



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ενότητα: Άσκηση 2 “Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις σύγχρονων μηχανών,
μετασηματιστών, γραμμών μεταφοράς”

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Παναγής Βοβός

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά **ΠΠ**
μαθήματα

Περιεχόμενα

1. Σκοπός	3
2. Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις.....	3
2.1 Ακολουθιακές αντιστάσεις σύγχρονων μηχανών	4
2.2 Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις μετασχηματιστών	8
2.3 Ακολουθιακές συνθέτες αντιστάσεις γραμμών μεταφοράς.....	10
3. Χρησιμοποιούμενα όργανα	15
4. Πειραματικό μέρος.....	15
4.1 Ακολουθιακές αντιστάσεις σύγχρονης μηχανής.....	15
4.2 Αντίσταση διαρροή μετασχηματιστή	17
4.3 Ακολουθιακές συνθέτες αντιστάσεις γραμμής μεταφοράς	18
5. Σημειώματα.....	19
5.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου	19
5.2 Σημείωμα Αναφοράς.....	19
5.3 Σημείωμα Αδειοδότησης.....	19
5.4 Διατήρηση Σημειωμάτων	19
6. Χρηματοδότηση.....	20

1. Σκοπός

Αντικείμενο της εργαστηριακής αυτής άσκησης είναι η εύρεση των ακολουθιακών σύνθετων αντιστάσεων των βασικών συνιστωσών ενός ενεργειακού συστήματος, δηλαδή των σύγχρονων μηχανών, των μετασχηματιστών και των γραμμών μεταφοράς.

2. Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.3 της άσκησης 1, η συμπεριφορά ενός τριφασικού παθητικού στοιχείου που λειτουργεί υπό ασύμμετρες συνθήκες περιγράφεται από τρεις εξισώσεις τάσεις (μία για κάθε φάση) που μπορούν υπό μορφή μητρών να γραφούν ως εξής:

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{Z}\mathbf{I}_P \quad (2.1)$$

όπου \mathbf{Z} είναι μήτρα διαστάσεων 3×3 που περιγράφει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του παθητικού στοιχείου και $\mathbf{V}_P, \mathbf{I}_P$ διανύσματα των φασικών τάσεων και ρευμάτων αντίστοιχα διαστάσεων 3×1 .

Η μήτρα \mathbf{Z} είναι εν γένει μία μήτρα με μη διαγώνια στοιχεία διάφορα του μηδενός, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει σύζευξη μεταξύ των φασικών ποσοτήτων των τριών φάσεων.

Οι εξισώσεις (2.1) μπορούν να αναχθούν σε τρεις ανεξάρτητες μεταξύ τους εξισώσεις αν η μήτρα \mathbf{Z} καταστεί διαγώνια. Προς τούτο χρησιμοποιούμε μια μιγαδική μήτρα μετασχηματισμού \mathbf{T} , που ονομάζεται μήτρα μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών και εκφράζουμε τις φασικές ποσότητες σαν συνάρτηση ενός νέου συνόλου μεταβλητών, των ακολουθιακών, ως εξής:

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{T}\mathbf{V}_S \quad (2.2)$$

$$\mathbf{I}_P = \mathbf{T}\mathbf{I}_S \quad (2.3)$$

όπου

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \alpha = 1 \angle 120^\circ, \alpha^2 = 1 \angle 240^\circ$$

και $\mathbf{V}_S, \mathbf{I}_S$ τα διανύσματα των ακολουθιακών τάσεων και ρευμάτων (οι συνιστώσες των οποίων ονομάζονται συνιστώσες μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας) που ορίζονται ως εξής:

$$\mathbf{V}_S = [V_{\alpha 0} \ V_{\alpha 1} \ V_{\alpha 2}]^T \quad (2.4)$$

$$\mathbf{I}_S = [I_{\alpha 0} \ I_{\alpha 1} \ I_{\alpha 2}]^T \quad (2.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.2) και (2.3) η εξίσωση (2.1) μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση των ακολουθιακών μεταβλητών ως εξής:

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{Z}_s \mathbf{I}_s \quad (2.6)$$

όπου:

$$\mathbf{Z}_s = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T} \quad (2.7)$$

Η σημαντικότερη ιδιότητα της μήτρας \mathbf{Z}_s είναι ότι αυτή είναι διαγώνια για τα περισσότερα στοιχεία ενός ενεργειακού συστήματος, της μορφής:

$$\mathbf{Z}_s = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} = \text{diag}(Z_0, Z_1, Z_2) \quad (2.8)$$

Τις σύνθετες αντιστάσεις Z_0, Z_1 και Z_2 , που συνδέουν τις τάσεις των διαφόρων ακολουθιών, τις ονομάζουμε σύνθετες αντιστάσεις μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα.

Στη συνέχεια αναφέρεται η διαδικασία υπολογισμού αυτών των σύνθετων αντιστάσεων, με αναλυτικό τρόπο ή με δοκιμές, για τις πιο βασικές συνιστώσες ενός ενεργειακού δικτύου, δηλαδή τις σύγχρονες μηχανές, τους μετασχηματιστές και τις γραμμές μεταφοράς.

2.1 Ακολουθιακές αντιστάσεις σύγχρονων μηχανών

Μια συμμετρική σύγχρονη μηχανή (Σχ. 2.1) χωρίς έκτυπους πόλους χαρακτηρίζεται από τυλίγματα στάτη που έχουν ίσες αντιστάσεις ($r_a = r_b = r_c = R_s$), ίσες ίδιες επαγωγές ($l_{aa} = l_{bb} = l_{cc} = L_s$) και ίσες αμοιβαίες επαγωγές ($l_{ab} = l_{bc} = l_{ca} = -M_s$). Οι εξισώσεις που περιγράφουν την τερματική συμπεριφορά μιας τέτοιας μηχανής στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μπορούν υπό μορφή μητρών να γραφούν ως εξής:

$$\mathbf{V}_p = -\mathbf{Z} \mathbf{I}_p + \mathbf{E}_p \quad (2.9)$$

όπου:

$$\mathbf{V}_P = [V_\alpha \ V_b \ V_c]^T \quad (2.10)$$

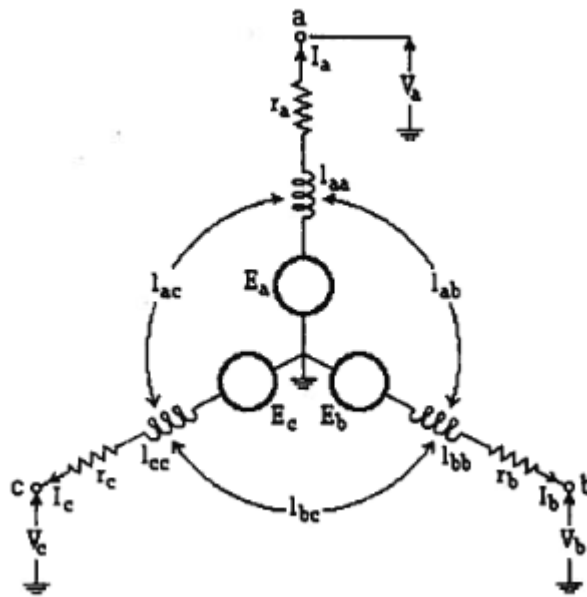
$$\mathbf{I}_P = [I_\alpha \ I_b \ I_c]^T \quad (2.11)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{E}_P = [E_\alpha \ E_b \ E_c]^T \quad (2.13)$$

και

$$Z_s = R_s + j\omega L_s, \quad Z_m = -j\omega M_s$$



Σχήμα 2.1 Τα τυλίγματα της σύγχρονης μηχανής

Οι εσωτερικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις της μηχανής E_α, E_b και E_c , που οφείλονται στο ρεύμα διέγερσης, παρουσιάζουν τριφασική συμμετρία. Το διάνυσμα \mathbf{E}_P , συνεπώς, μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της μιας εξ αυτών, της E_α , ως εξής:

$$\mathbf{E}_P = E_\alpha [1 \ \alpha^2 \ \alpha]^T \quad (2.14)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.2) και (2.3), η εξίσωση (2.9) μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των ακολουθιακών μεταβλητών ως εξής:

$$\mathbf{V}_s = -\mathbf{Z}_s \mathbf{I}_s + \mathbf{E}_s \quad (2.15)$$

όπου:

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{E}_P \quad (2.16)$$

$$Z_s = T^{-1}ZT = \text{diag}(Z_s + 2Z_m, Z_s - Z_m, Z_s - Z_m)$$

δηλαδή

$$Z_0 = R_s + j\omega(L_s - 2M_s) = R_s + jX_0 \cong jX_0 \quad (2.17)$$

$$Z_1 = R_s + j\omega(L_s + M_s) = R_s + jX_d \cong jX_d \quad (2.18)$$

$$Z_2 = R_s + j\omega(L_s + M_s) = R_s + jX_d \cong jX_d \quad (2.19)$$

Οι τελευταίες προσεγγιστικές ισότητες προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι συνήθως $R_s \ll \omega L_s$

Αν ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη μέσω αντίστασης Z_n , τότε η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας δίνεται από τη σχέση:

$$Z'_0 = Z_0 + 3Z_n \quad (2.20)$$

Γράφοντας τις εξισώσεις (2.15) αναλυτικά

$$V_{\alpha 0} = -Z_0 I_{\alpha 0}$$

$$V_{\alpha 1} = -Z_1 I_{\alpha 1} + E_\alpha \quad (2.21)$$

$$V_{\alpha 2} = -Z_2 I_{\alpha 2}$$

προκύπτουν τα κυκλώματα μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας της σύγχρονης μηχανής που φαίνονται στο **Σχ. 2.2**.



Σχήμα 2.2 Ακολουθιακά κυκλώματα σύγχρονης μηχανής

Οι ακολουθιακές αντιστάσεις της σύγχρονης μηχανής που δίδονται από τις σχέσεις (2.17) έως (2.19) προέκυψαν από ένα απλό μοντέλο της μηχανής το οποίο υποθέτει την ύπαρξη μόνο θεμελιωδών συνιστωσών των ρευμάτων. Υπό αυτή την παραδοχή οι αντιστάσεις Z_1 και Z_2 βρέθηκαν να είναι ίσες. Στην πράξη, όμως, οι ακολουθιακές αντιστάσεις της σύγχρονης μηχανής είναι γενικά διαφορετικές. Πιο ακριβείς τιμές

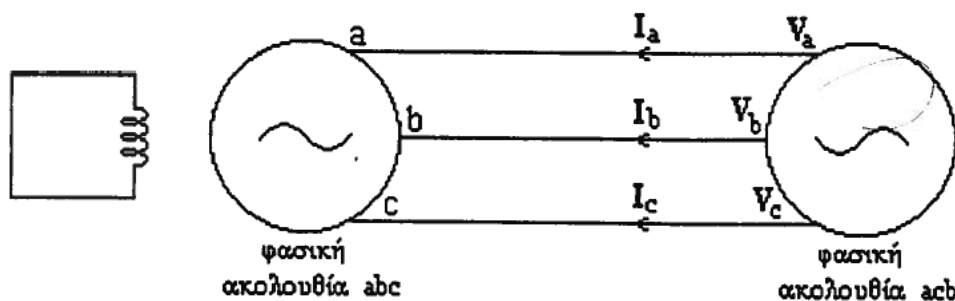
για τις ακολουθιακές αντιστάσεις μπορούν αν προκύψουν από κατάλληλες δοκιμές, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Η σύγχρονη αντίδραση κατά τον d άξονα X_d και συνεπώς η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας $Z_1 = jX_d$ μπορεί να ληφθεί με την εξής δοκιμή. Ενώ η σύγχρονη μηχανή περιστρέφεται χωρίς φορτίο με την σύγχρονη ταχύτητα και διεγείρεται μέχρι που η ηλεκτρεγερτική δύναμη E να φθάσει το 100% της τιμής της, προκαλούμε τριφασικό βραχυκύκλωμα και μετρούμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης I_{SS} , οπότε:

$$X_d = \frac{E}{I_{SS}} \quad (2.22)$$

Η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας $Z_2 = jX_2$ μπορεί να ληφθεί με τη δοκιμή του **Σχ. 2.3**. Ενώ η σύγχρονη μηχανή περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα και οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις μηδενίζονται βραχυκυκλώνοντας το τύλιγμα διέγερσης, εφαρμόζουμε ένα σύστημα τάσεων αρνητικής ακολουθίας που λαμβάνουμε από μια εξωτερική πηγή, π.χ. μια ίδια σύγχρονη γεννήτρια που περιστρέφεται επίσης με την σύγχρονη ταχύτητα αλλά με αντίστροφη φορά (δηλαδή με ακολουθία acb...) από αυτή της σύγχρονης μηχανής που δοκιμάζουμε. Αν I_α είναι το ρεύμα που τροφοδοτείται στην μηχανή που δοκιμάζουμε, τότε:

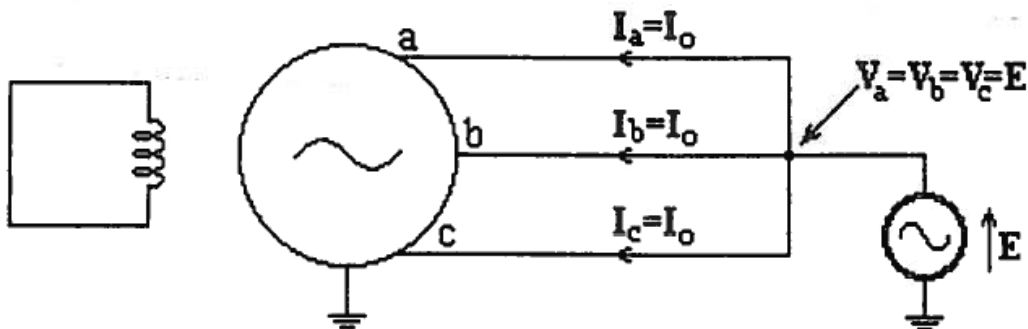
$$X_2 = \frac{V_\alpha}{I_\alpha} \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.3 Δοκιμή υπολογισμού αντίστασης αρνητικής ακολουθίας σύγχρονης μηχανής

Η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας $Z_0 = jX_0$ μπορεί να ληφθεί με την δοκιμή του **Σχ. 2.4**. Ενώ η σύγχρονη μηχανή περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα και το τύλιγμα διέγερσης είναι βραχυκυκλωμένο, μια μονοφασική πηγή E επιβάλλει τάσεις μηδενικής ακολουθίας στα τρία τυλίγματα του στάτη. Αν I_0 είναι τα ρεύματα δια των τυλιγμάτων του στάτη, τότε:

$$X_0 = \frac{E}{I_0} \quad (2.24)$$



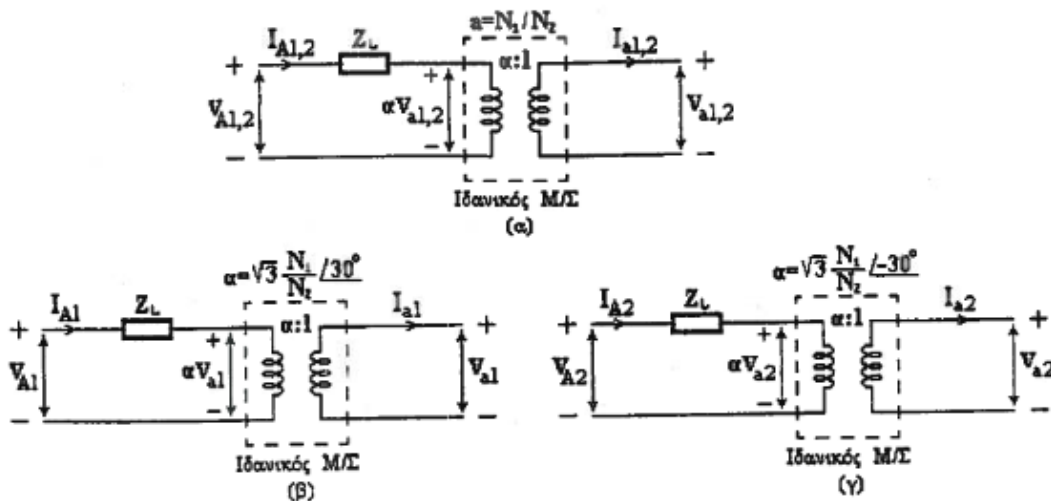
Σχήμα 2.4 .Δοκιμή υπολογισμού αντίστασης μηδενικής ακολουθίας σύγχρονης μηχανής

2.2 Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις μετασχηματιστών

Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας Z_1 ενός μετασχηματιστή είναι ίση με την σύνθετη αντίσταση διαρροής Z_L . Επειδή ο μετασχηματιστής είναι μία στατική συσκευή χωρίς κινούμενα μέρη, η σύνθετη αντίσταση διαρροής δεν αλλάζει αν η φασική ακολουθία μεταβληθεί από abc... σε acb... Αυτό σημαίνει ότι η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας Z_2 είναι ίση με την Z_1 , δηλαδή:

$$Z_1 = Z_2 = Z_L \quad (2.25)$$

Τα ανά φάση ισοδύναμα θετικής και αρνητικής ακολουθίας ενός τριφασικού μετασχηματιστή έχουν την ίδια δομή και μόνο η φασική μετατόπιση των ακολουθιακών ποσοτήτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων. Αμελώντας το ρεύμα μαγνήτισης, το ανά φάση ισοδύναμο θετικής και αρνητικής ακολουθίας για Y-Y ή Δ-Δ μετασχηματιστές είναι αυτό του Σχ. 2.5 (α). Για Y-Δ μετασχηματιστές τα ανά φάση ισοδύναμα θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι αυτά των Σχ. 2.5 (β) και Σχ. 2.5 (γ) αντίστοιχα.



Σχήμα 2.5 Ανά φάση ισοδύναμα θετικής και αρνητικής ακολουθίας τριφασικών μετασχηματιστών

Η σύνθετη αντίσταση διαρροής $Z_L = R_L + jX_L$ μπορεί να υπολογισθεί με τη δοκιμή βραχυκύκλωσης. Σύμφωνα μ' αυτή το τύλιγμα πρωτεύοντος βραχυκυκλώνεται ενώ στο τύλιγμα δευτερεύοντος εφαρμόζεται πηγή τάσης η τιμή της οποίας αυξάνεται μέχρι να κυκλοφορήσει ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αν P είναι η πραγματική ισχύς που καταναλώνει ο μετασχηματιστής και V η απαιτούμενη τάση για να κυκλοφορήσει ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I , τότε, όπως προκύπτει από το **Σχ. 2.5 (α)**, έχουμε:

$$R_L = \frac{P}{I^2} \quad (2.26)$$

$$X_L = \sqrt{|Z_L|^2 - R_L^2} \quad (2.27)$$

όπου:

$$|Z_L| = \frac{aV}{I} \quad (2.28)$$

Η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας Z_0 ενός μετασχηματιστή εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων (Υ ή Δ) και από το αν οι ουδέτεροι των Υ συνδέσεων είναι γειωμένοι ή όχι. Για τον προσδιορισμό του ανά φάση ισοδύναμου μηδενικής ακολουθίας ενός μετασχηματιστή ακολουθούμε τους εξής απλούς κανόνες:

- α) Αν ο τύπος του τυλιγματος δεν επιτρέπει ροή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας προς τη γη, τότε το ισοδύναμο μηδενικής ακολουθίας θα παρουσιάζει σε αυτό το τύλιγμα ένα ανοικτό κύκλωμα.
- β) Αν η κυκλοφορία των ρευμάτων μηδενική ακολουθίας περιορίζεται σε ένα Δ τύλιγμα, τότε το ισοδύναμο μηδενικής ακολουθίας θα υπάρχει ένα βραχυκύκλωμα προς της γη.
- γ) Αν ο τύπος του τυλιγματος επιτρέπει ελεύθερη ροή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας, τότε στο ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας αυτού του τυλιγματος θα υπάρχει η σύνθετη αντίσταση διαρροής Z_L .

Στο **Σχ. 2.6** συνοψίζουμε τα ανά φάση ισοδύναμα μηδενικής ακολουθίας για πέντε διαφορετικές συνδέσεις τριφασικών μετασχηματιστών. Τα βέλη στα ισοδύναμα κυκλώματα δείχνουν τους δυνατούς δρόμους για τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας, ενώ η απουσία βελών υποδηλώνει ότι δεν επιτρέπεται η ροή αυτών των ρευμάτων.

Η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας Z_0 αναφερόμενη στο πρωτεύον έχει για τους διάφορους τρόπους σύνδεσης των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή τις εξής τιμές:

$$Z_0 = Z_L + 3Z_N + 3\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_n \quad \text{για τη σύνδεση 1}$$

$$Z_0 = Z_L \quad \text{για τις συνδέσεις 2, 3, 5} \quad (2.29)$$

$$Z_0 = Z_L + 3Z_N \quad \text{για τη σύνδεση 4}$$

A/A	Τύπος	Διάγραμμα σύνδεσης	Ισοδύναμο μηδενικής ακολουθίας
1			
2			
3			
4			
5			

Σχήμα 2.6 Ανά φάση ισοδύναμο μηδενικής ακολουθίας τριφασικών μετασχηματιστών

2.3 Ακολουθιακές συνθέτες αντιστάσεις γραμμών μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας επιδιώκουμε να παρουσιάζουν συμμετρικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στις τρεις φάσεις γεγονός που επιτυγχάνεται με κατάλληλη αντιμετάθεση των φάσεων. Μια συμμετρική γραμμή μεταφοράς με ουδέτερο αγωγό σύνθετης αντίστασης Z_m χαρακτηρίζεται από φασικούς αγωγούς με ίσες ίδιες και αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις (Z_m και Z_{ab} αντίστοιχα) και ίσες αμοιβαίες αντιστάσεις προς ουδέτερο Z_{an} , όπως φαίνεται στο Σχ. 2.7.

Επειδή σε περιπτώσεις ασυμμετρίας των φασικών ρευμάτων I_a, I_b και I_c , ο ουδέτερος αγωγός λειτουργεί σαν αγωγός επιστροφής, έχουμε:

$$I_a = -(I_b + I_c) \quad (2.30)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.30), οι πτώσεις τάσης κατά μήκος των φασικών αγωγών της γραμμής μπορούν υπό μορφή μητρών να γραφούν ως εξής:

$$V_l = Z I_l \quad (2.31)$$

όπου:

$$V_l = \begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{an} - V_{a'n'} \\ V_{bn} - V_{b'n'} \\ V_{cn} - V_{c'n'} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

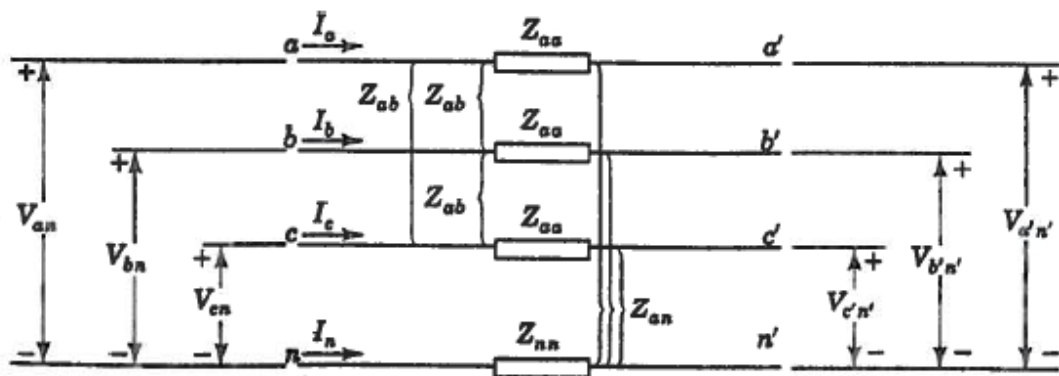
$$I_l = [I_a \ I_b \ I_c]^T \quad (2.33)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

και

$$Z_s = Z_{\alpha\alpha} + Z_{nn} - 2Z_{\alpha n} \quad (2.35)$$

$$Z_m = Z_{\alpha\beta} + Z_{nn} - 2Z_{\alpha n} \quad (2.36)$$



Σχήμα 2.7 Συμμετρική τριφασική γραμμή μεταφοράς με ουδέτερο αγωγό

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.2) και (2.3), η εξίσωση (2.31) μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση ακολουθιακών ποσοτήτων ως εξής:

$$V_{ls} = Z_s I_{sl} \quad (2.37)$$

όπου:

$$V_{ls} = [V_{aa'0} \quad V_{aa'1} \quad V_{aa'2}]^T \quad (2.38)$$

$$I_{ls} = [I_{a0} \quad I_{a1} \quad I_{a2}]^T \quad (2.39)$$

$$Z_s = T^{-1} Z T = \text{diag}(Z_s + 2Z_m, Z_s - Z_m, Z_s - Z_m)$$

δηλαδή

$$Z_0 = Z_s + 2Z_m = Z_{aa} + 2Z_{ab} + 3Z_{nn} - 6Z_{an} \quad (2.40)$$

$$Z_1 = Z_s - Z_m = Z_{aa} - Z_{ab} \quad (2.41)$$

$$Z_2 = Z_s - Z_m = Z_{aa} - Z_{ab} \quad (2.42)$$

Από τις προηγούμενες σχέσεις παρατηρούμε ότι οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας μιας συμμετρικής τριφασικής γραμμής μεταφοράς είναι ίσες και δεν εξαρτώνται από τις αντιστάσεις Z_{nn} και Z_{an} , οι οποίες υπεισέρχονται στον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας Z_0 .

Τόσο οι ίδιες όσο και οι αμοιβαίες μεταξύ των φασικών αγωγών σύνθετες αντιστάσεις Z_{aa} και Z_{ab} αντίστοιχα εξαρτώνται από το υλικό των αγωγών, τη διατομή τους και τις μεταξύ αυτών αποστάσεις, δηλαδή την γεωμετρία τους στο χώρο. Οι ποσότητες αυτές μπορούν να υπολογισθούν από αναλυτικές σχέσεις ή να προκύψουν από πίνακες που διατίθενται από τους κατασκευαστές. Αν και οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας μιας συμμετρικής γραμμής μεταφοράς μπορούν να υπολογισθούν απευθείας όταν είναι γνωστές οι ποσότητες Z_{aa} και Z_{ab} (σχέσεις (2.41) και (2.42)), είναι δυνατόν εν τούτοις να προκύψουν και από δοκιμές βραχυκύκλωσης όπως περιγράφεται στην συνέχεια.

Αναφερόμενοι στο **Σχ. 2.7** παρατηρούμε ότι η εξίσωση τάσης γύρω από το βρόχο που σχηματίζεται μεταξύ δύο φάσεων, π.χ. των φάσεων a και b , γράφεται ως εξής:

$$V_{ab} = Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ab}I_c + Z_{an}I_n + V_{a'b'} - (Z_{aa}I_b + Z_{ab}I_a + Z_{ab}I_c + Z_{an}I_n)$$

Αν θεωρήσουμε ανοικτούς τον αγωγό c και τον ουδέτερο στο πέρας της γραμμής, δηλ. $I_c = I_n$ και βραχυκυκλώσουμε τους αγωγούς a και b , δηλ. $V_{a'b'} = 0$, τότε λαμβάνοντας υπόψη ότι $I_b = -I_a$ έχουμε:

$$V_{ab} = 2(Z_{aa} - Z_{ab})I_a$$

οπότε

$$Z_1 = Z_2 = Z_{aa} - Z_{ab} = \frac{V_{ab}}{2I_a} \quad (2.43)$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις, συνεπώς, θετικής και αρνητικής ακολουθίας μπορούν να προκύψουν από τη σχέση (2.43) αν μεταξύ δύο φάσεων στο ένα άκρο της γραμμής εφαρμόσουμε τάση V_{ab} και μετρήσουμε το ρεύμα I_a που θα ρεύσει αν βραχυκυκλώσουμε αυτές τις φάσεις στο άλλο άκρο της γραμμής. Η τρίτη φάση και ο ουδέτερος παραμένουν ανοικτοί στα δύο άκρα της γραμμής.

Όταν ρεύματα μηδενικής ακολουθίας ρέουν σε μία γραμμή μεταφοράς, μπορούν να επιλέξουν για επιστροφή οποιονδήποτε διαθέσιμο δρόμο. Μερικά από αυτά επιστρέφουν μέσω της γης και άλλα μέσω των εναέριων αγωγών γείωσης. Αυτοί συνήθως γειώνονται σε κάθε πύργο μεταφοράς και συνεπώς το ρεύμα επιστροφής σ' αυτούς μπορεί να είναι ομοιόμορφο κατά μήκος της γραμμής. Παράμετροι, συνεπώς, όπως οι Z_{nn} και Z_{an} που εξαρτώνται από τον πραγματικό δρόμο επιστροφής και την αντίσταση της γης (που με την σειρά της εξαρτάται από το είδος του εδάφους, την υγρασία και άλλους εμπειρικούς παράγοντες), δεν είναι δυνατόν να υπολογισθούν με ακρίβεια αλλά μόνο προσεγγιστικά. Προσεγγιστική, κατά συνέπεια, θα είναι η τιμή της αντίστασης μηδενικής ακολουθίας Z_0 που θα υπολογισθεί με βάση αυτές τις παραμέτρους.

Στην πράξη η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας εναερίων γραμμών μεταφοράς λαμβάνεται να είναι 2 έως 3.5 φορές μεγαλύτερες από την αντίσταση θετικής ακολουθίας. Για την επίτευξη πιο ακριβών τιμών συνίσταται όπως αυτή προκύπτει όχι από υπολογισμούς αλλά από πραγματικές δοκιμές.

Αναφερόμενοι και πάλι στο **Σχ. 2.7** παρατηρούμε ότι η εξίσωση τάσης γύρω από το βρόχο που σχηματίζεται μεταξύ μίας φάσης, π.χ. της φάσης a, και του ουδέτερου αγωγού γράφεται ως εξής:

$$V_{an} = Z_{aa}I_a + Z_{an}I_n + V_{a'n'} - (Z_{nn}I_n + Z_{an}I_n)$$

Αν θεωρήσουμε ανοικτούς τους αγωγούς b και c στο πέρας της γραμμής, δηλ. $I_b=I_c = 0$ και βραχυκυκλώσουμε τον αγωγό a και τον ουδέτερο, δηλ. $V_{a'n'} = 0$, τότε λαμβάνοντας υπόψη ότι $I_a = -I_n$ έχουμε:

$$V_{an} = (Z_{aa} - 2Z_{an} + Z_{nn})I_a$$

οπότε:

$$Z_s = Z_{aa} - 2Z_{an} + Z_{nn} = \frac{V_{an}}{I_a} \quad (2.44)$$

Η αντίσταση Z_s , συνεπώς, μπορεί να προκύψει από τη σχέση (2.44) αν μεταξύ μίας φάσης και του ουδέτερου στο ένα άκρο της γραμμής εφαρμόσουμε μια τάση V_{an} και μετρήσουμε το ρεύμα I_a που θα ρεύσει αν βραχυκυκλώσουμε αυτούς τους αγωγούς στο άλλο άκρο της γραμμής. Οι δύο άλλες φάσεις παραμένουν ανοικτές και στα δύο άκρα της γραμμής.

Έχοντας υπολογίσει με τις δύο δοκιμές βραχυκύκλωσης που προαναφέρθηκαν τις αντιστάσεις Z_1 και Z_s , η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας Z_0 προκύπτει, συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.40) και (2.41), ως εξής:

$$Z_0 = 3Z_s - 2Z_1 \quad (2.45)$$

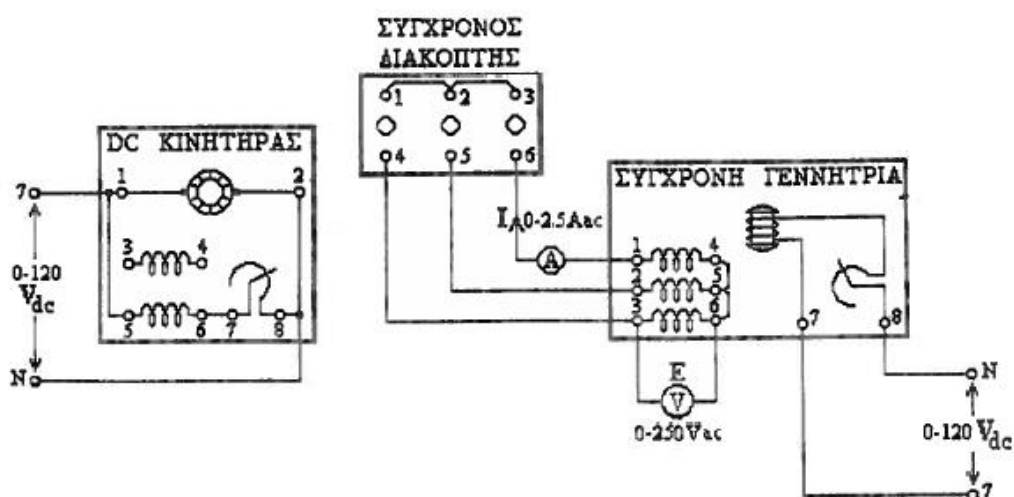
3. Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικά ισχύος
2. Μηχανές συνεχούς ρεύματος
3. Σύγχρονες μηχανές
4. Σύγχρονος τριφασικός διακόπτης
5. Όργανα μέτρησης AC και DC ρευμάτων και τάσεων
6. Μονοφασικός μετασχηματιστής
7. Τριφασική γραμμή μεταφοράς
8. Στροφόμετρο
9. Ιμάντας μετάδοσης κίνησης

4. Πειραματικό μέρος

4.1 Ακολουθιακές αντιστάσεις σύγχρονης μηχανής

Π2.1 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του **Σχ. 2.8**. Συνδέστε τους άξονες του DC κινητήρα (που χρησιμοποιείται αντί στροβίλου για την κίνηση της γεννήτριας) και της σύγχρονης μηχανής με ιμάντα. Να θέσετε τους ροοστάτες στις διεγέρσεις του DC κινητήρα και της σύγχρονης γεννήτριας στην μέγιστή τους τιμή.



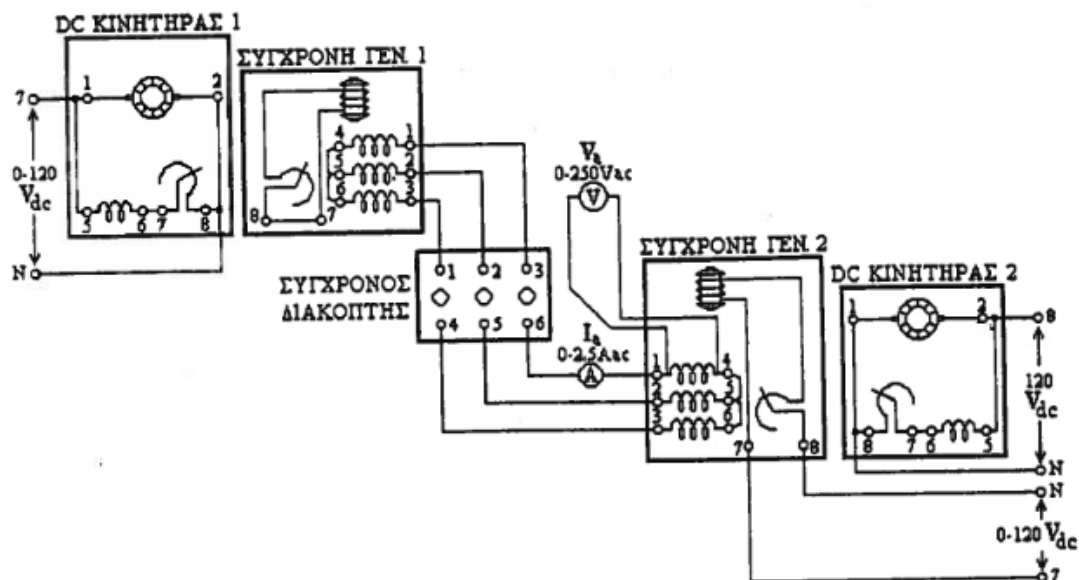
Σχήμα 2.8 Δοκιμή υπολογισμού αντίστασης θετικής ακολουθίας σύγχρονης μηχανής

Χωρίς να συνδέσετε το πεδίο της γεννήτριας ρυθμίστε την τάση διέγερσης στον DC κινητήρα μέχρι που αυτός να αποκτήσει τη σύγχρονη ταχύτητα, δηλ. 1500 rpm. Τροφοδοτήστε το τύλιγμα πεδίου της γεννήτριας και προσαρμόστε την τάση διέγερσης μέχρι η ηλεκτρεγερτική δύναμη να φθάσει το 100% της τιμής της, δηλαδή

διέγερση $E=120\text{ V}$. Οι διεγέρσεις του DC κινητήρα και της σύγχρονης γεννήτριας να ληφθούν από διαφορετικά τροφοδοτικά για να υπάρχει ανεξαρτησία ρυθμίσεων.

Προκαλέστε, με τη βοήθεια του σύγχρονου διακόπτη, τριφασικό βραχυκύκλωμα στα τυλίγματα της γεννήτριας. Μετρήστε την τελική τιμή I_{SS} του ρεύματος I_a . Να υπολογίσετε την σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας και να την μετατρέψετε σε ανά μονάδα τιμή.

Π2.2 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 2.9. Να περιστρέψετε πάλι την σύγχρονη γεννήτρια 1 (με τη βοήθεια του DC κινητήρα 1) με την σύγχρονη ταχύτητα αφού προηγουμένως βραχυκυκλώσετε το τύλιγμα πεδίου της γεννήτριας. Προσέχουμε να περιστρέφεται η γεννήτρια κατά την ορθή φορά, δηλαδή με ακολουθία φάσεων abc...



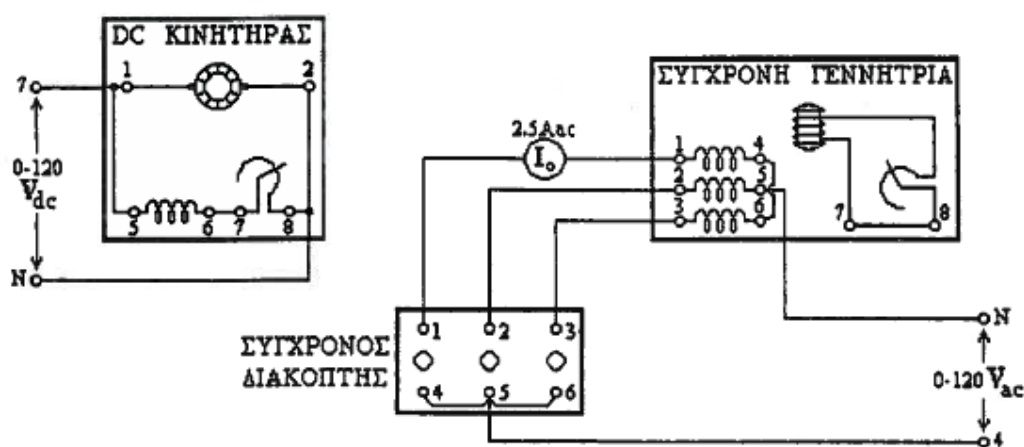
Σχήμα 2.9 Δοκιμή υπολογισμού αντίστασης αρνητικής ακολουθίας σύγχρονης μηχανής

Ομοίως να περιστρέψετε, αλλά με αντίστροφη φορά (δηλ. με ακολουθία φάσεων acb...) με τη βοήθεια του DC κινητήρα 2 την σύγχρονη γεννήτρια 2. Με κατάλληλη ρύθμιση των διεγέρσεων να πετύχετε σύγχρονη ταχύτητα και ονομαστική ηλεκτρεγερτική δύναμη, δηλαδή 1500 rpm και διέγερση 120 V. Οι διεγέρσεις του DC κινητήρα 1 και της σύγχρονης γεννήτριας 2 να ληφθούν από διαφορετικά τροφοδοτικά για να υπάρχει ανεξαρτησία ρυθμίσεων.

Τροφοδοτείστε τα τυλίγματα της σύγχρονης γεννήτριας 1 με τις τάσεις αρνητικής ακολουθίας της γεννήτριας 2 κλείνοντας τον σύγχρονο τριφασικό διακόπτη. Μετρήστε την τάση V_a και το ρεύμα I_a και υπολογίστε την σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας και την ανά μονάδα τιμής της.

Π2.3 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 2.10. Να περιστρέψετε πάλι την σύγχρονη γεννήτρια με την σύγχρονη ταχύτητα αφού προηγουμένως βραχυκυκλώσετε το τύλιγμα πεδίου της γεννήτριας.

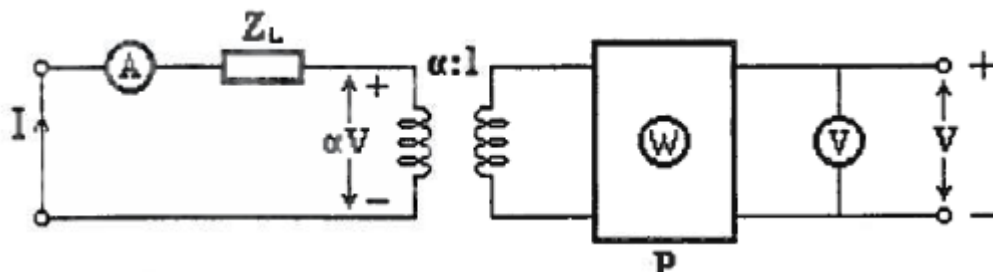
Να εφαρμόσετε στα τυλίγματα του στάτη εναλλασσόμενη τάση περίπου 30 V κλείνοντας τον σύγχρονο τριφασικό διακόπτη. Η διέγερση του DC κινητήρα και η εναλλασσόμενη τάση να ληφθούν από διαφορετικά τροφοδοτικά για να υπάρχει ανεξαρτησία ρυθμίσεων. Μετρήστε την τάση E και το ρεύμα I_0 δια των τυλιγμάτων του στάτη και υπολογίστε την σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας και την ανά μονάδα τιμής της.



Σχήμα 2.10 Δοκιμή υπολογισμού αντίστασης μηδενικής ακολουθίας σύγχρονης μηχανής

4.2 Αντίσταση διαρροή μετασχηματιστή

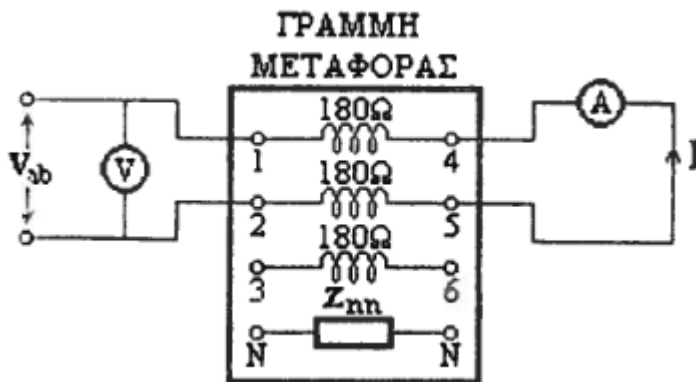
Π2.4 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 2.11. Να αυξήσετε την τάση V μέχρι που να ρεύσει ρεύμα βραχυκύκλωσης περίπου $I = 6.5 A$, N μετρήσετε την τάση V και την πραγματική ισχύ P που καταναλώνει ο μετασχηματιστής. Στην συνέχεια να υπολογίσετε την σύνθετη αντίσταση διαρροής Z_L του μετασχηματιστή δεχόμενοι ότι το ρεύμα μαγνήτισης είναι πολύ μικρό.



Σχήμα 2.11 Δοκιμή υπολογισμού αντίστασης διαρροής μετασχηματιστή

4.3 Ακολουθιακές συνθέτες αντιστάσεις γραμμής μεταφοράς

Π2.5 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 2.11. Η εν σειρά αντίδραση της γραμμής να ληφθεί 1.5 pu. Να αυξήσετε την τάση V_{ab} μεταξύ των φάσεων a, b μέχρι που το ρεύμα βραχυκύκλωσης να γίνει $I = 0.33 \text{ A}$. Να μετρήσετε την τάση V_{ab} και λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίσταση της γραμμής είναι πολύ μικρή να υπολογίσετε τις αντιδράσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας από τη σχέση $X_1 = X_2 = \frac{V_{ab}}{2I}$.



Σχήμα 2.12 Δοκιμή υπολογισμού αντιδράσεων θετικής και αρνητικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς

Π2.6 Να επαναλάβετε το προηγούμενο πείραμα αλλά να βραχυκυκλώσετε στο πέρας της γραμμής την φάση a και τον ουδέτερο. Στην αρχή της γραμμής να εφαρμόσετε μεταξύ αυτών των αγωγών τάση V_{an} την οποία να αυξήσετε μέχρι που το ρεύμα βραχυκύκλωσης να γίνει $I = 0.33 \text{ A}$. Να μετρήσετε την τάση V_{an} και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ωμική αντίσταση των αγωγών της γραμμής είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίδραση να υπολογίσετε την αντίδραση X_s από τη σχέση $X_s = \frac{V_{an}}{I}$. Στην συνέχεια να υπολογίσετε την αντίδραση μηδενικής ακολουθίας από την σχέση $X_0 = 3X_s - 2X_1$.

5. Σημειώματα

5.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **X.YZ**.

5.2 Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιον Πατρών, Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος «Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Άσκηση 2». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: σύνδεσμο μαθήματος.

5.3 Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

5.4 Διατήρηση Σημειωμάτων

- Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

6. Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

