



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Ενεργειακά Συστήματα»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΡΟΗΦΟΡΟΥ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΣΗΣ
ΤΑΣΗΣ 20KV ΣΤΟ ΣΗΕ ΚΡΗΤΗΣ»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Παναγιώτη Δρακονταειδή

Επιβλέπων

**Δρ Εμμανουήλ Καραπιδάκης, Αν. Καθηγητής, Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ**

Ηράκλειο, Ιούνιος 2017

Ευχαριστίες

Η επίβλεψη και καθοδήγηση της παρούσας εργασίας ανήκει στον Καθηγητή κ. Εμμανουήλ Καραπιδάκη, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την επιστημονική βοήθειά του καθώς και για τις υποδείξεις και διορθώσεις του, χωρίς τις οποίες θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αντώνιο Τσικαλάκη για τις εύστοχες και εποικοδομητικές παρατηρήσεις του, καθώς επίσης και κάποιον που θέλησε να διατηρήσει την ανωνυμία του για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε στην παραχώρηση των στοιχείων της υπό μελέτης γραμμής που χρησιμοποιήθηκαν στο 5ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΣΥΝΟΨΗ – ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii-vi
------------------------	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

1.1 Βασική δομή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1
1.2 Σκοπός της προστασίας των ΣΗΕ.....	2
1.3 Κατηγορίες μεταβατικών φαινομένων στα ΣΗΕ.....	3
1.4 Είδη σφαλμάτων στα δίκτυα διανομής.....	4
1.5 Ένταση βραχυκυκλώσεως.....	5
1.6 Ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών.....	6
1.6.1 Συμμετρικό και ασύμμετρο σύστημα.....	6
1.6.2 Ο τριφασικός στροφέας \dot{a}	6
1.6.3 Ανάλυση ασύμμετρου τριφασικού συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες.....	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΝΤΑΣΕΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΓΗΣ

2.1 Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως για την ανάλυση της προστασίας των γραμμών διανομής.....	11
2.1.1 Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης στην αρχή της γραμμής.....	11
2.1.2 Προσδιορισμός της ελάχιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το διφασικό, μη πλήρες σφάλμα χωρίς επαφή γης στο τέλος της γραμμής.....	16
2.1.3 Προσδιορισμός της ελάχιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες μονοφασικό σφάλμα στο τέλος της γραμμής.....	20
2.1.4 Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες μονοφασικό σφάλμα στην αρχή της γραμμής.....	24
2.1.5 Σύγκριση των μέτρων των εντάσεων βραχυκυκλώσεως για τις τέσσερις περιπτώσεις διαταραχών που μελετήθηκαν.....	24
2.2 Υπερπήδηση ρεύματος από τη Μέση Τάση προς τη Χαμηλή Τάση.....	26
2.3 Θερμική αντοχή γυμνών αγωγών σε βραχυκύκλωμα.....	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΤ

3.1 Βασικά στοιχεία συστήματος προστασίας δικτύων διανομής ΜΤ.....	39
3.2 Ηλεκτρονόμοι υπερεντάσεως επαγωγικού τύπου.....	39
3.2.1 Περιγραφή και αρχή λειτουργίας των επαγωγικών ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως.....	39
3.2.2 Βασικές παράμετροι ηλεκτρονόμων επαγωγικού τύπου.....	41
3.2.3 Κατηγορίες ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως επαγωγικού τύπου.....	42
3.3 Μέσα προστασίας δικτύων διανομής ΜΤ.....	43

3.3.1 Ελαιοδιακόπτες (Ε/Δ) υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ.....	43
3.3.2 Διακόπτες Αυτόματου Επαναφοράς (Δ/Α.Ε.).....	46
3.3.3 Διακόπτες Απομονώσεως (Δ/Α).....	47
3.3.4 Ασφάλειες ΜΤ.....	48
3.4 Εκλογή της θέσης και του είδους των μέσων προστασίας των δικτύων ΜΤ.....	50
3.5 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων ελαιοδιακόπτη.....	54
3.6. Επιλογή ασφαλειών ΜΤ για την προστασία Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ και διακλαδώσεων.....	56
3.7 Μέγιστο ρεύμα σφάλματος γης γραμμών ΜΤ.....	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΤ

4.1 Γενικά.....	60
4.2 Επιπτώσεις από τη σύνδεση ανεξάρτητων παραγωγών στο δίκτυο διανομής.....	60
4.3 Προϋποθέσεις παράλληλης λειτουργίας.....	61
4.4 Σύνδεση ανεξάρτητων παραγωγών που διαθέτουν ανεμογεννήτριες στο δίκτυο ΜΤ.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΡΟΗΦΟΡΟΥ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΤ

5.1 Εισαγωγή.....	65
5.2 Δεδομένα προβλήματος.....	66
5.3 Επιλογή ασφαλειών ΜΤ για την προστασία των μ/σ διανομής.....	66
5.4 Επιλογή ασφαλειών ΜΤ για την προστασία των διακλαδώσεων.....	68
5.5 Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως.....	69
5.6 Καθορισμός των περιοχών σφαλμάτων φάσεων και γης.....	71
5.7 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων ελαιοδιακόπτη.....	73

ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
-----------------------------------	-----------

Παραρτήματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Καμπύλες λειτουργίας ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως.....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου-εντάσεως ασφαλειών βραδείας και ταχείας τήξης εναερίων γραμμών διανομής ΜΤ.....	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Σχεδιαγράμματα δικτύου – μελέτης προστασίας.....	87
Βιβλιογραφία.....	91

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΡΟΗΦΟΡΟΥ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ 20KV
ΣΤΟ ΣΗΕ ΚΡΗΤΗΣ»**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

Παναγιώτης Δρακονταειδής

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

**Δρ Εμμανουήλ Καραπιδάκης, Αν. Καθηγητής, Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ**

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:

2016-17

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος σπουδών με τίτλο *Ενεργειακά Συστήματα* του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης και αφορά τη μελέτη της προστασίας ροηφόρου γραμμής διανομής Μέσης Τάσης (ΜΤ), καθώς και των διακλαδώσεων της, η οποία περιλαμβάνει και ανεξάρτητους παραγωγούς. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται μέσα από ανασκόπηση της τεχνικής βιβλιογραφίας, των Κανονισμών, των Τεχνικών Οδηγιών και των Προδιαγραφών του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) και εφαρμόζεται σε μια περίπτωση ροηφόρου γραμμής Μέσης Τάσης που προέκυψε από πραγματικά δεδομένα της νήσου Κρήτης.

Η εργασία αυτή αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια. Τα τέσσερα πρώτα αποτελούν το θεωρητικό μέρος της εργασίας και περιλαμβάνουν τόσο την ανάλυση και το σχεδιασμό της κλασικής προστασίας των γραμμών διανομής ΜΤ όσο και τις τεχνικές προδιαγραφές για τη σύνδεση των ανεξάρτητων παραγωγών στα εν λόγω δίκτυα ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των ανεξάρτητων παραγωγών. Το πέμπτο κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται εφαρμογή της μελέτης προστασίας σε μια γραμμή διανομής ΜΤ του ΔΕΔΔΗΕ, αποτελεί το πρακτικό μέρος της εργασίας. Πραγματοποιείται δηλαδή αναλυτικός και γραφικός προσδιορισμός όλων των απαιτούμενων μέσων προστασίας και ελέγχεται η επιλογική τους συνεργασία. Πρόκειται για μια διαδικασία σύνθετη, που απαιτεί πολλούς υπολογισμούς και δοκιμές μέχρι την επιλογή του βέλτιστου σεναρίου προστασίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρής πολυπλοκότητας δίκτυα διανομής ΜΤ για την ρύθμιση των μέσων προστασίας τους.

Περίληψη

Η ηλεκτρική μελέτη των δικτύων διανομής αφορά τους υπολογισμούς όλων των ηλεκτρικών παραμέτρων των εν λόγω δικτύων και είναι ένα αντικείμενο πολύπλευρο μιας και εκτείνεται σε τομείς όπως: *οι επιτρεπόμενες φορτίσεις των αγωγών και καλωδίων και η ικανότητα υπερφόρτισής τους, η αντοχή των αγωγών σε βραχυκυκλώματα, η ρύθμιση τάσης, οι γειώσεις, οι ηλεκτρικές απώλειες κ.α.* Ένα από τα αντικείμενα της ηλεκτρικής μελέτης των δικτύων είναι και η *προστασία των γραμμών και των υποσταθμών τους*. Η προστασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) υπό μεταβατικές συνθήκες (σφάλματα). Μια από τις δυσμενέστερες επιπτώσεις των σφαλμάτων στα ΣΗΕ είναι ότι οι υπερεντάσεις που προκαλούνται από τα βραχυκυκλώματα δημιουργούν σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια τόσο των καταναλωτών όσο και του προσωπικού της ηλεκτρικής εταιρείας, ενώ καταπονούν θερμικά και μηχανικά τα διάφορα στοιχεία του δικτύου που τις υφίστανται. Οι βασικοί στόχοι ενός συστήματος προστασίας είναι: α) να προλάβει ή να ελαχιστοποιήσει κατά το δυνατό την καταστροφή εξοπλισμού, β) να ελαχιστοποιήσει τα τμήματα του δικτύου που αποσυνδέονται κατά την εκδήλωση ενός σφάλματος καθώς και τη διάρκεια της αποσύνδεσης γ) να ελαχιστοποιήσει τις διαταραχές στη συχνότητα και την τάση τροφοδοσίας των καταναλωτών και δ) να διατηρήσει τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος.

Ένα σύστημα προστασίας αποτελείται κατά κύριο λόγο από τα εξαρτήματα τα οποία ανιχνεύουν τμήματα του δικτύου τα οποία έχουν υποστεί βλάβη (ηλεκτρονόμοι) και από εκείνα που τα απομονώνουν (διακόπτες ισχύος). Μια τέτοια βλάβη συνίσταται συνήθως σε βραχυκύκλωμα που εκδηλώνεται άμεσα ή εξελίσσεται σταδιακά. Σε κάθε τέτοια περίπτωση το στοιχείο του συστήματος στο οποίο εντοπίζεται η βλάβη πρέπει ν' απομονώνεται το ταχύτερο δυνατό, ώστε να περιοριστεί η βλάβη σ' αυτό, να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στο υπόλοιπο σύστημα και να αποφευχθούν καταστάσεις επικίνδυνες για την ασφάλεια προσώπων.

Στην εργασία αυτή μελετάται ο σχεδιασμός του συστήματος προστασίας των ροηφόρων γραμμών διανομής ΜΤ που περιλαμβάνουν και ανεξάρτητους παραγωγούς. Για την πληρέστερη αντιμετώπιση του ζητήματος, γίνεται

εφαρμογή της εν λόγω μελέτης προστασίας σε μια εναέρια ροηφόρο γραμμή MT που προήλθε από πραγματικά δεδομένα του δικτύου του Ν. Ρεθύμνου της νήσου Κρήτης. Επειδή η εν λόγω γραμμή περιείχε αρκετές δεκάδες διακλαδώσεων και υποδιακλαδώσεων και για να προσδιοριστούν οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων προστασίας της θα πρέπει να προσδιοριστούν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των σφαλμάτων γης και φάσεων σε όλα τα κομβικά της σημεία, προτιμήσαμε να την περιορίσουμε σε μήκος, αφαιρώντας ορισμένες από τις διακλαδώσεις της, με σκοπό να περιοριστεί το πλήθος των επαναλαμβανόμενων υπολογισμών που δεν θα πρόσθεταν κάτι καινούριο, χωρίς από την άλλη να μεταβάλλεται και να επηρεάζεται η διαδικασία υπολογισμού της προστασίας της.

Όσων αφορά το θεωρητικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, αυτό αναπτύσσεται σε τέσσερα κεφάλαια. Αναλυτικότερα, στα δυο πρώτα κεφάλαια και αφού αρχικά γίνει μια σύντομη αναφορά στη βασική δομή των ΣΗΕ, αναλύεται ο σκοπός της προστασίας και οι κατηγορίες μεταβατικών φαινομένων στα ΣΗΕ. Παρουσιάζονται τα είδη και οι κατηγορίες των σφαλμάτων στα δίκτυα διανομής και στη συνέχεια οι εξισώσεις που καθορίζουν την περιοχή των τιμών των σφαλμάτων βάση της οποίας πραγματοποιείται η ρύθμιση των μέσων προστασίας. Παρουσιάζονται δηλαδή οι σχέσεις που υπολογίζουν τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλματα φάσεων και γης, όπως ακριβώς τις ορίζει η Οδηγία Διανομής Νο21 του ΔΕΔΔΗΕ. Στη συνέχεια και με βάση την κλασική ανάλυση των συμμετρικών συνιστωσών, γίνεται απόδειξη των προηγούμενων σχέσεων, για να καταλήξουμε σε μια μεταξύ τους σύγκριση προκειμένου να διαπιστώσουμε τη σημαντικότητα του καθενός σφάλματος. Το δεύτερο κεφάλαιο επίσης ολοκληρώνεται εξετάζοντας δυο ακόμα βασικά, αλλά πολύ σπουδαία θέματα που αφορούν την προστασία των δικτύων διανομής. Πρόκειται για το ζήτημα της υπερπήδησης ρεύματος από τη Μέση Τάση προς τη Χαμηλή Τάση (XT) και για το ζήτημα της θερμικής αντοχής των αγωγών σε βραχυκυκλώματα. Από την ανάλυση του ζητήματος της υπερπήδησης ρεύματος από τη MT στη XT προσδιορίσαμε την καμπύλη προστασίας του ανθρώπου. Η καμπύλη αυτή εκφράζει τη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιεί η ένταση σφάλματος σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας των μέσων προστασίας για σφάλματα γης, έτσι ώστε το ακίνδυνο ρεύμα που θα διέλθει μέσα από το ανθρώπινο σώμα σε περίπτωση υπερπήδησης να ικανοποιεί τη συνθήκη του Dazlier. Το γραφικό αυτό δηλαδή αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη κάτω από την οποία θα πρέπει να λειτουργούν όλα τα μέσα προστασίας που ελέγχουν τα σφάλματα προς γη. Όσων αφορά το ζήτημα της θερμικής αντοχής των αγωγών σε βραχυκυκλώματα αυτό εξετάστηκε με την παραδοχή ότι επειδή τα εν λόγω σφάλματα έχουν μικρή διάρκεια, μέχρι να ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας δεν γίνεται αξιόλογη απαγωγή της θερμότητας προς το περιβάλλον. Ως συνέπεια, η παραγόμενη θερμότητα απωλείν διατίθεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας των αγωγών και για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή της διατομής τους.

Το τρίτο κεφάλαιο διαπραγματεύεται την κλασική μεθοδολογία προστασίας των γραμμών διανομής MT βάση της Τυποποίησης και των Οδηγιών του ΔΕΔΔΗΕ. Αρχικά, περιγράφεται η λειτουργία, οι παράμετροι και οι κατηγορίες των ηλεκτρονόμων υπερεντάσεων επαγωγικού τύπου, ως δομικά στοιχεία των διακοπών προστασίας, μιας και χωρίς την περιγραφή αυτή θα ήταν αδύνατη η κατανόηση του τρόπου ρυθμίσεως των μέσων αυτών. Στη συνέχεια και αφού παρουσιάστηκαν τα μέσα προστασίας των εναέριων δικτύων διανομής MT (ελαιοδιακόπτες, διακόπτες απομονώσεως, διακόπτες αυτόματου επαναφοράς, ασφάλειες) καθώς και η αρχή λειτουργίας τους, αναφέρθηκαν οι αρχές για την εκλογή της θέσης και του είδους τους. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με τη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων των ελαιοδιακοπών προστασίας κορμών και την επιλογή των ασφαλειών MT για την προστασία υποσταθμών διανομής και διακλαδώσεων. Σημαντικό κομμάτι του κεφαλαίου αυτό αποτελεί και η τελευταία παράγραφός του, στην οποία συγκρίνεται η καμπύλη προστασίας του ανθρώπου που εξάγαμε στο πρώτο κεφάλαιο με τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του ηλεκτρονόμου γης FIR-COE-11 που αποτελεί τον βασικό ηλεκτρονόμο των μέσων προστασίας για σφάλματα γης που χρησιμοποιείται στο Εθνικό μας δίκτυο. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα σφάλματος γης που δέχεται ο ΔΕΔΔΗΕ στα δίκτυά του (=1000A), τιμές μεγαλύτερες του οποίου θα πρέπει να διακόπτονται, μιας και λόγω υπερπήδησης επιφέρουν επικίνδυνες εντάσεις δια μέσω του ανθρώπινου σώματος. Επίσης, από την παράγραφο αυτή διαφαίνεται και ο λόγος που η μέγιστη τυποποιημένη ασφάλεια MT είναι αυτή των 30A (χαρακτηριστική καμπύλη της κάτωθεν της καμπύλης προστασίας του ανθρώπου).

Το τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αναφέρεται στις προϋποθέσεις που ορίζει η Οδηγία Νο129 του ΔΕΔΔΗΕ για τη σύνδεση και παράλληλη λειτουργία των μονάδων των ανεξάρτητων παραγωγών με τα δίκτυα διανομής MT, καθώς και στον απαιτούμενο εξοπλισμό προστασίας τους, με στόχο η πλειονότητα των περιπτώσεων να αντιμετωπίζονται άμεσα, χωρίς την ανάγκη τροποποίησης των κριτηρίων λειτουργίας του δικτύου διανομής. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι επιπτώσεις από τη σύνδεση στο δίκτυο διανομής MT των ανεξάρτητων παραγωγών που διαθέτουν σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες, οι προϋποθέσεις της παράλληλης λειτουργίας τους καθώς και οι ρυθμίσεις των μεταξύ τους μέσων προστασίας.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί και το πρακτικό μέρος της εργασίας, στο οποίο γίνεται εφαρμογή της μελέτης προστασίας σε μια γραμμή διανομής MT του ΔΕΔΔΗΕ. Πραγματοποιείται δηλαδή αναλυτικός και γραφικός προσδιορισμός όλων των απαιτούμενων μέσων προστασίας και ελέγχεται η επιλογική τους συνεργασία. Πρόκειται όπως θα δούμε για μια διαδικασία σύνθετη, που απαιτεί πολλούς υπολογισμούς και δοκιμές μέχρι την επιλογή του βέλτιστου σεναρίου προστασίας. Μια διαδικασία που σε εκτεταμένα δίκτυα του Εθνικού μας δικτύου διανομής είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις ιδιωτικών γραμμών ανεξάρτητων παραγωγών για την ρύθμιση των μέσων προστασίας τους.

POST-GRADUATE THESIS: «Study of Protection of a Medium Voltage 20KV Distribution Line in Crete Power System (P.S.)»

STUDENT: Panagiotis Drakontaeidis

SUPERVISOR: Dr. Emmanuel Karapidakis, Associate Professor, Electrical Engineering Department

ACADEMIC YEAR: 2016-17

Abstract

This thesis was conducted within the framework of the Interdepartmental Postgraduate Programme of Studies entitled *Energy Systems* of the Technological Educational Institute of Crete and concerns the study of protection of the medium voltage (MV) distribution lines and its branches, which also includes individual producers. This study is carried out through a review of the Technical Bibliography, the Regulations, the Technical Instructions and the Specifications of the Hellenic Electricity Distribution Network Operator (HEDNO) and is applied in a case of a medium voltage distribution grid resulting from actual data on the island of Crete.

This study is divided in five chapters. The first four are the theoretical part of the thesis and include both the analysis and design of the typical protection of MV distribution lines, the technical specifications for linking individual producers to these grids so that on the one hand not to cause discomfort to other consumers and on the other hand to be compatible between the distribution grid and individual producer facilities. The fifth chapter, in which the protection study is implemented in a MV distribution line of the Hellenic Electricity Distribution Network Operator, is the applied part of this project. Analytical and graphical determination of all required means of protection is carried out and their selective cooperation is checked. This is a complicated process that requires many calculations and tests until the optimal protection scenario is selected, which can be used in little complexity MV distribution lines to regulate their means of protection.

Summary

The electrical study of distribution grids deals with the calculations of all the electrical parameters of these grids and is a complex object since it extends to areas such as: allowable charge of cable wires and their overload capability, short circuit strength, voltage regulation, grounding, electrical losses etc. One of the objects of the electrical study of distribution grids is the protection of the lines and their substations. Protection is one of the most important factors affecting the operation of a Power System under transient conditions (faults). One of the worst implications of the failures in the power supply is that overcurrents caused by short circuits pose serious risks to the safety of both the consumers and the electrician's personnel of the electric provider, while stressing the various components of their grid thermally and mechanically. The main objectives of a protection system are: a) to prevent or minimize the destruction of equipment as far as possible, b) to minimize the parts of the grid disconnected at the occurrence of a fault and the duration of the disconnection; c) to minimize the frequency disturbances and the consumer supply voltage and d) to maintain the dynamic stability of the system.

A protection system consists predominantly of components that detect portions of the damaged grid (relays) and those that isolate them (power switches). Such a failure usually consists of a short-circuit which is directly manifested or progressing gradually. In such case, the component of the damage system must be isolated as soon as possible in order to limit the damage to the system, to minimize the impact on the rest of the system and to avoid situations which are dangerous to the safety of the consumers. In this project, the design of the protection system of the MV overhead distribution lines including individual producers, is being studied. In order to address this issue more thoroughly, this study is implemented in an aerial MV line in Rethymno, Crete. Since this line is composed of several dozen branches and sub-branches and as in order to define the settings of relay protection, we need to determine the maximum and minimum values of earth fault and phase to all the nodal points, we chose to reduce it in length. Thus, some of its branches were removed, so as to limit the number of repetitive calculations that did not add anything new, without on the other hand changing and affecting the calculation process of protection.

What concerns the theoretical part of the thesis, is developed in four chapters. More specifically, in the first two chapters after a brief reference is made to the basic structure of the Power System, the purpose of the protection and the categories of transition phenomenon of the Electrical Power Grid are analyzed. The types and categories of faults in distribution grids are presented, and then the mathematical equations that determine the range of error values under which the protection measures are set. The equations that they calculate the maximum and minimum value of the short circuit voltage for phases and earth faults, as defined by the Distribution Directive No.21 of the Hellenic Electricity Distribution Network Operator (HEDNO), are presented. Then, based on the classical analysis of the symmetrical components, we prove the previous equations, in order to arrive at a comparison between them, so as to determine the significance of each fault. The second chapter as well, deals with the protection of distribution grids by examining two more, equally important issues. One of which is the issue of jumping current from Medium Voltage (MV) to Low Voltage (LV) and the other is the issue of thermal resistance of the conductors to short circuits. From the analysis of the jumping current from MV to LV issue, we determined the human protection curve. This curve expresses the condition which has to be satisfied by the fault rate with respect to the operating time of earth fault protection means, so that the harmless current passing through the human body in the event of a skirmish satisfies the Dazlier condition. This graph is the characteristic curve under which all the protection means that control the earth faults should operate. Concerning the thermal resistance of cables in short circuits, this was examined with the assumption that because these errors are short-lived, until the activation of the protection means, there is no significant evacuation of the heat to the environment. As a result, the heat loss produced is available to raise the temperature of the cables, and for this reason an appropriate selection of their cross-section should be made.

The third chapter deals with the typical methodology of protection of MV distribution lines based on standardization and the directives of the HEDNO. Initially, the function, parameters and classes of the inductive type of overcurrent relays are described as building blocks of the protection switches, since without this description it would be impossible to understand how to regulate these means. Then, after the means of protection of the MV distribution grids (oil switches, isolation switches, auto-reset switches, fuses) and their operating principle were presented, the principles for the location and the type of their choice were mentioned. This chapter is completed by regulating the relays of oil switches and selecting the MV fuses for the protection of branches and substations. An important part of this chapter is its last paragraph, which compares the human protection curve exported to the first chapter with the characteristic curve of the FIR-COE-11 earth relay, which is the main relay of earth fault protection devices used in our National Grid. This comparison shows the maximum permissible ground fault current received by HEDNO in its grids (= 1000A), values greater than that which should be interrupted, because of the overshooting they cause dangerous tensions through the human body. Also in this paragraph is illustrated the reason why the maximum standard MT fuse is that of 30A (characteristic curve below the human protection curve).

The fourth chapter of this study refers to the conditions set out in the Directive No.129 of the HEDNO for the connection and parallel operation of the individual producer units with the MV distribution grids, as well as the required protection equipment, so that the majority of their cases being dealt with directly, without the need to modify the operating criteria of the distribution grid. More specifically, the effects of the connection to the MV distribution grid of individual producers with synchronous or asynchronous generators are mentioned together with the conditions of their parallel operation and the regulation of the means of protection among them are mentioned.

The fifth chapter, in which the protection study is implemented in a MV distribution line, is the applied part of this project. Analytical and graphical determination of all required means of protection is carried out and their selective cooperation is checked. This is a complex process that requires many calculations and tests until the optimal protection scenario is selected. A process that is very difficult to implement in our National Distribution Grids, but can be used in private independent production distribution lines to regulate their means of protection.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

1.1 Βασική δομή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)*, ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων (υποσταθμοί, γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, γραμμές διανομής, διακόπτες κ.α.) που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύνολο καταναλωτών.^[1] Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.^[2] Για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων, ένα ΣΗΕ αποτελείται από τα τρία παρακάτω υποσυστήματα:^[1]

α) Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το *Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας* περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (εγκατεστημένους στις πιο πρόσφορες περιοχές), στους οποίους παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια σε επαρκείς ποσότητες. Οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε *συμβατικούς σταθμούς* (οι οποίοι κάνουν χρήση συμβατικών γεωλογικών καυσίμων όπως λιθάνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, κ.α.) και σε *μη συμβατικούς* (οι οποίοι κάνουν χρήση *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΑΠΕ*). Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε *θερμοηλεκτρικούς* και *νηζελοηλεκτρικούς* σταθμούς. Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί διακρίνονται σε *ατμοηλεκτρικούς*, *αεριοστροβιλικούς* και *συνδυασμένου κύκλου*. Στους *μη συμβατικούς* σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συγκαταλέγονται κατά κύριο λόγο οι *αιολικοί σταθμοί* ηλεκτρικής ενέργειας που εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου, οι *φωτοβολταϊκοί σταθμοί* που εκμεταλλεύονται την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια, οι *σταθμοί βιομάζας* που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από *βιοκαύσιμα* και οι *υδροηλεκτρικοί σταθμοί*. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς μετατρέπεται η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια των υδάτων σε ηλεκτρική.^{[1],[5]}

β) Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το *Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας* διασύνδεει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής και μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από αυτούς προς τα κέντρα κατανάλωσης. Περιλαμβάνει τα *δίκτυα των γραμμών υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ)* και *υψηλής τάσης (ΥΤ)*, τους *υποσταθμούς μεταφοράς* για το μετασχηματισμό των διαφόρων επιπέδων υψηλής τάσης στα επίπεδα της μέσης τάσης (ΜΤ) και τα *Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ)* τα οποία εξυπηρετούν τις ανάγκες απομάστευσης ισχύος από το Σύστημα ΥΥΤ προς το Σύστημα της ΥΤ. Την ευθύνη για την ανάπτυξη, τη λειτουργία και τη συντήρηση του *Ελληνικού Συστήματος*

Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) έχει ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. συστάθηκε σύμφωνα με το Ν. 4001/2011 και σε συμμόρφωση με την Οδηγία 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Το ΕΣΜΗΕ περιλαμβάνει γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (66kV και 150kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV) διαφόρων ειδών και τύπων. Επιπλέον, είναι εγκατεστημένα υπόγεια καλώδια 150kV για τη μεταφορά ισχύος εντός των πυκνοκατοικημένων περιοχών της Πρωτεύουσας, τα οποία ανήκουν στο Δίκτυο των 150kV. Το ΕΣΜΗΕ περιλαμβάνει επίσης ένα πλήθος μετασχηματιστών όπως αυτομετασχηματιστές (ΑΜΣ) στα Κέντρα Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ), μετασχηματιστές που εξυπηρετούν τους σταθμούς παραγωγής της, μετασχηματιστές υποβιβασμού που εξυπηρετούν τις ανάγκες του δικτύου διανομής, μετασχηματιστές που εξυπηρετούν τις εγκαταστάσεις Πελατών ΥΤ κ.α.^{[1],[3]}

γ) Σύστημα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μέσω του *Συστήματος Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, η μεταφερόμενη ισχύς από τους υποσταθμούς μεταφοράς διανέμεται σε μικρότερες περιοχές στους καταναλωτές. Βασική συνιστώσα των δικτύων διανομής είναι οι *γραμμές διανομής*. Ανάλογα με το εύρος της τάσης που χρησιμοποιούν, οι γραμμές διανομής διακρίνονται σε: α) *Μέσης Τάσης (ΜΤ)* και β) *Χαμηλής Τάσης (ΧΤ)*. Την ευθύνη για την ανάπτυξη, τη λειτουργία και τη συντήρηση υπό οικονομικούς όρους, του *Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ)*, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη, αποδοτική και ασφαλής λειτουργία του έχει αναλάβει ο *Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ)*. Ο ΔΕΔΔΗΕ είναι ανώνυμη εταιρεία, 100% θυγατρική της ΔΕΗ Α.Ε. και συστάθηκε και αυτός με το Ν. 4001/2011.^[4]

Οι γραμμές διανομής ΜΤ του ΕΔΔΗΕ είναι τριφασικές χωρίς ουδέτερο, με τάση μεταξύ φάσεων 20kV. Στις γραμμές διανομής ΧΤ η τυποποιημένη τάση μεταξύ των φάσεων είναι σήμερα 400V, ενώ μεταξύ φάσεων και ουδετέρου είναι 230V. Μια ακόμα βασική συνιστώσα των δικτύων διανομής είναι οι μετασχηματιστές μέσης τάσης προς χαμηλή (Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ). Οι εν λόγω μετασχηματιστές μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα ΜΤ σε ρεύμα ΧΤ. Είναι μετασχηματιστές ισχύος, με λόγο μετασχηματισμού 20/0,4kV και συνδεσμολογία τριγώνου αστερά.^[8]

1.2 Σκοπός της προστασίας των ΣΗΕ

Η αυξανόμενη εξάρτηση της σύγχρονης κοινωνίας από την ηλεκτρική ενέργεια οδήγησε στα σημερινά πολύπλοκα και εκτεταμένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Με τη σημερινή οργάνωση της ζωής μας και η συντομότερη διακοπή της λειτουργίας των ΣΗΕ προκαλεί τρομακτική αναστάτωση στις δραστηριότητές μας, λόγω του μεγάλου πλήθους των ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιούμε στις σύγχρονες κοινωνίες. Επειδή όμως ανεξάρτητα των προσπαθειών μας πάντα θα συμβαίνουν σφάλματα στα ΣΗΕ, η αντιμετώπισή τους απαιτεί συστήματα προστασίας με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία και ακρίβεια.^[6] Από την εφαρμογή των συστημάτων προστασίας στα δίκτυα διανομής ΜΤ επιδιώκεται:^[7]

- 1) Η διακοπή τροφοδότησης σε περίπτωση ανωμαλιών, ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα που θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή ή περιουσία, όπως επίσης και να αποφεύγονται ζημιές στις εγκαταστάσεις τροφοδότησης
- 2) Η έκταση και η διάρκεια της διακοπής να είναι όσο το δυνατόν περιορισμένη.

Η συμβολή των συστημάτων προστασίας είναι να βοηθούν το υπόλοιπο σύστημα ισχύος να επιτυγχάνει το σκοπό του κατά τον αποδοτικότερο και αποτελεσματικότερο τρόπο στην περίπτωση σφαλμάτων. Τα συστήματα προστασίας ελαττώνουν:^[6]

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

1.3 Κατηγορίες μεταβατικών φαινομένων στα ΣΗΕ

Τα φαινόμενα που προκαλούν σημαντικές διαταραχές στα ΣΗΕ μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη διάρκειά τους:^{[2],[5]}

1) Υπερταχεία μεταβατικά (κυματικά) φαινόμενα. Τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα οφείλονται είτε στην πτώση κεραυνών στις γραμμές μεταφοράς είτε στις απότομες μεταβολές του δικτύου που προκαλούνται από διακοπτικές λειτουργίες. Αντιμετωπίζονται με αλεξικέραυνα τα οποία δρουν σαν βαλβίδες ασφαλείας, καθώς δεν επιτρέπουν τη δημιουργία υψηλών κυματικών τάσεων ικανών να διασπάσουν τη μόνωση των συσκευών. Η φύση των διαταραχών αυτών είναι τελειώς ηλεκτρική, αφορά αποκλειστικά τις γραμμές μεταφοράς και δεν θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία.^[5]

2) Μέσης ταχύτητας μεταβατικά φαινόμενα. Σε αυτή την κατηγορία μεταβατικών φαινομένων ανήκουν οι διαταραχές που οφείλονται στις απότομες, ανώμαλες δομικές αλλαγές (βραχυκυκλώματα) των επιμέρους συστημάτων του ΣΗΕ. Η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων συμβαίνει στις γραμμές μεταφοράς και διανομής και οφείλεται στη διάσπαση της μόνωσης που προκαλείται από πτώσεις δέντρων, κλαδιών σε θυελλώδεις ανέμους, θραύση μονωτήρων λόγω πάγου, δυσλειτουργία αλεξικέραυνων, συγκέντρωση πάγου στους αγωγούς κ.α..^[5] Η προστασία των γραμμών διανομής έναντι των φαινομένων αυτών είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

3) Βραδέα μεταβατικά φαινόμενα. Είναι από τις πιο σοβαρές διαταραχές μεταβατικής κατάστασης και εμφανίζεται αν το βραχυκύκλωμα που θα εμφανιστεί σε μια ζωτικής σημασίας γραμμή παραμείνει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις στους δρομείς των σύγχρονων μηχανών, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν στον αποσυγχρονισμό τους.^[5]

1.4 Είδη σφαλμάτων στα δίκτυα διανομής

Παρακάτω, με τον όρο «σφάλμα» στα δίκτυα διανομής θα εννοούμε το βραχυκύκλωμα που δημιουργείται όταν εμφανίζεται μειωμένη αντίσταση μόνωσης σε κάποιο σημείο της γραμμής. Βέβαια υπάρχουν και σπάνιες περιπτώσεις σφαλμάτων που δεν οφείλονται σε βραχυκυκλώματα (π.χ. διακοπή αγωγού γραμμής χωρίς να προκληθεί βραχυκύκλωμα). Τα σφάλματα, ανάλογα με τον χρόνο παραμονής τους στις γραμμές, διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: α) τα *παροδικά σφάλματα* και β) τα *μόνιμα σφάλματα*. Οι παραπάνω κατηγορίες σφαλμάτων ορίζονται ως εξής.^[7]

A) Παροδικά σφάλματα: είναι εκείνα που μπορούν να απαλειφθούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση στη θέση του σφάλματος.

α1) Αυτοαποσβενόμενα: είναι εκείνα τα οποία θα απαλείφονταν και χωρίς τη διακοπή της τάσης του δικτύου (π.χ. τόξο που δεν μπορεί να διατηρηθεί λόγω του σχετικά μεγάλου μήκους του).

α2) Κυρίως παροδικά: είναι εκείνα για τα οποία αρκεί μια στιγμιαία διακοπή (διάρκειας δεκάτων του δευτερολέπτου) για να απαλειφθούν.

α3) Ημιμόνιμα: είναι εκείνα που για την απόσβεσή τους δεν αρκεί μια στιγμιαία διακοπή αλλά απαιτείται διακοπή μεγαλύτερης διάρκειας (περισσοτέρων του ενός δευτερολέπτων).

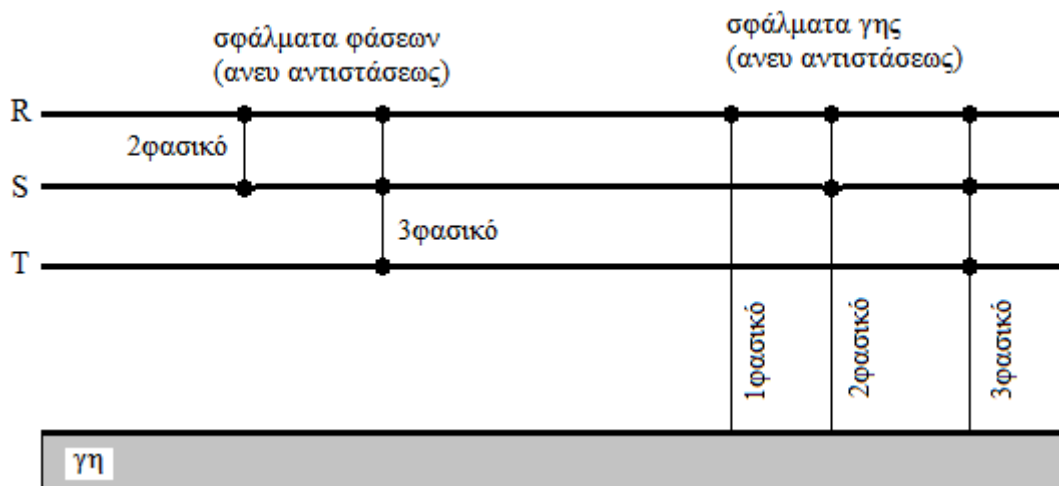
B) Μόνιμα σφάλματα: Τα σφάλματα που παραμένουν στη γραμμή ανεξαρτήτως τροφοδοτήσεώς της ή μη και απαιτούν επέμβαση προσώπου για να απομακρυνθούν.

Από τη στατιστική ανάλυση των σφαλμάτων έχει αποδειχτεί ότι τα μόνιμα σφάλματα είναι της τάξεως του 10% του συνόλου. Από το υπόλοιπο 90%, το 80% περίπου είναι κυρίως παροδικά, 10% αυτοαποσβενόμενα και 10% ημιμόνιμα.^[7]

Εκτός των παραπάνω κατηγοριών, τα σφάλματα διακρίνονται και ανάλογα με τον τρόπο που εκδηλώνονται. Έτσι έχουμε τα εξής είδη σφαλμάτων:^[7]

- *Σφάλματα φάσεων.* Εκδηλώνονται κατά την εμφάνιση μειωμένης αντίστασης μόνωσης μεταξύ φάσεων. Αυτά μπορεί να είναι «διφασικά» ή «τριφασικά».
- *Σφάλματα γης.* Οφείλονται στην μειωμένη αντίσταση μόνωσης μεταξύ αγωγού ή αγωγών φάσεων και γης. Αυτά μπορεί να είναι «μονοφασικά», «διφασικά» ή και «τριφασικά».

Τα σφάλματα φάσεων και γης μπορούν να είναι είτε άνευ αντιστάσεως (οπότε καλούνται *μεταλλικά* ή *στερεά*) είτε μέσω αντίστασης σφάλματος.



Σχήμα 1-1. Κατηγορίες σφαλμάτων ανάλογα με τον τρόπο που αυτά εκδηλώνονται^[9]

1.5 Ένταση βραχυκυκλώσεως

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, σε περίπτωση σφάλματος σε μια γραμμή, αυτή διαρρέεται από ρεύμα του οποίου η τιμή εξαρτάται πάντα από την αντίσταση της γραμμής μέχρι το σημείο του σφάλματος και την αντίσταση του ίδιου του σφάλματος. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται *ρεύμα βραχυκυκλώσεως*. Η γνώση της έντασης βραχυκυκλώσεως σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία μιας γραμμής, όπως π.χ. είναι η αρχή και το τέλος μιας διακλάδωσης και για τα δύο είδη σφαλμάτων (φάσεων και γης) αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον καθορισμό της προστασίας της γραμμής αυτής.

Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με το είδος του κάθε σφάλματος και της πιθανής τιμής της αντίστασής του, διαφορετικά σφάλματα στην ίδια θέση του δικτύου προκαλούν διάφορες τιμές εντάσεων βραχυκυκλώσεως. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο καθορισμός της περιοχής των τιμών των σφαλμάτων, δηλαδή ο καθορισμός της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως.

Για ένα τμήμα γραμμής στην αρχή του οποίου εγκαθίσταται ένα μέσο προστασίας (π.χ. για μια διακλάδωση) μας ενδιαφέρει η περιοχή εντάσεων βραχυκυκλώσεως για διάφορα είδη σφαλμάτων, τα οποία συμβαίνουν στα διάφορα σημεία του εν λόγω προστατευόμενου τμήματος. Με βάση την Οδηγία Διανομής 21 του ΔΕΔΔΗΕ, η περιοχή αυτή υπολογίζεται ξεχωριστά για σφάλματα φάσεων και γης, με βάση τις παρακάτω τιμές της έντασης βραχυκυκλώσεως:^[7]

1. Η μέγιστη τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως που προκαλείται κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα (αντίσταση σφάλματος μηδενική) στην αρχή της γραμμής διανομής (σφάλμα φάσεων)
2. Η ελάχιστη τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως που προκαλείται κατά το μη πλήρες διφασικό βραχυκύκλωμα στο άκρο της γραμμής διανομής (σφάλμα φάσεων). Η τιμή αυτή λαμβάνεται ίση με το 70% της προηγούμενης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως.
3. Η ελάχιστη τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως που προκαλείται κατά το μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη, μέσω αντίστασης σφάλματος 40Ω , στο άκρο της γραμμής διανομής (σφάλμα γης).

4. Η μέγιστη τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως που προκαλείται κατά το πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη στην αρχή της γραμμής διανομής (σφάλμα γης).

Στη συνέχεια και με βάση την ανάλυση των συμμετρικών συνιστωσών που ακολουθεί, θα προσδιοριστεί η μαθηματική σχέση που υπολογίζει την τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως για τις τέσσερις προαναφερθείσες περιπτώσεις σφάλματος.

1.6 Ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών

1.6.1 Συμμετρικό και ασύμμετρο σύστημα

Μόνο στην περίπτωση του τριφασικού σφάλματος τα μέτρα των εντάσεων βραχυκυκλώσεως είναι ίσα μεταξύ τους και συνιστούν συμμετρικό τριφασικό σύστημα. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις σφαλμάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα, οι εντάσεις των ρευμάτων βραχυκύκλωσης στις τρεις φάσεις του συστήματος είναι άνισες μεταξύ τους και για τον υπολογισμό τους δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί η κλασική μέθοδος των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων. Η πλέον συνήθης μέθοδος υπολογισμού των εντάσεων βραχυκυκλώσεως στα ασύμμετρα σφάλμα είναι αυτή των *συμμετρικών συνιστωσών*, που περιγράφεται στα επόμενα.

Γενικά, ένα σύστημα τριών διανυσματικών μεγεθών καλείται *συμμετρικό*, όταν ισχύουν ταυτόχρονα οι παρακάτω δυο συνθήκες:

- Τα μέτρα των τριών διανυσμάτων είναι ίσα
- Οι σχηματιζόμενες γωνίες μεταξύ των τριών διανυσμάτων είναι ίσες προς 120°

Ένα σύστημα τριών διανυσματικών μεγεθών καλείται *ασύμμετρο*, όταν δεν ισχύει έστω και μια από τις δυο προηγούμενες συνθήκες.

1.6.2 Ο τριφασικός στροφέας $\hat{\alpha}$

Για την καλύτερη μελέτη των συμμετρικών συνιστωσών, είναι σκόπιμη η εισαγωγή της έννοιας του *στροφέα $\hat{\alpha}$* (*turn operator*). Πρόκειται για ένα διάνυσμα με μέτρο ίσο προς τη μονάδα και γωνία ως προς τον πραγματικό άξονα αναφοράς ίση με 120° κατά τη θετική φορά. Δηλαδή:

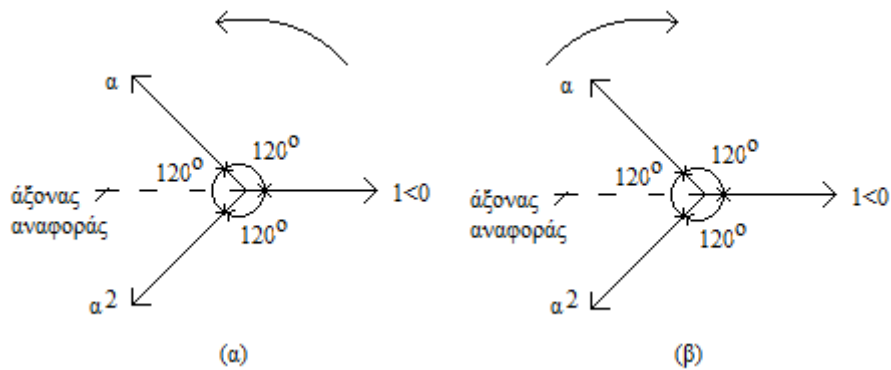
$$\hat{\alpha} = 1 \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \cdot \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} \quad 1.1$$

Θετική φορά περιστροφής ονομάζεται εξ' ορισμού η αντίθετη των δεικτών του ρολογιού και *αρνητική φορά* η αντίστροφη της θετικής φοράς περιστροφής ή αυτή που είναι ίδια με τη φορά περιστροφής των δεικτών του ρολογιού. Ο στροφέας $\hat{\alpha}$ έχει την ιδιότητα, όταν πολλαπλασιαστεί με ένα διάνυσμα να το περιστρέφει κατά 120° προς τη θετική φορά, χωρίς να μεταβάλλει το

μέτρο του. Όταν ο στροφάας a υψωθεί στο τετράγωνο, θα προκύψει ένα διάνυσμα το οποίο θα στραφεί ως τον πραγματικό άξονα αναφοράς κατά 240° προς τη θετική φορά (ή κατά 120° προς την αρνητική φορά αντίστοιχα). Η σχέση που συνδέει τα διανύσματα \dot{a} και \dot{a}^2 με το μοναδιαίο διάνυσμα 1 είναι:

$$\dot{a}^2 + \dot{a} + 1 = 0 \quad 1.2$$

Επομένως, τα διανύσματα 1 , \dot{a} και \dot{a}^2 θα αποτελούν ένα *συμμετρικό τριφασικό σύστημα θετικής φοράς περιστροφής*, όταν το \dot{a}^2 προπορεύεται του \dot{a} και αυτό προπορεύεται του μοναδιαίου διανύσματος 1 (σχήμα 1-2.α). Αντίθετα, αν το διάνυσμα \dot{a} έπεται του μοναδιαίου διανύσματος 1 και το \dot{a}^2 έπεται του \dot{a} , τότε προκύπτει ένα *συμμετρικό τριφασικό σύστημα αρνητικής ακολουθίας* (σχήμα 1-2.β).

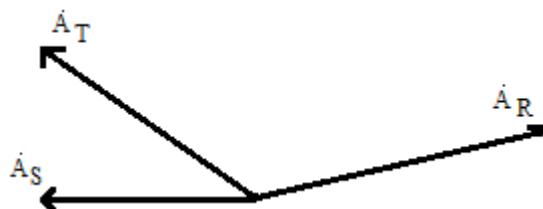


Σχήμα 1-2. (α) *συμμετρικό τριφασικό σύστημα θετικής φοράς των διανυσμάτων 1 , \dot{a} , και \dot{a}^2* (β) *αντίστοιχο τριφασικό σύστημα αρνητικής φοράς*

1.6.3 Ανάλυση ασύμμετρου τριφασικού συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες

Παρακάτω, θα δούμε πως μπορούμε να μετασχηματίσουμε ένα ασύμμετρο τριφασικό σύστημα σε τρία επιμέρους τριφασικά συμμετρικά υποσυστήματα. Με την ανάλυση αυτή θα μπορέσουμε στη συνέχεια να προσδιορίσουμε τις εντάσεις ενός ασύμμετρου σφάλματος, αναλύοντάς τες σε τρία επιμέρους συμμετρικά συστήματα.

Έστω το παρακάτω τριφασικό ασύμμετρο σύστημα των διανυσμάτων \dot{A}_R , \dot{A}_S , \dot{A}_T . Τα διανύσματα αυτά μπορεί να είναι π.χ. τάσεις ή εντάσεις.

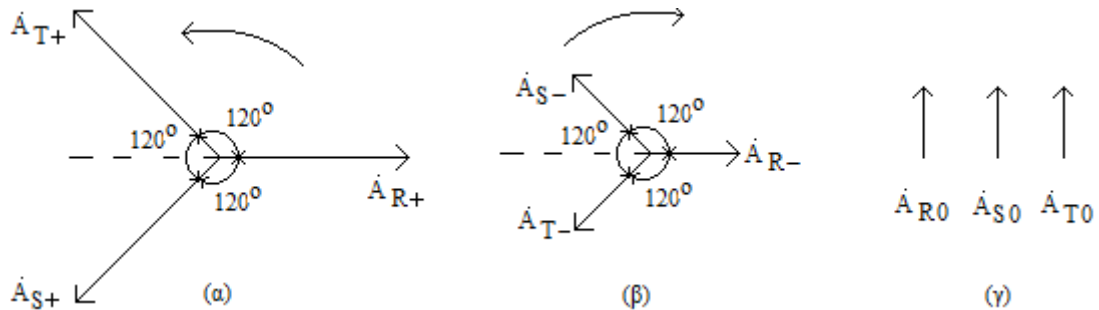


Σχήμα 1-3. *Παράδειγμα ασύμμετρου τριφασικού συστήματος*

Το εν λόγω σύστημα θα αποδείξουμε ότι μπορεί να προκύψει από τη σύνθεση τριών επιμέρους συμμετρικών συστημάτων ως εξής:

- α) ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα θετικής φοράς (σχήμα 1-4.α)
 β) ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα αρνητικής φοράς (σχήμα 1-4.β)
 γ) ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα μηδενικής φοράς (σχήμα 1-4.γ)

Τα εν λόγω συστήματα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 1-4. (α) συμμετρικό τριφασικό σύστημα θετικής φοράς (β) συμμετρικό τριφασικό σύστημα αρνητικής φοράς (γ) συμμετρικό τριφασικό σύστημα μηδενικής ακολουθίας του αρχικού ασύμμετρου συστήματος των διανυσμάτων A_R, A_S, A_T

Για το σύστημα θετικής φοράς ισχύουν:

$$\dot{A}_{R+} = \dot{A}_+ = A_+ < 0^\circ \quad 1.3$$

$$\dot{A}_{S+} = \alpha^2 \cdot \dot{A}_{R+} = \alpha^2 \cdot \dot{A}_+ = \alpha^2 \cdot A_+ < 240^\circ \quad 1.4$$

$$\dot{A}_{T+} = \alpha \cdot \dot{A}_{R+} = \alpha \cdot \dot{A}_+ = \alpha \cdot A_+ < 120^\circ \quad 1.5$$

Για το σύστημα αρνητικής φοράς ισχύουν:

$$\dot{A}_{R-} = \dot{A}_- = A_- < 0^\circ \quad 1.6$$

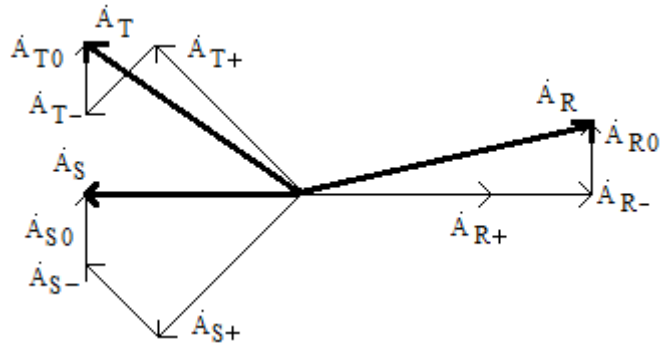
$$\dot{A}_{S-} = \alpha \cdot \dot{A}_{R-} = \alpha \cdot A_- < 120^\circ \quad 1.7$$

$$\dot{A}_{T-} = \alpha^2 \cdot \dot{A}_{R-} = \alpha^2 \cdot A_- < 240^\circ \quad 1.8$$

Για το σύστημα μηδενικής φοράς ισχύουν:

$$\dot{A}_{R0} = \dot{A}_{S0} = \dot{A}_{T0} = \dot{A}_0 = A_0 \quad 1.9$$

Όπου A_+ , A_- και A_0 είναι τα μέτρα των διανυσμάτων των συστημάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα. Πράγματι, η σύνθεση των τριών αυτών συστημάτων παρέχει το δοθέν αρχικό ασύμμετρο τριφασικό σύστημα $\dot{A}_R, \dot{A}_S, \dot{A}_T$.



Σχήμα 1-5. Η σύνθεση των τριών επιμέρους συμμετρικών συστημάτων, για την παραγωγή του αρχικού ασύμμετρου τριφασικού συστήματος

Στο προηγούμενο σχήμα ισχύουν ότι:

$$\dot{A}_R = \dot{A}_{R+} + \dot{A}_{R-} + \dot{A}_{R0} = \dot{A}_+ + \dot{A}_- + \dot{A}_0 \quad 1.10$$

$$\dot{A}_S = \dot{A}_{S+} + \dot{A}_{S-} + \dot{A}_{S0} = \alpha^2 \cdot \dot{A}_+ + \alpha \cdot \dot{A}_- + \dot{A}_0 \quad 1.11$$

$$\dot{A}_T = \dot{A}_{T+} + \dot{A}_{T-} + \dot{A}_{T0} = \alpha \cdot \dot{A}_+ + \alpha^2 \cdot \dot{A}_- + \dot{A}_0 \quad 1.12$$

Σε μορφή πινάκων, το παραπάνω σύστημα γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_R \\ \dot{A}_S \\ \dot{A}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}_+ \\ \dot{A}_- \\ \dot{A}_0 \end{bmatrix}$$

Με τη μέθοδο Grammer, η λύση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων ως προς τις συμμετρικές συνιστώσες \dot{A}_+ , \dot{A}_- και \dot{A}_0 προκύπτει από τους λόγους:

$$\dot{A}_+ = \frac{\begin{vmatrix} \dot{A}_R & 1 & 1 \\ \dot{A}_S & \alpha & 1 \\ \dot{A}_T & \alpha^2 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{vmatrix}}, \quad \dot{A}_- = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \dot{A}_R & 1 \\ \alpha^2 & \dot{A}_S & 1 \\ \alpha & \dot{A}_T & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{vmatrix}}, \quad \dot{A}_0 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & \dot{A}_R \\ \alpha^2 & \alpha & \dot{A}_S \\ \alpha & \alpha^2 & \dot{A}_T \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{vmatrix}}$$

Οι οποίοι τελικά δίνουν:

$$\dot{A}_+ = \frac{1}{3} \cdot (\dot{A}_R + \alpha \cdot \dot{A}_S + \alpha^2 \cdot \dot{A}_T) \quad 1.13$$

$$\dot{A}_- = \frac{1}{3} \cdot (\dot{A}_R + \alpha^2 \cdot \dot{A}_S + \alpha \cdot \dot{A}_T) \quad 1.14$$

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{A}_R + \dot{A}_S + \dot{A}_T) \quad 1.15$$

Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει ότι ένα τυχαίο ασύμμετρο τριφασικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί στα τρία συμμετρικά συστήματα συνιστωσών (θετικής, αρνητικής και μηδενικής

φοράς). Δοθέντων δηλαδή των τριών διανυσμάτων $\dot{A}_R, \dot{A}_S, \dot{A}_T$ του αρχικού ασύμμετρου συστήματος (που μπορεί να είναι τάσεις ή ρεύματα) και με τη βοήθεια του στροφέα $\dot{\alpha}$ (και του $\dot{\alpha}^2$ αντίστοιχα) είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συμμετρικών συνιστωσών \dot{A}_+, \dot{A}_- και \dot{A}_0 . Επειδή και τα τρία συστήματα αυτά είναι συμμετρικά, για την περιγραφή τους επαρκούν οι συνιστώσες της μιας φάσης (π.χ. της R). Οι συνιστώσες της φάσης R σε μητρική μορφή είναι:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_{0R} \\ \dot{A}_{+R} \\ \dot{A}_{-R} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^2 \\ 1 & \dot{\alpha}^2 & \dot{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}_R \\ \dot{A}_S \\ \dot{A}_T \end{bmatrix} \quad 1.16$$

2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΝΤΑΣΕΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΓΗΣ

2.1 Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως για την ανάλυση της προστασίας των γραμμών διανομής

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, σύμφωνα με την ΟΔ 21 του ΔΕΔΔΗΕ, για τον καθορισμό της προστασίας μιας ροηφόρου γραμμής διανομής ΜΤ μας ενδιαφέρει ο καθορισμός της περιοχής των τιμών των σφαλμάτων, δηλαδή ο καθορισμός της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως στα διάφορα τμήματά της. Η περιοχή αυτή υπολογίζεται ξεχωριστά για σφάλματα φάσεων και γης και καθορίστηκε στην παράγραφο 1.5. Στις επόμενες παραγράφους που ακολουθούν, με βάση την ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών που προηγήθηκε, θα προσδιοριστούν οι εξισώσεις που υπολογίζουν την ένταση βραχυκυκλώσεως για κάθε μια περίπτωση σφάλματος που ορίζει η ΟΔ 21 του ΔΕΔΔΗΕ. Η μέθοδος που ακολουθείται σε κάθε μια περίπτωση μπορεί να διαιρεθεί στα εξής βήματα:^[9]

- 1) Σχεδιάζεται το τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα στη θέση του σφάλματος
- 2) Καθορίζονται οι συνθήκες του σφάλματος στο αρχικό ασύμμετρο σύστημα R, S, T
- 3) Μετασχηματίζονται οι εξισώσεις σφάλματος από το ασύμμετρο σύστημα R, S, T στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας
- 4) Σχεδιάζονται τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών του αρχικού τριφασικού κυκλώματος
- 5) Υπολογίζονται οι ζητούμενες τάσεις ή εντάσεις στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών
- 6) Μετασχηματίζονται οι ζητούμενες τάσεις ή εντάσεις στο αρχικό σύστημα R, S, T

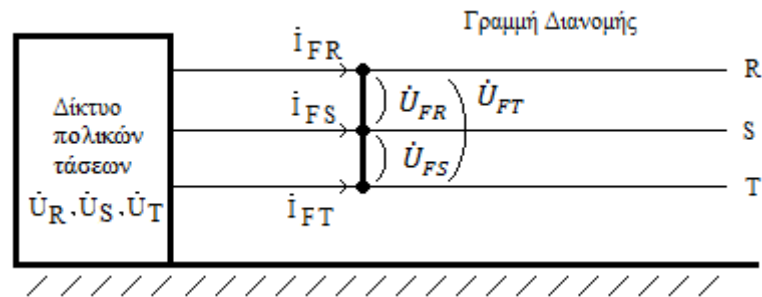
2.1.1 Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης στην αρχή της γραμμής

Στην περίπτωση αυτή μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της σχέσης που υπολογίζει την ένταση βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα (χωρίς επαφή με γη), στην αρχή μιας γραμμής διανομής. Με την έννοια *πλήρες*, νοείται ότι η αντίσταση σφάλματος Z_L μεταξύ των τριών βραχυκυκλωμένων φάσεων είναι μηδενική. Το πλήρες βραχυκύκλωμα ονομάζεται και *στερεό* ή *μεταλλικό*. Μας ενδιαφέρει η γνώση της τιμής της εν λόγω εντάσεως βραχυκυκλώσεως, γιατί κατά το σφάλμα αυτό μειώνεται σημαντικά η μεταφορική ικανότητα της γραμμής.^[5] Θυμίζετε πάλι ότι αν και μόνο αυτή η περίπτωση σφάλματος συνιστά συμμετρικό σύστημα εντάσεων και η ανάλυση με συμμετρικές συνιστώσες δεν προσφέρει στην ουσία κάποια

ευκολία, για την ενιαία αντιμετώπιση του ζητήματος και η ανάλυση αυτού του σφάλματος θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών.^[9]

Βήμα 1: Σχεδίαση του τριφασικού ισοδύναμου κυκλώματος στη θέση του σφάλματος

Το ισοδύναμο τριφασικό κύκλωμα για την περίπτωση του βραχυκυκλώματος αυτού φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2-1. Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης^[9]

Στο σχήμα αυτό είναι:

I_{FR}, I_{FS}, I_{FT} = διανύσματα των ρευμάτων γραμμών στο σημείο του σφάλματος στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T [A]

U_R, U_S, U_T = διανύσματα πολικών τάσεων δικτύου στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T [V]

U_{FR}, U_{FS}, U_{FT} = διανύσματα τάσεων σφάλματος στο σύστημα R, S, T [V]

Βήμα 2: Καθορισμός των συνθηκών σφάλματος στο αρχικό σύστημα R, S, T

Οι συνθήκες σφάλματος στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T είναι:

$$U_{FR} = U_{FS} = U_{FT} = 0 \quad 2.1$$

$$I_{FR} + I_{FS} + I_{FT} = 0 \quad 2.2$$

Βήμα 3: Μετασχηματισμός των εξισώσεων σφάλματος από το ασύμμετρο σύστημα R, S, T στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών

Με βάση τις σχέσεις 1.13, 1.14 και 1.15, οι τρεις συνιστώσες της τάσης σφάλματος U_{FR} από το σύστημα R, S, T στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών είναι:

$$U_{FR+} = \frac{1}{3} \cdot (U_{FR} + \alpha \cdot U_{FS} + \alpha^2 \cdot U_{FT}) \quad 2.3$$

$$U_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (U_{FR} + \alpha^2 \cdot U_{FS} + \alpha \cdot U_{FT}) \quad 2.4$$

$$U_{FR0} = \frac{1}{3} \cdot (U_{FR} + U_{FS} + U_{FT}) \quad 2.5$$

Για $\dot{U}_{FR} = \dot{U}_{FS} = \dot{U}_{FT} = 0$ (σχέση 2.1) προκύπτει ότι:

$$\dot{U}_{FR+} = \dot{U}_{FR-} = \dot{U}_{FR0} = 0 \quad 2.6$$

Επειδή οι εναλλακτήρες και γενικά τα τριφασικά δίκτυα παράγουν φασική τάση ορθής φοράς, στο προκύπτον σύστημα δεν θα υπάρχουν φασικές τάσεις δικτύου αρνητικής και μηδενικής φοράς. Έτσι, αν $\dot{U}_R/\sqrt{3}$ είναι η φασική τάση του δικτύου της πρώτης φάσης (R), για τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών θα πρέπει να είναι:

$$\dot{U}_{FR+} = \dot{U}_R/\sqrt{3} - \dot{I}_{FR+} \cdot \dot{Z}_+ \quad 2.7$$

$$\dot{U}_{FR-} = -\dot{I}_{FR-} \cdot \dot{Z}_- \quad 2.8$$

$$\dot{U}_{FR0} = -\dot{I}_{FR0} \cdot \dot{Z}_0 \quad 2.9$$

Όπου:

$\dot{Z}_+, \dot{Z}_-, \dot{Z}_0$ = συνολικές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς αντίστοιχα του συστήματος μέχρι το σημείο του σφάλματος κατά την περίπτωση πλήρους τριφασικού βραχυκυκλώματος [Ω]

$\dot{I}_{FR+}, \dot{I}_{FR-}, \dot{I}_{FR0}$ = διανύσματα των ρευμάτων γραμμών στο σημείο του σφάλματος στα συστήματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς αντίστοιχα [A]

Για $\dot{U}_{FR+} = \dot{U}_{FR-} = \dot{U}_{FR0} = 0$ από τις σχέσεις 2.7-2.9 προκύπτουν:

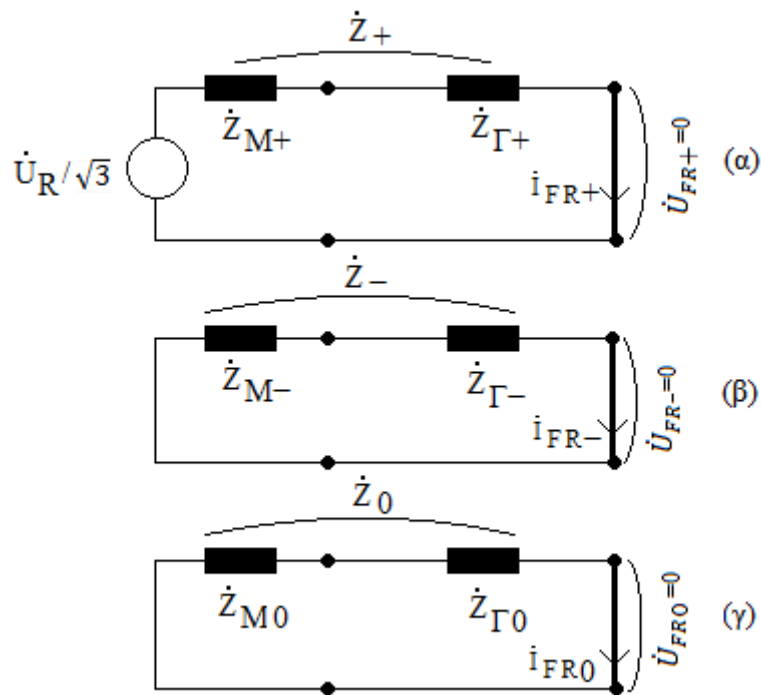
$$\dot{I}_{FR+} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} \quad 2.10$$

$$\dot{I}_{FR-} = \dot{I}_{FR0} = 0 \quad 2.11$$

Οι τρεις σχέσεις 2.6, 2.10 και 2.11 αντικαθιστούν στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς τις συνθήκες σφάλματος 2.1, 2.2.

Βήμα 4: Σχεδιασμός των κυκλωμάτων συμμετρικών συνιστωσών του αρχικού τριφασικού κυκλώματος

Όπως προκύπτει από τη σχέση 2.11, τα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής φοράς δεν θα πρέπει να διαρρέονται από ρεύμα ($\dot{I}_{FR-} = \dot{I}_{FR0} = 0$) και δεν θα εμφανίζονται οι φασικές τάσεις αρνητικής και μηδενικής φοράς δικτύου του. Η φασική τάση δικτύου $\dot{U}_R/\sqrt{3}$ εμφανίζεται μόνο στο κύκλωμα θετικής φοράς. Συνεπώς, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του τριφασικού συστήματος και οι μεταξύ τους συνδέσεις για την περίπτωση του εν λόγω σφάλματος φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2-2. Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα (α) θετικής (β) αρνητικής και (γ) μηδενικής φοράς του τριφασικού δικτύου του σχήματος 2-1^{[5], [9]}

Στο σχήμα 2-2 είναι:

\dot{U}_R = πολική τάση τριφασικού δικτύου στο αρχικό τριφασικό σύστημα [V]

$\dot{U}_{FR+}, \dot{U}_{FR-}, \dot{U}_{FR0}$ = συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς τάσης σφάλματος [V]

$\dot{Z}_{M+}, \dot{Z}_{M-}, \dot{Z}_{M0}$ = συνολικές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς αντίστοιχα του συστήματος μεταφοράς (Y/Σ YT/MT, ζυγί MT κ.α.) κατά την περίπτωση πλήρους τριφασικού βραχυκυκλώματος [Ω]

$\dot{Z}_{G+}, \dot{Z}_{G-}, \dot{Z}_{G0}$ = συνολικές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς αντίστοιχα της γραμμής MT μέχρι το σημείο του σφάλματος κατά την περίπτωση πλήρους τριφασικού βραχυκυκλώματος [Ω]

$\dot{Z}_{+}, \dot{Z}_{-}, \dot{Z}_{0}$ = συνολικές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς αντίστοιχα του συστήματος μέχρι το σημείο του σφάλματος κατά την περίπτωση πλήρους τριφασικού βραχυκυκλώματος [Ω]

$\dot{I}_{FR+}, \dot{I}_{FR-}, \dot{I}_{FR0}$ = διανύσματα των ρευμάτων γραμμών στο σημείο του σφάλματος στα συστήματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς αντίστοιχα [A]

Επειδή οι τιμές των αντιστάσεων του συστήματος μεταφοράς $\dot{Z}_{M+}, \dot{Z}_{M-}, \dot{Z}_{M0}$ (οι αντιστάσεις δηλαδή από τους ζυγούς MT μέχρι την αντίσταση γείωσης του M/Σ YT/MT) δεν είναι κοινές για όλους τους υποσταθμούς μεταφοράς, αλλά είναι ασήμαντες ως προς τις αντιστάσεις των γραμμών $\dot{Z}_{G+}, \dot{Z}_{G-}, \dot{Z}_{G0}$ μπορούν να αγνοηθούν. Έτσι, οι συνολικές σύνθετες αντιστάσεις $\dot{Z}_{+}, \dot{Z}_{-}, \dot{Z}_{0}$ μπορούν να θεωρηθούν ίσες με τις αντιστάσεις γραμμής $\dot{Z}_{G+}, \dot{Z}_{G-}, \dot{Z}_{G0}$.^[7]

Στον παρακάτω πίνακα 2-1 παρουσιάζονται οι ανά μονάδα μήκους τιμές των συνολικών σύνθετων αντιστάσεων \dot{Z}_+ , \dot{Z}_- , \dot{Z}_0 [Ω/Km] των γραμμών MT του Εθνικού Δικτύου Διανομής για τους συνήθη εναέριους αγωγούς.^[10]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 ^[10]		
Συνολικές σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας γραμμών MT για τους συνήθη εναέριους αγωγούς		
Αγωγός	$\dot{Z}_+ = \dot{Z}_- \quad [\Omega/\text{Km}]$	$\dot{Z}_0 \quad [\Omega/\text{Km}]$
ACSR 16 τ.χ	1,268+0,442j	1,4161+1,620
ACSR 35 τ.χ	0,576+0,397j	0,724+1,595j
ACSR 50 τ.χ	0,404+0,386j	0,552+1,584j
ACSR 95 τ.χ	0,215+0,334j	0,363+1,556j
Cu 35 τ.χ	0,596+0,393j	0,744+1,615j
Cu 90 τ.χ	0,2220+0,358j	0,368+1,580j

Βήμα 5: Υπολογισμός των ζητούμενων εντάσεων στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών

Οι ζητούμενες εντάσεις βραχυκυκλώσεως της φάσης R στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών από τα προηγούμενα τρία κυκλώματα είναι:

$$\dot{I}_{FR+} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} \quad 2.12$$

$$\dot{I}_{FR-} = \dot{I}_{FR0} = 0 \quad 2.13$$

Βήμα 6: Μετασχηματισμός των ζητούμενων εντάσεων βραχυκυκλώσεως στο αρχικό σύστημα

Από τις σχέσεις 1.10-1.12 προκύπτουν οι αντίστοιχες εντάσεις βραχυκυκλώσεως στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T.

$$\dot{I}_{FR} = \dot{I}_{FR+} + \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} + 0 + 0 = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} \quad 2.14$$

$$\dot{I}_{FS} = \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR+} + \alpha \cdot \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = \alpha^2 \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} + 0 + 0 = \alpha^2 \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} \quad 2.15$$

$$\dot{I}_{FT} = \alpha \cdot \dot{I}_{FR+} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = \alpha \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} + 0 + 0 = \alpha \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+} \quad 2.16$$

Όπως φαίνεται από τις προηγούμενες τρεις σχέσεις, οι εντάσεις βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα συνιστούν συμμετρικό τριφασικό σύστημα. Με βάση τη σχέση 2.14, το μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα άνευ γης θα είναι:

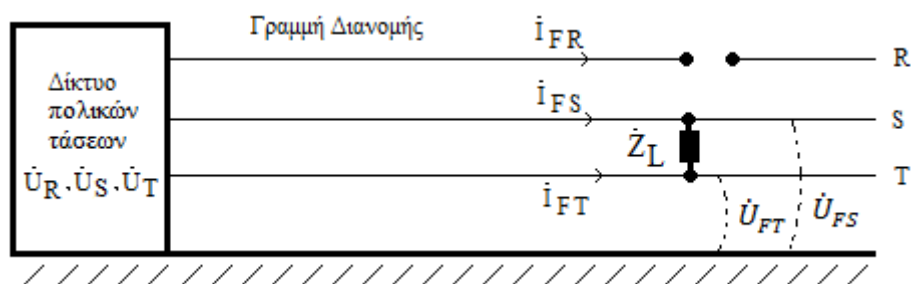
$$|I_{3F}| = \frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_+|} \quad 2.17$$

2.1.2 Προσδιορισμός της ελάχιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το διφασικό, μη πλήρες σφάλμα χωρίς επαφή γης στο τέλος της γραμμής

Στην περίπτωση αυτή μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της σχέσης που υπολογίζει την ένταση βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες διφασικό βραχυκύκλωμα (χωρίς επαφή με γη), στο τέλος μιας γραμμής διανομής. *Μη πλήρες* σημαίνει ότι μεταξύ των δυο βραχυκυκλωμένων φάσεων μεσολαβεί αντίσταση σφάλματος \dot{Z}_L .

Βήμα 1: Σχεδίαση του τριφασικού ισοδύναμου κυκλώματος στη θέση του σφάλματος

Το ισοδύναμο τριφασικό κύκλωμα για την περίπτωση του βραχυκυκλώματος αυτού φαίνεται στο σχήμα 2-3 παρακάτω:^[9]



Σχήμα 2-3. Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα^{[5], [9]}

Βήμα 2: Καθορισμός των συνθηκών σφάλματος στο αρχικό ασύμμετρο σύστημα R, S, T

Οι συνθήκες σφάλματος στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T είναι:

$$\dot{I}_{FR} = 0 \quad 2.18$$

$$\dot{I}_{FT} = -\dot{I}_{FS} \quad 2.19$$

$$\dot{U}_{FS} - \dot{U}_{FT} = \dot{I}_{FS} \cdot \dot{Z}_L \quad 2.20$$

Όπου:

$\dot{I}_{FR}, \dot{I}_{FS}, \dot{I}_{FT}$ = διανύσματα των εντάσεων βραχυκυκλώσεως στο σημείο του σφάλματος στο σύστημα R, S, T [A]

$\dot{U}_R, \dot{U}_S, \dot{U}_T$ = διανύσματα πολικών τάσεων δικτύου στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T [V]

$\dot{U}_{FS}, \dot{U}_{FT}$ = τάσεις σφάλματος στο σύστημα R, S, T [V]

\dot{Z}_L = αντίσταση σφάλματος [Ω]

Βήμα 3: Μετασχηματισμός των εξισώσεων σφάλματος από το ασύμμετρο σύστημα R, S, T στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών

Οι εντάσεις σφάλματος στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς για τη φάση R είναι:

$$\dot{I}_{FR+} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{FR} + \dot{a} \cdot \dot{I}_{FS} + \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_{FT}) \quad 2.21$$

$$\dot{i}_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{i}_{FR} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{i}_{FS} + \dot{\alpha} \cdot \dot{i}_{FT}) \quad 2.22$$

$$\dot{i}_{FR0} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{i}_{FR} + \dot{i}_{FS} + \dot{i}_{FT}) \quad 2.23$$

Για $\dot{i}_{FR} = 0$ και $\dot{i}_{FT} = -\dot{i}_{FS}$ προκύπτει ότι:

$$\dot{i}_{FR+} = \frac{1}{3} \cdot (0 + \dot{\alpha} \cdot \dot{i}_{FS} - \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{i}_{FS}) = \frac{1}{3} \cdot (\dot{\alpha} - \dot{\alpha}^2) \cdot \dot{i}_{FS} \quad 2.24$$

$$\dot{i}_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (0 + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{i}_{FS} - \dot{\alpha} \cdot \dot{i}_{FS}) = \frac{1}{3} \cdot (\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha}) \cdot \dot{i}_{FS} \quad 2.25$$

$$\dot{i}_{FR0} = \frac{1}{3} \cdot (0 + \dot{i}_{FS} - \dot{i}_{FS}) = 0 \quad 2.26$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις 2.24 και 2.25 προκύπτει ότι:

$$\dot{i}_{FR+} + \dot{i}_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{\alpha} - \dot{\alpha}^2) \cdot \dot{i}_{FS} + \frac{1}{3} \cdot (\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha}) \cdot \dot{i}_{FS} \Rightarrow \dot{i}_{FR-} = -\dot{i}_{FR+} \quad 2.27$$

Από:

$$\dot{U}_{FR} = \dot{U}_{FR+} + \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} \quad 2.28$$

$$\dot{U}_{FS} = \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FR+} + \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} \quad 2.29$$

$$\dot{U}_{FT} = \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FR+} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} \quad 2.30$$

Είναι:

$$\dot{U}_{FS} - \dot{U}_{FT} = \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FR+} + \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} - (\dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FR+} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0}) = \dot{i}_{FS} \cdot \dot{Z}_L \Rightarrow$$

$$\dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FR+} + \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FR-} - \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FR+} - \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FR-} = \dot{i}_{FS} \cdot \dot{Z}_L \Rightarrow$$

$$(\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha}) \cdot \dot{U}_{FR+} - (\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha}) \cdot \dot{U}_{FR-} = \dot{i}_{FS} \cdot \dot{Z}_L \Rightarrow (\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha}) \cdot (\dot{U}_{FR+} - \dot{U}_{FR-}) = \dot{i}_{FS} \cdot \dot{Z}_L \Rightarrow$$

$$(\dot{U}_{FR+} - \dot{U}_{FR-}) = \frac{\dot{i}_{FS} \cdot \dot{Z}_L}{(\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha})} \quad 2.31$$

Το ρεύμα σφάλματος της φάσης S στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας (λαμβάνοντας υπόψη και τη σχέση 1.11) γράφεται ως:

$$\dot{i}_{FS} = \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{i}_{FR+} + \dot{\alpha} \cdot \dot{i}_{FR-} + \dot{i}_{FR0} \Rightarrow$$

$$\dot{i}_{FS} = \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{i}_{FR+} - \dot{\alpha} \cdot \dot{i}_{FR+} + 0 \Rightarrow \dot{i}_{FS} = (\dot{\alpha}^2 - \dot{\alpha}) \cdot \dot{i}_{FR+} \quad 2.32$$

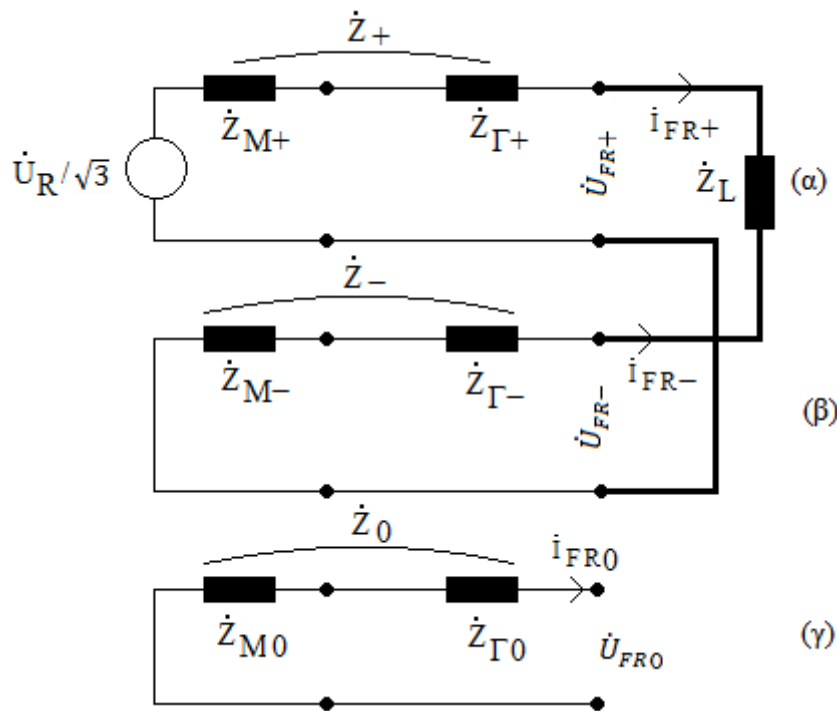
Αρα η σχέση 2.31 γράφεται ως:

$$\dot{U}_{FR+} - \dot{U}_{FR-} = \dot{i}_{FR+} \cdot \dot{Z}_L \quad 2.33$$

Οι τρεις σχέσεις 2.26, 2.27 και 2.33 αντικαθιστούν στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας τις συνθήκες 2.18 - 2.20.

Βήμα 4: Σχεδιασμός των κυκλωμάτων συμμετρικών συνιστωσών του αρχικού τριφασικού κυκλώματος

Τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του τριφασικού συστήματος και η μεταξύ τους σύνδεση για την περίπτωση του εν λόγω σφάλματος είναι:



Σχήμα 2-4. Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα (α) θετικής (β) αρνητικής και (γ) μηδενικής φοράς του τριφασικού δικτύου του σχήματος 2-3.^{[5], [9]}

Οι τιμές τάσεων και σύνθετων αντιστάσεων του σχήματος 2-4 ορίζονται το ίδιο όπως και στο πλήρες τριφασικό σφάλμα φάσεων και αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (σχήμα 2-2).

Βήμα 5: Υπολογισμός των ζητούμενων εντάσεων στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών

Οι ζητούμενες εντάσεις βραχυκυκλώσεως της φάσης R στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών από τα προηγούμενα τρία κυκλώματα είναι:

$$I_{FR+} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} \quad 2.34$$

$$I_{FR-} = -I_{FR+} = -\frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} \quad 2.35$$

$$I_{FR0} = 0 \quad 2.36$$

Βήμα 6: Μετασχηματισμός των ζητούμενων εντάσεων βραχυκυκλώσεως στο αρχικό σύστημα

Από τις σχέσεις 1.10-1.12 προκύπτουν οι αντίστοιχες εντάσεις βραχυκυκλώσεως στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T.

$$\dot{I}_{FR} = \dot{I}_{FR+} + \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = \dot{I}_{FR+} - \dot{I}_{FR+} + 0 = 0 \quad 2.37$$

$$\dot{I}_{FS} = \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR+} + \alpha \cdot \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR+} - \alpha \cdot \dot{I}_{FR+} + 0 = (\alpha^2 - \alpha) \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} \quad 2.38$$

$$\dot{I}_{FT} = \alpha \cdot \dot{I}_{FR+} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = \alpha \cdot \dot{I}_{FR+} - \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR+} + 0 = (\alpha - \alpha^2) \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} \quad 2.39$$

Αλλά από τη σχέση 1.1 προκύπτουν ότι:

$$\alpha^2 - \alpha = \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}\right)^2 - \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}\right) = -j \cdot \sqrt{3} \quad 2.40$$

$$\alpha - \alpha^2 = \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}\right) - \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}\right)^2 = j \cdot \sqrt{3} \quad 2.41$$

Άρα οι σχέσεις 2.38 και 2.39 γράφονται ως:

$$\dot{I}_{FS} = -j \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} = -j \cdot \frac{\dot{U}_R}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} \quad 2.42$$

$$\dot{I}_{FT} = j \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} = j \cdot \frac{\dot{U}_R}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_L} = -\dot{I}_{FS} \quad 2.43$$

Το μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα με αντίσταση σφάλματος \dot{Z}_L είναι:

$$|I_{2F}| = \frac{|U|}{|Z_+ + Z_- + Z_L|} \quad 2.44$$

Όπου:

$|I_{2F}|$ = μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες διφασικό βραχυκύκλωμα άνευ γης [A]

$|U|$ = μέτρο της πολικής τάσης του συστήματος [V]

$|Z_+ + Z_-|$ = μέτρο των σύνθετων αντιστάσεων θετικής και αρνητικής ακολουθίας βάση των τιμών του πίνακα 2-1[Ω]

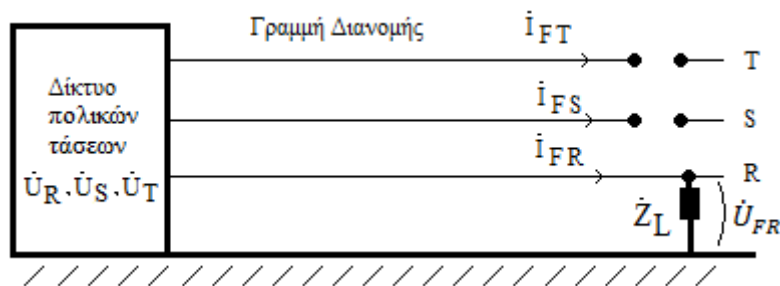
$|Z_L|$ = μέτρο της σύνθετης αντίστασης σφάλματος [Ω]

2.1.3 Προσδιορισμός της ελάχιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες μονοφασικό σφάλμα στο τέλος της γραμμής

Στην περίπτωση αυτή μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της σχέσης που υπολογίζει την ένταση βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα (με επαφή με γη), στο τέλος μιας γραμμής διανομής. Η ΟΔ 21 λαμβάνει υπόψη της αντίσταση σφάλματος $Z_L=40\Omega$.

Βήμα 1: Σχεδίαση του τριφασικού ισοδύναμου κυκλώματος στη θέση του σφάλματος

Το ισοδύναμο κύκλωμα για την περίπτωση του βραχυκυκλώματος αυτού φαίνεται στο σχήμα 2-5 παρακάτω:^[9]



Σχήμα 2-5. Ισοδύναμο κύκλωμα κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα^{[5], [9]}

Τα μεγέθη τάσεων και εντάσεως ορίζονται όπως ακριβώς και στο δίκτυο του σχήματος 2-1.

Βήμα 2: Καθορισμός των συνθηκών σφάλματος στο αρχικό ασύμμετρο σύστημα R, S, T

Οι συνθήκες σφάλματος στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T είναι:

$$\dot{U}_{FR} = \dot{I}_{FR} \cdot \dot{Z}_L \quad 2.45$$

$$\dot{I}_{FT} = \dot{I}_{FS} = 0 \quad 2.46$$

Βήμα 3: Μετασχηματισμός των εξισώσεων σφάλματος από το ασύμμετρο σύστημα R, S, T στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών

Οι εντάσεις σφάλματος στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς για τη φάση R είναι:

$$\dot{I}_{FR+} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{FR} + \dot{\alpha} \cdot \dot{I}_{FS} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{I}_{FT}) \quad 2.47$$

$$\dot{I}_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{FR} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{I}_{FS} + \dot{\alpha} \cdot \dot{I}_{FT}) \quad 2.48$$

$$\dot{I}_{FR0} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{FR} + \dot{I}_{FS} + \dot{I}_{FT}) \quad 2.49$$

Για $\dot{I}_{FT} = \dot{I}_{FS} = 0$ προκύπτει ότι:

$$i_{FR+} = \frac{1}{3} \cdot (i_{FR} + \dot{\alpha} \cdot 0 - \dot{\alpha}^2 \cdot 0) = \frac{1}{3} \cdot i_{FR} \quad 2.50$$

$$i_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (i_{FR} + \dot{\alpha}^2 \cdot 0 - \dot{\alpha} \cdot 0) = \frac{1}{3} \cdot i_{FR} \quad 2.51$$

$$i_{FR0} = \frac{1}{3} \cdot (i_{FR} + 0 - 0) = \frac{1}{3} \cdot i_{FR} \quad 2.52$$

Από τις προηγούμενες τρεις σχέσεις προκύπτει ότι:

$$i_{FR+} = i_{FR-} = i_{FR0} \quad 2.53$$

Μετασχηματίζοντας και τις τάσεις στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς είναι:

$$\dot{U}_{FR+} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{FR} + \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FS} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FT}) \quad 2.54$$

$$\dot{U}_{FR-} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{FR} + \dot{\alpha}^2 \cdot \dot{U}_{FS} + \dot{\alpha} \cdot \dot{U}_{FT}) \quad 2.55$$

$$\dot{U}_{FR0} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{FR} + \dot{U}_{FS} + \dot{U}_{FT}) \quad 2.56$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις τρεις τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\dot{U}_{FR+} + \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} = \dot{U}_{FR} + \frac{1}{3} \cdot \dot{U}_{FS} (\dot{\alpha}^2 + \dot{\alpha} + 1) + \frac{1}{3} \cdot \dot{U}_{FT} (\dot{\alpha}^2 + \dot{\alpha} + 1) \quad 2.57$$

Αλλά από 1.2 είναι $\dot{\alpha}^2 + \dot{\alpha} + 1 = 0$ οπότε η προηγούμενη σχέση γράφεται ως:

$$\dot{U}_{FR+} + \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} = \dot{U}_{FR} \quad 2.58$$

Η οποία μέσω των 2.45 και 2.50 μας δίνει τη σχέση:

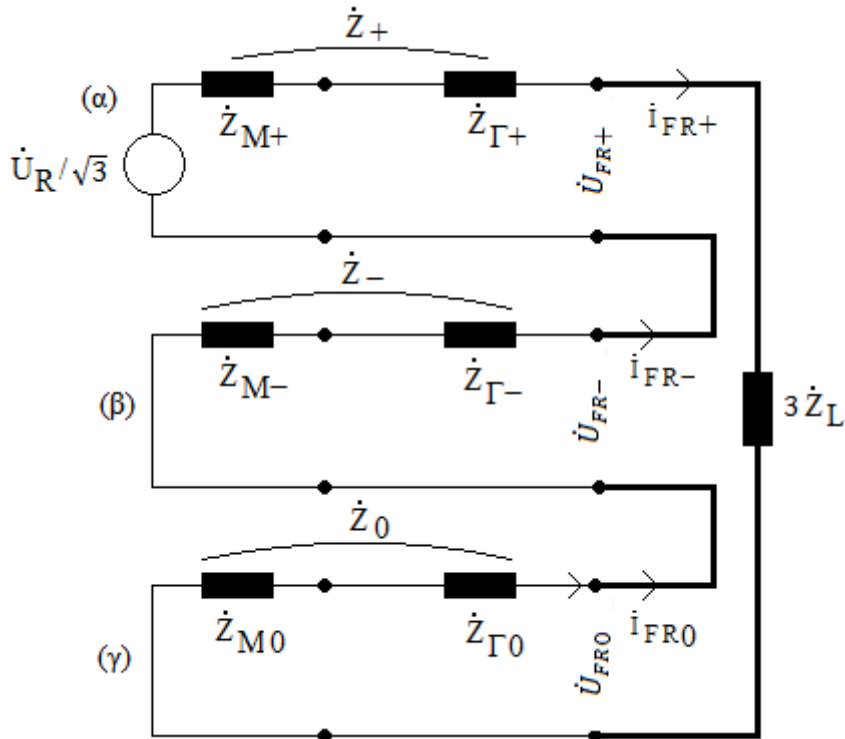
$$\dot{U}_{FR+} + \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0} = 3 \cdot i_{FR+} \cdot \dot{Z}_L \quad 2.59$$

Οι δυο σχέσεις 2.53 και 2.59 αντικαθιστούν στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας τις συνθήκες σφάλματος 2.45, 2.46.

Βήμα 4: Σχεδιασμός των κυκλωμάτων συμμετρικών συνιστωσών του αρχικού τριφασικού κυκλώματος

Από την εξίσωση 2.53 φαίνεται ότι κατά τη μεταξύ τους σύνδεση, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας θα πρέπει να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα ($i_{FR+} = i_{FR-} = i_{FR0}$) άρα θα πρέπει να συνδεθούν σε σειρά, ενώ από την εξίσωση 2.59 φαίνεται ότι το άθροισμα $\dot{U}_{FR+} + \dot{U}_{FR-} + \dot{U}_{FR0}$ είναι ίσο με την πτώση τάσης του ρεύματος i_{FR+} κατά μήκος μιας αντίστασης $3 \cdot \dot{Z}_L$.

Έτσι, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του αρχικού τριφασικού συστήματος και η μεταξύ τους σύνδεση για την περίπτωση του εν λόγω σφάλματος είναι:



Σχήμα 2-6. Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα (α) θετικής (β) αρνητικής και (γ) μηδενικής φοράς του τριφασικού δικτύου του σχήματος 2-5.^{[5], [9]}

Βήμα 5: Υπολογισμός των ζητούμενων εντάσεων στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών

Οι ζητούμενες εντάσεις βραχυκυκλώσεως της φάσης R στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών από τα προηγούμενα τρία κυκλώματα είναι:

$$I_{FR+} = I_{FR-} = I_{FR0} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_0 + 3 \cdot \dot{Z}_L} \quad 2.60$$

Βήμα 6: Μετασχηματισμός των ζητούμενων εντάσεων βραχυκυκλώσεως στο αρχικό σύστημα

Από τις σχέσεις 1.10-1.12 προκύπτουν οι αντίστοιχες εντάσεις βραχυκυκλώσεως στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T.

$$\dot{I}_{FR} = \dot{I}_{FR+} + \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = 3 \cdot \dot{I}_{FR+} = \frac{3 \cdot \dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_0 + 3 \cdot \dot{Z}_L} \quad 2.61$$

$$\dot{I}_{FS} = \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR+} + \alpha \cdot \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = (\alpha^2 + \alpha + 1) \cdot \dot{I}_{FR+} = 0 \cdot \dot{I}_{FR+} = 0 \quad 2.62$$

$$\dot{I}_{FT} = \alpha \cdot \dot{I}_{FR+} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{FR-} + \dot{I}_{FR0} = (\alpha^2 + \alpha + 1) \cdot \dot{I}_{FR+} = 0 \cdot \dot{I}_{FR+} = 0 \quad 2.63$$

Η σχέση 2.61 είναι ισοδύναμη με:

$$I_{FR} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{(\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_0)/3 + \dot{Z}_L} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z} + \dot{Z}_L} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z} + \dot{Z}_L} \quad 2.64$$

Όπου:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{Z}_+ + \dot{Z}_- + \dot{Z}_0}{3} \quad 2.65$$

Η σύνθετη αντίσταση \dot{Z} εκφράζει τη συνολική αντίσταση του συστήματος (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, ζυγοί ΜΤ και γραμμής ΜΤ) μέχρι το σημείο του σφάλματος κατά την περίπτωση του μονοφασικού βραχυκυκλώματος και προκύπτει από τις τιμές \dot{Z}_+ , \dot{Z}_- , \dot{Z}_0 του πίνακα 2-1. Η τιμή της αντίστασης αυτής για κάθε ένα αγωγό των εναέριων γραμμών ΜΤ δίνεται και στον επόμενο πίνακα 2-2.^[10]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 ^[10]		
Σύνθετη αντίσταση συστήματος για τους συνήθη αγωγούς των εναέριων δικτύων ΜΤ κατά το μονοφασικό βραχυκύκλωμα		
Αγωγός	\dot{Z} [Ω/Km]	Z [Ω/Km]
ACSR 16 τ.χ	1,317+0,821j	1,552
ACSR 35 τ.χ	0,625+0,769j	0,990
ACSR 50 τ.χ	0,453+0,785j	0,906
ACSR 95 τ.χ	0,264+0,741j	0,786
Cu 35 τ.χ	0,645+0,800j	1,027
Cu 90 τ.χ	0,269+0,765j	0,811

Άρα το μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα με αντίσταση σφάλματος $\dot{Z}_L = 40\Omega$ είναι:

$$|I_{1F}| = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z + 40|} \quad 2.66$$

Όπου:

$|I_{1F}|$ = μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες διφασικό βραχυκύκλωμα άνευ γης [A]

$|U|$ = μέτρο της πολικής τάσης του συστήματος [V]

$|Z + 40|$ = μέτρο συνολικής σύνθεσης αντίστασης συστήματος κατά το μονοφασικό μη πλήρες βραχυκύκλωμα [Ω]

2.1.4 Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες μονοφασικό σφάλμα στην αρχή της γραμμής

Το ισοδύναμο τριφασικό κύκλωμα για την περίπτωση του βραχυκυκλώματος αυτού είναι ίδιο με αυτό του σχήματος 2-5 παραπάνω, μόνο που $\dot{Z}_L=0$ ^[9]

Οι συνθήκες σφάλματος στο αρχικό τριφασικό σύστημα R, S, T προκύπτουν από τις σχέσεις 2.45 και 2.46 για $\dot{Z}_L=0$.

Οι εντάσεις σφάλματος στο σύστημα θετικής, αρνητικής και μηδενικής φοράς προκύπτουν από τη σχέση 2.60 πάλι για $\dot{Z}_L=0$.

Η ανάλυση δίνει το ίδιο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών με αυτό του σχήματος 1.11, μόνο που απουσιάζει η σύνθετη αντίσταση \dot{Z}_L .

Τελικά, από τη σχέση 2.64 για $\dot{Z}_L=0$ προκύπτει ότι η ένταση βραχυκυκλώσεως στο αρχικό σύστημα R, S, T στην περίπτωση του εν λόγω σφάλματος είναι:

$$\dot{I}_{FR} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z} + 0} = \frac{\dot{U}_R/\sqrt{3}}{\dot{Z}} \quad 2.67$$

Το μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα είναι:

$$|I_{1F}| = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z|} \quad 2.68$$

Όπου:

$|I_{1F}|$ = μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα [A]

$|U|$ = μέτρο της πολικής τάσης του δικτύου [V]

$|Z|$ = μέτρο της σύνθετης αντίστασης του συστήματος (Y/Σ YT/MT, ζυγοί MT και γραμμής MT) μέχρι το σημείο του σφάλματος κατά την περίπτωση του μονοφασικού βραχυκυκλώματος (από πίνακα 2-2) [Ω]

2.1.5 Σύγκριση των μέτρων των εντάσεων βραχυκυκλώσεως για τις τέσσερις περιπτώσεις διαταραχών που μελετήθηκαν

Μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα άνευ γης:

Από σχέση 2.17 είναι:

$$|I_{3F}| = \frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_+|}$$

Μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες διφασικό βραχυκύκλωμα άνευ γης:

Από σχέση 2.44 είναι:

$$|I_{2F}| = \frac{|U|}{|Z_+ + Z_- + Z_L|}$$

Κατά την περίπτωση του σφάλματος αυτού, ο ΔΕΔΔΗΕ δέχεται αντίσταση σφάλματος $Z_L = 0,474 \cdot Z_+$. Έτσι, η προηγούμενη σχέση γράφεται ως:

$$|I_{2F}| = \frac{|U|}{|Z_+ + Z_- + 0,474 \cdot Z_+|} \quad 2.69$$

Επειδή από τον πίνακα 2-1 είναι $Z_+ = Z_-$, θα είναι και $Z_+ = Z_-$. Έτσι, η 2.69 ισούται με:

$$|I_{2F}| = \frac{|U|}{|2,474 \cdot Z_+|} \quad 2.70$$

Από τη σύγκριση των μέτρων των εντάσεων βραχυκυκλώσεως ανάμεσα στο τριφασικό και διφασικό σφάλμα φάσεων άνευ επαφής με γη προκύπτει ότι:

$$\frac{|I_{2F}|}{|I_{3F}|} = \frac{\frac{|U|}{|2,474 \cdot Z_+|}}{\frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_+|}} = \frac{\sqrt{3}}{2,474} = 0,700 \Rightarrow |I_{2F}| = 0,7 \cdot |I_{3F}| \quad 2.71$$

Πράγματι, σύμφωνα και με όσα αναφέρονται στην παράγραφο 1.5, κατά την περίπτωση του διφασικού μη πλήρες σφάλματος με αντίσταση σφάλματος $Z_L = 0,474 \cdot Z_+$ η ένταση βραχυκυκλώσεως ισούται με το 70% της αντίστοιχης έντασης κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα.

Στην περίπτωση που αντίσταση σφάλματος κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα ήταν ίση με μηδέν, τότε η αντίστοιχη ένταση βραχυκυκλώσεως θα ήταν:

$$|I_{2F}| = \frac{|U|}{|Z_+ + Z_- + 0|} = \frac{|U|}{|2 \cdot Z_+|} \quad 2.72$$

Από τη σύγκριση των μέτρων των εντάσεων βραχυκυκλώσεως ανάμεσα στο πλήρες τριφασικό και πλήρες διφασικό σφάλμα φάσεων άνευ επαφής με γη προκύπτει ότι:

$$\frac{|I_{2F}|}{|I_{3F}|} = \frac{\frac{|U|}{|2 \cdot Z_+|}}{\frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_+|}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86 \Rightarrow |I_{2F}| = 0,86 \cdot |I_{3F}| \quad 2.73$$

Άρα μπορούμε να πούμε ότι ανάλογα με το είδος του σφάλματος, οι εντάσεις βραχυκυκλώσεως ικανοποιούν τη συνθήκη:

$$|I_{3F}| > |I_{2F}|_{\text{πλήρες}} > |I_{2F}|_{\text{μη πλήρες}} \quad 2.74$$

Μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το μη πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα (με $Z_L = 40\Omega$)

Από σχέση 2.66 είναι:

$$|I_{1F}|_{\text{μη πλήρες}} = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z + 40|}$$

Μέτρο της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Από σχέση 2.68 είναι:

$$|I_{1F}|_{\text{πλήρες}} = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z|}$$

$$|I_{1F}|_{\text{πλήρες}} > |I_{1F}|_{\text{μη πλήρες}} \quad 2.75$$

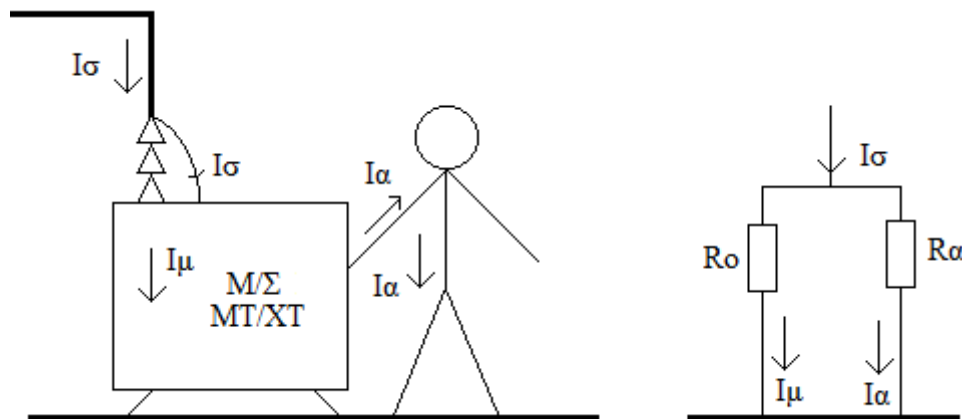
Παρόλο που τα πλήρη βραχυκυκλώματα μας δίνουν τις μεγαλύτερες εντάσεις βραχυκυκλώσεως και η αξιοποίησή τους εξασφαλίζει ασφάλεια, δεν θα πρέπει να αγνοείται ο υπολογισμός των εντάσεων βραχυκυκλώσεως και για σφάλματα δια μέσου σύνθετων αντιστάσεων μιας και αυτά εμφανίζονται κυρίως στην πράξη. Αυτό ο τύπος σφαλμάτων είναι όμοιος με τη σύνδεση ασύμμετρων φορτίων. Η εν λόγω αντίσταση σφάλματος επηρεάζει κυρίως τις τάσεις γραμμών στο σημείο του βραχυκυκλώματος.^[5]

2.2 Υπερπήδηση ρεύματος από τη Μέση Τάση προς τη Χαμηλή Τάση

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το φαινόμενο της υπερπήδησης ρεύματος σφάλματος από τα μεταλλικά αντικείμενα ΜΤ προς τα μεταλλικά αντικείμενα ΧΤ. Τα μεταλλικά αντικείμενα των εγκαταστάσεων ή συσκευών τα οποία δεν είναι μονωμένα προς το περιβάλλον, σε κανονική κατάσταση λειτουργίας τους δεν θα πρέπει να έχουν τάση προς τη γη. Υπάρχει όμως περίπτωση που λόγω της υψηλής τιμής της έντασης σφάλματος, μπορεί να δημιουργηθεί υπερπήδηση της μόνωσης της συσκευής και μέρος του ρεύματος σφάλματος που διαρρέει τη συσκευή να διαπερνάει το ανθρώπινο σώμα προς τη γη. Μια τέτοια υπερπήδηση μπορεί να προκύψει σε στύλο γραμμής διανομής ΜΤ, στον οποίο διέρχεται και γραμμή ΧΤ (στύλος μεικτής γραμμής ΜΤ+ΧΤ). Μπορεί να συμβεί επίσης σε μ/σ ΜΤ/ΧΤ. Σε έναν τέτοιο μ/σ, μεταλλικά ΜΤ ονομάζονται τα εξαρτήματα εκείνα που μπορεί να αποκτήσουν τάση προς γη από τη ΜΤ όπως το κέλυφος του μ/σ, οι πίνακες ΜΤ και οι μεταλλικές κατασκευές που στηρίζουν τον μ/σ.^[6]

Από την ανάλυση του φαινομένου της υπερπήδησης ρεύματος από τη ΜΤ στη ΧΤ μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε τη σχέση που συνδέει την ένταση σφάλματος με το χρόνο διέλευσής της μέσα από το ανθρώπινο σώμα, το γραφικό αυτό αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη κάτω από την οποία πρέπει να λειτουργούν όλα τα μέσα προστασίας που ελέγχουν τα σφάλματα προς γη.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το φαινόμενο της υπερπήδησης ρεύματος σφάλματος I_{σ} σε έναν μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ και το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα.



Σχήμα 2-7. Υπερπήδηση ρεύματος σφάλματος σε μ/σ (αριστερά) και ηλεκτρικό ισοδύναμο (δεξιά)

Στο σχήμα αυτό είναι:

I_{σ} = ρεύμα σφάλματος [A]

I_{α} = ακίνδυνο ρεύμα δια μέσω του ανθρώπου [A]

I_{μ} = ρεύμα που διαρρέει τα κανονικά μη αγώγιμα μέρη του μ/σ [A]

R_{α} = αντίσταση ανθρώπινου σώματος [Ω]

R_0 = συνολική αντίσταση γείωσης του δικτύου [Ω]

Όπως είναι γνωστό, το ηλεκτρικό ρεύμα διερχόμενο δια του ανθρώπινου σώματος προκαλεί διαταράξεις, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να επιφέρουν ακόμα και το θάνατο. Πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με πειράματα σε ζώα και όπου ήταν ακίνδυνο απευθείας σε ανθρώπους, προκειμένου να καταλήξουν σε διάφορα συμπεράσματα. Το σύστημα προστασίας του εθνικού μας δικτύου διανομής βασίζεται στα αποτελέσματα των πειραμάτων του Dalziel και των συνεργατών του, σύμφωνα με τα οποία το ακίνδυνο ρεύμα που δύναται να διέλθει από το ανθρώπινο σώμα θα δίνεται από τη σχέση:^[11]

$$I_{\alpha} = \frac{0,116 \text{ έως } 0,185}{\sqrt{t}} \quad [A] \quad 2.76$$

Όπου:

I_{α} = ακίνδυνο εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 ή 60Hz [A]

t = χρόνος διέλευσης του I_{α} από το ανθρώπινο σώμα [sec]

Η σταθερά 0,116 αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα μη μαρμαρυγής της καρδιάς και η σταθερά 0,185 αντιστοιχεί στο ελάχιστο ρεύμα μαρμαρυγής της καρδιάς. Θυμίζετε ότι *μαρμαρυγή* καλείται η εκδήλωση ταχύτατων, ασύντακτων και ανεπαρκών συσπάσεων των ινών του μυοκαρδίου. Έτσι, οι παλμοί της καρδιάς από περιοδικούς γίνονται άρρυθμοι και μπορεί να οδηγήσουν σε θάνατο. Για να προκληθεί μαρμαρυγή θα πρέπει η καρδιά να βρεθεί εντός της διαδρομής του ρεύματος. Ο χρόνος διέλευσης t κυμαίνεται από 0,083 μέχρι 5sec.^[11]

Ο ανωτέρω τύπος του Dalziel χρησιμοποιείται από το American Institute of Electrical Engineers (AIEE) με το συντελεστή 0,165 και έχει υιοθετηθεί από το ΔΕΔΔΗΕ για την εκλογή των μέσων προστασίας. Δηλαδή είναι:^{[11],[12]}

$$I_{\alpha} = \frac{0,165}{\sqrt{t}} \quad [A] \quad 2.77$$

Η ηλεκτρική αντίσταση R_{α} μεταξύ στοιχείου υπό τάση και γης με ενδιαμέσο τον άνθρωπο αποτελείται από τις ακόλουθες αντιστάσεις:^[11]

1. Αντίσταση του ανθρώπινου σώματος (άνευ της επιδερμίδας)
2. Αντίσταση επιδερμίδας
3. Αντίσταση υποδήσεως
4. Αντίσταση δαπέδου

Η καθαρή αντίσταση του ανθρώπινου σώματος είναι μικρότερη από 1000Ω. Η αντίσταση της επιδερμίδας ποικίλλει. Εξαρτάται από την επιφάνεια επαφής, το χρόνο επαφής, την εφίδρωση, την υγρασία και άλλα. Στις περιπτώσεις υψηλής τάσης, η τάση διασπά το δέρμα και η αντίσταση της επιδερμίδας μηδενίζεται. Η αντίσταση των υποδημάτων ποικίλλει και μπορεί να φτάσει μεγάλες τιμές αλλά και να μειωθεί σημαντικά σε περιπτώσεις υγρασίας. Τέλος, η αντίσταση δαπέδου και αυτή ποικίλλει αναλόγως του υλικού του δαπέδου.^[11]

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι αντιστάσεις ανθρώπινου σώματος R_{α} και γείωσης R_o καθώς και ο μεταξύ τους λόγος, ανάλογα τον τύπο του δικτύου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3 ^{[11],[12]}			
Αντίσταση γείωσης δικτύου R_o και αντίσταση ανθρώπινου σώματος R_{α} για τους διάφορους τύπους δικτύων			
Τύπος δικτύου	R_o [Ω]	R_{α} [Ω]	R_{α}/R_o
Δίκτυο ξύλινων στύλων	2,0	6000	3000
Δίκτυο στύλων οπλισμένου σκυροδέματος	0,5	1500	3000
Υπόγειο δίκτυο	1,0	3000	3000

Όπως προκύπτει από τον προηγούμενο πίνακα, ο λόγος R_{α}/R_o είναι σταθερός και πάντα ίσος με 3000, ανεξάρτητα από τον τύπο του δικτύου. Επίσης, η αντίσταση γείωσης του δικτύου R_o είναι

σημαντικά μικρότερη από αυτή του ανθρώπινου σώματος R_a . Αυτό σημαίνει ότι κατά την υπερπήδηση του ρεύματος σφάλματος I_σ , το μεγαλύτερο μέρος του θα διαρρέει τα κανονικά μη αγωγίμα μέρη του μ/σ και ένα μικρό μόνο ρεύμα θα διαρρέει το ανθρώπινο σώμα προς τη γη. Έτσι με βάση την παραδοχή αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$I_\mu = I_\sigma \quad 2.78$$

Από το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2-7 θα πρέπει να ισχύει:

$$I_\mu \cdot R_o = I_a \cdot R_a \quad 2.79$$

Η σχέση 2.79 με βάση τις σχέσεις 2.77 και 2.78 γράφεται ως:

$$I_\sigma \cdot R_o = \frac{0,165}{\sqrt{t}} \cdot R_a \Rightarrow I_\sigma = \frac{0,165}{\sqrt{t}} \cdot \frac{R_a}{R_o} \quad 2.80$$

Δεδομένου ότι $R_a/R_o=3000$ πάντα, η σχέση 2.80 γράφεται:

$$I_\sigma = \frac{0,165}{\sqrt{t}} \cdot 3000 \Rightarrow I_\sigma \cdot \sqrt{t} = 495 \quad 2.81$$

Ο ΔΕΔΔΗΕ στρογγυλοποιεί τη σχέση αυτή σε:^{[11][12]}

$$I_\sigma \cdot \sqrt{t} = 500 \quad 2.82$$

Η σχέση αυτή καθορίζει την περιοχή ασφαλείας, δηλαδή τη χαρακτηριστική καμπύλη κάτω από την οποία θα πρέπει να λειτουργούν όλα τα μέσα προστασίας που ελέγχουν τα σφάλματα προς γη.^[12]

Παρατήρηση:

Σύμφωνα με το IEC 479-1/1984, έχει αναθεωρηθεί η συνθήκη του Dalziel (σχέση 2.77) που καθορίζει την αντοχή του ανθρώπινου σώματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα ως εξής:^[12]

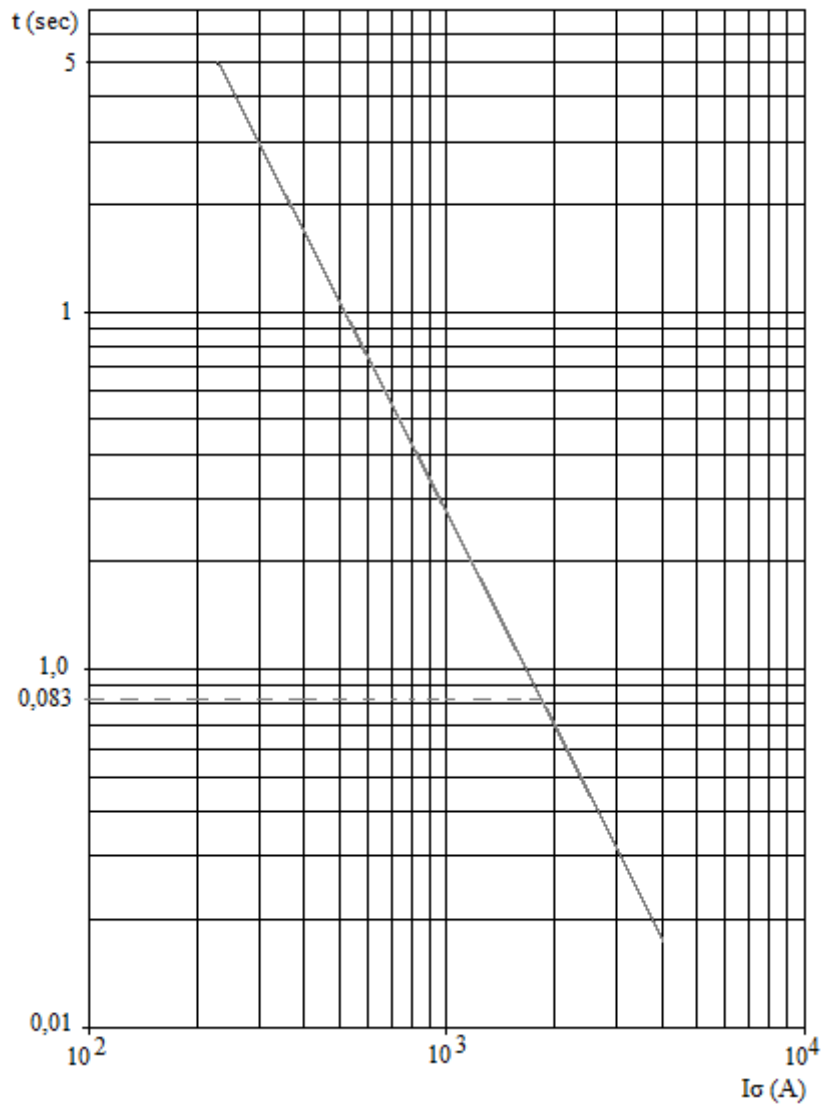
$$I_a = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad [A] \quad \text{για ανθρώπους βάρους } 50kg \quad 2.83$$

$$I_a = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad [A] \quad \text{για ανθρώπους βάρους } 70kg \quad 2.84$$

Οι αναθεωρημένες συνθήκες ισχύουν για χρόνους 0,03 έως 3sec.

Τα περιθώρια ασφαλείας που έχουν οι επιλογές των αντιστάσεων του ανθρώπινου σώματος είναι τέτοια που ο ΔΕΔΔΗΕ δεν έχει προχωρήσει στον επανασχεδιασμό της προστασίας των δικτύων του με βάση την αναθεώρηση αυτή.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη αντοχής του ανθρώπου $I_{\sigma}=f(t)$. Για κάθε ζεύγος τιμών I_{σ} και t (από 0,083 έως 5sec) ικανοποιείται η συνθήκη της σχέσης 2.82 και άρα το ακίνδυνο ρεύμα I_{α} διαμέσου του ανθρώπινου σώματος θα βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζει η συνθήκη του Dalziel.



Σχήμα 2-8. Καμπύλη αντοχής του ανθρώπου $I_{\sigma}=f(t)$ για σταθερό λόγο R_{α}/R_o ίσο με 3000

2.3 Θερμική αντοχή γυμνών αγωγών σε βραχυκύκλωμα

Βασικό μέγεθος για τον καθορισμό της θερμικής καταπόνησης των γραμμών διανομής και των λοιπών στοιχείων του δικτύου σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος είναι το *θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης* I_{th} . Πρόκειται για το μέτρο της ενεργού τιμής ενός θεωρητικού ημιτονοειδούς εναλλασσόμενου ρεύματος (συχνότητας 50Hz), το οποίο θα προκαλούσε το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα με το ρεύμα βραχυκύκλωσης $i_F(t)$.^[9]

Η αντοχή των γυμνών αγωγών (αλλά και των καλωδίων) σε βραχυκυκλώματα καθορίζεται με την παραδοχή ότι επειδή τα εν λόγω σφάλματα έχουν μικρή διάρκεια, μέχρι να ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας δεν γίνεται αξιόλογη απαγωγή της θερμότητας προς το περιβάλλον. Ως συνέπεια, η παραγόμενη θερμότητα απωλειών διατίθεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού.^[10]

Στην παράγραφο αυτή θα προσδιορίσουμε τη σχέση που καθορίζει τη διατομή S των αγωγών, έτσι ώστε αυτή να αντέχει την ανύψωση θερμοκρασίας που προκαλεί το θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{th} για σφάλμα που διαρκεί χρόνο t ($\leq 5\text{sec}$). Ως ανύψωση θερμοκρασίας ορίζεται η διαφορά θερμοκρασίας από τη μέγιστη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας του αγωγού (θ_a) σε μια οριακή τιμή θ_t στο τέλος του βραχυκυκλώματος, χαρακτηριστική για τον κάθε αγωγό. Οι τιμές θ_a και θ_t για τους συνήθεις γυμνούς αγωγούς των εναέριων δικτύων διανομής (ανεξαρτήτως διατομής τους), σύμφωνα με τις οποίες δεν παρουσιάζεται κίνδυνος μείωσης της μηχανικής αντοχής τους, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.^[10]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-4 ^[10]		
Αποδεκτές θερμοκρασίες θ_a και θ_t για τους διάφορους τύπους γυμνών αγωγών των δικτύων διανομής		
Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Αγωγός Cu	Αγωγός ASCR
θ_a	80	80
θ_t	170	160

Έστω R η ωμική αντίσταση του αγωγού. Για έναν στοιχειώδη χρόνο dt , το θερμικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{th} προκαλεί στον αγωγό αυτό στοιχειώδη θερμικές απώλειες dQ ίσες με:

$$dQ = I_{th}^2 \cdot R \cdot dt \quad 2.85$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά τη σύντομη διάρκεια του βραχυκυκλώματος δεν προλαβαίνει να γίνει αξιόλογη απαγωγή της θερμότητας απωλειών προς το περιβάλλον και συνεπώς, ολόκληρη η θερμότητα απωλειών διατίθεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού. Αν m είναι η μάζα του αγωγού [σε Kg] και c η ειδική θερμότητά του [σε J/Kg. $^{\circ}\text{C}$], τότε από τη θερμοδυναμική, η ποσότητα dQ θα ισούται με:

$$dQ = m \cdot c \cdot d\theta \quad 2.86$$

Από την εξίσωση των δυο προηγούμενων σχέσεων προκύπτει ότι:

$$I_{th}^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta \quad 2.87$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού κατά $d\theta$ λόγω του θερμικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{th} στο χρονικό διάστημα dt θα είναι:

$$d\theta = \frac{I_{th}^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot dt \quad 2.88$$

Η ωμική αντίσταση R του αγωγού συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$R = \frac{\rho_{20} \cdot l}{S} \cdot [1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)] \quad 2.89$$

Όπου:

R = αντίσταση αγωγού [Ω]

ρ_{20} = ειδική αντίσταση αγωγού στους 20°C [$\Omega \cdot \text{m}$]

S = διατομή αγωγού [m^2]

a_{20} = θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης στους 20°C

l = μήκος αγωγού [m]

Άρα η σχέση 2.88 γράφεται ως:

$$d\theta = \frac{I_{th}^2}{m \cdot c} \cdot \frac{\rho_{20} \cdot l}{S} \cdot [1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)] \cdot dt \quad 2.90$$

Αν p είναι η πυκνότητα [σε kg/m^3] του αγωγού μάζας m , τότε είναι:

$$m = p \cdot l \cdot S \quad 2.91$$

Έτσι η σχέση 2.90 γράφεται ως:

$$\begin{aligned} d\theta &= \frac{I_{th}^2}{(p \cdot l \cdot S) \cdot c} \cdot \frac{\rho_{20} \cdot l}{S} \cdot [1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)] \cdot dt = \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{p \cdot c \cdot S^2} \cdot [1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)] \cdot dt = \\ &= \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot [1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)] \cdot dt \quad 2.92 \end{aligned}$$

Το γινόμενο $p \cdot c$ καλείται θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου του υλικού του αγωγού και συμβολίζεται με Q_c [σε $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$].

Η σχέση 2.92 γράφεται και ως:

$$\frac{1}{[1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)]} \cdot d\theta = \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot dt \Rightarrow \frac{1}{\left[1 + \frac{(\theta - 20)}{B_0 + 20}\right]} \cdot d\theta = \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{B_o + 20}{B_o + \theta} \cdot d\theta = \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot dt \quad 2.93$$

Όπου η παράμετρος B_o εκφράζει το αντίστροφο του συντελεστή α_{20} στους 0°C [$B_o = \frac{1}{\alpha_{20}} - 20$].

Ολοκληρώνοντας την προηγούμενη διαφορική εξίσωση από την αρχική τιμή θ_α (μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού σε κανονική λειτουργία του) στην τελική τιμή θ_τ (θερμοκρασία αγωγού τη στιγμή διακοπής του ρεύματος βραχυκυκλώσεως), προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \int_{\theta_\alpha}^{\theta_\tau} \frac{B_o + 20}{B_o + \theta} \cdot d\theta &= \int_0^{t_F} \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot dt \Rightarrow \\ \Rightarrow (B_o + 20) \cdot \int_{\theta_\alpha}^{\theta_\tau} \frac{1}{B_o + \theta} \cdot d\theta &= \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot \int_0^t dt \Rightarrow \\ \Rightarrow (B_o + 20) \cdot \ln \frac{B_o + \theta_\tau}{B_o + \theta_\alpha} &= \frac{I_{th}^2 \cdot \rho_{20}}{Q_c \cdot S^2} \cdot t \Rightarrow \\ \Rightarrow Q_c \cdot S^2 \cdot \left[(B_o + 20) \cdot \ln \frac{B_o + \theta_\tau}{B_o + \theta_\alpha} \right] &= I_{th}^2 \cdot \rho_{20} \cdot t \Rightarrow \\ \Rightarrow S &= I_{th} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{20}}{Q_c \cdot \left[(B_o + 20) \cdot \ln \frac{B_o + \theta_\tau}{B_o + \theta_\alpha} \right]}} \cdot \sqrt{t} \Rightarrow \\ \Rightarrow S &= I_{th} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{20}}{Q_c \cdot (B_o + 20)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\ln \frac{B_o + \theta_\tau}{B_o + \theta_\alpha}}} \cdot \sqrt{t} \Rightarrow \\ \Rightarrow S &= I_{th} \cdot \left[\frac{Q_c \cdot (B_o + 20)}{\rho_{20}} \right]^{-1/2} \cdot \left[\ln \frac{B_o + \theta_\tau}{B_o + \theta_\alpha} \right]^{-1/2} \cdot \sqrt{t} \Rightarrow \\ &S = I_{th} \cdot K \cdot \sqrt{t} \quad 2.94 \end{aligned}$$

Όπου:

$$K = K_2 \cdot K_1 \quad \left[\frac{m^2}{A \cdot \text{sec}^{-1/2}} \right] \quad 2.95$$

με:

$$K_1 = \left[\frac{Q_c \cdot (B_o + 20)}{\rho_{20}} \right]^{-1/2} \quad 2.96$$

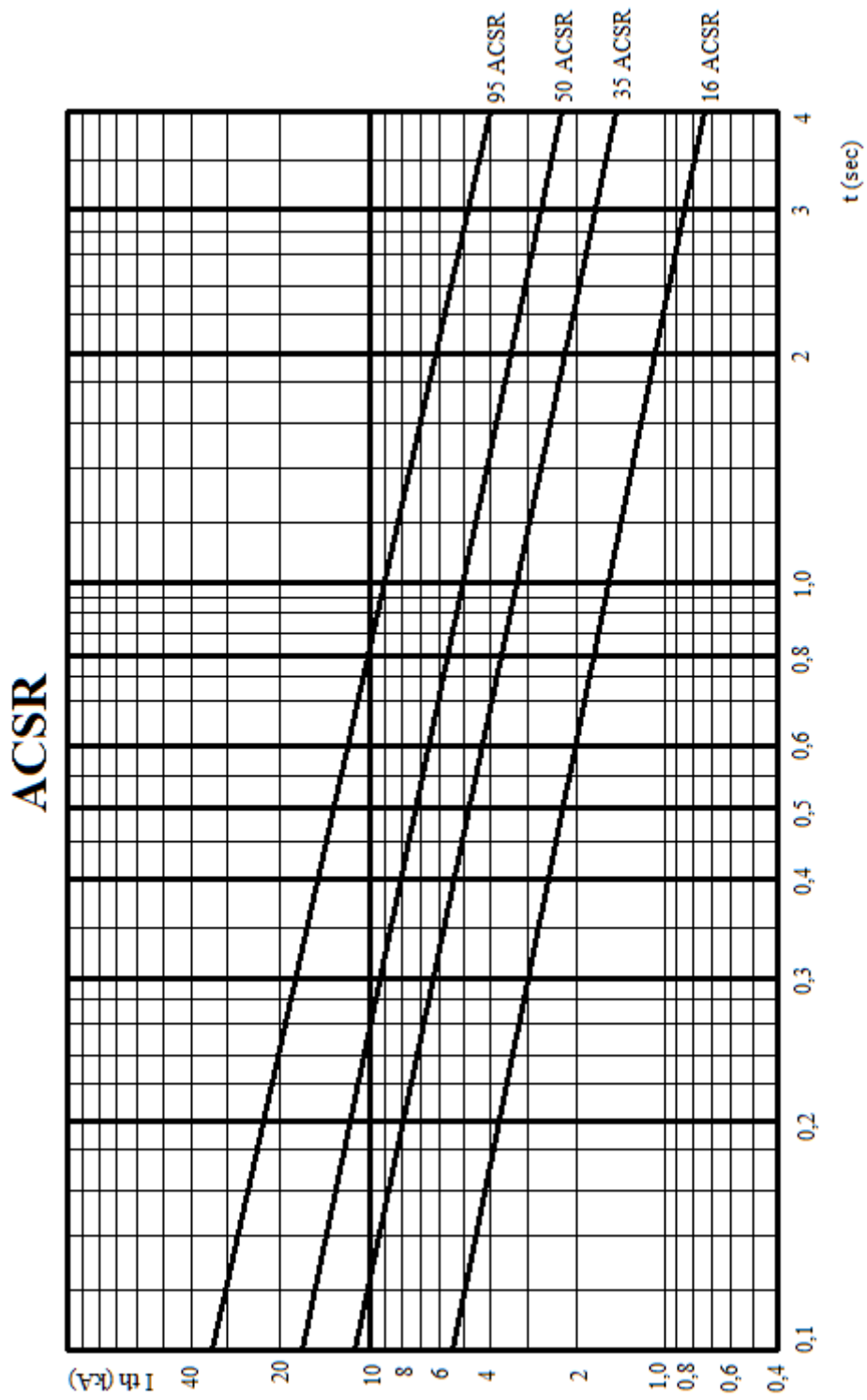
$$K_2 = \left[\ln \frac{B_o + \theta_\tau}{B_o + \theta_\alpha} \right]^{-1/2} \quad 2.97$$

Η σχέση 2.94 υπολογίζει τη διατομή ενός αγωγού προκειμένου αυτός να αντέξει την ανύψωση θερμοκρασίας από θ_α σε θ_τ κατά το χρόνο t που διαρρέεται από θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ίσο με I_{th} .

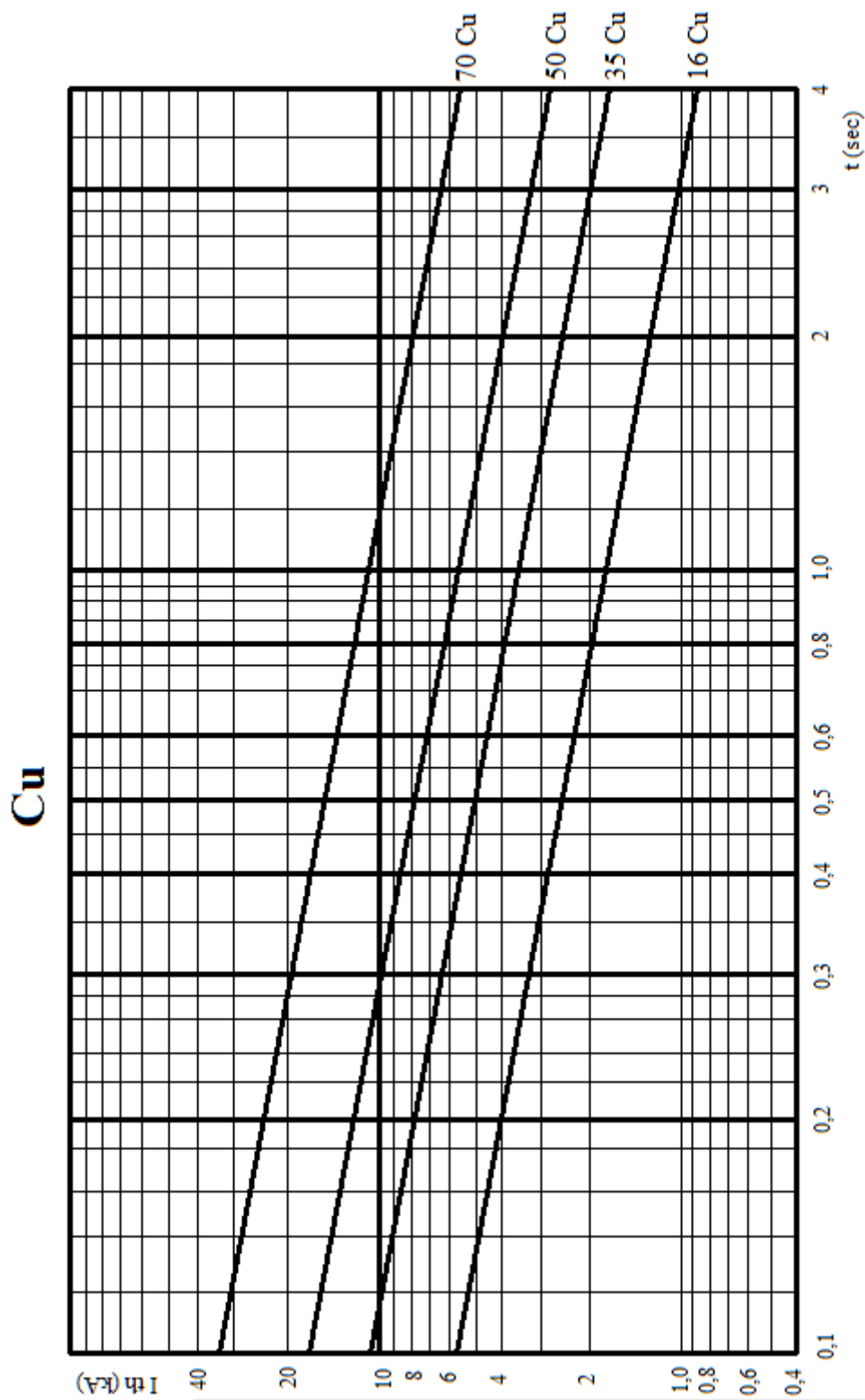
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γυμνών αγωγών των εναέριων δικτύων διανομής.^{[13],[14]}

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-5 ^{[13],[14]}		
Χαρακτηριστικά γυμνών αγωγών εναέριων δικτύων διανομής		
Μέγεθος	Αγωγός Cu	Αγωγός ACSR
Θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης α_{20} [1/°C]	0,00393	0,00403
B_o [°C]	234,5	228
Θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου Q_c [J/°C.m ³]	$3,45 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$
Ειδική αντίσταση στους 20 °C [Ω.m]	$17,241 \cdot 10^{-9}$	$28,264 \cdot 10^{-9}$
Σταθερά K_1 $\left[\frac{m^2}{A \cdot sec^{-1/2}} \right]$	$4,432 \cdot 10^9$	$6,750 \cdot 10^9$
Σταθερά K_1 $\left[\frac{mm^2}{kA \cdot sec^{-1/2}} \right]$	4,432	6,750
Σταθερά K $\left[\frac{mm^2}{kA \cdot sec^{-1/2}} \right]$	8,84	14,28

Με βάση τους συντελεστές K του πίνακα 2-5 και τη σχέση 2.94 και για τις τυποποιημένες τιμές διατομής των γυμνών αγωγών των εναέριων δικτύων διανομής κατασκευάζουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες αντοχής τους σε θερμικό βραχυκύκλωμα. Οι εν λόγω καμπύλες των αγωγών ACSR και Cu παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα 2-9 και 2-10 αντίστοιχα. Για τις καμπύλες αυτές ο συντελεστής K εκφράζεται σε $\frac{mm^2}{kA \cdot sec^{-1/2}}$, το θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης σε kA και η διατομή του αγωγού σε mm².



Σχήμα 2-9. Αντοχή εναέριων αγωγών ACSR σε θερμικό βραχυκύκλωμα



Σχήμα 2-10. Αντοχή εναέριων αγωγών Cu σε θερμικό βραχυκύκλωμα

Βάση του ορισμού του θερμικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως που δόθηκε στην αρχή της παρούσας παραγράφου είναι:^[9]

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \cdot \int_0^{T_k} i_F^2(t) \cdot dt} \quad 2.98$$

Όπου T_k είναι η χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

Επειδή ο υπολογισμός του θερμικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως σύμφωνα με τη σχέση 2.98 είναι δυσχερής, διευκρινήσεις της σχέσης αυτής οδήγησαν στην παρακάτω σχέση:

$$I_{th} = I_F'' \cdot \sqrt{m + n} \quad 2.99$$

Όπου:

I_F'' = αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης [A]

m = παράμετρος που λαμβάνει υπόψη της την ανάπτυξη θερμότητας λόγω της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης $i_F(t)$ και εξαρτάται από τον χρόνο T_k του σφάλματος

n = παράμετρος που λαμβάνει υπόψη της την ελάττωση της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος $i_F(t)$ σε περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτριες

Για βραχυκυκλώματα στο δίκτυο MT μακριά από γεννήτριες είναι $n=1$ και $I_F''=I_F$, όπου I_F είναι το μέτρο του μόνιμου, σταθερού ρεύματος βραχυκύκλωσης έτσι όπως υπολογίστηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Άρα, η σχέση 2.99 γράφεται ως:

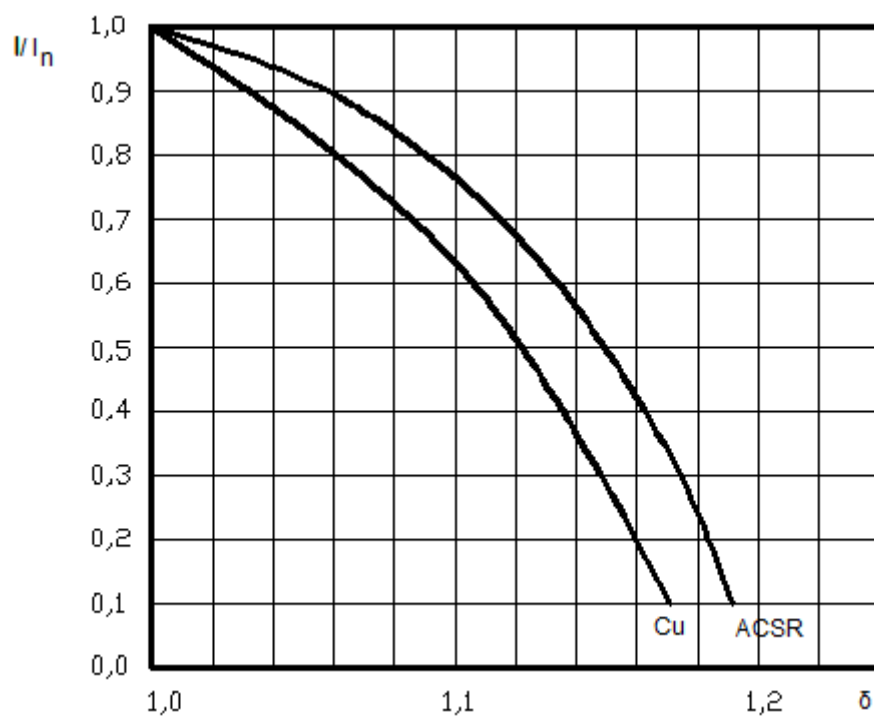
$$I_{th} = I_F \cdot \sqrt{m + 1} \quad 2.100$$

Για διάρκεια βραχυκυκλώματος $T_k > 0,5 \text{sec}$ η παράμετρος m πλησιάζει το μηδέν και άρα το θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{th} ισούται με πολύ μεγάλη προσέγγιση με το μόνιμο, σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_F .^[9]

Στη σχέση 2.94, κατά τον προσδιορισμό της θερμικής αντοχής σε βραχυκύκλωμα των γυμνών αγωγών, ως θερμοκρασία θ_a έχει ληφθεί υπόψη αυτή που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία εκείνη του αγωγού όταν αυτός φορτίζεται με το ονομαστικό του ρεύμα I_n . Στην πράξη, οι εναέριοι αγωγοί των δικτύων διανομής δεν φορτίζονται μέχρι την ονομαστική τους ένταση, επειδή είτε το κριτήριο της πτώσης τάσης είτε το κριτήριο της μηχανικής αντοχής οδηγεί σε αγωγούς μεγαλύτερης διατομής. Για το λόγω αυτό, η θερμοκρασία θ_a τη στιγμή της εμφάνισης του βραχυκυκλώματος δεν είναι πραγματικά η ονομαστική τιμή που καθορίζει ο πίνακας 2-4 αλλά αρκετά μικρότερη. Αυτό, οδηγεί σε μεγαλύτερα επιτρεπόμενα ρεύματα (σε σχέση με τα ρεύματα όταν η θ_a έχει την τιμή του πίνακα 2-4) για την ίδια διάρκεια βραχυκυκλώματος. Για να λάβουμε υπόψη μας τον παράγοντα που σχετίζεται με το γεγονός ότι οι γραμμές στην πράξη φορτίζονται με ένα ρεύμα I μικρότερο του ονομαστικού τους I_n , η σχέση 2.94 μετασχηματίζεται σε:^{[9],[10]}

$$S = \frac{1}{\delta} \cdot I_{th} \cdot K \cdot \sqrt{t} \quad 1.115$$

Όπου ο συντελεστής δ προσδιορίζεται βάση του γραφικού του επόμενου σχήματος ανάλογα με το λόγο I/I_n και το είδος του αγωγού. I είναι το πραγματικό φορτίο της γραμμής και προσδιορίζεται με βάση το άθροισμα των ισχύων όλων των μ/σ που συνδέονται στην γραμμή.



Σχήμα 2-11. Συντελεστής αύξησης της επιτρεπόμενης θερμικής έντασης βραχυκυκλώσεως εναέριων γραμμών διανομής

Οι ονομαστικές επιτρεπόμενες φορτίσεις των αγωγών των εναέριων δικτύων διανομής στην κανονική θερμοκρασία λειτουργίας τους θ_a ($=80^\circ\text{C}$ για αγωγούς Cu και ACSR από πίνακα 2-4) δίνονται στον παρακάτω πίνακα.^[10]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-6 ^[10]		
Μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις αγωγών I_n		
Διατομή αγωγού [mm ²]	Υλικό	
	Cu	ACSR
16	115 A	136 A
35	185 A	224 A
50	232 A	296 A
95	352 A	448 A

3. Προστασία δικτύων διανομής Μέσης Τάσης

3.1 Βασικά στοιχεία συστήματος προστασίας δικτύων διανομής MT

Για την προστασία των δικτύων διανομής MT μπορούμε να πούμε ότι γενικά απαιτούνται διαφόρων τύπων *διακόπτες*. Όπως θα δούμε παρακάτω, τέτοιοι διακόπτες είναι οι *ελαιοδιακόπτες*, οι *διακόπτες απομονώσεως* και οι *διακόπτες αυτόματου επαναφοράς*. Αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τον κυρίως διακόπτη ισχύος, τους μετασχηματιστές εντάσεως και τους ηλεκτρονόμους που ελέγχουν τη λειτουργία τους. Η λειτουργία των ηλεκτρονόμων είναι να ανιχνεύουν με διάφορους τρόπους τις υπερεντάσεις από τα σφάλματα που συμβαίνουν στις γραμμές και να δίνουν εντολή στο άνοιγμα του κυρίως διακόπτη ισχύος. Βέβαια, πέραν των διακοπών αυτών, στα μέσα προστασίας των γραμμών διανομής συμπεριλαμβάνονται και οι ασφάλειες MT, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα τόσο να ανιχνεύουν υπερεντάσεις όσο και να τις διακόπτουν ταυτόχρονα. Οι προαναφερθείσες συσκευές προστασίας ανταποκρίνονται σε μη ομαλές καταστάσεις που μπορούν να εμφανιστούν σε μια γραμμή διανομής όπως για παράδειγμα οι μεταβολές στο επίπεδο τάσης ή ρεύματός της. Οι περισσότερες από τις συσκευές αυτές παρακολουθούν τις παραμέτρους μέσω *μετασχηματιστών έντασης*, οι οποίοι είναι συχνά ενσωματωμένοι στους μονωτήρες του διακόπτη. Οι δυνατοί λόγοι μετασχηματισμού είναι συνήθως 200/5, 400/5 και 600/5. Επειδή οι εν λόγω μ/σ δεν αποτελούν στην ουσία μέσα προστασίας, δεν θα επεκταθούμε στην περαιτέρω ανάλυσή τους.^{[7],[15],[16]}

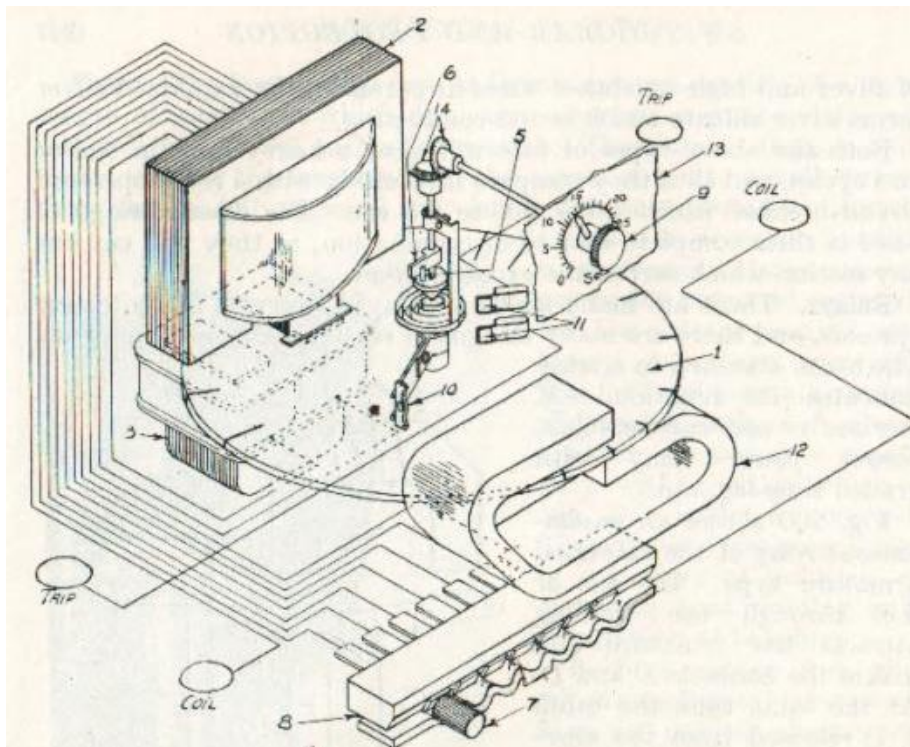
3.2 Ηλεκτρονόμοι υπερεντάσεως επαγωγικού τύπου

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται εν συντομία οι *ηλεκτρονόμοι υπερεντάσεως επαγωγικού τύπου*, γιατί αυτός είναι και ο πιο διαδεδομένος τύπος ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιείται στις συσκευές προστασίας των δικτύων διανομής.

3.2.1 Περιγραφή και αρχή λειτουργίας των επαγωγικών ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως

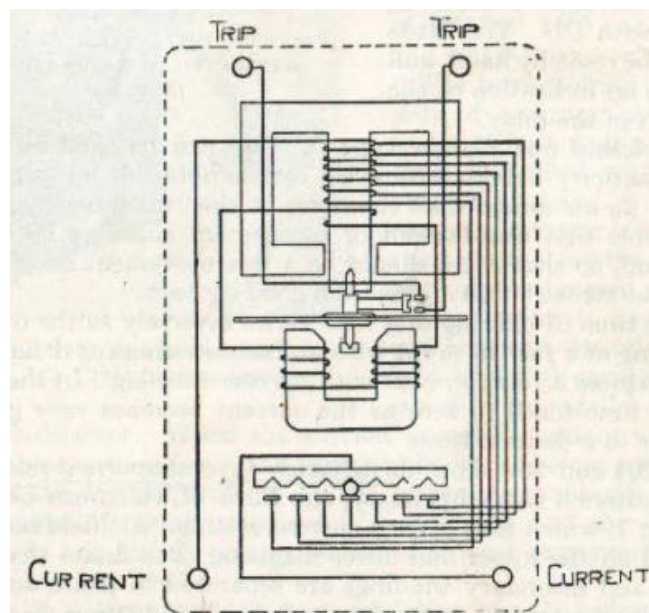
Οι ηλεκτρονόμοι υπερεντάσεως επαγωγικού τύπου διεγείρονται από εναλλασσόμενα μεγέθη. Στο σχήμα 3-1 παρουσιάζεται η άποψη ενός τέτοιου ηλεκτρονόμου. Αποτελείται κατά κύριο λόγο από δυο ανεξάρτητους πυρήνες (α/α 2, 3), έναν στρεφόμενο δίσκο (α/α 1) πάνω στον οποίο είναι στερεωμένο ένα σταθερό στέλεχος (α/α 10), δυο ακίνητες επαφές *trip* (α/α 11) που τις βραχυκυκλώνει το στέλεχος του δίσκου κατά την περιστροφή του, έναν ρυθμιστή χρόνου λειτουργίας (α/α 9), ένα σπειροειδές ελατήριο (α/α 6) για την επαναφορά του δίσκου στην αρχική του θέση μετά την ενεργοποίησή του και ένα πεδίο μεταβλητών λήψεων του τυλίγματος διέγερσης (α/α 8), για τη ρύθμιση της έντασης διέγερσης του ηλεκτρονόμου μέσω της τοποθέτησης κατάλληλου βύσματος (α/α 7) σε μια από τις λήψεις του πεδίου ρύθμισης. Έτσι,

τοποθετώντας το βύσμα σε μια από τις λήψεις αυτές στην ουσία ρυθμίζουμε σε τι ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος του μ/σ έντασης θα διεγείρεται ο ηλεκτρονόμος.^[17]



Σχήμα 3-1. Άποψη ηλεκτρονόμου επαγωγικού τύπου^[17]

Στο σχήμα 3-2 παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό διάγραμμα του ηλεκτρονόμου επαγωγικού τύπου.^[17]



Σχήμα 3-2. Ηλεκτρικό διάγραμμα ηλεκτρονόμου επαγωγικού τύπου^[17]

Το πρωτεύον τύλιγμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου (*coil* στο σχήμα 3-1 ή *current* στο σχήμα 3-2) συνδέεται μέσω μ/σ έντασης προς τη μια φάση της τριφασικής γραμμής που πρόκειται να

προστατέψει. Το δευτερεύων τύλιγμα του ηλεκτρονόμου είναι ανεπτυγμένο και στους δυο πυρήνες του και είναι βραχυκυκλωμένο. Οι μαγνητικές ροές των δυο τυλιγμάτων δημιουργούν στο δίσκο ροπή, η οποία εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύων τύλιγμα. Όταν λόγω ενός μεταβατικού φαινομένου ο μ/σ έντασης αναπτύξει ένταση η οποία υπερβαίνει την ονομαστική του τιμή, ο δίσκος θα περιστραφεί και το στέλεχος του δίσκου θα κλείσει τις επαφές *trip*. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να τεθεί σε λειτουργία ο μηχανισμός που θα ενεργοποιήσει το κλείσιμο των επαφών του κυρίως διακόπτη ισχύος (π.χ. ένας ηλεκτροκινητήρας). Η επαναφορά του ηλεκτρονόμου στην αρχική του θέση πραγματοποιείται μέσω ενός σπειροειδούς ελατηρίου στο δίσκο του. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία γραμμών, μετασχηματιστών και ζυγών. Η λειτουργία τους χαρακτηρίζεται από την τιμή του ρεύματος διέγερσής τους και το χρόνο λειτουργίας τους. Το ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου ρυθμίζεται με την τοποθέτηση ενός βύσματος σε μια από τις υποδοχές που φέρει ο ίδιος (α/α 8 στο σχήμα 3-1), ενώ ο χρόνος λειτουργίας τους ρυθμίζεται μέσω κατάλληλου ρυθμιστή (α/α 9 στο σχήμα 3-1).^{[7],[17]}

3.2.2 Βασικές παράμετροι ηλεκτρονόμων επαγωγικού τύπου

Υπάρχουν ορισμένες βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ηλεκτρονόμων επαγωγικού τύπου ειδικά αλλά και των ηλεκτρονόμων γενικότερα που θα πρέπει να ορισθούν από την αρχή. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι εξής:^[6]

Επίπεδο επιλογής (pick-up level). Είναι η τιμή του ρεύματος που αποτελεί το κατώφλι πάνω από το οποίο ο ηλεκτρονόμος κλείνει τις επαφές του. Καλείται και ρεύμα διέγερσης του ηλεκτρονόμου και ταυτίζεται με το λόγο του μ/σ έντασης με τον οποίο συνδέεται, πολλαπλασιασμένο με την κλίμακα του πεδίου ρύθμισής του. Για παράδειγμα, αν ένας ηλεκτρονόμος συνδέεται μέσω μ/σ έντασης με λόγο 200/5 και το βύσμα του είναι στη θέση «6», τότε το επίπεδο επιλογής του είναι $(200/5) \times 6 = 240\text{A}$. Η τιμή αυτή της έντασης αποτελεί στο συγκεκριμένο παράδειγμα το επίπεδο επιλογής του ηλεκτρονόμου. Αυτό σημαίνει ότι μόλις το ρεύμα της γραμμής που προστατεύει ο ηλεκτρονόμος υπερβεί τα 240A, τότε στο δευτερεύων τύλιγμα του μ/σ έντασης θα δημιουργηθεί ένα τέτοιο ρεύμα που θα διεγείρει τις επαφές του ηλεκτρονόμου και θα τις κλείσει.

- *Επίπεδο επαναφοράς (drop out ή reset level)*. Είναι η τιμή του ρεύματος που αποτελεί το κατώφλι κάτω από το οποίο ο ηλεκτρονόμος ανοίγει τις επαφές του και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση.
- *Χρόνος λειτουργίας (operating time)*. Είναι ο χρόνος που παρέχεται από τη στιγμή που θα επιτευχθεί το επίπεδο επιλογής μέχρις ότου ο ηλεκτρονόμος κλείσει τις επαφές του.
- *Χαρακτηριστική καμπύλη (characteristic)*. Είναι η γραφική παράσταση της έντασης διέγερσης του ηλεκτρονόμου συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας του. Μια τέτοια καμπύλη δηλαδή καθορίζει μετά από πόσο χρόνο λειτουργεί ο ηλεκτρονόμος για μια δεδομένη τιμή υπερεντάσεως. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των ηλεκτρονόμων που προμηθεύεται ο ΔΕΔΔΗΕ παρουσιάζονται στα σχήματα του *Παραρτήματος Α*.^[7]

3.2.3 Κατηγορίες ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως επαγωγικού τύπου

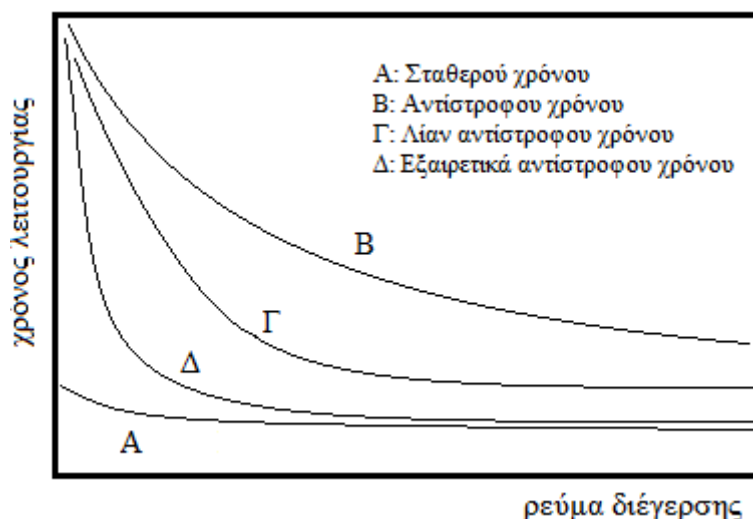
Με βάση το χρόνο λειτουργίας τους, οι επαγωγικοί ηλεκτρονόμοι διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες.^{[6],[7]}

α) τους ηλεκτρονόμους στιγμιαίας λειτουργίας (*instantaneous overcurrent relays*) οι οποίοι λειτουργούν αμέσως μόλις το πλάτος της υπερέντασης λόγω σφάλματος υπερβεί το όριο διέγερσής τους. Χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι διαθέτουν σταθερό χρόνο λειτουργίας, ο οποίος είναι $\leq 0,1 \text{ sec}$. Οι εν λόγω ηλεκτρονόμοι του ΔΕΔΔΗΕ έχουν χρόνο λειτουργίας $0,07 \text{ sec}$. Ο συνολικός χρόνος διακοπής του σφάλματος σε έναν τέτοιο ηλεκτρονόμο προκύπτει από το άθροισμα του χρόνου λειτουργίας του ($0,07 \text{ sec}$) συν τους χρόνους κινήσεως του μηχανισμού του κυρίως διακόπτη ισχύος και σβέσης του τόξου που είναι συνήθως περί τα $0,08 \text{ sec}$. Συνεπώς, ο συνολικός χρόνος διακοπής του σφάλματος στους ηλεκτρονόμους στιγμιαίας λειτουργίας του ΔΕΔΔΗΕ είναι σταθερός και ίσος με $0,07+0,08=0,15 \text{ sec}$.

β) τους ηλεκτρονόμους χρονικής καθυστέρησης (*time overcurrent relays*) η λειτουργία των οποίων ρυθμίζεται με κάποια χρονική καθυστέρηση. Η μορφή της χαρακτηριστικής τους καμπύλης χωρίζει τους εν λόγω ηλεκτρονόμους στις εξής υποκατηγορίες.^{[6],[7]}

- *Σταθερού χρόνου*. Στους ηλεκτρονόμους αυτούς, η χρονική καθυστέρηση είναι σταθερή και ανεξάρτητη από το πλάτος του ρεύματος διέγερσης
- *Αντίστροφου χρόνου (Inverse Time, IT)*. Στους ηλεκτρονόμους αυτούς, η χρονική καθυστέρηση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το πλάτος του ρεύματος διέγερσης. Ο χρόνος λειτουργίας τους δηλαδή μειώνεται, όταν αυξάνει το ρεύμα διέγερσης
- *Λίαν αντίστροφου χρόνου (Very Inverse Time, VIT)*. Όπως και στους ηλεκτρονόμους αντίστροφου χρόνου, μόνο που η χαρακτηριστική τους καμπύλη έχει μεγαλύτερη κλίση
- *Εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου (Extremely Inverse Time, EIT)*. Όπως και στους ηλεκτρονόμους αντίστροφου χρόνου, μόνο που η χαρακτηριστική τους καμπύλη έχει κλίση μεγαλύτερη και από αυτή των λίαν αντίστροφου χρόνου.

Μερικές τυπικές καμπύλες χρόνου έντασης των παραπάνω τύπων ηλεκτρονόμων χρονικής καθυστέρησης παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3-3. Χαρακτηριστικές καμπύλες ηλεκτρονόμων χρονικής καθυστέρησης^[7]

3.3 Μέσα προστασίας δικτύων διανομής ΜΤ

Τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται σήμερα στα δίκτυα ΜΤ είναι τα εξής:^{[7],[12]}

1. Ελαιοδιακόπτες (Ε/Δ) υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ
2. Διακόπτες Αυτόματου Επαναφοράς (Δ/Α.Ε.)
3. Διακόπτες Απομονώσεως (Δ/Α)
4. Ασφάλειες ΜΤ

Τα μέσα αυτά προστασίας περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

3.3.1 Ελαιοδιακόπτες (Ε/Δ) υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ

Οι ελαιοδιακόπτες (Ε/Δ) εγκαθίστανται στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών μεταφοράς και έχουν ως σκοπό την προστασία των κυρίων γραμμών ΜΤ που αναχωρούν από αυτούς. Κάθε μια γραμμή διανομής ΜΤ που αναχωρεί από υποσταθμό μεταφοράς, προστατεύεται στην αρχή της με Ε/Δ. Ένας Ε/Δ αποτελείται από τρία λειτουργικώς διακεκριμένα στοιχεία:^{[7],[12]}

- α) τον κυρίως διακόπτη ισχύος
- β) τους μετασχηματιστές (μ/σ) εντάσεως
- γ) τους ηλεκτρονόμους που ελέγχουν τη λειτουργία του Ε/Δ.

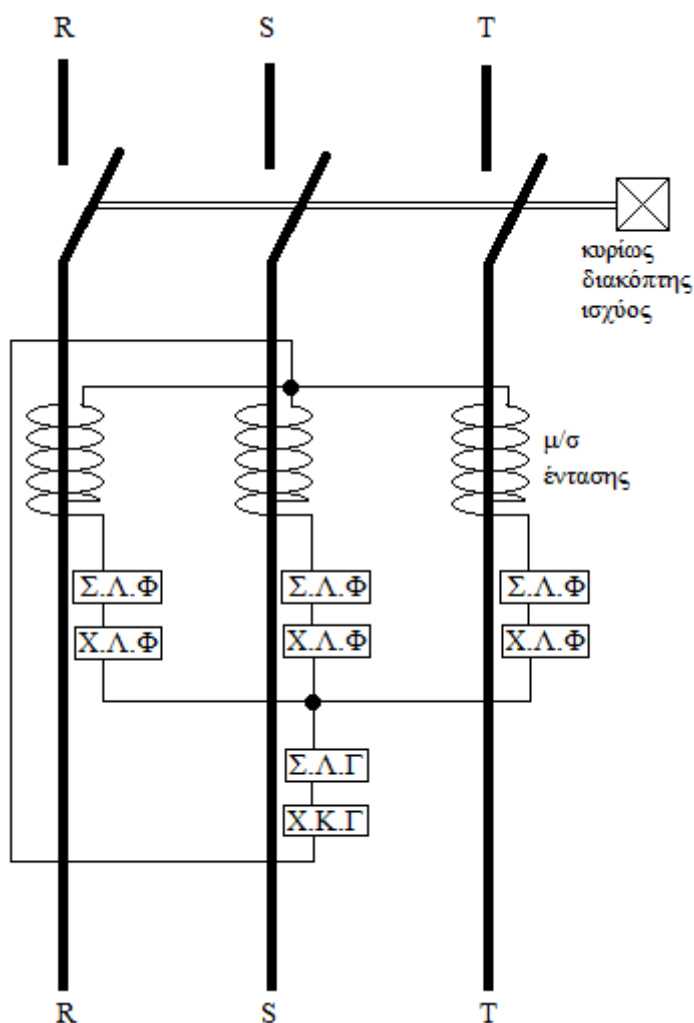
Διακρίνουμε δυο κατηγορίες ηλεκτρονόμων. Οι «υπερεντάσεως», που αντιλαμβάνονται την υπέρταση και δίνουν εντολή ανοίγματος στον Ε/Δ και οι ηλεκτρονόμοι «επαναφοράς».

Μια άλλη διάκριση των ηλεκτρονόμων σε έναν Ε/Δ είναι:

- Στιγμαϊάς λειτουργίας φάσεων (Σ.Α.Φ)

- Στιγμαϊαίας λειτουργίας γης (Σ.Λ.Γ)
- Χρονικής καθυστέρησης φάσεων (Χ.Κ.Φ)
- Χρονικής καθυστέρησης λειτουργίας γης (Χ.Κ.Γ)

Οι μ/σ έντασης είναι συχνά ενσωματωμένοι στους μονωτήρες του Ε/Δ και τροφοδοτούν τα διάφορα κυκλώματά του. Οι δυνατές σχέσεις των μ/σ αυτών είναι 200/5, 400/5 και 600/5. Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασεως συνδέονται στο δευτερεύον τύλιγμα των μ/σ έντασεως όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

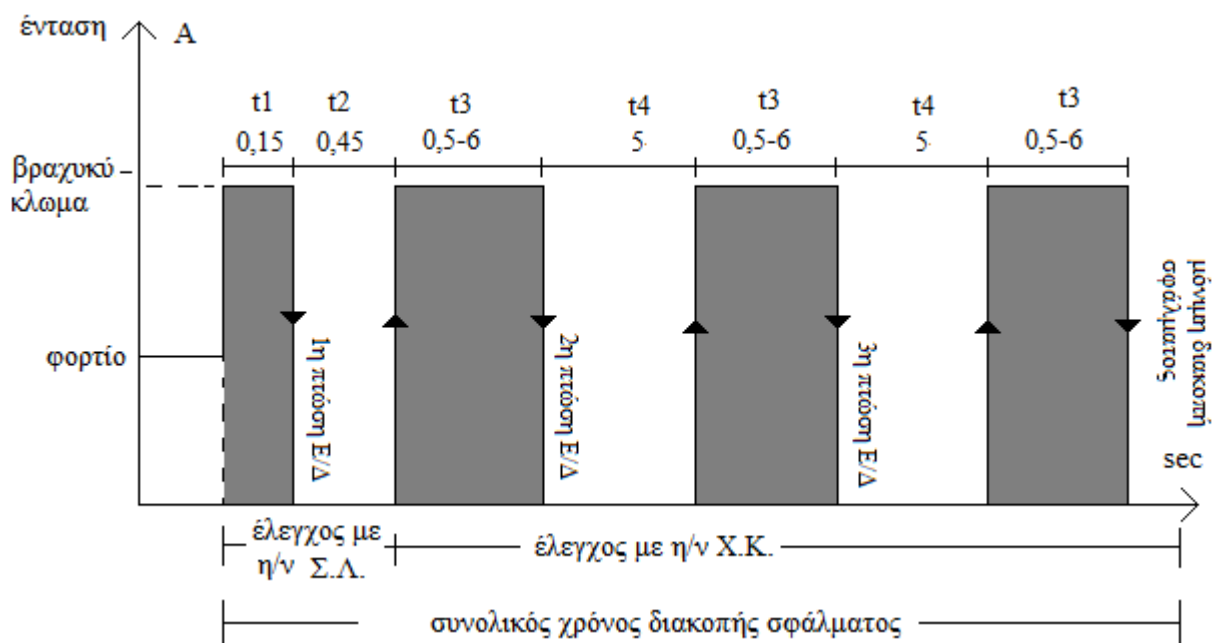


Σχήμα 3-4. Συνδεσμολογία των ηλεκτρονόμων εντάσεως στους Ε/Δ ΜΤ^[7]

Η λειτουργία του Ε/Δ στην περίπτωση σφάλματος περιγράφεται στο σχήμα 3-5 και είναι η εξής:

Εκ της προκαλούμενης υπερέντασης του σφάλματος διεγείρονται αρχικά οι ηλεκτρονόμοι στιγμιαίας λειτουργίας οι οποίοι δίνουν εντολή πτώσης στον Ε/Δ. Η διακοπή πραγματοποιείται σε χρόνο $t_1=0,15$ sec από της διεγέρσεως του ηλεκτρονόμου και εφόσον το σφάλμα προκαλεί ένταση 150%-200% της οριακής έντασεως διεγέρσεώς του. Ο Ε/Δ παραμένει ανοικτός για χρόνο $t_2=0,45$ sec περίπου, οπότε ακολουθεί ταχεία επανάφεση και οι ηλεκτρονόμοι Σ.Λ. τίθενται εκτός λειτουργίας για περίπου 1 λεπτό. Και ο χρόνος διακοπής t_2 αποτελεί σταθερά του Ε/Δ και δεν μπορεί να μεταβληθεί. Εάν κατά την πρώτη επαναφορά (επανάφεση) σε χρόνο $t_1+t_2=0,6$ sec

εξακολουθεί να υφίσταται το σφάλμα, τότε οι ηλεκτρονόμοι Χ.Κ δίνουν εντολή 2^{ης} πτώσης του Ε/Δ σε χρόνο t3 (0,5-6sec) ο οποίος εξαρτάται από τη ρύθμισή του, η οποία γίνεται επιλέγοντας την κατάλληλη χαρακτηριστική καμπύλη του. Μετά τη δεύτερη πτώση του Ε/Δ αυτός παραμένει ανοιχτός για διάστημα t4 μερικών sec. Συνήθως ο χρόνος αυτός ρυθμίζεται στα 5sec. Ακολουθεί ταχεία επανάζευξη και αν το σφάλμα παραμείνει, ο Ε/Δ εκτελεί μια 3^η πτώση σε χρόνο 0,5-6sec όπου και παραμένει ανοιχτός πάλι χρόνο 5sec. Αμέσως μετά ακολουθεί ταχεία επανάζευξη και αν το σφάλμα συνεχίσει να παραμένει για χρόνο 0,5-6sec τότε οι η/ν Χ.Κ δίνουν εντολή μόνιμης πτώσης του Ε/Δ, ενώ συγχρόνως τίθεται εκτός ο μηχανισμός αυτόματης επανάζευξης. Συνολικά, ο Ε/Δ εκτελεί τρεις πτώσεις, πριν φτάσει στην τελική όπου και πραγματοποιεί μόνιμη διακοπή εφόσον το σφάλμα παραμείνει.^{[7],[12]}



Σχήμα 3-5. Κύκλοι λειτουργίας Ε/Δ^[7]

Από την πιο πάνω ανάλυση προκύπτει ότι ο συνολικός χρόνος διακοπής ενός παραμένουστος σφάλματος κυμαίνεται από:

$$T1 = t1 + t2 + t3_{\min} + t4 + t3_{\min} + (\text{μια ακόμα επαναφορά και πτώση}) =$$

$$= 0,15 + 0,45 + 0,5 + 5 + 0,5 + (5 + 0,5) = 12 \text{ sec}$$

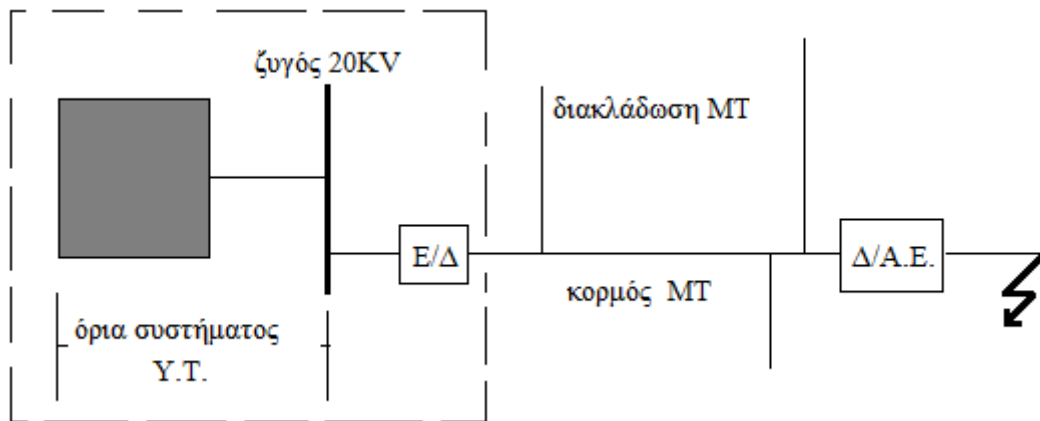
$$T2 = t1 + t2 + t3_{\max} + t4 + t3_{\max} + (\text{μια ακόμα επαναφορά και πτώση}) =$$

$$= 0,15 + 0,45 + 6 + 5 + 6 + (5 + 6) = 28,6 \text{ sec}$$

Ο χρόνος των t1=0,15sec οφείλεται στο χρόνο αντίδρασης του ηλεκτρονόμου Σ.Λ στο σφάλμα (0,07sec) συν το χρόνο κίνησης του μηχανισμού του Ε/Δ και το χρόνο σβέσης του τόξου (0,08sec).^[7]

3.3.2 Διακόπτες Αυτόματου Επαναφοράς (Δ/Α.Ε.)

Οι διακόπτες αυτοί εγκαθίστανται στις θέσεις εκείνες όπου είναι επιθυμητός ο λειτουργικός αποχωρισμός τμήματος μιας γραμμής από το σημείο εγκατάστασής τους και πέρα. Χρησιμοποιούνται για την προστασία κυρίων γραμμών διανομής (κορμών) για να προστατεύσουν τμήμα τους σε περίπτωση σφάλματος πολύ μακριά από τον Ε/Δ. Για παράδειγμα, αν έχουμε μια μεγάλη κύρια γραμμή ΜΤ και συμβεί σφάλμα στο τέλος της, χωρίς το Δ/Α.Ε. θα ενεργοποιούταν ο Ε/Δ και θα έχετε εκτός ολόκληρη η γραμμή αυτή. Αντίθετα, με την εγκατάσταση Δ/Α.Ε. σε κύρια σημεία της γραμμής τίθεται εκτός μόνο το τμήμα εκείνο μετά από αυτούς.^{[7],[12]}



Σχήμα 3-6. Εγκατάσταση Δ/Α.Ε. σε κύρια γραμμή διανομής ΜΤ

Οι διακόπτες αυτοί αποτελούνται από:

1. Από τον κύριο διακόπτη ισχύος
2. Από τον πίνακα ελέγχου που δίνει τις εντολές λειτουργίας
3. Από τα καλώδια σύνδεσης του πίνακα ελέγχου και του διακόπτη ισχύος μέσω των οποίων μεταβιβάζονται οι εντολές.

Η λειτουργία των Δ/Α.Ε. είναι όμοια με αυτή των Ε/Δ, χαρακτηρίζεται δηλαδή από διαδοχικές πτώσεις και αυτόματες επαναφορές κατά την περίπτωση μόνιμου σφάλματος. Ειδικότερα, για τους Δ/Α.Ε. υπάρχουν οι εξής δυνατότητες ρυθμίσεων:

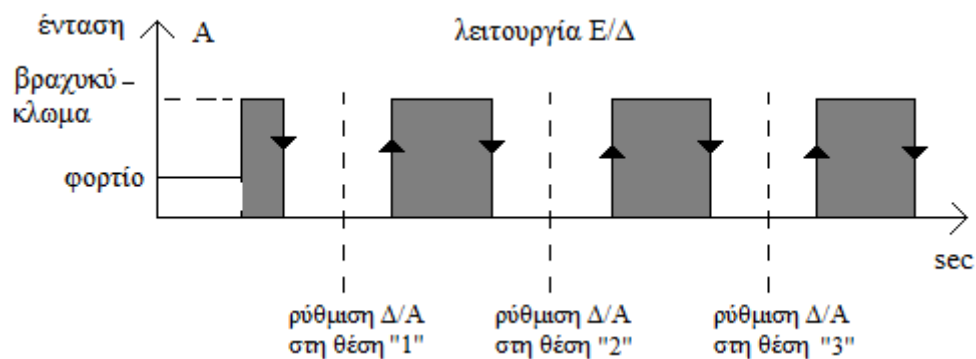
- Ο αριθμός των επαναφορών είναι δυνατό να καθοριστεί από 0 έως 3 (δηλαδή αριθμός πτώσεων 1 έως 4)
- Ο χρόνος καθυστέρησης της κάθε επαναφοράς μπορεί να καθοριστεί σε 0,5, 2, 10, 14, 30, 45 και 60sec
- Η οριακή ένταση διεγέρσεως των η/ν Σ.Λ είναι ενιαία και όχι ανεξάρτητη όπως στους Ε/Δ
- Είναι δυνατόν να επιλεγεί ο χρόνος επαναφοράς του συστήματος ελέγχου στην αρχική κατάσταση μεταξύ των τιμών 60, 90, 120, 150, 180 και 300sec
- Υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των ελάχιστων εντάσεων λειτουργίας του για σφάλματα γης σε 25, 50 ή 70Α και για σφάλματα φάσεων σε 100, 140, 200, 280, 400, 560, 800 ή 1120Α.

Οι παραπάνω ρυθμίσεις πραγματοποιούνται με κριτήρια εξαρτώμενα από τα δεδομένα της κάθε γραμμής. Οποσδήποτε, ο κατά κανόνα επιλεγόμενος κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει μια στιγμιαία λειτουργία και μια ταχεία επανάζευξη και στη συνέχεια τρεις λειτουργίες με χρονική καθυστέρηση πτώσεως και επαναφοράς όπως στον κύκλο λειτουργίας των Ε/Δ.

3.3.3 Διακόπτες Απομονώσεως (Δ/Α)

Οι Δ/Α χρησιμοποιούνται για την απομόνωση τμημάτων εναέριων δικτύων διανομής ΜΤ (διακλαδώσεων) σε περιπτώσεις μόνιμου σφάλματος. Λειτουργούν πάντοτε σε συνδυασμό με προτασσόμενο Ε/Δ ή Δ/Α.Ε.. Δεν ανιχνεύουν βραχυκυκλώματα και δεν δουλεύουν σαν μέσα προστασίας από αυτά. Σκοπός τους είναι να απομονώσουν μια διακλάδωση της κύριας γραμμής, προτού λειτουργήσει ο Ε/Δ και απομονώσει ολόκληρο τον κορμό.^{[7],[12]}

Η βασική λειτουργία του Δ/Α συνίσταται στη μέτρηση του αριθμού των διακοπών-διελεύσεων της υπερέντασης που προκαλεί ο προτασσόμενος Ε/Δ ή Δ/Α.Ε.. Όταν το πλήθος αυτό των διακοπών-διελεύσεων φτάσει σε μια ορισμένη τιμή ενεργοποιείται ο Δ/Α και ανοίγει. Το άνοιγμα αυτό είναι δυνατό να ρυθμιστεί μετά την πρώτη ή τη δεύτερη ή την τρίτη διακοπή της εντάσεως βραχυκυκλώσεως από τον προτασσόμενο Ε/Δ ή Δ/Α.Ε.. Για να λειτουργήσει πριν τον προτασσόμενο Ε/Δ ή Δ/Α.Ε. συνήθως ρυθμίζεται να ανοίγει έναν κύκλο πριν από αυτόν.



Σχήμα 3-7. Δυνατές ρυθμίσεις Δ/Α σε σχέση με τους κύκλους λειτουργίας του Ε/Δ^[7]

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να επανέλθει ο μηχανισμός του Δ/Α σε κατάσταση ηρεμίας από τη στιγμή που πραγματοποίησε το μόνιμο άνοιγμα του (τελικό βήμα) ονομάζεται *χρόνος επαναφοράς* και κυμαίνεται από 5 έως 25 λεπτά. Για την ορθή λειτουργία του Δ/Α απαιτείται να ελεγχθεί ότι στη θέση εγκατάστασής του πληρούνται οι εξής συνθήκες:

1. Ο Δ/Α θα πρέπει να έχει ρύθμιση μικρότερη κατά μία (τουλάχιστον) μονάδα από τον αριθμό πτώσεων του προτασσόμενου Ε/Δ ή Δ/Α.Ε.
2. Ο Δ/Α θα πρέπει να αντέχει τη διέλευση των μέγιστων εντάσεως βραχυκυκλώσεως μέχρι την πτώση του προτασσόμενου Ε/Δ ή Δ/Α.Ε.
3. Συστήνεται η ένταση διεγέρσεώς τους να μην είναι μεγαλύτερη από το 80% του ελάχιστου ρεύματος πτώσεως του προηγούμενου Ε/Δ ή Δ/Α.Ε. λόγω σφαλμάτων φάσεων.

Δυο είναι οι τύποι των Δ/Α που χρησιμοποιούνται στο Εθνικό Δίκτυο Διανομής:^[18]

- Δ/Α Mc GRAW EDISON τύπου GW, τριπολικός
- Δ/Α Mc GRAW EDISON τύπου GN3VE, τριπολικός

Τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 ^{[12],[18]}		
Τεχνικά χαρακτηριστικά Δ/Α που εγκαθίστα ο ΔΕΔΔΗΕ στο Εθνικό Δίκτυο Διανομής		
Τεχνικό χαρακτηριστικό	Τύπος Δ/Α	
	GW, τριπολικός	GN3VE, τριπολικός
Τύπος μηχανισμού	Ηλεκτρικός	Ηλεκτρικός
Ονομαστική τάση [kV]	34,5	24,9
Μέγιστη τάση [kV]	38	27
Μήκος ερπυσμού μονωτήρων [cm]	43	43
Ονομαστική ένταση λειτουργίας [A]	400	200
Μέγιστη ένταση διακοπής [A]	880	440
Μέγιστη στιγμ. ένταση (ασύμμετρη) [A]	15000	9000
Αριθμός θέσεων ρυθμίσεως	1, 2, 3	1, 2, 3

3.3.4 Ασφάλειες MT

Οι εν λόγω ασφάλειες αποτελούν μέσα προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων και όχι έναντι υπερφορτίσεων. Ανάλογα με την αρχή δια της οποίας πραγματοποιούν τη σβέση του τόξου κατά τη διακοπή, διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:^[7]

- α) ασφάλειες εκτονώσεως
- β) ασφάλειες κόνεως (ή κλειστής σβέσης)

Οι ασφάλειες εκτονώσεως είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στα εναέρια δίκτυα διανομής MT. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής:

Κατά τη διέλευση της υπερεντάσεως προκαλείται τήξη του τηκτού και συγχρόνως δημιουργούνται αέρια τα οποία εκτονούμενα προκαλούν σβέση του τόξου. Στη δημιουργία των αερίων αυτών συμβάλει και η ασφαλειοθήκη η οποία καταστρέφεται σε κάθε λειτουργία.

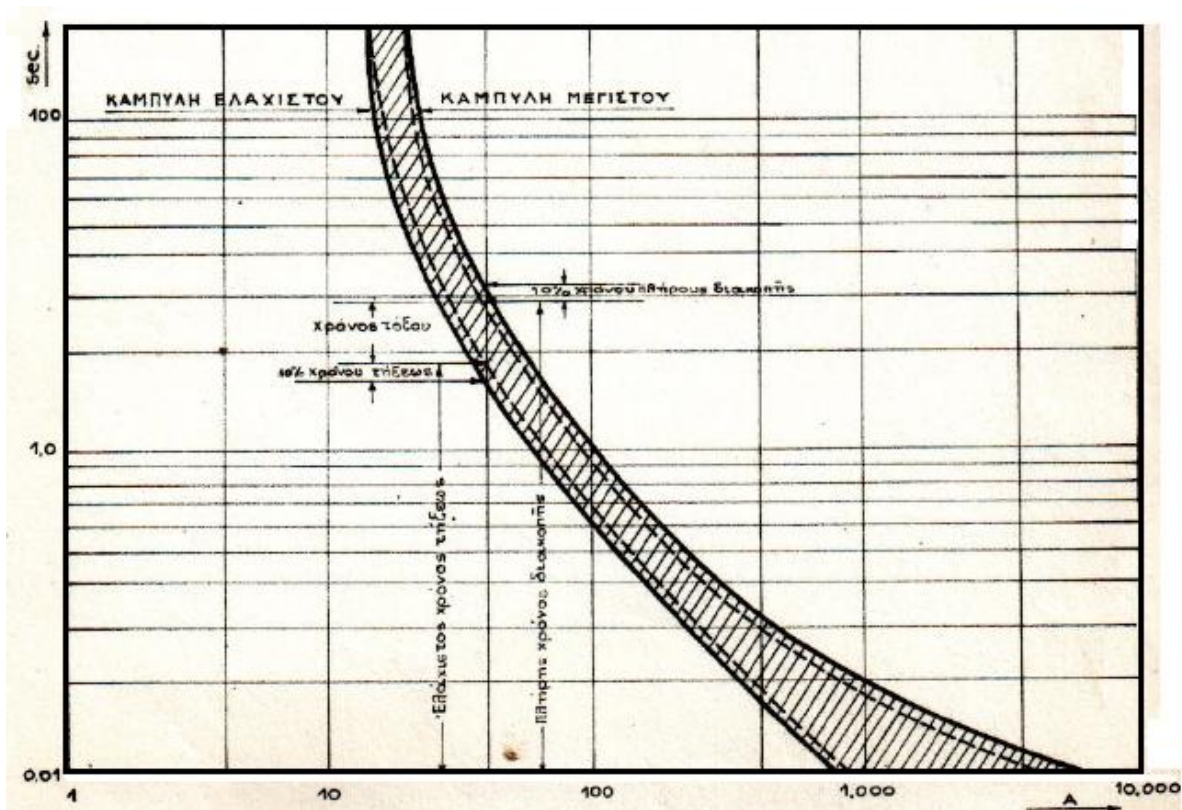
Στις ασφάλειες κόνεως η σβέση του τόξου γίνεται εντός του φυσιγγίου κυρίως δια απαγωγής της θερμότητας η οποία παράγεται κατά την τήξη του τηκτού υπό της ειδικής κόνεως που το περιβάλλει. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κλειστούς χώρους, μιας και σε αυτούς απαγορεύεται η εγκατάσταση ασφαλειών εκτονώσεως. Επίσης, εγκαθίστανται και στο ύπαιθρο, όταν η ισχύς

βραχυκυκλώσεως του δικτύου είναι μεγαλύτερη της ικανότητας διακοπής των ασφαλειών εκτονώσεως.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ασφαλειών MT είναι:

1. Ονομαστική ένταση βάσης (των επαφών)
2. Ονομαστική τάση
3. Ικανότητα διακοπής εντάσεως βραχυκυκλώσεως
4. Ονομαστική ένταση τηκτού (για ασφάλειες εκτονώσεως) ή του φυσιγγίου (για ασφάλειες κόνεως)
5. Η καμπύλη χρόνου-εντάσεως

Για τις ασφάλειες εκτονώσεως διακρίνουμε την καμπύλη «ελαχίστου χρόνου τήξεως», η οποία αντιστοιχεί στην τήξη του τηκτού της ασφάλειας υπό ρεύμα χαμηλής τάσεως και την καμπύλη του «πλήρους χρόνου διακοπής», η οποία προκύπτει από την προηγούμενη όταν για κάθε τιμή της υπερεντάσεως προστεθεί ο απαιτούμενος χρόνος σβέσης του τόξου (διακεκομμένες καμπύλες του σχήματος 3-8). Επιπλέον, για κάθε μια από τις δυο καμπύλες υπάρχει μια διασπορά τιμών $\pm 10\%$, την οποία επιτρέπουν οι κανονισμοί, με συνέπεια να σχηματίζονται οι τελικές καμπύλες ελάχιστου και μέγιστου χρόνου (σχήμα 3-8). Για να υπάρχει επιλεκτική (επιλογική) συνεργασία δυο τέτοιων ασφαλειών για ορισμένη τιμή υπερεντάσεως θα πρέπει για την τιμή αυτή, ο πλήρης χρόνος διακοπής της μικρότερης ασφάλειας να είναι μικρότερος του ελάχιστου χρόνου διακοπής της μεγαλύτερης. Για τις ασφάλειες κόνεως ο χρόνος σβέσης του τόξου είναι πολύ μικρός και δεν υπάρχουν δυο ανεξάρτητες τέτοιες καμπύλες.^[7]



Σχήμα 3-8. Ανάλυση χαρακτηριστικών καμπύλων χρόνου-εντάσεως ασφαλειών MT

Ανάλογα με την κλίση της καμπύλης των ασφαλειών εκτονώσεως διακρίνουμε δυο κατηγορίες:^[7]

- ασφάλειες ταχείας τήξης (συμβολίζονται με το γράμμα K) και χρησιμεύουν για την προστασία των μετασχηματιστών των υποσταθμών διανομής
- ασφάλειες βραδείας τήξης (συμβολίζονται με το γράμμα T) και χρησιμεύουν στην προστασία των διακλαδώσεων. Χρησιμοποιούνται οι: $30T$, $20T$, $10T$.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου-εντάσεως ασφαλειών βραδείας και ταχείας τήξης εναέριων γραμμών διανομής ΜΤ.

Όσον αφορά τις ασφάλειες που χρησιμοποιούνται για την προστασία των μετασχηματιστών των υποσταθμών διανομής αυτές είναι τύπου εκτονώσεως για τις υπαίθριες γραμμές και πάντα τύπου κόνεως για αυτούς των εσωτερικών χώρων.

3.4 Εκλογή της θέσης και του είδους των μέσων προστασίας των δικτύων ΜΤ

Γενικά, η επιθυμητή λειτουργία της προστασίας είναι η εξής:

1. Για παροδικά σφάλματα σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής (κορμός, διακλαδώσεις κ.α.) να μην προκαλείται μόνιμη διακοπή αλλά μόνο στιγμιαία πτώση και επαναφορά του Ε/Δ.
2. Για μόνιμα σφάλματα θα πρέπει να διακόπτεται η τροφοδότηση του μικρότερου δυνατού τμήματος της γραμμής, να ανοίγει δηλαδή (μονίμως) το αμέσως προηγούμενο του σφάλματος μέσο προστασίας.^{[7],[12]}

Οι βασικοί κανόνες εκλογής της θέσης των μέσων προστασίας των δικτύων ΜΤ είναι οι εξής:

α) Η εγκατάσταση Y/Σ ΜΤ/ΧΤ επί του κορμού απαγορεύεται για αποφυγή διακοπών τροφοδοτήσεως ολόκληρης της γραμμής κατά την εκτέλεση εργασιών επί του Y/Σ . Επίσης, θα πρέπει κατά το δυνατόν να αποφεύγεται η εγκατάσταση Y/Σ ΜΤ/ΧΤ επάνω σε κύριες διακλαδώσεις που τροφοδοτούν Y/Σ . Γι αυτό προτιμότερο είναι η εγκατάσταση των Y/Σ ΜΤ/ΧΤ να γίνεται σε υποδιακλαδώσεις μικρού μήκους.

β) Για λόγους εκμεταλλεύσεως και προστασίας, ενδείκνυται τα φορτία των γραμμών ΜΤ να τροφοδοτούνται μέσω εκτεταμένων διακλαδώσεων και υποδιακλαδώσεων αυτών, με τον αριθμό των συνδέσεων επί του κορμού της γραμμής να είναι μειωμένος στο ελάχιστο δυνατό. Αυτό επιβάλλεται, αφενός μεν για μείωση των ευπαθών σημείων (συνδέσεων) άρα και πιθανοτήτων βλάβης επί του κορμού, και αφετέρου για τον περιορισμό των διακοπών τροφοδοτήσεως του κορμού για εκτέλεση εργασιών τόσο κατά τις αρχικές συνδέσεις όσο και κατά της επόμενες συντηρήσεις. Επιπλέον η τήρηση αυτής της αρχής, συντελεί στην καλύτερη διαμόρφωση όλου του σχήματος προστασίας της γραμμής. Παράλληλα με τα παραπάνω, προτείνεται κατά τη

μελέτη των γραμμών να λαμβάνεται υπόψη το εύκολα προσπελάσιμο και επιθεωρήσιμο των γραμμών, καθώς και η ενδεχόμενη μελλοντική τροφοδότηση άλλων καταναλώσεων.

γ) Στις αρχές των διακλαδώσεων είναι επιβεβλημένη, κατά κανόνα, η εγκατάσταση ασφαλειών MT ή Δ/Α. Όταν εγκαθίστανται Δ/Α, προτάσσονται μαχαιρωτοί αποζεύκτες προς εξασφάλιση ορατού σημείου διακοπής. Η επιλογή μεταξύ A/Z ή Δ/Α γίνεται βασικά συναρτήσει του φορτίου της διακλάδωσης. Επιβάλλεται η χρησιμοποίηση Δ/Α σε γραμμές MT 20 KV στις οποίες η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ασφαλειών MT στο πρώτο τμήμα της γραμμής είναι 30T, όταν το πραγματικό φορτίο της διακλάδωσης διαπιστωθεί ότι ανήλθε σε:

- 25 A, εφόσον προηγείται απευθείας ο E/Δ του Y/Σ YT/MT
- 15 A, εφόσον προηγείται Δ/AE με ρύθμιση έναντι σφάλματος γης 70 A
- 10 A, εφόσον προηγείται Δ/AE με ρύθμιση έναντι σφάλματος γης 50 A

Εκτός του ανωτέρου λόγου, και εντελώς κατ' εξαίρεση, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν Δ/Α και σε διακλαδώσεις με μικρότερα φορτία σε περίπτωση κατά την οποία εάν τοποθετούνταν ασφάλειες MT, δε θα ήταν δυνατή η συνεργασία αυτών με τον E/Δ ή Δ/AE για παροδικά σφάλματα και μόνο εφόσον αυτή η έλλειψη συνεργασίας κρίνεται ότι δημιουργεί σοβαρά προβλήματα, λόγω της φύσης των φορτίων και των παροδικών σφαλμάτων. Επίσης Δ/Α επιτρέπεται να εγκαθίστανται κατ' εξαίρεση και σε σημεία στα οποία δεν είναι δυνατή η εκτέλεση χειρισμών των ασφαλειών MT λόγω ισχυρών ρευμάτων ζεύξεως (όπως πχ. σε διακλαδώσεις με μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ M/T άνευ σημαντικών φορτίων, ή με υπόγεια ή υποβρύχια καλώδια).

Σε περίπτωση εγκαταστάσεως Δ/Α προ διακλαδώσεων, επιπλέον έλεγχος απαιτείται ως προς τη θερμική αντοχή των αγωγών της διακλαδώσεως σε βραχυκυκλώματα. Αυτό, διότι στη συγκεκριμένη περίπτωση οι διακλαδώσεις βρίσκονται υπό βραχυκυκλωμάτων σε χρονικά διαστήματα καθοριζόμενα εκ των προτεταγμένων διακοπών (E/Δ ή Δ/AE). Η ανάπτυξη αυτού του θέματος περιλαμβάνεται στην ΟΔ.No.26-ΔΕΔ/ΤΤΕ Δ-10.

δ) Κατά την αρχική μελέτη των δικτύων MT πρέπει να προβλέπεται η εγκατάσταση μίας μόνο θέσεως εγκαταστάσεως ασφαλειών MT διακλαδώσεως. Μεταξύ E/Δ ή Δ/AE και των ασφαλειών MT τύπου (K) προστασίας M/Σ δύναται να μεσολαβήσει μόνο μία σειρά ασφαλειών τύπου (T) προστασίας διακλαδώσεως.

Κατά τα επόμενα στάδια αναπτύξεως του δικτύου δια μικροεπεκτάσεων οι περιοχές θα έχουν τη δυνατότητα να εγκαταστήσουν και δεύτερη σειρά ενδιάμεσων ασφαλειών MT (T), αυτό όμως πρέπει να γίνεται μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις και υπό τις προϋποθέσεις τήρησης των κατώτερων αναφερόμενων απαιτήσεων των εδαφίων (ζ). Τρίτη σειρά ασφαλειών MT (T) σε καμία περίπτωση δεν εγκαθίσταται. Σε όσες θέσεις κρίνεται απαραίτητο ότι πρέπει να υπάρχει σημείο τομής της γραμμής, θα εγκαθίστανται αποζεύκτες.

ε) Διακλαδώσεις ή υποδιακλαδώσεις που τροφοδοτούν μόνο έναν Y/Σ MT/XT και μήκους μικρότερου των 1.000 μέτρων, θα προστατεύονται μέσω της εγκατάστασης των ασφαλειών MT (K) προστασίας του M/Σ στην αρχή αυτών.

στ) Διακλαδώσεις μήκους άνω των 1.000 μέτρων που τροφοδοτούν μόνο έναν Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, θα προστατεύονται με Ασφάλειες ΜΤ (Τ) στην αρχή αυτών. Επί προηγούμενου του Υ/Σ στύλου θα τοποθετούνται οι ασφάλειες ΜΤ (Κ) προστασίας του Μ/Σ.

ζ) Εάν η διακλάδωση προστατεύεται με ασφάλειες ΜΤ (Τ), είναι δυνατή η εγκατάσταση δεύτερης σειράς Α/Ζ (Τ) στην αρχή υποδιακλαδώσεων και μόνο εφόσον πληρούνται συγχρόνως οι τρεις κάτωθι προϋποθέσεις:

- *Το μήκος της υποδιακλαδώσεως υπερβαίνει τα 5 Km*
- *Το συνολικό μήκος της διακλαδώσεως υπερβαίνει τα 20 Km (συμπεριλαμβανομένου και του μήκους των υποδιακλαδώσεων)*
- *Είναι εφικτή η συνεργασία των προς εγκατάσταση ασφαλειών ΜΤ (Τ) της υποδιακλαδώσεως προς τις εγκατεστημένες στην αρχή της διακλαδώσεως ασφάλειες ΜΤ (Τ).*

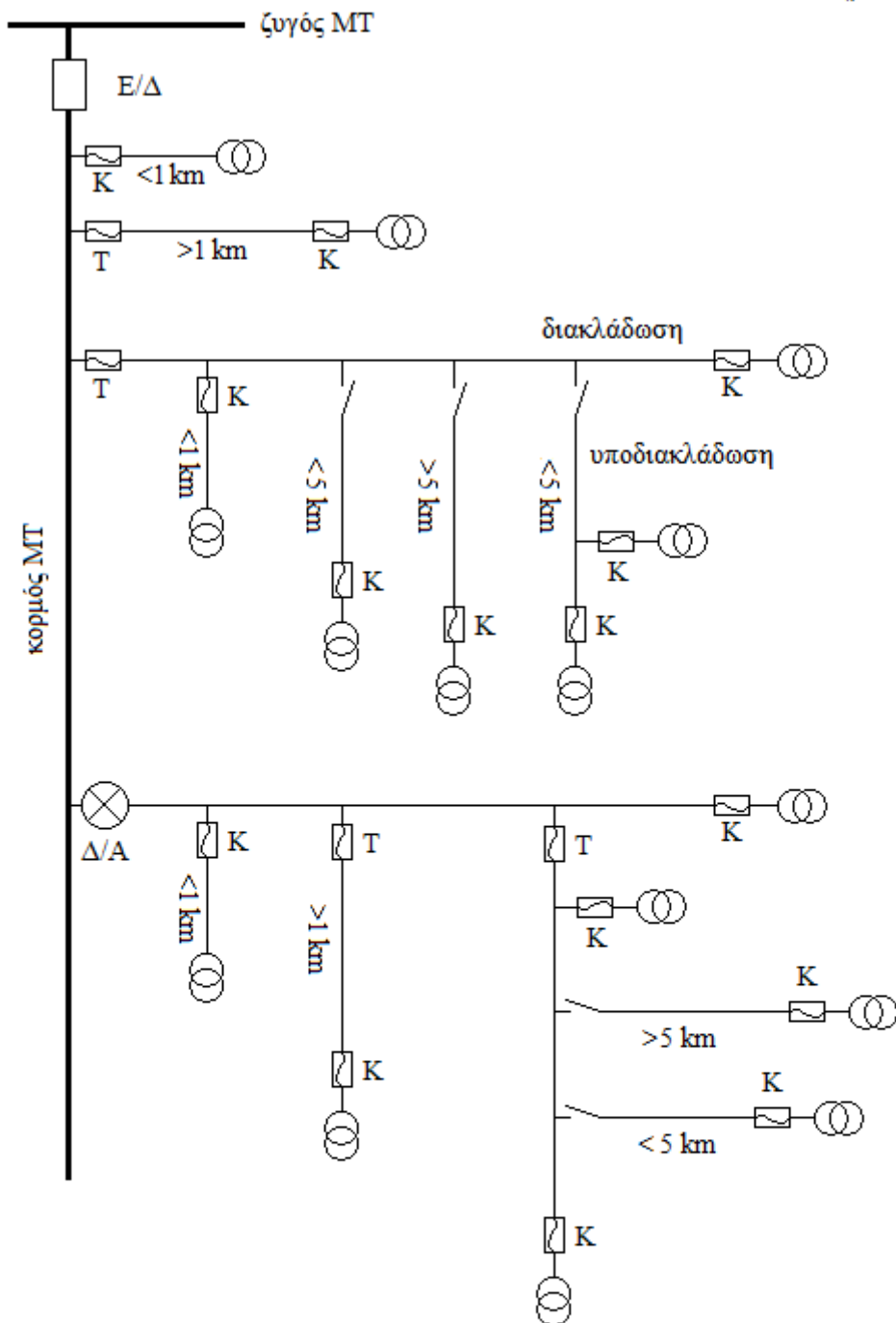
Εάν δεν πληρούνται και οι τρεις ανωτέρω συνθήκες, η υποδιακλάδωση θα συνδέεται απευθείας στην διακλάδωση (δηλαδή ουσιαστικά δε θα δημιουργείται υποδιακλάδωση).

η) Εάν η διακλάδωση προστατεύεται με Δ/Α όλες οι υποδιακλαδώσεις προστατεύονται με ασφάλειες ΜΤ (Τ). Και σε αυτήν την περίπτωση ισχύουν τα του εδαφίου (ε) που αναφέρονται σε μικρού μήκους υποδιακλαδώσεις. Η δημιουργία δεύτερης υποδιακλάδωσης, είναι εφικτή μόνο υπό τις άνωθεν προϋποθέσεις του εδαφίου (ζ).

θ) Όταν οι ασφάλειες ΜΤ (Κ) προστασίας του Μ/Σ δεν τοποθετούνται στην αρχή της διακλάδωσης, θα τοποθετούνται σε στύλο προ αυτού και σε απόσταση μικρότερης των 1.000 μέτρων από αυτόν.

ι) Γενικά κατά την επιλογή της θέσεως ενός αποζευκτικού μέσου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές συνθήκες, η δυνατότητα εύκολης προσπελάσεως, η τυχόν αναμενόμενη εξέλιξη των φορτίων και μελλοντική διαμόρφωση των γραμμών, κ.τ.λ..

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαμόρφωση της προστασίας μίας γραμμής ΜΤ σύμφωνα με τα ανωτέρω αναφερθέντα.



Υ Π Ο Μ Ν Η Μ Α			
	Μετασχηματιστής Υ/Σ Διανομής		Αποζεύκτης
	Ασφάλειες ΜΤ ταχείας τήξης		Διακόπτης Απομονώσεως
	Ασφάλειες ΜΤ βραδείας τήξης		Ελαιοδιακόπτης (Ε/Δ)

Σχήμα 3-9. Τυπική διαμόρφωση της προστασίας μίας γραμμής Μ.Τ

3.5 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων ελαιοδιακόπτη

Οι ηλεκτρονόμοι των ελαιοδιακοπών που προμηθεύεται ο ΔΕΔΔΗΕ είναι:

- ASEA R1
- CGE τύπου IAEC 4-14 (αντίστροφου χρόνου - IT)
- CGE τύπου IAEC 21-23-24 (λίαν αντίστροφου χρόνου - VIT)
- FIR-COE-11 (εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου – EIT, άνευ χρόνου διακόπτη)
- FIR-COE-11 (εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου – EIT, μετά χρόνου διακόπτη)

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των εν λόγω ηλεκτρονόμων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Η ρύθμιση του Ε/Δ ξεκινάει από τον καθορισμό της σχέσεως μετασχηματισμού των μ/σ έντασης. Αυτό εξαρτάται από το μέγιστο φορτίο της γραμμής που προστατεύεται από τον Ε/Δ. Μετά, πρέπει να γίνει η ρύθμιση της υπερέντασης απόκρισης των ηλεκτρονόμων Στιγμιαίας Λειτουργίας (Σ.Λ.) και Χρονικής Καθυστέρησης (Χ.Κ.). Οι η/ν Σ.Λ. ρυθμίζονται μόνο ως προς την οριακή ένταση λειτουργίας τους (χρόνος λειτουργίας τους 0,15sec), ενώ στους η/ν Χ.Κ. ρυθμίζεται και η καμπύλη αποκρίσεώς τους (καμπύλη έντασης-χρόνου). Αναλυτικά:

A) Ρύθμιση ηλεκτρονόμων φάσεων:

1) Ηλεκτρονόμος στιγμιαίας λειτουργίας (Σ.Λ.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. φάσεων ($I_{\Sigma\Lambda\Phi}$) θα πρέπει να ικανοποιεί μια από τις παρακάτω συνθήκες, ανάλογα με τον τύπο του:

$$1,5 \cdot I_{\phi} < I_{\Sigma\Lambda\Phi} < I_{\phi\min} \quad (\text{για η/ν ASEA R1}) \quad 3.1$$

$$2,0 \cdot I_{\phi} < I_{\Sigma\Lambda\Phi} < I_{\phi\min} \quad (\text{για τους υπόλοιπους η/ν}) \quad 3.2$$

Όπου:

$I_{\phi\min}$ = ελάχιστο σφάλμα φάσεων στο άκρο του δικτύου (από σχέση 1.85) [A]

I_{ϕ} = φορτίο γραμμής [A]

$I_{\Sigma\Lambda\Phi}$ = ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. φάσεων [A]

Το ρεύμα φορτίου της γραμμής I_{ϕ} προκύπτει λαμβάνοντας το 30-33% της εγκατεστημένης ισχύος όλων των μετασχηματιστών διανομής της Σ (kVA). Δηλαδή:

$$I_{\phi} = \frac{\Sigma(kVA) \cdot (30 - 33\%)}{\sqrt{3} \cdot U} \quad [A] \quad 3.3$$

Όπου:

U= πολική τάση δικτύου [kV]

Σ (kVA) = εγκατεστημένη ισχύς μ/σ διανομής της υπό μελέτη γραμμής MT [kVA]

$$I_{\Sigma\Lambda\Phi} = \text{σχέση } \mu/\sigma \text{ έντασης x ρύθμιση ρεύματος } \eta/\nu \quad 3.4$$

2) Ηλεκτρονόμος χρονικής καθυστέρησης (X.K.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν X.K. φάσεων ($I_{XK\Phi}$) θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$1,5 \cdot I_{\Phi} < I_{XK\Phi} < I_{\Phi\min} \quad 3.5$$

Όπου:

$I_{\Phi\min}$ = ελάχιστο σφάλμα φάσεων στο άκρο του δικτύου (από σχέση 2.71) [A]

I_{Φ} = φορτίο γραμμής [A]

$I_{XK\Phi}$ = ρεύμα διέγερσης του η/ν X.K. φάσεων [A]

$$I_{XK\Phi} = \text{σχέση } \mu/\sigma \text{ έντασης x ρύθμιση ρεύματος } \eta/\nu \quad 3.6$$

Επιλογή καμπύλης χρόνου: $t3=0,5-6\text{sec}$

B) Ρύθμιση ηλεκτρονόμων γης:

1) Ηλεκτρονόμος στιγμιαίας λειτουργίας (Σ.Λ.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. γης ($I_{\Sigma\Lambda\Gamma}$) θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$I_{\Sigma\Lambda\Gamma} < I_{\Gamma\min} \quad 3.7$$

Όπου:

$I_{\Gamma\min}$ = ελάχιστο σφάλμα γης στο άκρο του δικτύου (από σχέση 2.66) [A]

$I_{\Sigma\Lambda\Gamma}$ = ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. γης [A]

$$I_{\Sigma\Lambda\Gamma} = \text{σχέση } \mu/\sigma \text{ έντασης x ρύθμιση ρεύματος } \eta/\nu \quad 3.8$$

2) Ηλεκτρονόμος χρονικής καθυστέρησης (X.K.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν X.K. γης ($I_{XK\Gamma}$) θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$I_{XK\Gamma} < I_{\Gamma\min} \quad 3.9$$

$$I_{XK\Gamma} = \text{σχέση } \mu/\sigma \text{ έντασης x ρύθμιση ρεύματος } \eta/\nu \quad 3.10$$

Επιλογή καμπύλης χρόνου: $t3=0,5-6\text{sec}$

Η καμπύλη αποκρίσεως του η/ν Χ.Κ γης θα πρέπει να είναι πάνω από την καμπύλη ρεύματος-χρόνου της μεγαλύτερης ασφάλειας ΜΤ που υπάρχει στο δίκτυο, έτσι ώστε σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος να τήκεται η εν λόγω ασφάλεια της διακλάδωσης που παρουσιάζει το σφάλμα.

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΔΕΔΔΗΕ:

Ο ΔΕΔΔΗΕ δέχεται:

$$I_{\Sigma\Lambda\Gamma} = I_{\chi\kappa\Gamma} = 80A \quad 3.11$$

Ως ηλεκτρονόμους γης χρησιμοποιεί τους FIR-COE-11 (EIT) και CGE (VIT) με ρυθμίσεις:

FIR-COE-11 (EIT) 80A – 0,7sec

CGE (VIT) 80A – 6sec

Ηλεκτρονόμος φάσεων χρησιμοποιείται κυρίως ο ASEA R1, χωρίς να αποκλείεται και η χρήση λοιπών ηλεκτρονόμων όπως ο CGE τύπου IAEC 21-23-24 (VIT).

3.6 Επιλογή ασφαλειών ΜΤ για την προστασία Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ και διακλαδώσεων

Κριτήρια για την επιλογή των ασφαλειών ΜΤ για την προστασία των Υ/Δ διανομής είναι:

α) Οι ασφάλειες πρέπει να είναι τέτοιας ονομαστικής έντασης, ώστε να προστατεύουν το μ/σ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στην πλευρά της ΧΤ και σε θέση πριν το ασφαλειοκιβώτιο ΧΤ. Αυτό εξασφαλίζεται αν για κάθε τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως καίγεται η ασφάλεια και ο χρόνος διακοπής είναι μικρότερος από το χρόνο αντοχής του μ/σ.

β) Οι ασφάλειες δεν θα πρέπει να περιορίζουν τη δυνατότητα υπερφορτίσεως του μ/σ. Για το λόγο αυτό, η ονομαστική τους ένταση θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ονομαστική ένταση πρωτεύοντος I_{N1} του μ/σ.

γ) Οι ασφάλειες δεν θα πρέπει να καίγονται από το ρεύμα ζεύξης του μ/σ

Οι ασφάλειες ΜΤ ταχείας τήξης (τύπου Κ) για την προστασία των εναέριων υποσταθμών διανομής επιλέγονται βάση της ονομαστικής ισχύς των μ/σ τους, σύμφωνα με τον επόμενο πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2	
Ασφάλειες ΜΤ (Κ) προστασίας Υ/Σ διανομής	
<i>Ισχύς μ/σ [KVA]</i>	<i>Ονομαστική ισχύς ασφάλειας εκτονώσεως[A]</i>
25	3
50	3
75	6
100	8
150-160	12
200	15
250	15
400	25
500	40

Για τις ασφάλειες ΜΤ βραδείας τήξης (τύπου Τ) των διακλαδώσεων ισχύουν:

Η ονομαστική τιμή των τηκτών τους είναι:

- 30Α μετά Ε/Δ
- 20Α μετά Δ/Α.Ε. με ρύθμιση στοιχείων γης στα 70Α
- 15Α μετά Δ/Α.Ε. με ρύθμιση στοιχείων γης στα 50Α

Πέρα της ονομαστικής τιμής της έντασης του τηκτού τους, πρέπει να καθοριστεί και η ισχύς διακοπής τους. Η ισχύς αυτή εξαρτάται από την απόσταση είναι αυτές τοποθετημένες σε σχέση με την αρχή του κορμού (ζυγοί ΜΤ Υ/Σ μεταφοράς). Ανάλογα έτσι με την απόσταση αυτή, η τιμή της ισχύς διακοπής τους προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα:

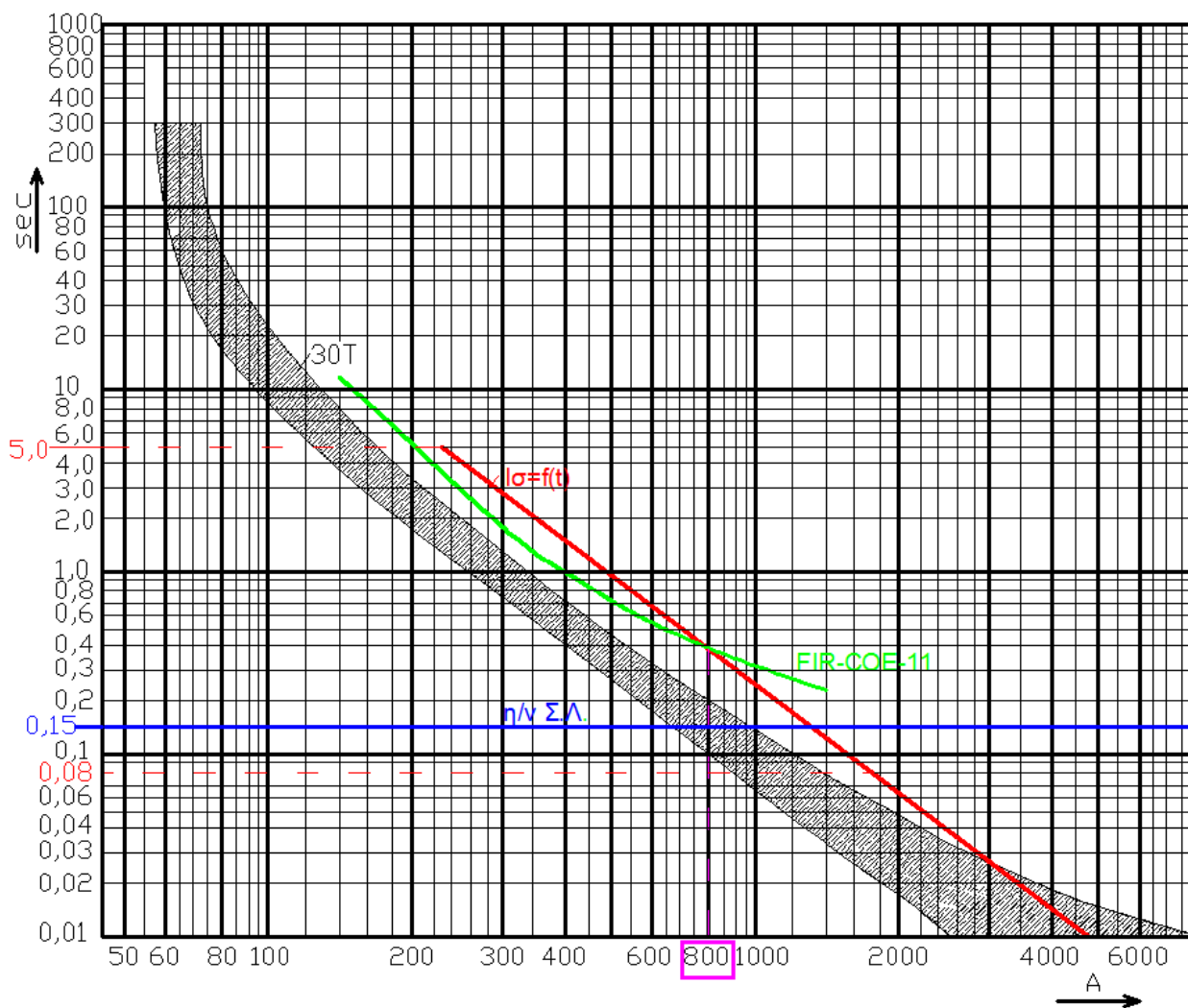
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3					
Ισχύς διακοπής ασφαλειών ΜΤ συναρτήσει της απόστασης από τον προτασσομένο Υ/Σ μεταφοράς					
<i>Ισχύς διακοπής ασφαλειών ΜΤ [MVA]</i>	250	140	100	75	40
<i>Απόσταση αγωγών 3x95ACSR εκ του Υ/Σ μεταφοράς [km]</i>	0-3,46	3,46-6,33	6,33-9,60	9,60-21,8	21,8 και άνω

Ο παρακάτω πίνακας δίνει την αντιστοιχία ανά km διαφόρων διατομών γραμμών ACSR με αγωγούς 3x95ACSR.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4	
Αντιστοιχία ανά km διαφόρων διατομών γραμμών ACSR με αγωγούς 3x95ACSR	
<i>Διατομή αγωγού ACSR</i>	<i>Αντιστοιχία σε km 3x95ACSR</i>
3x16	3,28
3x35	1,75
3x50	1,325

3.7 Μέγιστο ρεύμα σφάλματος γης γραμμών ΜΤ

Στην παράγραφο 2.2, εξάγαμε την καμπύλη αντοχής του ανθρώπου $I_σ=f(t)$ (σχήμα 2-8) η οποία μας δίνει το ρεύμα σφάλματος συναρτήσεως του χρόνου, προκειμένου το ακίνδυνο ρεύμα διαμέσου του ανθρώπινου σώματος να βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζει η συνθήκη του Dalziel (σχέση 2.82). Επίσης, στο Παράρτημα Β δόθηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες των ασφαλειών βραδείας και ταχείας τήξης που χρησιμοποιούνται στις γραμμές του ΕΔΔΗΕ. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα αυτό, η μέγιστη ασφάλεια ΜΤ είναι αυτή των 30Α (τύπου Τ). Τοποθετούμε τώρα στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων τις δυο παραπάνω καμπύλες, μαζί με τη χαρακτηριστική καμπύλη του ηλεκτρονόμου γης FIR-COE-11 (ΕΙΤ, μετά χρόνου διακόπτου), χρόνου αποκρίσεως 0,7sec. Στο ίδιο γραφικό τοποθετούμε και την καμπύλη (ευθεία στην προκειμένη περίπτωση) του ηλεκτρονόμου στιγμιαίας λειτουργίας ($I=0,15\text{sec}$). Η επιλογή της καμπύλης χρόνου αποκρίσεως των 0,7sec του η/ν FIR-COE-11 έγινε γιατί όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.5 αυτή χρησιμοποιείται στους Ε/Δ από την Ηλεκτρική Εταιρεία για την προστασία των σφαλμάτων γης.



Σχήμα 3-10. Καμπύλη αντοχής ανθρώπου και καμπύλη λειτουργίας γης προστασίας γραμμών ΜΤ.

Από το προηγούμενο σχήμα προκύπτει ότι εάν προ της θέσεως του σφάλματος υπάρχει ασφάλεια βραδείας τήξεως μέχρι 30A τότε ο άνθρωπος προστατεύεται, μιας και η καμπύλη της βρίσκεται κάτω από αυτή του ανθρωπίνου σώματος. Για το λόγο αυτό και η Ηλεκτρική Εταιρεία έχει καθιερώσει ως μέγιστη ασφάλεια αυτή των 30A. Επίσης, από το ίδιο σχήμα προκύπτει ότι ο άνθρωπος προστατεύεται μέχρι μέγιστο σφάλμα γης τα 800A (σημείο τομής καμπύλων $I_{\sigma}=f(t)$ και η/ν FIR-COE-11), μιας και για ρεύματα <800A η καμπύλη αντοχής του ανθρώπου βρίσκεται άνωθεν της καμπύλης λειτουργίας των ηλεκτρονόμων γης FIR-COE-11 των Ε/Δ αναχωρήσεως υποσταθμών μεταφοράς. Για να βρίσκεται στην ασφαλή πλευρά του ζητήματος, η Ηλεκτρική Εταιρεία τελευταία καθιέρωσε ως μέγιστο σφάλμα γης γραμμών ΜΤ τα 1000A.

Πράγματι, ακόμα και για $I_{\sigma}=1000A$ από τη σχέση 2.82 προκύπτει ότι:

$$1000 \cdot \sqrt{t} = 500 \quad \Rightarrow \quad t = 0,707$$

Ο χρόνος αυτός διέλευσης ρεύματος σφάλματος κυμαίνεται εντός της επιτρεπόμενης περιοχής από 0,083 μέχρι 5sec.

Προκειμένου να περιοριστεί η ανάπτυξη μεγάλων τιμών εντάσεων σφάλματος γης, ο ουδέτερος κόμβος των μετασχηματιστών μεταφοράς γειώνεται μέσω κατάλληλης αντίστασης.

4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΤ

4.1 Γενικά

Η λειτουργία του Εθνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρυθμιστές τάσης που έχουν σκοπό την παροχή προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων, παρέχοντας παράλληλα υψηλό επίπεδο ασφάλειας.

Η είσοδος στο δίκτυο μονάδων ανεξάρτητων παραγωγών από ΑΠΕ (Αιολικών Σταθμών, Φωτοβολταϊκών Σταθμών κ.α.) πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των ανεξάρτητων παραγωγών. *Ανεξάρτητος παραγωγός* ονομάζεται εκείνος που παράγει ηλεκτρική ενέργεια και τη διαθέτει αποκλειστικά στο Εθνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για τη σύνδεση και παράλληλη λειτουργία των μονάδων των ανεξάρτητων παραγωγών με τα δίκτυα διανομής ΜΤ, καθώς και στον απαιτούμενο εξοπλισμό προστασίας τους, με στόχο η πλειονότητα των περιπτώσεων να αντιμετωπίζονται άμεσα, χωρίς την ανάγκη τροποποίησης των κριτηρίων λειτουργίας του δικτύου διανομής.^[19]

4.2 Επιπτώσεις από τη σύνδεση ανεξάρτητων παραγωγών στο δίκτυο διανομής

Η λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται άμεσα από την προσθήκη μονάδων ανεξάρτητων παραγωγών (όπως είναι μια ανεμογεννήτρια ή ένα αιολικό πάρκο). Οι μονάδες αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα της εξυπηρέτησης στους υπόλοιπους καταναλωτές του δικτύου. Ειδικότερα, μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες διακοπές ή διακυμάνσεις τάσης ή να προκαλέσουν αρμονική παραμόρφωση στις κυματομορφές τάσης με την έγχυση αρμονικών. Βασικά, όπως θα δούμε και στη συνέχεια η εγκατάσταση του ανεξάρτητου παραγωγού δεν θα πρέπει να υποβιβάζει την προστασία του δικτύου ή την ποιότητα εξυπηρέτησης των καταναλωτών. Για το λόγο αυτό, η διασύνδεση παραγωγού-δικτύου πρέπει να επιβλέπεται σε συνεχή βάση από διακόπτες προστασίας. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση του ανεξάρτητου παραγωγού θα πρέπει να συνοδεύεται από πρόσθετο εξοπλισμό και διορθωτικά μέτρα.^[20]

Η Ηλεκτρική Εταιρεία διατηρεί καθορισμένα όρια διακύμανσης τάσης, απότομων μεταβολών τάσης (*flicker*), συχνότητας και αρμονικής παραμόρφωσης παρέχοντας παράλληλα κατάλληλη προστασία του ηλεκτρικού συστήματος από βραχυκυκλώματα. Εξάλλου την ευθύνη για την

ποιότητα της εξυπηρέτησης την έχει αποκλειστικά η ίδια η Ηλεκτρική Εταιρεία και δεν μπορεί να αποδοθεί στους ανεξάρτητους παραγωγούς. Αυτό σημαίνει ότι γεννήτριες των εν λόγω παραγωγών δεν θα πρέπει να συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν αποσυνδέονται από το δίκτυο. Ένας ανεξάρτητος παραγωγός θα πρέπει να εξυπηρετεί φορτία, μόνο όταν λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, τα βραχυκυκλώματα που εκδηλώνονται στο δίκτυο διανομής οδηγούν στην ανάπτυξη μεγάλων μεταβατικών ροπών και υπερεντάσεων στις ανεμογεννήτριες, οι οποίες ενδέχεται να καταπονήσουν το μηχανικό και το ηλεκτρικό τους σύστημα και να μειώσουν τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων τους. Είναι συνεπώς αναγκαία η άμεση αποσύνδεσή τους από το δίκτυο, κυρίως σε περιπτώσεις μόνιμων σφαλμάτων.^[20]

4.3 Προϋποθέσεις παράλληλης λειτουργίας

Οι προϋποθέσεις της παράλληλης λειτουργίας των μονάδων των ανεξάρτητων παραγωγών με τα δίκτυα διανομής είναι:^[19]

1. Η παρουσία ανεξάρτητων παραγωγών στο δίκτυο διανομής δεν θα πρέπει να επηρεάζει την κανονική του λειτουργία, όπως τον κύκλο πτώσεων-επαναφορών των μέσων προστασίας των εναέριων γραμμών MT, τη ζεύξη-απόζευξη των συστοιχιών πυκνωτών για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος κ.α..
2. Το σύστημα προστασίας του ανεξάρτητου παραγωγού θα πρέπει να συνεργάζεται με το σύστημα προστασίας του δικτύου, έτσι ώστε σφάλματα σε οποιαδήποτε πλευρά να ανιχνεύονται και να εκκαθαρίζονται.
3. Η είσοδος αρμονικών στο δίκτυο πρέπει να μην υπερβαίνει προκαθορισμένα όρια (3-5%).
4. Οι διαταραχές που προκαλούνται κατά τη ζεύξη-απόζευξη των ανεξάρτητων παραγωγών δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα προκαθορισμένα όρια.
5. Θα πρέπει να εξασφαλίζεται ανά πάσα στιγμή η αυτόματη ή η χειροκίνητη απομόνωση των εγκαταστάσεων του ανεξάρτητου παραγωγού, προκειμένου να αποφευχθούν κίνδυνοι για πρόσωπα που εκτελούν εργασίες σε κάποιο τμήμα του δικτύου.
6. Ο ανεξάρτητος παραγωγός θα παρέχει στις αρμόδιες υπηρεσίες του ΔΕΔΔΗΕ πληροφορίες για το μέγεθος και τον τύπο των γεννητριών που πρόκειται να συνδεθούν με το δίκτυο καθώς και για το μέγεθος της ισχύος που θα τροφοδοτεί το δίκτυο.
7. Ο ΔΕΔΔΗΕ θα πρέπει να παρέχει στον ανεξάρτητο παραγωγό πληροφορίες για τη δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας των μονάδων του με το δίκτυο και για τον απαιτούμενο εξοπλισμό προστασίας και τις μετρητικές διατάξεις.

4.4 Σύνδεση ανεξάρτητων παραγωγών που διαθέτουν ανεμογεννήτριες στο δίκτυο MT

Το σχήμα προστασίας της διασύνδεσης δικτύου με ανεξάρτητου παραγωγού πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να προστατεύει τόσο τον παραγωγό από καταστροφή λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο όσο και το δίκτυο και τους καταναλωτές από αρνητικές επιπτώσεις λόγω της λειτουργίας του ίδιου του παραγωγού. Αν και η επιλογή των συσκευών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της προστατευόμενης ανεμογεννήτριας, πρέπει σε κάθε περίπτωση να λαμβάνονται υπόψη οι αρχές που διέπουν το σχεδιασμό του συστήματος προστασίας ενός ΣΗΕ όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην αρχή του πρώτου κεφαλαίου. Για το λόγο αυτό, θα παρουσιαστούν στη συνέχεια οι προϋποθέσεις που διέπουν τη σύνδεση ανεξάρτητου παραγωγού στο δίκτυο MT.^[20]

Γενικά, επιτρέπεται η σύνδεση γεννητριών ανεξάρτητων παραγωγών συνολικής ισχύος άνω των 100kW στο δίκτυο MT. *Σημείο Σύνδεσης με Δίκτυο (ΣΣΔ)* είναι το σημείο σύνδεσης του ανεξάρτητου παραγωγού με το δίκτυο MT (μπορεί να είναι και με το δίκτυο XT). Η ενέργεια που αποδίδει ο ανεξάρτητος παραγωγός στο δίκτυο και αυτή που απορροφά από το δίκτυο ως καταναλωτής μεταφέρεται μέσω κοινού καλωδίου. Οι γεννήτριες μπορεί να είναι είτε *σύγχρονες*, είτε *ασύγχρονες με διόρθωση συντελεστού ισχύος*. Αναλυτικότερα:^{[19],[20]}

i) *Σύγχρονες γεννήτριες* είναι εκείνες που παρέχουν τάση εξόδου της οποίας η συχνότητα εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του άξονά της. Σε συνδυασμό με κατάλληλο εξοπλισμό που ελέγχει την τάση και το συντελεστή ισχύος μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από την παρουσία ή όχι του δικτύου της ΔΕΗ.

ii) *Ασύγχρονες με διόρθωση συντελεστού ισχύος* είναι εκείνες που ένα μέρος ή όλη η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται από μια συσκευή (πυκνωτές) που συνδέεται στη γεννήτρια. Οι εν λόγω πυκνωτές είναι σταθερής τιμής, ώστε σε απουσία του δικτύου η γεννήτρια να λειτουργεί σε μια προκαθορισμένη τιμή τάσης και συχνότητας για συγκεκριμένο φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτή.

Το βασικό μέσο προστασίας για ανεξάρτητους παραγωγούς που διαθέτουν σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες είναι ο *Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης (ΑΔΔ)*. Είναι το στοιχείο εκείνο που επιτρέπει τη ζεύξη ή απομόνωση του ανεξάρτητου παραγωγού από το δίκτυο. Ο ΑΔΔ ελέγχεται από κατάλληλο εξοπλισμό ελέγχου (ηλεκτρονόμους διαφόρων τύπων). Σε περίπτωση ανεξάρτητου παραγωγού με ασύγχρονες γεννήτριες, ο ΑΔΔ θα πρέπει να διαθέτει τους πιο κάτω ηλεκτρονόμους προστασίας:^[19]

- Ορίων τάσης (μέγιστης τάσης MV – ελάχιστης τάσης mV)
- Ορίων συχνότητας (μέγιστης συχνότητας MF – ελάχιστης συχνότητας mf)
- Ομοπολικής συνιστώσας τάσης (Vo)

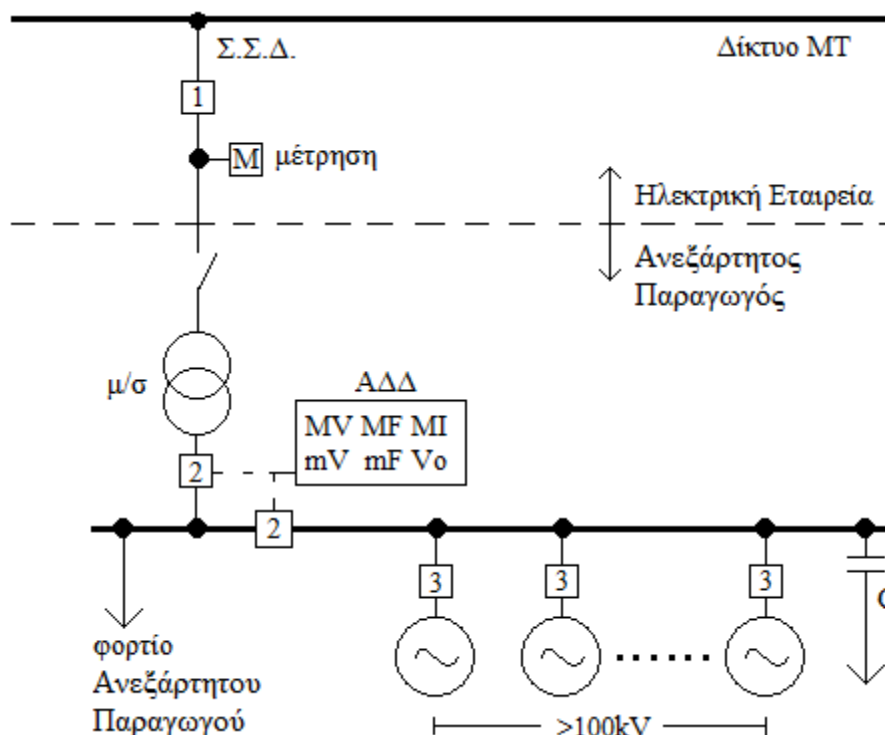
Για τους ανεξάρτητους παραγωγούς που διαθέτουν σύγχρονες γεννήτριες, για τον ΑΔΔ απαιτούνται οι πιο πάνω προστασίες και επιπλέον προστασία υπερεντάσεως καθώς και διάταξη συγχρονισμού.

Ο πίνακας παρακάτω παρουσιάζει τις ελάχιστες ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων του Αυτόματου Διακόπτη Διασύνδεσης.^[19]

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 ^[19]			
Ρυθμίσεις προστασιών που επενεργούν στη διάταξη ζεύξης (ΑΔΔ) του ανεξάρτητου παραγωγού με το δίκτυο			
Τύπος ηλεκτρονόμου	Ρυθμίσεις κύριου στοιχείου	Χρόνος λειτουργίας (msec)	Καθυστέρηση (msec)
Ελάχιστης τάσης (mV)	-20%.Un	50-150	0-5,0
Μέγιστης τάσης (MV)	15%.Un	50-150	0-5,0
Ελάχιστης συχνότητας (mF)	49,5 (47,5*) Hz	80-200	0-1,0
Μέγιστης συχνότητας (MF)	50,5 (51*) Hz	80-200	0-1,0
Ομοπολικής τάσης (Vo)	2-20V	50-150	0-1,5
Υπερεντάσεως (MI)**	1 ή 5A	50-150	1-5,0

* οι τιμές εντός παρενθέσεως αφορούν νησιωτικά συστήματα
 **για ανεξάρτητους παραγωγούς που διαθέτουν σύγχρονες γεννήτριες

Οι παραπάνω ρυθμίσεις των προστασιών του (άνω και κάτω όρια διέγερσης, χρονική καθυστέρηση λειτουργίας κ.α.) που επενεργούν στη διάταξη ζεύξης του ανεξάρτητου παραγωγού με το δίκτυο, έχουν σαν στόχο τόσο την αποφυγή βλαβών σε εγκαταστάσεις άλλων καταναλωτών ή στις εγκαταστάσεις του ίδιου του παραγωγού, όσο και την έγκαιρη απομόνωση σφαλμάτων ώστε να μην τροφοδοτηθεί το δίκτυο με ανεπίτρεπτη τάση ή συχνότητα από τις εγκαταστάσεις ανεξάρτητης παραγωγής. Στο σχήμα που ακολουθεί περιγράφεται η σύνδεση ανεξάρτητου παραγωγού στο δίκτυο MT.^[20]



Σχήμα 4-1. Σύνδεση γεννητριών ανεξάρτητου παραγωγού στο δίκτυο MT και απαιτούμενες διατάξεις προστασίας

Στο σχήμα 4-1 είναι:

Μέσο προστασίας (1): στοιχείο που επιτρέπει την απομόνωση του ανεξάρτητου παραγωγού από το δίκτυο, όταν αυτό απαιτείται από την ηλεκτρική εταιρεία. Χρησιμοποιείται διακόπτης απομονώσεως ή σπανιότερα ασφάλειες MT όταν πρόκειται για μικρές ισχύς. Το μέσο αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί έτσι ώστε να επαρκεί για τα μέγιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης που θα εμφανιστούν στη θέση τοποθέτησής του και να διακόπτει στον προδιαγραφόμενο χρόνο.

Μέσο προστασίας (2): στοιχείο που επιτρέπει την απομόνωση του ανεξάρτητου παραγωγού από το δίκτυο, όταν αυτό απαιτείται από τον ανεξάρτητο παραγωγό (Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης). Οι ρυθμίσεις του δίνονται στον πίνακα 4-1 παραπάνω.

Μέσο προστασίας (3): στοιχείο για την προστασία της κάθε γεννήτριας.

Στο σχήμα 4-1, οι πυκνωτές C για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος αφορούν την περίπτωση ασύγχρονων γεννητριών και θα πρέπει να τίθενται αυτόματα εκτός λειτουργίας με το άνοιγμα του διακόπτη των γεννητριών (στοιχεία 3).

5. ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΡΟΗΦΟΡΟΥ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΤ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μια πλήρη, πρακτική μελέτη προστασίας μιας εναέριας γραμμής διανομής ΜΤ του Ν. Ρεθύμνου της νήσου Κρήτης. Το λειτουργικό διάγραμμα της εν λόγω γραμμής παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ της παρούσας εργασίας (σχήμα Γ-1). Επειδή η εν λόγω γραμμή περιείχε αρκετές δεκάδες διακλαδώσεων και υποδιακλαδώσεων και για να προσδιοριστούν οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων προστασίας της θα πρέπει να προσδιοριστούν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των σφαλμάτων γης και φάσεων σε όλα τα κομβικά της σημεία, προτιμήσαμε να την περιορίσουμε σε μήκος, αφαιρώντας ορισμένες από τις διακλαδώσεις της, με σκοπό να περιοριστεί το πλήθος των επαναλαμβανόμενων υπολογισμών που δεν θα πρόσθεταν κάτι καινούριο, χωρίς από την άλλη να μεταβάλλεται και να επηρεάζεται η διαδικασία υπολογισμού της προστασίας της.

Τα λειτουργικά διαγράμματα γενικά, παρουσιάζουν το μονογραμμικό κύκλωμα των γραμμών ΜΤ που αναχωρούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς. Κατασκευάζονται άνευ κλίμακας και γεωγραφικού υποβάθρου. Σε διάφορες θέσεις μιας γραμμής ΜΤ ενός λειτουργικού διαγράμματος υπάρχουν κάποια κλάσματα. Τα κλάσματα αυτά βρίσκονται συνήθως στις θέσεις των διακλαδώσεων και των υποδιακλαδώσεων της γραμμής και υποδηλώνουν τα εξής: ο μεν αριθμητής υποδηλώνει το στύλο από τον οποίο γίνεται η εν λόγω διακλάδωση/υποδιακλάδωση, ο δε παρονομαστής υποδηλώνει το συνολικό μήκος σε μέτρα, από την αρχή της εν λόγω διακλάδωσης/υποδιακλάδωσης μέχρι και το συγκεκριμένο στύλο. Στην υπό μελέτη γραμμή, βλέπουμε ότι ο κορμός της ξεκινάει από τους ζυγούς του Υ/Σ μεταφοράς και καταλήγει στο στύλο 92, διαγράφοντας ένα συνολικό μήκος δικτύου ίσο με 10430m. Επί του κορμού, πραγματοποιούνται διακλαδώσεις στους στύλους 3, 4, 7, 10, 13, 23, 34, 37, 42, 43, 69, 74, 75, 80, 84, 89, 91. Σε κάθε μια τέτοια διακλάδωση, η αρίθμηση των στύλων ξεκινάει από την αρχή. Για παράδειγμα, από το στύλο 3 του κορμού γίνεται διακλάδωση με αγωγούς 3x35ACSR η οποία τροφοδοτεί τον υποσταθμό Νο5 στο στύλο 31, διαγράφοντας ένα μήκος δικτύου ίσο με 2697m. Από τους στύλους τώρα 8, 12, 16, 18 και 22 της εν λόγω διακλάδωσης εκκινούν νέες υποδιακλαδώσεις για να τροφοδοτήσουν τους υποσταθμούς Νο1, Νο2, Νο3, Νο4 και Νο6 αντίστοιχα. Όμοια και για τις υπόλοιπες διακλαδώσεις και υποδιακλαδώσεις του υπό μελέτη δικτύου.

5.2 Δεδομένα προβλήματος

Για τη μελέτη προστασίας της ροηφόρου γραμμής τα δεδομένα του προβλήματος είναι:

A) Στοιχεία υποσταθμού μεταφοράς

1) Εγκατεστημένη ισχύς μ/σ: 2x25MVA

2) μ/σ εντάσεως ελαιοδιακόπτη: 400:5

3) Ηλεκτρονόμοι ελαιοδιακόπτη:

- η/ν φάσεων: ASEA R1
- η/ν γης: FIR-COE11 (EIT, μετά χρόνου διακόπτου)

4) Ονομαστική πολική τάση ζυγών: 20kV

5) Ισχύς βραχυκυκλώσεως στους ζυγούς MT: 250MVA

6) Συνολική σύνθετη αντίσταση του συστήματος μεταφοράς (Y/Σ YT/MT, ζυγοί MT κ.α.), ανοιγμένη στους ζυγούς 20kV:

$$\dot{Z}_{M+}, \dot{Z}_{M-}, \dot{Z}_{M0} = 1,64j \Omega \rightarrow |Z_M| = 1,64\Omega \text{ (για σφάλματα φάσεων)}$$

$$\dot{Z}_{M+}, \dot{Z}_{M-}, \dot{Z}_{M0} = 0,62 + 1,45j \Omega \rightarrow |Z_M| = 1,65\Omega \text{ (για σφάλματα γης)}$$

B) Στοιχεία γραμμής διανομής

1) Μήκος γραμμής κορμού: 10,43km

2) Διατομή και αγωγός κορμού: 3x95 ACSR

3) Εγκατεστημένη ισχύς μ/σ διανομής: 3640kVA

5.3 Επιλογή ασφαλειών MT για την προστασία των μ/σ διανομής

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6, για την προστασία των μ/σ των εναέριων υποσταθμών διανομής χρησιμοποιούνται ασφάλειες MT ταχείας τήξης (τύπου K), οι οποίες επιλέγονται βάση της ονομαστικής ισχύς των μ/σ σύμφωνα με τον πίνακα 3-2. Η εκλογή της θέσης των εν λόγω ασφαλειών παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4 σε συνεργασία με το σχήμα 3-9 και σχετίζεται με το μήκος της διακλάδωσης (ή υποδιακλάδωσης) που τροφοδοτεί τον υποσταθμό διανομής. Πιο συγκεκριμένα, όταν το μήκος της γραμμής που τροφοδοτεί τον υποσταθμό είναι μικρότερο από 1km οι ασφάλειες προστασίας του μ/σ τοποθετούνται στην αρχή της διακλάδωσης, ενώ όταν το μήκος αυτό υπερβαίνει το 1km τότε οι εν λόγω ασφάλειες τοποθετούνται σε στύλο πλησίον του υποσταθμού διανομής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η επιλογή των ασφαλειών προστασίας των μ/σ διανομής και η εκλογή της θέσης τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1					
Επιλογή ασφαλειών MT για την προστασία των μ/σ των Υ/Σ διανομής					
Υ/Σ διανομής	Ονομαστική ισχύς [kVA]	Στύλος	Μήκος διακλάδωσης [m]	Ονομαστική ισχύς ασφαλείας εκτονώσεως [A] – είδος τηκτού	Θέση ασφάλειας
1	160	8/892	52	12K	Αρχή διακλάδωσης
2	50	12/1211	315	3K	Αρχή διακλάδωσης
3	150	16/1402	165	12K	Αρχή διακλάδωσης
4	100	18/1907	115	8K	Αρχή διακλάδωσης
5	100	3 κορμού	2697	8K	Κοντά στον Υ/Σ
6	50	22/2301	570	3K	Κοντά στον Υ/Σ*
7	50	3/120	87	3K	Αρχή διακλάδωσης
8	50	5/480	852	3K	Κοντά στον Υ/Σ*
9	50	4 κορμού	120	3K	Αρχή διακλάδωσης
10	50	7 κορμού	184	3K	Αρχή διακλάδωσης
11	50	10 κορμού	124	3K	Αρχή διακλάδωσης
12	50	13 κορμού	418	3K	Αρχή διακλάδωσης
13	100	23 κορμού	238	8K	Αρχή διακλάδωσης
14	100	3/250	35	8K	Αρχή διακλάδωσης
15	160	8/530	10	12K	Αρχή διακλάδωσης
16	250	11/780	45	15K	Αρχή διακλάδωσης
17	250	17/1250	222	15K	Αρχή διακλάδωσης
18	250	21/1560	382	15K	Αρχή διακλάδωσης
19	160	34 κορμού	3057	12K	Κοντά στον Υ/Σ
20	250	37 κορμού	45	15K	Αρχή διακλάδωσης
21	50	42 κορμού	221	3K	Αρχή διακλάδωσης
22	160	43 κορμού	1351	12K	Κοντά στον Υ/Σ
23	250	69 κορμού	675	15K	Αρχή διακλάδωσης
24	250	74 κορμού	195	15K	Αρχή διακλάδωσης
25	50	75 κορμού	704	3K	Αρχή διακλάδωσης
26	50	7/515	210	3K	Αρχή διακλάδωσης
27	100	80 κορμού	728	8K	Κοντά στον Υ/Σ*
28	250	84 κορμού	40	15K	Αρχή διακλάδωσης
29	50	89 κορμού	584	3K	Αρχή διακλάδωσης
Εγκατεστη- μένα μ/σ	3640				

*Για τους Υ/Σ 6, 8 και 27, παρόλο που οι διακλαδώσεις που τους τροφοδοτούν έχουν μήκος μικρότερο του 1km, οι ασφάλειες τοποθετούνται κοντά στους εν λόγω μ/σ, γιατί οι ασφάλειες τύπου K αφορούν την προστασία ενός μεμονωμένου μ/σ και όχι ομάδας μ/σ. Έτσι, εξασφαλίζεται και η συνεργασία των ασφαλειών αυτών με τις ασφάλειες XT των αναχωρήσεων XT. Στο σημείο αυτό αξίζει ν' αναφερθεί ότι η προστασία των δικτύων XT ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας και γι' αυτό δεν θα επεκταθούμε περισσότερο. Επανερχόμενοι πάλι στο αρχικό θέμα, αν για παράδειγμα για την προστασία του μ/σ του Υ/Σ 8 (μήκος διακλάδωσης 852m<1km) η ασφάλεια 3K τοποθετούταν στην αρχή της διακλάδωσης (στύλος 5/480) τότε θα αντιλαμβάνονταν και το ρεύμα του Υ/Σ 7, πράγμα που δεν είναι συμβατό.

5.4 Επιλογή ασφαλειών MT για την προστασία των διακλαδώσεων

Με βάση την παράγραφο 3.6, στις διακλαδώσεις μετά από Ε/Δ προβλέπεται προστασία με ασφάλειες MT εκτονώσεως, ονομαστικής έντασης 30Α, βραδείας τήξεως (30Τ), εκτός των διακλαδώσεων εκείνων που προστατεύονται στην αρχή τους από την ασφάλεια (Κ) του υποσταθμού διανομής. Συνεπώς, οι διακλαδώσεις εκείνες που θα πρέπει να προστατεύονται με ασφάλειες 30Τ είναι:

- Διακλάδωση Υ/Σ Νο5
- Διακλάδωση Υ/Σ Νο19
- Διακλάδωση Υ/Σ Νο22

Ασφάλεια 30Τ τοποθετείται και στην αρχή της διακλάδωσης που τροφοδοτεί τους υποσταθμούς 26 και 27 (στύλος 80/9098), μιας και η ασφάλεια 8Κ που θα μπορούσε να τοποθετηθεί στη θέση αυτή, βάση της τελευταίας παρατήρησης της προηγούμενης παραγράφου τοποθετήθηκε κοντά στον Υ/Σ 27. Δεν μπορεί να γίνει το ίδιο και για την υποδιακλάδωση που τροφοδοτεί τους Υ/Σ 7 και 8 (στύλος 5/480) γιατί αν τοποθετούταν στη θέση αυτή ασφάλεια 30Τ τότε από τους ζυγούς 20kV του Υ/Σ μεταφοράς μέχρι και τον Υ/Σ 8 θα ήταν η δεύτερη σειρά ασφαλειών τύπου Τ μετά από αυτή του στύλου 3 του κορμού, πράγμα που είναι αντίθετο με τα όσα αναφέρθηκαν στην παρατήρηση δ της παραγράφου 3.4.

Η ισχύς διακοπής των ασφαλειών 30Τ καθορίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 3-3, ανάλογα με την απόσταση από τους ζυγούς MT του Υ/Σ μεταφοράς και παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2		
Ισχύς διακοπής των ασφαλειών 30Τ των διακλαδώσεων της υπό μελέτη γραμμής		
Ονομασία διακλάδωσης	Απόσταση από ζυγούς MT Υ/Σ μεταφοράς [km]	Ισχύς διακοπής [MVA]
Διακλάδωση Υ/Σ Νο5	0,298(ACSR95) + 2,697x1,75(ACSR35) = 5,018km	140
Διακλάδωση Υ/Σ Νο19	3,925(ACSR95) + 3,057x1,75(ACSR35) = 9,275km	100
Διακλάδωση Υ/Σ Νο22	4,837(ACSR95) + 1,351x1,75(ACSR35) = 7,201km	100
Διακλάδωση Υ/Σ Νο26, 27	9,098(ACSR95) + 0,728x1,75(ACSR35) = 10,372km	75

Η θέση, η ονομαστική τιμή (σε Α) και το είδος (Τ ή Κ) των ασφαλειών MT προστασίας των μ/σ και των διακλαδώσεων παρουσιάζονται στο λειτουργικό διάγραμμα του Παραρτήματος Γ (σχήμα Γ-1).

ΠΑΡΑΤΗΣΗΣΗ: Στην πορεία ενδέχεται να τροποποιηθεί η διαρρύθμιση των ασφαλειών 30Τ.

5.5 Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως

Με βάση τις σχέσεις που εξάγαμε στις παραγράφους 2.1.1-2.1.4, προσδιορίζουμε τις τιμές της μέγιστης και ελάχιστης έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλματα φάσεων και γης, σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του υπό μελέτη δικτύου ΜΤ. Τα σημεία αυτά είναι υποχρεωτικά η αρχή του κορμού (ζυγοί ΜΤ 20kV) καθώς και το τέλος του (στύλος Νο92). Επίσης, οι εν λόγω εντάσεις βραχυκυκλώσεως θα πρέπει να προσδιοριστούν και σε μερικά ακόμα κομβικά σημεία του δικτύου. Τα σημεία αυτά είναι εκείνα του κορμού από τα οποία εκκινούν μεγάλες διακλαδώσεις, αλλά και τα σημεία εκείνα στα οποία καταλήγουν οι διακλαδώσεις αυτές. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ενδεικτικά ο τρόπος υπολογισμού των εντάσεων βραχυκυκλώσεως σε δυο σημεία του υπό μελέτη δικτύου διανομής.

1) Περιοχή εντάσεων βραχυκυκλώσεως στην αρχή του κορμού (ζυγοί 20kV) [l=0km]

- Μέγιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα φάσεων:

$$I_{\Phi MAX} = |I_{3F}| = \frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_+|} = \frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_{M+} + Z_{r+} \cdot l|} = \frac{|20/\sqrt{3}|}{|1,64 + Z_{r+} \cdot 0|} = \frac{|20/\sqrt{3}|}{|1,64|} = \mathbf{7049A}$$

Η σχέση αυτή μας προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή της έντασης βραχυκυκλώσεως κατά το πλήρες τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης στην αρχή της γραμμής (l=0km) και προέκυψε από την παράγραφο 2.1.1. Σε περίπτωση που δεν γνωρίζαμε τη συνολική σύνθετη αντίσταση του συστήματος μεταφοράς Z_M , τότε η εν λόγω ένταση θα προέκυπτε από τη γνώση της ισχύς βραχυκυκλώσεως στους ζυγούς ΜΤ, που ο ΔΕΔΔΗΕ τη λαμβάνει ίση με 250MVA σε όλες τις περιπτώσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση, θα ήταν:

$$|I_{3F}| = \frac{|S|}{|\sqrt{3} \cdot U|} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 6881A$$

- Ελάχιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα φάσεων:

Με βάση τη σχέση 2.71 είναι:

$$I_{\Phi MIN} = |I_{2F}| = 0,7 \cdot |I_{3F}| = 0,7 \cdot 7049 = \mathbf{4934A}$$

- Μέγιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα γης:

Με βάση τη σχέση 2.86 της παραγράφου 2.1.4 είναι:

$$I_{\Gamma MAX} = |I_{1F}| = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z|} = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z_M + Z_{r+} \cdot l|} = \frac{|20/\sqrt{3}|}{|1,65 + Z_{r+} \cdot 0|} = \mathbf{7006A}$$

- *Ελάχιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα γης:*

Με βάση τη σχέση 2.66 της παραγράφου 2.1.3 είναι:

$$I_{\Gamma MIN} = |I_{1F}| = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z + 40|} = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z_M + Z_{\Gamma} \cdot l + 40|} = \frac{|20|/\sqrt{3}}{|1,65 + Z_{\Gamma} \cdot 0 + 40|} = \mathbf{278A}$$

2) Περιοχή εντάσεων βραχυκυκλώσεως στο τέλος του κορμού (στύλος Νο92) [l=10,43km]

- *Μέγιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα φάσεων:*

Από τον πίνακα 2-1, για αγωγούς ACSR95 είναι: $\dot{Z}_{\Gamma+} = 0,215 + 0,334j \rightarrow |Z_{\Gamma+}| = 0,397\Omega/km$

$$I_{\Phi MAX} = |I_{3F}| = \frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_+|} = \frac{|U/\sqrt{3}|}{|Z_{M+} + Z_{\Gamma+} \cdot l|} = \frac{|20/\sqrt{3}|}{|1,64\Omega + 0,397\Omega/km \cdot 10,43km|} = \mathbf{2000A}$$

- *Ελάχιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα φάσεων:*

Με βάση τη σχέση 2.71 είναι:

$$I_{\Phi MIN} = |I_{2F}| = 0,7 \cdot |I_{3F}| = 0,7 \cdot 2068 = \mathbf{1400A}$$

- *Μέγιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα γης:*

Με βάση τη σχέση 2.86 της παραγράφου 2.1.4 είναι:

$$I_{\Gamma MAX} = |I_{1F}| = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z|} = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z_M + Z_{\Gamma} \cdot l|} = \frac{|20/\sqrt{3}|}{|1,65\Omega + 0,786\Omega/km \cdot 10,43km|} = \mathbf{1174A}$$

Η τιμή $|Z_{\Gamma}| = 0,786\Omega/km$ λήφθηκε από τον πίνακα 2-2 για σφάλματα γης.

- *Ελάχιστη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως για σφάλμα γης:*

Με βάση τη σχέση 2.66 της παραγράφου 2.1.3 είναι:

$$I_{\Gamma MIN} = |I_{1F}| = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z + 40|} = \frac{|U|/\sqrt{3}}{|Z_M + Z_{\Gamma} \cdot l + 40|} = \frac{|20|/\sqrt{3}}{|1,65\Omega + 0,786\Omega/km \cdot 10,43km + 40\Omega|} = \mathbf{232A}$$

Με την ίδια διαδικασία υπολογίζουμε τις εντάσεις βραχυκυκλώσεως για όλα τα κρίσιμα σημεία του υπό μελέτη δικτύου ΜΤ. Τα σημεία εκείνα στα οποία προσδιορίζονται οι εντάσεις βραχυκυκλώσεως καθώς και η τιμή των εντάσεων αυτών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

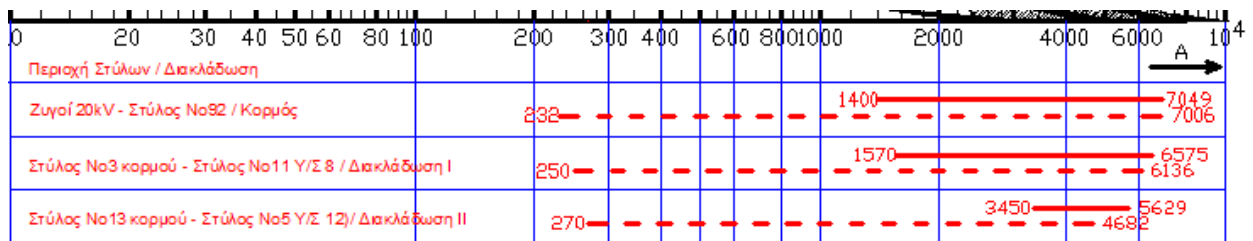
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3								
Περιοχές εντάσεως βραχυκυκλώσεων κορμού και διακλαδώσεων								
Αρ. Στύλου	Αρ. Διακλ.	Μήκη σε km			Εντάσεις βραχυκυκλώσεως [A]			
					Σφάλματα φάσεων		Σφάλματα γης	
		ACSR95	ACSR35	ACSR16	min	max	min	max
Ζυγοί	Κορμός	0	0	0	4934	7049	278	7006
92	Κορμός	10,43	0	0	1400	2000	232	1174
3	Κορμός	0,298	0	0	4602	6575	276	6136
11	Υ/Σ 8	0,298	2,301	0,48+0,852	1570	2242	250	1856
13	Κορμός	1,042	0	0	3940	5629	272	4682
5	Υ/Σ 12	1,042	0,418	0	3450	4928	270	4010
34	Κορμός	3,925	0	0	2530	3615	258	2442
43	Υ/Σ 19	3,925	3,057	0	1517	2167	242	1489
43	Κορμός	4,837	0	0	2273	3247	254	2120
14	Υ/Σ 22	4,837	1,351	0	1796	2566	247	1703
69	Κορμός	7,858	0	0	1700	2429	242	1477
7	Υ/Σ 23	7,858	0,675	0	1547	2210	238	1361
75	Κορμός	8,598	0	0	1601	2288	239	1375
7	Υ/Σ 25	8,598	0,704	0	1459	2085	235	1270
80	Κορμός	9,098	0	0	1541	2201	237	1314
10	Υ/Σ 27	9,098	0,728	0	1405	2007	233	1214
89	Κορμός	10,151	0	0	1427	2039	233	1201
7	Υ/Σ 29	10,151	0	0,584	1254	1791	229	1097
91	Κορμός	10,329	0	0	1410	2014	232	1183
68	Αιολικό Πάρκο	10,329+ 5,413	0	0	1026	1465	214	824

Από τον πίνακα 5-3 προκύπτει ότι τα ελάχιστα σφάλματα φάσεων (1026A) και γης (214A) εμφανίζονται στο άκρο της διακλάδωσης με το οποίο συνδέεται το Αιολικό Πάρκο (στύλος Νο68), ενώ τα μέγιστα σφάλματα φάσεων και γης εμφανίζονται στους ζυγούς των 20kV του Υ/Σ μεταφοράς (7049A και 7006A αντίστοιχα).

5.6 Καθορισμός των περιοχών σφαλμάτων φάσεων και γης

Προτού προχωρήσουμε στην εκλογή των ρυθμίσεων των η/ν του Ε/Δ, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να τοποθετήσουμε στο διάγραμμα αλληλουχίας των ασφαλειών ΜΤ του Παραρτήματος Β τις περιοχές εντάσεων βραχυκυκλώσεως για σφάλματα φάσεων και γης, για όλα τις θέσεις που υπολογίσαμε στον πίνακα 5-3. Ολοκληρωμένη άποψη του διαγράμματος αλληλουχίας ασφαλειών ΜΤ με τις εν λόγω περιοχές εντάσεων βραχυκυκλώσεως παρουσιάζεται στο σχήμα Γ-2 του Παραρτήματος Γ.

Παρακάτω παρουσιάζεται απόσπασμα του σχήματος Γ-2 για να ερμηνευτεί ο τρόπος με τον οποίο σχηματίστηκαν οι περιοχές αυτές εντάσεων.



Σχήμα 5-1. Απόσπασμα του σχήματος Γ-2 με τις περιοχές εντάσεων βραχυκυκλώσεων για τρία τμήματα του υπό μελέτη δικτύου διανομής

Στην πρώτη στήλη με τίτλο «Περιοχή Στύλων / Διακλάδωση» τοποθετείται το τμήμα του δικτύου που μας ενδιαφέρει να ξέρουμε τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές εντάσεων για σφάλματα φάσεων και γης. Για παράδειγμα, η εγγραφή «Ζυγοί 20kV – Στύλος Νο92 / Κορμός» αφορά το τμήμα του δικτύου που ξεκινάει από τους ζυγούς 20kV του Υ/Σ μεταφοράς και τελειώνει στο στύλο Νο92 του κορμού και αφορά τον κορμό. Ομοίως, η εγγραφή «Στύλος Νο13 κορμού – Στύλος Νο5 Υ/Σ 12 / Διακλάδωση ΙΙ» αφορά το τμήμα του δικτύου που ξεκινάει από το στύλο Νο13 του κορμού και καταλήγει στο στύλο Νο5 του Υ/Σ 12 το οποίο τμήμα είναι η διακλάδωση ΙΙ του λειτουργικού διαγράμματος (σχήμα Γ-1). Αυτό σημαίνει ότι τα 20 σημεία που υπολογίσαμε τις εντάσεις βραχυκυκλώσεως στον πίνακα 5-3 ορίζουν περιοχές εντάσεων βραχυκυκλώσεως σε 10 κομβικά τμήματα του δικτύου. Τα τμήματα αυτά είναι ολόκληρος ο κορμός και οι 9 μεγαλύτερες διακλαδώσεις που είναι σημειωμένες με τα λατινικά γράμματα I-IX στο λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος Γ-1.

Σε κάθε μια εγγραφή που αφορά ένα από τα 10 τμήματα του δικτύου χαράσσουμε υπό κλίμακα τις περιοχές εντάσεων βραχυκυκλώσεων για σφάλματα φάσεων και γης. Με συνεχόμενη γραμμή είναι η περιοχή σφαλμάτων φάσεων και με διακεκομμένη γραμμή είναι η περιοχή σφαλμάτων γης. Όσον αφορά την περιοχή σφαλμάτων φάσεων για την εγγραφή «Ζυγοί 20kV – Στύλος Νο92 / Κορμός» χρησιμοποιείται η μέγιστη ένταση στην αρχή της γραμμής (7049A από πίνακα 5-3) και η ελάχιστη ένταση στο τέλος της, στο στύλο δηλαδή Νο92 (1400A από πίνακα 5-3). Όσον αφορά την περιοχή σφαλμάτων γης για την ίδια εγγραφή, χρησιμοποιείται η μέγιστη ένταση σφάλματος γης στην αρχή της γραμμής (7006A από πίνακα 5-3) και η αντίστοιχη ελάχιστη ένταση στο τέλος της, στο στύλο δηλαδή Νο92 (232A από πίνακα 5-3).

Όσον αφορά την τρίτη εγγραφή «Στύλος Νο13 κορμού – Στύλος Νο5 Υ/Σ 12 / Διακλάδωση ΙΙ» του σχήματος Γ-2 για την περιοχή σφαλμάτων φάσεων χρησιμοποιούμε τη μέγιστη ένταση στην αρχή της (στύλος Νο13 κορμού), όπου από τον πίνακα 5-3 είναι ίση με 5629A καθώς και την ελάχιστη τιμή σφάλματος φάσεων στο τέλος της (Στύλος Νο5 Υ/Σ 12) όπου πάλι από τον πίνακα 5-3 είναι ίση με 3450. Η αντίστοιχη περιοχή σφαλμάτων γης της εγγραφής αυτής είναι η 270-4682A. Το ίδιο γίνεται και για τις υπόλοιπες οχτώ κρίσιμες περιοχές του υπό μελέτη δικτύου.

Όπως φαίνεται από το σχήμα Γ-2, τα όρια συνεργασίας των ασφαλειών 30T με τις ασφάλειες Κ προκύπτουν από την τομή των χαρακτηριστικών καμπύλων των εν λόγω ασφαλειών με αυτή της ασφάλειας 30T. Από το σχήμα Γ-2 τα όρια αυτά είναι:

- Ελάχιστο όριο συνεργασίας 30T με 15K: 1580A
- Ελάχιστο όριο συνεργασίας 30T με 12K: 1980A
- Ελάχιστο όριο συνεργασίας 30T με 8K: 2020A

- *Ελάχιστο όριο συνεργασίας 30T με 3K: 2500A*

Αυτό σημαίνει ότι για σφάλματα σε διακλαδώσεις που προστατεύονται με ασφάλειες 30T μεγαλύτερα από προηγούμενες τιμές, δεν υπάρχει επιλεκτική συνεργασία με τις ασφάλειες K. Λόγω του μικρού μήκους της υπό μελέτη γραμμής οι εντάσεις βραχυκυκλώσεως ανήλθαν σε υψηλά νούμερα, με αποτέλεσμα να υπερβαίνουν τα προαναφερθέντα όρια και να μην υπάρχει επιλεκτική συνεργασία ασφαλειών 30T-K. Για παράδειγμα, για τη διακλάδωση III που τροφοδοτεί τον Υ/Σ 19 η οποία προστατεύεται με 30T στην αρχή της, βλέπουμε ότι υπάρχουν στις διάφορες υποδιακλαδώσεις της ασφάλειες 8K, 12K και 15K. Βλέπουμε όμως ότι η περιοχή σφαλμάτων φάσεων εκτείνεται από τα 1566A μέχρι τα 3692A. Αυτό σημαίνει ότι για σφάλματα πάνω από τα 1580A για τις 15K, πάνω από τα 1980A για τις 12K και πάνω από τα 2020A για τις 8K είναι αμφίβολο αν θα δουλέψει πρώτα η K ή η 30T. Έτσι, η 30T στην αρχή της διακλάδωσης III δεν έχει νόημα και προτιμάται η τοποθέτηση Δ/Α. Τοποθετώντας Δ/Α αντί 30T στην αρχή της διακλάδωσης III, έχουμε τα εξής:

- τυχόν σφάλματα που θα συμβούν στις υποδιακλαδώσεις της θα ανιχνεύονται από τις ασφάλειες K και θα εκκαθαρίζονται
- τυχόν σφάλματα επί της ίδιας της διακλάδωσης III θα ανιχνεύονται από τον Ε/Δ στην αρχή του κορμού και πριν αυτός πραγματοποιήσει την τελευταία πτώση του και αποκόψει ολόκληρο τον κορμό θα ενεργοποιείται ο Δ/Α και θα βγάζει εκτός μόνο την εν λόγω διακλάδωση.

Το ίδιο συμβαίνει και στις υπόλοιπες διακλαδώσεις που προστατεύονται με 30T. Θα πρέπει να γίνει δηλαδή αντικατάστασή τους με Δ/Α. Διακόπτης Απομονώσεως θα πρέπει να τοποθετηθεί και στην αρχή της διακλάδωσης που τροφοδοτεί το Αιολικό Πάρκο.

Συνεπώς, στο λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος Γ-1, θα πρέπει να αντικατασταθούν οι ασφάλειες 30T με Δ/Α και να προστεθεί Δ/Α στη διακλάδωση που τροφοδοτεί το Αιολικό Πάρκο. Οι Δ/Α θα πρέπει να είναι τριπολικό τύπου GW με ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 400A (από πίνακα 2-1). Παρόλο που από άποψη ονομαστικού ρεύματος επαρκούσε και ο Δ/Α των 200A (GN3VE) επιλέγεται ο GW μιας και αντέχει σε υψηλότερες τιμές εντάσεων βραχυκυκλώσεως, πράγμα που χαρακτηρίζει και την υπό μελέτη γραμμή.

5.7 Ρύθμιση ηλεκτρονόμων ελαιοδιακόπτη

- Ηλεκτρονόμοι ελαιοδιακόπτη:
 - η/ν φάσεων: ASEA R1
 - η/ν γης: FIR-COE11 (EIT, μετά χρόνου διακόπτου)
- μ/σ εντάσεως: 400:5

Σκοπός μας, είναι να προσδιορίσουμε τις εντάσεις διεγέρσεως των εν λόγω η/ν καθώς και το χρόνο λειτουργίας του η/ν χρονικής καθυστέρησης, προκειμένου αυτοί να εξασφαλίζουν την προστασία του κορμού στα ελάχιστα σφάλματα φάσεων και γης.

A) Ρύθμιση ηλεκτρονόμων φάσεων:

1) Ηλεκτρονόμος στιγμιαίας λειτουργίας (Σ.Λ.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. ASEA R1 για σφάλματα φάσεων ($I_{\Sigma\Lambda\Phi}$) θα πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη 3.1:

$$1,5 \cdot I_{\phi} < I_{\Sigma\Lambda\Phi} < I_{\Phi\min}$$

Όπου:

$I_{\Phi\min}$ = ελάχιστο σφάλμα φάσεων στο άκρο του δικτύου [A]

I_{ϕ} = φορτίο γραμμής [A]

$I_{\Sigma\Lambda\Phi}$ = ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. φάσεων [A]

Το $I_{\Phi\min}$ από τον πίνακα 5-3 είναι ίσο με 1026A και εμφανίζεται στο στύλο Νο68 της διακλάδωσης IX που τροφοδοτεί το Αιολικό Πάρκο.

Από τη σχέση 3.3, το ρεύμα φορτίου της γραμμής I_{ϕ} προκύπτει λαμβάνοντας το 30-33% της εγκατεστημένης ισχύος όλων των μετασχηματιστών διανομής της. Δηλαδή:

$$I_{\phi} = \frac{\Sigma(kVA) \cdot (30 - 33\%)}{\sqrt{3} \cdot U(kV)} = \frac{3640 \cdot 33\%}{\sqrt{3} \cdot 20} = 34,7A$$

Επειδή η εν λόγω γραμμή τροφοδοτεί Αιολικό Πάρκο ισχύος 4,8MW θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και το ανάστροφο ρεύμα που αυτό τροφοδοτεί τη γραμμή.

Γενικά η Ηλεκτρική Εταιρεία επιβάλλει όλες οι εγκαταστάσεις να μην λειτουργούν με $\cos\phi$ μικρότερο του 0,85. Ειδικά όμως για τους σταθμούς Ανεξάρτητων Παραγωγών, η Ηλεκτρική Εταιρεία ζητάει βελτίωση του $\cos\phi$ κοντά στη μονάδα.

Για το συγκεκριμένο Αιολικό Σταθμό το $\cos\phi$ ανέρχεται στο 0,97. Συνεπώς, το ανάστροφο ρεύμα που τροφοδοτεί ο Σταθμός προς το δίκτυο είναι:

$$I_{\phi\text{ΑΠ}} = \frac{\Sigma(kVA)}{\sqrt{3} \cdot U(kV) \cdot \cos\phi} = \frac{4,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,97} = 143A$$

Λόγω της ύπαρξης του Αιολικού Πάρκου, δεν μπορούμε να ρυθμίσουμε τον η/ν Σ.Λ. για ρεύματα φορτίου μικρότερα από 143A, μιας και τότε αυτός θα διεγειρόταν από το ρεύμα που θα τροφοδοτούσε το Αιολικό Πάρκο κατά τη λειτουργία αιχμής του.

Έτσι, η σχέση 3.1 γράφεται ως:

$$1,5 \cdot 143 < I_{\Sigma\Lambda\Phi} < 1026 \Rightarrow 214,5 < I_{\Sigma\Lambda\Phi} < 1026$$

Από τις καμπύλες λειτουργίας του η/ν ASEA-R1 (Παράρτημα Α) έστω ότι επιλέγουμε την κλίμακα οριακής έντασης διεγέρσεως για σφάλματα φάσεων **8A**. Τότε, από σχέση 3.4 θα είναι:

$$I_{\Sigma\Lambda\Phi} = \text{σχέση } \mu/\sigma \text{ έντασης} \times \text{ρύθμιση ρεύματος } \eta/\nu = \frac{400}{5} \cdot 8 = 640A$$

Πράγματι: $214,5 < 640 < 1026$

Ακόμα και αν επιλέγαμε την κλίμακα 4A, θα ήταν:

$$I_{\Sigma\Lambda\Phi} = \frac{400}{5} \cdot 4 = 320A$$

Το οποίο εξακολουθεί να ικανοποιεί τη συνθήκη 3.1. Επειδή όμως η υπό μελέτη γραμμή είναι μικρού μήκους με υψηλές εντάσεις βραχυκυκλώσεως, η Ηλεκτρική Εταιρεία λαμβάνει υπόψη της $600 < I_{\Sigma\Lambda\Phi} < I_{\Phi\min}$.^[7] Έτσι, επιλέγοντας την κλίμακα των 8A είμαστε σύμφωνοι και με την εν λόγω παραδοχή.

Άρα:

$I_{\Sigma\Lambda\Phi} = 640A$

2) Ηλεκτρονόμος χρονικής καθυστέρησης (X.K.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν X.K. για σφάλματα φάσεων ($I_{XK\Phi}$) θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη 3.5:

$$1,5 \cdot I_{\phi} < I_{XK\Phi} < I_{\Phi\min}$$

Για $I_{\Phi\min}=1026A$ και $I_{\phi}=143A$ πάλι, θα είναι:

$$1,5 \cdot 143 < I_{XK\Phi} < 1026 \Rightarrow 214,5 < I_{XK\Phi} < 1026$$

Από τις καμπύλες λειτουργίας του η/ν ASEA-R1 (Παράρτημα Α) έστω ότι επιλέγουμε την κλίμακα οριακής έντασης διεγέρσεως για σφάλματα φάσεων **4A**. Τότε, από σχέση 3.6 θα είναι:

$$I_{\Sigma\Lambda\Phi} = \text{σχέση } \mu/\sigma \text{ έντασης} \times \text{ρύθμιση ρεύματος } \eta/\nu = \frac{400}{5} \cdot 4 = 320A$$

Πράγματι: $214,5 < 320 < 1026$

Άρα:

$I_{XK\Phi} = 320A$

Επιλογή καμπύλης χρόνου λειτουργίας: $t_3=0,5-6\text{sec}$
Επιλέγεται η καμπύλη χρόνου λειτουργίας 1sec.

Έχοντας υπολογίσει τα ρεύματα διέγερσης των δυο η/ν φάσεων (Σ.Λ. και Χ.Κ.) θα πρέπει να μεταφέρουμε τις αντίστοιχες καμπύλες τους (από το Παράρτημα Α) στο διάγραμμα αλληλουχίας ασφαλειών του σχήματος Γ-2. Στο σημείο αυτό αναφέρουμε ότι ο οριζόντιος άξονας των χαρακτηριστικών καμπύλων των ηλεκτρονόμων είναι βαθμονομημένος σε πολλαπλάσια του ρεύματος διέγερσης (πολλαπλάσια $\times I_n$) που σημαίνει ότι για τον η/ν ASEA-R1 Σ.Λ. αφού το ρεύμα διέγερσής του υπολογίστηκε στα 640A, θα πρέπει να τοποθετήσουμε την καμπύλη του (σημείο $1 \times I_n - 0,01\text{sec}$) στη θέση των 640A του διαγράμματος αλληλουχίας ασφαλειών. Το ίδιο κάνουμε για την καμπύλη του η/ν ASEA-R1 Χ.Κ. του 1sec, μόνο που αυτή τοποθετείται στα 320A του διαγράμματος αλληλουχίας ασφαλειών (σχήμα Γ-3, Παράρτημα Γ). Στο εν λόγω σχήμα μπορεί να αγνοηθεί τώρα η καμπύλη των ασφαλειών 30T, μιας και αυτές έχουν αντικατασταθεί από Δ/Α.

Όπως βλέπουμε από το σχήμα Γ-3, επιλέγοντας τις κλίμακες 8A για τον η/ν Σ.Λ. και 4A για τον η/ν Χ.Κ. έχουμε εντάσεις διεγέρσεως σφάλματος σημαντικά μικρότερες από τις ελάχιστες τιμές σφαλμάτων φάσεων των διαφόρων τμημάτων του υπό μελέτη δικτύου. Πράγματι, οι καμπύλες των η/ν ASEA-R1 βρίσκονται πριν τις σημειωμένες περιοχές σφαλμάτων φάσεων του υπό μελέτη δικτύου.

Αυτό σημαίνει ότι επιλέγοντας κατάλληλη κλίμακα ρυθμίσεως της οριακής έντασης διεγέρσεως των η/ν φάσεων, μπορούμε να καθορίσουμε την προστασία που παρέχει ο Ε/Δ για τα ελάχιστα σφάλματα φάσεων στα διάφορα σημεία του δικτύου. Όσον αφορά τον χρόνο λειτουργίας του η/ν Χ.Κ., βλέπουμε ότι ακόμα και αν πήραμε τον ελάχιστο χρόνο του 1sec, η καμπύλη του βρίσκεται πάνω από τις καμπύλες των ασφαλειών Κ, πράγμα που σημαίνει ότι θα ενεργοποιηθούν πρώτα αυτές.

B) Ρύθμιση ηλεκτρονόμων γης:

1) Ηλεκτρονόμος στιγμιαίας λειτουργίας (Σ.Λ.)

Το ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. γης ($I_{\Sigma\Lambda\Gamma}$) θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη 3.7:

$$I_{\Sigma\Lambda\Gamma} < I_{\Gamma\min}$$

Όπου:

$I_{\Gamma\min}$ = ελάχιστο σφάλμα γης στο άκρο του δικτύου [A]

$I_{\Sigma\Lambda\Gamma}$ = ρεύμα διέγερσης του η/ν Σ.Λ. γης [A]

Το $I_{\Gamma\min}$ από τον πίνακα 5-3 είναι ίσο με 214A και εμφανίζεται στο στύλο Νο68 της διακλάδωσης IX που τροφοδοτεί το Αιολικό Πάρκο.

Έτσι, η σχέση 3.7 γράφεται ως:

$$I_{\Sigma\Lambda\Gamma} < 214A$$

Ο ΔΕΔΔΗΕ δέχεται (παράγραφος 3.5):

$I_{\Sigma\Lambda\Gamma} = I_{\chi\kappa\Gamma} = 80A$
--

Πράγματι: $80A < 214A$

2) Ηλεκτρονόμος χρονικής καθυστέρησης (X.K.)

Για τον η/ν FIR-COE-11 (EIT) ο ΔΕΔΔΗΕ δέχεται τις ρυθμίσεις 80A – 0,7sec για όλες τις περιπτώσεις.

Μεταφέρουμε έτσι με τον ίδιο τρόπο όπως και για τους η/ν ASEA-R1 τις καμπύλες των η/ν Σ.Λ. και X.K. FIR-COE-11 (EIT) του Παραρτήματος Α, στο διάγραμμα αλληλουχίας ασφαλειών του σχήματος Γ-3. Μεταφέροντας το σημείο $1xI_n - 0,01sec$ (αρχή διαγράμματος καμπύλων FIR-COE-11 (EIT)) στη θέση των 80A του διαγράμματος αλληλουχίας ασφαλειών βλέπουμε ότι ο η/ν Σ.Λ. ξεκινάει όντος από τα 80A, ενώ ο αντίστοιχος X.K. ξεκινάει από ένα μεγαλύτερο ρεύμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αρχή των καμπύλων X.K. δεν είναι το $2xI_n$ όπως φαινομενικά δείχνει το διάγραμμα των η/ν FIR-COE-11 (EIT) του Παραρτήματος Α αλλά το σημείο $1xI_n - 0,01sec$.

Όπως προκύπτει από το σχήμα Γ-3, υπάρχουν εντάσεις σφάλματος που η καμπύλη του η/ν Σ.Λ. FIR-COE-11 βρίσκεται κάτω από τις καμπύλες των ασφαλειών 8K, 12K και 15K. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει επιλεκτική συνεργασία μεταξύ η/ν Σ.Λ. και ασφαλειών τύπου K και ότι σε ενδεχόμενο σφάλμα γης ο Ε/Δ είναι δυνατό να βγάλει εκτός ολόκληρο τον κορμό. Για το λόγο αυτό θέτουμε «εκτός» τον η/ν Σ.Λ. και αφήνουμε μόνο τον η/ν X.K για τον έλεγχο των σφαλμάτων γης, που όπως φαίνεται και στο σχήμα Γ-3 συνεργάζεται με όλες τις ασφάλειες K.

Επίσης, από το ίδιο σχήμα βλέπουμε ότι ο εν λόγω η/ν X.K. θα συνεργάζονταν και με μια ενδεχόμενη ασφάλεια 30T που θα ήταν εγκατεστημένη στο δίκτυο, μιας η χαρακτηριστική του βρίσκεται πάνω από αυτή της 30T. Αυτός είναι και ο λόγος που για σφάλματα γης στα δίκτυα του ΔΕΔΔΗΕ χρησιμοποιείται ο η/ν X.K. FIR-COE-11 (EIT) 80A- 0,7sec διότι αν για το ίδιο ρεύμα διέγερσης επιλέγονταν μια καμπύλη μικρότερου χρόνου λειτουργίας, τότε αυτή θα βρισκόταν μέσα στην χαρακτηριστική περιοχή της 30T και δεν θα υπήρχε επιλογική συνεργασία. Στην ειδική περίπτωση του υπό μελέτη δικτύου, θα ήταν δυνατή η επιλογή καμπύλης μικρότερου χρόνου λειτουργίας από αυτό των 0,7sec, μιας και υπάρχει αρκετό περιθώριο από τις καμπύλες K.

Στο ίδιο σχήμα Γ-3 τοποθετούμε τώρα και τις καμπύλες θερμικής αντοχής των αγωγών ACSR 16, 35 και 95 τ.χ. του σχήματος 2.9. Όπως προκύπτει από σχήμα Γ-3, οι καμπύλες θερμικής αντοχής των αγωγών βρίσκονται πολύ πιο πάνω από τις καμπύλες των ασφαλειών K, που

σημαίνει ότι σε περίπτωση σφάλματος σε διακλαδώσεις που προστατεύονται από ασφάλειες Κ θα έχουμε την τήξη τους, χωρίς να καταπονείται θερμικά ο αγωγός τους.

Το πρόβλημα αφορά τους αγωγούς εκείνους που δεν προστατεύονται με ασφάλειες Κ ή Τ αλλά από τον Ε/Δ απευθείας. Τέτοιοι αγωγοί είναι αυτοί των διακλαδώσεων Ι, ΙΙΙ, ΙV, VΙΙ και ΙΧ στους οποίους έχει εγκατασταθεί Δ/Α. Τοποθετώντας Δ/Α σε αυτές τις διακλαδώσεις θα πρέπει να ελεγχθούν οι αγωγοί τους σε θερμικό βραχυκύκλωμα, μιας και αυτοί διαρρέονται από το ρεύμα σφάλματος το χρονικό διάστημα εκείνο που μεσολαβεί μέχρι την διακοπή του Δ/Α. Η θερμική αντοχή των αγωγών που προστατεύονται απευθείας από Ε/Δ προκύπτει από την τομή των καμπύλων τους με αυτή του η/ν Χ.Κ. για σφάλματα φάσεων. Για παράδειγμα, από το σχήμα Γ-3 προκύπτουν ότι:

- $I_{th\ ACSR16} = 3300A$
- $I_{th\ ACSR35} = 6900A$

Αυτό σημαίνει ότι για τη διακλάδωση ΙΙΙ που αποτελείται από αγωγούς ACSR 35τ.χ. για την περιοχή σφαλμάτων φάσεων από 1517Α μέχρι 3615Α αυτοί προστατεύονται από θερμικό βραχυκύκλωμα, μιας και οι αγωγοί ACSR 35 αντέχουν μέχρι 6900Α όπως προέκυψε παραπάνω. Την ίδια αντοχή παρουσιάζουν και οι διακλαδώσεις ΙV και VΙΙ. Μόνο στη διακλάδωση Ι θα πρέπει να ελεγχθεί η θερμική αντοχή ξεχωριστά για το τμήμα της με αγωγούς ACSR 35 και ξεχωριστά το τμήμα της με αγωγούς ACSR 16. Για παράδειγμα, μέχρι και το στύλο Νο22 της διακλάδωσης Ι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 6900Α. Ομοίως στην υποδιακλάδωση με αγωγούς ACSR 16 το ρεύμα βραχυκυκλώσεως δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 3300Α. Σε περίπτωση που δεν εξασφαλίζεται η θερμική αντοχή των αγωγών, θα πρέπει αν γίνει αντικατάστασή τους από άλλους, μεγαλύτερης διατομής.

Η τελική έκδοση του λειτουργικού διαγράμματος της υπό μελέτη γραμμής παρουσιάζεται στο σχήμα Γ-4 του παραρτήματος Γ. Έχει γίνει αντικατάσταση των ασφαλειών 30Τ με Δ/Α.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4					
Συγκεντρωτικές ρυθμίσεις μέσω προστασίας του υπό μελέτη δικτύου					
<i>Ελαιδιακόπτης κορμού</i>					
	<i>Στιγμιαίας Λειτουργίας (Σ.Λ.)</i>		<i>Χρονικής Καθυστέρησης (Χ.Κ.)</i>		
	<i>Τύπος</i>	<i>Οριακή ένταση διέγερσης</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Οριακή ένταση διέγερσης</i>	<i>Καμπύλη λειτουργίας</i>
<i>η/ν φάσεων</i>	ASEA R1	640Α	ASEA R1	320Α	1sec
<i>η/ν γης</i>	FIR-COE11 (EIT)	80Α	FIR-COE11 (EIT)	80Α	0,7sec
<i>Διακόπτες Απομονώσεως διακλαδώσεων Ι, ΙΙΙ, ΙV, VΙΙ, ΙΧ</i>					
	<i>Τύπος</i>		<i>Ονομαστική ένταση λειτουργίας</i>		
	GW, τριπολικός		400Α		

ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να παρουσιαστεί με περιεκτικό τρόπο η προστασία των εναέριων δικτύων διανομής ΜΤ του Εθνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ). Πιο συγκεκριμένα, έγινε πρακτική εφαρμογή μελέτης προστασίας σε μια γραμμή ΜΤ που προήλθε από πραγματικά δεδομένα του δικτύου του Ν. Ρεθύμνου της νήσου Κρήτης. Όπως διαπιστώσαμε αρχικά, είναι δυνατή η επιλογή και η ρύθμιση όλων των μέσων προστασίας ενός δικτύου ΜΤ, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ειδικού λογισμικού μελέτης προστασίας. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι η μελέτη προστασίας θα πρέπει να γίνεται επί χάρτου, μέσω διαγραμμμάτων όπως παρουσιάστηκε, μιας και όπως διαπιστώσαμε απαιτούνται πάρα πολλοί υπολογισμοί, που σε γραμμές πολύ μεγάλου μήκους θα οδηγούσαν σίγουρα σε λάθη εκ παραδρομής. Εξάλλου, η χρήση κατάλληλου λογισμικού θα μπορούσε να πραγματοποιούσε ταυτόχρονα πλήρη ηλεκτρική μελέτη του δικτύου (έλεγχος σε πτώση τάσης, έλεγχος γειώσεων κ.α.). Από την άλλη πλευρά, το κεφάλαιο της προστασίας των δικτύων διανομής ΜΤ βλέπουμε ότι είναι αρκετά σύνθετο και απαιτεί πολύ καλή εξοικείωση στη χρήση των καμπύλων όλων των μέσων προστασίας, έτσι ώστε να μπορεί ο μελετητής να επιλέξει το κατάλληλο σενάριο προκειμένου να επιτευχθεί η επιλογική συνεργασία όλων των μέσων προστασίας. Απαιτούνται αρκετές δοκιμές που πολλές φορές μπορούν να οδηγήσουν σε ολοκληρωτικό επανασχεδιασμό της προστασίας, αντικατάσταση αγωγών κ.α.

Γεννάται έτσι το ερώτημα πού μπορεί να βρει εφαρμογή ο αναλυτικός, γραφικός προσδιορισμός της προστασίας που παρουσιάσαμε στην παρούσα εργασία. Η απάντηση βρίσκεται στις περιπτώσεις εκείνες που θα πρέπει να προσδιοριστεί η προστασία μιας γραμμής ΜΤ που αναχωρεί από ιδιωτικό Υποσταθμό Μεταφοράς ενός ανεξάρτητου παραγωγού και η οποία πρόκειται να τροφοδοτήσει ένα πλήθος σταθμών του. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί μια ιδιωτική γραμμή ΜΤ που σε διάφορα τμήματά της συνδέονται δύο ή περισσότεροι σταθμοί ΑΠΕ. Στην περίπτωση αυτή, ο μελετητής μηχανικός που δεν διαθέτει τα λογισμικά του ΔΕΔΔΗΕ θα είναι σε θέση να μελετάει τις ρυθμίσεις των μέσων προστασίας και να ελέγχει την επιλογική τους συνεργασία.

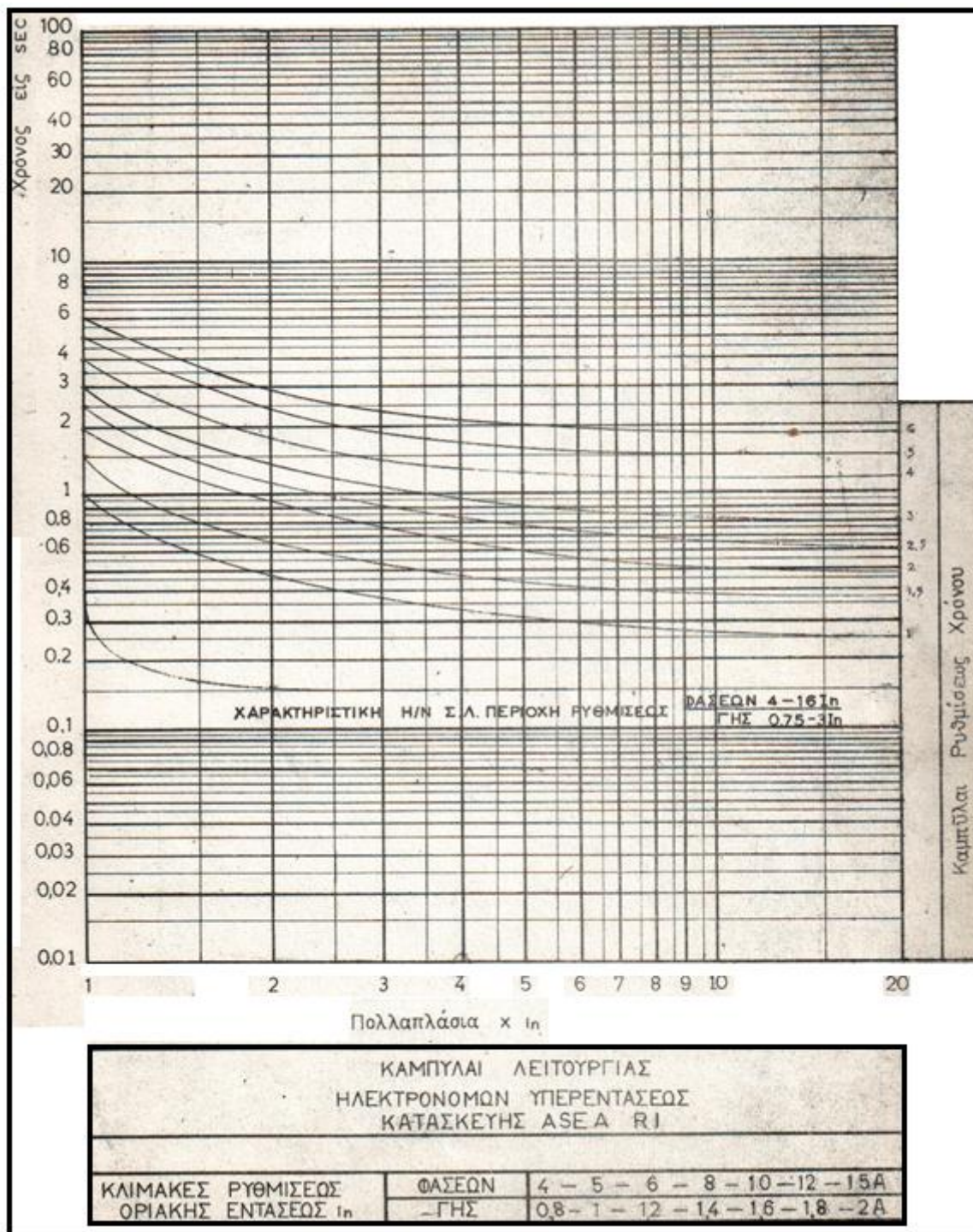
Από τη μελέτη προστασίας της εν λόγω γραμμής διαπιστώσαμε αρχικά ότι μικραίνοντάς την σε μήκος μεταβήκαμε σε μια ειδική περίπτωση γραμμών ΜΤ μικρού μήκους – μεγάλων εντάσεων βραχυκυκλώσεως. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να εμφανιστούν εντάσεις σφάλματος που υπερέβαιναν τα όρια επιλεκτικής συνεργασίας μεταξύ ασφαλειών 30Τ και Κ. Για το λόγο αυτό αναγκαστήκαμε να προβούμε στην τοποθέτηση Δ/Α, το οποίο με τη σειρά του απαιτούσε έλεγχο των αγωγών σε θερμικό βραχυκύκλωμα.

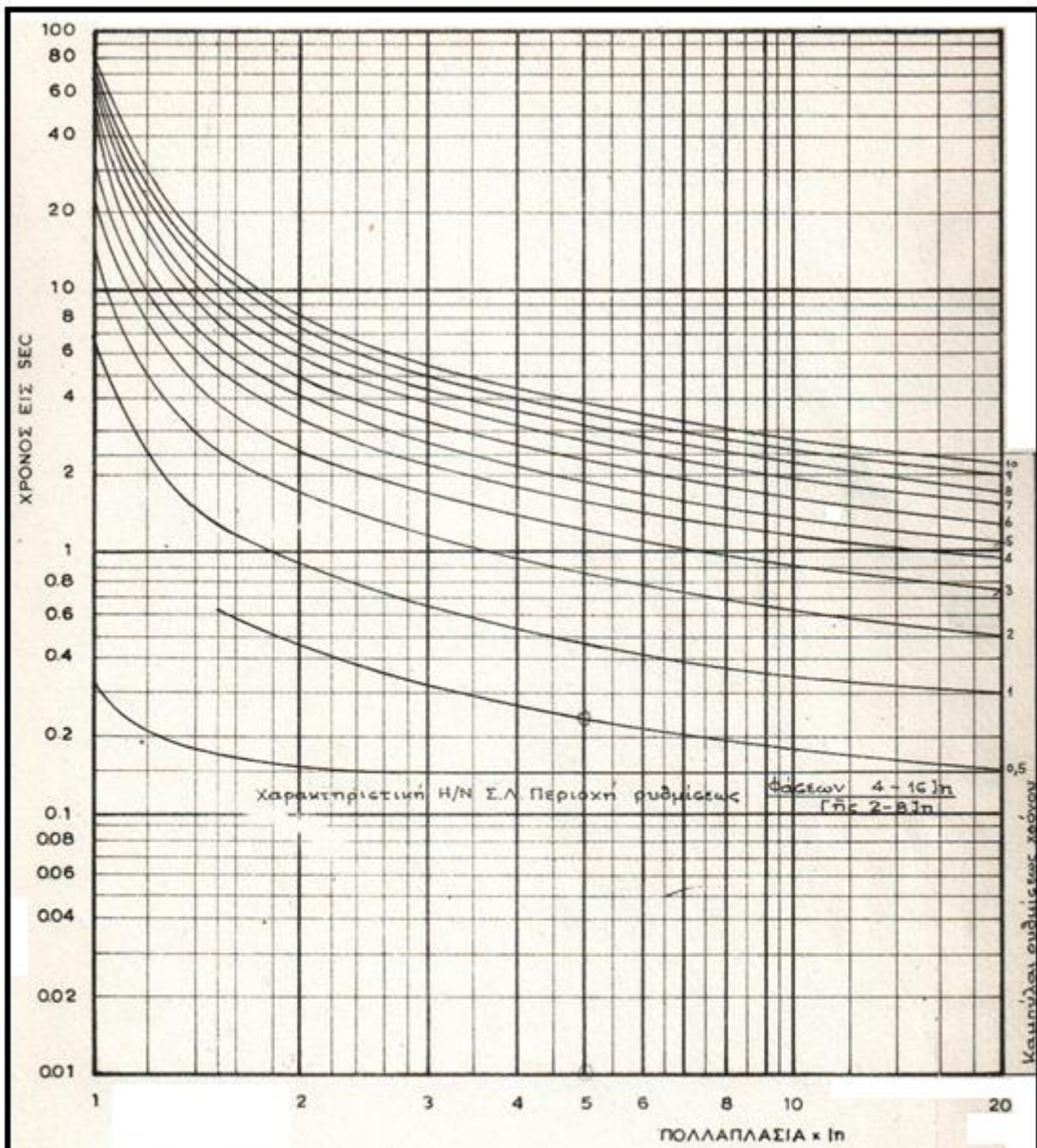
Επίσης το υπό μελέτη δίκτυο ΜΤ περιλάμβανε και ανεξάρτητο παραγωγό (Αιολικό Πάρκο), προκειμένου να διαπιστώσουμε την επίδραση που επιφέρει η λειτουργία του στο ρεύμα φορτίου της γραμμής. Έτσι, οι ρυθμίσεις των η/ν του Ε/Δ δεν πραγματοποιήθηκαν με βάση το ρεύμα φορτίου των εγκατεστημένων Υ/Σ του δικτύου το οποίο είδαμε ότι ανήλθε στα 34,7Α, αλλά με βάση το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτήσει τη γραμμή το Αιολικό Πάρκο, το οποίο ανήλθε στα 143Α. Με τις ρυθμίσεις του ρεύματος διέγερσης των ηλεκτρονόμων του Ε/Δ στα 320Α για τον Χ.Κ. και 640Α για τον Σ.Λ και με δεδομένο το μέγιστο φορτίο της γραμμής τα 143Α λόγω του Αιολικού Πάρκου, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει δυνατότητα στο υπό μελέτη

δίκτυο να αυξηθεί το φορτίο του (να προστεθούν δηλαδή και άλλοι ανεξάρτητοι παραγωγοί ή υποσταθμοί διανομής), χωρίς να πραγματοποιηθεί εκ νέου η μελέτη προστασίας.

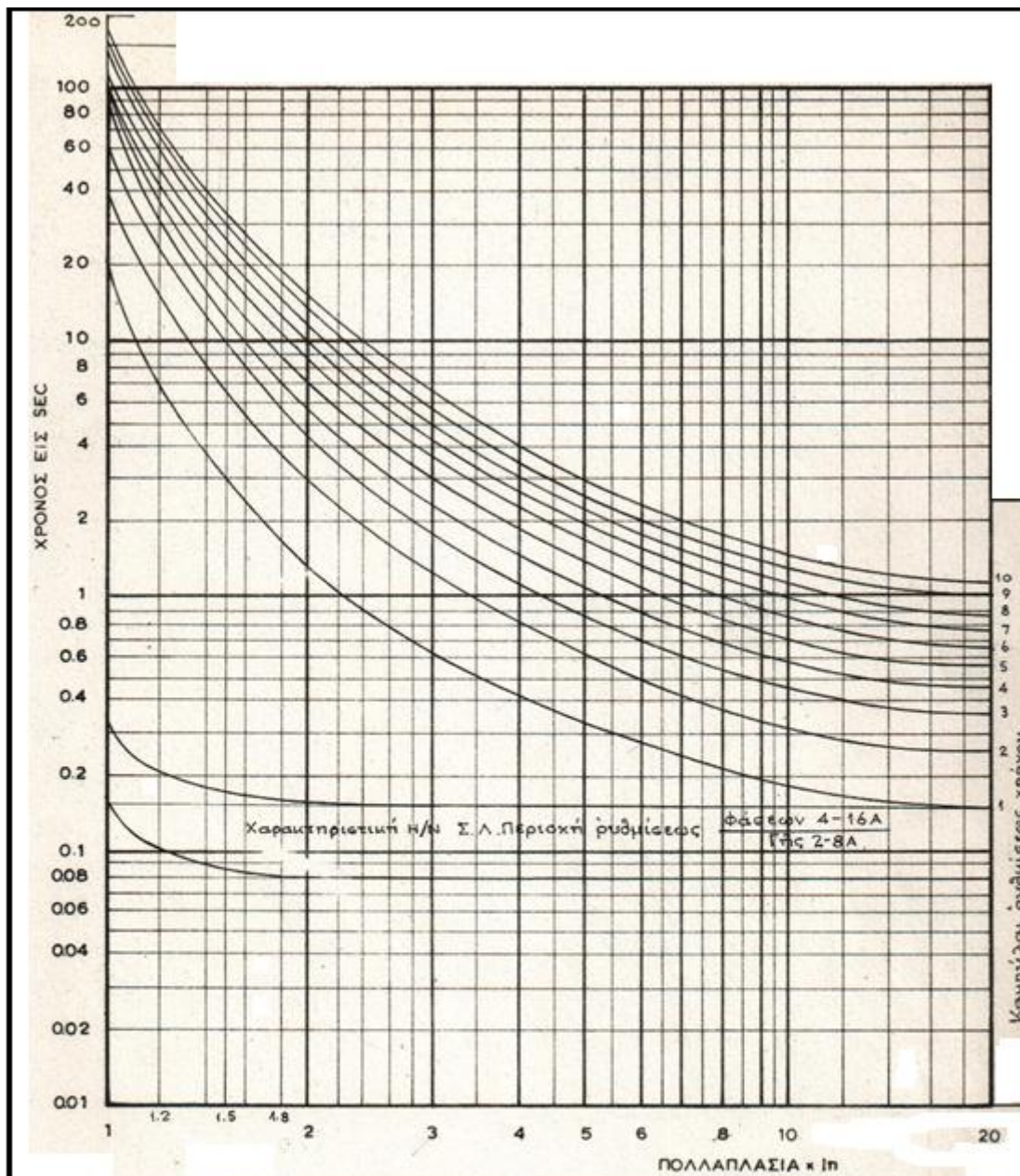
Τέλος, παρουσιάστηκαν και οι προϋποθέσεις της παράλληλης λειτουργίας των μονάδων των ανεξάρτητων παραγωγών με το ΕΔΔΗΕ, βάση της Οδηγίας Διανομής Νο129 του ΔΕΔΔΗΕ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΕΩΣ

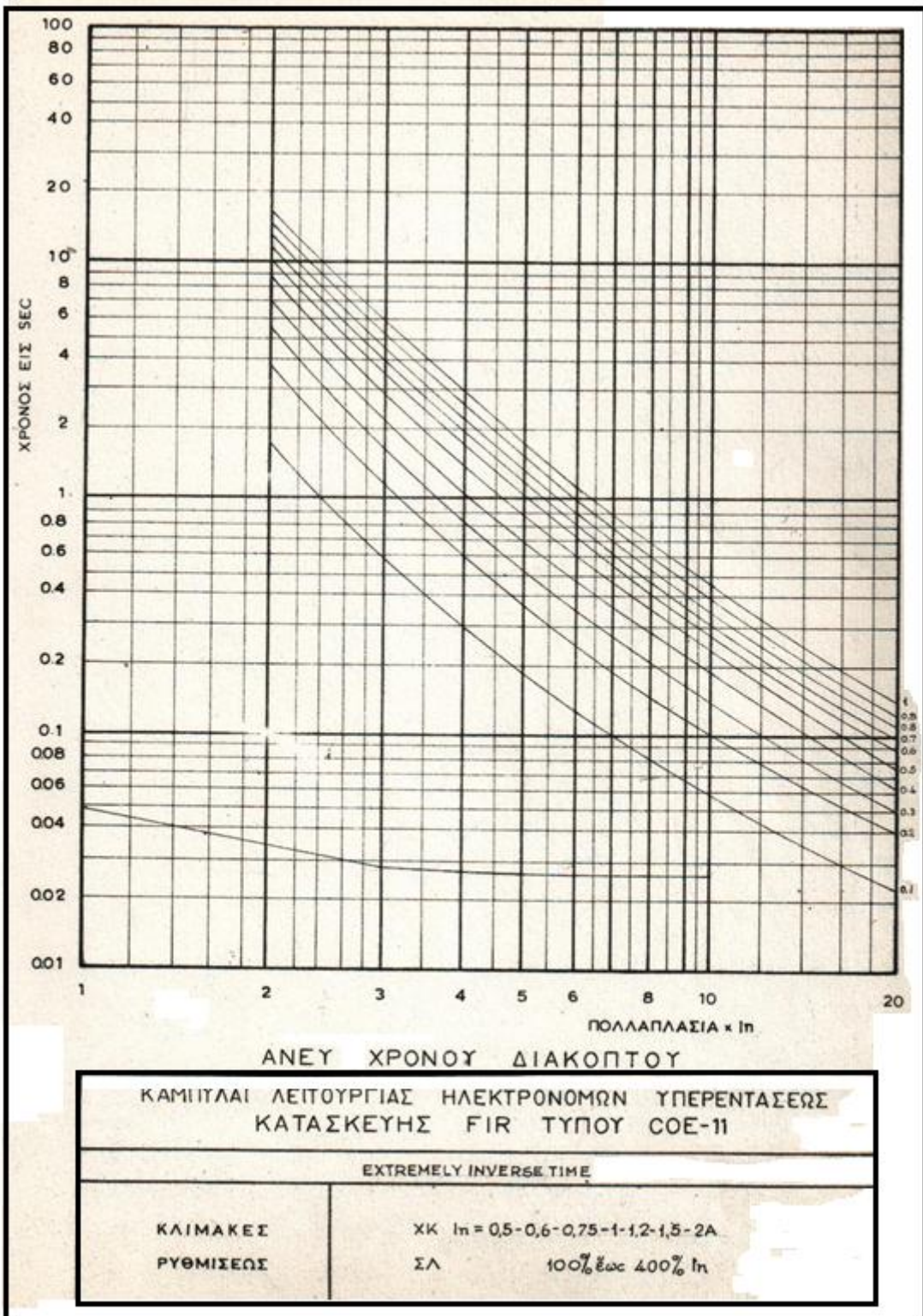


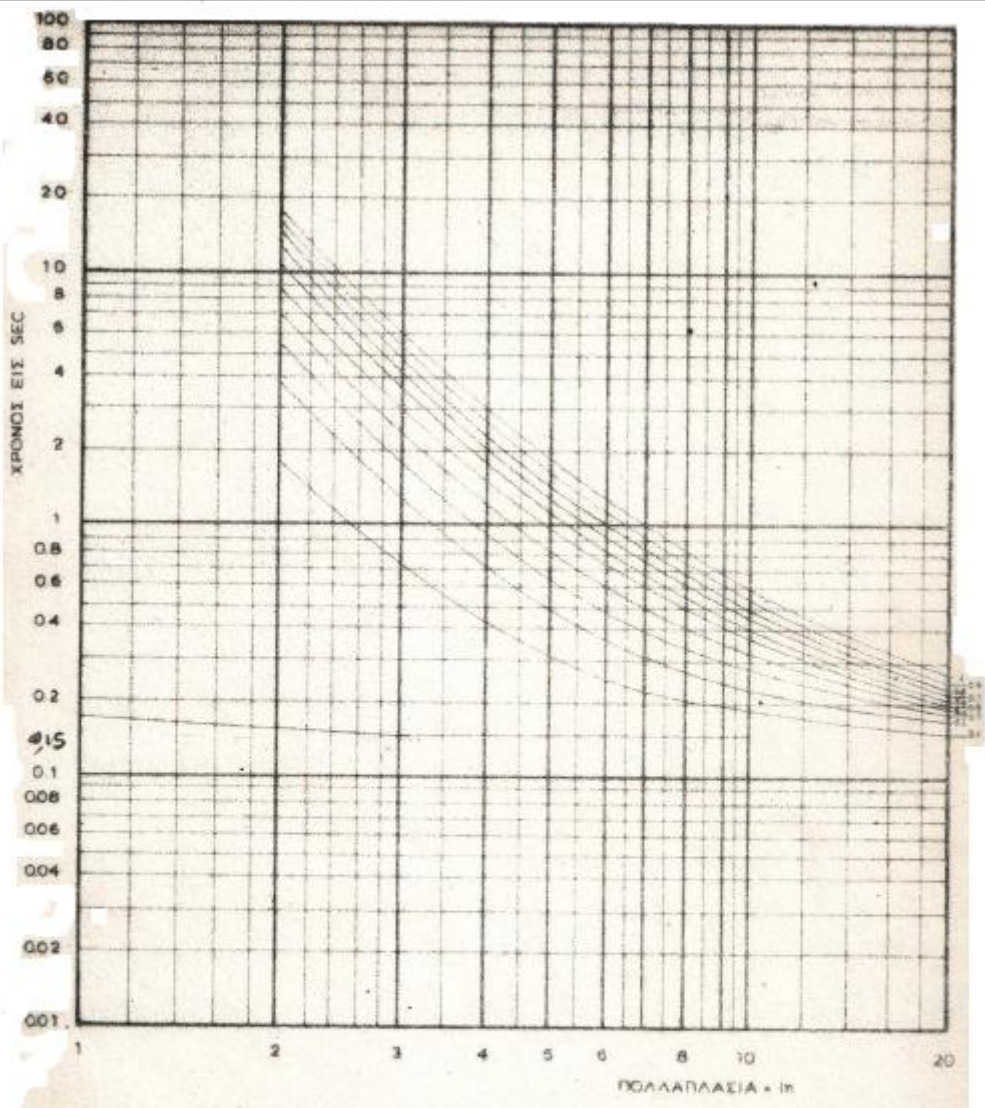


ΚΑΜΠΥΛΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΕΩΣ		
Κατασκευής CGE τύπου 1ACE4-14		
Inverse Time		
ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ όριαρης έντασης In	φάσεων	4 - 5 - 6 - 8 - 10 - 12 - 15A
	Γπς	0,5 - 0,6 - 0,8 - 1,0 - 1,5 - 2 - 2,5A



ΚΑΜΠΥΛΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΕΩΣ Κατασκευής CSE τύπου IACE 21-23-24		
Very Inverse Time		
ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ όριακής έντασης In	Φάσεων (21)	4 - 5 - 6 - 8 - 10 - 12 - 16A
	Γης (23)	0,5 - 0,6 - 0,8 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5A





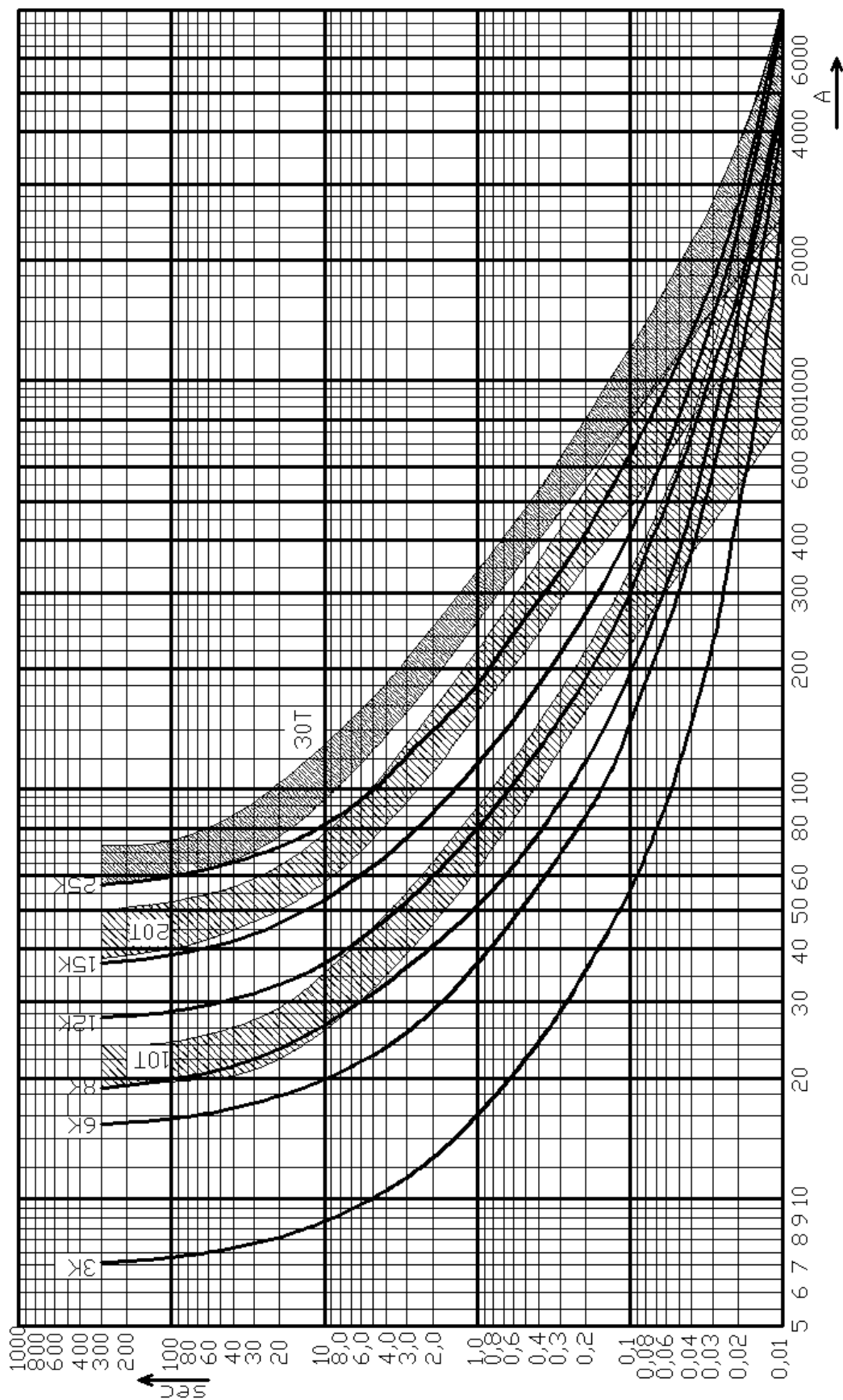
ΜΕΤΑ ΧΡΟΝΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΟΥ

ΚΑΜΠΥΛΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΩΝ ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΕΩΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ FIR ΤΥΠΟΥ COE-11

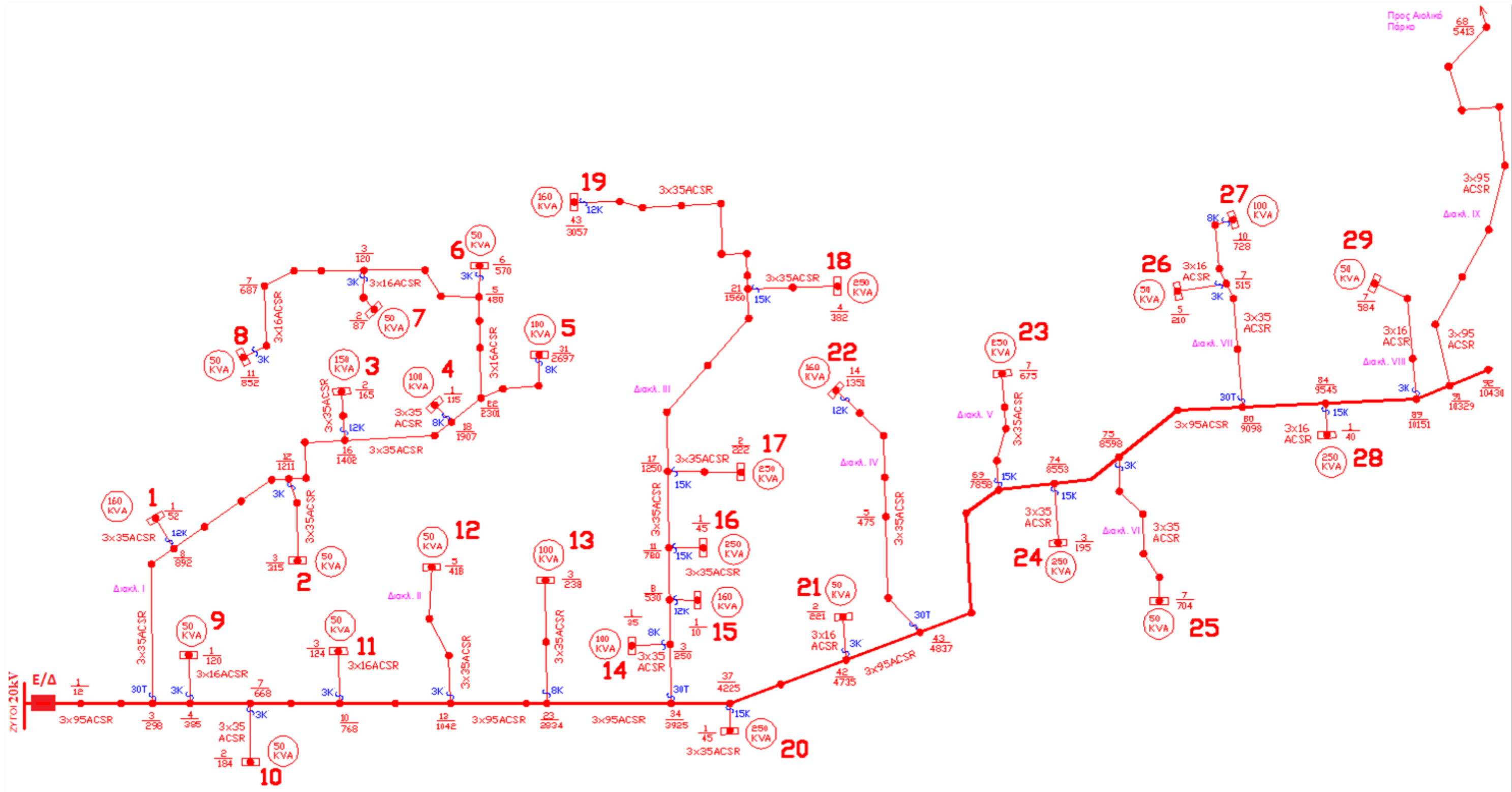
EXTREMELY INVERSE TIME

ΚΛΙΜΑΚΕΣ	ΧΚ $I_n = 0.5 - 0.6 - 0.75 - 1 - 1.2 - 1.5 - 2A$
ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ	ΣΑ 100% έως 400% I_n

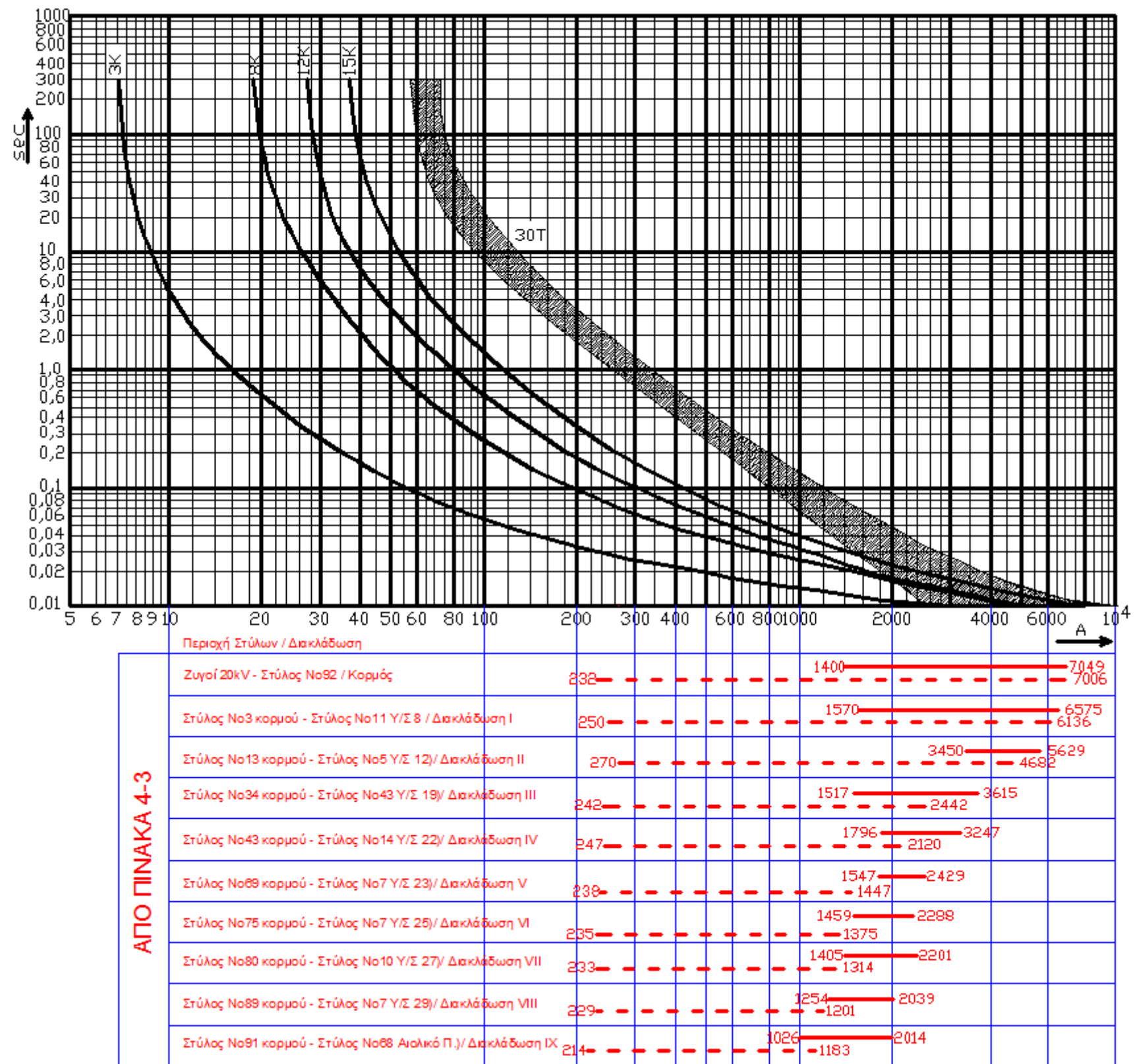
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΧΡΟΝΟΥ-ΕΝΤΑΣΕΩΣ
 ΑΣΦΑΛΕΙΩΝ ΒΡΑΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑΧΕΙΑΣ ΤΗΞΗΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ
 ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΤ**



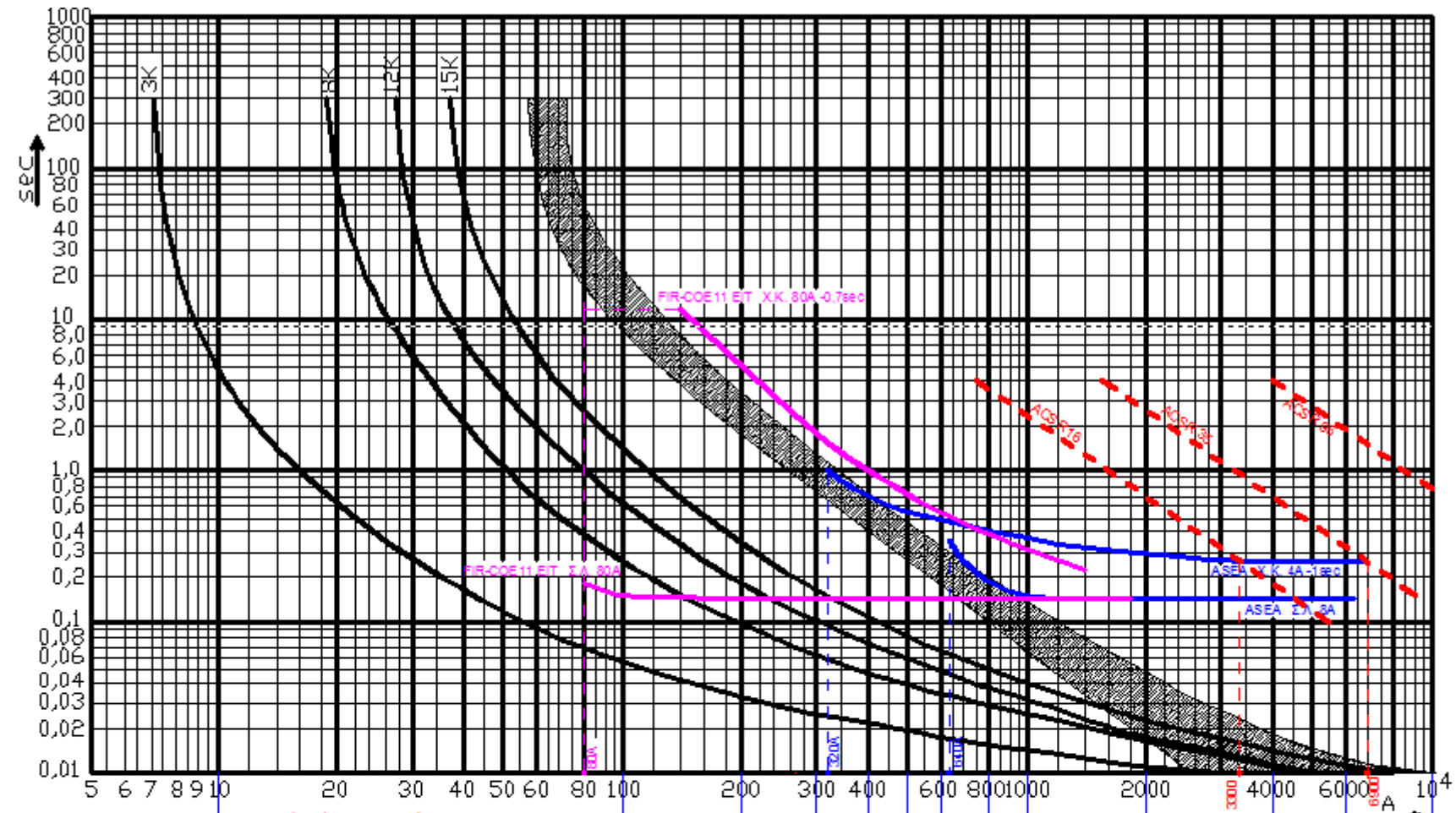
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ – ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ



Σχήμα Γ-1. Λειτουργικό διάγραμμα του υπό μελέτη εναέριου δικτύου ΜΤ με τη θέση, το είδος και την ονομαστική τιμή των ασφαλειών ΜΤ προστασίας μ/σ και διακλαδώσεων (1^η έκδοση)



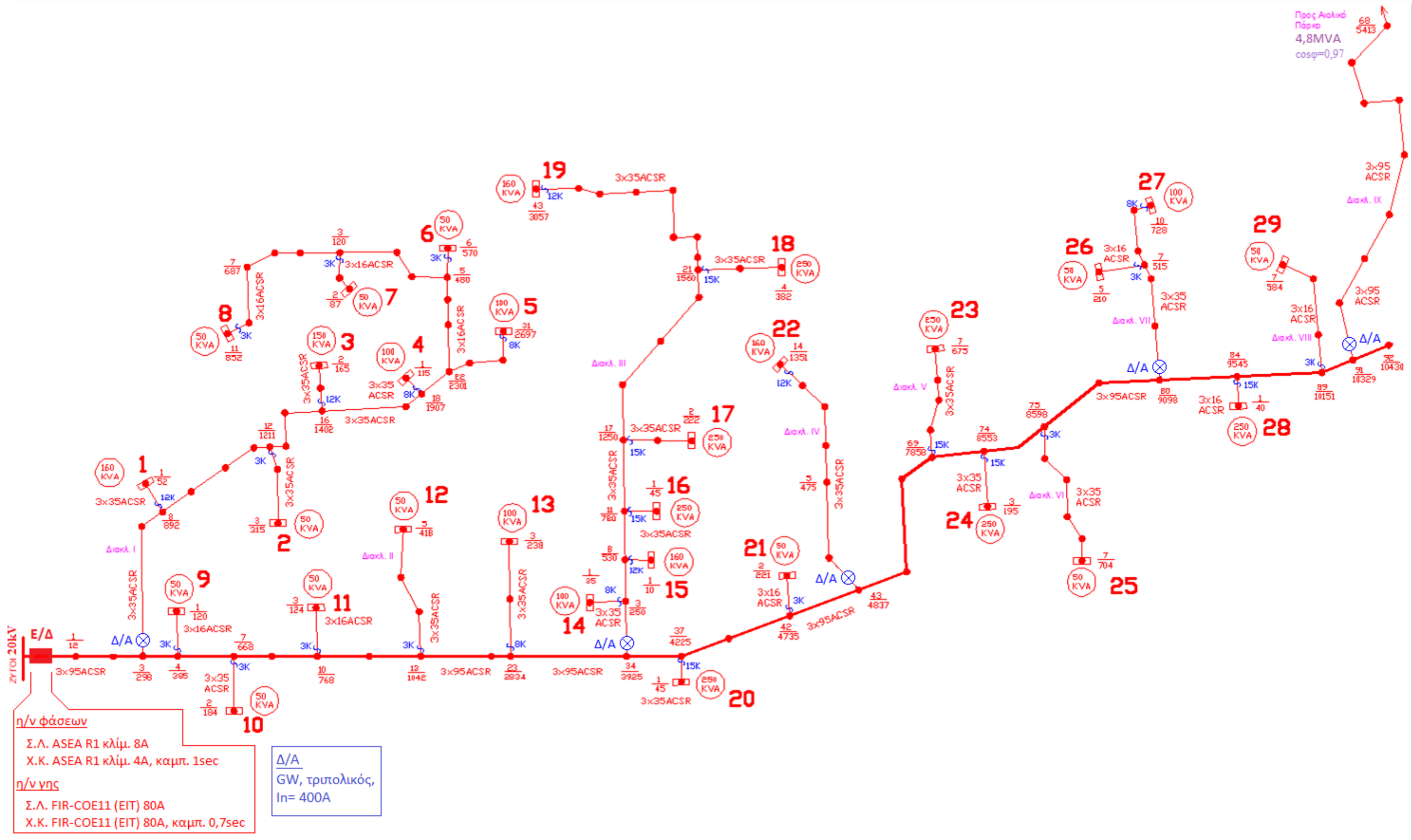
Σχήμα Γ-2. Διάγραμμα αλληλουχίας ασφαλειών MT με τις περιοχές εντάσεων βραχυκυκλώσεως στα κρίσιμα τμήματα του υπό μελέτη δικτύου διανομής



ΑΠΟ ΠΙΝΑΚΑ 4-3

Περιοχή Στύλων / Διακλάδωση	Απόσταση (m)	Ρεύμα (A)	Χρόνος (SEC)
Ζυγοί 20kV - Στύλος Νο92 / Κορμός	232	1400	7049 / 7006
Στύλος Νο3 κορμού - Στύλος Νο11 Υ/Σ 8 / Διακλάδωση I	250	1570	6575 / 6136
Στύλος Νο13 κορμού - Στύλος Νο5 Υ/Σ 12/ Διακλάδωση II	270	3450	5629 / 4682
Στύλος Νο34 κορμού - Στύλος Νο43 Υ/Σ 19/ Διακλάδωση III	242	1517	2442 / 3615
Στύλος Νο43 κορμού - Στύλος Νο14 Υ/Σ 22/ Διακλάδωση IV	247	1796	2120 / 3247
Στύλος Νο69 κορμού - Στύλος Νο7 Υ/Σ 23/ Διακλάδωση V	238	1547	1447 / 2429
Στύλος Νο75 κορμού - Στύλος Νο7 Υ/Σ 25/ Διακλάδωση VI	235	1459	1375 / 2288
Στύλος Νο80 κορμού - Στύλος Νο10 Υ/Σ 27/ Διακλάδωση VII	233	1405	1314 / 2201
Στύλος Νο89 κορμού - Στύλος Νο7 Υ/Σ 29/ Διακλάδωση VIII	229	1254	1201 / 2039
Στύλος Νο91 κορμού - Στύλος Νο68 Αισθητικό Π./ Διακλάδωση IX	214	1026	1183 / 2014

Σχήμα Γ-3. Ρύθμιση ηλεκτρονόμων και θερμική προστασία αγωγών



Σχήμα Γ-4. Τελική έκδοση λειτουργικού διαγράμματος του υπό μελέτη εναέριου δικτύου MT

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλου - Νικολάου Α. Βοβού, Πάτρα 2005
- [2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2006
- [3] <http://www.admie.gr/>
- [4] <http://www.deddie.gr/>
- [5] "Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια ΣΗΕ", Νικολάου Α. Βοβού
- [6] ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Βοβός Νικόλαος
- [7] Οδηγία διανομής Νο21: Προστασία εναέριων δικτύων ΜΤ έναντι βραχυκυκλώματος
- [8] Μελέτη ηλεκτρικών δικτύων διανομής, Κ. Λαμπρόπουλος, 2002
- [9] Ειδικά Κεφάλαια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Δ. Κ. Τσανάκα, 2006
- [10] Οδηγία διανομής Νο26: Επιτρεπόμενες φορτίσεις αγωγών – αντοχή σε βραχυκύκλωμα
- [11] Προστασία καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας έναντι τάσεων επαφής. Π.Θ. Παπανικολάου, ΔΕΗ 1972
- [12] Εγχειρίδιο λειτουργίας και προστασίας δικτύων διανομής, ΔΕΗ 1987
- [13] IEC 287/1982 "Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor)"
- [14] IEC 724/1984 "Guide to the short-circuit temperature limits of electric cables with rated voltage not exceeding 0,6/1,0kV"
- [15] Μ. Π. Παπαδόπουλος, "Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας". ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [16] IEEE C37.95-1989 "IEEE Guide for Protective Relaying of Utility-Consumer Interconnections"
- [17] A.T. Starr, M.A., Ph.D., C. Eng., F.I.E.E. "Generation, Transmission and utilization of electrical power". Pitman Publishing, 1957
- [18] Εγχειρίδιο Υλικών Διανομής. ΔΕΗ, ΔΕΔ – ΤΤΕ. Αρ. Φύλλου: Β3 (1978) & Β6 (1984)
- [19] Οδηγία διανομής Νο129: Σύνδεση ανεξάρτητων παραγωγών με τα δίκτυα διανομής
- [20] ΤΣΙΑΗ, Μ. (2001). Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας δικτύων που περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες. Διπλωματική Εργασία. ΕΜΠ. Τμήμα ΗΜ&ΜΥ. Αθήνα