

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΒΟΒΟΣ

Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Πρόλογος

Η αυξανόμενη εξάρτηση της σύγχρονης κοινωνίας από την ηλεκτρική ενέργεια οδήγησε στα σημερινά πολύπλοκα και εκτεταμένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Με τη σημερινή οργάνωση της ζωής μας και η συντομότερη διακοπή της λειτουργίας των ΣΗΕ προκαλεί τρομακτική αναστάτωση στις δραστηριότητές μας, λόγω του μεγάλου πλήθους των ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιούμε στις σύγχρονες κοινωνίες. Επειδή όμως ανεξάρτητα των προσπαθειών μας πάντα θα συμβαίνουν σφάλματα στα ΣΗΕ, η αντιμετώπισή τους απαιτεί συστήματα προστασίας με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία και ακρίβεια. Η εξέλιξη των ηλεκτρονόμενων προστασίας ξεκίνησε με τους ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους, προχώρησε στους ηλεκτρονόμους στερεάς κατάστασης ή στατικούς και σήμερα διαθέτουμε και ψηφιακούς ηλεκτρονόμους βασισμένους σε μικροεπεξεργαστές με αυτονομία για λήψη λογικών αποφάσεων.

Αναγνωρίζοντας την αδυναμία κάλυψης σε ένα μόνο τόμο όλων των προηγούμενων εξελίξεων, του τεράστιου όγκου της θεωρίας και των ποικίλων προβλημάτων που σχετίζονται με την ανάπτυξη και εφαρμογή των συστημάτων προστασίας, στο βιβλίο αυτό περιοριζόμαστε μόνο στην ανάπτυξη των βασικών αρχών της προστασίας. Το βιβλίο καλύπτει την ύλη του εξαμηνιαίου μαθήματος «Προστασία ΣΗΕ», που διδάσκεται στους φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Σκοπός του βιβλίου είναι να εξοικειώσει τους νέους ηλεκτρολόγους μηχανικούς με τα προβλήματα της προστασίας ΣΗΕ και τους τρόπους επίλυσής τους, ώστε στο μέλλον με την περαιτέρω λεπτομερέστερη μελέτη των ειδικών θεμάτων και την πρακτική εφαρμογή να καταστούν γνώστες του αντικειμένου. Η ανάπτυξη της ύλης έγινε έτσι ώστε να μην απαιτείται καμία προηγούμενη γνώση του αντικειμένου.

Για να επιτευχθούν οι προηγούμενοι στόχοι τα τέσσερα πρώτα κεφάλαια του βιβλίου είναι εισαγωγικά. Στόχο έχουν την εξοικείωση του νέου μηχανικού με τους όρους και τις θεμελιώδεις έννοιες της προστασίας, τις θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας των ηλεκτρονόμενων προστασίας και τις σύγχρονες εξελίξεις στα συστήματα προστασίας των ΣΗΕ. Τα υπόλοιπα έξι κεφάλαια πραγματεύονται την προστασία του βασικού εξοπλισμού ενός ΣΗΕ. Τα κεφάλαια 5, 6 και 7 ασχολού-

νται με την προστασία των γραμμών μεταφοράς, όπου χρησιμοποιούνται τα τρία βασικά είδη προστασίας, δηλαδή υπερέντασης, απόστασης και ενιαία προστασία. Στο κεφάλαιο 8 αναπτύσσονται τα θέματα που σχετίζονται με την προστασία ζυγών, στο κεφάλαιο 9 αναπτύσσεται η προστασία μετασχηματιστών και στο κεφάλαιο 10 εξετάζεται η προστασία μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Για την προσεγμένη εργασία τους θερμές ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω στους γιους μου Παναγή και Ανέστη για την επιμέλεια των σχημάτων.

Θερμές ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω και προς την οικογένειά μου και τους γονείς μου για τη συνεχή συμπαράσταση και κατανόησή τους κατά τη συγγραφή του βιβλίου.

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2008

Νικόλαος Α. Βοβός

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

1.1	Εισαγωγή	13
1.2	Ορισμοί	14
1.3	Σημαντικές απαιτήσεις	15
1.4	Πρωτεύουσα προστασία	15
1.5	Προστασία υποστήριξης ή βοηθητική προστασία	17
1.6	Αξιολόγηση των συστημάτων προστασίας	18
1.7	Αρχές λειτουργίας των ηλεκτρονόμων προστασίας	20
1.8	Επίτευξη επιλεκτικότητας στα διάφορα συστήματα προστασίας	22
1.8.1	Χρόνου-Υπερέντασης Ηλεκτρονόμοι (Time-Overcurrent Relays)	22
1.8.2	Ηλεκτρονόμοι Κατεύθυνσης (Directional Relays)	22
1.8.3	Προστασία Απόστασης (Distance Protection)	23
1.8.4	Ενιαία Προστασία (Unit Protection)	23
1.8.5	Προστασία Ισορροπημένου Ρεύματος (Balanced Current Protection)	24
1.9	Μετασχηματιστές ρεύματος για μέτρηση	24
1.10	Μετασχηματιστές τάσης για μέτρηση	27

Κεφάλαιο 2

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ

2.1	Γενικές θεωρήσεις	29
2.2	Χρονική καθυστέρηση ηλεκτρονόμων	30
2.3	Ηλεκτρομαγνητικής έλξης ηλεκτρονόμοι μιας δρώσης ποσότητας	32
2.4	Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης τύπου ηλεκτρομαγνητικής έλξης	34
2.5	Ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης επαγωγικού τύπου	35
2.6	Υπολογισμός ροπής σε επαγωγικούς ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης	40
2.6.1	Ηλεκτρονόμοι Ρεύματος - Ρεύματος	40
2.6.2	Ηλεκτρονόμοι ρεύματος-τάσης	42

2.7	Λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης	43
2.8	Γενική εξίσωση ροπής ηλεκτρονόμων	45

Κεφάλαιο 3

ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

3.1	Εισαγωγή	47
3.2	Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου σύνθετης αντίστασης	47
3.3	Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου τροποποιημένης σύνθετης αντίστασης	52
3.4	Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου μιγαδικής αντίστασης	53
3.5	Ηλεκτρονόμος απόστασης τύπου ΜΗΟ	56
3.6	Γενικές παρατηρήσεις για όλους τους ηλεκτρονόμους απόστασης	57

Κεφάλαιο 4

ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ

4.1	Εισαγωγή	59
4.2	Αξιοποίηση του τρανζίστορ στην κατασκευή αναλογικών στατικών ηλεκτρονόμων	61
4.3	Αξιοποίηση του τελεστικού ενισχυτή στην κατασκευή αναλογικού στατικού ηλεκτρονόμου	63
4.4	Αναλογικοί στατικοί ηλεκτρονόμοι	66
4.4.1	Στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ή υπέρτασης	67
4.4.2	Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης με χρονική καθυστέρηση και αντίστροφου χρόνου χαρακτηριστικά	68
4.5	Ψηφιακοί στατικοί ηλεκτρονόμοι	71

Κεφάλαιο 5

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥΣ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΕΣ

5.1	Εισαγωγή	73
5.2	Λειτουργία και ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων υπερέντασης	74
5.2.1	Λειτουργία	74
5.2.2	Ρύθμιση του επιπέδου επιλογής ή επαναφοράς	75
5.2.3	Ρύθμιση του χρόνου λειτουργίας	77
5.3	Χρονικά χαρακτηριστικά	77

5.4	Ρύθμιση ηλεκτρονόμενων αντίστροφου χρόνου	79
5.5	Ηλεκτρονόμοι ρεύματος ορισμένου χρόνου	81
5.6	Ηλεκτρονόμοι ρεύματος αντίστροφου χρόνου	82
5.7	Ρύθμιση ηλεκτρονόμενων υπερέντασης σε βροχοειδή συστήματα. Με μια πηγή παραγωγής	83
5.8	Χρησιμοποίηση στιγμιαίων ηλεκτρονόμενων υπερέντασης	85
5.9	Παράδειγμα ρύθμισης ηλεκτρονόμενων υπερέντασης για προστασία ακτινωτών γραμμών	87
5.10	Παράδειγμα ρύθμισης ηλεκτρονόμενων υπερέντασης για προστασία βροχοειδών συστημάτων	92
5.11	Χρησιμοποίηση δυο ηλεκτρονόμενων αντί τριών για προστασία βραχυ- κυκλωμάτων μεταξύ φάσεων	95
5.12	Σύγκριση μονοφασικών και πολυφασικών ηλεκτρονόμενων κατεύ- θυνσης – υπερέντασης	97
5.13	Χαρακτηριστικά ασφαλειών	98
5.14	Διακόπτες ισχύος	101
5.15	Αυτόματοι διακόπτες με επανακλείσιμο	103
5.16	Προστασία ακτινωτών γραμμών διανομής	105
5.17	Προστασία βραχυκυκλωμάτων γης	107

Κεφάλαιο 6

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

6.1	Μέτρηση απόστασης	109
6.2	Προβλήματα στη μέτρηση απόστασης	112
	Παράδειγμα 6.1	115
6.3	Παράμετροι σύνθετης αντίστασης	116
6.4	Αντιστάθμιση των σημάτων που τροφοδοτούνται σε ηλεκτρονόμους απόστασης για προστασία σφαλμάτων γης	120
6.5	Σήματα αντιστάθμισης για φασικούς ηλεκτρονόμους	122
6.6	Μη αντιμετατιθέμενοι αγωγοί	123
6.7	Επέκταση της πρώτης ζώνης	124
6.8	Ρύθμιση της πρώτης και δεύτερης ζώνης	124
	Παράδειγμα 6.2	127
6.9	Ρύθμιση της τρίτης ζώνης	129
6.10	Πλήρες σύστημα μονάδας προστασίας απόστασης	130

Κεφάλαιο 7

ΕΝΙΑΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

7.1	Εισαγωγή	133
7.2	Διαφορικοί ηλεκτρονόμοι	133
7.3	Προστασία οδηγού	139
7.4	Προβλήματα στη χρήση ηλεκτρονόμων με οδηγούς σύρματος στις γραμμές	140
7.5	Οδηγοί ενεργοποίησης και φραγμού	140
7.6	Ηλεκτρονόμοι οδηγού σύρματος ΣΡ	141
7.7	Προβλήματα ηλεκτρονόμων οδηγού σύρματος ΣΡ	144
7.8	Ηλεκτρονόμοι οδηγού σύρματος ΕΡ	144
7.9	Τύπος κυκλοφορούντος ρεύματος	147
7.10	Τύπος αντιτιθέμενης τάσης	148
7.11	Γενικά χαρακτηριστικά οδηγών σύρματος ΕΡ	149
7.12	Οδηγός φέροντος ρεύματος	150
7.13	Μικροκυματικός οδηγός	151
7.14	Συσκευές σύγκρισης φάσης	151
7.15	Σύστημα σύγκρισης κατεύθυνσης	156
7.16	Προστασία οδηγού για γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	159
7.17	Προβλήματα στη προστασία πολυτερματικών γραμμών	160
7.18	Προστασία υποστήριξης	162

Κεφάλαιο 8

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΖΩΝΗΣ ΖΥΓΟΥ

8.1	Γενικές αρχές	163
8.2	Διαφορική προστασία ρεύματος	165
8.3	Πολωμένη αναλογική διαφορική προστασία	166
8.4	Διαφορική προστασία τάσης	168
8.5	Μετασχηματιστές ρεύματος χωρίς πυρήνα σιδήρου	172
8.6	Σύγκριση κατεύθυνσης	174
8.7	Προστασία ζυγών χωρισμένων σε τμήματα	176
8.8	Προστασία διαρροής περιβλήματος	178
8.9	Επίβλεψη και έλεγχος ενεργοποίησης	179

Κεφάλαιο 9

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

9.1	Εισαγωγή	181
9.2	Προστασία υπερθέρμανσης	183
9.3	Ηλεκτρονόμοι αερίων	183
9.4	Ηλεκτρονόμοι αιφνίδιας πίεσης	185
9.5	Προστασία βραχυκυκλωμάτων γης	187
9.6	Πολωμένη διαφορική προστασία μετασχηματιστών	189
	Παράδειγμα 9.1	193
	Παράδειγμα 9.2	196
	Παράδειγμα 9.3	199
9.7	Μέθοδοι αντιμετώπισης του ρεύματος μαγνήτισης εισροής	201
9.8	Ενιαία προστασία γεννήτριας - μετασχηματιστή	205
9.9	Προστασία μετασχηματιστών και αγωγών τροφοδοσίας τους	207

Κεφάλαιο 10

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΡ

10.1	Προστασία γεννήτριας	211
10.2	Προστασία του στάτη	212
10.3	Βραχυκυκλώματα στο στάτη μεταξύ φάσεων και γης	213
	Παράδειγμα 10.1	215
10.4	Εσωτερικά βραχυκυκλώματα σπειρών του στάτη	216
10.5	Υπερθέρμανση του στάτη	218
10.6	Υπέρταση στο στάτη	219
10.7	Προστασία του δρομέα	219
	10.7.1 Βραχυκυκλώματα γης	219
	10.7.2 Ανοικτοκύκλωμα	220
	10.7.3 Ασύμμετρα ρεύματα στο στάτη	221
10.8	Σφάλματα που επιδρούν ταυτόχρονα στο στάτη και στο δρομέα	222
10.9	Γενικό διάγραμμα προστασίας γεννήτριας	224
10.10	Προστασία συστήματος γεννήτριας - μετασχηματιστή	226
10.11	Προστασία κινητήρων ΕΡ	228
10.12	Προβλήματα κινητήρων	228
10.13	Προστασία στάτη επαγωγικών κινητήρων	230
	10.13.1 Προστασία φασικών βραχυκυκλωμάτων	230
	10.13.2 Προστασία βραχυκυκλωμάτων γης	231
	10.13.3 Προστασία κατά την απώλεια στήριξης	231

10.13.4	Προστασία υπερφόρτισης	232
10.13.5	Προστασία υπότασης	233
10.13.6	Προστασία σε ασύμμετρες τάσεις τροφοδοσίας	233
10.14	Προστασία βοηθητικών συσκευών σε ηλεκτρικούς σταθμούς	234
Προβλήματα		235
Βιβλιογραφία		243
Αναφορές		244
Ευρετήριο Όρων		247



Κεφάλαιο

ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα χρήματα που επενδύονται στην παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τόσο μεγάλα, ώστε πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα όχι μόνο για την καλύτερη δυνατή απόδοση των διαφόρων συστημάτων, αλλά και για την προφύλαξή τους από διάφορα βραχυκυκλώματα. Όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα, η καταστροφική ικανότητα της τεράστιας ενέργειας των συστημάτων ισχύος μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες ζημιές στις διάφορες συσκευές του συστήματος. Με μία προσεκτική σχεδίαση τέτοια βραχυκυκλώματα μπορούν να γίνουν πολύ σπάνια, αλλά είναι αδύνατο να αποφευχθούν τελείως λόγω των κεραυνών και των ατυχημάτων.

Ο σκοπός των ηλεκτρονόμων προστασίας είναι να θέτουν σε λειτουργία τους κατάλληλους διακόπτες ισχύος, ώστε να αποσυνδέονται όσο το δυνατόν ταχύτερα τα τμήματα του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) που έχουν πάθει τη βλάβη και έτσι να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες οι ζημιές από τα βραχυκυκλώματα. Το ιδανικό θα ήταν αν τα συστήματα προστασίας προέβλεπαν και εμποδίζαν τα βραχυκυκλώματα, αλλά αυτό είναι αδύνατο γενικά, εκτός των περιπτώσεων εκείνων που η αρχική αιτία του βραχυκυκλώματος δημιουργεί κάποιο αποτέλεσμα, που μπορεί να θέσει σε λειτουργία έναν ηλεκτρονόμο προστασίας. Μόνον ένας ηλεκτρονόμος προστασίας υπάρχει αυτού του τύπου. Είναι ο ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων, που χρησιμοποιείται για την προστασία των μετασχηματιστών και λειτουργεί όταν συσσωρεύονται αέρια λόγω της διάσπασης από υπερθέρμανση του λαδιού στο μετασχηματιστή, που προκαλείται από κακή σύνδεση ή τη διάσπαση του μονωτικού.

1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ

Υπάρχουν ορισμένες έννοιες και ορισμοί που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ηλεκτρονόμων και των συστημάτων προστασίας και πρέπει να ορισθούν από την αρχή. Αυτοί είναι:

Ροπή ή δύναμη λειτουργίας (Operating Force or Torque): Αυτή που τείνει να κλείσει τις επαφές του ηλεκτρονόμου.

Ροπή ή δύναμη αναχαίτισης (Restraining Force or Torque): Αυτή που ανθίσταται στη ροπή ή δύναμη λειτουργίας και εμποδίζει το κλείσιμο των επαφών του ηλεκτρονόμου.

Επίπεδο επιλογής (Pick-up level): Η τιμή του ρεύματος ή τάσης κ.λπ. που είναι το κατώφλι πάνω από το οποίο ο ηλεκτρονόμος κλείνει τις επαφές του.

Επίπεδο επαναφοράς (Drop out or reset level): Η τιμή του ρεύματος ή τάσης κ.λπ. που είναι το κατώφλι κάτω από το οποίο ο ηλεκτρονόμος ανοίγει τις επαφές του και επιστρέφει στην κανονική κατάσταση.

Χαρακτηριστική (του ηλεκτρονόμου στη μόνιμη κατάσταση) (Characteristic): Η γραφική παράσταση του επιπέδου επιλογής ή επαναφοράς. Σε μερικούς ηλεκτρονόμους αυτές οι δύο καμπύλες συμπίπτουν και τότε έχουμε τον τόπο μηδενικής ροπής.

Ηλεκτρονόμος ενίσχυσης (Reinforcing Relay): Ένας ηλεκτρονόμος που ενεργοποιείται από τις επαφές του κυρίου ηλεκτρονόμου και οι επαφές του, που είναι παράλληλες με αυτές του κυρίου ηλεκτρονόμου, τις βοηθούν στη μεταφορά του ρεύματος ώστε να αποφεύγεται η φθορά τους.

Ηλεκτρονόμος επισφράγισης (Seal-in Relay): Είναι όμοιος με τον ηλεκτρονόμο ενίσχυσης, αλλά είναι συνδεδεμένος έτσι ώστε να διατηρεί κλειστές τις επαφές του, μέχρις ότου ένας διακόπτης που ενεργοποιείται με τη λειτουργία του διακόπτη ισχύος διακόψει το κύκλωμα του.

Ηλεκτρονόμος υποστήριξης (Back-up Relay): Ένας ηλεκτρονόμος που συνήθως λειτουργεί μετά από κάποια καθυστέρηση για να ενεργοποιήσει το διακόπτη ισχύος, όταν ο κανονικός ηλεκτρονόμος δεν λειτουργήσει.

Επιλεκτικότητα (Selectivity): Η ικανότητα του ηλεκτρονόμου να διακρίνει ένα βραχυκύκλωμα στη ζώνη που εποπτεύει από ένα βραχυκύκλωμα σε άλλη ζώνη.

Συνέπεια (Consistency): Η ακρίβεια με την οποία ένας ηλεκτρονόμος επαναλαμβάνει τα ηλεκτρικά ή χρονικά χαρακτηριστικά του.

Σημαία (Flag or target): Ένα σήμα μηχανικό ή ηλεκτρικό που εμφανίζεται μετά

τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου για να επιβεβαιώσει ότι ο ηλεκτρονόμος λειτουργήσει.

Χρόνος λειτουργίας (Operating time): Ο χρόνος που παρέρχεται από τη στιγμή που θα επιτευχθεί το επίπεδο επιλογής μέχρις ότου ο ηλεκτρονόμος κλείσει τις επαφές του.

Επέκταση (Reach): Το μακρινότερο σημείο στο οποίο επεκτείνεται η ζώνη προστασίας του ηλεκτρονόμου.

Ο χρόνος **εκκαθάρισης** (clearing time) ενός βραχυκυκλώματος t_c ορίζεται ως ακολούθως:

$$t_c = t_p + t_o + t_b$$

όπου: t_p είναι ο **χρόνος σύγκρισης**, δηλαδή ο χρόνος που παρέρχεται από την είσοδο του βραχυκυκλώματος μέχρι να επιτευχθεί το επίπεδο επιλογής του ηλεκτρονόμου.

t_o είναι ο **χρόνος λειτουργίας** του ηλεκτρονόμου.

t_b είναι ο **χρόνος λειτουργίας** του διακόπτη ισχύος.

1.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

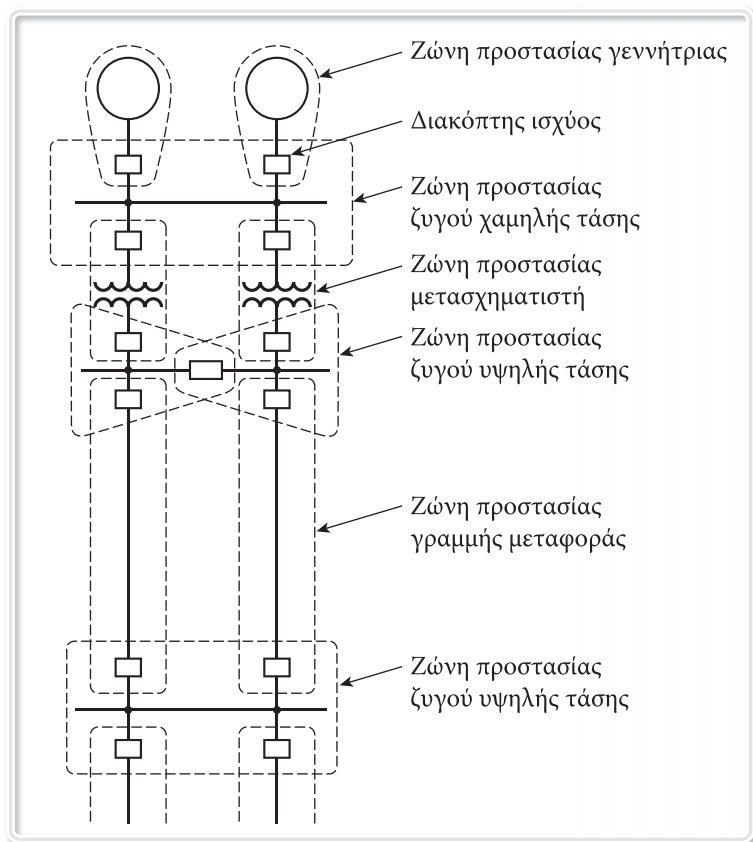
Οι βασικές απαιτήσεις από τους ηλεκτρονόμους είναι:

1. Υψηλός βαθμός αξιοπιστίας.
2. Ικανοποιητική ευαισθησία, που ορίζεται ως το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης που λειτουργεί τον ηλεκτρονόμο, όταν το βραχυκύκλωμα συμβαίνει μέσα στη ζώνη προστασίας.
3. Επιλεκτικότητα.
4. Μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας για να ελαχιστοποιεί τα καταστροφικά αποτελέσματα του βραχυκυκλώματος και να αποφεύγεται η αστάθεια των σύγχρονων γεννητριών.

1.4 ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Το Σχ. 1.1 διασαφηνίζει την πρωτεύουσα προστασία. Παρατηρούμε ότι οι διακόπτες ισχύος τοποθετούνται εκεί που συνδέονται μεταξύ τους δύο ηλεκτρικές συσκευές. Αυτή η τοποθέτηση επιτρέπει την αποσύνδεση μόνον των συσκευών που

έχουν το βραχυκύκλωμα. Περιστασιακά είναι δυνατόν ένας διακόπτης ισχύος να μην τοποθετηθεί σε μία τέτοια σύνδεση. Σε αυτήν την περίπτωση όμως αποσυνδέονται και οι δύο συσκευές όταν συμβεί κάποιο βραχυκύκλωμα σε μία από αυτές.



Σχ. 1.1: Μονοφασικό διάγραμμα ενός τμήματος ηλεκτρικού συστήματος που διασαφηνίζει την κύρια προστασία.

Η δεύτερη παρατήρηση είναι ότι μία ξεχωριστή ζώνη προστασίας δημιουργείται γύρω από κάθε συσκευή, αν και μέχρι τώρα δεν αναπτύχθηκε ο τρόπος που μία τέτοια ζώνη μπορεί να δημιουργηθεί. Η σημαντικότερη επιδίωξη είναι κάθε βραχυκύκλωμα που συμβαίνει μέσα σε μία δεδομένη ζώνη να ανοίγει τους διακόπτες ισχύος μέσα σε αυτήν τη ζώνη και μόνο αυτούς.

Είναι προφανές ότι για βραχυκυκλώματα στις περιοχές όπου δύο ζώνες προστασίας επικαλύπτονται ενεργοποιούνται περισσότεροι διακόπτες από όσους χρειά-

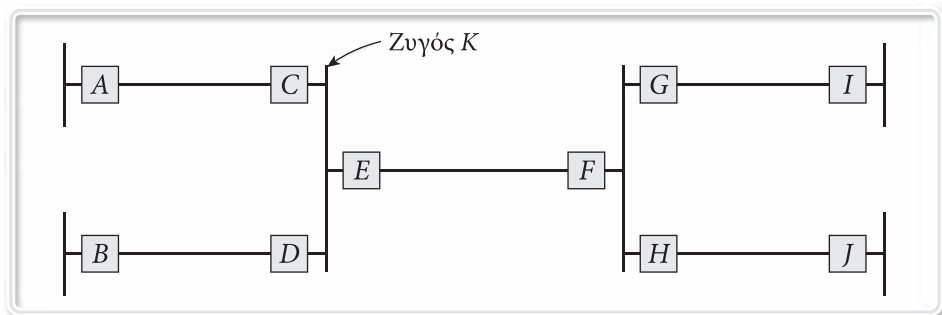
ζονται για την αποσύνδεση της περιοχής του βραχυκυκλώματος. Αλλά, αν δεν υπήρχε επικάλυψη, ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο ζωνών δεν θα ενεργοποιούσε κανένα διακόπτη ισχύος. Η επικάλυψη είναι το μικρότερο κακό μεταξύ των δύο. Εξάλλου η έκταση της επικάλυψης είναι σχετικά μικρή και η πιθανότητα να συμβεί βραχυκύκλωμα στην περιοχή που έχουμε επικάλυψη είναι μικρή. Επομένως, η λειτουργία περισσότερων διακοπών των απαραίτητων συμβαίνει πολύ σπάνια.

Τέλος παρατηρούμε ότι οι ζώνες προστασίας επικαλύπτονται γύρω από ένα διακόπτη ισχύος, επειδή για βραχυκυκλώματα εκτός των περιοχών επικάλυψης απαιτείται η λειτουργία του ελάχιστου αριθμού διακοπών ισχύος.

1.5 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ Ή ΒΟΗΘΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Η προστασία υποστήριξης χρησιμοποιείται μόνο για σφάλματα από βραχυκυκλώματα που είναι και τα πιο συχνά. Για αλλά είδη σφαλμάτων η προστασία υποστήριξης δεν συμφέρει οικονομικά. Με τον όρο **προστασία υποστήριξης** εννοούμε μία επί πλέον προστασία του κυκλώματος, που λειτουργεί με κάποια καθυστέρηση, όταν δε λειτουργήσει η πρωτεύουσα προστασία. Είναι προφανές ότι επιδιώκουμε κάθε αιτία που μπορεί να εμποδίσει την πρωτεύουσα προστασία να λειτουργήσει, να μην επηρεάζει την προστασία υποστήριξης. Πρακτικά αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση, όπου είναι δυνατόν, της προστασίας υποστήριξης σε διαφορετικό σταθμό από την πρωτεύουσα προστασία.

Εξετάζουμε για παράδειγμα, την προστασία υποστήριξης της γραμμής μεταφοράς EF του Σχ. 1.2. Η προστασία υποστήριξης για αυτήν τη γραμμή ρυθμίζεται έτσι ώστε να ανοίγει τους διακόπτες A, B, I και J. Αν ο διακόπτης E δεν λειτουργήσει λόγω κάποιου βραχυκυκλώματος στη γραμμή EF, τότε λειτουργούν οι δια-



Σχ. 1.2: Διασαφήνιση της προστασίας υποστήριξης για τη γραμμή μεταφοράς EF.

κόπτες A και B. Οι διακόπτες A και B και τα συνδεδεμένα σε αυτούς συστήματα προστασίας, είναι τοπολογικά μακριά από τα συστήματα που δε λειτούργησαν και είναι απίθανο να επηρεασθούν από τα αίτια που έκαναν το διακόπτη E να μην λειτουργήσει, πράγμα που πιθανά θα συνέβαινε, αν οι διακόπτες C και D είχαν εκλεγεί για την προστασία υποστήριξης.

Οι ηλεκτρονόμοι υποστήριξης στις θέσεις A, B και F παρέχουν προστασία υποστήριξης, αν συμβεί βραχυκύκλωμα στο ζυγό K. Επίσης οι ηλεκτρονόμοι υποστήριξης στα A και F παρέχουν προστασία υποστήριξης για βραχυκυκλώματα στη γραμμή DB. Δηλαδή η ζώνη προστασίας υποστήριξης αρχίζει από κάποιο ηλεκτρονόμο υποστήριξης και επικαλύπτει τουλάχιστον κάθε γειτονικό στοιχείο του συστήματος.

Μία δεύτερη εργασία της προστασίας υποστήριξης είναι να παρέχει πρωτεύουσα προστασία, όταν γίνεται συντήρηση ή επιδιόρθωση στην πρωτεύουσα προστασία.

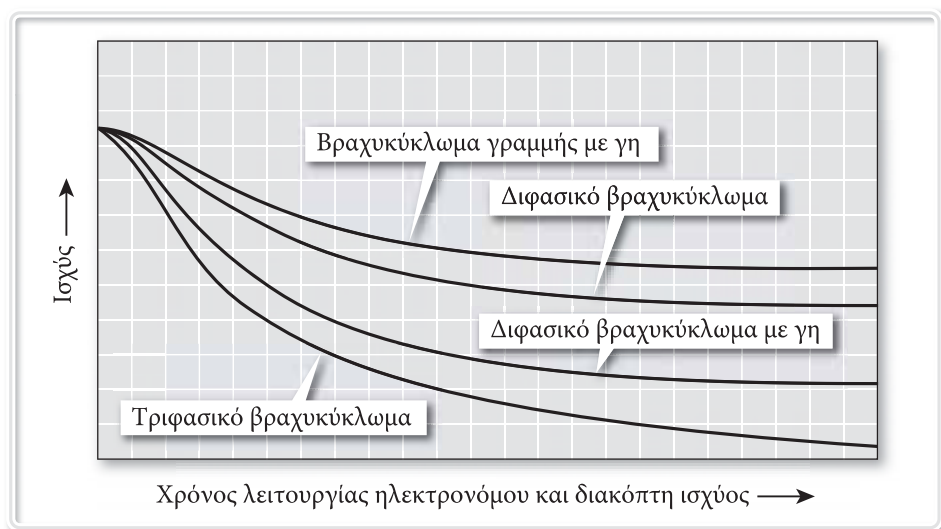
Όταν μία ομάδα ηλεκτρονόμων παρέχει προστασία υποστήριξης για μερικά γειτονικά στοιχεία του συστήματος, ο βραδύτερος ηλεκτρονόμος της πρωτεύουσας προστασίας προσδιορίζει τον απαραίτητο χρόνο καθυστέρησης των ηλεκτρονόμων υποστήριξης.

1.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Όπως όλα τα μέρη ενός συστήματος ισχύος, τα συστήματα προστασίας αξιολογούνται επί τη βάση της συμβολής τους στην καλύτερη και οικονομικότερη εξυπηρέτηση των πελατών. Η συμβολή των συστημάτων προστασίας είναι να βοηθούν το υπόλοιπο σύστημα ισχύος να επιτυγχάνει το σκοπό του κατά τον αποδοτικότερο και αποτελεσματικότερο τρόπο στην περίπτωση σφαλμάτων. Ελαττώνοντας τις ζημιές όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα, τα συστήματα προστασίας ελαττώνουν:

1. Το κόστος επισκευής των ζημιών που προκαλούνται από τα βραχυκυκλώματα.
2. Την πιθανότητα να έχουμε επέκταση των ζημιών με το να πάψουν να λειτουργούν και άλλες συσκευές.
3. Το χρόνο που οι συσκευές είναι εκτός λειτουργίας.
4. Την απώλεια εισοδήματος και τη διατάραξη του τρόπου ζωής των πολιτών κατά τις ώρες που τα ηλεκτρικά συστήματα δεν λειτουργούν.

Τα συστήματα προστασίας αυξάνουν την ευστάθεια των ΣΗΕ και κατά συνέπεια μας επιτρέπουν καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος. Το Σχ. 1.3 δείχνει πως η ταχύτητα του συστήματος προστασίας επηρεάζει την ισχύ που επιτρέπεται να μεταφέρει μία γραμμή, ώστε να μην έχουμε απώλεια του συγχρονισμού, όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα. Με άλλα λόγια, το φορτίο που μπορεί να τροφοδοτήσει ένα υπάρχον σύστημα αυξάνεται, όταν αυξάνεται η ταχύτητα των συστημάτων προστασίας. Η αύξηση της ταχύτητας των συστημάτων προστασίας είναι ένας φθηνός τρόπος για να αυξήσουμε το μεταβατικό όριο ευστάθειας.



Σχ. 1.3: Καμπύλες μεταβολής της μέγιστης ισχύος που μπορούν να μεταφέρουν οι γραμμές, σε συνάρτηση με το χρόνο καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου και του διακόπτη ισχύος για διάφορους τύπους βραχυκυκλωμάτων.

Σημειώνεται ότι το κόστος των ηλεκτρονόμων προστασίας δεν είναι πάντοτε ανάλογο με το κόστος του τμήματος του συστήματος που πρόκειται να προστατέψουν. Ένα βραχυκύκλωμα σε ένα τμήμα του ΣΗΕ μπορεί να προκαλέσει διαδοχικά βραχυκυκλώματα και να επηρεάσει τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος, ενώ το αρχικό βραχυκύκλωμα πιθανόν να συνέβη σε ένα όχι τόσο σπουδαίο τμήμα του συστήματος, που δεν ήταν κατάλληλα προστατευμένο. Τέτοια παραδείγματα υπάρχουν πολλά.

1.7 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Μέχρι αυτό το σημείο αναφερθήκαμε στο τι επιτυγχάνουν οι ηλεκτρονόμοι χωρίς να εξηγήσουμε τον τρόπο που το επιτυγχάνουν. Το θέμα αυτό θα εξετασθεί λεπτομερέστερα αργότερα, αλλά μέσα στα γενικά πλαίσια αυτού του κεφαλαίου θα αναφέρουμε λίγα λόγια.

Όλοι οι ηλεκτρονόμοι, που χρησιμοποιούνται για την προστασία από βραχυκυκλώματα και πολλούς άλλους τύπους σφαλμάτων, ενεργοποιούνται από κάποιο ρεύμα ή τάση ή και τα δύο, που τροφοδοτούνται σε αυτούς από μετασχηματιστές ρεύματος ή τάσης και συνδέονται με ποικίλους συνδυασμούς στο τμήμα του συστήματος που πρόκειται να προστατεύσουν. Για κάθε τύπο και θέση του βραχυκυκλώματος υπάρχει μία χαρακτηριστική διαφορά σε αυτές τις ποσότητες (ρεύμα ή τάση). Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρονόμων διαθέσιμοι, που ο καθένας σχεδιάστηκε για να αναγνωρίζει μία χαρακτηριστική διαφορά και να λειτουργεί αποκρινόμενος σε αυτή.

Υπάρχουν πολύ περισσότερες διαφορές σε αυτές τις ποσότητες από όσες αρχικά κάποιος περιμένει. Οι διαφορές αυτές μπορεί να υπάρχουν σε ένα ή περισσότερα από τα πιο κάτω μεγέθη:

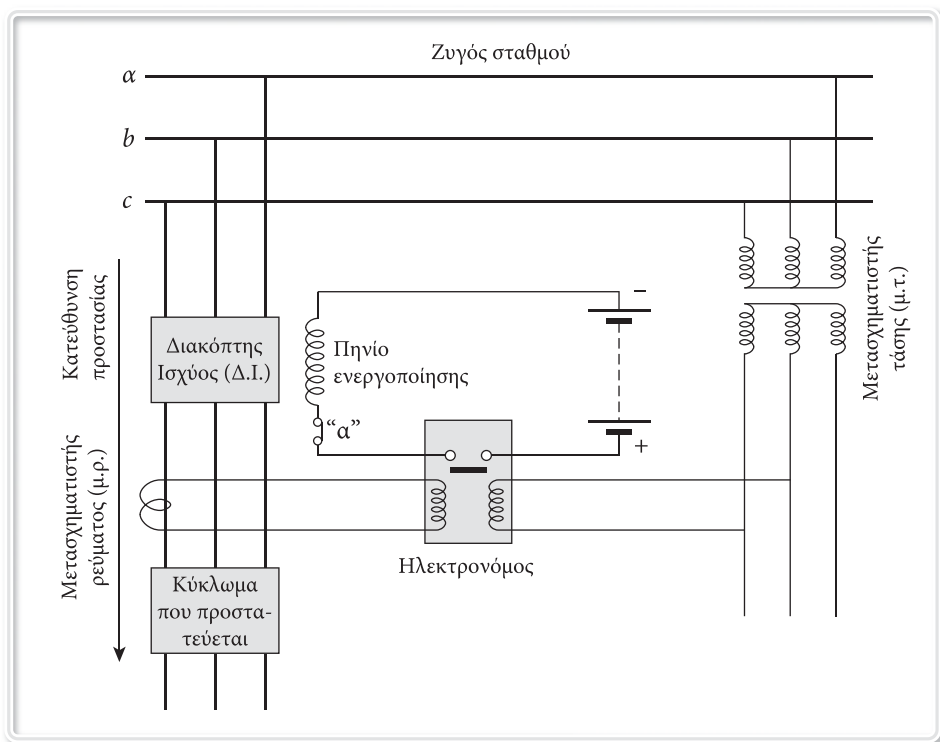
1. *Μέτρο.*
2. *Συχνότητα.*
3. *Φασική γωνία.*
4. *Διάρκεια.*
5. *Ρυθμό μεταβολής.*
6. *Διεύθυνση ή διαδοχή των μεταβολών.*
7. *Αρμονικές ή κυματομορφή.*

Όταν κάποιος συσχετίσει το ρεύμα και την τάση σε συνδυασμό με τα πιο πάνω μεγέθη αρχίζει να αντιλαμβάνεται τις δυνατότητες που είναι διαθέσιμες για το σκοπό της διακριτικότητας των διαφόρων τύπων σφαλμάτων.

Οι ηλεκτρονόμοι παίζουν το ρόλο ενός ακούραστου επόπτη που μετράει συνέχεια τις ηλεκτρικές ποσότητες του συστήματος που προστατεύει και είναι έτοιμος να αποσυνδέσει το κύκλωμα μόλις μία ποσότητα πάρει ασυνήθιστη τιμή. Στο Σχ. 1.4 φαίνεται η βασική συνδεσμολογία του ηλεκτρονόμου με το πηνίο ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος. Όταν κλείσουν οι επαφές του ηλεκτρονόμου ο μεγάλος λόγος L/R του πηνίου διέγερσης καθυστερεί τη γρήγορη αύξηση του ρεύματος και ένας γρήγορος διακόπτης ισχύος ανοίγει πριν το ρεύμα φθάσει τη

μόνιμη τιμή του. Γι' αυτό, οι επαφές των ηλεκτρονόμων έχουν ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας έντασης 5 A και ενεργοποιούν πηνία των 30 A.

Μετά την ενεργοποίηση του διακόπτη ισχύος ανοίγει ο βοηθητικός του διακόπτης "α" και ο ηλεκτρονόμος επαναφέρεται στην κανονική του κατάσταση καθώς αποδιεγείρεται με το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος. Είναι απαραίτητο όμως οι επαφές να μην ανοίξουν πριν σταματήσει το ρεύμα διέγερσης γιατί καταστρέφονται. Αυτό επιτυγχάνεται ή με τη χρήση ειδικών επαφών ώστε να μην αναπηδούν ή με τη χρήση μαγνητικού πηνίου συγκράτησης ή με τη χρήση του βοηθητικού ηλεκτρονόμου επισφράγισης.



Σχ. 1.4: Βασικό διάγραμμα σύνδεσης των ηλεκτρονόμων προστασίας.

1.8 ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Για τα πιο διαδεδομένα σχήματα προστασίας η επιλεκτικότητα επιτυγχάνεται ως εξής:

1.8.1 Χρόνου – Υπερέντασης Ηλεκτρονόμοι (Time-Overcurrent Relays)

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται στα χαμηλής τάσης δίκτυα διανομής. Χρησιμοποιεί την ιδιότητα ότι όταν έχουμε ένα βραχυκύκλωμα σε κάποιο τμήμα του δικτύου, ρεύμα ρέει σε αυτό απ' όλα τα γειτονικά τμήματα του δικτύου, έτσι ώστε το βραχυκυκλωμένο τμήμα έχει το περισσότερο ρεύμα.

Σε ένα ηλεκτρονόμο χρόνου-υπερέντασης ο χρόνος λειτουργίας είναι αντίστροφα ανάλογος με την ένταση του ρεύματος. Έτσι ο ηλεκτρονόμος που είναι πιο κοντά στο βραχυκύκλωμα επειδή έχει το περισσότερο ρεύμα, θα λειτουργήσει ταχύτερα και θα ανοίξει το διακόπτη ισχύος για να καθαρίσει το βραχυκύκλωμα, πριν οι πιο απομακρυσμένοι ηλεκτρονόμοι κάνουν το ίδιο.

Μία παραλλαγή αυτών των ηλεκτρονόμων είναι οι ηλεκτρονόμοι ορισμένου χρόνου. Σε αυτούς ο χρόνος λειτουργίας ρυθμίζεται και παραμένει ο ίδιος ανεξάρτητα από την τιμή του ρεύματος. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται για την προστασία ακτινωτών γραμμών ή βρόχων, όταν τα ρεύματα βραχυκυκλωμάτων σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος των γραμμών δεν αλλάζουν πολύ.

1.8.2 Ηλεκτρονόμοι Κατεύθυνσης (Directional Relays)

Σε ορισμένες συσκευές, όπως π.χ οι γεννήτριες, η ισχύς ρέει προς τα έξω, εκτός αν η γεννήτρια έχει βραχυκύκλωμα ή έχει χάσει τη μηχανική κινητήρια δύναμή της, οπότε λειτουργεί σαν κινητήρας και απορροφά ισχύ από το δίκτυο. Μία τέτοια κατάσταση ανακαλύπτεται από ένα ηλεκτρονόμο κατεύθυνσης, που κλείνει τις επαφές του, όταν η ισχύς ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κανονική της.

Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι εργάζονται με το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος. Αν το γινόμενο είναι θετικό, π.χ. κλείνουν τις επαφές, αν είναι αρνητικό τις κρα-

τούν ανοικτές. Έτσι ο ηλεκτρονόμος μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να ενεργοποιείται μόνον όταν το ρεύμα ρέει έξω από το ζυγό.

1.8.3 Προστασία Απόστασης (Distance Protection)

Σε όσες περιπτώσεις προστασίας η χρονική καθυστέρηση δεν είναι αποδεκτή, χρησιμοποιείται η προστασία απόστασης. Για μία γραμμή με σύνθετη αντίσταση Z_L , η ροή ρεύματος μέσω της γραμμής για ένα βραχυκύκλωμα στο τέλος της γραμμής δημιουργεί μία τάση $V = I Z_L$. Ο ηλεκτρονόμος συγκρίνει το V με το I και είναι ρυθμισμένος να ενεργοποιείται όταν $V < I Z_L$, που ισχύει μόνο όταν το βραχυκύκλωμα είναι εντός της γραμμής που προστατεύει. Στην πραγματικότητα ο ηλεκτρονόμος μετρά συνέχεια το $Z = V/I$, που είναι η σύνθετη αντίσταση από τη θέση του ηλεκτρονόμου μέχρι το σημείο του βραχυκυκλώματος. Επειδή το Z είναι ανάλογο με το μήκος της γραμμής, ο ηλεκτρονόμος μπορεί να ρυθμισθεί να ενεργοποιείται μόνο για βραχυκυκλώματα μέσα στην προστατευμένη γραμμή.

Η επιλεκτικότητα είναι πολύ ευκολότερο να αποκτηθεί με ένα ηλεκτρονόμο απόστασης από ότι με ένα ηλεκτρονόμο υπερέντασης, επειδή η επέκταση τους μένει ανεπηρέαστη από τις μεταβολές του ρεύματος λόγω μεταβολών στις συνθήκες παραγωγής και διακοπτικών λειτουργιών του συστήματος.

1.8.4 Ενιαία Προστασία (Unit Protection)

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την προστασία κυκλωμάτων είναι η διευθέτηση των ηλεκτρονόμων, έτσι ώστε να συγκρίνουν το ρεύμα που εισέρχεται με το ρεύμα που εξέρχεται από τον προστατευόμενο εξοπλισμό. Αυτά τα ρεύματα είναι πάντοτε ίσα όταν έχουμε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ή βραχυκυκλώματα έξω από τη ζώνη προστασίας, ενώ διαφέρουν για βραχυκυκλώματα μέσα στη ζώνη προστασίας. Το όνομα αυτού του τύπου προστασίας προκύπτει από το γεγονός ότι σε αυτήν την προστασία αντιμετωπίζουμε τον προστατευόμενο εξοπλισμό ως ένα ενιαίο σύνολο (ως μία μονάδα) μετρώντας ταυτόχρονα όλες τις εισόδους του. Σε αυτόν τον τύπο προστασίας η ζώνη προστασίας οριοθετείτε με ακρίβεια από τις θέσεις που εγκαθιστούμε τους μετασχηματιστές ρεύματος (μ.ρ.), συνεπώς η ζώνη προστασίας είναι απόλυτα καθορισμένη και η επιλεκτικότητα εξασφαλισμένη.

Όταν η ενιαία προστασία εφαρμόζεται για την προστασία ηλεκτρικών συσκευών ονομάζεται διαφορική προστασία ρεύματος (differential current protection). Όταν εφαρμόζεται σε γραμμές και καλώδια ονομάζεται διαφορική προστασία οδηγού (pilot differential protection), επειδή για να πραγματοποιηθεί χρειάζεται οδηγούς σύρματος ή μία ισοδύναμη ζεύξη ή κανάλι για να μεταφέρουν πληροφορίες στον ηλεκτρονόμο για τα ρεύματα στα άλλα άκρα των γραμμών.

Επειδή η ενιαία προστασία λειτουργεί για βραχυκυκλώματα μόνο μέσα στη ζώνη προστασίας, απαιτείται ξεχωριστή προστασία υποστήριξης, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο για προστασία υπέρεντασης και απόστασης, όπως θα δούμε στην αναλυτική περιγραφή κάθε είδους προστασίας.

1.8.5 Προστασία Ισορροπημένου Ρεύματος (Balanced Current Protection)

Παράλληλα κυκλώματα γραμμών της ίδιας σύνθετης αντίστασης κανονικά διαρρέονται από ίσα ρεύματα. Ένα βραχυκύκλωμα σε ένα από τα παράλληλα κυκλώματα αυξάνει το ρεύμα σε αυτό και ενεργοποιεί ένα ηλεκτρονόμο που συγκρίνει τα δύο ρεύματα. Αυτό το είδος προστασίας όταν εφαρμόζεται σε δύο παράλληλες γραμμές ονομάζεται προστασία **ισορροπημένου ρεύματος**. Όταν εφαρμόζεται σε γεννήτριες, που έχουν δύο διαχωρισμένες περιελίξεις για την ίδια φάση, ονομάζεται **εγκάρσια διαφορική προστασία** ρεύματος (transverse differential current protection).

1.9 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ

Για να πραγματοποιήσουν οι ηλεκτρονόμοι το σκοπό τους, πρέπει να μετρούν ηλεκτρικές ποσότητες με ακρίβεια και αυτό σημαίνει ότι οι μετασχηματιστές ρεύματος ή τάσης που χρησιμοποιούν πρέπει να διατηρούν σταθερό το λόγο τους, σε πολλές διαφορετικές καταστάσεις.

Η ικανότητα ενός μ.ρ. να διατηρεί σταθερό το λόγο του εξαρτάται από τη σύνθετη αντίσταση του ηλεκτρονόμου και των συρμάτων σύνδεσής του, που είναι τα φορτία του. Όσο υψηλότερη είναι αυτή η αντίσταση, τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι ο πυρήνας του μετασχηματιστή λόγω της υψηλής τάσης IZ που αναπτύσσεται στα άκρα του φορτίου. Για να έχουμε λοιπόν μικρούς και φθηνούς μ.ρ., πρέπει τα σύρματα σύνδεσης να είναι κοντά και οι ηλεκτρονόμοι να είναι

ευαίσθητοι, δηλαδή η ισχύς που απαιτείται για να κλείσουν τις επαφές τους να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Αυτή η ισχύς ονομάζεται επιβάρυνση (burden). Στη Βρετανία η επιβάρυνση εκφράζεται σε Volt-Ampere (VA) στο επίπεδο επιλογής και αποτελεί μία ένδειξη για την ευαισθησία του ηλεκτρονόμου.

Στις Η.Π.Α. η επιβάρυνση δίνεται συνήθως σε VA στο ονομαστικό ρεύμα του μ.ρ. Αυτή η επιβάρυνση δεν μας δίνει πληροφορίες για την ευαισθησία του ηλεκτρονόμου, αλλά μας δίνει τη δυνατότητα ευκολότερου υπολογισμού της ολικής επιβάρυνσης του μ.ρ.

Σήμερα συνηθίζεται να συνοδεύονται οι ηλεκτρονόμοι με καμπύλες, που μας δίνουν τη σύνθετη αντίσταση τους σε μία περιοχή τιμών του ρεύματος. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζουμε την απόκριση του μ.ρ. στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, που αναμένεται στη ζώνη προστασίας. Ιδιαίτερα μας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης του στο δευτερεύον στο μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης και έτσι μπορούμε να διαλέξουμε ένα κατάλληλο μετασχηματιστή. Για να έχουμε ένα μετασχηματιστή λογικού μεγέθους είναι συχνά επιθυμητό να χρησιμοποιούμε ένα ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος μικρό. Στις Η.Π.Α. συνήθως χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές 5 A και μερικές φορές είναι πολύ μεγάλη. Στη Βρετανία χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές 1 A ή ακόμα και 0.5 A.

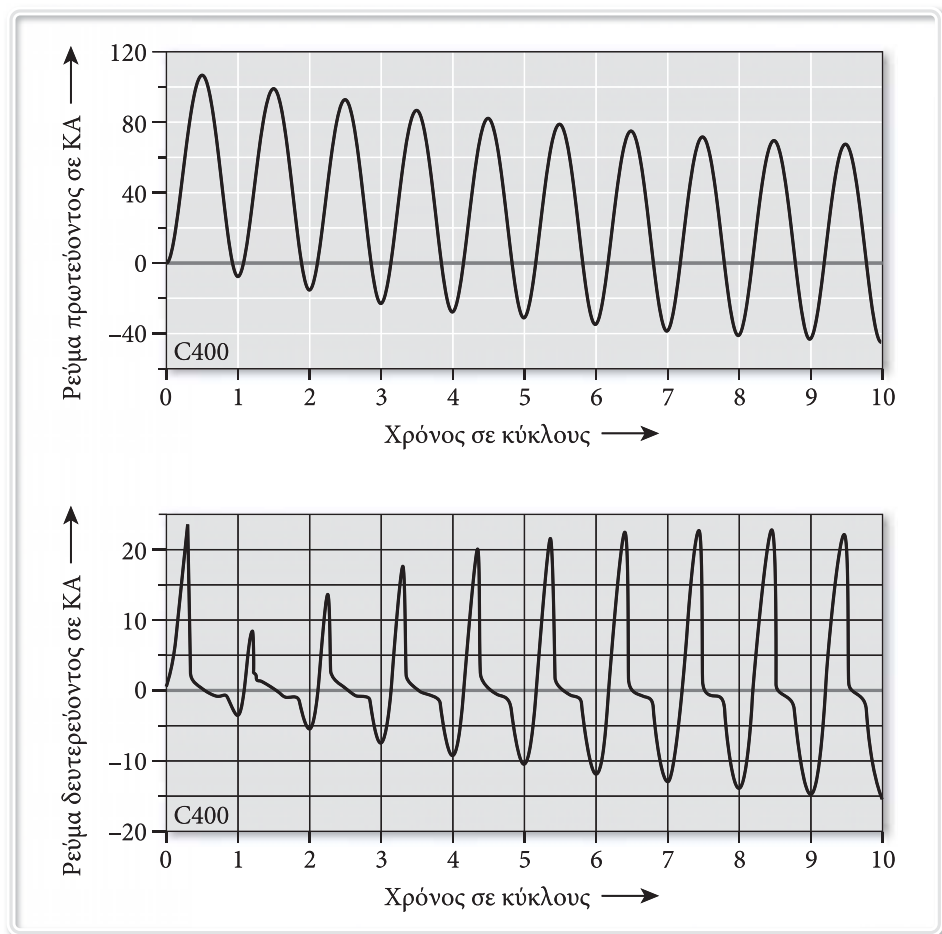
Επειδή οι μ.ρ. είναι μετασχηματιστές με πυρήνα σιδήρου είναι δυνατόν να οδηγηθούν στον κόρο, ιδίως όταν δέχονται τα μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης, οπότε χάνεται τελείως η ακρίβεια μετασχηματισμού τους. Αυτό είναι ένα πάρα πολύ σοβαρό πρόβλημα στη **διαφορική προστασία ρεύματος** (θα συζητηθεί στο Κεφ. 7), όπου ο ηλεκτρονόμος ελέγχει τη διαφορά στα μέτρα των ρευμάτων.

Στο Σχ. 1.5 δείχνεται η μεγάλη παραμόρφωση του ρεύματος δευτερεύοντος ενός μ.ρ. (κατηγορίας ακρίβειας C400) που δέχεται στο πρωτεύον του ρεύμα 40 KA με μεγάλη συνιστώσα συνεχούς ρεύματος. Με αυτό το ρεύμα δευτερεύοντος είναι απροσδιόριστη η απόκριση του ηλεκτρονόμου.

Οι μ.ρ. είναι συνήθως διαθέσιμοι σε δυο τύπους:

- (α) *δακτυλιοειδής* (bushing) μ.ρ. (Σχ. 1.6), που το πρωτεύον τους είναι ο διερχόμενος από μέσα τους αγωγός ισχύος (έχουν δηλαδή μία μόνο σπείρα στο τύλιγμα πρωτεύοντος). Αυτοί τοποθετούνται στους μονωτήρες των μετασχηματιστών και των διακοπών ισχύος.
- (β) *τυπικοί* μ.ρ. με πρωτεύον πολλών περιελίξεων.

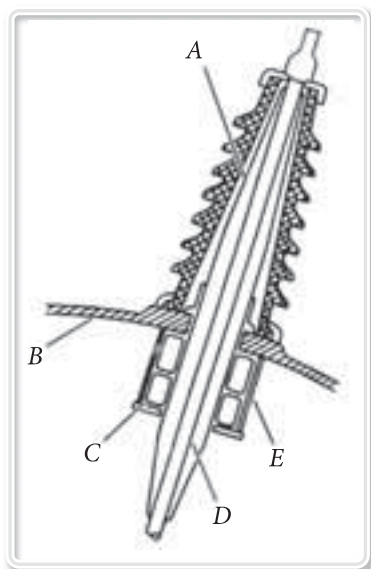
Για μεγάλα ρεύματα πρωτεύοντος, 500 A και μεγαλύτερα, χρησιμοποιούνται οι δακτυλιοειδείς μ.ρ. που έχουν ικανοποιητική ακρίβεια γι' αυτές τις τιμές ρεύματος και είναι φθηνοί. Για μικρότερα ρεύματα χρησιμοποιούνται οι μ.ρ. πολλών



Σχ. 1.5: Απόκριση μ.ρ. όταν οδηγείται στον κόρο.

περιελίξεων. Επειδή συνήθως απαιτείται η τροφοδοσία και άλλων βοηθητικών ηλεκτρονόμων ή οργάνων μέτρησης, εκτός από την τροφοδοσία του κύριου ηλεκτρονόμου προστασίας, οι δακτυλιοειδής μ.ρ. μπορούν να έχουν πολλά δευτερεύοντα τυλίγματα όπως φαίνεται στο Σχ. 1.6.

Επίσης είναι απαραίτητο να συνοδεύονται οι μ.ρ. με κατάλληλα συστήματα ελέγχου και διακόπτες, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας ανοικτού κυκλώματος στο δευτερεύον των μ.ρ. Ένα ανοικτό κύκλωμα δημιουργεί υπερβολικά μεγάλη τάση δευτερεύοντος, που συνήθως διασπά τη μόνωση και καταστρέφει το μ.ρ.



- A: χωρητικότητα που παρουσιάζει ο μ.ρ.
 B: πάνω μέρος δεξαμενής μ/σ.
 C: πυρήνες και τυλίγματα μ.ρ.
 D: αγωγός, πρωτεύων (μίας περιέλιξης) μ.ρ.
 E: συνδέσεις και υποστηρίγματα μ.ρ.

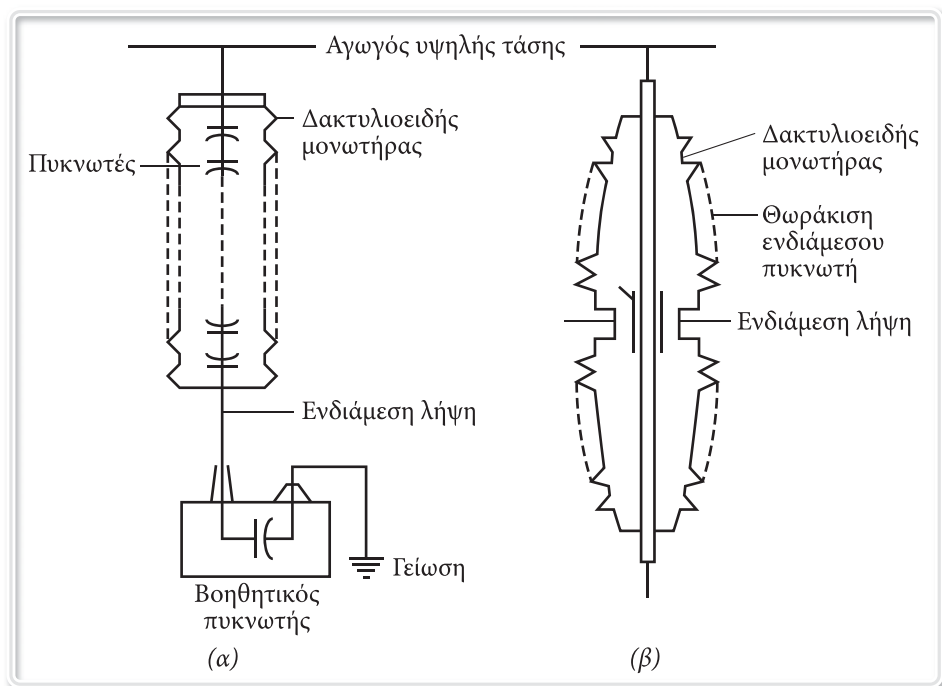
Σχ. 1.6: Τομή δακτυλιοειδή (bushing) μ.ρ. ενσωματωμένου σε μονωτήρα μετασχηματιστή ισχύος (μ.ι).

1.10 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ

Οι μαγνητικοί μετασχηματιστές δύο τυλιγμάτων για τη μέτρηση της τάσης συνήθως έχουν μία VA ονομαστική ισχύ που είναι αρκετή για να διατηρούν το λόγο τους με ηλεκτρονόμους συνηθισμένης επιβάρυνσης. Η ακρίβεια τους ελαττώνεται στις χαμηλές τάσεις, αλλά είναι αποδεκτή όταν δεν ξεπερνά κατά 1% την κανονική ακρίβεια.

Είναι όμοιοι με τους συμβατικούς μετασχηματιστές, όμως επειδή είναι σχεδιασμένοι για ένα μικρό σταθερό φορτίο, δεν μας απασχολεί το πρόβλημα της ψύξης τους αλλά της ακρίβειας στο μετασχηματισμό.

Δύο άλλοι τύποι μετασχηματιστών μέτρησης τάσης που χρησιμοποιούνται είναι: η συσκευή συζευγμένων πυκνωτών (coupling capacitor device) Σχ. 1.7α και η δακτυλιοειδής συσκευή (bushing device) Σχ. 1.7β.



Σχ. 1.7: Συσκευές μέτρησης τάσης με χωρητικό διαιρέτη τάσης.