

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ**  
**Σ.Τ.Ε.**  
**Τμήμα : ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ  
ΑΣΚΗΣΕΙΣ**

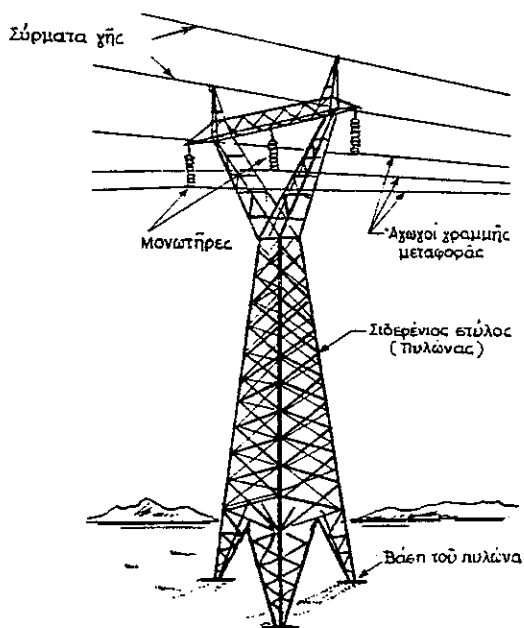
στο μάθημα

**«ΜΕΤΑΦΟΡΑ & ΔΙΑΝΟΜΗ Η. Ε.»**

για τους σπουδαστές του Ζ' εξαμήνου

**ΜΕΡΟΣ Α'**

από τον  
**ΛΟΗ ΗΛΙΑ**  
Δπλ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό  
Επίκουρο Καθηγητή Α.Τ.Ε.Ι.



**ΠΑΤΡΑ 2004**



α.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι εργαστηριακές ασκήσεις που περιλαμβάνονται σ' αυτό το εγχειρίδιο, καλύπτουν το εργαστηριακό μέρος του μαθήματος « ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ Η. Ε. », που διδασκεται στο Ζ' εξάμηνο του Τμήματος Ηλεκτρολογίας της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας.

Η έκδοση αυτή περιλαμβάνει την πείρα που αποκτήθηκε κατά τα προηγούμενα σπουδαστικά έτη, καθώς και τις υποδείξεις των σπουδαστών.

Με τη χρησιμοποίηση σε πειράματα εξομοιωτών ( μοντέλων ) 3-φ εναλλακτών, μ/σ, γραμμών μεταφοράς, γραμμών διανομής, ωμικών-επαγωγικών-χωρητικών φορτίων, κινητήρων κ.λ.π., ο σπουδαστής μπορεί να αφομοιώσει καλύτερα τη λειτουργική συμπεριφορά των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι χρησιμοποιούμενες μηχανές και συσκευές ( μοντέλα ), παρά το μικρό τους μέγεθος σε σύγκριση με τα πραγματικά τους μεγέθη, είναι σχεδιασμένες να συμπεριφέρονται ΑΚΡΙΒΩΣ με τον ίδιο τρόπο, που συμπεριφέρονται οι πραγματικές μηχανές σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.

Σεπτέμβριος 2004

ΗΛΙΑΣ ΛΟΗΣ  
Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός  
Επίκουρος Καθηγητής Α.Τ.Ε.Ι.

β.

Ασκήσεις που περιέχονται στο εγχειρίδιο.

1. Πραγματική και άεργη ισχύς.
2. Ροή ισχύος και εκατοστιαία μεταβολή της τάσης (voltage regulation) σε μια απλή γραμμή μεταφοράς.
3. Ρύθμιση τάσης στο τέλος μιας γραμμής μεταφοράς με χρήση πυκνωτών. Φασική γωνία και φασική πτώση τάσης σε μια απλή γραμμή μεταφοράς.
4. Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή της πραγματικής και της άεργης ισχύος.
5. Μελέτη της καμπύλης  $P_{ολ} = f(\theta)$ , μετασχηματιστές, παράλληλες γραμμές μεταφοράς. Βελτίωση δυνατότητας μεταφοράς ισχύος.
6. Φαινόμενο Ferranti. Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους και ο σύγχρονος πυκνωτής.

Σημείωση: Η άσκηση 4 διεξάγεται σε δύο περιόδους.

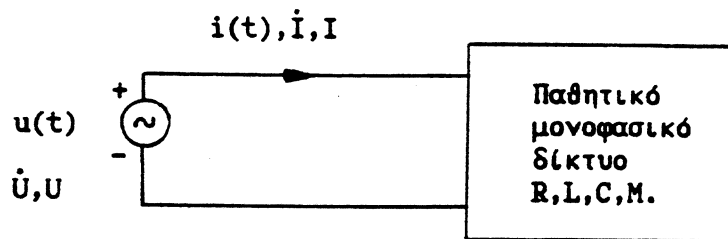
## ΑΣΚΗΣΗ 1η

Πραγματική και άεργη ισχύς.

Αντικείμενο: α) Ερμηνεία της σημασίας της θετικής ή αρνητικής πραγματικής και άεργης ισχύος.

β) Παρατήρηση της ροής της πραγματικής και άεργης ισχύος στα τριφασικά δίκτυα.

Θεωρία: Στα μονοφασικά και τριφασικά δίκτυα το ενδιαφέρον μας συγκεντρώνεται κύρια στην ισχύ. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται ένα μονοφασικό δίκτυο. Η τάση και το ρεύμα της πηγής είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου. Αν συμβολίσουμε με



Σχήμα 1.1

$\dot{U}$  και  $\dot{I}$  τους παραστατικούς μιγάδες των ημιτονοειδών συναρτήσεων  $u(t)$  και  $i(t)$  αντίστοιχα, τότε  $|\dot{U}|=U$  και  $|\dot{I}|=I$  είναι τα μέτρα των μιγάδων, δηλαδή οι ενεργές τιμές τους.

Η στιγμιαία ισχύς για το δίκτυο του σχήματος 1.1 είναι:

$$p(t)=u(t)i(t) \quad [W]$$

Η ισχύς  $p(t)$  μπορεί να πάρει θετικές ή αρνητικές τιμές. Αν η  $p(t)$  είναι θετική έχουμε μεταφορά ισχύος από την πηγή προς το δίκτυο, ενώ αν η  $p(t)$  είναι αρνητική έχουμε μεταφορά ισχύος από το δίκτυο προς την πηγή. Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο είναι ενεργητικό.

Ας εξετάσουμε τώρα ορισμένες ιδανικές περιπτώσεις. Όταν το δίκτυο περιέχει καθαρή ωμική αντίσταση  $R$ , τότε η πραγματική ισχύς  $P=UI$  είναι θετική, ενώ η άεργη  $Q$  είναι μηδέν. Όταν το δίκτυο αποτελείται από καθαρό επαγωγικό στοιχείο, τότε  $P=0$  και  $Q>0$ . Τέλος, όταν το δίκτυο αποτελείται από καθαρό χωρητικό στοιχείο, τότε  $P=0$  και  $Q<0$ .

Στη γενική περίπτωση που το δίκτυο περιέχει στοιχεία R,L,C η πραγματική (ή η μέση ή η ενεργός ή η ενδεικνύμενη ή η βαττική) ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P=UI\cos\varphi \quad [W]$$

$$\text{όπου } -90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$$

Η πιο πάνω ισχύς είναι πάντα θετική διότι:

- i) αν  $\varphi > 0^\circ$  τότε  $\sin(+\varphi) = \sin\varphi$  και το δίκτυο έχει R,L συμπεριφορά ( $X_L > X_C$ ).
- ii) αν  $\varphi < 0^\circ$  τότε  $\sin(-\varphi) = -\sin\varphi$  και το δίκτυο έχει R,C συμπεριφορά ( $X_L < X_C$ ).
- iii) αν  $\varphi = 0^\circ$  τότε  $\sin 0^\circ = 1$  και το δίκτυο έχει καθαρά ωμική συμπεριφορά, δηλαδή  $X_L = X_C$ .

Η άεργη (ή η φανταστική ή η αβαττική) ισχύς στη γενική περίπτωση που εξετάζουμε δίνεται από τη σχέση:

$$Q=UI\eta\mu\varphi \quad [VAR]$$

- i) αν  $\varphi > 0^\circ$  τότε  $\eta\mu(+\varphi) = \eta\mu\varphi$ ,  $Q > 0$  και το δίκτυο έχει R,L συμπεριφορά.
- ii) αν  $\varphi < 0^\circ$  τότε  $\eta\mu(-\varphi) = -\eta\mu\varphi$ ,  $Q < 0$  και το δίκτυο έχει R,C συμπεριφορά.
- iii) αν  $\varphi = 0^\circ$  τότε  $\eta\mu 0^\circ = 0$ ,  $Q = 0$  και το δίκτυο έχει καθαρά ωμική συμπεριφορά.

Τέλος η φαινόμενη ισχύς στη γενική περίπτωση που εξετάζουμε δίνεται από τη σχέση:

$$S=UI \quad [VA]$$

Η μιγαδική έκφραση τώρα της ισχύος για το μονοφασικό δίκτυο του σχήματος 1.1, αλλά και του σχήματος 1.2 είναι:

$$\begin{aligned} \text{Μιγαδική ισχύς} &= \dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = P + jQ = UI\cos\varphi + jUI\eta\mu\varphi = UI(\cos\varphi + j\eta\mu\varphi) = UIe^{j\varphi} \\ &= UI/\varphi = S/\varphi = \sqrt{P^2 + Q^2} / \text{τοξεφ}(Q/P) \end{aligned}$$

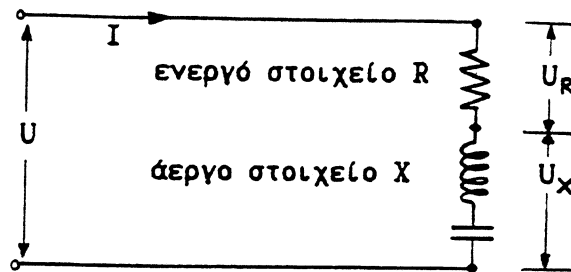
Επίσης ισχύουν οι σχέσεις:

$$P=UI\cos\varphi=I^2R=U_R^2/R=\text{Re}[\dot{S}]$$

$$Q=UI\eta\mu\varphi=I^2X=U_X^2/X=\text{Im}[\dot{S}]$$

$$S=UI=I^2Z=U^2/Z=|\dot{S}|$$

$$\Sigma. I. = \cos\varphi = P/S = R/Z$$



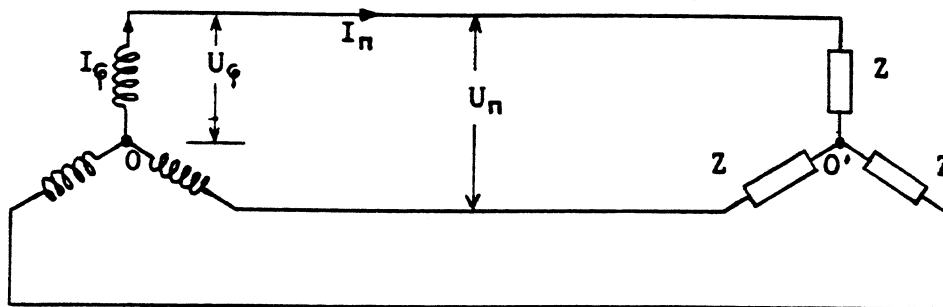
Σχήμα 1.2

όπου  $\dot{Z}=R+jX$  και  $Z=|\dot{Z}|=\sqrt{R^2+X^2}$

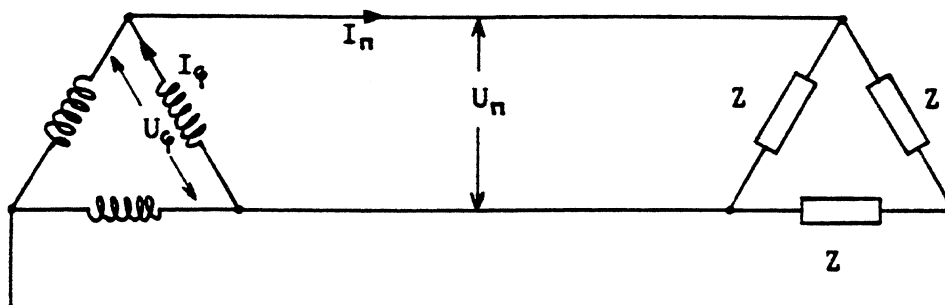
Στο σχήμα 1.3(α) φαίνεται ένα τριφασικό δίκτυο όπου τα τυλίγματα της γεννήτριας και οι φάσεις του φορτίου έχουν σύνδεση σε αστέρα.

Στο σχήμα 1.3(β) φαίνεται ένα τριφασικό δίκτυο όπου τα τυλίγματα της γεννήτριας και οι φάσεις του φορτίου έχουν σύνδεση σε τρίγωνο.

Και στις δύο περιπτώσεις το τριφασικό φορτίο είναι συμμετρικό.



(α)



(β)

Σχήμα 1.3

Όπως είναι γνωστό η ισχύς μιας συμμετρικής τριφασικής κατανάλωσης υπολογί-

ζεται από τις σχέσεις:

$$\text{Πραγματική ισχύς: } P = \sqrt{3} U_n I_n \cos\varphi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi \quad [W]$$

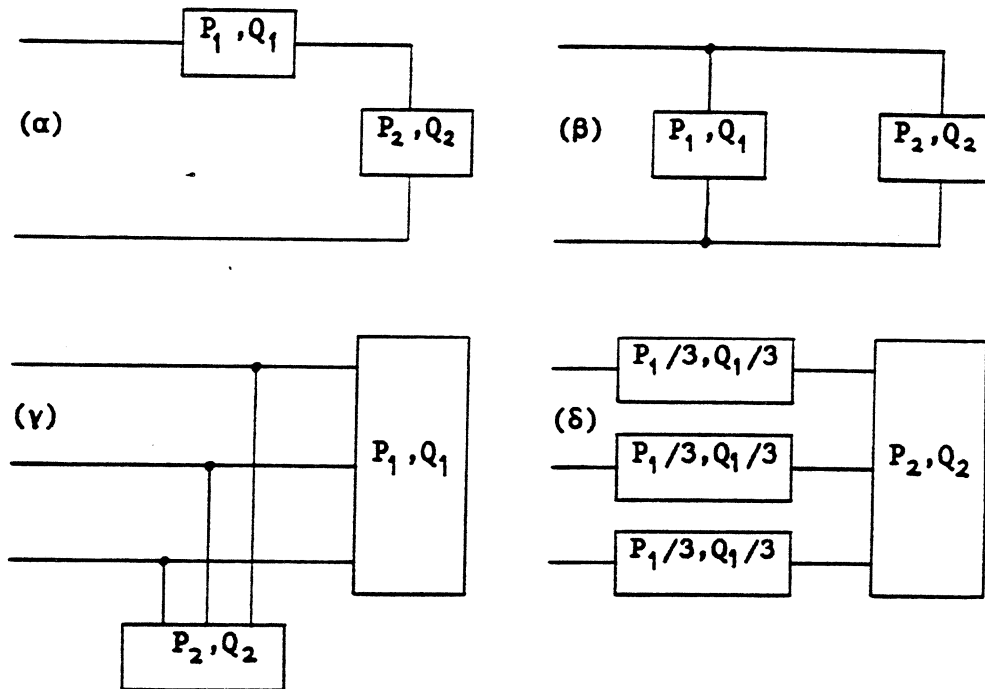
$$\text{Άεργη ισχύς: } Q = \sqrt{3} U_n I_n \eta\mu\varphi = 3U_\phi I_\phi \eta\mu\varphi \quad [VAr]$$

$$\text{Φαινόμενη ισχύς: } S = \sqrt{3} U_n I_n = 3U_\phi I_\phi \quad [VA]$$

όπου: με  $\pi$  και  $\varphi$  συμβολίζονται τα πολικά και φασικά μεγέθη αντίστοιχα, ενώ  $\varphi$  είναι η γωνία μεταξύ φασικής τάσης και φασικού ρεύματος.

Τα πιο πάνω ισχύουν για συμμετρική φόρτιση, για ζεύξη γεννήτριας και φορτίου σε αστέρα ή τρίγωνο και με ακολουθία των φάσεων της γεννήτριας θετική ή αρνητική.

Σε όλες τις περιπτώσεις του σχήματος 1.4, όπου φαίνονται δύο μονοφασικά (α,β) και δύο τριφασικά δίκτυα (γ,δ) οι ισχύεις προστίθενται, δηλαδή:



Σχήμα 1.4

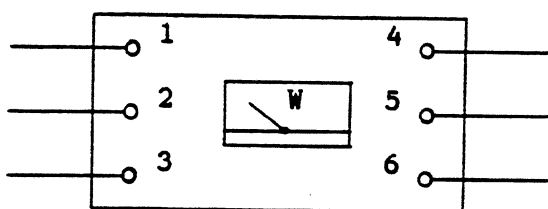
$$P_{o\lambda} = P_1 + P_2 \quad Q_{o\lambda} = Q_1 + Q_2 \quad \text{και} \quad S_{o\lambda} = \sqrt{P_{o\lambda}^2 + Q_{o\lambda}^2}$$

Στα τριφασικά κυκλώματα Σ.Ρ. με τρεις αγωγούς, χρειάζονται δύο βαττόμετρα για να μετρήσουμε την πραγματική ισχύ, ενώ σε τριφασικά κυκλώματα με τέσσερα



αγωγούς χρειάζονται τρία.

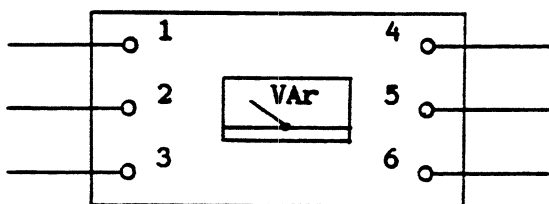
Τα βαττόμετρα αυτά μπορούν να συνδυαστούν σ'ένα μόνο βαττόμετρο ειδικής κατασκευής, που απλοποιεί το πρόβλημα της πρόσθεσης των δύο ή των τριών ενδείξεων των οργάνων, ώστε να βρούμε τη συνολική τριφασική ισχύ. Ένα τριφασικό βαττόμετρο έχει τρεις ακροδέκτες εισόδου (1,2,3) και τρεις ακροδέκτες εξόδου (4,5,6), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5. Αν το βαττόμετρο συνδεθεί σε μια τριφασική γραμμή



Σχήμα 1.5

όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5, θα δείξει τη συνολική πραγματική ισχύ που ρέει στη γραμμή. Αν η διεύθυνση ροής της ισχύος είναι από τους ακροδέκτες εισόδου προς τους ακροδέκτες εξόδου (από τα αρι-

στερά προς τα δεξιά) η ένδειξη θα είναι μέσα στην κλίμακα και θετική. Αν όμως η ισχύς που ρέει είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά, δηλαδή από τους ακροδέκτες εξόδου προς τους ακροδέκτες εισόδου, ο δείκτης του οργάνου θα αποκλείει προς την αρνητική διεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να γίνει καμιά ανάγνωση, εκτός αν υπάρχει διακόπτης αναστροφής στο όργανο που επιτρέπει την ανάγνωση αυτής της αρνητικής πραγματικής ισχύος. Άρα η πραγματική ισχύς είναι θετική ή αρνητική σύμφωνα με τη διεύθυνση ροής της. Η διεύθυνση της ροής μπορεί εύκολα να βρεθεί όταν έχουν ορισθεί οι ακροδέκτες "εισόδου".

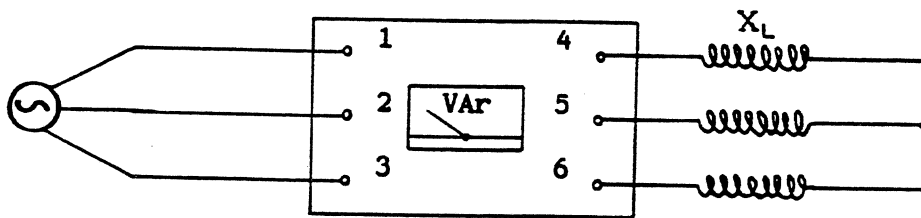


Σχήμα 1.6

Η άεργη ισχύς, όπως ακριβώς και η πραγματική ισχύς, μπορεί να μετρηθεί με τους μετρητές άεργης ισχύος. Στα τριφασικά κυκλώματα οι δύο ή οι τρεις μετρητές άεργης ισχύος που θα χρειαζόντουσαν κανο-

νικά, μπορούν να συνδυασθούν σε ένα μόνο όργανο, που να δίνει μια ένδειξη της συνολικής άεργης ισχύος που ρέει στο κύκλωμα. Ένας τέτοιος μετρητής φαίνεται στο σχήμα 1.6 και έχει τρεις ακροδέκτες εισόδου (1,2,3) και τρεις ακροδέκτες

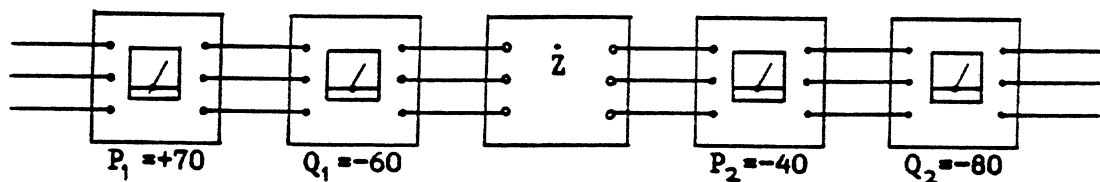
εξόδου (4,5,6). Όταν η άεργη ισχύς ρέει από τους ακροδέκτες εισόδου προς τους ακροδέκτες εξόδου, το όργανο θα δείχνει μια θετική ένδειξη. Αντίστροφα, αν η ροή της άεργης ισχύος είναι από τους ακροδέκτες εξόδου προς τους ακροδέκτες εισόδου, το αποτέλεσμα θα είναι μια αρνητική ένδειξη, που μπορούμε να διαβάσουμε σε συνδυασμό με το διακόπτη αναστροφής. Αν για παράδειγμα μια τριφασική πηγή και ένα τριφασικό πηνίο συνδεθούν όπως στο σχήμα 1.7, η ροή της άεργης ισχύος



Σχήμα 1.7

είναι προφανώς από τα αριστερά προς τα δεξιά και ο μετρητής άεργης ισχύος θα δώσει θετική ένδειξη. Όπως ακριβώς και με ένα βαττόμετρο, η διεύθυνση ροής της άεργης ισχύος μπορεί εύκολα να βρεθεί όταν ορίσουμε τους ακροδέκτες "εισόδου".

Τα τριφασικά δίκτυα Ε.Ρ. μπορεί να περιλαμβάνουν πολλούς τύπους κυκλωμάτων και συσκευών, η διεύθυνση της ροής της πραγματικής και της άεργης ισχύος όμως, μπορεί πάντα να προσδιορισθεί με τη βοήθεια των τριφασικών βαττομέτρων και των τριφασικών μετρητών άεργης ισχύος. Το παράδειγμα του σχήματος 1.8 μπορεί να διευκρινίσει πολλά. Η σύνθετη μιγαδική αντίσταση  $\dot{Z}$  αποτελεί τμήμα ενός μεγάλου



Σχήμα 1.8

κυκλώματος (που δε φαίνεται), ενώ τα βαττόμετρα  $P_1, P_2$  και οι μετρητές άεργης ισχύος  $Q_1, Q_2$  έχουν συνδεθεί δεξιά και αριστερά της  $\dot{Z}$ .

Υποθέτουμε ότι οι ακροδέκτες εισόδου για κάθε όργανο είναι στην αριστερή

πλευρά κάθε οργάνου. Οι ενδείξεις των οργάνων είναι:

$$P_1 = +70 \text{ W} \quad Q_1 = -60 \text{ VAR} \quad P_2 = -40 \text{ W} \quad Q_2 = -80 \text{ VAR}$$

Πως θα ερμηνεύσουμε αυτά τα αποτελέσματα; Κατ' αρχήν πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η ροή της πραγματικής ισχύος και η ροή της άεργης ισχύος είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή η μία δεν επηρεάζει την άλλη. Κατά συνέπεια, δεν πρέπει ποτέ να προσθέτουμε ή να αφαιρούμε πραγματική και άεργη ισχύ.

Επειδή η  $P_1$  είναι θετική, η πραγματική ισχύς ρέει προς τα δεξιά. Η  $P_2$  όμως είναι αρνητική, έτσι αυτή η πραγματική ισχύς ρέει προς τα αριστερά. Κατά συνέπεια η μιγαδική αντίσταση  $\dot{Z}$  απορροφάει  $+70 - (-40) = 70 + 40 = 110 \text{ W}$ .

Ας δούμε τώρα τι γίνεται με την άεργη ισχύ. 80 VAR ρέουν προς τα αριστερά, δηλαδή προς τη μιγαδική αντίσταση  $\dot{Z}$ , ενώ 60 VAR ρέουν πάλι προς τα αριστερά, και απομακρύνονται από τη  $\dot{Z}$ . Συνεπάγεται λοιπόν, ότι η  $\dot{Z}$  απορροφάει  $-60 - (-80) = -60 + 80 = +20 \text{ VAR}$ . Επειδή η  $\dot{Z}$  απορροφάει 110 W και 20 VAR, είναι παθητικό στοιχείο R, L.

Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι, όταν τριφασικά βαττόμετρα και τριφασικοί μετρητές άεργης ισχύος συνδέονται και στις δύο πλευρές ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή μιας συσκευής, μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε την πραγματική και την άεργη ισχύ που παράγει ή απορροφάει το κύκλωμα ή η συσκευή.

#### Όργανα-συσκευές-υλικά.

Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.

Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150.

Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.

Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας IM-150.

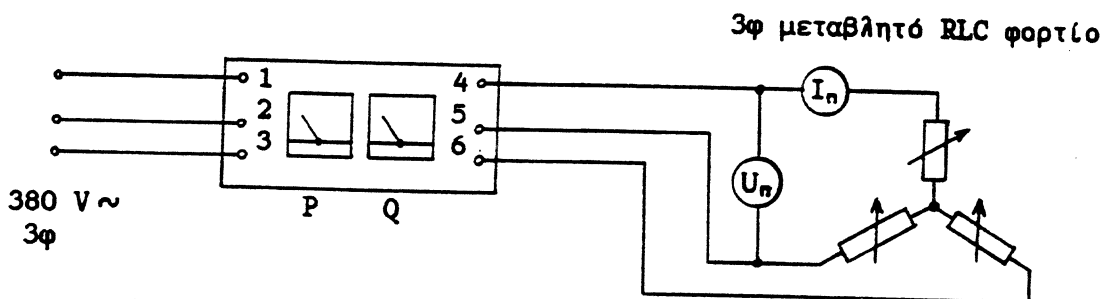
Αμπερόμετρα-Βολτόμετρα AC-VA-150.

#### Πειραματική διαδικασία.

Η ακόλουθη πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τριφασική πηγή με σταθερή τάση, βολτόμετρο, αμπερόμετρο, μετρητή πραγματικής και άεργης ισχύος και ένα τρι-

φασικό μεταβλητό ωμικό-αέργο φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα. Η τροφοδοσία της πηγής γίνεται από τους ακροδέκτες της σταθερής τάσης, η δε τάση τροφοδοσίας είναι περίπου 380 V.

1. Χρησιμοποιήστε μόνο δύο βήματα ωμικού φορτίου ανά φάση, όπως αυτό φαίνεται συνδεδεμένο στο σχήμα 1.9. Μετρήστε τα  $U_n, I_n, P$  και  $Q$  και καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 1.1.



Σχήμα 1.9

φορτίο	πολική τάση $U_n$ [V]	ρεύμα γραμμής $I_n$ [A]	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	P [W]	Q [VAR]	συνφ	$\phi^\circ$
ωμικό									
επαγωγικό									
ωμ./επαγ.									
χωρητικό									
ωμ./χωρητ.									
3φ επαγωγ. κινητήρας									
	Μ Ε Τ Ρ Ο Υ Ν Τ Α Ι				Υ Π Ο Λ Ο Γ Ι Ζ Ο Ν Τ Α Ι				

Πίνακας 1.1

2. Μηδενίστε το ωμικό φορτίο, θέστε κάθε ένα από τους τρεις επιλογείς του αέργου φορτίου στη θέση 3 (επαγωγικό φορτίο) και καταγράψτε τα αποτελέσματα για τα μεγέθη  $U_n, I_n, P$  και  $Q$  στον πίνακα 1.1.

Σημείωση: Οι συνδετήριοι αγωγοί που έρχονται από την πηγή πρέπει να συνδε-

θούν στους ακροδέκτες 1,2,3 του μετρητή πραγματικής και άεργης ισχύος κατά τη σειρά της ακολουθίας των φάσεων τους. Αν η ακολουθία των φάσεων της τροφοδοσίας είναι 1,2,3 ο μετρητής θα δώσει σωστή ένδειξη (δηλαδή όταν οι ακροδέκτες 1, 2,3 της τροφοδοσίας συνδεθούν με τους ακροδέκτες 1,2,3 του οργάνου).

Σ'αυτή τη μέτρηση η ένδειξη του μετρητή άεργης ισχύος πρέπει να είναι θετική. Αν είναι αρνητική, η ακολουθία των φάσεων είναι λανθασμένη και θα πρέπει να εναλλαγούν δύο οποιοιδήποτε από τους ακροδέκτες της πηγής.

3. Στο επαγωγικό φορτίο του πιο πάνω βήματος της πειραματικής διαδικασίας, προσθέστε δύο βήματα ωμικού φορτίου και καταγράψτε τις μετρήσεις στον πίνακα 1.1.

4. Μηδενίστε το ωμικό φορτίο, θέστε τους επιλογείς του άεργου φορτίου στη θέση 3 (χωρητικό φορτίο) και καταγράψτε τις μετρήσεις στον πίνακα 1.1.

5. Στο πιο πάνω χωρητικό φορτίο προσθέστε δύο βήματα ωμικού φορτίου και καταγράψτε τις μετρήσεις στον πίνακα 1.1.

6. Αντικαταστήστε το τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150 με τον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα IM-150 και καταγράψτε τις μετρήσεις στον πίνακα 1.1.

7. Κλείστε τον τριπολικό διακόπτη της πηγής (OFF). Αποσυνδέστε τους συνδετήριους αγωγούς.

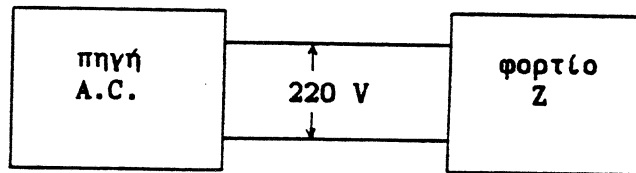
8. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αναφέραμε στη θεωρία της άσκησης, υπολογίστε τα μεγέθη  $S$ ,  $\cos\phi$ ,  $\phi$  και επαληθεύστε υπολογιστικά τα  $P$  και  $Q$ , καταγράφοντας τα στον πίνακα 1.1 για κάθε τύπο φορτίου.

#### Ερωτήσεις και προβλήματα.

1. Ένα ηλεκτρικό φορτίο  $Z$  συνδέεται στους ακροδέκτες μιας μονοφασικής πηγής A.C. 220 V. Δείξτε τη διεύθυνση της ροής της πραγματικής και της άεργης ισχύος με βελάκια στον πίνακα 1.2, αν η  $Z$  αποτελείται από:

α) μια ωμική αντίσταση,

- β) μια επαγωγική αντίσταση,
- γ) μια χωρητική αντίσταση,
- δ) μια ωμική-επαγωγική αντίσταση,
- ε) μια ωμική-χωρητική αντίσταση και
- στ) ένα μονοφασικό επαγωγικό κινητήρα. (σχήμα 1.10)

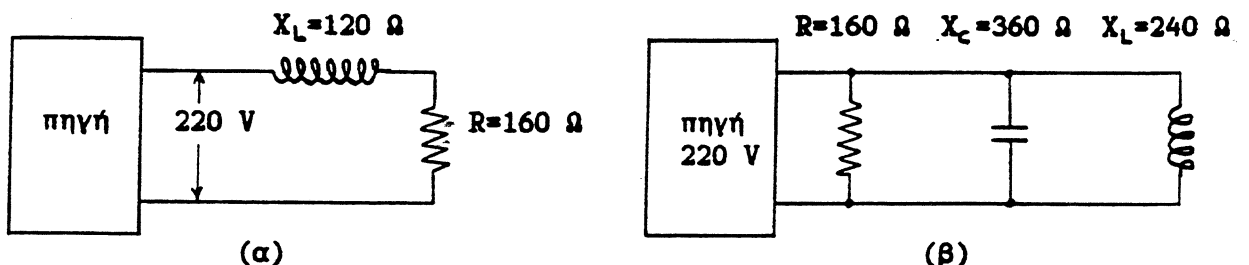


Σχήμα 1.10

φορτίο	Διεύθυνση ροής P	Διεύθυνση ροής Q
ωμικό		
επαγωγικό		
χωρητικό		
ωμ./επαγ.		
ωμ./χωρητ.		
μονοφ.επαγ. κινητήρας		

Πίνακας 1.2

2. Υπολογίστε την πραγματική και την άεργη ισχύ που η μονοφασική πηγή παρέχει στα δύο μονοφασικά κυκλώματα, που φαίνονται στο σχήμα 1.11.

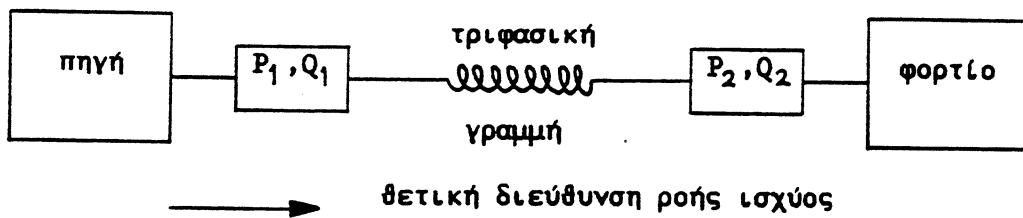


Σχήμα 1.11

3. Μια τριφασική πηγή με ολική τάση 66 KV τροφοδοτεί ένα τριφασικό ωμικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα με  $100 \Omega$  ανά φάση. Υπολογίστε την πραγματική ισχύ που απορροφάει το φορτίο.

4. Εξηγήστε τη σημασία της πρότασης "ένα πηνίο απορροφάει άεργη ισχύ, ενώ ένας πυκνωτής παράγει άεργη ισχύ."

5. Μια τριφασική γραμμή ισχύος, που φαίνεται μονογραμμικά στο σχήμα 1.12 μεταφέρει την πραγματική και την άεργη ισχύ που φαίνεται στον πίνακα 1.3.



Σχήμα 1.12

Υπολογίστε την πραγματική ισχύ ( $P_g$  [KW]) και την άεργη ισχύ ( $Q_g$  [KVAR]) που απορροφάει η γραμμή.

$P_1$ (KW)	$Q_1$ (KVAR)	$P_2$ (KW)	$Q_2$ (KVAR)	$P_g$ (KW)	$Q_g$ (KVAR)
+100	+10	+95	+5		
+100	+10	+95	-10		
+100	-10	+95	-25		
-100	+10	-105	+5		

Πίνακας 1.3

6. Μια τριφασική γραμμή ισχύος, που λειτουργεί με ολική τάση  $U_n$ , τροφοδοτεί ένα τριφασικό συμμετρικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα, του οποίου η σύνθετη αντίσταση είναι  $Z$  [ $\Omega$ ] ανά φάση. Αποδείξτε ότι η συνολική φαινόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση  $S = U_n^2 / Z$ .

## ΑΣΚΗΣΗ 2η

Ροή ισχύος και εκατοστιαία μεταβολή της τάσης (voltage regulation) σε μια απλή γραμμή μεταφοράς.

Αντικείμενο: α) Παρατήρηση της ροής της πραγματικής και της άεργης ισχύος σε μια τριφασική γραμμή μεταφοράς, όταν αυτή φορτίζεται στο τέλος της με γνωστά παθητικά φορτία.

β) Παρατήρηση της εκατοστιαίας μεταβολής της τάσης στο άκρο λήψης σε συνάρτηση του τύπου του φορτίου.

Θεωρία: Οι γραμμές μεταφοράς Ε.Ρ. είναι κατά κανόνα τριφασικές. Έχουν δηλαδή τρεις αγωγούς φάσεων και δεν υπάρχει αγωγός επιστροφής (ουδέτερος). Οι γραμμές μεταφοράς εξετάζονται για συμμετρική φόρτιση και επομένως κάθε φάση μεταφέρει το 1/3 του συνολικού φορτίου. Λόγω της συμμετρίας οι εντάσεις στις τρεις φάσεις είναι τρία ίσα διανύσματα με φασική απόκλιση  $120^\circ$  το ένα από το άλλο και επομένως η συνισταμένη ένταση είναι ίση με το μηδέν.

Συνήθως όταν εξετάζουμε μια γραμμή μεταφοράς, χρησιμοποιούμε το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμά της (κύκλωμα μιας φάσης), που προκύπτει εύκολα από το πραγματικό τριφασικό κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς.

Ο αυστηρός υπολογισμός ενός προβλήματος γραμμής μεταφοράς δεν είναι πάντα ευχερής, αλλά και η ακρίβεια που επιτυγχάνεται δεν έχει πάντα πρακτική αξία.

Για το λόγο αυτό στους υπολογισμούς εφαρμόζονται διάφορες παραδοχές και προσεγγίσεις, που απλοποιούν τα προβλήματα και δίνουν κατά κανόνα παραδεκτά αποτελέσματα με μικρές αποκλίσεις.

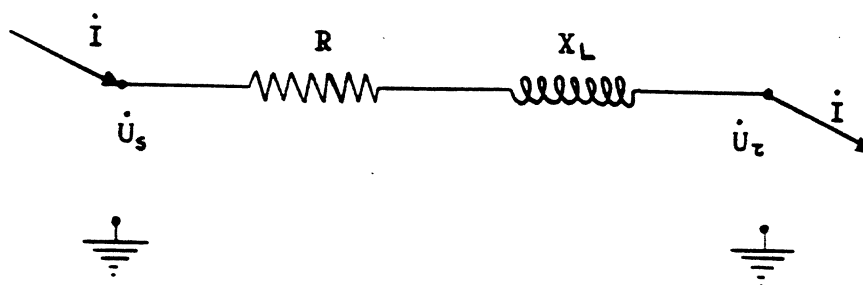
Τις γραμμές μεταφοράς τις διακρίνουμε σε τρεις κατηγορίες, δηλαδή: α) σε γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους, β) σε γραμμές μεταφοράς μέσου μήκους και γ) σε γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους. Η πιο πάνω διάκριση των γραμμών μεταφοράς δεν είναι απόλυτη.

Γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους χαρακτηρίζουμε εκείνες που έχουν αμελητέα χωρητικότητα C ή αμελητέα χωρητική αγωγιμότητα  $Y=\omega C$ .



Σαν τέτοιες μπορούν να θεωρηθούν όλες οι εναέριες ή υπόγειες γραμμές μεταφοράς με τάση μικρότερη από 40 KV ανεξάρτητα από το μήκος, καθώς και οι γραμμές μεταφοράς με τάση μεγαλύτερη από 40 KV, αλλά με μήκος μέχρι 50 Km περίπου.

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους (αναπαράσταση μιας φάσης της γραμμής μεταφοράς).



$R$  = ωμική αντίσταση ανά φάση συγκεντρωμένη σ' ένα σημείο.

$X_L$  = επαγωγική αντίσταση ανά φάση συγκεντρωμένη σ' ένα σημείο.

$I = |\dot{I}|$  = ρεύμα αναχώρησης, ρεύμα γραμμής, ρεύμα άφιξης ανά φάση.

$U_s = |\dot{U}_s|$  = φασική τάση αναχώρησης.

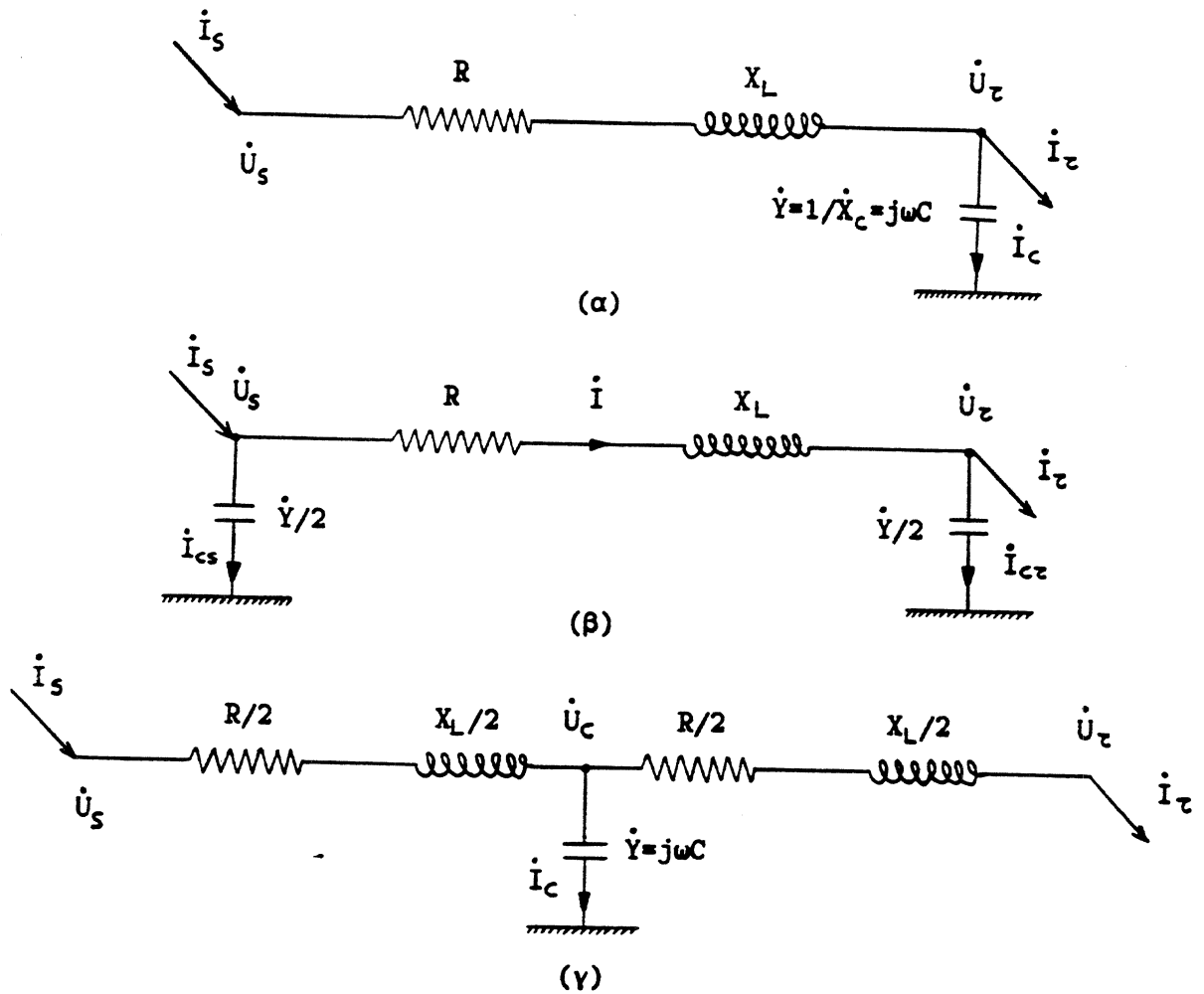
$U_z = |\dot{U}_z|$  = φασική τάση άφιξης.

Σχήμα 2.1

Στις γραμμές μεταφοράς μέσου μήκους θεωρούμε τη χωρητικότητα συγκεντρωμένη σε ένα ή δύο σημεία. Αυτό εφαρμόζεται για γραμμές μεταφοράς με μήκος μέχρι 250 Km περίπου. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται τα μονοφασικά ισοδύναμα κυκλώματα μιας γραμμής μεταφοράς μέσου μήκους. Στο (α) η χωρητικότητα είναι συγκεντρωμένη στο τέλος της γραμμής (ισοδύναμο κύκλωμα Γ), στο (β) η χωρητικότητα είναι μοιρασμένη εξίσου στα δύο άκρα της γραμμής (ισοδύναμο κύκλωμα Π) και στο (γ) η χωρητικότητα είναι συγκεντρωμένη στο μέσο της γραμμής (ισοδύναμο κύκλωμα Τ).

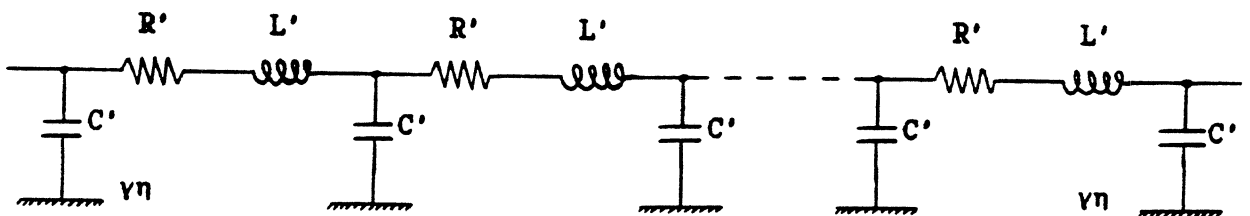
Στις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους θεωρούμε τη χωρητικότητα C (ή τη χωρητική αγωγιμότητα Y) καθώς και τα άλλα δύο στοιχεία ( $R, X_L$ ), ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το μήκος των γραμμών. Ο χαρακτηρισμός αυτός ισχύει όχι μόνο για γραμμές με μήκος πάνω από 250 Km, αλλά και για τις περιπτώσεις εκείνες που ζη-

τείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς.



Σχήμα 2.2

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους.



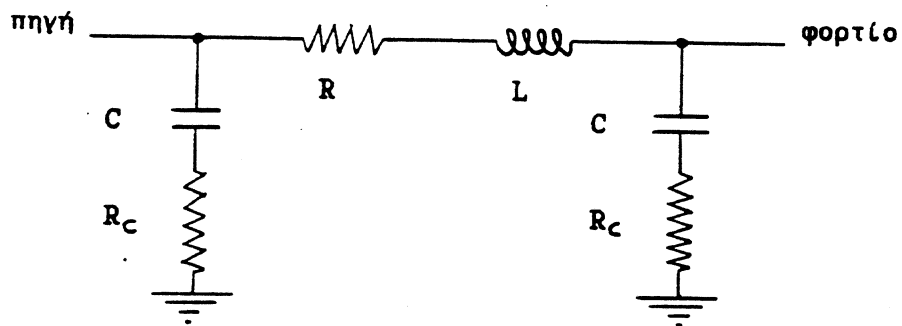
Σχήμα 2.3

Σ' αυτή την εργαστηριακή άσκηση θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς, το H-TLS-150, που έχει τρεις θέσεις επιλογής.

## 2.4

Οι επιλογές είναι: α) γραμμή μεταφοράς 66 KV, 100 Km β) γραμμή μεταφοράς 132 KV, 200 Km και γ) γραμμή μεταφοράς 220 KV, 300 Km.

Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς που θα χρησιμοποιήσουμε φαίνεται πιο κάτω στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4

Όταν μεταβάλλουμε την τάση λειτουργίας και το μήκος της γραμμής μεταφοράς, μεταβάλλονται οι τιμές  $R$ ,  $X_L$  και  $X_C$ , καθώς επίσης οι απώλειες της γραμμής και η εκατοστιαία μεταβολή της τάσης.

Για κάθε τύπο φορτίου και για κάθε γραμμή μεταφοράς του μοντέλου, θα υπολογίσετε την πραγματική και την άεργη ισχύ που απορροφάει η γραμμή, καθώς και την εκατοστιαία μεταβολή της τάσης.

Η εκατοστιαία μεταβολή της τάσης (regulation) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{regulation}(\%) = \frac{U_{\Pi}(\text{στο κενό}) - U_{\Pi}(\text{με φορτίο})}{U_{\Pi}(\text{στο κενό})} \times 100$$

όπου  $U_{\Pi}$  = πολική τάση στο φορτίο.

### Όργανα-συσσκευές-υλικά.

Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.

Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.

Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)

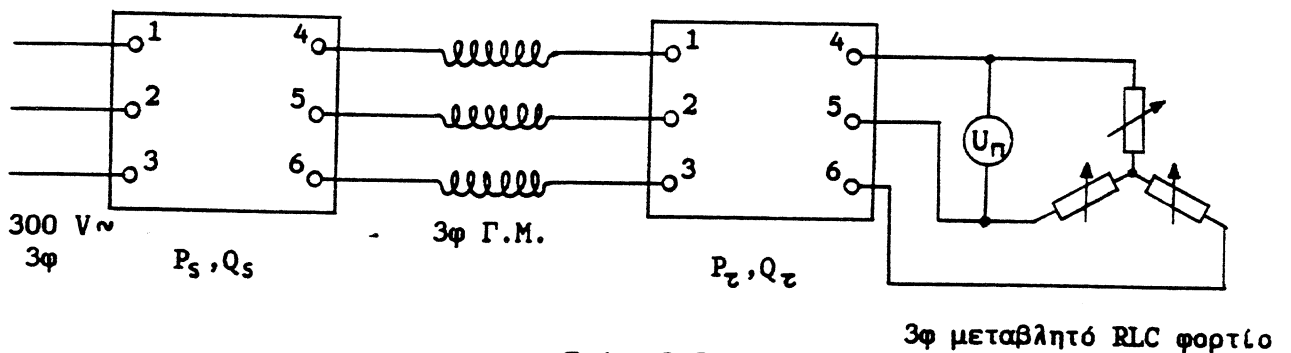
Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας IM-150.

Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.

Βολτόμετρο AC-VA-150.

Πειραματική διαδικασία.

1. Συνδέστε το κύκλωμα του σχήματος 2.5 χωρίς το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των δύο μετρητών Watt-Var.
2. Ρυθμίστε την τάση τροφοδοσίας στα 300 V (πολική τάση). Θέστε τους επιλογείς του τριφασικού μεταβλητού ωμικού-άεργου φορτίου RLC-150 στο επαγωγικό φορτίο. Και οι δύο μετρητές Watt-Var πρέπει να δείχνουν ενδείξεις μέσα στις κλίμακες με τους διακόπτες αναστροφής στη θέση +. Εάν όχι, τότε είναι συνδεμένη λάθος η διαδοχή (ακολουθία) των φάσεων της πηγής.



3. Θέστε OFF την τροφοδοσία. Αποσυνδέστε το τριφασικό φορτίο. Με το μοντέλο της τριφασικής γραμμής μεταφοράς μεταξύ των δύο μετρητών Watt-Var, θέστε τον επιλογέα του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς στη θέση 66 KV, 100 Km.
4. Θέστε ON την τροφοδοσία. Μετρήστε και καταγράψτε στον πίνακα 2.1 την τάση  $U_n$  στο κενό στην πλευρά του φορτίου, καθώς επίσης και τις ενδείξεις  $P_s, Q_s$ ,  $P_z$  και  $Q_z$ .
5. Θέστε OFF την τροφοδοσία. Συνδέστε το ωμικό φορτίο μόνο και συγκεκριμένα δύο βήματα φορτίου. Επαναλάβετε το βήμα 4 της πειραματικής διαδικασίας, με τη διαφορά ότι η τάση  $U_n$  δεν είναι στο κενό.
6. Θέστε OFF την τροφοδοσία. Συνδέστε το άεργο φορτίο και θέστε τους τρεις επιλογείς για ολόκληρο το επαγωγικό φορτίο. Επαναλάβετε το βήμα 4 ( $U_n$  με φορ-

τίο).

7. Στρέψτε τους τρεις επιλογείς του έργου φορτίου έτσι ώστε να έχετε πλήρες χωρητικό φορτίο. Επαναλάβετε το βήμα 4 ( $U_{\Pi}$  με φορτίο).

8. Θέστε OFF την τροφοδοσία. Αποσυνδέστε το φορτίο RLC-150 και αντικαταστήστε το με τον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα. Επαναλάβετε το βήμα 4 ( $U_{\Pi}$  με φορτίο).

9. Θέστε OFF την τροφοδοσία. Αποσυνδέστε τον κινητήρα και επανασυνδέστε το φορτίο RLC-150. Θέστε τον επιλογέα του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς στη θέση 132 KV, 200 Km. Επαναλάβετε τα βήματα 4÷8 και καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 2.2.

10. Επαναλάβετε το βήμα 9 για γραμμή 220 KV, 300 Km και καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 2.3. Θέστε OFF την τροφοδοσία. Αποσυνδέστε τους συνδετήριους αγωγούς.

11. Για κάθε τύπο φορτίου και για κάθε γραμμή μεταφοράς του μοντέλου, υπολογίστε την πραγματική και την άεργη ισχύ που απορροφάει η γραμμή. Συμπληρώστε τις τιμές στους πίνακες και συγκεκριμένα στις στήλες  $P_{\gamma}$  και  $Q_{\gamma}$ . Τέλος για κάθε τύπο φορτίου και για κάθε γραμμή μεταφοράς του μοντέλου, υπολογίστε την εκατοστιαία μεταβολή της τάσης, χρησιμοποιώντας τη γνωστή σχέση και καταγράψτε τα αποτελέσματα στις στήλες regulation % των πινάκων.

Γραμμή μεταφοράς 66 KV, 100Km

φορτίο	$P_S$	$Q_S$	$P_Z$	$Q_Z$	$U_{\Pi}$	$P_{\gamma}$	$Q_{\gamma}$	regulation %
ανοικτό								
ωμικό								
επαγωγικό								
χωρητικό								
κινητήρας								

Πίνακας 2.1

Γραμμή μεταφοράς 132 KV, 200 Km

φορτίο	$P_S$	$Q_S$	$P_T$	$Q_T$	$U_{\Pi}$	$P_{\gamma}$	$Q_{\gamma}$	regulation %
ανοικτό								
ωμικό								
επαγωγικό								
χωρητικό								
κινητήρας								

Πίνακας 2.2

Γραμμή μεταφοράς 220 KV, 300 Km

φορτίο	$P_S$	$Q_S$	$P_T$	$Q_T$	$U_{\Pi}$	$P_{\gamma}$	$Q_{\gamma}$	regulation %
ανοικτό								
ωμικό								
επαγωγικό								
χωρητικό								
κινητήρας								

Πίνακας 2.3

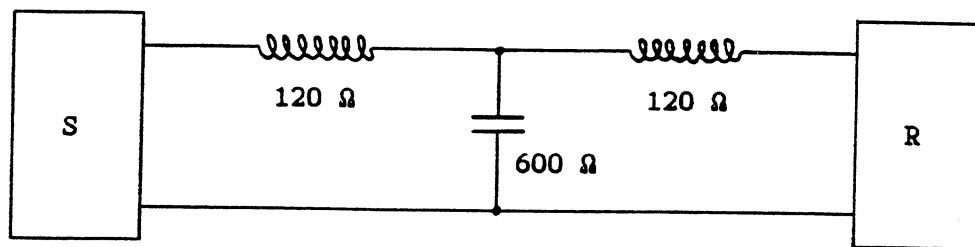
Ερωτήσεις και προβλήματα.

1. Μια τριφασική γραμμή μεταφοράς έχει επαγωγική αντίσταση  $X_L=20 \Omega$  ανά φάση και τροφοδοτεί τριφασικό συμμετρικό φορτίο που έχει ωμική αντίσταση  $100 \Omega$  ανά φάση. Το φορτίο έχει σύνδεση σε αστέρα. Αν η πολική τάση στην αρχή της γραμμής είναι  $U_{3\phi}=70 \text{ KV}$  υπολογίστε:

- τη φασική τάση στην αρχή της γραμμής,
- το ρεύμα κάθε φάσης,
- την πραγματική και την άεργη ισχύ που απορροφάει το φορτίο,
- την πραγματική και την άεργη ισχύ που απορροφάει η γραμμή,

- ε) την πολική τάση στο φορτίο,  
 στ) την πτώση τάσης ανά φάση στη γραμμή και  
 ζ) τη συνολική φαινόμενη, πραγματική και άεργη ισχύ που παρέχει η πηγή.

2. Μια τριφασική γραμμή μεταφοράς με μήκος 500 Km έχει επαγωγική αντίσταση 240  $\Omega$  ανά φάση και χωρητική αντίσταση 600  $\Omega$  ανά φάση ως προς γη. Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμά της φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6

Αν η πολική τάση αναχώρησης είναι 330 KV, υπολογίστε την πολική τάση άφιξης, όταν το φορτίο είναι αποσυνδεδεμένο. Υπολογίστε επίσης την άεργη ισχύ της πηγής σε KVar. Η άεργη αυτή ισχύς παράγεται ή απορροφάται από την πηγή;

### ΑΣΚΗΣΗ 3η

Ρύθμιση τάσης στο τέλος μιας γραμμής μεταφοράς με χρήση πυκνωτών. Φασική γωνία και φασική πτώση τάσης σε μια απλή γραμμή μεταφοράς.

Αντικείμενο: α) Ρύθμιση της τάσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς με χρήση πυκνωτών.

β) Παρατήρηση της φασικής γωνίας μεταξύ της τάσης αναχώρησης και της τάσης άφιξης της γραμμής μεταφοράς.

γ) Παρατήρηση της φασικής πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, όταν οι τάσεις στα δύο άκρα της έχουν ίσα μέτρα.

Θεωρία: α) Στην προηγούμενη εργαστηριακή άσκηση παρατηρήσαμε ότι ένα ωμικό ή επαγωγικό φορτίο στο τέλος μιας γραμμής μεταφοράς, έχει σαν αποτέλεσμα μια μεγάλη πτώση τάσης, που μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη. Οι κινητήρες όμως, τα ρελέ, οι ηλεκτρικές συσκευές κ.λ.π., εργάζονται αξιόπιστα μόνο κάτω από συνθήκες σταθερής ονομαστικής τάσης.

Για το λόγο αυτό, πρέπει να ρυθμίζουμε την τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή. Ένας τρόπος ρύθμισης της τάσης (υπάρχουν και πολλοί άλλοι, που θα εξετασθούν στη θεωρία του μαθήματος), που έχει καλά αποτελέσματα, είναι η σύνδεση στατών πυκνωτών στο τέλος της γραμμής μεταφοράς. Στην προηγούμενη εργαστηριακή άσκηση είδαμε ότι οι πυκνωτές αυτοί, όταν συνδεθούν στο τέλος της γραμμής, έχουν σαν αποτέλεσμα μια ουσιαστική ανύψωση της τάσης. (Η μαθηματική απόδειξη της προηγούμενης πρότασης θα γίνει στη θεωρία του μαθήματος.)

Στην πράξη οι στατοί πυκνωτές (3φ συστοιχίες στατών πυκνωτών) αποσυνδέονται και επανασυνδέονται κατά τη διάρκεια της ημέρας, και η τιμή τους ρυθμίζεται έτσι, ώστε να διατηρούν σταθερή την τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς.

Στην περίπτωση που η γραμμή μεταφοράς τροφοδοτεί καθαρά τριφασικό συμμετρικό επαγωγικό φορτίο, οι στατοί πυκνωτές πρέπει να παράγουν άεργη ισχύ ίση με εκείνη που απορροφάει το επαγωγικό φορτίο. Το αποτέλεσμα είναι ένας παράλληλος



συντονισμός, όπου η άεργη ισχύς που απορροφούν οι επαγωγές, παράγεται εξολοκλήρου από τις χωρητικότητες των στατών πυκνωτών και έτσι δε μεταφέρεται άεργη ισχύς από τη γραμμή μεταφοράς.

Στην περίπτωση που η γραμμή μεταφοράς τροφοδοτεί τριφασικό συμμετρικό ωμικό φορτίο, η άεργη ισχύς που πρέπει να παράγουν οι στατοί πυκνωτές για να ρυθμίσουν την τάση, υπολογίζεται δύσκολα. Σ' αυτή την άσκηση θα προσδιορίσουμε αυτή την άεργη ισχύ με δοκιμές, μεταβάλλοντας δηλαδή τη χωρητικότητα των πυκνωτών έως ότου η τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς γίνει ίση με την τάση στην αρχή.

Στην πράξη όμως, τα φορτία συμπεριφέρονται ωμικά-επαγωγικά (R,L), δηλαδή απορροφούν πραγματική και άεργη ισχύ. Και στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση της τάσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς γίνεται με χρήση στατών πυκνωτών.

β) Σ' αυτή την εργαστηριακή άσκηση θα χρησιμοποιήσουμε για πρώτη φορά το μετρητή φασικής γωνίας H-PAM-150. Με το όργανο αυτό μπορούμε να μετρήσουμε τη γωνία μεταξύ των παραστατικών μιγάδων των τάσεων  $\dot{U}_{S,\eta}$  και  $\dot{U}_{T,\eta}$ . (Με το δείκτη π συμβολίζουμε πολικά μεγέθη.)

Η γωνία αυτή λέγεται φασική γωνία ή γωνία ισχύος (power angle). Για τη μέτρηση της φασικής γωνίας, σαν τάση αναφοράς στο μιγαδικό επίπεδο εκλέγεται η φασική τάση άφιξης  $\dot{U}_T$  της γραμμής μεταφοράς.

γ) Κατά την πειραματική διαδικασία, θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει μια σημαντική πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, ακόμη και όταν οι τάσεις  $\dot{U}_{S,\eta}$  και  $\dot{U}_{T,\eta}$  στα δύο άκρα της γραμμής έχουν ίσα μέτρα, δηλαδή όταν:

$$|\dot{U}_{S,\eta}| = |\dot{U}_{T,\eta}|$$

Πώς όμως είναι δυνατόν να έχουμε πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, όταν οι τάσεις στα δύο άκρα είναι ίσες; Η απάντηση είναι η πτώση τάσης οφείλεται στη φασική γωνία μεταξύ των δύο τάσεων που αναφέραμε πιο πάνω.

Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, κάνουμε μια σύντομη ανάλυση των παρακάτω

υποθετικών ενδείξεων των οργάνων. Έστω ότι μετρήσαμε:

$$U_{S,\eta} = 300 \text{ V}$$

$$U_{Z,\eta} = 300 \text{ V}$$

Φασική πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς (πάνω σε μια φάση) = 141 V

$$P_S = +600 \text{ W}$$

$$Q_S = +170 \text{ VAR}$$

$$P_Z = +510 \text{ W}$$

$$Q_Z = -280 \text{ VAR}$$

$$\text{Φασική γωνία} = \theta = 48^\circ \text{ (σε προπορεία η } U_{S,\eta}\text{)}$$

Θα μετατρέψουμε κατ'αρχήν τις τάσεις και τις ισχύεις σε ανά φάση μεγέθη, υποθέτοντας ότι το φορτίο έχει σύνδεση σε αστέρα.

Έτσι η φασική πτώση τάσης είναι:

$$\begin{aligned} \dot{U}_S - \dot{U}_Z &= \frac{300}{\sqrt{3}} \angle 48^\circ - \frac{300}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 173,2 \angle 48^\circ - 173,2 \angle 0^\circ = \\ &= 173,2 \cos 48^\circ + j173,2 \sin 48^\circ - 173,2 = 115,9 + j128,7 - 173,2 = \\ &= -57,3 + j128,7 = 140,88 \angle 114^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Δηλαδή, επαληθεύσαμε υπολογιστικά την τιμή των 141 V περίπου, που μετρήσαμε στο εργαστήριο και παρατηρούμε ότι αυτή η πτώση τάσης οφείλεται στη φασική γωνία των  $48^\circ$ . Στο μιγαδικό διάγραμμα του σχήματος 3.1, φαίνονται οι φασικές τάσεις αναχώρησης και άφιξης της γραμμής, η φασική πτώση τάσης, καθώς και η φασική γωνία.

Επίσης έχουμε ότι:

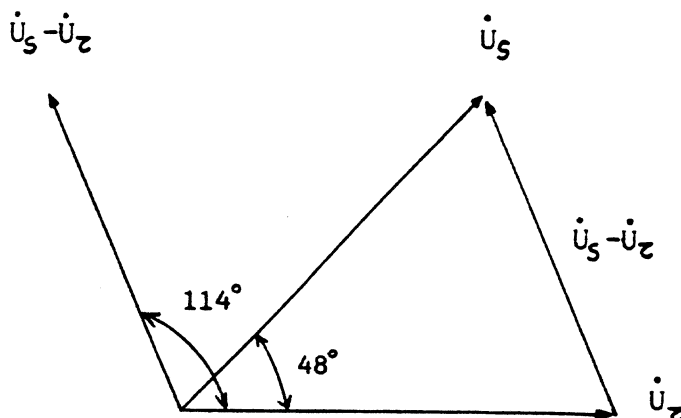
$$P_\gamma = 600 \text{ W} - 510 \text{ W} = 90 \text{ W} = 3I^2 R$$

$$P_\gamma (\text{ανά φάση}) = 90/3 \text{ W} = 30 \text{ W} = I^2 R$$

$$Q_\gamma = 170 \text{ VAR} - (-280) \text{ VAR} = 170 \text{ VAR} + 280 \text{ VAR} = 450 \text{ VAR} = 3I^2 X_L$$

$$Q_\gamma (\text{ανά φάση}) = 450/3 \text{ VAR} = 150 \text{ VAR} = I^2 X_L$$

$$S_\gamma (\text{ανά φάση}) = \sqrt{30^2 + 150^2} = 153 \text{ VA} = I^2 Z$$



Σχήμα 3.1

Το ρεύμα της γραμμής (ανά φάση) είναι:

$$I = \frac{153 \text{ VA}}{141 \text{ V}} = 1,085 \text{ A}$$

Στις πιο πάνω σχέσεις (σελίδα 3.3),  $R$  και  $X_L$  είναι η ωμική και η επαγωγική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς σε  $\Omega$  ανά φάση. Η χωρητικότητα ή η χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής έχει αμεληθεί.

Θα μπορούσαμε, στο υποθετικό παράδειγμα που αναφέραμε πιο πάνω, να είχαμε μετρήσει και το ρεύμα  $I$  της γραμμής, αλλά η μέτρηση της πραγματικής και της άεργης ισχύος καθώς και η γνώση των δύο τάσεων, είναι αρκετά στοιχεία ώστε να μπορούμε να υπολογίζουμε οτιδήποτε επιθυμούμε στη γραμμή μεταφοράς.

#### Όργανα-συσσκευές-υλικά.

Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.

Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)

Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.

Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.

Μετρητής φασικής γωνίας H-PAM-150.

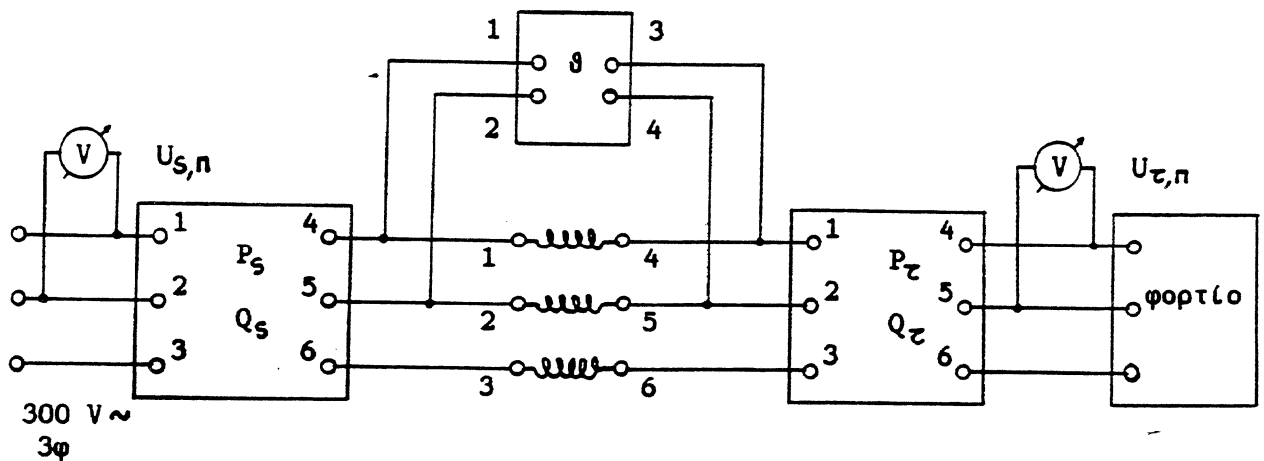
Βολτόμετρα AC-VA-150.

#### Πειραματική διαδικασία.

1. Τοποθετήστε τον επιλογέα του μοντέλου της τριφασικής γραμμής μεταφοράς

στη θέση 66 KV, 100 Km. Συνδέστε τα βολτόμετρα και τους μετρητές Watt-Var όπως στο σχήμα 3.2. Το κύκλωμα θα πρέπει να συνδεθεί στη μεταβλητή τριφασική τροφοδοσία. Σα φορτίο χρησιμοποιήστε το τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.

2. Ρυθμίστε την τάση  $U_{S,π}$  στα 300 V και κρατήστε την σταθερή σε όλη την πειραματική διαδικασία. Αυξήστε το ωμικό φορτίο κατά τα βήματα του πίνακα 3.1, διατηρώντας και τις τρεις φάσεις του συμμετρικές. Σημειώστε τις ενδείξεις των  $U_{S,π}$ ,  $P_S$ ,  $Q_S$ ,  $P_Z$ ,  $Q_Z$ ,  $U_{Z,π}$  και τη φασική γωνία  $\theta$  μεταξύ των τάσεων  $U_{S,π}$  και  $U_{Z,π}$ , χρησιμοποιώντας βέβαια και το μετρητή φασικής γωνίας. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 3.1. Σχεδιάστε σε μιλλιμετρέ χαρτί τη γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{Z,π}=f(P_Z)$ . Πάνω σε αυτή την καμπύλη σημειώστε τις φασικές γωνίες που αντιστοιχούν στην πραγματική ισχύ  $P_Z$  που απορροφούν τα διάφορα ωμικά φορτία.



Σχήμα 3.2

3. Επαναλάβετε το βήμα 2 της πειραματικής διαδικασίας, αλλά με τη διαφορά να τοποθετήστε στατούς πυκνωτές παράλληλα στο ωμικό φορτίο και να ρυθμίστε την τάση  $U_{Z,π}$  στο φορτίο, ώστε να είναι κατά το δυνατόν κοντά στα 300 V. Δεν ξεχνάμε ότι η τάση στην αρχή της γραμμής μεταφοράς διατηρείται σταθερή στα 300 V.

Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 3.2.

Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{Z,π}=f(P_Z)$  στο ίδιο μιλλιμετρέ

χαρτί που σχεδιάσατε και τη γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{\tau,n}=f(P_{\tau})$  στο βήμα 2 της πειραματικής διαδικασίας.

Σημειώστε το γεγονός ότι η πρόσδεση των στατών πυκνωτών παράλληλα στο φορτίο, έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο σταθερή τάση στο τέλος της γραμμής και επί πλέον ότι η ισχύς  $P_{\tau}$  που απορροφάται από το φορτίο έχει αυξηθεί.

Πάνω σ' αυτή την καμπύλη σημειώστε τη φασική γωνία μεταξύ των τάσεων  $U_{S,n}$  και  $U_{\tau,n}$ , καθώς επίσης και την άεργη ισχύ  $Q_{\tau}$  που χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση της τάσης, για κάθε τιμή του ωμικού φορτίου.

Μεταβολή της τάσης με ωμικό φορτίο.							
R [ $\Omega$ ] ανά φάση	$U_{S,n}$ [V]	$P_S$ [W]	$Q_S$ [VAr]	$U_{\tau,n}$ [V]	$P_{\tau}$ [W]	$Q_{\tau}$ [VAr]	$\theta$ [ $^{\circ}$ ]
$\infty$							
7000							
3500							
2333,3							
1750							
1400							
1166,6							

Πίνακας 3.1

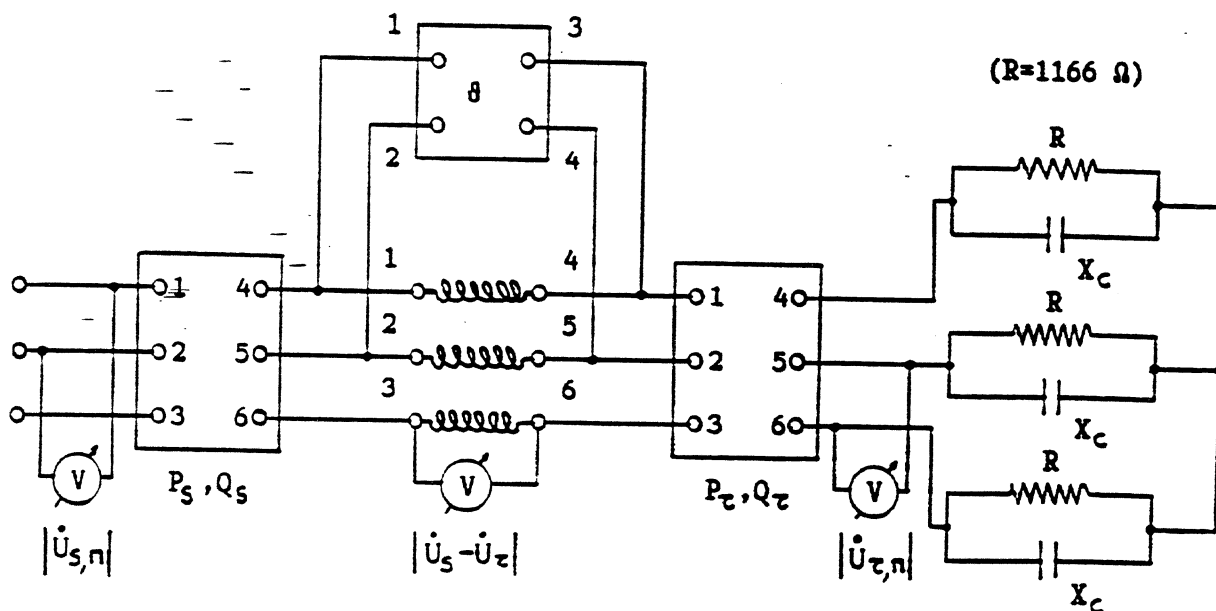
4. Χρησιμοποιήστε το κύκλωμα του σχήματος 3.3. Θέστε την ωμική ανά φάση αντίσταση του φορτίου ίση με 1166  $\Omega$  και  $|\dot{U}_{S,n}|=U_{S,n}=300$  V. Ρυθμίστε την άεργη αντίσταση μέχρις ότου η τάση φορτίου  $|\dot{U}_{\tau,n}|=U_{\tau,n}$  να προσεγγίσει όσο το δυνατόν τα 300 V. Μετρήστε τα μεγέθη  $U_{S,n}$ ,  $U_{\tau,n}$ ,  $P_S$ ,  $Q_S$ ,  $P_{\tau}$ ,  $Q_{\tau}$ , τη φασική γωνία  $\theta$  και τη φασική πτώση τάσης που το μέτρο της είναι  $|\dot{U}_S-\dot{U}_{\tau}|$ .

Χρησιμοποιώντας το εδάφιο γ) της θεωρίας, επαληθεύσατε υπολογιστικά την τιμή της φασικής πτώσης τάσης. Τέλος υπολογίστε το ρεύμα της γραμμής μεταφοράς ανά

φάση και την πραγματική και άεργη ισχύ που απορροφάει η γραμμή.

Μεταβολή της τάσης με ωμικό φορτίο και στατούς πυκνωτές.								
R [Ω] ανά φάση	X <sub>c</sub> [Ω] ανά φάση	U <sub>S,φ</sub> [V]	P <sub>S</sub> [W]	Q <sub>S</sub> [VAR]	U <sub>T,φ</sub> [V]	P <sub>T</sub> [W]	Q <sub>T</sub> [VAR]	θ [ο]
∞								
7000								
3500								
2333,3								
1750								
1400								
1166,6								

Πίνακας 3.2



Σχήμα 3.3

Ερωτήσεις και προβλήματα.

1. Μια τριφασική γραμμή μεταφοράς έχει επαγωγική αντίσταση 100 Ω ανά φάση. Η τάση στην αρχή της γραμμής είναι 100 KV και η τάση στο τέλος της γραμμής

ρυθμίζεται με τη χρήση στατών πυκνωτών, που συνδέονται παράλληλα προς το φορτίο, ώστε να είναι 100 KV επίσης. Το φορτίο απορροφάει συνολική πραγματική ισχύ 50 MW. Υπολογίστε:

- α) την άεργη ισχύ που παράγουν οι στατοί πυκνωτές,
- β) την άεργη ισχύ στην αρχή της γραμμής,
- γ) τη φασική πτώση τάσης στη γραμμή,
- δ) τη φασική γωνία μεταξύ των τάσεων στην αρχή και στο τέλος της γραμμής μεταφοράς και

ε) τη φαινόμενη ισχύ που παράγει η πηγή.

2. Αν το φορτίο των 50 MW του προβλήματος 1 αποσυνδεθεί ξαφνικά, υπολογίστε την τάση στο τέλος της γραμμής που θα εμφανισθεί στ' άκρα των πυκνωτών.

Ποιά προφύλαξη πρέπει να λάβουμε;

3. Αν υποθέσουμε ότι η γραμμή μεταφοράς ήταν καθαρά ωμική, θα ήταν δυνατόν να ανυψώσουμε την τάση στο τέλος της γραμμής με τη χρήση στατών πυκνωτών;

Εξηγήστε.

#### ΑΣΚΗΣΗ 4η

Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή της πραγματικής και της άεργης ισχύος.

Αντικείμενο: Παρατήρηση της ροής της πραγματικής και της άεργης ισχύος όταν:

α) οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς είναι ίσες κατά μέτρο με μηδενική ή διάφορη του μηδενός φασική γωνία.

β) οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς είναι διάφορες κατά μέτρο με μηδενική ή διάφορη του μηδενός φασική γωνία.

Θεωρία: Οι γραμμές μεταφοράς σχεδιάζονται και κατασκευάζονται για να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ισχύ τα διάφορα φορτία. Η ισχύς σε μια γραμμή μεταφοράς συνήθως ρέει από τη γεννήτρια (άκρο τροφοδοσίας S) προς το φορτίο (άκρο λήψης R).

Η ισχύς σε μια τέτοια γραμμή, μπορεί να ρέει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης του συστήματος, που μεταβάλλονται φυσικά κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο χαρακτήρας του φορτίου αλλάζει επίσης από ώρα σε ώρα και ως προς τα απορροφούμενα KVA και ως προς το συντελεστή ισχύος.

Κάτω από τέτοιες μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης, που περιπλέκονται ακόμη περισσότερο λόγω της δυνατότητας αντιστροφής των ρόλων πηγής και φορτίου στα δύο άκρα της γραμμής, πώς εμείς μπορούμε να κατανοήσουμε και να επιλύσουμε το πρόβλημα της ροής της ηλεκτρικής ισχύος;

Μπορούμε λοιπόν να έχουμε τις επιθυμητές απαντήσεις, αν στρέψουμε την προσοχή μας στις τάσεις σε κάθε άκρο της γραμμής και στη φασική γωνία.

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η αναπαράσταση του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους (η χωρητική αγωγιμότητα  $\dot{Y}$  έχει παραληφθεί για λόγους ευκολίας), όπου:

$\dot{U}_S, \dot{U}_R$  φασικές τάσεις αναχώρησης και άφιξης της γραμμής σε KV αντίστοιχα,

$\dot{Z}=R+jX_L$  σύνθετη μιγαδική αντίσταση της γραμμής ανά φάση σε  $\Omega$ ,

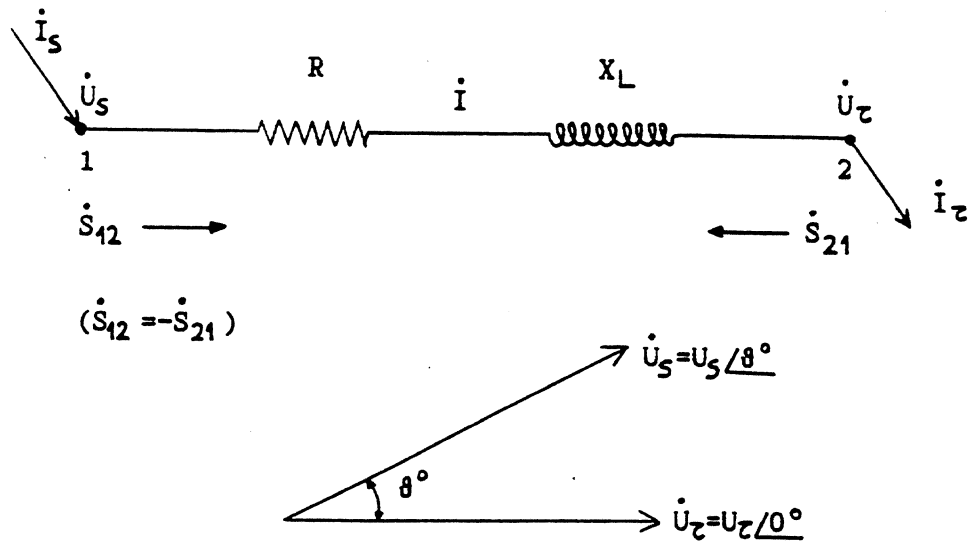
$\dot{I}_S = \dot{I}_R = \dot{I}$  ρεύμα γραμμής ανά φάση σε KA,

$\theta$  φασική γωνία και



$\dot{S}_{12}, \dot{S}_{21}$  οι μιγαδικές ανά φάση ισχύεις σε MVA.

Από το σχήμα 4.1 έχουμε:



Σχήμα 4.1

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S - \dot{U}_T}{\dot{Z}} \quad \text{και} \quad \dot{I}^* = \frac{\dot{U}_S^* - \dot{U}_T^*}{\dot{Z}^*}$$

$$\dot{S}_{12} = P_{12} + jQ_{12} = \dot{U}_S \dot{I}^* = \dot{U}_S \frac{\dot{U}_S^* - \dot{U}_T^*}{\dot{Z}^*} = \frac{U_S^2 - U_S U_T / \theta}{R - jX_L}$$

$$\dot{S}_{21} = P_{21} + jQ_{21} = \dot{U}_T (-\dot{I})^* = \dot{U}_T \frac{\dot{U}_T^* - \dot{U}_S^*}{\dot{Z}^*} = \frac{U_T^2 - U_S U_T / -\theta}{R - jX_L}$$

ή

$$P_{12} + jQ_{12} = \frac{[U_S^2 - (U_S U_T \cos \theta + j U_S U_T \eta \mu \theta)] (R + jX_L)}{R^2 + X_L^2}$$

$$= \frac{RU_S^2 - RU_S U_T \cos \theta - jRU_S U_T \eta \mu \theta + jX_L U_S^2 - jX_L U_S U_T \cos \theta - j^2 X_L U_S U_T \eta \mu \theta}{R^2 + X_L^2}$$

Από την τελευταία σχέση συμπεραίνουμε ότι:

$$P_{12} = \frac{1}{R^2 + X_L^2} (RU_S^2 - RU_S U_Z \cos \theta + X_L U_S U_Z \sin \theta) \quad (4.1)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{R^2 + X_L^2} (X_L U_S^2 - X_L U_S U_Z \cos \theta - RU_S U_Z \sin \theta)$$

Επίσης:

$$P_{21} + jQ_{21} = \frac{[U_Z^2 - (U_S U_Z \cos \theta - jU_S U_Z \sin \theta)] (R + jX_L)}{R^2 + X_L^2} =$$

$$= \frac{RU_Z^2 - RU_S U_Z \cos \theta + jRU_S U_Z \sin \theta + jX_L U_Z^2 - jX_L U_S U_Z \cos \theta + j^2 X_L U_S U_Z \sin \theta}{R^2 + X_L^2}$$

Από την τελευταία σχέση συμπεραίνουμε ότι:

$$P_{21} = \frac{1}{R^2 + X_L^2} (RU_Z^2 - RU_S U_Z \cos \theta - X_L U_S U_Z \sin \theta) \quad (4.2)$$

$$Q_{21} = \frac{1}{R^2 + X_L^2} (X_L U_Z^2 - X_L U_S U_Z \cos \theta + RU_S U_Z \sin \theta)$$

Οι πραγματικές ισχύεις  $P_{12}$  και  $P_{21}$  είναι σε MW και οι άεργες ισχύεις  $Q_{12}$  και  $Q_{21}$  είναι σε MVar.

Αν υποθέσουμε τώρα ότι η γραμμή μεταφοράς είναι χωρίς απώλειες, δηλαδή  $R=0$ , οι σχέσεις (4.1) και (4.2) δίνουν:

$$P_{12} = \frac{U_S U_Z}{X_L} \sin \theta = P_S \quad Q_{12} = \frac{U_S^2 - U_S U_Z \cos \theta}{X_L} = Q_S \quad (4.3)$$

και

$$P_{21} = -\frac{U_S U_Z}{X_L} \sin \theta = -P_Z \quad Q_{21} = \frac{U_Z^2 - U_S U_Z \cos \theta}{X_L} = -Q_Z \quad (4.4)$$

1) Αν  $U_S = U_Z$  και  $\theta = 0^\circ$

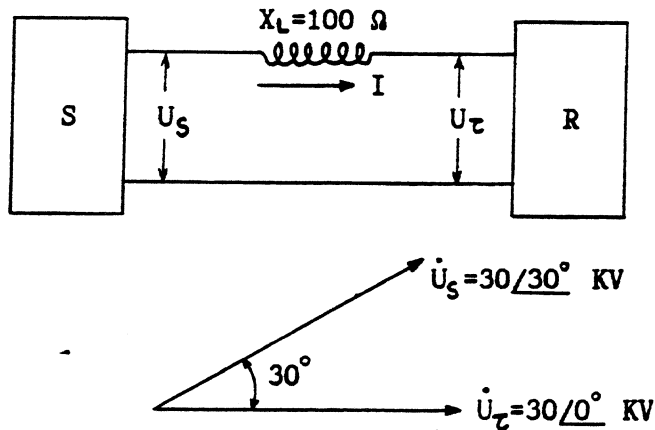
τότε  $P_{12} = P_{21} = 0$  και  $Q_{12} = Q_{21} = 0$ , δηλαδή στην περίπτωση αυτή δεν παρατηρείται ροή πραγματικής και άεργης ισχύος.

2) Αν  $U_S = U_T = U$  και  $\theta \neq 0^\circ$

$$\text{τότε} \quad P_{12} = \frac{U^2}{X_L} \eta \mu \theta = -P_{21} \quad \text{και} \quad Q_{12} = \frac{U^2}{X_L} (1 - \sigma \nu \theta) = Q_{21} \quad (4.5)$$

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ροή πραγματικής και άεργης ισχύος.

Θεωρούμε τώρα μια γραμμή μεταφοράς που οι φασικές τάσεις στα άκρα της είναι ίσες κατά μέτρο, δηλαδή  $U_S = U_T = 30 \text{ KV}$  και η τάση στο άκρο λήψης καθυστερεί της τάσης στο άκρο τροφοδοσίας κατά  $30^\circ$ . Η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση είναι  $100 \Omega$  και το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2

Η φασική πτώση τάσης στη γραμμή είναι:

$$\dot{U}_S - \dot{U}_T = 30 \angle 30^\circ - 30 \angle 0^\circ = 30 \sigma \nu \nu 30^\circ + j 30 \eta \mu 30^\circ - 30 = 26 + j 15 - 30 = -4 + j 15 = 15,5 \angle 105^\circ \text{ KV}$$

Το ρεύμα της γραμμής ανά φάση είναι:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S - \dot{U}_T}{j X_L} = \frac{15,5 \angle 105^\circ}{100 \angle 90^\circ} = 155 \angle 15^\circ \text{ A}$$

Οι παραστατικοί μιγάδες  $\dot{U}_S$ ,  $\dot{U}_T$ ,  $\dot{U}_S - \dot{U}_T$  και  $\dot{I}$  φαίνονται στο μιγαδικό διάγραμμα του σχήματος 4.3.

Η πραγματική και η άεργη ισχύς ανά φάση στα δύο άκρα της γραμμής είναι:

Άκρο τροφοδοσίας:

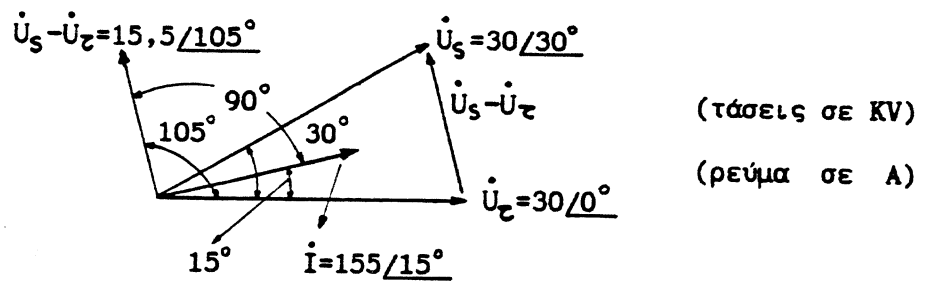
$$P_S = 30 \text{ KV} \cdot 155 \text{ A} \cdot \sigma \nu \nu (+15^\circ) = 4.500 \text{ KW}$$

$$Q_S = 30\text{KV} \cdot 155\text{A} \cdot \eta\mu(+15^\circ) = 1.200 \text{ KVAr}$$

Άκρο λήψης:

$$P_Z = 30\text{KV} \cdot 155\text{A} \cdot \sigma\upsilon\nu(-15^\circ) = 4.500 \text{ KW}$$

$$Q_Z = 30\text{KV} \cdot 155\text{A} \cdot \eta\mu(-15^\circ) = -1.200 \text{ KVAr}$$



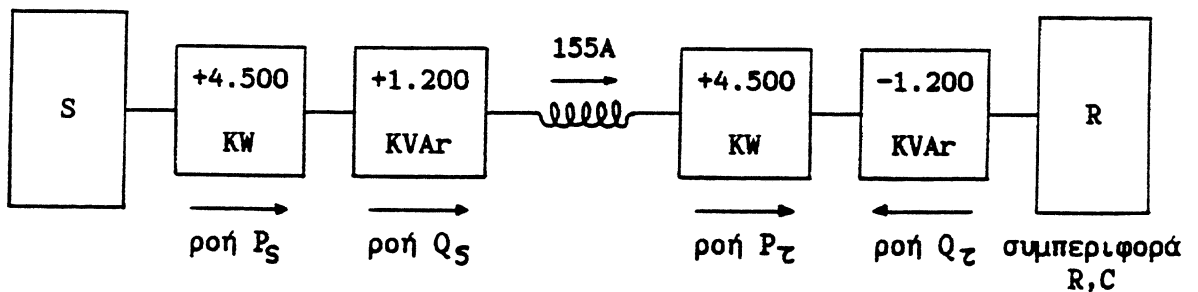
Σχήμα 4.3

Στα ίδια αποτελέσματα καταλήγουμε αν εφαρμόσουμε τις σχέσεις (4.5), δηλαδή:

$$P_{12} = -P_{21} = \frac{(30 \cdot 10^3)^2}{100} \eta\mu 30^\circ = 4.500 \text{ KW και}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{(30 \cdot 10^3)^2}{100} (1 - \sigma\upsilon\nu 30^\circ) = 1.200 \text{ KVAr}$$

Το άκρο τροφοδοσίας τροφοδοτεί με πραγματική και άεργη ισχύ τη γραμμή, ενώ το άκρο λήψης απορροφάει πραγματική ισχύ από τη γραμμή και την τροφοδοτεί με άεργη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4

Από το σχήμα 4.4 συμπεραίνουμε επίσης ότι:

$$P_{\gamma} = 4.500 \text{ KW} - 4.500 \text{ KW} = 0 \text{ KW} \quad \text{ή}$$

$$P_{\gamma} = I^2 R = 155^2 \cdot 0 = 0 \text{ KW} \quad \text{και}$$

$$Q_{\gamma} = 1.200 \text{ KVAR} + 1.200 \text{ KVAR} = 2.400 \text{ KVAR} \quad \text{ή}$$

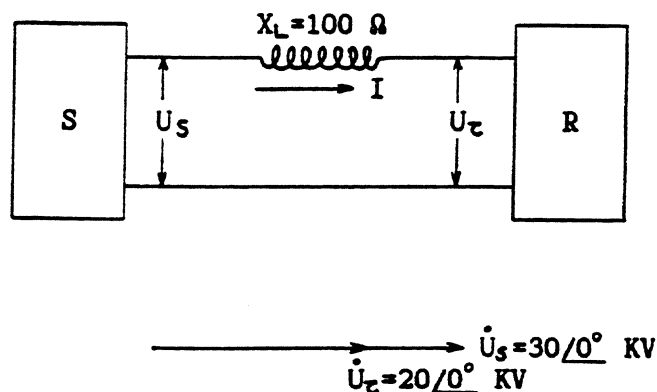
$$Q_{\gamma} = I^2 X_L = 155^2 \cdot 100 = 2.400 \text{ KVAR}$$

Το παράδειγμα αυτό της γραμμής μεταφοράς με  $U_S = U_T$  και  $\theta \neq 0^\circ$  δείχνει ότι μια φασική μετατόπιση μεταξύ των τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής, έχει σαν αποτέλεσμα ροή πραγματικής και άεργης ισχύος.

3) Αν  $U_S \neq U_T$  και  $\theta = 0^\circ$

$$\text{τότε} \quad P_{12} = P_{21} = 0 \quad \text{και} \quad Q_{12} = \frac{U_T^2 - U_S U_T}{X_L} \quad Q_{21} = \frac{U_S^2 - U_S U_T}{X_L} \quad (4.6)$$

Θεωρούμε τώρα μια γραμμή μεταφοράς που οι φασικές τάσεις στα άκρα της διαφέρουν κατά μέτρο, δηλαδή  $U_S = 30 \text{ KV}$ ,  $U_T = 20 \text{ KV}$  και η φασική γωνία είναι μηδέν. Η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση είναι  $100 \Omega$  και το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5

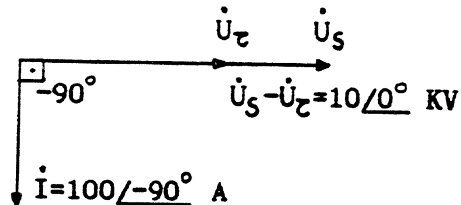
Η φασική πτώση τάσης στη γραμμή είναι:

$$\dot{U}_S - \dot{U}_T = 30 / 0^\circ - 20 / 0^\circ = 30 - 20 = 10 = 10 / 0^\circ \text{ KV}$$

Το ρεύμα της γραμμής ανά φάση είναι:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S - \dot{U}_Z}{jX_L} = \frac{10.000 \angle 0^\circ}{100 \angle 90^\circ} = 100 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Οι παραστατικοί μιγάδες  $\dot{U}_S, \dot{U}_Z, \dot{U}_S - \dot{U}_Z$  και  $\dot{I}$  φαίνονται στο μιγαδικό διάγραμμα του σχήματος 4.6.



Σχήμα 4.6

Η πραγματική και η άεργη ισχύς ανά φάση στα δύο άκρα της γραμμής είναι:

Άκρο τροφοδοσίας:

$$P_S = 30 \text{KV} \cdot 100 \text{A} \cdot \cos(+90^\circ) = 0 \text{ KW}$$

$$Q_S = 30 \text{KV} \cdot 100 \text{A} \cdot \sin(+90^\circ) = 3.000 \text{ KVAR}$$

Άκρο λήψης:

$$P_Z = 20 \text{KV} \cdot 100 \text{A} \cdot \cos(+90^\circ) = 0 \text{ KW}$$

$$Q_Z = 20 \text{KV} \cdot 100 \text{A} \cdot \sin(+90^\circ) = 2.000 \text{ KVAR}$$

Στα ίδια αποτελέσματα καταλήγουμε αν εφαρμόσουμε τις σχέσεις (4.6), δηλαδή:

$$P_{12} = P_{21} = 0 \text{ KW}$$

$$Q_{12} = \frac{(30 \cdot 10^3)^2 - 30 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3}{100} = 3.000 \text{ KVAR} \text{ και}$$

$$Q_{21} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2 - 30 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3}{100} = -2.000 \text{ KVAR}$$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε ροή πραγματικής ισχύος, ενώ έχουμε ροή άερρης ισχύος, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.7.

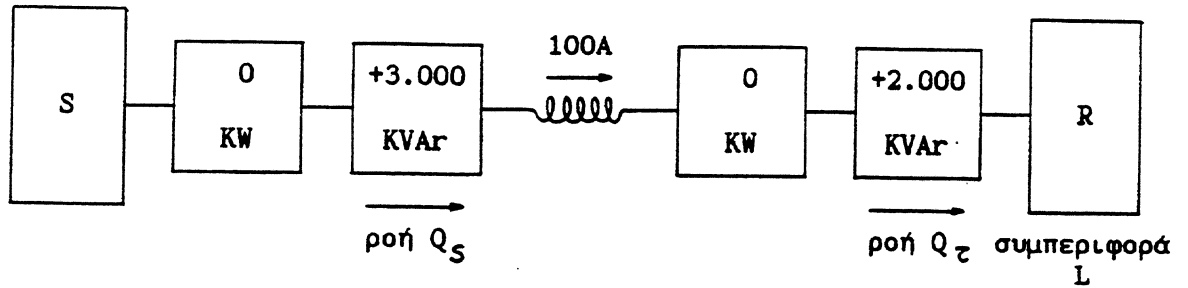
Από το σχήμα 4.7 συμπεραίνουμε επίσης ότι:

$$P_\gamma = 0 \text{ KW} \text{ ή}$$

$$P_{\gamma} = I^2 R = 100^2 \cdot 0 = 0 \text{ KW} \text{ και}$$

$$Q_{\gamma} = 3.000 \text{ KVAR} - 2.000 \text{ KVAR} = 1.000 \text{ KVAR} \text{ ή}$$

$$Q_{\gamma} = I^2 X_L = 100^2 \cdot 100 = 1.000 \text{ KVAR}$$

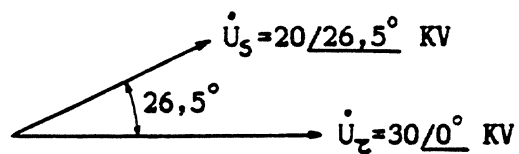
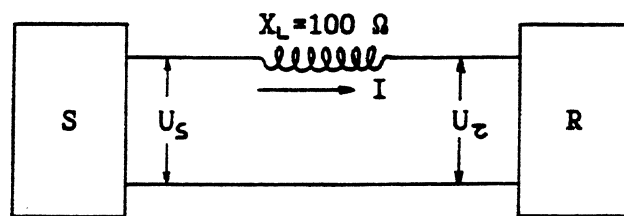


Σχήμα 4.7

4) Αν  $U_S \neq U_Z$  και  $\theta \neq 0^\circ$

$$\text{τότε } P_{12} = \frac{U_S U_Z}{X_L} \eta \mu \theta = -P_{21} \text{ και } Q_{12} = \frac{U_S^2 - U_S U_Z \cos \theta}{X_L} \quad Q_{21} = \frac{U_Z^2 - U_S U_Z \cos \theta}{X_L} \quad (4.7)$$

Θεωρούμε τώρα μια γραμμή μεταφοράς που οι φασικές τάσεις στα άκρα της διαφέρουν κατά μέτρο, δηλαδή  $U_S = 20 \text{ KV}$ ,  $U_Z = 30 \text{ KV}$  και η  $\dot{U}_S$  προπορεύεται της  $\dot{U}_Z$  κατά  $26,5^\circ$ . Η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση είναι  $100 \Omega$  και το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8

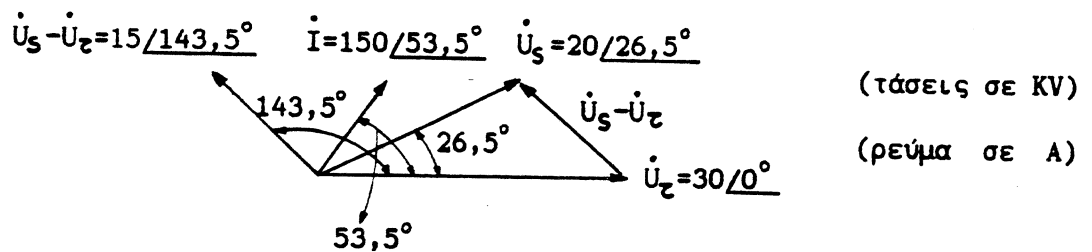
Η φασική πτώση τάσης στη γραμμή είναι:

$$\dot{U}_S - \dot{U}_Z = 20/26,5^\circ - 30/0^\circ = 20 \cos 26,5^\circ + j 20 \eta\mu 26,5^\circ - 30 = 17,9 + j 8,9 - 30 = -12,1 + j 8,9 = 15/143,5^\circ \text{ KV}$$

Το ρεύμα της γραμμής ανά φάση είναι:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S - \dot{U}_Z}{jX_L} = \frac{15.000/143,5^\circ}{100/90^\circ} = 150/53,5^\circ \text{ A}$$

Οι παραστατικοί μιγάδες  $\dot{U}_S, \dot{U}_Z, \dot{U}_S - \dot{U}_Z$  και  $\dot{I}$  φαίνονται στο μιγαδικό διάγραμμα του σχήματος 4.9.



Σχήμα 4.9

Η πραγματική και η άεργη ισχύς ανά φάση στα δύο άκρα της γραμμής είναι:

Άκρο τροφοδοσίας:

$$P_S = 20 \text{KV} \cdot 150 \text{A} \cdot \cos(-27^\circ) = 2.670 \text{ KW}$$

$$Q_S = 20 \text{KV} \cdot 150 \text{A} \cdot \eta\mu(-27^\circ) = -1.360 \text{ KVAR}$$

Άκρο λήψης:

$$P_Z = 30 \text{KV} \cdot 150 \text{A} \cdot \cos(-53,5^\circ) = 2.670 \text{ KW}$$

$$Q_Z = 30 \text{KV} \cdot 150 \text{A} \cdot \eta\mu(-53,5^\circ) = -3.610 \text{ KVAR}$$

Στα ίδια αποτελέσματα καταλήγουμε αν εφαρμόσουμε τις σχέσεις (4.7), δηλαδή:

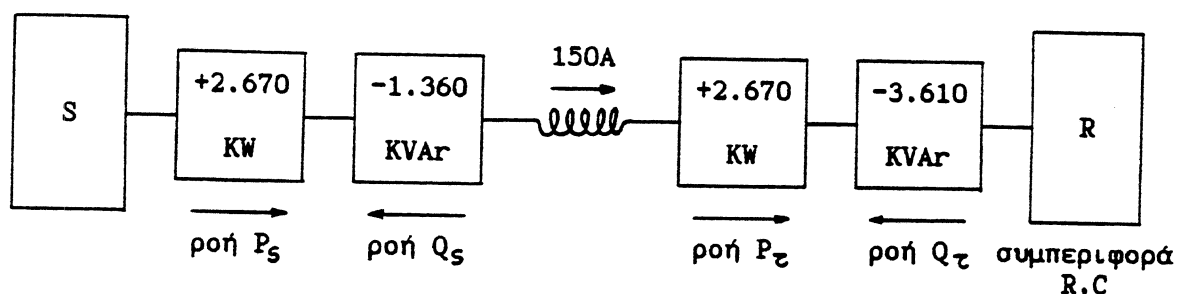
$$P_{12} = -P_{21} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^3}{100} \eta\mu 26,5^\circ = 2.670 \text{ KW}$$

$$Q_{12} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2 - 20 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot \cos 26,5^\circ}{100} = -1.360 \text{ KVAR} \quad \text{και}$$



$$Q_{21} = \frac{(30 \cdot 10^3)^2 - 20 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot \cos 26,5^\circ}{100} = 3.610 \text{ KVAR}$$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε ροή πραγματικής και άεργης ισχύος, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10

Από το σχήμα 4.10 συμπεραίνουμε επίσης ότι:

$$P_{\gamma} = 2.670 \text{ KW} - 2.670 \text{ KW} = 0 \text{ KW} \quad \text{ή}$$

$$P_{\gamma} = I^2 R = 150^2 \cdot 0 = 0 \text{ KW} \quad \text{και}$$

$$Q_{\gamma} = 3.610 \text{ KVAR} - 1.360 \text{ KVAR} = 2.250 \text{ KVAR} \quad \text{ή}$$

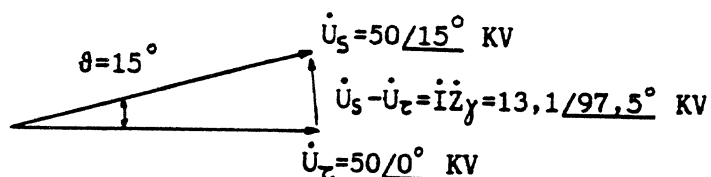
$$Q_{\gamma} = I^2 X_L = 150^2 \cdot 100 = 2.250 \text{ KVAR}$$

Τέλος, αν θεωρήσουμε ότι η γραμμή μεταφοράς έχει και ωμική και επαγωγική και χωρητική αντίσταση, γεγονός που συμβαίνει πάντα, αλλά λαμβάνεται υπόψη μόνο στις γραμμές μέσου και μεγάλου μήκους, θα έχουμε ότι:

Το ρεύμα  $\dot{I}_r$  στο άκρο λήψης είναι διαφορετικό από το ρεύμα  $\dot{I}_s$  στο άκρο τροφοδοσίας και κατά μέτρο και κατά γωνία, λόγω του ρεύματος που ρέει μεταξύ φάσης και ουδέτερου σημείου (γης), μέσω της παράλληλης χωρητικότητας.

Επίσης έχουμε δει ότι, αν και υπάρχει μια πτώση τάσης στη γραμμή μεταφοράς, το μέτρο της τάσης στο άκρο λήψης μπορεί να γίνει ίσο με το μέτρο της τάσης στο άκρο τροφοδοσίας. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει η τάση  $\dot{U}_r$  στο άκρο λήψης να μην είναι σε φάση με την τάση  $\dot{U}_s$  στο άκρο τροφοδοσίας. Για παράδειγμα θεωρούμε μια γραμμή μεταφοράς με τάσεις  $\dot{U}_r$  και  $\dot{U}_s$ , όπως στο σχήμα 4.11.

Η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής έχουν σαν αποτέλεσμα μια πτώση τάσης μεταξύ άκρου τροφοδοσίας και άκρου λήψης. Η χωρητική αντί-



Σχήμα 4.11

δραση όμως, έχει αλλάξει τη γωνία μεταξύ της τάσης στα άκρα της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής και του ρεύματος άφιξης. Η τάση που επάγεται τώρα στα άκρα της επαγωγικής αντίδρασης δεν έχει πλέον διαφορά φάσης  $90^\circ$  με το ρεύμα άφιξης, όπως είδαμε πιο πριν στις περιπτώσεις 2,3 και 4. Το ρεύμα άφιξης έχει μια τέτοια γωνία με την τάση που επάγεται στα άκρα της επαγωγικής αντίδρασης, ώστε η τάση αυτή να προστίθεται στην πραγματικότητα με την τάση που επάγεται στα άκρα της ωμικής αντίστασης της γραμμής. Δηλαδή οι πτώσεις τάσης  $\dot{I}R$  και  $\dot{I}X_L$  αντισταθμίζονται από το ρεύμα που ρέει από τη φάση προς τη γη μέσω της παράλληλης χωρητικότητας  $X_C$ .

#### Όργανα-συσσκευές-υλικά.

Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC. (2)

Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.

Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)

Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.

Μετρητής φασικής γωνίας H-PAM-150.

Τριφασικός ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής H-RA-150 (διαδοχή φάσεων ορθή).

Βολτόμετρα AC-VA-150.

#### Πειραματική διαδικασία.

Στην ακόλουθη πειραματική διαδικασία θα χρησιμοποιήσουμε δύο πηγές, μία στο

άκρο τροφοδοσίας και μία στο άκρο λήψης. Τις δύο πηγές (σταθμός I και σταθμός II) θα συνδέσει μια γραμμή μεταφοράς και εμείς θα μελετήσουμε τη ροή της πραγματικής και της άεργης ισχύος μεταξύ των δύο σταθμών.

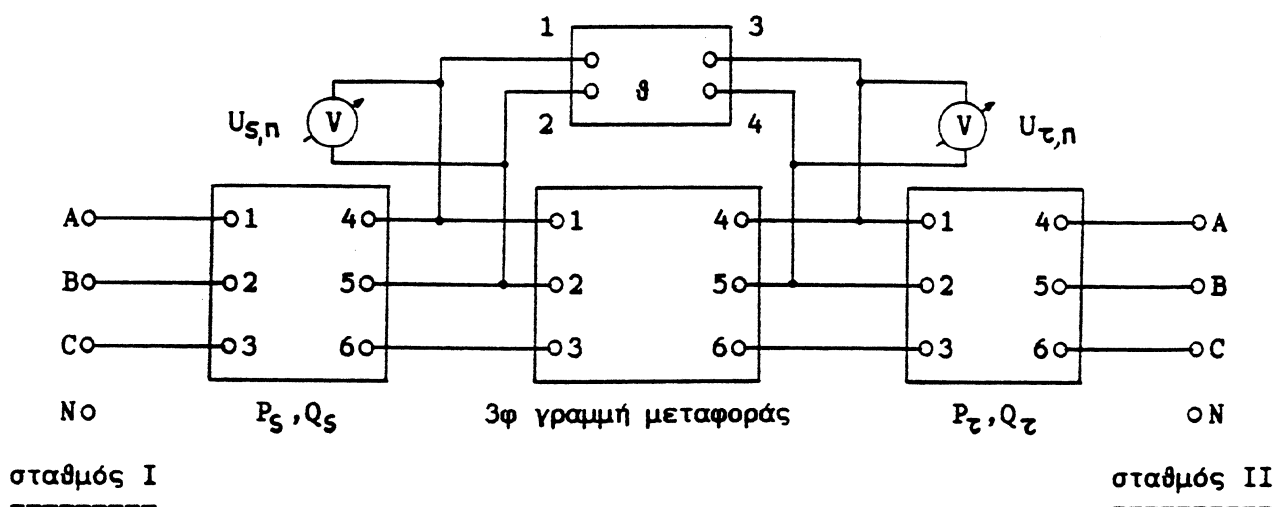
Το πείραμα θα γίνει σε τρία μέρη:

- i) Τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής άνισες αλλά σε φάση,
- ii) Τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής ίσες αλλά όχι σε φάση και
- iii) Τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής άνισες και όχι σε φάση.

i) Οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής άνισες αλλά σε φάση ( $U_{S,n} \neq U_{T,n}$ ,  $\theta = 0^\circ$ ).

(Περίπτωση 3)

1. Συνδέστε μια τριφασική γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ακροδεκτών A,B,C (μεταβλητή τριφασική τροφοδοσία) των δύο σταθμών I και II. Συνδέστε ένα τριφασικό μετρητή Watt-Var και ένα βολτόμετρο σε κάθε άκρο της γραμμής καθώς και ένα μετρητή φασικής γωνίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12

2. Με το διακόπτη της γραμμής μεταφοράς OFF, ρυθμίστε τις τάσεις  $U_{S,n} = U_{T,n} = 300 \text{ V}$  και παρατηρήστε ότι η φασική γωνία μεταξύ των ακροδεκτών A,B του σταθμού I και των ακροδεκτών A,B του σταθμού II είναι μηδέν. Αν η φασική γωνία εί-

ναι διάφορη του μηδενός ελέγξτε πάλι το κύκλωμα του σχήματος 4.12.

3. Χωρίς να κάνετε καμιά αλλαγή, μετρήστε τη φασική γωνία μεταξύ των ακροδεκτών A,B του σταθμού I και των ακροδεκτών B,A του σταθμού II.

Φασική γωνία = .....

Προπορεύεται η τάση .....

4. Χωρίς να κάνετε καμιά αλλαγή, μετρήστε τη φασική γωνία μεταξύ των ακροδεκτών A,B του σταθμού I και των ακροδεκτών B,C του σταθμού II.

Φασική γωνία = .....

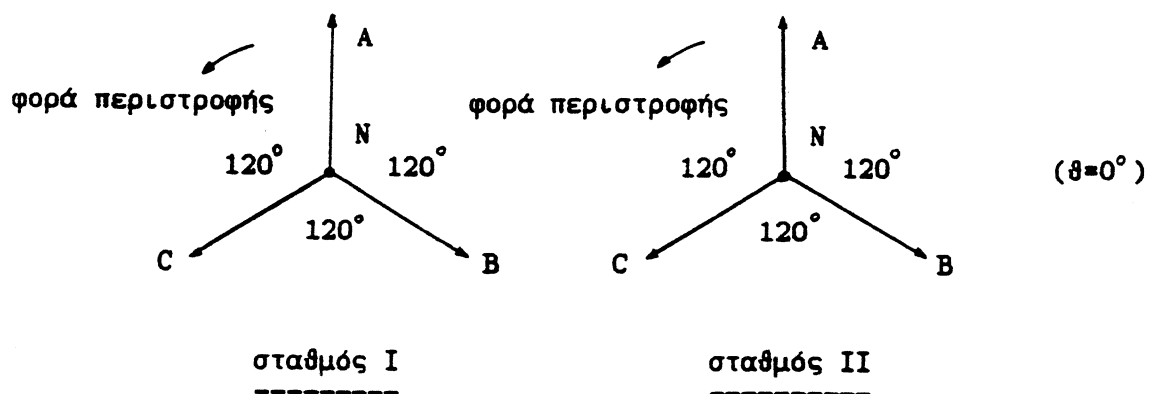
Προπορεύεται η τάση .....

5. Μετρήστε τη φασική γωνία μεταξύ των ακροδεκτών A,B του σταθμού I και των ακροδεκτών C,A του σταθμού II.

Φασική γωνία = .....

Προπορεύεται η τάση .....

6. Μετρήστε όλες τις φασικές γωνίες μεταξύ των φάσεων και του ουδέτερου (N) των σταθμών I και II. Δείξτε ότι το διάγραμμα των παραστατικών μιγάδων των φασικών τάσεων των δύο σταθμών, είναι σαν αυτό του σχήματος 4.13.



Σχήμα 4.13

Σκοπός αυτού του προκαταρκτικού ελέγχου των φασικών γωνιών είναι να εξοικειωθείτε με τις φασικές γωνίες μεταξύ των τάσεων των δύο σταθμών.

7. Θέστε τον επιλογέα της γραμμής μεταφοράς στη θέση 220 KV, 300 Km. Κλείστε

το διακόπτη της γραμμής μεταφοράς (ON).

8. Καταγράψτε στον πίνακα 4.1 τις ενδείξεις  $P_S, Q_S, U_{S,n}, \theta, U_{T,n}, P_T$  και  $Q_T$ . Οι ισχύεις  $P_S, Q_S, P_T$  και  $Q_T$  είναι συνολικές τριφασικές ισχύεις και όχι ανά φάση ισχύεις.

9. Θέστε την τάση του σταθμού I ίση με 340 V. Επαναλάβετε το βήμα 8. Ποιον από τους δύο σταθμούς θα θεωρήσετε σα λήπτη (φορτίο);

10. Θέστε την τάση του σταθμού I ίση με 260 V. Επαναλάβετε το βήμα 8. Ποιον από τους δύο σταθμούς θα θεωρήσετε σα λήπτη (φορτίο);

Σταθμός I	Σταθμός II	$P_S$	$Q_S$	$U_{S,n}$	$\theta$	$U_{T,n}$	$P_T$	$Q_T$
300 V	300 V							
340 V	300 V							
260 V	300 V							

Πίνακας 4.1

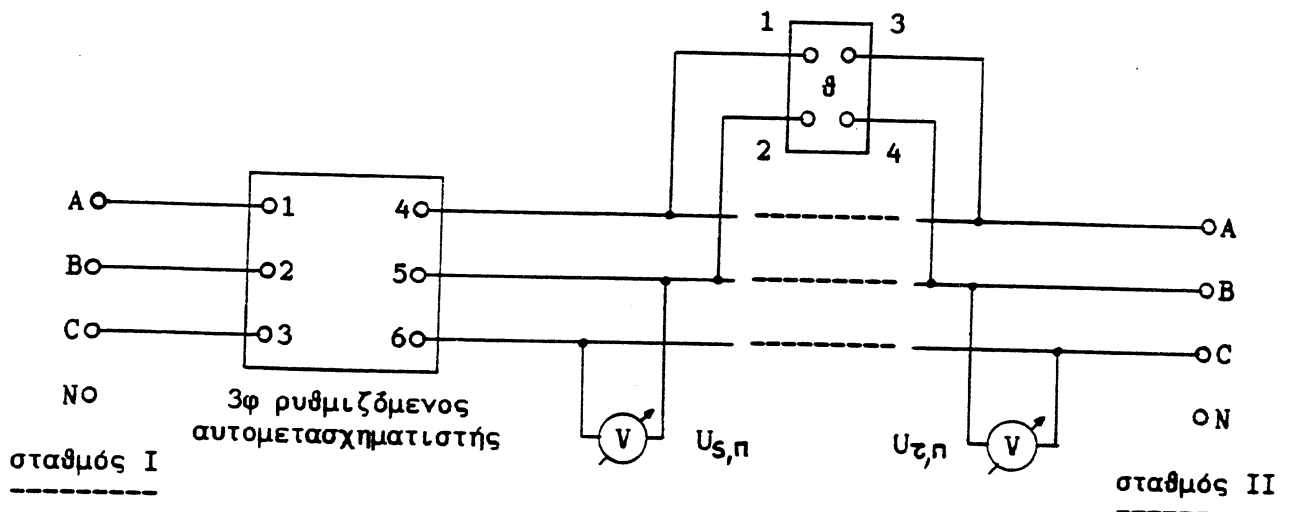
11. Μεταβάλλετε την τάση και των δύο σταθμών I και II και ελέγξτε την αλήθεια της πρότασης ότι "η άεργη ισχύς ρέει από την υψηλότερη τάση προς τη χαμηλότερη τάση."

ii) Οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής ίσες αλλά όχι σε φάση ( $U_{S,n} = U_{T,n}$ ,  $\theta \neq 0^\circ$ ).  
(Περίπτωση 2)

Στο σημείο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τον τριφασικό ρυθμιζόμενο αυτομετασχηματιστή H-RA-150 για να μας μετατοπίσει τη γωνία του σταθμού I κατά  $15^\circ$ . Η μετατόπιση της γωνίας (επιπορεία ή προπορεία) επιτυγχάνεται με την αλλαγή των συνδέσεων των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μ/σ, που γίνεται με τη βοήθεια ενός διακόπτη λήψεων. Για τους σκοπούς αυτής της άσκησης είναι αρκετό να γνωρίζουμε ότι, όταν η θέση του διακόπτη λήψεων αλλάζει, η τάση του δευτερεύοντος του τριφασικού μ/σ είναι:

- α) σε φάση με την τάση του πρωτεύοντος,  
 β) σε επιπορεία της τάσης του πρωτεύοντος κατά  $15^\circ$  και  
 γ) σε προπορεία της τάσης του πρωτεύοντος κατά  $15^\circ$ .

12. Συνδέστε τον τριφασικό ρυθμιζόμενο αυτομετασχηματιστή στους ακροδέκτες A,B,C του σταθμού I και με το μετρητή της φασικής γωνίας προσδιορίστε τη φασική γωνία των τάσεων των ακροδεκτών 4,5,6 του δευτερεύοντος του μ/σ ως προς τις τάσεις των ακροδεκτών A,B,C του σταθμού II. Χρησιμοποιήστε το κύκλωμα του σχήματος 4.14.



Σχήμα 4.14

Ρυθμίστε τις δύο μεταβλητές τροφοδοσίες (σταθμοί I και II) ώστε να έχετε  $U_{S,n} = U_{T,n} = 300 \text{ V}$  όταν  $\theta = 0^\circ$ . Καταγράψτε τις ενδείξεις των μεγεθών  $\theta$ ,  $U_{S,n}$  και  $U_{T,n}$  για τις τρεις θέσεις του διακόπτη λήψεων του μ/σ, στον πίνακα 4.2.

PHASE SHIFT θέση διακόπτη	φασική γωνία $\theta$ επιπορεία/προπορεία	$U_{S,n}$ [V]	$U_{T,n}$ [V]
$0^\circ$			
$+15^\circ$			
$-15^\circ$			

Πίνακας 4.2

Σημείωση: Ο διακόπτης βηματικής μεταβολής της τάσης του μ/σ (BUCK-BOOST %) πρέπει να μένει στο μηδέν και θα πρέπει να συνδέστε τη σωστή ακολουθία (διαδοχή) των φάσεων στο πρωτεύον του μ/σ. Από τα δύο λαμπάκια του PHASE SEQUENCE θα πρέπει να ανάψει το λαμπάκι RIGHT.

13. Ελέγξτε αν η γωνιακή (φασική) μετατόπιση είναι η ίδια και για τις τρεις φάσεις και ότι όλες οι τάσεις είναι συμμετρικές.

14. Συνδέστε το μοντέλο της τριφασικής γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ακροδεκτών 4,5,6 του δευτερεύοντος του μ/σ μετατόπισης της γωνίας και των ακροδεκτών A,B,C του σταθμού II. Θέστε τον επιλογέα της γραμμής μεταφοράς στη θέση 220 KV, 300 Km. Αφού παρεμβάλλετε κατάλληλα τους μετρητές Watt-Var σε κάθε άκρο της γραμμής, αλλάξτε τη θέση του διακόπτη λήψεων του ρυθμιζόμενου αυτομετασχηματιστή και καταγράψτε τις ενδείξεις των οργάνων στον πίνακα 4.3.

PHASE SHIFT θέση διακόπτη	$P_S$	$Q_S$	$U_{S,n}$	$\theta$	$U_{T,n}$	$P_T$	$Q_T$
$0^\circ$							
$+15^\circ$							
$-15^\circ$							

Πίνακας 4.3

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 4.3, προκύπτει ότι "η πραγματική ισχύς ρέει από το άκρο της γραμμής που η τάση του προπορεύεται προς το άκρο της γραμμής που η τάση του επιπορεύεται (καθυστερεί)."

iii) Οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής άνισες και όχι σε φάση ( $U_{S,n} \neq U_{T,n}$ ,  $\theta \neq 0^\circ$ ).

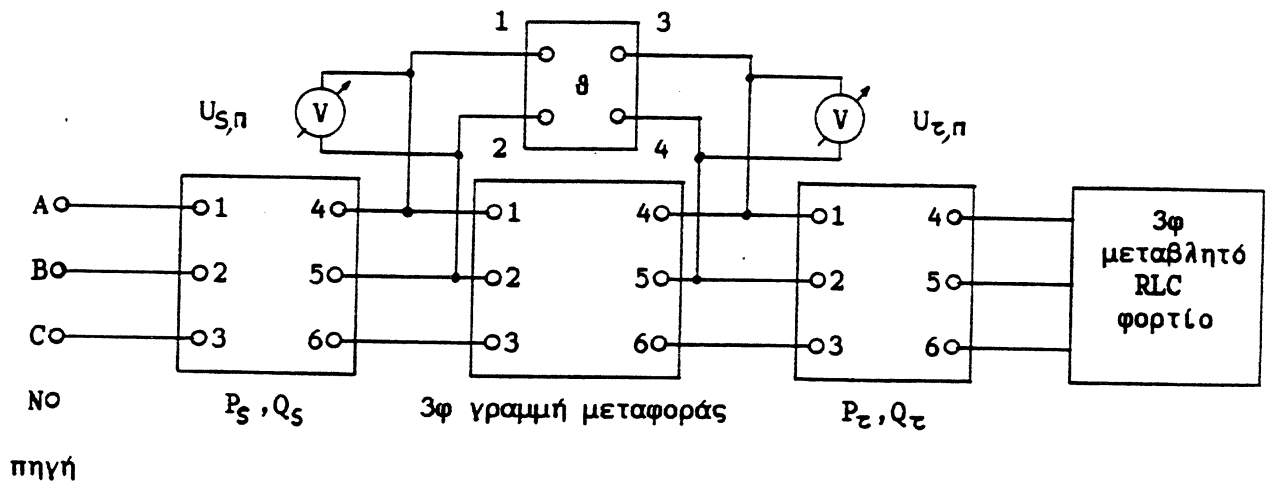
(Περίπτωση 4)

Στην παρακάτω πειραματική διαδικασία θα συνδέσουμε παθητικά φορτία (ωμικό,

επαγωγικό, χωρητικό) στο άκρο λήψης της τριφασικής γραμμής μεταφοράς.

Το αντικείμενο της διαδικασίας είναι να δείξουμε ότι υπάρχει μια φασική μετατόπιση μεταξύ των τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής, όταν αυτή τροφοδοτεί με πραγματική ισχύ το φορτίο της.

15. Χρησιμοποιήστε μία μόνο πηγή και συνδέστε το κύκλωμα του σχήματος 4.15.



Σχήμα 4.15

Θέστε  $U_{S,φ} = 300 \text{ V}$  και συνδέστε ένα ωμικό φορτίο (δύο βήματα) συνδεδεμένο σε αστέρα στο τέλος της γραμμής μεταφοράς. Ο επιλογέας της γραμμής θα πρέπει να είναι στη θέση 66 KV, 100 Km. Καταγράψτε τις ενδείξεις των οργάνων στον πίνακα 4.4.

φορτίο	$P_S$	$Q_S$	$U_{S,φ}$	$\theta$	$U_{T,φ}$	$P_T$	$Q_T$
ωμικό							
επαγωγικό							
χωρητικό							

Πίνακας 4.4

16. Επαναλάβετε το βήμα 15 της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας επαγωγικό φορτίο (θέστε τους τρεις επιλογείς του άεργου φορτίου σε πλήρες επα-



γωγικό φορτίο). Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 4.4.

17. Επαναλάβετε και πάλι το βήμα 15 χρησιμοποιώντας χωρητικό φορτίο (θέστε τους τρεις επιλογείς του έργου φορτίου σε πλήρες χωρητικό φορτίο). Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 4.4.

18. Από τις μετρήσεις που πήρατε και καταγράψατε στον πίνακα 4.4, βγάλτε τα συμπεράσματά σας.

#### Ερωτήσεις και προβλήματα.

1. Μια τριφασική γραμμή μεταφοράς έχει επαγωγική αντίδραση 100 Ω ανά φάση και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της ημέρας, βρέθηκε ότι οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής έχουν μέτρα και φασικές γωνίες όπως φαίνονται στον πίνακα 4.5.

$ \dot{U}_{S,n} $ [KV]	$ \dot{U}_{T,n} $ [KV]	φασική γωνία $\theta$ [°]	άκρο τροφοδοσίας S		άκρο λήψης R	
			$P_S$ [MW]	$Q_S$ [MVAR]	$P_T$ [MW]	$Q_T$ [MVAR]
100	100	$\dot{U}_{S,n}$ προηγείται $\dot{U}_{T,n}$ 60°				
120	100	$\dot{U}_{S,n}$ προηγείται $\dot{U}_{T,n}$ 60°				
100	120	$\dot{U}_{S,n}$ προηγείται $\dot{U}_{T,n}$ 60°				
120	100	$\dot{U}_{S,n}$ καθυστερεί $\dot{U}_{T,n}$ 30°				
120	100	0°				
α ν ά φ ά σ η						

Πίνακας 4.5

Υπολογίστε σε κάθε περίπτωση την πραγματική και την άεργη ισχύ στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς και δείξτε τη διεύθυνση ροής της ισχύος.

2. Στο πρόβλημα 1, υποθέστε ότι  $|\dot{U}_{S,n}| = |\dot{U}_{T,n}| = 100$  KV σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά ότι η φασική γωνία μεταξύ των δύο τάσεων αυτών αλλάζει κατά βήματα των

$30^\circ$ . Δηλαδή  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ . Υπολογίστε την τιμή της πραγματικής ισχύος σε κάθε περίπτωση καθώς και τη διεύθυνση ροής της, γνωρίζοντας ότι πάντα η  $\dot{U}_{\tau,\eta}$  καθυστερεί της  $\dot{U}_{\varsigma,\eta}$ .

Σχεδιάστε σε χαρτί μιλλιμετρέ την πραγματική ισχύ σε συνάρτηση της φασικής γωνίας [ $P_{\theta\lambda} = f(\theta)$ ].

Υπάρχει ένα όριο μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφέρει μια τέτοια γραμμή μεταφοράς; Τα μέτρα των τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής θεωρούνται σταθερά.

ΑΣΚΗΣΗ 5η

Μελέτη της καμπύλης  $P_{oλ} = f(\theta)$ , μετασχηματιστές, παράλληλες γραμμές μεταφοράς.

Βελτίωση δυνατότητας μεταφοράς ισχύος.

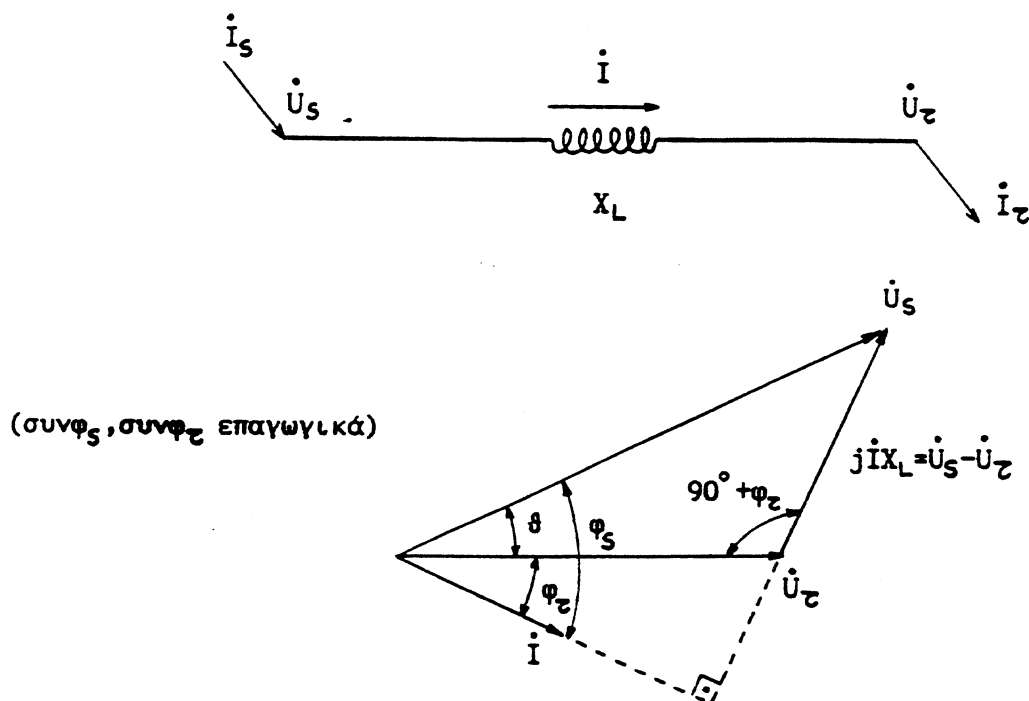
Αντικείμενο: α) Μελέτη της καμπύλης της πραγματικής ισχύος, που ρέει σε μια τριφασική γραμμή μεταφοράς, σε συνάρτηση της φασικής της γωνίας.

β) Χρήση μετασχηματιστών για αύξηση της δυνατότητας μεταφοράς της ισχύος σε μια τριφασική γραμμή μεταφοράς.

γ) Παράλληλες τριφασικές γραμμές μεταφοράς.

Θεωρία: α) Η πραγματική ισχύς, που μπορεί να μεταφέρει μια γραμμή μεταφοράς, εξαρτάται από τις τάσεις στα άκρα της γραμμής και από τη φασική γωνία μεταξύ των δύο τάσεων.

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η αναπαράσταση του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς, όπου:



Σχήμα 5.1

$\dot{U}_s, \dot{U}_r$  φασικές τάσεις αναχώρησης και άφιξης της γραμμής με  $|\dot{U}_s| > |\dot{U}_r|$ ,

$\dot{I}_S = \dot{I}_Z = \dot{I}$  ρεύμα γραμμής ανά φάση,

$R=0$  (γραμμή χωρίς απώλειες),

$X_L$  η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση,

$\dot{Y}=0$ ,

$\theta$  η φασική γωνία,

$\varphi_S$  η γωνία του συντελεστή ισχύος στην αναχώρηση, δηλαδή η γωνία μεταξύ  $\dot{U}_S$  και  $\dot{I}_S$ ,

$\varphi_Z$  η γωνία του συντελεστή ισχύος στην άφιξη, δηλαδή η γωνία μεταξύ  $\dot{U}_Z$  και  $\dot{I}_Z$  και  $\theta = \varphi_S - \varphi_Z$ .

Από τη γνωστή σχέση της τριγωνομετρίας (θεώρημα των ημιτόνων), έχουμε ότι:

$$\frac{|\dot{U}_S|}{\eta\mu(90^\circ + \varphi_Z)} = \frac{|j\dot{I}X_L|}{\eta\mu\theta} \quad \text{ή} \quad \frac{U_S}{\text{συν}\varphi_Z} = \frac{IX_L}{\eta\mu\theta} \quad \text{ή} \quad \text{Ισυν}\varphi_Z = \frac{U_S \eta\mu\theta}{X_L} \quad \text{ή}$$

$$U_Z \text{Ισυν}\varphi_Z = \frac{U_S U_Z}{X_L} \eta\mu\theta = P_Z = P_S$$

Άρα η πραγματική ισχύς που μεταφέρεται από τη γραμμή μεταφοράς ανά φάση είναι:

$$P_Z = P_S = P = \frac{U_S U_Z}{X_L} \eta\mu\theta$$

(Την πιο πάνω σχέση συναντήσαμε και στην προηγούμενη άσκηση.)

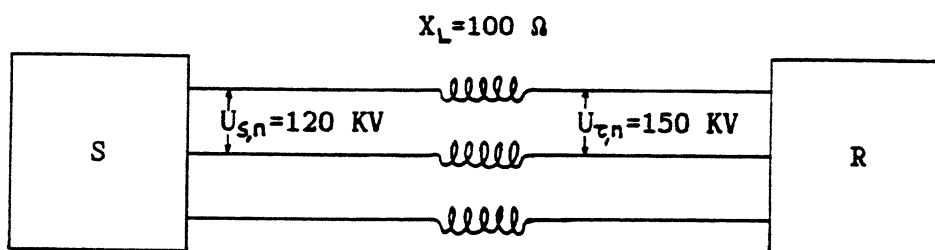
Η συνολική πραγματική ισχύς που μεταφέρεται τώρα από την τριφασική γραμμή μεταφοράς είναι:

$$P_{ολ} = 3 \frac{U_S U_Z}{X_L} \eta\mu\theta = \frac{\sqrt{3} U_S \sqrt{3} U_Z}{X_L} \eta\mu\theta = \frac{U_{S,\eta} U_{Z,\eta}}{X_L} \eta\mu\theta \quad (5.1)$$

όπου  $U_{S,\eta}$  και  $U_{Z,\eta}$  είναι τα μέτρα των πολικών τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς.

Αν η  $\dot{U}_{\tau,n}$  καθυστερεί ως προς την  $\dot{U}_{\xi,n}$ , η γωνία  $\theta$  είναι θετική. Αν όμως η  $\dot{U}_{\tau,n}$  προηγείται της  $\dot{U}_{\xi,n}$ , η γωνία  $\theta$  είναι αρνητική.

Η χρήση της σχέσης (5.1) διευκρινίζεται καλύτερα με ένα παράδειγμα. Στο σχήμα 5.2 φαίνεται μια τριφασική γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες, που έχει επαγωγική αντίδραση ανά φάση  $X_L=100 \Omega$ , πολική τάση στο άκρο τροφοδοσίας  $U_{\xi,n}=120 \text{ KV}$  και πολική τάση στο άκρο λήψης  $U_{\tau,n}=150 \text{ KV}$ . Η τάση  $\dot{U}_{\tau,n}$  καθυστερεί της τάσης  $\dot{U}_{\xi,n}$  κατά  $30^\circ$ , έτσι η φασική γωνία είναι θετική.



Σχήμα 5.2

Η συνολική πραγματική ισχύς που μεταφέρεται από την τριφασική γραμμή μεταφοράς είναι:

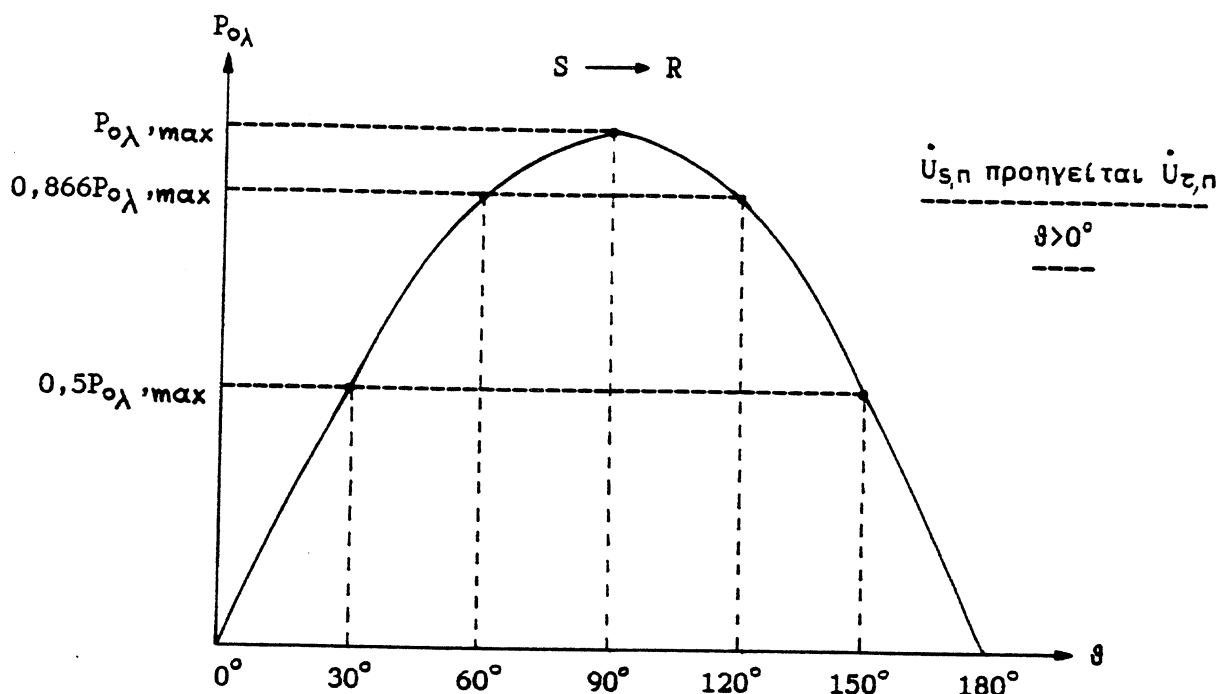
$$P_{o\lambda} = \frac{U_{\xi,n} U_{\tau,n}}{X_L} \eta_{\mu} \theta = \frac{120 \text{ KV} \cdot 150 \text{ KV}}{100 \Omega} \eta_{\mu} (+30^\circ) = 90 \text{ MW}$$

Εάν οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής διατηρούνται σταθερές (κάτι που συμβαίνει με αρκετή προσέγγιση στην πράξη), η μεταφερόμενη ισχύς θα εξαρτάται αποκλειστικά από τη φασική γωνία  $\theta$ . Η γραφική παράσταση της ισχύος  $P_{o\lambda}$  σε συνάρτηση της γωνίας  $\theta$  στην περίπτωση αυτή, φαίνεται στο σχήμα 5.3.

Καθώς η φασική γωνία αυξάνει από την τιμή μηδέν, η μεταφερόμενη ισχύς αυξάνει επίσης από την τιμή μηδέν και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή  $P_{o\lambda, \max}$  όταν η γωνία  $\theta$  γίνει  $90^\circ$ . Η τιμή  $0,5 P_{o\lambda, \max}$  επιτυγχάνεται όταν η γωνία  $\theta$  γίνει  $30^\circ$ .

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 5.3, αν η φασική γωνία περάσει τις  $90^\circ$ , η γραμμή θα εξακολουθεί να μεταφέρει πραγματική ισχύ από το άκρο τροφοδοσίας S προς το άκρο λήψης R, μόνο που καθώς η φασική γωνία αυξάνει, η μεταφερόμενη ισχύς ελαττώνεται. Πράγματι, η μεταφερόμενη ισχύς γίνεται μηδέν όταν η φασική

γωνία γίνεται  $180^\circ$ .



Σχήμα 5.3

Όταν η φασική γωνία περάσει τις  $90^\circ$ , η γραμμή μεταφοράς λειτουργεί σε μια ασταθή κατάσταση και η μεταφερόμενη ισχύς ή θα μηδενιστεί ή θα κινηθεί σε άλλο σημείο λειτουργίας πιο ευσταθές (μεταξύ  $0^\circ$  και  $90^\circ$ ) στην καμπύλη πραγματικής ισχύος-φασικής γωνίας.

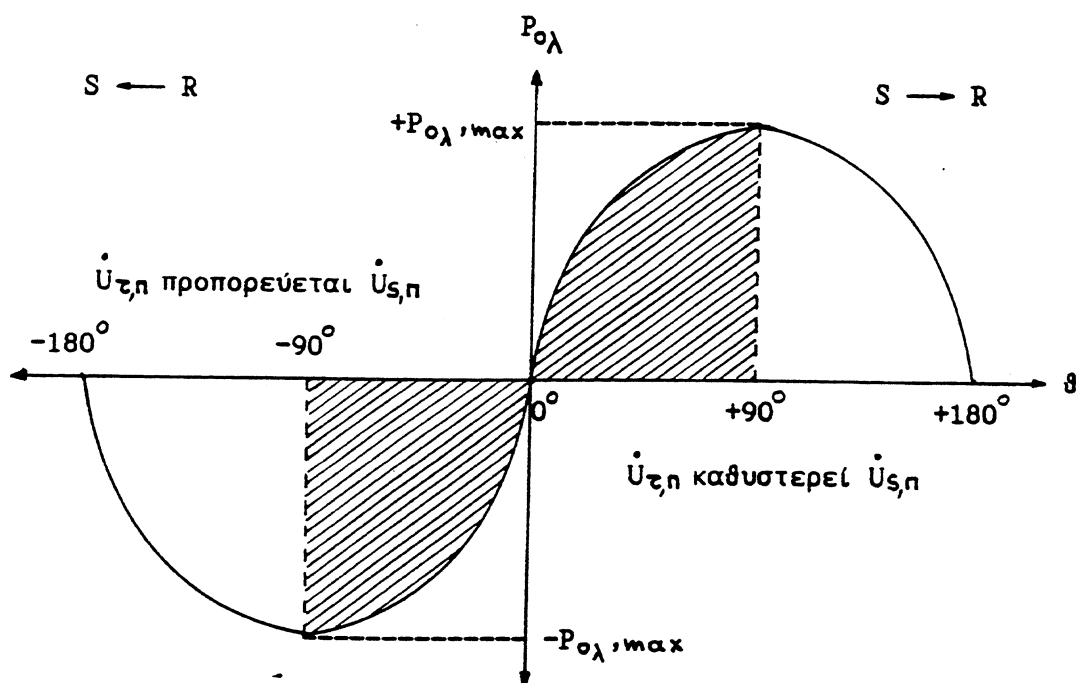
Κατά συνέπεια ευσταθή λειτουργία της γραμμής μεταφοράς και άρα αξιόπιστη μεταφορά πραγματικής ισχύος από το άκρο τροφοδοσίας προς το άκρο λήψης έχουμε μόνο όταν η φασική γωνία είναι μεταξύ  $0^\circ$  και  $90^\circ$ .

Η μέγιστη πραγματική ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί είναι:

$$P_{0\lambda, \max} = \frac{U_{s,n} U_{r,n}}{X_L} \sin 90^\circ = \frac{U_{s,n} U_{r,n}}{X_L}$$

Θα πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι μεταξύ των τάσεων  $\dot{U}_{s,n}$  και  $\dot{U}_{r,n}$  μπορεί να υπάρχει οποιαδήποτε φασική γωνία από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  ή με άλλα λόγια γωνία καθυστέρησης από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  και γωνία προπορείας από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$ .

Εάν η καμπύλη πραγματικής ισχύος-φασικής γωνίας επεκταθεί ώστε να καλύψει όλες τις δυνατές γωνίες, τότε φτιάχνουμε την καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4

Εάν η γωνία είναι μεταξύ  $0^\circ$  και  $+180^\circ$  η ισχύς μεταφέρεται από το άκρο τροφοδοσίας S στο άκρο λήψης R, ενώ όταν η γωνία είναι μεταξύ  $0^\circ$  και  $-180^\circ$  η ισχύς μεταφέρεται από το άκρο λήψης R στο άκρο τροφοδοσίας S. Σημειώνουμε ότι η γωνία π.χ. των  $-90^\circ$  δείχνει απλά ότι η τάση  $\dot{U}_{\tau,\eta}$  προηγείται της τάσης  $\dot{U}_{\varsigma,\eta}$ . Η περιοχή ευσταθούς λειτουργίας είναι τώρα μεταξύ  $-90^\circ$  και  $+90^\circ$  και είναι η μόνη περιοχή που μας ενδιαφέρει αυτή τη στιγμή.

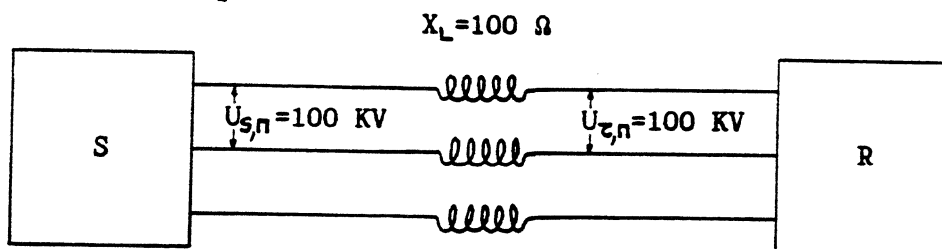
Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τάσεις στα δύο άκρα της γραμμής είναι ίσες περίπου κατά μέτρο, έτσι ώστε αν θεωρήσουμε ότι  $U_{\varsigma,\eta} = U_{\tau,\eta} = U_\eta$ , όπου  $U_\eta$  η πολική τάση της γραμμής μεταφοράς, βρίσκουμε ότι η μέγιστη ισχύς που μεταφέρεται είναι:

$$P_{0\lambda, \max} = \frac{U_\eta^2}{X_L}$$

β) Επειδή η μέγιστη ισχύς  $P_{ολ, max}$  που μπορεί να μεταφέρει μια τριφασική γραμμή μεταφοράς εξαρτάται από το τετράγωνο της τάσης  $U_n$ , όπου χρειαζόμαστε μεταφορά μεγάλων ποσών πραγματικής ισχύος, χρησιμοποιούμε υψηλές ή υπερυψηλές τάσεις. Έτσι, αν η τάση της γραμμής διπλασιαστεί, η μέγιστη πραγματική ισχύς που μεταφέρεται από τη γραμμή τετραπλασιάζεται.

Η τάση της γραμμής μπορεί να ανυψωθεί και μετά να υποβιβαστεί με την εισαγωγή ενός τριφασικού μετασχηματιστή ανύψωσης στο άκρο τροφοδοσίας και ενός παρόμοιου μετασχηματιστή υποβιβασμού στο άκρο λήψης της γραμμής. Έτσι με τη χρήση μετασχηματιστή σε κάθε άκρο της γραμμής, μπορούμε να βελτιώσουμε αισθητά τη δυνατότητα μεταφοράς πραγματικής ισχύος.

Στο σχήμα 5.5 φαίνονται ένας τροφοδότης (πηγή) και ένας λήπτης (φορτίο) που συνδέονται μέσω μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς που έχει επαγωγική αντίδραση  $100 \Omega$  ανά φάση. Η μέγιστη πραγματική ισχύς που θα μπορούσε να μεταφέρει η γραμμή είναι:

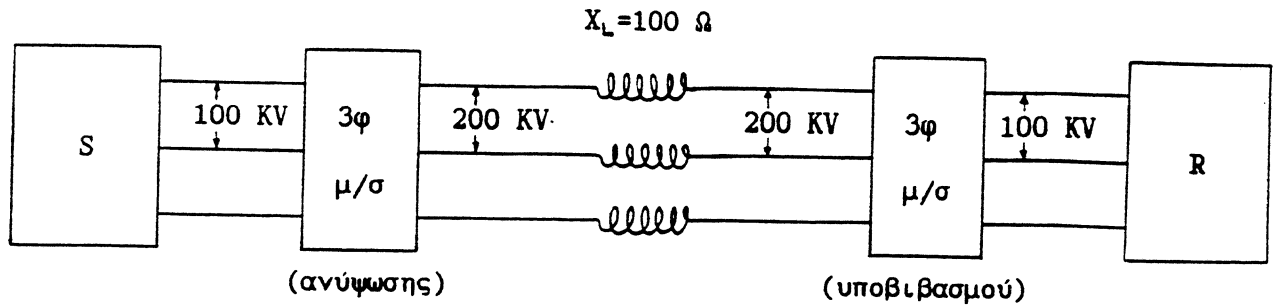


Σχήμα 5.5

$$P_{ολ, max} = \frac{U_n^2}{X_L} = \frac{100 \text{ KV} \cdot 100 \text{ KV}}{100 \Omega} = 100 \text{ MW}$$

Εάν εισάγουμε μετασχηματιστές στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς έτσι ώστε η τάση της να γίνει  $200 \text{ KV}$ , όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.6 της επόμενης σελίδας, η μέγιστη πραγματική ισχύς που θα μπορούσε να μεταφέρει τώρα η γραμμή γίνεται:





Σχήμα 5.6

$$P_{o\lambda, \max} = \frac{200 \text{ KV} \cdot 200 \text{ KV}}{100 \ \Omega} = 400 \text{ MW}$$

γ) Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο αυξάνουμε την πραγματική ισχύ που μπορεί να μεταφερθεί από έναν τροφοδότη σ'ένα λήπτη, είναι να χρησιμοποιήσουμε δύο όμοιες τριφασικές γραμμές μεταφοράς συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα. Οι δύο γραμμές μπορεί να βρίσκονται και στους ίδιους πυλώνες (πύργους).

Οι δύο όμοιες τριφασικές γραμμές μεταφοράς που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, μπορούν προφανώς να μεταφέρουν διπλάσια μέγιστη ισχύ από ότι η κάθε μία μόνη της.

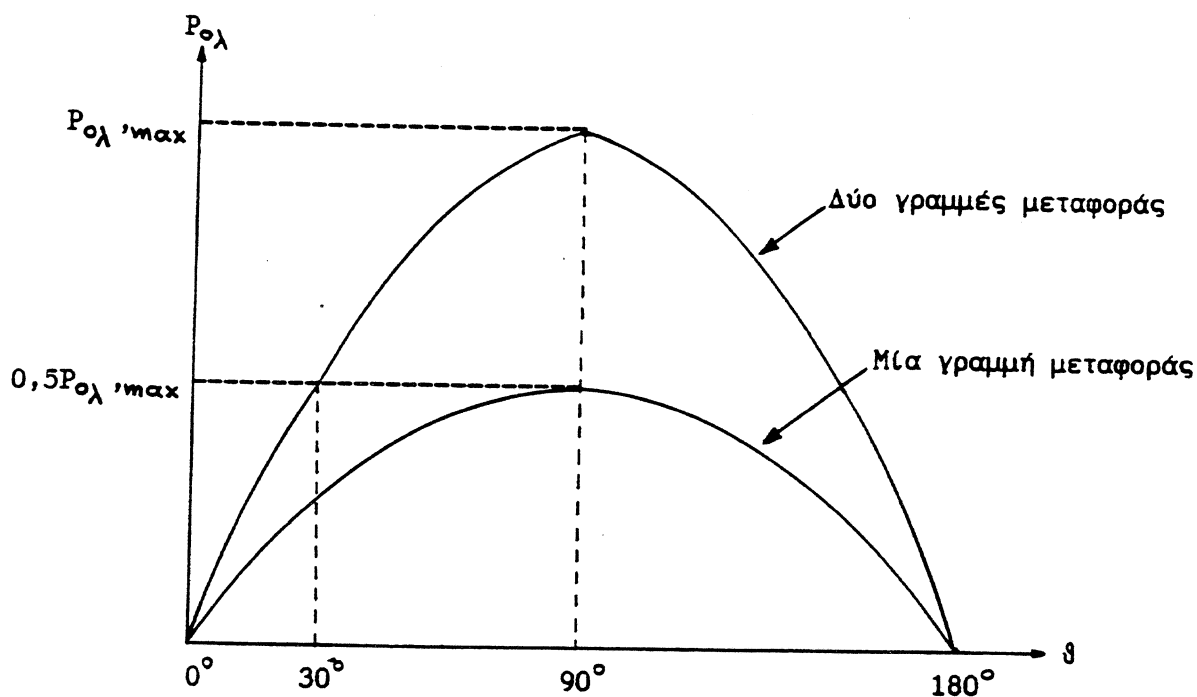
Στο σχήμα 5.7 φαίνεται η καμπύλη της συνάρτησης  $P_{o\lambda} = f(\theta)$  για δύο όμοιες τριφασικές γραμμές μεταφοράς, που βρίσκονται σε παράλληλη λειτουργία και η μέγιστη πραγματική ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί και από τις δύο γραμμές είναι  $P_{o\lambda, \max}$ .

Όταν η φασική γωνία μεταξύ της τάσης στο άκρο τροφοδοσίας και της τάσης στο άκρο λήψης είναι  $30^\circ$ , τότε η μεταφερόμενη ισχύς ισούται με  $0,5P_{o\lambda, \max}$ , που αντιστοιχεί σε ένα πολύ ευσταθές σημείο λειτουργίας.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης και η καμπύλη της συνάρτησης  $P_{o\lambda} = f(\theta)$  για μία γραμμή μεταφοράς από τις δύο πιο πάνω.

Αν μία από τις δύο τριφασικές γραμμές μεταφοράς ανοίξει ξαφνικά, είτε λόγω λάθους, είτε λόγω ενεργοποίησης των διακοπών ισχύος μετά από κάποιο σφάλμα, η

πραγματική ισχύς θα πρέπει να μεταφερθεί από την απομένουσα γραμμή. Αλλά όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 5.7, η ισχύς  $0,5P_{0\lambda, \max}$  αντιστοιχεί σε γωνία  $90^\circ$ , που είναι σημείο λειτουργίας στην περίπτωση που εργάζεται η μία γραμμή μεταφοράς.



Σχήμα 5.7

Το πιο πάνω σημείο λειτουργίας βρίσκεται ακριβώς στο χείλος της αστάθειας. Η απομένουσα γραμμή μεταφοράς δε θα μπορέσει τελικά να μεταφέρει την πραγματική ισχύ που χρειάζεται το φορτίο ( $0,5P_{0\lambda, \max}$ ) και οι τριφασικοί διακόπτες ισχύος (ελαιοδιακόπτες) της γραμμής θα ανοίξουν, εκτός αν η άλλη γραμμή μεταφοράς ξαναλειτουργήσει αμέσως. Άρα, για να έχουμε ευσταθή λειτουργία δύο παράλληλα συνδεδεμένων τριφασικών γραμμών μεταφοράς, πρέπει η φασική γωνία με την οποία λειτουργούν να είναι μικρότερη των  $30^\circ$ . Στην πράξη η γωνία αυτή κυμαίνεται από  $1^\circ$  έως  $10^\circ$  το πολύ.

Όργανα-συσσκευές-υλικά.

Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC. (2)

Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)

Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.

Τριφασικός μετασχηματιστής T-150-3A-3φ. (2)

Τριφασικός ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής H-RA-150 (διαδοχή φάσεων ορθή).

Τριφασική σύγχρονη μηχανή SM-150.

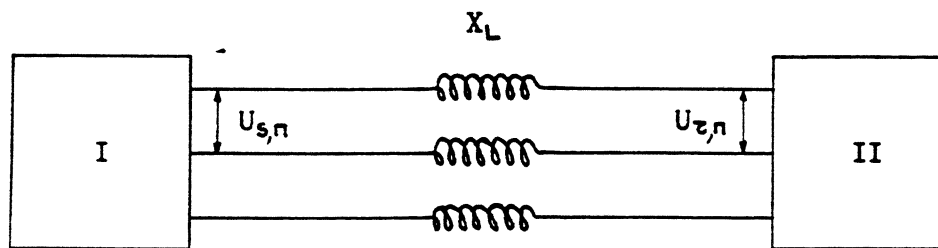
Φορτίο μεταβλητής αδράνειας VIL-150.

Βολτόμετρα AC-VA-150.

#### Πειραματική διαδικασία.

Το πρώτο μέρος αυτής της πειραματικής διαδικασίας (βήματα 1,2,3 και 4) ασχολείται με ορισμένα προβλήματα που έχουν σχέση με τα κομμάτια α) και γ) της θεωρίας, ενώ το δεύτερο μέρος (υπόλοιπα βήματα) ασχολείται με εργαστηριακό πείραμα που έχει σχέση με το β) κομμάτι της θεωρίας.

1. Οι σταθμοί I και II στο σχήμα 5.8 συνδέονται με μια τριφασική γραμμή με-



Σχήμα 5.8

ταφοράς που έχει καθορισμένη ανά φάση επαγωγική αντίδραση  $X_L$ . Από τα μέτρα των πολικών τάσεων αναχώρησης και άφιξης της γραμμής και τη φασική γωνία, που δίνονται στον πίνακα 5.1, προσδιορίστε τη συνολική πραγματική ισχύ  $P_{o\lambda}$  που μεταφέρει η γραμμή και τη διεύθυνση ροής της.

2. Στο πρόβλημα 1 υπολογίστε τη μέγιστη πραγματική ισχύ που θα μπορούσε να μεταφερθεί από την τριφασική γραμμή μεταφοράς ( $P_{o\lambda, \max}$ ) και γράψτε τα αποτελέσματά σας στον πίνακα 5.1.

3. Υπολογίστε το ρεύμα της γραμμής ανά φάση του προβλήματος 1, χρησιμοποιών-

τας παραστατικούς μιγάδες. Το ρεύμα της γραμμής ανά φάση είναι:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S - \dot{U}_Z}{jX_L} \quad \text{όπου } \dot{U}_S - \dot{U}_Z \text{ η φασική πτώση τάσης της γραμμής.}$$

Γράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 5.1.

$U_{S,n}$ [KV]	$U_{Z,n}$ [KV]	$X_L$ [Ω]	$\theta$ [°]	προπορεία ή επιπορεία	$P_{o\lambda}$ [MW]	διεύθυνση ροής ισχύος	$P_{o\lambda, \max}$ [MW]	ρεύμα γραμμής ανά φάση [A]
4	4	80	30	$U_{S,n}$ προπορ.		I II		
8	8	80	30	$U_{S,n}$ προπορ.		I II		
8	6	80	45	$U_{S,n}$ επιπορ.		I II		
8	6	80	45	$U_{Z,n}$ επιπορ.		I II		
8	6	80	120	$U_{Z,n}$ προπορ.		I II		
4	12	80	60	$U_{S,n}$ προπορ.		I II		

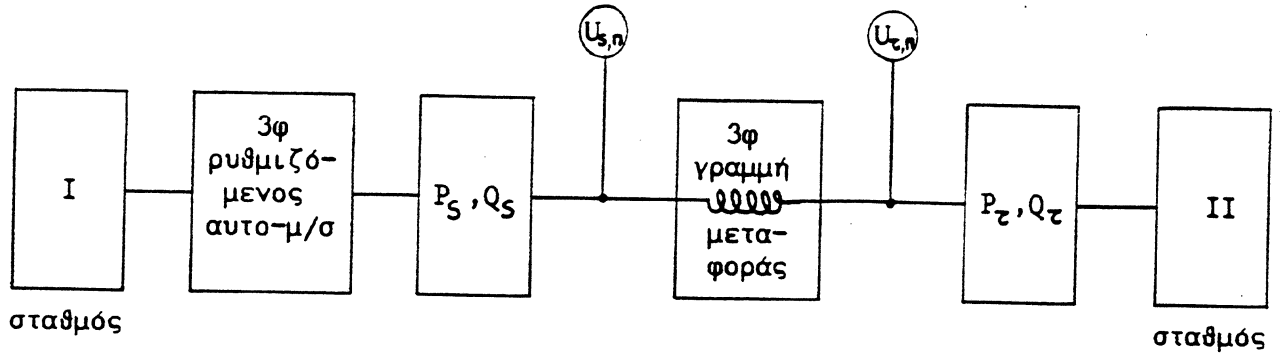
Πίνακας 5.1

4. Δύο παράλληλες τριφασικές γραμμές μεταφοράς, που έχουν επαγωγική αντίδραση  $X_L = 60 \Omega$  ανά φάση, λειτουργούν με πολική τάση 120 KV η κάθε μία. Αν η συνολική πραγματική ισχύς που μεταφέρουν και οι δύο γραμμές είναι 84 MW, υπολογίστε τη φασική γωνία μεταξύ των τάσεων στα δυο τους άκρα. Αν η μία από τις δύο γραμμές ανοίξει ξαφνικά, θα μπορέσει η άλλη γραμμή να σηκώσει το φορτίο; Αν ναι, πόση είναι η νέα φασική γωνία;

5. Συνδέστε το κύκλωμα που φαίνεται μονογραμμικά στο σχήμα 5.9, αφού προηγουμένως θέστε τον επιλογέα του μοντέλου της τριφασικής γραμμής μεταφοράς στη θέση 66 KV, 100 Km. Θέστε επίσης μετατόπιση φάσης (PHASE SHIFT)  $+15^\circ$  και μετρή-

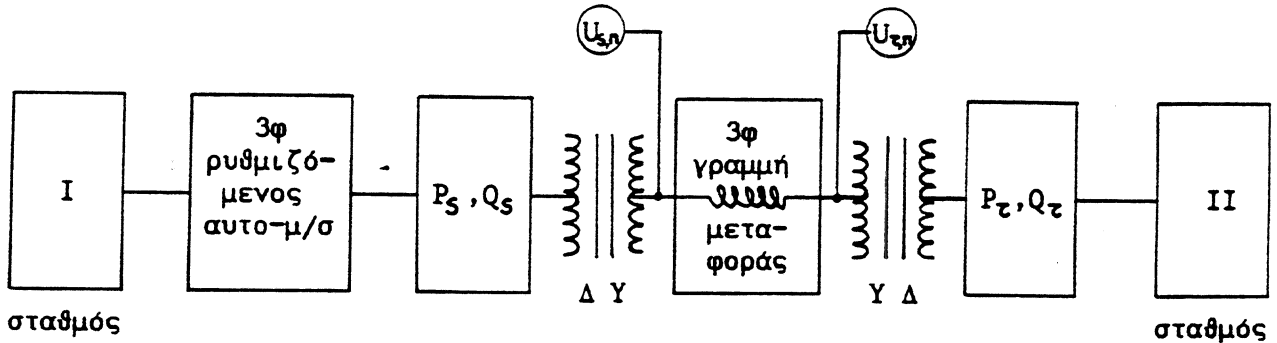
στε τα μεγέθη:

$U_{S,n} = \dots\dots\dots$	$U_{Z,n} = \dots\dots\dots$
$P_S = \dots\dots\dots$	$P_Z = \dots\dots\dots$
$Q_S = \dots\dots\dots$	$Q_Z = \dots\dots\dots$



Σχήμα 5.9

6. Θέστε τις δύο τροφοδοσίες (σταθμοί I και II) OFF. Συνδέστε τώρα σε κάθε άκρο της τριφασικής γραμμής μεταφοράς, τριφασικούς μετασχηματιστές ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης με σύνδεση Δ-Υ και Υ-Δ αντίστοιχα, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10

Προσέξτε να συνδέσετε σωστά τους μετασχηματιστές και ως προς την πολικότητα και ως προς τη διαδοχή των φάσεων. Θέστε ON τις τροφοδοσίες και μετρήστε τα μεγέθη:

$$U_{S,n} = \dots\dots\dots$$

$$U_{Z,n} = \dots\dots\dots$$

$$P_S = \dots\dots\dots$$

$$P_Z = \dots\dots\dots$$

$$Q_S = \dots\dots\dots$$

$$Q_Z = \dots\dots\dots$$

Συγκρίνατε τις τιμές αυτές με εκείνες που βρήκατε στο βήμα 5. Εξηγήστε τα αποτελέσματά σας.

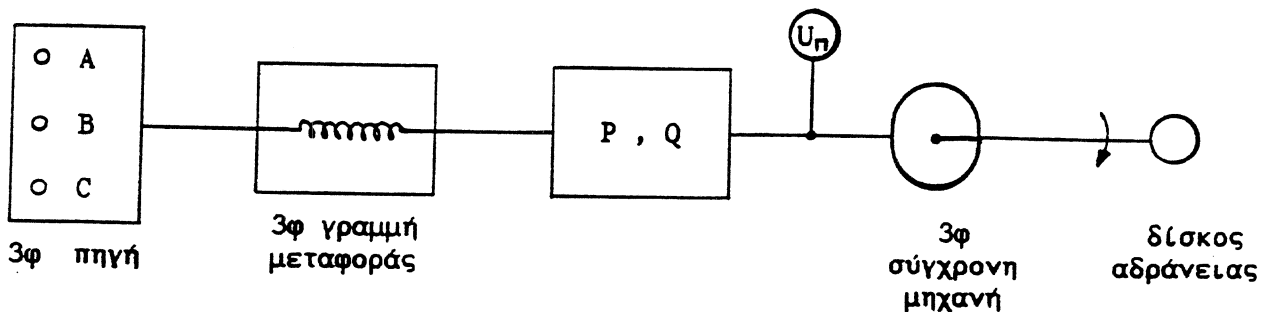
7. Ένα από τα αναπόφευκτα φυσικά γεγονότα είναι ότι, όταν αυξάνουμε το μέγεθος ενός αντικειμένου, αυξάνει και ο λόγος του όγκου του προς την εξωτερική

του επιφάνεια. Κατά τον ίδιο τρόπο η αδράνεια ενός κινητήρα αυξάνει πιο γρήγορα από την ισχύ του. Κατά συνέπεια οι μεγάλοι κινητήρες επιταχύνονται πολύ πιο αργά από τους μικρούς. Ένας κινητήρας με ισχύ 1/4 HP μπορεί να φτάσει τη μέγιστη ταχύτητά του σε κλάσμα του δευτερολέπτου, ενώ ένας μεγάλος κινητήρας με ισχύ 10.000 HP χρειάζεται μερικά λεπτά.

Για να εξετάσουμε τη συμπεριφορά μιας μεγάλης μηχανής, χρησιμοποιούμε μια μικρή μηχανή με ισχύ 1/4 HP, αυξάνοντας όμως τεχνητά την αδράνειά της.

Αυτό μπορούμε να το πραγματοποιήσουμε αν τοποθετήσουμε ένα μεταλλικό δίσκο αδράνειας στον άξονα της μηχανής. Ο δίσκος στο πιο κάτω σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος κάνει τη μηχανή του 1/4 HP, να έχει αδράνεια που να αντιστοιχεί σε μια μηχανή με ισχύ της τάξεως των MW.

α) Αποσυνδέστε εντελώς το κύκλωμα του σχήματος 5.10. Συνδέστε στους ακροδέκτες A, B, C της σταθερής τριφασικής τροφοδοσίας μια τριφασική γραμμή μεταφοράς (66 KV, 100 Km) σε σειρά με ένα μετρητή Watt-Var, όπως στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11

Μετρήστε τα  $U_{\eta}$ ,  $P$  και  $Q$  στο κενό.

$U_{\eta} = \dots\dots\dots$

$P = \dots\dots\dots$

$Q = \dots\dots\dots$

β) Θέστε την τροφοδοσία OFF και συνδέστε το στάτη του σύγχρονου κινητήρα στο τέλος της γραμμής μεταφοράς. Προσθέστε το μεταλλικό δίσκο (φορτίο αδράνειας) στον κινητήρα. Θέστε ON την τροφοδοσία και παρατηρήστε την εκκίνηση, δηλαδή πόσο χρόνο χρειάζεται για να επιταχυνθεί ο κινητήρας από μηδέν στροφές στις

πλήρεις στροφές του.

Χρόνος επιτάχυνσης  $T = \dots\dots\dots$

Μετρήστε τα  $U_n, P$  και  $Q$  στο τέλος της περιόδου της επιτάχυνσης.

$U_n = \dots\dots\dots$   $P = \dots\dots\dots$   $Q = \dots\dots\dots$

8. Συνδέστε τώρα τριφασικούς μετασχηματιστές ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης, με σύνδεση Δ-Υ και Υ-Δ αντίστοιχα, στα δύο άκρα της γραμμής.

Επαναλάβετε το βήμα 7.

α) Στο κενό:

$U_n = \dots\dots\dots$   $P = \dots\dots\dots$   $Q = \dots\dots\dots$

β) Εκκίνηση του σύγχρονου κινητήρα:

Χρόνος επιτάχυνσης  $T = \dots\dots\dots$

$U_n = \dots\dots\dots$   $P = \dots\dots\dots$   $Q = \dots\dots\dots$

Συγκρίνατε τα αποτελέσματα του βήματος αυτού με εκείνα του βήματος 7. Βγάλτε τα συμπεράσματά σας. Γιατί ο κινητήρας στο βήμα 8 εκκινεί πιο γρήγορα;

Ερωτήσεις και προβλήματα.

1. Μια τριφασική γραμμή μεταφοράς που λειτουργεί στα 300 KV, έχει επαγωγική αντίδραση ίση με 200 Ω ανά φάση. Υπολογίστε τη συνολική μέγιστη πραγματική ισχύ ( $P_{o\lambda, \max}$ ) που θα μπορούσε να μεταφέρει η γραμμή σε MW. Ποια είναι η φασική γωνία μεταξύ των τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής, όταν η γραμμή μεταφέρει ισχύ 100 MW; Ποια η συνολική πραγματική ισχύς που μεταφέρεται από τη γραμμή αν η φασική γωνία είναι  $1^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 16^\circ$  και  $32^\circ$ ;

2. Στο πρόβλημα 1, αν η φασική γωνία μεταξύ των τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς αυξηθεί από  $15^\circ$  σε  $20^\circ$ , κατά πόσο θα αυξηθεί η ροή της συνολικής πραγματικής ισχύος; Αν η φασική γωνία αυξηθεί από  $75^\circ$  σε  $80^\circ$ , η αύξηση της ροής της ισχύος θα είναι η ίδια όπως και πριν;

3. Αν η τάση της γραμμής στο πρόβλημα 1 αυξηθεί κατά 20%, κατά πόσο θα αυξηθεί η συνολική μέγιστη πραγματική ισχύς που θα μπορούσε να μεταφέρει η γραμμή;

4. Ποιος ο ρόλος των τριφασικών μετασχηματιστών ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης στα δύο άκρα μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς;

5. α) Δύο τριφασικές γραμμές μεταφοράς που έχουν επαγωγικές αντιδράσεις 100 και 200  $\Omega$  ανά φάση, συνδέονται παράλληλα μεταξύ δύο τριφασικών ζυγών. Ποια είναι η συνολική μέγιστη πραγματική ισχύς που θα μπορούσαν να μεταφέρουν και οι δύο γραμμές μαζί, αν η τάση λειτουργίας τους είναι 100 KV;

β) Αν οι δύο γραμμές τροφοδοτούν φορτίο με πραγματική ισχύ 75 MW, με τι θα ισούται η φασική γωνία μεταξύ των τάσεων στα δύο άκρα; Αν η γραμμή με την επαγωγική αντίδραση των 200  $\Omega$  βγει ξαφνικά εκτός λειτουργίας, με τι θα ισούται η νέα φασική γωνία;

γ) Στο πρόβλημα 5.(β), αν ανοίξει ξαφνικά η άλλη γραμμή με την επαγωγική αντίδραση των 100  $\Omega$ , τι θα συμβεί;



### ΑΣΚΗΣΗ 6η

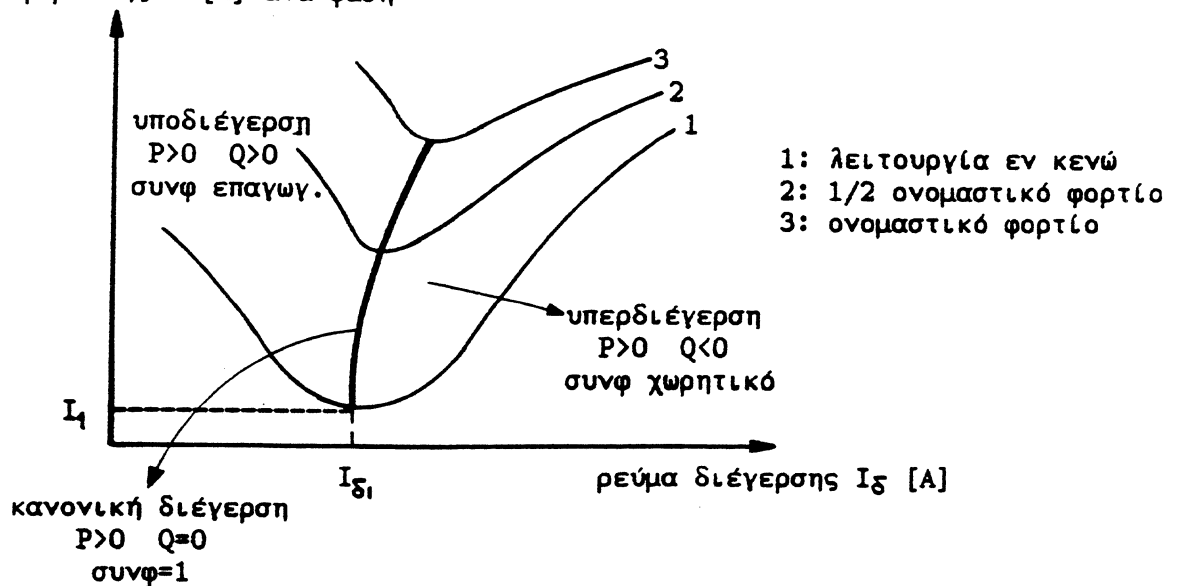
Φαινόμενο Ferranti. Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους και ο σύγχρονος πυκνωτής.

Αντικείμενο: Παρουσίαση του γεγονότος ότι ο σύγχρονος πυκνωτής μπορεί να ρυθμίσει την τάση στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους, ανάλογα με τη φόρτιση της γραμμής.

Θεωρία: Ας δούμε κατ'αρχήν τη λειτουργία ενός τριφασικού σύγχρονου κινητήρα  
i) εν κενώ και ii) με φορτίο.

Όταν ένας σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί εν κενώ, δηλαδή χωρίς φορτίο συνδεδεμένο στον άξονά του, το ρεύμα  $I$  που απορροφάει από το δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος, εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης  $I_D$  με το οποίο τροφοδοτείται το τυλιγμά των πόλων του δρομέα.

ρεύμα φόρτισης  $I$  [A] ανά φάση



Σχήμα 6.1

Η καμπύλη 1 στο σχήμα 6.1 δείχνει πως μεταβάλλεται το ρεύμα  $I$ , που ονομάζεται και ρεύμα φόρτισης, όταν μεταβάλλεται το ρεύμα διέγερσης  $I_D$  στην εν κενώ λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα. Η καμπύλη αυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1, έχει περίπου σχήμα V. Για μια ορισμένη τιμή  $I_{D1}$  του ρεύματος διέγερσης, το ρεύμα φόρτισης γίνεται ελάχιστο ( $I_1$ ). Με τη διέγερση αυτή, που ονομάζεται κανονική δι-

έγερση, ο σύγχρονος κινητήρας φορτίζει το δίκτυο ωμικά. Τότε η τάση του δικτύου και το ρεύμα  $I_1$  είναι σε φάση και συνεπώς ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα είναι ίσος με τη μονάδα ( $\cos\varphi=1$ ).

Για κάθε άλλη τιμή του ρεύματος διέγερσης, μικρότερη ή μεγαλύτερη της  $I_{δ1}$ , το ρεύμα φόρτισης μεγαλώνει. Συνεπώς το  $\cos\varphi$  του κινητήρα γίνεται μικρότερο της μονάδας και μάλιστα τόσο μικρότερο, όσο το  $I$  είναι μεγαλύτερο. Όταν το ρεύμα διέγερσης γίνει μικρότερο του  $I_{δ1}$ , λέμε ότι ο κινητήρας υποδιεγείρεται, ενώ όταν γίνει μεγαλύτερο, ότι ο σύγχρονος κινητήρας υπερδιεγείρεται.

Όταν ο σύγχρονος κινητήρας φορτιστεί και λειτουργεί με σταθερό φορτίο, πάλι το ρεύμα, που απορροφάει από το δίκτυο, εξαρτάται από τη διέγερση, όπως γίνεται και στην εν κενώ λειτουργία. Δηλαδή για κάθε φορτίο έχουμε μια καμπύλη σχήματος  $V$ . Το σχήμα 6.1 δείχνει τις καμπύλες αυτές για το  $1/2$  του ονομαστικού φορτίου και για το πλήρες φορτίο.

Για κάθε καμπύλη  $V$  υπάρχει ένα κανονικό ρεύμα διέγερσης για το οποίο το ρεύμα φόρτισης γίνεται ελάχιστο και το  $\cos\varphi$  του κινητήρα ίσο με τη μονάδα. Δηλαδή ο κινητήρας τότε φορτίζει το δίκτυο ωμικά. Τα σημεία που παριστάνουν τη λειτουργία του κινητήρα με  $\cos\varphi=1$  για τα διάφορα φορτία, κείνται επάνω σε μια καμπύλη. Δεξιά της καμπύλης αυτής ο σύγχρονος κινητήρας βρίσκεται σε υπερδιέγερση και αριστερά σε υποδιέγερση.

Όταν ο σύγχρονος κινητήρας, που εργάζεται με σταθερό φορτίο, υποδιεγείρεται, το ρεύμα που απορροφάει από το δίκτυο, καθυστερεί ως προς την τάση του δικτύου, δηλαδή ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο επαγωγικά. Το ρεύμα αυτό είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο η υποδιέγερση είναι μεγαλύτερη. Αντίστοιχα ελαττώνεται και το  $\cos\varphi$  του κινητήρα.

Όταν ο σύγχρονος κινητήρας εργάζεται με σταθερό φορτίο και υπερδιεγείρεται, το ρεύμα που απορροφάει προπορεύεται της τάσης και ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο χωρητικά. Το ρεύμα χωρητικής φόρτισης του δικτύου είναι τόσο μεγαλύτερο,

όσο μεγαλύτερη είναι η υπερδιέγερση του κινητήρα. Επίσης όσο μεγαλώνει η υπερδιέγερση, τόσο ελαττώνεται το (χωρητικό) συνφ, με το οποίο ο σύγχρονος κινητήρας φορτίζει το δίκτυο.

Οι σύγχρονοι κινητήρες λοιπόν, έχουν τη μοναδική ικανότητα να λειτουργούν με διαφορετικούς συντελεστές ισχύος.

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι ακριβόι κινητήρες συγκρινόμενοι με τους ασύγχρονους. Έχουν όμως ορισμένες ιδιότητες χάρη στις οποίες προτιμούνται σε ειδικές περιπτώσεις. Πάντως σύγχρονοι κινητήρες κάτω από 20 KW σπάνια κατασκευάζονται. Συνήθως οι χρησιμοποιούμενοι στη βιομηχανία σύγχρονοι κινητήρες είναι πάνω από 100 KW.

Οι κινητήρες αυτοί προτιμούνται, όταν απαιτείται απόλυτα σταθερή ταχύτητα περιστροφής σε συνδυασμό με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Σαν παράδειγμα εφαρμογών αναφέρουμε την κίνηση εναλλακτήρων που παράγουν ρεύμα συχνότητας διαφορετικής από τη συχνότητα του δικτύου, την κίνηση ελαστρών, την κίνηση μεγάλων φυγοκεντρικών αντλιών, συμπιεστών κ.λ.π.

Άλλο πεδίο εφαρμογής των σύγχρονων κινητήρων είναι η βελτίωση του συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης ή γενικότερα ενός δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές ο σύγχρονος κινητήρας είναι δυνατόν να κινεί φορτίο (μηχάνημα) και να βελτιώνει ταυτόχρονα το συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης ή να χρησιμοποιείται μόνο για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος, χωρίς να κινεί κανένα μηχάνημα.

Στην τελευταία αυτή περίπτωση ονομάζεται σύγχρονος πυκνωτής ή σύγχρονος αντισταθμιστής. Για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος γίνεται εκμετάλλευση της ιδιότητας που έχουν οι σύγχρονοι κινητήρες να φορτίζουν το δίκτυο χωρητικά, όταν υπερδιεγείρονται, όπως είδαμε πιο πάνω.

Μια άλλη σπουδαία εφαρμογή του σύγχρονου κινητήρα είναι η ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους. Είδαμε πιο πάνω ότι ένας σύγχρονος κινητήρας που εργάζεται εν κενώ, μπορεί να απορ-

ροφάει ή να τροφοδοτεί άεργη ισχύ. Στην ουσία ενεργεί σαν ένας τριφασικός επαγωγέας (πηνίο) ή σαν ένας τριφασικός πυκνωτής, ανάλογα με το αν είναι υπο- ή υπερ-διεγερμένος. Το γεγονός ότι μια τέτοια μηχανή μπορεί να αλλάζει τη συμπεριφορά της από επαγωγική σε χωρητική, την κάνει πολύ χρήσιμη στο να ρυθμίζει την τάση στο τέλος των γραμμών μεταφοράς.

Όταν ο σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται και κατ'αυτόν τον τρόπο, ονομάζεται σύγχρονος πυκνωτής, όπως και στην περίπτωση της βελτίωσης του συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης ή ενός δικτύου γενικώτερα, με την προϋπόθεση ότι ο σύγχρονος κινητήρας εργάζεται εν κενώ.

Ένας καλύτερος όρος θα μπορούσε να ήταν "σύγχρονος πυκνωτής-επαγωγέας", αλλά επειδή αυτές οι μηχανές συνήθως πρέπει να τροφοδοτήσουν άεργη ισχύ σ'ένα σύστημα ισχύος παρά να απορροφήσουν, ο όρος "σύγχρονος πυκνωτής" είναι καταλληλότερος.

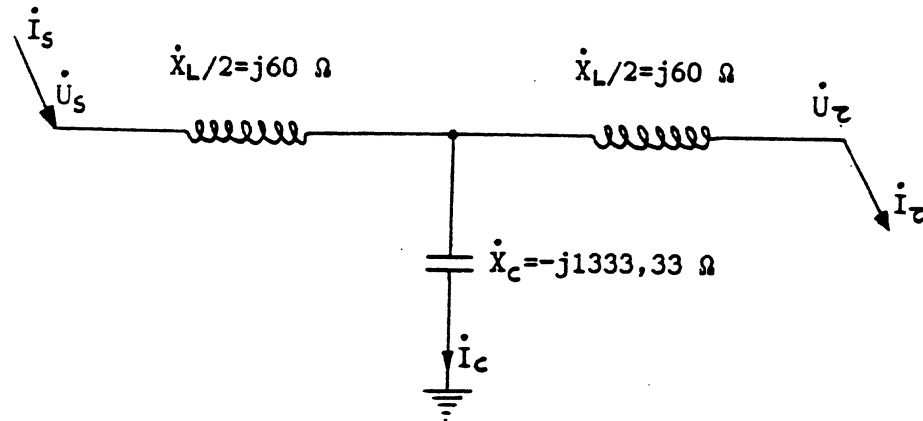
Στην 3η εργαστηριακή άσκηση είδαμε πως η τάση στο άκρο λήψης μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί να ρυθμιστεί με τη βοήθεια στατών πυκνωτών. Θα δούμε τώρα πως μπορούμε να επιτύχουμε τα ίδια αποτελέσματα πιο ομαλά μ'ένα σύγχρονο πυκνωτή.

Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης με μεγάλο μήκος, εκτός από την επαγωγή  $L$  έχουν και σημαντική χωρητικότητα  $C$ . Έτσι μια τέτοια γραμμή έχει συνήθως επαγωγική αντίσταση (αντίδραση)  $X_{L0} = 0,4 \Omega/\text{Km}$  και φάση και χωρητική αντίσταση (αντίδραση)  $X_{C0} = 4 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{Km}$  ανά φάση στα 50 Hz.

Αυτό σημαίνει ότι για γραμμή με μήκος 300 Km, η επαγωγική αντίδραση ανά φάση είναι  $X_L = 120 \Omega$  και η χωρητική αντίδραση ανά φάση  $X_C = 1333,33 \Omega$ .

Σ'αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης με μεγάλο μήκος, η ωμική αντίσταση ανά φάση της γραμμής είναι πολύ μικρότερη από την επαγωγική αντίδραση ανά φάση ( $R \ll X_L$ ). Έτσι μπορούμε να παραλείψουμε την ωμική αντίσταση ανά φάση της γραμμής, χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα στους υπολογισμούς.

Το απλοποιημένο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας τέτοιας γραμμής φαίνεται στο σχήμα 6.2, όπου η χωρητικότητα της γραμμής είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο (στο μέσον, ισοδύναμο κύκλωμα T), αντί να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλο το μήκος της.



Σχήμα 6.2

Όταν μια τριφασική γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης με μεγάλο μήκος τροφοδοτείται στην αρχή με μια τάση  $\dot{U}_s$  και η γραμμή ξαφνικά ξεφορτίζεται, η τάση ανοικτού κυκλώματος  $\dot{U}_r$  στο τέλος της γραμμής θα είναι αρκετά υψηλότερη.

Το πιο πάνω φαινόμενο ονομάζεται "φαινόμενο Ferranti". Αν εμφανιστεί, δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στις μονώσεις στο τέλος μιας γραμμής και οι ηλεκτρικές εταιρείες προσπαθούν πάντα να το αποφεύγουν.

Αν στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6.2, το μέτρο της φασικής τάσης αναχώρησης  $\dot{U}_s$  είναι 300 KV, το μέτρο της φασικής τάσης άφιξης  $\dot{U}_r$  θα είναι 314 KV περίπου, όπως εύκολα μπορεί να υπολογιστεί. Έχουμε λοιπόν για το ισοδύναμο κύκλωμα T:

$$\alpha) \dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z}\right) \dot{U}_r + \dot{Z} \left(1 + \frac{1}{4} \dot{Y}\dot{Z}\right) \dot{I}_r \quad \text{Επειδή όμως } \dot{I}_r = 0 \quad \text{τότε:} \quad \dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z}\right) \dot{U}_r$$

$$\dot{Z} = R + jX_L = 0 + j120 = j120 \text{ } \Omega/\varphi$$

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{X}_C} = \frac{1}{-j1333,33} = j0,00075 \text{ S}/\varphi$$

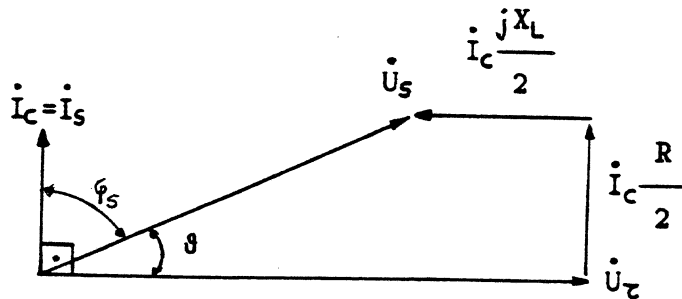
Άρα: 
$$\left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z}\right) = 1 + \frac{1}{2} \cdot j0,00075 \cdot j120 = 1 - 0,045 = 0,955$$

Δηλαδή:  $\dot{U}_S = 0,955 \cdot \dot{U}_T$  ή  $U_S = 0,955 \cdot U_T$  ή  $U_T = \frac{U_S}{0,955} = 1,04712 \cdot U_S = 1,04712 \cdot 300$

και τελικά  $\underline{U_T = 314,136 \text{ KV}}$

β)  $\dot{I}_S = \dot{Y}\dot{U}_T + \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z}\right) \dot{I}_T$  Επειδή  $\dot{I}_T = 0$  τότε:  $\dot{I}_S = \dot{Y}\dot{U}_T = \dot{I}_C$

Όταν το φαινόμενο Ferranti έχει εμφανιστεί, το μιγαδικό διάγραμμα των τάσεων και των εντάσεων της γραμμής μεταφοράς, η οποία έχει ωμική αντίσταση ανά φάση διάφορη του μηδενός ( $R \neq 0$ ), φαίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3

Για να δούμε λοιπόν τώρα, πως ο τριφασικός σύγχρονος κινητήρας ρυθμίζει την τάση στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης με μεγάλο μήκος, ανάλογα με τη φόρτιση της γραμμής.

i) Αν η γραμμή δέχεται μικρή φόρτιση (φαινόμενο Ferranti), η πολική τάση άφιξης  $U_{T,n}$  έχει μια ανύψωση. Συνδέουμε λοιπόν στο τέλος της γραμμής τριφασικό σύγχρονο κινητήρα υποδιεγερμένο (συμπεριφορά επαγωγική), ο οποίος απορροφάει άεργη ισχύ ( $Q_T > 0$ ) και με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η πολική τάση άφιξης  $U_{T,n}$ .

ii) Αν η γραμμή δέχεται μεγάλη φόρτιση, η πολική τάση άφιξης  $U_{T,n}$  έχει μια μείωση. Συνδέουμε λοιπόν στο τέλος της γραμμής τριφασικό σύγχρονο κινητήρα

υπερδιδεγερμένο (συμπεριφορά χωρητική), ο οποίος παράγει άεργη ισχύ ( $Q_z < 0$ ) και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η πολική τάση άφιξης  $U_{z,n}$ .

Βλέπουμε λοιπόν από τα παραπάνω, την άμεση σχέση της άεργης ισχύος  $Q_z$  που απορροφάει ή παράγει ο σύγχρονος πυκνωτής με την πολική τάση άφιξης  $U_{z,n}$ .

Όργανα-συσσκευές-υλικά.

Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.

Πηγή συνεχούς ρεύματος HMD-150-PPC-DC.

Τριφασική σύγχρονη μηχανή SM-150.

Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.

Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)

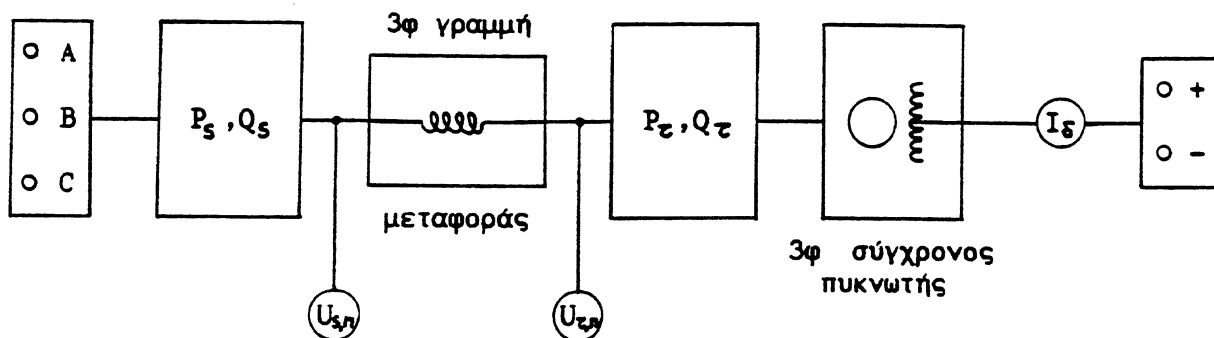
Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.

Αμπερόμετρα-βολτόμετρα AC-VA-150 και DC-VA-150.

Πειραματική διαδικασία.

1. Συνδέστε τη σύγχρονη τριφασική μηχανή στο τέλος του μοντέλου της τριφασικής γραμμής μεταφοράς των 100 Km, χωρίς διέγερση D.C. στη μηχανή. Τροφοδοτήστε το σύστημα με τάση, χρησιμοποιώντας τη σταθερή τριφασική τροφοδοσία (380 V).

Όταν η μηχανή (σύγχρονος κινητήρας-σύγχρονος πυκνωτής) επιταχυνθεί, συνδέστε τη διέγερση D.C., όπως αυτό φαίνεται στο μονογραμμικό σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4

Μεταβάλλετε τη διέγερση D.C. και παρατηρήστε το αποτέλεσμα στην τάση στο

τέλος της γραμμής μεταφοράς.

2. Καταγράψτε τις ενδείξεις  $P_S, Q_S, U_{S,n}$  και  $P_Z, Q_Z, U_{Z,n}$ , καθώς το ρεύμα διέγερσης  $I_S$  μεταβάλλεται από 0,0 A έως 1,0 A σε πέντε βήματα των 0,2 A, στον πίνακα 6.1.

Σχεδιάστε τώρα σε χαρτί μιλλιμετρέ τη γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{Z,n}=f(Q_Z)$ . Ποιά η επίδραση της διέγερσης στην άεργη ισχύ  $Q_S$ ;

Γραμμή μεταφοράς 100 Km						
$I_S$ [A]	$P_S$ [W]	$Q_S$ [VAR]	$U_{S,n}$ [V]	$P_Z$ [W]	$Q_Z$ [VAR]	$U_{Z,n}$ [V]
0,0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

Πίνακας 6.1

3. Επαναλάβετε το βήμα 2 της πειραματικής διαδικασίας για μοντέλο γραμμής μεταφοράς 200 Km. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 6.2 και σχεδιάστε σε χαρτί μιλλιμετρέ τη γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{Z,n}=f(Q_Z)$ .

4. Επαναλάβετε το βήμα 3 της πειραματικής διαδικασίας για μοντέλο γραμμής μεταφοράς 300 Km. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα 6.3 και σχεδιάστε σε χαρτί μιλλιμετρέ τη γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{Z,n}=f(Q_Z)$ .

5. Συνδέστε το τριφασικό μεταβλητό ωμικό φορτίο στο τέλος της γραμμής μεταφοράς παράλληλα στον κινητήρα. Ξεκινήστε και συγχρονίστε τον κινητήρα και τροφοδοτήστε τον με ρεύμα διέγερσης τέτοιο, ώστε η τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς να είναι 380 V. Μεταβάλλετε το ωμικό φορτίο κατά ένα βήμα κάθε φορά και ξαναρυθμίστε, αν χρειάζεται, το ρεύμα διέγερσης έτσι ώστε η τάση να παραμένει



σταθερή στα 380 V.

Γραμμή μεταφοράς 200 Km						
$I_S$ [A]	$P_S$ [W]	$Q_S$ [VAr]	$U_{S,n}$ [V]	$P_Z$ [W]	$Q_Z$ [VAr]	$U_{Z,n}$ [V]
0,0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

Πίνακας 6.2

Γραμμή μεταφοράς 300 Km						
$I_S$ [A]	$P_S$ [W]	$Q_S$ [VAr]	$U_{S,n}$ [V]	$P_Z$ [W]	$Q_Z$ [VAr]	$U_{Z,n}$ [V]
0,0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

Πίνακας 6.3

Καταγράψτε τις ενδείξεις  $P_S, Q_S, U_{S,n}$  και  $P_Z, Q_Z, U_{Z,n}$  στον πίνακα 6.4. Υπάρχει όριο στην ικανότητα του σύγχρονου πυκνωτή να ρυθμίζει την τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς;

Σχεδιάστε σε χαρτί μιλλιμετρέ τη γραφική παράσταση της πραγματικής ισχύος  $P_Z$  που απορροφάει το φορτίο, σε συνάρτηση της άεργης ισχύος  $Q_Z$  του σύγχρονου

πυκνωτή, όταν η τάση στο σημείο της τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στα 380 V.

Βήμα φορτίου	$P_S$ [W]	$Q_S$ [VAr]	$U_{S,n}$ [V]	$P_Z$ [W]	$Q_Z$ [VAr]	$U_{Z,n}$ [V]
1						
2						
3						
4						
5						

Πίνακας 6.4

#### Ερωτήσεις και προβλήματα.

1. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα του τριφασικού σύγχρονου πυκνωτή, σε σύγκριση με την τριφασική συστοιχία στατών πυκνωτών, στη ρύθμιση της τάσης στο τέλος των γραμμών μεταφοράς;

2. Μια υπερδιεγερμένη σύγχρονη μηχανή τροφοδοτεί άεργη ισχύ σε μια γραμμή μεταφοράς. Εξηγήστε την πρόταση και τι σημαίνει ο όρος "υπερδιεγερμένη".

3. Μια υποδιεγερμένη σύγχρονη μηχανή απορροφάει άεργη ισχύ από μια γραμμή μεταφοράς. Εξηγήστε την πρόταση και τι σημαίνει ο όρος "υποδιεγερμένη".

4. Μια τριφασική γραμμή μεταφοράς 380 KV, 300 Km, 50 Hz, έχει επαγωγική αντίδραση  $0,5 \Omega/\text{Km}$  και φάση και χωρητική αντίδραση  $300.000 \Omega \cdot \text{Km}$  ανά φάση.

Σχεδιάστε το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής. Υπολογίστε το ρεύμα ανά φάση στο άκρο τροφοδοσίας της γραμμής, όταν το άκρο λήψης είναι ανοικτό.

Τέλος, υπολογίστε την άεργη ισχύ που απορροφάει η γραμμή μεταφοράς από το άκρο τροφοδοσίας της.