



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΜΕ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΕΞΟΜΟΙΩΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιώργος Αδάμου

Επιβλέπων: Κορρές Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΜΕ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΕΞΟΜΟΙΩΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Γιώργος Αδάμου

Επιβλέπων : Κορρές Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουλίου 2008

.....
Γ. Κορρές

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Καβατζά

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....

Γιώργος Αδάμου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γιώργος Αδάμου 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της προσπάθειάς μου κ. Κορρέ Γεώργιο, Αν. Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε την ευκαιρία να εφαρμόσω πολλές από τις γνώσεις που απέκτησα στην πορεία των χρόνων κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αποστολόπουλο Χρήστο, Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., του οποίου η συνεισφορά και η καθοδήγηση κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, ήταν περισσότερο από απαραίτητη και εποικοδομητική.

Περίληψη

Για να καλυφθούν οι ανάγκες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας σε αξιοπιστία και ασφάλεια απαιτούνται ολοένα και πιο σύγχρονα και πολύπλοκα συστήματα προστασίας. Με την πολυπλοκότητα των συστημάτων προστασίας να αυξάνει ολοένα και περισσότερο, σε συνδυασμό με τις εξελιγμένες δυνατότητες των σύγχρονων ψηφιακών ηλεκτρονόμων, δημιουργείται η ανάγκη χρήσης εξομοιωτών στους οποίους θα δοκιμάζονται τα καινούρια σχέδια προστασίας για την ορθή λειτουργία τους πριν εφαρμοστούν στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας ρυθμίστηκε ένας ψηφιακός διαφορικός ηλεκτρονόμος για την προστασία ενός μετασχηματιστή 500 MVA και δοκιμάστηκε στον εξομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο. Ο ηλεκτρονόμος ρυθμίστηκε για την προστασία ενός μετασχηματιστή 500MVA αστέρα τριγώνου που βρίσκεται μεταξύ δύο πηγών τροφοδοσίας 230kV. Για την προστασία του χρησιμοποιήθηκαν τα διαφορικά στοιχεία του ηλεκτρονόμου και η μια από τις δύο ομάδες υπερεντάσεως που διαθέτει ο ηλεκτρονόμος ως εφεδρική προστασία. Για την εξακρίβωση της αναμενόμενης λειτουργίας του, ο ηλεκτρονόμος συνδέθηκε στην μονάδα εξομοίωσης (RTDS) που διαθέτει το εργαστήριο και δοκιμάστηκε σε διάφορες συνθήκες εξέλιξης βραχυκυκλωμάτων. Το μοντέλο του δικτύου στο οποίο έγιναν οι δοκιμές προέκυψε από την τροποποίηση ενός έτοιμου μοντέλου που ήταν διαθέσιμο στις βιβλιοθήκες του λογισμικού του RTDS. Έγιναν δοκιμές με βραχυκυκλώματα τόσο εντός όσο και εκτός της ζώνης προστασίας, τα οποία επιβεβαίωσαν την άψογη επιλογή των ρυθμίσεων και την απρόσκοπτη λειτουργία του ηλεκτρονόμου, αφού σε όλες τις περιπτώσεις σε διάστημα μόνο ορισμένων περιόδων ο ηλεκτρονόμος εντόπισε το βραχυκύκλωμα και ακολούθως προέβηκε στις απαραίτητες ενέργειες για την καταστολή του.

Λέξεις κλειδιά: Προστασία ΣΗΕ, διαφορική προστασία, προστασία υπερεντάσεως, εξομοιωτής RTDS, προστασία μετασχηματιστή, βραχυκυκλώματα, μετασχηματιστές εντάσεως, διαφορικός ηλεκτρονόμος, ρυθμίσεις ηλεκτρονόμου

Abstract

In order to keep up with the needs of Power Systems, for reliability and safety, protection systems tend to be more and more complicated. The constant increase in protection systems' complexity, combined with the advanced features of modern relays, brings the need of using a simulator, as a test system, in order to confirm the proper functionality of protection schemes before their application on Power Systems. In this diploma thesis a digital relay was set up for the protection of a 500MVA power transformer and then tested on a digital simulator (RTDS). The relay was set up for protecting a wye delta transformer rated at 500MVA connected on a network between two 230kV sources. The protection scheme used the differential elements of the relay as well as the one out of two available overcurrent elements for backup protection. In order to confirm the relay's proper operation it was connected on the simulation unit and tested under a series of faults. The test network model used was a modification of a model extracted from the RTDS library. The tests confirmed the suitability of the used settings and the proper operation of the relay, oince in all test cases the relay recognized the fault and took proper measures for eliminating it.

Key Words: Power System protection, differential protection, overcurrent protection, RTDS simulator, transformer protection, faults, short-circuits, current transformers, differential relay, relay settings

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	13
1.1 Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	13
1.2 Ανάλυση και αντιμετώπιση βλαβών και σφαλμάτων	13
1.2.1 Διατάξεις απόφασης – δράσης (Ενεργητικές διατάξεις).....	14
1.2.2 Κατασταλτικές διατάξεις προστασίας (Παθητικές διατάξεις)	16
1.2.3 Λειτουργία διατάξεων προστασίας	16
1.3 Μελέτη και σχεδίαση συστήματος προστασίας	18
1.4 Έννοιες που χρησιμοποιούνται στην προστασία συστημάτων.....	19
2. Διαφορική Προστασία.....	23
2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαφορική προστασία.....	24
2.1.1 Σφάλματα μέτρησης μετασχηματιστών εντάσεως	25
2.1.2 Τάξη δευτερεύοντος μετασχηματιστών εντάσεως	25
2.1.3 Καλώδια διασύνδεσης (αγωγοί πιλότοι).....	26
2.1.4 Συμμετρία κυκλωμάτων προστασίας	26
2.2 Χρήση χαρακτηριστικών πόλωσης.....	28
2.3 Υλοποίηση συστημάτων προστασίας	29
2.3.1 Προστασία ζώνης μικρού μήκους	29
2.3.2 Προστασία ζώνης μεγάλου μήκους.....	30
2.3.3 Προστασία ζωνών με περισσότερα από δύο άκρα	35
2.3.4 Προστασία ζυγών.....	36
2.4 Προστασία από βραχυκυκλώματα προς γη.....	38
3. Προστασία Μετασχηματιστή	41
3.1 Διαφορική Προστασία	42

3.2	Φαινόμενα διαταραχών.....	45
3.2.1	Ρεύματα ζεύξης – μαγνήτισης	45
3.2.2	Υπερδιέγερση μετασχηματιστή	46
3.2.3	Κορεσμός μετασχηματιστών εντάσεως.....	48
3.3	Μέθοδοι διάκρισης των εσωτερικών σφαλμάτων από τις καταστάσεις ενεργοποίησης και υπερδιέγερσης.....	49
3.3.1	Μέθοδοι βασισμένοι στις αρμονικές	49
3.3.2	Μέθοδοι βασισμένες στην αναγνώριση κυματομορφών.....	55
4.	<i>Ψηφιακός Εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)</i>	59
4.1	Ο Εξομοιωτής	59
4.2	Κύκλωμα προσομοίωσης	62
4.2.1	Κύκλωμα Ισχύος.....	62
4.2.2	Κύκλωμα ελέγχου	69
4.3	Σύνδεση του Ηλεκτρονόμου στο RTDS	75
4.3.1	Σήματα εισόδου	75
4.3.2	Σήματα εξόδου.....	76
5.	<i>Ηλεκτρονόμος SEL-587</i>	77
5.1	Χαρακτηριστικά ηλεκτρονόμου	77
5.1.1	Διαφορική Προστασία	77
5.1.2	Προστασία υπερεντάσεως	79
5.1.3	Αναφορές γεγονότων	79
5.1.4	Λογική ηλεκτρονόμου.....	79
5.2	Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμου	80
5.2.1	Γενικά δεδομένα	80
5.2.2	Ρυθμίσεις διαφορικού στοιχείου προστασίας.....	83

5.2.3	Ρυθμίσεις Προστασίας Υπερεντάσεως.....	86
5.2.4	Λογική λειτουργίας.....	90
5.3	Περιβάλλον ρύθμισης και επίβλεψης λειτουργίας του ηλεκτρονόμου.....	92
6.	<i>Έλεγχος Ρυθμίσεων</i>	95
6.1	Δοκιμές με Βραχυκυκλώματα Εντός της Ζώνης Προστασίας.....	95
6.1.1	Μονοφασικά βραχυκυκλώματα.....	96
6.1.2	Διφασικά βραχυκυκλώματα.....	100
6.1.3	Τριφασικά βραχυκυκλώματα.....	108
6.2	Δοκιμές με Βραχυκυκλώματα Εκτός της Ζώνης Προστασίας.....	112
6.2.1	Μονοφασικό βραχυκύκλωμα.....	112
6.2.2	Διφασικό βραχυκύκλωμα.....	114
6.3	Δοκιμές με ενεργοποιημένες και τις δύο ομάδες προστασίας υπερεντάσεως.....	116
6.4	Ηλέκτριση του Μ/Σ με ανοικτοκυκλωμένη την πλευρά τριγώνου.....	118
	<i>Βιβλιογραφία</i>	120

1. Εισαγωγή

1.1 Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Η προστασία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι το κομμάτι της επιστήμης των ηλεκτρολόγων μηχανικών που ασχολείται με την προστασία των διατάξεων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από τυχόν σφάλματα, απομονώνοντας το στοιχείο που υπέστη βλάβη από το υπόλοιπο σύστημα. Ο κύριος στόχος ενός σχεδίου προστασίας είναι η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος, με την άμεση απομόνωση των στοιχείων που υπέστησαν σφάλμα, καθώς και η διατήρηση, όσο το δυνατόν μεγαλύτερου τμήματος του συστήματος σε λειτουργία.

Με την πάροδο του χρόνου η προστασία έχει εξελιχθεί από σχετικά πρωτόγονες συσκευές με περιορισμένες δυνατότητες, σε πολύπλοκα συστήματα με εκτεταμένο εξοπλισμό. Αυτά τα μοντέρνα συστήματα προστασίας αποτελούνται κυρίως από ψηφιακούς ηλεκτρονόμους διαφόρων τύπων οι οποίοι επιβλέπουν τις διατάξεις ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι ενσωματώνουν δυνατότητες απομακρυσμένου ελέγχου και επίβλεψης. Επιπλέον ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι που προστατεύουν διαφορετικές διατάξεις, στο ίδιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω δίαυλων επικοινωνίας και να αποφασίζουν ως ένα ενιαίο σύστημα προστασίας.

1.2 Ανάλυση και αντιμετώπιση βλαβών και σφαλμάτων

Η προστασία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν στόχο της την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε περιπτώσεις σφαλμάτων και την αύξηση της αξιοπιστίας του ΣΗΕ. Με καλό σχεδιασμό του συστήματος μπορούν να αποτραπούν αστοχίες που οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα όπως την εναπόθεση πάγου, τυφώνες και ανεμοστρόβιλους σε εναέριες γραμμές. Αυτό όμως γίνεται πάντα με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς ισχύος, η οποία επιτυγχάνεται βρίσκοντας μια ισορροπία μεταξύ του αρχικού κόστους κατασκευής και του κόστους συντήρησης. Η σχεδίαση της μόνωσης γίνεται με στόχο την ελαχιστοποίηση των ζημιών στον ακριβό εξοπλισμό κατά τις ηλεκτρικές αιχμές. Ωστόσο, επειδή δεν είναι εφικτός ο σχεδιασμός ενός συστήματος το οποίο να αντέχει σε

όλους τους δυνατούς τύπους σφαλμάτων, στρεφόμαστε στον σχεδιασμό ενός συστήματος προστασίας το οποίο να μπορεί να τα εντοπίζει σε μικρό χρόνο και να λαμβάνει τα απαραίτητα μέτρα για την εκκαθάριση τους. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων προστασίας.

- **Διατάξεις απόφασης – δράσης (ή ενεργητικές διατάξεις).** Αυτές οι συσκευές είναι σχεδιασμένες ώστε να αναγνωρίζουν συγκεκριμένες βλάβες στο δίκτυο ισχύος και να αντιδρούν με προκαθορισμένο τρόπο για να αποκαταστήσουν την λειτουργία του. Στις πλείστες περιπτώσεις η βλάβη σχετίζεται με ανωμαλίες στη λειτουργία του συστήματος, οι οποίες εν τέλει καταστρέφουν ένα ή περισσότερα στοιχεία του. Γι' αυτό το λόγο, αυτό που συνήθως κάνει η διάταξη είναι να απομονώνει το τμήμα του συστήματος που παρουσιάζει βλάβη, έτσι ώστε το υπόλοιπο σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά.
- **Κατασταλτικές διατάξεις προστασίας (ή παθητικές διατάξεις).** Αυτές οι διατάξεις είναι σχεδιασμένες για να αναγνωρίζουν συγκεκριμένους κινδύνους σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και να ενεργοποιούνται για να το οδηγήσουν σε μία λιγότερο επικίνδυνη κατάσταση.

1.2.1 Διατάξεις απόφασης – δράσης (Ενεργητικές διατάξεις)

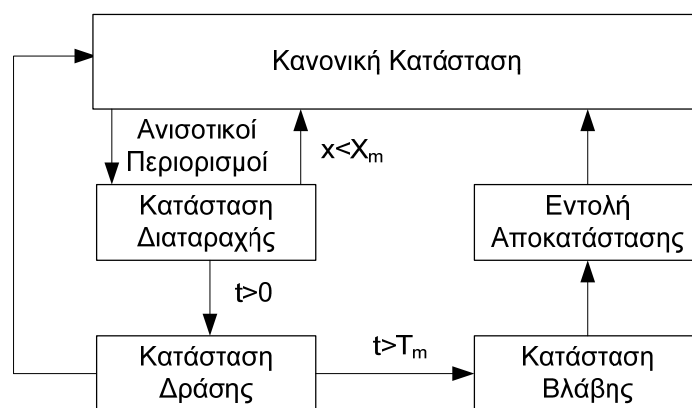
Οι διατάξεις απόφασης – δράσης είναι σχεδιασμένες για να ανιχνεύουν συγκεκριμένα σφάλματα, όπως βραχυκυκλώματα, στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και να τα εξουδετερώνουν. Το σύστημα δεν είναι σχεδιασμένο για συνεχή λειτουργία υπό την παρουσία βραχυκυκλώματος. Η διάταξη προστασίας επαναφέρει το σύστημα στην καλύτερη κατάσταση λειτουργίας υπό την εκάστοτε περίπτωση σφάλματος. Σε πολλές περιπτώσεις, μετά από επιθεώρηση και δοκιμή, μπορεί να αποκατασταθεί η λειτουργία του τμήματος που παρουσίασε βλάβη.

Η προστασία του συστήματος από καταστροφές είναι ανάγκη να υπόκειται στη λογική ότι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα σε κάθε ανεπιθύμητη κατάσταση που παρουσιάζεται. Η διάταξη προστασίας απαιτείται να δρα γρήγορα, τυπικά σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, και συνήθως έχοντας στη διάθεσή της περιορισμένες πληροφορίες για το ιστορικό και την κατάσταση του συστήματος που καλείται να προστατέψει.

Το συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επανέρχεται σε λειτουργία μετά από ένα σοβαρό σφάλμα, μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση ένα σύνολο μοναδικών καταστάσεων του συστήματος προστασίας. Έτσι λέμε ότι το σύστημα προστασίας είναι σε *κανονική λειτουργία* όταν όλος ο εξοπλισμός που έπρεπε να λειτουργεί πράγματι δουλεύει μέσα στα ορισμένα σχεδιαστικά όρια. Όταν προκύψει ένα γεγονός, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα οποιοδήποτε μέρος του συστήματος να υπερβεί τα όρια λειτουργίας του, λέμε ότι το σύστημα εισήλθε σε μια *κατάσταση διαταραχής*, εννοώντας ότι πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για αποτροπή της καταστροφής. Οι διαταραχές πολλές φορές είναι μεταβατικής φύσεως και εκκαθαρίζονται μόνες τους. Γι' αυτό είναι επιθυμητό η προστασία να επιδρά στο σύστημα μετά την πάροδο κάποιου μικρού χρονικού διαστήματος. Αλλιώς επέρχεται μια *κατάσταση δράσης* στην οποία γίνονται κάποιες προκαθορισμένες ενέργειες χωρίς περαιτέρω καθυστέρηση και η συσκευή που παρουσίασε βλάβη απομονώνεται από το σύστημα. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται *κατάσταση βλάβης* και επειδή δεν είναι επιθυμητή, ακολουθεί μια *εντολή αποκατάστασης* με σκοπό την επαναφορά του συστήματος στην κατάσταση *κανονικής λειτουργίας*. Αυτή η διαδικασία συνοψίζεται στο διάγραμμα 1.1 από το οποίο είναι φανερό ότι για να αφαιρεθεί ένα στοιχείο από την κανονική κατάσταση πρέπει να ισχύουν οι πιο κάτω σχέσεις:

α) Ο ανισοτικός περιορισμός $x > X_m$

β) Ο χρονικός περιορισμός $t > T_m$



Σχήμα 1.1 Καταστάσεις λειτουργίας της διάταξης προστασίας

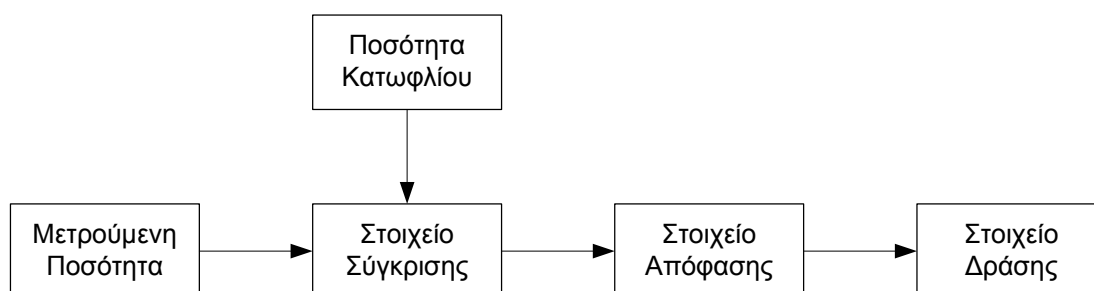
1.2.2 Κατασταλτικές διατάξεις προστασίας (Παθητικές διατάξεις)

Οι διατάξεις καταστολής διαφέρουν από τις διατάξεις απόφασης - δράσης στο ότι είναι σχεδιασμένες να αλλάζουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος οι οποίες είναι η αιτία του κινδύνου. Παραδείγματα κατασταλτικών διατάξεων είναι τα συστήματα πυρόσβεσης, συμπληρωματικές συσκευές ψύξης, και ανιχνευτές που επιτηρούν το ρεύμα και την τάση σε συσκευές. Το σύστημα πυρόσβεσης καταστέλλει την πυρκαγιά και η συμπληρωματική συσκευή ψύξης απάγει την επιπλέον θερμότητα από το μηχάνημα για να αποκαταστήσει το κανονικό περιβάλλον λειτουργίας της. Μερικές διατάξεις καταστολής είναι σχεδιασμένες για να προειδοποιούν τον χειριστή ο οποίος είναι υπεύθυνος να αξιολογήσει την επικινδυνότητα της κατάστασης και να λάβει τα απαραίτητα μέτρα, όπως την απόξευση της συσκευής. Άλλες διατάξεις είναι σχεδιασμένες για να λαμβάνουν μέτρα, το οποία μπορεί να περιλαμβάνουν και αποσύνδεση του εξοπλισμού, αν οι υπόλοιπες ενέργειες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Μερικές κατασταλτικές διατάξεις έχουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα καλό παράδειγμα είναι το σύστημα ψύξης επείγουσας ανάγκης σε πυρηνικό αντιδραστήρα, το οποίο έχει τη δυνατότητα να αποτρέπει την τήξη του πυρήνα που μπορεί να προκληθεί από ατύχημα. Μια τέτοια διάταξη πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά για να έχει πολύ μεγάλη αξιοπιστία και ασφάλεια λόγω των δραματικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει ένα ατύχημα.

1.2.3 Λειτουργία διατάξεων προστασίας

Οι συσκευές προστασίας συνήθως αποτελούνται από διάφορα στοιχεία, τα οποία αναλαμβάνουν τον έλεγχο του συστήματος, λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με την ομαλότητα των μεταβλητών που παρακολουθούν και ενεργούν αναλόγως.



Σχήμα 1.2 Στοιχεία λειτουργίας της διάταξης προστασίας

Το σύστημα προστασίας λαμβάνει πάντα συγκεκριμένες μετρήσεις, ρεύματος και τάσης, και τις συγκρίνει αυτούσιες, ή κάποιο συνδυασμό τους, με ένα κατώφλι το οποίο υπολογίστηκε από τον μηχανικό ο οποίος ρύθμισε την συσκευή προστασίας. Αν από την σύγκριση προκύψει ότι η μετρούμενη ποσότητα είναι εκτός ορίων, τότε ενεργοποιείται το στοιχείο απόφασης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει και μια χρονική καθυστέρηση, για να προσδιοριστεί η μονιμότητα της περίπτωσης, ενώ μπορεί επίσης να απαιτούνται επιπλέον έλεγχοι στο σύστημα ή σε άλλα σημεία του δικτύου. Εν τέλει, αν πληρούνται όλες οι απαραίτητες συνθήκες, ενεργοποιείται το στοιχείο δράσης το οποίο στις πλείστες περιπτώσεις θέτει σε λειτουργία διακόπτες ισχύος που απομονώνουν ένα τμήμα του δικτύου.

Ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει οποιαδήποτε διορθωτική κίνηση ονομάζεται *χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος* και μπορεί να υπολογιστεί από:

$$T_c = T_p + T_d + T_a$$

Όπου: T_c = Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος

T_p = Χρόνος σύγκρισης

T_d = Χρόνος απόφασης

T_a = Χρόνος δράσης, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου λειτουργίας του διακόπτη

Ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος μιας συσκευής προστασίας είναι πολύ σημαντικός καθώς άλλες συσκευές προστασίας που υπάρχουν στο δίκτυο μπορεί να είναι συντονισμένες με αυτή την συσκευή για να διασφαλίζεται ότι θα διακοπεί μόνο το απαραίτητο, για την απομόνωση του σφάλματος, τμήμα του δικτύου. Αυτό που πρέπει να κρατήσουμε είναι ότι στην περίπτωση σφάλματος πολλές από τις συσκευές προστασίας θα ανιχνεύσουν την διαταραχή. Κάθε συσκευή θα πρέπει να διαθέτει κάποιου είδους περιορισμό ώστε να επιτρέπεται στην πιο κοντινή στη διαταραχή συσκευή να δρα πρώτη. Πολλές φορές η διαβάθμιση αυτή γίνεται με τη βοήθεια προκαθορισμένης χρονικής καθυστέρησης.

Ο χρόνος εκκαθάρισης είναι επίσης σημαντικός επειδή κάποιες διαταραχές, όπως τα βραχυκυκλώματα, πρέπει να εκκαθαριστούν εγκαίρως ούτως ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι και η θέση στην οποία έγινε η διαταραχή. Γενικά,

όμως, είναι επιθυμητό η αντιμετώπιση του σφάλματος να γίνεται όσο το δυνατόν πιο σύντομα.

1.3 Μελέτη και σχεδίαση συστήματος προστασίας

Ένα σύστημα προστασίας πρέπει να σχεδιαστεί για να αναγνωρίζει ορισμένες διαταραχές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες, αν αμεληθούν, μπορούν να οδηγήσουν σε ζημιές στον εξοπλισμό ή εκτεταμένες απώλειες λειτουργίας. Το σύστημα προστασίας καλείται να εντοπίσει και να εκκαθαρίσει τα σφάλματα καθώς και να επαναφέρει στη λειτουργία τμήματα του δικτύου τα οποία τέθηκαν εκτός για την αντιμετώπιση της διαταραχής. Αυτό απαιτεί γνώση των τύπων των σφαλμάτων που είναι πιθανό να εμφανιστούν όπως και του είδους των συσκευών προστασίας που είναι σε θέση να τα εντοπίσουν και να τα αντιμετωπίσουν.

Υπάρχουν πολλοί σχεδιαστικοί παράγοντες στους οποίους τίθενται περιορισμοί λόγω του κόστους της εφαρμογής. Έχουμε ήδη αναφέρει ότι επιθυμούμε βέλτιστη επαναφορά λειτουργίας, αλλά αυτό δεν συμβαδίζει απαραίτητα με το γρηγορότερο δυνατό τρόπο επαναφοράς. Για παράδειγμα, αν το σύστημα προστασίας αντιληφθεί ότι ένα σφάλμα είναι μόνιμο, δεν υπάρχει λόγος να συνεχίζει την προσπάθεια επαναφοράς του κυκλώματος πριν κάποιο συνεργείο επιδιορθώσει το σφάλμα. Μόνο τότε μπορεί το κύκλωμα να αποκαταστήσει την κανονική του λειτουργία. Όπου είναι εφικτό σε τέτοια περίπτωση, το σύστημα προστασίας δίνει ένα σήμα κινδύνου, μετά το οποίο ο χειριστής μπορεί να αναλύσει το συμβάν και να αναλάβει επιτόπου την επιδιόρθωση του.

Το σύστημα προστασίας πρέπει επίσης να είναι σχεδιασμένο για την ελάχιστη απώλεια φορτίου. Συνήθως δεν υπάρχει λόγος να απενεργοποιείται ολόκληρο το σύστημα όταν εμφανιστεί ένα μεμονωμένο σφάλμα. Η επιλεκτικότητα του συστήματος προστασίας πρέπει είναι τέτοια ώστε το σύστημα να απομονώνει το σφάλμα με την ελάχιστη δυνατή παρεμβολή στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Συχνά αυτό γίνεται με την αυτόματη επανασύνδεση του τμήματος που απομονώθηκε, αφού η εμπειρία έχει δείξει ότι τα περισσότερα βραχυκυκλώματα είναι προσωρινά και έτσι η επανασύνδεση είναι επιτυχής και επιβεβλημένη. Η ελάχιστη απώλεια φορτίου μπορεί επίσης να επιτευχθεί χάρη στα διαθέσιμα εφεδρικά κυκλώματα που υπάρχουν στο σύστημα για να εξυπηρετήσουν τα κρίσιμα φορτία. Για παράδειγμα, τα μεγάλα συστήματα μεταφοράς έχουν συνήθως τη

δυνατότητα να εξυπηρετήσουν ολόκληρο το φορτίο με μία ή περισσότερες κύριες γραμμές εκτός λειτουργίας.

Είναι επίσης σημαντικό το σύστημα προστασίας να σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει τη δική του αναξιопιστία. Για αυτό πρέπει να εγκαθίστανται και εφεδρικά συστήματα προστασίας για να λειτουργήσουν στην περίπτωση που η κύρια προστασία αποτύχει να εκκαθαρίσει το σφάλμα. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η προκληθείσα ζημιά θα είναι περιορισμένη και ότι θα αποκατασταθεί γρήγορα η λειτουργία του συστήματος.

Επιπλέον το σύστημα προστασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να μπορεί να αποδίδει υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Ο εξοπλισμός προστασίας παίρνει μετρήσεις ρεύματος και τάσης και από αυτές υπολογίζει μια ποσότητα την οποία συγκρίνει με ένα κατώφλι. Αυτό το κατώφλι δεν πρέπει να τεθεί πολύ χαμηλά επειδή τότε μπορεί να τεθεί σε λειτουργία η προστασία χωρίς να συντρέχει λόγος. Επίσης, η τιμή κατωφλίου πρέπει να ανανεώνεται περιοδικά για να είναι βέβαιο ότι οι ρυθμίσεις είναι ικανοποιητικές για την αναμενόμενη φόρτιση του δικτύου.

Η λειτουργία του συστήματος προστασίας πρέπει να είναι γρήγορη και στοχευόμενη. Τα πρότυπα αξιοπιστίας των μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν να μην προκαλείται κατάρρευση του συστήματος μετά από σοβαρές περιπτώσεις σφαλμάτων. Αυτό με την σειρά του απαιτεί γρήγορη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος προστασίας. Έτσι υπάρχει άμεση εξάρτηση μεταξύ του συστήματος προστασίας και της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.4 Έννοιες που χρησιμοποιούνται στην προστασία συστημάτων

Ακολουθούν διάφορες έννοιες που χρησιμοποιούνται στην προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και επεξήγησή τους.

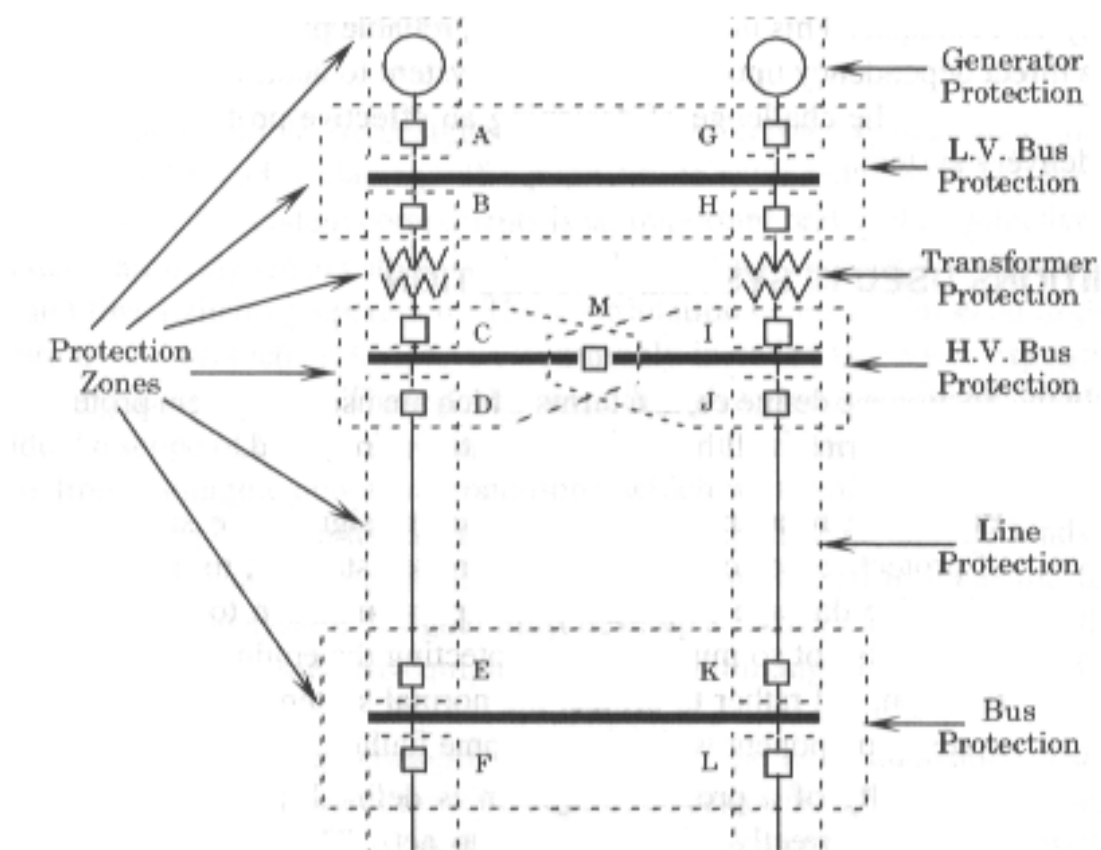
Ηλεκτρονόμοι προστασίας είναι οι συσκευές που εκτελούν τις εντολές προστασίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την μεγιστοποίηση της του χρόνου λειτουργίας του και την ελαχιστοποίηση των ζημιών στον εξοπλισμό λόγω διαταραχών που εμφανίζονται στο σύστημα.

Αξιοπιστία ενός συστήματος προστασίας ορίζεται ως η πιθανότητα το σύστημα να λειτουργήσει κανονικά όταν χρειαστεί, πράγμα το οποίο έχει δύο απόψεις: πρώτα, το

σύστημα πρέπει να λειτουργήσει κανονικά όταν παρουσιαστεί ένα σφάλμα στη ζώνη προστασίας του και δεύτερον, πρέπει να μην λειτουργήσει, χωρίς αυτό να είναι αναγκαίο σε περιπτώσεις σφαλμάτων εκτός της ζώνης προστασίας του ή σε περιπτώσεις που δεν υφίσταται σφάλμα.

Ασφάλεια στα συστήματα προστασίας είναι ένας όρος που κάποιες φορές χρησιμοποιείται για να δηλώσει την ικανότητα του συστήματος να μην λειτουργεί όταν δεν είναι αναγκαίο. Συχνά χρησιμοποιούμε τον όρο ασφάλεια σαν ένα γενικό όρο ο οποίος μας δείχνει ότι το σύστημα προστασίας έχει τη σωστή λειτουργία.

Ευαισθησία είναι η ικανότητα του συστήματος προστασίας να αναγνωρίζει μια διαταραχή στην λειτουργία η οποία ξεπερνά το προκαθορισμένο κατώφλι (pickup) και η οποία ενεργοποιεί τη διαδικασία της εκκαθάρισης του σφάλματος.



Σχήμα 1.3 Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τις πρωτεύουσες ζώνες προστασίας

Επιλεκτικότητα αναφέρεται στον ολικό σχεδιασμό της στρατηγικής της προστασίας κατά την οποία μόνο οι γειτονικές με το σημείο όπου εμφανίστηκε το σφάλμα συσκευές θα λειτουργήσουν για την εκκαθάρισή του. Αυτό μπορεί να γίνει με κατάλληλη ρύθμιση του κατωφλίου, του χρόνου ή των λειτουργικών χαρακτηριστικών του ηλεκτρονόμου.

Ζώνες προστασίας είναι τα τμήματα στα οποία υποδιαιρείται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να εφαρμοστεί το πλάνο προστασίας του. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 1.3 όπου οι ζώνες εμφανίζονται με διακεκομμένη γραμμή.

Διαβάθμιση των συσκευών προστασίας είναι ο καθορισμός των διαβαθμισμένων ρυθμίσεων τους ώστε να επιτυγχάνεται επιλεκτικότητα.

Πρωτεύοντες ηλεκτρονόμοι είναι οι ηλεκτρονόμοι σε μια πρωτεύουσα ζώνη προστασίας που πρέπει να λειτουργήσουν πρώτοι για ένα σφάλμα στη ζώνη προστασίας τους.

Εφεδρικοί ηλεκτρονόμοι είναι οι ηλεκτρονόμοι εκτός μιας πρωτεύουσας ζώνης προστασίας, σε μια προσκείμενη ζώνη, οι οποίοι θα λειτουργήσουν για ένα σφάλμα στην πρωτεύουσα ζώνη μόνο εάν για κάποιο λόγο δε λειτουργήσουν οι πρωτεύοντες ηλεκτρονόμοι.

Τοπικοί εφεδρικοί ηλεκτρονόμοι είναι οι ηλεκτρονόμοι μέσα στην κύρια ζώνη προστασίας που λειτουργούν εάν δε λειτουργήσουν οι πρωτεύοντες ηλεκτρονόμοι. Συχνά είναι αντίγραφα των πρωτευόντων ηλεκτρονόμων και λειτουργούν ανεξάρτητα από αυτούς. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη λογικής «H» για να αποτρέπει τη λειτουργία και των δύο ηλεκτρονόμων ταυτόχρονα.

Εσφαλμένη ενεργοποίηση προκύπτει όταν ένας ηλεκτρονόμος ενεργοποιηθεί για ένα σφάλμα εκτός της ζώνης επιτήρησης του, ή ακόμα και χωρίς την ύπαρξη σφάλματος. Αυτό μπορεί να προκύψει αν το σύστημα προστασίας είναι ρυθμισμένο σε πολύ μεγάλη ευαισθησία. Τέτοια ανεπιθύμητη λειτουργία μπορεί να προκαλέσει αποκοπή του φορτίου σε ακτινικά δίκτυα ή υπερφόρτιση παράπλευρων γραμμών σε δακτυλιοειδή δίκτυα.

Αποτυχία ενεργοποίησης είναι δυσλειτουργία του συστήματος προστασίας κατά την οποία ο ηλεκτρονόμος δε λειτουργεί όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες για την ενεργοποίησή του. Αυτό το γεγονός μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες ζημιές στο στοιχείο που εμφάνισε βλάβη αν δεν αντιμετωπιστεί από τη δευτερεύουσα προστασία.

Γενικά η προστασία δεν απαιτείται όταν το σύστημα λειτουργεί κανονικά, αλλά μόνο όταν υπάρχει σφάλμα. Αποτελεί δηλαδή ένα είδος ασφάλειας έναντι των αστοχιών του εξοπλισμού. Αυτό που καταβάλλεται είναι το κόστος επένδυσης και συντήρησης της

προστασίας, ενώ το κέρδος είναι η αποφυγή πιθανής αστάθειας του συστήματος και η ελαχιστοποίηση των πιθανών καταστροφών. Το κόστος ενός συστήματος προστασίας είναι γενικά πολύ μικρό σε σύγκριση με το κόστος του εξοπλισμού που προστατεύει.

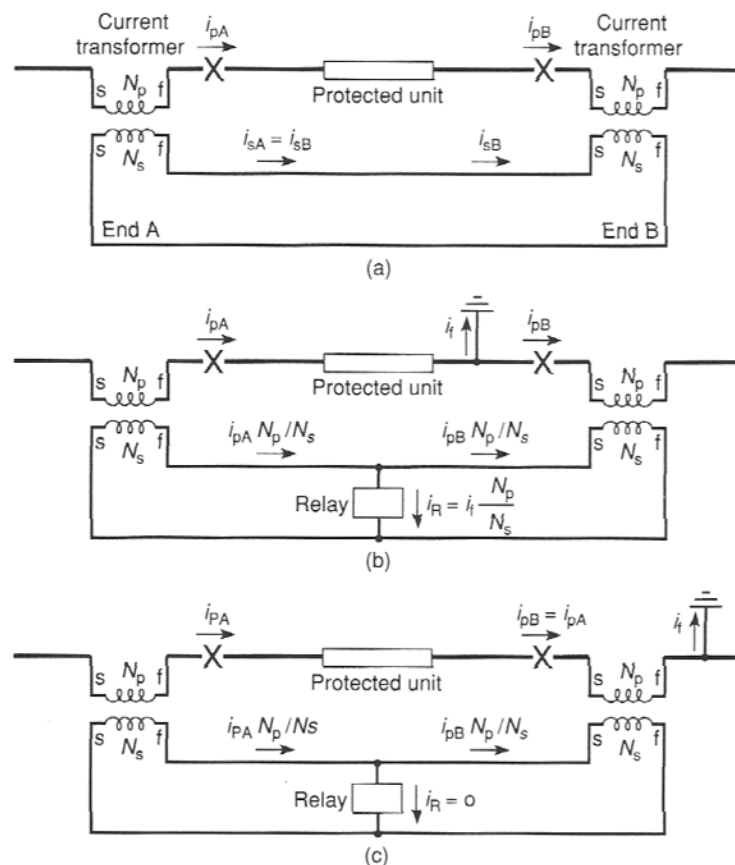
2. Διαφορική Προστασία

Η διαφορική είναι ένα είδος προστασίας το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για την προστασία συγκεκριμένων τμημάτων του δικτύου ή συσκευών του συστήματος. Η βασική έννοια πίσω από την λειτουργία της διαφορικής προστασίας είναι ο Πρώτος Νόμος του Kirchhoff, σύμφωνα με τον οποίο το άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε ένα κόμβο πρέπει να ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων που εξέρχονται από αυτόν. Βάσει αυτού, η συσκευή προστασίας που θα χρησιμοποιήσουμε πρέπει να είναι ικανή να αντιλαμβάνεται τη διαφορά ανάμεσα στα εισερχόμενα και τα εξερχόμενα ρεύματα ενός κόμβου.

Ένα στοιχειώδες μονοφασικό διάγραμμα προστασίας φαίνεται στο σχήμα 2.1. Σε κανονική λειτουργία το ρεύμα που εισέρχεται στην προστατευόμενη συσκευή θα είναι ίσο με το εξερχόμενο όπως δείχνει το σχήμα 2.1(a). Τα δευτερεύοντα τυλίγματα των δύο μετασχηματιστών εντάσεως, αν είναι ιδανικοί, θα διαρρέονται από ίσα ρεύματα τα οποία θα κυκλοφορούν και στους αγωγούς πιλότους.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στη μονάδα που προστατεύεται, το εισερχόμενο ρεύμα δε θα είναι πλέον ίσο με το εξερχόμενο. Είναι φανερό ότι το ρεύμα που εισέρχεται στη μονάδα θα είναι ίσο με το άθροισμα του ρεύματος που εξέρχεται και του ρεύματος που τροφοδοτεί το βραχυκύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1(b). Η διαφορά ρευμάτων που θα εμφανιστεί στα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών εντάσεως ανιχνεύεται από τον ηλεκτρονόμο ο οποίος είναι συνδεδεμένος μεταξύ των αγωγών πιλότων. Το ρεύμα που διαρρέει τον ηλεκτρονόμο κάθε στιγμή είναι ανάλογο του ρεύματος σφάλματος. Έτσι ο ηλεκτρονόμος θα ενεργοποιηθεί αμέσως μόλις το ρεύμα του βραχυκυκλώματος ξεπεράσει το προκαθορισμένο κατώφλι.

Αν προκύψει σφάλμα σε σημείο που δεν είναι μεταξύ των δύο μετασχηματιστών εντάσεως, τότε δε θα εμφανιστεί κάποια διαφορά στα ρεύματα που μετρούν οι μετασχηματιστές εντάσεως. Αυτή η περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 2.1(c). Έτσι το ρεύμα που θα διαρρέει τον ηλεκτρονόμο θα είναι μηδενικό, σε ιδανικές καταστάσεις, και ο ηλεκτρονόμος δε θα λειτουργήσει με αποτέλεσμα να επιτευχθεί η απαραίτητη επιλεκτικότητα σφαλμάτων.



Σχήμα 2.1 Βασικό διάγραμμα διαφορικής προστασίας. (α) κανονική λειτουργία, (β) σφάλμα εντός ζώνης, (γ) σφάλμα εκτός ζώνης

Οι συσκευές διαφορικής προστασίας παρέχουν την δυνατότητα γρήγορης εκκαθάρισης σφαλμάτων σε συνδυασμό με σωστή επιλεκτικότητα. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι προστατεύουν μόνο ό,τι βρίσκεται μεταξύ των μετασχηματιστών εντάσεως τους και δεν παρέχουν τρόπους δευτερεύουσας προστασίας άλλων τμημάτων του δικτύου.

Παρότι η πιο πάνω λογική λειτουργίας της διαφορικής προστασίας είναι απλή, υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν όταν εφαρμόζεται διαφορική προστασία σε πραγματικά δίκτυα ή σε συγκεκριμένες συσκευές.

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαφορική προστασία

Η συμπεριφορά της διαφορικής προστασίας, όπως περιγράφηκε πιο πάνω για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, βασίστηκε σε ιδανικούς μετασχηματιστές εντάσεως. Στην πράξη, όμως, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων και των σφαλμάτων

μετασχηματισμού πραγματικών μετασχηματιστών εντάσεως, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν εσφαλμένη λειτουργία.

2.1.1 Σφάλματα μέτρησης μετασχηματιστών εντάσεως

Οι μετασχηματιστές εντάσεως χρησιμοποιούνται στις διατάξεις προστασίας ώστε ο ηλεκτρονόμος και το υπόλοιπο κύκλωμα προστασίας να μην επηρεάζονται από την υψηλή τάση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην πράξη, όλοι οι μετασχηματιστές εντάσεως εμφανίζουν σφάλματα μετασχηματισμού. Γι' αυτό είναι επιθυμητό οι μετασχηματιστές εντάσεως της ζώνης προστασίας να είναι πανομοιότυποι, για να εξασφαλιστεί ότι τα σφάλματα μέτρησης τους θα είναι τα ίδια σε κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να προκύψει λανθασμένη λειτουργία λόγω προηγούμενων εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων. Ένα βραχυκύκλωμα του οποίου το πλάτος των ρευμάτων που εμφανίζεται στα άκρα της ζώνης προστασίας είναι αρκετά μεγάλο, θα προκαλέσει κορεσμό στους μετασχηματιστές εντάσεως. Αρχικά το σύστημα προστασίας θα δουλέψει κανονικά, αφού θα επαχθούν και μεγάλα ρεύματα στα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών που θα ενεργοποιήσουν τον ηλεκτρονόμο. Η παραμένουσα μαγνήτιση όμως μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργία των μετασχηματιστών εντάσεως σε διαφορετικά σημεία στη χαρακτηριστική μαγνήτισης τους κατά την διάρκεια ενός εξωτερικού βραχυκυκλώματος, πράγμα το οποίο θα μπορούσε να φέρει μόνο τον ένα σε κορεσμό. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα ασυμμετρία ρευμάτων στο κύκλωμα του ηλεκτρονόμου με συνέπεια την εσφαλμένη λειτουργία του.

Για την ελαχιστοποίηση αυτών των επιπτώσεων, οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να εμφανίζουν σχετικά μικρά σφάλματα μετασχηματισμού και να έχουν πυρήνες με χαμηλή παραμένουσα μαγνήτιση.

2.1.2 Τάξη δευτερεύοντος μετασχηματιστών εντάσεως

Κατά την διάρκεια εξωτερικών βραχυκυκλωμάτων, οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να μπορούν να παρέχουν ικανοποιητικό ρεύμα, όχι μόνο στο τύλιγμά τους, αλλά και στα καλώδια που τους διασυνδέουν. Σε εφαρμογές όπου τα δύο άκρα της ζώνης προστασίας είναι αρκετά μακριά, η αντίσταση της διασύνδεσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλη με αποτέλεσμα αισθητή πτώση τάσης όταν η τα καλώδια διασύνδεσης διαρρέονται από

υψηλά ρεύματα βραχυκυκλώσεως. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές εντάσεως με σχετικά χαμηλή τάξη δευτερεύοντος, για παράδειγμα 1A αντί για 5A. Παρόλο που οι μετασχηματιστές με χαμηλότερη ένταση δευτερεύοντος έχουν ψηλότερη αντίσταση τυλίγματος, μπορούν να επάγουν μεγαλύτερη τάση για δεδομένη μεταβολή ροής και έτσι μειώνεται η επίδραση της αντίστασης των αγωγών πιλότων.

2.1.3 Καλώδια διασύνδεσης (αγωγοί πιλότοι)

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε σαφές ότι η αντίσταση των καλωδίων διασύνδεσης επιδρά στο πλάτος της τάσης που πρέπει να εφαρμόσουν οι μετασχηματιστές εντάσεως όταν εκδηλωθεί βραχυκύκλωμα, με την επίδραση να είναι πιο σοβαρή όταν χρησιμοποιούνται δευτερεύοντα τυλίγματα υψηλής εντάσεως π.χ. 5A. Αν και η επίδραση είναι μικρότερη όταν το τύλιγμα είναι μικρότερης έντασης π.χ. 1A και πάλι οι αντιστάσεις των καλωδίων διασύνδεσης πρέπει να μην είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τις αντιστάσεις των δευτερευόντων τυλιγμάτων των μετασχηματιστών εντάσεως. Είναι εμφανές ότι το κόστος των καλωδίων μεγάλου μήκους με μεγάλες διατομές είναι υπερβολικά υψηλό και γι' αυτό πρέπει να γίνει κάποιος συμβιβασμός σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις.

2.1.4 Συμμετρία κυκλωμάτων προστασίας

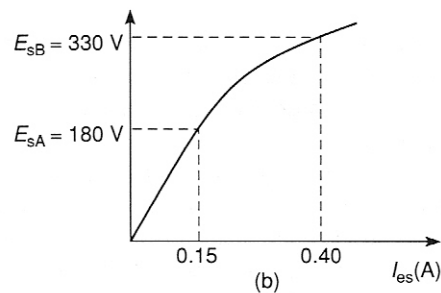
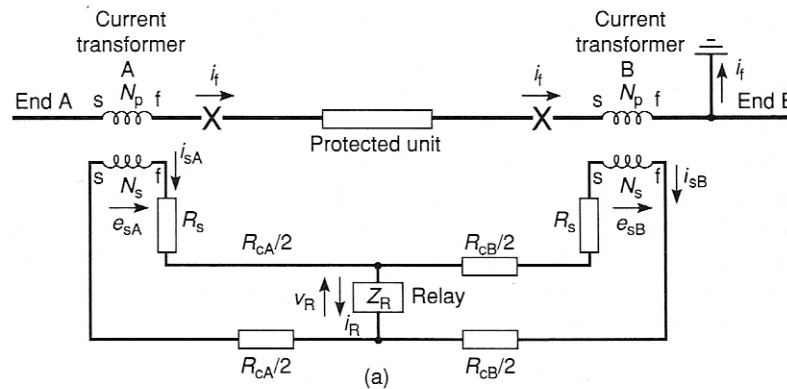
Στο σχήμα 2.2(a) παρουσιάζονται οι συνθήκες που θα προκύψουν σε ένα κύκλωμα προστασίας όταν υπάρχει βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας. Αν το κύκλωμα ήταν συμμετρικό π.χ. $R_{cA} = R_{cB}$, και οι μετασχηματιστές εντάσεως πανομοιότυποι, τα δευτερεύοντα ρεύματα i_{sA} και i_{sB} θα ήταν ίσα σε κάθε στιγμή. Οι τάσεις που θα παρείχαν οι μετασχηματιστές εντάσεως στα δευτερεύοντα τυλίγματα τους θα ήταν ίσες. Η τάση v_R κατά μήκος του ηλεκτρονόμου θα ήταν μηδενική και αυτός δε θα διαρρεόταν από ρεύμα.

Η πιο πάνω ιδανική συμπεριφορά δε μπορεί να επιτευχθεί όταν τα κυκλώματα προστασίας δεν είναι συμμετρικά. Σε ένα κύκλωμα, στο οποίο οι αντιστάσεις R_{cA} και R_{cB} των αγωγών δεν είναι ίσες, θα ίσχυαν οι παρακάτω σχέσεις αν ο ηλεκτρονόμος είχε μηδενική αντίδραση.

$$e_{sA} = i_{sA} (R_s + R_{cA})$$

$$e_{sB} = i_{sB} (R_s + R_{cB})$$

$$i_R = i_{sA} - i_{sB}$$



Σχήμα 2.2 Συνθήκες σε ένα κύκλωμα προστασίας όταν υπάρχει βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας

Το ρεύμα του ηλεκτρονόμου (i_R) είναι ίσο με τη διαφορά μεταξύ των ρευμάτων των δευτερευόντων τυλιγμάτων των μετασχηματιστών και επίσης με την διαφορά των δύο ρευμάτων διεγέρσεως που χρειάζονται για την παροχή των επαγόμενων τάσεων e_{sA} και e_{sB} . Στην ιδανική περίπτωση πυρήνων με άπειρη διαπερατότητα, τα ρεύματα διεγέρσεως θα ήταν μηδενικά και ο ηλεκτρονόμος δε θα διαρρεόταν από ρεύμα. Στην πραγματικότητα, με την διαπερατότητα των πυρήνων να είναι πεπερασμένη, ο ηλεκτρονόμος διαρρέεται από ρεύμα, του οποίου το πλάτος αυξάνεται αισθητά με την ελάττωση της διαπερατότητας. Επιπλέον, το ρεύμα του ηλεκτρονόμου είναι μεγαλύτερο, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στις τιμές των αντιστάσεων των δύο τμημάτων του δικτύου.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχει ρεύμα ηλεκτρονόμου ακόμα και με τις αντιστάσεις των δύο τμημάτων ίσες, αν οι πυρήνες των μετασχηματιστών εντάσεως έχουν διαφορετική επιτρεπτότητα. Προφανώς, κάθε ασυμμετρία στο κύκλωμα προκαλεί ροή

ρεύματος στον ηλεκτρονόμο ακόμα και όταν το σύστημα που είναι υπό επιτήρηση λειτουργεί κανονικά, με τις μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων να εμφανίζονται όταν εκδηλώνονται εξωτερικά σφάλματα.

Συνοψίζοντας, είναι σαφές ότι τα κυκλώματα προστασίας πρέπει να είναι συμμετρικά. Συγκεκριμένα, είναι επιθυμητό οι μετασχηματιστές εντάσεως να είναι πανομοιότυποι και ο ηλεκτρονόμος να συνδέεται στο μέσο των καλωδίων διασύνδεσης. Στην πράξη δεν είναι πάντοτε δυνατό να συμβαδίζουμε με αυτές τις απαιτήσεις επειδή για παράδειγμα οι μετασχηματιστές εντάσεως των δύο άκρων μπορεί να προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές. Παρομοίως μπορεί να είναι ασύμφορη και μη πρακτική η σύνδεση του ηλεκτρονόμου στο μέσο των αγωγών πιλότων. Στην προκειμένη περίπτωση γίνεται αντιστάθμιση του κυκλώματος με αντιστάσεις, έτσι ώστε οι συνολικές αντιστάσεις των δύο μισών να είναι ίσες.

2.2 Χρήση χαρακτηριστικών πόλωσης

Αν και η διαφορική προστασία είναι βασικά πολύ απλή, πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή της, για να διασφαλίσουμε ότι θα λειτουργεί σωστά κάτω από όλες τις πιθανές συνθήκες.

Είναι επιθυμητό οι ηλεκτρονόμοι να μπορούν να εντοπίσουν σφάλματα εντός ζώνης τα οποία προκαλούν ροή ασθενών ρευμάτων, για παράδειγμα μέχρι 20% του ονομαστικού ρεύματος. Αλλά δεν πρέπει να λειτουργούν για σφάλματα εκτός της ζώνης προστασίας όσο μεγάλα ρεύματα και αν παράγουν, ακόμα και αν αυτά είναι 20 φορές μεγαλύτερα από το ονομαστικό. Η επίτευξη μιας τέτοιας απόδοσης από το βασικό σχεδιασμό είναι δύσκολη. Σε τέτοια περίπτωση η ολική απόκλιση από την ισορροπία, λόγω του κακού ταιριάσματος των μετασχηματιστών εντάσεως και λόγω των άνισων αντιστάσεων του κυκλώματος, θα έπρεπε να είναι μικρότερη του 1%. Η πόλωση του κυκλώματος αυξάνει αποτελεσματικά τα ρεύματα που χρειάζονται για να λειτουργήσουν οι ηλεκτρονόμοι μειώνοντας έτσι τον απαιτούμενο βαθμό ταιριάσματος των μετασχηματιστών εντάσεως.

Η πόλωση στους ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους γίνεται με την συμπίληψη ενός ή περισσότερων επιπλέον πηνίων συγκράτησης στο πηνίο λειτουργίας. Η ροή του ρεύματος από τα πηνία συγκράτησης παράγει δύναμη ή ροπή η οποία αποτρέπει την

λειτουργία του ηλεκτρονόμου ενώ το ρεύμα που ρέει στο πηνίο λειτουργίας παράγει δύναμη ή ροπή στην κατεύθυνση που χρειάζεται για να λειτουργήσει.

Στους σύγχρονους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους οι οποίοι περιλαμβάνουν μικροεπεξεργαστές και διατάξεις επεξεργασίας σήματος η πόλωση γίνεται εσωτερικά. Μια κατάλληλη καμπύλη η οποία κατασκευάζεται από τον σχεδιαστή του συστήματος προστασίας επιτρέπει στον ηλεκτρονόμο, συγκρίνοντας την με τις μετρούμενες τιμές, να γνωρίζει πότε πρέπει να λειτουργήσει. Το απλούστερο παράδειγμα είναι μια κεκλιμένη ευθεία με συγκεκριμένη κλίση. Αν το σημείο που προκύπτει από το ημίθροισμα και την ημιδιαφορά των δύο ρευμάτων που μετρά ο ηλεκτρονόμος βρίσκεται το χωρίο πάνω από την ευθεία, ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί. Στην αντίθετη περίπτωση ο ηλεκτρονόμος παραμένει ανενεργός.

2.3 Υλοποίηση συστημάτων προστασίας

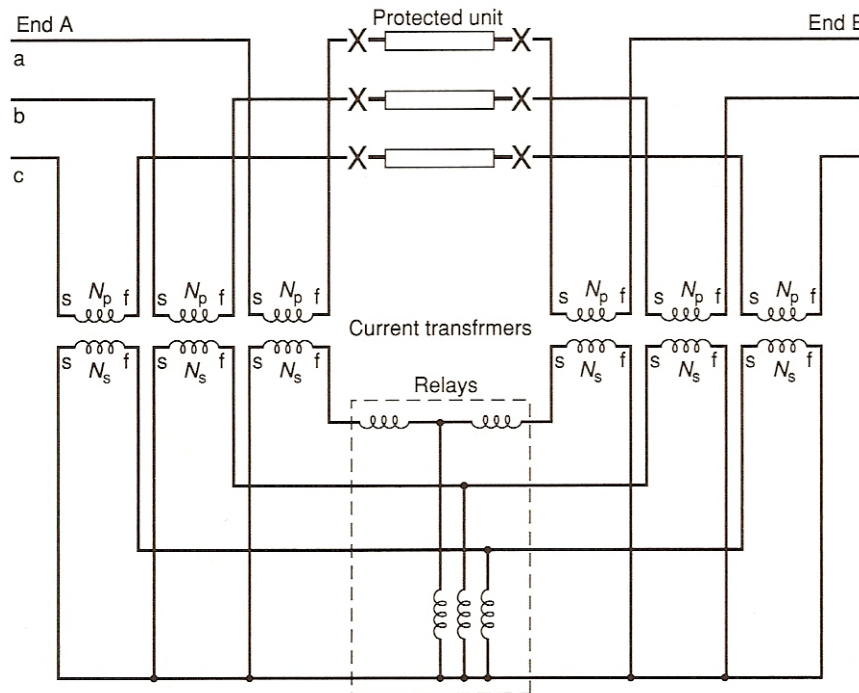
Η συμπεριφορά των σχεδίων διαφορικής προστασίας έχει περιγραφεί περιληπτικά πιο πάνω με βάση μονοφασικά συστήματα για λόγους ευκολίας. Κανονικά, όμως, τα συστήματα προστασίας χρησιμοποιούνται στην προστασία τριφασικών δικτύων και οι διαρρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές αναλύονται στη συνέχεια.

2.3.1 Προστασία ζώνης μικρού μήκους

Όταν πρόκειται να εφαρμόσουμε προστασία σε μονάδες όπως στρεφόμενες μηχανές, οι μετασχηματιστές εντάσεως στα δύο άκρα της ζώνης προστασίας απέχουν σχετικά μικρή απόσταση και κάθε φάση μπορεί να έχει τη δική της ανεξάρτητη προστασία. Είναι σύνηθες όμως να έχουμε τέσσερις διασυνδεδεμένους αγωγούς, με τον ένα να σχηματίζει ένα κοινό ουδέτερο αγωγό επιστροφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Χρειάζονται τρεις ηλεκτρονόμοι, με τον καθένα να έχει την ίδια ρύθμιση του ρεύματος ενεργοποίησης, ουσιαστικά ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Στην περίπτωση ενός μονοφασικού εσωτερικού σφάλματος προς γη μόνο ο ένας από τους τρεις ηλεκτρονόμους θα λειτουργήσει, ενώ για σφάλματα μεταξύ φάσεων θα λειτουργήσουν δύο ή και οι τρεις.

Το πλεονέκτημα αυτής της διαρρύθμισης σε σχέση με αυτήν των τριών ανεξάρτητων φάσεων είναι ότι οι συμμετρικές συνιστώσες των φασικών ρευμάτων, π.χ. θετικές και αρνητικές συνιστώσες ακολουθίας, δε διαρρέουν τον τέταρτο, ουδέτερο, αγωγό

και έτσι η τάση εξ επαγωγής που πρέπει να παρέχει ο καθένας από τους μετασχηματιστές εντάσεως είναι μειωμένη, αφού υπάρχει πτώση τάσης μόνο σε ένα αγωγό αντί σε δύο.



Σχέδιο 2.3 Διαφορική προστασία τριφασικής μονάδα με μικρό φυσικό μήκος

2.3.2 Προστασία ζώνης μεγάλου μήκους

Η υλοποίηση της βασικής διαφορικής προστασίας σε γραμμές διανομής ή καλώδια συχνά είναι πολύ πολύπλοκη και ακριβή. Για παράδειγμα, το κόστος της εγκατάστασης τεσσάρων, σχετικά μεγάλου μήκους, αγωγών πιλότων για να είναι δυνατή η σύγκριση των ρευμάτων κάθε φάσης θα είναι υπερβολικά υψηλό και επίσης η εγκατάσταση ηλεκτρονόμων στο μέσο της απόστασης μπορεί να μην είναι πρακτική. Πιο κάτω εξετάζονται οι μετατροπές που πρέπει να γίνουν στο βασικό σχέδιο για να είναι δυνατό να εφαρμοστεί η διαφορική προστασία και σε ζώνες προστασίας μεγάλου μήκους.

- *Μείωση του αριθμού των αγωγών διασύνδεσης*

Είναι επιθυμητό τα σχέδια προστασίας να χρειάζονται μόνο δύο αντί τέσσερις αγωγούς διασύνδεσης όταν τα άκρα της ζώνης προστασίας χωρίζονται με μεγάλη απόσταση. Αλλά η ανεξαρτησία των φάσεων δεν μπορεί να διατηρηθεί αν χρησιμοποιήσουμε μόνο δύο αγωγούς επειδή μόνο μια ποσότητα μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ των δύο άκρων. Αυτή η

μοναδική ποσότητα πρέπει να παράγεται από τα τριφασικά ρεύματα στο ένα άκρο της ζώνης και να συγκρίνεται με αυτή που παρήχθη με παρόμοιο τρόπο στο άλλο άκρο. Μια τέτοια ποσότητα μπορεί να παραχθεί τροφοδοτώντας τις εξόδους των τριών μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο το οποίο θα έχει έξοδο σχετική με μία ή περισσότερες συνιστώσες ακολουθίας των ρευμάτων εισόδου. Η συνιστώσα θετικής ακολουθίας είναι παρούσα σε όλα τα σφάλματα. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα σήματα που προκύπτουν μόνο από αυτή την συνιστώσα. Ωστόσο κατά την διάρκεια μονοφασικών σφαλμάτων προς γη, που εμφανίζονται πιο συχνά στην πράξη από τους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων, το πλάτος του ρεύματος σφάλματος είναι μόνο το ένα τρίτο του πραγματικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και έτσι οι ηλεκτρονόμοι θα έπρεπε να έχουν πολύ ευαίσθητες ρυθμίσεις. Για παράδειγμα, για να ανιχνεύσει ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος που είναι 20% μεγαλύτερο από το ονομαστικό, ο ηλεκτρονόμος θα πρέπει να μπορεί να δουλεύει με 67mA αν χρησιμοποιούνταν μετασχηματιστές εντάσεως με δευτερεύον τύλιγμα του 1A. Αυτό με τη σειρά του θα αύξανε τη δυσκολία όσο αφορά την προδιαγραφή που απαιτεί ο ηλεκτρονόμος να μην ενεργοποιείται για βραχυκυκλώματα εκτός της ζώνης προστασίας του.

Αν και αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται σε ορισμένα σχέδια προστασίας, τα κυκλώματα ακολουθίας τείνουν να είναι πολύπλοκα λόγω της μετατόπισης φάσεως που χρειάζεται για να προκύψουν τα ρεύματα θετικής ή αρνητικής ακολουθίας όπως μπορούμε να δούμε από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\bar{I}_{1a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + a\bar{I}_b + a^2\bar{I}_c)$$

$$\bar{I}_{2a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + a^2\bar{I}_b + a\bar{I}_c)$$

στις οποίες το a αντιστοιχεί σε $1 \angle \frac{2\pi}{3}$ και τα $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$ στα φασικά ρεύματα. Επιπλέον, οι πιο πάνω εξισώσεις αναφέρονται σε ημιτονοειδή ρεύματα και δεν είναι εφαρμόσιμες κατά τις περιόδους που εμφανίζονται μεταβατικές συνιστώσες.

Πιο απλές εναλλακτικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους τύπους κυματομορφών χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές διαφορικής προστασίας. Η πιο απλή λύση, η οποία χρησιμοποιείται από τις αρχές του αιώνα, είναι η άθροιση των εξόδων των μετασχηματιστών οι οποίοι όμως έχουν διαφορετικούς λόγους μετασχηματισμού, π.χ. 240/1, 300/1, 375/1 στις φάσεις a, b και c αντίστοιχα. Όπως

φαίνεται και στο σχήμα 2.4, αυτή η μέθοδος θα δώσει τα ακόλουθα σήματα εξόδου για πρωτεύοντα ρεύματα 300A.

Θετικής ακολουθίας : $(0.35 - j0.173)A$ ή $0.39A \angle -0.46rad$

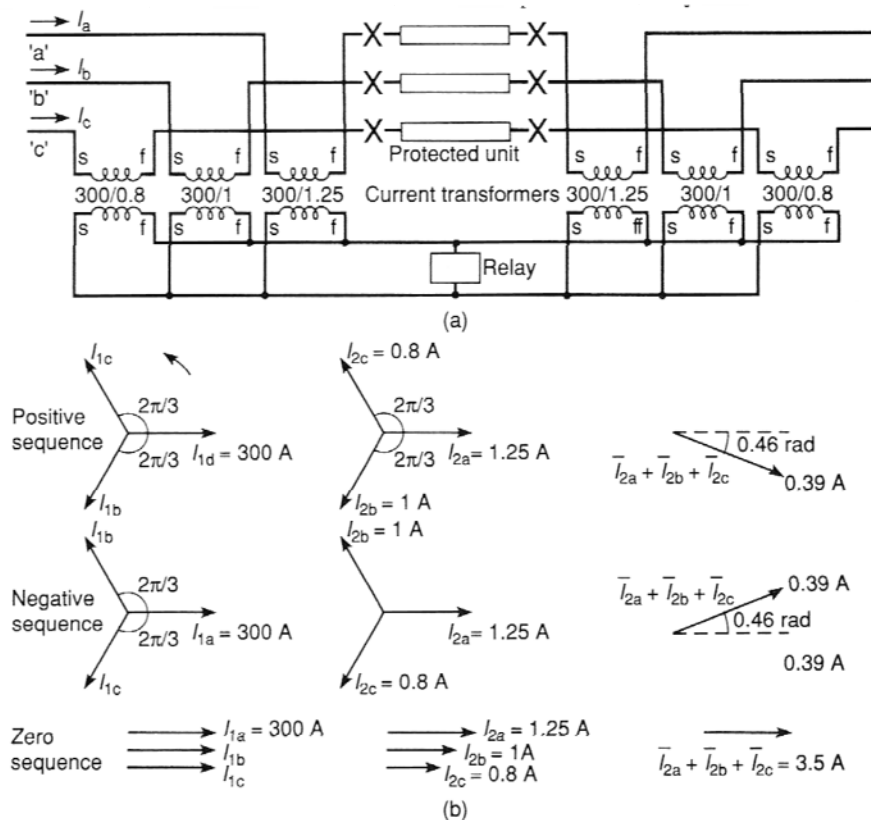
με βάση το ρεύμα πρωτεύοντος της φάσης α

Αρνητικής ακολουθίας : $(0.35 + j0.173)A$ ή $0.39A \angle 0.46rad$

με βάση το ρεύμα πρωτεύοντος της φάσης α

Μηδενικής ακολουθίας: 3.05A σε φάση με τα ρεύματα πρωτεύοντος

Είναι γεγονός ότι αυτή η διάταξη είναι πολύ πιο ευαίσθητη στα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας, δίνοντας έτσι μεγαλύτερα σήματα ελέγχου στα μονοφασικά βραχυκυκλώματα απ' ό,τι στα βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων, πράγμα το οποίο κάνει ευκολότερη τη διάκριση των εξωτερικών σφαλμάτων.



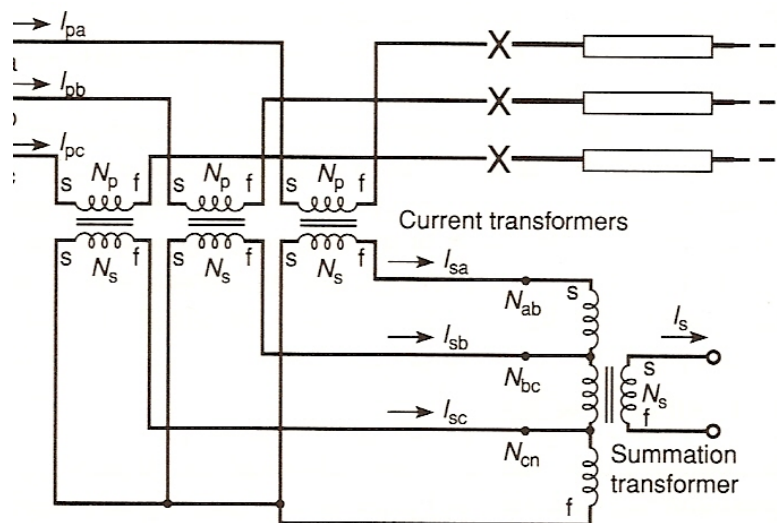
Σχήμα 2.4 Σήματα εξόδου που προκύπτουν όταν χρησιμοποιήσουμε μετασχηματιστές εντάσεως με διαφορετικούς λόγους μετασχηματισμού

Μια ακόμα εναλλακτική λύση, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για πολλά χρόνια, είναι να οδηγούμε τις εξόδους των μετασχηματιστών εντάσεως, που έχουν τους ίδιους λόγους μετασχηματισμού, σε ένα μετασχηματιστή αθροίσεως διαρρυθμισμένο όπως

φαίνεται στο σχήμα 2.5. Υποθέτοντας ότι ο μετασχηματιστής αθροίσεως είναι ιδανικός, τότε το ρεύμα στο δευτερεύον του θα είναι ίσο με:

$$i_s = \frac{1}{N_s} \{ (N_{ab} + N_{bc} + N_{cn}) i_{sa} + (N_{bc} + N_{cn}) i_{sb} + N_{cn} i_{sc} \}$$

Μπορούμε να δούμε ότι η πιο πάνω ποσότητα είναι η ίδια με αυτήν στην περίπτωση που οι τρεις μετασχηματιστές είχαν διαφορετικούς λόγους. Κάνοντας τις περιελίξεις του N_{cn} περισσότερες απ' ότι του N_{ab} και του N_{bc} η ευαισθησία του συστήματος σε σφάλματα γης γίνεται μεγαλύτερη σε σύγκριση με την ευαισθησία για σφάλματα μεταξύ φάσεων.



Σχήμα 2.5 Μετασχηματιστές εντάσεως τροφοδοτούν ένα μετασχηματιστή αθροίσεως

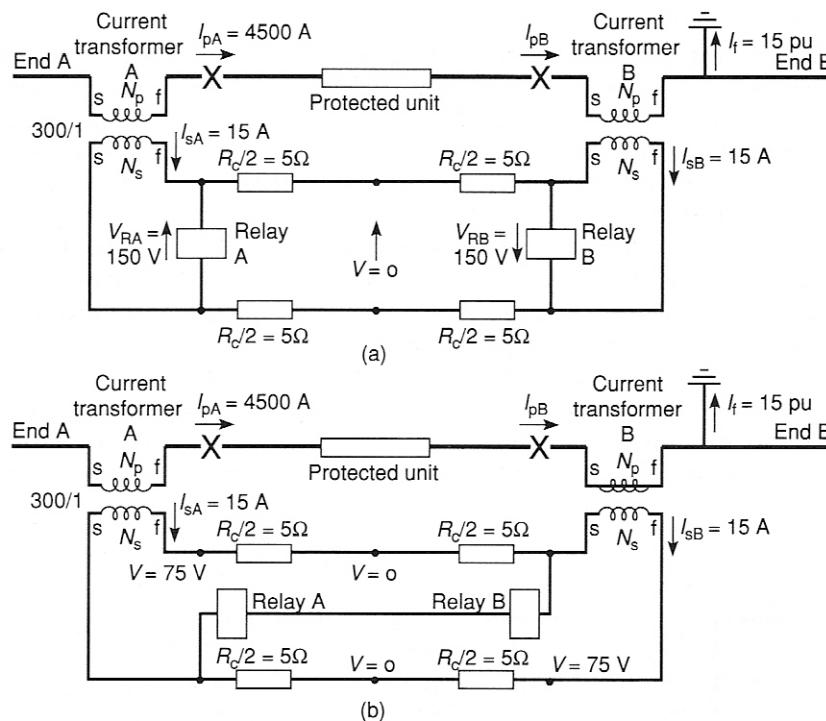
- Οι θέσεις και οι συνδεσμολογίες των ηλεκτρονόμων

Όπως είπαμε και προηγουμένως, είναι απαραίτητο τα κυκλώματα των σχεδίων διαφορικής προστασίας, να είναι όσο το δυνατό πιο συμμετρικά για να βοηθούν στην επίτευξη της ισορροπίας κατά την εκδήλωση εξωτερικών βραχυκυκλωμάτων. Στην ιδανική περίπτωση οι ηλεκτρονόμοι πρέπει να συνδέονται στο μέσο των αγωγών. Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, αυτό δεν είναι πρακτικό επειδή τα άκρα της ζώνης προστασίας είναι σε διαφορετικούς υποσταθμούς και η πρόνοια για εγκατάσταση των ηλεκτρονόμων σε κάποια άλλη θέση εκτός των υποσταθμών κοστίζει ακριβά. Σε κάθε περίπτωση, αν οι ηλεκτρονόμοι ήταν εγκατεστημένοι στη μέση της ζώνης προστασίας, τότε θα έπρεπε να υπάρχουν και καλώδια από τον ηλεκτρονόμο προς τους υποσταθμούς για τον έλεγχο των διακοπών ισχύος.

Για να αντεπεξέλθουμε αυτές τις δυσκολίες, είναι δυνατόν να εγκατασταθούν ηλεκτρονόμοι σε κάθε άκρο της προστατευόμενης συσκευής, όπως υποδεικνύεται στο

σχήμα 2.6. Σύμφωνα με το μονοφασικό διάγραμμα του σχήματος 2.6(a), με σύνδεση των ηλεκτρονόμων παράλληλα, κάθε ηλεκτρονόμος θα φέρει ρεύμα κατά την διάρκεια ενός εξωτερικού βραχυκυκλώματος ή στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτά τα ρεύματα είναι προφανές ότι θα αυξάνονται είτε μειώνοντας την αντίσταση των ηλεκτρονόμων, είτε αυξάνοντας το μήκος ή την αντίσταση των αγωγών διασύνδεσης. Στο σχήμα 2.6(a) υπάρχουν τιμές που επεξηγούν αυτή την περίπτωση. Η τάση των 150V που εμφανίζεται στον ηλεκτρονόμο προκαλείται από ένα εξωτερικό ρεύμα σφάλματος 15 αμ το οποίο είναι πολύ μεγάλο και πιθανώς απίθανο να συμβεί.

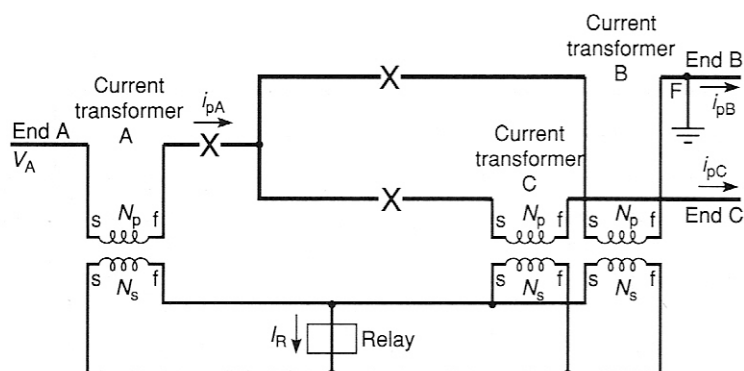
Η διάταξη του σχήματος 2.6(b), με τους δύο ηλεκτρονόμους συνδεδεμένους σε σειρά, είναι απόλυτα ισορροπημένη και δε διαρρέεται από ρεύμα σε κανονική λειτουργία ή κατά την εκδήλωση εξωτερικού βραχυκυκλώματος. Αυτή η διάταξη, η οποία απαιτεί έναν επιπλέον αγωγό διασύνδεσης ανά φάση, αυξάνει το φορτίο καταπόνησης των μετασχηματιστών εντάσεως, επειδή αυτοί πρέπει να παρέχουν επιπλέον τάση εξ επαγωγής για την τροφοδοσία με ρεύμα δύο ηλεκτρονόμων σε σειρά. Παρ' όλα αυτά έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως.



Σχήμα 2.6 Εναλλακτικές συνδέσεις ηλεκτρονόμων. (a) παράλληλα (b) σε σειρά

2.3.3 Προστασία ζωνών με περισσότερα από δύο άκρα

Προηγουμένως εξετάστηκαν σχέδια προστασίας κατάλληλα για ζώνες με μόνο δύο άκρα. Σε τέτοιες εφαρμογές χρειάζονται ζεύγη μετασχηματιστών εντάσεως, οι οποίοι θα έχουν το ίδιο ρεύμα πρωτεύοντος σε κανονική λειτουργία ή κάτω από εξωτερικό σφάλμα και έτσι το ρεύμα του ενός θα αντισταθμίζει το ρεύμα του άλλου.



Σχήμα 2.7 Προστασία μιας γραμμής τροφοδοσίας με διακλαδώσεις

Αυτό όμως δεν μπορεί να ισχύσει στην περίπτωση που χρειάζονται οι έξοδοι περισσότερων από δύο μετασχηματιστών εντάσεως για να ισορροπήσει το κύκλωμα προστασίας. Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται κατά την εφαρμογή προστασίας στα καλώδια τροφοδοσίας με διακλαδώσεις ή ζυγούς. Στο σχήμα 2.7, όπου παρουσιάζεται ένας ζυγός, είναι προφανές ότι το εισερχόμενο ρεύμα (i_{pA}) πρέπει να είναι ίσο με τα εξερχόμενα ρεύματα (i_{pB} και i_{pC}) κατά τη κανονική λειτουργία σε κάθε χρονική στιγμή. Σε αυτή την περίπτωση, οι τρεις μετασχηματιστές εντάσεως θα παράγουν διαφορετικές τάσεις εξ επαγωγής και θα λειτουργούν με διαφορετικές τιμές μαγνητικής ροής. Έτσι, μηδενικό ρεύμα στον ηλεκτρονόμο θα προέκυπτε μόνο αν οι μετασχηματιστές εντάσεως είχαν άπειρη μαγνητική διαπερατότητα ή αν οι καμπύλες μαγνήτισης τους ήταν γραμμικές και οι διαπερατότητες τους ίδιες. Αυτές οι συνθήκες δεν μπορούν να υπάρξουν στην πράξη και υπάρχει πάντα σε κάποιο βαθμό αστάθεια. Αυτή η αστάθεια εξαρτάται από τους λόγους των ρευμάτων που κυκλοφορούν στα τμήματα του ζυγού και στην πράξη πρέπει να προσδιοριστούν οι τάξεις ρευμάτων για διάφορα σφάλματα και καταστάσεις λειτουργίας όταν εφαρμόζεται τέτοιο είδος προστασίας.

- *Καλώδια με διακλαδώσεις και μια τροφοδοσία*

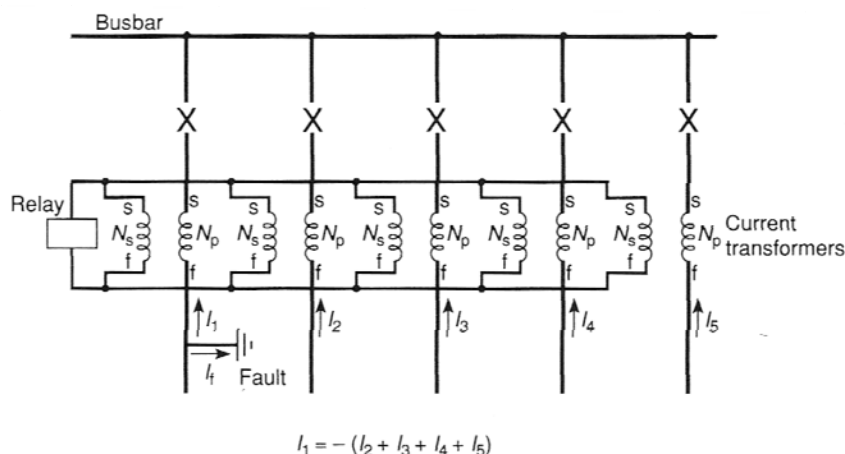
Αν εμφανιστεί βραχυκύκλωμα στο σημείο F, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7, και ο ζυγός τροφοδοτείται μόνο από μία πηγή που βρίσκεται στο σημείο A, τότε οι τάσεις στα άκρα εξόδου (v_b και v_c) θα τείνουν να μειωθούν, και τα ρεύματα φορτίου (I_{pb} και I_{pc}) θα είναι πιθανότατα αρκετά μικρότερα από τα ονομαστικά. Στα πρωτεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών εντάσεως (A και B) όμως θα έρρεαν ρεύματα αρκετά ψηλότερα από τα ονομαστικά και θα είχαν επίσης παρόμοιες φασικές γωνίες και πλάτη. Το πρωτεύον ρεύμα του τρίτου μετασχηματιστή εντάσεως θα είναι ελάχιστο και είναι πολύ πιθανό ο βαθμός ασυμμετρίας του να είναι μικρός.

- *Καλώδια με διακλαδώσεις και πολλαπλή τροφοδοσία*

Σε ένα πολύπλοκο δίκτυο είναι πιθανό όλα τα άκρα ενός ζυγού να έχουν τροφοδοσία. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα δύο άκρα θα εμφανίσουν μεγάλα ρεύματα αν εκδηλωθεί βραχυκύκλωμα στο τρίτο άκρο. Το ρεύμα που θα εξέρχεται από το άκρο όπου εκδηλώθηκε το σφάλμα, θα είναι το άθροισμα των δύο άλλων, το οποίο θα προκαλέσει πολύ υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως, αντίθετα με τους άλλους δύο, οι οποίοι θα λειτουργούν με πολύ χαμηλότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής. Σε μια τέτοια περίπτωση, μια σημαντική μη γραμμικότητα στις χαρακτηριστικές μαγνήτισης του πυρήνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική αστάθεια του κυκλώματος και να προκαλέσει διέγερση του ηλεκτρονόμου.

2.3.4 Προστασία ζυγών

Παρόμοιες αλλά ακόμα πιο ακραίες καταστάσεις από αυτές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μπορούν να προκύψουν σε μία εγκατάσταση για την προστασία ζυγών. Σε αυτές τις εφαρμογές, ένα σφάλμα εκτός της ζώνης μπορεί να τροφοδοτείται από πολλές πηγές, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8. Για να αποφύγουμε την ανεπιθύμητη λειτουργία κατά τη διάρκεια αυτού του σφάλματος, πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ των εξόδων πέντε μετασχηματιστών εντάσεως, ο ένας εκ των οποίων θα έχει πολύ μεγαλύτερο ρεύμα πρωτεύοντος σε σχέση με τους υπόλοιπους.

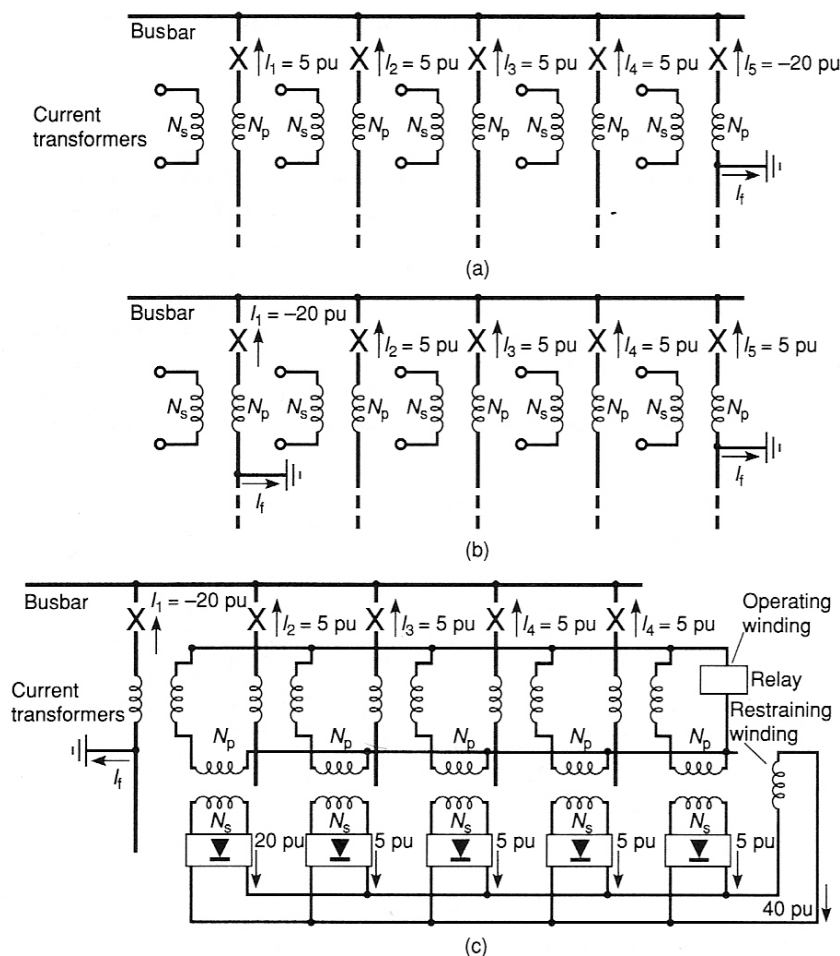


Σχήμα 2.8 Προστασία ζυγού

Είναι πιθανό να εμφανιστούν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί ρευμάτων κατά την διάρκεια τέτοιων βραχυκυκλωμάτων, δύο από τους οποίους παρουσιάζονται στο σχήμα 2.9. Στην περίπτωση του σχήματος 2.9(a) τα κυκλώματα 1 έως 4 έχουν ίσα ρεύματα εισόδου, (5 αμ) τα οποία τροφοδοτούν ένα βραχυκύκλωμα που εκδηλώνεται στο κύκλωμα 5. Αν η πόλωση προέκυπτε αθροίζοντας τα ρεύματα εισόδου των κυκλωμάτων 1 έως 4 και αφαιρώντας το ρεύμα που εξέρχεται από το κύκλωμα 5, π.χ $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - I_5$, τότε θα ήταν 40 αμ.

Αν χρησιμοποιούσαμε την ίδια ρύθμιση πόλωσης και στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9(b), στην οποία το σφάλμα εξελίσσεται στην γραμμή 1, το κύκλωμα 1 θα εμφάνιζε μια πόλωση -20 αμ. Λόγω της κατεύθυνσης ροής του ρεύματος, τα κυκλώματα 2 έως 4 θα έδιναν πόλωση 5 αμ και το κύκλωμα 5 πόλωση -5 αμ. Τελικά το πλάτος της συνολικής πόλωσης θα ήταν μόνο 10 αμ $(-20 + 5 + 5 + 5 - 5)$.

Όπως διαπιστώσαμε, οι δύο πιο πάνω παρόμοιες περιπτώσεις σφαλμάτων παρέχουν πολύ διαφορετικά επίπεδα πόλωσης, πράγμα το οποίο είναι ασφαλώς ανεπιθύμητο. Στην πραγματικότητα η μεγαλύτερη τιμή, 40 αμ, θα μπορούσε να προκύψει για βραχυκύκλωμα σε οποιοδήποτε κύκλωμα, με ανόρθωση των ρευμάτων πριν την άθροιση τους για τον υπολογισμό του ρεύματος πόλωσης. Αυτή η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9(c).



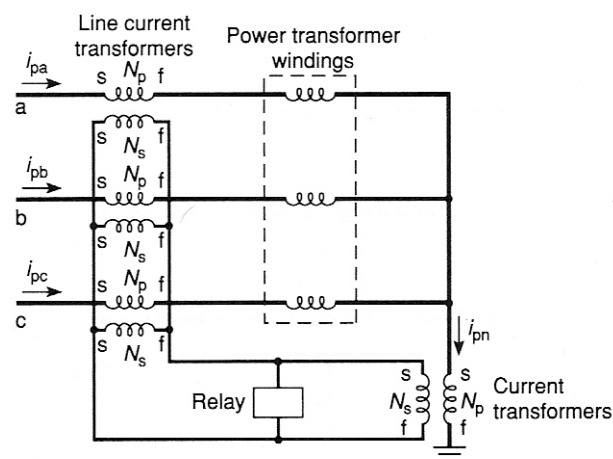
Σχήμα 2.9 Κατανομή ρευμάτων κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων και ρυθμίσεις πόλωσης

2.4 Προστασία από βραχυκυκλώματα προς γη

Σε πολλές εφαρμογές είναι αναγκαίο το άνοιγμα των διακοπών μέσα σε μια συγκεκριμένη ζώνη να γίνεται μόνο για σφάλματα γης. Για παράδειγμα, τα τυλίγματα που είναι συνδεδεμένα σε αστέρα στους μετασχηματιστές είναι συνήθως προστατευμένα με ευαίσθητη προστασία γης. Τα κυκλώματα αστέρα είναι σύνηθες να γειώνονται με απευθείας γείωση ή μέσω αντιστάσεων και σε αυτές τις περιπτώσεις τέσσερις μετασχηματιστές εντάσεως συνδέονται όπως στο σχήμα 2.10. Αυτοί οι τύποι προστασίας λειτουργούν μόνο για βραχυκυκλώματα στα τυλίγματα του αστέρα και στις συνδέσεις μεταξύ των μετασχηματιστών εντάσεως. Η συμπεριφορά τους διαφέρει, σε σχέση με τους τύπους προστασίας που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, στο ότι η ισορροπία πρέπει να διατηρείται μεταξύ των μετασχηματιστών εντάσεως των τριών φάσεων και του ουδετέρου,

αντί μεταξύ δύο ή περισσότερων μετασχηματιστών στην ίδια φάση όταν εξελιχθεί σφάλμα εκτός της ζώνης προστασίας.

Αυτό το χαρακτηριστικό της άθροισης των φασικών ρευμάτων είναι σημαντικό. Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας τα φασικά ρεύματα έχουν ίσα πλάτη και μετατόπιση φάσης $2\pi/3$ το καθένα. Αυτά τα ρεύματα, τα οποία τροφοδοτούν τα πρωτεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών εντάσεως, έχουν μηδενικό άθροισμα. Τα ρεύματα μαγνήτισης των μετασχηματιστών εντάσεως έχουν θεμελιώδεις συνιστώσες παρόμοια μετατοπισμένες η μια από την άλλη, αλλά και αρμονικές που είναι σε φάση, οι οποίες προστίθενται και περνούν από τον ηλεκτρονόμο. Αν και αυτό το φαινόμενο είναι αμελητέο σε κανονική λειτουργία, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην απίθανη περίπτωση που συμβεί τριφασικό βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας.



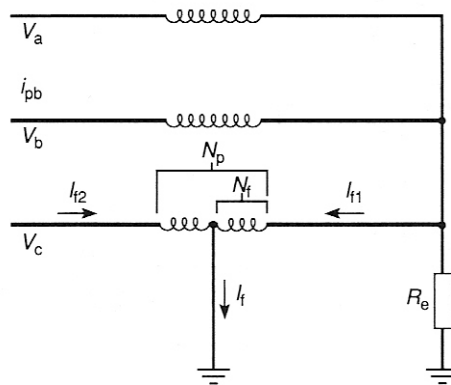
Σχήμα 2.10 Προστασία από βραχυκυκλώματα προς γη τυλίγματος μετασχηματιστή συνδεδεμένου σε αστέρα

Όπως και στα άλλα σχέδια προστασίας, είναι απαραίτητο να μην ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος που προστατεύεται, αλλά ούτε και σε σφάλματα εκτός της ζώνης προστασίας. Επιπλέον πρέπει οι ρυθμίσεις να είναι αρκετά ευαίσθητες ώστε ο ηλεκτρονόμος να εντοπίζει μικρά ρεύματα σφαλμάτων. Η τελευταία προϋπόθεση είναι ιδιαίτερα σημαντική στην προστασία τυλιγμάτων συνδεδεμένων κατά αστέρα καθώς καθορίζει το ποσοστό του τυλίγματος που μπορεί να προστατευτεί. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί από το σχήμα 2.11, το οποίο δείχνει ένα τύλιγμα μετασχηματιστή με βραχυκύκλωμα στη μια φάση.

Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των τυλιγμάτων (N_f) μεταξύ του κοινού κόμβου του αστέρα και της θέσης του σφάλματος, τόσο χαμηλότερη είναι η διαθέσιμη τάση σφάλματος. Αν αμεληθεί η σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος, το ρεύμα σφάλματος δίνεται από:

$$I_f = \frac{N_f V_{ph}}{N_p R_e}$$

στο οποίο R_e είναι η αντίσταση σφάλματος και N_p είναι ο αριθμός των ελιγμάτων στη φάση του σφάλματος.



Σχήμα 2.11 Σφάλμα προς γη στο τύλιγμα ενός μετασχηματιστή

Το ρεύμα σφάλματος (I_f) είναι η συνισταμένη του I_{f1} που κατευθύνεται από το βραχυκυκλωμένο τμήμα του τυλίγματος (N_f) και του I_{f2} που ρέει στο υπόλοιπο τύλιγμα. Το τελευταίο, που χρειάζεται για να αντισταθμίσει τα αμπερελίγματα $I_{f1}N_f$, επιστρέφει μέσω ενός ουδέτερου σημείου συσχετισμένου με την τροφοδοσία. Έτσι, το κύκλωμα προστασίας ανιχνεύει το πλήρες ρεύμα σφάλματος, καθώς το I_{f2} περνά από ένα μετασχηματιστή εντάσεως των φάσεων και το I_{f1} από το μετασχηματιστή εντάσεως του ουδέτερου.

3. Προστασία Μετασχηματιστή

Ο μετασχηματιστής είναι μια από τις πιο σημαντικές κατηγορίες εξοπλισμού σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και η προστασία του είναι απαραίτητη για τη συνολική προστασία του συστήματος. Οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών. Έτσι, συναντούμε μικρούς μετασχηματιστές διανομής για έναν ή περισσότερους καταναλωτές μέχρι πολύ μεγάλες μονάδες που εγκαθίστανται στον κορμό του δικτύου. Επιπλέον, οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο φάσμα χαρακτηριστικών όπως είναι μηχανισμοί αλλαγής λήψεως τάσης, μηχανισμοί μετάθεσης γωνίας και πολλαπλά τυλίγματα, χαρακτηριστικά για τα οποία απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση του συστήματος προστασίας.

Οι μετασχηματιστές υπόκεινται σε διαφόρων τύπων καταπονήσεις λόγω υπερθέρμανσης, βραχυκυκλωμάτων και ανοικτοκυκλωμάτων. Οι πλείστοι μετασχηματιστές, ιδιαίτερα οι μικρές μονάδες, δεν προστατεύονται από υπερθέρμανση, αν και υπάρχουν συσκευές ειδικά για αυτό το σκοπό. Τα ανοικτοκυκλώματα δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς δεν αποτελούν ιδιαίτερο κίνδυνο. Έτσι, το κύριο μέλημα της προστασίας είναι τα βραχυκυκλώματα. Για τους μετασχηματιστές υπάρχει επίσης η δυνατότητα προστασίας από τις αιχμές.

Η προστασία από βραχυκυκλώματα αφορά τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, όπως σφάλματα μεταξύ ελιγμάτων και σφάλματα μεταξύ ελιγμάτων και γης. Ακόμα αφορά τα εξωτερικά βραχυκυκλώματα τα οποία είναι μέσα στη ζώνη προστασίας του ηλεκτρονόμου του μετασχηματιστή, όπως είναι ο σπινθηρισμός των ακροδεκτών.

Η πιο συνήθης μέθοδος προστασίας του μετασχηματιστή είναι η διαφορική προστασία, η οποία συμπεριφέρεται στο μετασχηματιστή σαν μια μονάδα λαμβάνοντας μετρήσεις από όλα τα τερματικά του μετασχηματιστή. Αυτό είναι πολύ εύκολο καθώς, αντίθετα με τις γραμμές μεταφοράς, οι ακροδέκτες του μετασχηματιστή είναι όλοι στον ίδιο υποσταθμό.

Η προστασία του μετασχηματιστή παρουσιάζει κάποια προβλήματα στην επιλογή και εφαρμογή των μετασχηματιστών εντάσεως. Στην αγορά υπάρχουν μετασχηματιστές εντάσεως πολλών τύπων, λόγων μετασχηματισμού και χαρακτηριστικών. Ο λόγος μετασχηματισμού μεταξύ των μετασχηματιστών εντάσεως των δύο τυλιγμάτων πρέπει να είναι ίσος με το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ισχύος.

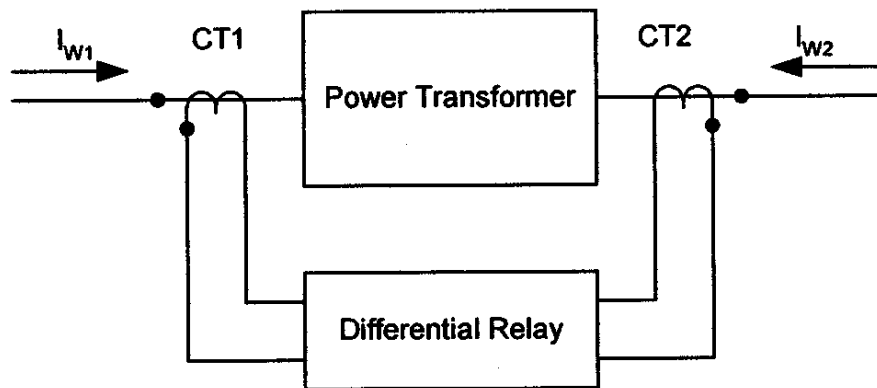
Οι μετασχηματιστές μπορούν επίσης να συνδεθούν με τρόπο που να παρέχουν μετατόπιση φάσης, όπως είναι η κοινή Δ-Υ με τις 30° αλλαγή φάσης. Αυτό σημαίνει ότι οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να συνδεθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίσουν αυτήν την μετατόπιση φάσης για να προκύπτουν στον ηλεκτρονόμο τα επιθυμητά διαφορικά ρεύματα λειτουργίας.

3.1 Διαφορική Προστασία

Οι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας χρησιμοποιούνται για την επίβλεψη της λειτουργίας των μετασχηματιστών εδώ και πολλά χρόνια. Το σχήμα 3.1 δείχνει ένα τυπικό διάγραμμα σύνδεσης ενός διαφορικού ηλεκτρονόμου. Τα διαφορικά στοιχεία συγκρίνουν ένα ρεύμα λειτουργίας με ένα ρεύμα συγκράτησης. Το ρεύμα λειτουργίας, που ονομάζεται επίσης διαφορικό ρεύμα, I_{OP} , μπορεί να υπολογιστεί από το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται στο προστατευόμενο στοιχείο.

$$I_{OP} = |\vec{I}_{W1} + \vec{I}_{W2}|$$

Το I_{OP} είναι ανάλογο με το ρεύμα σφάλματος σε εσωτερικά βραχυκυκλώματα και προσεγγίζει το μηδέν σε όλες τις άλλες ιδανικές καταστάσεις.



Σχήμα 3.1 Τυπικό διάγραμμα σύνδεσης διαφορικού ηλεκτρονόμου

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον υπολογισμό του ρεύματος συγκράτησης, I_{RT} , από τους οποίους οι πιο κοινοί είναι οι πιο κάτω:

$$I_{RT} = k |\vec{I}_{W1} - \vec{I}_{W2}|,$$

$$I_{RT} = k (|\vec{I}_{W1}| + |\vec{I}_{W2}|),$$

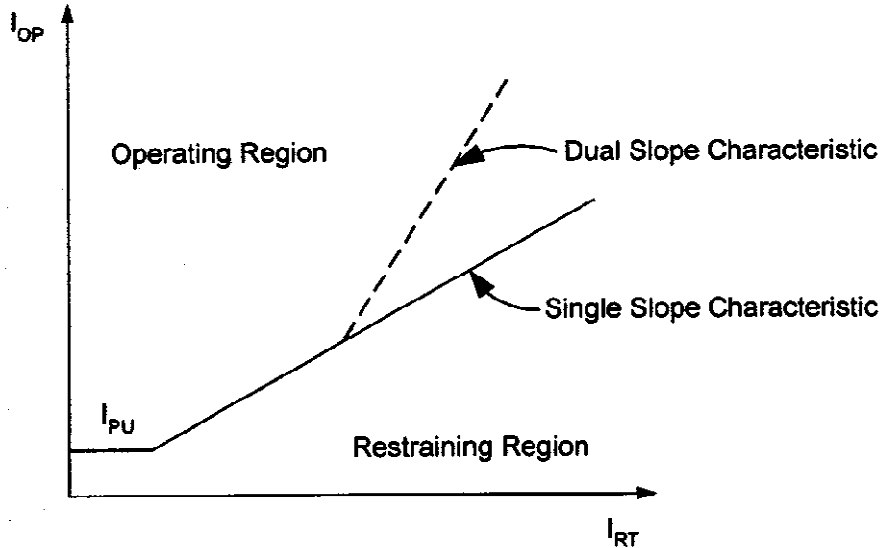
$$I_{RT} = \max(|\vec{I}_{W1}|, |\vec{I}_{W2}|)$$

όπου το k είναι ένας παράγοντας αντιστάθμισης, συνήθως 1 ή 0,5. Οι δύο τελευταίες εξισώσεις έχουν το πλεονέκτημα να είναι εφαρμόσιμες σε διαφορικούς ηλεκτρονόμους με περισσότερα από δύο στοιχεία συγκράτησης.

Ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας παράγει ένα σήμα ενεργοποίησης αν το ρεύμα λειτουργίας I_{OP} , είναι μεγαλύτερο από ένα ποσοστό του ρεύματος συγκράτησης I_{RT} .

$$I_{OP} > SLP \cdot I_{RT}$$

Το σχήμα 2 δείχνει τη χαρακτηριστική λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου προστασίας. Αυτή η χαρακτηριστική αποτελείται από μια ευθεία γραμμή με κλίση SLP και μια οριζόντια γραμμή που καθορίζει το ελάχιστο ρεύμα κατωφλίου (pickup current) I_{PU} . Η περιοχή λειτουργίας του ηλεκτρονόμου βρίσκεται πάνω από την κεκλιμένη χαρακτηριστική και η περιοχή συγκράτησης κάτω από τη χαρακτηριστική.



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστική λειτουργίας διαφορικού ηλεκτρονόμου με διπλή κλίση

Οι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι έχουν εξαιρετική απόδοση σε περιπτώσεις σφαλμάτων εκτός της ζώνης προστασίας, αρκεί οι μετασχηματιστές εντάσεως να αναπαράγουν τα πρωτεύοντα ρεύματα με ακρίβεια. Όταν ένας από τους μετασχηματιστές εντάσεως φτάσει σε κορεσμό ή όταν και οι δύο κορεστούν σε διαφορετικά επίπεδα, εμφανίζονται

λανθασμένα ρεύματα λειτουργίας στον ηλεκτρονόμο τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν δυσλειτουργία. Μερικοί διαφορικοί ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούν τις αρμονικές που παράγονται από τον κορεσμό των μετασχηματιστών εντάσεως για επιπλέον συγκράτηση και για να αποφύγουν την εσφαλμένη λειτουργία. Επιπλέον, η κλίση της χαρακτηριστικής παρέχει επιπρόσθετη ασφάλεια σε περιπτώσεις εξωτερικών σφαλμάτων τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν κορεσμό στους μετασχηματιστές εντάσεως. Μια μεταβλητής κλίσης ή διπλής κλίσης χαρακτηριστική αυξάνει ακόμα περισσότερο την ασφάλεια σε περίπτωση βαριάς μορφής κορεσμού των μετασχηματιστών. Αυτή η χαρακτηριστική φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 3.2.

Ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως είναι μόνο ένας από τους λόγους που μπορεί να προκαλέσει λανθασμένη λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Στην περίπτωση των μετασχηματιστών ισχύος λανθασμένα ρεύματα στον ηλεκτρονόμο μπορεί να εμφανιστούν και για τους πιο κάτω λόγους:

- Λανθασμένη επιλογή λόγων μετασχηματισμού των μετασχηματιστών εντάσεως σε σχέση με το λόγο ανύψωσης ή υποβιβασμού του μετασχηματιστή ισχύος.
- Μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ισχύος ο οποίος προκαλείται από το σύστημα αλλαγής λήψεων.
- Ολίσθηση φάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή λόγω σύνδεσης των τυλιγμάτων του σε αστέρα-τρίγωνο.
- Ρεύματα μαγνήτισης που δημιουργούνται κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή, κατά την ανάκτηση τάσης μετά από την εκκαθάριση εξωτερικού σφάλματος ή κατά την ηλέκτριση παράλληλου μετασχηματιστή.
- Μεγάλα ρεύματα διέγερσης που δημιουργούνται από την υπερδιέγερση του μετασχηματιστή.

Το στοιχείο συγκράτησης του ηλεκτρονόμου τυπικά επιλύει τα δύο πρώτα προβλήματα. Το πρόβλημα της μετάθεσης φάσεων αντιμετωπίζεται με την κατάλληλη σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως ή την εξομοίωση μιας τέτοιας σύνδεσης σε ένα ψηφιακό ηλεκτρονόμο. Ένα πολύ πολύπλοκο πρόβλημα όμως είναι η διάκριση μεταξύ των ρευμάτων σφαλμάτων εντός της ζώνης προστασίας και των λανθασμένων διαφορικών ρευμάτων που παράγονται από τα ρεύματα ζεύξης – μαγνήτισης και τα ρεύματα υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή.

3.2 Φαινόμενα διαταραχών

Τα φαινόμενα ζεύξης ή υπερδιέγερσης ενός μετασχηματιστή παράγουν λανθασμένα διαφορικά ρεύματα που μπορούν να προκαλέσουν εσφαλμένη λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Και τα δύο φαινόμενα παράγουν παραμορφωμένα ρεύματα επειδή σχετίζονται με τον κορεσμό του πυρήνα του μετασχηματιστή ισχύος. Οι παραμορφωμένες κυματομορφές παρέχουν πληροφορίες οι οποίες μας δίνουν τη δυνατότητα να διακρίνουμε τα φαινόμενα αυτά από τα σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας. Αυτή η διάκριση, όμως, μπορεί να είναι πολύπλοκη καθώς εμπλέκονται και άλλες πηγές παραμόρφωσης όπως οι μετασχηματιστές εντάσεως και οι μη γραμμικές αντιστάσεις βραχυκυκλωμάτων.

3.2.1 Ρεύματα ζεύξης – μαγνήτισης

Τα ρεύματα ζεύξης – μαγνήτισης προκύπτουν κάθε φορά που η πολικότητα και το πλάτος της υπάρχουσας μαγνήτισης δε συμβαδίζουν με την πολικότητα και το πλάτος της ιδανικής στιγμιαίας τιμής της μαγνητικής ροής σταθερής κατάστασης. Η φόρτιση του μετασχηματιστή είναι ένα τυπικό παράδειγμα ρευμάτων μαγνήτισης, αν και οποιαδήποτε μεταβατική κατάσταση μέσα στο μετασχηματιστή μπορεί να δημιουργήσει αυτά τα ρεύματα. Άλλοι λόγοι πρόκλησης ρευμάτων ζεύξης είναι η ανάκτηση τάσης μετά την εκκαθάριση ενός σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας και η ηλέκτριση μετασχηματιστή παράλληλου με μετασχηματιστή που είναι ήδη σε λειτουργία. Τα πλάτη και οι κυματομορφές των ρευμάτων ζεύξης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθούν. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ρευμάτων ζεύξης συνοψίζονται πιο κάτω:

- Γενικά περιέχουν dc συνιστώσα, περιττές και άρτιες αρμονικές.
- Τυπικά αποτελούνται από μονοπολικούς και διπολικούς παλμούς, τους οποίους τους χωρίζουν διάκενα πολύ μικρών ρευμάτων.
- Οι ακραίες τιμές των μονοπολικών παλμών φθίνουν πολύ αργά. Η χρονική σταθερά είναι τυπικά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της εκθετικής φθίνουσας dc μετάθεσης των ρευμάτων που προκαλούνται από σφάλματα.
- Το περιεχόμενο του ρεύματος σε δεύτερη αρμονική αρχίζει από χαμηλή τιμή και αυξάνει καθώς το ρεύμα μαγνήτισης μειώνεται.

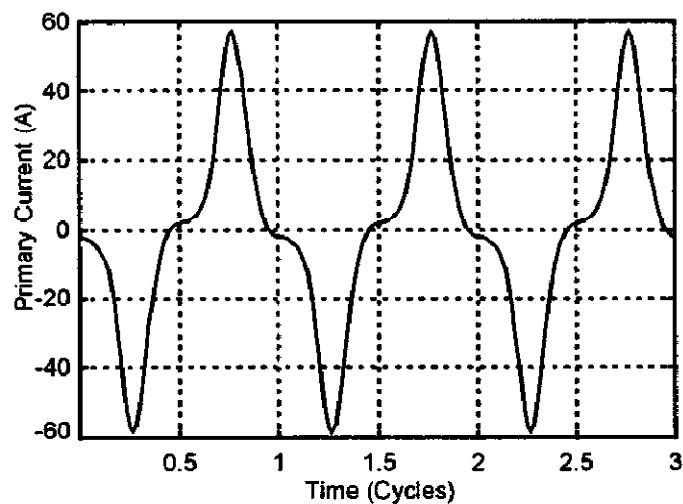
- Τα ρεύματα του ηλεκτρονόμου είναι ρεύματα τριγώνου (το τρίγωνο υφίσταται στο μετασχηματιστή εντάσεως ή στο μετασχηματιστή ισχύος, ή εξομοιώνεται από τον ηλεκτρονόμο), πράγμα που σημαίνει ότι τα ρεύματα των γειτονικών τυλιγμάτων αφαιρούνται, έτσι:
 - ο Το dc περιεχόμενο αφαιρείται.
 - ο Οι θεμελιώσεις συνιστώσες προστίθενται στις 60° .
 - ο Οι δεύτερες αρμονικές προστίθενται στις 120° .
 - ο Οι τρίτες αρμονικές προστίθενται στις 180° (αφαιρούνται), κτλ.

3.2.2 Υπερδιέγερση μετασχηματιστή

Η μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή είναι ανάλογη της επιβαλλόμενης τάσης και αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας του συστήματος. Καταστάσεις υπέρτασης ή και υποσυχνότητας μπορεί να προκαλέσουν επίπεδα ροής που θα φέρουν τον πυρήνα του μετασχηματιστή σε κορεσμό. Αυτές οι ανωμαλίες στη λειτουργία είναι δυνατό να υπάρξουν σε οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η υπερδιέγερση του μετασχηματιστή προκαλεί τη θέρμανσή του και αυξάνει το ρεύμα διέγερσης, το θόρυβο και τις δονήσεις. Ένας μετασχηματιστής με σοβαρή υπερδιέγερση πρέπει να αποσυνδέεται από το δίκτυο για να αποφευχθούν τυχόν ζημιές. Επειδή είναι δύσκολο με τη διαφορική προστασία να ελέγξουμε το ποσοστό υπερδιέγερσης που μπορεί να αντέξει ο μετασχηματιστής, δεν είναι επιθυμητή η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας για υπερδιέγερση. Αντί αυτού, χρησιμοποιείται ειδική προστασία υπερδιέγερσης, όπως ένας ηλεκτρονόμος V/Hz που παρακολουθεί το λόγο τάσης συχνότητας.

Η υπερδιέγερση του μετασχηματιστή είναι μία τυπική περίπτωση ac κορεσμού του πυρήνα η οποία παράγει άρτιες αρμονικές στο ρεύμα διεγέρσεως. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το ρεύμα διέγερσης που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής δοκιμής ενός 5kVA, 230/115 V, μονοφασικού μετασχηματιστή. Το ρεύμα προκύπτει από μια υπέρταση της τάξης του 150% σε ονομαστική συχνότητα. Για σκοπούς σύγκρισης, η τιμή κορυφής του ονομαστικού ρεύματος είναι 61.5 A και η τιμή κορυφής του ρεύματος διέγερσης είναι 57.3A.



Σχήμα 3.3 Ρεύμα διεγέρσεως ενός μετασχηματιστή σε υπερδιέγερση

Αρμονικές	Πλάτος Ρεύματος (A)	Ποσοστό Θεμελιώδους
Θεμελιώδης	22.5	100.0
Τρίτη	11.1	49.2
Πέμπτη	4.9	21.7
Εβδόμη	1.8	8.1

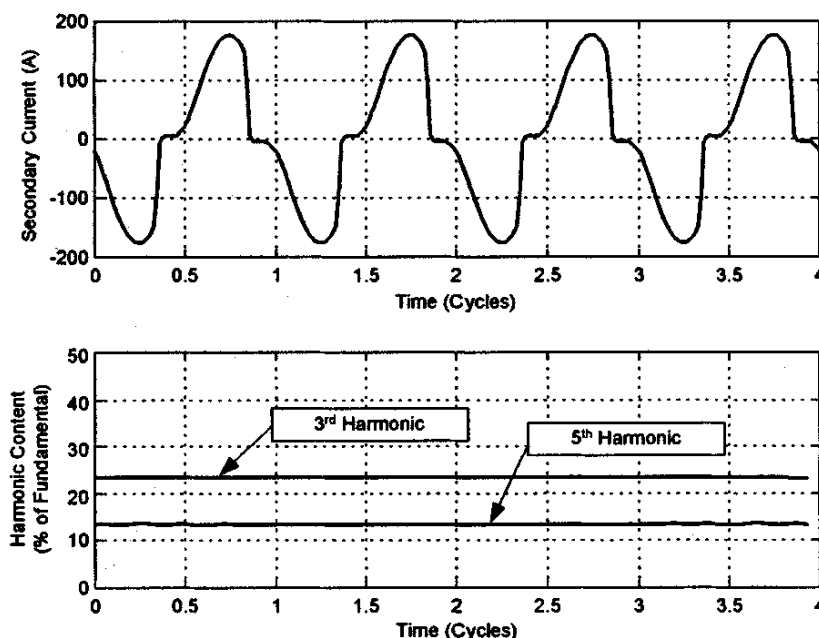
Πίνακας 3.1 Αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος διεγέρσεως

Ο πίνακας 3.1 δείχνει τις πιο σημαντικές αρμονικές του ρεύματος του σχήματος 3.3. Οι αρμονικές εκφράζονται ως ποσοστό της θεμελιώδους. Η τρίτη αρμονική είναι η πιο κατάλληλη για τον εντοπισμό της υπερδιέγερσης, αλλά φιλτράρεται είτε από τις συνδέσεις σε τρίγωνο των μετασχηματιστών εντάσεως, είτε από τον ηλεκτρονόμο. Η πέμπτη αρμονική όμως είναι αρκετά μεγάλη για να χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό της υπερδιέγερσης.

Οι Einval και Linders [9] ήταν οι πρώτοι που πρότειναν τη χρήση της πέμπτης αρμονικής για τη συγκράτηση του διαφορικού στοιχείου προστασίας του μετασχηματιστή. Πρότειναν τη ρύθμιση της λειτουργίας συγκράτησης της πέμπτης αρμονικής στο 35% της θεμελιώδους. Αυτό εξασφαλίζει ασφάλεια για καταστάσεις υπερδιέγερσης μέχρι και 140%. Σε μεγαλύτερες υπερδιεγέρσεις οι οποίες θα μπορούσαν να καταστρέψουν το μετασχηματιστή σε μερικά δευτερόλεπτα, είναι επιθυμητό να λειτουργεί και ο διαφορικός ηλεκτρονόμος μαζί με τον ηλεκτρονόμο υπερδιέγερσης.

3.2.3 Κορεσμός μετασχηματιστών εντάσεως

Η επίδραση του κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως στη διαφορική προστασία μετασχηματιστή είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος των σφαλμάτων. Στην περίπτωση εξωτερικού σφάλματος, το ρεύμα που προκύπτει μπορεί να προκαλέσει λανθασμένη λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το ποσοστό συγκράτησης του ηλεκτρονόμου αντιμετωπίζει αυτό το λανθασμένο διαφορικό ρεύμα. Στην περίπτωση εσωτερικού σφάλματος, οι αρμονικές που πηγάζουν από τον κορεσμό των μετασχηματιστών εντάσεως μπορεί να καθυστερήσουν την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου.



Σχήμα 3.4 Τυπικό ρεύμα δευτερεύοντος για συμμετρικό κορεσμό μετασχηματιστή εντάσεως και το αρμονικό του περιεχόμενο

Τα κύρια χαρακτηριστικά του κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως είναι τα εξής:

- Οι μετασχηματιστές εντάσεως αναπαράγουν πιστά το πρωτεύον ρεύμα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κατά την εξέλιξη ενός σφάλματος. Ο χρόνος μέχρι να φτάσει στον κορεσμό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Συνήθως, όμως, ο κορεσμός λαμβάνει χώρα μετά την πάροδο μιας περιόδου ή μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος.

- Η χειρότερη μορφή κορεσμού προκύπτει από την dc συνιστώσα του ρεύματος πρωτεύοντος. Κατά αυτή την dc περίοδο κορεσμού, το δευτερεύον ρεύμα μπορεί να περιέχει dc συνιστώσα και περιττές και άρτιες αρμονικές.

Όταν η dc συνιστώσα εξασθενίσει, ο μετασχηματιστής εντάσεως έχει μόνο ac κορεσμό, που χαρακτηρίζεται από την παρουσία περιττών αρμονικών στο ρεύμα δευτερεύοντος. Το σχήμα 3.4 παρουσιάζει μια τυπική κυματομορφή του ρεύματος στο δευτερεύον από μια προσομοίωση στον υπολογιστή του ac κορεσμού ενός μετασχηματιστή εντάσεως. Στο σχήμα απεικονίζεται επίσης και το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος που επιβεβαιώνει την παρουσία περιττών αρμονικών και την απουσία άρτιων αρμονικών στο ρεύμα δευτερεύοντος.

3.3 Μέθοδοι διάκρισης των εσωτερικών σφαλμάτων από τις καταστάσεις ενεργοποίησης και υπερδιέγερσης

Οι πρώτοι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούσαν καθυστέρηση χρόνου ή προσωρινή απενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου για να αντιμετωπίσουν τα ρεύματα ζεύξης. Επίσης, έχει προταθεί ένα επιπλέον σήμα τάσης το οποίο συγκρατεί ή παρεμποδίζει τη λειτουργία του διαφορικού στοιχείου. Αυτές οι προταθείσες λύσεις αυξάνουν την ταχύτητα λειτουργίας με κόστος την αύξηση της πολυπλοκότητας. Πρόσφατες μέθοδοι χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που περιέχονται στην τάση για να παρέχουν προστασία στο μετασχηματιστή. Η εφαρμογή σημάτων τάσης σε τέτοιο ηλεκτρονόμο χρειάζεται μετασχηματιστές που δεν υπάρχουν σε παλιότερες εγκαταστάσεις.

Οι μέθοδοι που βασίζονται στα ρεύματα προκειμένου να γίνει διάκριση των εσωτερικών σφαλμάτων από τις εισροές ρευμάτων και τις υπερδιεγέρσεις χωρίζονται στις δύο παρακάτω κατηγορίες: αυτές που χρησιμοποιούν αρμονικές για τη συγκράτηση του διαφορικού στοιχείου και αυτές που βασίζονται στην αναγνώριση της κυματομορφής.

3.3.1 Μέθοδοι βασισμένοι στις αρμονικές

Το αρμονικό περιεχόμενο των διαφορικών ρευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκράτηση ή την παρεμπόδιση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, παρέχοντας ένα τρόπο για τη διάκριση των εσωτερικών σφαλμάτων από τις καταστάσεις ενεργοποίησης ή

υπερδιέγερσης. Η τεχνική βιβλιογραφία σε αυτό το θέμα δεν καθορίζει ακριβώς τη διαφορά μεταξύ της συγκράτησης και της παρεμπόδισης.

Οι πρώτοι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι με αρμονική συγκράτηση χρησιμοποιούσαν όλες τις αρμονικές για να παρέχουν τη λειτουργία συγκράτησης. Η προκύπτουσα συγκράτηση μεγάλου βαθμού παρείχε την απαιτούμενη ασφάλεια από τις καταστάσεις ενεργοποίησης αλλά εις βάρος της ταχύτητας λειτουργίας για εσωτερικά σφάλματα σε συνδυασμό με κορεσμό στους μετασχηματιστές εντάσεως.

Οι Kennedy και Hayward [10] σχεδίασαν έναν ηλεκτρονόμο με μόνο αρμονική συγκράτηση για προστασία ζυγών. Η εξίσωση λειτουργίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_{OP} > K_2 I_2 + K_3 I_3 + \dots$$

όπου το I_{OP} αναπαριστά τη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος λειτουργίας, τα I_2, I_3 , είναι αρμονικές και οι K_2, K_3 , είναι σταθερές.

Οι Hayward και Matthews [11] βελτίωσαν αυτή τη μέθοδο προσθέτοντας ποσοστιαία διαφορική συγκράτηση για προστασία του μετασχηματιστή. Η συνθήκη λειτουργίας του διαφορικού ηλεκτρονόμου είναι:

$$I_{OP} > SLP \cdot I_{RT} + K_2 I_2 + K_3 I_3 + \dots$$

Οι Einval και Linders [9] σχεδίασαν έναν τριφασικό διαφορικό ηλεκτρονόμο με συγκράτηση δεύτερης και πέμπτης αρμονικής. Αυτή η σχεδίαση υλοποίησε την ιδέα χρησιμοποίησης μόνο της δεύτερης αρμονικής για την αναγνώριση των ρευμάτων ζεύξης και της πέμπτης αρμονικής για την αποφυγή λανθασμένων ενεργοποιήσεων του ηλεκτρονόμου από καταστάσεις υπερδιέγερσης.

Ο ηλεκτρονόμος περιλαμβάνει βοηθητικούς μετασχηματιστές εντάσεως κενού αέρος που αναπαράγουν δευτερεύοντα σήματα τάσης και φιλτράρουν το dc περιεχόμενο των εισερχόμενων ρευμάτων. Ένας ανιχνευτής μέγιστης τάσης παράγει την ποσοστιαία διαφορική τάση συγκράτησης, σύμφωνα με την εξίσωση $I_{RT} = \max(|\vec{I}_{W1}|, |\vec{I}_{W2}|)$. Ο ηλεκτρονόμος διαμορφώνει μια επιπλέον τάση συγκράτησης, ανάλογη του ρεύματος λειτουργίας, αθροίζοντας τις αρμονικές συνιστώσες δεύτερης και πέμπτης. Η βασική εξίσωση για μια φάση μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$I_{OP} > SLP \cdot I_{RT} + K_2 I_2 + K_5 I_5$$

Οι Einval και Linders [9] εισήγαγαν πρώτοι την έννοια της κοινής αρμονικής συγκράτησης στον ηλεκτρονόμο. Η ποσότητα αρμονικής συγκράτησης είναι ανάλογη του

αθροίσματος των αρμονικών συνιστωσών δεύτερης και πέμπτης τάξης των τριών διαφορικών στοιχείων του ηλεκτρονόμου. Η εξίσωση λειτουργίας του ηλεκτρονόμου έχει την παρακάτω μορφή:

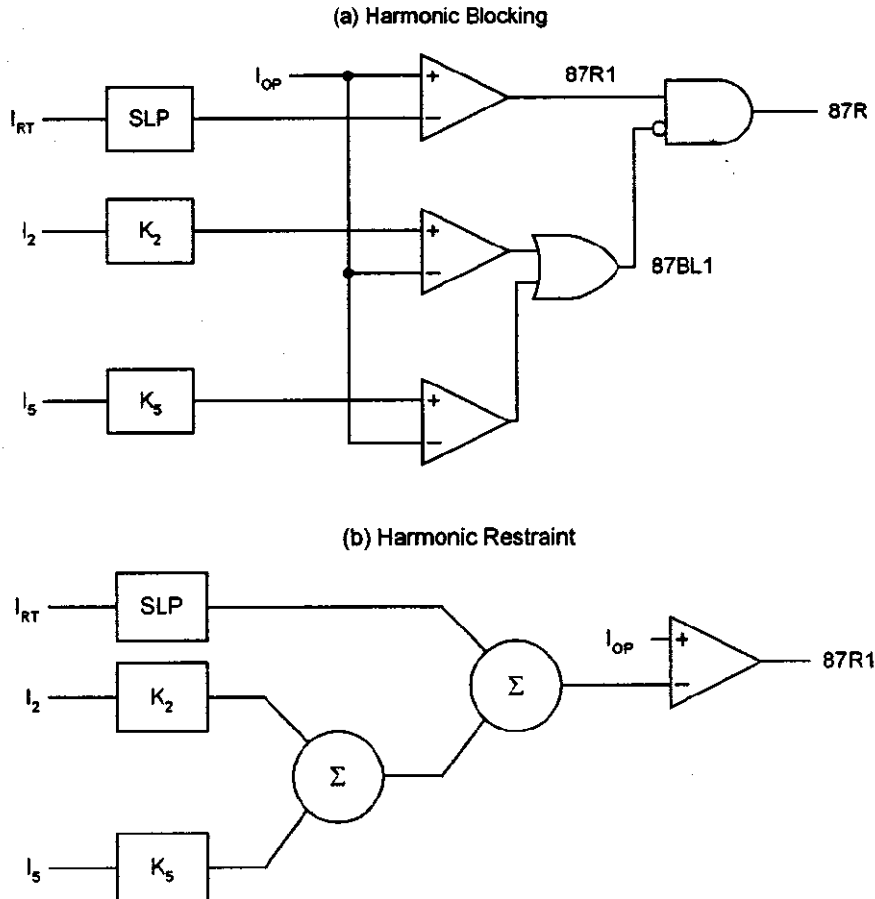
$$I_{OP} > SLP \cdot I_{RT} + \sum_{n=1}^3 (K_2 I_{2n} + K_5 I_{5n})$$

Οι Sharp και Glassburn [13] ήταν οι πρώτοι που πρότειναν την τεχνική παρεμπόδισης της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου με τη χρήση αρμονικών. Σχεδίασαν έναν ηλεκτρονόμο αποτελούμενο από μια μονάδα ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας και μια μονάδα αρμονικής παρεμπόδισης. Η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου απαιτεί τη λειτουργία και των δύο μονάδων.

Στη μονάδα παρεμπόδισης λειτουργίας η θεμελιώδης συνιστώσα και οι ανώτερες αρμονικές του κυκλώματος λειτουργίας περνούν από δύο παράλληλα κυκλώματα, ανορθώνονται και εφαρμόζονται στα πηνία λειτουργίας και συγκράτησης ενός πολωμένου ηλεκτρονόμου. Το κύκλωμα που τροφοδοτεί το πηνίο λειτουργίας του πολωμένου ηλεκτρονόμου περιλαμβάνει επίσης παράλληλο ζωνοφρακτικό φίλτρο συντονισμένο στα 120 Hz. Το κύκλωμα που τροφοδοτεί το πηνίο συγκράτησης του πολωμένου ηλεκτρονόμου περιέχει ένα βαθυπερατό σε συνδυασμό με ένα ζωνοφρακτικό φίλτρο συντονισμένο στα 60 Hz. Η σύνδεση σε σειρά των δύο φίλτρων επιτρέπει τη διέλευση της δεύτερης αρμονικής και την αποκοπή της θεμελιώδους και των υπόλοιπων αρμονικών του ρεύματος λειτουργίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο πολωμένος ηλεκτρονόμος να συγκρίνει το σήμα λειτουργίας, το οποίο σχηματίζεται από τη θεμελιώδη συνιστώσα, αθροισμένη με την τρίτη και τις ανωτέρων τάξεων αρμονικές του ρεύματος λειτουργίας, με το σήμα συγκράτησης, το οποίο είναι ανάλογο με τη δεύτερη αρμονική συνιστώσα του ρεύματος λειτουργίας. Η συνθήκη λειτουργίας της μονάδας αρμονικής παρεμπόδισης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I_{OP} + K_3 I_3 + K_4 I_4 + \dots > K_2 I_2$$

Τυπικά, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούν λογική παρεμπόδισης της δεύτερης και της πέμπτης αρμονικής. Το σχήμα 3.5(a) δείχνει το λογικό διάγραμμα ενός διαφορικού στοιχείου με παρεμπόδιση δεύτερης και πέμπτης αρμονικής.



Σχήμα 3.5 Δύο υλοποιήσεις ενός διαφορικού στοιχείου

Ένα σήμα ενεργοποίησης πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$I_{OP} > SLP \cdot I_{RT}$$

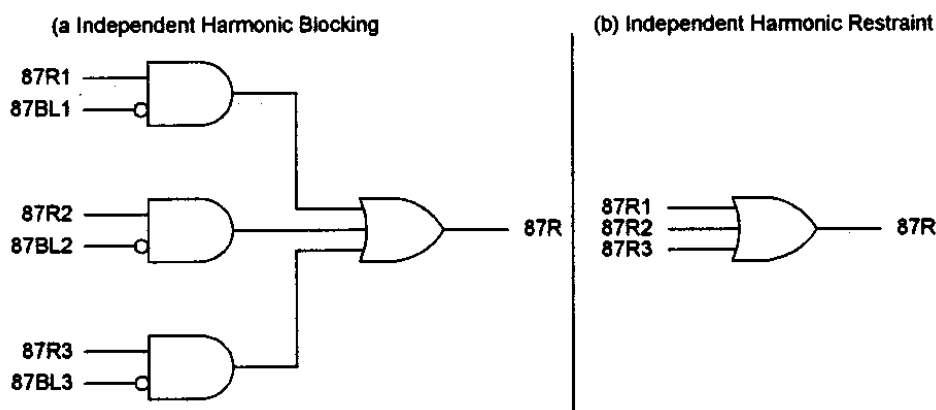
χωρίς ταυτόχρονα να ικανοποιεί τις πιο κάτω συνθήκες παρεμπόδισης:

$$I_{OP} < K_2 I_2$$

$$I_{OP} < K_5 I_5$$

Το σχήμα 3.5(b) παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα ενός διαφορικού στοιχείου με συγκράτηση δεύτερης και πέμπτης αρμονικής.

Το σχήμα 3.6 δείχνει τις τριφασικές εκδοχές του διαφορικού ηλεκτρονόμου του μετασχηματιστή με ανεξάρτητη αρμονική παρεμπόδιση ή συγκράτηση. Ο ηλεκτρονόμος αποτελείται από τρία διαφορικά στοιχεία των προδιαγραφών του σχήματος 3.5. Και στις δυο περιπτώσεις ένα σήμα ενεργοποίησης προκύπτει όταν, οποιοδήποτε από τα στοιχεία του ηλεκτρονόμου ικανοποιήσει τις συνθήκες.



Σχήμα 3.6 Τριφασικός διαφορικός ηλεκτρονόμος με ανεξάρτητη αρμονική παρεμπόδιση ή συγκράτηση

Πρέπει να σημειώσουμε ότι στο στοιχείο αρμονικής συγκράτησης του σχήματος 3.5(b) το ρεύμα λειτουργίας, I_{OP} , πρέπει να υπερβεί τη συνδυασμένη επίδραση του ρεύματος συγκράτησης I_{RT} , και των αρμονικών του ρεύματος λειτουργίας. Από την άλλη, όμως, στο στοιχείο αρμονικής παρεμπόδισης το ρεύμα λειτουργίας συγκρίνεται ανεξάρτητα με το ρεύμα συγκράτησης και τις αρμονικές. Ο πίνακας 2 συνοψίζει τα αποτελέσματα μιας ποιοτικής σύγκρισης των μεθόδων αρμονικής παρεμπόδισης και συγκράτησης για τη διαφορική προστασία μετασχηματιστών.

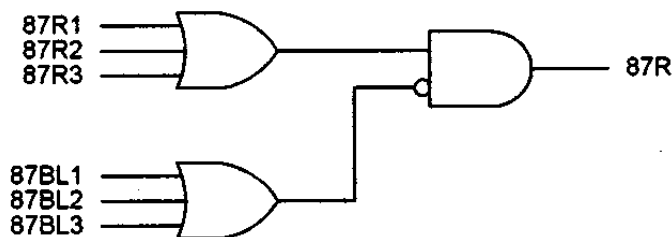
Τα αποτελέσματα της σύγκρισης του πίνακα 2 συνιστούν τη χρήση της μεθόδου παρεμπόδισης, αν μπορεί να εξασφαλιστεί με ανεξάρτητο σύστημα η ασφάλεια από εισροές, πράγμα που, όμως, δεν είναι πάντοτε δυνατό. Έτσι, η αρμονική συγκράτηση είναι μια εναλλακτική μέθοδος παροχής ασφάλειας από ρεύματα ζεύξης που έχουν χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο.

Μια εναλλακτική λύση είναι η χρήση από κοινού αρμονικής συγκράτησης ή παρεμπόδισης. Αυτή η μέθοδος είναι απλό να υλοποιηθεί σε ένα σχέδιο παρεμπόδισης και είναι η προτιμώμενη εναλλακτική λύση στους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους σήμερα. Το σχήμα 3.7 δείχνει ένα λογικό διάγραμμα της μεθόδου κοινής αρμονικής παρεμπόδισης.

Ζήτημα	Αρμονική Συγκράτηση (ΑΣ)	Αρμονική Παρεμπόδιση (ΑΠ)	Παρατηρήσεις
Ασφάλεια από εξωτερικά σφάλματα	Μεγαλύτερη	Μικρότερη	Η ΑΣ πάντα χρησιμοποιεί αρμονικές από τον κορεσμό των ΜΕ για επιπλέον συγκράτηση. Η ΑΠ παρεμποδίζει μόνο για μεγάλο αρμονικό περιεχόμενο
Ασφάλεια από ρεύματα ζεύξης	Μεγαλύτερη	Μικρότερη	Η ΑΣ αθροίζει τις επιπτώσεις ποσοστιαίας και αρμονικής συγκράτησης. Η ΑΠ αξιολογεί τις αρμονικές ανεξάρτητα
Ασφάλεια από Υπερδιέγερση	Μεγαλύτερη	Μικρότερη	Το ίδιο με πιο πάνω. Η καλύτερη τεχνική όμως είναι η παρεμπόδιση πέμπτης αρμονικής.
Αξιοπιστία	Μικρότερη	Μεγαλύτερη	Αρμονικές από κορεσμό των ΜΕ μειώνουν την ευαισθησία της ΑΣ για εσωτερικά σφάλματα. Λύση η χρήση μόνο άρτιων αρμονικών
Ταχύτητα	Μικρότερη	Μεγαλύτερη	Ποσοστιαία διαφορική και αρμονική παρεμπόδιση λειτουργούν παράλληλα στην ΑΠ
Κεκλιμένη χαρακτηριστική	Εξαρθρώμενη από τις αρμονικές	Καλά ορισμένη	Η κεκλιμένη χαρακτηριστική στην ΑΠ είναι ανεξάρτητη από τις αρμονικές
Δοκιμές	Αποτελέσματα που εξαρτώνται από τις αρμονικές	Ανεξάρτητα αποτελέσματα	Η κεκλιμένη χαρακτηριστική στην ΑΠ είναι ανεξάρτητη από τις αρμονικές

Πίνακας 2 Σύγκριση ανεξάρτητης αρμονικής συγκράτησης και ανεξάρτητης αρμονικής παρεμπόδισης

Μια μέθοδος, η οποία παρέχει ένα συμβιβασμό ως προς την αξιοπιστία μεταξύ των ανεξάρτητων και των κοινών μεθόδων αρμονικής παρεμπόδισης που περιγράφηκαν νωρίτερα, σχηματίζει ένα σύνθετο σήμα που περιέχει πληροφορίες για τις αρμονικές των ρευμάτων λειτουργίας όλων των στοιχείων του ηλεκτρονόμου. Η σύγκριση αυτού του σύνθετου σήματος με το ρεύμα λειτουργίας καθορίζει τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου.



Σχήμα 3.7 Μέθοδος κοινής αρμονικής παρεμπόδισης

Το σύνθετο σήμα, I_{CH} , μπορεί να έχει την πιο κάτω μορφή:

$$I_{CH} = \sum_{n=1}^3 K_2 I_{2n} + K_3 I_{3n} + \dots$$

Το I_{CH} μπορεί να περιέχει όλες ή μόνο μέρος των αρμονικών του ρεύματος λειτουργίας. Μια άλλη δυνατότητα είναι ο υπολογισμός της RMS τιμής των αρμονικών για κάθε στοιχείο του ηλεκτρονόμου.

$$I_{Hn} = \sqrt{I_{2n}^2 + I_{3n}^2 + \dots}$$

Το σύνθετο σήμα, I_{CH} μπορεί τότε να υπολογιστεί ως μια μέση τιμή χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$I_{CH} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 I_{Hn}$$

$$I_{CH} = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{n=1}^3 I_{Hn}^2}$$

Η συνθήκη παρεμπόδισης του ηλεκτρονόμου είναι η ακόλουθη:

$$I_{OP} < K_{CH} I_{CH}$$

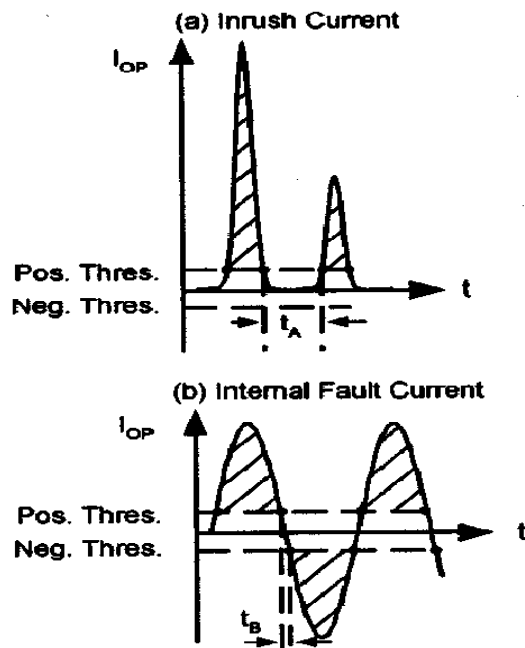
Η κοινή λογική αρμονικής παρεμπόδισης παρέχει μεγάλη ασφάλεια, αλλά μειώνει την αξιοπιστία. Η φόρτιση ενός μετασχηματιστή που έχει παρουσιάσει βλάβη μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα αρμονικές από τα ρεύματα ζεύξης των υγιών φάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή καθυστέρηση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου από τις αρμονικές αυτές.

3.3.2 Μέθοδοι βασισμένες στην αναγνώριση κυματομορφών

Οι άλλες μέθοδοι για τη διάκριση των εσωτερικών σφαλμάτων από τις καταστάσεις εισροών βασίζονται στην άμεση αναγνώριση της παραμόρφωσης του σχήματος της κυματομορφής του διαφορικού ρεύματος.

Η αναγνώριση της απόστασης μεταξύ των κορυφών του διαφορικού ρεύματος αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο τμήμα των τεχνικών αναγνώρισης κυματομορφών. Ο Bertula [14] σχεδίασε ένα πρώιμο ηλεκτρονόμο ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας στον οποίο οι επαφές δονούνταν για ρεύματα ζεύξης (λόγω των μικρών διακένων ρεύματος) και παρέμεναν ερμητικά κλειστές για συμμετρικά ρεύματα που αντιστοιχούν σε εσωτερικά σφάλματα. Ο Rockefeller [15] πρότεινε την παρεμπόδιση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου αν δεν εμφανίζονταν δύο διαδοχικές κορυφές σε περίπου 7.5-10 ms.

Μια καλά γνωστή αρχή αναγνωρίζει το μήκος των χρονικών περιόδων κατά τη διάρκεια των οποίων το διαφορικό ρεύμα είναι κοντά στο μηδέν. Το σχήμα 3.8 απεικονίζει τη βασική ιδέα πίσω από αυτή τη μέθοδο εντοπισμού χαμηλών ρεύματων.



Σχήμα 3.8 Αναγνώριση της διάρκειας των περιόδων χαμηλών ρευμάτων

Το διαφορικό ρεύμα συγκρίνεται με θετικά και αρνητικά κατώφλια που έχουν το ίδιο πλάτος. Αυτή η σύγκριση βοηθά τον καθορισμό της διάρκειας των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία η απόλυτη τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη από την απόλυτη τιμή του κατωφλίου. Ακολούθως τα χρονικά διαστήματα συγκρίνονται ψηφιακά με μια σταθερή τιμή ίση με το ένα τέταρτο της περιόδου. Για ρεύματα ζεύξης [σχήμα 3.8(a)], τα χρονικά διαστήματα χαμηλού ρεύματος, t_A , είναι μεγαλύτερα από το ένα τέταρτο της περιόδου και η λειτουργία του ηλεκτρονόμου παρεμποδίζεται. Για εσωτερικά σφάλματα [σχήμα 3.8(b)], τα διαστήματα χαμηλού ρεύματος, t_B , είναι μικρότερα από το ένα τέταρτο της περιόδου και ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί.

Η χρήση των ανορθωμένων διαφορικών ρευμάτων προσφέρει έναν έμμεσο τρόπο για την αναγνώριση των διαστημάτων χαμηλού ρεύματος. Ο Hegazy [16] πρότεινε τη σύγκριση της δεύτερης αρμονικής του ανορθωμένου διαφορικού ρεύματος με ένα προκαθορισμένο κατώφλι για την παραγωγή του σήματος ενεργοποίησης. Ο Dmitrenko [17] πρότεινε τη δημιουργία ενός σήματος ενεργοποίησης αν η πολικότητα του αθροίσματος του σήματος παραμένει η ίδια. Αυτό το σήμα είναι το άθροισμα του dc και των θεμελιωδών συνιστωσών του ανορθωμένου διαφορικού ρεύματος.

Μια άλλη ομάδα μεθόδων χρησιμοποιεί αναγνώριση της dc συνιστώσας ή ασυμμετρίας στο διαφορικό ρεύμα. Κάποιοι πρώτοι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούσαν τον κορεσμό ενός ενδιάμεσου μετασχηματιστή που προέκυπτε από την dc συνιστώσα του διαφορικού ρεύματος σαν μέθοδο παρεμπόδισης της λειτουργίας τους. Μια επιπλέον συγκράτηση βασισμένη στη μεταβατική dc συνιστώσα συντελεί σε μερική βελτίωση στο καλά γνωστό διαφορικό ηλεκτρονόμο προστασίας μετασχηματιστή με αρμονική συγκράτηση.

Οι περισσότεροι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι προστασίας μετασχηματιστών χρησιμοποιούν το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος λειτουργίας για να διακρίνουν τα εσωτερικά σφάλματα από τις μαγνητίζουσες εισροές και τις καταστάσεις υπερδιέγερσης. Οι αρμονικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγκράτηση ή την παρεμπόδιση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Οι μέθοδοι αρμονικής συγκράτησης και παρεμπόδισης διασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του ηλεκτρονόμου ακόμα και σε καταστάσεις πολύ μεγάλης υπερδιέγερσης και ζεύξης.

Η κοινή αρμονική συγκράτηση ή παρεμπόδιση αυξάνει την ασφάλεια του διαφορικού ηλεκτρονόμου, αλλά μπορεί να καθυστερήσει τη λειτουργία του σε περιπτώσεις εσωτερικών σφαλμάτων που εκδηλώνονται σε συνδυασμό με ρεύματα ζεύξης στις υγιείς φάσεις.

Οι τεχνικές αναγνώρισης κυματομορφής αποτελούν μια εναλλακτική λύση για τη διάκριση των εσωτερικών σφαλμάτων από τα ρεύματα ζεύξης. Αυτές οι τεχνικές όμως δε μπορούν να εντοπίσουν καταστάσεις υπερφόρτισης του μετασχηματιστή.

4. Ψηφιακός Εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)

Η ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης των ηλεκτρονόμενων προστασίας. Οι τεχνολογικά εξελιγμένοι ηλεκτρονόμοι και οι καινούριοι αλγόριθμοι προστασίας είναι αναγκαίο να δοκιμάζονται για την απρόσκοπτη λειτουργία τους πριν εγκατασταθούν σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πέρα από τις παραδοσιακές αναλογικές δυναμικές προσομοιώσεις, καταβάλλεται μια ολοένα αυξανόμενη προσπάθεια για την ανάπτυξη ψηφιακών προσομοιώσεων. Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε δοκιμές ηλεκτρονόμενων στη δεκαετία του 90. Στην εποχή μας όλο και περισσότεροι κατασκευαστές ηλεκτρονόμενων προστασίας χρησιμοποιούν το RTDS ως το κύριο μέσο ελέγχου της αποτελεσματικότητας των νέων προϊόντων τους.

4.1 Ο Εξομοιωτής

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS), που κατασκευάζεται από το RTDS Technology INC, είναι ένας ψηφιακός εξομοιωτής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εξομοιωτής χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή δοκιμών κλειστού βρόγχου, σε πραγματικό χρόνο, διάφορων συσκευών, όπως συσκευών προστασίας και συσκευών αυτόματου ελέγχου. Επίσης, χρησιμοποιείται σε αναλυτικές μελέτες συστημάτων όπως και στην εκπαίδευση χειριστών, μηχανικών και φοιτητών. Είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο που μπορεί να αντικαταστήσει τους αναλυτές της μεταβατικής κατάστασης των δικτύων και τους αναλογικούς εξομοιωτές. Ο εξομοιωτής επιτρέπει στο χειριστή του να διερευνήσει τις επιπτώσεις των διαταραχών στον εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων ή και καταστροφών.

Ο εξομοιωτής είναι ένας συνδυασμός εξελιγμένου υπολογιστικού υλικού και εξεζητημένου λογισμικού. Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονται στην οθόνη του υπολογιστή από τις βιβλιοθήκες έτοιμων ηλεκτρικών στοιχείων που περιέχει το λογισμικό του εξομοιωτή. Το λογισμικό είναι το κύριο στοιχείο επικοινωνίας του χειριστή με τον εξομοιωτή και είναι σχεδιασμένο ώστε να επιτρέπει στο χρήστη να εκτελεί όλα τα

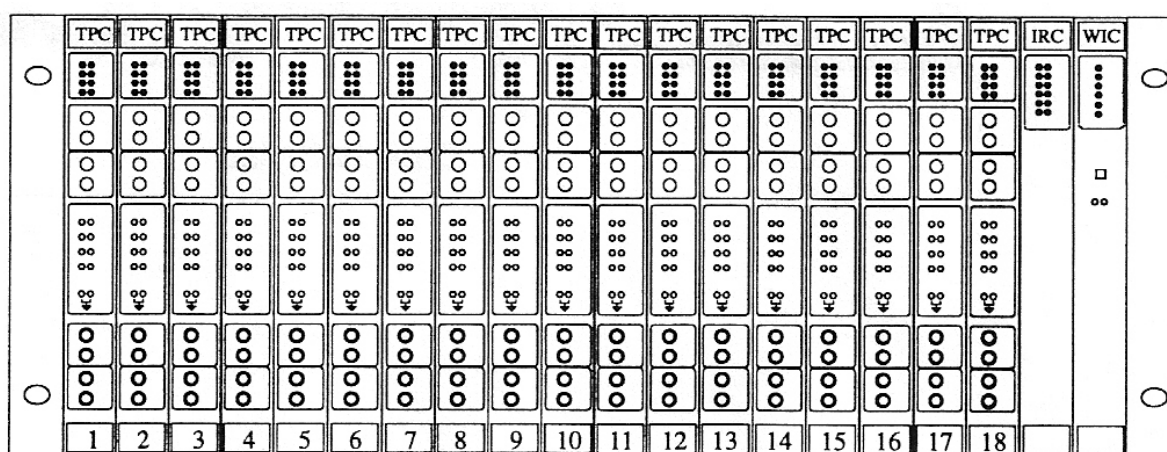
απαραίτητα βήματα για την προετοιμασία και την εκτέλεση της εξομοίωσης καθώς και να διεξάγει δοκιμές και να αναλύει τις εξόδους του εξομοιωτή. Ο εξομοιωτής είναι πλήρως επεκτάσιμος, επιτρέποντας μας έτσι να δουλέψουμε ακόμα και με τα πιο πολύπλοκα και ακριβή μοντέλα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι ο εξομοιωτής δουλεύει σε συνεχή σταθερό πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι εφικτό επειδή ο εξομοιωτής μπορεί να επιλύσει τις εξισώσεις του συστήματος αρκετά γρήγορα ώστε η έξοδος του να αντιπροσωπεύει συνεχώς και ρεαλιστικά τις συνθήκες στο πραγματικό δίκτυο. Ακριβώς επειδή η επίλυση του δικτύου γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ο εξομοιωτής μπορεί να συνδεθεί με διατάξεις αυτομάτου ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και με ηλεκτρονόμους προστασίας.

Στις μέρες μας ο εξομοιωτής χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, τυπικά στην ανάπτυξη, δοκιμή και μελέτη μεθόδων προστασίας με ηλεκτρονόμους, ενσωματωμένης προστασίας και συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Επίσης, χρησιμοποιείται για συστήματα ελέγχου για HVDC, SVC, σύγχρονες μηχανές και συσκευές FACTS, για γενικές λειτουργίες συστημάτων AC και DC και για την αλληλεπίδραση διάφορων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Επίσης, ο εξομοιωτής έχει πολύτιμη συνεισφορά στην εκπαίδευση και στις επιδείξεις.

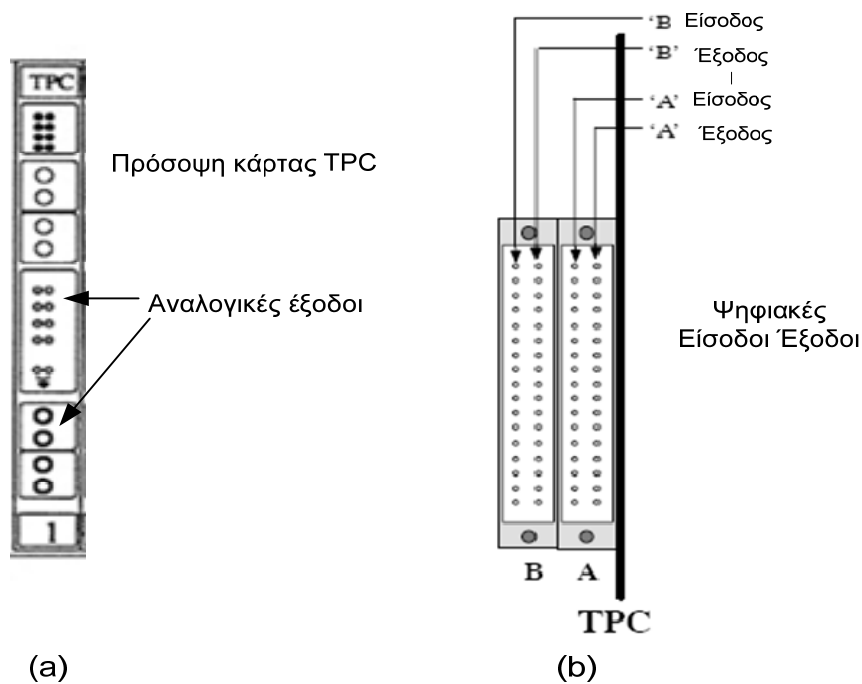
Ο εξομοιωτής εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιώντας πολλαπλούς επεξεργαστές που βρίσκονται σε ανεξάρτητες μονάδες που ονομάζονται racks. Κάθε rack αποτελείται από διάφορες κάρτες. Η σύνθεση ενός εξομοιωτή εξαρτάται από τις ανάγκες επεξεργασίας και εισόδων - εξόδων (I/O) της κάθε εφαρμογής. Ένα backbone συνδέει όλες τις κάρτες ενός rack και διεκπεραιώνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές διαφορετικές κάρτες στις οποίες περιλαμβάνονται και οι ακόλουθες: GPC (Giga Processor Card), 3PC (Triple Processor Card), IRC (Workstation Inter-Rack Communications Card), WIF (Workstation InterFace Card), TPC (Tandem Processor Card) κτλ. Ο εξομοιωτής συνοδεύεται από ένα εύχρηστο, γραφικό λογισμικό που ονομάζεται RSCAD. Αυτό το πρόγραμμα είναι το κύριο μέσο επικοινωνίας του χειριστή με τον εξομοιωτή. Το λογισμικό αποτελείται από επιμέρους εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν στο χρήστη να προετοιμάσει και να τρέξει μια προσομοίωση καθώς και να αναλύσει τα αποτελέσματα της.

Η μονάδα εξομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα rack με 18 κάρτες επεξεργασίας TPC (Tandem Processor Cards) και μια κάρτα WIC (Workstation Interface Card).



Σχήμα 4.1 Τυπικό rack του εξομοιωτή

Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο επεξεργαστές καθώς και αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους. Οι αναλογικές εξόδους βρίσκονται στην πρόσοψη του εξομοιωτή και μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικό υλικό είτε με ακροδέκτες τύπου 'μπανάνα', είτε με ομοαξονικά καλώδια. Κάθε επεξεργαστής διαθέτει 4 τέτοιες εξόδους, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 4.2(a). Οι ψηφιακές εισοδοί-εξοδοί βρίσκονται στην πίσω όψη του εξομοιωτή. Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο ψηφιακές υποδοχές σύνδεσης, μία για κάθε επεξεργαστή, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2(b). Οι υποδοχές είναι θυρίδες των 34 ακροδεκτών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικές συσκευές με τη χρήση καλωδίου κορδέλας. Κάθε υποδοχή αποτελείται από 2 στήλες 17 ακροδεκτών, μια για τις εισόδους και μια για τις εξόδους κάθε επεξεργαστή. Η κάθε στήλη μπορεί να φέρει μέχρι 16 ψηφιακά σήματα με τον 17^ο ακροδέκτη, που βρίσκεται στη βάση της υποδοχής, να είναι ο ακροδέκτης αναφοράς (γης).



Σχήμα 4.2 Αναλογικές και ψηφιακές είσοδοι-έξοδοι των καρτών TPC

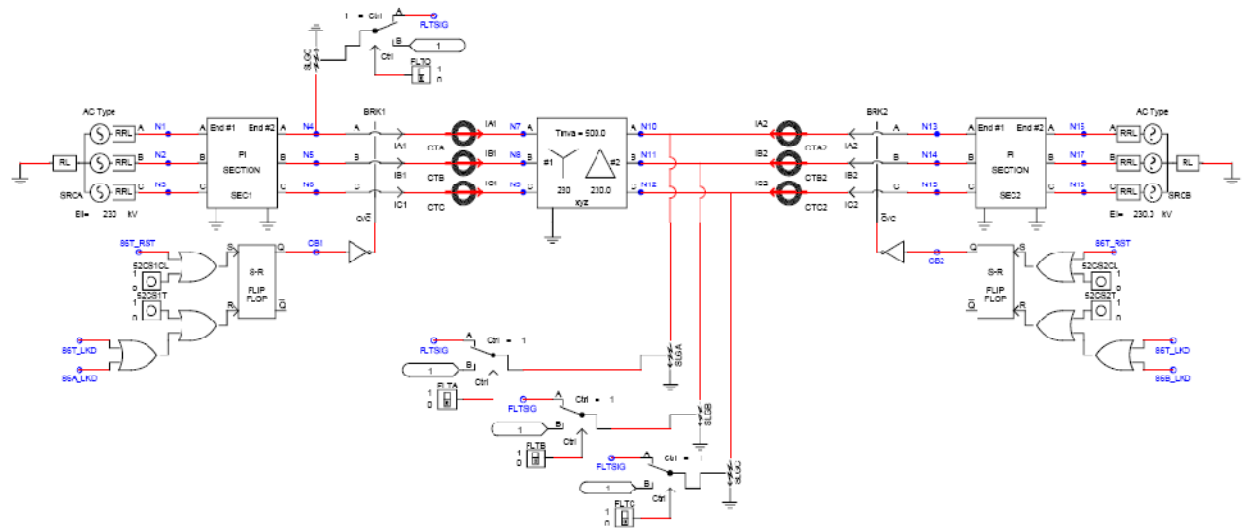
4.2 Κύκλωμα προσομοίωσης

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής δημιουργήθηκε ένα κύκλωμα που προσομοιώνει τη ροή ισχύος μεταξύ δύο γεννητριών διαμέσου ενός μετασχηματιστή με δυνατότητα δημιουργίας βραχυκυκλωμάτων όλων των τύπων, εντός και εκτός της ζώνης προστασίας. Το κύκλωμα παρουσιάζεται χωρισμένο σε δύο μέρη για πιο εύκολη περιγραφή της λειτουργίας του. Αυτά είναι το κύκλωμα ισχύος, που περιλαμβάνει τις γεννήτριες, το μετασχηματιστή και γενικά ό,τι βρίσκεται υπό υψηλή τάση και το κύκλωμα ελέγχου, στο οποίο έχουμε τις εισόδους-εξόδους του κυκλώματος και διάφορα στοιχεία ελέγχου.

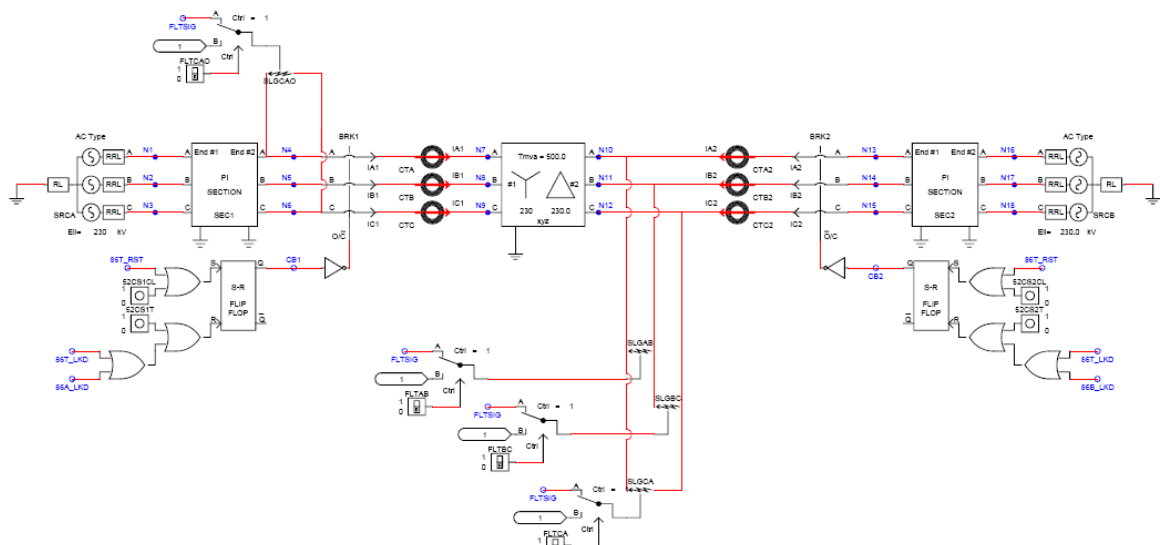
4.2.1 Κύκλωμα Ισχύος

Για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας τροποποιήθηκε ένα έτοιμο κύκλωμα από τη βιβλιοθήκη του DRAFT/RSCAD και προσαρμόστηκε στις ανάγκες της εργασίας. Το κύκλωμα περιελάμβανε δύο πηγές και ένα μετασχηματιστή αστέρα τριγώνου. Από αυτό το κύκλωμα δημιουργήθηκαν δύο όμοια κυκλώματα κατάλληλα για τον έλεγχο της προστασίας του μετασχηματιστή λόγω αδυναμίας του εξομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο να φιλοξενήσει περισσότερα από 4 βραχυκυκλώματα σε ένα κύκλωμα. Το ένα κύκλωμα περιλαμβάνει τα βραχυκυκλώματα φάσης – γης (L-G) και το άλλο τα

βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων(L-L). Τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2.



(a)



(b)

Σχήμα 4.3 Δίκτυο στο οποίο εφαρμόστηκε προστασία (a) Σφάλματα L-G, (b) Σφάλματα L-L

Στοιχεία κυκλώματος ισχύος

- Πηγές Τάσεις



Το πιο πάνω σύμβολο αντιπροσωπεύει την τριφασική πηγή τάσης στο RSCAD/DRAFT. Από το παράθυρο ιδιοτήτων της υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης αρκετών παραμέτρων. Μερικές παράμετροι είναι η τάση, η σύνθετη αντίσταση τυλίγματος, ο τρόπος γείωσης και η τιμή της σύνθετης αντίστασης γειώσεως αν υπάρχει, η φάση και πολλές άλλες. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα καταγραφής διάφορων μεγεθών της γεννήτριας, όπως τάσης, ρεύματος και ισχύος. Στην εργασία αυτή το κύκλωμα προσομοίωσης διαθέτει δύο πηγές τάσης των οποίων οι ρυθμίσεις φαίνονται στους πίνακες 4.1 και 4.2.

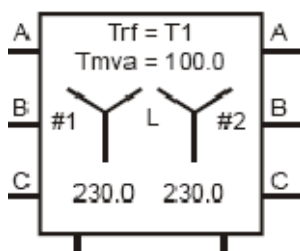
Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
1^η Πηγή Τάσης			
Διαμόρφωση			
Name	Όνομα Πηγής	SRCA	
Type	Τύπος Σύνθετης Αντίστασης Πηγής	R-R//L	
Tc	Χρονική Σταθερά Εισόδου Τάσης	0.05	sec
ZSeq	Περιλαμβάνεται η Μηδενική Ακολουθία	Yes	
Imp	Τύπος Δεδομένων Σύνθετης Αντίστασης	Impedance	
WnType	Τύπος Κυματομορφής Πηγής	AC	
Αρχικές Τιμές			
Es	Αρχικό Πλάτος Τάσης (L-L, RMS)	230.0	kV
F0	Αρχική Συχνότητα	60.0	Hz
Ph	Αρχική Φάση	0.0	deg
Σύνθετη Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας			
Vm	Ονομαστική Τάση (L-L, RMS)	230.0	kV
F	Βασική Συχνότητα	60.0	Hz
Z1	Σύνθετη Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας	3.77	Ohms
Phi1	Γωνία Συνθ. Αντίστασης Θετικής Ακολ.	81.2	deg
RN	Αρμονική που είναι σε Φάση με την Θεμελιώδη	2.0	
Σύνθετη Αντίσταση Μηδενικής Ακολουθίας			
Z0	Σύνθετη Αντίσταση Μηδενικής Ακολουθίας	12.80	Ohms
Phi0	Γωνία Συνθ. Αντίστασης Μηδενικής Ακολ.	73.6	deg

Πίνακας 4.1 Ρυθμίσεις 1^{ης} πηγής τάσης

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
2^η Πηγή Τάσης			
Διαμόρφωση			
Name	Όνομα Πηγής	SRCB	
Type	Τύπος Σύνθετης Αντίστασης Πηγής	R-R//L	
Tc	Χρονική Σταθερά Εισόδου Τάσης	0.05	sec
ZSeq	Περιλαμβάνεται η Μηδενική Ακολουθία	Yes	
Imp	Τύπος Δεδομένων Σύνθετης Αντίστασης	Impedance	
WvType	Τύπος Κυματομορφής Πηγής	AC	
Αρχικές Τιμές			
Es	Αρχικό Πλάτος Τάσης (L-L, RMS)	230.0	kV
F0	Αρχική Συχνότητα	60.0	Hz
Ph	Αρχική Φάση	-36.0	deg
Σύνθετη Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας			
Vm	Ονομαστική Τάση (L-L, RMS)	230.0	kV
F	Βασική Συχνότητα	60.0	Hz
Z1	Σύνθετη Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας	3.77	Ohms
Phi1	Γωνία Συνθ. Αντίστασης Θετικής Ακολ.	81.2	deg
RN	Αρμονική που είναι σε Φάση με την Θεμελιώδη	2.0	
Σύνθετη Αντίσταση Μηδενικής Ακολουθίας			
Z0	Σύνθετη Αντίσταση Μηδενικής Ακολουθίας	12.80	Ohms
Phi0	Γωνία Συνθ. Αντίστασης Μηδενικής Ακολ.	73.6	deg

Πίνακας 4.2 Ρυθμίσεις 2^{ης} πηγής τάσης

- Μετασχηματιστές

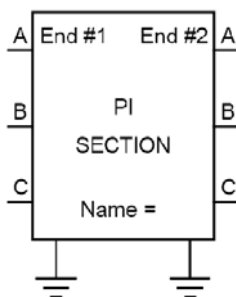


Στο RTDS μπορεί να γίνει προσομοίωση λειτουργίας κάθε τύπου μετασχηματιστή. Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό μοντέλο για το μετασχηματιστή ή να επιλεγεί πραγματικό μοντέλο μετασχηματιστή, το οποίο θα περιλαμβάνει και κορεσμό του πυρήνα του. Στην εργασία αυτή ο μετασχηματιστής είναι αστέρα τριγώνου με τον αστέρα να προηγείται κατά 30° του τριγώνου. Οι ρυθμίσεις του μετασχηματιστή ισχύος καταγράφονται στον πίνακα 4.3.

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
Διαμόρφωση			
Name	Όνομα Μετασχηματιστή	xyz	
Tmva	Ισχύς Τριφασικού Μετασχηματιστή	500.0	MVA
f	Βασική Συχνότητα Λειτουργίας	60.0	Hz
YD1	Τύπος 1 ^{ου} Τυλίγματος	Y	
YD2	Τύπος 2 ^{ου} Τυλίγματος	Delta	
Lead	Το Τρίγωνο Προηγείται ή Έπεται του Αστέρα	Lags	
Xl	Αντίδραση Σκέδασης Θετικής Ακολουθίας	0.1	p.u.
Ideal	Ιδανικό Μοντέλο Μετασχηματιστή	Yes	
NLL	Απώλειες Κενού Φορτίου	0.001	p.u.
1 ^ο Τύλιγμα			
V1	Πολική Τάση (RMS)	230.0	kV
Im1	Ρεύμα Μαγνήτισης	1.0	%
Mon1	Καταγραφή Ρευμάτων Γραμμής	No	
2 ^ο Τύλιγμα			
V2	Πολική Τάση (RMS)	230.0	kV
Im2	Ρεύμα Μαγνήτισης	1.0	%
Mon2	Καταγραφή Ρευμάτων Γραμμής	No	
Κορεσμός			
Enab	Ενεργοποίηση Κορεσμού	Yes	
Sat	Ο Κορεσμός Εμφανίζεται στο Τύλιγμα	#1	
Xair	Σκέδαση πυρήνα	0.2	p.u.
Tdc	Χρονική Σταθερά Ρευμάτων Ζεύξης	1.0	sec
Xknee	Γόνατο Τάσης	1.25	p.u.
Lw	Πλάτος Βρόγχου	12	%

Πίνακας 4.3 Παράμετροι μετασχηματιστή ισχύος

- Τμήμα PI

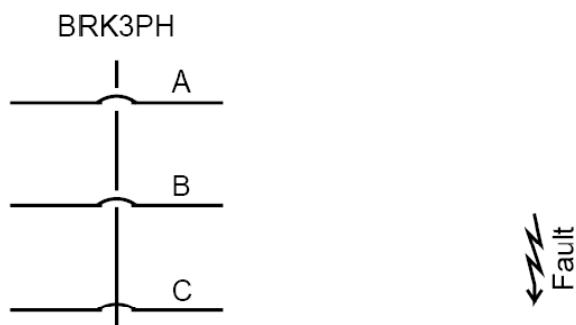


Το στοιχείο αυτό τοποθετείται μεταξύ των γεννητριών και του μετασχηματιστή για να μοντελοποιήσει μια γραμμή μεταφοράς. Δίνοντας στο στοιχείο αυτό, το οποίο είναι αποτελείται από R, L και C, την ολική σύνθετη αντίσταση της γραμμής, επιτυγχάνεται σε ένα μεγάλο βαθμό στα άκρα του λειτουργία τέτοια όπως αν υπήρχε πράγματι η γραμμή μεταφοράς. Οι παράμετροι του φαίνονται στον πίνακα 4.4.

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
1^ο Τμήμα PI			
Διαμόρφωση			
Name	Όνομα Τμήματος PI	SEC1	
f	Συχνότητα Γραμμής	60.0	Hz
Rp	Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας	1.8547	ohms
Xp	Σύνθετη Αντίδραση Θετικής Ακολουθίας	37.661	ohms
Xcp	Σύνθετη Χωρητικότητα Θετικής Ακολουθίας	22.789	Mohms
Rz	Αντίσταση Μηδενικής Ακολουθίας	36.18376	ohms
Xz	Σύνθετη Αντίδραση Μηδενικής Ακολουθίας	122.7747	ohms
Xcz	Σύνθετη Χωρητικότητα Μηδενικής Ακολουθίας	34.513	Mohms
2^ο Τμήμα PI			
Διαμόρφωση			
Name	Όνομα Τμήματος PI	SEC2	
f	Συχνότητα Γραμμής	60.0	Hz
Rp	Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας	0.18547	ohms
Xp	Σύνθετη Αντίδραση Θετικής Ακολουθίας	3.7661	ohms
Xcp	Σύνθετη Χωρητικότητα Θετικής Ακολουθίας	2.2789	Mohms
Rz	Αντίσταση Μηδενικής Ακολουθίας	3.618376	ohms
Xz	Σύνθετη Αντίδραση Μηδενικής Ακολουθίας	12.27747	ohms
Xcz	Σύνθετη Χωρητικότητα Μηδενικής Ακολουθίας	3.4513	Mohms

Πίνακας 4.4 Παράμετροι τμημάτων PI

- Βραχυκυκλώματα και διακόπτες κυκλώματος



Οι διακόπτες κυκλώματος και τα βραχυκυκλώματα μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα κύκλωμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από το RSCAD/DRAFT. Και τα δύο έχουν καθαρά ωμική συμπεριφορά η οποία μπορεί να αλλάξει δυναμικά κατά την προσομοίωση. Τα μοντέλα των διακοπών μπορούν προαιρετικά να συμπεριλαμβάνουν και αντίσταση. Η λειτουργία τους μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα από το RSCAD/RUNTIME, είτε χρησιμοποιώντας φυσική επαφή συνδεδεμένη στη ψηφιακή είσοδο ενός επεξεργαστή. Εναλλακτικά μπορούν να λειτουργήσουν αυτόματα με βάση μια προκαθορισμένη

ακολουθία γεγονότων. Οι ρυθμίσεις των τριφασικών διακοπών και των βραχυκυκλωμάτων δίνονται στους πίνακες 4.5 και 4.6 αντίστοιχα.

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
Διαμόρφωση			
NAME	Όνομα Διακόπτη	BRK1 (BRK2)	
OPEN	Αρχική Κατάσταση	Closed	
ENAB	Χρήση Αντίστασης Προεισαγωγής	No	
DIPE	Έλεγχος από Ψηφιακή θύρα	No	
CCOP	Λειτουργία από τον Compiler Ελέγχου	Yes	
Κύρια Δεδομένα Διακόπτη			
ROFF	Αντίσταση Ανοικτού Διακόπτη	1.0e6	ohms
RON	Αντίσταση Κλειστού Διακόπτη	0.1	ohms
OPNZ	Μπορεί ο διακόπτης να ανοίξει σε μη μηδενικό ρεύμα	No	
Ονόματα Ρευμάτων Διακόπτη			
IBRA	Όνομα Ρεύματος Φάσης Α	IA1	
IBRB	Όνομα Ρεύματος Φάσης Β	IB1	
IBRC	Όνομα Ρεύματος Φάσης C	IC1	

Πίνακας 4.5 Ρυθμίσεις διακόπτη κυκλώματος 1 (2)

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
Διαμόρφωση			
Name	Όνομα Βραχυκυκλώματος	SLGA	
DIP	Έλεγχος από Ψηφιακό Port	No	
CCOP	Λειτουργία από τον Compiler Ελέγχου	Yes	
IMON	Επιτήρηση Ρεύματος Βραχυκυκλώσεως	No	
Κύρια Δεδομένα Βραχυκυκλώματος			
ROn	Αντίσταση με Βραχυκύκλωμα	0.1	ohms
ROff	Αντίσταση Χωρίς Βραχυκύκλωμα	1.0E6	ohms
OPNZ	Εκκαθάριση σφάλματος σε μη μηδενικό ρεύμα	No	

Πίνακας 4.6 Ρυθμίσεις βραχυκυκλωμάτων

- Μετασχηματιστές Εντάσεως



Στο σύστημα που προσομοιώνεται ψηφιακά στο RTDS οποιοδήποτε ρεύμα κλάδου μπορεί να καταγραφεί άμεσα με τη χρήση του πιο πάνω συμβόλου. Έπειτα με ένα μετατροπέα D/A

και κατάλληλη κλίμακα επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση εξόδου στις αναλογικές εξόδους του επεξεργαστή. Σε αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι ρυθμίσεις του πίνακα 4.7 για τους μετασχηματιστές εντάσεως. Για συντομία παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις μόνο ενός μετασχηματιστή εντάσεως. Στους υπόλοιπους αλλάζει μόνο το όνομα.

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
Κύρια Χαρακτηριστικά			
CTnam	Όνομα Μετασχηματιστή Εντάσεως	CTA	
Name	Όνομα ρεύματος πρωτεύοντος	IA1	
Irat	Ονομαστικό Ρεύμα Γραμμής (rms)	1.0	kA
F	Συχνότητα	60.0	Hz
csa	Εμβαδό Διατομής	6.5e-3	m ²
PLen	Μήκος Διέλευσης	0.5	m
Rini	Initial Remenance	0.0	p.u.
PLCrv	Λεπτομερείς Απώλειες	No	
DE	Εισαγωγή Χαρακτηριστικών Δεδομένων Πυρήνα	B,H	
pnt	Αριθμός B,H ή Vrms,Irms σημείων δεδομένων	10	max=20
plt	Δημιουργία αρχείου γραφήματος	No	
Δεδομένα Μετασχηματιστή			
Rs	Αντίσταση Δευτερεύοντος	0.5	Ohms
Ls	Επαγωγή Δευτερεύοντος	0.8e-3	H
Ratio	Λόγος τυλιγμάτων	400.0	
Φορτίο (Burden)			
Rb	Αντίσταση Φορτίου	1.5	Ohms
Lb	Επαγωγή Φορτίου	35.0e-3	H
B1,H1 ... B10,H10			
B1	0.5	H1	10.0
B2	1.0	H2	25.0
B3	1.2	H3	30.0
B4	1.4	H4	45.0
B5	1.6	H5	100.0
B6	1.65	H6	150.0
B7	1.7	H7	250.0
B8	1.75	H8	400.0
B9	1.76	H9	500.0
B10	1.77	H10	600.0
Δεδομένα Απωλειών P (P-Loss Data)			
LoopW	Πλάτος Βρόχου	50	%

Πίνακας 4.7 Ρυθμίσεις μετασχηματιστών εντάσεως

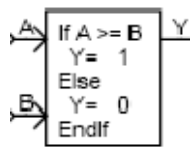
4.2.2 Κύκλωμα ελέγχου

Το κύκλωμα ελέγχου μπορεί να χωριστεί ανάλογα με τις λειτουργίες που εκτελεί σε τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι υπεύθυνο για την έναυση των βραχυκυκλωμάτων καθώς

και για τη χρονική διάρκεια τους. Το δεύτερο τμήμα αναλαμβάνει την ανάγνωση των σημάτων από την ψηφιακή κάρτα εισόδου του εξομοιωτή και τον έλεγχο των διακοπών κυκλώματος. Η αρμοδιότητα του τελευταίου τμήματος είναι η επεξεργασία των ψηφιακών σημάτων εξόδου των μετασχηματιστών εντάσεως του κυκλώματος και η μετατροπή τους σε αναλογικά σήματα για την τροφοδότηση των αναλογικών εξόδων του εξομοιωτή.

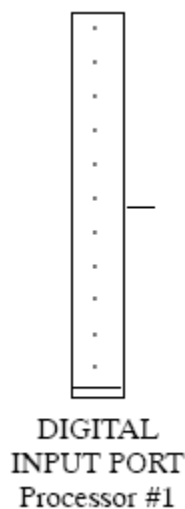
Στοιχεία κυκλώματος ελέγχου

- Επιλογέας



Η έξοδος του επιλογέα γίνεται ίση με την προκαθορισμένη τιμή ανάλογα με τις εισόδους του και τη συνάρτηση λογικής που εφαρμόζει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνει έξοδο 1 όταν το A είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το B και 0 σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση.

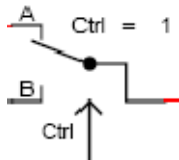
- Στοιχείο Θυρίδας Ψηφιακής Εισόδου



Διαβάζονται 16 bit δεδομένων από τη θυρίδα ψηφιακής εισόδου του επεξεργαστή. Το στοιχείο θυρίδας ψηφιακής εισόδου διαβάζει τα 16 bits και επιστρέφει ένα ακέραιο. Οι ακροδέκτες που δεν είναι συνδεδεμένοι με εξωτερικό εξοπλισμό διαβάζουν λογικό '1'. Αν δεν υπάρχουν συνδέσεις στην ψηφιακή είσοδο, τότε το σύστημα διαβάζει την τιμή 65535 (=0xFFFF). Για την αποκοπή των ανεπιθύμητων bits χρησιμοποιείται μια παράμετρος

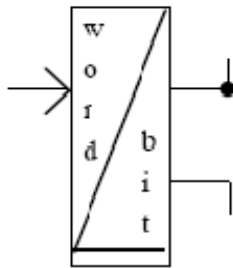
μάσκα. Για παράδειγμα μια τιμή μάσκας 000F θα διαβάσει μόνο τα τέσσερα λιγότερο σημαντικά bits.

- Διακόπτης Σήματος



Η έξοδος του γίνεται ίση με το σήμα εισόδου A ή B αναλόγως με την τιμή του σήματος στο Ctrl. Αν το Ctrl είναι ίσο με την καθορισμένη τιμή τότε η έξοδος γίνεται ίση με το σήμα A, αλλιώς η έξοδος είναι ίση με το σήμα B.

- Λέξη σε bit



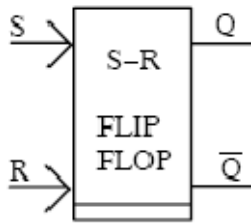
Μετατρέπει ένα ακέραιο σε πολλά λογικά σήματα. Το λιγότερο σημαντικό bit είναι στο καλώδιο που αναγνωρίζεται από την μικρή τελεία. Όλα τα σήματα εξόδου είναι λογικά (0 ή 1). Μπορεί να δώσει σαν έξοδο από ένα μέχρι οχτώ bit.

- Γεννήτρια Παλμού



Γεννήτρια παλμού με σταθερό ή μεταβλητό εύρος παλμού. Όταν εμφανιστεί κατάλληλη μετάβαση της κατάστασης της εισόδου του. Μια έγκυρη μετάβαση ορίζεται στις παραμέτρους της γεννήτριας και μπορεί να είναι κατά την μετάβαση από το 0 στο 1 είτε το αντίθετο. Στην γεννήτρια μεταβλητού εύρους παλμού το τρίτο σήμα εισόδου ορίζει το εύρος του παλμού σε δευτερόλεπτα.

- SR Φλιπ Φλοπ



Φλιπ Φλοπ SR χωρίς ρολόι. Το φλιπ φλοπ λειτουργεί σύμφωνα με τους ακόλουθους πίνακες αληθείας. Η αρχική κατάσταση του φλιπ φλοπ ($Q=0$ ή $Q=1$) μπορεί να οριστεί από την παράμετρο ISTA.

Inputs Active High:

$Q_{init}=0$

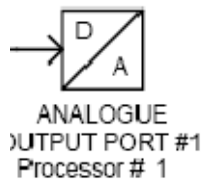
S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	1	0

Inputs Active Low

$Q_{init}=0$

S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0	1

- Μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό

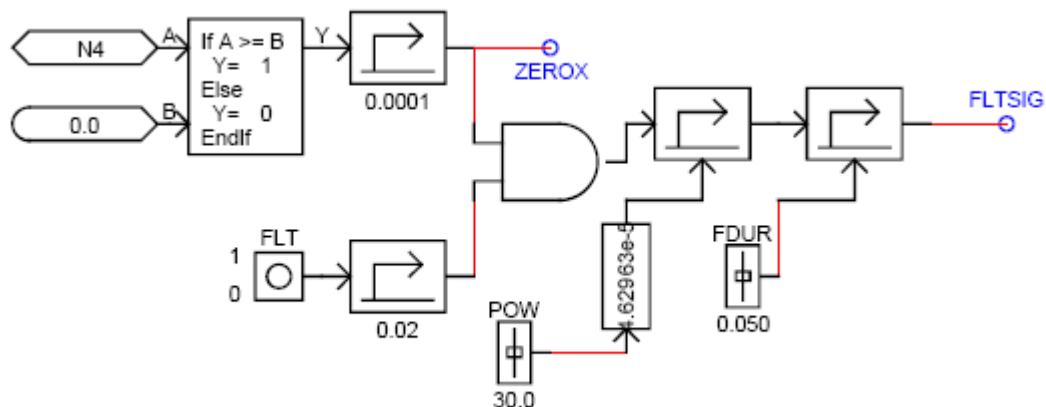


Ο μετατροπέας αυτός μετατρέπει το ψηφιακό σήμα που λαμβάνει στην είσοδο του σε αναλογικό και ακολούθως το δίνει σε μια από τις αναλογικές εξόδους του εξομοιωτή. Από τις παραμέτρους του μπορεί να οριστεί το κανάλι εξόδου και ο επεξεργαστής εξόδου.

4.2.2.1 Κύκλωμα ελέγχου βραχυκυκλωμάτων

Το κύκλωμα ελέγχου βραχυκυκλωμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Το κύκλωμα αυτό σε πρώτο στάδιο, αφού λάβει παλμό ενεργοποίησης από το μπουτόν ελέγχου FLT, εντοπίζει την επόμενη διέλευση της τάσης της φάσης A από το μηδέν και δίνει ένα παλμό (ZEROX). Αυτός ο παλμός με τη σειρά του ενεργοποιεί έναν παλμό με μεταβλητή διάρκεια POW ο οποίος λειτουργεί σαν χρονική καθυστέρηση. Η χρονική καθυστέρηση αυτή έχει

μέγιστη διάρκεια μια περίοδο. Με τη λήξη της χρονικής περιόδου καθυστέρησης ενεργοποιείται η τελευταία γεννήτρια παλμού, η οποία καθορίζει τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος με τη βοήθεια της μεταβλητής FDUR. Συνοψίζοντας τη λειτουργία του όλου κυκλώματος είναι φανερό ότι συγχρονίζει τα σφάλματα με την τάση του δικτύου. Έτσι, μπορούν να εκτελούνται σφάλματα όχι μόνο με την ίδια διάρκεια κάθε φορά αλλά και με την ίδια φάση.



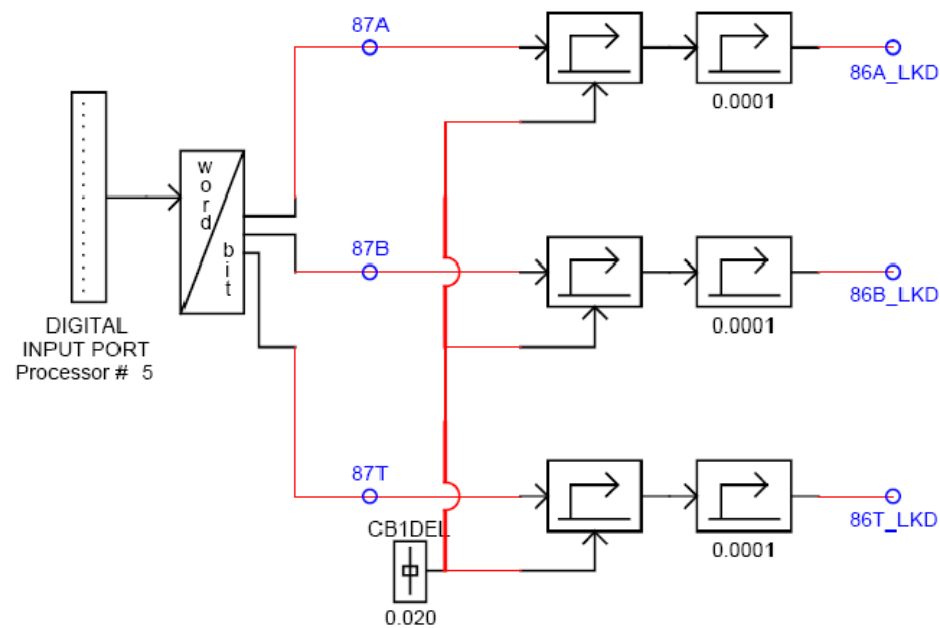
Σχήμα 4.4 Κύκλωμα ελέγχου βραχυκυκλωμάτων

4.2.2.2 Κύκλωμα ελέγχου διακοπών δικτύου

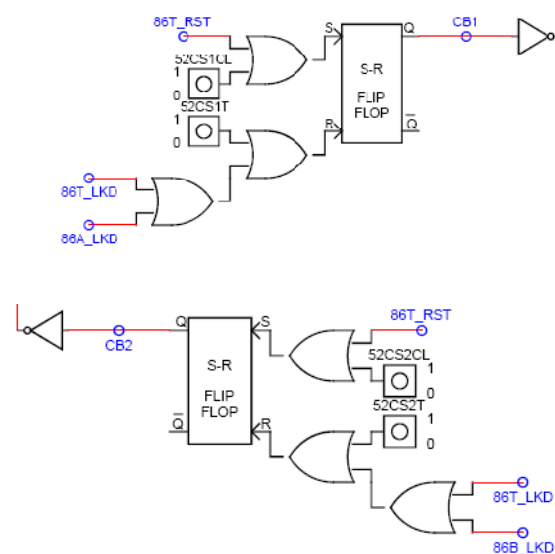
Το κύκλωμα του σχήματος 4.5 έχει ως στόχο τη διοχέτευση των αποφάσεων του ηλεκτρονόμου στους διακόπτες κυκλώματος. Η θυρίδα ψηφιακής εισόδου έχει μάσκα ανάγνωσης 0x0007, η οποία, αν αναλυθεί σε δυαδικό σύστημα, δίνει 0000 0000 0000 0111 σύμφωνα με την οποία διαβάζονται μόνο τα τρία λιγότερο σημαντικά bit από την κάρτα ψηφιακής εισόδου. Ο μετατροπέας λέξης σε bit που ακολουθεί μεταβιβάζει τα σήματα που διαβάστηκαν από την θυρίδα ψηφιακής εισόδου στα σήματα 87A, 87B και 87T αντίστοιχα με το πρώτο σήμα να αντιστοιχεί στο λιγότερο σημαντικό bit. Τα σήματα αυτά ενεργοποιούν τις γεννήτριες παλμού που δίνουν τους παλμούς ενεργοποίησης των διακοπών. Το στοιχείο CB1DEL επιτρέπει την εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης στη λειτουργία των διακοπών.

Τα κυκλώματα του σχήματος 4.6 είναι τα κυκλώματα μανδάλωσης των διακοπών. Τα βοηθητικά αυτά κυκλώματα χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση της κατάστασης των διακοπών. Με ένα παλμό στον ακροδέκτη R (reset) του φλιπ-φλοπ ανοίγει ο διακόπτης και

κλείνει με ένα παλμό στο S (set). Οι παλμοί 87A_LKD και 87B_LKD εξυπηρετούν την απομονωμένη λειτουργία των διακοπών πριν και μετά το μετασχηματιστή αντίστοιχα, ενώ ο παλμός 87T_LKD προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας και των δύο διακοπών. Επίσης στο κύκλωμα αυτό υπάρχουν τα βοηθητικά μπουτόν 52CS1CL, 52CS1T, 52CS2CL, 52CS2T για τη χειροκίνητη λειτουργία των διακοπών.



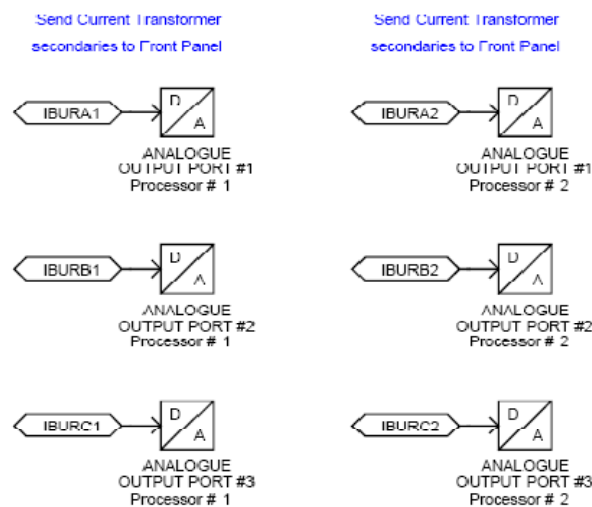
Σχήμα 4.5 Κύκλωμα ελέγχου διακοπών



Σχήμα 4.6 Κυκλώματα μανδάλωσης διακοπών

4.2.2.3 Κύκλωμα τροφοδοσίας αναλογικών εξόδων του εξομοιωτή

Στις εισόδους των μετατροπέων από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα εισάγονται οι ψηφιακές μετρήσεις των μετασχηματιστών εντάσεως. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας θεωρείται ότι οι μετασχηματιστές εντάσεως είναι σε συνδεσμολογία αστέρα και γι' αυτό δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία του ψηφιακού σήματος πριν τροφοδοτηθεί στις αναλογικές εξόδους. Με κατάλληλη κλίμακα οι μετατροπείς υποβιβάζουν το αναλογικό σήμα εξόδου στην επιθυμητή τάση για την λειτουργία του ηλεκτρονόμου.

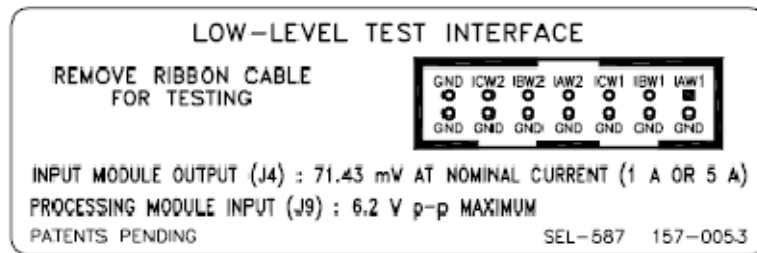


Σχήμα 4.7 Κύκλωμα τροφοδοσίας αναλογικών εξόδων του εξομοιωτή

4.3 Σύνδεση του Ηλεκτρονόμου στο RTDS

4.3.1 Σήματα εισόδου

Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 διαθέτει ένα στοιχείο διασύνδεσης χαμηλού επιπέδου μεταξύ της βαθμονομημένης αυτοτελούς μονάδας του και της ανεξάρτητα βαθμονομημένης μονάδας επεξεργασίας του. Ο ηλεκτρονόμος μπορεί να ελεγχθεί για την ορθή λειτουργία του με τους ακόλουθους δύο τρόπους: είτε συμβατικά, εφαρμόζοντας εναλλασσόμενα ρεύματα διάχυσης στις εισόδους του, είτε εφαρμόζοντας ασθενή εναλλασσόμενα σήματα τάσης στο στοιχείο διασύνδεσης χαμηλού επιπέδου. Επειδή το RTDS στην έξοδο του δίνει σήματα τάσης, ο δεύτερος τρόπος είναι και ο πιο κατάλληλος για τον έλεγχο του ηλεκτρονόμου στην παρούσα εργασία. Η πρόσβαση στο στοιχείο διασύνδεσης επιτυγχάνεται αφαιρώντας την πρόσοψη του ηλεκτρονόμου.

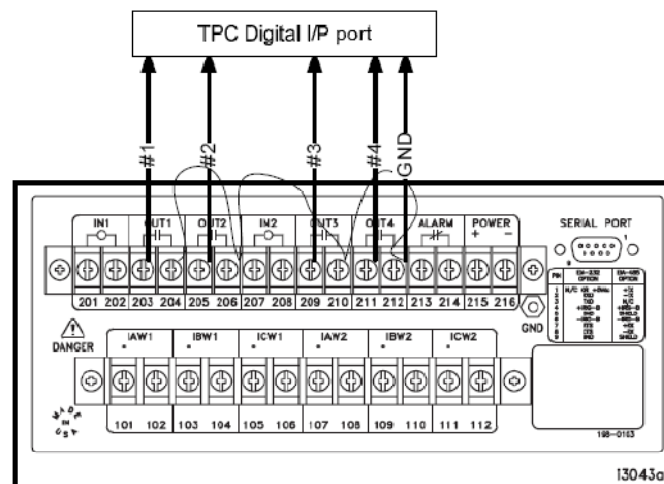


Σχήμα 4.8 Στοιχείο διασύνδεσης δοκιμών χαμηλού επιπέδου

Το σχήμα 4.8 δείχνει τις συνδέσεις του στοιχείου διασύνδεσης χαμηλού επιπέδου. Το διάγραμμα αυτό υπάρχει επίσης και στην πίσω όψη της πρόσοψης του ηλεκτρονόμου. Για να είναι προσβάσιμο το στοιχείο διασύνδεσης πρέπει να αφαιρεθεί το καλώδιο που το συνδέει με τη μονάδα εισόδου του ηλεκτρονόμου. Εδώ πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι εφαρμοζόμενες τάσεις δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 6.2 V από κορυφή σε κορυφή. Η σύνδεση του ηλεκτρονόμου με το RDTS γίνεται με ειδικό καλώδιο με θυρίδα 14 ακροδεκτών στη μια πλευρά και ακροδέκτες τύπου 'μπανάνα' στην άλλη.

4.3.2 Σήματα εξόδου

Οι επαφές εξόδου του ηλεκτρονόμου SEL-587 μπορούν να συνδεθούν με το RTDS μέσω ενός καλωδίου κορδέλας με θηλυκή επαφή 34^{ων} ακροδεκτών στη μια πλευρά και μαχαιρωτούς ακροδέκτες στην άλλη. Το καλώδιο αυτό συνδέεται στον ηλεκτρονόμο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 με τους αύξοντες αριθμούς να καθορίζουν τη σειρά με την οποία θα συνδεθούν οι ακροδέκτες αρχίζοντας από το λιγότερο σημαντικό bit.



Σχήμα 4.9 Συνδέσεις εξόδων του ηλεκτρονόμου για ανατροφοδότηση της λειτουργίας του στον εξομοιωτή

5. Ηλεκτρονόμος SEL-587

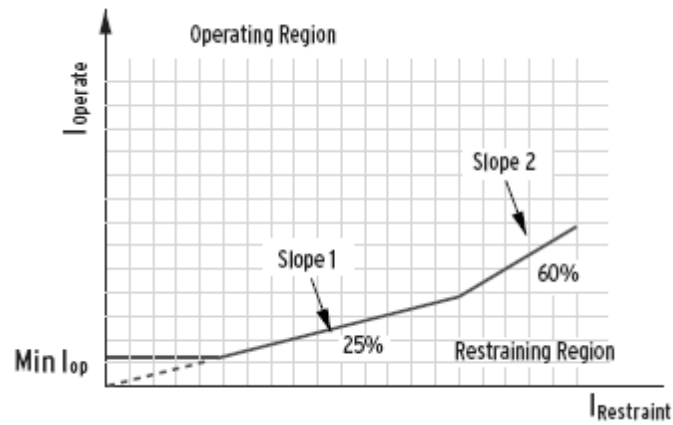
Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 είναι ένας ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας ρεύματος και ταυτόχρονα έχει ενσωματωμένες λειτουργίες ηλεκτρονόμου υπερεντάσεως. Ο ηλεκτρονόμος μετρά ρεύματα στην πλευρά υψηλής και χαμηλής τάσης, τις διαφορικές ποσότητες λειτουργίας και συγκράτησης, όπως και δεύτερες και πέμπτες αρμονικές των επιβαλλόμενων ρευμάτων. Η συσκευή διαθέτει 2 οπτικά απομονωμένες (optoisolated) εισόδους, τέσσερις προγραμματιζόμενες επαφές εξόδου και μια επαφή εξόδου ειδοποίησης.

Αυτός ο ηλεκτρονόμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων, πηνίων, γεννητριών, μεγάλων κινητήρων και γενικά συσκευών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με δύο τερματικά. Οι ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου επιτρέπουν τη χρήση μετασχηματιστών εντάσεως στην πλευρά υψηλής και την πλευρά χαμηλής τάσης σε σύνδεση είτε αστέρα είτε τριγώνου. Ο ηλεκτρονόμος μπορεί να υπολογίσει τις κατάλληλες διαφορικές ποσότητες για διάφορους τύπους μετασχηματιστών εντάσεως όπως και για διαφορετικούς συνδυασμούς συνδέσεων τους.

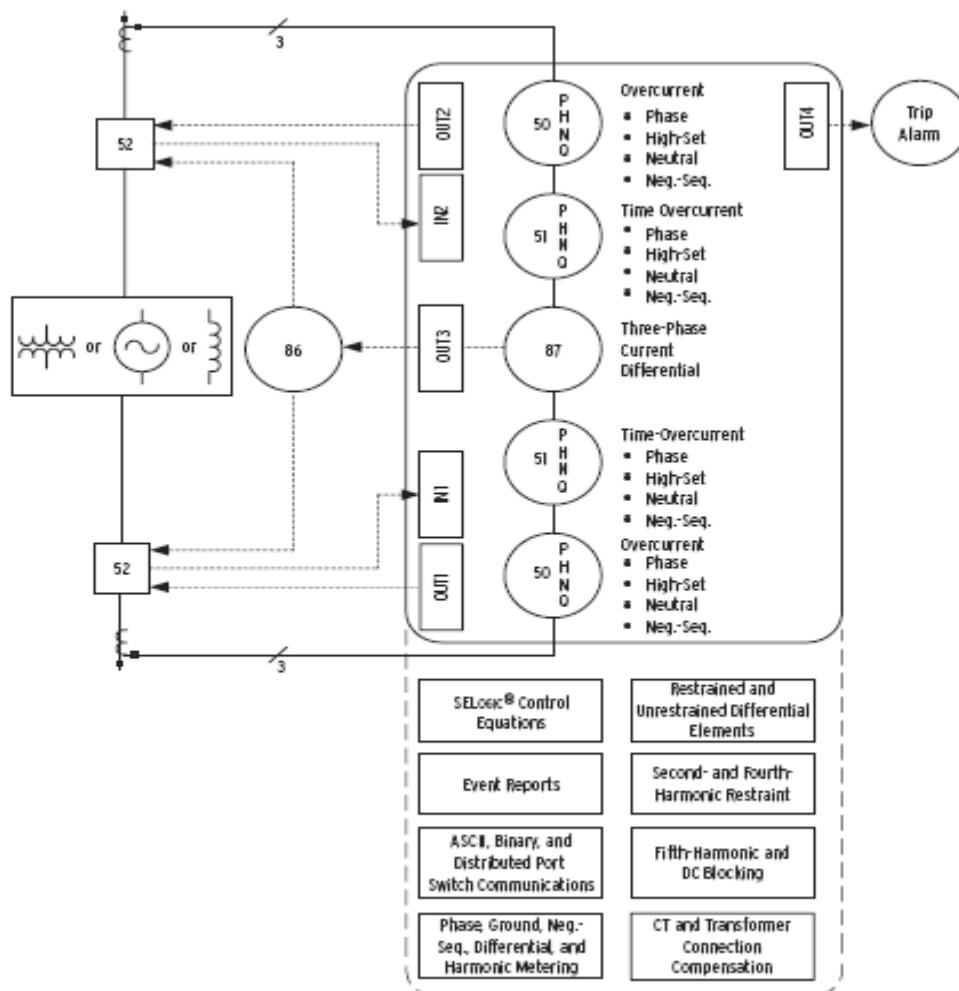
5.1 Χαρακτηριστικά ηλεκτρονόμου

5.1.1 Διαφορική Προστασία

Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 έχει τρία διαφορικά στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούν τις ποσότητες λειτουργίας και συγκράτησης που υπολογίζονται από τα ρεύματα εισόδων των δύο τυλιγμάτων. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των στοιχείων διαφορικής προστασίας με χαρακτηριστικές διαφορικής ποσοστιαίας συγκράτησης μονής ή διπλής κλίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1. Η χρήση της πέμπτης αρμονικής αποτρέπει τις λανθασμένες ενεργοποιήσεις του ηλεκτρονόμου σε καταστάσεις υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή. Επίσης, στοιχεία δεύτερης αρμονικής, υποβοηθούμενα από το στοιχείο μέτρησης της dc μετατόπισης διασφαλίζουν την ορθή λειτουργία του ηλεκτρονόμου κατά την εμφάνιση ρευμάτων ζεύξης.



Σχήμα 5.1 Χαρακτηριστική ποσοστιαίας διαφορικής συγκράτησης



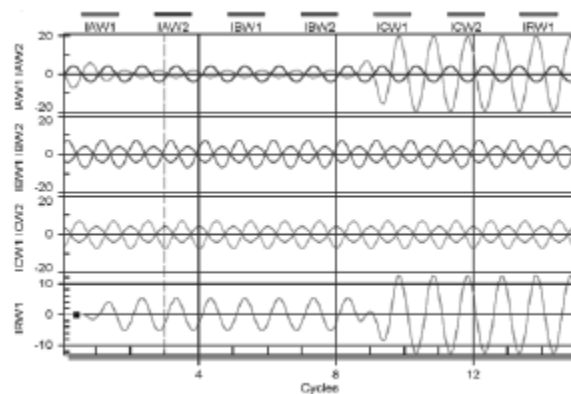
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα λειτουργιών του SEL-587

5.1.2 Προστασία υπερεντάσεως

Ο συγκεκριμένος ηλεκτρονόμος εκτός από στοιχεία διαφορικής προστασίας διαθέτει και δύο ομάδες προστασίας υπερεντάσεως. Κάθε ομάδα τριφασικών τερματικών εισόδου ρεύματος έχει στοιχεία υπερεντάσεως φασικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Το κάθε στοιχείο υπερεντάσεως μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί ως απόλυτου χρόνου, ως στιγμιαίου και ως αντίστροφου χρόνου.

5.1.3 Αναφορές γεγονότων

Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 αποθηκεύει μια αναφορά διάρκειας 15 κύκλων κάθε φορά που ενεργοποιείται κάποιο στοιχείο του καθώς και σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση που καθόρισε εκ των προτέρων ο χειριστής. Κάθε αναφορά περιέχει λεπτομερώς το ρεύμα, την κατάσταση των στοιχείων του ηλεκτρονόμου και τα δεδομένα εισόδων και εξόδων που σχετίζονται με το γεγονός. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης των σφαλμάτων.



Σχήμα 5.3 Παράδειγμα αναφοράς ενός γεγονότος

5.1.4 Λογική ηλεκτρονόμου

Οι εξισώσεις ελέγχου της SELogic επιτρέπουν τον καθορισμό των συνθηκών που αν ισχύσουν ο ηλεκτρονόμος θα δράσει είτε ενεργοποιώντας κάποια επαφή εξόδου, είτε εκδίδοντας μια αναφορά γεγονότος. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο μελετητή να καθορίσει με ακρίβεια την επιθυμητή λειτουργία του ηλεκτρονόμου.

5.2 Ρυθμίσεις ηλεκτρονόμου

Σκοπός του ηλεκτρονόμου σε αυτή την εργασία είναι η προστασία ενός μετασχηματιστή αστέρα τριγώνου των 500 MVA. Η προστασία του μετασχηματιστή θα γίνει με συνδυασμένη λειτουργία των στοιχείων διαφορικής προστασίας, για την εκκαθάριση των σφαλμάτων που είναι εντός της ζώνης προστασίας και της μιας ομάδας των στοιχείων υπερεντάσεως, για την εφεδρική προστασία από σφάλματα. Η ρύθμιση του ηλεκτρονόμου γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος AcSELerator Quickset που παρέχεται από την εταιρία κατασκευής του ηλεκτρονόμου.

5.2.1 Γενικά δεδομένα

Αναγνωριστικό ηλεκτρονόμου(RID) και τερματικού(TID)

Ο ηλεκτρονόμος διαθέτει δύο ετικέτες αναγνώρισης: το αναγνωριστικό ηλεκτρονόμου (RID) και το αναγνωριστικό τερματικού (TID). Το αναγνωριστικό ηλεκτρονόμου τυπικά χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του ηλεκτρονόμου ή του σχεδίου προστασίας. Τυπικά τα αναγνωριστικά τερματικών περιλαμβάνουν συντομογραφία του ονόματος του υποσταθμού και της γραμμής στην οποία είναι συνδεδεμένος. Ο ηλεκτρονόμος σημειώνει σε κάθε αναφορά γεγονόςτος που εκδίδει το αναγνωριστικό ηλεκτρονόμου και το αναγνωριστικό τερματικού. Αυτό επιτρέπει τον εντοπισμό του συγκεκριμένου ηλεκτρονόμου και υποσταθμού από τους οποίους εκδόθηκαν οι αναφορές.

Αμπερόμετρο ζήτησης (DATC, PDEM, QDEM, NDEM)

Ο ηλεκτρονόμος διαθέτει αμπερόμετρα ζήτησης για τα ρεύματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας της πρώτης φάσης. Ο ηλεκτρονόμος αποθηκεύει τη μέγιστη τιμή ζήτησης για κάθε μετρούμενη ποσότητα. Τα αμπερόμετρα ζήτησης συμπεριφέρονται σχεδόν όπως τα βαθυπερατά φίλτρα αντιδρώντας στις βαθμιαίες αλλαγές του πλάτους του ρεύματος. Ο ηλεκτρονόμος χρησιμοποιεί τη χρονική σταθερά, DATC, και για τα τρία αμπερόμετρα. Οι ρυθμίσεις PDEM, QDEM και NDEM είναι τα κατώφλια σε αμπέρ στο δευτερεύον για τις συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.

Συχνότητα συστήματος (NFREQ) και ακολουθία φάσεων (PHROT)

Οι ρυθμίσεις NFREQ και PHROT επιτρέπουν τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου με βάση τα χαρακτηριστικά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο θα εγκατασταθεί. Το NFREQ ρυθμίζεται ώστε να είναι ίσο με την ονομαστική συχνότητα του δικτύου, 50Hz ή 60Hz. Το PHROT ρυθμίζεται σύμφωνα με την ακολουθία των φάσεων του δικτύου, ABC ή ACB.

Μέγιστη ικανότητα φόρτισης μετασχηματιστή ισχύος (MVA)

Όταν ρυθμίζεται η μέγιστη ικανότητα του μετασχηματιστή ισχύος πρέπει να χρησιμοποιείται η μέγιστη αναμενόμενη φόρτιση του, όπως για παράδειγμα, η φόρτιση εξαναγκασμένης ψύξης λαδιού και αέρα ή μια ακόμα μεγαλύτερη φόρτιση έκτακτης ανάγκης, αν υπάρχει.

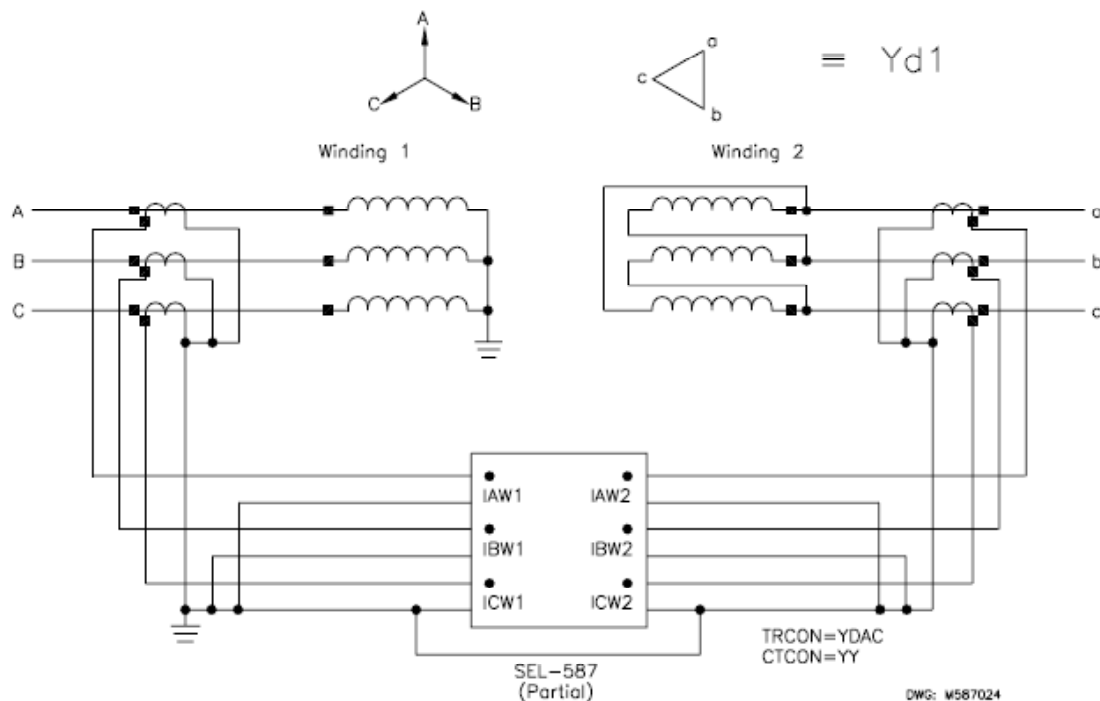
Πολικές τάσεις τυλιγμάτων (VWDG1, VDWG2)

Είναι οι τάσεις μεταξύ των φάσεων στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή. Αν ο μετασχηματιστής έχει σύστημα λήψεων αλλαγής τάσης, τότε πρέπει να υποθεθεί ότι είναι στην αρχική του θέση. Η μονάδα μέτρησης είναι τα κιλοβόλτ.

Συνδεσμολογία μετασχηματιστή (TRCON) και ME (CTCON)

Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 μπορεί να αντισταθμίσει αυτόματα 14 συνδυασμούς συνδέσεων τυλιγμάτων μετασχηματιστών και συνδέσεων τυλιγμάτων μετασχηματιστών εντάσεως. Οι εσωτερικοί παράγοντες αντιστάθμισης (CON1 και CON2) χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν οποιεσδήποτε στροφές φάσης που οφείλονται στη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων και για να αφαιρέσουν το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας όταν είναι απαραίτητο. Οι κατάλληλες ρυθμίσεις μπορούν να βρεθούν από το παράρτημα στο εγχειρίδιο του ηλεκτρονόμου το οποίο περιέχει όλες τις υποστηριζόμενες συνδέσεις. Επίσης, ο κατασκευαστής του ηλεκτρονόμου προτείνει τη χρήση γειωμένων μετασχηματιστών εντάσεως σε συνδεσμολογία αστέρα και στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή σε καινούριες εγκαταστάσεις επειδή έτσι είναι ευκολότερη η εφαρμογή των στοιχείων υπερεντάσεως του ηλεκτρονόμου. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία φαίνεται στο σχήμα 6.3. Ο μετασχηματιστής έχει συνδεσμολογία αστέρα τριγώνου

με το ρεύμα τριγώνου να προηγείται κατά 30° . Οι μετασχηματιστές εντάσεως είναι σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα.



Σχήμα 5.4 Συνδεσμολογία μετασχηματιστή και μετασχηματιστών εντάσεως

Λόγος μετασχηματισμού των μετασχηματιστών εντάσεως

Αυτή η ρύθμιση είναι ο αριθμητικός λόγος μετασχηματισμού των μετασχηματιστών εντάσεως για το συγκεκριμένο τύλιγμα, ο οποίος υπολογίζεται από τη διαίρεση του ρεύματος πρωτεύοντος με το απαιτούμενο από τον ηλεκτρονόμο ρεύμα στο δευτερεύον.

Ρεύματα TAPs (TAP1, TAP2)

Υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν οι τιμές των TAP1 και TAP2 με δικούς μας υπολογισμούς, σε ειδικές περιπτώσεις όπου θα κριθεί απαραίτητο, θέτοντας το MVA=OFF. Στις περισσότερες εφαρμογές όμως προτείνεται ο αυτόματος υπολογισμός των τιμών των TAPs από τον ηλεκτρονόμο. Περισσότερες πληροφορίες για το πώς υπολογίζονται αυτές οι τιμές μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο του ηλεκτρονόμου.

Γενικά δεδομένα

Περιγραφή	Εύρος τιμών		
Αναγνωριστικό Ηλεκτρονόμου	12 Χαρακτήρες	RID =	<i>XFMR 1</i>
Αναγνωριστικό Τερματικού	12 Χαρακτήρες	TID =	<i>STATION A</i>
Περιγραφή	Εύρος τιμών		
Συχνότητα Συστήματος	50Hz, 60Hz	NFREQ=	<i>60Hz</i>
Ακολουθία των Φάσεων	ABC, ACB	PHROT=	<i>ABC</i>
Μέγιστη Ικανότητα Μετασχηματιστή	OFF, 0.2–5000 MVA in .1 steps	MVA =	<i>500</i>
Πολική Τάση του Τυλίγματος 1	1–1000 kV	VWDG1 =	<i>230</i>
Πολική Τάση του Τυλίγματος 2	1–1000 kV	VWDG2 =	<i>230</i>
Συνδεσμολογία Μετασχηματιστή	YY, YDAC, YDAB, DACDAC, DABDAB, DABY, DACY, OTHER	TRCON =	<i>YDAC</i>
Συνδεσμολογία Μετασχηματιστών Εντάσεως	DACDAC, DABDAB, DACY, DABY, YY, YDAB, YDAC	CTCON =	<i>YY</i>
Λόγος Μετασχηματισμού ME Τυλίγματος 1	1–50000	CTR1 =	<i>400</i>
Λόγος Μετασχηματισμού ME Τυλίγματος 1	1–50000	CTR2 =	<i>400</i>
Χρονική Σταθερά Αμπερομέτρου Ζήτησης	OFF, 5–255 min	DATC =	<i>OFF</i>
TAP Ρεύματος Τυλίγματος 1		TAP1 =	<i>3,14</i>
TAP Ρεύματος Τυλίγματος 2		TAP2 =	<i>3,14</i>

Πίνακας 5.1 Γενικές ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου

5.2.2 Ρυθμίσεις διαφορικού στοιχείου προστασίας

Ρεύμα λειτουργίας (O87P)

Το ρεύμα λειτουργίας πρέπει να ρυθμίζεται αρκετά χαμηλά ώστε να αυξάνεται η ευαισθησία της προστασίας, αλλά ταυτόχρονα αρκετά ψηλά ώστε να αποφεύγεται η προκληθείσα από τα σφάλματα μετασχηματισμού των μετασχηματιστών εντάσεως και από το ρεύμα διέγερσης του μετασχηματιστή ισχύος λανθασμένη λειτουργία του διαφορικού στοιχείου. Προτείνεται ρύθμιση του O87P στο 0,3.

Ποσοστιαίες κλίσεις συγκράτησης (SLP1, SLP2 και IRS1)

Οι ρυθμίσεις των ποσοστιαίων κλίσεων συγκράτησης χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των εξωτερικών από τα εσωτερικά σφάλματα. Τα SLP1 και SLP2 αποσκοπούν στην

αντιμετώπιση των διαφορικών ρευμάτων που προκύπτουν από το σύστημα αλλαγής λήψεων του Μ/Σ, το ρεύμα μαγνήτισης και τα σφάλματα του ηλεκτρονόμου.

Ο μετασχηματιστής αυτής της εργασίας δε διαθέτει σύστημα αλλαγής λήψεων και γι' αυτό δε χρειάζεται να ληφθεί στο SLP1 επιπλέον πρόνοια συγκράτησης. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το σφάλμα υποβιβασμού των μετασχηματιστών εντάσεως είναι μόνο 10% δίνει τελικά συνολικό σφάλμα 10%

Η χειρότερη περίπτωση λανθασμένου διαφορικού ρεύματος προκύπτει όταν όλα τα ρεύματα εισόδου μετρούνται με το μέγιστο θετικό λάθος των μετασχηματιστών εντάσεως και όλα τα ρεύματα εξόδου με το μέγιστο αρνητικό λάθος των ΜΕ. Άρα, το μέγιστο λανθασμένο διαφορικό ρεύμα που αναμένεται είναι:

$$e - (-e) = 2e = 0.2 = 20\%$$

Επιπλέον, στο λάθος που υπολογίζεται πιο πάνω πρέπει να προστεθούν τα λάθη που οφείλονται στο ρεύμα διέγερσης του μετασχηματιστή ($\approx 3\%$) και το λάθος μέτρησης του ηλεκτρονόμου ($\leq 5\%$). Το μέγιστο συνολικό λάθος κυμαίνεται γύρω στο 28%. Έτσι, αν θα χρησιμοποιηθεί χαρακτηριστική απλής κλίσης, το SLP1 θα πρέπει να ρυθμιστεί περίπου στο 30%.

Σε αυτή την εφαρμογή, όμως, θα χρησιμοποιηθεί χαρακτηριστική δύο κλίσεων η οποία βελτιώνει την ευαισθησία στην περιοχή χαμηλών ρευμάτων, όπου τα λάθη των μετασχηματιστών εντάσεως είναι μικρότερα και αυξάνει την ασφάλεια στην περιοχή υψηλών ρευμάτων όπου τα λάθη των μετασχηματιστών εντάσεως είναι μεγαλύτερα. Για να οριστεί η χαρακτηριστική διπλής κλίσης χρειάζονται οι δύο κλίσεις, SLP1, SLP2, καθώς και το σημείο τομής τους, IRS1. Αν υποθέσουμε ότι το λάθος των μετασχηματιστών εντάσεως σε χαμηλά ρεύματα είναι μόνο 1%, το SLP1 μπορεί να ρυθμιστεί περίπου στο 15%. Μια καλή επιλογή για το IRS1 είναι περίπου 3,0 ανά μονάδα του TAP. Μια ρύθμιση του SLP2 μεταξύ 50% και 60% είναι ικανοποιητική για την αποφυγή του κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως σε μεγάλα ρεύματα.

Στιγμιαίο ρεύμα χωρίς συγκράτηση (U87P)

Η ρύθμιση του στιγμιαίου ρεύματος ενεργοποίησης χωρίς συγκράτηση συστήνεται στο 8 ανά μονάδα. Η ρύθμιση μπορεί να αλλαχθεί αν είναι απαραίτητο. Αυτό το διαφορικό στοιχείο αντιδρά μόνο στη θεμελιώδη συχνότητα.

Ρύθμιση παρεμπόδισης δεύτερης αρμονικής (PCT2)

Η δεύτερη αρμονική συνιστώσα εμφανίζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό στα ρεύματα ζεύξης, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν λανθασμένη λειτουργία του ηλεκτρονόμου, παρά στα ρεύματα βραχυκυκλώσεως. Έτσι η δεύτερη αρμονική συνιστώσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση αυτού του φαινομένου και την αποφυγή τυχόν ανεπιθύμητης ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου. Η ρύθμιση του PCT2 είναι το ποσοστό της δεύτερης αρμονικής ως προς τη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος, το οποίο αν υπερβεί η δεύτερη αρμονική, τότε αποτρέπεται η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου. Μια ρύθμιση της τάξης του 15% παρέχει συνήθως ένα ικανοποιητικό περιθώριο ασφαλείας.

Παρεμπόδιση πέμπτης αρμονικής (PCT5, TH5, TH5D)

Η παρεμπόδιση πέμπτης αρμονικής χρησιμοποιείται για την αποτροπή της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου σε καταστάσεις υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή. Με ανάλυση Fourier των ρευμάτων που εμφανίζονται κατά την υπερδιέγερση βρέθηκε ότι μια ρύθμιση 35% του PCT5 είναι ικανοποιητική. Υπάρχει η δυνατότητα ενεργοποίησης μιας σήμανσης που υποδεικνύει ότι το ρεύμα διέγερσης του μετασχηματιστή ξεπέρασε το ονομαστικό. Μια ρύθμιση χρονικής καθυστέρησης, TH5D, αποτρέπει τον ηλεκτρονόμο από την ενεργοποίηση της ειδοποίησης για μεταβατικές καταστάσεις των ρευμάτων πέμπτης αρμονικής. Η τιμή του TH5 προκύπτει από το γινόμενο 0.1 επί I_N επί το ελάχιστο από τα TAP1 και TAP2.

Στοιχείο ανεξάρτητης παρεμπόδισης αρμονικών (IHBL)

Όταν ένας τριφασικός μετασχηματιστής ηλεκτρίζεται, εμφανίζονται ρεύματα ζεύξης σε τουλάχιστον δύο φάσεις. Στους παραδοσιακούς μονοφασικούς ηλεκτρονόμους, κάθε ηλεκτρονόμος επιτηρεί το ρεύμα που διαρρέει τη φάση του. Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 μπορεί να εκτελέσει την λειτουργία παρεμπόδισης αρμονικών με δύο τρόπους:

- Η ανεξάρτητη παρεμπόδιση αρμονικών (IHBL=Y) αναστέλλει τη λειτουργία του στοιχείου διαφορικής προστασίας μόνο στη φάση στην οποία το αρμονικό περιεχόμενο ξεπέρασε την τιμή κατωφλίου. Τα υπόλοιπα στοιχεία λειτουργούν κανονικά.

- Η κοινή παρεμπόδιση αρμονικών (IHBL=N) αναστέλλει τη λειτουργία όλων των στοιχείων διαφορικής προστασίας όταν το αρμονικό περιεχόμενο της μιας φάσης ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου.

Διαφορικά Στοιχεία				
Περιγραφή	Εύρος Τιμών			
Ρεύμα Λειτουργίας	0.1–1.0 in per unit of tap	O87P	=	0,3
Ποσοστιαία κλίση συγκράτησης 1	5–100%	SLP1	=	15
Ποσοστιαία κλίση συγκράτησης 2	OFF, 25–200%	SLP2	=	50
Όριο Ρεύματος Συγκράτησης Κλίσης 1	1–16 in per unit of tap	IRS1	=	3,0
Στιγμιαίο Ρεύμα Χωρίς Συγκράτηση	1–16 in per unit of tap	U87P	=	8,0
Ποσοστό Παρεμπόδισης Δεύτερης Αρμονικής	OFF, 5–100%	PCT2	=	15
Ποσοστό Παρεμπόδισης Πέμπτης Αρμονικής	OFF, 5–100%	PCT5	=	35
Κατώφλι Ειδοποίησης Πέμπτης Αρμονικής	0.1–3.2 in per unit of tap	TH5	=	1,7
Χρονική Καθυστέρηση Ειδοποίησης Πέμπτης Αρμονικής	0.00–8000.00 cycles	TH5D	=	30,000
Ανεξάρτητη Παρεμπόδιση Αρμονικών	Y, N	IHBL	=	N

Πίνακας 5.2 Ρυθμίσεις διαφορικών στοιχείων του ηλεκτρονόμου

5.2.3 Ρυθμίσεις Προστασίας Υπερεντάσεως

Ο ηλεκτρονόμος περιλαμβάνει δύο ομάδες στοιχείων προστασίας υπερεντάσεως για να συμπληρώνουν τη διαφορική προστασία. Η μια ομάδα λειτουργεί με ρεύματα από το τύλιγμα 1 και η άλλη από το τύλιγμα 2. Όλα τα στοιχεία λειτουργούν ανεξάρτητα. Αν οι μετασχηματιστές εντάσεως είναι συνδεδεμένοι κατά αστέρα, ο ηλεκτρονόμος μπορεί να παρέχει προστασία υπερεντάσεως θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Αν όμως οι μετασχηματιστές εντάσεως είναι σε συνδεσμολογία τριγώνου, τότε μπορεί να προσφέρει μόνο προστασία υπερεντάσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Τα στοιχεία προστασίας υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας απενεργοποιούνται αυτόματα επειδή οι μετασχηματιστές εντάσεως σε συνδεσμολογία τριγώνου δε μπορούν να παρέχουν ρεύμα μηδενικής ακολουθίας. Αυτός είναι και ο λόγος που ο κατασκευαστής του ηλεκτρονόμου προτείνει στις καινούριες εγκαταστάσεις, όταν είναι δυνατό, να χρησιμοποιούνται

μετασχηματιστές εντάσεως σε σύνδεση αστέρα, αφού έτσι μεγιστοποιείται η προστασία και απλοποιούνται οι ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου.

Ρυθμίσεις Ενεργοποίησης (50PnP, 50PnH, 51PnP, 50QnP, 51QnP, 50NnP, 50NnH, 51NnP)

Αυτή η ρύθμιση χρησιμοποιείται για να καθορίσει το κατώφλι ρεύματος στο οποίο ενεργοποιούνται τα στιγμιαία στοιχεία και η χρονική καθυστέρηση των υπόλοιπων στοιχείων υπερεντάσεως. Οι χαρακτηριστικές αντίστροφου χρόνου των στοιχείων υπερεντάσεως είναι βαθμονομημένες σε πολλαπλάσια αυτής της ρύθμισης ενεργοποίησης. Τα στοιχεία, αν ρυθμιστούν στο OFF, απενεργοποιούνται και αγνοούνται οι υπόλοιπες ρυθμίσεις τους.

Ρυθμίσεις Χρονικής Καθυστέρησης (50PnD, 50QnD, 50NnD)

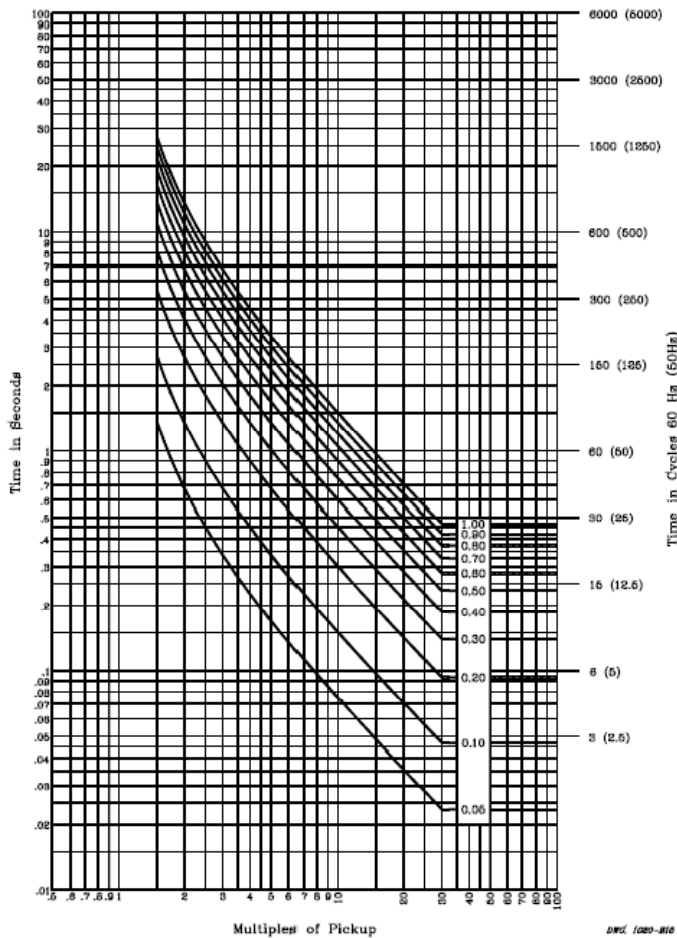
Αυτή η ρύθμιση καθορίζει τη χρονική καθυστέρηση στην ενεργοποίηση του στιγμιαίου στοιχείου για την διαβάθμιση με τις άλλες συσκευές προστασίας.

Ρυθμίσεις Χαρακτηριστικών (51PnC, 51QnC, 51NnC) και Time-Dial (51PnTD, 51QnTD, 51NnTD)

Είναι η ρύθμιση επιλογής της χαρακτηριστικής και του time-dial για το συντονισμό του ηλεκτρονόμου υπερεντάσεως αντίστροφου χρόνου με τους άλλους ηλεκτρονόμους προστασίας. Οι χαρακτηριστικές υπάρχουν στο εγχειρίδιο του ηλεκτρονόμου. Υπάρχουν τέσσερις διαθέσιμες κατηγορίες χαρακτηριστικών κατά IEC:

- C1: Αντίστροφου χρόνου
- C2: Πολύ αντίστροφου χρόνου
- C3: Εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου
- C4: Αντίστροφη μακρού χρόνου

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε η καμπύλη πολύ αντίστροφου χρόνου.



IEC Class B Curve: C2

(Very Inverse)

$$t_p = TD \cdot \left[\frac{13.5}{M - 1} \right]$$

$$t_r = TD \cdot \left[\frac{47.3}{1 - M^2} \right]$$

Σχήμα 5.5 Καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στην προστασία υπερεντάσεως

Προστασία Υπερεντάσεως Θετικής Ακολουθίας

Οι ρυθμίσεις ενεργοποίησης των στοιχείων υπερεντάσεως θετικής ακολουθίας πρέπει να τίθενται πάνω από το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα φορτίου για να αποφεύγεται η λειτουργία του ηλεκτρονόμου στο ονομαστικό ρεύμα φορτίου. Αφού υπάρχει η δυνατότητα χρήσης των στοιχείων υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας για τον εντοπισμό των βραχυκυκλωμάτων μεταξύ φάσεων, το στοιχείο υπερεντάσεως θετικής ακολουθίας μπορεί να ρυθμιστεί για να ανιχνεύει μόνο τα τριφασικά βραχυκυκλώματα. Αυτή η επιλογή ρυθμίσεων βελτιώνει το λόγο του ελάχιστου ρεύματος σφάλματος προς το μέγιστο ρεύμα φορτίου που χρειάζεται για την ασφαλή λειτουργία του ηλεκτρονόμου.

Για τον υπολογισμό του κατωφλίου (pick up) θετικής ακολουθίας χρειάζεται πρώτα να γνωρίζουμε το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή το οποίο υπολογίζεται πιο κάτω.

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{p-p}} = \frac{500MVA}{230kV\sqrt{3}} = 1,26kA$$

Θεωρούμε ότι ο μετασχηματιστής έχει ικανότητα υπερφόρτισης 130% και επίσης ένα συντελεστή ασφαλείας 1,5 για τις ανάγκες της προστασίας υπερεντάσεως. Έτσι το ρεύμα κατωφλίου στο πρωτεύον προκύπτει ίσο με:

$$I_{PU\piρωτ.} = 1,5 \cdot 1,3 \cdot 1,26 = 2,46kA$$

Ο ηλεκτρονόμος όμως βλέπει το ρεύμα δευτερεύοντος των μετασχηματιστών εντάσεως. Ανάγοντας το πιο πάνω ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως βρίσκουμε:

$$I_{PU} = \frac{I_{PU\piρωτ}}{CT_{ratio}} \frac{2,46kA}{400} = 6,15A$$

Το Time Dial (TD) επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει πρώτα στη διαφορική προστασία να δράσει πριν ενεργοποιηθεί η προστασία υπερεντάσεως.

Στοιχεία Υπερεντάσεως Θετικής Ακολουθίας 2^{ου} Τυλίγματος

Description	Range				
Κατώφλι Σταθερού Χρόνου	OFF, 0.5–80 A	5Amp	50P2P	=	OFF
Κατώφλι Αντιστρόφου Χρόνου	OFF, 0.5–16 A	5 Amp	51P2P	=	6,15
Χαρακτηριστική Αντιστρόφου χρόνου	U1–U4, C1–C4		51P2C	=	C2
Time Dial Αντιστρόφου Χρόνου	IEC 0.05–1 in .01 increments		51P2TD	=	0,25

Πίνακας 5.3 Ρυθμίσεις στοιχείων υπερεντάσεως θετικής ακολουθίας 2^{ου} τυλίγματος

Προστασία Υπερεντάσεως Αρνητικής Ακολουθίας

Τα στοιχεία υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας αντιδρούν στο ρεύμα αρνητικής ακολουθίας (I_2), όπου $3I_2 = I_a + Ib \cdot (1 \angle 240) + Ic \cdot (1 \angle 120)$. Τα στοιχεία υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας είναι τα πλέον κατάλληλα για τον εντοπισμό βραχυκυκλωμάτων μεταξύ φάσεων και δεν αντιδρούν σε καταστάσεις ισορροπημένης φόρτισης. Αν και τα στοιχεία αρνητικής ακολουθίας δεν επηρεάζονται από ισορροπημένα φορτία, εντοπίζουν το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας που υπάρχει σε ασύμμετρα φορτία. Για αυτό το λόγο το κατώφλι ενεργοποίησης τους πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα αρνητικής ακολουθίας που οφείλεται στην ασυμμετρία του φορτίου.

Στοιχεία Υπερεντάσεως Αρνητικής Ακολουθίας 2^{ου} Τυλίγματος

Description	Range				
Κατώφλι Σταθερού Χρόνου	OFF, 0.5–80 A	5 Amp	50Q2P	=	OFF
Κατώφλι Αντιστρόφου Χρόνου	OFF, 0.5–16 A	5 Amp	51Q2P	=	1,0
Χαρακτηριστική Αντιστρόφου χρόνου	C1–C4		51Q2C	=	C2
Time Dial Αντιστρόφου Χρόνου	IEC 0.05–1 in .01 increments		51Q2TD	=	0,25

Πίνακας 5.4 Ρυθμίσεις στοιχείων υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας 2^{ου} τυλίγματος

Προστασία Υπερεντάσεως Μηδενικής Ακολουθίας

Το στοιχείο μηδενικής ακολουθίας αντιδρά στο ρεύμα $3I_0$, όπου $3I_0 = I_a + I_b + I_c$. Τα στοιχεία υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας εντοπίζουν τα σφάλματα προς γη και δεν επηρεάζονται από τα συμμετρικά φορτία. Το στοιχείο μηδενικής ακολουθίας είναι όμως ευαίσθητο σε ασύμμετρα φορτία και πρέπει να ρυθμιστεί πάνω από το μέγιστο ρεύμα $3I_0$ που αναμένεται να προκληθεί από ασύμμετρη φόρτιση. Όταν όμως τοποθετηθεί στην πλευρά του τριγώνου ενός μετασχηματιστή αστέρα τριγώνου, τότε τα στοιχεία υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας δε μπορούν να εντοπίσουν οποιοδήποτε σφάλμα γης συμβαίνει στην πλευρά του αστέρα.

Στοιχεία Υπερεντάσεως Μηδενικής Ακολουθίας 2^{ου} Τυλίγματος

Description	Range				
Κατώφλι Σταθερού Χρόνου	OFF, 0.5–80 A	5 Amp	50N2P	=	OFF
Κατώφλι Αντιστρόφου Χρόνου	OFF, 0.5–16 A	5 Amp	51N2P	=	1,0
Χαρακτηριστική Αντιστρόφου χρόνου	C1–C4		51N2C	=	C2
Time Dial Αντιστρόφου Χρόνου	IEC 0.05–1 in .01 increments		51N2TD	=	0,25

Πίνακας 5.5 Ρυθμίσεις στοιχείων υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας 2^{ου} τυλίγματος

5.2.4 Λογική λειτουργίας

Ο ηλεκτρονόμος παρέχει τη δυνατότητα σύνταξης της λογικής σύμφωνα με την οποία θα δίνει σήματα στις εξόδους του για τον έλεγχο των διακοπών του κυκλώματος ισχύος.

Εξισώσεις ελέγχου SELogic

Οι εξισώσεις ελέγχου SELogic επιτρέπουν τον καθορισμό των συνθηκών για την παραγωγή μιας αναφοράς γεγονότος ή την ενεργοποίηση μιας επαφής εξόδου. Οι λογικές εξισώσεις συντίθενται με τη χρήση των Relay Word bits του ηλεκτρονόμου και τους πιο κάτω λογικούς τελεστές:

* για το λογικό «και»

+ για το λογικό «ή»

! για την λογική «όχι»

Για την απενεργοποίηση μιας εξίσωσης χρησιμοποιείται το σύμβολο NA στη θέση της μεταβλητής.

Ο ηλεκτρονόμος SEL-587 εκτελεί τις εξισώσεις λογικής SELogic οκτώ φορές κάθε περίοδο του συστήματος. Όταν η εξίσωση μιας επαφής εξόδου είναι αληθής, τότε ο ηλεκτρονόμος θέτει σε λειτουργία την επαφή.

Συναρτήσεις ενεργοποίησης (MTU1, MTU2, MTU3)

Οι MTU1, MTU2, MTU3, εξισώσεις ελέγχου χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των συνθηκών που θέτουν τα Relay Word bits TRP1, TRP2, TRP3, αντίστοιχα. Οποιοδήποτε από τα TRP1, TRP2, TRP3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποια έξοδο του ηλεκτρονόμου για σκοπούς ενεργοποίησης κάποιου διακόπτη ή κάποιας άλλης λειτουργίας. Για την ενεργοποίηση της εντολής «OPEN» πρέπει τα MTU1 και MTU2 να περιλαμβάνουν και τα Relay Word bits OC1 και OC2 αντίστοιχα.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα MTU2 και MTU3 καθώς η πρώτη ομάδα υπερεντάσεως δε χρησιμοποιήθηκε και έτσι δεν υπήρχε η ανάγκη για απομονωμένο έλεγχο του διακόπτη κυκλώματος που βρίσκεται στα αριστερά του μετασχηματιστή.

Τα στοιχεία υπερεντάσεως του δευτέρου τυλίγματος χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση του διακόπτη κυκλώματος που βρίσκεται δεξιά από το μετασχηματιστή. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα στοιχεία αντίστροφου χρόνου θετικής, 51P2T, αρνητικής, 51N2T και μηδενικής, 51N2T, ακολουθίας και η εντολή ανοίγματος του δεύτερου διακόπτη κυκλώματος OC2.

$$MTU2 = 51P2T + 51Q2T + 51N2T + OC2$$

Τα διαφορικά στοιχεία με συγκράτηση, 87R, και χωρίς συγκράτηση, 87U, χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση της λειτουργίας αποκλεισμού του μετασχηματιστή, κατά την οποία ανοίγουν και οι δύο διακόπτες κυκλώματος.

$$MTU3 = 87R + 87U$$

Συναρτήσεις Επαφών Εξόδου (OUT1, OUT2, OUT3, OUT4)

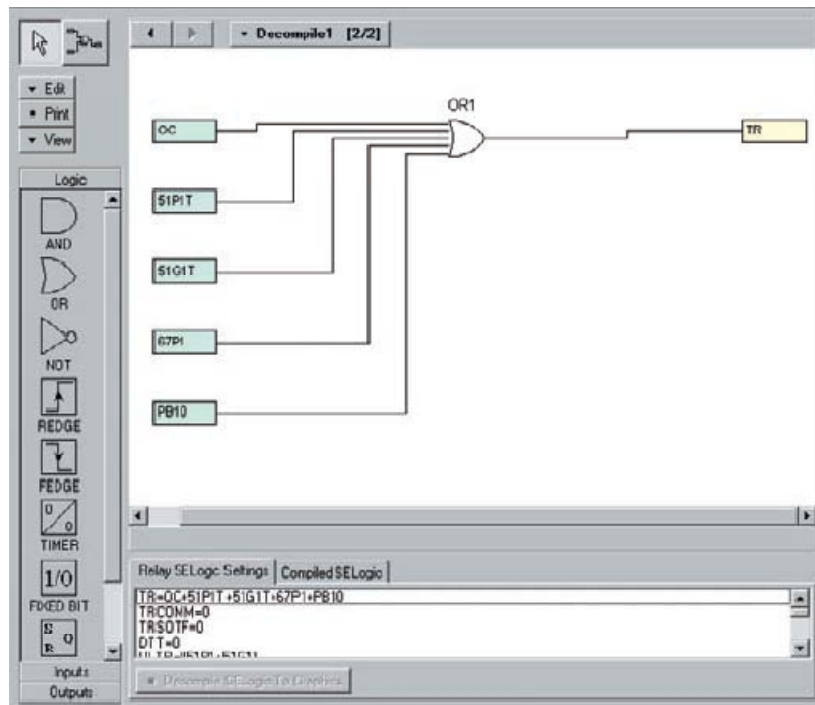
Οι εξισώσεις ελέγχου SELogic ελέγχουν τα Relay Word bits που έχουν το ίδιο όνομα. Αυτά τα Relay Word Bits με τη σειρά τους ελέγχουν τις επαφές εξόδου. Σε αυτή την εφαρμογή οι έξοδοι χρησιμοποιήθηκαν ως εξής:

OUT1 = NA	Δε χρησιμοποιείται
OUT2 = TRP2	Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του διακόπτη 2
OUT3 = TRP3	Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των διακοπών 1-2
OUT4 = NA	Δε χρησιμοποιείται

5.3 Περιβάλλον ρύθμισης και επίβλεψης λειτουργίας του ηλεκτρονόμου

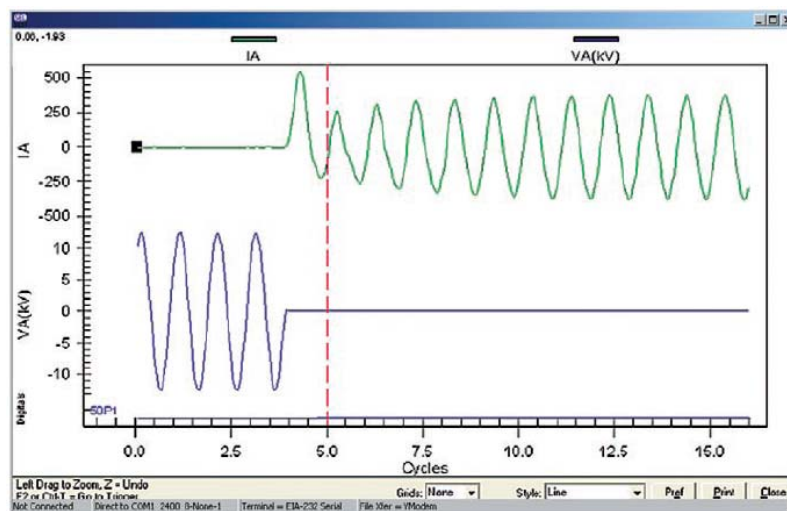
Για τη ρύθμιση και την επίβλεψη του ηλεκτρονόμου χρησιμοποιήθηκε το ACCELERATOR QuickSet SEL-5030, το λογισμικό που διαθέτει δωρεάν η εταιρία η οποία κατασκευάζει τον ηλεκτρονόμο. Είναι ένα λογισμικό εύχρηστο αλλά με πολλές δυνατότητες το οποίο μπορεί να βοηθήσει στη σωστή ρύθμιση του ηλεκτρονόμου. Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρει είναι:

- Δημιουργία, δοκιμή και διαχείριση των ρυθμίσεων του ηλεκτρονόμου σε περιβάλλον Windows.
- Γραφική σχεδίαση των εξισώσεων ελέγχου SELogic (σχήμα 5.6).
- Ενσωματωμένος εξομοιωτής για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των εξισώσεων ελέγχου.



Σχήμα 5.6 Περιβάλλον σχεδίασης εξισώσεων ελέγχου

- Ανάλυση των καταγραφέντων γεγονότων του ηλεκτρονόμου με τα ενσωματωμένα εργαλεία ανάλυσης κυματομορφών και αρμονικών (σχήμα 5.7).
- Επικοινωνία με τον ηλεκτρονόμο μέσω ενός εύχρηστου περιβάλλοντος HMI με ενσωματωμένους μετρητές και λειτουργίες ελέγχου.
- Βάση δεδομένων των ρυθμίσεων με δυνατότητες διαχείρισης, αντιγραφής και ανάγνωσης τους από τους ηλεκτρονόμους.



Σχήμα 5.7 Ανάλυση κυματομορφών των καταγραφέντων γεγονότων

6. Έλεγχος Ρυθμίσεων

Για τη διαπίστωση της ορθής λειτουργίας του και της καταλληλότητας των ρυθμίσεων του ο ηλεκτρονόμος υποβάλλεται σε διάφορους τύπους δοκιμών, κυρίως βραχυκυκλωμάτων. Από αυτές τις δοκιμές συλλέχθηκαν τα δεδομένα που παρουσιάζονται πιο κάτω. Συγκεκριμένα, έγιναν δοκιμές με βραχυκυκλώματα στην πλευρά του τριγώνου και του αστέρα του μετασχηματιστή εντός και εκτός της ζώνης προστασίας. Επίσης, έγινε μια δοκιμή ενεργοποίησης του μετασχηματιστή με το δευτερεύον ανοικτοκυκλωμένο για να δοκιμαστεί η λειτουργία συγκράτησης δεύτερης αρμονικής του διαφορικού στοιχείου καθώς δεν πρέπει να λειτουργήσει η διαφορική προστασία.

6.1 Δοκιμές με Βραχυκυκλώματα Εντός της Ζώνης Προστασίας

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζονται τα βραχυκυκλώματα που έγιναν εντός της ζώνης προστασίας για τη δοκιμή της ορθής λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Πραγματοποιήθηκαν μονοφασικά, διφασικά με και χωρίς γη και τριφασικά βραχυκυκλώματα και στα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή.

Για την εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας του ηλεκτρονόμου συγκρίθηκαν οι κυματομορφές που εμφανίστηκαν στο ειδικό λογισμικό του RTDS, οι οποίες αναπαριστούν τα σήματα τα οποία προσομοιώνονται στις αναλογικές εξόδους του, με τις κυματομορφές που λήφθηκαν από τις αναφορές γεγονότων του ηλεκτρονόμου. Με τη σύγκριση αυτή διαπιστώνεται αν οι μετασχηματιστές εντάσεως υποβιβάζουν ορθά τα πρωτεύοντα ρεύματα καθώς επίσης και κατά πόσον ο ηλεκτρονόμος πραγματικά βλέπει στα δύο τυλίγματα του τα υποβιβασμένα ρεύματα από τα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών εντάσεως.

Οι αναφορές γεγονότων του ηλεκτρονόμου εκτός από τα ρεύματα που καταγράφει ο ηλεκτρονόμος κατά την εξέλιξη ενός βραχυκυκλώματος παρουσιάζουν και τα ενεργοποιημένα Relay Word bits του ηλεκτρονόμου. Σε ένα ψηφιακό διάγραμμα στο τέλος της αναφοράς δίνονται πληροφορίες για τα bits που ενεργοποιήθηκαν καθώς και για το χρόνο ενεργοποίησής τους.

6.1.1 Μονοφασικά βραχυκυκλώματα

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιούνται μονοφασικά σφάλματα εκατέρωθεν του μετασχηματιστή για την ανάλυση της λειτουργίας της διαφορικής προστασίας.

- **Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του τριγώνου**

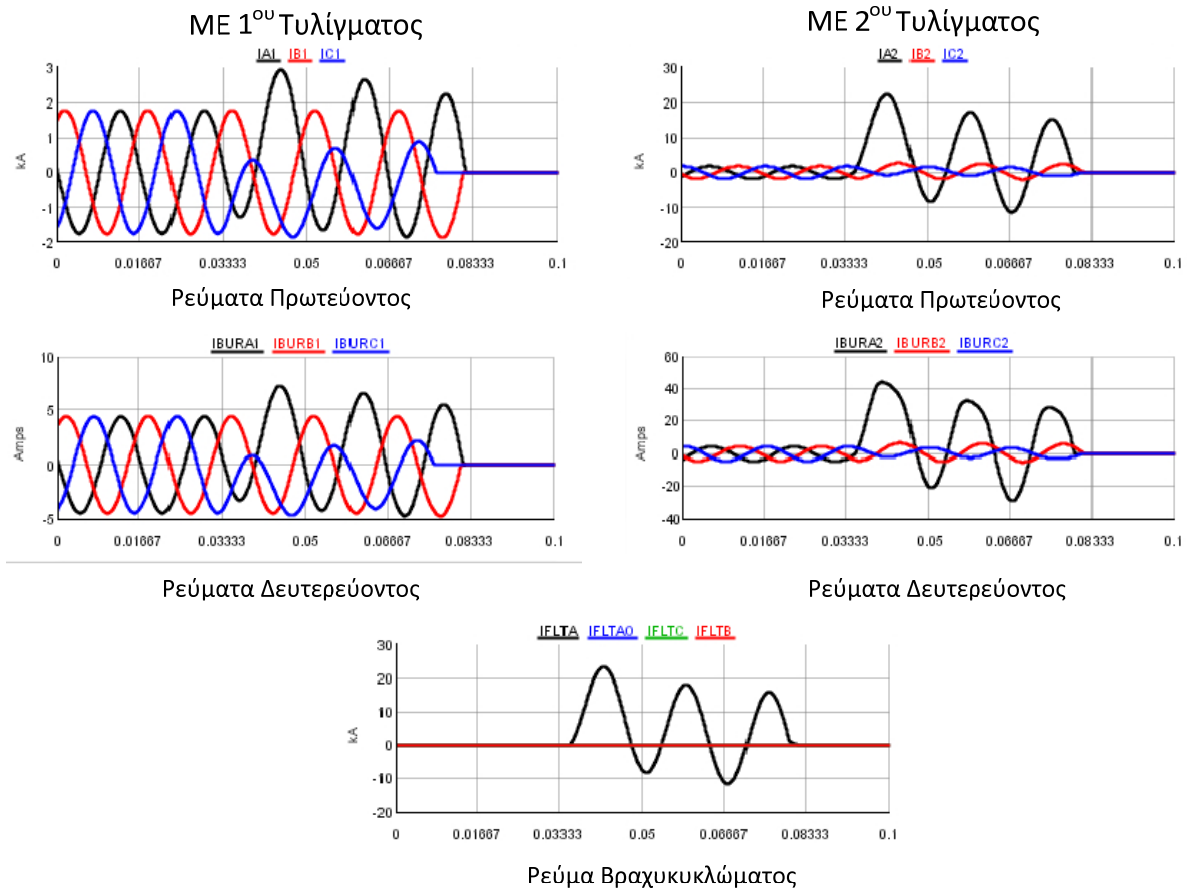
Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι κυματομορφές που λήφθηκαν από το RTDS και η αναφορά γεγονότος που δημιούργησε ο ηλεκτρονόμος.

Από το RDTS λήφθηκαν κυματομορφές των ρευμάτων στους μετασχηματιστές εντάσεως και του ρεύματος που εμφανίζεται στο σημείο βραχυκύκλωσης. Στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 6.1 οι δύο πρώτες ομάδες κυματομορφών αντιστοιχούν στα ρεύματα τα οποία επιτηρεί ο ηλεκτρονόμος στο πρώτο και δεύτερο τύλιγμα του αντίστοιχα. Η τρίτη ομάδα κυματομορφών, IAW2mag, IBW2mag, ICW2mag, απεικονίζει τα RMS πλάτη των ρευμάτων που διαρρέουν το δεύτερο τύλιγμα του ηλεκτρονόμου και η IRW2mag απεικονίζει την RMS τιμή του ρεύματος που ρέει προς τη γη.

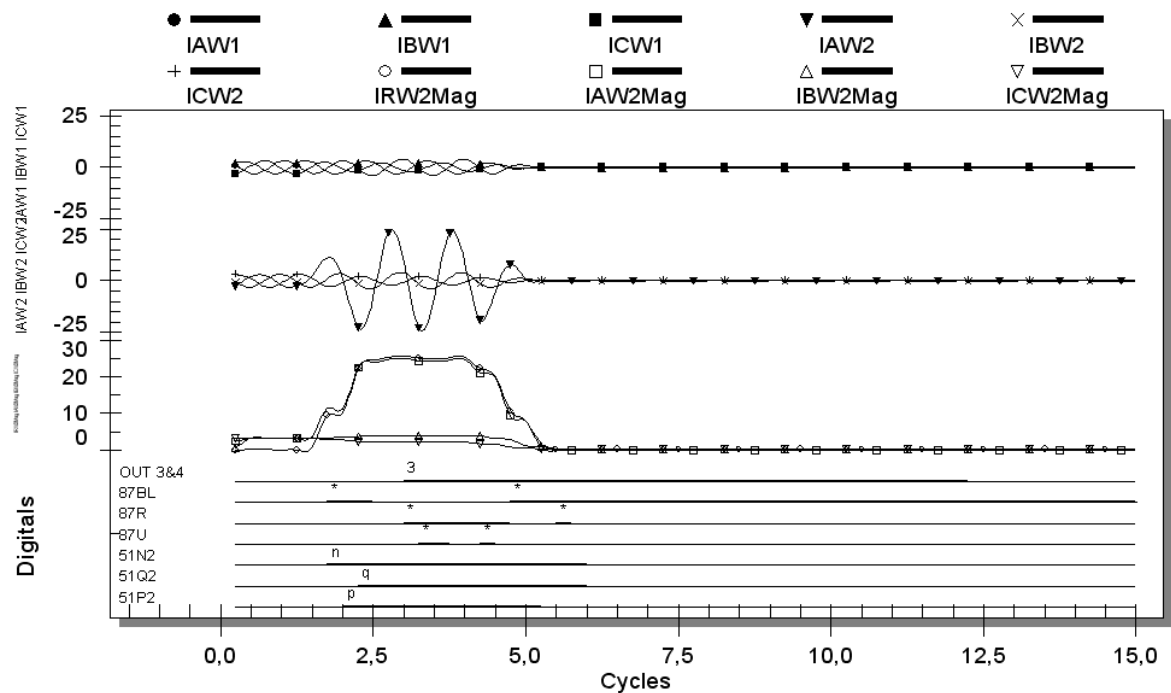
Τα ψηφιακά σήματα που εμφανίζονται στο κάτω μέρος διαγράμματος δείχνουν την κατάσταση των Relay World bits. Το OUT 3&4 είναι ένδειξη για την ενεργοποίηση της εξόδου 3 του ηλεκτρονόμου. Το 87BL δείχνει τη λειτουργία των στοιχείων παρεμπόδισης δεύτερης και πέμπτης αρμονικής. Το 87R είναι το διαφορικό στοιχείο με συγκράτηση και των τριών φάσεων. Το 87U είναι το Relay Word bit που είναι υπεύθυνο για τη δήλωση της ενεργοποίησης του στιγμιαίου διαφορικού στοιχείου χωρίς παρεμπόδιση και στις τρεις φάσεις. Τα 51N2, 51Q2 και 51P2 δείχνουν την ενεργοποίηση των στοιχείων υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου, μηδενικής, αρνητικής και θετικής ακολουθίας αντίστοιχα.

Από την αντιπαραβολή των κυματομορφών του RTDS και του ηλεκτρονόμου συμπεραίνεται ότι η λειτουργία των μετασχηματιστών εντάσεως και των αγωγών πιλότων είναι ικανοποιητική, αφού τα ρεύματα στα πρωτεύοντα των μετασχηματιστών εντάσεως αναπαριστώνται πιστά τόσο στα δευτερεύοντα τους, όσο και στις εισόδους του ηλεκτρονόμου. Επίσης, οι ενδείξεις των Relay Word bits επιβεβαιώνουν την ορθότητα των ρυθμίσεων του ηλεκτρονόμου αφού η εντολή για εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος δίνεται από το διαφορικό στοιχείο σε 1,5 κύκλους από την εκδήλωση του. Ακόμα, τα στοιχεία υπερεντάσεως εντοπίζουν το βραχυκύκλωμα, αλλά δεν ενεργούν λόγω της χρονικής καθυστέρησης που προβλέπουν οι ρυθμίσεις τους.

Κυματομορφές RTDS



Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του τριγώνου

- **Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του αστέρα**

Οι κυματομορφές που προέκυψαν από μονοφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του τυλίγματος αστέρα του μετασχηματιστή παρουσιάζονται στο σχήμα 6.2.

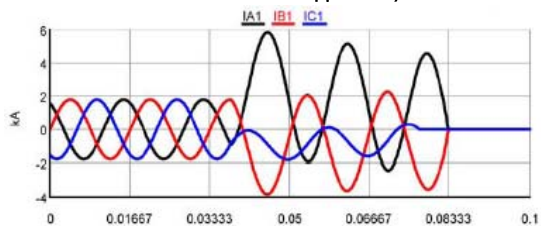
Στις κυματομορφές του RTDS με σύγκριση των ρευμάτων πρωτεύοντος με τα ρεύματα δευτερεύοντος των μετασχηματιστών εντάσεως παρατηρείται μια μικρή παραμόρφωση στο ρεύμα δευτερεύοντος του δεύτερου, τυλίγματος η οποία φανερώνει την ύπαρξη κορεσμού. Αυτό, ωστόσο, δεν επηρεάζει τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου αφού και σε αυτή την περίπτωση ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί όπως αναμενόταν. Οι πρώτες δύο ομάδες κυματομορφών στο διάγραμμα, οι οποίες λήφθηκαν από τον ηλεκτρονόμο, παρουσιάζουν όπως και πριν τα ρεύματα τα οποία καταγράφει στις εισόδους του ο ηλεκτρονόμος. Η τρίτη ομάδα κυματομορφών απεικονίζει την RMS τιμή του ρεύματος που ρέει προς τη γη.

Στο κάτω μέρος του διαγράμματος τα ψηφιακά σήματα δείχνουν τα Relay Word bits που ενεργοποιήθηκαν καθώς και τη χρονική στιγμή κατά την οποία έγινε η ενεργοποίηση τους. Αρχικά, με την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος, ενεργοποιείται το στοιχείο παρεμπόδισης 2^{ης} και 5^{ης} αρμονικής (87 BL). Μόλις όμως το ρεύμα ξεπεράσει την ποσοστιαία τιμή συγκράτησης, το στοιχείο συγκράτησης (87 R) ενεργοποιεί τις επαφές εξόδου OUT 3&4. Οι επαφές εξόδου του ηλεκτρονόμου (OUT 3&4) δίνουν σήμα ενεργοποίησης του διακόπτη κυκλώματος μετά από 1,5 κύκλους από την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος.

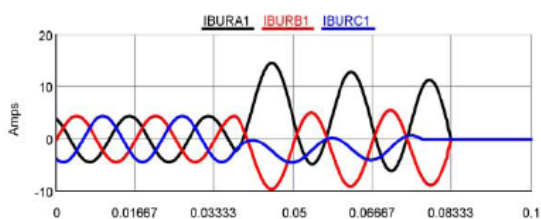
Αν και τα στοιχεία προστασίας υπερεντάσεως θετικής (51P2), αρνητικής (51Q2) και μηδενικής (51R2) ακολουθίας είναι σε λειτουργία, δεν ενεργοποιούν την προστασία υπερεντάσεως, λόγω της χρονικής καθυστέρησης που προβλέπεται από τις ρυθμίσεις τους. Έτσι στην περίπτωση που δε λειτουργήσει η διαφορική προστασία στον αναμενόμενο χρόνο, τότε αναλαμβάνει η προστασία υπερεντάσεως να εξουδετερώσει το βραχυκύκλωμα.

Κυματομορφές RTDS

ΜΕ 1^{ου} Τυλίγματος

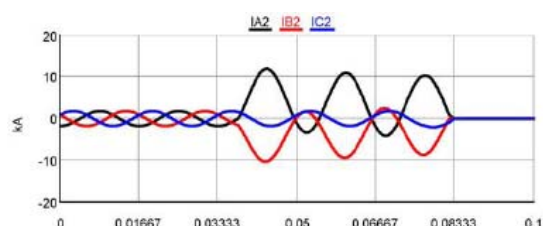


Ρεύματα Πρωτεύοντος

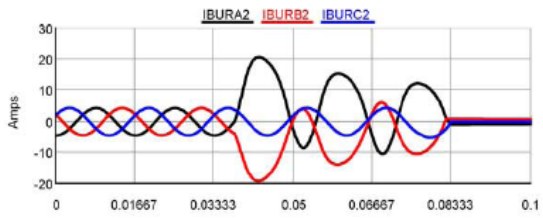


Ρεύματα Δευτερεύοντος

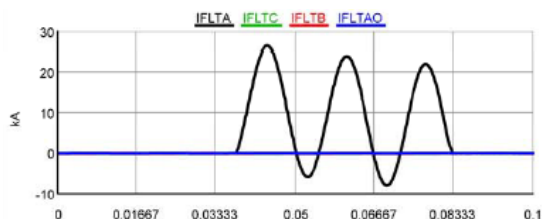
ΜΕ 2^{ου} Τυλίγματος



Ρεύματα Πρωτεύοντος

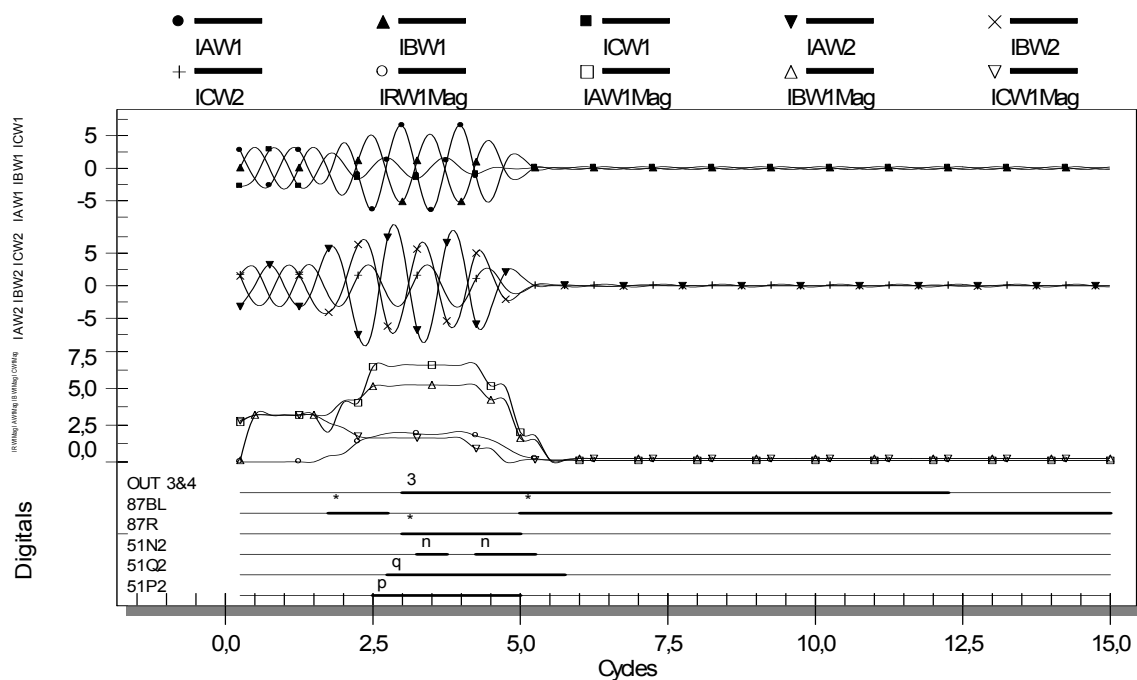


Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του αστέρα

6.1.2 Διφασικά βραχυκυκλώματα

Σε αυτή την ενότητα των δοκιμών παρουσιάζονται τα διφασικά βραχυκυκλώματα και τα διφασικά βραχυκυκλώματα προς γη εντός της ζώνης προστασίας.

- **Διφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του τριγώνου**

Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν από διφασικό βραχυκύκλωμα εντός της ζώνης προστασίας στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή από την πλευρά του τυλίγματος τριγώνου.

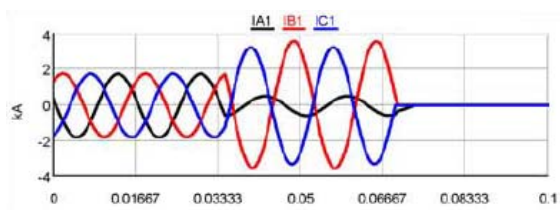
Από την κυματομορφή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως που λήφθηκε από το RTDS μπορεί εύκολα να εξαχθεί ότι το πλάτος του ρεύματος από κορυφή σε κορυφή είναι πολύ μεγαλύτερο απ' ότι στα μονοφασικά σφάλματα και των δύο περιπτώσεων. Μια σύγκριση των κυματομορφών τις οποίες ανιχνεύει ο ηλεκτρονόμος στα τυλίγματα του με τις αντίστοιχες κυματομορφές που εμφανίζονται στα πρωτεύοντα των μετασχηματιστών εντάσεως φανερώνει την ορθή λειτουργία του συστήματος μέτρησης των ρευμάτων, αφού είναι πανομοιότυπες.

Οι πρώτες 2 ομάδες κυματομορφών του ηλεκτρονόμου παρουσιάζουν τα ρεύματα που καταγράφει στους ακροδέκτες του ο ηλεκτρονόμος. Η τρίτη και η τέταρτη αναπαριστούν τις RMS τιμές των ρευμάτων γραμμής καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του σφάλματος. Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται οι RMS τιμές των ρευμάτων γραμμής και όχι οι RMS τιμές των ρευμάτων που διαρρέουν προς τη γη επειδή δεν υπάρχουν ρεύματα προς γη σε αυτού του είδους το διφασικό σφάλμα.

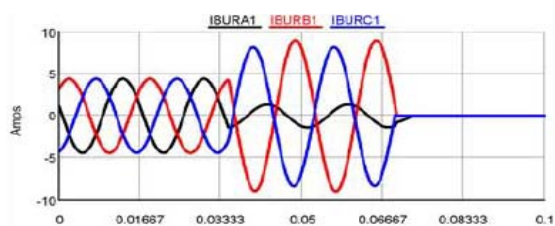
Τα ψηφιακά σήματα εξόδου σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με των δύο προηγούμενων περιπτώσεων με τη διαφορά ότι εδώ την ενεργοποίηση των διακοπών κυκλώματος την προκαλεί το στοιχείο χωρίς παρεμπόδιση, 87U, το οποίο είναι ένα στιγμιαίο στοιχείο ρυθμισμένο για την αποτροπή ζημιών από μεγάλα ρεύματα.

Κυματομορφές RTDS

ΜΕ 1^{ου} Τυλίσματος

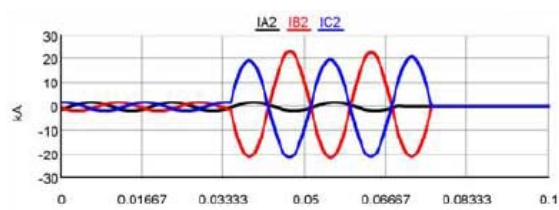


Ρεύματα Πρωτεύοντος

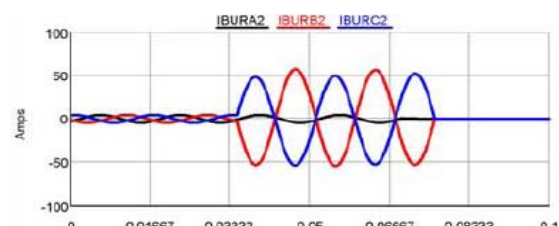


Ρεύματα Δευτερεύοντος

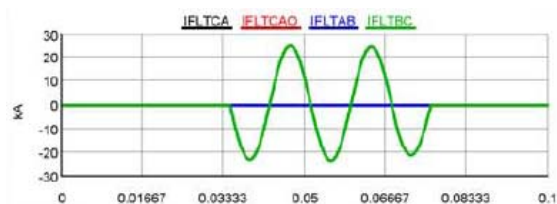
ΜΕ 2^{ου} Τυλίσματος



Ρεύματα Πρωτεύοντος

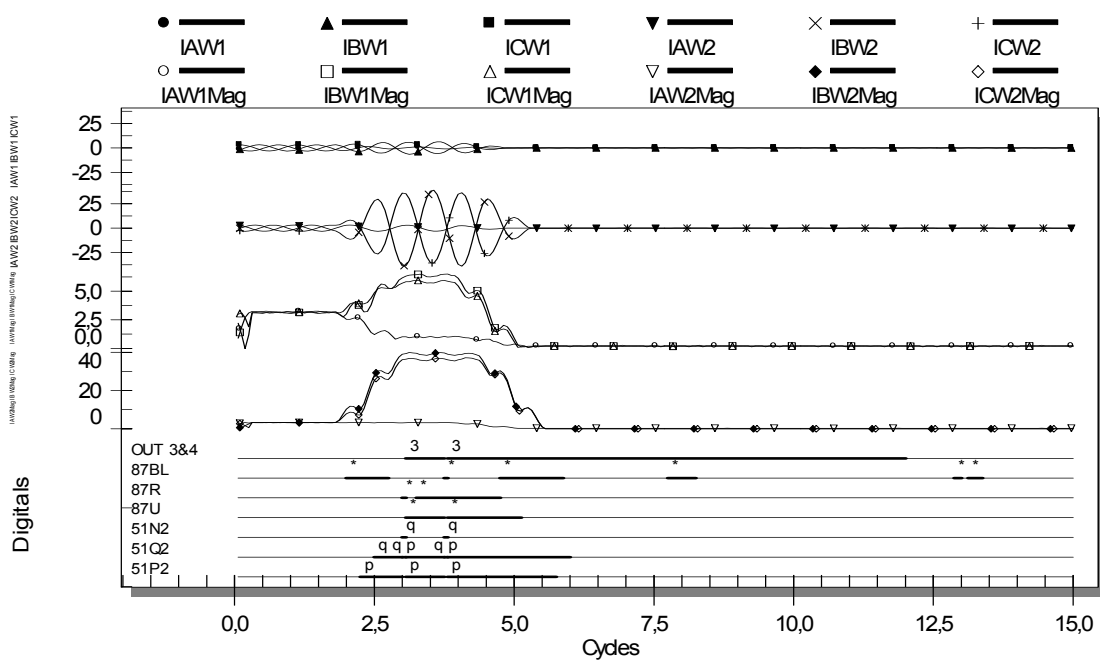


Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του τριγώνου

- **Διφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του αστέρα**

Τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως που εμφανίζονται κατά την εκδήλωση διφασικού βραχυκυκλώματος στο τύλιγμα αστέρα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.4.

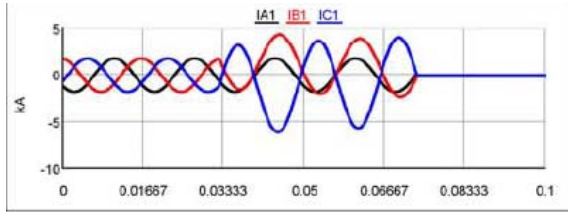
Οι δύο πρώτες ομάδες κυματομορφών του ηλεκτρονόμου είναι και πάλι τα ρεύματα των δύο τυλιγμάτων που καταγράφει ο ηλεκτρονόμος. Η τρίτη και τέταρτη ομάδα κυματομορφών επιλέγηκαν να παρουσιάζουν τα RMS πλάτη των ρευμάτων γραμμής όπως και στην προηγούμενη δοκιμή για τον ίδιο λόγο.

Τα ψηφιακά σήματα που παρουσιάζουν τη λειτουργία των Relay Word bits του ηλεκτρονόμου φανερώνουν ότι η ενεργοποίηση των εξόδων του ηλεκτρονόμου, OUT 3&4 έγινε 1,5 κύκλους μετά από την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος. Επίσης, από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι το στοιχείο που προκάλεσε την ενεργοποίηση της προστασίας είναι το ποσοστιαίο διαφορικό στοιχείο με συγκράτηση, 87R. Σε αυτή την περίπτωση το πλάτος των ρευμάτων βραχυκύκλωσης δεν είναι αρκετά μεγάλο για την ενεργοποίηση του στιγμιαίου στοιχείου.

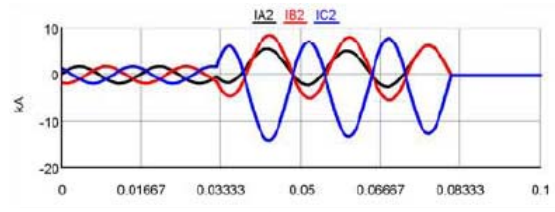
Τα στοιχεία υπερεντάσεως 51Q2 και 51P2 ενεργοποιήθηκαν και σε αυτή την περίπτωση χωρίς όμως να προκαλέσουν λειτουργία των διακοπών κυκλώματος, όπως άλλωστε αναμενόταν. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το στοιχείο υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας, 51N2, δεν ενεργοποιείται όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή το βραχυκύκλωμα εκδηλώνεται στην πλευρά του αστέρα και το τρίγωνο του μετασχηματιστή, όπως είναι γνωστό, δεν επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας.

Κυματομορφές RTDS

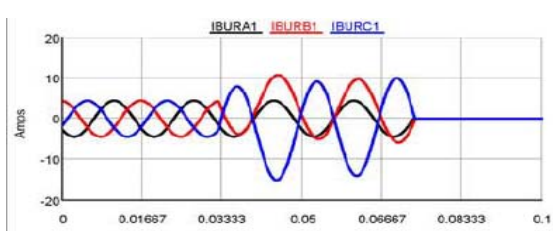
ΜΕ 1^{ου} Τυλίγματος



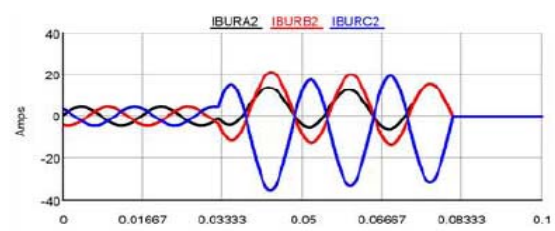
ΜΕ 2^{ου} Τυλίγματος



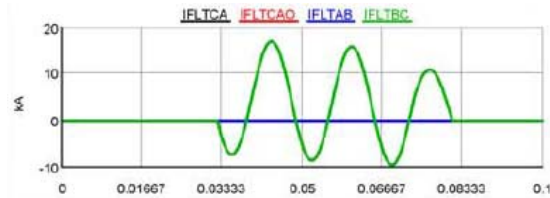
Ρεύματα Πρωτεύοντος



Ρεύματα Πρωτεύοντος



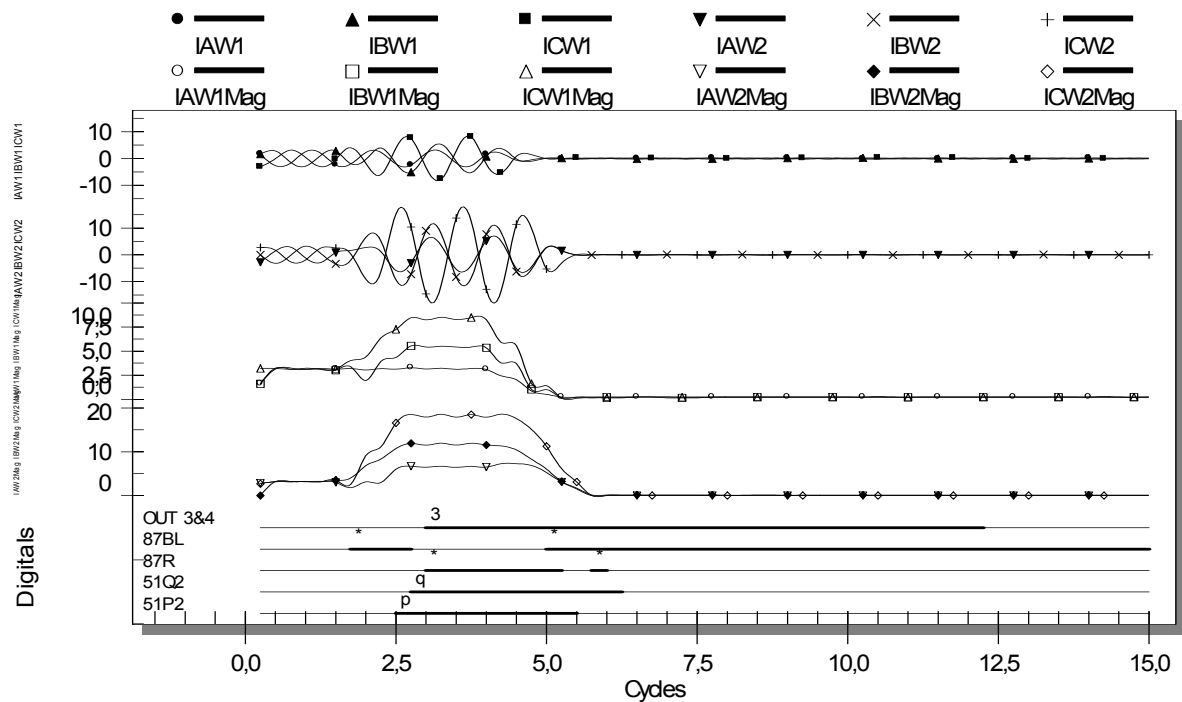
Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύματα Δευτερεύοντος

Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του αστέρα

- **Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του τριγώνου**

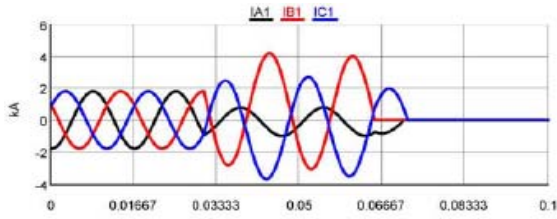
Το διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του τριγώνου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5. Η σύγκριση των ρευμάτων στα πρωτεύοντα των μετασχηματιστών εντάσεως, βάσει των κυματομορφών του RTDS, με τα ρεύματα στις εισόδους του ηλεκτρονόμου επιβεβαιώνουν την ορθή τροφοδοσία του ηλεκτρονόμου με τα απαιτούμενα σήματα για τη λειτουργία της προστασίας αφού τα σήματα αυτά είναι πανομοιότυπα.

Στην περίπτωση του διφασικού βραχυκυκλώματος με γη εμφανίζεται και σημαντικό ρεύμα προς τη γη. Η μεταβολή της RMS τιμής του ρεύματος αυτού παρουσιάζεται στην τελευταία κυματομορφή του ηλεκτρονόμου. Επίσης, από αυτή την κυματομορφή, όπως και από τις κυματομορφές των ρευμάτων γραμμής, είναι φανερό ότι η πηγή τάσης που βρίσκεται στην πλευρά του τριγώνου έχει μεγαλύτερη συνεισφορά στο βραχυκύκλωμα απ' ότι η άλλη πηγή. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μικρότερη συνολική σύνθετη αντίσταση των στοιχείων που παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής στα δεξιά και του βραχυκυκλώματος σε σχέση με τη συνολική σύνθετη αντίσταση των στοιχείων στα αριστερά.

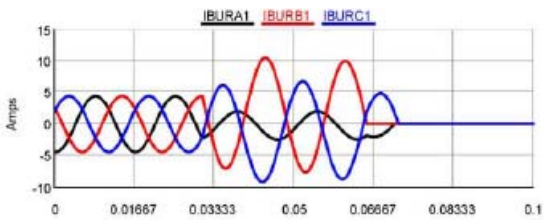
Το στοιχείο που προκαλεί το άνοιγμα των διακοπών του κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση είναι το στιγμιαίο στοιχείο διαφορικής προστασίας, 87U. Αν και, εκτός από το στιγμιαίο στοιχείο διαφορικής προστασίας, ενεργοποιείται και το διαφορικό στοιχείο με συγκράτηση, 87R, εντούτοις λόγω του μεγάλου πλάτους του ρεύματος βραχυκυκλώσεως το στιγμιαίο στοιχείο είναι αυτό που δίνει σήμα ενεργοποίησης για τους διακόπτες. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ τα στοιχεία υπερεντάσεως ενεργοποιούνται χωρίς όμως να επηρεάσουν τη λειτουργία των διακοπών.

Κυματομορφές RTDS

ΜΕ 1^{ου} Τυλίσματος

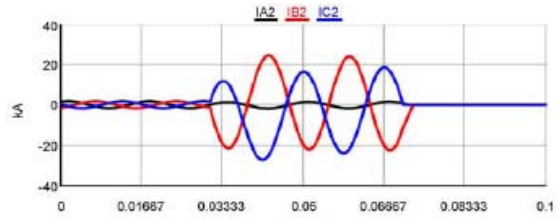


Ρεύματα Πρωτεύοντος

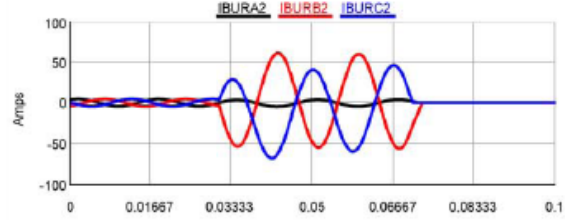


Ρεύματα Δευτερεύοντος

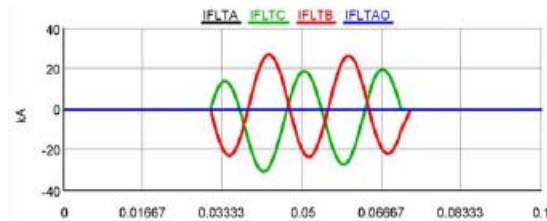
ΜΕ 2^{ου} Τυλίσματος



Ρεύματα Πρωτεύοντος

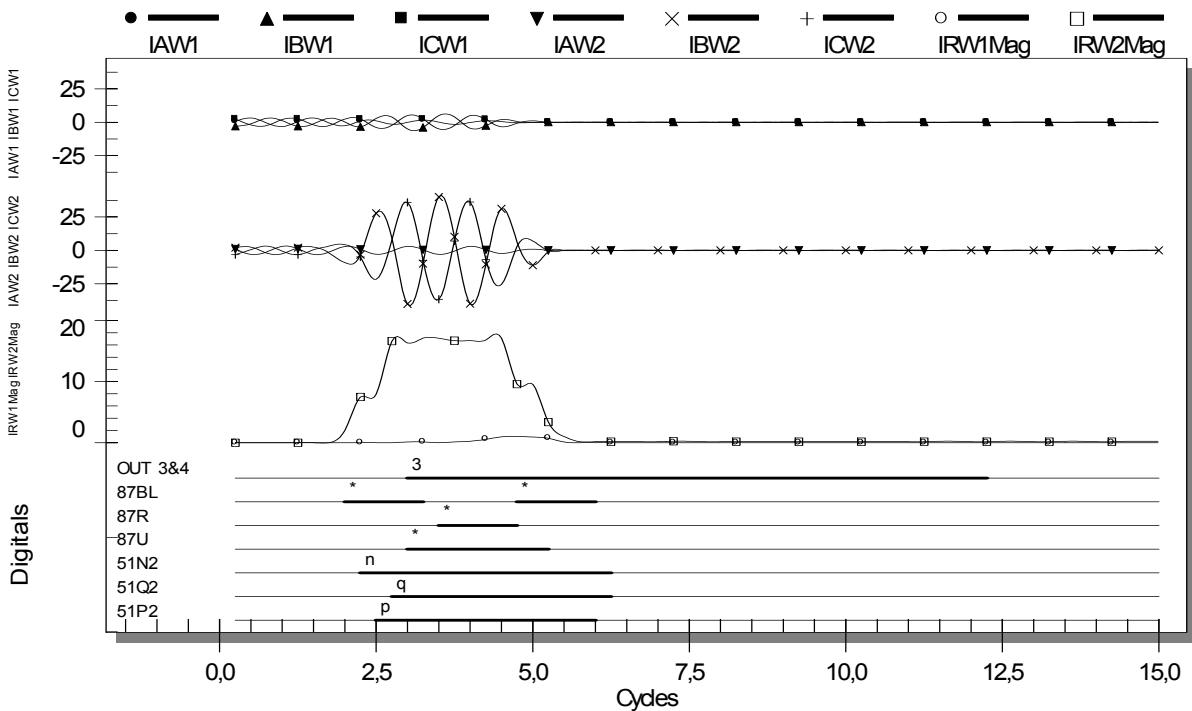


Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του τριγώνου

- **Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του αστέρα**

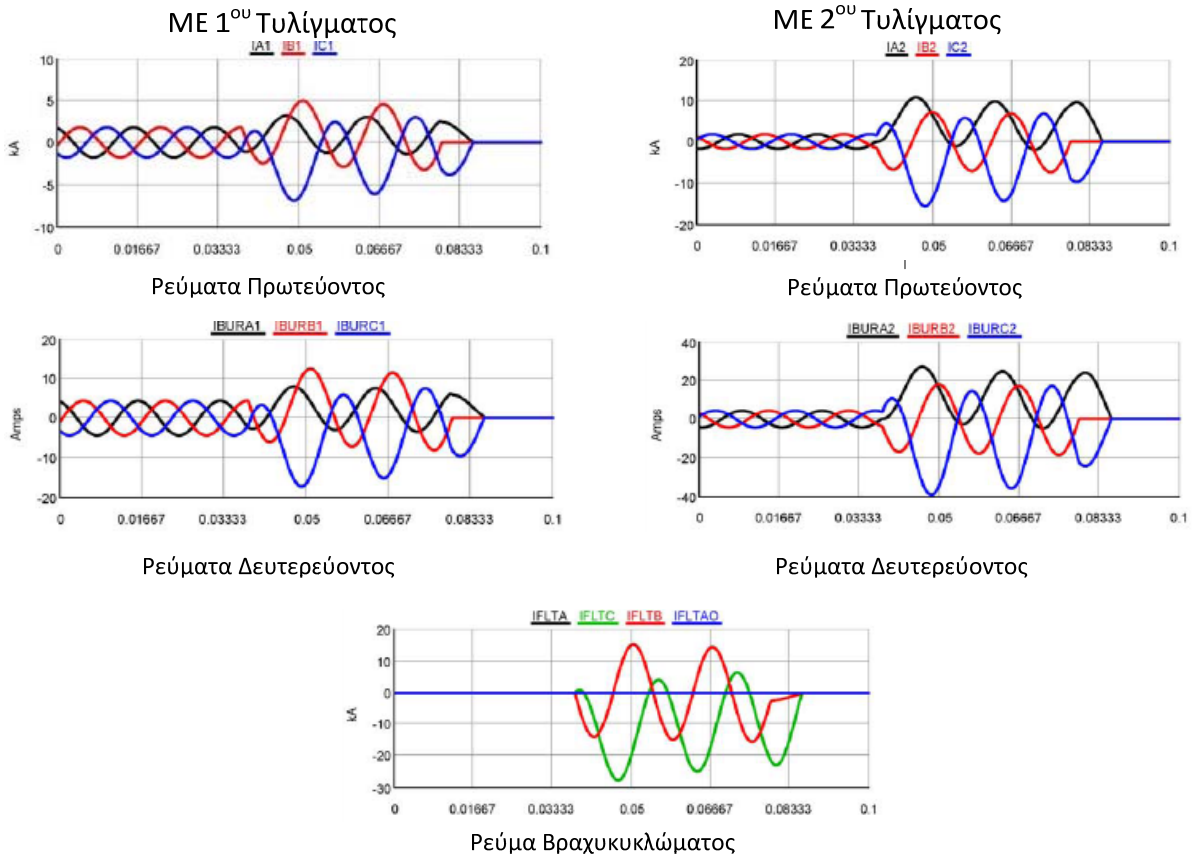
Το σχήμα 6.6 περιέχει τις κυματομορφές των ρευμάτων που εμφανίστηκαν κατά την εκδήλωση διφασικού βραχυκυκλώματος προς γη στην πλευρά αστέρα του μετασχηματιστή ισχύος.

Οι κυματομορφές λήφθηκαν από το περιβάλλον λειτουργίας του εξομοιωτή και από τις αναφορές γεγονότων του ηλεκτρονόμου, ο οποίος εκδίδει μία αναφορά για κάθε περίπτωση ενεργοποίησης κάποιας από τις εξόδους του ή για οποιαδήποτε άλλη περίπτωση οριστεί από τον μηχανικό ρύθμισης του ηλεκτρονόμου. Και σε αυτή την περίπτωση οι μετασχηματιστές εντάσεως λειτουργούν άριστα αφού οι κυματομορφές στα δευτερεύοντα τους δεν εμφανίζουν ούτε την παραμικρή παραμόρφωση λόγω κορεσμού των πυρήνων τους.

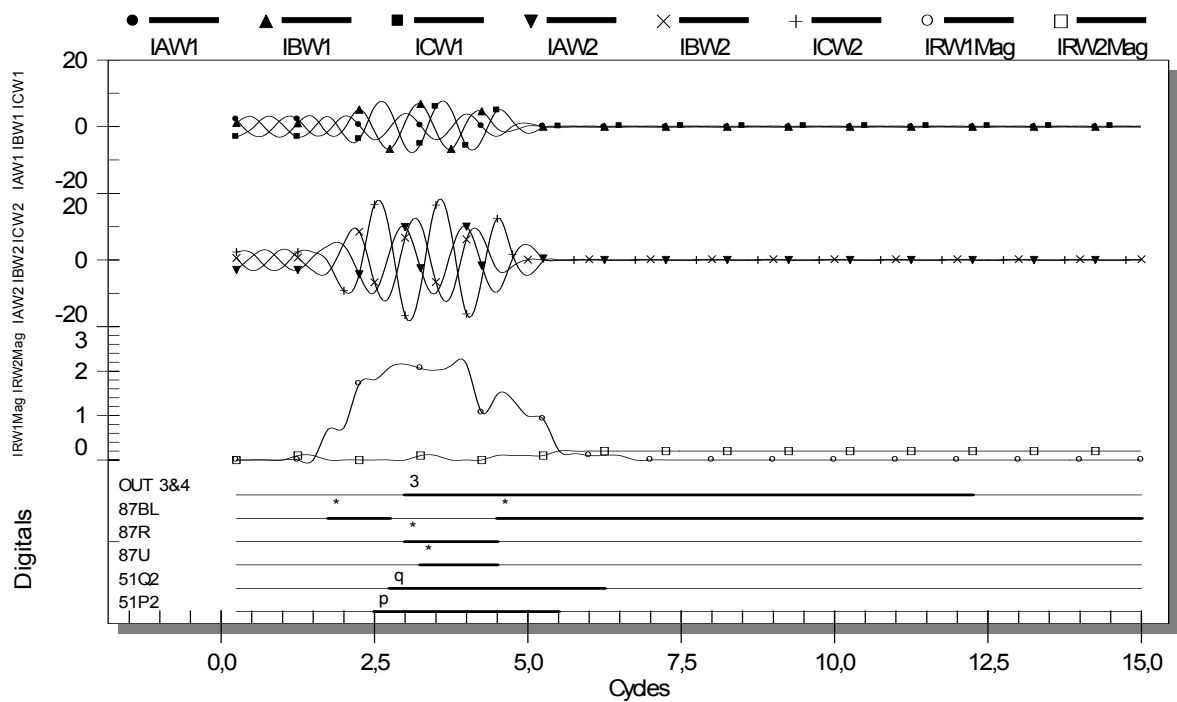
Σε αυτή τη δοκιμή η διαφορική προστασία τίθεται σε λειτουργία από το στοιχείο ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας με συγκράτηση, 87R, και ενεργοποιεί την έξοδο 3 του ηλεκτρονόμου, η οποία ελέγχει και τους δύο διακόπτες του κυκλώματος, απομονώνοντας το μετασχηματιστή από το υπόλοιπο κύκλωμα. Το στοιχείο χωρίς συγκράτηση, 87U, ενεργοποιείται επίσης, αλλά μετά από το σήμα ενεργοποίησης των διακοπών κυκλώματος που έχει δώσει το 87R. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει μια μικρή χρονική καθυστέρηση 1,5 – 2 κύκλων μέχρι την απόξευση των διακοπών, κατά τη διάρκεια της οποίας το ρεύμα σφάλματος συνεχίζει να αυξάνεται.

Τα στοιχεία υπερεντάσεως ενεργοποιούνται και σε αυτή την περίπτωση προσφέροντας εφεδρική προστασία στο μετασχηματιστή. Εδώ, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων στον αστέρα, το στοιχείο αντίστροφου χρόνου μηδενικής ακολουθίας δεν ενεργοποιείται επειδή η συνιστώσα αυτή αποκόπτεται από το τρίγωνο του μετασχηματιστή.

Κυματομορφές RTDS



Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.6 Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη στην πλευρά του αστέρα

6.1.3 Τριφασικά βραχυκυκλώματα

Εδώ παρουσιάζονται τα τριφασικά βραχυκυκλώματα, τα οποία αποτελούν τη χειρότερη περίπτωση βραχυκυκλωμάτων αλλά ταυτόχρονα και την πιο απίθανη να εκδηλωθεί. Επειδή το σύστημα στο οποίο έγιναν οι δοκιμές βραχυκύκλωσης είναι συμμετρικό, τα ρεύματα που εκδηλώνονται κατά την εξέλιξη των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων είναι τα ίδια με ή χωρίς την παρουσία γης, γι' αυτό και εξετάζεται μόνο η μία από τις περιπτώσεις.

- **Τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του τριγώνου**

Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά τριγώνου του μετασχηματιστή. Όπως στα διφασικά χωρίς γη, έτσι και εδώ δεν εμφανίζεται συνιστώσα ρεύματος προς γη λόγω της συμμετρίας του κυκλώματος.

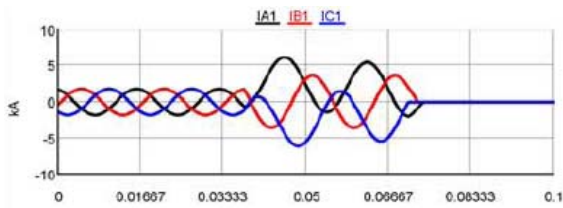
Στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, παρόλο που το πλάτος των ρευμάτων γραμμής είναι αρκετά μεγάλο, δεν παρατηρείται παραμόρφωση των κυματομορφών λόγω κορεσμού των πυρήνων των μετασχηματιστών εντάσεως. Αυτό αποδεικνύει την ορθότητα επιλογής των μετασχηματιστών εντάσεως.

Η ενεργοποίηση των διακοπών κυκλώματος γίνεται από το διαφορικό στοιχείο χωρίς παρεμπόδιση, 87U, πριν εντοπίσει το σφάλμα το διαφορικό στοιχείο με συγκράτηση, 87R, λόγω των μεγάλων ρευμάτων που εκδηλώνονται.

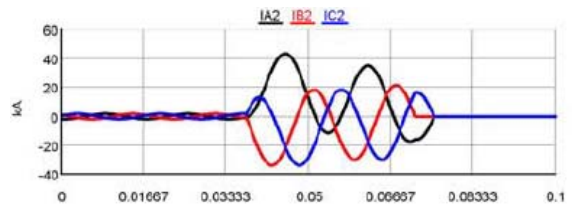
Τα στοιχεία υπερεντάσεως ανιχνεύουν το σφάλμα και σε αυτή την περίπτωση, χωρίς όμως να δράσουν, αφού και πάλι η διαφορική προστασία εκκαθαρίζει το βραχυκύκλωμα πριν την πάροδο του προκαθορισμένου χρόνου ενεργοποίησης της προστασίας υπερεντάσεως.

Κυματομορφές RTDS

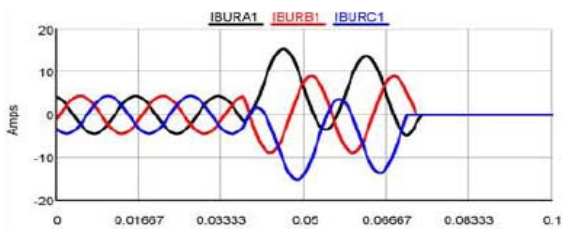
ΜΕ 1^{ου} Τυλίσματος



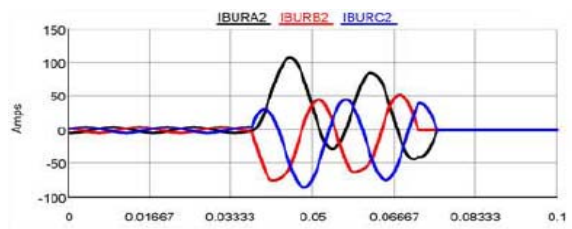
ΜΕ 2^{ου} Τυλίσματος



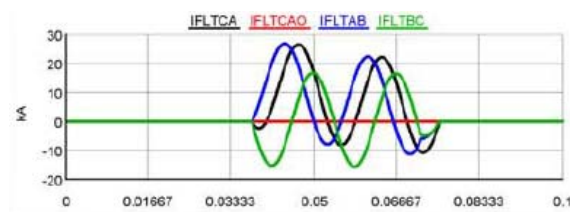
Ρεύματα Πρωτεύοντος



Ρεύματα Πρωτεύοντος



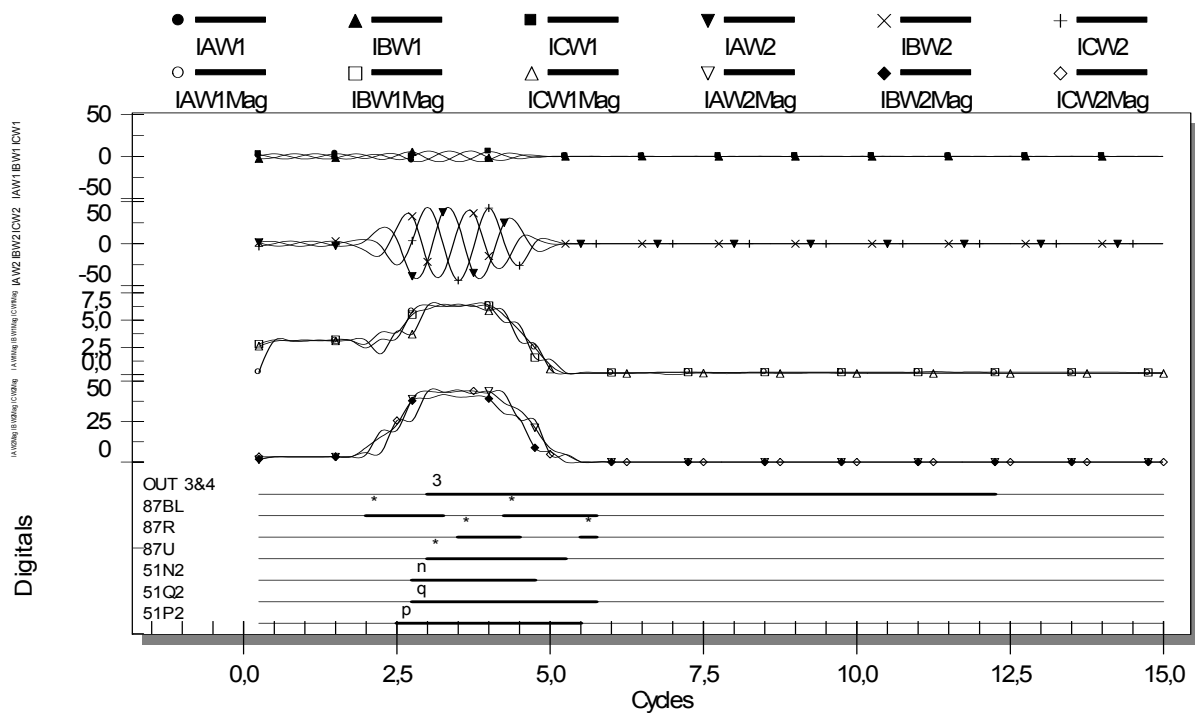
Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύματα Δευτερεύοντος

Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.7 Τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του τριγώνου

- **Τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του αστέρα**

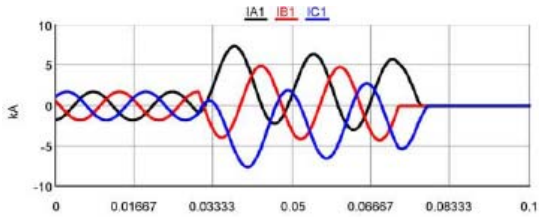
Κατά την εκδήλωση τριφασικού σφάλματος στην πλευρά του αστέρα παρουσιάστηκαν τα ρεύματα του σχήματος 6.8.

Τα ρεύματα και σε αυτή την περίπτωση δοκιμής έχουν πολύ μεγάλα πλάτη όπως και στη δοκιμή με τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά τριγώνου. Γι' αυτό και εδώ δρα πρώτο το στοιχείο στιγμιαίας διαφορικής προστασίας, 87U, και με την ενεργοποίηση των επαφών εξόδου, OUT3&4, προβαίνει στην αστραπιαία εκκαθάριση του σφάλματος.

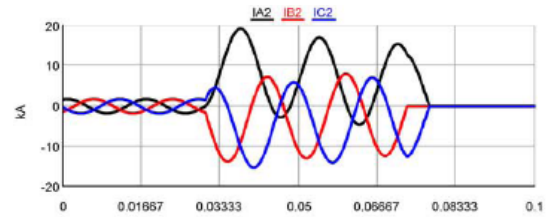
Η προστασία υπερεντάσεως αντίστροφου χρόνου λειτουργεί και εδώ όπως και στην προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά, όμως, ότι το στοιχείο προστασίας μηδενικής ακολουθίας δεν ενεργοποιείται. Αυτό συμβαίνει, όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενες περιπτώσεις, λόγω της αποκοπής από το τρίγωνο του μετασχηματιστή ισχύος της συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας του ρεύματος.

Κυματομορφές RTDS

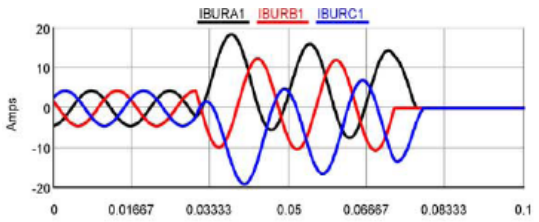
ΜΕ 1^{ου} Τυλίσματος



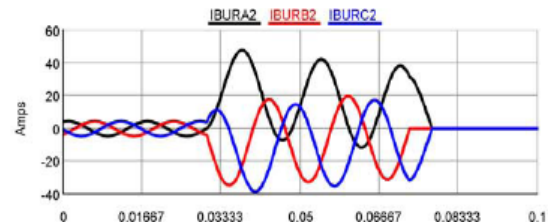
ΜΕ 2^{ου} Τυλίσματος



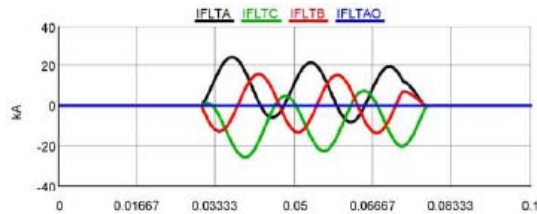
Ρεύματα Πρωτεύοντος



Ρεύματα Πρωτεύοντος



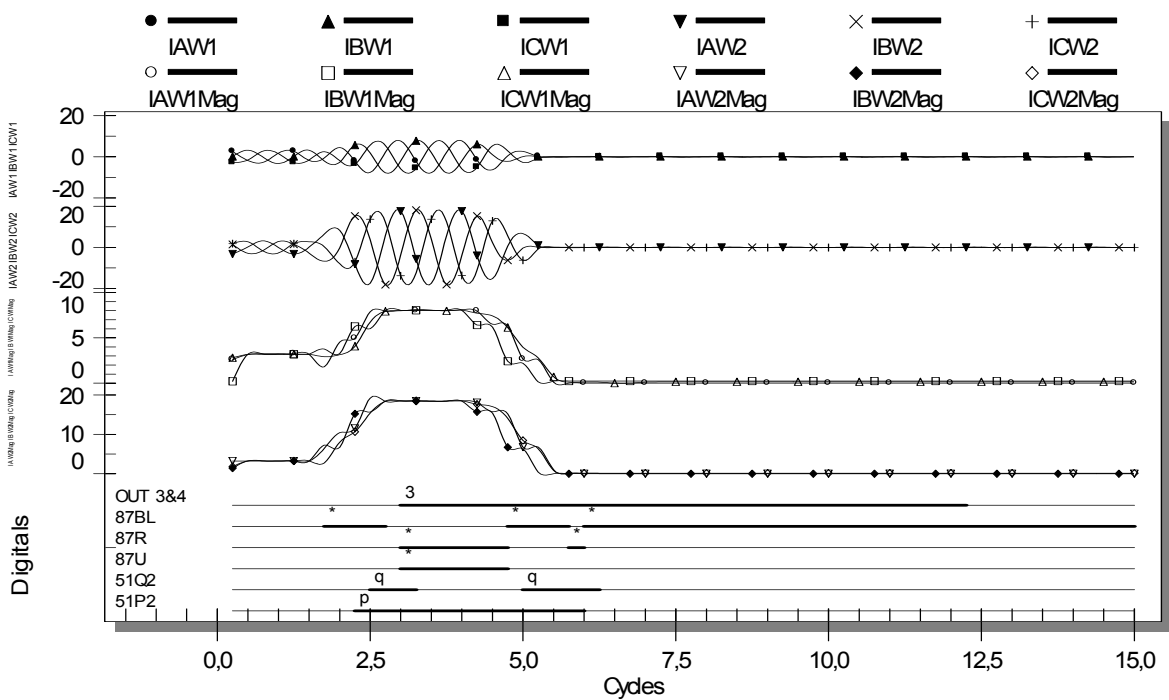
Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύματα Δευτερεύοντος

Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.8 Τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά του αστέρα

6.2 Δοκιμές με Βραχυκυκλώματα Εκτός της Ζώνης Προστασίας

Η λογική λειτουργίας της διαφορικής προστασίας απαιτεί η ενεργοποίηση της να γίνεται μόνο όταν το σφάλμα συμβαίνει εντός της ζώνης προστασίας. Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας της διαφορικής προστασίας προκλήθηκαν βραχυκυκλώματα εκτός της ζώνης προστασίας και παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του ηλεκτρονόμου.

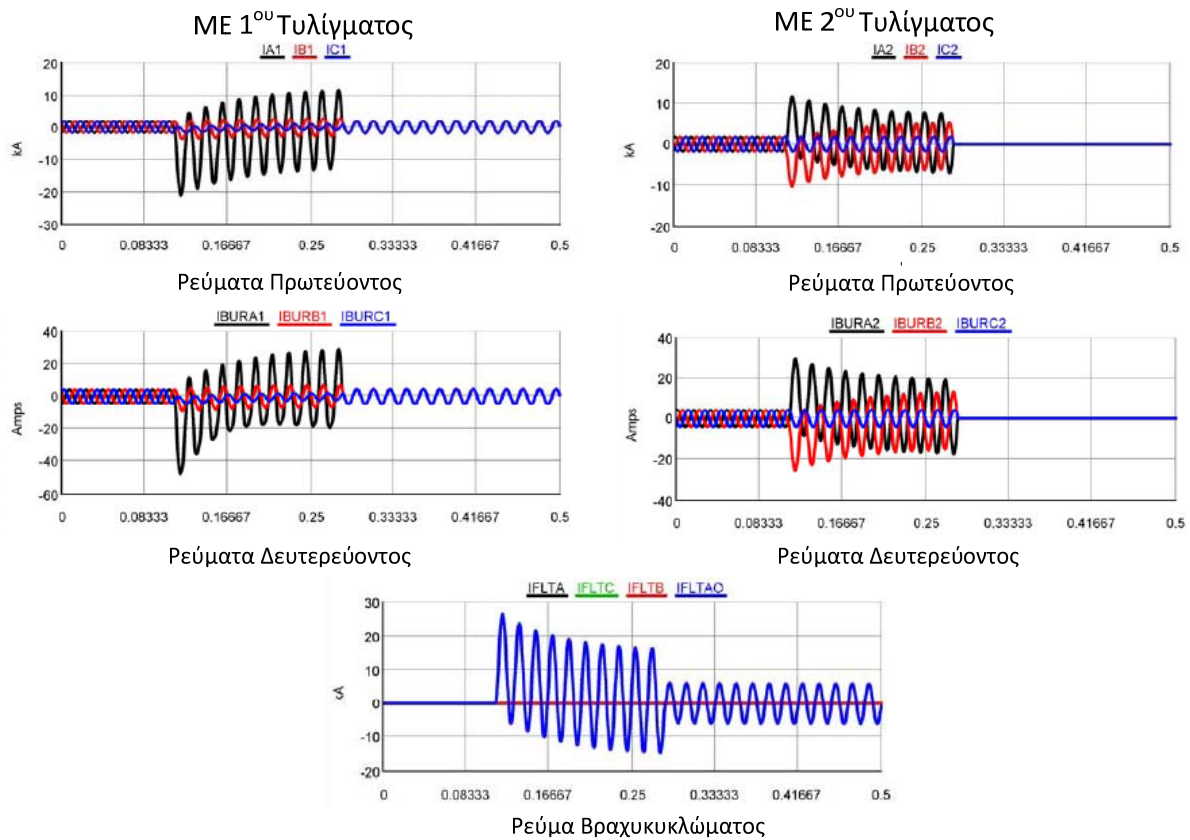
Για την εφεδρική προστασία του μετασχηματιστή έχει ρυθμιστεί το ένα από τα δύο στοιχεία υπερεντάσεως για την εκκαθάριση των βραχυκυκλωμάτων εκτός της ζώνης προστασίας. Τα στοιχεία υπερεντάσεως που ενεργοποιήθηκαν είναι πολύ αντίστροφου χρόνου και εμφανίζουν μικρή χρονική καθυστέρηση στην ενεργοποίησή τους. Αυτή η χρονική καθυστέρηση ρυθμίζεται κατά κύριο λόγο για να επιτρέπει στη διαφορική προστασία να εκκαθαρίζει τα σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας, αλλά και για να επιτρέπει στην υποθετική υπάρχουσα πρωτεύουσα προστασία των σφαλμάτων που βρίσκονται εκτός ζώνης να δρα πρώτη. Ουσιαστικά, δηλαδή, το στοιχείο υπερεντάσεως είναι ρυθμισμένο έτσι ώστε να προσφέρει στο μετασχηματιστή δευτερεύουσα προστασία τόσο από σφάλματα εντός, όσο και εκτός της ζώνης διαφορικής προστασίας.

6.2.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα

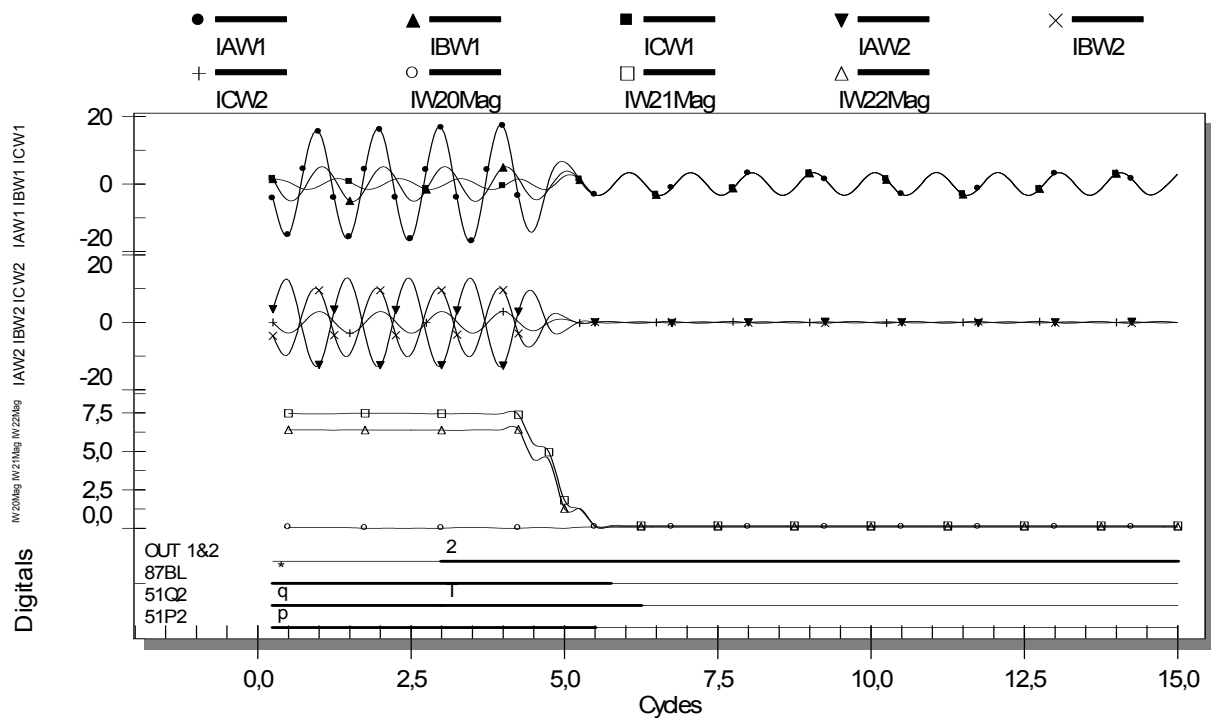
Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζονται τα ρεύματα που προκύπτουν κατά την εκδήλωση μονοφασικού βραχυκυκλώματος εκτός της ζώνης προστασίας. Από τη σύγκριση των κυματομορφών είναι εμφανές ότι ο ηλεκτρονόμος αφαιρεί από τα σήματα ρευμάτων την dc συνιστώσα, αφού οι κυματομορφές που λήφθηκαν από την αναφορά γεγονότος δεν εμφανίζουν dc μετάθεση.

Στα ψηφιακά σήματα στο κάτω μέρος του διαγράμματος που λήφθηκε από τον ηλεκτρονόμο φαίνονται τα Relay Word bits που ενεργοποιήθηκαν. Η έξοδος 2, OUT 1&2, η οποία ελέγχει το διακόπτη κυκλώματος στην πλευρά τριγώνου, ενεργοποιείται από στοιχείο υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας,. Αυτό συμβαίνει επειδή η ρύθμιση κατωφλίου (pick up) του στοιχείου αυτού είναι μικρότερη απ' ότι του στοιχείου θετικής ακολουθίας, ενώ το RMS πλάτος των συνιστωσών τους, όπως φαίνονται στην τρίτη ομάδα κυματομορφών του ηλεκτρονόμου, είναι της ίδιας τάξης.

Κυματομορφές RTDS



Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου



Σχήμα 6.9 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας

6.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα

Τα ρεύματα στους μετασχηματιστές εντάσεως και στον ηλεκτρονόμο κατά τη διάρκεια ενός διφασικού βραχυκυκλώματος παρουσιάζονται στο σχήμα 6.10.

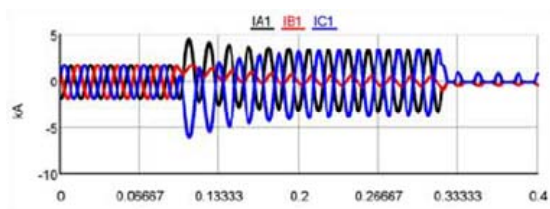
Κατά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος η ποσοστιαία κλίση του διαφορικού στοιχείου και τα στοιχεία παρεμπόδισης δεύτερης και πέμπτης αρμονικής, 87BL, λειτουργούν όπως αναμενόταν και δεν επιτρέπουν στο διαφορικό στοιχείο να ενεργοποιηθεί. Αυτό αποτελεί ένδειξη τόσο των σωστών ρυθμίσεων που έγιναν στο διαφορικό στοιχείο, όσο και της σωστής επιλογής των μετασχηματιστών εντάσεως. Σε περίπτωση που οι μετασχηματιστές εντάσεως εμφανίσουν διαφορετικά επίπεδα κορεσμού των πυρήνων τους είναι πιθανό να δώσουν λανθασμένο διαφορικό ρεύμα και να προκαλέσουν ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας χωρίς αυτό να είναι αναγκαίο.

Την εκκαθάριση του σφάλματος αναλαμβάνουν τα στοιχεία υπερεντάσεως μετά την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια του οποίου έχει υπολογιστεί ότι θα λειτουργούσε μια υποθετική πρωτεύουσα προστασία. Συγκεκριμένα, η ενεργοποίηση του διακόπτη κυκλώματος γίνεται μέσω της επαφής εξόδου 2 από το στοιχείο υπερεντάσεως αντίστροφου χρόνου αρνητικής ακολουθίας. Αυτό συμβαίνει επειδή, όπως εξηγήθηκε και πιο πάνω, η ρύθμιση κατώφλιου του στοιχείου αρνητικής ακολουθίας είναι χαμηλότερη από ότι του στοιχείου θετικής ακολουθίας.

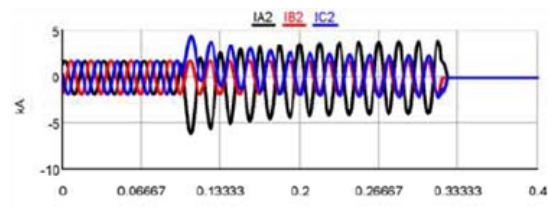
Από την ανάλυση των δύο αυτών γεγονότων συμπεραίνεται ότι οι ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου και η επιλογή των μετασχηματιστών εντάσεως είναι κατάλληλες για την επιτυχημένη προστασία του μετασχηματιστή. Επίσης, τα στοιχεία υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας προσφέρουν σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά τον εντοπισμό και την εκκαθάριση μονοφασικών και διφασικών σφαλμάτων εκτός της ζώνης προστασίας επειδή μπορούν να ρυθμιστούν με πολύ μικρότερο κατώφλι (pick up) απ' ότι τα στοιχεία θετικής ακολουθίας. Έτσι παρέχουν τη δυνατότητα ταχύτερης απόκρισης στα σφάλματα ταυτόχρονα με αυξημένη ασφάλεια από λανθασμένες ενεργοποιήσεις που μπορεί να προκύψουν από ένα χαμηλό κατώφλι στην προστασία με συνιστώσες θετικής ακολουθίας.

Κυματομορφές RTDS

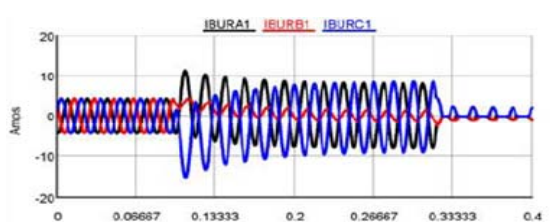
ΜΕ 1^{ου} Τυλίγματος



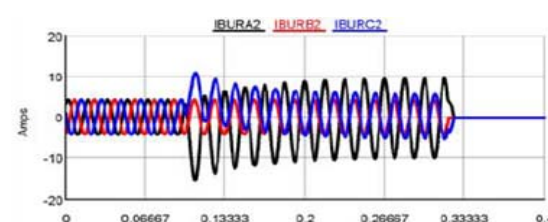
ΜΕ 2^{ου} Τυλίγματος



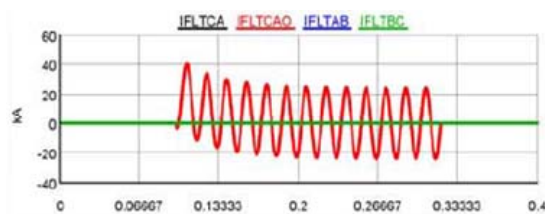
Ρεύματα Πρωτεύοντος



Ρεύματα Πρωτεύοντος



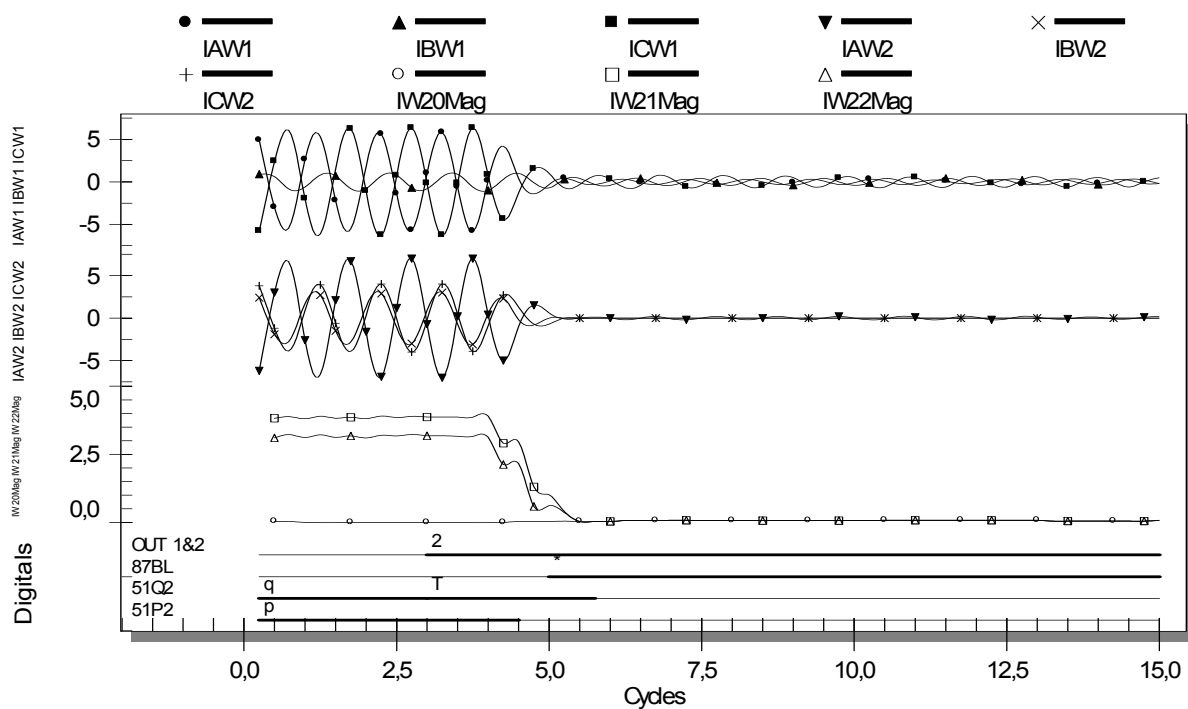
Ρεύματα Δευτερεύοντος



Ρεύματα Δευτερεύοντος

Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Κυματομορφές Ηλεκτρονόμου

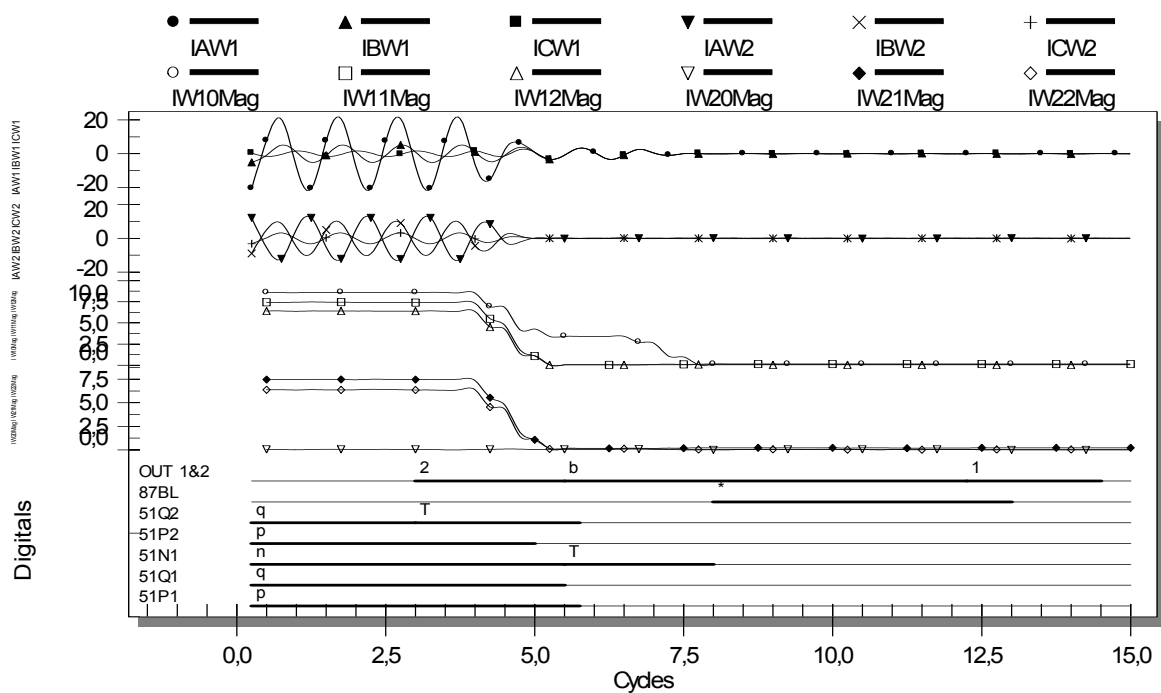


Σχήμα 6.10 Διφασικό βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας

6.3 Δοκιμές με ενεργοποιημένες και τις δύο ομάδες προστασίας υπερεντάσεως

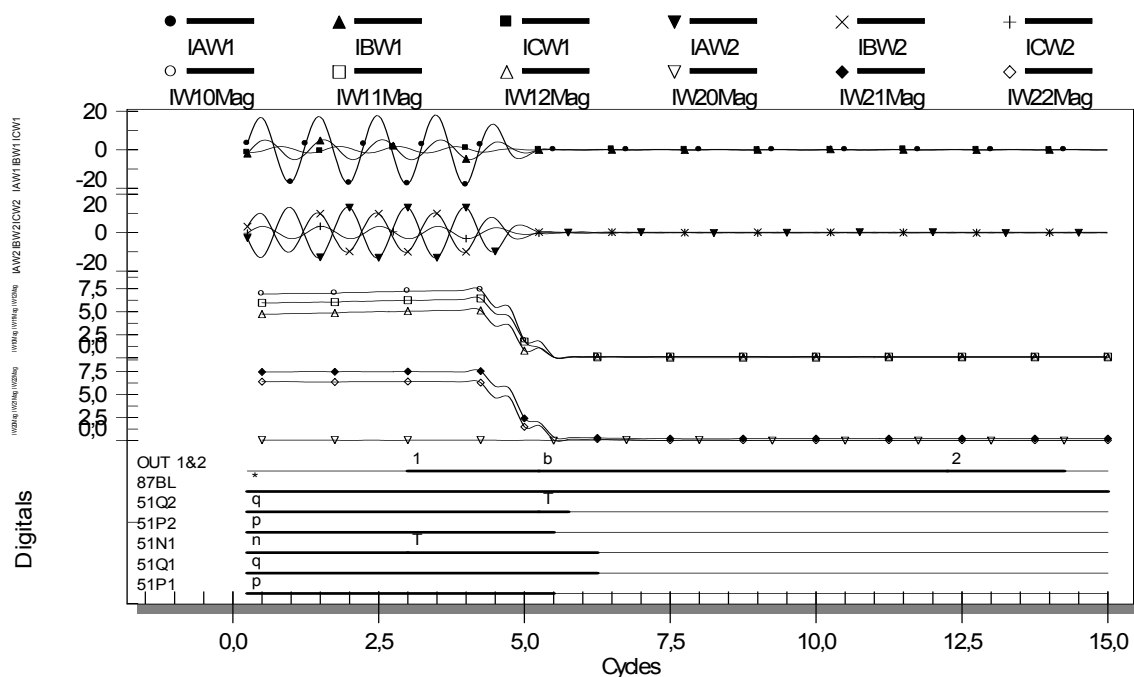
Για τη μελέτη της επιλεκτικότητας των στοιχείων υπερεντάσεως σε βραχυκυκλώματα εκτός της ζώνης προστασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με ενεργοποιημένες και τις δύο ομάδες στοιχείων υπερεντάσεως. Οι αναφορές γεγονότων που συνέταξε ο ηλεκτρονόμος κατά την εκδήλωση των βραχυκυκλωμάτων παρουσιάζονται στα σχήματα 6.11 και 6.12.

Στη δοκιμή του σχήματος 6.11 οι ρυθμίσεις της πρώτης ομάδας ήταν οι ίδιες με τις ρυθμίσεις της δεύτερης ομάδας, που δίνονται στους πίνακες 5.3 έως 5.5, με μεγαλύτερο time dial, όμως, για λόγους χρονικής διαβάθμισης. Σε αυτή την περίπτωση αναμενόταν ότι θα λειτουργούσε η προστασία υπερεντάσεως του δευτέρου τυλίγματος πρώτη, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τα ψηφιακά σήματα στο τέλος του σχήματος 6.11. Τα ψηφιακά σήματα φανερώουν ότι πρώτα λειτουργεί το στοιχείο υπερεντάσεως αρνητικής ακολουθίας του δευτέρου τυλίγματος, 51Q2, το οποίο ενεργοποιεί το άνοιγμα του διακόπτη στην πλευρά του τυλίγματος τριγώνου.



Σχήμα 6.11 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας και με τις δύο ομάδες προστασίας υπερεντάσεως σε λειτουργία και διαφορετικά μόνο τα TD

Ωστόσο, επειδή ο διακόπτης στην πλευρά του αστέρα παραμένει κλειστός και το βραχυκύκλωμα είναι ακόμα σε εξέλιξη, οι μετασχηματιστές εντάσεως του πρώτου τυλίγματος συνεχίζουν να ανιχνεύουν το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που ρέει προς το γειωμένο αστέρα του μετασχηματιστή, όπως φαίνεται άλλωστε και στην τρίτη ομάδα κυματομορφών του σχήματος 6.11. Γι' αυτό το λόγο, το στοιχείο υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας του πρώτου τυλίγματος ενεργοποιεί την απόζευξη και του πρώτου διακόπτη κυκλώματος μετά τον 5^ο κύκλο.



Σχήμα 6.12 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας με ίδια TD στα στοιχεία μηδενικής ακολουθίας

Με κατευθυντήρια γραμμή την αποκοπή της συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας από το μετασχηματιστή νοούμενου ότι το ένα του τύλιγμα τουλάχιστον είναι σε τρίγωνο, το στοιχείο υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας του πρώτου τυλίγματος σε αυτή τη δοκιμή ρυθμίστηκε ανεξάρτητα από το αντίστοιχο στοιχείο του δεύτερου τυλίγματος. Συγκριμένα, δεν ακολουθήθηκε εδώ η λογική της χρονικής διαβάθμισης για την επιλεκτικότητα στην αναγνώριση σφαλμάτων και έτσι στα στοιχεία μηδενικής ακολουθίας και των δύο τυλιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς οι ίδιες ρυθμίσεις. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε ταχύτερη εκκαθάριση των βραχυκυκλωμάτων που εμφανίζουν ρεύμα προς γη χωρίς όμως αυτό να γίνεται εις βάρος της επιλεκτικότητας, αφού τα στοιχεία μηδενικής

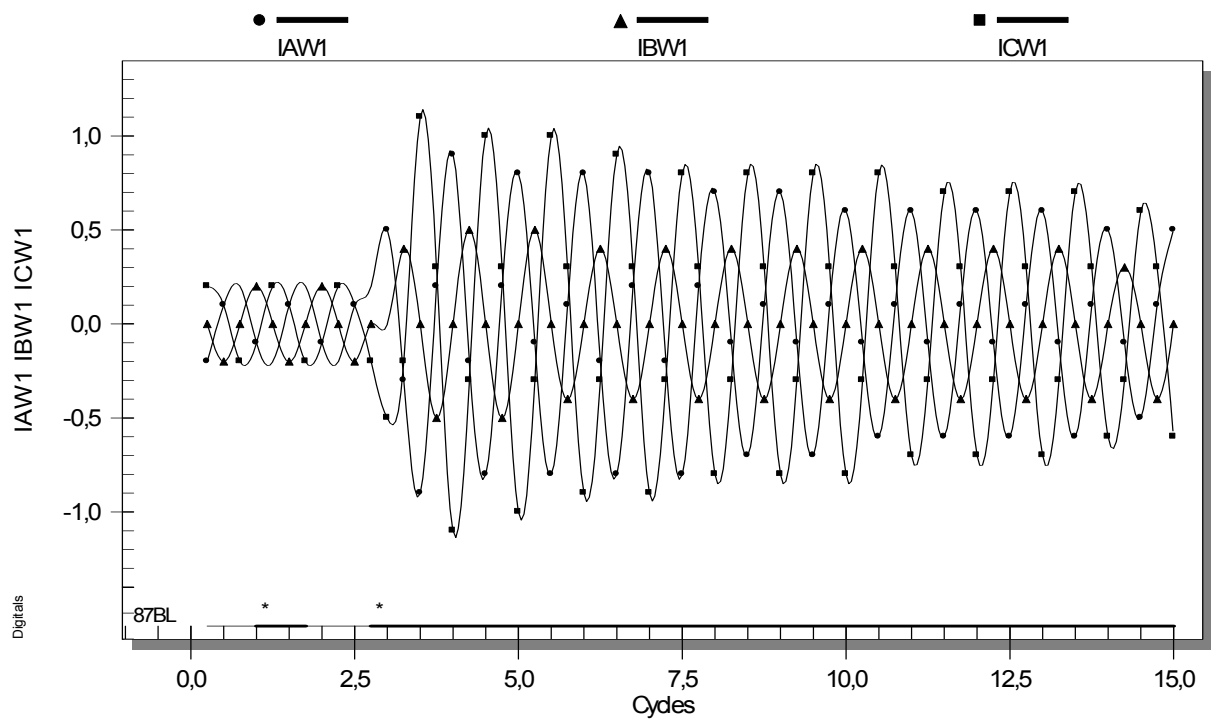
ακολουθίας μπορούν να εντοπίσουν τα κατάλληλα ρεύματα για την ενεργοποίηση τους μόνο αν είναι στην ίδια πλευρά του μετασχηματιστή με αυτά.

Τα ψηφιακά σήματα του σχήματος 6.12, που προέκυψε από την αναφορά γεγονότος που δημιούργησε ο ηλεκτρονόμος σε ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα, επιβεβαιώνουν αυτή τη λογική. Οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν εδώ είναι οι ίδιες με αυτές της προηγούμενης δοκιμής, με τη διαφορά όμως ότι δεν υπάρχει χρονική διαβάθμιση στα στοιχεία υπερεντάσεως μηδενικής ακολουθίας. Από τα ψηφιακά σήματα βλέπουμε ότι πρώτο ενεργοποιείται το στοιχείο προστασίας μηδενικής ακολουθίας του πρώτου τυλίγματος. Επίσης η τρίτη και τέταρτη ομάδα κυματομορφών, οι οποίες παρουσιάζουν τα RMS πλάτη των συνιστωσών ακολουθίας των ρευμάτων, επιβεβαιώνουν την αποκοπή της συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας στο δεύτερο τύλιγμα.

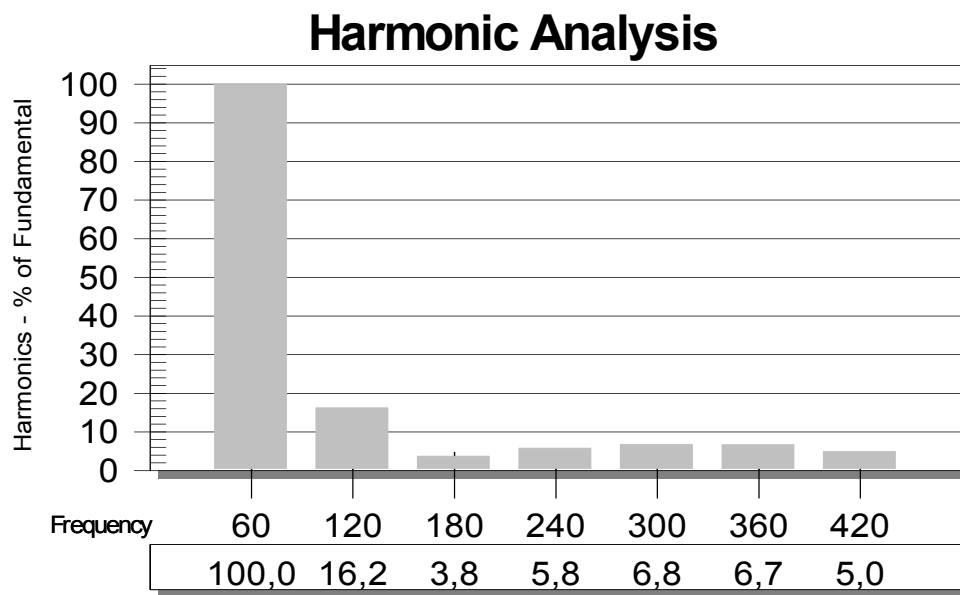
6.4 Ηλέκτριση του Μ/Σ με ανοικτοκυκλωμένη την πλευρά τριγώνου

Αυτή η δοκιμή γίνεται με σκοπό τη δοκιμή της συγκράτησης 2^{ης} αρμονικής της διαφορικής προστασίας. Αν δεν υπήρχε η λειτουργία της αρμονικής παρεμπόδισης στα διαφορικά στοιχεία του ηλεκτρονόμου, τα ρευμάτων ζεύξης - μαγνήτισης που εμφανίζονται κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή θα προκαλούσαν επαρκές διαφορικό ρεύμα λειτουργίας για την ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας του μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται το ρεύμα που εμφανίζεται στο πρωτεύον κατά την ενεργοποίηση του μετασχηματιστή. Το πλάτος του ρεύματος είναι αρκετά μεγάλο, αν συγκριθεί με το μηδενικό ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα να προκαλέσει ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας,. Όμως η ενεργοποίηση της λειτουργίας αρμονικής παρεμπόδισης, όπως φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος, 87BL, αποτρέπει την ανεπιθύμητη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου. Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος που εκδηλώνεται κατά την ενεργοποίηση του μετασχηματιστή. Το μεγάλο ποσοστό της δεύτερης αρμονικής, όπως και αναμενόταν, είναι αυτό το οποίο ενεργοποιεί το στοιχείο αρμονικής παρεμπόδισης και αποτρέπει τον ηλεκτρονόμο από λανθασμένη ενεργοποίηση.



Σχήμα 6.13 Ενεργοποίηση του μετασχηματιστή με ανοικτοκυκλωμένο το δευτερεύον



Σχήμα 6.14 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος κατά την ενεργοποίηση του μετασχηματιστή

Βιβλιογραφία

1. Anderson, P.M. (1999). Power System Protection. New York: IEEE Press.
2. Blackburn, J.L. (1998). Protective Relaying Principles and Applications. New York: Marcel Dekker.
3. Christopoulos, C. and Wright, A. (1999). Electrical Power System Protection. London: Kluwer Academic Publishers.
4. Grainger, J.J. Stevenson, W.D., Jr. (1994). Power System Analysis. New York, McGraw-Hill, Inc.
5. Du, D.X. Bo, Z.Q. Zhou, Z.X. Perks, A. Denning, L. and Simth, B. (2006). An advanced real time simulator based test system for protection relays. Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, vol. 5, pp. 851-855.
6. Du, D.X. Wang, H.G. Bo, Z.Q. Zhou, Z.X. Dong, X.Z. Caunce, B.R.J. and Klimek, A. (2006). Design of a real time digital simulation system for test of new protection schemes. International Conference on Power System Technology, pp. 1-6.
7. Guzman, A. Zocholl, S. Benmouyak, G. Altuve, H.J. (2001). A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection – Part I: Problem Statement. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 485-491.
8. Guzman, A. Zocholl, S. Benmouyak, G. Altuve, H.J. (2002). A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection – Part II: Relay Description and Evaluation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp. 886-893.
9. Einval, C. H. and Linders, J. R. (1975). A three-phase differential relay for transformer protection, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-94, no. 6, pp. 1971–1980.
10. Kennedy, L. F. and Hayward, C. D. (1938). Harmonic-current-restrained relays for differential protection, AIEE Transactions, vol. 57, pp. 262–266.
11. Hayward, C. D. (1941). Harmonic-current-restrained relays for transformer differential protection, AIEE Transactions, vol. 60, pp. 377–382.
12. Mathews, C. A. (1954). An improved transformer differential relay, AIEE Transactions, pt. III, vol. 73, pp. 645–650.
13. Sharp, R. L. and Glassburn, W. E. (1958). A transformer differential relay with second-harmonic restraint, AIEE Transactions, pt. III, vol. 77, pp. 913–918.

14. Bertula, G. (1945). Enhanced transformer protection through inrush-proof ratio differential relays, *Brown Boveri Review*, vol. 32, pp. 129–133.
15. Rockefeller, G. D. (1969). Fault protection with a digital computer, *IEEETrans. PAS*, vol. PAS-98, pp. 438–464.
16. Hegazy, M. (1969). New principle for using full-wave rectifiers in differential protection of transformers, *IEE Proceedings*, vol. 116, pp. 425–428.
17. Dmitrenko, A. M. (1979). The use of currentless pauses for detuning differential protection from transient imbalance currents, *Elektrichestvo*, no. 1, pp. 55–58.
18. Costello, D. Lessons Learned Through Commissioning and Analyzing Data From Transformer Differential Installations. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
19. Costello, D. and Gregory, J. Determining the Correct TRCON Setting in the SEL-587 Relay When Applied to Delta-Wye Power Transformers. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
20. SEL-587 -0 -1 Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., date code 20071025.
21. Gross, L. Protecting $\pm 30^\circ$ and $\pm 150^\circ$ Delta-Wye Transformers with the SEL-587 Relay. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
22. Real-Time Digital Simulator Hardware Manual, RTDS Technologies 2001
23. Real-Time Digital Simulator Power System Users Manual, RTDS Technologies 2001
24. Real-Time Digital Simulator Controls Library Manual, RTDS Technologies 2001
25. Real-Time Digital Simulator Tutorial Manual, RTDS Technologies 2003