



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ανάλυση και Σχεδίαση Διακοπών Ισχύος Μέσης Τάσης-Συνεχούς Ρεύματος
βασισμένους σε κυκλώματα συντονισμού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Α. Λιάσκος

Επιβλέπων: Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ανάλυση και Σχεδίαση Διακοπών Ισχύος Μέσης Τάσης-Συνεχούς Ρεύματος
βασισμένους σε κυκλώματα συντονισμού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Α. Λιάσκος

Επιβλέπων: Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24η Ιουλίου 2019.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....
Λιάσκος Α. Νικόλαος

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

Copyright © Λιάσκος Α. Νικόλαος, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάλυση και σχεδίαση διακοπών ισχύος μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος, βασισμένους στην χρήση ενός μηχανικού διακόπτη και ενός κυκλώματος συντονισμού.

Τα σχέδια για την δημιουργία πολυτερματικών δικτύων συνεχούς ρεύματος έχουν οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών τρόπων για την διακοπή των ρευμάτων σφάλματος που προκύπτουν στα συστήματα αυτά. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι μετά από ένα σφάλμα σε ένα σύστημα ΣΡ δεν υπάρχουν σημεία μηδενισμού του ρεύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ΕΡ να κρίνονται ανεπαρκή. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων στα συστήματα ΣΡ είναι η χρήση ενός κυκλώματος συντονισμού για την δημιουργία ενός ρεύματος που αντιτίθεται στο ρεύμα σφάλματος και ενός μηχανικού διακόπτη ο οποίος ενεργεί την στιγμή που ρεύμα που τον διαρρέει μηδενιστεί.

Στην εργασία γίνεται παρουσίαση και θεωρητική ανάλυση δύο διαφορετικών διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος τέτοιου τύπου, οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο δημιουργίας του ρεύματος που αντιτίθεται στο σφάλμα. Ο ένας τρόπος είναι η εκφόρτιση του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού με τον έλεγχο ενός ημιαγωγικού διακόπτη και ο άλλος είναι η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού μέσω ενός μετατροπέα δύο επιπέδων. Μέσα από την θεωρητική ανάλυση προέκυψε ο τρόπος επιλογής των παραμέτρων των διακοπών για την βελτιστοποίηση της απόκρισης τους. Έπειτα, με βάση τα αποτελέσματα η λειτουργία των διακοπών προσομοιώνεται στο Simulink. Μέσα από τις προσομοιώσεις και την θεωρητική ανάλυση προκύπτουν τα συμπεράσματα και η σύγκριση των δυο διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος.

Λέξεις-Κλειδιά: Συστήματα συνεχούς ρεύματος, Διακόπτες ισχύος συνεχούς ρεύματος, κυκλώματα συντονισμού, μετατροπέας δύο επιπέδων

Abstract

This thesis is dedicated to the analysis and design of medium voltage direct current breakers, utilizing a mechanical breaker and a resonance circuit.

The plans for the development of multi-terminal direct current systems have resulted in the need of development of effective ways to interrupt the fault currents that appear in this type of systems. The difficulty arises from the fact that after a fault in a DC system there are no zero-crossings of the current. As a result of this, the protection devices used in AC systems become deficient. One way to deal with faults in DC systems is to utilize a resonance circuit in order to create a current that opposes the fault current, and a mechanical breaker that acts the moment the current through it becomes zero.

In this thesis two different direct current circuit breakers of this type are presented and analysed. The difference between the two is the way of creating the current that opposes the fault current. The first way is the discharge of the capacitor of the resonance circuit by controlling a semiconductor switch, while the other is the excitation of the resonance circuit by a two level converter. Through the theoretical analysis occurs the way of selecting the circuit breakers' parameters in order to optimize their operation. Afterwards, based on these results the operation of the circuit breakers is simulated in Simulink. Through the simulations and the theoretical analysis occurs the conclusion and the comparison between the two circuit breakers.

Keyword: Direct current systems, direct current circuit breakers, resonance circuits, two level converter

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και των προπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν να ολοκληρώσω αυτόν τον στόχο μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντωνόπουλο Αντώνη, επιβλέπωντα της εργασίας αυτής, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την συγγραφή αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένειά μου, και ιδιαίτερα την μητέρα μου Μαρία και τον αδερφό μου Λάζαρο, για την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

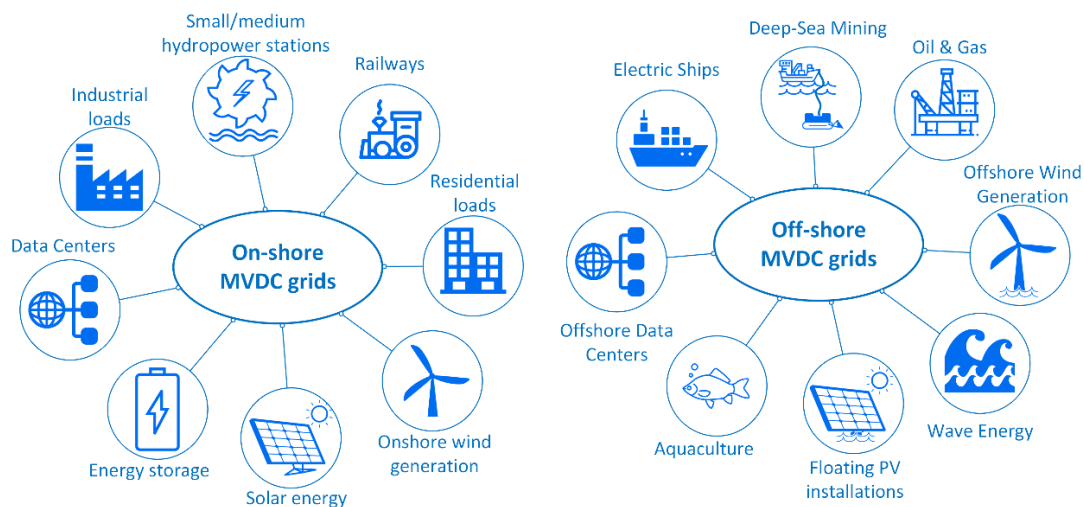
1	Εισαγωγή	10
2	Δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος	13
2.1	Συνδέσεις Συνεχούς Ρεύματος Υψηλής Τάσης (HVDC)	13
2.2	Δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος Μέσης Τάξης (MVDC)	15
2.3	Προστασία Συστημάτων Συνεχούς Ρεύματος	16
2.3.1	Ρεύμα σφάλματος τριφασικού μετατροπέα τάσης	16
2.4	Διατάξεις διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος (DCCBs)	19
2.4.1	Διακόπτες ισχύος στερεάς κατάστασης (Solid-State DCCBs)	19
2.4.2	Μηχανικοί διακόπτες ισχύος με κυκλώματα συντονισμού (Mechanical DCCBs)	20
2.4.3	Υβριδικοί διακόπτες ισχύος	21
3	Στοιχεία Μηχανικών Διακοπών Ισχύος Συνεχούς Ρεύματος με Κυκλώματα Συντονισμού	22
3.1	Κυκλώματα συντονισμού	22
3.1.1	Απόκριση κυκλώματος συντονισμού σειράς	22
3.1.2	Απόκριση κυκλώματος συντονισμού σειράς φορτισμένου πυκνωτή	24
3.1.3	Απόκριση κυκλώματος συντονισμού σειράς που διεγείρεται από μετατροπέα δύο επιπέδων	25
3.2	Κλάδος Απορρόφησης Ενέργειας	29
3.3	Μηχανικός Διακόπτης	32
4	Θεωρητική ανάλυση μηχανικών διακοπών ισχύος με κυκλώματα συντονισμού	34
4.1	Μηχανικός διακόπτης ισχύος έγχυσης ενεργού ρεύματος	34
4.1.1	Αρχή Λειτουργίας	34
4.1.2	Σχολιασμός και επιλογή παραμέτρων	42
4.1.3	Απαιτήσεις σε ημιαγωγούς	46
4.2	Μηχανικός διακόπτης ισχύος με κύκλωμα συντονισμού που διεγείρεται από μετατροπέα (VARC)	48
4.2.1	Αρχή Λειτουργίας	48
4.2.2	Σχολιασμός και επιλογή παραμέτρων	54
4.2.3	Απαιτήσεις σε ημιαγωγούς	60
5	Σχεδίαση και Προσομοίωση μηχανικών διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος	61
5.1	Ορισμός συστήματος	61
5.1.1	Μέγιστο ρεύμα σφάλματος	62
5.2	Διακόπτης ισχύος έγχυσης ρεύματος με φορτισμένο πυκνωτή	64
5.2.1	Σχεδίαση	64
5.2.2	Μοντελοποίηση	65
5.2.3	Σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα	69
5.2.4	Σφάλμα κοντά στο φορτίο	71
5.3	Διακόπτης ισχύος με κύκλωμα συντονισμού που διεγείρεται από αντιστροφή δύο επιπέδων	73
5.3.1	Σχεδίαση	73
5.3.2	Μοντελοποίηση	74
5.3.3	Σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα	76
5.3.4	Σφάλμα κοντά στο φορτίο	81
5.4	Σύγκριση χαρακτηριστικών	83
5.4.1	Τιμές των παθητικών στοιχείων της διάταξης	83
5.4.2	Αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια	83
5.4.3	Χρόνος μηδενισμού του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη	83
5.4.4	Χρόνος μεταγωγής του ρεύματος στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας	84

5.4.5	Χρόνος μηδενισμού του ρεύματος σφάλματος και ενέργεια απορρόφησης από το MOV	84
5.4.6	Αριθμός μηδενισμών του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη	84
5.4.7	Σύγκριση απαιτήσεων σε ημιαγωγούς	85
6	Συμπεράσματα	86
6.1	Ανασκόπηση εργασίας	86
6.2	Μελλοντικές προοπτικές	87

1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον στο ερευνητικό πεδίο της μεταφοράς ισχύος με συνεχή τάση (MVDC-HVDC). Στο πεδίο της υψηλής τάσης, πλεονεκτήματα όπως οι μικρότερες απώλειες, η εξάλειψη φαινομένων που σχετίζονται με την συχνότητα και ο απλούστερος έλεγχος καθιστούν αυτά τα συστήματα μεταφοράς πολύ ελκυστικά για μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Όμως, η απουσία αποτελεσματικών και αξιόπιστων διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος δεν επιτρέπει ακόμη την ανάπτυξη πολυτεματικών δικτύων συνεχούς ρεύματος [1]. Για τον λόγο αυτό, οι διασυνδέσεις συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης που πραγματοποιούνται αφορούν την σύνδεση μεταξύ δύο μόνο κόμβων (point to point). Στις διασυνδέσεις αυτές, η αντιμετώπιση των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν γίνεται από την πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος του συστήματος με την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία των διακοπών ισχύος ΕΡ.

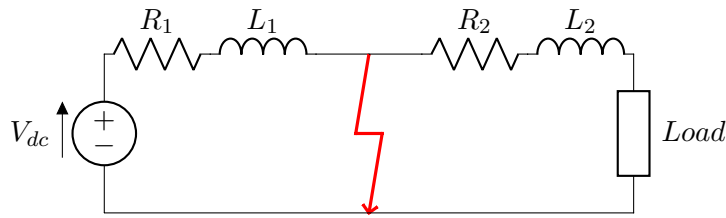
Ταυτόχρονα, μεγάλο είναι το ενδιαφέρον για συστήματα μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος (MVDC), τόσο για την χρήση σε δίκτυα διανομής όσο και σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως τα MVDC μικροδίκτυα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών που βρίσκονται υπό διερεύνηση από την ακαδημαϊκή κοινότητα είναι η μεταφορά ενέργειας από διεσπαρμένη παραγωγή ΑΠΕ όπως οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες και τα απομακρυσμένα φωτοβολταϊκά πάρκα. Ένας τομέας στον οποίον υπάρχουν πολλές προοπτικές χρήσης MVDC συστημάτων είναι η ναυσιπλοΐα, όπου στα ήδη αναφερθέντα πλεονεκτήματα προστίθεται και η απαλλαγή από τους μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων, μειώνοντας το βάρος και τον όγκο των ηλεκτρικών συστημάτων των πλοίων. Περισσότερα παραδείγματα εφαρμογών μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος φαίνονται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Πιθανές εφαρμογές δικτύων MVDC [2]

Το ζήτημα όμως της αντιμετώπισης σφαλμάτων εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση, όπως και στα συστήματα HVDC, και σχετίζεται με την φύση των συστημάτων ΣΡ. Το ρεύμα σφάλματος σε ένα σύστημα ΣΡ αυξάνεται μονοτονικά, σε αντίθεση με τα συστήματα ΕΡ όπου το ρεύμα που προκύπτει μετά από ένα σφάλμα είναι ημιτονικής μορφής.

Το πρόβλημα γίνεται κατανοητό αν μελετηθεί ένα απλουστευμένο παράδειγμα για ένα σύστημα ΣΡ όπου μια ισχυρή πηγή τροφοδοτεί ένα φορτίο όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.

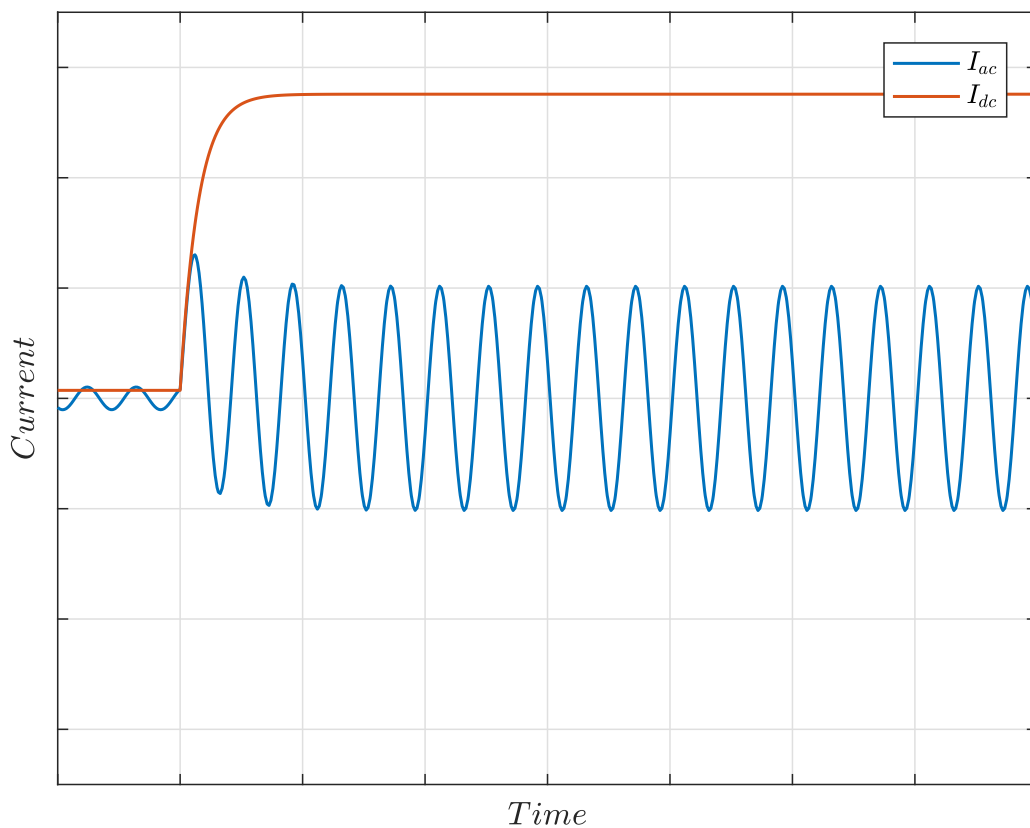


Σχήμα 1.2: Απλοποιημένο σύστημα συνεχούς ρεύματος κατά το σφάλμα

Αν προκύψει βραχυκύκλωμα σε ένα σημείο του μέσου μεταφοράς, το ρεύμα σφάλματος ισούται με:

$$I_{sc} = \frac{U_s}{R_1} \cdot (1 - e^{-\frac{R_1}{L_1}t}) + \frac{U_s}{R_1 + R_2} \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1}t} \quad (1.1)$$

Όπως φαίνεται, το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται μονοτονικά, χωρίς να λαμβάνει μηδενική τιμή μετά το σφάλμα, και ο ρυθμός αύξησής του εξαρτάται από το πηλίκο μεταξύ της αντίδρασης και της αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος, η απουσία επαγωγικών στοιχείων όπως οι μετασχηματιστές έχει ως αποτέλεσμα τον μεγάλο ρυθμό αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Παράλληλα, το πλάτος του ρεύματος βραχυκύκλωσης περιορίζεται μόνο από την αντίσταση του μέσου μεταφοράς, σε αντίθεση με τα συστήματα ΕΡ όπου το πλάτος περιορίζεται από την σύνθετη αντίσταση του μέσου μεταφοράς.



Σχήμα 1.3: Τυπικές κυματομορφές ρεύματος σφάλματος σε AC και DC συστήματα

Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος οι διακόπτες ισχύος ανιχνεύουν τα σημεία μηδενισμού του ρεύματος (zero crossings), ώστε να διακόψουν το ρεύμα εκείνη τη χρονική στιγμή για να εκκαθαρίσουν τυχόν σφάλματα. Εφόσον το ρεύμα σφάλματος σε ένα σύστημα ΣΡ δεν έχει σημεία μηδενισμού, όπως φάνηκε στο παραπάνω παράδειγμα, η χρήση διακοπών ισχύος που χρησιμοποιούν την φιλοσοφία των αντίστοιχων ΕΡ είναι αδύνατη. Για τον λόγο αυτό είναι η απαραίτητη η ανάπτυξη και σχεδίαση διατάξεων ικανών να διακόπτουν ρεύματα τέτοιου τύπου. Στην βιβλιογραφία συναντάμε κυρίως τρεις κατηγορίες τέτοιων διατάξεων: τους διακόπτες στερεάς κατάστασης (solid state), τους μηχανικούς διακόπτες με κυκλώματα συντονισμού και τους υβριδικούς διακόπτες. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε χαρακτηριστικά όπως τον χρόνο απόκρισης, τις απώλειες αγωγής κατά την λειτουργία υπό ονομαστικό φορτίο, τις απαιτήσεις σε ημιαγωγούς καθώς και το συνολικό κόστος και όγκο.

Η εργασία αυτή στοχεύει να μελετήσει τοπολογίες διακοπών ισχύος μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος που αποτελούνται από τον συνδυασμό ενός μηχανικού διακόπτη και ενός κύκλωματος συντονισμού. Η βασική αρχή πίσω από την λειτουργία της συγκεκριμένης κατηγορίας διακοπών είναι η δημιουργία ενός ρεύματος ίσου πλάτους και αντίθετης φοράς με αυτό του σφάλματος, ώστε να κατασκευαστεί τεχνητά ένα σημείο μηδενισμού στο οποίο μπορεί να ενεργήσει ο μηχανικός διακόπτης ισχύος. Το ρεύμα αυτό δημιουργείται από ένα κύκλωμα συντονισμού, το οποίο διεγείρεται μόλις εντοπισθεί κάποιο σφάλμα. Παράλληλα σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη διαφορετικών τρόπων διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού, π.χ. μέσω ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Στόχος της χρήσης του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος είναι η μείωση των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού, χωρίς όμως να διακινδυνεύεται ο χρόνος αντίδρασης του συστήματος προστασίας.

2 Δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος

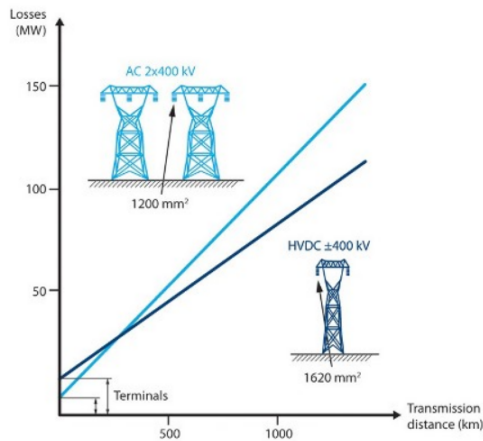
2.1 Συνδέσεις Συνεχούς Ρεύματος Υψηλής Τάσης (HVDC)

Τον 19ο αιώνα όταν και ξεκίνησε η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, τέθηκε και το δίλημμα μεταξύ της χρήσης συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Κύριοι υποστηρικτές κάθε πλευράς υπήρξαν ο Τόμας Έντισον και ο Νικόλα Τέσλα αντίστοιχα και η αντιπαράθεση μεταξύ τους ονομάστηκε "Πόλεμος των Ρευμάτων". Όπως είναι φανερό σήμερα, το εναλλασσόμενο ρεύμα επικράτησε. Σπουδαίο ρόλο στην επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος έπαιξε η ανακάλυψη του μετασχηματιστή όπου έδωσε την δυνατότητα αλλαγής των επιπέδων της τάσης καθώς και η επικράτηση των μηχανών επαγωγής τόσο στην παραγωγή όσο και στην κατανάλωση.

Με την ανακάλυψη τρόπων μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και το αντίστροφο ξεκίνησε η ανάπτυξη συνδέσεων συνεχούς ρεύματος. Ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος HVDC σύνδεσμος (Gotland 1) τέθηκε σε λειτουργία το 1954 και συνέδεε το σουηδικό νησί Gotland με την σουηδική ενδοχώρα. Μπόρουσε να μεταφέρει 20 MW σε απόσταση 98 χιλιομέτρων υπό τάση 100 kV. Η τεχνολογία που χρησιμοποιούσε βασιζόταν στους ανορθωτές τόξου υδρογόνου (mercury arc rectifiers). Την δεκαετία του 1970 με την ανάπτυξη των πρώτων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (π.χ. θυρίστρο) και των μετατροπέων πηγής ρεύματος (CSC - LCC), οι ανορθωτές τόξου υδρογόνου αντικαταστάθηκαν και πραγματοποιήθηκαν περισσότερες HVDC διασυνδέσεις. Ένα ακόμη σημαντικό βήμα στην τεχνολογία των συστημάτων συνεχούς ρεύματος έγινε με την ανάπτυξη πλήρως ελεγχόμενων διακοπών όπως τα IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors). Η εμφάνιση των IGBTs οδήγησε στην ανάπτυξη μετατροπέων πηγής τάσης (VSC) που παρουσιάζουν πολλά πλεονέκτηματα σε σχέση με τους μετατροπείς ρεύματος. Μερικά από αυτά είναι ο ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος, η παροχή ισχύος υψηλής ποιότητας, η δυνατότητα σύνδεσης ακόμα και σε αδύναμα δίκτυα και η ταχύτατη απόκριση. Πλέον μεγάλο μέρος των HVDC διασυνδέσεων, που αναπτύσσονται στις μέρες μας πραγματοποιείται με την τεχνολογία των μετατροπέων τάσης (VSC-HVDC).

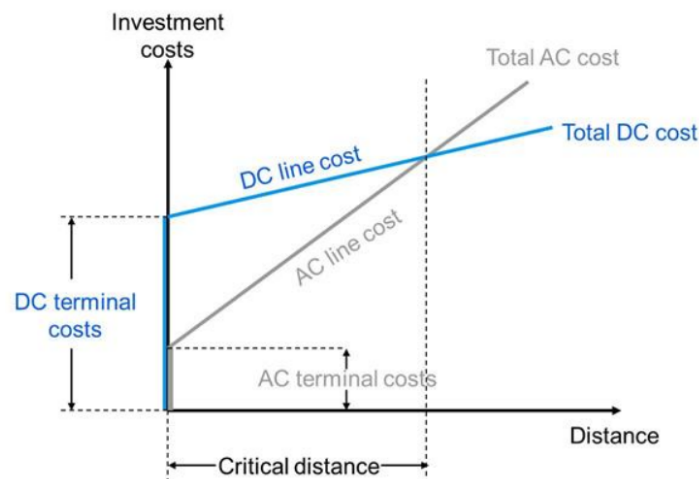
Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μεταφορά ενέργειας με συνεχές ρεύμα είναι [3], [4]:

- **Ικανότητα μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.** Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, οι χωρητικότητες και οι επαγωγές των γραμμών μεταφοράς καθιστούν αναγκαία την αντιστάθμιση αέργου ισχύος και θέτουν περιορισμούς στο μήκος μιας σύνδεσης. Αντίθετα, η μεταφορά ενέργειας με συνεχές ρεύμα δεν εισάγει περιορισμούς στο μήκος της σύνδεσης πέρα από τις ωμικές απώλειες του μέσου μεταφοράς. Επιπρόσθετα στις υποθαλάσσιες συνδέσεις, όπου η χωρητικότητα των καλωδίων είναι μεγαλύτερη ο περιορισμός για τις συνδέσεις εναλλασσόμενου ρεύματος γίνεται αυστηρότερος. Για τον λόγο αυτό, για την μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, και ειδικότερα με υποθαλάσσια καλώδια, τα συστήματα συνεχούς ρεύματος είναι η μόνη βιώσιμη λύση.
- **Δυνατότητα σύνδεσης δικτύων με διαφορετική συχνότητα.** Η σύνδεση μεταξύ δύο δικτύων προϋποθέτει τον συγχρονισμό τους, κάτι που είναι αδύνατον όταν έχουμε δίκτυα με διαφορετική συχνότητα. Με την σύνδεση μέσω συνδέσμου ΣΡ δύο δίκτυα μπορούν να συνδεθούν χωρίς να είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός τους, ή ακόμα και αν λειτουργούν υπό διαφορετική συχνότητα (π.χ. 50 Hz και 60 Hz).
- **Μείωση των απωλειών.** Η απουσία ροής αέργων ρευμάτων στις γραμμές συνεχούς ρεύματος μειώνει τις απώλειες για την μεταφορά της ίδιας ηλεκτρικής ισχύος. Για διασυνδέσεις μεγάλου μήκους οι λιγότερες απώλειες αντισταθμίζουν και τις απώλειες στους μετατροπείς της σύνδεσης ΣΡ, καθιστώντας την σύνδεση πιο αποδοτική. Αυτό γίνεται εμφανές στο σχήμα 2.1. Το μήκος για το οποίο η διασύνδεση ΣΡ γίνεται πιο αποδοτική μειώνεται δραστικά για υποθαλάσσιες συνδέσεις.



Σχήμα 2.1: Απώλειες μεταφοράς για μεταφορά ισχύος 1200 MW ως συνάρτηση του μήκους σύνδεσης για ΣΡ και ΕΡ. [4]

- **Ελεγχιμότητα.** Η χρήση μετατροπέων με πλήρη ελεγχόμενα στοιχεία καθιστά τον έλεγχο της ροής ισχύος μεταξύ των δυο σημείων σύνδεσης πολύ εύκολο. Παράλληλα, η πλήρης ελεγχιμότητα των μετατροπέων βελτιώνει την επίδοση του συστήματος και στην πλευρά ΕΡ προσφέροντας επικουρικές λειτουργίες όπως ο έλεγχος της συχνότητας, η αντιστάθμιση αέργου ισχύος και η συμβολή στην απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.
- **Κόστος.** Οι γραμμές μεταφοράς μιας διασύνδεσης ΣΡ είναι φθηνότερες από μια σύνδεση ΕΡ με την ίδια ικανότητα μεταφοράς. Είναι γεγονός όμως ότι οι τεμαχικοί σταθμοί μιας σύνδεσης ΣΡ είναι πολύ ακριβότεροι λόγω των μετατροπέων. Υπάρχει λοιπόν ένα μήκος σύνδεσης για το οποίο επιλογή της διασύνδεσης ΣΡ είναι οικονομικά περισσότερο συμφέρουσα. Το μήκος αυτό το οποίο αποκαλείται και break-even distance εξαρτάται από την ισχύ και το επίπεδο της τάσης της διασύνδεσης και μπορεί να φτάσει έως τα 600 χιλιόμετρα για εναέριες συνδέσεις ή έως τα 50 χιλιόμετρα για υποθαλάσσιες συνδέσεις. Η σχέση μεταξύ του μήκους της διασύνδεσης και του κόστους εγκατάστασης φαίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Κόστος επένδυσης σύνδεσης σε συνάρτηση με το μήκος της σύνδεσης. [4]

2.2 Δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος Μέσης Τάξης (MVDC)

Με μεγάλα ποσά ενέργειας να μεταφέρονται μέσω HVDC συνδέσεων εδώ και δεκαετίες, τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση για επέκταση των δικτύων συνεχούς ρεύματος και στο επίπεδο της διανομής [5, 6]. Εκτός από τα συστήματα διανομής, τα συστήματα μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος (MVDC) μπορούν να αποτελέσουν καλύτερη επιλογή έναντι των αντίστοιχων ΕΡ σε πληθώρα άλλων εφαρμογών.

Στα [7–9] γίνεται παρουσίαση των πλεονεκτημάτων της σύνδεσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών στο δίκτυο με την χρήση MVDC υποθαλάσσιων γραμμών. Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι το μικρότερο κόστος και η μεγαλύτερη απόδοση. Μια εφαρμογή για την οποία υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον είναι και τα μικροδίκτυα MVDC. Στο [10], βλέπουμε τα πλεονεκτήματα που έχει η δημιουργία ενός μικροδικτύου MVDC, για την ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων βιομηχανικών εργασιών όπως η εξόρυξη ορυκτού πλούτου. Με την δημιουργία του μικροδικτύου ΣΡ γίνεται πιο εύκολη η ενσωμάτωση των τοπικών πηγών ανανεώσιμης ενέργειας (αιολική και ηλιακή ενέργεια) και η εκμετάλλευση της αναγεννητικής πέδησης των μηχανημάτων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Ένας ιδιαίτερος τύπος μικροδικτύων για τα οποία έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα είναι τα ηλεκτρικά πλοία. Σε πληθώρα ακαδημαϊκών δημοσιεύσεων προτείνεται η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό πλοίο να γίνεται με την χρήση ΣΡ [11,12]. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα από την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα στα ηλεκτρικά πλοία είναι:

- **Δεν υπάρχει για ανάγκη για συγχρονισμό της φάσης λειτουργίας των γεννητριών.** Επειδή οι γεννήτριες συνδέονται στο σύστημα μέσω ανορθωτικών διατάξεων, δεν είναι ανάγκη να είναι συγχρονισμένες όσο αφορά την φάση.
- **Μείωση του κόστους και του όγκου του εξοπλισμού.** Με την μεταφορά ενέργειας μέσω συνεχούς συστήματος, εξαλείπονται οι ογκώδεις μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων. Παράλληλα, η εξάλειψη στον περιορισμό της συχνότητας λειτουργίας των γεννητριών επιτρέπει την επιλογή μικρότερων γεννητριών. Τέλος, επειδή τα καλώδια στο εναλλασσόμενο σύστημα διαστασιολογούνται με κριτήριο το πλάτος του ημιτόνου της τάσης και όχι την ενεργό (RMS) τιμή, για την μεταφορά του ίδιου ποσού ισχύος στο συνεχές σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο λεπτά καλώδια.
- **Καλύτερη ενεργειακή απόδοση** Η απουσία άεργων ρεύματων στο σύστημα, μειώνει τις απώλειες. Επιπλέον, λόγω της σύνδεσης των γεννητριών μέσω ανορθωτικών διατάξεων, οι γεννήτριες μπορούν να περιστρέφονται στην ταχύτητα την οποία είναι πιο αποδοτικές.
- **Περιβαλλοντικά οφέλη** Η επιλογή των γεννητριών ανεξάρτητα της συχνότητας λειτουργίας τους, μπορεί να κάνει οικονομικά βιώσιμες τις μηχανές εξωτερικής καύσης όπως τους αεριοστρόβιλους. Οι μηχανές αυτές παράγουν πολύ μικρότερη ποσότητα καυσαερίων από τις μηχανές ντίζελ που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα.

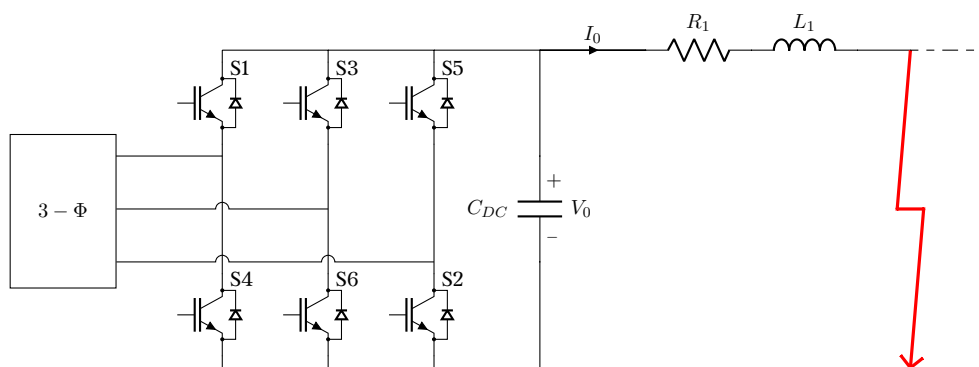
2.3 Προστασία Συστημάτων Συνεχούς Ρεύματος

Στις περισσότερες από τις παραπάνω δημοσιεύσεις γίνεται εκτενής αναφορά στην ανάγκη ανάπτυξης ενός αποτελεσματικού συστήματος προστασίας, προκειμένου να γίνει εφικτή η εκμετάλλευση των προτερημάτων που προσφέρουν τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος. Ένας διακόπτης ισχύος συνεχούς ρεύματος πρέπει να είναι σε θέση να αποσυνδέσει το κομμάτι του δικτύου στο οποίο εντοπίζεται ένα σφάλμα από το υγιές, όπως επίσης πρέπει να είναι σε θέση να απορροφήσει την μαγνητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις επαγωγές της γραμμής κατά την διακοπή. Το ρεύμα σφάλματος που προκύπτει σε ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος εξαρτάται από παράγοντες όπως η τοπολογία (μονοπολική ή διπολική), την διάταξη γείωσης του συστήματος, καθώς και την πηγή που τροφοδοτεί το σφάλμα.

Σε κάθε περίπτωση, το πιθανότερο είναι το σύστημα να τροφοδοτείται μέσω ανορθωτικών διατάξεων και μετατροπέων ΣΡ/ΣΡ. Τότε παύει να ισχύει η εξίσωση (1.1), όπου περιγράφει το ρεύμα σφάλματος στην περίπτωση που η πηγή θεωρείται ιδανική. Αντίθετα το ρεύμα σφάλματος εξαρτάται από τον τύπο του μετατροπέα που τροφοδοτεί το σύστημα. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν διατάξεις μετατροπέων που είναι σχεδιασμένοι ώστε να περιορίζουν το ρεύμα σφάλματος στην πλευρά ΣΡ [13,14].

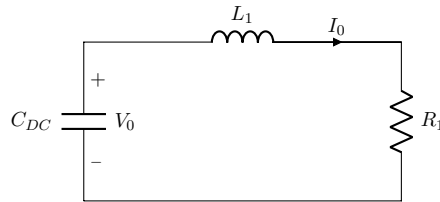
2.3.1 Ρεύμα σφάλματος τριφασικού μετατροπέα τάσης

Σε περίπτωση σφάλματος σε ένα σύστημα ΣΡ το οποίο τροφοδοτείται από έναν τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, το σφάλμα μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια. Κατά τον εντοπισμό του σφάλματος, δίνεται εντολή στα ενεργά στοιχεία του μετατροπέα να περάσουν σε αποκοπή για την προστασίας τους, έχοντας σαν συνέπεια ο μετατροπέας λειτουργεί σαν μη ελεγχόμενος ανορθωτής. Στο πρώτο στάδιο ο πυκνωτής εξόδου του μετατροπέα εκφορτίζεται, τροφοδοτώντας το ρεύμα σφάλματος. Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος για το σύστημα ΣΡ. Το δεύτερο στάδιο ξεκινάει με τον μηδενισμό της τάσης του πυκνωτή εξόδου, και το ρεύμα που ρέει μέσω της επαγωγής L_1 οδηγείται πλέον μέσω των διόδων του μετατροπέα. Η μεγάλη αρχική τιμή του ρεύματος αυτού, η οποία είναι στο επίπεδο του μεγίστου ρεύματος σφάλματος, έχει ως αποτέλεσμα αυτό το στάδιο να είναι το πιο κρίσιμο για τις διόδους του μετατροπέα. Μετά την εκφόρτιση και της επαγωγής L_1 το σφάλμα πλέον τροφοδοτείται από το δίκτυο ΕΡ μέσω του μετατροπέα ο οποίος συνεχίζει να λειτουργεί σαν μη ελεγχόμενος ανορθωτής. Μια λεπτομερής ανάλυση για όλα τα στάδια μπορεί να βρεθεί στο [15].



Σχήμα 2.3: Σφάλμα σε τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης

Είναι θεμιτό, τόσο για την προστασία των διόδων του μετατροπέα όσο και για την προστασία όλου του συστήματος, ο διακόπτης ισχύος να ενεργεί πριν την ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα του πρώτου σταδίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα πρώτου σταδίου του σφάλματος

Όπου:

- C_{DC} είναι η χωρητικότητα εξόδου του μετατροπέα
- V_0 είναι η τάση φόρτισης της χωρητικότητας πριν το σφάλμα
- I_0 είναι το ρεύμα που ρέει στην πλευρά ΣΡ πριν το σφάλμα
- R_1 και L_1 είναι η αντίσταση και η επαγωγή της γραμμής προ του σφάλματος αντίστοιχα

Η απόκριση της εκφόρτισης της χωρητικότητας εξαρτάται από τον συντελεστή απόσβεσης του συστήματος ο οποίος ισούται με :

$$\zeta = \frac{R_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_{DC}}{L_1}}$$

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής απόσβεσης είναι μικρότερος της μονάδας, όπως συνήθως συμβαίνει, η απόκριση των μεταβλητών κατάστασης του RLC κυκλώματος είναι:

$$v_{C_{DC}} = \frac{V_0 \cdot \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega \cdot C_{DC}} e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$i = C_{DC} \frac{dv_{C_{DC}}}{dt} = -\frac{I_0 \cdot \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t - \beta) + \frac{V_0}{\omega L_1} e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t \quad (2.2)$$

όπου:

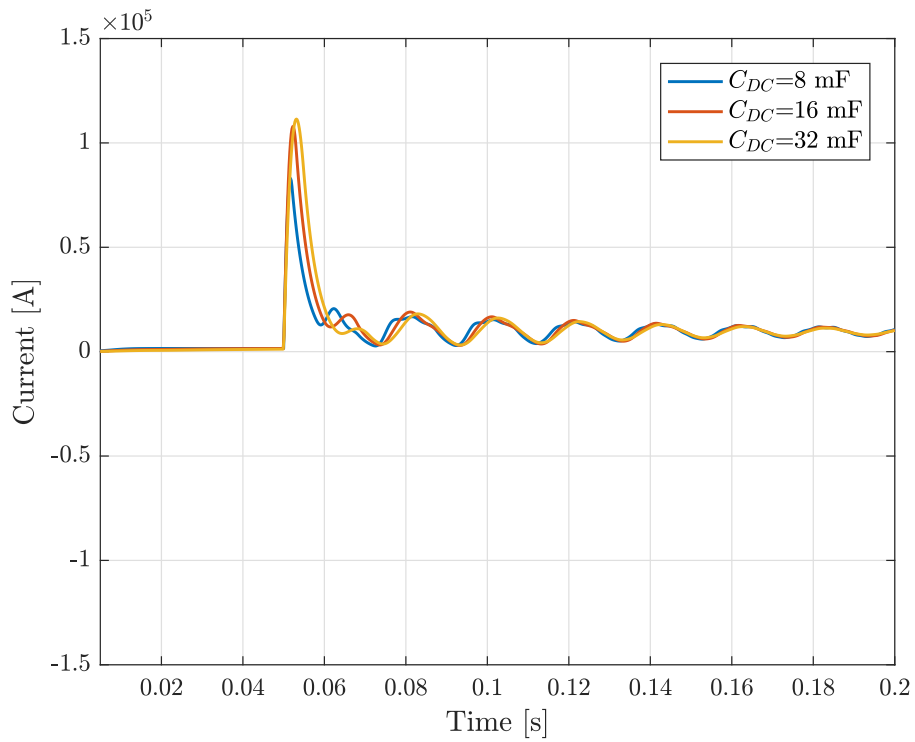
$$\delta = \frac{R_1}{2L_1}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L_1 \cdot C_{dc}} - \left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2$$

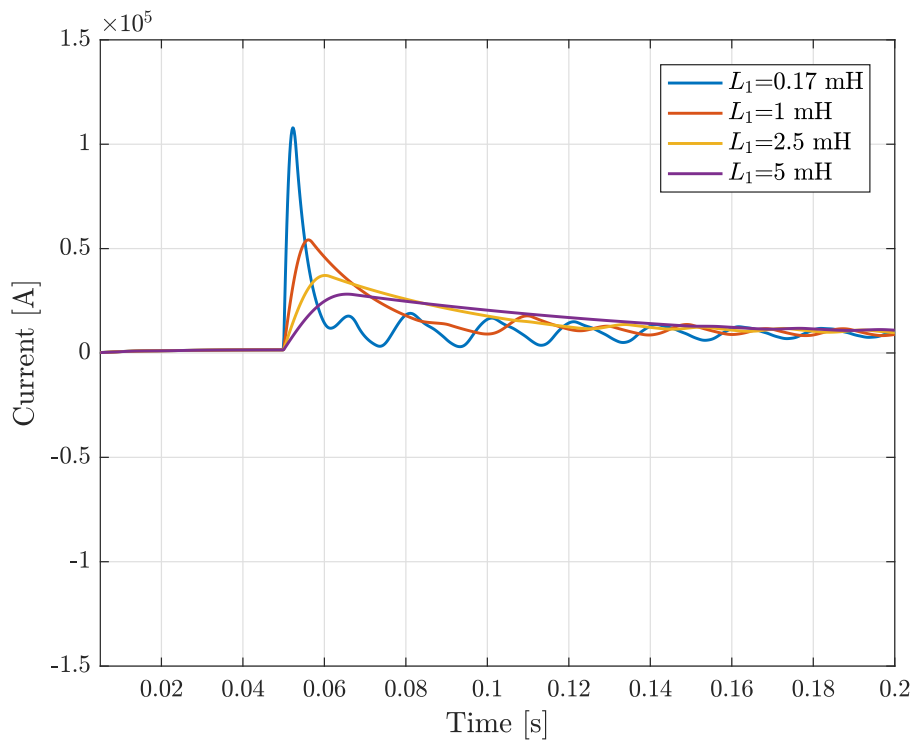
$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \delta^2}$$

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

Στο σχήμα 2.5 φαίνεται το ρεύμα σφάλματος ενός μετατροπέα για διαφορετικές τιμές της χωρητικότητας εξόδου. Παράλληλα με την αύξηση του ρεύματος σφάλματος με την αύξηση της χωρητικότητας του μετατροπέα, παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, το ρεύμα σφάλματος αυξάνεται ραγδαία φτάνοντας στην μέγιστη τιμή του σε λίγα μόλις ms. Όπως αναφέρθηκε, είναι θεμιτό το σφάλμα να αντιμετωπίζεται προτού φτάσει την μέγιστη τιμή του. Για τον λόγο αυτό, οι διακόπτες ισχύος συνεχούς ρεύματος συνδέονται σε σειρά με μια επαγωγή περιορισμού του ρεύματος σφάλματος. Με την σύνδεση της επαγωγής, ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος σφάλματος μειώνεται, και ο διακόπτης ΣΡ μπορεί να ενεργήσει πριν αυτό φτάσει στην μέγιστη τιμή του. Παράλληλα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.2), η σύνδεση της επαγωγής οδηγεί και σε μείωση της μέγιστης τιμής του ρεύματος σφάλματος ενός μετατροπέα. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η μεταβολή του πλάτους και του ρυθμού αύξησης του ρεύματος σφάλματος του μετατροπέα για διαφορετικές τιμές της επαγωγής L_1 . Αν και η σύνδεση της επαγωγής λειτουργεί ευεργετικά για την αντιμετώπιση των σφάλματων, παράλληλα αυξάνει το κόστος των μέσων προστασίας ΣΡ και δυσχαιρένει τον έλεγχο του συστήματος



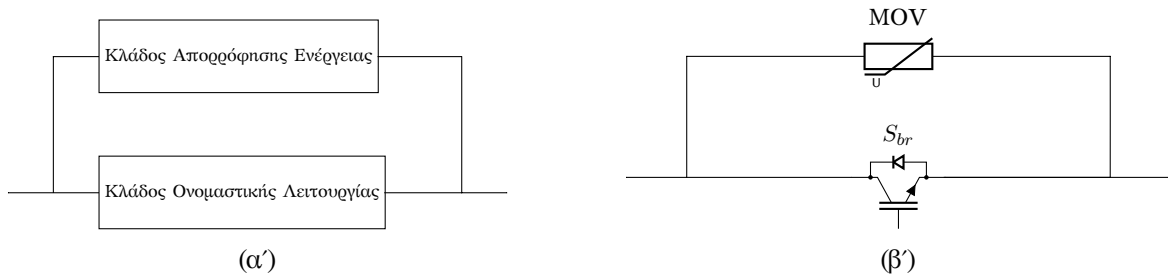
Σχήμα 2.5: Ρεύμα σφάλματος για διαφορετικές τιμές της χωρητικότητας C_{DC} για $V_0=15$ kV, $I_0=1.5$ kA, $R_1=45$ mΩ, $L_1=0.17$ mH.



Σχήμα 2.6: Ρεύμα σφάλματος για διαφορετικές τιμές της επαγωγής L_1 για $V_0=15$ kV, $I_0=1.5$ kA, $R_1=45$ mΩ, $C_{DC}=16$ mF.

2.4 Διατάξεις διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος (DCCBs)

2.4.1 Διακόπτες ισχύος στερεάς κατάστασης (Solid-State DCCBs)



Σχήμα 2.7: Solid-State DCCB

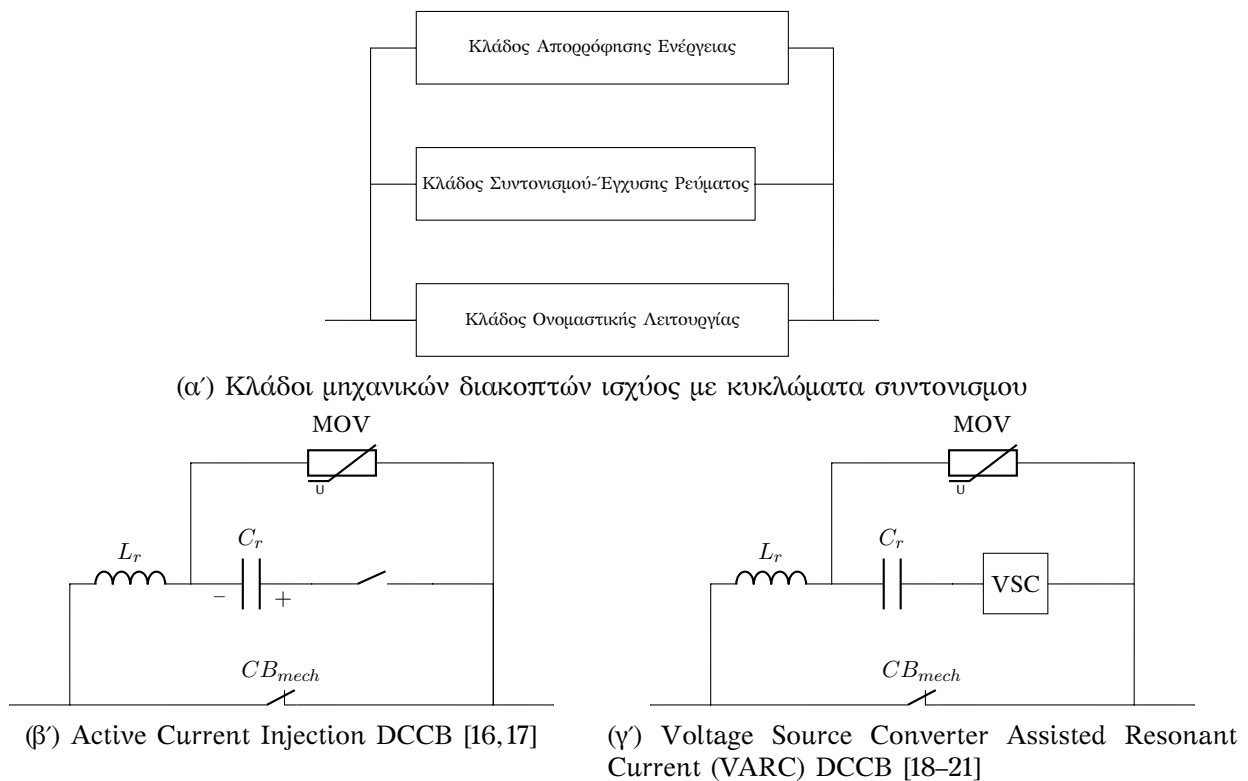
Οι διακόπτες ισχύος στερεάς κατάστασης (Solid-State) αποτελούνται από δύο κλάδους όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7, τον κλάδο ονομαστικής λειτουργίας και τον κλάδο απορρόφησης ενέργειας. Ο κλάδος ονομαστικής λειτουργίας αποτελείται από συστοιχίες ημιαγωγών με ικανότητα διακοπής ρεύματος (turn-off capability) όπως είναι τα IGBTs. Κατά την ονομαστική λειτουργία το ρεύμα ρέει μέσω του κλάδου αυτού. Για την διακοπή του ρεύματος, δίνεται εντολή στους ημιαγωγούς να μεταβούν σε κατάσταση αποκοπής και το ρεύμα μετάγεται στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας. Ο κλάδος αυτός αποτελείται από βαρίστορ τα οποία απορροφούν την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις επαγωγές του συστήματος, και οδηγούν το ρεύμα του συστήματος στο μηδέν. Η συστοιχία των ημιαγωγών του κλάδου ονομαστικής λειτουργίας, αποτελείται από ημιαγωγούς συνδεδεμένους σε σειρά και παράλληλα. Η επιλογή του αριθμού των ημιαγωγών σε σειρά γίνεται με κριτήριο να έχουν την απαραίτητη τάση αποκοπής ώστε να μπορούν να αντέξουν την τάση που τους επιβάλλεται από τα βαρίστορ όταν αυτά άγουν. Η επιλογή του αριθμού των ημιαγωγών συνδεδεμένων παράλληλα γίνεται με κριτήριο την ικανότητα διακοπής όταν αυτά διαρρέονται από το ρεύμα σφάλματος.

Ο χρόνος απόκρισης των Solid-State DCCBs είναι εξαιρετικά γρήγορος (<1ms). Όμως το γεγονός ότι απαιτείται μεγάλος αριθμός ημιαγωγών για την λειτουργία τους οδηγεί σε μειονεκτήματα όπως:

- Υψηλό κόστος εγκατάστασης
- Υψηλές απώλειες, επειδή κατά την ονομαστική λειτουργία το ρεύμα ρέει μέσω της συστοιχίας των ημιαγωγών
- Οι υψηλές απώλειες έχουν ως αποτέλεσμα την ανάγκη για εγκατάσταση συστήματος ψύξης, αυξάνοντας περισσότερο το κόστος εγκατάστασης

Τα παραπάνω μειονεκτήματα καθιστούν τις διατάξεις αυτές οικονομικά ασύμφωρες, ειδικότερα για συστήματα μεγάλης ισχύος.

2.4.2 Μηχανικοί διακόπτες ισχύος με κυκλώματα συντονισμού (Mechanical DCCBs)



Σχήμα 2.8: Μηχανικοί διακόπτες ισχύος ΣΡ

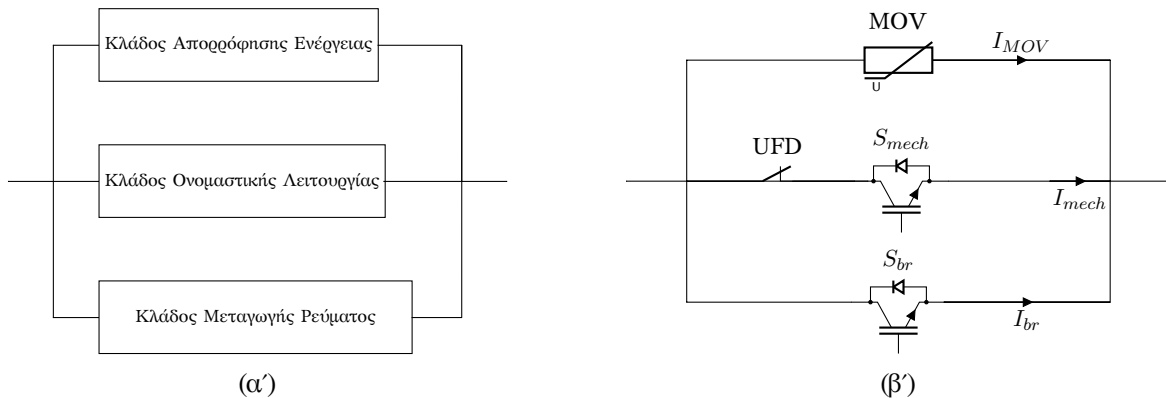
Οι μηχανικοί διακόπτες ισχύος με κυκλώματα συντονισμού, βασίζονται στην χρήση συμβατικών μηχανικών διακοπών, όπως αυτούς που χρησιμοποιούνται στα συστήματα εναλλασόμενου ρεύματος. Αποτελούνται από τρεις κλάδους όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Κατά την ονομαστική λειτουργία, το ρεύμα ρέει μέσω του κλάδου ονομαστικής λειτουργίας που αποτελείται από έναν μηχανικό διακόπτη με εξαιρετικά χαμηλές απώλειες. Όταν εντοπιστεί ένα σφάλμα, οι επαφές του μηχανικού διακόπτη ξεκινάνε να ανοίγουν και το ρεύμα συνεχίζει να ρέει μέσω αυτού, δημιουργώντας ηλεκτρικό τόξο. Για την επιτυχή σβέση του τόξου απαιτείται το ρεύμα που διαπερνάει τον μηχανικό διακόπτη να είναι μηδενικό. Αυτό επιτυγχάνεται με την έγχυση ενός ρεύματος (ημιτονικής μορφής) που αντιτίθεται στο ρεύμα σφάλματος, από τον κλάδο συντονισμού-έγχυσης ρεύματος

Ο κλάδος συντονισμού-έγχυσης ρεύματος αποτελείται από ένα κύκλωμα συντονισμού L-C, απαραίτητο για την δημιουργία του ημιτονικού ρεύματος που απαιτείται. Διαφορά ανάμεσα στις διατάξεις (β') και (γ') αποτελεί η πηγή διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού. Στην διάταξη (β') χρησιμοποιείται ένας φορτισμένος πυκνωτής και το ρεύμα εγχέεται στον μηχανικό διακόπτη με τον έλεγχο ενός ημιαγωγικού διακόπτη. Ο διακόπτης S μπορεί να είναι είτε θυριστορ είτε IGBT. Στην διάταξη (γ') για την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας, και πιο συγκεκριμένα ένας αντιστροφέας πλήρους γέφυρας 2 επιπέδων. Με αυτόν τον τρόπο οι απαιτήσεις των ημιαγωγών σε τάση μειώνονται δραστικά, αφού οι ημιαγωγοί του μετατροπέα επιλέγονται με βάση την τάση της εισόδου του και όχι την τάση του συστήματος. Μετά το άνοιγμα του μηχανικού διακόπτη και την σβέση του τόξου, το ρεύμα σφάλματος συνεχίζει να ρέει μέσω του κλάδου συντονισμού, φορτίζοντας τον πυκνωτή. Όσο φορτίζεται ο πυκνωτής το ρεύμα μεταγεται στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας που αποτελείται από βαρίστορ, τα οποία απορροφούν την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις επαγωγές του συστήματος, και οδηγούν το ρεύμα του συστήματος στο μηδέν. Κατά την σβέση του τόξου, είναι απαραίτητο οι επαφές του μηχανικού διακόπτη να έχουν ανοίξει τόσο ώστε να έχει αποκτήσει ηλεκτροστατική αντοχή που να ξεπερνάει την τάση που επιβάλλει το βαρίστορ κατά την αγωγή

του. Σε διαφορετική περίπτωση προκαλείται επανεμφάνιση του ηλεκτρικού τόξου.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των μηχανικών διακοπών ισχύος με κυκλώματα συντονισμού είναι οι ελάχιστες απώλειες, και ως εκ τούτου η απουσία υποχρέωσης για συνεχή ψύξη. Κατά την ονομαστική λειτουργία το ρεύμα διαρρέει τον μηχανικό διακόπτη, η αντίσταση του οποίου είναι πολύ μικρή ($<1\text{ m}\Omega$). Ο χρόνος απόκρισης τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα με την οποία ανοίγει ο μηχανικός διακόπτης και μπορεί να φτάσει τα 10 ms .

2.4.3 Υβριδικοί διακόπτες ισχύος



Σχήμα 2.9: Hybrid DCCB [22]

Σκοπός των υβριδικών διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος είναι ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των δύο προηγούμενων διατάξεων διακοπών ισχύος. Ο υβριδικός διακόπτης ισχύος αποτελείται από τρεις κλάδους. Ο κλάδος ονομαστικής λειτουργίας αποτελείται από μια συστοιχία μικρού αριθμού IGBTs και έναν εξαιρετικά γρήγορο διακόπτη αποσύνδεσης (UFD), ο κλάδος μεταγωγής ρεύματος από μια συστοιχία μεγάλου αριθμού IGBTs και ο κλάδος απορρόφησης ενέργειας από βαρίστορ. Κατά την ονομαστική λειτουργία το ρεύμα διαρρέει τον διακόπτη αποσύνδεσης και την συστοιχία των IGBTs του ονομαστικού κλάδου. Για την αντιμετώπιση ενός σφάλματος, δίνεται εντολή στους ημιαγωγούς του κλάδου μεταγωγής ρεύματος να περάσουν σε αγωγή και ύστερα εντολή στους ημιαγωγούς του κλάδου ονομαστικής λειτουργίας να περάσουν σε αποκοπή. Με το ρεύμα να ρέει μέσω του κλάδου μεταγωγής, ο διακόπτης αποσύνδεσης μπορεί να ανοίξει με μεγάλη ταχύτητα δίχως να δημιουργηθεί ηλεκτρικό τόξο. Όταν ο διακόπτης αποσύνδεσης ανοίξει, οι ημιαγωγοί του κλάδου μεταγωγής περνάνε και αυτοί σε αποκοπή και το ρεύμα συνεχίζει να ρέει μέσω του κλάδου απορρόφησης ενέργειας. Τα βαρίστορ απορροφούν την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις επαγωγές του συστήματος, και οδηγούν το ρεύμα του συστήματος στο μηδέν.

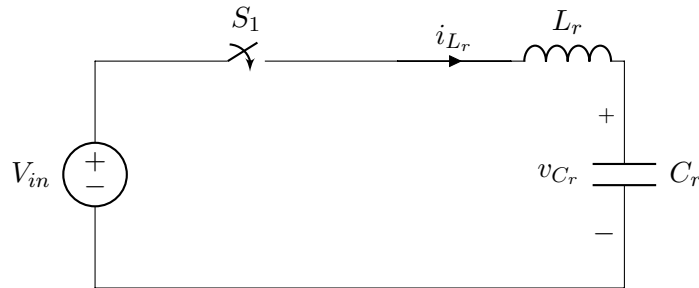
Καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του διακόπτη ισχύος, οι ημιαγωγοί του κλάδου ονομαστικής λειτουργίας δεν βρίσκονται ποτέ υπό την τάση του συστήματος ή την τάση των βαρίστορ. Αυτό επιτρέπει την μείωση των απαιτούμενων ημιαγωγών συνδεδεμένους σε σειρά, που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών κατά την κανονική λειτουργία. Αντίθετα, ο κλάδος μεταγωγής απαιτεί συνδέσεις ημιαγωγών σε σειρά και παράλληλα. Σε σειρά προκειμένου η τάση αποκοπής της συστοιχίας να είναι μεγαλύτερη από την τάση του βαρίστορ κατά την αγωγή του και παράλληλα προκειμένου η συστοιχία να μπορεί να διακόψει το ρεύμα σφάλματος. Ο χρόνος απόκρισης του είναι της τάξης των λίγων ms, και εξαρτάται από τον χρόνο ανοίγματος του διακόπτη αποσύνδεσης. Το κόστος υλοποίησης είναι υψηλό, λόγω των μεγάλων απαιτήσεων σε ημιαγωγούς.

3 Στοιχεία Μηχανικών Διακοπών Ισχύος Συνεχούς Ρεύματος με Κυκλώματα Συντονισμού

3.1 Κυκλώματα συντονισμού

Τα κυκλώματα συντονισμού είναι κυκλώματα τα οποία αποτελούνται από επαγωγές και χωρητικότητες. Στον τομέα της ηλεκτρικής ισχύος, χρησιμοποιούνται σε παθητικά φίλτρα και σε συντονιζόμενους μετατροπείς για την μείωση των διακοπτικών απωλειών. Η χρήση τους σε συνδυασμό με κατάλληλες διακοπτικές στρατηγικές επιτρέπει σε ημιαγωγικούς διακόπτες να ανοίγουν ή να κλείνουν όταν είτε η τάση στα άκρα τους είτε το ρεύμα που τους διαρρέει είναι μηδέν ή σχεδόν μηδέν. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης της χωρητικότητας και της επαγωγής, τα κυκλώματα συντονισμού χωρίζονται σε συντονιζόμενα κυκλώματα σειράς L-C και σε παράλληλα συντονιζόμενα κυκλώματα L-C. Σε τοπολογίες διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται αποκλειστικά τα πρώτα.

3.1.1 Απόκριση κυκλώματος συντονισμού σειράς



Σχήμα 3.1: Κύκλωμα συντονισμού σειράς

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ένα κύκλωμα συντονισμού σειράς αποτελούμενο από μια επαγωγή L_r και μια χωρητικότητα C_r . Την χρονική στιγμή $t = t_0$ ο διακόπτης S_1 κλείνει, και στο κύκλωμα συνδέεται μια πηγή τάσης V_{in} . Οι μεταβλητές κατάστασης του κυκλώματος είναι το ρεύμα πηνίου i_{L_r} και η τάση στα άκρα του πυκνωτή v_{C_r} . Οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών κατάστασης είναι I_{L_0} και V_{C_0} αντίστοιχα. Μετά το κλείσιμο του αμφίδρομου διακόπτη S_1 ισχύουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:

$$L_r \cdot \frac{di_{L_r}(t)}{dt} + v_{C_r}(t) = V_{in} \quad (3.1)$$

και

$$C_r \cdot \frac{dv_{C_r}(t)}{dt} = i_{L_r}(t) \quad (3.2)$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων προκύπτει:

$$i_{L_r}(t) = I_{L_0} \cdot \cos[\omega_0(t - t_0)] + \frac{V_{in} - V_{C_0}}{Z_0} \cdot \sin[\omega_0(t - t_0)] \quad (3.3)$$

και

$$v_{C_r}(t) = V_{in} - (V_{in} - V_{C_0}) \cdot \cos[\omega_0(t - t_0)] + Z_0 \cdot I_{L_0} \cdot \sin[\omega_0(t - t_0)] \quad (3.4)$$

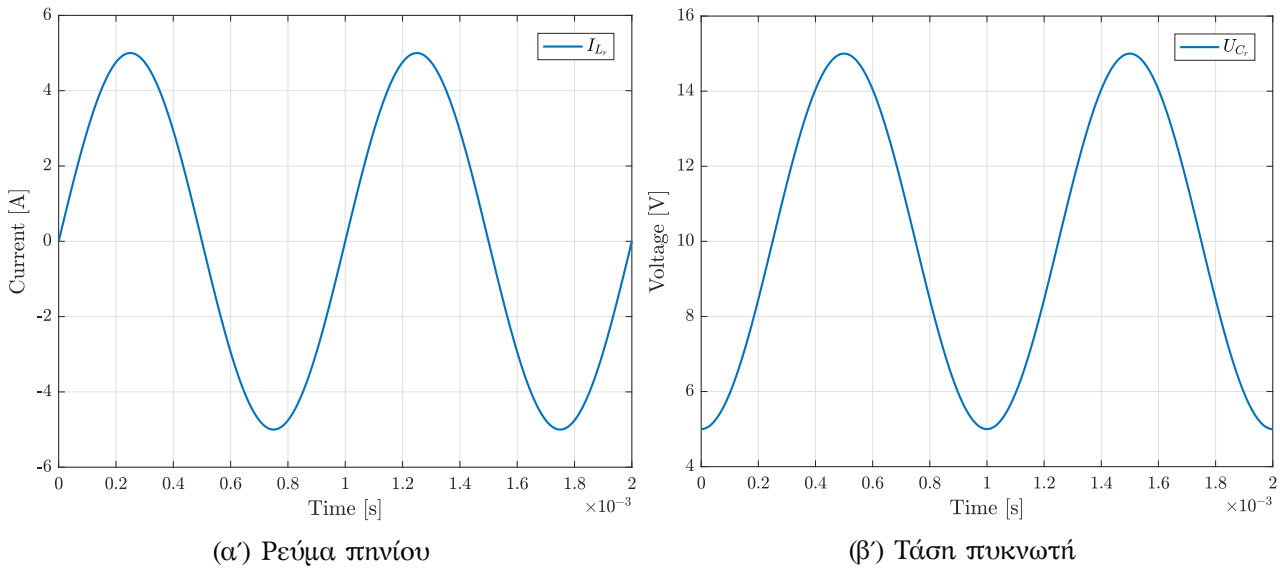
Λόγω της μορφής των εξισώσεων ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- η γωνιακή συχνότητα συντονισμού (rads/sec):

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C_r}} \quad (3.5)$$

- η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση (Ω):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (3.6)$$

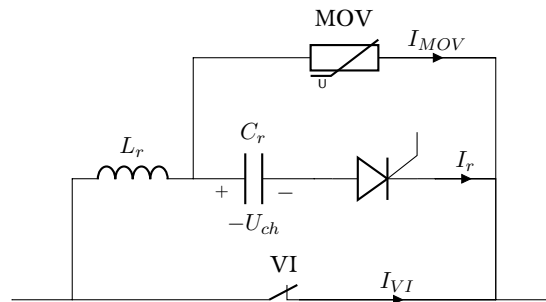


Σχήμα 3.2: Κυματομορφές απόκρισης κυκλώματος συντονισμού σειράς για $V_{in}=10\text{ V}, V_{C_0}=5\text{ V}, I_{L_0}=0\text{ A}, Z_0=1\Omega, f_r=1000\text{ Hz}$

Στο σχήμα 3.2 φαίνονται οι κυματομορφές απόκρισης των μεταβλητών κατάστασης του κυκλώματος συντονισμού όταν αυτό διεγείρεται από πηγή σταθερής τάσης.

3.1.2 Απόκριση κυκλώματος συντονισμού σειράς φορτισμένου πυκνωτή

Στους διακόπτες ισχύος έγχυσης ενεργού ρεύματος, σαν αυτόν του σχήματος 3.3 χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα συντονισμού σειράς όπως αυτό που μελετήθηκε προηγουμένως, με αρχικά φορτισμένο πυκνωτή.

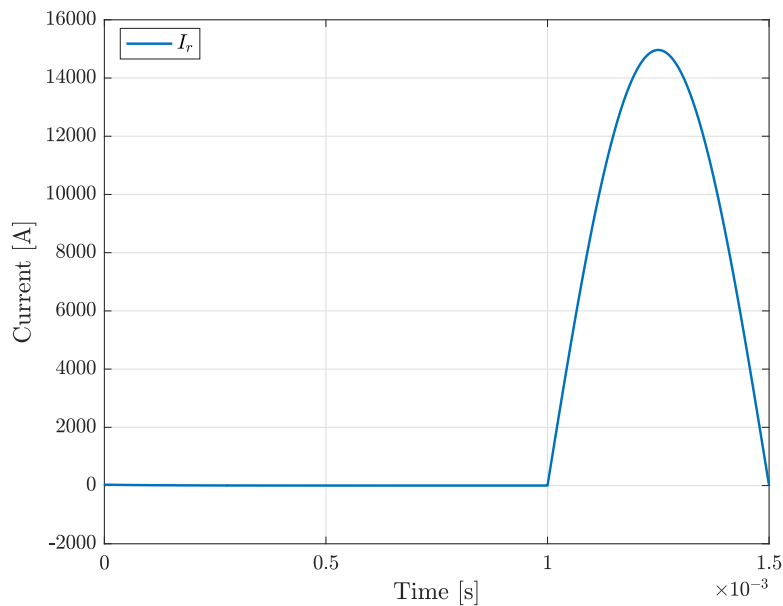


Σχήμα 3.3: Διακόπτης ισχύος έγχυσης ενεργού ρεύματος

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.3),(3.4) όταν δοθεί παλμός έναυσης στο θυρίστορ το ρεύμα του κλάδου συντονισμού θα είναι:

$$i_r = \frac{U_{ch}}{Z_0} \cdot \sin[\omega_0(t - t_0)], \quad (3.7)$$

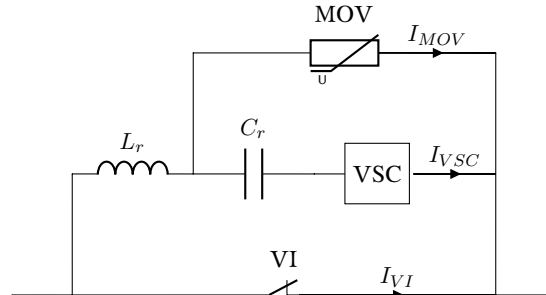
λόγω της απουσίας πηγής τάσης V_{in} και της μηδενικής αρχικής τιμής του ρεύματος πηνίου. Το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο φαίνεται στο σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Απόκριση κλάδου συντονισμού του διακόπτη ισχύος έγχυσης ενεργού ρεύματος για $U_{ch}=-15$ kV, $Z_0=1\Omega$, $f_r=1000$ Hz, $t_0=1$ ms

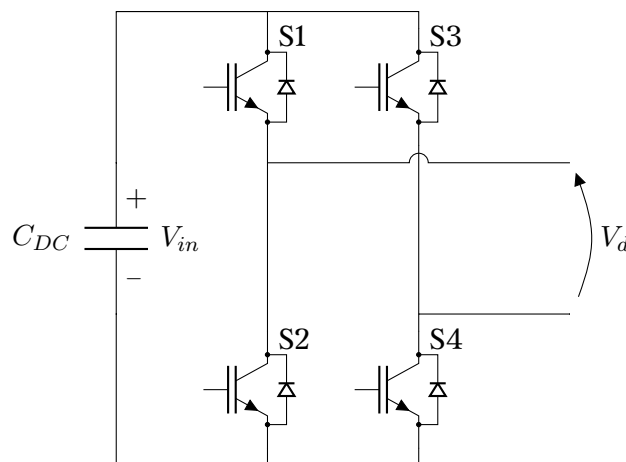
3.1.3 Απόκριση κυκλώματος συντονισμού σειράς που διεγείρεται από μετατροπέα δύο επιπέδων

Στον διακόπτη ισχύος VARC του σχήματος 3.5 η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού γίνεται από έναν μετατροπέα τάσης δυο επιπέδων.



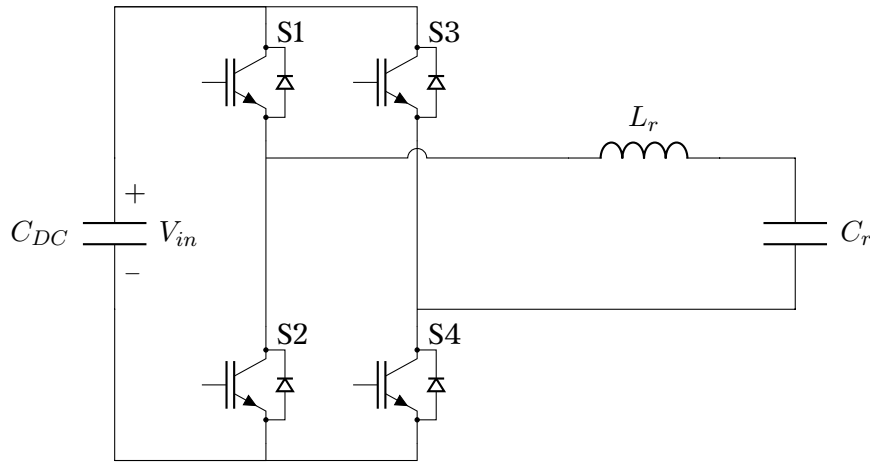
Σχήμα 3.5: VARC

Ο μετατροπέας είναι ένας μονοφασικός αντιστροφέας δύο επιπέδων και αποτελείται από έναν πυκνωτή που παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού, φορτισμένο σε τάση V_{in} και μια πλήρη γέφυρα από IGBTs με αντιπαράλληλες διόδους.



Σχήμα 3.6: Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας δύο επιπέδων

Όπως είναι γνωστό, για έναν μετατροπέα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, όταν άγουν οι διακόπτες S1 και S4 η τάση εξόδου V_d είναι ίση με V_{in} . Αντίστοιχα όταν άγουν οι διακόπτες S2 και S3 η τάση εξόδου V_d ισούται με $-V_{in}$. Χρησιμοποιώντας τον αντιστροφέα για τη διέγερση του κυκλώματος συντονισμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, σκόπος είναι η δημιουργία ενός ταλαντευόμενου ρεύματος αυξανόμενου πλάτους στην έξοδο.



Σχήμα 3.7: Κύκλωμα συντονισμού που διεγείρεται από μονοφασικό αντιστροφέα πλήρους γέφυρας

Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι εξισώσεις απόκρισης ενός κυκλώματος συντονισμού σειράς είναι οι εξής:

$$i_L(t) = I_{L_0} \cdot \cos \omega_0(t - t_0) + \frac{V_d - V_{C_0}}{Z_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_0)$$

$$v_c(t) = V_d - (V_d - V_{C_0}) \cdot \cos \omega_0(t - t_0) + Z_0 \cdot I_{L_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_0),$$

όπου V_d είναι η τάση που διεγείρει το κύκλωμα συντονισμού, δηλαδή η έξοδος του αντιστροφέα. Αντίστοιχα,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C_r}}$$

είναι η κυκλική συχνότητα συντονισμού και

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

η χαρακτηριστική αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού, με αρχικές συνθήκες I_{L_0} , V_{C_0} . Η χωρητικότητα του μετατροπέα θεωρείται πολύ μεγαλύτερη από τον πυκνωτή συντονισμού, και η συνεισφορά στην συχνότητα και την χαρακτηριστική αντίσταση συντονισμού θεωρείται αμελητέα.

Θεωρώντας ότι όλα τα ημιαγωγικά στοιχεία του αντιστροφέα είναι αρχικά σε κατάσταση αποκοπής, η διαδικασία για την δημιουργία του ρεύματος ταλάντωσης αυξανόμενου πλάτους είναι η εξής:

- Αρχικά δίνεται παλμός αγωγής σε ένα από τα ζεύγη ημιαγωγών S1-S4 ή S2-S3, έστω στο S1-S4. Η τάση που διεγείρει το κύκλωμα συντονισμού είναι $V_d = V_{in}$ και σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.3) και (3.4), για μηδενικές αρχικές συνθήκες το ρεύμα του πηνίου L_r και η τάση του πυκνωτή C_r θα είναι:

$$i_L(t) = \frac{V_{in}}{Z_0} \cdot [\sin \omega_0(t - t_0)] \text{ και } v_C(t) = V_{in} \cdot (1 - \cos[\omega_0(t - t_0)])$$

- Όταν το ρεύμα στο πηνίο συντονισμού μηδενιστεί, η τάση του πυκνωτή συντονισμού είναι στην μέγιστη τιμή της, $V_c(t_1) = 2V_{in}$. Αυτό συμβαίνει την χρονική στιγμή t_1 όπου $\cos(\omega_0 t_1) = \pi$. Τότε δίνεται παλμός αγωγής στο ζεύγος ημιαγωγών S2-S3, και η τάση εξόδου

του μετατροπέα αντιστρέφεται. Επομένως η τάση που διεγείρει το κύκλωμα είναι πλέον $V_d = -V_{in}$. Σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.3) και (3.4), και για αρχική τιμή τάσης πυκνωτή $V_c(t_1) = 2V_{in}$ ισχύει:

$$i_L(t) = \frac{-3V_{in}}{Z_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_1) \text{ και } v_C(t) = V_{in} \cdot (1 + 3 \cdot \cos \omega_0(t - t_1))$$

Την χρονική στιγμή t_2 , όπου $\cos \omega_0(t - t_2) = \pi$, το ρεύμα του πηνίου είναι μηδενικό και η τάση του πυκνωτή στην μέγιστη τιμή $V_c(t_2) = -4V_{in}$. Τότε δίνεται παλμός αγωγής στο ζεύγος S1-S4. Η τάση εξόδου του μετατροπέα αντιστρέφεται, επομένως η τάση που διεγείρει το κύκλωμα συντονισμού γίνεται ξανά $V_d = V_{in}$. Σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.3 και 3.4, και για αρχική τιμή τάσης πυκνωτή $V_c(t_2) = -4V_{in}$ ισχύει:

$$i_L(t) = \frac{5V_{in}}{Z_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_2) \text{ και } v_C(t) = V_{in} \cdot (1 - 5 \cdot \cos \omega_0(t - t_2))$$

- Παρατηρείται ότι σε κάθε αντιστροφή της τάσης διέγερσης το ρεύμα αυξάνεται κατά $2V_{in}/Z_0$. Συνεχίζοντας την ίδια διαδικασία μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ταλαντευόμενο ρεύμα ημιτονικής μορφής αυξανόμενου πλάτους. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ως n τον αριθμό των αντιστροφών τάσης εξόδου του μετατροπέα ($V_{in} \rightarrow -V_{in}$ ή $-V_{in} \rightarrow V_{in}$), για το ρεύμα εξόδου και την τάση του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού θα ισχύει:

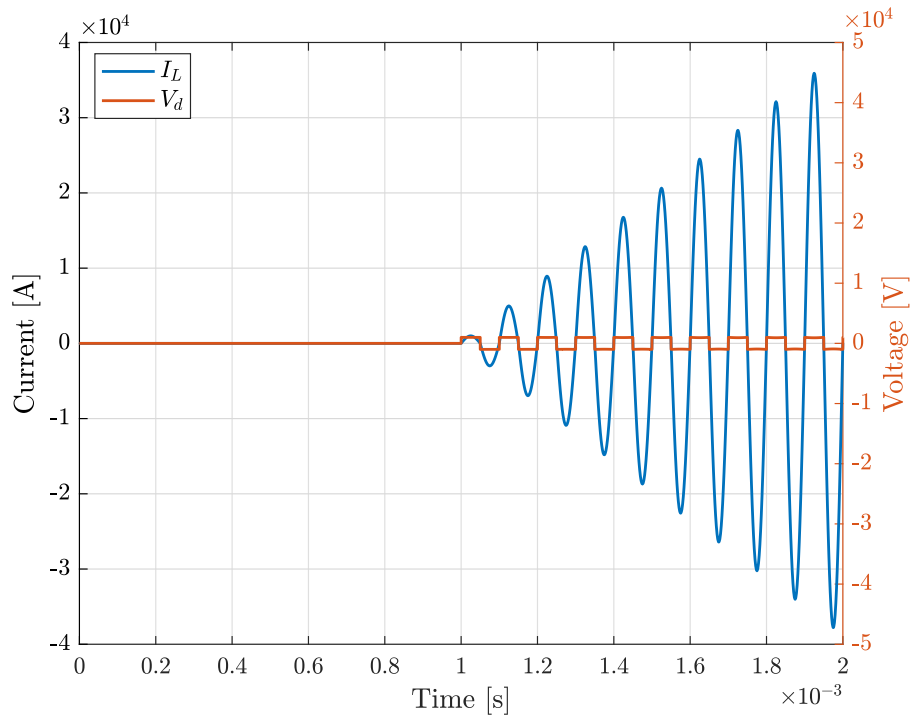
$$i_L(t) = (-1)^n \cdot (2n + 1) \cdot \frac{V_{in}}{Z_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_n) \quad (3.8)$$

$$v_C(t) = V_{in} \cdot (1 - (-1)^n \cdot (2n + 1) \cdot \cos \omega_0(t - t_n)) \quad (3.9)$$

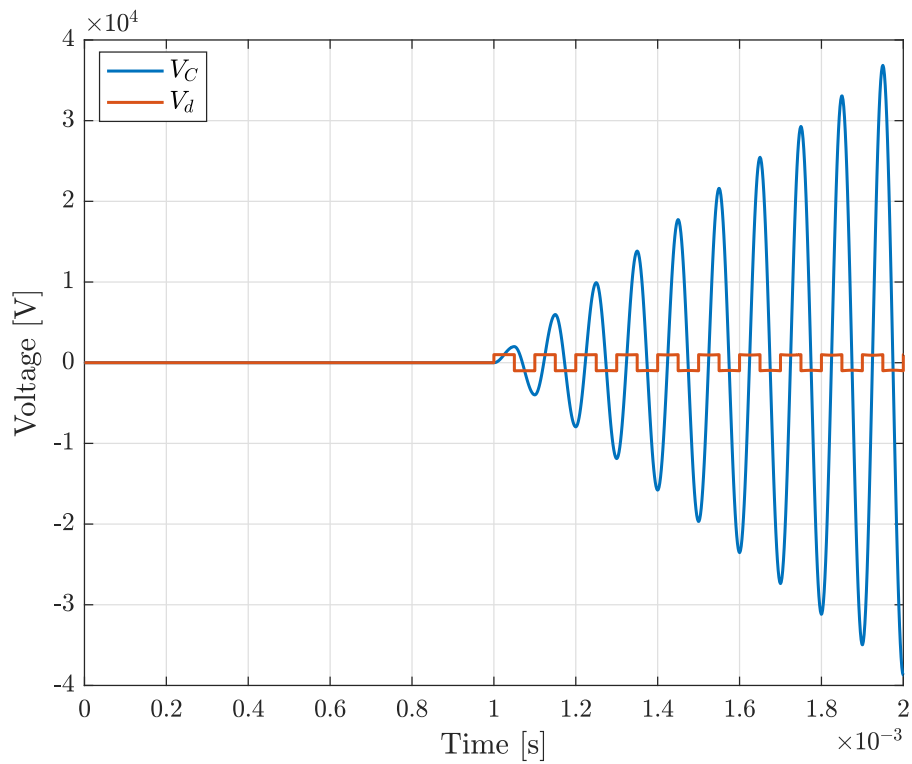
Όπως φαίνεται από την εξίσωση (3.8) το ρεύμα του μετατροπέα μετά από n αντιστροφές ισούται με το ρεύμα που προκύπτει με την εκφόρτιση ενός πυκνωτή με αρχική τάση φόρτισης $(2n + 1)V_{in}$. Επομένως με την σταδιακή δημιουργία του ρεύματος του κλάδου συντονισμού χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα μπορεί να δημιουργηθεί το ίδιο ρεύμα χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς με απαιτήσεις τάσης δραστηκά μειωμένες.

Ο έλεγχος του μετατροπέα μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με διαμόρφωση εύρους παλμού 180 μοιρών, όπου η περίοδος προκύπτει από την συχνότητα του κυκλώματος συντονισμού. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα ελέγχου που ανιχνεύει τις χρονικές στιγμές που μηδενίζεται το ρεύμα των διακοπών, προκειμένου να αντιστραφεί η τάση εξόδου.

Η παραπάνω ανάλυση αποτελεί το ιδανικό μοντέλο της διέγερσης ενός κυκλώματος συντονισμού από έναν αντιστροφέα. Στην πραγματικότητα, κατά την διέγερση η τάση της χωρητικότητας εισόδου του αντιστροφέα μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται και το πλάτος $2V_{in}/Z_0$ που προστίθεται στο ρεύμα μετά από κάθε αντιστροφή. Το φαινόμενο αυτό και οι επιπτώσεις που έχει στο ρεύμα που δημιουργείται αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο. Στα σχήματα 3.8 και 3.9 φαίνονται οι κυματομορφές του ρεύματος πηνίου και της τάσης του πυκνωτή όταν το κύκλωμα συντονισμού διεγείρεται από έναν αντιστροφέα δύο επιπέδων.



Σχήμα 3.8: Τάση διέγερσης (V_d) και ρεύμα πηνίου (I_L) του κυκλώματος συντονισμού για $V_{in}=1000$ V, $f_0=10$ kHz, $Z_0=1 \Omega$, $t_0=1$ ms

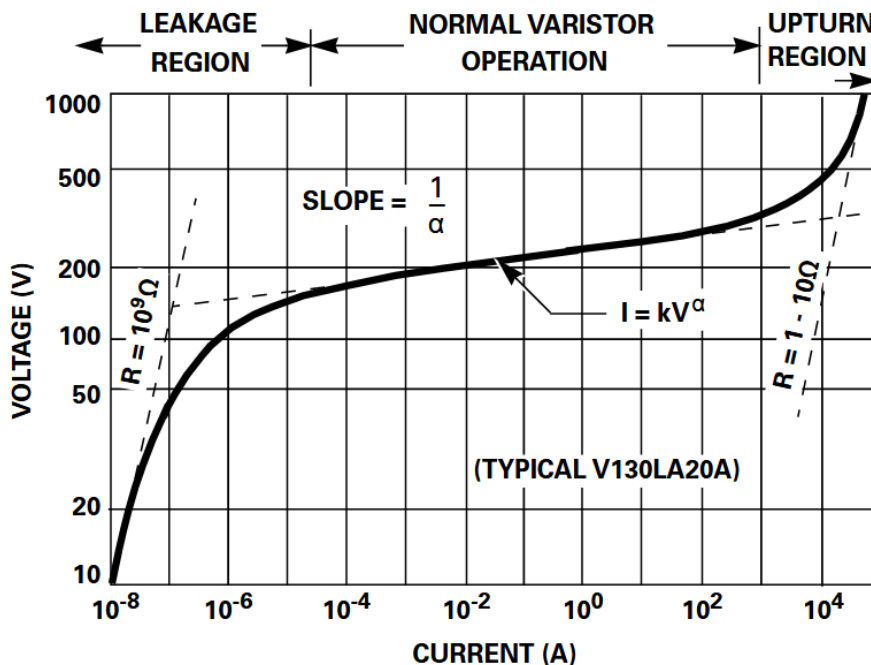


Σχήμα 3.9: Τάση διέγερσης (V_d) και τάση πυκνωτή (V_C) του κυκλώματος συντονισμού για $V_{in}=1000$ V, $f_0=10$ kHz, $Z_0=1 \Omega$, $t_0=1$ ms

3.2 Κλάδος Απορρόφησης Ενέργειας

Σε όλες τις διατάξεις διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος της προηγούμενης ενότητας υπάρχει ένας κλάδος απορρόφησης ενέργειας. Ο κλάδος αυτός αποτελείται από βαρίστορ, και πιο συγκεκριμένα από Metal Oxide Varistors (MOV). Τα MOVs κατασκευάζονται κυρίως από οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) με προσμίξεις από άλλα οξείδια μετάλλων. Είναι μη γραμμικά παθητικά στοιχεία, η αντίσταση των οποίων εξαρτάται από την τάση στα άκρα τους. Υπό χαμηλή τάση διαρρέονται από ένα μικρό ρεύμα διαρροής (της τάξης των mA), ενώ όταν αυξηθεί η τάση στα άκρα τους η αντίστασή τους μειώνεται και απορροφάνε ρεύματα τα οποία θα ήταν καταστροφικά για το σύστημα.

Στα συστήματα ΕΡ τα MOV χρησιμοποιούνται για την καταστολή κεραυνών, καθώς και άλλων μεταβατικών φαινομένων που απαιτούν την απορρόφηση μεγάλων ποσών ενέργειας. Στους διακόπτες ισχύος συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στις επαγωγές του συστήματος μετά την λειτουργία του διακόπτη και την οδήγηση του ρεύματος σφάλματος σε μηδενικά επίπεδα (ρεύμα διαρροής). Παράλληλα, στις διατάξεις στερεάς κατάστασης, προστατεύουν τους ημιαγωγούς από την υπέρταση που δημιουργείται μετά την διακοπή του ρεύματος σφάλματος.



Σχήμα 3.10: Τυπική χαρακτηριστική κυματομορφή τάσης-ρεύματος ενός MOV [23]

Η χαρακτηριστική κυματομορφή ενός MOV, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.10 χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

- Η πρώτη περιοχή είναι η περιοχή διαρροής. Όπως φαίνεται, σε χαμηλές τάσεις, η αντίσταση του βαρίστορ είναι πολύ μεγάλη (της τάξης των kΩ) και το ρεύμα που το διαρρέει είναι ένα μικρό ρεύμα διαρροής. Κατά την συνεχή λειτουργία, το βαρίστορ πρέπει να λειτουργεί σε αυτή την περιοχή. Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να προκληθεί υπερθέρμανση του στοιχείου που θα έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση των χαρακτηριστικών του και τελικά την καταστροφή του.
- Η δεύτερη περιοχή ή Περιοχή Κανονικής Λειτουργίας του βαρίστορ, όπου η αντίσταση του βαρίστορ μεταβάλλεται μη γραμμικά με την μεταβολή της τάσης του. Σε αυτή την περιοχή ισχύει η σχέση:

$$I_{MOV} = K \cdot V_{MOV}^{\alpha}$$

όπου K ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο του βαρίστορ, και α μια σταθερά η οποία εκφράζει την μη γραμμικότητα της χαρακτηριστικής του.

- Η τρίτη περιοχή όπου η αντίσταση έχει σε φτάσει πολύ μικρές τιμές (τάξης των Ω) και παραμένει σχεδόν σταθερή για αύξηση της τάσης.

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται ένα μέρος του φύλλου αναφοράς μιας σειράς MOV:

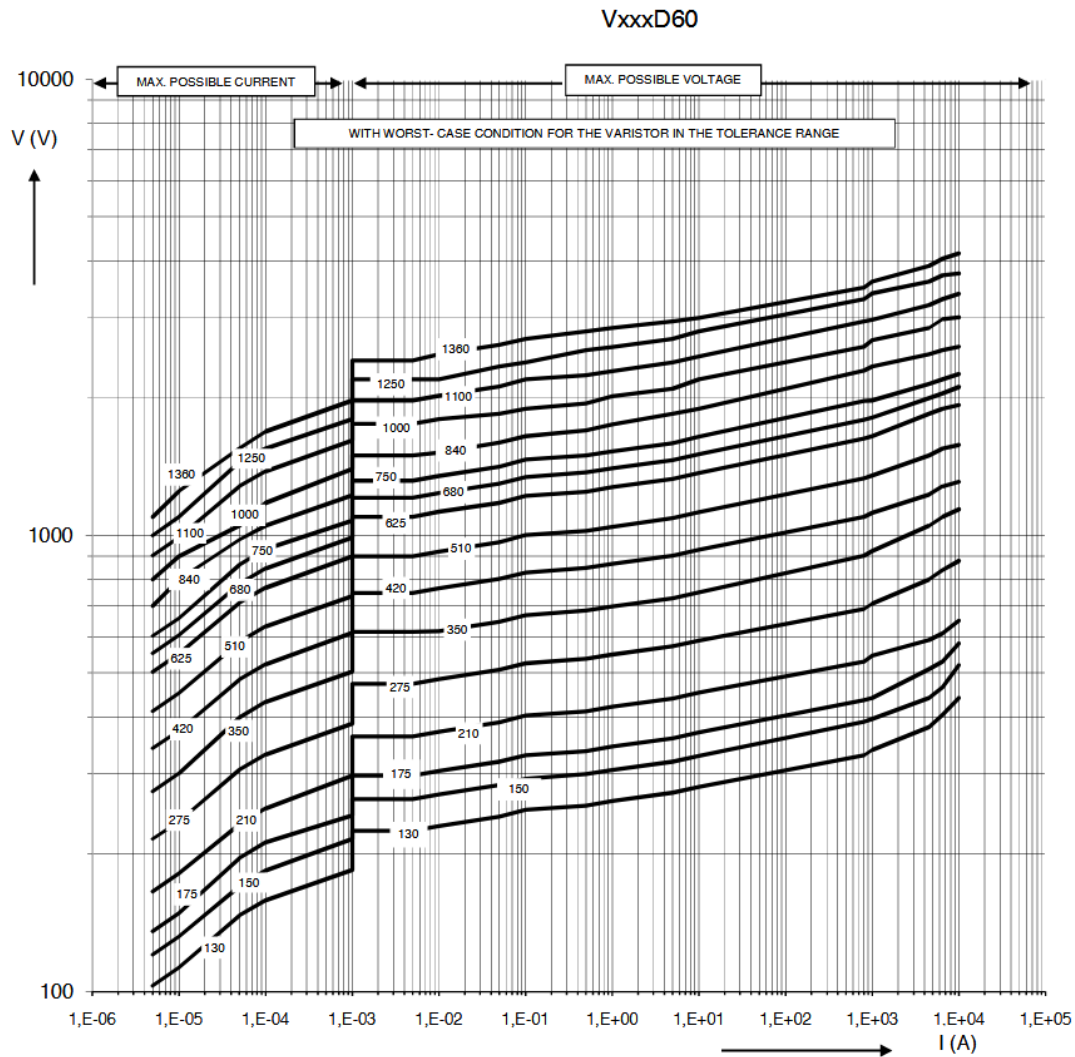
Model number	Maximum Ratings TA=+85 °C (+185 F)		Characteristics TA = +25 °C (+77 F)			
	Operating Voltage		Varistor Voltage (1mA) Tol.: +/-10 %	Energy Absorption of long transients (50 Hz)	Maximum Clamping Voltage at Test Current I _{peak} =1 kA (10/350 μs)	Maximum Clamping Voltage at Test Current I _{peak} =10 kA (10/350 μs)
	V _{RMS} (V)	V _{DC} (V)	V _n (V)	W _{LT} (J)	V _c (V)	V _c (V)
V625D60	625	825	1000	20000	1560	1930
V625D80	625	825	1000	27000	1550	1900
V625D100	625	825	1000	45000	1540	1880
V680D60	680	895	1100	23000	1730	2120
V680D80	680	895	1100	30000	1720	2080
V680D100	680	895	1100	50000	1710	2200

Σχήμα 3.11: Παράδειγμα φύλλου αναφοράς MOV [24]

Παρατηρούνται τα εξής μεγέθη:

- Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας, τόσο για εναλλασσόμενη όσο και για συνεχή τάση. Στους διακόπτες ισχύος συνεχούς ρεύματος, κατά την συνεχή λειτουργία όπου αυτοί είναι κλειστοί, το MOV βρίσκεται υπό πολύ χαμηλή τάση. Συγκεκριμένα στις διατάξεις διακοπών στερεάς κατάστασης η τάση που του επιβάλλεται είναι η πτώση τάσης των ημιαγωγών, ενώ στις διατάξεις με κυκλώματα συντονισμού η τάση που του επιβάλλεται είναι η πτώση τάσης στον μηχανικό διακόπτη. Για αυτό τον λόγο κατά την επιλογή του MOV το μέγεθος αυτό δεν λαμβάνεται υπ'όψη.
- Η τάση V_n η οποία παρατηρείται στα άκρα του βαρίστορ όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα μεγέθους 1 mA. Αυτό το σημείο στην χαρακτηριστική του βαρίστορ σηματοδοτεί το όριο της περιοχής διαρροής (Leakage Region). Αυτό σημαίνει ότι για τάσεις μεγαλύτερη από αυτή, παρατηρείται απότομη πτώση της αντίστασης και κατ' επέκταση αγωγή πολύ μεγαλύτερων ρευμάτων.
- Η ενέργεια W_{LT} , που είναι ικανό να απορροφήσει το βαρίστορ κατά την καταστολή ενός μεταβατικού φαινομένου. Υπέρβαση αυτού του ορίου προκαλεί αλλοίωση της χαρακτηριστικής του (αύξηση του ρεύματος διαρροής), και σε χειρότερες περιπτώσεις την καταστροφή του.
- Η τάση V_c που είναι η μέγιστη τάση που παρατηρείται στα άκρα του βαρίστορ κατά την αγωγή συγκεκριμένων κυματομορφών ρεύματος.

Παράλληλα στο φύλλο αναφοράς των βαρίστορ παρατίθενται και οι χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος σε λογαριθμική κλίμακα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12 .



Σχήμα 3.12: Παράδειγμα χαρακτηριστικών τάσης-ρεύματος MOV [24]

Όταν κρίνεται απαραίτητο, υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης των βαρίστορ σε σειρά, παράλληλα καθώς και σε συνδυασμό αυτών. Με την σύνδεση των βαρίστορ σε σειρά, αυξάνεται η τάση συνεχούς λειτουργίας και η τάση προστασίας. Αντίστοιχα με την σύνδεση τους παράλληλα, για δεδομένη τάση η συστοιχία άγει μεγαλύτερα ρεύματα και αυξάνεται κα μέγιστη ενέργεια που μπορούν να απορροφήσουν [25].

3.3 Μηχανικός Διακόπτης

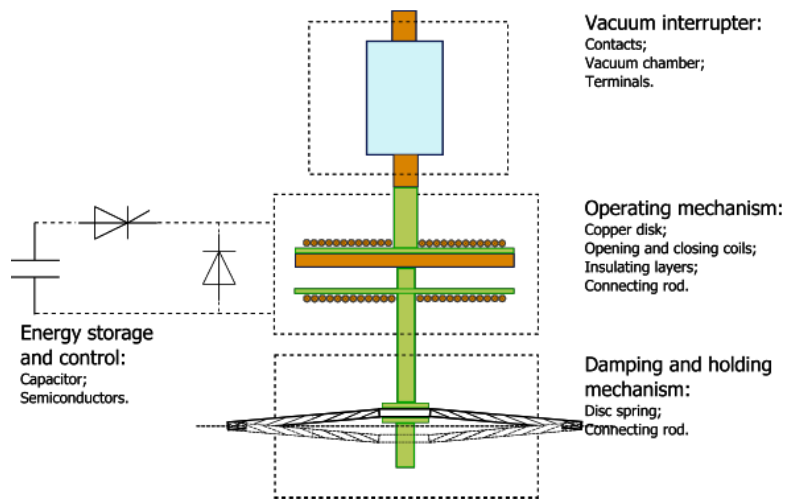
Οι μηχανικοί διακόπτες χρησιμοποιούνται εδώ και χρόνια για την προστασία συστημάτων ΕΡ. Για την διακοπή ενός ρεύματος σφάλματος, δίνεται εντολή στις επαφές, που βρίσκονται μέσα σε έναν θάλαμο με μονωτικό υλικό, να ανοίξουν. Ανάλογα με το μονωτικό υλικό που περιέχει ο θάλαμος χωρίζονται σε διαφορετικούς τύπους. Κατά το άνοιγμα των επαφών το ρεύμα συνεχίζει να ρέει, δημιουργώντας ηλεκτρικό τόξο, το οποίο ο μηχανικός διακόπτης πρέπει να σβήσει. Ένας τρόπος για να σβήσει το ηλεκτρικό τόξο είναι το ρεύμα που διαρρέει τον διακόπτη να μηδενιστεί στιγμιαία. Σε αυτό το χαρακτηριστικό βασίζεται και η λειτουργία των μηχανικών διακοπών ισχύος ΣΡ. Στις αρχικές απόπειρες για την δημιουργία ενός διακόπτη ισχύος συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν μηχανικοί διακόπτες εξαφθοριούχου θείου [26], καθώς εκείνη την εποχή υπερέτερουσαν των υπολοίπων. Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες για την χρήση του εξαφθοριούχου θείου, οδήγησαν στην περαιτέρω ανάπτυξη των μηχανικών διακοπών κενού. Πλέον, στην ανάπτυξη διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος μονοπωλούν το ενδιαφέρον οι τελευταίοι, λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Για την επιτυχή σβέση του τόξου και την αποφυγή επανεμφάνισής του είναι ανάγκη να ληφθούν υπ' όψιν τα παρακάτω μεγέθη:

- **Η κλίση του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό.** Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος κατά τον μηδενισμό επηρεάζει την ικανότητα σβέσης του τόξου. Η υπέρβαση ενός μέγιστου ρυθμού μεταβολής S_{max} οδηγεί σε αποτυχία σβέσης. Σύμφωνα με το [27] ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής μπορεί να παρασταθεί ως συνάρτηση του χρόνου ύπαρξης του ηλεκτρικού τόξου:

$$S(t) = C \cdot (t - t_{open}) + D$$

, όπου C και D είναι σταθερές που εξαρτώνται από το μοντέλο του διακόπτη κενού. Στο [28] γίνεται σύγκριση της ικανότητας σβέσης του τόξου ανάλογα με την κλίση του ρεύματος στο μηδενισμό ανάμεσα σε μηχανικούς διακόπτες κενού και μηχανικούς διακόπτες εξαφθοριούχου θείου. Οι διακόπτες κενού υπερέτερούν καθώς παρουσιάζουν ικανότητα διακοπής για πολλαπλάσιο ρυθμό μεταβολής από τους διακόπτες εξαφθοριούχου θείου. Συγκεκριμένα οι μηχανικοί διακόπτες κενού, για ρεύματα της τάξης των kA, μπορούν να διακόψουν ρεύμα με κλίση από 100 έως 2500 A/μs σε αντίθεση με τους διακόπτες εξαφθοριούχου θείου που περιορίζονται σε μερικές δεκάδες A/μs. Στη εργασία αυτή, με βάση προηγούμενες δουλειές [29], η μέγιστη κλίση του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό θεωρείται σταθερή και ίση με 500 A/μs.

- **Διηλεκτρική αντοχή** Μετά την σβέση του τόξου, στα άκρα του διακόπτη εφαρμόζεται μια τάση που εξαρτάται από την τοπολογία του συστήματος. Στις διατάξεις μηχανικών διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος, η τάση αυτή είναι η τάση του κλάδου συντονισμού την στιγμή της σβέσης του τόξου, η οποία ισούται με την τάση του πυκνωτή συντονισμού εκείνη την στιγμή. Πολύ γρήγορα όμως η τάση που εφαρμόζεται στον διακόπτη αυξάνεται στην τάση προστασίας του βαρίστορ λόγω της φόρτισης του πυκνωτή. Αν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του διακόπτη ξεπεράσει την διηλεκτρική αντοχή του, τότε δημιουργείται ξανά ηλεκτρικό τόξο. Για τον λόγο αυτό, στους μηχανικούς διακόπτες ισχύος ΣΡ, η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού ξεκινά αφού ο διακόπτης έχει αποκτήσει διηλεκτρική αντοχή μεγαλύτερη από την τάση του βαρίστορ. Η διηλεκτρική αντοχή συνδέεται άμεσα με την απόσταση που έχουν αποκτήσει οι επαφές του μηχανικού διακόπτη και κατ' επέκταση την ταχύτητα ανοίγματος τους. Επειδή ο χρόνος απόκρισης των διακοπών ισχύος ΣΡ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα απόκτησης της απαραίτητης διηλεκτρικής αντοχής από τον μηχανικό διακόπτη, στις εφαρμογές αυτές δεν χρησιμοποιείται ο συμβατικός μηχανισμός ανοίγματος των επαφών. Αντίθετα, για το άνοιγμα των επαφών του διακόπτη χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός βασισμένος στο Thompson Coil. Ένας τέτοιος μηχανισμός φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Μηχανισμός ανοίγματος των επαφών του μηχανικού διακόπτη [30].

Ο μηχανισμός αποτελείται από δυο σπειρώματα, ένα για το άνοιγμα και ένα για το κλείσιμο των επαφών του διακόπτη. Όταν δωθεί εντολή για το άνοιγμα των επαφών του διακόπτη ο πυκνωτής εκφορτίζεται στο πάνω σπείρωμα. Αυτό προκαλεί την επαγωγή ρεύματος στον δίσκο που βρίσκεται μεταξύ των δύο σπειρωμάτων και την ανάπτυξη απωθητικών δυνάμεων μεταξύ του σπειρώματος και του δίσκου. Επειδή το σπείρωμα είναι στερεωμένο στον μηχανισμό, ο δίσκος ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια επαφή του μηχανικού διακόπτη εκτοξεύεται προς τα κάτω. Με τον τρόπο αυτό η καθυστέρηση που εισάγει ο μηχανικός διακόπτης στην λειτουργία των μηχανικών διακοπτών ισχύος ΣΡ μειώνεται σε μερικά ms. Στην εργασία αυτή ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο μηχανικός διακόπτης κενού να αποκτήσει την απαραίτητη διηλεκτρική αντοχή θεωρείται 3 ms, βασισμένο στο [31].

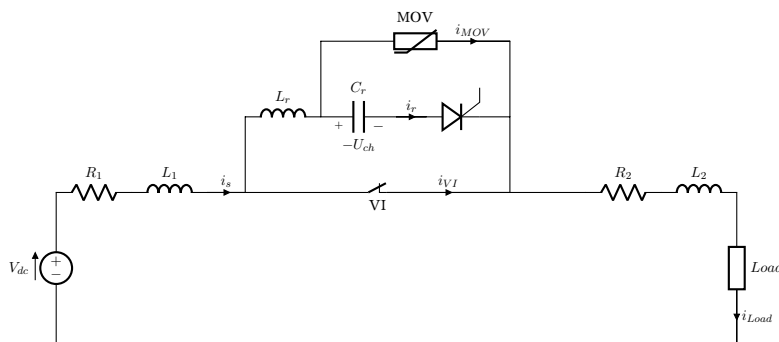
4 Θεωρητική ανάλυση μηχανικών διακοπών ισχύος με κυκλώματα συντονισμού

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας των δύο διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος που αποτελούνται από μηχανικούς διακόπτες σε συνδυασμο με ένα κύκλωμα συντονισμού. Αρχικά γίνεται παρουσίαση της αρχής λειτουργίας κάθε διάταξης, χωρισμένη σε χρονικά στάδια ανάλογα με τα στοιχεία που βρίσκονται σε αγωγή κάθε χρονική στιγμή. Για λόγους απλότητας, η παρουσίαση της αρχής λειτουργίας γίνεται θεωρώντας μια ιδανική πηγή τάσης ΣΡ, παραβλέποντας τις επιπτώσεις που έχει ένα σφάλμα στην λειτουργία ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ ή ΕΡ/ΣΡ. Ύστερα, παρατίθενται τυπικές κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων κάθε διάταξης. Οι κυματομορφές δημιουργήθηκαν μετά από προσομοιώσεις στο προγραμματιστικό περιβάλλον *Simulink*. Τέλος, γίνεται σχολιασμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την λειτουργία κάθε διάταξης όπως επίσης και ο τρόπος επιλογής της τιμής κάθε παραμέτρου για βελτίωση των χρόνων απόκρισης.

4.1 Μηχανικός διακόπτης ισχύος έγχυσης ενεργού ρεύματος

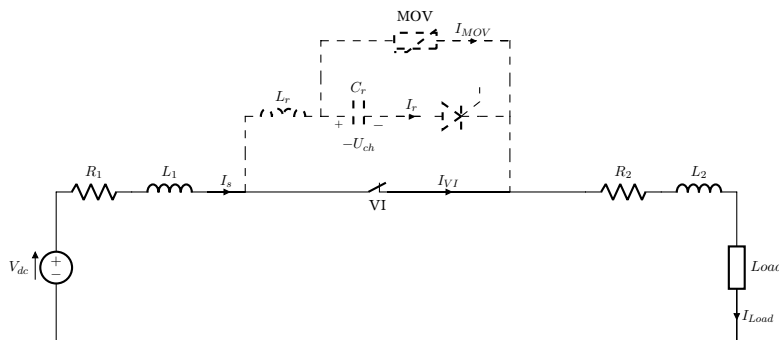
4.1.1 Αρχή Λειτουργίας

Στην σχήμα 4.1 φαίνεται ένα απλό σύστημα ΣΡ στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο διακόπτης ισχύος που μελετάται.



Σχήμα 4.1: Σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο διακόπτης προς διερεύνηση.

Το σύστημα αποτελείται από μια πηγή τάσης ΣΡ, η οποία θεωρείται ιδανική. Τα στοιχεία R_1 , L_1 , R_2 , L_2 είναι οι αντιστάσεις και οι επαγωγές της γραμμής μεταφοράς πριν και μετά το σφάλμα αντίστοιχα. Η πηγή τροφοδοτεί ωμικό φορτίο αντίστασης R_{Load} . Στην συνέχεια αναλύεται βήμα βήμα η λειτουργία του διακόπτη ισχύος μετά από ένα σφάλμα.



Σχήμα 4.2: Μόνη κατάσταση λειτουργίας. $0 < t < t_1$

Η πρώτη φάση λειτουργίας του σχήματος 4.2 είναι η λειτουργία μόνιμης κατάστασης. Το ρεύμα I_s διαρρέει τον μηχανικό διακόπτη VI, και ο διακόπτης ισχύος βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Το ρεύμα φορτίου I_{Load} είναι ίσο με το ρεύμα της πηγής I_s . Η εξίσωση που περιγράφει το σύστημα είναι:

$$V_{dc} = (R_1 + R_2 + R_{Load}) \cdot I_s + (L_1 + L_2) \cdot \frac{dI_s}{dt}, \quad (4.1)$$

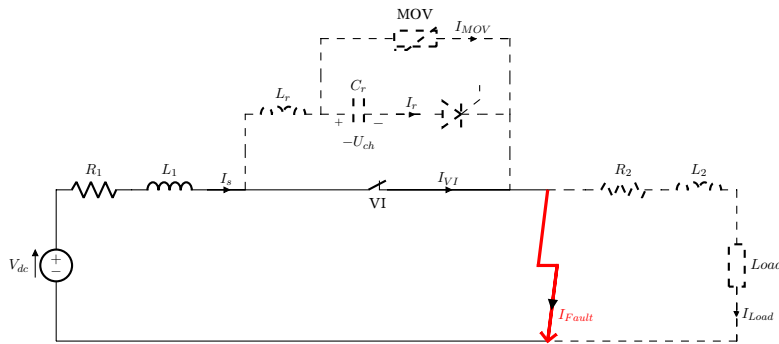
και επειδή το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται στην μόνιμη κατάσταση ισχύει:

$$V_{dc} = (R_1 + R_2 + R_{Load}) \cdot I_s \quad (4.2)$$

Το ρεύμα της πηγής ισούται με το ονομαστικό:

$$I_s = I_0 = \frac{V_{dc}}{R_1 + R_2 + R_{Load}} \quad (4.3)$$

Η αντίσταση του μηχανικού διακόπτη VI θεωρείται αμελητέα και ο πυκνωτής C_r του κυκλώματος συντονισμού είναι φορτισμένος σε τάση $-U_{ch}$.



Σχήμα 4.3: Δεύτερη φάση λειτουργίας. $t_1 < t < t_2$

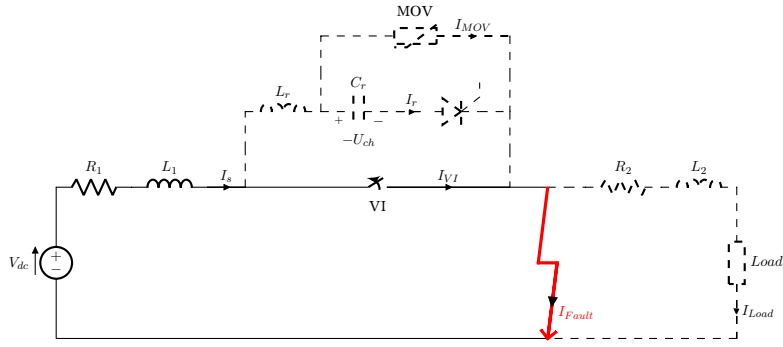
Την χρονική στιγμή $t = t_1$ εκδηλώνεται σφάλμα στο σύστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Επειδή η πηγή τάσης ΣΡ θεωρείται ιδανική, για το σύστημα ισχύει:

$$V_{dc} = L_1 \cdot \frac{dI_s(t)}{dt} + R_1 \cdot I_s(t), \quad (4.4)$$

με αρχική συνθήκη $I_L(t_1) = I_0$. Με την χρήση μετασχηματισμών Laplace, το ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει:

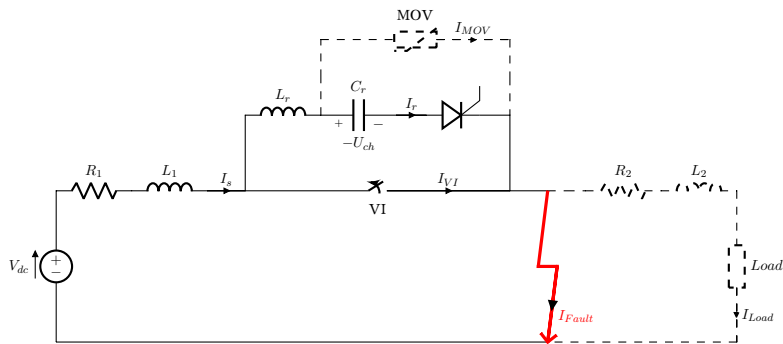
$$I_s(t) = I_f \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.5)$$

όπου $I_f = V_{dc}/R_1$ η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος, I_0 το ονομαστικό ρεύμα του συστήματος και $\tau = L_1/R_1$ η χρονική σταθερά των ωμικοεπαγωγικών στοιχείων της γραμμής προ του σφάλματος. Το ρεύμα σφάλματος αυξάνεται μέχρι μια τιμή που καθορίζεται από το σύστημα προστασίας, όπου αρχίζει η διαδικασία ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος. Η τιμή αυτή συνήθως επιλέγεται $I_{threshold} = 2 \cdot I_0$.



Σχήμα 4.4: Τρίτη φάση λειτουργίας. $t_2 < t < t_3$

Όταν το ρεύμα σφάλματος την στιγμή $t = t_2$ ξεπεράσει την καθορισμένη τιμή $I_{threshold}$ αρχίζει να ενεργεί ο διακόπτης ισχύος. Δίνεται εντολή για να ανοίξουν οι επαφές του μηχανικού διακόπτη κενού όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Το ρεύμα συνεχίζει να ρέει μέσω του διακόπτη, και ανάμεσα στις επαφές του δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο. Για την σβέση του τόξου και την επιτυχή εκκαθάριση του σφάλματος θα πρέπει να τηρούνται δύο προϋποθέσεις: αρχικά το ρεύμα που ρέει μέσω του διακόπτη να γίνει μηδενικό, και σε δεύτερη φάση οι επαφές του διακόπτη να έχουν αποκτήσει την απαραίτητη απόσταση μεταξύ τους ώστε ο διακόπτης να έχει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή προκειμένου να μην εκδηλωθεί ξανά τόξο. Για τον λόγο αυτό η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού δεν γίνεται άμεσα αλλά μετά από μερικά ms, την χρονική στιγμή t_3 , όπου ο διακόπτης κενού έχει αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή για να αντέξει την τάση που επιβάλλει το MOV κατά την απορρόφηση της ενέργειας του συστήματος.



Σχήμα 4.5: Τέταρτη φάση λειτουργίας. $t_3 < t < t_4$

Όταν περάσει ο χρόνος που χρειάζεται ο μηχανικός διακόπτης για να ανοίξουν επαρκώς οι επαφές του, την χρονική στιγμή t_3 δίνεται παλμός έναυσης στο θυρίστορ όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Σύμφωνα με τις εξισώσεις που περιγράφουν την απόκριση του κυκλώματος συντονισμού σειράς ισχύει:

$$I_r(t) = \frac{U_{ch}}{Z_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_3) \quad (4.6)$$

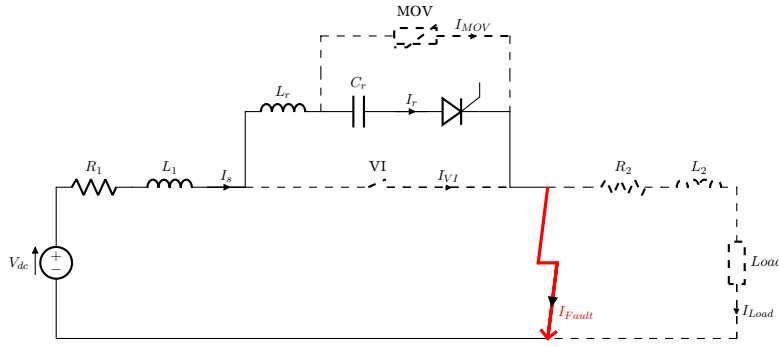
και

$$V_{C_r}(t) = -U_{ch} \cdot \cos \omega_0(t - t_3) \quad (4.7)$$

Το ρεύμα που εγχέεται από τον κλάδο συντονισμού αντίτιθεται στο ρεύμα σφάλματος. Ισχύει ότι:

$$I_{VI}(t) = I_s(t) - I_r(t) \quad (4.8)$$

Οι τιμές των παραμέτρων του κλάδου συντονισμού επιλέγονται κατάλληλα ώστε το ρεύμα που εγχέεται να είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα σφάλματος. Έτσι το ρεύμα που διαρρέει τον μηχανικό διακόπτη μηδενίζεται στιγμιαία, και το ηλεκτρικό τόξο σβήνει.



Σχήμα 4.6: Πέμπτη φάση λειτουργίας. $t_4 < t < t_5$

Με την επιτυχή σβέση του τόξου, το ρεύμα πλέον ρέει μέσω του κλάδου συντονισμού, φορτίζοντας τον πυκνωτή συντονισμού C_r . Για το σχήμα 4.6, όπου φαίνεται αυτή η φάση λειτουργίας, ισχύει:

$$V_{dc} = I_s \cdot R_1 + V_{L_1} + V_{L_r} + V_{C_r} \quad (4.9)$$

Με βάση τις σχέσεις

$$v_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

$$i_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt}$$

, καθώς και το γεγονός ότι ισχύει $I_s = I_{R_1} = I_{L_1} = I_{L_r} = I_{C_r}$, η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το σύστημα είναι:

$$L_{tot} \cdot C_r \cdot \frac{d^2 V_{C_r}(t)}{dt^2} + R_1 \cdot C_r \cdot \frac{dV_{C_r}(t)}{dt} + V_{C_r}(t) = V_{dc}, \quad (4.10)$$

όπου $L_{tot} = L_1 + L_r$. Οι αρχικές συνθήκες της διαφορικής εξίσωσης είναι $V_{C_r}(t_4)$ και $I_{L_{tot}}(t_4) = I_s(t_4) = I_{L_1}(t_4) = I_{L_r}(t_4) = I_r(t_4)$ και μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις 4.6 και 4.7. Η λύση της εξίσωσης εξαρτάται από το πρόσημο του παράγοντα:

$$\left(\frac{R_1}{2 \cdot L_{tot}}\right)^2 - \frac{1}{L_{tot} \cdot C_r}$$

ο οποίος καθορίζει τον συντελεστή απόσβεσης του συστήματος:

$$\xi = \frac{R_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_r}{L_{tot}}}$$

Στο σχήμα 4.7 φαίνεται η μορφή της λύσης της διαφορικής εξίσωσης (4.10) ανάλογα με την τιμή του συντελεστή απόσβεσης ξ .

Για $\xi < 1$ προκύπτει η εξής λύση:

$$V_{C_r} = e^{-\alpha(t-t_4)} \cdot [A_1 \cdot \cos \gamma(t-t_4) + A_2 \cdot \sin \gamma(t-t_4)] + V_{dc} \quad (4.11)$$

$$I_s = e^{-\alpha(t-t_4)} \cdot [A_3 \cdot \cos \gamma(t-t_4) + A_4 \cdot \sin \gamma(t-t_4)] \quad (4.12)$$

όπου:

-
-
-

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{tot} \cdot C_r}}$$

$$\alpha = \frac{R_1}{2 \cdot L_{tot}}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{L_{tot} \cdot C_r} - \left(\frac{R_1}{2 \cdot L_{tot}}\right)^2} = \sqrt{(\omega_1)^2 - (\alpha)^2}$$

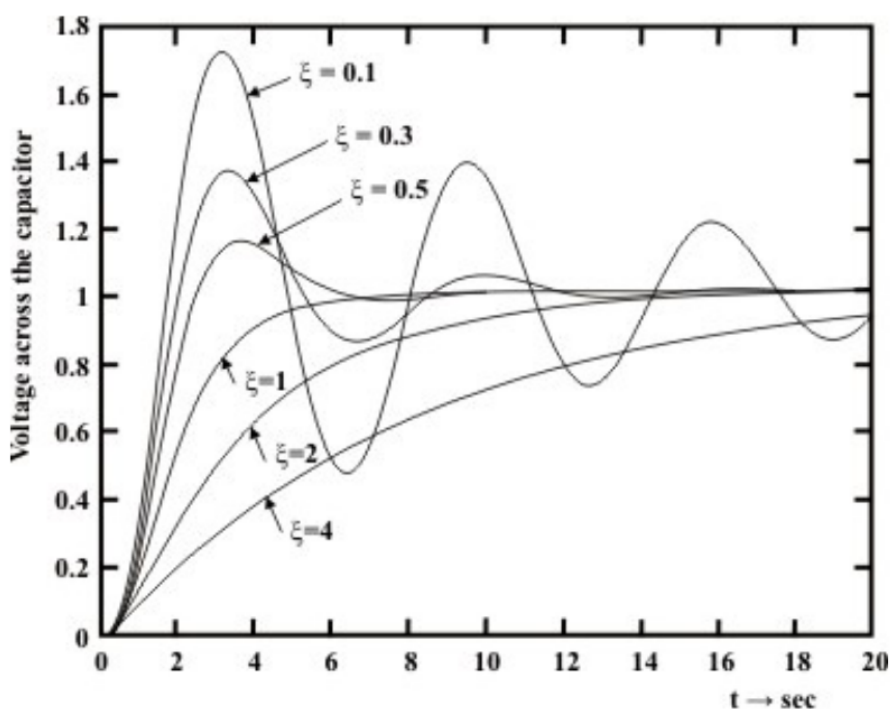
-
-
-
-

$$A_1 = V_{C_r}(t_4) - V_{dc}$$

$$A_2 = \frac{1}{\gamma} \cdot \left[\frac{I_s(t_4)}{C_r} + \alpha \cdot A_1 \right]$$

$$A_3 = I_s(t_4)$$

$$A_4 = -\frac{1}{\gamma} \cdot \left[\frac{A_1}{L_{tot}} + \alpha \cdot I_s(t_4) \right]$$



Σχήμα 4.7: Μορφή λύσεων δευτεροβάθμιας διαφορικής εξίσωσης ως συνάρτηση του συντελεστή απόσβεσης ξ [32]

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.11) και (4.12), οι κυματομορφές της τάσης του πυκνωτή και του ρεύματος του πηνίου είναι αποσβένουσες ταλαντώσεις. Πρακτικά, όταν τάση του πυκνωτή ξεπεράσει την τάση του συστήματος το βαρίστορ αρχίζει να άγει και το ρεύμα μεταφέρεται στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας. Ο χρόνος που χρειάζεται για να φορτιστεί ο πυκνωτής στην τάση προστασίας του βαρίστορ, και να γίνει πλήρης μεταγωγή του ρεύματος εξαρτάται από το συντελεστή απόσβεσης

$$\xi = \frac{R_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_r}{L_{tot}}}$$

ο οποίος είναι αντιστρόφως ανάλογος με την αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

Μικρότερες τιμές του συντελεστή απόσβεσης οδηγούν σε μικρότερο απαιτούμενο χρόνο ώστε να φορτιστεί ο πυκνωτής στην τάση του βαρίστορ. Εμπειρικά, αυτό φαίνεται και από τον τύπο του συντελεστή απόσβεσης όπου η τιμή του είναι ανάλογη με την χωρητικότητα C_r του πυκνωτή

του κυκλώματος συντονισμού και ισχύει ότι μεγαλύτερη τιμή χωρητικότητας συνεπάγεται και πιο αργή φόρτιση.

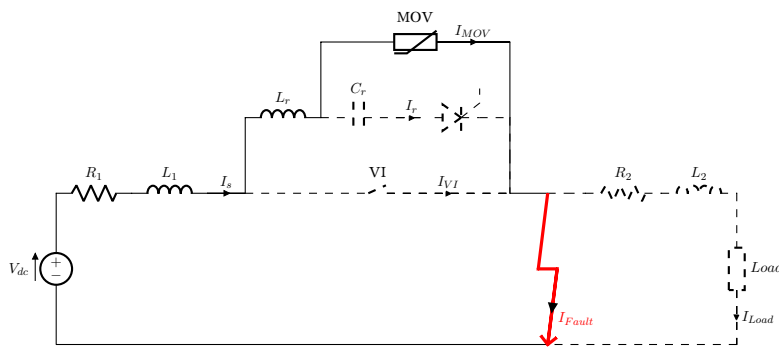
Η τάση του πυκνωτή την στιγμή της σβέσης του τόξου είναι :

$$V_{C_r}(t_4) = -U_{ch} \cdot \cos(\arcsin(\frac{I_s(t_4)}{\frac{U_{ch}}{Z_0}})) \quad (4.13)$$

Η εξίσωση που περιγράφει την διαδικασία της φόρτισης του στην τάση προστασίας του βαρίστορ (V_{MOV}) είναι:

$$\frac{1}{C_r} \cdot \int_{t_4}^{t_5} i_{C_r}(t) dt = V_{MOV} - V_{C_r}(t_4) \quad (4.14)$$

Αν ο συντελεστής απόσβεσης ξ είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας τότε η τάση του πυκνωτή δεν ξεπερνάει την τάση του συστήματος. Αντίθετα γίνεται ίση με την τάση του συστήματος ακολουθώντας μια αντίστροφα εκθετική κυματομορφή. Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα δεν μεταγεται στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας και όλη η ενέργεια του συστήματος αποθηκεύεται στον πυκνωτή συντονισμού. Πράκτικα όμως αυτό δεν συμβαίνει λόγω των τιμών που έχουν τα στοιχεία σε ένα ρεαλιστικό σύστημα.



Σχήμα 4.8: Έκτη φάση λειτουργίας. $t_5 < t < t_6$

Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει την τάση προστασίας του βαρίστορ, αυτό πλέον άγει το συνολικό ρεύμα. Η εξίσωση που περιγράφει το σύστημα σε αυτή την φάση λειτουργίας είναι:

$$\frac{dI_s}{dt} = \frac{V_{dc} - V_{MOV}}{L_1 + L_r} \quad (4.15)$$

Εφόσον η τάση προστασίας του βαρίστορ είναι μεγαλύτερη (συνήθως $V_{MOV} = 1.5 \cdot V_{dc}$) από την τάση του συστήματος, το ρεύμα της πηγής οδηγείται στο μηδέν και το σφάλμα εκκαθαρίζεται. Θεωρώντας γραμμική την μείωση του ρεύματος του σφάλματος, η κυματομορφή του ρεύματος του MOV προκύπτει τριγωνική. Υποθέτοντας επίσης σταθερή την τάση του MOV κατά την διάρκεια της αγωγής του, η ενέργεια που απορροφάει είναι ίση με:

$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot V_{MOV} \cdot I_s(t_5) \cdot t_p$$

όπου t_p η διάρκεια αγωγής του MOV.

Με τις παραπάνω παραδοχές η χρονική διάρκεια t_p ισούται με:

$$t_p = \frac{(L_1 + L_r) \cdot I_s(t_5)}{V_{MOV} - V_{dc}}$$

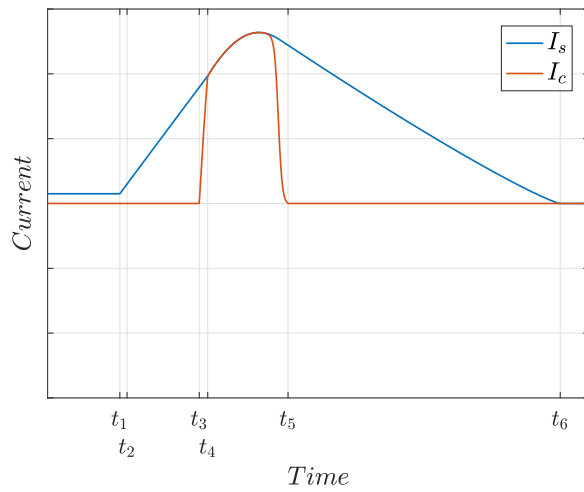
Συνολικά:

$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot (L_1 + L_r) \cdot (I_s(t_5))^2 \cdot \left(\frac{V_{MOV}}{V_{MOV} - V_{dc}}\right) \rightarrow$$

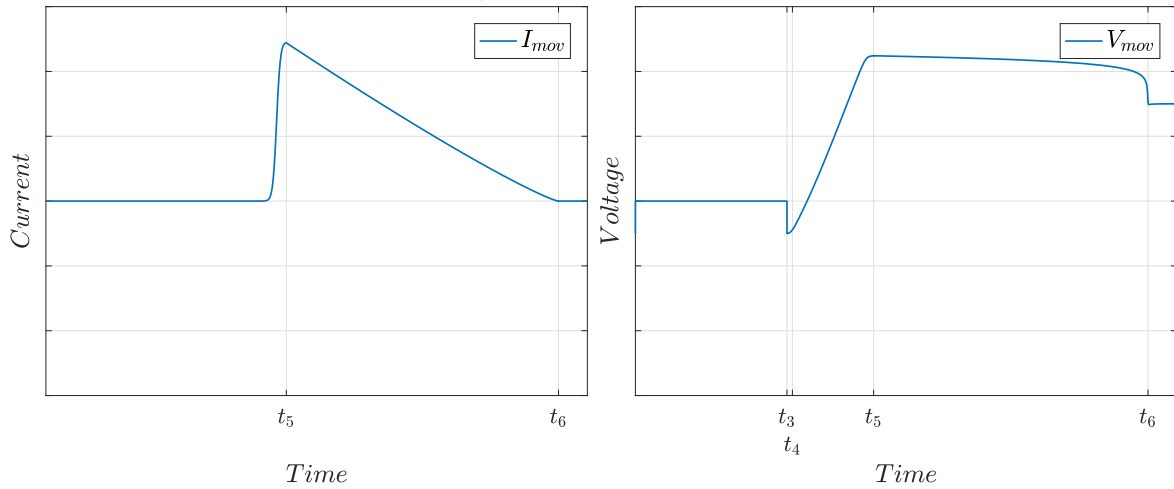
$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot (L_1 + L_r) \cdot (I_s(t_5))^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{dc}}{V_{MOV} - V_{dc}}\right) \quad (4.16)$$

Από την εξίσωση (4.16) φαίνεται ότι αυξάνοντας την τάση προστασίας του MOV μειώνεται η ενέργεια την οποία πρέπει να απορροφήσει, καθώς το ρεύμα σφάλματος οδηγείται πιο γρήγορα στο μηδέν. Ταυτόχρονα όμως υπάρχει αντίκτυπος στον χρόνο που χρειάζεται ο μηχανικός διακόπτης για να αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή. Μετα την κατανάλωση της ενέργειας στο MOV, η τάση του μειώνεται στην τάση του συστήματος και πλέον διαρρέεται από ένα μικρό ρεύμα διαρροής της τάξης των mA. Το ρεύμα αυτό διακόπτεται από έναν περιφερειακό διακόπτη σε σειρά με την διάταξη, ο οποίος προσφέρει και την απαραίτητη γαλβανική απομόνωση.

Στο σχήμα 4.9 παρατίθενται τυπικές κυματομορφές λειτουργίας της διάταξης. Στον άξονα του χρόνου έχουν σημειωθεί οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές με βάση την ανάλυση που έγινε στην ενότητα αυτή.

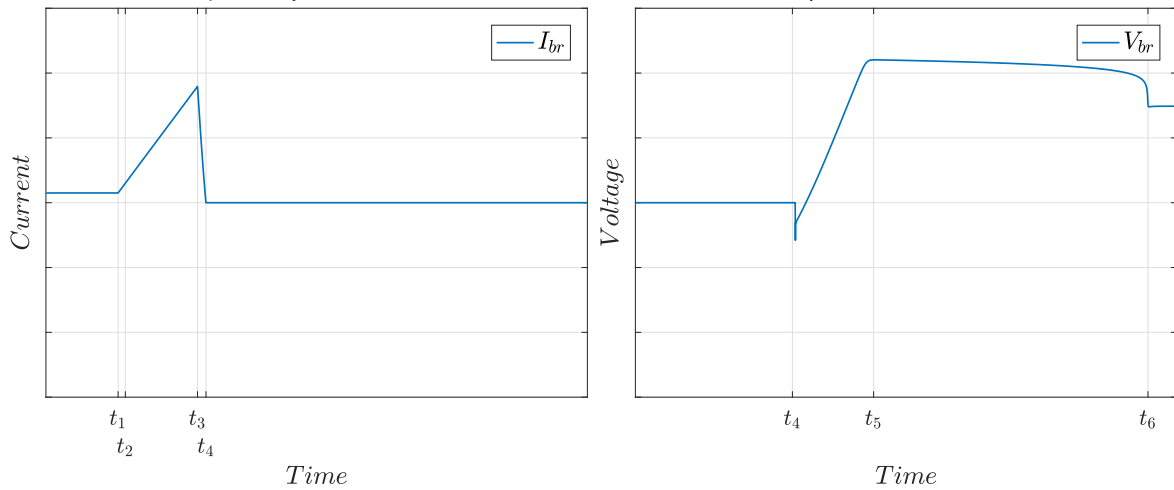


(α) Ρεύμα συστήματος (I_s) και ρεύμα (πυκνωτή I_c) του κυκλώματος συντονισμού.



(β) Ρεύμα MOV

(γ) Τάση MOV



(δ) Ρεύμα μηχανικού διακόπτη

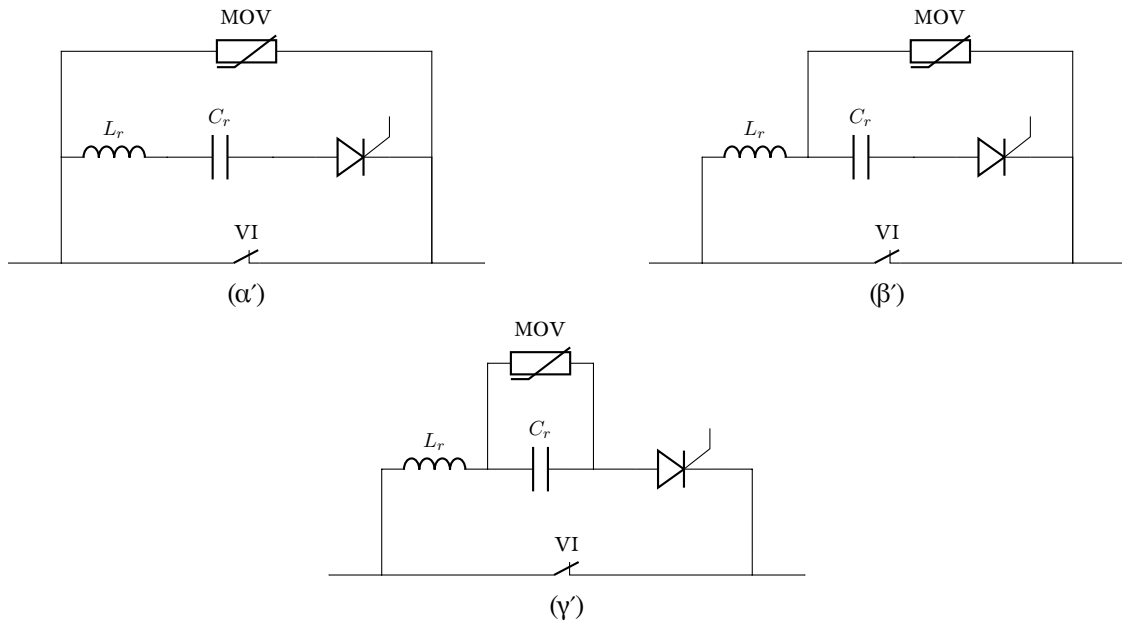
(ε) Τάση μηχανικού διακόπτη

Σχήμα 4.9: Τυπικές κυματομορφές λειτουργίας της διάταξης όπου φαίνονται και οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

4.1.2 Σχολιασμός και επιλογή παραμέτρων

Σύνδεση του MOV

Στην βιβλιογραφία εντοπίζονται τρεις διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης του MOV. Οι εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης φαίνονται στο σχήμα 4.10.

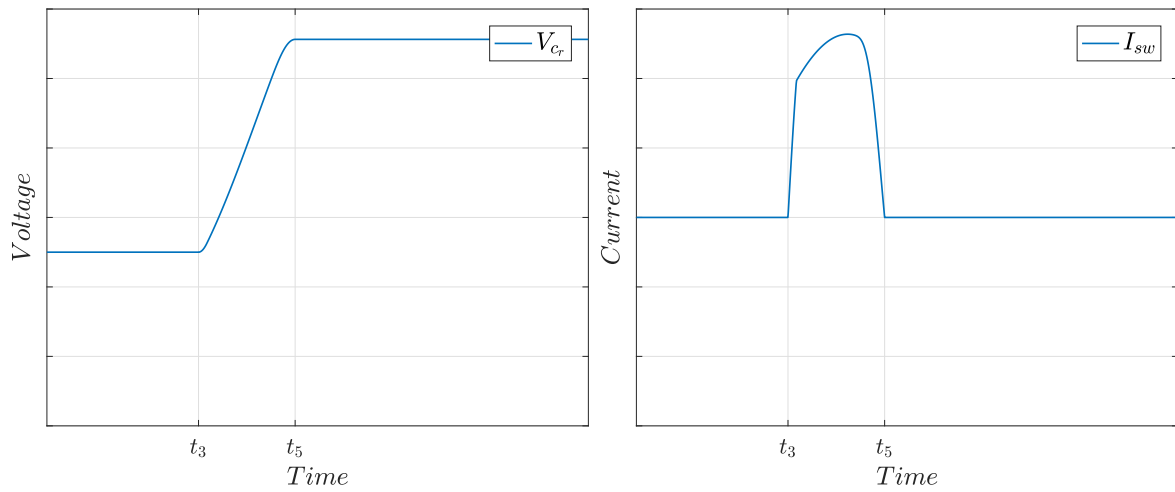


Σχήμα 4.10: Εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης του MOV.

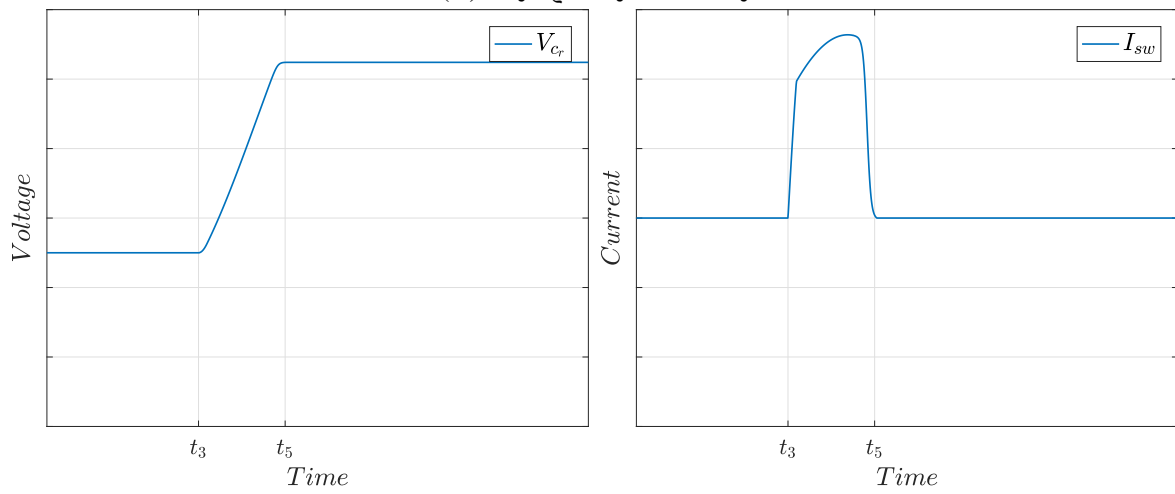
Οι τρεις παραλλαγές έχουν την ίδια απόκριση κατά τα πρώτα στάδια λειτουργίας και διαφοροποιούνται αφού ανοίξει ο μηχανικός διακόπτης και το ρεύμα σφάλματος διαρρέει το κύκλωμα συντονισμού φορτίζοντας τον πυκνωτή C_r .

- Στην πρώτη (α') περίπτωση, επειδή το ρεύμα του πηνίου του κυκλώματος συντονισμού δεν μπορεί να αλλάξει στιγμιαία, ο πυκνωτής φορτίζεται σε υψηλότερη τάση από την τάση προστασίας του MOV. Αυτό προσθέτει μικρή καθυστέρηση στην συνολική απόκριση της διάταξης. Επίσης εισάγει μια δυσκολία στην ασφαλή επιλογή του MOV, καθώς κάνει πιο περίπλοκο τον υπολογισμό της ενέργειας που πρέπει να απορροφήσει.
- Στην τρίτη (γ') περίπτωση δεν παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο. Το συνολικό ρεύμα διαπερνάει το MOV αφού ο πυκνωτής C_r φορτιστεί στην τάση προστασίας του. Όμως, με αυτό τον τρόπο σύνδεσης το θυρίστορ διαρρέεται από το ρεύμα σφάλματος έως αυτό να μηδενιστεί από την τάση που επιβάλλει το MOV (διάστημα $t_5 - t_6$), καταπονώντας το περισσότερο τους ημιαγωγούς. Με αυτόν τον τρόπο σύνδεσης λοιπόν αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της στιγμιαίας μεταγωγής του ρεύματος στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας, αυξάνεται όμως κατά πολύ το ρεύμα που διαπερνάει τους ημιαγωγούς. Παράλληλα, μετά την απορρόφηση της ενέργειας από το MOV, μπορεί να παρατηρηθεί ροή ρεύματος από τον πυκνωτή συντονισμού στο MOV.
- Στην δεύτερη (β') περίπτωση η μεταγωγή του ρεύματος στο MOV γίνεται στιγμιαία και δεν υπάρχουν τα μειονεκτήματα της προηγούμενης περίπτωσης. Για τον λόγο αυτό στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης.

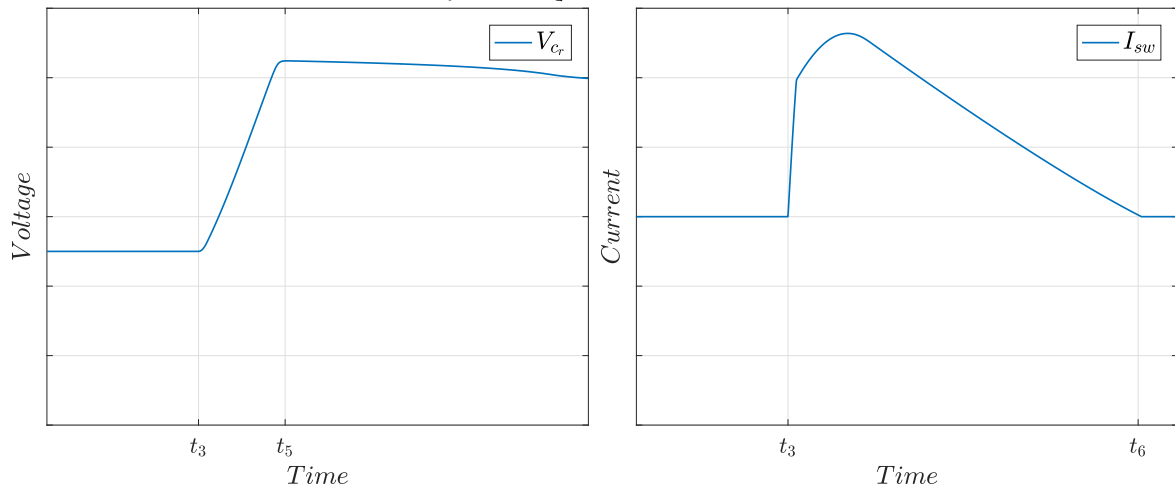
Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η τάση του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού και το ρεύμα των ημιαγωγικών διακοπών για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης του MOV.



(α') 1ος τρόπος σύνδεσης



(β') 2ος τρόπος σύνδεσης



(γ') 3ος τρόπος σύνδεσης

Σχήμα 4.11: Τάση πυκνωτή κυκλώματος συντονισμού (V_{cr}) και ρεύμα ημιαγωγικού διακόπτη για διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης του MOV.

Τάση φόρτισης του πυκνωτή και τιμές στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού

Οι παράμετροι αυτοί είναι οι σημαντικότεροι αφού καθορίζουν την ικανότητα της διάταξης να δημιουργεί ένα τεχνητό σημείο μηδενισμού του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη προκειμένου αυτός να ενεργήσει και να σβήσει το ηλεκτρικό τόξο. Οι τιμές τους εξαρτώνται από το σύστημα στο οποίο συνδέεται ο διακόπτης ισχύος. Η κατάλληλη επιλογή τους προϋποθέτει γνώση του συστήματος και του μέγιστου ρεύματος σφάλματος I_{max} που θα κληθεί να διακόψει η διάταξη. Αρχικά οι τιμές πρέπει να επιλέγονται με τρόπο ώστε το ρεύμα που εγχέεται:

$$I_r = \frac{U_{ch}}{Z_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t),$$

όπου:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C_r}}$$

να ισούται με την μέγιστη ικανότητα διακοπής του διακόπτη ισχύος I_{max} .

Η τάση φόρτισης του πυκνωτή U_{ch} επιλέγεται συνήθως ίση με την τάση του συστήματος [29]. Με δεδομένη την τάση φόρτισης του πυκνωτή επιλέγεται η τιμή της αντίστασης συντονισμού Z_0 ώστε να ισχύει

$$\frac{U_{ch}}{Z_0} > I_{max}$$

Είναι θεμιτό η συχνότητα συντονισμού ω_0 να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη για τους παρακάτω λόγους:

- Μειώνεται ο χρόνος απόκρισης της διάταξης καθώς μειώνεται το χρονικό διάστημα $t_3 - t_4$, δηλαδή ο χρόνος από την έναυση του θυρίστορ έως τον μηδενισμό του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη.
- Αύξηση της συχνότητας συντονισμού συνεπάγεται μείωση των τιμών χωρητικότητας C_r και επαγωγής L_r . Κατ'επέκταση μειώνεται το χρονικό διάστημα $t_4 - t_5$ αφού ο πυκνωτής C_r φορτίζεται πιο γρήγορα στην τάση προστασίας του MOV.
- Μειώνεται το χρονικό διάστημα $t_5 - t_6$ καθώς με την μείωση της επαγωγής L_r το ρεύμα σφάλματος οδηγείται πιο γρήγορα στο μηδέν.
- Οι μικρότερες τιμές των στοιχείων έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και του όγκου της διάταξης.

Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή της συχνότητας συντονισμού είναι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του ρεύματος (di/dt) του μηχανικού διακόπτη όταν αυτό μηδενίζεται. Η υπέρβαση του μέγιστου ρυθμού αυτού μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία σβέσης του τόξου από τον μηχανικό διακόπτη. Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη την στιγμή του zero-crossing εξαρτάται από την χρονική στιγμή όπου μηδενίζεται το ρεύμα, η οποία εξαρτάται από το πλάτος του ρεύματος σφάλματος.

Για ρεύμα πλάτους I_f που διακόπτεται την χρονική στιγμή t_{br} . Ισχύει:

$$I_{VI} = 0 \Rightarrow \frac{U_{ch}}{Z_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_{br}) = I_f \quad (4.17)$$

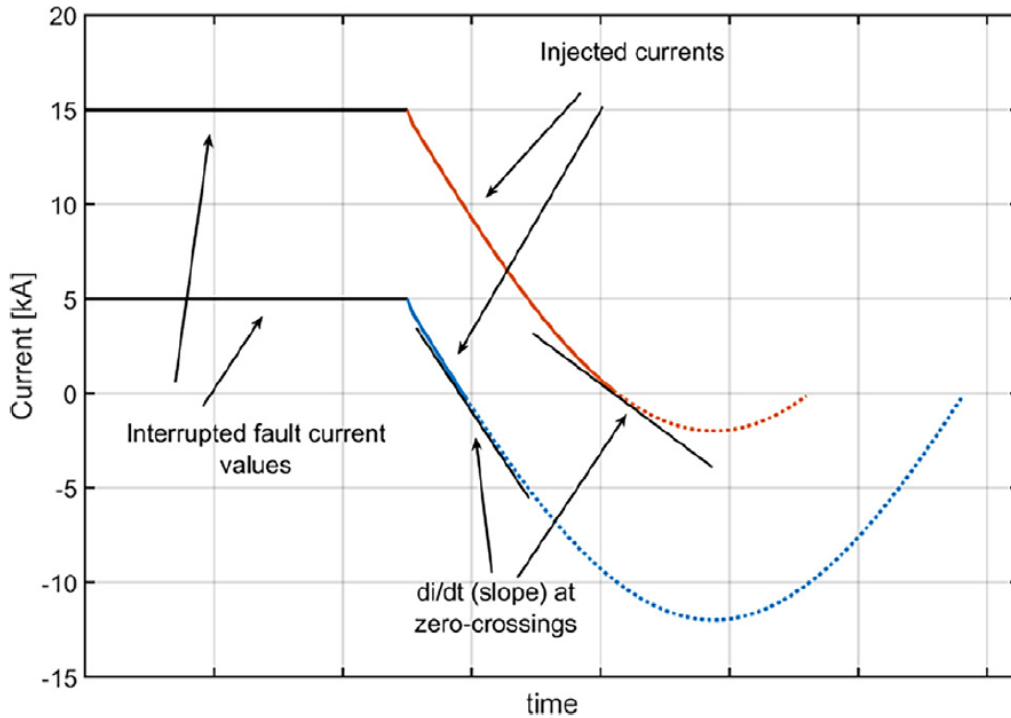
Για την χρονική στιγμή του μηδενισμού του ρεύματος ισχύει:

$$\omega_0 \cdot t_{br} = \arcsin\left(\frac{I_f}{\left(\frac{U_{ch}}{Z_0}\right)}\right) \quad (4.18)$$

Η παραπάνω ποσότητα η οποία βρίσκεται στο διάστημα $[0, \frac{\pi}{2}]$ είναι ανάλογη με το πλάτος του ρεύματος σφάλματος I_f .

Αγνοώντας τον ρυθμό αύξησης του ρεύματος σφάλματος, ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό του μπορεί να βρεθεί από την σχέση:

$$\frac{di}{dt}|_{I_{VI}=0} = \frac{U_{ch}}{Z_0} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_{br}) \quad (4.19)$$



Σχήμα 4.12: Διαφορές στον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη για διαφορετικά ρεύματα σφάλματος [29].

Απο την εξίσωση (4.19) και το σχήμα 4.12 γίνεται εμφανές ότι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη αυξάνεται όσο μειώνεται το πλάτος του ρεύματος που πρέπει να διακοπεί από την διάταξη. Επομένως η μέγιστη, και επιθυμητή, συχνότητα συντονισμού θα προκύψει από το ελάχιστο ρεύμα που πρέπει να διακοπεί η διάταξη. Θεωρώντας ότι το ελάχιστο ρεύμα διακοπής της διάταξης είναι δύο φορές το ονομαστικό και ότι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη ισούται με S_{max} ισχύει:

$$\frac{U_{ch}}{Z_0} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\arcsin(\frac{2I_n}{\frac{U_{ch}}{Z_0}})) \leq S_{max} \quad (4.20)$$

Ο όρος του συνημιτόνου μπορεί να παραλειφθεί, καθώς είναι πολύ κοντά στην μονάδα, αφού το ονομαστικό ρεύμα είναι πολύ μικρότερο του εγχεόμενου. Η επιθυμητή συχνότητα συντονισμού επομένως προκύπτει:

$$\omega_0 = \frac{S_{max}}{\left(\frac{U_{ch}}{Z_0}\right)} \quad (4.21)$$

Γνωρίζοντας την επιθυμητή αντίσταση και συχνότητα συντονισμού μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των τιμών της χωρητικότητας C_r και της επαγωγής L_r .

4.1.3 Απαιτήσεις σε ημιαγωγούς

Ο τύπος των ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται σε αυτή την διάταξη είναι τα θυρίστρο. Ο αριθμός των ημιαγωγών που απαιτούνται καθορίζεται από το ρεύμα που διαρρέονται και την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους κατά την λειτουργία της διάταξης.

Για το προφίλ της τάσης ισχύει:

Κατά την μόνιμη λειτουργία όπου ο διακόπτης είναι κλειστός, η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα των ημιαγωγών, είναι η τάση φόρτισης του πυκνωτή. Αντίστοιχα κατά την αγωγή του MOV μετά την σβέση των θυρίστρο, η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους ισούται με:

$$V_{th} = U_{MOV}(t) - U_{C_r}(t_4)$$

Η τάση $U_{C_r}(t_4)$ είναι η τάση στην οποία φορτίζεται ο πυκνωτής από το ρεύμα σφάλματος που διαρρέει το κύκλωμα συντονισμού μετά το την σβέση του τόξου στον μηχανικό διακόπτη (τάση προστασίας του βαρίστρο). Αντίστοιχα, η τάση V_{MOV} είναι η τάση του βαρίστρο, η οποία κατά την σβέση των θυρίστρο ισούται με $V_{C_r}(t_4)$ και μειώνεται σταδιακά στην τάση του συστήματος όσο το ρεύμα σφάλματος οδηγείται στο μηδέν. Θεωρώντας την αρχική τάση φόρτισης του πυκνωτή ίση με την τάση του συστήματος και την τάση προστασίας του MOV 50% μεγαλύτερη, η μέγιστη τάση η οποία εφαρμόζεται στα άκρα των ημιαγωγών είναι η τάση του συστήματος, και με βάση αυτή γίνεται η επιλογή του αριθμού των ημιαγωγών συνδεδεμένων σε σειρά.

Για το προφίλ του ρεύματος που διαρρέει του ημιαγωγούς ισχύει:

Με την έναυση των θυρίστρο, εγχέεται στον μηχανικό διακόπτη ένα ρεύμα ημιτονικής μορφής, το πλάτος του οποίου καθορίζεται από την ικανότητα διακοπής για την οποία σχεδιάζεται η διάταξη και η περίοδος του οποίου καθορίζεται από την συχνότητα συντονισμού. Με βάση αυτά τα μεγέθη καθορίζεται και ο αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων ημιαγωγών. Τα θυρίστρο έχουν την ικανότητα αγωγής ρεύματος πολύ μεγαλύτερων από το ονομαστικό (surge current) για μη επαναλαμβανόμενες εφαρμογές. Το πλάτος του ρεύματος αυτού δίνεται στα φύλλα αναφοράς για έναν ημιτονικό παλμό διάρκειας 10 ms, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τον χρόνο αγωγής των θυρίστρο στους διακόπτες ισχύος. Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την επιλογή είναι και ο κρίσιμος ρυθμός αύξησης του ρεύματος $(di/dt)_{cr}$ των θυρίστρο κατά την έναυση, ο οποίος δεν πρέπει να ξεπερνάται. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από τον τρόπο τον οποίο περνάει σε αγωγή το θυρίστρο. Όταν δωθεί παλμός έναυσης στην πύλη του θυρίστρο το ρεύμα αρχικά διαρρέει μια μικρή περιοχή γύρω από την πύλη. Η αγωγή αυτή περιοχή ύστερα επεκτείνεται και καλύπτει ολόκληρο το θυρίστρο. Για τον λόγο αυτό κατά την έναυση ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος πρέπει να διατηρείται σε ένα όριο για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση της περιοχής που άγει αρχικά με αποτέλεσμα την καταστροφή του θυρίστρο. Για την έγχυση ενός ρεύματος πλάτους I_0 και συχνότητας ω_0 ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος των θυρίστρο κατά την έναυση ισούται με:

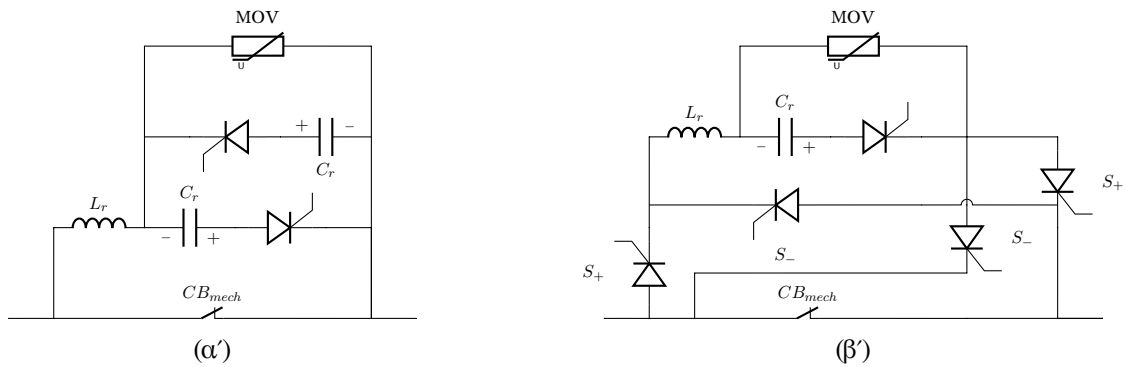
$$\frac{di_{th}}{dt} = \omega_0 \cdot I_0$$

Ο περιορισμός του ρυθμού αύξησης του ρεύματος κατά την έναυση, αν αυτό κρίνεται αναγκαίο, μπορεί να επιτευχθεί με την:

- Αύξηση των παράλληλα συνδεδεμένων ημιαγωγών για τον διαμοιρασμό του ρυθμού αύξησης, με συνέπεια την αύξηση των απαιτήσεων σε ημιαγωγούς
- Μείωση της συχνότητας συντονισμού με συνέπεια την αύξηση του χρόνου απόκρισης, όπως και του όγκου και του κόστους της διάταξης

Για αμφίδρομη λειτουργία του διακόπτη ισχύος, απαιτείται η επέκταση του με έναν από τους τρόπους που φαίνεται στο σχήμα 4.13:

- Προσθήκη ενός ακόμα κλάδου συντονισμού, για την έγχυση ρεύματος αντίθετης φοράς, με συνέπεια τον διπλασιασμό των απαιτήσεων σε ημιαγωγούς.
- Προσθήκη επιπλέον διακοπών για τον έλεγχο της φοράς έγχυσης του ρεύματος του κυκλώματος συντονισμού. Ο έλεγχος της φοράς του εγχεόμενου ρεύματος γίνεται με τον έλεγχο των διακοπών S_+ και S_- όπου ανάλογα την φορά του ρεύματος σφάλματος δίνεται παλμός έναυσης στο κατάλληλο ζεύγος. Ως συνέπεια οι απαιτήσεις σε ημιαγωγούς πολλαπλασιάζονται αλλά τα παθητικά στοιχεία παραμένουν τα ίδια.

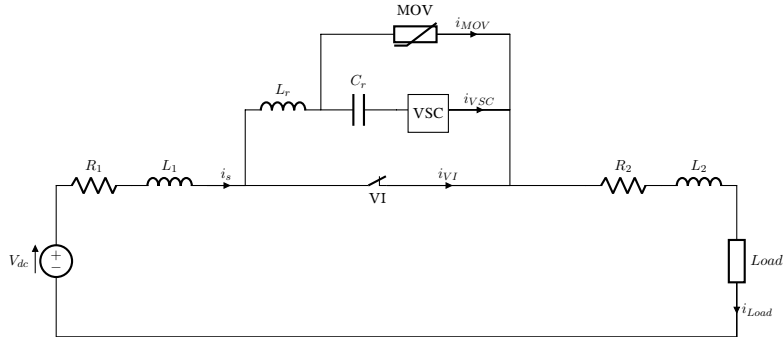


Σχήμα 4.13: Τοπολογίες διακόπτη ισχύος για αμφίπλευρη λειτουργία [33]

4.2 Μηχανικός διακόπτης ισχύος με κυκλώμα συντονισμού που διεγείρεται από μετατροπέα (VARC)

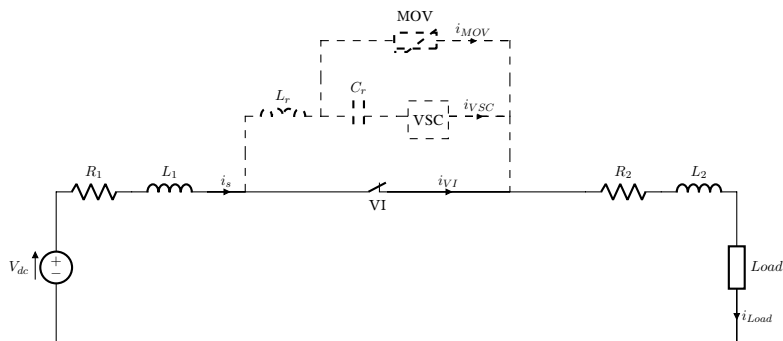
4.2.1 Αρχή Λειτουργίας

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται ένα απλό σύστημα ΣΡ στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο διακόπτης ισχύος που μελετάται.



Σχήμα 4.14: Σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο διακόπτης προς διερεύνηση.

Το σύστημα αποτελείται από μια πηγή τάσης ΣΡ, η οποία θεωρείται ιδανική. Τα στοιχεία R_1 , L_1 , R_2 , L_2 είναι οι αντιστάσεις και οι επαγωγές της γραμμής μεταφοράς πριν και μετά το σφάλμα αντίστοιχα. Η πηγή τροφοδοτεί ωμικό φορτίο αντίστασης R_{Load} .



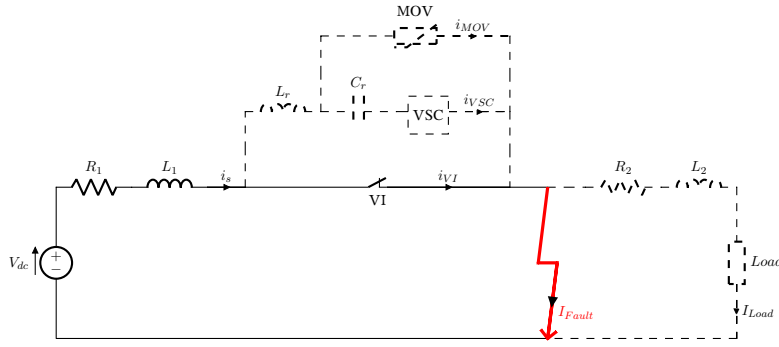
Σχήμα 4.15: Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. $0 < t < t_1$

Η πρώτη φάση λειτουργίας, η οποία φαίνεται στο σχήμα 4.15 είναι η λειτουργία μόνιμης κατάστασης. Το ρεύμα I_s διαρρέει τον μηχανικό διακόπτη VI. Το ρεύμα φορτίου I_{Load} είναι ίσο με το ρεύμα της πηγής I_s .

Το ρεύμα της πηγής ισούται με το ονομαστικό:

$$I_s = I_0 = \frac{V_{dc}}{R_1 + R_2 + R_{Load}} \quad (4.22)$$

Η αντίσταση του μηχανικού διακόπτη VI θεωρείται αμελητέα.



Σχήμα 4.16: Δεύτερη φάση λειτουργίας. $t_1 < t < t_2$

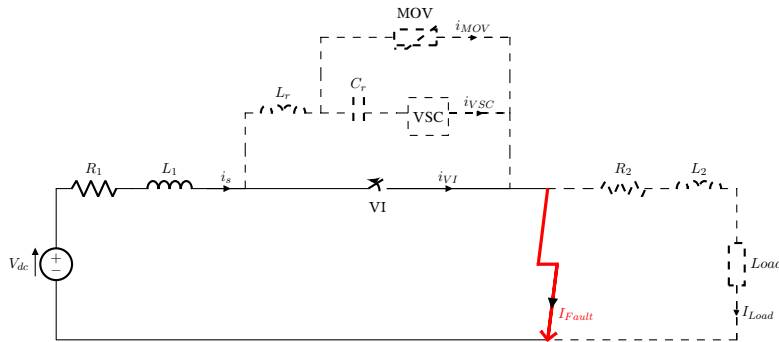
Την χρονική στιγμή $t = t_1$ εκδηλώνεται βραχυκύκλωμα στο σύστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Επειδή η πηγή τάσης ΣΡ θεωρείται ιδανική η εξίσωση που περιγράφει τότε το σύστημα είναι:

$$V_{dc} = L_1 \cdot \frac{dI_s(t)}{dt} + R_1 \cdot I_s(t) \quad (4.23)$$

με αρχική συνθήκη $I_L(t_1) = I_0$. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει:

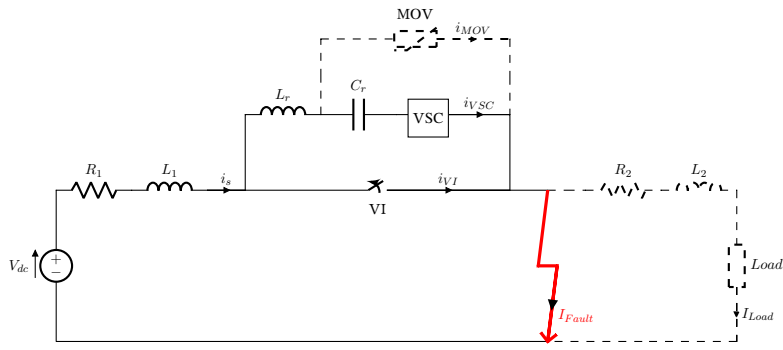
$$I_s(t) = I_f \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.24)$$

όπου $I_f = V_{dc}/R_1$ η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος, I_0 το ονομαστικό ρεύμα του συστήματος και $\tau = L_1/R_1$ η χρονική σταθερά των ωμικοεπαγωγικών στοιχείων. Το ρεύμα σφάλματος αυξάνεται μέχρι μια τιμή που καθορίζεται από το σύστημα προστασίας, όπου αρχίζει η διαδικασία ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος. Η τιμή αυτή συνήθως επιλέγεται $I_{threshold} = 2 \cdot I_0$.



Σχήμα 4.17: Τρίτη φάση λειτουργίας. $t_2 < t < t_3$

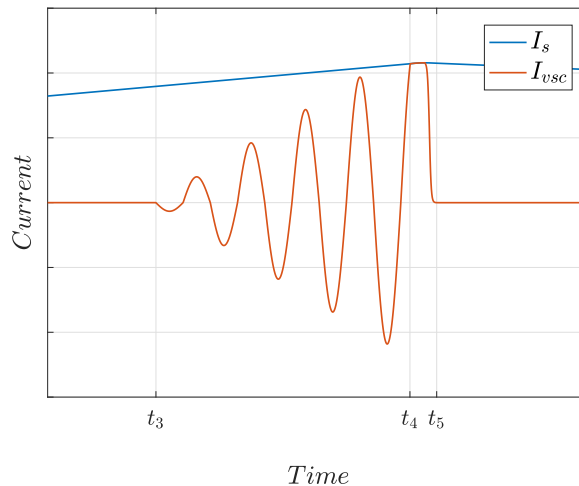
Όταν το ρεύμα σφάλματος την στιγμή $t = t_2$ φτάσει στην καθορισμένη τιμή $I_{threshold}$ αρχίζει να ενεργεί ο διακόπτης ισχύος. Δίνεται εντολή για να ανοίξουν οι επαφές του μηχανικού διακόπτη κενού. Το ρεύμα συνεχίζει να ρέει μέσω αυτού, και ανάμεσα στις επαφές του δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο. Για την σβέση του τόξου και την επιτυχή εκκαθάριση του σφάλματος θα πρέπει να τηρούνται δύο προϋποθέσεις. Αρχικά το ρεύμα που ρέει μέσω του διακόπτη να γίνει μηδενικό, και σε δεύτερη φάση οι επαφές του διακόπτη να έχουν αποκτήσει την απαραίτητη απόσταση μεταξύ τους ώστε ο διακόπτης να έχει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή προκειμένου να μην εκδηλωθεί ξανά τόξο. Η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού ξεκινάει την χρονική στιγμή t_3 , οποία μπορεί να συμπίπτει με την χρονική στιγμή όπου ο διακόπτης κενού αποκτάει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή προκειμένου να αντέξει την τάση του MOV. Αν η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού ξεκινήσει νωρίτερα, ώστε την στιγμή που οι επαφές του διακόπτη κενού έχουν την απαραίτητη απόσταση το ρεύμα του μετατροπέα να ισούται με το ρεύμα σφάλματος, ο χρόνος απόκρισης της διάταξης μπορεί να μειωθεί. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συστήματος ελέγχου όπου μετράει το ρεύμα σφάλματος και υπολογίζει την κατάλληλη στιγμή για την ενεργοποίηση του μετατροπέα.



Σχήμα 4.18: Τέταρτη φάση λειτουργίας. $t_3 < t < t_4$

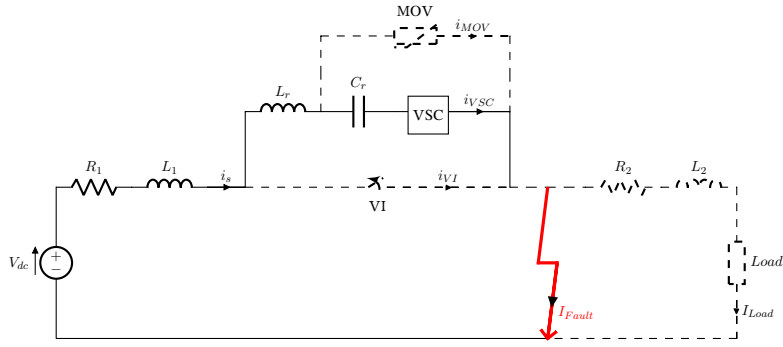
Την χρονική στιγμή t_3 ξεκινάει η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού από τον μετατροπέα VSC. Όπως φάνηκε στην ενότητα 2.2.3, ο μετατροπέας ελέγχεται με διαμόρφωση εύρους παλμών 180 μοιρών και διακοπτική συχνότητα ίση με την συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος $L_r - C_r$. Με βάση το ιδανικό μοντέλο, μετά από η αντιστροφές της τάσης εξόδου του μετατροπέα ($V_{in} \rightarrow -V_{in}$ ή $-V_{in} \rightarrow V_{in}$) το ρεύμα εξόδου του, σύμφωνα με την σύμβαση του σχήματος 4.18, ισούται με:

$$i_{VSC}(t) = (-1)^{(n+1)} \cdot (2n + 1) \cdot \frac{V_{in}}{Z_0} \cdot \sin \omega_0(t - t_n) \quad (4.25)$$



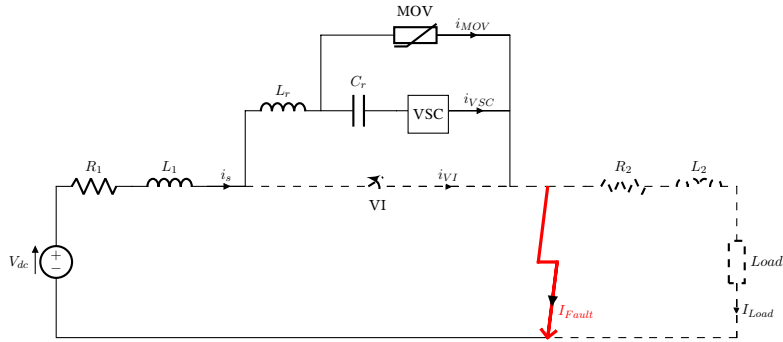
Σχήμα 4.19: Τυπική κυματομορφή ρεύματος μετατροπέα και ρεύματος σφάλματος

Το ρεύμα αυτό αντιτίθεται στο ρεύμα σφάλματος στον μηχανικό διακόπτη. Μετά από επαρκείς αντιστροφές το ρεύμα του μηχανικού διακόπτη μηδενίζεται την χρονική στιγμή t_4 και το ηλεκτρικό τόξο σβήνει. Στο σχήμα 4.19 φαίνεται η διαδικασία διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού και η στιγμή που το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα γίνεται ίσο με το ρεύμα σφάλματος στον μηχανικό διακόπτη.



Σχήμα 4.20: Πέμπτη φάση λειτουργίας. $t_4 < t < t_5$

Μετά την επιτυχή σβέση του τόξου και το άνοιγμα του μηχανικού διακόπτη το ρεύμα σφάλματος συνεχίζει να ρέει μέσω του κλάδου συντονισμού, φορτίζοντας τον πυκνωτή. Αγνοώντας την επίδραση της χωρητικότητας εισόδου του μετατροπέα, οι εξισώσεις που περιγράφουν την φόρτιση του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού είναι οι (4.11) και (4.12). Όσο ο πυκνωτής φορτίζεται, η τάση στα άκρα του MOV αυξάνεται. Το MOV φεύγει από την περιοχή διαρροής, η αντίσταση του μειώνεται μη γραμμικά και το ρεύμα μεταγεται στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας. Μετά την σβέση του τόξου οι ημιαγωγοί του μετατροπέα μένουν στην ίδια κατάσταση και σταματάει η αντιστροφή της τάσης του.



Σχήμα 4.21: Έκτη φάση λειτουργίας. $t_5 < t < t_6$

Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει την τάση προστασίας του βαρίστορ, αυτό πλέον άγει το συνολικό ρεύμα. Η εξίσωση που περιγράφει το σύστημα σε αυτή την φάση λειτουργίας είναι:

$$\frac{dI_s}{dt} = \frac{V_{dc} - V_{MOV}}{L_1 + L_r} \quad (4.26)$$

Εφόσον η τάση προστασίας του βαρίστορ είναι μεγαλύτερη (συνήθως $V_{MOV} = 1.5 \cdot V_{dc}$) από την τάση του συστήματος το ρεύμα της πηγής οδηγείται στο μηδέν και το σφάλμα εκκαθαρίζεται. Θεωρώντας γραμμική την μείωση του ρεύματος του σφάλματος, επομένως την κυματομορφή του ρεύματος του MOV τριγωνική, όπως επίσης και σταθερή την τάση του MOV κατά την διάρκεια της αγωγής του, η ενέργεια που απορροφάει είναι ίση με:

$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot V_{MOV} \cdot I_s(t_5) \cdot t_p$$

όπου t_p η διάρκεια αγωγής του MOV.

Με τις παραπάνω παραδοχές η χρονική διάρκεια t_p ισούται με:

$$t_p = \frac{(L_1 + L_r) \cdot I_s(t_5)}{V_{MOV} - V_{dc}}$$

Συνολικά:

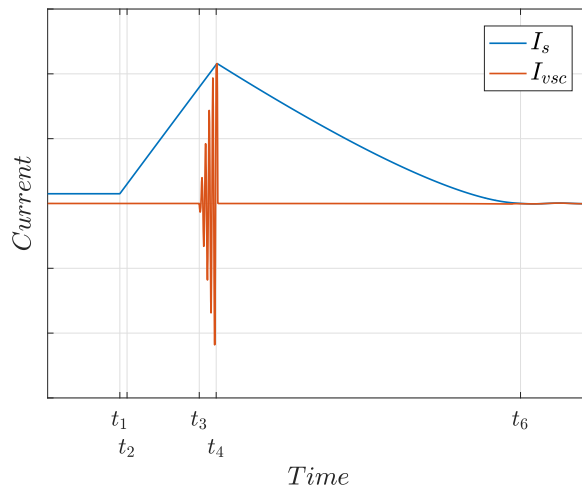
$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot (L_1 + L_r) \cdot (I_s(t_5))^2 \cdot \left(\frac{V_{MOV}}{V_{MOV} - V_{dc}} \right) \rightarrow$$

$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot (L_1 + L_r) \cdot (I_s(t_5))^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{dc}}{V_{MOV} - V_{dc}} \right) \quad (4.27)$$

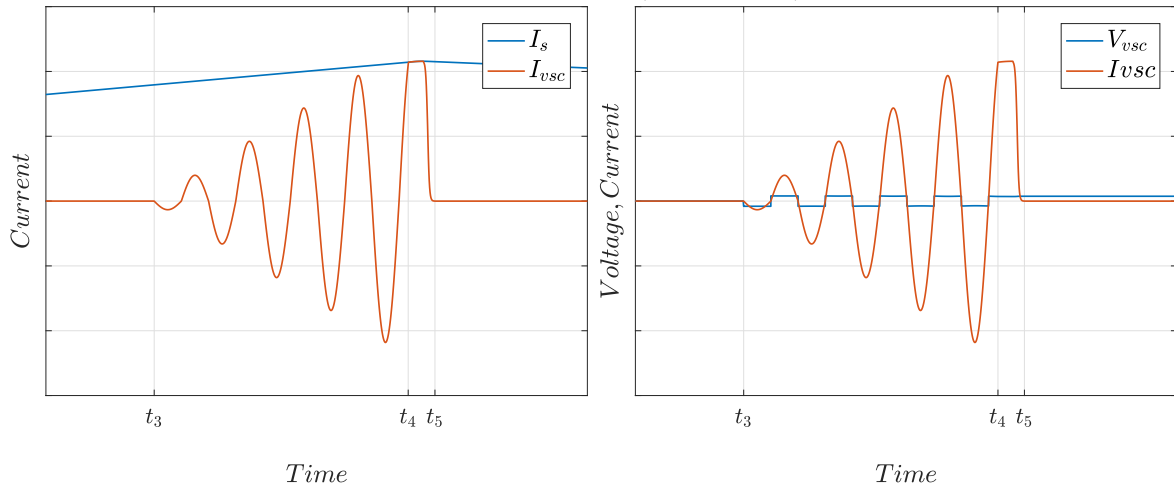
Από την εξίσωση 4.27, φαίνεται ότι αυξάνοντας την τάση προστασίας του MOV, μειώνεται η ενέργεια την οποία πρέπει να απορροφήσει, καθώς το ρεύμα σφάλματος οδηγείται πιο γρήγορα στο μηδέν. Ταυτόχρονα όμως υπάρχει αντίκτυπος στον χρόνο που χρειάζεται ο μηχανικός διακόπτης για να αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή.

Μετα την κατανάλωση της ενέργειας στο MOV, μπορεί να παρατηρηθεί ένα αποσβενόμενο ημιτονικό ρεύμα να διαρρέει το κύκλωμα συντονισμού. Αυτό το ρεύμα οφείλεται στην διαφορά της τάσης του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού με αυτή του συστήματος μετά την οδήγηση του ρεύματος σφάλματος στο μηδέν από το MOV. Ο μετατροπέας δεν μπορεί να διακόψει αυτή την ταλάντωση του ρεύματος. Ακόμα και αν τα IGBTs του περάσουν σε αποκοπή, το ρεύμα ρέει μέσω των αντιπαράλληλων διόδων. Το φαινόμενο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς η ταλάντωση δεν διαρκεί περισσότερο από λίγα ms και το πλάτος του ρεύματος ταλάντωσης είναι μικρό. Μετά την απόσβεση της εν λόγω ταλάντωσης το ρεύμα που διαρρέει την διάταξη είναι το ρεύμα διαρροής του MOV, το οποίο είναι της τάξης των mA. Το ρεύμα αυτό διακόπτεται από έναν περιφερειακό διακόπτη σε σειρά με την διάταξη, ο οποίος προσφέρει και την απαραίτητη γαλβανική απομόνωση.

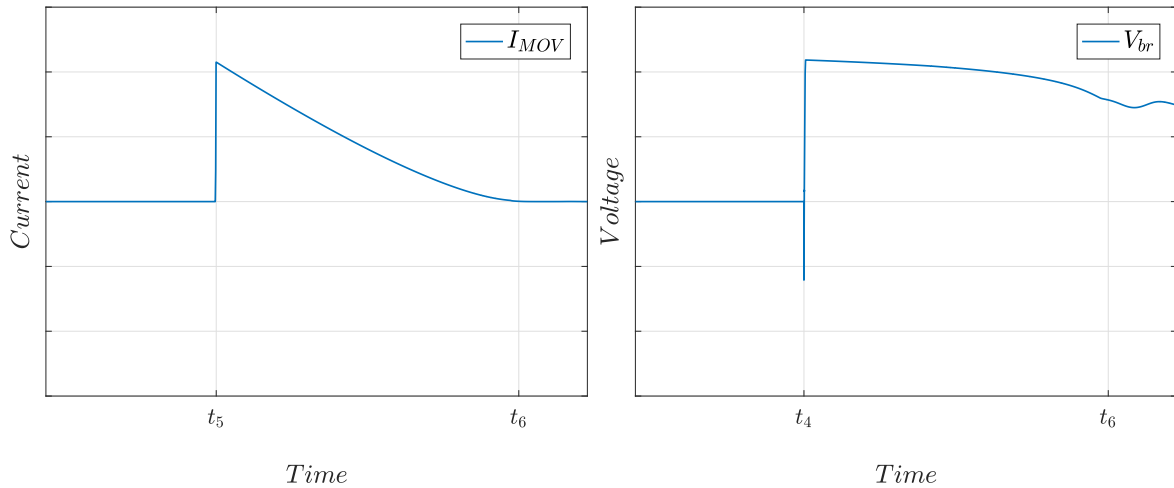
Στο σχήμα 4.22 φαίνονται τυπικές κυματομορφές λειτουργίας της διάταξης. Στον άξονα του χρόνου έχουν σημειωθεί οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές με βάση την ανάλυση που έγινε στην ενότητα αυτή.



(α) Ρεύμα συστήματος (I_s) και ρεύμα μετατροπέα I_{vsc} .



(β) Ρεύμα συστήματος (I_s) και μετατροπέα (I_{vsc}) (κοντινό). (γ) Ρεύμα και τάση εξόδου μετατροπέα (κοντινό).



(δ) Ρεύμα MOV

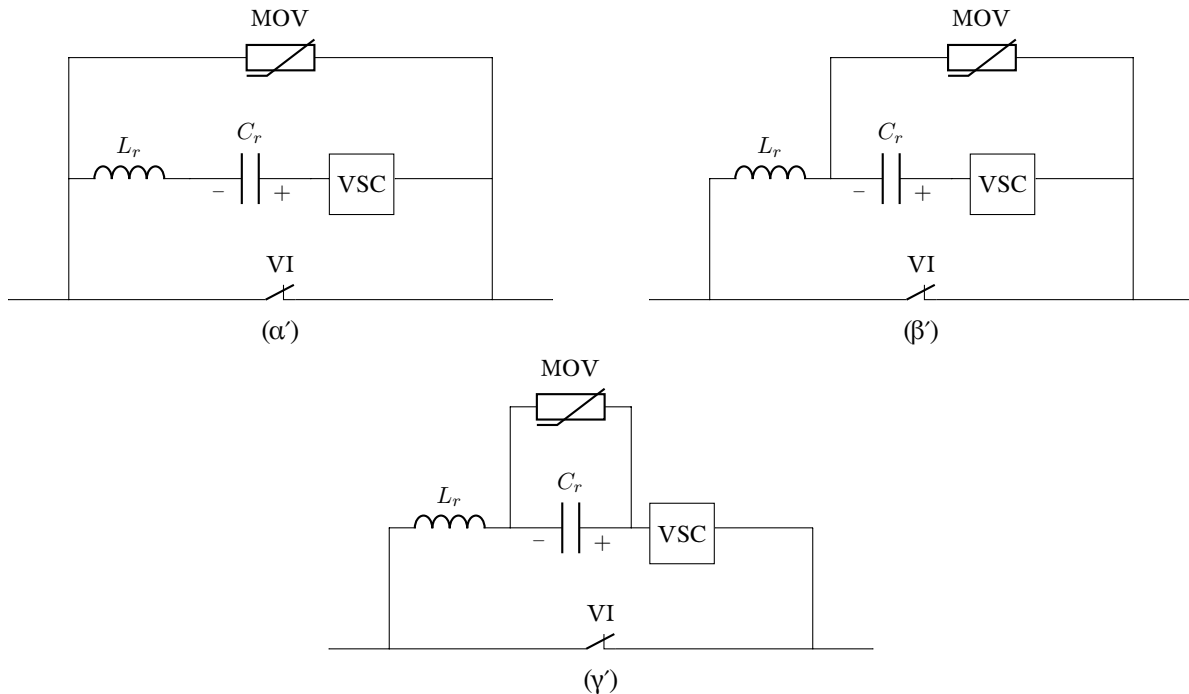
(ε) Τάση μηχανικού διακόπτη

Σχήμα 4.22: Τυπικές κυματομορφές λειτουργίας της διάταξης όπου φαίνονται και οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

4.2.2 Σχολιασμός και επιλογή παραμέτρων

Σύνδεση του MOV

Στην βιβλιογραφία εντοπίζονται τρεις εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης του MOV, οι οποίοι φαίνονται στο σχήμα 4.23.

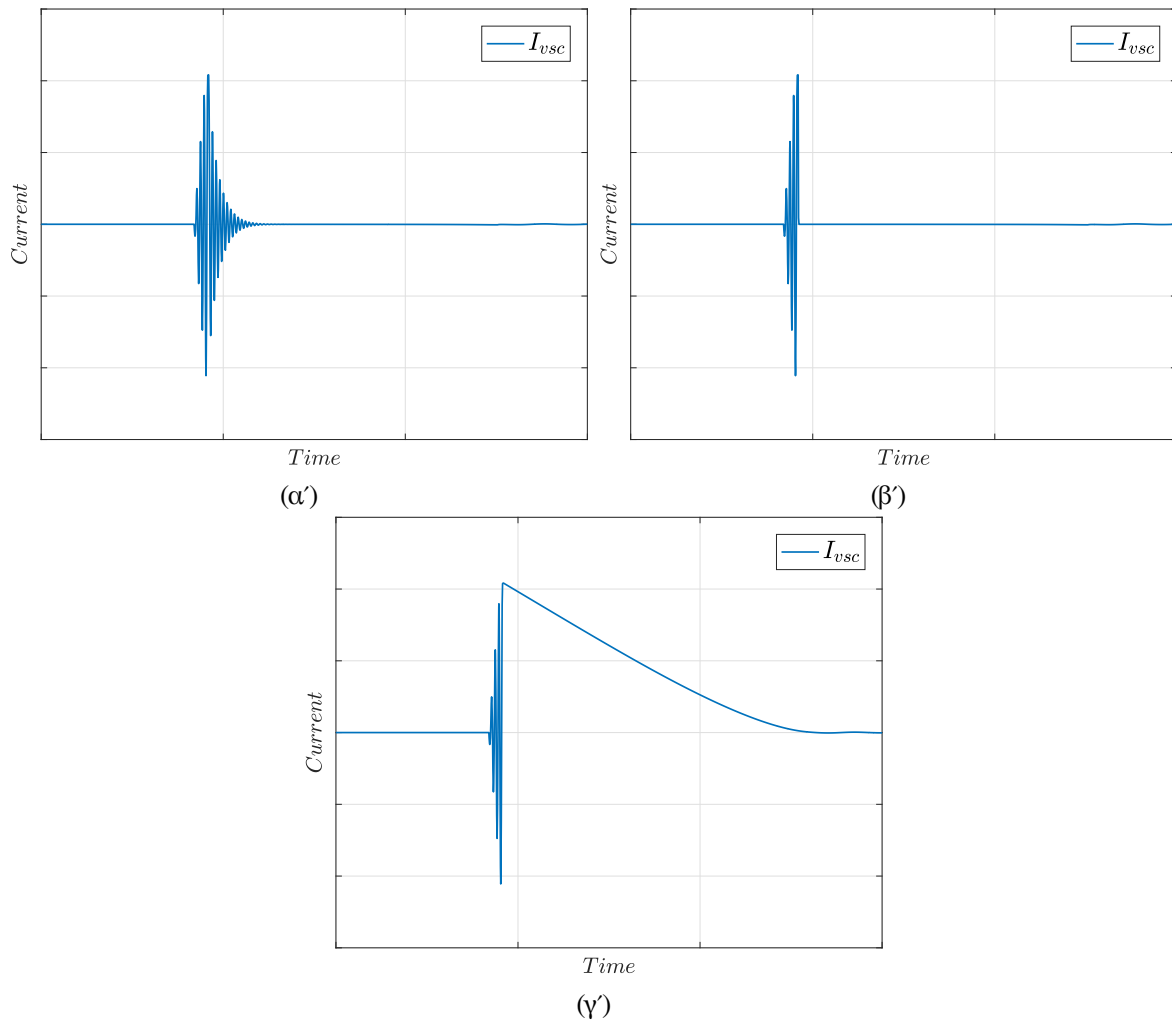


Σχήμα 4.23: Εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης του MOV.

Η απόκριση στα πρώτα στάδια λειτουργίας της διάταξης είναι πανομοιότυπη και διαφορές παρατηρούνται στο στάδιο φόρτισης του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού μετά το άνοιγμα του μηχανικού διακόπτη, καθώς και στο στάδιο μείωσης του ρεύματος σφάλματος από την τάση προστασίας του MOV.

Στην αρχική σχεδίαση της διάταξης [18] συναντάμε τον πρώτο (α') τρόπο σύνδεσης. Επειδή το MOV είναι παράλληλα με το κύκλωμα συντονισμού, το ρεύμα το οποίο δημιουργήθηκε για να μηδενιστεί το ρεύμα του μηχανικού διακόπτη συνεχίζει να ρέει στον βρόχο $L_r - C_r - VSC - MOV$. Η ενέργεια του ρεύματος απορροφάται από το MOV και η ταλάντωση καταστέλλεται. Το ρεύμα μέχρι να μηδενιστεί διαπερνάει τους ημιαγωγούς με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη καταπόνηση τους. Παράλληλα, πυκνωτής του κυκλώματος συντονισμού φορτίζεται σε μεγαλύτερη τάση από την τάση προστασίας του MOV. Αυτό εισάγει σχεδιαστικές δυσκολίες ως προς την επιλογή του MOV. Επομένως αυτός ο τρόπος σύνδεσης απορρίφθηκε [21].

Ο δεύτερος (β') και ο τρίτος (γ') τρόπος σύνδεσης διαφέρουν ως προς το ρεύμα που διαπερνάει τον μετατροπέα μετά την φόρτιση του πυκνωτή στην τάση προστασίας του MOV. Στον τρίτο τρόπο ο μετατροπέας διαπερνάται από το ρεύμα σφάλματος έως τον μηδενισμό του από την τάση προστασίας του MOV. Αντίθετα με τον δεύτερο τρόπο σύνδεσης, μετά την φόρτιση του πυκνωτή C_r στην τάση προστασίας του MOV, το ρεύμα του μετατροπέα μηδενίζεται. Επομένως, προτιμάται ο δεύτερος τρόπος σύνδεσης καθώς προσφέρει μικρότερη καταπόνηση των ημιαγωγών του μετατροπέα. Δίχως να υστερεί σε κάποιον άλλο παράγοντα από τον τρίτο τρόπο σύνδεσης. Στο σχήμα 4.24 φαίνεται η διαφορά στο ρεύμα του μετατροπέα για τις εναλλακτικές συνδέσεις του MOV.



Σχίμα 4.24: Τυπικές κυματομορφές ρεύματος μετατροπέα VSC για διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης του MOV.

Αντίσταση κυκλώματος συντονισμού Z_0

Κατά την διαδικασία διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού, η τάση στα άκρα του MOV δεν πρέπει να ξεπερνάει την τάση προστασίας του. Ο λόγος είναι ότι σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα θα διέρρε το MOV και όχι τον μηχανικό διακόπτη. Για την δημιουργία ενός παλμού ρεύματος πλάτους I_{BRK} , το μέγιστο πλάτος της τάσης στα άκρα του MOV θα ισούται με:

$$V_{MOV} = I_{BRK} \cdot Z_0$$

Επομένως το πηλίκο μεταξύ της τάσης προστασίας του MOV, U_{MOV} , και του μέγιστου ρεύματος σφάλματος που σχεδιάζεται για να διακόπτει η διάταξη, I_{max} , ορίζει μια μέγιστη αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

$$Z_0 < \frac{U_{MOV}}{I_{max}} \quad (4.28)$$

Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά την επιλογή της αντίστασης του κυκλώματος συντονισμού, είναι το ρεύμα που μπορεί να δημιουργηθεί στο κύκλωμα συντονισμού σε περίπτωση αποτυχίας του μηχανικού διακόπτη και επανεμφάνισης ηλεκτρικού τόξου. Το πλάτος του ρεύματος θα εξαρτάται από την τάση του πυκνωτή συντονισμού κατά την επανεμφάνιση καθώς και την αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού Z_0 . Είναι θεμιτό λοιπόν η αντίσταση να επιλέγεται όσο δυνατόν μεγαλύτερη για τον περιορισμό του ρεύματος αυτού. Συνολικά λοιπόν, η αντίσταση Z_0 επιλέγεται λίγο μικρότερη από τον όρο U_{MOV}/I_{max} . Έτσι, το

πλάτος του παλμού ρεύματος σε περίπτωση αποτυχίας του μηχανικού διακόπτη και επανεμφάνιση του ηλεκτρικού τόξου θα είναι, στην χειρότερη περίπτωση όπου ο πυκνωτής C_r έχει φορτιστεί στην τάση προστασίας του MOV, λίγο μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα διακοπής I_{max} για το οποίο έχει σχεδιαστεί η διατάξη [21].

Επιλογή συχνότητας συντονισμού ω_0

Είναι θεμιτό η συχνότητα συντονισμού να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη καθώς έτσι μειώνεται ο χρόνος απόκρισης της διάταξης αφού το ρεύμα που απαιτείται να δημιουργηθεί, δημιουργείται πιο γρήγορα. Επιπρόσθετα μεγαλύτερη συχνότητα συντονισμού οδηγεί μικρότερες τιμές των παθητικών στοιχείων της διάταξης μειώνοντας τόσο το κόστος, όσο και τον όγκο και το βάρος της. Παράλληλα όμως, η συχνότητα συντονισμού συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό του. Επειδή ο ρυθμός μεταβολής αυτός δεν πρέπει να ξεπερνάει ένα όριο, η συχνότητα συντονισμού περιορίζεται σε ένα μέγιστο. Για ρεύμα σφάλματος I_f το οποίο ρέει στον μηχανικό διακόπτη και οδηγείται στον μηδέν από το ρεύμα του μετατροπέα VSC, το οποίο είναι ένας ημιτονικός παλμός πλάτους I_{VSC} και συχνότητας ω_0 , την στιγμή του μηδενισμού του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη ισχύει (αγνοώντας τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος σφάλματος):

$$\left. \frac{di_{VI}}{dt} \right|_{i_{VI}=0} = \omega_0 \cdot I_{VSC} \cdot \cos(\arcsin(\frac{I_f}{I_{VSC}})) \quad (4.29)$$

Από την εξίσωση 4.29 φαίνεται ότι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό του εξαρτάται από το πλάτος του ρεύματος σφάλματος, καθώς και από το πλάτος και την συχνότητα του ρεύματος που δημιουργείται από τον μετατροπέα για να το μηδενίσει. Μια προσέγγιση για την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας μπορεί να γίνει με τον ακόλουθο συλλογισμό. Σε κάθε αντιστροφή της τάσης του μετατροπέα στο πλάτος του ρεύματος εξόδου του προστίθεται:

$$\frac{2 \cdot V_{C_{dc}}}{Z_0}$$

Επειδή δύο διαδοχικοί ημιτονικοί παλμοί είναι αντίθετης φοράς, η μέγιστη διαφορά μεταξύ του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του παλμού που θα το μηδενίσει ισούται με:

$$\frac{4 \cdot V_{C_{dc}}}{Z_0}$$

Μετά από η αντιστροφές της τάσης διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού, το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα ισούται με:

$$(2n + 1) \cdot \frac{V_{C_{dc}}}{Z_0}$$

Αν το ρεύμα αυτό είναι σχεδόν ίσο, αλλά μικρότερο, από το ρεύμα σφάλματος το τόξο δεν θα σβήσει. Θεωρώντας ότι το ρεύμα σφάλματος μετά παραμένει σχεδόν σταθερό, τότε την στιγμή του μηδενισμού του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη από τον επόμενο παλμό ίδιας φοράς θα ισχύει:

$$\left. \frac{di_{VI}}{dt} \right|_{i_{VI}=0} = \omega_0 \cdot (2n + 5) \cdot \frac{V_{C_{dc}}}{Z_0} \cdot \cos(\arcsin(\frac{2n + 1}{2n + 5})) \quad (4.30)$$

Με βάση την σχέση:

$$\cos(\arcsin(x)) = \sqrt{1 - x^2}$$

ισχύει:

$$\frac{di_{VI}}{dt} \Big|_{i_{VI}=0} = \omega_0 \cdot (2n + 5) \cdot \frac{V_{C_{dc}}}{Z_0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2n + 1}{2n + 5}\right)^2} \rightarrow$$

$$\frac{di_{VI}}{dt} \Big|_{i_{VI}=0} = \omega_0 \cdot \frac{V_{C_{dc}}}{Z_0} \cdot \sqrt{(2n + 5)^2 - (2n + 1)^2} \rightarrow$$

$$\frac{di_{VI}}{dt} \Big|_{i_{VI}=0} = \omega_0 \cdot \frac{V_{C_{dc}}}{Z_0} \cdot \sqrt{16n + 24}$$

Επειδή η ακολουθία:

$$\alpha_n = \sqrt{16n + 24}$$

είναι γνησίως αύξουσα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος διακόπτη κατά τον μηδενισμό του αυξάνεται όσο το ρεύμα σφάλματος είναι μεγαλύτερο και επομένως οι απαιτούμενες αντιστροφές της τάσης διέγερσης από τον μετατροπέα περισσότερες. Για έναν μέγιστο ρυθμό μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό του, S_{max} , η μέγιστη συχνότητα συντονισμού προκύπτει:

$$\omega_0 \cdot I_{max} \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{I_{max} - \frac{4V_{C_{dc}}}{Z_0}}{I_{max}}\right)\right) \leq S_{max} \quad (4.31)$$

$$\omega_0 \leq \frac{S_{max}}{I_{max} \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{I_{max} - \frac{4V_{C_{dc}}}{Z_0}}{I_{max}}\right)\right)} \quad (4.32)$$

Η παραπάνω ανάλυση είναι συντηρητική και μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση των στοιχείων της διάταξης καθώς:

- Αγνοείται ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος σφάλματος. Το ρεύμα στον μηχανικό διακόπτη ισούται με :

$$I_{VI} = I_f - I_{VSC}$$

Αν το ρεύμα σφάλματος έχει θετικό ρυθμό μεταβολής, ο ρυθμός μεταβολής του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό του μειώνεται αν αυτό ληφθεί υπ' όψη.

- Αγνοείται η μείωση της τάσης χωρητικότητας του μετατροπέα. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας της διάταξης, η τάση της χωρητικότητας του μετατροπέα μειώνεται, όσο αυτός τροφοδοτεί με ρεύμα το κύκλωμα συντονισμού. Η μείωση της τάσης αυτή οδηγεί σε μείωση του όρου $2V_{C_{dc}}/Z_0$ που προστίθεται στο πλάτος του ρεύματος σε κάθε αντιστροφή. Σύμφωνα με την εξίσωση (4.31), αν η τάση της χωρητικότητας μειωθεί τότε μειώνεται και ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό του.

Επιλογή χωρητικότητας μετατροπέα C_{dc}

Η ενέργεια για την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού και την δημιουργία του απαραίτητου ρεύματος για τον μηδενισμό του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη προέρχεται απο την χωρητικότητα του μετατροπέα. Κατά την διαδικασία της διέγερσης, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον μετατροπέα μειώνεται και κατ'επέκταση μειώνεται το πλάτος που προστίθεται στο ρεύμα σε κάθε αντιστροφή ($2u_{DC}/Z_0$). Για την μελέτη της σχέσης μεταξύ της τιμής του μετατροπέα και του ρεύματος εξόδου του δεν αρκεί το ιδανικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε έως τώρα, καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η πτώση της τάσης του κατά της διάρκεια της λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό παρακάτω αναπτύσσεται ένα μοντέλο για την επίδραση της πτώσης τάσης της χωρητικότητας του μετατροπέα στο ρεύμα που δημιουργείται [21]. Οι μεταβλητές του μοντέλου είναι το πλάτος του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα \hat{i}_{VSC} και η τάση της χωρητικότητας u_{DC} .

Σε κάθε αντιστροφή της τάσης του μετατροπέα το πλάτος του ρεύματος εξόδου αυξάνεται κατά:

$$\frac{2 \cdot u_{DC}}{Z_0}$$

Επομένως για την μεταβολή του πλάτους του ρεύματος προκύπτει η σχέση:

$$\frac{d\hat{i}_{VSC}}{dn} = \frac{2u_{DC}}{Z_0}$$

Ο αριθμός των αντιστροφών n για συχνότητα συντονισμού f_0 ισούται με:

$$n = 2 \cdot t \cdot f_0$$

Συνολικά, για την μεταβολή του πλάτους του ρεύματος ισχύει:

$$\frac{d\hat{i}_{VSC}}{dt} = \frac{d\hat{i}_{VSC}}{dn} \frac{dn}{dt} = \frac{2u_{DC}}{Z_0} \cdot 2f_0 = \frac{4f_0 \cdot u_{DC}}{Z_0} \quad (4.33)$$

Για την μεταβολή της τάσης της χωρητικότητας ισχύει:

$$C_{DC} \cdot \frac{du_{DC}}{dt} = -i_{C_{DC}}$$

Επειδή το ρεύμα που εξέρχεται της χωρητικότητας είναι της μορφής:

$$i_{C_{DC}} = \hat{i}_{VSC} \cdot |\sin \omega_0 t|$$

χρησιμοποιείται ο συντελεστής $\frac{2}{\pi}$ για την συσχέτιση του πλάτους του ρεύματος εξόδου και του ρεύματος εξόδου της χωρητικότητας. Ο συντελεστής προκύπτει απο την εξής σχέση:

$$\frac{\int_0^{\pi} \hat{i}_{VSC} \cdot \sin \omega_0 t}{\hat{i}_{VSC} \cdot \frac{T_0}{2}} = \frac{\frac{2}{\omega_0}}{\frac{1}{2f_0}} = \frac{2}{\pi}$$

Συνολικά, οι δύο εξισώσεις που περιγράφουν την αλληλεπίδραση της τάσης της χωρητικότητας του μετατροπέα και το ρεύμα εξόδου του είναι:

$$\frac{d\hat{i}_{VSC}}{dt} = \frac{4f_0 \cdot u_{DC}}{Z_0} \quad (4.34)$$

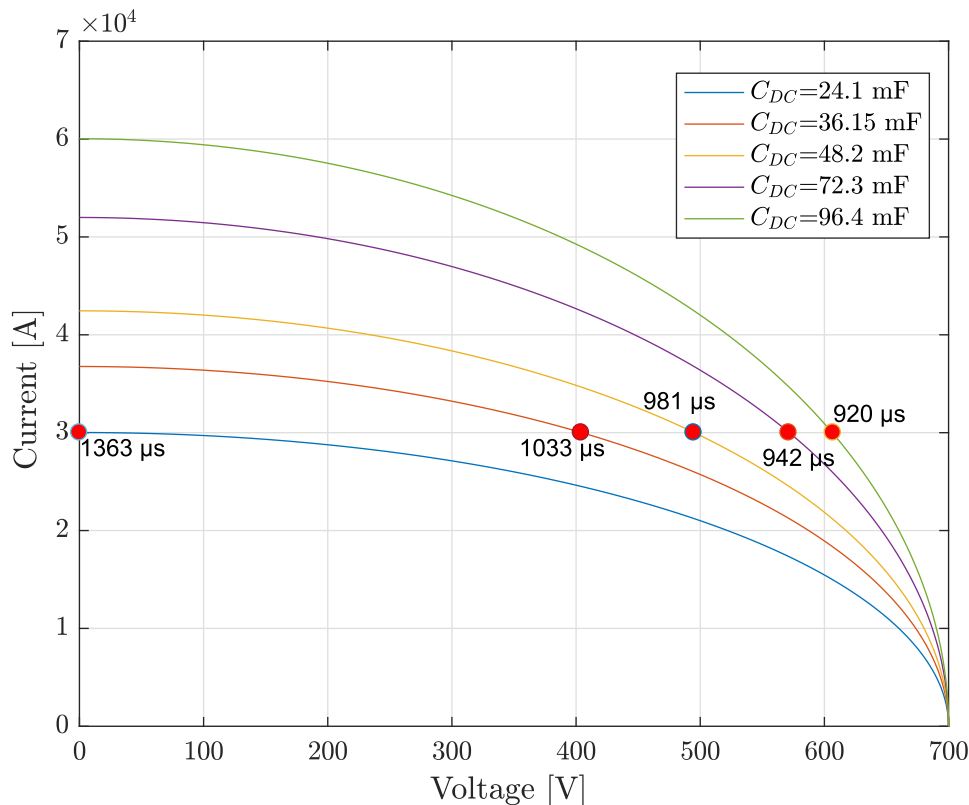
$$C_{DC} \cdot \frac{u_{DC}}{dt} = -\frac{2}{\pi} \cdot \hat{i}_{VSC} \quad (4.35)$$

Η τιμή της χωρητικότητας πρέπει να επιλέγεται τέτοια ώστε η ενέργεια που είναι αρχικά αποθηκευμένη σε αυτή να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια της επαγωγής του κυκλώματος συντονισμού όταν αυτή διαρρέεται απο το μέγιστο ρεύμα I_{max} για το οποίο σχεδιάζεται η διάταξη. Πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$\frac{1}{2} C_{DC} \cdot V_{DC}^2 \geq \frac{1}{2} L_r \cdot I_{max}^2 \quad (4.36)$$

Η ισότητα στην παραπάνω σχέση, ισχύει αν όλη η ενέργεια της χωρητικότητας χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του ρεύματος εξόδου. Στην πραγματικότητα όμως, αν λάβουμε υπόψη τις απώλειες του κυκλώματος συντονισμού και του μετατροπέα η ισότητα στην παραπάνω σχέση δεν ισχύει. Αυξάνοντας την αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια της χωρητικότητας, το ρεύμα του μετατροπέα μπορεί να φτάσει την τιμή I_{max} σε μικρότερο χρόνο, καθώς το ρεύμα που προστίθεται σε κάθε αντιστροφή ($2u_{DC}/Z_0$) παραμένει σε υψηλότερη τιμή.

Στο σχήμα 4.25, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των εξισώσεων 4.34,4.35 και για διάφορες τιμές της χωρητικότητας C_{DC} φαίνεται ο χρόνος που χρειάζεται για την δημιουργία ενός ρεύματος 30 kA. Παράλληλα φαίνεται και η τάση στην οποία παραμένει φορτισμένη η χωρητικότητα μετά την δημιουργία του ρεύματος. Όπως φαίνεται η αύξηση της τιμής της χωρητικότητας μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για την δημιουργία ενός ρεύματος συγκεκριμένου πλάτους. Παρατηρείται ότι η επιλογή διπλάσιας χωρητικότητας από την ελάχιστη απαιτούμενη (24.1 mF), οδηγεί σε μείωση του χρόνου κατά 28 %. Αντίστοιχα, η επιλογή τετραπλάσιας χωρητικότητας οδηγεί σε μείωση του χρόνου κατά 32.5 %. Ο θεωρητικά ελάχιστος χρόνος για την δημιουργία του ρεύματος, με βάση το ιδανικό μοντέλο (θεωρώντας άπειρη χωρητικότητα C_{DC}) ισούται με 882 μ s. Η επιλογή της χωρητικότητας μπορεί να γίνει με βάση την μείωση του χρόνου απόκρισης σε συνάρτηση με την αύξηση του κόστους που επιφέρει η αύξηση της χωρητικότητας. Παράλληλα, η τιμή της χωρητικότητας επηρεάζει και τον ικανό αριθμό συνεχόμενων λειτουργιών της διάταξης, χωρίς ενδιάμεση φόρτιση.



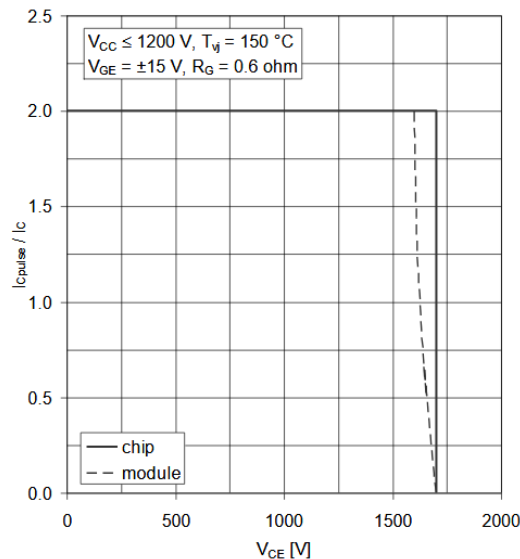
Σχήμα 4.25: Τροχιές του πλάτους ρεύματος εξόδου του μετατροπέα και παραμένονσα τάση στην χωρητικότητα εισόδου για διάφορες τιμές της χωρητικότητας C_{DC} για $Z_0=0.7 \Omega$, $f_0=8.5$ kHz, $u_{DC}(0)=700$ V

4.2.3 Απαιτήσεις σε ημιαγωγούς

Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται σε αυτή την διάταξη είναι IGBTs, για τον μετατροπέα τάσης δύο επιπέδων πλήρους γέφυρας. Για τον μετατροπέα απαιτούνται τέσσερις συστοιχίες ημιαγωγών. Τα IGBTs μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για την επίτευξη της απαιτούμενης τάσης αποκοπής, καθώς και παράλληλα για την επίτευξη αγωγής μεγαλύτερων ρευμάτων. Οι απαιτήσεις καθορίζονται από την τάση που εφαρμόζεται στους ημιαγωγούς καθώς και από το ρεύμα διαρρέονται κατά την λειτουργία της διάταξης.

Καθ'όλη την διάρκεια λειτουργίας της διατάξης, η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα των ημιαγωγών του μετατροπέα είναι η τάση της χωρητικότητας εισόδου του. Η τάση αυτή είναι πολύ μικρότερη, έως και μιας τάξης μεγέθους, από την τάση του συστήματος. Η αποσύνδεση μεταξύ της τάσης του συστήματος και της απαραίτητης τάσης αποκοπής των ημιαγωγών οδηγεί σε μείωση των απαιτούμενων ημιαγωγών συνδεδεμένων σε σειρά ή ακόμα και την μη ανάγκη σύνδεσης σε σειρά.

Το ρεύμα που διαπερνά τους ημιαγωγούς είναι ημιτονικοί παλμοί αυξανόμενου πλάτους, το μέγιστο πλάτος των οποίων καθορίζεται από την ικανότητα διακοπής του διακόπτη ισχύος. Οι ημιαγωγοί λειτουργούν υπό πολύ ευνοϊκές συνθήκες, καθώς περνάνε σε αγωγή και αποκοπή υπό μηδενικό, ή σχεδόν μηδενικό, ρεύμα. Για τον λόγο αυτό μπορεί να γίνει πλήρης εκμετάλλευση των ονομαστικών τιμών ρεύματος. Παράλληλα, θα μπορούσε να ερευνηθεί η χρήση των ημιαγωγών εκτός της περιοχής ασφαλούς λειτουργίας, και ως κριτήριο επιλογής να χρησιμοποιηθούν τα θερμικά τους όρια. Ένα τυπικό γράφημα της περιοχής ασφαλούς λειτουργίας ενός IGBT φαίνεται στην εικόνα 4.26. Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας καθορίζει την ικανότητα του ημιαγωγού να περάσει σε αποκοπή ενώ διαρρέεται από ρεύμα σε συνάρτηση με την τάση που εφαρμόζεται μετά στα άκρα του.



Σχήμα 4.26: Τυπική κυματομορφή περιοχής ασφαλούς λειτουργίας ενός IGBT [34]

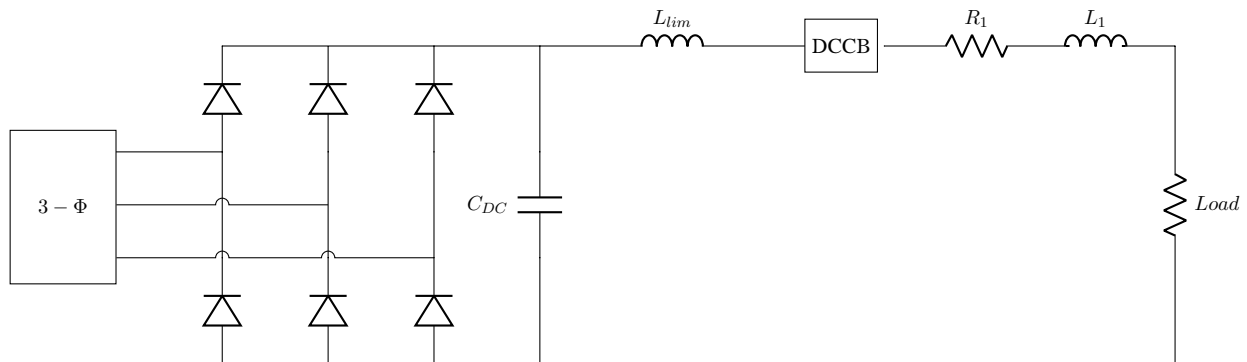
Η υπέρβαση του ρεύματος που ορίζει η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας ενός IGBT μπορεί να οδηγήσει σε μανδάλωση του παρασιτικού θυρίστορ της δομής του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια του ελέγχου της πύλης του ημιαγωγού και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει τρόπος να περιοριστεί το ρεύμα που τον διαρρέει την καταστροφή του λόγω υπερθέρμανσης. Στην περίπτωση ενός μετατροπέα που διεγείρει ένα κύκλωμα συντονισμού, το ρεύμα περιορίζεται λόγω της κυματομορφής του ρεύματος στον κλάδο συντονισμού. Έτσι, ακόμα και μετά την μανδάλωση του παρασιτικού θυρίστορ το ρεύμα οδηγείται στο μηδέν και ο ημιαγωγός περνάει σε αποκοπή παρά την απώλεια ελέγχου της πύλης του.

5 Σχεδίαση και Προσομοίωση μηχανικών διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος

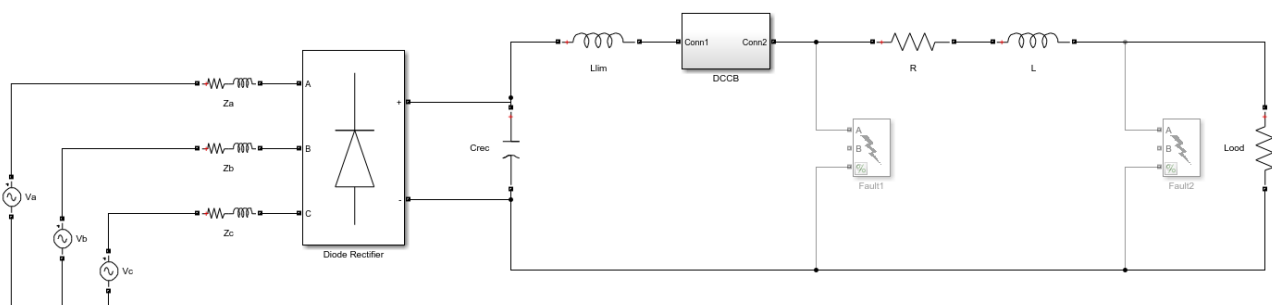
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σχεδίαση και προσομοίωση των μηχανικών διακοπών ισχύος που μελετήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

5.1 Ορισμός συστήματος

Οι προσομοιώσεις γίνονται σε ένα απλό σύστημα συνεχούς ρεύματος όπως αυτο που φαίνεται στο σχήμα 5.1. Η υλοποίηση του συστήματος στο Simulink φαίνεται στο σχήμα 5.2



Σχήμα 5.1: Σύστημα συνεχούς ρεύματος



Σχήμα 5.2: Υλοποίηση συστήματος στο Simulink

Το σύστημα αποτελείται από έναν μη ελεγχόμενο ανορθωτή, ο οποίος τροφοδοτεί ένα φορτίο. Στην έξοδο του μετατροπέα είναι συνδεδεμένο ένα πηνίο περιορισμού του ρεύματος. Οι παράμετροι του συστήματος φαίνονται στον πίνακα 1.

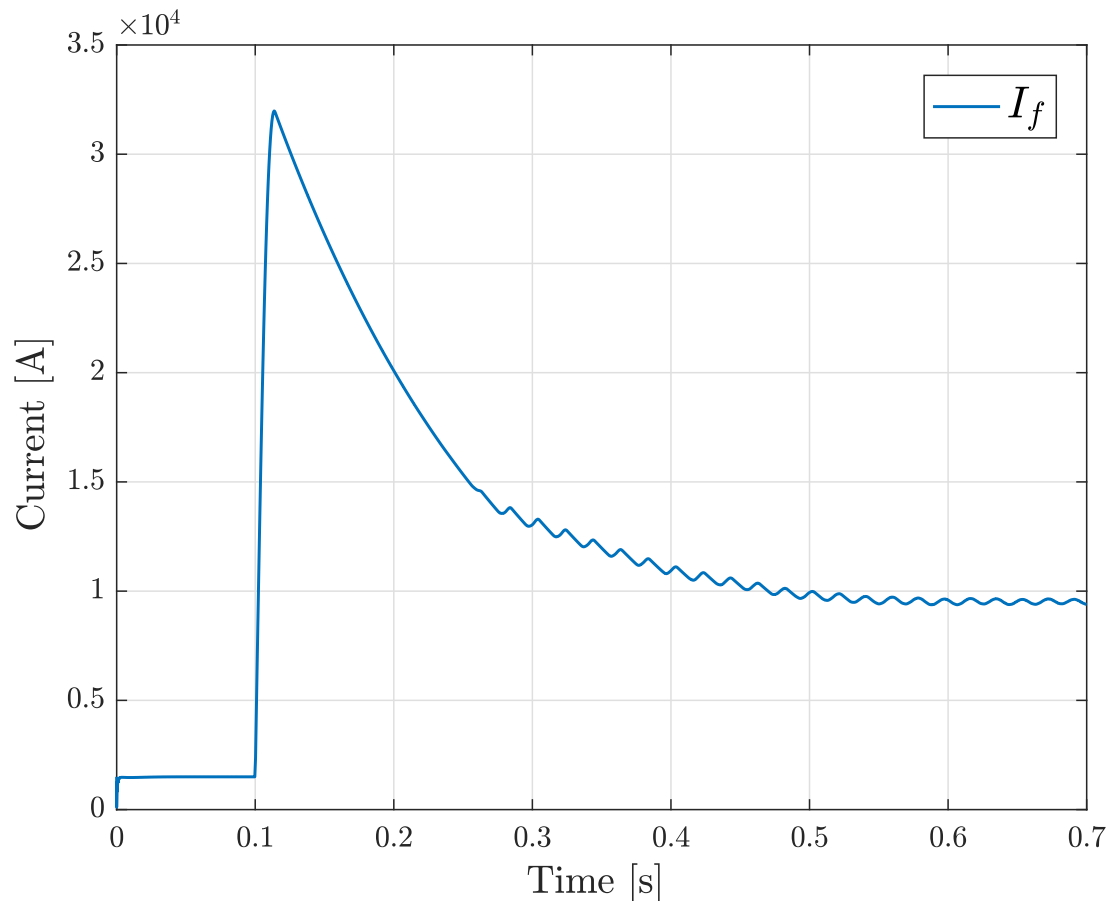
Παράμετρος	Τιμή
Τάση συστήματος ΕΡ ($V_{p-p,rms}$)	12.25 kV
Αντίσταση πηγής ΕΡ (R_s)	1 mΩ/φάση
Επαγωγή πηγής ΕΡ (L_s)	3.2 mH/φάση
Τάση συστήματος ΣΡ (V_{DC})	15 kV
Επαγωγή περιορισμού ρεύματος (L_{lim})	4 mH
Αντίσταση μέσου μεταφοράς (R)	89 mΩ/km
Επαγωγή μέσου μεταφοράς (L)	0.347 mH/km
Μήκος μέσου μεταφοράς	5 km
Φορτίο	22.5 MW
Χωρητικότητα εξόδου (C_{rec})	16 mF

Πίνακας 1: Παράμετροι συστήματος

Οι παράμετροι του συστήματος μπορούν να βρεθούν και εδώ [35], ενώ οι τιμές του μέσου μεταφοράς βασίζονται στο [36].

5.1.1 Μέγιστο ρεύμα σφάλματος

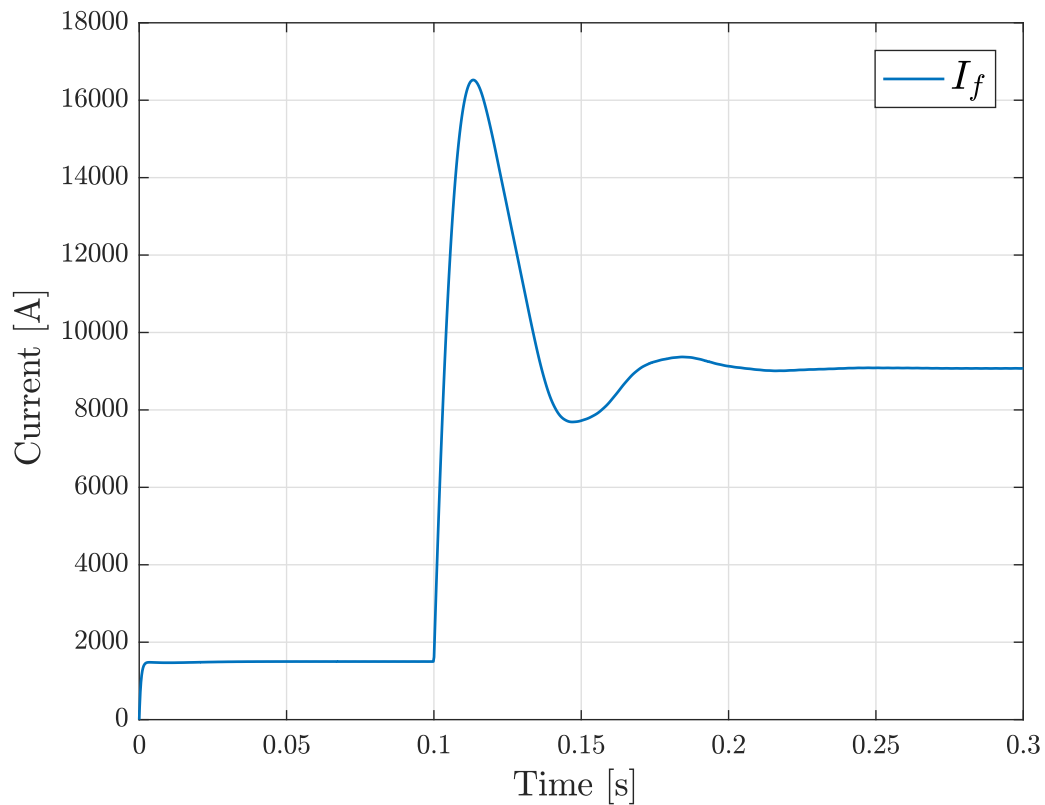
Για το παραπάνω σύστημα το ρεύμα σφάλματος που προκύπτει για σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Κυματομορφή ρεύματος σφάλματος για σφάλμα στην έξοδο του ανορθωτή

Για την σχεδίαση των διακοπών ισχύος είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών του μέγιστου ρεύματος σφάλματος που προκύπτει. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα σφάλματος ξεπερνάει την τιμή ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος, που επιλέγεται δυο φορές το ονομαστικό ρεύμα (3 kA), μετά από 0.4 ms. Ύστερα από 3 ms μετά την αναγνώριση του σφάλματος, όπου 3 ms είναι ο χρόνος που θεωρείται ότι χρειάζεται ο μηχανικός διακόπτης για να αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή, το ρεύμα σφάλματος ισούται με 13.75 kA. Στο [29] προτείνεται οι μηχανικοί διακόπτες να σχεδιάζονται με περιθώριο κέρδους από 50 έως 100%, επομένως η σχεδίαση των μηχανικών διακοπών θα γίνει με ικανότητα διακοπής τα 21 kA.

Στο σχήμα 5.4 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος σφάλματος για σφάλμα κοντά στο φορτίο.



Σχήμα 5.4: Ρεύμα σφάλματος για σφάλμα κοντά στο φορτίο

5.2 Διακόπτης ισχύος έγχυσης ρεύματος με φορτισμένο πυκνωτή

5.2.1 Σχεδίαση

Η σχεδίαση γίνεται με βάση την ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά η τάση φόρτισης του πυκνωτή συντονισμού επιλέγεται ίση με την τάση του συστήματος, δηλαδή 15 kV. Η αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού προκύπτει από την εξίσωση:

$$Z_0 = \frac{V_{ch}}{I_{max}} = \frac{15 \cdot 10^3}{21 \cdot 10^3} = 0.714 \ \Omega \quad (5.1)$$

Η συχνότητα συντονισμού προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\omega_0 = \frac{S_{max}}{I_{max}} = \frac{500 \cdot 10^6}{21 \cdot 10^3} = 23809.5 \text{ rad/s} \ \acute{\eta} \ f_0 = 3.789 \text{ kHz} \quad (5.2)$$

Υπενθυμίζεται ότι S_{max} είναι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό ο οποίος θεωρείται σταθερός και ίσος με 500 A/μs.

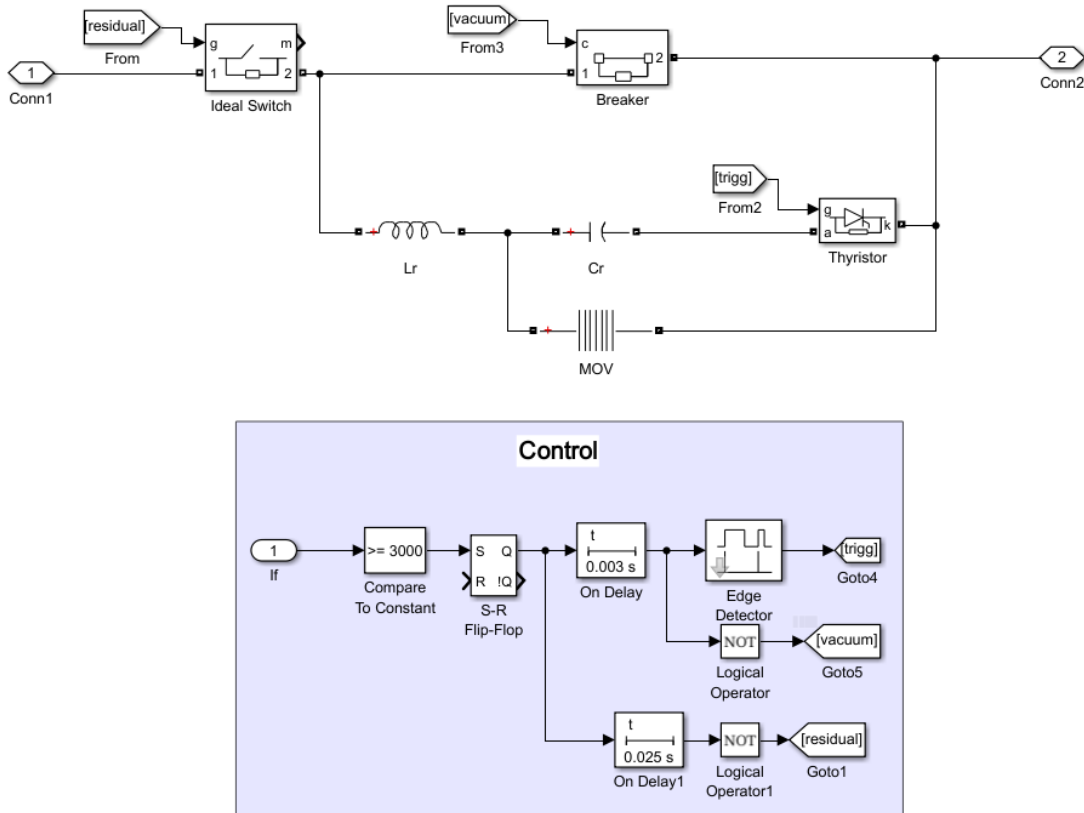
Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν οι τιμές των παραμέτρων του κυκλώματος συντονισμού, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 2.

Παράμετρος	Τιμή
Πυκνωτής συντονισμού (C_r)	58.52 μF
Πηνίο συντονισμού (L_r)	29.83 μH
Τάση φόρτισης του πυκνωτή συντονισμού (U_{ch})	15 kV

Πίνακας 2: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού

5.2.2 Μοντελοποίηση

Στο σχήμα 5.5 φαίνεται η υλοποίηση του διακόπτη ισχύος στο Simulink. Ο έλεγχος γίνεται με τον εξής απλό τρόπο. Όταν εντοπιστεί το σφάλμα ενεργοποιείται η διάταξη και μετά την καθυστέρηση των 3 ms που εισάγει ο μηχανικός διακόπτης δίνεται παλμός έναυσης στο θυρίστορ. Την ίδια στιγμή δίνεται εντολή στον μηχανικό διακόπτη να ενεργοποιηθεί, με αποτέλεσμα να ανοίξει μετά τον μηδενισμό του ρεύματος που τον διαρρέει. Τέλος με την ενεργοποίηση της διάταξης δίνεται εντολή και στον περιφερειακό διακόπτη απομόνωσης να ανοίξει. Ο διακόπτης αυτός θεωρείται ότι εισάγει μια καθυστέρηση των 25 ms. Επίσης μοντελοποιείται σαν ιδανικός διακόπτης καθώς ανοίγει ενώ διαρρέεται από το ρεύμα διαρροής του MOV.



Σχήμα 5.5: Υλοποίηση του διακόπτη ισχύος στο Simulink

Για την μοντελοποίηση του MOV χρησιμοποιείται το μπλοκ Surge Arrester που αναπαριστά μια μη γραμμική αντίσταση. Οι παράμετροι του μπλοκ είναι οι εξής:

- V_{ref}, I_{ref} όπου είναι η τάση προστασίας του MOV καθώς και το ρεύμα απο το οποίο διαρρέεται για την τάση αυτή
- n ο αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων κλάδων βαρίστορ
- k_{1-3} και a_{1-3} σταθερές που καθορίζουν την χαρακτηριστική του MOV

Από τα παραπάνω δεδομένα η χαρακτηριστική κάθε παράλληλου κλάδου του μπλοκ προκύπτει από την εξίσωση:

$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^{\frac{1}{\alpha_i}}, \quad i=1,2,3 \quad (5.3)$$

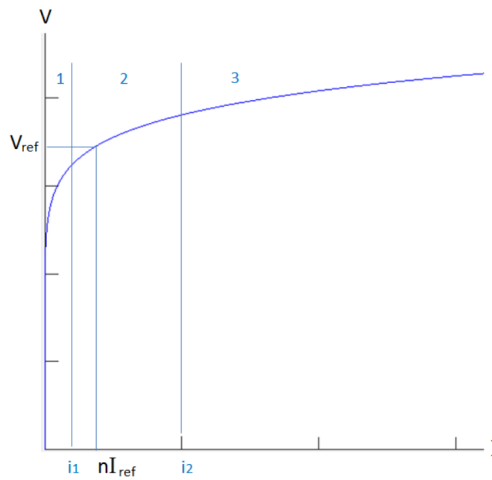
Η χαρακτηριστική χωρίζεται σε τρεις περιοχές, και το ρεύμα μετάβασης μεταξύ των περιοχών ισούται με:

$$i_1 = P_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2}} \quad \text{και} \quad i_2 = P_2 \cdot \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_3}} \quad (5.4)$$

όπου:

$$P_i = \frac{nI_{ref}}{k_i^{\alpha_i}}, \quad i=1,2,3 \quad (5.5)$$

Τα παραπάνω γίνονται πιο κατανοητά στο σχήμα 5.6.



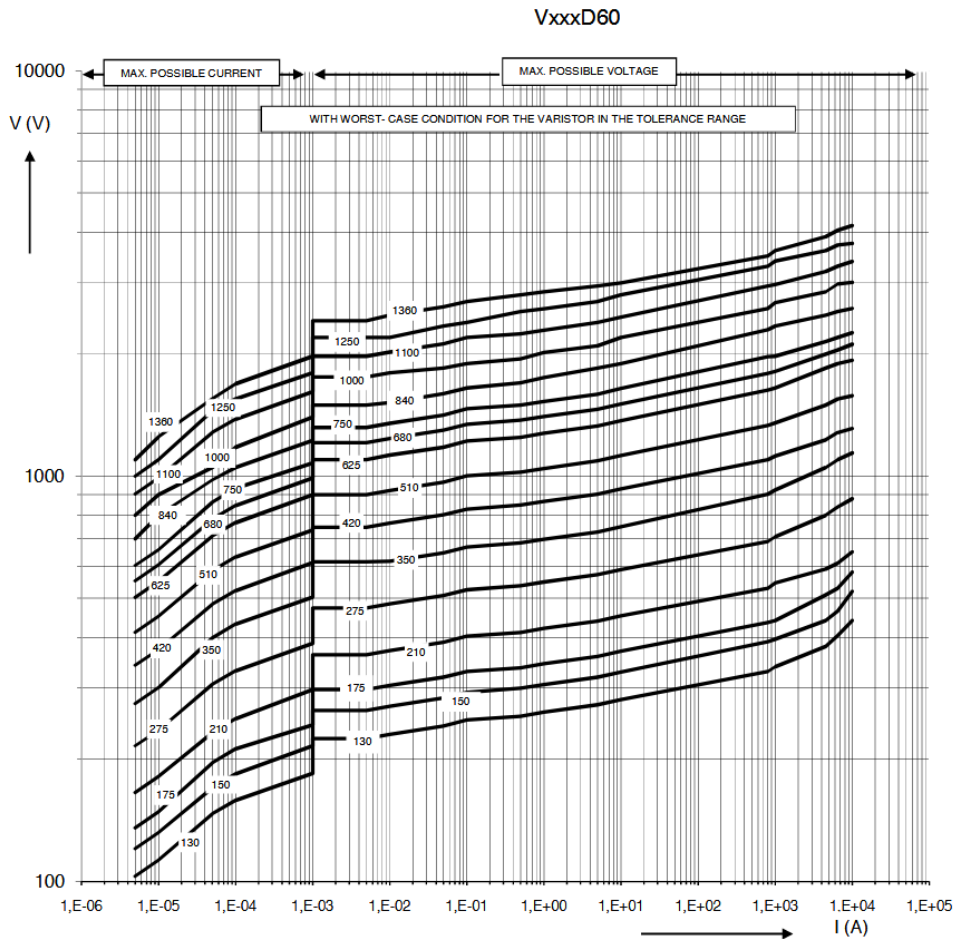
Σχήμα 5.6: Παράδειγμα χαρακτηριστικής του μπλοκ Surge Arrester [37]

Για την κατασκευή της χαρακτηριστικής χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά το μοντέλο V1360D60 της εταιρίας Varsi, με ικανότητα απορρόφησης ενέργειας 85 kJ ανά δίσκο. Η ενέργεια που πρέπει να απορροφήσει το MOV κατά την αγωγή του βρίσκεται από την εξίσωση:

$$W_{MOV} = \frac{1}{2} \cdot (L_{lim} + L_r) \cdot (I_{max})^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{dc}}{V_{MOV} - V_{dc}}\right) \approx 1.8 \text{ MJ} \quad (5.6)$$

Στη παραπάνω εξίσωση θεωρήθηκε τάση προστασίας ίση με μιάμιση φορά την τάση του συστήματος, δηλαδή 22.5 kV. Η εξίσωση αυτή ισχύει για συστήματα με ισχυρή πηγή, όπου η τάση της δεν επηρεάζεται από το σφάλμα. Στην περίπτωση ενός μετατροπέα, η τάση της χωρητικότητας εξόδου μειώνεται κατά το σφάλμα με αποτέλεσμα την μείωση της απαραίτητης ενέργειας απορρόφησης. Επομένως η χρήση της εξίσωσης, όπως θα φανεί και στις προσομοιώσεις, οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση του MOV.

Με βάση την ενέργεια αυτή καθώς και την ικανότητα απόρροφησης ενέργειας ανά δίσκο προκύπτει ο απαιτούμενος αριθμός παράλληλων κλάδων ο οποίος ισούται με 22. Ο κάθε κλάδος αποτελείται από βαρίστορ συνδεδεμένα σε σειρά, τόσα σε αριθμό ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις σε τάση προστασίας και τάση κανονικής λειτουργίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο διαρρέεται από το ρεύμα διαρροής 1 mA σε τάση 2.2 kV ενώ παρέχει τάση προστασίας 3.34 kV όταν διαρρέεται από ρεύμα 1kA. Δεδομένου ότι είναι επιθυμητό στην τάση του συστήματος το MOV να διαρρέεται από το ρεύμα διαρροής, καθώς και ότι για το μέγιστο ρεύμα σφάλματος η τάση προστασίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 22.5 kV, ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων δίσκων ανά κλάδο προκύπτει ίσος με 7. Επομένως συνολικά χρειάζονται 154 δίσκοι βαρίστορ σε διάταξη 22x7. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται η χαρακτηριστική του συγκεκριμένου δίσκου.



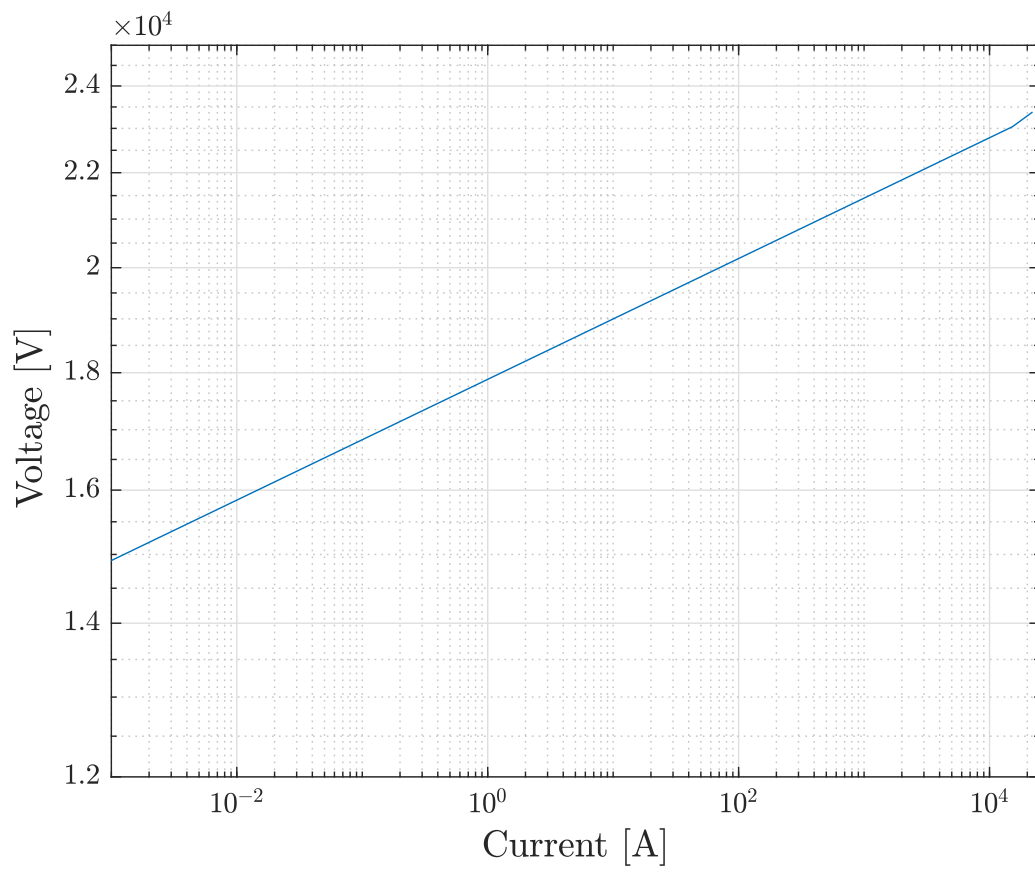
Σχήμα 5.7: Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος του δίσκου V1360D60

Με βάση αυτά προκύπτει μετά από δοκιμές η επιλογή των παραμέτρων του μπλοκ Surge Arrester η οποία φαίνεται στον πίνακα 3.

Παράμετρος	Τιμή
Protection Voltage (V_{ref})	23.38 kV
Number of columns (n)	22
Reference current per column (I_{ref})	1 kA
$k_1 - k_3$	[0.995 1 0.9915]
$\alpha_1 - \alpha_3$	[38 25 16.5]

Πίνακας 3: Επιλογή των παραμέτρων του μπλοκ Surge Arrester

Στο σχήμα 5.8 φαίνεται η συνολική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της συστοιχίας των βαρίστορ σε λογαριθμική κλίμακα. Σύμφωνα με την χαρακτηριστική, για το μέγιστο ρεύμα διακοπής το MOV επιβάλλει τάση προστασίας 23.38 kV. Η τιμή αυτή είναι αρκετά κοντά στην αρχική τιμή σχεδίασης των 22.5 kV.



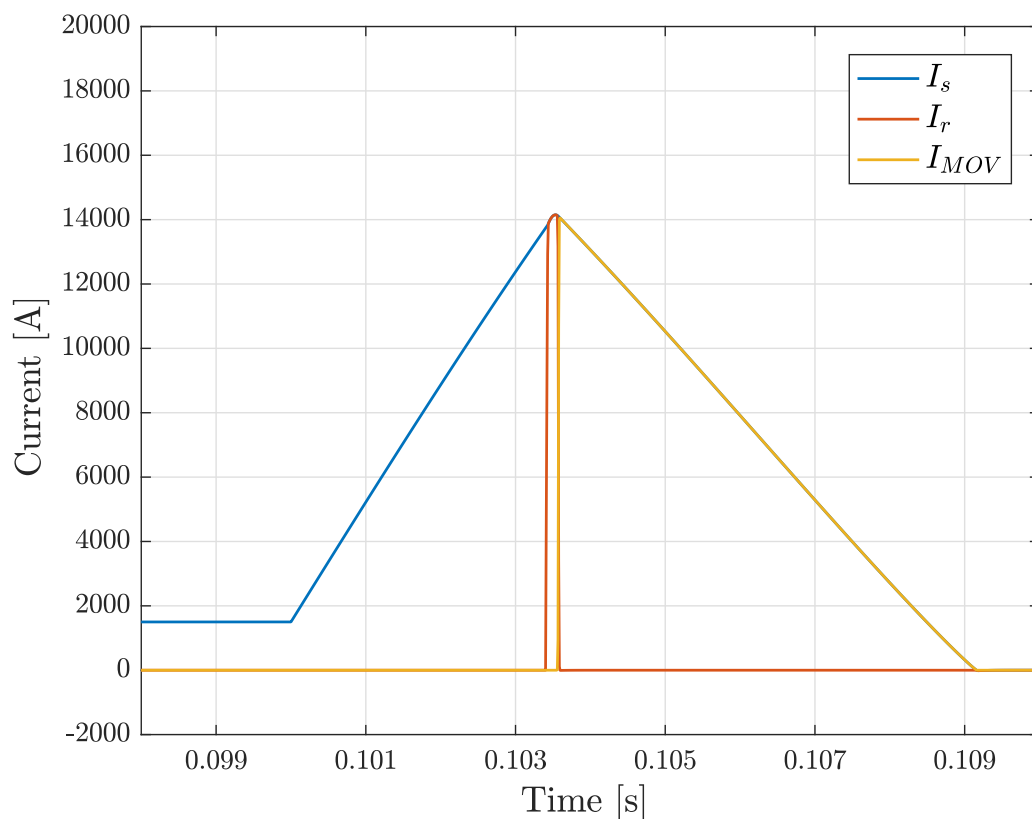
Σχήμα 5.8: Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος συστοιχίας βαρίστορ

5.2.3 Σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα

Την στιγμή $t=0.1$ s προσομοιώνεται ένα σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα η κυματομορφή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.3. Στον πίνακα 4 φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος ενώ στο σχήμα 5.9 φαίνεται η κυματομορφή των ρευμάτων.

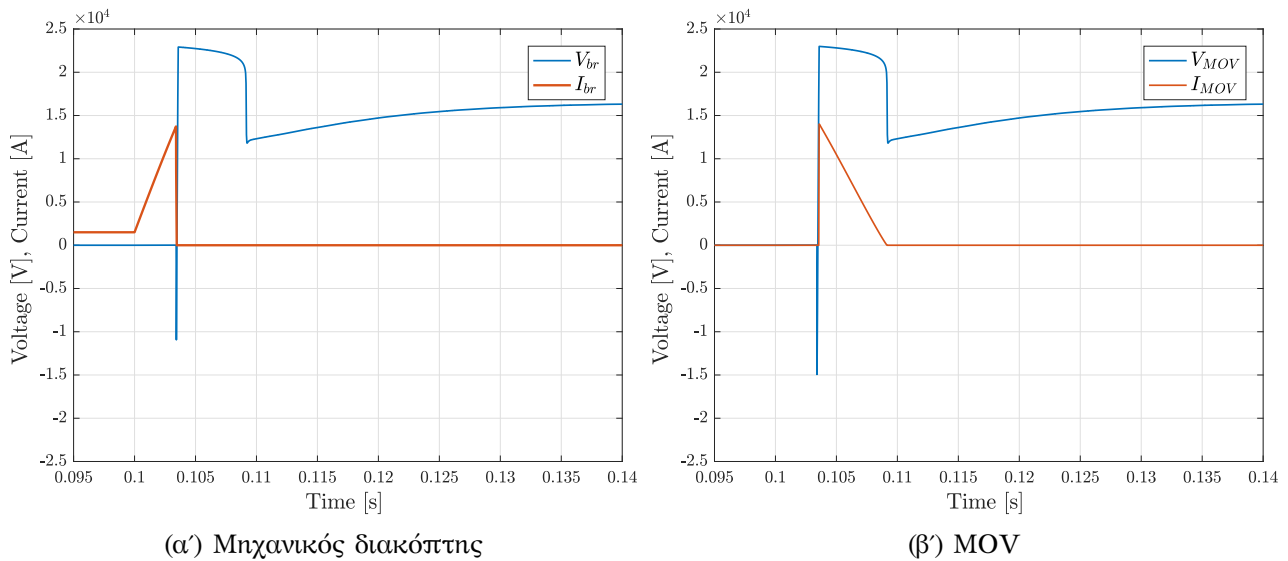
Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστο ρεύμα σφάλματος	14.17 kA
Μέγιστο ρεύμα μηχανικού διακόπτη	13.84 kA
Χρόνος μέχρι την έναρξη της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού	3.4 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη	3.44 ms
Χρόνος μέχρι την μεταγωγή του ρεύματος στο MOV	3.6 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος συστήματος	9.16 ms
Ενέργεια που απορρόφηθηκε από το MOV	884.8 kJ

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος



Σχήμα 5.9: Ρεύμα συστήματος (I_s), ρεύμα κλάδου συντονισμού (I_r) και ρεύμα MOV για σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα

Στο σχήμα 5.10 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του MOV.



Σχήμα 5.10: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του MOV

Όπως φαίνεται με το άνοιγμα του μηχανικού διακόπτη η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του είναι ίση με την τάση που έχει απομείνει φορτισμένος ο πυκνωτής. Η τάση αυτή μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση :

$$V_{br}(t_4) = V_{ch} \cdot \cos(\arcsin(\frac{I_{br_{max}}}{I_{max}})) = 11.07 \text{ kV} \quad (5.7)$$

Παρατηρείται ότι αν και το ρεύμα διακοπής ισούται περίπου με 2/3 του μέγιστο ρεύματος διακοπής του διακόπτη ισχύος η τάση που απομένει στον πυκνωτή ξεπερνάει τα 2/3 της αρχικής, επιβάλλοντας αυξημένη φόρτιση στον μηχανικό διακόπτη. Επίσης παρατηρείται ότι λόγω της μη ελεγχόμενης ανόρθωσης μετά την απορρόφηση ενέργειας από το MOV η τάση του μηχανικού διακόπτη και κατ'επέκταση και του MOV μειώνεται στην τάση που είναι φορτισμένη η χωρητικότητα εξόδου του ανορθωτή. Η τάση αυτή αυξάνεται όσο ο πυκνωτής φορτίζεται από το δίκτυο ΕΡ και ξεπερνάει την ονομαστική τιμή του συστήματος ΣΡ λόγω της έλλειψης φορτίου.

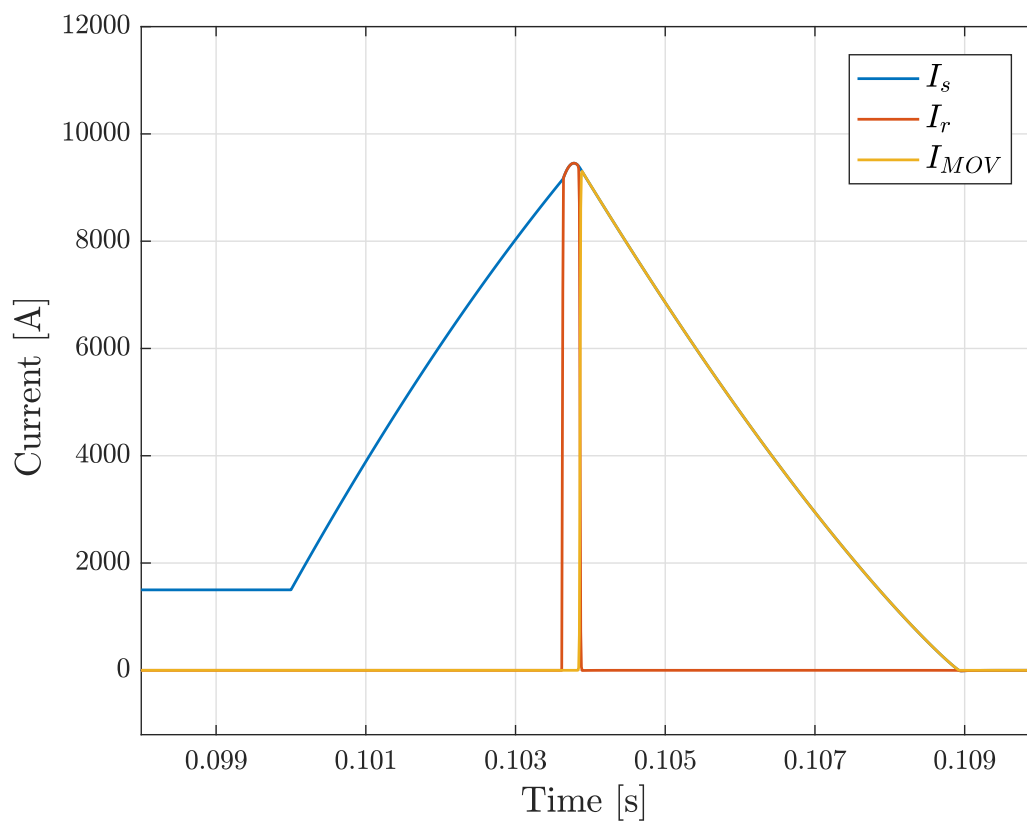
5.2.4 Σφάλμα κοντά στο φορτίο

Την στιγμή $t=0.1$ s προσομοιώνεται ένα σφάλμα κοντά στο φορτίο, η κυματομορφή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.4.

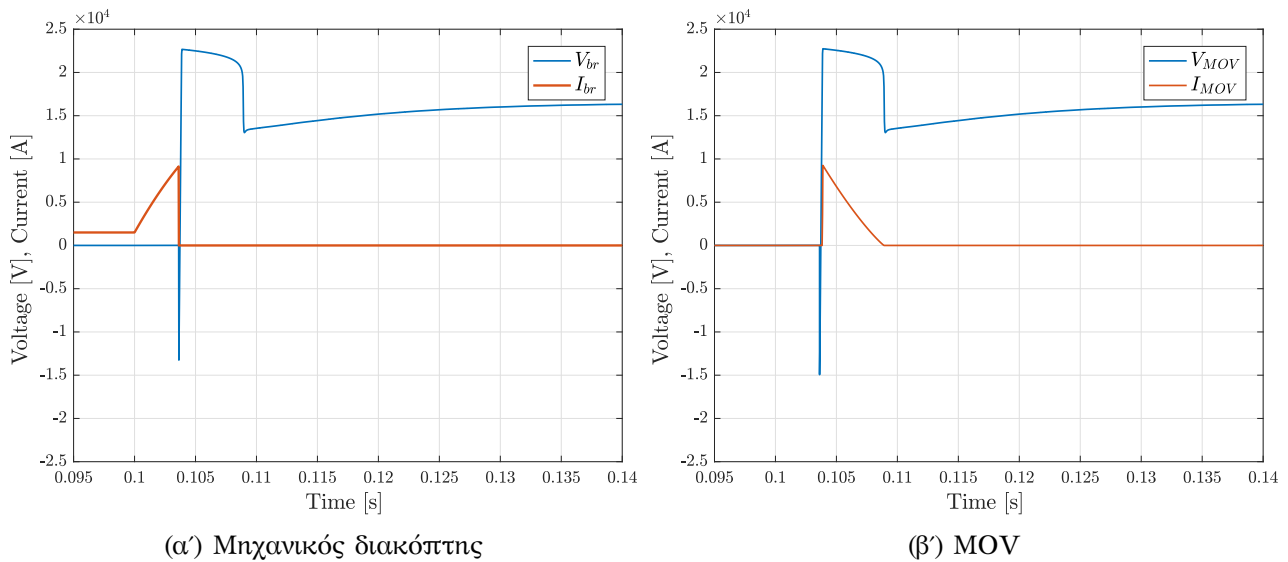
Στον πίνακα 5 φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος ενώ στο σχήμα 5.11 φαίνονται οι κυματομορφές των ρευμάτων.

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστο ρεύμα σφάλματος	9.47 kA
Μέγιστο ρεύμα μηχανικού διακόπτη	9.17 kA
Χρόνος μέχρι την έναρξη της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού	3.62 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη	3.64 ms
Χρόνος μέχρι την μεταγωγή του ρεύματος στο MOV	3.89 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος συστήματος	8.93 ms
Ενέργεια που απορροφήθηκε από το MOV	483.8 kJ

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος



Σχήμα 5.11: Ρεύμα συστήματος (I_s), ρεύμα κλάδου συντονισμού (I_r) και ρεύμα MOV για σφάλμα κοντά στο φορτίο



Σχήμα 5.12: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του MOV

Παρατηρείται ότι επειδή το μέγιστο ρεύμα του μηχανικού διακόπτη είναι μικρότερο από την περίπτωση σφάλματος στην έξοδο του μετατροπέα, η εναπομείνουσα τάση στον πυκνωτή και επομένως η τάση που εφαρμόζεται στον μηχανικό διακόπτη μετά την σβέση του τόξου είναι μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα ισούται με:

$$V_{br}(t_4) = V_{ch} \cdot \cos(\arcsin(\frac{I_{br_{max}}}{I_{max}})) = 13.56 \text{ kV} \quad (5.8)$$

Φαίνεται από την θεωρητική ανάλυση και τις προσομοιώσεις ότι η φόρτιση του μηχανικού διακόπτη, όπως είναι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος κατά τον μηδενισμό και η τάση που επιβάλλεται μετά την σβέση του τόξου, αυξάνεται όσο μειώνεται το ρεύμα που πρέπει να διακοπεί.

5.3 Διακόπτης ισχύος με κύκλωμα συντονισμού που διεγείρεται απο αντιστροφέα δύο επιπέδων

5.3.1 Σχεδίαση

Η σχεδίαση του διακόπτη ισχύος γίνεται με βάση την ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά επιλέγεται η τάση της χωρητικότητας του αντιστροφέα, ίση με 900 V. Η επιλογή αυτή γίνεται μετά από έρευνα στα εμπορικά διαθέσιμα ημιαγωγικά στοιχεία και με κριτήριο να μην υπάρχει ανάγκη σύνδεσης ημιαγωγών σε σειρά. Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο, η αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού επιλέγεται λίγο μικρότερη από το πηλίκο που ορίζει η τάση προστασίας του MOV και η μέγιστη ικανότητα διακοπής. Επειδή η ενέργεια απορρόφησης του MOV εξαρτάται κυρίως από την επαγωγή περιορισμού του ρεύματος χρησιμοποιείται το ίδιο με την προηγούμενη διάταξη. Επομένως το πηλίκο αυτό ισούται με:

$$Z_0 < \frac{V_{MOV}}{I_{max}} = \frac{23.38 \cdot 10^3}{21 \cdot 10^3} = 1.11 \Omega \quad (5.9)$$

Με βάση αυτό η αντίσταση του κυκλώματος συντονισμού Z_0 επιλέγεται ίση με 1 Ω. Χρησιμοποιείται το ίδιο MOV που χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση του προηγούμενου διακόπτη καθώς οι απαιτήσεις σε ρεύμα και τάση παραμένουν ίδιες, ενώ η απαίτηση για απορρόφηση ενέργειας εξαρτάται κυρίως από την επαγωγή περιορισμού ρεύματος η οποία είναι 2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από το πηνίο του κυκλώματος συντονισμού.

Η συχνότητα του κυκλώματος συντονισμού επιλέγεται με βάση την εξίσωση:

$$\omega_0 \leq \frac{S_{max}}{I_{max} \cdot \cos(\arcsin(\frac{I_{max} - \frac{4V_{DC}}{Z_0}}{I_{max}}))} \quad (5.10)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει:

$$\omega_0 = 42526 \text{ rad/s } \acute{\eta} \text{ } f_0 = 6.768 \text{ kHz} \quad (5.11)$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 6.

Παράμετρος	Τιμή
Πυκνωτής συντονισμού (C_r)	23.53 μF
Πηνίο συντονισμού (L_r)	23.53 μH
Τάση φόρτισης χωρητικότητας αντιστροφέα ($U_{C_{DC}}$)	900 V

Πίνακας 6: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού

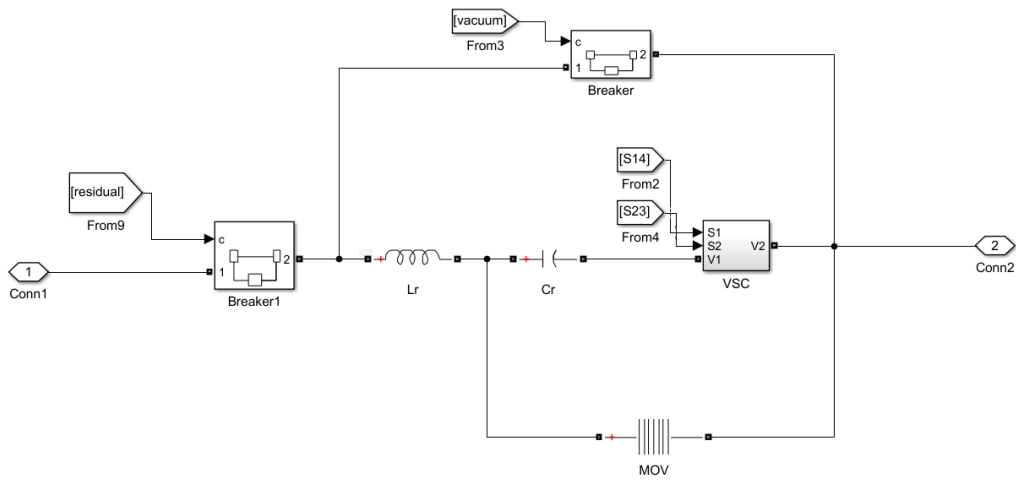
Η ελάχιστη τιμή της χωρητικότητας προκύπτει ώστε η αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο συντονισμού όταν διαρρέεται από το μέγιστο ρεύμα διακοπής. Συγκεκριμένα:

$$\frac{1}{2} C_{DC,min} \cdot (U_{C_{DC}})^2 = \frac{1}{2} L_r \cdot I_{max}^2 \quad (5.12)$$

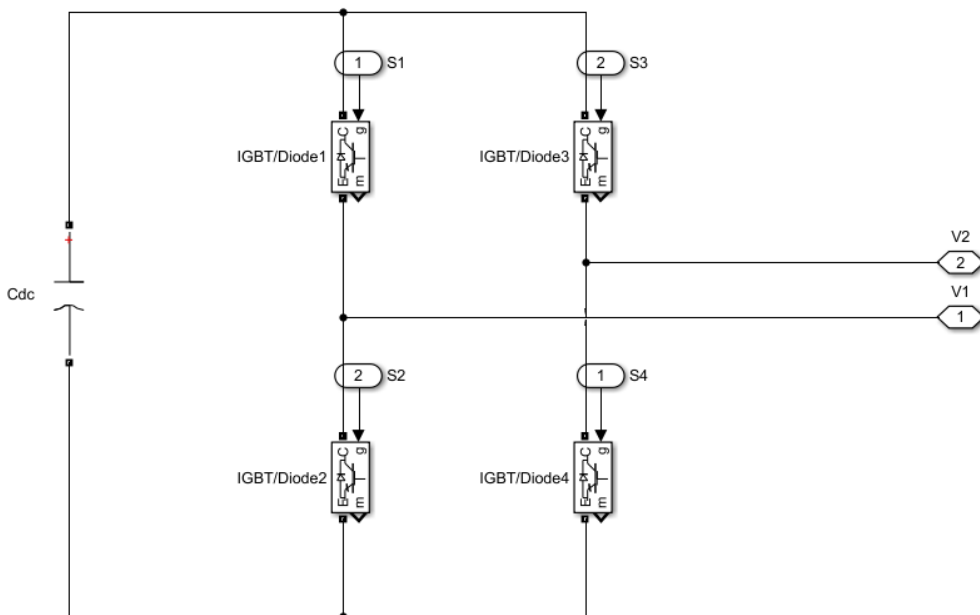
Από την παραπάνω εξίσωση η ελάχιστη τιμή της χωρητικότητας ισούται με 12.8 mF. Η χωρητικότητα επιλέγεται διπλάσια της ελάχιστης, καθώς στην παραπάνω εξίσωση δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες στον αντιστροφέα και στο κύκλωμα συντονισμού που παρατηρούνται σε ένα ρεαλιστικό σύστημα. Επομένως η τιμή της χωρητικότητας εισόδου του αντιστροφέα $U_{C_{DC}}$ προκύπτει ίση με 25.6 mF.

5.3.2 Μοντελοποίηση

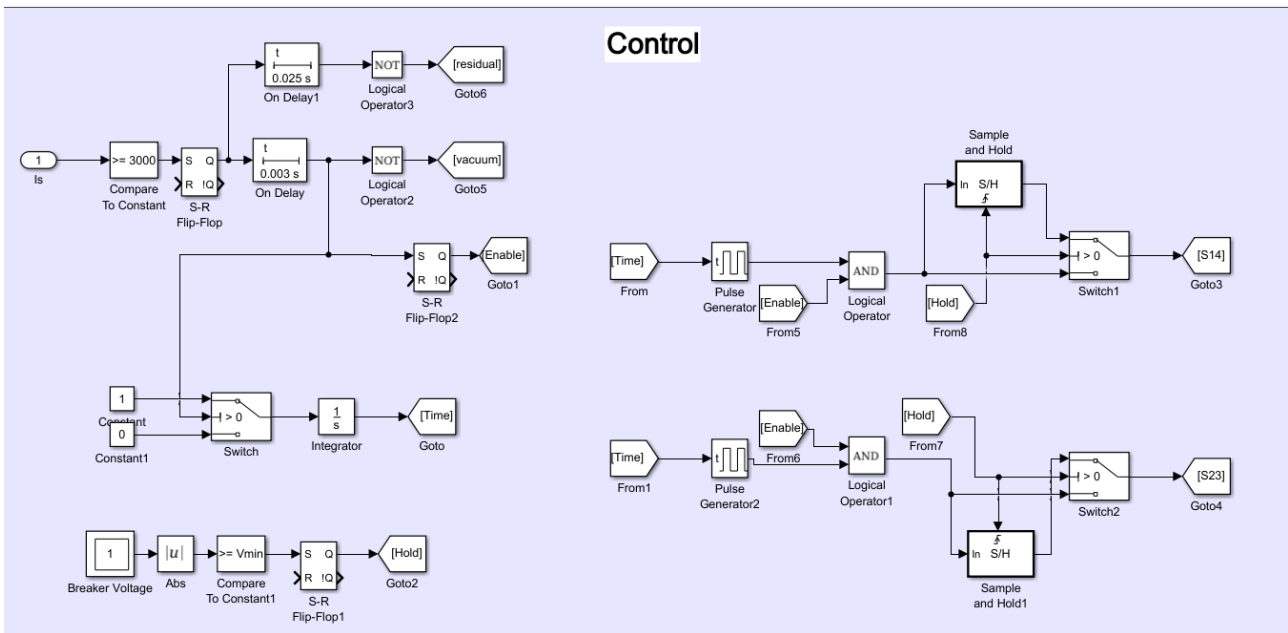
Στα σχήματα 5.13, 5.14 και 5.15 φαίνεται η υλοποίηση του διακόπτη ισχύος στο Simulink.



Σχήμα 5.13: Υλοποίηση του διακόπτη ισχύος στο Simulink



Σχήμα 5.14: Υλοποίηση του αντιστροφέα δύο επιπέδων του διακόπτη ισχύος στο Simulink



Σχίμα 5.15: Υλοποίηση του ελέγχου του διακόπτη ισχύος στο Simulink

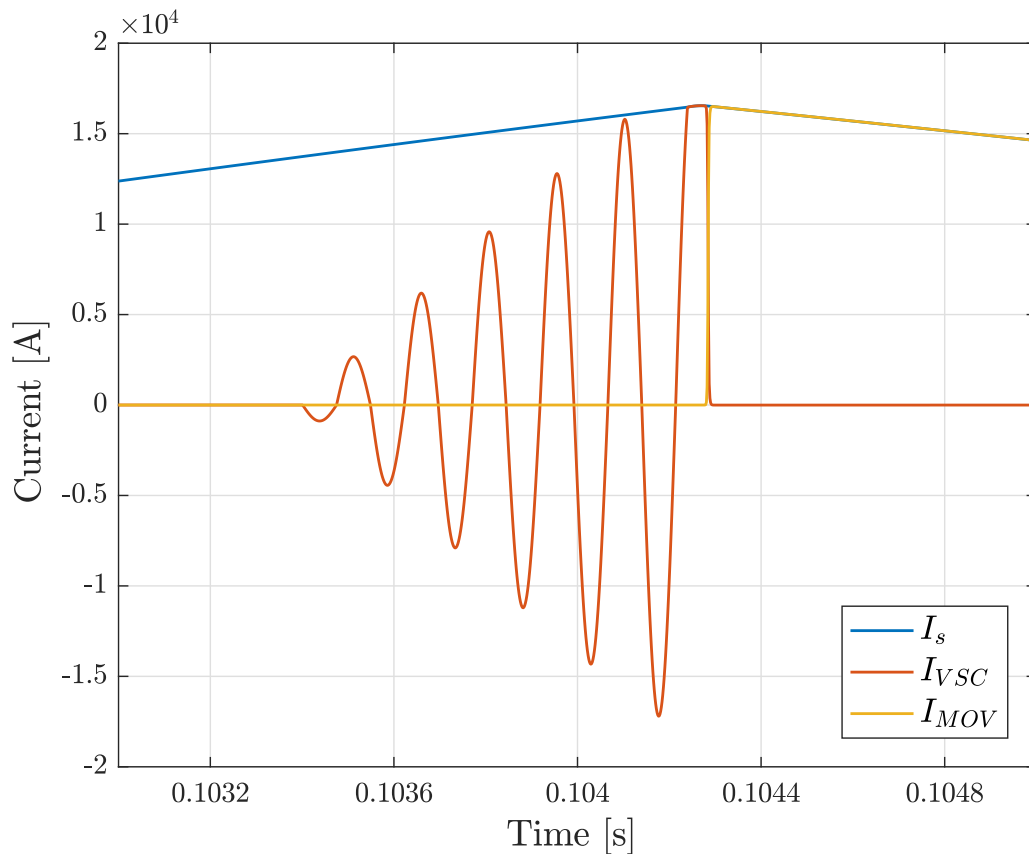
Ο έλεγχος του διακόπτη ισχύος γίνεται με τον εξής τρόπο: με τον εντοπισμό του σφάλματος δίνεται εντολή στον διακόπτη κενού να ανοίξει, ο οποίος εισάγει μια καθυστέρηση 3 ms, και στον περιφερειακό διακόπτη ο οποίος εισάγει μια καθυστέρηση 25 ms. Μετά τα 3 ms όπου ο διακόπτης έχει αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή ξεκινάει η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού απο τον αντιστροφέα, με την μεταβλητή Enable. Ο έλεγχος του μετατροπέα γίνεται με δύο γεννήτριες τετραγωνικών παλμών η συχνότητα των οποίων ισούται με την συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος συντονισμού. Οι παλμοί των δύο γεννητριών διαφέρουν κατά 180 μοίρες. Η διακοπή της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού, όταν το τόξο στον μηχανικό διακόπτη σβήσει, γίνεται με την μεταβλητή Hold. Η μεταβλητή Hold ελέγχεται με την τάση του μηχανικού διακόπτη, η οποία αυξάνεται απότομα όταν σβήσει το ηλεκτρικό τόξο. Όταν η μεταβλητή Hold πάρει την λογική τιμή 1 οι παλμοί ελέγχου του αντιστροφέα διατηρούν την τιμή που είχαν εκείνη την στιγμή και έτσι σταματάει η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού.

5.3.3 Σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα

Την στιγμή $t=0.1$ s προσομοιώνεται ένα σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα η κυματομορφή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.3. Στον πίνακα 7 φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος ενώ στα σχήματα 5.16 και 5.19 φαίνονται οι κυματομορφές των ρεύματων.

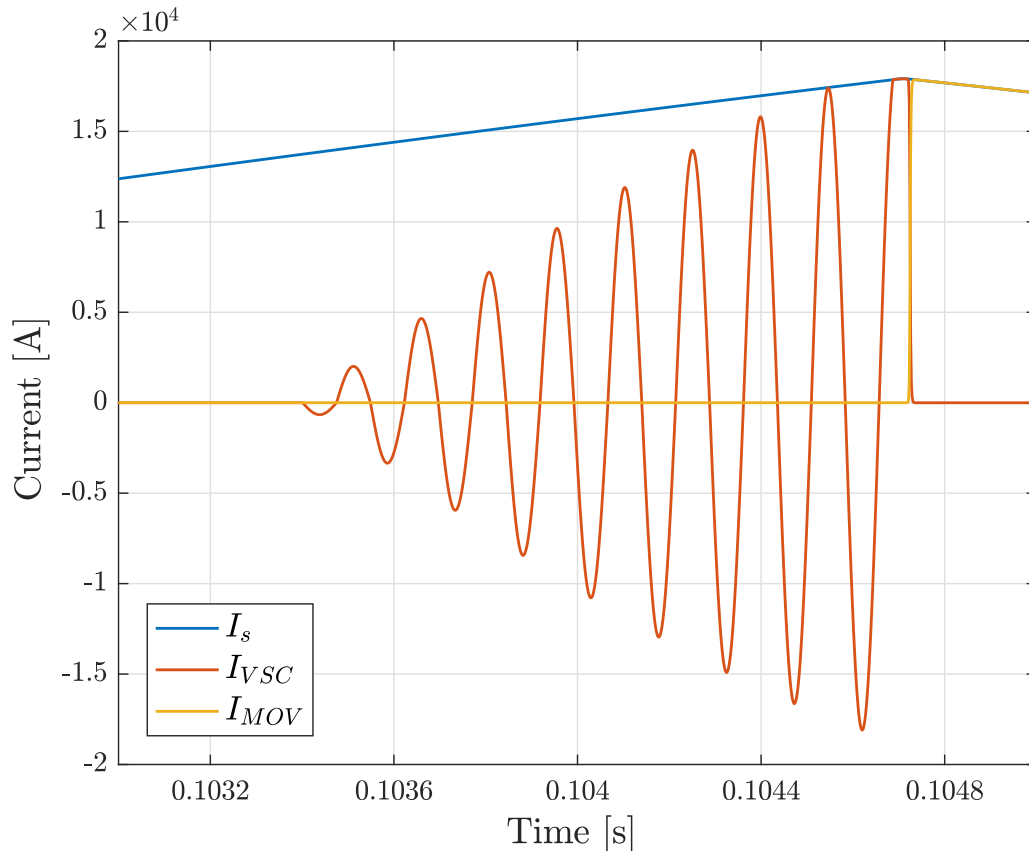
Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστο ρεύμα σφάλματος	16.45 kA
Χρόνος μέχρι την έναρξη της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού	3.4 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη	4.24 ms
Χρόνος μέχρι την μεταγωγή του ρεύματος στο MOV	4.29 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος συστήματος	10.17 ms
Ενέργεια που απορρόφηθηκε από το MOV	1099.2 kJ

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος



Σχήμα 5.16: Ρεύμα συστήματος (I_s) και ρεύμα μετατροπέα (I_{VSC}) για σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα

Η τάση της χωρητικότητας μετά την λειτουργία του διακόπτη ισχύος ισούται με 678 V. Η τάση αυτή είναι επαρκής για την λειτουργία του διακόπτη ξανά χωρίς την ανάγκη φόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.17 όπου προσομοιώνεται ένα σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα με αρχική τάση της χωρητικότητας του αντιστροφέα ίση με 678 V.



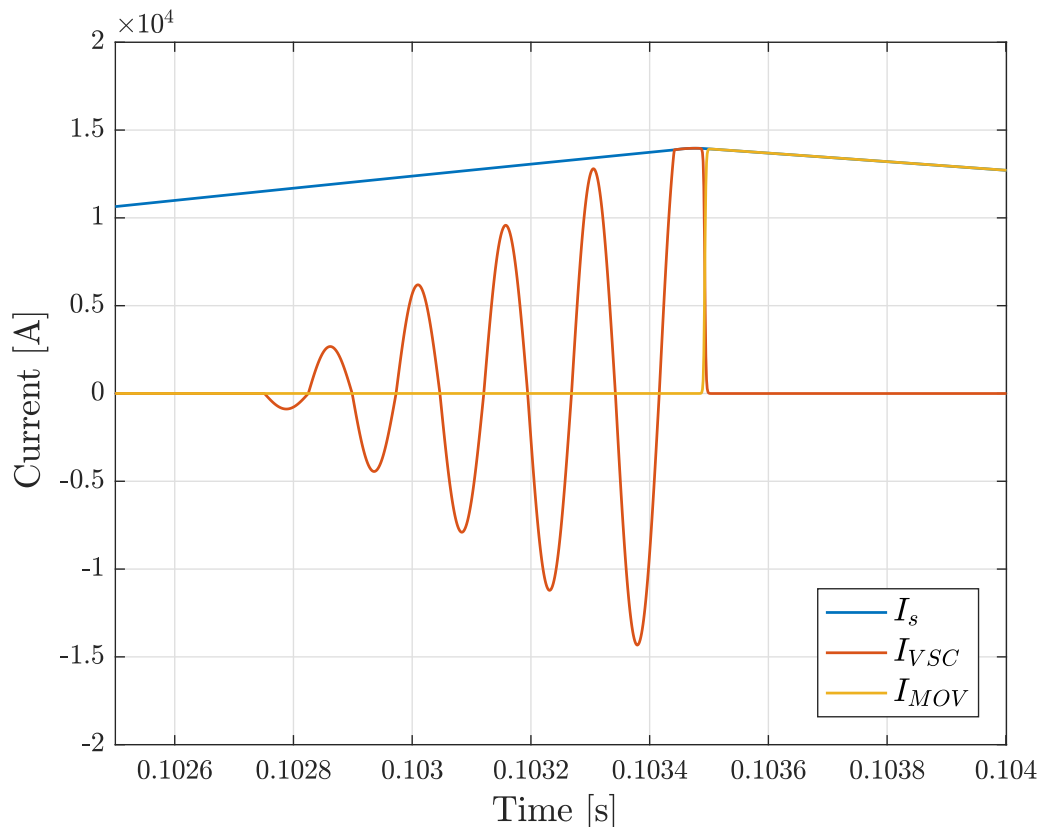
Σχήμα 5.17: Ρεύμα συστήματος (I_s) και ρεύμα μετατροπέα (I_{VSC}) για λειτουργία του διακόπτη δίχως προηγούμενη φόρτιση

Παρατηρείται ότι λόγω της μικρότερης τάσης της χωρητικότητας του αντιστροφέα απαιτούνται περισσότερες αντιστροφές για την δημιουργία του απαιτούμενου ρεύματος, κάτι που έχει ως συνέπεια την αύξηση του χρόνου απόκρισης καθώς και του μέγιστου ρεύματος σφάλματος. Η τάση της χωρητικότητας μετά την παραπάνω λειτουργία ισούται με 207 V, οπότε για επαναλειτουργία απαιτείται η φόρτιση της.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16, η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού διαρκεί λιγότερο από ένα ms. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μικρότερος από τον χρόνο που χρειάζεται ο μηχανικός διακόπτης να αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή. Για την βελτίωση της απόκρισης της διάταξης, το σύστημα ελέγχου μπορεί να εμπλουτιστεί με ένα σύστημα το οποίο με βάση το ρεύμα σφάλματος και τον ρυθμό αύξησής του να ξεκινάει την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού πριν τα 3 ms. Ο σκοπός είναι η διέγερση να ξεκινάει την κατάλληλη στιγμή, ώστε το ρεύμα στον μηχανικό διακόπτη να μηδενίζεται το συντομότερο δυνατό μετά την στιγμή απόκτησης της απαραίτητης ηλεκτροστατικής αντοχής. Για παράδειγμα αν το σύστημα ελέγχου ξεκινήσει την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού 650 μ s πριν αποκτήσει ο μηχανικός διακόπτης την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή προκύπτουν τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 8 και η κυματομορφή των ρεύματων που φαίνεται στο σχήμα 5.18.

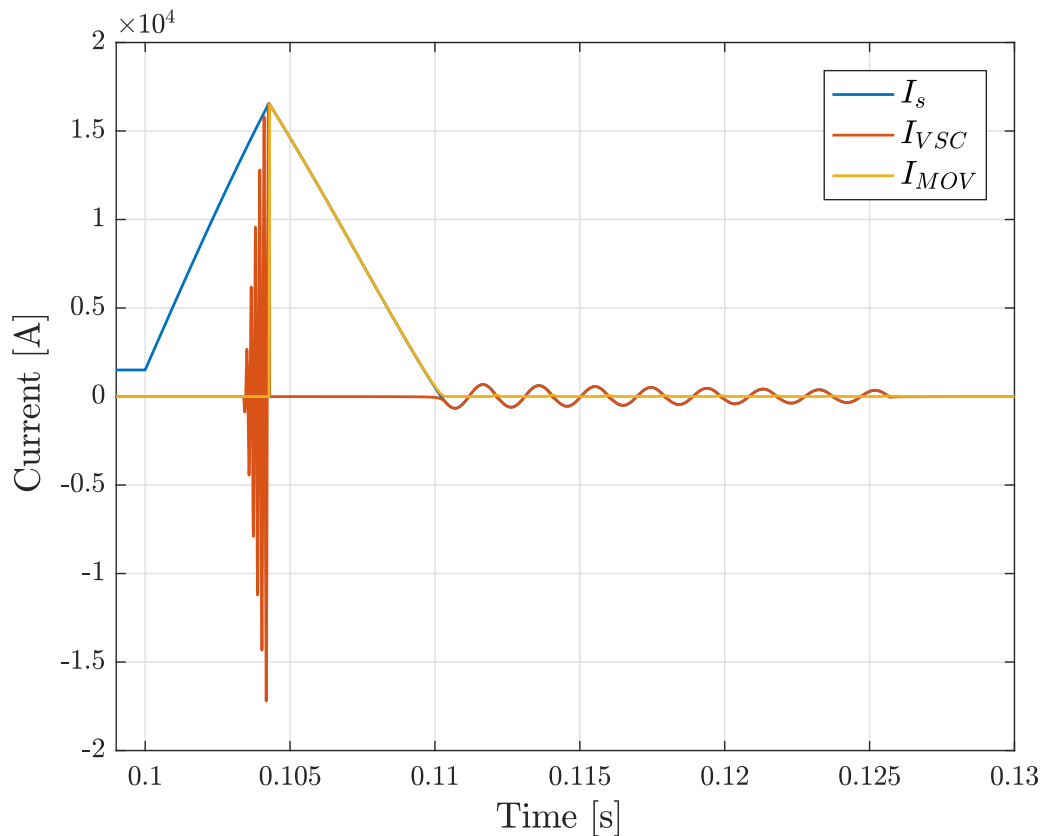
Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστο ρεύμα σφάλματος	13.97 kA
Χρόνος μέχρι την έναρξη της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού	2.75 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη	3.44 ms
Χρόνος μέχρι την μεταγωγή του ρεύματος στο MOV	3.48 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος συστήματος	9.05 ms
Ενέργεια που απορρόφηθηκε από το MOV	872.3 kJ

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος για νωρίτερη διέγερση του κυκλώματος συντονισμού

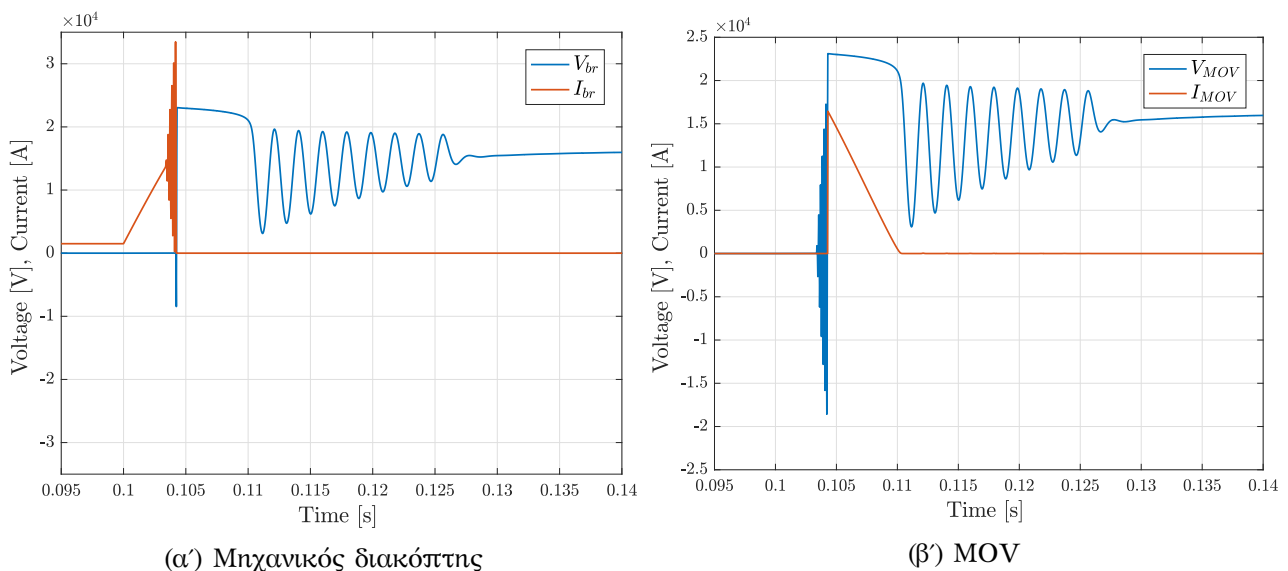


Σχήμα 5.18: Ρεύμα συστήματος (I_s) και ρεύμα μετατροπέα (I_{VSC}) για νωρίτερη διέγερση του κυκλώματος συντονισμού

Μετά την απορρόφηση της ενέργειας από το MOV και το μηδενισμό του ρεύματος του συστήματος παρατηρείται μια ταλάντωση ρεύματος μεταξύ της πηγής και του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού. Ο λόγος ύπαρξης της ταλάντωσης αυτής είναι η διαφορά τάσης μεταξύ του πυκνωτή συντονισμού ο οποίος είναι φορτισμένος στην τάση προστασίας του MOV και της χωρητικότητας εξόδου του ανορθωτή. Το ρεύμα ρέει μέσω του αγωγισμού 'μονοπατιού' των αντιπαράλληλων διόδων του αντιστροφέα. Η ταλάντωση αυτή σταματάει με το άνοιγμα του περιφερειακού διακόπτη όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19. Τα επόμενα σχήματα έχουν προκύψει για διέγερση του κυκλώματος συντονισμού μετά την απόκτηση της ηλεκτροστατικής αντοχής από τον μηχανικό διακόπτη, αποτελούν δηλαδή συνέχεια του σχήματος 5.16.



Σχήμα 5.19: Ρεύμα συστήματος (I_s) και ρεύμα μετατροπέα (I_{VSC}) για σφάλμα στην έξοδο του μετατροπέα



Σχήμα 5.20: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του MOV

Στο σχήμα 5.20 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του MOV. Παρατηρείται η ταλάντωση του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη πριν τον μηδενισμό του λόγω της μορφής του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Μετά την σβέση του τόξου η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του μηχανικού διακόπτη ισούται με την τάση στην οποία είναι φορτισμένος ο πυκνωτής του κυκλώματος συντονισμού. Η τάση αυτή εξαρτάται από τον μέγεθος του παλμού που μηδενίζει το ρεύμα σε σχέση με το ρεύμα σφάλματος. Σε ιδανική περίπτωση το πλάτος του τελευταίου παλμού ισούται με το ρεύμα σφάλματος και επειδή το

ρεύμα εξόδου του μετατροπέα και η τάση του πυκνωτή συντονισμού έχουν διαφορά φάσης 90 μοιρών η τάση του πυκνωτή κατά την διακοπή ισούται με μηδέν. Αντίστοιχα, η χειρότερη περίπτωση προκύπτει όταν το πλάτος του προηγούμενου παλμού είναι πολύ κοντά στο ρεύμα σφάλματος και η σβέση του τόξου προκύπτει από τον επόμενο. Με βάση το σχήμα 5.16 εδώ έχουμε την χειρότερη περίπτωση. Η τάση που προκύπτει είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερη από την προηγούμενη διάταξη.

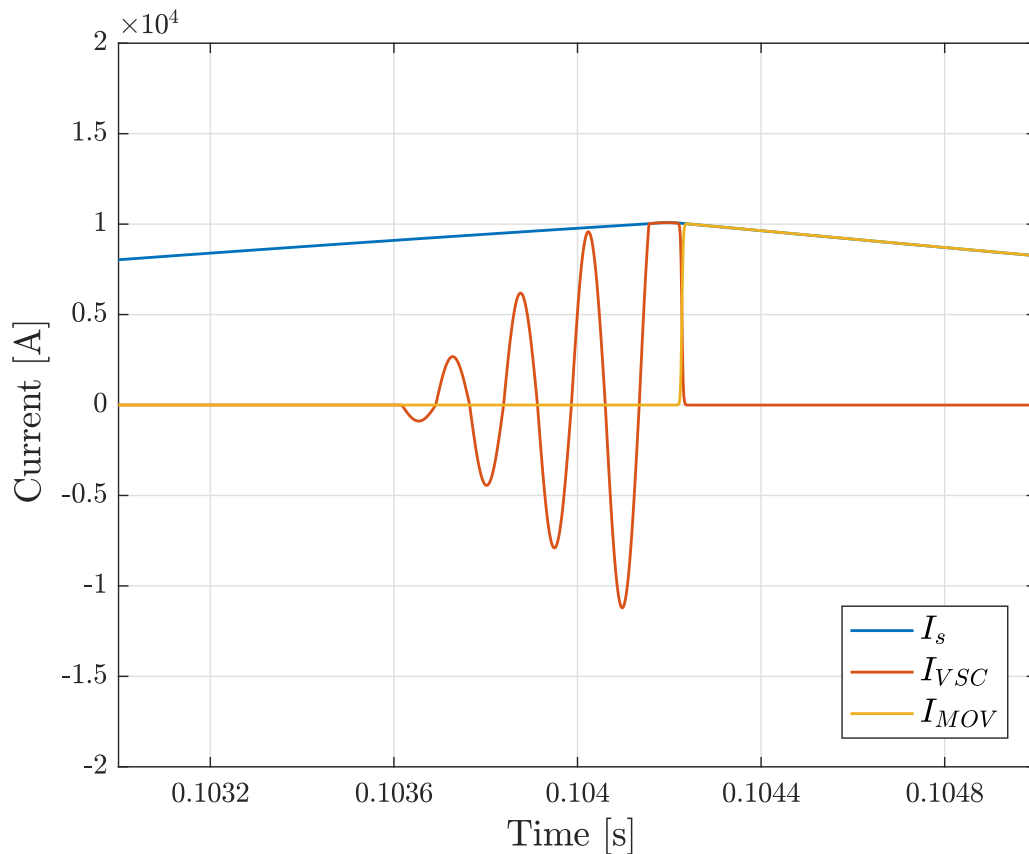
Τέλος, παρατηρείται και η ταλάντωση της τάσης του μηχανικού διακόπτη και του MOV οι οποίες είναι αποτέλεσμα της ταλάντωσης του ρεύματος του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού μετά την απορρόφηση ενέργειας από το MOV. Μετά το άνοιγμα του περιφερειακού διακόπτη, η τάση του μηχανικού διακόπτη και κατ'επέκταση και του MOV ισούται με την τάση του συστήματος, δηλαδή της χωρητικότητας εξόδου του ανορθωτή. Η τάση αυτή αυξάνεται λόγω της τροφοδότησης από την πλευρά ΕΡ και της έλλειψης φορτίου.

5.3.4 Σφάλμα κοντά στο φορτίο

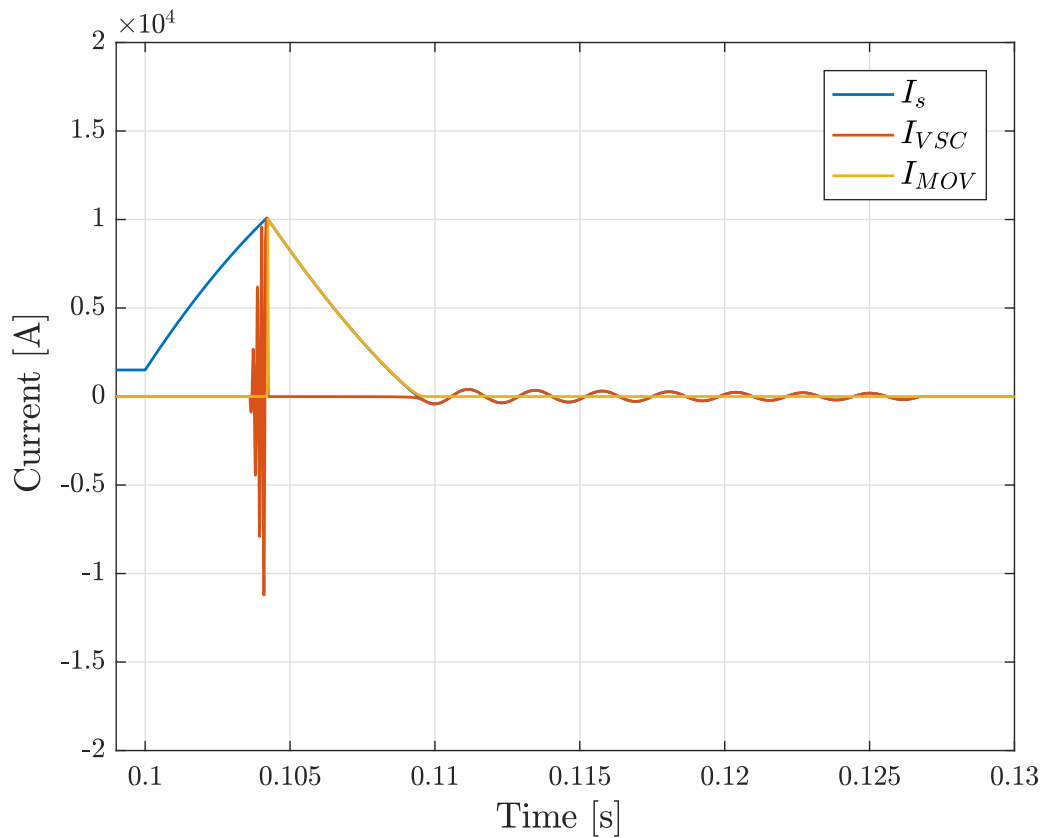
Την στιγμή $t=0.1$ s προσομοιώνεται ένα σφάλμα κοντά στο φορτίο, η κυματομορφή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.4. Στον πίνακα 9 φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος. Στα σχήματα 5.21, 5.22 και 5.23 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος των στοιχείων της διάταξης.

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστο ρεύμα σφάλματος	10.05 kA
Χρόνος μέχρι την έναρξη της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού	3.62 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος στον μηχανικό διακόπτη	4.16 ms
Χρόνος μέχρι την μεταγωγή του ρεύματος στο MOV	4.24 ms
Χρόνος μέχρι τον μηδενισμό του ρεύματος συστήματος	9.41 ms
Ενέργεια που απορροφήθηκε από το MOV	531.8 kJ

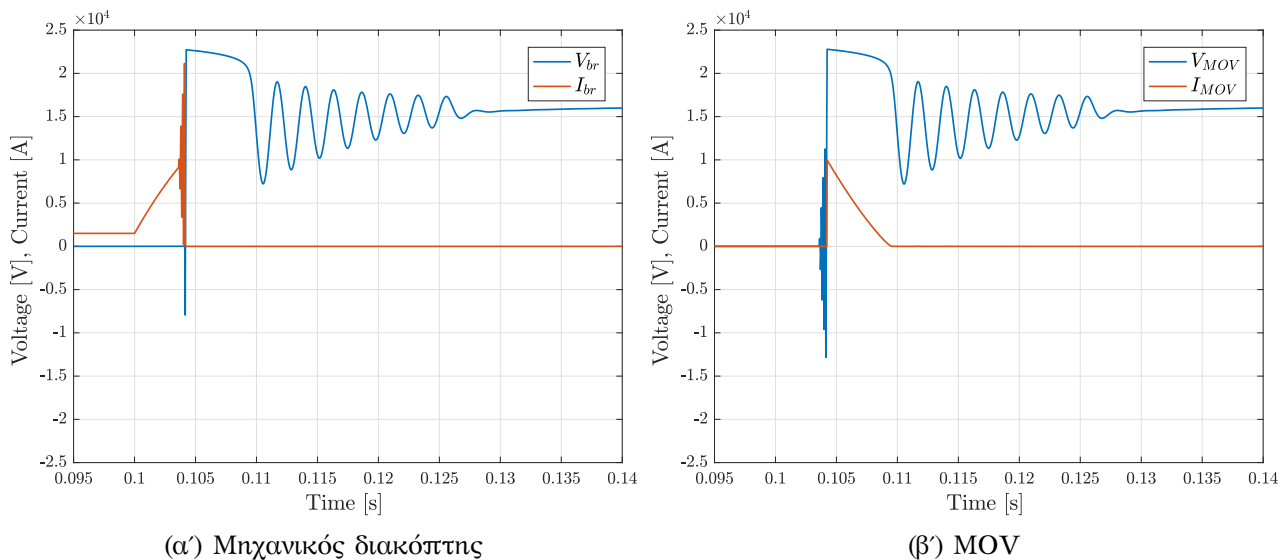
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης του διακόπτη ισχύος



Σχήμα 5.21: Ρεύμα συστήματος (I_s), ρεύμα μετατροπέα (I_{VSC}) και ρεύμα MOV για σφάλμα κοντά στο φορτίο



Σχήμα 5.22: Ρεύμα συστήματος (I_s), ρεύμα μετατροπέα (I_{VSC}) και ρεύμα MOV για σφάλμα κοντά στο φορτίο



(α) Μηχανικός διακόπτης

(β) MOV

Σχήμα 5.23: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μηχανικού διακόπτη και του MOV

Όπως φάνηκε από την θεωρητική ανάλυση και τις προσομοιώσεις στην διάταξη αυτή η πιθανή φόρτιση του μηχανικού διακόπτη, όπως ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος κατά τον μηδενισμό και η τάση που επιβάλλεται μετά την σβέση του τόξου, αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος που πρέπει να διακοπεί. Παράλληλα όμως, σε περίπτωση που ο παλμός που μηδενίζει το ρεύμα του μηχανικού διακόπτη έχει πλάτος ίσο με το ρεύμα σφάλματος τα μεγέθη αυτά λαμβάνουν μηδενικές τιμές. Η χειρότερη περίπτωση εμφανίζεται όταν ένας παλμός είναι σχεδόν ίσος με το ρεύμα σφάλματος, και το ρεύμα μηδενίζεται με τον επόμενο παλμό.

5.4 Σύγκριση χαρακτηριστικών

5.4.1 Τιμές των παθητικών στοιχείων της διάταξης

Οι τιμές των παθητικών στοιχείων εξαρτώνται άμεσα από την συχνότητα συντονισμού. Η χρήση μεγαλύτερης συχνότητας συντονισμού στην δεύτερη διάταξη οδηγεί σε μικρότερες τιμές των παθητικών στοιχείων όπως φάνηκε κατά την σχεδίαση. Αν στα παθητικά στοιχεία προστεθεί και η χωρητικότητα του μετατροπέα της δεύτερης διάταξης μια σύγκριση μπορεί να γίνει θεωρώντας ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της ονομαστικής τιμής της ενέργειας μιας χωρητικότητας με την τιμή κόστους της. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει ότι:

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot 58.52 \cdot 10^{-6} \cdot (23380)^2 = 15.994 \text{ kJ} \quad (5.13)$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot 23.53 \cdot 10^{-6} \cdot (23380)^2 + \frac{1}{2} \cdot 25.6 \cdot 10^{-3} \cdot (900)^2 = 16.799 \text{ kJ} \quad (5.14)$$

Παράλληλα το πηνίο συντονισμού της πρώτης διάταξης είναι 2.5 φορές μεγαλύτερο από της δεύτερης διάταξης όπως φαίνεται από τους πίνακες 2 και 6.

Η μείωση των τιμών των παθητικών στοιχείων στην δεύτερη διάταξη γίνεται πιο ξεκάθαρη στην περίπτωση σχεδίασης διακοπών με αμφίδρομη λειτουργία και ίδια ικανότητα διακοπής. Η αμφίδρομη λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ενός ακόμα πυκνωτή συντονισμού, φορτισμένο με αντίθετη φορά, για την πρώτη διάταξη. Αντίθετα η δεύτερη διάταξη έχει την ικανότητα αμφίδρομης λειτουργίας χωρίς καμιά αλλαγή.

5.4.2 Αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια

Η αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια κάθε διάταξης μπορεί να βρεθεί από τις εξισώσεις:

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot 58.52 \cdot 10^{-6} \cdot (15000)^2 = 6583.5 \text{ J} \quad (5.15)$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot 25.6 \cdot 10^{-3} \cdot (900)^2 = 10368 \text{ J} \quad (5.16)$$

Για την δεύτερη διάταξη χρησιμοποιήθηκε διπλάσια χωρητικότητα από την ελάχιστη. Αυτό επέτρεψε, όπως φάνηκε, την λειτουργία δύο συνεχόμενες φορές χωρίς την ανάγκη επαναφόρτισης. Με την χρήση της ελάχιστη απαιτούμενης χωρητικότητας η αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια θα υποδιπλασιαζόταν, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερη από της πρώτης διάταξης.

Παράλληλα με την αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια είναι ανάγκη να σχολιαστεί και ο τρόπος που αυτή χρησιμοποιείται. Στην πρώτη διάταξη ακόμα και για την εκκαθάριση ενός μικρού σφάλματος η χωρητικότητα στο τέλος της λειτουργίας καταλήγει φορτισμένη με αντίθετη πολικότητα στην τάση προστασίας του MOV. Για την επαναλειτουργία της διάταξης, η χωρητικότητα συνήθως εκφορτίζεται σε μια αντίσταση και ύστερα φορτίζεται στην επιθυμητή τάση που ήταν αρχικά φορτισμένη. Ένας άλλος τρόπος για την επαναφορά της τάσης στην αρχική είναι η μερική εκφόρτιση σε μια αντίσταση έως ότου η τάση να γίνει ίση με την αρχική με αντίθετη πολικότητα και ύστερα η χρήση ενός πρόσθετου κυκλώματος συντονισμού για την αντιστροφή της πολικότητας. Αντίθετα στην δεύτερη διάταξη η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι ανάλογη του ρεύματος σφάλματος που πρέπει να αντιμετωπιστεί ενώ όση δεν χρησιμοποιείται παραμένει αποθηκευμένη στην χωρητικότητα του μετατροπέα.

5.4.3 Χρόνος μηδενισμού του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη

Το ρεύμα στον μηχανικό διακόπτη μηδενίζεται πιο γρήγορα στην πρώτη διάταξη αν η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού ξεκινήσει την ίδια στιγμή και για τις δύο διατάξεις. Ο χρόνος αυτός είναι ο σημαντικότερος αφού επηρεάζει μια σειρά από άλλα μεγέθη. Για παράδειγμα, όταν αυξάνεται ο χρόνος αυτός αυξάνεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος με αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο χρόνος απορρόφησης ενέργειας καθώς και η ενέργεια που πρέπει να απορροφηθεί από το MOV. Αυτό γίνεται εμφανές παρατηρώντας τους πίνακες 4 και 7. Οι τιμές αυτές

προέκυψαν θεωρώντας ότι η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού ξεκινάει την ίδια στιγμή και για τις δύο διατάξεις. Με την υιοθέτηση ενός συστήματος ελέγχου για την δεύτερη διάταξη που ξεκινάει την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού πριν την απόκτηση της απαραίτητης ηλεκτροστατικής αντοχής από τον μηχανικό διακόπτη ο χρόνος μηδενισμού του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη γίνεται πρακτικά ίσος για τις δύο διατάξεις.

5.4.4 Χρόνος μεταγωγής του ρεύματος στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας

Η μεταγωγή του ρεύματος στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας συμβαίνει μετά την φόρτιση του πυκνωτή συντονισμού στην τάση προστασίας του βαριστορ. Όπως φαίνεται και από τους πίνακες 4,7 και 8 ο χρόνος αυτός είναι μικρότερος για την δεύτερη διάταξη. Η φόρτιση του πυκνωτή στην τάση προστασίας του βαριστορ περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{C_r} \cdot \int_{t_4}^{t_5} i_{C_r}(t) dt = V_{MOV} - V_{C_r}(t_4) \quad (5.17)$$

Στην παραπάνω εξίσωση t_4 θεωρείται η στιγμή που σβήνει το τόξο στον μηχανικό διακόπτη, ενώ t_5 η στιγμή της μεταγωγής του ρεύματος στο MOV. Η δεύτερη διάταξη υπερτερεί σε αυτό το στάδιο λόγω των εξής παραγόντων:

- Η χρήση μεγαλύτερης συχνότητας συντονισμού οδηγεί σε μικρότερες τιμές των στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού, και επομένως σε μικρότερη χωρητικότητα του πυκνωτή συντονισμού.
- Την στιγμή που μηδενίζεται το ρεύμα στον μηχανικό διακόπτη και το τόξο σβήνει, η τάση του πυκνωτή του κυκλώματος συντονισμού είναι μικρότερη για την δεύτερη διάταξη.

5.4.5 Χρόνος μηδενισμού του ρεύματος σφάλματος και ενέργεια απορρόφησης από το MOV

Η εξίσωση που περιγράφει την μείωση του ρεύματος σύστηματος στο στο επίπεδο του ρεύματος διαρροής του MOV είναι:

$$t_6 - t_5 = L_{tot} \cdot \frac{I_{t_5}}{V_{MOV} - V_{DC}} \quad (5.18)$$

Αν και στην δεύτερη διάταξη χρησιμοποιείται μικρότερη τιμή πηνίου συντονισμού, κυριαρχούν οι επαγωγές του συστήματος οι οποίες είναι τάξεις μέγεθους μεγαλύτερες. Για τον λόγο αυτό τον κυριότερο ρόλο σε αυτό το στάδιο παίζει η τιμή του ρεύματος σφάλματος όταν αυτό μεταγεται στον κλάδο απορρόφησης ενέργειας. Η μεγαλύτερη τιμή του ρεύματος σφάλματος οδηγεί στην αύξηση των τιμών των χαρακτηριστικών αυτών για την δεύτερη διάταξη όταν η διέγερση του κυκλώματος συντονισμού ξεκινάει την ίδια στιγμή. Στους πίνακες 4 και 8 όπου το μέγιστο ρεύματος σφάλματος είναι ίσο, η ενέργεια που απορροφάει το MOV της δεύτερης διάταξης είναι ελάχιστα μικρότερη λόγω της μικρότερης τιμής της επαγωγής συντονισμού.

5.4.6 Αριθμός μηδενισμών του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη

Σε περίπτωση αποτυχίας σβέσης του τόξου που δημιουργείται στον μηχανικό διακόπτη μετά το άνοιγμα των επαφών του είναι απαραίτητο η διάταξη να είναι σε θέση να δημιουργήσει και άλλο σημείο μηδενισμού. Ο μέγιστος αριθμός σημείων μηδενισμού για την πρώτη διάταξη είναι δύο, ένα στην άνοδο του ημιτονικού παλμού και ένα στην κάθοδο. Αντίθετα η δεύτερη διάταξη μπορεί να προσφέρει περισσότερα σημεία μηδενισμού αυξάνοντας την αξιοπιστία του διακόπτη ισχύος

5.4.7 Σύγκριση απαιτήσεων σε ημιαγωγούς

Ο τύπος των ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην πρώτη διάταξη είναι τα θυρίστορ. Τα θυρίστορ έχουν την ικανότητα αγωγής μεγάλου ρεύματος για μικρό χρονικό διάστημα (surge current). Μετά την αγωγή του ρεύματος αυτού χάνουν την ικανότητα αποκοπής τάσης για μικρό χρονικό διάστημα. Στα φύλλα αναφοράς συνήθως δίνονται δύο τιμές αυτού του ρεύματος. Η πρώτη, η οποία είναι και υψηλότερη, προϋποθέτει την μη εφαρμογή αντίστροφης τάσης μετά την σβέση ενώ η δεύτερη προϋποθέτει την εφαρμογή τάσης μικρότερης από ένα ποσοστό της ονομαστικής τάσης αποκοπής. Επειδή στην εφαρμογή αυτή εφαρμόζεται αντίστροφη τάση μετά την σβέση των θυρίστορ, ίση με την διαφορά τάσης μεταξύ του MOV και του πυκνωτή συντονισμού οι ημιαγωγοί επιλέγονται με βάση την δεύτερη τιμή. Η τιμή αυτή επιλέγεται να ξεπερνάει την ικανότητα διακοπής του διακόπτη, δηλαδή τα 21 kA. Με βάση το παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα θυρίστορ της σειράς ABB 5STP 17H5200 με ικανότητα αγωγής ενός ημιτονικού παλμού πλάτους 24.5 kA, διάρκειας 10 ms και δυνατότητα αποκοπής τάσης μετά την σβέση ίση με το 60% της ονομαστικής. Ο χρόνος περιόδου είναι πολύ μικρότερος από τον χρόνο αγωγής των θυρίστορ κατά την λειτουργία της διάταξης και τα θυρίστορ δεν κινδυνεύουν από υπερθέρμανση. Ο κρίσιμος ρυθμός αύξησης του ρεύματος κατά την έναυση των εν λόγω θυρίστορ είναι 1000 A/μs με συχνότητα επανάληψης 1 Hz. Λόγω του τρόπου επιλογής των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος κατά την έναυση προκύπτει ίσος με τον μέγιστο ρυθμό μεταβολής του ρεύματος του μηχανικού διακόπτη κατά τον μηδενισμό, δηλαδή 500 A/μs.

Ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων ημιαγωγών προκύπτει από την τάση φόρτισης του πυκνωτή συντονισμού κατά την μόνιμη λειτουργία, η οποία ισούται με την τάση του συστήματος. Η τάση αποκοπής των θυρίστορ που επιλέχθηκαν ισούται με 5.2 kV. Επειδή η τάση που εφαρμόζεται κατά την μόνιμη κατάσταση είναι συνεχής εφαρμόζεται ένας συντελεστής ασφαλείας 0.6 και ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων ημιαγωγών προκύπτει ίσος με 5.

Ο τύπος των ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην δεύτερη διάταξη είναι τα IGBTs. Λόγω του τρόπου λειτουργίας της διάταξης, όπου τα ημιαγωγικά στοιχεία περνάνε σε αποκοπή υπό μηδενικό ή σχεδόν μηδενικό ρεύμα, μπορεί να γίνει πλήρης εκμετάλλευση των ονομαστικών τιμών του ρεύματος. Σύμφωνα με την ικανότητα διακοπής του διακόπτη ισχύος τα ημιαγωγικά στοιχεία πρέπει να έχουν ικανότητα αγωγής μέγιστου ρεύματος 21 kA. Παράλληλα, σύμφωνα με την σχεδίαση του διακόπτη ισχύος, η τάση της χωρητικότητας του μετατροπέα η οποία καθορίζει την απαραίτητη τάση αποκοπής των ημιαγωγών είναι 900 V. Με βάση τα προηγούμενα το κάθε σκέλος του μετατροπέα μπορεί να αποτελείται από τρία συνδεδεμένα παράλληλα IGBTs της σειράς ABB 5SNA 3600E170300, με ικανότητα αποκοπής 1.7 kV και μέγιστο ρεύμα συλλέκτη 7.2 kA. Ο μέγιστος αριθμός των απαιτούμενων ημιαγωγών προκύπτει ίσος με 12.

6 Συμπεράσματα

6.1 Ανασκόπηση εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας έγινε ο ορισμός του προβλήματος. Η απουσία σημείων μηδενισμού του ρεύματος μετά από ένα σφάλμα σε ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος δεν επιτρέπει την χρήση των μέσων προστασίας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Επομένως για την προστασία των συστημάτων συνεχούς ρεύματος είναι αναγκαία η σχεδίαση διατάξεων που μπορούν να διακόψουν μορφές ρεύματων που δεν έχουν σημεία μηδενισμού. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση ενός μηχανικού διακόπτη και η δημιουργία ενός τεχνητού σημείου μηδενισμού του ρεύματος του ώστε να μπορέσει να ενεργήσει. Το ρεύμα αυτό δημιουργείται από ένα κύκλωμα συντονισμού συνδεδεμένο παράλληλα στον μηχανικό διακόπτη. Έτσι έγινε και ο ορισμός του θέματος της εργασίας. Η σχεδίαση μηχανικών διακοπών μηχανικών διακοπών συνεχούς ρεύματος - μέσης τάσης βασισμένους σε κυκλώματα συντονισμού και η διερεύνηση της διέγερσης τους με εναλλακτικούς τρόπους όπως είναι για παράδειγμα ένας μετατροπέας τάσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε μια σύντομη ανασκόπηση των συστημάτων συνεχούς ρεύματος. Παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος τόσο στην υψηλή όσο και στην μέση τάση. Αναφέρθηκε πως το σφάλμα διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της πηγής που τροφοδοτεί το σύστημα και αναλύθηκε το ρεύμα σφάλματος ενός μετατροπέα δύο επιπέδων. Τέλος παρουσιάστηκαν οι τρεις κατηγορίες των διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος και φάνηκαν τα πλεονεκτήματα των μηχανικών διακοπών ισχύος, όπως είναι οι εξαιρετικά ελάχιστες απώλειες μόνιμης κατάστασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται οι μηχανικοί διακόπτες ισχύος συνεχούς ρεύματος προκειμένου να γίνει κατανοητή η θεωρητική ανάλυση που ακολούθησε. Αναλύθηκαν οι εξισώσεις απόκρισης των κυκλωμάτων συντονισμού για δυο διαφορετικούς τρόπους διέγερσης, η λειτουργία των βαρίστορ καθώς και οι περιορισμοί που εισάγει ο μηχανικός διακόπτης στην απόκριση των διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας των μηχανικών διακοπών ισχύος συνεχούς ρεύματος. Μετά την θεωρητική ανάλυση, διερευνήθηκε ο τρόπος επιλογής των παραμέτρων για την βελτίωση της ταχύτητας απόκρισης τους και έγινε και αναφορά στον τρόπο επιλογής των απαραίτητων ημιαγωγών για την κατασκευή τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις των δύο διατάξεων μηχανικών διακοπών ισχύος σε ένα απλό σύστημα συνεχούς ρεύματος και ύστερα σύγκριση των χαρακτηριστικών διακοπής. Η επιλογή των παραμέτρων για την σχεδίαση των διατάξεων βασίστηκε στην θεωρητική ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου. Μέσα από τις προσομοιώσεις φάνηκε ότι ακόμα και με μια συντηρητική προσέγγιση για την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας, μέσω της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού από έναν μετατροπέα τάσης δύο επιπέδων είναι εφικτή η μείωση των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος συντονισμού. Αυτό οδηγεί στην μείωση του χρόνου απόκρισης του διακόπτη ισχύος καθώς και στην μείωση του κόστους των παθητικών στοιχείων. Παράλληλα φάνηκε ότι με την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού από έναν μετατροπέα δύο επιπέδων οι απαιτήσεις σε τάση των ημιαγωγών για την κατασκευή της διάταξης αποσυνδέεται από την τάση του συστήματος. Αυτό μπορεί να φανεί πολύ σημαντικό στην σχεδίαση διακοπών ισχύος υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος.

6.2 Μελλοντικές προοπτικές

Οι μελλοντικές προοπτικές που προκύπτουν μετά το τέλος της εργασίας αυτής είναι:

- Η ανάπτυξη ενός ακριβέστερου μοντέλου για την μέγιστη συχνότητα συντονισμού του διακόπτη ισχύος που διεγείρεται απο έναν μετατροπέα δύο επιπέδων
- Η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου που να καθορίζει την στιγμή της διέγερσης του κυκλώματος συντονισμού από τον μετατροπέα δύο επιπέδων ώστε το ρεύμα στον μηχανικό διακόπτη να μηδενίζεται λίγο μετά αφού αποκτήσει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή. Το σύστημα ελέγχου θα μπορούσε να βασίζεται στην μέτρηση του ρεύματος σφάλματος καθώς και του ρυθμού μεταβολής του και με βάση αυτά να υπολογίζει την τιμή του ρεύματος την χρονική στιγμή που ο μηχανικός διακόπτης αποκτάει την απαραίτητη ηλεκτροστατική αντοχή. Σε συνδυασμό με την τάση της χωρητικότητας και την συχνότητα συντονισμού θα μπορούσε να υπολογιστεί η κατάλληλη στιγμή για την διέγερση του κυκλώματος συντονισμού.
- Η διερεύνηση πειραματικά της ικανότητας των IGBTs να λειτουργήσουν εκτός την περιοχής ασφαλούς λειτουργίας για μικρό χρονικό διάστημα και η επίδραση της μανδάλωσης του παρασιτικού θυρίστορ στον χρόνο σβέσης τους.
- Η μελέτη της δυνατότητας κλίμακωσης των χαρακτηριστικών των μηχανικών διακοπών ισχύος, όπως η ικανότητα διακοπής και η τάση λειτουργίας, σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις σε ημιαγωγούς.

Αναφορές

- [1] S. Cole, T. Vrana, J.-B. Curis, C.-C. Liu, K. Karoui, O. Fosso, and A.-M. Denis, “A european supergrid: Present state and future challenges,” 06 2011.
- [2] A. Giannakis and D. Pefitsis, “MVDC distribution grids and potential applications: Future trends and protection challenges,” in *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, Sep. 2018, pp. P.1–P.9.
- [3] “Technical advantages - why choose HVDC over HVAC,” <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/technical-advantages.html>, accessed: 02-06-2019.
- [4] “Economic and environmental advantages - why choose HVDC over HVAC,” <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>, accessed: 02-06-2019.
- [5] C. Long, J. Wu, K. Smith, A. Moon, R. Bryans, and J. Yu, “MVDC link in a 33 kv distribution network,” *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1308–1312, 2017.
- [6] M. Monadi, M. A. Zamani, J. Ignacio Candela, A. Luna, and P. Rodriguez, “Protection of ac and dc distribution systems embedding distributed energy resources: A comparative review and analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1578–1593, 11 2015.
- [7] B. Ravi, S. Raval, V. R. R. Rudraraju, and C. Nagamani, “Performance analysis of MVAC and MVDC offshore wind farm distribution system using direct load flow method,” in *2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, Feb 2016, pp. 341–346.
- [8] M. S. Carmeli, F. Castelli-Dezza, D. Rosati, G. Marchegiani, and M. Mauri, “MVDC connection of offshore wind farms to the transmission system,” in *SPEEDAM 2010*, June 2010, pp. 1201–1206.
- [9] F. Wang, Yunqing Pei, D. Boroyevich, R. Burgos, and Khai Ngo, “Ac vs. dc distribution for off-shore power delivery,” in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Nov 2008, pp. 2113–2118.
- [10] C. Yuan, M. A. Haj-ahmed, and M. S. Illindala, “An MVDC microgrid for a remote area mine site: Protection, operation and control,” in *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Oct 2014, pp. 1–9.
- [11] S. Castellan, R. Menis, A. Tessarolo, F. Luise, and T. Mazzuca, “A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96, pp. 306–323, March 2018.
- [12] K. Kim, K. Park, G. Roh, and K. Chun, “Dc-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations,” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 2, pp. 1–12, Nov 2018.
- [13] T. A. Toshon, A. Newaz, and M. O Faruque, “Fault current limiting capabilities of tcr and mmc for MVDC based shipboard power systems,” March 2018.
- [14] P. Cairoli, R. Rodrigues, and H. Zheng, “Fault current limiting power converters for protection of dc microgrids,” March 2017, pp. 1–7.
- [15] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O'Reilly, “Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based dc network cables,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3827–3837, Oct 2012.
- [16] L. Liljestr and, M. Backman, L. Jonsson, E. Dullni, and M. Riva, “Medium voltage dc vacuum circuit breaker,” in *2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology (ICEPE-ST)*, Oct 2015, pp. 495–500.

- [17] L. Liljestrand, M. Backman, L. Jonsson, M. Riva, and E. Dullni, "Dc vacuum circuit breaker," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 100–104, 2017.
- [18] L. Ängquist, S. Norrga, and T. Moder, "A new dc breaker with reduced need for semiconductors," in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Sep. 2016, pp. 1–9.
- [19] L. Ängquist, S. Norrga, T. Modeer, and S. Nee, "Fast HVDC breaker using reduced-rating power electronics," in *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)*, Feb 2017, pp. 1–6.
- [20] L. Ängquist, A. Baudoin, S. Norrga, S. Nee, and T. Modeer, "Low-cost ultra-fast dc circuit-breaker: Power electronics integrated with mechanical switchgear," in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Feb 2018, pp. 1708–1713.
- [21] L. Ängquist, S. Nee, T. Modeer, A. Baudoin, S. Norrga, and N. A. Belda, "Design and test of VSC assisted resonant current (VARC) DC circuit breaker," in *15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019)*, Feb 2019, pp. 1–6.
- [22] M. Callavik, A. Blomberg, J. Häfner, and B. Jacobson, "Break-through!: ABB's hybrid breaker, an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids," pp. 7–13, Jan 2013.
- [23] "Littelfuse - general electrical mov training," https://www.littelfuse.com/~media/electronics/trainings/littelfuse_mov_general_electrical.pdf.pdf, accessed: 24-05-2019.
- [24] "Vea - varsi energy absorber catalogue," <http://varsi.si/wp-content/uploads/2016/11/VEA-catalogue.pdf>, accessed: 25-05-2019.
- [25] "Littelfuse - the abcs of movs," https://www.littelfuse.com/~media/electronics_technical/application_notes/varistors/littelfuse_the_abcs_of_movs_application_note.pdf, accessed: 24-05-2019.
- [26] A. Lee, P. Slade, K. Yoon, J. Porter, and J. Vithayathil, "The development of a hvdc sf6 breaker," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PER-5, pp. 2721 – 2729, 11 1985.
- [27] M. T. Glinkowski, M. R. Gutierrez, and D. Braun, "Voltage escalation and reignition behavior of vacuum generator circuit breakers during load shedding," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, pp. 219–226, Jan 1997.
- [28] S. Tokoyoda, T. Inagaki, F. Page, M. Sato, K. Kamei, M. Miyashita, and H. Ito, "Interruption characteristics of vacuum circuit breaker and the application to DCCB," in *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)*, Feb 2017, pp. 1–5.
- [29] L. Liu, S. Liu, and M. Popov, "Optimized algorithm of active current injection circuit to calibrate dc circuit breaker," *International Journal of Power and Energy Systems*, vol. 103, 06 2018.
- [30] C. Peng, X. Song, A. Q. Huang, and I. Husain, "A medium-voltage hybrid DC circuit breaker-part II: Ultrafast mechanical switch," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 289–296, March 2017.
- [31] A. Baudoin, B. Hatsagi, M. Alvarez, L. Angquist, S. Nee, S. Norrga, and T. Modeer, "Experimental results from a thomson-coil actuator for a vacuum interrupter in an HVDC breaker," *The Journal of Engineering*, 01 2019.
- [32] "NPTEL, Study of DC transients in R-L-C circuits."

- [33] L. Liu, M. Meijden, M. Popov, and V. Terzija, "The DC circuit breaker with necessary bidirectional interruption capability," 10 2016, pp. 110–114.
- [34] "ABB, Data Sheet 5SNA 3600E170300."
- [35] A. Giannakis and D. Pefitisis, "Design considerations of power semiconductor devices employed in VSCs under short-circuit fault conditions in MVDC distribution grids," in *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, Sep. 2018, pp. P.1–P.11.
- [36] U. Javaid, F. D. Freijedo, D. Dujic, and W. van der Merwe, "Dynamic assessment of source-load interactions in marine MVDC distribution," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4372–4381, June 2017.
- [37] "Mathworks, surge arrester," <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/surgearrester.html>, accessed: 02-07-2019.