



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Προστασία Σ.Η.Ε

Ενότητα 3: Ηλεκτρονόμοι 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.



Εισαγωγή

- Στους ηλεκτρονόμους απόστασης αξιοποιείται ο λόγος μεταξύ μίας τάσης και ενός ρεύματος, που εκφράζει τη σύνθετη αντίσταση.
- Η σύνθετη αντίσταση είναι ένα ηλεκτρικό μέτρο της απόστασης κατά μήκος μίας γραμμής μεταφοράς και από αυτή την ιδιότητα πήραν το όνομά τους οι ηλεκτρονόμοι αυτού του τύπου.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(1)

- Σε ένα ηλεκτρονόμο σύνθετης αντίστασης η ροπή που παράγεται από ένα ρεύμα εξισορροπείται από μία τάση.
- Το ρεύμα παράγει θετική ροπή (ενεργοποίησης), ενώ η τάση αρνητική ροπή (επαναφοράς). Με άλλα λόγια ένας ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης είναι ένας ηλεκτρονόμος υπερέντασης με αναχαίτιση τάσης.
- Η εξίσωση ροπής του ηλεκτρονόμου είναι:
$$T = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_3$$
, όπου:
- I, V : η ενεργός τιμή του ρεύματος και της τάσης.
- K_3 : η ροπή στο ελατήριο.
- Στο σημείο ισορροπίας η συνισταμένη ροπή είναι μηδέν και έχουμε:
$$K_2 V^2 = K_1 I^2 - K_3$$
- Με τη διαίρεση και των δύο μελών με $K_2 I^2$ έχουμε:



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(2)

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}$$

ή

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}}$$

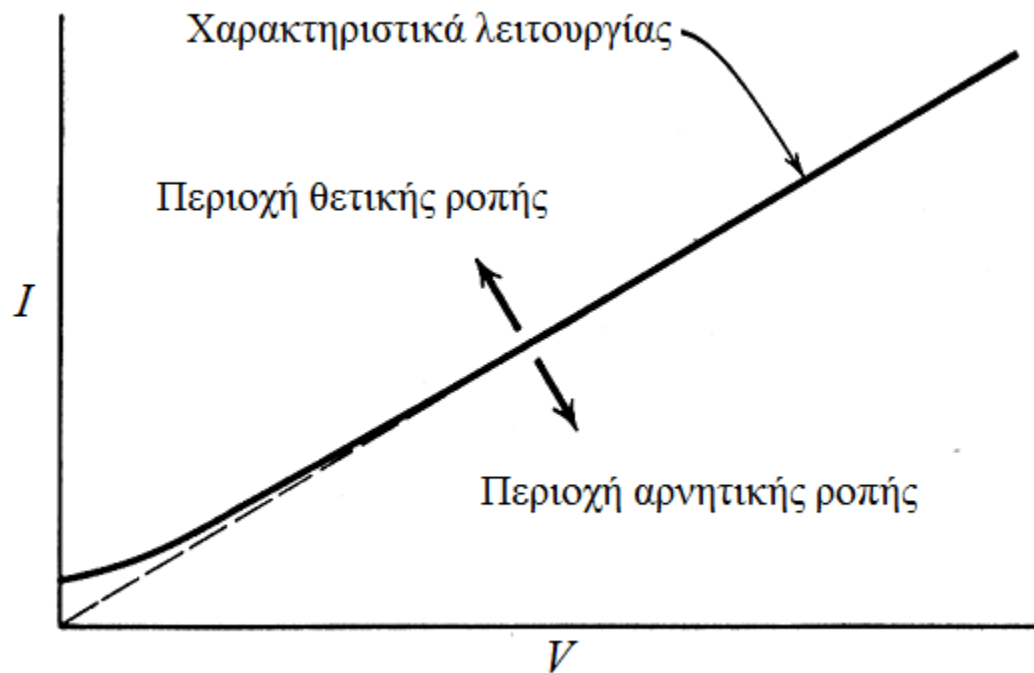
- Επειδή η επίδραση του ελατηρίου είναι αισθητή μόνο για μικρές τιμές του ρεύματος, που ποτέ σχεδόν δεν έχουμε, μπορούμε να θέσουμε $K_3 = 0$ και η εξίσωση γίνεται:

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = \text{σταθερά}$$



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(3)

- Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας σε ένα επίπεδο τάσης-ρεύματος φαίνονται στο Σχήμα.

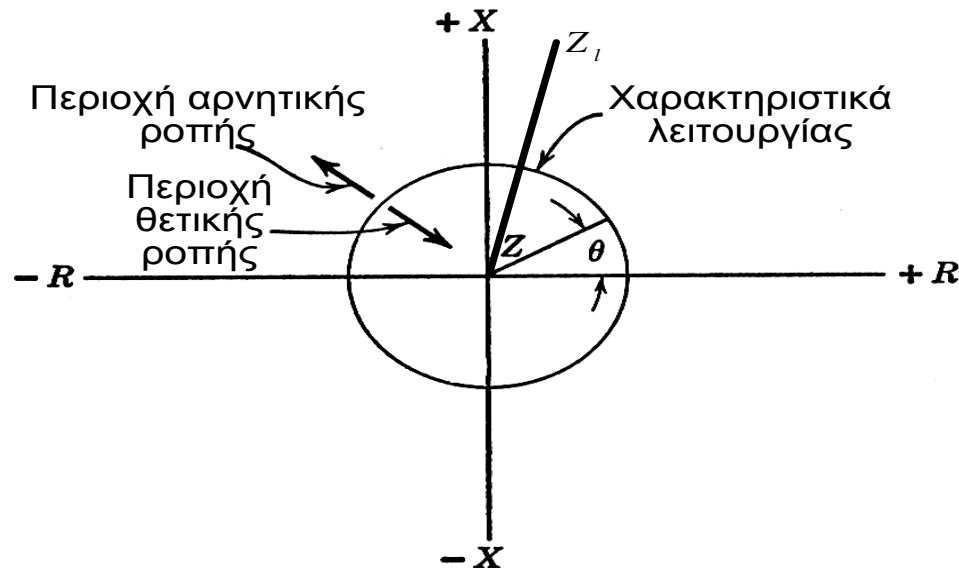


Σχ. 3 .1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(4)

- Ένας πιο χρήσιμος τρόπος για να παραστήσουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας είναι με τη χρήση του **διαγράμματος σύνθετης αντίστασης ή $R-X$ διάγραμμα.**

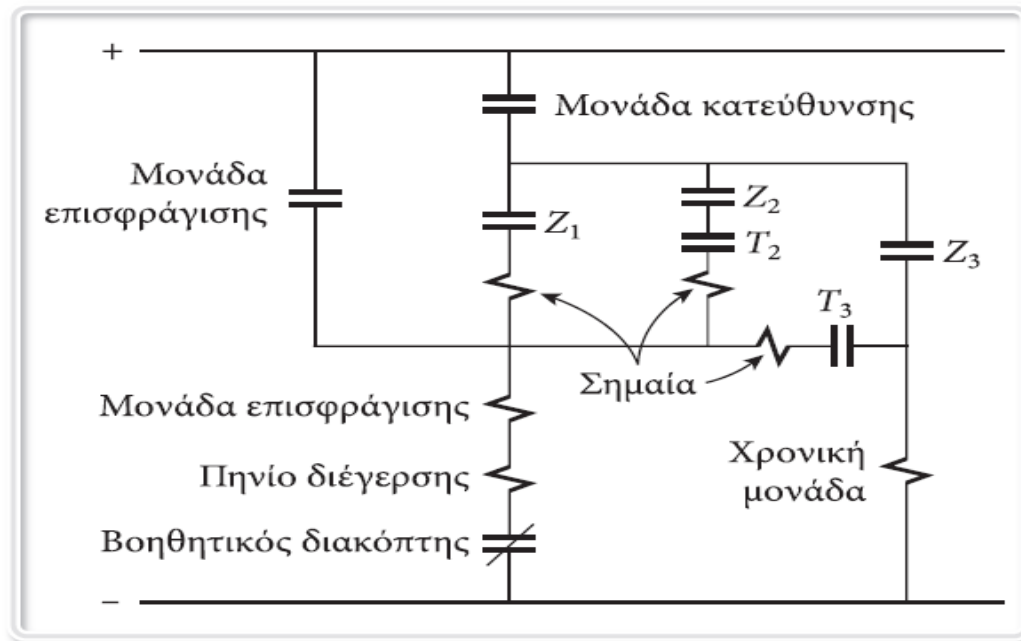


*Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης
στο $R - X$ διάγραμμα.*



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(5)

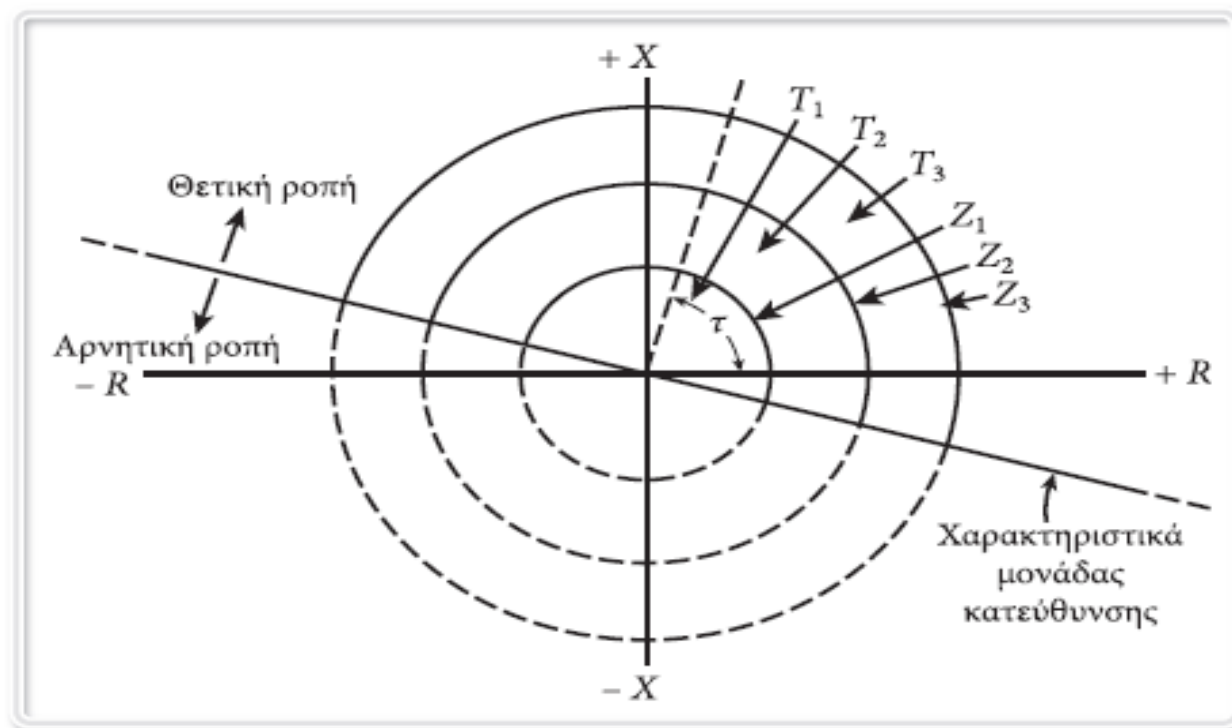
- Για την προστασία γραμμών μεταφοράς, ένας ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης για μία φάση αποτελείται από μία μονάδα κατεύθυνσης, τρεις μονάδες σύνθετης αντίστασης, μία μονάδα χρόνου, τις συνήθεις σημαίες, τη μονάδα επισφράγισης και άλλες βοηθητικές.



Σχηματική σύνδεση επαφών για ένα ηλεκτρονόμο απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης.

Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(6)

- Στο Σχήμα έχουμε μαζί με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας κατεύθυνσης, που είναι ως γνωστόν μία ευθεία.

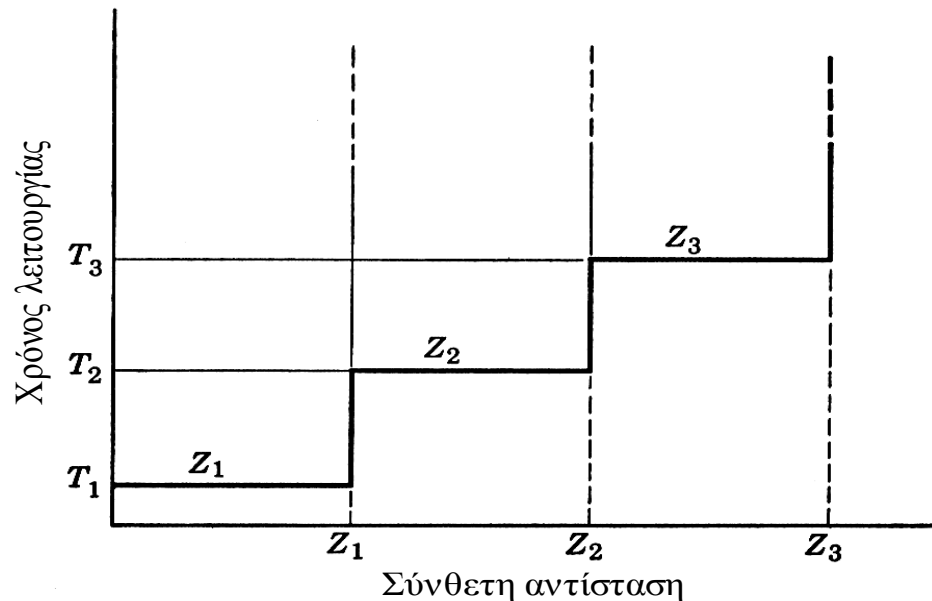


Λειτουργικά και χρονικής καθυστέρησης χαρακτηριστικά για ένα ηλεκτρονόμο σύνθετης αντίστασης.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης(7)

- Επειδή ο προηγούμενος τύπος ηλεκτρονόμου χρησιμοποιείται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς, είναι πιο εύχρηστο να χρησιμοποιήσουμε τη γραφική παράσταση του Σχήματος.



Χρόνος λειτουργίας συναρτήσει της σύνθετης αντίστασης για ένα ηλεκτρονόμο απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου τροποποιημένης σύνθετης αντίστασης(1)

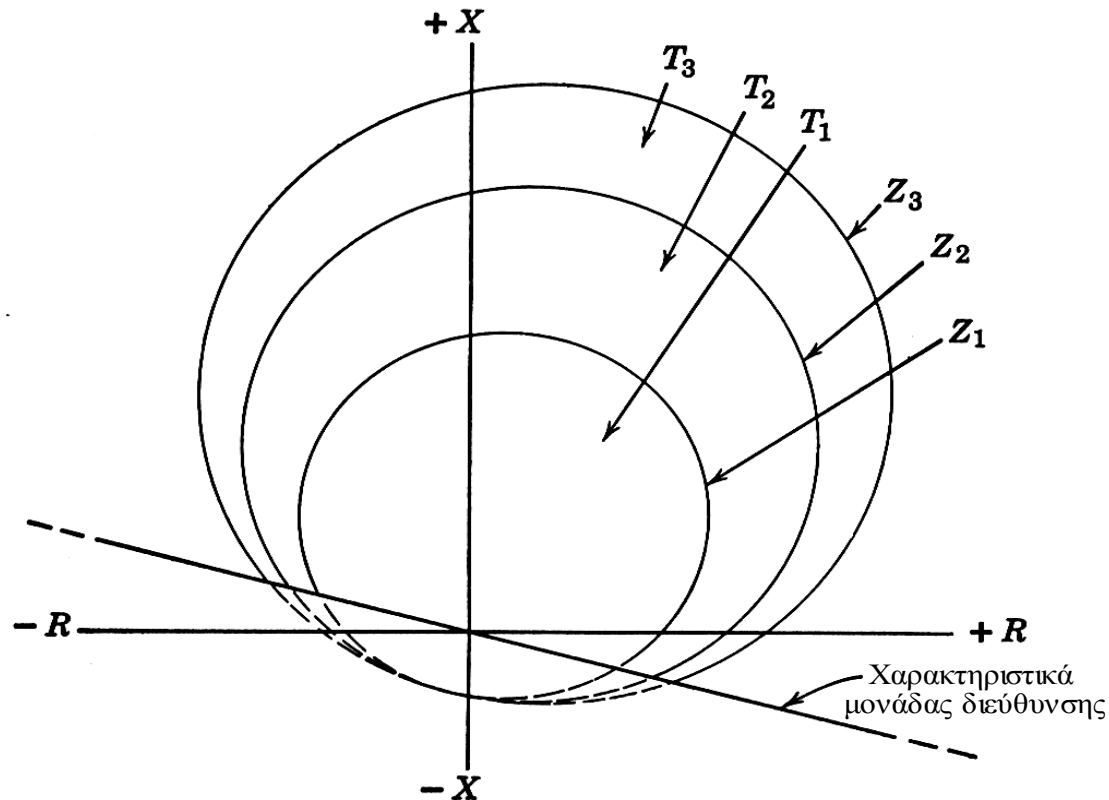
- Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου ηλεκτρονόμου είναι μετατοπισμένα, επειδή ένα **ρεύμα πόλωσης** βάζει μέσα στο πηνίο τάσης μία τάση ανάλογη με το ρεύμα.
- Τώρα η εξίσωση ροπής γίνεται:

$$T = K_1 I^2 - K_2 (V + CI)^2$$



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου τροποποιημένης σύνθετης αντίστασης(2)

- Για μηδενική ροπή, παίρνουμε την εξίσωση ενός κύκλου, που το κέντρο του δεν συμπίπτει με την αρχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Χαρακτηριστικά λειτουργίας ηλεκτρονόμου απόστασης τύπου τροποποιημένης σύνθετης αντίστασης.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου μιγαδικής αντίστασης(1)

- Αυτός ο ηλεκτρονόμος έχει μία μονάδα υπέρεντασης, που παράγει θετική ροπή και μία μονάδα κατεύθυνσης ρεύματος-τάσης, που παράγει θετική ή αρνητική ροπή, ανάλογα με τη φασική γωνία του ρεύματος και της τάσης.
- Η μονάδα κατεύθυνσης κατασκευάζεται να παράγει μέγιστη αρνητική ροπή όταν το ρεύμα καθυστερεί της τάσης 90° .
- Αν ονομάσουμε K_3 τη ροπή του ελατηρίου, η εξίσωση ροπής γίνεται:

$$T = K_1 I^2 - K_2 I \sin \theta - K_3$$

Όπου το θ ορίζεται θετικό όταν το I καθυστερεί της τάσης.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου μιγαδικής αντίστασης(2)

- Στο σημείο ισορροπίας η ροπή είναι μηδέν και έχουμε:

$$K_1 I^2 = K_2 I \sin \theta + K_3$$

- Με τι διαίρεση και των δύο μερών με I^2 παίρνουμε:

$$K_1 = K_2 \frac{V}{I} \sin \theta + \frac{K_3}{I}$$

ή

$$\frac{V}{I} \sin \theta = Z \sin \theta = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2} = X$$

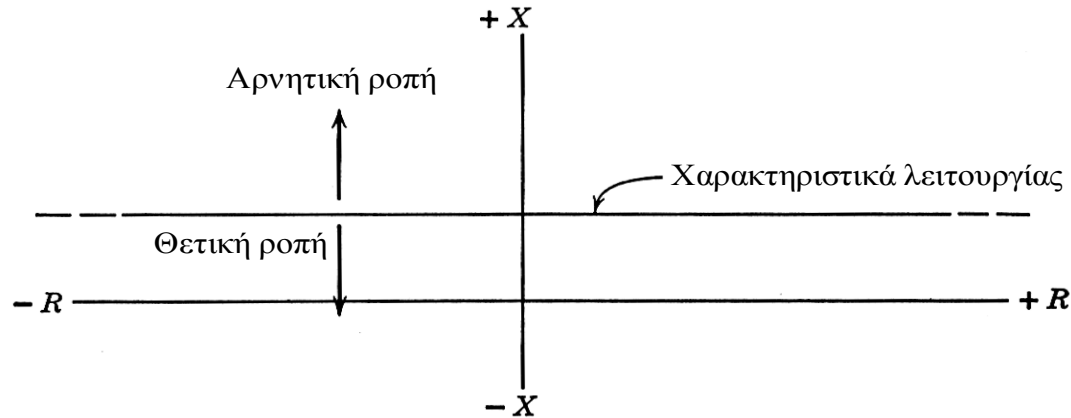
- Αν αμελήσουμε την επίδραση του ελατηρίου, παίρνουμε:

$$X = \frac{K_1}{K_2} = \text{σταθερά}$$

- Αυτή η εξίσωση περιγράφει μια ευθεία γραμμή παράλληλη προς τον άξονα R στο R-X διάγραμμα, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου μιγαδικής αντίστασης(3)



Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου μιγαδικής αντίστασης.

- Ένας ηλεκτρονόμος μιγαδικής αντίστασης δεν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα κοινό ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης, γιατί ενεργοποιείται σε κανονικές συνθήκες φορτίου.
- Ο τύπος του ηλεκτρονόμου που χρησιμοποιείται έχει ένα πηνίο αναχαίτισης-τάσης, που δημιουργεί μία αρνητική ροπή σε ένα ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης. Αυτός ο ηλεκτρονόμος ονομάζεται **σύνθετης αγωγιμότητας** ή **mho**.
- Όταν ο ηλεκτρονόμος **σύνθετης αγωγιμότητας** χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα ηλεκτρονόμο απόστασης τύπου μιγαδικής αντίστασης, ονομάζεται **μονάδα εκκίνησης**.



Ηλεκτρονόμος σύνθετης αγωγιμότητας(1)

- Η εξίσωση ροπής του ηλεκτρονόμου σύνθετης αγωγιμότητας είναι:

$$T = K_1 VI \cos(\theta - \tau) - K_2 V^2 - K_3$$

όπου:

- Τα θ και τ ορίζονται θετικά όταν το I καθυστερεί του V .
- K_3 είναι η ροπή του ελατηρίου.
- Στο σημείο ισορροπίας η ροπή είναι μηδέν και έχουμε:

$$K_2 V^2 = K_1 VI \cos(\theta - \tau) - K_3$$



Ηλεκτρονόμος σύνθετης αγωγιμότητας(2)

- Με τη διαίρεση και των δύο μερών με $K_2 VI$ παίρνουμε:

$$\frac{V}{I} = \frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - \tau) - \frac{K_3}{K_2 VI}$$

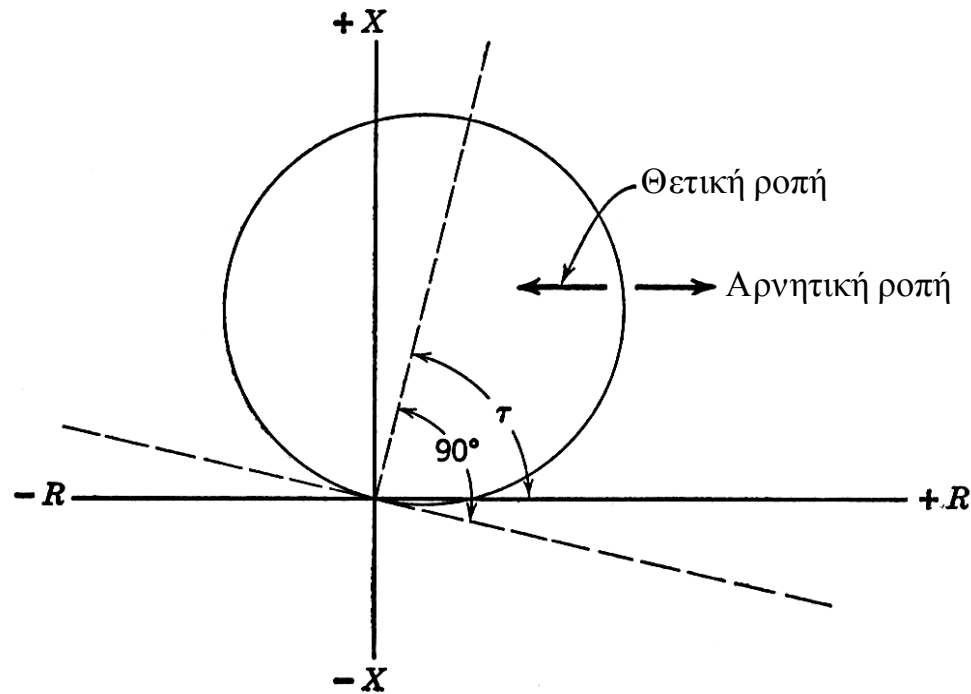
- Αν αμελήσουμε την επίδραση του ελατηρίου παίρνουμε:

$$Z = \frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - \tau)$$

- Αυτή η εξίσωση περιγράφει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ηλεκτρονόμου **σύνθετης αγωγιμότητας** ή **mho**, που δείχνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Ηλεκτρονόμος σύνθετης αγωγιμότητας(3)

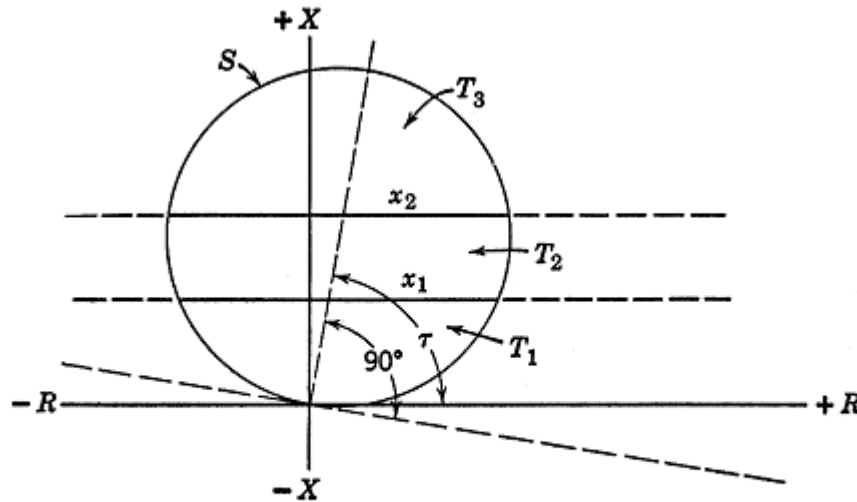


Σχ. 3.8 Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου απόστασης με αναχαίτιση τάσης.



Ηλεκτρονόμος σύνθετης αγωγιμότητας(4)

- Ο συνολικός ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου *μονάδας εκκίνησης* έχει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του Σχήματος.



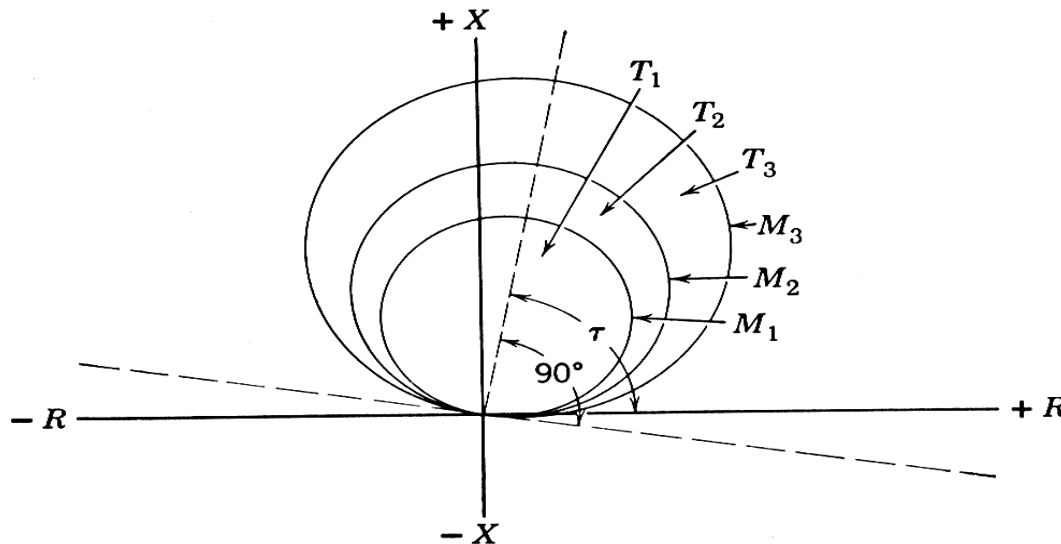
*Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου απόστασης
τύπου μονάδας εκκίνησης.*

- Παρατηρούμε ότι η μονάδα σύνθετης αγωγιμότητας έχει διπλό σκοπό:
- α) Παρέχει τα χαρακτηριστικά της μονάδας κατεύθυνσης.
- β) Παρέχει το τρίτο βήμα για τη μέτρηση απόστασης.



Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου *mho*

- Αυτός ο ηλεκτρονόμος έχει ήδη περιγραφεί και τα χαρακτηριστικά του περιγράφηκαν όταν χρησιμοποιήθηκε σαν **μονάδα εκκίνησης**.
- Η πλήρη μονάδα ηλεκτρονόμου απόστασης τύπου σύνθετης αγωγιμότητας για την προστασία γραμμών μεταφοράς, αποτελείται από τρεις μονάδες σύνθετης αγωγιμότητας μεγάλης ταχύτητας (M_1 , M_2 και M_3) και μία χρονική μονάδα συνδεδεμένη με τον ίδιο τρόπο όπως για ένα ηλεκτρονόμο σύνθετης αντίστασης, αλλά δεν χρησιμοποιείται ξεχωριστή μονάδα κατεύθυνσης, επειδή η μονάδα σύνθετης αγωγιμότητας είναι κατεύθυνσης.
- Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ολόκληρης της μονάδας φαίνονται στο Σχήμα.



Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου *mho*.



Γενικές παρατηρήσεις για όλους τους ηλεκτρονόμους απόστασης

- Όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα, η τιμή του ρεύματος είναι αρχικά μεγαλύτερη από την τιμή του ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση, που αποκτάται λίγο αργότερα. Με αυτές τις συνθήκες ένας ηλεκτρονόμος απόστασης μετρά αρχικά ένα λόγο V δια I που είναι μικρότερος από τον πραγματικό (δηλαδή στη μόνιμη κατάσταση).
- Άρα ο ηλεκτρονόμος απόστασης τείνει να λειτουργήσει για τιμές του Z μεγαλύτερες από την καθορισμένη τιμή Z . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **υπερεπέκταση** (overreach).
- Οι ηλεκτρονόμοι απόστασης, που χρησιμοποιούν το πηνίο τάσης για να παράγουν τη θετική ροπή, μερικές φορές κατασκευάζονται με **δράση μνήμης**.
- Η δράση μνήμης αποκτάται με τη χρησιμοποίηση ενός πηνίου πόλωσης-τάσης, στο οποίο το ρεύμα δεν σταματά αμέσως μόλις η τάση στη πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή μηδενιστεί.
- Έτσι ο ηλεκτρονόμος είναι κατάλληλα πολωμένος, δηλαδή στην ουσία **θυμάται** την τάση πριν από το σφάλμα.



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.

