



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”**



Υπεύθυνος Καθηγητής: Παντελής Μαλατέστας
Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Χρήστος Πανουσόπουλος

**Αθήνα
Ιούνιος – 2017**

Copyright © Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα

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 της 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας κ. Παντελή Μαλατέστα Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε - Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την παρούσα εργασία καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και που χωρίς την πολύτιμη παρουσία της δε θα είχα καταφέρει τίποτα από όσα έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	3
Περίληψη	4
Executive Summary	5
<u>Κεφάλαιο 1 - Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας</u>	6
1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	6
1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	8
1.3 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.....	9
1.4 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	12
1.5 Ευστάθεια Σ.Η.Ε.....	13
1.6 Έλεγχος Σ.Η.Ε.....	16
<u>Κεφάλαιο 2 - Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας</u>	18
2.1 Πρωτεύουσα διανομή.....	18
2.1.1 Κατηγορίες σχεδιασμού δικτύων πρωτεύουσας διανομής.....	19
2.2 Εξοπλισμός συστημάτων διανομής.....	25
2.2.1 Μετασχηματιστές.....	25
2.2.2 Γραμμές διανομής.....	27
2.2.3 Μέσα προστασίας.....	30
2.2.4 Διακόπτες.....	38
2.3 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ.....	40
2.4 Δευτερεύουσα διανομή.....	41
2.5 Βέλτιστη λειτουργία των δικτύων διανομής.....	44
<u>Κεφάλαιο 3 - Φορτία δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας</u>	46
3.1 Είδη φορτίων.....	46
3.1.1 Φωτισμός.....	46
3.1.2 Φορτία ισχύος.....	48
3.1.3 Θέρμανση.....	50
3.1.4 Ηλεκτρονικά φορτία.....	53
3.2 Παράγοντες καταναλώσεων.....	54
3.3 Κατηγοριοποίηση καταναλωτών.....	56
3.4 Μελλοντική ανάπτυξη του φορτίου.....	57
3.5 Απαιτήσεις τάσης.....	58
3.6 Αξιοπιστία.....	59

Κεφάλαιο 4 - Μέθοδοι ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	62
4.1 Πτώση τάσης.....	62
4.2 Προβλήματα στην τάση του δικτύου.....	64
4.3 Πρότυπα τάσης.....	66
4.4 Μοντέλα ροής φορτίου.....	67
4.5 Ρύθμιση τάσης με χρήση μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ.....	69
4.6 Έλεγχος τάσης με πυκνωτές αντιστάθμισης.....	78
4.7 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης.....	82
4.8 Βαθμίδα αντιστάθμισης απωλειών γραμμής.....	90
4.9 Στατικός αντισταθμιστής δικτύων διανομής (d-STATCOM).....	95
4.10 Έλεγχος τάσης και εξοικονόμηση ενέργειας με βελτιστοποίηση τάσης.....	99
Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις.....	105
Βιβλιογραφία.....	108

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο **κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας αναφέρονται τα συστατικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και οι μορφές ευστάθειάς του και τα μέσα ελέγχου του.

Στο **κεφάλαιο 2** αναλύονται με περισσότερη λεπτομέρεια τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Πραγματοποιείται ανάλυση των δικτύων διανομής από το στάδιο την αναχώρηση της μέσης τάσης (πρωτεύουσα διανομή), έως τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ όπου ξεκινά η διανομή χαμηλής τάσης στον καταναλωτή (δευτερεύουσα διανομή). Επίσης γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους ανάπτυξης και τον εξοπλισμό των δικτύων διανομής.

Στο **κεφάλαιο 3** καταγράφονται οι κατηγορίες φορτίων των δικτύων διανομής από φορτία χαμηλής ισχύος (ηλεκτρονικές συσκευές, φωτισμός), έως φορτία μεγαλύτερης ισχύος (φορτία θέρμανσης, κινητήρες). Έπειτα αναφέρονται οι παράγοντες που εξασφαλίζουν την καλή λειτουργία των φορτίων και η μελλοντική ανάπτυξη του φορτίου που βοηθά στο σωστό σχεδιασμό των δικτύων διανομής. Στο τέλος, αναγράφονται οι απαιτήσεις των φορτίων σε τάση και η αξιοπιστία.

Το **κεφάλαιο 4** περιλαμβάνει τις μεθόδους ρύθμισης του μεγέθους της τάσης στα δίκτυα διανομής, ξεκινώντας με μια αναφορά στην πτώση τάσης και τα πρόβλημα που μπορεί να προκαλούνται στην τάση του δικτύου. Εν συνεχεία γίνεται μια αναφορά στο πρότυπο ρύθμισης τάσης EN50160 και στα όρια τάσης. Έπειτα αναλύονται οι μέθοδοι ρύθμισης τάσης οι Μ/Σ με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο, η ρύθμισης τάσης με αντιστάθμιση της άεργης ισχύος, και ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης που κυριαρχεί των υπόλοιπων μεθόδων ρύθμισης. Επίσης γίνεται μια αναφορά στον στατικό αντισταθμιστή (d-STATCOM) μια διάταξη που ανήκει στην κατηγορία των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά τα τελευταία χρόνια αρχίζει και κάνει την εμφάνιση του στα δίκτυα διανομής. Τέλος, αναφέρεται, η βελτιστοποίηση τάσης, που έχει σημαντικά οφέλη τόσο στα δίκτυα διανομής ως προς την λειτουργία τους, αλλά παρέχει επίσης σημαντικά ποσά εξοικονόμησης ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ρύθμισης τάσης, αυτόματος ρυθμιστής τάσης, συστήματα αλλαγής υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), d-STATCOM, βελτιστοποίηση τάσης

EXECUTIVE SUMMARY

Chapter 1 of this paper describes the components of an electrical energy system, its stability and its means of control.

Chapter 2 analyzes in more detail the electricity distribution networks. An analysis of the distribution networks from the mid-voltage phase (primary distribution) to the MV/LV substation where the low voltage distribution to the consumer begins (secondary distribution). Reference is also made to methods of development and equipment of distribution networks.

Chapter 3 lists the load categories of distribution networks from low power loads (electronics, lighting) to higher power loads (heating, motors). The factors that ensure good load operation and future load development help guide the proper design of distribution networks are then mentioned. Finally, the voltage demand of loads and reliability are listed.

Chapter 4 includes the methods of regulating the voltage in the distribution networks, starting with a reference to the voltage drop and the problems that may be caused by the network voltage. Then a reference is made to the EN50160 voltage regulation standard and its voltage limits. Then the methods of voltage regulation are the transformers with on-load tap changer, the reactive power compensated voltage regulation, and the automatic voltage regulator that dominates the other regulation methods. Also, a reference to the static compensator (d-STATCOM), a device belonging to the category of flexible power transmission systems, but in the last years it has begun to make its appearance in the distribution networks. Finally, voltage optimization is mentioned, which has significant benefits both in distribution networks in terms of their operation, but also provides great amounts of energy savings.

Keywords: Electric power systems, electrical distribution networks, voltage regulation, automatic voltage regulator, on-load tap changer (OLTC) transformer, d-STATCOM, voltage optimization

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ο όρος Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε) θεωρείται ότι περιλαμβάνει όλη τη σειρά των μηχανών, συσκευών, διατάξεων, κατασκευών και εξαρτημάτων που καλύπτουν το συνολικό φάσμα της διακίνησης της ηλεκτρικής ενέργειας από το τόπο παραγωγής μέχρι τη θέση τροφοδότησης του τελευταίου καταναλωτή.

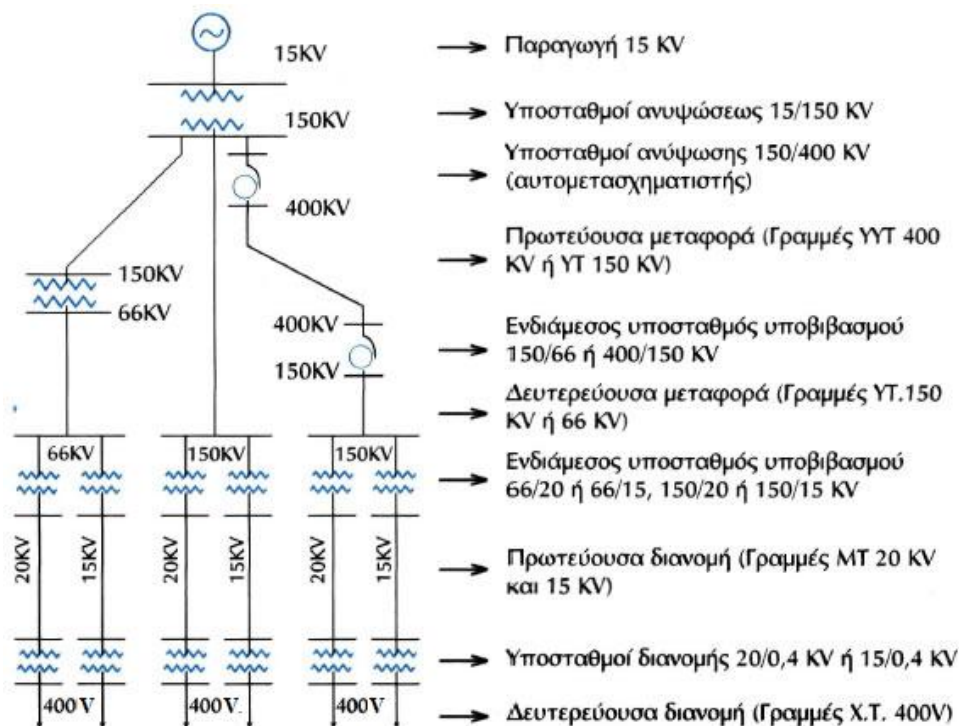
Όπως είναι γνωστό το μεγαλύτερο μειονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες ενεργειακές μορφές που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι η ανάγκη μεταφοράς της στους καταναλωτές ταυτόχρονα με τη παραγωγή αφού δεν αποθηκεύεται με τρόπο μαζικό, αξιόπιστο και οικονομικό. Η ανάγκη αυτή είναι σαφές πως οδηγεί στη κατασκευή και χρήση εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων που συνδέουν τα εργοστάσια παραγωγής με τα φορτία κατανάλωσης. Τα δίκτυα αυτά, εκτός από την άμεση οικονομική επιβάρυνση που δημιουργούν, επηρεάζουν προφανώς το βαθμό απόδοσης και την αξιοπιστία των Σ.Η.Ε. Το μέγεθος του προβλήματος μπορεί να εκτιμηθεί καλύτερα αν ληφθεί υπ' όψιν ότι οι τόποι εγκατάστασης των σταθμών παραγωγής επιλέγονται με βάση τη κατανομή και διαθεσιμότητα των αντίστοιχων πρωτογενών ενεργειακών αποθεμάτων αλλά και τη προστασία του περιβάλλοντος. Ακόμα εδώ πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι η αύξηση της απόδοσης των μονάδων παραγωγής με το μέγεθος τους, οδηγεί ασφαλώς στην ανάγκη απομάκρυνσής τους από τα καταναλωτικά κέντρα.

Ένα ολοκληρωμένο Σ.Η.Ε αποτελείται από τρία βασικά χαρακτηριστικά:

1. Του σταθμούς παραγωγής
2. Τα συστήματα μεταφοράς
3. και τα δίκτυα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής.

Με το σύστημα μεταφοράς η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης – μερικές φορές και υψηλής τάσης – στα οποία δίκτυα υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων και προσφέρει ορισμένα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του κάθε συστήματος. Η βασική δομή του συστήματος παριστάνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 - Αναλυτική διάταξη συστήματος διακίνησης ηλεκτρικής ενέργειας

1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα χρησιμοποιείται η μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση και από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι ο άνεμος, τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα κ.α.

Η παραγωγή από την καύση ορυκτών καυσίμων, πραγματοποιείται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με τη χρησιμοποίηση ατμοηλεκτρικών και νηξελοηλεκτρικών σταθμών. Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι και αυτοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί που όμως ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Οι νηξελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Επίσης, θερμική παραγωγή πραγματοποιείται σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου, όπου έχουμε συνδυασμό λειτουργίας αεροστροβίλου και ατμοστροβίλου και τα καυσαέρια του αεροστροβίλου χρησιμοποιούνται στο ατμοηλεκτρικό μέρος του σταθμού.

Η θερμική παραγωγή χαρακτηρίζεται ως ένας έμμεσος τρόπος παραγωγής, γιατί προηγούνται δύο στάδια μετατροπών. Άμεσο τρόπο παραγωγής έχουμε όταν παρακάμπτεται το στάδιο μετατροπής σε μηχανική ενέργεια, όπως συμβαίνει στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς η κινητική και η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των υδροστροβίλων και των γεννητριών. Διακρίνονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς φυσικής ροής και ρυθμιζόμενης ροής.

Οι πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται σε κάποιον ζυγό του δικτύου. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο μέσω ενός

ανεμοκινητήρα και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών. Τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό.

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των ηλιακών κυψελών. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών σταθμών είναι μέχρι σήμερα χαμηλή, περίπου 15% και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εγκαθίστανται συνήθως για την τροφοδότηση απομονωμένων καταναλώσεων.

1.3 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

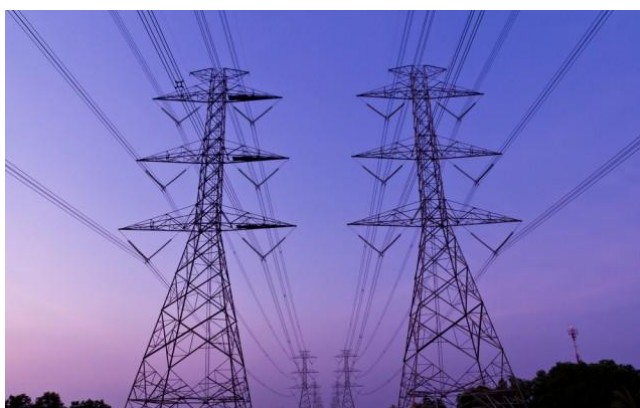
Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την αναχώρηση από τους σταθμούς παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς υψηλής/μέσης τάσης (Υ.Τ/Μ.Τ) που τροφοδοτούν μεγάλα κέντρα κατανάλωσης και από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης. Επίσης, τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού Υ.Τ/Μ.Τ και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης (Μ.Τ/Χ.Τ), και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 10MW (τσιμεντοβιομηχανίες, εργοστάσια αλουμινίου, αυτοκινητοβιομηχανίες κ.α.).

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης (σχήμα 1.2), τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ισχύος και συνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής και όλα τα σημεία μεγάλης κατανάλωσης του συστήματος. Επιπλέον, μέσω διασυνδεδετικών γραμμών, είναι σε θέση να ανταλλάσει ενέργεια με άλλα γειτονικά δίκτυα. Η ενέργεια αυτή μπορεί να διακινηθεί προς κάθε κατεύθυνση που επιθυμούμε μέσω των διαφόρων γραμμών του συστήματος μεταφοράς και μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται βέλτιστη οικονομική λειτουργία. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο το σύστημα μεταφοράς

είναι βροχοειδές, για να είναι σε θέση να διοχετεύει ενέργεια σε μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων.

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη μια σειρά από περιορισμούς:

- το υπάρχον σύστημα
- τη θέση των καταναλώσεων που ήδη υπάρχουν ή θα αναπτυχθούν μελλοντικά
- τη κατάλληλη γεωγραφική θέση των σταθμών παραγωγής



Σχήμα 1.2 - Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και άρα οικονομικότερη λειτουργία. Για το ελληνικό δίκτυο οι τάσεις είναι 400kV/20kV ή 150kV/20kV. Η μορφή των δικτύων μεταφοράς μπορεί να είναι διαμήκης ή κυκλική, αναλόγως με τη θέση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως προς τα κέντρα κατανάλωσης.

Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσεως και επομένως προφανής είναι ο λόγος των υπερυψηλών τάσεων στην επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς. Επιπλέον οι μειωμένες απώλειες, τις οποίες συνεπάγεται η μεταφορά με υπερυψηλή τάση καθιστούν οικονομικότερη λειτουργία με τη τάση αυτή. Το κόστος μεταφοράς αποτελεί συνισταμένη του κόστους εγκατάστασης, του κόστους απωλειών και του κόστους συντήρησης της γραμμής. Κριτήριο για την εκλογή μιας τάσης μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό σημαίνει πως η εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας από μια αύξηση της τάσης που επιλέγεται, αντισταθμίζεται από τις αναγκαίες πρόσθετες επενδύσεις στη γραμμή και το λοιπό εξοπλισμό. Μέχρις ορισμένου σημείου, η

αύξηση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες λειτουργίας για δεδομένο μέγεθος αγωγού ή μικρότερο αγωγό για δεδομένες απώλειες. Ένα μέρος της επιτευχθείσας οικονομίας στο κόστος του αγωγού λόγω εφαρμογής υψηλότερης τάσης χάνεται αφ' ενός από αυξημένες απώλειες στο περιβάλλοντα αέρα, ο οποίος ionίζεται από τις υψηλές πεδιακές εντάσεις των αγωγών και αφ' ετέρου λόγω αυξημένου κόστους μονωτήρων, διακοπών, μετασχηματιστών κ.τ.λ. Το κόστος του εξοπλισμού αυξάνει τόσο γρήγορα στις υψηλές τάσεις, ώστε να υπάρχει κάποια μέγιστη τιμή της τάσης, επάνω από την οποία γίνεται αντιοικονομική η μεταφορά με τα σημερινά δεδομένα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Από τα δύο μέταλλα παράγεται το ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) δηλαδή αγωγός αλουμινίου ενισχυμένος με χάλυβα. Αποτελείται από κλώνους αλουμινίου, τοποθετημένους γύρω από ένα χαλύβδινο κεντρικό πυρήνα, ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή στο αγωγό.

Οι αγωγοί υψηλής τάσεως των εναερίων γραμμών μεταφοράς αναρτώνται από τους πυλώνες της γραμμής δια μέσου σειράς μονωτήρων, ο καθένας εκ των οποίων αποτελείται από μια αλυσίδα δίσκων από πορσελάνη ή γυαλί. Η αύξηση της μόνωσης για υψηλότερες τάσεις μεταφοράς αντιμετωπίζεται με την προσθήκη περισσότερων δίσκων στους αλυσοειδής αυτούς μονωτήρες. Η μόνωση μεταξύ μονωτήρων και γης, στις εναέριες γραμμές αποτελείται από τον αέρα που υπάρχει μεταξύ τους. Η απόσταση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην επιτρέπει στους αγωγούς να πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους, κατά τις ταλαντώσεις που υφίστανται από τον άνεμο, για να αποφεύγονται τυχόν διασπάσεις στις μονώσεις και δημιουργία σπινθηρισμών. Οι στύλοι ή πυλώνες, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναερίων γραμμών μεταφοράς, είναι συνήθως χαλύβδινοι πυλώνες, οι οποίοι καλούνται και πύργοι.

Οι κλιματικές διαφορές απαιτούν ποικίλες σχεδιάσεις στους πύργους μεταφοράς. Σε μερικές περιοχές οι γραμμές πρέπει να αντέχουν σε θύελλες, ενώ άλλες πρέπει να αντέχουν σε πάγο, χιόνι κ.τ.λ. Η ένταση των κεραυνών διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Η σχεδίαση της γραμμής πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη τοπογραφία της περιοχής, η οποία μπορεί να ποικίλει από ανοιχτές πεδιάδες μέχρι δασωμένα βουνά. Μεγαλύτερη αξιοπιστία μεταφοράς έχουν, οι γραμμές απλού κυκλώματος, όταν οι

ζώνες διελύσεως των γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση κατά το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής. Όπου όμως είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρομών διελύσεως, όπως σε διαδρομές ορεινού χαρακτήρα, ή και για λόγους μικρότερου κόστους μεταφοράς, εις βάρος της αξιοπιστίας, χρησιμοποιούνται γραμμές διπλού κυκλώματος, στις οποίες χρησιμοποιούνται δύο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα σε κοινούς πυλώνες.

1.4 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου που απαιτούνται ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να διανεμηθεί στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των οποίων αυτή φτάνει ως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση.

Η διάκριση μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η αξία των εγκαταστάσεων διανομής κυμαίνεται στο 30% του συνόλου των εγκαταστάσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που το αποτελούν. Οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες από το επίπεδο μεταφοράς.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης. Τα δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται σε δίκτυα υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια είναι λιγότερο δαπανηρά και σε αυτά η αποκατάσταση των βλαβών είναι ταχύτερη. Ωστόσο στις

πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων τα δίκτυα κατασκευάζονται υπόγεια, διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος, ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας από τα κτίρια αλλά και για λόγους αισθητικής.

1.5 Ευστάθεια Σ.Η.Ε

Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ ορίζεται ως η ικανότητά του να παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας υπό κανονικές συνθήκες και να επανέρχεται σε αυτή μετά από κάποια διαταραχή.

Η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και μπορεί να επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Η ανάλυση των προβλημάτων αστάθειας, η αναγνώριση των βασικών παραγόντων που συνεισφέρουν στην αστάθεια και η σχεδίαση μεθόδων βελτίωσης της ευσταθούς λειτουργίας διευκολύνεται ιδιαίτερα από το διαχωρισμό της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες βασίζονται στους παρακάτω παράγοντες:

- Οι μηχανισμοί, διαδικασίες και η χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να εξεταστεί η αστάθεια
- Τον τρόπο εξέλιξης της επικείμενης αστάθειας
- Το μέγεθος της διαταραχής που μπορεί να προκαλέσει την αστάθεια

Στο σχήμα 1.3 δίνεται μια κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων ευστάθειας των Σ.Η.Ε με βάση τα παραπάνω κριτήρια.



Σχήμα 1.3 - Κατηγορίες ευστάθειας ενός Σ.Η.Ε

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς σε αποδεκτά επίπεδα τιμών όταν υποβάλλεται σε μια διαταραχή από ένα αρχικό σημείο λειτουργίας.

Η αστάθεια τάσης εκδηλώνεται με τη μορφή της βαθμιαίας πτώσης ή ανύψωσης των τάσεων ορισμένων ζυγών. Πιθανή επίπτωση μιας τέτοιας εξέλιξης είναι η απώλεια φορτίου μιας περιοχής ή απώλεια γραμμών μεταφοράς εξαιτίας της λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας που μπορεί να οδηγήσουν και σε άλλες διαδοχικές απώλειες στοιχείων του συστήματος.

Η κινητήρια δύναμη της αστάθειας τάσης είναι συνήθως τα φορτία που τείνουν να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν. Τέτοια δυναμικά φορτία είναι συνήθως κινητήρες επαγωγής που μεταβάλλουν την ολίσθησή τους, θερμοστατικά φορτία αλλά και έμμεσοι μηχανισμοί αποκατάστασης φορτίου, Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και φορτία ελεγχόμενα με μετατροπείς ισχύος.

Η ευστάθεια τάσης μπορεί, για λόγους αποτελεσματικότερης ανάλυσης, να χωριστεί σε ευστάθεια μεγάλων και μικρών διαταραχών. Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τα επίπεδα των τάσεων στις επιθυμητές τιμές ύστερα από σοβαρές διαταραχές όπως απώλεια μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής ή μιας διασυνδεδετικής γραμμής. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών βασίζεται στην εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του συστήματος για ορισμένο χρόνο, ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ διατάξεων του δικτύου όπως οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, οι κινητήρες και τα ΣΑΤΥΦ.

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υφίσταται μικρές διαταραχές όπως είναι η μεταβολή στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Ο εξεταζόμενος τύπος ευστάθειας εξαρτάται από την χαρακτηριστική των φορτίων και των συνεχόμενων ή διακριτών διατάξεων ελέγχου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή λειτουργίας. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μικρών διαταραχών μπορεί να γίνει με

γραμμικοποίηση του συστήματος στην εγγύτητα του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας.

Επιπλέον η ευστάθεια τάσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και ως προς το χρονικό πλαίσιο στο οποίο εξετάζεται, δηλαδή είτε στη βραχυπρόθεσμη (μερικά δευτερόλεπτα) είτε στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (δεκάδες λεπτά). Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης εμπλέκει ταχέως αποκρινόμενους δυναμικούς μηχανισμούς όπως κινητήρες επαγωγής, ηλεκτρικά ελεγχόμενα φορτία και διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Η ανάλυση φαινομένων αυτής της κλίμακας απαιτεί την επίλυση διαφορικών εξισώσεων ή και εξισώσεων διαφορών. Επιπλέον, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία, σε αντίθεση με την αστάθεια γωνίας που εξετάζεται κοντά στις μονάδες παραγωγής.

Η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης προέρχεται από την λειτουργία πιο αργών μηχανισμών, όπως τα ΣΑΤΥΦ, επαναφερόμενα θερμοστατικά φορτία, περιοριστές υπερδιέγερσης στις σύγχρονες μηχανές και στατά συστήματα πυκνωτών. Η ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης πραγματοποιείται με δυναμικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών. Στη περίπτωση αυτή η αστάθεια μπορεί να οφείλεται είτε σε απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας είτε στην επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, το οποίο όμως είναι ασταθές από πλευράς ευστάθειας μικρών διαταραχών. Επίσης η αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί όταν ξεπεραστούν τα όρια της περιοχής έλξης ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή και τη λήψη διορθωτικών μέτρων. Στις περιπτώσεις αξιολόγησης μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης απαιτούνται εκτεταμένες χρονικές προσομοιώσεις του δικτύου.

1.6 Έλεγχος Σ.Η.Ε

Η διαχείριση της ενέργειας ενός μεγάλου διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με κεντρικά συστήματα εποπτείας και αυτομάτου ελέγχου, με τα οποία εξασφαλίζεται οικονομική λειτουργία, υψηλός δείκτης ασφάλειας και μεγάλη αξιοπιστία λειτουργίας. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές υπό ορισμένη τάση και συχνότητα, οι τιμές των οποίων πρέπει να διατηρούνται σταθερές μέσα σε προκαθορισμένα συμβατικά όρια και η τήρηση αυτών των συνθηκών καθορίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης του καταναλωτή. Η σχεδίαση του συστήματος και η λειτουργία του πρέπει να εξισορροπούν καλή ποιότητα εξυπηρέτησης και καλό δείκτη αξιοπιστίας με ικανοποιητικό κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης αποτελούν τις δύο βασικές διαδικασίες λειτουργίας ενός ΣΗΕ. Η συχνότητα συνδέεται με το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος. Η συνεχής εξισορρόπηση του ισοζυγίου αυτού έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθερή τιμή της συχνότητας. Σε κάθε μεταβολή του φορτίου η παραγωγή πρέπει να προσαρμόζεται άμεσα. Η ρύθμιση αυτή γίνεται από τους ρυθμιστές στροφών των στροβίλων, οι οποίοι αποτελούν συστήματα κλειστού βρόχου και ανταποκρίνονται αυτόματα στις αλλαγές του φορτίου. Στα σύγχρονα διασυνδεδεμένα συστήματα το πρόβλημα του ελέγχου συχνότητας είναι σύνθετο και περιλαμβάνει την κατανομή των μεταβολών ζήτησης μεταξύ των διαφόρων μονάδων.

Το πρόβλημα της διατήρησης της τάσης μεταξύ των επιτρεπόμενων ορίων περιπλέκεται από το γεγονός ότι η τάση δεν είναι ενιαία σε όλο το σύστημα, όπως η συχνότητα, αλλά ποικίλει από θέση σε θέση και σχετίζεται με την άεργο ισχύ, η οποία διακινείται από το σύστημα. Επομένως η ρύθμιση της τάσης δεν μπορεί να γίνεται μόνο από τις γεννήτριες, που είναι φυσιολογικά οι πηγές άεργου ισχύος, αλλά γίνεται και με άλλα μέσα σε περισσότερες θέσεις του δικτύου και συγκεκριμένα με τη ρύθμιση της σχέσης μεταφοράς των μετασχηματιστών, με τη σύνδεση-αποσύνδεση πυκνωτών, πηνίων και εξειδικευμένων διατάξεων (αυτόματων ρυθμιστών τάσης).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

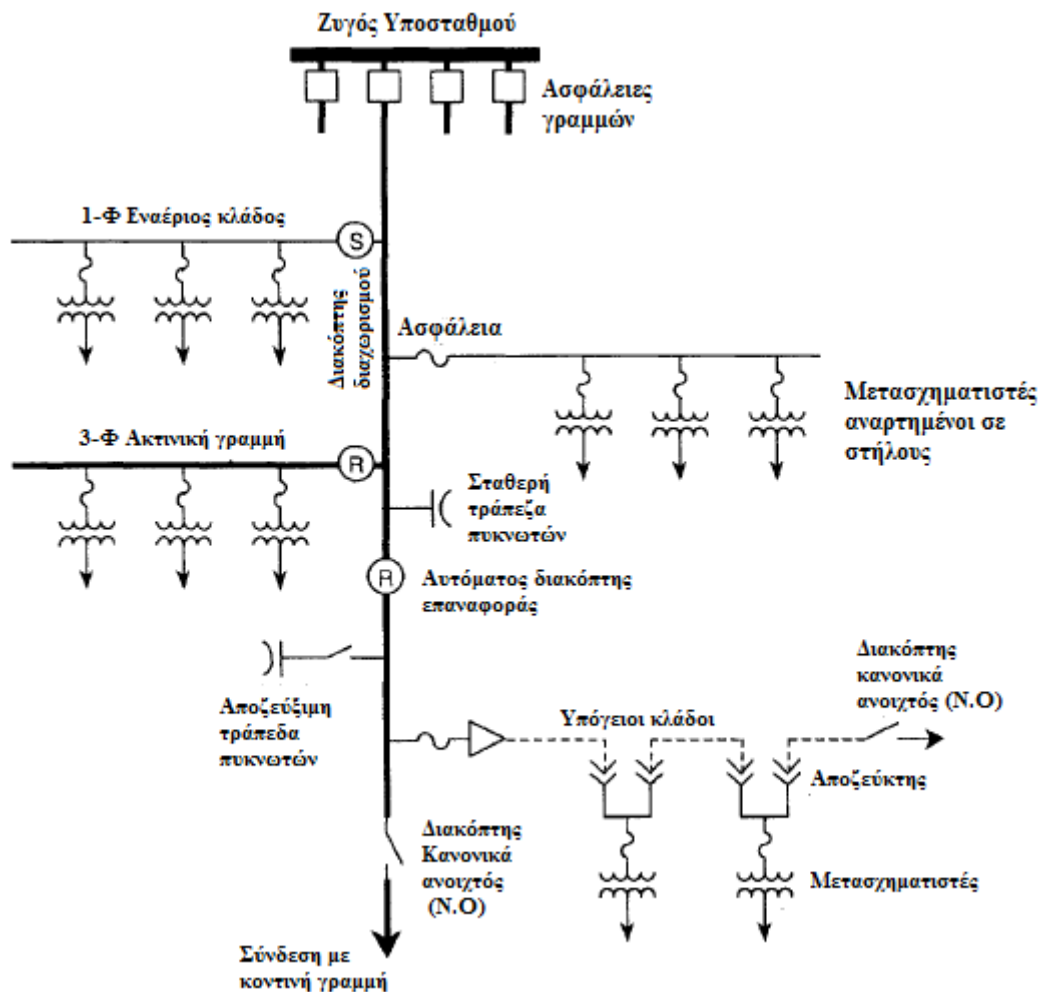
2.1 Πρωτεύουσα διανομή

Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί τρόποι ανάπτυξης των δικτύων πρωτεύουσας διανομής, οι περισσότεροι από αυτούς εμφανίζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Στα περισσότερα δίκτυα, τόσο στο μέρος της πρωτεύουσας διανομής αλλά όσο και στο επίπεδο της δευτερεύουσας διανομής παρουσιάζουν ακτινική (δενδροειδή) μορφή. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ανάπτυξης έναντι των υπολοίπων είναι:

- ευκολότερη ρύθμιση τάσης
- πιο απλά μέσα προστασίας
- μικρότερα σφαλματικά ρεύματα
- ευκολότερη πρόγνωση και έλεγχος της ροής ισχύος
- χαμηλότερο λειτουργικό κόστος
- συντηρησιμότητα

Η κατάλληλη επιλογή ανάπτυξης του δικτύου έχει άμεση σχέση με το μέγεθος της περιοχής κάλυψης και τη γεωγραφική πυκνότητα του φορτίου, τη διαμόρφωση των κεντρικών και των παραπλεύρων οδικών αρτηριών, τα εμπόδια που μπορεί να παρεμβάλλονται κατά μήκος της όδευσης των δικτύων, τη κρισιμότητα των φορτίων κάλυψης κ.τ.λ.

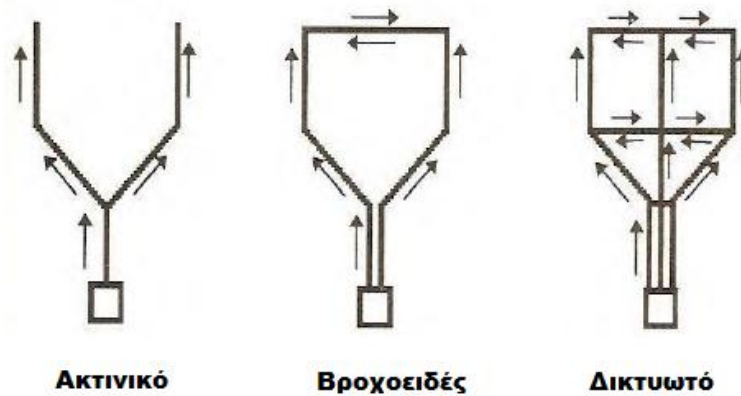
Τα εναέρια δίκτυα διανομής έχουν μικρότερα κόστη κατασκευής και συντήρησης σε σχέση με τα υπόγεια, απαιτούν όμως σημαντικό χώρο για την όδυσή τους και το γεγονός αυτό είναι σημαντικό μειονέκτημα, ιδιαίτερα στις πυκνοκατοικημένες περιοχές (αστικά κέντρα). Η χρήση των εναέριων δικτύων συνίσταται κυρίως στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από μικρές έως μέτριες πυκνότητες φορτίου, δηλαδή για τις αγροτικές και τις ημιαστικές περιοχές. Στα μεγάλα αστικά κέντρα τα δίκτυα διανομής συνήθως είναι εν μέρει εναέρια εν μέρει υπόγεια.



Σχήμα 2.1 - Τυπική γραμμή πρωτεύουσας διανομής με τα βασικά εξαρτήματα και χαρακτηριστικά

2.1.1 Κατηγορίες σχεδιασμού δικτύων πρωτεύουσας διανομής

Υπάρχουν τρεις κυρίαρχοι τρόποι σχεδιασμού ενός συστήματος διανομής που χρησιμοποιούν οι εταιρίες ηλεκτρισμού, καθένας από τους οποίους έχει διαφοροποιήσεις στη δημιουργία του. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, τα ακτινικά, τα βροχοειδή, και τα δικτυωτά συστήματα διαφέρουν στο πώς τα συστήματα τροφοδοσίας τακτοποιούνται και διασυνδέονται γύρω από ένα υποσταθμό. Τα βέλη δείχνουν τη διαδρομή της ηλεκτρικής ισχύος.

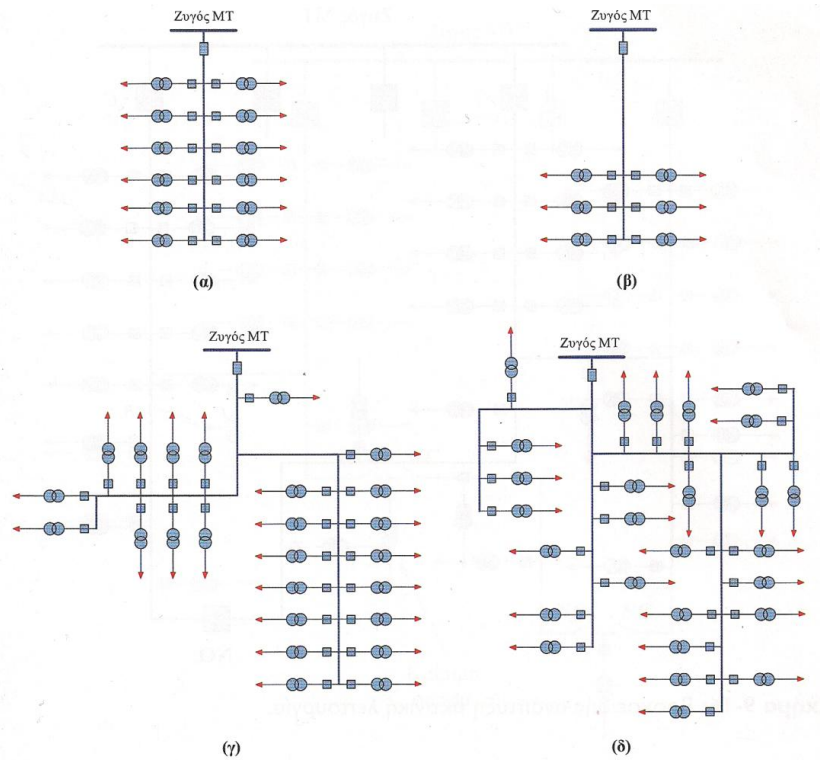


Σχήμα 2.2 - Ακτινικά, βροχοειδή και δικτυωτά συστήματα

2.1.1.1 Ακτινικά δίκτυα

Τα περισσότερα δίκτυα διανομής σχεδιάζονται ακτινικά, κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι ότι υπάρχει μόνο ένα μονοπάτι ανάμεσα σε καταναλωτή και υποσταθμό. Η ηλεκτρική ροή ρέει αποκλειστικά μακριά από τον υποσταθμό προς τους καταναλωτές μέσω μιας και μοναδικής διαδρομής, η οποία εάν διακοπεί έχει ως αποτέλεσμα την ολική απώλεια ενέργειας προς το καταναλωτή. Ο ακτινικός σχεδιασμός είναι ο πιο διαδεδομένος και αντιπροσωπεύει το 99% των δικτύων διανομής στη Βόρεια Αμερική. Η υπεροχή του βασίζεται σε δύο μεγάλα πλεονεκτήματα: είναι η οικονομικότερη λύση σε σχέση με τις άλλες δύο εναλλακτικές και είναι πιο απλά στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και στην λειτουργικότητά τους.

Τα ακτινικά δίκτυα χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στα εναέρια δίκτυα πρωτεύουσας διανομής. Στην ακτινική μορφή ανάπτυξης, ο κορμός της κύριας γραμμής διατρέχει τις κεντρικές οδικές αρτηρίες της περιοχής κάλυψης και οι διακλαδώσεις της κατά μήκος των παραπλεύρων οδών, σαρώνοντας με το τρόπο αυτό όλη την επιφάνεια κάλυψης. Ανάλογα με τη δόμηση της περιοχής και τη πυκνότητα φορτίου, οι συνηθέστερες μορφές ανάπτυξης των ακτινικών δικτύων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 - Τυπικές μορφές ακτινικών δικτύων (α) Απλή μορφή, (β) Υπεραστική μορφή, (γ) Δενδροειδής μορφή, (δ) Σύνθετη δενδροειδής μορφή

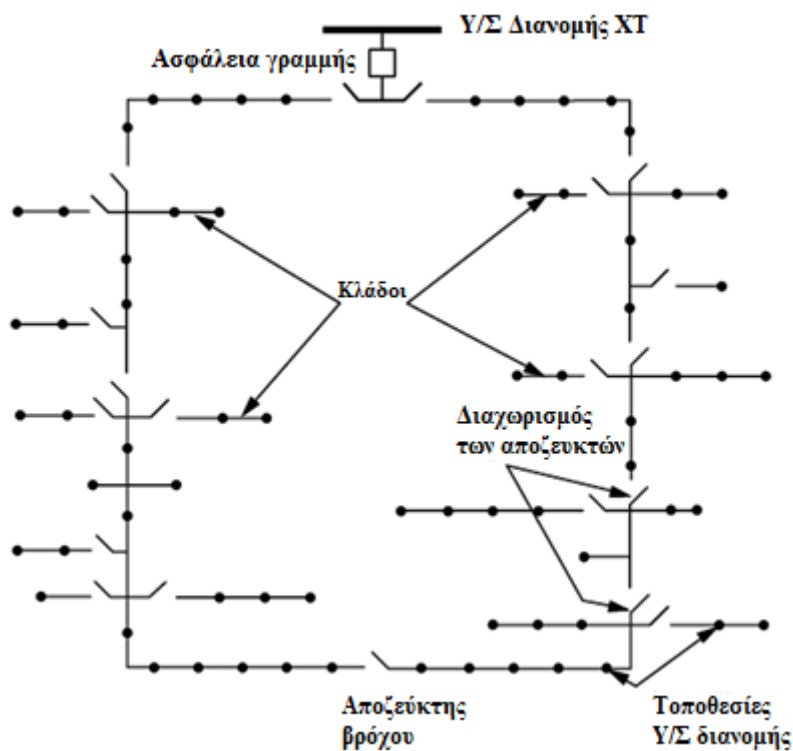
Η απλή ακτινική μορφή (σχήμα 2.3(α)) συναντάται στις ημιαστικές και στις αγροτικές περιοχές. Στις περιπτώσεις εκείνες που τα φορτία βρίσκονται σε απομακρυσμένη απόσταση από τον Υ/Σ διανομής (σχήμα 2.3(β)) η απλή ακτινική γραμμή χαρακτηρίζεται ως "υπεραστική" (express mainline). Στις πιο πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, η ανάπτυξη του δικτύου έχει δενδροειδή μορφή (σχήμα 2.3 (γ) και (δ)). Δηλαδή ο κορμός της κύριας γραμμής κατά μήκος της όδευσης του διακλαδίζεται (branched mainline), με αποτέλεσμα κάθε διακλάδωση του κύριου κορμού να εμφανίζει λειτουργικά χαρακτηριστικά απλής ακτινικής μορφής.

Επειδή η κατεύθυνση της ροής ενέργειας και του φορτίου είναι εύκολο να προσδιοριστεί, το επίπεδο της τάσης μπορεί να ευρεθεί με καλή ακρίβεια, οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα εξοπλισμού μπορούν να εξακριβωθούν επακριβώς, τα σφάλματα μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια και τα μέσα προστασίας (ασφάλειες και ηλεκτρονόμοι) μπορούν να συγχρονιστούν με απόλυτο τρόπο. Οι ρυθμιστές και οι

πυκνωτές μπορούν να μετρηθούν και να τοποθετηθούν σε κατάλληλα σημεία με απλές διαδικασίες.

2.1.1.2 Βροχοειδή δίκτυα

Μια εναλλακτική λύση για το ακτινικό σχεδιασμό είναι το βροχοειδές σύστημα ανάπτυξης (σχήμα 2.4) που αποτελείται από ένα σχέδιο διανομής με δύο μονοπάτια ανάμεσα στην πηγή ενέργειας (υποσταθμός) και κάθε καταναλωτή. Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε η παροχή να διατηρείται ανεξάρτητα απ' το που βρίσκεται ένα "ανοιχτό" σημείο πάνω στο βρόχο. Λόγω αυτής της απαίτησης (είτε λειτουργεί ακτινικά, με ένα ανοιχτό σημείο σε κάθε βρόχο, είτε με κλειστούς βρόχους), η βασική χωρητικότητα του εξοπλισμού τροφοδοσίας που απαιτείται δεν μεταβάλλεται.



Σχήμα 2.4 - Βροχοειδές δίκτυο πρωτεύουσας διανομής

Ένα σύστημα βροχοειδούς τροφοδοσίας είναι ελάχιστα πιο περίπλοκο από ένα ακτινικό, καθώς η ενέργεια συνήθως ρέει από δύο πλευρές προς τη μέση και σε όλες τις περιπτώσεις μπορεί να πάρει μόνο μια από τις δύο οδούς. Ομοίως και για τη πτώση τάσης το μέγεθος και το προστατευτικό εξοπλισμό. Αλλά εάν σχεδιαστεί έτσι και αν η προστασία (ηλεκτρονόμοι διακοπής και οι αναλυτές τμημάτων) επίσης

κατασκευαστεί βάσει σωστών προδιαγραφών, το βροχοειδές σύστημα είναι πιο αξιόπιστο από τα ακτινικά δίκτυα. Η παροχή υπηρεσιών δεν θα διακοπεί στην πλειοψηφία των πελατών οποτεδήποτε ένα τμήμα βγει εκτός, επειδή δεν υπάρχει μονόπλευρη κατεύθυνση σε κανένα βρόχο.

Το κύριο μειονέκτημα των βροχοειδών δικτύων είναι η χωρητικότητα και το κόστος. Ένας βρόχος πρέπει να εκπληρώνει όλες τις απαιτήσεις ενέργειας και πτώσεις τάσης όταν τροφοδοτείται από μόνο μια οδό, όχι και από τις δύο. Απαιτεί επιπλέον χωρητικότητα σε κάθε οδό, και ο αγωγός πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να χειριστεί τις ανάγκες ενέργειας και πτώσης τάσης ολόκληρης της τροφοδοσίας εάν τροφοδοτείται από οποιαδήποτε οδό. Αυτό κάνει το κυκλικό σύστημα έμφυτα πιο αξιόπιστο από ένα ακτινικό σύστημα, αλλά ο μεγάλος αγωγός και η επιπλέον χωρητικότητα αυξάνουν το κόστος.

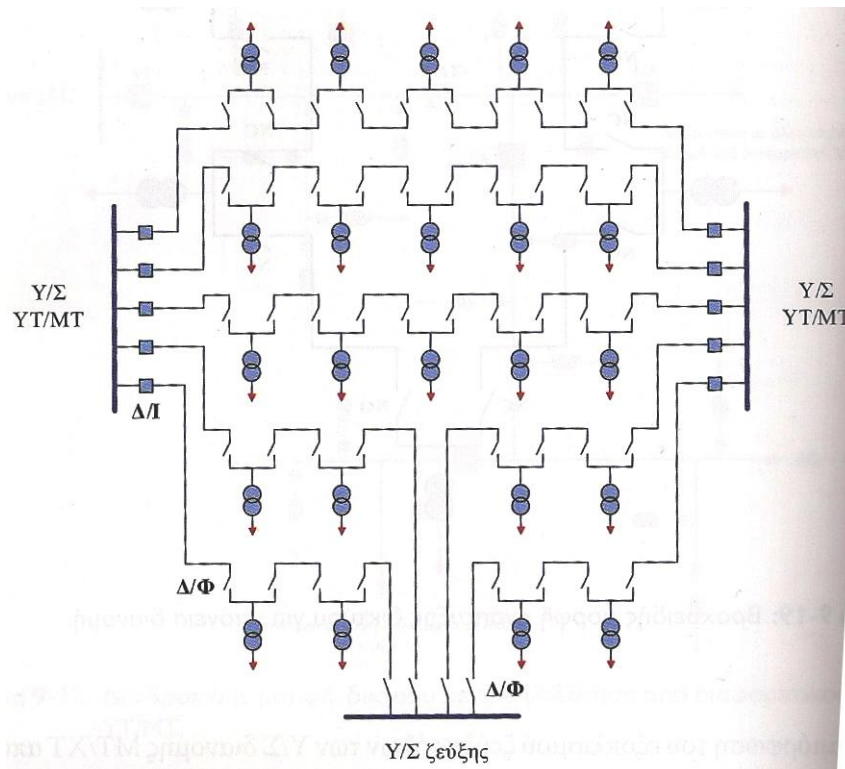
2.1.1.3 Δικτυωτά συστήματα

Τα δικτυωτά συστήματα διανομής είναι τα πιο περίπλοκα, τα πιο αξιόπιστα και σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις και το πιο οικονομικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα δίκτυο που περιλαμβάνει πολλά μονοπάτια ανάμεσα σε όλα τα σημεία του (σχήμα 2.5). Η ροή ενέργειας ανάμεσα σε οποιαδήποτε δύο σημεία συνήθως χωρίζεται σε διαφορετικά μονοπάτια και αν εμφανιστεί βλάβη, το σύστημα άμεσα και αυτόματα αλλάζει την κατεύθυνση ροής.

Σπανίως ένα δίκτυο διανομής περιλαμβάνει σχεδιασμό βασικού επιπέδου τάσης, στο οποίο όλοι ή οι περισσότεροι διακόπτες ανάμεσα στους τροφοδότες είναι κλειστοί έτσι ώστε το σύστημα τροφοδοσίας να ενώνεται ανάμεσα στους υποσταθμούς. Αυτό συμβαίνει σπάνια επειδή έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα δαπανηρό και χωρίς άμεσα αποτελέσματα. Ένα δίκτυο διανομής σχεδόν πάντα περιλαμβάνει συμπλέγματα ακτινικών τροφοδοσιών και ένα δευτερεύον δικτυωτό σύστημα (ένα δικτυωτό πλέγμα από ηλεκτρικά ισχυρούς αγωγούς που συνδέουν μαζί τους καταναλωτές σε βασική τάση χρησιμοποίησης).

Τα δικτυωτά συστήματα είναι πολύ πιο ακριβά από τα ακτινικά συστήματα διανομής, αλλά όχι πάντα. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου η πυκνότητα φορτίου είναι

πολύ υψηλή, η διανομή πρέπει να τοποθετηθεί υπόγεια με συνέπεια οι επισκευές και η συντήρηση να είναι επίπονες λόγω της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα αυτής της μορφής να κοστίζουν περισσότερο από τα βροχοειδή. Τα δικτυωτά συστήματα απαιτούν μόλις μια μικρή ποσότητα χωρητικής αγωγιμότητας, μεγαλύτερη από ένα βροχοειδές σύστημα.



Σχήμα 2.5 - Δικτυακή μορφή ανάπτυξης δικτύου υπόγειας διανομής.

Το κύριο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από όλες τις υπόλοιπες μορφές ανάπτυξης δικτύων διανομής και έτσι είναι πολύ δύσκολα στη σχεδίαση και την ανάπτυξή τους. Επειδή δεν υπάρχει μια μονομερής κατεύθυνση ανάμεσα στις μονάδες του εξοπλισμού όπως στα ακτινικά δίκτυα, το φορτίο δεν μπορεί να υπολογιστεί με την απλή πρόσθεση των καταναλωτών που βρίσκονται υπό φορτίο, ούτε μπορεί να ευρεθεί η κατεύθυνση της ενεργειακής ροής. Το φορτία, η ροή ενέργειας, τα σφαλματικά ρεύματα και η προστασία πρέπει να καθορίζονται από ειδικούς τεχνικούς του δικτύου. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι απαιτούνται πολύπλοκοι υπολογισμοί, καθώς ένα τεράστιο δίκτυο διανομής μπορεί να αποτελείται από 50.000 ή περισσότερους κόμβους.

2.2 Εξοπλισμός των συστημάτων διανομής

Ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χιλιάδων (ή και εκατομμυρίων) στοιχείων που λειτουργούν όλα μαζί με κοινό στόχο τη μεταφορά ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής μέχρι τον τελικό καταναλωτή είναι μια πολυσύνθετη κατασκευή. Κάθε μονάδα εξοπλισμού παίζει ένα μικρό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος, όμως είναι αναγκαία έτσι ώστε να προσφέρει ικανοποιητικές υπηρεσίες σε έναν ή περισσότερους καταναλωτές, αλλιώς δεν θα συμπεριλαμβανόταν στο σύστημα.

Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύπλοκος γιατί κάθε μονάδα του εξοπλισμού επηρεάζει την ηλεκτρική συμπεριφορά των γειτονικών της μονάδων και πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά σε συνεργασία με το υπόλοιπο σύστημα κάτω από μια πληθώρα διαφορετικών συνθηκών, ανεξάρτητα από ενδεχόμενες αλλαγές στην κανονική μορφή των φορτίων ή στην κατάσταση του γειτονικού εξοπλισμού.

Οι κυριότεροι τύποι εξοπλισμού των δικτύων διανομής είναι:

- οι γραμμές διανομής (αγωγοί)
- οι μετασχηματιστές που αλλάζουν τα επίπεδα τάσης της μεταφερόμενης ενέργειας
- τα μέσα προστασίας που προσφέρουν ασφάλεια και αδιάλειπτη ακόμα και σε περίπτωση βλάβης
- ο εξοπλισμός ρύθμισης τάσης που χρησιμοποιείται για να διατηρεί τη τάση μέσα σε επιτρεπτά όρια καθώς το φορτίο μεταβάλλεται. (περισσότερα στο 4ο Κεφάλαιο)

2.2.1 Μετασχηματιστές

Στο πυρήνα κάθε εναλλασσόμενου συστήματος ενέργειας βρίσκονται οι μετασχηματιστές (Μ/Σ), οι οποίοι αλλάζουν τα επίπεδα τάσης και ρεύματος της ενέργειας, διατηρώντας την ίδια συνολική ενεργειακή ροή.

Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται βάσει προκαθορισμένων προδιαγραφών και αγοράζονται σε μεγάλες ποσότητες. Οι μετασχηματιστές αντιμετωπίζουν δύο τύπους ηλεκτρικών απωλειών:

1. Τις απώλειες κενού φορτίου (απώλειες πυρήνα ή σιδήρου)
2. και τις απώλειες πλήρους φορτίου

Οι απώλειες κενού φορτίου είναι ηλεκτρικές απώλειες σχετιζόμενες με τη λειτουργία του Μ/Σ (λόγω της δημιουργίας μαγνητικού πεδίου μέσα στο πυρήνα του) και εμφανίζονται φυσικά επειδή ο μετασχηματιστής συνδέεται με μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι συνεχής ανεξάρτητα απ' το αν η ροή μέσω του μετασχηματιστή είναι μικρή ή μεγάλη. Οι απώλειες πυρήνα είναι τυπικά μικρότερες από το 1% της ονομαστικής τιμής του Μ/Σ. Μόνο όταν ο μετασχηματιστής υπερφορτωθεί σε σημείο πολύ πιο πέρα από το όριο του, θα αλλάξουν οι απώλειες κενού, λόγω μαγνητικού κορεσμού στο πυρήνα.

Οι μετασχηματιστές είναι διαθέσιμοι σε ποικίλα μεγέθη και χωρητικότητες. Χρησιμοποιούνται στα ενεργειακά συστήματα σε τρεις κύριες περιοχές:

- για την ανύψωση της τάσης σε ΥΤ, στα εργοστάσια παραγωγής (20kV/150kV ή 20kV/400kV)
- για τη μεταφορά της ενέργειας (150kV/20kV ή 400kV/20kV)
- για τον υποβιβασμό της τάσης και τη διανομή της ενέργεια στους καταναλωτές (20kV/400V).

Η αναπτυσσόμενη θερμότητα στο εσωτερικό των τυλιγμάτων των Μ/Σ αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για το προσδιορισμό των μέγιστων ορίων φόρτισης. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει καθοριστική επίδραση στη διάρκεια ζωής του Μ/Σ, λόγω της προκαλούμενης φθοράς των τυλιγμάτων. Άρα, η απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας κατά την υπό φορτίο λειτουργία είναι βασικός παράγοντας για την αποδεκτή και ασφαλή λειτουργία του Μ/Σ. Ανάλογα με το μέσο του οποίου πραγματοποιείται η απαγωγή θερμότητας στο περιβάλλοντα χώρο, οι Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ διακρίνονται (σχήμα 2.6) σε τύπου ελαίου (oil-filled) και ξηρού τύπου (dry-filled).



Σχήμα 2.6 - Τύποι μετασχηματιστών ισχύος α) ξηρού τύπου, β) τύπου ελαίου

Για μεγάλα ποσά ισχύος και για υψηλές τάσης, χρησιμοποιούνται κατά αποκλειστικότητα οι Μ/Σ τύπου ελαίου. Σε στεγασμένους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ η χρήση Μ/Σ ξηρού τύπου κερδίζει συνεχώς και περισσότερο έδαφος. Οι λόγοι είναι πως για την ίδια ισχύ οι Μ/Σ ξηρού τύπου σε σύγκριση με τους ελαίου καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο, απαιτούν λιγότερη συντήρηση, είναι φιλικότεροι στο περιβάλλον και επιπλέον ενδείκνυται η χρήση τους σε εκρηκτικά περιβάλλοντα.

2.2.2 Γραμμές διανομής

Οι γραμμές διανομής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

α) Στις γραμμές μέσης τάσης: Είναι οι γραμμές οι οποίες πραγματοποιούν την πρώτη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος (πρωτεύουσα διανομή) που παραλαμβάνουν από τις γραμμές μεταφοράς προς τους τοπικούς υποσταθμούς.

β) Στις γραμμές χαμηλής τάσης: Είναι οι γραμμές οι οποίες πραγματοποιούν τη δεύτερη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος (δευτερεύουσα διανομή) που παραλαμβάνουν από τους υποσταθμούς διανομής χαμηλής τάσης προς τους καταναλωτές.

Το ποσό της ισχύος και η απόσταση μεταφοράς της σε μία γραμμή διανομής είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα μίας γραμμής μεταφοράς.

Στα δίκτυα διανομής, εκτός από τους αγωγούς των τριών φάσεων υπάρχει και αγωγός ουδέτερος, επειδή προβλέπεται η δυνατότητα πολικής τάσης (380V) και φασικής (220V). Ο ουδέτερος ξεκινάει από τους μετασχηματιστές διανομής και αποτελεί το κοινό σημείο της συνδεσμολογίας αστέρα στο δευτερεύον τους.

Οι αγωγοί πρέπει να αντέχουν στην μηχανική και θερμική καταπόνηση και στην περίπτωση της μέσης τάσης να μην προκαλούν απώλειες Corona. Η πεδιακή ένταση πέραν της οποίας αρχίζει η εκκένωση Corona, εξαρτάται από τη διάμετρο του αγωγού (21 - 27 kV/cm σε ενεργό τιμή).

Σαν αγωγούς χρησιμοποιούμε πολύκλινα συρματόσχοινα, για λόγους ευκαμψίας. Τα κυριότερα υλικά των οποίων είναι:

- **Χαλκός (Cu)**, εφελκυσμένος εν ψυχρώ. Ο χαλκός έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και καλή μηχανική αντοχή. Η αγωγιμότητα του μειώνεται όταν έχει ξένες προσμίξεις και όταν κατεργαστεί εν ψυχρώ το οποίο του δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Ένα άλλο πλεονέκτημα του είναι πως δεν διαβρώνεται εύκολα και για αυτό και χρησιμοποιείται σε δίκτυα που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα.
- **Αλουμίνιο (Al)**, το οποίο είναι καθαρό αλουμίνιο 99,9% και λέγεται αλουμίνιο ηλεκτροτεχνίας (E-Al) ή το κράμα αλουμινίου Aldrey με περίπου εκατοστιαία σύνθεση: 0,3-0,5Mg, 0,4-0,7 Si, 0,3 Fe και το υπόλοιπο αλουμίνιο. Το αλουμίνιο λόγω του μικρού του κόστους και βάρους αντικαθιστά το χαλκό στην κατασκευή αγωγών εναέριων δικτύων. Μειονεκτεί όμως στο γεγονός ότι έχει το 60% περίπου της αγωγιμότητας του χαλκού και το 50% της διηλεκτρικής αντοχής του. Με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες το αλουμίνιο οξειδώνεται επιφανειακά και έτσι προστατεύει τον αγωγό από περεταίρω οξείδωση.
- **Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου-χάλυβα (Al/St)**. Έχουν και την ονομασία Aluminum Coated Steel Reinforced Conductors ή ACSR αγωγοί. Τα μειονεκτήματα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζονται με τους αγωγούς ACSR. Έχουν στο κέντρο τους κλώνους γαλβανισμένου χάλυβα όπως

φαίνεται στο σχήμα 2.7. Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο το μεγαλύτερο μέρος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο, δηλαδή το ρεύμα μέσα στο χάλυβα είναι αμελητέο. Οι αγωγοί αυτοί έχουν περίπου 50% μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20% ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό.

Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα (π.χ φωσφορούχος ορείχαλκος, γαλβανισμένος χάλυβας κ.λ.π). Στη χαμηλή τάση εκσυγχρονίζονται πλέον τα δίκτυα μέσω συνεστραμμένων καλωδίων.



Σχήμα 2.7 - Αγωγός ACSR

Το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι PVC (χλωριούχο πολυβινύλιο), PE (πολυαιθυλένιο), XLPE (δικτυωτό πολυαιθυλένιο), EPR (ελαστικό), MIND (εμποτισμένο χαρτί). Η θωράκιση αποτελείται από σύρματα ή ταινίες χαλκού. Τα σύρματα περιτυλίγονται ελικοειδώς με βήμα σταθερής φοράς ή εναλλασσόμενης (τύπου CEANDER). Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί για θωράκιση να χρησιμοποιηθεί μολύβδινος μανδύας. Η προστασία του καλωδίου από μηχανικές κακώσεις επιτυγχάνεται με τον οπλισμό αποτελούμενο από ατσαλοσύρματα ή σιδηροταινίες. Εάν τα καλώδια είναι μονοπολικά και προορίζονται για χρήση με εναλλασσόμενο ρεύμα τότε ο οπλισμός κατασκευάζεται με μη μαγνητικό υλικό (χαλκός, αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι, κ.τ.λ.). Ο εξωτερικός μανδύας αποτελείται από PVC ή PE ή XLPE ή νεοπρένιο κ.α. Τα καλώδια αυτά κατασκευάζονται και με ειδικές ιδιότητες ως προς την συμπεριφορά στην φωτιά όπως επιβράδυνση της μετάδοσης της φλόγας (flame retardant), χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές τοξικών αερίων, μειωμένης εκπομπής καπνών (LSF,LS 0 H, κ.α.).

2.2.3 Μέσα προστασίας

Όταν ο ηλεκτρικός εξοπλισμός αποτύχει (π.χ αν μια γραμμή κοπεί και πέσει από το στύλο στο έδαφος λόγω καταιγίδας), η φυσιολογική συνέχεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας διακόπτεται. Ο εξοπλισμός προστασίας είναι σχεδιασμένος να εντοπίζει τέτοιες καταστάσεις και να απομονώνει τον εξοπλισμό που τις έχει υποστεί, ακόμα και αν αυτό σημαίνει την διακοπή της ροής ενέργειας σε μερικούς καταναλωτές.

Τα μέσα προστασίας των δικτύων διανομής αποβλέπουν σε τρεις κύριους στόχους, που καθορίζουν και τον τρόπο διαμόρφωσής τους:

- Την πρόληψη ή τουλάχιστον τον περιορισμό της βλάβης των στοιχείων του δικτύου αν σε αυτό συμβεί κάποιο σφάλμα. Εφ' όσον η βλάβη δεν εκδηλωθεί τότε επιδιώκεται:
- Να αποφευχθεί κατά το δυνατόν η δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων για πρόσωπα (ηλεκτροπληξία) και για αντικείμενα (πυρκαγιά).
- Να περιοριστούν στο ελάχιστο οι επιπτώσεις στο υπόλοιπο σύστημα και ιδιαίτερα να ελαχιστοποιηθεί η διακοπή της τροφοδοσίας.

Οι προστασίες του δικτύου διανομής διακρίνονται στις προστασίες υπερεντάσεων και στις προστασίες υπερτάσεων. Στα δίκτυα πρωτεύουσας διανομής (μέση τάση) τα χρησιμοποιούμενα μέσα προστασίας είναι:

- Ηλεκτρονόμοι προστασίας
- Επαναληπτικοί διακόπτες ισχύος με ηλεκτρονόμο υπερέντασης
- Διακόπτες αυτόματης επαναφοράς
- Διακόπτες απομόνωσης
- Ασφάλειες
- Απαγωγείς υπερτάσεων

2.2.3.1 Ηλεκτρονόμοι προστασίας

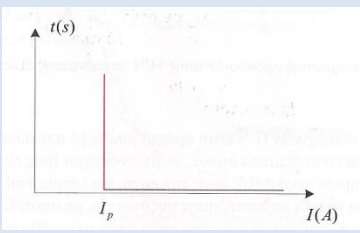
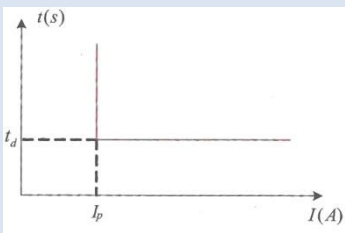

Οι ηλεκτρονόμοι (H/N) προστασίας δεν ανήκουν στη κλασσική κατηγορία ηλεκτρονόμων, οι οποίοι δεχόμενοι κάποιο ηλεκτρικό σήμα ανοιγοκλείνουν τις επαφές τους και επιφέρουν μεταβολές στις συνδεσμολογίες διαφόρων κυκλωμάτων, αλλά και στην κατηγορία των κυκλωμάτων που επιτηρούν κατά φυσικό μέγεθος (π.χ τάση, ρεύμα) και οι οποίοι ενεργοποιούνται μετά την υπέρβαση είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω των προκαθορισμένων ορίων. Οι H/N προστασίας αποτελούν τις βασικές συνιστώσες των συστημάτων προστασίας.

Ανεξάρτητα από το είδος της τεχνολογίας και το τρόπο κατασκευής τους, το βασικό πρόβλημα έγκειται στην ορθή επιλογή της ρύθμισης, έτσι ώστε να ανταποκριθούν με το βέλτιστο τρόπο, στον έγκαιρο εντοπισμό και στην ταχεία απομόνωση του σφάλματος, στη ζώνη προστασίας που καλύπτουν και επιτηρούν. Η βασική επιδίωξη είναι (στην περίπτωση σφάλματος οποιουδήποτε εντός μιας ζώνης προστασίας) να διεγείρονται μόνο τα μέσα προστασίας και διακοπής της συγκεκριμένης ζώνης και όχι των παρακείμενων ζωνών.

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, τα ρεύματα στα διάφορα τμήματα του δικτύου εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα κατά την κανονική λειτουργία. Τα ρεύματα αυτά στις συνηθέστερες περιπτώσεις είναι σε μέγεθος 5-20 φορές μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα ρεύματα υπερφόρτισης.

Οι **H/N υπερέντασης** αποτελούν βασική συνιστώσα των μέσων προστασίας των δικτύων διανομής. Ανιχνεύοντας την υπερένταση της γραμμής που επιτηρούν, ενεργοποιούνται και δίνουν εντολή στο μέσο διακοπής για την απομόνωσή της. Διαθέτουν δύο βασικές ρυθμίσεις, η πρώτη αφορά στην τιμή της έντασης της διέγερσής τους (pick-up current) και η δεύτερη στην χρονοκαθυστέρηση της εντολής μετά την ενεργοποίησή τους (time delay).

Οι H/N υπερέντασης, ανάλογα με την μορφή της χαρακτηριστικής χρόνου-έντασης, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

H/N Στιγμιαίου χρόνου	H/N Ορισμένου χρόνου	H/N Αντίστροφου χρόνου
		
<ul style="list-style-type: none"> • Ενεργοποιούνται στιγμιαία, όταν το ρεύμα που επιτηρούν ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή. • Η διαβάθμιση μεταξύ των H/N της συγκεκριμένης κατηγορίας βασίζεται στο γεγονός ότι τα μεγέθη των σφαλματικών ρευμάτων διαφοροποιούνται στα διάφορα σημεία όδευσης, λόγω των σύνθετων αντιστάσεων του δικτύου. • Δηλαδή ο H/N που βρίσκεται πιο μακριά από τη πηγή ενεργοποιείται με μικρότερο ρεύμα διέγερσης. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενεργοποιούνται όταν το ρεύμα ξεπεράσει την τιμή του ρεύματος διέγερσης για χρονικό διάστημα ίσο με τη προκαθορισμένη τιμή του χρόνου ρύθμισης. • Η λειτουργία του H/N ορισμένου χρόνου είναι ανεξάρτητη του ρεύματος, όταν το ρεύμα επιτήρησης του H/N είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα διέγερσης. • Οι χρόνοι καθυστέρησης αυξάνονται όσο πλησιάζουμε από το σημείο σφάλματος στη πηγή. • Επαρκές περιθώριο ασφαλείας της τάξεως 0,4 - 0,6 sec. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ο χρόνος ενεργοποίησης μειώνεται με την αύξηση του μέγεθος της υπερέντασης. • Βάσει διεθνών πιστοποιήσεων διακρίνονται σε πολύ αντίστροφου χρόνου (very inverse time) και εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου (extremely inverse time). • Δραστική μείωση του σφάλματος πλησίον της πηγής ως αποτέλεσμα της συνδυαστικής ρύθμισης

Πίνακας 2.1 - Κατηγορίες ηλεκτρονόμων υπερέντασης

2.2.3.2 Επαναληπτικοί διακόπτες ισχύος με ηλεκτρονόμο υπερέντασης

Οι διακόπτες ισχύος με ηλεκτρονόμο (H/N) υπερέντασης, εκτός από τους συνήθεις χειρισμούς ζεύξης/απόζευξης, αποτελούν παράλληλα και μέσα προστασία, γιατί μέσω αυτών επιτυγχάνεται η διακοπή των βραχυκυκλωμάτων και η απομόνωση του σφάλματος από το υπόλοιπο δίκτυο. Η ικανότητα διακοπής του διακόπτη ισχύος (Δ/I) θα πρέπει να είναι ίση με την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου στη θέση της εγκατάστασής του.

Η ανίχνευση του σφάλματος και η εντολή για το άνοιγμα του διακόπτη γίνεται με τον ηλεκτρονόμο υπερέντασης. Οι ηλεκτρονόμοι διεγείρονται μόλις η ένταση του ρεύματος της γραμμής την οποία επιτηρούν ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή και μετά από ορισμένη χρονική καθυστέρηση κλείνουν την αντίστοιχη επαφή τους.

2.2.3.3 Διακόπτες αυτόματης επαναφοράς

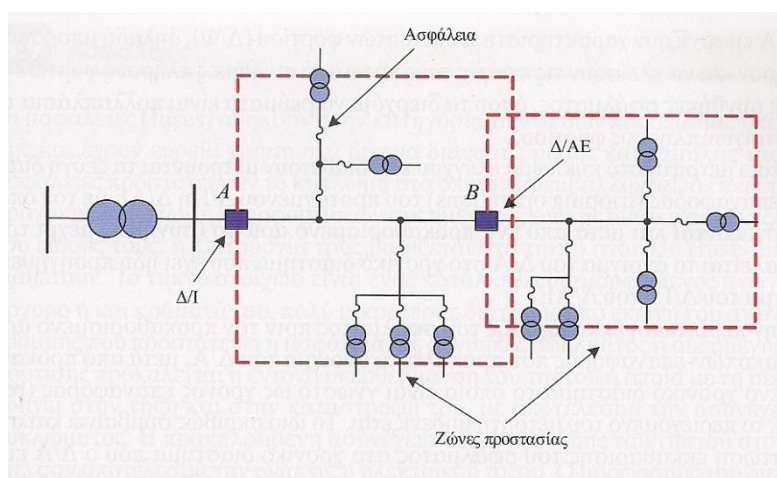
Σε αναλογία με τους Δ/I με H/N υπερέντασης και οι αυτόματοι διακόπτες επαναφοράς (Δ/AE) αποτελούν συσκευές προστασίας από υπερεντάσεις στα εναέρια δίκτυα διανομής, με τη διαφορά ότι δεν ελέγχονται από ξεχωριστούς H/N και αποτελούν αυτοελεγχόμενες συσκευές. Μέσω του ελεγκτή τους, στο οποίο εμπεριέχονται και οι H/N του διακόπτη, εξασφαλίζεται η δυνατότητα πραγματοποίησης καθορισμένων κύκλων διακοπής-επαναφοράς, με δυνατότητες χειρισμού από απόσταση αλλά και χειροκίνητα. Οι Δ/AE διατίθενται είτε ως τριφασικοί είτε ως μονοφασικοί. Οι τριφασικοί μπορεί να είναι τύπου λαδιού ή και ξηρού τύπου. Οι Δ/AE ξηρού τύπου είναι πιο σύγχρονοι, μικρότεροι σε όγκο και απαιτούν την λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τους αντίστοιχους Δ/AE λαδιού.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα χρήσης μονοφασικών Δ/AE είναι ότι στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος λειτουργεί μόνο ο αντίστοιχος Δ/AE της πληγείσας φάσης και δεν διαταράσσεται η παροχή τροφοδότησης των δύο υπόλοιπων υγιών φάσεων.

Η ικανότητα διακοπής ρευμάτων βραχυκύκλωσης των Δ/AE είναι μικρότερη σε σχέση με τους Δ/I και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσες βαθμίδες προστασίας σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος της ακτινικής γραμμής, περιορίζοντας έτσι το βαθμό έκθεσης του εξοπλισμού του κεντρικού υποσταθμού στα παροδικά σφάλματα. Η προστασία στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής, όπου η ισχύς βραχυκύκλωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερη, εξασφαλίζεται μέσω Δ/I με H/N υπερέντασης (σχήμα 2.8).

Πρέπει να δοθεί προσοχή επίσης στους χρόνους αποδιέγερσης των H/N του Δ/I , οι οποίοι πρέπει να είναι αρκετά μικροί, για να αποφεύγονται εσφαλμένες

ενεργοποιήσεις του Δ/I κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των κύκλων λειτουργίας του Δ/AE , για την αποκατάσταση κυρίως των ημιμόνιμων και μόνιμων σφαλμάτων.



Σχήμα 2.8 - Μέσα προστασίας ακτινικής γραμμής με Δ/I και Δ/AE

2.2.3.4 Διακόπτες απομόνωσης

Οι διακόπτες απομόνωσης (Δ/A) αποτελούν συσκευές προστασίας στα εναέρια δίκτυα διανομής έναντι υπερτάσεων και υποστηρίζονται πάντοτε από Δ/I ή Δ/AE προηγούμενων ζωνών προστασίας. Οι Δ/A είναι τύπου ελαίου και σε αναλογία με τους Δ/AE μπορεί να είναι τριφασικοί ή μονοφασικοί.

Οι Δ/A εμφανίζουν χαρακτηριστικά διακοπών φορτίου, δηλαδή μπορούν να ανοίξουν και να κλείσουν τις επαφές τους κάτω από συνθήκες πλήρους φορτίου και όχι σε συνθήκες σφάλματος, όπου τα διερχόμενα ρεύματα είναι πολλαπλάσια των αντιστοίχων πλήρους φορτίου.

Μέσω του μετρητή στο κύκλωμα ελέγχου που διαθέτουν μετρούνται τα ζεύγη διακοπών-επαναφοράς του προταγμένου Δ/I ή Δ/AE με τον οποίο συνεργάζονται και μετά από ένα προκαθορισμένο αριθμό (συνήθως μέχρι τρία) προκαλείται το άνοιγμα του Δ/A στο χρονικό διάστημα που έχει ήδη προηγηθεί το άνοιγμα του Δ/I ή του Δ/AE .

2.2.3.5 Ασφάλειες

Οι ασφάλειες ΜΤ χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν ένα κύκλωμα ΜΤ όταν σε αυτό υπάρχει βραχυκύκλωμα αλλά και υπερφόρτιση που διαρκεί αρκετή ώρα. Οι ασφάλειες ΜΤ χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Ασφάλειες σκόνης**

Οι ασφάλειες σκόνης αποτελούνται από ένα κύλινδρο από πορσελάνη μέσα στον οποίον υπάρχει το τηκτό και η σκόνη χαλαζία. Το τηκτό, που είναι άργυρος, αλλά και κράματά του, είναι τυλιγμένο γύρω από ένα κεραμικό υλικό. Η σκόνη βρίσκεται γύρω από τον κεραμικό κύλινδρο και σκεπάζει το τηκτό.

Οι ασφάλειες αυτές μειώνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαιτίας της σκόνης χαλαζία. Η σκόνη βοηθά στη σβέση του τόξου, που δημιουργείται με την τήξη του αγωγού, λόγω της ψυκτικής της ικανότητας. Ταυτόχρονα όμως δημιουργείται και μια μεγάλη αντίσταση με αποτέλεσμα να μειώνεται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έτσι στην πραγματικότητα το ρεύμα αυτό παίρνει χαμηλότερη τιμή από αυτή που είχε υπολογιστεί αρχικά με αποτέλεσμα να υπάρχει μια επιπλέον προστασία του εξοπλισμού σε μια εγκατάσταση. Η ασφάλεια αυτή είναι ακριβότερη από την ασφάλεια εκτόνωσης, και χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 2.9 - Βασικά μέρη ασφάλειας χαλαζία

- **Ασφάλειες εκτόνωσης**

Η ασφάλεια εκτόνωσης είναι ένας μονωτικός κυλινδρικός σωλήνας μέσα στον οποίο βρίσκεται ένας αγωγός, το τηκτό. Το τηκτό είναι τανυσμένο με ελατήριο ενώ ο σωλήνας είναι ανοιχτός πάνω και κάτω. Εσωτερικά του κυλινδρικού σωλήνα υπάρχει

ένα στρώμα από βορικό οξύ. Σε περίπτωση σφάλματος κατά την τήξη του αγωγού το στρώμα του βορικού οξέος βοηθάει στην σβέση του τόξου που δημιουργείται. Το τόξο έρχεται σε επαφή με το βορικό οξύ και δημιουργούνται ατμοί, που ψύχουν το τόξο, έτσι αυτό σταδιακά σβήνει.

Κατά τη διάρκεια της σβέσης όμως δημιουργούνται τοξικά αέρια, τα οποία εκλύονται στο χώρο που βρίσκεται η ασφάλεια, αφού ο σωλήνας είναι ανοιχτός. Γι' αυτό τον λόγο δεν επιτρέπεται η χρήση της συγκεκριμένης ασφάλειας σε κλειστούς χώρους αλλά χρησιμοποιούνται μόνο σε εξωτερικούς χώρους, σε υπαίθριες εγκαταστάσεις. Οι ασφάλειες αυτές δεν μειώνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως οι ασφάλειες σκόνης, Παραδείγματος χάρη χρησιμοποιούνται για προστασία Μ/Σ υποβιβασμού της τάσης 20/0,4 kV στα εναέρια δίκτυα διανομής, όπου όλη η εγκατάσταση είναι υπαίθρια πάνω σε στύλους της Δ.Ε.Η. Οι ασφάλειες εκτόνωσης είναι πολύ πιο φθηνές σε σχέση με τις ασφάλειες σκόνης γι' αυτό και προτιμούνται σε υπαίθριες εγκαταστάσεις.

Οι ασφάλειες εκτόνωσης χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

- α) Ασφάλειες εκτόνωσης ταχείας τήξης (χαρακτηρίζονται με το γράμμα T)
- β) Ασφάλειες εκτόνωσης βραδείας τήξης (χαρακτηρίζονται με το γράμμα K12)

Επίσης η ασφάλεια εκτόνωσης, σε συνδυασμό με την βάση, στην οποία τοποθετείται, μπορεί να λειτουργήσει και ως αποζεύκτης. Σε περίπτωση σφάλματος και τήξης της ασφάλειας, η ασφάλεια αποσυνδέεται από το ένα άκρο της βάσης, και έτσι μπορεί κάποιος από μακριά να διαπιστώσει ότι η ασφάλεια έχει καεί και το κύκλωμα βρίσκεται εκτός τάσης (σχήμα 2.10β). Έτσι χρησιμοποιείται ο όρος ασφαλειοαποζεύκτης.



Σχήμα 2.10 - α) Ασφάλειας εκτόνωσης σε κατάσταση λειτουργίας, β) Ασφάλεια εκτόνωσης καμένη και αποσυνδεδεμένη από τη βάση

2.2.3.5 Απαγωγείς υπερτάσεων

Η προστασία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων από τις υπερτάσεις αποσκοπεί αρχικά στην αποφυγή ή τουλάχιστον στον περιορισμό της συχνότητας εμφάνισής τους. Στην περίπτωση εμφάνισής τους, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεών τους, με τον κατάλληλο σχεδιασμό του δικτύου και την επιλογή και εγκατάσταση των κατάλληλων μέσω προστασίας έναντι των υπερτάσεων.

Οι απαγωγείς υπερτάσεων (surge protective devices) προστατεύουν τον εξοπλισμό του δικτύου από τις έντονες ηλεκτρικές και μηχανικές καταπονήσεις, που προκαλούνται λόγω των αναπτυσσόμενων κρουστικών υπερτάσεων. Οι απαγωγείς αυτοί τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου, μεταξύ των αγωγών των φάσεων και του αγωγού της γης, λίγο πριν από τον εξοπλισμό που θέλουμε να προστατεύσουμε.

Οι κρουστικές υπερτάσεις δημιουργούνται από εσωτερικά και εξωτερικά αίτια. Οι εξωτερικές υπερτάσεις είναι πιο έντονες από τις αντίστοιχες εσωτερικές και οφείλονται σε φυσικά αίτια. Πηγές των εξωτερικών υπερτάσεων είναι οι ατμοσφαιρικές ηλεκτρικές εκκενώσεις, γνωστές και ως κεραυνοί. Οι εξωτερικές υπερτάσεις πλήττουν τα εναέρια και όχι τα υπόγεια δίκτυα διανομής.

Οι εσωτερικές υπερτάσεις οφείλονται σε εσωτερικά λειτουργικά αίτια και προέρχονται κυρίως από το άνοιγμα και το κλείσιμο των διακοπών κάτω από

καταστάσεις έντονης επαγωγικής ή χωρητικής φόρτισης. Αν και το μέγεθος των υπερτάσεων αυτών κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέχρι και λίγες εκατοντάδες kV, είναι πολύ μικρότερες και λιγότερο ζημιογόνες από τις αντίστοιχες εξωτερικές υπερτάσεις.

2.2.4 Διακόπτες

Περιστασιακά, είναι επιθυμητό να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στην σύνδεση των τμημάτων μιας γραμμής σε ένα σύστημα διανομής, κυρίως στις γραμμές τροφοδοσίας. Διακόπτες τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία έτσι ώστε η σύνδεση ανάμεσα σε δύο τμήματα γραμμής να μπορεί να επιτευχθεί ή να διακοπεί. Οι διακόπτες ποικίλουν στην ταξινόμησή τους (ανάλογα με το ποσό του ρεύματος που μπορούν να άγουν) και την ικανότητα διακοπής φορτίου (ανάλογα με το ποσό του ρεύματος που μπορούν να διακόψουν με το άνοιγμα τους). Ο χειρισμός τους γίνεται χειροκίνητα, αυτόματα ή ελεγχόμενα από απόσταση.

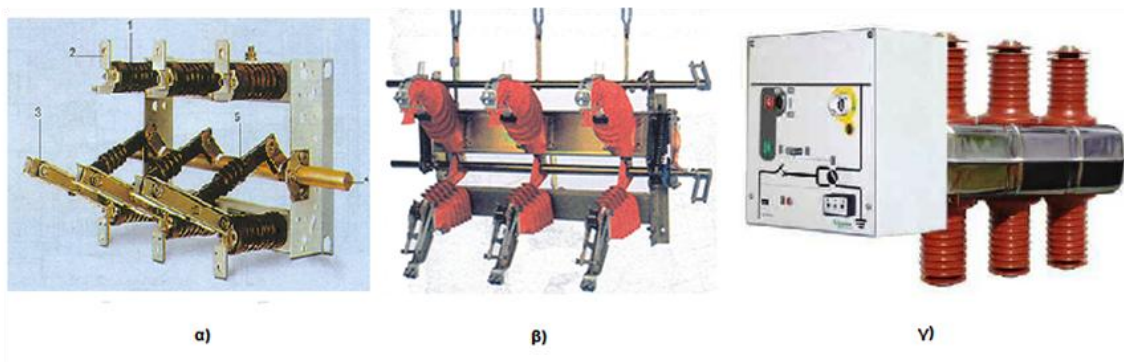
Οι διακόπτες χρησιμεύουν στα δίκτυα για την εκτέλεση των διαφόρων χειρισμών, δηλαδή την ζεύξη - απόζευξη τμημάτων του δικτύου. Οι κύριες κατηγορίες είναι:

- Οι **Αποζεύκτες (A/Z - Disconnect Switches)**. Είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για το άνοιγμα (ή το κλείσιμο) ενός κυκλώματος, είτε όταν το ρεύμα που διακόπτεται είναι αμελητέο ή είτε όταν δεν επέρχεται ουσιαστική μεταβολή στην τάση μεταξύ των πόλων όταν ανοίγει (ως αμελητέα θεωρούνται π.χ τα χωρητικά ρεύματα των μονωτήρων, των ζυγών, των μετασχηματιστών τάσεως ή και πολύ μικρού μήκους καλωδίων). Πρόκειται δηλαδή για διακόπτες που δεν έχουν ισχύ διακοπής.
- Οι **Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ - Load Switches)**. Είναι οι συσκευές που έχουν την δυνατότητα να διακόπτουν ή να αποθηκεύουν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος καθώς και να αποκαθιστούν αλλά όχι και να διακόπτουν περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων. Ένας Δ/Φ ο οποίος, όταν είναι στην ανοιχτή θέση ικανοποιεί τις απαιτήσεις απομονώσεως που ορίζονται από τον αντίστοιχο A/Z, ονομάζεται διακόπτης φορτίου-αποζεύκτης. Ανάλογα με το μέσον μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η σβέση του ηλεκτρικού τόξου, οι διακόπτες διακρίνονται σε διακόπτες αέρα, κενού

και εξαφθοριούχου θείου (SF_6). Οι διακόπτες φορτίου χρησιμοποιούνται στη μέση τάση.

- **Οι Διακόπτες Ισχύος (Δ/I - Circuit Breakers).** Είναι οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος αλλά κυρίως υπό ορισμένες μη κανονικές συνθήκες, όπως είναι η περίπτωση βραχυκυκλώματος. Το κύριο καθήκον του διακόπτη είναι η έγκαιρη σβέση του ηλεκτρικού τόξου, η οποία θα οδηγήσει στην οριστική διακοπή του κυκλώματος. Η σβέση του τόξου επιτυγχάνεται με την εκτόξευση ενός άλλου μέσου επάνω του όπως μονωτικού ελαίου, πεπιεσμένου αέρα ή οποιουδήποτε άλλου μονωτικού αερίου. Ανάλογα με το μέσο σβέση του τόξου οι Δ/I διακρίνονται σε διακόπτες αέρα, πτωχού ελαίου, εξαφθοριούχου θείου (SF_6) και κενού.

Όλοι οι προαναφερθέντες διακόπτες, έχουν την δυνατότητα να υφίστανται (στην κλειστή θέση) την δίοδο υπερεντάσεων που οφείλονται σε βραχυκυκλώματα, επί ορισμένο μικρό χρονικό διάστημα, εκτός βέβαια της ικανότητας τους να διαρρέονται συνεχώς από το ονομαστικό τους ρεύμα.



Σχήμα 2.11 - α) Αποζεύκτης μέσης τάσης με μαχαίρια, β) Διακόπτης φορτίου μέσης τάσης, γ) Διακόπτης ισχύος κενού

2.3 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ

Τα συστήματα διανομής αρχίζουν από τους υποσταθμούς διανομής. Βασικά του χαρακτηριστικά είναι ο Μ/Σ διανομής, τα μέσα προστασίας και διακοπής. Η πηγή τροφοδοσίας του υποσταθμού είναι μια ενιαία γραμμή υπομεταφοράς που εισέρχεται στο πρωτεύον του Μ/Σ διανομής και από την έξοδό του (δευτερεύον του Μ/Σ διανομής) αναχωρούν οι γραμμές ΧΤ που με τη σειρά τους καταλήγουν στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, στα όρια ιδιοκτησίας των καταναλωτών χαμηλής τάσης.

Η ονομαστική ισχύς των Υ/Σ διανομής κυμαίνεται στα 50-2500 KVA. Ανάλογα με τον τρόπο εγκατάστασης διακρίνονται σε *εναέριους, επίγειους και υπόγειους*. Στα εναέρια δίκτυα διανομής και για μικρές τιμές ισχύος (περί τα 250 KVA), οι Μ/Σ διανομής είναι *υπαίθριοι* και τοποθετούνται σε ειδικές κατασκευές (ικριώματα) επάνω στους στύλους (pole-mounted transformers). Οι υπαίθριοι υποσταθμοί διαθέτουν μετασχηματιστή ισχύος και δυο κυψέλες οργάνων ελέγχου, μία για τη μέση και μία για τη χαμηλή τάση. Όλα κατασκευασμένα, ώστε να αντέχουν σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, επειδή τοποθετούνται στο ύπαιθρο χωρίς κανένα προστατευτικό κάλυμμα.

Οι επίγειοι υποσταθμοί κατασκευάζονται σε δύο τύπους, τους *κλειστούς* και τους *υπαίθριους*. Κύριο χαρακτηριστικό των υποσταθμών κλειστού τύπου είναι ότι όλες οι εγκαταστάσεις τους είναι τοποθετημένες μέσα σε ειδικά διαμορφωμένα κτίρια, τα οποία εσωτερικά χωρίζονται με μεταλλικά πλέγματα σε δύο συνήθως μέρη, την κυψέλη μέσης τάσης και την κυψέλη χαμηλής τάσης. Ιδιαίτερη είναι η φροντίδα για την εξασφάλιση του καλού αερισμού, γιατί υπάρχουν μετασχηματιστές ισχύος και άλλα μηχανήματα τα οποία κατά τη λειτουργία τους θερμαίνονται. Εξέλιξη των υποσταθμών κλειστού τύπου είναι οι λεγόμενοι *συναρμολογούμενοι υποσταθμοί*. Σ' αυτούς τα επί μέρους στοιχεία (μετασχηματιστές, αποζεύκτες, όργανα ελέγχου κλπ) είναι τυποποιημένα σε αντίστοιχες κυψέλες από τα εργοστάσια κατασκευής και τοποθετούνται σε σειρά με σωστή ηλεκτρική σύνδεση. Τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τους επίγειους υποσταθμούς είναι ο περιορισμένος χώρος, η μεγαλύτερη ασφάλεια και η εύκολη συντήρηση.

Οι υπόγειοι Υ/Σ είναι τοποθετημένοι κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ιδιαίτερα στις μεγάλες πόλεις όπου δεν είναι εύκολη η διάθεση χώρου για επίγειες κατασκευές και ταυτόχρονα μπορούν να συνδυαστούν άμεσα με τα υπόγεια δίκτυα μέσης τάσης. Η εγκατάστασή τους γίνεται είτε κάτω από πλατείες είτε κάτω από φαρδιά πεζοδρόμια, έτσι ώστε να μην υπάρχουν μηχανικές καταπονήσεις.

Κύριο πρόβλημα των υπόγειων σταθμών αποτελεί ο αερισμός τους και αντιμετωπίζεται με κατάλληλα ανοίγματα στην επιφάνεια του εδάφους, για τον εξαερισμό του υπόγειου μετασχηματιστή, και μερικές φορές με ανεμιστήρες. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η στεγανότητα των σταθμών, γιατί, η υγρασία μπορεί να προξενήσει βλάβες στα μηχανήματα. Πλήρης όμως στεγανότητα είναι αδύνατη, καθότι συγκρούεται με την ανάγκη εξαερισμού των εγκαταστάσεων. Επίσης, για την ανάγκη επιθεωρήσεων ή συντηρήσεων στις διάφορες μονάδες, κατασκευάζονται στην επιφάνεια του εδάφους ειδικές θυρίδες που επιτρέπουν την είσοδο του τεχνίτη στον υπόγειο χώρο του υποσταθμού.



Σχήμα 2.12 - Υποσταθμός διανομής MT/XT

2.4 Δευτερεύουσα διανομή

Τα δευτερεύοντα συστήματα συνδέουν τους μετασχηματιστές διανομής με τις εισόδους εξυπηρέτησης των καταναλωτών χαμηλής τάσης (XT). Τα δίκτυα XT (υπόγεια ή εναέρια) λειτουργούν ακτινικά, εκτός των βραχυχρόνιων συνδέσεων που

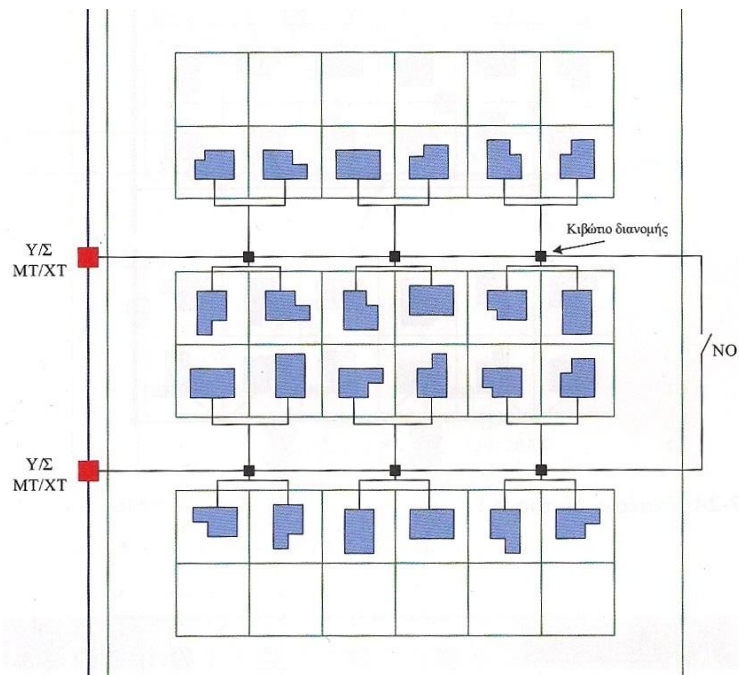
μπορεί να υφίστανται κατά τη διάρκεια χειρισμών. Το μεγαλύτερο ποσοστό των οικιακών καταναλωτών συνδέεται με το δίκτυο ΧΤ με μονοφασική παροχή, όμως με την αύξηση του βιοτικού επιπέδου το πλήθος των τριφασικών παροχών αυξάνει διαρκώς.

Το πλήθος και το είδος των καταναλωτών, τα μεγέθη των φορτίων και των Υ/Σ διανομής ΜΤ/ΧΤ, οι διατομές των αγωγών, τα θερμικά όρια φόρτισης, καθώς και η μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης, αποτελούν μερικούς από τους βασικούς παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση και την ανάπτυξη του συστήματος δευτερεύουσας διανομής.

Η πλειονότητα των μεθόδων σχεδίασης του δικτύου ΧΤ εστιάζεται στις συνεχείς ανάγκες σύνδεσης νέων καταναλωτών, καθώς και στις ανάγκες ενίσχυσης του υπάρχοντος δικτύου, λόγω της σταδιακής αύξησης των φορτίων των ήδη συνδεδεμένων καταναλωτών, καθώς και στην αντικατάσταση του πεπαλαιωμένου εξοπλισμού.

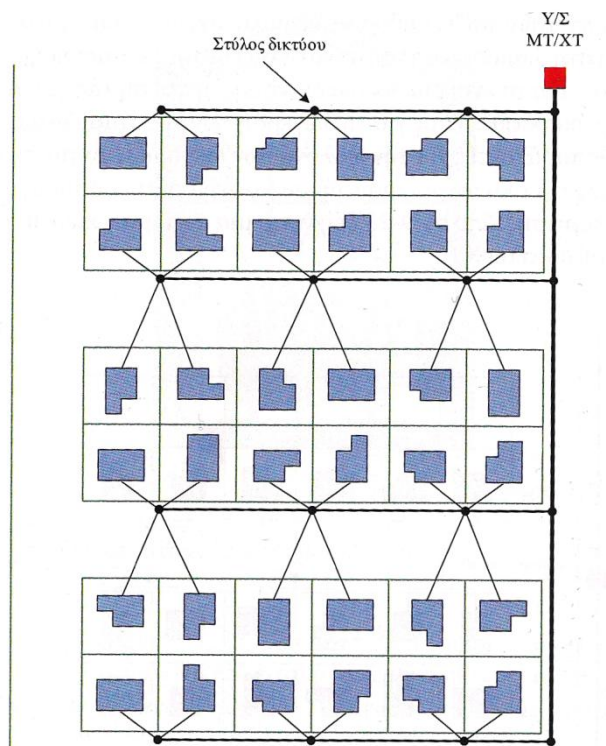
Η διατομή των αγωγών παίζει σημαντικό ρόλο, όχι μόνο για τις ηλεκτρικές απώλειες, αλλά και στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους κατασκευής και συντήρησης του δικτύου. Για τα εναέρια δίκτυα διανομής, η πτώση τάσης και το ελάχιστο απαιτούμενο ρεύμα σφάλματος για τη διέγερση των προστασιών αποτελούν τους περιοριστικούς παράγοντες για την επιλογή των διατομών. Αντίθετα στα υπόγεια δίκτυα, λόγω του σχετικά μικρότερου μήκους, ο περιοριστικός παράγοντας είναι το θερμικό όριο φόρτισης. Στο σχήμα 2.13 δείχνεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ανάπτυξης δικτύου ΧΤ.

Η συγκεκριμένη μορφή ανάπτυξης εξασφαλίζει υψηλή αξιοπιστία ως προς τη συνέχεια της τροφοδότησης, καθότι παρέχει τη δυνατότητα διπλής τροφοδότησης (μετά από χειρισμούς) οποιουδήποτε δρόμου. Οι αγωγοί του δικτύου ΧΤ είναι ενιαίας διατομής. Τα κιβώτια διανομής ως επί το πλείστον εγκαθίστανται υπόγεια (ιδιαίτερα σε περιοχές με συνεχή δόμηση) ενδέχεται όμως να είναι και επίγεια.



Σχήμα 2.13 - Ακτινική λειτουργία υπόγειου δικτύου ΧΤ

Η διαμόρφωση των εναέριων δικτύων ΧΤ είναι απλούστερη των υπόγειων, αλλά παρέχει μικρότερο βαθμό εξυπηρέτησης, καθότι κατά γενικό κανόνα δεν προβλέπονται δυνατότητες διπλών τροφοδοτήσεων (σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14 - Εναέριο δίκτυο διανομής ΧΤ

2.5 Βέλτιστη λειτουργία των δικτύων διανομής

Η κατασκευή νέων δικτύων διανομής αλλά και η αντικατάσταση υφισταμένων, πραγματοποιείται σταδιακά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ικανοποιητική εξυπηρέτηση των καταναλωτών, των οποίων το πλήθος και το φορτίο μεταβάλλονται διαρκώς. Εάν επί πλέον ληφθεί υπ' όψιν πως η διάρκεια ζωής των δικτύων είναι σημαντική (περί τα 50 χρόνια) καθώς και ότι η εκτέλεση των έργων απαιτεί αρκετό χρόνο, έπεται ότι ο ορθός σχεδιασμός της ανάπτυξης των δικτύων διανομής, δηλαδή η ορθολογική ιεράρχηση και ο προγραμματισμός της πραγματοποίησής τους, επηρεάζει άμεσα τόσο τον βαθμό εξυπηρέτησης των καταναλωτών όσο και τις αντίστοιχες δαπάνες.

Είναι προφανές ότι η λήψη των αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό της αναπτύξεως των δικτύων πρέπει να βασίζεται στο συνολικό κόστος, που προκύπτει από την εξέταση του θέματος κατά μία περίοδο αρκετών ετών (π.χ 10 χρόνια) κατά την οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνον οι δαπάνες κατασκευής νέων έργων αλλά και οι δαπάνες εκμεταλλεύσεως (λειτουργία και συντήρηση), οι επιβαρύνσεις λόγω απωλειών καθώς και ο διαφορετικός βαθμός ποιότητας εξυπηρέτησης που επιτυγχάνεται αν πραγματοποιηθεί ένα έργο.

Πιο αναλυτικά οι μελέτες σχεδιασμού της ανάπτυξης των δικτύων διανομής περιλαμβάνουν τα εξής βήματα:

1. Αναλύεται αρχικά η υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου, η οποία αποτελεί και την αρχή της μελέτης.
2. Προσδιορίζεται η αναμενόμενη εξέλιξη των φορτίων για όλη της περίοδο της μελέτης.
3. Καθορίζονται διαφορετικές τεχνικά δυνατές λύσεις ανάπτυξης του δικτύου, δηλαδή τα για τεχνικούς λόγους αναγκαία να εκτελεστούν κατά καιρούς έργα, ώστε να εξασφαλίζεται η κανονική εξυπηρέτηση των φορτίων, καθ' όλη της εξεταζόμενη περίοδο.
4. Αναζητείται και τελικά επιλέγεται, η πιο τεχνοοικονομική λύση και συγκεκριμένα εκείνη η οποία:
 - Παρουσιάζει τον καλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης των καταναλωτών
 - Έχει το ελάχιστο συνολικό κόστος για όλη την εξεταζόμενη περίοδο

Λόγω της πολυπλοκότητας και του μεγάλου πλήθους των στοιχείων των δικτύων διανομής οι μελέτες τους συνήθως υποδιαιρούνται σε:

- Μελέτες XT, στις οποίες δεδομένα είναι οι θέσεις και η ισχύς των καταναλωτών και ζητούμενα είναι η θέση, το μέγεθος και η διαμόρφωση των υποσταθμών MT/XT, καθώς και το μέγεθος και η διαδρομή των γραμμών XT
- Μελέτες MT, στις οποίες δεδομένα είναι οι θέσεις και η ισχύς των υποσταθμών MT/XT και ζητούμενα είναι η θέση, το μέγεθος και η διαμόρφωση των υποσταθμών YT/MT, καθώς και το μέγεθος και η διαδρομή των γραμμών MT

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΦΟΡΤΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Είδη φορτίων

Στο σχεδιασμό ενός ηλεκτρικού συστήματος διανομής, όπως σε κάθε άλλη εργασία, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τρία βασικά πράγματα:

1. Την ποσότητα του επιθυμητού προϊόντος ή υπηρεσίας (ανά μονάδα χρόνου)
2. Την ποιότητα του επιθυμητού προϊόντος ή υπηρεσίας
3. Την θέση της αγοράς και τους μεμονωμένους καταναλωτές

Λογικά, λοιπόν, θα ήταν καλό να αρχίσουμε με τα βασικά δομικά στοιχεία, τους μεμονωμένους καταναλωτές, και στη συνέχεια να καθορίσουμε αποτελεσματικά μέσα για την κάλυψη των αναγκών τους, ατομικά και συλλογικά.

Τα είδη των φορτίων διανομής μπορούν να διαχωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες: **φωτισμός, φορτία ισχύος, θέρμανση, ηλεκτρονικά φορτία**. Το καθένα από αυτά έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και τις δικές του απαιτήσεις.

3.1.1 Φωτισμός

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται οι λαμπτήρες φθορισμού και πυρακτώσεως, οι λαμπτήρες νέον, οι λαμπτήρες υδραργύρου, οι λαμπτήρες νατρίου και οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων. Οι ονομαστικές τάσεις του φωτιστικών ορίζονται σε 120 V, 240V και 277 V (μπορεί να υπάρχουν μεταβολές στη βασική τιμή των 120 V, π.χ 115 V ή 125 V). Όλοι τους οι λαμπτήρες λειτουργούν με συνεχές ή μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα.

- **Λαμπτήρες πυρακτώσεως**

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως λειτουργούν με σταθερό συντελεστή ισχύος (power factor, PF). Η έξοδος φωτός τους μειώνεται σημαντικά στη μείωση της τάσης, σε μερικές περιπτώσεις 16% λιγότερο με 5% χαμηλότερη τάση, έπειτα μειώνεται ακόμα με γεωμετρικά ταχύτερο ρυθμό. Είναι επίσης ευαίσθητοι σε απότομες μεταβολές της τάσης, προκαλώντας ένα αξιοσημείωτο (και ενοχλητικό) τρεμόπαιγμα σε μεταβολή μόλις 3 V (στη βάση των 120 V). Ο φωτισμός δρόμου με λάμπες πυρακτώσεως μπορεί να λειτουργήσει με πολλαπλούς ή σειριακούς τρόπους. Ο πρώτος λειτουργεί ως ξεχωριστός φωτισμός σε ένα πολλαπλό ή παράλληλο κύκλωμα, ενώ η έξοδος φωτός για τον τύπο σειράς εξαρτάται από την ποσότητα απόκλισης από την τυπική τιμή του ρεύματος που ρέει μέσω αυτού (συνήθως 6,6, 15 ή 20 A). Επίσης ο σειριακός τρόπος είναι ευαίσθητος σε μεταβολές ακόμα και στο 1% της τιμής του ρεύματος. Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων πυράκτωσης μειώνεται σημαντικά αν εφαρμόζονται τάσεις αισθητά υψηλότερες από τις κανονικές.

- **Λαμπτήρες φθορισμού και νέον**

Οι λαμπτήρες φθορισμού και τα φώτα νέον λειτουργούν με συντελεστές ισχύος της τάξεως του 50% ($PF = 0,5$), αλλά συνήθως περιλαμβάνονται διορθωτικοί πυκνωτές αντιστάθμισης, ώστε για λόγους προγραμματισμού, για να μπορούν να θεωρηθούν ότι λειτουργούν με συντελεστή ισχύος κοντά στην μονάδα ($PF \approx 1$). Η έξοδος φωτός, ανά μονάδα εισόδου ηλεκτρικής ενέργειας, είναι σημαντικά μεγαλύτερη (25% ή μεγαλύτερη) από αυτή ενός λαμπτήρα πυράκτωσης παρόμοιας ονομαστικής τιμής. Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων φθορισμού και των φώτων νέον επηρεάζεται από τον αριθμό των λειτουργιών μεταγωγής που υφίστανται. Εάν οι λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικά βοηθητικά εξαρτήματα με σειριακή αντίσταση. Η λειτουργία είναι κατώτερης ποιότητας από εκείνη του AC, με πολύ λιγότερο παραγόμενο φως ανά μονάδα ενέργειας και η ονομαστική του ζωή μειώνεται κατά 20%. Τα φώτα νέον δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος. Οι λαμπτήρες φθορισμού, τα φώτα νέον, υδραργύρου και νατρίου και οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων ενδέχεται να προκαλέσουν, αν έχουν τοποθετηθεί λανθασμένα ή όταν επιδεινωθούν, ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές παρεμβολές.

- **Λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης**

Οι λαμπτήρες υδραργύρου (υψηλής πίεσης) και νατρίου (υψηλής και χαμηλής πίεσης) και οι λαμπτήρες αλογονιδίων μετάλλων λειτουργούν σε συντελεστές ισχύος από 70% έως 80 % ($PF=0,7-0,8$), αλλά και αυτοί (όπως οι φθορισμού και οι νέον) συνδέονται με πυκνωτές αντιστάθμισης για να αυξήσουν την πραγματική τιμή τους κοντά στη μονάδα ($PF \approx 1$). Δεν είναι τόσο ευαίσθητοι στις μεταβολές τάσης όσο είναι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως. Η φωτεινή τους απόδοση και το προσδόκιμο ζωής είναι μεγαλύτερο από τους λαμπτήρες φθορισμού. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος, αλλά απαιτούν επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα εκκίνησης. Περιορίζονται γενικά σε εφαρμογές όπου είναι επιθυμητές μεγάλες ποσότητες φωτισμού, όπως σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας, σε μεγάλες βιομηχανικές περιοχές ή σε φωτογραφικό έργο. Είναι κάπως ακριβότεροι από άλλους τύπους και έχουν το μειονέκτημα ότι χρειάζονται κάποιο συγκεκριμένο χρόνο για να ενεργοποιηθούν στο 100%.

3.1.2 Φορτία ισχύος

Γενικά περιλαμβάνονται στα φορτία ισχύος οι κινητήρες όλων των τύπων:

- Συνεχούς ρεύματος (σειράς, παράλληλης διέγερσης, σύνθετης διέγερσης)
- Μονοφασικοί και τριφασικοί εναλλασσομένου ρεύματος (επαγωγής, σύγχρονους)
- Κινητήρες Universal (για συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα)

Στο πίνακα 3.1 φαίνονται οι κατηγορίες των κινητήρων αναλυτικότερα.

- **Μονοφασικοί κινητήρες κλασματικής ιπποδύναμης (FHP)**

Η πλειοψηφία αυτών των κινητήρων, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές διαφόρων ειδών, είναι μονοφασικοί και λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 50 - 70%, αλλά οι περισσότεροι χρησιμοποιούν πυκνωτές αντιστάθμισης. Όταν λειτουργούν χωρίς διατάξεις ελέγχου ταχύτητας ή ομαλούς εκκινητές, τα ρεύματα εκκίνησής τους ενδέχεται να προκαλέσουν τρεμόπαιγμα των φωτιστικών στο ίδιο κύκλωμα.

Τύπος κινητήρα	Ισχύς	Χαρακτηριστικά στροφών	Γενικές ικανότητες
DC σειράς	Έως 200 HP	Μεταβλητές στροφές	Βαριά διακοπτόμενη εκκίνηση. Κίνηση βαρέων φορτίων για μικρά χρονικά διαστήματα
DC παράλληλης διέγερσης	Έως 200 HP	Σταθερές στροφές ή μεταβλητές στροφές με έλεγχο του μαγνητικού πεδίου	Ομαλή εκκίνηση λειτουργίας.
DC σύνθετης διέγερσης	Έως 200 HP	Μεταβολή των στροφών έως 25% από εν κενό λειτουργία σε λειτουργία με πλήρες φορτίο	Βαριά εκκίνηση λειτουργίας. Κίνηση βαρέων φορτίων για μικρά χρονικά διαστήματα
AC 1Φ	Κάτω των 10 HP	Σταθερές στροφές	Σταθερές στροφές. Δεν χρειάζεται έλεγχος στροφών για ομαλή και βαριά εκκίνηση
AC επαγωγής 3Φ	Τύπου κλωβού έως 200 HP. Τυλιγμένου δρομέα έως 1000 HP	Οι στροφές αλλάζουν με μεταβολή του μαγνητικού πεδίου ή με τη μείωση της τάσης. Διαθέσιμοι για λειτουργία σταθερή ροπή και σταθερή ισχύ.	Σταθερές στροφές. Ομαλή, μεσαία και βαριά εκκίνηση
AC σύγχρονος 3Φ	Από 300 έως 5000+ HP	Σταθερές στροφές, για τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος λόγω υπερδιέγερσης ή υποδιέγερσης	Σταθερές στροφές. Ομαλή, μεσαία και βαριά εκκίνηση

Πίνακας 3.1 - Τα γενικά χαρακτηριστικών των κινητήρων συνοπτικά

- **Κινητήρες επαγωγής**

Οι περισσότεροι εμπορικοί και βιομηχανικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι τύπου επαγωγής. Ο έλεγχος ταχύτητας στροφών μπορεί να επιτευχθεί σε ορισμένους τύπους με μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης. Όπου είναι επιθυμητός ο ακριβής έλεγχος της ταχύτητας, όπως για τους ανελκυστήρες και τα πιεστήρια εκτύπωσης, χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος, μερικές φορές εξυπηρετούνται από πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω σετ κινητήρα-γεννήτριας. Οι κινητήρες επαγωγής μπορεί να λειτουργούν με συντελεστές ισχύος από 50 έως 95%, αλλά γενικά λειτουργούν περίπου από 80 έως 90% (Κάτω από το πλήρες φορτίο, οι συντελεστές ισχύος μπορεί να πέσουν στο 50 έως 60%). Οι περισσότεροι μεγάλοι κινητήρες για βιομηχανικά φορτία (από περίπου 2 HP και άνω)

είναι συνήθως τριφασικοί (παρόλο που εξακολουθούν να υπάρχουν πολλοί παλαιοί κινητήρες δύο φάσεων). Οι μεταβολές τάσης (περίπου 10%) μπορούν να προσαρμοστούν με μικρή μείωση των τιμών απόδοσης του κινητήρα και του συντελεστή ισχύος.

- **Σύγχρονοι κινητήρες**

Οι σύγχρονοι κινητήρες, συνήθως μεγάλου μεγέθους, μπορούν να λειτουργούν με συντελεστές ισχύος έως 1 ($PF \leq 1$) ρυθμίζοντας τη διέγερση τους: η υπερεκμετάλλευση αντλεί το κύριο ρεύμα, το οποίο υποβαθμίζει το ρεύμα υστέρησης. Συχνά αυτός ο τύπος κινητήρα χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε ολόκληρη την εγκατάσταση.

Δεδομένου ότι οι μεγαλύτεροι κινητήρες είναι κατάλληλοι για να προκαλέσουν βύθιση τάσης κατά την εκκίνηση, παρέχονται κυκλώματα χωριστά από τα κυκλώματα φωτισμού για την εξάλειψη των προβλημάτων τρεμοπαίγματος (flicker) (Μερικές φορές γίνεται χρήση ξεχωριστού μετασχηματιστή παροχής). Επίσης προκαλώντας παρόμοια προβλήματα flicker είναι διάφορες χημικές και ηλεκτρολυτικές συσκευές και μηχανικές διατάξεις που λειτουργούν με πηνία ή σωληνοειδή.

3.1.3 Θέρμανση

Η κατηγορία της θέρμανσης μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους κατηγορίες:

1. Οικιακής εφαρμογής (μικρής ισχύος)
2. Βιομηχανικής εφαρμογής (μεγάλης ισχύος)

- **Θέρμανση κατοικιών**

Η οικιακή θέρμανση περιλαμβάνει συσκευές για μαγείρεμα, θερμοσίφωνες, τوستιέρες, ηλεκτρικά σίδερα, στεγνωτήρια ρούχων και άλλες παρόμοιες συσκευές, καθώς και συσκευές οικιακής θέρμανσης. Αυτά είναι όλα τα φορτία αντοχής, που κυμαίνονται από σχετικά λίγα Watt σε αρκετά kWatt, τα περισσότερα από τα οποία λειτουργούν με τάση 230 V. Ο συντελεστής ισχύος για αυτές τις συσκευές είναι

ενιαίος και ίσος με τη μονάδα. Η αντίσταση των εμπλεκόμενων στοιχείων είναι πρακτικά σταθερή. Συνεπώς, το ρεύμα θα ποικίλει άμεσα με την εφαρμοσμένη τάση.

Η επίδραση της μειωμένης τάσης και κατ' επέκταση του μειωμένου ρεύματος είναι απλά να προκαλέσει αντίστοιχη μείωση της παραγόμενης θερμότητας ή επιβράδυνση της λειτουργίας της συσκευής. Ενώ η διακύμανση της τάσης δεν είναι κρίσιμη, συνήθως διατηρείται σε μικρές τιμές δεδομένου ότι πολύ συχνά οι μικρότερες συσκευές συνδέονται με τα υπόλοιπα οικιακά κυκλώματα όπως τα φορτία φωτισμού, αν και οι θερμοσίφωνες και άλλα μεγαλύτερα φορτία τροφοδοτούνται συνήθως από ξεχωριστά κυκλώματα.

- **Βιομηχανική θέρμανση**

Η βιομηχανική θέρμανση μπορεί να περιλαμβάνει μεγάλους θερμαντήρες χώρου, φούρνους (ψησίματος, θερμικής επεξεργασίας, σμάλτου κ.λπ.), καμίνους (χάλυβα, ορείχαλκου κ.λπ.), συγκολλητές και συσκευές θέρμανσης υψηλής συχνότητας. Τα δύο πρώτα είναι φορτία τύπου αντιστάσεως και λειτουργούν όπως οι μικρότερες οικιακές συσκευές, με λειτουργία σε 230 V, μονοφασικό και με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ωστόσο, οι φούρνοι μπορούν να λειτουργούν συνεχώς για λόγους οικονομίας, ενώ ορισμένοι μπορεί να είναι τριφασικοί.

- **Ηλεκτρικοί κάμινοι**

Οι ηλεκτρικοί κάμινοι μπορούν να αντλούν μεγάλα ρεύματα (κατά το μάλλον ή το ήττον περιοδικά) κατά τη διάρκεια της θερμικής διεργασίας και ένα αρκετά σταθερό μικρότερο ρεύμα για τις υπόλοιπες λειτουργίες. Σε γενικές γραμμές, ο συντελεστής ισχύος είναι αρκετά υψηλός δεδομένου ότι ενδείκνυται συνεχής λειτουργία για οικονομικούς λόγους. Τα μεγέθη των κάμινων ποικίλουν σημαντικά. Μικρότερες μονάδες με μια σειρά από αρκετές εκατοντάδες κιλοβάτ (kW) είναι μονοφασικές, ενώ οι μεγαλύτερες είναι συνήθως τριφασικές με ισχύ μερικά μεγαβάτ (MW). Η ρύθμιση της τάσης (ενώ δεν είναι κρίσιμη) θα πρέπει να είναι αρκετά κοντά λόγω της πιθανής επίδρασής της στο υλικό της κάμινου.

- **Συσκευές συγκόλλησης**

Οι συγκολλητές αντλούν πολύ μεγάλα ρεύματα για πολύ σύντομες διαλείπουσες χρονικές περιόδους. Λειτουργούν με συγκριτικά χαμηλή τάση 30 έως 50 V, που εξυπηρετείται από ξεχωριστό μετασχηματιστή που έχει υψηλή ισχύ ρεύματος. Οι μεγαλύτεροι συγκολλητές μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια γεννήτρια μεταξύ του συγκολλητή και του συστήματος ισχύος για να αποτρέψουν τις ενοχλητικές βυθίσεις τάσης. Ο συντελεστής ισχύος είναι σχετικά χαμηλός και μεταβάλλεται ανάλογα το φορτίο. Ο χρονισμός της συγκόλλησης είναι μεγάλης σημασίας και μπορεί να ρυθμιστεί από ηλεκτρονικές συσκευές χρονισμού.

- **Θέρμανση υψηλής συχνότητας**

Η θέρμανση υψηλής συχνότητας παράγει θερμότητα σε υλικά από πηγές υψηλής συχνότητας ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχονται από την κανονική παροχή ρεύματος (50 Hz). Η θέρμανση υψηλής συχνότητας είναι δύο τύπων: επαγωγική και διηλεκτρική.

Στην *επαγωγική θέρμανση*, το υλικό είναι αγωγίμο (μέταλλα κ.λπ.) και τοποθετείται μέσα σε ένα πηνίο που συνδέεται με μια πηγή ενέργειας υψηλής συχνότητας. Το μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας προκαλεί στα υλικά υψηλής έντασης φλεβικά ρεύματα που το θερμαίνουν. Λόγω του επιδερμικού φαινομένου, τα επαγόμενα ρεύματα τείνουν συσσωρεύονται κοντά στην επιφάνεια. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, το βάθος των επαγόμενων ρευμάτων μειώνεται, παρέχοντας έτσι μια μέθοδο ελέγχου του βάθους στο οποίο θερμαίνεται το αντικείμενο.

Στην *διηλεκτρική θέρμανση*, ένα κακώς αγωγίμο υλικό (πλαστικό, κόντρα πλακέ κ.λπ.) τοποθετείται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια συνδεδεμένα σε μια πηγή υψηλής συχνότητας. Η διάταξη αποτελεί έναν πυκνωτή και στο υλικό θα τοποθετηθεί ένα εναλλασσόμενο ηλεκτροστατικό πεδίο. Το εναλλασσόμενο πεδίο που διέρχεται ομοιόμορφα μέσω του υλικού μετατοπίζει ή τεντώνει τα μόρια, πρώτα σε μία κατεύθυνση και στη συνέχεια στη άλλη, καθώς το πεδίο αντιστρέφει την πολικότητα του. Η εμφανιζόμενη τριβή μεταξύ των μορίων παράγει θερμότητα ομοιόμορφα σε όλο το υλικό. Τέτοιες τριβές και θερμότητα είναι ανάλογες με το ρυθμό αντιστροφής των πεδίων. Ως εκ τούτου, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο πιο γρήγορη είναι

η θέρμανση. Λόγω της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια, ωστόσο, το κέντρο του υλικού μπορεί να είναι θερμότερο από τα εξωτερικά στρώματα. Οι φούρνοι μικροκυμάτων οικιακού τύπου είναι μια εφαρμογή διηλεκτρικής θέρμανσης.

- **Ταλαντωτές**

Οι ταλαντωτές χρησιμοποιούνται ως πηγή ισχύος υψηλής συχνότητας που απαιτείται τόσο για την επαγωγική όσο και για την διηλεκτρική θέρμανση. Πρόκειται για μια ηλεκτρονική εφαρμογή και τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις της περιγράφονται στην επόμενη ενότητα.

3.1.4 Ηλεκτρονικά φορτία

Η κατηγορία των ηλεκτρονικών φορτίου περιλαμβάνει ραδιόφωνα, τηλεοράσεις, συσκευές ακτινών Χ, εξοπλισμό λέιζερ, υπολογιστές, συσκευές ψηφιακού χρόνου και χρονισμού, ανορθωτές, ταλαντωτές για παραγωγή ρεύματος υψηλής συχνότητας και πολλές άλλες ηλεκτρονικά λειτουργούσες συσκευές. Γενικά, αυτοί χρησιμοποιούν σωλήνες ηλεκτρονίων ή συσκευές στερεάς κατάστασης όπως τρανζίστορ, ημιαγωγούς κ.λ.π. Πρακτικά όλες αυτές οι συσκευές λειτουργούν σε τάσεις χαμηλότερες από τις εμπορικές πηγές ισχύος και χρησιμοποιούν μετασχηματιστές ή άλλες συσκευές για να αποκτήσουν τις συγκεκριμένες τάσεις λειτουργίας τους. Όλες οι παραπάνω συσκευές επηρεάζονται από τις μεταβολές τάσης.

Οι μεταβολές τάσης ενδέχεται να έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στους σωλήνες ηλεκτρονίων, επηρεάζοντας τις ικανότητες τους, καθώς και το προσδόκιμο ζωής τους. Λόγω της μειωμένης ζωής του θερμαντικού στοιχείου και του υψηλού ποσοστού εξάτμισης των ενεργών υλικών από την επιφάνεια της καθόδου, η ζωή καθόδου ηλεκτρονίων μπορεί να μειωθεί κατά το ήμισυ μόνο με 5% αύξηση στην τάση καθόδου. Οι σωλήνες βιομηχανικού τύπου σχεδιάζονται κανονικά για να λειτουργούν με ανοχή τάσης ± 5 τοις εκατό, αν και συχνά καθορίζονται μεγαλύτερες ανοχές.

Οι διακυμάνσεις τάσης επηρεάζουν επίσης τη λειτουργία συσκευών στερεάς κατάστασης, αν και η επίδραση στο προσδόκιμο ζωής τους δεν είναι τόσο σοβαρή

όσο στην περίπτωση των ηλεκτρονίων. Από την άλλη πλευρά, οι μεταβολές στη συχνότητα τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος έχουν μικρή επίδραση επί των ηλεκτρονίων, αλλά μπορεί να έχουν έντονη επίδραση στις συσκευές στερεάς κατάστασης.

Και οι δύο τύποι συσκευών είναι πολύ ευαίσθητοι στις βυθίσεις τάσης και, από την άποψη τροφοδοσίας, λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ορισμένες εφαρμογές, όπως οι υπολογιστές, ενδέχεται να απαιτούν αδιάλειπτη πηγή τροφοδοσίας και για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης γεννητριών ικανών να λειτουργούν με μπαταρίες για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Μια γεννήτρια εξαλείφει επίσης τα προβλήματα πτώσης τάσης στην εμπορική τροφοδοσία ρεύματος.

Εκτός από ορισμένες εφαρμογές των ανορθωτών, οι περισσότερες από αυτές λειτουργούν με μονοφασικά κυκλώματα τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος. Μεγάλοι ανορθωτές μπορούν να τροφοδοτούνται από πηγές τριών φάσεων.

Οι ταλαντωτές για εμπορικούς σκοπούς χρησιμοποιούν σωλήνες ηλεκτρονίων βιομηχανικού τύπου σε συνδυασμό με πυκνωτές και πηνία που μπορεί να ποικίλουν για να παράγουν τις επιθυμητές πηγές υψηλής συχνότητας. Οι κανονικές τιμές ανοχής στην παροχή τάσης από πηγές ενέργειας είναι κατάλληλες για αυτή την εφαρμογή.

3.2 Παράγοντες καταναλώσεων

Είναι προφανές ότι ένας μεμονωμένος καταναλωτής δεν είναι ικανός να χρησιμοποιεί όλες τις ηλεκτρικές συσκευές που αποτελούν το "συνδεδεμένο φορτίο" του ταυτόχρονα ή στην πλήρη ισχύ τους. Θα ήταν προφανώς περιττό να παρέχονται εγκαταστάσεις που να εξυπηρετούν ένα τέτοιο συνολικό φορτίο και πολύ πιο οικονομικό να παρέχει μόνο το φορτίο που δημιουργεί τη ζήτηση στις εγκαταστάσεις διανομής. Στο πίνακα 3.2 δίνονται ενδεικτικά οι παράγοντες των καταναλώσεων που εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία των δικτύων διανομής.

Μέγιστη ζήτηση	Το πραγματικό φορτίο σε χρήση από έναν καταναλωτή δημιουργεί μια ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια που ποικίλλει από ώρα σε ώρα για μια χρονική περίοδο αλλά φτάνει τη μεγαλύτερη τιμή της σε κάποιο σημείο. Αυτό ονομάζεται ως <i>στιγμιαία μέγιστη ζήτηση</i> του καταναλωτή. Στην πράξη, ωστόσο, ως μέγιστη ζήτηση λαμβάνουμε αυτή που διατηρείται σε μια πιο συγκεκριμένη χρονική περίοδο, συνήθως 15, 30 ή 60 λεπτά. Αυτές αναφέρονται ως ολοκληρωμένες απαιτήσεις 15, 30 ή 60 λεπτών, αντίστοιχα.
Συντελεστής ζήτησης	Ο λόγος της μέγιστης ζήτησης προς το συνολικό συνδεδεμένο φορτίο ονομάζεται <i>συντελεστής ζήτησης</i> . Ο συντελεστής ζήτησης διαφέρει για διαφορετικούς τύπους φορτίων και με τον μέσο όρο ενός μεγάλου αριθμού φορτίων (κάθε τύπου) μπορούν να ληφθούν τυπικοί συντελεστές ζήτησης.
Συντελεστής φορτίου	Ο <i>συντελεστής φορτίου</i> είναι ένα χαρακτηριστικό που σχετίζεται με το συντελεστή ζήτησης, εκφράζοντας την αναλογία του μέσου φορτίου ή της ζήτησης για μια χρονική περίοδο (π.χ. μία ημέρα) στη μέγιστη ζήτηση (για παράδειγμα 60 λεπτά) κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου.
Συντελεστής ετεροχρονισμού	Ο <i>συντελεστής ετεροχρονισμού</i> είναι ο λόγος του αθροίσματος των μέγιστων απαιτήσεων κάθε φορτίου προς τη μέγιστη ζήτηση του φορτίου στο σύνολό του (ή της συνυπάρχουσας μέγιστης ζήτησης). Αυτός είναι ο σημαντικότερος παράγοντας στον οικονομικό σχεδιασμό και το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων διανομής.
Συντελεστής ταυτοχρονισμού	Ο <i>συντελεστής ταυτοχρονισμού</i> είναι ο λόγος της μέγιστης συνολικής ζήτησης μιας ομάδας καταναλωτών προς το άθροισμα των μέγιστων απαιτήσεων κάθε καταναλωτή. Η χρησιμότητα του συντελεστή ταυτοχρονισμού έγκειται στο ότι, στην περίπτωση που η τιμή του για μια ομάδα καταναλωτών είναι γνωστή, καθώς επίσης και οι μέγιστες ζήτησεις των επιμέρους καταναλωτών, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της <i>μέγιστης ταυτοχρονισμένης ζήτησης</i> της ομάδας των καταναλωτών.
Συντελεστής χρησιμοποίησης	Ο λόγος της μέγιστης ζήτησης ενός συστήματος προς την ονομαστική ικανότητα του συστήματος είναι γνωστός ως <i>συντελεστής χρησιμοποίησης</i> συντελεστής υποδεικνύει το βαθμό στον οποίο ένα σύστημα φορτίζεται κατά τη διάρκεια μιας αιχμής φορτίου σε σχέση με την ισχύ του.
Συντελεστής ισχύος	Ο λόγος πραγματικής (σε W) και της φαινόμενης ισχύος (σε VA) ονομάζεται <i>συντελεστής ισχύος</i> . Είναι ένα μέτρο της σχέσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης (εκτός φάσης το ένα με το άλλο) που προκαλείται από την αντίδραση στο κύκλωμα (συμπεριλαμβανομένης της συσκευής που εξυπηρετείται). Δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις πρέπει να σχεδιάζονται για να μεταφέρουν το ρεύμα και να προβλέπουν απώλειες που ποικίλλουν ως το τετράγωνο του ρεύματος και για πτώσεις τάσης οι οποίες είναι περίπου ανάλογες προς το ρεύμα, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι τρέχουσες τιμές.

Πίνακας 3.2 - Παράγοντες καταναλώσεων

3.3 Κατηγοριοποίηση καταναλωτών

Ως βοηθητικά μέσα σχεδιασμού, οι καταναλωτές μπορούν εύκολα να ταξινομηθούν σε ορισμένες κατηγορίες και ορισμένες περιοχές πυκνότητας φορτίου εκφρασμένες σε kVA/km².

Οι περαιτέρω ταξινομήσεις (Πίνακας 3.3) μπορούν να βασίζονται σε στοιχεία όπως η εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια λόγω της κρίσιμης φύσης των δραστηριοτήτων του καταναλωτή, υπό φυσιολογικές συνθήκες ή συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Το κόστος που προκύπτει σε περίπτωση διακοπής κρίσιμων διαδικασιών ή την ευαισθησία των φορτίων σε μικρές αποκλίσεις τάσης.

Οικιακοί καταναλωτές	
Πολυκατοικίες, ξενοδοχεία	4 έως 20.000 kVA/km ²
Αστικές και προαστιακές περιοχές:	
Μεγάλες οικίες	0,4 έως 2.000 kVA/km ²
Μικρές οικίες	0,2 έως 400 kVA/km ²
Αγροικίες και φάρμες	Λιγότερο από 0.04 έως 2 kVA/km ²
Εμπορικοί καταναλωτές	
Καταστήματα και εμπορικά κέντρα	4 έως 200.000 kVA/km ²
Κτίρια γραφείων	4 έως 200.000 kVA/km ²
Υπηρεσίες εξυπηρέτησης, αποθήκες	4 έως 200.000 kVA/km ²
Νοσοκομεία	0,4 έως 20.000 kVA/km ²
Σχολεία, εκκλησίες	0,4 έως 200 kVA/km ²
Φωτισμός δρόμων και περιοχών	0,4 έως 200 kVA/km ²
Βιομηχανικοί καταναλωτές	
Μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις	Εξαιρετικά μεγάλες διακυμάνσεις, θεωρούνται ως σημεία συγκέντρωσης φορτίων
Μικρές βιομηχανικές εγκαταστάσεις	
Στρατιωτικές βάσεις	

Πίνακας 3.3 - Κατηγορίες ταξινόμησης των καταναλωτών

3.4 Μελλοντική ανάπτυξη του φορτίου

Μια καλή μελέτη απαιτεί να λαμβάνεται υπόψη κατά τον προγραμματισμό η πιθανή μελλοντική ανάπτυξη φορτίων. Αυτό συνήθως παρέχεται από την πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα στο σημερινό σχεδιασμό των διαφόρων στοιχείων ή από προβλέψεις για πιθανές μελλοντικές προσθήκες ή μεταβολές ή και τα δύο. Η αύξηση του φορτίου είναι σπανίως ομοιόμορφη σε μια περιοχή, έτσι ώστε οι αυξήσεις στα διάφορα τμήματα ενός συστήματος να είναι διαφορετικές μεταξύ τους και από εκείνες του συστήματος συνολικά.

Το πόσο σημαντική είναι η σημερινή χωρητικότητα για το μελλοντικό φορτίο είναι σε μεγάλο βαθμό οικονομικό ζήτημα. Το κόστος μεταφοράς της πλεονάζουσας παραγωγικής ικανότητας (έως ότου χρειαστεί) έναντι του κόστους αντικατάστασης μικρότερων μονάδων με μεγαλύτερες όταν αυτό κριθεί αναγκαίο. Πρόκειται για πρόβλημα της μελλοντικής αξίας των σημερινών δαπανών, που επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις των επιτοκίων και του πληθωρισμού. Τα τυποποιημένα μεγέθη των υλικών και του εξοπλισμού παρέχουν αυτομάτως περιορισμένη ποσότητα πλεονάζουσας παραγωγικής ικανότητας, έτσι ώστε οποιαδήποτε οικονομική ανάλυση να μπορεί να είναι κατά προσέγγιση.

Τα δεδομένα παλαιότερων επιδόσεων, όπως τα συνολικά φορτία του συστήματος, τα φορτία των υποσταθμών και τα φορτία τροφοδοσίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την εκτίμηση αυτής της ανάπτυξης. Οι διακυμάνσεις από έτος σε έτος ή από μήνα σε μήνα μπορούν να δώσουν μια τάση για μια τέτοια ανάπτυξη (Μπορούν να αναπτυχθούν ξεχωριστές τάσεις για διαφορετικά μέρη ή περιοχές). Όταν τα δεδομένα αυτά είναι ανύπαρκτα (ή αναξιόπιστα), οι εκτιμήσεις μπορούν να περιλαμβάνουν ένα σταθερό ποσοστό αύξησης πάνω από τις τιμές στις οποίες γίνεται ο προγραμματισμός.

Για να αποκτήσουμε κάποια ιδέα για το τι μπορεί να συμβεί στο μέλλον, μπορεί να είναι καλό να κοιτάξουμε πίσω μια γενιά ή δύο. Νωρίτερα, οι καταναλωτικές συσκευές θα μπορούσαν να περιέχονται σε σχετικά σύντομο πίνακα. Για να προσπαθήσουμε να καταγράψουμε όλες τις ηλεκτρικά λειτουργούσες συσκευές και μικροσυσκευές που βρίσκονται επί του παρόντος σε σπίτια και εμπορικά

καταστήματα θα ήταν ένα σχεδόν ατελείωτο καθήκον. Η προσπάθεια να προβλέψουμε τι μπορεί να αναπτυχθεί στο μέλλον θα ήταν μάταιο.

Η εμφάνιση του ευρέως διαδεδομένου κλιματισμού και θέρμανσης χώρων, σε συνδυασμό με την σχεδόν καθολική χρήση της τηλεόρασης, όχι μόνο μείωσε σημαντικά τις μέγιστες απαιτήσεις και την κατανάλωση των φορτίων, αλλά και επηρέασε σημαντικά τους συντελεστές φορτίου, ετεροχρονισμού και ταυτοχρονισμού.

Ενώ ο συντελεστής ζήτησης μπορεί να υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα συνδεδεμένα φορτία, ο συντελεστής χρησιμοποίησης υποδεικνύει πώς χρησιμοποιείται η χωρητικότητα του συστήματος τροφοδοσίας. Δεδομένου ότι η ικανότητα του συστήματος παροχής εξαρτάται από τη θερμική του ικανότητα, η αυξημένη παρατεταμένη ζήτηση σε αυτές τις εγκαταστάσεις θα μειώσει τη θερμική τους ικανότητα και, συνεπώς, την ικανότητα του συστήματος.

Η όλο και μεγαλύτερη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών θα απαιτήσει στενότερα όρια ελέγχου της τάσης (ρύθμιση και flicker) και μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας της υπηρεσίας με την ενίσχυση του συστήματος διανομής ή μέσω της εγκατάστασης βοηθητικού εξοπλισμού που ανήκει και συντηρείται από τον καταναλωτή ή να ενοικιαστεί ως άλλη υπηρεσία από το πάροχο ενέργειας. Η επιλογή θα καθοριστεί από τις μελλοντικές αναπτύξεις.

3.5 Απαιτήσεις τάσης

Οι ηλεκτρικές συσκευές με χαμηλή τάση στις Ηνωμένες Πολιτείες έχουν τυποποιηθεί από σχεδόν όλους τους κατασκευαστές στα 120/240 V. Στην Ελλάδα η τάση τροφοδοσίας των καταναλωτών ορίζεται στα 230/400 V. Με συστήματα διανομής σχεδιασμένα για πρακτικές ανοχές τάσης εκπεφρασμένες σε βολτ συν ή πλην σε σχέση με την κανονική, βασική μονοφασική τάση βάσης των 230, μπορούν να υπάρχουν τάσεις 207 έως 253 V στους ακροδέκτες των φορτίων (λαμπτήρες, συσκευές κ.λπ.). Πρόκειται δηλαδή για διακύμανση $\pm 10\%$ στην οποία πρέπει να προστεθεί πτώση τάσης (flicker) περίπου 6 V, ή 2,5%, για να επιτρέψει την εκκίνηση

των περισσότερων κινητήρων. Ο στενότερος συντονισμός μεταξύ των κατασκευαστών και των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την κατάσταση αυτή. Οι ηλεκτρονικές συσκευές είναι πιο ευαίσθητες στις μεταβολές τάσης και μπορεί να παρουσιαστεί δυσκολία στη λειτουργία τους σε παραλλαγές της τάσης.

Ορισμένοι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας παρέχουν εκτιμώμενη πτώση τάσης έως και 2 V στην καλωδίωση του καταναλωτή, καθορίζοντας την κανονική τάση στο σημείο εξυπηρέτησης 2 V υψηλότερη από ό, τι αναφέρθηκε προηγουμένως. Τα σχέδιά τους, ωστόσο, προβλέπουν τα ίδια όρια υψηλής και χαμηλής τάσης, αλλά οι διακυμάνσεις πάνω και κάτω από τη συνήθη βάση είναι άνισες.

Η ικανοποιητική λειτουργία του φωτισμού, των οικιακών συσκευών κ.α δεν είναι μόνο για την ικανοποίηση των καταναλωτών, αλλά θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η επίδραση των υψηλών και χαμηλών τάσεων (κυρίως λόγω των φορτίων φωτισμού με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος) στα έσοδα και στην εξοικονόμηση των καυσίμων. Οι καταναλωτές που χρησιμοποιούν υψηλές τάσεις εξυπηρετούνται συνήθως από την πρωτεύουσα διανομή και πληρούν τα δικά τους πρότυπα τάσης.

3.6 Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία της υπηρεσίας ερμηνεύεται γενικά ως η συνέχεια της υπηρεσίας ή την απουσία διακοπής της εν λόγω υπηρεσίας. Για ένα σύστημα διανομής ή για οποιοδήποτε από τα μέρη του, η απόλυτη αξιοπιστία ή η συνέχεια της υπηρεσίας είναι 100% του χρόνου για το 100% των καταναλωτών του. Ο στόχος αυτός είναι αδύνατος, αν και μπορεί να προσεγγιστεί. Το κόστος για την επίτευξη τέτοιων στόχων, ακόμη και εν μέρει, συνήθως δεν δικαιολογείται.

Ως πρακτικό ζήτημα, όλοι οι καταναλωτές μπορεί να μην απαιτούν έναν υψηλό και ομοιόμορφο βαθμό αξιοπιστίας των υπηρεσιών. Για ορισμένους καταναλωτές, ένας εξαιρετικά υψηλός βαθμός εξυπηρέτησης είναι απαραίτητος. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν νοσοκομεία, στρατιωτικά ιδρύματα, μερικά μεγαλύτερα θέατρα,

πολυκαταστήματα, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία κ.λπ., όπου πρόκειται για την ασφάλεια του κοινού.

Για ορισμένους άλλους τύπους φορτίων, είναι επιθυμητός ένας υψηλός βαθμός αξιοπιστίας, αλλά όχι τόσο σημαντικός από την άποψη της δημόσιας ασφάλειας. Τα μικρότερα διαμερίσματα και τα θέατρα αποτελούν παραδείγματα αυτών, καθώς και ορισμένες διαδικασίες κατασκευής ή εξυπηρέτησης, όπου η διακοπή μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές απώλειες. Εντούτοις, στον μέσο οικιακό ή εμπορικό καταναλωτή, μια σύντομη διακοπή (και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη μια διακοπή μακράς διάρκειας) είναι περισσότερο ενοχλητική από ότι ένας κίνδυνος ή αιτία που προκαλεί οικονομική ζημιά.

Κατά κανόνα, οι προβλέψεις για υψηλότερο βαθμό αξιοπιστίας των υπηρεσιών συνεπάγονται υψηλότερες δαπάνες, τόσο για πρόσθετες εγκαταστάσεις όσο και για την αυξημένη συντήρηση. Οι δαπάνες για την παροχή αξιοπιστίας θα πρέπει να έχουν κάποια αναλογία με τον βαθμό αξιοπιστίας που απαιτείται. Κάθε τύπος υπηρεσίας θα πρέπει να παράγει έσοδα για να δικαιολογήσει τις πρόσθετες δαπάνες για την επίτευξη της επιθυμητής ή απαιτούμενης αξιοπιστίας εξυπηρέτησης (Μπορεί να γίνει εξαίρεση για δημόσιες υπηρεσίες όπως τα νοσοκομεία και τα στρατιωτικά ιδρύματα).

Από την άποψη της αξιοπιστίας, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συγκρίσεις μεταξύ εναέριων και υπόγειων συστημάτων. Τα συστήματα εναέριας διανομής είναι λιγότερο δαπανηρά αλλά είναι πιο ευάλωτα στους κινδύνους της φύσης (πάγος, αέρας, κεραυνοί, πλημμύρες κ.α) και στις ενέργειες των ανθρώπων (χαρταετοί, οχήματα που συγκρούονται με τους στύλους κ.α). Είναι, ωστόσο, ευκολότερο να διατηρηθούν, ειδικά επειδή τα σφάλματα μπορούν να εντοπιστούν και να επισκευαστούν πιο εύκολα. Τα υπόγεια συστήματα, γενικά πιο ακριβά και λιγότερο ευάλωτα στις ιδιοτροπίες της φύσης και των ανθρώπων, χρειάζεται ωστόσο περισσότερος χρόνος για τον εντοπισμό της θέσης και την αποκατάσταση του σφάλματος που μπορεί να συμβεί.

Οι δείκτες αξιοπιστίας των υπηρεσιών διατηρούνται για να μετρήσουν και να αποκτήσουν νέες τάσεις στην απόδοση ενός συστήματος διανομής και των εξαρτημάτων του. Ορισμένες από αυτές περιλαμβάνουν τον αριθμό των διακοπών

ανά καταναλωτή που εξυπηρετείται, τον αριθμό των καταναλωτών που πλήττονται ανά εξυπηρετούμενο καταναλωτή, τον αριθμό των ωρών διακοπής του καταναλωτή ανά εξυπηρετούμενο καταναλωτή, τη μέση διάρκεια διακοπής (ώρες) ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή, το μέσο όρο των καταναλωτών που πλήττονται ανά εξυπηρετούμενο καταναλωτή, και τη μέση διάρκεια (ώρες) ανά εξυπηρετούμενο καταναλωτή. Περαιτέρω δείκτες διατηρούνται ως προς τα αίτια και τη διάρκεια των διακοπών στα διάφορα μέρη του συστήματος, π.χ. με βάση τα χιλιόμετρα αγωγού που είναι εγκατεστημένα, με ταξινόμηση τάσης ή με γεωγραφικές διαιρέσεις κ.τ.λ. Η σύνταξη και ανάλυση αυτών των δεδομένων γίνεται συνήθως μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Πτώση τάσης

Μπορούμε να προσεγγίσουμε την πτώση τάσης κατά μήκος μιας γραμμής ως εξής:

$$V_{\text{drop}} = |V_s| - |V_r| \approx I_R \cdot R + I_X \cdot X \quad (4.1)$$

Όπου:

- V_{drop} = πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής (V)
- R = ωμική αντίσταση της γραμμής (Ω)
- X = επαγωγική αντίσταση της γραμμής, (Ω)
- I_R = ρεύμα της γραμμής λόγω ροής πραγματικής ισχύος (A)
- I_X = ρεύμα της γραμμής λόγω ροής αέργου ισχύος (A)

Όσον αφορά το συντελεστή ισχύος του φορτίου (PF) τα ρεύματα I_R και I_X είναι:

$$\begin{aligned} I_R &= I \cdot \text{PF} = I \cdot \cos\theta \\ I_X &= I \cdot \sin\theta = I \cdot \sin\left(\cos^{-1}(\text{PF})\right) \end{aligned} \quad (4.2 \text{ και } 4.3)$$

Όπου:

- I = συνολικό ρεύμα της γραμμής (A)
- PF = συντελεστής ισχύος του φορτίου
- θ = γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος

Ενώ είναι μια προσέγγιση, ο Brice (1982) έδειξε ότι το $I_R \cdot R + I_X \cdot X$ είναι αρκετά ακριβές για τις περισσότερες περιπτώσεις συστημάτων διανομής. Το μεγαλύτερο σφάλμα εμφανίζεται κάτω από το ισχυρό ρεύμα και τον συντελεστή ισχύος. Η

προσέγγιση έχει ένα σφάλμα μικρότερο από 1% για μια γωνία μεταξύ των τάσεων άφιξης και αναχώρησης μέχρι 8° (πράγμα που είναι απίθανο σε ένα δίκτυο διανομής).

Τα περισσότερα προγράμματα διανομής χρησιμοποιούν τους πλήρεις σύνθετους υπολογισμούς φάσεων, οπότε το σφάλμα είναι κυρίως ένα ζήτημα λάθος υπολογισμού. Αυτή η προσέγγιση υπογραμμίζει δύο σημαντικές πτυχές της πτώσης τάσης:

- **Φορτίο αντίστασης:** Σε παράγοντες υψηλής ισχύος, η πτώση της τάσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντίσταση των αγωγών.
- **Φορτίο αντίδρασης:** Σε παράγοντες μέτριας έως χαμηλής ισχύος, η πτώση της τάσης εξαρτάται κυρίως από την αντίδραση των αγωγών. Ο κακός συντελεστής ισχύος αυξάνει σημαντικά την πτώση τάσης.

Η πτώση τάσης είναι υψηλότερη με συστήματα χαμηλής τάσης, χαμηλού συντελεστή ισχύος, σε μονοφασικά κυκλώματα και ασύμμετρα κυκλώματα. Οι κύριοι τρόποι μείωσης της πτώσης τάσης είναι:

- Αύξηση του συντελεστή ισχύος (προσθήκη πυκνωτών αντιστάθμισης)
- Χρήση καλωδίων μεγαλύτερου μεγέθους
- Ισορρόπηση των κυκλωμάτων
- Μετατροπή μονοφασικών (1-Φ) τμημάτων σε τριφασικά (3-Φ)
- Μείωση του φορτίου
- Ελάττωση του μήκους των αγωγών

Σε πολλές περιπτώσεις, μπορούμε να ζήσουμε με σημαντική πτώση τάσης, εφ' όσον έχουμε αρκετό εξοπλισμό ρύθμισης για να ρυθμίσουμε την πτώση τάσης στο κύκλωμα.

4.2 Προβλήματα στην τάση του δικτύου

Η καλή και αποδοτική λειτουργία των συσκευών των καταναλωτών επιβάλλει, οι μεταβολές του μεγέθους της τάσης τροφοδοσίας τους να κυμαίνεται μέσα σε προκαθορισμένα όρια, ανάλογα με τον τύπο της κάθε συσκευής. Μεγάλες διακυμάνσεις έχουν ως αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά και τη μείωση της διάρκειας ζωής των συσκευών, ή ακόμα την εσφαλμένη λειτουργία έως και τη καταστροφή τους (εάν πρόκειται για ηλεκτρονικές συσκευές). Προκαλείται επίσης έντονη διακύμανση της φωτεινότητας των λαμπτήρων, καθώς και στην περίπτωση της μείωσης της τάσης παρουσιάζονται προβλήματα εκκίνησης και υπερθέρμανσης κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων.

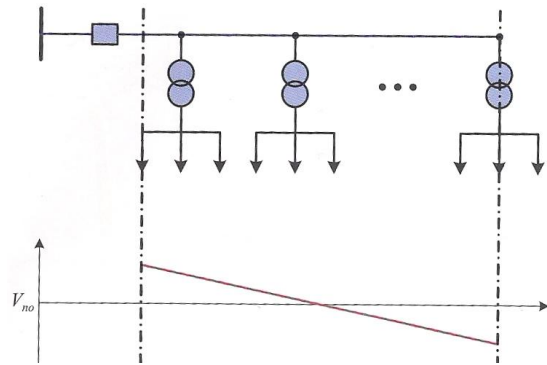
Οι διαταραχές της τάσης (στιγμιαίες διακοπές ή διακυμάνσεις της τάσης κ.α.) μπορεί να προκαλούνται τόσο από το δημόσιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και, αρκετά συχνά, από την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση του καταναλωτή ή από γειτονική εγκατάσταση άλλου καταναλωτή. Η εμφάνιση διαταραχών τάσης μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες, όπως π.χ.:

- στην επίδραση ακραίου καιρικού φαινομένου (θύελλα κ.α.) σε εναέριο δίκτυο
- στην πτώση στύλου εναερίου δικτύου της ΔΕΗ λόγω πρόσκρουσης οχήματος πάνω του
- σε τυχαία αποκοπή του ουδετέρου αγωγού σε υπόγειο καλώδιο της ΔΕΗ, στο οποίο δεν είναι δυνατή η επιθεώρηση
- σε μεγάλες και συχνές μεταβολές των ηλεκτρικών καταναλώσεων της εσωτερικής ηλεκτρικής εγκατάστασης ή άλλων γειτονικών εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων άλλων καταναλωτών (π.χ. εκκίνηση/διακοπή λειτουργίας κινητήρων)
- στη λειτουργία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (π.χ. φωτοβολταϊκές, αιολικές)

Προφανώς, για καθαρά οικονομικούς λόγους, είναι πρακτικά αδύνατο η οποιαδήποτε ηλεκτρική επιχείρηση να εξασφαλίσει στο κάθε καταναλωτή σταθερού μεγέθους ονομαστική τάση για την κάθε του συσκευή. Η κοινή πρακτική που ακολουθείται από όλες τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στον

περιορισμό των μεταβολών του μεγέθους της τάσης μέσα σε καθορισμένα όρια, που εγγυώνται και εξασφαλίζουν την ικανοποιητική λειτουργία όλων των συσκευών.

Η μεταβολή του μεγέθους της τάσης κατά μήκος μιας κύριας γραμμής πρωτεύουσας διανομής παρουσιάζει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 4.1 - Μεταβολή της τάσης κατά μήκος του κορμού της γραμμής πρωτεύουσας διανομής

Η μεταβολή της τάσης δεν είναι χρονικά σταθερή, αλλά εξαρτάται από τις διακυμάνσεις του φορτίου, κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Αυτό σημαίνει ότι στα χρονικά διαστήματα αυξημένης ζήτησης οι διακυμάνσεις του μεγέθους της τάσης θα είναι εντονότερες από ότι στα αντίστοιχα διαστήματα μειωμένης ζήτησης. Υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι για τον έλεγχο των διακυμάνσεων της τάσης διανομής:

- Μείωση της σειριακής αντίστασης και αντίδρασης
- Μείωση του ρεύματος φορτίου
- Αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος
- Ρύθμιση τάσης

Οι δύο πρώτες επιλογές απαιτούν υψηλές επενδύσεις κεφαλαίου, υψηλό κόστος εγκατάστασης και μεγάλους χρόνους εκτέλεσης. Η τρίτη επιλογή χρησιμοποιεί παράλληλους πυκνωτές κατά μήκος της γραμμής για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, αλλά η βελτίωση της τάσης είναι μεταξύ 2-3%, και συνήθως δεν επαρκεί για τη διόρθωση των περισσότερων προβλημάτων τάσης. Προκειμένου να ρυθμίζεται συνεχώς η τάση σε πραγματικό χρόνο αυξάνοντας ή μειώνοντας την τάση τροφοδοσίας, η εγκατάσταση των διατάξεων ρύθμισης τάσης παρέχει τη βέλτιστη λύση.

4.3 Πρότυπα τάσης

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 50160, το οποίο έχει εκδοθεί και στη χώρα μας ως Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50160/25.05.2000 καθορίζει ορισμένα όρια μέσα στα οποία είναι αποδεκτή η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον κάθε καταναλωτή. Τα όρια που τίθενται από το πρότυπο αυτό είναι περιληπτικά τα παρακάτω:

Όρια διακύμανσης της τάσης

- Για τη χαμηλή τάση, οι μετρούμενες τιμές πρέπει να βρίσκονται μεταξύ των ορίων $230 \pm 10\%$ (δηλαδή 207 V έως 253 V).
- Στη μέση τάση, τα όρια διακύμανσης είναι $20\text{kV} \pm 10\%$ (Όταν βέβαια η μέση τάση είναι 15kV τότε τα όρια είναι $15\text{kV} \pm 10\%$).

Βυθίσεις τάσης

Η ετήσια συχνότητά τους διαφέρει πολύ ανάλογα με το είδος του συστήματος και το σημείο παρατήρησης. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ο αναμενόμενος αριθμός των βυθίσεων τάσης μέσα σε ένα χρόνο μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέχρι και χίλιες.

Διακοπές τροφοδότησης

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας οι βραχείες διακοπές ετησίως κυμαίνονται από λίγες δεκάδες μέχρι αρκετές εκατοντάδες, ενώ η ετήσια συχνότητα των διακοπών διάρκειας μεγαλύτερης από τρία λεπτά μπορεί να είναι μικρότερη από 10 ή μέχρι 50 διακοπές ανάλογα με την περιοχή.

Το EN 50160 παρέχει μόνο γενικά όρια, τα οποία είναι τεχνικά και οικονομικά δυνατά για τον προμηθευτή να διατηρεί σε δημόσια συστήματα διανομής. Όταν απαιτούνται αυστηρότεροι όροι, πρέπει να διεξαχθεί μια χωριστή και λεπτομερή συμφωνία μεταξύ προμηθευτή και καταναλωτή.

Το EN 50160 έχει επιπλέον περιορισμούς. Δεν ισχύει υπό ασταθείς συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων:

- συνθήκες που προκύπτουν ως αποτέλεσμα σφάλματος

- σε περίπτωση βλάβης της εγκατάστασης ή του εξοπλισμού του πελάτη για συμμόρφωση με τα σχετικά πρότυπα ή με τις τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση φορτίων
- σε περίπτωση αδυναμίας συμμόρφωσης εγκαταστάσεων γεννητριών τα σχετικά πρότυπα ή με τις τεχνικές απαιτήσεις για διασύνδεση με σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- σε εξαιρετικές περιπτώσεις εκτός του ελέγχου του προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας, και ειδικότερα:
 - ✚ εξαιρετικές καιρικές συνθήκες και άλλες φυσικές καταστροφές
 - ✚ παρεμβολές τρίτων
 - ✚ δράσεις των δημόσιων αρχών
 - ✚ βιομηχανική δράση (υπόκεινται σε νομικές απαιτήσεις)
 - ✚ ανωτέρας βία
 - ✚ ελλείψεις ισχύος λόγω εξωτερικών συμβάντων.

4.4 Μοντέλα ροής φορτίου

Οι ροές φορτίου παρέχουν προφίλ τάσης που βοηθούν κατά το σχεδιασμό νέων κυκλωμάτων διανομής, την προσθήκη νέων καταναλωτών και την παρακολούθηση και τον καθορισμό προβλημάτων τάσης. Τα περισσότερα προγράμματα ροής φορτίου διανομής προσφέρουν μια συνάρτηση για την καταγραφή της τάσης ως συνάρτηση της απόστασης από την πηγή.

Οι εταιρίες παροχής ηλεκτρισμού μπορούν να μοντελοποιήσουν ένα κύκλωμα διανομής σε πολλά επίπεδα λεπτομέρειας. Πολλά βοηθητικά προγράμματα μοντελοποιούν περισσότερα από τα συστήματα τους με περισσότερες λεπτομέρειες. Για τις περισσότερες ροές φορτίου, τα βοηθητικά προγράμματα συνήθως μοντελοποιούν την πρωτεύουσα διανομή. Η μοντελοποίηση της δευτερεύουσας διανομής είναι περιστασιακά χρήσιμη για τη μοντελοποίηση συγκεκριμένων προβλημάτων σε έναν καταναλωτή. Η μοντελοποίηση μεγάλων πλευρικών κλάδων είναι συνήθως μια καλή ιδέα, αλλά μπορούμε να συγκεντρώσουμε τους περισσότερους πλευρικούς κλάδους μαζί ως ένα φορτίο όπου θα συνθεθεί στην κύρια

γραμμή. Η μοντελοποίηση κάθε μετασχηματιστή ως φορτίου σπάνια αξίζει την προσπάθεια. Μπορούμε να συνδυάσουμε τα φορτία μαζί και να διατηρήσουμε την ακρίβεια με κάποια κοινή λογική. Τα περισσότερα κυκλώματα κύριας γραμμής μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια αν διαχωριστούν σε 10 έως 20 τμήματα με φορτίο συγκεντρωμένο σε κάθε τμήμα. Φυσικά, ακριβή μοντέλα πυκνωτών και ρυθμιστών γραμμής είναι μια εξίσου καλή ιδέα.

Η ορθή μοντελοποίηση της φόρτισης της κάθε φάσης παρέχει ένα καλύτερο προφίλ τάσης ανά φάση. Τα ασύμμετρα φορτία προκαλούν μεγαλύτερη πτώση τάσης εξαιτίας της:

- **Μεγαλύτερης αντίστασης βρόχου** - Η σύνθετη αντίσταση που παρατηρείται από τα ασύμμετρα φορτία, η σύνθετη αντίσταση βρόχου συμπεριλαμβανομένης της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας, είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση θετικής ακολουθίας που παρατηρείται στα ισορροπημένα φορτία.
- **Υψηλότερο ρεύμα στις φορτισμένες φάσεις** - Αν το ρεύμα διαχωρίζεται άνισα στις φάσεις, οι πιο φορτισμένες φάσεις θα έχουν μεγαλύτερη πτώση τάσης.

Από τα δεδομένα που εισάγονται σε μοντέλα ροής φορτίου, η πιο περίπλοκη είναι η κατανομή φορτίου. Συχνά, τα φορτία εισάγονται ανάλογα με τα kVA του μετασχηματιστή. Εάν ένα κύκλωμα έχει μέγιστο φορτίο ίσο με το άθροισμα των kVA όλων των συνδεδεμένων μετασχηματιστών διαιρούμενο με 2.5, τότε κάθε φορτίο διαμορφώνεται ως το δεδομένο μέγεθος του μετασχηματιστή σε kVA διαιρούμενο με 2.5. Η ενσωμάτωση δεδομένων μέτρησης είναι ένας ακόμη πιο πολύπλοκος τρόπος για την κατανομή του φορτίου. Εάν μια παροχή διαθέτει ένα σύστημα διαχείρισης φορτίου του μετασχηματιστή ή άλλο σύστημα που συνδέει τη μέτρηση της χρήσης (σε kWh) σε έναν μετασχηματιστή για να εκτιμήσει τις φορτίσεις, η τροφοδοσία αυτών των δεδομένων στη ροή φορτίου μπορεί να αποφέρει ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όλα τα φορτία έχουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος, και συνήθως αυτός μετράται στον υποσταθμό. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετες μετρήσεις για την τελειοποίηση της κατανομής του συντελεστή ισχύος. Ορισμένοι πάροχοι ορίζουν επίσης συντελεστή ισχύος ανά κατηγορία πελατών.

Τα περισσότερα προγράμματα ροής φορτίου διανομής προσφέρουν αρκετούς τύπους φορτίου, συνήθως σταθερή ισχύ, σταθερό ρεύμα και σταθερή αντίσταση:

- **Φορτίο σταθερής ισχύος** - Η πραγματική και η άεργος ισχύς παραμένει σταθερή καθώς μεταβάλλεται η τάση. Καθώς μειώνεται η τάση, το φορτίο αυτό αντλεί περισσότερο ρεύμα, πράγμα που αυξάνει την πτώση τάσης. Ένα σταθερό μοντέλο ισχύος είναι καλό για τους κινητήρες επαγωγής.
- **Φορτίο σταθερής έντασης** - Το ρεύμα παραμένει σταθερό καθώς αλλάζει η τάση και η ισχύς αυξάνεται με τάση. Καθώς μειώνεται η τάση, η ένταση του ρεύματος παραμένει η ίδια, οπότε η πτώση τάσης δεν αλλάζει.
- **Φορτίο σταθερής αντίστασης** - Η σύνθετη αντίσταση είναι σταθερή καθώς αλλάζει η τάση και η ισχύς αυξάνεται με το τετράγωνο της τάσης. Καθώς μειώνεται η τάση, η έλξη ρεύματος πέφτει γραμμικά, έτσι μειώνεται η πτώση τάσης. Το μοντέλο σταθερής αντίστασης είναι καλό για τους λαμπτήρες πυράκτωσης και για άλλα φορτία αντίστασης.

Κανονικά, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τα περισσότερα κυκλώματα περίπου με 40 έως 60% σταθερή ισχύ και 40 έως 60% σταθερή αντίσταση. Η μοντελοποίηση όλων των φορτίων ως σταθερού ρεύματος είναι μια καλή προσέγγιση για πολλά κυκλώματα. Η μοντελοποίηση όλων των φορτίων ως σταθερής ισχύος είναι συντηρητική για την πτώση τάσης.

4.5 Ρύθμιση τάσης με χρήση μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ

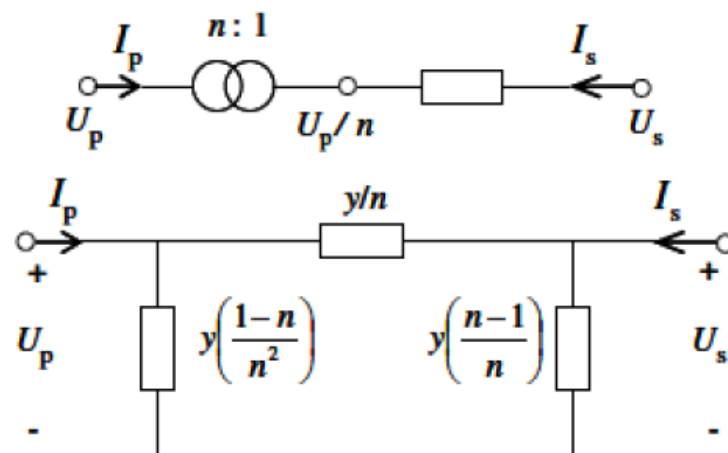
Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς αλλαγής της τάσης εξόδου τους χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η τάση ανά σπείρα παραμένει σταθερή. Ο μηχανισμός αυτός, που βρίσκεται συνήθως στην πλευρά υψηλής τάσης καθώς εκεί ρέουν μικρότερα ρεύματα και υπάρχουν περισσότερες σπείρες επιτρέποντας ακριβέστερη ρύθμιση της τάσης, ονομάζεται Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ. Τα ΣΑΤΥΦ είναι σχετικά αργοί διακριτοί μηχανισμοί, που μεταβάλλονται μόνο κατά ένα βήμα την φορά, όταν η ελεγχόμενη τάση βρεθεί εκτός μιας νεκρής ζώνης περισσότερο από ένα

προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Οι χρονικές στιγμές στις οποίες μπορούν να λειτουργήσουν τα ΣΑΤΥΦ, είναι:

$$t_{k+1} = t_k + T_D \quad (4.4)$$

Όπου T_D είναι η χρονοκαυστέρηση μεταξύ δυο διαδοχικών αλλαγών του ΣΑΤΥΦ και περιλαμβάνει τόσο τον απαραίτητο μηχανικό χρόνο που απαιτείται για την αλλαγή, όσο και τον εκούσιο χρόνο καθυστέρησης που εισάγεται για αποφυγή άσκοπων κινήσεων και ταλαντώσεων, ειδικά στην περίπτωση που υπάρχουν πολλά ΣΑΤΥΦ σε σειρά.

Ο λόγος ενός μετασχηματιστή μπορεί να αλλάξει προσθέτοντας ή αφαιρώντας τυλίγματα είτε στο πρωτεύον είτε στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή με αλλαγές λήψης. Ένας τέτοιος μετασχηματιστής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.2) καθώς και το ισοδύναμο Π του:



Σχήμα 4.2 - Κύκλωμα μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ και ισοδύναμο Π

όπου I , U και y είναι ρεύμα, τάση και αγωγιμότητα αντίστοιχα, n είναι ο λόγος μετασχηματισμού και p , s είναι πρωτεύον και δευτερεύον αντίστοιχα.

Υπάρχουν δύο ειδών μετασχηματιστές αλλαγής λήψεως:

1) Αυτοί που η αλλαγή λήψης απαιτεί ο μετασχηματιστής να είναι εκτός συστήματος (offline) κατά τη διάρκεια αυτής, και

2) αυτοί που έχουν τη δυνατότητα αλλαγής λήψης όταν είναι ακόμα συνδεδεμένοι στο δίκτυο και περνάει ρεύμα από τα τυλίγματα τους (ΣΑΤΥΦ).

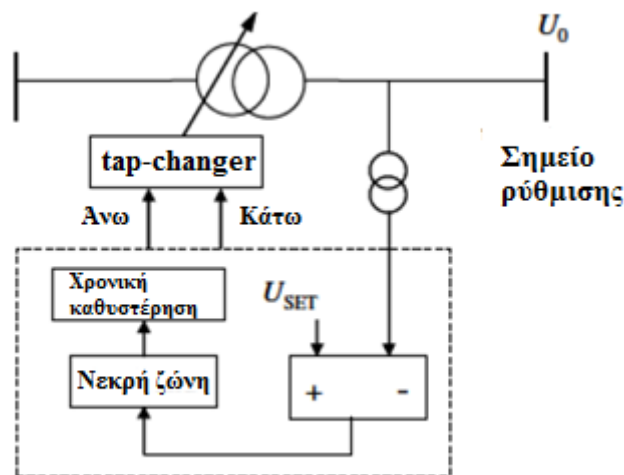
Ο ελεγκτής του ΣΑΤΥΦ προσπαθεί να κρατήσει σταθερή την τάση U_1 μεταξύ των ορίων:

$$U_K \leq U_1 \leq U_A \quad (4.5)$$

Όπου

- $U_K = U_{SET} - 0,5 \cdot U_{DZ}$, το κάτω αποδεκτό όριο της τάσης
- $U_A = U_{SET} + 0,5 \cdot U_{DZ}$, το άνω αποδεκτό όριο της τάσης
- U_{SET} = η τάση αναφοράς που δίνεται από τον κατασκευαστή
- U_{DZ} = η νεκρή ζώνη που δίνουμε εμείς στο ΣΑΤΥΦ

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.3), φαίνεται ο βασικός τρόπος λειτουργίας ενός ΣΑΤΥΦ.



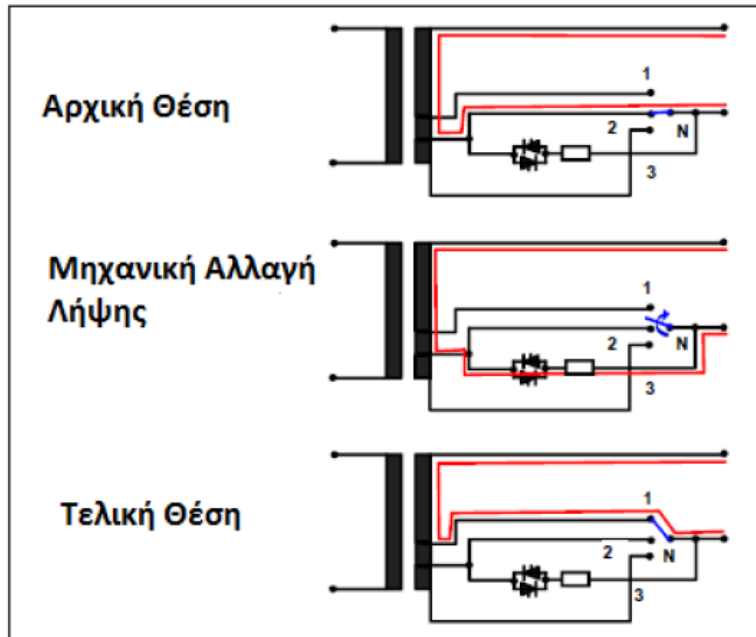
Σχήμα 4.3 - Βασικός τρόπος λειτουργίας ενός ΣΑΤΥΦ

Οι μετασχηματιστές ΣΑΤΥΦ έχουν συνήθως ενσωματωμένη τη λειτουργία της αντιστάθμισης της πτώσης τάσης στη γραμμή μεταφοράς (Line Drop Compensation ή LDC). Η εν λόγω λειτουργία βοηθά να κρατηθεί σταθερή η τάση σε έναν ζυγό απομακρυσμένο χωρίς την ανάγκη χρήσης επικοινωνίας με το ζυγό μειώνοντας έτσι σε πολύ μεγάλο βαθμό τις οικονομικές δαπάνες για την εγκατάσταση αυτών (βλ. παράγραφο 4.8).

Το ΣΑΤΥΦ έχει και ένα εύρος ζώνης χρόνου το οποίο το ονομάζουμε **χρονική καθυστέρηση (time delay)** και περιλαμβάνει το χρόνο που χρειάζεται το μηχανικό μέρος του μετασχηματιστή για αλλαγή λήψης (μεγέθους 3-10sec), ο οποίος ονομάζεται **μηχανική χρονική** καθυστέρηση έναν πιο μικρό χρόνο της τάξης του 1sec ώστε να αποφευχθούν άσκοπες αλλαγές λήψης σε πολύ απότομες αλλαγές τάσης ακόμα και αν ξεπερνάνε τα όρια του εύρους ζώνης και τέλος έναν πολύ μικρό χρόνο της τάξης των msec (40-60msec) ο οποίος ονομάζεται **χρονική καθυστέρηση μετάβασης** και είναι ο στιγμιαίος χρόνος κατά τον οποίο γίνεται η αλλαγή λήψης από την κατάσταση που βρίσκεται στην αμέσως προηγούμενη ή επόμενη ανάλογα αν έχουμε ανύψωση ή πτώση τάσης πέραν από το επιθυμητό όριο.

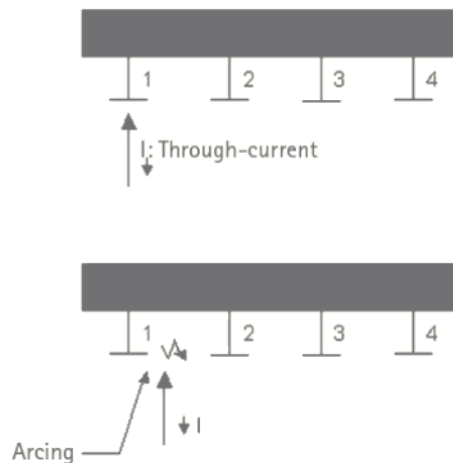
Για να μην υπάρχει διακοπή τροφοδότησης του φορτίου κατά τη διάρκεια της αλλαγής λήψης τα ΣΑΤΥΦ είναι εφοδιασμένα με μία αντίσταση σε σειρά από την οποία περνάει όλο το ρεύμα που τροφοδοτούσε τα φορτία αλλά ακόμα και με ηλεκτρονικά μέσα και συγκεκριμένα με θυρίστορ ώστε η διαδικασία αλλαγής να γίνεται όσο πιο γρήγορα και ομαλά (Σχήμα 4.4). Πιο συγκεκριμένα, η λογική με την οποία λειτουργούν τα θυρίστορ έχει ως εξής:

- α) Αν η τάση στο σημείο N είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση στη θέση 2 τότε ενεργοποιούνται τα θυρίστορ για αλλαγή της λήψης από τη 2η στην 1η λήψη και
- β) Αν η τάση στο σημείο N γίνει ίση με την τάση στο σημείο 1 τότε απενεργοποιούνται τα θυρίστορ γιατί έχει επιτευχθεί η επιθυμητή τάση λειτουργίας.



Σχήμα 4.4 - Διαδικασία αλλαγής λήψεων (από την 2η στην 1η λήψη) σε ένα ΣΑΤΥΦ

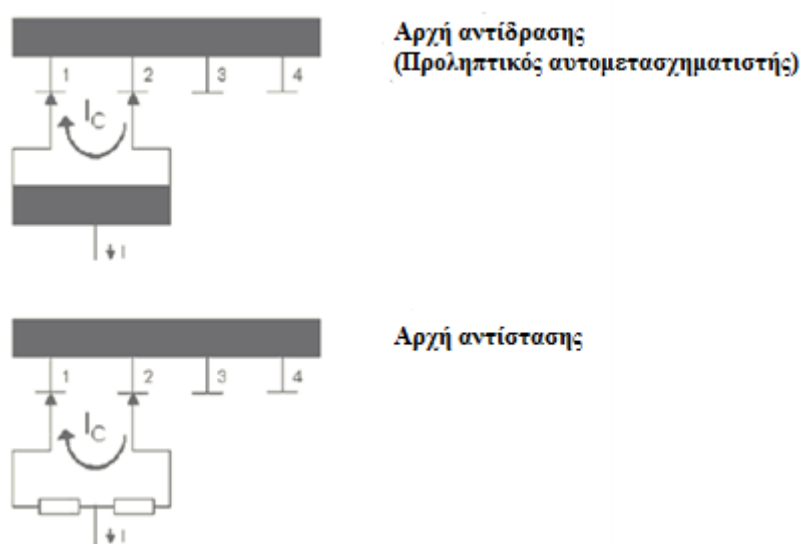
Η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ έχει διαφορές σε σχέση με τον τρόπο λειτουργίας των απλών μετασχηματιστών. Μοιάζουν αρκετά στον τρόπο λειτουργίας τους και στη συνδεσμολογία τους με τους γνωστούς σε όλους μας αυτομετασχηματιστές.



Σχήμα 4.5 - Απώλεια φορτίου λόγω αλλαγής λήψης

Οι Μ/Σ ΣΑΤΥΦ λειτουργούν ως ρυθμιστές τάσης αλλάζοντας τις λήψεις τους υπό φορτίο χωρίς να διακόπτεται η ροή ισχύος προς το υπόλοιπο δίκτυο (Σχήμα 4.5). Πράγματι, τυχόν αλλαγή λήψης χωρίς κατάλληλες συνθήκες συνεχόμενης

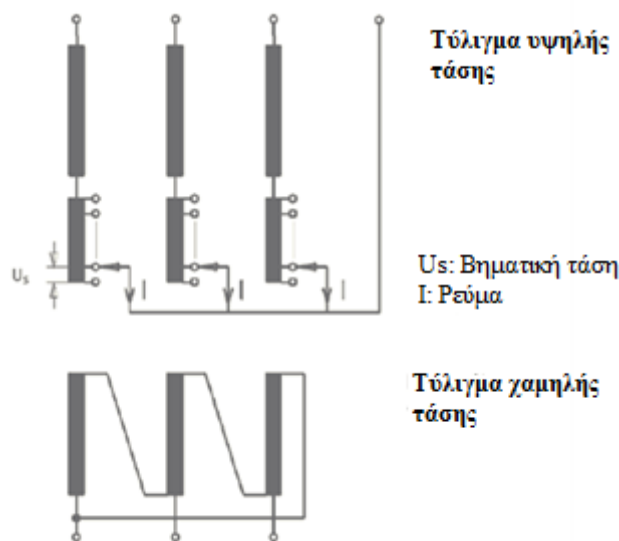
λειτουργίας του δικτύου ώστε να τροφοδοτηθούν τα φορτία θα δημιουργούσε σοβαρότατα προβλήματα στη σωστή λειτουργία του δικτύου και είναι μη αποδεκτή. Από την αρχή της εξέλιξης των ΣΑΤΥΦ υπάρχουν δύο βασικές αρχές αλλαγής λήψης που έχουν χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και εξαιτίας αυτών των αρχών τα ΣΑΤΥΦ χωρίζονται σε **υψηλής ταχύτητας αντίστασης (high-speed resistor-type)** και **επαγωγής (reactor-type)** όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.6. Κατά την πάροδο του χρόνου και οι δύο αρχές έχουν εξελιχθεί σε αξιόπιστα στοιχεία των μετασχηματιστών τα οποία είναι διαθέσιμα σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών ρεύματος και τάσης. Αυτά τα στοιχεία καλύπτουν τις ανάγκες του σημερινού ηλεκτρικού δικτύου και εξασφαλίζουν βελτιστοποιήσεις στο σύστημα διανομής ή μεταφοράς και καλύτερο έλεγχο αυτού.



Σχήμα 4.6 - Αρχή αλλαγής λήψης με την χρήση αντιστάσεων και αντιδράσεων

Το ΣΑΤΥΦ αλλάζει την αναλογία του Μ/Σ προσθέτοντας είτε αφαιρώντας ελίγματα είτε απο το πρωτεύον είτε από το δευτερεύον του τύλιγμα. Συνεπώς Ο Μ/Σ είναι εξοπλισμένος με τυλίγματα λήψεως που είναι συνδεδεμένα στο ΣΑΤΥΦ. Το σχήμα 4.7 δείχνει τον τρόπο δόμησης ενός τριφασικού Μ/Σ ρύθμισης τάσης σε συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου με τη ρύθμιση να λαμβάνει χώρα στο πρωτεύον του Μ/Σ. Απλή αλλαγή λήψης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου θεωρείται μη αποδεκτή διότι υπάρχει στιγμιαία απώλεια του φορτίου του συστήματος κατά τη

διάρκεια αλλαγής λήψης. Για το λόγο αυτό υπάρχει η αρχή "make before break contact concept" η οποία φαίνεται επίσης στο σχήμα 4.7 και λειτουργεί είτε μέσω της χρήσης μίας αντίστασης είτε μίας αντίδρασης οι οποίες ενώνουν γειτονικές λήψεις και μόνο μέσω αυτών γίνεται η αλλαγή από τη μία λήψη στην άλλη. Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα και κατ' επέκταση και το φορτίο δεν αποκόπτεται και κατά τη διάρκεια αλλαγής λήψης συνεχίζει να διαρρέει μέσω της αντίστασης ή αντίδρασης. Την ίδια στιγμή η αντίσταση αυτή περιορίζουν το ρεύμα που τις διαρρέει για την περίοδο που βρίσκονται και οι δύο λήψεις σε λειτουργία.



Σχήμα 4.7 - Διάταξη του τυλίγματος ενός ΣΑΤΥΦ σε συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου

Η τάση μεταξύ δύο λήψεων ονομάζεται **τάση βήματος** (step voltage) και κυμαίνεται μεταξύ του 0,8% και 2,5% της ονομαστικής τάσης του Μ/Σ. Τα κύρια μέρη ενός ΣΑΤΥΦ είναι τα συστήματα διεπαφής για τα ρεύματα της αρχής "make and break" καθώς και τα ρεύματα μεταφοράς είτε διανομής, οι αντιστάσεις μετάβασης από την μία λήψη σε άλλη, τα κινητά μέρη που είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση αλλαγής λήψης, οι συσσωρευτές ενέργειας και ένας κινητήριος μηχανισμός οδήγησης του ΣΑΤΥΦ.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διασύνδεσης των τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση τάσης και ουσιαστικά καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται

αυτή η ρύθμιση καθώς και το εύρος ρύθμισης. Παρακάτω παρατίθενται αυτοί οι τρόποι σύνδεσης.

- Η **γραμμική διάταξη (linear arrangement)** χρησιμοποιείται γενικά σε μετασχηματιστές ισχύος με μεσαίο εύρος ρύθμισης μέχρι 20%. Τα τυλίγματα αλλαγής λήψης προστίθενται σε σειρά με το κύριο τύλιγμα και αλλάζουν την αναλογία του μετασχηματιστή. Η ονομαστική θέση λήψης μπορεί να είναι οποιαδήποτε από τις θέσεις λήψης.
- Η **αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα (reversing change-over selector)** είναι ακόμα ένας τρόπος λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ με την οποία το επιπλέον τύλιγμα προστίθεται ή αφαιρείται από το κύριο τύλιγμα ώστε το εύρος ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ να διπλασιαστεί είτε οι αλλαγές λήψης να μειωθούν. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το επιπλέον τύλιγμα ρύθμισης αποσυνδέεται από το κύριο τύλιγμα. Οι μεγαλύτερες απώλειες χαλκού παρατηρούνται όταν βρίσκεται η λήψη στην ελάχιστη δυνατή. Η ονομαστική λήψη είναι συνήθως η μεσαία λήψη ή η ουδέτερη λήψη.
- Χρησιμοποιώντας τη σύνδεση **κοινή αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα (coarse change-over selector)** το δευτερεύον τύλιγμα του ΣΑΤΥΦ συνδέεται είτε στη θετική είτε στην αρνητική λήψη του κοινού τυλίγματος. Κατά τη λειτουργία της παραπάνω σύνδεσης το το τύλιγμα λήψης αποσυνδέεται από το κύριο τύλιγμα και ελέγχεται η αντίσταση σειράς για τυχόν παρουσίαση προβλημάτων. Στην περίπτωση αυτή οι απώλειες χαλκού είναι ελάχιστες στη χαμηλότερη θέση λήψης. Αυτό το πλεονέκτημα παρόλα αυτά ανεβάζει τις απαιτήσεις σε μονωτικό υλικό και απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό τυλιγμάτων.
- Η **πολλαπλή κοινή αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα (multiple coarse change-over selector)** επιτυγχάνει την αύξηση σε μεγάλο βαθμό του εύρους ρύθμισης εκ μέρους του ΣΑΤΥΦ. Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικούς μετασχηματιστές.
- Η **διπλή αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα (double reversing change-over selector)** αποφεύγει την αποσύνδεση του τυλίγματος του ΣΑΤΥΦ από το κύριο τύλιγμα του Μ/Σ κατά τη διάρκεια αλλαγής λήψης.

Το ποιος από τους παραπάνω τρόπους σύνδεσης των τυλιγμάτων θα χρησιμοποιηθεί δεν εξαρτάται παρά από το σύστημα και τις απαιτήσεις του δικτύου. Όλοι οι τρόποι σύνδεσης όμως χρησιμοποιούνται είτε σε διπλού τυλίγματος μετασχηματιστές είτε σε αυτομετασχηματιστές είτε σε μετασχηματιστές αλλαγής φάσης. Επίσης, πού θα τοποθετηθούν τα επιπλέον τυλίγματα (πρωτεύον ή δευτερεύον) του Μ/Σ εξαρτάται από τη σχεδίαση του μετασχηματιστή και από τις απαιτήσεις του κατασκευαστή αλλά και του πελάτη.

Κάτι που αξίζει τέλος να αναφέρουμε για τα ΣΑΤΥΦ αντίστασης (ή αντίδρασης) είναι ότι η πλειοψηφία των ΣΑΤΥΦ αντίστασης βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή του Μ/Σ (in-tank OLTC) (Σχήμα 4.8α) ενώ οι επαγωγικοί ΣΑΤΥΦ βρίσκονται σε ξεχωριστό τμήμα του Μ/Σ το οποίο είναι συνήθως συγκολλημένο στη δεξαμενή του Μ/Σ (compartment OLTC) (Σχήμα. 4.8β).



Σχήμα 4.8 - α) Μ/Σ με ενσωματωμένο ΣΑΤΥΦ (In-tank OLTC), β) Μ/Σ με αποκομμένο ΣΑΤΥΦ (compartment OLTC)

4.6 Έλεγχος τάσης με πυκνωτές αντιστάθμισης

Στα δίκτυα διανομής μπορούν να τοποθετηθούν σε κατάλληλα επιλεγμένα σημεία πυκνωτές αντιστάθμισης για την ρύθμιση τάσης και την μείωση των ηλεκτρικών απωλειών. Η εξίσωση 4.5 δείχνει ότι η αύξηση της τάσης (μείωση του ρεύματος φορτίου I_L) μπορεί να υπολογιστεί εάν γνωρίζουμε τη μονοφασική ή τριφασική άεργο ισχύ, την απόσταση από την πηγή έως τον πυκνωτή, την επαγωγική αντίσταση γραμμής και την τάση γραμμής. Η αύξηση της τάσης είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του φορτίου.

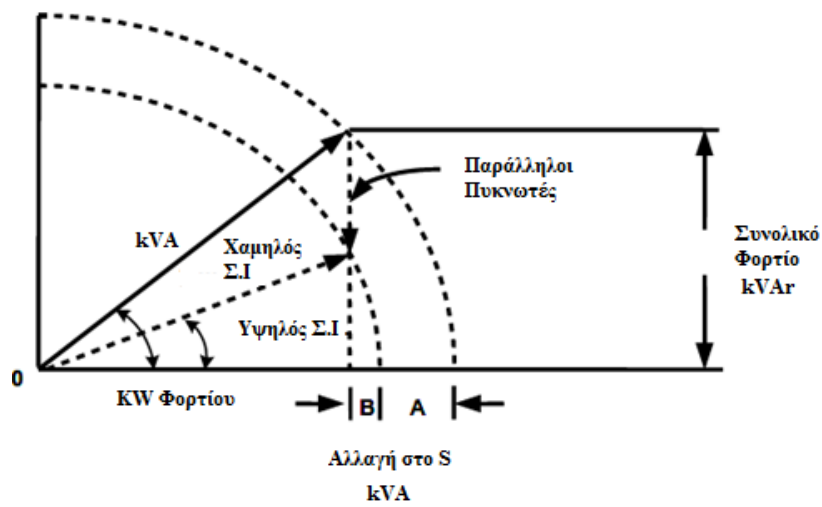
$$\Delta V_{rise} \% = Q \cdot X \cdot I / V^2 \quad (4.5)$$

Οι πυκνωτές μετρώνται σε kVAr, η αξία των οποίων προέρχεται από την χωρητικότητα C σε μF , την τάση rms σε V και τη συχνότητα f

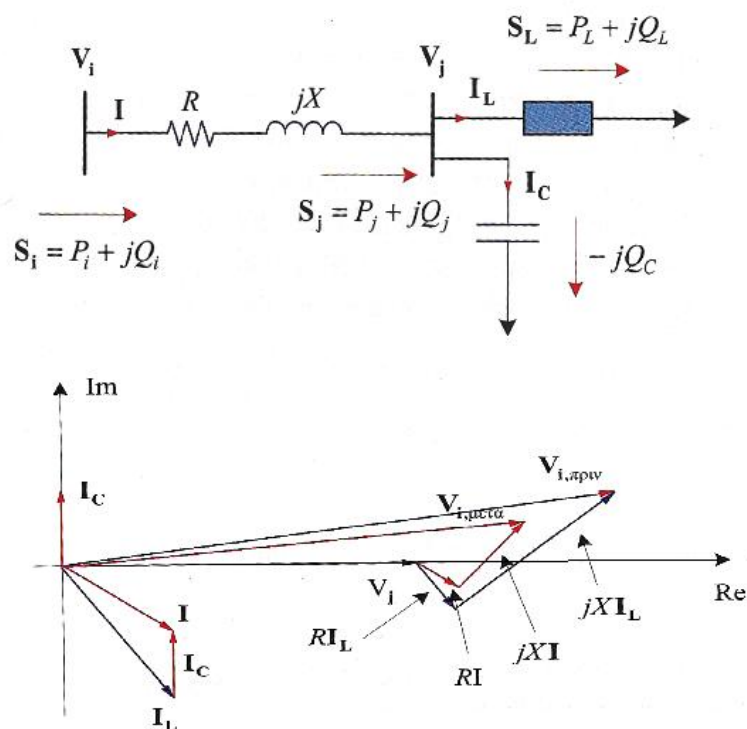
$$Q_C (\text{kVAr}) = (V^2 2\pi f C \times 10^{-6}) / 1000 \quad (4.6)$$

Παρατηρούμε ότι η τιμή της άεργης ισχύος του πυκνωτή είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσης. Καθώς πέφτει τάση σε ένα κύκλωμα, η τιμή της άεργης ισχύος μειώνεται και η άνοδος της τάσης μειώνεται.

Υπάρχουν δύο τύποι πυκνωτών: **σειράς και παράλληλοι**. Οι πυκνωτές σειράς δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία, επειδή η εφαρμογή τους μπορεί να προκαλέσει συντονισμό. Συχνά, μπορεί να προστεθεί αντίσταση για τη διόρθωση αυτού του προβλήματος. Οι **παράλληλοι** πυκνωτές παρέχουν μια πηγή άεργης ισχύος παρόμοια με μια υπερβολικά διεγερμένη σύγχρονη γεννήτρια. Συχνά εφαρμόζονται σε γεννήτριες επαγωγής για την παροχή τάσης. Οι παράλληλοι πυκνωτές χαμηλώνουν ή εξουδετερώνουν την υστέρηση του ρεύματος σε ένα κύκλωμα και, συνεπώς, αυξάνουν την τάση στη θέση τους. Αυτό βελτιώνει την ρύθμιση της τάσης. Όταν προστίθενται πυκνωτές σε ένα κύκλωμα, μειώνουν το ρεύμα φορτίου, δίνουν την ικανότητα απελευθέρωσης για να εξυπηρετούν το μελλοντικό φορτίο και μειώνουν το κόστος εξυπηρέτησης ισχύος.

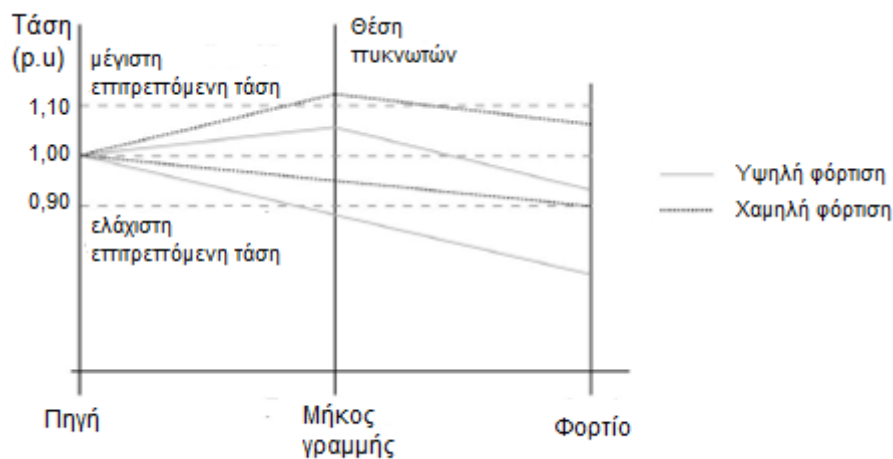


Σχήμα 4.9 - Εφαρμογή των παράλληλων πυκνωτών



Σχήμα 4.10 - Ακτική γραμμή με παράλληλο πυκνωτή αντιστάθμισης και διανυσματικό διάγραμμα της τάσης στην άφιξη της γραμμής

Ένας σωστά επιλεγμένος και τοποθετημένος παράλληλος πυκνωτής εξασφαλίζει ότι η τάση στο φορτίο θα είναι εντός του επιτρεπόμενου ορίου στην κατάσταση βαρέως φορτίου. Ωστόσο, κατά την χαμηλή φόρτιση, ο ίδιος πυκνωτής θα αυξήσει την τάση πάνω από το επιτρεπόμενο όριο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 - Επίδραση των πυκνωτών στην τάση

Ο τρόπος για να αποφεύγεται αυτή η επίδραση είναι να χρησιμοποιήσουμε τις **αποξεύξιμες τράπεζες πυκνωτών (switched capacitor banks)**. Οι πυκνωτές ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια ισχυρών συνθηκών φόρτισης και απενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια των συνθηκών χαμηλής φόρτισης. Όταν ενεργοποιείται ο (οι) πυκνωτής (-ες), το χωρητικό ρεύμα προστίθεται στο επαγωγικό ρεύμα, μειώνοντας το συνολικό ρεύμα, την πτώση τάσης και τις ηλεκτρικές απώλειες. Το τελευταίο οφείλεται στη μείωση της άεργου ισχύος στο σύστημα.

Ο βέλτιστος αριθμός, το μέγεθος και η θέση των τραπεζών πυκνωτών σε μια γραμμή καθορίζονται με λεπτομερή ανάλυση σε υπολογιστή, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την ελαχιστοποίηση των λειτουργικών, επενδυτικών δαπανών και του κόστους εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή είναι τα επίπεδα τάσης, η συνολική φόρτιση, ο συντελεστής διανομής και ο συντελεστής ισχύος των φορτίων.

Για την καλύτερη προσαρμογή στις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης και τον περιορισμό των έντονων διακυμάνσεων της τάσης, οι αποζεύξιμοι πυκνωτές μπαίνουν κατά βήματα. Ο αριθμός των βημάτων περιορίζεται από την αύξηση του κόστους των διακοπτικών στοιχείων και του κυκλώματος ελέγχου τους. Για το μέγεθος των αποζεύξιμων πυκνωτών, έχει υιοθετηθεί από τις περισσότερες ηλεκτρικές επιχειρήσεις ότι το συνολικό μέγεθος των πυκνωτών (αποζευγμένοι είτε μόνιμοι) θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε για 50% του μέγιστου φορτίου το μέγεθος της τάσης στο άκρο της γραμμής να ισούται με το μέγιστο επιτρεπόμενο.



Σχήμα 4.12 - Αποζεύξιμη τράπεζα πυκνωτών αναρτημένη σε στύλο διανομής XT

Οι αποζευγμένες τράπεζες πυκνωτών κανονικά έχουν διαστασιολογηθεί ώστε να περιορίζουν την αύξηση της τάσης κατά 2,5 έως 5% (ανάλογα με την προτίμηση κάθε επιχείρησης). Αφού εφαρμοστούν οι αποζευγμένες ή οι μόνιμες τράπεζες πυκνωτών, μπορούν να εφαρμοστούν ρυθμιστές τάσης για να διασφαλιστεί ότι τα επίπεδα τάσης σε όλα τα σημεία κατά μήκος της γραμμής είναι εντός των απαιτήσεων ποιότητας ισχύος της επιχείρησης.

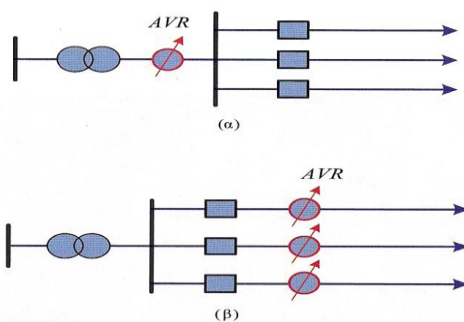
Τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης είναι: η απελευθέρωση της παραγωγής, η χωρητικότητα του συστήματος απελευθερώνεται, οι απώλειες συστήματος μειώνονται, τα επίπεδα τάσης αυξάνονται (Βελτιωμένη ποιότητα παροχής), βελτιωμένη ρύθμιση τάσης.

4.7 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης

Η δυνατότητα αλλαγής λήψης των Μ/Σ στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και ΜΤ/ΧΤ, καθώς επίσης και η χρήση παράλληλων πυκνωτών αντιστάθμισης, συμβάλλουν θετικά στην μείωση των διακυμάνσεων της τάσης, αλλά δεν λύνουν το πρόβλημα. Η ουσιαστική αντιμετώπιση του θέματος στα δίκτυα διανομής επιτυγχάνεται με την χρήση των αυτόματων ρυθμιστών τάσης (automatic voltage regulator - AVR). Ο AVR πλεονεκτεί σε σχέση με τους Μ/Σ ΣΑΤΥΦ διότι:

- Η εγκατάσταση των ΣΑΤΥΦ είναι χρονοβόρα διαδικασία και έχουν υψηλότερο κόστος αγοράς σε σχέση με τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης
- Ολόκληρος ο μετασχηματιστής πρέπει να βγει εκτός σύνδεσης αντί να παραμείνει ενεργοποιημένος, ενώ μόνο οι ρυθμιστές τάσης είναι εκτός λειτουργίας
- Η αλλαγή των AVR σε περίπτωση βλάβης πραγματοποιείται σε διάστημα ωρών αντί για μέρες

Οι ρυθμιστές αυτοί, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο το μέγεθος της τάσης σε επιλεγμένες θέσεις των γραμμών του δικτύου και ανάλογα με τις παρατηρούμενες διακυμάνσεις, μεταβάλλουν ανάλογα το μέγεθος της τάσης στα σημεία εγκατάστασής τους με στόχο την αντιστάθμιση της πτώσης τάσης κατά μήκος των γραμμών. Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης μπορεί να τοποθετηθεί στον υποσταθμό διανομής (bus regulation), όπου ελέγχει ταυτόχρονα όλες τις γραμμές πρωτεύουσας διανομής που αναχωρούν από το ζυγό ΜΤ (σχήμα 4.13α), είτε αμέσως μετά το ζυγό ΜΤ στην αναχώρηση της κάθε γραμμής (feeder regulation), σχήμα 4.13β).



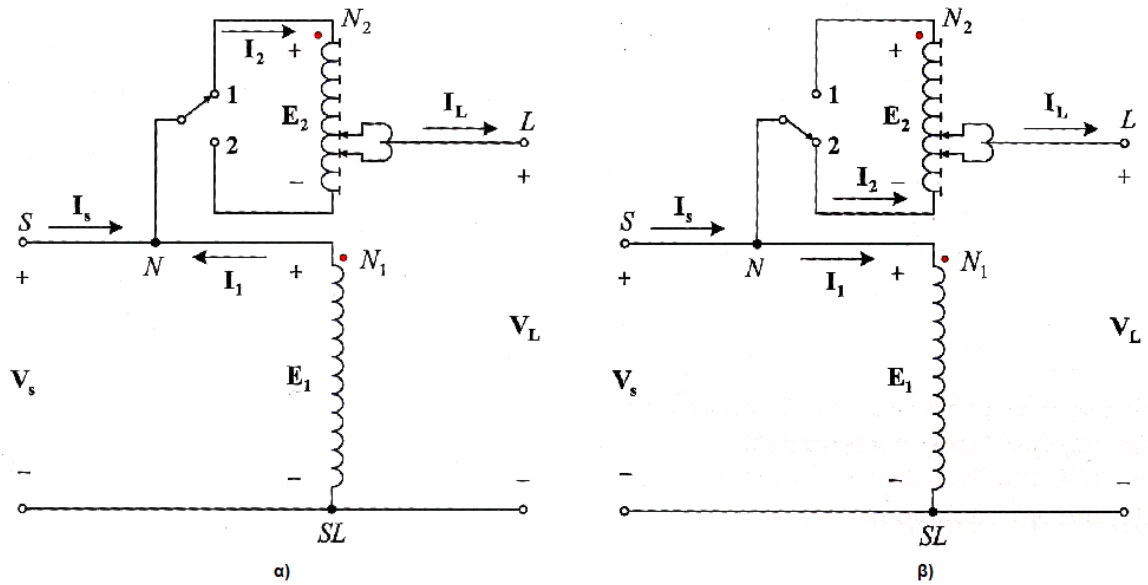
Σχήμα 4.13 - Τρόποι εγκατάστασης των αυτόματων ρυθμιστών τάσης στα δίκτυα διανομής

Λόγω της ανομοιομορφης φόρτισης των γραμμών, οι διακυμάνσεις τάσης θα είναι διαφορετικές σε κάθε γραμμή. Για το λόγο αυτό, ο δεύτερος τρόπος είναι τεχνικά καλύτερος, αλλά πιο δαπανηρός.

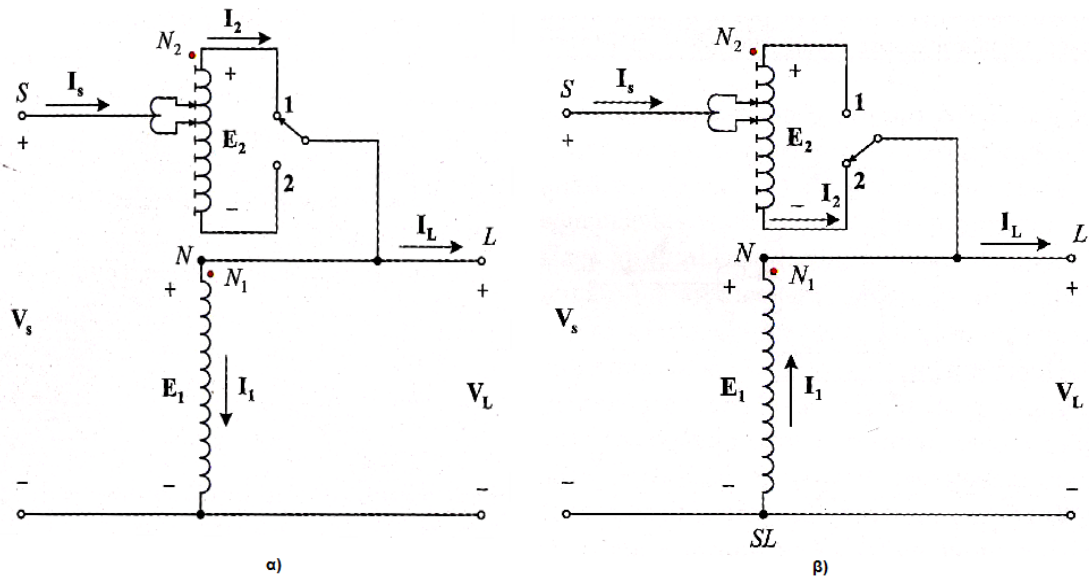
Οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης ρυθμίζονται, ώστε ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις του φορτίου να διατηρούν τις μεταβολές της τάσης εντός των ορίων που καθορίζονται από την ηλεκτρική επιχείρηση. Η τάση στην έξοδο τους μεταβάλλεται κατά βήματα είτε προς τα πάνω (boost) είτε προς τα κάτω (buck). Η ισχύς τους κυμαίνεται, για τους μονοφασικούς ρυθμιστές από 25 έως 800 KVA, και για τους τριφασικούς από 500 έως και 2000 KVA. Λόγω ανομοιομορφίας του φορτίου μεταξύ των τριών φάσεων μια τριφασικής γραμμής είναι προτιμότερη η χρήση τριών μονοφασικών ρυθμιστών (ένας ανά φάση) αντί ενός τριφασικού.

Το κύκλωμα ισχύος του αυτόματου ρυθμιστή τάσης είναι στην ουσία ένας αυτομετασχηματιστής (AM/Σ). Ο αριθμός των ελιγμάτων του τυλίγματος σειράς είναι μικρότερος από τον αριθμό των ελιγμάτων του κοινού τυλίγματος. Το τύλιγμα σειράς είναι εφοδιασμένο με μηχανισμό αλλαγής λήψης υπό φορτίο (tap-changing), με αποτέλεσμα τη δυνατότητα μεταβολής της σχέσης μεταφοράς του AM/Σ και κατ' επέκταση τη μεταβολή της τάσης στο φορτίο.

Το πρόσημο της μεταβολής της τάσης (σε σχέση με την αντίστοιχη ονομαστική) στην έξοδο του αυτομετασχηματιστή, δηλαδή εάν η ρύθμιση είναι προς τα επάνω σε περίπτωση μειωμένης τάσης στο φορτίο (boost configuration) ή προς τα κάτω στην περίπτωση αύξησης της τάσης του φορτίου (buck configuration), ορίζεται μέσω ενός επιλογικού διακόπτη δύο θέσεων (reversing switch), του οποίου οι δύο θέσεις επιλογής συνδέονται στους ακροδέκτες του τυλίγματος σειράς. Δηλαδή, στη μια από τις δύο δυνατές θέσεις επιλογής, ανάλογα με τον τύπο του ρυθμιστή, η τάση στην έξοδο του AM/Σ αυξάνει στην περίπτωση που η τάση του φορτίου είναι μικρότερη της αντίστοιχης ονομαστικής, ενώ στην δεύτερη θέση επιλογής η τάση στην έξοδο, στην περίπτωση αύξησης της τάσης του φορτίου άνω της ονομαστικής τιμής, μειώνεται. Στα επόμενα σχήματα δείχνονται οι συνδεσμολογίες των προαναφερθέντων ρυθμιστών Α και Β κατά ANSI, στις περιπτώσεις ρυθμίσεων προς τα επάνω και προς τα κάτω αντίστοιχα.



Σχήμα 4.14 - Αυτόματος ρυθμιστής τάσης τύπου A: α) με ρύθμιση προς τα κάτω (buck configuration), β) με ρύθμιση προς τα πάνω (boost configuration)

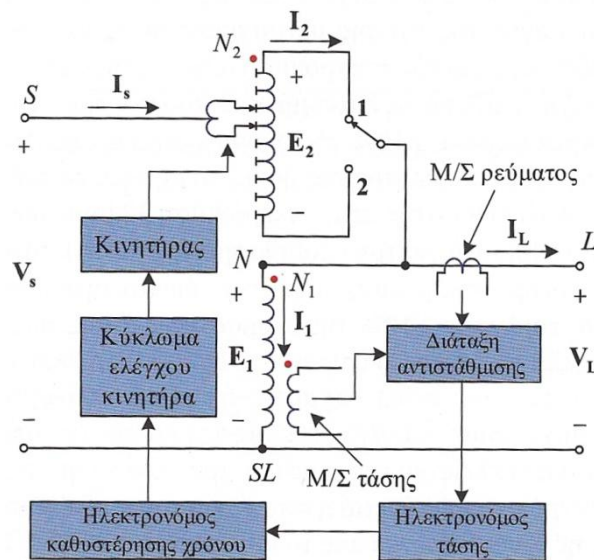


Σχήμα 4.15 - Αυτόματος ρυθμιστής τάσης τύπου B: α) με ρύθμιση προς τα πάνω (boost configuration), β) με ρύθμιση προς τα κάτω (buck configuration)

Παρατηρούμε ότι στον τύπο A η τάση της πηγής εφαρμόζεται στο ένα μόνο τυλίγμα και συγκεκριμένα στο κοινό τυλίγμα, ενώ η τάση στο φορτίο προέρχεται και από τα δύο τυλίγματα. Αντίθετα, στο τύπο B, η τάση της πηγής εφαρμόζεται και στα δύο

τυλίγματα, ενώ η τάση του φορτίου προέρχεται από τους ακροδέκτες του ενός μόνο τυλίγματος και συγκεκριμένα του κοινού τυλίγματος. Ο ακροδέκτης του τυλίγματος σειράς με τον οποίο συνδέεται η τάση της πηγής συμβολίζεται με το γράμμα S, με το γράμμα L συμβολίζεται ο ακροδέκτης τάσης εξόδου του ρυθμιστή που συνδέεται με το φορτίο, με τα γράμματα SL ο κοινός ακροδέκτης μεταξύ πηγής και φορτίου και τέλος με το γράμμα N ο κοινός κόμβος (σημείο σύνδεσης) μεταξύ των δύο τυλιγμάτων.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.16) δείχνεται το κύκλωμα ελέγχου του αυτομάτου ρυθμιστή τάσης σε απλοποιημένη μορφή:

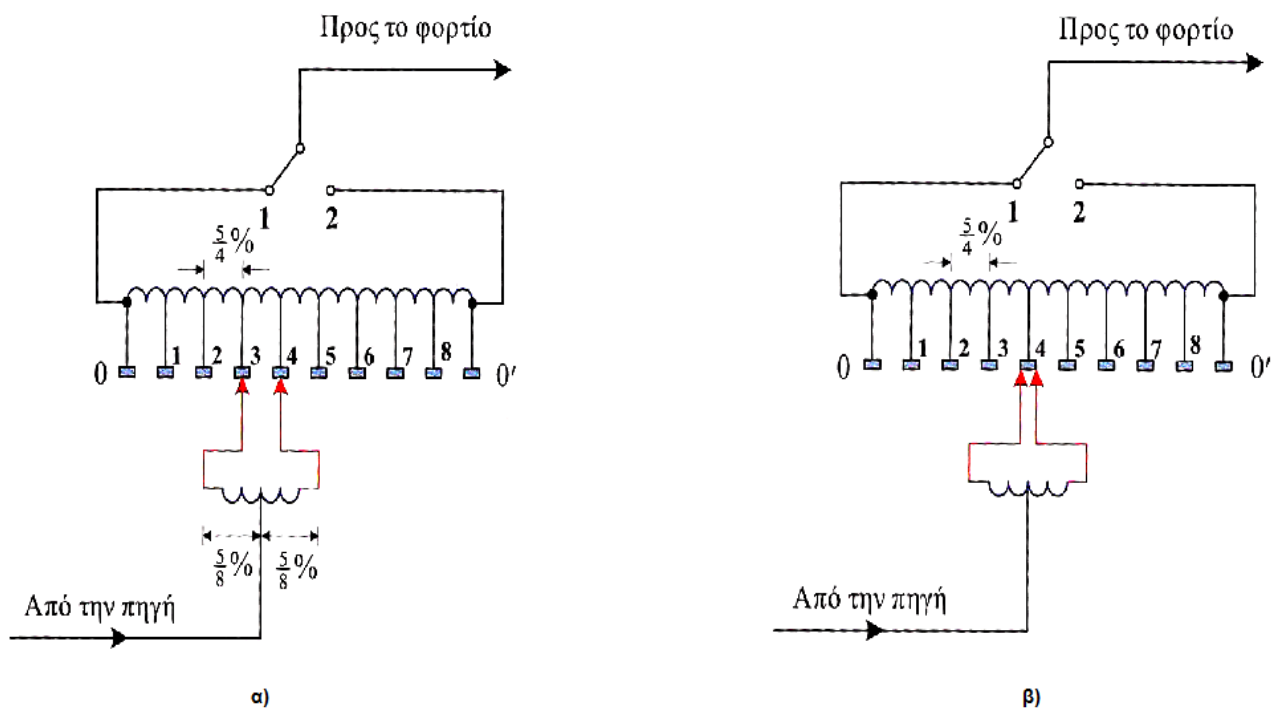


Σχήμα 4.16 - Απλοποιημένη μορφή κυκλώματος ελέγχου αυτόματου ρυθμιστή τάσης

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, οι εισοδοί της βαθμίδας αντιστάθμισης αντιπροσωπεύουν την τάση στην έξοδο του αυτομετασχηματιστή και το ρεύμα φορτίου. Μιας και η δράση του ρυθμιστή τάσης έγκειται στην αντιστάθμιση της πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής (στην πραγματικότητα, από το σημείο εγκατάστασης του ρυθμιστή, έως κάποιο συγκεκριμένο προεπιλεγμένο σημείο της γραμμής - σημείο ρύθμισης), η διάταξη αντιστάθμισης εξομοιώνει συγκεκριμένο τμήμα της γραμμής. Η έξοδος της βαθμίδας αντιστάθμισης, η οποία αντικατοπτρίζει την τάση στο προεπιλεγμένο σημείο ρύθμισης (regulation point), διεγείρει τον ηλεκτρονόμο τάσης και μέσω του ηλεκτρονόμου καθυστέρησης ενεργοποιείται το κύκλωμα ελέγχου του κινητήρα του μηχανισμού αλλαγής λήψης.

Οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης είναι εφοδιασμένοι με μηχανισμούς επιτήρησης της τάσης και έχουν τη δυνατότητα της αυτόματης αλλαγής της σχέσης μετασχηματισμού υπό φορτίο (load tap-changing), ρυθμίζοντας με αυτό τον τρόπο το μέγεθος της τάσης εντός των επιθυμητών ορίων, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις του φορτίου. Το εύρος ρύθμισης της τάσης είναι (σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160) $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης, με βήματα $0,5\%$ και $1,5\%$. Στα αμερικάνικα πρότυπα, τα βήματα είναι $5/8\%$ και $5/4\%$.

Σύμφωνα με το σχήμα 4.17α), όταν οι βραχίονες του μηχανισμού αλλαγής λήψης βρίσκονται ο καθένας από αυτούς σε δύο διαδοχικές λήψεις (θέσεις επιλογής), οι δύο επαγωγικές αντιδράσεις που χρησιμεύουν για τον περιορισμό του κυκλικού ρεύματος λειτουργούν παράλληλα και ως καταμεριστής τάσης μεταξύ των δύο αυτών διαδοχικών θέσεων επιλογής, με αποτέλεσμα στη συγκεκριμένη θέση του επιλογέα το βήμα μεταβολής της τάσης να είναι ακριβώς το μισό από το αντίστοιχο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μετάβασης του επιλογέα από τη μία θέση επιλογής στην αμέσως επόμενη.



Σχήμα 4.17 - Βήματα ρύθμισης της τάσης

Για τη ρύθμιση 32 βημάτων (16 βήματα για την ανύψωση και 16 για τον υποβιβασμό της τάσης, σχήμα 4.14), και με εύρος ρύθμισης $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης, η μεταβολή της τάσης σε κάθε βήμα θα είναι το $1/16$ του συνολικού εύρους ανά κατεύθυνση. Δηλαδή,

$$\Delta V_{Step} (\%) = \frac{10\%}{16} = \frac{5}{8} \% = 0,625\% \quad (4.6)$$

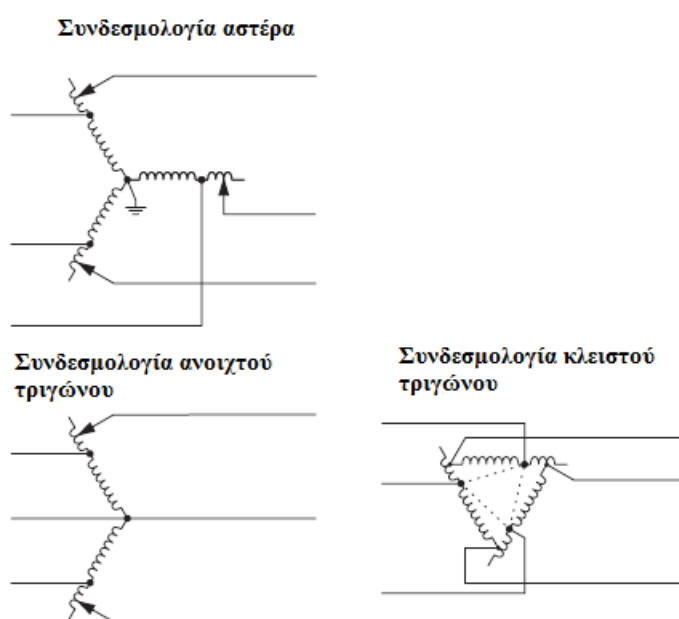
Άρα για βήμα μεταγωγής $0,625\%$ της ονομαστικής τάσης παρέχει την δυνατότητα ρύθμισης στο προαναφερόμενο εύρος τιμών ($\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης) σε 32 βήματα.

Οι τριφασικοί ρυθμιστές τάσης, που χρησιμοποιούνται συχνά σε υποσταθμούς, χρησιμοποιούνται σε συστήματα αστέρα ή τριγώνου. Ένας τριφασικός ρυθμιστής ελέγχει ταυτόχρονα και τις τρεις φάσεις. Αυτές είναι συνήθως μεγαλύτερες μονάδες. Η κανονική σύνδεση εσωτερικά είναι μια σύνδεση αστέρα με ελεύθερο ουδέτερο σημείο.

Όπως αναφέραμε παραπάνω χρησιμοποιούνται από τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού μονοφασικοί ρυθμιστές για την ρύθμιση τάσης σε τριφασικά συστήματα. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές σύνδεσης κατά καιρούς:

- **Γραμμή στον ουδέτερο** - Στα συστήματα τεσσάρων αγωγών, τα τριφασικά κυκλώματα διαθέτουν κανονικά τρεις μονοφασικούς ρυθμιστές συνδεδεμένους στον ουδέτερο. Οι συνδέσεις γραμμής προς ουδέτερο είναι επίσης κατάλληλες για κυκλώματα μίας ή και διπλής φάσης. Κάθε ρυθμιστής ελέγχει ανεξάρτητα την τάση, η οποία βοηθά στον έλεγχο της ανισορροπίας τάσης καθώς και της τάσης σταθερής κατάστασης.
- **Ανοιχτού τριγώνου** - Απαιτούνται μόνο δύο μονοφασικοί ρυθμιστές, οι οποίοι συνδέονται από φάση προς φάση.
- **Κλειστού τριγώνου** - Τρεις ρυθμιστές συνδέονται από φάση προς φάση. Χρησιμοποιώντας την συνδεσμολογία κλειστού τριγώνου εκτείνεται η περιοχή ρύθμισης κατά 50% , από $\pm 10\%$ έως $\pm 15\%$.

Και στις δύο συνδέσεις τριγώνου, οι ρυθμιστές βλέπουν μια τρέχουσα φάση μετατοπισμένη σε σχέση με την τάση. Στην κύρια σύνδεση με ωμικά φορτία, το ρεύμα γραμμής μέσω του ρυθμιστή προπορεύεται της τάσεως γραμμής κατά 30° . Η σύνδεση καθυστέρησης έχει αντιστρέψει το ρεύμα: για φορτίο μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, το ρεύμα γραμμής καθυστερεί την τάση γραμμής κατά 30° . Στη διαμόρφωση ανοικτού τριγώνου, μία από τις μονάδες οδηγεί και η άλλη καθυστερεί. Στη διάταξη κλειστού τριγώνου και οι τρεις μονάδες προπορεύονται ή και οι τρεις καθυστερούν. Αν και όχι συχνά, και οι δύο συνδέσεις τριγώνου μπορούν να εφαρμοστούν συστήματα τεσσάρων αγωγών.



Σχήμα 4.18 - Συνδεσμολογίες τριφασικών αυτόματων ρυθμιστών τάσης

Χωρίς ρυθμιστές στην αναχώρηση της γραμμής, η συνολική πτώση τάσης σε ένα κύκλωμα πρέπει να βρίσκεται εντός του επιτρεπόμενου εύρους πρωτογενούς τάσης. Ένας ρυθμιστής τάσης γραμμής (feeder regulator) μπορεί να καλύψει την κύρια πτώση τάση που πέφτει έως και το διπλάσιο της επιτρεπόμενης μεταβολής της τάσης. Ομοίως, δύο συμπληρωματικοί ρυθμιστές μπορούν να καλύψουν τις πτώσεις τάσης έως και τρεις φορές από την επιτρεπόμενη μεταβολή. Για ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, οι βέλτιστες θέσεις για δύο ρυθμιστές είναι σε αποστάσεις από το σταθμό περίπου 20% του μήκους του τροφοδότη για τον έναν και 50% για το άλλο. Για έναν ρυθμιστή τάσης γραμμής, η βέλτιστη θέση για ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο είναι στα $3/8$ του μήκους της γραμμής από το σταθμό.

Στην τοποθέτηση των ρυθμιστών και την επιλογή των ρυθμίσεων του αντισταθμιστή, πρέπει να λάβουμε υπόψη την μελλοντική αύξηση του φορτίου στο δίκτυο. Εάν εγκατασταθεί ένας ρυθμιστής όπου η ονομαστική ισχύς του είναι πολύ κοντά στην ισχύ του φορτίου, μπορεί να μην είναι σε θέση να αντέξει την μελλοντική αύξηση του φορτίου.

Αρκετοί ρυθμιστές μπορούν να συνδεθούν μαζί σε ένα κύκλωμα. Αν και αυτό μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις τάσης σταθερής κατάστασης των καταναλώσεων, θα δημιουργήσει μια πολύ αδύναμη πηγή για αυτούς. Έτσι είναι πιθανή η εμφάνιση προβλημάτων τρεμοπαίγματος (flicker) από τους κινητήρες και άλλα κυμαινόμενα φορτία

Τα τεχνικά πλεονεκτήματα των ρυθμιστών τάσης είναι:

- Ευελιξία με προσαρμοσμένα σχέδια ρύθμισης ($\pm 10\%$, $\pm 15\%$ και $\pm 20\%$)
- Πιο ισχυρή και οικονομική λύση από τους πυκνωτές και τους σταθεροποιητές χαμηλής τάσης
- Η εγκατάσταση ενός ρυθμιστή τάσης είναι ακόμη πιο απλή από έναν μετασχηματιστή διανομής
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (τυπικά 25+ έτη)
- Όλες οι εργασίες συντήρησης μπορούν να πραγματοποιηθούν στον υποσταθμό χωρίς διακοπές φορτίου (με χρήση του διακόπτη παράκαμψης).

Η εγκατάσταση των ρυθμιστών τάσης έχει ως αποτέλεσμα:

- Εξοικονόμηση ενέργειας από υψηλότερη απόδοση και μειωμένες απώλειες συστήματος
- Επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού
- Αποτρέπει τη ζημιά σε κινητήρες και αυτοματοποιημένο εξοπλισμό
- Μειωμένη λειτουργία των γεννητριών ντίτζελ για σταθερή παροχή τάσης (χαμηλότερο λειτουργικό κόστος)
- Αποτρέπει τη διακοπή κρίσιμων διεργασιών λόγω τροφοδοσίας τάσης εκτός των επιτρεπόμενων ορίων

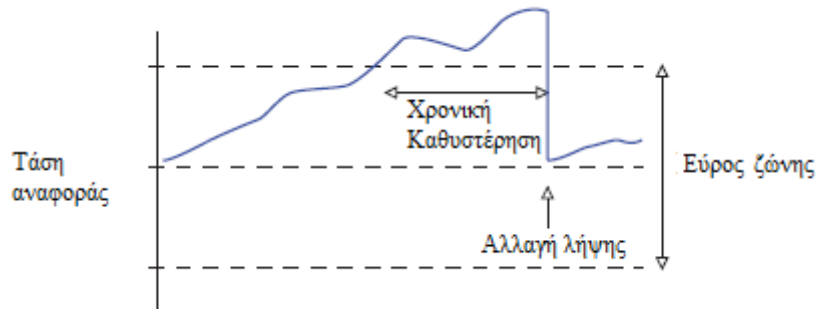
4.8 Βαθμίδα αντιστάθμισης απωλειών γραμμής

Οι βασικές συνιστώσες του αυτόματου ρυθμιστή τάσης είναι το κύκλωμα ελέγχου και ο μηχανισμός αλλαγής λήψης. Με συνεχή επιτήρηση των συνθηκών φόρτισης της γραμμής μέσω της τάσης και του ρεύματος, το κύκλωμα ελέγχου μεταβάλλει ανάλογα μέσω του μηχανισμού λήψης τη σχέση ρύθμισης, ώστε η τάση σε ένα προκαθορισμένο σημείο της γραμμής (σημείο ρύθμισης) να παραμένει εντός των συγκεκριμένων ορίων ανεξάρτητα από τις χρονικές μεταβολές του φορτίου της γραμμής.

Βασική συνιστώσα του κυκλώματος ελέγχου είναι ο ηλεκτρονόμος ρύθμισης της τάσης (voltage regulating relay), μέσω του οποίου ελέγχεται ο μηχανισμός αλλαγής λήψης. Είσοδοι του κυκλώματος ελέγχου αποτελούν η τάση στην είσοδο του ρυθμιστή και το ρεύμα της γραμμής, οι τιμές των οποίων διαμορφώνονται κατάλληλα μέσω μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος αντίστοιχα. Ο ηλεκτρονόμος τάσης δέχεται ρυθμίσεις σε τρεις βασικές λειτουργικές παραμέτρους:

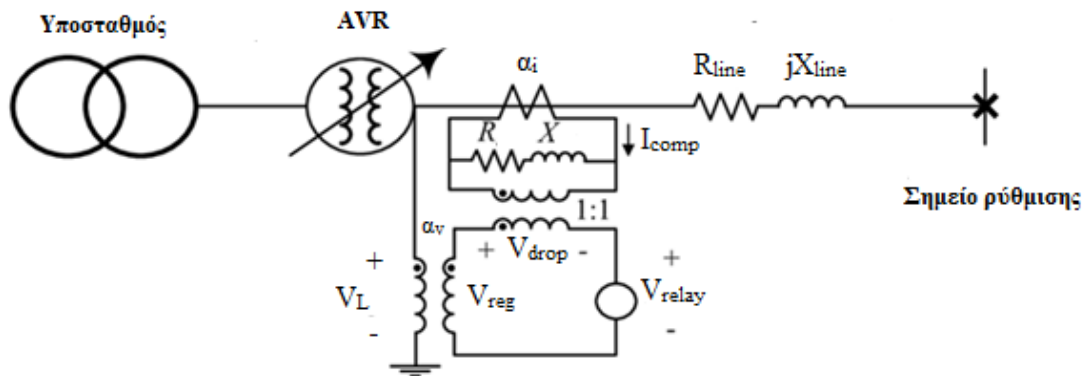
- Τάσης αναφοράς (Set voltage) - Ο ηλεκτρονόμος τάσης διεγείρεται, όταν η απόλυτη τιμή της διαφοράς της μετρούμενης τάσης από την τάση αναφοράς ξεπεράσει σε απόλυτη τιμή το ήμισυ του εύρους ζώνης.
- Εύρος ζώνης ρύθμισης της τάσης (Bandwidth) - Έχει στόχο την παρεμπόδιση της συνεχούς λειτουργίας του μηχανισμού αλλαγής λήψης, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την διάρκεια ζωής του.
- Χρονική καθυστέρηση (Time delay) - Με την εισαγόμενη χρονική καθυστέρηση μεταξύ του ηλεκτρονόμου τάσης και του κυκλώματος ελέγχου του κινητήριου μηχανισμού αλλαγής λήψης, παρεμποδίζεται η λειτουργία του μηχανισμού αλλαγής λήψης κατά την διάρκεια μεταβατικών φαινομένων και μεταβολών του ρεύματος της γραμμής, μικρής χρονικής διάρκειας. Τυπικές τιμές χρονικής καθυστέρησης κυμαίνονται από (30-100 sec).

Η λειτουργία του ρυθμιστή με βάση τις τρεις παραπάνω παραμέτρους φαίνεται στο σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19 - Λειτουργία ρυθμιστή τάσης με βάση τις ρυθμίσεις στις παραμέτρους, τάσης αναφοράς, καθυστέρησης χρόνου και εύρους ζώνης

Η προσθήκη της βαθμίδας αντιστάθμισης της πτώσης τάσης της γραμμής (Line Drop Compensation - LDC) παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης στο σημείο επιλογής ρύθμισης (regulation point). Ως σημείο ρύθμισης μπορεί να επιλεγεί οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της γραμμής, από το σημείο εγκατάστασης του ρυθμιστή τάσης μέχρι και το τέλος της γραμμής. Χωρίς τη συγκεκριμένη βαθμίδα, ο ρυθμιστής έχει τη δυνατότητα ρύθμισης αποκλειστικά και μόνο στο σημείο της εγκατάστασής του. Το κύκλωμα του αντισταθμιστή πτώσης τάσης δείχνεται στο σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20 - Κύκλωμα αντιστάθμισης πτώσης τάσης της γραμμής

Το ωμικό και το επαγωγικό στοιχείο (R και X αντιστοίχως) από την πλευρά του αντισταθμιστή της γραμμής έχει στόχο την προσομοίωση του τμήματος της γραμμής μεταφοράς από το σημείο εγκατάστασης του ρυθμιστή τάσης μέχρι και το σημείο ρύθμισης της τάσης. Η τάση αναφοράς του ηλεκτρονόμου τάσης V_{set} ρυθμίζεται εργοστασιακά σε μία συγκεκριμένη τιμή και μέσω ειδικού επιλογέα παρέχεται η

δυνατότητα αλλαγής της, μέσα στα όρια του $\pm 10\%$ της αρχικής ρύθμισης. Ο λόγος a_v του μετασχηματιστή τάσης επιλέγεται έτσι ώστε όταν το σημείο ρύθμισης είναι ακριβώς στην έξοδο του ρυθμιστή τάσης, να ισχύει $V_{reg} = V_{set}$. Ο μετασχηματιστής ρεύματος δίνει τη δυνατότητα ροής δια μέσου των στοιχείων R και X ενός ρεύματος ανάλογου με το ρεύμα του φορτίου της γραμμής.

Η εσωτερική αντίσταση του ηλεκτρονόμου τάσης είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα το ρεύμα που απορροφά θεωρείται (με αρκετά καλή προσέγγιση) μηδενικό. Αυτό σημαίνει ότι από τα τυλίγματα του μετασχηματιστή απομόνωσης με λόγο 1:1 που συνδέει επαγωγικά τις δύο βαθμίδες (αντισταθμιστή γραμμής και ηλεκτρονόμου τάσης) το διερχόμενο ρεύμα να είναι μηδενικό.

Οι σχέσεις μεταφοράς των μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος αντίστοιχα είναι:

$$a_v = \frac{V_{L,nom}}{V_{set}} = \frac{V_{l,b}}{V_{set}} \quad (4.7)$$

$$a_i = \frac{I_{L,nom}}{I_{comp,nom}} = \frac{I_{L,b}}{I_{comp,b}} \quad (4.8)$$

Με βάση το κύκλωμα του αντισταθμιστή (σχήμα 4.20) ισχύει ότι:

$$V_{reg} = V_{drop} + V_{relay} = I_{comp} (R + jX) + V_{relay} \quad (4.9)$$

Έαν οι τιμές των στοιχείων R και X επιλεγούν έτσι ώστε:

$$R = \frac{a_i}{a_v} R_o l \quad (4.10)$$

$$X = \frac{a_i}{a_v} X_o l \quad (4.11)$$

όπου R_o , X_o η ωμική και η επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά μονάδα μήκους και l η απόσταση από τη θέση εγκατάστασης.

Η (4.9) παίρνει τη παρακάτω μορφή

$$V_{reg} = I_{comp} (R + jX) + \frac{V_{RP}}{a_V} \quad (4.12)$$

Εάν συγκρίνουμε τις σχέσεις (4.12) και (4.9), και με βάση τις παραπάνω ρυθμίσεις:

$$V_{relay} = \frac{V_{RP}}{a_V} \quad (4.13)$$

Παρατηρούμε πως μέσω του κυκλώματος αντιστάθμισης επιτυγχάνεται πλήρης προσομοίωση των συνθηκών φόρτισης της γραμμής και κατ' επέκταση της πτώσης τάσης από τη θέση της εγκατάστασης του ρυθμιστή μέχρι το σημείο ρύθμισης.

Η τάση των ακροδεκτών στο ανά μονάδα σύστημα ταυτίζεται με την πραγματική τιμή της τάσης στο σημείο ρύθμισης, όπως φαίνεται στη σχέση (4.14).

$$V_{relay} (p.u.) = V_{RP} (p.u.) \quad (4.14)$$

Η ρύθμιση των στοιχείων R, X επιτυγχάνεται μέσω διακοπών επιλογής στο πίνακα ελέγχου, οι διαβαθμίσεις των οποίων είναι είτε σε μονάδες αντίστασης (Ω) είτε σε μονάδες τάσης (V). Στην περίπτωση διαβάθμισης σε μονάδες τάσης, η τάση αναφέρεται στην πτώση τάσης στα άκρα κάθε μιας από τις δύο συνιστώσες την σύνθετης αντίστασης, όταν διαρρέονται από ονομαστικό ρεύμα. Εάν η τιμή της σύνθετης αντίστασης του τμήματος της γραμμής που παρεμβάλλεται από τη θέση εγκατάστασης του ρυθμιστή μέχρι και το σημείο ρύθμισης είναι γνωστή, η επιλογή των θέσεων των επιλογικών διακοπών ανάλογα με το είδος της διαβάθμισης της κλίμακας επιλογής γίνεται ως εξής:

- **Ρύθμιση σε V**

$$R_V = I_{L,b} \frac{V_{set}}{V_{L,b}} R_{line} \quad (4.15)$$

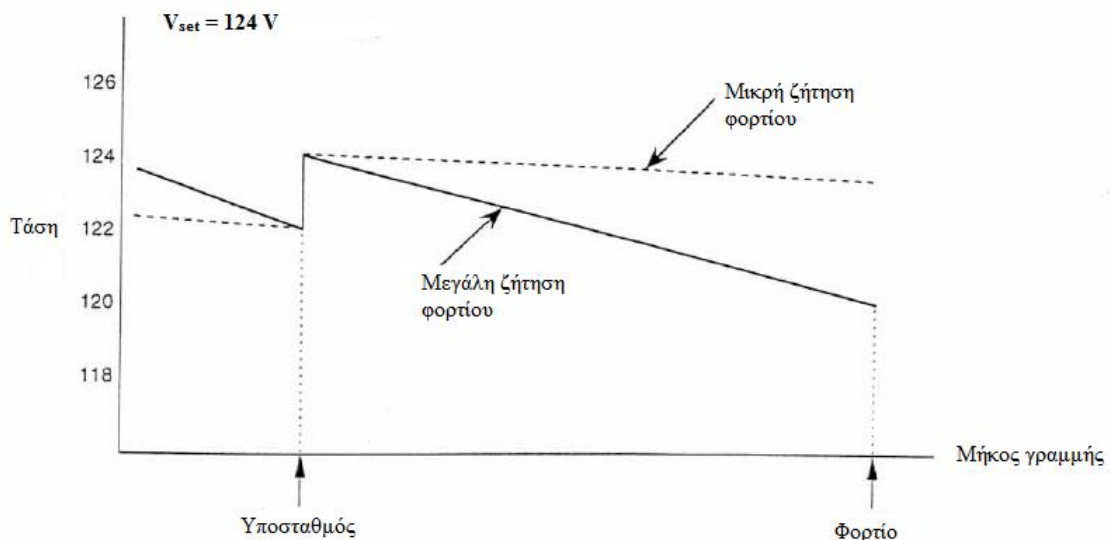
$$X_V = I_{L,b} \frac{V_{set}}{V_{L,b}} X_{line} \quad (4.16)$$

• Ρύθμιση σε Ω

$$R = \frac{I_{L,b}}{I_{\text{comp},b}} \cdot \frac{V_{\text{set}}}{V_{L,b}} R_{\text{line}} = \frac{a_i}{a_V} R_{\text{line}} \quad (4.17)$$

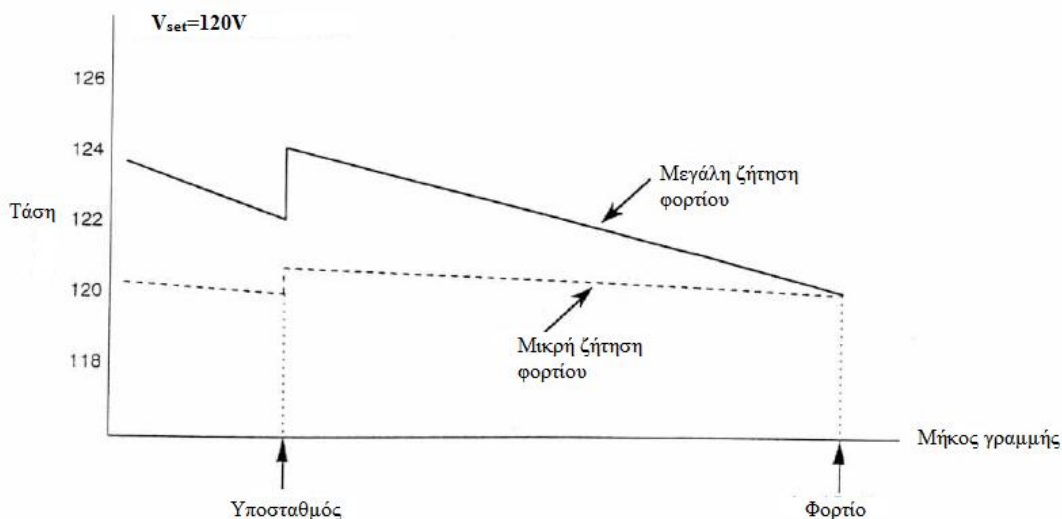
$$X = \frac{I_{L,b}}{I_{\text{comp},b}} \cdot \frac{V_{\text{set}}}{V_{L,b}} X_{\text{line}} = \frac{a_i}{a_V} X_{\text{line}} \quad (4.18)$$

Τα σχήματα 4.21 και 4.22 παραστούν διάφορα προφίλ τάσης σε μία αμερικάνικη γραμμή διανομής για να δείξουν τα οφέλη του αντισταθμιστή πτώσης τάσης. Στο σχήμα 4.21 η τάση του φορτίου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του ρεύματος φορτίου. Για παράδειγμα, η τάση αναφοράς έχει οριστεί στα 124 V στον υποσταθμό ώστε να έχουμε 120 V στο φορτίο (ονομαστική τάση του αμερικάνικου πρότυπου) κατά την περίοδο αυξημένης ζήτησης φορτίου. Για να είναι αυτό αληθές, θα πρέπει η τάση φορτίου να έχειδειχθεί ότι είναι ελαφρώς μικρότερη από 124 V κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικρής ζήτησης.



Σχήμα 4.21 - Προφίλ τάσης σε σύστημα διανομής χωρίς αντιστάθμιση πτώσης τάσης της γραμμής

Το σχήμα 4.22 δείχνει το όφελος που προκύπτει από την χρήση του LDC. Εδώ, η τάση έχει οριστεί στα 120 V, αυτή η τάση διατηρείται ανεξάρτητα από το μέγεθος του φορτίου. Προφανώς, αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την τάση του υποσταθμού από ελαφρώς πάνω από 120 V σε 124 V καθώς το φορτίο αυξάνεται.



Σχήμα 4.22 - Προφίλ τάσης σε σύστημα διανομής με βαθμίδα αντιστάθμισης πτώσης τάσης της γραμμής

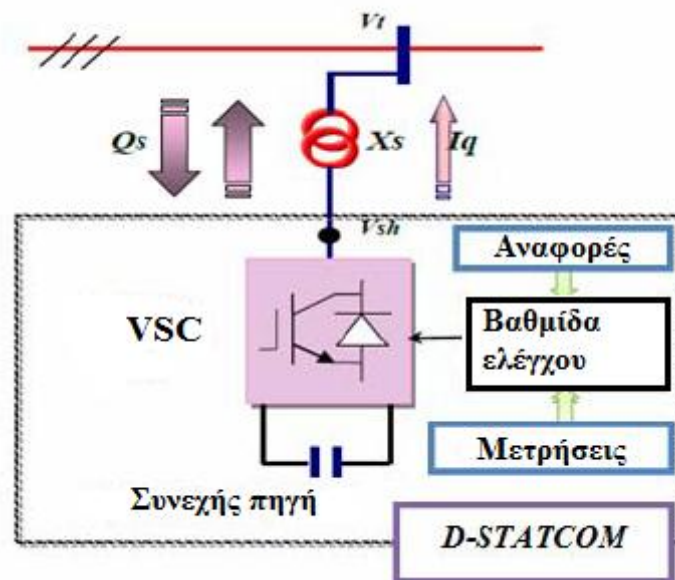
4.9 Στατικός αντισταθμιστής δικτύων διανομής (d-STATCOM)

Στα δίκτυα διανομής ισχύος, η άεργη ισχύς είναι η κύρια αιτία αύξησης των απωλειών του συστήματος διανομής και των διαφόρων προβλημάτων ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Αναμένεται επίσης από τις εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας να παρέχουν μια ισορροπημένη τάση χωρίς διακυμάνσεις στους πελάτες της, ειδικά σε εκείνους με ευαίσθητα φορτία. Τα συμβατικά συστήματα αντιστάθμισης, όπως οι τράπεζες πυκνωτών, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες μηχανές, έχουν χρησιμοποιηθεί για να αυξήσουν τη ροή ισχύος σε σταθερή κατάσταση ελέγχοντας την τάση των δικτύων διανομής.

Έχει αποδειχθεί ότι η μεταβατική ευστάθεια καθώς και η ευστάθεια στο μόνιμο σύστημα ενός ηλεκτρικού δικτύου μπορούν να βελτιωθούν εάν η αντιστάθμιση μπορεί να αντιδράσει γρήγορα χρησιμοποιώντας θυρίστορ ως διακόπτες και ειδικότερα τα νέα ελεγχόμενα εξαρτήματα τόσο στο άνοιγμα όσο και στο κλείσιμο (IGBT, GTO). Για να αποφευχθούν οι απώλειες από φαινόμενα Joule στις γραμμές διανομής που προκαλούνται από επαγωγικά ρεύματα (προκαλούμενες κυρίως από τον καταναλωτή αλλά και από την ίδια την γραμμή) και αποφεύγοντας την πτώση τάσης ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να αντισταθμίσουμε την άεργη ισχύ. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αντιστάθμιση της άεργης ισχύος δύναται να επιτευχθεί με διάφορους

τρόπους. Οι περισσότεροι από αυτούς τους αντισταθμιστές είναι αποτελεσματικοί, αλλά εξακολουθούν να έχουν κάποια ελαττώματα: υψηλό χρόνο αντίδρασης ή παραγωγή αρμονικών.

Ο **στατικός αντισταθμιστής δικτύων διανομής (D-STATCOM)** είναι μια συσκευή διακλάδωσης που χρησιμοποιείται γενικά για την επίλυση προβλημάτων ποιότητας ισχύος και για ρύθμιση της τάσης στα συστήματα διανομής και ανήκει στην "οικογένεια" των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (FACTS). Το D-STATCOM είναι μια ελεγχόμενη πηγή αντίδρασης, η οποία περιλαμβάνει έναν μετατροπέα πηγής τάσης (VSC) και έναν πυκνωτή συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένο παράλληλα, ικανό να παράγει ή /και να απορροφά την άεργο ισχύ (σχήμα 4.23).



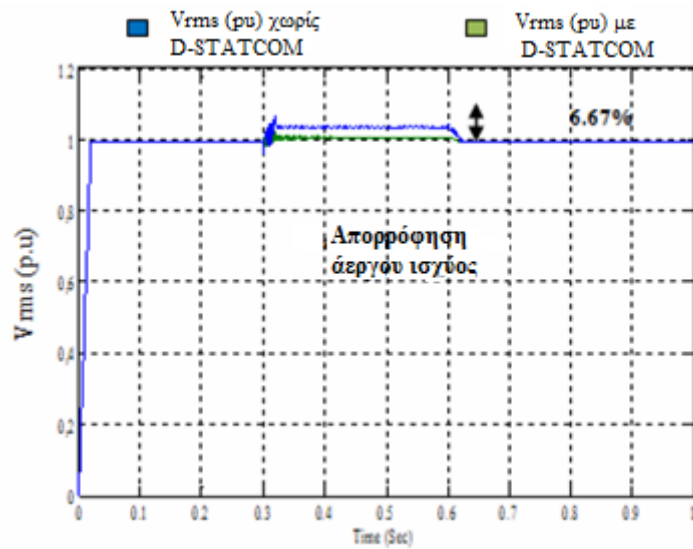
Σχήμα 4.23 - Βασική δομή ενός D-STATCOM

Η ανταλλαγή άεργης ισχύος με το δίκτυο γίνεται με τη μεταβολή του εύρους των τάσεων εξόδου. Ανάλογα με το εύρος αυτών των τάσεων, τα τρία ακόλουθα λειτουργικά συστήματα είναι διαθέσιμα για το D-STATCOM. Η βασική αρχή λειτουργίας για ένα D-STATCOM εξηγείται με τη βοήθεια του Σχήματος 4.23. Η τάση εξόδου του μετατροπέα (V_{sh}) ελέγχεται σε φάση με την τάση του συστήματος (V_t), όπως φαίνεται στο σχήμα, και το ρεύμα εξόδου του D-STATCOM (I_q) ποικίλει ανάλογα με την τάση V_{sh} .

1. $V_t > V_{sh}$: Η γωνία φάσης του I_q υστερεί σε σχέση με το V_t κατά 90 μοίρες. Το D-STATCOM καταναλώνει ρεύματα αέργης ισχύος (επαγωγική λειτουργία).
2. $V_t < V_{sh}$: Η γωνία φάσης του I_q προπορεύεται σε σχέση με τη γωνία φάσης V_t κατά 90 μοίρες. Ως αποτέλεσμα έχουμε, ροή άεργης ισχύος από το D-STATCOM (χωρητική λειτουργία).
3. $V_t = V_{sh}$: Δεν παρέχεται αέργη ισχύς στο σύστημα. Ως αποτέλεσμα, η υστερούμενη ισχύς να εξέρχεται στο STATCOM (επαγωγική λειτουργία). Η ποσότητα της άεργης ισχύος είναι ανάλογη της διαφοράς τάσης μεταξύ V_t και V_{sh} .

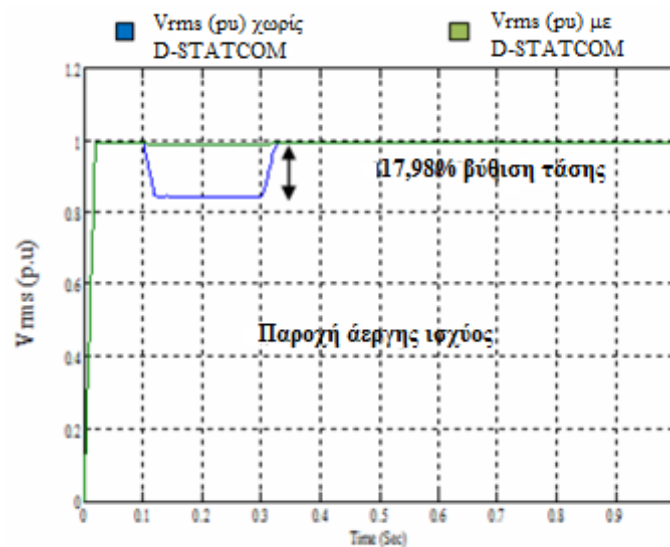
Η μεταβολή του πλάτους των τάσεων εξόδου επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την συνεχή τάση στον πυκνωτή. Το D-STATCOM μπορεί να παράγει χωρητικό ή επαγωγικό ρεύμα ανεξάρτητο από την τάση του δικτύου. Έτσι μπορεί να παρέχει το μέγιστο χωρητικό ρεύμα ακόμα και σε χαμηλές τιμές τάσης. Η ικανότητά του να υποστηρίζει την τάση τροφοδοσίας είναι καλύτερη από άλλες διατάξεις FACTS. Επιπλέον, το D-STATCOM μπορεί προσωρινά να αυξήσει το ονομαστικό ρεύμα (επαγωγικό ή χωρητικό).

Ακολουθούν δύο παραδείγματα ενός συστήματος διανομής σε δύο καταστάσεις λειτουργίας πριν και μετά την τοποθέτηση του D-STATCOM. Οι τιμές είναι διαστασιολογισμένες με το αμερικάνικο πρότυπο (ANSI C84.1-1995), όπου οι διακυμάνσεις της τάσης περιορίζονται στο 5% της ονομαστικής. Στο πρώτο παράδειγμα έχουμε δίκτυο διανομής στο οποίο έχει τοποθετηθεί ήδη μια τράπεζα πυκνωτών η οποία έχει περιορίσει σε ένα μέρος την διακύμανση τάσης αλλά και πάλι ξεπερνά το 5% της ονομαστικής (σχήμα 4.24), στην συνέχεια τοποθετείται το D-STATCOM και η διακύμανση αυτή σχεδόν εξομαλύνεται.



Σχήμα 4.24 - Τάση στο σημείο του φορτίου πριν και μετά την εφαρμογή του D-STATCOM

Το δεύτερο παράδειγμα περιλαμβάνει ένα κινητήρα επαγωγής συνδεδεμένο στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αρχικά ο κινητήρας λειτουργεί προκαλώντας μία βύθιση τάσης της τάξεως του 17,98%. Μετά την προσθήκη του D-STATCOM η βύθιση αυτή εξαφανίζεται χάρη στην παραγωγή άεργης ισχύος (χωρητική λειτουργία) από το ίδιο το STATCOM.



Σχήμα 4.25 - Τάση στο σημείο του φορτίου, με την λειτουργία ενός ασύγχρονου κινητήρα πριν και μετά την εφαρμογή του D-STATCOM

4.10 Έλεγχος τάσης και εξοικονόμηση ενέργειας με βελτιστοποίηση τάσης

Οι ηλεκτρικές επιχειρήσεις μπορούν να προσαρμόζουν την τάση σαν ένα τρόπο ελέγχου του φορτίου σε ένα σύστημα. Η μείωση της τάσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας ή και να μειώσει την αιχμή της ζήτησης. Ο όρος **διατηρούμενη μείωσης τάσης (Conservation Voltage Reduction, CVR)** εφαρμόζεται κανονικά και σημαίνει πλήρη λειτουργία για μειώσεις ενέργειας. Η βελτιστοποίηση τάσης χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει την εφαρμογή μειωμένων τάσεων, βελτιώσεων του συστήματος και ελέγχου τάσης. Ουσιαστικά η διατηρούμενη μείωση της τάσης μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: *Η τυπική τάση των 230 V έχει ένα εύρος επιθυμητής μεταβολής +/- 10%, δηλαδή 207 V και 253 V. Η ζώνη τάσης μεταξύ 207 και 253 V μπορεί να συμπιεστεί μέσω ρύθμισης στο κατώτερο ήμισυ (207-230) αντί του άνω ημίσεως (230-253) και συνεπώς να έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας με χαμηλό κόστος και χωρίς παρενέργειες στις συσκευές του καταναλωτή.*

Το Εθνικό Εργαστήριο Βορειοδυτικού Ειρηνικού (PNNL, 2010) προέβλεψε ότι η εφαρμογή του CVR στο 100% των γραμμών διανομής των ΗΠΑ θα μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 3% και η εφαρμογή στο 40% των γραμμών θα μειώσει την κατανάλωση κατά 2,4%.

Η χρήση μείωσης της τάσης για τη μείωση της ζήτησης έχει ακόμη μεγαλύτερη επίπτωση στη ζήτηση παρά στην ενέργεια. Η μεγαλύτερη μείωση συμβαίνει ακριβώς όταν ελαττώνεται η τάση και στη συνέχεια μειώνεται ακόμα αυτή μείωση, καθώς ορισμένα φορτία συνεχίζουν να λειτουργούν περισσότερο από το κανονικό για να αντισταθμίσουν τη χαμηλότερη τάση. Για παράδειγμα, οι Priess και Warnock (1978) διαπίστωσαν ότι κατά τη διάρκεια μιας 4ωρης μείωσης της τάσης κατά 5%, η ζήτηση σε ένα τυπικό οικιακό κύκλωμα μειώθηκε αρχικά κατά 4% και μειώθηκε σε πτώση 3% μέχρι το τέλος της 4ωρης περιόδου.

Η μείωση της τάσης μπορεί επίσης να μειώσει τις απώλειες, κυρίως από τις χαμηλότερες απώλειες κενού φορτίου στους μετασχηματιστές. Γενικά, οι απώλειες φορτίου παραμένουν περίπου ίδιες. Παρόλο που η συνιστώσα πραγματικής ισχύος

του ρεύματος αυξάνεται για ορισμένα φορτία με μειωμένη τάση, η συνιστώσα της άεργης ισχύος του ρεύματος μειώνεται. Αυτά τα αποτελέσματα τείνουν να εξισορροπηθούν και τα πραγματικά αποτελέσματα εξαρτώνται από τη σύνθεση του φορτίου του κυκλώματος. Εάν ο έλεγχος volt-var χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της άεργης ισχύος μαζί με τη βελτιστοποίηση τάσης, οι απώλειες μπορούν να μειωθούν μαζί με τα ισοπεδωτικά προφίλ τάσης.

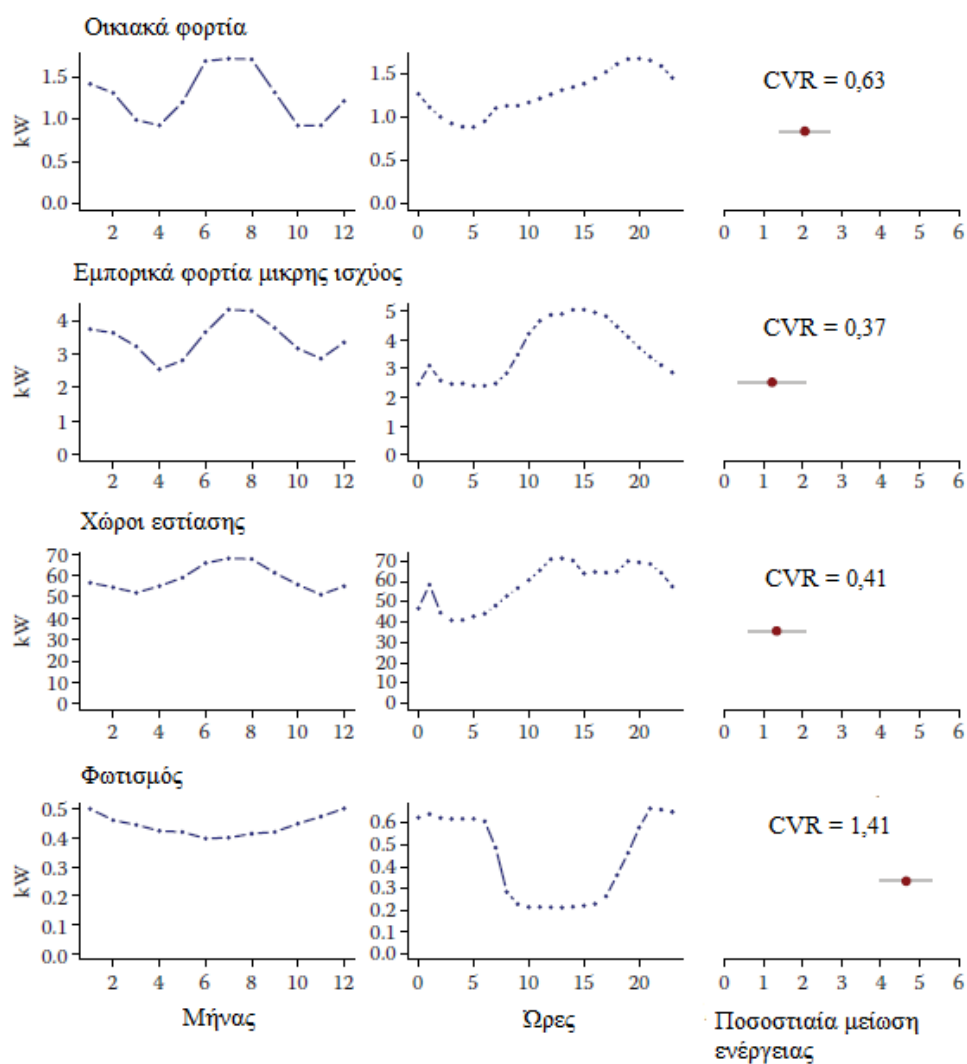
Κατανομή της συνολικής ενέργειας	<u>Εξοικονόμηση ενέργειας με βελτιστοποίησης τάσης</u>	
	Εξοικονόμηση ανά στοιχείο	Μέρος της συνολικής εξοικονόμησης ανά κατηγορία
Απώλειες εν κενώ	1,6%	5,6%
Απώλειες φορτίου	1,8%	0,6%
Κατανάλωση	96,6%	2,3%
		4,1%
		0,2%
		95,6%

Πίνακας 4.1 - Μέση εξοικονόμηση ενέργειας από βελτιστοποίηση τάσης ανά στοιχείο

Η επίδραση της τάσης στα φορτία συχνά ποσοτικοποιείται ως συντελεστής CVR, το ποσοστό μεταβολής του φορτίου για μεταβολή τάσης της τάξεως του 1%. Οι Kirshner και Giorsetto (1984) ανέλυν τις δοκιμές CVR σε διάφορες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού. Ενώ τα αποτελέσματα διαφέρουν σημαντικά, τα περισσότερα κυκλώματα δοκιμής είχαν εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 0,5% και 1% για κάθε μείωση της τάσης κατά 1%. Η ανάλυσή τους στις γραμμές διανομής βρήκε ότι η εξοικονόμηση ενέργειας οικιακής χρήσης ήταν 0,76% για κάθε 1% μείωση.

Ένα από τα βασικά ερωτήματα σχετικά με τη μέθοδο μείωσης της τάσης είναι το πόσο αποτελεσματική είναι στα εμπορικά φορτία. Το Σχήμα 4.24 παρουσιάζει μια κατανομή για τέσσερις ταξινομήσεις φορτίου σε ένα κύκλωμα και παρουσιάζει σαφείς διαφορές ανά πελάτη. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι τα φορτία φωτισμού είχαν τη μεγαλύτερη μείωση της ενέργειας. Το εμπορικό φορτίο σε αυτό το κύκλωμα ήταν κυρίως καταστήματα και χώροι εστίασης (καφετέριες, εστιατόρια). Αυτός ο τύπος εμπορικού φορτίου φαίνεται ότι είχε λιγότερη μείωση της ενέργειας από το οικιακό φορτίο.

Στο Σχήμα 4.26, η δεξιά στήλη των πλαισίων των γραφημάτων δείχνει την μείωση της ενέργειας για αυτό το σύνολο πελατών. Η κόκκινη κουκίδα σηματοδοτεί την εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας με μείωση της τάσης και η γκρι γραμμή σηματοδοτεί τα διαστήματα εμπιστοσύνης κατά 95% γύρω από την εκτίμηση. Οι δύο αριστερές στήλες των πλαισίων γραφημάτων παρουσιάζουν ετήσια και ωριαία προφίλ χρήσης για κάθε ομάδα καταναλώσεων.



Σχήμα 4.26 - Προφίλ χρήσης ενέργειας ανά κατηγορία πελατών με μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από μείωση τάσης για ένα κύκλωμα.

Η απόκριση φορτίου ενός κυκλώματος στις μεταβολές τάσης εξαρτάται τελικά από τα χαρακτηριστικά των φορτίων του κυκλώματος. Η μείωση της τάσης παράγει την ισχυρότερη ενεργειακή απόκριση με φορτία αντίστασης (η ισχύς που αντλείται από

ένα φορτίο αντίστασης μειώνεται με το τετράγωνο της τάσης). Ο φωτισμός και τα φορτία θέρμανσης με αντιστάσεις είναι τα κυρίαρχα φορτία αντίστασης. Αυτά δεν είναι τελείως ιδανικά φορτία αντίστασης. Τα οικιακά και εμπορικά φορτία έχουν υψηλότερα ποσοστά φορτίου αντίστασης. Για τους θερμοσίφωνες και άλλες συσκευές που ρυθμίζουν τη θερμοκρασία τους, η μείωση της τάσης δεν μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας (Οι συσκευές αυτές απλά λειτουργούν με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής).

Τύπος συσκευής	Συντελεστής CVR
Λαμπτήρες πυρακτώσεως	1,50
Λαμπτήρες LED	0,07
Λαμπτήρες φθορισμού	0,87
Λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης 400 W	0,64
Λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης με ηλεκτρονικό Ballast	-0,03
Κλιματιστικό 30000-BTU, σε εξωτερική θερμοκρασία 40°C	0,34
Κλιματιστικό 30000-BTU, σε εξωτερική θερμοκρασία 30°C	0,73
Ψυγείο	2,28
3-Φ Ασύγχρονος κινητήρας 5 HP	0,40
3-Φ Ασύγχρονος κινητήρας 15 HP	0,02

Πίνακας 4.2 - Συντελεστές CVR για διάφορους τύπους συσκευών

Οι κινητήρες δεν είναι συσκευές σταθερής ισχύος. Η απόδοση και η απόκριση του κινητήρα στην τάση εξαρτάται από τη μηχανική φόρτιση. Σε υψηλότερη μηχανική φόρτιση, ένας κινητήρας αντλεί περισσότερο ρεύμα και λειτουργεί περισσότερο σαν μια συσκευή σταθερής ισχύος, έτσι οι συντελεστές CVR είναι χαμηλότεροι.

Η απόκριση τάσης του φωτισμού ποικίλει σημαντικά με την τεχνολογία όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 4.2. Για τις περισσότερες τεχνολογίες φωτισμού, η έξοδος φωτός ποικίλλει άμεσα με την είσοδο ισχύος. Με χαμηλότερη τάση, η κατανάλωση ενέργειας πέφτει, αλλά η ένταση φωτισμού πέφτει επίσης. Για τους λαμπτήρες

φορισμού και τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης που μετρήθηκαν στο EPRI EL-2036 (1981), καθώς μειώθηκε η τάση, ο φωτισμός μειώθηκε, αλλά όχι τόσο γρήγορα όσο η κατανάλωση, έτσι βελτιώθηκε η συνολική απόδοση του εξοπλισμού στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε φως. Με λαμπτήρες πυρακτώσεως, η χαμηλότερη τάση προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των νημάτων λόγω της ψυχρότερης λειτουργίας τους. Σε υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες, ο συμπιεστής του κλιματιστικού πρέπει να λειτουργήσει περισσότερο. Αυτό αντιστοιχεί στα αποτελέσματα φόρτωσης για κινητήρες επαγωγής (οι ελαφρά φορτισμένοι κινητήρες έχουν υψηλότερους συντελεστές CVR). Σε πολλές τοποθεσίες, τα κλιματιστικά θα ξοδεύουν το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας τους στις χαμηλότερες θερμοκρασίες όπου οι παράγοντες CVR τείνουν να είναι υψηλότεροι.

Οι ηλεκτρονικές συσκευές έχουν γενικά χαμηλούς παράγοντες CVR. Σε δοκιμές δύο τροφοδοτικών υπολογιστών που ελέγχθηκαν από την EPRI (Electric Power Research Institute), ο συντελεστής CVR ήταν κατά μέσο όρο -0,03. Παρόμοιες δοκιμές σε τηλεοράσεις LCD, LED και plasma έδειξαν μέσους παράγοντες CVR που ήταν ελαφρώς αρνητικοί. Το PNNL (2010) ανέφερε επίσης ελαφρώς αρνητικούς παράγοντες CVR για οθόνες LCD και πλάσματος.

Η μείωση της τάσης λειτουργεί καλύτερα στις γραμμές μικρού μήκους (που δεν έχουν μεγάλη πτώση τάσης). Σε αυτές, μπορούμε να ελέγξουμε τη μείωση μόνο μέσω ρυθμίσεων στο ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού. Είναι εύκολο να δημιουργηθεί ένα σύστημα όπου οι χειριστές μπορούν να αλλάξουν την τάση που έχει θέσει ο σταθμός μέσω του SCADA. Σε γραμμές μεγαλύτερου μήκους, χρειαζόμαστε επιπλέον μέτρα. Ορισμένες στρατηγικές περιλαμβάνουν:

- **Επιπλέον ρυθμιστές** - Οι επιπλέον ρυθμιστές μπορούν να βοηθήσουν να ισοπεδωθεί το προφίλ τάσης κατά μήκος του κυκλώματος. Κάθε ρυθμιστής ρυθμίζεται με κατάλληλες τιμές τάσης και αντιστάθμισης για ένα πιο αυστηρό εύρος τάσης. Αυτή η προσέγγιση είναι η καταλληλότερη για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο έλεγχος των ρυθμιστών για τον περιορισμό των διακυμάνσεων τάσης είναι δύσκολος. Οι επικοινωνίες και οι έλεγχοι προσθέτουν σημαντικά στο κόστος.

- **Συστοιχίες πυκνωτών κατά μήκος της γραμμής** - Τα VARs που εγχύονται από τους πυκνωτές βοηθούν στην ισοπέδωση του προφίλ τάσης και επιτρέπουν χαμηλότερη τάση στο υποσταθμό. Ο McCarthy (2000) ανέφερε πως η Georgia Power χρησιμοποίησε αυτή τη στρατηγική για να μειώσει τα μέγιστα φορτία κατά 500 kW σε κυκλώματα κατά μέσο όρο περίπου 18 MW.
- **Μικρότερο εύρος ζώνης** - Με μικρότερο εύρος ζώνης ρυθμιστή, η τάση που διαδίδεται στο κύκλωμα είναι μικρότερη. Ένα μικρότερο εύρος ζώνης απαιτεί πιο συχνή ρύθμιση ή συντήρηση του ρυθμιστή (ο ρυθμιστής αλλάζει τις λήψεις συχνότερα). Ο Kirshner (1990) ανέφερε ότι η μείωση του εύρους ζώνης από 3 σε 1,5 V διπλασίασε τον αριθμό των αλλαγών λήψεων του ρυθμιστή.
- **Επιθετική αντιστάθμιση πτώσης τάσης της γραμμής** - Ένα επιθετικό σχέδιο αντιστάθμισης πτώσης τάσης γραμμής μπορεί να προσπαθήσει να διατηρήσει την τάση στο χαμηλότερο σημείο (δηλ. 207 V) για τον τελευταίο πελάτη πάντα. Η επιθετική αντιστάθμιση ενισχύει την τάση κατά τη διάρκεια βαρέων φορτίων, ενώ προσπαθεί να κρατήσει τις τάσεις χαμηλές στα άκρα των κυκλωμάτων.
- **Εξισορρόπηση φάσης** - Μερικές φορές, μια φάση μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας. Η βελτίωση της ισορροπίας φάσης μπορεί να συμβάλει στην εξισορρόπηση της πτώσης τάσης στις φάσεις και να επιτρέψει μεγαλύτερη συνολική μείωση της τάσης.
- **Επανασχεδιασμοί δικτύων** - Μερικές αναδιαρθρώσεις μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση των σημείων συμφόρησης της τάσης.
- Άλλες επιλογές βελτίωσης του μεγέθους της τάσης βοηθούν στην εφαρμογή ενός προγράμματος μείωσης της τάσης, αν και ορισμένες από αυτές τις επιλογές, όπως η αντικατάσταση των αγωγών, η υπογείωση και η αύξηση των επιπέδων τάσης πρωτεύουσας διανομής, είναι αρκετά δαπανηρές.

Πολλές από αυτές τις βελτιώσεις μειώνουν τις απώλειες μαζί με τη βελτίωση της τάσης. Η βελτίωση των προφίλ τάσης επιτρέπει μεγαλύτερη μείωση της τάσης του δικτύου, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση στην τελική χρήση και μειώνει τη συνολική κατανάλωση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η καλή λειτουργία των συσκευών και του εξοπλισμού του φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής, επιβάλλει σωστά ρυθμισμένη τάση ($\pm 10\%$ της ονομαστικής όπως αναγράφεται στο πρότυπο EN50160) έτσι ώστε να αποφεύγονται οι βλάβες και τελικώς η καταστροφή των συσκευών. Άρα είναι επιτακτική ανάγκη (κυρίως για οικονομικούς λόγους) η τοποθέτηση διατάξεων ρύθμισης του μεγέθους της τάσης. Γενικά η χρήση ρυθμιστών τάσης βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας αφού το δίκτυο διανομής λειτουργεί αποδοτικότερα με λιγότερες απώλειες.

Αλλά δεν είναι όλες οι διατάξεις 100% αποδοτικές. Οι πυκνωτές αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται στην αντιστάθμιση άεργης ισχύος ρυθμίζουν την τάση για μικρές τιμές μεταβολών περίπου 2,5 - 5% της ονομαστικής. Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικά μέσα ρύθμισης μαζί με τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης και τους Μ/Σ με συστήματα αλλαγής λήψεων (ΣΑΤΥΦ). Οι απλοί πυκνωτές δεν χρησιμοποιούνται γιατί αυξάνουν την τάση πάνω από τα προκαθορισμένα όρια στην χαμηλή ζήτηση του φορτίου, και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οι αποζεύξιμες τράπεζες πυκνωτών. Οι πυκνωτές αυτοί ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια ισχυρών συνθηκών φόρτισης και απενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια των συνθηκών χαμηλής φόρτισης επιτυγχάνοντας καλύτερες συνθήκες λειτουργίας.

Ο Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ είναι μια καλή διάταξη ρύθμισης τάσης με πληθώρα ρυθμίσεων στα τυλίγματά του για τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνεται η ρύθμιση καθώς και το εύρος ρύθμισης. Τα ΣΑΤΥΦ είναι εφοδιασμένα με σειριακές αντιστάσεις και θυρίστορ για ομαλότερη αλλαγή λήψης. Σημαντικό μειονέκτημα τους ότι είναι αργοί διακριτοί μηχανισμοί, που μεταβάλλονται μόνο κατά ένα βήμα την φορά. Τα ΣΑΤΥΦ εγκαθίστανται στον υποσταθμό και κυρίως στην πρωτεύουσα διανομή στην πλευρά της υψηλής τάσης γιατί εκεί ρέουν μικρότερα ρεύματα και η ρύθμιση τάσης είναι καλύτερη.

Όμως τα ΣΑΤΥΦ έχουν αρκετά μειονεκτήματα χρήσης και για αυτό χρησιμοποιούνται περισσότερο οι Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης. Οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης είναι στην ουσία αυτομετασχηματιστές εφοδιασμένοι με σύστημα

αλλαγής λήψεων. Οι αυτόματοι ρυθμιστές πλεονεκτούν έναντι των πυκνωτών και των ΣΑΤΥΦ επειδή παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο τις διακυμάνσεις της τάσης, και μπορούν να τοποθετηθούν και στον υποσταθμό διανομής (bus regulation) αλλά και στην αναχώρηση της εκάστοτε γραμμής (feeder regulation). Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης πρόκειται για μια ευαίσθητη συσκευή γιατί μπορεί να ρυθμίσει την τάση σε 32 βήματα (16 για την ανύψωση και 16 για τον υποβιβασμό), περίπου 0,625% της ονομαστικής τάση ανά βήμα.

Ο αυτόματος ρυθμιστής (ή και ο Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ) λειτουργεί καλύτερα με την προσθήκη της βαθμίδας αντιστάθμισης πτώσης τάσης της γραμμής, λόγω της συνεχούς επιτήρησης της τάσης και του ρεύματος σε ένα οποιοδήποτε σημείο της γραμμής. Χωρίς τη συγκεκριμένη βαθμίδα, ο ρυθμιστής έχει τη δυνατότητα ρύθμισης αποκλειστικά και μόνο στο σημείο της εγκατάστασής του και για την ρύθμιση της τάσης θα έπρεπε να ρυθμίσουμε τον ρυθμιστή σε μεγαλύτερη τιμή έτσι ώστε να έχουμε την επιθυμητή τιμή στο φορτίο, ανεξάρτητα με την μεταβολή του.

Μια άλλη διάταξη ρύθμισης τάσης είναι ο στατικός αντισταθμιστής δικτύων διανομής (d-STATCOM) και πρόκειται για μία ελεγχόμενη πηγή αντίδρασης που παράγει ή απορροφά άεργη ισχύ, το οποίο βοηθά στην ρύθμιση τάσης. Όπως είδαμε η ρύθμιση της τάσης εξαρτάται με την μεταβολή των τάσεων εξόδου του μετατροπέα. Έτσι σε περίπτωση αιχμών τάσης το d-STATCOM παράγει ένα χωρητικό ρεύμα για την εξομάλυνση τους, και στις βυθίσεις τάσης παράγει ένα επαγωγικό ρεύμα για να ανυψώσει την βυθισμένη τάση. Στα παραδείγματα με τον ασύγχρονο κινητήρα και την τράπεζα πυκνωτών φαίνονται ακριβέστερα οι μεταβολές αυτές.

Παρατηρούμε επίσης ότι τα μοντέλα ροής φορτίου μας παρέχουν προφίλ τάσης που βοηθούν κατά το σχεδιασμό νέων κυκλωμάτων διανομής, την προσθήκη νέων καταναλωτών και την παρακολούθηση και τον καθορισμό προβλημάτων τάσης. Η μοντελοποίηση όλων των φορτίων ως σταθερού ρεύματος είναι μια καλή προσέγγιση για πολλά κυκλώματα. Η μοντελοποίηση όλων των φορτίων ως σταθερής ισχύος είναι συντηρητική για την πτώση τάσης. Η μελέτη των ροών φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να είναι καθοριστική για την επιλογή κατάλληλης μεθόδου ρύθμισης τάσης καθώς προβλέπει τα ενδεχόμενα προβλήματα τάσης σε ένα δίκτυο διανομής.

Τέλος, μια τελευταία μέθοδος ρύθμισης τάσης που κυρίως σχετίζεται με την εξοικονόμηση ενέργειας είναι η διατηρούμενη μείωση τάσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αποφέρει εξοικονόμηση ενέργειας μειώνοντας την τάση κατά 1%. Ανάλογα με τον τύπο της κάθε συσκευής του φορτίου επιτυγχάνεται και η ανάλογη εξοικονόμηση. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί καλύτερα σε γραμμές μικρού μήκους, αλλά μπορεί να λειτουργήσει και σε γραμμές μεγαλύτερου μήκους με την προσθήκη επιπλέον διατάξεων ρύθμισης τάσης, με την εγκατάσταση πυκνωτών κατά μήκος της γραμμής, με επανασχεδιασμό του δικτύου, με πιο επιθετική αντιστάθμιση πτώσης τάσης της γραμμής κ.α. Πολλές από αυτές τις βελτιώσεις μειώνουν τις απώλειες μαζί με τη βελτίωση της τάσης. Η βελτίωση των προφίλ τάσης επιτρέπει μεγαλύτερη μείωση της τάσης του δικτύου, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση στην τελική χρήση και μειώνει τη συνολική κατανάλωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Κάλφας, "**Συστήματα Διακίνησης Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Σύγχρονη εκδοτική, 2006
- [2] Π. Μαλατέστας, "**Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Εκδόσεις Τζιόλα, 2015
- [3] B.M. Weedy, B.J. Cory, "**Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Εκδόσεις Ίων, 2001
- [4] T.A Short, "**Electric Power Distribution Handbook**", CRC Press, 2014
- [5] T. Gönen, "**Electric Power Distribution Engineering**", CRC Press, 2014
- [6] A. Pansini, "**Electrical Distribution Engineering**", CRC Press, 2007
- [7] Α. Μπακιρτζής, "**Οικονομική λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Εκδόσεις Ζήτη, 1998
- [8] Π. Γεωργιλάκης, "**Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015
- [9] Μ.Π. Παπαδόπουλος, "**Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1997
- [10] D. Patrick, S. Fardo, "**Electrical Distribution Systems**", CRC Press, 2009
- [11] N. Hadjsaïd, J.C. Sabonnadière, "**Electrical Distribution Networks**", Wiley, 2011
- [12] R. Fehr III, "**Industrial Power Distribution**", IEEE Press, 2016
- [13] Γ. Ιωαννίδης, "**Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές**", Εκδόσεις Τσότρας, 2015
- [14] R. Brown, "**Electric Power Distribution Reliability**", Marcel Dekker, 2002
- [15] Ε. Λεκατσάς, "**Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας**", Εκδόσεις Δ.Ε.Η, 1985

- [16] N. Hingorani, L. Gyugui, "**Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**", IEEE Press, 2000
- [17] G. Rey and L. Muneta, "**Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances**", InTech, 2011
- [18] A. Pansini "**Power Transmission and Distibution**", CRC Press/Marcel Decker, 2005
- [19] A. Mokhtari, F.Gherbi, C. Mokhtar, K. Kerrouche, A.Aimer (2014) "*Study, analysis and simulation of a static compensator D-STATCOM for distribution systems of electric power*", Leonardo Journal of Sciences, (25), pp.117-130
- [20] H. Markiewicz, A. Klajn "Voltage Disturbances Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems", Wroclaw University of Technology (2004)
- [21] G. Ledwich, A. Ghosh "*A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode*", IEE Proc.- Generation, Transmission, Distribution, 149(2), pp.215 - 224
- [22] "Basic Considerations of the application of LTC Transformers and Associated Controls", Beckwith Electric Co., Inc.
- [23] "Transformer Handbook", ABB (2004)
- [24] K. Rao, C. Krishna, K. Kuthadi (2012) "*Implementation of D-STACTOM for Improvement of Power Quality in Radial Distribution System*", International Journal of Modern Engineering Research, 2(5), pp. 3548-3552
- [25] "Χρήσιμες πληροφορίες για την προστασία των ευαίσθητων ηλεκτρικών συσκευών", ΔΕΔΔΗΕ
- [26] EUROPEAN COMMISSION "EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", CENELEC (2005)

- [27] Δ. Μητροπούλου, "Συγκριτική μελέτη διατάξεων προστασίας υποσταθμών Υ.Τ/Μ.Τ και ΚΥΤ", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π (2010)
- [28] Κ. Καραμανλής, Χ. Ντούπης "Σημασία των διαταραχών τάσης για του καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π (2010)
- [29] D. Dohnal, "On-load tap changers for power transformers", Maschinenfabrik Reinhausen GmbH (2013)
- [30] "Gridcon Transformer - Voltage regulation for distribution grids", Maschinenfabrik Reinhausen GmbH (2015)
- [31] S. Dey (2015) "*Application of Distribution Static Synchronous Compensator in Electrical Distribution System*", International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation, and Control Engineering, 3(5), pp. 144 - 149
- [32] P. Chakravarty, A.K. Sharma (2015) "*Improvement in Power Quality of Distribution System Using STATCOM*", International Journal of Engineering Research and Reviews, 3(1), pp. 55 - 59
- [33] Δ. Λαθούρης "*Ποιότητα των υπηρεσιών Δικτύου της ΔΕΗ Α.Ε.*", ΔΕΗ Α.Ε - Γενική Διεύθυνση Διανομής (2009)
- [34] M. Larsson "Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems", Doctoral Dissertation, Lund University (2000)
- [35] "Solutions for voltage control options at LV busbars", University of Manchester (2011)
- [36] M.W. Davis, R. Broadwater, J. Hambrick "Modeling and Testing of Unbalanced Loading and Voltage Regulation", NREL (2007)
- [37] Π. Κρομπάς "Επίδραση στην ποιότητα ισχύος του συστήματος διανομής υπό υψηλή διείδυση αιολικών συστημάτων μεταβλητών στροφών ", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών (2010)

- [38] K. Schneider, F. Tuffner, J. Fuller, R. Singh "Evaluation of Conservation Voltage Reduction (CVR) on a National Level", PNNL (2010)
- [39] B. Kingham "Quality of Supply Standards: Is EN 50160 the answer?"
- [40] V. Kirubakaran, D. Kalyankumar (2010) "*D- STATCOM Based Voltage Regulation and Harmonic Damping*", International Journal of Computer Applications, 7(4), pp. 39 - 43
- [41] N. Muromba and D. Pudney (2011) "*Shunt capacitor banks increase capacity of distribution networks*", Energize, pp. 30 - 33
- [42] "Smarter Voltage Regulation", Eaton's Cooper Power Systems (2013)
- [43] Β. Παπαδιάς, Ε. Λεωνιδάκη (2002) "*Επίδραση των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS) στη Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*", Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, 3(1-2), pp. 23 - 34
- [44] American National Standard. "STANDARD FOR MAINTENANCE TESTING SPECIFICATIONS for Electrical Power Equipment and Systems" ANSI, (2011)
- [45] L. Miller, L. Cibulka, M. Brown, A.von Meier, R. Arghandeh "Distribution system voltage management and optimization for intergration of renewables and electric vehicles. Status and State of the Art", California Institute for Energy and Environment (2012)
- [46] S. Thongkeaw, M. Boonthienthong (2013) "*Technique for Voltage Control in Distribution System*", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 7(10), pp. 1313 - 1316
- [47] C. Gao "Voltage Control in Distribution Networks using On-Load Tap Changer Transformers", Doctoral Dissertation, University of Bath (2013)
- [48] B. Kalyani, G. Ravi Kumar (2014) "*Function of Distribution Power Electronic Transformer for Medium Voltage*", IJCERT, 1(6) pp. 524 - 528
- [49] J. Seymour "*The Seven Types of Power Problems*", Schneider Electric

[50] "Distribution Voltage Regulators", Siemens Power Transmission and Distribution (2008)

[51] "Distribution Voltage Regulators", Siemens Energy (2011)

[52] "Single-phase step voltage regulators", Howard Industries, Inc. (2011)

[53] www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/

[54] www.nrel.gov/

[55] www.pnnl.gov

[56] www.deddie.gr