



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Προστασία Σ.Η.Ε

Ενότητα 6: Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους απόστασης

Νικόλαος Βοβός
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών



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.



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.



Άδειες χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης creative commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκεινται σε άλλου τύπου άδειες χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



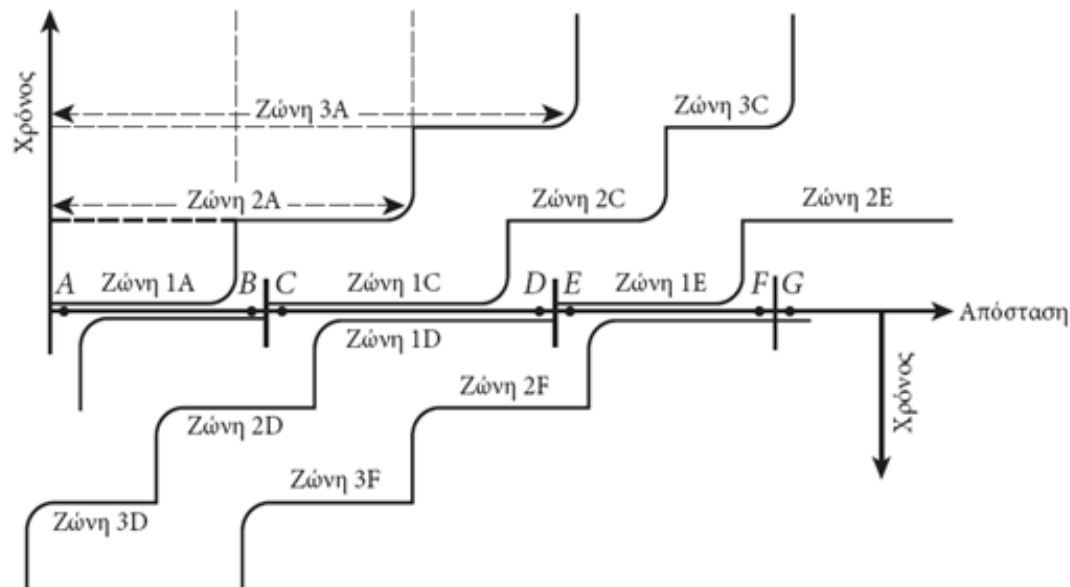
Μέτρηση απόστασης(1)

- Η τάση που μετράει ένας ηλεκτρονόμος που βρίσκεται στο ένα άκρο της γραμμής, όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα στο άλλο άκρο της γραμμής είναι η πτώση τάσης της γραμμής IZ_L .
- Άρα ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα για ένα βραχυκύκλωμα στο άλλο άκρο θα είναι $\frac{V}{I}=Z_L$, όπου Z_L είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής.
- Για ένα βραχυκύκλωμα μέσα στο τμήμα της γραμμής που προστατεύεται $\frac{V}{I} < Z_L$, ενώ για ένα βραχυκύκλωμα πέρα από αυτό το τμήμα $\frac{V}{I} > Z_L$.
- Επειδή το Z_L είναι ανάλογο με το μήκος της γραμμής μεταξύ του ηλεκτρονόμου και του βραχυκυκλώματος, είναι ένα μέτρο της απόστασης του βραχυκυκλώματος. Από αυτήν την ιδιότητα προήλθε ο όρος ηλεκτρονόμος απόστασης.



Μέτρηση απόστασης(2)

- Για τον ηλεκτρονόμο στο άλλο άκρο της γραμμής το ρεύμα αντιστρέφεται, όταν περνάμε από εσωτερικά σε εξωτερικά βραχυκυκλώματα και αυτή η απότομη ασυνέχεια κάνει την επιλεκτικότητα εύκολη και αυτόματη.
- Λόγω των αναπόφευκτων ανακρίβειών στη μέτρηση των διαφόρων ποσοτήτων δεν γνωρίζουμε την ακριβή επέκταση των ηλεκτρονόμων απόστασης. Γι' αυτόν το λόγο αυτοί οι ηλεκτρονόμοι συνήθως παρέχουν προστασία σε τρεις ζώνες.



Βηματικά χρονικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρονόμων απόστασης.



Μέτρηση απόστασης(3)

- Η πρώτη ζώνη παρέχει μεγάλης ταχύτητας προστασία (20 ms) για ένα τμήμα της γραμμής, συνήθως το 85-90% για φασικούς ηλεκτρονόμους και περίπου 75% για ηλεκτρονόμους γης.
- Η δεύτερη ζώνη υπερκαλύπτει το σύνολο της γραμμής, έχει μία χρονική καθυστέρηση σε σχέση με την πρώτη ζώνη και εκτείνεται μέχρι 20% μέσα στην επόμενη γραμμή (χρόνος λειτουργίας περίπου 0.35 s).
- Η τρίτη ζώνη παρέχει προστασία υποστήριξης και η χρονική της καθυστέρηση είναι 1–2 s.
- Σε ένα ποσοστό μήκους γραμμής (π.χ. 10%) ανοίγουν οι διακόπτες στα δυο άκρα της γραμμής σε διαφορετικό χρόνο, αυτό αυξάνει το χρόνο επανακλεισίματος και αυτό δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στη διατήρηση της ευστάθειας των ΣΗΕ.



Προβλήματα μέτρησης απόστασης(1)

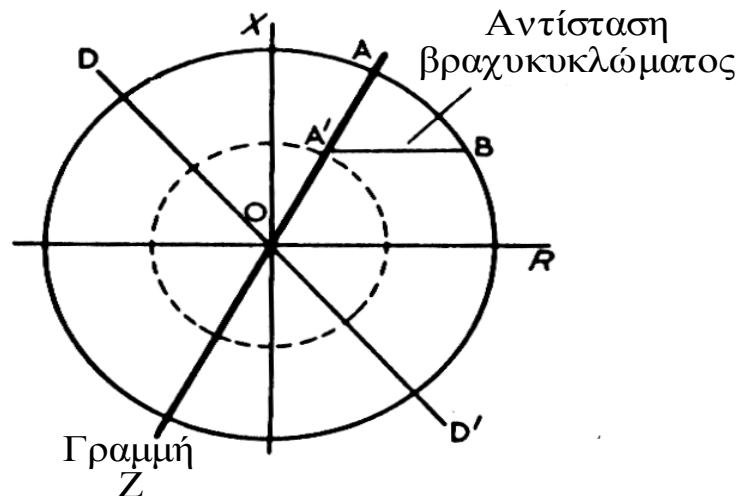
- Η καρδιά του ηλεκτρονόμου απόστασης είναι η μονάδα μέτρησης, που συγκρίνει το ρεύμα με τις πολικές ή φασικές τάσεις.
- Αυτή η μονάδα δεν πρέπει μόνο να συγκρίνει το I και V με ακρίβεια αλλά επίσης να αγνοεί την αντίσταση βραχυκυκλώματος και μεταβατικές συνθήκες, που δημιουργούν πρόσχηρες ανακριβείς τιμές του I και V .



Προβλήματα μέτρησης απόστασης(2)

(α) Αντίσταση βραχυκυκλώματος.

- Μία πηγή σφάλματος είναι η πτώση τάσης στο ίδιο το βραχυκύκλωμα, που οφείλεται στο τόξο και/ή την αντίσταση στη στήριξη του πύργου.
- Αυτό το φαινόμενο ελαττώνει την επέκταση του ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης από OA σε OA' .



Ελάττωση της επέκτασης του ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης λόγω της αντίστασης βραχυκυκλώματος.



Προβλήματα μέτρησης απόστασης(3)

- Ο καλύτερος τρόπος για να αποφύγουμε την επίδραση της αντίστασης του τόξου είναι η χρησιμοποίηση ηλεκτρονόμων μιγαδικής αντίστασης. Η αντίσταση βραχυκυκλώματος για βραχυκυκλώματα με γη έχει δύο συνιστώσες, την αντίσταση του τόξου και την αντίσταση της γης.
- Η αντίσταση του τόξου δίνεται από τον τύπο Warrington:

$$R_{arc} = \frac{8750l}{I^{1.4}}$$

όπου l είναι το μήκος του τόξου σε πόδια και I είναι το ρεύμα του βραχυκυκλώματος.

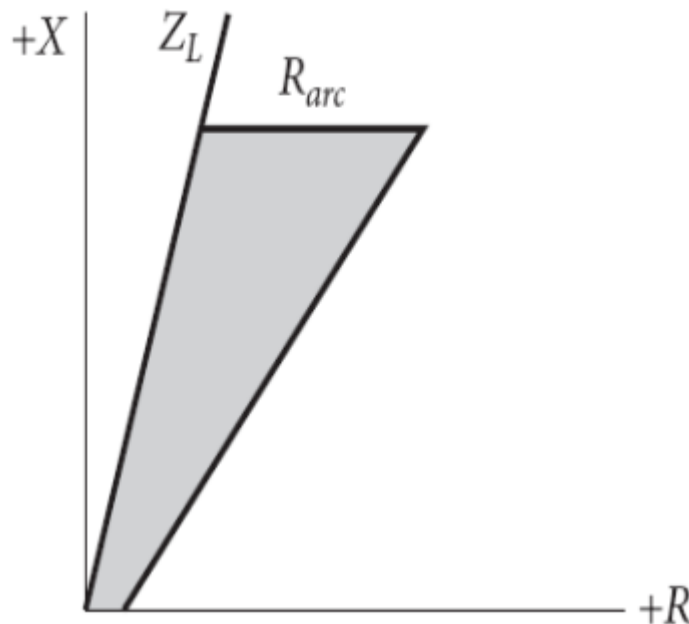
- Το l όταν φυσάει αέρας αυξάνει και γίνεται μεγαλύτερο από την απόσταση των αγωγών, οπότε:

$$R_{arc} = \frac{8750(S+3ut)}{I^{1.4}}$$

Όπου S είναι η απόσταση των αγωγών και u είναι η ταχύτητα του ανέμου σε $\frac{\text{μίλια}}{\text{ώρα}}$ και t η διάρκεια του τόξου σε δευτερόλεπτα.

Προβλήματα μέτρησης απόστασης(4)

- Επειδή η αντίσταση τόξου του βραχυκυκλώματος έχει την ένταση του ρεύματος στον παρονομαστή, έχει μικρές τιμές για μεγάλα ρεύματα βραχυκυκλώματος και μεγάλες τιμές για μικρά ρεύματα.
- Επομένως η αντίσταση τόξου δεν έχει σταθερή τιμή όταν το βραχυκύκλωμα μετακινείται από τη θέση του ηλεκτρονόμου στο άλλο άκρο της γραμμής αλλά έχει τη μορφή του σχήματος:



Τροποποίηση της αντίστασης που μετράει ο ηλεκτρονόμος λόγω της αντίστασης τόξου.

Προβλήματα μέτρησης απόστασης(6)

(β) Κατεύθυνση.

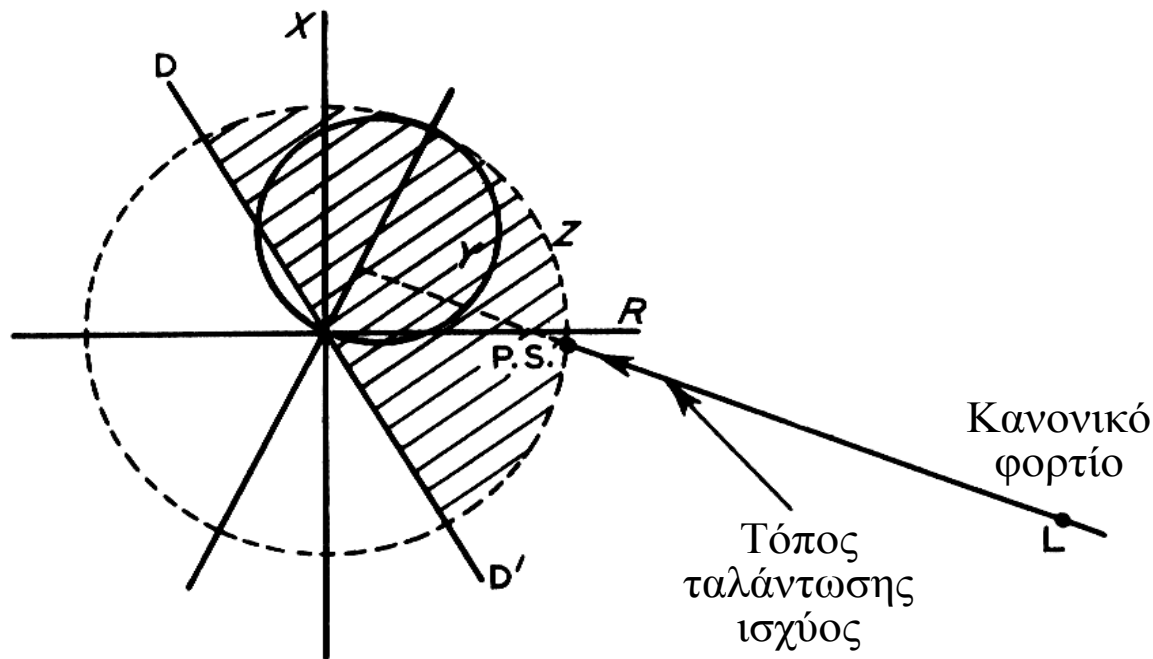
- Επειδή η ροπή λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης δίνεται από τη σχέση $VI \cos(\theta - \tau)$, για μικρές τάσεις που μπορούν να εμφανισθούν για βραχυκυκλώματα κοντά στον ηλεκτρονόμο, αυτή η ροπή γίνεται μικρή και αναξιόπιστη.
- Οι τρεις δυνατές λύσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι: **(α)** Ουδέτερη ευαισθησία. **(β)** Δράση μνήμης. **(γ)** Πόλωση, με δυναμικό από μία μη βραχυκυκλωμένη φάση.



Προβλήματα μέτρησης απόστασης(7)

(γ) Υπερφόρτιση και ταλάντωση ισχύος.

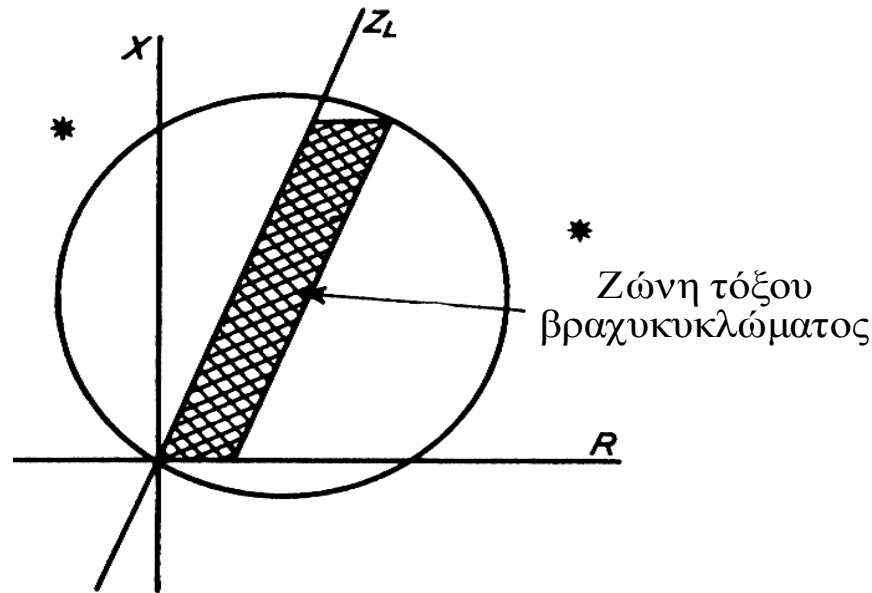
Η σύνθετη αντίσταση που μετράει ένας ηλεκτρονόμος απόστασης, όταν έχουμε κανονική φόρτιση, είναι έξω από την περιοχή ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου απόστασης.



Επίδραση της ταλάντωσης ισχύος σε ηλεκτρονόμους σύνθετης αντίστασης (διακεκομμένος κύκλος) και τηλο ηλεκτρονόμο (συμπαγής κύκλος).

Προβλήματα μέτρησης απόστασης(8)

- Άλλο πλεονέκτημα των ηλεκτρονόμων τύπου σύνθετης αγωγιμότητας είναι ότι τα χαρακτηριστικά τους είναι τόσο στενά ταιριασμένα γύρω από την περιοχή βραχυκυκλώματος ώστε δεν ενεργοποιούνται από βραχυκυκλώματα σε άλλες φάσεις.



Χαρακτηριστικά ηλεκτρονόμου mho . (* σφάλματα σε άλλες φάσεις)



Παράμετροι σύνθετης αντίστασης(1)

- Πριν προχωρήσουμε στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης από τους ηλεκτρονόμους απόστασης θα δώσουμε τους βασικούς τύπους που δίνουν τις ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις.
- Η μηδενικής ακολουθίας σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα μήκους δίνεται από τη σχέση:

$$Z_0 = Z_{el} + 2Z_{lm}$$

- Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας ανά μονάδα μήκους δίνεται από τη σχέση:

$$Z_1 = Z_{le} - Z_{lm}$$



Παράμετροι σύνθετης αντίστασης(2)

- Για διπλά κυκλώματα γραμμών η αμοιβαία σύζευξη Z_{m1} μεταξύ των κυκλωμάτων συμβάλει στη φαινόμενη σύνθετη αντίσταση και η αντίσταση θετικής ακολουθίας του ενός κυκλώματος γίνεται:

$$Z_{1dc} = Z_1 + Z_{m1}$$

- Για την πιο πάνω περίπτωση η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας Z_{0dc} δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{0dc} = Z_0 + Z_{m0}$$

όπου Z_{m0} είναι η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας μεταξύ των κυκλωμάτων.

- Ασυμμετρία στις αυτεπαγωγές και αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τριών φάσεων τροποποιεί τη σχέση μεταξύ των ακολουθιακών σύνθετων αντιστάσεων και των αυτεπαγωγών και επίσης δημιουργεί σύζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.



Παράμετροι σύνθετης αντίστασης(3)

- Μία ενδεικτική συσχέτιση του μεγέθους των πιο πάνω αναφερθέντων συνθέτων αντιστάσεων για την περιοχή των 132-400 KV είναι η εξής.
- Η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μεταξύ των φάσεων είναι 30-45% της σύνθετης αντίστασης που οφείλεται στην αυτεπαγωγή, ενώ η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μεταξύ των παράλληλων κυκλωμάτων (για γραμμές διπλού κυκλώματος) είναι το 25-35% της ίδιας αντίστασης.
- Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας είναι το 65-70% της σύνθετης αντίστασης που οφείλεται στην αυτεπαγωγή, ενώ η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας μεταξύ παράλληλων κυκλωμάτων είναι το 5% της ίδιας αντίστασης.
- Για σύγκριση, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας είναι 1.7 φορές μεγαλύτερη από τη σύνθετη αντίσταση αυτεπαγωγής, ενώ η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας μεταξύ παράλληλων κυκλωμάτων είναι το 90% της σύνθετης αντίστασης αυτεπαγωγής.



Αντιστάθμιση των σημάτων που τροφοδοτούνται σε ηλεκτρονόμους απόστασης για προστασία σφαιμάτων γης(1)

- Για αντιμετατιθέμενες γραμμές η τάση της φάσης α στη θέση του ηλεκτρονόμου, για τη περίπτωση ενός βραχυκυκλώματος γης αυτής της φάσης σε μια απόσταση m από τον ηλεκτρονόμο, δίνεται από τη σχέση:

$$V_a = I_a m Z_{le} + (I_b + I_c) m Z_{lm}$$

- Από αυτήν τη σχέση παρατηρούμε ότι η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης από τον ηλεκτρονόμο χρησιμοποιώντας απευθείας τα μεγέθη V_a και I_a είναι λάθος, κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από το λόγο του αθροίσματος $I_b + I_c$ προς το ρεύμα I_a .
- Αυτή η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$V_a = \left(I_a + \frac{(I_b + I_c) Z_{lm}}{Z_{le}} \right) m Z_{le}$$



Αντιστάθμιση των σημάτων που τροφοδοτούνται σε ηλεκτρονόμους απόστασης για προστασία σφαλμάτων γης(2)

- Για να ελαττωθεί το λάθος τροφοδοτούμε τον ηλεκτρονόμο με ένα σύνθετο σήμα που περιέχει τα ρεύματα των υγιών φάσεων και την αμοιβαία σύνθετη αντίσταση.
- Έτσι κατά μία μέθοδο γνωστή ως **μέθοδος αντιστάθμισης των υγιών φάσεων (sound-phase compensation)**, το αντισταθμισμένο σήμα του ηλεκτρονόμου, I_{ra} , έχει τη μορφή:

$$I_{ra} = I_a + \frac{(I_b + I_c)Z_{lm}}{Z_{le}} \quad V_a = \left(I_a + \frac{(I_b + I_c)Z_{lm}}{Z_{le}} \right) mZ_{le}$$

- Με αυτόν τον τρόπο, αν ο ηλεκτρονόμος μετρά απευθείας τη φασική τάση V_a και δέχεται σαν ρεύμα την τιμή του αντισταθμισμένου ρεύματος, η σύνθετη αντίσταση που θα μετράται από τον ηλεκτρονόμο απόστασης, Z_{ra} , δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{ra} = \frac{V_a}{I_{ra}} = mZ_{le}$$



Αντιστάθμιση των σημάτων που τροφοδοτούνται σε ηλεκτρονόμους απόστασης για προστασία σφαλμάτων γης(3)

- Κατά μία άλλη μέθοδο, τη μέθοδο του υπολειμματικού ρεύματος (residual-current), το αντισταθμισμένο σήμα δημιουργείται από το ρεύμα στη βραχυκυκλωμένη φάση και το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας στη θέση του ηλεκτρονόμου.
- Για να βρούμε την μορφή του αντισταθμισμένου σήματος γράφουμε την εξίσωση όπως πιο κάτω:

$$V_a = I_a mZ_{le} + (I_a + I_b + I_c) mZ_{bn} - I_a mZ_{bn}$$

$$V_a = I_a m(Z_{le} - Z_{lm}) + 3 I_0 mZ_{lm}$$

$$V_a = I_a mZ_1 + 3 I_0 mZ_{lm}$$

$$V_a = mZ_1 \left(I_a + \frac{3 I_0 Z_{lm}}{Z_1} \right)$$

- Από την τελευταία εξίσωση το αντισταθμισμένο σήμα του ηλεκτρονόμου είναι:

$$I_{ra} = I_a + \frac{3 I_0 Z_{bn}}{Z_1}$$

- Σε αυτήν την περίπτωση ο ηλεκτρονόμος μετρά τη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του κυκλώματος που προστατεύει.



Σήματα αντιστάθμισης για φασικούς ηλεκτρονόμους

- Για αντιμετατιθέμενες εν σειρά γραμμές ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b και c δημιουργεί μία τάση V_b στη θέση του ηλεκτρονόμου, που δίνεται από τη σχέση:

$$V_b = I_b mZ_{le} - I_c mZ_{le} - I_b mZ_{bn} + I_c mZ_{lm} + V_c$$

$$V_b - V_c = (I_b - I_c) mZ_{le} - (I_b - I_c) mZ_{bn}$$

$$\frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = mZ_1$$

- Αν τα σήματα του ηλεκτρονόμου είναι

$$V_{rbc} = V_b - V_c \quad \text{και} \quad I_{rbc} = I_b - I_c,$$

Ο φασικός ηλεκτρονόμος θα αποκρίνεται στη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής.



Μη αντιμετατιθέμενοι αγωγοί

- Σε αυτήν την περίπτωση η τάση V_a στη θέση του ηλεκτρονόμου για ένα βραχυκύκλωμα της φάσης α με τη γη, σε μία απόσταση m από τη θέση του ηλεκτρονόμου δίνεται από τη σχέση:

$$V_a = I_a mZ_{laa} + I_b mZ_{lab} + I_c mZ_{lac}$$

$$V_a = mZ_{laa} \left(I_a + I_b \frac{Z_{lab}}{Z_{laa}} + I_c \frac{Z_{lac}}{Z_{laa}} \right)$$

- Με τη χρησιμοποίηση της **αρχής των υγιών φάσεων** το σήμα αντιστάθμισης I_{ra} είναι τώρα:

$$I_{ra} = I_a + I_b \frac{Z_{lab}}{Z_{laa}} + I_c \frac{Z_{lac}}{Z_{laa}}$$

οπότε ο ηλεκτρονόμος μετρά μια σύνθετη αντίσταση:

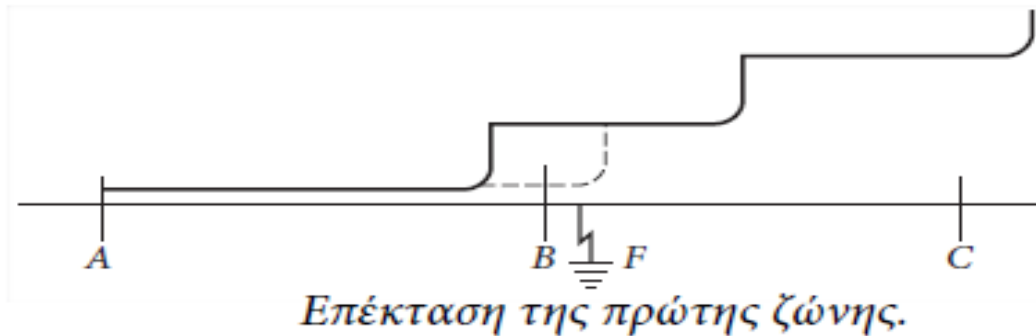
$$Z_{ra} = mZ_{laa}$$

- Στην περίπτωση γραμμής διπλού κυκλώματος μια επιπλέον πηγή σφάλματος είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των παράλληλων κυκλωμάτων.



Επέκταση της πρώτης ζώνης σε ειδικές περιπτώσεις

- Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούμε διακόπτες με αυτόματη επανασύνδεση της γραμμής μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος, ο ηλεκτρονόμος απόστασης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε η πρώτη ζώνη του να καλύπτει το 105-110% της γραμμής αντί του 80%.



- Σε αυτήν την περίπτωση, όταν ανοίγει ο διακόπτης A, μέσω ενός βοηθητικού διακόπτη λειτουργεί ένας ηλεκτρονόμος, που ρυθμίζει τη ζώνη 1 από το 110% στο 90% της γραμμής AB.
- Με αυτόν τον τρόπο έχουμε στιγμιαία εκκαθάριση όλων των βραχυκυκλωμάτων στη γραμμή που προστατεύεται, με αντιστάθμιση μία πολύ σπάνια επιπλέον ενεργοποίηση ενός διακόπτη και επανασύνδεση. 23

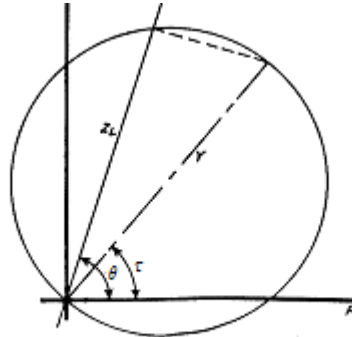


Ρύθμιση της πρώτης και της δεύτερης ζώνης(1)

- Η τιμή του ρυθμιστή της πρώτης ζώνης είναι: $0.9 \frac{Z_1 n_i}{n_p}$, όπου Z_1 είναι το μέτρο της αντίστασης θετικής ακολουθίας της γραμμής που προστατεύεται, n_i είναι ο λόγος του μετασχηματιστή ρεύματος, n_p είναι ο λόγος του μετασχηματιστή τάσης και 0.9 είναι το ποσοστό της γραμμής που προστατεύεται με την υπόθεση ότι έχουμε έναν σύγχρονο ηλεκτρονόμο με ακρίβεια $\pm 5\%$.
- Για ηλεκτρονόμο μιγαδικής αντίστασης χρησιμοποιείται η μιγαδική αντίσταση της γραμμής X_1 αντί του Z_1 .
- Όταν χρησιμοποιείται σύνθετης αγωγιμότητας ηλεκτρονόμος με χαρακτηριστική γωνία (ή γωνία μέγιστης ροπής) τ διαφορετική από τη φασική γωνία ϑ της γραμμής $\vartheta = \tan^{-1}\left(\frac{X_1}{R_1}\right)$ η τιμή ρύθμισης πρέπει να αυξάνει με τη διαίρεσή της με το $\cos(\vartheta - \tau)$.



Ρύθμιση της πρώτης και της δεύτερης ζώνης(2)



Σχ. 5.8 Διόρθωση της τιμής ρύθμισης τμho ηλεκτρονόμου $Z_r = Z_L / \cos(\theta - \tau)$.

Διόρθωση της τιμής ρύθμισης τμho ηλεκτρονόμου $Z_r = Z_L / \cos(\theta - \tau)$.

- Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχουν συγκεκριμένη φασική γωνία και για βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων έχουν προσεγγιστικά τις φασικές γωνίες του Πίνακα.

KV:	11	33	132	275	400
50 Hz:	45°	55°	70°	75°	81°
60 Hz:	50°	60°	72°	76°	82°

- Για βραχυκυκλώματα όμως με γη η φασική γωνία εξαρτάται από την κατάσταση του εδάφους. Για καλώδια η κατάσταση είναι πιο πολύπλοκη γιατί η φασική γωνία τους ϑ εξαρτάται από τη διαίρεση του ρεύματος που επιστρέφει μέσω του καλύμματος και μέσω της γης. Μία μέση τιμή είναι 30°.



Ρύθμιση της πρώτης και της δεύτερης ζώνης(3)

- Με την υπόθεση ότι το Z_1 έχει ρυθμιστεί σωστά, η ακρίβεια του ηλεκτρονόμου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή ρεύματος και τάσης.
- Γι' αυτό η τελική τιμή του ρυθμιστή βρίσκεται από την τιμή του Z_1 πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή:

$$\frac{R_\rho \cos(\theta - \tau + \theta_\rho + \theta_c)}{R_c \cos(\theta - \tau)}, \text{ όπου:}$$

- R_ρ : ο συντελεστή διόρθωσης του λόγου του μετασχηματιστή τάσης.
- R_c : ο συντελεστή διόρθωσης του λόγου του μετασχηματιστή ρεύματος.
- θ : η φασική γωνία ισχύος της γραμμής μεταφοράς.
- τ : η χαρακτηριστική ή γωνία μέγιστης ροπής του ηλεκτρονόμου.
- θ_ρ : το σφάλμα φασικής γωνίας του μετασχηματιστή τάσης (θετική αν προπορεύεται).
- θ_c : το σφάλμα φασικής γωνίας του μετασχηματιστή ρεύματος (θετική αν προπορεύεται).



Ρύθμιση της πρώτης και της δεύτερης ζώνης(3)

- Η δεύτερη ζώνη δεν πρέπει να καλύπτει περισσότερο από 75% της επόμενης γραμμής.
- Αν η επόμενη γραμμή τροφοδοτείται με ένα επιπλέον ρεύμα I_F στο ζυγό της, αυτό ελαττώνει την επέκταση της δεύτερης ζώνης, γιατί αυτό το επιπλέον ρεύμα δεν περιλαμβάνεται στο ρεύμα I_{ra} του ηλεκτρονόμου και η επιπλέον πτώση τάσης θα αυξήσει την αντίσταση που βλέπει ο ηλεκτρονόμος.
- Αυτό το φαινόμενο δεν δημιουργεί πολύ σοβαρά προβλήματα , γιατί όσο μεγάλο να είναι το ρεύμα I_F , δεν περιορίζει ποτέ τη δεύτερη ζώνη τόσο πολύ ώστε να μην καλύπτει τον επόμενο ζυγό, που είναι και το κύριο καθήκον της.



Παράδειγμα 6.2(1)

- Μία γραμμή **132 KV** έχει δύο τμήματα, **AB** μήκους **60Km** και **BC** μήκους **40 Km** και $Z_1 = 0.77 \angle 70^\circ \Omega/\text{φάση-Km}$. Τα **MVA** τριφασικού βραχυκυκλώματος στο **A** είναι **1500 MVA**, ο λόγος μετασχηματισμού τάσης είναι **132000/110 V**, ο λόγος μετασχηματισμού ρεύματος είναι **600/1 A** και η χαρακτηριστική γωνία ηλεκτρονόμου (ή γωνία μέγιστης ροπής) είναι **60°**. Υπολογίστε την τιμή της αντίστασης που πρέπει να τοποθετήσουμε σε ένα φασικό **mho** ηλεκτρονόμο στο **A**, ώστε η πρώτη του ζώνη να προστατεύει το **80%** του τμήματος **AB**, για τριφασικό βραχυκύκλωμα (η τιμή αντίστασης που τοποθετούμε ισούται με τη διάμετρο του κύκλου των χαρακτηριστικών του).



Λύση(1)

- Γνωρίζουμε ότι: $|SCC| = \sqrt{3} |V_{\pi\beta}| |I_{\mu\beta}|$ **MVA**, όπου:
 $|V_{\pi\beta}|$: η πολική τάση ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα σε KV.
 $|I_{\mu\beta}|$: το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε KA.
- Άρα μπορούμε να αντικαταστήσουμε το ηλεκτρικό σύστημα πίσω από το ζυγό **A** με το ισοδύναμο **Thevenin** για μία φάση που έχει:

μία πηγή φασικής τάσης $V_s = \frac{132}{\sqrt{3}} \text{KV} = 76.21 \text{KV}$.

και αντίσταση $Z_s = \frac{V}{I} = j \frac{76.21}{1500 / (132\sqrt{3})} \Omega / \Phi\alpha\sigma\eta = j11.62 \Omega / \Phi\alpha\sigma\eta$.



Λύση(2)

- Η αντίσταση της γραμμής μέχρι το σημείο που πρέπει να επεκτείνετε η πρώτη ζώνη του ηλεκτρονόμου είναι:

$$\begin{aligned} Z_f &= 0.8 * 0.7 \angle 70^\circ * 60 \Omega / \Phi_{αση} = 33.76 \angle 70^\circ \Omega / \Phi_{αση} \\ &= 11.48 + j31.6 \Omega / \Phi_{αση}. \end{aligned}$$

- Συνεπώς η συνολική αντίσταση που περιορίζει το ρεύμα για ένα βραχυκύκλωμα στο τέλος της πρώτης ζώνης είναι:

$$\begin{aligned} Z_t &= Z_s + Z_f = j 11.62 + 11.48 + j31.6 = 11.48 + j43.22 = \\ &= 44.6 \angle 71.18^\circ \Omega / \Phi_{αση}. \end{aligned}$$



Λύση(3)

- Άρα το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_f = \frac{76.21}{44.6} \text{ KA} = 1.7087 \text{ KA}$$

- Γι' αυτό το βραχυκύκλωμα η φασική τάση που μετράει ο ηλεκτρονόμος είναι:

$$V_f = 1.7087 * 33.6 \text{ KV} = 57.412 \text{ KV}$$

- Λόγω των μετασχηματιστών ρεύματος και τάσης ο ηλεκτρονόμος δέχεται τις ακόλουθες τιμές:

- Ρεύμα $I_R = \frac{1708.7}{600} \text{ A} = 2.848 \text{ A}$

- Φασική τάση $V_R = \frac{57412}{\frac{132000}{110}} \text{ V} = 47.843 \text{ V}$

- Άρα ο ηλεκτρονόμος θα μετράει μία αντίσταση:

$$Z_R = \frac{47.843}{2.848} \Omega = 16.8 \Omega$$

- Η τιμή αυτή προκύπτει πολύ εύκολα αν αξιοποιήσουμε την παρατήρηση:

$$Z_R = Z_f \frac{n_i}{n_p} = 33.6 \frac{600/1}{132000/110} = 16.8 \Omega$$



Λύση(4)

- Όμως επειδή η γωνία μέγιστης ροπής του ηλεκτρονόμου είναι 60° και η φασική γωνία της γραμμής είναι 70° , η τιμή της αντίστασης που πρέπει να τοποθετήσουμε γίνεται:

$$Z_{RS} = \frac{16.8}{\cos(70^\circ - 60^\circ)} \Omega = 17 \Omega.$$

- Τυπικές τιμές που διαθέτουμε για αυτούς τους ηλεκτρονόμους είναι από 3 μέχρι 20 Ω .



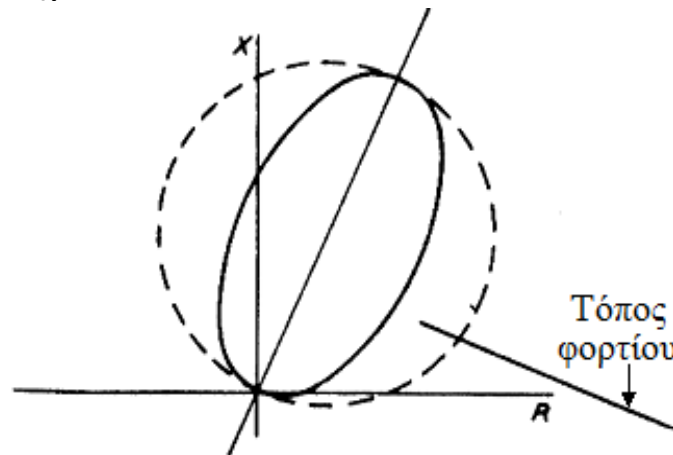
Ρύθμιση της τρίτης ζώνης (1)

- Η τρίτη ζώνη χρησιμοποιείται για προστασία υποστήριξης και ενώ η πρώτη και δεύτερη ζώνη σκοπό έχουν να διατηρήσουν τη συνέχεια της τροφοδοσίας, η τρίτη ζώνη είναι για να εμποδίζει την καταστροφή των συσκευών και για την προστασία του προσωπικού.
- Η τρίτη ζώνη ρυθμίζεται να υπερκαλύπτει τη γειτονική γραμμή.
- Προσέχουμε να μην έχουμε μικρότερη επέκταση, γιατί τότε έχουμε ανεπαρκή προστασία υποστήριξης, ενώ στην πρώτη και δεύτερη ζώνη προσέχουμε να μην έχουμε υπερέκταση, γιατί τότε διαταράσσεται η επιλεκτικότητα.
- Ενώ η πρώτη και δεύτερη ζώνη ρυθμίζονται χρησιμοποιώντας την πραγματική σύνθετη αντίσταση της γραμμής και αγνοώντας τα επιπλέον I_F ρεύματα, που πιθανόν να τροφοδοτούν τον επόμενο ζυγό, για τη ρύθμιση της τρίτης ζώνης λαμβάνουμε υπόψη το μέγιστο I_F .



Ρύθμιση της τρίτης ζώνης (2)

- Η τρίτη ζώνη ρυθμίζεται τουλάχιστον με την τιμή $Z_1 + WZ_1' \Omega$, όπου Z_1 είναι η τιμή της σύνθετης αντίστασης της γραμμής που προστατεύεται, Z_1' είναι η σύνθετη αντίσταση της επόμενης γραμμής και W είναι η μέγιστη τιμή του λόγου $\frac{(I_{ra} + I_F)}{I_{ra}}$, που είναι ο λόγος του ολικού ρεύματος της επόμενης γραμμής προς το ρεύμα της γραμμής που προστατεύεται.
- Μερικές φορές η μεγάλη αυτή τιμή ρύθμισης της τρίτης ζώνης ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο, όταν έχουμε συνθήκες υπερφόρτισης. Η δυσκολία αυτή αντιμετωπίζεται: (α) Με τη χρησιμοποίηση ενός ηλεκτρονόμου που ελέγχει το ρυθμό αύξησης του ρεύματος. (β) Με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονόμων με ελλειπτικά $R-X$ χαρακτηριστικά:



Ελλειπτικά χαρακτηριστικά για την τρίτη ζώνη, ώστε να αποφεύγεται η ενεργοποίηση σε συνθήκες υπερφόρτισης.



Ρύθμιση της τρίτης ζώνης (3)

- Όταν είναι αδύνατο να αποφύγουμε την ενεργοποίηση της τρίτης ζώνης σε συνθήκες υπερφόρτισης, μερικοί ευρωπαϊκοί ηλεκτρονόμοι έχουν δύο επιπλέον χρονικά βήματα με πολύ μεγάλη χρονική καθυστέρηση, ένα υπερέντασης χωρίς ιδιότητες κατεύθυνσης και ένα τελικό βήμα που ελέγχεται από μία μονάδα κατεύθυνσης.



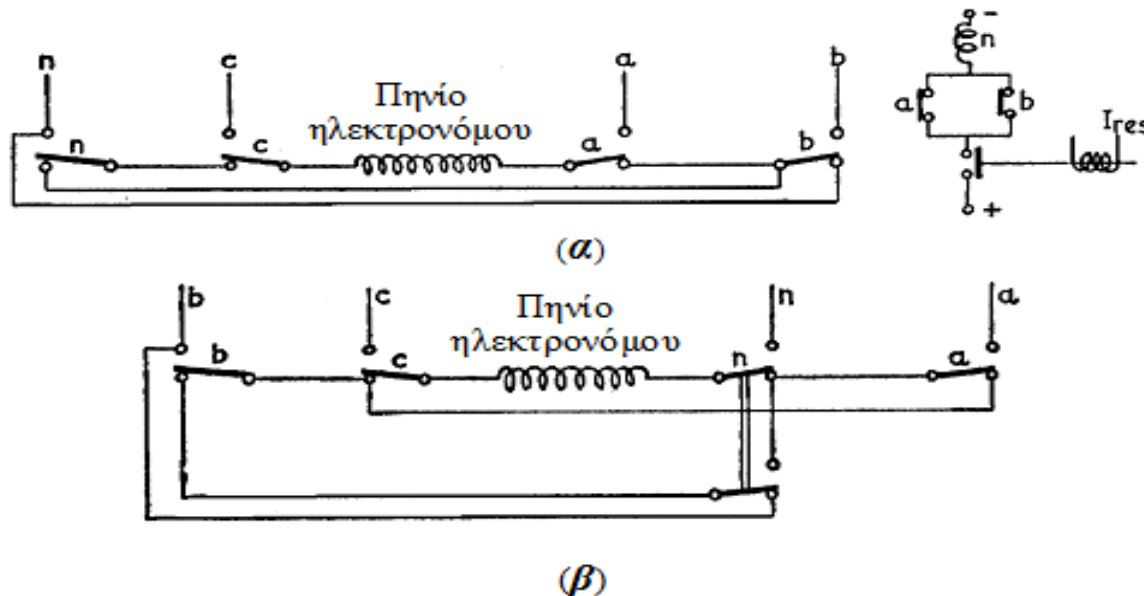
Πλήρες σύστημα μονάδας προστασίας(1)

- Ενώ μέχρι τώρα θεωρούσαμε τον ηλεκτρονόμο απόστασης σαν στοιχείο μιας μόνο φάσης, για να είναι δυνατή η προστασία από κάθε τύπο σφάλματος απαιτείται ένα πλήρες τερματικό σύστημα.
- Μία προφανή λύση είναι να χρησιμοποιηθεί μία ανεξάρτητη μονάδα μέτρησης για κάθε διαφορετικό τύπο σφάλματος και ξεχωριστές ζώνες προστασίας.
- Σε αυτήν την περίπτωση για να καλυφθούν οι δέκα δυνατοί τύποι σφαλμάτων απαιτούνται δέκα οκτώ μετρητικές μονάδες και τέσσερις μονάδες ανακάλυψης του τύπου σφάλματος.
- Ο αριθμός των μονάδων μέτρησης αντίστασης ελαττώνεται στο ένα τρίτο με τη χρησιμοποίηση της ίδιας μονάδας και στις τρεις ζώνες. Αυτό γίνεται με τη χρησιμοποίηση μιας χρονικής μονάδας, που προοδευτικά αυξάνει την επέκταση της μετρητικής μονάδας κατά βήματα.



Πλήρες σύστημα μονάδας προστασίας(2)

- Ο αριθμός των μετρητικών μονάδων μερικές φορές ελαττώνεται ακόμα περισσότερο με τη χρησιμοποίηση των ίδιων μονάδων για φασικά βραχυκυκλώματα και για βραχυκυκλώματα με τη γη.
- Στην Ευρώπη από το 1930 χρησιμοποιήθηκε μία μόνο μετρητική μονάδα για όλα τα βραχυκυκλώματα. Σε αυτόν τον τύπο προστασίας επιλέγονται για κάθε είδος βραχυκυκλώματος η κατάλληλη τάση και το ρεύμα.



Ένας ηλεκτρονόμος απόστασης για όλα τα βραχυκυκλώματα.

(α) Βασικό κύκλωμα διακοπών. (β) Τυπικό Ευρωπαϊκό κύκλωμα.



Πλήρες σύστημα μονάδας προστασίας(3)

- Τα μειονεκτήματα του είναι :
- (α) Χρόνος ενεργοποίησης 0.1 s, ενώ χωρίς διακόπτες ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου είναι 0.02 s.
- (β) Πλήρη έλλειψη προστασίας όταν η μόνη μετρητική μονάδα ή κάποια από τις επαφές δεν λειτουργήσει.
- (γ) Πιθανή λανθασμένη λειτουργία, όταν ο τύπος του βραχυκυκλώματος αλλάξει κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ηλεκτρονόμου (λόγω του ανέμου ή του τόξου στο βραχυκύκλωμα).
- (δ) Ανακρίβεια λόγω των διαφορετικών συνθέτων αντιστάσεων των φάσεων.
- Για γραμμές διανομής, ένας διακοπτικός ηλεκτρονόμος απόστασης μιας μετρητικής μονάδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντικατάσταση των ηλεκτρονόμων υπέρεντασης, όταν απαιτείται μεγάλη ταχύτητα.



Βιβλιογραφία

- Όλα τα σχήματα, οι εικόνες και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την ενότητα είναι από το βιβλίο «Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Α. Βοβός, Εκδόσεις Ζήτη.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.

