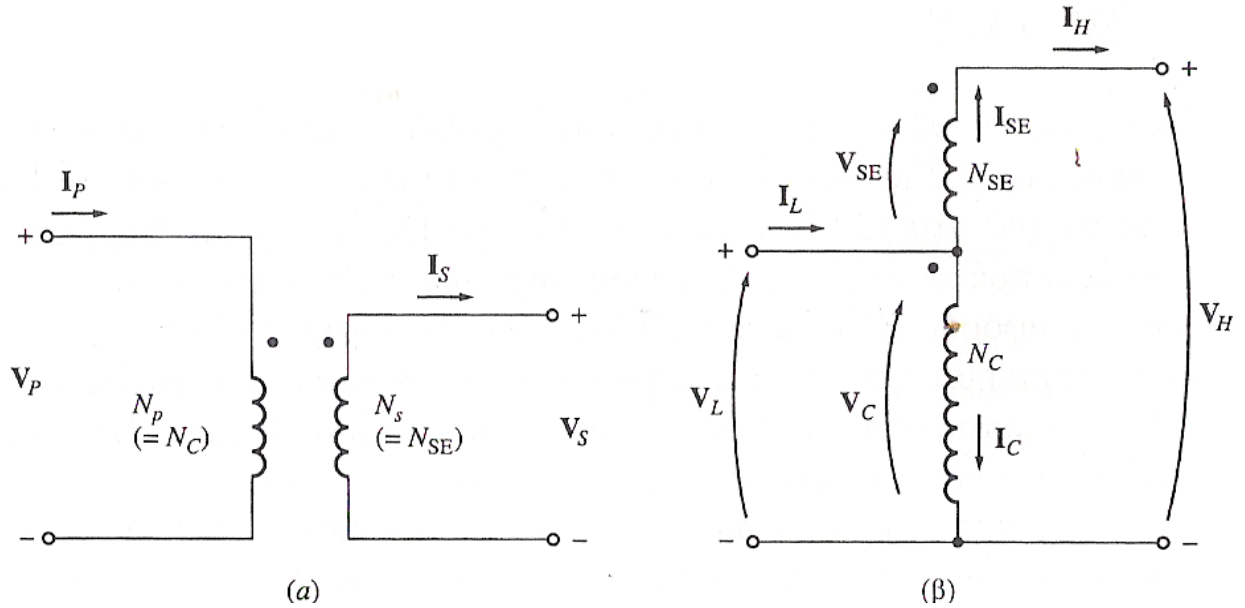
Οι μετασχηματιστές πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένοι, ώστε, να αντέχουν χωρίς καταστροφή ή αλλαγή των ιδιοτήτων τους σε βραχυκύκλωμα που συμβαίνει έξω από τον μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα ενός βραχυκυκλώματος είναι ισχυρές δυνάμεις και υπερθέρμανση. Το σφάλμα με το μεγαλύτερο ρεύμα πρέπει να λαμβάνετε υπ όψη. Αυτά μπορεί να είναι τριπολικά σφάλματα, αλλά στην περίπτωση τεθλασμένου αστέρα μπορεί ένα μονοφασικό σφάλμα να οδηγήσει σε κατά 1,4 μεγαλύτερο ρεύμα απ'ότι ένα τριφασικό σφάλμα. Ο πίνακας **π.7.7** δείχνει το μέγιστο ρεύμα που πρέπει να αντέξουν τα τυλίγματα ενός μετασχηματιστή .

### **5.2.5 Αυτομετασχηματιστές**

Σε μερικές εφαρμογές είναι απαραίτητη κάποια μικρή αλλαγή στο επίπεδο της τάσης ενός κύκλωματος. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα όταν πρέπει να αποκατασταθούν οι πτώσεις τάσης μιας μεγάλης σε μήκος γραμμής μεταφοράς. Σ' αυτή την περίπτωση θα ήταν φοβερά δαπανηρή η κατασκευή ενός μετασχηματιστή με δυο ξεχωριστά και σχεδόν όμοια τυλίγματα. Στην θέση αυτού του μετασχηματιστή χρησιμοποιείται μια παραπλήσια συσκευή που ονομάζεται αυτομετασχηματιστής (autotransformer).

Στο σχήμα 5.27 ,φαίνεται το κύκλωμα ενός αυτομετασχηματιστή. Στο σχήμα 5.27(α) το κύκλωμα αυτό σχεδιάζεται με τον γνωστό τρόπο, ενώ στο σχήμα 5.27(β), το πρώτο τύλιγμα του μετασχηματιστή προστίθεται σε σειρά με το δεύτερο. Η σχέση των τάσεων στα άκρα των δυο τυλιγμάτων δίνετε από τον λόγο μετασχηματισμού. Εδώ όμως η τάση στη έξοδο του αυτομετασχηματιστή είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων στο πρώτο και το δεύτερο τύλιγμα του. Το πρώτο τύλιγμα του μετασχηματιστή ονομάζετε εδώ *κοινό (common)* τύλιγμα ,επειδή η τάση του, εμφανίζετε τόσο στην είσοδο, όσο και στην έξοδα του αυτομετασχηματιστή. Το δεύτερο τύλιγμα ονομάζεται τύλιγμα *σειράς (series)*, επειδή συνδέεται σε σειρά με το κοινό τύλιγμα.

Στο σχήμα 5.28, φαίνεται ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού. Εδώ η τάση εισόδου είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων στα δυο τυλίγματα, ενώ η τάση εξόδου είναι η τάση του κοινού τυλίγματος.



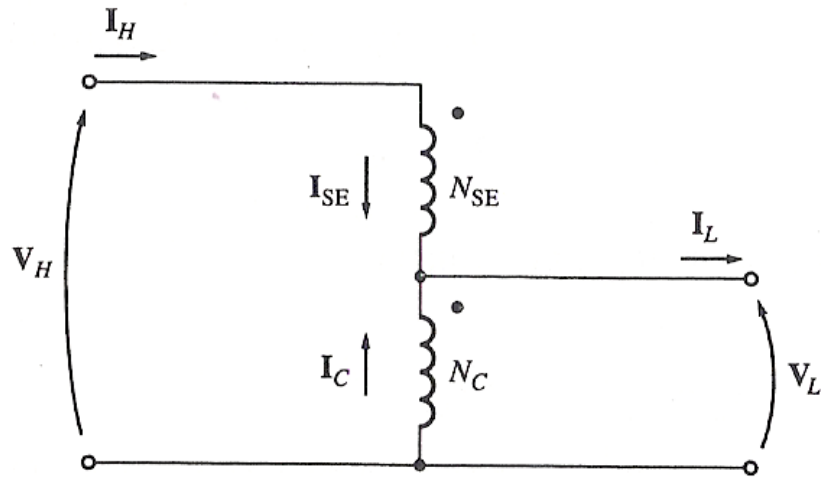
Σχήμα 5.27: Ένας μετασχηματιστής με τα τυλίγματα του (α) κανονικά συνδεδεμένα και (β) επανασυνδεδεμένα ώστε να λειτουργεί ως αυτομετασχηματιστής.

Επειδή τα δυο τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι φυσικά συνδεδεμένα μεταξύ τους, οι όροι που χρησιμοποιούνται για τις ηλεκτρικές ποσότητες του αυτομετασχηματιστή είναι διαφορετικές από αυτές που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα. Ποιο συγκεκριμένα η τάση στα άκρα του κοινού τυλίγματος ονομάζεται *κοινή τάση*  $V_C$ , ενώ το ρεύμα του ονομάζεται *κοινό ρεύμα*  $I_C$ . Αντίστοιχα, η τάση στα άκρα του τυλίγματος σειράς ονομάζεται *τάση σειράς*  $V_{SE}$  και το ρεύμα του ρεύμα σειράς  $I_{SE}$ . Ακόμα η τάση και το ρεύμα του μετασχηματιστή στην πλευρά που εμφανίζει την υψηλότερη τάση συμβολίζονται ως  $V_H$  και  $I_H$  αντίστοιχα, ενώ το ρεύμα και η τάση στην πλευρά που εμφανίζει την χαμηλότερη τάση συμβολίζονται ως  $I_L$  και  $V_L$  αντίστοιχα. Η πρωτεύουσα πλευρά του μετασχηματιστή (που στα άκρα της εφαρμόζετε τάση) μπορεί να είναι αυτή που εμφανίζει την υψηλότερη τάση ή αυτή που εμφανίζει την χαμηλότερη. Αυτό εξαρτάτε φυσικά από το αν ο είναι μετασχηματιστής ανύψωσης ή υποβιβασμού. Από το σχήμα 5.27, εξάγονται οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων στα άκρα των τυλιγμάτων του αυτομετασχηματιστή, καθώς και τα ρεύματα τους.

$$\frac{V_C}{V_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}} \quad [ 5.44 ]$$

$$N_C \cdot I_C = N_{SE} \cdot I_{SE} \quad [5.45]$$





Σχήμα 5.28: Η συνδεσμολογία αυτομετασχηματιστή υποβιβασμού .

Οι τάσεις στα άκρα των τυλιγμάτων συνδέονται με τις τάσεις στα άκρα του μετασχηματιστή μέσω των σχέσεων:

$$V_L = V_C \quad [5.46]$$

$$V_H = V_C + V_{SE} \quad [5.47]$$

Εντελώς ανάλογα, τα ρεύματα των δυο τυλιγμάτων συνδέονται με τα ρεύματα εισόδου και εξόδου του μετασχηματιστή μέσω των σχέσεων:

$$I_L = I_C + I_{SE} \quad [5.48]$$

$$I_H = I_{SE} \quad [5.49]$$

### 5.2.5.1 Σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων ενός αυτομετασχηματιστή

Ο υπολογισμός της σχέσης μεταξύ της  $V_H$  και  $V_L$  είναι αρκετά εύκολος. Η σχέση που δίνει την υψηλή τάση του αυτομετασχηματιστή είναι η:

$$V_H = V_C + V_{SE}$$

Αλλά ισχύει  $V_C/V_{SE} = N_C/N_{SE}$ , οπότε:

$$V_H = V_C + \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot V_C$$

[5.50]

Τελικά , επειδή είναι  $V_L = V_C$ , ισχύει η:

$$V_H = V_L + \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot V_L = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} \cdot V_L$$

[5.51]

Ή

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_{SE} + N_C}$$

[5.52]

Η σχέση μεταξύ των ρευμάτων στις δυο πλευρές του αυτομετασχηματιστή υπολογίζεται κι αυτή αρκετά εύκολα. Η εξίσωση που δίνει το ρεύμα στην πλευρά χαμηλής τάσης, όπως αναφέρθηκε, είναι η εξής:

$$I_L = I_C + I_{SE}$$

Από την σχέση 5.45  $I_C = (N_C/N_{SE}) \cdot I_{SE}$ , προκύπτει:

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot I_{SE} + I_{SE}$$

[5.53]

Επειδή όμως, είναι  $I_H = I_{SE}$ , η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot I_H + I_H = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} \cdot I_H$$

[5.54]

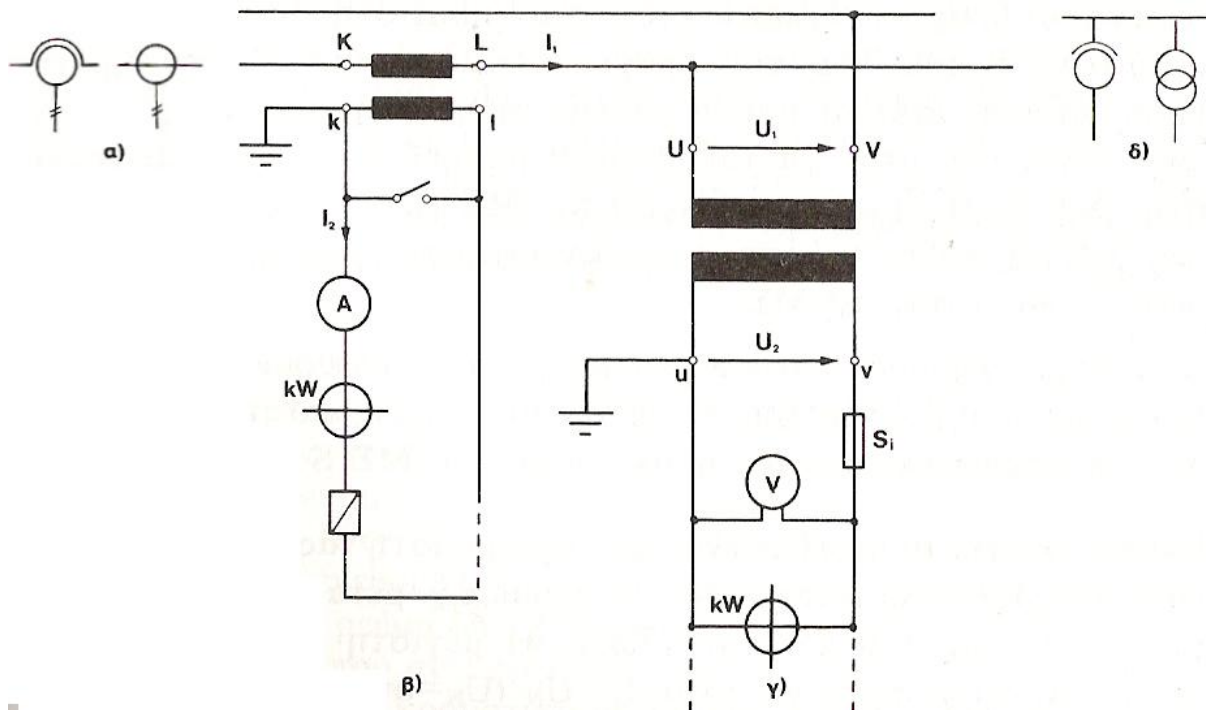
Ή

$$\frac{I_L}{I_H} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}$$

[5.55]

### 5.2.6 Μετασχηματιστές μετρήσεων

Οι μετασχηματιστές μετρήσεων ή οργάνων έχουν εφαρμογή στις μετρήσεις, στην προστασία των εγκαταστάσεων και την τιμολόγηση της καταναλισκόμενης ισχύος, πράγμα που απαιτεί ακρίβεια λειτουργίας. Η κατασκευή και η ποιότητα των μετασχηματιστών μετρήσεων ρυθμίζετε από τους κανονισμούς VDE 0414, DIN 42600 και DIN 42601. Οι μετασχηματιστές οργάνων διακρίνονται στους μετασχηματιστές τάσης και έντασης οι οποίο μεταδίδουν τις τιμές τις τάσης και τις έντασης των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης στα όργανα ελέγχους, μετρήσεων ή προστασίας, που είναι μονωμένα έναντι της γης για μικρή τάσης π.χ. 380V. Έτσι ένας μετασχηματιστής έντασης μπορεί να συνδεθεί με έναν μετρητή ισχύος ή με ένα όργανο προστασίας που για παράδειγμα ανοίγει έναν διακόπτη, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι, προκειμένου για μετασχηματιστές τάσης, υπάρχουν και άλλου είδους «μετασχηματιστές», οι χωρητικοί, που η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην χωρητική κατανομή της τάσης. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών μετρήσεων τάσης και έντασης και τις τεχνικές ιδιαιτερότητες στην εφαρμογή τους σε υποσταθμούς.



Σχήμα 5.29: Μετασχηματιστές οργάνων α) Συμβολισμός MΣ έντασης (DIN40714). β) συνδεσμολογία MΣ έντασης με Αμπερόμετρο, Κιλοβαττόμετρο και Ρεονόμο.

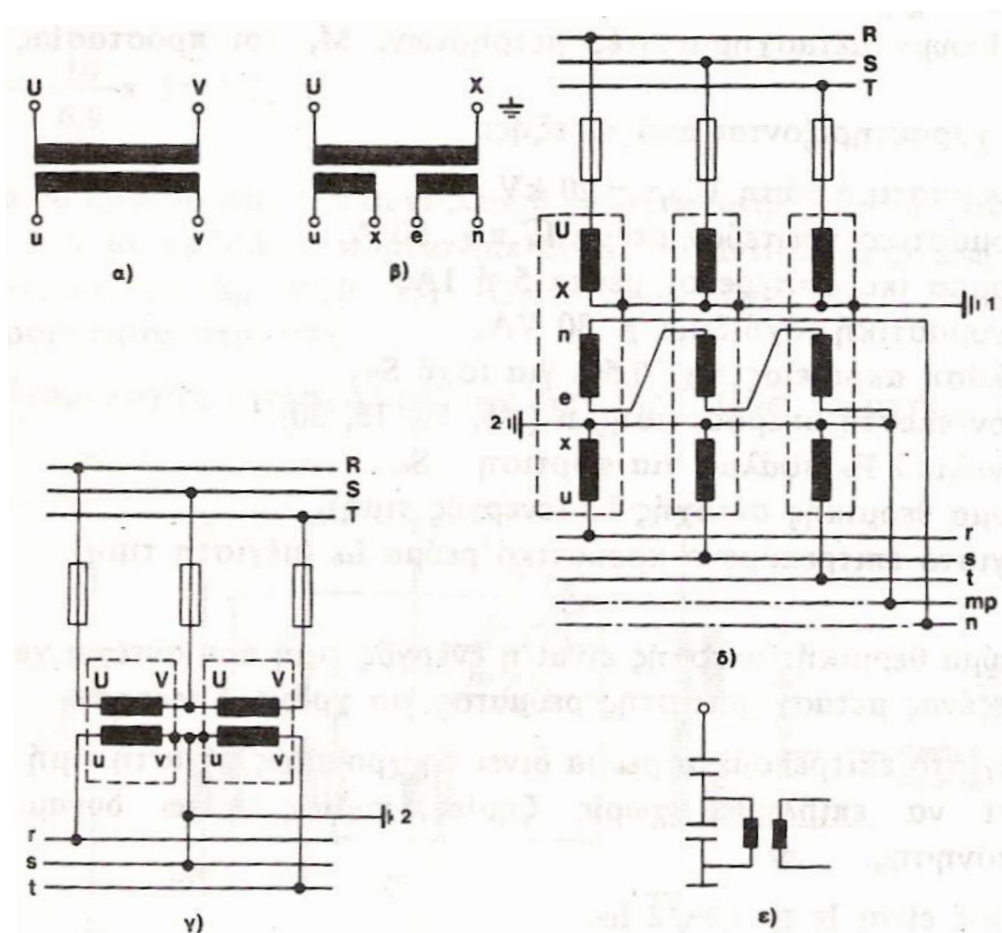
γ) Συνδεσμολογία MΣ τάσης με Βολτόμετρο, Κιλοβαττόμετρο, δ) Συμβολισμός MΣ τάσης (DIN40714).

#### 5.2.6.1 Μετασχηματιστές τάσης

Οι μετασχηματιστές τάσεις (potential transformers) είναι μετασχηματιστές μικρής ισχύος, της τάξης των 2-100VA και υψηλής τάσης. Αυτοί χρησιμοποιούνται για να υποβιβάζουν την υψηλή τάση του δικτύου π.χ. από τα 400-150 ή 25kV σε ένα μέγεθος (συνήθως στα 100 ή

200V) που να μπορεί να μετρηθεί με συνήθη όργανα, όπως ένα βολτόμετρο. Ενώ δηλαδή η τάση του μετασχηματιστή είναι ίση με την τάση του δικτύου, το ρεύμα είναι πολύ μικρό.

Οι μετασχηματιστές τάσης οι οποίοι συνδέονται μεταξύ δυο φάσεων λέγονται *διπολικοί* και αυτοί που συνδέονται μεταξύ φάσης και γης *μονοπολικοί*. Οι διπολικοί βρίσκουν εφαρμογή σε δίκτυα μέσης τάσης κάτω των 30kV, όπου χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της πολικής τάσης και της ισχύος, έχουν δε δυο πόλους (ακροδέκτες) μονωμένους. Η χρήση διπολικών μετασχηματιστών τάσης οδηγεί σε φθηνή κατασκευή. Διπολικοί μετασχηματιστές τάσης συνδέονται κατά V όπως δείχνει το 5.30. Προφανως, με συνδεσμολογία V, δεν είναι δυνατή η μέτρηση της ομοπολικής συνιστώσας της τάσης.



Σχήμα 5.30: Συνδεσμολογία μετασχηματιστών τάσης. α) διπολικός μετασχηματιστής τάσης, β) μετασχηματιστής δύο εξόδων για μέτρηση (ux) και ανίχνευση σφαλμάτων γής (en). γ) συνδεσμολογία V, δ) συνδεσμολογία κατ αστέρα για μέτρηση και κατ ανοικτό τρίγωνο για την ανίχνευση της ομοπολικής συνιστώσας.

Στο σχήμα 5.30 παρουσιάζονται συνδεσμολογίες μετασχηματιστών τάσης. Οι μονοπολικοί μετασχηματιστές τάσης, σε διάταξη αστέρα, μπορούν να μετρήσουν φασικές και πολικές τάσης και με ένα πρόσθετο τύλιγμα μπορούν, επίσης, να μετρηθούν σφάλματα γής, όπως φαίνετε στο σχήμα. Στο ανοικτό τρίγωνο η τάση mp-n είναι μηδέν, στην κανονική λειτουργία και ανάλογη της ομοπολικής συνιστώσας της τάσης, όταν ένας αγωγός βραχυκυκλωθεί. Σε τάσης άνω των 60kV, χρησιμοποιούνται και χωρητικοί καταμεριστές τάσης όπως δείχνει το

σχήμα 5.30ε. Συχνά συνδέονται και με κυματοπαγίδες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει ο μετασχηματιστής τάσης να συνδεθεί πάνω στην γραμμή και όχι μετά τον αποζεύκτη της.

Βραχυκυκλώματα στον μετασχηματιστή τάσης οδηγούν σε καταστροφή του μετασχηματιστή και βραχυκυκλώματα στο δίκτυο. Αρκετή προστασία προσφέρει μια ασφάλεια τήξεως στην μεριά της υψηλής τάσης. Αν αυτή είναι αδύνατον να τοποθετηθεί, μπορεί να συνδεθεί ασφάλεια στην πλευρά της χαμηλής τάσης. Αυτή όμως θα προστατεύει τον μετασχηματιστή σε σφάλματα στην πλευρά της χαμηλής τάσης όπως για παράδειγμα λάθος γείωσης κτλ, δεν θα υπάρχει όμως προστασία για σφάλμα μέσα στον μετασχηματιστή.

Σε έναν μετασχηματιστή τάσης μπορεί να συνδεθούν εν παραλλήλω πολλά όργανα, βολτόμετρα, κιλοβαττόμετρα κτλ, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπερβαίνουμε την οριακή ισχύ του μετασχηματιστή,  $S_N$ .

Ενδεικτικό για το μέγεθος ενός μετασχηματιστή είναι κυρίως η τάση του και όχι τόσο η ισχύς. Έχουμε για παράδειγμα μετασχηματιστές τάσεις των 20kV, των 150kV, των 750kV. Η μέγιστη διαρκής τάση στο πρωτεύον επιτρέπεται να είναι  $1,2V_N$  ( $V_N$ =ονομαστική τάση).

### 5.2.6.2 Μετασχηματιστές εντάσεως

Σκοπός του μετασχηματιστή εντάσεως (current transformer) είναι ο υποβιβασμός του ρεύματος της γραμμής σε κάποιο μετρούμενο, από τα όργανα μέτρησης, μέγεθος. Συνήθως, έχουν μόνο μια σπείρα, για ρεύματα πάνω από 500A στο πρωτεύον τύλιγμα το οποίο συνδέετε σε σειρά με την γραμμή και διαρρέετε από το ρεύμα της υψηλής τάσης και ανάλογο αριθμό σπειρών στο δευτερεύον, οπού συνδέουμε εν σειρά τα όργανα μετρήσεως ή ελέγχου. Τα τυποποιημένα ρεύματα του δευτερεύοντος είναι 1A (σπάνια) και 5A. Σε εγκαταστάσεις με μεγάλο μήκος γραμμών σύνδεσης (μεγαλύτερο των 50m), είναι καλό να εκλέγονται μετασχηματιστές με δευτερεύον ρεύμα 1A αντί για 5A, επειδή η γραμμές μεταξύ μετασχηματιστή και οργάνων απορροφούν σημαντική ισχύ.

Η ονομαστική ένταση στο πρωτεύον είναι 5, 10, 15, 30, 50, 75A και 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800A και υπάρχουν επίσης και τα δεκαπλάσια της δεύτερης ομάδος, μέχρι 80kA.

Ισχύει η παρακάτω σχέση μεταξύ ρευμάτων και σπειρών.

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{W_2}{W_1}$$

Προφανώς, η τάση του μετασχηματιστή είναι αμελητέα σε σύγκριση με την τάση του δικτύου. Εκείνο που χρειάζεται να μεταφερθεί από την γραμμή υψηλής τάσης είναι το ρεύμα και όχι η τάση.

Οι μετασχηματιστές ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιούνται για μετρήσεις, οπότε η απαίτηση είναι να έχουν αρκετή ακρίβεια στο ονομαστικό ρεύμα  $I_N$ , της τάξης του 0,1-0,5% και όχι μεγάλη ακρίβεια στις περιοχές υπερρευμάτων. Αντίθετα, όταν πρέπει να διεγερθούν ηλεκτρονόμοι υπερεντάσεως ή αποστάσεων, το σφάλμα των ηλεκτρονόμων πρέπει να είναι πολύ μικρό και σε ρεύματα αρκετά μεγαλύτερα του ονομαστικού. Το σφάλμα αυξάνετε αυξανόμενου του ρεύματος. Αν για ένα ρεύμα ίσο με  $n$  φορές το ονομαστικό ρεύμα, έχουμε σφάλμα 10%, τότε λέμε ότι ο συντελεστής υπερφόρτισης είναι  $n$  για 10% σφάλμα. Αυτός εξαρτάτε από το φορτίο. Δίνετε δε πάνω στην πινακίδα του μετασχηματιστή για το ονομαστικό φορτίο.

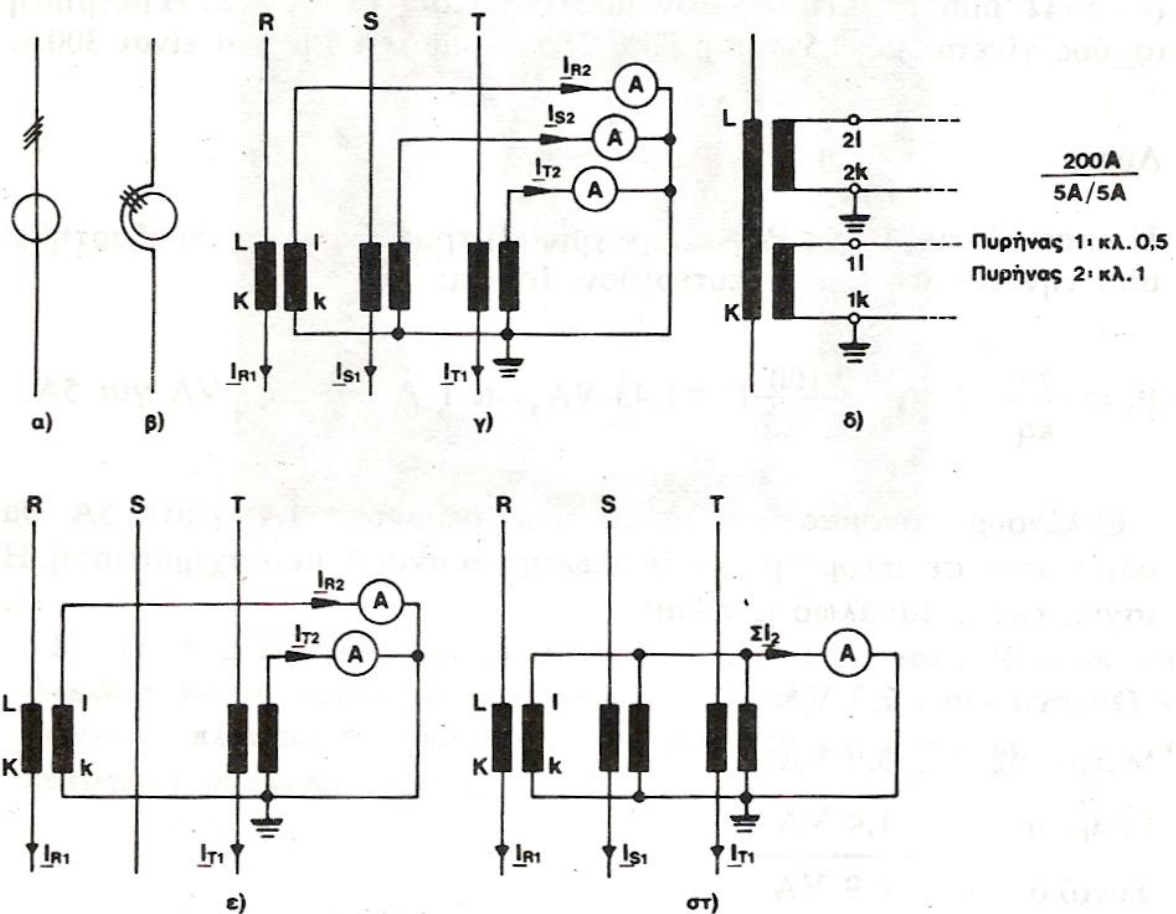
Η ονομαστική ισχύς φόρτισης (Nominal Burden, Nennburden) είναι 5 έως 60VA και αναγράφετε στην πινακίδα του μετασχηματιστή. Αυτή την ισχύ μπορούμε να την υπερβούμε, χωρίς να καταστραφεί ο μετασχηματιστής, πλην όμως δεν θα έχουμε την ακρίβεια της κλάσης που δίνετε στην πινακίδα του.

Οι κλάσεις ακριβείας είναι 0,1/0,2/0,5/1/3/% και ισχύουν σαν μέγιστα επιτρεπόμενα σφάλματα ρεύματος και φόρτιση μικρότερη της οριακής φόρτισης  $S_N$  (VA). Για μετρήσεις τιμολογήσεων χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές κλάσης 0,2 ή 0,5.

Η μέγιστη διαρκής επιτρεπόμενη φόρτιση του μετασχηματιστή έντασης μπορεί να είναι στο πρωτεύον μέχρι 1,2 φορές το ονομαστικό του ρεύμα και σπανίως 2 φορές στους μετασχηματιστές μεγάλης περιοχής οι οποίο συμβολίζονται με G (Grossbereichswandler). Εκτός όμως αυτών των ρευμάτων, ο μετασχηματιστής θα πρέπει να αντέχει στα ρεύματα βραχυκυκλωμάτων του δικτύου. Χαρακτηριστικό μέγεθος για αυτήν την αντοχή είναι το θερμικό ρεύμα  $I_{th}$  και το δυναμικό ρεύμα  $I_{din}$ . Θερμικό ρεύμα είναι η ενεργός τιμή του μέγιστου ρεύματος που αντέχει ο μετασχηματιστής για 1sec χωρίς να προκληθεί ζημιά. Δυναμικό ρεύμα είναι το μέγιστο κρουστικό ρεύμα που δεν επιφέρει ζημιά στο μετασχηματιστή, λόγω ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων.

Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι ο μετασχηματιστής ρεύματος θα πρέπει να είναι διαρκώς βραχυκυκλωμένος ή να είναι συνδεδεμένος με φορτίο. Στην αντίθετη περίπτωση όταν το δευτερεύον παραμένει ανοιχτό, το ρεύμα του δικτύου είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του, με αποτέλεσμα στα άκρα του να αναπτυχτεί επικίνδυνα υψηλή τάση και να επέλθει κορεσμός ή υπερθέρμανση σιδήρου που θα οδηγήσει στην καταστροφή του μετασχηματιστή ή σε βραχυκύκλωμα στο δίκτυο. Για τον λόγο αυτό προτού αποσυνδέσουμε το φορτίο πρέπει ο μετασχηματιστής έντασης να βραχυκυκλώνετε. Στην πραγματικότητα οι ηλεκτρονόμοι και οι άλλες συσκευές που τροφοδοτούνται μέσω μετασχηματιστή ρεύματος διαθέτουν πάντα έναν βραχυκυκλωτήρα ασφαλείας (Shorting interlock), ο οποίος κλείνει κάθε φορά που ο ηλεκτρονόμος απομακρύνετε από τον μετασχηματιστή.

Συνδεσμολογίες μετασχηματιστών εντάσεως παρουσιάζονται στο σχήμα που ακόλουθη σχήμα 5.31.



Σχήμα 5.31: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης. α) σύμβολο, β) σύμβολο ΜΣ ρεύματος, γ) τρεις μετασχηματιστές κατ αστέρα, δ) μετασχηματιστές με δυο πυρήνες ε) συνδεσμολογία δυο μετασχηματιστών σε τριφασικό σύστημα, στ) συνδεσμολογία τριών μετασχηματιστών, αθροιστική.

Για μετασχηματιστές ρεύματος ισχύουν οι κανονισμοί VDE 0414. Αυτοί χαρακτηρίζονται από τα εξής:

- Την ονομαστική τάση  $V_N$ , σε kV.
- Το ονομαστικό πρωτεύον ρεύμα  $I_N$ , σε A.
- Το ονομαστικό δευτερεύον ρεύμα, σε A.
- Την ονομαστική ισχύ  $S_N$ , σε VA.
- Την κλάση ακρίβειας ,π.χ. 0,5% για ισχύ  $S_N$ .
- Τον συντελεστή υπερφόρτισης  $n$  ( $=5, 10, 15, 30$ ).
- Το συνολικό σφάλμα  $F_g$  για φόρτιση  $S_n$ .
- Το ρεύμα θερμικής αντοχής  $I_{th}$  (ενεργός τιμή).

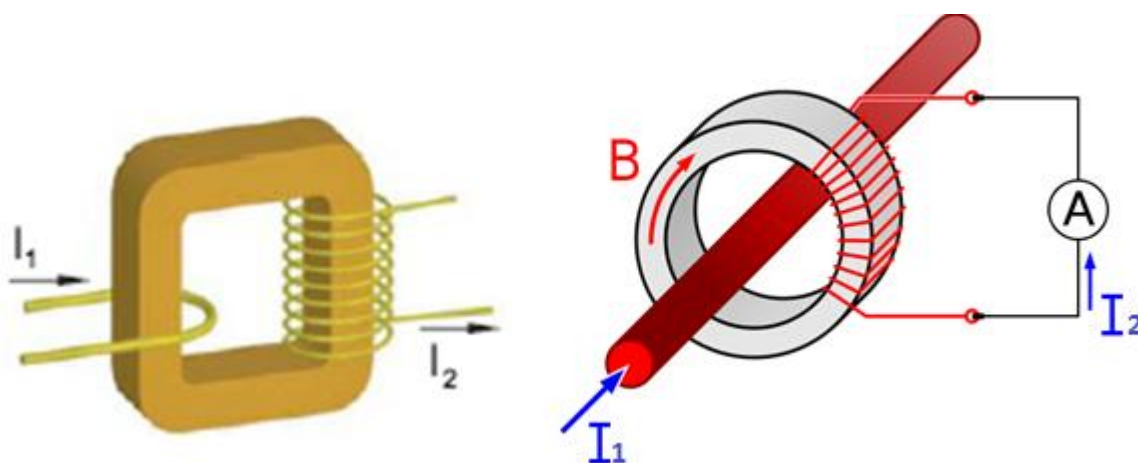
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο κρουστικό ρεύμα  $I_{sn}$  (μέγιστη τιμή).

Ανάλογος του τρόπου κατασκευής τους, διακρίνουμε δυο τύπους μετασχηματιστών εντάσεως:

- Τον μετασχηματιστή εντάσεως τύπου πυρήνα και
- Τον μετασχηματιστή εντάσεως τύπου διελεύσεως.

Ο μετασχηματιστής τύπου πυρήνα αποτελείται από δυο τυλίγματα, τα οποία έχουν τοποθετηθεί γύρω από σιδηροπυρήνα. Το πρωτεύον συνδέεται με τον αγωγό της φάσης σε σειρά ενώ το δευτερεύον συνδέεται με τα όργανα μετρήσεων.

Ο μετασχηματιστής τύπου διελεύσεως αποτελείται από ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης, τυλιγμένο σε δακτυλιοειδή πυρήνα. Σαν πρωτεύον τύλιγμα χρησιμοποιείται ο αγωγός της φάσης, που τέλει υπό μέτρηση και ο οποίος περνά μέσα από τον δακτυλιοειδή πυρήνα.

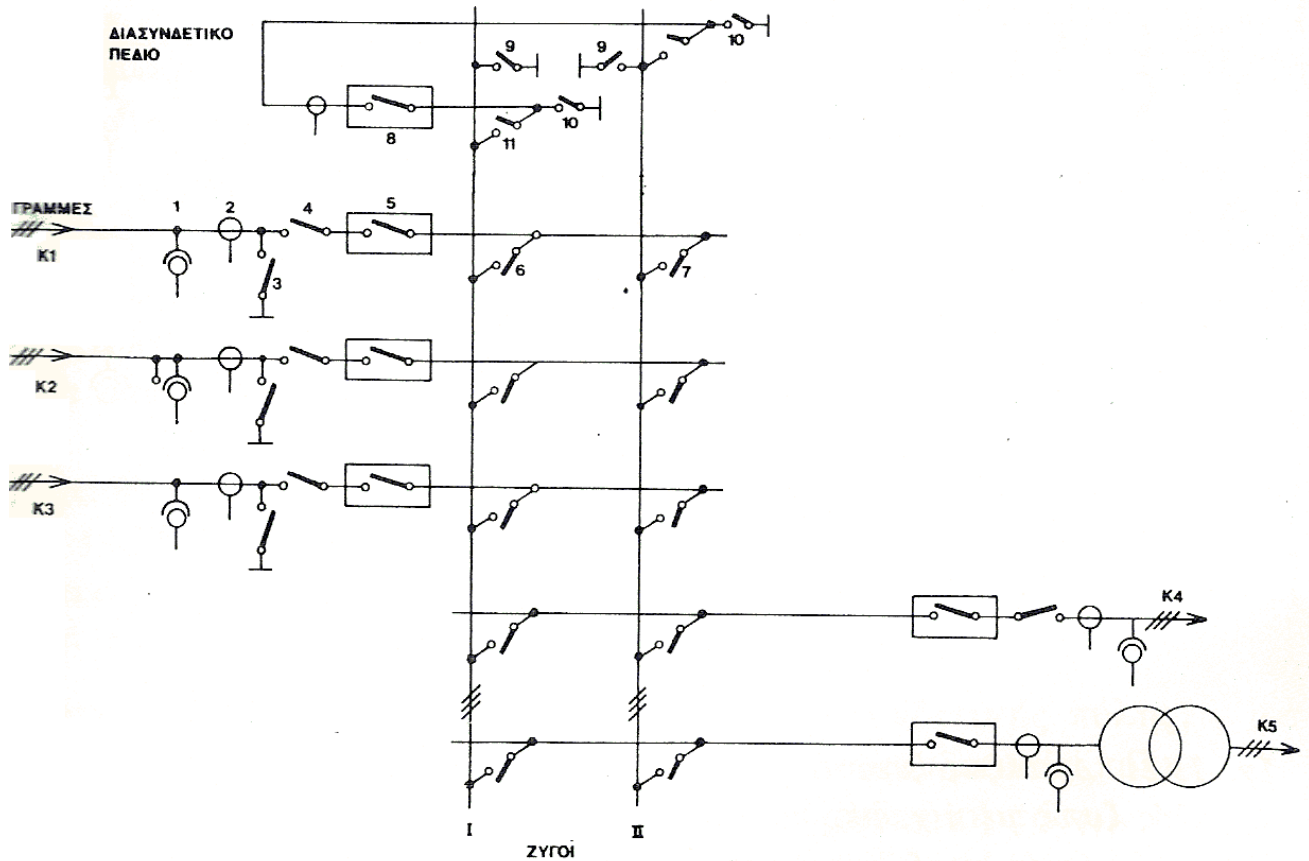


Σχήμα 5.32

### 5.3 Διατάξεις ζυγών και πυλών σε υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσεις

Σε έναν υπαίθριο υποσταθμό, διακρίνουμε εισερχόμενες και εξερχόμενες γραμμές (κυκλώματα) και ζυγούς που διασυνδέουν τα κυκλώματα. Οι γραμμές ευρίσκονται σε ένα οριζόντιο επίπεδο και οι ζυγοί σε ένα άλλο, συνήθως χαμηλότερο, επίσης οριζόντιο επίπεδο. Οι γραμμές εισερχόμενες ή εξερχόμενες είναι, κατά κανόνα, παράλληλα διατεταγμένες στον χώρο. Κάθετα στις γραμμές είναι διατεταγμένοι οι ζυγοί. Μπορούμε να έχουμε απλούς ή πολλαπλούς δηλαδή διπλούς ή τριπλούς ζυγούς. Κάθε γραμμή συνδέεται με τους ζυγούς μέσω τριφασικών αποζευκτών. Έχουμε για κάθε γραμμή τόσους αποζεύκτες, όσοι είναι και οι ζυγοί. Οδεύοντας από τον ζυγό προς την εισερχόμενη γραμμή διακρίνουμε κατά κανόνα 5.33:





Σχήμα 5.33: Τυπική διάταξη αναχωρήσεων και ζυγών σε υπαίθριους υποσταθμούς υψηλής τάσης.

1 μετασχηματιστής τάσης, 2 μετασχηματιστής ρεύματος, 3 γειωτής γραμμής, 4 αποζεύκτης γραμμής, 5 διακόπτης ισχύος, 6,7 αποζεύκτης επιλογής ζυγών, 8 διασυνδεδεμένος διακόπτης ισχύος (coupler, Kurpler), 9 γειωτές ζυγών, 10 γειωτές διασυνδεδεμένου πεδίου, 11 αποζεύκτες διασυνδεδεμένου πεδίου.

1. Τον αποζεύκτη επιλογής ζυγών,
2. Τον διακόπτη ισχύος,
3. Τους μετασχηματιστές ρεύματος μετρήσεων και προστασίας,
4. Τον μετασχηματιστή τάσης και
5. Ενδεχομένως μια κυματοπαγίδα τηλεπικοινωνιών, όχι κατ' ανάγκη σε κάθε φάση.

Σε πολλούς υποσταθμούς οι μετασχηματιστές ρεύματος, όπως και οι μετασχηματιστές τάσης, ευρίσκονται μόνιμα διασυνδεδεμένοι με την γραμμή και όχι στην πλευρά του διακόπτη ισχύος.

Τόσο στους ζυγούς, όσο και στους αποζεύκτες αναχώρηση, υπάρχουν γειωτές.

Σε μικρούς υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσης, με μειωμένες απαιτήσεις για εφεδρεία, μειωμένο κίνδυνο σφαλμάτων και μικρό αριθμό εισόδων-εξόδων, χρησιμοποιούνται απλοί (μονοί) ζυγοί.

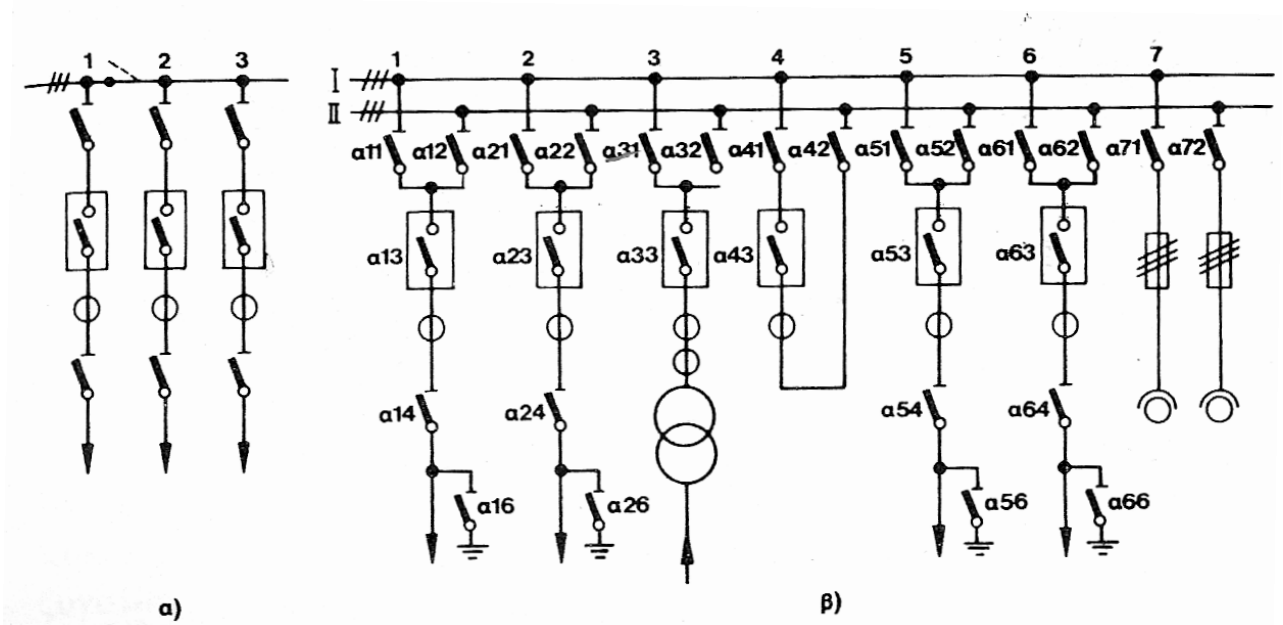
Σε μεγάλους υποσταθμούς συναντά κανείς διπλούς ζυγούς ή και για λόγους εφεδρείας και ευκολίας διευθέτησης των φορτίων, μπορεί να υπάρχουν και τριπλοί ζυγοί, δυο κύριοι και ένας βοηθητικός ζυγός όπως εικονίζετε στα σχήματα 5.34 και 5.35.

Σε μεγάλους υποσταθμούς πρέπει, σε περίπτωση συντήρησης ή βλάβης, να εξασφαλίζεται μια αδιάλειπτη λειτουργία και έτσι οι αλλαγές ζυγών πρέπει να γίνονται υπό φορτίο. Οι αλλαγές ζυγών γίνονται με τους διασυνδετικούς διακόπτες ζυγών (Coupler, Kuppel-Schalter). Είναι ανά φάση ένας διακόπτης ισχύος με δυο αποζευκτες εκατέρωθεν. Αποτελούν μαζί την διασυνδετική πύλη ή το διασυνδετικό πεδίο. Πέραν τούτου, σε περιπτώσεις αυξημένου φορτίου και για λόγους ασφαλείας, σε συστήματα δίπλων ζυγών, μοιράζονται τα φορτία και στους δυο ζυγούς, με κλειστή την διασυνδετική πύλη. Αν προκύψει σφάλμα στους ζυγούς, τότε ανοίγει η διασυνδετική πύλη και αποχωρίζετε μόνο μέρος των αναχωρήσεων.

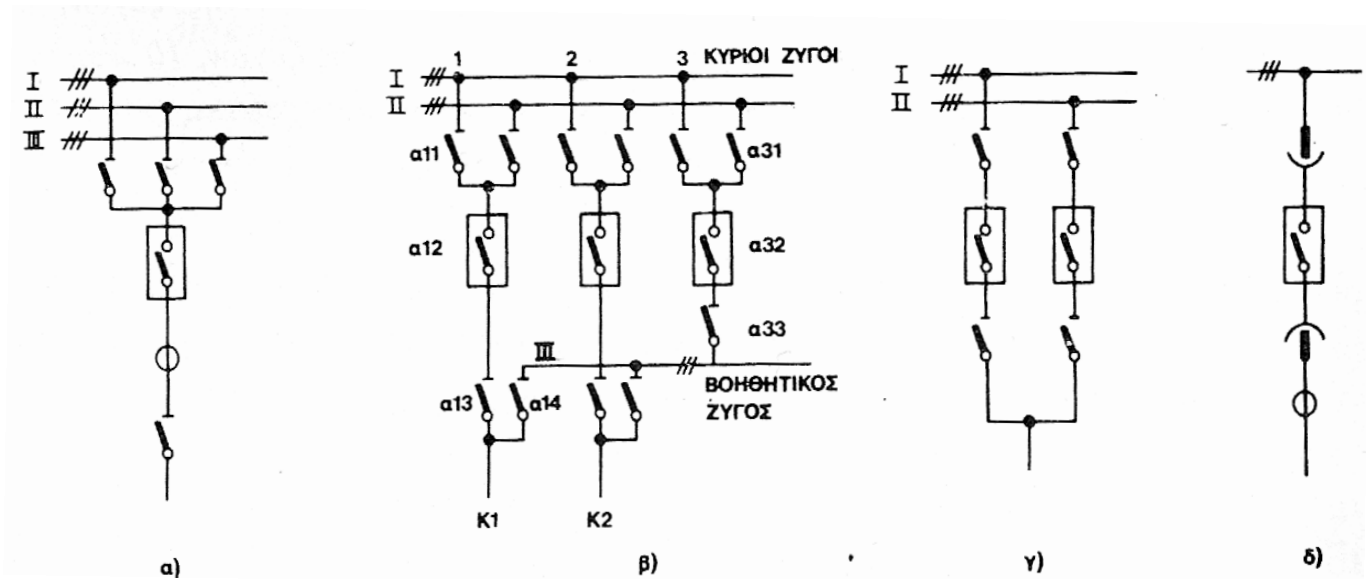
Στους χειρισμούς που γίνονται κατά την αλλαγή ζυγών, ζεύξης ή απόζευξης γραμμών, πρέπει να δοθεί προσοχή στην σειρά με την οποία γίνονται οι χειρισμοί στους αποζεύκτες, γειωτές και διακόπτες ισχύος. Όπως έχει αναφερθεί οι αποζεύκτες χειρίζονται μόνο υπό μηδενική τάση και δεν μπορούν να αποζεύξουν κυκλώματα υπό τάση.

Έστω ότι οι αναχωρήσεις και αφήξεις στο σχήμα 5.34, είναι όλες στον ζυγό I και πρέπει όλες να μεταβούν, χωρίς διακοπή της τροφοδοσίας, στον ζυγό II, ο οποίος και θα απομονωθεί από τον ζυγό I. Οι χειρισμοί είναι οι εξής.

1. Κλείνουν οι αποζεύκτες α41, α42 της διασυνδετικής πύλης.
2. Κλείνουν οι διακόπτες ισχύος α43 της διασυνδετικής πύλης.
3. Κλείνει ο αποζεύκτης α12 (κλείνει υπό μηδενική τάση).
4. Ανοίγει ο αποζεύκτης α11 (ανοίγει υπό μηδενική τάση).
5. Οι χειρισμοί 3,4 επαναλαμβάνονται και με τις άλλες πύλες .
6. Ανοίγει ο α43.
7. Ανοίγουν οι α41 και α42.



Σχήμα 5.34: Διατάξεις ζυγών. α) Απλός ζυγός με ή χωρίς διαμήκη διακόπτη, β) Διπλός ζυγός με 5 αναχωρήσεις (1, 2, 3, 5, 6), πεδίο μετρήσεων (7) και διασυνδετικό πεδίο (4).



Σχήμα 5.35: Διατάξεις ζυγών (συνέχεια). α) τριπλός ζυγός. β) τριπλός ζυγός με βοηθητικό ζυγό. γ) Διπλός ζυγός με δύο διάκοπτε ισχύος ανά αναχώρηση. δ) Μονός ζυγός σε προκατασκευασμένα πεδία, με τροχοφόρους διακόπτες.

Αν στην διάταξη του σχήματος 5.34β θέλουμε να συνδεθεί με τους ζυγούς I μια αναχώρηση, για παράδειγμα η αντιστοιχούσα στον διακόπτη α13 και ακολούθως να αποσυνδεθεί, οι σειρά των χειρισμών που θα πρέπει να ακολουθήσουμε είναι η εξής:

- Για την σύνδεση:

1. Ανοίγουμε τους γειωτές α16.
  2. Κλείνουμε τους αποζεύκτες α11, α14.
  3. Κλείνουμε τον διακόπτη ισχύος α13.
- Για την αποσύνδεση:
    1. Ανοίγουμε τον διακόπτη ισχύος α13.
    2. Ανοίγουμε τους αποζεύκτες α11, α12.
    3. Κλείνουμε τους γειωτές α16.

Στα σχήματα 5.34 και 5.35 εικονίζονται συνήθεις συνδεσμολογίες ζυγών. Διακρίνουμε της παρακάτω συνδεσμολογίες.

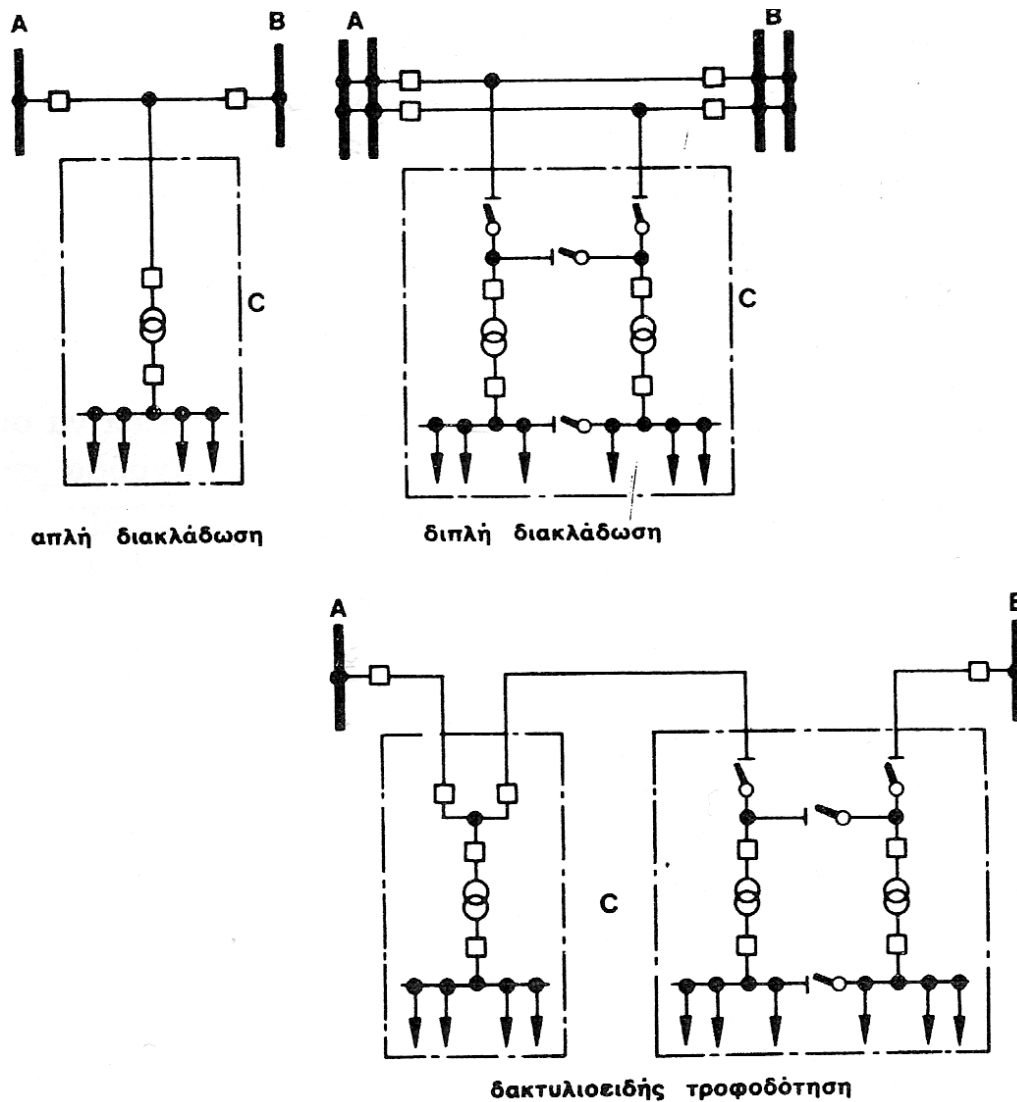
*Συνδεσμολογία απλών ζυγών 5.34α.* Αυτή είναι κατάλληλη για μικρές εγκαταστάσεις. Μπορεί να γίνει διαχωρισμός των ζυγών σε δυο ήμισυ, *διαμήκη χωρισμός ζυγών*. Αυτό διευκολύνει τις εργασίες συντήρησης.

*Συνδεσμολογία διπλών ή πολλαπλών ζυγών, 5.34β και 5.35α.* Αυτή είναι κατάλληλη για μεγάλες εγκαταστάσεις υποσταθμών. Το πλεονέκτημα του είναι ότι μπορεί να γίνει συντήρηση του ενός ζυγού χωρίς να διακοπεί η λειτουργία. Ένας διαμήκης χωρισμός των ζυγών, διευκολύνει ακόμα περισσότερο τις εργασίες. Στην διάταξη διπλών ζυγών υπάρχει και ο συνδετικός διακόπτης.

*Συνδεσμολογία διπλών (πολλαπλών) ζυγών με βοηθητικούς ζυγούς 5.35β.* Ο βοηθητικός ζυγός χρησιμοποιείται για να γίνουν επισκευές στις πύλες, χωρίς να σταματήσει η λειτουργία. Για παράδειγμα με ανοικτούς τους διακόπτες α11, α12, α13 και κλειστούς τους α14, α33, α32 και α31 μπορούν να πραγματοποιηθούν εργασίες στον διακόπτη α12.

*Συνδεσμολογία διπλών διακοπών ισχύος 5.35γ.* Εδώ σε κάθε αναχώρηση, έχουμε δυο συρμούς διακοπών. Αυτό διευκολύνει την χωρίς διακοπή αλλαγή ζυγών και ακόμα την συντήρηση κάθε διακόπτη, χωρίς την διακοπή της λειτουργίας.

*Συνδεσμολογία απλού ζυγού σε εγκαταστάσεις μεταλλικού περιβλήματος, 5.35δ.* Οι εγκαταστάσεις μεταλλικού περιβλήματος έχουν τις ίδιες συνδεσμολογίες, με τις εγκαταστάσεις ελεύθερου χώρου με την διάφορα ότι τον ρόλο των αποζευκτών παίζουν, σε περίπτωση τροχοφόρων διακοπών, οι λυόμενες επιφάνειες.

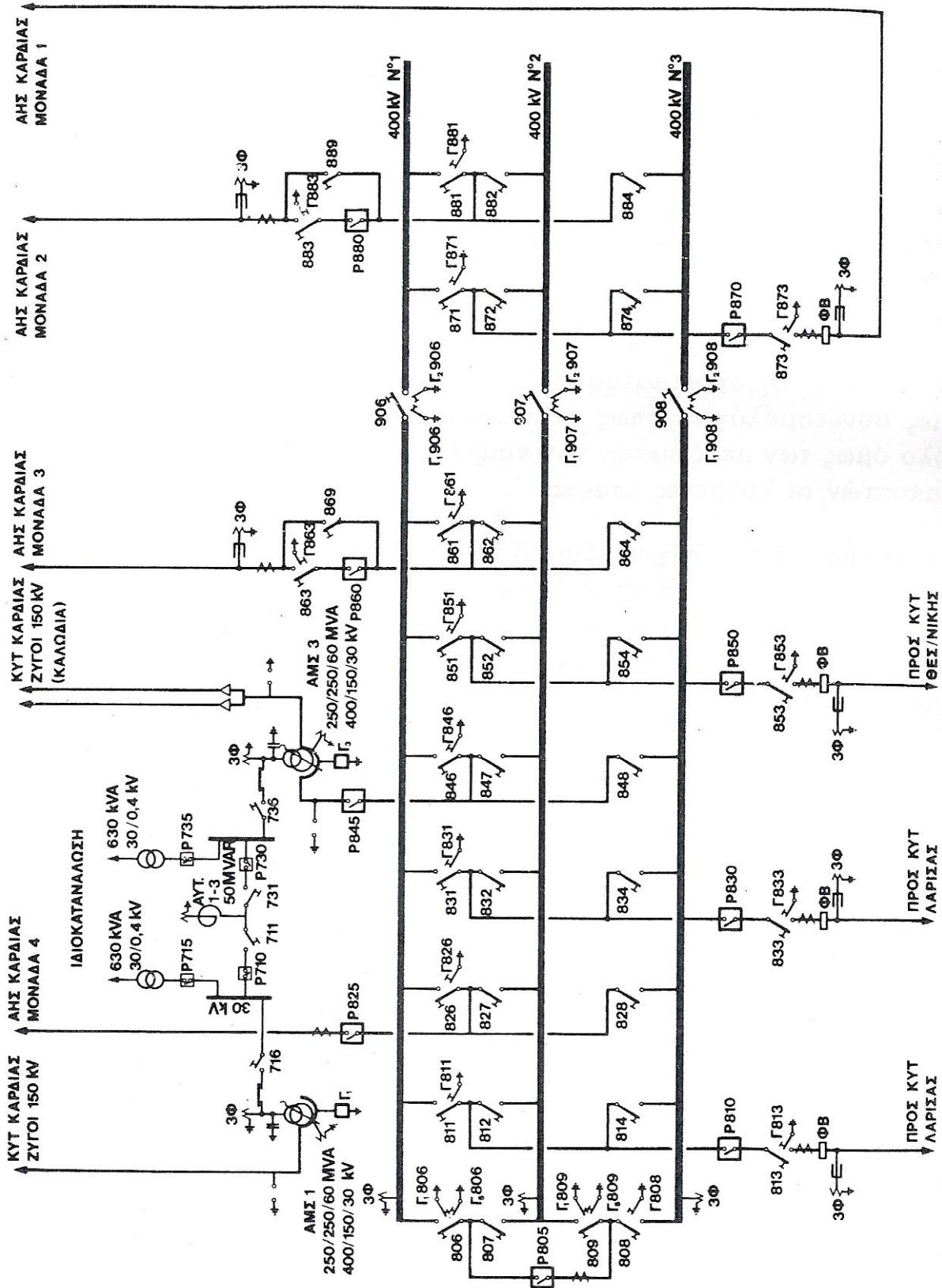


Σχήμα 5.36: Διατάξεις κέντρων τροφοδοσίας.

$A, B$  = κέντρο υψηλής τάσης,  $C$  = σταθμοί τροφοδοσίας,  $\square$  διακόπτης ισχύος.

Στο σχήμα 5.36 απεικονίζονται διασυνδεδεμένες διατάξεις υποσταθμών, σε μεγάλα κέντρα παραγωγής ή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έστω δυο μεγάλοι υποσταθμοί  $A, B$ . Η σύνδεση ενός ή περισσότερων υποσταθμών  $C$  μπορεί να γίνει με διακλάδωση από τους  $A, B$  οπότε, έχουμε σύνδεση διακλάδωσης ή οι υποσταθμοί  $C$  μπορεί να συνδέονται εν σειρά, οπότε έχουμε δακτυλιοειδή σύνδεση.

Στο σχήμα 5.37 απεικονίζετε η διάταξη των ζυγών του κέντρου υψηλής τάσης (ΚΥΤ) Καρδιάς των 400kV.

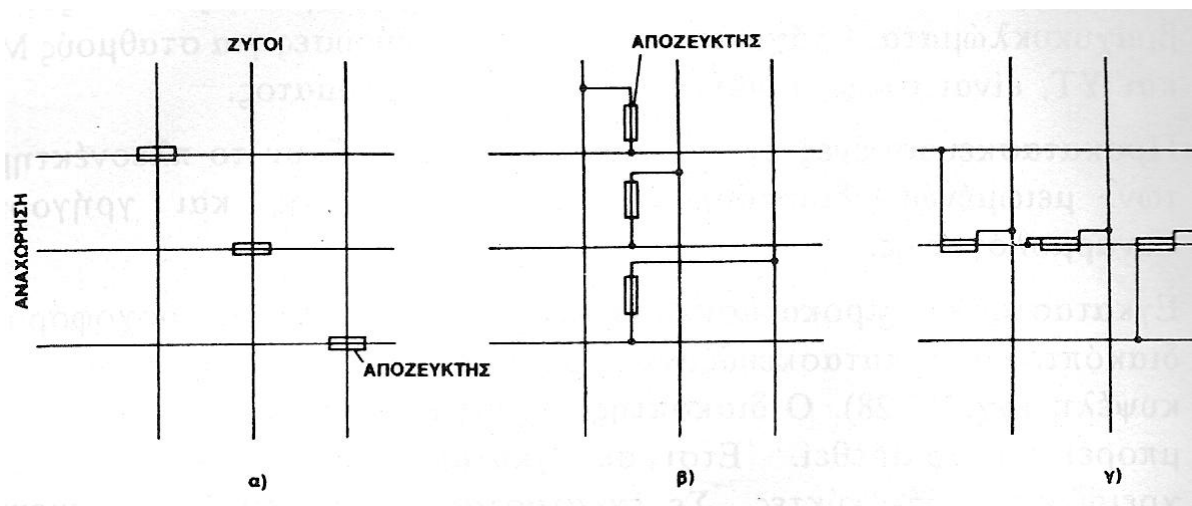


Σχήμα 5.37: Διάγραμμα ζυγών 400kV στο κέντρο υψηλής τάσης (ΚΥΤ) Καρδιάς. Εδώ σημαίνουν: Φ = φάση. ΦΒ = μόνο στην φάση Β, Ρ = διακόπτης ισχύος, Γ = ρειωτής.

## 5.4 Διατάξεις σταθμών υψηλής τάσης

### 5.4.1 Υπαίθριοι υποσταθμοί Υψηλής Τάσης

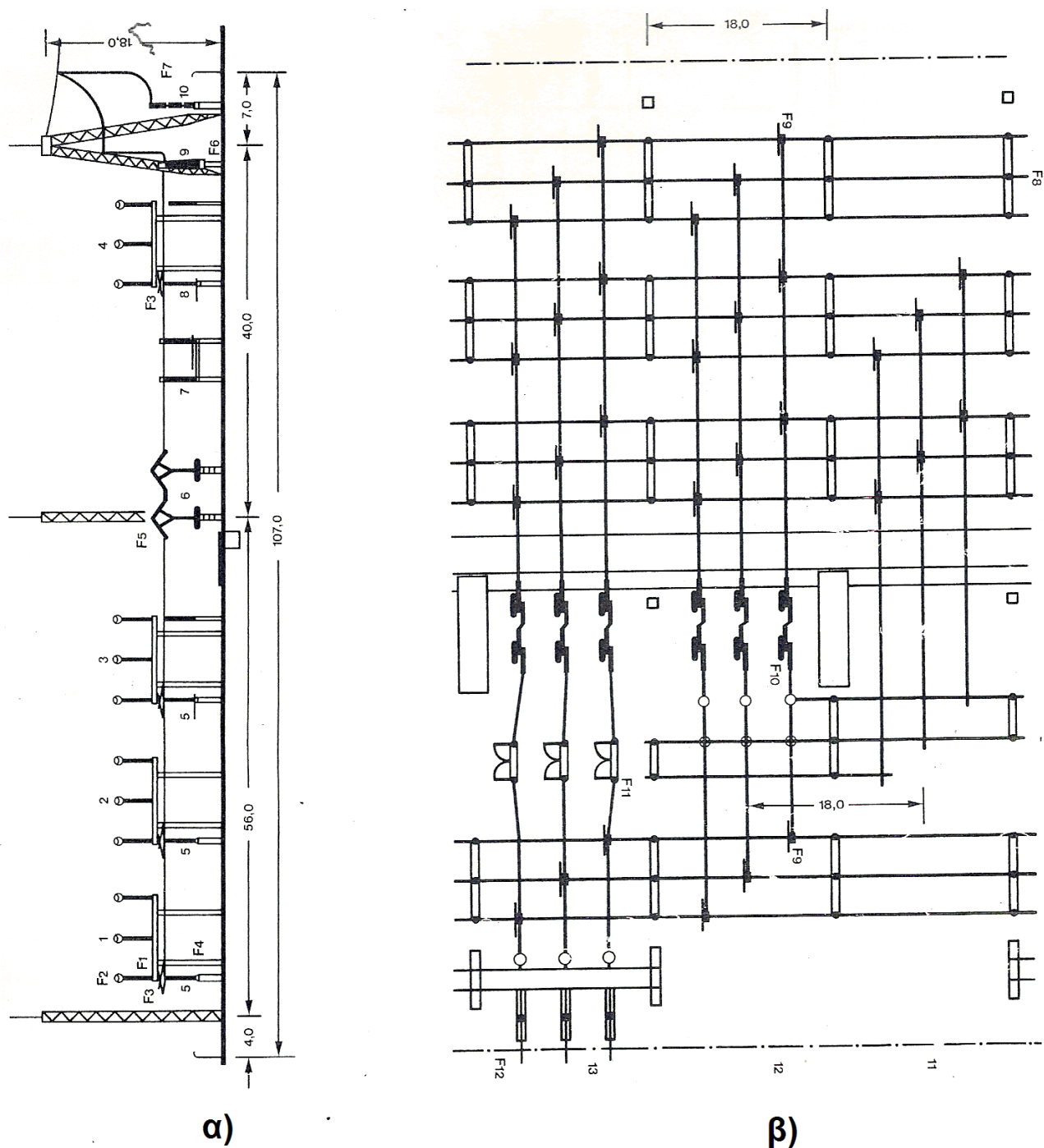
Εφόσον υπάρχει διαθέσιμος χώρος, ένας απλός και φθηνός τρόπος κατασκευής υποσταθμών υψηλής τάσης, είναι οι υπαίθρια κατασκευή (σχήμα 5.1). Διπλοί ζυγοί τουλάχιστον είναι ο κανόνας για να υπάρχει δυνατότητα συνεχούς τροφοδότησης σε συνθήκες σφάλματος στους ζυγούς. Στους διπλούς ζυγούς κάθε πύλη αναχώρησης ή άφιξης έχει δυο τριάδες αποζευκτών, μέσω των οποίων διαλέγουμε τους ζυγούς στους οποίους θα συνδεθεί η πύλη (αποζευκτες ζυγών). Κάθε πύλη έχει τρεις διασυνδετικούς αγωγούς, που οδεύουν κάθετα προς τους ζυγούς. Μπορεί οι ζυγοί να είναι πάνω ή κάτω από τους από τους αγωγούς της πύλης. Ανάλογα με την διάταξη των αποζευκτών επιλογής ζυγών έχουμε διάταξη *παράλληλη* (ευθεία), *εγκάρσια* ή *διαγώνια* ως προς τους ζυγούς, όπως δείχνει το σχήμα 5.38. Διαγώνια διάταξη χρησιμοποιήστε σε συνδυασμό με μονόστηλους αποζευκτες και παράλληλη ή εγκάρσια διάταξη σε δίστηλους αποζευκτες.



Σχήμα 5.38: Διατάξεις αποζευκτών επιλογής ζυγών. α) διαγώνια β) παράλληλη, γ) εγκάρσια.

Η διαγώνια διάταξη αποζευκτών, με κάτωθεν ζυγούς και μονόστηλους αποζευκτες, έχει το πλεονέκτημα του ότι, οι ζυγοί μπορεί να τεθούν εκτός και οι, στον ζυγό ανήκοντες, αποζευκτες να επισκευαστούν.

Το σχήμα 5.37 δείχνει την διάταξη του σταθμού (κέντρου) υψηλής τάσης της Καρδιάς (ΚΥΤ-Καρδιάς). Οι εναέριες γραμμές μπορεί να φέρουν, σε μια ή περισσότερες φάσεις τους και υψηλής συχνότητας σήματα τηλεπικοινωνίας, που πρέπει να διοχετευθούν κατάλληλα στον πομποδέκτη και όχι στους ζυγούς. Γι' αυτό υπάρχουν οι κυματοπαγίδες στην είσοδο των γραμμών, δηλαδή κατωπερατά φίλτρα, που εμποδίζουν το σήμα να διοχετευθεί στον ζυγό. Στην είσοδο των γραμμών είναι και οι μετασχηματιστές τάσης. Ακολουθούν οι μετασχηματιστές έντασης και οι αποζευκτες αναχώρησης με τους γειωτές.



Σχήμα 5.39: α) Υπαίθριος σταθμός 400kV, διαγώνιας διάταξης αποζευκτών. Δείχνεται μόνο μια αναχώρηση και το διασυνδεδετικό πεδίο. Υπάρχουν 3 κύριοι και 1 βοηθητικός ζυγός.

1,2,3 κύριοι ζυγοί, 4 βοηθητικοί ζυγοί, 5 αποζεύκτες επιλογής, 6 διακόπτες ισχύος, 7 αποζεύκτες, 8 αποζεύκτες επιλογής βοηθητικών ζυγών, 9 μετασχηματιστής ρεύματος, 10 μετασχηματιστής τάσης, 11 διασυνδεδετικοί ζυγοί, 12 διασυνδεδετικό πεδίο, 13 πύλη αναχώρησης.

β) Υπαίθριος σταθμός 400kV κάτωψη του σχήματος 39.α)

Οι μετασχηματιστές έντασης είναι συνήθως δυο, για μέτρηση και προστασία και μπορεί να έχουν έναν μεν πυρήνα, με δυο όμως τυλίγματα ανά φάση, με διαφορετικές κλάσεις ακριβείας



και συντελεστή υπερφόρτισης για μέτρηση και προστασία. Σαν επόμενο στοιχείο είναι ο διακόπτης ισχύος και τελικά οι αποζεύκτες επιλογής ζυγών.

Σε άλλους υποσταθμούς, ο μετασχηματιστής ρεύματος δεν είναι συνδεδεμένος στην μεριά της γραμμής αλλά στην μεριά του διακόπτη ισχύος. Στο σχήμα 5.39 απεικονίζετε διάταξη σταθμού 400kV με τις διαστάσεις του.

#### **5.4.2 Σταθμοί υψηλής τάσης με μεταλλικό περίβλημα**

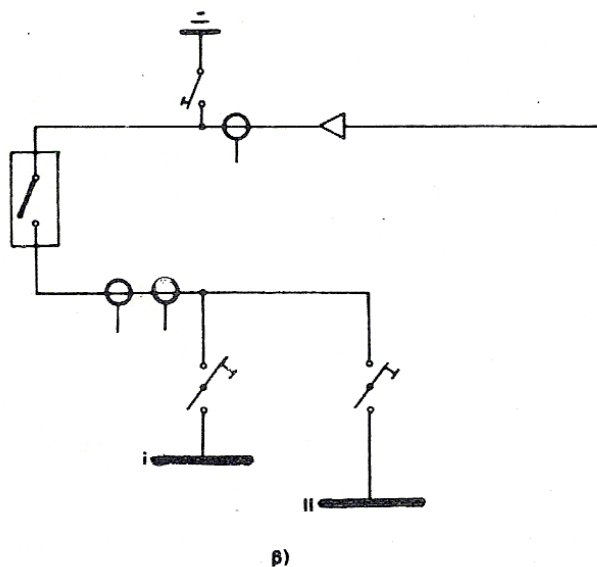
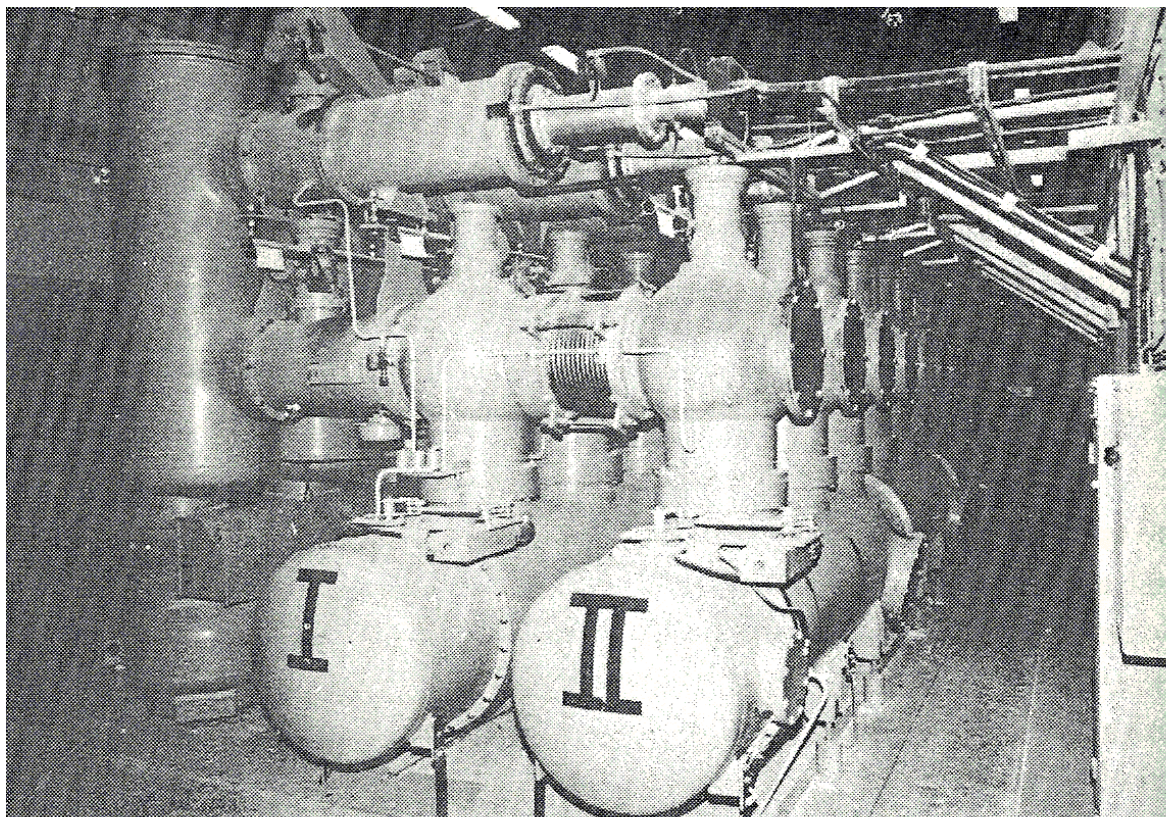
Οι υποσταθμοί υψηλής τάσης καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση γης, πράγμα δυσμενές για μεγάλες πόλεις, Συχνά σε πόλεις με μεγάλη κατανάλωση ισχύος, υποσταθμοί των 150kV ή και μεγαλύτερης τάσης, γίνετε αναγκαίο να εγκαθίστανται στις κεντρικές περιοχές τους. Για να ελαττωθεί ο χώρος που θα καταλαμβάνουν οι σταθμοί αυτοί, χρησιμοποιήθηκαν παλιότερα πολλές τεχνικές, όπως ειδικές συσκευές και εγκαταστάσεις στεγασμένων χώρων, μειώνοντας έτσι τις αποστάσεις μόνωσης. Ακολούθως δημιουργήθηκαν εγκαταστάσεις *πλήρως μονωμένες*, με αέριο άζωτο υπό πίεση και τέλος εγκαταστάσεις με πλήρη μόνωση από εξαφθοριούχο θείο SF<sub>6</sub> υπό πίεση 0-5bar, για τάσεις έως 750kV.

Εγκαταστάσεις SF<sub>6</sub> (σχήμα 5.40) καταλαμβάνουν χώρο 10-15% των εναέριων εγκαταστάσεων. Ζυγοί, αποζεύκτες, διακόπτες ισχύος, μετασχηματιστές οργάνων και ακροκεφαλές καλωδίων εμπεριέχονται σε μεταλλικά περιβλήματα (metal-clad, Metallkapselung) που περιέχουν SF<sub>6</sub>. Τέτοιες εγκαταστάσεις υπάρχουν για τάσεις έως και 750kV, ρεύματα 1000A, ικανές να χειριστούν ρεύματα βραχυκύκλωσης της τάξης μεγέθους των 100kA.

Άλλα προτερήματα των πλήρως μονωμένων σταθμών, σε αντιδιαστολή με τους εναέριους σταθμούς είναι, πέραν της οικονομίας χώρου και τα εξής:

- Η ασφάλεια των εγκαταστάσεων λόγω του μεταλλικού περιβλήματος,
- η μειωμένη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση,
- ο μειωμένος θόρυβος,
- η μειωμένη περιβαλλοντική ενόχληση
- η ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
- και ο βραχύς χρόνος κατασκευής.

Σαν μειονεκτήματα των εγκαταστάσεων αυτών πρέπει να αναφερθούν, το υψηλό κόστος της εγκατάστασης καθώς και η δύσκολη και δαπανηρή επισκευή βλαβών. Το κόστος της εγκατάστασης μπορεί όμως να αντισταθμιστεί στην περίπτωση των μεγάλων πόλεων από την σημαντική μείωση του κόστους γης. Εγκαταστάσεις SF<sub>6</sub> υπάρχουν σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη στα 150kV.



Σχήμα 5.40: Σταθμός κλειστού τύπου, πλήρως μονωμένος με  $SF_6$  στην Ν. Ελβετία Θεσσαλονίκης. Η τάση των ζυγών είναι 150kV.

α) φωτογραφία, β) μονογραμμικό σχέδιο μιας αναχώρησης.

## Βιβλιογραφία

Πέτρου Ντοκόπουλου: "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας", τόμος 1 και τόμος 2. Θεσσαλονίκη, 1986 .

Δ.Ν. Διαμαντόπουλου : "Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας" . Αθήνα, 1981

Stephen J. Chapman : "Ηλεκτρικές μηχανές AC-DC" . 2000.

Βασιλείου Κ. Παπαδιά: "Γραμμές Μεταφοράς ηλεκτρικής ενεργείας - Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας" . Αθήνα, 1985.

Βασιλείου Κ. Παπαδιά: "Ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, μέρος 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> ".Αθήνα, 1982.

Μανώλης Κάλφας : "Παράγωγη , μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενεργείας".

Βασίλη Ξανθού: "Παράγωγη -μεταφορά-διανομή, μέτρηση και εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας". Θεσσαλονίκη, 2003.

Δ.Ν. Διαμαντόπουλου : "Σημειώσεις υψηλών τάσεων" .Αιγάλεω, 2006.

Κ.Σ. Ψωμόπουλου : "Ηλεκτρομονωτικά υλικά υψηλών τάσεων". Πειραιάς , 2007.

Ευδόκιμου Μ. Μούσλογλου : "Δοκιμαί και μετρήσεις επί ηλεκτρικών μονώσεων". Αθήνα, 1976.

Γεωργίου Κ. Γουναρίδη : "Εργαστηριακή επαλήθευση της θεωρίας στα Π.Μ.Δ. 2. "

*Γερμανικοί κανονισμοί VDE που αναφέρονται σε εγκαταστάσεις ισχύος*

### **Μονώσεις, μονωτήρες**

- VDE 0303 Bestimmungen für elektrische Prüfung von Isolierstoffen. Κανονισμοί δοκιμής μονωτικών.
- VDE 0370 Bestimmungen für Transformatoren, Wandler- und Schalterole. Κανονισμοί για μονωτικά λάδια μετασχηματιστών ισχύος, οργάνων και διακοπών.
- VDE 0432 Hochspannungsprüftechnik. Τεχνικές δοκιμών υψηλής τάσης.
- VDE 0303 Bestimmungen für Isolatoren aus keramischen Werkstoffen für Starkstrom-Freileitungen und Fahrleitungen. Κανονισμοί για μονωτήρες από κεραμικά υλικά για εναέριες γραμμές μεταφοράς και ηλεκτροκινητήρες.

### **Αγωγοί**

- VDE 0201 Vorschriften für Kupfer für die Elektrotechnik. Προδιαγραφές για χαλκό ηλεκτροτεχνίας .
- VDE 0202 Vorschriften für Aluminium für die Elektrotechnik. Προδιαγραφές για αλουμίνιο ηλεκτροτεχνίας.
- VDE 0210 Bestimmungen für den Bau von Starkstrom-Freileitungen über 1kV. Κανονισμοί για την κατασκευή εναέριων γραμμών ισχύος πάνω από 1kV.
- VDE 0212 Leitsätze für Isolatorketten und Leiter-Zubehorteile für Starkstrom-Freileitungen. Οδηγίες για αλυσίδες μονωτήρων και εξαρτημάτων αγωγών εναέριων γραμμών ισχυρών ρευμάτων.

### **Ηλεκτρικές μηχανές**

- VDE 0530 Bestimmungen für elektrische Maschinen. Κανονισμοί για ηλεκτρικές μηχανές.
- VDE 0532 Bestimmungen für Transformatoren und Drosselspulen. Κανονισμοί για μετασχηματιστές και πηνία .

### **Διακόπτες , ασφάλειες**

- VDE 0635 Vorschriften für Leitungsschutzsicherungen. Προδιαγραφές για ασφάλειες προστασίας γραμμών.
- VDE 0641 Vorschriften für Leitungsschutzschalter. Προδιαγραφές για αυτόματους προστασίας γραμμών.
- VDE 0660 Regeln für Schaltgeräte. Κανονισμοί για συσκευές διακοπής ρεύματος.
- VDE 0664 Bestimmungen für Fehlerstrom-Schutzschalter .Κανονισμοί για αυτόματους διαφυγής ρεύματος.
- VDE 0670 Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte. Κανονισμοί για συσκευές εναλλασσομένου ρεύματος υψηλής τάσης.

- VDE 06705 Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen Überspannungen.  
Κανονισμοί για την προστασία ηλεκτρικών εγκαταστάσεως κατά υπερτάσεων.



## Παράρτημα Πινάκων

Αριθμός σωματιδίων	7	19	37	61	91
Επιτρεπόμενη μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	70	70	70	70	70
Μέτρο ελαστικότητας (10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	0,6	0,57	0,57	0,55	0,55
Συντελεστής θερμικής διαστολής α (10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> )	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Ειδική μάζα (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7

Πίνακας 1: Αγωγοί εναέριων γραμμών από Αλουμίνιο Ηλεκτροτεχνίας E-Al κατά DIN 48201, Blatt 5.

Ονομαστική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Πραγματική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Σωματίδια x διάμετρο (mm)	Διάμετρος d (mm)	Φορτίο θραύσης (N)	Μάζα (kg/m)	Πρόσθετο φορτίο πάγου (kg/m)*	Πρόσθετο φορτίο + πάγος (kg/m)	Ωμική αντίσταση στους 20°C (Ω/km)
25	24,25	7x2,1	6,3	4250	0,066	0,563	0,629	1,163
35	34,36	7x2,5	7,5	5850	0,094	0,575	0,669	0,822
50	49,48	7x3	9,0	8100	0,133	0,590	0,725	0,571
	48,36	19x1,8	9,0	8600	0,135	0,590	0,723	0,584
70	65,82	19x2,1	10,5	11500	0,181	0,605	0,786	0,428
95	93,27	19x2,5	12,5	15950	0,256	0,685	0,941	0,303
120	117,2	19x2,8	14,0	19100	0,322	0,640	0,962	0,242
150	147,1	37x2,25	15,7	25700	0,405	0,657	1,062	0,192
185	181,6	37x2,5	17,5	31050	0,501	0,675	1,176	0,156
240	242,5	61x2,25	20,2	40150	0,669	0,702	1,371	0,116
300	299,4	61x2,5	22,5	48500	0,827	0,725	1,552	0,094
400	400,1	61x2,89	26,0	61900	1,105	0,760	1,865	0,071
500	499,8	61x3,23	29,1	82750	1,380	0,791	2,171	0,057
625	626,2	91x2,96	32,6	96900	1,733	0,826	2,559	0,045
800	802,1	91x3,35	36,8	120550	2,219	0,863	3,087	0,035
1000	999,7	91x3,74	41,1	148450	2,766	0,911	3,667	0,028

Πίνακας 2: Αγωγοί εναέριων γραμμών από Αλουμίνιο Ηλεκτροτεχνίας E-Al κατά DIN 48201, Blatt 5.

\* Το πρόσθετο φορτίο πάγου είναι κατά VDE 0210 (0,5+0,01d) ·9,81N

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αριθμός σωματιδίων	7	19	37	61	91
Επιτρεπόμενη μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	140	140	140	140	140
Μέτρο ελαστικότητας (10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	0,60	0,57	0,57	0,55	0,5
Συντελεστής θερμικής διαστολής α (10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> )	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Ειδική μάζα (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7

Πίνακας 3: Αγωγοί εναέριων γραμμών από κράμα αλουμίνιου ALDRAY (E-Al+Mg+Si) κατά DIN 48201, Blatt 6.

Ονομαστική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Πραγματική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Σωματίδια x διάμετρο (mm)	Διάμετρος d (mm)	Φορτίο θραύσης (N)	Μάζα (kg/m)	Πρόσθετο φορτίο πάγου (kg/m)*	Πρόσθετο φορτίο + πάγος (kg/m)	Ωμική αντίσταση στους 20°C (Ω/km)
25	24,25	7x2,1	6,3	6900	0,067	0,563	0,630	1,351
35	34,36	7x2,5	7,5	9800	0,094	0,575	0,669	0,954
50	49,48	7x3	9,0	14100	0,135	0,590	0,725	0,663
	48,36	19x1,8	9,0	13800	0,133	0,590	0,723	0,678
70	65,82	19x2,1	10,5	18750	0,181	0,605	0,786	0,498
95	93,27	19x2,5	12,5	26600	0,256	0,625	0,881	0,352
120	117,2	19x2,8	14,0	33350	0,322	0,640	0,962	0,280
150	147,1	37x2,25	15,7	41900	0,405	0,657	1,063	0,223
185	181,6	37x2,5	17,5	51750	0,501	0,675	1,176	0,181
240	242,5	61x2,25	20,2	69100	0,702	0,702	1,372	0,135
300	299,4	61x2,5	22,5	85350	0,827	0,725	1,552	0,110
400	400,1	61x2,89	26,0	114000	1,105	0,760	1,865	0,082
500	499,8	61x3,23	29,1	142450	1,381	0,791	2,172	0,066
625	626,2	91x2,96	32,6	178450	1,733	0,826	2,559	0,052
800	802,1	91x3,35	36,8	228600	2,219	0,868	3,087	0,041
1000	999,7	91x3,74	41,1	284900	2,766	0,911	3,667	0,033

Πίνακας 4: Αγωγοί εναέριων γραμμών από κράμα αλουμίνιου ALDRAY (E-Al+Mg+Si) κατά DIN 48201, Blatt 6.

\* Το πρόσθετο φορτίο πάγου είναι κατά VDE 0210 (0,5+0,01d) ·9,81N/m



Αριθμός σωματιδίων	7	19	37	61
Επιτρεπόμενη μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	175	175	175	175
Μέτρο ελαστικότητας (10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	1,13	1,05	1,05	1,0
Συντελεστής θερμικής διαστολής α (10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> )	1,7	1,7	1,7	1,7
Ειδική μάζα (Kg/dm <sup>3</sup> )	8,9	8,9	8,9	8,9

Πίνακας 5: Αγωγοί εναέριων γραμμών από Χαλκό Ηλεκτροτεχνίας (E-Cu) κατά DIN 48201, Blatt 1.

Ονομαστική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Πραγματική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Σωματίδια x διάμετρο (mm)	Διάμετρος d (mm)	Φορτίο θραύσης (N)	Μάζα (kg/m)	Πρόσθετο φορτίο πάγου (kg/m)*	Πρόσθετο φορτίο + πάγος (kg/m)	Ωμική αντίσταση στους 20°C (Ω/km)
10	10,02	7x1,35	4,05	4100	0,090	0,5405	0,630	1,780
16	15,89	7x1,7	5,1	6500	0,142	0,551	0,669	1,122
25	24,25	7x2,1	6,3	9900	0,219	0,563	0,725	0,735
35	34,36	7x2,5	7,5	14050	0,310	0,575	0,723	0,519
50	49,48	7x3	9,0	20200	0,447	0,590	0,786	0,360
	48,36	19x1,8	9,0	19800	0,438	0,590	0,881	0,369
70	65,83	19x2,1	10,5	26900	0,597	0,605	0,962	0,271
95	93,27	19x2,5	12,5	38100	0,846	0,625	1,063	0,191
120	117,0	19x2,8	14,1	47800	1,061	0,640	1,176	0,152
150	147,1	37x2,25	15,7	60100	1,337	0,657	1,372	0,121
185	181,6	37x2,5	17,5	74200	1,651	0,675	1,552	0,098
240	242,5	61x2,25	20,2	99100	2,208	0,702	1,865	0,074
300	299,4	61x2,5	22,5	122350	2,726	0,725	2,172	0,060
400	400,1	91x2,89	26,0	164450	3,643	0,760	2,559	0,045
500	499,8	91x3,23	29,1	204200	4,551	0,791	3,087	0,035

Πίνακας 6: Αγωγοί εναέριων γραμμών από Χαλκό Ηλεκτροτεχνίας (E-Cu) κατά DIN 48201, Blatt 1.

\* Το πρόσθετο φορτίο πάγου είναι κατά VDE 0210 (0,5+0,01d) ·9,81N/m.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Διατομή (CM)	Αλουμίνιο			Χάλυβας		Εξωτερική διάμετρος (Inches)	Ισοδύναμη διάμετρος (CM)	Όριο Θραύσης (Pounds)	Βάρος (Pounds/Mile)	Μέγιστη φόρτιση A	Αντίστα στη 25°C ( )	
	Αριθμός κλώνων	Αριθμός στρώσεων	Διάμετρος κλώνων (Inches)	Αριθμός κλώνων	Διάμετρος κλώνων (Inches)						Σ.Ρ	50Hz
1590000	54	3	0,1716	19	0,1030	1,545	1000000	56000	10770	1380	0,0587	0,0590
1510500	54	3	0,1673	19	0,1004	1,506	950000	53200	10237	1340	0,0618	0,0621
1431000	54	3	0,1628	19	0,0977	1,465	900000	50400	9699	1300	0,0652	0,0655
1351000	54	3	0,1582	19	0,0949	1,424	850000	47600	9160	1250	0,0691	0,0694
1272000	54	3	0,1535	19	0,0921	1,382	800000	44800	8621	1200	0,0734	0,0737
1192500	54	3	0,1486	19	0,0892	1,338	750000	43100	8082	1160	0,0783	0,0786
1113000	54	3	0,1436	19	0,0862	1,293	700000	40200	7544	1110	0,0839	0,0842
1033500	54	3	0,1384	7	0,1384	1,246	650000	37100	7019	1060	0,0903	0,0907
954000	54	3	0,1329	7	0,1329	1,196	600000	34200	6479	1010	0,0979	0,0981
900000	54	3	0,1291	7	0,1291	1,162	566000	32300	6112	970	0,104	0,104
874400	54	3	0,1273	7	0,1273	1,146	550000	31400	5940	950	0,117	0,107
795000	54	3	0,1214	7	0,1214	1,093	500000	28500	5399	900	0,117	0,118
795000	26	2	0,1749	7	0,1360	1,108	500000	31200	5770	910	0,117	0,117
795000	30	2	0,1628	19	0,0977	1,140	500000	38400	6517	910	0,131	0,117
715500	54	3	0,1151	7	0,1152	1,036	450000	26300	4859	830	0,131	0,131
715500	26	2	0,1659	7	0,1290	1,051	450000	28100	5193	840	0,131	0,131
715500	30	2	0,1544	19	0,0926	1,081	450000	34600	5865	840	0,140	0,131
666600	54	3	0,1111	7	0,1111	1,000	419000	24500	4527	800	0,147	0,141
636000	54	3	0,1085	7	0,1085	0,977	400000	23600	4319	770	0,147	0,148
636000	26	2	0,1564	7	0,1216	0,990	400000	25000	4616	780	0,147	0,147
636000	30	2	0,1456	19	0,0874	1,019	400000	31500	5213	780	0,154	0,147
605000	54	3	0,1059	7	0,1059	0,953	380500	22500	4119	750	0,154	0,155
605000	26	2	0,1525	7	0,1186	0,966	380500	24100	4391	760	0,168	0,154
556500	26	2	0,1463	7	0,1138	0,927	350000	22400	4039	730	0,168	0,168
556500	30	2	0,1362	7	0,1362	0,953	350000	27200	4588	730	0,168	0,168
500000	30	2	0,1291	7	0,1291	0,904	314500	24400	4122	690	0,187	0,187
477000	26	2	0,1355	7	0,1054	0,858	300000	19340	3462	670	0,196	0,196
477000	30	2	0,1261	7	0,1261	0,883	300000	23300	3933	670	0,196	0,196
397500	26	2	0,1236	7	0,0961	0,783	250000	16190	2885	590	0,235	Όπως και στο Σ.Ρ.
397500	30	2	0,1151	7	0,1151	0,806	250000	19980	3277	600	0,235	
336400	26	2	0,1138	7	0,0885	0,721	212000	14050	2442	530	0,278	
336400	30	2	0,1059	7	0,1059	0,741	212000	17040	2774	530	0,278	
300000	26	2	0,1074	7	0,0835	0,680	188700	12650	2178	490	0,311	
300000	30	2	0,1000	7	0,1000	0,700	188700	15430	2473	500	0,311	
266800	26	2	0,1013	7	0,0788	0,642	168130	11250	1936	460	0,350	

Πίνακας 8.7: Χαρακτηριστικές τιμές αγωγών ACSR εναέριων γραμμών, προδιαγραφών της Aluminum Company Of America (ALCOA)

\* Η φόρτιση σε A αντιστοιχεί σε 25°C θερμοκρασία αέρα, 75°C θερμοκρασία αγωγού, ταχύτητα αέρα 0,6.m/s

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΥΓΟΥΛΗΣ : ΕΝΑΕΡΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

\*\* Χρησιμοποιούνται μονάδες :  $1CM=5,067 \cdot 10^{-4}mm^2$ ,  $10^6CM=506,7mm^2$ ,  $1Pound=4,448N=0,4536kp$ ,  
 $1Mile=1609m$ ,  $1inch=25,4mm$ ,  $1foot=304,8mm$ .

		Αριθμός σωματιδίων Al /St				
		14/7	14/19	12/7	30/7	6/1
Σχέση διατομών		1,4	1,4	1,7	4,3	6
Επιτρεπόμενη μέγιστη τάση N/mm <sup>2</sup>		240	240	220	140	120
Μέτρο ελαστικότητας 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>		1,10	1,10	1,07	0,82	0,81
Συντελεστής θερμικής διαστολής 10 <sup>5</sup> K		1,50	1,50	1,53	1,78	1,92
Ειδική μάζα kg/dm <sup>2</sup>		4,91	4,91	4,66	3,75	3,50
Ονομαστική διατομή mm <sup>2</sup>	Πρέπουσα διατομή mm <sup>2</sup>		Συνολική διατομή mm <sup>2</sup>	Σύρματα x διάμετρος		
	Al	St		Al	St	
16/25	15,3	2,55	17,85	6 x1,8	1x1,8	
25/4	23,8	4,0	27,8	6x2,25	1x2,25	
36/6	34,3	5,7	40,0	6x2,7	1x2,7	
44/32	44,1	31,7	75,7	14x2,0	7x2,4	
50/8	48,3	8,0	56,3	6x3,2	1x3,2	
50/30	51,2	29,8	81,0	12x2,33	7x2,33	
70/12	69,9	11,4	81,3	26x1,85	7x1,44	
95/15	94,4	15,3	109,7	26x2,15	7x1,67	
95/55	96,5	56,3	152,8	12x3,2	7x3,2	
105/75	105,7	75,5	181,5	14x3,1	19x2,25	
120/20	121,6	19,8	141,4	26x2,44	7x1,9	
120/70	122,0	71,3	193,3	12x3,6	7x2,6	
125/30	127,9	29,8	157,7	30x2,33	7x2,33	
150/25	148,9	34,1	173,1	26x2,7	7x2,1	
170/40	171,8	49,5	211,9	30x2,7	7x2,7	
185/30	183,8	29,8	213,6	26x3,0	7x2,33	
210/35	209,1	24,2	243,2	26x3,2	7x2,49	
210/50	212,1	40,1	261,6	30x3,0	7x3,0	
230/30	230,9	29,8	260,7	24x3,5	7x2,33	
240/40	243,0	39,5	282,5	26x3,45	7x2,68	
265/35	263,7	34,1	297,8	24x3,74	7x2,49	
300/50	304,3	49,5	353,7	26x3,86	7x3,0	
305/40	304,6	39,5	344,1	54x2,28	7x2,68	
340/30	339,3	29,8	369,1	48x3,0	7x2,33	
380/50	382,0	49,5	431,5	54x3,0	7x3,0	
385/35	386,0	34,1	420,1	48x3,2	7x2,49	
435/55	434,3	56,3	490,6	54x3,2	7x3,2	
450/40	448,7	39,5	488,2	48x3,45	7x2,68	
490/65	490,3	63,6	533,9	54x3,4	7x3,4	
495/35	494,1	34,1	520,2	45x3,74	7x2,59	
510/45	510,2	45,3	555,5	48x3,68	7x2,87	
550/70	550	71,3	621,3	54x3,6	7x3,6	
560/50	561,7	49,5	611,2	48x3,86	7x3	
570/40	565,5	39,5	610,3	45x4	7x2,68	
632/45	632,1	45,3	677,4	45x4,23	7x287	
680/85	678,8	86	764,8	54x4	7x2,4	

Πίνακας 8: Σύνθετοι αγωγοί Αλουμινίου – Χάλυβα ACSR Κατά DIN 48204

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

		Αριθμός σωματιδίων Al /St				
		26/7	24/7	54/7	54/19	48/7
Σχέση διατομών		6	7,7	7,7	7,7	11,3
Επιτρεπόμενη μέγιστη τάση N/mm <sup>2</sup>		120	110	110	110	95
Μέτρο ελαστικότητας 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>		0,77	0,74	0,70	0,68	0,77
Συντελεστής θερμικής διαστολής 10 <sup>5</sup> K		1,89	1,96	1,93	1,94	2,13
Ειδική μάζα kg/dm <sup>2</sup>		350	3,36	3,36	3,36	3,20
Σχέση διατομών	Διάμετρος αγωγών d mm	Λογιστική αντοχή N	Μάζα αγωγού kg/m	Πρόσθετο φορτίο πάγου kg/m	Συνολικό φορτίο βάρους + πάγος kg/m	Ωμική αντίσταση 20 <sup>0</sup> C Ω/km
6	5,4	5950	0,062	0,554	0,616	1,847
6	6,8	9200	0,097	0,568	0,669	1,188
6	8,1	12650	0,140	0,581	0,721	0,824
1,4	11,2	45000	0,372	0,612	0,984	0,643
6	9,6	17100	0,196	0,596	0,792	0,574
1,7	11,7	43800	0,378	0,617	0,995	0,552
6	11,7	26800	0,284	0,617	0,901	0,404
6	13,6	35750	0,383	0,636	1,019	0,300
1,7	16	79650	0,712	0,660	1,372	0,293
1,4	17,5	108450	0,891	0,675	1,566	0,268
6	15,5	45650	0,494	0,655	1,149	0,233
1,7	18	100000	0,901	0,680	1,581	0,232
4,3	16,1	57600	0,591	0,663	1,254	0,221
6	17,1	55250	0,605	0,671	1,276	0,190
4,3	18,9	76750	0,794	0,689	1,483	0,165
6	19	66200	0,746	0,690	1,436	0,154
6	20,3	74900	0,850	0,703	1,553	0,135
4,3	21	93900	0,981	0,710	1,691	0,133
7,7	21	73100	0,877	0,710	1,587	0,122
11,3	21,9	86400	0,987	0,719	1,706	0,116
7,7	22,4	83050	1,02	0,724	1,726	0,107
11,3	24,5	107000	1,236	0,745	1,981	0,093
7,7	24,1	99400	1,160	0,741	1,901	0,093
11,3	25	92900	1,180	0,750	1,930	0,083
7,7	27	123100	1,453	0,770	1,223	0,074
11,3	26,7	104800	1,344	0,767	2,111	0,073
7,7	28,8	136450	1,653	0,788	2,441	0,065
11,3	28,7	120750	1,561	0,787	2,348	0,063
7,7	30,6	153100	1,866	0,806	2,672	0,058
14,5	29,9	121800	1,646	0,799	2,445	0,058
11,3	30,7	136650	1,778	0,807	2,585	0,056
7,7	32,4	170600	2,092	0,824	2,916	0,051
11,3	32,2	148950	1,954	0,822	2,776	0,050
14,3	32,2	139000	1,888	0,822	2,710	0,050
14,5	34	155800	2,118	0,840	2,958	0,045
7,7	36	210400	2,570	0,860	3,430	0,042

Πίνακας 8 (συνέχεια) : : Σύνθετοι αγωγοί Αλουμινίου – Χάλυβα ACSR Κατά DIN 48204

\* Το πρόσθετο φορτίο πάγου είναι κατά VDE 0210 (0,5+0,1d). 9,81 N/m

Αριθμός δίσκων	Μέση τιμή της εν/νης τάσης διάσπασης		50% τιμή της κρουστικής τάσης διάσπασης 1,2/50μs	
	ξηρός kV	Υπό βροχή kV	θετική kV	αρνητική kV
1	78	45	105	110
2	140	80	210	220
3	195	120	310	310
4	245	155	390	375
5	290	195	470	445
6	340	235	550	525
7	390	270	625	605
8	435	310	700	685
9	485	345	775	760
10	530	380	850	835
11	575	414	920	915
12	620	450	995	995
13	660	485	1065	1070
14	705	520	1140	1145
15	745	555	1210	1225
16	785	585	1280	1295
17	830	620	1355	1375
18	870	650	1425	1455
19	910	685	1500	1530
20	950	715	1570	1605
21	990	750	1640	1680
22	1030	780	1710	1755
23	1070	815	1780	1830
24	1110	845	1850	1905
25	1150	875	1920	1980

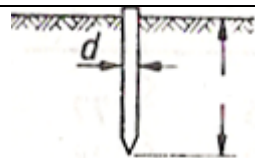
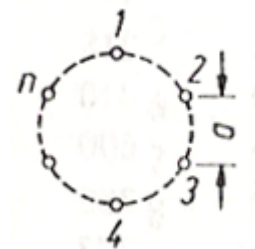
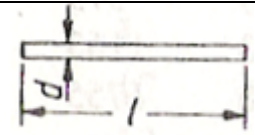
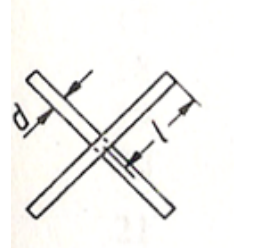
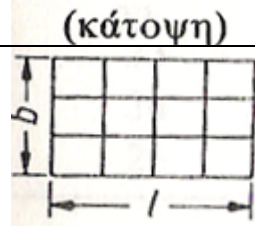
Πίνακας 10: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά δισκοειδών μονωτήρων διαστάσεων 254x146 DIN 48013, χωρίς εξαρτήματα. Τιμές κατασκευαστή των μονωτήρων.

Διάμετρος Ø μήκος ενός μονωτήρα	Αριθμός μονωτήρων ν εν σειρά	Μέση εν/νης τάση υπερπήδησης		Τάση αντοχής υπό βροχή kV	50% κρουστική τάση διάσπασης 1,2/50μs μέγιστη τιμή		Κρουστική τάση αντοχής 1,2/50μs kV
		ξηρός kV	Υπό βροχή kV		θετική kV	αρνητική kV	
60 Ø	1	120	90	82	195	215	177
380...	2	225	170	155	360	430	328
390mm	3	320	250	227	525	645	478
490mm	1	150	120	109	240	265	218
	2	280	220	200	450	530	410
	3	400	320	291	660	795	600
60 ...85 Ø	1	265	225	205	420	470	382
850...	2	510	435	396	850	940	773

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

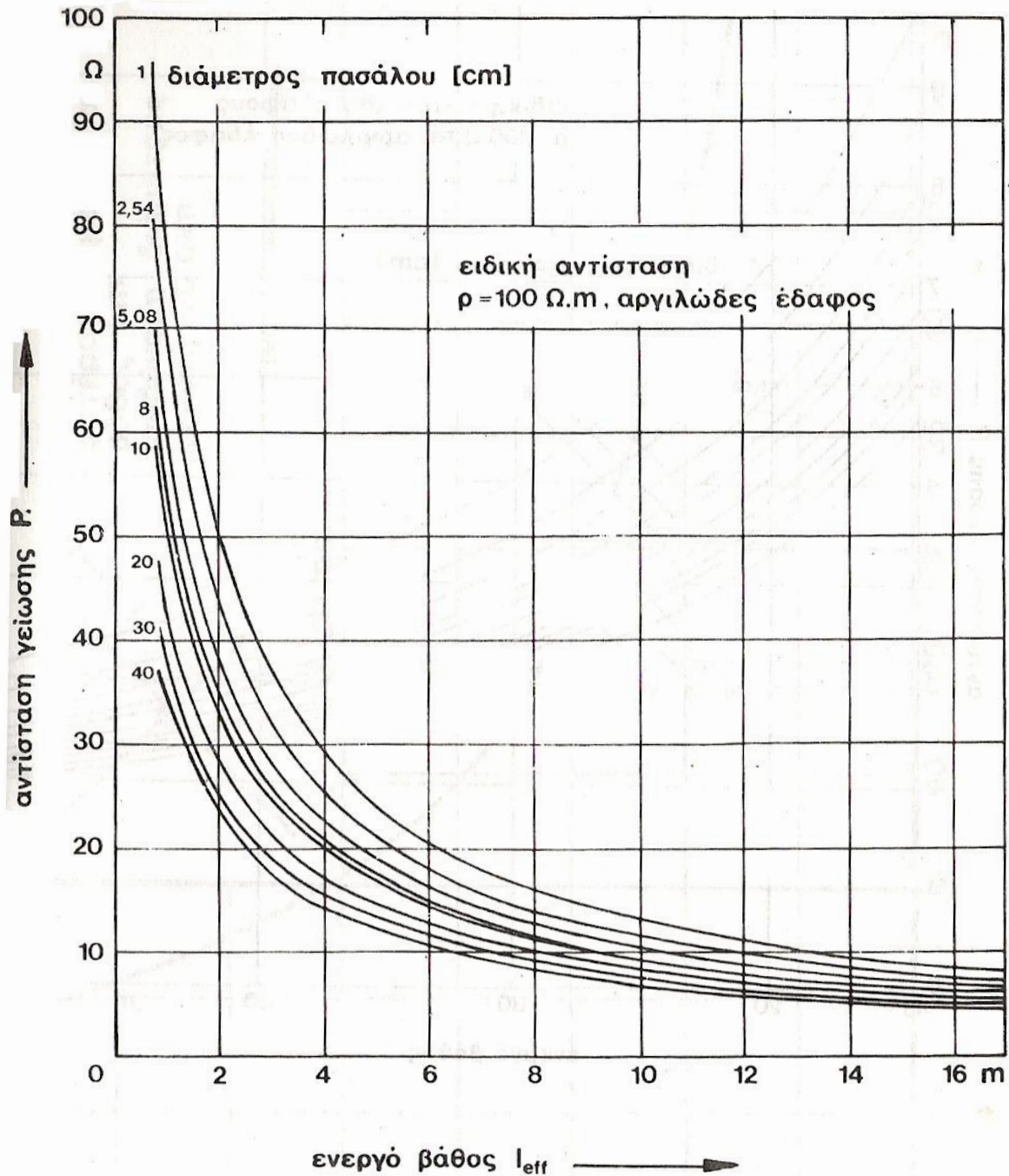
Διάμετρος Ø μήκος ενός μονωτήρα	Αριθμός μονωτήρων ν εν σειρά	Μέση εν/νης τάση υπερπήδησης		Τάση αντοχής υπό βροχή kV	50% κρουστική τάση διάσπασης 1,2/50μs μέγιστη τιμή		Κρουστική τάση αντοχής 1,2/50μs kV
		ξηρός kV	Υπό βροχή kV		θετική kV	αρνητική kV	
900mm	3	700	635	577	1270	1400	1155
1200...	1	400	340	309	630	700	573
1310mm	2	780	660	600	1280	1400	1163
	3	1000	920	836	1930	2100	1755
75 Ø	1	445	365	390	715	800	650
1430mm	2	830	680	620	1400	1600	1370
	3	1100	930	850	2000	2400	1820

Πίνακας 11: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μονωτήρων ράβδου κατά DIN 48006, Blatt 1 και Blatt 2 χωρίς εξαρτήματα.

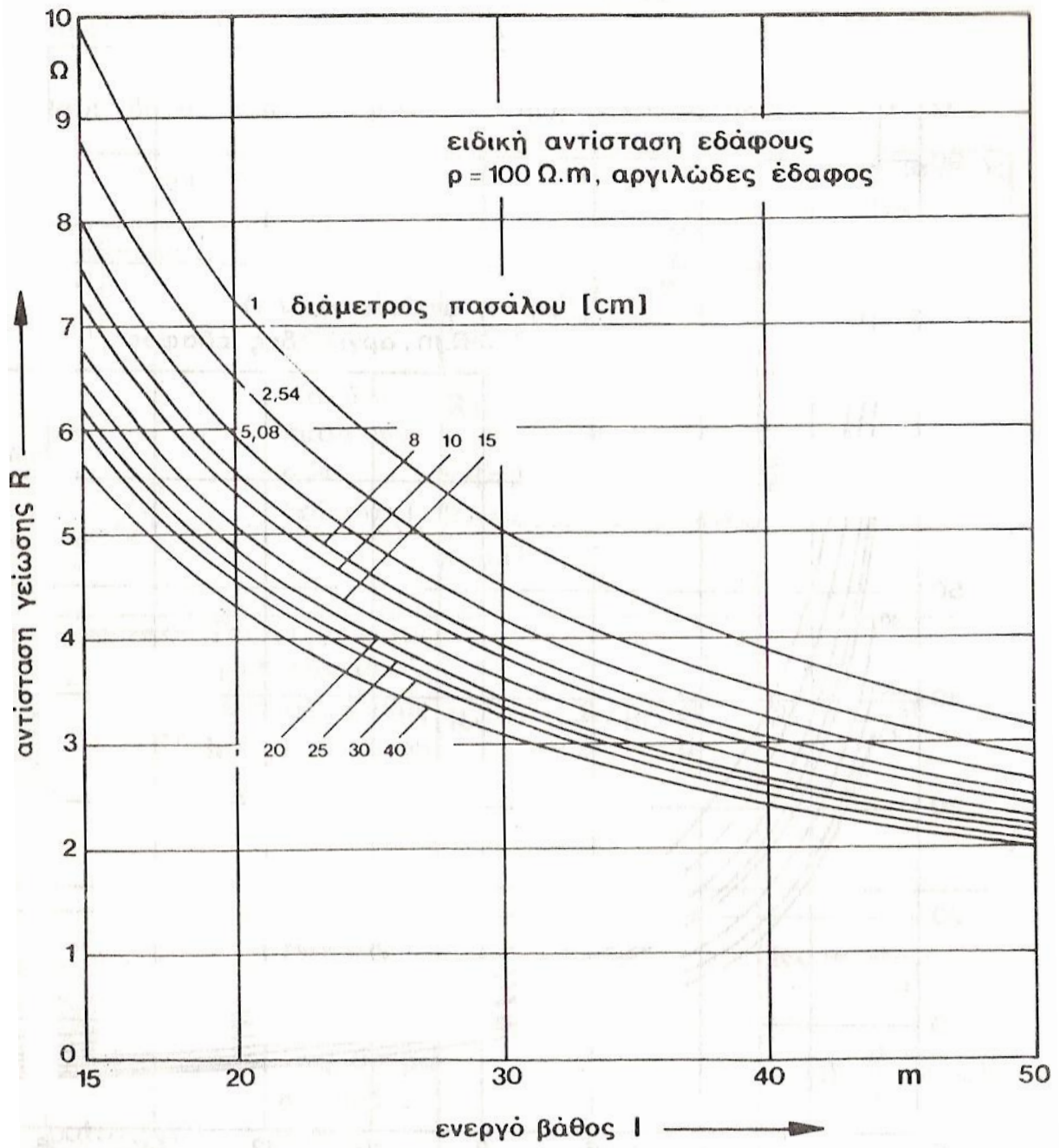
Γειώσεις	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	$R_{AI} = \frac{\rho}{2\pi \cdot I_{eff}} \ln \frac{4l}{d}$ $I_{eff} = l - 0,5m$	$R_A \approx \frac{\rho}{I_{eff}}$
	$R_A \approx k \frac{2\rho}{I} R_{AI}$ $\frac{a}{I} = 3: n = 5: k \approx 1,2$ $n = 10: k \approx 1,25$ <p><math>R_{AI}</math>: η αντίσταση ενός πασάλου</p>	$k = (1 \dots 1,5)$ $n = 10: k \approx 1,25$
	$R_A = \frac{\rho}{\pi I} \ln \frac{2l}{d}$	$R_A \approx \frac{2\rho}{I}$
 (κάτοψη)	-	$R_A \approx \frac{\rho}{2\pi \cdot I}$
	$R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{I_g}$ <p><math>I_g</math>=Το συνολικό μήκος αγωγού</p>	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$

Πίνακας 12: Γειώσεις και οι αντιστάσεις τους.

\*Σαν πάχος ηλεκτροδίου λαμβάνεται  $d = \sqrt{4q}/\pi$ ,  $q =$  διατομή ειδική αντίσταση  $\Omega \cdot m$ . Οι τιμές του  $\rho$  είναι σε σχέση με την σύσταση του εδάφους: Βάλτος = 5...40  $\Omega \cdot m$  , αργιλώδες και οργανικό έδαφος = 20...200  $\Omega \cdot m$  , βράχοι, βουνό = 500...3000  $\Omega \cdot m$ .



Πίνακας 13: Αντίσταση γείωσης πάσων.



Πίνακας 13: Αντίσταση γείωσης πάσालων.