



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Προστασία Σ.Η.Ε

Ενότητα 9: Προστασία μετασχηματιστών ισχύος

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:

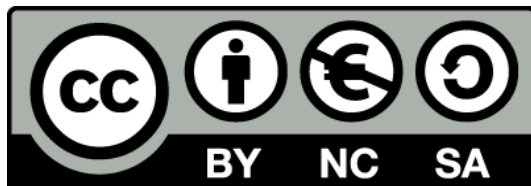
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

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(1)

- Οι συσκευές προστασίας μετασχηματιστών 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 μετασχηματιστών ανακαλύπτεται από θερμικούς ηλεκτρονόμους, που θέτουν σε λειτουργία ένα σήμα κινδύνου.
- Για εξωτερικά βραχυκυκλώματα χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι υπέρεντασης ή ασφάλειες για προστασία υποστήριξης.
- Η πρωτεύουσα προστασία χρησιμοποιείται για τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, που είναι πάρα πολύ επικίνδυνα και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:



Εισαγωγή(2)

- **Ομάδα (α).** Είναι 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.



Εισαγωγή(3)

- **Ομάδα (β).** Είναι 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 ποσότητα λαδιού ή εμπόδια στην ελεύθερη κίνηση λαδιού, που δημιουργούν τοπικές υπέρθερμες περιοχές στα τυλίγματα.
- (iv) Σε περίπτωση παράλληλων μετασχηματιστών δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων και υπερθέρμανση.



Προστασία υπερθέρμανσης(1)

- Οι υπερφορτίσεις στους μετασχηματιστές δημιουργούν παροδικές υπερθερμάνσεις και ελάττωση του χρόνου ζωής τους.
- Το μέγεθος και η διάρκεια της αποδεκτής υπερφόρτισης εξαρτάται από την πρόσφατη ιστορία της 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 μετασχηματιστή λόγω υπερθέρμανσης πραγματοποιείται σε μεγάλο χρόνο και σε πολλές περιπτώσεις ειδική προστασία δεν υπάρχει.

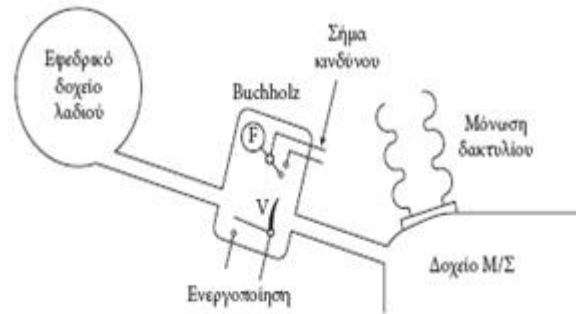


Προστασία υπερθέρμανσης(2)

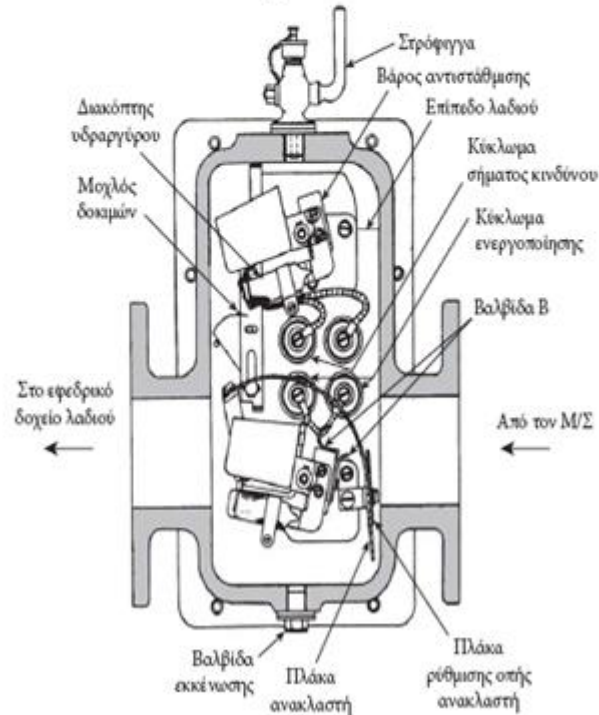
- Κατά μία ειδική μέθοδο τοποθετείται στο πάνω μέρος του μετασχηματιστή ένα μικρό δοχείο, που περιέχει ένα αισθητήρα θερμότητας (π.χ. μία μη γραμμική αντίσταση) και μία πηγή θερμότητας (π.χ. μία ωμική αντίσταση) στην οποία τροφοδοτείται ρεύμα ανάλογο της φόρτισης του μετασχηματιστή.
- Με κατάλληλη σχεδίαση 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 μετασχηματιστή και ένδειξη για την πιθανή απώλεια ζωής του.



Ηλεκτρονόμοι αερίων



α)



β)

(α) Αρχικό διάγραμμα ηλεκτρονόμου Buchholz.

(β) Μοντέρνος ηλεκτρονόμος Buchholz.



Ηλεκτρονόμοι αιφνίδιας πίεσης

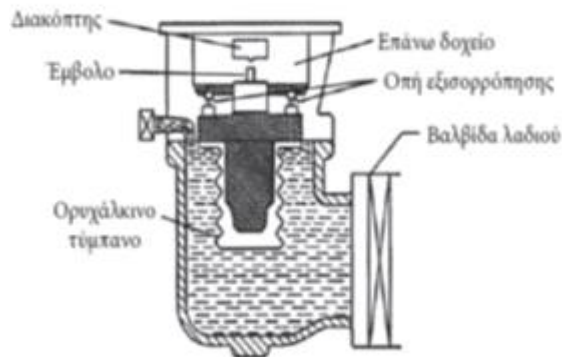
- Στους μετασχηματιστές, που έχουν στο επάνω μέρος ένα στρώμα αερίου αντί για εφεδρικό δοχείο, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον ηλεκτρονόμο του Buchholz, γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι αιφνίδιας πίεσης.
- Αυτοί τοποθετούνται μέσα στη δεξαμενή και λειτουργούν με το ρυθμό μεταβολής της πίεσης.



α)

(α) Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρονόμου αιφνίδιας πίεσης.

(β) Σύγχρονος ηλεκτρονόμος αιφνίδιας πίεσης.

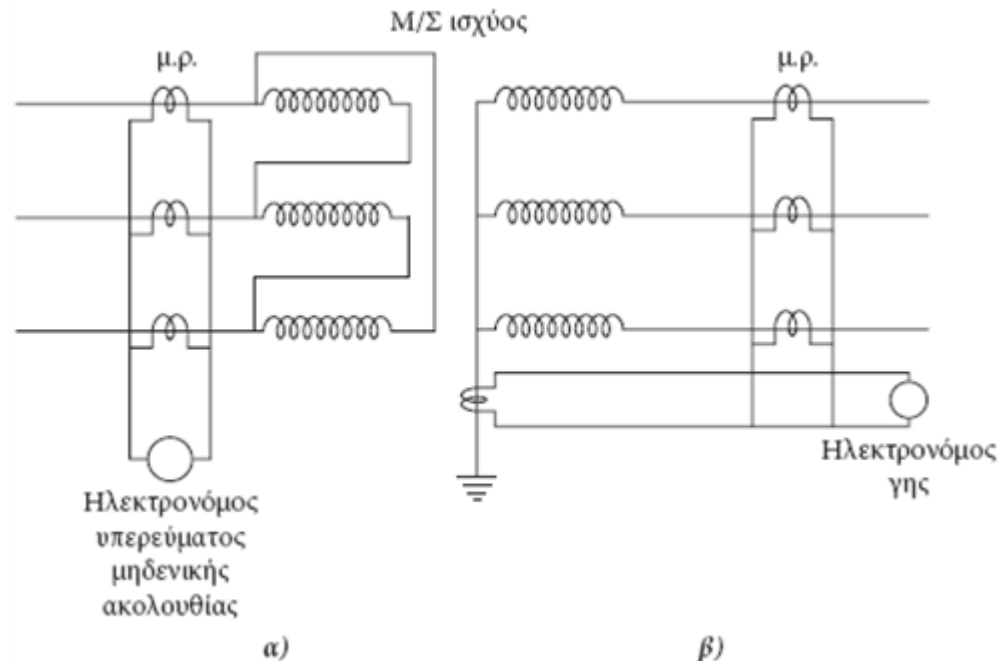


β)



Προστασία βραχυκυκλωμάτων γης(1)

- Για βραχυκυκλώματα γης τυλίγματα μετασχηματιστών συνδεδεμένα σε τρίγωνο και μη γειωμένο αστέρα προστατεύονται καλύτερα με ηλεκτρονόμους υπέρτάσης μηδενικής ακολουθίας Σχ. α, ενώ για τυλίγματα μετασχηματιστών συνδεδεμένα σε γειωμένο αστέρα χρησιμοποιείται το κύκλωμα του Σχ. β .



Προστασία μετασχηματιστών από βραχυκυκλώματα γης.



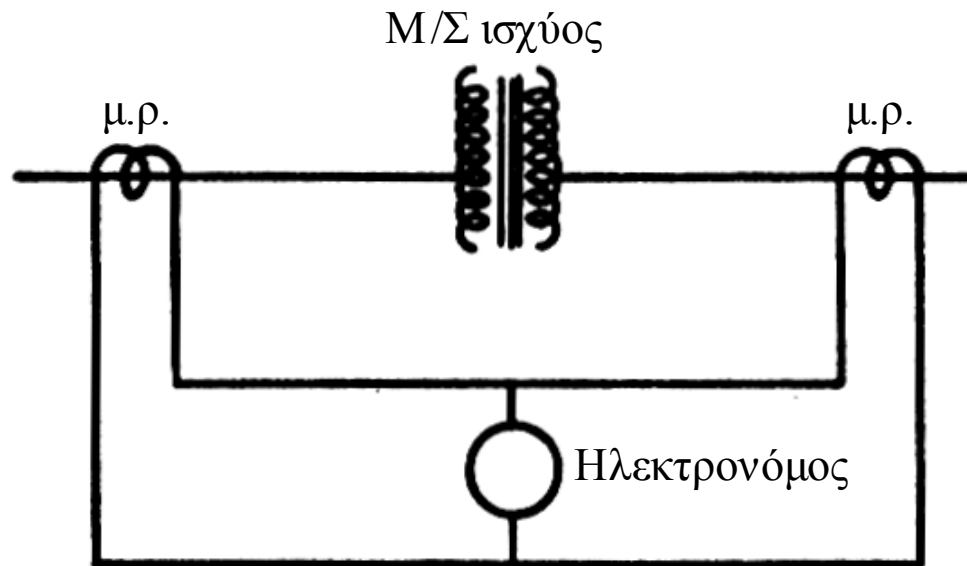
Προστασία βραχυκυκλωμάτων γης(2)

- Για το Σχ. β οι τρίτες αρμονικές και στις τρεις φάσεις είναι συμφασικές και συμπεριφέρονται σαν συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας.
- Ευτυχώς, συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα, που εμφανίζουν αυτό το πρόβλημα, είναι πολύ σπάνια.
- Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με συντονισμό του ηλεκτρονόμου στη θεμελιώδη ή με τη χρήση φίλτρων για την τρίτη αρμονική.
- Το κύκλωμα του Σχ. β χρησιμοποιείται για να αυξηθεί το ποσοστό του τυλίγματος που προστατεύεται με αναλογική διαφορική προστασία. Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται στη διαφορική προστασία μετασχηματιστών με τυλίγματα Υ γειωμένα.



Πολωμένη διαφορική προστασία μετασχηματιστών(1)

- Ένας διαφορικός ηλεκτρονόμος μετασχηματιστή συγκρίνει τα ρεύματα στις περιελίξεις του μετασχηματιστή μέσω μετασχηματιστών ρεύματος, των οποίων ο λόγος είναι τέτοιος, ώστε να κάνει τα ρεύματα δευτερεύοντος ίσα, εκτός από το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή που είναι σχετικά μικρό.



Βασική αρχή διαφορικής προστασίας μετασχηματιστή.



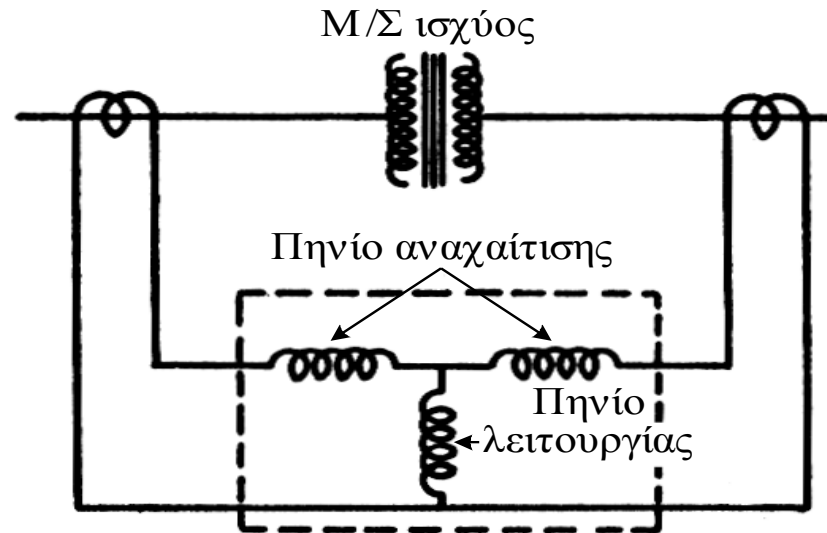
Πολωμένη διαφορική προστασία μετασχηματιστών(2)

- Μία απλή διαφορική προστασία, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, παρουσιάζει τα έξης προβλήματα :
- (i) Κατά τη διάρκεια σοβαρών εξωτερικών σφαλμάτων οι μετασχηματιστές ρεύματος με τα διαφορετικά τυλίγματα υφίστανται διαφορετική μαγνήτιση κόρου, που επιφέρει σημαντική διαφορά στα ρεύματα δευτερεύοντος και λειτουργία του ηλεκτρονόμου.
- (ii) Όλοι οι μεγάλοι σύγχρονοι μετασχηματιστές 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 μετασχηματιστή 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.



Πολωμένη διαφορική προστασία μετασχηματιστών(3)

- 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.

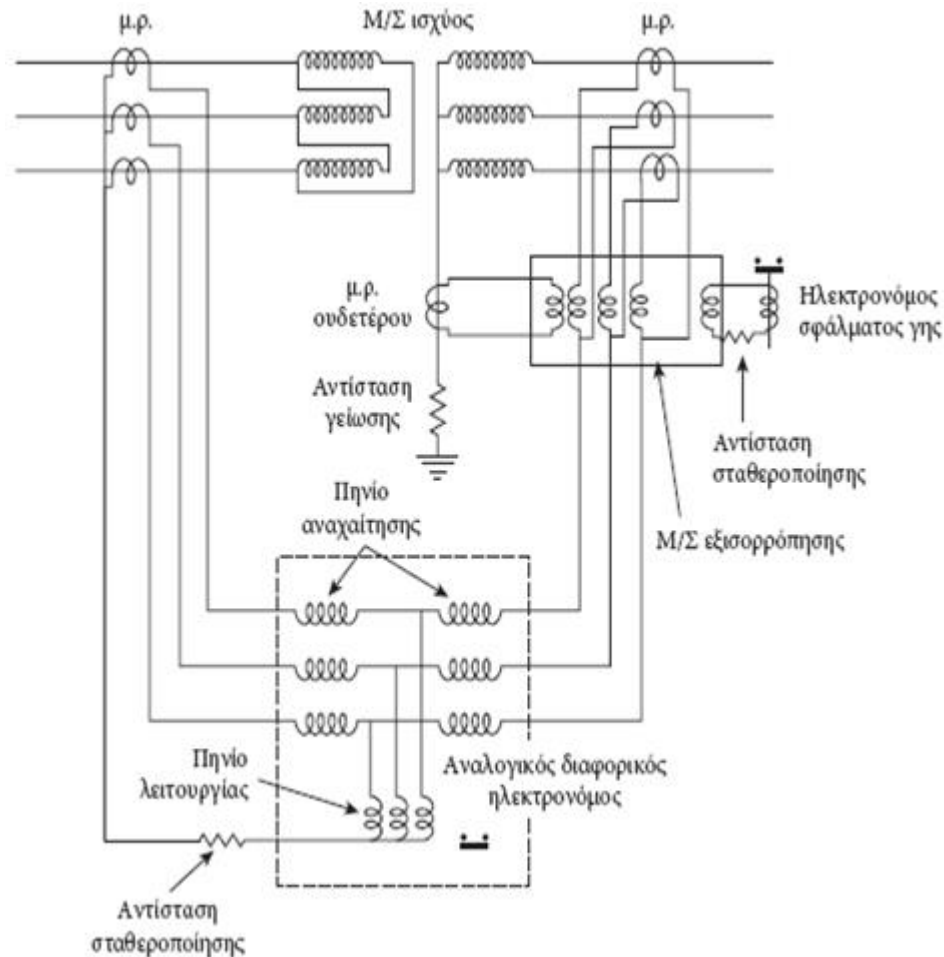


Πολωμένη διαφορική προστασία μετασχηματιστών(4)

- Στην περίπτωση τριφασικών μετασχηματιστών, οι μετασχηματιστές ρεύματος που είναι στη πλευρά των τυλιγμάτων που συνδέονται σε αστέρα συνδέονται σε τρίγωνο και στην πλευρά που τα τυλίγματα συνδέονται σε τρίγωνο οι μετασχηματιστές ρεύματος συνδέονται σε αστέρα.
- Αυτό γίνεται για δύο λόγους: **(α)** Να διορθώνεται η φασική διαφορά των ρευμάτων γραμμής, που προκαλεί η σύνδεση αστέρα-τριγώνου. **(β)** Να εξαφανίζει τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας στην πλευρά του αστέρα, που αν υπήρχαν, λόγω της έλλειψης τέτοιων ρευμάτων στη πλευρά του τριγώνου για εξωτερικά βραχυκυκλώματα, θα μπορούσαν να θέσουν σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο.
- Στην περίπτωση μετασχηματιστών 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.



Πολωμένη διαφορική προστασία μετασχηματιστών(5)



Συνδυασμένη διαφορική και γης προστασία μετασχηματιστών Υ/Δ.



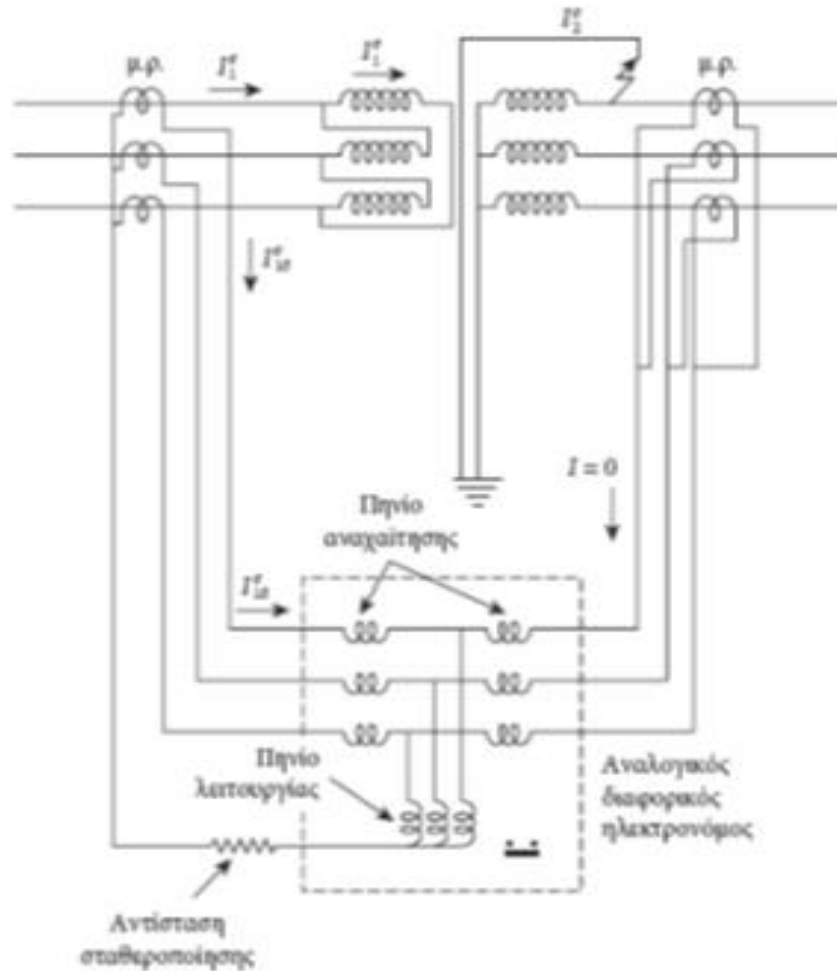
Παράδειγμα(1)

- Ένας μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης **30 MVA, 33/132 KV, Δ/Υ** σταθερά γειωμένος έχει αναλογική διαφορική προστασία ρεύματος και τροφοδοτείται μόνο από την πλευρά των **33 KV**. Οι μετασχηματιστές ρεύματος στην πλευρά υψηλής τάσης έχουν ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος **150 A**.
- **(α)** Σχεδιάστε το πλήρες κύκλωμα με όλες τις συνδέσεις των μετασχηματιστών και υπολογίστε τον απαραίτητο λόγο των μετασχηματιστών ρεύματος ώστε να χρησιμοποιηθούν με ηλεκτρονόμο ονομαστικού ρεύματος **1A**.
- **(β)** Αν έχουμε ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος **1000 A** για μονοφασικό 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. Υποθέστε ότι το βραχυκύκλωμα δεν τροφοδοτείται από την πλευρά των **132 KV**.



Λύση(1)

Μ/Σ ισχύος Δ/Υ 33/132 KV



Κύκλωμα και συνδέσεις μ.ρ. για το παράδειγμα



Λύση(2)

- Επειδή οι μετασχηματιστές ρεύματος στα **132 KV** έχουν σύνδεση Δ , το ρεύμα στους αγωγούς σύνδεσης είναι $\sqrt{3}$ φορές το ρεύμα στο δευτερεύον των μετασχηματιστών ρεύματος.
- Άρα για να έχουμε στους αγωγούς σύνδεσης και στον ηλεκτρονόμο ρεύμα **1A** πρέπει το ρεύμα στο δευτερεύον των μετασχηματιστών ρεύματος να είναι:
- $\frac{1}{\sqrt{3}}=0.577A$ και άρα ο λόγος των μετασχηματιστών ρεύματος είναι **150/0.577**



Λύση(3)

- Επειδή ο λόγος των πολικών τάσεων (όχι ο λόγος σπειρών των τυλιγμάτων) του μετασχηματιστή είναι $33/132 = 1/4$ για τα ρεύματα γραμμών του μετασχηματιστή θα ισχύει ο αντίστροφος λόγος.
- Άρα το ρεύμα πρωτεύοντος των μετασχηματιστών ρεύματος στη χαμηλή τάση των 33 KV θα είναι:
 $150 \times 4 = 600 \text{ A}$ και ο λόγος των μετασχηματιστών ρεύματος θα είναι **$600/1$** .



Λύση(4)

- **(β)** Ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα στον ακροδέκτη υψηλής τάσης της φάσης **a** του Σχήματος δημιουργεί ένα ρεύμα $I^{\sigma}_2 = 1000 \text{ A}$, που θα κυκλοφορεί όπως δείχνεται στο σχήμα.
- Το ρεύμα I^{σ}_2 δεν διέρχεται από τους μετασχηματιστές ρεύματος και επομένως δεν τροφοδοτεί κανένα ρεύμα στον ηλεκτρονόμο.
- Τα συζευγμένα τυλίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης της φάσης **a** έχουν λόγο σπειρών (που είναι ίσος με το λόγο τάσεων στα άκρα τους) $33/(132/\sqrt{3})$.
- Άρα το ρεύμα I^{σ}_2 θα δημιουργήσει την κυκλοφορία ενός ρεύματος I^{σ}_1 που δίνεται από τη σχέση:

$$I^{\sigma}_1 = I^{\sigma}_2 \frac{132/\sqrt{3}}{33} \text{ A} = 1000 \frac{132/\sqrt{3}}{33} \text{ A} = 2309.5 \text{ A}$$

- Όλο το ρεύμα I^{σ}_1 τροφοδοτείται από τη γραμμή και μετασχηματίζεται στο ρεύμα δευτερεύοντος των μετασχηματιστών ρεύματος $I^{\sigma}_{1\delta}$ που ισούται με:

$$I^{\sigma}_{1\delta} = I^{\sigma}_1 \frac{1}{600} = 2309.5 \frac{1}{600} \text{ A} = 3.849 \text{ A}$$

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



Παράδειγμα(2)

- Ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης **50 MVA**, **66/33 KV**, **Δ/Υ** γειωμένος μέσω αντίστασης έχει αναλογική διαφορική προστασία. Ο λόγος των μετασχηματιστών ρεύματος στην πλευρά υψηλής (πρωτεύον τύλιγμα) και χαμηλής τάσης (δευτερεύον τύλιγμα) είναι αντίστοιχα **600/5 A** και **1200/2.89 A**. Ο διαφορικός ηλεκτρονόμος έχει επίπεδο επιλογής **20%** του ονομαστικού του ρεύματος (**5A**).



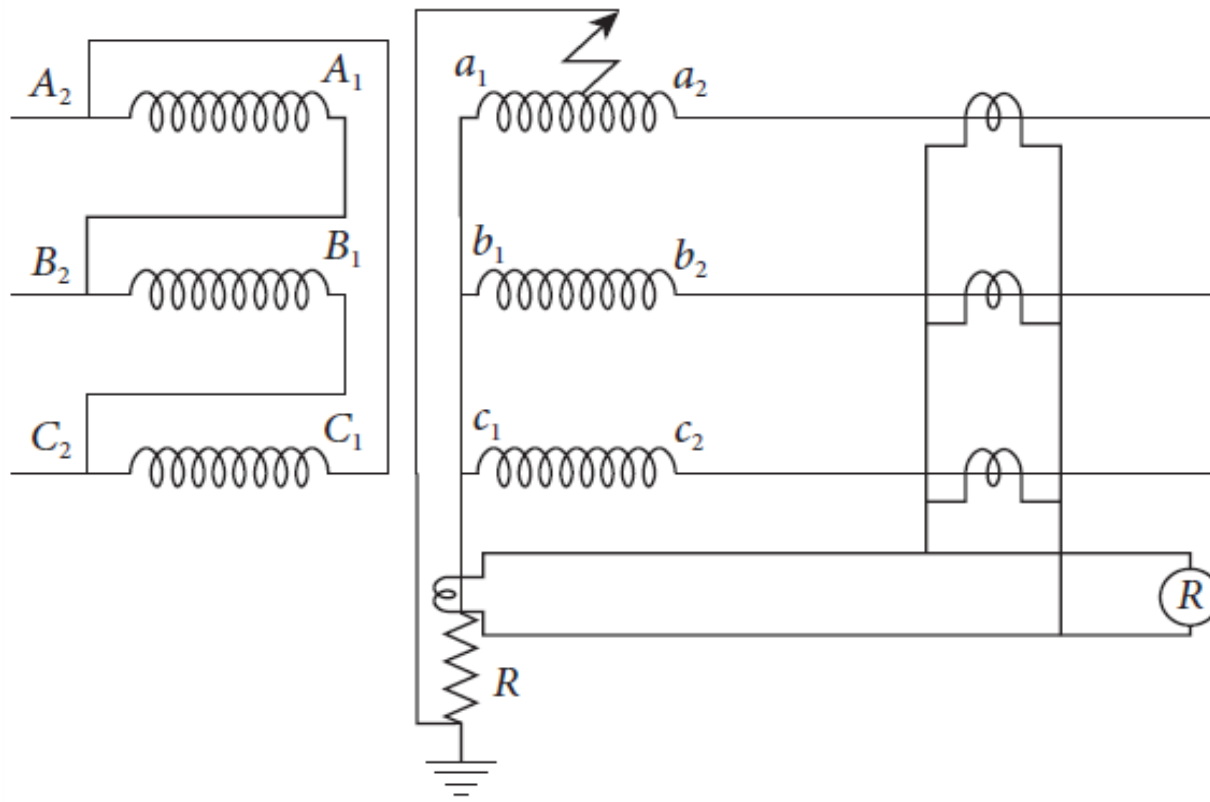
Παράδειγμα(2)

- **(α)** Υπολογίστε τι ποσοστό (επί τοις %) του τυλίγματος των **33 KV** δεν προστατεύεται από εσωτερικό μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη, όταν η αντίσταση γείωσης είναι **1 Ω** (με βάση τις ονομαστικές τιμές του μετασχηματιστή) και δεν υπάρχει τροφοδοσία του βραχυκυκλώματος από την πλευρά των **33 KV**. Υποθέτουμε ότι η αντίσταση γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση σκέδασης των τυλιγμάτων γι' αυτό και παραλείπουμε την αντίσταση αυτή
- **(β)** Για να αυξήσουμε το ποσοστό του τυλίγματος που προστατεύουμε, προσθέτουμε και προστασία σφάλματος γης. Στην προστασία αυτή όλοι οι μετασχηματιστές ρεύματος 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 μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη.



Λύση(1)

Μ/Σ ισχύος Δ/Υ 66/33 KV



Προστασία σφάλματος γης για το παράδειγμα



Λύση(2)

- **(α)** Αν το βραχυκύκλωμα γίνει στο τύλιγμα σε μια απόσταση $x\%$ από τον κόμβο του αστέρα και ονομάσουμε V_s την ονομαστική φασική τάση του αστέρα, τότε θα αναπτυχθεί στα άκρα της αντίστασης γείωσης μια τάση xV_s , που θα προκαλέσει στην αντίσταση ένα ρεύμα xV_s/R .
- Αυτό το ρεύμα κυκλοφορεί εντός του μετασχηματιστή και δεν το βλέπουν οι μετασχηματιστές ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.
- Αν στον μετασχηματιστή ο λόγος σπειρών είναι N_s/N_p , επειδή συμμετέχει στο δευτερεύον μόνο το τμήμα του τυλίγματος xV_s , ο λόγος σπειρών γίνεται xN_s/N_p .



Λύση(3)

- Άρα το ρεύμα στην αντίσταση γείωσης προκαλεί ένα ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή:

$$\frac{xV_s}{R} \frac{xN_s}{N_p} = \frac{x^2V_sN_s}{RN_p}$$

- Αν K είναι ο λόγος του μετασχηματιστή ρεύματος στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, το ρεύμα στο δευτερεύον αυτού του μετασχηματιστή ρεύματος και άρα το ρεύμα που τροφοδοτείται στον ηλεκτρονόμο θα είναι:

$$I_R = \frac{x^2V_sN_s}{RN_pK}$$

- Σύμφωνα με αυτήν τη σχέση ζητούμε το x να πάρει μία 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:



Λύση(4)

$x^2 = \sqrt{3} (PFS)_{pu} R_{pu} V_{pu}$, όπου $(PFS)_{pu}$ είναι το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ρεύματος σε pu που είναι ικανό να θέσει σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο.

- Αυτό το ρεύμα σε A με βάση τα δεδομένα του παραδείγματος είναι:

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

M/Σ 50 MVA, 66/33 KV, Δ/Υ

- Η βάση του ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

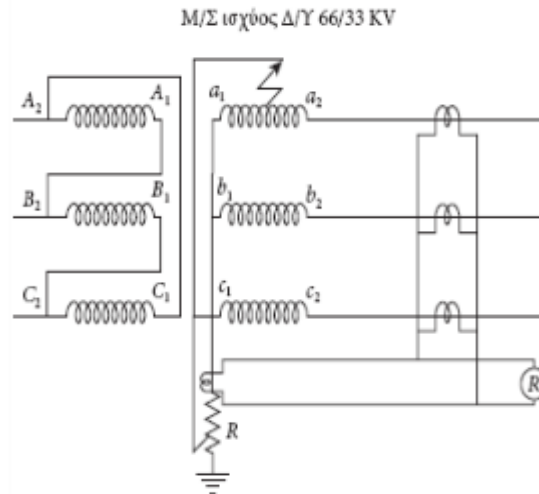
$$I_b = \frac{50 * 10^3}{\sqrt{3} * 66} = 437.39 \text{ A} \text{ και } (PFS)_{pu} = \frac{120}{437.39} = 0.27435 \text{ A}$$

- Άρα $x^2 = \sqrt{3} * 0.27435 * 1/1 = 0.47572$ 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.



Λύση(5)



- **(β)** Σε αυτόν τον τύπο προστασίας αν K είναι ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ρεύματος 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:

$$V_{min} = KI_s R$$

- Το ποσοστό x του τυλίγματος (μετρούμενο από τον κόμβο του αστερά) στο οποίο αναπτύσσεται αυτή η τάση δίνεται από τη σχέση:

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

όπου V_s είναι η φασική τάση του τυλίγματος σε V.



Λύση(6)

- Για την περίπτωση μας έχουμε:

Μ/Σ 50 MVA, 66/33 KV, Δ/Υ

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

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

και βάση αντίστασης

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

- Άρα $x = \frac{160 * 21.78}{\left(\frac{33}{\sqrt{3}}\right) * 10^3} = 0.1829$ ή $x = 18.29\%$
- Βλέπουμε ότι με αυτόν τον τύπο προστασίας έχουμε μία σημαντική ελάττωση του ποσοστού τυλίγματος που δεν προστατεύεται



Ρεύμα ανισορροπίας

- Στην αναλογική διαφορική προστασία των μετασχηματιστών ρεύμα ανισορροπίας προκαλείται και από την τυποποίηση των μετασχηματιστών ρεύματος που υπάρχουν στην αγορά και συνήθως δεν συμπίπτουν με 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, που όμως και αυτές είναι διακριτές και περιορισμένες και γι αυτό παραμένει πάντα ένα ποσοστό ανισορροπίας στα τροφοδοτούμενα ρεύματα.
- Αυτό το λάθος μαζί με το λάθος που προκύπτει από την περιορισμένη ακρίβεια μετασχηματισμού των μετασχηματιστών ρεύματος και το λάθος από το μεταβλητό λόγο σπειρών του μετασχηματιστή ισχύος έρχεται να καλύψει συνολικά η χρησιμοποίηση του αναλογικού διαφορικού ηλεκτρονόμου.



Παράδειγμα (3)

- Ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης **42 MVA, 69/12.5 KV, Δ/Υ** σταθερά γειωμένος έχει μεταβλητό λόγο σπειρών σε ποσοστό **10%**. Ο λόγος των μετασχηματιστών ρεύματος στην πλευρά υψηλής και χαμηλής τάσης είναι αντίστοιχα **400/5 A** και **2000/5 A** και έχουν μέγιστο σφάλμα μετασχηματισμού **5%**. Ο μετασχηματιστής ζητούμε να προστατευθεί με αναλογικό (ή πολωμένο) διαφορικό ηλεκτρονόμο **50%**, που σημαίνει ότι το ρεύμα λειτουργίας πρέπει να γίνει τουλάχιστον **50%** του ρεύματος αναχαίτισης για να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος. Ο ηλεκτρονόμος διαθέτει μεταβλητές λήψεις **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 λήψη $I(5/8)$). Να επιλέξετε τις κατάλληλες λήψεις στον αναλογικό διαφορικό ηλεκτρονόμο και να ελέγξετε ότι υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ο ηλεκτρονόμος δεν κινδυνεύει να ενεργοποιηθεί.



Λύση(1)

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

- **Πλευρά υψηλής τάσης:**

M/Σ 42 MVA, 69/12.5 KV, Δ/Y

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

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

- **Πλευρά χαμηλής τάσης:**

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

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



Λύση(2)

- 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 που θα κάνει τα δύο ρεύματα ίσα, οπότε έχουμε:

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

- 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 ανισορροπίας που είναι:

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



Λύση(3)

- 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 μετασχηματιστών ρεύματος που είναι **5%**. Αν θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση, όπου όλα τα σφάλματα αθροίζονται με τη μεγαλύτερη τιμή τους, τότε έχουμε :

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

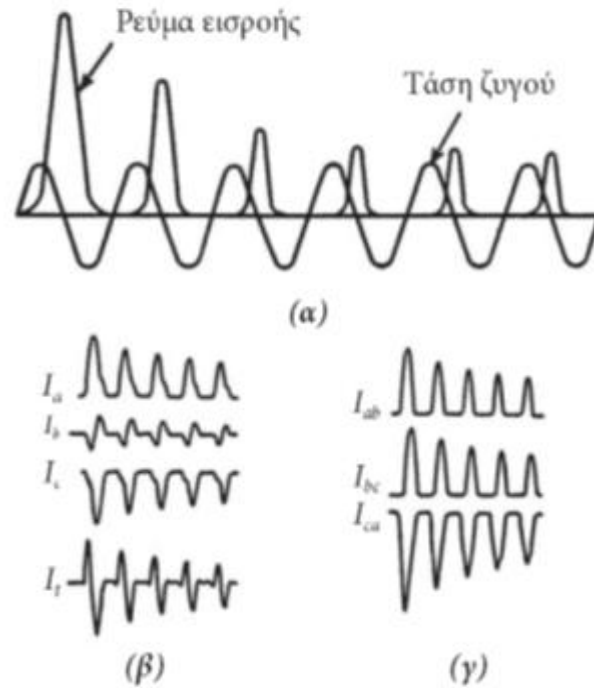
- Άρα σε κανονική λειτουργία το ρεύμα στο πηνίο λειτουργίας λόγω σφαλμάτων μπορεί να φθάσει το 19.53% του ρεύματος στο πηνίο αναχαίτισης. Επειδή η πόλωση του ηλεκτρονόμου είναι 50% έχουμε ένα περιθώριο ευαισθησίας που είναι:

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

που θεωρείται αρκετό.



Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής(1)



Τυπικές κυματομορφές ρεύματος μαγνήτισης.

(α) Θεωρητικές.

(β) Πραγματικά ρεύματα στον αστέρα του μετασχηματιστή.

(γ) Πραγματικά ρεύματα στο τρίγωνο του μετασχηματιστή.

Συνιστώσα	ΣΡ	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η	7 ^η
Μέτρο %	55%	63%	26.8%	5.1%	4.1%	3.7%	2.4%



Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής(2)

Συνιστώσα	ΣΡ	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η	7 ^η
Μέτρο %	55%	63%	26.8%	5.1%	4.1%	3.7%	2.4%

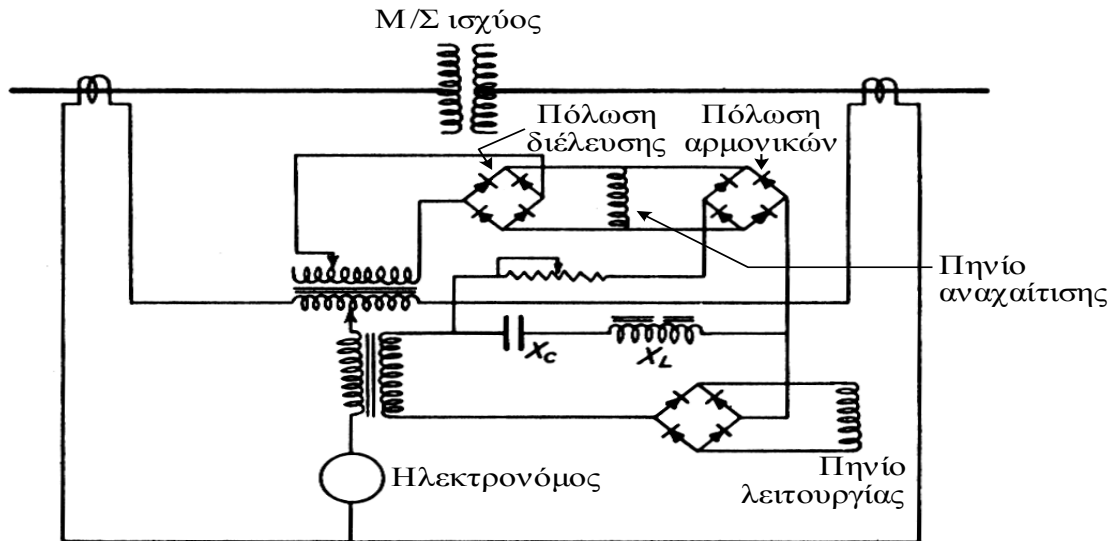
(i) Απαλοιφή των άρτιων αρμονικών.

- Η τρίτη αρμονική και τα πολλαπλάσια της δεν εμφανίζονται στις συνδέσεις των μετασχηματιστών ρεύματος επειδή αυτές οι συνιστώσες κυκλοφορούν στο τρίγωνο του μετασχηματιστή και στο τρίγωνο των μετασχηματιστών ρεύματος που βρίσκονται στην πλευρά του αστέρα.
- 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^η , 7^η ,κ.λ.π. αρμονικές που μπορούν να αγνοηθούν λόγω του μικρού τους εύρους ή να αποκοπούν με φίλτρα.



Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής(3)

(ii) Αναχαίτιση από αρμονικές.



Βασικό κύκλωμα ηλεκτρονόμου με αναχαίτιση από αρμονικές.

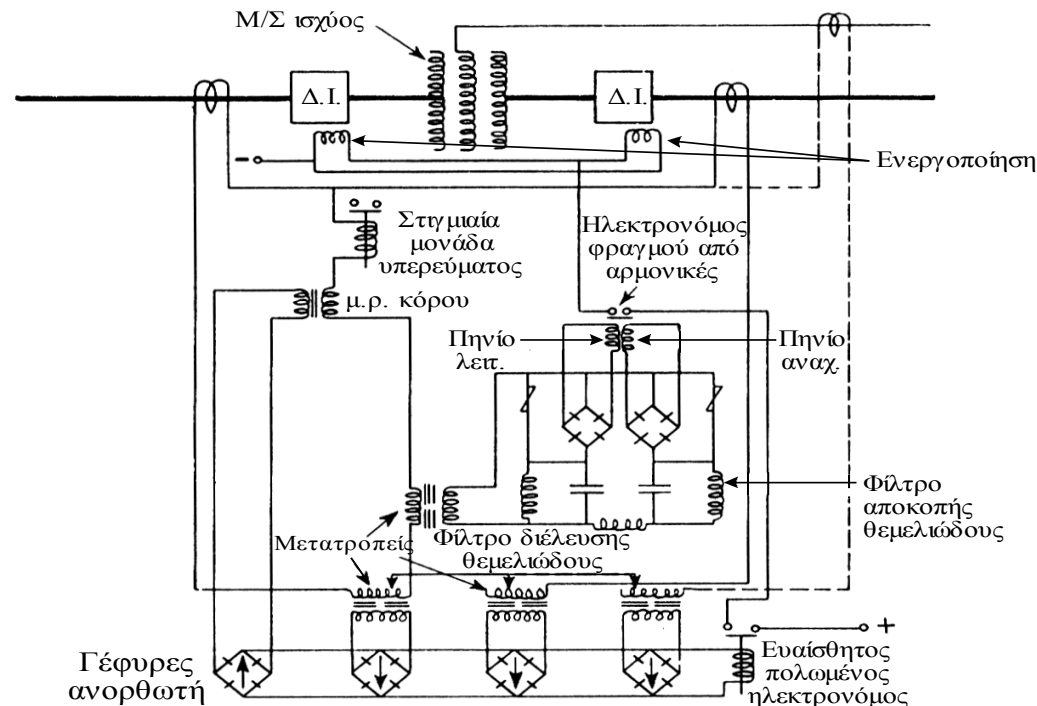
- Φιλτράρουμε τις αρμονικές από το διαφορικό ρεύμα, τις ανορθώνουμε και τις προσθέσουμε στο πηνίο αναλογικής αναχαίτισης.
- Η αναχαίτιση αρμονικών αποκτάται από το κύκλωμα συντονισμού X_C , X_L , που επιτρέπει μόνο ρεύμα της θεμελιώδους συχνότητας να μπαίνει στο κύκλωμα λειτουργίας, ενώ οι συνιστώσες ΣΡ και οι αρμονικές τροφοδοτούνται στο πηνίο αναχαίτισης.



Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής(4)

(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.



Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής(4)

(iv) Φραγμός συντονισμού.

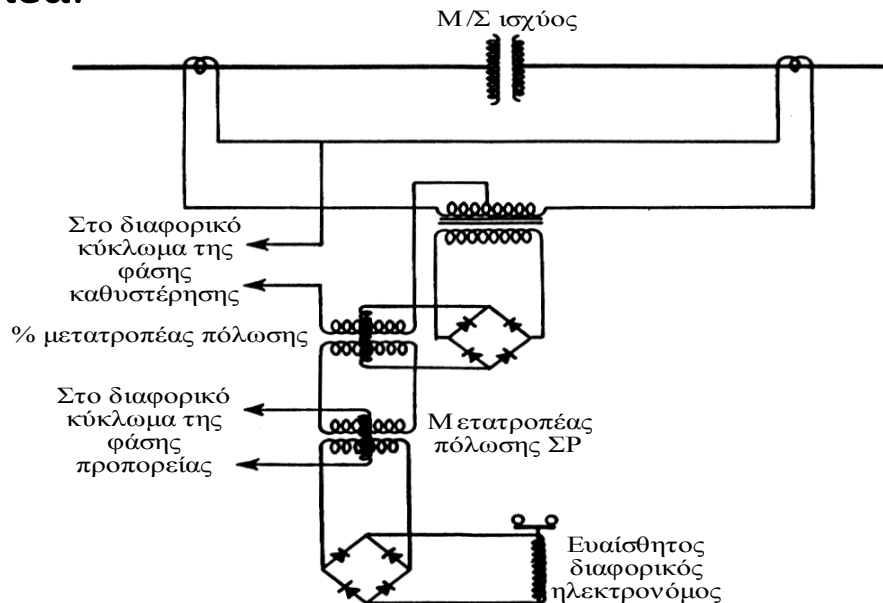
- Το μαγνητικό ρεύμα εισροής του μετασχηματιστή ισχύος, όταν ανορθωθεί , δίνει τον αριθμό των παλμών ΣΡ στο δευτερόλεπτο, που αντιστοιχεί στη συχνότητα του συστήματος και ο ηλεκτρονόμος φράσσει.
- Κατά τη διάρκεια ενός εσωτερικού βραχυκυκλώματος το ρεύμα έχει μεγάλη θεμελιώδη συνιστώσα, που όταν ανορθωθεί δίνει διπλάσιο αριθμό παλμών στο δευτερόλεπτο και ο ηλεκτρονόμος φραγμού δεν λειτουργεί, επιτρέποντας στο διαφορικό ηλεκτρονόμο να ενεργοποιηθεί.



Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής(5)

(ν) Πόλωση ΣΡ

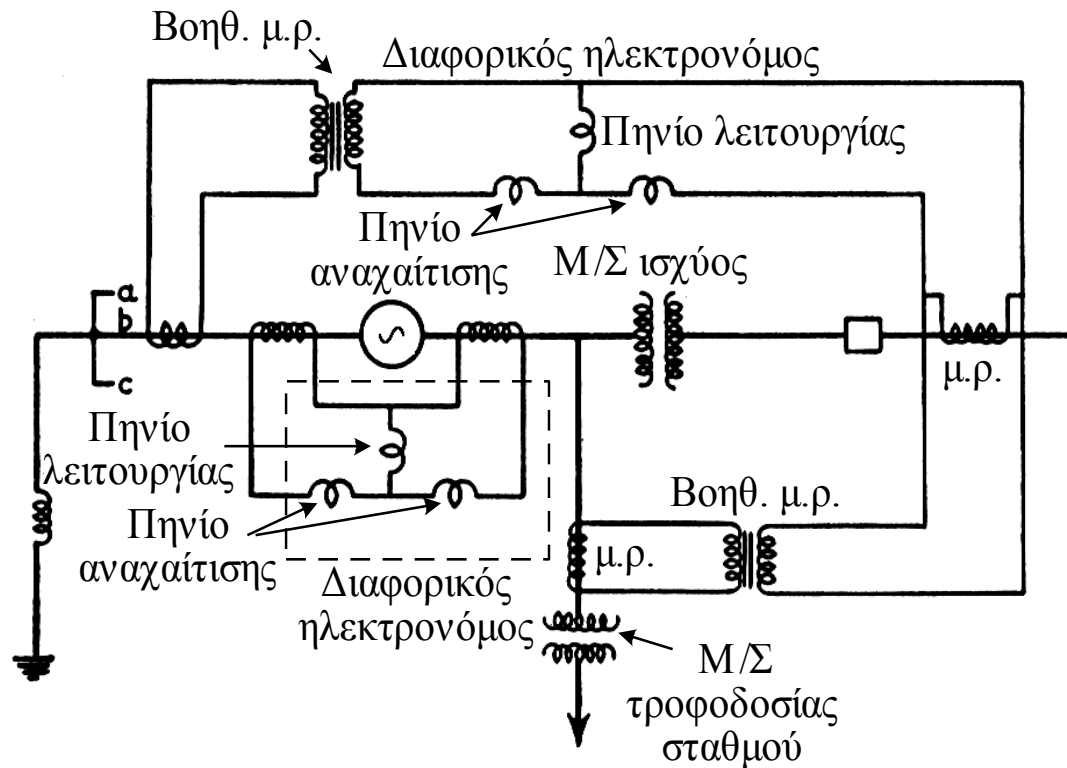
- Αυτό το σχήμα χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά ενός παράλληλου μορφομετατροπέα (transducer) που λειτουργεί με ρεύμα.
- Αυτός είναι ένας μαγνητικός ενισχυτής που έχει τρία τυλίγματα, πρωτεύων, δευτερεύων και ελέγχου. Στο τύλιγμα ελέγχου τροφοδοτούμε ένα συνεχές ρεύμα με το οποίο ελέγχουμε το σημείο κόρου του μαγνητικού πυρήνα και έτσι αλλάζει η έξοδος του δευτερεύοντος.
- Οι συνιστώσες ΣΡ του ρεύματος μαγνήτισης εισροής χρησιμοποιούνται για αυτόματη πόλωση του ηλεκτρονόμου στο ίδιο στοιχείο του μορφομετατροπέα.



Αναλογική πόλωση και πόλωση μετατροπέα ΣΡ ηλεκτρονόμου για προστασία μετασχηματιστή.



Ενιαία προστασία γεννήτριας-μετασχηματιστή

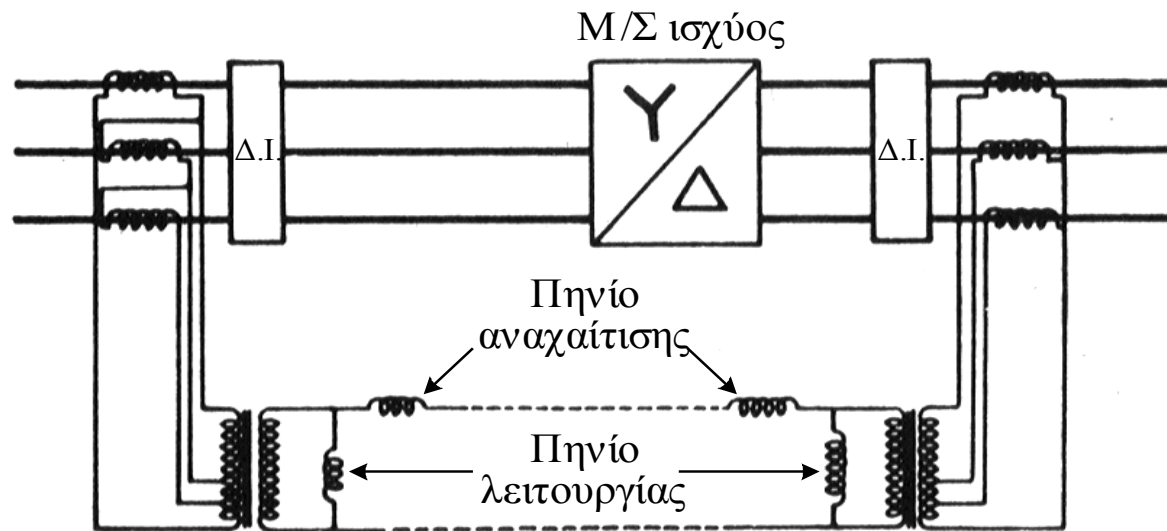


Ολική διαφορική προστασία γεννήτριας-μετασχηματιστή.



Προστασία μετασχηματιστών και αγωγών τροφοδοσίας τους

- Όταν δεν υπάρχει διακόπτης μεταξύ του μετασχηματιστή 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.



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.

