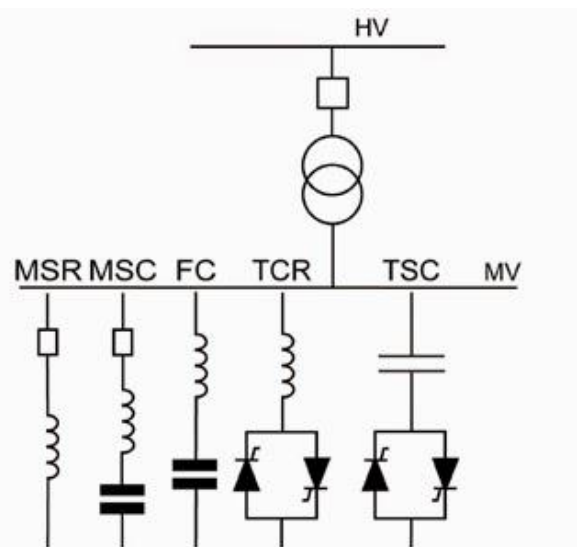


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΠΟΥ  
ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ  
ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ



SVCs (Static VAr Compensators)

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2016



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο Μεταπτυχιακό πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, με τίτλο: «Μελέτη δικτύου υψηλής τάσης που περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια και ηλεκτρονικά ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης» και αναφέρεται στη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από μία ανεμογεννήτρια που συνδέεται σε δίκτυο υψηλής τάσης.

Ξεκινώντας γίνεται αναφορά στις επιμέρους διατάξεις από τις οποίες αποτελείται ένα δίκτυο υψηλής τάσης και στις αρχές που το διέπουν για την ομαλή λειτουργία του. Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο του συστήματος και ο σχεδιασμός του ελεγκτή, ώστε σε όποια διαφοροποίηση στις παραμέτρους του, που οφείλονται στη σύνδεση του αιολικού πάρκου στο δίκτυο, να αποκρίνεται αυτόματα σε πραγματικό χρόνο, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την συμπαράσταση που μου παρείχε κατά την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Σχοινά, Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την καθοδήγηση και βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Αδαμόπουλος Θεόδωρος  
Σεπτέμβριος 2016

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής  
(Ονοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάμε τη ρύθμιση της τάσης ενός ζυγού σε ένα δίκτυο. Ο ζυγός δέχεται πραγματική ισχύ από ένα αιολικό πάρκο μέσω ενός καλωδίου υψηλής τάσης. Οι τεράστιες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές στην ανταλλαγή της πραγματικής και άεργου ισχύος μεταξύ του καλωδίου και του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση του ζυγού να μην είναι σταθερή. Η εγκατάσταση ενός Στατικού Αντισταθμιστή Αέργου Ισχύος SVC είναι μια λογική επιλογή για τη σταθεροποίηση της τάσης.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές των ηλεκτρικών κυκλωμάτων που σχετίζονται άμεσα με τη μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται παρουσίαση των τριφασικών κυκλωμάτων, των στοιχείων που τα αποτελούν και όλων των πιθανών συνδεσμολογιών μεταξύ τους. Επίσης γίνεται ανάλυση των τάσεων, των ρευμάτων και της παραγωγής ισχύος στα τριφασικά κυκλώματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία των μετασχηματιστών ισχύος και η χρήση τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας και παρουσιάζεται η εν κενώ λειτουργία και υπό φορτίο του μονοφασικού μετασχηματιστή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα του μετασχηματιστή και οι συνδεσμολογίες του τριφασικού μετασχηματιστή.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι ηλεκτρικές γεννήτριες και συγκεκριμένα παρουσιάζεται η σύγχρονη γεννήτρια η οποία βρίσκει εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες. Ακολουθεί η λεπτομερής περιγραφή της αρχής λειτουργίας της, η ανάπτυξη της τάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας, καθώς επίσης και οι παράμετροι που επηρεάζουν την ταχύτητα περιστροφής της. Αναπτύσσονται τα ισοδύναμα κυκλώματα των γεννητριών κυλινδρικού δρομέα και εκτύπων πόλων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση στο σύστημα των ανά μονάδα μεγεθών, της επιλογής των βασικών μεγεθών και της ανά μονάδα παράστασης διαφόρων τύπων φορτίων. Επίσης παρουσιάζεται η ανά μονάδα ανάλυση του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή και περιγράφεται η μεθοδολογία αλλαγής βάσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των τρόπων ελέγχου της τάσης των ζυγών μέσω της αντισταθμίσεως της άεργου ισχύος. Περιγράφονται οι

κλασικές μέθοδοι αντιστάθμισης: η εν σειρά αντιστάθμιση, η εγκάρσια αντιστάθμιση και η αντιστάθμιση μέσω μετασχηματιστών ρύθμισης τάσης. Ακολουθούν οι διατάξεις των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος (FACTS) και οι κατηγορίες τους ανάλογα με την παράμετρο της γραμμής μεταφοράς που επιδρούν. Έτσι ο SVC επιδρά στην τάση, ο TCSC στην εν σειρά αντίδραση και ο TCPAR στη φασική γωνία. Το κεφάλαιο κλείνει με τη δεύτερη κατηγορία των FACTS διατάξεων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο Στατικός Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM), ο Στατικός Σύγχρονος Σειριακός Αντισταθμιστής (SSSC) και ο Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC).

Στο έκτο κεφάλαιο ακολουθεί μία εφαρμογή ρύθμισης της τάσης ενός ζυγού σε ένα δίκτυο. Ο ζυγός δέχεται πραγματική ισχύ από ένα αιολικό πάρκο μέσω ενός καλωδίου υψηλής τάσης. Οι τεράστιες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές στην ανταλλαγή της πραγματικής και άεργου ισχύος μεταξύ του καλωδίου και του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση του ζυγού να μην είναι σταθερή. Η εγκατάσταση ενός SVC είναι μια λογική επιλογή για τη σταθεροποίηση της τάσης. Ο SVC χρειάζεται έναν ελεγκτή ο οποίος σύμφωνα με τη διαφορά της μετρούμενης από την ονομαστική τάση, καθορίζει το ισοδύναμο αγωγιμότητας του SVC. Έτσι, επιτυγχάνεται το σωστό ποσό της άεργου ισχύος μεταξύ του δικτύου και του SVC. Προτείνεται μία τεχνική σχεδιασμού για τον ελεγκτή, η οποία βασίζεται στη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου. Τέλος, συμπεραίνουμε ότι η απόκριση του όλου συστήματος είναι ικανοποιητική και η εφαρμογή των ελεγκτών είναι απλή γιατί οι προτεινόμενες τεχνικές καταλήγουν σε PI ελεγκτές. Παρά τις μεγάλες διακυμάνσεις στην ανταλλαγή της πραγματικής και άεργου ισχύος μεταξύ του αιολικού πάρκου και του δικτύου, η διακύμανση της τάσης δικτύου είναι μικρότερη από 1,5%.

## ABSTRACT

This thesis describes the cooperation between a power station, which in our case consists of a wind turbine and the high-voltage grid, with the purpose of powering a power system. The aim for this system is to make assessment of the state of the electrical quantities of the various points, so as the power generated by the wind turbine, to be automatically provided or absorbed by the load, for optimal system operation.

The development of the subject is through six chapters. The first chapter is a reference to the basic principles of electrical circuits which are directly related to the study of power systems. It becomes a presentation of three-phase circuits and the elements that constitute all the possible connections between them. Also an analysis of trends, currents and power generation in three-phase circuits.

The second chapter describes the operation of power transformers and their use in electrical power systems. There is a detailed description of the operation and shown in no and under load of the single-phase transformer. They also show the equivalent circuits of the transformer and the circuits of three-phase transformer.

The third chapter describes the electrical generators and specifically shows the synchronous generator, which finds application in wind turbines. Following is a detailed description of its operating principle, the creation of voltage within the generator, and the parameters that affect the speed of rotation. The equivalent circuits of the cylindrical rotor generators and salient pole type generators developed.

In the fourth chapter there is an analysis in the per-unit system, the choice of base quantities and the performance of per-unit system in various types of load. There is also a presentation of per-unit analysis on the single-phase equivalent circuit of the transformer and the base change methodology is shown.

In the fifth chapter there is a description on how to control the busbar voltage through compensation of reactive power. There is also a description on the classical methods of compensation: the series compensation, the shunt compensation and compensation through voltage regulation transformers. The flexible alternative current transmission systems (FACTS) devices description follows and their categories according to which transmission line parameter

affect. Thus the SVC regulates the voltage, the TCSC affects the line susceptance and the TCPAR performs phase shifting. The chapter ends with the second category of FACTS devices. In this category there are STATCOM, SSSC and UPFC devices.

In the sixth chapter there is an implementation of a busbar voltage regulation in a grid. The bus accepts real power from a wind park through a medium voltage cable. The huge changes of the wind speed result in large alterations in the exchange of real and reactive power between the cable and the grid. As a result, the voltage of the bus is not stable. The installation of an SVC is a rational choice for the stabilization of the voltage. The SVC needs a controller which according to the difference of the measured voltage from its nominal value, it defines the equivalent susceptance of the SVC in order the right amount of reactive power between the grid and the SVC to be achieved. A design technique of the controller is proposed, that based on the theory of optimal control. The response of the system is satisfactory and the implementation of the controllers easy because the proposed techniques result in PI controllers. Despite the large variations in the exchange of real and reactive power between the wind park and the grid, the variation of the grid voltage is under 1.5%.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ABSTRACT ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και μέθοδοι ελέγχου της τάσης κατά τη σύνδεση ενός αιολικού πάρκου στο δίκτυο.....1

### 1. ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.1 Εισαγωγή.....4  
1.2 Ηλεκτρικά μεγέθη (τάση, ρεύμα και ισχύς) τριφασικών συστημάτων.....5  
1.3 Τριφασικές συνδέσεις σε αστέρα (Υ) & τρίγωνο (Δ).....9  
1.4 Τριφασικά φορτία.....14  
1.5 Ανάλυση κυκλωμάτων συμμετρικών τριφασικών συστημάτων.....17

### 2. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.1 Εισαγωγή.....19  
2.2 Δομή μετασχηματιστή.....19  
2.3 Αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή.....20  
2.4 Εν κενώ λειτουργία του μετασχηματιστή.....21  
2.5 Απώλειες μετασχηματιστή.....23  
2.6 Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή.....25  
2.7 Αναγωγή κυκλώματος Μ/Σ στο πρωτεύον – δευτερεύον τύλιγμα.....27  
2.8 Μαγνητικά συζευγμένα κυκλώματα.....31  
2.9 Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών.....35

### 3. ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

3.1 Εισαγωγή.....42  
3.2 Δομή σύγχρονης γεννήτριας.....42  
3.3 Ταχύτητα περιστροφής σύγχρονης γεννήτριας.....43  
3.4 Τάση στο εσωτερικό της γεννήτριας.....43  
3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα.....51  
3.6 Ισχύς σύγχρονης γεννήτριας.....54  
3.7 Διάγραμμα λειτουργίας.....58  
3.8 Σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων.....60

#### **4. ΤΟ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΓΕΘΩΝ**

4.1 Εισαγωγή.....	67
4.2 Βασικά μεγέθη.....	68
4.3 Αλλαγή βάσης.....	71

#### **5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΩΝ**

5.1 Εισαγωγή.....	72
5.2 Αντιστάθμιση εν σειρά.....	72
5.3 Εγκάρσια αντιστάθμιση.....	73
5.4 Ρύθμιση φασικής γωνίας και μέτρου τάσης.....	73
5.5 Προβλήματα στις κλασικές μεθόδους αντιστάθμισης.....	74
5.6 Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (FACTS).....	75
5.6.1 Εισαγωγή των FACTS στα Σύγχρονα ΣΗΕ.....	75
5.6.2 Χρήση των Facts.....	75
5.7 Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος (facts διατάξεις) και εξέλιξη των κλασικών μεθόδων έλεγχου.....	76
5.7.1 Πυκνωτής σειράς ελεγχόμενος από θυρίστορ (TCSC).....	76
5.7.2 Στατικός αντισταθμιστής αέργου ισχύος (SVC).....	77
5.7.3 Ρυθμιστής φασικής γωνίας ελεγχόμενος από θυρίστορ (TCPAR).....	79
5.8 Οι μετατροπείς πηγής τάσης/ρεύματος στα FACTS.....	80
5.8.1 Αντιστάθμιση εν σειρά.....	80
5.8.2 Εγκάρσια αντιστάθμιση.....	81
5.8.3 Ρύθμιση φασικής γωνίας.....	82

#### **6. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΖΥΓΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SVC**

6.1 Περίληψη.....	85
6.2 Εισαγωγή.....	85
6.3 Περιγραφή και μοντελοποίηση του συστήματος.....	86
6.4 Βέλτιστος σχεδιασμός ελέγχου.....	90
6.5 Μη γραμμικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος.....	92
6.6 Συμπεράσματα.....	95
6.7 Παράρτημα.....	96

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>97</b>
--------------------------	-----------

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΛΟΓΩ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΕ (ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ)

Η διείσδυση των Α.Π.Ε. στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί στις μέρες μας έχοντας σαν αποτέλεσμα, σε αρκετά σύγχρονα συστήματα ισχύος, να περιπλέκεται ο διαχωρισμός μεταξύ παραγωγών ενέργειας και των χρηστών του δικτύου, καθώς μικρότερες σε μέγεθος αλλά και οικονομικότερες γεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν κοντά στα φορτία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μικρές φωτοβολταϊκές γεννήτριες ή μικρές ανεμογεννήτριες, οι οποίες μπορούν να τοποθετηθούν στις στέγες των κατοικιών ή στον προαύλιο χώρο τους αποτελώντας μια εναλλακτική λύση, αφού απαιτούν μικρή συντήρηση, συντελώντας στη μείωση του κόστους της παραγόμενης κιλοβατώρας και στη μείωση των απωλειών λόγω μεταφοράς αφού τα φορτία βρίσκονται κοντά στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

Η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική ενέργεια και η βιομάζα, αποτελούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας οι οποίες ονομάζονται και πράσινη ενέργεια γιατί δεν εκλύουν διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στο περιβάλλον κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντικαθιστούν σε μικρό ποσοστό τα ορυκτά καύσιμα, είναι ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον. Στόχος είναι η αύξηση του ποσοστού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και όσο το δυνατόν μείωση του ποσοστού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Το (Σ.Η.Ε.) Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από το σύνολο των υποδομών που απαιτούνται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών σε μια ευρύτερη περιοχή. Όλα τα συστήματα είναι τριφασικά, εναλλασσόμενου ρεύματος και έχουν συχνότητα λειτουργίας 50 Hz.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

α) Στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους απαραίτητους υποσταθμούς για την ανύψωση της τάσης και την είσοδό της στο σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

β) Στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από τον αναγκαίο εξοπλισμό για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα επίπεδα υψηλής τάσης μεταξύ των κέντρων παραγωγής και των κέντρων κατανάλωσης, καθώς και για τη διασύνδεση με άλλα Σ.Η.Ε. Κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σημειώνονται απώλειες λόγω των αντιστάσεων των αγωγών που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό το λόγο η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υψηλές τάσεις (66kV, 150kV, 400kV) οι οποίες απαιτούν μικρότερα ρεύματα. (Οι απώλειες στους αγωγούς είναι ανάλογες του τετραγώνου της τιμής του ρεύματος, επομένως για λειτουργία της γραμμής μεταφοράς σε διπλάσια τάση έχουμε απώλειες ίσες με το 1/4 των αντίστοιχων στη χαμηλότερη τάση). Η μετατροπή των τάσεων γίνεται στους υποσταθμούς.

γ) Στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα διανομής αποτελείται από το σύνολο των υποδομών (υποσταθμοί, διατάξεις διακοπής, ελέγχου και προστασίας) μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης. Διακρίνεται στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (20kV) τα οποία μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής και στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (230/400 V) τα οποία μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

Σημαντική είναι η γεωγραφική εξάπλωση των συστημάτων ισχύος μεγάλης κλίμακας, τα τελευταία χρόνια, γεγονός που οφείλεται στη διασύνδεση γειτονικών δικτύων μεταξύ τους. Σαφές είναι ότι απαιτούνται προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές για τον κατάλληλο σχεδιασμό, λειτουργία και έλεγχο των συστημάτων αυτών.

Στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας εκτός των συμβατικών θερμικών σταθμών και υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, των φορτίων (καταναλωτών) έχουν εισέλθει δυναμικά και οι ΑΠΕ σημαντικό μερίδιο των οποίων αποτελούν τα αιολικά πάρκα (ανεμογεννήτριες).

Η ένταξη των ανεμογεννητριών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός από σημαντικά πλεονεκτήματα (ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, κ.ά.) συνεπάγεται και κάποια προβλήματα. Οι εναλλαγές του ανέμου προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις στην ισχύ που απομαστεύεται από τον άνεμο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών και ηλεκτρικών ταλαντώσεων καθώς και τη μείωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος η οποία τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στην περίπτωση της διεσπαρμένης παραγωγής, όπου τα δίκτυα με τα οποία συνδέονται τα αιολικά πάρκα είναι συνήθως ασθενή. Οι κυριότερες επιπτώσεις κατά την σύνδεση των αιολικών πάρκων στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι παρακάτω :

- αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων (αστάθεια τάσης)
- μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης
- αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου
- Η έκθεση σε κίνδυνο της ευστάθειας του συστήματος

Αρκετά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Οι διατάξεις των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος (FACTS) κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την επίδρασή τους στη γραμμής μεταφοράς. Έτσι ο SVC επιδρά στην τάση, ο TCSC στην εν σειρά αντίδραση και ο TCPAR στη φασική γωνία. Υπάρχει και μια νέα κατηγορία των FACTS διατάξεων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο Στατικός Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM), ο Στατικός Σύγχρονος Σειριακός Αντισταθμιστής (SSSC) και ο Ένοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC).

Στην παρούσα εργασία (όπως φαίνεται στο 6ο κεφάλαιο) σχεδιάζουμε και επαληθεύουμε με εξομοίωση τη ρύθμιση της τάσης με χρήση SVC σε ένα αιολικό πάρκο ισχύος 40 MW περίπου.

# 1. ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πλην της παραγωγής από φωτοβολταϊκές γεννήτριες, όπως επίσης και η μεταφορά ισχύος γίνονται με τη μορφή τριφασικής εναλλασσόμενης ισχύος. Ένα τριφασικό σύστημα ισχύος αποτελείται από τριφασικές γεννήτριες, τριφασικές γραμμές μεταφοράς και φορτία.

Τα τριφασικά συστήματα χρησιμοποιούνται κατ' αποκλειστικότητα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν:

α) Έναντι των μονοφασικών συστημάτων εναλλασσόμενης ισχύος είναι δυνατή η απολαβή περισσότερης ισχύος ανά μονάδα βάρους μετάλλου από μία τριφασική μηχανή.

β) Οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς είναι μικρότερες για τριφασικά ρεύματα με αποτέλεσμα η απαιτούμενη διατομή των αγωγών να είναι μικρότερη από ότι σε αντίστοιχα μονοφασικά.

γ) Στα τριφασικά συστήματα η στιγμιαία ισχύς είναι σταθερή και ίση με τη μέση ισχύ, ενώ στα μονοφασικά συστήματα μεταβάλλεται με το χρόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατασκευή και η λειτουργία των τριφασικών μηχανών και κινητήρων να είναι απλούστερη, οικονομικότερη και πιο σταθερή.

δ) Έναντι των συστημάτων συνεχούς ισχύος παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της ικανότητας να μεταβάλουν το επίπεδο της τάσης, με σκοπό τη μείωση των απωλειών μεταφοράς. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής είναι μία διάταξη, που αποτελείται από πηνία. Η επαγωγική αντίσταση  $X_L$  του πηνίου ισούται με  $X_L = jL\omega$  σε *Ohm*, όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα σε *rad/sec* και  $L$  η αυτεπαγωγή του πηνίου σε *Henry*. Στο συνεχές ρεύμα (DC) όμως η συχνότητα  $f$  ισούται με μηδέν, επομένως  $\omega = 2\pi f = 0$  και  $jL\omega = 0$ . Δηλαδή στο συνεχές ρεύμα το πηνίο λειτουργεί σαν βραχυκύκλωμα. Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο μετασχηματιστής δεν έχει εφαρμογή σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος.

Θεωρούμε μία γραμμή μεταφοράς μήκους  $l$  και διατομής  $d$ , η οποία μεταφέρει ισχύ  $P$  με τάση  $V$ , ρεύμα έντασης  $I$  και συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ , σε σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, τότε ισχύει ότι:

$$P=VI\cos\varphi \Rightarrow I = \frac{P}{V\cos\varphi} \quad (1.1)$$

Οι απώλειες ισχύος  $\rho$  σε μία γραμμή μεταφοράς, με ολική αντίσταση της γραμμής ίση με  $R$ , δίνονται από τον ακόλουθο τύπο,

$$\rho = I^2 R = \left( \frac{P}{V\cos\varphi} \right)^2 R \quad (1.2)$$

και όπως φαίνεται στον τύπο (1.2) είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος της γραμμής και αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της τάσης μεταφοράς.

Έτσι αν διπλασιάσουμε την τάση πριν τη μεταφορά της οδηγούμαστε σε υποτετραπλασιασμό των απωλειών ισχύος λόγω μεταφοράς.

## 1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ (ΤΑΣΗ, ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ) ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κάθε τριφασική γεννήτρια ουσιαστικά αποτελείται από τρεις μονοφασικές γεννήτριες, των οποίων οι τάσεις είναι ίσες σε μέτρο αλλά παρουσιάζουν διαφορά φάσης  $120^\circ$  η μία από τις άλλες. Η τάση της κάθε γεννήτριας δίδεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

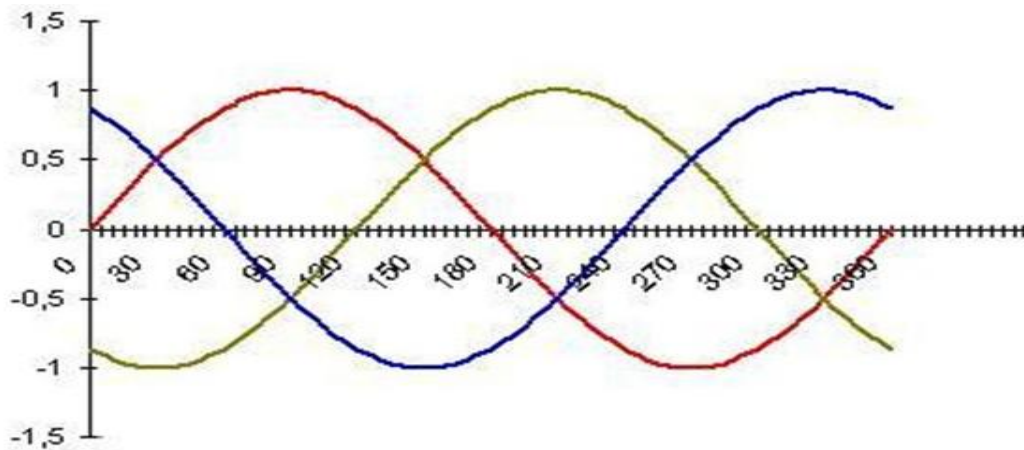
$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_m \sin(\omega t) \\ u_2(t) &= U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_3(t) &= U_m \sin(\omega t - 240^\circ) = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1.3)$$

η γενική μορφή της τάσης είναι:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1.4)$$

$u(t)$  η εναλλασσόμενη τάση,  
 $U_m$  το πλάτος  
 $\omega t + \theta = \varphi$ , η φάση

Στο ακόλουθο σχήμα παρατηρούμε τις κυματομορφές τριών τάσεων με ίδιο μέτρο και διαφορά φάσης  $120^\circ$  μεταξύ τους:



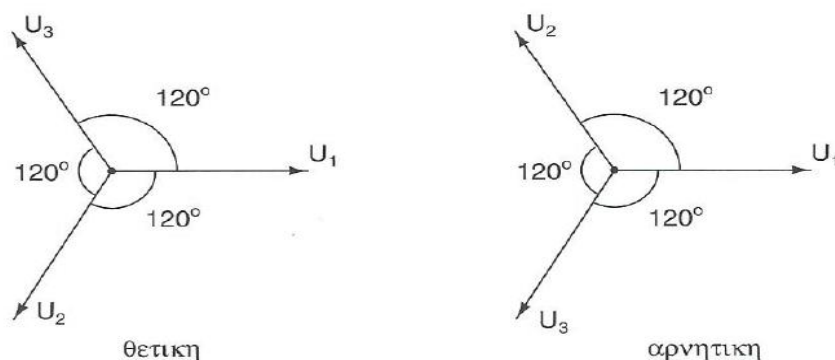
**Σχήμα 1Α:** Κυματομορφές τάσεων τριφασικής πηγής.

Οι εναλλασσόμενες τάσεις του σχήματος μπορούν να εκφραστούν με στρεφόμενα διανύσματα (πολική μορφή) ένα μέγεθος που συμπεριλαμβάνει το πλάτος και τη φάση, στην προκειμένη περίπτωση, της τάσης, οπότε είναι δυνατόν να σχεδιαστούν σε δύο διαστάσεις. Επειδή σε μετρήσεις χρησιμοποιείται η ενεργός τιμή, η σχέση που συνδέει το πλάτος  $U_m$  με την ενεργό τιμή  $U_{rms}$  είναι  $U_{rms} = U_m / \sqrt{2}$ . Άρα οι τάσεις σε πολική μορφή περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_2 &= U \angle -120^\circ \\ \dot{U}_3 &= U \angle -240^\circ = U \angle +120^\circ \end{aligned} \quad (1.5)$$

με  $\dot{U}$  συμβολίζεται ο αντίστοιχος φάσορας της τάσης  $U_x$ .

Η διαδοχή αυτή των φάσεων είναι η θετική διαδοχή, επειδή στο διανυσματικό διάγραμμα τάσεων τα παραπάνω διανύσματα έχουν δεξιόστροφη φορά. Η αριστερόστροφη φορά ορίζεται ως αρνητική διαδοχή. Και οι δύο τύποι διαδοχής των φάσεων φαίνονται στο σχήμα (1B).



**Σχήμα 1B:** Θετική και αρνητική διαδοχή φάσεων.



Συνδέοντας στα άκρα της γεννήτριας φορτίο μεγέθους  $Z\angle\theta^\circ$ , τότε θα έχουμε ροή ρεύματος από τη γεννήτρια προς το φορτίο. Το ρεύμα  $I$  στο φορτίο δίνεται από την εξίσωση:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (1.6)$$

Τα ρεύματα σε κάθε μία από τις τρεις φάσεις θα είναι:

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{V\angle 0^\circ}{Z\angle\theta^\circ} = I\angle -\theta^\circ \\ I_B &= \frac{V\angle -120^\circ}{Z\angle\theta^\circ} = I\angle -120^\circ - \theta^\circ \\ I_C &= \frac{V\angle 120^\circ}{Z\angle\theta^\circ} = I\angle 120^\circ - \theta^\circ \end{aligned} \quad (1.7)$$

Το φορτίο τώρα τροφοδοτείται με ισχύ. Αν αντικαταστήσουμε το πλάτος με την ενεργό τιμή στη σχέση (1.4) η κάθε μία από τις 3 φάσεις στο φορτίο δίνεται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= \sqrt{2} U \sin(\omega t) \\ u_B(t) &= \sqrt{2} U \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C(t) &= \sqrt{2} U \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1.8)$$

και τα αντίστοιχα ρεύματα των 3 φάσεων από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} i_A(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t) \\ i_B(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Η στιγμιαία πραγματική ισχύς σε μια φάση του φορτίου δίνεται από την σχέση:

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (1.10)$$

Άρα, η παρεχόμενη ισχύς κάθε φάσης του φορτίου θα είναι:

$$\begin{aligned} p_A(t) &= u_A(t) i_A(t) = 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) \\ p_B(t) &= u_B(t) i_B(t) = 2VI \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t - 120^\circ - \theta) \\ p_C(t) &= u_C(t) i_C(t) = 2VI \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(\omega t + 120^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (1.11)$$

Χρησιμοποιώντας την ακόλουθη τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha-\beta) - \cos(\alpha+\beta)] \quad (1.12)$$

Συνδυάζοντας (1.11) και (1.12) η ισχύς στην κάθε φάση του φορτίου που προκύπτει, θα είναι:

$$\begin{aligned} p_A(t) &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) = 2VI \frac{1}{2} [\cos(\omega t - \omega t - \theta) - \cos(\omega t + \omega t - \theta)] \\ &= VI [\cos(-\theta) - \cos(2\omega t - \theta)] = VI [\cos(\theta) - \cos(2\omega t - \theta)] \end{aligned} \quad (1.13)$$

Ομοίως για τις φάσεις B και C:

$$p_B(t) = VI [\cos(\theta) - \cos(2\omega t - 120^\circ - \theta)] \quad (1.14)$$

$$p_C(t) = VI [\cos(\theta) - \cos(2\omega t + 120^\circ - \theta)] \quad (1.15)$$

Η συνολική πραγματική ισχύς, που παρέχεται στο τριφασικό φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$p_{\text{total}}(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = 3VI \cos(\theta) \quad (1.16)$$

$V$  η τάση στα άκρα του φορτίου

$I$  το ρεύμα στο φορτίο

$\theta$  η διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης στα άκρα του φορτίου

Η συνολική ισχύς που παρέχεται σε ένα τριφασικό φορτίο είναι σταθερή κάθε χρονική στιγμή, σε αντίθεση με τα μονοφασικά συστήματα που είναι μεταβαλλόμενη.

Το συνημίτονο της διαφοράς φάσης  $\theta$  ονομάζεται συντελεστής ισχύος του φορτίου και εκφράζει το λόγο της πραγματικής ισχύος  $P$  προς τη φαινόμενη ισχύς  $S$  του φορτίου. Τα περισσότερα φορτία στην πράξη για τη λειτουργία τους, εκτός από την παραγωγή πραγματικής ισχύος χρειάζονται και την παραγωγή άεργης ισχύος. Η άεργη ισχύς, η οποία χρησιμεύει για την παραγωγή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων των συσκευών των καταναλωτών, δεν καταναλώνεται, αλλά είναι απαραίτητη, γιατί μέσω αυτής είναι δυνατή και η ροή της πραγματικής ισχύος για την παραγωγή ωφέλιμου έργου. Η άεργος ισχύς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q = 3VI \sin(\theta) \quad (1.17)$$

Το σύνολο της ισχύος, η οποία τροφοδοτεί το φορτίο, ορίζεται ως φαινόμενη ισχύς και δίνεται από τον τύπο:

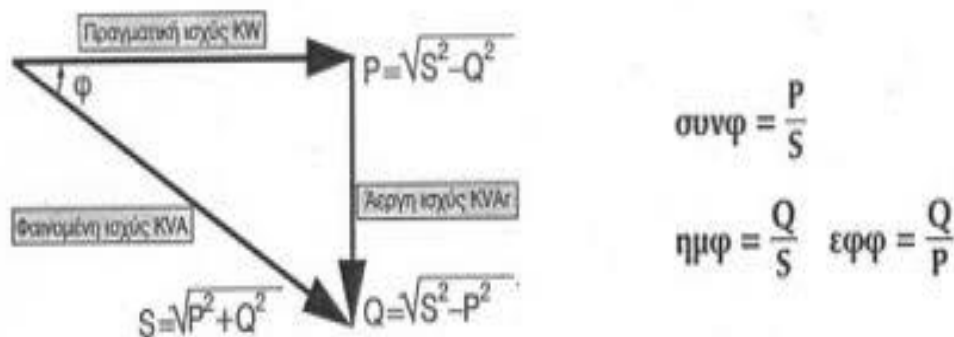
$$S = 3VI \quad (1.18)$$

και ισodύναμα σε καρτεσιανή μορφή:

$$S=3(P+jQ) \quad (1.19)$$

Οι μονάδες μέτρησης της φαινόμενης ισχύος είναι τα Volt-ampere (VA), της πραγματικής τα Watt (W) και της άεργης τα Volt-ampere reactive (Var).

Η φαινόμενη, η ενεργός και η άεργη ισχύς, με τις οποίες τροφοδοτείται ένα φορτίο σχετίζονται μεταξύ τους μέσω του τριγώνου ισχύος το οποίο φαίνεται στο σχήμα (1Γ).

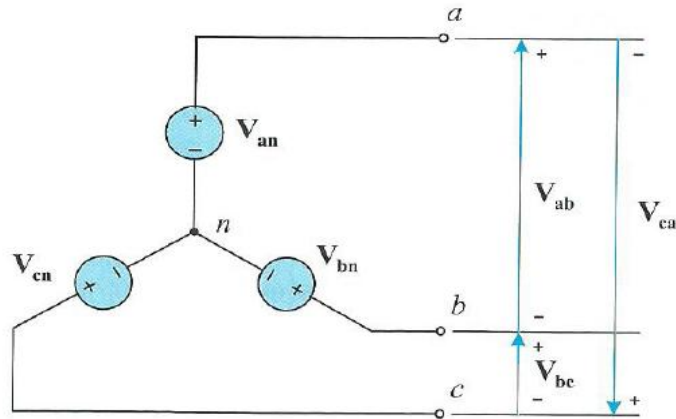


**Σχήμα 1Γ:** Τρίγωνο ισχύος.

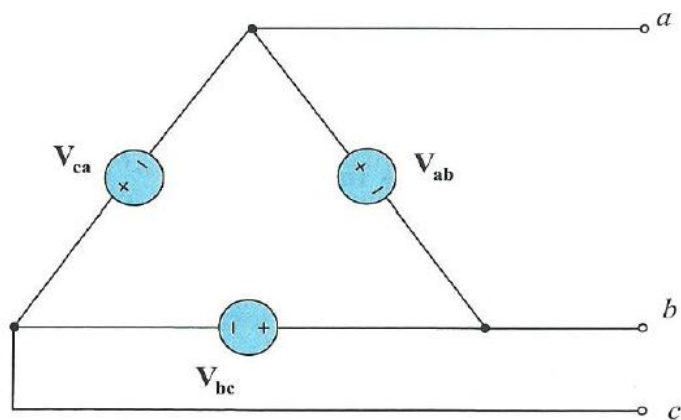
### 1.3 ΤΡΙΦΑΣΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΣΕ ΑΣΤΕΡΑ (Y) ΚΑΙ ΤΡΙΓΩΝΟ (Δ)

Κάθε γεννήτρια και κάθε φορτίο σε ένα τριφασικό σύστημα μπορεί να συνδεθεί σε αστέρα (Y) ή τρίγωνο (Δ). Σε ένα σύστημα ισχύος είναι δυνατή η συνύπαρξη πλήθους γεννητριών και φορτίων συνδεδεμένα σε αστέρα ή σε τρίγωνο. Οι πιθανοί τρόποι συνδεσμολογίας της πηγής με το φορτίο είναι:  $Y \leftrightarrow Y$ ,  $Y \leftrightarrow \Delta$ ,  $\Delta \leftrightarrow Y$ ,  $\Delta \leftrightarrow \Delta$ .

Στα σχήματα (1Δ) και (1Ε) φαίνονται τριφασικές γεννήτριες συνδεδεμένες σε αστέρα και σε τρίγωνο.



**Σχήμα 1Δ:** Συνδεσμολογία πηγών σε αστέρα.



**Σχήμα 1Ε:** Συνδεσμολογία πηγών σε τρίγωνο.

Οι τάσεις και τα ρεύματα μιας φάσης ονομάζονται φασικά μεγέθη και συμβολίζονται με  $U_\phi$ ,  $I_\phi$  αντίστοιχα ενώ οι τάσεις και τα ρεύματα στις γραμμές που συνδέονται στις γεννήτριες ονομάζονται μεγέθη γραμμής ή πολικά μεγέθη και συμβολίζονται με  $U_L$ ,  $I_L$  αντίστοιχα. Οι σχέσεις μεταξύ των φασικών μεγεθών και των μεγεθών γραμμής σε μια γεννήτρια ή φορτίο εξαρτώνται από το είδος της συνδεσμολογίας της γεννήτριας ή του φορτίου.

### Συνδεσμολογία αστέρα Υ

Παίρνουμε την τριφασική γεννήτρια του σχήματος 1Δ, όπου οι φασικές τάσεις έχουν θετική διαδοχή και έχουμε:

$$\begin{aligned}
 U_{an} &= U \angle 0^\circ \\
 U_{bn} &= U \angle -120^\circ \\
 U_{cn} &= U \angle 120^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1.20}$$

$$Ae^{j\theta} = A \angle \theta^\circ \quad (1.21)$$

η σχέση του Euler:

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (1.22)$$

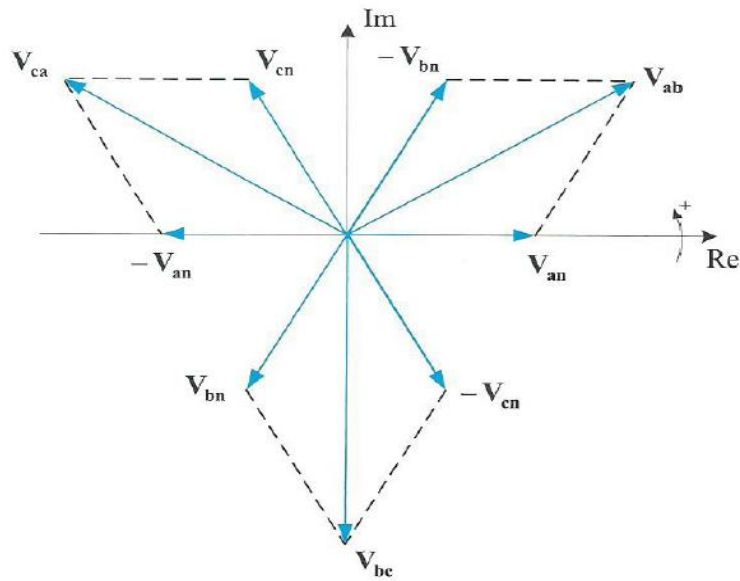
Συνδυάζοντας τον 2ο νόμο του Kirchoff, τη σχέση (1.21) η οποία ισχύει για έναν φάσορα και τη σχέση (1.22) του Euler προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{an} - U_{bn} = \\ &= U \angle 0^\circ - U \angle -120^\circ = \\ &= U e^{j0} - U e^{j(-120)} = \\ &= U(e^{j0} - e^{j(-120)}) = \\ &= U(\cos(0^\circ) + j\sin(0^\circ) - \cos(-120^\circ) - j\sin(-120^\circ)) = \\ &= U\left(1 + 0 + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \\ &= U\left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \\ &= \sqrt{3} U \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right) = \\ &= \sqrt{3} U \angle 30^\circ \end{aligned} \quad (1.23)$$

Προκύπτει λοιπόν ότι οι πολικές τάσεις είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος  $\sqrt{3}$  φορές ως προς τις αντίστοιχες φασικές τάσεις και προηγούνται  $30^\circ$  σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

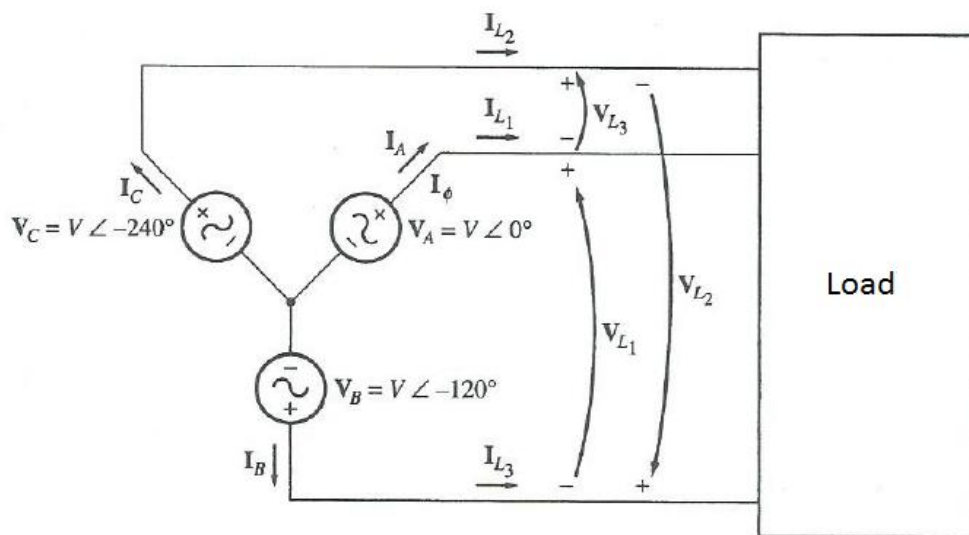
$$\begin{aligned} U_{ab} &= \sqrt{3} U_{an} \angle 30^\circ = \sqrt{3} U \angle 0^\circ + 30^\circ = \sqrt{3} U \angle 30^\circ \\ U_{bc} &= \sqrt{3} U_{bn} \angle 30^\circ = \sqrt{3} U \angle -120^\circ + 30^\circ = \sqrt{3} U \angle 90^\circ \\ U_{ca} &= \sqrt{3} U_{cn} \angle 30^\circ = \sqrt{3} U \angle 120^\circ + 30^\circ = \sqrt{3} U \angle 150^\circ \end{aligned} \quad (1.24)$$

και φαίνονται και στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα 1ΣΤ:** Διανυσματικό διάγραμμα φασικών - πολικών τάσεων για συνδεσμολογία πηγών σε αστέρα.

Συνδέουμε στα άκρα της γεννήτριας ένα φορτίο και σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα, το ρεύμα  $I_L$  της κάθε γραμμής είναι ίσο με το ρεύμα  $I_\phi$  στην αντίστοιχη φάση. Άρα στη συνδεσμολογία αστέρα τα δύο ρεύματα είναι ίσα μεταξύ τους.



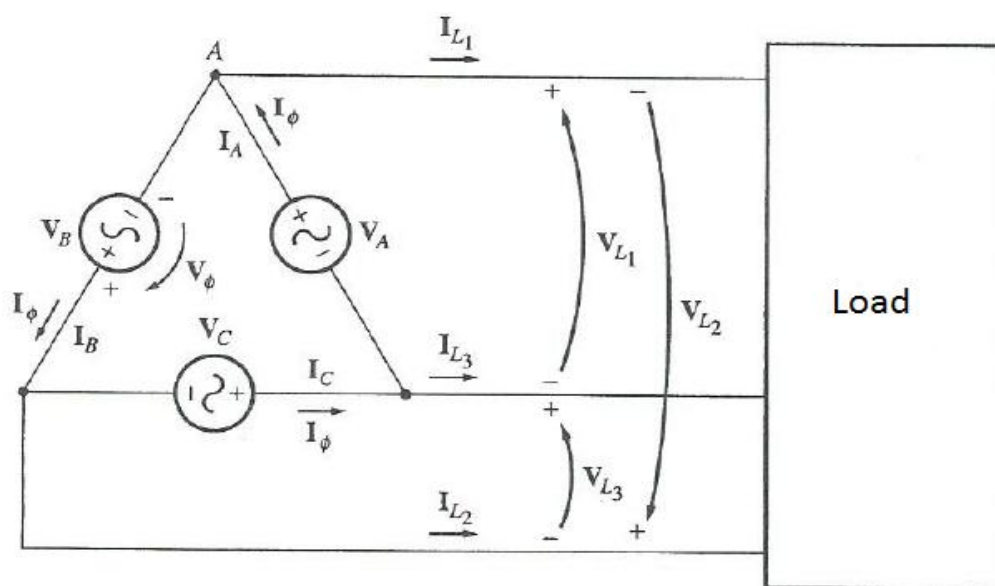
**Σχήμα 1Ζ:** Γεννήτρια σε συνδεσμολογία αστέρα συνδεδεμένη με φορτίο.

## Συνδεσμολογία τριγώνου Δ

Όπως προκύπτει από το σχήμα 1E στη συνδεσμολογία τριγώνου η τάση της κάθε γραμμής είναι ίση με την τάση της αντίστοιχης φάσης.

$$U_L = U_\phi \quad (1.25)$$

Όμως η σχέση μεταξύ του ρεύματος γραμμής  $I_L$  και του φασικού ρεύματος  $I_\phi$ , είναι διαφορετική από την συνδεσμολογία αστέρα, όταν συνδεθεί φορτίο στα άκρα της γεννήτριας, όπως προκύπτει από το ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα 1H:** Γεννήτρια σε συνδεσμολογία τριγώνου συνδεδεμένη σε φορτίο.

Υποθέτουμε ότι το φορτίο, που συνδέεται στη γεννήτρια είναι ωμικό, έτσι το ρεύμα στην κάθε φάση της γεννήτριας θα είναι σε φάση με την αντίστοιχη τάση. Δηλαδή:

$$U_A = U \angle 0^\circ \quad U_B = U \angle -120^\circ \quad U_C = U \angle 120^\circ \quad (1.26)$$

και

$$I_A = I \angle 0^\circ \quad I_B = I \angle -120^\circ \quad I_C = I \angle 120^\circ \quad (1.27)$$

Κάνοντας συνδυασμό των σχέσεων για τον φάσορα και του Euler όπως πριν και εφαρμόζοντας το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff στον κόμβο A του σχήματος 1H προκύπτει ότι:

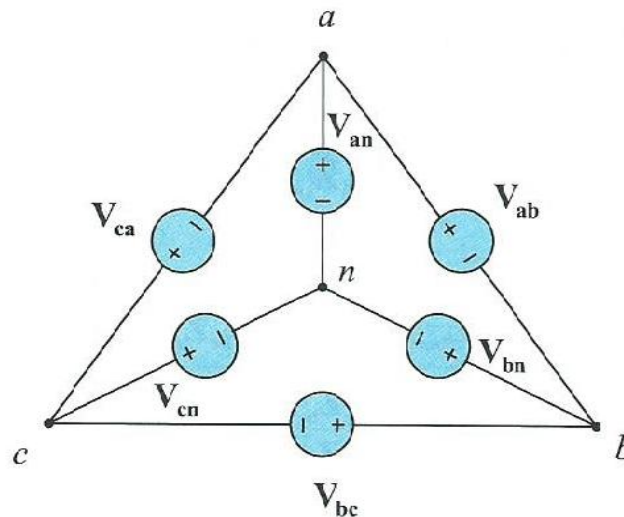
$$I_{L1} = I_A - I_B =$$

$$\begin{aligned}
 &= I\angle 0^\circ - I\angle -120^\circ = \\
 &= \sqrt{3} I\angle 30^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1.28}$$

Προκύπτει ότι τα ρεύματα γραμμής στη συνδεσμολογία τριγώνου είναι  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα αντίστοιχα φασικά ρεύματα και προηγούνται κατά  $30^\circ$ .

Παρόλο που οι σχέσεις μεταξύ των φασικών και πολικών τάσεων και ρευμάτων στις συνδεσμολογίες αστέρα και τριγώνου υπολογίστηκαν υποθέτοντας ότι ο συντελεστής ισχύος είναι μονάδα, αποδεικνύεται ότι οι σχέσεις αυτές ισχύουν και για διαφορετική τιμή του συντελεστή ισχύος.

Κάθε συμμετρική τριφασική πηγή μπορεί να μετατραπεί από συνδεσμολογία  $Y$  σε ισοδύναμη συνδεσμολογία  $\Delta$  και αντίστροφα. Για μετατροπή από  $\Delta$  σε  $Y$ , οι τάσεις στον αστέρα είναι  $\sqrt{3}$  μικρότερες σε μέγεθος των τάσεων του τριγώνου και καθυστερούν ή προηγούνται κατά  $30^\circ$  των τάσεων του τριγώνου για ευθύ ή ανάστροφο αντίστοιχα συμμετρικό  $3\Phi$  σύστημα. Για μετατροπή από  $Y$  σε  $\Delta$  οι τάσεις στο τρίγωνο είναι  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερες σε μέγεθος των τάσεων του αστέρα και προηγούνται ή καθυστερούν κατά  $30^\circ$  των τάσεων του αστέρα για ευθύ ή ανάστροφο αντίστοιχα συμμετρικό  $3\Phi$  σύστημα.



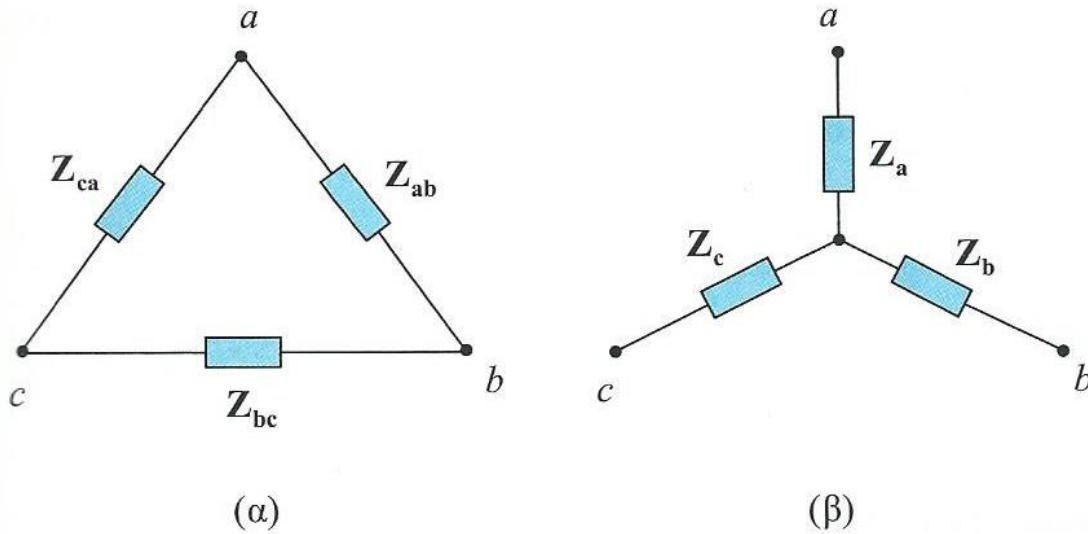
**Σχήμα 1Θ:** Μετασχηματισμός  $3\Phi$  πηγών μεταξύ αστέρα - τριγώνου.

#### 1.4 ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Τα τριφασικά φορτία μπορεί να είναι συμμετρικά ή ασύμμετρα, σε συνδεσμολογίες αστέρα ή τριγώνου, όπως παριστάνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Κάνοντας χρήση του θεωρήματος Kenelly, οποιοδήποτε τριφασικό ασύμμετρο φορτίο μπορεί να μετατραπεί από συνδεσμολογία τριγώνου σε ισοδύναμη συνδεσμολογία αστέρα και αντιστρόφως.



**Σχήμα 11:** Συνδεσμολογίες τριφασικών φορτίων, (α) σε τρίγωνο Δ, και (β) σε Αστέρα Υ.

Μετατροπή από τρίγωνο σε αστέρα ( $\Delta \rightarrow Y$ ): Με βάση το σχήμα 11, για τη μετατροπή της συνδεσμολογίας των φορτίων, σύμφωνα με τις σχέσεις του θεωρήματος Kenelly έχουμε:

$$Z_a = \frac{Z_{ab}Z_{ac}}{Z_{ab}Z_{bc} + Z_{ab}Z_{ac} + Z_{bc}Z_{ac}} \quad (1.29)$$

$$Z_b = \frac{Z_{ab}Z_{bc}}{Z_{ab}Z_{bc} + Z_{ab}Z_{ac} + Z_{bc}Z_{ac}} \quad (1.30)$$

$$Z_c = \frac{Z_{ac}Z_{bc}}{Z_{ab}Z_{bc} + Z_{ab}Z_{ac} + Z_{bc}Z_{ac}} \quad (1.31)$$

Αντιστοίχως για τη μετατροπή από αστέρα σε τρίγωνο ( $Y \rightarrow \Delta$ ) έχουμε:

$$Z_{ab} = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_c} \quad (1.32)$$

$$Z_{bc} = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_a} \quad (1.33)$$

$$Z_{ca} = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_b} \quad (1.34)$$

Όταν έχουμε συμμετρικό τριφασικό φορτίο ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_{\Delta} \quad (1.35)$$

και

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z_Y \quad (1.36)$$

Έστω ότι οι τρεις πλευρές του αστερά είναι ίσες μεταξύ τους με τιμή  $Z_Y$ , τότε προκύπτει ότι και οι τρεις πλευρές του τριγώνου είναι ίσες μεταξύ τους με τιμή:

$$Z_{\Delta} = \frac{3Z_Y^2}{Z_Y} = 3Z_Y \quad (1.37)$$

Αντίστοιχα, αν οι τρεις πλευρές του τριγώνου είναι ίσες μεταξύ τους με τιμή  $Z_{\Delta}$ , τότε και οι τρεις πλευρές του αστερά είναι ίσες μεταξύ τους με τιμή:

$$Z_Y = \frac{Z_{\Delta}^2}{3Z_{\Delta}} = \frac{1}{3}Z_{\Delta} \quad (1.38)$$

Όταν ένα φορτίο συνδέεται σε αστερά, η ισχύς που καταναλώνεται δίνεται από τη σχέση  $P=3V_{\phi}I_{\phi}\cos\theta$ . Επίσης ισχύει ότι  $I_L = I_{\phi}$  και  $U_L = \sqrt{3} U_{\phi}$ , έτσι η ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$P=3V_{\phi}I_{\phi}\cos\theta=3\frac{U_L}{\sqrt{3}}I_L\cos\theta=\sqrt{3}U_LI_L\cos\theta \quad (1.39)$$

Ομοίως για ένα φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο, ισχύουν  $I_L = \sqrt{3} I_{\phi}$  και  $U_L = U_{\phi}$ . Έτσι προκύπτει ότι:

$$P=3V_{\phi}I_{\phi}\cos\theta=3U_L\frac{I_L}{\sqrt{3}}\cos\theta=\sqrt{3}U_LI_L\cos\theta \quad (1.40)$$

Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η ισχύς ενός τριφασικού συμμετρικού φορτίου είναι ανεξάρτητη του τρόπου σύνδεσης του φορτίου.

Αντιστοίχως για την άεργο και φαινόμενη ισχύ έχουμε:

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \theta \quad (1.41)$$

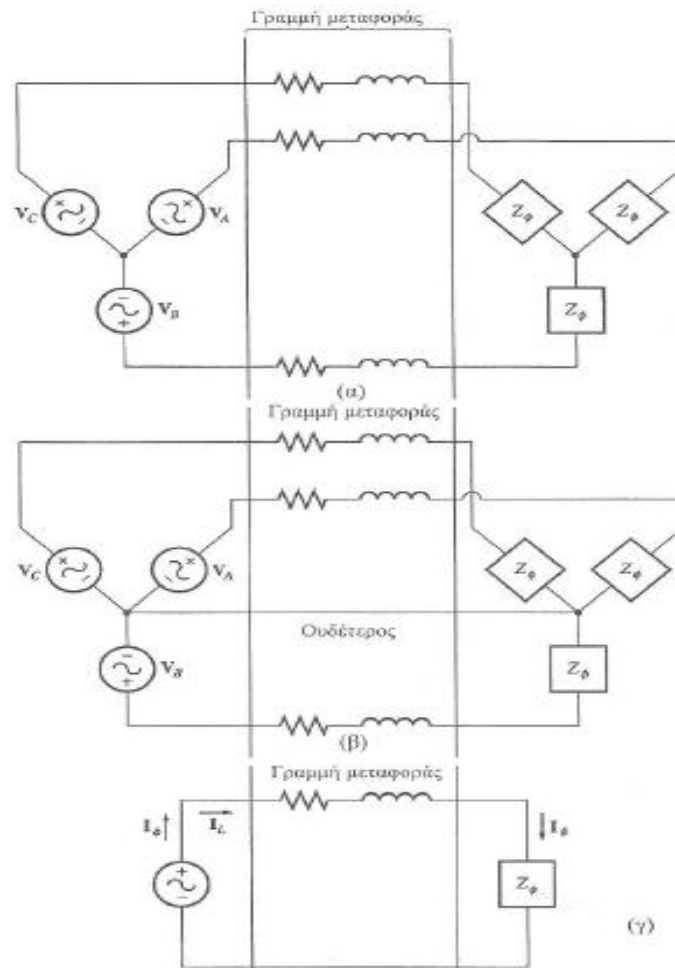
$$S = \sqrt{3} U_L I_L \quad (1.42)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η γωνία  $\theta$  εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ της φασικής τάσης και του φασικού ρεύματος και όχι μεταξύ της τάσης γραμμής και του ρεύματος γραμμής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω μεταξύ της τάσης γραμμής και της φασικής τάσης στη συνδεσμολογία αστέρα υπάρχει διαφορά φάσης  $30^\circ$ , όπως επίσης και ανάμεσα στο ρεύμα γραμμής και το φασικό ρεύμα στη συνδεσμολογία τριγώνου.

## 1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Έστω ότι έχουμε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ισχύος, γεγονός που σημαίνει ότι οι πηγές είναι ίδιες μεταξύ τους, έχοντας μόνο διαφορά φάσης, όπως επίσης και ότι τα φορτία είναι ίσα μεταξύ τους, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε τις τάσεις, τα ρεύματα και της ισχύες σε διάφορα σημεία του κυκλώματος κάνοντας χρήση ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος.

Έτσι μπορούμε να το επιτύχουμε εισάγοντας έναν ουδέτερο αγωγό ο οποίος δε διαρρέεται από ρεύμα αφήνοντας το σύστημα αμετάβλητο. Εφόσον οι φάσεις είναι ίσες ως προς το μέτρο μεταξύ τους είναι δυνατή η ανάλυση ενός κυκλώματος που αποτελείται από τη μια φάση και τον ουδέτερο (μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα), όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 11Α:** α) Γεννήτρια και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. β) Το ίδιο σύστημα ισχύος με ουδέτερο. γ) Η ανά φάση μορφή του κυκλώματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στα φορτία και τις γεννήτριες που συνδέονται σε αστέρα και όχι σε τρίγωνο, γιατί στη συνδεσμολογία τριγώνου δεν μπορεί να εφαρμοστεί ο ουδέτερος. Άρα για πηγές ή φορτία που είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο πρέπει προηγουμένως να κάνουμε μετασχηματισμό σε αστέρα.

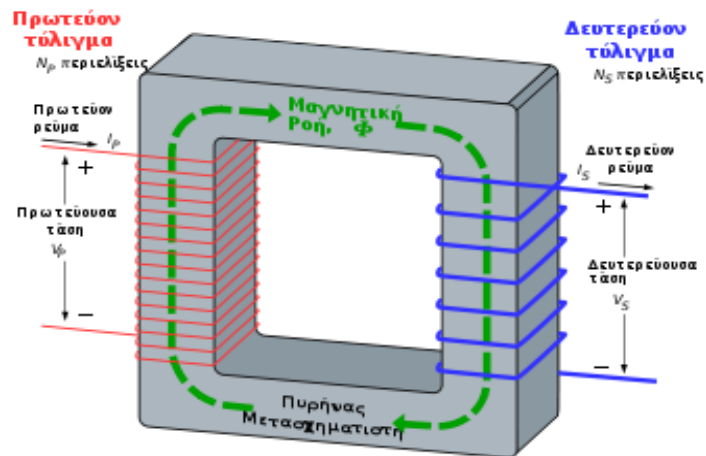
## **2. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

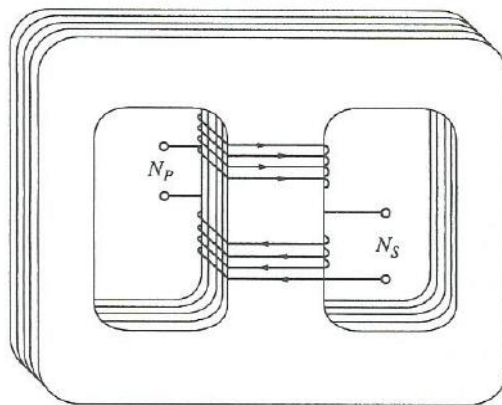
Οι μετασχηματιστές είναι διατάξεις πηνίων, όπου με την ιδιότητα του φαινομένου της αυτεπαγωγής πετυχαίνουμε μετασχηματισμό της τάσης και του ρεύματος από μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης. Όταν η τάση εισόδου ανυψώνεται, το ρεύμα εισόδου υποβιβάζεται, ώστε η ισχύς εξόδου να είναι ίση με την ισχύ εισόδου. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η ανύψωση της εναλλασσόμενης τάσης και η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες. Μετά τη μεταφορά και κοντά στο σημείο κατανάλωσης απαιτείται ο υποβιβασμός της με τη χρήση ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού.

### **2.2 ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ**

Αυτή η συσκευή αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα, τα οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους. Τα πηνία είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή αλουμίνιο και ο πυρήνας κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικά υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Υπάρχουν δύο τρόποι κατασκευής ενός μετασχηματιστή. Στον πρώτο, τα τυλίγματα τοποθετούνται γύρω από τις δύο απέναντι πλευρές ενός ορθογώνιου πυρήνα. Αυτός ο τύπος μετασχηματιστή ονομάζεται τύπου πυρήνα. Ο άλλος τρόπος κατασκευής λαμβάνει χώρα σε έναν πυρήνα με τρία σκέλη. Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος. Η διατομή του μεσαίου σκέλους είναι διπλάσια από τη διατομή των δύο ακριανών σκελών. Αυτό γίνεται, με σκοπό η πυκνότητα της μαγνητικής ροής να είναι η ίδια και στα τρία σκέλη. Το είδος αυτό του μετασχηματιστή ονομάζεται τύπου μανδύα. Οι δύο τύποι μετασχηματιστών απεικονίζονται στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 2Α: Μετασχηματιστής (τύπου πυρήνα).



Σχήμα 2Β: Μετασχηματιστής (τύπου μανδύα).

Το τύλιγμα του μετασχηματιστή που συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα, ενώ το άλλο που συνδέεται με το φορτίο και ονομάζεται δευτερεύον τύλιγμα.

### 2.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Αν συνδέσουμε μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα τότε αυτό θα διαρρέεται από ρεύμα, και θα αναπτυχθεί γύρω του μαγνητική ροή  $\phi$ . Επειδή τα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή έχουν μαγνητική σύζευξη μεταξύ τους, τότε μαγνητική ροή θα διέρχεται μέσα από τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος και σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής του Faraday θα επάγεται μία ηλεκτρική τάση στα άκρα του δεύτερου πηνίου η οποία θα είναι

ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής και του αριθμού των σπειρών του πηνίου. Έχουμε ότι:

$$e_{ind} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$e_{ind}$  η τάση που επάγεται στα άκρα του πηνίου  
 $\phi$  η μαγνητική ροή που διέρχεται από το πηνίο  
 $N$  ο αριθμός σπειρών του πηνίου

Η  $e_{ind}$  τάση που επάγεται στα άκρα του πηνίου ισούται επίσης με:

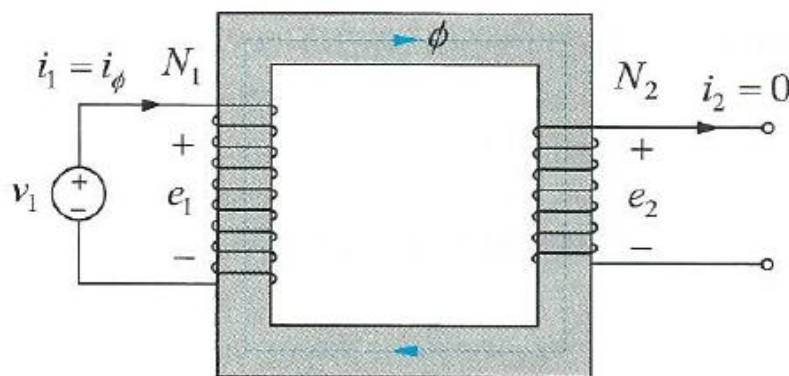
$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.2)$$

όπου  $\lambda = \sum_{i=1}^N \phi$ , ονομάζεται *πεπλεγμένη ροή* του τυλίγματος και είναι το άθροισμα των ροών που διέρχονται από κάθε σπείρα του πηνίου. Οι μονάδες της πεπλεγμένης ροής είναι: *Weber* επί τις σπείρες.

Για τη μέγιστη απόδοση θα πρέπει η μαγνητική ροή, προερχόμενη από το ρεύμα του πρωτεύοντος πηνίου να εμπλέκει όλες τις σπείρες του δευτερεύοντος πηνίου. Ο λόγος που ο πυρήνας κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικά υλικά υψηλής διαπερατότητας είναι η αύξηση της μαγνητικής σύζευξης των τυλιγμάτων, γεγονός που οδηγεί στην μεγαλύτερη απόδοση του μετασχηματιστή.

## 2.4 ΕΝ ΚΕΝΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Κατά τη λειτουργία κενού φορτίου, το τύλιγμα του δευτερεύοντος είναι ανοιχτό (δεν υπάρχει φορτίο), επομένως δε διαρρέεται από ρεύμα, ενώ το τύλιγμα του πρωτεύοντος είναι συνδεδεμένο με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα :



**Σχήμα 2Γ:** Λειτουργία μονοφασικού μετασχηματιστή με κενό φορτίο.

Θεωρούμε  $v_I$  την τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$v_I = V_{I,max} \cos(\omega t) = \sqrt{2} V_I \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

$V_{I,max}$  μέγιστη τιμή τάσης εισόδου σε Volts (V)

$V_I$  ενεργός τιμή τάσης εισόδου (V)

$\omega$  κυκλική συχνότητα της τάσης εισόδου (rad/sec)

Συνδυάζοντας τη σχέση (2.1) και το 2<sup>ο</sup> νόμο του Kirchoff στο πρωτεύον τυλίγμα θα έχουμε:

$$v_I = i_\varphi R_I + e_I = i_\varphi R_I + N_I \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.4)$$

$i_\varphi$  το ρεύμα του πρωτεύοντος, και

$R_I$  η ωμική αντίσταση του τυλίγματος

Ως ρεύμα διέγερσης ορίζεται το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο, το οποίο αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του αντίστοιχου ονομαστικού ρεύματος του πρωτεύοντος και επειδή η αντίσταση των τυλιγμάτων έχει πολύ μικρή τιμή, θεωρούμε ότι:

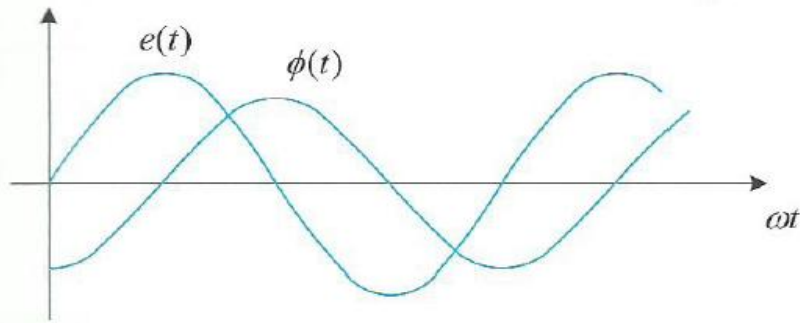
$$e_I = v_I = V_{I,max} \cos(\omega t) = E_{I,max} \cos(\omega t) \quad (2.5)$$

Η μαγνητική ροή  $\varphi$  στον πυρήνα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} e_I &= N_I \frac{d\varphi}{dt} \Leftrightarrow \frac{d\varphi}{dt} = \frac{e_I}{N_I} \Leftrightarrow \\ \varphi &= \frac{1}{N_I} \int e_I dt = \frac{1}{N_I} \int E_{I,max} \cos(\omega t) dt = \\ &= \frac{E_{I,max}}{N_I \omega} \int \cos(\omega t) dt = \frac{E_{I,max}}{N_I \omega} \sin(\omega t) = \varphi_{max} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Προκύπτει ότι αφού το  $\sin(\omega t)$  καθυστερεί του  $\cos(\omega t)$  κατά  $90^\circ$ , τότε η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα του μετασχηματιστή θα καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση κατά  $90^\circ$ .





**Σχήμα 2Δ:** Χρονικές μεταβολές μαγνητικής ροής και επαγόμενης τάσης.

Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής ( $\varphi_{max}$ ) προκύπτει από την προηγούμενη σχέση (2.6) και έχουμε:

$$\varphi_{max} = \frac{E_{1,max}}{N_1\omega} = \frac{V_{1,max}}{2\pi f N_1} = \frac{V_1}{\sqrt{2}\pi f N_1} \quad (2.7)$$

Όπως βλέπουμε, η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής ( $\varphi_{max}$ ) εξαρτάται από την ενεργό τιμή της τάσης τροφοδοσίας  $V_1$ , τη συχνότητά  $f$  και το πλήθος των σπειρών  $N_1$  του πρωτεύοντος, θεωρώντας όμως την πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος μηδενική.

## 2.5 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Οι βασικές απώλειες που υπολογίζονται κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή είναι οι κάτωθι:

1) Απώλειες χαλκού. Αφορά τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος και της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων.

2) Απώλειες λόγω δινορρευμάτων.

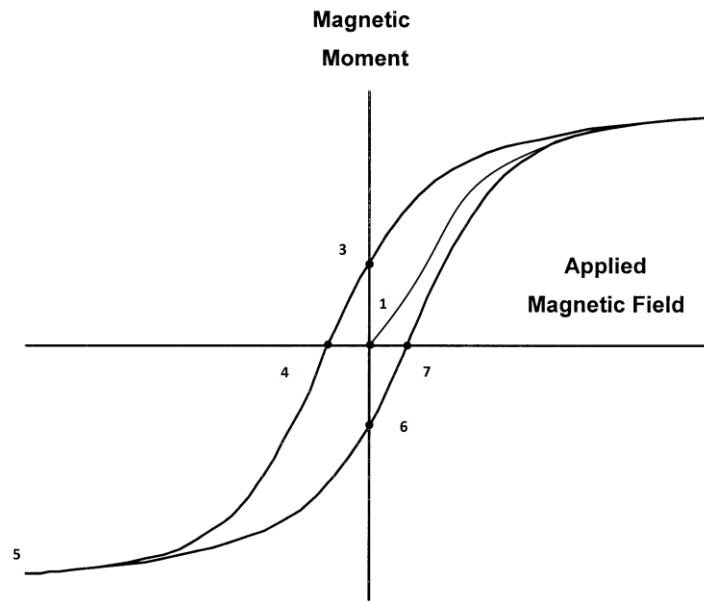
Εκτός από τις απώλειες χαλκού, εμφανίζονται και οι απώλειες λόγω ανάπτυξης δινορρευμάτων, δηλαδή λόγω των εναλλασσόμενων ρευμάτων, που επάγονται στο εσωτερικό του σιδερένιου πυρήνα από την περιοδικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή  $\varphi$ . Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες δινορρευμάτων και εξαρτώνται από το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του υλικού και από την ειδική αντίστασή του. Γνωρίζουμε από το νόμο επαγωγής του Faraday, ότι όταν αγωγήμη μάζα βρεθεί μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε επάγεται σε αυτή μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Η δύναμη αυτή αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της μάζας να κινηθούν σε τυρβώδεις τροχιές, σχηματίζοντας

κλειστούς βρόχους ή δίνες και δημιουργώντας τα δινορρεύματα. Τα ρεύματα αυτά θερμαίνουν τη μάζα του σιδήρου μέσα στην οποία ρέουν λόγω φαινομένου Joule. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου ο πυρήνας στην πράξη κατασκευάζεται από πολλά λεπτά φύλλα που ονομάζονται δυναμοελάσματα, ανάμεσα στα οποία παρεμβάλλονται μονωτικές ρητίνες, οι οποίες περιορίζουν τις διαδρομές των δινορρευμάτων.

### 3) Απώλειες υστέρησης.

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ότι ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι από σίδηρο και η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται στις μαγνητικές ιδιότητές του. Από τη φύση τους τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν την ιδιότητα, όταν μαγνητίζονται, να διατηρούν για αρκετό χρονικό διάστημα έναν παραμένοντα μαγνητισμό. Η ιδιότητα αυτή προκαλεί το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης.

Θεωρούμε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει μαγνητιστεί και του εφαρμόζουμε μία εναλλασσόμενη ένταση μαγνητικού πεδίου  $H$ . Παρακάτω παρατίθεται ένας πλήρης κύκλος της εναλλασσόμενης εντάσεως  $H$ . Ξεκινώντας, αφού υποθέσαμε ότι το υλικό αρχικά δεν έχει μαγνητιστεί, καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της πάνω στην καμπύλη 1-2, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής θα μεταβληθεί αντίστοιχα κατά μήκος της καμπύλης αυτής μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί ξανά ακολουθώντας τώρα την καμπύλη 2-3, αφού το υλικό είναι πλέον μαγνητισμένο, με αποτέλεσμα όταν μηδενίζεται η ένταση να εξακολουθεί να υπάρχει μαγνητική ροή. Στη συνέχεια, η ένταση του μαγνητικού πεδίου γίνεται αρνητική και η πυκνότητα μαγνητικής ροής εξακολουθεί να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί πάνω στην καμπύλη 3-4. Στην κατάσταση αυτή, η απαιτούμενη ένταση για να απομαγνητιστεί το μαγνητισμένο υλικό ονομάζεται ένταση επαναφοράς ( $H$ ). Μετά από το σημείο αυτό, η μαγνητική επαγωγή αρχίζει να παίρνει αρνητικές τιμές έως το αρνητικό της μέγιστο (καμπύλη 4-5) και αφού φτάσει στο σημείο αυτό, η εναλλασσόμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει πάλι να αυξάνεται αλγεβρικά κατά μήκος της καμπύλης 5-6 μέχρι που φτάνει στο σημείο όπου μηδενίζεται, ενώ υπάρχει και πάλι μία παραμένουσα αρνητική μαγνητική ροή. Καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να αυξάνεται παίρνοντας θετικές τιμές, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μηδενίζεται στο σημείο 7 και μεγιστοποιείται και πάλι στο σημείο 2, όπου και κλείνει ο πρώτος κύκλος και επαναλαμβάνεται.



**Σχήμα 2Ε:** Ο βρόχος υστέρησης

Αφού έχουμε παρατηρήσει έναν πλήρη κύκλο υστέρησης, κάνουμε την εξής διαπίστωση: το μαγνητικό πεδίο απορροφά περισσότερη ενέργεια απ' όση αποδίδει. Δεδομένου ότι η τελική κατάσταση είναι ακριβώς η ίδια με την αρχική, αυτή η επιπλέον ενέργεια, η οποία ισούται με το εμβαδό του βρόχου υστερήσεως, χάνεται με τη μορφή απωλειών. Αφορά ενέργεια, η οποία χάνεται υπό μορφή θερμότητας από τη μεταβολή του προσανατολισμού των στοιχειωδών μαγνητών, που αποτελούν το σιδηρομαγνητικό υλικό, τότε προς τη θετική και τότε προς την αρνητική κατεύθυνση. Το είδος αυτό των απωλειών ονομάζεται απώλειες υστέρησης και αποτελούν το 50% έως το 80% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου.

4) Απώλειες λόγω σκέδασης. Στον πραγματικό μετασχηματιστή δεν περνούν όλες οι μαγνητικές γραμμές μέσα από τον πυρήνα. Υπάρχει ένα μικρό ποσοστό των μαγνητικών γραμμών που ξεφεύγουν από τον πυρήνα και κλείνουν μέσω του αέρα περίξ του πυρήνα. Η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι εκείνη που περνάει μέσα από τον πυρήνα και ονομάζεται ροή μαγνήτισης. Η ροή που δεν περνάει μέσα από τον πυρήνα ονομάζεται ροή σκέδασης.

## 2.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή λαμβάνει υπ' όψιν όλες τις βασικές ατέλειες, που παρουσιάζει η συμπεριφορά του.

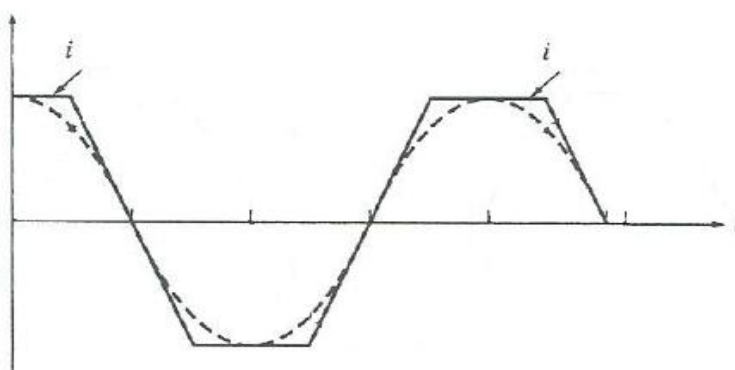
Οι απώλειες χαλκού, που είναι οι ωμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων απεικονίζονται με την προσθήκη δύο αντιστάσεων, οι οποίες αντιστοιχούν στην ωμική αντίσταση και των δύο τυλιγμάτων, πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Οι απώλειες σκέδασης σε κάθε τύλιγμα εκφράζονται μέσω μιας σταθερής αυτεπαγωγής σκέδασης. Το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον, όταν σε αυτό εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση, ακόμη και αν δεν υπάρχει φορτίο στο δευτερεύον, αποτελείται από δύο συνιστώσες:

α) Το ρεύμα μαγνήτισης που είναι η αιτία ανάπτυξης μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή.

β) Το ρεύμα απωλειών πυρήνα που αντιστοιχεί στις απώλειες λόγω υστέρησης και δινορρευμάτων του πυρήνα.

Το ρεύμα απωλειών πυρήνα είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή και η κυματομορφή του είναι συμφασική με την κυματομορφή της τάσης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Έτσι το ρεύμα αυτό απεικονίζεται με μια παράλληλη αντίσταση στην πηγή της τάσης.

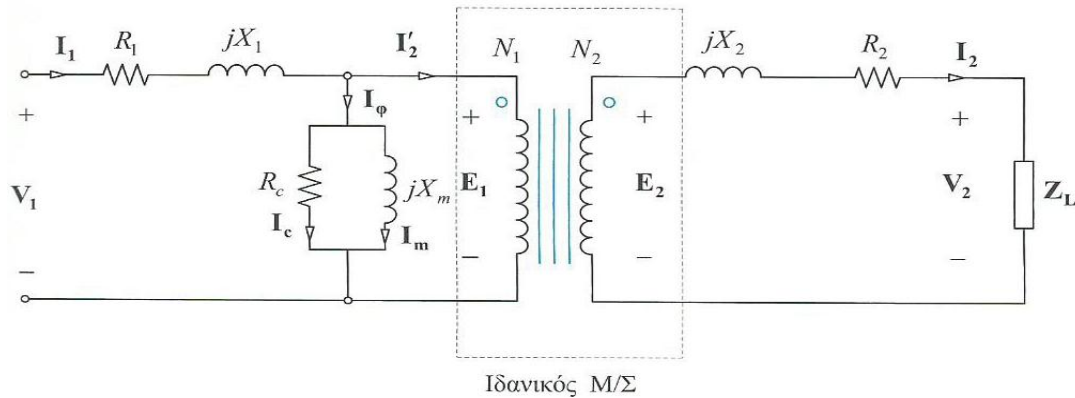


**Σχήμα 2ΣΤ:** Ρεύμα απωλειών πυρήνα μετασχηματιστή.

Το ρεύμα μαγνήτισης είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή στην ακόρεστη περιοχή, όπως είδαμε στο Σχ. 2Ε, ενώ η κυματομορφή του καθυστερεί της κυματομορφής της τάσης κατά  $90^\circ$  (Σχ. 2Δ). Άρα αυτό το ρεύμα αντιστοιχίζεται σε μια αντίδραση  $X_m$  που τοποθετείται παράλληλα στην πηγή τάσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού μετασχηματιστή απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.

Το ρεύμα στον κλάδο διέγερσης συνήθως είναι αρκετά μικρότερο από το ρεύμα στο φορτίο του μετασχηματιστή. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας αυτό το ρεύμα δεν προκαλεί πτώση τάσης στη σύνθετη αντίδραση σκέδασης

του πρωτεύοντος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις, ο κλάδος διέγερσης να παραλείπεται από τους υπολογισμούς.



**Σχήμα 2Z:** Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή.

## 2.7 ΑΝΑΓΩΓΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΣΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ – ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΤΥΛΙΓΜΑ

Όσον αφορά την ανάλυση του κυκλώματος του μετασχηματιστή, ως προς τα ρεύματα και τις τάσεις του, το αρχικό κύκλωμα απλοποιείται σε ένα ισοδύναμο με ένα μόνο επίπεδο τάσης. Αυτό γίνεται με αντικατάσταση του ενός τμήματος μετασχηματιστή (πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος) με ένα ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμόζοντας τα θεωρήματα Thevenin και Norton. Στο υπό αντικατάσταση τμήμα, οι τάσεις και τα ρεύματα υπολογίζονται έχοντας υπόψη τον συντελεστή μετασχηματισμού του μετασχηματιστή.

Οι ενέργειες αντικατάστασης της μιας πλευράς του κυκλώματος ενός μετασχηματιστή με το ισοδύναμο κύκλωμά της, ως προς το επίπεδο τάσης της άλλης πλευράς ονομάζονται αναγωγή της πρώτης πλευράς στη δεύτερη πλευρά.

### Αναγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα μετασχηματιστή

Θεωρούμε ότι σε ένα μετασχηματιστή, το πρωτεύον τύλιγμα διαθέτει  $N_1$  σπείρες και το δευτερεύον  $N_2$  σπείρες. Τότε σύμφωνα με το νόμο επαγωγής του *Faraday*, και τη σχέση 2.1, για το πρωτεύον τύλιγμα προκύπτει ότι:

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.8)$$

ομοίως για το δευτερεύον:

$$v_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.9)$$

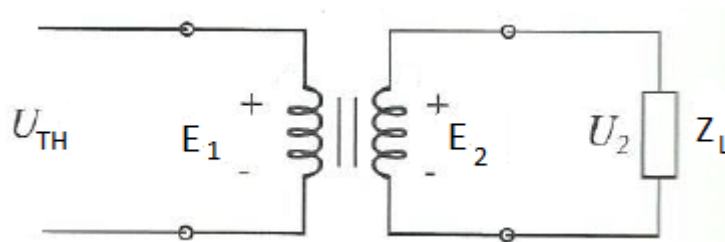
Διαιρώντας κατά μέλη την 2.8 και 2.9 προκύπτει ότι:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.10)$$

όπου  $a$  είναι ο λόγος μετασχηματισμού και δίνει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα και της τάσης στα άκρα του δευτερεύοντος. Θεωρούμε έναν ιδανικό μετασχηματιστή άρα η ισχύς στο πρωτεύον είναι ίση με την ισχύ στο δευτερεύον, συνεπάγεται ότι:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \Leftrightarrow \frac{i_2}{i_1} = \frac{v_1}{v_2} = a \quad (2.11)$$

Αν ανάγουμε το δευτερεύον τύλιγμα στο πρωτεύον θεωρούμε αρχικά ανοικτούς τους ακροδέκτες στο πρωτεύον, όπως φαίνεται στο σχήμα 2H και κάνοντας εφαρμογή του θεωρήματος *Thevenin* έχουμε  $I_1 = I_2 = 0$ , άρα και  $V_2 = E_2$ .

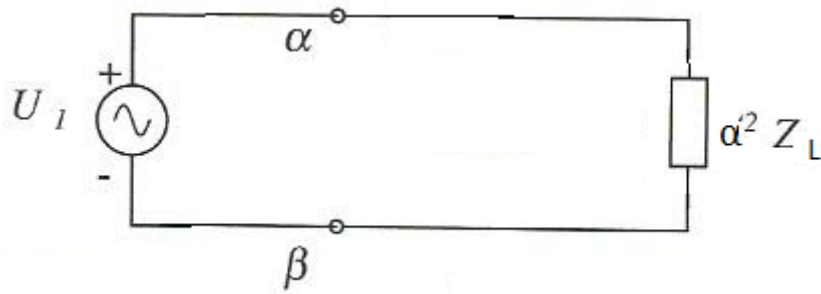


**Σχήμα 2H:** Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή κατά Thevenin.

Συνδυάζοντας με τη σχέση 2.11, τότε έχουμε:

$$U_{TH} = U_1 = U_2 a \quad (2.12)$$

Ακολούθως κάνουμε εφαρμογή του θεωρήματος του Norton και βραχυκυκλώνουμε τους ακροδέκτες για να υπολογίσουμε την  $Z_{TH}$ . Το κύκλωμα γίνεται όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.

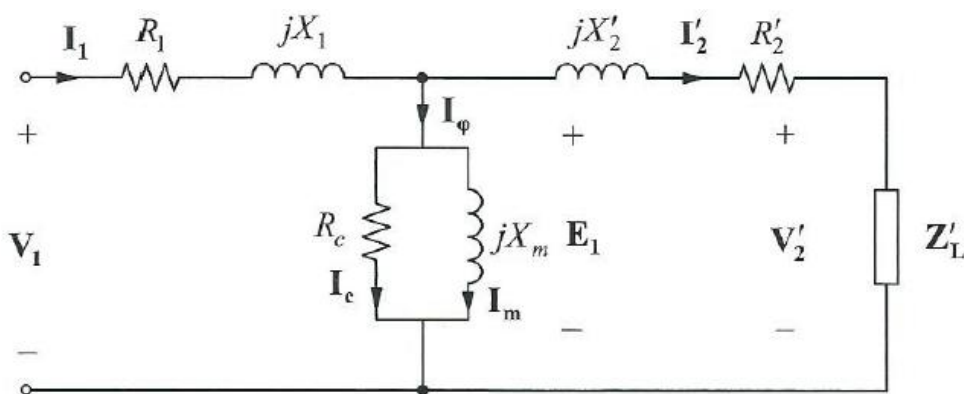


**Σχήμα 20:** Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή κατά Norton.

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι  $I_1 = I_2/\alpha$ , οπότε:

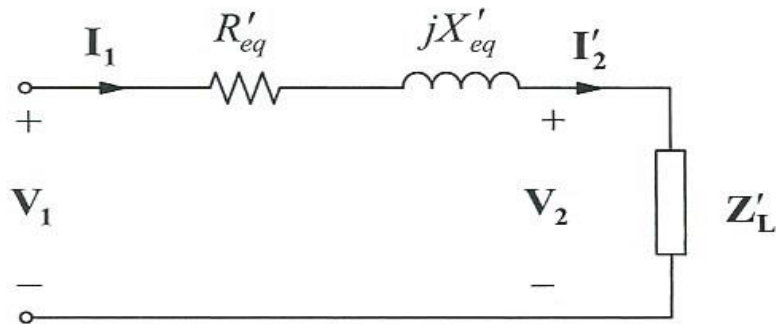
$$Z_{TH} = \frac{U_{TH}}{I_1} = \frac{U_2\alpha}{I_2/\alpha} = \alpha^2 \frac{U_2}{I_2} = \alpha^2 Z_{TH} \quad (2.13)$$

Θέτοντας όπου  $Z_L' = \alpha^2 Z_L$ ,  $R_2' = \alpha^2 R_2$ ,  $X_2' = \alpha^2 X_2$ ,  $U_2' = \alpha U_2$  και  $I_2' = I_2/\alpha$ , το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή παίρνει τη μορφή του ακόλουθου σχήματος:



**Σχήμα 21:** Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.

Μη λαμβάνοντας υπ' όψιν τον κλάδο μαγνήτισης, για τους λόγους που αναφέραμε πιο πάνω και θέτοντας  $R'_{eq} = R_1 + R_2'$  και  $X'_{eq} = X_1 + X_2'$  το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή απλουστεύεται και παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

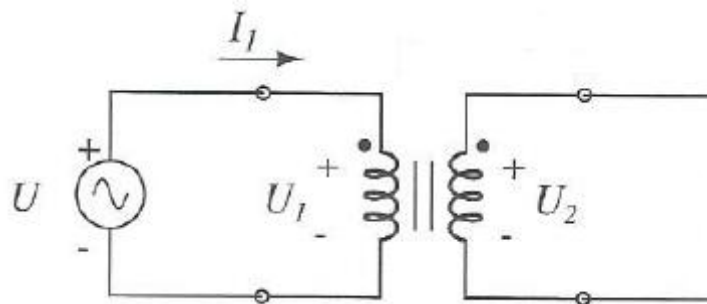


**Σχήμα 2ΙΑ:** Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.

### Αναγωγή στο δευτερεύον τύλιγμα

Ομοίως ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με πριν αλλά με τη διαφορά ότι τώρα το τμήμα του μετασχηματιστή που αντικαθιστούμε είναι το πρωτεύον τύλιγμα. Εφαρμόζοντας το θεώρημα *Thevenin*, με ανοιχτούς τους ακροδέκτες του δευτερεύοντος, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, σε συνδυασμό με τη σχέση 2.11, προκύπτει ότι:

$$U_{TH} = U_2 = \frac{U_1}{a} \quad (2.14)$$



**Σχήμα 2ΙΒ:** Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή κατά Thevenin.

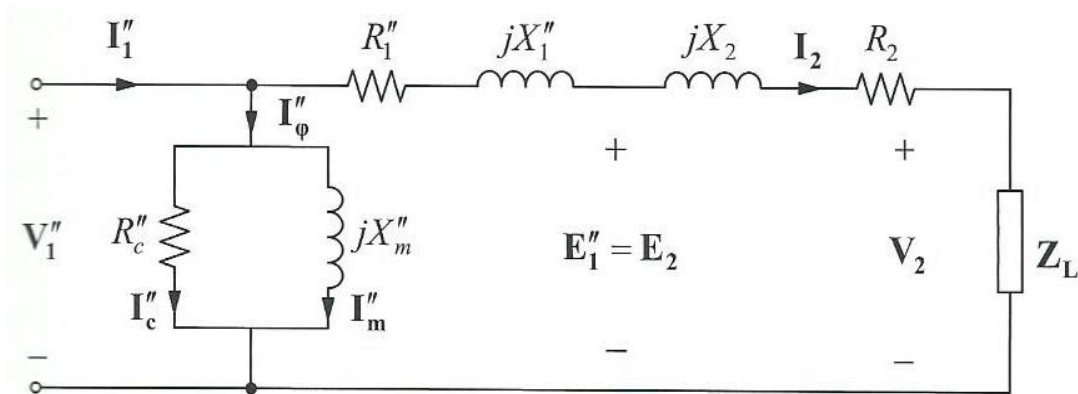
Βραχυκυκλώνουμε αντίστοιχα το δευτερεύον τύλιγμα και εφαρμόζουμε το θεώρημα *Norton*, και προκύπτει ότι:

$$I_2 = aI_1 \quad (2.15)$$

$$Z_{TH} = \frac{U_{TH}}{I_2} = \frac{U_1/a}{aI_1} = \frac{U_1}{a^2 I_1} = \frac{Z}{a^2} \quad (2.16)$$

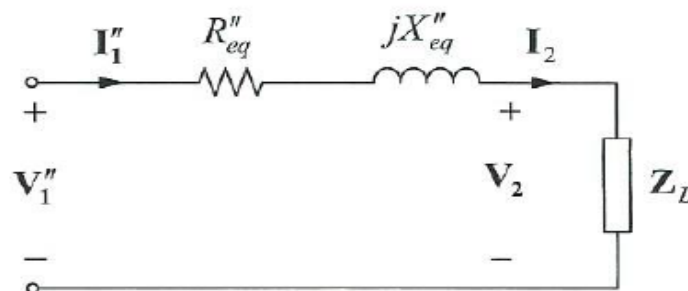


Αντίστοιχα θέτοντας  $R''_1 = R_1/\alpha^2$ ,  $X''_1 = X_1/\alpha^2$ ,  $U''_1 = U_1/\alpha$ , και  $R''_{eq} = R''_1 + R_2$ ,  $X''_{eq} = X''_1 + X_2$ , το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή παίρνει τη μορφή του επόμενου σχήματος:



**Σχήμα 2ΙΓ:** Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.

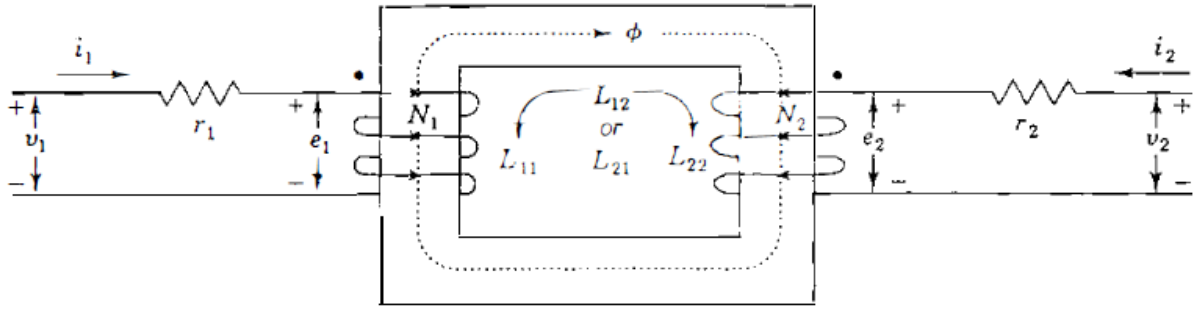
Το αντίστοιχο απλουστευμένο κύκλωμα με παράλειψη του παράλληλου κλάδου απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα 2ΙΔ:** Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.

## 2.8 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.

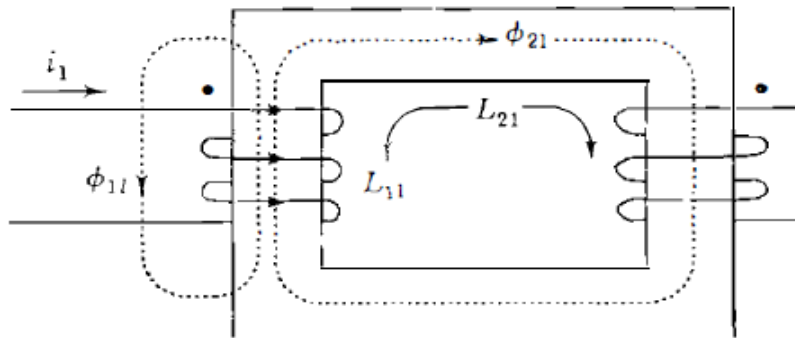
Στο ακόλουθο σχήμα η φορά του ρεύματος  $i_2$  του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί μαγνητική ροή  $\phi$  κατά την ίδια διεύθυνση με τη μαγνητική ροή που παράγει το ρεύμα του πρωτεύοντος  $i_1$ .



**Σχήμα 2IE:** Μαγνητική σύζευξη τυλιγμάτων μέσω αμοιβαίας μαγνητικής ροής λόγω των δύο ρευμάτων  $i_1$  και  $i_2$ .

Μελετώντας ξεχωριστά τα δύο ρεύματα  $i_1$  και  $i_2$ , το ρεύμα του πρωτεύοντος  $i_1$  παράγει τη μαγνητική ροή, έστω  $\varphi_{11}$ , η οποία αποτελείται από δύο συνιστώσες, τη ροή σκέδασης  $\varphi_{1L}$ , η οποία αποτελεί τη μη ωφέλιμη συνιστώσα της παραγόμενης ροής, εφόσον δεν εμπλέκει το άλλο τύλιγμα, και τη συνιστώσα  $\varphi_{21}$ , η οποία αποτελεί τη χρήσιμη συνιστώσα της ροής, εφόσον εμπλέκει όλες τις σπείρες και των δύο τυλιγμάτων, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα.

$$\varphi_{11} = \varphi_{1L} + \varphi_{21} \quad (2.17)$$



**Σχήμα 2ΙΣΤ:** Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής που οφείλονται μόνο στο ρεύμα  $i_1$ .

Η πεπλεγμένη ροή  $\lambda$  κάθε τυλίγματος, που οφείλεται στο ρεύμα του πρωτεύοντος  $i_1$  δίνεται από την σχέση:

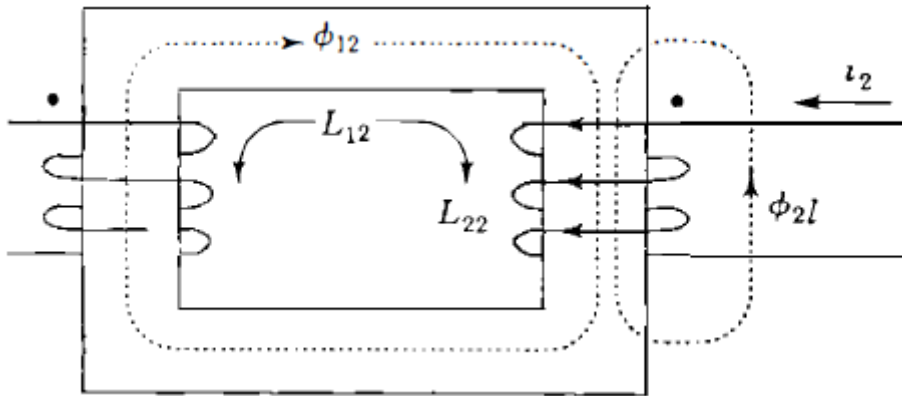
$$\lambda_{11} = N_1 \varphi_{11} = N_1 \frac{\varphi_{11}}{i_1} i_1 = L_{11} i_1 \quad (2.18)$$

$$\lambda_{21} = N_2 \varphi_{21} = N_2 \frac{\varphi_{21}}{i_1} i_1 = L_{21} i_1 \quad (2.19)$$

$L_{11}$  η αυτεπαγωγή σκέδασης του πρωτεύοντος τυλίγματος  
 $L_{12}$  η αλληλεπαγωγή μεταξύ των δύο τυλιγμάτων

Κάνουμε το ίδιο και για το ρεύμα  $i_2$ , το οποίο αντίστοιχα δημιουργεί τη μαγνητική ροή  $\phi_{22}$ , η οποία αποτελείται από δύο συνιστώσες, τη ροή σκέδασης  $\phi_{2L}$  και την ωφέλιμη συνιστώσα  $\phi_{12}$ , όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:

$$\phi_{22} = \phi_{2L} + \phi_{12} \quad (2.20)$$



**Σχήμα 21Z:** Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής που οφείλονται μόνο στο ρεύμα  $i_2$ .

Ομοίως η πεπλεγμένη ροή  $\lambda$  του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι:

$$\lambda_{22} = N_2 \phi_{22} = L_{22} i_2 \quad (2.21)$$

$$\lambda_{12} = N_1 \phi_{12} = L_{12} i_2 \quad (2.22)$$

Στην περίπτωση που και τα δύο ρεύματα ρέουν ταυτόχρονα, τότε η συνολική πεπλεγμένη ροή για κάθε τύλιγμα γίνεται:

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \quad (2.23)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \quad (2.24)$$

Για την αλληλεπαγωγή μεταξύ των δύο τυλιγμάτων έχουμε:

$$L_{12} = L_{21} = M \quad (2.25)$$

Η αυτεπαγωγή ενός τυλίγματος είναι το κλάσμα της συνολικής πεπλεγμένης ροής του τυλίγματος προς το ρεύμα του ίδιου του τυλίγματος, όταν

τα ρεύματα των υπόλοιπων τυλιγμάτων θεωρηθούν μηδενικά. Άρα για τα μαγνητικά συζευγμένα κυκλώματα ισχύει:

$$L_{11} = \frac{\lambda_1}{i_1|_{i_2=0}} = \frac{N_1(\varphi_{1L} + \varphi_{21})}{i_1} = L_1 + L_{21} \quad (2.26)$$

Ομοίως για:

$$L_{22} = L_2 + L_{12} \quad (2.27)$$

Κάνοντας εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> νόμου του Kirchoff στα δύο τυλίγματα προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} u_1 = i_1 r_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \\ &+ M \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \alpha M \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2'}{dt} \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

όπου  $\alpha = \frac{N_1}{N_2}$  και  $\alpha M$  η ισοδύναμη αυτεπαγωγή μαγνήτισης ανηγμένη στο πρωτεύον.

Ομοίως για το δευτερεύον τυλίγμα έχουμε:

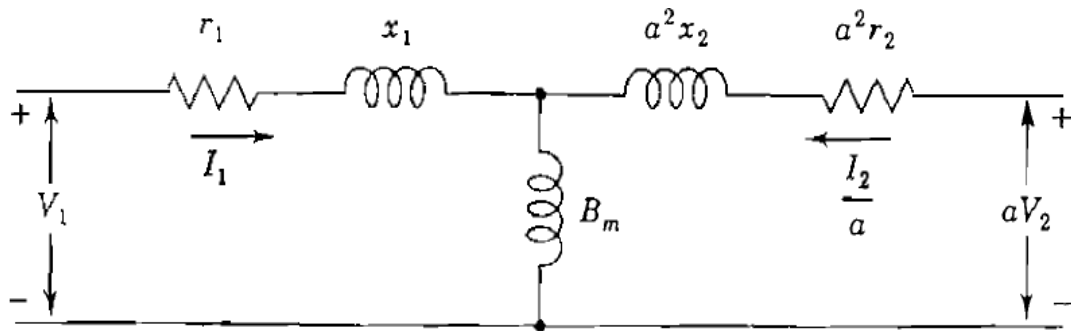
$$\begin{aligned} u_2 = i_2 r_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} &= i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \\ &+ M \left( \frac{di_2}{dt} + \frac{di_1}{dt} \right) = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \alpha M \left( \frac{di_2}{dt} + \frac{di_1'}{dt} \right) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Οι παραπάνω σχέσεις με τη μορφή φασόρων γίνονται:

$$U_1 = (r_1 + j\omega L_1) I_1 + j\omega \alpha M (I_1 + I_2) \quad (2.30)$$

$$U_2 = (r_2 + j\omega L_2) I_2 + j\omega \alpha M (I_2 + I_1) \quad (2.31)$$

Θέτοντας  $x_1 = \omega L_1$ ,  $x_2 = \omega L_2$  και  $B_m = \omega \alpha M$ , κάνοντας αναγωγή στο πρωτεύον παίρνουμε το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή:



**Σχήμα 21Η:** Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή με αυτεπαγωγή μαγνήτισης των δύο τυλιγμάτων.

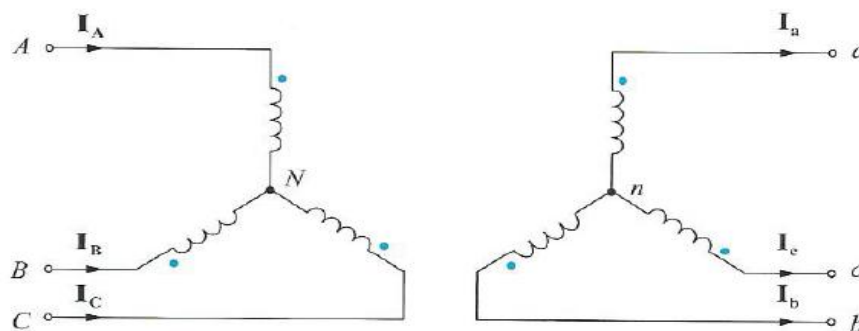
## 2.9 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Ο τριφασικός μετασχηματιστής έχει τρία τυλίγματα σε κάθε πλευρά και μπορούν να συνδεθούν είτε σε αστέρα, είτε σε τρίγωνο. Άρα οι δυνατές συνδεσμολογίες για έναν τριφασικό μετασχηματιστή έξι τυλιγμάτων είναι οι ακόλουθες:

- α) Συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα ( $Y/y$ )
- β) Συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου ( $D/d$ )
- γ) Συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου ( $Y/d$ )
- δ) Συνδεσμολογία τριγώνου-αστέρα ( $D/y$ )

### 2.9.α Συνδεσμολογία ( $Y/y$ ) αστέρα-αστέρα

Σε αυτή την περίπτωση, το ένα από τα δύο άκρα των τυλιγμάτων της κάθε φάσης, τόσο στο πρωτεύον όσο και το δευτερεύον συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν κοινό κόμβο, ο οποίος είναι προτιμότερο να είναι ουδετερωμένος, για τη δυνατότητα τροφοδότησης και μονοφασικών φορτίων παράλληλα με τα τριφασικά αλλά και για λόγους καλής λειτουργίας



**Σχήμα 21Θ:** Συνδεσμολογία  $Y/y$ .

Μεταξύ των φασικών τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ισχύουν τα κάτωθι:

$$\frac{U_{AN}}{U_{\alpha n}} = \frac{U_{BN}}{U_{bn}} = \frac{U_{CN}}{U_{cn}} = \alpha \quad (2.32)$$

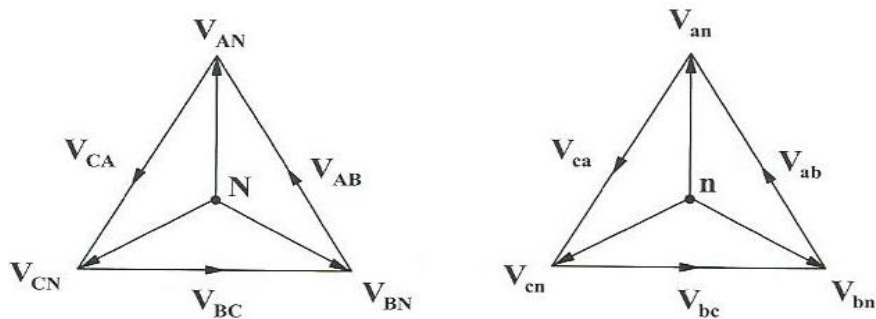
Τα φασικά ρεύματα στην περίπτωση μας ταυτίζονται με τα ρεύματα γραμμής και για συμμετρικές συνθήκες φόρτισης έχουμε:

$$\frac{I_A}{I_\alpha} = \frac{I_B}{I_b} = \frac{I_C}{I_c} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.33)$$

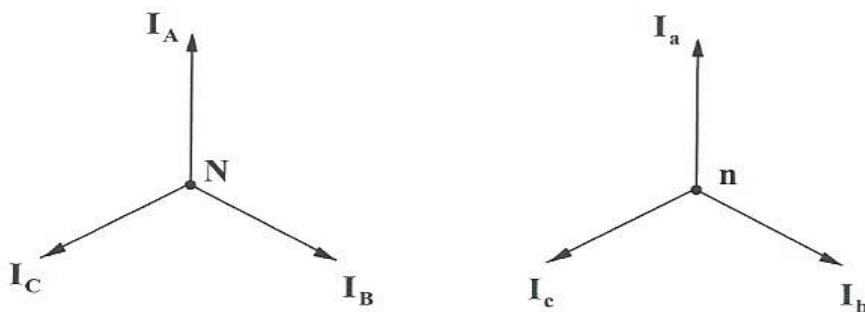
Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι πολικές τάσεις είναι  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερες σε μέγεθος και προηγούνται έναντι των αντίστοιχων φασικών για συστήματα ορθής ακολουθίας κατά  $30^\circ$ , έχουμε:

$$\frac{U_{AB}}{U_{\alpha b}} = \frac{U_{BC}}{U_{bc}} = \frac{U_{CA}}{U_{ca}} = \alpha \quad (2.34)$$

Τα διανυσματικά διαγράμματα των φασικών και πολικών τάσεων των δύο τυλιγμάτων και τα αντίστοιχα ρεύματα απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν:



**Σχήμα 2Κ:** Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων συνδεσμολογίας Y/y.

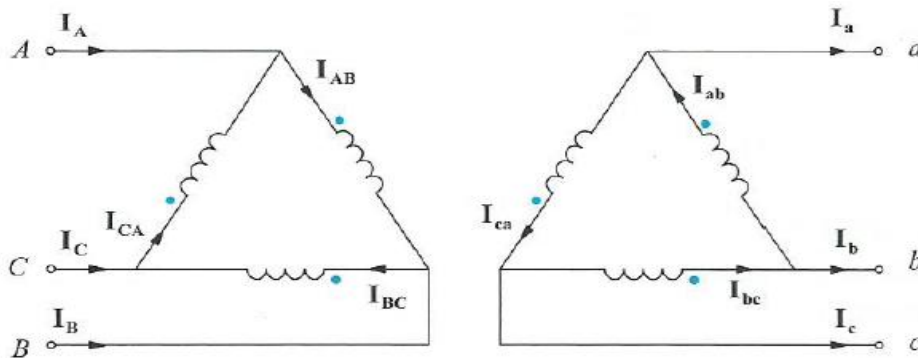


**Σχήμα 2ΚΑ:** Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων συνδεσμολογίας Y/y.

## 2.9.β Συνδεσμολογία (D/d) τριγώνου-τριγώνου

Σε αυτή την περίπτωση οι φασικές τάσεις είναι ίσες με τις πολικές όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Η σχέση μεταξύ των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δίνεται:

$$\frac{U_{AB}}{U_{ab}} = \frac{U_{BC}}{U_{bc}} = \frac{U_{CA}}{U_{ca}} = \alpha \quad (2.35)$$



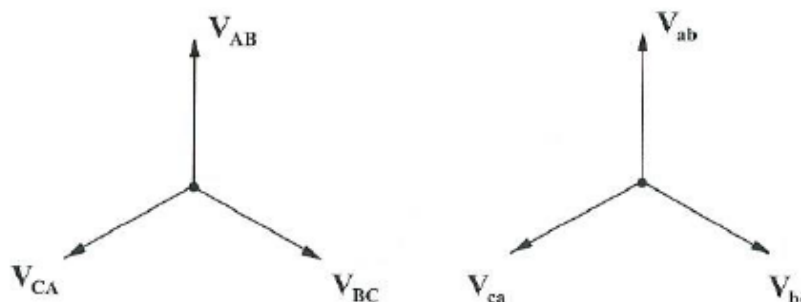
**Σχήμα 2ΚΒ:** Συνδεσμολογία D/d.

Τα ρεύματα γραμμής είναι κατά  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερα από τα φασικά ρεύματα και δίνονται:

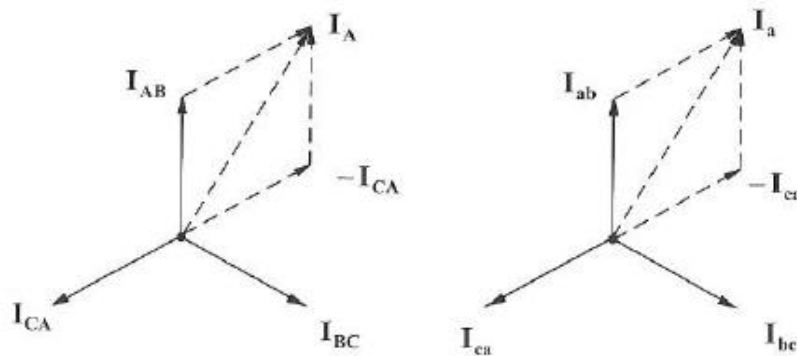
$$\frac{I_{AB}}{I_{ab}} = \frac{I_{BC}}{I_{bc}} = \frac{I_{CA}}{I_{ca}} = \frac{1}{a} \quad (2.36)$$

Στη συνδεσμολογία (D/d) δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης ουδέτερου αγωγού. Για ικανοποιητική λειτουργία θα πρέπει οι μετασχηματιστές κάθε φάσης να έχουν τη ίδια σχέση μεταφοράς, αλλιώς τα δευτερεύοντα τυλίγματα θα διαρρέονται από εσωτερικά ρεύματα ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχει φορτίο.

Τα διανυσματικά διαγράμματα των φασικών και πολικών τάσεων, καθώς και τα αντίστοιχα ρεύματα των δύο τυλιγμάτων απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν:



**Σχήμα 2ΚΓ:** Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων συνδεσμολογίας D/d.



Σχήμα 2ΚΔ: Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων συνδεσμολογίας D/d.

### 2.9.γ Συνδεσμολογία (Y/d) αστέρα-τριγώνου

Σ' αυτή την περίπτωση τα ρεύματα των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος είναι μικρότερα κατά  $\sqrt{3}$  φορές από τα ρεύματα φορτίου. Ομοίως σε αυτήν τη συνδεσμολογία δεν μπορούν να τροφοδοτηθούν μονοφασικά φορτία, εφόσον δεν παρέχεται η δυνατότητα σύνδεσης ουδέτερου αγωγού.

Οι πολικές τάσεις του πρωτεύοντος προηγούνται κατά  $30^\circ$  σε σχέση με τις πολικές τάσεις του δευτερεύοντος. Το ίδιο ισχύει και για τα ρεύματα. Αντίθετα, οι φασικές τάσεις των δύο τυλιγμάτων είναι σε φάση χρόνου μεταξύ τους. Το ίδιο ισχύει και για τα ρεύματα των τυλιγμάτων. Άρα για ευθύ συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων τροφοδοσίας ισχύουν:

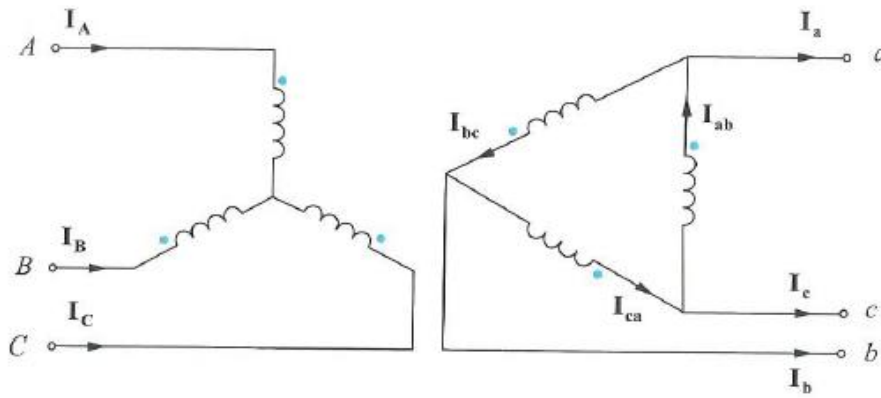
$$\frac{U_{AN}}{U_{\alpha n}} = \frac{U_{BN}}{U_{\beta n}} = \frac{U_{CN}}{U_{\gamma n}} = \alpha \quad (2.37)$$

$$\frac{U_{AB}}{U_{\alpha\beta}} = \frac{U_{BC}}{U_{\beta\gamma}} = \frac{U_{CA}}{U_{\gamma\alpha}} = \alpha \angle 30^\circ \quad (2.38)$$

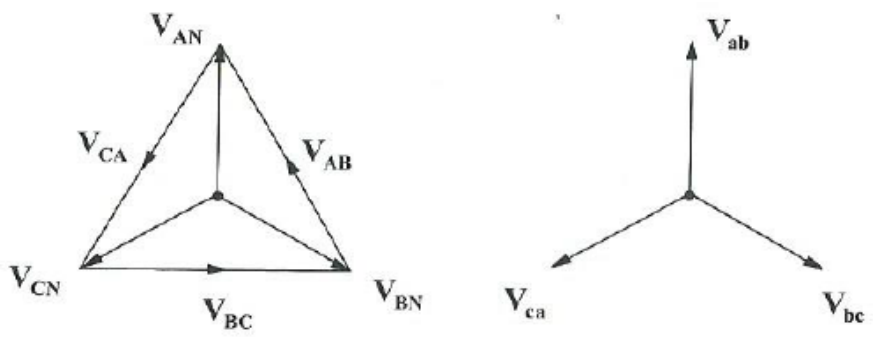
$$\frac{I_A}{I_\alpha} = \frac{I_B}{I_\beta} = \frac{I_C}{I_\gamma} = \frac{1}{a} \quad (2.39)$$

$$\frac{I_{AB}}{I_{\alpha\beta}} = \frac{I_{BC}}{I_{\beta\gamma}} = \frac{I_{CA}}{I_{\gamma\alpha}} = \frac{1}{a} \angle -30^\circ \quad (2.40)$$

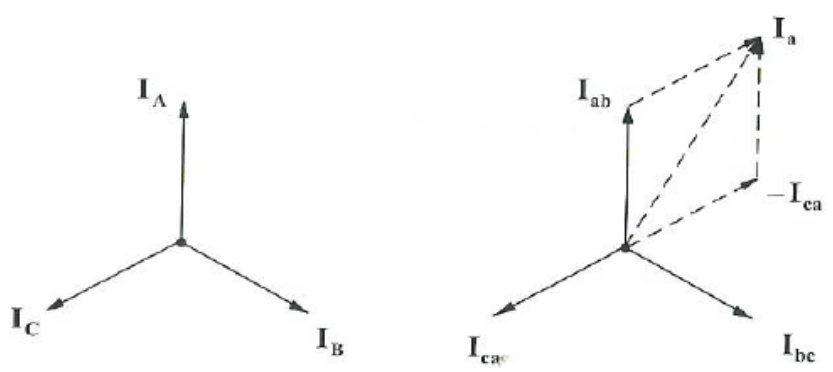




Σχήμα 2ΚΕ: Συνδεσμολογία Y/d.



Σχήμα 2ΚΣΤ: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων συνδεσμολογίας Y/d.

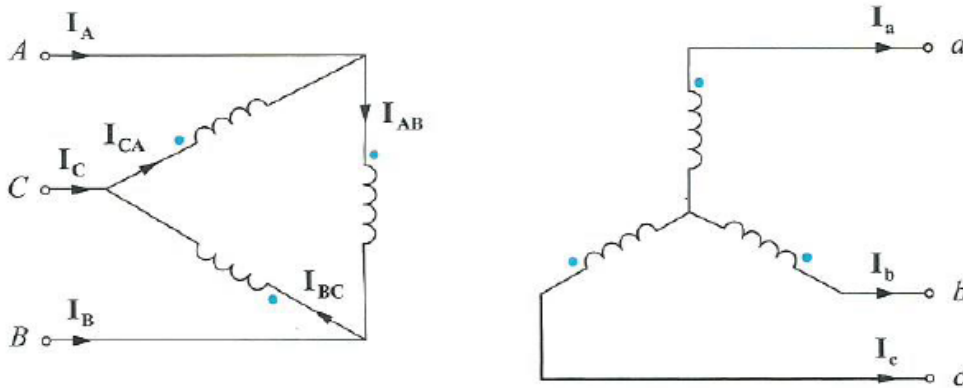


Σχήμα 2ΚΖ: Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων συνδεσμολογίας Y/d.

### 2.9.δ Συνδεσμολογία (D/y) τριγώνου-αστέρα

Σ' αυτή τη συνδεσμολογία οι πολικές τάσεις του πρωτεύοντος καθυστερούν κατά  $30^\circ$  από τις αντίστοιχες πολικές τάσεις του δευτερεύοντος. Το ίδιο ισχύει και μεταξύ των ρευμάτων των δύο τυλιγμάτων. Άρα έχουμε ότι:

$$\frac{U_{AB}}{U_{ab}} = \frac{U_{BC}}{U_{bc}} = \frac{U_{CA}}{U_{ca}} = \alpha \angle -30^\circ \quad (2.41)$$



**Σχήμα 2KH:** Συνδεσμολογία D/y.

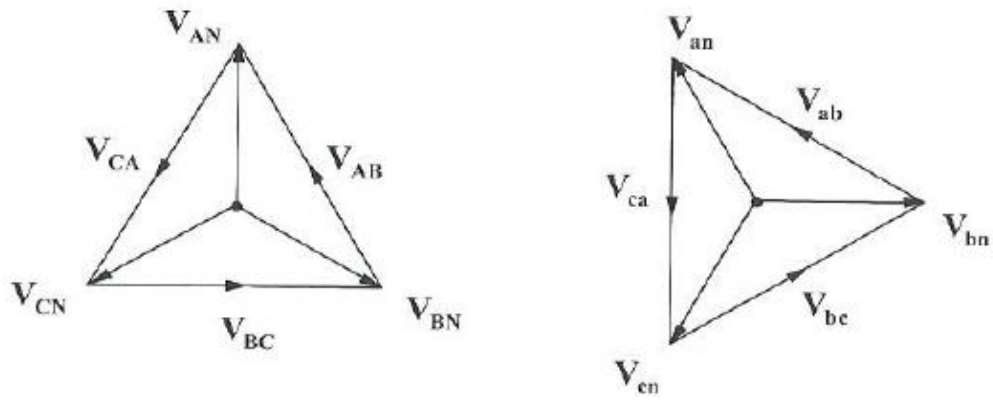
Οι πολικές τάσεις πρωτεύοντος και οι φασικές τάσεις του δευτερεύοντος βρίσκονται σε φάση χρόνου μεταξύ τους. Άρα:

$$\frac{U_{AB}}{U_{an}} = \frac{U_{BC}}{U_{bn}} = \frac{U_{CA}}{U_{cn}} = \alpha \quad (2.42)$$

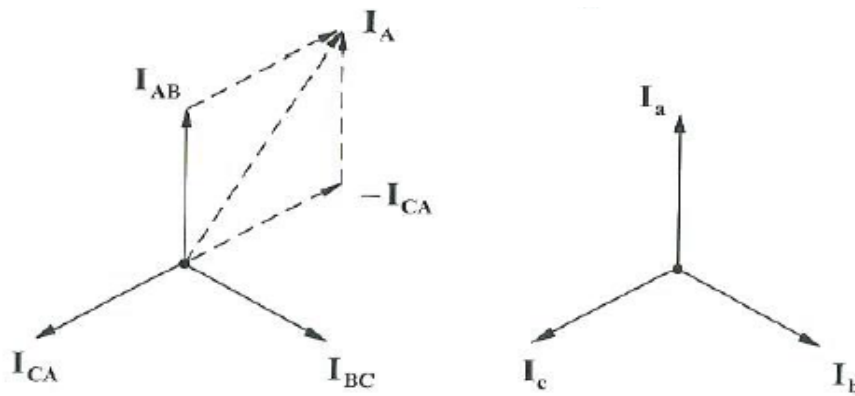
Ομοίως και οι σχέσεις μεταξύ των φασικών και πολικών ρευμάτων δίνονται:

$$\frac{I_{AB}}{I_a} = \frac{I_{BC}}{I_b} = \frac{I_{CA}}{I_c} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.43)$$

$$\frac{I_A}{I_a} = \frac{I_B}{I_b} = \frac{I_C}{I_c} = \frac{1}{\alpha} \angle -30^\circ \quad (2.44)$$



Σχήμα 2ΚΘ: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων συνδεσμολογίας D/y.



Σχήμα 2Λ: Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων συνδεσμολογίας D/y.

### 3. ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

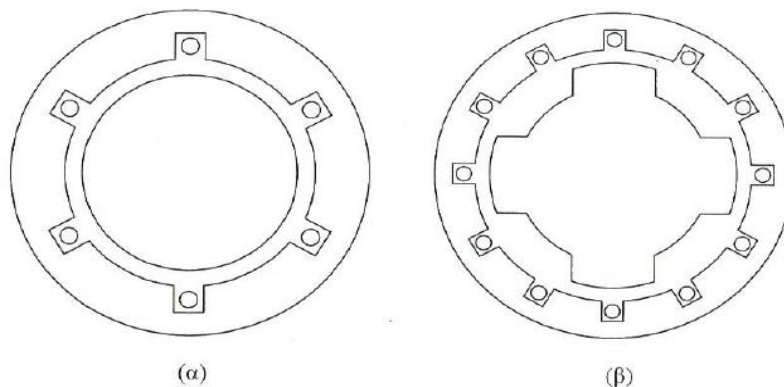
#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη γεννήτρια (synchronous generator), ή αλλιώς εναλλακτήρας, είναι σύγχρονη μηχανή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί το επίκεντρο κάθε σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής τάσεως.

#### 3.2 ΔΟΜΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι σύγχρονες μηχανές, στις οποίες η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Οι γεννήτριες αυτές αποτελούνται από ένα μεγάλο στατό μαγνήτη, που δημιουργεί ένα σταθερό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας, όπως επίσης και από έναν περιστρεφόμενο βρόγχο μέσα στο πεδίο αυτό. Το περιστρεφόμενο τμήμα της ηλεκτρικής μηχανής ονομάζεται δρομέας και το στατό τμήμα στάτης.

Ο δρομέας της μηχανής μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, όταν οι πόλοι της γεννήτριας βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνειά του, είτε εκτύπων πόλων, όταν οι πόλοι του προεξέχουν στην επιφάνειά του. Οι δύο τύποι δρομέα φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 3Α:** Ηλεκτρική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος : α) κυλινδρικού δρομέα, β) εκτύπων πόλων.

Για τη λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας πρέπει το τύλιγμα του δρομέα να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική αιτία όπως μια

κινητήρια μηχανή ή ο άνεμος στην περίπτωση ανεμογεννήτριας, το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Δεδομένου ότι ο στάτης διαθέτει τρία τυλίγματα, που απέχουν μεταξύ τους  $120^\circ$ , τότε το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής.

Ονομάζεται σύγχρονη επειδή το μαγνητικό πεδίο του δρομέα και το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφονται με την αυτή ταχύτητα.

### 3.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη στις σύγχρονες μηχανές δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f = \frac{n p}{120} \quad (3.1)$$

$f$  η ηλεκτρική συχνότητα σε  $Hz$

$n$  η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό ( $r/min$ )

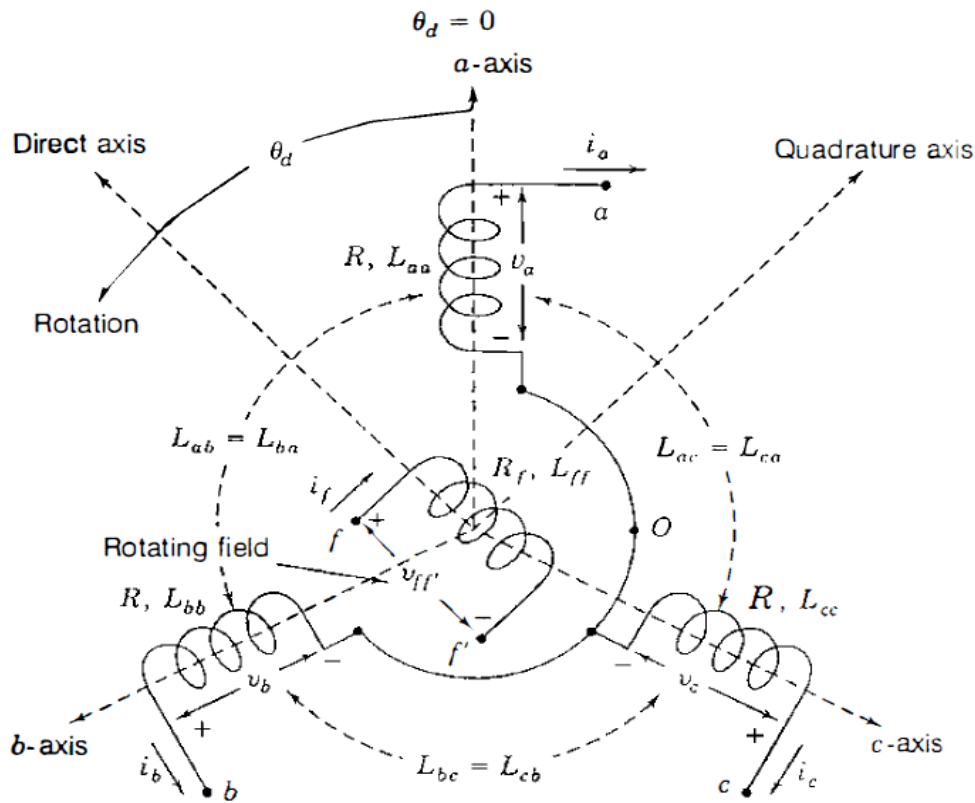
$p$  ο αριθμός των πόλων

Το σύνολο των γεννητριών όμως παράγουν συχνότητες  $50 Hz$  ή  $60 Hz$ , οπότε η ταχύτητα περιστροφής τους για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη. Για παράδειγμα κατά την παραγωγή συχνότητας  $60 Hz$ , μια μηχανή 4 πόλων θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα  $1800 rpm$ , ενώ για  $50 Hz$  μια μηχανή 2 πόλων με ταχύτητα  $3000 rpm$ . Άρα η παραπάνω σχέση δίνει την ταχύτητα με την οποία θα περιστρέφεται μια μηχανή, ώστε η συγκεκριμένη συχνότητα να επιτυγχάνεται.

### 3.4 ΤΑΣΗ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια το τριφασικό τύλιγμα τυμπάνου αποτελείται από τρία επιμέρους όμοια μονοφασικά διανεμημένα τυλίγματα, ένα για κάθε φάση. Το τύλιγμα τυμπάνου μπορεί να παρασταθεί με τρία όμοια συγκεντρωμένα τυλίγματα. Τα τρία τυλίγματα του στάτη θεωρούνται ιδανικά και η μία άκρη του καθενός από αυτά συνδέεται σε ένα κοινό σημείο  $O$ . Η άλλη άκρη από το καθένα σημειώνεται ως  $a$ ,  $b$ , και  $c$ . Τα τρία τυλίγματα είναι τοποθετημένα με τους μαγνητικούς άξονες μετατιθέμενους στο χώρο κατά  $120^\circ$ . Ο μαγνητικός άξονας του τυλίγματος  $a$  ορίζεται ως άξονας αναφοράς σε γωνία  $\theta_a = 0^\circ$ , επομένως οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων  $b$  και  $c$  βρίσκονται σε

γωνία  $120^\circ$  και  $240^\circ$  αντίστοιχα. Ο άξονας κατά μήκος του άξονα του πόλου του δρομέα ονομάζεται ορθός άξονας και ο κάθετος στον ορθό άξονα ονομάζεται εγκάρσιος άξονας. Η διάταξη των τυλιγμάτων φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



**Σχήμα 3B:** Τυλίγματα στάτη a, b, c και τύλιγμα ρότορα f τριφασικής γεννήτριας. Ο ορθός άξονας προηγείται πάντα κατά  $90^\circ$  του εγκάρσιου κατά τη φορά περιστροφής.

Το κάθε ένα από τα τυλίγματα a, b, c έχει αυτεπαγωγή  $L_s$ , η οποία ισούται με τις αυτεπαγωγές  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$  και  $L_{cc}$  των τυλιγμάτων του τυμπάνου που αντιστοιχούν, δηλαδή:

$$L_s = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \quad (3.2)$$

Η αλληλεπαγωγή μεταξύ κάθε ζευγαριού τυλιγμάτων ορίζεται ως  $-M_s$ , ώστε έχουμε:

$$-M_s = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} \quad (3.3)$$

Η αλληλεπαγωγή μεταξύ του τυλίγματος του πεδίου και κάθε ενός από τα τυλίγματα του τυμπάνου εξαρτάται από τη γωνία  $\theta_d$  του δρομέα και μεταβάλλεται ως συνημιτονοειδής συνάρτηση με μέγιστη τιμή  $M_f$ , έτσι έχουμε:

$$\begin{aligned} L_{af} &= M_f \cos\theta_d \\ L_{bf} &= M_f \cos(\theta_d - 120^\circ) \\ L_{cf} &= M_f \cos(\theta_d - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Το πηνίο του πεδίου έχει σταθερή αυτεπαγωγή ίση με  $L_{ff}$ . Το σύνολο της μαγνητικής ροής για κάθε ένα από τα τυλίγματα του τυμπάνου και του πεδίου οφείλεται στο ίδιο το ρεύμα του κάθε ενός ξεχωριστά μαζί με τα ρεύματα των υπόλοιπων τριών τυλιγμάτων. Επομένως οι εξισώσεις της πεπλεγμένης ροής για κάθε ένα από τα τυλίγματα είναι:

α) Για τυλίγματα τυμπάνου:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f = L_s i_a - M_s(i_b + i_c) + L_{af}i_f \\ \lambda_b &= L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f = L_s i_b - M_s(i_a + i_c) + L_{bf}i_f \\ \lambda_c &= L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f = L_s i_c - M_s(i_a + i_b) + L_{cf}i_f \end{aligned} \quad (3.5)$$

β) Για τύλιγμα πεδίου:

$$\lambda_f = L_{af}i_a + L_{bf}i_b + L_{cf}i_c \quad (3.6)$$

Στην περίπτωση που τα τριφασικά ρεύματα  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  είναι και συμμετρικά τότε ισχύει:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.7)$$

Θέτοντας σε αυτή την περίπτωση  $i_a = - (i_b + i_c)$ ,  $i_b = - (i_a + i_c)$  και  $i_c = - (i_b + i_c)$  τότε για τα τυλίγματα τυμπάνου έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= (L_s + M_s) i_a + L_{af} i_f \\ \lambda_b &= (L_s + M_s) i_b + L_{bf} i_f \\ \lambda_c &= (L_s + M_s) i_c + L_{cf} i_f \end{aligned} \quad (3.8)$$

Σε σταθερές συνθήκες, το ρεύμα του δρομέα  $i_f$  όπως είπαμε είναι συνεχές (D.C.) με σταθερή τιμή  $I_f$ , και ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , ώστε για μία διπολική μηχανή έχουμε:

$$\frac{d\theta_d}{dt} = \omega \quad (3.9)$$

και

$$\theta_d = \omega t + \theta_{d0} \quad (3.10)$$

$\theta_{d0}$  είναι η γωνία στην οποία δίνεται η αρχική θέση του τυλίγματος δρομέα τη χρονική στιγμή  $t = 0$ .

Κάνοντας χρήση της (3.10) σχέσης και αντικαθιστώντας στις εξισώσεις αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του τυμπάνου και του πεδίου (σχέση 3.4) και θέτοντας  $i_f = I_f$  οι εξισώσεις του συνόλου της μαγνητικής ροής για τα τυλίγματα τυμπάνου δίνονται από:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= (L_s + M_s) i_a + M_f I_f \cos(\omega t + \theta_{d0}) \\ \lambda_b &= (L_s + M_s) i_b + M_f I_f \cos(\omega t + \theta_{d0} - 120^\circ) \\ \lambda_c &= (L_s + M_s) i_c + M_f I_f \cos(\omega t + \theta_{d0} - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Από τις πιο πάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η πεπλεγμένη ροή κάθε τυλίγματος αποτελείται από δύο συνιστώσες. Στο τύλιγμα  $a$ , η μία συνιστώσα οφείλεται στο ρεύμα του πεδίου  $I_f$  και η άλλη συνιστώσα στο ρεύμα του τυμπάνου  $i_a$ , το οποίο ρέει προς την έξοδο της μηχανής. Θεωρώντας πως το τύλιγμα  $a$  του τυμπάνου έχει αντίσταση  $R$ , τότε η πτώση τάσης στο τύλιγμα μεταξύ των ακροδεκτών  $a$  και  $O$ , όπως φαίνονται στο σχήμα 3.2, δίνεται από τη σχέση:

$$u_a = -Ri_a - \frac{d\lambda_a}{dt} = -Ri_a - (L_s + M_s) \frac{di_a}{dt} + \omega M_f I_f \sin(\omega t + \theta_{d0}) \quad (3.12)$$

Η χρήση του αρνητικού πρόσημου γίνεται, όταν το τύλιγμα λειτουργεί ως γεννήτρια, δηλ. παράγει ισχύ. Αντίστοιχα, όταν ένα τύλιγμα συμπεριφέρεται ως φορτίο (κινητήρας), καταναλώνοντας ισχύ από μία πηγή, τότε χρησιμοποιείται θετικό πρόσημο.

Στην προηγούμενη εξίσωση (3.12) ο τελευταίος όρος εκφράζει μία εσωτερική ηλεκτρεγερτική δύναμη, ή τάση, την  $e_a$ , η οποία γράφεται:

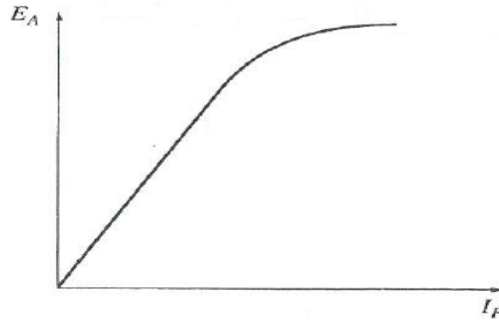
$$e_a = \sqrt{3} |E_i| \sin(\omega t + \theta_{d0}) \quad (3.13)$$

$E_i$  η ενεργός τιμή της τάσης, η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος πεδίου και δίνεται από τη σχέση:

$$|E_i| = \frac{\omega M_f I_f}{\sqrt{2}} \quad (3.14)$$

Η σχέση μεταξύ της τάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας και του ρεύματος διέγερσης δίνεται από την καμπύλη του επόμενου σχήματος. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται *καμπύλη μαγνήτισης* και απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.





**Σχήμα 3Γ:** Καμπύλη μαγνήτισης σύγχρονης γεννήτριας.

Η τάση, η οποία αναπτύσσεται στο εσωτερικό της γεννήτριας λόγω του ρεύματος διέγερσης, όταν το ρεύμα  $i_a$  είναι μηδέν, εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής και ονομάζεται *τάση κενού φορτίου* (*no-load voltage*) ή *τάση ανοιχτού κυκλώματος* (*open-circuit voltage*) της φάσης  $a$ .

Η γωνία  $\theta_{d0}$  δείχνει τη θέση του παράλληλου άξονα (*d-axis*) του τυλίγματος του πεδίου ως προς τον παράλληλο άξονα του τυλίγματος  $a$  του τυμπάνου τη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Οι παράλληλοι άξονες των τυλιγμάτων φαίνονται στο σχήμα 3.2. Η γωνία  $\delta = \theta_{d0} - 90^\circ$  δείχνει τη θέση του κάθετου άξονα (*q-axis*) ο οποίος έχει διαφορά  $90^\circ$  από τον παράλληλο άξονα. Θέτοντας:

$$\theta_d = \omega t + \theta_{d0} = (\omega t + \delta + 90^\circ) \quad (3.15)$$

και αφού ισχύει  $\sin(\alpha + 90) = \cos \alpha$ , τότε η εξίσωση για την τάση ανοιχτού κυκλώματος της φάσης  $a$  (εξ. 3.13) γράφεται ως εξής:

$$e_a = \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta) \quad (3.16)$$

Άρα η τάση στην έξοδο της μηχανής  $u_a$  γράφεται:

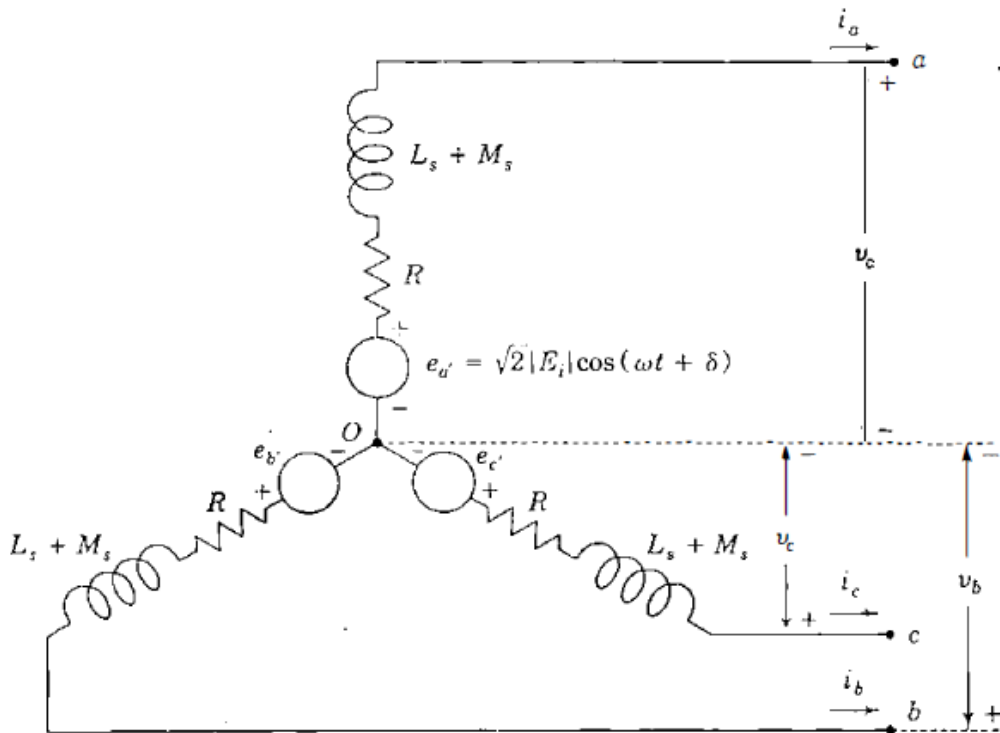
$$\begin{aligned} u_a &= -Ri_a - (L_s + M_s) \frac{di_a}{dt} + \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta) = \\ &= -Ri_a - (L_s + M_s) \frac{di_a}{dt} + e_a \end{aligned} \quad (3.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση αντιστοιχεί στη φάση  $a$  του κυκλώματος, που φαίνεται στο επόμενο σχήμα 3Δ, όπου η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $e_a$  είναι η πηγή τάσης και το εξωτερικό φορτίο θεωρείται συμμετρικό και για τις τρεις φάσεις.

Έχοντας υπόψη και τις αντίστοιχες ροές  $\lambda_b$  και  $\lambda_c$  των τυλιγμάτων των υπόλοιπων φάσεων, οδηγούμαστε σε παρόμοια αποτελέσματα για τις εσωτερικές τάσεις κενού φορτίου  $e_b$  και  $e_c$ , οι οποίες έχουν διαφορά φάσης  $120^\circ$  και  $240^\circ$  με την τάση  $e_a$  αντίστοιχα. Το ίδιο ισχύει και για τις τάσεις των υπόλοιπων φάσεων στην έξοδο της μηχανής. Δηλαδή έχουμε:

$$\begin{aligned}
 u_b &= -Ri_b - (L_s + M_s) \frac{di_b}{dt} + \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta - 120^\circ) = \\
 &= -Ri_b - (L_s + M_s) \frac{di_b}{dt} + e_b
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}
 u_{ac} &= -Ri_c - (L_s + M_s) \frac{di_c}{dt} + \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta - 240^\circ) = \\
 &= -Ri_c - (L_s + M_s) \frac{di_c}{dt} + e_c
 \end{aligned} \tag{3.19}$$



**Σχήμα 3Δ:** Ισοδύναμο κύκλωμα τυμπάνου 3Φ γεννήτριας στο οποίο διακρίνονται οι τάσεις κενού φορτίου  $e_a$ ,  $e_b$  και  $e_c$ .

Συνδέοντας τριφασικό συμμετρικό φορτίο στην έξοδο της μηχανής, έχουμε ροή συμμετρικών ρευμάτων, τα οποία δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$\begin{aligned}
 i_a &= \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta - \theta_a) \\
 i_b &= \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta - \theta_a - 120^\circ) \\
 i_c &= \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta - \theta_a - 240^\circ)
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$|I_a|$  η ενεργός τιμή του ρεύματος

$\theta_a$  η φασική γωνία καθυστέρησης μεταξύ του ρεύματος  $i_a$  και της τάσης  $e_a$ .

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις που δίνουν την αμοιβαία επαγωγή  $L_{af}$ ,  $L_{bf}$  και  $L_{cf}$  μεταξύ των τυλιγμάτων του τυμπάνου με το τύλιγμα του πεδίου (εξ. 3.4) και την εξ. 3.6, που δίνει το σύνολο της μαγνητικής ροής  $\lambda_f$  στο πεδίο, η τελευταία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\lambda_f = L_{ff} I_f + M_f [i_a \cos\theta_d + i_b \cos(\theta_d - 120^\circ) + i_c \cos(\theta_d - 240^\circ)] \quad (3.21)$$

Ο πρώτος όρος μέσα στην παρένθεση, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.9), (3.10) και (3.17) μπορεί να αντικατασταθεί με:

$$i_a \cos\theta_d = \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta - \theta_a) \cos(\omega t + \delta + 90^\circ) \quad (3.22)$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας  $2\cos(a)\cos(\beta) = \cos(a-\beta) + \cos(a+\beta)$ , τότε έχουμε:

$$i_a \cos\theta_d = \frac{|I_a|}{\sqrt{2}} [-\sin\theta_a - \sin(2(\omega t + \delta) - \theta_a)] \quad (3.23)$$

Αντίστοιχα για τα ρεύματα  $i_b$  και  $i_c$  έχουμε:

$$i_b \cos(\theta_d - 120^\circ) = \frac{|I_a|}{\sqrt{2}} [-\sin\theta_a - \sin(2(\omega t + \delta) - \theta_a - 120^\circ)] \quad (3.24)$$

$$i_c \cos(\theta_d - 240^\circ) = \frac{|I_a|}{\sqrt{2}} [-\sin\theta_a - \sin(2(\omega t + \delta) - \theta_a - 240^\circ)] \quad (3.25)$$

Οι όροι που περιλαμβάνουν το  $2\omega t$  στις παραπάνω εξισώσεις ισούνται με μηδέν για κάθε χρόνο  $t$ , οπότε κάνοντας τις πράξεις στην παρένθεση έχουμε:

$$[i_a \cos\theta_d + i_b \cos(\theta_d - 120^\circ) + i_c \cos(\theta_d - 240^\circ)] = -3 \frac{|I_a|}{\sqrt{2}} \sin\theta_a \quad (3.26)$$

άρα η σχέση για το συνολική μαγνητική ροή στο πεδίο  $\lambda_f$  απλοποιείται σε:

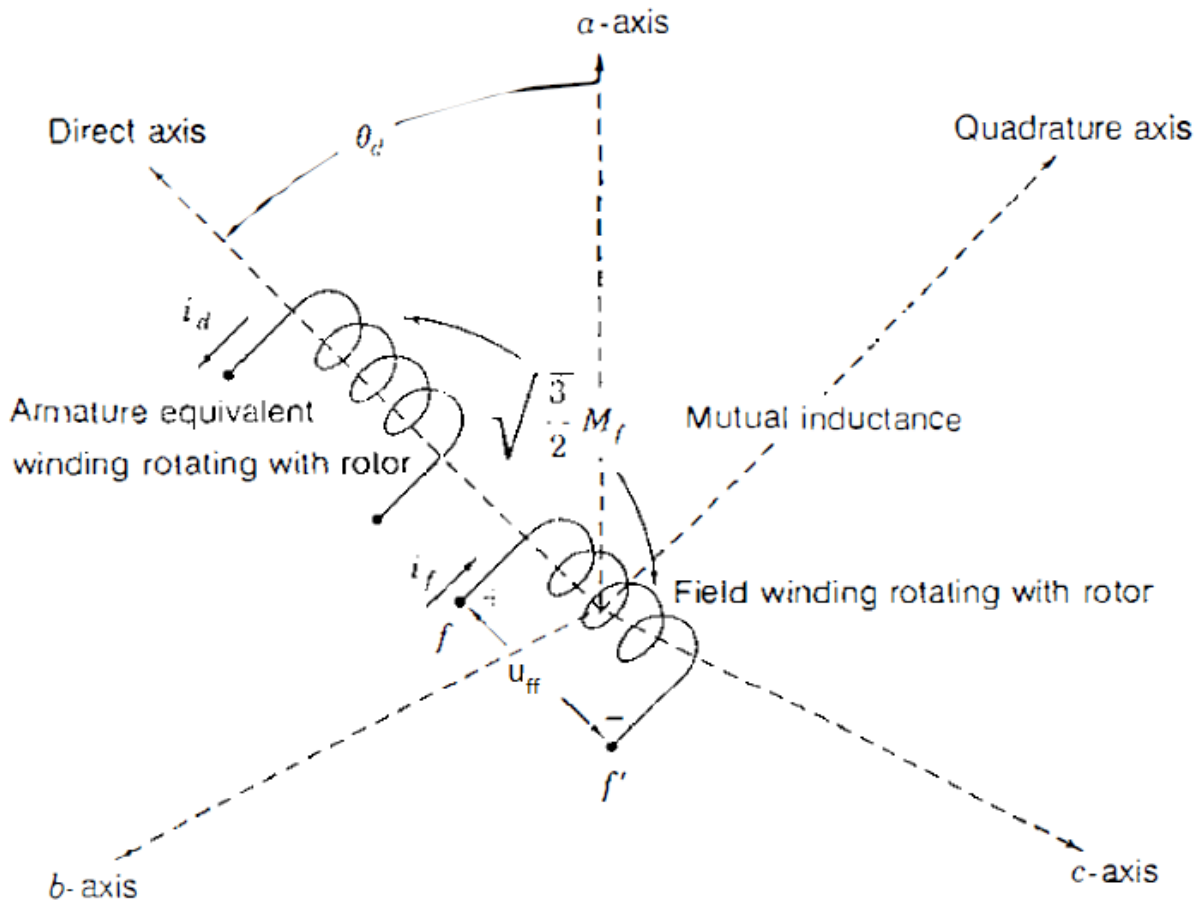
$$\lambda_f = L_{ff} i_f - 3 \frac{M_f |I_a|}{\sqrt{2}} \sin\theta_a = L_{ff} i_f + \sqrt{\frac{3}{2}} M_f i_d \quad (3.27)$$

όπου

$$i_d = -\sqrt{3} |I_a| \sin\theta_a \quad (3.28)$$

Παρατηρώντας τις προηγούμενες εξισώσεις βγαίνει το συμπέρασμα ότι η συνιστώσα της μαγνητικής ροής στο πεδίο που οφείλεται στα ρεύματα  $i_a$ ,  $i_b$  και  $i_c$  δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οφείλεται στο συνεχές ρεύμα  $i_d$  ενός κυκλώματος (τυλίγματος), το οποίο

συμπίπτει με τον παράλληλο άξονα του τυλίγματος του πεδίου και μένει σταθερό με αναφορά το τύλιγμα του πεδίου. Τα δύο τυλίγματα περιστρέφονται μαζί στη σύγχρονη ταχύτητα και η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ τους ισούται με  $\sqrt{\frac{3}{2}}M_f$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



**Σχήμα 3E :** Τα τυλίγματα τυμπάνου σύγχρονης μηχανής ως ένα ενιαίο τύλιγμα στον παράλληλο άξονα του τυλίγματος πεδίου με αμοιβαία επαγωγή  $\sqrt{\frac{3}{2}}M_f$ .

Θεωρώντας ότι το τύλιγμα του πεδίου παρουσιάζει αντίσταση  $R_f$  και το ρεύμα που κυκλοφορεί  $i_f$  τότε η τάση στα άκρα του δίνεται:

$$u_{ff} = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (3.29)$$

Λόγω ότι η μαγνητική ροή  $\lambda_f$  δεν μεταβάλλεται με το χρόνο η τάση του πεδίου γίνεται:

$$u_{ff} = R_f i_f \quad (3.30)$$

το ρεύμα  $i_f = I_f$  μπορεί να τροφοδοτηθεί από μία πηγή συνεχούς ρεύματος.

Από την εξίσωση του ρεύματος  $i_d$  (σχέση 3.28) βλέπουμε ότι η τιμή του εξαρτάται από το πλάτος του ρεύματος τυμπάνου  $I_a$  και τη γωνία  $\theta_a$  μεταξύ του ρεύματος τυμπάνου και της τάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας  $e_a$ . Για επαγωγικό συντελεστή ισχύος η γωνία  $\theta_a$  θα είναι θετική και επομένως η τιμή του ρεύματος  $i_d$  αρνητική, το οποίο σημαίνει ότι η συνδυασμένη επίδραση και των τριών ρευμάτων του στάτη  $i_a$ ,  $i_b$  και  $i_c$  προκαλεί μια εξασθένηση στο μαγνητικό πεδίο, το οποίο είχε διαμορφωθεί από το ρεύμα διέγερσης  $I_f$ . Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα  $I_f$  πρέπει να αυξηθεί μέσω του συστήματος ελέγχου διέγερσης της μηχανής. Για χωρητικό συντελεστή ισχύος, η γωνία  $\theta_a$  παίρνει μικρότερες τιμές, οπότε η εξασθένηση που προκαλείται είναι μικρότερη και επομένως το ρεύμα  $I_f$  μπορεί και πάλι να προσαρμοστεί κατάλληλα (π.χ. να μειωθεί αν πριν λειτουργούσε με επαγωγικό συντελεστή ισχύος) μέσω του συστήματος ελέγχου διέγερσης.

Η επίδραση των ρευμάτων του στάτη στο μαγνητικό πεδίο που είχε διαμορφωθεί στο εσωτερικό της γεννήτριας από το ρεύμα πεδίου ονομάζεται *αντίδραση οπλισμού*.

### 3.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΥΛΙΔΡΙΚΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Η αναπτυσσόμενη τάση  $e_a$  στα άκρα της μιας φάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας είναι ίση με την αντίστοιχη φασική τάση  $U_\phi$  στην έξοδο της μηχανής μόνο όταν το ρεύμα τυμπάνου είναι μηδέν, δηλ. όταν δεν έχει συνδεθεί κάποιο φορτίο. Οι λόγοι που η τάση  $e_a$  διαφοροποιείται από την  $U_\phi$  είναι οι ακόλουθοι:

- α) Οι ωμικές αντιστάσεις των αγωγών του στάτη
- β) Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη
- γ) Η αντίδραση οπλισμού

Έστω ότι η μηχανή περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα  $\omega$  και το ρεύμα διέγερσης  $I_f$  είναι σταθερό, τότε η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής φαίνεται στο σχήμα 3.4, όπου στο εσωτερικό της μηχανής έχουν αναπτυχθεί οι τάσεις  $e_a$ ,  $e_b$  και  $e_c$ . Θεωρώντας ως φάση αναφοράς τη φάση  $a$  της μηχανής, τα ρεύματα και οι τάσεις των φάσεων  $b$  και  $c$  θα καθυστερούν κατά  $120^\circ$  και  $240^\circ$  αντίστοιχα. Επειδή στην πράξη όμως η τάση  $e_a$  δεν μπορεί να μετρηθεί όταν στη μηχανή είναι συνδεδεμένο κάποιο φορτίο, θα θεωρήσουμε ως φάση αναφοράς τη φάση της τάσης  $U_a$  στην έξοδο της μηχανής, με βάση την οποία θα μετρηθεί και η γωνία του ρεύματος  $i_a$ . Θέτουμε:

$$U_\alpha = \sqrt{2} |V_\alpha| \cos(\omega t) \quad (3.31)$$

$$e_\alpha = \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta) \quad (3.32)$$

$$i_\alpha = \sqrt{2} |I_\alpha| \cos(\omega t - \theta) \quad (3.33)$$

η γωνία  $\theta$  ισούται με  $(\theta_\alpha - \delta)$  στη σχέση 3.20 για το ρεύμα  $i_\alpha$  με αναφορά την τάση  $e_\alpha$ .

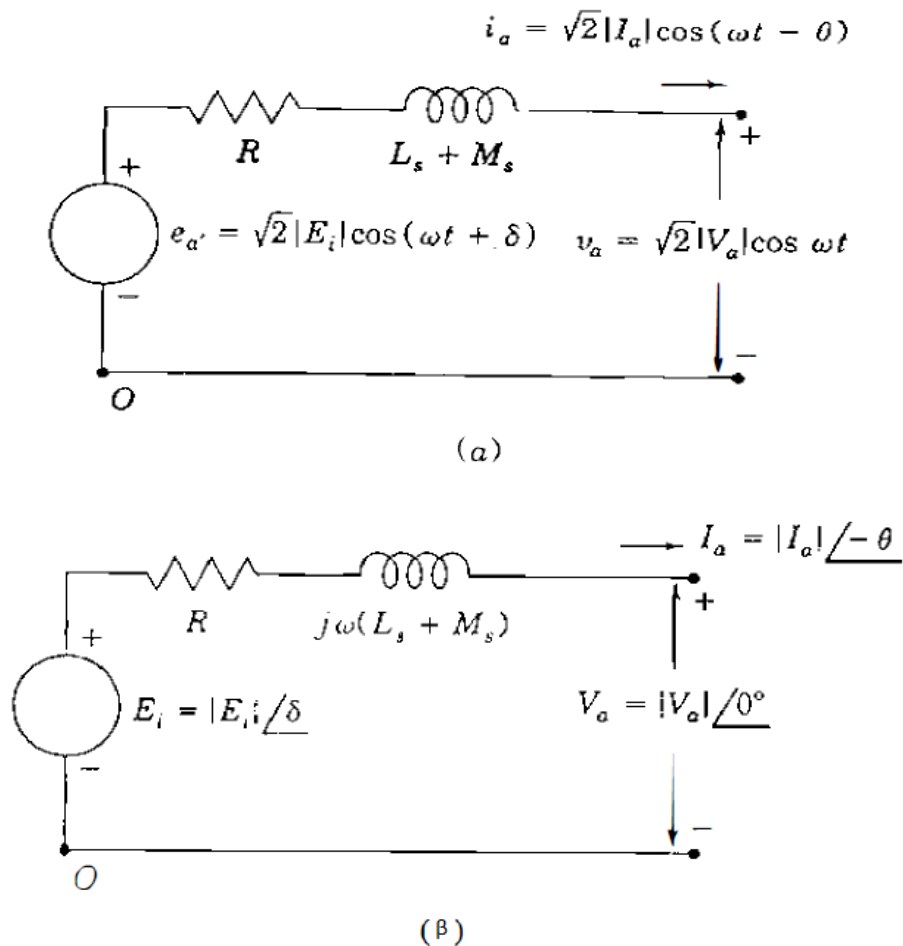
Τα πιο πάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή φασόρων ως:

$$U_\alpha = |V_\alpha| \angle 0^\circ \quad (3.34)$$

$$E_\alpha = |E_i| \angle \delta \quad (3.35)$$

$$I_\alpha = |I_\alpha| \angle -\theta \quad (3.36)$$

Άρα το ισοδύναμο κύκλωμα για μια φάση της σύγχρονης γεννήτριας εκφρασμένο και με τις δυο μορφές φαίνεται στ ακόλουθα σχήματα:



**Σχήμα 3ΣΤ:** Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας με αναφορά τη φάση α με α) συνημιτονοειδή μορφή, και β) με τη μορφή φασόρων.

Κάνοντας εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> νόμου του Kirchoff, η τάση  $U_\alpha$  στην έξοδο της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$U_\alpha = E_i - RI_\alpha - j\omega L_s I_\alpha - j\omega M_s I_\alpha \quad (3.37)$$

$RI_\alpha$  η πτώση τάσης λόγω της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη  
 $j\omega L_s I_\alpha$  η πτώση τάσης λόγω της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων του στάτη,  
 $j\omega M_s I_\alpha$  η πτώση τάσης λόγω αντίδρασης οπλισμού.

Η αντίδραση οπλισμού και η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων του στάτη εκφράζονται με μία ενιαία αντίδραση, η οποία ονομάζεται σύγχρονη αντίδραση της μηχανής  $X_d$  και είναι ίση:

$$X_d = \omega(L_s + M_s) \quad (3.38)$$

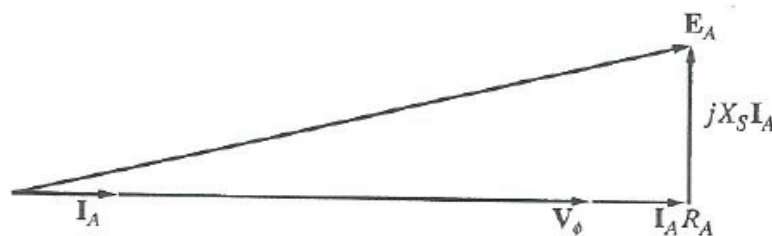
Ομοίως η συνολική εμπέδηση της μηχανής ορίζεται ως σύγχρονη εμπέδηση  $Z_d$  και ισούται:

$$Z_d = R + jX_d \quad (3.39)$$

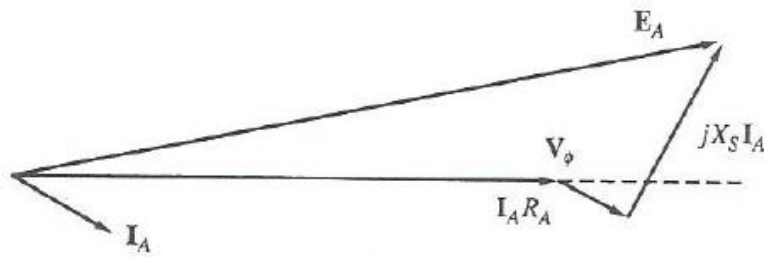
η εξίσωση για την τάση  $U_\alpha$  γράφεται:

$$U_\alpha = E_i - I_\alpha Z_d = E_i - RI_\alpha - jX_d I_\alpha \quad (3.40)$$

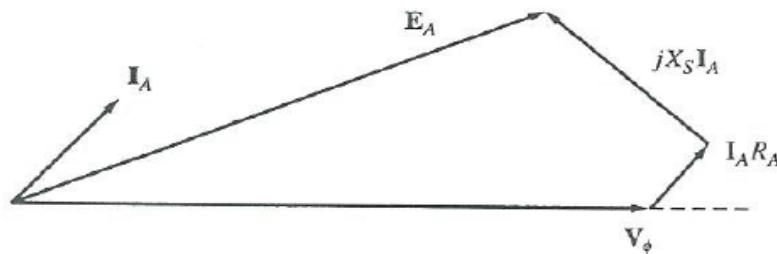
Η σχέση μεταξύ του ρεύματος τυμπάνου  $I_\alpha$  και των εναλλασσόμενων τάσεων ( $E_\alpha$ ,  $U_\phi$ ,  $I_\alpha R$ ,  $jX_d I_\alpha$ ) που αναπτύσσονται σε μια σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να παρασταθεί σε ένα διανυσματικό διάγραμμα, εφόσον τα μεγέθη είναι εκφρασμένα με τη μορφή φασόρων, δηλαδή διαθέτουν πλάτος και φάση. Ως αναφορά όλων των τάσεων και των ρευμάτων θεωρείται, όπως και στο ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση εξόδου της γεννήτριας  $U_\phi$ , γι' αυτό και η φάση της θεωρείται μηδενική. Ανάλογα με το είδος του φορτίου (ωμικό, χωρητικό ή επαγωγικό) το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα φαίνεται στις επόμενα σχήματα:



**Σχήμα 3Z:** Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί με ωμικό συντελεστή ισχύος



**Σχήμα 3Η:** Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος.



**Σχήμα 3Θ:** Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί με χωρητικό συντελεστή ισχύος.

### 3.6 ΙΣΧΥΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Τις περισσότερες φορές οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται σε άπειρο ζυγό, δηλαδή ένα μεγάλο σύστημα ισχύος, σταθερής τάσης και συχνότητας, το οποίο παραμένει αμετάβλητο από την εισαγωγή ή έξοδο της γεννήτριας σε αυτό ή και σε οποιαδήποτε μεταβολή στα χαρακτηριστικά τους. Άρα, όταν μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται σε άπειρο ζυγό, η ταχύτητα περιστροφής της και η τάση στην έξοδό της παραμένουν σταθερές. Όμως, το ρεύμα διέγερσης και η ροπή στον άξονα παραμένουν ελεγχόμενα. Μέσω της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης  $I_f$  ελέγχεται το ποσό της άεργου ισχύος που παρέχεται από τη γεννήτρια, ενώ μέσω της μεταβολής της ροπής στον άξονα της γεννήτριας ελέγχεται η ενεργός ισχύς.

Μη λαμβάνοντας υπ' όψη την ωμική αντίσταση στο τύλιγμα του στάτη και θεωρώντας ότι η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ζυγό, η συνολική ισχύς που παρέχεται από τη γεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

$$S = P + jQ = U_\varphi I_\alpha^* = |U_\varphi| |I_\alpha| (\cos\theta + j \sin\theta) \quad (3.41)$$



$I_\alpha^*$  ο συζυγής αριθμός του ρεύματος τυμπάνου  $I_\alpha$   
 $\theta_\alpha$ , όπως έχουμε αναφέρει, η γωνία μεταξύ της τάσης εξόδου  $U_\varphi$  και του  
 ρεύματος  $I_\alpha$ .

Επειδή η ενεργός ισχύς  $P$  της γεννήτριας ισούται με το πραγματικό μέρος  
 της εξίσωσης και η άεργος  $Q$  με το φανταστικό, τότε έχουμε ότι:

$$P = |U_\varphi| |I_\alpha| \cos\theta \quad (3.42)$$

και

$$Q = |U_\varphi| |I_\alpha| \sin\theta \quad (3.43)$$

Όμως η ισχύς της γεννήτριας μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση της  
 γωνίας  $\delta$ , δηλ. της γωνίας μεταξύ της τάσης  $E_\alpha$  στο εσωτερικό της γεννήτριας  
 και της τάσης εξόδου  $U_\varphi$ . Λαμβάνοντας υπόψη από το διανυσματικό διάγραμμα  
 του σχήματος 3Z ότι:

$$U_\varphi = |U_\varphi| \angle 0^\circ \quad (3.44)$$

και

$$E_\alpha = |E_\alpha| \angle \delta \quad (3.45)$$

για το ρεύμα τυμπάνου  $I_\alpha$  ότι:

$$I_\alpha = \frac{|E_\alpha| \angle \delta - |U_\varphi| \angle 0^\circ}{jX_d} \quad (3.46)$$

τότε προκύπτει ότι:

$$I_\alpha^* = \frac{|E_\alpha| \angle \delta - |U_\varphi| \angle 0^\circ}{-jX_d} \quad (3.47)$$

η συνολική ισχύς δίνεται:

$$\begin{aligned} S = U_\varphi I_\alpha &= \frac{|U_\varphi| |E_\alpha| \angle -\delta - |U_\varphi|^2}{-jX_d} = \frac{|U_\varphi| |E_\alpha| (\cos\delta + j \sin\delta) - |U_\varphi|^2}{-jX_d} = \\ &= \frac{|U_\varphi| |E_\alpha| \cos\delta}{-jX_d} - \frac{|U_\varphi| |E_\alpha| j \sin\delta}{-jX_d} - \frac{|U_\varphi|^2}{-jX_d} = j \frac{|U_\varphi| |E_\alpha| \cos\delta}{X_d} + \frac{|U_\varphi| |E_\alpha| \sin\delta}{X_d} - jX_d = \end{aligned}$$

$$= \frac{|U_{\varphi}| |E_{\alpha}| \sin \delta}{X_d} + j \frac{|U_{\varphi}| |E_{\alpha}| \cos \delta - |U_{\varphi}|^2}{X_d} \quad (3.48)$$

Αντίστοιχα με πριν, για το πραγματικό και το φανταστικό μέρος έχουμε:

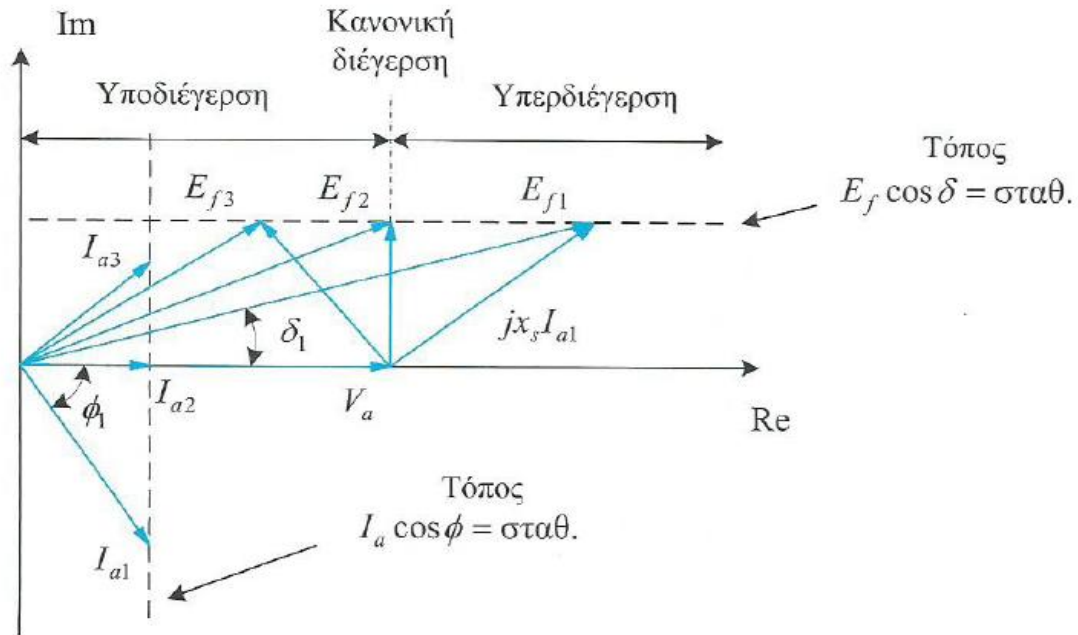
για την ενεργό ισχύ:

$$P = \frac{|U_{\varphi}| |E_{\alpha}| \sin \delta}{X_d} \quad (3.49)$$

και για την άεργο ισχύ:

$$Q = \frac{|U_{\varphi}| |E_{\alpha}| \cos \delta - |U_{\varphi}|^2}{X_d} \quad (3.50)$$

Παρατηρώντας τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνουμε ότι για την περίπτωση λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας, όπου η ενεργός ισχύς  $P$  που παράγεται από αυτήν και τροφοδοτείται στο σύστημα σταθερής τάσης (ζυγό) πρέπει να παραμένει σταθερή, τότε στην εξίσωση 3.42 ο όρος  $(I_{\alpha} \cos \theta)$  θα πρέπει να παραμένει σταθερός. Δηλαδή για οποιαδήποτε μεταβολή του μέτρου του ρεύματος στο τύλιγμα του στάτη έχουμε και μεταβολή της γωνίας  $\theta$  μεταξύ του ρεύματος και της τάσης στο στάτη, ώστε η προβολή του ρεύματος στον άξονα της τάσης στο διανυσματικό διάγραμμα να παραμένει σταθερή. Επομένως, κάτω από αυτές τις συνθήκες όσο μεταβάλλεται το ρεύμα διέγερσης  $I_F$ , μεταβάλλεται ανάλογα και η παραγόμενη τάση  $E_{\alpha}$  στο εσωτερικό της γεννήτριας, πάντα όμως με τρόπο ώστε ο όρος  $(I_{\alpha} \cos \theta)$  να παραμένει σταθερός. Από την εξίσωση 3.49 όμως πρέπει παράλληλα και ο όρος  $(E_{\alpha} \sin \delta)$  να παραμένει σταθερός, ώστε και η ενεργός ισχύς  $P$  να παραμένει σταθερή. Δηλαδή οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος διέγερσης  $I_F$  θα συνεπάγεται και αντίστοιχη μεταβολή της γωνίας  $\delta$ , ώστε το γινόμενο  $(E_{\alpha} \sin \delta)$  να μην μεταβάλλεται. Το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας που δείχνει την επίδραση της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης  $I_F$  για λειτουργία με σταθερή ισχύ  $P$ , φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



**Σχήμα 3I:** Λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας με σταθερό φορτίο και μεταβλητό ρεύμα διέγερσης. Τόποι μεταβολής των  $E_a$  και  $I_a$ .

Από την εξίσωση 3.50, για την περίπτωση που  $|E_a| \cos \delta = |U_\phi|$ , τότε  $Q = 0$ , επομένως ο συντελεστής ισχύς είναι μοναδιαίος (ωμικός) και η γεννήτρια λειτουργεί σε κανονική διέγερση. Αντίστοιχα, και όπως βλέπουμε από το προηγούμενο σχήμα, για  $|E_a| \cos \delta > |U_\phi|$ , τότε  $Q > 0$ , ο συντελεστής ισχύος μειώνεται, καθώς τείνει από ωμικός σε ωμικό-επαγωγικό, επομένως η γεννήτρια λειτουργεί σε υπερδιέγερση και τροφοδοτεί το σύστημα (ζυγό) με άεργο ισχύ, ενώ για  $|E_a| \cos \delta < |U_\phi|$ , τότε  $Q < 0$ , ο συντελεστής ισχύος τείνει σε ωμικό-χωρητικό και η γεννήτρια λειτουργεί σε υποδιέγερση καταναλώνοντας άεργο ισχύ.

Παρατηρώντας το διανυσματικό διάγραμμα του προηγούμενου σχήματος και θεωρώντας ότι γεννήτρια λειτουργεί σε υπερδιέγερση καθώς το ρεύμα διέγερσης ελαττώνεται, η τάση  $E_a$  μειώνεται, ενώ η γωνία φορτίου  $\delta$  αυξάνεται. Ταυτόχρονα, το μέτρο του ρεύματος  $I_a$  μειώνεται παίρνοντας την ελάχιστη τιμή του, όταν η τάση και το ρεύμα τυμπάνου είναι συμφασικά, δηλαδή, όταν η γεννήτρια λειτουργεί στην κανονική διέγερση. Περαιτέρω μείωση του ρεύματος διέγερσης οδηγεί τη γεννήτρια σε υποδιέγερση με επιπρόσθετη μείωση της τάσης  $E_a$  και αύξηση της γωνίας φορτίου  $\delta$ . Το μέτρο όμως του ρεύματος τυμπάνου  $I_a$  αυξάνεται με την ελάττωση του ρεύματος διέγερσης στην περιοχή υποδιέγερσης. Επομένως η άεργος ισχύς  $Q$  μπορεί να ελεγχθεί και ως προς το μέτρο και ως προς την κατεύθυνση μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης  $I_F$ .

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος διέγερσης για λόγους ευστάθειας (δηλ. δεν έχουμε αποσυγχρονισμό της μηχανής), είναι εκείνη για την οποία η γωνία  $\delta$  ισούται με  $90^\circ$ , και εφόσον ισχύει  $\sin 90 = 1$ , τότε η τάση  $E_a$

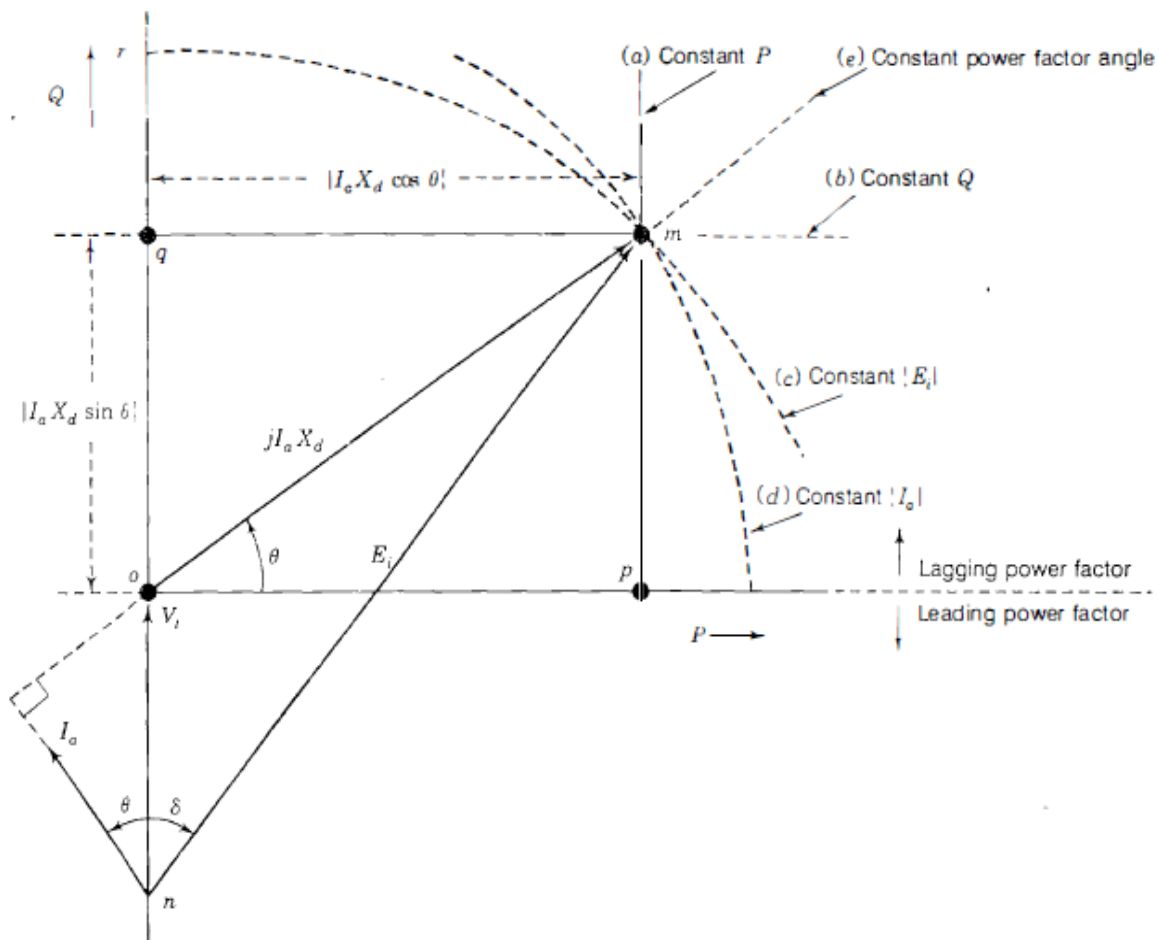
παίρνει τη μικρότερη τιμή της και βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα (ισχύει για γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα).

### 3.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το σύνολο των συνθηκών λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας, όταν συνδέεται σε ζυγό μπορούν να παρασταθούν, όπως είδαμε, σε ένα διανυσματικό διάγραμμα, το οποίο ονομάζεται *διάγραμμα ικανότητας φόρτισης* ή *διάγραμμα λειτουργίας* της μηχανής. Το διάγραμμα αυτό είναι απαραίτητο για τη σωστή φόρτιση και λειτουργία της γεννήτριας.

Το διάγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας δημιουργείται βάσει της παραδοχής, ότι η γεννήτρια έχει σταθερή τάση εξόδου  $U_\phi$  και αμελητέα ωμική αντίσταση στο στάτη. Όπως και πριν, ως φάσορας αναφοράς θεωρείται και εδώ η τάση  $U_\phi$  ( $U_\phi \angle 0^\circ$ ).

Το διάγραμμα λειτουργίας αντικατοπτρισμένο, περιστρέφεται και μας δίνει το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας που φαίνεται στο επόμενο σχήμα, στο οποίο φαίνονται πέντε δυνατές λειτουργίες της γεννήτριας, στην κάθε μία από τις οποίες μία παράμετρος παραμένει σταθερή.



**Σχήμα 31Α:** Διανυσματικό διάγραμμα φασόρων σύγχρονης γεννήτριας στο οποίο απεικονίζονται οι δυνατές λειτουργίες της γεννήτριας.

Αναλυτικά, οι δυνατές λειτουργίες της γεννήτριας είναι:

α) Σταθερή διέγερση.

Ο τόπος λειτουργίας της γεννήτριας για σταθερή διέγερση δείχνεται από το τόξο κύκλου με κέντρο το σημείο  $n$  και ακτίνα ίση με το μέτρο της τάσης  $E_a$ , η οποία παραμένει σταθερή για σταθερό ρεύμα διέγερσης, όπως δείχνεται και από την εξίσωση 3.14.

β) Σταθερό ρεύμα τυμπάνου  $I_a$ .

Ο τόπος λειτουργίας για σταθερό μέτρο του ρεύματος τυμπάνου δείχνεται από το τόξο με κέντρο το σημείο  $O$  και ακτίνα μήκους  $O-m$  ανάλογη της σταθερής τιμής του μέτρου του ρεύματος  $I_a$ . Επειδή και η τάση  $U_\phi$  είναι σταθερή, τα σημεία λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση αντιστοιχούν και σε σταθερή ισχύ εξόδου ( $VA$ ) από τη γεννήτρια.

γ) Σταθερή ενεργός ισχύς  $P$ .

Εφόσον η ενεργός ισχύς στη έξοδο της γεννήτριας δίνεται από τον τύπο  $P = |U_\phi| |I_a| \cos\theta$  και το μέτρο της τάσης  $U_\phi$  είναι σταθερό, το σύνολο των σημείων που απέχουν σταθερή απόσταση  $X_d I_a \cos\theta$  από τον άξονα  $n-O$  και για τα οποία η ενεργός ισχύς  $P$  παραμένει σταθερή, σχηματίζουν την ευθεία γραμμή  $m-p$ . Η ενεργός ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας είναι πάντα θετική, ανεξάρτητα από το συντελεστή ισχύος.

δ) Σταθερή άεργος ισχύς  $Q$ .

Ομοίως για σταθερό μέτρο της τάσης  $U_\phi$  και εφόσον η άεργος ισχύς δίνεται από τον τύπο  $Q = |U_\phi| |I_a| \sin\theta$ , το σύνολο των στοιχείων που απέχουν σταθερή απόσταση  $X_d I_a \sin\theta$  και για τα οποία έχουμε σταθερή άεργο ισχύ  $Q$ , σχηματίζουν την ευθεία γραμμή  $q-m$ . Για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, η άεργος ισχύς ισούται με μηδέν και αντιστοιχεί με ένα σημείο λειτουργίας πάνω στον άξονα  $o-p$ . Για χωρητικό ή επαγωγικό συντελεστή ισχύος τα σημεία λειτουργίας βρίσκονται παράλληλα κάτω ή πάνω από τη γραμμή  $o-p$  αντίστοιχα.

ε) Σταθερός συντελεστής ισχύος.

Η ευθεία γραμμή  $o-m$  αντιστοιχεί στα σημεία λειτουργίας, για τα οποία μένει σταθερή η γωνία  $\theta$  μεταξύ της τάσης εξόδου  $U_\phi$  της γεννήτριας και του ρεύματος τυμπάνου  $I_a$ . Για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλ.  $\theta = 0^\circ$ , το σημείο λειτουργίας βρίσκεται επάνω στη γραμμή  $o-p$ . Για επαγωγικό ή χωρητικό συντελεστή ισχύος, βρίσκεται αντίστοιχα επάνω ή κάτω από τη γραμμή  $o-p$ .

### 3.8 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΚΤΥΠΩΝ ΠΟΛΩΝ

Συγκρίνοντας με τις γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα, οι έκτυποι πόλοι εισαγάγουν μια ανομοιομορφία στο διάκενο μεταξύ δρομέα και στάτη, με αποτέλεσμα η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος να μην είναι σταθερή γύρω από την περιφέρεια του διακένου. Όπως είναι αναμενόμενο και στις μηχανές εκτύπων πόλων το κάθε τυλίγμα χαρακτηρίζεται από μια αυτεπαγωγή και αμοιβαίες επαγωγές με τα υπόλοιπα τυλίγματα (και σε αυτή την περίπτωση, οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων θα θεωρηθούν αμελητέες).

Πιο συγκεκριμένα, οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη, εφόσον δεν υπάρχουν αλλαγές στη δομή του, και του τυλίγματος πεδίου, το οποίο "βλέπει" το ίδιο διάκενο σταθερά, ανεξάρτητα από τη θέση του ρότορα, είναι οι ίδιες με τις αντίστοιχες του κυλινδρικού δρομέα. Αντίθετα, σε κάθε περιστροφή του ρότορα, οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων τυμπάνου  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$  και  $L_{cc}$ , και οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ τους  $L_{ab}$ ,  $L_{bc}$  και  $L_{ca}$  δεν είναι σταθερές, όπως αντίθετα συμβαίνει στον κυλινδρικό δρομέα, αλλά μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τη γωνία  $\theta_s$ , εξαρτώνται δηλαδή από τη θέση του δρομέα για κάθε χρονική στιγμή  $t$ .

Αναλυτικότερα, δίνονται στον επόμενο πίνακα οι εκφράσεις όλων των αυτεπαγωγών και αμοιβαίων επαγωγών των τυλιγμάτων για τη σύγχρονη γεννήτρια εκτύπων πόλων.

**Πίνακας 3.1:** Εξισώσεις για τις επαγωγές τυλιγμάτων και πεδίου τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας εκτύπων πόλων.

---

	$\text{Self-inductances } \begin{cases} L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta_d \\ L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta_d - 2\pi/3) \\ L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta_d + 2\pi/3) \end{cases}$ <p style="text-align: center;"><math>(L_s &gt; L_m &gt; 0)</math></p>
<b>Stator</b>	$\text{Mutual-inductances } \begin{cases} L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2(\theta_d + \pi/6) \\ L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2(\theta_d - \pi/2) \\ L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2(\theta_d + 5\pi/6) \end{cases}$ <p style="text-align: center;"><math>(M_s &gt; L_m &gt; 0)</math></p>
<b>Rotor</b>	$\text{Self-inductances } \begin{cases} \text{Field winding: } L_{ff} \\ \text{D-damper winding: } L_{D} \\ \text{Q-damper winding: } L_{Q} \end{cases}$
	$\text{Mutual-inductances } \begin{cases} \text{Field/D-winding: } M_f \\ \text{Field/Q-winding: } 0 \\ \text{D-winding/Q-winding: } 0 \end{cases}$
	$\text{Armature/field } \begin{cases} L_{af} = L_{fa} = M_f \cos \theta_d \\ L_{bf} = L_{fb} = M_f \cos(\theta_d - 2\pi/3) \\ L_{cf} = L_{fc} = M_f \cos(\theta_d - 4\pi/3) \end{cases}$
<b>Stator-rotor mutual inductances</b>	$\text{Armature/D-winding } \begin{cases} L_{aD} = L_{Da} = M_D \cos \theta_d \\ L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos(\theta_d - 2\pi/3) \\ L_{cD} = L_{Dc} = M_D \cos(\theta_d - 4\pi/3) \end{cases}$
	$\text{Armature/Q-winding } \begin{cases} L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \cos \theta_d \\ L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \cos(\theta_d - 2\pi/3) \\ L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \cos(\theta_d - 4\pi/3) \end{cases}$

---

Το σύνολο της μαγνητικής ροής για κάθε ένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη συναρτήσει των αντίστοιχων ρευμάτων και επαγωγών δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \\ \lambda_b &= L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \\ \lambda_c &= L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \end{aligned} \tag{3.51}$$

Παρόλο που οι εξισώσεις είναι ίδιες με τις αντίστοιχες για τη σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα, εντούτοις όλες οι παράμετροι είναι μεταβλητές. Για ευκολία, οι δείκτες  $a$ ,  $b$ , και  $c$  μετασχηματίζονται σε νέες μεταβλητές, οι οποίες ονομάζονται συνιστώσες οριζόντιου άξονα, εγκάρσιου άξονα και μηδενικής ακολουθίας, και συμβολίζονται με τους δείκτες  $d$ ,  $q$  και  $0$  αντίστοιχα. Για παράδειγμα τα τρία ρεύματα του στάτη  $i_a$ ,  $i_b$  και  $i_c$  μετασχηματίζονται σε τρία ισοδύναμα ρεύματα, το ρεύμα οριζόντιου άξονα  $i_d$ , το ρεύμα εγκάρσιου άξονα  $i_q$  και το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας  $i_0$ .

Ο μετασχηματισμός γίνεται μέσω του πίνακα  $P$ , όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα και η τεχνική αυτή ονομάζεται μετασχηματισμός *Park*.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{matrix} \textcircled{a} & \textcircled{b} & \textcircled{c} \\ \textcircled{a} & \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos (\theta_d - 120^\circ) & \cos (\theta_d - 240^\circ) \\ \sin \theta_d & \sin (\theta_d - 120^\circ) & \sin (\theta_d - 240^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Σχήμα 3IB:** Ο πίνακας Park για τον μετασχηματισμό των ρευμάτων τυμπάνου σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας.

Τα ρεύματα, οι τάσεις και η συνολική μαγνητική ροή των φάσεων  $a$ ,  $b$  και  $c$  μετασχηματίζονται μέσω του πίνακα  $P$  στις μεταβλητές  $d$ ,  $q$  και  $0$  όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix}$$

**Σχήμα 3IIΓ:** Μετασχηματισμοί Park ρευμάτων, τάσεως και ισχύος τριφασικής γεννήτριας.

Τα ρεύματα  $i_d$ ,  $i_q$  και  $i_0$  μπορούν να θεωρηθούν ως τα ρεύματα τριών εικονικών τυλιγμάτων ( $d$ ,  $q$  και  $0$  αντίστοιχα) η συνολική μαγνητική ροή των οποίων, ύστερα από μετασχηματισμό Park, προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} M_f i_f \\ \lambda_q &= L_q i_q \\ \lambda_0 &= L_0 i_0 \end{aligned} \tag{3.52}$$

$i_f$  το ρεύμα πεδίου,  
 $L_d$ ,  $L_q$  και  $L_0$  οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων,



οι οποίες ονομάζονται σύγχρονη επαγωγή οριζόντιου άξονα, σύγχρονη επαγωγή εγκάρσιου άξονα και επαγωγή μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα και ισούνται:

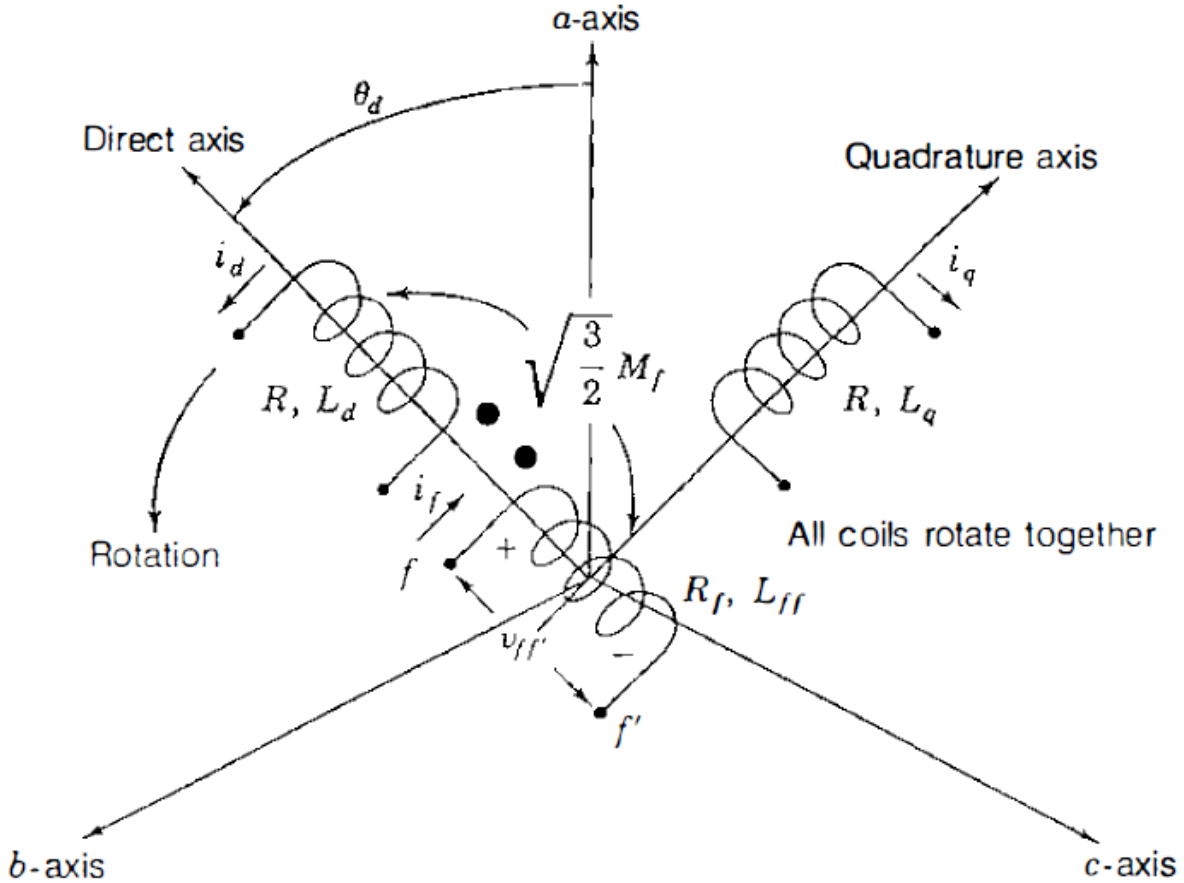
$$\begin{aligned} L_d &= L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m \\ L_q &= L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m \\ L_0 &= L_s - 2M_s \end{aligned} \quad (3.53)$$

Η συνολική μαγνητική ροή του πεδίου δίνεται, όπως και στη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα, από τη σχέση:

$$\lambda_f = L_{ff} i_f + \sqrt{\frac{3}{2}} M_f i_d \quad (3.54)$$

Το τύλιγμα που έχει αυτεπαγωγή  $L_d$  και διαρρέεται από το ρεύμα  $i_d$ , θεωρείται τοποθετημένο κατά μήκος του άξονα  $d$  του πεδίου, ενώ αυτό που έχει αυτεπαγωγή  $L_q$  και διαρρέεται από ρεύμα  $i_q$  είναι τοποθετημένο κατά μήκος του άξονα  $q$  του πεδίου. Τα ρεύματα  $i_d$  και  $i_q$  παράγουν τις ίδιες συνιστώσες ροής όπως τα πραγματικά ρεύματα  $i_a$ ,  $i_b$  και  $i_c$  του στάτη.

Τα τυλίγματα  $d$  και  $q$  εφόσον είναι τοποθετημένα επάνω στο δρομέα περιστρέφονται μαζί με αυτόν. Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις 3.53, το εικονικό τύλιγμα στον άξονα  $d$  και το τύλιγμα του πεδίου  $f$  λειτουργούν ως δύο συζευγμένα κυκλώματα που έχουν αμοιβαία επαγωγή  $k M_f$  ( $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$ ) μεταξύ τους. Αντίθετα, τα τυλίγματα  $f$  και  $q$  δεν έχουν μαγνητική σύζευξη με το τύλιγμα στον άξονα  $q$ , το οποίο καθυστερεί του άξονα  $d$  κατά  $90^\circ$ . Η επαγωγή  $L_0$  σχετίζεται με ένα εικονικό ακίνητο τύλιγμα, το οποίο δεν έχει σύζευξη με κανένα από τα υπόλοιπα τυλίγματα. Σε συμμετρική κατάσταση λειτουργίας δεν διαρρέεται από ρεύμα ( $i_0 = 0$ ) επομένως παραλείπεται. Τα τυλίγματα στους άξονες  $d$  και  $q$  που αντιπροσωπεύουν τα τυλίγματα του στάτη σε μια σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων, φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί:



**Σχήμα 3ΙΔ:** Απεικόνιση ισοδύναμων τυλιγμάτων οριζοντίου και εγκάρσιου άξονα σύγχρονης γεννήτριας εκτύπων πόλων, στρεφόμενα σε συγχρονισμό με το τύλιγμα πεδίου του ρότορα.

Αναφέρθηκε πριν, ότι η τάση στην έξοδο της μηχανής για κάθε φάση δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$u = -R_s i - \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.55)$$

Αν και εδώ ο συντελεστής  $\lambda$  δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από τη γωνία  $\theta$  και συνεπώς από το χρόνο  $t$ , εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Park προκύπτει:

$$u_d = -R_s i_d - \omega L_q i_q \quad (3.56)$$

$$u_q = -R_s i_q + \omega L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega M_f i_f \quad (3.57)$$

Πολλαπλασιάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις με τους όρους  $j e^{j\delta}/\sqrt{3}$  και  $e^{j\delta}/\sqrt{3}$  αντίστοιχα και προσθέτοντάς τες κατά μέλη έχουμε:

$$\begin{aligned} \left( \frac{u_q}{\sqrt{3}} + j \frac{u_d}{\sqrt{3}} \right) e^{j\delta} &= -R_s \left( \frac{i_q}{\sqrt{3}} + j \frac{i_d}{\sqrt{3}} \right) e^{j\delta} + \omega L_d \frac{i_d}{\sqrt{3}} e^{j\delta} - j \omega L_q \frac{i_q}{\sqrt{3}} e^{j\delta} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{3}{2}} \omega M_f i_f e^{j\delta} \end{aligned} \quad (3.58)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$U_d = \frac{u_d}{\sqrt{3}} \quad (3.59)$$

$$U_q = \frac{u_q}{\sqrt{3}} \quad (3.60)$$

$$I_d = \frac{i_d}{\sqrt{3}} \quad (3.61)$$

$$I_q = \frac{i_q}{\sqrt{3}} \quad (3.62)$$

$$|E_a| = \frac{\omega M_f i_f}{\sqrt{2}} \quad (3.63)$$

η εξίσωση 3.58 γράφεται:

$$\begin{aligned} (U_d + U_q) e^{j\delta} &= -R_s (I_q + I_d) e^{j\delta} + \omega L_d I_d e^{j\delta} - j \omega L_q I_q e^{j\delta} + \\ &+ |E_a| e^{j\delta} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Κάνοντας χρήση της σχέσης:

$$I_\alpha = (I_d + I_q) e^{j\delta} \quad (3.65)$$

όπως επίσης και της σχέσης:

$$E_\alpha = |E| e^{j\delta} \quad (3.66)$$

τότε η εξίσωση για την τάση γίνεται:

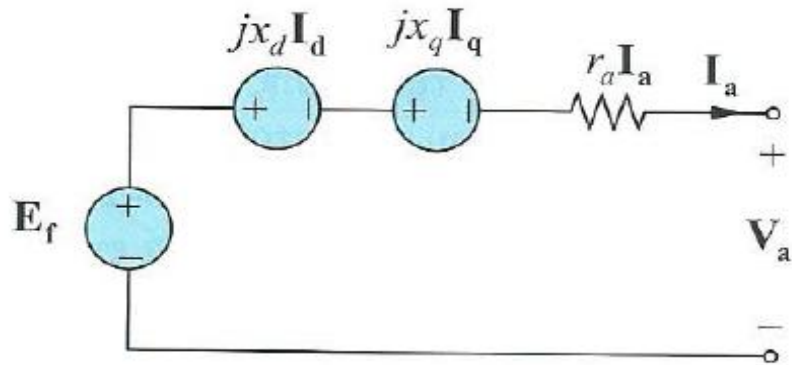
$$E_\alpha = U_\alpha + R_s I_\alpha + (jX_d + jX_q) I_\alpha \quad (3.67)$$

όπου οι ποσότητες  $X_d$  και  $X_q$  ονομάζονται σύγχρονες αντιδράσεις κατά τον d και q άξονα αντίστοιχα και ισούνται:

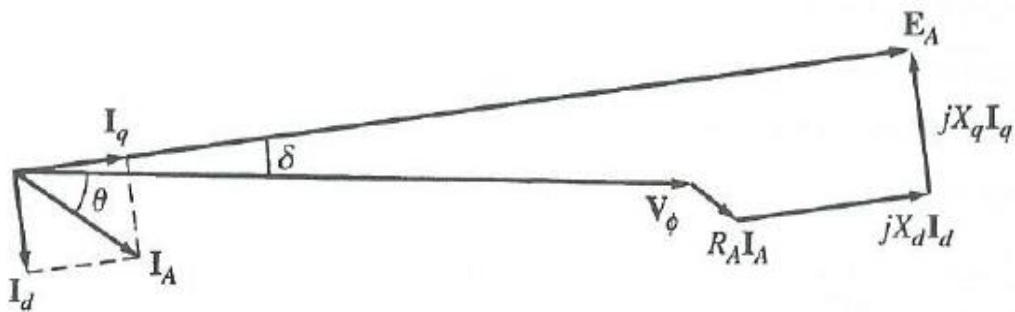
$$X_d = \omega L_d \quad (3.68)$$

$$X_q = \omega L_q \quad (3.69)$$

Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα και το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων - ρευμάτων για την περίπτωση της σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας με έκτυπους πόλους φαίνονται στα επόμενα σχήματα:



**Σχήμα 3ΙΕ:** Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης σύγχρονης γεννήτριας εκτύπων πόλων.



**Σχήμα 3ΙΣΤ:** Το διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας εκτύπων πόλων.

## 4. ΤΟ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΓΕΘΩΝ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές εφαρμογές αλλά κυρίως στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εμπεριέχονται διάφορα επίπεδα τάσης, κυρίως λόγω της ύπαρξης μετασχηματιστών στα διάφορα στάδια της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Θα μπορούσαμε με τη χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος της μιας φάσης, λόγω της τριφασικής συμμετρίας να επιτύχουμε μια απλοποίηση στην ανάλυση αυτών των συστημάτων, εντούτοις τα διάφορα επίπεδα τάσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν δύσκολη την ανάλυσή τους. Ο κύριος λόγος είναι, ότι λόγω της ύπαρξης μετασχηματιστών επιβάλλεται η αναγωγή των παραμέτρων των μονοφασικών ισοδύναμων κυκλωμάτων τους καθώς και των στοιχείων του δικτύου που παρεμβάλλονται σε μια από τις δύο πλευρές ή στο πρωτεύον τύλιγμα ή στο δευτερεύον.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσχέρεια στην ανάλυση καθώς υπάρχει πλήθος μετασχηματιστών σε διαφορετικούς ζυγούς και με διαφορετικά επίπεδα τάσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά την ανάλυση ενός Σ.Η.Ε. είναι και η περίπτωση μετατροπής των συνδεσμολογιών των στοιχείων από συνδεσμολογία τριγώνου σε ισοδύναμη συνδεσμολογία αστέρα (π.χ. γεννήτριες, μετασχηματιστές, φορτία κ.α.).

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την απλοποιημένη παράσταση και ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι το ανά μονάδα σύστημα μεγεθών. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι τα εξής:

α) Η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή στο ανά μονάδα σύστημα μεγεθών είναι η ίδια, ανεξάρτητα αν αναφέρεται στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον τύλιγμα, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται η αναγωγή της στο ένα ή στο άλλο τύλιγμα.

β) Όταν απαιτείται μετατροπή πολικών τάσεων σε φασικές τάσεις, μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος στους υπολογισμούς λόγω παράλειψης του παράγοντα μετατροπής  $\sqrt{3}$ , αφού η ανά μονάδα τιμή της τάσης μεταξύ φάσης και ουδέτερου είναι ίδια με την ανά μονάδα τιμή της τάσης μεταξύ των δύο φάσεων.

γ) Στις ηλεκτρικές μηχανές ιδίου τύπου (π.χ. μετασχηματιστές, σύγχρονες ή ασύγχρονες μηχανές, κ.α.) οι ανά μονάδα τιμές των ωμικών αντιστάσεων και

των επαγωγικών αντιδράσεων μεταβάλλονται σε στενά όρια, ανεξάρτητα από τα μεγέθη της ονομαστικής τάσης και της ονομαστικής ισχύος τους. Άρα, στην περίπτωση που δεν γνωρίζουμε τις ακριβείς παραμέτρους, θα ήταν αμελητέο σφάλμα να υποθέσουμε τις μέσες σε ανά μονάδα τιμές των παραπάνω ορίων. Για παράδειγμα, όταν σε όλους τους μετασχηματιστές μεταξύ 3 kVA και 300 kVA η αντίδραση σκέδασης κυμαίνεται στα όρια από 0.01 pu έως 0.03 pu, για ένα μετασχηματιστή 50 kVA θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι η αντίδραση σκέδασης είναι 0.015 pu.

Η ανά μονάδα τιμή (pu) οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους όπως τάση, ρεύμα, ισχύς κ.α. ισούται με το λόγο της απόλυτης τιμής του μεγέθους προς την τιμή βάσης του ίδιου μεγέθους, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Ανά μονάδα τιμή} = \frac{\text{Απόλυτη τιμή}}{\text{Βασική τιμή}} \quad (4.1)$$

Η απόλυτη τιμή του φυσικού μεγέθους μπορεί να είναι πραγματικός ή φανταστικός αριθμός, η βασική τιμή είναι πάντα πραγματικός αριθμός σε απόλυτη τιμή, ενώ η ανά μονάδα τιμή είναι αδιάστατο μέγεθος.

## 4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Για τα φυσικά μεγέθη του ρεύματος, της τάσης, της ισχύος και της σύνθετης αντίστασης, λόγω των σχέσεων που συνδέονται μεταξύ τους, μπορεί να γίνει επιλογή βασικών τιμών για δύο μόνο από τα προηγούμενα μεγέθη. Οι βασικές τιμές που συνήθως επιλέγονται είναι της τάσης και της ισχύος και από αυτές υπολογίζονται οι βασικές τιμές του ρεύματος και της σύνθετης αντίστασης.

Για μονοφασικά συστήματα ως βασική τάση ορίζεται συνήθως η ενεργός τιμή της ονομαστικής τάσης μεταξύ φάσης και ουδέτερου, δηλ. η τάση  $U_{b,LN}$ . Ως βασικό ρεύμα ορίζεται το ρεύμα γραμμής του κυκλώματος. Ως βασική σύνθετη αντίσταση ορίζεται η αντίσταση για την οποία έχουμε πτώση τάσης, η οποία ισούται με την τιμή της βασικής τάσης, όταν το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση έχει τιμή ίση με αυτή του βασικού ρεύματος. Η βάση ισχύος δίνεται από το γινόμενο της τιμής της βασικής τάσης επί της αντίστοιχης τιμής του βασικού ρεύματος. Με βάση τα παραπάνω ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για τα μονοφασικά συστήματα:

$$\text{Βασικό ρεύμα: } I_b (A) = \frac{\text{Βασική ισχύς } S_{b,1\Phi} (kVA)}{\text{Βασική τάση } V_{b,LN} (kV)} \quad (4.2)$$

$$\text{Βασική σύνθετη αντίσταση: } Z_b (\Omega) = \frac{\text{Βασική τάση } V_{b,LN} (V)}{\text{Βασικό ρεύμα } I_b (A)} \quad (4.3)$$

$$\text{Βασική σύνθετη αντίσταση: } Z_b(\Omega) = \frac{\text{Βασική τάση } V_{b,LN} (kV_{LN}^2 * 1000)}{\text{Βασική ισχύς } S_{b,1\Phi} (kVA)} \quad (4.4)$$

$$\text{Βασική σύνθετη αντίσταση: } Z_b(\Omega) = \frac{\text{Βασική τάση } V_{b,LN} (kV_{LN}^2)}{\text{Βασική ισχύς } S_{b,1\Phi} (MVA)} \quad (4.5)$$

$$\text{Ανά μονάδα τιμή σύνθετης αντίστασης} = \frac{\text{πραγματική τιμή σύνθετης αντίστασης}}{\text{βασική τιμή σύνθετης αντίστασης}} \quad (4.6)$$

Ορίζοντας τις βασικές τιμές, οι ανά μονάδα τιμές ( $pu$ ) των επιμέρους μεγεθών ορίζονται από τις σχέσεις:

$$U_{LN,pu} = \frac{U_{LN}}{U_{b,LN}} = \frac{Z}{Z_b} \frac{I}{I_b} = Z_{pu} I_{pu} \quad (4.7)$$

$$S_{1\Phi,pu} = \frac{S_{1\Phi}}{S_{b,1\Phi}} \quad (4.8)$$

Ακολουθώντας για τα τριφασικά συστήματα, ως βασική τάση ορίζεται η ενεργός τιμή της ονομαστικής τάσης μεταξύ δύο φάσεων ( $U_{b,LL}$ ) ενώ για συμμετρικό τριφασικό σύστημα η βασική ισχύς ισούται με το τριπλάσιο της βασικής ισχύος του ισοδύναμου κυκλώματος της μιας φάσης. Επομένως ισχύει:

$$U_{b,LL} = \sqrt{3} U_{b,LN} \quad (4.9)$$

$$S_{b,3\Phi} = 3 S_{b,1\Phi} \quad (4.10)$$

Αντίστοιχα για τα τριφασικά συστήματα, μέσω της βασικής τάσης  $U_b$  και της βασικής ισχύος  $S_b$ , υπολογίζονται τα υπόλοιπα μεγέθη.

$$\text{Βασικό ρεύμα: } I_b (A) = \frac{\text{Βασική ισχύς } S_{b,3\Phi} (kVA)}{\sqrt{3} * \text{Βασική τάση } V_{b,LN} (kV_{LL})} \quad (4.11)$$

$$\text{Βασική σύνθετη αντίσταση: } Z_b(\Omega) = \frac{\text{Βασική τάση } V_{b,LL} (kV_{LL}/\sqrt{3})^2 * 1000}{\text{Βασική ισχύς } S_{b,3\Phi} (kVA/3)} \quad (4.12)$$

$$\text{Βασική σύνθετη αντίσταση: } Z_b(\Omega) = \frac{\text{Βασική τάση } V_{b,LL} (kV_{LL}^2 * 1000)}{\text{Βασική ισχύς } S_{b,3\Phi} (kVA)} \quad (4.13)$$

$$\text{Βασική σύνθετη αντίσταση: } Z_b(\Omega) = \frac{\text{Βασική τάση } V_{b,LI} (kV_{LN}^2)}{\text{Βασική ισχύς } S_{b,3\Phi} (MVA)} \quad (4.14)$$

Στην περίπτωση του ισοδύναμου κυκλώματος του μονοφασικού μετασχηματιστή, οι ανά μονάδες τιμές των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2ΙΑ, δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$R'_{eq,pu} = \frac{R'_{eq}}{Z_b} \quad (4.15)$$

$$X'_{eq,pu} = \frac{X'_{eq}}{Z_b} \quad (4.16)$$

Ανάμεσα σ' ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα και στο ισοδύναμο κύκλωμα της μιας φάσης, στο ανά μονάδα σύστημα μεγεθών ισχύουν τα κάτωθι:

$$U_{LN,pu} = \frac{U_{LN}}{U_{b,LN}} = \frac{\sqrt{3}U_{LN}}{\sqrt{3}U_{b,LN}} = \frac{U_{LL}}{U_{b,LL}} = \frac{U_{LL}}{U_{b,LL}} = U_{LL,pu} = U_{pu} \quad (4.17)$$

$$S_{1\Phi,pu} = \frac{S_{1\Phi}}{S_{b,1\Phi}} = \frac{3 S_{1\Phi}}{3 S_{b,1\Phi}} = \frac{S_{3\Phi}}{S_{b,3\Phi}} = S_{3\Phi,pu} = S_{pu} \quad (4.18)$$

Πράγμα που σημαίνει ότι η ανά μονάδα τιμή της τάσης μεταξύ φάσης και ουδετέρου σε βάση τάσης μεταξύ φάσης και ουδετέρου είναι ίση με την ανά μονάδα τιμή της τάσης μεταξύ δύο φάσεων στο ίδιο σημείο, σε βάση τάσης μεταξύ δύο φάσεων. Ομοίως, καθώς η τριφασική ισχύς είναι τρεις φορές η ισχύς ανά φάση και η βασική τριφασική ισχύς είναι τρεις φορές η βασική ισχύς ανά φάση, η ανά μονάδα τιμή της τριφασικής ισχύος σε βάση τριφασικής ισχύος ισούται με την ανά μονάδα τιμή μονοφασικής ισχύος σε βάση ισχύος της μιας φάσης.

Για την αναγωγή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο ανά μονάδα σύστημα πρέπει να τηρούνται τα ακόλουθα:

α) Όταν έχουμε διάφορα επίπεδα τάσης σε ένα σύστημα λόγω ύπαρξης μετασχηματιστών, επιλέγουμε ως βασική τάση μία τιμή σε ένα από τα επίπεδα και οι βασικές τιμές των τάσεων στα υπόλοιπα επίπεδα ορίζονται με βάση τους λόγους των τάσεων των μετασχηματιστών που παρεμβάλλονται.

β) Σαν βασική ισχύ, επιλέγουμε μία τιμή και επειδή η βασική ισχύς είναι σταθερό μέγεθος, θα έχει την ίδια τιμή σε όλα τα διαφορετικά επίπεδα τάσης στην περίπτωση ύπαρξης μετασχηματιστών.

γ) Οι σύνθετες αντιστάσεις ανάγονται στο ανά μονάδα σύστημα με βάση τα κοινά βασικά μεγέθη που επιλέξαμε.



### 4.3 ΑΛΛΑΓΗ ΒΑΣΗΣ

Η σύνθετη αντίσταση ενός στοιχείου του συστήματος είναι εκφρασμένη σε μια βασική τιμή διαφορετική από την επιλεγμένη για το σύστημα ή το μέρος του συστήματος, στο οποίο θα τοποθετηθεί. Εφόσον, όπως αναφέραμε παραπάνω, όλες οι σύνθετες αντιστάσεις σε οποιοδήποτε μέρος του συστήματος πρέπει να είναι ανηγμένες στην ίδια βασική τιμή, τότε πρέπει να γίνει μετατροπή από την παλιά βασική τιμή στη νέα.

Θεωρούμε τα δύο συστήματα αναφοράς, το παλιό σύστημα ( $U_{b,old}$ ,  $S_{b,old}$ ) και το νέο σύστημα ( $U_{b,new}$ ,  $S_{b,new}$ ). Μεταξύ της πραγματικής τιμής της σύνθετης αντίστασης και των ανηγμένων τιμών της στα δύο διαφορετικά συστήματα βάσεων, σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.5 και 4.6 ισχύουν τα κάτωθι:

$$Z = Z_{pu, old} Z_{b, old} = Z_{pu, new} Z_{b, new} \quad (4.19)$$

όπου:

$$Z_{b, old} = \frac{U_{b,old}^2}{S_{b,old}} \quad (4.20)$$

και

$$Z_{b, new} = \frac{U_{b,new}^2}{S_{b,new}} \quad (4.21)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$Z_{pu, new} = Z_{pu, old} \frac{Z_{b,old}}{Z_{b,new}} = Z_{pu, old} \left( \frac{U_{b,old}}{U_{b,new}} \right)^2 \left( \frac{S_{b,old}}{S_{b,new}} \right) \quad (4.22)$$

## 5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΩΝ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος είναι ο καλύτερος τρόπος για τη βελτίωση της μεταφοράς πραγματικής ισχύος και της ευστάθειας της τάσης. Υπάρχουν οι ακόλουθοι μέθοδοι αντιστάθμισης: εν σειρά αντιστάθμιση, εγκάρσια αντιστάθμιση και αντιστάθμιση μέσω μετασχηματιστών ρύθμισης τάσης. Επίσης διακρίνεται στην παθητική και ενεργό άεργη αντιστάθμιση, όπου ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση ρυθμίζει την τάση και άλλες μεταβλητές. Σκοπός είναι η χρήση του συστήματος ελέγχου της τάσης γεννητριών και των τοπικών αντισταθμιστών άεργου ισχύος στα σύγχρονα ΣΗΕ ώστε η διακύμανση της τάσης στα φορτία να είναι μικρότερη του 10% της ονομαστικής τάσης.

### 5.2 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΕΝ ΣΕΙΡΑ

Ουσιαστικά η σειριακή αντιστάθμιση είναι η εισαγωγή στη γραμμή μεταφοράς μιας χωρητικής αντίδρασης  $X_C$  σε σειρά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αντίδραση  $X_C$  να μειώνει την επαγωγική αντίδραση  $X_L$  της γραμμής με αποτέλεσμα να προκύπτει συνολικά μικρότερη επαγωγή στη γραμμή  $X = X_C - X_L$ . Η χωρητική αντίδραση  $X_C$  είναι δυνατόν να παράγεται μέσω πυκνωτών αλλά και μέσω πηγών τάσης που οδηγούν στον καλύτερο έλεγχο. Κάνοντας χρήση της σειριακής αντιστάθμισης πετυχαίνουμε αύξηση του στατικού ορίου ευστάθειας σύμφωνα με τον σχέση  $P_{MAX} = |V_S||V_R| / X$ . Έρευνες έχουν δείξει ότι με τη σειριακή αντιστάθμιση μπορεί να αυξηθεί, ως και να υπερδιπλασιαστεί, η ικανότητα φόρτισης μίας γραμμής υπερυψηλής τάσης με μεγάλο μήκος καταβάλλοντας σημαντικά μικρότερο κόστος από αυτό που θα χρειαζόταν για την εγκατάσταση μιας νέας γραμμής μεταφοράς. Εκτός αυτού του πλεονεκτήματος, ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αντιστάθμισης είναι ότι επιβάλλεται η εγκατάσταση αυτόματων διατάξεων προστασίας που θα οδηγήσουν σε εκτροπή τα υψηλά ρεύματα κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και θα ξαναβάλουν εντός τους πυκνωτές μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Ένα ακόμη μειονέκτημα των εν σειρά πυκνωτών είναι ότι δημιουργούν κυκλώματα συντονισμού τα οποία μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας, ένα φαινόμενο που ονομάζεται υπερσύγχρονος συντονισμός. Οι ταλαντώσεις αυτές μπορούν να προξενήσουν μέχρι και καταστροφή των αξόνων των στροβίλων των γεννητριών.

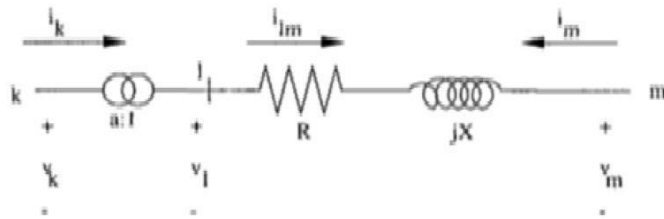
### 5.3 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ

Οι εγκάρσιοι πυκνωτές χρησιμοποιούνται στις περιόδους μεγάλου φορτίου και οι εγκάρσιες επαγωγές στις περιόδους χαμηλού φορτίου (έλλειψη και περίσσεια αέργου ισχύος, αντιστοίχως). Οι εγκάρσιοι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για την παροχή μέρους της αέργου ισχύος που ζητείται από το φορτίο ώστε να μειωθεί η άεργος ισχύς που μεταφέρεται μέσω της γραμμής, σταθεροποιώντας την τάση στα επιθυμητά όρια. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές συνδέονται είτε απευθείας στους ζυγούς την τάση των οποίων θέλουμε να ελέγξουμε ή στο τριτεύον τύλιγμα των μετασχηματιστών ισχύος. Ένα σημαντικό μειονέκτημά τους είναι ότι προκαλούν σημαντική ανύψωση της τάσης όταν η γραμμή είναι λίγο φορτισμένη ή λειτουργεί άνευ φορτίου. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος απαιτείται η συστοιχία πυκνωτών που συνδέεται να διαθέτει σταθερά και μεταβλητά στοιχεία. Με την ανύψωση ή την πτώση της τάσης τα μεταβλητά στοιχεία αφαιρούνται ή προστίθενται στην συστοιχία για να μειώσουν ή να αυξήσουν αντίστοιχα τη συνολική χωρητικότητα. Αντίθετα, στις περιόδους χαμηλού φορτίου λόγω της εγκάρσιας χωρητικότητας των γραμμών και ιδιαίτερα των καλωδίων έχουμε περίσσεια αέργου ισχύος, οπότε είναι αναγκαίο να συνδέσουμε σε ορισμένα σημεία του δικτύου επαγωγές που καταναλώνουν άεργο ισχύ, ώστε να εμποδίσουμε την υπερβολική ανύψωση της τάσης σε αυτά.

Στις μέρες μας, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και των συστημάτων αυτόματου ελέγχου, οι εγκάρσιοι πυκνωτές και τα πηνία έχουν αντικατασταθεί σε πολλές περιπτώσεις από πλήρως αξιόπιστες συσκευές αντιστάθμισης όπως είναι οι στατικοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος SVCs και οι σύγχρονοι αντισταθμιστές .

### 5.4 ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΑΣΙΚΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΣΗΣ

Η ρύθμιση του μέτρου της τάσης αλλά και της φασικής γωνίας γινόταν αρχικά με τη χρήση μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές αυτοί μεταβάλουν, συνήθως κατά μικρή μεταβολή  $\Delta V$ , την τάση σε ένα σημείο του ενεργειακού δικτύου. Η μεταβολή της τάσης  $\Delta V$  που προκαλείται από αυτές τις συσκευές λαμβάνει χώρα και στο μέτρο της τάσης αλλά και στη φασική γωνία. Παρόλο που η μεταβολή είναι συνήθως μικρή, επιδρά δραστικά στην ισχύ που μεταφέρεται στη γραμμή μεταφοράς στην οποία παρεμβάλλεται ένας τέτοιος μετασχηματιστής. Άρα οι μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ροής ισχύος στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα με τη ρύθμιση του μέτρου  $|V|$  της τάσης ελέγχεται η ροή αέργου ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, ενώ με τον έλεγχο της φασικής γωνίας της τάσης  $V$  ελέγχουμε τη ροή πραγματικής ισχύος στη γραμμή που τοποθετείται ο μετασχηματιστής.



Σχήμα 5Α: Μετασχηματιστής ρύθμισης τάσης

## 5.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΚΛΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

Οι κλασικές μέθοδοι αντιστάθμισης αέργου ισχύος αντιμετωπίζουν μόνο ένα μέρος των προβλημάτων που συναντάμε στα ενεργειακά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος. Έτσι με τους τρόπους που πριν αναφέρθηκαν βελτιώνεται η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος και σε κάποιο βαθμό η ικανότητα γρήγορης μετάβασής του σε ομαλή λειτουργία μετά από διάφορες μεταβατικές καταστάσεις, όπως είναι τα βραχυκυκλώματα και η διαδικασία σύνδεσης ή αποσύνδεσης μεγάλων φορτίων στο δίκτυο.

Παρόλα αυτά, οι κλασικοί αντισταθμιστές δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις σύγχρονες ανάγκες για γρήγορο και ακριβή έλεγχο καθώς συνδέονται και αποσυνδέονται στο δίκτυο μέσω μηχανικών διακοπών. Άρα ενώ ο έλεγχος του συστήματος, η μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων γίνεται γρήγορα και σύμφωνα με τη σύγχρονη τεχνολογία, η διαδικασία αντιστάθμισης καθυστερεί λόγω αδράνειας και μηχανικής καταπόνησης των κινούμενων ηλεκτρομηχανικών τμημάτων.

Αποτέλεσμα όλων αυτών των περιορισμών είναι η αδυναμία εφαρμογής ουσιαστικού ελέγχου σε περιπτώσεις μεταβατικών, δυναμικών καταστάσεων. Επίσης σημαντικό μειονέκτημα των κλασικών μεθόδων αντιστάθμισης είναι ότι η αέργος ισχύς ελέγχεται κατά βήματα και όχι αδιαλείπτως. Αυτό συμβαίνει διότι εισάγοντας ή εξάγοντας πυκνωτές στο δίκτυο, βάζουμε ή βγάζουμε σταθερές χωρητικές ποσότητες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση βημάτων στην αντιστάθμιση.

Συμπεραίνουμε ότι για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα ελέγχου μέσω διακοπτικών στοιχείων, έγινε απαραίτητη η διερεύνηση άλλων τεχνικών ελέγχου, όπως η χρήση της τεχνολογίας των FACTS, που κρίνεται επιτακτική όπως θα δούμε αργότερα.

## **5.6 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΠΡΕΥΜΑΤΟΣ (FACTS)**

Με τον όρο FACTS εννοούμε τα συστήματα εκείνα που εμπεριέχουν στη δομή τους ελεγκτές βασισμένους σε ηλεκτρονικά ισχύος αλλά και στατικούς ελεγκτές με σκοπό την ασφαλή μεταφοράς ισχύος, τη μείωση της διαφοράς μεταξύ θερμικού ορίου και ορίου ευστάθειας και τη βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου.

### **5.6.1 Εισαγωγή των FACTS στα Σύγχρονα ΣΗΕ**

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί νέους κανόνες λόγω του μεγάλου ανταγωνισμού των παραγωγών αλλά και των ΣΗΕ που πρέπει να ανταπεξέλθουν στις νέες συνθήκες. Στόχος αυτών των κανόνων είναι η δημιουργία ενός δικτύου ελεύθερης πρόσβασης για παραγωγούς, προμηθευτές, καταναλωτές. Ο ανταγωνισμός που αναφέρθηκε έχει σαν αποτέλεσμα την πλήρη διαφοροποίηση των συνθηκών, στην παραγωγή όσο στη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μείωση του κόστους παραγωγής, ενώ σημαντικό μειονέκτημα είναι η διάσπαρτη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η ανομοιογενής παραγωγή και ζήτηση της από το δίκτυο. Η ανομοιογένεια στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει επιδεινώσει τα υπάρχοντα προβλήματα των ενεργειακών δικτύων. Στα προβλήματα συγκαταλέγονται η υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς, η διαφοροποίηση του μέτρου της τάσης από τις ονομαστικές τιμές στους ζυγούς του ΣΗΕ, όπως επίσης και το όριο μεταβατικής ευστάθειας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων δεν μπορούμε από οικονομικής άποψης και γεωγραφικών συνθηκών να οδηγηθούμε στην λύση της εγκατάστασης νέων γραμμών μεταφοράς. Άρα η λύση της αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων καθώς και των απαιτήσεων που προαναφέρθηκαν, βρίσκεται στην τεχνολογία των FACTS.

### **5.6.2 Χρήση των Facts**

Η χρήση των FACTS στα σύγχρονα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλει εκτός από την αντιμετώπιση των προβλημάτων λειτουργίας των μηχανικών διακοπών, και στον περιορισμό των ακόλουθων προβλημάτων που συναντάμε στα ενεργειακά δίκτυα :

- Μεταβολές που επηρεάζουν την ποιότητα της τροφοδοτούμενης ισχύος, όπως οι βυθίσεις τάσης, οι μεταβατικές και μόνιμες υπερτάσεις, οι διακυμάνσεις τάσης και οι αρμονικές.
- Προβλήματα ευστάθειας σε μόνιμες ή μεταβατικές καταστάσεις.

- Επίδραση στα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου από την ύπαρξη πολλών ηλεκτρικών εταιρειών παραγωγής.
- Έλλειψη μακροπρόθεσμου σχεδιασμού.

Η επίλυση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν θα πραγματοποιηθεί από ελεγκτές FACTS οι οποίοι έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη ροή ισχύος του συστήματος μεταφοράς όπως η εν σειρά αντίδραση, η εγκάρσια χωρητικότητα, το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης έχοντας σαν σκοπό:

- Την αξιοποίηση του συστήματος μεταφοράς με ασφαλή φόρτιση των γραμμών κοντά στο θερμικό τους όριο.
- Τον έλεγχο της ροής πραγματικής και άεργης ισχύος.
- Την μέγιστη μεταφορά ισχύος μεταξύ των διασυνδεδεμένων περιοχών ελέγχου, με ταυτόχρονη μείωση της θερμής εφεδρείας από 18% που είναι σήμερα σε 15%.
- Τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης και των σφαλμάτων συσκευών με αποτέλεσμα την πρόληψη αλυσιδωτών αποσυνδέσεων τμημάτων δικτύου και συσκευών.
- Την απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος που καταπονούν ή καταστρέφουν τον εξοπλισμό και περιορίζουν την επιτρεπόμενη μεταφορά ισχύος.

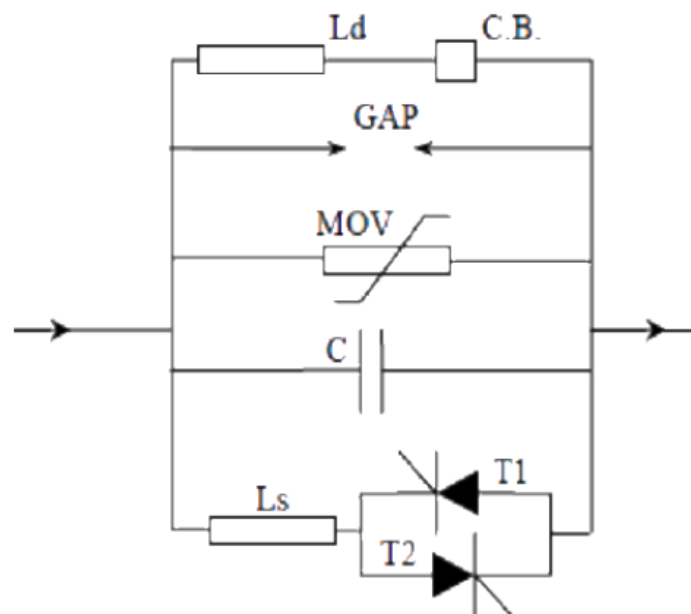
## **5.7 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (FACTS ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ) ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΛΑΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Οι διατάξεις των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος (FACTS) μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα σε ποια παράμετρο της γραμμής μεταφοράς επιδρούν. Έτσι ο SVC επιδρά στην τάση, ο TCSC στην εν σειρά αντίδραση και ο TCPAR στη φασική γωνία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα αυτά είναι παρόμοια με συστοιχίες πυκνωτών, με συστοιχίες πηνίων με διακοπτική ζεύξη και μετασχηματιστές με ρύθμιση φάσης, αλλά έχουν πολύ γρήγορη απόκριση και βέλτιστο έλεγχο.

### **5.7.1 Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCSC)**

Στη σειριακή αντιστάθμιση, ο TCSC (thyristor controlled series capacitor) δημιουργεί μια συνεχή μεταβολή της εν σειρά επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής, με αποτέλεσμα τη μείωση ή την αύξηση της φόρτισης της κυματικής αντίστασης.



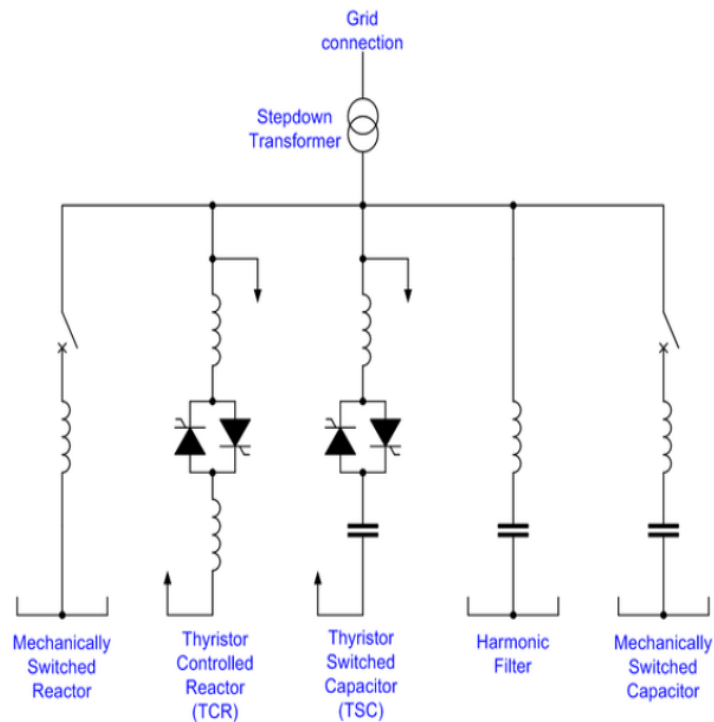
Σχήμα 5B: Διάγραμμα TCSC

Άρα, ο TCSC μπορεί να τροφοδοτεί κατά την υπερφόρτιση ή να απορροφά κατά την υποφόρτιση άεργο ισχύ, να βοηθάει στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος, να ελέγχει τη μεταβατική ευστάθεια, να περιορίζει τους υποσύγχρονους συντονισμούς και εφ' όσον εξασφαλιστούν οι δυνατότητες υπερφόρτισης του να διαχειρίζεται την υπερφόρτιση της γραμμής και να περιορίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

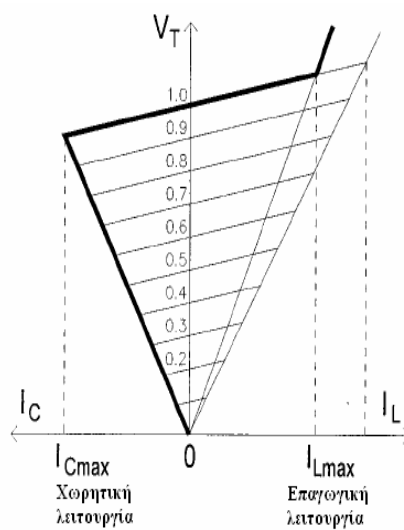
### 5.7.2 Στατικός Ανισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC)

Στην εγκάρσια αντιστάθμιση, ο SVC διαθέτει διακόπτες στερεάς κατάστασης. Ελέγχοντας τις γωνίες έναυσης των θυρίστορ μπορούμε να καθορίσουμε το ποσό της αέργου ισχύος που δίνει ο SVC στο δίκτυο παίρνοντας όλες τις ενδιάμεσες τιμές από πλήρως χωρητική ως πλήρως επαγωγική μέσα σε ένα κύκλο της θεμελιώδους συχνότητας. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημά του είναι η ταχύτητά του, η παροχή ικανοποιητικού ελέγχου και

η ταχύτερη σύνδεση ή αποσύνδεση των πυκνωτών χωρίς μεταβατικές υπερτάσεις για αποκατάσταση του συστήματος μετά την εκκαθάριση βραχυκυκλωμάτων. Επίσης, μπορεί να διατηρεί την τάση εντός των προδιαγραφών στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ και μπορεί να συμβάλει στον έλεγχο της ευστάθειας.



Σχήμα 5Γ: Διάγραμμα SVC



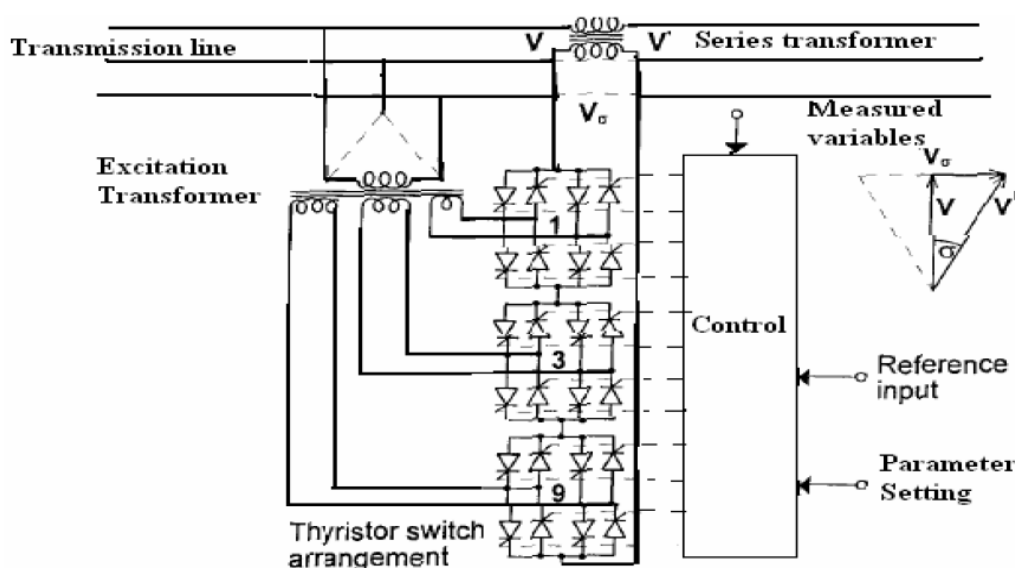
Σχήμα 5Δ: Χαρακτηριστική V-I του SVC



Δύο σημαντικά μειονεκτήματά του είναι ότι δεν έχει την δυνατότητα να ελέγξει τη ροή πραγματικής ισχύος και η ποσότητα της αέργου ισχύος που παρέχει είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης με αποτέλεσμα να είναι σχετικά μικρή σε περιπτώσεις βυθίσεων τάσης, τη στιγμή δηλαδή που το σύστημα την έχει περισσότερο ανάγκη. Το δεύτερο μειονέκτημα οδήγησε στη σχεδίαση του στατικού σύγχρονου αντισταθμιστή (STATCOM) ο οποίος παρέχει άεργο ισχύ ίση με το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα.

### 5.7.3 Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCPAR)

Η μέθοδος αντιστάθμισης που αποσκοπεί στη ρύθμιση της φασικής γωνίας έχει ανατεθεί στον TCPAR (thyristor controlled phase angle regulator) ο οποίος στηρίζεται στη γρήγορη εισαγωγή μιας τάσης εν σειρά με την τάση στο ένα άκρο της γραμμής, ώστε να ελέγχει τη ροή ισχύος στη γραμμή. Παρόλο που έχουν προταθεί κυκλώματα με ρύθμιση όχι μόνο του μέτρου αλλά και της φασικής γωνίας της εισαγόμενης τάσης, έχουν επικρατήσει τα κυκλώματα με ρύθμιση μόνο του μέτρου και σταθερή φασική γωνία  $90^\circ$  λόγω της απλότητας τους. Επειδή ο TCPAR δεν παράγει άεργο ισχύ, όλη η άεργος ισχύς που εισάγεται στη γραμμή ως αποτέλεσμα της φασικής στροφής της τάσης, απορροφάται από το ζυγό. Γι αυτό ακριβώς το λόγο ο TCPAR πρέπει να συνδέεται σε ισχυρούς ζυγούς για να αποφεύγονται οι διακυμάνσεις τις τάσεις.



Σχήμα 5E: Διάγραμμα TCPAR

## 5.8 Οι Μετατροπείς Πηγής Τάσης/Ρεύματος στα FACTS

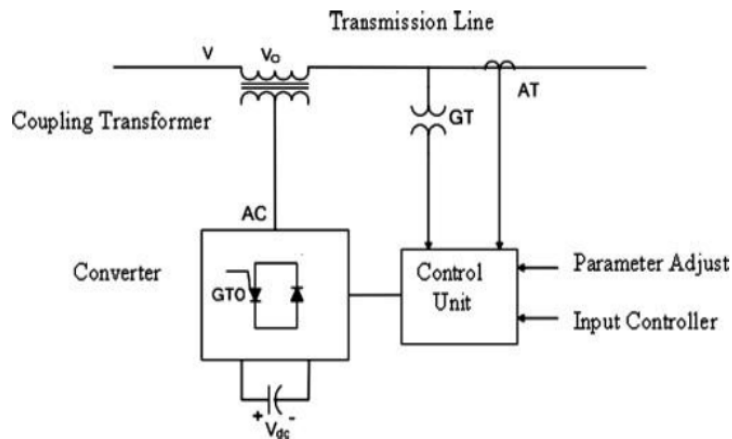
Η δεύτερη κατηγορία των FACTS διατάξεων πρόκειται για ελεγχόμενες σύγχρονες πηγές εναλλασσόμενης τάσης (SVS-Synchronous Voltage Sources) ή ρεύματος (SCS-Synchronous Current Sources). Έχουν ανώτερη λειτουργικότητα για κάθε είδος αντιστάθμισης και εκτός της αντιστάθμισης της άεργου ισχύος, επιπλέον έχουν τη δυνατότητα άμεσης ανταλλαγής ενεργού ισχύος με το δίκτυο, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο πιο ευέλικτη διαχείριση ροής ισχύος και αντιμετώπιση δυναμικών διαταραχών.

Αυτό ο τύπος της πηγής είναι ανάλογος με μια ιδανική στρεφόμενη σύγχρονη μηχανή, η οποία παράγει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων στη θεμελιώδη συχνότητα, με ελεγχόμενο πλάτος και φάση. Αυτή η ιδανική μηχανή δεν έχει καθόλου αδράνεια, η απόκρισή της είναι πρακτικά στιγμιαία, δεν αλλάζει σημαντικά τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου και μπορεί να παράγει άεργο ισχύ (χωρητική και επαγωγική).

Εκτός των άλλων μπορεί να ανταλλάσσει ενεργό ισχύ με το δίκτυο, εάν διασυνδεθεί με μια κατάλληλη πηγή ενέργειας η οποία θα μπορεί να παρέχει ή να απορροφά την ισχύ που ο SVS παρέχει ή απορροφά από το δίκτυο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο Στατικός Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM), ο Στατικός Σύγχρονος Σειριακός Αντισταθμιστής (SSSC) και ο Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC).

### 5.8.1 Αντιστάθμιση εν σειρά

Ο στατικός σύγχρονος σειριακός αντισταθμιστής (SSSC) αποτελεί την πλέον σύγχρονη διάταξη για τον συνεχή έλεγχο της ενεργού μιγαδικής αντίστασης της γραμμής. Αποτελείται από έναν αντιστροφέα πηγής τάσης συνδεδεμένο σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς μέσω ενός μετασχηματιστή. Ως διακοπτικά στοιχεία χρησιμοποιεί GTO θυρίστορ (θυρίστορ με αποκοπή από την πύλη) για τον έλεγχο της σβέσης εκτός της έναυσης. Στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος βρίσκεται μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, όπως υψηλής ενεργειακής πυκνότητας πυκνωτές, μπαταρίες, υπεραγωγία πηνία, σφόνδυλοι με υπεραγώγιμη έδραση και ενεργειακά κύτταρα. Ένας SSSC με πυκνωτή παρέχει στην έξοδο του μια ελεγχόμενου μέτρου τάση, που παρουσιάζει μία γωνία σε σχέση με το ρεύμα γραμμής περίπου  $\pm 90^\circ$ .

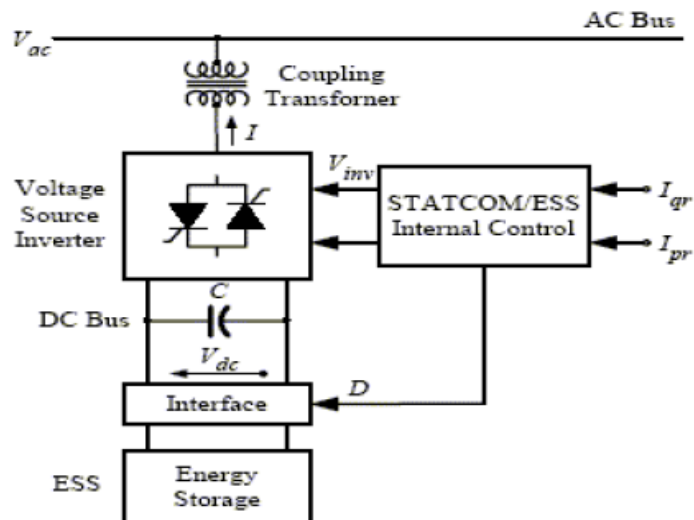


Σχήμα 5ΣΤ : Διάγραμμα SCCS με πυκνωτή

### 5.8.2 Εγκάρσια Αντιστάθμιση

Ο στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM) αποτελεί την πιο εξελιγμένη διάταξη εγκάρσιας αντιστάθμισης. Έχει τη δυνατότητα να παράγει ή να καταναλώνει άεργο ισχύ. Επίσης η άεργος ισχύς στην έξοδό του δεν επηρεάζεται από μεταβολές στην τάση του συστήματος με αποτέλεσμα καλύτερο έλεγχο συγκεκριμένων παραμέτρων του συστήματος όπως η τάση ή η απόσβεση ταλαντώσεων. Η άεργος ισχύς είναι επίσης ίση με το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όταν βυθίζεται η τάση του, εκμεταλλευόμενος την δυνατότητα υπερρεύματος που έχει, μπορεί να τροφοδοτεί σημαντικό ποσό αέργου ισχύος. Επιπλέον, όταν διαθέτει σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με πραγματική ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα.

Επίσης έχει τη δυνατότητα να αυξάνει ή να μειώνει την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής παρέχοντας ή απορροφώντας άεργο ισχύ και συμβάλλει σημαντικά στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος.



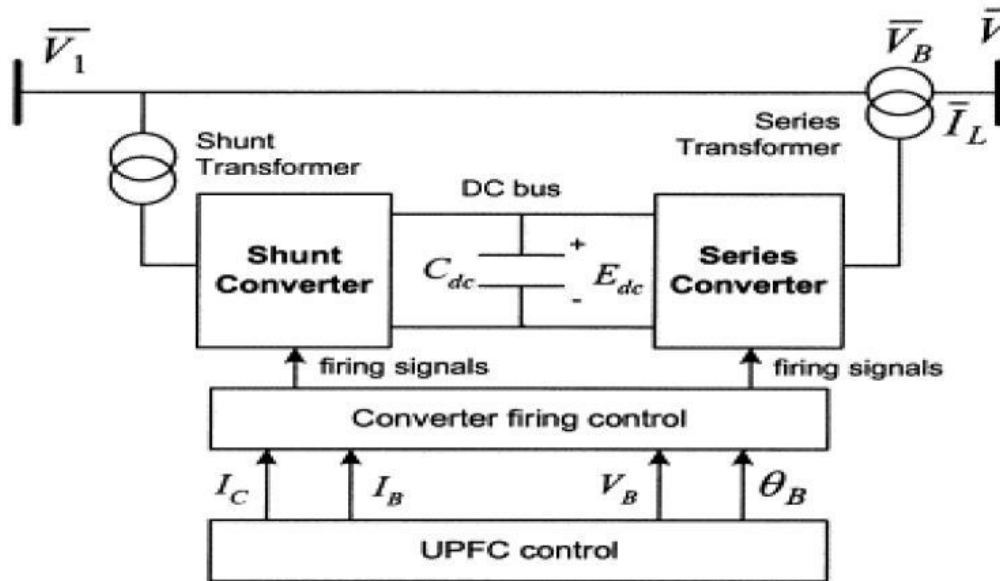
Σχήμα 5Z: Διάγραμμα STATCOM

Ο αντισταθμιστής STATCOM επιτυγχάνει έλεγχο της τάσης σε μόνιμες, μεταβατικές και δυναμικές συνθήκες λειτουργίας, αντιμετωπίζει τις γρήγορες διακυμάνσεις της τάσης, συμβάλλει στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος και μπορεί να αποτρέψει τον υπερσύγχρονο συντονισμό.

Σημαντικό μειονέκτημά του προς το παρόν είναι ότι η κατασκευή του απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων με δυνατότητες ελέγχου του χρόνου σβέσης, που επί του παρόντος δεν συνδυάζουν μεγάλη ισχύ χειρισμού ισχύος, μεγάλη συχνότητα διακοπτικής λειτουργίας (στην περιοχή των KHz), μικρές απώλειες και λογικό κόστος.

### 5.8.3 Ρύθμιση Φασικής Γωνίας

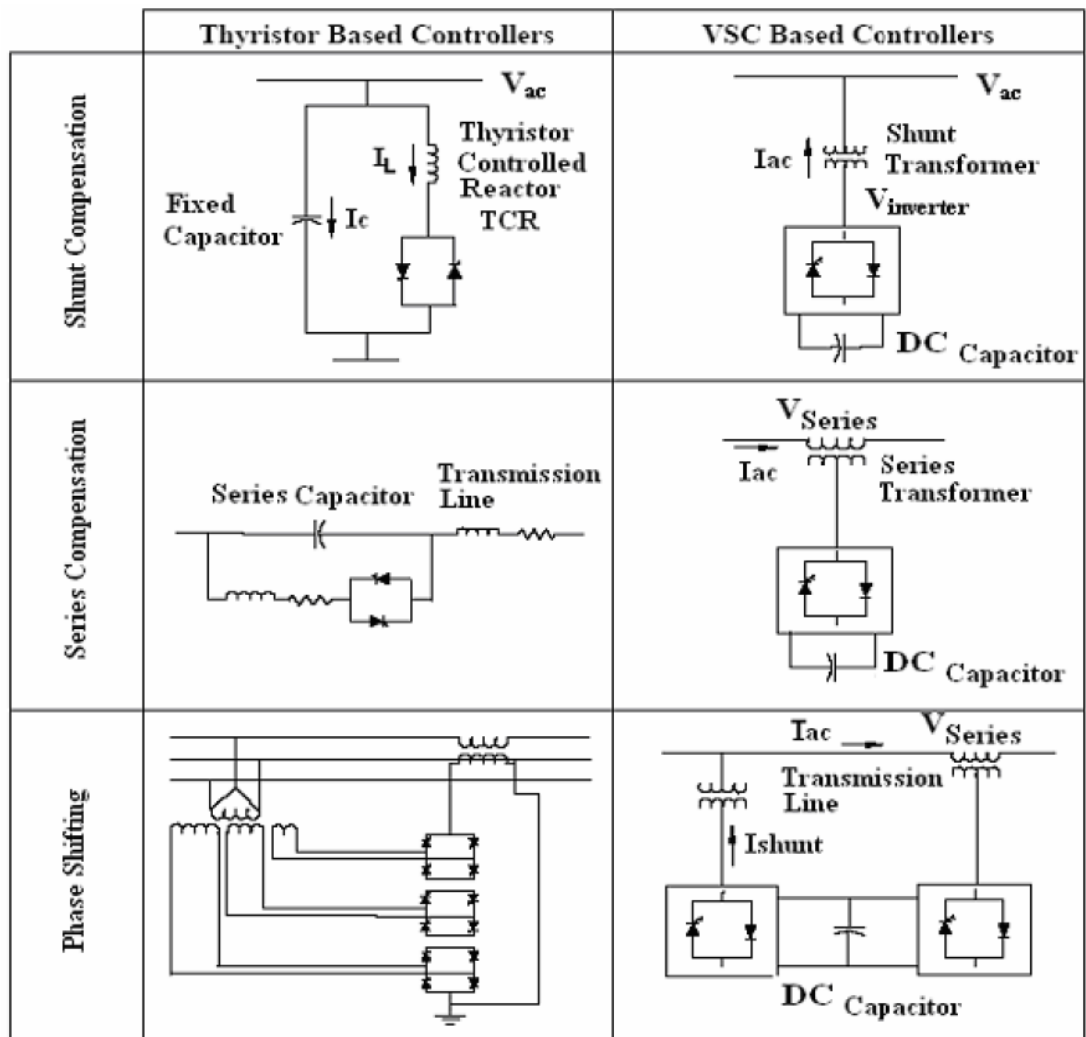
Ο ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος UPFC αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης. Ο ένας μετατροπέας παράγει μία τάση μεταβλητού μέτρου και γωνίας που εισάγεται σε σειρά στη γραμμή, ενώ ο δεύτερος μετατροπέας παρέχει στον πυκνωτή της διάταξης την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία του πρώτου μετατροπέα. Με βάση τη δυνατότητα ρύθμισης τόσο του μέτρου όσο και της γωνίας της παρεχόμενης τάσης, ο UPFC μπορεί να ελέγχει και τις τρεις παραμέτρους σχετικά με τη ροή ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς, δηλαδή το μέτρο και τη γωνία της τάσης γραμμής, όπως επίσης και την αντίδραση της.



Σχήμα 5H: Διάγραμμα UPFC

Γενικότερα, παρατηρούμε ότι οι αντισταθμιστές αυτής της κατηγορίας, συγκρινόμενοι με τους αντισταθμιστές ελεγχόμενους από θυρίστορ, παρέχουν ταχύτερο έλεγχο της τάσης (ο STATCOM και ο UPFC), της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής (ο SSSC και ο UPFC) και της γωνίας ισχύος (ο UPFC). Επιπλέον, είναι ο μοναδικός τύπος ελεγκτών που έχει τη δυνατότητα απευθείας ανταλλαγής πραγματικής ισχύος με το δίκτυο, ανεξαρτήτως της αντιστάθμισης αέργου ισχύος.

Στον ακόλουθο πίνακα παραθέτουμε τα μονοφασικά διαγράμματα ελεγκτών FACTS που είδαμε πιο πάνω:



Σχήμα 50: Ελεγκτές FACTS

## **6. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΖΥΓΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SVC**

### **6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

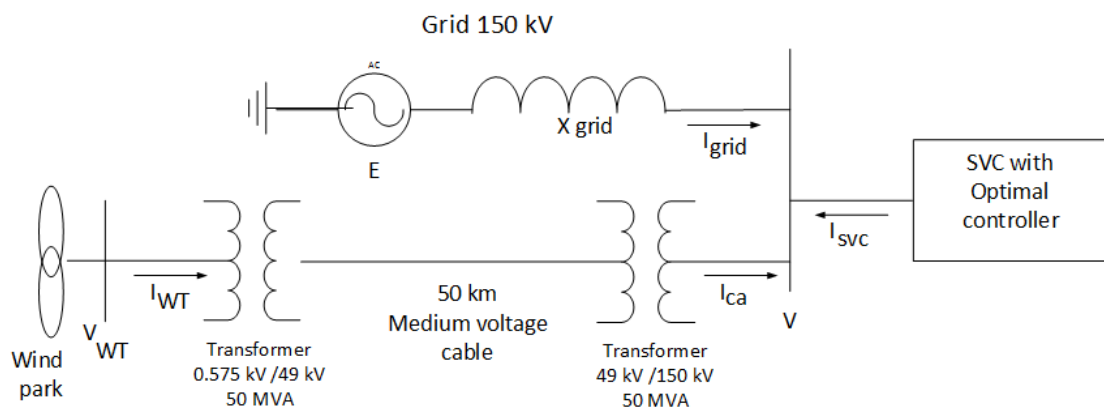
Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάμε τη ρύθμιση της τάσης ενός ζυγού σε ένα δίκτυο. Ο ζυγός δέχεται πραγματική ισχύ από ένα αιολικό πάρκο μέσω ενός καλωδίου υψηλής τάσης. Οι τεράστιες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές στην ανταλλαγή της πραγματικής και άεργου ισχύος μεταξύ του καλωδίου και του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση του ζυγού να μην είναι σταθερή. Η εγκατάσταση ενός SVC είναι μια λογική επιλογή για τη σταθεροποίηση της τάσης. Ο SVC χρειάζεται έναν ελεγκτή ο οποίος σύμφωνα με τη διαφορά της μετρούμενης από την ονομαστική τάση, η οποία ορίζει το ισοδύναμο αγωγιμότητας του SVC. Έτσι, επιτυγχάνεται το σωστό ποσό της άεργου ισχύος μεταξύ του δικτύου και του SVC. Προτείνεται μία τεχνική σχεδιασμού για τον ελεγκτή, η οποία βασίζεται στη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου. Μετά το σχεδιασμό του ελεγκτή το όλο μη γραμμικό σύστημα έχει προσομοιωθεί σε SIMULINK έτσι ώστε η απόκριση των προτεινόμενων ελεγκτών να κριθούν. Η απόκριση του όλου συστήματος είναι ικανοποιητική και η εφαρμογή των ελεγκτών είναι εύκολη λόγω των προτεινόμενων τεχνικών σαν αποτέλεσμα των PI ελεγκτών. Παρά τις μεγάλες διακυμάνσεις στην ανταλλαγή της πραγματικής και άεργου ισχύος μεταξύ του αιολικού πάρκου και του δικτύου, η διακύμανση της τάσης δικτύου είναι κάτω από 1,5%.

### **6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Πολλές εφαρμογές αιολικών πάρκων απαιτούν παράκτιες εγκαταστάσεις που σημαίνει διασύνδεση με το κυρίως δίκτυο, μέσω υποβρύχιων καλωδίων. Ως αποτέλεσμα, η τάση του δικτύου είναι ευαίσθητη σε μεταβολές από την ονομαστική τιμή λόγω των σημαντικών μεταβολών της άεργου ισχύος που εναλλάσσεται μεταξύ του δικτύου και του καλωδίου.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα στατικού αντισταθμιστή άεργου ισχύος (SVC) εξοπλισμένο με ένα ειδικό ελεγκτή το οποίο είναι σε θέση να διατηρήσει την τάση του δικτύου σταθερή παρά τις μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Ο σχεδιασμός του ελεγκτή βασίζεται στη βέλτιστη θεωρία ελέγχου. Τελικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν απλό ελεγκτή PI.

Το υπό μελέτη σύστημα παρουσιάζεται στο Σχ. 6Α όπου φαίνεται ο ζυγός του δικτύου στον οποίο είναι συνδεδεμένο το καλώδιο του αιολικού πάρκου. Ο SVC είναι συνδεδεμένος στον ίδιο ζυγό. Ο στόχος του ελεγκτή του SVC είναι να κρατήσει την τάση του ζυγού όσο το δυνατό σταθερότερη κάτω από μεγάλες διακυμάνσεις της πραγματικής και αέργου ισχύος από το καλώδιο στο δίκτυο. Η ονομαστική τάση του καλωδίου είναι 49 kV έτσι ώστε να συνδέεται με το κύριο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή 150/49 kV. Το αιολικό πάρκο (WP) αποτελείται από 26 σύγχρονες γεννήτριες. Η ονομαστική ισχύς της κάθε ανεμογεννήτριας είναι 1,5 MVA και η ονομαστική τάση 575 V. Για λόγους απλότητας υπάρχει ένας κεντρικός μετασχηματιστής 49 kV / 0.575 kV για τη διασύνδεση του αιολικού πάρκου με το καλώδιο. Στο παράρτημα, υπάρχουν οι τιμές όλων των παραμέτρων του συστήματος. Το όλο μη γραμμικό σύστημα έχει προσομοιωθεί στο λογισμικό SIMULINK χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες για τις κύριες συνιστώσες, όπως η WT, το καλώδιο, ο SVC κ.λπ.



Σχ. 6Α. Το υπό μελέτη σύστημα.

### 6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (Μαθηματικό γραμμικοποιημένο μοντέλο του συστήματος)

Στην παράγραφο αυτή, έχουμε αναπτύξει τις αρχικές μη γραμμικές μαθηματικές εξισώσεις των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος και στη συνέχεια τις γραμμικοποιούμε γύρω από το σημείο λειτουργίας. Το σημείο λειτουργίας έχει επιλεγεί να είναι η σταθερή κατάσταση του συστήματος όταν το αιολικό πάρκο παράγει μέγιστη πραγματική ισχύς  $S_0 = 40 \text{ MW}$  υπό ονομαστική τάση. Για το όλο σύστημα έχει αποφασιστεί να είναι  $S_b = 100 \text{ MVA}$ . Έτσι, στο ανά μονάδα σύστημα (p.u.) είναι:  $S_0 = 0,4$ . Η τάση του υπό μελέτη ζυγού είναι  $V$  και η τάση του ζυγού στην έξοδο του αιολικού πάρκου



είναι  $V_{WT}$ . Για το σημείο λειτουργίας είναι  $V_0 = V_{0WT} = 1$  σε p.u. Το καλώδιο μεταφέρει ρεύμα  $I_{ca}$  προς την σύνδεσή του με το ζυγό του δικτύου και αποδέχεται ένα ρεύμα  $I_{WT}$  από το αιολικό πάρκο. Από τις τιμές του καλωδίου έχουμε:

$$\begin{aligned} Y &= C * s = 0.00002s, & Z &= 4.55 + 0.055s = B, \\ A = D &= 1 + 0.5 * Y * Z = 1 + 0.000022s + 0.0000055s^2. \\ C &= Y(1 + 0.25 * Y * Z) = 0.00002s + 4.55 * 10^{-10}s + 5.5 * 10^{-12}s \approx 0.00002s \\ I_{WT} &= C * V + A * I_{ca} = 0.00002s * V + (1 + 0.000045s + 0.0000055s^2) * I_{ca} \Rightarrow \\ I_{ca} &= \frac{181818}{s^2 + 8.18s + 181818} I_{WT} - \frac{3.64s}{s^2 + 8.18s + 181818} V \end{aligned}$$

Για  $V_b = 49 \text{ kV}$  είναι  $I_b = 1178 \text{ A}$ .

Έτσι, η προηγούμενη εξίσωση σε p.u. εκφράζεται σε γραμμικοποιημένη μορφή ως εξής:

$$\Delta I_{ca} = \frac{154.35}{s^2 + 8.18s + 181818} \Delta I_{WT} - \frac{0.003s}{s^2 + 8.18s + 181818} \Delta V \quad (6.1)$$

Το δίκτυο προσομοιώνεται με μια πηγή τάσης  $E$  και ένα πηνίο ίσο με  $X_{grid} = 0,18 \text{ H}$ . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε βραχυκύκλωμα δυναμικότητας των  $400 \text{ MVA}$  η οποία είναι δέκα φορές η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου. Υποθέτουμε ένα «αδύναμο» κόμβο του συστήματος, διότι σε αυτή την περίπτωση, η τάση είναι πιο ευαίσθητη στις μεταβολές του  $I_{ca}$ . Η εσωτερική τάση  $E$  δεν είναι μια παράμετρος στο γραμμικοποιημένο μοντέλο, και αν θεωρήσουμε ότι  $I_b = 385 \text{ A}$  στα  $150 \text{ kV}$  τελικά είναι σε p.u.:

$$I_{grid} = \frac{E - V}{sL} = \frac{E}{0.095s} - \frac{V}{0.095s} \Rightarrow \Delta I_{grid} = -\frac{0.014}{s} \Delta V \quad (6.2)$$

Η ρύθμιση της τάσης ενός ζυγού επιτυγχάνεται συμβατικά μέσω παράλληλης στατικής αντιστάθμισης άεργου ισχύος, που σημαίνει την εγκατάσταση ενός συνδυασμού πυκνωτών στο ζυγό. Οι σύγχρονες διατάξεις SVC χρησιμοποιούν την τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, επιτυγχάνοντας έτσι γρήγορη και ομαλή ρύθμιση της τάσης. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούν είτε βαθμίδες πηνίων ελεγχόμενες από θυρίστορ (TCRs) είτε βαθμίδες πυκνωτών ελεγχόμενες από θυρίστορ (TSCs). Σε κάθε περίπτωση, οι στατικοί αντισταθμιστές άεργου ισχύος (SVCs) μπορούν να θεωρηθούν ως μια πηγή αέργου ισχύος από τη πλευρά του δικτύου. Με τη σωστή διαδικασία παλμοδότησης, το ισοδύναμο αγωγιμότητας  $B_{SVC}$  του SVC ρυθμίζεται έτσι ώστε η ακριβής ποσότητα της άεργου ισχύος να εναλλάσσεται μεταξύ του SVC και του δικτύου με σκοπό τη συνεχή ρύθμιση της τάσης του ζυγού. Έτσι, γενικά έχουμε:

$$Q_{SVC} = \frac{V^2}{X_{SVC}}$$

και σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας θα είναι σε p.u.:

$$Q_{SVC0} = \frac{V_0^2}{X_{SVC0}} = \frac{1}{X_{SVC0}} = B_{SVC0}$$

Το μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής ισχύος του καλωδίου είναι:

$$P_{WT} = \left| \frac{D}{B} \right| |V_{WT}|^2 \cos(b - a) - \frac{|V_{WT}| |V|}{|B|} \cos(b + \delta)$$

όπου  $\delta$  είναι η γωνία μεταξύ των τάσεων  $V_{WT}$  και  $V$ ,

$P_{WT}$  είναι η πραγματική ισχύς της WP

και οι παράμετροι  $A = |A| \angle a, B = |B| \angle b$  είναι οι παράμετροι A, B, C, D από το ισοδύναμο κύκλωμα του καλωδίου.

Από τις τιμές των παραμέτρων του καλωδίου έχουμε:

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ = 0.923 \angle 1.044^\circ \text{ p.u.}, B = 0.89 \angle 77.7^\circ, C = Y \left( 1 + \frac{1}{4}YZ \right) = 0.17 \angle 90.5^\circ.$$

Για μέγιστη παραγωγή πραγματικής ισχύος από το αιολικό πάρκο ( $P = 40$  MW ή 0.4 pu) και τιμές τάσεων (όλες ίσες με 1 p.u.) προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση ότι:

$$\delta_0 = 20,5^\circ$$

Η σταθερή κατάσταση αέργου ισχύος  $Q_{ca0}$  από το καλώδιο στο δίκτυο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{ca} = - \left| \frac{D}{B} \right| |V|^2 \sin(b - a) + \frac{|V_{WT}| |V|}{|B|} \sin(b - \delta)$$

και με αντικατάσταση προκύπτει ότι:

$$Q_{ca0} = -0.066 \text{ p.u.}$$

πράγμα που σημαίνει ότι το καλώδιο απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο.

Η πραγματική ισχύς προέρχεται όταν η WP εισέρχεται στο δίκτυο, έτσι από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P = \frac{E * V}{X} \sin \delta, Q = \frac{V * (E * \cos \delta - V)}{X}$$

μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η άεργος ισχύς από το δίκτυο είναι :

$$Q_{grid0} = 0.02 \text{ p.u.}$$

Έτσι, σε λειτουργία σταθερής κατάστασης, η εξίσωση της αέργου ισχύος η οποία ρέει προς το ζυγό μας δίνει ότι:

$$Q_{grid0} + Q_{ca0} + Q_{SVC0} = 0 \Rightarrow Q_{SVC0} = 0.046 \text{ p.u.} = B_{SVC0}$$

Το ρεύμα από τον στατικό αντισταθμιστή αέργου ισχύος (SVC) γενικά δίνεται από τη σχέση :

$$I_{SVC} = V * B_{SVC}$$

οπότε η γραμμικοποίηση δίνει:

$$\Delta I_{SVC} = B_{SVC0} * \Delta V + V_0 * \Delta B_{SVC}$$

Σε μια απλή καθυστέρηση στην παλμοδότηση του (SVC) η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη, η προηγούμενη εξίσωση θα γίνει:

$$\Delta I_{SVC} = B_{SVC0} * \Delta V + V_0 * \frac{1}{1 + T_d s} * \Delta B_{SVC}$$

Ο χρόνος καθυστέρησης  $T_d$  λαμβάνεται ίσος με 3 ms, έτσι ώστε η γραμμικοποιημένη μορφή της μεταβολής του ρεύματος του SVC, τελικά γίνεται:

$$\Delta I_{SVC} = 0.046 * \Delta V + \frac{1}{1 + 0.003s} * \Delta B_{SVC} \quad (6.3)$$

Η εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff για τα ρεύματα στο ζυγό μας δίνει:

$$\Delta I_{ca} + \Delta I_{grid} + \Delta I_{SVC} = 0$$

Αντικαθιστώντας τις (6.1), (6.2), (6.3) στην εξίσωση του νόμου του Kirchhoff και μετά από χρήση άλγεβρας, τελικά οδηγούμαστε στην ακόλουθη βασική εξίσωση που δίνει το γραμμικοποιημένο μοντέλο της τάσης του ζυγού:

$$\begin{aligned} \Delta V &= -0.32 \frac{s^2 + 22227s}{s^2 + 329s - 100} \Delta B_{SVC} - \frac{3355.43s}{s^3 + 7.82s^2 + 181782s - 55326} \Delta I_{WT} \\ &= h_1(s) * \Delta B_{SVC} + h_2(s) * \Delta I_{WT} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Αυτή η εξίσωση περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά της τάσης του ζυγού (έξοδος στο μοντέλο μας), σύμφωνα με την αγωγιμότητα του SVC (input) και το ρεύμα από το αιολικό πάρκο (διαταραχή). Το σύστημα ελέγχου στην περίπτωση μας, θα πρέπει να σχεδιαστεί σύμφωνα με αυτό το μοντέλο.

Παράλληλα, η άεργος ισχύς από τον SVC θα είναι:

$$Q_{SVC} = B_{SVC} * V^2 \Rightarrow \Delta Q = 2B_{SVC0}V_0\Delta V + V_0^2\Delta B_{SVC} \Rightarrow \Delta Q = 0.092\Delta V + \Delta B_{SVC} \quad (6.5)$$

#### 6.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (ΑΠΛΟ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ )

Προκειμένου να επιτευχθεί γρήγορη απόκριση του συστήματος, το προηγούμενο γραμμικό μοντέλο προσαρμόζεται έτσι ώστε να περιέχει τις κανονικοποιημένες τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων.

Η κανονικοποιημένη τιμή  $\Delta V$  αποδίδεται ως  $\overline{\Delta V}$  και είναι ίση με:

$$\overline{\Delta V} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Ομοίως οι κανονικοποιημένες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων έχουν οριστεί ως:

$$\overline{\Delta B} = \frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC0}}, \quad \overline{\Delta I_{WT}} = \frac{\Delta I_{WT}}{I_{WT0}}$$

Από την εξίσωση (6.4) και αγνοώντας την τρίτη σειρά του s έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V_0} V_0 &= -0.32 \frac{s^2 + 22227s}{s^2 + 329s - 100} \frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC0}} B_{SVC0} - \frac{3355.43s}{s^3 + 7.82s^2 + 181782s - 55326} \frac{\Delta I_{WT}}{I_{WT0}} I_{WT0} \Rightarrow \\ \overline{\Delta V} &= \frac{-0.0145s^2 - 322.3s}{s^2 + 329s - 100} \overline{\Delta B_{SVC}} - \frac{154.45s}{s^2 + 23246s - 7075} \overline{\Delta I_{WT}} = h'_1(s) * \overline{\Delta B_{SVC}} + h'_2(s) * \overline{\Delta I_{WT}} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Η κανονικοποιημένη εξίσωση της άεργου ισχύος του SVC προέρχεται από την εξίσωση (6.5) ως εξής:

$$\frac{\Delta Q_{SVC}}{Q_{SVC0}} Q_{SVC0} = 0.092 \frac{\Delta V}{V_0} V_0 + \frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC0}} B_{SVC0} \Rightarrow \overline{\Delta Q_{SVC}} = 2\overline{\Delta V} + \overline{\Delta B_{SVC}}$$

(6.7)

Η πρώτη απλή διαδικασία σχεδιασμού βασίζεται στο παραπάνω μοντέλο και μόνο για την είσοδο-έξοδο συνάρτηση μεταφοράς  $h^{-1}(s)$ , οπότε δεν έχει ληφθεί υπόψη η παράμετρος διαταραχής.

Στις εξισώσεις στο χώρο κατάστασης, η συνάρτηση μεταφοράς  $h_1^{-1}$  μετατρέπεται σε μήτρες:

$$A = \begin{bmatrix} -329 & 100 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [-317.53 - 1.45], D = -0.0145 \quad (6.8)$$

Το βασικό στοιχείο που χρησιμοποιείται στο κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η άεργος ισχύς  $\Delta Q_{SVC}$  από τον SVC και έτσι το κριτήριο βελτιστοποίησης ορίζεται ως:

$$I = \int_0^{\infty} [a * \overline{\Delta Q_{SVC}}^2(t) + \overline{\Delta B_{SVC}}^2(t)] dt = \int_0^{\infty} [a * \overline{\Delta Q_{SVC}}^2(t) + u^2(t)] dt$$

δεδομένου ότι η είσοδος ( $u$ ) στο σύστημα ελέγχου είναι η αγωγιμότητα του SVC. Από τις (6.6) και (6.7) προκύπτει ότι:

$$I = \int_0^{\infty} [4a * \overline{\Delta V}^2(t) + 4a * \overline{\Delta V}(t) * \overline{\Delta B}(t) + (a + 1) * \overline{\Delta B_{SVC}}^2(t)] dt \quad (6.9)$$

Από την (6.8) έχουμε ότι:

$$\overline{\Delta V} = -317.53x_1(t) - 1.45x_2(t)$$

όπου  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  είναι οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Με την αντικατάσταση στην (6.9), έχουμε:

$$I = \int_0^{\infty} [403300ax_1^2(t) + 3684ax_1(t)x_2(t) + 8.4ax_2^2(t) + 2(-635ax_1(t) - 2.9ax_2(t))u + (a + 1)u^2(t)] dt$$

η οποία είναι της μορφής:

$$I = \int_0^{\infty} [x^T(t)Q_1x(t) + 2x^T(t)Q_{12}u(t) + u^T(t)Q_2u(t)] dt$$

Προφανώς, οι πίνακες στάθμισης είναι οι εξής:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 403300a & 1842a \\ 1842a & 8.4a \end{bmatrix}, Q_{12} = \begin{bmatrix} -635a \\ -2.9a \end{bmatrix}, Q_2 = a + 1$$

Το πρόβλημα λύνεται επιλύοντας τη σχετική εξίσωση του Riccati:

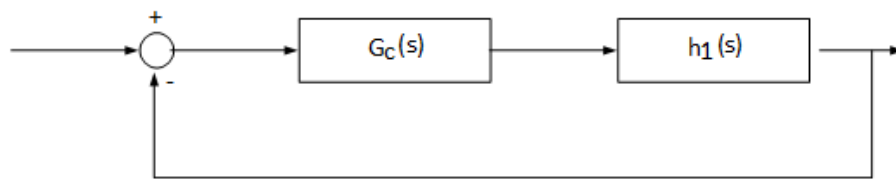
$$A^T S + SA - (SB + Q_{12})Q_2^{-1}(B^T S + Q_{12}^T) + Q_1 = 0$$

Η κατάσταση ανάδρασης  $L$  είναι τότε:

$$L = Q_2^{-1}(B^T S + Q_{12}^T)$$

Η L έχει υπολογιστεί μέσω του λογισμικού MATLAB για διάφορες τιμές της παραμέτρου α. Ο νόμος ελέγχου είναι  $u = -Lx$ . Στη συνέχεια, ένα ισοδύναμο ελεγκτή σειράς έχει υπολογιστεί έτσι ώστε το τελικό σύστημα ελέγχου να είναι της μορφής που απεικονίζεται στο Σχήμα 6B. Για παράδειγμα, για  $\alpha = 1$ , ο ισοδύναμος ελεγκτής σειράς που προήλθε από την βέλτιστη κατάσταση του νόμου ανάδρασης, είναι:

$$G_c(s) = \frac{0.95s^2 + 312.3s + 201.4}{s^2 + 324.5s - 2 * 10^{-16}} \cong \frac{0.95s^2 + 312.3s + 201.4}{s^2 + 324.5s}$$



Σχ.6B. Απλός βρόχος ελέγχου για το σχεδιασμό του ελεγκτή του SVC.

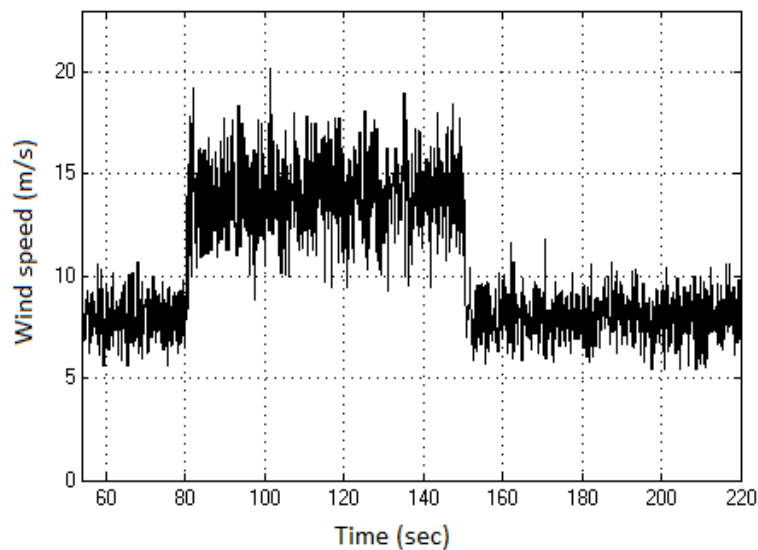
Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον ελεγκτή, αλλά αν έχουμε αγνοήσει τη δεύτερη σειρά του s, τότε καταλήγουμε σε ένα απλό ελεγκτή PI με παραμέτρους  $K_p = 0,96$  και  $K_I = 0,62$  το οποίο είναι πολύ εύκολο να εφαρμοστεί σε ένα μικροεπεξεργαστή. Έτσι, βλέπουμε ότι μέσα από τη βέλτιστη θεωρία φτάσαμε σε ένα απλό ελεγκτή PI για την εφαρμογή μας. Άλλες τιμές για το «α» δε δίνουν πολύ διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους του ελεγκτή PI, για παράδειγμα, εάν  $\alpha = 1,000$  τότε  $K_p = 1,6$  και  $K_I = 0,62$ .

## 6.5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το υπό μελέτη σύστημα, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 6A έχει προσομοιωθεί στο λογισμικό SIMULINK. Τα μη γραμμικά μοντέλα για την σύγχρονη γεννήτρια SG και SVC ελήφθησαν από τη βιβλιοθήκη του

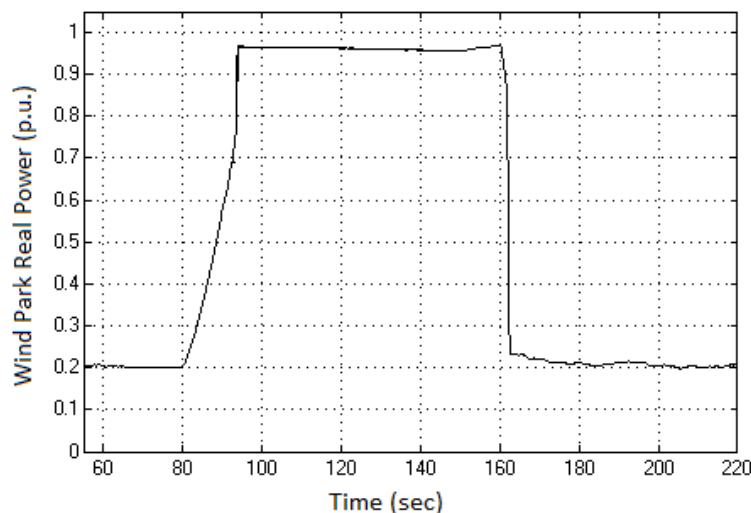
λογισμικού. Οι ονομαστικές τιμές για τις μηχανές παρατίθενται στο παράρτημα.

Αρχικά, θα δοκιμαστεί η απόκριση του συστήματος κάτω από σφοδρές αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου που επιφέρει τεράστιες εναλλαγές της πραγματικής και της αέργου ισχύος από το καλώδιο στο δίκτυο. Σαν αποτέλεσμα, η τάση του δικτύου αλλάζει. Οι προτεινόμενοι βέλτιστοι ελεγκτές του SVC αναλαμβάνουν να ρυθμίσουν την τάση του δικτύου στην ονομαστική του αξία. Στο Σχ. 6Γ απεικονίζεται η ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται ραγδαία από 8 m/s σε 14 m/s σε  $t = 80$  sec και στη συνέχεια μειώνεται σε 8 m/s σε  $t = 150$  sec.



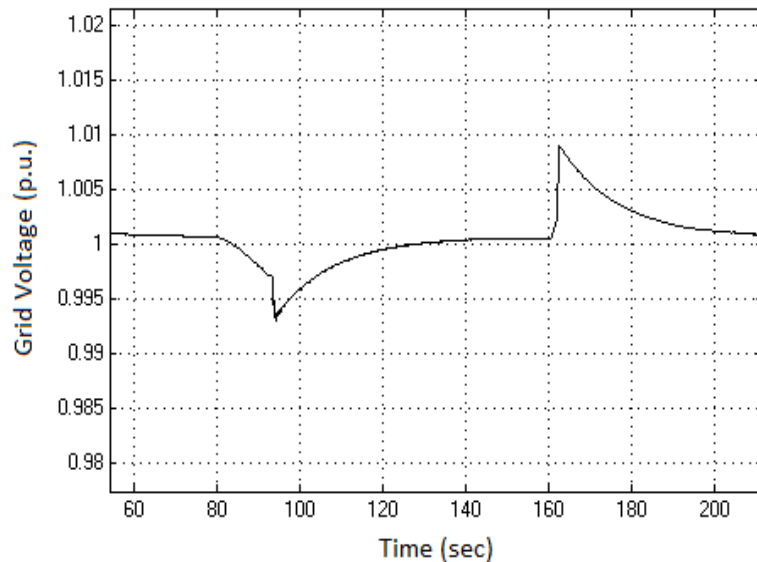
Σχ.6Γ. Κυματομορφή ταχύτητας ανέμου.

Στο Σχήμα 6Δ απεικονίζεται η πραγματική ισχύς που προέρχεται από το αιολικό πάρκο η οποία αλλάζει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου (p.u. αναφέρεται στην ονομαστική ισχύ του αιολικού πάρκου).

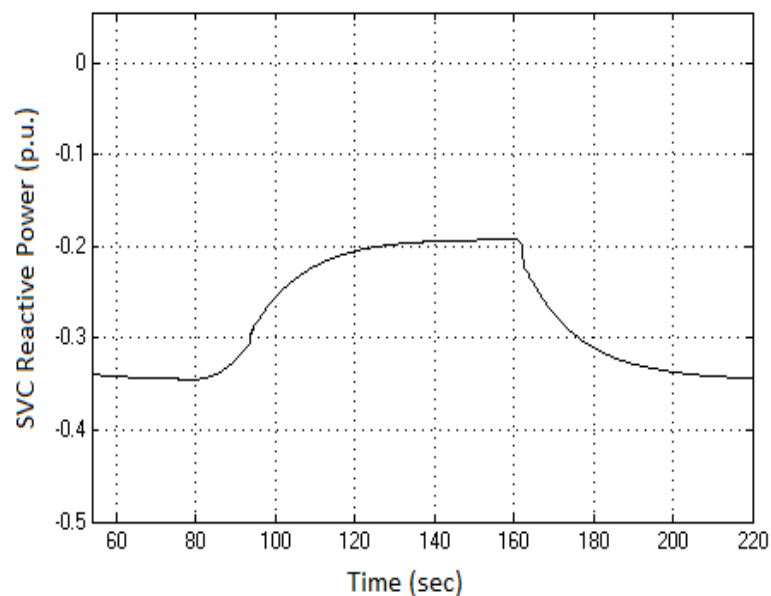


Σχ.6Δ. Πραγματική ισχύς του αιολικού πάρκου.

Στο σχήμα 6Ε βλέπουμε την απόκριση της τάσης του δικτύου με τον βέλτιστο ελεγκτή που σχεδιάστηκε σύμφωνα με το απλό κανονικοποιημένο μοντέλο για  $\alpha = 100$ .



Σχ. 6Ε. Απόκριση τάσης δικτύου με χρήση βέλτιστου ελεγκτή.

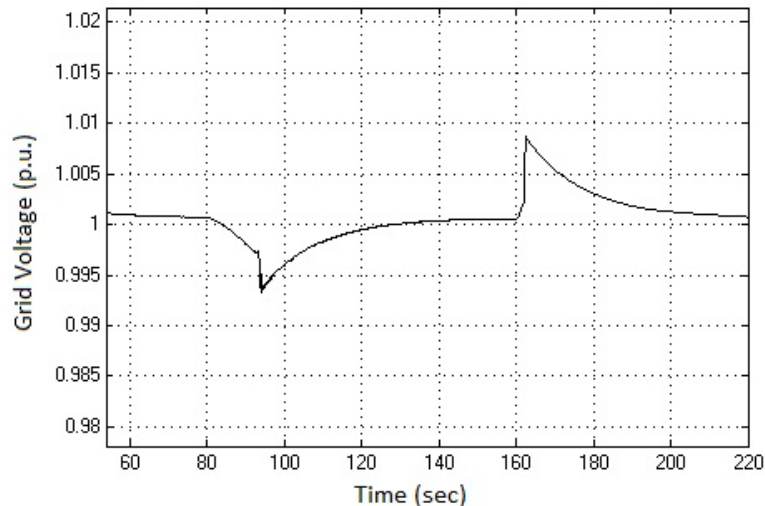


Σχ. 6ΣΤ. Άεργη ισχύς SVC με χρήση βέλτιστου ελεγκτή.

Στο Σχήμα 6ΣΤ βλέπουμε την αλλαγή στην άεργο ισχύ του SVC λόγω του βέλτιστου ελεγκτή.

Γενικά, η απόκριση του συστήματος είναι ικανοποιητική στην περίπτωση με το σύστημα ελέγχου.





Σχ.6Ζ. Απόκριση τάσης δικτύου για απλό μοντέλο όταν  $a = 1000$ .

Μπορούμε να δούμε ότι το απλό κανονικοποιημένο μοντέλο καταλήγει σε έναν ελεγκτή ο οποίος έχει μικρές υπερβάσεις αλλά με αργή απόκριση. Σε μια σφοδρή αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου, η διακύμανση της τάσης του δικτύου είναι μόλις 1,5%. Αντιθέτως, με χρήση άλλης μεθόδου (επαυξημένης κανονικοποιημένης μεθόδου μοντέλο) καταλήγει σε έναν ελεγκτή με μεγαλύτερες υπερβάσεις αλλά πολύ πιο γρήγορο από τον πρώτο (περίπου το ήμισυ του χρόνου του προηγούμενου ελεγκτή). Η τελική επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις.

Τέλος, στο Σχήμα 6Ζ υπάρχει η απόκριση της τάσης δικτύου με το απλό κανονικοποιημένο μοντέλο για  $a = 1000$ . Μπορούμε να δούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή συγκρινόμενο με το Σχήμα 6Ε. Η μόνη λεπτή διαφορά είναι ότι οι κορυφές των μεταβατικών περιόδων είναι μικρότερες σε αυτήν την περίπτωση.

## 6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία εξετάζεται ένα δίκτυο ζυγών υψηλής τάσης στο οποίο είναι συνδεδεμένο ένα αιολικό πάρκο μέσω ενός καλωδίου μέσης τάσης. Οι σοβαρές αλλαγές της πραγματικής και αέργου ισχύος που προέρχονται από τη σύνδεση του καλωδίου στο δίκτυο προκαλεί αστάθεια στην τάση. Η εγκατάσταση ενός SVC βελτιώνει την απόκριση της τάσης. Ο SVC ελέγχεται μέσω ενός προτεινόμενου ελεγκτή που έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου. Η θεωρία καταλήγει σε απλό ελεγκτή PI ο οποίος μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί. Η απόκριση του συστήματος είναι ικανοποιητική και η διακύμανση της τάσης που οφείλεται στις αλλαγές της ισχύος από το αιολικό πάρκο μπορεί να περιορίζεται μεταξύ  $\pm 1,5\%$  σε μια μεταβατική περίοδο για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

## 6.7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράμετροι ανεμογεννήτριας:

Low speed inertia $J_1$	800 kgm <sup>2</sup>
Coupling stiffness $K_{c2}$	12500 Nm/rad
Coupling damping $D_{c2}$	130 Nms/rad
High speed inertia $J_2$	90 kgm <sup>2</sup>
Nominal active power $P_N$	1.5 MW
Nominal electrical torque $T_{eN}$ or $T_g$	9555 Nm
Stator voltage $V_{SN}$	700 V
Nominal generator speed $\eta_{ge}$	1500 rpm
Speed range of generator	900-2000 rpm
Pole pairs	2
Blades diameter $d$	60 m
Nominal wind speed $V_{wN}$	13 m/sec
Maximum power coefficient $C_p$	0.44
Air density	1.125 kg/m <sup>3</sup>
Nominal turbine speed $\eta_{te}$	18 rpm
Speed range of turbine speed	9-18 rpm

Παράμετροι καλωδίου μέσης τάσης:

Rated voltage $V_N$	49 kV
Inductive reactance $X_c$	0.417 $\Omega$ /mi
Resistance	0.091 $\Omega$ /mi
Capacitive Reactance	6700 $\Omega$ *mi
Total Length	50 mi

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. N. Schinas – A. Moullas “Optimal Control for the Voltage Regulation of a Power Line Including an Interconnection with a Wind Park and FACTS” American Journal of Electrical and Electronic Engineering 2016, Vol. 4, No. 1, 9-15
2. Δροσόπουλος Α., Ηλεκτροτεχνία Εναλλασσόμενου Ρεύματος, Επιστημονικές Εκδόσεις και Λογισμικό, 2006.
3. Παπαδιά Β., Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας-Τόμος 2, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1<sup>η</sup> έκδοση, 1985.
4. Duffin W.J., Electricity and Magnetism, McGraw-Hill, 2nd Edition, 1973.
5. Μαλατέστας Π., Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Τζιόλα, 2014.
6. Χατζαράκης Γ., Ηλεκτρικά Κυκλώματα, Τόμος Α, εκδόσεις Τζιόλα, 1<sup>η</sup> Έκδοση, 2002.
7. Anderson P., Fouad A., Power System Control and Stability, Iowa State University Press, 1<sup>st</sup> Edition, 1977.
8. Arthur R., Vittal V., Power System Analysis, Prentice Hall, 2nd Edition, 2000.
9. Cheng D.K., Field and Wave Electromagnetism, Addison-Wesley, 2<sup>nd</sup> edition, 1989.
10. Alexander C.K. and Sadiku M.N.O., Fundamentals of Electric circuits, McGraw-Hill, 2nd Edition, 2003.
11. Dopazo J.F., Klitin O.A., Stagg G.W., VanSlyck L.S., State Calculations of Power Systems from Line Flow Measurements, IEEE Trans. on Pas, Vol. PAS-89, September/October 1970, pp 1698-1708.
12. Elgerd O., Electric Energy Systems Theory, McGraw-Hill, 1<sup>st</sup> Edition, 1983.
13. Grainger J., Stevenson W., Power System Analysis, McGraw Hill, 1<sup>st</sup> Edition, 1994.

14. Irwin J.D., Basic Engineering Circuit Analysis, McMillan, 2nd Edition, 1987.
15. Γεώργιος Δ. Καρπούζος, Διπλωματική Εργασία, Σχεδιασμός Έξυπνου Δικτύου με Α.Π.Ε., ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, 2015.
16. Kothari D.P., Nagrath I.J., Electric Machines, Tata McGraw-Hill, 4<sup>th</sup> Edition, 2006.
17. Miller R., Power System Operation, McGraw-Hill, 1970.
18. Ευάγγελος Θ. Καλαμπαλίκης, Διπλωματική Εργασία, Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτρονικά ελεγχόμενη συστοιχία πυκνωτών (στατικό αντισταθμιστή), Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.
19. Weedy B., Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Γκιούρδα, 8<sup>η</sup> έκδοση, 1977.
20. Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε., 2<sup>η</sup> Έκδοση, Θεσσαλονίκη 1993.
21. Stevenson W., Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill, 4<sup>th</sup> Edition, 1982.
22. Chapman J. Stephen, Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, εκδόσεις Τζιόλα, 3<sup>η</sup> έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2003.
23. Γιαννακόπουλος Γ., Βωβός Π., Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, 2<sup>η</sup> έκδοση, 2011.