



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

ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριστείδης Κ. Καζακόπουλος

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριστείδης Κ. Καζακόπουλος

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13-7-2015

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεωργιλάκης Παύλος
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....

Αριστείδης Κ. Καζακόπουλος

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

Copyright © Αριστείδης Κ. Καζακόπουλος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια σημειώνεται ιδιαίτερα αυξημένο ενδιαφέρον σε ερευνητικό επίπεδο για τη μελέτη των DC μικροδικτύων, με στόχο την υλοποίηση οικονομικά βιώσιμων και συγχρόνως αξιόπιστων εφαρμογών. Η παρούσα διπλωματική εργασία καταπιάνεται με ζητήματα που αφορούν τα σφάλματα και την προστασία DC μικροδικτύων και DC δικτύων στη χαμηλή τάση εν γένει. Ειδικότερα:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στα μικροδίκτυα και παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των DC μικροδικτύων σε σύγκριση με τα AC.

Στο Κεφάλαιο 2 θίγονται ζητήματα που σχετίζονται με την προστασία των DC μικροδικτύων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το πρώτο μέρος του προτύπου IEC 61660, το οποίο αφορά τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε βοηθητικές εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος σε εργοστάσια παραγωγής ισχύος και υποσταθμούς.

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζεται μέσω μιας προσομοίωσης στο λογισμικό Simulink το κατά πόσο οι εξισώσεις που δίνει το πρότυπο IEC 61660 μπορούν να εφαρμοστούν με ικανοποιητική ακρίβεια για να υπολογιστούν ρεύματα βραχυκύκλωσης σε DC δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια μέθοδος προσδιορισμού της τοποθεσίας του σφάλματος σε DC μικροδίκτυα και στη συνέχεια ελέγχεται η αποτελεσματικότητά της με χρήση του λογισμικού Simulink.

Λέξεις κλειδιά: DC μικροδίκτυο, σφάλματα, προστασία, ρεύμα βραχυκύκλωσης, IEC 61660, τοποθεσία σφάλματος

ABSTRACT

In recent years, there has been a growing interest in research concerning DC microgrids, as a response to the expectance of application in reliable and economically viable implementations. This thesis revolves around faults and protection issues related to DC microgrids and low voltage DC networks in general.

Chapter 1 is an introduction to microgrids, presenting some of the main advantages of DC microgrids compared to AC.

In Chapter 2, issues concerning DC microgrid protection are being discussed.

Chapter 3 is a detailed presentation of the first part of IEC 61660, a standard about short-circuit currents in DC auxiliary installations in power plants and substations.

In Chapter 4, a simulation using Simulink is being made, in order to test the effectiveness of using IEC 61660 for calculating short-circuit currents in low voltage DC distribution networks.

In chapter 5, a fault location method in DC microgrids is being presented and its effectiveness is being tested using Simulink.

Key words: DC microgrid, faults, protection, short-circuit current, IEC 61660, fault location

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της εργασίας ήταν ο Καθηγητής Νικόλαος Χατζηαργυρίου, τον οποίο και ευχαριστώ για την ανάθεση.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Βασίλη Κλεφτάκη, υποψήφιο διδάκτορα και μέλος του ερευνητικού προσωπικού του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, ο οποίος με καθοδήγησε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας και με διευκόλυνε με άμεση ανταπόκριση οποτεδήποτε τον χρειάστηκα, επιδεικνύοντας συγχρόνως ιδιαίτερη κατανόηση και υπομονή.

Τέλος, θα ήθελα με αυτήν την ευκαιρία να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για τη στήριξή τους σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Μικροδίκτυα.....	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Χρησιμότητα και Πλεονεκτήματα Μικροδικτύων.....	11
1.3 Περιγραφή των Μικροδικτύων.....	13
1.4 Τα DC Μικροδίκτυα.....	15
1.5 Πλεονεκτήματα των DC Μικροδικτύων σε Σχέση με τα AC.....	18
Κεφάλαιο 2: Ζητήματα Προστασίας DC Μικροδικτύων.....	22
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Συστήματα Προστασίας.....	24
2.2.1 Γείωση.....	25
2.2.2 Υλικό Προστασίας.....	27
2.2.3 Προστατευτικά Ρελέ και Εξοπλισμός Μετρήσεων.....	31
2.3 Απαιτήσεις Σχεδιασμού του Συστήματος Προστασίας.....	31
2.4 Τα Σφάλματα στα DC Μικροδίκτυα.....	33
2.5 Χαρακτηριστικά Ρευμάτων Σφάλματος στα DC Συστήματα.....	35
Κεφάλαιο 3: Το Πρότυπο IEC 61660.....	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 Γενικά.....	41
3.3 Μέθοδοι Υπολογισμού.....	44
3.4 Ωμική Αντίσταση και Αυτεπαγωγή τω Αγωγών.....	46
3.4.1 Ανά Μονάδα Ωμική Αντίσταση.....	46
3.4.2 Ανά Μονάδα Αυτεπαγωγή.....	47
3.5 Ο Ανορθωτής.....	48
3.6 Η Μπαταρία.....	53

3.7 Ο Πυκνωτής.....	56
3.8 Ο DC Κινητήρας με Ανεξάρτητη Διέγερση.....	61
3.9 Υπολογισμούς του Συνολικού Ρεύματος Βραχυκύκλωσης.....	68
3.9.1 Συντελεστής Διόρθωσης.....	68
3.9.2 Υπέρθυση των Επιμέρους Ρευμάτων στην Τοποθεσία του Σφάλματος.....	69

Κεφάλαιο 4: Η Αποτελεσματικότητα της Χρήσης του Προτύπου IEC 61660 σε DC Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης.....72

4.1 Εισαγωγή.....	72
4.2 Το Δοκιμαστικό Δίκτυο.....	73
4.3 Υλοποίηση της Χρονικής Συνάρτησης Ρεύματος.....	74
4.4 Υλοποίηση του Ηλεκτρικού Κυκλώματος Προσομοίωσης.....	77
4.5 Αποτελέσματα για το Ρεύμα Συμπεριλαμβανομένου και του Ανορθωτή.....	79

Κεφάλαιο 5: Μέθοδος Προσδιορισμού Τοποθεσίας Σφάλματος σε DC Μικροδίκτυο.....80

5.1 Εισαγωγή.....	80
5.2 Η Τοπολογία του Δικτύου.....	81
5.3 Η Χρονική Εξίσωση του Ρεύματος.....	84
5.4 Προσδιορισμός της Τοποθεσίας του Σφάλματος.....	87
5.5 Προσδιορισμός των Σφαλμάτων στο Simulink.....	88
5.5.1 Σφάλμα στο 10% του Μήκους της Γραμμής.....	90
5.5.2 Σφάλμα στο 50% του Μήκους της Γραμμής.....	91
5.5.3 Σφάλμα στο 90% του Μήκους της Γραμμής.....	93
5.5.4 Συμπεράσματα.....	94

Συμπεράσματα / Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....95

Αναφορές.....96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

1.1 Εισαγωγή

Ως μικροδίκτυο (microgrid) ορίζεται ένα υποσύστημα του κυρίως δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο διανομής και περιλαμβάνει μικρές μονάδες παραγωγής, στοιχεία αποθήκευσης της ενέργειας και φορτία [1]. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο, είτε αυτόνομα, όπως τα συστήματα ισχύος των νησιωτικών μονάδων.

Στην περίπτωση διασύνδεσης του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο (παραλληλισμένη λειτουργία) είναι δυνατή η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ τους με τρεις τρόπους:

- α) Μεταφορά ενέργειας από το μικροδίκτυο στο κυρίως δίκτυο, σε περίπτωση που το πρώτο παράγει πλεονάζουσα ενέργεια
- β) Μεταφορά ενέργειας από το κυρίως δίκτυο στο μικροδίκτυο, σε περίπτωση που οι μονάδες του δεύτερου αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση
- γ) Καμία μεταφορά ενέργειας και αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου με τροφοδότηση από τις δικές του μονάδες, όταν το κεντρικό δίκτυο καταρρέει

Παράλληλα, με κατάλληλη επικοινωνία μεταξύ των κέντρων ελέγχου των δύο δικτύων, το μικροδίκτυο δύναται να λειτουργήσει και υποστηρικτικά ως προς το κυρίως δίκτυο, ρυθμίζοντας κατάλληλα την ενεργό και την άεργο ισχύ που παρέχει ή απορροφά, ανάλογα με τις τρέχουσες ανάγκες.

Με βάση το μέγεθος των μονάδων παραγωγής και των φορτίων, το μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο είτε στη χαμηλή είτε στη μέση τάση, υπό την προϋπόθεση ότι η ποιότητα και τα επίπεδα της τάσης και της παρεχόμενης ενέργειας είναι συμβατά και δεν δημιουργούνται προβλήματα στο μικροδίκτυο. Συνηθέστερη πάντως είναι η σύνδεσή του στη χαμηλή τάση, δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων του.

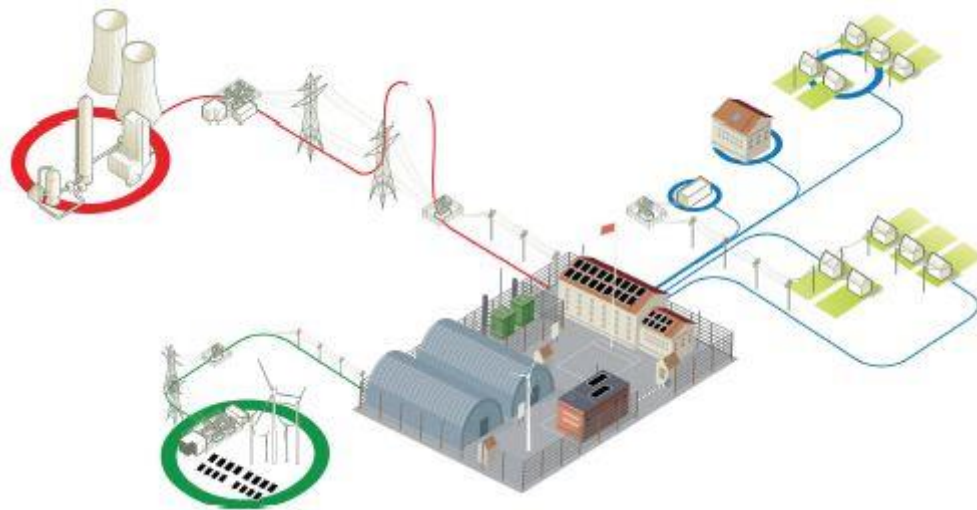
Η διασύνδεση ενός μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο έχει βέβαια συγκεκριμένες επιδράσεις, οι οποίες αφορούν τα επίπεδα τάσης και τη στάθμη βραχυκύκλωσης των δικτύων, την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος, την ευστάθεια του συστήματος, την αύξηση των παραγόμενων αρμονικών, αλλά και την τροποποίηση των μηχανισμών προστασίας του δικτύου [1].

1.2 Χρησιμότητα και Πλεονεκτήματα των Μικροδικτύων

Η τεχνολογική πρόοδος και η βιομηχανική ανάπτυξη στο σύγχρονο, παγκοσμιοποιημένο περιβάλλον των τελευταίων δεκαετιών έχει οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση των ενεργειακών αναγκών ενός σημαντικού μέρους του πληθυσμού, την ίδια στιγμή που ένα άλλο μέρος του πληθυσμού στερείται την πρόσβαση στο ίδιο το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Καθίσταται έτσι αναγκαία η επέκταση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής.

Με την ένταξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ενέργειας δημιουργήθηκε η έννοια των μικροδικτύων, ως απόρροια της αύξησης αυτής στη ζήτηση της ενέργειας και της αδυναμίας των υπαρχόντων δικτύων να ανταπεξέλθουν αξιόπιστα σε αυτές τις απαιτήσεις. Τα μικροδίκτυα βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή ενέργειας, γεγονός που τα τοποθετεί στο επίκεντρο των εξελίξεων τόσο της ερευνητικής, όσο και της εμπορικής δραστηριότητας.

Πρακτικά, τα μικροδίκτυα αποτελούν μικρογραφίες του δημόσιου δικτύου και συνδράμουν την κατανομημένη παραγωγή, δίνοντας σε απομονωμένους καταναλωτές την πρόσβαση σε αδιάλειπτη, τοπική ηλεκτρική παροχή.



Εικόνα 1.1 Παράδειγμα μικροδικτύου

Τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων συνοψίζονται στα ακόλουθα [1], [2]:

- α) Τοπική παραγωγή ισχύος και θερμότητας μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης της ενέργειας
- β) Ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας
- γ) Ενισχυμένη αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα του συστήματος ενέργειας
- δ) Δραστική μείωση των απωλειών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η παραγωγή γίνεται τοπικά
- ε) Δυνατότητα ελέγχου τάσης και ισχύος του δικτύου

στ) Αποτροπή της κατάρρευσης σε περιόδους αιχμής φορτίου, μέσω της μείωσης του φορτίου του δικτύου

ζ) Οικονομικά οφέλη για τους χρήστες

η) Αξιοποίηση φιλικών προς το περιβάλλον πηγών ενέργειας (ΑΠΕ)

θ) Σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂

ι) Αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τη χρήση μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων για εγκαταστάσεις

1.3 Περιγραφή των Μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα απαρτίζονται από μονάδες παραγωγής και ελεγχόμενα φορτία συνδεδεμένα στην πλευρά της χαμηλής ή της μέσης τάσης και ουσιαστικά αποτελούν μικρογραφίες των ευρύτερων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ως ιδέα, τα μικροδίκτυα βασίζονται στην ύπαρξη ενός συνόλου ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων τοποθετημένων μαζί με πηγές ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας μικρής κλίμακας. Οι πηγές ισχύος ποικίλλουν, συμπεριλαμβάνοντας ανανεώσιμες πηγές (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κ.ά.), αλλά και γεννήτριες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, για την αντιμετώπιση της τοπικής ζήτησης σε θερμότητα και ηλεκτρισμό. Το μικροδίκτυο είναι υπεύθυνο για την εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών του, διασφαλίζοντας ότι η ποιότητα της παροχής ανταποκρίνεται σε αυτές τις ανάγκες και πιθανώς ελέγχοντας μερικά από τα μη κρίσιμα (non critical) φορτία. Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο η διασύνδεση με τον τοπικό πάροχο ηλεκτρισμού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το μικροδίκτυο να μοιάζει με ένα καλά συμπεριφερόμενο φορτίο ή γεννήτρια.

Σε ό,τι αφορά τις γεννήτριες, υπάρχουν διάφορα είδη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τυπικές πηγές ενέργειας ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, κυψέλες καυσίμου, γεωθερμικοί και ηλιοθερμικοί σταθμοί, μικρά υδροηλεκτρικά και μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα ή βιοντίζελ. Οι γεννήτριες φωτοβολταϊκών αποτελούν πολύ καλή επιλογή εάν το περιβάλλον είναι αστικό, καθώς ενσωματώνονται σε κτήρια

με πολύ διακριτικό τρόπο. Οι εφαρμογές συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας μπορούν να βασίζονται σε λέβητες αερίων για κεντρική θέρμανση και οικιακό ζεστό νερό. Πιθανές τεχνολογίες που το επιτυγχάνουν αυτό είναι οι κυψέλες καυσίμου. Σε περίπτωση που το μικροδίκτυο συμπεριλαμβάνει εμπορικούς ή βιομηχανικούς χώρους, τότε η λειτουργία του θα μπορούσε να βασιστεί σε τουρμπίνες αερίου.

Οι μικροπηγές στην πλειοψηφία τους συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω μετατροπέων (converters), οι οποίοι τα τελευταία χρόνια εξελίσσονται σημαντικά, χάρη στην έντονη ερευνητική δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα τόσο στην Ευρώπη, όσο και στην Αμερική. Έτσι, οι σύγχρονοι αντιστροφείς (inverters) παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου πολλαπλών λειτουργιών (όπως η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος) και επομένως ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας του δικτύου σε απομονωμένη λειτουργία. Αντίθετα, τα μεγάλα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται αποκλειστικά σε στρεφόμενες μάζες, οι οποίες θεωρούνται απαραίτητες για την ευστάθεια του δικτύου.

Πέραν των γεννητριών και των φορτίων, στα μικροδίκτυα απαιτείται και αποθήκευση ενέργειας. Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση της ισχύος είναι απαραίτητη έτσι ώστε να ικανοποιεί τις ραγδαίες διακυμάνσεις του φορτίου ή της παραγωγής που αναμένονται σε ένα σχετικά μικρό δίκτυο, αλλά και να καλύπτει ικανοποιητικά την αυτόνομη λειτουργία. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με τη μορφή παροχής ζεστού νερού σε σπίτια ή για τη θέρμανση χώρων.

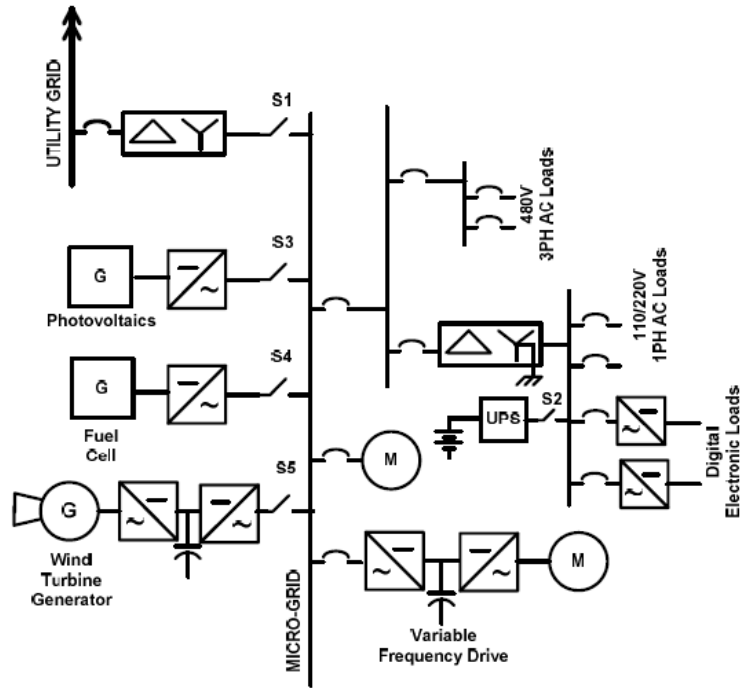
Γενικά, ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μία από τις παραπάνω φυσικές ενέργειας, καλύπτοντας τις καταναλώσεις της περιοχής όπου εγκαθίσταται. Η κλίμακα του μικροδικτύου ποικίλει: από μία οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων ή ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού, μέχρι και μια πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ και αιολικά πάρκα.

1.4 Τα DC Μικροδίκτυα

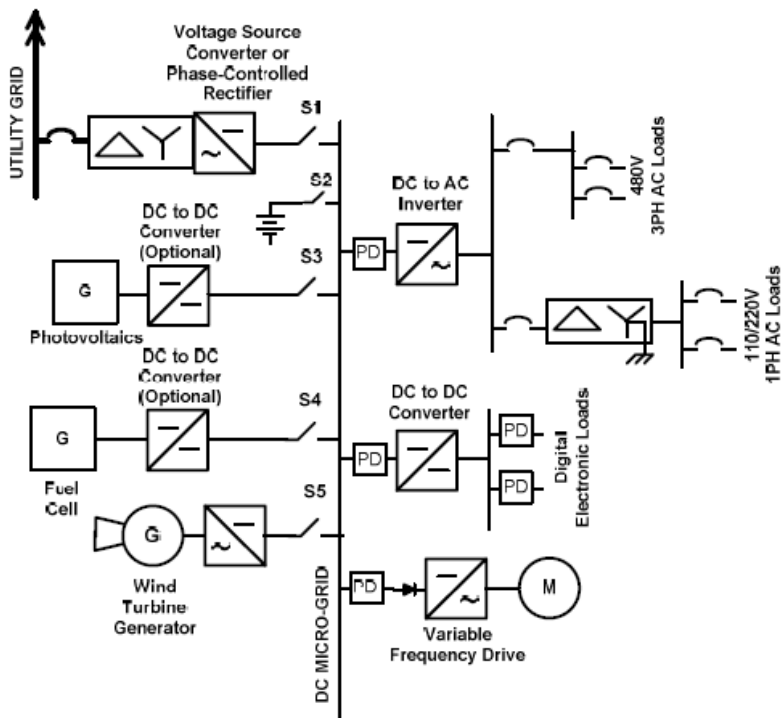
Οι ανά τον κόσμο εγκαταστάσεις μικροδικτύων πολλαπλασιάζονται διαρκώς, ως μία βιώσιμη λύση σε προβλήματα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης και η εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων, καθώς προωθούν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών και συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής. Πρακτικά, οι εφαρμογές μικροδικτύων αυτή τη στιγμή αφορούν συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Ωστόσο, τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος (DC) παρέχουν τη δυνατότητα διανομής ισχύος υψηλής ποιότητας με περισσότερο αποτελεσματικό τρόπο τόσο σε οικιστικές περιοχές (αστικές ή αγροτικές), όσο και σε εμπορικές εγκαταστάσεις.

Η ευρεία εφαρμογή των DC μικροδικτύων θα επιτρέψει μελλοντικά τη χρήση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα και σε πολλαπλά επίπεδα διανομής ισχύος, ενώ παράλληλα θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα με την οποία ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου και η αιολική ενέργεια θα μπορούν να παρέχουν αθροιστικά ισχύ σε μια ομάδα φορτίων. Η δυνατότητα σύνδεσης φορτίων και πηγών σε έναν κοινό DC ζυγό συνεπάγεται την αποφυγή περιττών σταδίων μετατροπής ενέργειας, με αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες θερμότητας και δυνητικά χαμηλότερο κόστος, σε σύγκριση με AC εφαρμογές διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Παρόλα αυτά, τα συστήματα AC εξακολουθούν να είναι προτιμητέα, λόγω της έλλειψης οικονομικά βιώσιμων μέσων προστασίας και τεχνολογιών στα DC μικροδίκτυα. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει και τη χρησιμότητα των ερευνών γύρω από το ζήτημα της προστασίας τέτοιων μικροδικτύων, οι οποίες τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν έντονη δραστηριότητα.

Στην εικόνα 1.3 παρακάτω, απεικονίζεται μια ενδεικτική δομή ενός DC μικροδικτύου, όπου όλες οι πηγές και τα φορτία είναι συνδεδεμένα σε έναν DC ζυγό ή ένα DC μικροδίκτυο [3]. Τα μέσα προστασίας του συστήματος αναπαρίστανται με τον ίδιο τρόπο όπως και στο AC μικροδίκτυο της εικόνας 1.2, με μοναδική εξαίρεση το γενικό block “PD” (Protective Devices), μιας και στο σημείο αυτό δεν υπάρχουν απλοί διακόπτες ισχύος, όπως στο AC δίκτυο.



Εικόνα 1.2 Δομή AC μικροδικτύου



Εικόνα 1.3 Δομή DC μικροδικτύου

Τα DC μικροδίκτυα μπορούν να θεωρηθούν μετεξέλιξη της ιδέας των multi-terminal DC (MTDC) συστημάτων που προτάθηκαν αρχικά ως διεσπαρμένοι υποσταθμοί για μεταφορά ισχύος υψηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος (HVDC) [8]. Το πρωταρχικό σκέλος της έρευνας ήταν απόρροια του έντονου ενδιαφέροντος που εκδηλώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 γύρω από την εκμετάλλευση της υπεραγωγιμότητας υψηλής θερμοκρασίας για την HVDC μεταφορά [9], αλλά και για τη λεγόμενη Super-conducting Magnetic Energy Storage (SMES) [10] στα δίκτυα χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος (LVDC).

Η γέννηση της ιδέας ότι τα LVDC μικροδίκτυα θα μπορούσαν να αποτελέσουν κοινό τόπο για κατοικίες, επιχειρήσεις, νοσοκομειακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, συνέπεσε με την τάση για στροφή στα DC τροφοδοτούμενα φορτία [11] στις αρχές της δεκαετίας του '90, αλλά και με την εμφάνιση της ανάγκης για ανεύρεση αποτελεσματικών μεθόδων παροχής επιπρόσθετης υποστήριξης των ευαίσθητων φορτίων με μπαταρίες. Τα τάση δε για εκτεταμένη χρήση κυψελών καυσίμου και φωτοβολταϊκών σε κτήρια και εγκαταστάσεις περί τα τέλη της ίδιας δεκαετίας, οδήγησε σε περεταίρω αύξηση της δημοτικότητας των DC μικροδικτύων.

Συστήματα διανομής συνεχούς ρεύματος πολλαπλών πηγών και φορτίων βρίσκουν επίσης εφαρμογή και σε εγκαταστάσεις πλοίων του ναυτικού, όπου εμφανίζονται ανάγκες για δομές παροχής ενέργειας με πλεονάζουσα τροφοδοσία, απαιτήσεις για μειωμένη επάνδρωση και αυτοματισμούς στα συστήματα ενέργειας, καθώς και ενδεχόμενη διευκόλυνση στην ενσωμάτωση με ηλεκτρική πρόωση [12]. Αεροσκάφη και συστήματα αυτοκίνησης επίσης στρέφονται προς παρόμοια συστήματα διανομής συνεχούς ρεύματος, προκειμένου να αντικαταστήσουν φορτία μηχανικά, υδραυλικά και συστήματα συμπιεσμένου αέρα με ανάλογα ηλεκτρικά, αλλά και να επιτύχουν μια βελτιωμένη απόδοση και μια αξιοσημείωτη οικονομία σε καύσιμη ύλη [13],[14].

Τα τέλη της δεκαετίας του '90 σηματοδότησαν μια αναζωπύρωση των ερευνών γύρω από τα MTDC συστήματα —όπου η ισχύς προέρχεται από περισσότερες από μία ανεξάρτητες πηγές και διανέμεται σε πληθώρα φορτίων από έναν DC ζυγό— συμπεριλαμβάνοντας εφαρμογές σε αστικές περιοχές μεγαλουπόλεων, πάρκα, ανεμογεννήτριες σε νησιωτικές περιοχές, βιομηχανικά συστήματα και συγκροτήματα γραφείων.

1.5 Πλεονεκτήματα των DC Μικροδικτύων σε Σχέση με τα AC

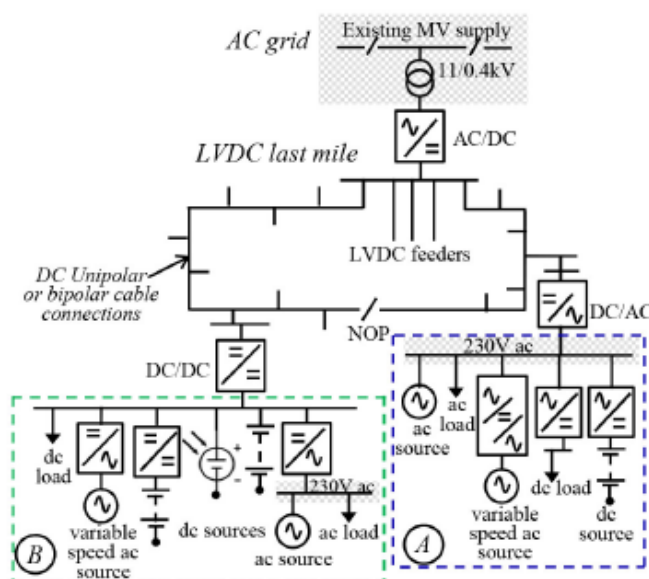
Στην παράγραφο 1.4 έγινε μια πρώτη νύξη σε κάποια από τα πλεονεκτήματα των DC μικροδικτύων. Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται μια αναλυτικότερη παρουσίαση των πλεονεκτημάτων των DC μικροδικτύων και των DC συστημάτων διανομής χαμηλής τάσης (LVDC networks) εν γένει, που στην περίπτωση μας είναι σχεδόν το ίδιο.

Προτού προχωρήσουμε στην αναλυτική καταγραφή, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το πρότυπο 2006/95/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης επιτρέπει τη χρήση υψηλότερων τάσεων στα DC συστήματα διανομής, σε σχέση με τα AC. Συγκεκριμένα, το όριο για τα DC δίκτυα είναι το 1,5kV, ενώ για τα AC το όριο είναι στο 1kV, γεγονός που επιτρέπει την παροχή μεγαλύτερης ισχύος [15]. Έρευνες έχουν δείξει ότι με την ίδια πτώση τάσης και τα ίδια καλώδια όπως σε ένα τριφασικό AC σύστημα, ένα LVDC δίκτυο του 1,5kV είναι σε θέση να μεταφέρει έως και 16 φορές περισσότερη ισχύ σε σχέση με ένα AC σύστημα των 0,4kV. Επίσης, στα DC συστήματα οι αυτεπαγωγές έχουν περιορισμένη επίδραση στις τάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και επομένως η άεργος συνιστώσα που εισάγει απώλειες είναι αμελητέα. Επιπλέον, το λεγόμενο skin effect που αυξάνει την αντίσταση των καλωδίων στα AC δίκτυα δεν επηρεάζει τα DC καλώδια. Αυτά είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά των DC δικτύων, από τα οποία απορρέουν τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια [5].

A. Βελτίωση της αποδοτικότητας και παροχή μεγαλύτερης ισχύος

Η χρήση των LVDC δικτύων με τις υψηλότερες τάσεις που αναφέρθηκαν μειώνει τις θερμικές απώλειες και τις πτώσεις τάσης στα καλώδια χαμηλής τάσης και επιτρέπει τη διανομή μεγαλύτερης ισχύος, με καλύτερη αποδοτικότητα. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει την πιθανότητα επέκτασης ενός υπάρχοντος συστήματος ώστε να τροφοδοτεί ένα μεγαλύτερο φορτίο, χωρίς να επιβληθούν μετατροπές στον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ ή να προστεθούν νέα καλώδια. Επίσης, το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των αγροτικών δικτύων, όπου απαιτούνται καλώδια μεγαλύτερου μήκους για την τροφοδοσία των φορτίων (feeders) και η αποδοτικότητα είναι ένα σοβαρό ζήτημα. Έρευνες σε δοκιμαστικά δίκτυα της Φινλανδίας έδειξαν ότι σε feeders μήκους μεγαλύτερου του ενός χιλιομέτρου, η διαφορά των DC δικτύων στην αποδοτικότητα είναι αξιοσημείωτη [16]. Τα LVDC δίκτυα έχουν επίσης τη δυναμική να παράσχουν μεγαλύτερη ισχύ σε αστικά δίκτυα, προκειμένου να ανταποκριθούν καλύτερα στη ζήτηση σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα φορτίων.

Παράλληλα, σε αστικό επίπεδο τα επίπεδα σφαλμάτων των converters είναι χαμηλότερα σε σχέση με τα AC δίκτυα.



Εικόνα 1.4 Συνδυασμένη χρήση AC και DC τοπολογιών

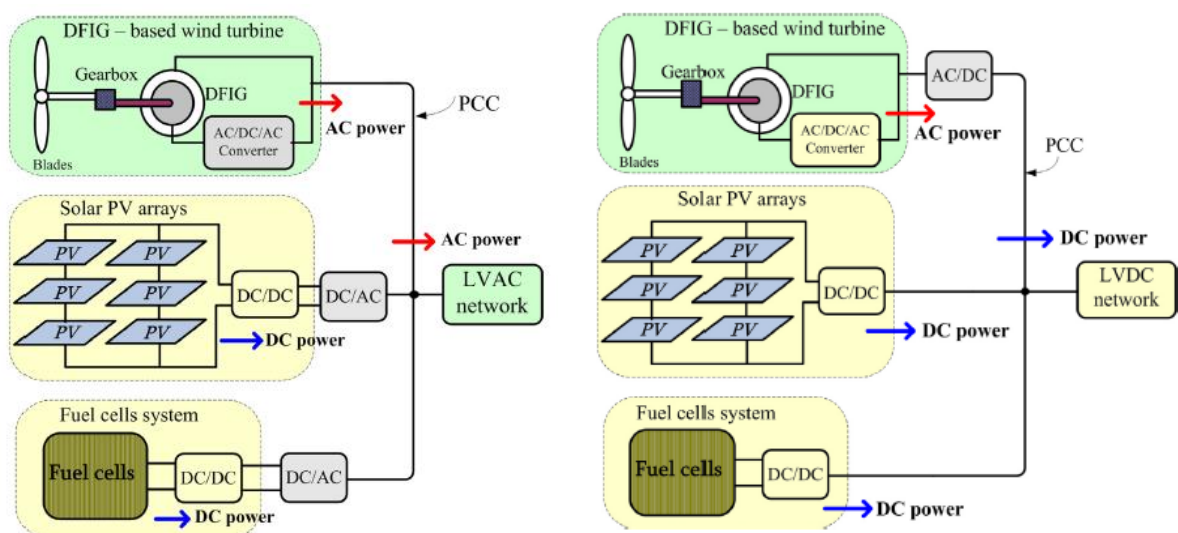
B. Διευκόλυνση της σύνδεσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και DC φορτίων

Το πιο προφανές πλεονέκτημα των DC μικροδικτύων σχετίζεται με την μείωση του συνολικού αριθμού των converters που απαιτούνται. Η πλειονότητα των αποκεντρωμένων διατάξεων παράγει ή καταναλώνει σε DC συνθήκες, ή απαιτεί την παρεμβολή ενός ενδιάμεσου DC σταδίου. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας, είτε με DC/DC converters στα LVDC δίκτυα, με αποτέλεσμα οι απώλειες ενέργειας, που στη μετατροπή από DC σε AC κυμαίνονται στο 7%-15%, να μειώνονται σημαντικά [17]. Η διασύνδεση πολλαπλών παραλληλισμένων πηγών καθίσταται επίσης ευκολότερη στα DC δίκτυα σε σχέση με τα AC, καθώς δεν απαιτείται συγχρονισμός συχνοτήτων. Ο παραλληλισμός των πηγών επιτρέπει μια ισχυρότερη και περισσότερο αποκεντρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση επίσης ροής ισχύος με χρήση επίσης τεχνικής voltage droop, καθώς επίσης και βελτιωμένη ικανότητα λειτουργίας σε χαμηλότερη τάση, σε περιπτώσεις αποσυνδέσεων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, ένα LVDC δίκτυο ενδείκνυται περισσότερο στην περίπτωση διασύνδεσης μεγάλου αριθμού DC φορτίων, αφού αποφεύγεται η χρήση προσαρμογέων από τα 230V AC σε DC και επομένως μειώνονται το κόστος και οι απώλειες [18]. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στους αντάπτορες του ηλεκτρονικού εξοπλισμού μπορούν να επιφέρουν υπολογίσιμες απώλειες στη λειτουργία αναμονής

(stand-by). Ενδεικτικό είναι ότι, σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency), η συνολική εσωτερική κατανάλωση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε stand-by λειτουργία στην Ευρώπη εκτιμάται ότι υπερβαίνει τις 36 TWh κάθε χρόνο [18].

Γ. Οικονομικά οφέλη

Τα τεχνικά οφέλη των LVDC εφαρμογών θα πρέπει να βρίσκονται σε σύμπνοια και με τα οικονομικά οφέλη, καθώς αυτά αποτελούν τον κρισιμότερο ίσως παράγοντα για την μελλοντική τους κυριαρχία. Ήδη αναφερθήκαμε στον περιορισμό του αριθμού των converters, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερο κόστος. Αναφερθήκαμε επίσης στις χαμηλότερες απώλειες και τις υψηλότερες τάσεις των LVDC, οι οποίες καθιστούν δυνατή τη χρήση μικρότερων καλωδίων έως και 20%, με τα ανάλογα οικονομικά οφέλη. Σε γενικές γραμμές βέβαια, ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονικών συσκευών μετατροπής είναι βραχύτερος σε σχέση με τους παραδοσιακούς μετασχηματιστές. Παρόλα αυτά, τα LVDC συστήματα έχουν ήδη αποδείξει τα οφέλη τους σε σχέση με άλλες υπάρχουσες εφαρμογές. Πρόσφατη έρευνα του EPRI (Electric Power Research Institute) έδειξε ότι η χρησιμοποίηση LVDC των 380V για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε data centers μικρού ή μεσαίου μεγέθους θα ενισχύσει την αποδοτικότητα έως και 15%, με 36% χαμηλότερο κόστος [19]. Επίσης, σύμφωνα με το ABB, το DC δίκτυο (1MW, 380V) που στήθηκε το 2012 για να τροφοδοτήσει ένα μεσαίου μεγέθους data center αποδείχθηκε 10% πιο οικονομικό σε σχέση με το AC [19].



Εικόνα 1.5 Αναπαράσταση της διασύνδεσης των μονάδων παραγωγής σε AC και DC δίκτυα χαμηλής τάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής, οι εφαρμογές των DC μικροδικτύων στην πλειοψηφία τους είτε βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης, είτε υλοποιούνται στο πλαίσιο ερευνών, με την κάθε εφαρμογή να χαρακτηρίζεται από τις δικές της προδιαγραφές –δίχως προτεινόμενες κατευθυντήριες γραμμές ή συγκεκριμένα βιομηχανικά πρότυπα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι από τη στιγμή που η ασφάλεια συνιστά επιτακτικής σημασίας προϋπόθεση σε κάθε ηλεκτρικό σύστημα, τα DC μικροδίκτυα δεν πρόκειται να γίνουν βιώσιμα σε μεγάλη κλίμακα μέχρι να αντιμετωπιστεί η έλλειψη αυτή σε κατευθυντήριες γραμμές και πρότυπα. Η ασφάλεια του ηλεκτρικού συστήματος μεταφράζεται αφενός σε κατάλληλες εφαρμογές γειώσεων και αφετέρου σε προστασία του εξοπλισμού από σφάλματα. Οι μεγαλύτεροι κίνδυνοι στα DC συστήματα είναι το ηλεκτρικό τόξο και τα ενδεχόμενο πυρκαγιάς και ηλεκτροπληξίας.

Η πρόκληση με την προστασία των DC μικροδικτύων όμως δεν αφορά μόνο την απουσία προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών, αλλά και τη σχετική έλλειψη πρακτικής εμπειρίας. Για τον λόγο αυτόν, είναι απαραίτητο να υπάρξει μια καλή κατανόηση της δουλειάς που έχει γίνει μέχρι στιγμής στον συγκεκριμένο χώρο, να διερευνηθεί ποιες από τις αρχές που διέπουν τα AC συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν στα DC, αλλά και να εντοπιστούν τα σημεία στα οποία η συμβατική προστασία των AC συστημάτων κρίνεται ανεπαρκής, ούτως ώστε να μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την εξέλιξη των μεθόδων προστασίας των DC μικροδικτύων.

Τα κριτήρια για τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος προστασίας είναι τα ακόλουθα [3], [20]:

α) **Αξιοπιστία** Πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος προστασίας στα σφάλματα και διασφάλιση ότι αυτό δεν θα ενεργοποιείται σε περιπτώσεις θορύβου και μεταβατικών φαινομένων

β) **Ταχύτητα** Το σφάλμα πρέπει να εξαλείφεται και η επαναφορά της τάσης στα κανονικά της επίπεδα πρέπει να γίνεται άμεσα

γ) **Επίδοση** Συνέχιση της αδιάλειπτης εξυπηρέτησης των φορτίων σε περίπτωση σφάλματος

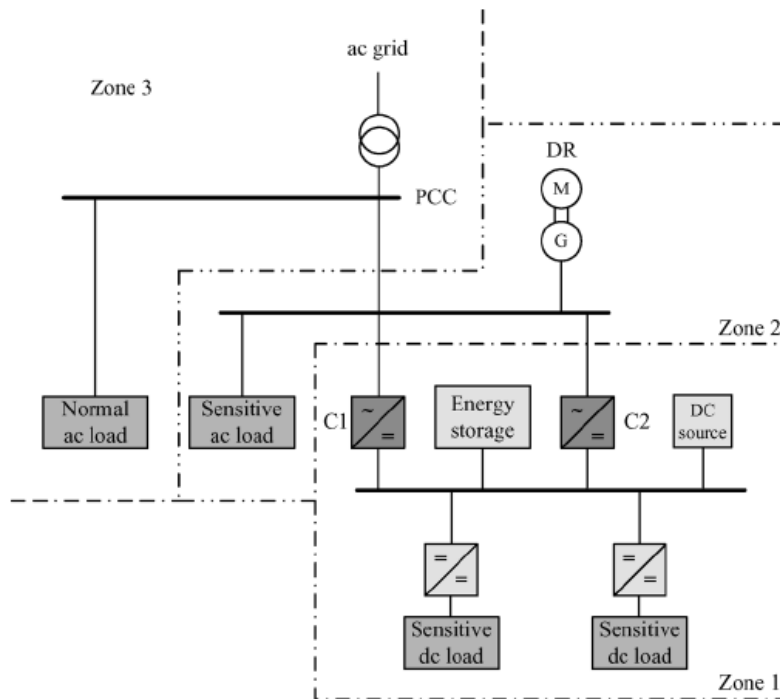
δ) **Οικονομία** Υψηλή επίδοση με όσο κατά το δυνατόν χαμηλότερα κόστη εγκατάστασης, αλλά και πάγια έξοδα

ε) **Απλότητα** Τμηματοποίηση δικτύου, ζώνες προστασίας και αποκεντρωμένα επίπεδα ελέγχου, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος προστασίας

Με δεδομένα τα προαναφερθέντα κριτήρια, παρακάτω επιχειρείται μια όσο κατά το δυνατόν πιο πολύπλευρη ανασκόπηση του ζητήματος της προστασίας των DC μικροδικτύων, όπως αυτό παρουσιάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η τρέχουσα πρόοδος μπορεί να βρίσκεται ακόμα σε νηπιακό στάδιο σε σχέση με τα AC μικροδίκτυα και να μην επιτρέπει την ανάπτυξη οικονομικά βιώσιμων συστημάτων προστασίας που να ανταποκρίνονται στα παραπάνω κριτήρια, ωστόσο η καταγραφή των ζητημάτων αυτών έχει νόημα, στο πλαίσιο της διερεύνησης εμπορικά εφικτών εφαρμογών προστασίας των DC μικροδικτύων.

2.2 Συστήματα Προστασίας

Ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα προστασίας είναι αναγκαίο ώστε να διασφαλίσει την αξιόπιστη λειτουργία του DC μικροδικτύου. Το σύστημα προστασίας περιλαμβάνει υλικό προστασίας (protection devices), ηλεκτρονόμους προστασίας, εξοπλισμό μετρήσεων και γειώσεις. Το σύστημα προστασίας του μικροδικτύου μπορεί να χωριστεί σε ένα DC σύστημα προστασίας για τη Ζώνη 1 και ένα AC σύστημα προστασίας για τη Ζώνη 2, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1 [7].

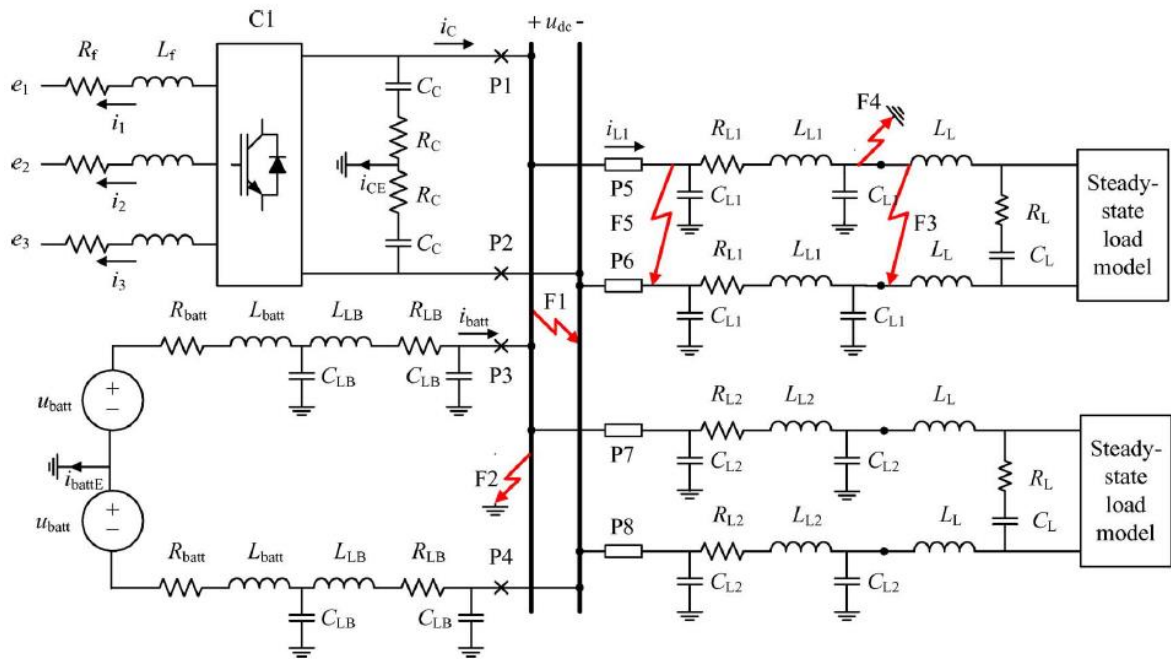


Εικόνα 2.1 Παράδειγμα μικρού AC/DC μικροδικτύου χαμηλής τάσης

Η Ζώνη 2 μπορεί να περιγραφεί ως ένας ενδιάμεσος ζυγός μεταξύ του κεντρικού δικτύου και της κατανάλωσης με παραγωγή και το σύστημα προστασίας της μπορεί να διαχωριστεί σε 5 υποσυστήματα: (α) προστασία του AC δικτύου, (β) προστασία του ac/dc converter, (γ) προστασία της γεννήτριας ντίζελ, (δ) προστασία των feeders και (ε) προστασία του ζυγού.

Εν προκειμένω όμως, η προστασία της Ζώνης 1 είναι αυτή που μας ενδιαφέρει, για την οποία απεικονίζεται ένα μοντέλο στην εικόνα 2.2 [7], βασισμένο σε σύστημα ενός data center. Ο AC/DC converter μοντελοποιείται ως τριφασικός, δύο επιπέδων voltage-source converter (VSC), η μπαταρία μοντελοποιείται ως μία DC πηγή με ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση, ενώ τα φορτία μοντελοποιούνται ως φορτία σταθερής ισχύος με

φίλτρο εισόδου και είναι συνδεδεμένα ανάμεσα στους δύο πόλους. Οι παράμετροι όλων των στοιχείων παρατίθενται στον πίνακα 2.1.



Εικόνα 2.2 Αναλυτικό μοντέλο της Ζώνης 1

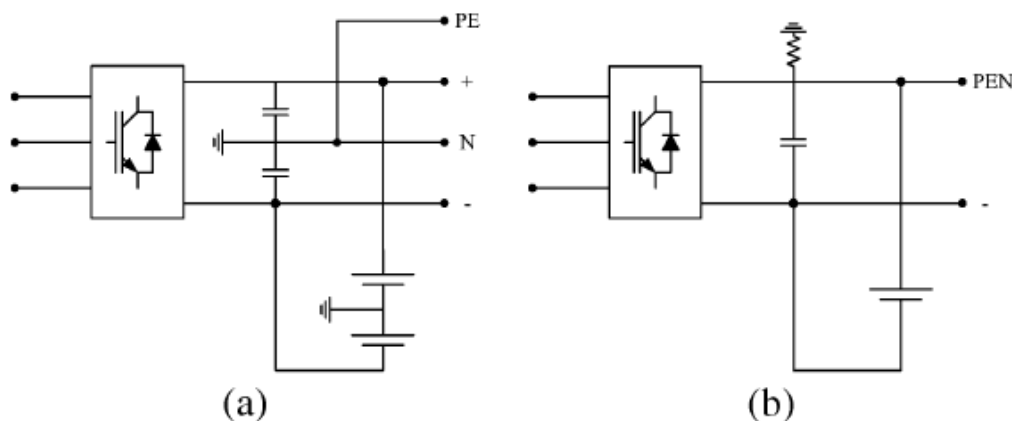
Component	Data	Parameters		
		R	L	C
Converter (ac)	320 kVA/190 V	1.356 mΩ	43.2 μH	
Converter (dc)	320 kVA/400 V	2 mΩ		56 mF
Battery	400 V	0.0134 Ω	40 μH	
Load	160 kW (CP)	50 Ω	0.2 mH	1 mF
Cable (battery)	20 m	0.125 Ω/km	0.34 mH/km	0.5 μF/km
Cable (L1)	30 m	0.641 Ω/km	0.34 mH/km	0.1 μF/km
Cable (L2)	70 m	0.641 Ω/km	0.34 mH/km	0.1 μF/km
$U_{base,dc}$	400 V			
$I_{base,ac}$	0.8 kA			
$I_{base,dc}$	1.371 kA			

Πίνακας 2.1 Παράμετροι συστήματος ενός LVDC μικροδικτύου

2.2.1 Γείωση

Η γείωση είναι ένα σύνθετο ζήτημα, μιας και υπάρχει πληθώρα διαφορετικών προσεγγίσεων στον σχεδιασμό γειώσεων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, κάθε μία με διαφορετικές παραμέτρους και επιδόσεις.

Η χρησιμότητα της γείωσης συνίσταται στον εντοπισμό των σφαλμάτων γης, αλλά και την ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού. Ένα LVDC μικροδίκτυο μπορεί να βρίσκεται χωρίς γείωση, με γείωση υψηλής αντίστασης ή με γείωση χαμηλής αντίστασης. Η γείωση μπορεί να συνδεθεί είτε σε έναν από τους πόλους, είτε στο ενδιάμεσο σημείο μεταξύ του converter και της μπαταρίας. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζονται οι δύο εναλλακτικές συνδεσμολογίες [7].



Εικόνα 2.3 Γείωση ενός DC μικροδικτύου χαμηλής τάσης. (a) TN-S DC σύστημα. (b) IT DC σύστημα.

Στην εικόνα 2.3 (a) παρουσιάζεται ένα TN-S DC σύστημα. Το ενδιάμεσο σημείο μεταξύ converter και μπαταρίας είναι συνδεδεμένο με τη γη και ξεχωριστά καλώδια χρησιμοποιούνται για τον ουδέτερο και τον αγωγό προστασίας. Στην εικόνα 2.3 (b) αντίθετα έχουμε ένα IT DC σύστημα, το οποίο έχει τον θετικό του πόλο συνδεδεμένο στη γη μέσω μιας αντίστασης. Είναι προτιμότερο να συνδέεται ο θετικός πόλος με τη γη και όχι ο αρνητικός, προκειμένου να μειωθεί ο αντίκτυπος της διάβρωσης.

Η χρήση της διάταξης (a) στην εικόνα 2.3 έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλή τιμή ρεύματος προς τη γη και ένα έντονο μεταβατικό φαινόμενο στην τάση σε περίπτωση σφάλματος προς τη γη με μικρή αντίσταση. Αυτό ενδεχομένως θα επηρεάσει άλλα φορτία συνδεδεμένα στον πόλο του σφάλματος, αλλά όχι τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στον άλλο πόλο. Το σφάλμα εντοπίζεται εύκολα και μπορεί να επιδιορθωθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ένα TN-S DC σύστημα παρέχει μια καλώς ορισμένη πολική τάση και μονοπάτια για ρεύματα διαρροής από φίλτρα θορύβου.

Ένα IT DC σύστημα χαρακτηρίζεται από πολύ ήπια μεταβατικά φαινόμενα στην τάση και το ρεύμα σε περίπτωση σφάλματος προς γη. Το γεγονός αυτό διασφαλίζει σταθερή λειτουργία των φορτίων κατά τη διάρκεια ενός

σφάλματος. Ωστόσο, μια γείωση στο σύστημα θα μεταβάλει την πολιική τάση, πράγμα που ίσως επηρεάσει τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά φορτία. Εξαιτίας του μικρού ρεύματος σφάλματος, ενδεχομένως να είναι δύσκολο να μετρηθεί και να εντοπιστεί το σφάλμα. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω το σύστημα σε περίπτωση σφάλματος προς γη, η σύνθετη αντίσταση της γραμμής κάθε φορτίου μπορεί να αυξηθεί ώστε να περιορίσει την αύξηση της τάσης, γεγονός βέβαιο που μεταφράζεται σε αυξημένες απώλειες. Γενικά, η συνδεσμολογία (b) χρησιμοποιείται ευρέως σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

2.2.2 Υλικό Προστασίας

Εμπορικά βιώσιμες προσεγγίσεις στην προστασία των DC συστημάτων διανομής περιλαμβάνουν ασφάλειες τήξης και διακόπτες ισχύος, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο άνοιγμα ενός μονοπατιού για το ρεύμα σε συνθήκες υψηλών ρευμάτων με ένα τόξο. Οι συσκευές είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε το μήκος του τόξου να αυξάνεται όσο διατηρείται η συνθήκη υψηλών τιμών ρεύματος, μέχρι να λιώσει το μέταλλο ή να ανοίξουν οι επαφές —έτσι ώστε το ρεύμα να αναγκαστεί να μηδενιστεί (και το τόξο να σβήσει) όσο η τάση του τόξου ενισχύεται. Οι ασφάλειες τήξης και οι περισσότεροι διακόπτες ισχύος που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο, όμως, έχουν σχεδιαστεί με βάση τα AC συστήματα, καθώς στην συντριπτική τους πλειοψηφία, τα συστήματα διανομής είναι AC. Έτσι, η χρήση τους δεν είναι απόλυτα ενδεδειγμένη στα DC συστήματα και στην καλύτερη περίπτωση απαιτούνται αναπροσαρμογές. Αναπόφευκτα, η επιτυχημένη πρακτική εφαρμογή των παραπάνω περιορίζεται λόγω της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης των καλωδίων, του επιπέδου της DC τάσης, αλλά και κάθε εγκάρσιας χωρητικότητας μεταξύ γραμμών, τοποθετημένης πριν ή μετά τους διακόπτες ισχύος. Υπάρχουν βέβαιοι και διακόπτες ισχύος ειδικά σχεδιασμένοι για DC συνθήκες, αλλά οι περισσότερες εφαρμογές αναφέρονται κυρίως στα AC συστήματα. Παρακάτω γίνεται μια αναλυτικότερη περιγραφή του υλικού προστασίας [7].

A) Ασφάλειες Τήξης

Η ασφάλεια τήξης αποτελείται από ένα μονωτικό περίβλημα, μέσα στο οποίο εγκλείεται ένα υλικό που απορροφά τη θερμότητα και ένας μικρός αγωγός από χαλκό ή ασήμι, του οποίου τα φυσικά χαρακτηριστικά είναι προϋπολογισμένα έτσι, ώστε να αντέχει μέχρι μια ορισμένη ένταση ρεύματος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος.

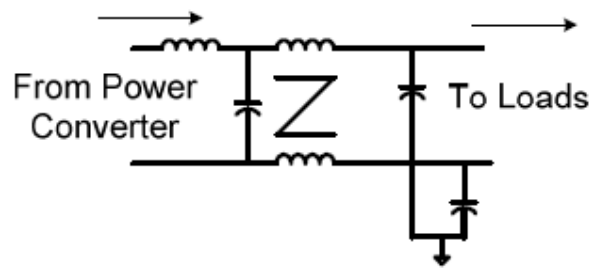
Τα όρια τάσης και ρεύματος των ασφαλειών τήξης αναγράφονται σε rms τιμές και επομένως ανταποκρίνονται τόσο στα AC, όσο και στα DC συστήματα. Παρόλα αυτά, όταν χρησιμοποιούνται σε ένα DC σύστημα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σταθερά χρόνου του συστήματος, η οποία καθορίζει τον χρόνο ανόδου στη μεταβατική κατάσταση, αλλά όχι την τιμή της μόνιμης κατάστασης. Ο χρόνος ανόδου επηρεάζει την ικανότητα της ασφάλειας να διακόψει το ρεύμα. Μια μικρή σταθερά χρόνου (<2,5ms) θα έχει ως αποτέλεσμα μια ταχεία αύξηση της τιμής του ρεύματος, οπότε η ασφάλεια θα λιώσει γρήγορα και το τόξο θα ψυχθεί από το υλικό που απορροφά τη θερμότητα. Αντίθετα, εάν η σταθερά χρόνου είναι μεγάλη (>6ms), τότε το ρεύμα και κατά συνέπεια και η θερμοκρασία θα αυξηθεί με αργούς ρυθμούς και όταν τελικά σχηματιστεί το τόξο, δεν θα είναι δυνατόν να ψυχθεί επαρκώς από το υλικό που απορροφά τη θερμότητα [21]. Επιπροσθέτως, οι ασφάλειες τήξης που χρησιμοποιούνται στα DC συστήματα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να διαχειριστούν ελαφριές υπερβάσεις των τιμών των ρευμάτων ώστε να λειτουργούν σωστά. Από πλευράς αξιοπιστίας και απλότητας πάντως, οι ασφάλειες τήξης δεν είναι η πλέον ενδεδειγμένη λύση σε ένα DC μικροδίκτυο, λόγω περιορισμών που αφορούν το μήκος των καλωδίων διανομής και των δυσκολιών στην πρόβλεψη των μεταβατικών φαινομένων.

B) Διακόπτες Ισχύος

Διακόπτες ισχύος κλειστού τύπου (MCCB, Molded-Case Circuit Breakers) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακοπή ρευμάτων σε DC συστήματα, συνδέοντας ρελέ σε σειρά μέχρις ότου να επιτευχθεί επαρκής ικανότητα διακοπής τάσης. Όπως συμβαίνει και με τις ασφάλειες τήξης, έτσι και με τους διακόπτες ισχύος τα όρια τάσης και ρεύματος αναγράφονται σε rms τιμές και επομένως ανταποκρίνονται τόσο στα AC, όσο και στα DC συστήματα. Το μαγνητικό tripping ανιχνεύει τη στιγμιαία τιμή του ρεύματος, πράγμα που σημαίνει ότι για τα DC η ονομαστική τιμή του είναι $\sqrt{2}$ φορές υψηλότερη σε σχέση με τα AC. Αντίθετα, για το θερμικό tripping οι τιμές είναι οι ίδιες.

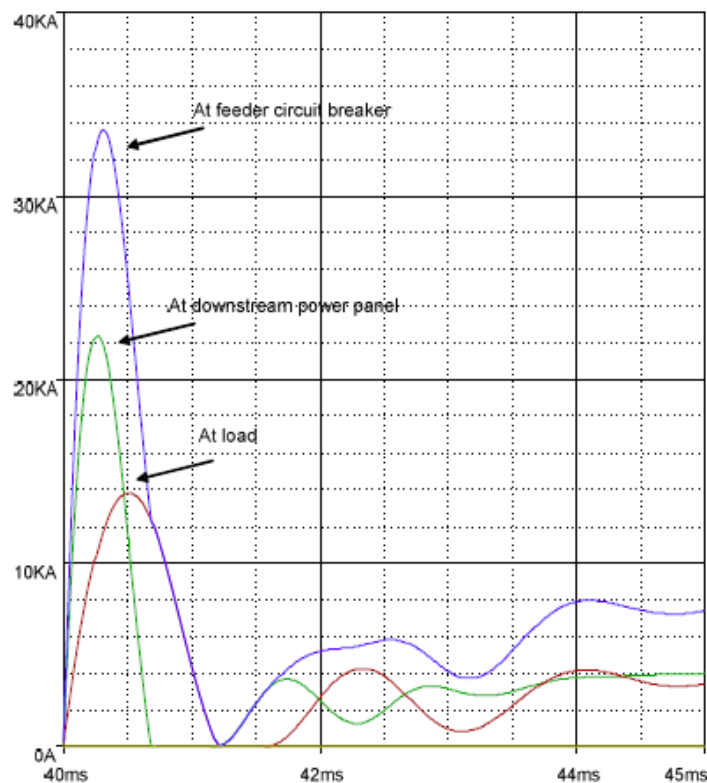
Η χρήση των διακοπών ισχύος είναι οικονομικά εφικτή για τα DC μικροδίκτυα μέγιστης τάσης 600V. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που πρέπει να συνεκτιμηθούν. Με βάση την εικόνα 1.3, κάποιες από τις πηγές του μικροδικτύου απαιτούν την παρεμβολή converters, δηλαδή οι ανεμογεννήτριες, οι μικρο-τουρμπίνες, αλλά και το ίδιο το κυρίως δίκτυο. Επιπλέον, DC/DC converters μπορούν να παρεμβληθούν ανάμεσα στο μικροδίκτυο και σε ένα φορτίο (ή μια ομάδα φορτίων) προκειμένου να παραχθούν ποικίλα επίπεδα τάσης ή απομόνωση υψηλών συχνοτήτων. Τέτοιοι converters συνήθως απαιτούν χαμηλή αυτεπαγωγή, καθώς και φίλτρα με χωρητικότητες L-L και L-G, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4, ώστε

να ανταποκρίνονται σε άλλα σημαντικά κριτήρια επίδοσης στο μικροδίκτυο ή σε σημεία κοινής ζεύξης με άλλα φορτία.



Εικόνα 2.4 Τυπικό φίλτρο εξόδου σε DC/DC converter

Όταν πραγματοποιείται βραχυκύκλωμα στην περιοχή του converter, οι πυκνωτές αποφορτίζονται ταχέως, με αποτέλεσμα μια στιγμιαία εκτίναξη του ρεύματος σε τιμές που κυμαίνονται από 10.000, έως 50.000A (εικόνα 2.5), ανάλογα με τον σχεδιασμό του φίλτρου, την τοποθεσία του σφάλματος σε σχέση με τον converter, αλλά και με τα ίδια τα χαρακτηριστικά του converter [3].



Εικόνα 2.5 Κυματομορφές ρεύματος κατά την αποφόρτιση του πυκνωτή σε DC/DC converter σε περίπτωση σφάλματος

Ο αντίκτυπος της αποφόρτισης των πυκνωτών στα DC συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούν διακόπτες ισχύος έχει εντοπιστεί κυρίως σε εφαρμογές μικροδικτύων τηλεπικοινωνίας και πλοίων. Οι βασικές συνέπειες είναι πιθανές βλάβες στους διακόπτες ισχύος μιας γραμμής σε περίπτωση που τριπάρουν ταυτόχρονα, αλλά και το ενδεχόμενο να υπάρξει ανάλογο φαινόμενο και στις χωρητικότητες των DC φορτίων που βρίσκονται κοντά στο σημείο του σφάλματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρευμάτων εισροής (από φορτία) που προκαλούν ανεπιθύμητες ενεργοποιήσεις των διακοπών ισχύος [3].

Για μεγαλύτερα DC συστήματα χαμηλής τάσης υπάρχουν και ειδικοί DC διακόπτες ισχύος υψηλής ταχύτητας (high-speed DC circuit breakers). Αυτοί οι διακόπτες είναι ειδικά σχεδιασμένοι ώστε να ανταποκρίνονται πλήρως στις ονομαστικές τιμές της τάσης και του ρεύματος, ακόμα και σε συστήματα με μεγάλη σταθερά χρόνου. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι ξεκινούν να διακόπτουν το ρεύμα σφάλματος εντός 0,01s από τη στιγμή του σφάλματος, ωστόσο υπάρχει κίνδυνος στις χαμηλές τιμές ρεύματος, οι οποίες μπορεί να έχουν ως συνέπεια τη συγκόλληση των επαφών του διακόπτη μεταξύ τους.

Γ) Ηλεκτρονικά Ισχύος

Υπάρχουν διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με τις ασφάλειες τήξης και τους διακόπτες ισχύος στα DC συστήματα, όπως η υψηλές σταθερές χρόνου και ο μεγάλος χρόνος διακοπής. Χρησιμοποιώντας διακόπτες ηλεκτρονικών ισχύος, όπως για παράδειγμα θυρίστορ, είναι δυνατόν να ενισχυθεί η ικανότητα διακοπής του επαγωγικού ρεύματος [22]. Ωστόσο, οι απώλειες στην περίπτωση των ηλεκτρονικών ισχύος είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με αυτές ενός μηχανικού διακόπτη. Επομένως, μια καλή επιλογή είναι ο έξυπνος συνδυασμός των δύο διακοπών, κάτι που έχει προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [23].

Type	Manufacturer	U_n [V]	I_n [A]	I_{sc} [kA]
Fuse	Ferraz Shawmut	500–1000	1–600	100
Fuse	IFÖ ELECTRIC	250–550	2–630	120
MCCB	ABB	250–750	25–800	16–70
MCCB	Eaton	250–750	15–630	10–42
MCCB	Siemens	250–600	26–630	20–32
CB	Sécheron	900–3600	1000–6000	80

Πίνακας 2.2 Παραδείγματα διαθέσιμων συσκευών για την προστασία DC δικτύων χαμηλής τάσης

2.2.3 Προστατευτικά Ρελέ και Εξοπλισμός Μετρήσεων

Οι DC διακόπτες ισχύος υψηλής ταχύτητας που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι εξοπλισμένοι με συσκευές στιγμιαίου tripping σε περίπτωση υψηλών τιμών ρεύματος, οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ενεργοποιούν τον διακόπτη αν το ρεύμα υπερβαίνει το 1 έως 4 ανά μονάδα. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που προκαλεί το ρεύμα είναι αυτή που χρησιμοποιείται για το tripping. Είδαμε όμως ότι συμβαίνει ο διακόπτης να ενεργοποιείται και από άλλα γεγονότα, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση ενός προστατευτικού ρελέ.

Τα προστατευτικά ρελέ αξιοποιούν πληροφορίες από μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων και σε κάποιες περιπτώσεις πληροφορίες που βασίζονται στην επικοινωνία με άλλες μονάδες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο εξοπλισμός μετρήσεων πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστεί DC ποσότητες προκειμένου να λειτουργήσει σωστά.

Εκτός από τις υψηλές τιμές των ρευμάτων, τα προστατευτικά ρελέ μπορούν να υπολογίσουν χρονικές παραγώγους και βηματικές αλλαγές σε ρεύματα προκειμένου να αποφανθούν για το αν το DC σύστημα λειτουργεί κανονικά ή αν έχει προκύψει σφάλμα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ακόμη πιο πολύπλοκες και εξειδικευμένες αριθμητικές μέθοδοι για τον εντοπισμό σφαλμάτων και τον διαχωρισμό τους από την κανονική λειτουργία [7].

2.3 Απαιτήσεις Σχεδιασμού του Συστήματος Προστασίας

Είναι γνωστό ότι τα στοιχεία μετατροπής που συναντώνται απαραίτητως σε ένα DC μικροδίκτυο ήδη διαθέτουν δυνατότητες προστασίας, οι οποίες θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν προκειμένου να αποφευχθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός από ειδικό υλικό προστασίας, που συνεπάγεται απώλειες και κόστη. Αυτό αποτελεί μια ακόμη διαφορά των DC συστημάτων σε σχέση με τα AC. Οι σχεδιαστές των DC μικροδικτύων απαιτείται να έχουν μια καλή επίγνωση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των λειτουργιών προστασίας και μετατροπής, καθώς και των διαφόρων αποκρίσεων, έτσι ώστε να αναπτύξουν ένα αξιόπιστο σύστημα.

Η αξιόπιστη εφαρμογή των μικροδικτύων βασίζεται σε δύο ιδέες-κλειδιά: peer-to-peer και plug and play για κάθε στοιχείο του μικροδικτύου. Το peer-to-peer σημαίνει ότι τα στοιχεία που έχουν υποστεί σφάλμα εντοπίζονται και

απομονώνονται χωρίς κεντρικό έλεγχο ή επικοινωνία μεταξύ των μονάδων. Το plug and play σημαίνει ότι τα στοιχεία εγκαθίστανται με τέτοιο τρόπο, ώστε η αφαίρεση κάποιου να μην επηρεάζει την συμπεριφορά των υπολοίπων.

Η ασφαλής, αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία ενός DC μικροδικτύου προϋποθέτει την τήρηση των παρακάτω βασικών απαιτήσεων [3]:

- 1) Κανένα σημείο αποτυχίας
- 2) Επαρκώς τροφοδοτούμενες ζώνες ή ζυγοί που μπορούν να διαχωριστούν άμεσα από το κυρίως δίκτυο
- 3) Δυνατότητα για άμεση επαναδιαμόρφωση του συστήματος και απομόνωση του σφάλματος, ελαχιστοποιώντας την επίδραση σε μη εσφαλμένα τμήματα του συστήματος
- 4) Δυνατότητα για εντοπισμό και απομόνωση σφαλμάτων
- 5) Δυνατότητα για επιδιόρθωση του σφάλματος και επαναφορά σε αξιόπιστη λειτουργία
- 6) Διάκριση των φορτίων σε ευαίσθητα και μη ευαίσθητα
- 7) Ελαχιστοποίηση της επίδρασης του σφάλματος ενός φορτίου στα υπόλοιπα φορτία
- 8) Πλεονάζουσα τροφοδοσία σε ευαίσθητα φορτία
- 9) Δυνατότητα για άμεση αποσύνδεση των μη ευαίσθητων φορτίων
- 10) Κεντρικός έλεγχος των φορτίων και της ροής ισχύος
- 11) Δυνατότητα για μερική λειτουργία υπό δυσμενείς συνθήκες, όπως απώλεια ψύξης ή απώλεια ελέγχου της ροής ισχύος
- 12) Συντήρηση ανάλογα με την κατάσταση

Ο βαθμός στον οποίο οι παραπάνω απαιτήσεις καλύπτονται είναι αφενός ζήτημα κόστους και αφετέρου ζήτημα αναγκών επίδοσης. Ωστόσο, μελλοντική ανάγκη είναι η υιοθέτηση προτύπων κοινής αποδοχής ώστε να ικανοποιούνται αυτές οι απαιτήσεις, τα οποία θα δώσουν το κίνητρο για οικονομικές λύσεις. Υπάρχει ακόμα αρκετός δρόμος που πρέπει να διανύσουμε σε επίπεδο επάρκειας του συστήματος προστασίας των DC μικροδικτύων, ώστε να είναι αυτό συγκρίσιμο με το αντίστοιχο των AC.

2.4 Τα Σφάλματα στα DC Μικροδίκτυα

Η όλη λειτουργία του συστήματος προστασίας του DC μικροδικτύου βασίζεται στον εντοπισμό και της απομόνωση σφαλμάτων με ταχύτητα και ακρίβεια, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες των διαταραχών. Ο επιτυχημένος σχεδιασμός του συστήματος προϋποθέτει την καταγραφή των πιθανών σφαλμάτων ως προς το είδος τους, αλλά και ως προς το σημείο στο οποίο μπορεί αυτά να συμβούν. Στη συνέχεια επιχειρείται αυτή η καταγραφή [7].

A) Πιθανά είδη σφαλμάτων

Τα σφάλματα στα DC μικροδίκτυα γίνονται είτε μεταξύ των δύο πόλων (pole-to-pole), είτε μεταξύ του ενός πόλου και της γης (pole-to-ground). Τα pole-to-pole σφάλματα συνήθως έχουν χαμηλή σύνθετη αντίσταση σφάλματος, ενώ τα pole-to-ground μπορεί να είναι είτε χαμηλής, είτε υψηλής σύνθετης αντίστασης. Τα σφάλματα μπορούν να συμβούν στον ζυγό ή σε κάποιον από τους feeders. Τα τέσσερα αυτά ενδεχόμενα σφαλμάτων απεικονίζονται στην εικόνα 2.2 ως F1-F4. Το σφάλμα F1 είναι ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου του ζυγού, ενώ το F2 είναι σφάλμα μεταξύ του θετικού πόλου και της γης. Τα σφάλματα αυτά είναι πολύ κρίσιμα για τον converter, αλλά και την μπαταρία. Τα σφάλματα F3 και F4 είναι αντίστοιχου τύπου, αλλά πραγματοποιούνται στον feeder κοντά σε ένα από τα δύο φορτία. Τα συγκεκριμένα σφάλματα παίζουν ρόλο κυρίως στη διερεύνηση της επίδρασης του σφάλματος στο άλλο φορτίο και στον σχεδιασμό προστασίας για τους feeders. Τα σφάλματα στο εσωτερικό του converter, στην μπαταρία ή στα φορτία δεν εξετάζονται ξεχωριστά. Τα σφάλματα στον converter και την μπαταρία είναι όμοια με τα F1 και F2, ενώ τα σφάλματα στα φορτία είναι όμοια με τα F3 και F4.

B) Σφάλματα στον ζυγό (F1)

Τα σφάλματα F1 και F2 θα επηρεάσουν όλες τις πηγές και τα φορτία που συνδέονται στον ζυγό. Από τη στιγμή που οι πηγές συνδέονται παράλληλα, μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά.

Η μπαταρία βρίσκεται εγκατεστημένη σε ξεχωριστό χώρο και επομένως είναι συνδεδεμένη στον DC ζυγό μέσω καλωδίων. Η συνολική σύνθετη αντίσταση σφάλματος, όπως εμφανίζεται στην μπαταρία όταν συμβαίνει ένα σφάλμα τύπου F1, είναι το άθροισμα της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης της μπαταρίας (R_{batt} και L_{batt}) και του καλωδίου (R_{LB} και L_{LB}). Η χωρητικότητα του καλωδίου μπορεί να αγνοηθεί στα pole-to-pole σφάλματα. Έτσι, το ρεύμα σφάλματος της μπαταρίας υπολογίζεται ως εξής [7]:

$$i_{batt}(t) = \frac{u_{batt}}{R_{batt} + R_{LB}} (1 - e^{-t/\tau_{batt}}) \quad (2.1)$$

όπου

$$\tau_{batt} = (L_{batt} + L_{LB}) / (R_{batt} + R_{LB}) \quad (2.2)$$

Ο σχεδιασμός της μπαταρίας καθορίζει τη διάρκεια κατά την οποία μπορεί να τροφοδοτήσει ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος χωρίς να προκληθεί εσωτερική ζημιά.

Ο converter συνδέεται απευθείας στον ζυγό και επομένως έχει χαμηλή σύνθετη αντίσταση, η οποία αποτελείται κυρίως από τη σύνθετη αντίσταση των πυκνωτών R_c και L_c , με το δεύτερο να αμελείται. Το σφάλμα F1 θα προκαλέσει την αποφόρτιση των πυκνωτών, γεγονός που θα προκαλέσει ένα ρεύμα υψηλού πλάτους και μικρού χρόνου ανόδου, αλλά με πολύ περιορισμένη διάρκεια. Το ρεύμα σφάλματος του πυκνωτή υπολογίζεται ως εξής [7]:

$$i_c(t) = \frac{u_{dc}}{2R_c} e^{-t/\tau_c} \quad (2.3)$$

όπου

$$\tau_c = R_c C_c \quad (2.4)$$

Ωστόσο, όταν η DC τάση γίνεται σχεδόν μηδέν, ο converter θα χάσει την ικανότητά του να ελέγχει το ρεύμα και ένα ρεύμα σφάλματος θα περάσει μέσα από τις αντιπαράλληλες διόδους των διακοπών IGBT, το οποίο περιορίζεται μόνο από το φίλτρο του δικτύου (R_f και L_f στην εικόνα 2.2). Αυτές οι διόδους είναι ευαίσθητες στα υψηλά ρεύματα, επομένως το ρεύμα που διέρχεται από μέσα τους δεν θα πρέπει να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο πλάτος, ούτε να έχει διάρκεια μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο διάστημα.

Γ) Σφάλματα στους feeders (F3)

Το σφάλμα F3 βρίσκεται μετά τις διατάξεις προστασίας που προστατεύουν τον feeder L1 και θα επηρεάσει μόνιμα μόνο τα φορτία τα οποία συνδέονται στον feeder αυτόν. Προτού αποκατασταθεί το σφάλμα, ο άλλος feeder θα υποστεί μια πτώση τάσης, της οποίας το μέγεθος εξαρτάται από τη σύνθετη

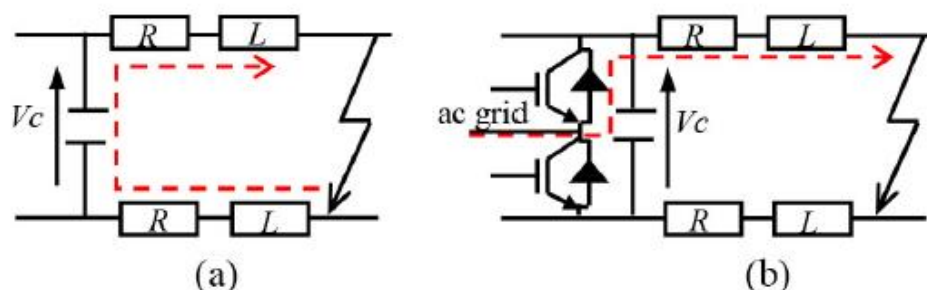
αντίσταση του σφάλματος. Μεγάλη σύνθετη αντίσταση συνεπάγεται μικρή πτώση τάσης αλλά και μικρό ρεύμα σφάλματος, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τον χρόνο που απαιτείται για την αποκατάσταση του σφάλματος. Το σφάλμα F3 οδηγεί σε ένα RLC σύστημα δεύτερης τάξης, το οποίο θα αναλυθεί εκτενέστερα στην πορεία.

Δ) Σφάλματα γης (F2, F4)

Τα σφάλματα F2 και F4 είναι σφάλματα μεταξύ του θετικού πόλου και της γης και στις περιπτώσεις αυτές μόνο ο συγκεκριμένος πόλος επηρεάζεται. Η μείωση της τάσης εξαρτάται από τη γείωση του συστήματος και από τη σύνθετη αντίσταση του σφάλματος. Παράλληλα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι χωρητικότητες των καλωδίων C_{LB} , C_{L1} και C_{L2} σε γειωμένα συστήματα υψηλής σύνθετης αντίστασης.

2.5 Χαρακτηριστικά Ρευμάτων Σφάλματος στα DC Συστήματα

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκαν όλες οι περιπτώσεις πιθανών σφαλμάτων, ενώ δόθηκαν και κάποιες εξισώσεις των ρευμάτων σφάλματος στην μπαταρία και τον converter. Υπάρχει επίσης και το πρότυπο IEC61660, το οποίο θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 και περιγράφει τα σφάλματα σε βοηθητικά DC συστήματα. Ωστόσο, η έρευνα στο [4] έχει δείξει ότι το IEC61660 υποτιμά τα DC μεταβατικά φαινόμενα στα DC συστήματα διανομής. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα ακριβέστερο μαθηματικό μοντέλο για τα DC σφάλματα στους feeders, το οποίο μπορεί να συμβάλλει στον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό της DC προστασίας.



Εικόνα 2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα σφάλματος σε έναν DC feeder. (a) Συνεισφορά ρεύματος από την αποφόρτιση του πυκνωτή. (b) Συνεισφορά ρεύματος από τις αντιπαράλληλες διόδους

Η περιγραφή του σφάλματος μπορεί να χωριστεί σε 3 φάσεις.

Φάση 1

Όταν πραγματοποιείται ένα DC σφάλμα, οι IGBT διακόπτες των converters είναι κανονικά μπλοκαρισμένοι για αυτοπροστασία και ο πυκνωτής των φίλτρων, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6 (a), θα δράσει άμεσα ως μια DC πηγή και θα παρέχει ένα υψηλό μεταβατικό ρεύμα που θα σβήνει εκθετικά, σύμφωνα με την σχέση 2.5, μέχρι η τάση του πυκνωτή που δίνεται στη σχέση 2.6 να μηδενιστεί [5],[6].

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{V_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (2.5)$$

$$V_c = \frac{V_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega C} \sin \omega t \quad (2.6)$$

όπου

V_c : τάση πυκνωτή

i_c : ρεύμα πυκνωτή

V_0 : αρχική τιμή τάσης πυκνωτή

I_0 : αρχική τιμή ρεύματος πυκνωτή

C : τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή

R : ισοδύναμη αντίσταση από το σημείο σφάλματος μέχρι την πηγή

L : ισοδύναμη αυτεπαγωγή από το σημείο σφάλματος μέχρι την πηγή

Τα δ , ω_0 , ω και β δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (2.7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (2.8)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} \quad (2.9)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \quad (2.10)$$

Ο χρόνος για να μηδενιστεί η τάση του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση

$$t_1 = t_0 + \frac{\pi - \gamma}{\omega} \quad (2.11)$$

όπου t_0 είναι η χρονική στιγμή που συμβαίνει το σφάλμα, ενώ το γ δίνεται από τη σχέση

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sin \beta}{\cos \beta - \frac{I_0}{V_0 \omega_0 C}}\right) \quad (2.12)$$

Φάση 2

Όταν ο πυκνωτής έχει αποφορτιστεί εντελώς, οι αντιπαράλληλες δίοδοι που φαίνονται στην εικόνα 2.6 (b) θα περιέλθουν σε ορθή πόλωση και θα συμπεριφερθούν ως ανορθωτής γέφυρας, συνεχίζοντας να τροφοδοτούν το σφάλμα κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου. Τότε, το ρεύμα των πηνίων δίνεται από τη σχέση [5], [6]:

$$i_L = I'_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.13)$$

όπου το I'_0 είναι το αρχικό ρεύμα του πηνίου.

Φάση 3

Όταν ολοκληρωθεί η μεταβατική περίοδος, θα υπάρξει ένα DC ρεύμα σφάλματος μόνιμης κατάστασης το οποίο θα προέρχεται από το δίκτυο μέσα από τις αντιπαράλληλες διόδους. Σε κάθε σκέλος του converter θα περνάει και από μία φάση του ρεύματος. Η εξίσωση του ρεύματος της φάσης a θα δίνεται από τον τύπο [5]:

$$i_{ga} = I_m \sin(\omega_s t + \alpha - \varphi) + i_{m0} \sin(\alpha - \varphi_0) - I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.14)$$

όπου

ω_s : σύγχρονη γωνιακή συχνότητα

α : η γωνία της φάσης a

I_m : μέτρο του ρεύματος του δικτύου

i_{m0} : αρχική τιμή του πλάτους του ρεύματος του δικτύου

φ_0 : αρχική φάση

Η γωνία φ και η σταθερά χρόνου τ δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις [5]:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_s(L_g + L)}{R} \right) \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{L_g + L}{R} \quad (2.16)$$

όπου L_g είναι η αυτεπαγωγή του δικτύου.

Το άθροισμα των ρευμάτων των τριών φάσεων a, b και c δίνει και τη συνολική συνεισφορά του δικτύου σε ένα DC σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση. Δηλαδή,

$$i = i_{ga} + i_{gb} + i_{gc} \quad (2.17)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC 61660

3.1 Εισαγωγή

Το IEC 61660 είναι ένα πρότυπο που εισήχθη το 1997 και αφορά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε βοηθητικές εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος σε εργοστάσια παραγωγής ισχύος και υποσταθμούς [24]. Το πρότυπο αυτό υπολογίζει τη μεταβατική και τη μόνιμη κατάσταση των ρευμάτων σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων σε τέτοια DC δίκτυα. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, οι εξισώσεις που παρουσιάζονται στο πρότυπο μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να δώσουν ικανοποιητικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των σφαλμάτων στα DC μικροδίκτυα, επομένως η παρουσίασή του έχει νόημα στο πλαίσιο της καταγραφής και της κατανόησης ορισμένων εκ των ιδιαιτεροτήτων που διέπουν τα σφάλματα των DC δικτύων εν γένει. Μια αναλυτική παρουσίαση των κυριότερων σημείων του πρώτου μέρους του

προτύπου IEC 61660 στην ελληνική γλώσσα επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο.

Τα βοηθητικά DC συστήματα στα οποία αναφέρεται το πρότυπο περιέχουν τις εξής τέσσερις διατάξεις, που μπορούν να συμπεριφερθούν ως πηγές ρευμάτων βραχυκύκλωσης:

- α) Ανορθωτές σε τριφασικές AC συνδέσεις γέφυρας για 50Hz
- β) Στατικές μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης (lead-acid batteries)
- γ) Πυκνωτές εξομάλυνσης (smoothing capacitors)
- δ) DC κινητήρες με ανεξάρτητη διέγερση

Πρέπει να σημειωθεί ότι το πρότυπο αναφέρεται μόνο σε τριφασικούς AC ανορθωτές γέφυρας και όχι σε άλλα είδη ανορθωτών, ενώ είναι επίσης αναγκαίο να γίνει εξαρχής μια διάκριση μεταξύ δύο διαφορετικών τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης:

- το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο καθορίζει τις ονομαστικές τιμές του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού
- το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο καθορίζει τις ονομαστικές τιμές και τις ρυθμίσεις του εξοπλισμού προστασίας

3.2 Γενικά

Ένας πλήρης υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης παρέχει πληροφορίες για τη χρονική διακύμανση των ρευμάτων στην τοποθεσία του σφάλματος, από τη στιγμή του βραχυκυκλώματος και μέχρι το τέλος του. Εξαιτίας των έντονων διακυμάνσεων του ρεύματος και της μη γραμμικότητας του εξοπλισμού, τέτοιοι υπολογισμοί μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Η δαπάνη είναι πολύ μεγάλη, ιδιαίτερα από τη στιγμή που δεν υπάρχουν καθολικές μέθοδοι υπολογισμού. Γι' αυτό, το πρότυπο ασχολείται μόνο με τον υπολογισμό χαρακτηριστικών ποσοτήτων. Στην εικόνα 3.1 φαίνονται οι κυματομορφές του ρεύματος σφάλματος για την κάθε μία από τις τέσσερις πηγές που εξετάζονται. Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης στην τοποθεσία του σφάλματος ενδέχεται να προκύπτει από την επαλληλία των ρευμάτων από διαφορετικές πηγές.

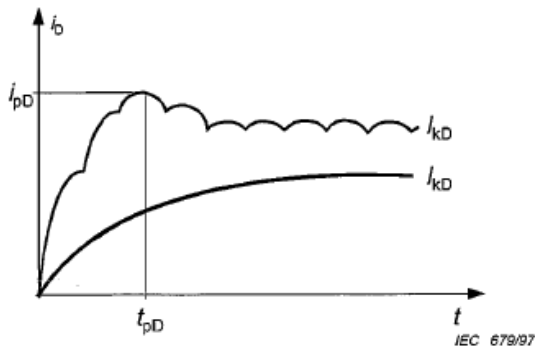


Figure 1a – Rectifier without and with smoothing reactor

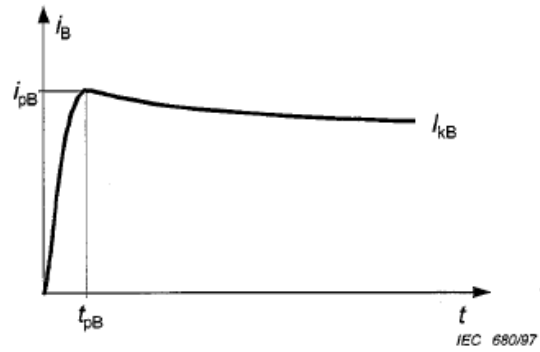


Figure 1b – Battery

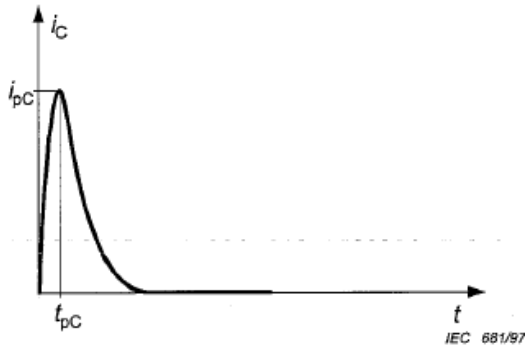


Figure 1c – Capacitor

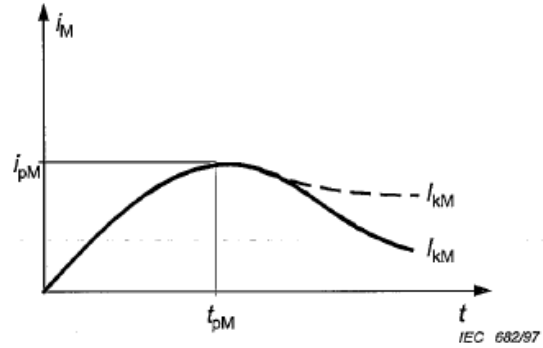


Figure 1d

— Motor without additional inertia mass
 Motor with additional inertia mass

Εικόνα 3.1 Διαγράμματα ρευμάτων βραχυκύκλωσης για κάθε στοιχείο-πηγή

Οι προσεγγιστικές εξισώσεις του ρεύματος σφάλματος που θα μπορούσε να προκύψει από όλες τις παραπάνω πηγές έχουν ως εξής:

$$i_1(t) = i_p \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (3.1)$$

$$i_2(t) = i_p \left[(1 - p)e^{-\frac{-(t-t_p)}{\tau_2}} + p \right] \quad t_p \leq t \quad (3.2)$$

όπου:

i_p : μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης

t_p : χρόνος μέγιστου

τ_1 : σταθερά χρόνου ανόδου

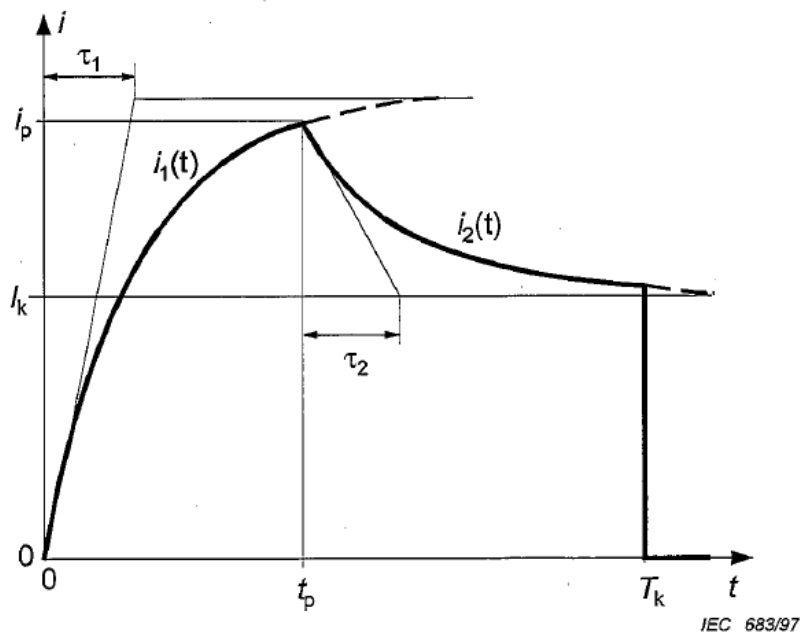
τ_2 : σταθερά χρόνου καθόδου

Η σταθερά p δίνεται από τον τύπο:

$$p = \frac{I_k}{i_p} \quad (3.3)$$

όπου I_k είναι η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στην μόνιμη κατάσταση.

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει καθορισμένο μέγιστο ρεύμα θεωρούμε ότι $i_p = I_k$ και $t_p = T_k$, όπου T_k είναι η χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Οι σταθερές τ_1 και τ_2 υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε είδους πηγή, με τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στις παραγράφους που θα ακολουθήσουν.



Εικόνα 3.2 Απεικόνιση της προσεγγιστικής συνάρτησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Στην εικόνα 3.2 φαίνεται η γραφική απεικόνιση της κυματομορφής του ρεύματος βραχυκύκλωσης πριν και μετά τον χρόνο μεγίστου, όπως αυτή περιγράφεται προσεγγιστικά από τις εξισώσεις (3.1), (3.2) και (3.3).

Στο πρότυπο αναγράφονται και ορισμένες συνθήκες και παραδοχές που σχετίζονται με τον υπολογισμό του μεγίστου και του ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης, οι οποίες δεν έχει νόημα να αναλυθούν στο πλαίσιο της παρούσας συνοπτικής καταγραφής [24].

3.3 Μέθοδοι Υπολογισμού

Στην εικόνα 3.3 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός συστήματος το οποίο περιέχει τέσσερις πηγές: έναν τριφασικό AC ανορθωτή γέφυρας, μια μπαταρία, έναν πυκνωτή και έναν κινητήρα. Οι χαρακτηριστικές ποσότητες των ισοδύναμων κυκλωμάτων αυτών των πηγών παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους 3.5, 3.6, 3.7 και 3.8.

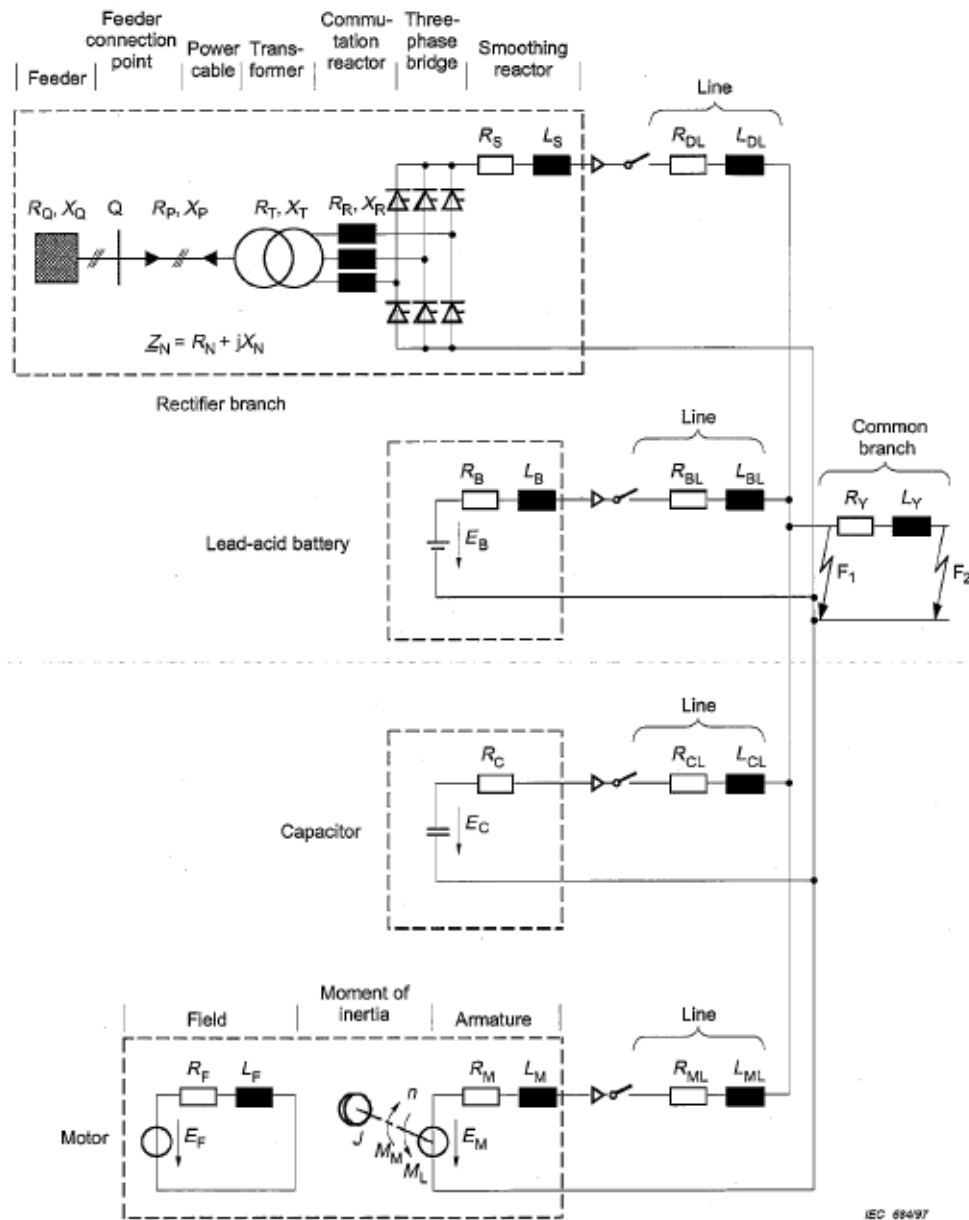
Εάν το ισοδύναμο διάγραμμα περιλαμβάνει μόνο μία πηγή, τότε το ρεύμα βραχυκύκλωσης του σφάλματος $F1$ λαμβάνει υπόψη την αντίσταση και την αυτεπαγωγή μόνο αυτής της πηγής. Εάν περιλαμβάνει περισσότερες από μία πηγές, τότε το ρεύμα βραχυκύκλωσης για το σφάλμα $F1$ προκύπτει με άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων της κάθε πηγής. Εάν το διάγραμμα περιλαμβάνει πολλές πηγές και κοινό κλάδο (common branch), τότε το ρεύμα βραχυκύκλωσης του σφάλματος $F2$ υπολογίζεται ως εξής:

α) Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης από κάθε πηγή ξεχωριστά όπως στην περίπτωση του σφάλματος $F1$, με τον συνυπολογισμό του R_{γ} και του L_{γ} του κοινού κλάδου

β) Διόρθωση ρευμάτων με τον συντελεστή διόρθωσης σύμφωνα με την παράγραφο 3.9

γ) Εισαγωγή των διορθωμένων τιμών στις εξισώσεις (3.1), (3.2) και (3.3)

δ) Άθροισμα των επιμέρους χρονικών συναρτήσεων των ρευμάτων σε μία κοινή, που δίνει το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το σφάλμα $F2$



Short-circuit locations:
 F1 Short circuit without common branch
 F2 Short circuit with common branch

Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό των επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης της κάθε πηγής

3.4 Ωμική Αντίσταση και Αυτεπαγωγή των Αγωγών

Οι τιμές της αντίστασης και της αυτεπαγωγής των αγωγών υπολογίζονται με τον πολλαπλασιασμό των ανά μονάδα τιμών τους R' και L' επί το μήκος του αγωγού. Παρακάτω δίνονται οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται τα R' και L' .

3.4.1 Ανά Μονάδα Ωμική Αντίσταση

Η ωμική αντίσταση ανά μονάδα μήκους των αγωγών μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη διατομή A και την ειδική αντίσταση ρ :

$$R' = 2 \frac{\rho}{A} \quad (3.4)$$

Στους 20°C η ειδική αντίσταση παίρνει τις τιμές:

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{για αγωγούς από χαλκό}$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{για αγωγούς από αλουμίνιο}$$

Η ανά μονάδα ωμική αντίσταση σε διαφορετικές θερμοκρασίες θ υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_{\theta} = R_{20}[1 + 0,004(\theta - 20)] \quad (3.5)$$

όπου R_{θ} είναι η ανά μονάδα ωμική αντίσταση σε θερμοκρασία θ , ενώ R_{20} η ανά μονάδα ωμική αντίσταση σε θερμοκρασία 20°C.

3.4.2 Ανά Μονάδα Αυτεπαγωγή

Στην εικόνα 3.4 φαίνονται οι δύο τύποι αγωγών, κυκλικής και ορθογώνιας διατομής.

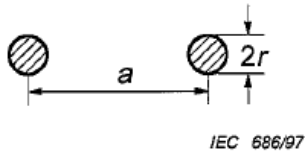


Figure 5a – Cable arrangement

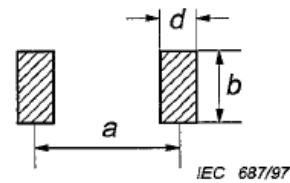


Figure 5b – Busbar arrangement

Εικόνα 3.4 (a) Αγωγός κυκλικής διατομής (b) αγωγός ορθογώνιας διατομής

Στην περίπτωση των μονόκλωνων καλωδίων κυκλικής διατομής (a), η ανά μονάδα τιμή της αυτεπαγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) \quad (3.6)$$

όπου:

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$: η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό

a : η απόσταση μεταξύ των αγωγών

r : η ακτίνα του αγωγού

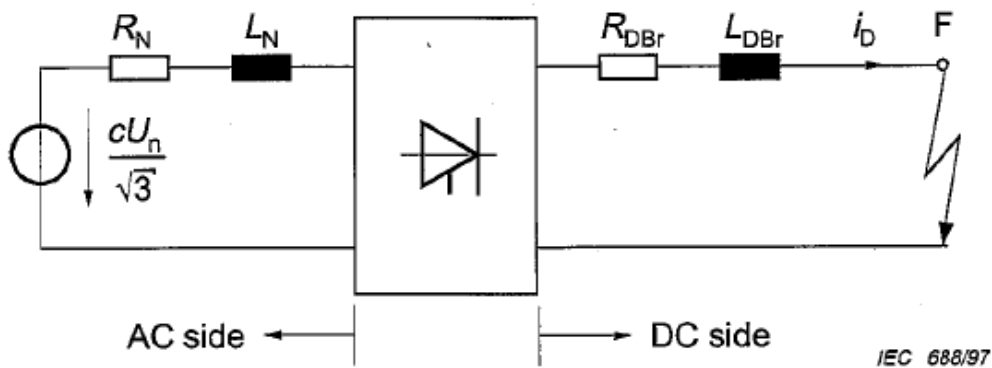
Στην περίπτωση αγωγών ορθογώνιας διατομής (b), η ανά μονάδα τιμή της αυτεπαγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{3}{2} + \ln \frac{a}{d+b} \right) \quad \text{όταν } a > b \quad (3.7)$$

Η ανά μονάδα αυτεπαγωγή παραλληλισμένων αγωγών υπολογίζεται με γεωμετρικές μεθόδους μέσης απόστασης.

3.5 Ο Ανορθωτής

Στην εικόνα 3.5 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του ανορθωτή για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα του ανορθωτή

Η τάση $c \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ αναπαριστά την ισοδύναμη πηγή τάσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909. Η ωμική αντίσταση R_N και η επαγωγική αντίδραση X_N στην εικόνα 3.5 είναι συντομεύσεις των αντιστάσεων και των αντιδράσεων της AC πλευράς του κλάδου του ανορθωτή, όπως αυτός φαίνεται στην εικόνα 3.3. Ισχύει δηλαδή:

$$R_N = R_Q + R_P + R_T + R_R \quad (3.8)$$

$$X_N = X_Q + X_P + X_T + X_R \quad (3.9)$$

όπου:

R_Q , X_Q : η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του AC feeder σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909, ανηγμένες στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

R_P , X_P : η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του καλωδίου παροχής ισχύος, ανηγμένες στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

R_T, X_T : η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή ανηγμένες στο δευτερεύον, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909

R_R, X_R : η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του κυκλώματος μετάβασης (commutation reactor), σε περίπτωση που αυτό υπάρχει

Για να προσδιοριστεί το μέγιστο DC ρεύμα βραχυκύκλωσης, η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση Z_{Qmin} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης I''_{kQmax} του συστήματος στο σημείο της σύνδεσης με τον feeder (σημείο Q):

$$Z_{Qmin} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{kQmax}} \quad (3.10)$$

Για να προσδιοριστεί το ελάχιστο DC ρεύμα βραχυκύκλωσης, η μέγιστη σύνθετη αντίσταση Z_{Qmax} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης I''_{kQmin} του συστήματος στο σημείο της σύνδεσης με τον feeder (σημείο Q):

$$Z_{Qmax} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{kQmin}} \quad (3.11)$$

Τα R_{DBr} και L_{DBr} στην εικόνα 3.5 είναι συντομεύσεις για τις ωμικές αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις της DC πλευράς του ανορθωτή και του DC συστήματος, σύμφωνα με την εικόνα 3.3:

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y \quad (3.12)$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{DL} + L_Y \quad (3.13)$$

όπου:

R_S, L_S : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του κυκλώματος εξομάλυνσης (smoothing reactor) στην DC πλευρά του ανορθωτή

R_{DL}, L_{DL} : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του αγωγού στον κλάδο του ανορθωτή

R_Y, L_Y : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του κοινού κλάδου, εάν αυτός υπάρχει

Ακολουθεί ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών ποσοτήτων της προσεγγιστικής συνάρτησης της εικόνας 3.2, για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι παράμετροι για τις αντιστάσεις και τις αγωγιμότητες, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση (I_{kD})

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση είναι:

$$I_{kD} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \quad (3.14)$$

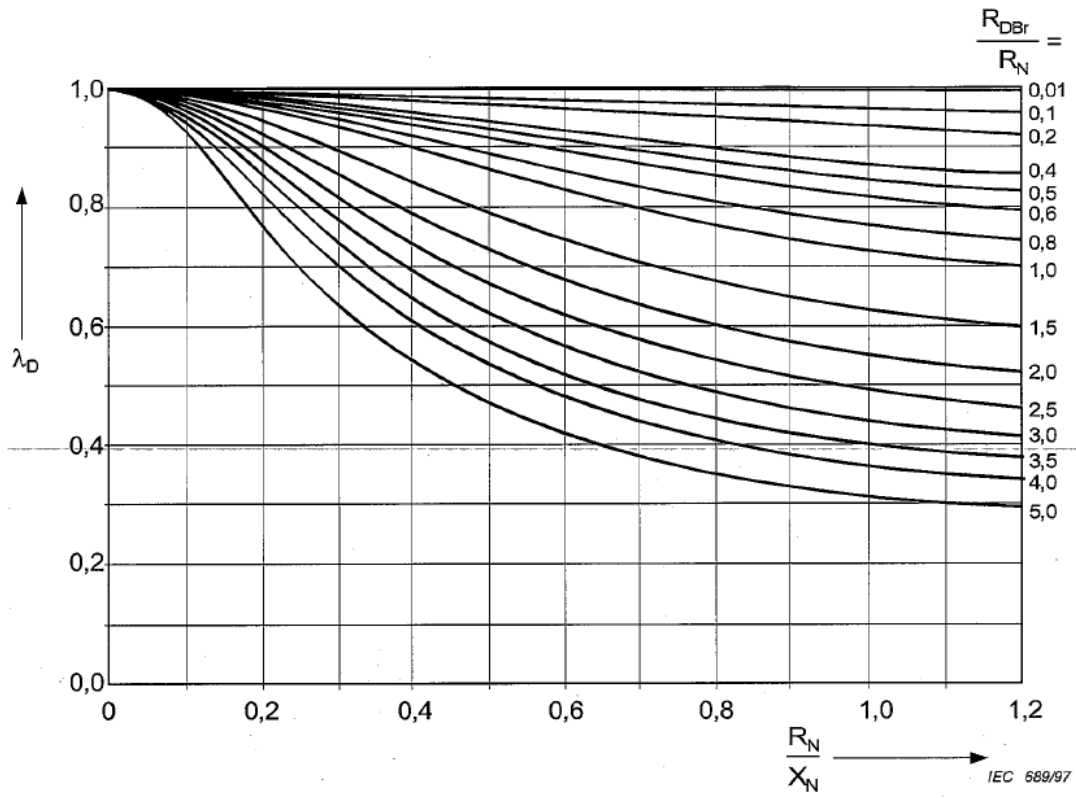
Στην παραπάνω σχέση το κλάσμα $\frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}}$ αναφέρεται στον λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή, ενώ η παράμετρος λ_D εξαρτάται από τους λόγους R_N/X_N και R_{DBr}/R_N και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.6.

Μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης (i_{pD})

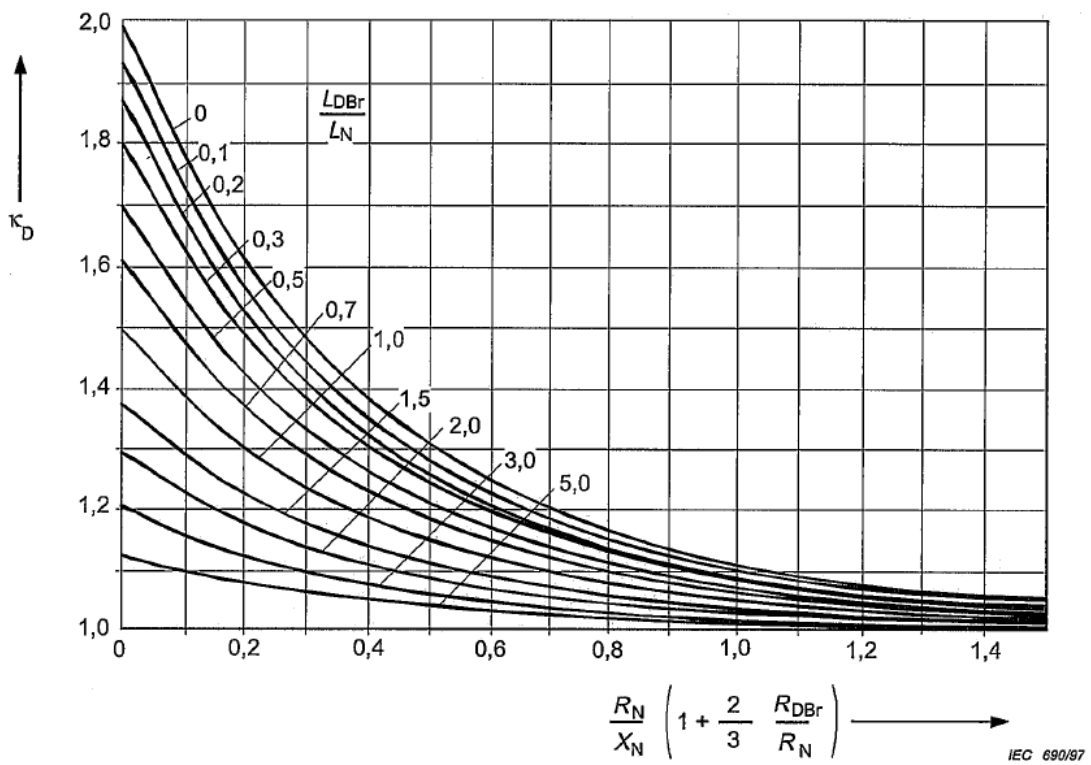
Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι:

$$i_{pD} = \kappa_D I_{kD} \quad (3.15)$$

Η παράμετρος κ_D υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.7.



Εικόνα 3.6 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου λ_D



Εικόνα 3.7 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου κ_D

Χρόνος μεγίστου (t_{pD})

Όταν $\kappa_D \geq 1,05$ ο χρόνος μεγίστου είναι:

$$t_{pD} = (3\kappa_D + 6) \text{ ms} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1 \quad (3.16)$$

$$t_{pD} = \left[(3\kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} > 1 \quad (3.17)$$

Όταν $\kappa_D > 1,05$ το μέγιστο ρεύμα είναι αμελητέο σε σύγκριση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση και θεωρούμε ότι:

$$t_{pD} = T_k \quad (3.18)$$

όπου T_k είναι η χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

Σταθερά χρόνου ανόδου (τ_{1D})

Όταν $f_n = 50\text{Hz}$ η σταθερά χρόνου ανόδου είναι:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} \quad \kappa_D \geq 1,05 \quad (3.19)$$

$$\tau_{1D} = \left[0,7 + \left[7 - \frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \left(0,1 + 0,2 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} \quad \kappa_D < 1,05 \quad (3.20)$$

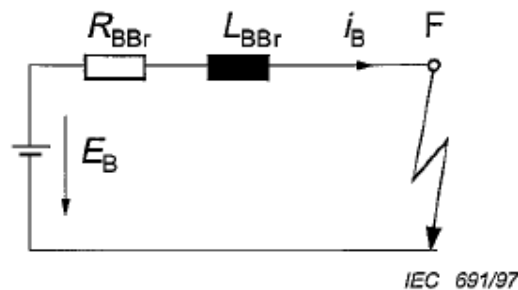
Σταθερά χρόνου καθόδου (τ_{2D})

Όταν $f_n = 50\text{Hz}$ η σταθερά χρόνου καθόδου είναι:

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \left(0,6 + 0,9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \text{ ms} \quad (3.21)$$

3.6 Η μπαταρία

Στην εικόνα 3.8 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα της μπαταρίας για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 3.8 Ισοδύναμο κύκλωμα της μπαταρίας

Σε περίπτωση που η τάση ανοικτού κυκλώματος της μπαταρίας είναι άγνωστη, μπορεί να θεωρηθεί ότι $E_B = 1,05U_{nB}$ για τις φορτισμένες μπαταρίες και $E_B = 0,9U_{nB}$ για τις μη φορτισμένες, όπου U_{nB} η ονομαστική τάση της μπαταρίας. Για τις μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης (lead-acid batteries) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή $U_{nB} = 2V/\text{cell}$ σε περίπτωση που λείπουν οι προδιαγραφές από τον κατασκευαστή.

Τα R_{BBr} και L_{BBr} στην εικόνα 3.8 είναι συντομεύσεις για τις ωμικές αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις, σύμφωνα με την εικόνα 3.3:

$$R_{BBr} = 0,9R_B + R_{BL} + R_Y \quad (3.22)$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{BL} + L_Y \quad (3.23)$$

όπου:

R_B, L_B : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή της μπαταρίας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, για μια φορτισμένη μπαταρία. Εάν το R_B είναι άγνωστο για μια αποφορτισμένη μπαταρία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το R_B μιας φορτισμένης μπαταρίας πολλαπλασιασμένο επί 1,7, ενώ σε περίπτωση που η αυτεπαγωγή είναι άγνωστη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή $L=0,2\text{mH}$.

R_{BL}, L_{BL} : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του αγωγού στον κλάδο της μπαταρίας

R_Y, L_Y : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του κοινού κλάδου, εάν αυτός υπάρχει

Ακολουθεί ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών ποσοτήτων της προσεγγιστικής συνάρτησης της εικόνας 3.2, για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι παράμετροι για τις αντιστάσεις και τις αγωγιμότητες, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση (I_{kB})

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης 1s μετά την έναρξη του βραχυκυκλώματος είναι:

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BBr} + 0,1 R_B} \quad (3.24)$$

Μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης (i_{pB})

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad (3.25)$$

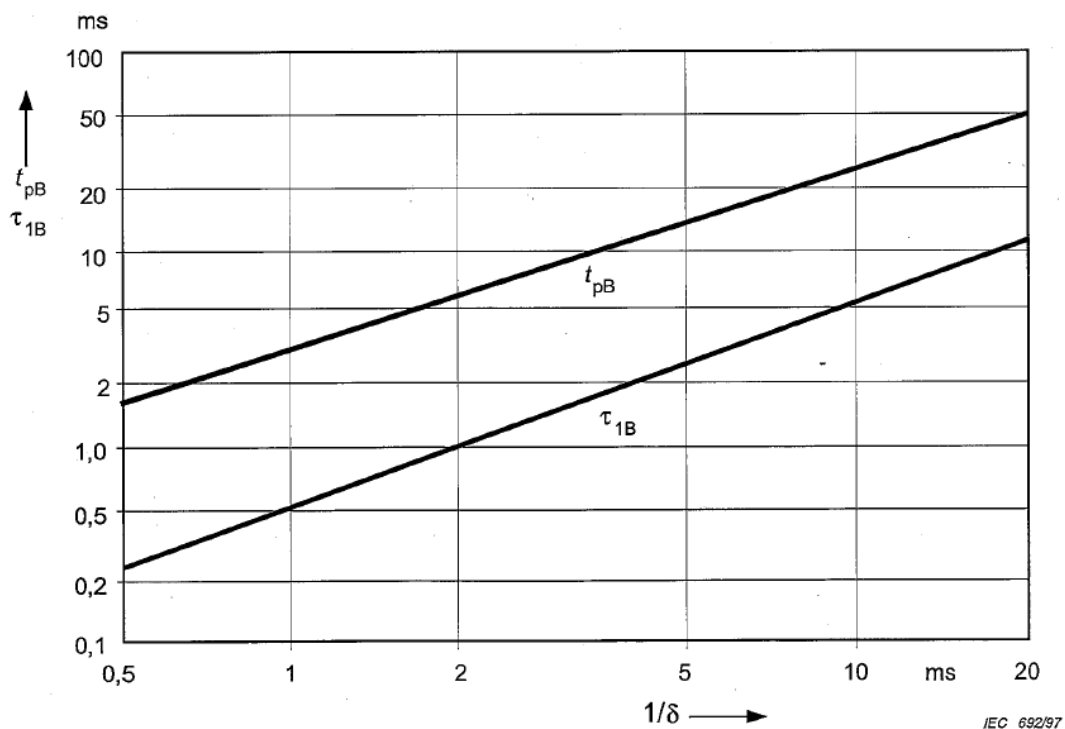
Χρόνος μεγίστου και σταθερά χρόνου ανόδου (t_{pB} , τ_{1B})

Ο χρόνος μεγίστου t_{pB} και η σταθερά χρόνου ανόδου τ_{1B} εξαρτώνται από τη σταθερά $1/\delta$:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \quad (3.26)$$

όπου θεωρούμε ότι $T_B=30ms$.

Οι τιμές των t_{pB} και τ_{1B} υπολογίζονται από τις καμπύλες της εικόνας 3.9.



Εικόνα 3.9 Καμπύλες υπολογισμού των t_{pB} και τ_{1B}

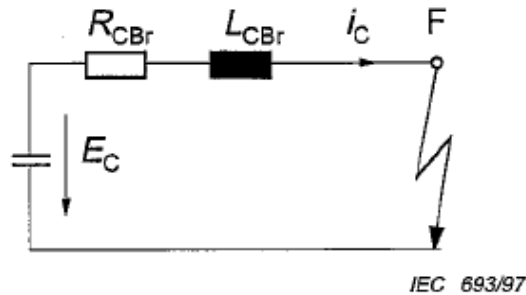
Σταθερά χρόνου καθόδου (τ_{2B})

Η σταθερά χρόνου καθόδου είναι:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms} \quad (3.27)$$

3.7 Ο Πυκνωτής

Στην εικόνα 3.10 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 3.10 Ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή

Τα R_{CBr} και L_{CBr} στην εικόνα 3.10 είναι συντομεύσεις για τις ωμικές αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις, σύμφωνα με την εικόνα 3.3:

$$R_{CBr} = R_C + R_{CL} + R_Y \quad (3.28)$$

$$L_{CBr} = L_{CL} + L_Y \quad (3.29)$$

όπου:

R_C : η ισοδύναμη DC ωμική αντίσταση σειράς του πυκνωτή, που δίνεται από τον κατασκευαστή (εάν η DC αντίσταση είναι άγνωστη, χρησιμοποιείται η μέγιστη AC αντίσταση)

R_{CL} , L_{CL} : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του αγωγού στον κλάδο του πυκνωτή

R_Y , L_Y : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του κοινού κλάδου, εάν αυτός υπάρχει

Η τιμή της χωρητικότητας C είναι η DC χωρητικότητα. Εάν είναι άγνωστη, θεωρούμε ότι $C=1,2 C_{AC}$, όπου C_{AC} η χωρητικότητα όταν $f=100\text{Hz}$.

Ακολουθεί ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών ποσοτήτων της προσεγγιστικής συνάρτησης της εικόνας 3.2, για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι παράμετροι για τις αντιστάσεις και τις αγωγιμότητες, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση (I_{kC})

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση είναι:

$$I_{kC} = 0 \quad (3.30)$$

Μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης (i_{pC})

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι:

$$i_{pC} = \kappa_C \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad (3.31)$$

όπου:

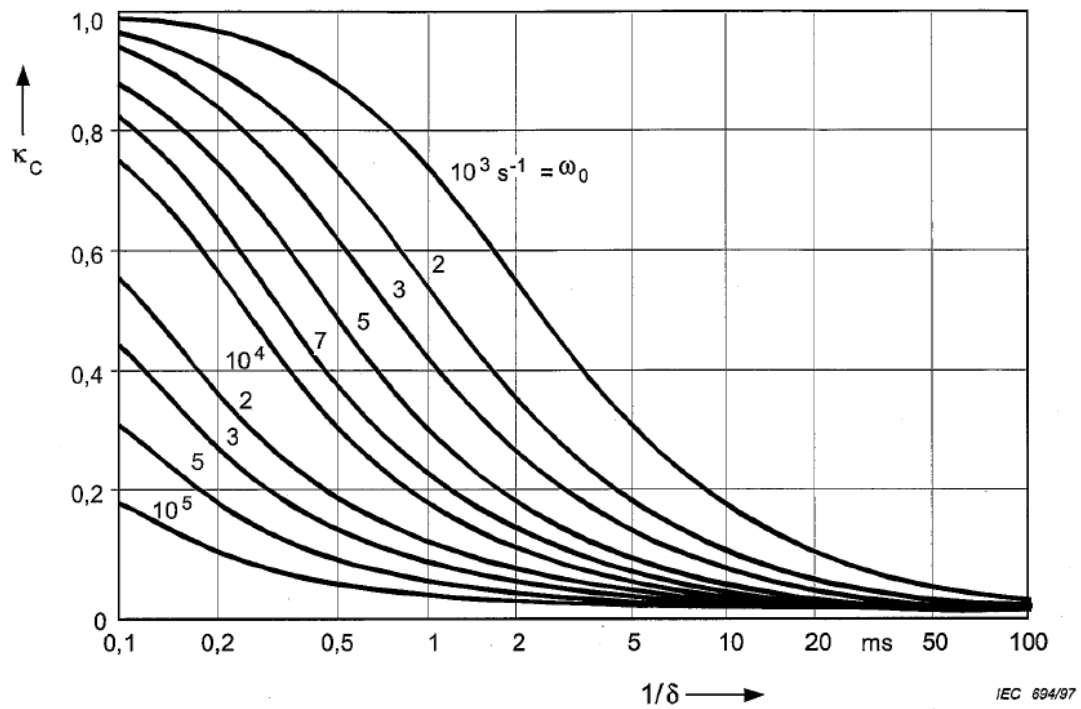
κ_C : παράμετρος υπολογισμού του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης
 E_C : η τάση του πυκνωτή πριν το βραχυκύκλωμα

Η παράμετρος κ_C εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_o και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.11.

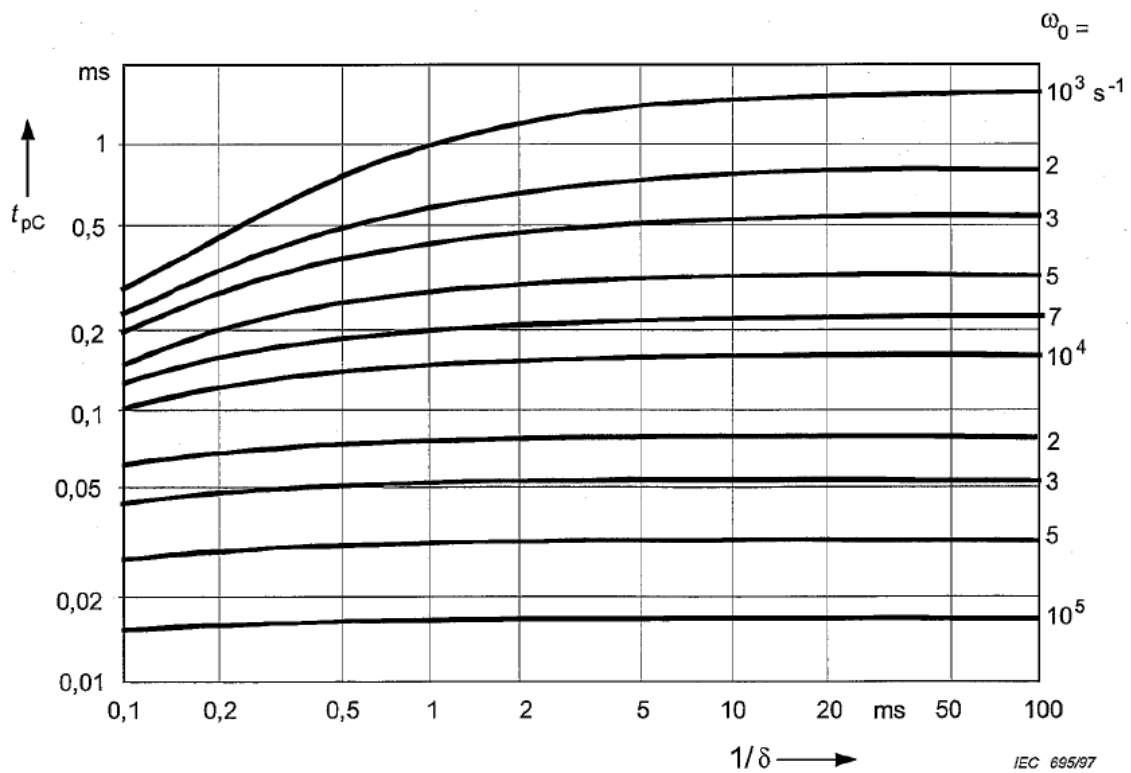
$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad (3.32)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr}C}} \quad (3.33)$$

Αν $L_{CBr} = 0$ τότε $\kappa_C = 1$.



Εικόνα 3.11 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου κ_c



Εικόνα 3.12 Καμπύλες υπολογισμού του χρόνου μέγιστου t_{pc}

Χρόνος μεγίστου (t_{pC})

Ο χρόνος μεγίστου t_{pC} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_0 και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.12.

Αν $L_{CBr} = 0$ τότε $t_{pC} = 0$.

Σταθερά χρόνου ανόδου (τ_{1C})

Η σταθερά χρόνου ανόδου είναι:

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} \quad (3.34)$$

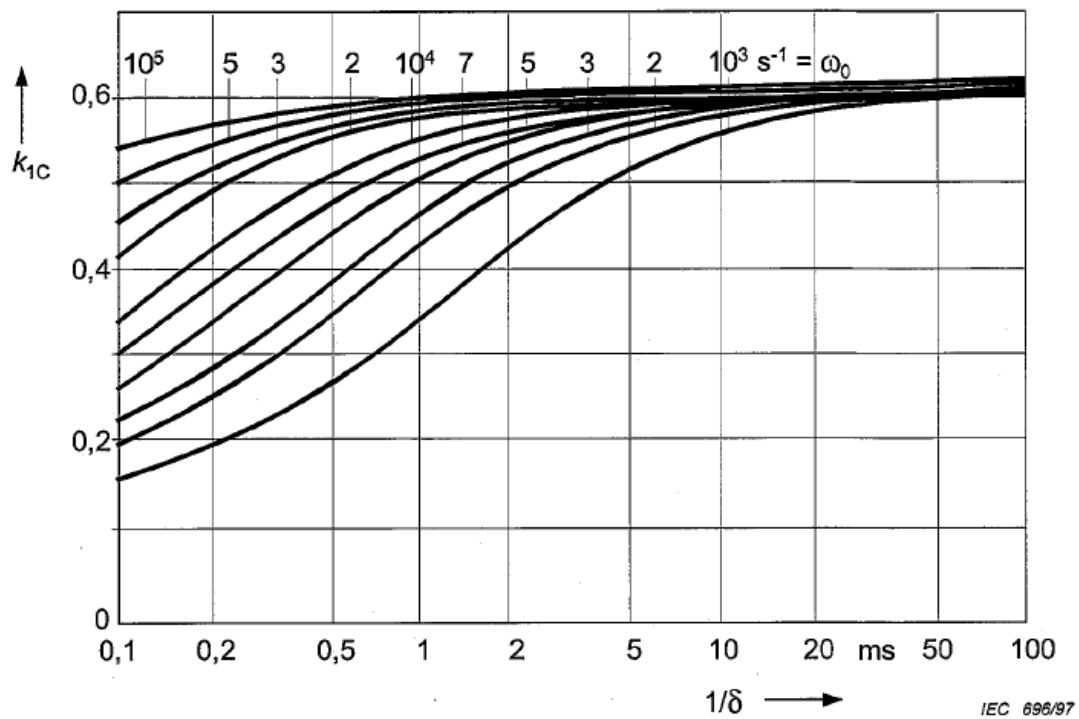
όπου το k_{1C} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_0 και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.13.

Σταθερά χρόνου καθόδου (τ_{2C})

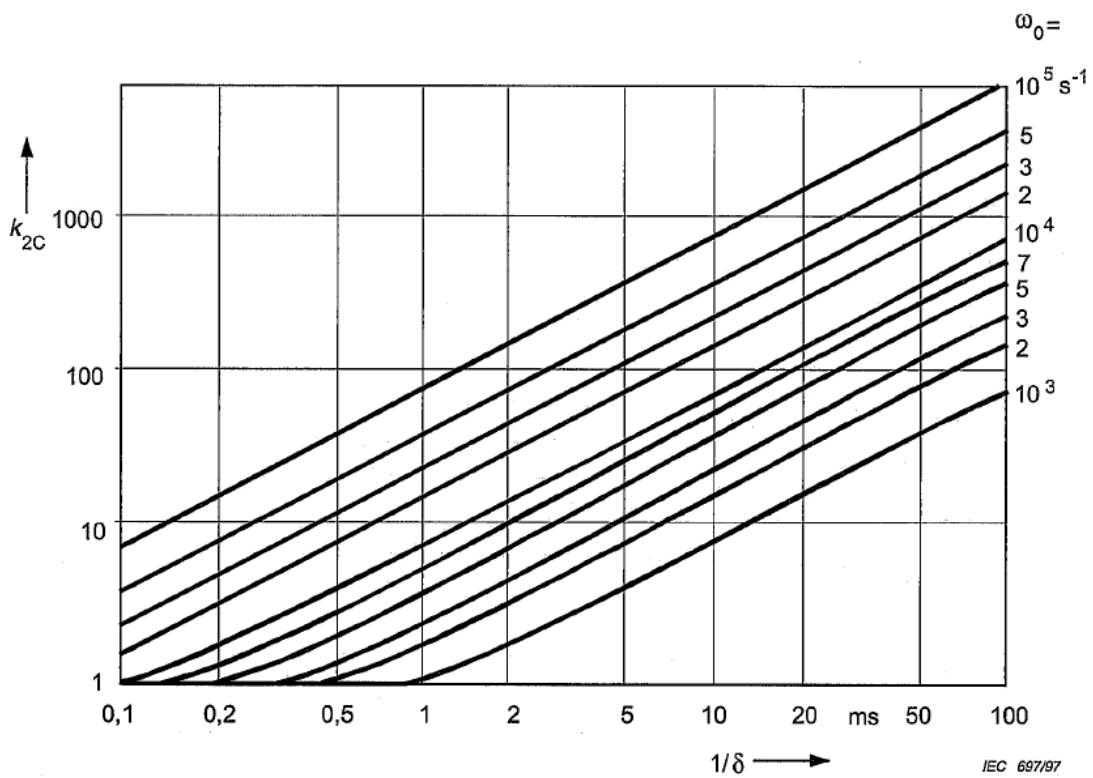
Η σταθερά χρόνου καθόδου είναι:

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBr} C \quad (3.35)$$

όπου το k_{2C} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_0 και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.14. Αν $L_{CBr} = 0$ τότε $k_{2C} = 1$.



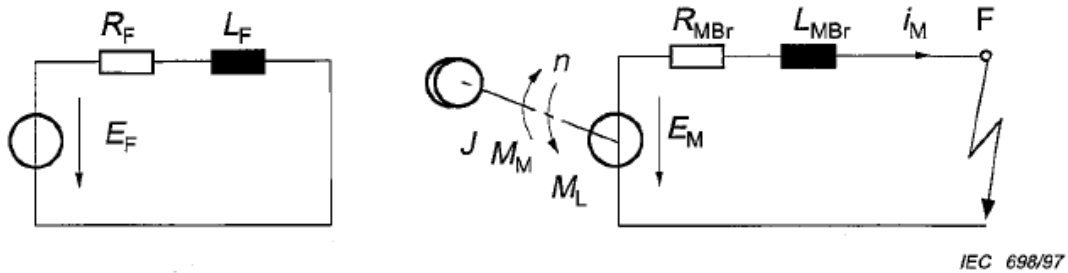
Εικόνα 3.13 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου k_{1c}



Εικόνα 3.14 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου k_{2c}

3.8 Ο DC Κινητήρας με Ανεξάρτητη Διέγερση

Στην εικόνα 3.15 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του DC κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 3.15 Ισοδύναμο κύκλωμα του DC κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση

Τα R_{MBr} και L_{MBr} στην εικόνα 3.15 είναι συντομεύσεις για τις ωμικές αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις, σύμφωνα με την εικόνα 3.3:

$$R_{MBr} = R_M + R_{ML} + R_Y \quad (3.36)$$

$$L_{MBr} = L_M + L_{ML} + L_Y \quad (3.37)$$

$$\tau_M = \frac{L_{MBr}}{R_{MBr}} \quad (3.38)$$

όπου:

R_M, L_M : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του επαγωγίμου κυκλώματος

R_{ML}, L_{ML} : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του αγωγού στον κλάδο του κινητήρα

R_Y, L_Y : η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του κοινού κλάδου, εάν αυτός υπάρχει

τ_M : η σταθερά χρόνου του επαγωγίμου κυκλώματος μέχρι το σημείο του σφάλματος

Σε περίπτωση που περισσότεροι από ένας κινητήρες με ανεξάρτητη διέγερση είναι συνδεδεμένοι στο DC σύστημα, τότε καθένας από αυτούς θα πρέπει να υπολογιστεί μεμονωμένα, ως ξεχωριστός κλάδος κινητήρα.

Ακολουθεί ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών ποσοτήτων της προσεγγιστικής συνάρτησης της εικόνας 3.2, για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι παράμετροι για τις αντιστάσεις και τις αγωγιμότητες, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

Να σημειωθεί πως, όταν το άθροισμα ΣI_{rM} των ονομαστικών ρευμάτων των κινητήρων είναι μικρότερο του 1% του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ανορθωτή I_{kD} , η συνεισφορά των ρευμάτων των DC κινητήρων στο συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης μπορεί να αγνοηθεί.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση (I_{kM})

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση είναι:

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \left(\frac{U_{rM} - R_M I_{rM}}{R_{MBr}} \right) \quad n = n_n = \text{σταθερό} \quad (3.39)$$

$$I_{kM} = 0 \quad n \rightarrow 0 \quad (3.40)$$

όπου:

L_F : η ισοδύναμη κορεσμένη αυτεπαγωγή του κυκλώματος του στάτη σε βραχυκύκλωμα

L_{OF} : η ισοδύναμη μη κορεσμένη αυτεπαγωγή του κυκλώματος του στάτη σε κενό φορτίο

U_{rM} : η ονομαστική τάση του κινητήρα

I_{rM} : το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα

n_n : η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα

Μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης (i_{pM})

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι:

$$i_{pM} = \kappa_M \frac{U_{rM} - I_{rM}R_M}{R_{MBr}} \quad (3.41)$$

Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου κ_M απαιτείται ο υπολογισμός της μηχανικής σταθεράς χρόνου τ_{mec} και της σταθεράς χρόνου του κυκλώματος του στάτη τ_F , οι οποίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_o J R_{MBr} I_{rM}}{M_r U_{rM}} \quad (3.42)$$

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} \quad (3.43)$$

όπου:

J: η στιγμή της αδράνειας του στρεφόμενου μέρους

n_o : η ταχύτητα κενού φορτίου

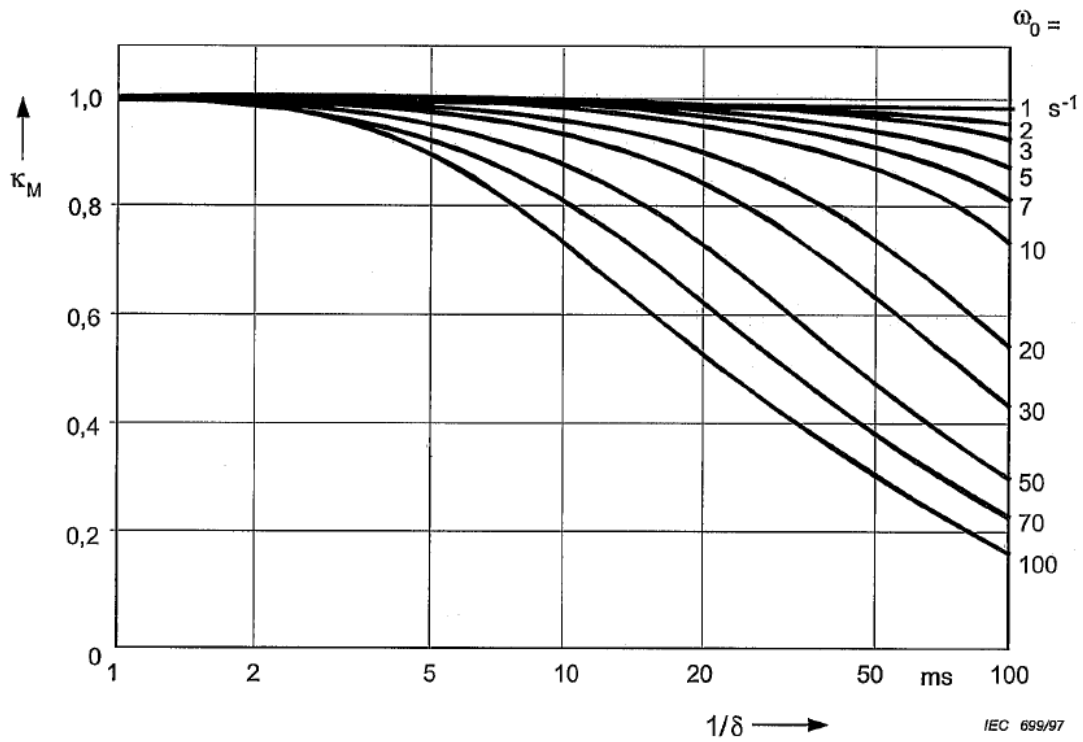
M_r : η ονομαστική ροπή του κινητήρα

Αν ισχύει $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$ τότε $\kappa_M=1$.

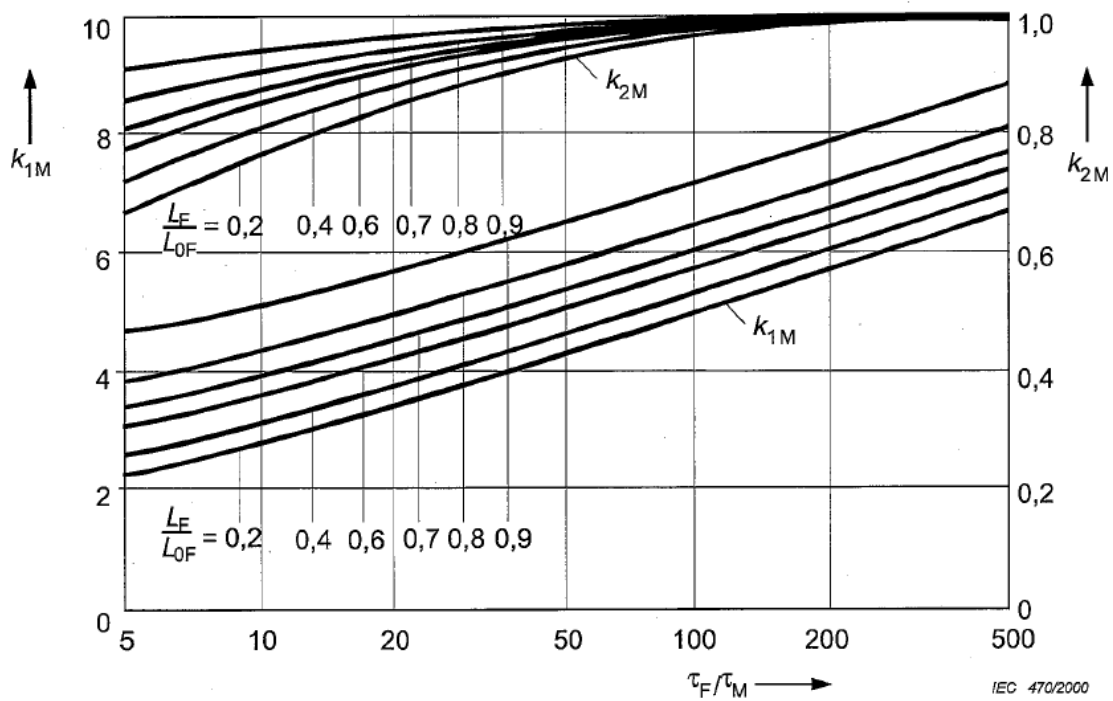
Αν ισχύει $\tau_{mec} < 10\tau_F$ τότε η παράμετρος κ_M εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και από τη γωνιακή συχνότητα ω_o και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.16, όπου:

$$\frac{1}{\delta} = 2\tau_M \quad (3.44)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec}\tau_M} \left(1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}}\right)} \quad (3.45)$$



Εικόνα 3.16 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου k_M όταν $\tau_{mec} < 10\tau_F$



Εικόνα 3.17 Καμπύλες υπολογισμού των παραμέτρων k_{1M} και k_{2M} για τον υπολογισμό των τ_{pM} και τ_{1M} όταν ισχύει $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$

Χρόνος μεγίστου και σταθερά χρόνου ανόδου (t_{pM} , τ_{1M})

Αν ισχύει $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$ τότε τα t_{pM} και τ_{1M} υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$t_{pM} = k_{1M}t_M \quad (3.46)$$

$$\tau_{1M} = k_{2M}\tau_M \quad (3.47)$$

Οι παράμετροι k_{1M} και k_{2M} εξαρτώνται από τους λόγους τ_F/τ_M και L_F/L_{OF} και υπολογίζονται από τις καμπύλες της εικόνας 3.17.

Αν ισχύει $\tau_{mec} < 10\tau_F$ τότε το t_{pM} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_o και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.18, ενώ το τ_{1M} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{1M} = k_{3M}\tau_M \quad (3.48)$$

όπου η παράμετρος k_{3M} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_o και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.19.

Σταθερά χρόνου καθόδου (τ_{2M})

Αν ισχύει $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$ τότε το τ_{2M} υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\tau_{2M} = \tau_F \quad n = n_n = \text{σταθερό} \quad (3.49)$$

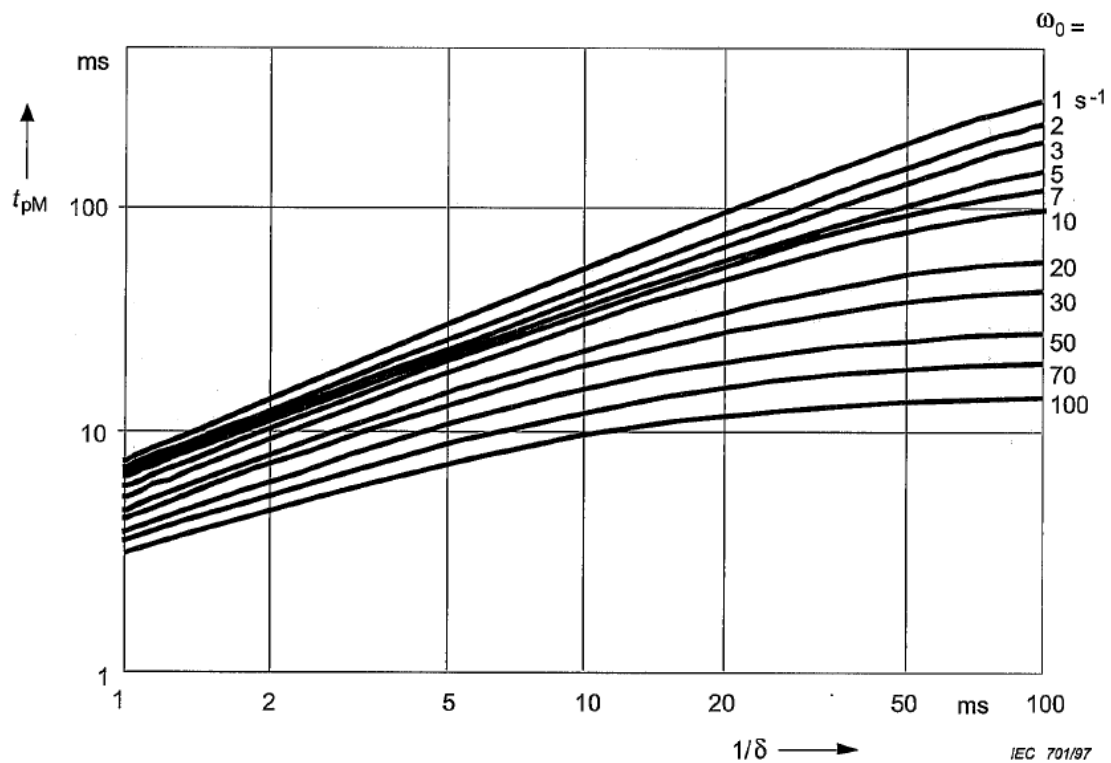
$$\tau_{2M} = \frac{L_{OF}}{L_F} k_{4M} \tau_{mec} \quad n \rightarrow 0 \quad (3.50)$$

όπου η παράμετρος k_{4M} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_o και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.20.

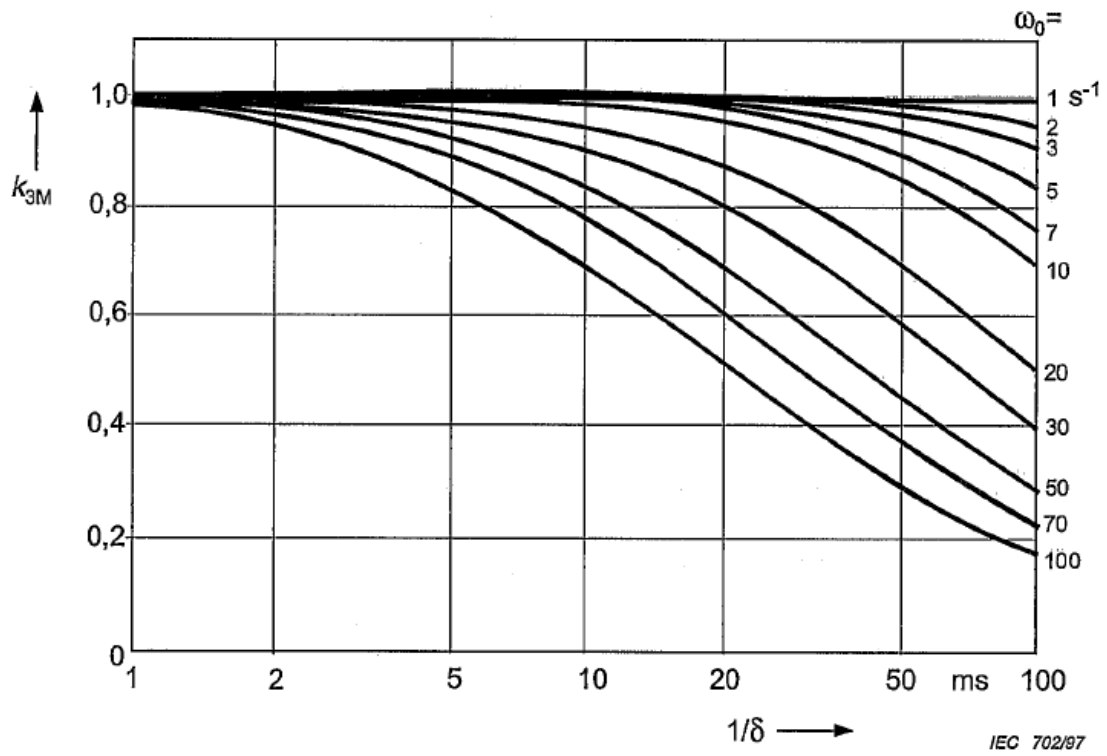
Αν ισχύει $\tau_{mec} < 10\tau_F$ τότε το τ_{2M} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{2M} = k_{4M}\tau_{mec} \quad (3.51)$$

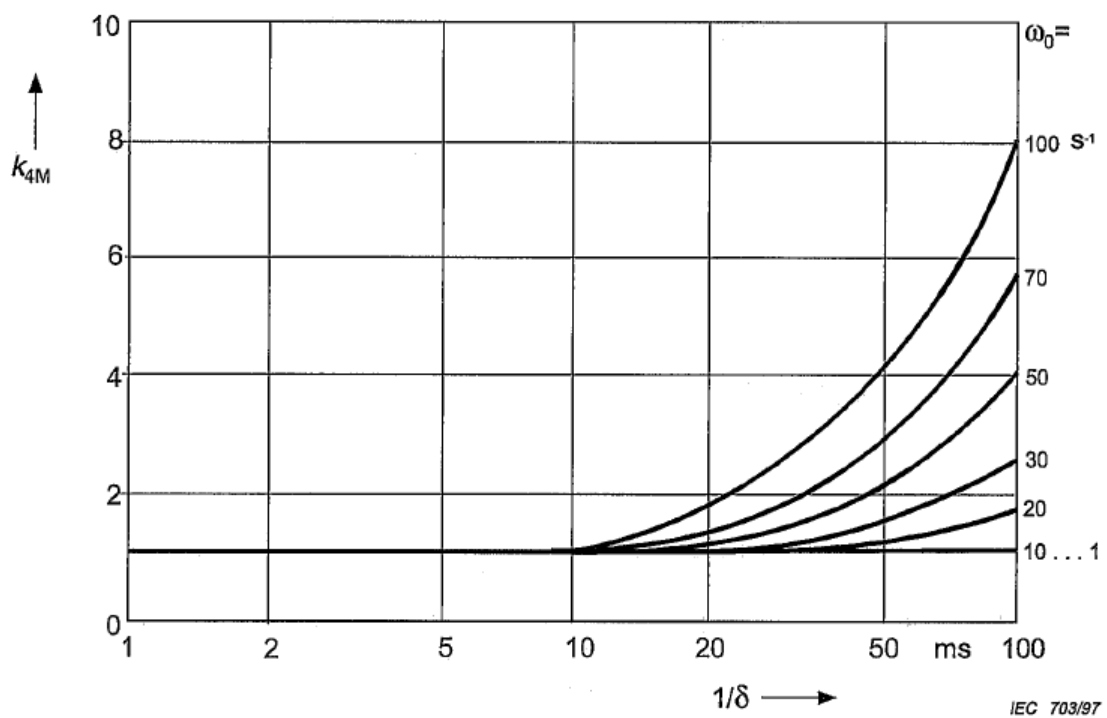
όπου το k_{4M} εξαρτάται από τον λόγο $1/\delta$ και τη γωνιακή συχνότητα ω_0 και υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.20.



Εικόνα 3.18 Καμπύλες υπολογισμού του χρόνου μεγίστου t_{pM} όταν ισχύει $\tau_{mec} < 10\tau_F$



Εικόνα 3.19 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου k_{3M} για τον υπολογισμό της σταθεράς χρόνου ανόδου τ_{1M} όταν ισχύει $\tau_{mec} < 10\tau_F$



Εικόνα 3.20 Καμπύλες υπολογισμού της παραμέτρου k_{4M} για τον υπολογισμό της σταθεράς χρόνου καθόδου τ_{2M}

3.9 Υπολογισμός Συνολικού Ρεύματος Βραχυκύκλωσης

3.9.1 Συντελεστής Διόρθωσης

Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το σφάλμα F1 στην εικόνα 3.3 προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης που υπολογίστηκαν στις παραγράφους 3.5, 3.6, 3.7 και 3.8 θεωρώντας $R_Y=0$ και $L_Y=0$, καθώς δεν υπάρχει κοινός κλάδος.

Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το σφάλμα F2 στην εικόνα 3.3 προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης που υπολογίστηκαν στις παραγράφους 3.5, 3.6, 3.7 και 3.8 λαμβάνοντας υπόψη τα R_Y και L_Y του κοινού κλάδου. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται διόρθωση των τιμών, λόγω του κοινού κλάδου. Οι διορθωμένες τιμές των ρευμάτων i_{pj} και I_{kj} για κάθε πηγή υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$i_{pcorj} = \sigma_j i_{pj} \quad (3.52)$$

$$I_{kcorj} = \sigma_j I_{kj} \quad (3.53)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης σ_j υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_j = \frac{R_{resj}(R_{ij} + R_Y)}{R_{resj}R_{ij} + R_{ij}R_Y + R_{resj}R_Y} \quad (3.54)$$

Οι σταθερές τ_1 και τ_2 δεν επηρεάζονται από τη διόρθωση.

Οι αντιστάσεις R_{ij} και R_{resj} υπολογίζονται με βάση τον πίνακα της εικόνας 3.21, όπου:

U: η τάση στην τοποθεσία του σφάλματος πριν το βραχυκύκλωμα

R_Y : η ωμική αντίσταση του κοινού κλάδου

Source j	R_{ij}	R_{resj}
Rectifier D	$R_{iD} = \frac{U}{I_{kD}} - R_Y$	$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Battery B	$R_{iB} = R_B + R_{BL}$	$R_{resB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Capacitor C	$R_{iC} = R_C + R_{CL}$	$R_{resC} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Motor M	$R_{iM} = R_M + R_{ML}$	$R_{resM} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}}}$

Εικόνα 3.21 Πίνακας υπολογισμού των αντιστάσεων R_{ij} και R_{resj}

3.9.2 Υπέρθωση των Επιμέρους Ρευμάτων στην Τοποθεσία του Σφάλματος

Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει από την υπέρθεση των προσεγγιστικών χρονικών συναρτήσεων ρεύματος βραχυκύκλωσης για την κάθε πηγή, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις (3.1), (3.2) και (3.3). Δηλαδή είναι:

$$i(t) = \sum_{j=1}^m \left\{ \begin{array}{ll} i_{pj} \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1j}}}}{1 - e^{-\frac{t_{pj}}{\tau_{1j}}}} & 0 \leq t \leq t_{pj} \\ i_{pj} \left[(1 - p_j) e^{-\frac{-(t-t_{pj})}{\tau_{2j}}} + p_j \right] & t_{pj} \leq t \leq T_k \end{array} \right\} \quad (3.55)$$

με

$$p_j = \frac{I_{kj}}{i_{pj}} \quad (3.56)$$

όπου:

$i(t)$: το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης

j : η αρίθμηση των πηγών

m : το πλήθος των πηγών

T_k : η χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ IEC 61660 ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 ασχοληθήκαμε με την εκτενή παρουσίαση του προτύπου IEC 61660, το οποίο αφορά την εξαγωγή εξισώσεων που περιγράφουν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε βοηθητικές εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος σε εργοστάσια παραγωγής ισχύος και υποσταθμούς. Στο πλαίσιο της μελέτης των DC μικροδικτύων και των δικτύων διανομής συνεχούς ρεύματος, έχει ενδιαφέρον η έρευνα γύρω από το κατά πόσο το πρότυπο αυτό δίνει καλές προσεγγίσεις για τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προκύπτουν στα σφάλματα σε δίκτυα τέτοιου είδους.

Το παραπάνω ζήτημα έχει απασχολήσει τη διεθνή βιβλιογραφία και στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια επιβεβαίωση του συμπεράσματος που έχει εξαχθεί, ότι δηλαδή το πρότυπο IEC 61660 είναι αρκετά ακριβές στις περισσότερες περιπτώσεις [4]. Για το σκοπό αυτό στήθηκε το υποθετικό δοκιμαστικό δίκτυο που προτείνεται στο [4], πραγματοποιήθηκε ένα υποθετικό σφάλμα σε απόσταση 0,5km από τον DC ζυγό και έγινε χρήση του λογισμικού Simulink σε δύο εφαρμογές:

α) Υλοποίηση της μαθηματικής φόρμουλας που προτείνει το πρότυπο IEC 61660 για τη χρονική συνάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης

β) Υλοποίηση του αντίστοιχου ηλεκτρικού κυκλώματος, στο οποίο γίνεται η προσομοίωση του σφάλματος και μετριέται το ρεύμα βραχυκύκλωσης

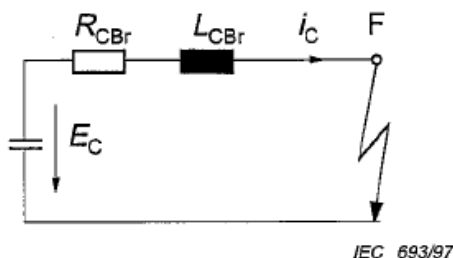
Η σύγκριση των δύο κυματομορφών του ρεύματος (εκείνης που προέκυψε από τον υπολογισμό και εκείνης που προέκυψε από την προσομοίωση) επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που συναντάμε στη βιβλιογραφία και διατυπώθηκε παραπάνω.

Να σημειωθεί ότι το πρότυπο IEC 61660 αναφέρεται σε δίκτυα που περιλαμβάνουν ανορθωτές, μπαταρίες, πυκνωτές εξομάλυνσης και DC κινητήρες με ανεξάρτητη διέγερση. Το δοκιμαστικό δίκτυο που στήθηκε περιλαμβάνει μόνο ανορθωτή και πυκνωτή εξομάλυνσης και η προσομοίωση του Simulink έγινε για το ρεύμα του πυκνωτή.

4.2 Το Δοκιμαστικό Δίκτυο

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης επιλέχθηκε ένα δίκτυο με ρεαλιστικές παραμέτρους, όπως προτείνεται στο [4]. Τα δεδομένα προέκυψαν από το [25]. Πρόκειται για ένα DC δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης, το οποίο περιλαμβάνει μόνο φορτία. Η διασύνδεση του AC συστήματος με το DC γίνεται μέσω ενός VSC (Voltage Source Converter) με IGBT, με την προσθήκη πυκνωτή εξομάλυνσης με χωρητικότητα $C=6750\mu\text{F}$. Τόσο ο converter, όσο και ο πυκνωτής εξομάλυνσης συνεισφέρουν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, αλλά στο πλαίσιο αυτής της μελέτης εξετάζεται η συνεισφορά του πυκνωτή. Επειδή ο πυκνωτής και ο converter είναι παράλληλα τοποθετημένοι και εξετάζεται μόνο το ρεύμα του πυκνωτή, ουσιαστικά το κύκλωμα που υλοποιείται είναι αυτό της εικόνας (3.10), η οποία παρατίθεται παρακάτω για διευκόλυνση. Η τάση μεταξύ των δύο πόλων του DC δικτύου είναι 612V, ενώ οι παράμετροι των καλωδίων χαμηλής τάσης ανά μονάδα μήκους είναι $R = 0,164\Omega/\text{km}$ και $L = 0,24\text{mH}/\text{km}$.

Υπενθυμίζεται ότι το σφάλμα στην προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε απόσταση 0,5km από τον DC ζυγό.



Εικόνα 4.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή

4.3 Υλοποίηση της Χρονικής Συνάρτησης Ρεύματος

Η προσεγγιστική χρονική συνάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης που δίνεται στο πρότυπο IEC 61660 περιγράφεται από τις σχέσεις (3.1), (3.2) και (3.3) που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτές οι σχέσεις περιλαμβάνουν τα μεγέθη i_p , I_k , t_p , τ_1 , τ_2 , τα προσδιορίζονται για την κάθε πηγή σφάλματος ξεχωριστά (ανορθωτής, μπαταρία, πυκνωτής, κινητήρας). Στην περίπτωση μας ασχολούμαστε με τον πυκνωτή (εικόνα 4.1), στον οποίο το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη μόνιμη κατάσταση είναι μηδενικό, δηλαδή $I_{kC} = 0$. Επομένως, οι εξισώσεις των ρευμάτων απλοποιούνται στις ακόλουθες:

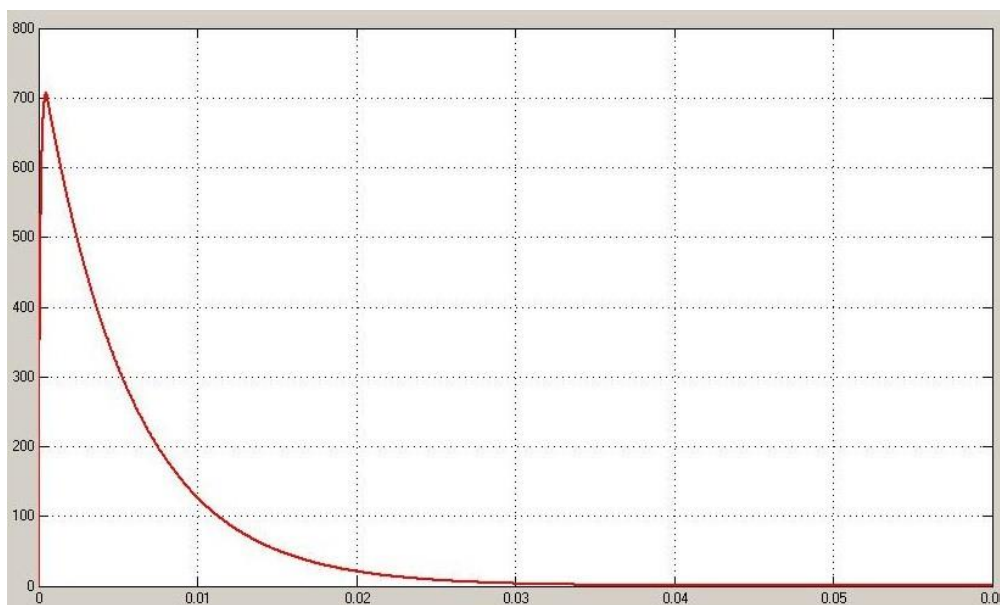
$$i_1(t) = i_p \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (4.1)$$

$$i_2(t) = i_p e^{-\frac{-(t-t_p)}{\tau_2}} \quad t_p \leq t \quad (4.2)$$

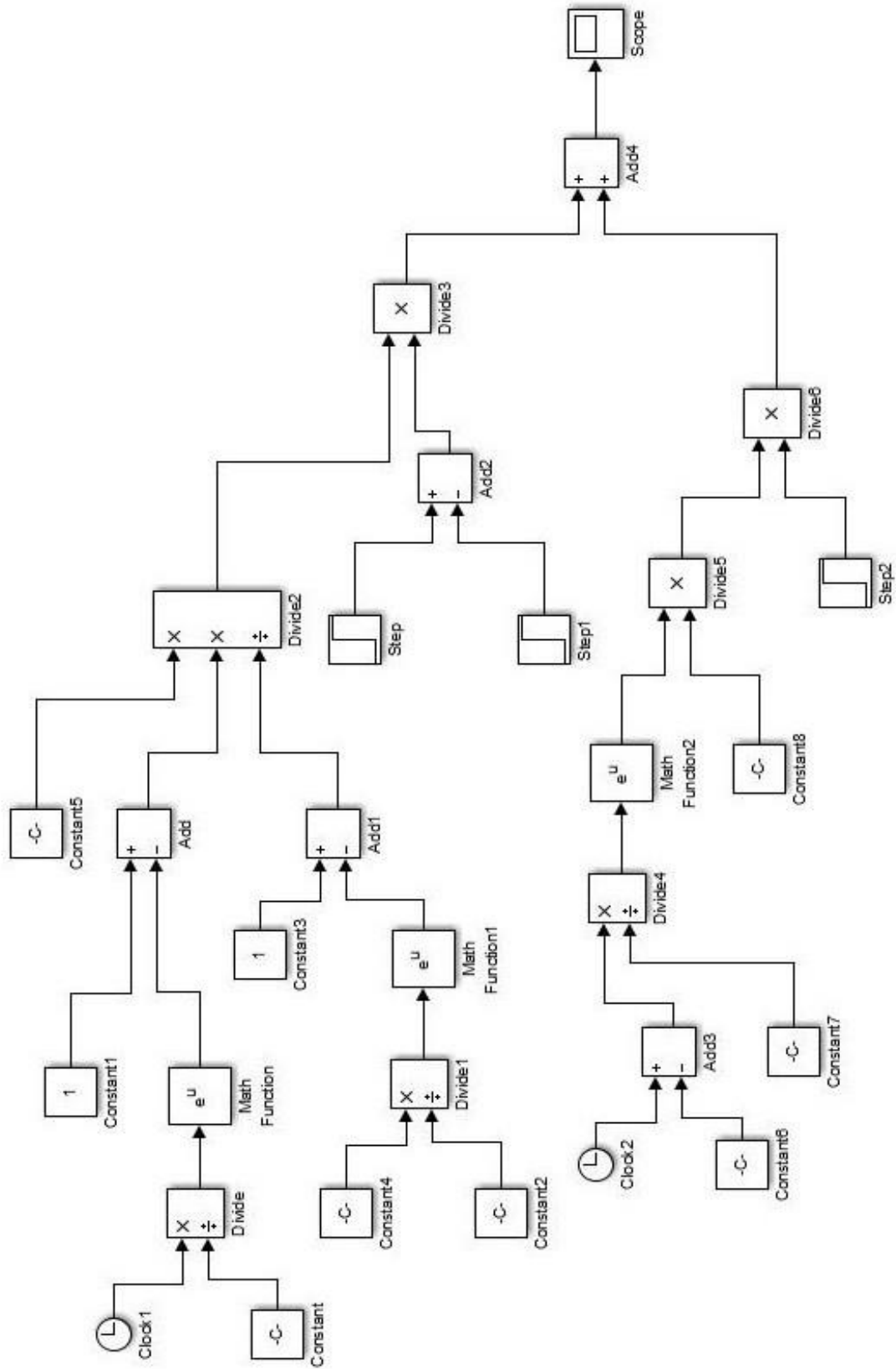
Σύμφωνα με τη σχέση (3.31), είναι $i_p = \kappa_C \frac{E_C}{R_{CBr}}$. Είναι $E_C=612V$, όση δηλαδή και η τάση του DC δικτύου, ενώ ως R_{CBr} μπορούμε να θεωρήσουμε την ωμική

αντίσταση των καλωδίων της γραμμής χαμηλής τάσης, υποθέτοντας ότι η ωμική αντίσταση του πυκνωτή και η ωμική αντίσταση του κλάδου του πυκνωτή είναι αμελητέες σε σχέση με εκείνη των καλωδίων της γραμμής χαμηλής τάσης. Επομένως, για σφάλμα που πραγματοποιείται σε απόσταση 0,5km έχουμε $R_{CBr} = 0,82\Omega$. Αντίστοιχα, για την αυτεπαγωγή έχουμε $L_{CBr}=0,12mH$. Η παράμετρος k_C υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.11, αφού προσδιοριστούν πρώτα ο λόγος $1/\delta$ και η γωνιακή συχνότητα ω_o . Είναι $\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CBr}}{R_{CBr}} = 0,297 \cdot 10^{-3}$ και $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr}C}} = 1111,11 s^{-1}$ οπότε οι καμπύλες της εικόνας 3.11 δίνουν $k_C=0,95$ και επομένως είναι $i_p=709,02A$. Για τον υπολογισμό του χρόνου μεγίστου t_p χρησιμοποιούμε τις καμπύλες της εικόνας 3.12 και βρίσκουμε $t_p=0,5ms$.

Ακολουθεί ο υπολογισμός της σταθεράς χρόνου ανόδου τ_1 , η οποία δίνεται από τη σχέση (3.34) ως $\tau_1 = k_{1C}t_p$. Η παράμετρος k_{1C} υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.13 και έχει την τιμή $k_{1C} = 0,22$. Οπότε ο υπολογισμός της σταθεράς τ_1 δίνει $\tau_1 = 0,11ms$. Η σταθερά χρόνου καθόδου τ_2 δίνεται από τη σχέση (3.35) ως $\tau_2 = k_{2C}R_{CBr}C$. Η σταθερά k_{2C} υπολογίζεται από τις καμπύλες της εικόνας 3.14 και έχει την τιμή $k_{2C} = 1$. Οπότε ο υπολογισμός της σταθεράς τ_2 δίνει $\tau_2 = 5,54ms$. Οι τιμές αυτές εισάγονται στις σχέσεις (4.1) και (4.2) για να προκύψει η προσεγγιστική χρονική συνάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η υλοποίηση αυτή έγινε στο λογισμικό Simulink με χρήση κατάλληλων blocks. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος όπως υπολογίστηκε από το Simulink, ενώ στην εικόνα 4.3 φαίνεται η διάταξη που υλοποιήθηκε.



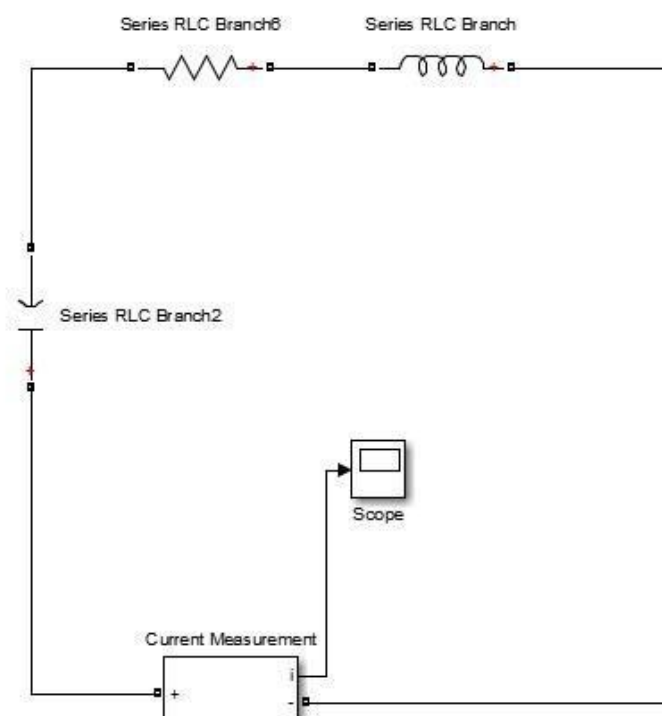
Εικόνα 4.2 Κυματομορφή του ρεύματος σε A σύμφωνα με τις εξισώσεις



Εικόνα 4.3 Η υλοποίηση της συνάρτησης στο Simulink

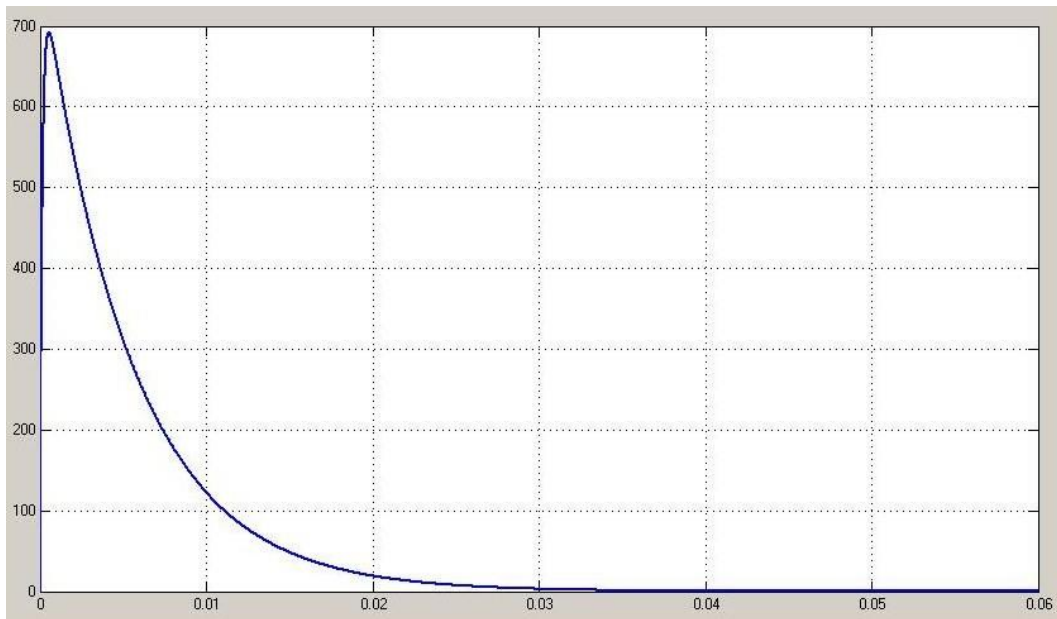
4.4 Υλοποίηση του Ηλεκτρικού Κυκλώματος Προσομοίωσης

Με βάση την εικόνα (4.1), το ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή περιλαμβάνει τον πυκνωτή χωρητικότητας C , την ωμική αντίσταση σειράς R_{CB_r} και την αυτεπαγωγή L_{CB_r} . Για τον σκοπό αυτόν, ένα RLC κύκλωμα υλοποιήθηκε στο Simulink, με την προσθήκη ενός αμπερομέτρου για τη μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι τιμές των στοιχείων που επιλέχθηκαν ήταν βέβαια οι ίδιες με αυτές της υλοποίησης της συνάρτησης, δηλαδή: $E_C=612V$, $R_{CB_r} = 0,82\Omega$, $L_{CB_r}=0,12mH$ και $C=6750\mu F$. Στην εικόνα 4.4 φαίνεται το κύκλωμα που σχεδιάστηκε.

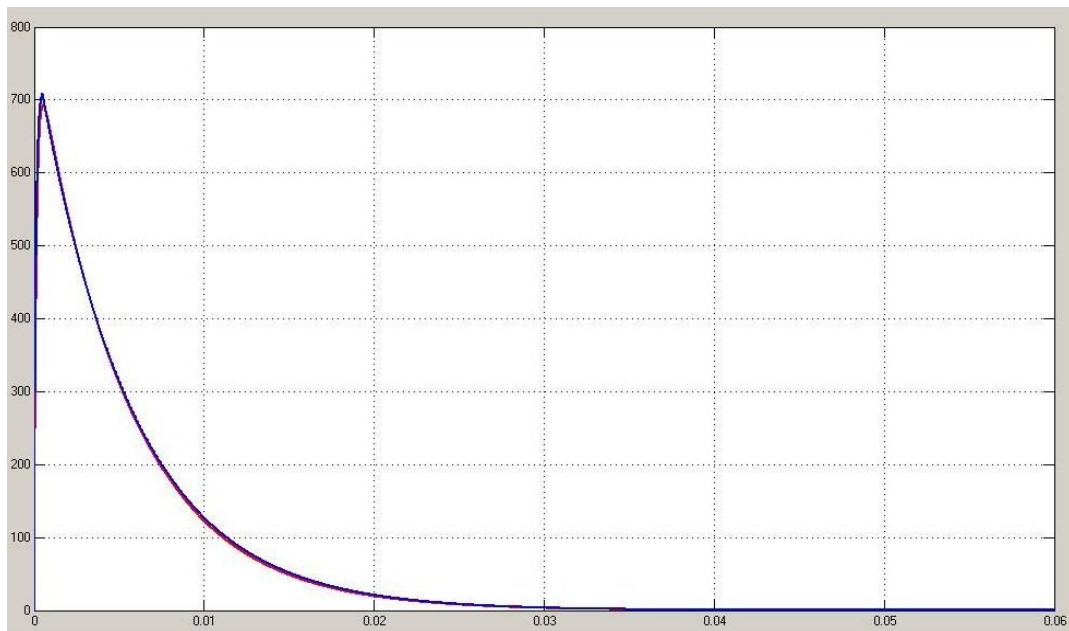


Εικόνα 4.4 Το ηλεκτρικό κύκλωμα προσομοίωσης

Στην εικόνα 4.5 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που προέκυψε από την προσομοίωση του παραπάνω κυκλώματος στο Simulink, ενώ στην εικόνα 4.6 παρουσιάζονται οι δύο κυματομορφές στο ίδιο γράφημα και γίνεται προφανές ότι η προσέγγιση που δίνουν οι εξισώσεις του IEC 61660 για το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πυκνωτή παρεκκλίνει ελάχιστα από την τιμή που δίνει η προσομοίωση.



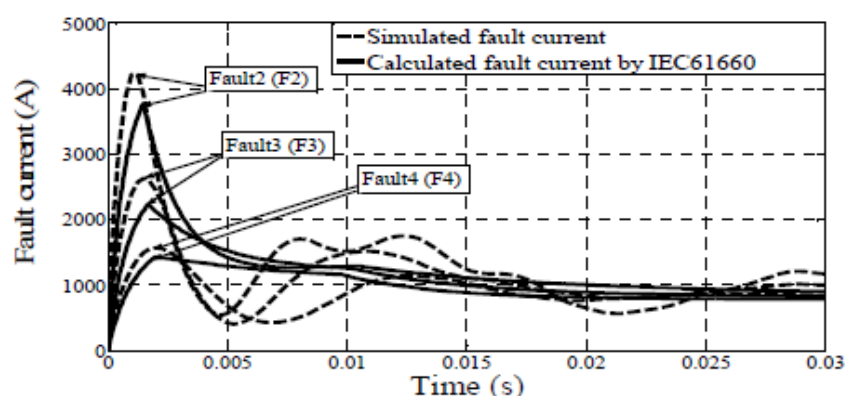
Εικόνα 4.5 Κυματομορφή του ρεύματος σε A σύμφωνα με την προσομοίωση



Εικόνα 4.6 Σύγκριση των δύο κυματομορφών σε κοινό γράφημα (κόκκινο: κυματομορφή σύμφωνα με τις εξισώσεις / μπλε: κυματομορφή σύμφωνα με την προσομοίωση)

4.5 Αποτελέσματα για το Ρεύμα Συμπεριλαμβανομένου και του Ανορθωτή

Εκτός από το ρεύμα του πυκνωτή που μελετήσαμε προηγουμένως, μια αντίστοιχη δουλειά έχει γίνει στο [4] για το συνολικό ρεύμα (συμπεριλαμβανομένου του ανορθωτή) με χρήση του λογισμικού PSCAD/EMTDC. Ενδεικτικά, στην εικόνα 4.7 φαίνονται οι κυματομορφές του ρεύματος σύμφωνα με τις εξισώσεις και σύμφωνα με την προσομοίωση σε κοινό γράφημα, για διάφορες περιπτώσεις σφαλμάτων σε διαφορετικές αποστάσεις.



Εικόνα 4.7 Σύγκριση των κυματομορφών για το ολικό ρεύμα σε διάφορες περιπτώσεις σφαλμάτων

Παρατηρείται ότι το μαθηματικό μοντέλο του προτύπου IEC 61660 υπολογίζει με καλή ακρίβεια την τιμή της μόνιμης κατάστασης του ρεύματος βραχυκύκλωσης, όμως υστερεί στον υπολογισμό της μεταβατικής κατάστασης, αφού υποτιμά τις μέγιστες τιμές του σε κάθε περίπτωση σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΕ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

5.1 Εισαγωγή

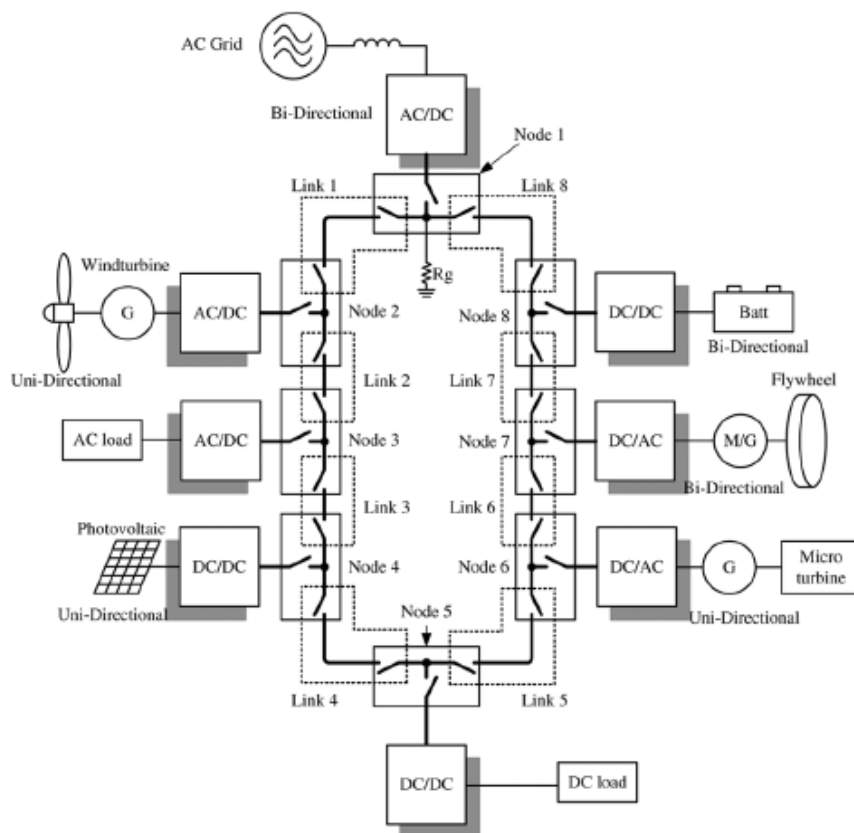
Σε περιπτώσεις σφαλμάτων των DC μικροδικτύων και των DC δικτύων χαμηλής τάσης, ένα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει είναι ο εντοπισμός της τοποθεσίας του σφάλματος. Παρότι έχουν αναπτυχθεί αξιόπιστες μέθοδοι εντοπισμού στα AC δίκτυα, οι μέθοδοι αυτές είναι δύσκολο να εφαρμοστούν πιστά σε DC συστήματα εξαιτίας της απουσίας παραμέτρων όπως η συχνότητα ή τα phasors των διαφόρων μεγεθών.

Στη βιβλιογραφία έχει προταθεί ένα σύστημα προστασίας και εντοπισμού του σφάλματος με χρήση της συσκευής probe power unit, το οποίο επιτρέπει τον εντοπισμό και την απομόνωση του σφάλματος χωρίς να απενεργοποιηθεί

ολόκληρο το σύστημα [26]. Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται αφενός μια παρουσίαση της εν λόγω μεθόδου εντοπισμού της τοποθεσίας του σφάλματος και αφετέρου γίνεται δοκιμή της μεθόδου αυτής με μια προσομοίωση διαφόρων σφαλμάτων στο λογισμικό Simulink, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβειά της σε κάθε περίπτωση σφάλματος.

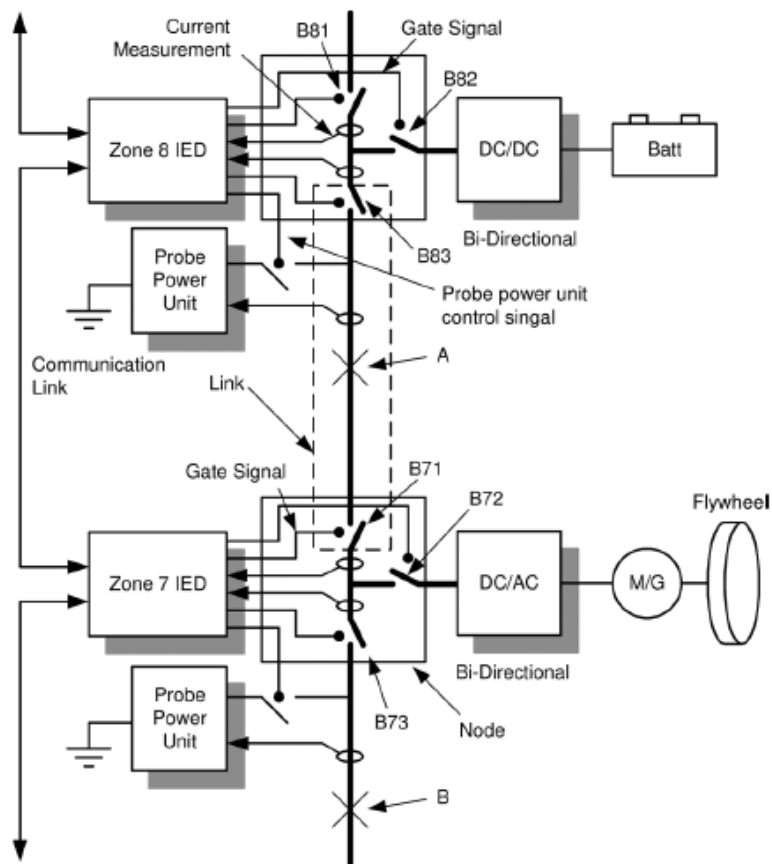
5.2 Η Τοπολογία του Δικτύου

Για την εφαρμογή της μεθόδου έχει προταθεί μια συγκεκριμένη τοπολογία του DC μικροδικτύου που βασίζεται σε έναν DC ζυγό-δαχτυλίδι (ring-bus), ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 5.1. Το σχήμα περιλαμβάνει τις πηγές, τα φορτία, τις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, τους converters και τους διακόπτες ισχύος.



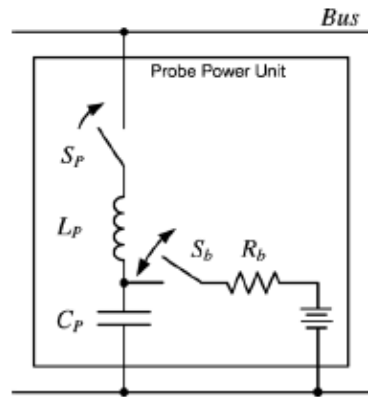
Εικόνα 5.1 Ring-bus τοπολογία του DC μικροδικτύου

Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους προστασίας, η μέθοδος που προτείνεται στο [26] δεν προϋποθέτει την πλήρη απενεργοποίηση του μικροδικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Αντιθέτως, δίνει τη δυνατότητα απομόνωσης του τμήματος του δικτύου που έχει υποστεί το σφάλμα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ring-bus τοπολογίας του DC μικροδικτύου, η οποία δημιουργεί πολλές διαφορετικές ζώνες προστασίας που μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους χάρη στην πληθώρα κόμβων του DC ζυγού. Σε κάθε ζώνη προστασίας είναι εγκατεστημένο ένα IED το οποίο καταγράφει και ελέγχει τους κόμβους και τους κλάδους, με σκοπό να αναγνωρίζει τα μη κανονικά ρεύματα όταν αυτά προκύπτουν. Επίσης, σε κάθε κόμβο εγκαθίσταται ένα probe power unit, το οποίο εντοπίζει το σφάλμα και ελέγχει εάν οι διακόπτες μπορούν να ξανακλείσουν. Στην εικόνα 5.2 φαίνονται περισσότερες λεπτομέρειες γύρω από τη διασύνδεση των κόμβων.



Εικόνα 5.2 Λεπτομερές διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος προστασίας

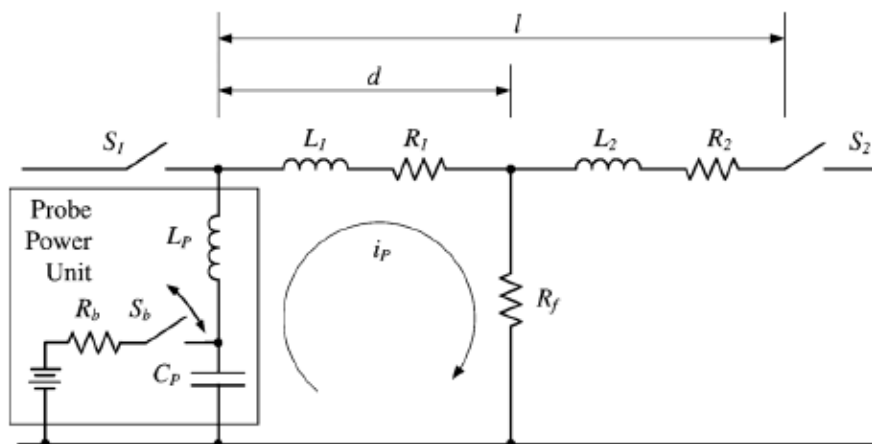
Στην εικόνα 5.3 φαίνεται το εσωτερικό ενός probe power unit, το οποίο αποτελείται από έναν πυκνωτή, ένα πηνίο, μια πηγή τάσης (π.χ. μπαταρία) και διακόπτες ισχύος.



Εικόνα 5.3 Το εσωτερικό ενός probe power unit

5.3 Η Χρονική Εξίσωση του Ρεύματος

Όταν το τμήμα του ζυγού στο οποίο πραγματοποιείται το σφάλμα απομονώνεται, τότε προκύπτει ένα RLC κύκλωμα δεύτερης τάξεως λόγω του probe power unit, όπως φαίνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 5.4.



Εικόνα 5.4 Ισοδύναμο κύκλωμα στο σημείο του βραχυκυκλώματος

Ο διακόπτης S_p του probe power unit κλείνει (με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί κύκλωμα ανάμεσα στο probe power unit, τη γραμμή και τον κλάδο του σφάλματος με την αντίσταση R_f), ενώ ο διακόπτης S_b ανοίγει, επιτρέποντας την αποφόρτιση του πυκνωτή.

Το ρεύμα του RLC κυκλώματος δίνεται από τις λύσεις της διαφορικής εξίσωσης:

$$\frac{d^2 i_p(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di_p(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i_p(t) = 0 \quad (5.1)$$

Η ισοδύναμη ωμική αντίσταση R λογίζεται ως το άθροισμα της ωμικής αντίστασης της γραμμής R_1 και της ωμικής αντίστασης του σφάλματος R_f . Αντίστοιχα, η ισοδύναμη αυτεπαγωγή L λογίζεται ως το άθροισμα της αυτεπαγωγής της γραμμής L_1 και της αυτεπαγωγής του probe power unit L_p . Η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σύγκριση με τη χωρητικότητα C_p του πυκνωτή του probe power unit και δεν λαμβάνεται υπόψη. Είναι δηλαδή:

$$R = R_1 + R_f \quad (5.2)$$

$$L = L_1 + L_p \quad (5.3)$$

$$C \approx C_p \quad (5.4)$$

Η ωμική αντίσταση R_1 και η αυτεπαγωγή L_1 υπολογίζονται με πολλαπλασιασμό των ανά μονάδα τιμών των αντίστοιχων παραμέτρων των καλωδίων R_u και L_u επί την απόσταση d από την τοποθεσία του σφάλματος. Είναι δηλαδή:

$$R_1 = R_u d \quad (5.5)$$

$$L_1 = L_u d \quad (5.6)$$

Η διαφορική εξίσωση (5.1) υπάγεται στη γενική μορφή:

$$\frac{d^2 i_p(t)}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_p(t)}{dt} + \omega_o^2 i_p(t) = 0 \quad (5.7)$$

όπου α είναι η απόσβεση και σχετίζεται με τον ρυθμό εξασθένησης της μεταβατικής κατάστασης, ενώ ω_o είναι η φυσική συχνότητα. Οι τιμές τους δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (5.8)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.9)$$

Ο παράγοντας απόσβεσης ζ δίνεται από τη σχέση:

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_o} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5.10)$$

Επειδή $\zeta < 1$ έχουμε μία φθίνουσα ταλάντωση και οι λύσεις της διαφορικής εξίσωσης έχουν τη μορφή:

$$i_p(t) = A_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t) + A_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) \quad (5.11)$$

όπου ω_d η αποσβεννύμενη συχνότητα συντονισμού, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \alpha^2} \quad (5.12)$$

Οι αρχικές συνθήκες για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης έχουν ως εξής:

$$i_p(0) = I_o \quad (5.13)$$

$$V_{CP}(0) = V_o \quad (5.14)$$

$$i'_p(0) = \frac{V_o - Ri_p(0)}{L} \quad (5.15)$$

όπου:

I_o : το αρχικό ρεύμα στο κύκλωμα

V_{CP} : η τάση του πυκνωτή

V_o : η αρχική τάση του πυκνωτή

Η αρχική συνθήκη (5.15) προκύπτει έπειτα από εφαρμογή του Νόμου Τάσεων Kirchhoff.

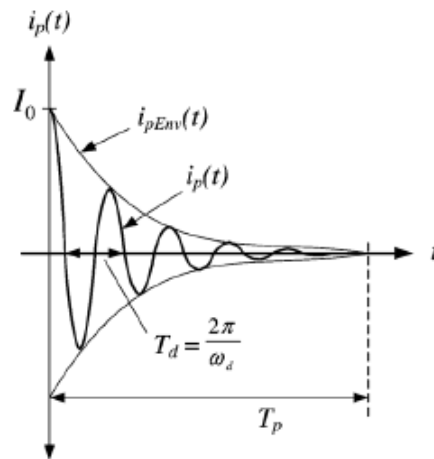
Αν στη σχέση (5.11) θέσουμε $t=0$ προκύπτει:

$$A_1 = I_o \quad (5.16)$$

Αν την ίδια σχέση πρώτα την παραγωγίσουμε και στη συνέχεια θέσουμε $t=0$ προκύπτει:

$$A_2 = \frac{(La - R)I_o + V_o}{\omega_d L} \quad (5.17)$$

Στην εικόνα 5.5 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος της φθίνουσας ταλάντωσης που περιγράφεται από τη σχέση (5.11), ως λύση της διαφορικής εξίσωσης (5.7).



Εικόνα 5.5 Η κυματομορφή του ρεύματος

5.4 Προσδιορισμός της Τοποθεσίας του Σφάλματος

Για τη μέθοδο του προσδιορισμού της τοποθεσίας του σφάλματος, θεωρούμε ότι για τον παράγοντα απόσβεσης ζ ισχύει $\zeta \ll 1$. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων C_P και L_P του probe power unit, όπως φαίνεται από τη σχέση (5.10). Επομένως ισχύει:

$$\zeta \ll 1 \Rightarrow \frac{\alpha}{\omega_o} \ll 1 \Rightarrow \alpha \ll \omega_o$$

Με βάση τη σχέση (5.12) και επειδή όπως δείξαμε $\alpha \ll \omega_o$, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $\omega_d \approx \omega_o$. Επομένως, με βάση τις σχέσεις (5.3) και (5.9) είναι:

$$\omega_d \approx \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_P)C_P}} \quad (5.18)$$

Η τιμή της αυτεπαγωγής L_1 εξαρτάται από την απόσταση d του σημείου του σφάλματος, όπως υποδεικνύει η σχέση (5.6). Οι τιμές των L_P και C_P του

probe power unit είναι γνωστές, αφού έχουν καθοριστεί από τον κατασκευαστή.

Η ιδέα της μεθόδου εύρεσης της τοποθεσίας του σφάλματος βασίζεται στη χρήση ενός αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT) για τον προσδιορισμό της συχνότητας f_{ip} μέσω της κυματομορφής του ρεύματος. Για τη συχνότητα αυτή ισχύει:

$$f_{ip} = \frac{\omega_d}{2\pi} \quad (5.19)$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων (5.6), (5.18) και (5.19) δίνει:

$$d = \frac{1 - 4\pi^2 f_{ip}^2 L_P C_P}{4\pi^2 f_{ip}^2 L_u C_P} \quad (5.20)$$

Με την εισαγωγή της τιμής της συχνότητας f_{ip} που δίνει ο αλγόριθμος FFT στη σχέση (5.20) είναι δυνατός ο υπολογισμός του d και επομένως ο προσδιορισμός της τοποθεσίας του σφάλματος.

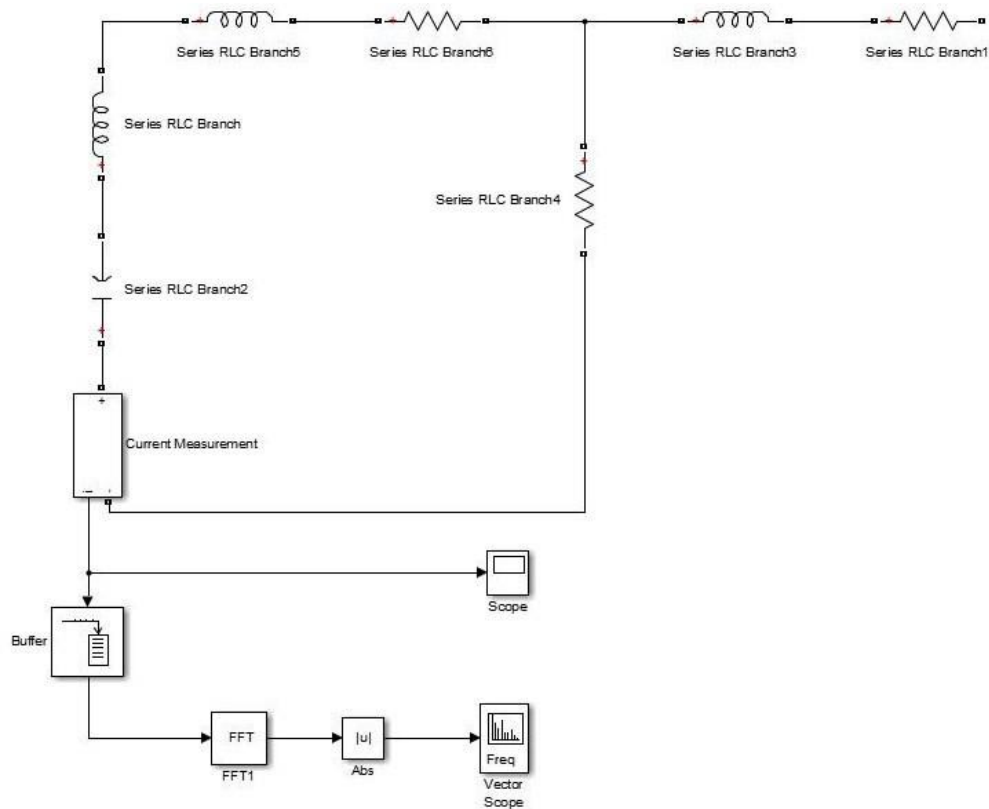
5.5 Προσομοιώσεις Σφαλμάτων στο Simulink

Για να διαπιστωθεί η ακρίβεια της μεθόδου προσδιορισμού της τοποθεσίας του σφάλματος που παρουσιάστηκε προηγουμένως, δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink ένα υποθετικό δίκτυο και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τρία διαφορετικά σφάλματα:

- α) στο 10% του μήκους της γραμμής
- β) στο 50% του μήκους της γραμμής
- γ) στο 90% του μήκους της γραμμής

Για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις σφαλμάτων, η απόσταση d που έδωσε η μέθοδος μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου FFT συγκρίθηκε με το πραγματικό d και βρέθηκαν οι αντίστοιχες αποκλίσεις.

Η διάταξη που υλοποιήθηκε είναι εκείνη της εικόνας 5.4 και το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις φαίνεται στην εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6 Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις στο Simulink

Οι παράμετροι του υποθετικού κυκλώματος που χρησιμοποιήθηκε είναι οι εξής:

$$R_u = 100 \text{ m}\Omega / \text{km}$$

$$L_u = 1 \text{ mH} / \text{km}$$

$$l = 2 \text{ km}$$

$$R_f = 0,1 \Omega$$

$$V_o=100V$$

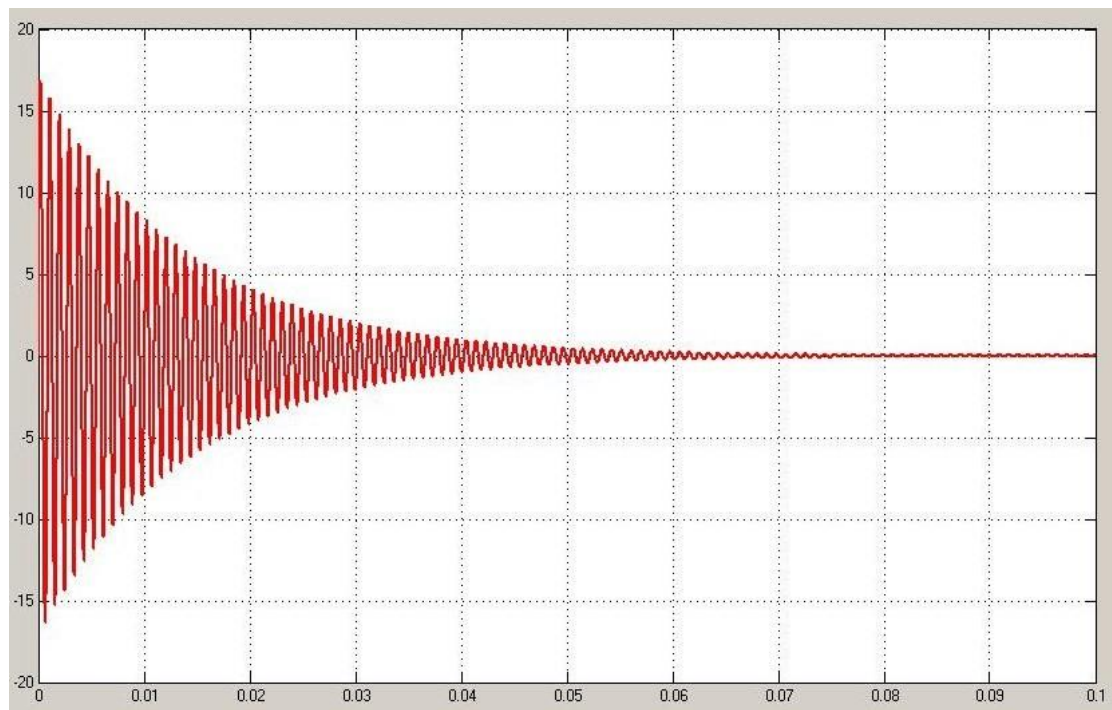
$$C_p=25\mu F$$

$$L_p=650\mu H$$

Όλα τα μεγέθη αντιστοιχούν σε αυτά που ορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα τρία διαφορετικά σφάλματα.

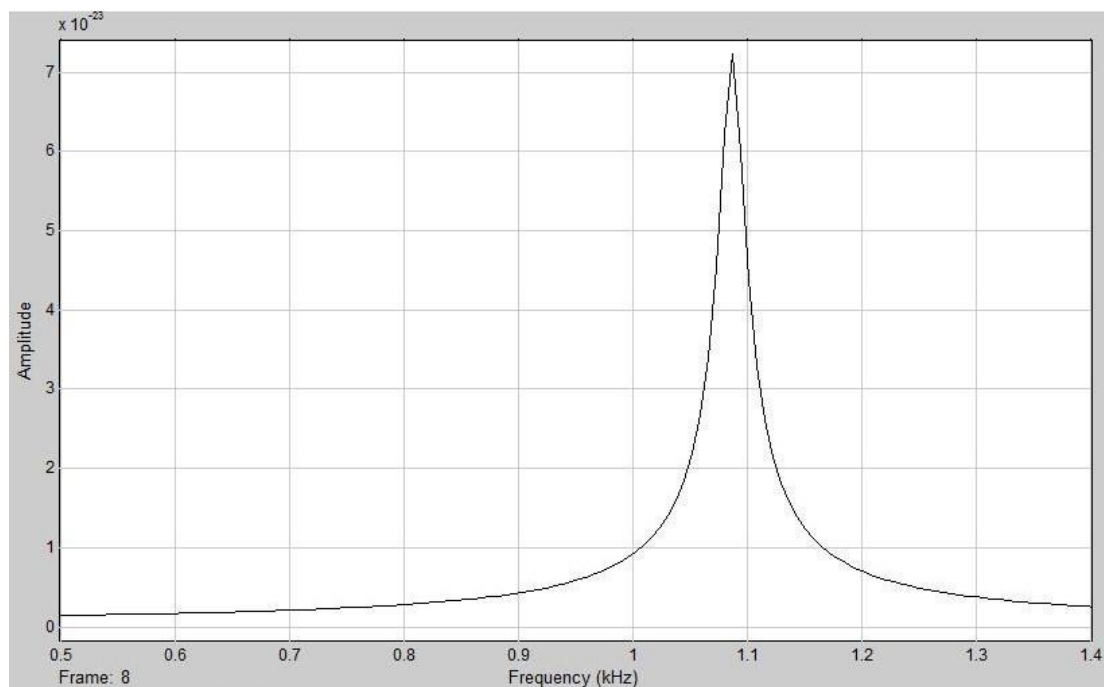
5.5.1 Σφάλμα στο 10% του Μήκους της Γραμμής

Στην περίπτωση σφάλματος στο 10% του μήκους της γραμμής 2km θα είναι $d=0,2km$ και σύμφωνα με τις σχέσεις (5.5) και (5.6) θα έχουμε $R_1=20m\Omega$ και $L_1=0,2mH$ αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.7 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος.



Εικόνα 5.7 Κυματομορφή του ρεύματος σε A για το σφάλμα στο 10% του μήκους της γραμμής

Μετά την απόδοση των τιμών αυτών στα στοιχεία του κυκλώματος και την εφαρμογή του FFT, ο αλγόριθμος έδωσε $f_{ip}=1087\text{Hz}$. Το σχετικό διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 5.8.

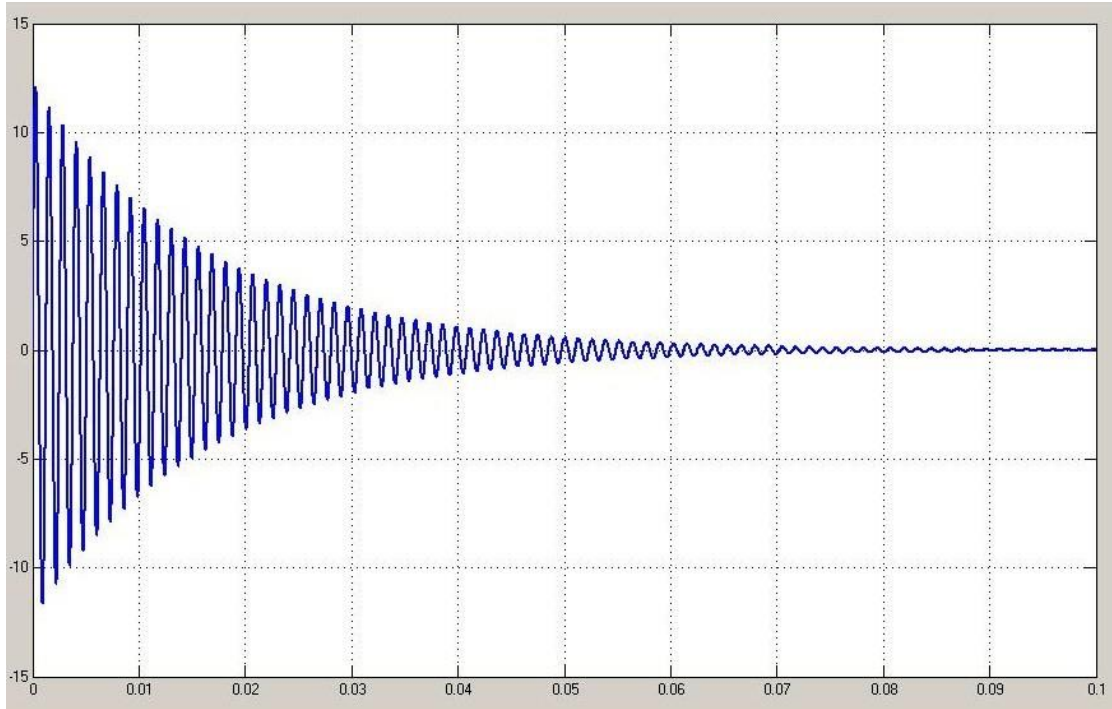


Εικόνα 5.8 Διάγραμμα για την εξαγωγή του f_{ip} για το σφάλμα στο 10% του μήκους της γραμμής

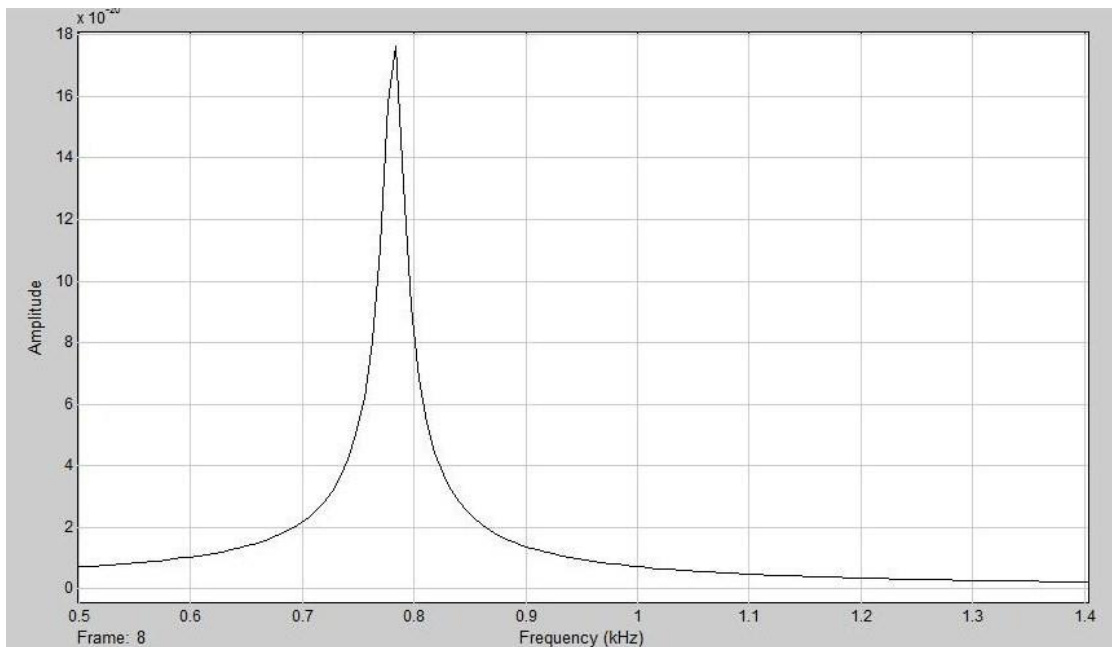
Με χρήση της σχέσης (5.20) όπου $f_{ip}=1087\text{Hz}$, η απόσταση d υπολογίζεται ως $d=0,2084\text{km}$. Το σφάλμα της μεθόδου ανέρχεται στο 4,2%.

5.5.2 Σφάλμα στο 50% του Μήκους της Γραμμής

Στην περίπτωση σφάλματος στο 50% του μήκους της γραμμής 2km θα είναι $d=1\text{km}$ και σύμφωνα με τις σχέσεις (5.5) και (5.6) θα έχουμε $R_1=100\text{m}\Omega$ και $L_1=1\text{mH}$ αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.9 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος.



Εικόνα 5.9 Κυματομορφή του ρεύματος σε Α για το σφάλμα στο 50% του μήκους της γραμμής



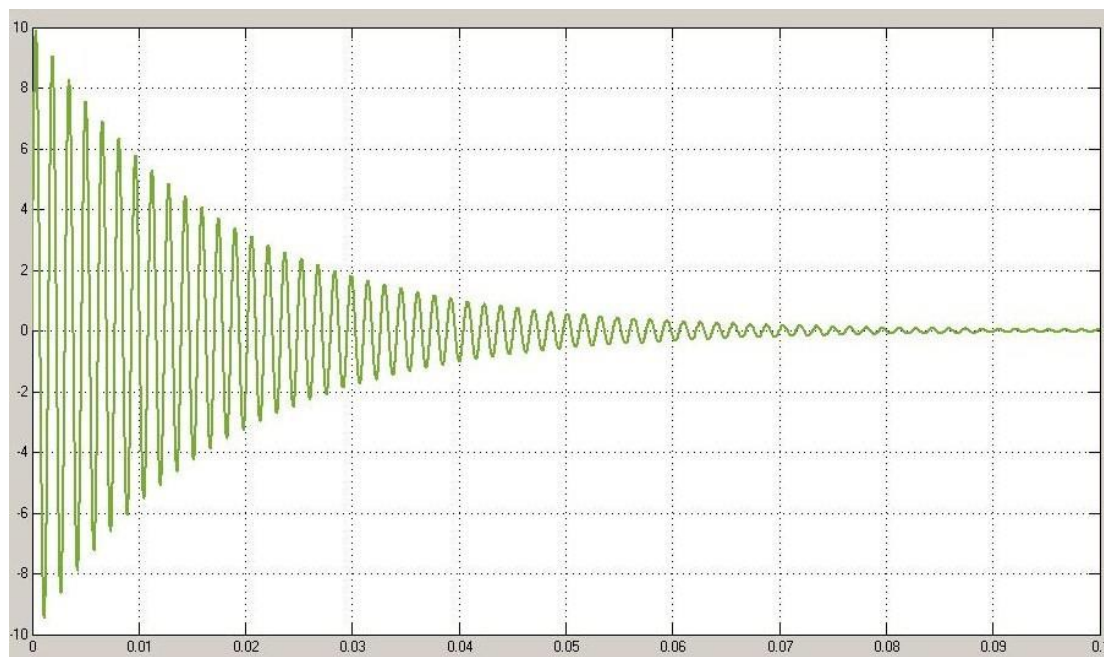
Εικόνα 5.10 Διάγραμμα για την εξαγωγή του f_{ip} για το σφάλμα στο 50% του μήκους της γραμμής

Μετά την απόδοση των τιμών αυτών στα στοιχεία του κυκλώματος και την εφαρμογή του FFT, ο αλγόριθμος έδωσε $f_{ip}=783,5\text{Hz}$. Το σχετικό διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 5.10.

Με χρήση της σχέσης (5.20) όπου $f_{ip}=783,5\text{Hz}$, η απόσταση d υπολογίζεται ως $d=1,0022\text{km}$. Το σφάλμα της μεθόδου ανέρχεται στο 0,22%.

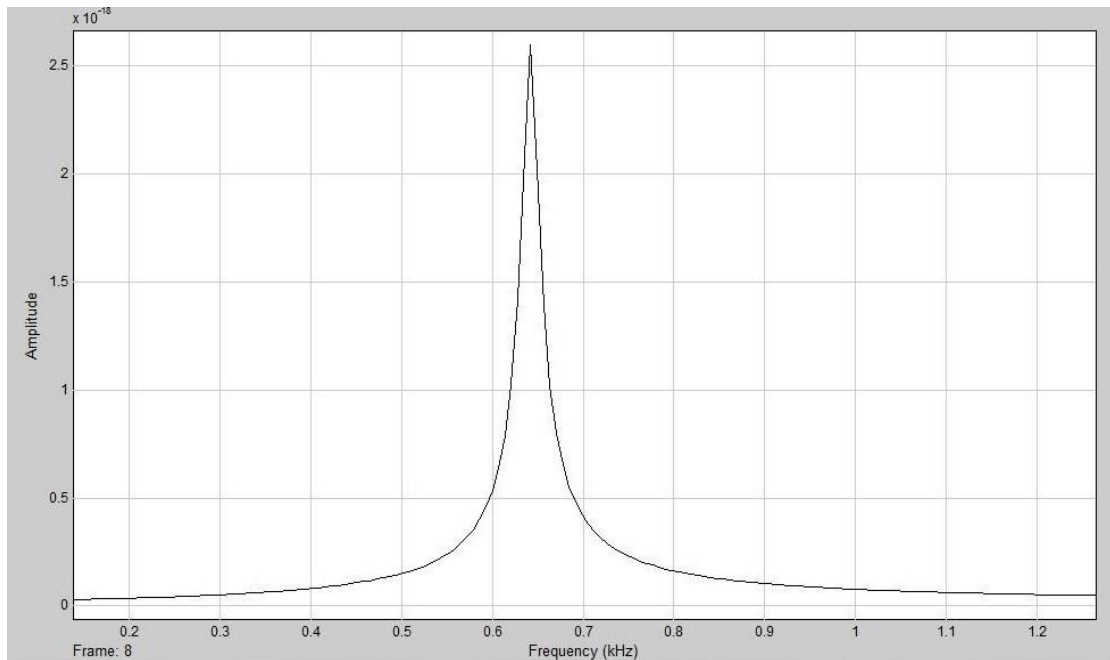
5.5.3 Σφάλμα στο 90% του Μήκους της Γραμμής

Στην περίπτωση σφάλματος στο 90% του μήκους της γραμμής 2km θα είναι $d=1,8\text{km}$ και σύμφωνα με τις σχέσεις (5.5) και (5.6) θα έχουμε $R_1=180\text{m}\Omega$ και $L_1=1,8\text{mH}$ αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.11 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος.



Εικόνα 5.11 Κυματομορφή του ρεύματος σε A για το σφάλμα στο 90% του μήκους της γραμμής

Μετά την απόδοση των τιμών αυτών στα στοιχεία του κυκλώματος και την εφαρμογή του FFT, ο αλγόριθμος έδωσε $f_{ip}=642,3\text{Hz}$. Το σχετικό διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12 Διάγραμμα για την εξαγωγή του f_{ip} για το σφάλμα στο 90% του μήκους της γραμμής

Με χρήση της σχέσης (5.20) όπου $f_{ip}=642,3\text{Hz}$, η απόσταση d υπολογίζεται ως $d=1,8085\text{km}$. Το σφάλμα της μεθόδου ανέρχεται στο 0,47%.

5.5.4 Συμπέρασμα

Δεδομένων των χαμηλών τιμών των σφαλμάτων στον υπολογισμό της απόστασης d σε κάθε περίπτωση (4,2%, 0,22% και 0,47%), η ακρίβεια της μεθόδου κρίνεται ικανοποιητική.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η αξιόπιστη λειτουργία και η ικανοποιητική προστασία των DC μικροδικτύων δεν είναι για την ώρα οικονομικά βιώσιμη.
2. Το μαθηματικό μοντέλο του προτύπου IEC 61660 προσεγγίζει με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια το ρεύμα αποφόρτισης του πυκνωτή. Σε ό,τι αφορά το συνολικό ρεύμα από τον πυκνωτή και τον ανορθωτή, το μοντέλο του προτύπου IEC 61660 υπολογίζει με καλή ακρίβεια την τιμή της μόνιμης κατάστασης του ρεύματος βραχυκύκλωσης, όμως υστερεί στον υπολογισμό της μεταβατικής κατάστασης, αφού υποτιμά τις μέγιστες τιμές του σε κάθε περίπτωση σφάλματος.
3. Η μέθοδος προσδιορισμού της τοποθεσίας του σφάλματος παρουσιάζει πολύ καλή ακρίβεια, ανεξαρτήτως του σημείου όπου προκύπτει το σφάλμα.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

1. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε το πρώτο μέρος του προτύπου IEC 61660, το οποίο αφορά τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Το πρότυπο περιλαμβάνει άλλα δύο μέρη, τα οποία θα μπορούσαν να αποδοθούν στην ελληνική γλώσσα.
2. Στο Κεφάλαιο 4 έγιναν προσομοιώσεις για το ρεύμα του πυκνωτή σε ένα DC σφάλμα. Θα μπορούσαν να γίνουν αντίστοιχες και για το ρεύμα του ανορθωτή.
3. Στο Κεφάλαιο 5 έχει ενδιαφέρον η ανάλυση ορισμένων προεκτάσεων της μεθόδου προσδιορισμού της τοποθεσίας του σφάλματος, όπως για παράδειγμα τα κριτήρια με τα οποία επιλέγονται οι τιμές των στοιχείων του probe power unit ή η μέθοδος υπολογισμού της αντίστασης σφάλματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Γεώργιος Κατσαρός, «Μοντελοποίηση και Δυναμική Ανάλυση Μικροδικτύου», Διπλωματική Εργασία για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Nemertes
- [2] Μαρία Καλογερά, «Προστασία Μικροδικτύου Συνδεδεμένου στο δίκτυο Διανομής Χαμηλής Τάσης από Μεγάλα Ρεύματα που Οφείλονται σε Βυθίσεις Τάσης του Δικτύου Διανομής», Διπλωματική Εργασία για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Nemertes
- [3] Robert M. Cuzner, Giri Venkataramanan, “The Status of DC Micro-Grid Protection”, *IEEE*
- [4] A. Emhemed and G. Burt, “The effectiveness of using IEC61660 for characterizing short-circuit currents of future low voltage DC distribution networks”, in *Proc. Int. Conf. Exhib. Electr. Distrib. (CIRED)*, Stockholm, Sweden, Jun.2013, pp.1-4
- [5] Abdullah A. S. Emhemed and Graeme M. Burt, “An Advanced Protection Scheme for Enabling an LVDC Last Mile Distribution Network”, *IEEE*
- [6] J. Yang, J. E. Fletcher and J. O’Reilly, “Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design”, *IEEE Trans. Power Del.* Vol. 25, No. 4, pp 2308-2318, Oct. 2010
- [7] Daniel Salomonsson, Lennart Söder and Ambra Sannino, “Protection of Low-Voltage DC Microgrids, *IEEE*
- [8] R. Forest, G. Heyner, K.W. Kanngiesser, H. Waldermann, “Multi-terminal Operation of HVDC Converter Stations” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol 88, pp. 1402-1052, July 1969
- [9] R.F.Giese, T.P. Sheahan, A.M. Wolsky, D.K. Sharma, “High-Temperature Superconductors: Their Potential for Utility Applications”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No.3, pp. 589-597, September 1992
- [10] B.K. Johnson, R. H. Lasseter, R. Adapa, “Power Control Applications on a Superconducting LVDC Mesh”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No.3, July 1991
- [11] J.A. Ferreira, H.W. van der Broeck, “Alternative power distribution in residential and commercial buildings”, European Conf.

- Power Electronics and Applications (EPE '93), vol.7, 1993, pp. 188-193
- [12] J.G. Ciezky, R.W.Ashton, "Selection and stability issues associated with a navy shipboard DC zonal electric distribution system", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 15, No.2 pp 665-669, Apr 2000
- [13] K. Emadi, M. Ehsani, "Aircraft power systems: technology, state of the art and future trends", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 15, no.1, pp. 28-32, Jan 2000
- [14] J.M. Miller, A. Emadi, A.V. Rajarathnam. M. Ehsani, "Current Status and Future Trends in More Electric Car Power Systems", Vehicular Technology Conference, 1999, vol.2, pp. 1380-1384
- [15] Low Voltage Directive (LVD), EU LV Legislation LVD2006/95/EC, Dec. 2006
- [16] P. Nuutinen et al., "Experiences from use of an LVDC system in public electricity distribution" in *Proc. Int. Conf. Exhib. Electr. Distrib. (CIRED)*, Jun.2013, pp.1-4
- [17] B.T. Patterson, "DC, come home", *IEEE Power Energy Mag.*, vol.10, no.6, pp.60-69, Nov/Dec 2012
- [18] D. Nilsson and A. Sannino, "Efficiency analysis of low- and medium- voltage DC distribution systems" in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol.2 Denver, CO, USA, Jun. 2004, pp. 2315-2321
- [19] G.Allen and W.Tschundi, "Edison redux: 380 Vdc brings reliability and efficiency to sustainable data centers", *IEEE Power Energy Mag.*, vol.10, no.6,pp.50-59, Nov/Dec 2012
- [20] W.A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", Marcel Dekker, Inc., 2004
- [21] IEEE Guide for the Protection of Stationary Battery Systems, IEEE Std. 1375-1998, 1998
- [22] M. Baran and N. Mahajan, "Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribution systems", *IEEE Trans. Power Del.* vol.22, no.1, pp.406-412, Jan.2007
- [23] J.M. Meyer and A. Rufer "A dc hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (igcts)", *IEEE Trans, Power Del.* vol. 21, no. 2, pp. 646-651, Apr. 2006
- [24] IEC 61660-1, 1997, "Short-Circuit Currents in DC Auxiliary Installations in Power Plants and Substations"
- [25] LTDS2008 for ScottishPower LTD-Year 08-13
- [26] Jae-Do Park, Jared Candelaria, Liuyan Ma, Kyle Dunn, "DC Ring-Bus Microgrid Fault Protection and Identification of Fault Location", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.28, No.4, pp. 2574-2584, Oct. 2013