

# ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΗΕ

## Ενότητα 8

### Προστασία μετασχηματιστών ισχύος



# Εισαγωγή

- Οι συσκευές προστασίας μετασχηματιστών (Μ/Σ) ισχύος περιλαμβάνουν εκτροπείς υπερτάσεων (surge divertors), ηλεκτρονόμους αερίων και ηλεκτρικούς ηλεκτρονόμους.
- Οι ηλεκτρονόμοι αερίων έχουν ιδιαίτερη σημασία επειδή ανακαλύπτουν βραχυκυκλώματα που αναπτύσσονται αργά και μας προειδοποιούν.
- Η παρατεταμένη υπερφόρτιση των Μ/Σ ανακαλύπτεται από θερμικούς ηλεκτρονόμους, που θέτουν σε λειτουργία ένα σήμα κινδύνου.
- Για προστασία υποστήριξης (εξωτερικά βραχυκυκλώματα) χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι υπέρεντασης ή ασφάλειες.

- Η πρωτεύουσα προστασία χρησιμοποιείται για τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, που είναι πάρα πολύ επικίνδυνα και χωρίζονται σε δύο ομάδες:
- **A) Ηλεκτρικά βραχυκυκλώματα που επιφέρουν άμεσες σοβαρές καταστροφές και μπορούν να ανακαλυφθούν :**
- (i) Βραχυκύκλωμα φάσης-γης ή φασικά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες.
- (ii) Βραχυκύκλωμα φάσης-γης ή φασικά βραχυκυκλώματα στα τυλίγματα χαμηλής ή υψηλής τάσης.
- (iii) Βραχυκυκλώματα μεταξύ των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης.
- (iv) Βραχυκύκλωμα γης στο τύλιγμα του τριτεύοντος ή βραχυκύκλωμα μεταξύ των περιελίξεων του.

- **B) Βραχυκυκλώματα που επιφέρουν αργές καταστροφές αρχικά και δεν είναι δυνατόν να ανακαλυφθούν με έλεγχο στα άκρα των τυλιγμάτων :**
- (i) Μία κακή ηλεκτρική σύνδεση ή μικρή φθορά του μονωτικού, που δημιουργεί ένα μικρό τόξο μέσα στο λάδι.
- (ii) Εσφαλμένη ψύξη, που δημιουργεί αύξηση της θερμοκρασίας.
- (iii) Μικρότερη από την προδιαγεγραμμένη ποσότητα λαδιού ή εμπόδια στην ελεύθερη κίνηση λαδιού, που δημιουργούν τοπικές υπέρθερμες περιοχές στα τυλίγματα.
- (iv) Σε περίπτωση παράλληλων Μ/Σ , δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων και υπερθέρμανση.

# Προστασία υπερθέρμανσης

- Οι υπερφορτίσεις στους Μ/Σ δημιουργούν παροδικές υπερθερμάνσεις και ελάττωση του χρόνου ζωής τους.
- Το μέγεθος και η διάρκεια της αποδεκτής υπερφόρτισης εξαρτάται από την πρόσφατη ιστορία φόρτισης του.
- Ο βασικός κανόνας είναι ότι τα τυλίγματα του δεν πρέπει να υπερθερμανθούν, γιατί τότε ο χρήσιμος χρόνος ζωής του υφίσταται δραστική μείωση.
- Επειδή η μέτρηση της θερμοκρασίας στο θερμότερο σημείο των τυλιγμάτων δεν είναι πρακτικά εφικτή, η προστασία βασίζεται σε κάποια μορφής εξομοίωση της θερμοκρασιακής απόκρισης της μονάδος.
- Η γήρανση του Μ/Σ λόγω υπερθέρμανσης πραγματοποιείται σε μεγάλο χρόνο και σε πολλές περιπτώσεις ειδική προστασία δεν υπάρχει.

- Κατά μία ειδική μέθοδο τοποθετείται στο πάνω μέρος του Μ/Σ ένα μικρό δοχείο, που περιέχει ένα αισθητήρα θερμότητας (π.χ. μία μη γραμμική αντίσταση) και μία πηγή θερμότητας (π.χ. μία ωμική αντίσταση) στην οποία τροφοδοτείται ρεύμα ανάλογο της φόρτισης του μετασχηματιστή.
- Με κατάλληλη σχεδίαση η αύξηση της θερμοκρασίας στο δοχείο γίνεται ανάλογη της αύξησης της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων.
- Η μη γραμμική αντίσταση, που είναι μέρος μίας ηλεκτρικής γέφυρας Wheatstone, δημιουργεί την κατάλληλη ανισορροπία σε συνθήκες υπερφόρτισης για ενεργοποίηση της προστασίας.
- Μία πιο ακριβής μέθοδος είναι η ολοκλήρωση της θερμοκρασίας με το χρόνο, με την οποία έχουμε το συνολικό χρόνο υπερθέρμανσης του Μ/Σ και ένδειξη για την πιθανή απώλεια ζωής του.



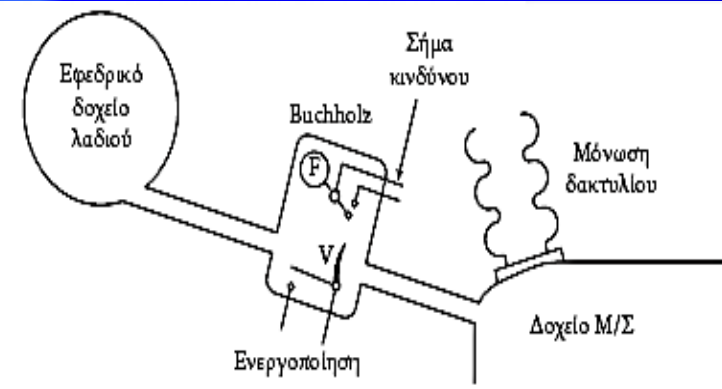
# Ηλεκτρονόμοι αερίων

Μικρή διάσπαση της μόνωσης του πυρήνα ή κακή ηλεκτρική σύνδεση δημιουργούν τοπική θέρμανση.

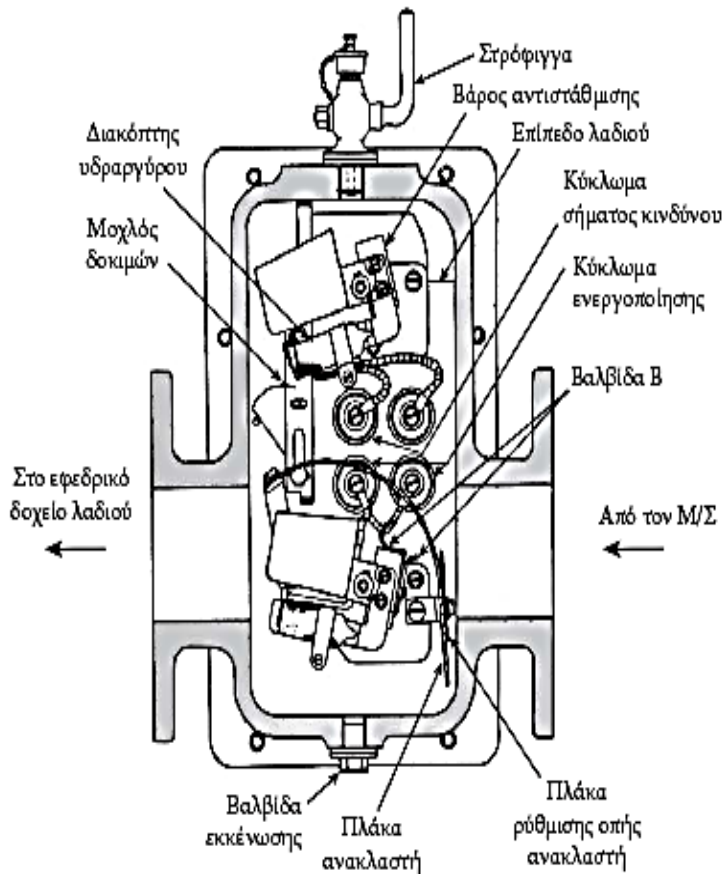
Αυτή στους 350 °C προκαλεί διάσπαση του λαδιού σε εύφλεκτα αέρια, που συσσωρεύονται στο πάνω μέρος του Μ/Σ.

Μία ανάλυση αυτών των αερίων μπορεί να μας δείξει το είδος του βραχυκυκλώματος που τα προκάλεσε.

Στον ηλεκτρονόμο ανοικτού δοχείου, Σχήμα (β), καθώς το επίπεδο λαδιού πέφτει λόγω της συγκέντρωσης του αερίου, το δοχείο παραμένει γεμάτο με λάδι και κλείνει τις επαφές.



α)



β)

(α) Αρχικό διάγραμμα ηλεκτρονόμου Buchholz.

(β) Μοντέρνος ηλεκτρονόμος Buchholz.

# Ηλεκτρονόμοι αιφνίδιας πίεσης

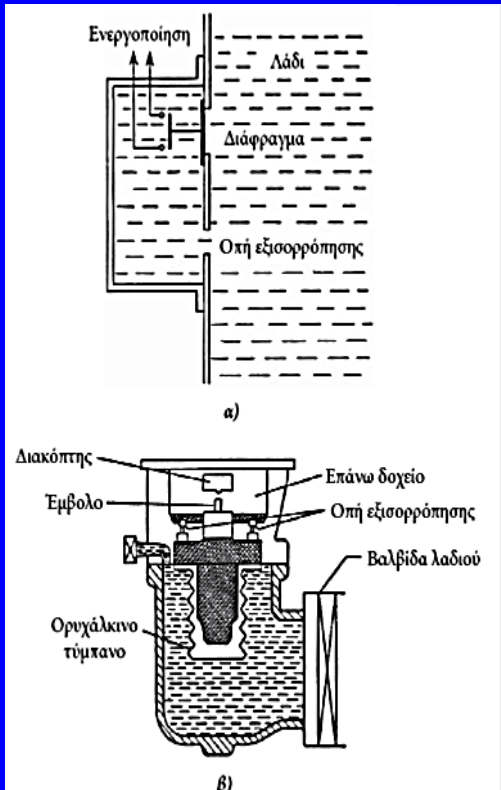
- Στους Μ/Σ, που έχουν στο επάνω μέρος ένα στρώμα αερίου αντί για εφεδρικό δοχείο λαδιού, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον ηλεκτρονόμο του Buchholz.
- Τότε χρησιμοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι αιφνίδιας πίεσης.
- Αυτοί τοποθετούνται μέσα στη δεξαμενή και λειτουργούν με το ρυθμό μεταβολής της πίεσης.

Στον Αμερικάνικο ηλεκτρονόμο του Σχήματος (β) το διάφραγμα βρίσκεται μέσα σε ένα ορειχάλκινο τύμπανο γεμάτο με λάδι σιλκόνης.

Το τύμπανο βρίσκεται μέσα στο λάδι του Μ/Σ και μεταφέρει τις μεταβολές της πίεσης λαδιού στο λάδι σιλκόνης.

Έτσι το διάφραγμα και ο διακόπτης λειτουργούν μέσα στο λάδι σιλκόνης.

Το λάδι σιλκόνης έχει επίπεδα χαρακτηριστικά ιξώδους/θερμοκρασίας παρέχοντας χαρακτηριστικά αντίστροφου χρόνου/αύξησης πίεσης, που εμποδίζουν τη λειτουργία όταν έχουμε μηχανικούς κραδασμούς.



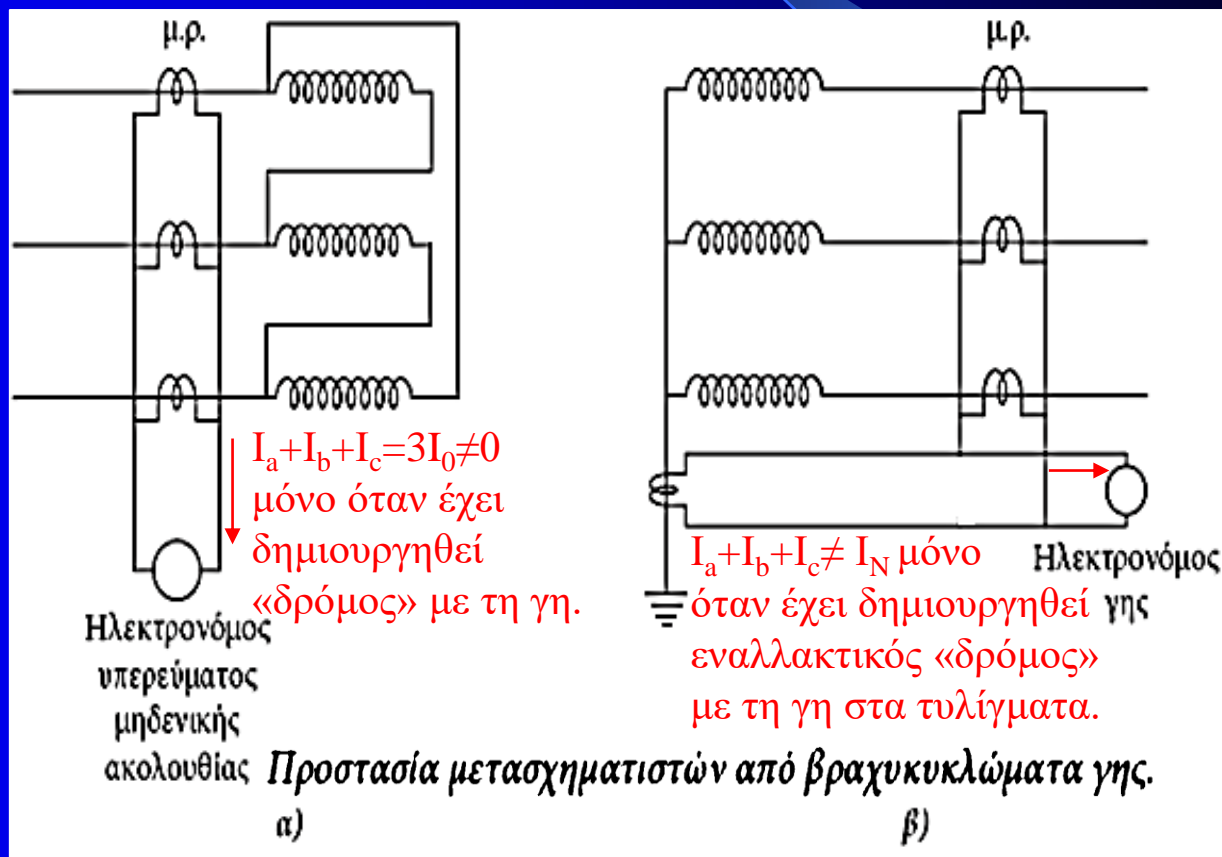
(α) Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρονόμου αιφνίδιας πίεσης.

(β) Σύγχρονος ηλεκτρονόμος αιφνίδιας πίεσης.

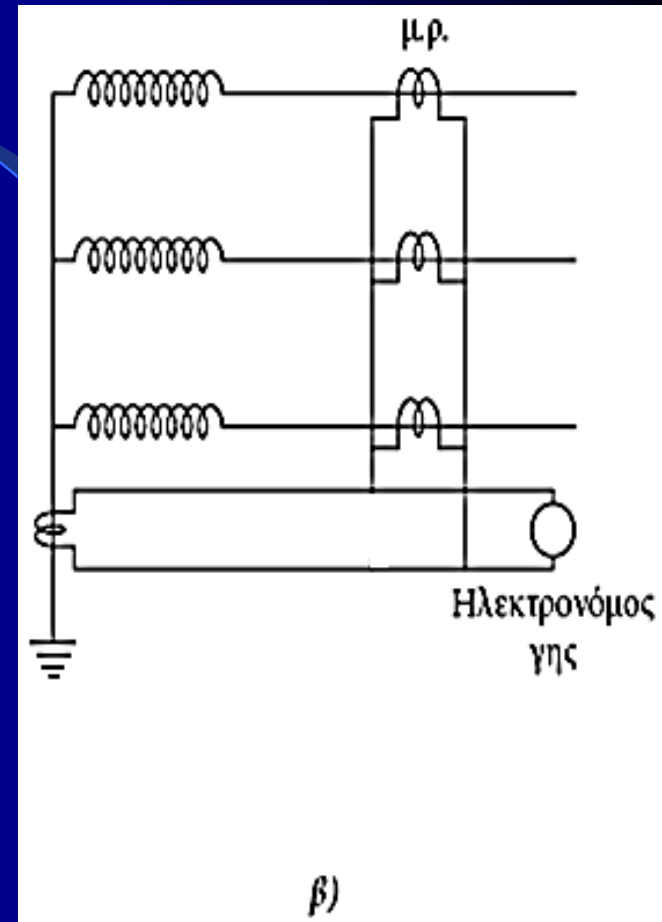


# Προστασία βραχυκυκλωμάτων γης

- Για βραχυκυκλώματα γης τυλίγματα Μ/Σ συνδεδεμένα σε  $\Delta$  και μη γειωμένο Υ προστατεύονται καλύτερα με ηλεκτρονόμους υπέρτάσης μηδενικής ακολουθίας (Σχήμα (α)).
- Για τυλίγματα Μ/Σ συνδεδεμένα σε γειωμένο Υ χρησιμοποιείται το κύκλωμα του Σχήματος (β) : ο διαφορικός ηλεκτρονόμος έχει ρεύμα μόνο για βραχ. των τυλιγμάτων με τη γη.

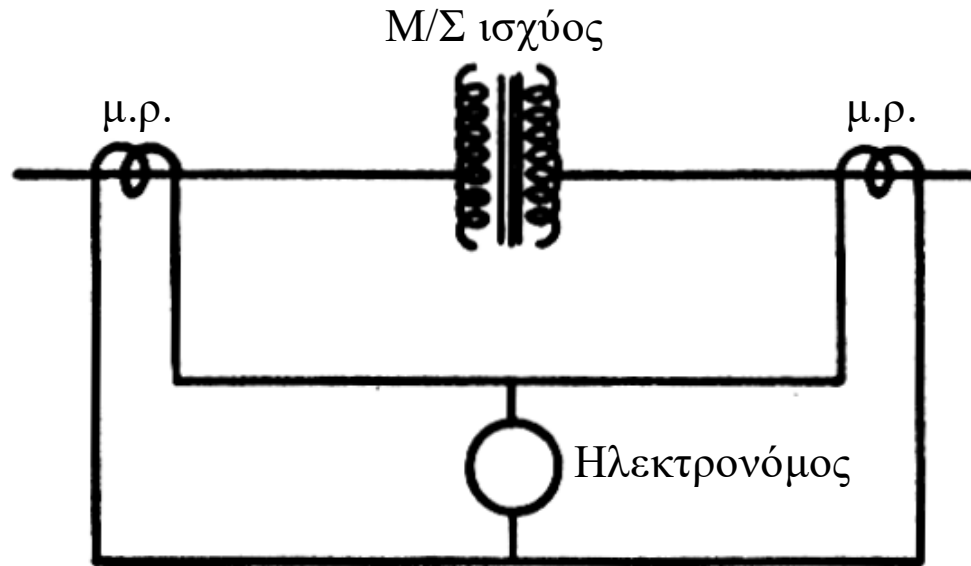


- Στο Σχήμα (β), για σοβαρά εξωτερικά σφάλματα, το ρεύμα μαγνήτισης στο μ.ρ. του ουδετέρου/γής είναι τριπλάσιο από τους άλλους μ.ρ.: διαφορική σύνδεση.
- Το πρόβλημα λύνεται με αντίσταση σταθεροποίησης στον ηλεκτρονόμο ή με ηλεκτρονόμους μεγάλης σύνθετης αντίστασης.
- Άλλο πρόβλημα είναι οι 3τες αρμονικές: συμφασικές και στις τρεις φάσεις και συμπεριφέρονται σαν συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας.
- Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με συντονισμό του ηλεκτρονόμου στη θεμελιώδη συχνότητα ή με τη χρήση φίλτρων για την 3<sup>η</sup> αρμονική.
- Ευτυχώς, συμμετρικά 3Φ βραχυκυκλώματα, που εμφανίζουν αυτό το πρόβλημα, είναι πολύ σπάνια.
- Πρόβλημα παρουσιάζεται στη αναλογική-διαφορική προστασία Μ/Σ με τυλίγματα Υ γειωμένα μέσω αντίστασης για να περιορίζουν τα ρεύματα βραχ. γης.
- Το κύκλωμα του Σχήματος (β) χρησιμοποιείται για να αυξηθεί το ποσοστό του τυλίγματος που προστατεύεται με αναλογική διαφορική προστασία.



# Πολωμένη διαφορική προστασία Μ/Σ

- Ένας διαφορικός ηλεκτρονόμος Μ/Σ συγκρίνει τα ρεύματα στις περιελίξεις του μέσω μ.ρ., των οποίων ο λόγος είναι τέτοιος, ώστε να κάνει τα ρεύματα δευτερεύοντος ίσα.  
(εκτός από το ρεύμα μαγνήτισης του Μ/Σ που είναι μικρό)

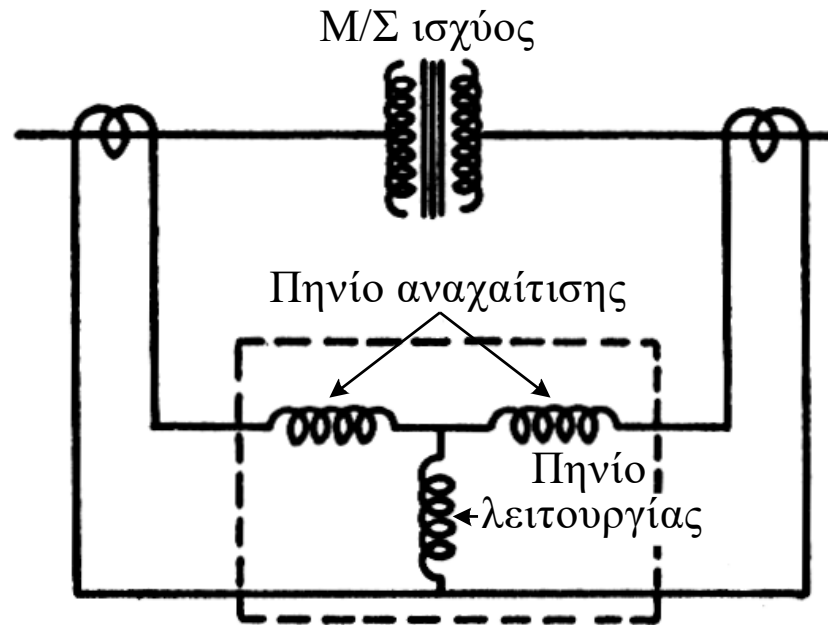


*Βασική αρχή διαφορικής προστασίας μετασχηματιστή.*

- Μία απλή διαφορική προστασία, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, παρουσιάζει τα έξης προβλήματα :
- (i) Κατά τη διάρκεια σοβαρών εξωτερικών σφαλμάτων οι μ.ρ. με τα διαφορετικά τυλίγματα υφίστανται διαφορετική μαγνήτιση κόρου, που επιφέρει σημαντική διαφορά στα ρεύματα δευτερεύοντος και λειτουργία του ηλεκτρονόμου.
- (ii) Όλοι οι μεγάλοι σύγχρονοι Μ/Σ ισχύος είναι εφοδιασμένοι με συσκευές αυτόματης μεταβολής του λόγου σπειρών υπό φορτίο. Μία τέτοια μεταβολή όμως αλλάζει το λόγο ρευμάτων και δημιουργεί ένα ρεύμα ανισορροπίας στο διαφορικό ηλεκτρονόμο.
- (iii) Όταν έχουμε την αρχική ενεργοποίηση του Μ/Σ με ανοικτό δευτερεύον δημιουργείται ένα ρεύμα μαγνήτισης εισροής, που γενικά ρέει στη μία πλευρά του διαφορικά συνδεδεμένου ηλεκτρονόμου και τείνει να τον λειτουργήσει, αν δεν ληφθεί κατάλληλη πρόνοια.



Για να κάνουμε ένα διαφορικό ηλεκτρονόμο ευσταθή λόγω των δυσκολιών (i) και (ii) χρησιμοποιούμε τον αναλογικό διαφορικό ηλεκτρονόμο.

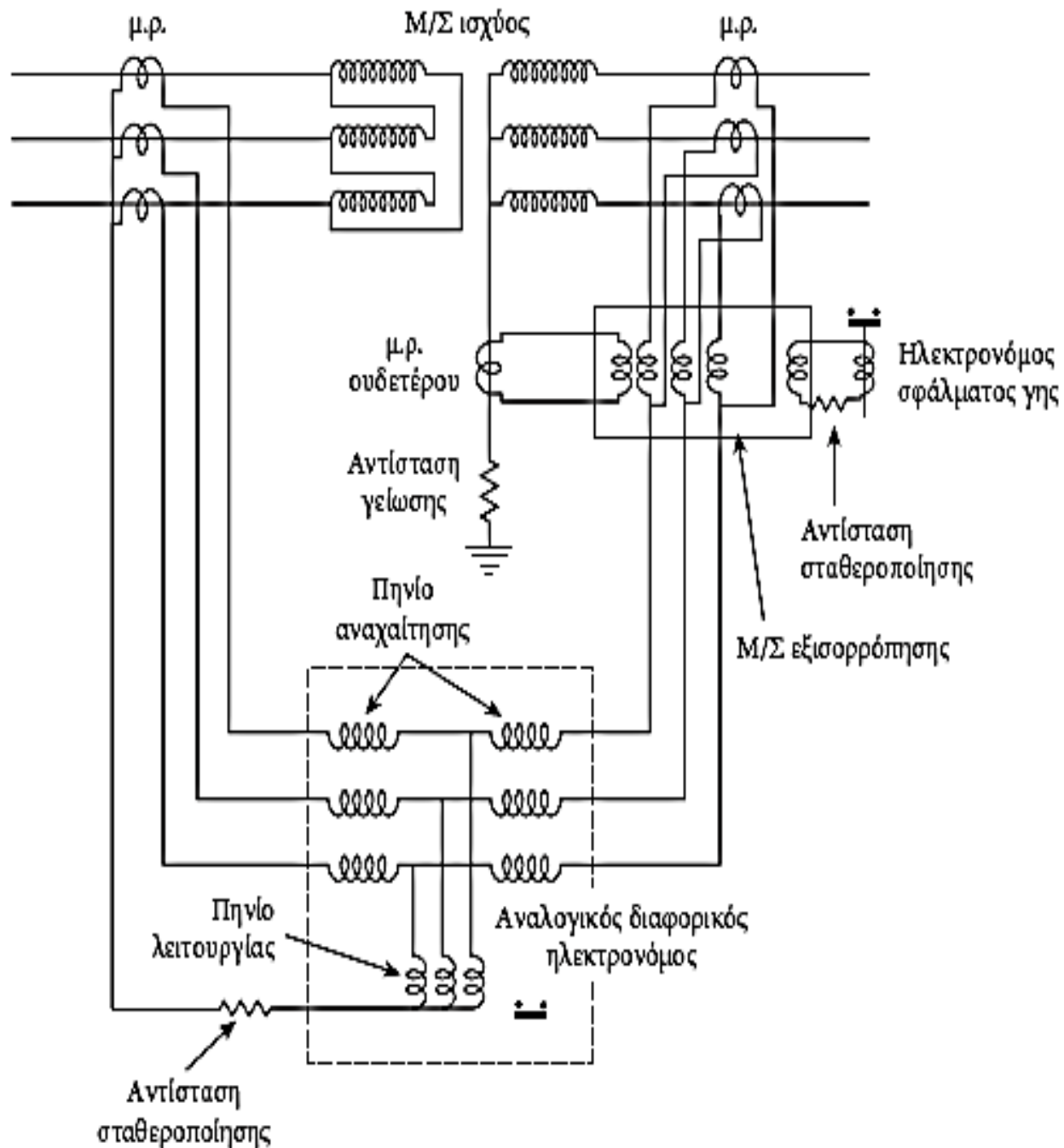


*Αναλογικός διαφορικός ηλεκτρονόμος.*

- Για να αντισταθμισθεί η δυσκολία (iii) ο ηλεκτρονόμος τροφοδοτείται με μία ροπή αναχαίτισης που εξαρτάται από τις αρμονικές του ρεύματος μαγνήτισης εισροής.



- Στην περίπτωση 3Φ Μ/Σ, οι μ.ρ. που είναι στη πλευρά των τυλιγμάτων που συνδέονται σε Υ συνδέονται σε Δ και στην πλευρά που τα τυλίγματα συνδέονται σε Δ οι μ.ρ. συνδέονται σε Υ.
- Αυτό γίνεται για δύο λόγους:
- α) Να διορθώνεται η φασική διαφορά των ρευμάτων γραμμής, που προκαλεί η Υ-Δ σύνδεση.
- β) Να εξαφανίζει τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας στην πλευρά του Υ, που αν υπήρχαν, λόγω της έλλειψης τέτοιων ρευμάτων στη πλευρά του Δ για εξωτερικά βραχυκυκλώματα, θα μπορούσαν να θέσουν σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο.
- Στην περίπτωση Μ/Σ γειωμένων μέσω αντίστασης, η διαφορική προστασία πρέπει να βοηθείται και από προστασία βραχυκυκλώματος γης.
- Χωρίς την προστασία βραχυκυκλώματος γης προστατεύουμε μόνο το 41% των τυλιγμάτων, για ένα επίπεδο επιλογής του ηλεκτρονόμου 20% του ονομαστικού ρεύματός του.



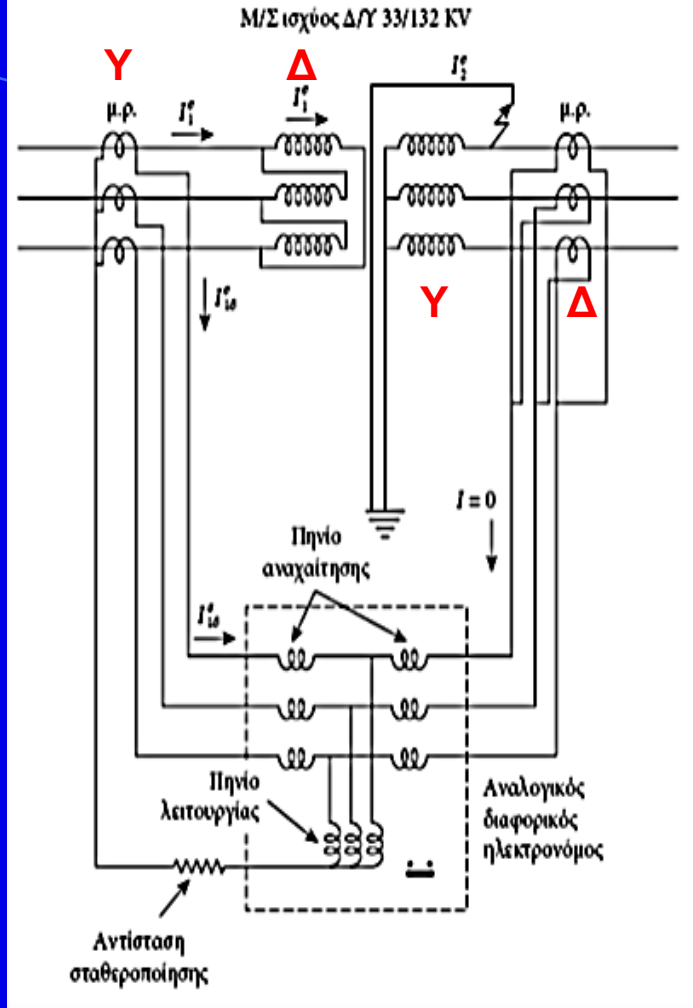
Συνδυασμένη διαφορική και γης προστασία μετασχηματιστών Υ/Δ.

# Παράδειγμα

- Ένας Μ/Σ ανύψωσης τάσης 30 MVA, 33/132 KV, Υ/Δ στέρεα γειωμένος τροφοδοτείται μόνο από την πλευρά των 33 KV.
- Έχει αναλογική διαφορική προστασία ρεύματος και οι μ.ρ. στην πλευρά υψηλής τάσης έχουν ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος 150 A.
- α) Σχεδιάστε το πλήρες κύκλωμα με όλες τις συνδέσεις των μ.ρ. και υπολογίστε τον απαραίτητο λόγο τους ώστε να χρησιμοποιηθούν με ηλεκτρονόμο ονομαστικού ρεύματος 1A.
- β) Αν έχουμε ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος 1000 A για 1Φ βραχυκύκλωμα στον ακροδέκτη της φάσης a των 132 KV (μέσα στη ζώνη προστασίας), υπολογίστε τα ρεύματα σε κάθε τμήμα του αγωγού σύνδεσης και στο πηνίο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου.

Σημείωση: υποθέστε ότι το βραχυκύκλωμα δεν τροφοδοτείται από την πλευρά των 132 KV.

α)



Κύκλωμα και συνδέσεις μ.ρ. για το παράδειγμα

Επειδή οι μ.ρ. στα 132 KV έχουν σύνδεση Δ, το ρεύμα στους αγωγούς σύνδεσης είναι  $\sqrt{3}$  φορές το ρεύμα στο δευτερεύον των μ.ρ.

Άρα για να έχουμε στους αγωγούς σύνδεσης και τον ηλεκτρονόμο ρεύμα 1 A πρέπει το ρεύμα στο δευτερεύον των μ.ρ. να είναι:

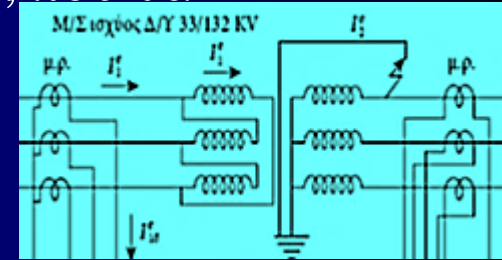
$$1/\sqrt{3} = 0.577 \text{ A και άρα ο λόγος των μ.ρ. είναι } 150/0.577$$



- Επειδή ο λόγος των πολικών τάσεων του Μ/Σ (όχι ο λόγος σπειρών των τυλιγμάτων σε Δ/Υ) είναι  $33/132 = 1/4$  για τα ρεύματα γραμμών του Μ/Σ θα ισχύει ο αντίστροφος λόγος.
- Άρα το ρεύμα πρωτεύοντος των μ.ρ. στη χαμηλή τάση των 33 KV θα είναι:  
 $150 \times 4 = 600 \text{ A}$ ,  
οπότε ο λόγος των μ.ρ. θα είναι 600/1.



(β) Ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα στον ακροδέκτη υψηλής τάσης της φάσης α του Σχήματος δημιουργεί ένα ρεύμα  $I_2^\sigma = 1000 \text{ A}$ , που θα κυκλοφορεί όπως δείχνεται στο Σχήμα.



Το ρεύμα  $I_2^\sigma$  δεν διέρχεται από τους μ.ρ. και επομένως δεν τροφοδοτεί κανένα ρεύμα στον ηλεκτρονόμο.

Τα συζευγμένα τυλίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης της φάσης α έχουν λόγο σπειρών (που είναι ίσος με το λόγο των τάσεων στα άκρα τους)  $33/(132/\sqrt{3})$ . Τα υπόλοιπα τυλίγματα δε συνεισφέρουν ρεύματα βραχυκύκλωσης.

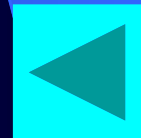
Άρα το ρεύμα  $I_2^\sigma$  θα δημιουργήσει την κυκλοφορία ενός ρεύματος  $I_1^\sigma$ , που δίνεται από τη σχέση:

$$I_1^\sigma = I_2^\sigma \frac{132/\sqrt{3}}{33} \text{ A} = 1000 \frac{132/\sqrt{3}}{33} \text{ A} = 2309.5 \text{ A}$$

Όλο το ρεύμα  $I_1^\sigma$  τροφοδοτείται από τη γραμμή και μετασχηματίζεται στο ρεύμα δευτερεύοντος των μ.ρ.  $I_{1\delta}^\sigma$  που ισούται με:

$$I_{1\delta}^\sigma = I_1^\sigma \frac{1}{600} = 2309.5 \frac{1}{600} \text{ A} = 3.849 \text{ A}$$

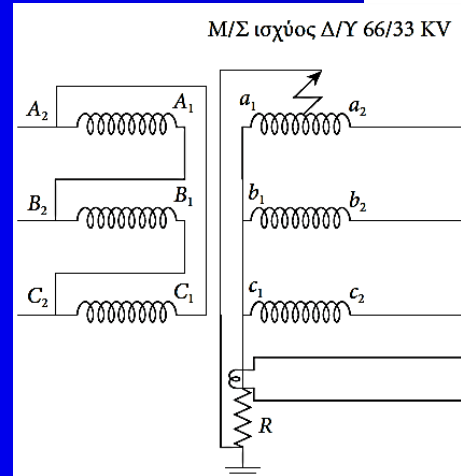
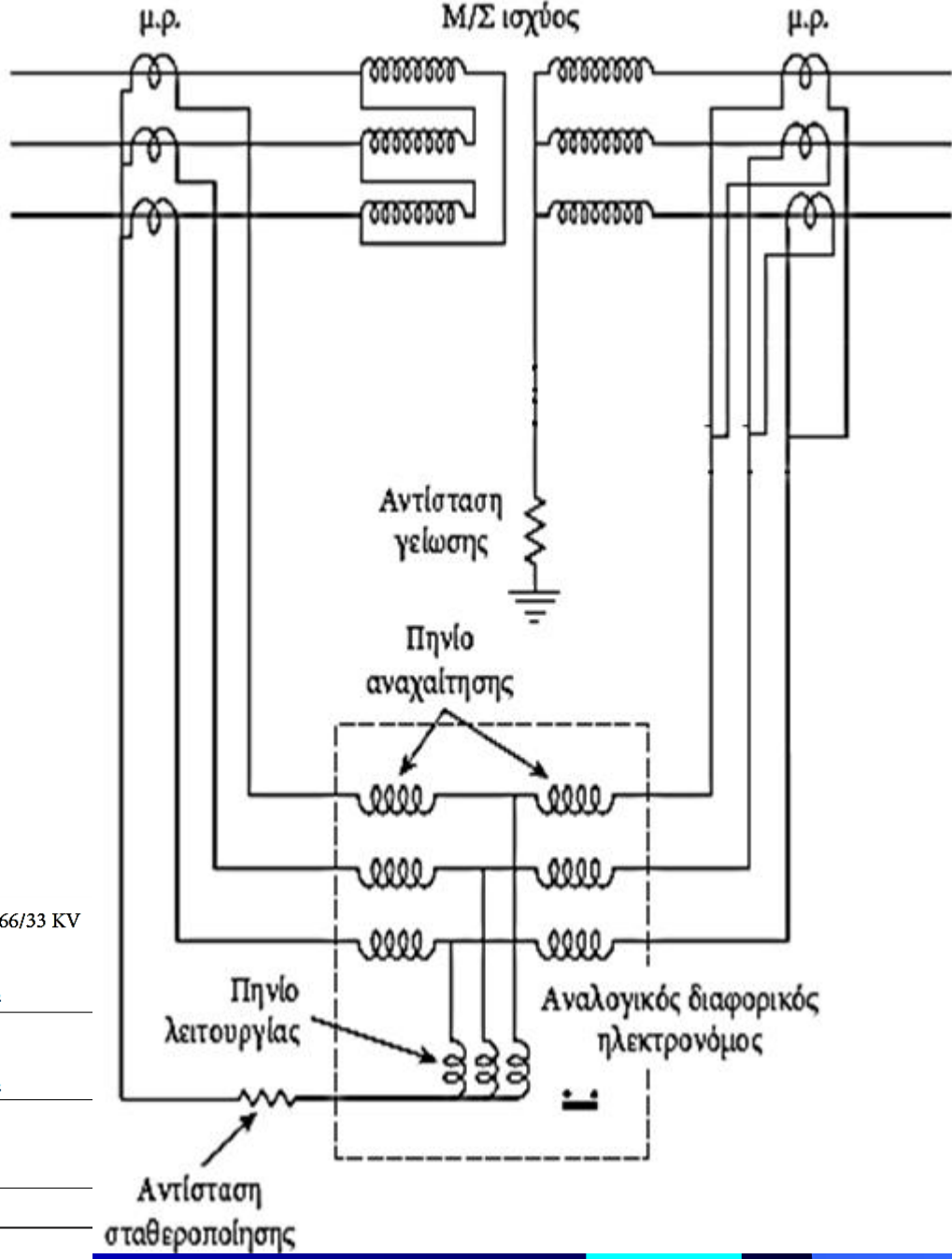
Αυτό είναι το ζητούμενο ρεύμα στον αγωγό σύνδεσης και τον ηλεκτρονόμο.



# Παράδειγμα ανάγκης προστασίας σφάλματος γης

- Ένας Μ/Σ υποβιβασμού τάσης 50 MVA, 66/33 KV,  $\Delta/Y$  γειωμένος μέσω αντίστασης έχει αναλογική διαφορική προστασία.
- Ο λόγος των μ.ρ. στην πλευρά υψηλής (πρωτεύον τύλιγμα) και χαμηλής τάσης (δευτερεύον τύλιγμα) είναι 600/5 A και 1200/2.89 A, αντίστοιχα. Ο διαφορικός ηλεκτρονόμος έχει επίπεδο επιλογής 20% του ονομαστικού του ρεύματος (5A).
- α) Υπολογίστε τι ποσοστό του τυλίγματος των 33 KV δεν προστατεύεται από εσωτερικό 1Φ βραχυκύκλωμα με τη γη, όταν η αντίσταση γείωσης είναι 1  $\mu\Omega$  (με βάση τις ονομαστικές τιμές του Μ/Σ) και δεν υπάρχει τροφοδοσία του βραχυκυκλώματος από την πλευρά των 33 KV. Υποθέτουμε ότι μπορούμε να παραλείψουμε την αντίσταση σκέδασης των τυλιγμάτων, επειδή η αντίσταση γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερη.
- β) Για να αυξήσουμε το ποσοστό του τυλίγματος που προστατεύουμε, προσθέτουμε προστασία σφάλματος γης. Στην προστασία αυτή όλοι οι μ.ρ. έχουν λόγο 800/5 A και το επίπεδο επιλογής του ηλεκτρονόμου είναι πάλι 20% του ονομαστικού του ρεύματος (5A). Υπολογίστε τι ποσοστό (επί τοις %) του τυλίγματος των 33 KV δεν προστατεύεται από εσωτερικό 1Φ βραχυκύκλωμα με τη γη.

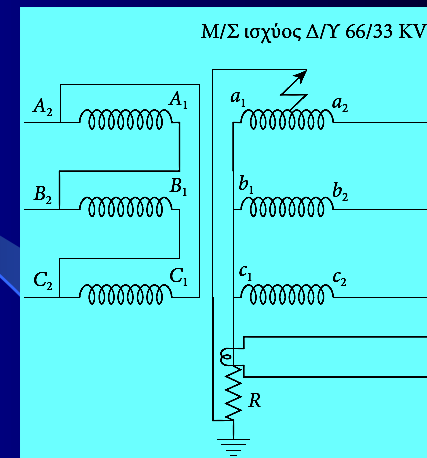
- α) Έστω  $x\%$  το ποσοστό του τυλίγματος από τον κοινό κόμβο του Υ που γίνεται το βραχυκύκλωμα.
- Αν  $V_s$  η ονομαστική φασική τάση του Υ, τότε στα άκρα της αντίστασης γείωσης θα αναπτυχθεί μία τάση  $x \cdot V_s$ .
- Αυτή θα προκαλέσει στην αντίσταση ένα ρεύμα  $x \cdot V_s / R$ .
- Αυτό το ρεύμα κυκλοφορεί εντός του Μ/Σ και δεν το βλέπουν στο δευτερεύον του Μ/Σ οι μ.ρ.



Αν στο μετασχηματιστή ο λόγος σπειρών είναι  $N_s/N_p$ , επειδή συμμετέχει στο δευτερεύον μόνο το τμήμα του τυλίγματος  $xN_s$ , ο λόγος σπειρών γίνεται  $xN_s/N_p$ . Άρα το ρεύμα στην αντίσταση γείωσης προκαλεί ένα ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή:

$$xV_s / R \cdot xN_s / N_p = \frac{x^2 V_s N_s}{RN_p}$$

Σημείωση: στο προηγούμενο παράδειγμα είχαμε «συμμετοχή» όλου του τυλίγματος στο βραχυκύκλωμα, οπότε εκεί  $x=100\%$ .



Αν  $K$  είναι ο λόγος του μ.ρ. στο πρωτεύον του μ/σ, το ρεύμα στο δευτερεύον αυτού του μ.ρ. και άρα το ρεύμα που τροφοδοτείται στον ηλεκτρονόμο είναι:

$$I_R = \frac{x^2 V_s N_s}{RN_p K}$$

Σύμφωνα με αυτήν τη σχέση ζητούμε το  $x$  να πάρει μια τέτοια τιμή που θα κάνει το  $I_R$  τουλάχιστον ίσο με το επίπεδο επιλογής του ηλεκτρονόμου.

Αν λύσουμε αυτήν τη σχέση ως προς  $x$  και μετατρέψουμε όλα τα μεγέθη σε pu (με βάση τα ονομαστικά μεγέθη του μετασχηματιστή ισχύος) παίρνουμε:

$$x^2 = \sqrt{3} (PFS)_{pu} R_{pu} / V_{pu}$$

όπου  $(PFS)_{pu}$  είναι το ρεύμα στο πρωτεύον του μ.ρ. σε pu που είναι ικανό να θέσει σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο.

Αυτό το ρεύμα σε A, σύμφωνα με τα δεδομένα του παραδείγματος είναι:

$$0.2 \cdot 5 \cdot \frac{600}{5} = 120 \text{ A}$$

Ηλεκτρονόμος: 20% επίπεδο επιλογής, 5A ονομαστικό ρεύμα.  
μ.ρ: λόγος μετασχηματισμού 600/5

$$x^2 = \sqrt{3} (PFS)_{pu} \frac{R_{pu}}{V_{pu}}$$

Η βάση ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_b = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 66} = 437.39 \text{ A}$$

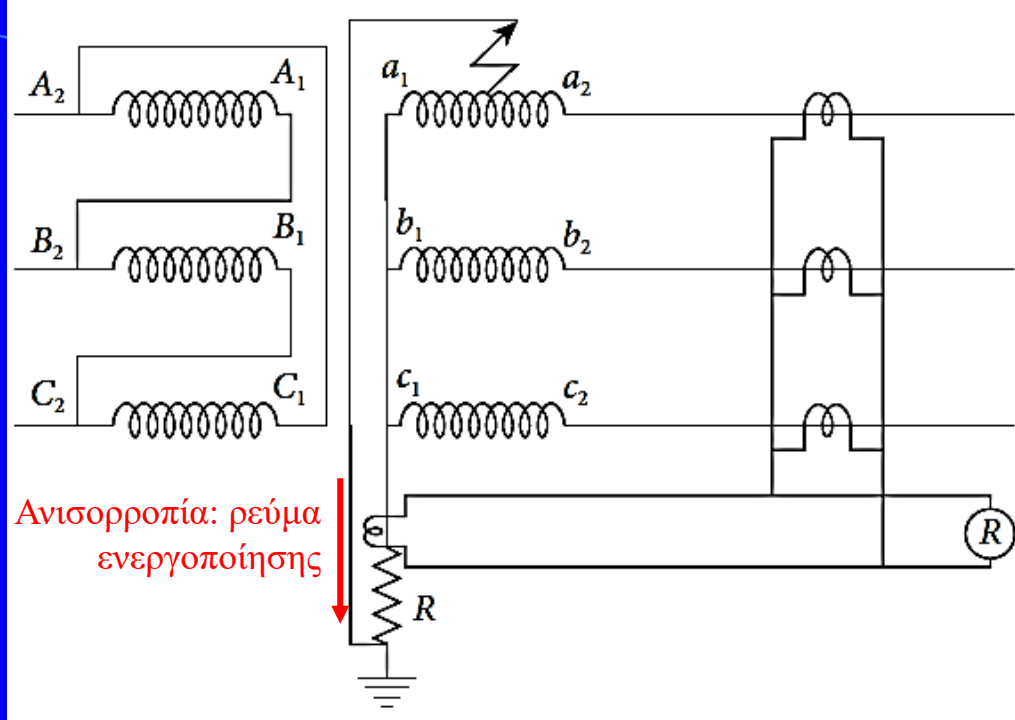
**M/Σ 50 MVA, 66/33 KV, Δ/Y**

και  $(PFS)_{pu} = 120 / 437.39 pu = 0.27435 pu$

Άρα:  $x^2 = \sqrt{3} \cdot 0.27435 \cdot 1/1 = 0.47572$  και  $x = 0.68972$  ή  $x = 68.972 \%$

Δηλαδή περίπου το 70% του τυλίγματος (με αρχή τον κόμβο του αστέρα) δεν προστατεύεται, επειδή αν γίνει ένα βραχυκύκλωμα σ' αυτό το τμήμα του τυλίγματος δεν θα αναπτυχθεί αρκετό διαφορικό ρεύμα για να θέσει σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο.





β) Σε αυτόν τον τύπο προστασίας αν  $K$  είναι ο λόγος μετασχηματισμού του μ.ρ. στον ουδέτερο,  $I_s$  το επίπεδο επιλογής του ηλεκτρονόμου και  $R$  η αντίσταση γείωσης, η ελάχιστη τάση που απαιτείται για να δημιουργήσει το ρεύμα που θα ενεργοποιήσει τον ηλεκτρονόμο είναι:

$$V_{\min} = KI_s R \quad KI_s : \text{ρεύμα πρωτεύοντος μ.ρ. ουδέτερου (ρεύμα προς γη)}$$

Το ποσοστό  $x$  του τυλίγματος (μετρούμενο από τον κόμβο του αστερά) στο οποίο αναπτύσσεται αυτή η τάση δίνεται από τη σχέση:  $V_{\min} = x \cdot V_s \Rightarrow$

$$x = \frac{V_{\min}}{V_s} = \frac{KI_s R}{V_s}$$

όπου  $V_s$  είναι η φασική τάση του τυλίγματος σε  $V$ .

**M/Σ 50 MVA, 66/33 KV, Δ/Y**

Για την περίπτωση μας έχουμε:

$$KI_s = \frac{800}{5} \cdot 0.2 \cdot 5 = 160 \text{ A}$$

$$x = \frac{V_{\min}}{V_s} = \frac{KI_s R}{V_s}$$

και βάση αντίστασης  $Z_b = \frac{33^2}{50} = 21.78 \Omega$ , άρα  $R = 1 pu = 21.78 \Omega$

$$\text{Άρα } x = \frac{160 \cdot 21.78}{(33/\sqrt{3}) \cdot 10^3} = 0.1829 \text{ ή } x = 18.29 \%$$

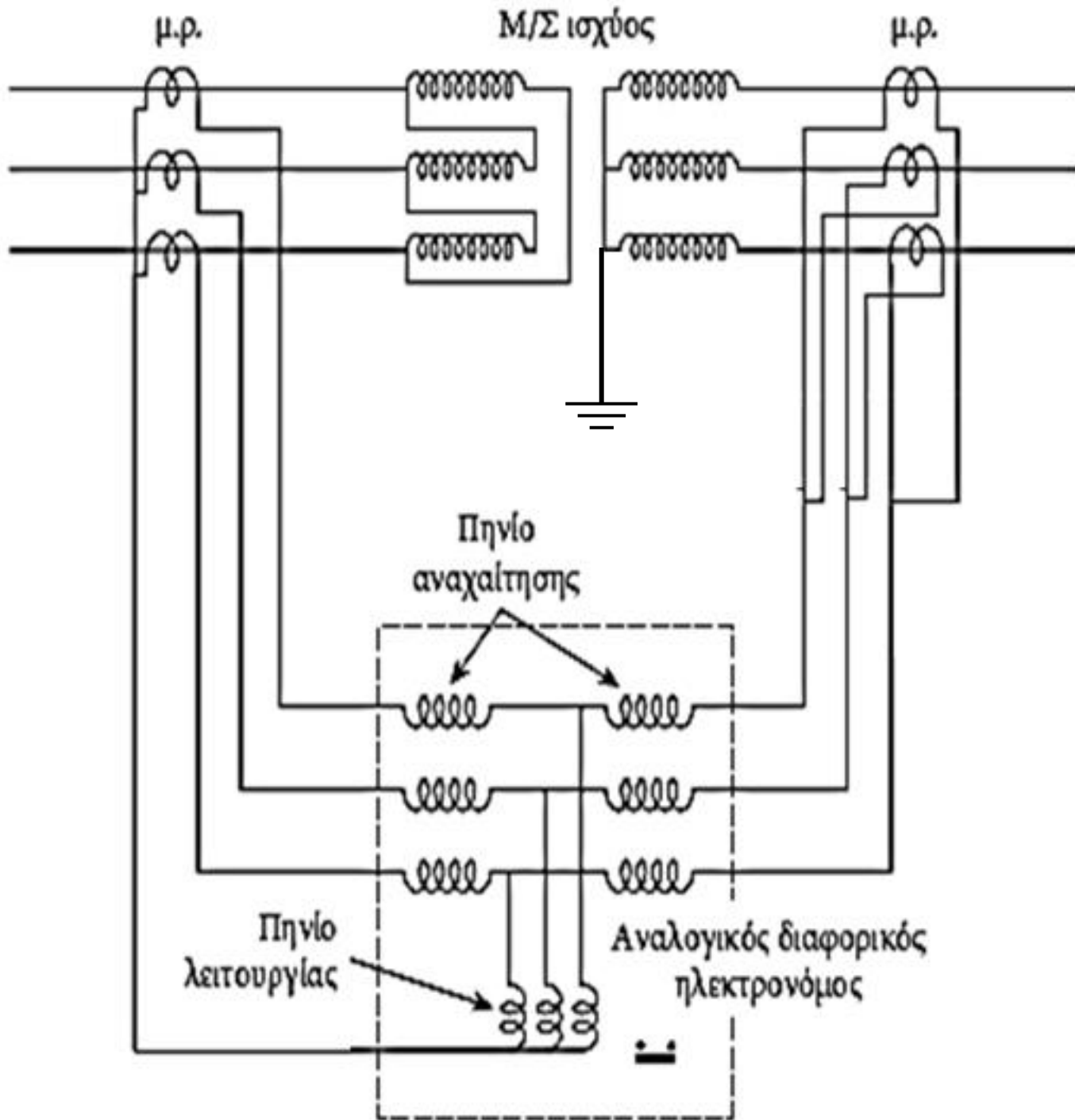
Βλέπουμε ότι με αυτόν τον τύπο προστασίας έχουμε μία σημαντική ελάττωση του ποσοστού τυλίγματος που δεν προστατεύεται.

# Διαφορικοί ηλεκτρονόμοι και προστασία Μ/Σ

- Στην αναλογική διαφορική προστασία των Μ/Σ ρεύμα ανισορροπίας προκαλείται και από την τυποποίηση των μ.ρ.
- Οι μ.ρ. που υπάρχουν στην αγορά συνήθως δεν έχουν ακριβώς τους λόγους που εμείς επιθυμούμε για να εξασφαλίσουμε ισορροπία των ρευμάτων που τροφοδοτούμε στον ηλεκτρονόμο.
- Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα οι αναλογικοί διαφορικοί ηλεκτρονόμοι διαθέτουν μεταβλητές λήψεις στα πηνία αναχαίτισής τους.
- Όμως και αυτές είναι διακριτές και περιορισμένες και γι' αυτό παραμένει πάντα ένα ποσοστό ανισορροπίας στα τροφοδοτούμενα ρεύματα.
- Αυτό το λάθος προστίθεται στο λάθος που προκύπτει από την περιορισμένη ακρίβεια μετασχηματισμού των μ.ρ. και το πιθανό λάθος από το μεταβλητό λόγο σπειρών του Μ/Σ ισχύος, αλλά ... φαίνεται να μη δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα στον αναλογικό διαφορικό ηλεκτρονόμο.
- Ακολουθεί παράδειγμα.

# Παράδειγμα

- Ένας Μ/Σ υποβιβασμού τάσης 42 MVA, 69/12.5 KV, Δ/Υ στέρα γειωμένος έχει μεταβλητό λόγο σπειρών σε ποσοστό 10%.
- Ο λόγος των μ.ρ. στην πλευρά υψηλής και χαμηλής τάσης είναι αντίστοιχα 400/5 A και 2000/5 A και έχουν μέγιστο σφάλμα μετασχηματισμού 5%.
- Ο Μ/Σ ζητούμε να προστατευθεί με αναλογικό (ή πολωμένο) διαφορικό ηλεκτρονόμο 50%.
- Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα λειτουργίας πρέπει να γίνει τουλάχιστον 50% του ρεύματος αναχαίτισης για να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος.
- Ο ηλεκτρονόμος διαθέτει μεταβλητές λήψεις στα πηνία αναχαίτισης: 5.0, 5.5, 6.0, 6.6, 7.3, 8.0, 9.0 και 10.0.
- Επειδή το ονομαστικό ρεύμα είναι 5 A, μία λήψη π.χ. 8.0, σημαίνει ότι ένα τροφοδοτούμενο στον ηλεκτρονόμο ρεύμα  $I$  γίνεται με τη συγκεκριμένη λήψη  $5 \cdot I/8$ .
- Ζητείται να επιλέξετε τις κατάλληλες λήψεις στον αναλογικό διαφορικό ηλεκτρονόμο και να ελέγξετε ότι υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ο ηλεκτρονόμος δεν κινδυνεύει να ενεργοποιηθεί.





## Λύση:

Πρώτα θα υπολογίσουμε σε κανονική φόρτιση τα ρεύματα που θα δεχθεί ο ηλεκτρονόμος από τις δύο πλευρές του μετασχηματιστή ισχύος:

*Πλευρά υψηλής τάσης:*

$$\text{Ρεύμα γραμμής } I = \frac{42000}{\sqrt{3} \cdot 69} \text{ A} = 351.43 \text{ A}$$

**M/Σ 42 MVA, 69/12.5 KV, Δ/Y**

$$\text{Ρεύμα ηλεκτρονόμου } I_R = 351.43 \cdot \frac{5}{400} \text{ A} = 4.39 \text{ A}$$

*Πλευρά χαμηλής τάσης:*

$$\text{Ρεύμα γραμμής } I = \frac{42000}{\sqrt{3} \cdot 12.5} \text{ A} = 1939.9 \text{ A}$$

**μ.ρ. συνδεδεμένοι σε Δ**

$$\text{Ρεύμα ηλεκτρονόμου } I_R = 1939.9 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{5}{2000} \text{ A} = 8.4 \text{ A}$$

Για την πλευρά υψηλής τάσης επιλέγουμε την πλησιέστερη λήψη του ηλεκτρονόμου που είναι 5.0. Για την πλευρά χαμηλής τάσης πρέπει να επιλέξουμε μία λήψη  $x$  που θα κάνει τα δύο ρεύματα ίσα, οπότε έχουμε:

$$4.39 \cdot \frac{5}{5} = 8.4 \cdot \frac{5}{x} \Rightarrow x = 9.567$$

Επειδή δεν υπάρχει τέτοια λήψη επιλέγουμε την πλησιέστερη που είναι η 10.0. Όμως με αυτήν την επιλογή, με κανονικές συνθήκες φορτίου, δημιουργείται ένα σφάλμα ανισοροπίας που είναι:

$$\text{Σφάλμα \%} = \frac{10 - 9.567}{9.567} \cdot 100 = 4.53 \%$$

Εκτός από αυτό το σφάλμα υπάρχει το σφάλμα λόγω της μεταβολής του λόγου στο μετασχηματιστή ισχύος, που είναι στη χειρότερη περίπτωση 10% και το σφάλμα των μ.ρ. που είναι 5%.

Αν θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση, όπου όλα τα σφάλματα αθροίζονται με τη μεγαλύτερη τιμή τους, τότε έχουμε :

$$\text{Συνολικό σφάλμα \%} = (4.53 + 10 + 5)\% = 19.53\%$$

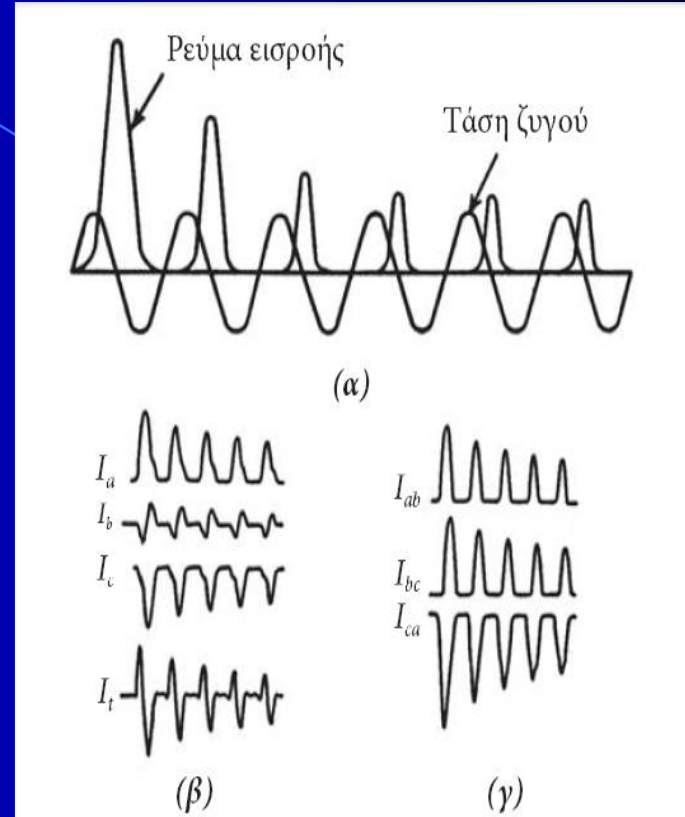
Άρα σε κανονική λειτουργία το ρεύμα στο πηνίο λειτουργίας λόγω σφαλμάτων μπορεί να φθάσει το 19.53% του ρεύματος στο πηνίο αναχαίτισης. Επειδή η πόλωση του ηλεκτρονόμου είναι 50% έχουμε ένα περιθώριο ευαισθησίας που είναι :

$$\text{περιθώριο} = 50\% - 19.53\% = 30.47\%$$

που θεωρείται αρκετό.

# Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής

- Στηρίζονται στην ανίχνευση της ιδιαίτερης μορφής του ρεύματος όταν κυριαρχεί το φαινόμενο.
- Υπάρχουν έντονες αρμονικές: μονές και ζυγές.
- Είναι φθίνουσες πολύ γρήγορα όσο αυξάνεται η τάξη τους.



Τυπικές κυματομορφές ρεύματος μαγνήτισης.  
 (α) Θεωρητικές.  
 (β) Πραγματικά ρεύματα στον αστέρα του μετασχηματιστή.  
 (γ) Πραγματικά ρεύματα στο τρίγωνο του μετασχηματιστή.

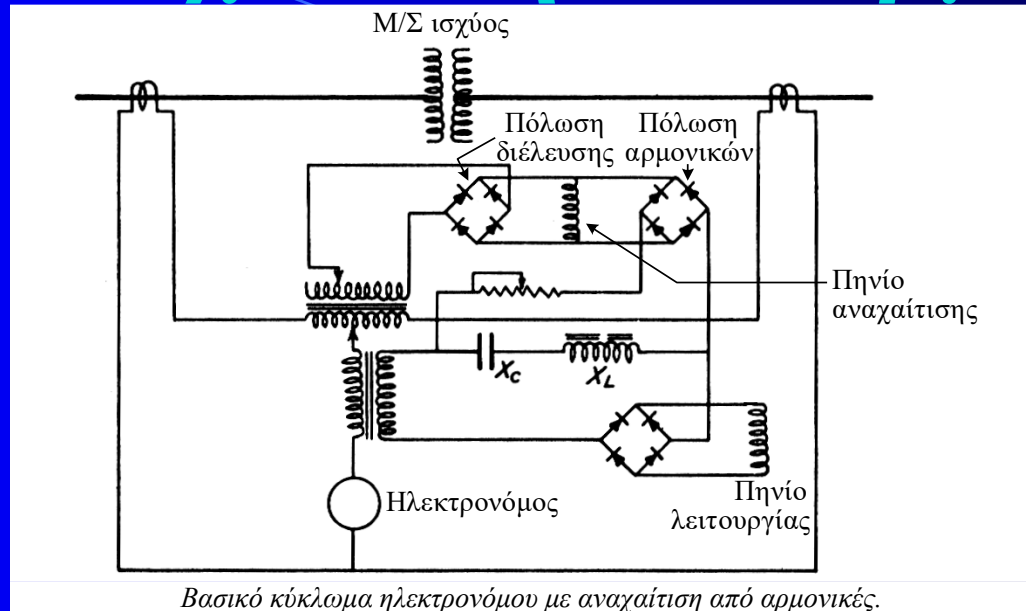
Συνιστώσα	ΣΡ	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>
Μέτρο %	55%	63%	26.8%	5.1%	4.1%	3.7%	2.4%

Συνιστώσα	ΣΡ	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>
Μέτρο %	55%	63%	26.8%	5.1%	4.1%	3.7%	2.4%

## (i) Απαλοιφή άρτιων αρμονικών.

- Η τρίτη αρμονική και τα πολλαπλάσια της δεν εμφανίζονται στις συνδέσεις των μ.ρ. επειδή αυτές οι συνιστώσες κυκλοφορούν στο τρίγωνο του μετασχηματιστή και στο τρίγωνο των μ.ρ. που βρίσκονται στην πλευρά του αστήρα.
- Οι συνιστώσες ΣΡ και οι άρτιες αρμονικές μπορούν να απαλειφθούν από το πηνίο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου και να προστεθούν στο πηνίο αναχαίτισης.
- Με αυτόν τον τρόπο μένουν η 5<sup>η</sup> , 7<sup>η</sup> ,κ.λ.π. αρμονικές που μπορούν να αγνοηθούν λόγω του μικρού τους εύρους ή να αποκοπούν με φίλτρα.

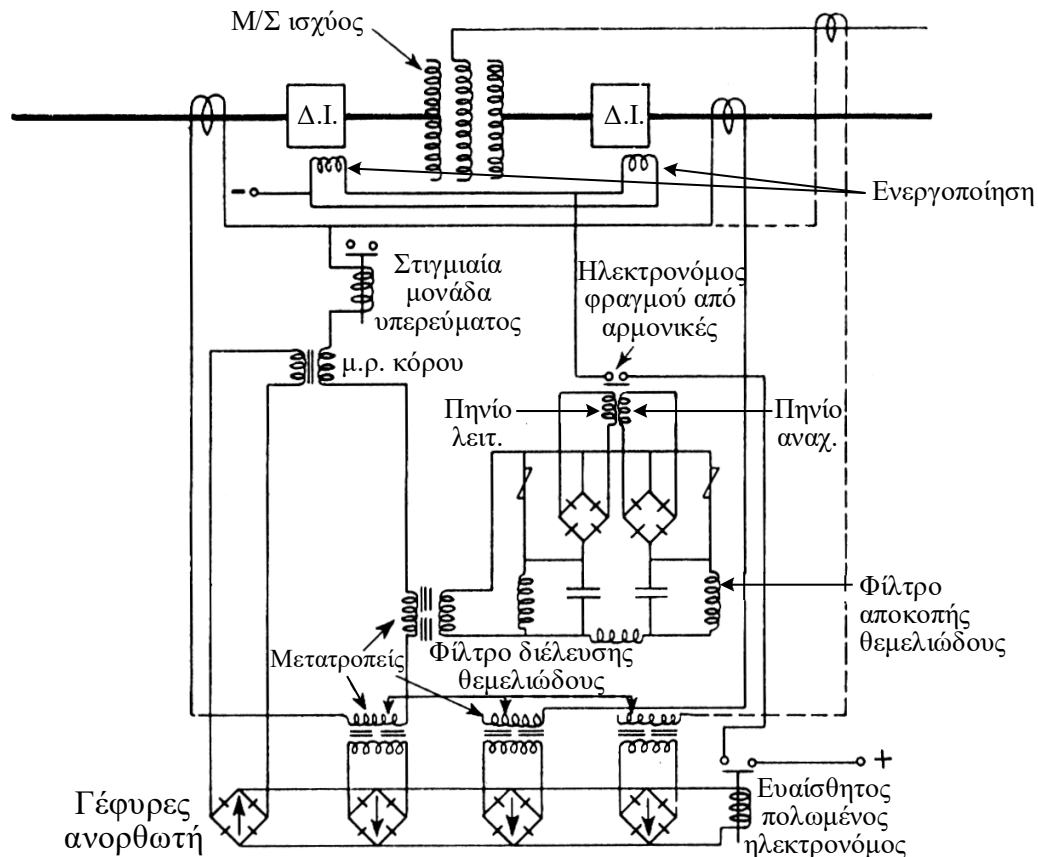
# (ii) Αναχαίτιση από αρμονικές.



- Φιλτράρουμε τις αρμονικές από το διαφορικό ρεύμα, τις ανορθώνουμε και τις προσθέσουμε στο πηνίο αναλογικής αναχαίτισης.
- Η αναχαίτιση αρμονικών αποκτάται από το κύκλωμα συντονισμού  $X_C$  ,  $X_L$ , που επιτρέπει μόνο ρεύμα της θεμελιώδους συχνότητας να μπαίνει στο κύκλωμα λειτουργίας, ενώ οι συνιστώσες ΣΡ και οι αρμονικές τροφοδοτούνται στο πηνίο αναχαίτισης.
- Ο ηλεκτρονόμος ρυθμίζεται να μην λειτουργεί όταν η 2η αρμονική υπερβαίνει το 15% της θεμελιώδους. Το ελάχιστο επίπεδο επιλογής είναι 15% του ονομαστικού ρεύματος του μ.ρ. και ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας είναι δύο περίοδοι.

# (iii) Φραγμός από αρμονικές.

- Μία άλλη μέθοδος είναι να χρησιμοποιείται ένας ξεχωριστός ηλεκτρονόμος φραγμού, που οι επαφές του είναι σε σειρά με τις επαφές του διαφορικού ηλεκτρονόμου. Αυτός κλίνει τις επαφές του όταν η δεύτερη αρμονική είναι μικρότερη από 15% της θεμελιώδους.



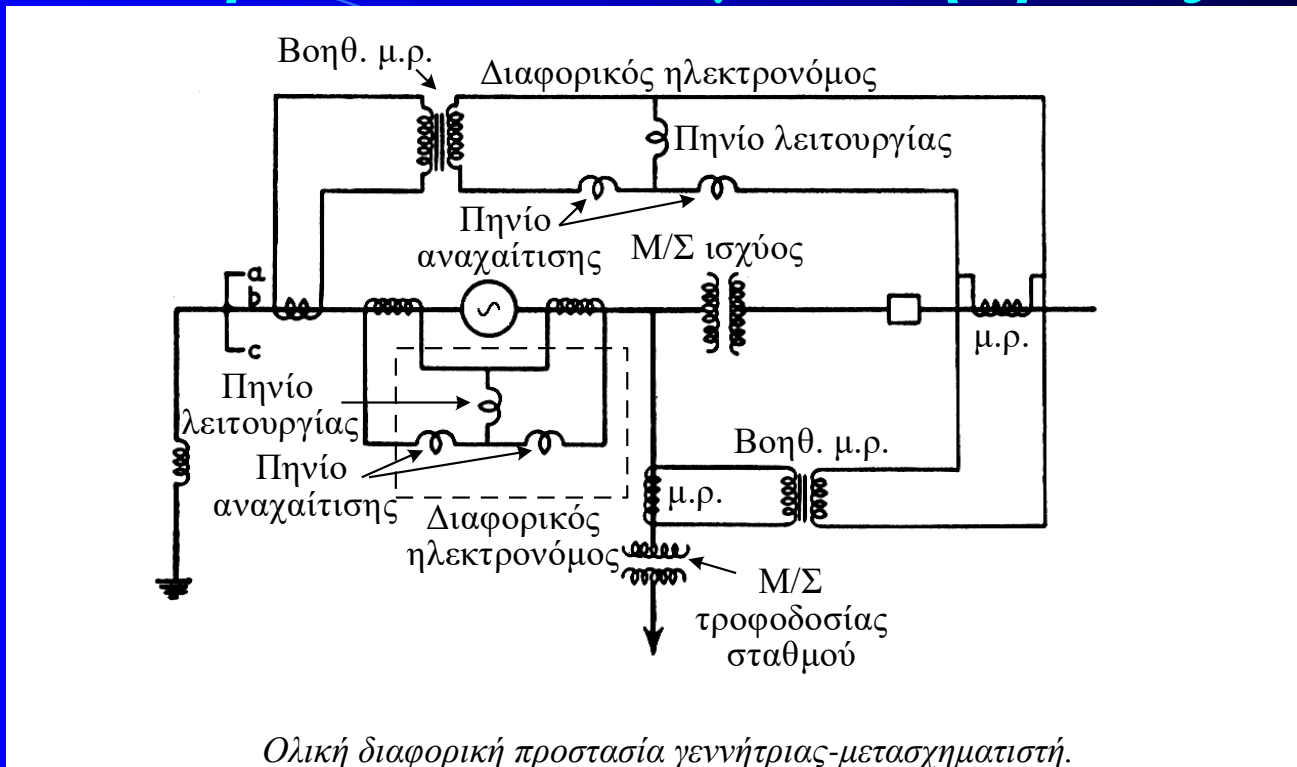
Βασικό κύκλωμα ενός ηλεκτρονόμου φραγμού από αρμονικές.



## (iv) Φραγμός συντονισμού.

- Αυτή η μέθοδος είναι όμοια με τη μέθοδο φραγμού από αρμονικές εκτός από το γεγονός ότι ο ηλεκτρονόμος φραγμού συντονίζεται στη συχνότητα του συστήματος και τροφοδοτείται από ανορθωμένο ρεύμα από το διαφορικό κύκλωμα.
- Το μαγνητικό ρεύμα εισροής του μετασχηματιστή ισχύος, όταν ανορθωθεί, δίνει τον αριθμό των παλμών ΣΡ στο δευτερόλεπτο, που αντιστοιχεί στη συχνότητα του συστήματος και ο ηλεκτρονόμος φράσσει.
- Όμως, κατά τη διάρκεια ενός εσωτερικού βραχυκυκλώματος το ρεύμα έχει μεγάλη θεμελιώδη συνιστώσα: όταν ανορθωθεί δίνει διπλάσιο αριθμό παλμών στο δευτερόλεπτο.
- Τότε ο ηλεκτρ. φραγμού δεν λειτουργεί, επιτρέποντας στο διαφορικό ηλεκτρονόμο να ενεργοποιηθεί.

# Ενιαία προστασία γεννήτριας Μ/Σ



Ολική διαφορική προστασία γεννήτριας-μετασχηματιστή.

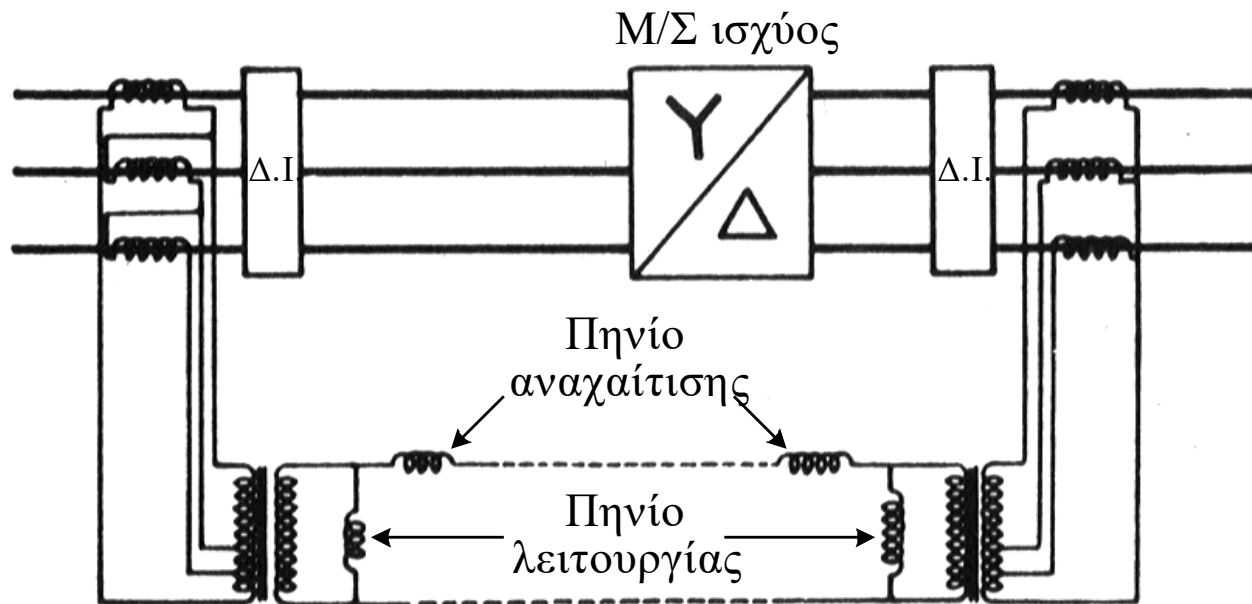
Ο Μ/Σ και η γεννήτρια διαθέτουν τα κανονικά κυκλώματα προστασίας τους, αλλά επί πλέον ένας πολωμένος διαφορικός ηλεκτρονόμος συνδέεται για να προστατεύει και τις δύο μονάδες μαζί.

Ο ηλεκτρονόμος συνήθως ρυθμίζεται για ένα επίπεδο επιλογής 20% και μία πόλωση 20%.

Πόλωση είναι ο λόγος σπειρών του πηνίου αναχαίτισης προς τις σπείρες του πηνίου λειτουργίας (το ρεύμα λειτουργίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 20% του ρεύματος αναχαίτισης για να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος).

# Προστασία Μ/Σ & αγωγών τροφοδοσίας

- Όταν δεν υπάρχει διακόπτης μεταξύ του Μ/Σ και του τροφοδότη που ξεκινάει από αυτόν, οι δύο μονάδες προστατεύονται μαζί.
- Ο ηλεκτρονόμος είναι τύπου οδηγού σύρματος κυκλοφορούντος ρεύματος.



*Προστασία μετασχηματιστή και αγωγών τροφοδοσίας του.*