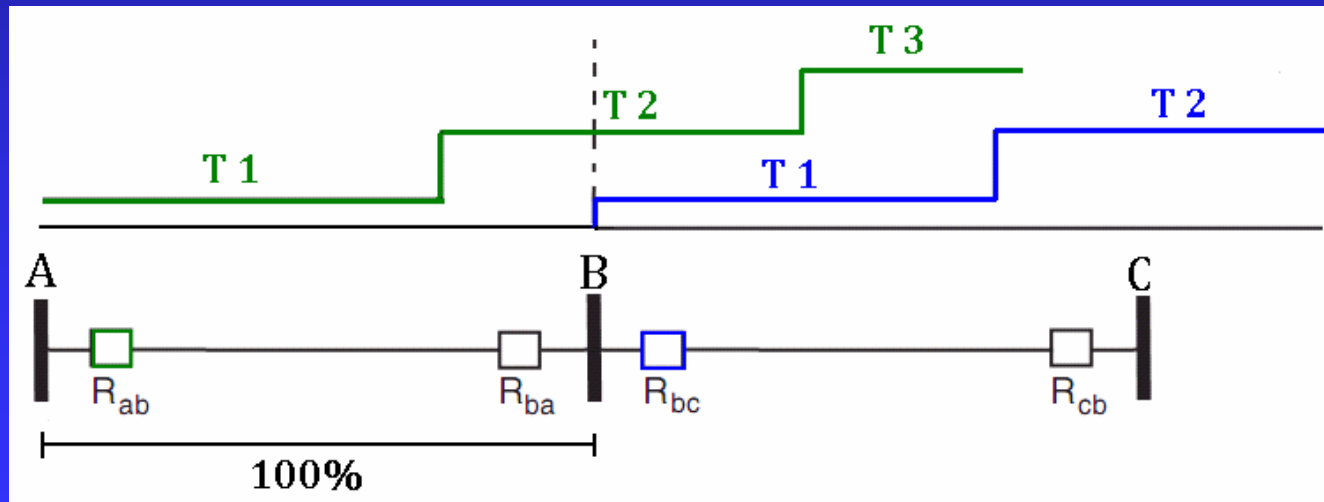


ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΗΕ

Ενότητα 4

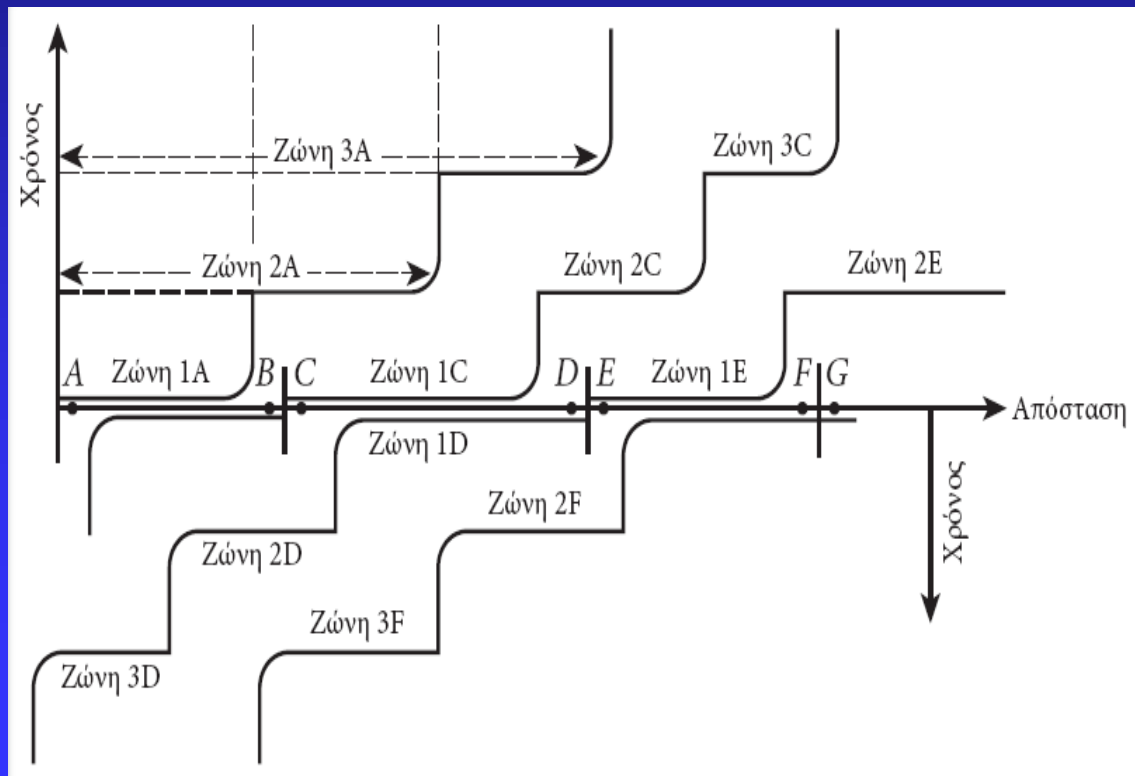
Προστασία γραμμών με ηλεκτρονόμους απόστασης



Εισαγωγή - μέτρηση απόστασης

- Η τάση που μετράει ένας ηλεκτρονόμος που βρίσκεται στο ένα άκρο της γραμμής, όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα στο άλλο άκρο της γραμμής με σύνθετη αντίσταση Z_L , είναι η πτώση τάσης της γραμμής $I \cdot Z_L$.
- Για ένα βραχυκύκλωμα μέσα στο τμήμα της γραμμής που προστατεύεται $V/I < Z_L$, ενώ για ένα βραχυκύκλωμα πέρα από αυτό το τμήμα $V/I > Z_L$.
- 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*.

- 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 ανακριβειών 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.

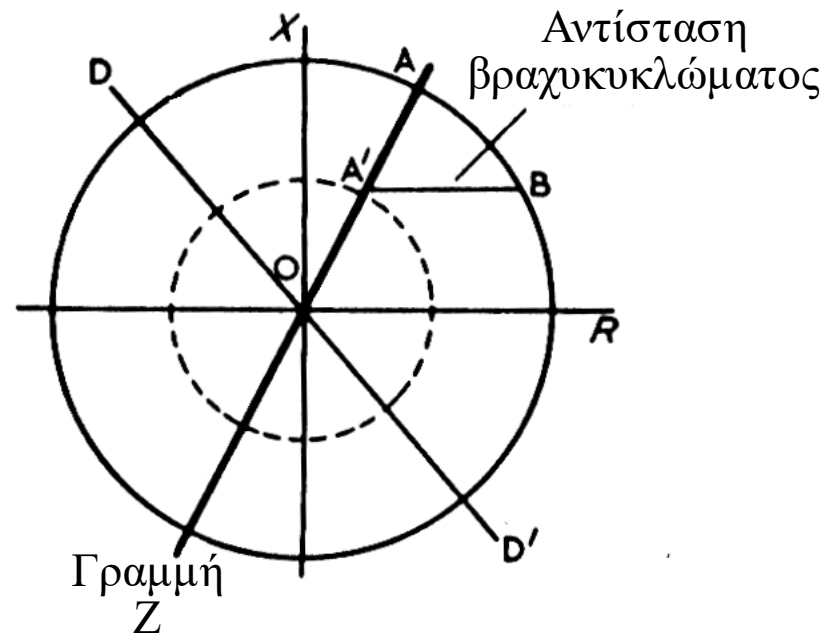
- Η πρώτη ζώνη παρέχει μεγάλης ταχύτητας προστασία (~ 0.02 s) για ένα τμήμα της γραμμής
- Συνήθως εκτείνεται στο 85-90% της γραμμής για φασικούς ηλεκτρονόμους και στο $\sim 75\%$ για ηλεκτρονόμους γης.
- Η δεύτερη ζώνη υπερκαλύπτει το σύνολο της γραμμής, έχει μία χρονική καθυστέρηση σε σχέση με την πρώτη ζώνη (~ 0.35 s) και εκτείνεται τουλάχιστον 20% μέσα στην επόμενη γραμμή.
- 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 δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στη διατήρηση της ευστάθειας των ΣΗΕ.

Προβλήματα στη μέτρηση απόστασης

- 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.
- Πρέπει να αγνοεί:
 - ◆ την αντίσταση βραχυκυκλώματος και ...
 - ◆ τις μεταβατικές συνθήκες, που δημιουργούν πρόσκαιρες, ανακριβείς τιμές του I και V .

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.

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

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

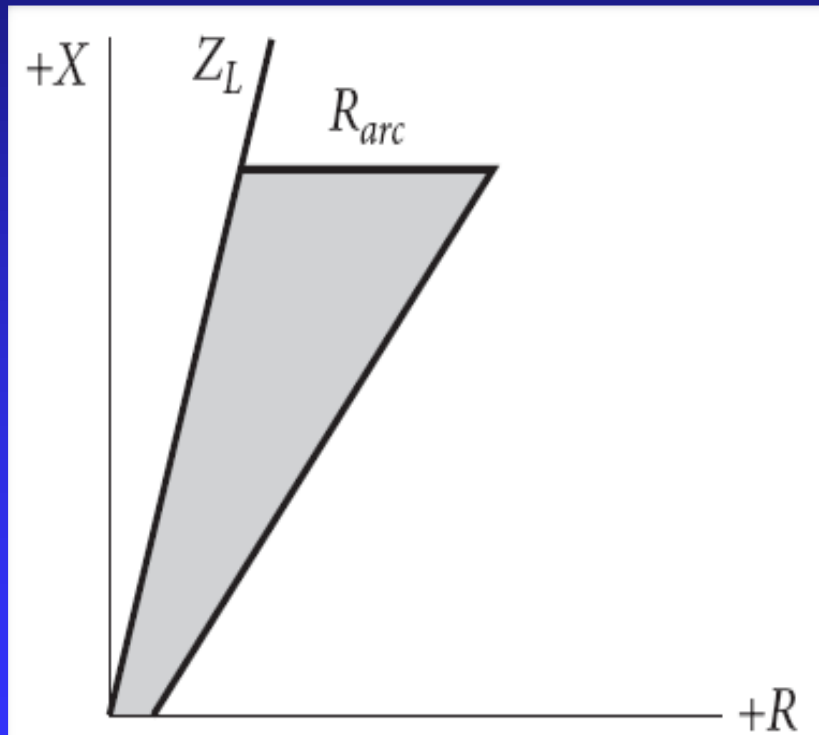
όπου l είναι το μήκος του τόξου σε πόδια και I είναι το ρεύμα του βραχυκυκλώματος.

- 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 αγωγών και u είναι η ταχύτητα του ανέμου σε μίλια/ώρα και t η διάρκεια του τόξου σε δευτερόλεπτα.

- 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 απομακρύνεται από τη θέση του ηλεκτρονόμου στο άλλο άκρο της γραμμής, αλλά έχει τη μορφή του σχήματος:



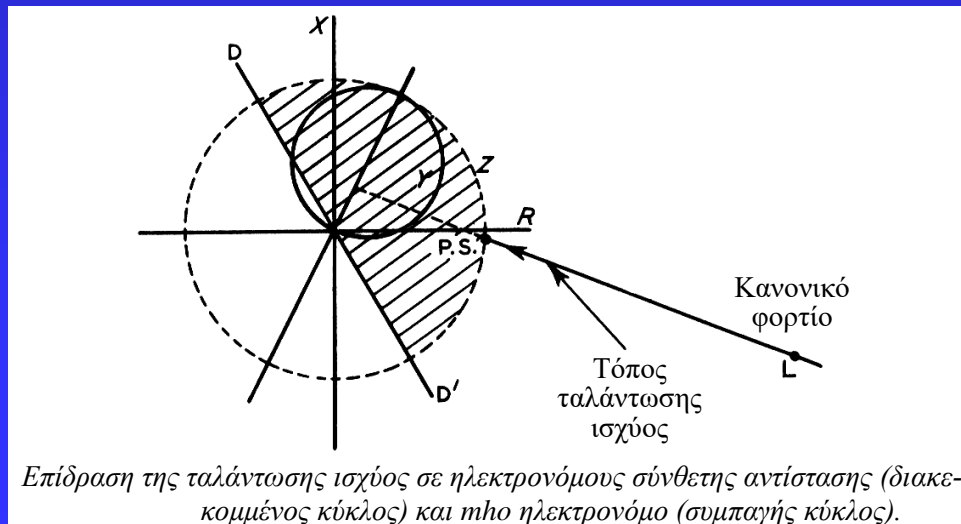
Τροποποίηση της αντίστασης που μετράει ο ηλεκτρονόμος λόγω της αντίστασης τόξου.

β) Κατεύθυνση

- Οι ηλεκτρονόμοι απόστασης αναλόγως του τύπου τους ή διαθέτουν ξεχωριστή μονάδα κατεύθυνσης ή η ιδιότητα της κατεύθυνσης ενυπάρχει σε αυτούς (ηλεκτρονόμος mho).
- Επειδή η ροπή λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης δίνεται από τη σχέση $V\cos(\theta-\tau)$, 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) ανεξάρτητη πηγή, β) δράση μνήμης (βλ. ενότητα 3 & βιβλίο §3.6), γ) πόλωση, με δυναμικό από μία μη βραχυκυκλωμένη φάση.

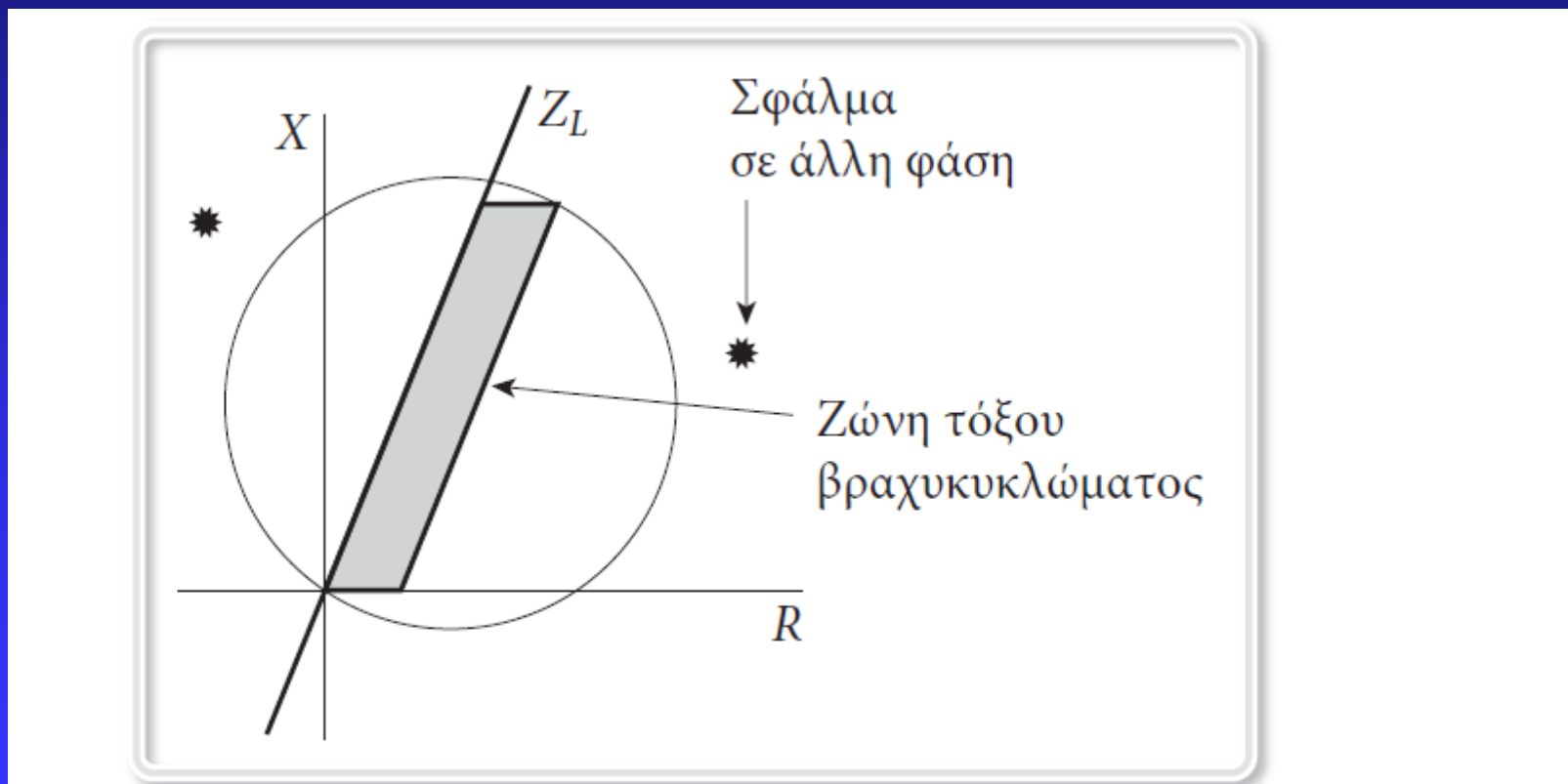
γ) Υπερφόρτωση και ταλάντωση ισχύος

- Όταν έχουμε κανονική φόρτιση (L) η σύνθετη αντίσταση που μετράει ο ηλεκτρονόμος είναι έξω από την περιοχή ενεργοποίησης του.
- Όμως σε γραμμές μεγάλου μήκους (μήκος της γραμμής σε μίλια $> kV$), τα χαρακτηριστικά της σύνθετης αντίστασης μπορεί να περιλαμβάνουν το σημείο L ή το L να μετακινηθεί εντός λόγω αύξησης του φορτίου η ταλάντωσης ισχύος.
- Για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι mho , που δεν επηρεάζονται από την υπερφόρτιση και την ταλάντωση ισχύος.



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

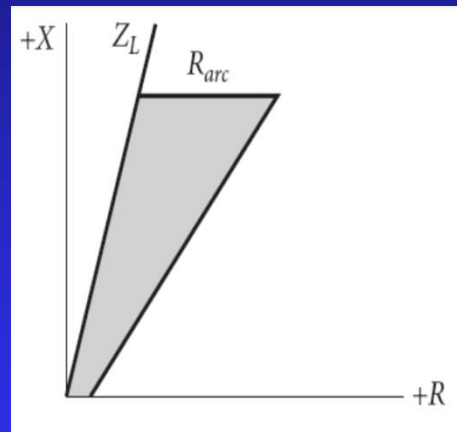
Άλλο πλεονέκτημα των ηλεκτρονόμων mho είναι ότι τα χαρακτηριστικά τους είναι τόσο στενά ταιριασμένα γύρω από την περιοχή βραχυκυκλώματος, ώστε δεν ενεργοποιούνται από βραχυκυκλώματα σε άλλες φάσεις.



Επίδραση αντίστασης τόξου και αντιστάσεις για σφάλματα σε άλλες φάσεις.

Απόσταση βραχυκ. και αντίσταση τόξου

Με το παράδειγμα αυτό θα διευκρινίσουμε ότι η αντίσταση τόξου του βραχυκυκλώματος, που έχει την ένταση του ρεύματος στον παρονομαστή, για γραμμές που η ροή ισχύος είναι από τη θέση του ηλεκτρονόμου προς το άλλο άκρο της γραμμής, έχει μικρές τιμές για βραχυκυκλώματα κοντά στον ηλεκτρονόμο απόστασης και μεγάλες τιμές για απομακρυσμένα βραχυκυκλώματα (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα).



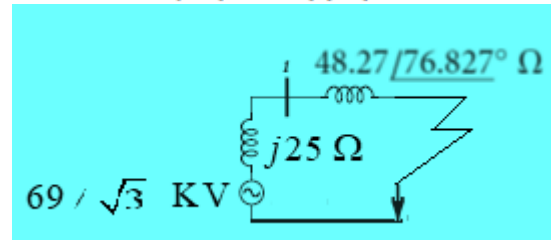
Θεωρούμε μία ακτινωτή γραμμή 69 KV, 40 Km με απόσταση αγωγών δέκα πόδια και συνολική συνθέτη αντίσταση $Z_l = 11 + j22 \Omega$. Αν η ισοδύναμη αντίσταση του δικτύου που τροφοδοτεί τη γραμμή είναι $Z_s = 0 + j25 \Omega$, να υπολογίσετε την αντίσταση τόξου για βραχυκυκλώματα στην αρχή και το τέλος της γραμμής.

Λύση:

69 KV, 40 Km, $l=10$, $Z_l = 11 + j22 \Omega$, $Z_s = 0 + j25 \Omega$

Για βραχυκύκλωμα στην αρχή της γραμμής το ρεύμα βραχυκυκλώματος περιορίζεται μόνο από την αντίσταση της ισοδύναμης πηγής και ισούται με:

$$I = \frac{69000}{\sqrt{3} \cdot 25} \text{ A} = 1593.48 \text{ A}$$



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

και
$$R_{arc} = \frac{8750 \cdot 10}{(1593.48)^{1.4}} \Omega = 2.868 \Omega$$

Για βραχυκύκλωμα στο τέλος της γραμμής η αντίσταση που περιορίζει το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι:

$$Z = Z_s + Z_l = 0 + j25 + 11 + j22 \Omega = 11 + j47 \Omega = 48.27 / 76.827^\circ \Omega$$

Άρα:
$$I = \frac{69000}{\sqrt{3} \cdot 48.27} \text{ A} = 825.298 \text{ A}$$

και
$$R_{arc} = \frac{8750 \cdot 10}{(825.298)^{1.4}} \Omega = 7.223 \Omega$$

Η αντίσταση τόξου για βραχυκύκλωμα στο τέλος της γραμμής είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη αυτής για βραχυκύκλωμα στην αρχή.

Παράμετροι σύνθετης αντίστασης γραμμών

- Πριν προχωρήσουμε στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης από τους ηλεκτρονόμους απόστασης θα δώσουμε τους βασικούς τύπους που δίνουν τις ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις γραμμών.

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

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

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

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

όπου Z_{le} είναι η σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα μήκους που οφείλεται στην αυτεπαγωγή των αγωγών, που περιλαμβάνει την επιστροφή μέσω γης και τροποποιημένη για να παίρνει υπόψη την απαλοιφή του αγωγού γης, και ...

Z_{lm} είναι η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα μήκους μεταξύ ζευγών των αγωγών με μία κοινή επιστροφή γης και τροποποιημένη έτσι ώστε να αντιστοιχεί στην απαλοιφή του αγωγού γης.

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

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

Για την πιο πάνω περίπτωση η σύνθετη 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:
 - ◆ Α) τροποποιεί τη σχέση μεταξύ των ακολουθιακών σύνθετων αντιστάσεων και των αυτεπαγωγών και
 - ◆ Β) δημιουργεί σύζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.

- Μία ενδεικτική συσχέτιση του μεγέθους των πιο πάνω αναφερθέντων συνθέτων αντιστάσεων για την περιοχή των 132-400 KV είναι :
 - ◆ Η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μεταξύ των φάσεων Z_{lm} είναι 30-45% της σύνθετης αντίστασης που οφείλεται στην αυτεπαγωγή Z_{le} , ενώ η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μεταξύ των παράλληλων κυκλωμάτων για γραμμές διπλού κυκλώματος είναι το 25-35% της Z_{le} .
 - ◆ Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας $Z_1 = Z_{le} - Z_{lm}$ είναι το 65-70% της σύνθετης αντίστασης που οφείλεται στην αυτεπαγωγή Z_{le} , ενώ η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας μεταξύ παράλληλων κυκλωμάτων Z_{m1} είναι το 5% της Z_{le} .
- Για σύγκριση, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας Z_0 είναι 1.7 φορές μεγαλύτερη από τη σύνθετη αντίσταση αυτεπαγωγής Z_{le} , ενώ η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας μεταξύ παράλληλων κυκλωμάτων Z_{m0} είναι το 90% της σύνθετης αντίστασης αυτεπαγωγής Z_{le} .

Αντιστάθμιση σημάτων ηλεκτρονόμων απόστασης για προστασία σφαλμάτων γης

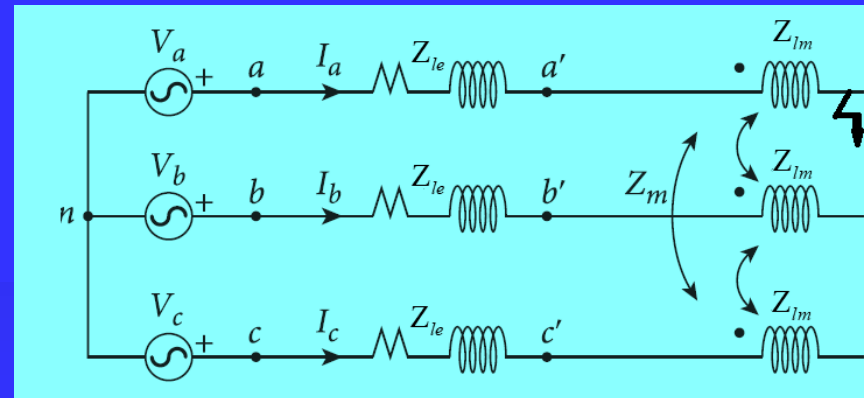
Για αντιμετατιθέμενες γραμμές η τάση της φάσης a στη θέση του ηλεκτρονόμου, για την περίπτωση ενός βραχυκυκλώματος γης αυτής της φάσης σε μία απόσταση m από τον ηλεκτρονόμο, δίνεται από τη σχέση:

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

Από αυτήν τη σχέση παρατηρούμε ότι η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης από τον ηλεκτρονόμο χρησιμοποιώντας απ' ευθείας 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:

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



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:

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

Με αυτόν τον τρόπο, αν ο ηλεκτρονόμος μετρά απ' ευθείας 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:

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

- 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 τη μορφή του αντισταθμισμένου σήματος γράφουμε την εξ. όπως πιο κάτω:

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

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

$$V_a = I_a m Z_1 + 3I_0 m Z_{lm}$$

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

Από την τελευταία εξ. το αντισταθμισμένο σήμα του ηλεκτρονόμου είναι:

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

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

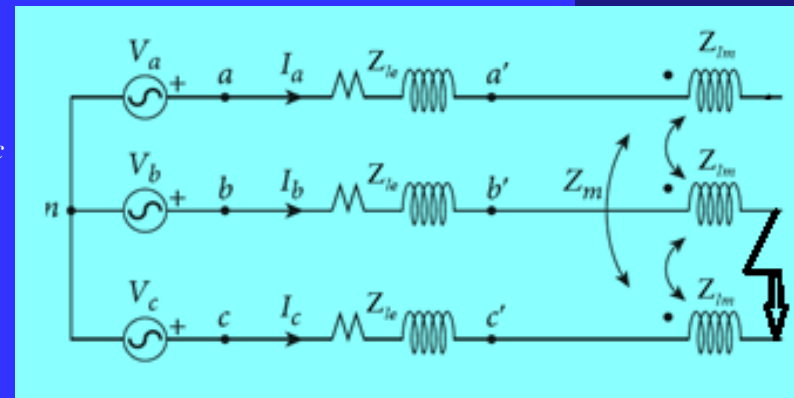
Σήματα αντιστάθμισης για φασικούς ηλεκτρονόμους

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:

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

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

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



Αν τα σήματα του ηλεκτρονόμου είναι $V_{rbc} = V_b - V_c$ και $I_{rbc} = I_b - I_c$, 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 a με τη γη, σε μία απόσταση m από τη θέση του ηλεκτρονόμου, δίνεται από τη σχέση:

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

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

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

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

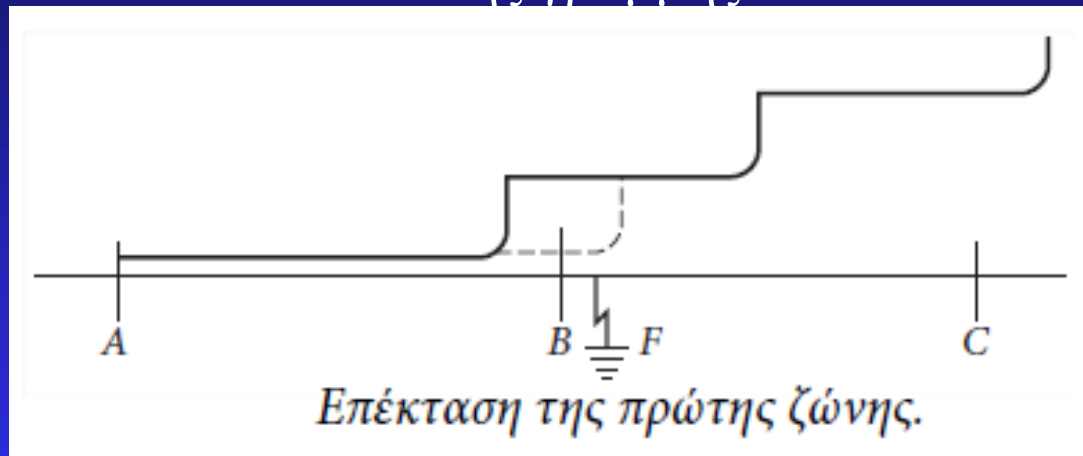
οπότε ο ηλεκτρονόμος μετράει μία σύνθετη αντίσταση:

$$Z_{ra} = m Z_{laa}$$

- Στην περίπτωση γραμμής διπλού κυκλώματος μία 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 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%.

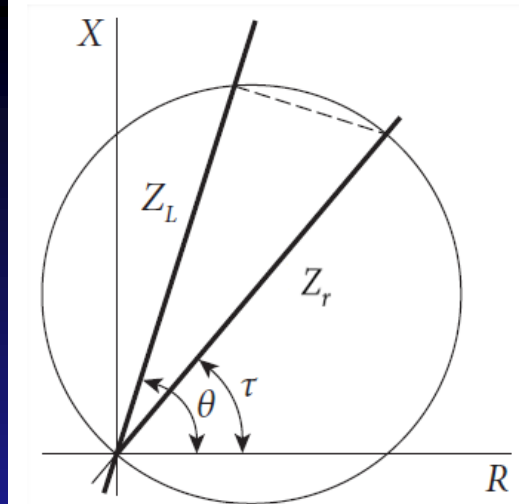


- Σε αυτήν την περίπτωση, όταν ανοίγει ο διακόπτης A, μέσω ενός βοηθητικού διακόπτη λειτουργεί ένας ηλεκτρονόμος, που ρυθμίζει τη ζώνη 1 από το 110% στο 90% της γραμμής AB.
- Με αυτόν τον τρόπο έχουμε στιγμιαία εκκαθάριση όλων των βραχυκυκλωμάτων στη γραμμή που προστατεύεται, με αντιστάθμιση μία πολύ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

Ρύθμιση πρώτης ζώνης

Η τιμή του ρυθμιστή της πρώτης ζώνης είναι $0.9 Z_1 n_i / n_p$, όπου Z_1 είναι το μέτρο της σύνθετης 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 ένα σύγχρονο ηλεκτρονόμο με ακρίβεια $\pm 5\%$.

- Για ηλεκτρονόμο μιγαδικής αντίστασης χρησιμοποιείται η μιγαδική αντίσταση (αντίδραση) της γραμμής X_1 αντί του Z_1 .
- Όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρονόμος σύνθετης αγωγιμότητας με γωνία μέγιστης ροπής τ διαφορετική από τη φασική γωνία θ της γραμμής ($\theta = \tan^{-1}(X_1/R_1)$), η τιμή ρύθμισης πρέπει να αυξάνει με τη διαίρεσή της με το $\cos(\theta - \tau)$.



Διόρθωση της τιμής ρύθμισης του 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 :

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 °.

Με την υπόθεση ότι το Z_1 έχει υπολογιστεί 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:

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

όπου: R_ρ = ο συντελεστής διόρθωσης του λόγου του μετασχηματιστή τάσης.

R_c = ο συντελεστής διόρθωσης του λόγου του μετασχηματιστή ρεύματος.

θ = η φασική γωνία της γραμμής μεταφοράς ισχύος.

τ = η χαρακτηριστική ή γωνία μέγιστης ροπής του ηλεκτρονόμου.

θ_ρ = σφάλμα φασικής γωνίας του μετασχηματιστή τάσης (θετική αν προπορεύεται).

θ_c = σφάλμα φασικής γωνίας του μετασχηματιστή ρεύματος (θετική αν προπορεύεται).

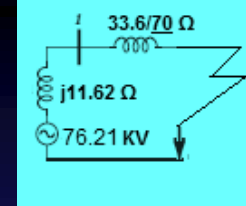
Ρύθμιση δεύτερης ζώνης

- Η δεύτερη ζώνη δεν πρέπει να καλύπτει περισσότερο από το 75% της επόμενης γραμμής.
- Αν η επόμενη γραμμή τροφοδοτείται με ένα επί πλέον ρεύμα I_F στο ζυγό της, αυτό ελαττώνει την επέκταση της δεύτερης ζώνης: το επιπλέον ρεύμα δεν περιλαμβάνεται στο ρεύμα I_{ra} του ηλεκτρονόμου και η επί πλέον 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

- Μία γραμμή 132 KV έχει δύο τμήματα, AB μήκους 60 Km και BC μήκους 40 Km και $Z_1=0.7/\underline{70^\circ}$ Ω/φάση-Km.
- Τα MVA τριφασικού βραχυκυκλώματος στο A είναι 1500 MVA, ο λόγος μ.τ. είναι 132000/110 V, ο λόγος μ.ρ. είναι 600/1 A και η γωνία μέγιστης ροπής ηλεκτρονόμου (ή χαρακτηριστική γωνία) 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.
- Σημείωση: η τιμή αντίστασης που τοποθετούμε ισούται με τη διάμετρο του κύκλου των χαρακτηριστικών του.

Λύση:



Γνωρίζουμε ότι: $|SCC| = \sqrt{3} |V_{\pi\beta}| |I_{\mu\beta}| \text{ MVA}$

όπου: $|V_{\pi\beta}|$ είναι η πολική τάση ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα σε KV.

$|I_{\mu\beta}|$ είναι 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 $Z_s = \frac{V}{I} = j \frac{76.21}{(1500/(\sqrt{3} \cdot 132))} \Omega / \text{φάση} = j11.62 \Omega / \text{φάση}$

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

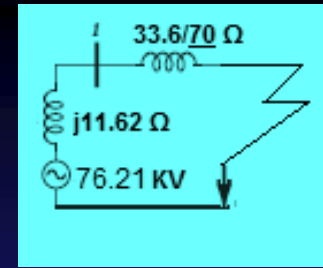
$Z_f = 0.8 \cdot 0.7 / \underline{70}^\circ \cdot 60 \Omega / \text{φάση} = 33.6 / \underline{70}^\circ \Omega / \text{φάση} = 11.48 + j31.6 \Omega / \text{φάση}$

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

$Z_t = Z_s + Z_f = j11.62 + 11.48 + j31.6 = 11.48 + j43.22 = 44.6 / \underline{71.18}^\circ \Omega / \varphi$ ²⁸

Άρα το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι:

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



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

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

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

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

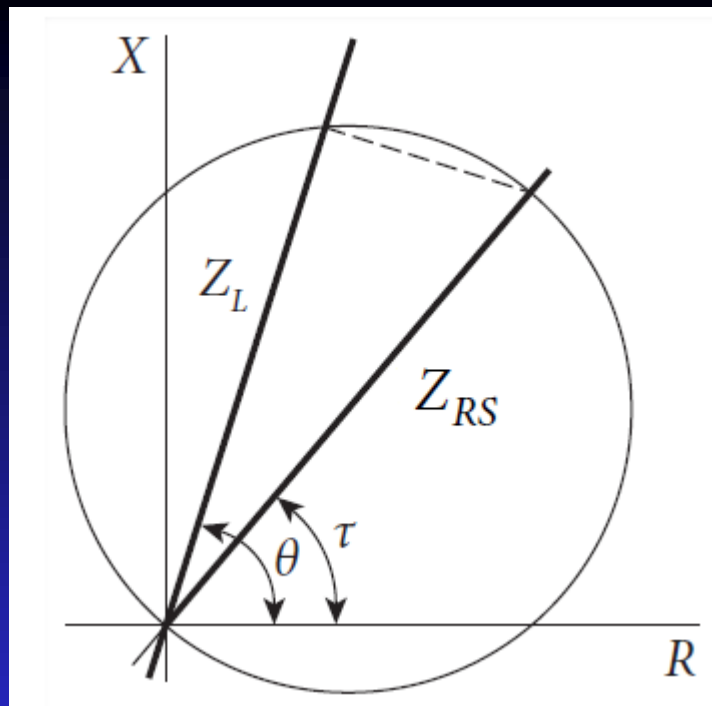
$$\text{Φασική τάση } V_R = 57412 / (132000 / 110) \text{ V} = 47.843 \text{ V}$$

Άρα ο ηλεκτρονόμος θα μετράει μία αντίστασή:

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

Η τιμή αυτή προκύπτει πολύ εύκολα αν αξιοποιήσουμε την παρατήρηση:

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



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

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

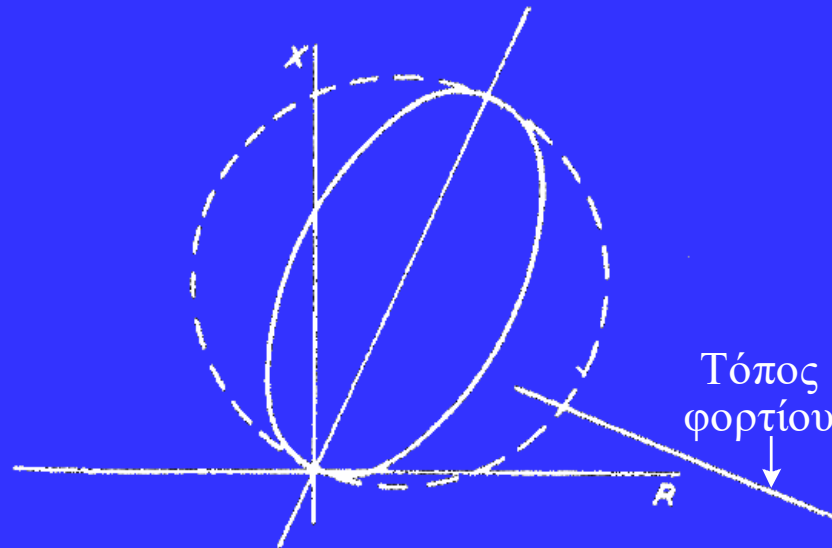
Τυπικές τιμές που διαθέτουμε για αυτούς τους ηλεκτρονόμους είναι από 3 μέχρι 20 Ω .

Ρύθμιση της τρίτης ζώνης

- Η τρίτη ζώνη χρησιμοποιείται για προστασία υποστήριξης:
 - ◆ 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 ρεύματα I_F , που πιθανόν να τροφοδοτούν τον επόμενο ζυγό, για τη ρύθμιση της τρίτης ζώνης λαμβάνουμε υπόψη το μέγιστο I_F .

Η τρίτη ζώνη ρυθμίζεται τουλάχιστον με την τιμή $Z_1 + WZ_1'$ Ω, 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 $(I_{ra} + I_F)/I_{ra}$, 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:



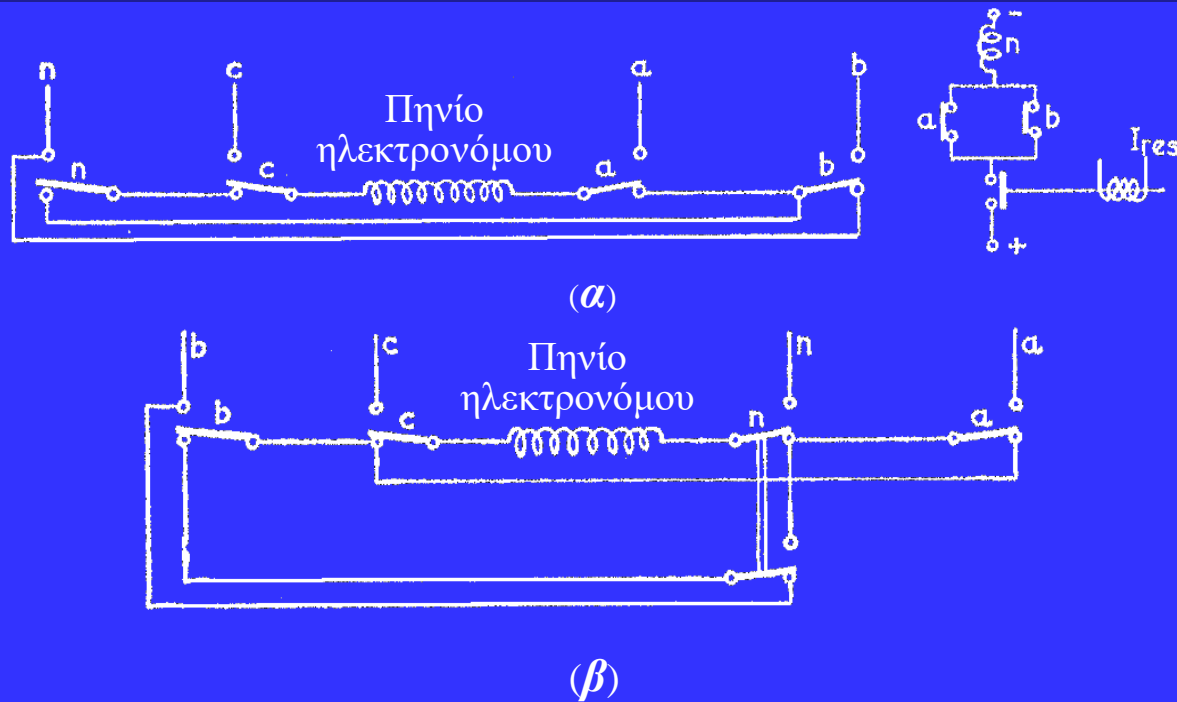
Ελλειπτικά χαρακτηριστικά για την τρίτη ζώνη, ώστε να αποφεύγεται η ενεργοποίηση σε συνθήκες υπερφόρτισης.

- 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 που ελέγχεται από μία μονάδα κατεύθυνσης.

Πλήρες σύστημα μονάδας προστασίας απόστασης

- 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.

- 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.

- 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 υπερέντασης, όταν απαιτείται μεγάλη ταχύτητα.