

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
Επιβλέπων: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης

Ρύθμιση Τάσης και Συχνότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Πτυχιακή Εργασία:
Ζιώγας Ηλίας (Α.Μ. 37885)
Μιχαλιού Μαρία-Ελένη (Α.Μ. 29760)

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε το κύριο αντικείμενο ενασχόλησης μου τον τελευταίο χρόνο φοίτησης μου στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, του τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πειραιά. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω μερικούς ανθρώπους για την πολύτιμη βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια σπουδών μου και για τη συμβολή στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέποντα της πτυχιακής αυτής, κ. Εριέττα Ζουντουρίδου, τόσο για την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο, όσο και για την συνεχή επιστημονική της καθοδήγηση και το αμείωτο ενδιαφέρον με το οποίο αντιμετώπισε το σύνολο των προσπαθειών μας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση της σε όλη τη διάρκεια τον σπουδών μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην συμφοιτήτρια μου Μιχαλιού Μαρία – Ελένη για την άριστη συνεργασία και για την υπομονή που έδειξε κατά την εκπόνηση της πτυχιακής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους για τα τόσα ωραία φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

Ηλίας Ζιώγας

Με την παρούσα πτυχιακή εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου σαν φοιτήτρια στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, του τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πειραιά και για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους αυτούς που με βοήθησαν τόσο στην εκπόνηση της εργασίας μου όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου και επιβλέποντα της πτυχιακής μου κ. Εριέττα Ζουντουρίδου που μας εμπιστεύθηκε να μας αναθέσει την πτυχιακή αυτή εργασία και που με την πείρα της και τις γνώσεις της μας παρείχε τη βοήθεια που χρειαζόμασταν για να αντιμετωπίσουμε όλα τα εμπόδια που συναντήσαμε. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον συμφοιτητή μου Ηλία Ζιώγα για την άκρως δημιουργική και απόλυτα επιτυχημένη συνεργασία, αποτέλεσμα της οποίας ήταν η παρούσα εργασία. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς και στην οικογένεια μου για την υποστήριξη και την συμπαράσταση τους, καθώς και στους φίλους μου για τα ωραία φοιτητικά χρόνια που περάσαμε.

Μιχαλιού Μαρία – Ελένη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία αναφορά στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.), στη γενική τους μορφή. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι διάφοροι μέθοδοι ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας στα διάφορα Σ.Η.Ε., με σκοπό την εύρυθμη λειτουργία τους αλλά και την καλύτερη απόδοση τους, για τον τελικό καταναλωτή.

Προκειμένου να καταστεί ολοκληρωμένη η εικόνα της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία. Συγκεκριμένα:

- Το πρώτο κεφάλαιο αποτελείται από την εισαγωγή και την πραγματοποίηση ιστορικής αναδρομής, στην ενεργειακή εξέλιξη και υλοποίηση των Σ.Η.Ε. Γίνεται μία γενική αναφορά στο στάδιο της παραγωγής και της μεταφοράς της ενέργειας όσο και μία εισαγωγή στη δομή, την αναπαράσταση των Σ.Η.Ε. και τ φορτία που αποτελούν το δίκτυο. Στη συνέχεια, υπάρχει εισαγωγή σε κάθε ενότητα από την οποία αποτελείται η παρούσα διπλωματική εργασία.

- Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.). Γίνεται μία ανάλυση των ανά μονάδα (αμ) μεγεθών και σε βασικές σχέσεις που βοηθούν στην επίλυση των μαθηματικών προβλημάτων που προκύπτουν. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία πιο αναλυτική αναφορά στις συνιστώσες που αποτελούν ένα Σ.Η.Ε.

- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία ανάλυση στο κύριο μέρος της παρούσης εργασίας, το οποίο αποτελείται από τις διάφορους μεθόδους ρύθμισης τόσο της τάσης όσο και της συχνότητας στα Σ.Η.Ε. Επίσης εξηγείται και η ευστάθεια των Σ.Η.Ε. που αποτελεί σημαντικόςς παράγοντας για την ομαλή λειτουργί των συστημάτων.

- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές έρευνας που δημιουργούνται από τη συνεχή ανάζητηση για βελτιστοποίηση των παραπάνω μεθόδων.

Λέξεις κλειδιά:

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.), Ρύθμιση Τάσης, Ρύθμιση Συχνότητας, Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή..……...…...σελ.1

1.2 Χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την παραγωγή και μεταφορά..σελ.2

1.3 Δομή ΣΗΕ .....……..….σελ.4

1.3.1 Σύστημα Παραγωγής..... σελ. 6

1.3.2 Σύστημα Μεταφοράς..... σελ. 6

1.3.3 Δίκτυο Διανομής..... σελ. 6

1.4 Παράσταση Σ.Η.Ε.....……..….σελ.7

1.4.1 Αναπαράσταση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας... σελ. 6

1.4.2 Σύγχρονες Γεννήτριες..... σελ. 9

1.4.3 Δυναμικά Φορτία..... σελ. 10

1.4.4 Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο..... σελ. 11

1.4.5 Δίκτυο..... σελ.11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)

2.1 Εισαγωγή …….....….σελ.13

2.2 Το σύστημα των ανά μονάδα μεγεθών…….....….σελ.13

2.2.1 Βασικές σχέσεις…….....….....σελ.14

2.3 Ισχύς, άεργος ισχύς, σχέσεις τάσεως σε απλά κυκλώματα..……σελ.18

2.4 Σύγχρονες Μηχανές…….....….σελ.21

2.5 Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσεως (ΑΡΤ) …….....….σελ.22

2.5.1 Συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....….σελ.22

2.5.2 Τύποι αυτόματου ρυθμιστού τάσεως……..….σελ.24

2.5.3 Αυτόματοι ρυθμιστές τάσεως και οι χαρακτηριστικές των γεννητριών…….....….σελ.26

2.6 Εναέριες γραμμές - τύποι και παράμετροι…….....….σελ.27

2.6.1 Παράμετροι…….....….σελ.29

2.7 Μετασχηματιστές…….....….σελ.35

2.7.1 Μετατοπίσεις φάσεως για τριφασικούς μετασχηματιστές.σελ.36

2.7.2 Μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων…….....….σελ.37

2.7.2.1 Αντομετασχηματιστές…….....σελ.39

2.7.2.2 Μετασχηματιστές γειωτές…….....σελ.39

2.7.2.3 Αρμονικές…….....σελ.40

2.7.3 Μετασχηματιστές μεταβλητής λήψεως (λόγου) ……..σελ.40

2.7.4 Τυπικές παράμετροι για μετασχηματιστές…..…….σελ.42

2.8 Φορτία…….....……...σελ.42

2.8.1 Εισαγωγή…….....……...σελ.42

2.8.2 Οικονομικές απόψεις…….....……...σελ.43

2.8.3 Συντελεστής απωλειών φορτίου…….....……...σελ.44

2.8.4 Χαρακτηριστικές τάσεις των φορτίων…….....……...σελ.45

2.8.4.1 Φωτισμός…….....σελ.45

2.8.4.2 Θέρμανση…….....σελ.45

2.8.4.3 Σύγχρονοι κινητήρες…….....σελ.46

2.8.4.4 Επαγωγικοί κινητήρες…….....σελ.46

2.8.5 Σύνθετα Φορτία…….....……...σελ.48

2.9 Χαρακτηριστικές φορτίου – συχνότητας…….....σελ.50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ Σ.Η.Ε.

3.1 Εισαγωγή σελ.51

3.2 Ρύθμιση Τάσης σε Σ.Η.Ε.....σελ.53

3.2.1 Εισαγωγή…….....……...σελ.53

3.2.2 Μέθοδοι ρυθμίσεως της τάσεως (i) – Εισαγωγή άεργου ισχύος.....σελ.55

3.2.2.1 Πυκνωτές διακλαδώσεως και επαγωγείς(πηνία) διακλαδώσεως…….....σελ.56

3.2.2.2 Πνκνωτές σειράς…….....σελ.57

3.2.2.3 Σύγχρονοι αντισταθμιστές…….....σελ.58

3.2.3 Μέθοδοι ρυθμίσεως της τάσεως (ii) — Μετασχηματιστές ενδιαμέσων
λήψεων.....σελ.60

3.2.4 Ρύθμιση τάσεως σε δίκτυα διανομής.....σελ.61

3.3 Ρύθμιση συχνότητας σε Σ.Η.Ε. σελ.63

3.3.1 Εισαγωγή.....σελ.63

3.3.2 Τύποι ρύθμισης φορτίου - συχνότητας.....σελ.63

3.3.3 Επίπεδος έλεγχος συχνότητας.....σελ.66

3.3.4 Μοντέλο ρυθμίσεως φορτίου-συχνότητας διασυνδεδεμένου συστήματος.....σελ.69

3.4 Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας αυτόνομου συστήματος.....σελ.71

3.4.1 Πρωτεύουσα ρύθμιση.....σελ.71

3.4.2 Δευτερεύουσα ρύθμιση.....σελ.74

3.5 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....σελ.77

3.6 Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις.....σελ.79

3.6.1 Κατηγοριοποίηση ευστάθειας.....σελ.81

3.6.1.1 Ευστάθεια γωνίας.....σελ.82

3.6.1.2 Ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών.....σελ.82

3.6.1.3 Ευστάθεια γωνίας για διαταραχές μεγάλης κλίμακας.....σελ.83

3.7 Ευστάθεια τάσης.....σελ.83

3.7.1 Ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών.....σελ.84

3.7.2 Ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών.....σελ.84

3.7.3 Ευστάθεια συχνότητας.....σελ.84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ

4.1 Συμπεράσματα-Επίλογος.....σελ.85

Βιβλιογραφία.....σελ.87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Το δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού επάνω σε μία εμπορική βάση, απετελείτο αρχικά από γεννήτριες συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτούσαν ειδικευμένα φορτία, π.χ. φωτισμού οδών, αιθουσών τέχνης και θεάτρων. Τον Ιανουάριο του 1882, ο Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας της Οδογέφυρας του Χόλμπορν (Holborn Viaduct) στο Λονδίνο, άρχισε να λειτουργεί, και αυτός ήταν ένας από τους πρώτους ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς το κόσμου, που τροφοδοτούσε ιδιωτικούς καταναλωτές γενικά και όχι ειδικευμένα φορτία. Ο σταθμός συνίστατο από μία γεννήτρια 60 kW στρεφόμενη από μία οριζόντια ατμομηχανή. Η παραγόμενη τάση ήταν συνεχής 110 V. Το ίδιο έτος άρχισε να λειτουργεί ένας παρόμοιος σταθμός στη Νέα Υόρκη.

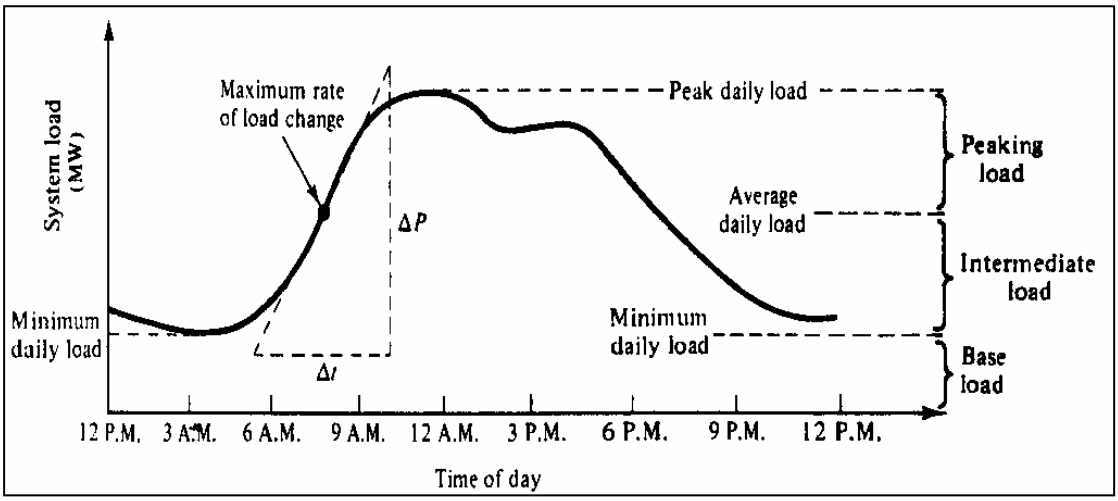
Ο πρώτος μεγάλος σταθμός παραγωγής εναλλασσομένου στη Μ. Βρετανία κατασκευάστηκε στοDeptford, όπου η ηλεκτρική ισχύς παρήγετο από μηχανές των 10.000 ίππων (hp) και μεταφέροταν, υπό τάση 110 kV, καταναλωτές του Λονδίνου. Τα χρόνια εκείνα, η μάχη μεταξύ των οπαδών του συνεχούς και του εναλλασσομένου είχε τη μεγαλύτερη της ένταση και οξύτητα. Τον ίδιο καιρό, παρόμοιες εξελίξεις παρατηρούνταν στις Η.Π.Α. και άλλες χώρες. Κυρίως λόγω της εφευρέσεως του μετασχηματιστή, οι οπαδοί του εναλλασσομένου υπερίσχυσαν, και άρχισε μία σταθερή ανάπτυξη των τοπικών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών, με κάθε πόλη ή μεγάλο κέντρο φορτίου να θέτει σε λειτουργία τον δικό της.

Το 1926, μία Απόφαση του Βρετανικού Κοινοβουλίου ίδρυσε το Κεντρικό Συμβούλιο Ηλεκτρισμού με αντικειμενικό σκοπό να διασυνδέσει τους καλύτερους από τους 500 ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς που λειτουργούσαν τότε, με ένα δίκτυο υψηλής τάσεως, γνωστό σαν «The grid» (Εθνικό Δίκτυο). Το 1948 η βρετανική ηλεκτροπαραγωγός βιομηχανία εθνικοποιήθηκε και ιδρύθηκαν δύο οργανισμοί: α) τα Συμβούλια Περιοχών, και τα β) τα Συμβούλια Παραγωγής, υπεύθυνα για την παραγωγή και τη λειτουργία του δικτύου μεταφοράς ενέργειας υπό υψηλή τάση, ή Εθνικού Δικτύου. Στις περισσότερες άλλες χώρες εκτός των Η.Π.Α. υπάρχει επίσης κεντρικός κυβερνητικός έλεγχος του κυρίου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την παραγωγή και μεταφορά

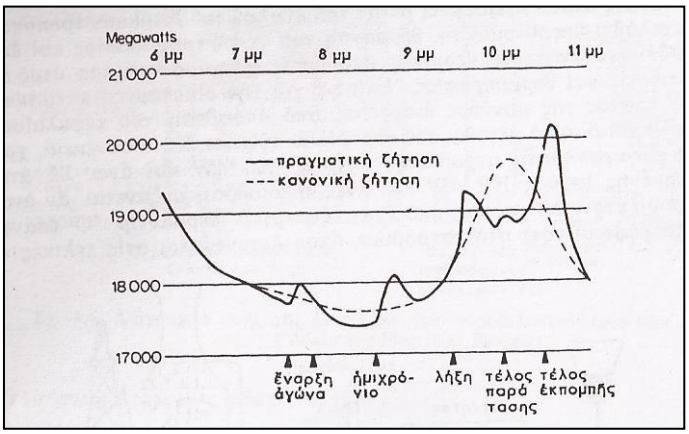
Υπάρχουν τρία κύρια χαρακτηριστικά της παροχής ηλεκτρισμού που, αν και φανερά, έχουν βαθειά σημασία και επίδραση στον τρόπο χειρισμού της από τους μηχανικούς της:

α) Ο ηλεκτρισμός, αντίθετα από το φωταέριο ή το νερό, δε μπορεί να αποθηκευθεί, και ο οργανισμός ηλεκτροπαροχής, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, μπορεί να συμμετέχει ελάχιστα μόνο στο διακανονισμό του φορτίου. Οι μηχανικοί ρυθμίσεως επιδιώκουν να διατηρούν την έξοδο από τις γεννήτριες ίση προς το συνδεμένο φορτίο υπό την καθορισμένη τάση και συχνότητα. Η δυσκολία της επιδιώξεως αυτής γίνεται φανερή αν μελετήσουμετην ημερήσια καμπύλη φορτίου στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Θα δούμε οτι το φορτίο αποτελείται βασικά από μία σταθερή συνιστώσα, γνωστή σαν «φορτίο βάσης» και από αιχμές που εξαρτώναι από την ώρα του εικοσιτετραώρου, δημοφιλή προγράμματα τηλεόρασης, κτλ. Π.χ. η επίδραση ενός ασυνήθιστα δημοφιλούς προγράμματος τηλεόρασης φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2. Επίδραση προγραμμάτων τηλεόρασης στη ζήτηση – Ο ποδοσφαιρικός αγώνας του Ευρωπαϊκού Κυπέλλου, που μεταδόθηκε στη Βρετανική τηλεόραση στις 29 Μαΐου του 1968. Οι αιχμές προκαλούνται από τη σύνδεση ηλεκτρικών τσαγιερών κτλ. Στα διαλείμματα και στο τέλος. (Άδεια αναδημοσίευσης από τη ΔΕΗ Αγγλίας)

β) Υπάρχει μία συνεχής αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, που χονδρικά ισοδυναμεί με διπλασιασμό κάθε δέκα χρόνια. Αυτό εφαρμόζεται στις περισσότερες χώρες, αν και σε μερικές υπό ανάπτυξη χώρες, είναι ακόμα ταχύτερη. Μία μεγάλη και διαρκής διαδικασία επεκτάσεως του συστήματος παρατηρείται σαν αποτέλεσμα. Τα δίκτυα ηλεκτρισμού μάλλον αναπτύσσονται καθώς περνούν τα χρόνια, παρά σχεδιάζονται/πραγματοποιούνται στην οριστική τους μορφή.

γ) Η διανομή και φύση των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Η άποψη αυτή είναι ζωτικού ενδιαφέροντος, γιατί τα ανθρακωρυχεία δεν γειτονεύουν υποχρεωτικά με τα κύρια κέντρα φορτίου. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι συνήθως απομακρυσμένη από τα μεγάλα κέντρα φορτίου. Αυτές είναι οι δύο παραδοσιακές πηγές ενέργειας στις περισσότερες χώρες, και το πρόβλημα εκλογής τοποθεσίας του σταθμούκαι αποστάσεων μεταφοράς αποτελεί μία πολύπλοκη άσκηση στα οικονομικά. Η πιο εκτεταμένη χρήση πετρελαίου και πυρηνικής ενέργειας θα τείνει να τροποπιήσει τη γεωγραφική κατανομή των σταθμών παραγωγής.

Μία ακόμη επίδραση, διαφορετικής φύσεως, που διαρκώς γίνεται εμφανέστερη, είναι η η διατήρηση του τοπίου. Υπάρχουν σημαντικές πιέσεις αντίθετες στη μεγάλη πλήθυνση των εναερίων γραμμών που παρατηρείται καθώς η ζήτηση ηλεκτρισμού αυξάνει σταθερά. Αν και η ανύψωση των τάσεων παροχής αυξάνει σημαντικά την ισχύ που μεταφέρεται από κάθε εναέρια γραμμή, ο αριθμός γραμμών αυξάνει γρήγορα, και φαίνεται πιθανό οτι περιορισμένα μέρη του δικτύου θα κατασκευάζονται υπόγεια, παρ' όλο το πολύ μεγαλύτερο κόστος. Τα υπόγεια αυτά καλώδιαθα είναι επιπλέον αυτών που χρησιμοποιούνται κανονικά στις οικοδομημένες περιοχές. Για σχετικά μικρές αποστάσεις είναι εφαρμόσιμη στα υπόγεια καλώδια εναλλασσόμενη υψηλή τάση, για μακρύτερες όμως διαδρομές θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συνεχής υψηλή τάση.

1.3 Δομή ΣΗΕ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί, να λειτουργεί σωστά και να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.

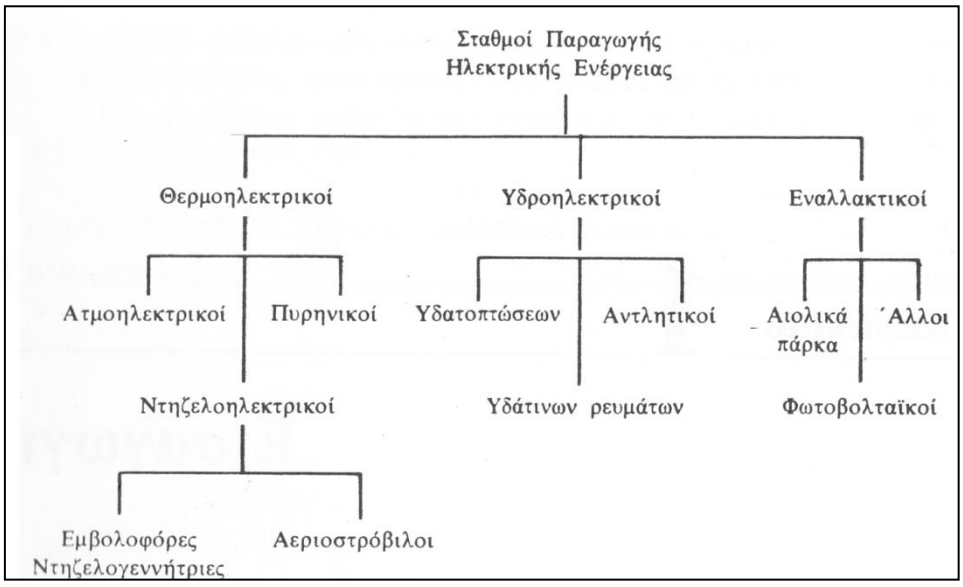
2. Πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος.

3. Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας. Τρεις βασικοί παράγοντες που συνιστούν τη ποιότητα αυτή είναι: σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.

4. Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Αν και τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρουν ανά τον κόσμο όλα αποτελούνται από τρια βασικά υποσυστήματα. Αυτά είναι το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής.

Το σύστημα παραγωγής αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση (ΥΤ) για μείωση των απωλειών. Οι σταθμοί παραγωγής μετατρέπουν μια πρωτογεννή μορφή ενέργειας σε μηχανική (κινητήριες μηχανές-στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι διάφοροι τύποι σταθμών παραγωγής κατατάσσονται όπως στο Σχήμα 1.1 σε θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και εναλλακτικούς.



Σχήμα 1.1 Χωρισμός σταθμών παραγωγής

Από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο (εξωτερική καύση) για παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων. Αντίθετα οι ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ).

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική με τη βοήθεια υδροστροβίλων διαφόρων τύπων. Όσον αφορά τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, οι περισσότερες διαδεδομένες εφαρμογές τους στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται στον ίδιο ζυγό του δικτύου. Συνήθως τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν κυρίως ντηζελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εγκαθίστανται συνηθως για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων γεωγραφικών οικισμών, οι οποίοι είναι δύσκολο να συνδεθούν με το δίκτυο. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να γίνεται μια προσπάθεια για την αύξηση της διείσδυσης των εναλλακτικών πηγών ενέργειας στο κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως 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 καταναλώσεως. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. ιεθνώς οι εφαρμοζόμενες ονομαστικές τάσεις μεταφοράς σήμερα περιλαμβάνουν τιμές όπως 66 KV, 110 KV, 132 KV, 138 KV, 150 KV, 220 KV, 275 KV, 345 KV, 400 KV, 500 KV και 750 KV. Το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου και παρέχεται στους καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ. Περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει έως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι τους συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, όπως άλλωστε και για τη μεταφορά, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο της μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

1.3.1 Σύστημα Παραγωγής

Το Σύστημα Παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, στους οποίους μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική και κατόπιν σε ηλεκτρική με την βοήθεια των τριφασικών σύγχρονων γεννητριών. Ανάλογα με την μορφή της πρωτογενούς αυτής ενέργειας οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε:

• Θερμοηλεκτρικούς, όπου η θερμότητα, προερχόμενη από καύση ορυκτών καυσίμων ή πυρηνική σχάση μετατρέπεται με την βοήθεια στροβίλων σε κινητική που οδηγεί την σύγχρονη γεννήτρια. Ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιούν οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί χωρίζονται περεταίρω σε ατμοηλεκτρικούς και πυρηνικούς, που χρησιμοποιούν τον ατμό και στους ντηζελοηλεκτρικούς, που χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) που μπορεί να είναι είτε εμβολοφόρες ντηζελογεννήτριες είτε αεριοστρόβιλοι.

• Υδροηλεκτρικούς, όπου η απαραίτητη κινητική ενέργεια προέρχεται από την δυναμική ενέργεια του νερού καθώς αυτό διέρχεται μέσα από διάφορους τύπους υδροστροβίλων. Ανάλογα με τον τρόπο που ρέει το νερό, τους διακρίνουμε σε σταθμούς φυσικής ροής, ρυθμιζόμενης ροής και αντλητικούς.

• Εναλλακτικούς, όπου γίνεται χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οι οποίες βρίσκονται στην φύση σε πρακτικά ανεξάντλητες ποσότητες και καθώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας γίνονται περισσότερο από αισθητές, αναμένεται η χρήση τους να αυξηθεί δραματικά τα επόμενα χρόνια. Ανάλογα με την μορφή της πρωτογενούς μορφής έχουμε τα αιολικά πάρκα, όπου χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια του ανέμου με την βοήθεια ανεμογεννητριών και τους σταθμούς που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια, είτε απευθείας σαν φωτεινή ενέργεια οπότε μιλάμε για φωτοβολταϊκά πάρκα, είτε μετατρέποντας την πρώτα σε θερμότητα οπότε μιλάμε για ηλιοθερμικούς σταθμούς.

1.3.2 Σύστημα Μεταφοράς

Το Σύστημα Μεταφοράς είναι εκείνο το κομμάτι του ΣΗΕ που ενώνει τους διάφορους σταθμούς παραγωγής με τα μείζονα κέντρα φορτίου καθώς και με άλλα ΣΗΕ και ως εκ τούτου είναι το μέσο που μεταφέρει τις μεγάλες ποσότητες ισχύος . Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής (66-220kV) και υπερυψηλής (275-500kV) τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης (κατανάλωση ισχύος μεγαλύτερη από 10MW). Η δομή τους είναι βροχοειδής ώστε να εξασφαλίζουν εναλλακτικούς δρόμους ροής της ισχύος και ως εκ τούτου μεγαλύτερη αξιοπιστία. Σε πολλές χώρες τα Συστήματα Μεταφοράς περιλαμβάνουν και τα συστήματα Υπομεταφοράς που είναι τα δίκτυα μεταφοράς του παρελθόντος και μεταφέρουν ισχύ σε ποσότητες και αποστάσεις μικρότερες των τελευταίων και με χαμηλότερες τάσεις. Αν και ο ρόλος τους την σημερινή εποχή είναι παρόμοιος με

αυτόν των Δικτύων Διανομής που θα περιγραφούν παρακάτω, εντούτοις περιλαμβάνονται στο Σύστημα Μεταφοράς για τον λόγο ότι δεν μπορούν εύκολα να διαχωριστούν από αυτό.

1.3.3 Δίκτυο Διανομής

Το Δίκτυο Διανομής παραλαμβάνει την ενέργεια που μεταφέρεται στις μείζονες περιοχές φορτίου μέσω του Συστήματος Μεταφοράς και το διανέμει μέσα στην εξυπηρετούμενη περιοχή, φθάνοντας μέχρι τον τελευταίο καταναλωτή. Το Δίκτυο Διανομής χωρίζεται σε δυο βαθμίδες: την διανομή Μ.Τ. ή πρωτεύουσα διανομή και την διανομή Χ.Τ. ή δευτερεύουσα διανομή. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους σταθμούς ΜΤ/ΧΤ καθώς και τους καταναλωτές ΜΤ. Ανάλογα με τον τύπο περιοχής που τροφοδοτούν μπορούν να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια, ενώ λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας στα δίκτυα αυτά.

1.4 Παράσταση Σ.Η.Ε

Αφού στην προηγούμενη ενότητα είδαμε την βασική δομή των ΣΗΕ, στην παρούσα εξετάζουμε την δυναμική συμπεριφορά και μοντελοποίηση των βασικών στοιχείων που τα αποτελούν. Τα στοιχεία αυτά είναι οι γεννήτριες, τα δυναμικά φορτία, οι μετασχηματιστές εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ και το δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει τους ζυγούς και τις ηλεκτρικές γραμμές που τους ενώνουν.

1.4.1 Αναπαράσταση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Τα μοντέρνα συστήματα παροχής ηλεκτρισμού είναι όλα τριφασικά, εναλλασσομένης τάσεως. Τα δίκτυα διανομής έχουν μελετηθεί για να προσεγγίζει η κανονική τους λειτουργία αρκετά την εξισορροπημένη τριφασική κατάσταση, και συχνά αρκεί η μελέτη των ηλεκτρικών συνθηκών (κατάστασης) της μίας φάσης για να δώσει την γενική εικόνα. Ίση φόρτιση των τριών φάσεων δικτύου εξασφαλίζεται με τη διανομή κατά το δυνατόν ίσων οικιακών φορτίων σε κάθε φάση των τροφοδοτικών διανομής της χαμηλής τάσης.

Ένας πολύ χρήσιμος και απλός τρόπος γραφικής παράστασης ενός δικτύου είναι το σχηματικό ή γραμμικό διάγραμμα, όπου τα τριφασικά κυκλώματα παρίστανονται από απλές γραμμές (κυρίως ευθείες ή τεθλασμένες). Ορισμένες συμβατικές παραστάσεις (σύμβολα), που χρησιμοποιούνται, φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Το τυπικό γραμμικό ή σχηματικό διάγραμμα ενός τμήματος συστήματος ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Στο διάγραμμα αυτό, η γεννήτρια είναι συνδεμένη κατ' άστέρα, όπου το σημείο-κορυφή του αστέρα είναι συνδεμένο προς τη γη μέσω αντίστασης. Η φύση της σύνδεσης του σημείου αστέρα περιστρεφόμενων μηχανών και μετασχηματιστών προς τη γη είναι ζωτικής σημασίας, όταν θεωρούμε σφάλματα που παράγουν ηλεκτρική ανισοκατανομή στις τρεις φάσεις. Η γεννήτρια τροφοδοτεί δύο τριφασικές γραμμές (εναέριες ή υπόγειες). Η τάση γραμμής αυξάνεται με πολλαπλασιασμό της τάσης των

ακροδεκτών της γεννήτριας, από μετασχηματιστές συνδεμένους όπως φαίνεται. Στο τέρμα των γραμμών, η τάση ελαττώνεται για τη δευτερογενή διανομή ισχύος (ενέργειας). Χρησιμοοιούνται δύο γραμμές για να βελτιώσουν την ασφάλεια της παροχής, δηλαδή αν η μία γραμμή παρουσιάσει ένα σφάλμα και πρέπει να τεθεί εκτός κυκλώματος, όποια παραμείνει εξακολουθεί να τροφοδοτεί το άκρο κατανάλωσης. Σε απλούς υπολογισμούς ρεύματος και τάσης δεν είναι απαραίτητη η ένδειξη για την παρουσία διακοπτών κτλ. στα διαγράμματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, όπως τους υπολογισμούς ευσταθείας, η θέση των διακοπτών, μετασχηματιστών έντασης και προστασίας είναι πολύ χρήσιμο να φαίνεται.

Αν και η χρήση υπερειδικευμένων ή όρων της πρακτικής εφαρμογής αποφεύγονται όσο είναι δυνατό, ορισμένοι όροι που συναντάμε συχνά θα πρέπει να επεξηγηθούν. Έτσι, ακολουθεί ένας μικρός κατάλογοστέτοιων όρων με τις εξηγήσεις τους.

Συστήματα: Χρησιμοποιείται για να περιγράφει το πλήρες ηλεκτρικό δίκτυο, τα φορτία, τις γεννήτριες και τους κινητήρες που τις περιστρέφουν

Φορτίο: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά πολλούς τρόπους : για ένδειξη μίας συσκευής ή συλλογής συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρισμό, για ένδειξη της ισχύος που απαιτείται από ένα δεδομένο κύκλωμα ηλεκτροπαροχής, για ένδειξη της ισχύος ή ρεύματος που περνά από μία γραμμή ή μηχανή.

Ζυγός: Μια ηλεκτρική σύνδεση μηδενικής σύνθετης αντίστασης, που συνδέει πολλά αντικείμενα όπως γραμμές, φορτία, κτλ. Συχνά παίρνει τη μορφή πραγματικών ζυγών χαλκού ή αλουμινίου.

Γείωση: Η σύνδεση ενός αγωγού ή του πλαισίου μίας συσκευής προς το κύριο σώμα της γης. Αυτό πρέπει να γίνει έτσι, ώστε η ωμική αντίσταση μεταξύ του αντικειμένου και γης να μην υπερβαίνει ορισμένη τιμή. Αυτό συχνά σημαίνει την ταφή μεγάλων συγκροτημάτων αγώγιμων ράβδων στη γη και τη χρήση διασυνδέσεων μεγάλου εμβαδού διατομής.

Σφάλμα: Αυτό είναι η καή λειτουργία δικτύου, που συνήθως οφείλεται στη βραχυκύκλωση δύο αγωγών ή τη σύνδεση προς γη αγωγού υπό τάση.

Ασφάλεια παροχής: Πρέπει να γίνει πρόβλεψη για την εξασφάλιση της συνέχεις της παροχής στους καταναλωτές, ακόμη και όταν μερικά κομμάτια εξοπλισμού (μηχανήματα) βρεθούν εκτός κυκλώματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο κυκλώματα εν παραλλήλω, και λέγεται οτι ένα σύστημα είναι ασφαλισμένο όταν εξασφαλίζεται η συνέχεια της παροχής. Αυτό προφανώς είναι το πρωταρχικό θέμα στη μελέτη και τη λειτοργία.

1.4.2 Σύγχρονες Γεννήτριες

Η πλειοψηφία των γεννητριών στα ΣΗΕ είναι σύγχρονες μηχανές (με εξαίρεση τα αιολικά πάρκα στα οποία χρησιμοποιούνται μηχανές επαγωγής και τα φωτοβολταϊκά, τα οποία δεν χρησιμοποιούν στρεφόμενες μηχανές), οι οποίες εκτός από πηγές ενεργού ισχύος είναι ταυτόχρονα και οι βασικές πηγές αέργου ισχύος, με αποτέλεσμα να είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνες για την διατήρηση των τάσεων σε όλο το δίκτυο σε αποδεκτά επίπεδα. Ως εκ τούτου τα χαρακτηριστικά τους και τα όρια τους είναι σπουδαίας σημασίας για την ευστάθεια των ΣΗΕ.

Δομικά οι σύγχρονες γεννήτριες αποτελούνται από τον δρομέα, τον στάτη και τα αντίστοιχα τυλίγματα. Ο δρομέας είναι μηχανικά συζευγμένος με την κινητήρια μηχανή (π.χ. ατμοστρόβιλο) και διαρρέεται από συνεχές ρεύμα που δημιουργεί στο διάκενο της μηχανής ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο έλεγχος των σύγχρονων γεννητριών γίνεται επομένως από δυο δυνάμεις ελέγχου, το ρεύμα διεγέρσεως και το μηχανικό ζεύγος του κινητήριου άξονα. Το ρεύμα διεγέρσεως χρησιμοποιείται από του Αυτόματους Ρυθμιστές Τάσεως (ΑΡΤ) ώστε να κρατάνε την τερματική τάση σταθερή ενώ το μηχανικό ζεύγος χρησιμοποιείται από τον ρυθμιστή στροφών για την διατήρηση σταθερής συχνότητας. Μεταβολή πάντως οποιασδήποτε από τις δύο δυνάμεις ελέγχου προκαλεί τόσο αλλαγή τάσης όσο και αλλαγή συχνότητας. Η αλληλεξάρτηση αυτή είναι τόσο μικρότερη όσο πιο ισχυρό είναι το σύστημα στο οποίο συνδέεται η γεννήτρια.

Για την ανάλυση, μελέτη και αναπαράσταση των γεννητριών υπάρχουν διάφορα μοντέλα ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, που στηρίζονται στις εξισώσεις του Park και μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία . Χωρίς να επεκταθούμε περισσότερο σε αυτά, εισάγουμε εδώ ένα μοντέλο γεννήτριας τρίτης τάξης, που περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\delta} = \omega \qquad (1.1)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{2H}\omega + \frac{\omega}{2H}(P_m - P_e) \qquad (1.2)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{-(E'_q) + u_{fd} - (X_d - X'_d)i_d}{T'_{do}} \qquad (1.3)$$

όπου δ είναι η γωνία του δρομέα, ω η γωνιακή του ταχύτητα σε ανά μονάδα, Η η σταθερά αδρανείας της μηχανής σε s, Pm η ισχύς της κινητήριας μηχανής, Pe η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η γεννήτρια, D μια σταθερά αποσβέσεως, E’ q η ΗΕΔ πίσω από την μεταβατική αντίδραση, Xd η αντίδραση οριζόντιου άξονα, X’d η μεταβατική αντίδραση οριζόντιου άξονα, T’do η σταθερά χρόνου ανοιχτοκυκλώσεως, ufd η τάση του τυλίγματος διεγέρσεως και id το ρεύμα οριζόντιου άξονα. Όλες οι τιμές αν δεν αναφέρεται διαφορετικά είναι σε ανά μονάδα.

Αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις περιγράφουν και τους διάφορους μηχανισμούς ελέγχου που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως τον ΑΡΤ και τον ρυθμιστή στροφών.

Λόγω της πρωτεύουσας σημασίας των γεννητριών, αυτές είναι εφοδιασμένες με διάφορους μηχανισμούς προστασίας, οι οποίοι εισάγουν μη γραμμικότητες και είναι υπεύθυνοι για αρκετά φαινόμενα αστάθειας. Ο σημαντικότερος από αυτούς τους μηχανισμούς είναι ο μηχανισμός προστασίας υπερδιέγερσης (Over Excitation Limiter, OXL). Ο μηχανισμός αυτός προστατεύει τα τυλίγματα του δρομέα από υπερθέρμανση λόγω μεγάλου ρεύματος διεγέρσεως. Όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός αυτός, ο ΑΡΤ δεν μπορεί να κρατήσει πλέον σταθερή την τερματική τάση της γεννήτριας, που όπως αναφέραμε γίνεται μέσω ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως, αφού το τελευταίο διατηρείται σε μια σταθερή τιμή που ορίζεται από τον μηχανισμό προστασίας υπερδιέγερσης.

Στην παρούσα πτυχιακή πάντως θα θεωρήσουμε ότι οι σύγχρονες γεννήτριες ελέγχονται από ιδανικούς ΑΡΤ, χωρίς προστασία υπερδιέγερσης, οι οποίοι κρατάνε σταθερή την τερματική τάση, με αποτέλεσμα οι γεννήτριες να μπορούν να περιγραφούν από το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, σαν ιδανικές πηγές τάσης πίσω από μια σύγχρονη αντίδραση.

1.4.3 Δυναμικά Φορτία

Η συστηματική περιγραφή των δυναμικών φορτίων είναι πολύ δύσκολη, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ΣΗΕ περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό συσκευών που διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Η καρδιά του προβλήματος βρίσκεται στον προσδιορισμό ανά πάσα χρονική στιγμή της σύστασης των φορτίων και της ανάπτυξης ενός συνολικού μοντέλου που να περιγράφει την εξάρτηση τους από το χρόνο.

Στην παρούσα πτυχιακή θεωρούμε δυναμικά φορτία, σταθερού συντελεστή ισχύος, τα οποία έχουν την τάση να αποκαταστήσουν την ονομαστική τους ζήτηση. Τέτοια φορτία μπορεί να είναι για παράδειγμα μηχανές επαγωγής, θερμοστατικά φορτία (δηλαδή φορτία που ελέγχονται από θερμοστάτες και καταναλώνουν σταθερή ποσότητα ενέργειας ανεξάρτητα της τάσης) ή φορτία που αντιστοιχούν σε ρυθμιστές τάσης στη διανομή.

Τα φορτία αυτά μπορούν να παρασταθούν σαν σύνθετες αγωγιμότητες με μεταβλητές κατάστασης τις ωμικές αγωγιμότητες και εξαρτημένες μεταβλητές τις χωρητικές, οι οποίες λόγω σταθερού συντελεστή ισχύος μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση 1.4:

$$B = G \tan\varphi \qquad (1.4)$$

όπου φ είναι η γωνία του συντελεστή ισχύος και G, B η ωμική και χωρητική αγωγιμότητα αντίστοιχα.

Η δυναμική συμπεριφορά τέτοιων φορτίων περιγράφεται μέσω διαφορικών εξισώσεων, όπως η παρακάτω:

$$\dot{G}T_G = P_D - GV^2 \qquad (1.5)$$

όπου PD η ονομαστική ζήτηση του φορτίου και V η τάση του.

1.4.4 Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο

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:

$$t_{k+1} = t_k + T_D \qquad (1.6)$$

όπου TD είναι η χρονική καθυστέρηση 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.

Η δυναμική συμπεριφορά των ΣΑΤΥΦ περιγράφεται από εξισώσεις διαφορών της μορφής:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta_r, & \text{εάν } V > V_{ref} + \frac{d}{2} \text{ και } r < r_{max} \\ r_k - \Delta_r, & \text{εάν } V < V_{ref} - \frac{d}{2} \text{ και } r > r_{max} \\ r_k\text{ , διαφορετικά} & \end{cases} \qquad (1.7)$$

V είναι η ελεγχόμενη τάση, r ο λόγος του μετασχηματιστή που φέρει το ΣΑΤΥΦ, rmin και rmax το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα των τιμών που μπορεί να πάρει αυτός ο λόγος, Δr το βήμα του λόγου μετασχηματισμού, Vref η τάση αναφοράς και d η νεκρή ζώνη, η έκταση της οποίας είναι από Vref - d/2 έως Vref + d/2.

1.4.5 Δίκτυο

Για την παράσταση του δικτύου γίνεται η υπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται στην Ημιτονοειδή Μόνιμη Κατάσταση (ΗΜΚ) κατά την οποία όλα τα ηλεκτροδυναμικά μεταβατικά φαινόμενα έχουν εξαλειφθεί και όλο το σύστημα έχει σταθερή συχνότητα, ίση με την ονομαστική της τιμή. Όταν συμβαίνει αυτό οι τάσεις και τα ρεύματα του δικτύου μπορούν να περιγραφούν από τους αντίστοιχους παραστατικούς μιγαδικούς αριθμούς (phasors) με σταθερό μέτρο και φάση, ενώ τα δεδομένα του

δικτύου (π.χ. γραμμές μεταφοράς) μπορούν να αναπαρασταθούν μέσω σύνθετων αντιστάσεων.

Επομένως εφαρμογή του Νόμου Ρευμάτων του Kirchhoff σε κάθε ένα ζυγό, ενός συστήματος N ζυγών συνολικά, δίνει σε μητρική μορφή:

$$\tilde{I} = Y\tilde{V} \qquad (1.8)$$

όπου $\tilde{I}$ είναι το N-διάστατο διάνυσμα των εγχύσεων ρεύματος, $\tilde{V}$ το N-διάστατο διάνυσμα των τάσεων των ζυγών και Y ο πίνακας αγωγιμοτήτων του συστήματος, διάστασης N×N, με μιγαδικά στοιχεία. Αντικαθιστώντας τις εγχύσεις ρευμάτων συναρτήσει των εγχεόμενων ισχύων και των τάσεων, βάση του τύπου:

$$\tilde{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} \qquad (1.9)$$

και εκτελώντας τις πράξεις στην σχέση (1.8), χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, παίρνουμε συνολικά 2N μη γραμμικές πραγματικές εξισώσεις ροών φορτίου που συνδέουν τις ισχείς, τις τάσεις και τις γωνίες όλου του συστήματος και αποτελούν τις αλγεβρικές του εξισώσεις.

Σε συνεκτική μορφή οι αλγεβρικές εξισώσεις της ροής φορτίου μπορούν να γραφούν στην μορφή:

$$g(P,Q,V,\theta) = 0 \qquad (1.10)$$

όπου P, Q οι ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα και V, θ το μέτρο και η φάση των τάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των συνιστωσών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι απαραίτητο να κατανοηθούν, προτού αναλάβουμε τη μελέτη των μεγάλων συστημάτων που αυναπαρτίζουν οι συνιστώσες αυτές διασυνδεμένες. Σε κάθε περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η πιο απλή παράσταση που χρησιμοποιεί το ισοδύναμο κύκλωμα, όχι μόνο για να αποσαφηνίσει τις αρχές που υποκρύβονται, αλλά και επειδή αυτά τα απλά μοντέλα χρησιμοποιούν οι Μηχανικοί συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στην πράξη.

Τα φορτία θεωρούνται σαν συνιστώσες, αν και η ακριβής σύνθεση και τα χαρακτηριστικά στους δεν είναι γνωστά με απόλυτη βεβαιότητα. Όταν μελετούμε/σχεδιάζουμε ένα σύστημα ηλεκτροπαροχής ή επεκτείνουμε ένα σύστημα που ήδη υπάρχει, απαιτείται η πρόβλεψη των αναμενμένων φορτίων με τη χρήση στατιστικών μεθόδων.

Προτού ασχοληθούμε με τις συνιστώσες , θα εξηγήσουμε μερικές βασικές ιδέες και ιδιαίτερα το σύστημα αναφοράς με ανηγμένα στη μονάδα μεγέθη, που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην ανάλυση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τονίζεται οτι, τα περισσότερα ισοδύναμα κυκλώματα που χρησιμοποιούμε είναι μονοφασικάκαι χρησιμοποιούν τιμές φάση – προς – ουδέτερο. Αυτό γίνεται με την παραδοχή οτι τα φορτία είναι εξισσορροπημένα τριφασικά, πράγμα λογικό για την κανονική (μόνιμη, στατικότροπη)λειτουργία. Όταν έχουμε διαταραχή της ισορροπίας μεταξύ των τριών φάσεων, απαιτείται πλήρης αντιμετώπιση και των τριών φάσεων.

2.2 Το σύστημα των ανά μονάδα μεγεθών

Σε πολλὲς εφαρμογές (και όχι μόνο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας) είναι χρήσιμο να κανονικοποιούμε τα μεγέθη ενός συστήματος διαιρώντας κάθε μέγεθος με μια αντίστοιχη τιμή αναφοράς ή βάσεως. Αποκτούμε έτσι μια άμεση αντίληψη για το μέγεθος ως ποσοστό μιας τιμής που συνήθως αντιστοιχεί στην κανονική

λειτουργία. Η κανονικοποίηση επιτρέπει μια πιο άμεση αντίληψη για την τάξη μεγέθους και διευκολύνει κατά κανόνα τους υπολογισμούς.

Πιο συγκεκριμένα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η τάξη των μεγεθών είναι τέτοια που οι υπολογισμοί σε Volt και Watt είναι αρκετά δυσχερείς και ενέχουν σοβαρό κίνδυνο αριθμητικού λάθους. Αυτός ήταν ένας από τους πρώτους λόγους που επέβαλαν τη γενικευμένη χρήση του ανα μονάδα συστήματος στα ΣΗΕ. Αν και σήμερα θα μπορούσε να αντιταχθεί ότι η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών με εξειδικευμένα ψηφιακά προγράμματα έχει απλοποιήσει κατά πολύ το πρόβλημα των υπολογισμών, υπάρχουν ωστόσο άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα του ανά μονάδα συστήματος, τα οποία παραμένουν, όπως π.χ.:

- Οι παράμετροι των συνιστωσών του συστήματος κυμαίνονται σε ένα μικρό φασμα τιμών. Έτσι, ένα πιθανό σφάλμα σε κάποια τιμή γίνεται άμεσα αντιληπτό.

- Με το ανά μονάδα σύστημα δεν χρειάζεται πλέον η αναγωγή στο ένα τύλιγμα των μετασχηματιστών. Αυτό είναι ιδιαίτερα εξυπηρετικό γιατί ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει εκατοντάδες μετασχηματιστών.

- Η ανά μονάδα τιμή της τάσεως είναι περίπου ίση με τη μονάδα σε όλο το σύστημα.

Υπάρχουν όμως και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να έχει κανείς υπόψη όταν εφαρμόζει το ανά μονάδα σύστημα:

- Αλλάζουν τα ισοδύναμα κυκλώματα των στοιχείων και χάνουν τη φυσική τους ιδιότητα.
- Μερικές εξισώσεις που ισχύουν στη μη κανονικοποιημένη μορφή αλλάζουν στο ανά μονάδα σύστημα.

2.2.1 Βασικές σχέσεις

Ορίζουμε σαν ανά μονάδα τιμή (αμ) ενός μεγέθους το λόγο της φυσικής τιμής του προς τη βασική τιμή (ή τιμή βάσεως) του αντίστοιχου μεγέθους:

$$\frac{\eta\ \pi\rho\alpha\gamma\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{\eta}\ \tau\iota\mu\acute{\eta}\ (\sigma\varepsilon\ o\pi o\iota\alpha\delta\acute{\eta}\pi o\tau\varepsilon\ \mu o\nu\acute{\alpha}\delta\alpha)}{\eta\ \beta\acute{\alpha}\sigma\eta\ \alpha\nu\alpha\phi o\rho\acute{\alpha}\varsigma\ (\tau\iota\mu\acute{\eta})\sigma\tau\eta\nu\ \acute{\iota}\delta\iota\alpha\ \mu o\nu\acute{\alpha}\delta\alpha}$$

Με τον τρόπο αυτό, η ανά μονάδα τιμή είναι αδιάστατη και μπορεί να εκφράζεται και ως ποσοστό επί τοις εκατό. Έτσι οι ανά μονάδα τιμές τάσεως, ισχύος και ρεύματος είναι:

$$V_{\alpha\mu} = \frac{V}{V_B} \quad S_{\alpha\mu} = \frac{S}{S_B} \quad I_{\alpha\mu} = \frac{I}{I_B} \qquad (2.1)$$

όπου με τον δείκτη Β εννοούμε την τιμή βασεώς τασεώς, ισχύος κλπ.

Η βασική τιμή είναι παντα πραγματικός αριθμός. Έτσι η τιμή βασεώς S_B της ισχύος είναι η ίδια είτε πρόκειται για ενεργό, άεργο ή φαινόμενη ισχύ. Η ανά μονάδα τιμή κάποιου μεγέθους μπορεί φυσικά να είναι μιγαδική, όταν το μέγεθος αυτό εκφραζεται από παραστατικό ή αλλο μιγαδικό αριθμό. Η βασική τιμή έχει τη φυσική μονάδα του αντιστοίχου μεγέθους, επιλέγεται αυθαίρετα και αποτελεί τιμή αναφοράς.
Οι τιμές βάσεως διαφορετικών μεγεθών επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ισχύουν στο ανά μονάδα σύστημα οι εξισώσεις του δικτύου. Έτσι 1 αμ ρεύμα, όταν ρέει σε μοναδιαία αντίσταση πρέπει να προκαλεί 1 αμ πτώση τάσεως. Επίσης 1 αμ ρεύμα υπό μοναδιαία τάση πρέπει να δίνει 1 αμ ισχύ, κ.ο.κ.

Μονοφασικό σύστημα
Σε ένα μονοφασικό σύστημα, ή στη μια φάση ενός τριφασικού συστήματος οι βάσεις της φασικής τάσεως $V_{B\varphi}$, της ισχύος ανά φάση $S_{B\varphi}$, του ρεύματος $I_{B\varphi}$ και της αντιστάσεως $Z_{B\varphi}$ πρέπει να ικανοποιούν τις μεταξύ τους σχέσεις:

$$I_{B\varphi} = \frac{S_{B\varphi}}{V_{B\varphi}} \qquad (2.2)$$

$$Z_{B\varphi} = \frac{V_{B\varphi}}{I_{B\varphi}} = \frac{V_{B\varphi}^2}{S_{B\varphi}} \qquad (2.3)$$

Από τις σχέσεις (2.2)-(2.3) γίνεται φανερό ότι από τα τέσσερα βασικά μεγέθη, $V_{B\varphi}$, $S_{B\varphi}$, $I_{B\varphi}$, και $Z_{B\varphi}$ μπορούμε να επιλέξουμε αυθαίρετα μόνο τα δύο. Συνήθως επιλέγονται οι βάσεις ισχύος και τάσεως, ενώ οι τιμές βάσεως ρεύματος και αντιστάσεως προκύπτουν κατευθείαν από τις (2.2)-(2.3).

Σύμφωνα με τα παραπανω, η εξίσωση της μιγαδικής ισχύος ανά φάση στο ανά μονάδα σύστημα βρίσκεται διαιρώντας και τα δυο μέλη της εξίσωσης:

$$S_{B\varphi} = \widehat{V_\varphi} \cdot \widehat{I^*} \qquad (2.4)$$

με τη βαση ισχύος ανά φάση $S_{B\varphi}$, η οποία σύμφωνα με την (2.4) ισούται με $V_{B\varphi} I_{B\varphi}$:

$$\frac{S_\varphi}{S_{B\varphi}} = \frac{\widehat{V_\varphi}}{V_{B\varphi}} \frac{\widehat{I^*}}{I_{B\varphi}}$$

οπότε βάσει των ορισμών (2.1):

$$S_{\varphi,\alpha\mu} = \widehat{V_{\varphi,\alpha\mu}} \cdot \widehat{I^*_{\alpha\mu}} \qquad (2.5)$$

Παρατηρούμε πως η εξίσωση της μιγαδικής ισχύος (2.5) σε ανά μονάδα μεγέθη είναι ακριβώς ίδια με την αντίστοιχη εξίσωση (2.4) με μονοφασικά μεγέθη.

Παρατηρούμε τώρα ξανά τη σχέση για τη σύνθετη αντίσταση ανά φαση:

$$Z = \frac{\widehat{V_\varphi}}{\hat{I}} \qquad (2.6)$$

Διαιρώντας κατά μέλη την (5.7) με την εξίσωση (5.4) προκύπτει:

$$\frac{Z}{Z_{B\varphi}} = \frac{\widehat{V_\varphi}/V_{B\varphi}}{\hat{I}/I_{B\varphi}}$$

Δηλαδή:

$$Z_{\alpha\mu} = \widehat{V_{\varphi,\alpha\mu}}/\widehat{I_{\alpha\mu}} \qquad (2.7)$$

Συνεπώς και η σχέση της σύνθετης αντίστασης με ανά μονάδα μεγέθη είναι ακριβώς ίδια με αυτή που ισχύει για τα μονοφασικά μεγέθη.

Τριφασικό σύστημα

Στα τριφασικά συστήματα τώρα, επιλέγεται ως τιμή βάσεως για την τριφασική ισχύ $S_{B\varphi}$ το τριπλάσιο της βασικής ισχύος ανά φάση $S_{B\varphi}$:

$$S_{B\varphi} = 3S_{B\varphi} \qquad (2.8)$$

και ως βασική τιμή για την πολική τάση V_B, η πολική τάση που αντιστοιχεί στη βασική φασική τάση $V_{B\varphi}$:

$$V_{B\varphi} = \sqrt{3}V_{B\varphi} \qquad (2.9)$$

Με τον τρόπο αυτό η ανά μονάδα τιμή της φασικής τάσεως είναι ίση με την ανά μονάδα τιμή της πολικής τάσεως:

$$V_{\pi,\alpha\mu} = \frac{V_\pi}{V_B} = \frac{\sqrt{3}V_B}{\sqrt{3}V_{B\varphi}} = V_{\varphi,\alpha\mu} = V_{\alpha\mu} \qquad (2.10)$$

Με άλλα λόγια, όταν η πολική τάση είναι 1 αμ και η φασική τάση είναι 1 αμ.

Το ίδιο ισχύει και για την ανά μονάδα τιμή της τριφασικής ισχύος, η οποία είναι ίση με την ανά μονάδα τιμή της ισχύος ανά φάση:

$$S_{\alpha\mu} = \frac{S}{S_B} = \frac{3S_B}{3S_{B\varphi}} = S_{\varphi,\alpha\mu} \qquad (2.11)$$

Πάλι δηλαδή η τριφασική ισχύς είναι 1 αμ, όταν και η ισχύς ανά φαση είναι 1 αμ.

Κατ' αναλογίαν με την περίπτωση της μιας φάσεως, τα βασικά μεγέθη ρεύματος γραμμής I_B και αντιστάσεως ανά φάση Z_B πρέπει να ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} \qquad (2.12)$$

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \qquad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας τις (2.8)-(2.9) στις (2.12)-(2.13) προκύπτει εύκολα ότι οι βασικές τιμές ρεύματος και αντιστάσεως είναι ίσες με αυτές που ορίστηκαν για το μονοφασικό σύστημα:

$$I_B = \frac{3S_B}{\sqrt{3}\sqrt{3}V_{B\varphi}} = \frac{S_B}{V_{B\varphi}} \qquad (2.15)$$

$$Z_B = \frac{(\sqrt{3}V_{B\varphi})^2}{3S_{B\varphi}} = \frac{V_{B\varphi}^2}{S_{B\varphi}} = Z_{B\varphi} \qquad (2.16)$$

Ας υπολογίσουμε τώρα τον τύπο της μιγαδικής τριφασικής ισχύος σε ανά μονάδα τιμές. Ως γνωστόν σε ένα τριφασικό σύστημα:

$$S = 3\widehat{V_\varphi} \cdot \hat{I}^* \qquad (2.17)$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη με τη βασική τριφασική ισχύ S_B και κάνοντας χρήση της (2.12) και της (2.9) παίρνουμε:

$$S_{\alpha\mu} = \frac{S}{S_B} = \frac{3\widehat{V_\varphi}}{\sqrt{3}(\sqrt{3}V_{B\varphi})} \frac{\hat{I}^*}{I_B} = \widehat{V_{\alpha\mu}} \cdot \widehat{I_{\alpha\mu}^*} \qquad (2.18)$$

Προσέξτε ότι στο αμ σύστημα η εξίσωση της μιγαδικής ισχύος είναι όμοια με αυτήν τον μονοφασικού συστήματος. 'Οπως είπαμε παραπάνω, η ανά μονάδα τιμή της πολικής τάσεως είναι ίδια με αυτή της φασικής, σημειώστε όμως ότι η γωνία της μιγαδικής τάσεως που χρησιμοποιείται στούς ανά μονάδα υπολογισμούς είναι πάντα ίση με αυτή της φασικής τάσεως.

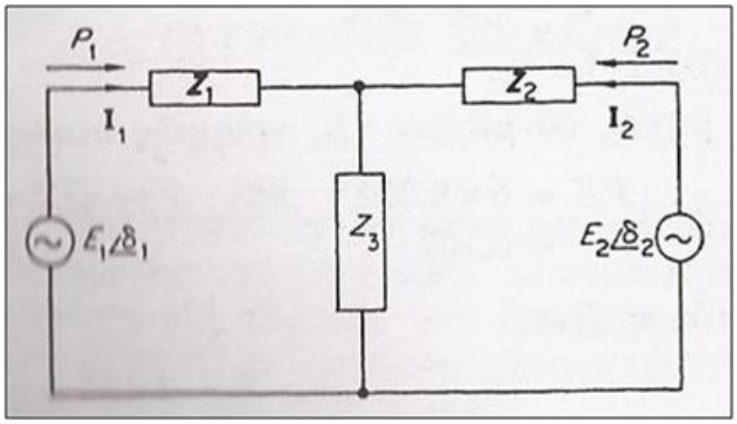
Η βασική τιμή της *αγωγιμότητας* είναι φυσικά το αντίστροφο της βάσεως αντιστάσεων $Y_B = 1/Z_B$. 'Ετσι η ανά μονάδα αγωγιμότητα εξακολουθεί να είναι το αντίστροφα της ανά μονάδα αντιστάσεως. Για οικονομία συμβόλων ωστόσο δεν Θα χρησιμοποιήσουμε το μέγεθος Y_B. Απλά, για να μετατρέψουμε μια αγωγιμότητα σε ανά μονάδα, θα πολλαπλασιάζουμε με τη βασική αντίσταση Z_B.:

$$Y_{\alpha\mu} = YZ_B \qquad (2.19)$$

και αντιστρόφως Θα διαιρούμε την ανά μονάδα αγωγιμότητα με το Z_B για να πάρούμε την αγωγιμότητα σε Ω^{-1}.

2.3 Ισχύς, άεργος ισχύς, σχέσεις τάσεως σε απλά κυκλώματα

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τις εξισώσεις για την ισχύ και άεργο ισχύ που μεταφέρεται συναρτήσει των τάσεων στους κόμβους και των αμοιβαίων συνθέτων αντιστάσεων. Οι εξισώσεις αυτές θα φανούν πολύ χρήσιμες στην ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.1 Δίκτυο με δύο πηγές τάσης

Το απλό κύκλωμα του Σχήματος 2.1 θα αναλυθεί λεπτομερειακά, και τα αποτελέσματα θα επεκταθούν στη γενική περίπτωση ενός δικτύου με n κόμβους. Η ισχύς από την πηγή τάσεως E_1

$$=P_1=\text{πραγματικό μέρος του } E_1I_1^*= E_1I_1cos\varphi_1$$

(I_1^* ορίζεται σαν ο συζυγής μιγαδικός του I_1)

Όμοια,

$$P_2=\text{πραγματικό μέρος του } E_2I_2^*= E_2I_2cos\varphi_2$$

$$Q_1=\text{φανταστικό μέρος του } E_1I_1^* \text{ κ.ο.κ.}$$

Επίσης,

$I_1=E_1Y_{11} – E_2Y_{12}$

$I_2=E_2Y_{22} – E_1Y_{21}$

Y_{11} και Y_{12} είναι αντίστοιχα οι σύνθετες αγωγιμότητες κατά την βραχυκύκλωση άγοντος σημείου και μεταφοράς.

Άρα

$$P_1=\text{πραγματικό μέρος } E_1e^{j\delta1}(E_1e^{j\delta1}\ Y_{11}e^{-j\theta11} - E_2e^{j\delta2}\ Y_{12}e^{-j\theta12})^*$$

$$= E_1 e^{j\delta 1}[E_1\, Y_{11}\{\cos(\delta_1 - \theta_{11}) + jsin(\delta_1 - \theta_{11})\}$$

$$-E_2\, Y_{12}\{\cos(\delta_2 - \theta_{12}) + jsin(\delta_2 - \theta_{12})\}]^*$$

Αναπτύσσοντας τους όρους cos και sin και αντικαθιστώντας

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2,\ \alpha_{11} = 90 - \theta_{11}\ και\ \alpha_{12} = 90 - \theta_{12}$$

$$P_1 = E_1^2 Y_{11} sina_{11} + E_1 E_2 Y_{11} \sin(\delta_{12} - a_{12})$$

Όμοια,

$$P_2 = E_2^2 Y_{22} sina_{22} + E_1 E_2 Y_{21} \sin(\delta_{21} - a_{21})$$

$$= E_2^2 Y_{22} sina_{22} - E_1 E_2 Y_{21} \sin(\delta_{12} + a_{12})$$

αφού

$$\delta_{21} = -\delta_{12}$$

Επίσης,

$$Q_1 = E_1^2 Y_{11} cosa_{11} + E_1 E_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} - a_{12})$$

$$Q_2 = E_2^2 Y_{22} cosa_{22} + E_1 E_2 Y_{21} \cos(\delta_{21} - a_{21}).$$

Για ένα δίκτυο με n πηγές,

$$P_m = E_m E_1 Y_{m1} \sin(\delta_{m1} - a_{m1}) + E_m E_3 Y_{m3} \sin(\delta_{m3} = a_{m3}) + \ldots \qquad (2.20)$$

Όταν δεν υπάρχει ωμική αντίσταση, τα a_{11}, a_{12} κτλ=0 και

$$P_m = E_m E_1 Y_{m1} \sin\delta_{m1} + E_m E_3 Y_{m3} \sin\delta_{m3} + \cdots \qquad (2.21)$$

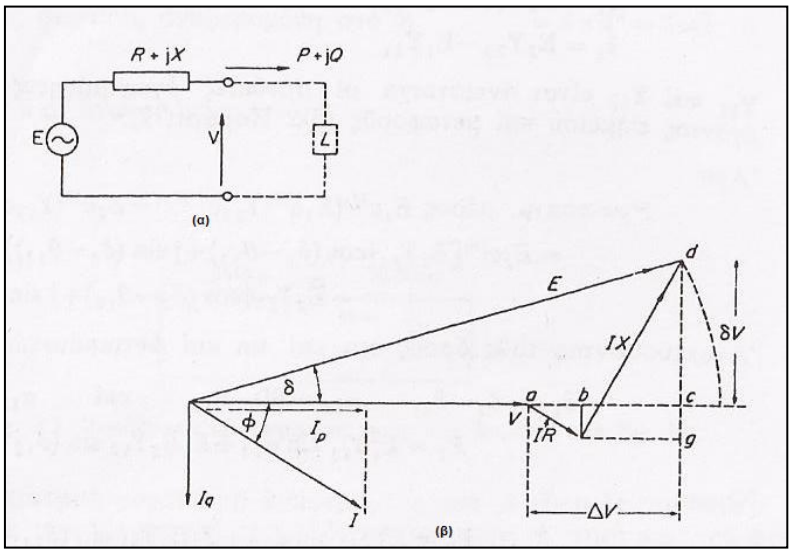
Υπολογισμός αποστελλόμενης και προσλαμβανόμενης τάσεως συναρτήσει της ισχύος και αέργου ισχύος. Ο προσδιορισμός των τάσεων και εντάσεων σε ένα δίκτυο μπορεί προφανώς να επιτευχθεί με τη χρήση μιγαδικών παραστάσεων, στα συστήματα όμως ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως καθορίζονται η ισχύς (P) και η άεργως ισχύς (Q), και συχνά η αντίσταση γραμμών είναι αμελητέα αν συγκριθεί με την άεργη αντίσταση. Π.χ. αν R=0,1 X, το σφάλμα αν αμελήσουμε την R είναι 0,49% και ακόμα και αν R=0,4 X, το σφάλμα είναι 7,7%.

Ένας απλός σύνδεσμος μεταφοράς φαίνεται στο Σχήμα 2.2α. Ζητείται να βρεθούν οι σχέσεις για τα E, V και δ. Από το Σχήμα 2.2β,

$$E^2 = (V + \Delta V)^2 + \delta V^2$$

$$= (V + RIcos\varphi + XIsin\varphi)^2 + (XIcos\varphi - RIsin\varphi)^2$$

$$E^2 = (V + \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V})^2 + (\frac{XP}{V} - \frac{RQ}{V})^2 \qquad (2.22)$$



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα φασικών διανυσμάτων για τη μεταφορά ισχύος μέσα από μία σύνθετη αντίσταση σειράς.

Άρα,

$$\Delta V = \frac{RP+XQ}{V} \qquad (2.23)$$

και

$$\delta V = \frac{XP-RQ}{V} \qquad (2.24)$$

Άν

$$\delta V \ll V + \Delta V$$

$$E^2 = (V + \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V})^2$$

Και

$$E - V = \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V} = \Delta V$$

Άρα η αριθμητική διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων δίνεται κατά προσέγγιση το

$$\frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V}$$

Άν

$$R = 0,$$

$$E - V = \frac{XQ}{V}$$

Και από την εξίσωση (2.20) αυτό ισχύει αν

$$PX \ll V^2 + QX$$

Η γωνία μεταφοράς δ λαμβάνεται από το $\sin^{-1}(\delta V/E)$.

2.4 Σύγχρονες Μηχανές

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται καθημερινά σε διάφορες χρήσεις παράγεται από σύγχρονες γεννήτριες που βρίσκονται εγκατεστημένες σε σταθμούς παραγωγής (ατμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς, κλπ.). Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι συνήθως μεγάλες μηχανές, ισχύος από μερικές δεκάδες MW μέχρι και πάνω από 1000 - 1200 MW. Στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι περισσότερες ατμοηλεκτρικές μονάδες είναι των 300 MW, ενώ υπάρχουν και αρκετές γεννήτριες με μικρότερη ισχύ.

Όπως όλες οι ηλεκτρικές μηχανες, οι συγχρονες μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν και σαν κινητήρες. Για παράδειγμα, στους αντλητικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς οι ίδιες σύγχρονες μηχανές ορισμένες ώρες της ημέρας λειτουργούν σαν γεννήτριες παράγοντας ηλεκτρική ισχύ, ενώ άλλες ώρες λειτουργούν σαν κινητήρες, απορροφούν δηλαδή ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο, την οποία χρησιμοποιούν για να αντλήσουν νερό πίσω στη δεξαμενή αποθηκεύσεως (τεχνητή λίμνη).

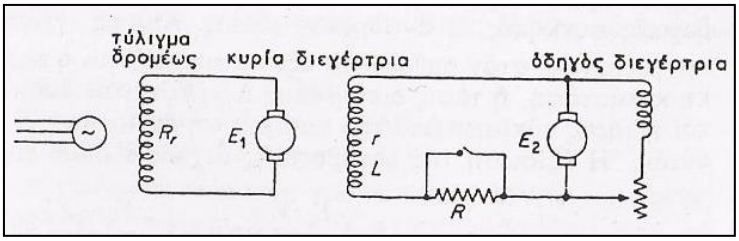
Εκτός από γεννήτριες και κινητήρες, οι σύγχρονες μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και σαν σύγχρονοι πυκνωτές. Οι σύγχρονοι πυκνωτές είναι στην ουσία σύγχρονοι κινητήρες χωρίς μηχανικό φορτίο και χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την άεργο ισχύ που ρέει στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο όρος σύγχρονη μηχανή αναφέρεται στο γεγονός πως η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας γίνεται σε μια ορισμένη ταχύτητα περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα των εναλλασσομένων ρευμάτων και τάσεων του τυμπάνου της μηχανής.

Εκτός από ελάχιστες, σπάνιες εξαιρέσεις το τύλιγμα τυμπάνου των σύγχρονων μηχανών είναι τριφασικό, διανεμημένο στις αύλακες του στάτη, ενώ το τύλιγμα διεγέρσεως ή τήλιγμα πεδίου βρίσκεται στο δρομέα και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από ένα σύστημα διεγέρσεως μέσω δακτυλίων και ψηκτρών. Ο δρομέας μπορεί να είναι κυλινδρικός ή με έκτυπους πόλους.

2.5 Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσεως (ΑΡΤ)

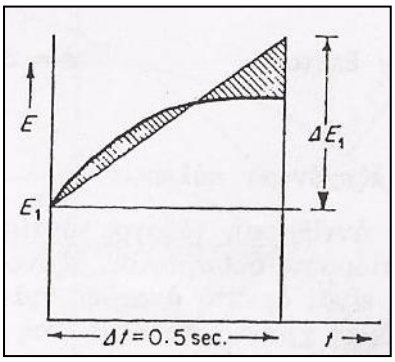
Η σύγχρονη γεννήτρια θεωρείται ότι λειτουργεί με σταθερή διέγερση καί οποιεσδήποτε μεταβολές στή διέγερση έγινε η παραδοχή ότι διεξήχθησαν χειροκίνητα. Οποιοσδήποτε διακανονισμός της τερματικής τάσεως μετά από μία μεταβολή φορτίου, απαιτεί σημαντικό χρόνο. Στις περισσότερες μοντέρνες γεννήτριες, η τάση εξόδου ρυθμίζεται από αυτόματες συσκευές, έτσι ώστε νά διατηρείται σέ μία σταθερή προκαθορισμένη τιμή. Στήν παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε τούς τρόπους λειτουργίας των *αυτομάτων ρνθμιστών* τάσεων (A.V.R.) και την επίδρασή τους στη λειτουργία των σύγχρονων μηχανών.



Σχήμα 2.3 Διατάξεις διεγέρσεως σύγχρονης γεννήτριας.

2.5.1 Συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

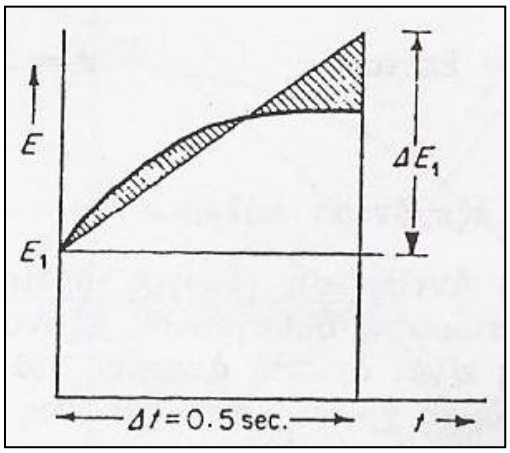
Οι διατάξεις διεγέρσεως για τον δρομέα σύγχρονης γεννήτριας φαίνονται στο Σχήμα 2.3 Η κυρία διεγέρτρια, γεννήτρια συνεχούς παραλλήλου διεγέρσεως (σπειρών πεδίου) παράγει τάση E_1 πού παρέχεται κατευθείαν στό τύλιγμα τού δρομέως μέσω δακτυλίων ολισθήσεως. Το πεδίο της κυρίας διεγερτρίας τροφοδοτείται από μία ακόμη διεγέρτρια αυτοδιεγειρομένη. Και οι δύο περιελίξεις των μηχανών συνεχούς άγονται σε περιστροφή από τον κύριο άξονα του δρομέως. Εν σειρά με το τύλιγμα του πεδίου της κυρίας διεγερτρίας είναι ένας αντιστάτης R που μπορεί να βραχυκυκλωθεί, όπως του υπαγορεύει ένας μηχανισμός αισθήσεως τάσεως, που ενεργοποιείται από την τερματική τάση συγχρόνου μηχανής. Μία από τις σημαντικότερες απόψεις είναι η ταχύτητα αποκρίσεως του ρυθμιστού, δηλ. ο χρόνος που περνά μεταξύ της αποκλίσεως τάσεως και της επιστροφής προς την προκαθορισμένη τιμή.



Σχήμα 2.4 Αυτοδιεγειρομένη κυρία διεγέρτρια.–επίδραση του ρυθμιστού τάσεως. I_f = ένταση ρεύματος πεδίου.

Ας πάρουμε το κύκλωμα του Σχήμα 2.3 Αν η R είναι βραχυκυκλωμένη, το τελικό ρεύμα διεγέρσεως είναι E_2/r, και αν δεχθούμε ότι η μηχανή δεν έχει φθάσει στον κόρο, η καμπύλη αυξήσεως είναι ανάλογη του $e^{t/\tau}$ (εκθετική) όπου η σταθερά χρόνου $\tau=L/r$. Αν η κυρία διεγέρτρια ήταν αυτοδιεγειρομένη, τότε η τάση E_1 παρέχεται από την καμπύλη μαγνητίσεως, όπως φαίνεται στό Σχήμα 2.4.

Η ταχύτητα αποκρίσεως της διεγερτρίας θά ληφθεί ως εξής: Έστω ότι η μηχανή είναι ανοικτοκυκλωμένη και ρυθμισμένη για να δίνει την κανονική τάση πλήρους φορτίου E_1. Όταν η αντίσταση R είναι βραχυκυκλωμένη, η τάση ανέρχεται, όπως φαίνεται από την καμπύλη τού Σχήμα 2.5. Για έναν χρόνο 0,5 sec άγεται μία τέτοια

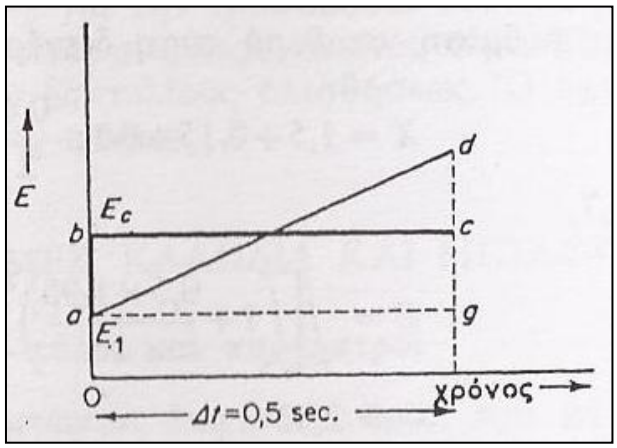


Σχήμα 2.5. Ταχύτητα αποκρίσεως διεγερτρίας.

ευθεία ώστε νά ληφθούν ίσα εμβαδά επάνω και κάτω από την καμπύλη (γραμμοσκιασμένα). Ο λόγος $\Delta E_1/\Delta t$ είναι η ονομαστική ταχύτητα αποκρίσης, και $\Delta E_1/\Delta t/E_1$ είναι η σχετική ταχύτητα αποκρίσεως. Για μεγάλες μηχανές, το E_1 είναι μερικές εκτοντάδες βόλτ, και με E_1 = 200 V και $\Delta E/\Delta t$ = 200 V/sec, η σχετική απόκριση είναι 1, που είναι μία μέση τιμή.

Μία μέθοδος για να λάβουμε υψηλή απόκριση για τη διεγέρτρια είναι να χρησιμοποιήσουμε μία μηχανή που παρέχει υψηλή μεγίστη τάση όταν η R είναι βραχυκυκλωμένη. Αυτή η τάση είναι γνωστή σαν τάση *οροφής*. Στο Σχήμα 2.6 η βέλτιστη χαρακτηριστική διεγερτρίας (δηλ, απείρως ταχεία διεγέρτρια) είναι η γραμμή abc, καα E_c είναι η τάση οροφής, που είναι συνήθως της τάξεως του $2E_1$. Η σχετική ταχύτητα αποκρίσεως είναι dg/ag/E_1, και, αν $E_c = 2E_1$, είναι ίση με 4. Αυτό θέτει ένα άνω όριο στην απόκριση για μεγάλες αυτοδιεγειρόμενες μηχανές.

Υπάρχουν ειδικές διεγέρτριες για να διατηρούν το πεδίο του δρομέως όταν συμβούν σφάλματα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (δίκτυο), και σ' αυτές φθάνουμε τάσεις οροφής τετραπλάσιες της E_1, με μία ταχύτητα αυξήσεως 2000 V/sec. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενισχυούσης γεννήτριας εν σειρά με την κυρία διεγέρτρια.



Σχήμα 2.6. Βέλτιστη ταχύτητα αποκρίσεως.

Η προηγούμενη ανάπτυξη περιορίστηκε στη διεγέρτρια, πρέπει όμως επίσης να μελετηθεί η απόκριση στους ακροδέκτες της σύγχρονης μηχανής. Αν συμβεί μία ξαφνική μεταβολή στο κύκλωμα πεδίου της διεγερτρίας, με αποτέλεσμα την απότομη επιβολή μίας τάσεως, τότε η Η.Ε.Δ. που παράγεται από τη διεγέρτρια $e=E_1(1-e^{t/\tau_e})$, όπου r_e είναι η σταθερά χρόνου και E_1 η αρχική τάση.

Αν ο σίδηρος του δρομέως δεν έχει κορεσθεί, τότε $e_r = R_r \cdot i + L_r \frac{d_i}{dt}$, όπου R_r και

L_r αναφέρονται στην αντίσταση και επαγωγή του δρομέως. Αλλά

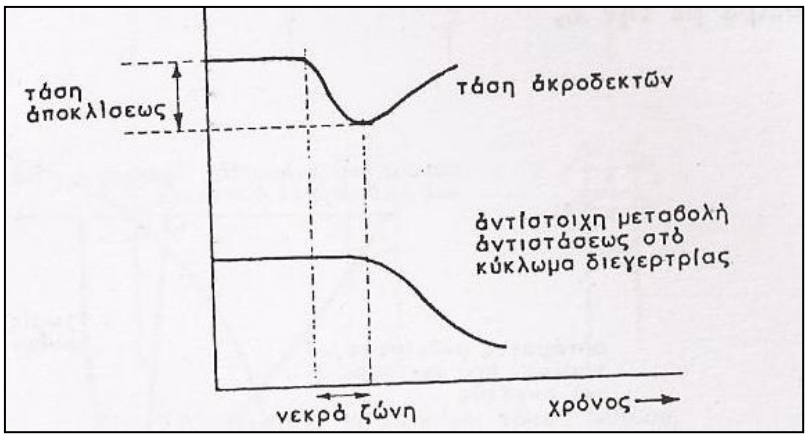
$e_r = E_1(1 - e^{-t/\tau_e}) = R_r \cdot i + L_r \frac{d_i}{dt}$, άρα μπορούν να προσδιοριστούν το ρεύμα καi h συνδυασμένη σταθερά χρόνου τού δρομέως.

2.5.2 Τύποι αυτόματου ρυθμιστού τάσεως

Η λεπτομερειακή μελέτη των ρυθμιστών είναι ένας ειδικευμένος τομέας, και καθόλου δεν σκοπεύουμε στην παρούσα εργασία να περιγράψουμε λεπτομερειακά κατηγορίες ρυθμιστών και τύπους, αλλά μάλλον να δώσουμε μία ένδειξη της γενικής των επιδράσεως.

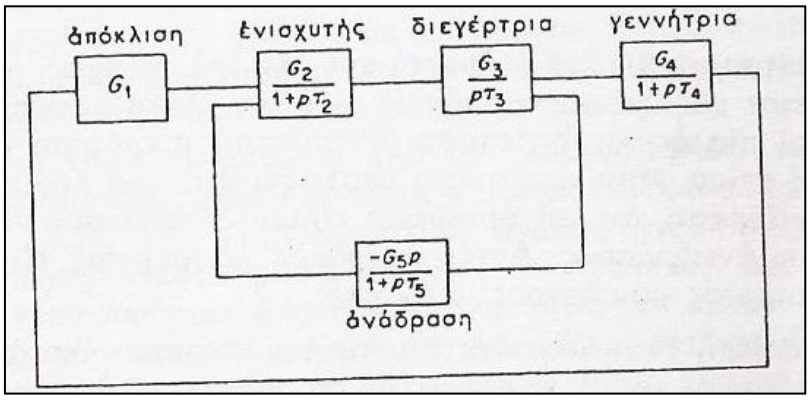
Υπάρχουν δύο ευρείες κατηγορίες αυτομάτων ρυθμιστών. Και οι δύο επιτυγχάνουν την ρύθμιση της τάσεως εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας διά ρυθμίσεως του πεδίου της διεγερτρίας. Γενικά, η απόκλιση της τερματικής τάσεως από μία προκαθορισμένη τιμή, διαβιβάζεται σε κυκλώματα ρυθμίσεως, και έτσι το ρεύμα πεδίου μεταβάλλεται. Η διαίρεση σε κατηγορίες βασίζεται στους τρόπους και την ταχύτητα με τα οποία γίνονται τα προηγούμενα.

Ο πρώτος και αρχαιότερος τύπος (κατηγορία) ακούει στην ευρεία ονομασία *ηλεκτρομηχανικός*. Μία πασίγνωστη πασίγνωστη ποικιλία του είναι ο ρυθμιστής στήλης άνθρακος. Σ'αυτόν, μία τάση ανάλογη πρός την τάση αποκλίσεως θέτει σε λειτουργία μία σωληνοειδή διάταξη για να μεταβάλλει την πίεση που ασκείται σε μία αντίσταση στήλης άνθρακος στο πεδίο της διεγερτρίας, μεταβάλλοντας έτσι την αντίστασή του.



Σχήμα 2.7. Η επίδραση μίας νεκράς ζώνης σε έναν ρυθμιστή.

Ένας άλλος τύπος εξαρτάται από τη μετατροπή της τάσεως αποκλίσεως σε μηχανική ροπή μέσω «κινητήρος ροπής». Ανάλογα με την θέση-γωνία του άξονος του κινητήρος, αποκόπτονται από το κύκλωμα ορισμένοι αντιστάτες σε μία άλυσο αντιστατών, άρα μεταβάλλεται το ρεύμα πεδίου της διεγερτρίας ,



Σχήμα 2.8. Λογικό διάγραμμα αυτόματου ρυθμιστή τάσεως συνεχούς δράσεως, κλειστού βρόχου (αναδράσεως).

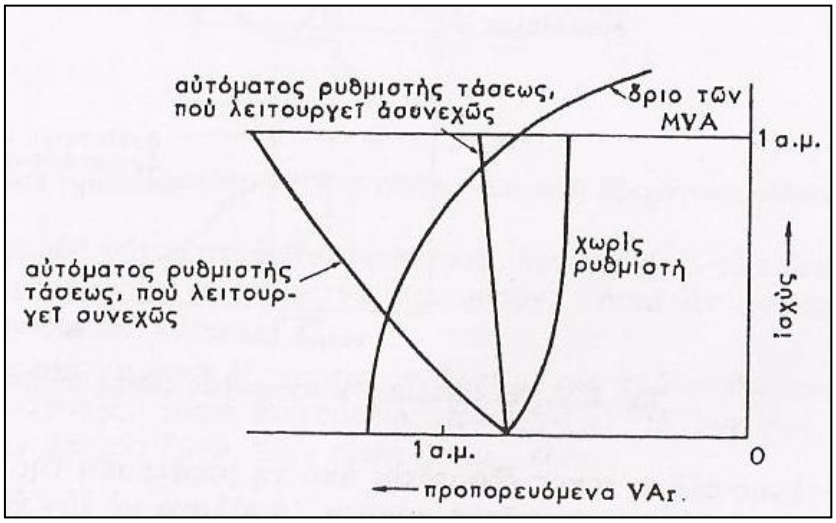
Υπάρχουν και διάφοροι άλλοι τύποι, που συμπεριλαμβάνουν τον διαδεδομένο *ρυθμιστή ταλαντούμενης γλωσσίδος*. Όλοι όμως αυτοί οι τύποι υποφέρουν από τα μειονεκτήματα σχετικά αργής δράσεως και μη απαλλαγής από νεκρές ζώνες, δηλ. πρέπει να συμβεί ορισμένη πεπερασμένη απόκλιση για να μπορέσει ο ρυθμιστής να λειτουργήσει. Αυτό φαίνεται στό Σχήμα 2.7.

Η άλλη κύρια κατηγορία ρυθμιστών είναι γνωστή σαν *συνεχούς δράσεως*. Είναι ταχύτεροι από τους προηγούμενους και απαλλαγμένοι από νεκρές ζώνες. Ένα γενικό λογικό διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος ρυθμίσεως φαίνεται στό Σχήμα 2.8. Ο ενισχυτής μπορεί να λάβει μία ποικιλία μορφών, που συμπεριλαμβάνουν τους μαγνητικούς ενισχυτές και τους περιστροφικούς ενισχυτές, όπως τους Amplidyne, Metadyne και Magnavolt (ειδικοί τύποι γεννητριών συνεχούς).

2.5.3 Αυτόματοι ρυθμιστές τάσεως και οι χαρακτηριστικές των γεννητριών

Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται για την παράσταση του σύγχρονου κινητήρα μπορεί να τροποποιηθεί για την δράση ενός ρυθμιστοή. Βασικά υπάρχουν τρεις συνθήκες να ληφθούν υπόψη:

Ι) Λειτουργία με σταθερή διέγερση και σταθερή τάση χωρίς φορτίο (Ε), δηλ. χωρίς δράση ρυθμιστή. Αυτό απαιτει το συνηθισμένο ισοδύναμο κύκλωμα της Ε εν σειρά με την Z_s,



Σχήμα 2.9. Σχεδιάγραμμα άποδόσεως λειτουργίας, όπως μεταβάλλεται μέ τή χρήση αύτομάτων ρυθμιστών τάσεως

ΙΙ) Λειτουργία με ένα ρυθμιστή που δεν δρα συνεχώς, δηλ. η τάση ακροδεκτών κυμαίνεται μαζί με τις μεταβολές φορτίου. Αυτό μπορεί να προσομοιωθεί από την Ε' και μία άεργη αντίσταση (αντίδραση) μικρότερη από την σύγχρονη αντίδραση. Η πείρα στην πράξη έχει υποδείξει ότι, μία λογική τιμή θα ήταν η μεταβατική αντίδραση, αν και ορισμένοι ειδικοί προτείνουν να ληφθεί το μισό της σύγχρονης αντίδρασης. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι εφαρμόσιμος στους περισσότερους μοντέρνους ρυθμιστές.

III) Σταθερή τάση ακροδεκτών. Αυτή η συνθήκη απαιτεί ένα ρυθμιστή πολύ ταχείας δράσεως, και η πλησιέστερη προσέγγιση σ' αυτήν βρίσκεται στους ρυθμιστές εξαναγκασμένης διεγέρσεως, που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες που τροφοδοτούν πολύ μακρές γραμμές. Η τάση διεγερτρίας αυξάνεται πολύ γρήγορα σ' αυτές, με ταχύτητα της τάξεως των 2.000 V/sec.

Κάθε μία από τις παραπάνω αναπαραστάσεις θα δίνει σημαντικά διαφορετικές τιμές για την μέγιστη έξοδο ισχύος. Ο βαθμός στον οποίο θα συμβεί αυτό εξαρτάται από την ταχύτητα του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως, και η επίδρασή του στο σχεδιάγραμμα λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 2.9, που δείχνει καθαρά την αύξηση που επιτυγχάνεται στην περιοχή λειτουργίας. Θα πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι, η λειτουργία υπό τις βελτιωμένες αυτές συνθήκες, δηλ. στις περιοχές βελτιωμένου προπορευομένου συντελεστή ισχύος, μπορεί να περιορίζεται λόγω θέρμανσης του τυλίγματος του στάτη. Η πραγματική καμπύλη ισχύος-γωνίας μπορεί να ληφθεί με μία βηματοπορική διαδικασία (=βήμα προς βήμα), αν χρησιμοποιήσομε τις βαθμιαία αυξανόμενες τιμές του Ε στην παράσταση EV/X sin δ.

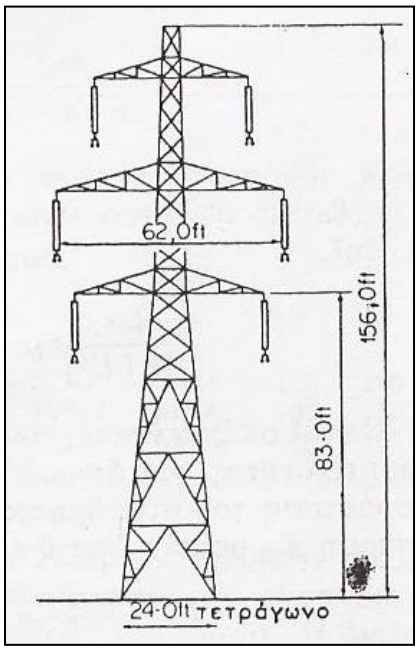
Όταν μία γεννήτρια πέρασε την οριακή γωνία δ=90° της μονίμου καταστάσεως με έναν ταχύ αυτόματο ρυθμιστή τάσεως, είναι δυνατό να διατηρηθεί ο συγχρονισμός. Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως, αναγκάζοντας την τάση να ανέλθει, αυξάνει την έξοδο ισχύος της μηχανής, έτσι που, αντί η ισχύς να ελαττώνεται μετά την δ = 90°, διατηρεί την τιμή της, και το dP/dδ παραμένει θετικό.

Μία πρόσφατη βελτίωση είναι η χρήση ανορθωτών στερεάς καταστάσεως (με κρυστάλλους αντί λυχνιών) για την τροφοδοσία του τυλιγμάτος πεδίου του δρομέα με συνεχές. Οι ανορθωτές είναι στερεωμένοι στον κύριο άξονα και περιστρέφονται μαζί του, τροφοδοτούμενοι από δακτυλίους ολισθήσεως. Ο σχετικός αυτόματος ρυθμιστής τασεως είναι ηλεκτρονικής φύσεως.

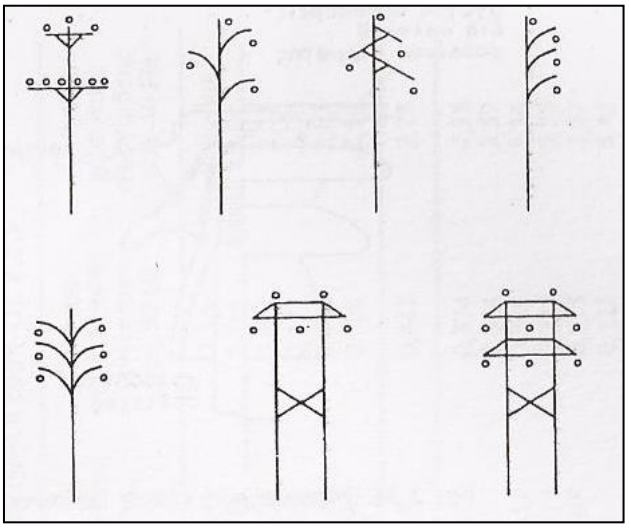
2.6 Εναέριες γραμμές - τύποι και παράμετροι

Οι εναέριες γραμμές αναρτώνται από μονωτήρες, που με τη σειρά τους αναρτώνται από πύργούς ή στύλους. Οι πύργοι (ή πυλώνες) είναι συνήθως χαλύβδινα στατικά δικτυώματα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πύργων εξαρτάται από το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου (κοιλιά) του αναρτημένου αγωγού, και, για χαλύβδινους πύργους με γραμμές πολύ υψηλής τάσεως, το άνοιγμα, δηλ. απόσταση των πύργων οριζοντίως, κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 370-460 m. Στα Σχήματα 2.10 και 2.11 φαίνονται τυπικές κατασκευές αναρτήσεως (πύργοι και στύλοι). Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πύργου:

α) Οι πύργοι ευθύγραμμης πορείας, στους οποίους πρέπει να υπστηριχθεί μόνο η δύναμη που προέρχεται από το βάρος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.



Σχήμα 2.10. Πύργος εναέριας γραμμής 400 kV διπλού κυκλώματος. Δύο αγωγοί ανά φάση (αγωγοί δέσμης). (Άδεια του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Βρετανίας).



Σχήμα 2.11. Τυπικές κατασκευές τύπου στύλου.

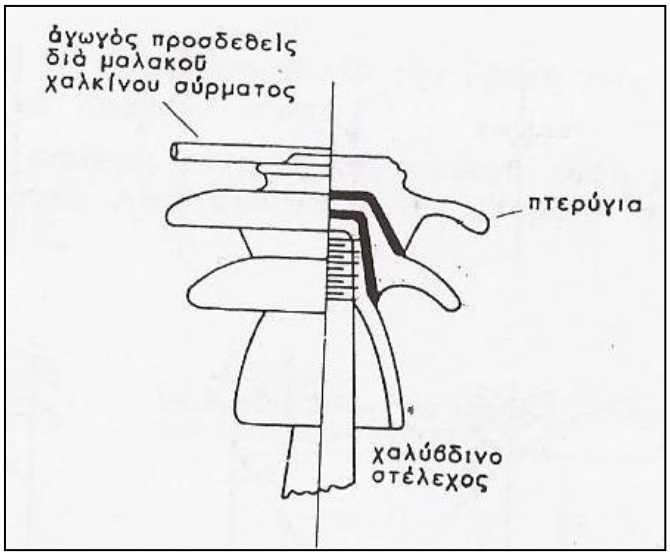
β) Οι πύργοι αλλαγής πορείας, που ονομάζονται πύργοι αποκλίσεως ή πύργοι γωνίας, επειδή υποστηρίζονν επιπλέον με τη δύναμη που χρειάζεται για να αλλάξει η κατεύθυνση της γραμμής.

Όταν ετοιμάζουμε τις προδιαγραφές πύργων και γραμμών, παίρνουμε υπόψη την επιβάρυνση πάγου και φόρτιση ανέμου, καθώς και τις πρόσθετες δυνάμεις που οφείλονται σε μία θραύση αγωγού από την μία πλευρά του πύργου. Για χαμηλότερες τάσεις και κυκλώματα διανομής, χρησιμοποιούνται στύλοι από ξύλο ή ενισχυμένο σκυρόδεμα, με αγωγούς υποστηριζόμενους σε οριζόντιους σχηματισμούς.

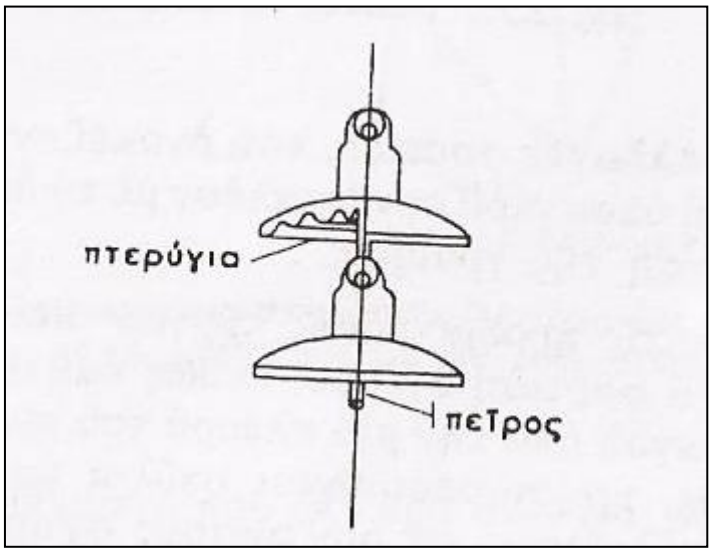
Οι αγωγοί υπό τάση μονώνονται από τους πύργους μέσω των μονωτήρων, που έχουν δύο βασικές μορφές: *τύπου κώδωνος* και *τύπου αναρτήσεως*. Ο τύπος κώδωνος φαίνεται στο Σχήμα 2.12, και βλέπουμε ότι ο αγωγός υποστηρίζεται υπεράνω του μονωτήρα. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για γραμμές έως 33 kV. Τα δύο ή τρία πτερύγια ή «επανωφόρια» από πορσελάνη παρέχουν αρκετό «μήκος διαρροής» για να παρεμποδίζει την υπερπήδηση μεταξύ αγωγού και πύργου. Το σχήμα τους ακολουθεί τις ισοδυναμικές επιφάνειες του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αγωγού και πύργου. Οι μονωτήρες αναρτήσεως (Σχήμα 2.13) αποτελούνται από μία σειρά αλληλοσυνδεομένων συνδέσμων, που τα μήκη εξαρτώνται από την τάση της γραμμής. Για γραμμές των 400 kV (πολική ενδεικνυμένη τάση), χρησιμοποιούνται 19 δίσκοι, συνολικού μήκους 3,84 m. Ο αγωγός συγκρατείται στο κάτω άκρο του μονωτήρος, ενώ ο τελευταίος αναρτάται από βραχίονα του πύργου. Λόγω των χωρητικοτήτων που υπάρχουν μεταξύ δίσκων, αγωγού και πύργου, η κατανομή τάσεως κατά μήκος του αλυσοειδή μονωτήρα δεν είναι ομοιόμορφη, όπου οι δίσκοι κοντά στον αγωγό είναι αυτοί που καταπονούνται ηλεκτρικά περισσότερο. Οι μέθοδοι υπολογισμού της κατανομής τάσεως στους δίσκους είναι αμφίβολης αξίας, λόγω της βραχυκυκλωτικής δράσεως της αντίστασης διαρροής (βλ. Σχήμα 2.14). Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από την παρουσία καπνιάς και ρυπάνσεως στις επιφάνειες του μονωτήρα, και τροποποιείται σημαντικά από τη βροχή και την ομίχλη.

2.6.1 Παράμετροι

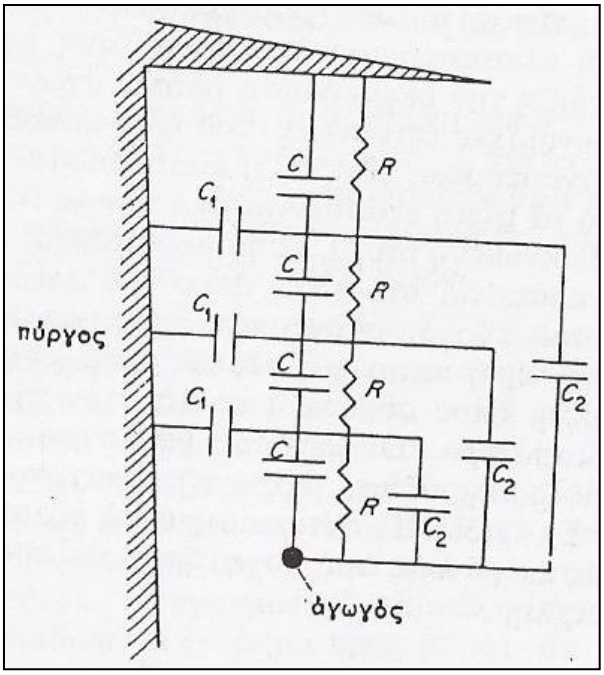
Οι παράμετροι που ενδιαφέρουν για την ανάλυση κυκλωμάτων είναι η επαγωγή, χωρητικότητα, αντίσταση και αντίσταση διαρροής. Η εξαγωγή των τύπων για τον υπολογισμό των ποσοτήτων αυτών δίνεται στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας. Η πρόθεσή μας είναι απλώς να αναγράψουμε τους τύπους αυτούς και να αναλύσουμε την εφαρμογή τους.



Σχήμα 2.12. Μονωτήρας τύπου κώδωνος.



Σχήμα 2.13. Μονωτήρας τύπου αναρτήσεως



Σχήμα. 2.14. Ισοδύναμο κύκλωμα αλυσοειδούs μονωτήρα αποτελούμενου από 4 δισκοειδείς μονωτήρες (μονωτικούς δίσκους).

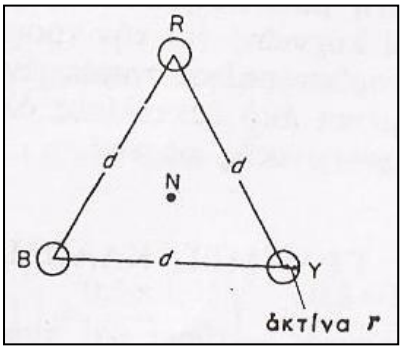
C = εσωτερική χωρητικότητα του δίσκου
Cl = χωρητικότητα δίσκου προς γη
C2= χωρητικότητα δίσκου προς γραμμή
R = αντίσταση διαρροής

Η επαγωγή μονοφασικής γραμμής δύο αγωγών

$$= \frac{\mu_o}{4\pi}\left[1 + 4ln\left(\frac{d-r}{r}\right)\right] H/m \qquad (2.15)$$

όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων και r η ακτίνα των αγωγών.

Όταν εκτελούμε την ανάλυση ροής φορτίου και συμμετρικού σφάλματος στα τριφασικά συστήματα, συνηθίζεται να μελετάται η μία φάση μόνο, όπου γίνονται οι κατάλληλες γωνιακές μεταβολές για τις άλλες δύο φάσεις. Άρα χρησιμοποιούνται φασικές τάσεις, και οι επαγωγές και χωρητικότητες είναι οι ισοδύναμες φασικές τιμές τιμές γραμμή-προς-ουδέτερο. Για μία τριφασική γραμμή με ισόπλευρο τρίγωνο αποστάσεων των αγωγών (Σχήμα 2.16), η επαγωγή και χωρητικότητα θα είναι ως προς τον



Σχήμα 2.16. Εναέρια γραμμή με ισόπλευρο τρίγωνο αποστάσεων των αγωγών.

υποθετικό ουδέτερο, και η επαγωγή αυτή μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι ίση με το μισό της αντίστασης βρόχου της μονοφασικής γραμμής, δηλ, την επαγωγή ενός αγωγού.
Η επαγωγή γραμμής προς ουδέτερο, για ισόπλευρο τρίγωνο αποστάσεων

$$= \frac{\mu_o}{8\pi}\left[1 + 4ln\left(\frac{d-r}{r}\right)\right] {}^{H}/_{m} \qquad (2.16)$$

Η χωρητικότητα μίας μονοφασικής γραμμής

$$C = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\left[(d-r)/r\right]} {}^{F}/_{m} \qquad (2.17)$$

Με τους αγωγούς των τριών φάσεων απέχοντας εξίσου, η χωρητικότητα κάθε γραμμής προς τον υποθετικό ουδέτερο είναι διπλάσια της χωρητικότητας του κυκλώματος δύο αγωγών, δηλ.

$$\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\,(d/r)} {}^{F}/_{m}\,(d \gg r) \qquad (2.17)$$

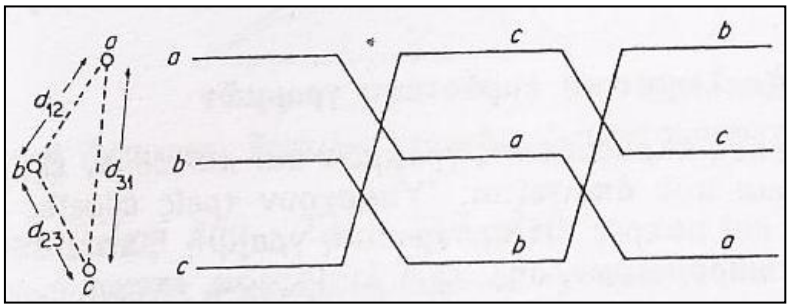
Στην πράξη, οι αγωγοί σπάνια ισαπέχουν, και μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέση τιμή της επαγωγής ή χωρητικότητας, για οποιοδήποτε σχηματισμό αγωγών, μπορεί να

ληφθεί με την αναπαράσταση του συστήματος από ένα άλλο με ισαπέχοντες αγωγούς. Η ισοδύναμη απόσταση $d_{ισ}$ μεταξύ αγωγών δίνεται από τον τύπο:

$$d_{ισ} = \sqrt[3]{(d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31})}$$

Συχνά, δύο τριφασικά κυκλώματα είναι ηλεκτρικώς εν παραλλήλω. Αν μάλιστα φυσικά απέχουν μεταξύ τους, οι άεργες αντιστάσεις των γραμμών είναι ταυτόσημες.

Οταν τα δύο κυκλώματα είναι τοποθετημένα στους ίδιους πύργους, οπωσδήποτε πρέπει να ληφθεί υπόψη η μαγνητική τούς αλληλεπίδραση. Η χρήση αγωγών δέσμης δηλαδή περισσοτέρων του ενός αγωγών ανά μονωτήρα, ελαττώνει την άεργο αντίσταση. Ελαττώνει επίσης την ηλεκτρική αλκή στην επιφάνεια του κάθε αγωγού, άρα και τις απώλειες corona, και την ραδιοφωνική παρεμβολή. Από τήν ασύμμετρη όμως διάταξη των τριών αγωγών προκύπτουν διαφορετικές επαγωγές για κάθε φάση, πράγμα που προκαλεί ασύμμετρη πτώση τάσεως, ακόμη και όταν τα ρεύματα φορτίου είναι εξισορροπημένα.



Σχήμα 2.17. Αντιμετάθεση αγωγών.

Η υπόλοιπη ή συνισταμένη τάση ή ρεύμα επάγει ανεπιθύμητες τάσεις στις γειτονικές γραμμές τηλεπικοινωνιών. Αυτό μπορεί να υπερνικηθεί με τήν εναλλαγή των θέσεων των αγωγών σε κανονικά διαστήματα κατά μήκος της πορείας της γραμμής, διαδικασία γνωστή σσν *αντιμετάθεση,* Σχήμα 2.17. Στην πράξη, οι γραμμές σπάνια αντιμετατίθενται κατά κανονικές αποστάσεις μήκους γραμμής, και η αντιμετάθεση εφαρμόζεται όπου είναι φυσικώς πρόσφορο, π.χ. στούς υποσταθμούς. Σε πολλές περιπτώσεις, ο βαθμός ασυμμετρίας τάσεων/ρευμάτων που συμβαίνει χωρίς αντιμετάθεση είναι αμελητέος για τους υπολογισμούς.

Πίνακας 2.2α. Σταθερές έναερίων γραμμών τών 50 Hz (άνά φάση καί άνά μίλι ξηράς= 1.609,3 μέτρα)

Τάση		132 kV		275 kV		400 kV	
Ἀριθμὸς καὶ ἐπιφάνεια τῶν ἀγωγῶν $(mm)^2$		1× 113	1× 258	2× 113	2× 258	2× 258	4× 258
Ἀντίσταση (R)	Ὦμ	0,25	0,11	0,125	0,055	0,055	0,027
Ἄεργος ἀντίσταση (X_L)	Ὦμ	0,66	0,65	0,54	0,52	0,52	0,435
Ἄεργος ἀγωγιμότης (I/X_c)	μMho	4,72	4,72	5,92	5,92	5,92	6,58
Ρεῦμα φορτίσεως (I_c)	Αμπ.	0,36	0,36	0,94	0,94	1,36	1,52
Σύνθετος ἀντίσταση ἡλ. κρούσεως	Ὦμ	373	371	302	296	296	258
Φυσικὴ φόρτιση	MW	47	47	250	255	540	620
X_L/R Λόγος	—	2,6	5,9	4,3	9,5	9,5	15,8
Θερμικὴ ὀνομαστικὴ τιμή:							
Ψυχρὸς καιρὸς (κάτω τῶν +5 °C)	MVA	125	180	525	760	1100	2200
Κανονικὸς καιρὸς (5 °C ἕως 18 °C)	MVA	100	150	430	620	900	1800
Θερμὸς (ἄνω τῶν 18 °C)	MVA	80	115	330	480	790	1580

Αντίσταση. Οι αγωγοί των εναέριων γραμμών αποτελούνται συνήθως από ένα χαλύβδινο συρματόσχοινο ως πυρήνα (για τη μηχανική αντοχή), περιβαλλόμενο από σύρματα αλουμινίου που αποτελούν τον αγωγό. Η αντίσταση στη συχνότητα του δικτύου (50 ή 60 Hz), με πυρήνα είτε συρματόσχοινο είτε συμπαγή, είναι υψηλότερη από την αντίσταση στο συνεχές, που οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο. Σημαντική είναι επίσης η επίδραση του συντελεστή θερμοκρασίας στη μεταβολή της αντίστασης.

Πίνακας 2.2β. Τυπικά χαρακτηριστικά γραμμών με αγωγούς δέσμης και πολύ υψηλή τάση (Π.Υ.Τ)

Ἀριθμὸς ἀγωγῶν δέσμης	Χώρα	Πολικὴ τάση γραμμῆς καὶ ἀριθμὸς κυκλωμάτων (σὲ παρένθεση)	Διάμετρος ἑκάστου ἀγωγοῦ μιᾶς δέσμης	Ἀκτίνα τοῦ κύκλου στὸν ὁποῖο εἶναι διευθετημένοι οἱ ἀγωγοί	Ἀντίσταση δέσμης	Ἄεργος ἐπαγωγικὴ ἀντίσταση στὰ 50 Hz	Ἄεργος χωρητικὴ ἀγωγιμότης στὰ 50 Hz
		kV	mm	mm	Ω/km	Ω/km	μmho/km
1	Ἰαπωνία	275 (2)	27,9	—	0,0744	0,511	3,01
	Καναδὰς	300 (2)	35,0	—	0,0451	0,492	2,33
	Αὐστραλία	330 (1)	45,0	—	0,0367	0,422	2,78
	Ε.Σ.Σ.Δ.	330 (1)	30,2	—	0,065	0,404	2,82
	Ἰταλία	380 (1)	50,0	—	0,0294	0,398	2,84
Μέσος ὅρος (ἕνας ἀγωγὸς)					0 048	0,442	2,75
2	Ἰαπωνία	275 (2)	25,3	200	0,0444	0,374	4,35
	Καναδὰς	360 (1)	28,1	229	0,04	0,314	3,57
	Αὐστραλία	330 (1)	31,8	190,5	0,0451	0,341	3,34
	Η.Π.Α.	345 (1)	30,4	228,6	0,0315	0,325	3,55
	Ἰταλία	380 (1)	31,5	200	0,0285	0,315	3,57
	Ε.Σ.Σ.Δ.	330 (1)	28,0	200	0,04	0,321	3,43
Μέσος ὅρος (δύο ἀγωγοί)					0,0400	0,323	3,58
3	Σουηδία	380 (1)	31,68	260	0,018	0,29	3,85
	Ε.Σ.Σ.Δ.	525 (1)	30,2	230	0,0212	0,294	3,88
4	Γερμανία	380 (2)	21,7	202	0,0316	0,260	4,3
	Γερμανία	500 (1)	22,86	323	0,0285	0,272	4,0
	Καναδὰς	735 (1)	35,04	323	0,0121	0,279	3,9

Πίνακας 2.2γ. Παράμετροι εναέριων γραμμών - H.R.A. (Άδεια του Edison Electric lnstitute)

Πολική τάση (kV)		345	345	500	500	735	735
Άγωγοί ανά φάση, άλληλαπέχοντες 18 in		1	2	2	4	3	4
Κώδιξ άγωγών		Expanded	Curlew	Chuker	Parakeet	Expanded	Pheasant
Διάμετρος άγωγού (in)		1,750	1,246	1,602	0,914	1,750	1,382
Απόσταση φάσεων (ft)		28	28	38	38	56	56
ΜΓΔ (ft)		35,3	35,3	47,9	47,9	70,6	70,6
Επαγωγική αντίδραση στά 60 Hz (Ω/μίλι)	X_A	0,3336	0,1677	0,1529	0,0584	0,0784	0,0456
	X_D	0,4325	0,4325	0,4694	0,4694	0,5166	0,5166
	X_A+X_D	0,7661	0,6002	0,6223	0,5278	0,5950	0,5622
Χωρητική αντίδραση στά 60 Hz (ΜΩ-μίλια)	X'_A	0,0777	0,0379	0,0341	0,0126	0,0179	0,0096
	X'_D	0,1057	0,1057	0,1147	0,1147	0,1263	0,1263
	$X'_A+X'_D$	0,1834	0,1436	0,1488	0,1273	0,1442	0,1359
Zo (Ω)		374,8	293,6	304,3	259,2	292,9	276,4
Φυσική φόρτιση MVA		318	405	822	965	1844	1955
Αντίσταση αγωγού στό συνεχές, σέ 25° c (Ω/μίλι)		0,0644	0,0871	0,0510	0,162	0,0644	0,0709
Αντίσταση αγωγού στό έναλλασσόμενο, σέ 50° c καί 60 Hz (Ω/μίλι)		0,0728	0,0979	0,0599	0,179	0,0728	0,0805

X_A = συνιστώσα της επαγωγικής αντίδρασης που οφείλεται στη μαγνητική ροή μέσα σε μία ακτίνα 1 ft.

X_D = συνιστώσα που οφείλεται στις άλλες φάσεις

Συνολική αντίδραση ανά φάση = $X_A + X_D$

$$X_A = 0{,}2794 log_{10}\left(\frac{1}{[N(M\Gamma A)(A)^{N-1}]^{1/N}}\right) \Omega/\mu\acute{\iota}\lambda\iota$$

$$X_D = 0{,}2794 log_{10}(M\Gamma\Delta)\ \Omega/\mu\acute{\iota}\lambda\iota$$

X'_A καί X'_D ορίζονται ομοίως για χωρητική αντίδραση, και

$$X'_A = 0{,}0683 log_{10}\left(\frac{1}{[Nr(A)^{N-1}]^{1/N}}\right) M\Omega/\mu\acute{\iota}\lambda\iota\alpha,\ X'_D = 0{,}0683 log_{10}(M\Gamma\Delta)\ M\Omega/\mu\acute{\iota}\lambda\iota\alpha$$

όπου

ΜΓΑ = μέση γεωμετρική ακτίνα (ft)

ΜΓΔ = μέση γεωμετρική διάμετρος (ft)

N = αριθμός αγωγών ανά φάση

A =S/2 sin(π/N) N>1

A=0. N=1.

S = αποστάσεις των αγωγών δέσμης μεταξύ τους (ft)

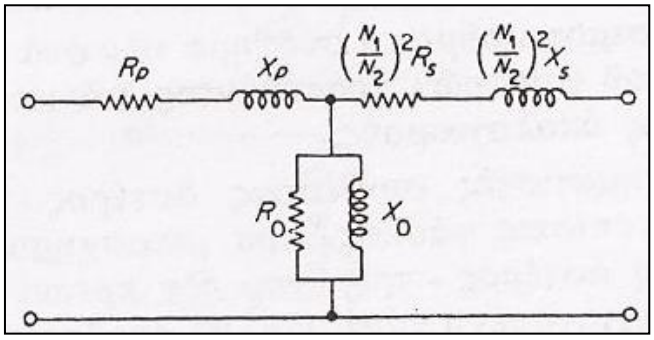
r = ακτίνα αγωγού (ft)

Η αντίσταση διαρροής είναι συνήθως τόσο μεγάλη που μπορεί να αμεληθεί στους περισσότερους υπολογισμούς. Αντιπροσωπεύει τη συνδυασμένη δράση όλων των διάφορων δρόμων διαρροής από την γραμμή προς γή. Ο κύριος δρόμος είναι αυτός που παρουσιάζουν οι επιφάνειες των μονωτήρων γραμμής, η αντίσταση των οποίων εξαρτάται από την κατάσταση των επιφανειών τους, που μεταβάλλεται σημαντικά αναλόγως τοποθεσίας. Στις βιομηχανικές περιοχές θα υπάρχει ρύπανση και κάπνα, ενώ στις παραθαλάσσιες απόθεση θαλασσίων αλάτων (άλμης). Οι μονωτήρες διελεύσεως των διακοπτών ισχύος και μετασχηματιστών σχηματίζουν άλλους δρόμους διαρροής.

Οι απώλειες διαρροής στις γραμμές των 132 kV κυμαίνονται μεταξύ 0,3 καί 1 1kW ανά μίλι (περίπου 0,2 και 0,7 kW ανά χιλιόμετρο). Ο Πίνακας 2.2 α δίνει τις παραμέτρους για διάφορα κυκλώματα εναερίων γραμμών, για τις τάσεις (πολικές) λειτουργίας στη Μ. Βρετανία, ενώ ο Πίνακας 2.2 β για διεθνείς γραμμές, και ο 2.2 γ για τις ΗΠΑ.

2.7 Μετασχηματιστές

Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φάσεως μετασχηματιστή, αναφερόμενο στο πρωτεύον τύλιγμα, φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Οι αντιστάσεις και αντιδράσεις μπορούν να βρεθούν από τους γνωστούς τρόπους δοκιμής ανοικτοκυκλώσεως και βραχυκυκλώσεως. Αν δεν υπάρχει πλήρης πληροφόρηση για το κάθε τύλιγμα, μπορούν οι δύο βραχίονες του ισοδύναμου τετράπολου δικτύου Τ να γίνουν δεκτοί ο καθένας σαν ίσος με το ήμισυ της συνολικής σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή. Λίγη μόνο ακρίβεια χάνεται κατά την μεταφορά του παράλληλου κλάδου στους ακροδέκτες εισόδου, που σχηματίζει έτσι έναν κλάδο — πρόβολο του ισοδύναμου (αναφερομένου στο πρωτεύον).

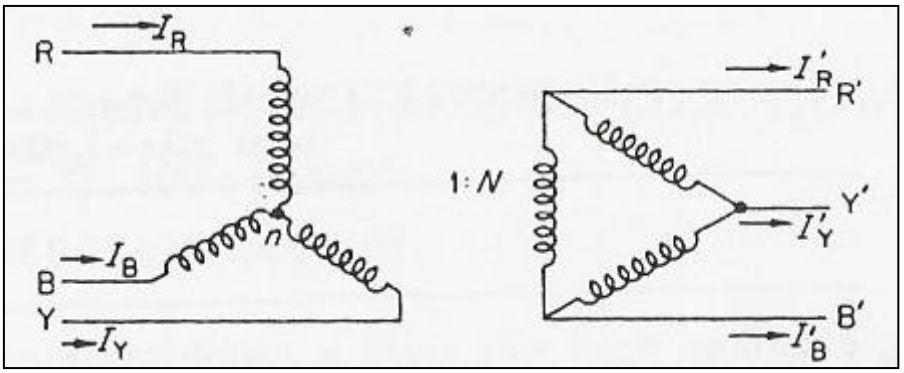


Σχήμα 2.18. Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων

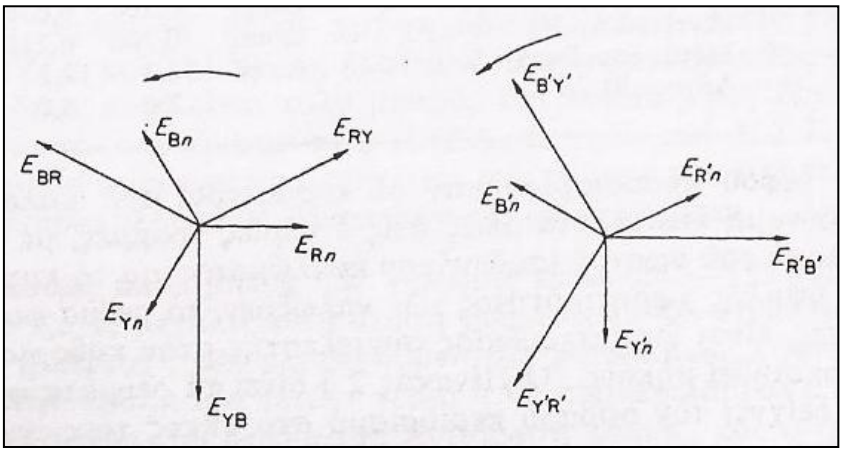
Στους μετασχηματιστές ισχύος, το ρεύμα που απορροφά ο κλάδος διακλαδώσεως είναι συνήθως ένα μικρό ποσοστό του ρεύματος φορτίου, και ο κλάδος αυτός μπορεί να αμεληθεί.

2.7.1 Μετατοπίσεις φάσεως για τριφασικούς μετασχηματιστές

Ας πάρουμε τον μετασχηματιστή που φαίνεται στο Σχήμα 2.19α. Οι ερυθρές φάσεις R παίρνονται σαν φάσεις αναφοράς και για τις δύο πλευρές, και ο λόγος μετασχηματισμού είναι 1:N. Τα αντίστοιχα φασικά διαγράμματα φαίνονται στο Σχήμα 2.19β. Αν κα δεν διατίθεται σημείο ουδετέρου στην πλευρά τριγώνου, οι ενεργοί τάσεις γραμμή – προς γη (φασικές) σημειώνονται σαν $E_{R'n}$, $E_{Y'n}$ και $E_{B'n}$.



Σχήμα 2.19α. Μετασχηματιστής αστέρας-τρίγωνο, με λόγο σπειρών 1: N



Σχήμα 2.19β. Αντίστοιχα φασικά διαγράμματα (Το N λαμβάνεται σαν μονάδα στα διαγράμματα).

Αν συγκρίνουμε τα δύο φασικά διαγράμματα, βλέπουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$E_{R'n}$ = τάση φασική στην πλευρά τριγώνου

$= NE_{Rn} \angle 30^{\circ}$,

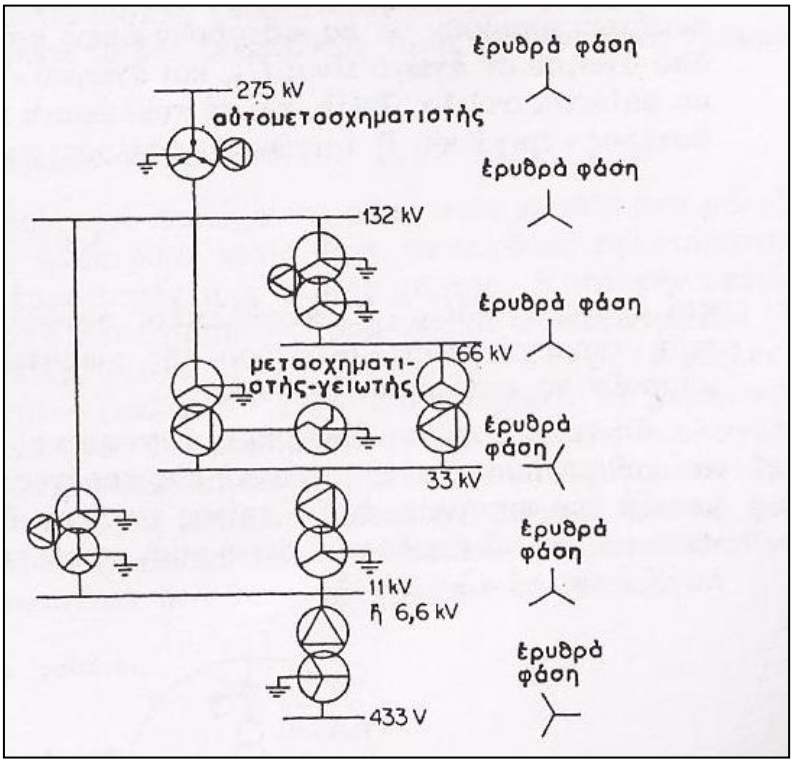
δηλ. η τάση θετικής διαδοχής ή κανονική τάση ισορροπίας των τριών φάσεων για την φάση R' είναι προχωρημένη (προηγείται) κατά 30°.

Παρατηρώντας τα φασικά διαγράμματα αρνητικής διαδοχής φάσεων (αυτά είναι φασικά διανύσματα με ανάστροφη περιστροφή, δηλ. *R—B—Y)*. Θα δούμε εύκολα ότι οι φασικες τάσεις και εντάσεις είναι μετατοπισμένες κατά —30°.

Όταν χρησιμοποιούμε το σύστημα των ανά μονάδα (ανηγμένων) μεγεθών, ο λόγος μετασχηματισμού (σπειρών πρωτεύοντος διά σπειρών δευτερεύοντος) δεν εμφανίζεται απευθείας στους υπολογισμούς.

Σαν μετασχηματιστές συνδέσεως αστέρα - αστέρα ή τριγώνου - τριγώνου δεν υπάρχουν μετατοπίσεις φάσεως. Άρα μετασχηματιστές με τις συνδέσεις αυτές καθώς καί τη σύνδεση αστέρα - τριγώνου δεν πρέπει να συνδέονται παράλληλα. Αυτό θα εισήγαγε μία συνισταμένη τάση που θα δρούσε στο τοπικό κύκλωμα που σχηματίζουν οι χαμηλές συνήθως σύνθετες αντιστάσεις των τυλιγμάτων.

Στο Σχήμα 2.20 φαίνεται η γενική πράξη στο βρετανικό δίκτυο σχετικά με τους μετασχηματιστές με μετατοπίσεις φάσεως. Βλέπουμε ότι η κατεύθυνση του φασικού διανύσματος ανφοράς είναι διαφορετική στις διάφορες στάθμες τάσεως. Οι μεγαλύτερες των 30^0 μετατοπίσεις φάσεως παρέχονται από κατάλληλη αναδιάρθρωση των συνδέσεων των τυλιγμάτων.Παρέχονται *τριτεύοντα* ή τρίτα τυλίγματα, για να παρέχουν επαρκές ρεύμα σφάλματος για τη λειτουργία των συσκευών προστασίας και ένα μονοπάτι διόδου των ρευμάτων τρίτης αρμονικής.

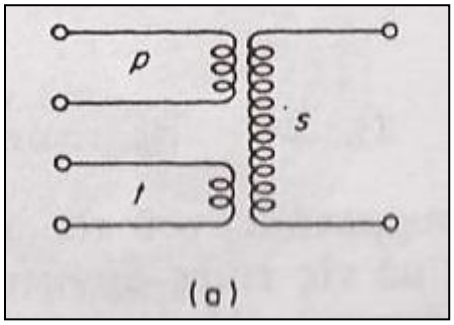


Σχήμα 2.20. Τυπικές μετατοπίσεις φάσεως σε ένα σύστημα ηλεκτρ. ενέργειας.

2.7.2 Μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων

Πολλοί μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τρία τυλίγματα ανά φάση, όπου το τρίτο τύλιγμα είναι γνωστό σαν τριτεύον. Ο τύπος αυτός μπορεί να παρασταθεί υπό συνθήκες ισορροπίας των τριών φάσεων από ένα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα τριών συνθέτων αντιστάσεων που

συνδέονται κατ' αστέρα, καθώς φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Οι τιμές των ισοδυνάμων συνθέτων αντιστάσεων Z_p, Z_s και Z_t μπορούν να ληφθούν από την ηλεκτρική δοκιμή. Γίνεται δεκτό ότι τα ρεύματα χωρίς φορτίο είναι αμελητέα.



Σχήμα 2.21α. Μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων.

Έστω Z_{ps} = σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος, όταν το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο και το τριτεύον ανοικτό.

Z_{ps} = σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος, όταν το τριτεύον είναι βραχυκυλωμένο και το δευτερεύον ανοικτό.

Z_{st} = σύνθετη αντίσταση του δευτερεύοντος, όταν το τριτεύον είναι βραχυκυκλωμένο και το πρωτεύον ανοικτό.

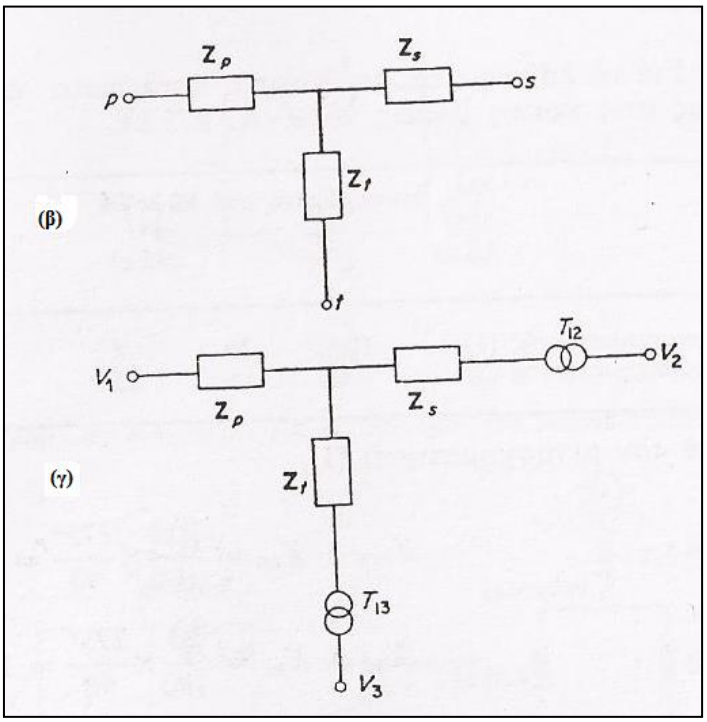
Οι ανωτέρω σύνθετες αντιστάσεις μετρούνται με Ωμ αναφερόμενα στην ίδια πτώση τάσεως. Επομένως:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t$$

$$\left.\begin{aligned} Z_p &= \tfrac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} + Z_{st}) \\ Z_s &= \tfrac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} + Z_{pt}) \\ Z_t &= \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} + Z_{ps}) \end{aligned}\right\} \qquad (2.24)$$



Σχήμα 2.21β και γ. Ισοδύναμα κυκλώματα.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι το σημείο αστέρα στο Σχήμα 2.21β είναι καθαρά φανταστικό, και ότι το διάγραμμα εκείνο είναι ένα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα. Στους περισσότερους μεγάλους μετασχηματιστές η τιμή της Z_s είναι πολύ μικρή και μπορεί να είναι αρνητική. Όλες οι σύνθετες αντιστάσεις πρέπει να αναφέρονται σε κοινές βάσεις των βολταμπέρ και της τάσεως. Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 2.21γ.

2.7.2.1 Αντομετασχηματιστές

Ο συμμετρικός αυτομετασχηματιστής μπορεί να αντιμετωπιστεί όμοια με τους μετασχηματιστές δύο τριών τυλιγμάτων. Αυτός ο τύπος μετασχηματιστή φαίνεται ο καλύτερος όταν ο λόγος μετασχηματισμού είναι μικρός, και χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη διασύνδεση δικτύων ηλεκτροπαροχής που εργάζονται σε διαφορετικές τάσεις, π.χ. 275 kV προς 132 kV. Το σημείο ουδετέρου είναι στερεά γειωμένο, δηλ. συνδέεται απευθείας προς γη, χωρίς την παρέμβαση αντιστάσεως.

2.7.2.2 Μετασχηματιστές γειωτές

Ένα μέσο για την παροχή σημείου γειωμένου ή ουδετέρου σε μία ηλεκτροπαροχή που προέρχεται από μετασχηματιστή συνδέσεων τριγώνου, μπορεί να ληφθεί με τη χρήση τεθλασμένου μετασχηματιστή (ζίγκ-ζάγκ) που φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.20. Με τη διασύνδεση δύο τυλιγμάτων σε κάθε μέλος, παίρνουμε ένα κόμβο με δυναμικό μηδέν.

2.7.2.3 Αρμονικές

Λόγω της μη γραμμικότητας της χαρακτηριστικής μαγνητίσεως των μετασχηματιστών, η κυματομορφή ρεύματος παραμορφώνεται, άρα περιέχει αρμονικές. Οι τελευταίες ρέουν διά των συνθέτων αντιστάσεων του συστήματος και παράγουν αρμονικές τάσεις. Σε μετασχηματιστές με τυλίγματα συνδεόμενα κατά τρίγωνο, η τρίτη και η ένατη αρμονική κυκλοφορούν περιφερειακά επί του τριγώνου, και η παρουσία τους γίνεται λιγότερο αισθητή στα ρεύματα γραμμής. Μία άλλη πηγή αρμονικών είναι ένα φορτίο ανορθωτών.

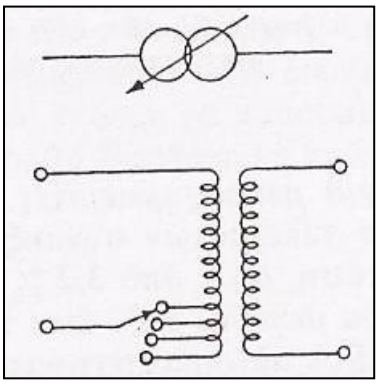
Μερικές φορές το ποσοστό αρμονικών συνιστωσών μπορεί να αποβεί σημαντικό, κυρίως λόγω της δυνατότητας συντονισμού του συστήματος σ' αυτές, δηλ. συντονισμός έχει παρατηρηθεί, π.χ., των πέμπτων αρμονικών. Οι τρίτες αρμονικές είναι επίσης εν φάσει στους τρεις αγωγούς τριφασικής γραμμής, και αν *υπάρχει* μονοπάτι επιστροφής, τα ρεύματα αυτά προστίθενται και προκαλούν παρεμβολή στα γειτονικά κυκλώματα τηλεπικοινωνιών.

Όταν αναλύουμε συστήματα με αρμονικές συνιστώσες, είναι αρκετό να χρησιμοποιούμε τις κανονικές τιμές για την επαγωγή σειράς και την χωρητικότητα διακλαδώσεως. Η επίδραση επί της αντίστασης είναι δυσκολότερο να εκτιμηθεί. Είναι αρκετό όμως, για τις συνήθεις απαιτήσεις, να διαπιστωθεί η παρουσία ή μή αρμονικών καθώς και η δυνατότητα συντονισμού.

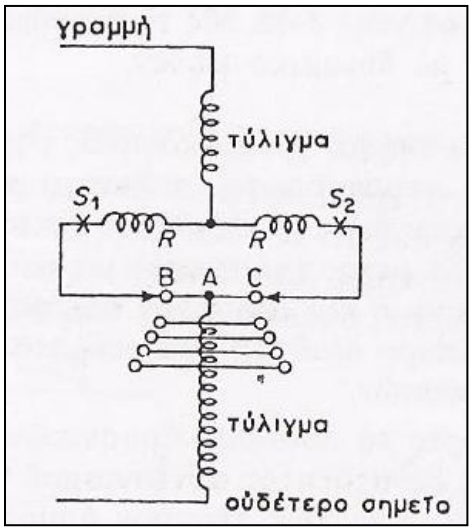
2.7.3 Μετασχηματιστές μεταβλητής λήψεως (λόγου)

Μία μέθοδος ελέγχου των τάσεων δικτύου στηρίζεται στη χρήση μετασχηματιστών με μεταβλητό λόγο σπειρών (πρωτεύοντος προς δευτερεύοντος). Στο Σχήμα 2.22α φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του μετασχηματιστή αυτού, με αλλαγή λήψεως για τη μεταβολή της τάσεως εξόδου μόνο όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Αυτό όμως απαιτεί την αποσύνδεση του μετασχηματιστή όταν πρέπει να μεταβληθεί η λήψη. Οι περισσότεροι μετασχηματιστές έχουν σήμερα επιλογείς τάσεως που μπορούν να την μεταβάλλουν υπό φορτίο, της βασικής μορφής του Σχήμα 2.22β. Στη θέση που φαίνεται, η τάση είναι μέγιστη και το ρεύμα διαιρείται εξίσου στα δύο μισά του πηνίου R, με αποτέλεσμα μηδέν συνισταμένη ροή και ελαχιστοποιημένη σύνθετη αντίσταση. Για να ελαττώσουμε την τάση, ανοίγουμε το S_1 και το συνολικό ρεύμα περνά μέσα από το άλλο ήμισυ του επαγωγέα αντιδράσεως. Ο διακόπτης επιλογής Β μετατίθεται τότε στην επόμενη επαφή, και το S_1 κλείνει. Ρέει τώρα διά της R ένα ρεύμα κυκλοφορίας, υπερτιθέμενο στο ρεύμα φορτίου. Το S_2 ανοίγει τώρα και το C κινείται προς την επόμενη λήψη. Το S_2 κλείνει μετά, καi h ενέργεια έχει σημπληρωθεί. Απαιτούνται έξι χειρισμοί του διακόπτη για να επιτευχθεί μία αλλαγή θέσεως λήψεως.

Η αλλαγή τάσεως μεταξύ λήψεων είναι συχνά 1,25 % της ονομαστικής τάσεως. Η μικρή αυτή μεταβολή είναι απαραίτητη για να αποφύγουμε μεγάλες διαταραχές της τάσεως στους ζυγούς του καταναλωτή.

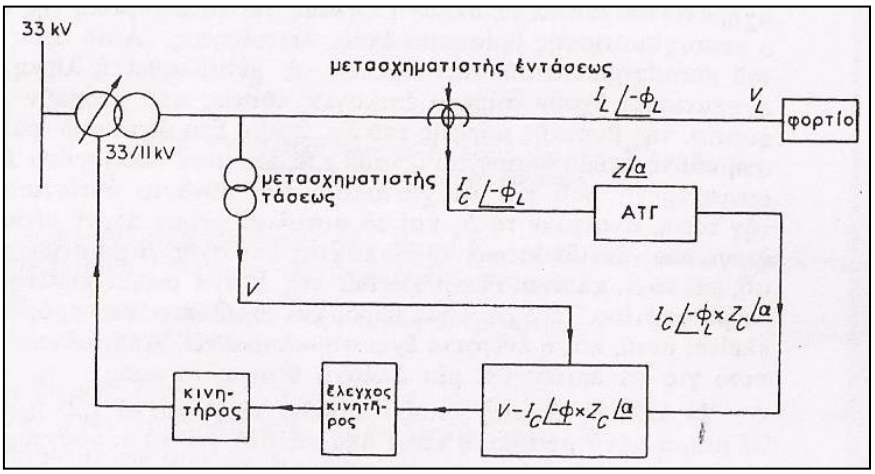


Σχήμα 2.22α. Μετασχηματιστής μεταβλητής λήψεως.



Σχήμα 2.22β. Μετασχηματιστής αλλαγής λήψεως ενώ βρίσκεται υπό φορτίο. S_1, S_2 = διακόπτες μεταβιβάσεως, R=επαγωγέας αντιδράσεως.

Στο Σχήμα 2.23 φαίνεται ένα σχηματικό λογικό διάγραμμα του συστήματος αλλαγής λήψεως υπό φορτίο. Ο *αντισταθμιστής της πτώσεως τάσεως γραμμής* (ΑΤΓ) χρησιμοποιείται για να λάβει υπόψη την πτώση τάσεως κατά μήκος του αγωγού τροφοδοσίας προς τη θέση φορτίου, έτσι που η πραγματική τάση φορτίου παρατηρείται και διορθώνεται από τον μετασχηματιστή. Η συνολική περιοχή λήψεων κυμαίνεται με τη χρήση του μετασχηματιστή. Τυπικά, για μετασχηματιστές γεννητριών, μεταβάλλεται από +2 μέχρι —16% σε 18 βήματα.



Σχήμα 2.23. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου για μετασχηματιστή αλλαγής λήψεως υπό φορτίο, που ενσωματώνει αντιστάθμιση πτώσεως τάσεως γραμμής (ΑΠΓ)

2.7.4 Τυπικές παράμετροι για μετασχηματιστές

Οι αντιδράσεις (επαγωγικές) διαρροής των μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων συναυξάνουν ελαφρά με την ονομαστική ισχύ τους (kVA) για ορισμένη τάση, δηλ. από 3,2 % στα 20 kVA έως 4,3 % στα 500 kVA, όλα για 11 kV. Για μεγαλύτερα μεγέθη, δηλ. άνω των 20 MVA, μία τυπική τιμή είναι το 10 % για όλες τις τάσεις. Για αυτομετασχηματιστές, οι σύνθετες αντιστάσεις είναι συνήθως μικρότερες απ' ότι για διπλού τυλίγματος (δύο τυλιγμάτων). Οί παράμετροι για μεγάλους μετασχηματιστές είναι:

(α) 400/275 kV αυτομετασχηματιστής, 500 MVA, 12 % σύνθετη αντίσταση, περιοχή λήψεων +10 έως -20%.

(β) 400/132 kV δύο τυλιγμάτων, 240 MVA, 20 % σύνθετη αντίσταση, περιοχή λήψεων +5 έως -15%.

2.8 Φορτία

2.8.1 Εισαγωγή

Μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, το φορτίο που απαιτείται από τους καταναλωτές είναι το δυσκολότερο να εκτιμηθεί επιστημονικά. Το μέγεθος του φορτίου μεταβάλλεται με το δευτερόλεπτο και, με εκατομμύρια καταναλωτών που ο καθένας απορροφά ενέργεια όση θα του χρειαστεί κάθε φορά, το πρόβλημα της εκτιμήσεως για το μέλλον ανάγεται υποχρεωτικά σε στατιστική πρόβλεψη.

Μία τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η καμπύλη αυτή είναι μία ένδειξη των κοινωνικών συνηθειών ενός έθνους. Π.χ., σε ορισμένες Ευρωπαϊκές χώρες, το φορτίο παραμένει υψηλότερο πιο αργά το βράδυ και την νύκτα απ' ότι

σε άλλες. Η διαφορά αυτή σε αιχμές φορτίου έχει χρησιμοποιηθεί από τη διασύνδεση Αγγλίας-Γαλλίας, που η κάθε μία έχει περίσσεια ισχύ και σε διαφορετικές ώρες του εικοσιτετραώρου.

Η ανάπτυξη της χρήσεως θερμοσυσσωρευτών είναι μία προσπάθεια να έξομαλυνθεί η ημερήσια καμπύλη φορτίου. Υπάρχουν σχέδια για τον κεντρικό έλεγχο της θερμάνσεως αυτής, και αν πραγματοποιηθούν, ο μηχανικός ηλεκτροπαροχής θα έχει ορισμένο βαθμό ελέγχου επί του φορτίου.

Η σύνθεση των φορτίων μπορεί γενικά να διαχωριστεί σε βιομηχανικούς και οικιακούς καταναλωτές. Η αναλογία του βιομηχανικού φορτίου αυξάνει από περίπου το 1/3 στα φορτία αιχμής, μέχρι το ήμισυ υπό συνθήκες ελαχίστου συνολικού φορτίου. Μία πολύ σπουδαία διαφορά μεταξύ των δύο τύπων καταναλωτή είναι η υψηλή αναλογία επαγωγικών κινητήρων στο βιομηχανικό φορτίο (περίπου 60 %), ενώ το οικιακό φορτίο είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος θέρμανση και φωτισμός. Τα φορτία επηρεάζουν την σχεδίαση και λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενεργείας, τόσο οικονομικώς όσο και ηλεκτρικώς.

2.8.2 Οικονομικές απόψεις

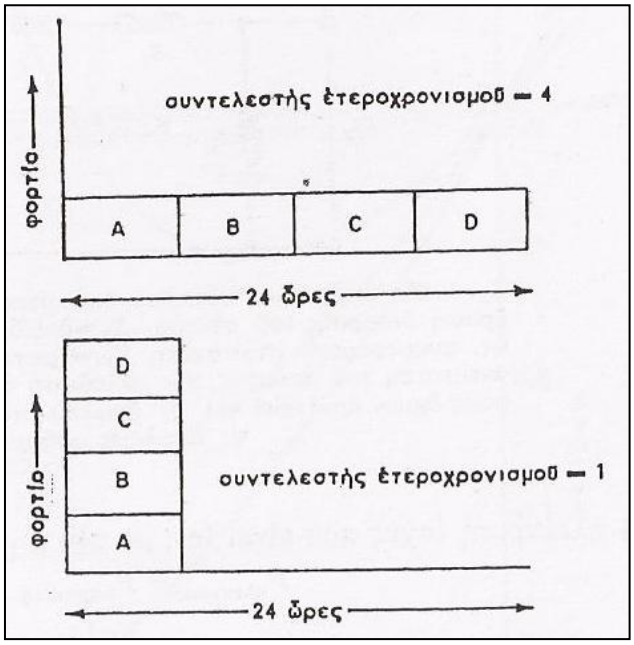
Οι χρησιμοποιούμενες στη μέτρηση φορτίων ποσότητες, ορίζονται ως : *Μέγιστο φορτίο*. Το μέσο φορτίο κατά τη μισή ώρα της μεγίστης εξόδου.

Συντελεστής φορτίου: Οι μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) που εξάγονται από τις γεννήτριες σε ορισμένο χρονικό διάστημα, διά του διαστήματος αυτού σε ώρες και διά του μεγίστου φορτίου που παρουσιάζεται μέσα στο διάστημα αυτό. Ο συντελεστής φορτίου πρέπει να είναι υψηλός. Αν μάλιστα είναι μονάδα, αυτό σημαίνει ότι όλα τα μηχανήματα χρησιμοποιούνται για όλο αύτο το διάστημα. Κυμαίνεται ανάλογα με τον τύπο του φορτίου, και είναι χαμηλός για φορτίο φωτισμού (περίπου 12 %) και υψηλός για βιομηχανικά φορτία, π.χ. 100 % για αντλητικούς σταθμούς.

Συντελεστής ετεροχρονισμού (καταναλωτών): Ορίζεται σαν το άθροισμα των μεμονωμένων μεγίστων των καταναλωτών, διά του μεγίστου φορτίου του συστήματος. Ο συντελεστής αυτός μετρά την διαφοροποίηση (χρονικό διαφορισμό) των μεγίστων του φορτίου, και αφορά στην εγκατάσταση επαρκών μηχανημάτων παραγωγής και μεταφοράς. Αν όλες οι ζητήσεις συνέβαιναν ταυτοχρόνως, δηλ. με συντελεστή ετεροχρονισμού ίσο με τη μονάδα, θα έπρεπε να εγκατασταθούν πολλές επιπλέον γεννήτριες. Ευτυχώς, ο συντελεστής είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδος, ιδιαίτερα για οικιακά φορτία.

Ένας υψηλός συντελεστής ετεροχρονισμού θα μπορούσε να ληφθεί με τέσσερις καταναλωτές, αν τους αναγκάζαμε να αναλάβουν φορτίο κατά το πρώτο διάγραμμα του Σχήμα 2.24. Αν και δεν μπορούμε προφανώς να τους εξαναγκάσουμε, μπορούμε να τους επηρεάσουμε με τη μορφή τιμολογίων. Ένα παράδειγμα είναι το τιμολόγιο δύο συντελεστών, στο οποίο ο καταναλωτής πρέπει να πληρώσει ένα ποσό που

εξαρτάται απο τη μέγιστη ζήτησή του, συν μία επιβάρυνση σταθερή για κάθε μονάδα της χρηστμοποιούμενης ενέργειας. Μερικές φορές η επιβάρυνση είναι ανάλογη της καταναλισκομένης φαινομένης ενέργειας σε kVAh καί όχι της πραγματικής (kWh).



Σχήμα 2.24. Δύο ακραίες περιπτώσεις συντελεστή ετεροχρονισμού σε ένα σύστημα με τέσσερις καταναλωτές.

Το κόστος παραγωγής και διανομής καθορίζεται κατά προσέγγιση από την έκφραση (a+bxkW+cxkWh) κατ' έτος, όπου το a είναι μία δεδομένη επιβάρυνση για την κεντρική οργάνωση και παρόμοιες δραστηριότητες, και είναι ανεξάρτητο της ισχύος εξόδου. Το b εξαρτάται από την μέγιστη ζήτηση από το σύστημα, άρα από τον τόκο και την απόσβεση επί των εγκαταστημένων μηχανημάτων. Το c εξαρτάται από τις μονάδες της παραγομένης ενεργείας, άρα και από το κόστος καυσίμου και τους μισθούς του προσωπικού που ασχολείται απευθείας στην παραγωγή ενεργείας.

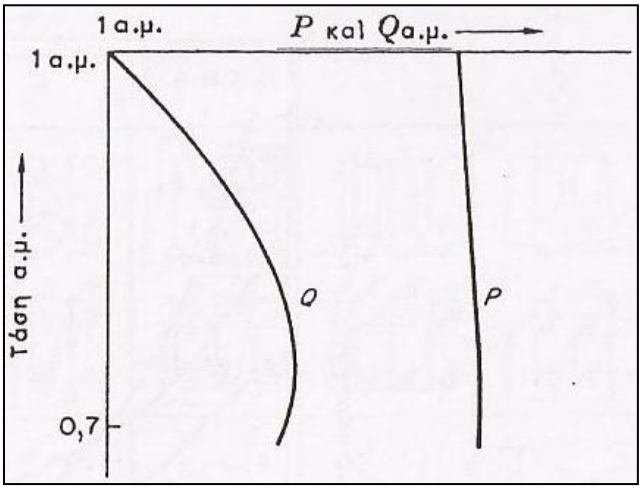
2.8.3 Συντελεστής απωλειών φορτίου

Οι μέσες απώλειες στο σύστημα, *π.χ.* απώλειες της γραμμής μεταφοράς, εξαρτώνται από τις καμπύλες φορτίου για οποιαδήποτε δεδομένη περίοδο. Ο *συντελεστής απωλειών φορτίου* ορίζεται σαν ο λόγος των πραγματικών απωλειών σε ένα χρονικό διάστημα, προς τις απώλειες που προκύπτουν αν διατηρείται το μέγιστο φορτίο.Μία λεπτομερής μελέτη των ιδιαιτέρων καμπύλων φορτίου της Μ. Βρετανίας έδειξε ότι, ο συντελεστής απωλειών φορτίου σχετίζεται προς τον συντελεστή φορτίου με την ακόλουθη έκφραση:

συντελεστής απωλειών φορτίου = 0,2 (συντελ. φορτίου) + 0,8 (συντελ. φορτίου)^2

2.8.4 Χαρακτηριστικές τάσεις των φορτίων

Η διακύμανση της ισχύος και αέργου ισχύος που παίρνουμε από ένα φορτίο με διάφορες τάσεις, έχει σημασία όταν θεωρούμε τον τρόπο με τον οποίο παριστάνονται τέτοια φορτία σε μελέτες ροής φορτίου και ευσταθείας.



Σχήμα 2.25. *P*- V καί Q-V καμπύλες συγχρόνου κινητήρα

Συνήθως σε τέτοιες μελέτες το φορτίο σε έναν υποσταθμό πρέπει να παριστάνεται, και είναι σύνθετο φορτίο από βιομηχανικούς και οικιακούς καταναλωτές. Μία τυπική σύνθεση του φορτίου ενός υποσταθμού είναι:

επαγωγικοί κινητήρες	50-70 %
φωτισμός και θέρμανση	20-25 %
σύγχρονοι κινητήρες	10%
απώλειες μεταφοράς	10-12 %

2.8.4.1 Φωτισμός

Είναι ανεξάρτητος της συχνότητας και δεν καταναλίσκει άεργο ισχύ. Η ισχύς που καταναλίσκει δεν μεταβάλλεται αναλόγως της τάσεως στο τετράγωνο [(τάση)^2] αλλά, κατά προσέγγιση, της τάσεως στην δεκαδική δύναμη 1,6 [(τάση)^{1,6}].

2.8.4.2 Θέρμανση

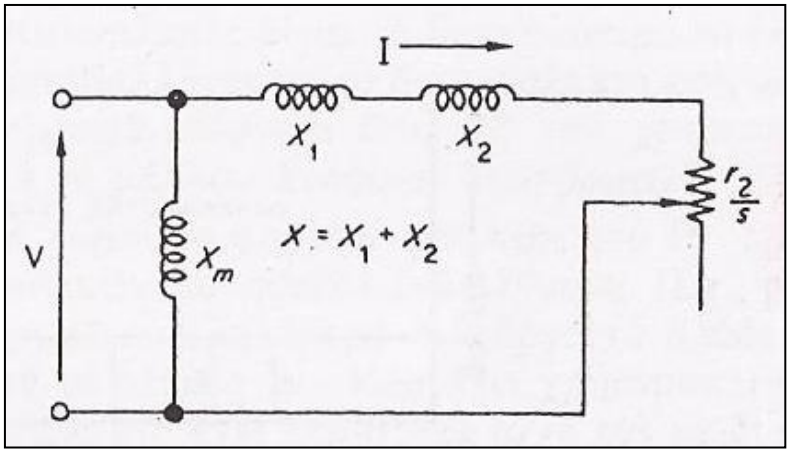
Διατηρεί σταθερή αντίσταση με την μεταβολή τάσεως, και άρα η ισχύς μεταβάλλεται αναλόγως της τάσεως στο τετράγωνο [(τάση)^2]. Τα ανωτέρω φορτία μπορούν να περιγραφούν σαν στατικά.

2.8.4.3 Σύγχρονοι κινητήρες

Η ισχύς που καταναλίσκουν είναι κατά προσέγγιση σταθερή. Για ορισμένη διέγερση, τα VAr μεταβάλλονται προς τα χωρητικά, με την ελάττωση της τάσεως. Οι γενικευμένες χαρακτηριστικές P-V, Q-V φαίνονται στο Σχήμα 2.25.

2.8.4.4 Επαγωγικοί κινητήρες

Οι χαρακτηριστικές *P—V,* Q-V μπορούν να προσδιοριστούν με τη χρήση του απλοποιημένου ισοδυνάμου κυκλώματος που φαίνεται στο Σχήμα 2.26. Γίνεται δεκτό ότι είναι σταθερό το μηχανικό φορτίο στον άξονα.



Σχήμα 2.26. Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα. X_1 = αντίδραση διαρροής του στάτη, X_2 = αντίδραση διαρροής του δρομέα, αναφερομένη στον στάτη, Xm = μαγνητίζουσα αντίδραση, r_2= αντίσταση του δρομέα, s = ολίσθηση α.μ. Οι απώλειες μαγνητίσεως έχουν αμεληθεί και οι απώλειες του στάτη συγχωνευθεί με τις απώλειες γραμμής.

Η ηλεκτρική ισχύς που είναι ίση με την μηχανική του άξονα είναι:

$$P_{ηλεκτρική} = P_{μηχανική} = P$$

$$= 3I^2 \frac{r_2}{s} = σταθερά$$

Από την οποία συνάγεται:

$$s = \frac{3I^2 r_2}{P}$$

Η άεργος ισχύςπου καταναλίσκεται

$$= \frac{3V^2}{X_m} + 3I^2(X_1 + X_2) \qquad (2.25)$$

Επίσης, από το Σχήμα 2.26

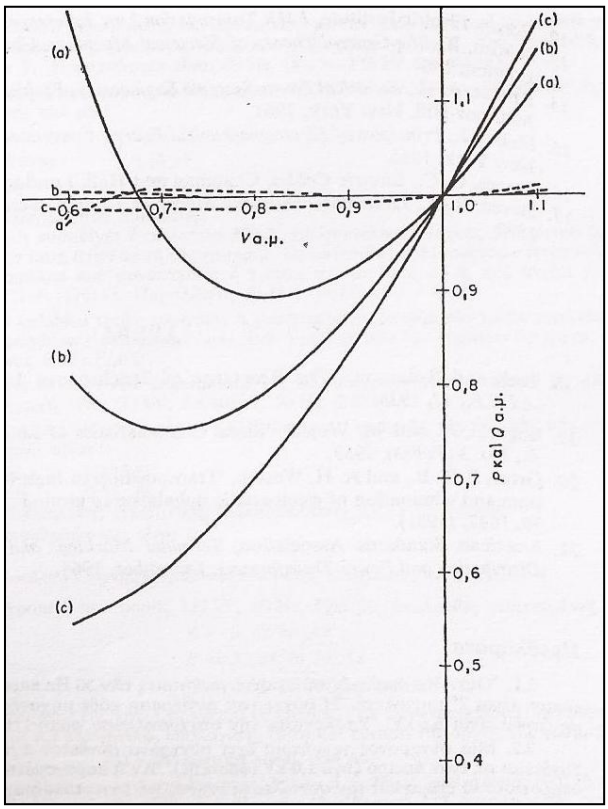
$$P = 3I^2\frac{r_2}{s} = \frac{3V^2}{(r_2/s)^2 + X^2}\cdot\frac{r^2}{s}$$

$$\frac{3V^2 r_2 s}{r_2^2 + (sX)^2}$$

Οι καμπύλες *P—V* και Q-V φαίνονται στο Σχήμα 2.27. Οι κλίμακες P και Q έχουν επιλεγεί τέτοιες, που τα P και Q είναι ίσα με 1 α.μ. το καθένα υπό τάση 1 α.μ. Η επίδραση του φορτίου του άξονα φαίνεται επίσης. Πρέπει να κάνουμε μία όμοια ανάλυση για τον επαγωγικό κινητήρα με ροπή $\propto$ (ταχύτητα)^2 και ροπή $\propto$ ταχύτητα.

Οι γνωστές καμπύλες ισχύς-ολίσθηση ενός επαγωγικού κινητήα φαίνονται στο Σχήμα 2.28. Βλέπουμε ότι, για ορισμένη μηχανική ροπή, υπάρχει μία κρίσιμη τάση και κρίσιμη διολίσθηση. Αν η τάση ελαττωθεί περισσότερο, ο κινητήρας γίνεται ασταθής και στολλάρει (περιστρέφεται τελείως ακανόνιστα). Αυτό το κρίσιμο σημείο συμβαίνει όταν

$$\frac{dP}{ds} = 0$$



Σχήμα 2.27. Καμπύλες P—V και Q-V για έναν επαγωγικό κινητήρα σταθερή ροπή άξονα. Καμπύλη (α) πλήρους φορτίου, (b) 0,75 του πλήρους φορτίου, (c) 0,5 του πλήρους φορτίου, - - - -P, —Q.

δηλ. όταν :

$$V^2 r_2 \cdot \frac{r_2^2 - (sX)^2}{(r_2^2 + (sX)^2)^2} = 0$$

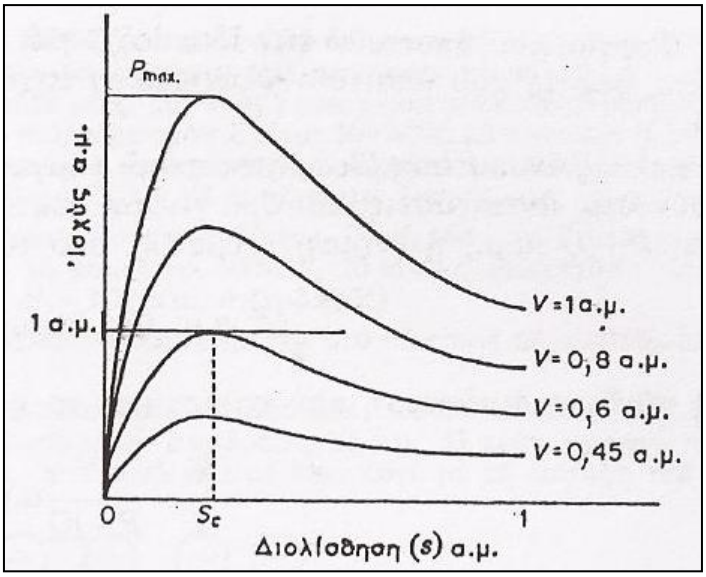
ούτως ώστε

$$s = \frac{r_2}{X} \text{ και } P_{max} = \frac{V^2}{2X}$$

Η για ορισμένη ισχύ εξόδου P,$V_{κρίσιμη} = \sqrt{2PX}$

2.8.5 Σύνθετα Φορτία

Εκτός από μεμονωμένες περιπτώσεις, όπως όταν ένας πολύ μεγάλος επαγωγικός κινητήρας αποτελεί την κινητήριο μηχανή σε ένα διυλιστήριο ή εργοστάσιο διαμορφώσεως χάλυβος (διά κοπής), αυτό που ενδιαφέρει είναι το σύνθετο φορτίο.



Σχήμα 2.28. Καμπύλες ισχύς-ολίσθηση επαγωγικού κινητήρα. Άν η τάση πέσει στο 0,6 α.μ. υπό πλήρες φορτίο P=1, η κατάσταση είναι κρίσιμη (s_c)

Δεν υπάρχονν πολλές δοκιμές ευρέσεως των χαρακτηριστικών καμπύλων I-V και Q-V των φορτίων πλήρων υποσταθμών (λόγω αντιδράσεως του καταναλωτικού κόσμου!). Τα αποτελέσματα μίας τέτοιας δοκιμής, που έγινε στο Εθνικό Δίκτυο της Πολωνίας, δίνονται στον Πίνακα 2.3. Αντί για πραγματικές χαρακτηριστικές, δίνονται οι τιμές των $\vartheta P/\partial V$ και $\vartheta Q/\partial V$ υπό τάση 1 α.μ. Καθώς θα γίνει αργότερα αντιληπτό, οι ποσότητες αυτές έχουν σπουδαίο ενδιαφέρον. Μπορούμε να λάβουμε τις χαρακτηριστικές συνθέτου φορτίου, αθροίζοντας τις χαρακτηριστικές των φορτίων που το αποτελούν.

Στην πράξη, συναντάμε μεγάλη δυσκολία στην εκτίμηση του βαθμού φορτίσεως των κινητήρων, και αυτό επηρεάζει σημαντικά το σχήμα των χαρακτηριστικών καμπύλων.

Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα δοκιμών στο Εθνικό δίκτυο της Πολωνίας (Boguckí, A. και Wojcík M., Στατικές χαρακτηριστικές φορτίων)

dP/dV ὑπὸ ὀνομαστικὴ τάση	Πρωΐ	Ἀπόγευμα-Βράδυ	Νύχτα
Μεγάλες πόλεις	0,9–1,2	1,5–1,7	1,5–1,6
Μικρὲς πόλεις	0,6–0,7	1,4–1,6	1,4–1,6
Χωριὰ	0,5–0,6	1,5	1,5
Φωτισμὸς δρόμων	—	1,55	1,55
Ὀρυχεῖα	0,6–0,76	0,75–0,89	0,65–0,78
Βιομηχ. σιδήρου	0,6–0,7	0,6–0,75	0,6–0,7
Ὑφαντουργικὲς βιομηχ.	0,5–0,6	0,6–0,7	0,6–0,65
Μεγάλες χημ. βιομηχ.	0,6–0,7	0,6–0,75	0,6–0,7
Κατασκευὴ μηχανῶν	0,5–0,55	0,6–0,65	0,6–0,65
Σημεῖα συνδέσεως στὸ δίκτυο Υ.Τ	0,6–0,7	0,8–1;1	0,8–1;0
dQ/dV ὑπὸ ὀνομαστικὴ τάση	Πρωΐ	Ἀπόγευμα-Βράδυ	Νύχτα
Μεγάλες πόλεις	2,5–3,0	2,2–2,5	2,4–3,0
Μικρὲς πόλεις	2,6–3,5	2,0–2,5	2,5–3,0
Χωριὰ	2,6–3,5	2,0–2,5	2,4–3,5
Βιομηχανία (συνολικὴ)	1,8–2,7	1,8–2,3	1,8–2,7
Σημεῖα συνδέσεως στὸ δίκτυο 6 kV	2,2–2,9	1,8–2,5	2,0–2,6
Σημεῖα συνδέσεως στὸ δίκτυο 110 kV	1,8–2,6	1,5–2,2	1,7–2,3

Φορτία που απαιτούν την ίδια ισχύ για ελαττωμένη τάση, λέγονται *άκαμπτα*. Αντίθετα, φορτία που απαιτούν ελαττωμένη ισχύ όταν η τάση ελαττώνεται, λέγονται *μαλακά*.

Σε πολλές αναλυτικές (θεωρητικές δηλ.) εργασίες, τα φορτία παριστάνονται με σταθερές σύνθετες αντιστάσεις, και άρα γίνεται δεκτό ότι $P \propto V^2$ και $Q \propto V^2$. Αν το φορτίο είναι $P+jQ$ α.μ., η ένταση ρεύματος, υπό τάση V, είναι:

$\frac{P-jQ}{V}$ α.μ. (ας θυμόμαστε ότι VI*=S)

Άρα η σύνθετη αντίσταση που παριστάνει το φορτίο αυτό

$$= \frac{V}{I} = \frac{V^2}{P-jQ} \text{ α.μ.}$$

Οι χαρακτηριστικές *P— V, Q—V,* μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν είναι γνωστές, αλλά η διαδικασία αυτή είναι μάλλον επίπονη. Ορισμένοι ειδικοί υποστηρίζονν ότι η παράσταση του φορτίου με μία συσκευή που καταναλίσκει σταθερό (εναλλασσόμενο) ρεύμα, επαληθεύεται με καλή προσέγγιση στην πράξη. Αν χρησιμοποιούνται ψηφιακές οι αναλογικές μέθοδοι, η σωστή παράσταση των φορτίων δεν παρουσιάζει

μεγάλες δυσκολίες. Όταν απαιτείται εκτεταμένη ελάττωση της πολυπλοκότητας στη μορφή ενός δικτύου, τότε η παράσταση σταθερής συνθέτου αντιστάσεως είναι η λύση αναγκαστικά, αν και το φορτίο που παριστάνει σπάνια το συναντούμε στην πράξη.

2.9 Χαρακτηριστικές φορτίου – συχνότητας

Συχνά, οι μεταβολές της τάσεως συνοδεύονται από μεταβολές συχνότητας. Και πάλι, σπανίζουν οι πληροφορίες σχετικά με τις χαρακτηριστικές των συνθέτων φορτίων σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Με τις μικρές μεταβολές συχνότητας που επιτρέπονται στην πράξη, οι επιδράσεις στην καταναλισκόμενη ισχύ και άεργο ισχύ είναι συνήθως αμελητέες και δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ Σ.Η.Ε.

3.1 Εισαγωγή

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας των 20^0 αιώνα είχε μια αλματώδη αυξηση, αλλά των 21^0 αιώνα εκτιμάται ότι η αυξηση αυτή θα πολλαπλασιαστεί. Μέχρι το 2020 εκτιμάται ότι θα έχούμε μια αυξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 76% σε σχέση με το 1997. Η ετήσια αυξηση για τα ανεπτυγμένα κράτη εκτιμάται σε 1.5%, ενώ η αυξηση στις υπό ανάπτυξη χώρες της Ασίας, Αφρικής και της Κεντρικής και Νότιας Αμερικής θα είναι πολυ μεγαλυτερη, δεδομένου ότι εκτιμάται ότι περίπου 1.5 δισεκατομμυρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση στον ηλεκτρισμό.

Για να καλυφθεί η ραγδαία αυξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν απαραίτητη μια δραστική αυξηση σε μέγεθος και πολυπλοκότητα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Στην αύξηση τον μεγέθους των ΣΗΕ και τη δυσκολία λειτουργίας τους συνέβαλε σημαντικά και το γεγονός ότι συνήθως οι διαθέσιμες ενεργειακές πηγές για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απομακρυσμένες από τα κέντρα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη λειτουργία ενός Τοσο εκτεταμένου και πολυπλοκου συστήματος απαραίτητη ήταν η άμεση χρήση και αξιοποίηση όλων των συγχρονων τεχνολογικών ανακαλυψεων. Με την εφαρμογή τους είχαμε μια συνεχή βελτίωση στην αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των μεθόδων και των εξοπλισμών που χρησιμοποιούν ταν στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την ευσταθεί και αξιόπιστη λειτουργία των ΣΗΕ.

Μεγάλη δυσκολία στην επίτευξη αξιόπιστης λειτουργίας των ΣΗΕ είναι η μέχρι σήμερα αδυναμία αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η αδυναμία σε συνδυασμό με τις ημερήσιες μεταβολές τον φορτίου επιβάλλει τη συνεχή προσαρμογή της παραγωγής στο κυμαινόμενο φορτίο, με διατήρηση της τάσης και της συχνότητας στις ονομαστικές τους τιμές. Το δυσκολο αυΤο έργο αναλαμβάνουν να εκτελέσουν ο τοπικός και κεντρικός έλεγχος των ΣΗΕ.

Επιπρόσθετα προβλήματα στη λειτουργία των ΣΗΕ προκαλουν και οι σημαντικές διαταραχές που προκαλουνται σε αυτά από την πτώση κεραυνών, τις διακοπτικές λειτουργίες και τα βραχυκυκλώματα (συμμετρικά και ασυμμετρα). Ακόμα και μετά από αυτές τις διαταραχές σε πολυ ζωτικά σημεία τους τα ΣΗΕ πρέπει να συνεχίζουν

την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία τους. Οι μηχανικοί των ΣΗΕ υπολογίζουν την ικανότητα ενός δικτύου να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από σημαντικές διαταραχές (μελέτη μεταβατικής ευστάθειας) και αν αυτό δεν είναι δυνατόν προτείνουν δομικές αλλαγές του ή αποφυγή λειτουργικών καταστάσεων που οδηγούν σε αστάθεια τα ΣΗΕ.

Η ταχεία ανάπτυξη των ΣΗΕ για την κάλυψη της ραγδαίας αύξησης των ηλεκτρικών φορτίων απαιτεί την επέκταση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής. Αυτό, σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι συχνά δύσκολο να επιτευχθεί, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων αντιδράσεων, που οφείλονται κύρια στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των γραμμών μεταφοράς και των σταθμών. Αυτός ο λόγος μαζί με την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάπτυξη νέων ημιαγωγών στοιχείων στερεάς κατάστασης, οδήγησαν τη δεκαετία του ‘80 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, στην ανάπτυξη συστημάτων μεταφοράς που ονομάστηκαν «Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος» (Flexible AC Transmission Systems (FACTS)). Αυτή η τεχνολογία μπορεί να αυξήσει το βαθμό χρησιμοποίησης της εγκατεστημένης ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς ευστάθειας, ελέγχου πραγματικής και αέργου ισχύος και ελέγχου του μέτρου και της γωνίας της τάσης, όπως και της συχνότητας. Με τη βοήθεια της επεκτάθηκε η χρήση των γραμμών εναλλασσομένου ρεύματος και σε περιπτώσεις που προηγουμένως δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για τεχνοοικονομικούς λόγους.

Εν τω μεταξύ, από το τέλος της δεκαετίας του 1970, άρχισε η αναμόρφωση ή κατ' άλλους απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που στο τελικό της στάδιο φιλοδοξεί να δώσει τη δυνατότητα σε κάθε καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας να επιλέγει τον προμηθευτή του. Οι υποστηρικτές αυτής της ιδέας πιστεύουν ότι η βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας και η ελάττωση του κόστους της μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τον ανταγωνισμό στην παραγωγή και τη διανομή της, δηλαδή να υπάρχουν πολλές εταιρίες παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και να αναπτύσσεται μεταξύ τους ανταγωνισμός Η απελευθέρωση όμως της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τα πιο σύνθετα τεχνοοικονομικά προβλήματα, γιατί η ηλεκτρική ενέργειας παράγεται και διανέμεται μέσω του δικτύου χωρίς να έχει συγκεκριμένες διευθύνσεις. Συνεπώς, αφ' ενός για να γίνει δυνατή η επιλογή του προμηθευτή από τον καταναλωτή πρέπει να εξευρεθούν και να εφαρμοστούν συμπληρωματικές λειτουργίες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, αφ' ετέρου η ποιότητα του ηλεκτρισμού και οι φυσικοί περιορισμοί του συστήματος επιβάλλουν αυστηρές προδιαγραφές για την ασφαλή λειτουργία του. Η δυνατότητα ανταγωνισμού στην παραγωγή έγινε δυνατή με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των στροβίλων και την πτώση των τιμών φυσικού αερίου. Αυτοί οι λόγοι κατέστησαν τις σχετικά μικρές μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου ανταγωνιστικές των μεγάλων θερμικών μονάδων και ανέτρεψαν τη φιλοσοφία κατασκευής μεγάλων μονάδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής.

3.2 Ρύθμιση Τάσης σε Σ.Η.Ε

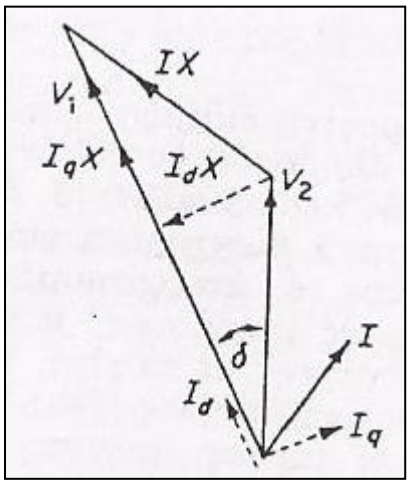
3.2.1 Εισαγωγή

Η προσεγγιστική σχέση μεταξύ της μονόμετρης διαφοράς τάσεως μεταξύ δύο κόμβων δικτύου και της ροής αέργου ισχύος, αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2 ότι είναι:

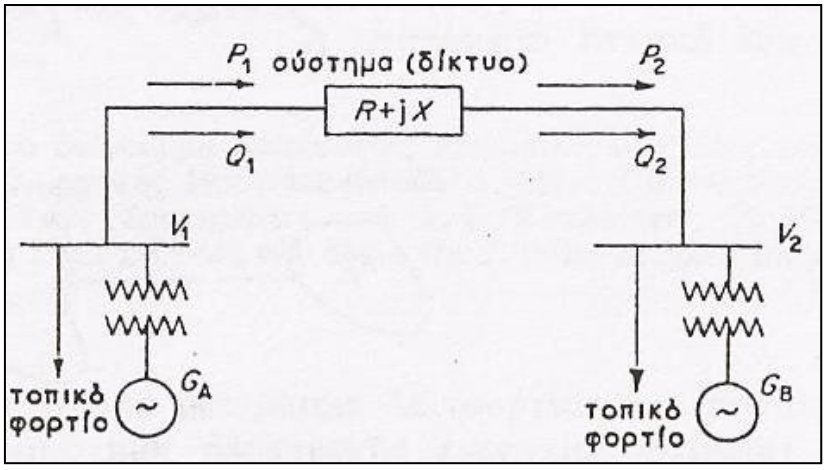
$$\Delta V = \frac{RP+XQ}{V} \qquad (3.1)$$

Επίσης αποδείχθηκε ότι η γωνία μεταφοράς είναι είναι ανάλογη του

$$\frac{XP_2-RQ_2}{V_2} \qquad (3.2)$$

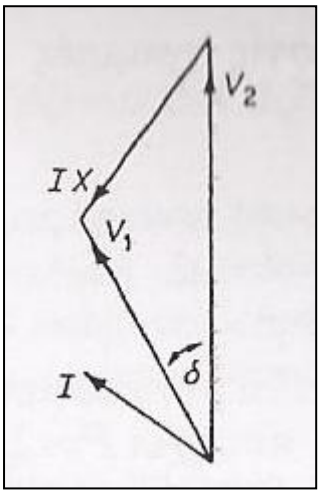


Σχήμα 3.1. Φασικό διάγραμμα για το σύστημα που φαίνεται στο Σχήμα 3.2, με $V_1>V_2$. Αντίσταση γραμμής μηδενική, επαγωγική αντίδραση X Ω. I_d και I_q είναι, αντίστοιχα, η συνιστώσα εν φάσει (προς V_1) και η ορθογώνιος του ρεύματος I.



Σχήμα 3.2 Δύο σταθμοί παραγωγής, συνδεόμενοι με μία γραμμή σύνθετης αντίστασης *(R+jX)*Ω. Ο δρομέας της Α προπορεύεται κατά φάση του δρομέα της Β, και $V_1>V_2$.

Για δίκτυα που X ≫ R, δηλ, τα περισσότερα κυκλώματα ισχύος (ηλεκτροδοτήσεως) η διαφορά τάσεως Δ καθορίζει το Q. Ας θεωρήσούμε την απλοποιημένη διασυνδετική γραμμή δυο σταθμών παραγωγής του Σχήματος 3.2. Η μηχανή στον Α προπορεύεται φασικά αυτής του Β, και το V_1 είναι μεγαλύτερο του V_2, άρα υπάρχει ροή ισχύος και αέργου ισχύος από το Α στο Β. Αυτό μπορούμε να το δούμε από το φασικό διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Βλέπούμε οτι το I_d , άρα και το P προσδιορίζεται από τη (γωνία) $\angle\delta$, και το I_q , άρα το *Q*, κυρίως από τη διαφορά V_1—V_2. Στην περίπτωση αυτή $V_1 > V_2$, και η άεργος ισχύς μεταφέρεται από το Α στο Β; αν μεταβάλλοντας τις διεγέρσεις της γεννήτριας έτσι που $V_2 > V_1$, η κατεύθυνση της αέργου ισχύος αντιστρέφεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα. 3.3. Άρα μπορεί η ισχύς να μεταφέρεται από το Α προς το Β ή από το Β προς το Α με κατάλληλο διακανονισμό του ποσού ατμού ή νερού που εισέρχεται στο στρόβιλο ανά δευτερόλεπτο, ενώ η άεργος ισχύς με διακανονισμό των μεγεθών των τάσεων.



Σχήμα 3.3. Φασικό διάγραμμα για το σύστημα του Σχήματος *3.2. $V_2 > V_1$.*

Οι δυο αυτές λειτουργίες είναι κατά προσέγγιση ανεξάρτητες η μία από την άλλη αν X ≫ R, και η ροή αέργου ισχύος μπορεί να μελετηθεί σχεδόν ανεξάρτητα από τη ροή ισχύος. Τα φασικά διαγράμματα δείχνουν ότι αν υπάρχει μία μονόμετρη διαφορά τάσεως κατά μήκος μίας διασυνδετικής γραμμής με επαγωγικό κυρίως χαρακτήρα, αυτή η άεργος ισχύς ρέει προς τον κόμβο της χαμηλότερης τάσεως.

Από μία άλλη άποψη, αν σ' ένα δίκτυο υπάρχει έλλειψη σε άεργο ισχύ σε ένα σημείο, η ισχύς πρέπει να παρέχεται από τις γραμμές που καταλήγουν σ' αυτό, άρα η τάση του ελαττώνεται. Και αντίστροφα, αν υπάρχει πλεόνασμα της αέργου ισχύος που παράγεται (π.χ. ελαφρώς φορτισμένα καλώδια απορροφούν χωρητικά ή «αρνητικά» VAr και άρα είναι σαν να παράγουν επαγωγικά ή «θετικά» VAr — κατά τη σύμβαση στον ορισμό θετικών-αρνητικών) Τότε θα ανυψωθεί η τάση. Αυτός είναι ένας εύχρηστος τρόπος να εκφράσούμε την επίδραση του συντελεστή ισχύος του μεταφερομένου ρεύματος, αν και μπορεί να φαίνεται παράξενος στην αρχή. Η συνήθεια όμως να μιλούμε με ροές των VAr αντί αποκλειστικά με συντελεστές

ισχύος και φασικά διαγράμματα, διευκολύνει πολύ τη μελέτη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Αν μπορεί να κανονιστεί το Q_2 στο σύστημα του Σχήματος 3.2 να είναι μηδέν, Τότε δεν θα υπάρχει πτώση τάσεως μεταξύ Α και Β, μία κατάσταση πολύ ικανοποιητική. Αν δεχθούμε ότι το Νι είναι σταθερό, ας σκεφθούμε το αποτέλεσμα του να τηρείται το V_2, και άρα η πτώση τάσεως ΔV σταθερή. Από την εξίσωση (2.6)

$$Q_2 = \frac{V_2 \Delta V - R P_2}{X} = K - \frac{R}{X} P_2 \qquad (3.3)$$

όπου το Κ είναι μία σταθερά.

Αν η τιμή αυτή του Q_2 δεν υπάρχει φυσιολογικά στο κυκλωμα, Τοτε θα πρέπει να ληφθεί με τεχνητά μέσα, όπως τη σύνδεση στο Β πυκνωτών ή επαγωγέων. Αν η τιμή της ισχύος μεταβληθεί από P_2 σε P_2^1 και το V_2 παραμένει σταθερό, Τοτε η άεργος ισχύς στο Β πρέπει να μεταβληθεί σε Q_2^1 ώστε

$$Q_2^1 - Q_2 = \frac{R}{X}(P_2^1 - P_2)$$

δηλ, μία αυξηση στην ισχύ προκαλεί μία αυξηση στην άεργο ισχύ. Η μεταβολή όμως είναι ανάλογη του *R/X,* που κανονικά είναι μικρό. Βλέπούμε ότι η τάση μπορεί να ρυθμίζεται με την εισαγωγή από τα έξω στο δίκτυο αέργου ισχύος του άρθου προσήμου. Άλλες μέθοδοι, ενός πιό φανερού είδους για να ρυθμίζουμε την τάση, είναι η χρήση μετασχηματιστών με πολλές λήψεις και μετασχηματιστών επαυξητικών της τάσεως.

3.2.2 Μέθοδοι ρυθμίσεως της τάσεως (i) – Εισαγωγή άεργου ισχύος

Το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μέθοδο αυτή δόθηκε σε προηγούμενες παραγράφους. Είναι η θεμελιωδέστερη μέθοδος, αλλά στα συστήματα μεταφοράς δεν έχει την ευκαμψία και οικονομία της αλλαγής λήψεως μετασχηματιστή. Άρα, χρησιμοποιείται μόνο σε διατάξεις όπου οι μετασχηματιστές μόνοι δεν επαρκουν. Η πρόβλεψη στατικών πυκνωτών για τη βελτίωση των συντελεστών ισχύος βιομηχανικών φορτίων έχει προ πολλου καθιερωθεί. Η χωρητικότητα που απαιτείται για τη βελτίωση του σνντελεστή ισχύος, με σκοπό τη βελτίστη οικονομία, προσδιορίζεται ως εξής:

Έστω ότι η επιβάρυνση ενός καταναλωτή είναι

£A x kVA + B x kWh

Φορτίο P_1 kW, σε συντελεστή ισχύος επαγωγικό φ_1, έχει τιμή $P1/\cos\varphi_1$ kVA. Αν αυτός ο συντελεστής ισχύος βελτιωθεί και γίνει $\cos\varphi_2$, τα νέα kVA θα είναι $P1/\cos\varphi_2$. Επομένως ή οικονομία θα είναι

$$£PιA\ (\frac{1}{cos\varphi_1} - \frac{1}{cos\varphi_2})$$

Η άεργος ισχύς που απατείται από τους διορθωτικούς πυκνωτές

$$= \text{P1 tan } \varphi\iota - P_1 \text{ tan } \varphi_2 \text{ kVAr}$$

Έστω το ετήσιο κόστος από τόκους και αποσβέσεις επί της εγκαταστάσεως πυκνωτών ότι είναι £ *C ανά* kVAr ή

$$£C(P_1 \text{ tan } \varphi_1 — P_1 \text{ tan } \varphi_2).$$

Η καθαρή οικονομία

$$= £[\ AP_1 \left(\frac{1}{cos\varphi_1} - \frac{1}{cos\varphi_2}\right) - CP_1(\ \text{tan } \varphi_1 — \text{ tan } \varphi_2)]$$

Η οικονομία αυτή είναι μεγίστη όταν

d (οικονομία)

$$\frac{d\ (οικονομία)}{d\varphi_2} = 0,$$

δηλ., όταν sin $\varphi_2 = C/A$.

Είναι ενδιαφέρον να σημειώσούμε ότι ο βέλτιστος συντελεστής ισχύος είναι ανεξάρτητος του αρχικού. Η βελτίωση των συντελεστών ισχύος του φορτίου κατά ένα τέτοιο τρόπο προφανώς θα ανακουφίσει το όλο πρόβλημα της ροής αέργου ισχύος στο σύστημα μεταφοράς.

Το κύριο αποτέλεσμα της μεταφοράς ισχύος σε συντελεστές ισχύος διάφορους της μονάδας είναι το εξής:

προφανές είναι από την εξίσωση (2.6) ότι η πτώση τάσεως προσδιορίζεται κατά το μεγαλύτερο μέρος από την άεργο ισχύ *(Q).* Τα ρεύματα της γραμμής είναι μεγαλύτερα όσο αυτή είναι μεγαλύτερη, και έτσι προκύπτουν αυξημένες θερμικές απώλειες I^2R άρα και ελαττωμένη θερμική ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Ένας από τους φανερούς τόπους που μπορεί και πρέπει να εισαχθεί άεργος ισχύς τεχνητά, είναι στα ίδια τα φορτία. Γενικά υπάρχουν τρεις μέθοδοι, δηλαδή η χρήση,

α) στατικών πυκνωτών διακλαδώσεως

β) στατικών πυκνωτών σειράς

γ) συγχρόνων αντισταθμιστών.

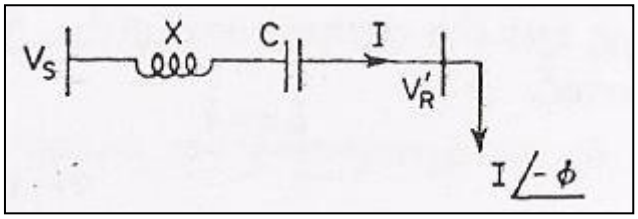
3.2.2.1 Πυκνωτές διακλαδώσεως και επαγωγείς(πηνία) διακλαδώσεως

Οι πυκνωτές διακλαδώσεως χρησιμοποιούνται για κυκλώματα με συντελεστή ισχύος επαγωγικό, ενώ οι επαγωγείς αντίστοιχα με χωρητικό, όπως στα καλώδια με ελαφρυ μόνο φορτίο. Και στις δυο περιπτώσεις, το αποτέλεσμα είναι να παρέχουν την απαιτούμενη άεργο ισχύ για να διατηρουνται οι τιμές της τάσεως.

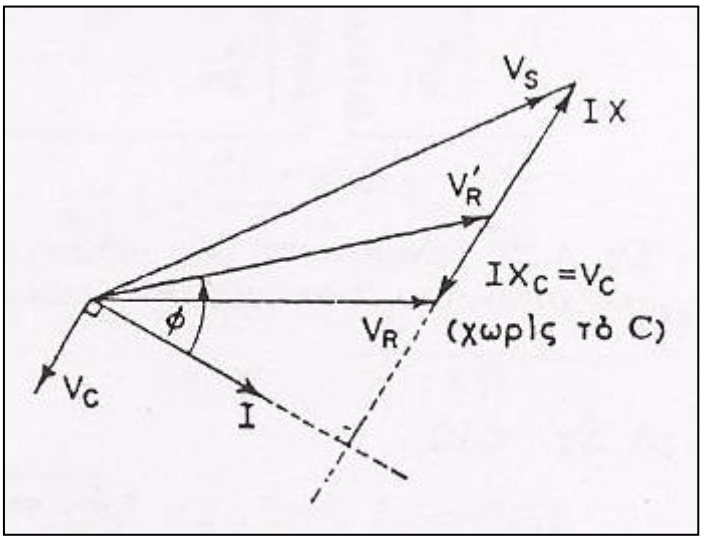
Οι πυκνωτές συνδέονται είτε κατευθείαν με έναν ζυγό ή στο τριτευον τυλιγμα ενός κυρίου μετασχηματιστή, και είναι κατανεμημένοι κατά μήκος της διαδρομής για να ελαχιστοποιοιουν τις απώλειες και τις πτώσεις τάσεως. Δυστυχώς, καθώς η τάση ελαττώνεται, τα VAr που παράγονται από τη διακλάδωση ενός πυκνωτή ή επαγωγέα ελαττώνονται, και έτσι η αποτελεσματικότητά τους είναι ελάχιστη εκεί που τα χρειαζόμαστε περισσότερο. Επίσης, σε ελαφρά φορτία, όταν η τάση είναι υψηλή, η έξοδος του πυκνωτή είναι μεγάλη και η τάση τείνει να αυξηθεί σε υπέρβολικές στάθμες.

3.2.2.2 Πνκνωτές σειράς

Συνδέονται εν σειρά με τους αγωγους της γραμμής και χρησιμοποιούν ται για να ελαττώσουν την επαγωγική αντίδραση μεταξυ του σημείου τροφοδοσίας και του φορτίου. Ενα σημαντικό μειονέκτημα είναι η υψηλή υπέρταση που παράγεται όταν ένα ρεύμα βραχυκυκλώσεως ρέει μέσω του πυκνωτή και είναι ενσωματωμένες ειδικές συσκευές προστασίας (π.χ. διάκενα αέρος). Το φασικό διάγραμμα για μία γραμμή με έναν πυκνωτή σειράς φαίνεται στο Σχήμα 3.4.β.



Σχήμα 3.4α. Η γραμμή με πυκνωτή σειράς.



Σχήμα 3.4.β. Φασικά διάγραμμα.

Τα σχετικά πλεονεκτήματα των παραλλήλων πυκνωτών απέναντι στους πυκνωτές σειράς συνοψίζονται στα εξής:

α) Αν είναι μικρή η απαίτηση VAr του φορτίου, δεν χρειάζονται πυκνωτές σειράς

β) Με πυκνωτές σειράς η ελάττωση στο ρεύμα γραμμής είναι μικρή, άρα αν θερμικοί περιορισμοί περιορίζουν το ρεύμα , προκυπτει ελάχιστη ωφέλεια και πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντιστάθμιση σειράς.

γ) Αν δ περιοριστικός παράγοντας είναι η πτώση τάσεως, οι πυκνωτές σειράς είναι αποτελεσματικοί. Επίσης εξομαλυνουν τις διακυμάνσεις τάσεως που οφείλονται σε ηλεκτρικές καμίνους (τόξου) κτλ.

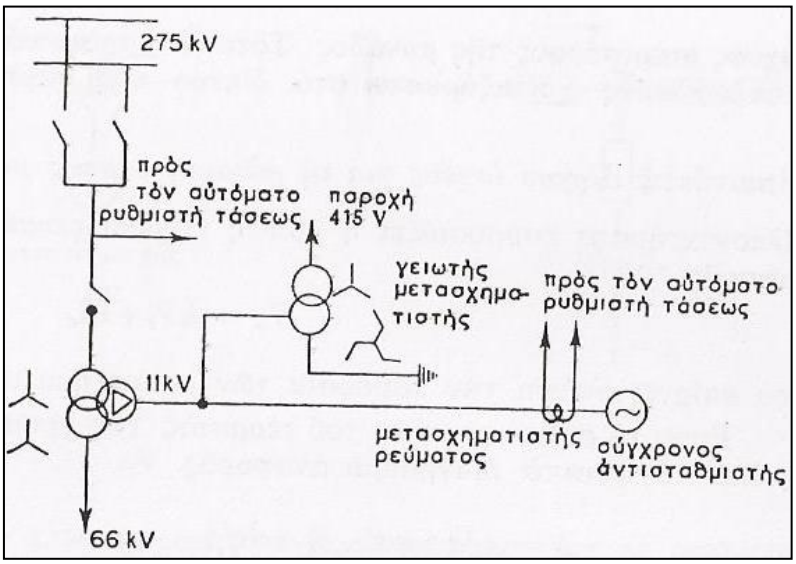
δ) Αν είναι υψηλή η συνολική αντίδραση της γραμμής, οι πυκνωτές σειράς είναι πολυ αποτελεσματικοί και βελτιώνεται η εϋστάθεια της γραμμής.

3.2.2.3 Σύγχρονοι αντισταθμιστές

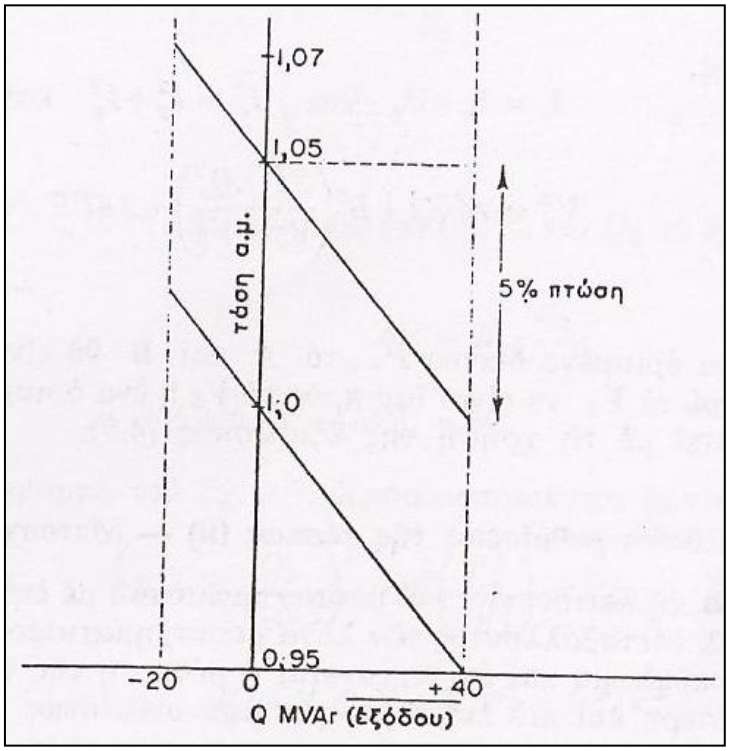
Ο συγχρονος αντισταθμιστής είναι ένας συγχρονος κινητήρας που στρέφεται χωρίς μηχανικό φορίο, και εξαρτάται από την τιμή διεγέρσεως αν θα απορροφά (καταναλίσκει) ή θα παράγει άεργο ισχύ. Επειδή οι απώλετες είναι σημαντικές συγκρινόμενες με του στατικού πυκνωτή, ο συντελεστής ισχύος δεν είναι μηδέν. Όταν χρησιμοποιείται με ένα ρυθμιστή τάσεως, ο αντισταθμιστής μπορεί αυτόματα να στρέφεται υπερδιεγειρόμενος, σε περιόδους υψηλου φορτίου, και υποδιεγειρόμενος, σε περιπτώσεις χαμηλού φορτίου.

Μία τυπική σύνδεση συγχρόνου αντισταθμιστου φαίνεται στο Σχήμα 3.5 και η σχετική χαρακτηριστική τάσεως-εξόδου VAr στο Σχήμα 3.6. Ο αντισταθμιστής τίθεται σε κίνηση σαν επαγωγικός κινητήρας σε 2,5 λεπτά, και μετά συγχρονίζεται.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι η ευκαμψία (προσαρμοστικότητα) λειτουργίας σε όλες τις καταστάσεις φορτίου. Αν και το κόστος τέτοιων εγκαταστάσεων είναι υψηλό, δικαιολογείται σε ορισμένες περιστάσεις, π.χ. στον ζυγό τέρματος μίας μακρας γραμμής υψηλής τάσεως, όπου δεν μπορεί να γίνει ανεκτή η μεταφορά σε συντελεστές ισχύος μικρότερους της μονάδος. Τότε θα χρησιμοποιούσαμε ότι στατικους πυκνωτές διακλαδώσεως χρειαζόμαστε στο δίκτυο της χαμηλότερης τάσεως.



Σχήμα 3.5. Τυπική εγκατάσταση με σύγχρονο αντισταθμιστή συνδεόμενο στο τριτεύον (τρίγωνο) τύλιγμα ένας κυρίου μετασχηματιστή. Παρέχεται ένα ουδέτερο σημείο από τον γειωτή-μετασχηματιστή που φαίνεται. Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως στον αντισταθμιστή ρυθμίζεται από ένα συνδυασμό της τάσεως στο σύστημα των 275 kV και της εξόδου του ρεύματος. Αυτό παρέχει μία πτώση στην καμπυλη τάσεως-εξόδου VAr, που μπορεί να μεταβάλλεται κατά βουληση.

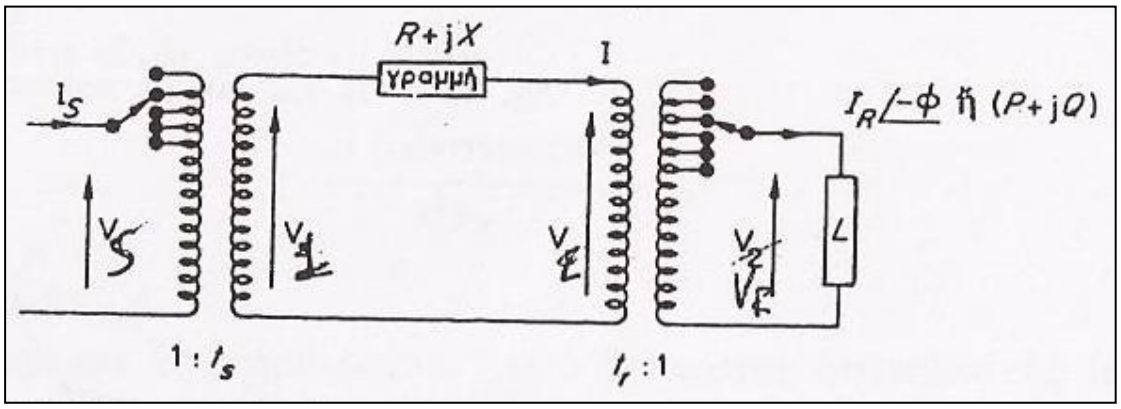


Σχήμα 3.6. Τάση-έξοδος αέργου ισχύος ένας τυπικού σύγχρονου αντισταθμιστή.

3.2.3 Μέθοδοι ρυθμίσεως της τάσεως (ii) — Μετασχηματιστές ενδιαμέσων λήψεων

Η βασική λειτουργία του μετασχηματιστή με ενδιάμεσες λήψεις έχει αναπτυχθεί στο Κεφ. 2. Μεταβάλλοντας τον λόγο μετασχηματισμού μεταβάλλεται η τάση στο δευτερευον κυκλωμα και επιτυγχάνεται η ρυθμιση της τάσεως. Αυτό αποτελεί την εξυπηρερετικότερη και πιο εκτεταμένη μορφή ρυθμίσεως τάσεως σε όλες τις στάθμες τάσεως.

Ας θεωρήσούμε την λειτουργία ενός ακτινικου συστήματος μεταφοράς με δυο μετασχηματιστές ενδιαμέσων λήψεων, όπως φαίνεται στο ισοδυναμο μονοφασικό κυκλωμα του Σχήμα 3.7. Τα t_s και t_r είναι κλάσματα των ονομαστικών λόγων μετασχηματισμού, δηλ. ο λόγος λήψεως/ονομαστικού λόγου. Π.χ. ένας μετασχηματιστής ονομαστικού λόγου 6,6 kV προς 33 kV, στη λήψη λόγου 6,6 kV προς 36 kV έχει $t_s = 36/33 = 1{,}09$. Τα V_1 και V_2 είναι ονομαστικές τάσεις στα άκρα των γραμμών και οι πραγματικές τάσεις είναι t_sV_1 και t_rV_2. Ζητείται να προσδιοριστουν οι λόγοι μεταβολής λήψεως που χρειάζονται για να αντισταθμιστεί πλήρως η πτώση τάσεως της γραμμής. Το γινόμενο $t_s\, t_r$ θα καταστεί μονάδα. Αυτό εξασφαλίζει οτι η συνολική στάθμη τάσεως παραμένει της ίδιας τάξεως και ότι χρησιμοποιείται η ελάχιστη περιοχή λήψεων και στους δύο μετασχηματιστές.



Σχήμα 3.7. Συνεργασία δυο μετασχηματιστών ενδιαμέσων λήψεων σε ένα συνδεσμο (διασυνδετική γραμμή) ακτινικής μεταφοράς (ισχύος).

Από το Σχήμα 3.7,

$$t_sV_1 = t_rV_2 + IZ$$

Με τη χρήση της εξίσωσης (2.6),

$$IZ \doteq \Delta V = \frac{RP + XQ}{t_rV_2}$$

Άρα, προσεγγιστικά, $t_sV_1 = \Delta V = t_rV_2 + \frac{RP+XQ}{t_rV_2}$

Αλλά, αφού t_s, $t_r = 1$,

$$t_s = \frac{1}{V_1}\left(\frac{1}{t_s}V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2/t_s}\right)$$

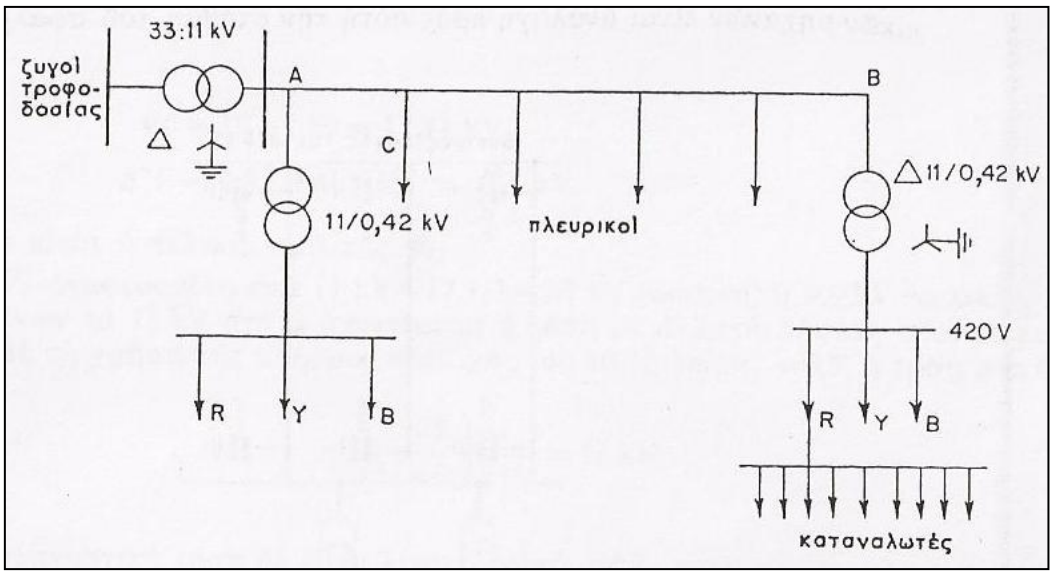
Άρα $$t_s^2 = \frac{V_2}{V_1} + \frac{RP+XQ}{V_1 V_2} \cdot t_s^2$$

και $$t_s^2\left(1 - \frac{RP+XQ}{V_1 V_2}\right) = \frac{V_2}{V_1} \qquad (3.4)$$

Για πλήρη αντιστάθμιση της πτώσεως τάσεως της γραμμής $V_1 = V_2$.

3.2.4 Ρύθμιση τάσεως σε δίκτυα διανομής

Από τους τριφασικούς τροφοδοτικούς ζυγούς διοχετεύονται μονοφασικές παροχές προς κατοικίες και άλλους μικρούς καταναλωτές. Αν και γίνονται προσπάθειες για να κατανεμηθεί το φορτίο εξίσου στις τρεις φάσεις, τα φορτία δεν εφαρμόζονται ταυτόχρονα και παρατηρείται ορισμένη ασυμμετρία.



Σχήμα 3.8. Γραμμικό διάγραμμα μιας τυπικής ακτινικής διατάξεως διανομής.

Στο δίκτυο διανομής (Βρετανική πράξη) που φαίνεται στο Σχήμα 3.8 ένας διανομέας 11 kV τροφοδοτεί έναν αριθμό πλευρικών τροφοδοτών στους οποίους η τάση είναι 420 V και μετά η κάθε φάση αναλαμβάνει φορτίο χωριστά (δηλ. a,b,c).

Ο αντικειμενικός σκοπός της μελέτης είναι εδώ να διατηρηθεί η ονομαστική παροχή 415 V των καταναλωτών μέσα στα όρια ±6 % του καταστατικου για την δηλουμένη τάση (δηλ. τα νόμιμα όρια διακυμάνσεως της τάσεως). Ο κυριος 33/1 1 kV μετασχηματιστής, παρέχει μία ανυψωση τάσεως 5 % από την κατάσταση χωρίς φορτίο μέχρι το πλήρες φορτίο. Οι μετασχηματιστές διανομής έχουν σταθερές λήψεις και φασική τάση δευτερευοντος 250 V, που είναι 4 % ανώτερη από την ονομαστική τιμή των 240 V.

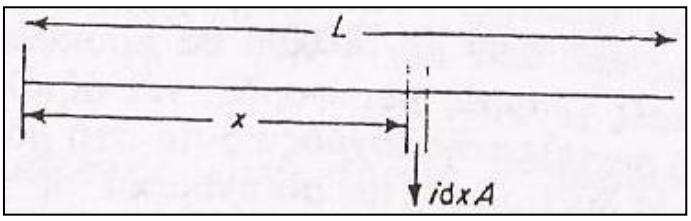
Η ακόλουθη κατανομή πτώσεων τάσεως παρουσιάζεται σαν τυπική: κύριος διανομέας 6 %, μετασχηματιστής (των 11/0,42 kV) 3 %, κύκλωμα (των 420 V) 7 %, κύκλωμα καταναλωτών 1,5 %, δίνοντας ένα συνολο 17,5 %.

Για να αντισταθμιστούν αυτές οι πτώσεις τάσεως χρησιμοποιούν ται διάφορες επαυξήσεις τάσεως ως εξής: κύριος μετασχηματιστής, + 5 % (μηδέν για ελαφρύ φορτίο) μετασχηματιστής διανομής, εγγενής επαύξηση +4 % (δηλ, δευτερεύον 250 V) συν μία σταθερή επαύξηση 2,5 %. Όλα αυτά αν προστεθούν δίνουν μία συνολική επαύξηση υπό πλήρες φορτίο και 6,5 % υπό ελαφρύ φορτίο. Άρα η τάση των καταναλωτών κυμαίνεται μεταξυ (—17,5 % + 11,5), δηλ. —6 % και 6,5 —1,5, δηλ. + 5 %, που είναι η μόλις επιτρεπόμενη.

Θα υπάρχει επίσης και διαφορά στην τάση καταναλωτή που θα εξαρτηθεί από τη θέση του πλευρικου τροφοδότη επάνω στον κυριο διανομέα. Έτσι, π.χ., ένας καταναλωτής που τροφοδοτείται από το C θα έχει ανώτερη τάση από έναν που τροφοδοτείται από το B.

Τροφοδότης διανομής ομοιόμορφα φορτισμένος. Σε περιοχές όπως μικρές πόλεις με μεγάλες πυκνότητες φορτίου, γίνεται ένας μεγάλος αριθμός λήψεων από τους τροδότες και μπορούμε να θεωρήσούμε ότι υπάρχει ομοιόμορφο φορτίο κατά μήκος του τροφοδότη.

Ας θεωρήσούμε το φορτίο που παραλαμβάνεται από ένα μήκος d_x του τροφοδότη που απέχει από το άκρο παροχής (αρχή) του τροφοδότη απόσταση x σε μέτρα. Ας είναι *iA* το ρεύμα που παραλαμβάνεται ανά μονάδα μήκους και *r* και x η αντίσταση και αντίδραση αντιστοίχως ανά φάση και ανά μονάδα μήκους.



Σχήμα 3.9. Ομοιόμορφα φορτισμένος τροφοδότης διανομής.

Η διαφορική πτώση τάσεως στο σημείο x, είναι *rix dx* cosθ + *x ixdx* sinθ, όπου cosθ είναι ο συντελεστής ισχύος του ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου.

Η συνολική λοιπόν πτώση της τάσεως στο μήκος x είναι

$$= r\int_0^L ixdxcos\theta + x\int_0^L ixdxsin\theta$$

$$= ri\frac{L^2}{2}cos\theta + xi\frac{L^2}{2}sin\theta$$

$$= \frac{Lr}{2} Icos\theta + \frac{Lx}{2} Isin\theta$$

Όπου I=Li το συνολικό ρεύμα φορτίου. Άρα το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο μπορεί να παριστάνεται από το συνολικό φορτίο λαμβανόμενο στο μέσο του μήκους του τροφοδότη.

3.3 Ρύθμιση συχνότητας σε Σ.Η.Ε.

3.3.1 Εισαγωγή

Διακρίνούμε δύο τρόπους με τους οποίους γίνεται η διανομή του φορτίου:

- Αρχικά οι μονάδες μοιράζονται μεταξύ τους τις μεταβολές τον φορτίου μεταβάλλοντας την παραγωγή τους κατά ποσότητες αντιστρόφως ανάλογες του στατισμού των ρυθμιστών τους. Η ρύθμιση αυτή αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας.

- Στη συνέχεια, το μόνιμο σφάλμα συχνότητας μπορεί να διορθωθεί και το φορτίο να ανακατανεμηθεί μετακινώντας παράλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου-συχνότητας των μονάδων μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών των ρυθμιστών στροφών.

Το πρώτο είδος ρύθμισης ονομάζεται *πρωτεύουσα ρύθμιση,* ενώ το δεύτερο αποτελεί τη *δευτερεύουσα ρύθμιση,* η οποία σε ένα συστημα ηλεκτρικής ενέργειας με πολλές μηχανές ονομάζεται επίσης *ρύθμιση φορτίου-συχνότητας* του συστήματος. Η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας έχει στόχο να εναρμονίσει την παραγωγή με το φορτίο ενός συτήματος ηλεκτρικής ενέργειας που είναι είτε αυτόνομο, είτε διασυνδεδεμένο με άλλα συστήματα μέσω μιας ή και περισσοτέρων διασυνδετικών γραμμών.

3.3.2 Τύποι ρύθμισης φορτίου - συχνότητας

'Οταν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει εξωτερική διασύνδεση, τότε μια μεταβολή φορτίού ΔP καλύπτεται εν μέρει από την πρωτεύουσα ρύθμιση και την αυτορρύθμιση τον φορτίου, και κατά το υπόλοιπο μέρος από την αύξηση της εισαγόμενης ισχύος ΔP_1 . Στην περίπτωση του διασυνδεδεμένου συστήματος έχούμε:

$$\Delta P = — C\Delta f + \Delta P_t \qquad (3.5)$$

Ανάλογα με τα ελεγχόμενα μεγέθη διακρίνονται τρεις τύποι ρύθμισης φορτίου-συχνότητας στα συστήματα με εξωτερική διασύνδεση: *Ο επίπεδος* έλεγχος *συχνότητας* (flat frequency control), ο *επίπεδος έλεγχος διασύνδεσης* (flat tie - line control), και ο σύνθετος έλεγχος με *συντελεστή πολώσεως* (biased frequency tie - line control).

'Οταν εφαρμόζεται ο επίπεδος έλεγχος συχνότητας, ρυθμίζεται μόνο η συχνότητα του συστήματος, ενώ δεν ελέγχεται η διασυνδετική ροή. Αυτό το είδος ελέγχου εφαρμόζεται στα αυτόνομα συστήματα, ενώ έχει εφαρμογή και σε χαλαρά διασυνδεδεμένα συστήματα, η εξωτερική διασύνδεση των οποίων είναι μικρής

ισχύος. Αντίθετα, σε στενά διασυνδεδεμένα συστήματα η ροή ισχύος στη διασυνδετική γραμμή πρέπει να ελέγχεται συνεχώς.

Με τον επίπεδο έλεγχο διασυνδέσεως ρυθμίζεται μόνο η ροή της εξωτερικής διασύνδεσης. Η παραγόμενη ισχύς αναπροσαρμόζεται έτσι ώστε να παραμένει σταθερή η ανταλλαγή ισχύος με το εξωτερικό σύστημα, ανεξάρτητα από τις μεταβολές φορτίου στο ένα ή και στα δύο συστήματα. Αυτός ο τύπος ελέγχου έχει εφαρμογή σε συστήματα που είναι συνδεδεμένα με πολύ μεγαλύτερά τους. Το μεγάλο σύστημα σ' αυτή την περίπτωση αναλαμβάνει ουσιαστικά να κρατά τη συχνότητα σταθερή.

Ο έλεγχος με συντελεστή πολώσεως είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ρύθμισης φορτίου-συχνότητας για τα συστήματα με εξωτερική διασύνδεση. Εδώ έχούμε δύο μετρήσεις, τόσο της συχνότητας όσο και της διασυνδετικής ροής, οι οποίες συντίθενται στο σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ):

$$\Sigma\Epsilon\Pi = \Delta P_t - B\Delta f \qquad (3.6)$$

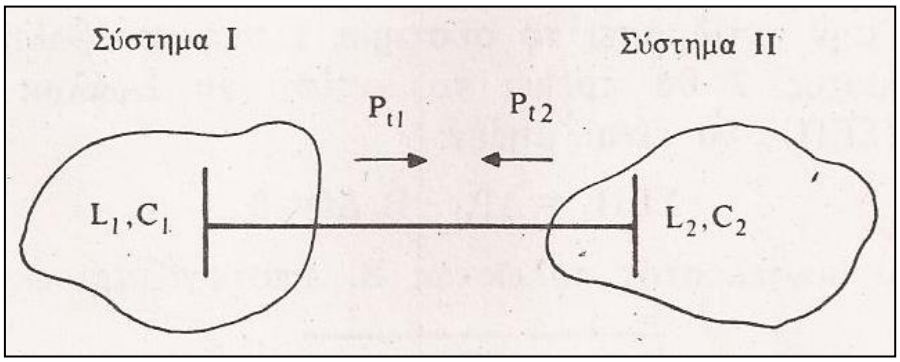
όπου με Β συμβολίζεται ο *συντελεστής πολώσεως* του σφάλματος της συχνότητας.

'Οταν ο συντελεστής πολώσεως είναι ίσος με τη χαρακτηριστική C του συστήματος στο οποίο αναφέρεται, το σφάλμα ελέγχου περιοχής παίρνει την τιμή της μεταβολής φορτίου ΔP στο σύστημα, όπως φαίνεται από την (3.5). Στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας ενεργοποιείται μόνο για μεταβολές που συμβαίνουν στο εσωτερικό του συστήματος, ενώ παραμένει αδρανής στις εξωτερικές μεταβολές φορτίου. Η τελευταία ιδιότητα είναι εξαιρετικά σημαντική για δύο λόγους:

- Κάθε σύστημα αναλαμβάνει σε τελική ανάλυση το δικό τον φορτίο, κάτι που είναι επιθυμητό στα διασυνδεδεμένα συστήματα, και

- Στη μεταβατική περίοδο μετά από μια σοβαρή διαταραχή στο ένα σύστημα, το άλλο συνεχίζει να το ενισχύει μέσω της διασυνδετικής ροής μέχρι να μπορέσει το πρώτο σύστημα να αναλάβει όλο το φορτίο πού τον αναλογεί.

Αυτό φαίνεται από το παράδειγμα του σχήματος 3.10, όπου υπάρχουν τα διασυνδεδεμένα συστήματα Ι και ΙΙ με φορτία L_1, και L_2 και ρυθμίζουσες ενέργειες C_1, και C_2 (MW/Hz) αντίστοιχα. Η ροή στη διασύνδεση συμβολίζεται με P_{t1} και P_{t2} στα αντίστοιχα άκρα των δύο συστημάτων.



Σχήμα 3.10. Διασύνδεση δύο συστημάτων

Μια αύξηση τον φορτίου ΔL_2 στο σύστημα ΙΙ θα καλυφθεί κατά ένα μέρος από τη ροή της διασύνδεσης (μείωση της ροής P_{12}) και κατά το υπόλοιπο μέρος από τη πτώση της κοινής συχνότητας των δύο συστημάτων (τα μεταβατικά φαινόμενα αμελούνται). Μετά από αρκετό χρονικό διάστημα θα φτάσούμε στη μόνιμη κατάσταση των δύο συστημάτων, οπότε θα ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

Για το σύστημα ΙΙ:

$$\Delta L_2 = \Delta P_{t2} - C_2 \Delta f \quad (3.7)$$

Για το σύστημα Ι:

$$\Delta L_1 = 0 = \Delta P_{t1} - C_1 \Delta f \quad (3.8)$$

και:

$$\Delta P_{t1} = -\Delta P_{t2} = -\Delta P_t \quad (3.9)$$

όπου με το σύμβολο Δ συμβολίζονται τα *σφάλματα ή οι αποκλίσεις* από τις ονομαστικές τιμές f_0 , P_{t1o} και P_{t2o} της συχνότητας και των ροών στα δύο άκρα της διασυνδέσεως αντίστοιχα. Είναι δηλαδή:

$$\Delta f = f - f_0$$

$$\Delta P_{t1} = P_{t1o} - P_{t1} \quad (3.10)$$

$$\Delta P_{t2} = P_{t2o} - P_{t2}$$

Από τις εξισώσεις (3.7) έως (3.9) προκύπτουν τελικά:

$$\Delta f = \frac{-\Delta L_2}{C_1 + C_2} \quad (3.11)$$

$$\Delta P_t = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \Delta L_2 \quad (3.12)$$

Για να μην αντιδράσει το σύστημα 1 στη μεταβολή φορτίου του συστήματος 2 θα πρέπει το αντίστοιχο Σφάλμα Ελέγχου Περιοχής (ΣΕΠ1) να είναι μηδέν:

$$\Sigma\text{ΕΠ}_1 = \Delta P_{t1} — B_1\,\Delta E = 0 \qquad (3.13)$$

απ' όπου ο συντελεστής πολώσεως B_1 υπολογίζεται ως:

$$B_1 = \frac{\Delta P_{t1}}{\Delta f} = C_1 \qquad (3.14)$$

Αντίστοιχα στο σύστημα 2 το ΣΕΠ πρέπει να είναι ίσο με την πραγματική μεταβολή του φορτίού ΔL_2:

$$\Sigma\text{ΕΠ}_2 = \Delta P_{t2} — B_2\Delta f = \Delta L_2 \qquad (3.15)$$

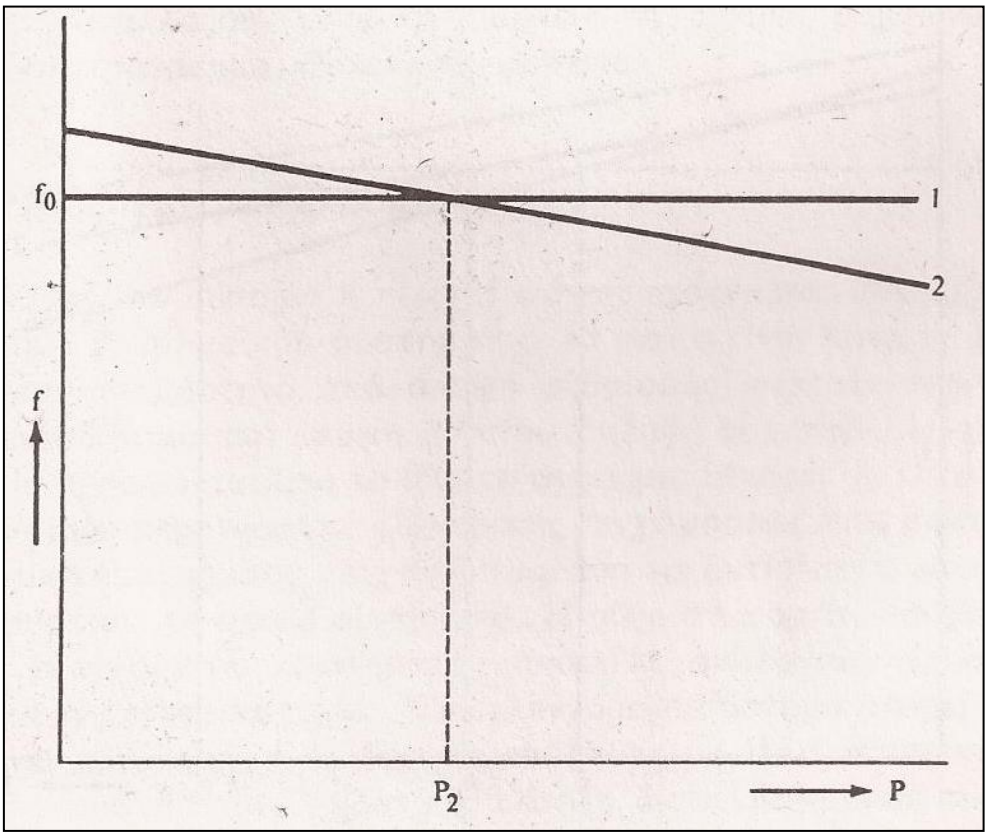
απ όπου υπολογίζεται:

$$B_2 = C_2 \qquad (3.16)$$

Από τις εξισώσεις (3.14) και (3.16) προκύπτει ότι στην ιδανική περίπτωση που κάθε περιοχή ρυθμίζει. μόνο το φορτίο της, ο συντελεστής πολώσεως πρέπει να είναι ίσος με τη ρυθμίζουσα ενέργεια του συστήματος.

3.3.3 Επίπεδος έλεγχος συχνότητας

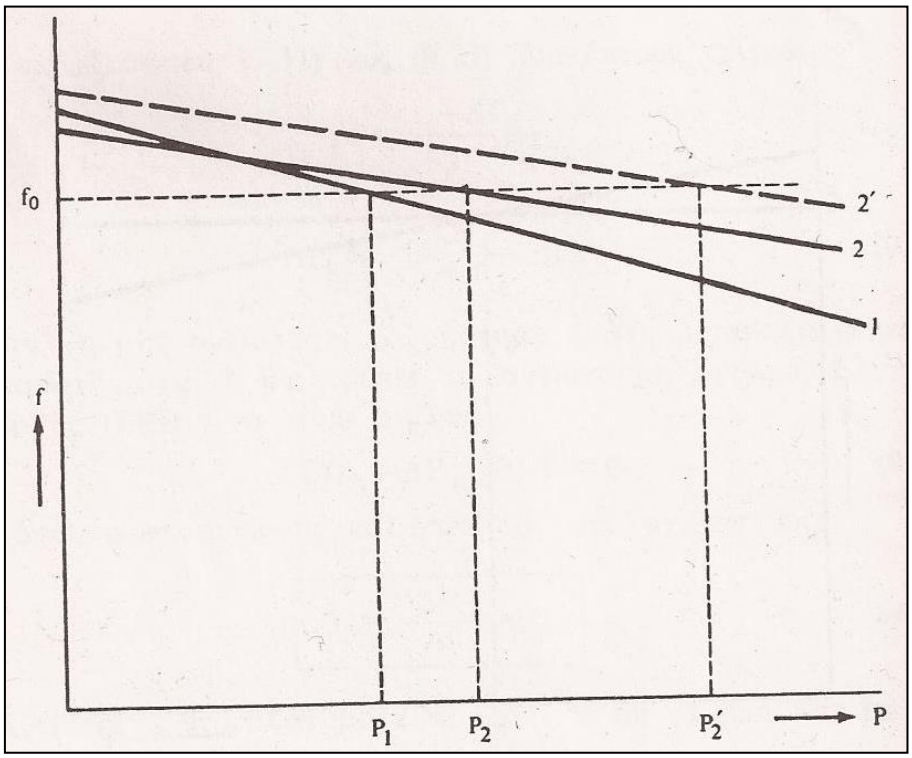
Στην περίπτωση της παράλληλης λειτουργίας δύο γεννητριών. είδαμε ό,τι η κατανομή του φορτίου εξαρτάται από το στατισμό και τη θέση των χαρακτηριστικών των δύο μονάδων. Επανερχόμενοι στο θέμα αυτό ας εξετάσουμε την περίπτωση δύο γεννητριών από τις οποίες η μία, έστω η 1, έχει μηδενικό στατισμό (Σχήμα 3.11). Επειδή η μηχανή αυτή μπορεί να λειτουργεί συνεχώς μόνο με συχνότητα f_o



Σχήμα 3.11. Παράλληλη λειτουργία δύο γεννητριών, η μία από τις οποίες έχει μηδενικό στατισμό

(π.χ. 50Hz) θα κρατήσει τις στροφές και των δύο μονάδων συνέχεια στην τιμή αυτή. Η μονάδα 2 όμως στις στροφές αυτές μπορεί να παράγει μόνο μια ορισμένη ισχύ, P_2. Συνεπώς η μονάδα με το μηδενικό στατισμό θα απορροφά όλες τις διακυμάνσεις του φορτίου ενώ η μονάδα με την κεκλιμένη χαρακτηριστική θα λειτουργεί συνεχώς με ένα σταθερό φορτίο *βάσεως*. Αυτό αποτελεί μια θεμελιώδη αρχή της ρυθμίσεως φορτίου-συχνότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία καλύπτει και τη δευτερεύουσα ρύθμιση που είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συχνότητας όταν και οι δύο μηχανές έχουν στατισμό.

Στην πράξη συνήθως όλες οι μηχανές έχουν στατισμό, οπότε η κατανομή τον φορτίου και η ρύθμιση της συχνότητας μπορεί να γίνει είτε με ρύθμιση και των δύο χαρακτηριστικών, ή με τη ρύθμιση της μίας μόνο μηχανής. Στην τελευταία περίπτωση η μία μονάδα, η *ρυθμίζουσα μονάδα* είναι υπεύθυνη για την τήρηση της συχνότητας σταθερής ενώ η άλλη μονάδα διατηρεί σταθερό το φορτίο της. Στο Σχήμα 3.12 το ρόλο της ρυθμιζούσας μονάδας έχει η μονάδα 2. 'Εστω



Σχήμα 3.12. Τήρηση σταθερής συχνότητας με ρύθμιση μόνο της μονάδας 2. (επίπεδος έλεγχος συχνότητας)

ότι σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας οι μονάδες έχουν φορτία P_1 και P_2 , υπό συχνότητα f_o. Εάν παρουσιαστεί μία αύξηση φορτίου η ρυθμίζουσα μονάδα θα ανεβάσει τη χαρακτηριστική της στη θέση 2' παίρνοντας όλη την αύξηση φορτίου, $\Delta P = P'_2 - P_2$. Κατ' αυτό τον τρόπο το σύστημα θα φέρει το νέο συνολικό φορτίο $P_1+P'_2$ με την κανονική συχνότητα f_o, ενώ η μονάδα 1 διατηρεί το ίδιο φορτίο P_1. Η ρυθμίζουσα μονάδα απορροφά ή αποδίδει κάθε μεταβολή του συνολικού φορτίου.

Στο είδος αυτό της ρυθμίσεως βασίζεται η κλασική μέθοδος ρυθμίσεως, ο επίπεδος έλεγχος συχνότητας. Είναι γενική πρακτική όλες οι μηχανές να έχουν κεκλιμένες χαρακτηριστικές, επειδή οι χαρακτηριστικές αυτές κάνουν την κατανομή του φορτίου στις μηχανές συγκεκριμένη και συμβάλλουν στην ευστάθεια του συστήματος ελέγχου. Κατά τον επίπεδο έλεγχο της συχνότητας μία μονάδα ορίζεται ως ρυθμίζουσα μηχανή και παίρνει όλες τις μεταβολές του φορτίου του συστήματος διατηρώντας τη συχνότητα και τα φορτία των άλλων μηχανών σταθερά. Οι άλλες μονάδες συνεπώς λειτουργούν ως μονάδες βάσεως. Εν τούτοις όμως, οι ημερήσιες μεταβολές τον φορτίου είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες από την ισχύ της ρυθμίζουσας μηχανής και επομένως τα φορτία των μηχανών βάσεως πρέπει να αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας σύμφωνα με το σχετικό πρόγραμμα κατανομής φορτίου.

3.3.4 Μοντέλο ρυθμίσεως φορτίου-συχνότητας διασυνδεδεμένου συστήματος

Με την εισαγωγή τη Η η εξίσωση

$$\Delta\bar{P}_{\Gamma} - \Delta\bar{P}_{\varphi} - \frac{2H}{f_N}\frac{d\Delta f}{dt} - \bar{D}\Delta f - 2\pi\sum_{k=1}^{n}\bar{P}_{mk}cos\delta_{\sigma k}(\int \Delta f dt - \int \Delta f_k dt) = 0 \quad (3.17)$$

Θεωρώντας τις μεταβολές της ισχύος και της συχνότητας μεταβλητές τον χρόνου παίρνούμε τους μετασχηματισμούς Laplace της (3.17) και έχούμε:

$$\Delta P_{\Gamma}(s) - \Delta P_{\varphi}(s) - \Delta P_{\sigma}(s) = \frac{2H}{f_N}s\Delta F(s) + D\Delta F(s) \quad (3.18)$$

Όπου:

$$\Delta P_{\sigma}(s) = \frac{2\pi}{s}\sum_{k=1}^{n}\bar{P}_{mk}cos\delta_{\sigma k}[\Delta F(s) - \Delta F_k(s)] \quad (3.19)$$

Η εμφάνιση του όρου $\Delta P_{\sigma}(s)$ στην (3.18) έγινε αφενός για να έχει η εξίσωση εποπτικότερη μορφή —όρους από ισχείς και συχνότητες— και αφετέρου διότι διευκολύνεται η σχηματική παράσταση του συστήματος. Στο μετασχηματισμό (3.19) ο όρος $cos\delta_{\sigma\kappa}$ έχει χρησιμοποιηθεί ως σταθερός, με την παραδοχή ότι το συνημίτονο είναι αναίσθητο στις μικρές μεταβολές μικρών γωνιών.

Η (3.18) γράφεται ακόμη:

$$[\Delta P_{\Gamma}(s) - \Delta P_{\varphi}(s) - \Delta P_{\sigma}(s)]G_{\varepsilon}(s) = \Delta F(s) \quad (3.20)$$

όπου η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ορίζεται ως:

$$G_{\varepsilon}(s) = \frac{K_{\varepsilon}}{1+sT_{\varepsilon}} \quad (3.21)$$

Με κέρδος K_{ε} (σε Hz/αμMW):

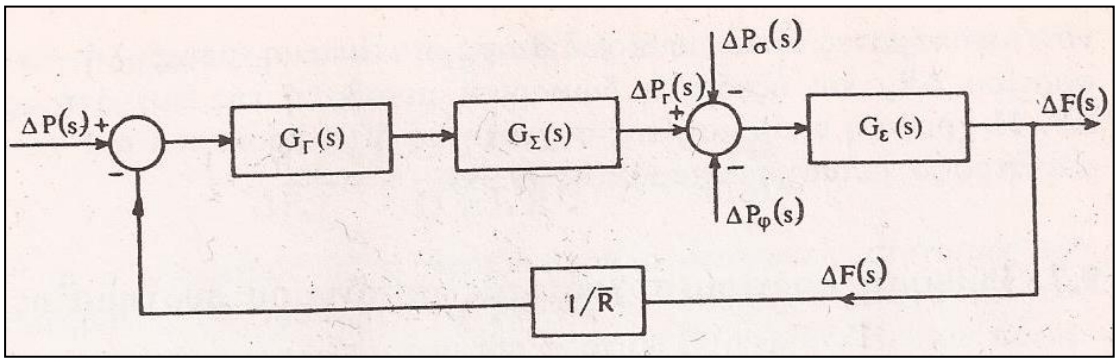
$$K_{\varepsilon} = \frac{1}{\bar{D}} \quad (3.22)$$

Και χρονική σταθερά (σε sec):

$$T_{\varepsilon} = \frac{2H}{f_N\bar{D}} \quad (3.23)$$

Παρατηρούμε ότι και οι δύο παράμετροι της συναρτήσεως μεταφοράς είναι αντιστρόφως ανάλογοι του συντελεστή αυτορρυθμίσεως.

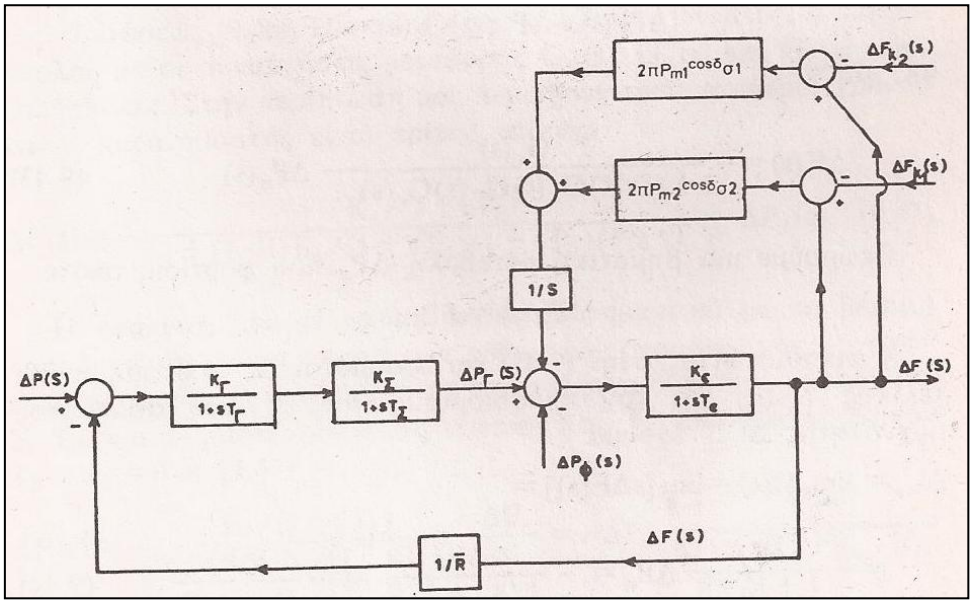
Με βάση τη συνάρτηση μεταφοράς (3.21) μπορούμε να σχεδιάσούμε το διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 3.13, το οποίο περιγράφει τη ρύθμιση φορτίου συχνότητας μιας περιοχής ελέγχου ή ενός συστήματος.



Σχήμα 3.13. Σχηματική διάταξη κατά βαθμίδες της ρυθμίσεως φορτίου-συχνότητας ελεγχόμενου συστήματος

Οι βαθμίδες $G_Γ(s)$ και $G_Σ$ (s) αντιστοιχούν στις συναρτήσεις μεταφοράς των ρυθμιστών στροφών και των στροβίλων τον συστήματος Α. Η είσοδος ΔP εκφράζει τη συχνότητα αναφοράς εκφρασμένη σε ισχύ (MW), ενώ η ανάδραση $1/\bar{R}$ εκφράζει το αντίστροφο του συνολικού στατισμού του συστήματος σε ανά μονάδα ισχύ προς Hz (αμMW/Hz).

Ας θεωρήσούμε ότι η περιοχή ελέγχου που εξετάζούμε αποτελείται από όμοιες ατμοηλεκτρικές μονάδες μιας βαθμίδας με σταθερές χρόνου του ρυθμιστή στροφών $T_Γ$ και του στροβίλου $T_Σ$, τότε προκύπτει το διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 3.13. Στο Σχήμα 3.14 έχουν προστεθεί και οι βαθμίδες δύο διασυνδετικών γραμμών με τα συστήματα 1 και 2, οπότε έχούμε την πλήρη διάταξη του ελεγχόμενου συστήματος, στο οποίο διαταραχή είναι η μεταβολή τον φορτίου ΔP και έξοδος η διαφορική μεταβολή της συχνότητας ΔΕ. Η χρονική απόκριση της συχνότητας Δf(t) προκύπτει από τον αντίστροφο μετασχηματισμό της (3.20).



Σχήμα 3.14. Πλήρης σχηματική διάταξη ρυθμίσεως φορτίου-συχνότητας

3.4 Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας αυτόνομου συστήματος

Αυτόνομο ελεγχόμενο σύστημα είναι ένα ελεγχόμενο σύστημα χωρίς διασυνδέσεις και η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί την απλούστερη περίπτωση ελέγχου. Σχηματική διάταξη ελέγχου ενός αυτόνομου συστήματος μπορεί να θεωρηθεί εκείνη του Σχήματος 3.13, με ΔP_σ = Ο. Θεωρούμε χωριστά, πρωτεύουσα ρύθμιση μόνο, και πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση μαζί.

3.4.1 Πρωτεύουσα ρύθμιση

Στην περίπτωση αυτή είναι ΔP =0, δηλαδή η λειτουργία τον μηχανισμού αλλαγής στροφών δεν περιλαμβάνεται στην αυτόματη ρύθμιση συχνότητας. Από το Σχήμα 3.13 προκύπτει τότε:

$$\Delta P_\Gamma(s) = G_\Gamma(s)G_\Sigma(s)\left[-\frac{1}{R}\Delta F(s)\right]$$

$$\left[\Delta P_\Gamma(s) - \Delta P_\varphi(s)\right]G_\varepsilon(s) = \Delta F(s)$$

απ' όπου:

$$\Delta F(s) = -\frac{G_\varepsilon(s)}{1+(1/R)G_\Sigma(s)G_\Gamma(s)G_\varepsilon(s)}\Delta P_\varphi(s) \qquad (3.24)$$

Θεωρούμε μια βηματική μεταβολή ΔP, τον φορτίου, οπότε: $\Delta P_\varphi(s) = \Delta P_\varphi/s$.

Αντικαθιστώντας στην (3.24) και εφαρμόζοντας το θεώρημα της τελικής τιμής, για τον προσδιορισμό τον μόνιμου σφάλματος συχνότητας $\Delta f_{\sigma\varphi}$, έχουμε:

$$\Delta f_{\sigma\varphi} = \lim_{t\to\infty}\Delta f(t) = \lim_{t\to 0}[s\Delta F(s)] = -\frac{K_\varepsilon}{1+K_\varepsilon/R}\Delta P_\varphi = -\frac{\Delta P_\varphi}{1/K_\varepsilon + 1/R}$$

$$= -\frac{\Delta P_\varphi}{D-1/R} \qquad (3.25)$$

Το μόνιμο σφάλμα συχνότητας $\Delta f_{\sigma\varphi}$ είναι η μεταβολή της συχνότητας που προκάλεσε η μεταβολή φορτίου ΔP και συνεπώς ο λόγος,

$$\frac{\Delta f_{\sigma\varphi}}{\Delta P_\varphi} = -\frac{1}{D+1/R} = R'_\delta \quad \frac{Hz}{\alpha\mu MW} \qquad (3.26)$$

είναι ο στατισμός R'_δ ή ακριβέστερα *ο διαφορικός στατισμός* του συτήματος σε ημιανηγμένη μορφή, ο οποίος περιέχει και τον συντελεστή αυτορρυθμίσεως του φορτίου D (αμMW/Hz) και επομένως η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας στην περίπτωση αυτή είναι μικτή, δηλαδή περιλαμβάνει και την επίδραση των φορτίων. Ο διαφορικός στατισμός είναι προφανώς το αντίστροφο της ρυθμίζούσας ενέργειας C

τον συστήματος αν αυτή μετρηθεί σε αμ MW/Hz. Εάν αγνοηθεί η αυτορρύθμιση, δηλαδή θεωρηθεί D = 0, προκύπτει ο στατισμός του συστήματος, ο οποίος από την (3.26) είναι:

$$\frac{\Delta f_{\sigma\varphi}}{\Delta P_{\varphi}} = -R \qquad (3.27)$$

Το μικρότερο μέγεθος στατισμού τον συστήματος, το οποίο προκύπτει από τη σύγκριση των (3.26) και (3.27), αποδεικνύει την ευνοϊκή επίδραση των φορτίων στη ρύθμιση της συχνότητας.

Η χρονική απόκριση της συχνότητας στη βηματική μεταβολή τον φορτίου προκύπτει με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace της εξισώσεως (3.24), ο οποίος είναι αναλυτικά δυνατός, αλλά δύσκολος αν οι συναρτήσεις μεταφοράς G_{Γ} (s), G_{Σ} (s) και G_{ε} (s) είναι πολύπλοκες. Στην περίπτωσή μας περιέχουν τρεις σταθερές χρόνου και ο παρονομαστής είναι τρίτης τάξεως:

$$\Delta F(s) = -\frac{K_{\varepsilon}/(1+sT_{\varepsilon})}{1+(1/R)K_{\varepsilon}/(1+sT_{\Sigma})(1+sT_{\Gamma})(1+sT_{\varepsilon})}\Delta P_{\varphi}(s) \qquad (3.28)$$

Η ανάλυση μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά με τη βάσιμη παραδοχή ότι η αντίδραση των ρυθμιστών στροφών των μηχανών είναι ακαρι ία, συγκρινόμενη με το υπόλοιπο σύστημα, δηλαδή ότι οι T_{Γ} και T_{Σ} είναι αμελητέες ενώπιον της T_{ε} . Θεωρώντας λοιπόν $T_{\Gamma} = T_{\Sigma} = 0$ η (3.137) γίνεται:

$$\Delta F(s) \cong -\frac{K_{\varepsilon}/(1+sT_{\varepsilon})}{1+(1/R)K_{\varepsilon}/(1+sT_{\varepsilon})}\frac{\Delta P_{\varphi}}{s} = -\Delta P_{\varphi}\frac{K_{\varepsilon}}{s(1+sT_{\varepsilon}+K_{\varepsilon}/R)} = -\Delta P_{\varphi}\frac{K}{s(1+sT)} \qquad (3.29)$$

όπου:

$$K = \frac{RK_{\varepsilon}}{R+K_{\varepsilon}} \qquad (3.30)$$

$$T = \frac{RT_{\varepsilon}}{R+K_{\varepsilon}}$$

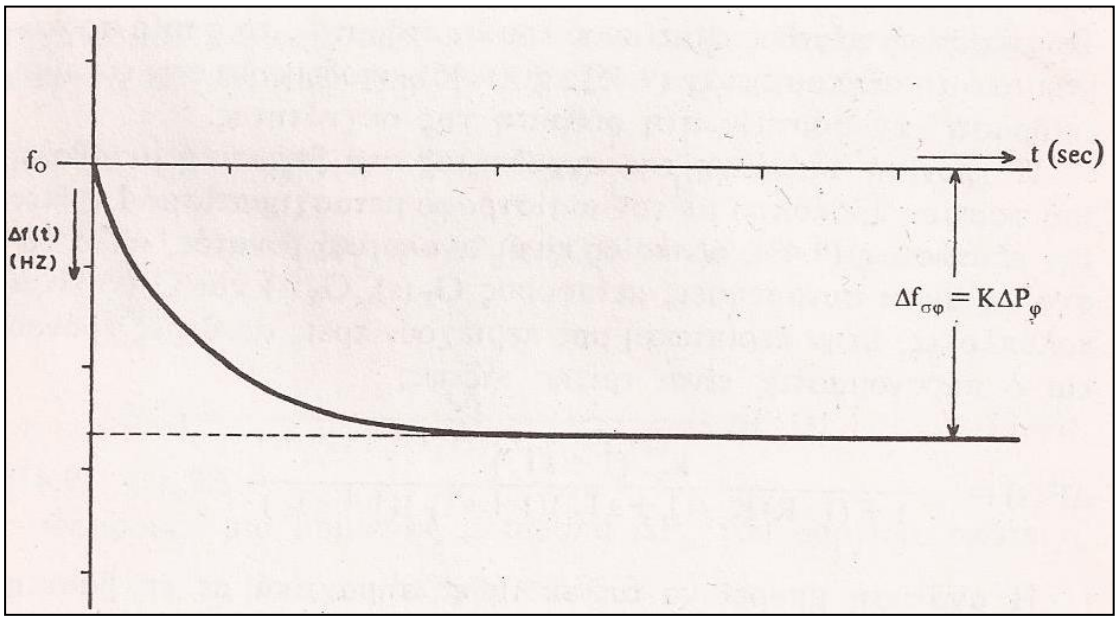
Ο αντίστροφος της (3.29) δίνει τη χρονική απόκριση της συχνότητας, η οποία είναι μια καθαρά εκθετική συνάρτηση Laplace:

$$\Delta f\,(t) = — \Delta P_{\varphi}\, K\, (1\text{-}e^{-t/T}) \qquad (3.31)$$

και στατική μεταβολή της συχνότητας (μόνιμο σφάλμα):

$$\Delta f\sigma\varphi = -\Delta P_{\varphi}\frac{RK_{\varepsilon}}{R+K_{\varepsilon}} = -K\Delta P_{\varphi} \qquad (3.32)$$

Η χρονική συνάρτηση (3.31) παριστάνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15. Μεταβολή της συχνότητας συναρτήσει του χρόνου λόγω βηματικής αυξήσεως φορτίου ΔP, με ακαριαία πρωτεύουσα ρύθμιση

Λόγω μεγάλης σχετικά τιμής του K_ε η συνολική σταθερά χρόνου T του κλειστού βρόχου ρυθμίσεως είναι πολύ μικρότερη από τη σταθερά χρόνου T_ε του συστήματος. Η ταχύτερη αυτή αντίδραση οφείλεται στο σήμα ανατροφοδοτήσεως του ρυθμιστή με κέρδος 1 /R, δηλαδή στο στατισμό των ρυθμιστών στροφών του συστήματος. 'Οπως φαίνεται από την (3.30), η αντίδραση μπορεί να γίνει ακόμη ταχύτερη με αύξηση του κέρδους 1 /R, δηλαδή ελάττωση τον στατισμού τον συστήματος, πράγμα αυτονόητο εφ' όσον συνεπάγεται αύξηση της ευαισθησίας της συχνότητας στη μεταβολή του φορτίου. Η ελάττωση του R μειώνει επίσης και το μόνιμο σφάλμα συχνότητας.

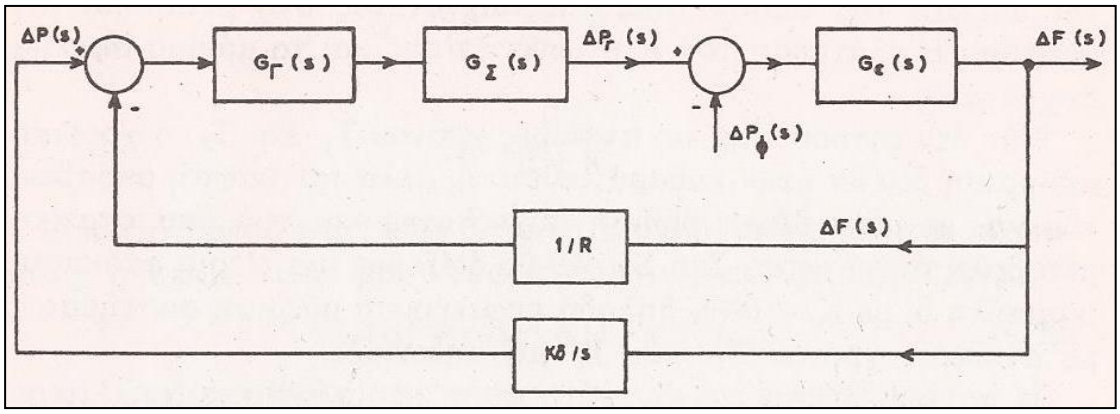
Εάν δεν αγνοούσαμε τις σταθερές χρόνον T_Γ και T_Σ η χρονική απόκριση δεν θα ήταν καθαρά εκθετική, αλλά ταλάντωση αποσβεννύμενη, με μεγαλύτερη βύθιση συχνότητας και την ίδια στατική μεταβολή συχνότητας. Στο Σχήμα 3.17 θα δείξούμε μια τέτοια απόκριση (καμπύλη 6, με K_δ = 0%), δηλαδή πρωτεύουσα ρύθμιση συστήματος με σταθερές χρόνου T_Γ και T_Σ μη μηδενικές.

Η αρχική βύθιση της συχνότητας, η οποία φαίνεται καλλίτερα στο Σχήμα 3.17, οφείλεται στην απότομη μείωση των στροφών, κατά την επιβολή τον φορτίου ΔP_φ. Κατά τις πρώτες στιγμές οι ρυθμιστές στροφών δεν προλαβαίνουν να αντιδράσουν ώστε να προκαλέσουν αύξηση της ισχύος των στροβίλων και όλη η πρόσθετη ζήτηση φορτίου παρέχεται από την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια. Η συνεπαγόμενη μείωση των στροφών, άρα και της συχνότητας, γίνεται με αρχική κλίση ΔP_φ (K_ε /T_ε) Hz/sec. Εν τω μεταξύ, η μείωση των στροφών προκαλεί αύξηση της ισχύος των στροβίλων και η πτώση της συχνότητας ελάττωση του φορτίου με ρυθμό $D = \vartheta P/\vartheta f$, λόγω αυτορρυθμίσεως. Και οι δυο αυτές συνιστώσες μεταβολής ισχύος, οι οποίες στην αρχή είναι μηδενικές, αρχίζουν να δρουν ανασταλτικά στη μείωση της

συχνότητας, η οποία μειώνεται όλο και με μικρότερο ρυθμό, μέχρις ότου ισορροπήσει σε μια νέα σταθερή κατώτερη τιμή.

3.4.2 Δευτερεύουσα ρύθμιση

Η εξουδετέρωση του μόνιμου σφάλματος συχνότητας $\Delta f_{\sigma\varphi}$, που μένει μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση και η επαναφορά της συχνότητας στην αρχική τιμή της αποτελεί τη δευτερεύουσα ρύθμιση, με την εφαρμογή της οποίας διατηρείται η καλλίτερη σταθερότητα της συχνότητας στο σύστημα. Η αυτόματη δευτερεύουσα ρύθμιση πραγματοποιείται με χειρισμό του μηχανισμού αλλαγής στροφών. Η επαναφορά της συχνότητας μπορεί να γίνει με διάφορες στρατηγικές. Βασικά, η μεταβατική απόκλιση της συχνότητας από την προκαθορισμένη (ονομαστική) τιμή πρέπει να τηρείται στο ελάχιστο και να μηδενίζεται ύστερα από μια μεταβολή τον φορτίου. Η διόρθωση είναι συσσωρευτική, δηλαδή το σήμα είναι ανάλογο του ολοκληρώματος τον σφάλματος της συχνότητας.



Σχήμα 3.16. Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας με δευτερεύουσα ρύθμιση αυτόνομου συστήματος

Η διάταξη με την οποία επιτυγχάνεται η αυτόματη δευτερεύουσα ρύθμιση φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Προκύπτει από το σύστημα της πρωτεύουσας ρύθμισης (Σχήμα 3.13), με προσθήκη σήματος ανατροφοδοτήσεως ανάλογου προς το ολοκλήρωμα του σφάλματος συχνότητας. Η πολικότητα του σήματος είναι αρνητική για θετική μεταβολή της συχνότητας,

$$\Delta P = -K_\delta \int \Delta f dt \tag{3.33}$$

και:

$$\Delta P(s) = -\frac{K_\delta}{s}\Delta F(s) \tag{3.34}$$

όπου Δf, είναι το μετρούμενο στιγμιαίο σφάλμα συχνότητας τον συστήματος, το οποίο ολοκληρώνεται συναρτήσει τον χρόνον στον ολοκληρωτή. Στην πράξη, η

μέτρηση της Δf δεν γίνεται συνεχώς, αλλά δειγματοληπτικά. Η ακρίβεια της αναλύσεως και η ποιότητα της ρυθμίσεως είναι τόσο καλλίτερη όσο ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι ταχύτερος. Το ολοκλήρωμα αυτό ενισχύεται με τη σταθερά K_δ και όταν φθάσει σε ορισμένη τιμή αποστέλλει το σήμα κινήσεως στους μηχανισμούς αλλαγής στροφών. Η δευτερεύουσα αυτή ρύθμιση θα έχει σαν αποτέλεσμα να μηδενιστεί το σχετικό σφάλμα συχνότητας ύστερα από μια βηματική μεταβολή φορτίου, δεδομένου ότι όσο υπάρχει σφάλμα η έξοδος του ολοκληρωτή θα δίνει σήμα διορθώσεως. Ο ρυθμός ολοκληρώσεως, άρα και η ταχύτητα αποκρίσεως της ρυθμίσεως αυτής εξαρτώνται από τη σταθερά K_δ. Στο Σχήμα 3.16 γίνεται η παραδοχή ότι η δευτερεύουσα ρύθμιση είναι συνεχής για λόγους απλοποιήσεως της αναλύσεως.

Από το Σχήμα 3.17 προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\Delta F(s) = G_\varepsilon(s)\,[\Delta P_\Gamma(s) - \Delta P_\varphi(s)] \tag{3.35}$$

$$\Delta P_\Gamma(s) = G_\Gamma(s)\,G_\Sigma(s)\left[\frac{-K_\delta}{s} - \frac{1}{R}\right]\Delta F(s)$$

Θεωρώντας μια βηματική μεταβολή φορτίου, $\Delta P_\varphi(s) = \Delta P_\varphi / s$, και επιλύοντας τις (3.35) ως προς ΔF(s) έχουμε:

$$\Delta F(s) = \frac{-G_\varepsilon(s)\Delta P_\varphi}{s[G_\Sigma G_\Gamma G_\varepsilon(K_\delta/s + 1/R) + 1]} \tag{3.36}$$

Η χρονική απόκριση της συχνότητας στην περίπτωση αυτή προκύπτει από την αντιστροφή της μετασχηματισμένης εξισώσεως (3.36). Μπορούμε πάλι για απλοποίηση της αναλύσεως, να δεχθούμε όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ότι $T_\Gamma = T_\Sigma = 0$, οπότε η (3.36) γίνεται:

$$\Delta F(s) = -\frac{K_\varepsilon \Delta P_\varphi}{s^2 T_\varepsilon + (1 + K_\varepsilon/R) + K_\varepsilon K_\delta} \tag{3.37}$$

Η χρονική συνάρτηση εξαρτάται από το είδος των πόλων της συναρτήσεως, δηλαδή τις ρίζες της χαρακτηριστικής εξισώσεως. Εφόσον αυτή είναι πολυώνυμο δευτέρου βαθμού ως προς s, η σχετική διερεύνηση μπορεί να γίνει με την εξέταση της διακρίνουσας τον τριωνύμου. Εάν η διακρίνουσα είναι θετική η ΔF(s) έχει ένα ζεύγος πόλων πραγματικών και αρνητικών, — ρ_1 , — ρ_2 , (ρ_1 , ρ_2 > 0). Έχούμε τότε την υποκρίσιμη περίπτωση. Η χρονική συνάρτηση Δf(t) έχει εκθετικούς όρους, του τύπου $e^{-\rho_1 t}$, $e^{-\rho_2 t}$, άρα είναι αποσβεννύμενη χωρίς ταλαντώσεις και πλησιάζει ασυμπτωτικά στο μηδέν. Αυτό αποδεικνύει ότι επιτυγχάνεται η δευτερεύουσα ρύθμιση, εφ' όσον μηδενίζεται το σφάλμα όπως επίσης και ότι ο έλεγχος είναι ευστα-θής. Το τελευταίο φαίνεται και από το ότι οι πόλοι κείνται στο αρνητικό μιγαδικό ημιεπίπεδο s, όπως προκύπτει εύκολα από την έκφραση των ριζών του τριωνύμου.

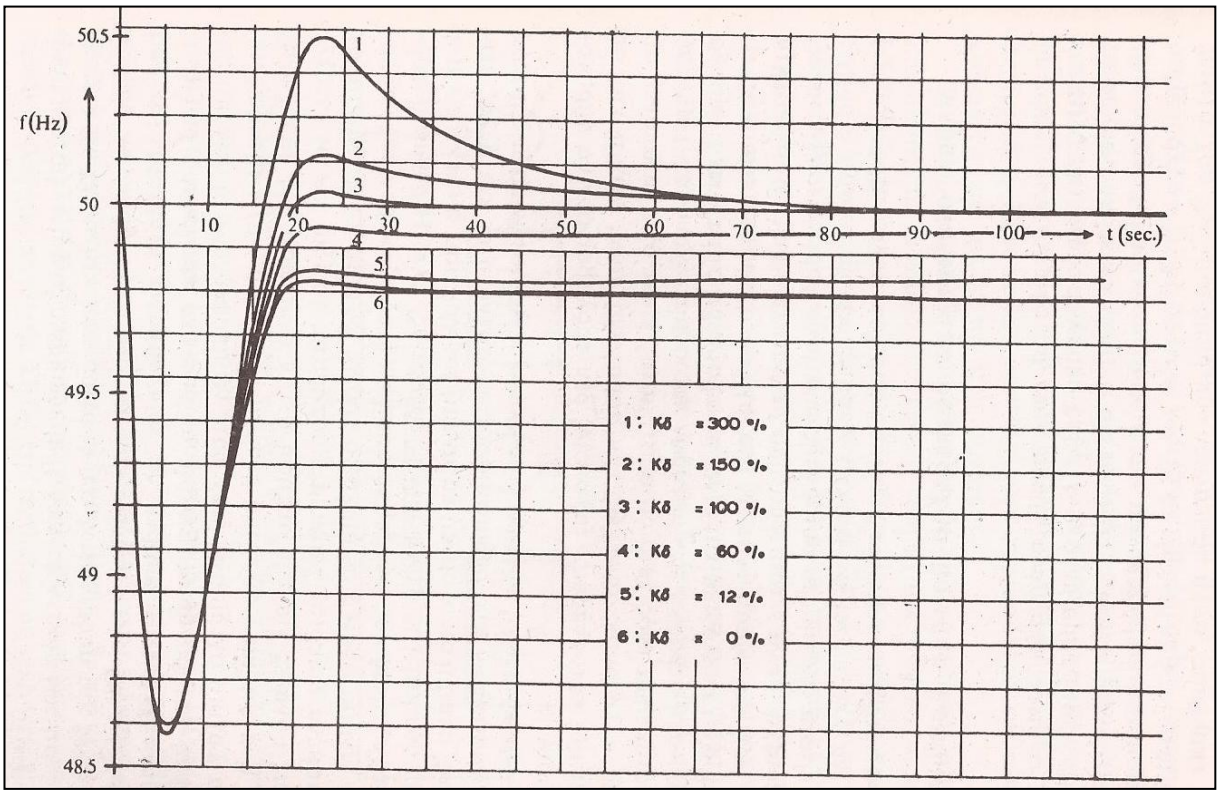
Για μεγαλύτερες τιμές του K_δ η διακρίνονσα γίνεται αρνητική, οπότε έχούμε την υπερκρίσιμη περίπτωση. Η συνάρτηση ΔF(s) έχει δύο συζυγείς μιγαδικούς πόλους στο ευσταθές ημιεπίπεδο s και η χρονική ανταπόκριση αποτελείται από αποσβεννύμενες ταλαντώσεις. Τέλος, υπάρχει όπως είναι γνωστό και η κρίσιμη

περίπτωση, οπότε η συνάρτηση έχει ένα διπλό πραγματικό και αρνητικό πόλο και η χρονική συνάρτηση αποτελείται από ένα κριτικά αποσβεννύμενο όρο, της μορφής $te^{-\rho t}$. Η κρίσιμη απόσβεση επιτυγχάνεται με ενδιάμεση τιμή τον K_δ .

Στο Σχήμα 3.17 δίνονται οι δυναμικές ταλαντώσεις της συχνότητας από καταγραφή του αναλογικού υπολογιστή τον εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ τύπου EAI, PACE TI-48, κατά τη μελέτη ενός προβλήματος φορτίου-συχνότητας ενός συστήματος πέντε μονάδων. Οι τέσσερεις μονάδες είναι θερμικές, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 760MW, από τις οποίες οι δύο με αναθέρμανση ατμού και οι δύο χωρίς αναθέρμανση. Η πέμπτη μονάδα είναι υδροηλεκτρική, εγκατεστημένης ισχύος 437MW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι συνεπώς 1197MW και το συνολικό τον φορτίο 1170MW. Η μία θερμική μονάδα ισχύος 300MW με φορτίο 300MW, λειτουργεί ως μονάδα βάσεως και δεν ρυθμίζει. Τις μεταβολές του φορτίου αναλαμβάνουν οι υπόλοιπες μονάδες.

Οι ταλαντώσεις της συχνότητας του Σχήμα 3.17 οφείλονται σε μια διαταραχή του συστήματος, η οποία συνίσταται στην έξοδο μιας θερμικής μονάδας 100 MW, η οποία συμμετείχε στη λειτουργία του συστήματος με φορτίο 100MW. Η μεταβολή της συχνότητας μελετήθηκε για έξι τιμές τον κέρδους K_δ που αντιστοιχούν στις ισάριθμες καμπύλες της συχνότητας του σχήματος. Η καμπύλη 3 θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί στην κρίσιμη περίπτωση καιθΘεωρήθηκε με K_δ = 100% και οι ενισχύσεις των άλλων καμπυλών βαθμολογήθηκαν ως προς αυτή. Οι χρονικές σταθερές στροβίλων και γεννητριών T_Σ και T_Γ έχουν ληφθεί με μη μηδενικές τιμές.

Οι καμπύλες 1 και 2 είναι υπερκρίσιμες, ενώ οι 4 και 5 υπο-κρίσιμες. Η καμπύλη 6 αντιστοιχεί σε πρωτεύουσα ρύθμιση μόνο. Παρατηρούμε ότι στα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την επιβολή της διαταραχής (μείωση της παραγωγής ή αντίστοιχα αύξηση του φορτίου) οπότε δεν έχει ακόμη αρχίσει να δρα η ολοκληρωτική ρύθμιση, η συχνότητα πέφτει με τον ίδιο εκθετικό ρυθμό, όπως και χωρίς δευτερεύουσα ρύθμιση. 'Οταν αρχίσει η επίδραση της δευτερεύουσας ρύθμισης μετά από ορισμένο χρόνο, η επαναφορά της συχνότητας είναι ταχύτερη.



Σχήμα 3.17. Ταλαντώσεις συχνότητας συστήματος πέντε μονάδων συνολικής ισχύος 1197MW και φορτίου 1170MW σε περίπτωση εξόδου μονάδος 100MW με φορτίο 100MW. (Μελέτη αναλογικού υπολογιστή).

Οι υπερκρίσιμες ρυθμίσεις συνεπάγονται ταχύτερη ανταπόκριση πράγμα επιθυμητό, αλλά προκαλούν «υπερπήδηση» της συχνότητας μετά τη βύθιση. Εάν μειωθεί το K_δ για να αποφευχθεί η υπερπήδηση η ανταπόκριση επιβραδύνεται και γίνεται υποκρίσιμη. Το μειονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι οτι ο μηδενισμός του σφάλματος αργεί, με αποτέλεσμα μεγάλα σχετικά ολοκληρώματα της Δf(t) και μεγάλα σχετικά σφάλματα χρόνου των ρολογιών.

3.5 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αναγνωρίζεται ως ένα σημαντικό ζήτημα για την ασφαλή τους λειτουργία ήδη από το 1920. Η εμφάνιση αρκετών συμβάντων ολικής σβέσης των συστημάτων τα τελευταία χρόνια αντανακλά την σημασία του προβλήματος. Ιστορικά, η μεταβατική ευστάθεια αποτελούσε το κυρίαρχο πρόβλημα ευστάθειας στα περισσότερα συστήματα. Ωστόσο, η εξέλιξη των συστημάτων, μέσω της συνεχούς ανάπτυξης των διασυνδέσεων και την χρήση νέων διατάξεων ελέγχου, καθώς και η λειτουργία κάτω από δυσμενείς συνθήκες αναδεικνύουν την ύπαρξη πολλαπλών μηχανισμών αστάθειας.

Η ευστάθεια ΣΗΕ ορίζεται παρόμοια με την ευστάθεια οποιουδήποτε άλλου δυναμικού συστήματος, με το αντίστοιχο μαθηματικό υπόβαθρο και μεθοδολογία. Με φυσικούς όρους στην εργασία ως ευστάθεια ΣΗΕ ορίζεται «η ικανότητα ενός

ηλεκτρικού συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας, να επανέρχεται σε ένα σημείο λειτουργίας (το οποίο είναι και σημείο ισορροπίας) μετά από μια διαταραχή, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο». Ο ορισμός αυτός εφαρμόζεται σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ως σύνολο. Ωστόσο συχνά ενδιαφέρει η ευστάθεια μιας γεννήτριας ή μιας ομάδας γεννητριών . Μία απομακρυσμένη γεννήτρια μπορεί να απολέσει τον συγχρονισμό χωρίς να προκαλέσει αστάθεια συνολικά για το σύστημα μετά την αποσυνδεσή της. Αντίστοιχα το ίδιο μπορεί να ισχύει και για τις μηχανές.

Τα ΣΗΕ είναι συστήματα εξόχως μη γραμμικά και λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον (συνεχείς μεταβολές φορτίων, παραμέτρων κ.α.). Όταν τέτοια συστήματα υφίστανται μια διαταραχή, η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας όσο και από την φύση της διαταραχής. Τα ΣΗΕ υφίστανται κατά την λειτουργία τους, πολλών ειδών διαταραχές. Αυτό μπορεί να αφορά μικρές διαταραχές των οποίων το πιο τυπικό παράδειγμα είναι οι μεταβολές στο φορτίο, οι οποίες συμβαίνουν διαρκώς. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτές τις διαρκείς μεταβολές και να λειτουργεί ικανοποιητικά. Μια δεύτερη κατηγορία διαταραχών είναι οι διαταραχές μεγάλης κλίμακας, στις οποίες περιλαμβάνονται βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς ή υποσταθμούς, απώλειες μονάδων παραγωγής ή φορτίων. Οι διαταραχές μεγάλης κλίμακας συνήθως οδηγούν σε δομικές αλλαγές του συστήματος λόγω της απομόνωσης των στοιχείων στα οποία παρουσιάστηκε το σφάλμα.

Στα μη γραμμικά συστήματα (όπως είναι τα ΣΗΕ) η ευστάθεια δεν ορίζεται ανεξάρτητα από την διαταραχή. Σε ένα σημείο ισορροπίας ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για κάποιες διαταραχές και ασταθές για κάποιες άλλες. Ο σχεδιασμός και τα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας τίθενται με βάση τα συμβάντα που παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα. Έτσι, ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας έχει μια ορισμένη περιοχή έλξης. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η περιοχή, τόσο πιο ικανοποιητικά αποκρίνεται το συστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή αυτή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα και με το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε. οι μηχανισμοί της αστάθειας ενός ΣΗΕ είναι πολλαπλοί και εξαρτώνται τόσο από το σύστημα, όσο και από την κατάσταση λειτουργίας. Παραδοσιακά το πρόβλημα της ευστάθειας ήταν η διατήρηση της σύγχρονης λειτουργίας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κυρίαρχα από σύγχρονες γεννήτριες, συνεπώς απαραίτητη προϋπόθεση για την ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος είναι η διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ τους. Ένας δεύτερος μηχανισμός αστάθειας είναι η κατάρρευση της τάσης, στην οποία δεν εμπλέκεται ο συγχρονισμός των μηχανών.

3.5 Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζουν διαφόρων ειδών ρυθμούς ταλάντωσης λόγω της αλληλεπίδρασης των επιμέρους δυναμικών συστημάτων που τα απαρτίζουν. Οι πιο συνηθισμένες από τις ταλαντώσεις αυτές, αφορούν την ταλάντωση των στρεφόμενων μαζών των δρομέων των σύγχρονων μηχανών μεταξύ τους ή ως προς κάποιο σταθερά στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (άπειρος ζυγός). Μια μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος (φορτία, κέρδη διατάξεων ελέγχου κλπ) αλλάζει το σημείο λειτουργίας του συστήματος και συνοδεύεται από αντίστοιχες μεταβολές της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος των σύγχρονων γεννητριών, καθώς αυτές προσπαθούν να προσεγγίσουν ένα νέο σημείο ισορροπίας. Σαν αποτέλεσμα, η ταχύτητα περιστροφής τους αποκλίνει ελαφρά από τη σύγχρονη ταχύτητα και προκαλεί την ανταλλαγή μηχανικής (κινητικής) και ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των γεννητριών. Εφόσον μια γεννήτρια παραμείνει σε συγχρονισμό μετά τη διαταραχή, προσεγγίζει ταλαντωτικά ένα νέο σημείο ισορροπίας στο οποίο η μηχανή επανέρχεται στη σύγχρονη ταχύτητα.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο δρομέας της γεννήτριας εκτελεί μια ταλάντωση ως προς το δρομέα κάθε άλλης γεννήτριας του συστήματος και ταυτόχρονα μια ταλάντωση προς το εξωτερικό σύστημα, στη περίπτωση που το συστημα είναι διασυνδεδεμένο σε κάποιον άπειρο ζυγό. Έτσι, ένα συστημα *m* γεννητριών και ενός άπειρου ζυγου (που συνήθως εκφράζει κάποια εξωτερική διασύνδεση με ένα άλλο συστημα), εμφανίζει *m* τέτοιες ταλαντώσεις, ενώ ένα αυτόνομο σύστημα *m* γεννητριών εμφανίζει *m-1* ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Από ηλεκτρομαγνητική σκοπιά, η ταλάντωση ανάμεσα στους δρομείς των μηχανών οφείλεται στην προσπάθεια συγχρονισμού των μαγνητικών πεδίων των γεννητριών. Οι ταλαντώσεις αυτές συνοδεύονται από ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των συγχρόνων μηχανών και ονομάζονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις ή ταλαντώσεις ισχύος.

Η κατανόηση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων έγινε δυνατή με την ανάλυση της μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής των μηχανών σε μια συνιστώσα ροπής συγχρονισμού, εν φάση με τη μεταβολή της γωνίας δ του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας και σε μια συνιστώσα ροπής απόσβεσης, εν φάση με τη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα.

Η ροπή συγχρονισμού είναι η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής που περιορίζει την απόκλιση των πεδίων των μηχανών και κρατά τις μηχανές σε συγχρονισμό. Έχει συνήθως μεγάλη τιμή, παίζει κυρίαρχο ρόλο στην μεταβατική ευστάθεια γωνίας αμέσως μετά από μια απότομη μεταβολή στο σύστημα και καθορίζει τη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης.

Η ροπή απόσβεσης είναι η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής που περιορίζει την απόκλιση της ταχυτητας περιστροφής της γεννήτριας από την ονομαστική της τιμή. Είναι υπεύθυνη για την απόσβεση των ταλαντώσεων και έχει τον κυρίαρχο ρόλο στην διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος αμέσως μετά από το πέρας της

μεταβατικής περιόδου ύστερα από μια μεγάλη μεταβολή. Αυτή η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής, έχει συνήθως μικρή τιμή, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και μπορεί να γίνει αρνητική λόγω της δράσεως άλλων διατάξεων ελέγχου που μπορεί να δράσουν ως αρνητικές πηγές απόσβεσης. Κυριότερο παράδειγμα είναι η δράση του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως, ειδικά για υψηλές τιμές κέρδους του, αμέσως μετά το πέρας ενός μεταβατικού φαινομένου.

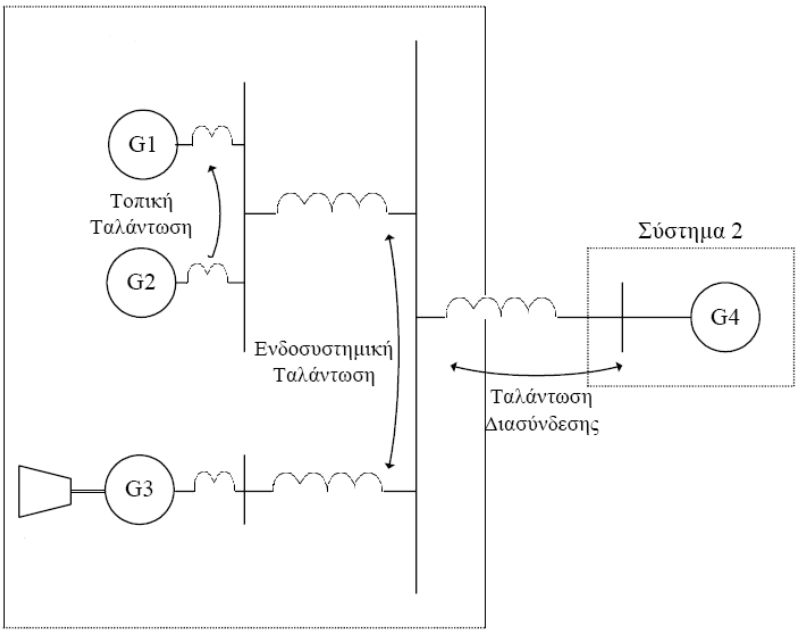
Με την εξέλιξη των συστημάτων ρυθμίσεως τάσεως των γεννητριών, έγινε δυνατή η προσθήκη διατάξεων ελέγχου οι οποίες επιδρούν τοπικά στη διέγερσή τους ώστε αυτή να εισάγει θετική ροπή απόσβεσης. Οι διατάξεις αυτές, ονομάζονται σταθεροποιητές ισχύος (Power System Stabilizers), ενεργούν σαν βαθμίδες προπορείας φάσεως οι οποίες αντισταθμίζουν την υστέρηση φάσεως που εισάγουν ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως και το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως της γεννήτριας.

Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μπορούν να ταξινομηθουν ως εξής (Σχήμα 3.18):

1. Τοπικές ταλαντώσεις (Local modes). Είναι οι πλέον συνήθεις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις και περιγράφουν την ταλάντωση των δρομέων των γεννητριών ενός σταθμού παραγωγής μεταξύ τους ή μεταξύ γεννητριών κοντινών σταθμών. Πρόβλημα ευστάθειας δημιουργείται συνήθως από την δράση αυτόματων ρυθμιστών τάσεως ταχείας απόκρισης όταν αυτοί λειτουργούν με μεγάλη τιμή κέρδους (για να αυξήσουν τη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος), ενώ η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα σχετικά ασθενές δίκτυο μεταφοράς. Οι ταλαντώσεις αυτές, που εμφανίζονται συνήθως σε ένα φάσμα συχνοτήτων 1 ως 3 Hz, και είναι ιστορικά οι πρώτες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που εμφανίστηκαν.

2. Ενδοσυστημικές Ταλαντώσεις (Intra-area oscillations). Είναι οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ σταθμών παραγωγής οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές του ίδιου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και συνοδεύονται από ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των σταθμών αυτών. Οι ταλαντώσεις αυτές οφείλονται στη δομή του ηλεκτρικού δικτύου, όταν υπάρχει ασθενής διασύνδεση ανάμεσα σε περιοχές του συστήματος όπου υπάρχει μεγάλη ηλεκτροπαραγωγή και εμφανίζονται με συχνότητα 0.6-1 Hz.

3. Ταλαντώσεις διασυνδέσεων ή διασυνδετικές ταλαντώσεις (Interarea Oscillations). Πρόκειται για ταλαντώσεις που εμπλέκουν το συνολο των συγχρόνων μηχανών ενός συστήματος, με τις μηχανές ενός γειτονικού συστήματος (ή γειτονικών συστημάτων), όταν αυτά συνδέονται μέσω ενός ασθενους δικτύου μεταφοράς. Οι ταλαντώσεις αυτές εμφανίζονται με πολύ χαμηλή συχνότητα, 0.1 ως 0.6 Hz και, όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος της απόσβεσής τους είναι δύσκολος καθώς απαιτεί σωστή σχεδίαση των διατάξεων απόσβεσης σε ένα μεγάλο αριθμό μηχανών.



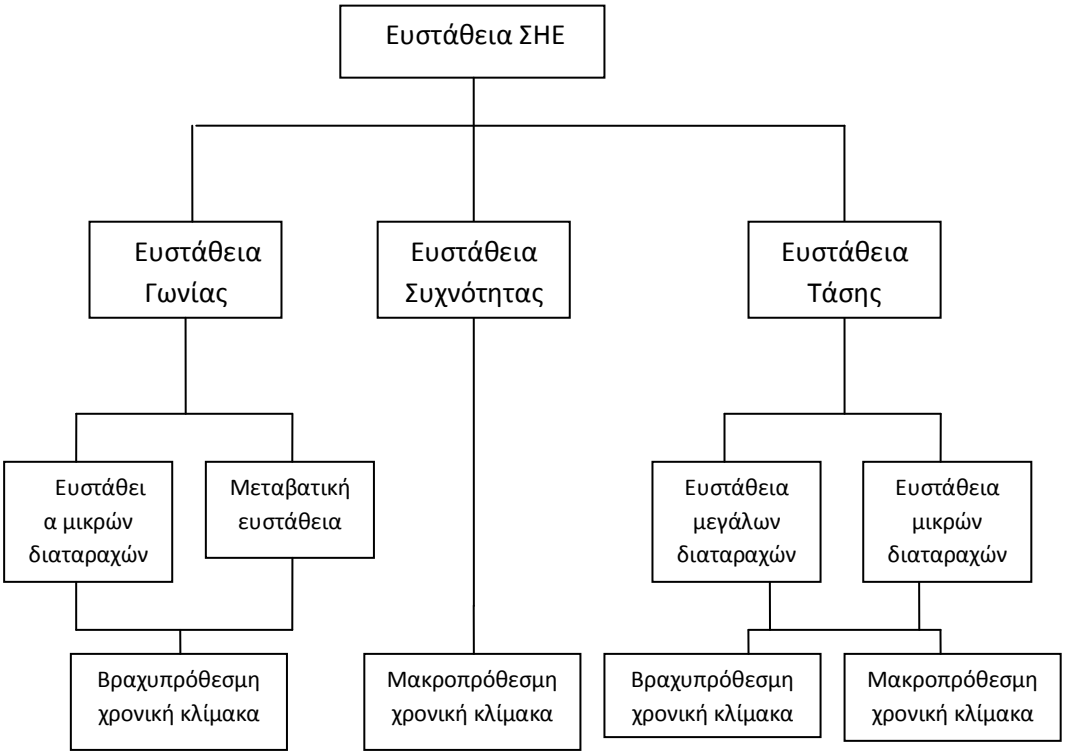
Σχήμα 3.18. Κατηγορίες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

3.6.1 Κατηγοριοποίηση ευστάθειας

Η ευστάθεια των ΣΗΕ αποτελεί στην πραγματικότητα ένα ενιαίο πρόβλημα. Ωστόσο η πολλαπλότητα των μηχανισμών αστάθειας δεν επιτρέπει την ευκολη κατανόηση και την μελέτη του προβλήματος αν αντιμετωπιστεί ως ενιαίο. Λόγω της πολυπλοκότητας και της αυξημένης διάστασης του προβλήματος αυτού, βοηθά η θεώρηση κάποιων παραδοχών που το απλοποιούν, έτσι ώστε να αναλύονται συγκεκριμένοι τύποι ευστάθειας με χρήση του ανάλογου επιπέδου λεπτομέρειας στην μοντελοποίηση των διατάξεων του ΣΗΕ. Η κατηγοριοποίηση των τύπων ευστάθειας βασίζεται στα παρακάτω κριτήρια.

- Την φύση του ρυθμού αστάθειας που υποδεικνύεται από τις επικρατούσες μεταβλητές του συστήματος στις αποκρίσεις των οποίων παρατηρείται η εμφανιζόμενη αστάθεια.
- Το μέγεθος της εξεταζόμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει την μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.
- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Η κατηγοριοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19



Σχήμα 3.19. Ταξινόμηση ευστάθειας ΣΗΕ

3.6.1.1 Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από κάποια διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα αποκατάστασης ισορροπίας μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ροπής.

Το πρόβλημα της ευστάθειας γωνίας προϋποθέτει την μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις αυτές συνδέονται με τον τρόπο που μεταβάλλεται η έγχυση ηλεκτρικής ισχύος από την γεννήτρια σε σχέση με την γωνία του δρομέα της. Σε συνθήκες ισορροπίας, η ηλεκτρική και μηχανική ροπή της γεννήτριας είναι ίσες, συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή. Στην περίπτωση όμως μιας διαταραχής, προκαλείται ανισορροπία μεταξύ των δυο ροπών με αποτέλεσμα ο δρομέας να επιταχύνεται ή να επιβραδύνεται. Η μεταβολή αυτή στην ταχύτητα, άρα και στην σχετική ταχύτητα μεταξύ των γεννητριών οδηγεί στην μεταβολή της σχετικής γωνίας. Τελικά η μεταβολή αυτή οδηγεί στην μεταβολή της έγχυσης ισχύος, ή με άλλα λόγια στην μεταφορά μέρους του φορτίου από την μία γεννήτρια στην άλλη. Η σχέση γωνίας-ισχύος είναι μη γραμμική. Πέραν ενός ορίου, η αύξηση της σχετικής γωνίας μεταξύ των γεννητριών δεν λειτουργεί όπως προαναφέρθηκε, αλλά οδηγεί σε μείωση της μεταφοράς ισχύος και σε περαιτέρω αυξηση της σχετικής γωνίας.

Η ευστάθεια γωνίας διαχωρίζεται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.19 ανάλογα με το είδος των διαταραχών που μελετώνται:

3.6.1.2 Ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών

Η οποία σχετίζεται με την δυνατότητα του ΣΗΕ να διατηρεί τον συγχρονισμό των γεννητριών μετά από μικρές διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές θεωρούνται τόσο μικρές ώστε να είναι δυνατή η μελέτη μέσω της γραμμικοποίησης του συστήματος. Η αστάθεια καταρχήν σχετίζεται με το σημείο λειτουργίας και μπορεί να εμφανιστεί με δυο μορφές. Η πρώτη είναι η αύξηση της γωνίας μέσω ενός απεριοδικού ρυθμού λόγω έλλειψης ροπής συγχρονισμού, και η δεύτερη είναι η αυξανόμενου πλάτους ταλάντωση των δρομέων των γεννητριών λόγω έλλειψης ροπής απόσβεσης.

Στα σύγχρονα ΣΗΕ η αστάθεια μικρών διαταραχών σχετίζεται με την ανεπαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων. Η απεριοδική αστάθεια αντιμετωπίζεται με την χρήση Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης (ΑΡΤ), όμως το πρόβλημα παραμένει όταν γεννήτριες λειτουργούν με σταθερή διέγερση λόγω της επίδρασης των περιοριστών υπερδιεγέρσεως.

3.6.1.3 Ευστάθεια γωνίας για διαταραχές μεγάλης κλίμακας

Η αστάθεια συνήθως εμφανίζεται ως απεριοδική απομάκρυνση των γωνιών των γεννητριών λόγω ανεπαρκους ροπής συγχρονισμου, ενώ χαρακτηρίζεται και ως ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης. Ωστόσο στα μεγάλα ΣΗΕ η μεταβατική αστάθεια δεν εμφανίζεται πάντα ως ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης, αλλά μπορεί να εκδηλωθεί ως αποτέλεσμα της επαλληλίας μιας αργής διασυνδετικής ταλάντωσης και μιας τόπικής. Επιπρόσθετα η μεταβατική αστάθεια μπορεί να προκληθεί από την επίδραση μη γραμμικών φαινομένων σε έναν απλό ρυθμό πέραν τόυ χρονικου ευρους της πρώτης ταλάντωσης.

Γενικά, το χρονικό διάστημα για μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης κάποιων δευτερολέπτων. Στην περίπτωση μεγάλων ΣΗΕ, όπου επικρατούν οι διασυνδετικές ταλαντώσεις, το ευρος αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων.

3.7 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις σε όλους του ζυγούς, μετά από μια διαταραχή. Ο εν λόγω μηχανισμός σχετίζεται με την ικανότητα διατήρησης σημείου ισορροπίας μεταξύ της ζήτησης του φορτίου και της παροχής από την πλευρά του δικτύου. Η αστάθεια παρουσιάζεται σαν μια σταδιακή κατάρρευση της τάσης σε κάποιους ζυγούς του συστήματος. Ένα από τα πιθανά αποτελέσματα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι η αποσύνδεση κάποιων γραμμών μεταφοράς και άλλων στοιχείων, λόγω της λειτουργίας των προστασιών, και η διαδοχική αποσύνδεση και άλλων στοιχείων του δικτύου σε δεύτερο χρόνο.

Όπως και στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας, έτσι και στην ευστάθεια τάσης, υλοποιείται ένας διαχωρισμός ανάλογα με τις διαταραχές οι οποίες μελετώνται.

3.7.1 Ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών

Η οποία σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις, όταν υφίσταται μικρές διαταραχές, όπως μικρές μεταβολές στο φορτίο. Το είδος αυτό της ευστάθειας επηρεάζεται από τις χαρακτηριστικές των φορτίων και τις διατάξεις ελέγχου.

3.7.2 Ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών

Η οποία αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τις τιμές των τάσεων, έπειτα από διαταραχές όπως απώλεια γραμμών και μονάδων παραγωγής. Για τον καθορισμό της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών είναι απαραίτητη η εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του ΣΗΕ σε μια χρονική περίοδο, αρκετή για να συμπεριλάβει την απόδοση και την αλληλεπίδραση διατάξεων όπως μηχανές, συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), περιοριστές διέγερσης σύγχρονων γεννητριών.

3.7.3 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας σχετίζεται με την ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί σταθερή συχνότητα μετά από μια μεγάλη διαταραχή, η οποία προκαλεί σημαντική ανισορροπία μεταξυ παραγωγής και φορτίου. Εξαρτάται δηλαδή από την ικανότητά του να διατηρεί ή να επαναφέρει σε σημείο ισορροπίας την παραγωγή και το φορτίο, χωρίς σημαντικές αποκοπές φορτίου.

Μεγάλες μεταβολές φορτίου ή παραγωγής οδηγούν σε μεγάλες διαταραχές της συχνότητας, των ροών ισχύος και των τάσεων και άλλων παραμέτρων οι οποίες μπορεί να ενεργοποιούν την λειτουργία διατάξεων ελέγχου και προστασιών. Οι διαδικασίες αυτές μπορεί να είναι αργές, όπως για παράδειγμα η δυναμική απόκριση των ατμοπαραγωγών, είτε γρήγορες όπως η ενεργοποίηση προστασιών. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, τέτοιες καταστάσεις συνήθως σχετίζονται με τις συνθήκες που ακολουθουν τον διαχωρισμό των συστημάτων σε νησιδοποιημένα υποσυστήματα. Η ευστάθεια στην περίπτωση αυτή εξαρτάται από το εάν και κατά πόσον, κάθε νησιδοποιημένο συστημα θα φτάσει στο σημείο ισορροπίας με τις ελάχιστες δυνατές αποκοπές φορτίου. Γενικότερα, τα προβλήματα ευστάθειας συχνότητας σχετίζονται με κακή συνεργασία διατάξεων ελέγχου και προστασίας, και με ανεπαρκή στρεφόμενη εφεδρεία.

Οι μεταβολές της παραγωγής ισχύος (πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας) ενεργοποιείται σε διάστημα δευτερολέπτων και η δευτερεύουσα ρύθμιση διαρκεί για κάποια λεπτά. Γενικότερα η ευστάθεια συχνότητας προσδιορίζεται περισσότερο από την συνολική απόκριση της μέσης συχνότητας, παρά από την σχετική κίνηση των στρεφόμενων μηχανών, συνεπώς η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην χρονική

κλίμακα μετά την επίτευξη ισορροπίας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και των άλλων βραχυπρόθεσμων φαινομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ

4.1 Συμπεράσματα-Επίλογος

Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας, υπάρχουν κάποια σενάρια λειτουργίας τα οποία βελτιώνουν τις ρυθμίσεις στην τάση και τη συχνότητα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, από την απόψη της τεχνικής. Ωστόσο, για να βρεθεί το σενάριο που οδηγεί στην καλύτερη δυνατή εικόνα στον τομέα της ρύθμισης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα σύνολο παραγόντων και να συμψηφιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε λύσης.

Η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας είναι μία χρήσιμη τεχνική δυνατότητα που θα διασφαλίσει την ομαλή λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ο έλεγχος τάσης επιτυγχάνεται με χρήση μέσων του Συστήματος, και ιδίως με αλλαγή σχέσης τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, με τη διακοπή ή ενεργοποίηση γραμμών ή καλωδίων, χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων αντιστάθμισης, με ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση αυτεπαγωγών και πυκνωτών, και με έλεγχο της χωρητικότητας του Συστήματος. Σε ότι αφορά την ρύθμιση της συχνότητας αυτή διακρίνεται σε πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Ως πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας ορίζεται η αυτόματη διορθωτική αντίδραση που λαμβάνει χώρα εντός τριάντα (30) δευτερολέπτων μετά την εκδήλωση κάποιας μεταβολής στη συχνότητα. Η αυτόματη διορθωτική αντίδραση μπορεί να είναι το αποτέλεσμα είτε της μεταβολής του φορτίου των κινητήρων λόγω της μεταβολής της συχνότητας, είτε της αυτόματης ρύθμισης της Ενεργού Ισχύος εξόδου των Μονάδων ανάλογα με το στατισμό του ρυθμιστή φορτίου. Ως δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας ορίζεται η ρύθμιση η οποία είναι το αποτέλεσμα συνδυασμού χειροκίνητων και αυτόματων ενεργειών, και λαμβάνει χώρα σε χρονικό διάστημα μεταξύ είκοσι πέντε (25) δευτερολέπτων και δέκα πέντε (15) λεπτών μετά τη μεταβολή της συχνότητας. Τέτοιες ενέργειες είναι ιδίως η αυτόματη αντίδραση του ρυθμιστή φορτίου ή άλλων συστημάτων ελέγχου των Μονάδων, η χειροκίνητη αύξηση της Ενεργού Ισχύος εξόδου των Μονάδων που γίνεται κατ' εκτέλεση Εντολών Κατανομής, και η χρήση συστήματος αυτόματης ρύθμισης παραγωγής που επιδρά άμεσα στην Ενεργό Ισχύ εξόδου των Μονάδων. Η ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αναγνωρίζεται ως ένα σημαντικό ζήτημα για την

ασφαλή τους λειτουργία και είναι σημαντική , ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο.

Γενικά γίνονται πολλές έρευνες ώστε να αναπτυχθούν εφαρμογές στα πεδία του ελέγχου τάσης, συχνότητας, όπως και ταχύτητας, υπολογισμού ροής ρότορα και άμεσου ελέγχου της ροπής. Στο εγγύς μέλλον η μέθοδος ελέγχου και ρύθμισης τόσο της τάσης όσο και της συχνότητας προβλέπεται να γίνεται ψηφιακά και με τ μεγίστη λεπτομέρεια, με σκόπο την καλύτρη απόδοση του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) B.M Weedy, Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας, Ιανουάριος 1980
2) Β.Κ. Παπαδιά – Κ. Βουρνά, Παραγωγή Ηλεκτρικλης Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας Τάσεως, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
3) Κ. Βουρνά – Γ. Κονταξή, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα 2001
4) Ι.Α. Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β', Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
5) Πολύκαρπος Αντρέ Χριστοφορίδης , Διπλωματική Εργασία, Μέθοδοι Ρύθμισης Τάσης Διανομής και Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς Ακτινικού Δικτύου, Αθήνα 2012
6) Χαράλαμπος Α. Λάμπρου, Διπλωματική Εργασία, Ανάλυση Ευστάθεως Τάσεως Υβριδικού Συστήματος Δυναμικών Φορτίων και ΣΑΤΥΦ, Αθήνα 2008
7) http://www.desmie.gr/