

# ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ

Τζιράκης Γεώργιος Ηλ/γος Μηχ/κος Τ.Ε.  
Δρ.Τσικαλάκης Αντώνης

Ηράκλειο 2014

<u>ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....</u>	<u>4</u>
Χαρακτηριστικά φορτίων:.....	4
ΚΙΒΩΤΙΟ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ .....	4
ΚΙΒΩΤΙΟ ΠΗΝΙΩΝ.....	5
ΚΙΒΩΤΙΟ ΠΥΚΝΩΤΩΝ.....	6
Βαττόμετρο .....	7
Αναλογικά Βαττόμετρα .....	7
Ηλεκτρονικό βαττόμετρο .....	8
ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	9
ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΑΓΩΓΩΝ.....	9
ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 3 ΑΓΩΓΩΝ.....	10
Συντελεστής ισχύος .....	13
Εργαστηριακή εργασία.....	15
Μέτρηση Ισχύος Ασύμμετρου φορτίου.....	18
<u>ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Η.Ε-Γενικά .....</u>	<u>20</u>
Παράσταση Γραμμών.....	20
<u>ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Η.Ε ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ .....</u>	<u>23</u>
Περιγραφή εργαστηριακού μοντέλου .....	25
Στοιχεία γραμμής:.....	25
Στοιχεία μοντέλου: .....	25
Στοιχεία εξομοίωσης: .....	25
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	26
Εργασία .....	29
<u>ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΣΟΥ ΜΗΚΟΥΣ.....</u>	<u>30</u>
Για το ονομαστικό κύκλωμα Τ .....	33
Για το ονομαστικό κύκλωμα Π.....	33
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	33
Υπολογισμός των παραμέτρων $Z, R, X_L$ .....	34
Υπολογισμός του μήκους της γραμμής.....	34
Υπολογισμός της χωρητικότητας της γραμμής.....	35
Υπολογισμός της χωρητικότητας ως προς τη γη.....	35
ΑΣΚΗΣΗ.....	36

Εκτέλεση: .....	36
Τεστ ανοιχτού κυκλώματος .....	37
Συμπεριφορά υπό φορτίο.....	38
<u>ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ.....</u>	<u>41</u>
Θεωρία .....	44
Μετατροπή παραμέτρου $\gamma$ και υπερβολικών ημιτονο-συνημάτων.....	44
Παραδείγματα.....	45
Ρεύμα φόρτισης της γραμμής.....	49
Φαινόμενο Ferranti.....	50
Αντιστάθμιση γραμμής μεταφοράς .....	50
Εργαστηριακή Άσκηση .....	51
Προσδιορισμός γενικευμένων σταθερών A B C D του συστήματος.....	51
Συμπεριφορά μοντέλου γραμμής εν κενώ.....	51
Συμπεριφορά μοντέλου γραμμής εν φορτίο.....	52
Πίνακας αποτελεσμάτων .....	53
$\text{Cos}\Phi_R=$ .....	53

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

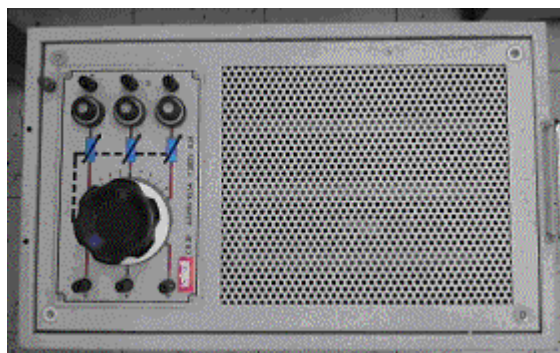
Στο εργαστήριο υπάρχουν τόσο ψηφιακά πολύμετρα όσο και αναλογικά όργανα –κυρίως Αμπερόμετρο. Η συνδεσμολογία τους θεωρείται γνωστή και απαραίτητη για την επιτυχία σας στο εργαστήριο. Θα επειμίνουμε λίγο περισσότερο στη συνδεσμολογία του Βαττομέτρου και κυρίως γιθα τη χρήση του με ασύμμετρα φορτία. Για οποιοσδήποτε άλλες απορίες για όργανα καλό θα είναι να συμβουλευέστε τις σημειώσεις σας τόσο στο θεωρητικό όσο και στο εργαστηριακό τμήμα του μαθήματος «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ».

### **Χαρακτηριστικά φορτίων:**

Αυτό το εξάμηνο θα χρησιμοποιήσουμε φορτία όπως Αντιστάσεις, Πηνία και πυκνωτές.

### **ΚΙΒΩΤΙΟ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ**

Η μία ομάδα τριφασικών αντιστάσεων έχει 8 επιλογές, εμ τις τιμές των αντιστάσεων να παρουσιάζονται παρακάτω:



ΘΕΣΗ ΕΠΙΛΟΓΕΑ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω)
0	0
1	288
2	145
3	96
4	72
5	58
6	48
7	41
8	36

## Με συνεχή ρύθμιση αντίστασης



Αντίσταση φορτίου MV 1100

Γενικά στοιχεία:

3 φάσεις 3,3 kW, συνεχή ρύθμιση.

Συνδεσμολογία αστέρα 230 / 133 V 0.5-5 A	Συνδεσμολογία τριγώνου 230 / 133 V 1.3-8.7 A
DC παράλληλη σύνδεση 220 V 2.3-15 A	Ικανότητα υπερφόρτωσης, μικρής διάρκειας, περίπου 20%.

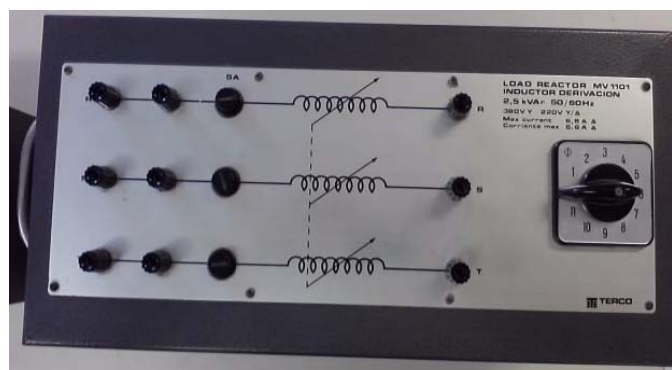
## Μονοφασικές αντιστάσεις

Για τα πειράματα με ασύμμετρη φόρτιση ή για βραχυκλώματα θα χρειαστούμε ροοστάτες.

Ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μέγιστη ωμική αντίσταση και κυρίως το μέγιστο ρεύμα που θα μπορούσαν να αντέξουν.

1	175Ω	2.7A
2	380Ω	1.6A

## ΚΙΒΩΤΙΟ ΠΗΝΙΩΝ



Εικόνα 1 LOAD REACTOR MV 1101

ΘΕΣΗ ΕΠΙΛΟΓΕΑ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ( $X_L \Omega$ )
0	0
1	404
2	208
3	138
4	105
5	84
6	70
7	60
8	52
9	46
10	42
11	38



CARICHI REATTIVI TRIFASI

C:50 $\mu$ F, L:0.1H

Το συγκεκριμένο φορτίο αποτελείται από 6 πηνία και 6 πυκνωτές τα οποία μπορούν να συνδεθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα αναλόγως τις ανάγκες του πειράματος.

### ΚΙΒΩΤΙΟ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

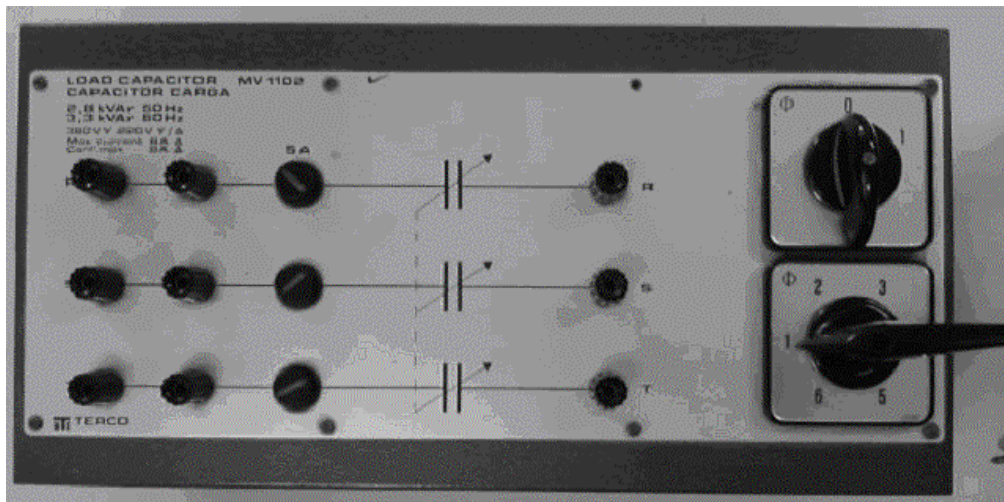


Figure 1 LOAD CAPACITOR MV 1102

ΘΕΣΗ ΕΠΙΛΟΓΕΑ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ( $X_C \Omega$ )
0	0
1	305
2	152
3	101
4	76
5	61
6	51

## Βαττόμετρο

### Αναλογικά Βαττόμετρα

Τα αναλογικά βαττόμετρα του εργαστηρίου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικ. 0-INORMA BATTOMETRO

Οι Κλίμακες μετρήσεων στις οποίες αντιστοιχεί το μέγιστο (120) παρουσιάζονται παρακάτω. Με απλή αναλογία μπορείτε να δείτε τις ενδείξεις.

1A:		5A:	
24W	24V	120W	24V
60W	60V	300W	60V
120W	120V	600W	120V
240W	240V	1200W	240V

Πιν. 0-1 Ισχύς για διάφορους συνδυασμούς ρευμάτων και τάσης

### Ηλεκτρονικό βαττόμετρο

Συνήθως θα αξιοποιούμε τα ηλεκτρονικά βαττόμετρα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των βαττομέτρων αυτών είναι:

#### BATOMETPO EW604

Μέγιστη κλίμακα τάσης 1000V	Μέγιστη κλίμακα ρεύματος 10A
Μέγιστη κλίμακα ισχύος 10000W	



Εικ. 0-2 Ηλεκτρονικό βαττόμετρο

Η μέγιστη ισχύς ανά συνδυασμό των 2 διακοπών έντασης και τάσης παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Μέγιστη ισχύς ανά Συνδυασμό (Watts)								
Τάση Ρεύμα (A)	5V	10V	20V	50V	100V	200V	500V	1000V
0.05	0.25	0.5	1.0	2.5	5	10	25	50
0.1	0.5	1.0	2	5	10	20	50	100
0.2	1.0	2	4	10	20	40	100	200
0.5	2.5	5	10	25	50	100	250	500
1	5	10	20	50	100	200	500	1k
2	10	20	40	100	200	400	1k	2k
5	25	50	100	250	500	1k	2.5	5k
10	50	100	200	500	1k	2k	5k	10k

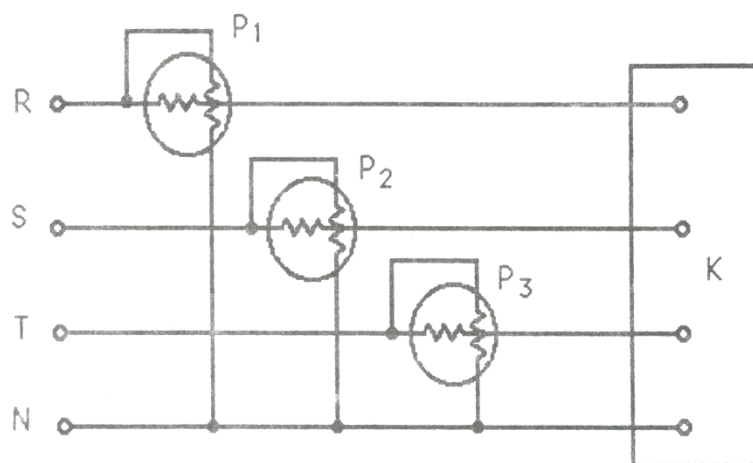
*Πιν. 0-2 Ισχύς ανά συνδυασμό επιλογής τάσης και έντασης*

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να μην υπερβαίνουμε το ρεύμα που διέρχεται από το βαττόμετρο από τη ρυθμιζόμενη ένταση αλλά ούτε και την τάση του επιλογέα. Αυτό θα είναι ο γνόμενος επιλογής της επιθυμητής κλίμακας.

## **ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

### **ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΑΓΩΓΩΝ**

Συνήθως είναι διαδεδομένη η χρήση τριφασικού συστήματος με ουδέτερο αγωγό

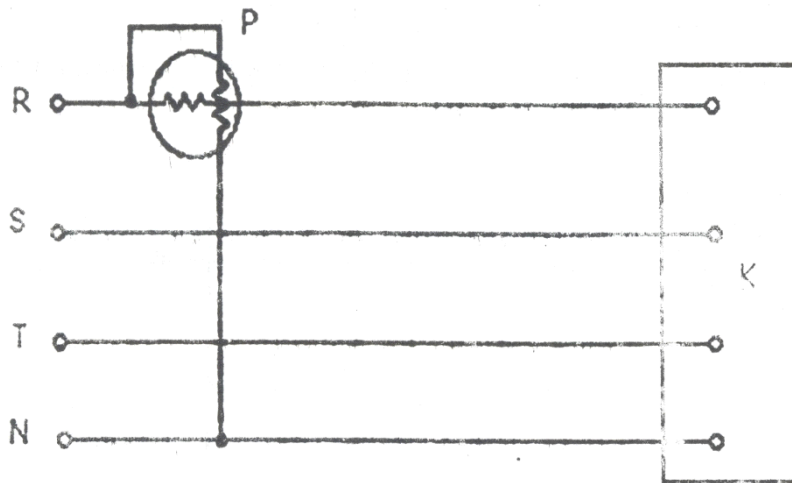


Σε ένα τέτοιο σύστημα η ολική ισχύς δίνεται από το σχήμα της ισχύος κάθε βαττόμετρου.

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1)$$

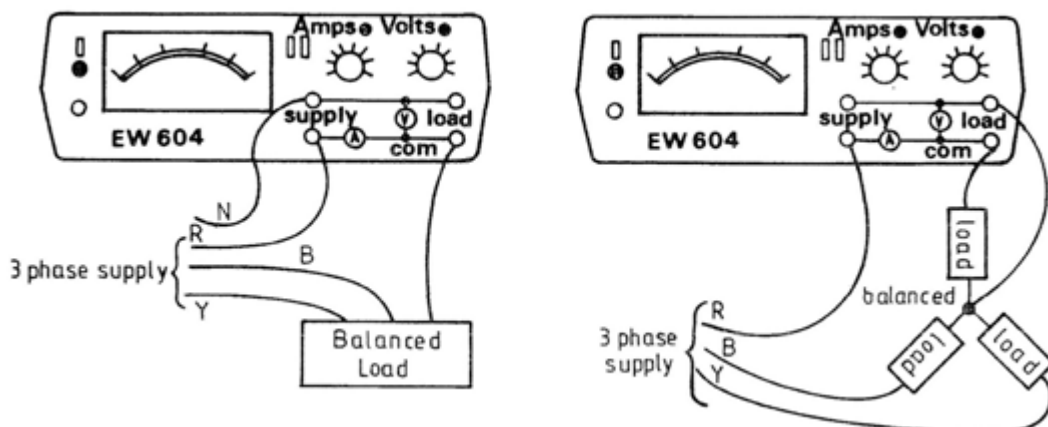
### **Μέτρηση ισχύος Συμμετρικού φορτίου**

Εάν το φορτίο είναι συμμετρικό τότε οι ενδείξεις των βαττόμετρων θα είναι ίδιες με το αποτέλεσμα για τη μέτρηση της ισχύος να απαιτείται ένα μόνο βαττόμετρο η τριφασική ισχύς θα είναι  $P_{3\phi} = 3P$ , όπου P η ένδειξη του βαττόμετρου.



Αξιοποιώντας το βαττόμετρο τους εργαστηρίου η συνδεσμολογία η οποία πρέπει να υλοποιηθεί φαίνεται παρακάτω:

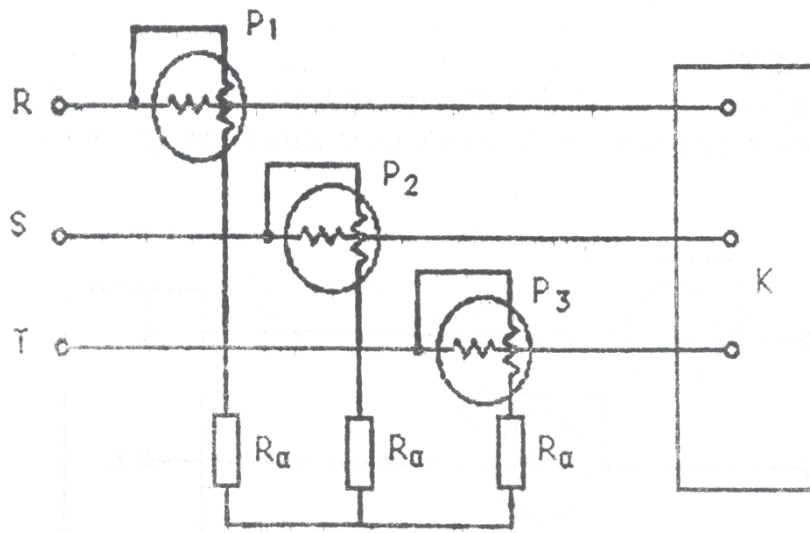
Σε αυτό το πείραμα θα μετρηθεί η ισχύς σε ένα ασύμμετρο φορτίο, σύνδεσης αστέρα, μεταβάλλοντας την τιμή της αντίστασης σε μια φάση (έστω στην S)



Εικ. 0-3 Μέτρηση Συμμετρικού φορτίου με ένα βαττόμετρο.

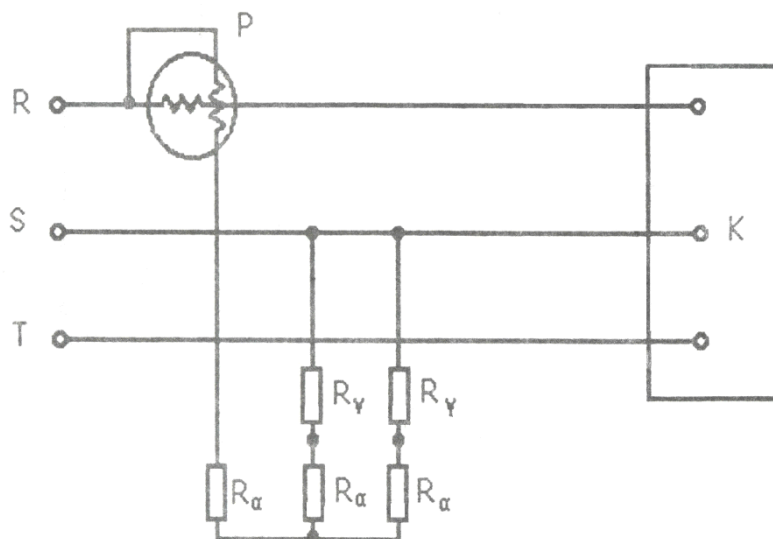
### ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 3 ΑΓΩΓΩΝ

Σε ένα τριφασικό σύστημα χωρίς ουδέτερο αγωγό η μέτρηση της ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη δημιουργία τεχνητού ουδέτερου με τη βοήθεια τριών ίσων αντιστάσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2)$$

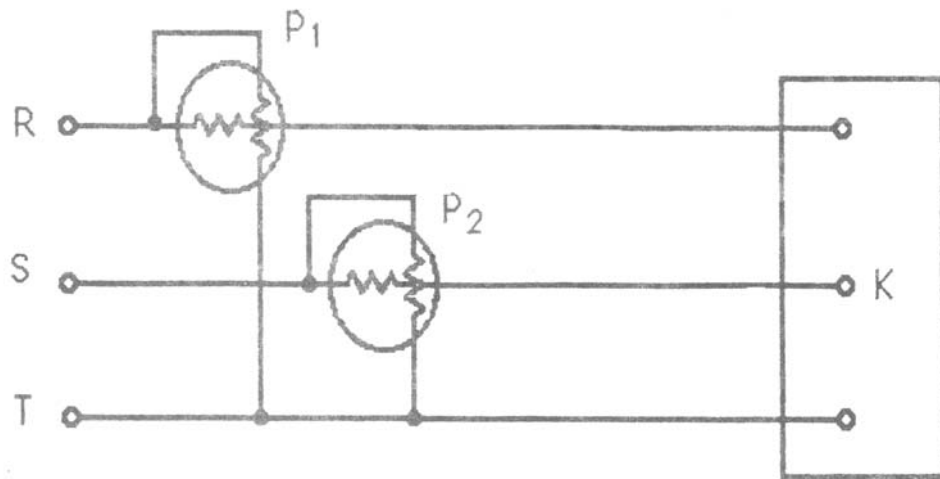
Εάν το σύστημα είναι συμμετρικό και ισορροπημένο απαιτείται μόνο ένα βατόμετρο και η συνδεσμολογία θα είναι η ακόλουθη με την τριφασική ισχύ  $P_{3\phi} = 3P$



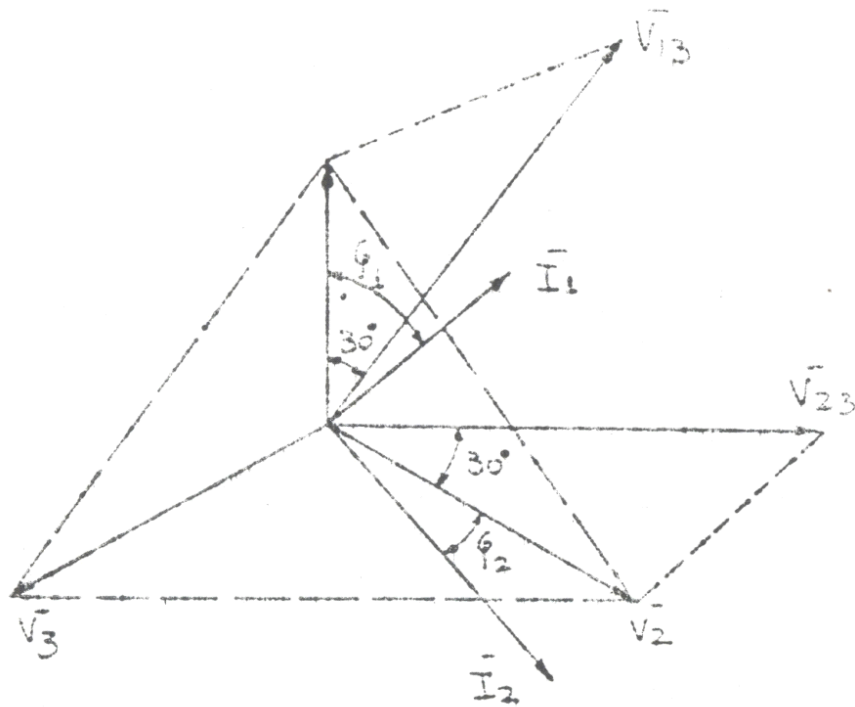
Εικ. 0-4 Χρήση 1 βαττομέτρου σε αγωγό χωρίς ουδέτερο.

## ΜΕΘΟΔΟΣ ARON

Μεγαλύτερη εφαρμογή στη μέτρηση της ενεργού ισχύος σε τριφασικό σύστημα χωρίς ουδέτερο αγωγό με φορτίο μη ισορροπημένο έχει η μέθοδος ARON.



Εικ. 0-5 Συνδεσμολογία μεθόδου ARON.



Εικ. 0-6 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και εντάσεων, μέτρησης ισχύος με δύο βαττόμετρα με κοινό κόμβο τον αγωγό T.

$$P2 = V_{23} \cdot I_2 \cdot \cos(\phi_2 + 30^\circ) \quad (3)$$

η γωνία,  $(V_{13}, I_1) = \phi_1 - 30^\circ$  σε μοίρες

$(V_{23}, I_2) = \phi_2 + 30^\circ$  σε μοίρες

$$\text{Άρα, } P_1 = V_{13} \cdot I_1 \cos(\varphi_1 - 30^\circ)$$

$$P_2 = V_{23} \cdot I_2 \cos(\varphi_2 + 30^\circ)$$

Αν το φορτίο είναι επαγωγικό οι γωνίες  $\varphi_1, \varphi_2$  είναι θετικές. Τότε το  $\cos(\varphi_1 - 30^\circ)$ , είναι μεγαλύτερο του  $\cos(\varphi_2 + 30^\circ)$  και μηδενίζεται όταν  $\varphi_2 = 60^\circ$ . Στην περίπτωση αυτή το βαττομετρο με ισχύ  $P_2$  δείχνει μηδέν και η συνολική ισχύς είναι αυτή του βαττομετρου  $P_1$ .

Αν η γωνία  $\varphi_2$  είναι μεγαλύτερη των  $60^\circ$  τότε  $(\varphi_2 + 30^\circ) > 90^\circ$  και το συνημίτονο γίνεται αρνητικό οπότε η ισχύς του βαττόμετρου  $P_2$  τείνει να δείξει προς τα πίσω. Για να πραγματοποιήσουμε τη μέτρηση αυτή αλλάζουμε την συνδεσμολογία του βολτομετρικού πηνίου και λαμβάνουμε την ένδειξη αρνητική.

Αν το σύστημα είναι συμμετρικό και ισορροπημένο τότε:

$$V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V$$

$$I_R = I_S = I_T = I$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

$$\text{Άρα, } P_1 = V \cdot I \cos(\varphi - 30^\circ)$$

$$P_2 = V \cdot I \cos(\varphi + 30^\circ)$$

Η συνολική ισχύ θα είναι:

$$\begin{aligned} P_3 \varphi &= P_1 + P_2 = V_1 \cdot (\cos(\varphi - 30^\circ) + \cos(\varphi + 30^\circ)) = \\ &= V_1 \cdot (\cos\varphi \cos 30^\circ + \sin\varphi \sin 30^\circ + \cos\varphi \cos 30^\circ - \sin\varphi \sin 30^\circ) = \\ &= V_1 \cdot (\cos\varphi \cos 30^\circ + \cos\varphi \cos 30^\circ) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \cos 30^\circ = \\ &2 \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi. \end{aligned}$$

### Συντελεστής ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος  $\cos\varphi$  σε ένα μονοφασικό κύκλωμα δίδεται από την σχέση:

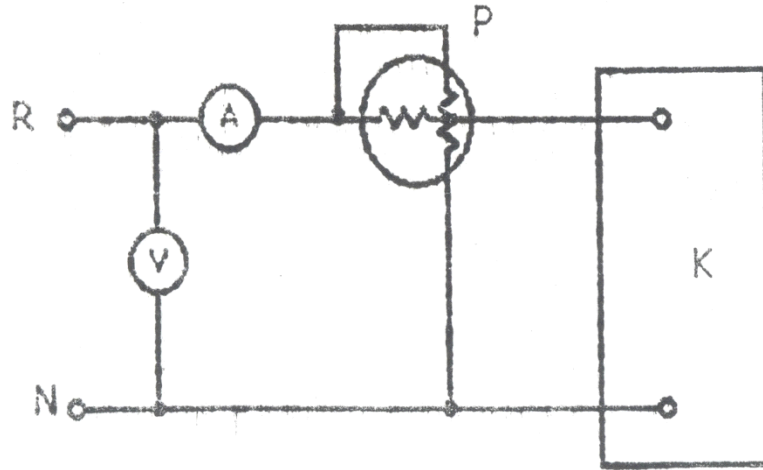
$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \Rightarrow \cos\varphi = \frac{P}{VI} \quad (4)$$

Σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ο συντελεστής ισχύος δίδεται από τη σχέση :

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{\pi} \cdot I \cdot \cos\varphi = 3 \cdot V_{\varphi} \cdot I \cdot \cos\varphi \Rightarrow \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V_{\pi} \cdot I} = \frac{P}{3 \cdot V_{\varphi} \cdot I} \quad (5)$$

Όπου,  $V_p$  και  $V_f$  η ενεργός τιμή της πολικής και φυσικής τάσης του συστήματος.

### Μέτρηση του συντελεστή ισχύος σε μονοφασικό σύστημα



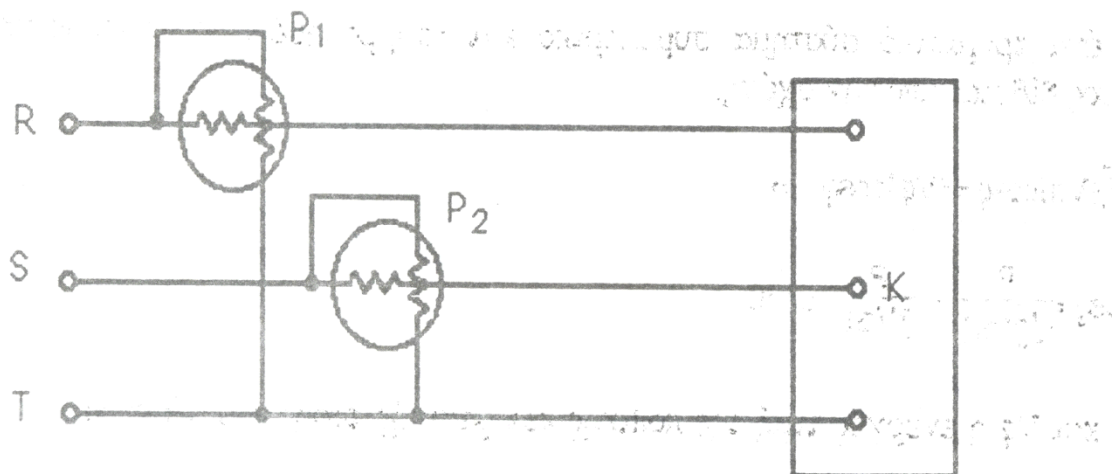
Ο υπολογισμός του συντελεστή ισχύος γίνεται με άμεσο τρόπο βάση της σχέσεως  $\cos\phi = \frac{P}{VI}$  όπου  $P, V, I$  οι ενδείξεις των αντίστοιχων οργάνων.

### Μέτρηση του συντελεστή ισχύος σε τριφασικό σύστημα

Σε ένα τριφασικό συμμετρικό και ισορροπημένο σύστημα 3 αγωγών, ουδέτερο, η μέτρηση του συντελεστή ισχύος μπορεί να γίνει όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

Αν το φορτίο είναι μη ισορροπημένο η μέτρηση του συντελεστή ισχύος μπορεί να γίνει μόνο με τη χρήση τριφασικού συνιμιτινόμετρου.

Σε ένα τριφασικό σύστημα 3 αγωγών όπου η ενεργός ισχύς με την συνδεσμολογία δύο βαττόμετρων ARON



Από τις ενδείξεις των οργάνων  $P_1+P_2$  ορίζονται αφενώς μεν η τριφασική ενεργός ισχύς αφετέρου η αεργός βάση των σχέσεων.

$$P_{3\phi}=P_1+P_2$$

$$Q_{3\phi}=\sqrt{3}(P_1-P_2) \quad (6)$$

Ο ζητούμενος συντελεστής ισχύος ορίζεται ως συνημίτονο της γωνίας που έχει εφαπτομένη την αεργό ισχύ προς την ενεργό ισχύ.

$$\epsilon\phi\phi=\frac{Q}{P} \quad \acute{\alpha}\rho\alpha, \cos\phi=\frac{1}{\sqrt{1+\epsilon\phi\phi^2}}=\frac{1}{\sqrt{1+(\frac{Q}{P})^2}}=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (7)$$

Με αντικατάσταση των P και Q στην παραπάνω σχέση έχουμε:

$$(7) = \frac{P_1+P_2}{\sqrt{(P_1+P_2)^2+3*(P_1-P_2)^2}} = \frac{P_1+P_2}{\sqrt{4*P_1^2+4*P_2^2-4*P_1*P_2}} = \frac{P_1+P_2}{2*\sqrt{P_1^2+P_2^2-P_1*P_2}} \quad (8) \text{ διαιρούμε με } P_1$$

$$\cos\phi = \frac{1+\frac{P_2}{P_1}}{2*\sqrt{1-\frac{P_2}{P_1}+(\frac{P_2}{P_1})^2}} \quad \acute{\epsilon}\acute{\alpha}\nu \text{ θέσουμε } \frac{P_2}{P_1} = \alpha, \text{ τότε}$$

$$\cos\phi = \frac{1+\alpha}{2*\sqrt{\alpha^2-\alpha+1}} \quad (9)$$

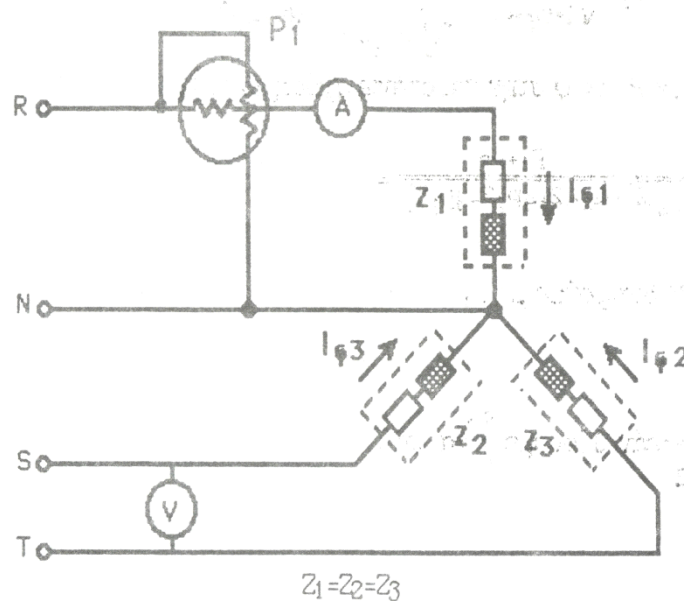
### Εργαστηριακή εργασία

Απαραίτητες συσκευές και όργανα

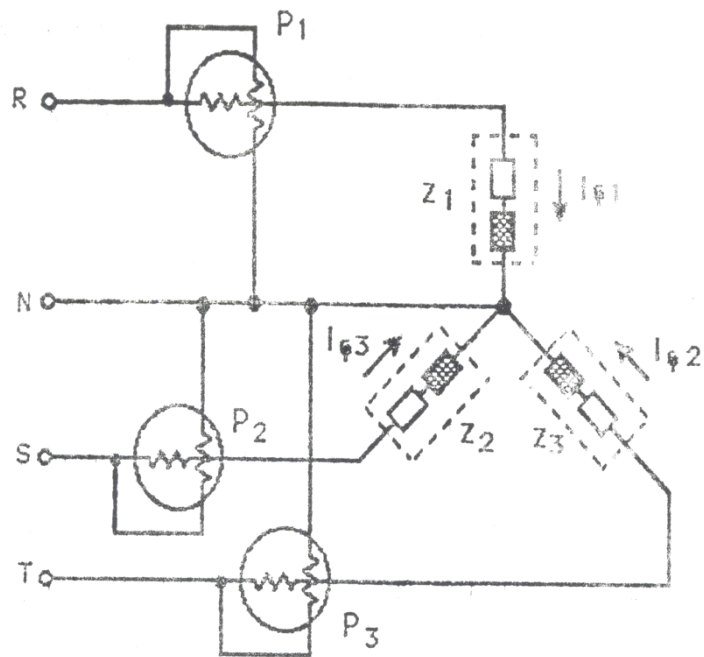
- Τριφασικό φορτίο
- 3 βαττόμετρα feedback ew 604
- Βολτόμετρο 0-600 volt
- Αμπερόμετρο 0,6-6ampere

Συνδεσμολογίστε το παρακάτω κύκλωμα με το τριφασικό ωμικό φορτίο συνδεδεμένο σε σειρά με το επαγωγικό φορτίο. Ρυθμίστε τα τρία ρεύματα να γίνουν ίσα και υπολογίστε την συνολική τριφασική ισχύ από την ένδειξη του βαττόμετρου.

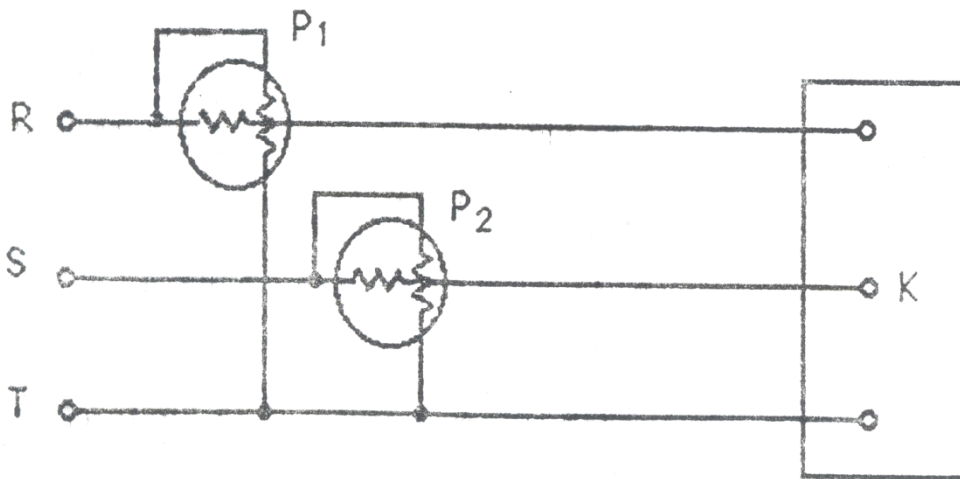
Να υπολογίσετε το συντελεστή ισχύος του κυκλώματος.



Συνδεσμολογήστε το παρακάτω κύκλωμα με το τριφασικό ωμικό φορτίο συνδεδεμένο σε σειρά με το επαγωγικό φορτίο. Ρυθμίστε τα τρία ρεύματα σε διαφορετικές τιμές για κάθε φάση . Να υπολογίσετε την τριφασική ισχύ από τις ενδείξεις των βαττόμετρων.



- 1) Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα (συνδεσμολογία ARON), ώστε να έχετε ασύμμετρη φόρτιση και υπολογίστε από τις ενδείξεις των βαττομέτρων
- 2)  $P_1, P_2$  .
  - α) την συνολική τριφασική ισχύ
  - β) το συντελεστή ισχύος

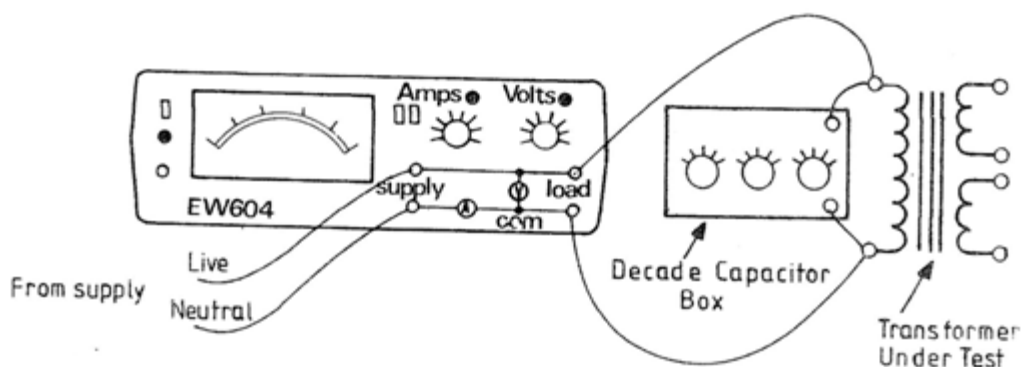


### Μετρώντας συστήματα με χαμηλό συντελεστή ισχύος

Είναι δυνατόν με συνθήκες χαμηλού συντελεστή ισχύος ή υψηλού συντελεστή κορυφής να λαμβάνεται μόνο μια μικρή εκτροπή χωρίς υπερφόρτωση. Αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της πραγματικής ισχύος που είναι χαμηλή στο κύκλωμα και συνεπώς δεν είναι λογικό να αναμένουμε μια μεγάλη εκτροπή. Στην πράξη οι συντελεστές χαμηλής ισχύος συνήθως συναντώνται όταν μετράμε, για παράδειγμα, την απώλεια σιδήρου των μετασχηματιστών. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτωση του βαττόμετρου όταν αυτό εμφανίζει μια πολύ μικρή εκτροπή που αντιστοιχεί σε μια μικρή απώλεια σιδήρου. Αυτή η δυσκολία μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση των πυκνωτών διόρθωσης συντελεστή ισχύος. Στη θεωρία η χρήση των εν λόγω πυκνωτών για να "συντονίσουν" την επαγωγή του μετασχηματιστή δεν επηρεάζει την ένδειξη της ισχύος αλλά μειώνει το ρεύμα τροφοδοσίας επιτρέποντας σε μια πιο ευαίσθητη περιοχή ρεύματος να χρησιμοποιείται χωρίς υπερφόρτωση του βαττόμετρου, παρέχοντας έτσι μια πιο σημαντική εκτροπή.

Ο πυκνωτής που χρησιμοποιείται όπως φαίνεται στο Σχ. 1 μπορεί να είναι, για ευκολία, ένα κιβώτιο τύπου δεκάδας κατάλληλης ονομαστικής τάσης και τιμής. Η γωνία απωλειών των περισσότερων εμπορικών κιβωτίων πυκνωτή είναι τόσο μικρή ώστε να είναι ασήμαντη σε σύγκριση με τις κανονικές γωνίες απωλειών μετασχηματιστή ισχύος και έτσι δεν απαιτεί διόρθωση.

Η τιμή των πυκνωτών δεν είναι κρίσιμη, ρυθμίζεται στη δοκιμή για να σβήσει η τρέχουσα ένδειξη υπερφόρτωσης.

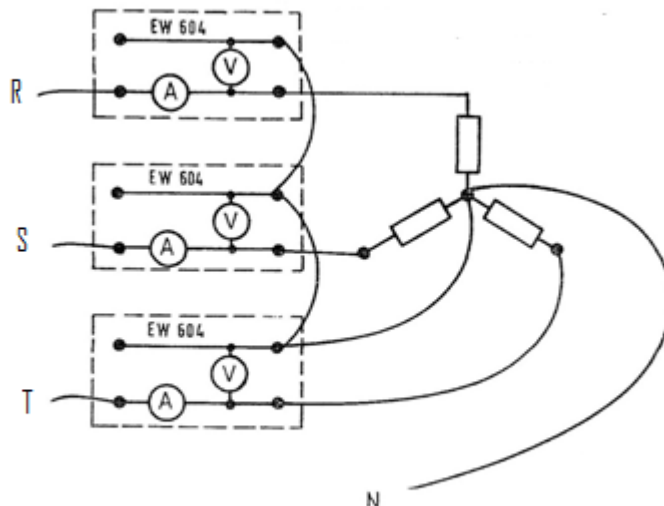


Σχ. 1 Μέτρηση φορτίου με χαμηλό συντελεστή ισχύος.

## Μέτρηση Ισχύος Ασύμμετρου φορτίου

### Συνδεσμολογία

1. Συνδέστε ένα βολτόμετρο για την μέτρηση της πολικής τάσης  $V_{RS}$ .
2. Συνδέστε από ένα αμπερόμετρο στις φάσεις S, T.
3. Μετρήστε την ισχύ σε κάθε φάση.
4. Ρυθμίστε το φορτίο στα 100Ω.



Εικ. 0-7 Η συνδεσμολογία μέτρησης για 3 βαττόμετρα.

### Εκτέλεση Πειράματος

Έχοντας ελέγξει τη συνδεσμολογία μας, και έχοντας συνδέσει στη φάση S αντίσταση π.χ.  $R=33\Omega$  αντί  $100\Omega$  δίνουμε τάση από το Variac.

Να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας.

$V_{RS}$ (V)	$P_S$ (W)	$P_R$ (W)	$P_T$ (W)	$I_S$ (A)	$I_T$ (A)

Να επαναληφθεί το πείραμα με  $R=50\Omega$ .

Να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας.

$V_{RS}$ (V)	$P_S$ (W)	$P_R$ (W)	$P_T$ (W)	$I_S$ (A)	$I_T$ (A)

Να επαναληφθεί το πείραμα με  $R=100\Omega$ .

Να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας.

$V_{RS}$ (V)	$P_S$ (W)	$P_R$ (W)	$P_T$ (W)	$I_S$ (A)	$I_T$ (A)

Να επαναληφθεί το πείραμα έχοντας σε 2 φάσεις από μια αντίσταση των  $18\Omega$  και στην 3 φάση ένα πηνίο  $L=0.2H$ ,  $X_L=62\Omega$ . (έστω το πηνίο στην φάση S).

Να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας.

$V_{RS}$ (V)	$P_S$ (W)	$P_R$ (W)	$P_T$ (W)	$I_S$ (A)	$I_T$ (A)	$I_N$ (A)

## ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Η.Ε-Γενικά

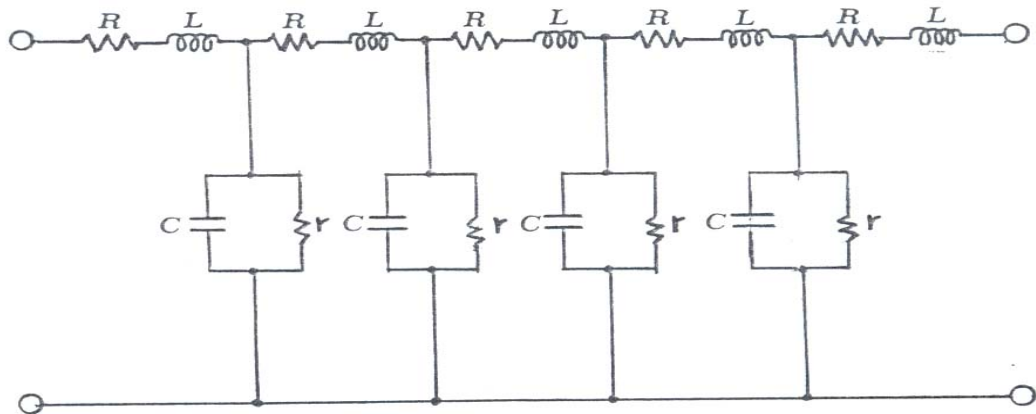
### Παράσταση Γραμμών

Ο τρόπος παραστάσεως των γραμμών μεταφοράς εξαρτάται πολύ από το μήκος και την ακρίβεια που απαιτείται.

Υπάρχουν τρεις ευρείες ταξινομήσεις μήκους:

- **Κοντές γραμμές** ( μέχρι 80 km περίπου )
- **Μέσες γραμμές** ( μέχρι 240 km περίπου )
- **Μακριές γραμμές** ( πάνω από 240 km )

Η πραγματική γραμμή είναι ένα κύκλωμα ισοκατανεμημένων παραμέτρων, δηλαδή έχει **αντίσταση, αυτεπαγωγή, χωρητικότητα και αντίσταση διαρροής** ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Παράσταση γραμμής με ισοκατανεμημένες παραμέτρους:

$R$  = Ωμική αντίσταση γραμμής ανά μονάδα μήκους.

$L$  = Αυτεπαγωγή γραμμή – προς ουδέτερο ανά μονάδα μήκους.

$r$  = Αντίσταση διαρροής ανά μονάδα μήκους

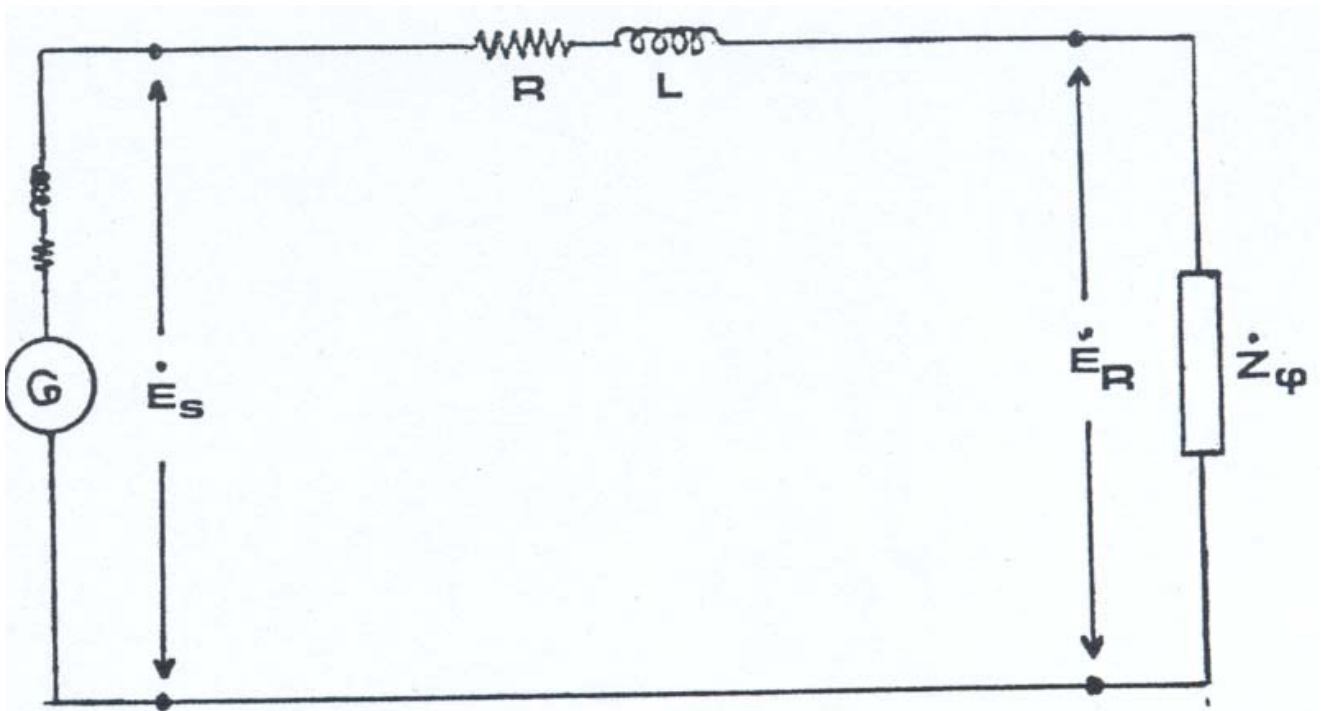
$C$  = Χωρητικότητα γραμμή – προς ουδέτερο ανά μονάδα μήκους.

Σχ. 2 Παράσταση γραμμής με ισοκατανεμημένες Παραμέτρους

Βασική προϋπόθεση για να γίνει μονοφασική παράσταση ενός τριφασικού κυκλώματος είναι η τριφασική συμμετρία τόσο του κυκλώματος, όσο και των ηλεκτρικών μεγεθών ( τάσεων και εντάσεων ).

Οι γραμμές μεταφοράς λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες με συμμετρική φόρτιση και είτε έχουν αντιμετατεθειμένους, ή όχι, αγωγούς φάσεων, κατά μήκος της γραμμής, η ασυμμετρία των φάσεων είναι μικρή και οι γραμμές θεωρούνται συμμετρικές.

Το μονοφασικό ισοδύναμο στην περίπτωση αυτή, περιέχει τα στοιχεία μιας φάσεως, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 3 Μονοφασικό ισοδύναμο Γραμμής

Οι υπολογισμοί , οι οποίοι γίνονται για το κύκλωμα αυτό, επεκτείνονται στο τριφασικό κύκλωμα, δεδομένου ότι τα ρεύματα των δύο άλλων φάσεων είναι ίσα σε μέγεθος με το ρεύμα της υπολογισθείσας φάσεως και σε φασικές αποκλίσεις **120 μοίρες** και **240 μοίρες** από αυτό.

Δεν έχει σημασία αν το φορτίο, καθορισμένο από την τάση, την ισχύ και το συντελεστή ισχύος του, είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο ή σε αστέρα, αφού το τρίγωνο μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο του αστέρα.

**Στις κοντές γραμμές** η συνολική χωρητική αγωγιμότητα είναι τόσο μικρή που μπορεί να παραληφθεί.

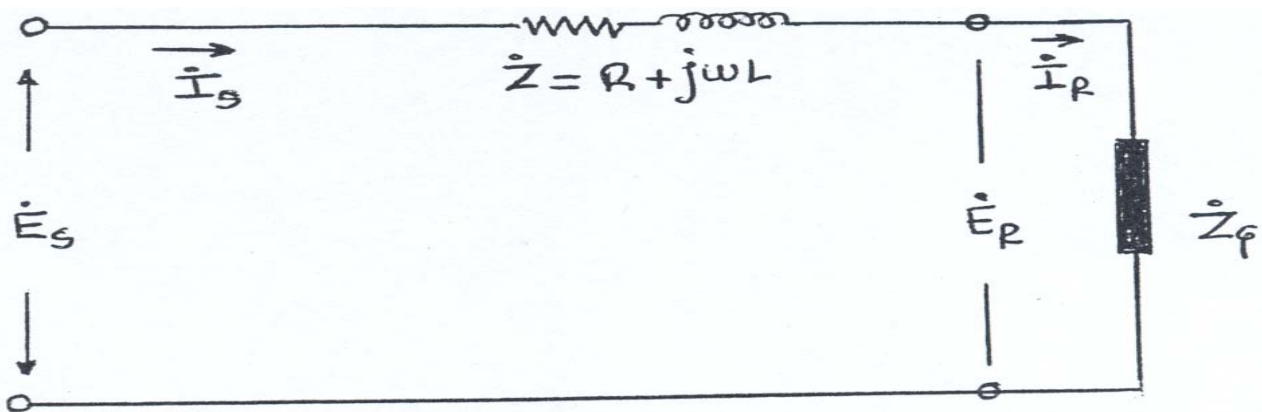
Το ρεύμα της εγκάρσιας αγωγιμότητας είναι συνήθως μικρό σε σχέση με το χωρητικό ρεύμα της γραμμής, επομένως και η εγκάρσια αγωγιμότητα μπορεί επίσης να παραληφθεί.

**Στις γραμμές μέσου μήκους** η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής μπορεί να θεωρηθεί μοιρασμένη σε δύο ίσα μέρη συγκεντρωμένα στα άκρα της, χωρίς αξιοσημείωτο σφάλμα στον υπολογισμό των τάσεων και των εντάσεων.

**Οι γραμμές μεγάλου μήκους** απαιτούν υπολογισμούς με κατανεμημένες παραμέτρους για να έχουμε παραδεκτή ακρίβεια αποτελεσμάτων.

## ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Η.Ε ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Εάν το σύστημα θεωρηθεί συμμετρικό κάθε γραμμή μικρού μήκους μπορεί να παρασταθεί όπως το μονοφασικό διάγραμμα του παρακάτω σχήματος.



Σχ. 4 Ισοδύναμο κύκλωμα κοντής γραμμής

Όπου:

$\dot{E}_S$  = τάση αναχώρησης

$\dot{E}_R$  = τάση άφιξης

$\dot{I}_S$  = ρεύμα αναχώρησης

$\dot{I}_R$  = ρεύμα άφιξης

$\dot{Z}$  = σύνθετη αντίσταση γραμμής

Κατά την μελέτη της κοντής γραμμής δεν λαμβάνονται υπόψη οι χωρητικοί κλάδοι, αλλά μόνο η ωμική και η αυτεπαγωγική αντίσταση της γραμμής. Το κύκλωμα επιλύεται όπως ένα απλό κύκλωμα εναλλασσομένου ρεύματος. Αφού δεν υπάρχουν εγκάρσιοι κλάδοι, το ρεύμα στην αναχώρηση είναι το **ίδιο** με το ρεύμα στην άφιξη.

Δηλαδή:

$$\dot{I}_S = \dot{I}_R$$

Η τάση στην αναχώρηση θα είναι:

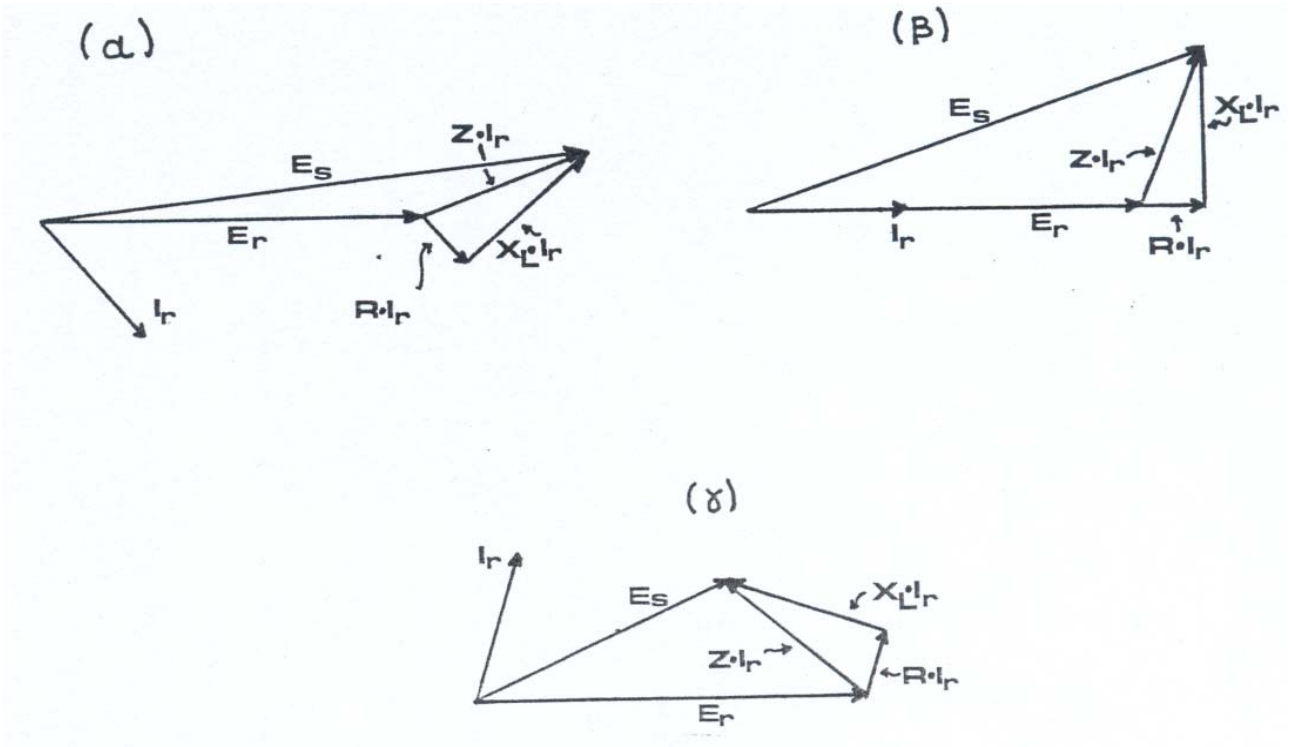
$$\dot{E}_S = \dot{E}_R + \dot{I}_R * \dot{Z}$$

όπου  $(I_R \cdot Z)$  είναι η πτώση τάσης στη γραμμή.

Μετά την απομάκρυνση του φορτίο μιας κοντής γραμμής, η τάση στην άφιξη θα είναι ίση με την τάση στην αναχώρηση της γραμμής, δηλαδή:

$$\dot{E}_S = \dot{E}_R$$

Τα διαγράμματα των φασικών διανυσμάτων του σχ.4 έχουν σχεδιασθεί για ίδια μεγέθη ρεύματος και τάσεως αφίξεως και δείχνουν ότι, για να διατηρηθεί μια δεδομένη τάση αφίξεως, απαιτείται μεγαλύτερη τιμή της τάσεως αναχωρήσεως, όταν το ρεύμα αφίξεως καθυστερεί της τάσεως, από ότι όταν το ρεύμα και η τάση είναι σε φάση. Μια ακόμη μικρότερη τάση αναχωρήσεως απαιτείται για να διατηρήσει τη δεδομένη τάση αφίξεως, όταν το ρεύμα αφίξεως προπορεύεται της τάσης.



Σχ. 5 Διαγράμματα φασικών διανυσμάτων κοντής γραμμής, για επαγωγικό, ωμικό και χωρητικό φορτίο

Διακύμανση τάσεως μιας γραμμής μεταφοράς είναι η εκατοστιαία διαφορά τάσεως του άκρου αφίξεως της γραμμής, σε κενή λειτουργία και με πλήρες φορτίο, για ορισμένο συντελεστή ισχύος και σταθερή τάση αναχωρήσεως, ανοιγμένη στην τάση πλήρους φορτίου:

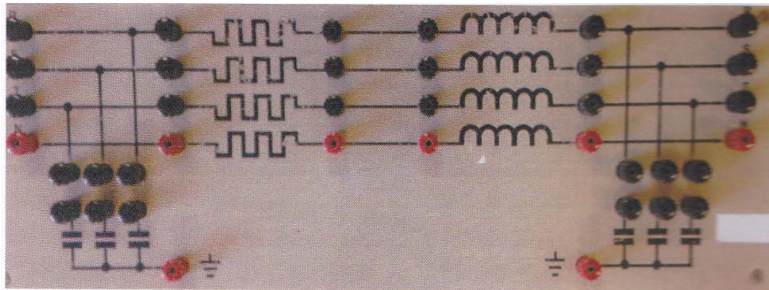
$$\Delta V\% = \frac{|E_{R0}| - |E_{R1}|}{|E_{R1}|} * 100$$

Όπου:

$E_{R0}$  = Τάση άφιξης χωρίς φορτίο

$E_{R1}$  = Τάση άφιξης με πλήρες φορτίο

### Περιγραφή εργαστηριακού μοντέλου



#### Στοιχεία γραμμής:

μήκος 8 km

τάση λειτουργίας 20KV

#### Στοιχεία μοντέλου:

τάση λειτουργίας 220V, 380V

μέγιστο ρεύμα 5A

αντίσταση ανά φάση 1.5Ω

αυτεπαγωγική αντίδραση ανά φάση 3.14Ω, 50Hz

χωρητικότητα ανά φάση ως προς γη 16μF

#### Στοιχεία εξομοίωσης:

ονομαστική τάση 220V

τάση 90.9

ρεύμα 90.9

ισχύς 90.9\*90.9=8263

ονομαστική τάση 380V

τάση 52.6

ρεύμα 52.6

ισχύς  $52.6 \cdot 52.6 = 2767$

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

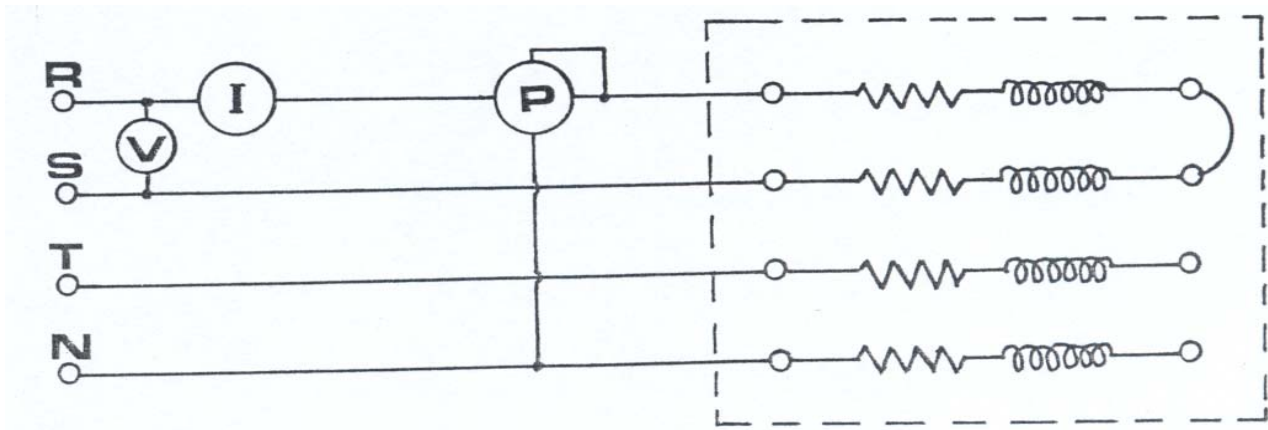
**Θέμα:** Μελέτη κοντής γραμμής.

**Στόχος:** Η εργαστηριακή μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, της ηλεκτρικής συμπεριφοράς και του λειτουργικού διαγράμματος μιας κοντής γραμμής.

**Εκτέλεση:**

**1. Μέτρηση- προσδιορισμός των ηλεκτρικών παραμέτρων του μοντέλου κοντής γραμμής του εργαστηρίου.**

- Να μελετηθούν οι ηλεκτρικές παράμετροι μιας φάσεως της γραμμής.
- Να εκτελεστεί η δοκιμή βραχυκύκλωσης της άφιξης της γραμμής.



Σχ. 6 Δοκιμή βραχυκύκλωσης

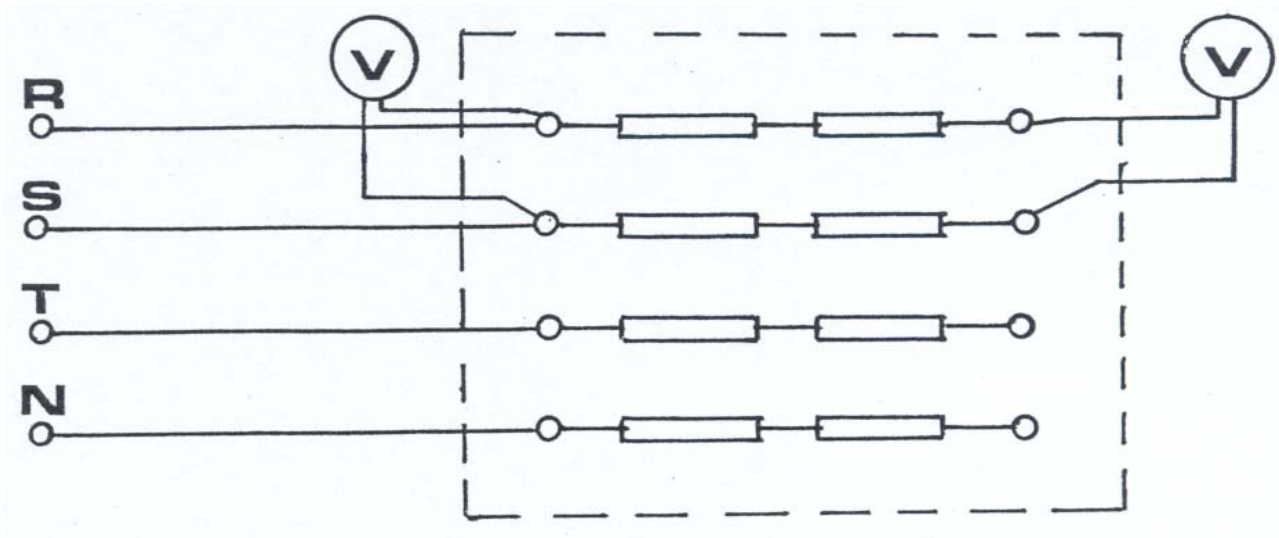
Να συμπληρωθεί ο πίνακας μετρήσεων.

$U_{\beta\rho}$	$I_{\beta\rho}$	$P_{\beta\rho}$
$Z$	$R$	$X_L$

**2. Λειτουργία γραμμής χωρίς φορτίο.**

Να πραγματοποιηθεί η συνδεσμολογία του σχήματος.

Να τροφοδοτηθεί το μοντέλο με τάση 220V πολική και να μετρήσετε την τάση κενής λειτουργίας  $E_{R0}$ .



Σχ. 7 Δοκιμή Ανοικτούκυκλώματος

Παρατηρήσεις, συμπεράσματα για την λειτουργία της γραμμής χωρίς φορτίο.

### 3.Λειτουργία γραμμής υπό φορτίο.

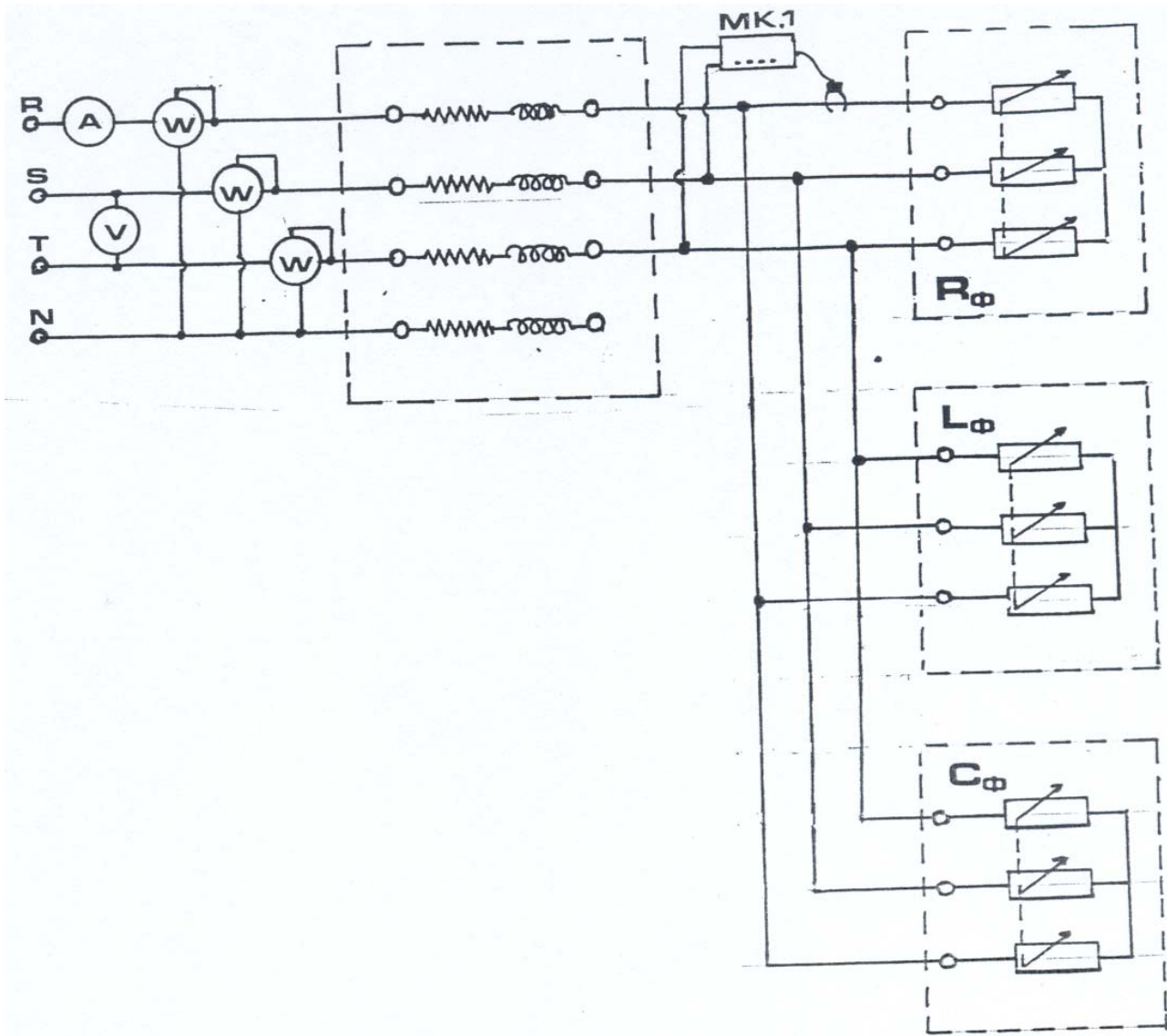
Να πραγματοποιηθεί η συνδεσμολογία του παρακάτω σχήματος και να τροφοδοτηθεί το μοντέλο με την ονομαστική τάση λειτουργίας.

Με πλήρες ωμικό φορτίο ( $\cos\phi=1$ ) να μετρηθούν:

- Οι τάσεις  $E_R$  και  $E_S$
- Το ρεύμα  $I_R$
- Ο συντελεστής ισχύος στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής.
- Η πτώση τάσης κατά μήκος της κοντής γραμμής.

Να πραγματοποιηθούν τα ερωτήματα a, b, c, d για  $\cos\phi_R = 0.6$  επαγωγικό.

Να πραγματοποιηθούν τα ερωτήματα a, b, c, d για  $\cos\phi_R = 0.6$  χωρητικό.



Σχ. 8 Συνδεσμολογία για διάφορα φορτία με τη βοήθεια της κοντής γραμμής.

$\cos\phi_R$	$E_R$	$I_R$	$P_R$	$E_S$	$I_S$	$P_S$	$\Delta V\%$
1							
0.6 ind							
0.6 cap							

Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα για τη λειτουργία της γραμμής.

## **Εργασία**

Να προσδιορισθεί το ανώτατο όριο φόρτισης της γραμμής για ( $\cos\phi_R = 1$ ,  $\cos\phi_R = 0.6$  επαγωγικό,  $\cos\phi_R = 0.6$  χωρητικό) υπό την προϋπόθεση η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής να είναι στα επιτρεπόμενα όρια  $\pm 5\%$ .

Να υπολογίσετε και για τις τρεις περιπτώσεις:

- Την ισχύ στην άφιξη (**Φαινόμενη – Ενεργό – ‘Αεργο**)
- Την ισχύ στην αναχώρηση (**Φαινόμενη – Ενεργό – ‘Αεργο**)
- Την **απώλεια ισχύος**.

Να συντάξετε γραπτή λεπτομερειακή έκθεση στην οποία θα παραδώσετε στο επόμενο εργαστήριο.

## ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΣΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

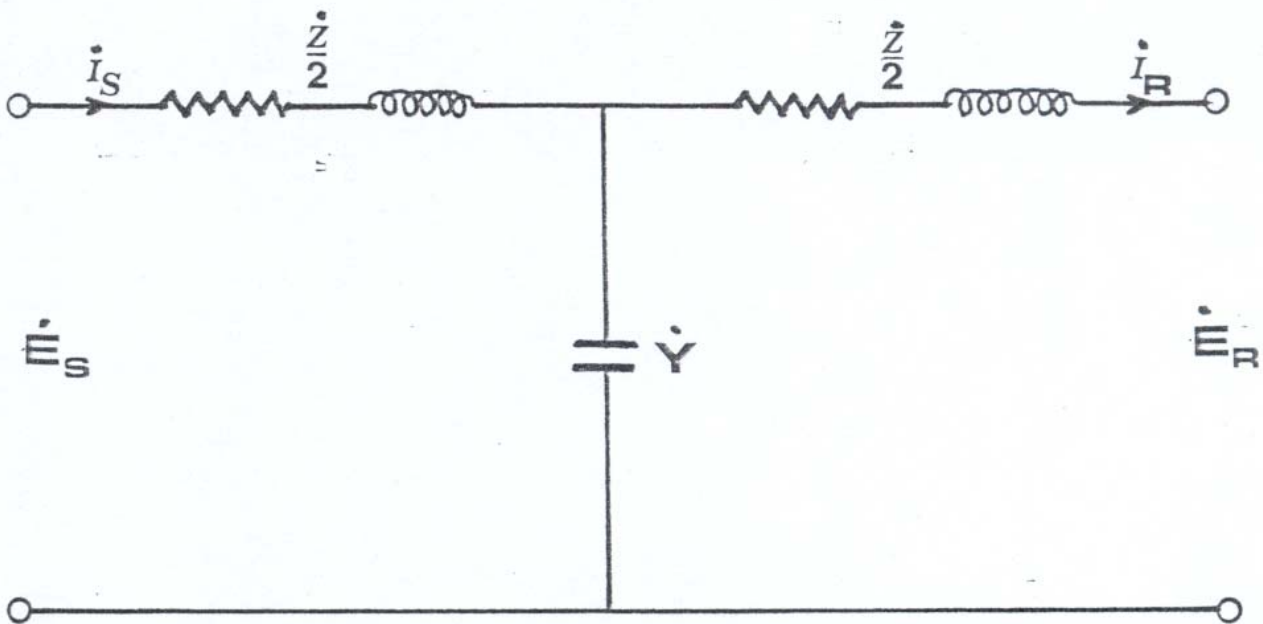
Στους υπολογισμούς των γραμμών μέσου μήκους λαμβάνεται υπόψη και η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα, η οποία γενικά θεωρείται ότι αποτελείται μόνο από τη χωρητικότητα.

Στην πραγματικότητα η χωρητικότητα είναι κατανομημένη ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής.

Η ποσότητα όμως αυτή μπορεί να θεωρηθεί συγκεντρωμένη σε ορισμένα σημεία κατά μήκος της γραμμής, με καλή προσέγγιση στους υπολογισμούς.

Οι δύο πιο συνηθισμένες διατάξεις είναι το ονομαστικό κύκλωμα **T**, και το ονομαστικό κύκλωμα **Π**.

Εάν όλη η εγκάρσια αγωγιμότητα θεωρηθεί συγκεντρωμένη στο μέσο του κυκλώματος, το οποίο παριστάνει τη γραμμή, προκύπτει το ονομαστικό κύκλωμα **T**.



Σχ. 9 Ισοδύναμο T της Γραμμής

Όπου:

$\dot{E}_S$  = Τάση αναχώρησης

$\dot{E}_R$  = Τάση άφιξης

$\dot{I}_S$  = Ρεύμα αναχώρησης

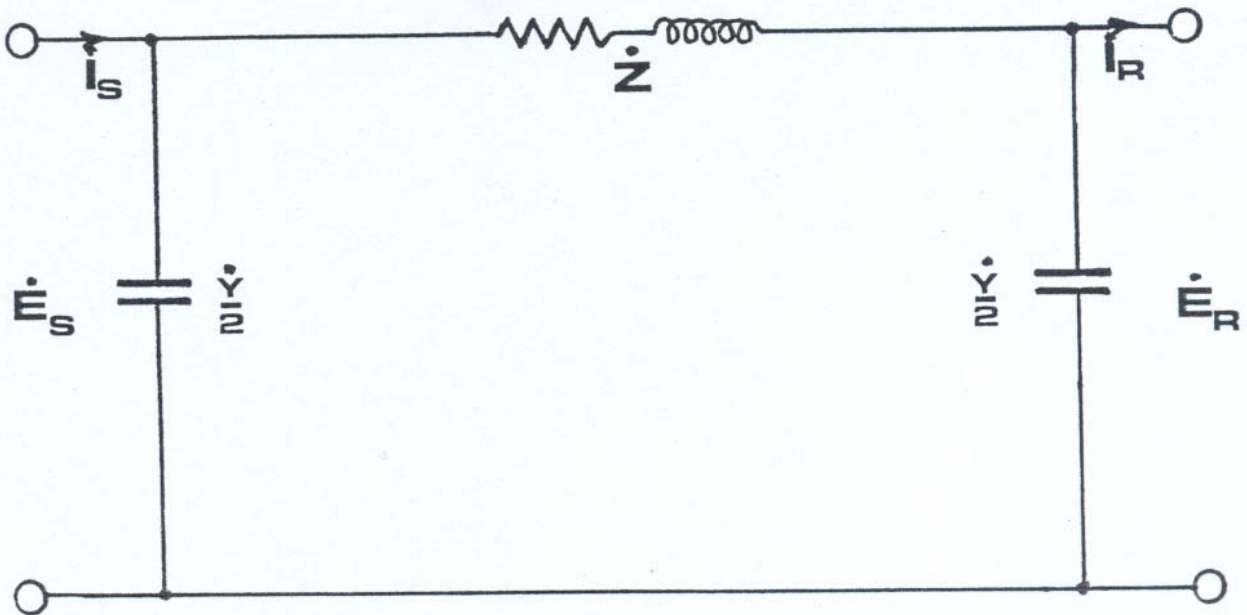
$\dot{I}_R$  = Ρεύμα άφιξης

$\dot{Z}$  = Σύνθετη αντίσταση γραμμής ( $Z = R + jX$ )

$\dot{Y}$  = Συνολική σύνθετη εγκάρσια αγωγιμότητα ( $Y = G + j\omega C$ )

$\dot{G}$  = Αγωγιμότητα μονωτήρων (συνήθως  $G = 0$ )

Εάν η συνολική εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μοιράζεται σε δύο ίσα μέρη τοποθετημένα στα δύο άκρα του κυκλώματος, το οποίο παριστάνει τη γραμμή, προκύπτει το ονομαστικό κύκλωμα Π.



Σχ. 10 Ισοδύναμο Π της γραμμής

Όπου:

$E_S$  = Τάση αναχώρησης

$E_R$  = Τάση άφιξης

$I_S$  = Ρεύμα αναχώρησης

$I_R$  = Ρεύμα άφιξης

$Z$  = Σύνθετη αντίσταση γραμμής ( $\dot{Z} = R + jX$ )

$Y$  = Συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα ( $\dot{Y} = G + j\omega C$ )

$G = 0$

Το ονομαστικό κύκλωμα  $\Pi$  χρησιμοποιείται συχνότερα για την παράσταση γραμμών μέσου μήκους.

Στη μόνιμη κατάσταση και στη συχνότητα λειτουργίας μπορούμε να θεωρήσουμε τη γραμμή σαν ένα τετράπολο με γενικευμένες σταθερές **A B C D**.

Η γενική μορφή των εξισώσεων του τετράπολου (διθύρου)

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{E}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_S &= \dot{A}\dot{E}_R + \dot{B}\dot{I}_R \\ \dot{I}_S &= \dot{C}\dot{E}_R + \dot{D}\dot{I}_R \end{aligned} \quad (11)$$

Η με αντιστροφή της μήτρας των παραμέτρων

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{D} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{A} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_R &= \dot{D}\dot{E}_S - \dot{B}\dot{I}_S \\ \dot{I}_R &= -\dot{C}\dot{E}_S + \dot{A}\dot{I}_S\end{aligned}$$

(13)

Για το ονομαστικό κύκλωμα Π

Για το ονομαστικό κύκλωμα Τ

$$\dot{A} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$$

$$\dot{B} = \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right) \cdot \dot{Z}$$

$$\dot{C} = \dot{Y}$$

$$\dot{D} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$$

$$\dot{A} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$$

$$\dot{B} = \dot{Z}$$

$$\dot{C} = \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right) \cdot \dot{Y}$$

$$\dot{D} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$$

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στοιχεία γραμμής:

Μήκος: 136 Km

Τάση: 77 KV

Ρεύμα: 100 A

Ισχύς:  $\sqrt{3} \cdot 77 \cdot 100 = 13.3 \text{ MVA}$

### Στοιχεία μοντέλου:

Τάση: 220 V

Ρεύμα: 5 A

Ισχύς:  $\sqrt{3} * 5 * 220 = 1905$  VA

### Σχέσεις μεταξύ μοντέλου-γραμμής:

$$\text{Λόγος τάσεως} = (\text{τάση μοντέλου}) / (\text{Τάση γραμμής}) = \frac{220}{(77 * 10^3)} = \frac{1}{350}$$

$$\text{Λόγος ρευμάτων} = (\text{Ρεύμα μοντέλου}) / (\text{Ρεύμα γραμμής}) = \frac{5}{100} = \frac{1}{20}$$

$$\text{Λόγος ισχύος} = (\text{Ισχύς μοντέλου}) / (\text{Ισχύς γραμμής}) = \frac{(\sqrt{3} * 220 * 5)}{(\sqrt{3} * 77 * 10^3 * 100)} = \frac{1}{7000}$$

$$\text{Λόγος σύνθετου αντιστάσεως} = (\text{Λόγος τάσεων}) / (\text{Λόγος ρευμάτων}) = \frac{\frac{1}{350}}{\frac{1}{20}} = \frac{2}{35}$$

### Υπολογισμός των παραμέτρων Z, R, X<sub>L</sub>

Η σύνθετη αντίσταση του μοντέλου υπολογίζεται από τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μοντέλου.

Από τις μετρήσεις των  $U_{\beta\rho}$ ,  $I_{\beta\rho}$ ,  $P_{\beta\rho}$  υπολογίζουμε τα Z, R, X<sub>L</sub>.

$$Z = \frac{U_{\beta\rho}}{I_{\beta\rho}}, \quad R = \frac{P_{\beta\rho}}{I_{\beta\rho}^2}, \quad X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

### Υπολογισμός του μήκους της γραμμής.

Στις τριφασικές γραμμές στις οποίες η απόσταση μεταξύ των αγωγών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη διάμετρο των αγωγών, η επαγωγική αντίδραση είναι περίπου 0.4 Ω ανά φάση και Km.

Εάν λάβουμε υπόψη και το λόγο συνθέτου αντιστάσεως, το μήκος της γραμμής δίδεται από τη σχέση:

$$L_{\text{γραμμής}} = \frac{1}{\frac{\text{λόγος.συνθ.αντ}}{0.4}} * X_{L_{\text{μοντέλου}}} \quad (\text{Km})$$

### Υπολογισμός της χωρητικότητας της γραμμής.

Η χωρητικότητα της γραμμής υπολογίζεται αν τροφοδοτήσουμε το μοντέλο με την κανονική τάση λειτουργίας και μετρήσουμε το ρεύμα  $I_c$  εν κενώ.

Οπότε εάν: Λόγος ρευμάτων =  $\frac{1}{20}$  και Λόγος τάσεων =  $\frac{1}{350}$  έχουμε:

$$X_c = \frac{1}{C * \omega} = \frac{U}{I} \Rightarrow I = U * C * \omega \Rightarrow C = \frac{I_c}{U * \omega} \Rightarrow C_{\text{γρ}} = \frac{I_c * 20}{350 * U_{\Phi} * \omega}$$

$$C_{\text{γρ}} = \frac{20 * I_c}{350 * E_{S\Phi} * \omega} \quad (F)$$

$$C'_{\text{γρ}} = \frac{20 * I_c}{350 * E_{S\Phi} * \omega * L} \quad \left( \frac{F}{\text{Km}} \right)$$

όπου:

$I_c$  = Ρεύμα μοντέλου εν κενώ  
 $E_{S\Phi}$  = Τάση αναχώρησης του μοντέλου  
 $L$  = Μήκος γραμμής  
 $\omega$  =  $2\pi f$

### Υπολογισμός της χωρητικότητας ως προς τη γη.

Η χωρητικότητα της γραμμής ως προς τη γη μπορεί να υπολογισθεί εάν τροφοδοτήσουμε το μοντέλο με την κανονική τάση λειτουργίας και μετρήσουμε το ρεύμα  $I_{c_j}$ .

Εάν δεν λάβουμε υπόψη ότι ο λόγος των ρευμάτων είναι  $\frac{1}{20}$  και ο λόγος των τάσεων  $\frac{1}{350}$  υπολογίζουμε την χωρητικότητα ως προς γη από την σχέση:

$$C_j = \frac{20 \cdot I_{Cj}}{350 \cdot E_{S\Phi} \cdot \omega} \quad (F)$$

$$C'_{j} = \frac{20 \cdot I_{Cj}}{350 \cdot E_{S\Phi} \cdot \omega \cdot L} \quad \left( \frac{F}{Km} \right)$$

όπου:

$I_{Cj}$  = Ρεύμα μοντέλου εν κενώ με χωρητικότητα μόνο ως προς γη  
 $E_{S\Phi}$  = Τάση στο μοντέλο  
 $L$  = Μήκος γραμμής  
 $\omega$  =  $2\pi f$

$$L_{\text{γραμμής}} = \frac{1}{\frac{\text{λόγος.συνθ.αντ}}{0.4}} \cdot X_{L\text{μοντέλ}} \quad (Km)$$

## **ΑΣΚΗΣΗ**

**Θέμα:** Μελέτη γραμμής μέσου μήκους.

**Στόχος:** Η εργαστηριακή μελέτη της γραμμής μεταφοράς Η.Ε, με τη χρήση μοντέλου Π-τετραπόλου.

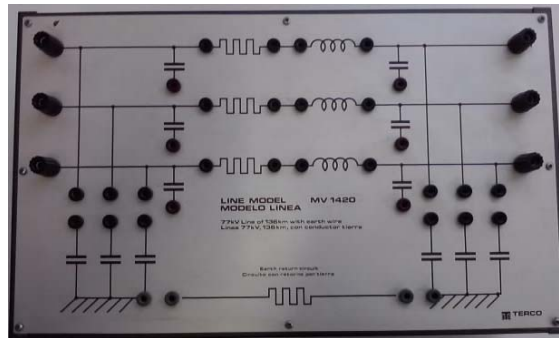
Ο προσδιορισμός των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών παραμέτρων της γραμμής και των σταθερών του τετραπόλου καθώς και της ηλεκτρικής συμπεριφοράς της γραμμής.

**Εκτέλεση:**

1. Να πραγματοποιηθεί η συνδεσμολογία του ΤΕΣΤ βραχυκύκλωσης της γραμμής και να συμπληρωθεί ο πίνακας μετρήσεων.

$U_{\beta\rho}$	$I_{\beta\rho}$	$P_{\beta\rho}$
$Z$	$R$	$X_L$

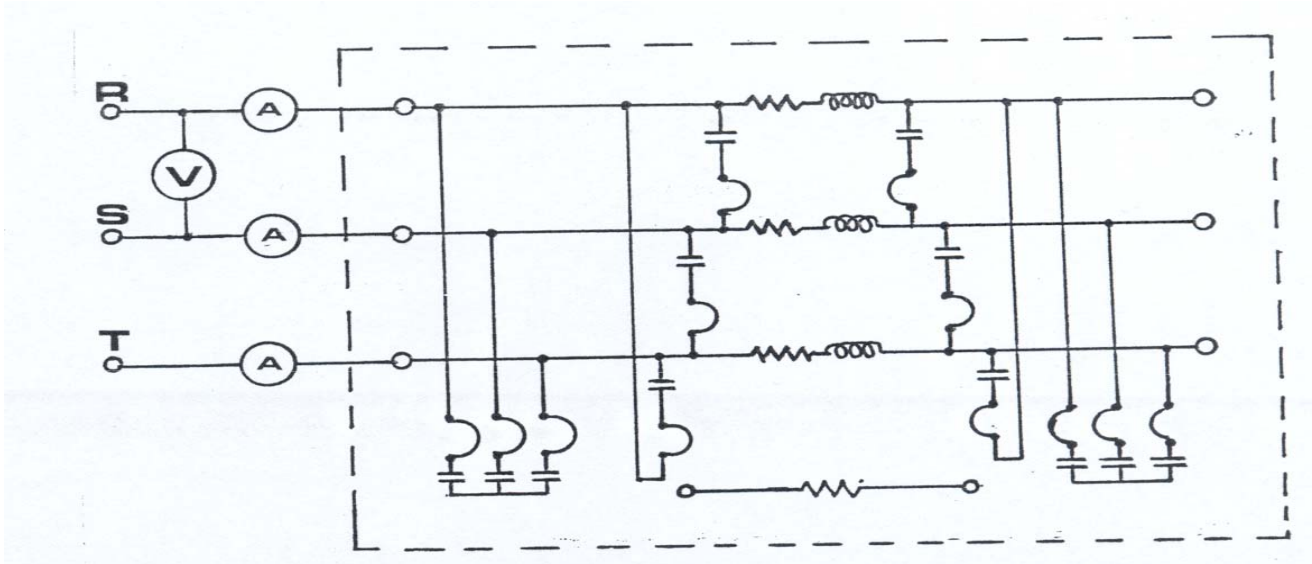
2. Να υπολογισθεί το  $Z$  της γραμμής.
3. Να υπολογισθεί το μήκος της γραμμής.



Μοντέλο γραμμής MV 1420 MODELO LINEA

77kV γραμμή 136 km με καλώδιο γείωσης.

### Τεστ ανοιχτού κυκλώματος



1. Να ανοικτοκυκλωθεί η γραμμή και να μετρήσετε τα ρεύματα  $I_C$  που δημιουργούνται από τις αμοιβαίες χωρητικότητες της γραμμής.

Καταχωρήστε τις μετρήσεις στον παρακάτω πίνακα.

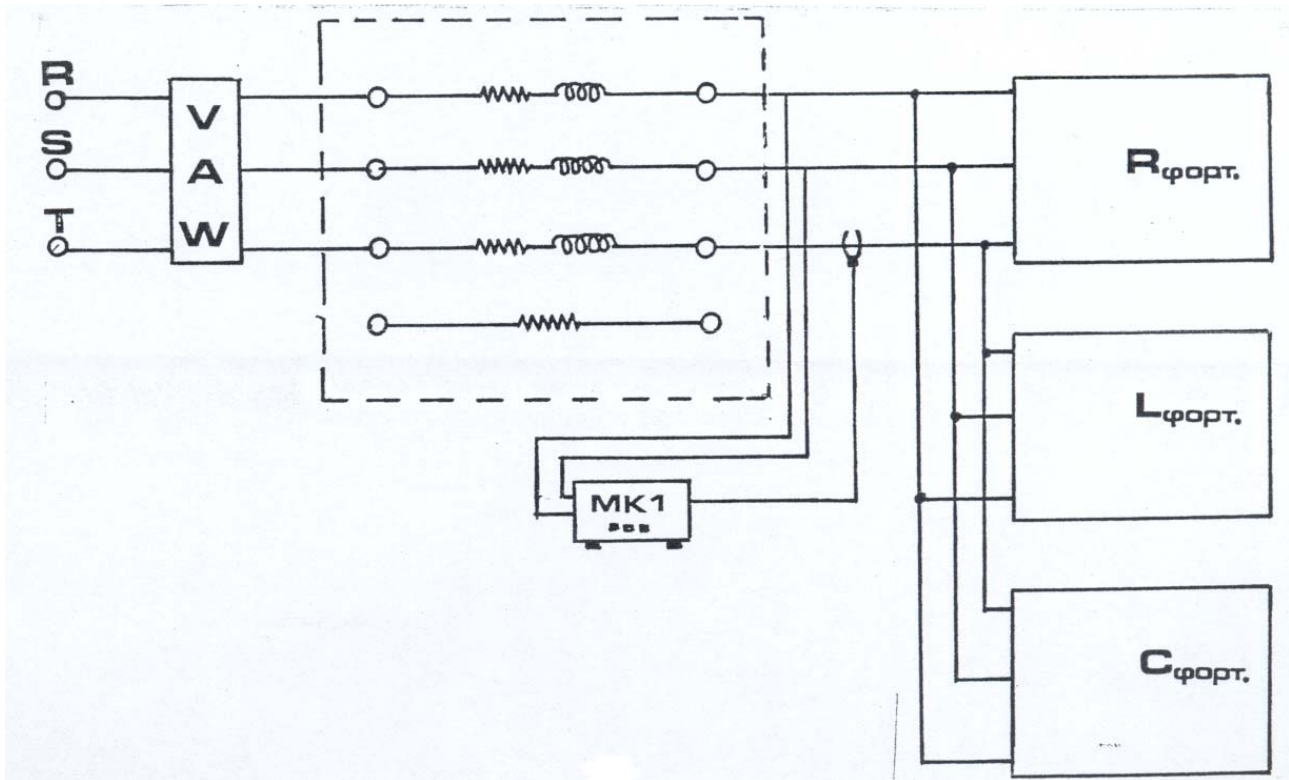
2. Αφαιρέστε τις χωρητικότητες μεταξύ των φάσεων και διατηρήστε τις χωρητικότητες μεταξύ φάσεων και γης. Μετρήστε τα ρεύματα  $I_{cj}$  που δημιουργούνται λόγω των χωρητικοτήτων ως προς την γη και καταχωρήστε τις μετρήσεις στον παρακάτω πίνακα.

$I_C$	$I_j$	
		<b>R</b>
		<b>S</b>
		<b>T</b>
<b><math>I_C</math> μέση τιμή</b>	<b><math>I_{cj}</math> μέση τιμή</b>	

3. Να υπολογισθεί η χωρητικότητα της γραμμής και η χωρητικότητα της γραμμής ως προς την γη.  
 4. Να υπολογισθεί το  $Y$  της γραμμής.  
 5. Να υπολογισθούν οι σταθερές του ισοδύναμου τετραπόλου  $A B C D$ .  
 6. Να πάρετε τις απαραίτητες μετρήσεις για να υπολογίσετε τα μέτρα των σταθερών  $A B C D$ , από τις εξισώσεις τετραπόλου :

$$\begin{array}{l} \bar{E}_S = \dot{A}\bar{E}_R + \dot{B}\bar{I}_R \\ \bar{I}_S = \dot{C}\bar{E}_R + \dot{D}\bar{I}_R \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \bar{E}_R = \dot{D}\bar{E}_S - \dot{B}\bar{I}_S \\ \bar{I}_R = -\dot{C}\bar{E}_S + \dot{D}\bar{I}_S \end{array}$$

### Συμπεριφορά υπό φορτίο



1. Να τροφοδοτηθεί το μοντέλο με την ονομαστική τάση λειτουργίας του και να μετρήσετε την  $E_{R0}$  (Εν κενώ).  
Να υπολογίσετε την  $E_{R0}$  συναρτήσει των  $A B C D$  και της τάσης αναχωρήσεως.
  2. Να γίνουν διάφορες φορτίσεις της γραμμής και να προσδιοριστούν τα όρια φόρτισης υπό τον περιορισμό πτώσης τάσεως  $\Delta U \leq \pm 10\%$ .
  3. Να συνδέσετε ένα ωμικό φορτίο και να ρυθμίσετε το ρεύμα  $I_R = 1A, \cos \varphi = 1$ .
- Μετρήστε την τάση  $E_R$  και καταχωρήστε τις μετρήσεις στον παρακάτω πίνακα. Επαναλάβετε την ίδια εργασία για **2, 3, 4, 5A**.

		ΑΝΑΧΩΡΗΣΗ					ΑΦΙΞΗ				
$\cos\varphi = 1$	$E_R$										
	$I_R$										
	$P_R$										
$\cos\varphi = 0.6\epsilon\pi$	$E_R$										
	$I_R$										
	$P_R$										
$\cos\varphi = 0.6\chi\omega\rho$	$I_R$										
	$E_R$										
	$P_R$										

4. Να πραγματοποιηθεί η προηγούμενη εργασία αλλά με  $\cos\varphi = 0.6$  επαγωγικό.
5. Να πραγματοποιηθεί η προηγούμενη εργασία αλλά με  $\cos\varphi = 0.6$  χωρητικό.
6. Να υπολογισθούν οι βαθμοί απόδοσης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
7. Να βρεθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης με σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων.
8. Να συνταχθεί λεπτομερειακή γραπτή έκθεση εργαστηρίου.  
Δίδεται  $G = 0$ .

## ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Ο ακριβής υπολογισμός κάθε γραμμής μεταφοράς απαιτεί να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι παράμετροι της γραμμής δεν είναι συγκεντρωμένες, αλλά κατανεμημένες ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής.

Τα ονομαστικά κυκλώματα  $T$  και  $\Pi$  αποτελούν προσεγγιστικά μοντέλα μιας γραμμής, η ακρίβεια των οποίων μειώνεται με την αύξηση του μήκους της γραμμής.

Η ισοδύναμη παράσταση μιας μακριάς γραμμής με κυκλώματα  $T$  και  $\Pi$ , δηλαδή κυκλώματα με συγκεντρωμένες παραμέτρους, μπορεί εύκολα να γίνει με τη βοήθεια των υπερβολικών συναρτήσεων.

Εάν θεωρήσουμε τη γραμμή τετράπολο οι γενικευμένες σταθερές  $A B C D$  μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή υπερβολικών συναρτήσεων:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \cosh \gamma l & \dot{B} &= \dot{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l \\ \dot{C} &= \frac{\sinh \gamma l}{Z_0} & \dot{D} &= \cosh \gamma l \end{aligned}$$

Όπου:

$\dot{\gamma}$  = Σταθερά μετάδοσης της γραμμής.

$$\left| \dot{\gamma} = \sqrt{\dot{Z}' \cdot \dot{Y}'} \quad (Km^{-1}) \right|$$

$\dot{Z}_0$  = Κυματική αντίσταση της γραμμής.

$$\left| \dot{Z}_0 = \sqrt{\frac{\dot{Z}'}{\dot{Y}'}} \quad (\Omega) \right|$$

Συγκεκριμένα, οι εκφράσεις των παραμέτρων σειράς και των εγκάρσιων παραμέτρων των ισοδύναμων αυτών κυκλωμάτων προκύπτουν από τη σύγκριση των στοιχείων των μητρών ενός κυκλώματος  $T$  ή  $\Pi$  με τα αντίστοιχα στοιχεία της μήτρας συντελεστών των υπερβολικών συναρτήσεων.

Δηλαδή:

$$\left[ \begin{array}{cc} 1 + (\dot{Z}_1 \dot{Y}_1) / 2 & \dot{Z}_1 \\ \{1 + (\dot{Z}_1 \dot{Y}_1) / 4\} \cdot \dot{Y}_1 & 1 + (\dot{Z}_1 \dot{Y}_1) / 2 \end{array} \right] \Leftrightarrow \left[ \begin{array}{cc} \cosh \gamma l & \dot{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l \\ \sinh \gamma l / \dot{Z}_0 & \cosh \gamma l \end{array} \right]$$

Όπου  $\dot{Z}_1, \dot{Y}_1$  οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος Π.  
και

$$\begin{bmatrix} 1 + (\dot{Z}_2 \dot{Y}_2)/2 & \{1 + (\dot{Z}_2 \dot{Y}_2)/4\} \cdot \dot{Z}_2 \\ \dot{Y}_1 & 1 + (\dot{Z}_2 \dot{Y}_2)/2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & \dot{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l \\ \sinh \gamma l / \dot{Z}_0 & \cosh \gamma l \end{bmatrix}$$

Όπου:

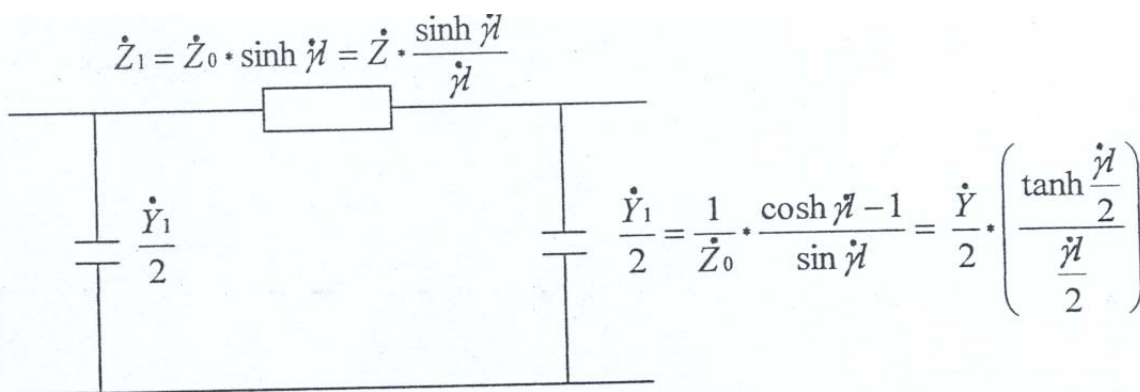
$\dot{Z}_2, \dot{Y}_2$  οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος Τ.  
Έτσι για το ισοδύναμο Π έχουμε:

$$\boxed{\dot{Z}_1 = \dot{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l} \quad \text{και} \quad \boxed{\frac{\dot{Y}_1}{2} = \frac{1}{\dot{Z}_0} \cdot \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sin \gamma l}}$$

Τροποποιώντας τις εκφράσεις αυτές, ώστε να εμφανιστούν οι παράμετροι  $\dot{Z}$  και  $\frac{\dot{Y}}{2}$ , του ονομαστικού κυκλώματος Π έχουμε:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z} \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \quad \text{και} \quad \frac{\dot{Y}_1}{2} = \frac{\dot{Y}}{2} \cdot \left( \frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}} \right)$$

Οι παραστάσεις  $\frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$  και  $\frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}}$  είναι συντελεστές διόρθωσης των παραμέτρων  $\dot{Z}$  και  $\frac{\dot{Y}}{2}$ , του ονομαστικού κυκλώματος Π, ώστε να προκύψει η ακριβής παράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος Π.



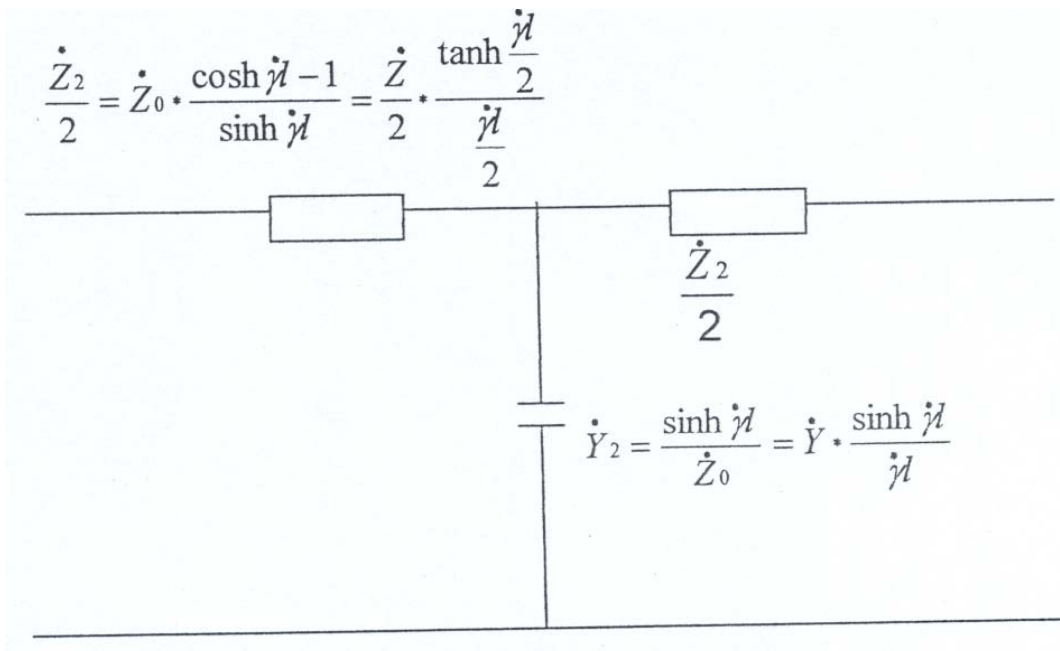
Για το ισοδύναμο T έχουμε:

$$\dot{Y}_2 = \frac{\sinh \dot{\gamma}}{\dot{Z}_0} \quad \text{και} \quad \frac{\dot{Z}_2}{2} = \dot{Z}_0 + \frac{\cosh \dot{\gamma} - 1}{\sinh \dot{\gamma}}$$

Τροποποιώντας τις εκφράσεις αυτές, ώστε να εμφανιστούν οι παράμετροι  $Y$  και  $\frac{\dot{Z}}{2}$  του ονομαστικού κυκλώματος T, οι παράμετροι του ισοδυνάμου κυκλώματος T γίνονται:

$$\dot{Y}_2 = \dot{Y} \cdot \frac{\sinh \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}} \quad \text{και} \quad \frac{\dot{Z}_2}{2} = \frac{\dot{Z}}{2} \cdot \frac{\tanh \frac{\dot{\gamma}}{2}}{\frac{\dot{\gamma}}{2}}$$

Οι παραστάσεις  $\frac{\sinh \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}}$  και  $\frac{\tanh \frac{\dot{\gamma}}{2}}{\frac{\dot{\gamma}}{2}}$  είναι συντελεστές διόρθωσης των παραμέτρων  $\dot{Y}$  και  $\frac{\dot{Z}}{2}$  του ονομαστικού κυκλώματος T, ώστε να προκύψει η ακριβής παράσταση του ισοδυνάμου κυκλώματος T.



## Θεωρία

### Μετατροπή παραμέτρου $\gamma l$ και υπερβολικών ημιτονο-συνημάτων

A) φέρουμε το  $\gamma l$  στη μορφή  $\alpha + j\beta l$  (Καρτεσιανή)-συνεχίζετε με μοίρες

B) Χρησιμοποιούμε τους παρακάτω τύπους

$$\cosh(\gamma l) = \cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh(\alpha l) \cdot \cos(\beta l) + j \sinh(\alpha l) \cdot \sin(\beta l)$$

$$\sinh(\gamma l) = \sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh(\alpha l) \cdot \cos(\beta l) + j \cosh(\alpha l) \cdot \sin(\beta l)$$

Για να κάνετε τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιήσετε rad. Δε χρειάζεται να κάνετε μετατροπή παρά μόνο να πατήσετε το κουμπί για να υπολογιστούν οι αριθμοί σε rad.

Γ) Συνεχίστε την μετατροπή των αριθμών παραπάνω από καρτεσιανή σε πολική μορφή σε μοίρες

## Παραδείγματα

### Παράδειγμα 1

Να βρεθεί το ισοδύναμο κύκλωμα  $\Pi$  για τη γραμμή του παραδείγματος και να συγκριθεί με το ονομαστικό κύκλωμα  $\Pi$ .

Στοιχεία γραμμής:

$$R' = 0.107 \frac{\Omega}{Km}$$

$$L' = 1.362 \frac{mH}{Km}$$

$$C' = 0.0085 \frac{\mu F}{Km}$$

$$G = 0$$

$$l = 360 Km$$

### Λύση

$$\dot{Z}' = R' + j\omega L' = 0.107 + j314 \cdot 1.362 \cdot 10^{-3} = 0.441 \angle 76^\circ \frac{\Omega}{Km}$$

$$\dot{Y}' = G' + j\omega C' = 0 + j314 \cdot 0.0085 \cdot 10^{-6} = 2.65 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \frac{Sim}{Km}$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \sqrt{Z' \cdot Y'} \cdot l = \sqrt{0.441 \angle 76^\circ \cdot 2.65 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ} \cdot 360 = 360 \cdot \sqrt{1.168 \cdot 10^{-6}} \angle \left( \frac{76 + 90}{2} \right) = \\ &= 0.389 \angle 83^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{Z}_0 = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{0.441 \angle 76^\circ}{2.65 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ}} = 408 \angle -7^\circ \Omega$$

Υπολογίζω τα  $\cosh \dot{\gamma} l$  και  $\sinh \dot{\gamma} l$ :

$$\cosh \dot{\gamma} l = \cosh \alpha l \cdot \sigma \nu \nu \beta l + j \sinh \alpha l \cdot \eta \mu \beta l$$

$$\dot{\gamma}l = 0.389 \angle 83^\circ = 0.047 + j0.386$$

$$\alpha = 0.047$$

$$\beta = 0.386$$

$$\cosh 0.047 = \frac{e^{0.047} + e^{-0.047}}{2} = 1.0011$$

$$\sinh 0.047 = \frac{e^{0.047} - e^{-0.047}}{2} = 0.047$$

Μετατρέπω τα rad σε μοίρες:

$$\frac{\mu}{180} = \frac{r}{\pi} \Rightarrow \mu = \frac{180 \cdot r}{\pi} = \frac{180 \cdot 0.386}{\pi} = 22.12^\circ$$

$$\Phi = 22.12^\circ \Rightarrow \sigma\upsilon\nu\varphi = 0.926$$

$$\eta\mu\varphi = 0.376$$

$$\begin{aligned} \cosh \dot{\gamma}l &= \cosh 0.047 \cdot \sigma\upsilon\nu 22.12^\circ + j \sinh 0.047 \cdot \eta\mu 22.12^\circ = 1.0011 \cdot 0.926 + j0.047 \cdot 0.376 = \\ &= 0.927 + j0.0176 = 0.927 \angle 1.08^\circ \end{aligned}$$

$$\sinh \dot{\gamma}l = \sinh \alpha l \cdot \sigma\upsilon\nu\beta l + j \cosh \alpha l \cdot \eta\mu\beta l$$

$$\sinh \dot{\gamma}l = 0.047 \cdot 0.926 + j1.0011 \cdot 0.376 = 0.0435 + j0.3764 = 0.379 \angle 83.4^\circ$$

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_0 \cdot \sinh \dot{\gamma}l = 408 \angle -7^\circ \cdot 0.379 \angle 83.4^\circ \Rightarrow Z_1 = 155 \angle 76.3^\circ \Omega \text{ ( η σύνθετη αντίσταση σειράς )}.$$

$$\frac{\dot{Y}_1}{2} = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{\cosh \dot{\gamma} l - 1}{\sin \dot{\gamma} l} = \frac{1}{408 \angle -7^\circ} \cdot \frac{0.927 \angle 1.08^\circ - 1}{0.379 \angle 83.4^\circ} \Rightarrow \frac{\dot{Y}_1}{2} = 4.87 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ Sim}$$

( η σύνθετη αγωγιμότητα κάθε κλάδου ) .

Το ονομαστικό κύκλωμα Π έχει σύνθετη αντίσταση σειράς:

$$\dot{Z} = \dot{Z}' \cdot l = 0.441 \angle 76^\circ \cdot 360 = 158.7 \angle 76^\circ \Omega \text{ και ίσους εγκάρσιους κλάδους:}$$

$$\frac{\dot{Y}}{2} = \frac{\dot{Y}' \cdot l}{2} = \frac{2.65 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \cdot 360}{2} = 4.77 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ Sim}$$

Η σύγκριση των τιμών των αντιστοιχών κλάδων του ισοδυνάμου κυκλώματος Π και του ονομαστικού κυκλώματος Π δείχνει ότι οι διαφορές είναι σχετικά μικρές για μια γραμμή 360 Km και συνεπώς, αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, θα μπορούσε η γραμμή να παρασταθεί με το ονομαστικό της κύκλωμα Π.

Η γενική μορφή των εξισώσεων του τετραπόλου σε μορφή μητρών είναι:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \dot{\gamma} l & \dot{Z}_0 \cdot \sinh \dot{\gamma} l \\ \sinh \dot{\gamma} l / \dot{Z}_0 & \cosh \dot{\gamma} l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix}$$

$$\dot{E}_S = \dot{E}_R \cdot \cosh \dot{\gamma} l + \dot{Z}_0 \cdot \dot{I}_R \cdot \sinh \dot{\gamma} l$$

$$\dot{I}_S = \frac{\dot{E}_R}{\dot{Z}_0} \cdot \sinh \dot{\gamma} l + \dot{I}_R \cdot \cosh \dot{\gamma} l$$

ή με αντιστροφή της μήτρας

$$\dot{E}_R = \dot{E}_S \cdot \cosh \dot{\gamma}l - \dot{Z}_0 \cdot \dot{I}_S \cdot \sinh \dot{\gamma}l$$

$$\dot{I}_R = -\frac{\dot{E}_S}{\dot{Z}_0} \cdot \sinh \dot{\gamma}l + \dot{I}_S \cdot \cosh \dot{\gamma}l$$

## Παράδειγμα 2

Τριφασική γραμμή μεταφοράς 50Hz, μήκους 300km, με τάση στο άκρο άφιξης 220 kV και με τις εξής παραμέτρους:

$$R' = 0.099 \Omega/\text{Km}$$

$$X_L' = 0.507 \Omega/\text{Km}$$

$$Y' = 3.224 \cdot 10^{-6} \text{Sim}/\text{Km}$$

Να προσδιοριστούν:

- Οι βοηθητικές σταθερές  $\cosh \dot{\gamma}l$  και  $\sinh \dot{\gamma}l$  της γραμμής.
- Η τάση και το ρεύμα αναχώρησης, όταν το ρεύμα στην άφιξη είναι 250A, με  $\cos \varphi = 0,97$  επαγωγικό.

Λύση

$$\dot{Z}' = R' + j\omega L' = 0.099 + j0.507 = 0.517 \angle 79^\circ \Omega$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{Z}' \cdot Y'} = \sqrt{0.517 \angle 79^\circ \cdot 3.224 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ} = 1.291 \cdot 10^{-3} \angle 84.5^\circ \text{ Km}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}l = 1.291 \cdot 10^{-3} \angle 84.5^\circ \text{ Km}^{-1} \cdot 300 \text{ Km} = 0.387 \angle 84.5^\circ = 0.037 + j0.385$$

$$\cosh \dot{\gamma}l = \cosh \alpha l \cdot \cos \nu \beta l + j \sinh \alpha l \cdot \eta \mu \beta l$$

$$\cosh 0.037 = \frac{e^{0.037} + e^{-0.037}}{2} = 1.0006$$

$$\sinh 0.037 = \frac{e^{0.037} - e^{-0.037}}{2} = 0.037$$

Μετατρέπω τα rad σε μοίρες:

$$\frac{\mu}{180} = \frac{r}{\pi} \Rightarrow \mu = \frac{180 \cdot r}{\pi} = \frac{180 \cdot 0.385}{\pi} = 22^\circ$$

$$\Phi = 22^\circ \Rightarrow \sigma\upsilon\nu\phi = 0.927$$

$$\eta\mu\phi = 0.374$$

$$\cosh \dot{\gamma} = \cosh 0.037 \cdot \sigma\upsilon\nu 22^\circ + j \sinh 0.037 \cdot \eta\mu 22^\circ = 1.0006 \cdot 0.927 + j0.037 \cdot 0.374 = 0.927 + j0.0138 = 0.927 \angle 0.85^\circ$$

$$\sinh \dot{\gamma} = 0.037 \cdot 0.927 + j1.0006 \cdot 0.374 = 0.034 + j0.374 = 0.375 \angle 84.8^\circ$$

Η φασική τάση στο άκρο άφιξης είναι:

$$\dot{E}_R = \frac{220KV}{\sqrt{3}} = 127KV$$

Αν η τάση αφίξεως θεωρηθεί φασικό διάνυσμα αναφοράς θα είναι:

$$\dot{E}_R = \dot{E}_R \angle 0^\circ \text{ και } \dot{I}_R = 250 \angle -14^\circ$$

$$\dot{Z}_0 = \sqrt{\frac{\dot{Z}'}{\dot{Y}'}} = \sqrt{\frac{0.517 \angle 79^\circ}{3.224 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ}} = 400 \angle -5.5^\circ \Omega$$

$$\dot{E}_S = \dot{E}_R \cdot \cosh \dot{\gamma} + \dot{Z}_0 \cdot \dot{I}_R \cdot \sinh \dot{\gamma} = 127000 \angle 0^\circ \cdot 0.927 \angle 0.85^\circ + 400 \angle -5.5^\circ \cdot 250 \angle -14^\circ \cdot 0.375 \angle 84.8^\circ = 138110V = 138.11KV$$

$$\dot{I}_S = \frac{\dot{E}_R}{\dot{Z}_0} \cdot \sinh \dot{\gamma} + \dot{I}_R \cdot \cosh \dot{\gamma} = \frac{127000 \angle 0^\circ}{400 \angle -5.5^\circ} \cdot 0.375 \angle 84.8^\circ + 250 \angle -14^\circ \cdot 0.927 \angle 0.85^\circ = 235.4 \angle 16.2^\circ A$$

### Ρεύμα φόρτισης της γραμμής

Ρεύμα φόρτισης της γραμμής ή χωρητικό ρεύμα της γραμμής είναι το ρεύμα που προκαλείται από την εναλλασσόμενη φόρτιση και εκφόρτιση της γραμμής, η οποία οφείλεται σε μια εναλλασσόμενη τάση.

Το ρεύμα φόρτισης δίνεται απ'τη σχέση:

$$I_{\text{φορτ.}} = 2 \pi f_{\text{sf}} C E_{\text{sf}} \text{ A / km ανά φάση,}$$

όπου  $E_{\text{sf}}$  η φασική τάση αναχώρησης και  $C$  η χωρητικότητα γραμμής προς ουδέτερο / Km .

Παράδειγμα: έστω μια γραμμή μεταφοράς στη χώρα μας με τα παρακάτω στοιχεία:

$$C_{\text{gr}} = 0.0088 \mu\text{F/km και } E_{\text{sf}} = 22\text{kV.}$$

Το ρεύμα φόρτισης της γραμμής ανά km μήκους θα είναι:

$$I_{\text{φορτ.}} = 314 \cdot 0.0088 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 35.2 \text{mA / km}$$

## Φαινόμενο Ferranti

Το χωρητικό ρεύμα ή ρεύμα φόρτισης της γραμμής, όταν ρέει δια μέσου της επαγωγικής αντίστασης της γραμμής, προκαλεί ανύψωση της τάσης της γραμμής, η οποία μεγαλώνει με την απόσταση από την αναχώρηση και παίρνει την μεγαλύτερη τιμή της στην άφιξη της γραμμής.

Το φαινόμενο αυτό καλείται φαινόμενο Ferranti, είναι χαρακτηριστικό των μεγάλων γραμμών και πολλές φορές δημιουργεί προβλήματα στην πράξη. Εάν, στην αναχώρηση η τάση διατηρείται σε κανονική τιμή, στην άφιξη της γραμμής μπορεί να ανυψωθεί σε μη κανονικές τιμές καθώς το φορτίο πλησιάζει το μηδέν, θέτοντας σε κίνδυνο τη μόνωση της γραμμής ή του εξοπλισμού.

## Αντιστάθμιση γραμμής μεταφοράς

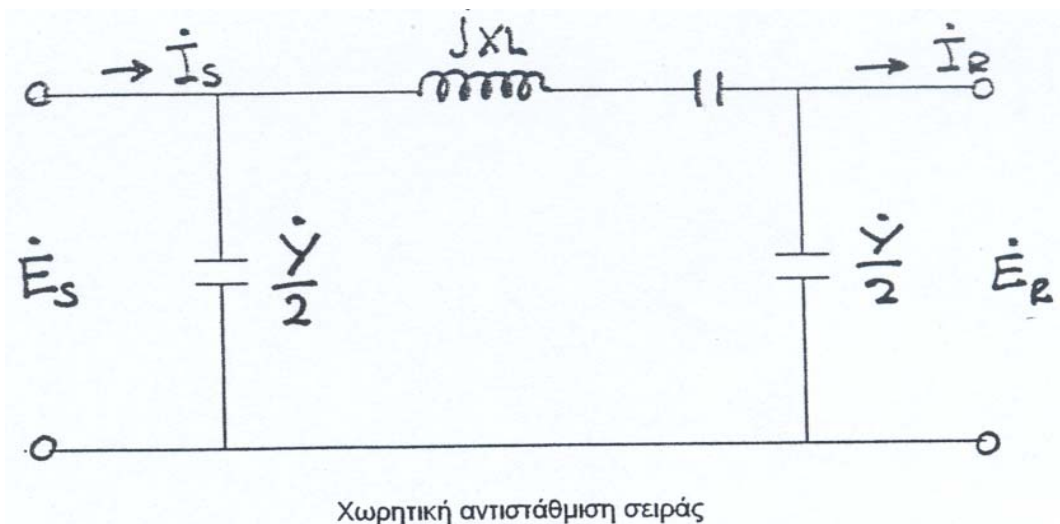
Η αντιστάθμιση έχει σκοπό την εξουδετέρωση της ανύψωσης τάσης κατά μήκος της γραμμής, λόγω του φαινομένου Ferranti κατά την κενή λειτουργία της γραμμής.

### **A) Χωρητική Αντιστάθμιση**

Η χωρητική αντιστάθμιση σειράς πραγματοποιείται με την παρεμβολή της χωρητικότητας ενός πυκνωτή σε σειρά με τη γραμμή, με σκοπό τη μείωση της επαγωγικής αντιδράσεως, στην οποία οφείλεται κατά ένα μέρος η ανύψωση τάσης στη γραμμή.

Εάν,  $X_c = X_L$ , έχουμε αντιστάθμιση της επαγωγικής αντιδράσεως 100%

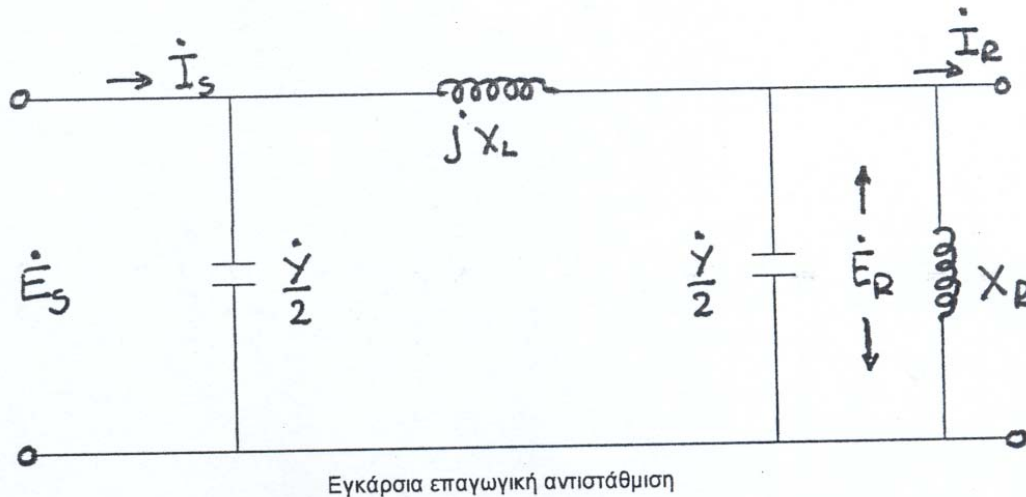
Εάν  $X_c = 0.5X_L$  έχουμε αντιστάθμιση 50% κ.ο.κ.



## Β) Εγκάρσια επαγωγική αντιστάθμιση.

Συνδέεται ένα πηνίο παράλληλα με τη γραμμή (στην άφιξή της) με σκοπό τη μερική ή πλήρη εξουδετέρωση του χωρητικού ρεύματος της γραμμής, το οποίο αποτελεί την άλλη αιτία της ανύψωσης της τάσης. Πλήρης αντιστάθμιση επιτυγχάνεται όταν:  $X_R = 2X_C$ .

Απαιτείται συχνά στις διασυνδέσεις νησιών με την ηπειρωτική χώρα λόγω της μεγάλης χωρητικότητας των υποβρυχίων αγωγών.



## Εργαστηριακή Άσκηση

Τα στοιχεία του εργαστηριακού μοντέλου φαίνονται παρακάτω:

<b>L</b>	8mH
<b>R</b>	0.75Ω
<b>C</b>	10μF
<b>G</b>	0

### Προσδιορισμός γενικευμένων σταθερών A B C D του συστήματος.

1. Να βραχυκυκλώσετε το τέρμα της γραμμής και να μετρήσετε τα  $E_S, I_S, I_R$
2. Ανοιχτοκυκλώστε τη γραμμή και μετρήστε τα  $E_S, I_S, R_R$
3. Υπολογίστε εργαστηριακά τις σταθερές **A B C D**.
4. Από τα στοιχεία του μοντέλου που σας δίνονται να υπολογίσετε τις παραμέτρους  $Y, Z_0, \gamma l$ .
5. Υπολογίστε θεωρητικά τις σταθερές του τετραπόλου **A B C D**.

### Συμπεριφορά μοντέλου γραμμής εν κενώ.

1. Με τη γραμμή χωρίς φορτίο να μετρήσετε τα  $E_S, I_S, E_R$
2. Να υπολογίσετε την ισχύ φόρτισης του μοντέλου.

3. Πως δικαιολογείται τυχόν ανύψωση της τάσης (φαινόμενο Ferranti) και πως αντιμετωπίζεται.

Συμπεριφορά μοντέλου γραμμής εν φορτίο.

1. Να συνδέσετε ένα ωμικό φορτίο και να ρυθμίσετε το ρεύμα άφιξης  $I_R=1A$  και  $\cos\varphi=1$  . Επαναλάβετε για 2,3,4,5 A. Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στον παρακάτω πίνακα.
2. Επαναλάβετε τις ίδιες μετρήσεις αλλά με συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi=0.6$  επαγωγικό.
3. Επαναλάβετε τις ίδιες μετρήσεις αλλά με συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi=0.6$  χωρητικό.
4. Να γίνουν διάφορες φορτίσεις της γραμμής και να προσδιοριστούν τα όρια φόρτισης υπό τον περιορισμό πτώσης τάσεως  $\leq \pm 10\%$  .
5. Εάν θεωρήσετε γνωστά τα στοιχεία εξόδου και τις γενικευμένες σταθερές A B C D να υπολογίσετε για  $\cos\varphi=0.6$  επαγωγικό και για μια τιμή ρεύματος:
  1. Την τάση και το ρεύμα στην αναχώρηση
  2. Τη μιγαδική τριφασική ισχύ αναχώρησης και άφιξης της γραμμής καθώς και τις απώλειες ισχύος της γραμμής.
6. Να υπολογιστούν οι βαθμοί απόδοσης μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.
7. Να βρεθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος με σύγκριση όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων.

Πίνακας αποτελεσμάτων

<b><math>\cos\Phi_R=</math></b>	$E_R$					
	$E_S$					
	$I_R$					
	$I_S$					
	$P_R$					
	$P_S$					
	$Q_R$					
	$Q_S$					
<b><math>\cos\Phi_R=</math></b>	$E_R$					
	$E_S$					
	$I_R$					
	$I_S$					
	$P_R$					
	$P_S$					
	$Q_R$					
	$Q_S$					
<b><math>\cos\Phi_R=</math></b>	$E_R$					
	$E_S$					
	$I_R$					
	$I_S$					
	$P_R$					
	$P_S$					
	$Q_R$					
	$Q_S$					