



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Προστασία Σ.Η.Ε

Ενότητα 2: Θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας των ηλεκτρονόμων και χαρακτηριστικές

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.



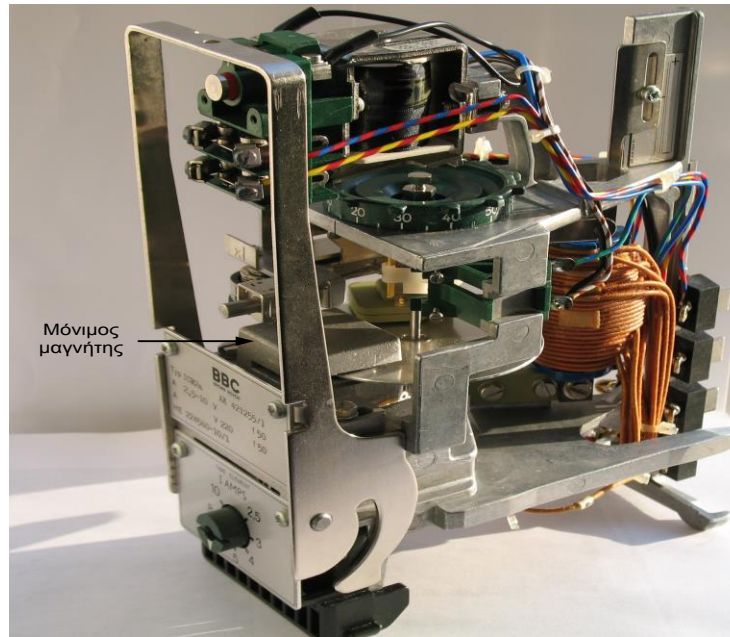
Γενικές Θεωρήσεις

- Όλοι οι ηλεκτρονόμοι που θα εξετάσουμε διεγείρονται από μία ή περισσότερες ηλεκτρικές ποσότητες για να ανοίξουν ή να κλείσουν τις επαφές τους. Όταν οι επαφές ενός ηλεκτρονόμου στην κανονική κατάσταση (αποδιεγερμένος ηλεκτρονόμος) είναι ανοικτές ονομάζονται **ανοικτές** ή "a" επαφές, ενώ όταν είναι κλειστές ονομάζονται **κλειστές** ή "b" επαφές.
- Έχουμε δύο κατηγορίες ηλεκτρονόμων σε σχέση με τις αρχές λειτουργίας τους:
- (1) Ηλεκτρομαγνητικής έλξης, όπου ένα στέλεχος έλκεται μέσα σε ένα σωληνοειδές πηνίο ή ένας οπλισμός έλκεται από τους πόλους ενός ηλεκτρομαγνήτη. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι μπορούν να διεγείρονται από εναλλασσόμενες ή συνεχείς ηλεκτρικές ποσότητες.
- (2) Ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, που κάνουν χρήση της αρχής του επαγωγικού κινητήρα. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι διεγείρονται μόνο με εναλλασσόμενες ποσότητες και θα τους ονομάζουμε στα επόμενα **επαγωγικού τύπου**.



Χρονική καθυστέρηση ηλεκτρονόμων(1)

- Μερικοί ηλεκτρονόμοι έχουν ρυθμιζόμενη χρονική καθυστέρηση και άλλοι είναι **στιγμιαίοι** ή **μεγάλης ταχύτητας**.
- Χρονική καθυστέρηση σε ένα ηλεκτρονόμο επαγωγικού τύπου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός κινούμενου μονίμου μαγνήτη.

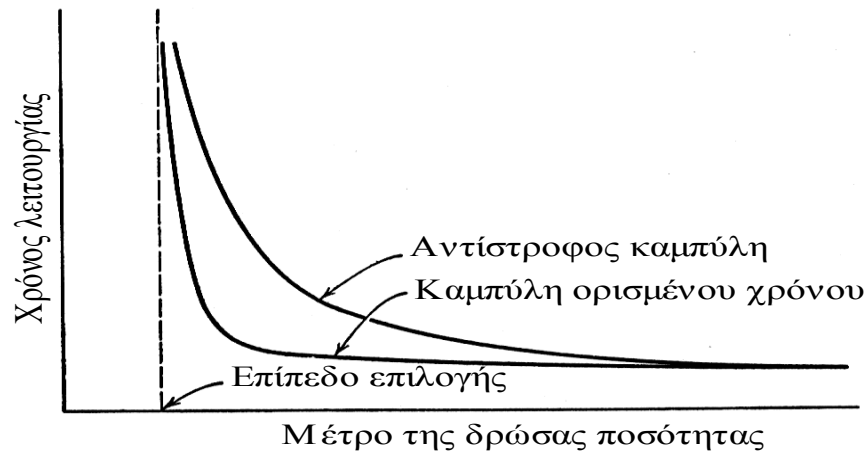


Σχ. 2.1 Εκπαιδευτικός ηλεκτρονόμος υπερέντασης επαγωγικού τύπου.



Χρονική καθυστέρηση ηλεκτρονόμων(2)

- Η ορολογία για να εκφράσουμε το σχήμα της καμπύλης, που περιγράφει το χρόνο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου είναι:
- **Αντίστροφου χρόνου**, όταν ο χρόνος λειτουργίας ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η ηλεκτρική ποσότητα που δρα στον ηλεκτρονόμο.
- **Ορισμένου χρόνου**, όταν ο χρόνος λειτουργίας είναι ανεξάρτητος από τη δρώσα ηλεκτρική ποσότητα.



Γχ. 2.2 Καμπύλες χρόνου λειτουργίας έναντι του μέτρου της ηλεκτρικής ποσότητας που ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο.



Ηλεκτρομαγνητικής έλξης ηλεκτρονόμοι μιας δρώσης ποσότητας(1)

- Αυτοί είναι ηλεκτρονόμοι εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος που ενεργοποιούνται ή μόνο από ρεύμα ή μόνο από τάση.
- Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που ασκείται στο κινούμενο στέλεχος είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ροής στο διάκενο αέρα.
- $F=K_1I^2-K_2$
όπου:
 - F : η συνισταμένη δύναμη.
 - K_1 : μία σταθερά μετατροπής σε διαστάσεις δύναμης.
 - I : η ενεργός τιμή του ρεύματος στο πηνίο διέγερσης.
 - K_2 : η δύναμη αναχαίτισης (μαζί με τη τριβή).
- Όταν η δρώσα ηλεκτρική ποσότητα φθάσει το επίπεδο επιλογής, η συνισταμένη δύναμη είναι μηδέν και η χαρακτηριστική λειτουργίας δίνεται από τη σχέση:



Ηλεκτρομαγνητικής έλξης ηλεκτρονόμοι μιας δρώσης ποσότητας (2)

$$K_1 I^2 = K_2$$

ή

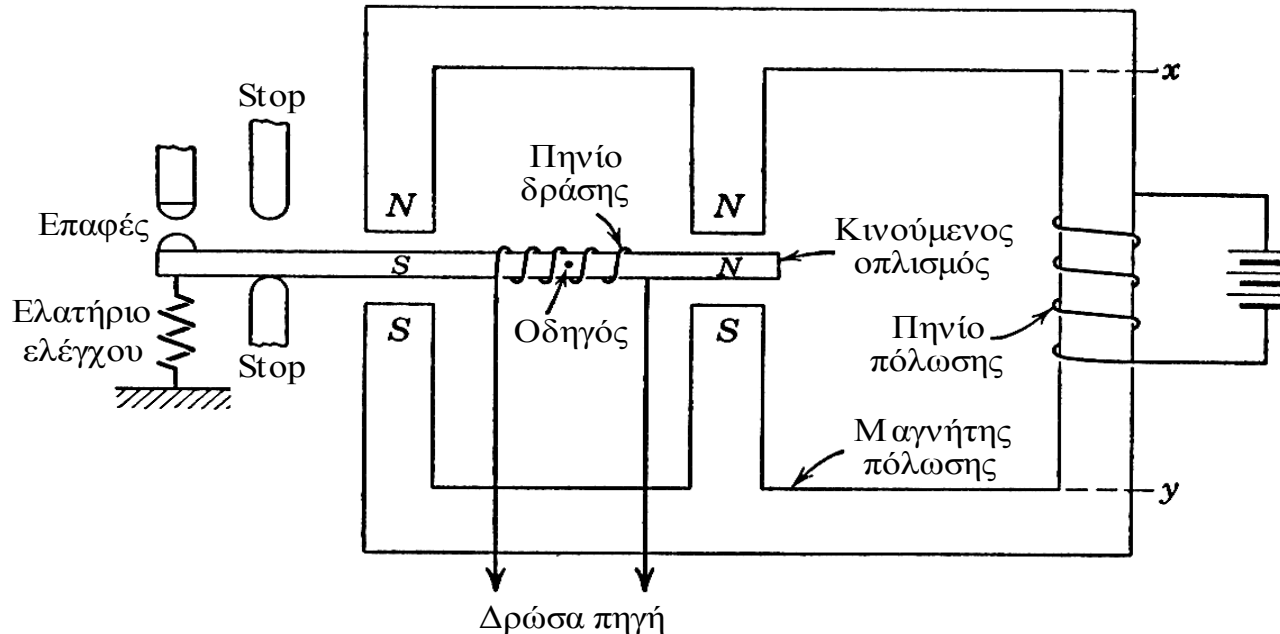
$$I = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \text{σταθερά}$$

- Μία χαρακτηριστική ιδιότητα που επηρεάζει τις εφαρμογές μερικών ηλεκτρονόμων αυτού του τύπου, είναι η μεγάλη διαφορά μεταξύ του επίπεδου επιλογής και του επίπεδου επαναφοράς.
- Όταν ένας ηλεκτρονόμος χαμηλού επίπεδου επαναφοράς χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλους ηλεκτρονόμους και με τέτοιο τρόπο, ώστε η ενεργοποίηση αυτού του ηλεκτρονόμου να μην οδηγεί πάντοτε σε ενεργοποίηση του διακόπτη ισχύος, τότε πρέπει να εξετάζουμε με πολύ προσοχή μία τέτοια εφαρμογή.
- Ο λόγος είναι ότι ένα μεταβατικό φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου, ενώ η επαναφορά στην κανονική κατάσταση του συστήματος να μην οδηγήσει σε επαναφορά του ηλεκτρονόμου στην κανονική κατάσταση λειτουργίας.



Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης τύπου ηλεκτρομαγνητικής έλξης(1)

- Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης ηλεκτρομαγνητικής έλξης ενεργοποιούνται από ΣΡ ή από ανορθωμένες ποσότητες ΕΡ.



Σχ. 2.3 Ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης τύπου ηλεκτρομαγνητικής έλξης.



Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης τύπου ηλεκτρομαγνητικής έλξης(2)

- Αν αμελήσουμε τον κόρο, η δύναμη που τείνει να κινήσει τον οπλισμό δίνεται από τη σχέση:

$$F = K_1 I_\rho I_\alpha - K_2$$

Όπου:

- K_1 : μια σταθερά μετατροπής σε δύναμη.
- I_ρ : το μέτρο του ρεύματος στο πηνίο πόλωσης.
- I_α : το μέτρο του ρεύματος στο πηνίο οπλισμού.
- K_2 : η δύναμη αναχαίτισης (μαζί με τη τριβή).
- Στο σημείο ισορροπίας, όπου $F = 0$, ο ηλεκτρονόμος είναι έτοιμος να λειτουργήσει και η χαρακτηριστική λειτουργίας δίνεται από τη σχέση:



Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης τύπου ηλεκτρομαγνητικής έλξης(3)

$$I_{\rho} I_{\alpha} = \frac{K_2}{K_1} = \text{σταθερά}$$

- Τα ρεύματα I_{α} και I_{ρ} υποθέτουμε ότι ρέουν προς τέτοια κατεύθυνση ώστε να δημιουργείται δύναμη που να τείνει να κλείσει τις επαφές.
- Αν αλλάξει η φορά κάποιου ρεύματος από τα δύο (αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα) αλλάζει η φορά της δύναμης. Από την ιδιότητα αυτή, δηλαδή να ενεργοποιείται μόνο όταν η δρώσα ποσότητα έχει ορισμένη φορά, πήρε το όνομα του αυτός ο ηλεκτρονόμος.
- Αν το ρεύμα μαγνήτισης διατηρείται σταθερό, η χαρακτηριστική λειτουργίας γίνεται:



Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης τύπου ηλεκτρομαγνητικής έλξης(4)

$$I_{\alpha} = \frac{K_2}{I_{\rho} K_1} = \text{σταθερό}$$

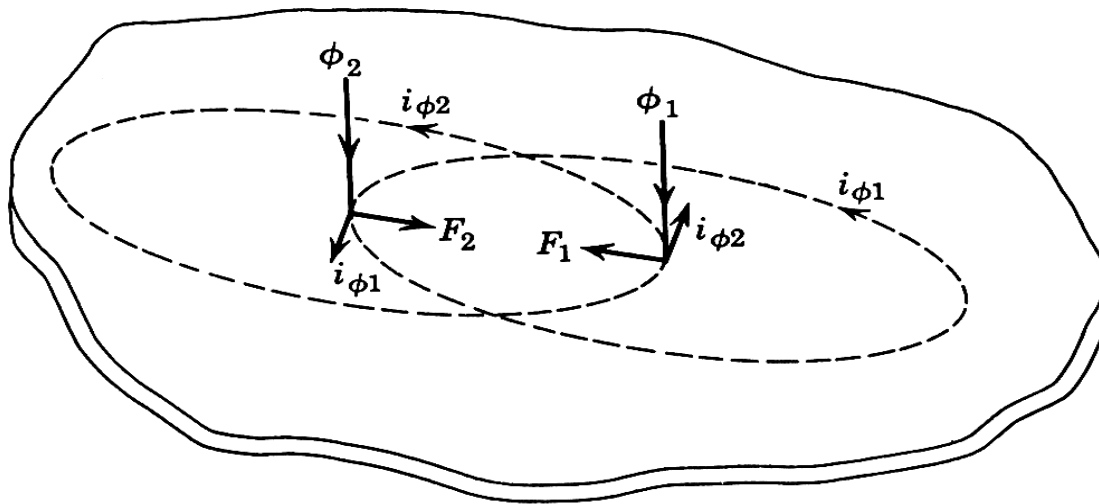
και ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται μόνον όταν το ρεύμα έχει την κατάλληλη πολικότητα και το καθορισμένο μέτρο.

- Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου έχει χαμηλή επιβάρυνση και μερικές φορές ενεργοποιείται από ποσότητες ΕΡ μέσω ενός ανορθωτή πλήρους κύματος, όταν χρειαζόμαστε ηλεκτρονόμους ΕΡ με χαμηλή επιβάρυνση. Αυτός ο ηλεκτρονόμος είναι στιγμιαίου τύπου.



Ηλεκτρονόμοι επαγωγικού τύπου(1)

- Οι ηλεκτρονόμοι επαγωγικού τύπου είναι οι πιο διαδεδομένοι από τους ηλεκτρονόμους που διεγείρονται με ποσότητες ΕΡ.
- Είναι επαγωγικοί κινητήρες με επαφές που διαχωρίζουν τη ροή και εισάγουν μία φασική διαφορά στις δύο συνιστώσες.



Σχ.2.4 Δημιουργία ροπής σε ένα ηλεκτρονόμο επαγωγής.



Ηλεκτρονόμοι επαγωγικού τύπου(2)

$$\varphi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$$

$$\varphi_2 = \Phi_2 \sin(\omega t + \theta), \text{ όπου:}$$

θ : η φασική γωνία κατά την οποία η φ_2 προπορεύεται της φ_1 .

- Μπορούμε να υποθέσουμε με αμελητέο σφάλμα ότι οι δρόμοι που ρέουν τα ρεύματα στο δρομέα έχουν αμελητέα αυτεπαγωγή και συνεπώς τα ρεύματα του δρομέα είναι σε φάση με τις τάσεις οπότε:

$$i_{\varphi_1} \propto \frac{d\varphi_1}{dt} \propto \Phi_1 \cos \omega t$$

$$i_{\varphi_2} \propto \frac{d\varphi_2}{dt} \propto \Phi_2 \cos(\omega t + \theta)$$



Ηλεκτρονόμοι επαγωγικού τύπου(3)

- Στο σχήμα 2.4 οι δύο δυνάμεις είναι αντίθετες και η συνισταμένη δύναμη είναι:

$$F = F_2 - F_1 \propto \varphi_2 i_{\varphi_1} - \varphi_1 i_{\varphi_2}$$

Με αντικατάσταση παίρνουμε:

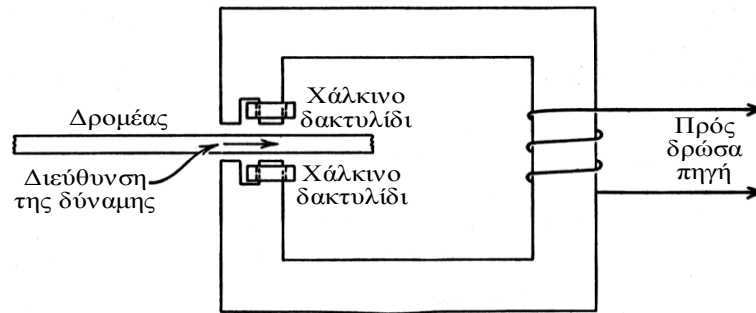
$$F \propto \Phi_1 \Phi_2 [\sin(\omega t + \theta) \cos \omega t - \sin \omega t \cos(\omega t + \theta)]$$

- Εφόσον υποθέσαμε ημιτονοειδείς ροές, μπορούμε να αντικαταστήσουμε τις μέγιστες ροές με την ενεργό τιμή τους.
- Από τη τελευταία εξίσωση παρατηρούμε ότι η συνισταμένη δύναμη είναι ανεξάρτητη του χρόνου, δημιουργείται από δύο μη φασικές ροές και δεν είναι δυνατόν να παραχθεί από μία μόνο ροή.
- Η διεύθυνση της συνισταμένης δύναμης είναι από το σημείο που η ροή που προπορεύεται διαπερνά το δρομέα προς το σημείο που διαπερνά το δρομέα η ροή που βραδυπορεί. Έτσι η φορά περιστροφής του δρομέα εξαρτάται από το ποια ροή προπορεύεται.
- Ο λόγος του επίπεδου επαναφοράς προς το επίπεδο επιλογής είναι μεγάλος στους επαγωγικούς ηλεκτρονόμους, επειδή η λειτουργία τους δεν περιλαμβάνει καμία μεταβολή στο διάκενο αέρα του μαγνητικού κυκλώματος.

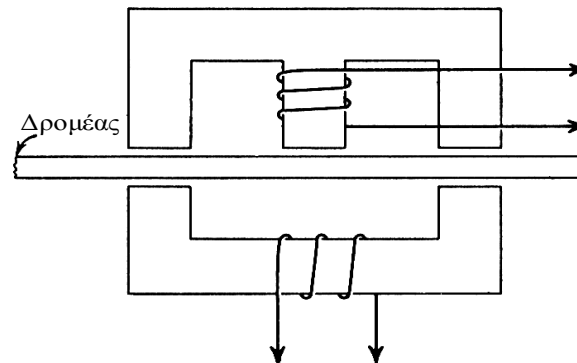


Ηλεκτρονόμοι επαγωγικού τύπου(4)

- Οι αρχές λειτουργίας των διαφόρων κατασκευών ηλεκτρονόμων αυτού του τύπου φαίνονται στα Σχήματα 2.5-2.9.



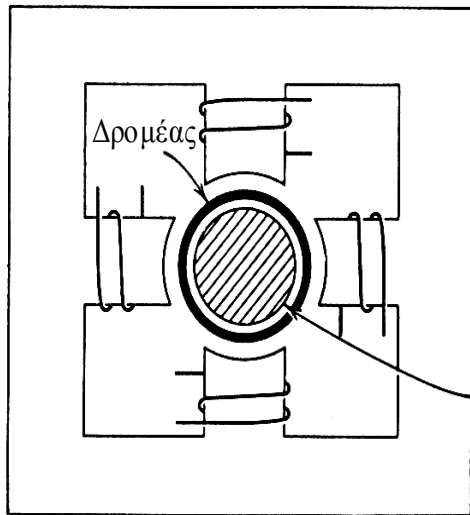
Σχ. 2.5 Κατασκευή με χάλκινα δακτυλίδια στους πόλους.



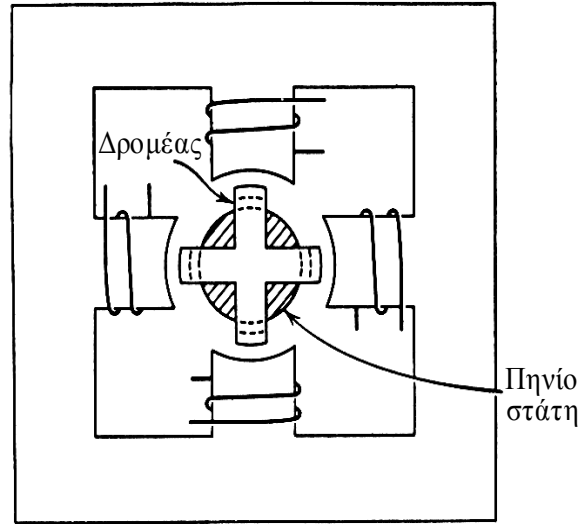
Σχ. 2.6 Κατασκευή μετρητού βαττωρών.



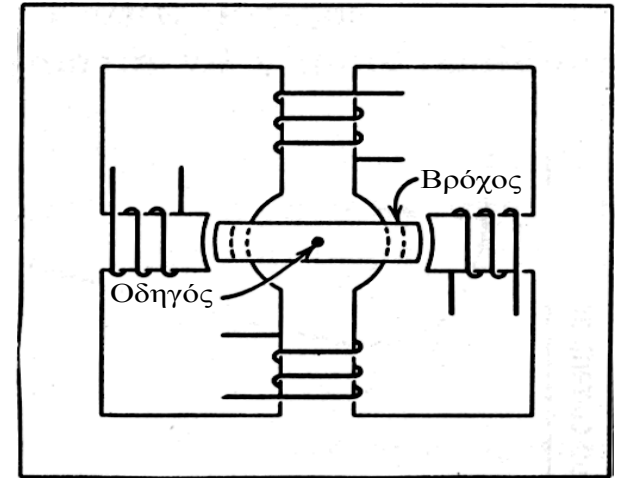
Ηλεκτρονόμοι επαγωγικού τύπου(4)



Σχ. 2.7 Κατασκευή επαγωγικού κυλίνδρου.



Σχ. 2.8 Κατασκευή διπλού επαγωγικού βρόχου.



Σχ. 2.9 Κατασκευή μονού επαγωγικού βρόχου.



Υπολογισμός ροπής σε επαγωγικούς ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης(1)

- **1) Ηλεκτρονόμοι ρεύματος-ρεύματος.**
 - Ένας ηλεκτρονόμος ρεύματος - ρεύματος ενεργοποιείται από δύο διαφορετικά ρεύματα. Αν αμελήσουμε τον κόρο μπορούμε να αντικαταστήσουμε τις ροές με τα ρεύματα που τις δημιουργούν, οπότε η σχέση για τη ροπή γράφεται :
- $$T = K_1 I_1 I_2 \sin \theta - K_2 , \text{όπου:}$$
- I_1, I_2 : η ενεργός τιμή των ρευμάτων που δρουν στον ηλεκτρονόμο.
 - θ : η φασική γωνία των ροών που δημιουργούν τα ρεύματα I_1 και I_2 .

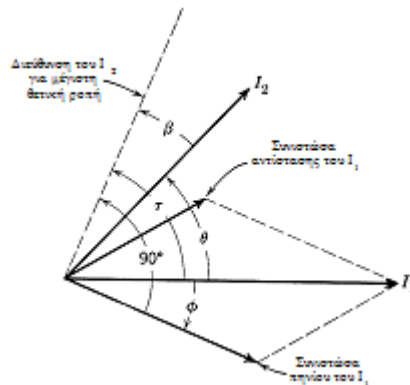


Υπολογισμός ροπής σε επαγωγικούς ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης(3)

- Στο Σχ. 2.10 η σχέση που δίνει τη ροπή παίρνει τη μορφή:

$$T = K_1 I_1 I_2 \sin(\theta - \varphi) - K_2$$

- Η γωνία τ στο Σχ. 2.10 ονομάζεται **γωνία μέγιστης ροπής**, γιατί είναι η τιμή της γωνίας θ στην οποία έχουμε μέγιστη θετική ροπή. Στην πράξη ορίζουμε αυτή τη γωνία, όταν θέλουμε να περιγράψουμε τον ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης και όχι το φ .



$$\sin(\theta - \varphi) = \sin(90^\circ - \beta) = \cos(\beta) = \cos(\tau - \theta) = \cos(\theta - \tau)$$

$$T = K_1 I_1 I_2 \cos(\theta - \tau) - K_2$$



Υπολογισμός ροπής σε επαγωγικούς ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης(4)

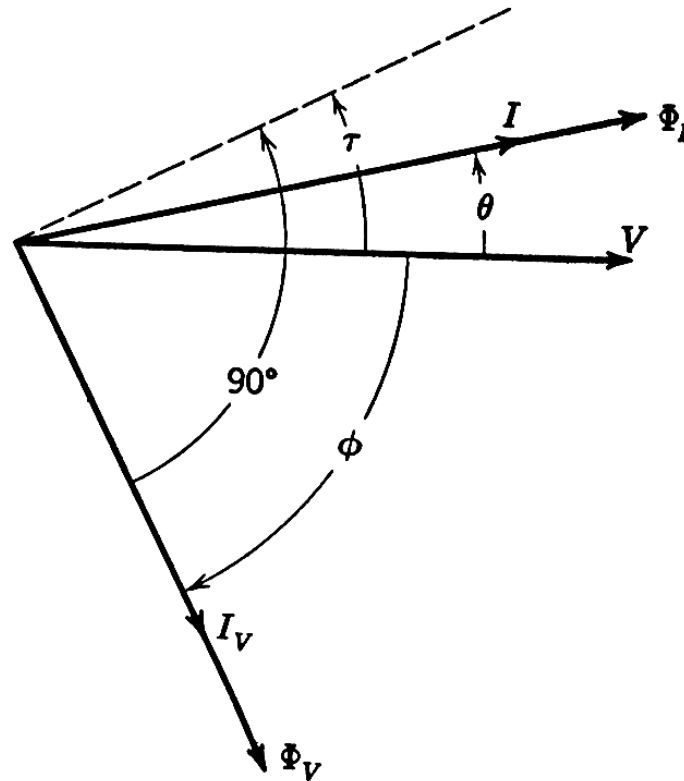
- **2) Ηλεκτρονόμοι ρεύματος-τάσης.**
- Ένας ηλεκτρονόμος ρεύματος-τάσης ενεργοποιείται από μια πηγή ρεύματος και μια πηγή τάσης. Η εξίσωση ροπής σε αυτή τη περίπτωση είναι:

$$T = K_1 VI \cos(\theta - \tau) - K_2, \text{ όπου:}$$

- V : η ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο πηνίο τάσης.
- I : η ενεργός τιμή του ρεύματος που εφαρμόζεται στο πηνίο ρεύματος.
- θ : η γωνία μεταξύ V και I
- τ : η γωνία μέγιστης ροπής



Υπολογισμός ροπής σε επαγωγικούς ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης(4)



Σχ. 2.11 Διανυσματικό διάγραμμα για μέγιστη ροπή σε ένα ρεύματος-τάσης επαγωγικού τύπου ηλεκτρονόμο διεύθυνσης



Υπολογισμός ροπής σε επαγωγικούς ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης(5)

- Η τιμή του τ είναι συνήθως της τάξης των 20° - 30° . Με την εισαγωγή εν σειρά με το πηνίο τάσης ενός συνδυασμού αντίστασης και πυκνωτή μπορούμε να επιτύχουμε οποιαδήποτε τιμή του φ και κατά συνέπεια του τ χωρίς να μεταβάλλουμε το IV και κατά συνέπεια και το επίπεδο επιλογής.
- Ένας ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης EP αναγνωρίζει διαφορές στη φασική γωνία μεταξύ δύο ποσοτήτων, όπως ένας ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης SP αναγνωρίζει διαφορές στην πολικότητα.
- Από τις δύο ποσότητες που εφαρμόζονται σε ένα ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης EP η μία ονομάζεται **πόλωση**. Αυτή είναι η αναφορά προς την οποία συγκρίνεται η άλλη ποσότητα και πρέπει να παραμένει σχεδόν σταθερή καθώς η άλλη μεταβάλλεται.



Λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης(1)

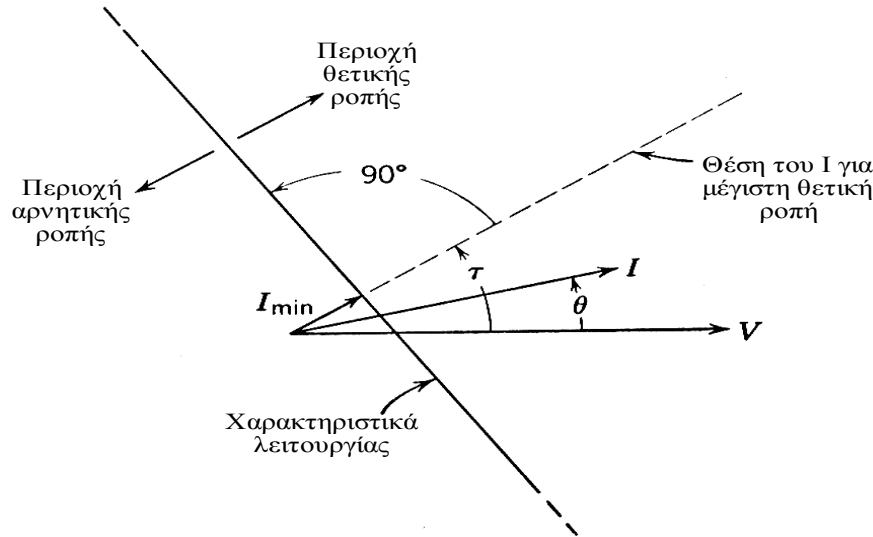
- Εξετάζουμε τη σχέση ροπής για ένα ρεύματος-τάσης ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης. Στο σημείο ισορροπίας η συνισταμένη ροπή είναι μηδέν και παίρνουμε τη σχέση:

$$VI \cos(\theta - \tau) = \frac{K_2}{K_1} = \text{σταθερά}$$

- Αυτά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά σχεδιάζονται σε ένα διάγραμμα πολικών συντεταγμένων όπως στο Σχ. 2.12.



Λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης(2)



Σχ. 2.12 Λειτουργικά χαρακτηριστικά για ένα ηλεκτρονόμο διεύθυνσης σε πολικές συντεταγμένες.

- Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά είναι η διαχωριστική γραμμή μεταξύ θετικής και αρνητικής ροπής. Κάθε διάνυσμα ρεύματος που η κεφαλή του βρίσκεται μέσα στην περιοχή θετικής ροπής ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο.
- Το I_{min} είναι το μικρότερο μέτρο του I που μπορεί να ενεργοποιήσει τον ηλεκτρονόμο και ονομάζεται **ελάχιστο ρεύμα επιλογής**.



Γενική εξίσωση ροπής ηλεκτρονόμων

- Όλοι οι απομένοντες ηλεκτρονόμοι είναι απλή συνδυασμοί των ηλεκτρονόμων που ήδη εξετάσθηκαν. Με τη χρησιμοποίηση των προηγούμενων σχέσεων μπορούμε να γράψουμε τη γενική εξίσωση που περιγράφει κάθε τύπο ηλεκτρονόμου, όπως πιο κάτω:

$$T = K_1 I^2 + K_2 V^2 + K_3 VI \cos(\theta - \tau) + K_4$$



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.

