

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
ΑΜ :4344**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Κ. ΓΕΡΑΣΗ**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ**

**2013**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
ΑΜ :4344**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :**

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	ΣΕΛΙΔΑ
Εξώφυλλο	1
Περιεχόμενα	3
Περίληψη	5
Πρόλογος	6
Μέρος 1 <sup>ο</sup> : Απαιτήσεις και Κανονισμοί Ηλεκτρικών Δικτύων	8
1.1 Συχνότητα και τάση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου	8
1.2 Πτώση Τάσης	11
Μέρος 2 <sup>ο</sup> : Ηλεκτρολογικές Εγκαταστάσεις Πλοίων	13
2.1 Γενικά στοιχεία	13
2.2 Παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας	14
2.3 Μετασχηματιστές	16
2.3.1 Ιδανικός Μετασχηματιστής	16
2.3.2 Είδη Μετασχηματιστών	17
2.3.3 Λειτουργία Μονοφασικού Μετασχηματιστή	19
2.3.4 Τριφασικοί Μετασχηματιστές	21
2.3.5 Είδη Τριφασικών Μετασχηματιστών	23
2.3.6 Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων Στους Τριφασικούς Μ/Τ	24
2.3.7 Απώλειες Μετασχηματιστή	28
2.4 Σύγχρονες Γεννήτριες – Εναλλακτήρες	29

2.4.1	Στροβιλοεναλλακτήρες	32
2.4.2	Ψύξη των Εναλλακτών	33
2.4.3	Ταχύτητα Περιστροφής Των Σύγχρονων Γεννητριών	34
2.4.4	Παραγωγή Εναλλασσόμενου Ρεύματος	35
2.4.5	Λειτουργία Εναλλάκτηρα Χωρίς Φορτίο ή Εν Κενώ	36
2.4.6	Τρόποι Ρύθμισης Της ΗΕΔ Εναλλακτήρα	37
2.4.7	Χαρακτηριστική Φορτίου – Διακύμανσης	38
2.4.8	Ρύθμιση Της Τάσης Του Εναλλακτήρα	40
2.4.9	Παράλληλη Λειτουργία Εναλλακτών	41
2.4.10	Διαδικασία παραλληλισμού	43
	Μέρος 3 <sup>ο</sup> : Διάγραμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας- Καλώδια	44
3.1	Περιγραφή των Ηλεκτρολογικών Παροχών	44
3.2	Υπολογισμοί Διατομής Καλωδίων	47
3.3	Συμπεράσματα	49
	Μέρος 4 <sup>ο</sup> : Βιβλιογραφία	51

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε όλα τα σημεία του πλοίου, εκτός από το εσωτερικό των αμπαριών και των δεξαμενών, υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα για τις ανάγκες φωτισμού, αλλά και για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών με χρήση ηλεκτρικών συσκευών και εργαλείων.

Η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου πρέπει να συντηρείται και να προστατεύεται, με τέτοιο τρόπο που να μειώνεται το ενδεχόμενο πυρκαγιάς από σπινθήρες βραχυκυκλώματος, ηλεκτροπληξίας ανθρώπων και γενικά κινδύνων για το προσωπικό.

Επίσης, όλα τα είδη του ηλεκτρικού εξοπλισμού πρέπει να επιθεωρούνται τακτικά για να διαπιστώνεται η καλή κατάστασή τους, ενώ σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να παραβιάζονται ή να τροποποιούνται οι όροι λειτουργίας μιας ηλεκτρικής διάταξης, όπως για παράδειγμα η χρήση καλωδίων διαφορετικής διατομής.

Επομένως, η ηλεκτρολογική μελέτη και ο υπολογισμός της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του πλοίου, έχουν ιδιαίτερη σημασία τόσο για τη σωστή λειτουργία του πλοίου, όσο και για την ασφάλεια του προσωπικού.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής είναι η παρουσίαση του υπολογισμού της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του πλοίου, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και των διεθνών κανονισμών που καθορίζουν τις συνθήκες λειτουργίας των πλοίων.

**Λέξεις κλειδιά:** ηλεκτρολογική μελέτη πλοίου, ηλεκτρολογική εγκατάσταση πλοίου, ηλεκτρικός εξοπλισμός πλοίου.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου αποτελεί ένα σύστημα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα, το σύστημα ισχύος, το σύστημα φωτισμού και το σύστημα επικοινωνιών-ναυσιπλοΐας και χαρακτηρίζεται από αυτάρκεια. Η δομή της ηλεκτρικής εγκατάστασης του πλοίου θα πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να εξασφαλίζονται οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, η λειτουργία του εξοπλισμού που είναι αναγκαίος για την ασφάλεια του πλοίου κάτω από συνθήκες έκτακτης ανάγκης και η ασφάλεια του πληρώματος από ηλεκτρικούς κινδύνους.

Μια σταθερή παροχή ρεύματος είναι βασική για την ασφαλή λειτουργία του πλοίου και τη λειτουργία των μηχανημάτων. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχουν στο πλοίο γεννήτριες οι οποίες θα είναι συνεχώς σε ετοιμότητα. Από την άλλη μεριά, η χρήση της ηλεκτροπρόωσης έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερες ηλεκτρικές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να έχει αυξηθεί και η σημασία του υπολογισμού της ηλεκτρικής εγκατάστασης του πλοίου.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση του υπολογισμού της ηλεκτρικής εγκατάστασης του πλοίου και η ανάδειξη της σημαντικότητάς του.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις και στους κανονισμούς των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις του πλοίου και η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, εστιάζοντας κυρίως στους Μετασχηματιστές και τις Γεννήτριες.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ηλεκτρολογική μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων και κυρίως η διαστασιολόγηση των παροχικών καλωδίων.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία.

**ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>**  
**ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ**  
**ΔΙΚΤΥΩΝ**

**1.1 Συχνότητα και τάση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου**

Στην παρακάτω εικόνα 1, απεικονίζονται τα μέγιστα επίπεδα τάσεων λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς του GL.

17 500 V	for permanently installed power plants
500 V	a) for permanently installed power and control circuits b) for devices with plug-and-socket connections which are earthed either via their mounting or through a protective earth conductor c) the power supply to systems requiring special electric shock-prevention measures shall be provided via earth-leakage circuit breaker $\leq 30$ mA (not applicable to essential equipment)
250 V	a) for installations and devices, as laid down in paras a) to c) for 500 V, see above b) for permanently installed lighting systems c) for permanently installed control, monitoring and ships safety systems d) for devices supplied via plug-and-socket and requiring special electric shock-prevention measures, the power supply is to take place via a protective isolating transformer, or the device shall be double-insulated
50 V Safety voltage	for portable devices for working in confined spaces where special electric shock-prevention measures are required

Εικόνα 1: Μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα τάσεων.

Ορίζονται ως συστήματα χαμηλής τάσης εκείνα που λειτουργούν σε τάση από 50 V έως και 1000 V, με συχνότητα λειτουργίας 50 ή 60 Hz ή τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος με μέγιστη τάση λειτουργίας τα 1500 V.

Ως συστήματα μέσης τάσης ορίζονται εκείνα που λειτουργούν σε τάση από 1 kV έως και 17,5 kV, με συχνότητα 50 ή 60 Hz ή τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος με τάση λειτουργίας μεγαλύτερη από 1500 V.

Σε δίκτυα χαμηλής τάσης επιτρέπονται τα εξής συστήματα:



- Για συστήματα Σ.Ρ. και μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος:
- 2 αγωγοί, με τον έναν αγωγό γειωμένο (1/N/PE)
- 1 αγωγός με επιστροφή μέσω της γάστρας του πλοίου (1/PEN)
- 2 αγωγοί μονωμένοι από τη γάστρα του πλοίου (2/PE)

Για τριφασικά συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος:

- 4 αγωγοί με τον ουδέτερο γειωμένο, χωρίς επιστροφή μέσω της γάστρας του πλοίου (3/N/PE)
- 3 αγωγοί με τον ουδέτερο γειωμένο μέσω της γάστρας του πλοίου (3/PEN)
- 3 αγωγοί μονωμένοι από τη γάστρα του πλοίου (3/PE)

Σε ένα αγείωτο σύστημα, τα ουδέτερα σημεία των γεννητριών δεν πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους, ενώ η αντίσταση μόνωσης ενός αγείωτου συστήματος θα πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς.

Στους πίνακες 1, 2 και 3 δίνονται οι επιτρεπτές διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων.

Ποσότητα σε λειτουργία	Διακυμάνσεις	
	Μόνιμο	Παροδικό
Συχνότητα	± 5%	± 10% (5 sec)
Τάση	+ 6%, - 10%	± 20% (1,5 sec)

Πίνακας 1: Διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας σε Ε.Ρ. συστήματα διανομής.

<b>Παράμετροι</b>	<b>Διακυμάνσεις</b>
Ανοχή τάσης (συνεχής)	$\pm 10\%$
Τάση κυκλική διακύμανση απόκλιση	5 %
Διακύμανση τάσης (a.c.r.m.s. σε σταθερή d.c. τάση)	10%

Πίνακας 2: Διακυμάνσεις τάσης σε Σ.Ρ. συστήματα διανομής.

<b>Συστήματα</b>	<b>Διακυμάνσεις</b>
Στοιχεία που συνδέονται με την κάβα κατά τη διάρκεια της φόρτισης (βλέπε σημείωση)	+ 30%, - 25%
Στοιχεία που δεν συνδέονται με την κάβα κατά τη διάρκεια της φόρτισης	+ 20%, - 25%
Σημείωση: Διαφορετικές διακυμάνσεις τάσης, όπως καθορίζεται από φόρτωση/εκφόρτωση χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της κυμάτωσης της τάσης από τη συσκευή φόρτισης, μπορεί να θεωρηθεί.	

Πίνακας 3: Διακυμάνσεις τάσης για συστήματα συσσωρευτών.

## 1.2 Πτώση Τάσης

Μια γραμμή πρέπει να μην προκαλεί ανεπίτρεπτη πτώση τάσης. Σε εγκατάσταση κίνησης, μεγάλη πτώση τάσης μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση ισχύος, ακόμα και αδυναμία εκκίνησης του κινητήρα. Σε εγκαταστάσεις φωτισμού πέφτει σημαντική ένταση του φωτός, πράγμα που ενοχλεί ιδιαίτερα σε μεταβαλλόμενα φορτία. Τα επιτρεπόμενα όρια είναι:

1. 3% για κινητήρες και συσκευές με δικό τους κύκλωμα π.χ. 13.2 V για 440 V τροφοδότηση.
2. 1% για φωτισμό και πρίζες γενικής χρήσης π.χ. 2.3 V για 230 V τροφοδότηση.

Η πτώση τάσης  $\Delta V$  υπολογίζεται συνήθως ανηγμένη στην ονομαστική τάση με βάση την αντίσταση  $R$ , την αντίδραση ανά μονάδα μήκους  $X$ , την ισχύ  $P$  και τον συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ .

Για μονοφασικό κύκλωμα είναι :

$$\Delta V/V = 2 \cdot l \cdot \Psi \cdot P/V^2 = 2 \cdot l \cdot \Psi \cdot I \cdot \cos\phi/V$$

Για τριφασικό κύκλωμα είναι :

$$\Delta V/V = l \cdot \Psi \cdot P/V^2 = \sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos\phi/V$$

Όπου  $V$  η πολική τάση και  $\Psi$  η ισοδύναμη αντίσταση ανά μονάδα μήκους.

Έχουμε επίσης τις σχέσεις

$$\Psi = R + X \cdot \tan\phi \text{ και } R = 1/k \cdot A$$

Όπου:

$l$  το μήκος της γραμμής σε mt

$P$  η ισχύς σε W

$V$  η τάση σε Volt

$I$  το ρεύμα σε A

$\cos\phi$  ο συντελεστής ισχύος

R η αντίσταση σε Ω

X η αντίδραση ανά μονάδα μήκους σε Ω/m

κ η αγωγιμότητα στην θερμοκρασία λειτουργίας

και A η διατομή της γραμμής.

Για χαμηλή τάση και για διατομές  $A < 35 \text{ mm}^2$  ισχύει  $\Psi = R$ . Αν χρειαστεί να υπολογιστεί η X, τότε χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση, η οποία ισχύει τόσο για μονοφασικό όσο και για τριφασικό κύκλωμα και κυκλικές διατομές αγωγών:

$$X = 0,0628 \cdot (\ln D/r + 0.25),$$

όπου D η απόσταση κέντρων αγωγών για μονοφασικό κύκλωμα και  $D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$  για τριφασικό κύκλωμα, όπου  $D_{12}, D_{23}, D_{31}$  οι αποστάσεις των φάσεων, και r ακτίνα αγωγών.

Εάν ζητηθεί να βρεθεί η απαιτούμενη διατομή χαλκού για δοσμένη πτώση τάσης χρησιμοποιούμε τους τύπους:

$$A = (l \cdot P \cdot 100) / (V^2 \cdot \kappa \cdot \varepsilon), \text{ για τριφασικά καλώδια,}$$

$$A = (2 \cdot l \cdot P \cdot 100) / (V^2 \cdot \kappa \cdot \varepsilon), \text{ για μονοφασικά καλώδια,}$$

$$\text{όπου } \varepsilon = (\Delta V / V) \cdot 100$$

## ΜΕΡΟΣ 2<sup>ο</sup>

### ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ

#### 2.1 Γενικά στοιχεία

Οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις των πλοίων περιλαμβάνουν τα εξής συστήματα:

**Σύστημα ισχύος:** περιλαμβάνει τις γεννήτριες, τους πίνακες ελέγχου και διανομής, τους πίνακες ισχύος, τα καλώδια, τις συσκευές ελέγχου κινητήρων και τις υπόλοιπες ηλεκτρικές συσκευές.

**Σύστημα φωτισμού:** περιλαμβάνει τα καλώδια, τα κιβώτια διανομής, τους λαμπτήρες για τον γενικό φωτισμό, το σύστημα φωτισμού ανάγκης, τα φώτα ναυσιπλοΐας και αγκυροβολίας, τα φώτα και τους προβολείς σημάτων.

**Σύστημα εσωτερικής επικοινωνίας:** περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες συσκευές και τις καλωδιώσεις για την διαβίβαση και κάλυψη διαταγών και πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων διαμερισμάτων του πλοίου.

#### 2.2 Παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχει τον φωτισμό στο πλοίο και τροφοδοτεί τα συστήματα εσωτερικής επικοινωνίας, των ασυρμάτων, το ραντάρ και παράγεται από κατάλληλες ηλεκτρογεννήτριες εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος.

Τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα πλοία είναι τα εξής:

- **Συστήματα παραγωγής και διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος:** Αποτελούνται από τις κύριες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάγκης, της προσωρινής τροφοδότησης ανάγκης, το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ισχύος, την διάταξη λήψεως ρεύματος εκ της ξηράς, την διάταξη επιλογής πηγών ηλεκτρικής ενέργειας και το σύστημα φωτισμού.
- **Κύριες πηγές:** Αυτές είναι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος τριφασικού, 380 βολτ, 50 περιόδων ή 440 βολτ, 60 περιόδων. Οι γεννήτριες αυτές κινούνται δια στροβίλων ή μηχανών ντίζελ και παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στους πίνακες ελέγχου και διανομής. Από τους πίνακες αυτούς τροφοδοτούνται οι διάφορες καταναλώσεις του πλοίου ως και το σύστημα φωτισμού, η τάση τού οποίου είναι 220 ή 110 βολτ. Σε κάθε πλοίο είναι απαραίτητο να υπάρχουν δύο τουλάχιστον ανεξάρτητες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, καθεμία από τις οποίες πρέπει να δύναται να τροφοδοτεί ορισμένα ζωτικά φορτία, όπως είναι το μηχάνημα εξαερισμού του χώρου μηχανοστασίου και λεβητοστασίου, η εσωτερική επικοινωνία του σκάφους, ο ασύρματος, το ραντάρ και ο φωτισμός.
- **Σύστημα διανομής:** το σύστημα αυτό συνδέει τις γεννήτριες που θα παράγουν την ισχύ, με τους διάφορους ηλεκτρικούς καταναλωτές, οι όποιες είναι εγκατεστημένες στο πλοίο.
- **Διάταξη επιλογής πηγών:** η εγκατάσταση αυτή χρησιμοποιείται για την επιλογή της γεννήτριας, από την οποία θα τροφοδοτηθούν οι διάφορες καταναλώσεις.

- **Διάταξη λήψεως ρεύματος εκ της ξηράς:** με αυτή συνδέονται τα φορητά καλώδια λήψεως ρεύματος εκ της ξηράς, όταν το πλοίο είναι προσαραγμένο και δεν εργάζονται οι δικές του ηλεκτρογεννήτριες.
- **Σύστημα φωτισμού:** υποδιαιρείται στο κύριο σύστημα φωτισμού και το σύστημα φωτισμού ανάγκης. Υπό κανονικές συνθήκες οι κύριες γεννήτριες παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα για τον φωτισμό όλου του πλοίου. Εάν όμως, για κάποιον λόγο καταστεί αδύνατη η παροχή ρεύματος στο σύστημα φωτισμού από την κύρια γεννήτρια, τότε αρχίζει να λειτουργεί αυτομάτως η γεννήτρια ανάγκης, η οποία και τροφοδοτεί περιορισμένο αριθμό φώτων του πλοίου, τα οποία ανήκουν στο σύστημα φωτισμού ανάγκης.<sup>[6]</sup>
- **Πηγές ανάγκης:** παρέχουν αμέσως και αυτόματα ηλεκτρική ενέργεια σε ορισμένα ζωτικά φορτία του πλοίου, στην περίπτωση που οι κυρίες γεννήτριες τεθούν εκτός λειτουργίας. Πηγές ανάγκης σε ένα πλοίο είναι μία ή και περισσότερες ντιζελογεννήτριες. Το σύστημα διανομής ανάγκης είναι ανεξάρτητο από το κύριο σύστημα διανομής και κάθε ντιζελογεννήτρια του τροφοδοτεί τον δικό της πίνακα ελέγχου, από τον οποίον φεύγουν ειδικές γραμμές, που καταλήγουν στις χειροκίνητες ή αυτόματες διατάξεις τροφοδοτήσεως των ζωτικών φορτίων.<sup>[6]</sup>
- **Προσωρινές τροφοδοτήσεις ανάγκης:** παρέχει προσωρινές συνδέσεις παρακάμπτοντας κατεστραμμένα καλώδια και πίνακες.
- **Συστήματα διανομής συνεχούς ρεύματος:** περιλαμβάνουν τις κύριες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα διανομής για δύο ή τρεις αγωγούς, το σύστημα φωτισμού και τις πηγές ανάγκης και προσωρινές τροφοδοτήσεις ανάγκης.

## 2.3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου μέσω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου.

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δυο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι ένα κοινό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα.

Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με πηγή εναλλασσόμενης, ενώ το δεύτερο με το φορτίο. Το πρώτο ονομάζεται τύλιγμα εισόδου και το δεύτερο τύλιγμα εξόδου.

Οι μετασχηματιστές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες :

1. Μονοφασικοί Μετασχηματιστές
2. Τριφασικοί Μετασχηματιστές

### 2.3.1 Ιδανικός Μετασχηματιστής

Ιδανικός μετασχηματιστής είναι η συσκευή που δεν παρουσιάζει απώλειες και διαθέτει μια περιέλιξη εισόδου και μια περιέλιξη εξόδου. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή διαθέτει  $N_p$  σπείρες και το δευτερεύον  $N_s$  σπείρες. Η εξίσωση που δίνει την σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα  $V_{p(t)}$  είναι η:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = \alpha \quad (1)$$

Όπου ο  $\alpha$  είναι ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή :



$$\frac{N_p}{N_s} = \alpha \quad (2)$$

Η σχέση μεταξύ του ρεύματος  $i_{p(t)}$  στο πρωτεύον τύλιγμα του ιδανικού μετασχηματιστή και του ρεύματος  $i_{s(t)}$  στο δευτερεύον τύλιγμα δίνεται από την σχέση:

$$N_p \cdot i_p(t) = N_s \cdot i_s(t) \quad \text{ή} \quad \frac{i_p(t)}{i_s(t)} = 1/\alpha \quad (3)$$

Και στο πεδίο συχνότητας οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται :

$$\frac{V_p}{V_s} = \alpha \quad (4) \quad \text{και} \quad \frac{I_p}{I_s} = 1/\alpha \quad (5)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις είναι φανερό ότι τόσο οι τάσεις  $V_p$  και  $V_s$ , όσο και τα ρεύματα  $I_p$  και  $I_s$  παρουσιάζουν μεταξύ τους τις ίδιες φάσεις. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος μετασχηματισμού επηρεάζει μονό τα μέτρα των τάσεων και των ρευμάτων του μετασχηματιστή και όχι τις φάσεις τους.

Οι παραπάνω εξισώσεις (1) έως (5) αν και δίνουν τις ακριβείς σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή, αφήνουν άλυτο το πρόβλημα της πολικότητας τους, τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα. Ο μόνος τρόπος να βρεθεί η πολικότητα στο δευτερεύον τύλιγμα ενός πραγματικού μετασχηματιστή είναι να ανοιχτεί το κέλυφος της συσκευής και να εξεταστεί το ίδιο το τύλιγμα. Για να αποφευχθεί όμως κάτι τέτοιο, στο κυκλωματικό διάγραμμα του μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται τελείες που δείχνουν την πολικότητα της τάσης και του ρεύματος.

### 2.3.2 Είδη Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ισχύος κατασκευάζονται με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο κατασκευής τα τυλίγματα του μετασχηματιστή γύρω από τις δύο πλευρές ενός ορθογώνιου πυρήνα από φύλλα χάλυβα. Τέτοιοι

μετασχηματιστές ονομάζονται μετασχηματιστές τύπου πυρήνα. Ο άλλος τρόπος κατασκευής πραγματοποιείται σε έναν πυρήνα με τρία σκέλη. Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος. Αυτοί ονομάζονται μετασχηματιστές τύπου μανδύα. Και στις δυο περιπτώσεις οι πυρήνες κατασκευάζονται από λεπτά δυναμοελάσματα. Τα δυναμοελάσματα είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους με σκοπό τη μείωση των δινορευμάτων.

Ανάλογα με τη λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες. Ένας μετασχηματιστής που συνδέεται με την έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο τάσης εξόδου της πριν οδηγηθεί στην γραμμή μεταφοράς ονομάζεται μετασχηματιστής μονάδος. Ο μετασχηματιστής στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει το επίπεδο τάσης της γραμμής στα επίπεδα διανομής ονομάζεται μετασχηματιστής υποσταθμού. Τέλος, ο μετασχηματιστής που υποβιβάζει την τάση διανομής σε επίπεδα χρησιμοποιήσιμης τάσης ονομάζεται μετασχηματιστής διανομής.

Εκτός από τους μετασχηματιστές ισχύος, πολύ σημαντικοί είναι και άλλοι δυο ιδιαίτεροι τύποι μετασχηματιστών. Ο πρώτος χρησιμοποιείται για την μετατροπή της υψηλής τάσης εισόδου σε κάποια χαμηλότερη τιμή ανάλογη της πρώτης και ονομάζεται μετασχηματιστής τάσης. Αυτή την λειτουργία μπορεί να την υλοποιήσει και ένας μετασχηματιστής ισχύος, όμως η διάφορα τους είναι ότι ο μετασχηματιστής δουλεύει μόνο με ρεύματα πολύ χαμηλής τιμής.

Ο δεύτερος ειδικός τύπος μετασχηματιστή μετατρέπει το ρεύμα υψηλής τιμής της εισόδου σε χαμηλότερης τιμής ανάλογο πάλι του ρεύματος εισόδου και ονομάζεται μετασχηματιστής ρεύματος.

Άλλα είδη μετασχηματιστών είναι :

Διαφορικός μετασχηματιστής : μετασχηματιστής με δυο πρωτεύοντα τυλίγματα που μπορούν να συνδεθούν έτσι ώστε να διαρρέονται από ρεύματα αντίθετης φοράς με αποτέλεσμα η επίδραση στο δευτερεύον τύλιγμα να παράγεται από την διαφορά των δυο ρευμάτων.

Μετασχηματιστής σταθερής εντάσεως : μετασχηματιστής ειδικά διευθετημένος για την διατήρηση της εντάσεως του δευτερεύοντος αρκετά σταθερής εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας ανεξάρτητα από τις μεταβολές της εμπεδήσεως του δευτερεύοντος κυκλώματος ή της τάσης που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα.

Μετασχηματιστής στρεφόμενου πεδίου : πολυφασικός μετασχηματιστής του οποίου τα τυλίγματα διατάσσονται έτσι ώστε όταν διαρρέονται από κατάλληλα ρεύματα να παράγουν στρεφόμενα μαγνητικά πεδία.

Μετασχηματιστής συστήματος Λεμπλαν : διευθέτηση των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή έτσι ώστε να επιτρέπει τον μετασχηματισμό τριφασικού συστήματος τάσεων σε διφασικό ή αντίστροφα.

Μετασχηματιστής συστήματος Σκοτ : διευθέτηση των τυλιγμάτων δύο μονοφασικών μετασχηματιστών έτσι ώστε να επιτρέπει τον μετασχηματισμό τριφασικού συστήματος σε διφασικό ή αντίστροφα

### **2.3.3 Λειτουργία Μονοφασικού Μετασχηματιστή**

Λειτουργία μονοφασικού μετασχηματιστή χωρίς φορτίο ονομάζεται η περίπτωση στην οποία η παραγόμενη ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη) στο δευτερεύον τύλιγμα δεν δίνεται σε κατανάλωση και επομένως δεν διαρρέεται από ρεύμα. Η ΗΕΔ στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος παράγεται από το φαινόμενο της

επαγωγής. Έχουμε παραγωγή ΗΕΔ στο δευτερεύον από επαγωγή όταν στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος εφαρμόσουμε τάση στιγμιαίας τιμής  $V_1 = 2 \cdot V_{\min} \cdot \sin \omega t$ , όποτε εμφανίζεται στο δευτερεύον χρήσιμη μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή  $\Phi_0$ . Το μαγνητικό κύκλωμα αυτής της ροής κλείνει μέσα από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και διαπερνά τις σπείρες του δευτερεύοντος όποτε παράγεται ΗΕΔ από επαγωγή, η οποία δίνεται από την σχέση :

$$e_2 = d\Phi_0/n_2 \cdot dt$$

Όπου  $n_2$  ο αριθμός των σπειρών του δευτερεύοντος,  $d\Phi_0/dt$  η ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής. Για την λειτουργία χωρίς φορτίο του μετασχηματιστή έχουμε  $e_2 = U_2$

Επειδή η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον μεταβάλλεται, παράγεται στα άκρα του ΗΕΔ από αυτεπαγωγή οποία δίνεται από την σχέση :

$$e_1 = -L_1 \cdot dI_0/dt = - d\Phi_0/n_1 \cdot dt$$

Όπου  $L_1$  ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου του πρωτεύοντος,  $dI_0/dt$  η ταχύτητα μεταβολής της έντασης του ρεύματος,  $n_1$  ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος και  $d\Phi_0/dt$  η ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή στο πρωτεύον αντιτίθεται στο αίτιο που την προκαλεί, δηλαδή την τάση που εφαρμόζουμε. Γι' αυτό ισχύει  $V_1 = e_1$ . Η σχέση αυτή ισχύει όμως σε πηνίο με καθαρή επαγωγική συμπεριφορά, όπου δεν υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα του πρωτεύοντος. Στην πράξη όμως δεν συναντάμε καθαρή επαγωγική αντίσταση, γιατί δεν μπορούμε να αγνοήσουμε τον παράγοντα της κατασκευής του πηνίου. Έτσι το τύλιγμα του πρωτεύοντος έχει ωμική αντίσταση πολύ μικρής τιμής. Επομένως  $V_1 \neq e_1$  με τα  $V_1, e_1$  να διαφέρουν κατά την πτώση τάσης στην μικρή ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος.

Επειδή η πτώση τάσης έχει πολύ μικρή τιμή είναι προφανές πως και η ένταση του ρεύματος της λειτουργίας του μετασχηματιστή χωρίς φορτίο θα έχει πολύ μικρή τιμή.

Λειτουργία μονοφασικού μετασχηματιστή με φορτίο ονομάζεται η περίπτωση στην οποία η παραγόμενη ΗΕΔ στο δευτερεύον τύλιγμα δίνεται σε κατανάλωση και επομένως υπάρχει ροή ρεύματος σ' αυτή. Κατά την διαδικασία αυτή η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται στο φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής . Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχουν δύο πηνία που διαρρέονται από μεταβαλλόμενα ρεύματα, τα οποία δημιουργούν οι μαγνητικές ροές που επηρεάζουν τα πηνία.

Το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή διαρρέεται από ρεύμα  $I_2$ , που παράγει την μαγνητική ροή  $\Phi_2$ . Αυτή η ροή έχει αντίθετη φορά από την μαγνητική ροή  $\Phi_1$ , που δημιουργείται στο πρωτεύον και το επηρεάζει. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ΗΕΔ στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος.

Η ένταση του ρεύματος  $I_1$  που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα και παράγει την μαγνητική ροή  $\Phi_1$  που εξουδετερώνει την  $\Phi_2$  στο δευτερεύον δίνεται από την σχέση:

$$I_1 = I_2 = n_1/n_2$$

#### **2.3.4 Τριφασικοί Μετασχηματιστές**

Τα μέρη ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι :

1. Ο πυρήνας
2. Τα τυλίγματα
3. Δοχείο λαδιού

Ο προορισμός του πυρήνα είναι, όπως και στην περίπτωση του μονοφασικού μετασχηματιστή :

1. Η στήριξη του μετασχηματιστή
2. Το κλείσιμο του δημιουργούμενου μαγνητικού κυκλώματος μέσα από αυτόν.
3. Ο περιορισμός της μαγνητικής ροής σκέδασης

Η κατασκευή του πυρήνα των τριφασικών μετασχηματιστών είναι εντελώς ανάλογη των μονοφασικών. Για τη κατασκευή του πυρήνα ενός μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται ελάσματα που είναι μονωμένα μεταξύ τους και το πάχος τους είναι πολύ λεπτό. Αυτό γίνεται ώστε να αποφευχθούν τα επαγωγικά ρεύματα Foucault ή δινορεύματα και η κατασκευή των ελασμάτων γίνεται από σιδηρομαγνητικό υλικό κατάλληλης επεξεργασίας για τον περιορισμό των μαγνητικών απωλειών. Ο πυρήνας περιλαμβάνει και σ' αυτήν την περίπτωση κορμούς και ζυγώματα, ενωμένα ώστε να περιορίζεται ο μαγνητικός θόρυβος και οι μαγνητικές απώλειες.

Σε καθένα από τους τρεις κορμούς του πυρήνα του τριφασικού μετασχηματιστή τοποθετούνται δύο τυλίγματα, ένα υψηλής τάσης και ένα χαμηλής τάσης. Το καθένα από αυτά τα τυλίγματα είναι και μία φάση του μετασχηματιστή.

Η διευθέτηση των τυλιγμάτων σε κάθε κορμό του μετασχηματιστή γίνεται με τους παρακάτω τρόπους :

1. Στο εσωτερικό του κορμού να υπάρχει το τύλιγμα χαμηλής τάσης, και το εξωτερικό του να περιβάλλεται από το τύλιγμα υψηλής τάσης.
2. Στον κάθε κορμό να υπάρχει τμήμα του τυλίγματος υψηλής τάσης και να ακολουθεί τμήμα του τυλίγματος χαμηλής τάσης διαδοχικά και εναλλάξ

Συνολικά έχουμε έξι ζευγάρια ακρών, τρία ζευγάρια ακρών για τα τυλίγματα υψηλής τάσης και τρία ζευγάρια για τα τυλίγματα χαμηλής

τάσης. Τα τυλίγματα τοποθετούνται κάθετα το ένα σε σχέση με το άλλο και μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τους παρακάτω τρόπους:

1. Σε τρίγωνο
2. Σε αστέρα
3. Σε τεθλασμένο αστέρα

Τέλος, έχουμε το δοχείο λαδιού. Ο προορισμός του είναι :

1. Να τοποθετείται στο εσωτερικό του ο πυρήνας του μετασχηματιστή
2. Να συντελεί στην ψύξη του μετασχηματιστή κατά την λειτουργία του.

Η κατασκευή του δοχείου λαδιού γίνεται από κυματοειδή ή επίπεδη λαμαρίνα με πτέρυγα ψύξης του λαδιού. Επίσης, υπάρχει συνήθως δοχείο διαστολής ώστε να αποτρέπεται η δημιουργία υπερπλίσεων, που έχουν σαν αποτέλεσμα την καταπόνηση των ραφιών και των συγκολλήσεων του δοχείου λαδιού, να ενισχύεται η ασφάλεια λειτουργίας του μετασχηματιστή και να επιτυγχάνεται η άριστη λειτουργία και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του.

### **2.3.5 Είδη Τριφασικών Μετασχηματιστών**

Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: ελεύθερης ροής και εξαναγκασμένης ροής. Στην πρώτη κατηγορία αναφέρονται οι τριφασικοί μετασχηματιστές που απαρτίζονται από τρεις αυτόνομους και ανεξάρτητους μονοφασικούς μετασχηματιστές. Στην δεύτερη περίπτωση το κοινό μαγνητικό κύκλωμα των μετασχηματιστών περιλαμβάνει τρεις πυρήνες, καθένας από τους οποίους φέρει το πρωτεύον, το δευτερεύον και ενδεχομένως το τριτεύον τύλιγμα κάθε

φάσης ,και οι άξονες τους βρίσκονται στις κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου ή στο είναι συνεπίπεδοι.

Στους μεγάλους μετασχηματιστές απαιτείται συνήθως ψύξη, την οποία πετυχαίνουμε συνήθως χρησιμοποιώντας ορυκτέλαιο και σπανιότερα χρησιμοποιώντας άζωτο ή χαλαζία. Στους μικρούς μετασχηματιστές δεν απαιτείται ψύξη.

### **2.3.6 Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων Στους Τριφασικούς Μετασχηματιστές**

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής αποτελείται είτε από τρεις μετασχηματιστές που λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας απ' τον άλλο, είτε από τρεις μετασχηματιστές που συνδέονται σε έναν κοινό πυρήνα. Τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα τυλίγματα των τριών μετασχηματιστών μπορούν να συνδεθούν σε συνδεσμολογία αστέρα (Y) ή σε συνδεσμολογία τρίγωνου ( $\Delta$ ). Έτσι, οι διαφορετικοί συνδυασμοί συνδεσμολογίας είναι :

1. Αστέρας – Αστέρας (Y-Y)
2. Αστέρας – Τρίγωνο (Y- $\Delta$ )
3. Τρίγωνο – Αστέρας ( $\Delta$ -Y)
4. Τρίγωνο – Τρίγωνο ( $\Delta$ - $\Delta$ )

Για την ανάλυση ενός τριφασικού μετασχηματιστή, παρατηρούμε τους μετασχηματιστές που τον αποτελούν ξεχωριστά, οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι απλοί μονοφασικοί μετασχηματιστές. Έτσι, οι υπολογισμοί ποσοτήτων του τριφασικού μετασχηματιστή, όπως η σύνθετη αντίσταση ή η διακύμανση της τάσης γίνονται χρησιμοποιώντας μεθόδους που αναφέρονται στους μονοφασικούς μετασχηματιστές.

Συνδεσμολογία Αστέρα– Αστέρα (Y-Y)



Στην συνδεσμολογία Y-Y η τάση στα άκρα κάθε φάσης του μετασχηματιστή δίνεται από την σχέση:

$$V_{\phi P} = V_{LP}/\sqrt{3}$$

Ο λόγος των φασικών τάσεων στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή δίνεται από το λόγο μετασχηματισμού. Επίσης, η σχέση της πολικής τάσης του δευτερεύοντος με την αντίστοιχη φασική τάση είναι η  $V_{LS} = V_{\phi S} \cdot \sqrt{3}$ . Δηλαδή ο συνολικός λόγος τάσεων σ' αυτόν τον τριφασικό μετασχηματιστή είναι:  $V_{LP}/V_{LS} = (V_{\phi P} \cdot \sqrt{3}) / (V_{\phi S} \cdot \sqrt{3}) = \alpha$

Όμως, η συνδεσμολογία Y-Y παρουσιάζει δύο πολύ σημαντικά προβλήματα:

1. Αν το τριφασικό φορτίο του μετασχηματιστή δεν είναι συμμετρικό, τότε οι φασικές τάσεις του μετασχηματιστή γίνονται σε μεγάλο βαθμό μη συμμετρικές.
2. Η τρίτη αρμονική της τάσης δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην λειτουργία του μετασχηματιστή.

Σε ένα τριφασικό σύστημα η τάση της κάθε φάσης έχει διαφορά φάσης από τις άλλες δύο ίση με  $120^\circ$ . Όμως, οι τρίτες αρμονικές της τάσης στο τριφασικό σύστημα παρουσιάζουν διαφορά φάσης μεταξύ τους επειδή σε τρεις περιόδους της τρίτης αρμονικής αντιστοιχεί μια περίοδος της βασικής αρμονικής. Η τρίτη αρμονική της τάσης είναι πάντα παρούσα στους μετασχηματιστές, λόγω της μη-γραμμικότητας του πυρήνα τους. Εδώ ειδικά, καθώς οι τρίτες αρμονικές προστίθενται μεταξύ τους και με την βασική αρμονική της τάσης, είναι δυνατό να προκληθούν παραμορφώσεις ανάλογες με το πλάτος τους. Μάλιστα, σε μερικές περιπτώσεις το πλάτος της αρμονικής μπορεί να υπερβαίνει το πλάτος της βασικής αρμονικής.

Και τα δυο προβλήματα που αναφέραμε παραπάνω μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας τις παρακάτω τεχνικές:

1. Με γείωση των ουδετέρων του μετασχηματιστή, ιδιαίτερα με τη γείωση του ουδετέρου στο πρωτεύον τύλιγμα. Μ' αυτόν τον τρόπο η τρίτη αρμονική της τάσης αντί να αυξάνει την συνολική τάση του πρωτεύοντος, προκαλεί κάποιο ρεύμα προς την γείωση μέσω του ουδετέρου. Ο ουδέτερος προσφέρει επίσης μια οδό επιστροφής στα μη-συμμετρικά ρεύματα που παράγει το φορτίο.
2. Με την πρόσθεση ενός ακόμα τυλίγματος, του τριτεύοντος, που συνδέεται σε τρίγωνο και τοποθετείται στο ζύγωμα του μετασχηματιστή. Σ' αυτήν την περίπτωση οι τρίτες αρμονικές εμφανίζονται στο τριτεύον ρεύμα. Αυτή η μέθοδος είναι το ίδιο αποτελεσματική με την παραπάνω της γείωσης των ουδετέρων του μετασχηματιστή.

Το τριτεύον τύλιγμα που τοποθετείται σ' αυτήν την περίπτωση γενικά δεν παρέχει τροφοδοσία σε κάποιο φορτίο, όμως πολύ συχνά αναλαμβάνει την τροφοδοσία του φωτισμού ή και όλων των φορτίων του υποσταθμού στο οποίο είναι τοποθετημένο. Το τριτεύον τύλιγμα θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να μη παρουσιάζει προβλήματα με τα αρκετά υψηλά παρασιτικά ρεύματα. Ένας συχνός περιορισμός που εφαρμόζεται στην επιλογή του κατάλληλου τριτεύοντος είναι να διαθέτει ονομαστική ισχύ ίση με το 1/3 της ονομαστικής ισχύς των άλλων δύο τυλιγμάτων.

- Συνδεσμολογία Αστέρα– Τριγώνου (Y-Δ)

Στην συνδεσμολογία Y-Δ η πολική τάση του πρωτεύοντος συνδέεται με την αντίστοιχη φασική τάση μέσω της σχέσης:  $V_{LP} =$

$V_{\phi P} \cdot \sqrt{3}$ . Επίσης η πολική τάση του δευτερεύοντος είναι ίση με την

φασική τάση  $V_{LS} = V_{\phi S}$ . Ακόμη ο λόγος των φασικών τάσεων είναι ίσος με το λόγο μετασχηματισμού:

$$V_{\phi P}/V_{\phi S} = \alpha$$

Έτσι, ο συνολικός λόγος των πολικών τάσεων της μίας πλευράς του τριφασικού μετασχηματιστή προς τις πολικές τάσεις της άλλης πλευράς είναι:

$$V_{LP}/V_{LS} = (V_{\phi P}/V_{\phi S}) \cdot \sqrt{3} = \alpha \cdot \sqrt{3}$$

Αυτή η συνδεσμολογία δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα με τις τρίτες αρμονικές, καθώς αυτές καταναλώνονται με τη μορφή παρασιτικών ρευμάτων στο τρίγωνο του μετασχηματιστή. Ακόμα, η ευστάθεια της συνδεσμολογίας κατά τη λειτουργία με τα συμμετρικά φορτία είναι πολύ μεγαλύτερη, επειδή το τρίγωνο συνεισφέρει στην ανακατανομή της παραπάνω συμμετρίας.

Καθυστερεί σε σχέση με την τάση του πρωτεύοντος, αν η διαδοχή των φάσεων είναι abc. Αν αντίθετα η διαδοχή φάσεων είναι acb, η τάση του δευτερεύοντος θα προηγείται της τάσης του πρωτεύοντος κατά 30°.

- Συνδεσμολογία Τριγώνου – Αστέρα (Δ-Υ)

Στην συνδεσμολογία Δ-Y η πολική τάση του πρωτεύοντος είναι ίση με την φασική τάση  $V_{LP} = V_{\phi P}$ , ενώ οι αντίστοιχες τάσεις στο δευτερεύον συνδέονται μέσω της σχέσης  $V_{LS} = V_{\phi S} \cdot \sqrt{3}$ . Έτσι, ο λόγος των πολικών τάσεων είναι:

$$V_{LP}/V_{LS} = V_{\phi P}/V_{\phi S} \cdot \sqrt{3} = \alpha/\sqrt{3}$$

Η συνδεσμολογία αυτή παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα και την ίδια διαφορά φάσης με την συνδεσμολογία Αστέρα – Τριγώνου. Στον μετασχηματιστή η τάση του δευτερεύοντος θα καθυστερεί σε σχέση με την τάση του πρωτεύοντος κατά  $30^\circ$ .

#### - Συνδεσμολογία Τριγώνου – Τριγώνου

Στην συνδεσμολογία Δ-Δ οι πολικές τάσεις και στα δύο άκρα είναι ίσες με τις φασικές, δηλαδή ισχύουν οι σχέσεις :  $V_{LP} = V_{\phi P}$  και  $V_{LS} = V_{\phi S}$  οπότε ο λόγος των πολικών τάσεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος θα είναι:

$$V_{LP}/V_{\phi P} = V_{\phi P}/V_{\phi S} = \alpha$$

Σ' αυτό το μετασχηματιστή δεν εμφανίζεται μετατόπιση της τάσης του πρωτεύοντος σε σχέση μ' αυτή του δευτερεύοντος, ενώ επίσης δεν εμφανίζονται τα προβλήματα της τρίτης αρμονικής και της ασυμμετρίας των τάσεων.

### 2.3.7 Απώλειες Μετασχηματιστή

Για την λειτουργία ενός μετασχηματιστή δίνουμε ηλεκτρική ενέργεια που όμως δεν μετατρέπεται ολόκληρη σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αυτό συμβαίνει γιατί ένα μέρος της ενέργειας δαπανάται κατά την μετατροπή και αποτελεί τις απώλειες.

Οι απώλειες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Οι μαγνητικές ή σταθερές απώλειες
2. Οι ηλεκτρικές ή μεταβλητές απώλειες

Οι μαγνητικές απώλειες είναι εκείνες που :

1. Εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή.
2. Είναι ανεξάρτητες από την λειτουργία του μετασχηματιστή με φορτίο.
3. Μετρώνται κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή χωρίς φορτίο και είναι η ισχύς που απορροφά.

Οι ηλεκτρικές απώλειες είναι εκείνες που:

1. Εξαρτώνται από την λειτουργία του μετασχηματιστή με φορτίο.
2. Μετρώνται κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή στο πείραμα της βραχυκύκλωσης και είναι η ισχύς που απορροφά.

Οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται ως το άθροισμα των μαγνητικών και των ηλεκτρικών απωλειών .

## **2.4 Σύγχρονες Γεννήτριες – Εναλλακτήρες**

Σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος ή εναλλακτήρες είναι μηχανές που μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ή αλλιώς οι μηχανές που η

συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος απ' αυτές είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής τους.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται κινούμενος από κάποιο εξωτερικό κινητήρα, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του.

Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής.

Οι εναλλακτήρες χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους ή σταθερούς
2. Εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους ή στρεφόμενους

Αυτοί χωρίζονται έπειτα σε δυο υποκατηγορίες :

1. Εναλλακτήρες με ορατούς πόλους
2. Εναλλακτήρες με κυλινδρικό δρομέα ή στροβιλογεννήτριες που ουσιαστικά αποτελούν κατασκευαστική παραλλαγή των εναλλακτών με εσωτερικούς πόλους.

Οι εναλλακτήρες με σταθερούς πόλους χρησιμοποιούνται για μικρή ισχύ και χαμηλές τάσεις και χρησιμοποιούνται μόνο για

διεγέρτριες. Οι εναλλακτικές με στρεφόμενους πόλους χρησιμοποιούνται για μεγάλη ισχύ, αλλά για πολύ μικρές ταχύτητες περιστροφής και χρησιμοποιούνται μόνο για κύριες γεννήτριες.

Οι εναλλακτικές με σταθερούς πόλους παρουσιάζουν το μειονέκτημα της συνεχούς συντήρησης λόγω των μεγάλων φθορών στο σύστημα ψύξης – δακτυλιδιών. Αυτό συμβαίνει διότι μέσα από το σύστημα αυτό διέρχεται όλο το ρεύμα των φορτίων, δημιουργώντας υπερθέρμανση, και η κατασκευή των ψηκτρών είναι κοντή, λεπτή και από σκληρό μίγμα άνθρακα. Άλλα μειονεκτήματα των εναλλακτικών με σταθερούς πόλους είναι η πτώση τάσης στο σύστημα ψύξης – δακτυλιδιών, καθώς και η καταπόνηση των μονώσεων του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή του δρομέα.

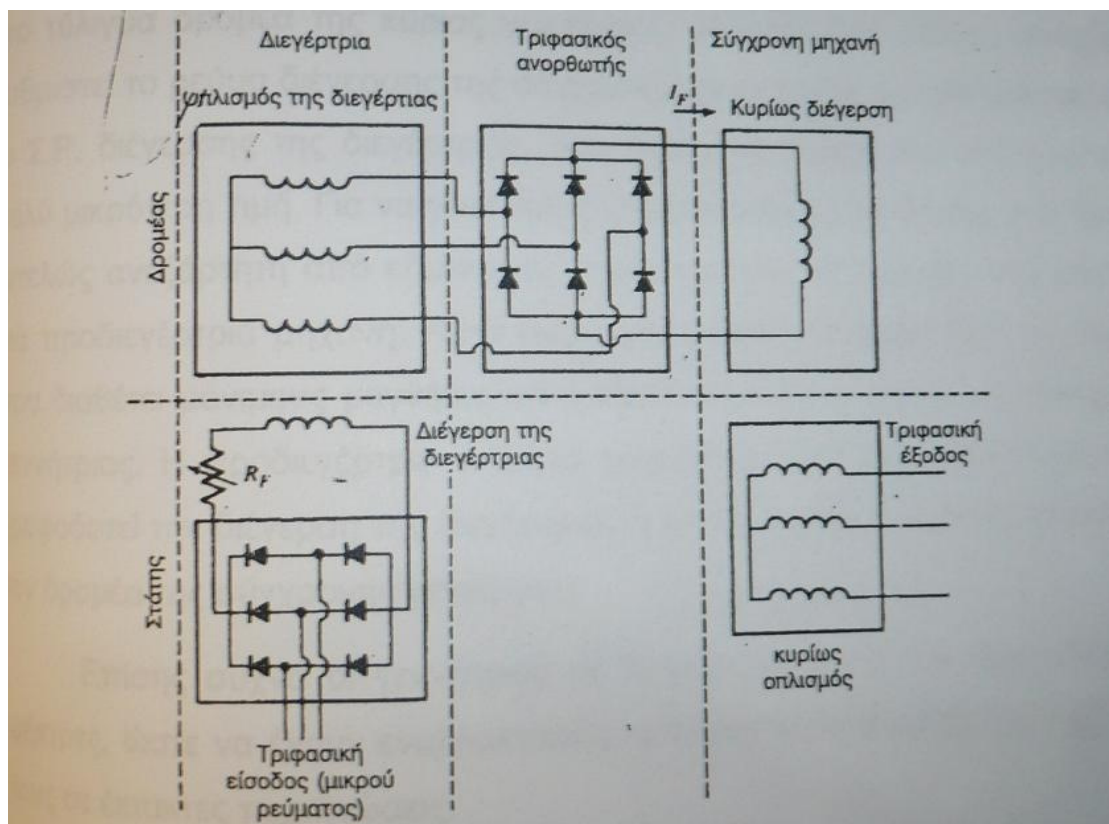
Από την άλλη μεριά οι εναλλακτικές με στρεφόμενους πόλους παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα:

1. Της ευχέρειας χώρου στο επαγωγικό τύμπανο για την τύλιξη του τυλίγματος οπλισμού.
2. Της εύκολης μόνωσης μεταξύ των αγωγών του τυλίγματος οπλισμού.
3. Της εύκολης λήψης της ηλεκτρικής ενέργειας από το ακίνητο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου.

Όμως παρουσιάζουν το μειονέκτημα της καταπόνησης των στρεφόμενων μαγνητικών πόλων από τις μεγάλες φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή του δρομέα, γι' αυτό πρέπει να δουλεύουν σε σχετικά μικρές ταχύτητες περιστροφής.

Οι διεγέρτριες μηχανές είναι μικρές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, των οποίων το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από τον στάτη της κύριας γεννήτριας, ενώ το κύκλωμα οπλισμού τους τοποθετείται γύρω από τον άξονα. Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας

ανορθώνεται από έναν τριφασικό ανορθωτή που βρίσκεται πάνω στον άξονα της μηχανής και το συνεχές ρεύμα της εξόδου του ανορθωτή οδηγείται στο τύλιγμα του δρομέα της κύριας γεννήτριας. Μ' αυτή την μέθοδο μπορεί να ρυθμιστεί το ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλοντας απλά το συνεχές ρεύμα διέγερσης της διεγέρτριας, που βρίσκεται πάνω στον στάτη, που έχει πολύ μικρότερη τιμή. Για να γίνει όμως η διαδικασία τροφοδοσίας του δρομέα εντελώς ανεξάρτητη από εξωτερικές πηγές μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα μια προδιεγέρτρια μηχανή. Αυτή είναι μια μικρή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με δρομέα που διαθέτει μόνιμους μαγνήτες και τοποθετείται στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας. Η προδιεγέρτρια μηχανή παράγει τριφασική τάση που ανορθώνεται και τροφοδοτεί την διέγερση της διεγέρτριας η οποία με την σειρά της τροφοδοτεί τον δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας.



Εικόνα 2: Κυκλωματικό διάγραμμα Διεγέρτριας- Ανορθωτή

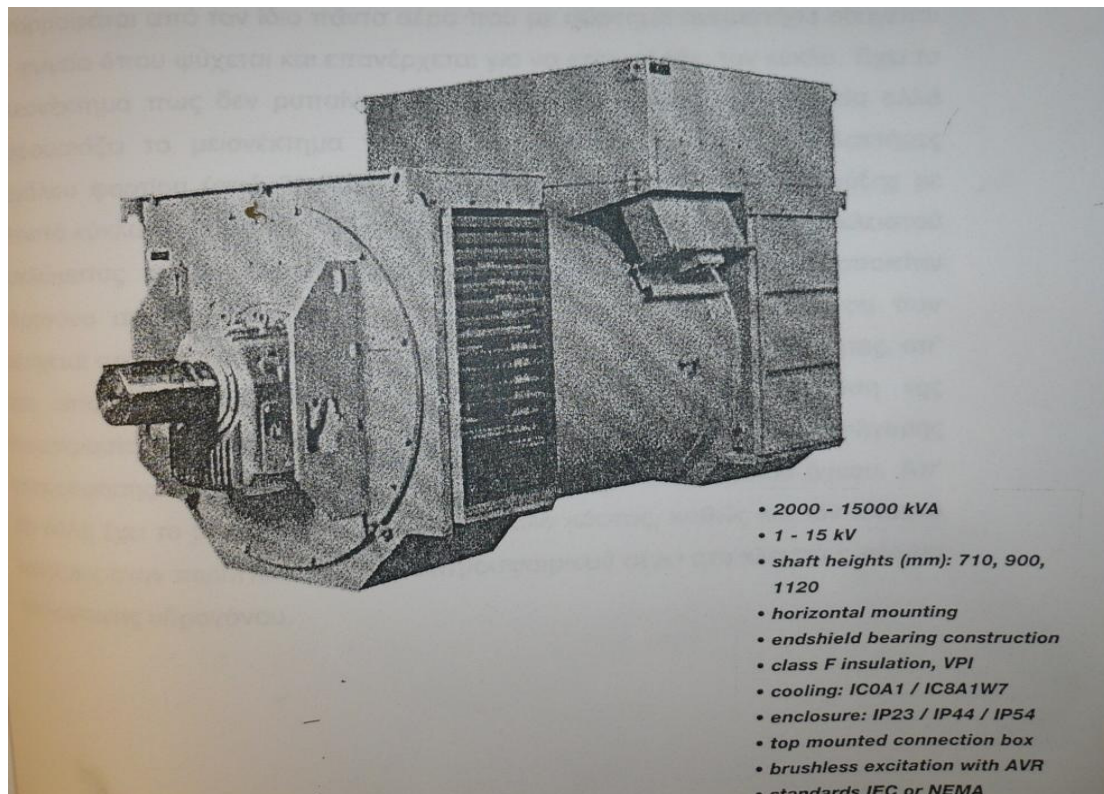


Επίσης συχνά οι γεννήτριες με διεγέρτριες διαθέτουν δακτυλίδια και ψήκτρες, ώστε να έχουν εναλλακτικούς τρόπους τροφοδοσίας της διέγερσης τους σε έκτακτες περιπτώσεις.

#### **2.4.1 Στροβιλοεναλλακτήρες**

Οι στροβιλοεναλλακτήρες χρησιμοποιούνται για πολύ μεγάλη ισχύ (π.χ. 300.000 KW) και μεγάλες ταχύτητες περιστροφής (π.χ. 3.000 rpm). Χαρακτηριστικό τους είναι η σχετικά μικρή διάμετρος του δρομέα αλλά και το μεγάλο μήκος του κατά τον άξονα. Έχουν την ίδια κατασκευή στον στάτη με στρεφόμενους πόλους.

Ο δρομέας διαφέρει από τον δρομέα των εναλλακτών με ορατούς πόλους. Ο δρομέας των στροβιλοεναλλακτών δεν έχει προεξέχοντες μαγνητικούς πόλους, αλλά ένα συμπαγές κυλινδρικό τύμπανο από χάλυβα κοινό με τον άξονα. Στην επιφάνεια του κυλινδρικού τυμπάνου υπάρχουν αυλάκια στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από την διεγέρτρια μέσω των δύο δακτυλιδιών που στερεώνονται στον άξονα του δρομέα. Οι στροβιλοεναλλακτήρες κατασκευάζονται συνήθως με δύο μαγνητικούς πόλους και σπάνια με τέσσερις.



Εικόνα 3: Στροβιλογεννήτρια

#### 2.4.2 Ψύξη των Εναλλακτών.

Ανάλογα με την ισχύ που παράγει ένας εναλλακτήρας, στα ενεργά του τυλίγματα, αυτά που διαρρέονται από ρεύμα, αναπτύσσεται θερμότητα, που πρέπει να περιορίζεται για να εξασφαλίζεται η σωστή και συνεχή λειτουργία του. Ο περιορισμός της θερμότητας που αναπτύσσεται στα ενεργά τυλίγματα γίνεται με κάποιο σύστημα ψύξης.

Τα συστήματα ψύξης που συναντούμε είναι ανάλογα των φορτίων:

1. Στους εναλλακτές μικρού φορτίου μέχρι 5.000 WA οι εναλλακτές διαθέτουν σύστημα ψύξης με ανεμιστήρα. Η κατασκευή του ζυγώματος έχει οπές εξαερισμού για την δημιουργία ρευμάτων αέρα και εύκολη ψύξη. Δημιουργούν το μειονέκτημα της εισόδου σκουπιδιών, σκόνης και υγρασίας στο εσωτερικό των εναλλακτών.
2. Στους εναλλακτές μέσου φορτίου από 5.000 WA μέχρι 30.000 WA οι εναλλακτές διαθέτουν σύστημα ψύξης με

κλειστό κύκλωμα ατμοσφαιρικού αέρα. Με το σύστημα αυτό η θερμότητα που παράγεται στα ενεργά τυλίγματα του εναλλακτήρα απορροφάται από τον ίδιο αέρα που μέσω ενός συστήματος ανεμιστήρα οδηγείται σε ψυγείο και επανέρχεται ώστε να επαναλάβει τον ίδιο κύκλο. Έχει το πλεονέκτημα ότι δεν ρυπαίνεται με σκουπίδια, σκόνη και υγρασία, παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα του μεγάλου κόστους.

3. Στους εναλλακτήρες μεγάλου φορτίου, άνω των 30.000 W, οι οποίοι διαθέτουν σύστημα ψύξης με κλειστό κύκλωμα υδρογόνου. Το κύκλωμα αυτό είναι ουσιαστικά ίδιο με το παραπάνω σύστημα ατμοσφαιρικού αέρα, με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται υδρογόνο αντί για αέρα. Ένα κυβικό μέτρο υδρογόνου που διέρχεται από τον εναλλακτήρα απορροφά περισσότερη θερμότητα σε σχέση με ένα κυβικό μέτρο αέρα, για την ίδια ανύψωση θερμοκρασίας. Συνεπώς υπάρχουν τα πλεονεκτήματα της γρηγορότερης ψύξης και της ψύξης μηχανών μεγάλου όγκου. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα του πολύ μεγάλου κόστους, καθώς και τον κίνδυνο εκρήξεως σε περίπτωση εισόδου ατμοσφαιρικού αέρα στο κλειστό κύκλωμα κυκλοφορίας του υδρογόνου

### **2.4.3 Ταχύτητα Περιστροφής Των Σύγχρονων Γεννητριών**

Οι σύγχρονες γεννήτριες οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας σ' αυτές τις μηχανές είναι ένας ηλεκτροκινητήρας, του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με φορά ίδια

με αυτή του δρομέα. Η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου με την σχέση:

$$F = n_m \cdot \rho / 60$$

Όπου,  $F$  η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη σε Hz,  $n_m$  η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε rpm και  $\rho$  ο αριθμός ζευγών μαγνητικών πόλων της μηχανής.

Επειδή ο δρομέας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας, η παραπάνω εξίσωση δίνει την σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και της ηλεκτρικής συχνότητας της.

#### **2.4.4 Λειτουργία Εναλλάκτηρα Χωρίς Φορτίο ή Εν Κενώ**

Η λειτουργία εναλλακτήρα χωρίς φορτίο είναι η λειτουργία κατά την οποία η ηλεκτρεγερτική δύναμη που δημιουργείται στα άκρα της κάθε φάσης του τυλίγματος εξόδου δεν οδηγείται σε κατανάλωση. Συνεπώς το εξωτερικό κύκλωμα παραμένει ανοικτό και δεν κυκλοφορεί ρεύμα στην κατανάλωση.

Για την λειτουργία χωρίς φορτίο θα πρέπει:

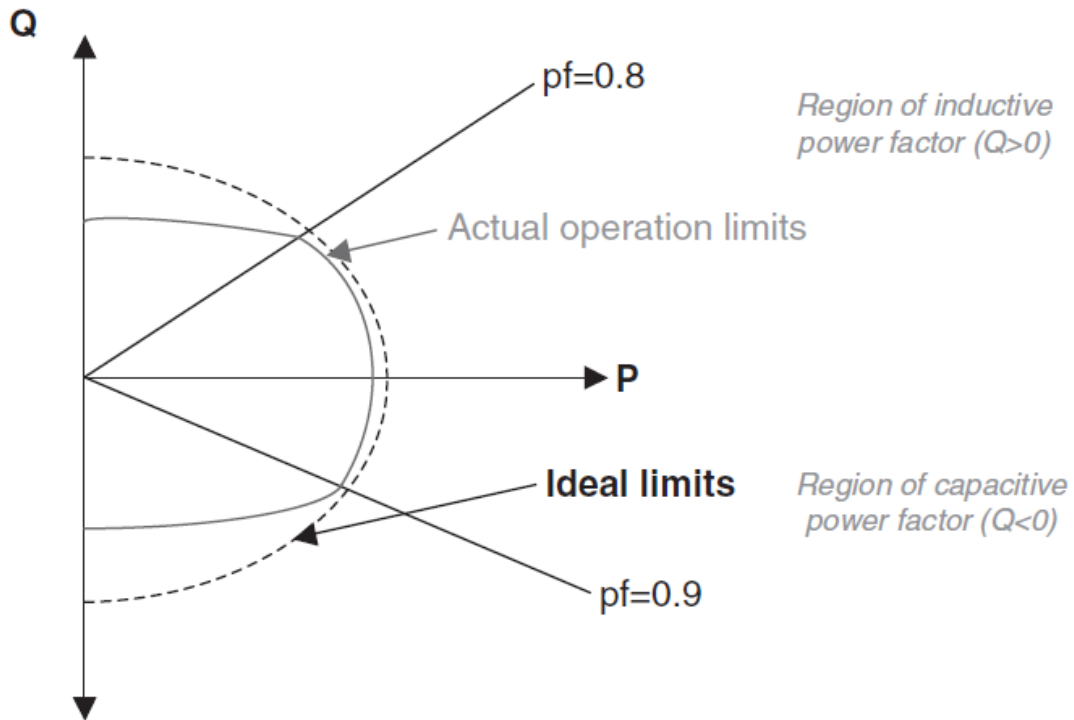
1. Να λειτουργεί η κινητήρια μηχανή με την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής για να στρέφεται:
  - a. Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου στους εναλλακτήρες σταθερών πόλων
  - b. Το μαγνητικό πεδίο στους εναλλακτήρες στρεφόμενων πόλων
2. Να λειτουργεί η διεγέρτρια, για να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα το τύλιγμα του εναλλάκτη.
3. Να είναι στην θέση εκτός ο διακόπτης σύνδεσης των φορτίων.

#### **2.4.5 Χαρακτηριστική Φορτίου – Διακύμανσης**

Χαρακτηριστική φορτίου του εναλλακτήρα είναι η καμπύλη του πως μεταβάλλεται η τάση του όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίσεως, ενώ ο συντελεστής ισχύος του φορτίου και η ένταση διεγέρσεως παραμένουν σταθεροί, και ο εναλλάκτης περιστρέφεται με την κανονική του ταχύτητα. Κατασκευάζεται από την σχέση  $V = E - I \cdot Z$ , δίνοντας τιμές στην ένταση φόρτισης  $I$  για να λάβουμε τις τιμές για την τάση  $V$ . Ξεκινάει από την τιμή  $V = E$  για  $I = 0$  και έχει τρεις μορφές, όσα και τα είδη των φορτίων (χωρητικό, ωμικό, επαγωγικό)

Η καμπύλη (1) για χωρητικό φορτίο έχει αύξουσα μορφή γιατί η ένταση  $I$  προηγείται της τάσης  $V$ , και η μεταξύ τους γωνία είναι θετική ( $\varphi > 0$ ) με αποτέλεσμα η δημιουργούμενη πτώση τάσης  $I \cdot Z$  να προστίθεται στην ΗΕΔ.

Η καμπύλη (2) για ωμικό φορτίο έχει ελαφρώς φθίνουσα μορφή γιατί αν η ένταση  $I$  και η τάση  $\Omega$  βρίσκονται σε φάση, δηλαδή η μεταξύ τους γωνία είναι μηδέν ( $\varphi = 0$ ), υπάρχει μια μικρή πτώση τάσης  $I \cdot Z$  η οποία αφαιρείται από την ΗΕΔ.



Διάγραμμα 1: Τρίγωνο Ισχύος και λειτουργία Γεννήτριας.

Τέλος η καμπύλη (3) για επαγωγικό φορτίο έχει φθίνουσα μορφή γιατί η ένταση  $I$  προηγείται της τάσης  $\Omega$ , δηλαδή η μεταξύ τους γωνία είναι αρνητική ( $\varphi < 0$ ) με αποτέλεσμα η δημιουργούμενη τάση να αφαιρείται από την ΗΕΔ.

Αν  $V_o$  είναι η τάση του εναλλακτήρα χωρίς φορτίο και  $V$  η τάση του με φορτίο, τότε η διακύμανση τάσεως του εναλλακτήρα δίνεται από την σχέση  $\varepsilon\% = [(V_o - V)/V] \cdot 100$ , οπότε στη χωρητική φόρτιση όπου  $V_o < V$  θα είναι αρνητική, ενώ στην ωμική και επαγωγική όπου  $V_o > V$  θα είναι θετική.

#### 2.4.6 Ρύθμιση Της Τάσης Του Εναλλακτήρα

Κατά την διάρκεια λειτουργίας ενός εναλλακτήρα η τάση που παράγεται από αυτόν μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του φορτίου που εξυπηρετεί. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια ανεπιθύμητη κατάσταση, γιατί κατά την λειτουργία του ο εναλλακτήρας πρέπει να τροφοδοτεί με σταθερή τάση το φορτίο του και να μην επηρεάζεται από το είδος του.

Για την σταθεροποίηση της τάσης θα πρέπει κάθε φορά αναλόγως του φορτίου να ρυθμίζουμε την ένταση διεγέρσεως του εναλλακτήρα για να μεταβάλλεται η ΗΕΔ και συνεπώς η παραγόμενη τάση  $V$  σύμφωνα με τον τύπο  $V = E - I \cdot Z$ .

Η ρύθμιση της έντασης διεγέρσεως  $I_{\delta}$  γίνεται είτε χειροκίνητα με ρυθμιστική αντίσταση είτε αυτόματα με αυτόματο ρυθμιστή τάσεως.

Όταν ο εναλλακτήρας τροφοδοτεί επαγωγικό φορτίο με ορισμένο συντελεστή ισχύος, πρέπει, όταν αυξάνεται η ένταση φορτίσεως, να αυξάνουμε και την ένταση διεγέρσεως ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση του εναλλακτήρα. Τότε λέμε ότι ο εναλλακτήρας υπερδιεγείρεται. Αντιθέτως, όταν τροφοδοτεί χωρητικό φορτίο, θα πρέπει να ελαττώνουμε την ένταση διεγέρσεως, δηλαδή να υποδιεγείρουμε τον εναλλακτήρα.

#### **2.4.7 Παράλληλη Λειτουργία Εναλλακτών**

Πολλές φορές στην πράξη, για την τροφοδοσία των φορτίων απαιτείται η από κοινού τροφοδοσία των ίδιων ζυγών από περισσότερους του ενός εναλλακτές. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται παράλληλη λειτουργία εναλλακτών.

Για να πραγματοποιηθεί η παράλληλη λειτουργία των δύο εναλλακτών πρέπει να εκπληρώνονται κάποιες προϋποθέσεις που αποτελούν τις συνθήκες παραλληλισμού. Οι συνθήκες αυτές είναι :

1. Οι εναλλακτές να έχουν την ίδια τάση
2. Να έχουν την ίδια συχνότητα παραγόμενου ρεύματος.
3. Να έχουν την ίδια διαδοχή φάσης
4. Οι τάσεις των αντίστοιχων φάσεων των εναλλακτών να μην έχουν μεταξύ τους φασική απόκλιση.

Ο έλεγχος αυτών των συνθηκών γίνεται με λάμπες που έχουν την δυνατότητα λειτουργίας σε διπλάσια τάση από αυτή που παράγει ο εναλλακτήρας. Όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες αυτές οι λάμπες είναι σβηστές.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του παραλληλισμού είναι:

1. Το μέγεθος του φορτίου που μπορούν να τροφοδοτήσουν περισσότερες από μια γεννήτριες είναι πολύ μεγαλύτερο απ' αυτό που μπορεί να τροφοδοτήσει μια μόνο γεννήτρια.
2. Η αξιοπιστία ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερη καθώς τυχόν βλάβη σε μια από τις γεννήτριες δεν αφήνει το φορτίο χωρίς τροφοδοσία.
3. Όταν πολλές σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα είναι δυνατή η διακοπή λειτουργίας και απομάκρυνση μιας απ' αυτές χωρίς να υπάρχουν επιπτώσεις στο δίκτυο, ώστε σε τακτά χρονικά διαστήματα να υποβάλλεται σε προληπτική συντήρηση.
4. Μια γεννήτρια που λειτουργεί αυτόνομα θα πρέπει να εργάζεται σε συνθήκες πλήρους φόρτισης για να έχει ικανοποιητική απόδοση. Όμως στην περίπτωση του παραλληλισμού περισσότερων γεννητριών είναι δυνατή η λειτουργία μερικών απ' αυτές. Έτσι, οι γεννήτριες που είναι ενεργοποιημένες κάθε φορά δουλεύουν σε πλήρη φόρτιση .



#### 2.4.8 Διαδικασία παραλληλισμού

1<sup>ο</sup> βήμα : Ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας προς παραλληλισμό, ενώ ταυτόχρονα μετρώνται οι πολικές τάσεις στην έξοδο της ώστε να είναι ίσες με τις αντίστοιχες πολικές τάσεις της άλλης γεννήτριας.

2<sup>ο</sup> βήμα: Συγκρίνεται η σειρά διαδοχής των φάσεων των δύο γεννητριών, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Μια από αυτές είναι η σύνδεση ενός επαγωγικού κινητήρα στα άκρα των δύο γεννητριών. Αν ο κινητήρας περιστρέφεται και στις δύο δοκιμές με την ίδια φορά, τότε η σειρά διαδοχής είναι η ίδια. Στην αντίθετη περίπτωση αντιστρέφεται η σύνδεση των δύο από τις τρεις φάσεις της γεννήτριας προς παραλληλισμό και επιτυγχάνεται η σωστή σειρά διαδοχής των φάσεων.

3<sup>ο</sup> βήμα : Ρυθμίζουμε την συχνότητα της γεννήτριας προς παραλληλισμό σε μια τιμή λίγο μεγαλύτερη από την συχνότητα της υπάρχουσας γεννήτριας. Αυτό γίνεται αρχικά με την μέτρηση της συχνότητας με ένα συχνόμετρο και κατόπιν με τον έλεγχο της διαφοράς φάσης που παρουσιάζουν τα δύο συστήματα. Η γεννήτρια προς παραλληλισμό θα πρέπει να διαθέτει λίγο μεγαλύτερη συχνότητα, ώστε να μην εισαχθεί στο σύστημα ως κινητήρας.

Επειδή οι δύο συχνότητες είναι περίπου ίσες, η διαφορά φάσης στα δύο συστήματα μεταβάλλεται πολύ αργά. Έτσι αυτή η διαφορά φάσης μπορεί να παρατηρηθεί με ακρίβεια ώστε τη στιγμή που μηδενίζεται να κλείσει ο διακόπτης και να πραγματοποιηθεί ο παραλληλισμός.

Ένας απλός τρόπος για την πραγματοποίηση του παραλληλισμού την κατάλληλη στιγμή είναι η παρατήρηση του συστήματος με τις λάμπες που αναφέρθηκε παραπάνω. Όταν τα δύο συστήματα βρίσκονται σε φάση οι λάμπες δεν εμφανίζουν στα άκρα τους διαφορά δυναμικού και έτσι είναι σβηστές. Εκείνη την στιγμή μπορεί να γίνει ο παραλληλισμός. Αυτή η μέθοδος είναι ανακριβής.

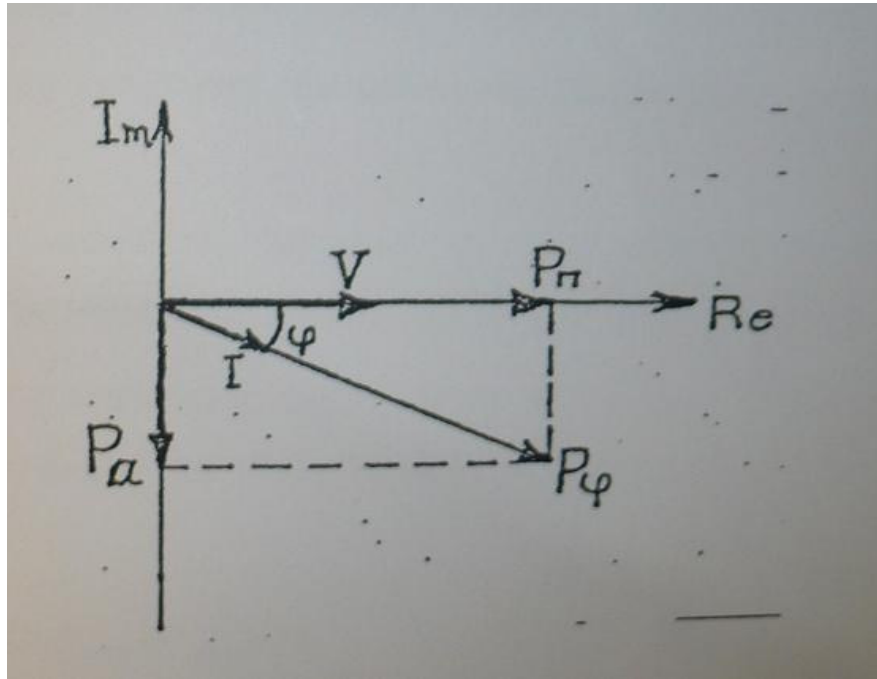
Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της χρονικής στιγμής που τα δύο συστήματα βρίσκονται σε φάση είναι με την χρήση ενός οργάνου που ονομάζεται συγχρονοσκόπιο. Αυτό το όργανο μπορεί να μετρήσει την διαφορά φάσης μεταξύ δύο συστημάτων που πρόκειται να συνδεθούν. Η ένδειξη ενός συγχρονοσκοπίου είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημείων στα οποία συνδέεται και οι ενδείξεις  $0^\circ$  και  $180^\circ$  βρίσκονται στο πάνω μέρος και στην βάση αντίστοιχα.

#### **2.4.9 Είδη Ισχύος Εναλλακτών**

Τα είδη ισχύος των εναλλακτών είναι :

1. Φαινόμενη  $P_\phi$ , που είναι αυτή που παράγεται από τον εναλλάκτη, δηλαδή το διανυσματικό άθροισμα πραγματικής και άεργης ισχύς.
2. Πραγματική  $P_\pi$ , που είναι αυτή που χρειάζονται τα φορτία για την λειτουργία τους.
3. Άεργη  $P_\alpha$ , που είναι αυτή που χάνεται σε επαγωγικά και χωρητικά φορτία. Δεν την εκμεταλλευόμαστε και την θεωρούμε υποτιθέμενη ισχύ.

Η ισχύς σε άξονες φανταστικών  $Im$  και πραγματικών  $Re$  είναι:



Διάγραμμα 2: Τρίγωνο Ισχύος Εναλλακτήρα

Το τρίγωνο της ισχύος είναι ορθογώνιο, συνεπώς ισχύει το πυθαγόρειο θεώρημα :  $P_{\varphi}^2 = P_{\pi}^2 + P_{\alpha}^2$

Για τους μονοφασικούς και τριφασικούς εναλλακτήρες η ισχύς δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

1. Φαινόμενη ισχύς: α) Μονοφασικός,  $P_{\varphi} = V \cdot I$  σε VA  
β) Τριφασικός,  $P_{\varphi} = 3 \cdot V \cdot I$  σε VA
2. Πραγματική ισχύς: α) Μονοφασικός,  $P_{\pi} = V \cdot I \cdot \cos\varphi$  σε W  
β) Τριφασικός,  $P_{\pi} = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi$  σε W
3. Άεργος ισχύς: α) Μονοφασικός,  $P_{\alpha} = V \cdot I \cdot \sin\varphi$  σε VAr  
β) Τριφασικός,  $P_{\alpha} = 3 \cdot V \cdot I \cdot \sin\varphi$  σε VAr.

Όπου  $V, I$  φασικά μεγέθη και  $\cos\varphi$  συντελεστής ισχύος.

### 2.4.10 Απώλειες Εναλλακτήρα

Για την λειτουργία ενός εναλλακτήρα δίνουμε κινητική ενέργεια που όμως δεν μετατρέπεται όλη σε ηλεκτρική. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα μέρος χάνεται κατά την μετατροπή και αποτελεί τις απώλειες.

Οι απώλειες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Σταθερές απώλειες
2. Μεταβλητές απώλειες

Οι σταθερές απώλειες είναι εκείνες που :

1. Εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του εναλλακτήρα.
2. Είναι ανεξάρτητες από την λειτουργία του εναλλακτήρα με φορτίο.

Διακρίνονται σε μηχανικές, μαγνητικές και ηλεκτρικές.

Συνεπώς οι σταθερές απώλειες θα είναι :

$$N_1 = N_{μηχ} + N_{μαγ} + N_{\delta}$$

Οι μεταβλητές απώλειες είναι εκείνες που :

1. Εξαρτώνται από την λειτουργία του εναλλακτήρα με φορτίο
2. Εξαρτώνται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του επαγωγικού τυμπάνου που μπορεί να είναι σε :

α) Αστέρα,  $P_2 = 3 \cdot R \cdot I^2$

β) Τρίγωνο,  $P_2 = R \cdot I^2$

όπου  $R$ , ωμική αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου και  $I$  η ένταση φορτίσεως.

Ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  του εναλλάκτη είναι ο λόγος της πραγματικής ισχύος, την οποία αποδίδει, προς την ισχύ την οποία παίρνει από την κινητήρια μηχανή. Δίνεται από την σχέση:

$\eta = P/P_{\epsilon\iota\varsigma} = P_{\phi}/(P_{\pi} + P_{\alpha})$ , και είναι ένας αριθμός καθαρά μικρότερος της μονάδας.

ΜΕΡΟΣ 3<sup>ο</sup>  
ΓΕΝΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ  
ΚΑΛΩΔΙΩΝ

### 3.1 Περιγραφή των ηλεκτρολογικών παροχών

Στο παρακάτω σχέδιο παρατηρούμε ότι για την παραγωγή τάσης στο κύκλωμα χρησιμοποιούνται τρεις ανεξάρτητες ηλεκτρογεννήτριες (DIESEL GENERATOR) ισχύος 2100 KVA η καθεμία και δύο εξαρτημένες από άξονες των ελίκων (SHAFT GENERATOR) ισχύος 2400 KVA η καθεμία.

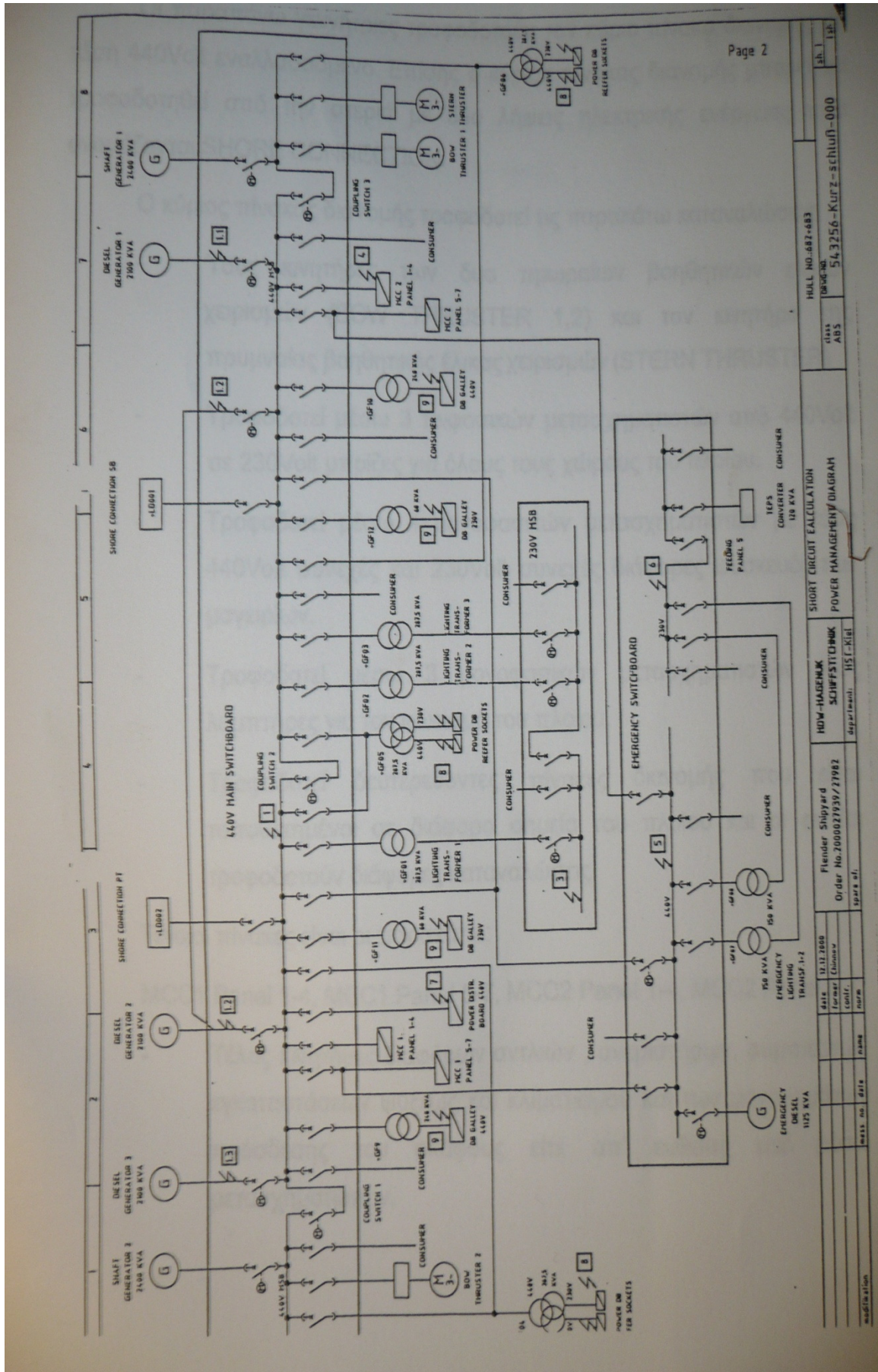
Οι παραπάνω γεννήτριες τροφοδοτούν τον κύριο πίνακα διανομής με τάση 440 V εναλλασσόμενο . Επίσης υπάρχει η δυνατότητα τροφοδότησης του κύριου πίνακα διανομής από την στεριά με δύο λήψεις ηλεκτρικής ενέργειας (SHORE CONNECTION).

Ο κύριος πίνακας διανομής τροφοδοτεί τους παρακάτω καταναλωτές:

1. Τους κινητήρες των δυο προραίων βοηθητικών ελίκων χειρισμών (BOW THRUSTER 1,2) και τον κινητήρα της πρυμναίας βοηθητικής έλικας χειρισμών (STERN THRUSTER).
2. Τρεις τριφασικούς μετασχηματιστές, που μετατρέπουν την τάση 440 V σε 230 V για τις πρίζες σε όλο το πλοίο.
3. Τέσσερις μονοφασικούς μετασχηματιστές, που μετατρέπουν την τάση 440 V εναλλασσόμενο σε 440 V και 230 V συνεχές για διάφορες συσκευές στα μαγειρεία.

4. Τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές για τις λάμπες του πλοίου.
5. Δευτερεύοντες πίνακες διανομής, που με την σειρά τους τροφοδοτούν άλλους καταναλωτές. Αυτοί είναι οι MCC1 PANEL 1-4, MCC1 PANEL 5-7, MCC2 PANEL 1-4, MCC2 PANEL 5-7 .
6. Τέλος, τροφοδοτεί κινητήρες διάφορων αντλιών, ανεμιστήρων, συμπιεστών εγκαταστάσεων ψύξης και κλιματισμού και τα μηχανήματα πρόσδεσης του πλοίου είτε απ' ευθείας είτε μέσω μετασχηματιστών.

Επίσης στο σχέδιο υπάρχει και μια γεννήτρια ανάγκης (EMERGENCY GENERATOR) , οποία τροφοδοτεί τον πίνακα διανομής ανάγκης (EMERGENCY SWITCHBOARD), ο οποίος τροφοδοτείται και μέσω του κύριου πίνακα διανομής όταν δεν δουλεύει η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης. Ο πίνακας ανάγκης τροφοδοτεί διατάξεις και μηχανισμούς ασφαλείας στο πλοίο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης , όπως είναι ο φωτισμός ασφαλείας, οι μηχανισμοί καθέλκυσης σωσίβιων λέμβων και σχεδίων καθώς και τα απαραίτητα φώτα και όργανα ναυσιπλοΐας.



class	ABS	HULL NO.	543256-Kurz-schluß-000
sh. 1			
SHORT CIRCUIT CALCULATION POWER MANAGEMENT DIAGRAM			
Order No.	200002193/21982	Flender Shipyard	HOV-HADENKOW SCHIFFSTÜCKWERK
date	12.12.2000	Project Engineer	Department: HSE-Kiel
author			
check			
name			
date			
no. / date			
modification			

### 3.2 Υπολογισμός διατομής καλωδίων

Για τον υπολογισμό κάποιων ενδεικτικών διατομών καλωδίων προχωρούμε σε κάποιες παραδοχές. Υπολογίζουμε τέσσερα τριφασικά και ένα μονοφασικό καλώδιο, σε διάφορα μήκη και παρεχόμενες ισχύς. Με βάση τους τύπους της παραγράφου 1.2, υπολογίζουμε την ισοδύναμη αντίσταση ανά μονάδα μήκους του κάθε καλωδίου, θεωρώντας συντελεστή ισχύος αρκετά χαμηλό ( $\cos\phi=0,707$ ) για να λάβουμε υπόψη το χειρότερο σενάριο φόρτισης. Αποδεχόμενοι πτώση τάσης μέχρι 6%, και επιλέγοντας καλώδια θωρακισμένα για προστασία από μηχανική καταπόνηση, κατασκευασμένα από Δικτυωμένο Πολυαιθυλένιο που είναι ανθεκτικό στη διάβρωση, προκύπτει η διατομή που αντιστοιχεί στο κόκκινο χρώμα για κάθε καλώδιο. Η μόνη διόρθωση που χρειάστηκε να γίνει είναι για το πρώτο καλώδιο αφού με την επιλογή 3x400+1x240+1x240PE έχουμε πτώση τάσης 5,72% μεν, αλλά το καλώδιο αυτό δεν 'σηκώνει' τα 742 A και έτσι καταφεύγουμε στη λύση του 3x500+1x240+1x240PE, που καλύπτει και το θερμικό ρεύμα και τις προδιαγραφές για την πτώση τάσης.



3ΦΑΣΙΚΟ Η ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ		3-ph	3-ph	3-ph	3-ph	3-ph	3-ph	1-ph
ΜΙΓΑΔΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΕ VA		800000	400000	400000	400000	300000	100000	
ΜΗΚΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ		100	150	50	50	50	50	
ΡΕΥΜΑ ΣΕ AMPERE		742.179	371.09	371.09	278.317	307.391		
	cosφ	0.707						
	tanφ	1.000302046						
ΔΙΑΤΟΜΗ	R	ψ						
95	95	0.000202	0.000095	0.000297	15.05	11.29	3.76	<b>2.82</b>
120	120	0.000160	0.000090	0.000250	12.66	9.50	3.17	2.37
150	150	0.000128	0.000085	0.000213	10.79	8.09	<b>2.70</b>	2.02
185	185	0.000104	0.000080	0.000184	9.31	6.98	2.33	1.75
240	240	0.000080	0.000075	0.000155	7.85	<b>5.89</b>	1.96	1.47
300	300	0.000064	0.000070	0.000134	6.79	5.09	1.70	1.27
400	400	0.000048	0.000065	0.000113	5.72	4.29	1.43	1.07
500	500	0.000038	0.000060	0.000098	<b>4.98</b>	3.74	1.25	0.93
								1.32

### 3.3 Συμπεράσματα

Όπως προαναφέραμε, η πλήρης ηλεκτρολογική εγκατάσταση σε ένα πλοίο αποτελείται από τον εξοπλισμό παραγωγής ισχύος, ένα σύστημα διανομής και από πολλούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια. Η εγκατάσταση αυτή θα πρέπει να γίνεται με βάση τις προδιαγραφές των διεθνών κανονισμών και με βάση τις διεθνείς συμβάσεις σχετικά με τη ρύπανση του περιβάλλοντος από τις μηχανές του πλοίου.

Το ηλεκτρικό σύστημα των πλοίων αποτελείται από συγκεντρωμένα δίκτυα με διακεκριμένα συστήματα παραγωγής και καταναλωτών συγκεντρωμένα σε πολύ μικρό χώρο ανά μονάδα ισχύος. Στη πλειοψηφία των σύγχρονων εφαρμογών με ηλεκτρική πρόωση, η εγκατεστημένη ισχύς φτάνει τα 40-80 MW σε έκταση μερικών τετραγωνικών μέτρων.

Επίσης, το ηλεκτρικό σύστημα θα πρέπει να είναι αυτόνομο, με γεννήτριες που λειτουργούν σε υψηλές τάσεις των 3.3 kV, 6.6 kV ακόμη και 11 kV. Οι τάσεις είναι οικονομικά αναγκαίες σε συστήματα υψηλής ισχύος για τη μείωση της έντασης του ρεύματος, και επομένως τη μείωση της διατομής των αγωγών και του μεγέθους του απαιτούμενου εξοπλισμού.

Όσον αφορά τις γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα πλοία, η αξονική γεννήτρια είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή απ' ευθείας συνδεδεμένη με τον ελικοφόρο άξονα του πλοίου και χρησιμοποιείται σαν μια επιπρόσθετη πηγή ενέργειας όταν το πλοίο κινείται.

Από την άλλη, η χρήση της αξονικής γεννήτριας προκαλεί πρόβλημα στη διατήρηση σταθερής τάσης και συχνότητας, το οποίο επιλύεται με τη χρήση στατών μετατροπέων.

Είναι γεγονός ότι η ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια στην πλειοψηφία των εφαρμογών στα πλοία λόγω της εξέλιξης που παρατηρείται στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, καθώς και στην εξέλιξη των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος.

Από όλα τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ηλεκτρολογική μελέτη και ο υπολογισμός της ηλεκτρικής εγκατάστασης του πλοίου έχει μεγάλη σημασία κατά την διάρκεια κατασκευής του πλοίου.

Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου θα πρέπει να είναι ικανό να αντιμετωπίσει οποιοδήποτε σφάλμα προκύψει στον ηλεκτρικό εξοπλισμό του, πρέπει να έχει εφεδρεία, να έχει μεγάλη αξιοπιστία και για την ασφάλεια του πλοίου αλλά και για το πλήρωμα και τους επιβάτες του και να λειτουργεί σωστά κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, κακοκαιρία, καταπονήσεις κλπ.

Επομένως, ο υπολογισμός της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του πλοίου θα πρέπει να είναι αρκετά ακριβής, έτσι ώστε να αποφευχθούν λάθη στον ηλεκτρικό εξοπλισμό του πλοίου και να διατηρείται χαμηλό το κόστος του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου, ακολουθώντας πάντα τους κανονισμούς για τη σωστή λειτουργία του πλοίου και τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

ΜΕΡΟΣ 4<sup>ο</sup>  
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ DC-AC

STEPHEN J. CHARMAN

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ  
ΡΕΥΜΑΤΟΣ

ΤΟΥΛΟΓΛΟΥ - ΣΤΕΡΓΙΟΥ

3. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ

I. Β. ΚΑΡΑΤΡΑΣΟΓΛΟΥ

4. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΓΕΡΑΣΗ Κ.

5. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ ΜΤ ΚΑΙ  
ΧΤ.

ΝΤΟΚΟΠΟΥΛΟΣ ΠΕΤΡΟΣ