



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ενότητα: Άσκηση 3 “Μελέτη ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων”

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Παναγής Βοβός

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά **ΠΠ**
μαθήματα

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| 1. Σκοπός | 3 |
| 2. Μοντέλο συστήματος για ανάλυση βραχυκυκλωμάτων | 3 |
| 3. Προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων..... | 6 |
| 3.1 Μονοφασικό προς γη βραχυκύκλωμα..... | 6 |
| 3.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα..... | 7 |
| 3.3 Διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα | 9 |
| 3.4 Συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα..... | 11 |
| 4. Χρησιμοποιούμενα όργανα | 12 |
| 5. Πειραματικό μέρος..... | 13 |
| 5.1 Βραχυκυκλώματα σε αφόρτιστη γεννήτρια..... | 13 |
| 5.2 Βραχυκυκλώματα σε γραμμή μεταφοράς | 15 |
| 6. Σημειώματα..... | 16 |
| 6.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου | 16 |
| 6.2 Σημείωμα Αναφοράς..... | 16 |
| 6.3 Σημείωμα Αδειοδότησης..... | 16 |
| 6.4 Διατήρηση Σημειωμάτων | 17 |
| 7. Χρηματοδότηση | 17 |

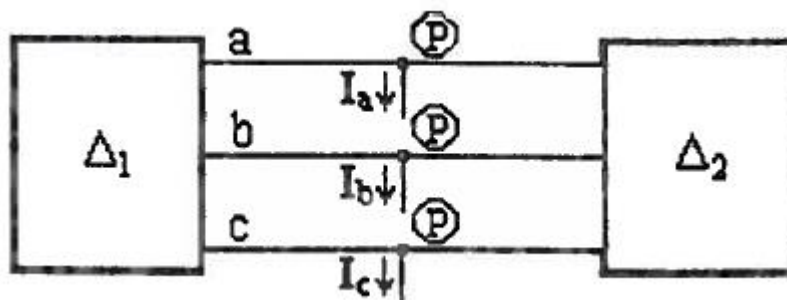
1. Σκοπός

Αντικείμενο της εργαστηριακής αυτής άσκησης είναι να γίνει κατανοητό πως με κατάλληλη σύνδεση των δικτύων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι δυνατόν να προσομοιωθούν και να μελετηθούν τα διάφορα είδη ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, δηλαδή το μονοφασικό προς γη, το διφασικό και το διφασικό προς γη, αλλά και το συμμετρικό τριφασικό.

2. Μοντέλο συστήματος για ανάλυση βραχυκυκλωμάτων

Τα περισσότερα από τα βραχυκυκλώματα που συμβαίνουν σε ένα ενεργειακό σύστημα είναι ασύμμετρα. Κάθε ασύμμετρο βραχυκύκλωμα προκαλεί ροή μη ισοζυγισμένων ρευμάτων στο σύστημα και συνεπώς η χρήση των συμμετρικών συνιστωσών είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό των ρευμάτων και των τάσεων σε κάθε σημείο του συστήματος αμέσως μετά το σφάλμα.

Για την διατύπωση των εξισώσεων που διέπουν την συμπεριφορά ενός ενεργειακού συστήματος κατά τη διάρκεια κάποιου βραχυκυκλώματος σε ένα σημείο P αυτού, παριστάνουμε το σύστημα όπως φαίνεται στο **Σχ. 3.1**. Οι υποθετικές διακλαδώσεις για να είναι δυνατόν, με κατάλληλη σύνδεση αυτών, να προσομοιωθούν τα διάφορα είδη βραχυκυκλωμάτων. Τα ρεύματα που ρέουν κατά τη διάρκεια του σφάλματος έξω από τις φάσεις a, b, και c του αρχικού συμμετρικού συστήματος τα συμβολίζουμε I_a , I_b και I_c αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1 Παράσταση συστήματος για μελέτη βραχυκυκλωμάτων

Όταν το σύστημα λειτουργεί χωρίς σφάλμα, τότε φυσικά κανένα ρεύμα δεν εξέρχεται από τις υποθετικές διακλαδώσεις. Όταν όμως συμβεί κάποιο βραχυκύκλωμα, τότε θα δημιουργηθεί ροή ρευμάτων δι' αυτών.

Προτού να συμβεί κάποιο βραχυκύκλωμα το σύστημα είναι ισοζυγισμένο και συνεπώς δεν υπάρχει ροή ρευμάτων αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, αλλά μόνο ροή ρευμάτων θετικής ακολουθίας. Την ίδια χρονική περίοδο, δηλαδή πριν το σφάλμα, οι φασικές τάσεις στο σημείο P $V_{a(0)}$, $V_{b(0)}$ και $V_{c(0)}$ είναι ισοζυγισμένες και ως εκ τούτου έχουν μόνο συνιστώσες θετικής ακολουθίας. Η συνιστώσα θετικής

ακολουθίας της τάσης της φάσης a είναι ίση με την προσφαλματική τιμή $V_{a(0)}$ αυτής της τάσης που συμβολίζεται απλά V_f , δηλαδή $V_{a(0)} = V_f$.

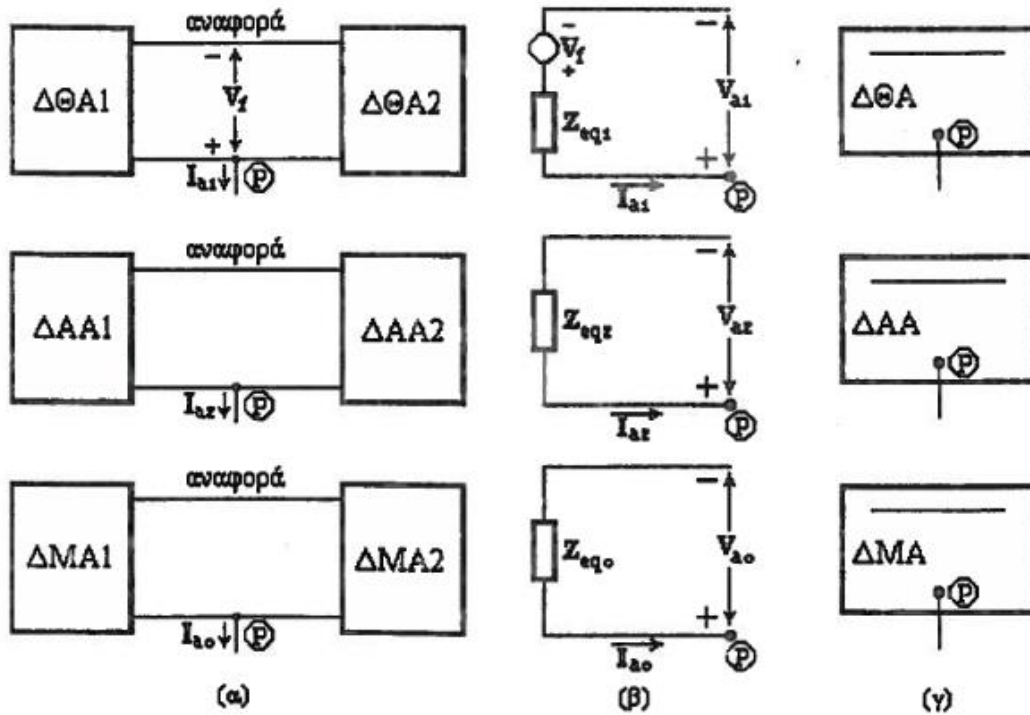
Κατά τη διάρκεια κάποιου βραχυκυκλώματος τόσο τα ρεύματα σφάλματος I_a, I_b και I_c , όσο και οι φασικές τάσεις στο σημείο του σφάλματος V_a, V_b και V_c είναι ποσότητες μη ισοζυγισμένες και συνεπώς η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών προσφέρεται θαυμάσια για τον υπολογισμό τους. Προς τούτο αρκεί να υπολογισθούν οι συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του ρεύματος και της τάσης της φάσης a δηλαδή I_{a1}, I_{a2} , και I_{a0} και V_{a1}, V_{a2} και V_{a0} αντίστοιχα, οπότε οι φασικές ποσότητες I_a, I_b, I_c και V_a, V_b, V_c υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη μήτρα μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών.

Τα δίκτυα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του ενεργειακού συστήματος του **Σχ. 3.1**, που λαμβάνονται αντικαθιστώντας κάθε μία συνιστώσα με τα αντίστοιχα ακολουθιακά της κυκλώματα, φαίνονται στο **Σχ. 3.2(α)**. Προφανώς προσφαλματική τιμή της τάσης υπάρχει μόνο στο δίκτυο θετικής ακολουθίας, διότι οι προσφαλματικές τάσεις ως ισοζυγισμένες έχουν, όπως προαναφέρθηκε, μόνο συνιστώσες θετικής ακολουθίας.

Τα ισοδύναμα Thevenin μεταξύ του σφάλματος P και του κόμβου αναφοράς κάθε ακολουθιακού δικτύου φαίνονται στο **Σχ. 3.2(β)**. Η τάση που εμφανίζεται στο ισοδύναμο θετικής ακολουθίας είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος μεταξύ του σημείου P και του ζυγού αναφοράς και ισούται φυσικά με την τάση V_f .

Οι σύνθετες αντιστάσεις Z_{eq1}, Z_{eq2} και Z_{eq0} είναι οι ισοδύναμες κατά Thevenin αντιστάσεις των αντίστοιχων ακολουθιακών δικτύων και ορίζονται σαν τις αντιστάσεις υπό τις οποίες φαίνεται το κάθε δίκτυο μεταξύ του σημείου P και του κόμβου αναφοράς. Ειδικά για να προσδιορίσουμε την αντίσταση Z_{eq1} πρέπει προηγουμένως να βραχυκυκλώσουμε όλες τις πηγές τάσης που υπάρχουν στο δίκτυο θετικής ακολουθίας.

Στο **Σχ. 3.2(γ)** φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο συμβολίζουμε σχηματικά τα τρία ακολουθιακά δίκτυα, δηλαδή με ορθογώνια όπου φαίνονται ο ζυγός αναφοράς και το σημείο σφάλματος P .



Σχήμα 3.2 (α) Ακολουθιακά δίκτυα (β) Ισοδύναμα κατά Thevenin (γ) Σχηματική παράσταση ακολουθιακών δικτύων

Για τα ισοδύναμα κατά Thevenin των δικτύων μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας ισχύουν λοιπόν οι σχέσεις:

$$V_{a0} = -Z_{eq0}I_{a0} \quad (3.1)$$

$$V_{a1} = V_f - Z_{eq1}I_{a1} \quad (3.2)$$

$$V_{a2} = -Z_{eq2}I_{a2} \quad (3.3)$$

Υπό μορφή μητρώων οι παραπάνω σχέσεις γράφονται

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{eq0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{eq1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{eq2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Η σχέση (3.4) είναι σχέση γενική και ισχύει για κάθε ενεργειακό σύστημα. Μπορεί συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της συμπεριφοράς οποιουδήποτε συστήματος σε οποιοδήποτε βραχυκύκλωμα.

3. Προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων

Θα δούμε στην συνέχεια πως μπορούμε, στηριζόμενοι στη γενική σχέση (3.4) να προσομοιώσουμε τα διάφορα είδη βραχυκυκλωμάτων με κατάλληλη σύνδεση των δικτύων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Θα εξετάσουμε τα τρία είδη ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, δηλαδή το μονοφασικό προς γη, το διφασικό και το διφασικό προς γη, αλλά για την πληρότητα του θέματος και το συμμετρικό τριφασικό.

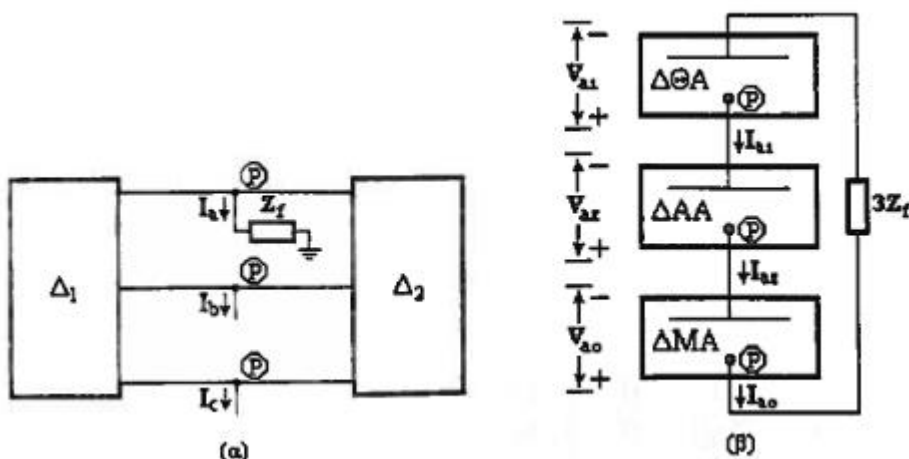
3.1 Μονοφασικό προς γη βραχυκύκλωμα

Όταν σε ένα σημείο P ενός δικτύου συμβεί ένα απλό μονοφασικό προς γη βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης Z_f , τότε το δίκτυο λαμβάνει τη μορφή που φαίνεται στο Σχ. 3.3(α). Το βραχυκύκλωμα εμφανίζεται στο σχήμα να γίνεται στη φάση a, αλλά αυτό δεν περιορίζει τη γενικότητα των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, διότι οι φάσεις χαρακτηρίζονται αυθαίρετα και κάθε φάση θα μπορούσε να ορισθεί σαν φάση a. Στο σημείο αυτό του σφάλματος ισχύουν οι εξής συνθήκες:

$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = Z_f I_a \quad (3.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο πρώτες συνθήκες του σφάλματος, οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων σφάλματος δίδονται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



Σχήμα 3.3 (α) Μονοφασικό προς γη βραχυκύκλωμα (β) Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για την προσομοίωση του μονοφασικού προς γη βραχυκυκλώματος

από όπου εύκολα προκύπτει ότι:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{I_a}{3} \quad (3.6)$$

οπότε η τρίτη από τις συνθήκες σφάλματος γίνεται

$$V_a (= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}) = 3 Z_f I_{a0} \quad (3.7)$$

Η γενική σχέση (3.4) στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{eq0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{eq1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{eq2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a0} \\ I_{a0} \end{bmatrix}$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις παραπάνω τρεις εξισώσεις, όπως η συνθήκη σφάλματος (3.7) απαιτεί, έχουμε:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = V_f - (Z_{eq0} + Z_{eq1} + Z_{eq2})I_{a0} = 3 Z_f I_{a0}$$

Λύνοντας ως προς I_{a0} και συνδυάζοντας το αποτέλεσμα με τη σχέση (3.6), λαμβάνουμε:

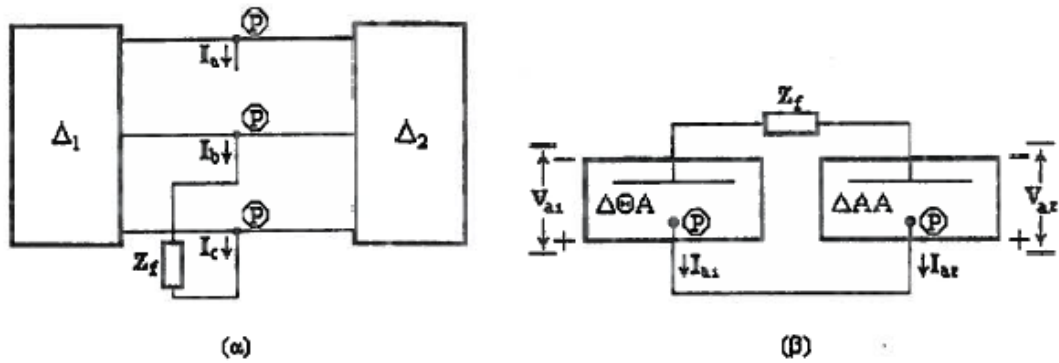
$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_{eq0} + Z_{eq1} + Z_{eq2} + 3 Z_f} \quad (3.8)$$

Οι εξισώσεις (3.8) είναι οι ειδικές εξισώσεις που ισχύουν για μονοφασικό προς γη βραχυκύκλωμα. Οι εξισώσεις αυτές σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (3.4) και τις σχέσεις των συμμετρικών συνιστωσών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό όλων των τάσεων και των ρευμάτων στο σημείο του σφάλματος.

Από τις ειδικές εξισώσεις (3.8) εύκολα προκύπτει ότι το μονοφασικό προς γη βραχυκύκλωμα προσομοιώνεται συνδέοντας εν σειρά τα τρία ακολουθιακά δίκτυα, όπως φαίνεται στο **Σχ. 3.3 (β)**.

3.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα

Όταν σε ένα σημείο P ενός δικτύου συμβεί ένα διφασικό βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης Z_f , τότε το δίκτυο λαμβάνει τη μορφή που φαίνεται στο **Σχ. 3.4 (α)**. Χωρίς να περιορίζεται η γενικότητα, το διφασικό βραχυκύκλωμα θεωρούμε ότι συμβαίνει ανάμεσα στις φάσεις b και c. Στο σημείο του σφάλματος, συνεπώς, ισχύουν οι εξής συνθήκες:



Σχήμα 3.4 (α) Διφασικό βραχυκύκλωμα (β) Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για την προσομοίωση του διφασικού βραχυκυκλώματος

$$I_{a0} = 0 \quad I_b = -I_c \quad V_b - V_c = Z_f I_b \quad (3.9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο πρώτες συνθήκες σφάλματος, οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων σφάλματος δίδονται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$

από όπου εύκολα προκύπτει ότι

$$I_{a0} = 0 \quad (3.10)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (3.11)$$

Οι τάσεις στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν επειδή το δίκτυο αυτό στερείται πηγών τάσης και επιπλέον $I_{a0} = 0$, δηλαδή δεν χύνεται σε αυτό ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που να οφείλεται στο σφάλμα. Το δίκτυο, λοιπόν, μηδενικής ακολουθίας δεν εμπλέκεται στους υπολογισμούς των διφασικών βραχυκυκλωμάτων, αλλά παραμένει ανενεργό όπως και πριν το σφάλμα.

Μετασχηματίζοντας τις ποσότητες που υπεισέρχονται στην τρίτη από τις συνθήκες του σφάλματος (3.9) στις συμμετρικές τους συνιστώσες έχουμε:

$$(V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2}) - (V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2}) = Z_f (I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2})$$

και επειδή $I_{a0} = 0$ και $I_{a1} = -I_{a2}$ λαμβάνουμε:

$$(\alpha^2 - \alpha)V_{a1} - (\alpha^2 - \alpha)V_{a2} = Z_f(\alpha^2 - \alpha)I_{a1}$$

ή

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} \quad (3.12)$$

Η γενική σχέση (3.4) στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{eq0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{eq1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{eq2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix}$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις δύο τελευταίες από τις παραπάνω εξισώσεις, όπως η συνθήκη σφάλματος (3.12) απαιτεί, έχουμε:

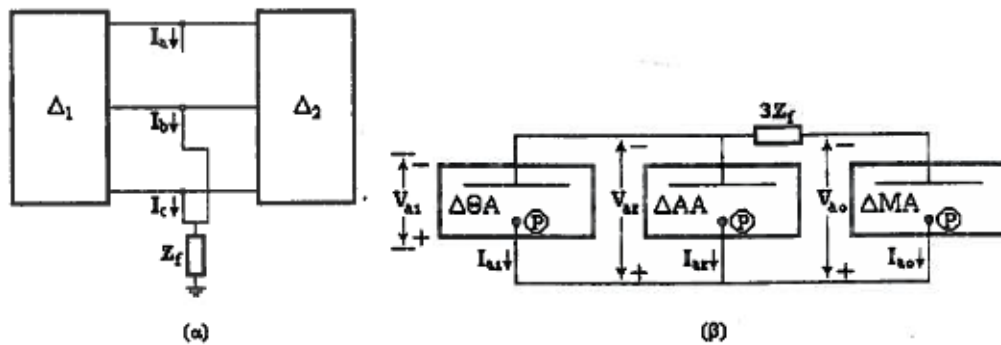
$$V_{a1} - V_{a2} = V_f - (Z_{eq1} - Z_{eq2})I_{a1} = Z_f I_{a1} \quad (3.13)$$

Οι εξισώσεις (3,10), (3.12) και (3.13) είναι οι ειδικές εξισώσεις που ισχύουν για διφασικό βραχυκύκλωμα. Οι εξισώσεις αυτές σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (3.4) και τις σχέσεις των συμμετρικών συνιστωσών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό όλων των τάσεων και των ρευμάτων στο σημείο του σφάλματος. Από τις ειδικές εξισώσεις εύκολα προκύπτει ότι το διφασικό βραχυκύκλωμα προσομοιώνεται συνδέοντας **παράλληλα τα δίκτυα θετικής και αρνητικής ακολουθίας**, όπως φαίνεται στο **Σχ. 3.4 (β)**.

3.3 Διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα

Όταν σε ένα σημείο P ενός δικτύου συμβεί ένα διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης Z_f , τότε το δίκτυο λαμβάνει τη μορφή που φαίνεται στο **Σχ. 3.5(α)**. Και στην περίπτωση αυτή, το διφασικό βραχυκύκλωμα θεωρούμε ότι συμβαίνει ανάμεσα στις φάσεις b και c. Στο σημείο του σφάλματος, συνεπώς, ισχύουν οι εξής συνθήκες:

$$I_a = 0 \qquad V_b = V_c = Z_f(I_a + I_b) \qquad (3.14)$$



Σχήμα 3.5 (α) Διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα (β) Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για την προσομοίωση του διφασικού προς γη βραχυκυκλώματος

Λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη συνθήκη σφάλματος, οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων σφάλματος δίδονται από τη σχέση :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

από όπου εύκολα προκύπτει ότι:

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_b + I_c)$$

οπότε η δεύτερη από τις συνθήκες σφάλματος γίνεται:

$$V_b = V_c = 3Z_f I_{a0} \qquad (3.15)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την δεύτερη συνθήκη σφάλματος όπου $V_b = V_c$, οι συμμετρικές συνιστώσες των τάσεων στο σημείο του σφάλματος δίδονται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix}$$

από όπου εύκολα προκύπτει ότι:

$$V_{a1} = V_{a2} \qquad (3.16)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + 2V_b) \qquad (3.17)$$

Η εξίσωση (3.17), λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (3.15) καθώς και ότι $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = V_{a0} + 2V_{a1}$, δίδει:

$$V_{a1} = V_{a0} - 3Z_f I_{a0}$$

οπότε, λόγω της (3.16), έχουμε:

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} - 3Z_f I_{a0} \quad (3.18)$$

Οι εξισώσεις (3.18) μαζί με την εξίσωση

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (3.19)$$

είναι οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα και ικανοποιούνται συγχρόνως **όταν τα τρία ακολουθιακά δίκτυα συνδέονται παράλληλα**, όπως φαίνεται στο **Σχ. 3.5(β)**. Από τη σύνδεση των ακολουθιακών δικτύων εύκολα προκύπτει ότι το ρεύμα θετικής ακολουθίας I_{a1} μπορεί να υπολογισθεί αν διαιρέσουμε τη προσφαλματική τάση V_f δια της αντίστασης που προκύπτει όταν η Z_{eq1} συνδεθεί σε σειρά με τον παράλληλο συνδυασμό της Z_{eq2} και της $(Z_{eq0} + 3Z_f)$, δηλαδή:

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_{eq1} + \frac{Z_{eq2}(Z_{eq0} + 3Z_f)}{Z_{eq2} + Z_{eq0} + 3Z_f}} \quad (3.20)$$

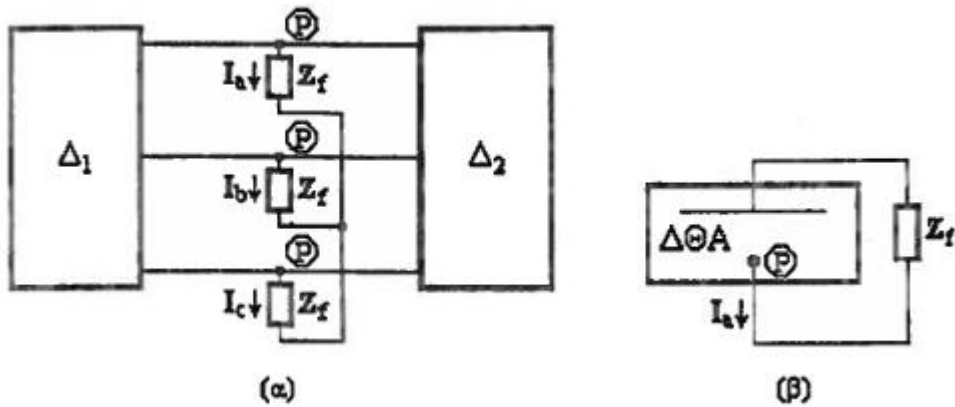
Τα ρεύματα I_{a2} και I_{a0} μπορούν να προκύψουν σαν συνάρτηση του ρεύματος I_{a1} ως εξής:

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_{eq0} + 3Z_f}{Z_{eq2} + Z_{eq0} + 3Z_f} \quad (3.21)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_{eq2}}{Z_{eq2} + Z_{eq0} + 3Z_f} \quad (3.22)$$

3.4 Συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα

Όταν σε ένα σημείο P ενός δικτύου συμβεί ένα συμμετρικό βραχυκύκλωμα μέσω ίσων αντιστάσεων Z_f , τότε το δίκτυο λαμβάνει τη μορφή που φαίνεται στο **Σχ. 3.6(α)**. Το δίκτυο μετά το σφάλμα παραμένει συμμετρικό και ως εκ τούτου μόνο ρεύματα θετικής ακολουθίας ρέουν σε αυτό. Τα δίκτυα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας παραμένουν ανενεργά, όπως και πριν το σφάλμα, επειδή στερούνται πηγών τάσης και επιπλέον δεν χύνεται σε αυτά ρεύμα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα που να οφείλεται στο σφάλμα. Δεν εμπλέκονται, συνεπώς, στους υπολογισμούς των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων.



Σχήμα 3.6 (α) Τριφασικό βραχυκύκλωμα (β) Δίκτυο που προσομοιώνει το τριφασικό βραχυκύκλωμα

Η συνθήκη σφάλματος $V_a = Z_f I_a$ της φάσης a μετασχηματίζεται δε ακολουθιακές ποσότητες ως εξής:

$$V_{a1} = Z_f I_{a1} \quad (3.23)$$

οπότε από τη δεύτερη των γενικών σχέσεων (3.4) προκύπτει:

$$V_{a1} = V_f - Z_{eq1} I_{a1} = Z_f I_{a1}$$

και

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_{eq1} + Z_f} \quad (3.24)$$

Η εξίσωση (3.24) είναι η ειδική εξίσωση που ισχύει για συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα, το οποίο προσομοιώνεται όπως φαίνεται στο **Σχ. 3.6(β)**.

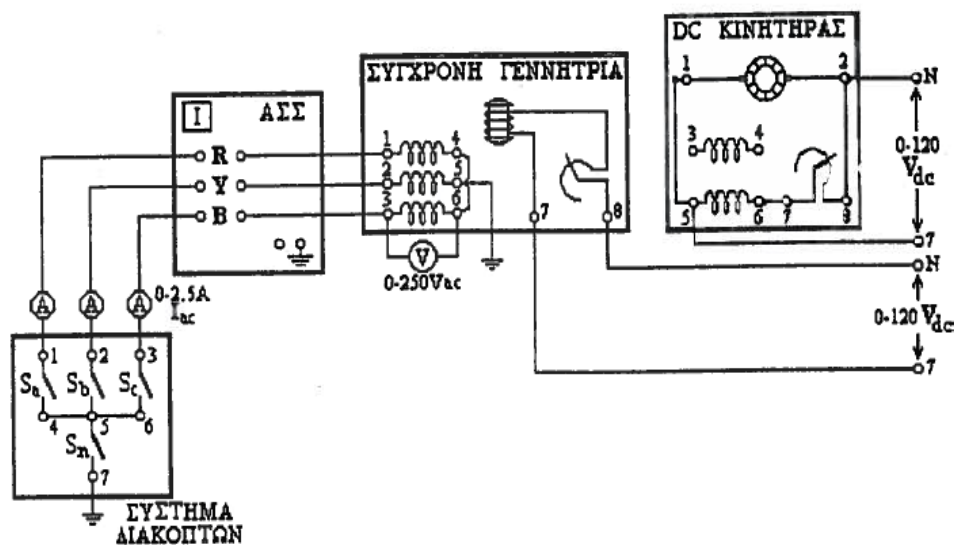
4. Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικά ισχύος
2. Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια
3. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος
4. Τριφασική γραμμή μεταφοράς
5. Σύστημα μονοφασικών διακοπών
6. Αναλυτής τριφασικών συνιστωσών (δες Εργαστηριακή Άσκηση 1, σελ. 1-13)
7. Στοιχείο επαγωγικών αντιστάσεων
8. Ιμάντας μετάδοσης κίνησης
9. Στροφόμετρο
10. Στροβοσκόπιο
11. Παλμογράφος

5. Πειραματικό μέρος

5.1 Βραχυκυκλώματα σε αφόρτιστη γεννήτρια

Π3.1 α) Να κατασκευάσετε το κύκλωμα το Σχ. 3.7. Συνδέστε τους άξονες του DC κινητήρα (που χρησιμοποιείτε 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 στη μέγιστή τους τιμή. Χωρίς να συνδέσετε το πεδίο της γεννήτριας και με τους διακόπτες του συστήματος διακοπών ανοικτούς, 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 που η ηλεκτρεγερτική δύναμη να φθάσει το 100% της τιμής της, δηλαδή $E=120\text{ V}$. Οι διεγέρσεις του DC κινητήρα και της σύγχρονης γεννήτριας να ληφθούν από διαφορετικά τροφοδοτικά για να υπάρχει ανεξαρτησία ρυθμίσεων.



Σχήμα 3.7

β) Προκαλέστε, με τη βοήθεια του συστήματος διακοπών, τα εξής βραχυκυκλώματα:

- I. Μονοφασικό προς γη (διακόπτες s_a και s_n σε θέση "ON")
- II. Διφασικό (διακόπτες s_b και s_c σε θέση "ON")
- III. Διφασικό προς γη (διακόπτες s_b , s_c και s_n σε θέση "ON")
- IV. Τριφασικό (διακόπτες s_a , s_b και s_c σε θέση "ON")

γ) Μετρείστε, με τη βοήθεια του παλμογράφου, τα μέτρα (rms τιμές) των φασικών ρευμάτων και των ρευμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας έτσι όπως εμφανίζονται στη θέση MONITOR του Αναλυτή Συμμετρικών Συνιστωσών (ΑΣΣ).

Να σημειωθεί ότι οι τάσεις στην έξοδο του αναλυτή συμμετρικών συνιστωσών βρίσκονται σε σχέση 1:10 με τα ρεύματα που αντιπροσωπεύουν, δηλαδή τάση 1 V αντιπροσωπεύει ρεύμα 10 A.

δ) Χρησιμοποιώντας τις τιμές των αντιστάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας που βρέθηκαν για τη σύγχρονη γεννήτρια στην εργαστηριακή άσκηση 2, να υπολογίσετε από τα δίκτυα που προσομοιώνουν κάθε βραχυκύκλωμα τα ακολουθιακά και φασικά ρεύματα σφάλματος και να τα συγκρίνετε με αυτά που προέκυψαν από τις μετρήσεις.

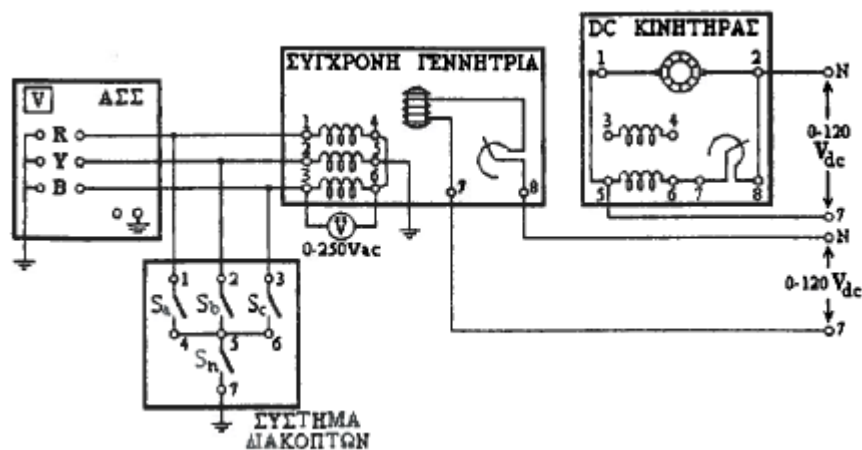
Π3.2 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα το Σχ. 3.8.

α) Αφού επαναλάβετε τη διαδικασία που αναφέρεται στην παράγραφο α) του πειράματος Π3.1.

β) Να προκαλέσετε τα βραχυκυκλώματα που περιγράφονται στην παράγραφο β) του ίδιου πειράματος.

γ) Μετρείστε, με τη βοήθεια του παλμογράφου, τα μέτρα (rms τιμές) των φασικών τάσεων και των τάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας έτσι όπως εμφανίζονται στη θέση MONITOR του αναλυτή συμμετρικών συνιστωσών.

δ) Να υπολογίσετε από τα δίκτυα που προσομοιώνουν κάθε βραχυκύκλωμα τις ακολουθιακές και φασικές τάσεις σφάλματος και να τις συγκρίνετε με αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις.

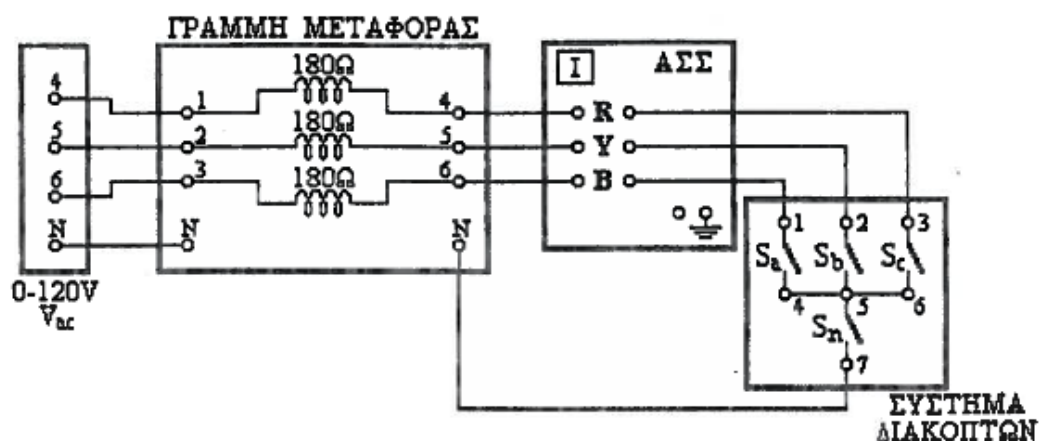


Σχήμα 3.8

5.2 Βραχυκυκλώματα σε γραμμή μεταφοράς

Π3.3 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα το Σχ. 3.9. Αφού τροφοδοτήσετε τη γραμμή με φασική τάση 50 V, να προκαλέσετε μονοφασικό προς ουδέτερο, διφασικό, διφασικό προς ουδέτερο και τριφασικό βραχυκύκλωμα και να μετρήσετε τα φασικά και ακολουθιακά ρεύματα σφάλματος.

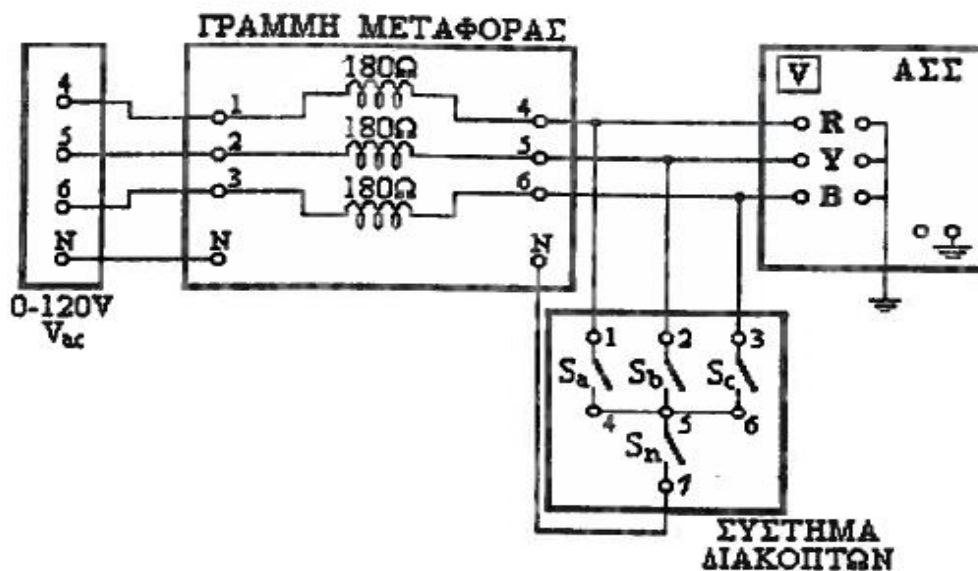
Από τις ακολουθιακές αντιστάσεις της γραμμής μεταφοράς, που προσδιορίστηκαν στην εργαστηριακή άσκηση 2, να υπολογίσετε από τα δίκτυα που προσομοιώνουν κάθε βραχυκύκλωμα τα φασικά και ακολουθιακά ρεύματα σφάλματος και να τα συγκρίνετε με αυτά που προέκυψαν από τις μετρήσεις.



Σχήμα 3.9

Π3.4 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα το Σχ. 3.10. Αφού τροφοδοτήσετε τη γραμμή με φασική τάση 50 V, να μετρήσετε τις φασικές και ακολουθιακές τάσεις σφάλματος για κάθε ένα από τα βραχυκυκλώματα του προηγούμενου πειράματος Π3.3.

Να υπολογίσετε από τα δίκτυα που προσομοιώνουν κάθε βραχυκύκλωμα τις ακολουθιακές και φασικές τάσεις σφάλματος και να τις συγκρίνετε με αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις.



Σχήμα 3.10

6. Σημειώματα

6.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου

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

6.2 Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιον Πατρών, Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος «Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Άσκηση 3». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: σύνδεσμο μαθήματος.

6.3 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.

6.4 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.

7. 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.



