



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΠΑΦΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥ
ΜΕ VARISTOR»***

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Βασιλείου Δ. Μαυράκη

Επιβλέπων

Μανιάς Στέφανος, Καθηγητής

**Τμήμα: Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών**

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Στους γονείς μου, Δημήτρη και Ξανθή.

Στο Θείο μου, Νίκο.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπον κ. Στέφανο Μανιά καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε και για την επίβλεψη αυτής της εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος να μου προσφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του για τη βαθύτερη κατανόηση της θεωρίας των ηλεκτρονικών ισχύος.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Σταύρο Παπαθανασίου, αναπληρωτή καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και τον κ. Δημοσθένη Στάμπα, διπλωματούχο ηλεκτρολόγο μηχανικό και μηχανικό υπολογιστών για την πολύτιμη βοήθεια τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω προς την οικογένειά μου, το θείο μου Νίκο, και κυρίως στους γονείς μου Δημήτρη και Ξανθή, για την διαχρονική συμπαράστασή τους, την υλική, ηθική στήριξη των επιλογών μου και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών και σχολικών χρόνων.

Βασίλειος Δ. Μαυράκης,

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Δ.Π.Θ.

MSc “Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας” Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 3 Ιουλίου 2016

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «προστασία επαφών ηλεκτρονόμου με βαρίστορ» πραγματεύεται τη χρήση βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων για την προστασία των διακοπών έναντι κρουστικών υπερτάσεων. Σκοπός της είναι η σύγκριση των βαρίστορ με άλλες μεθόδους προστασίας, snubber, και η εξαγωγή τελικών συμπερασμάτων μέσα από υπολογιστικές προσομοιώσεις (Simulink).

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά γύρω από τον ημιαγωγό βαρίστορ, το υλικό και τον τρόπο παρασκευής, τη συνδεσμολογία, και γενικώς στον τρόπο λειτουργείας του, με σκοπό την εισαγωγή και τη βαθύτερη κατανόηση της χρήσης των βαρίστορ στην προστασία έναντι κρουστικών υπερτάσεων.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τους διάφορους τύπους των ηλεκτρονόμων και τα πιθανά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν στα διακοπτικά τους στοιχεία καθώς επίσης και στην αντιμετώπιση τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη εισαγωγή γύρω από τη χρήση των βαρίστορ και snubber, ως μέσα καταστολής κρουστικών υπερτάσεων, με την χρήση ενός θεωρητικού παραδείγματος χειρισμού επαγωγικών φορτίων. Παρουσιάζονται επίσης υπολογιστικά αποτελέσματα προσομοίωσης. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η πλήρης εμπέδωση των δύο αυτών μεθόδων προστασίας, και η αναλυτική παρουσίαση της επιλογής των κατάλληλων μεγεθών. Ακόμη στο κεφάλαιο αυτό γίνεται κατανοητή η χρήση του βαρίστορ στο υπολογιστικό πρόγραμμα του simulink.

Μια γενική περιγραφή γύρω από της ανεμογεννήτριες καθώς και η προσομοίωση, μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από την κατάσταση ηρεμίας στην μόνιμη κατάσταση λειτουργείας περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο τέσσερα.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5, αναλύονται οι υπερτάσεις που μπορούν να δημιουργηθούν από τους διακοπτικούς χειρισμούς της ανεμογεννήτριας, και αναλύονται οι τρόποι καταστολής τους μέσα από αποτελέσματα υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά

Κρουστικές Υπερτάσεις, Βαρίστορ Μεταλλικών Οξειδίων, Προστασία Ηλεκτρονόμων, Ηλεκτρικό Τόξο, Απαγωγός Υπέρτασης, Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης, Κρουστικό Ρεύμα, Προστασία Snubber

Abstract

This post graduate thesis titled “relay contacts protection using varistor” deals with the usage of metal oxide varistors as overvoltage circuit protection. The purpose of this thesis is the comparison between metal oxide varistors and snubbers as surge suppression methods using the simulation program matlab – simulink.

The First chapter contains all useful information about semiconductor varistor, the material and the method of manufacturing and the principles of voltage limitation. The goal of the first section is an introduction to general technical information of an MOV against voltage transients and surges.

The second chapter contains a review of relays, and all the methods designed to limit the wear and degradation that occur during the normal use of contacts within an electromechanical switch, relay or contactor.

The third section presents computer simulations using MOV and snubber as arc suppressions in contacts relays, when the relay is used to control an inductive load. General in this section, is discussed the varistor and snubber design considerations and how to select the right values.

Section 4 refers to a simulation of an 9 MW wind farm consisting of six 1.5 MW wind turbines connected to a 20 kV distribution system exports power to a 150 kV grid through a 20 km, 20 kV feeder. Wind turbines using a doubly-fed induction generator (DFIG) consist of a wound rotor induction generator and an AC/DC/AC IGBT-based PWM converter.

Finally, in section 5, presents transients which may be occur during switching operations and discussed the arc suppression methods using computer simulations.

Keywords

Voltage Transients, Surges, Metal Oxide Varistor, MOV, Relay Protection, Surge Protector, Surge Suppressor, Surge Arrester, Arc, DFIG, Snubber

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	1
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
1. Ο ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ VARISTOR.....	9
1.1. Εισαγωγή	9
1.2. Φυσικές Ιδιότητες.....	9
1.2.1. Υλικό Κατασκευής.....	9
1.2.2. Τρόπος Κατασκευής και Λειτουργίας.....	9
1.3. Κυκλωματικός Συμβολισμός.....	10
1.4. Χαρακτηριστική V-I.....	11
1.5. Τεχνικά Χαρακτηριστικά	13
1.5.1. Χαρακτηριστικά Κρουστικών Ρευμάτων.....	13
1.5.2. Μέγιστη Συνεχόμενη Τάση (Maximum Continuous Voltage) AC/DC	14
1.5.3. Ονομαστική Τάση Varistor (Varistor Voltage).....	15
1.5.4. Επίπεδο Προστασίας (Maximum Clamping Voltage)	15
1.5.5. Μέγιστο μη Επαναλαμβανόμενο Κρουστικό Ρεύμα (Maximum Non Repetitive Surge Current).....	17
1.5.6. Μέγιστη Απορροφούμενη Ενέργεια (Maximum Energy).....	18
1.5.7. Χωρητικά Χαρακτηριστικά (Capacitance)	19
1.5.8. Επαγωγικά Χαρακτηριστικά (Lead Inductance)	20
1.5.9. Χρόνος Απόκρισης (Response Time)	20
1.6. Ισοδύναμο κύκλωμα MOV.....	20
1.6.1. Ισοδύναμο Κύκλωμα στην Περιοχή Ρευμάτων Διαρροής (Leakage Region of Operation)	21
1.6.2. Ισοδύναμο Κύκλωμα στην Περιοχή Κανονικής Λειτουργίας (Nominal Varistor Region of Operation)	21
1.6.3. Ισοδύναμο Κύκλωμα στην Άνω Περιοχή Λειτουργίας (Up Turn Region of Operation)	22
1.7. Πραγματική Χαρακτηριστική V-I.....	23
1.7.1. Περιοχές Λειτουργίας Varistor	23
1.7.2. Μαθηματική Προσέγγιση Χαρακτηριστικής	24
1.8. Πρόσθετα Χαρακτηριστικά	30
1.8.1. Επίδραση Θερμοκρασίας (Temperature Coefficient)	30

1.8.2.	Ανέχεια Σφάλματος (Tolerance).....	31
1.8.3.	Καταναλισκόμενη Ισχύς (Power Dissipated).....	32
1.9.	Αρχή Λειτουργίας – Προστασίας.....	34
1.10.	Διατάξεις Πολλαπλών MOV	36
1.10.1.	Συνδεσμολογία σε Σειρά	36
1.10.2.	Συνδεσμολογία Παράλληλων MOV	37
1.11.	Συνοπτικά Χαρακτηριστικά - Κίνδυνοι.....	37
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	39
2.	ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ.....	41
2.1.	Εισαγωγή.....	41
2.1.1.	Ιστορική Αναδρομή	41
2.2.	Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρονόμων	41
2.2.1.	Εσωτερική Δομή Ηλεκτρονόμου με Ηλεκτρομαγνήτη	42
2.2.2.	Τρόπος Λειτουργίας Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου	43
2.2.3.	Συνοπτική Περιγραφή Ηλεκτρονόμου Στέρεας Κατάστασης	45
2.3.	Τύποι Επαφών Ηλεκτρονόμου	47
2.4.	Ειδικό Τύποι Ηλεκτρονόμων	50
2.4.1.	Ηλεκτρονόμοι Μανδάλωσης (Latching Relay)	51
2.4.2.	Ηλεκτρονόμοι Χρονικής Καθυστέρησης (Time Delay Relay).....	51
2.4.3.	Επαφίας (Contactor).....	52
2.4.4.	Ηλεκτρονόμος Buchholz.....	53
2.4.5.	Μαγνητικός Διακόπτης (Reed Relay).....	53
2.5.	Διάκριση Ηλεκτρονόμων με Βάση το Ρόλο που Επιτελούν	54
2.5.1.	Διακοπτικοί Ηλεκτρονόμοι (Switching Relays)	54
2.5.2.	Ηλεκτρονόμοι Κατεύθυνσης (Directional Relays)	54
2.5.3.	Ηλεκτρονόμοι Απόστασης (Distance Relays)	55
2.5.4.	Ηλεκτρονόμοι Υπερέντασης (Overcurrent Relays)	55
2.5.5.	Διαφορικοί Ηλεκτρονόμοι (Differential Relays)	55
2.5.6.	Ηλεκτρονικά Θερμικά.....	56
2.6.	Ηλεκτρονόμοι Προστασίας και Αυτόματι Διακόπτες	56
2.6.1.	Αυτόματι Διακόπτες Ισχύος.....	57
2.6.2.	Αυτόματι ή Μικροαυτόματι Ασφαλειοδιακόπτες.....	57

2.6.3.	Αυτόματοι Διακόπτες Διαρροής	57
2.6.4.	Διακόπτες Μέσης και Υψηλής Τάσεως	57
2.6.5.	Διακόπτες Χαμηλής Τάσεως.....	58
2.7.	Προβλήματα κατά την Χρήση Ηλεκτρονόμων	59
2.7.1.	Υπερτάσεις στο Πηνίο Ενεργοποίησης.....	59
2.7.2.	Αντιμετώπιση Υπέρτασης στο Πηνίο Ενεργοποίησης.....	59
2.7.3.	Υπερτάσεις στις Επαφές του Ηλεκτρονόμου	59
2.7.4.	Αντιμετώπιση Υπέρτασης στις Επαφές του Ηλεκτρονόμου.....	60
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	62
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΠΑΦΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥ	65
3.1.	Εισαγωγή	65
3.2.	Εμφάνιση Κρουστικών Υπερτάσεων στο Χειρισμό Επαγωγικών Φορτίων	65
3.3.	Προστασία με Χρήση MOV	66
3.3.1.	Βήματα Επιλογής Κατάλληλου Τύπου MOV	68
3.3.2.	Προσδιορισμός Συνεχόμενης Τάσης.....	69
3.3.3.	Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής.....	70
3.3.4.	Έλεγχος Απαιτήσεων Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής.....	71
3.3.5.	Υπολογισμός Απορροφούμενης Ενέργειας.....	73
3.3.6.	Έλεγχος Απαιτήσεων Απορροφούμενης Ενέργειας.....	73
3.4.	Προστασία με Χρήση Snubber.....	73
3.4.1.	Βήματα Επιλογής Κατάλληλων Μεγεθών	74
3.4.2.	Τιμές Μεγεθών για τη Συγκεκριμένη Εφαρμογή.....	76
3.5.	Προσομοιώσεις με Χρήση Matlab – Simulink.....	76
3.5.1.	Προσομοίωση Χωρίς την Ύπαρξη Προστασίας	76
3.5.2.	Προσομοίωση MOV σε Simulink.....	78
3.5.3.	Προσομοίωση με Χρήση MOV	80
3.5.4.	Προσομοίωση με Χρήση Snubber	83
3.6.	Σύγκριση Μεθόδων	85
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	86
4.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	
	ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	87
4.1.	Εισαγωγή	87

4.1.1.	Ο Ενεργειακός Χάρτης της Ελλάδος	87
4.2.	Τύποι και Υποσυστήματα Ανεμογεννητριών.....	87
4.2.1.	Τύποι Συλλογής Αιολικής Ενέργειας.....	89
4.2.2.	Τύποι Ταχύτητας Περιστροφής	91
4.2.3.	Τύποι Γεννητριών	92
4.3.	Μηχανικός Έλεγχος Ισχύος Ανεμοκινητήρα	94
4.4.	Εξαγωγή Ισχύος.....	95
4.5.	Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης (Doubly Fed Induction Generator – DFIG).....	96
4.6.	Κύκλωμα Προσομοίωσης.....	97
4.7.	Δημιουργία Κυκλώματος στο Simulink.....	98
4.7.1.	Άπειρο Σύστημα.....	98
4.7.2.	Μετασχηματιστής Υποβιβασμού Τάσης 150/20 KV.....	99
4.7.3.	Γραμμή Μεταφοράς Μέσης Τάσης	100
4.7.4.	Μετασχηματιστής Ανύψωσης Ανεμογεννήτριας 0,69/20 KV	101
4.7.5.	Ανεμογεννήτρια (DFIG)	102
4.7.6.	Κατασκευή Κυκλώματος Προσομοίωσης	103
4.8.	Υπολογιστική Προσομοίωση	104
4.8.1.	Προσομοίωση στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας	106
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 4 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	112
5.	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	115
5.1.	Προσομοίωση σε Συνθήκες Κανονικής Λειτουργίας	115
5.2.	Προσομοίωση κατά την Απόξευση και την Ζεύξη.....	117
5.3.	Προστασία με Χρήση MOV.....	119
5.3.1.	Προσδιορισμός Συνεχόμενης Τάσης (RMS)	119
5.3.2.	Επιλογή MOV με Κριτήριο τη Μέγιστη Επιτρεπόμενη Συνεχόμενη Τάση	120
5.3.3.	Χαρακτηριστικά Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής	121
5.3.4.	Επίπεδο Προστασίας.....	122
5.4.	Προσομοίωση με Χρήση MOV	123
5.4.1.	Διαμόρφωση Τάσης με την Προσθήκη του MOV.....	124
5.4.2.	Κρουστικό Ρεύμα Διαρροής	124
5.4.3.	Υπολογισμός Μέγιστης Ικανότητας Απορροφούμενης Ενέργειας.....	126

5.4.4. Χρήση Παράλληλων ΜΟΝ – Διάρκεια Ζωής.....	127
5.5. Προσομοίωση με Χρήση Snubber.....	128
5.6. Σύγκριση Μεθόδων	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 5 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	133
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	135

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: V-I Χαρακτηριστική Λειτουργίας Ενός Varistor.	11
Σχήμα 1.2: Διαφορές στην Χαρακτηριστική Λειτουργίας Ενός Varistor ZnO και SiC.	12
Σχήμα 1.3: Τυπική Εκθετική Κυματομορφή Κρουστικού Ρεύματος.	14
Σχήμα 1.4: Τυπική Ορθογωνική Κυματομορφή Κρουστικού Ρεύματος.	15
Σχήμα 1.5: Πραγματική Χαρακτηριστική Varistor.	16
Σχήμα 1.6: Παράμετροι από την Πραγματική Χαρακτηριστική Varistor.	17
Σχήμα 1.7: Μέγιστη Επιτρεπόμενη Κορυφή Ρεύματος σε Συνάρτηση με τον Αριθμό των Παλμών και τη Διάρκεια τους.	18
Σχήμα 1.8: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV.	20
Σχήμα 1.9: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV στην Περιοχή Ρευμάτων Διαρροής.	21
Σχήμα 1.10: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV στην Κανονική Λειτουργία.	22
Σχήμα 1.11: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV στην Άνω Περιοχή Λειτουργίας.	22
Σχήμα 1.12: Περιοχές Λειτουργίας Varistor.	23
Σχήμα 1.13: Πραγματική Χαρακτηριστική V-I ενός MOV.	24
Σχήμα 1.14: Πραγματική Χαρακτηριστική I-V ενός MOV.	24
Σχήμα 1.15: Τυπική I-V Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία.	26
Σχήμα 1.16: Συντελεστής μη Γραμμικότητας “α”.	26
Σχήμα 1.17: Τυπική V-R Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία.	27
Σχήμα 1.18: Τυπική I-V Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία σε Λογαριθμική Κλίμακα (log).	27
Σχήμα 1.19: Τυπική V-R Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία σε Λογαριθμική Κλίμακα (log).	27
Σχήμα 1.20: Χαρακτηριστικά Ημιαγωγού για Διάφορες Τιμές του β.	28
Σχήμα 1.21: Μαθηματική Προσέγγιση I-V Χαρακτηριστικής στην Κανονική Λειτουργία όπως Προκύπτει από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα MATLAB.	29
Σχήμα 1.22: Επίδραση Θερμοκρασίας στην Περιοχή Διαρροής Ρευμάτων.	31
Σχήμα 1.23: Επίδραση Θερμοκρασίας στην Περιοχή Κανονικής Λειτουργίας.	31
Σχήμα 1.24: Επίδραση Θερμοκρασίας στα Χαρακτηριστικά του Varistor.	32
Σχήμα 1.25: Όρια Σφάλματος για Ένα Τυπικό Varistor.	32
Σχήμα 1.26: Αρχή Προστασίας Varistor.	35
Σχήμα 1.27: Γραφική Απεικόνιση Λειτουργίας MOV.	36
Σχήμα 2.1: Εσωτερική Δομή Ενός Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου.	42

Σχήμα 2.2: Σχηματική Απεικόνιση Καταστάσεων Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου.	45
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα Ρεύματος Πηνίου Ηλεκτρονόμου και Ρεύματος Πηνίου Σκιάσεως.	45
Σχήμα 2.4: Απλοποιημένο Διάγραμμα Λειτουργίας Ηλεκτρονόμου Στέρεας Κατάστασης.	46
Σχήμα 2.5: Κυκλωματικό Διάγραμμα Επαφής Τύπου «NO» στις Δύο Καταστάσεις.	48
Σχήμα 2.6: Κυκλωματικό Διάγραμμα Επαφής Τύπου «NC» στις Δύο Καταστάσεις.	48
Σχήμα 2.7: Κυκλωματικό Διάγραμμα Μεταγωγικής Επαφής στις Δύο Καταστάσεις:	49
Σχήμα 2.8: Κυκλωματικό Διάγραμμα Ηλεκτρονόμου Τύπου SPST.	50
Σχήμα 2.9: Κυκλωματικό Διάγραμμα Ηλεκτρονόμου Τύπου SPDT.	50
Σχήμα 2.10: Κυκλωματικός Συμβολισμός Χρονικών Ηλεκτρονόμων.	52
Σχήμα 3.1: Σχηματική Διάταξη Χειρισμού Επαγωγικού Φορτίου από Ηλεκτρονόμο.	65
Σχήμα 3.2: Σταθερά Χρόνου «τ» του Κυκλώματος Προστασίας.	67
Σχήμα 3.3: Γράφημα Ευρέσεως Χρόνου Ημίσεως Εύρους.	68
Σχήμα 3.4: Εύρεση Εσωτερικής Αντίστασης MOV από τη Χαρακτηριστική V-I.	72
Σχήμα 3.5: Διάρκεια Ζωής MOV.	72
Σχήμα 3.6: Γράφημα Ευρέσεως Βέλτιστων Ποσοτήτων d,δ.	75
Σχήμα 3.7: Κύκλωμα Προσομοίωσης στο Simulink Χωρίς Προστασία.	76
Σχήμα 3.8: Τάση στα Άκρα των Επαφών Χωρίς την Ύπαρξη Προστασίας όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	77
Σχήμα 3.9: Ρεύμα Φορτίου Χωρίς την Ύπαρξη Προστασίας όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	77
Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστική V-I του Βαρίστορ S07K20.	80
Σχήμα 3.11: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink με την Προσθήκη MOV Παράλληλα.	81
Σχήμα 3.12: Τάση στα Άκρα των Επαφών μετά την Προσθήκη του MOV όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα	81
Σχήμα 3.13: Ρεύμα Φορτίου μετά την Προσθήκη του MOV όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	82
Σχήμα 3.14: Κρουστικό Ρεύμα Διαρροής MOV όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	82
Σχήμα 3.15: Ισχύς που Καταναλώνεται στο Βαρίστορ όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	83
Σχήμα 3.16: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink με την Προσθήκη Snubber.	83
Σχήμα 3.17: Τάση στα Άκρα των Επαφών μετά την Προσθήκη του Snubber όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	84

Σχήμα 3.18: Ρεύμα Φορτίου μετά την Προσθήκη του Snubber όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	84
Σχήμα 3.19: Ισχύς που Καταναλώνεται στον Αντιστάτη όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	85
Σχήμα 4.1: Η Συμμετοχή των ΑΠΕ στην Συνολική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.	88
Σχήμα 4.2: Η Συνολική Εγκαταστημένη Ισχύς των Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα ανά Χρόνο.	88
Σχήμα 4.3: Διάταξη Εκμετάλλευσης Αιολικής Ενέργειας.	88
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.	97
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα Εύρους Ταχύτητας μιας Γεννήτριας DFIG.	97
Σχήμα 4.6: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης Αιολικού Πάρκου στο Δίκτυο Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.	98
Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστική Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.	103
Σχήμα 4.8: Πορεία Ενεργούς Ισχύος από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	104
Σχήμα 4.9: Άεργος Ισχύς από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	105
Σχήμα 4.10: DC Τάση Μετατροπέα από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	105
Σχήμα 4.11: Ταχύτητα Περιστροφής Ρότορα από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Εκφρασμένη σε Ποσοστό της Σύγχρονης.	106
Σχήμα 4.12: Ενεργός Ισχύς στη Μόνιμη Κατάσταση όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	106
Σχήμα 4.13: Άεργος Ισχύς στη Μόνιμη Κατάσταση όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	107
Σχήμα 4.14: DC Τάση Μετατροπέα στη Μόνιμη Κατάσταση όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	107
Σχήμα 4.15: Πολικές Τάσεις στο Ζυγό B690 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτές Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	108
Σχήμα 4.16: Πολικά Ρεύματα στο Ζυγό B690 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτά Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	108
Σχήμα 4.17: Πολικές Τάσεις στο Ζυγό B20 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτές Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	109
Σχήμα 4.18: Πολικά Ρεύματα στο Ζυγό B20 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτά Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	109

Σχήμα 4.19: Πολικές Τάσεις στο Ζυγό B150 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτές Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	110
Σχήμα 4.20: Πολικά Ρεύματα στο Ζυγό B150 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτά Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	110
Σχήμα 4.21: Ταχύτητα Περιστροφής Ρότορα στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Εκφρασμένη σε Ποσοστό της Σύγχρονης (+20%).	111
Σχήμα 5.1: Σχηματική Αναπαράσταση Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink.	115
Σχήμα 5.2: Τάση Επαφών (V) σε Συνθήκες Κανονικής Λειτουργίας με το Διακόπτη Κλειστό στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας.	116
Σχήμα 5.3: Ρεύμα Φάσεων (A) (A,B,C) σε Συνθήκες Κανονικής Λειτουργίας με το Διακόπτη Κλειστό στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας.	116
Σχήμα 5.4: Τάση Επαφών Διακόπτη (V) για κάθε Φάση (A,B,C), στην Αρχή της Προσομοίωσης ο Διακόπτης είναι Κλειστός και το Κύκλωμα στη Μόνιμη Κατάσταση, στη Συνέχεια Εμφανίζεται ένα Συμμετρικό Σφάλμα που Οδηγεί στην Απόρριξη, Άνοιγμα του Διακόπτη, ο οποίος Παραμένει Ανοικτός μέχρι την Εκκαθάριση του Σφάλματος και Τελικά το Κλείσιμο του, Ζεύξη.	117
Σχήμα 5.5: Εμφάνιση Υπέρτασης στις Επαφές (V) του Διακόπτη (A) για το Φαινόμενο που Περιεγράφηκε στο Προηγούμενο Σχήμα.	118
Σχήμα 5.6: Εμφάνιση Υπέρτασης (V) στις Επαφές του Διακόπτη (B) για Διαφορετικούς Χρόνους Ανοίγματος του Διακόπτη Ισχύος.	118
Σχήμα 5.7: Εμφάνιση Υπέρτασης (V) στις Επαφές του Διακόπτη (C) για Διαφορετικούς Χρόνους Ανοίγματος του Διακόπτη Ισχύος.	119
Σχήμα 5.8: Διαμορφούμενη Τάση στα Άκρα των Επαφών (V) του Διακόπτη των Φάσεων (A,B,C) για Συνθήκες Μόνιμου Συμμετρικού Σφάλματος, Διακόπτης Ανοικτός.	120
Σχήμα 5.9: Τιμή Ρεύματος (A) τη Στιγμή της Απόρριξης.	122
Σχήμα 5.10: Χαρακτηριστική I-V MOV “V481BA60” που Επιλέχθηκε για την Προστασία.	122
Σχήμα 5.11: Σχηματική Αναπαράσταση Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink με Χρήση MOV για την Προστασία.	123
Σχήμα 5.12: Διαμόρφωση Τάσης στα Άκρα των Επαφών του Διακόπτη (A) μετά την Προσθήκη του MOV.	124
Σχήμα 5.13: Κρουστικό Ρεύμα Διαρροής MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας.	125
Σχήμα 5.14: Λεπτομερής Ανάλυση Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας, εκ της οποίας Προκύπτει $I_m=1850$ A και $T_r=3000\mu s$.	125
Σχήμα 5.15: Απορροφούμενη Ενέργεια MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας (3100J).	126
Σχήμα 5.16: Διαμόρφωση Τάσης (V) στα Άκρα των Επαφών (A) μετά την Προσθήκη Δύο Παράλληλων MOV Ίδιου Τύπου.	127

- Σχήμα 5.17: Διάγραμμα Ευρέσεως Χρόνου Ζωής MOV που Επιλέχθηκε από την Οποία Προκύπτει μια Διάρκεια Ζωής 10 Επαναλήψεων για την Συγκεκριμένη Εφαρμογή ή 100 για Χρήση δύο Παράλληλων MOV ίδιου Τύπου. 128
- Σχήμα 5.18: Διαμόρφωση Τάσης (V) στα Άκρα των Επαφών του Διακόπτη (A) μετά την Προσθήκη του Snubber για Αντιστάτη $R=10\Omega$. 129
- Σχήμα 5.19: Η Ισχύς (W) που Καταναλίσκεται στον Αντιστάτη των 10Ω Ανέρχεται στα 65KW. 129
- Σχήμα 5.20: Μέγεθος Αντιστάτης σε Συνάρτηση με την Καταναλισκόμενη Ισχύ της. 130
- Σχήμα 5.21: Μέγεθος MOV που Επιλέχθηκε για την Συγκεκριμένη Εφαρμογή. 131
- Σχήμα 5.22: Τάση στα Άκρα των Επαφών του Διακόπτη (A), με Χρήση Προστασίας Snubber με Μέγεθος Αντιστάτη 100Ω , εκ του Οποίου Προκύπτει ότι η Αύξηση της Τιμής του Αντιστάτη δεν Προσδίδει το Αναμενόμενο Επίπεδο Προστασίας. 131
- Σχήμα 5.23: Ισχύς που Καταναλίσκεται στον Αντιστάτη των 100Ω είναι 12KW, Ωστόσο το Μέγεθος αυτό δεν Παρέχει καμία Ουσιαστική Προστασία στο Διακόπτη. 132

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Το Εσωτερικό Ενός MOV.	9
Εικόνα 1.2: Μικροσκοπική Απεικόνιση Ενός MOV.	10
Εικόνα 1.3: Κυκλωματικός Συμβολισμός Varistor.	11
Εικόνα 1.4: Παλαιότερος Κυκλωματικός Συμβολισμός Varistor.	11
Εικόνα 1.5: Συστοιχία Παράλληλων MOV με Συμβατική Διάταξη Προστασίας.	38
Εικόνα 1.6: Καταστροφική Αστοχία Διάταξης MOV.	38
Εικόνα 2.1: Εσωτερική Δομή ενός Πραγματικού Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου.	43
Εικόνα 2.2: Μικρός Ηλεκτρονόμος που Χρησιμοποιείται στην Ηλεκτρονική.	45
Εικόνα 2.3: Τυπικός Ηλεκτρονόμος Στέρεας Κατάστασης.	47
Εικόνα 2.4: Τυπικός Ηλεκτρονόμος Μανδάλωσης.	51
Εικόνα 2.5: Τυπικός Contactor.	52
Εικόνα 2.6: Ηλεκτρονόμος Buchholz για την Προστασία Μετασχηματιστών Ελαίου.	53
Εικόνα 2.7: Τυπικός Ηλεκτρονόμος τύπου Reed.	54
Εικόνα 2.8: Διακόπτες Ισχύος Υψηλής Τάσεως Τύπου Πτωχού Ελαίου.	58
Εικόνα 2.9: Εξέλιξη Διάβρωσης Επαφών Ηλεκτρονόμου Λόγο Έκθεσης σε Κρουστικές Υπερτάσεις.	60
Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά MOV για την Επιλογή του με Βάση τη Συνεχόμενη Τάση.	70
Εικόνα 3.2:	77
Εικόνα 3.3: Παράμετροι Εισαγωγής MOV στο Simulink.	79
Εικόνα 3.4: Παράμετροι S07K20 στο Simulink.	79
Εικόνα 3.5:..	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 4.1: Ανεμογεννήτρια Τριών Πτερυγίων Οριζόντιου Άξονα.	90
Εικόνα 4.2: Ανεμογεννήτρια Κάθετου Άξονα.	91
Εικόνα 4.3: Παράμετροι Εισαγωγής Άπειρου Συστήματος στο Simulink.	98
Εικόνα 4.4: Παράμετροι Εισαγωγής Μετασχηματιστή Υποβιβασμού στο Simulink.	99
Εικόνα 4.5: Παράμετροι Εισαγωγής Γραμμής Μέσης Τάσης στο Simulink.	100
Εικόνα 4.6: Παράμετροι Εισαγωγής Μετασχηματιστή Ανύψωσης στο Simulink.	101
Εικόνα 4.7: Παράμετροι Εισαγωγής Ανεμογεννήτριας στο Simulink.	102
Εικόνα 4.8: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink.	103
Εικόνα 5.1: Ενεργός Τιμή Τάσης Επαφών (V) όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα για Συνθήκες Μόνιμου Σφάλματος.	120

Εικόνα 5.2: Επιλογή MOV εκ των Διαθέσιμων με Κριτήριο τη Μέγιστη Επιτρεπόμενη Τάση.	121
Εικόνα 5.3: Συνοπτικά Χαρακτηριστικά MOV “V481BA60” που Επιλέχθηκε.	121
Εικόνα 5.4: Απορροφούμενη Ενέργεια του MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας, όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.	126

1. Ο ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ VARISTOR

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1. Εισαγωγή

Το varistor είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα ισχύος, ημιαγωγός, που μπορούμε να τον συμπεριλάβουμε στην κατηγορία των ειδικών διόδων, με μία ηλεκτρική αντίσταση η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την εφαρμοσμένη τάση με τρόπο μη γραμμικό [1]. Αυτή η ημιαγωγική διάταξη λειτουργεί σαν δύο κατ' αντίθεση διόδους zener (back to back) με μία υψηλή τάση κατάρρευσης και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τα varistors διατίθενται στο εμπόριο με ποικίλες τάσης κατάρρευσης από λίγα Volts έως αρκετά KVolts. Είναι επίσης γνωστό ως «εξαρτώμενη από την τάση αντίσταση», (Voltage Dependent Resistor), (VDR), αλλά παρουσιάζει μία μη γραμμική, μη ωμική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης παρόμοια με αυτή της διόδου. Σε αντίθεση με μία δίοδο ωστόσο, έχει τα ίδια χαρακτηριστικά και για τις δύο κατευθύνσεις του ρεύματος. Η ονομασία του προέρχεται από τις αγγλικές λέξεις **variable** και **resistor** και η συνηθέστερη λειτουργία τους είναι ως μέσα προστασίας έναντι κρουστικών υπερτάσεων.

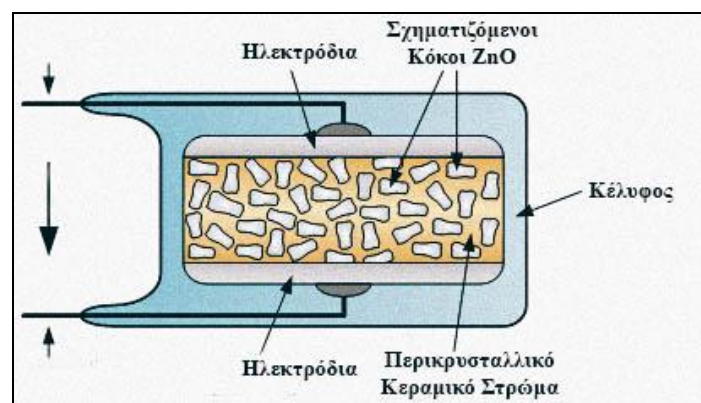
1.2. Φυσικές Ιδιότητες

1.2.1. Υλικό Κατασκευής

Τα varistors κατασκευάζονται από καρβίδιο του πυριτίου (SiC), οξείδια ψευδαργύρου (ZnO) ή τιτανίου (Ti). Ο πιο κοινός τύπος ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα είναι αυτός από μεταλλικά οξείδια (Metal Oxide Varistor) που εν συντομία αναφέρονται ως MOV. Το συνηθέστερο συστατικό είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO). Ο τύπος αυτός αναφέρεται και αναλύεται στην συνέχεια.

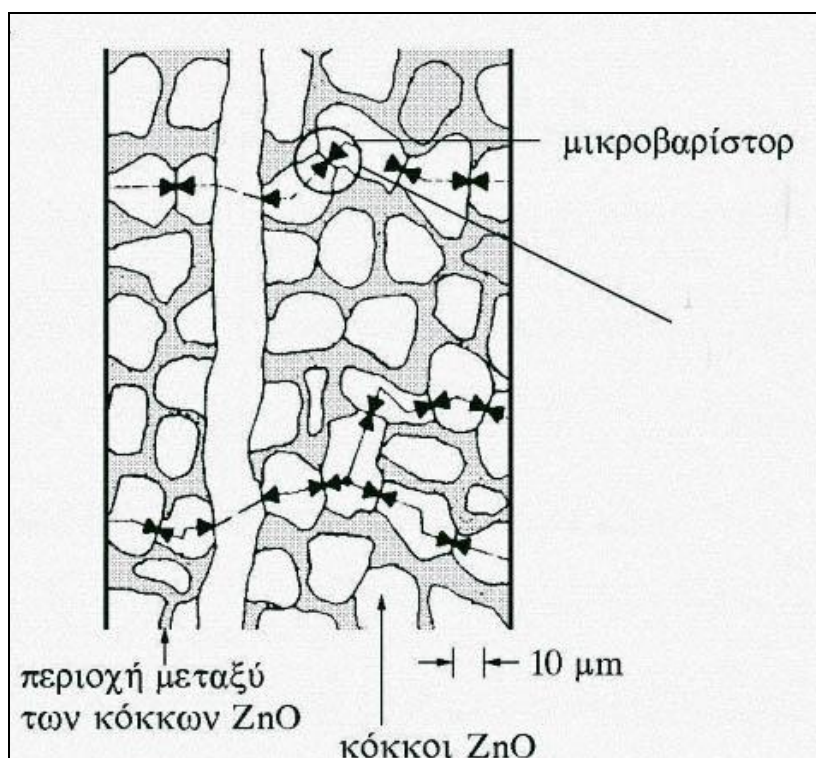
1.2.2. Τρόπος Κατασκευής και Λειτουργίας

Ένα MOV περιέχει μια μάζα από κόκκους οξειδίου του ψευδαργύρου, συμπιεσμένη σε μια κεραμική ύλη και τοποθετημένη μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών (ηλεκτρόδια) σχηματίζοντας, συνήθως, σχήμα ράβδου ή δίσκου (Εικόνα 1.1). Η περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο είναι περίπου 90% και η υπόλοιπη ποσότητα πληρώνεται με άλλα υλικά για το σχηματισμό των συνδέσεων μεταξύ των κόκκων οξειδίου του ψευδαργύρου.



Εικόνα 1.1: Το Εσωτερικό Ενός MOV.

Το όριο μεταξύ κάθε κόκκου και του γειτονικού σχηματίζει μία διόδο, η οποία επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει σε μία μόνο κατεύθυνση. Η μάζα των τυχαία προσανατολισμένων κόκκων είναι ηλεκτρικά ισοδύναμη με μία διάταξη back to back ζευγών από διόδους, κάθε ζεύγος παράλληλα με πολλά άλλα ζεύγη (Εικόνα 1.2). Όταν μια μικρή τάση εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια, μόνο ένα μικρό επίπεδο ρεύματος διαρρέει τον ημιαγωγό, εξαιτίας του ανάστροφου ρεύματος διαρροής των διόδων. Όταν όμως ένα μεγάλο επίπεδο τάσης εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια οι διόδοι λειτουργούν στην περιοχή κατάρρευσης, και έτσι προκύπτει ένα μεγάλο ρεύμα που βασίζεται στο φαινόμενο zener και το φαινόμενο της χιονοστιβάδας από την θεωρία της φυσικής των ημιαγωγών [2]. Το αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς είναι μια ιδιαίτερα μη γραμμική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης, στην οποία το MOV έχει υψηλή αντοχή σε χαμηλές τάσεις και χαμηλή αντίσταση σε υψηλές τάσεις. Τα όρια αυτά των τάσεων εξαρτώνται από την γεωμετρία και τον τρόπο παρασκευής του κάθε varistor.



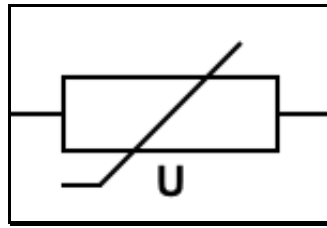
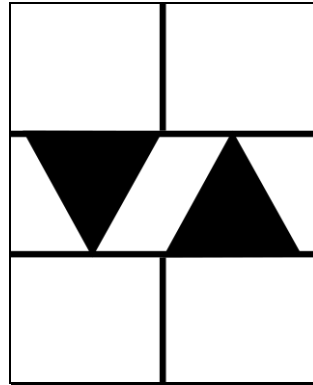
Εικόνα 1.2: Μικροσκοπική Απεικόνιση Ενός MOV¹.

1.3. Κυκλωματικός Συμβολισμός

Ο κυκλωματικός συμβολισμός ενός varistor² είναι ίδιος με αυτόν ενός thermistor με την διαφορά ότι τοποθετείται ένα U κάτω από το σύμβολο (Εικόνα 1.3). Σε πολλές βιβλιογραφικές αναφορές ωστόσο μπορεί να συναντάμε και το συμβολισμό δύο κατ' αντίθεση διόδων αναπαριστώντας την ομοιότητα του ημιαγωγού με διόδους back to back zener (Εικόνα 1.4).

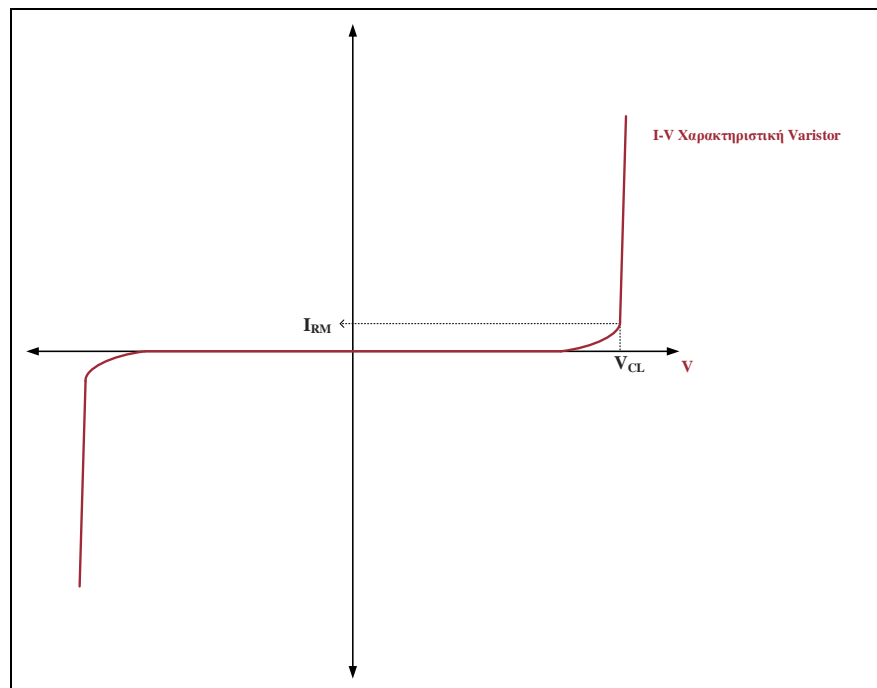
¹ Πηγή: <http://www.electronics-tutorials.ws/resistor/varistor.html>

² Κατά τα πρότυπα IEC 60617.

Εικόνα 1.3: Κυκλωματικός Συμβολισμός Varistor¹.Εικόνα 1.4: Παλαιότερος Κυκλωματικός Συμβολισμός Varistor².

1.4. Χαρακτηριστική V-I

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική λειτουργίας ενός varistor.



Σχήμα 1.1: V-I Χαρακτηριστική Λειτουργίας Ενός Varistor.

¹ Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Varistor>

² Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Varistor>

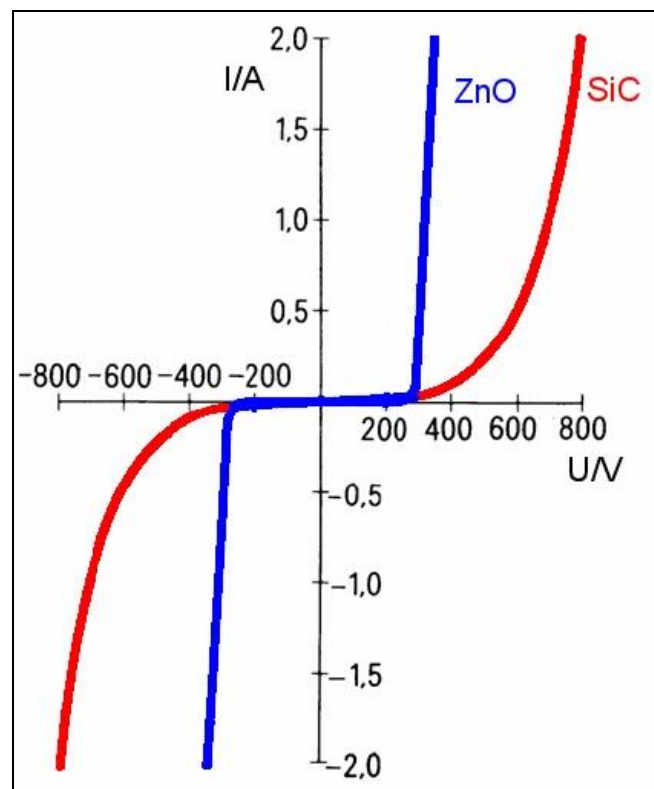
Είναι σαφές ότι ένα varistor έχει διπλής κατεύθυνσης συμμετρικά χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα να μπορεί να λειτουργήσει με τον ίδιο τρόπο στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο. Αυτός είναι και ο λόγος που η λειτουργία του παρομοιάζεται με δύο κατ' αντίθεση διόδους zener (back to back).

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη τάσης και ρεύματος φαίνεται ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης όταν το varistor δεν άγει. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα που διέρχεται μέσω της μεταβλητής του αντίστασης, I_{RM} , είναι σταθερό και πρακτικά πάρα πολύ μικρό. Αυτό το πολύ μικρό ρεύμα ονομάζεται ρεύμα διαρροής του varistor και είναι της τάξης των πολύ λίγων mA και θα διέρχεται από το εσωτερικό του μέχρι η εφαρμοσμένη τάση στα άκρα του υπερβεί την ονομαστική του τάση διάσπασης V_{CL} .

Κατά την διάρκεια του προαναφερθέντος φαινομένου, στο οποίο η εφαρμοσμένη τάση στα άκρα του είναι μικρότερη από την ονομαστική του τάση διάσπασης, το varistor βρίσκεται σε κατάσταση μη αγωγής, με σχεδόν γραμμικά χαρακτηριστικά, συμπεριφερόμενο ως σχεδόν ιδανικός μονωτής με πολύ μεγάλη αντίσταση της τάξης των $K\Omega$, επιτρέποντας μόνο το μικρό ρεύμα διαρροής. Όταν η εφαρμοσμένη τάση φτάσει την ονομαστική τάση διάσπασης, μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής, καθότι είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί στην περιοχή κατάρρευσης.

Στην κατάσταση αγωγής η αντίσταση του γίνεται πολύ μικρή. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι το ρεύμα διαρροής να αυξηθεί απότομα και να λάβει πολύ μεγαλύτερες τιμές ενώ η καμπύλη τάσης - ρεύματος γίνεται απότομη και μη γραμμική.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1.2) φαίνεται η διαφορά στην λειτουργία ενός varistor (MOV) από οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) και ενός varistor κατασκευασμένο από καρβίδιο του πυρίτιο (SiC). Είναι φανερός ο λόγος για τον οποίο τα MOV κυριαρχούν στις περισσότερες εφαρμογές σήμερα.



Σχήμα 1.2: Διαφορές στην Χαρακτηριστική Λειτουργίας Ενός Varistor ZnO και SiC.

1.5. Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Τα varistors μπορούν να προστατέψουν τον εξοπλισμό από κρουστικές υπερτάσεις με μεγάλη αξιοπιστία. Όταν δημιουργείται μια κρουστική υπέρταση, η αντίσταση του varistor μεταβαίνει σε πολύ μικρές τιμές. Το αποτέλεσμα της μεταβολής αυτή είναι η τάση στον υπό προστασία αγωγό να παραμένει σε συγκεκριμένα όρια, ωστόσο, ο ημιαγωγός διαρρέεται από κρουστικά ρεύματα μεγάλης έντασης ικανά να τον καταστρέψουν. Η επιλογή του κατάλληλου ημιαγωγού είναι πολύ σημαντική για να διατηρείται η συνέχεια της προστασίας.

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε μια σειρά από τεχνικές προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν τα varistors, κρίνεται ωστόσο απαραίτητο να γίνει μια μικρή αναφορά στην μορφή των κρουστικών ρευμάτων. Εκτενείς αναφορά σχετικά με τα αίτια δημιουργίας τους θα ακολουθήσει σε επόμενη ενότητα.

1.5.1. Χαρακτηριστικά Κρουστικών Ρευμάτων

Με τον όρο κρουστικά ρεύματα μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ισχυρούς παλμούς ρεύματος που διαρρέουν ηλεκτρικές διατάξεις και διοχετεύουν σε αυτές μεγάλες ποσότητες ενέργειας ικανές να τις καταστρέψουν [3]. Οι κυματομορφές των κρουστικών ρευμάτων ποικίλουν ανάλογα με το αίτιο της δημιουργίας τους. Συχνά εμφανίζονται σαν αποσβενούμενες ταλαντώσεις απεριοδικής μορφής. Για την μελέτη τους χρησιμοποιούνται τυπικές μορφές κυματομορφών, όπως αυτές ορίζονται από συγκεκριμένο πρότυπο¹ και έχουν είτε εκθετική είτε ορθογωνική μορφή.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1.3) διακρίνουμε μια εκθετική κυματομορφή κρουστικού ρεύματος η οποία αποτελείται από το μέτωπο και την ουρά. Ως μέτωπο χαρακτηρίζεται το τμήμα από την αρχή του χρόνου μέχρι η τιμή του ρεύματος να πάρει την μέγιστη τιμή της και έχει μικρότερη διάρκεια από την ουρά (το ρεύμα μετώπου αυξάνει απότομα) η οποία χαρακτηρίζει το υπόλοιπο τμήμα της κυματομορφής. Η τιμή του ρεύματος στην ουρά μειώνεται με βραδύτερο ρυθμό απ' ότι αυξάνεται κατά τη διάρκεια του μετώπου. Κατά τον προσδιορισμό της εκθετικής κυματομορφής χρησιμοποιείται επίσης μια σειρά από συμπληρωματικές παραμέτρους:

Εύρος (Amplitude - Peak) [I_m]: Η τιμή της κορυφής του ρεύματος.

Χρόνος Ανόδου ή Διάρκεια Μετώπου (Rise Time) [T_s]: Ορίζεται ως 1,25 φορές του χρόνου T, δηλαδή του χρόνου που χρειάζεται το ρεύμα να αυξηθεί από το 10% της μέγιστης τιμής του στο 90%.

Συμβατική Αρχή (Nominal Start) [0_I]: Ως συμβατική αρχή των χρόνων 0_I ορίζεται η χρονική στιγμή που προηγείται κατά 0.1T_s της στιγμής που το ρεύμα λαμβάνει τιμή ίση με το 10% του εύρους του.

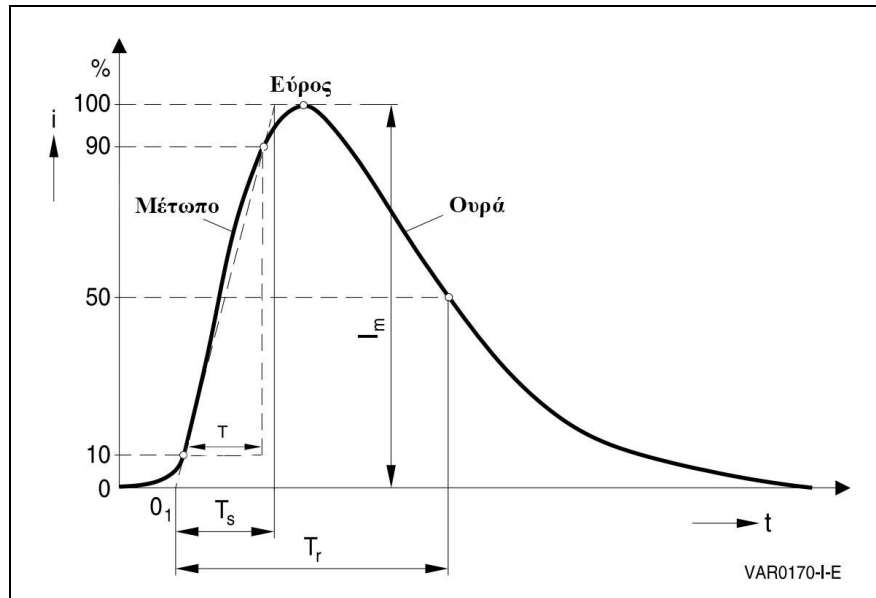
Διάρκεια Ημίσεος Εύρους (Decay Time to Half Value) [T_T]: Ο χρόνος από την συμβατική αρχή μέχρι το εύρος του ρεύματος να μειωθεί στο 50% της τιμής του.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες ανοχές για τα εκθετικά κρουστικά ρεύματα είναι ±10% για το εύρος, για τη διάρκεια μετώπου και τη διάρκεια ημίσεος εύρους. Ταλαντώσεις στην κορυφή ή μια μικρή

¹ Κατά IEC (600)60-1

υπέρβαση του εύρους μέχρι 5% είναι ανεκτές. Επίσης, αναστροφή πολικότητας μετά το μηδενισμό μπορεί να γίνει αποδεκτή εφ' όσον δεν υπερβαίνει το 20% [3].

Συχνά αναφερόμαστε στις εκθετικές κυματομορφές χρησιμοποιώντας τους όρους T_s/T_r για να προσδιορίσουμε τους αντίστοιχους χρόνους σε μs . Για παράδειγμα μια εκθετική κυματομορφή κρουστικού ρεύματος με 8/20 μs σημαίνει ότι έχει χρόνο ανόδου 8 μs και χρόνο ημίσεος εύρους 20 μs .



Σχήμα 1.3: Τυπική Εκθετική Κυματομορφή Κρουστικού Ρεύματος.¹

Όσο αναφορά τις ορθογωνικές κυματομορφές μια τυπική μορφή κατά το ίδιο πρότυπο δίνεται στο σχήμα (Σχήμα 1.4). Στην περίπτωση αυτή έχουμε μια μικρή διαφοροποίηση όσο αναφορά τους χρόνους που προαναφέρθηκαν ως εξής:

Διάρκεια Κορυφής (Duration of Peak Time) [T_D]: Ο χρόνος από την στιγμή που το ρεύμα αυξηθεί στο 90% του εύρους του, ως τη στιγμή που μειωθεί στο 90%. Ο συνολικός δηλαδή χρόνος που το ρεύμα έχει τιμή ίση ή μεγαλύτερη με το 90% του εύρους του.

Συνολική Διάρκεια (Total Duration) [T_T]: Ο χρόνος από την στιγμή που το ρεύμα αυξηθεί στο 10% του εύρους του ως τη στιγμή που θα μειωθεί στο 10% του εύρους του.

Για τα ορθογωνικά κρουστικά ρεύματα οι ανοχές τόσο για το εύρος όσο και για τη διάρκεια κορυφής τους είναι 20%. Η συνολική διάρκεια δεν πρέπει να υπερβαίνει 1,5 φορές τη διάρκεια κορυφής τους. Ταλαντώσεις στην κορυφή ή μια μικρή υπέρβαση του εύρους μέχρι 10% μπορεί να γίνει ανεκτή. Επιπλέον, αναστροφή πολικότητας μετά το μηδενισμό γίνεται δεκτή εφ' όσον το μέγιστο εύρος στην αντίθετη πολικότητα δεν υπερβαίνει το 10% του αρχικού εύρους [3].

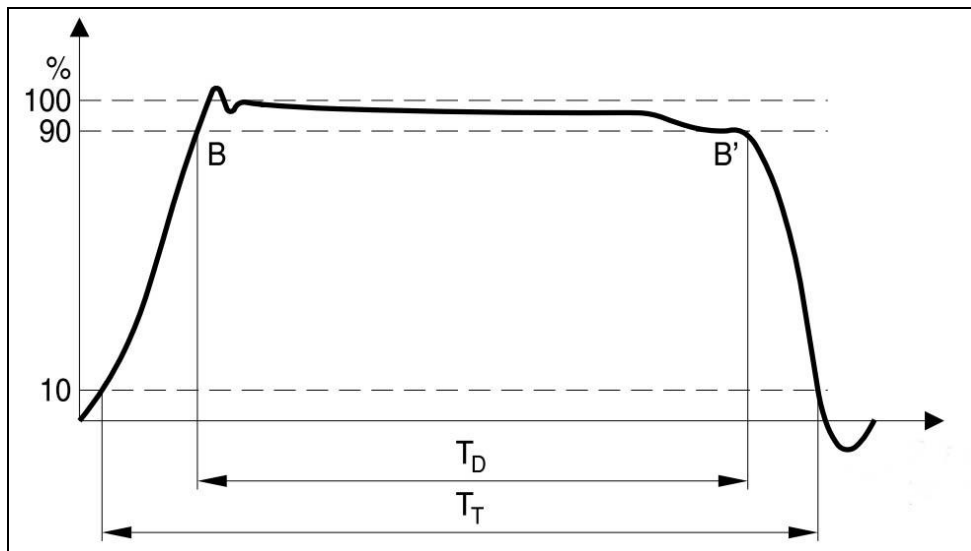
1.5.2. Μέγιστη Συνεχόμενη Τάση (Maximum Continuous Voltage) AC/DC

Αποτελεί το πρωταρχικό κριτήριο για την επιλογή ενός varistor. Η μέγιστη συνεχόμενη τάση αναφέρεται στην μέγιστη συνεχόμενη τάση η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στο varistor χωρίς αυτό

¹ Πηγή: ΚΟΚΙΔΗΣ, Δ. (2011). Διερεύνηση της λειτουργίας της γεννήτριας ισχυρών κρουστικών ρευμάτων του εργαστηρίου υψηλών τάσεων Α.Π.Θ. Διπλωματική Εργασία.

να καταστραφεί. Όσο αναφορά τις AC τάσεις χρησιμοποιούνται τιμές RMS. Συνηθέστερες ονομασίες στα φυλλάδια των κατασκευαστών είναι, maximum continuous voltage, operating voltage.

Επειδή το περιβάλλον στο οποίο επρόκειτο να τοποθετηθεί το varistor είναι γνωστό, μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε μέσω του ισοδύναμου κατά thevenin κυκλώματος, τις απαιτήσεις για τη μέγιστη συνεχόμενη τάση η οποία θα εφαρμόζεται στα άκρα του. Εφόσον προσδιορίσουμε το κατάλληλο varistor για να ικανοποιηθεί ο άνωθεν περιορισμός, στη συνέχεια εύκολα βρίσκουμε και το ρεύμα διαρροής στην τάση λειτουργίας της υπό προστασίας συσκευής, από την χαρακτηριστική V-I, το οποίο σε κάθε περίπτωση θα είναι μικρότερο του 1mA και κατά τον περισσοτέρων των περιπτώσεων αμελητέο. Το varistor στη συνεχή του λειτουργία βρίσκεται στην κατάσταση μη αγωγής με μεγάλη εσωτερική αντίσταση.



Σχήμα 1.4: Τυπική Ορθογωνική Κυματομορφή Κρουστικού Ρεύματος.¹

1.5.3. Ονομαστική Τάση Varistor (Varistor Voltage)

Είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του varistor όταν διαρρέεται από ρεύμα 1mA. Η ονομαστική τάση του varistor μπορεί επίσης να αναφέρεται στα φυλλάδια των κατασκευαστών ως voltage at 1mA ή varistor voltage.

Για λόγους ασφαλείας είναι πάντα μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη συνεχή τάση και δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να εφαρμόζουμε συνεχή τάση ίση με την ονομαστική. Η ονομαστική τάση του varistor δεν έχει καμία φυσική ερμηνεία αλλά χρησιμοποιείται για τεχνικούς λόγους, παρέχοντας έναν εύκολο τρόπο σύγκρισης μεταξύ των διαφόρων τύπων.

1.5.4. Επίπεδο Προστασίας (Maximum Clamping Voltage)

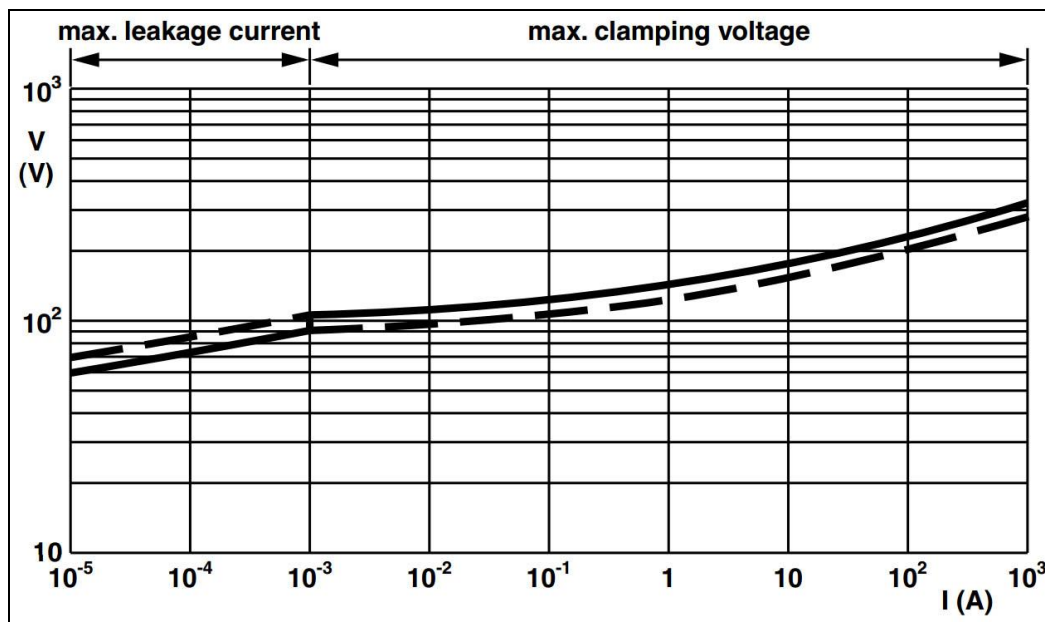
Από τη στιγμή που το varistor λειτουργεί σαν μέσο προστασίας έναντι κρουστικών υπερτάσεων θα πρέπει να γνωρίζουμε την μέγιστη πτώση τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του όταν αυτό διαρρέεται από κρουστικά ρεύματα. Η μέγιστη εμφανιζόμενη τάση όμως εξαρτάται από τα

¹ ΚΟΚΙΔΗΣ, Δ. (2011). Διερεύνηση της λειτουργίας της γεννήτριας ισχυρών κρουστικών ρευμάτων του εργαστηρίου υψηλών τάσεων Α.Π.Θ. Διπλωματική Εργασία.

χαρακτηριστικά της κυματομορφής (εύρος, διάρκεια μετώπου, διάρκεια ημίσεως εύρους) του εφαρμοζόμενου κρουστικού ρεύματος, και δεν μπορεί να χαρακτηριστεί μονοσήμαντα.

Για να μπορέσουμε να έχουμε αντιπροσωπευτική εικόνα της μέγιστης πτώσης τάσης ενός varistor όταν αυτό διαρρέεται από κρουστικό ρεύμα, εύρους I , βασιζόμαστε στην μέγιστη τάση που εμφανίζεται στα άκρα του για εκθετική κρουστική κυματομορφή με χρόνους $8/20 \mu\text{s}$ και εύρος I , όπως επιβάλλει το πρότυπο¹ των προδιαγραφών του. Μέσο της χαρακτηριστικής $V-I$ έχουμε πληροφορίες για την μέγιστη δυνατή πτώση τάσης του varistor για όλες τις δυνατές τιμές του εύρους I σε αναφορά πάντα με την πρότυπη κυματομορφή κρουστικού ρεύματος.

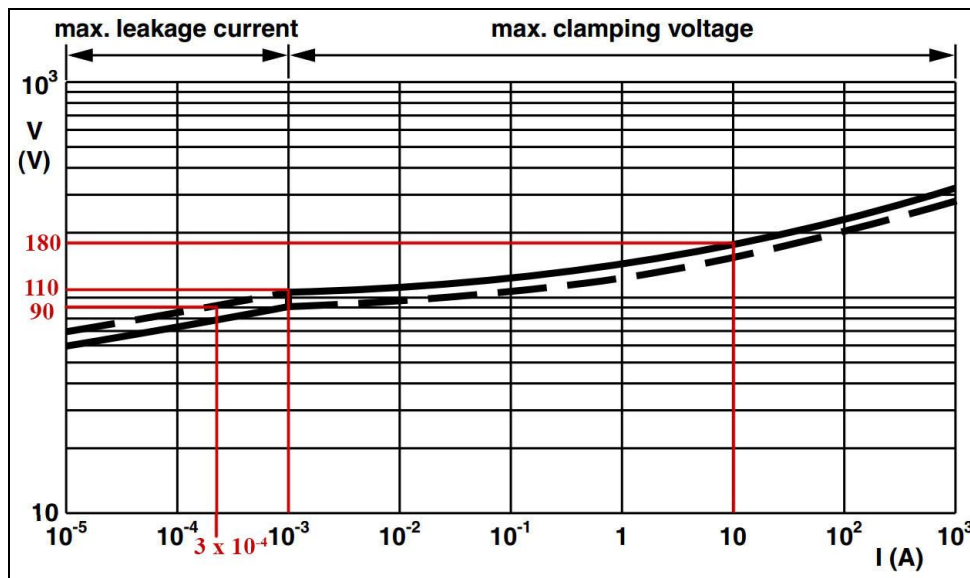
Στο σχήμα (Σχήμα 1.5) φαίνεται μια πραγματική χαρακτηριστική $I-V$ ενός varistor το οποίο έχει μέγιστη συνεχόμενη τάση $V_{\text{max(DC)}}=100\text{V}$ και λειτουργεί υπό συνεχόμενη τάση DC 90V . Με βάση την χαρακτηριστική του μπορούμε να προσδιορίσουμε (Σχήμα 1.6) το ρεύμα διαρροής στην κανονική λειτουργία ($3 \times 10^{-4}\text{A}$), την ονομαστική τάση του varistor (110V), και τη μέγιστη τάση για εύρος 10A και εκθετική κυματομορφή $8/20 \mu\text{s}$ (180V).



Σχήμα 1.5: Πραγματική Χαρακτηριστική Varistor.²

¹ Κατά IEC 60060-2, section 6

² Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>



Σχήμα 1.6: Παράμετροι από την Πραγματική Χαρακτηριστική Varistor.¹

1.5.5. Μέγιστο μη Επαναλαμβανόμενο Κρουστικό Ρεύμα (Maximum Non Repetitive Surge Current)

Το μέγιστο μη επαναλαμβανόμενο κρουστικό ρεύμα αναφέρεται στο μέγιστο εύρος που μπορεί να λάβει το κρουστικό ρεύμα χωρίς το varistor να καταστραφεί, ωστόσο, μπορεί να το διαχειριστεί μια φορά σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Όπως στον προηγούμενο ορισμό, η τιμή αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κρουστικής κυματομορφής.

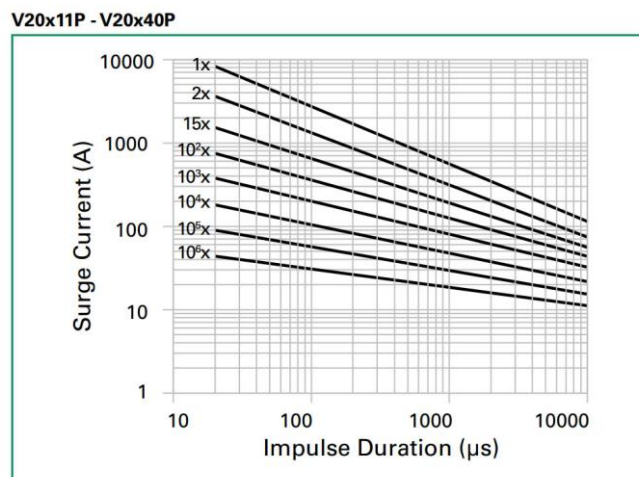
Με σκοπό να χαρακτηρίσουμε την ικανότητα του varistor να διαχειριστεί ένα μέγιστο μη επαναλαμβανόμενο κρουστικό ρεύμα, χρησιμοποιούμε μια πρότυπη εκθετική κυματομορφή², 8/20 μs με ένα τέτοιο εύρος έτσι ώστε η τάση του varistor να μην υπερβαίνει κατά 10% την ονομαστική του τάση. Εάν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εκτίθεται σε περισσότερους του ενός παλμούς κρουστικού ρεύματος τέτοιας μορφής ή η διάρκεια του/τους είναι μεγαλύτερη των 20 μs πρέπει να κάνουμε αναπροσαρμογή των μεγεθών (derating). Η διαδικασία αυτή είναι περίπλοκη αλλά απλουστεύεται με χρήση των διαγραμμάτων που παρέχονται στα φυλλάδια των προδιαγραφών.

Η ονοματολογία στο φυλλάδιο των κατασκευαστών είναι συνήθως Maximum Non Repetitive Surge Current ή Max Peak Current.

Ένα τυπικό varistor σχήμα δίσκου και διαμέτρου 20mm έχει χαρακτηριστικά: Max Peak Current (8 x 20μs 1 pulse) – 8000A. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να διαχειριστεί μόνο ένα εκθετικό παλμό κρουστικού ρεύματος 8/20 μs και εύρους 8000A ή ισοδύναμα 1000 παλμούς, 8/100 μs με εύρος 200A χωρίς να καταστραφεί. Το διάγραμμά του για αναπροσαρμογή των μεγεθών (derating) δίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.7).

¹ Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>

² Κατά IEC 60060-2, section 6



Σχήμα 1.7: Μέγιστη Επιτρεπόμενη Κορυφή Ρεύματος σε Συνάρτηση με τον Αριθμό των Παλμών και τη Διάρκεια τους.¹

1.5.6. Μέγιστη Απορροφούμενη Ενέργεια (Maximum Energy)

Κατά τη διάρκεια ενός κρουστικού ρεύματος, απορροφάτε από το varistor μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, η ποσότητα της ενέργειας αυτής είναι συνάρτηση του εύρους του ρεύματος, την πτώσης τάσης του varistor, της διάρκειας του μετώπου, της διάρκειας ημίσεως εύρους (ενδεικτικά, η μέγιστη ενέργεια απορροφάτε όταν το ρεύμα αποκτά τη μέγιστη τιμή του, μέχρι τη στιγμή που μειώνεται στο 50% του εύρους του) και τα χαρακτηριστικά του ημιαγωγού. Γενικά, η τιμή της απορροφούμενης ενέργειας δίνεται από τον τύπο:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} v(t)i(t)dt$$

(Εξίσωση 1.1)

όπου:

- $v(t)$: η πτώση τάσης στο varistor

Θεωρώντας την τιμή του ρεύματος και την πτώση τάσης σταθερή ίση με την μέγιστη τιμή τους για χρόνο όσο ο χρόνος ημίσεως εύρους, χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική απορροφούμενη ενέργεια από την εξίσωση:

$$E = V_{peak} \cdot I_{peak} \cdot t_2 \cdot K$$

(Εξίσωση 1.2)

όπου:

- I_{peak} : το εύρος του κρουστικού ρεύματος
- V_{peak} : η μέγιστη πτώση τάσης στα άκρα του varistor
- t_2 : ο χρόνος ημίσεως εύρους
- K : μια σταθερά που εξαρτάται από το t_2

¹ Πηγή: Littelfuse. (2015). MOV Technical Notes. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Littelfuse: <http://www.littelfuse.com/>

Το K χρησιμοποιείται ως ένας συντελεστής διόρθωσης της τιμής V_{peak} καθώς αυτή αναφέρεται σε εκθετική κυματομορφή κρουστικού ρεύματος 8/20 μs , με εύρος I_{peak} (Παράγραφος 1.5.4) ενδεικτικές τιμές φαίνονται στο παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 1.1: Πίνακας Παραμέτρου K για τον Υπολογισμό της Απορροφούμενης Ενέργειας.¹

K DEPENDS ON t_2 WHEN t_1 IS 8 μs TO 10 μs	
t_2 (μs)	K
20	1
50	1.2
100	1.3
1000	1.4

Με σκοπό να χαρακτηρίσουμε την μέγιστη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του varistor χρησιμοποιούμε μια πρότυπη² κυματομορφή 10/1000 μs με ένα τέτοιο εύρος έτσι ώστε η τάση του varistor να μην υπερβαίνει κατά 10% την ονομαστική του τάση. Η μέγιστη αυτή ικανότητα δεν αποτελεί στοιχείο της ποιότητας του ημιαγωγού αλλά είναι μια πολύτιμη ένδειξη όταν θέλουμε να συγκρίνουμε διάφορους τύπους varistors οι οποίοι έχουν την ίδια ονομαστική τάση.

1.5.7. Χωρητικά Χαρακτηριστικά (Capacitance)

Ένα MOV, συμπεριφέρεται ως πυκνωτής με διηλεκτρικό το υλικό κατασκευής του (ZnO). Τα χωρητικά χαρακτηριστικά του εξαρτώνται από το υλικό, το μέγεθος, και γενικώς, μπορούμε να πούμε ότι αυξάνονται με την διάμετρο του (και επομένως με την ικανότητα του να διαχειρίζεται κρουστικά ρεύματα μεγάλου εύρους) και μειώνεται με το πάχος του (άρα με το επίπεδο προστασία του). Η τυπική τιμή για ένα MOV διαμέτρου 7-20 mm είναι στην περιοχή των 100-2,500 pF. Η συμπεριφορά αυτή του varistor, ως πυκνωτής, είναι επιθυμητή γιατί ως μέσο προστασίας έναντι υπερτάσεων, βελτιώνει το επίπεδο προστασίας του.

Σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος, η χωρητικότητα του varistor παραμένει περίπου σταθερή υπό την προϋπόθεση η εφαρμοζόμενη τάση να παραμένει και εκείνη σταθερή κάτω από το όριο της μέγιστης συνεχόμενης τάσης του ημιαγωγού, και πέφτει απότομα όταν φτάσει ή υπερβεί την τιμή αυτή (τη μέγιστη συνεχόμενη τάση).

Σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος, η χωρητικότητα μπορεί να επηρεάσει την παράλληλη αντίσταση στην περιοχή μη αγωγής (βλ. 1.6.1), είναι περίπου γραμμική με τη συχνότητα και η προκύπτουσα παράλληλη αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $\frac{1}{\omega C}$ όπως σε κάθε συνήθη πυκνωτή. Παρ' όλα αυτά, λόγω των δομικών χαρακτηριστικών των MOV ψευδαργύρου, η χωρητικότητα μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της συχνότητας. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο όταν η συχνότητα φτάνει περίπου τα 100 kHz.

¹ Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>

² Κατά IEC 60060-2, section 6

1.5.8. Επαγωγικά Χαρακτηριστικά (Lead Inductance)

Τα επαγωγικά χαρακτηριστικά του ημιαγωγού οφείλονται στο ηλεκτρόδιο σύνδεσης του. Η τιμή της επαγωγής του συνεπώς είναι πολύ μικρή ($\approx 1 \text{ nH/mm}$) ωστόσο είναι πολύ σημαντική όσο αφορά τον χρόνο απόκρισης του ημιαγωγού. Επιδιώκουμε όσο το δυνατό μικρότερη αυτεπαγωγή (π.χ. με χρήση μικρότερων ηλεκτροδίων σύνδεσης) έτσι ώστε να έχουμε ταχύτερους χρόνους απόκρισης.

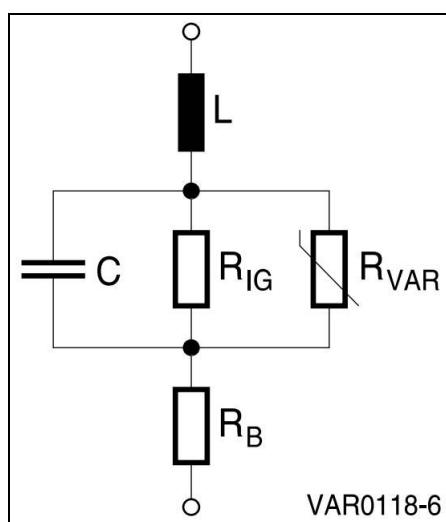
1.5.9. Χρόνος Απόκρισης (Response Time)

Η δράση του varistor εξαρτάται από ένα μηχανισμό αγωγιμότητας παρόμοιο με εκείνη των άλλων ημιαγωγών. Για το λόγο αυτό, η μετάβαση στην περιοχή αγωγής λαμβάνει χώρα πολύ γρήγορα, χωρίς προφανή χρονική καθυστέρηση, ακόμα και μέσα σε χρόνο του επιπέδου των nanosecond (ns). Παρόλα αυτά ο χρόνος απόκρισης δεν μπορεί να τυποποιηθεί καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ενδεικτικά, μπορεί να γίνει μεγαλύτερος εξαιτίας της αυτεπαγωγής που παρουσιάζουν τα ηλεκτρόδια σύνδεσης τους, σε κάθε περίπτωση όμως ο ημιαγωγός θα επενεργήσει σε χρόνο στο επίπεδο των ns παρέχοντας πολύ καλή προστασία έναντι κρουστικών υπερτάσεων (μs).

1.6. Ισοδύναμο κύκλωμα MOV

Το σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1.8) παρουσιάζει το ισοδύναμο κύκλωμα ενός MOV στο οποίο παρουσιάζεται τα εξής χαρακτηριστικά:

- C: η χωρητικότητα του varistor
- L: η επαγωγή των ηλεκτροδίων ($\approx 1 \text{ nH/mm}$)
- R_{IG} : η αντίσταση της κεραμικής ύλης ($\rho \approx 10^{12}$ έως $10^{13} \Omega\text{m}$)
- R_{VAR} : η αντίσταση του ιδανικού varistor (0 έως $\infty \Omega$)
- R_B : η αντίσταση των κόκκων ZnO ($\rho \approx 1$ έως $10 \Omega\text{m}$)



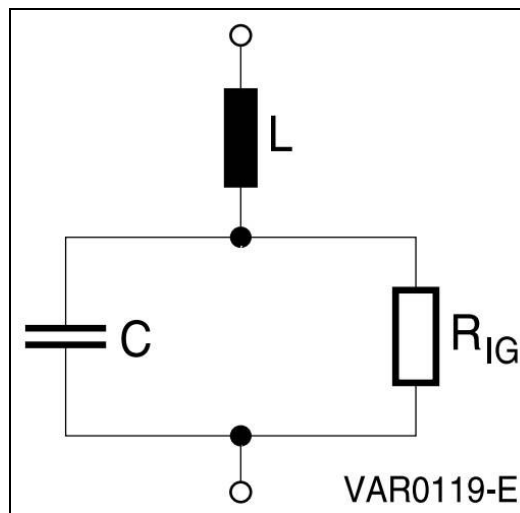
Σχήμα 1.8: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV. ¹

¹ Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

1.6.1. Ισοδύναμο Κύκλωμα στην Περιοχή Ρευμάτων Διαρροής (Leakage Region of Operation)

Όταν το varistor λειτουργεί σε τιμή μικρότερη ή ίση με την τιμή της μέγιστης ονομαστικής συνεχόμενης τάσης λειτουργίας του, τότε διαρρέεται από πολύ μικρά ρεύματα, μικρότερα από 1mA. Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση του ιδανικού varistor γίνεται πολύ μεγάλη, ταυτόχρονα ισχύει $R_B \ll R_{IG}$. Με τις συνθήκες αυτές στην περιοχή για πολύ μικρά ρεύματα διαρροής (συνήθως $<10^{-4}$ A) το ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιείται και λαμβάνει τη μορφή του σχήματος (Σχήμα 1.9). Η R_{VAR} παράλληλα με την R_{IG} δημιουργούν μια ισοδύναμη αντίσταση που αποτελείται μόνο από την R_{IG} και η εν σειρά αντίσταση R_B μπορεί να παραλειφθεί.

- $R_{VAR} = \infty$
- $R_B \ll R_{IG}$



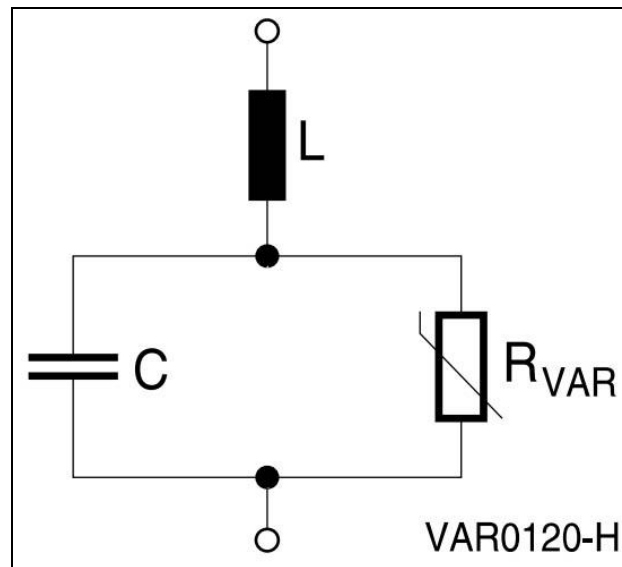
Σχήμα 1.9: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV στην Περιοχή Ρευμάτων Διαρροής.¹

1.6.2. Ισοδύναμο Κύκλωμα στην Περιοχή Κανονικής Λειτουργίας (Nominal Varistor Region of Operation)

Όταν το varistor βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις, στην πρώτη περίπτωση διαρρέεται από ρεύματα μικρότερα από το μέγιστο κρουστικό ρεύμα κατά περίπου 20% και μεγαλύτερα σαφώς από το ρεύμα διαρροής. Τυπικές τιμές για την περίπτωση αυτή είναι περίπου 10^{-5} έως 10^3 A, φυσικά όμως οι τιμές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του varistor. Στην περίπτωση αυτή $R_{VAR} \ll R_{IG}$ καθώς η αντίσταση του ημιαγωγού είναι πολύ μικρή στην κατάσταση αγωγής και $R_B \ll R_{VAR}$ επομένως το κύκλωμα παίρνει την ισοδύναμη μορφή του σχήματος (Σχήμα 1.10). Η R_{VAR} παράλληλα με την R_{IG} δημιουργούν μια ισοδύναμη αντίσταση που αποτελείται μόνο από την R_{VAR} και η εν σειρά αντίσταση R_B μπορεί να παραλειφθεί.

- $R_{VAR} \ll R_{IG}$
- $R_B \ll R_{VAR}$

¹ Πηγή: Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

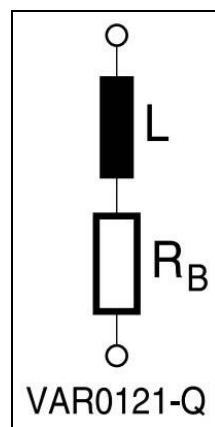


Σχήμα 1.10: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV στην Κανονική Λειτουργία.¹

1.6.3. Ισοδύναμο Κύκλωμα στην Άνω Περιοχή Λειτουργίας (Up Turn Region of Operation)

Τέλος, μπορούμε να διακρίνουμε, την περίπτωση την οποία το MOV διαρρέεται από ρεύματα που προσεγγίζουν την μέγιστη δυνατή τιμή ρεύματος κορυφής (τυπική τιμή 10^3 A). Στην περίπτωση αυτή η R_{VAR} είναι σχεδόν μηδενική και $R_{VAR} < R_B$ επομένως το κύκλωμα παίρνει την ισοδύναμη μορφή του σχήματος (Σχήμα 1.11). Η R_{VAR} παράλληλα με την R_{IG} δημιουργούν μια ισοδύναμη αντίσταση που αποτελείται μόνο από την R_{VAR} η οποία μπορεί να παραλειφθεί, συνδεόμενη εν σειρά με την αντίσταση R_B .

- $R_{VAR} = 0$
- $R_{VAR} < R_B$



Σχήμα 1.11: Ισοδύναμο Κύκλωμα MOV στην Άνω Περιοχή Λειτουργίας.²

¹ Πηγή: Πηγή: Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

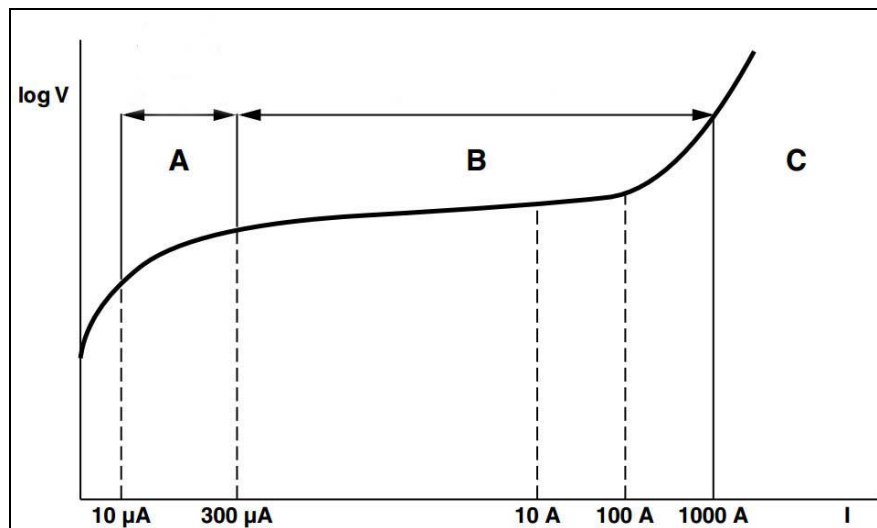
² Πηγή: Πηγή: Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

1.7. Πραγματική Χαρακτηριστική V-I

Η προσέγγιση της ιδανικής χαρακτηριστικής του ημιαγωγού είναι αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών λειτουργίας που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η παρούσα ενότητα είναι επίσης πολύ χρήσιμη όσο αναφορά την επιλογή και την ρύθμιση των varistors σε υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης.

1.7.1. Περιοχές Λειτουργίας Varistor

Όπως είδαμε, ένα varistor μπορεί να λειτουργεί υπό συνεχόμενη τάση ευρισκόμενο σε κατάσταση μη αγωγής με μεγάλη εσωτερική αντίσταση, να διαρρέεται από κρουστικά ρεύματα ψαλιδίζοντας τις κρουστικές υπερτάσεις, σε κατάσταση αγωγής, με πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση και τέλος να διαρρέεται από ρεύματα πολύ κοντά ή ίσα στο μέγιστο μη επαναλαμβανόμενο κρουστικό ρεύμα. Οι περιοχές αυτές μπορούν να οριστούν στο διάγραμμα όπως φαίνεται στο σχήμα (Σχήμα 1.12) για ένα τυπικό varistor.



Σχήμα 1.12: Περιοχές Λειτουργίας Varistor.¹

Περιοχή Α (Leakage Region): Περιοχή Ρευμάτων Διαρροής, (υπό συνεχόμενη τάση). Το ρεύμα που διαρρέει τον ημιαγωγό (ρεύμα διαρροής), περιορίζεται στις μικρότερες δυνατές τιμές έτσι ώστε να έχουμε πολύ λίγες απώλειες. Το άνω όριο προσδιορίζεται από το ρεύμα διαρροής στην μέγιστη συνεχόμενη τάση του varistor (παράγραφος 1.5.2).

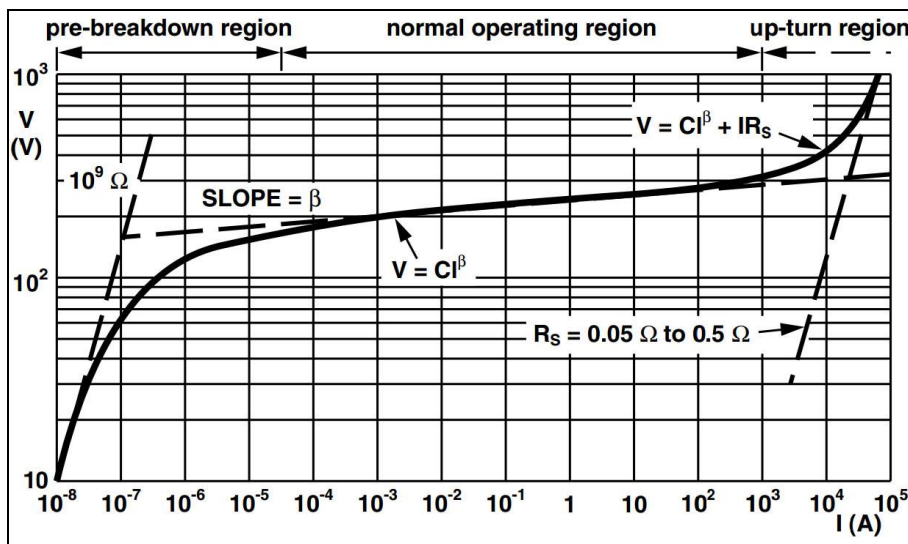
Περιοχή Β (Nominal Region): Κανονική Λειτουργία ή Ζώνη Προστασίας. Ο ημιαγωγός διαρρέεται από κρουστικά ρεύματα δημιουργώντας πτώση τάσης στα άκρα του. Ταυτόχρονα η αντίσταση του είναι αρκετά μικρή και βρίσκεται στην κατάσταση αγωγής.

Περιοχή Γ (Up Turn Region): Ανώτερη περιοχή, ο ημιαγωγός διαρρέεται από κρουστικά ρεύματα που προσεγγίζουν τη μέγιστη δυνατότητα του. Το εύρος του μέγιστου μη επαναλαμβανόμενου κρουστικού ρεύματος, προσδιορίζει το άνω όριο της περιοχής (παράγραφος 1.5.5).

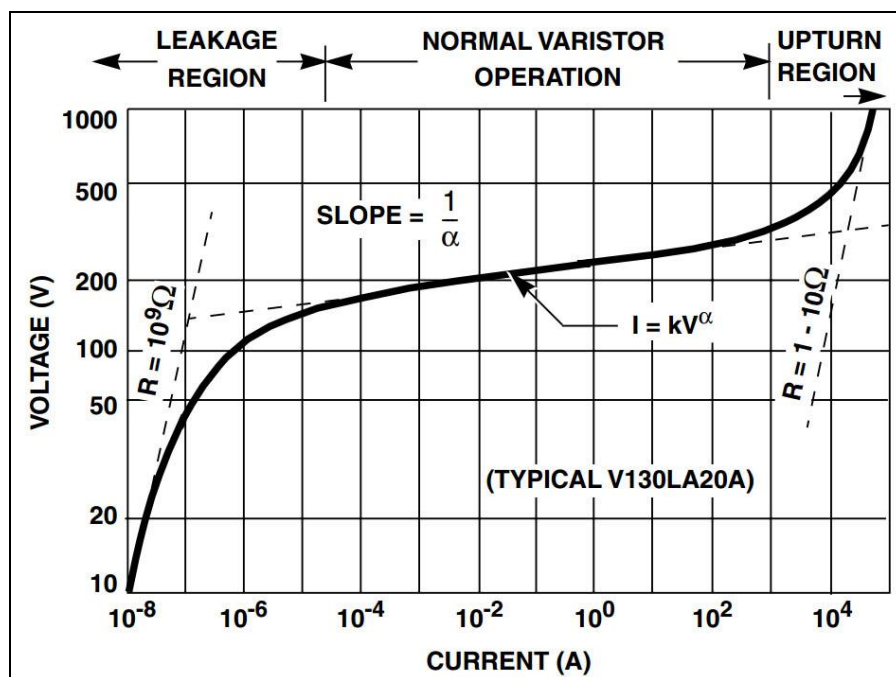
¹ Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>

1.7.2. Μαθηματική Προσέγγιση Χαρακτηριστικής

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 1.13, Σχήμα 1.14) φαίνεται μια τυπική πραγματική χαρακτηριστική ενός varistor. Για να μπορέσουμε να διατυπώσουμε τις μαθηματικές εκφράσεις που την διέπουν αναφερόμαστε στις επιμέρους περιοχές της, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Θα ξεκινήσουμε την περιγραφή από την περιοχή κανονικής λειτουργίας που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.



Σχήμα 1.13: Πραγματική Χαρακτηριστική V-I ενός MOV.¹



Σχήμα 1.14: Πραγματική Χαρακτηριστική I-V ενός MOV.²

¹ Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>

² Πηγή: Πηγή: Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

Περιοχή Β (Κανονική Λειτουργία):

Η χαρακτηριστική του varistor ακολουθεί την εξίσωση:

$$I = K V^{\alpha}$$

(Εξίσωση 1.3)

η οποία έχει την τυπική μορφή του σχήματος (Σχήμα 1.15), όπου:

- I : το ρεύμα που διαρρέει τον ημιαγωγό
- V : η τάση στους ακροδέκτες του
- K : μια σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του varistor
- α : συντελεστής μη γραμμικότητας, $\alpha > 1$

Ο συντελεστής α , εκφράσει το βαθμός της μη γραμμικότητας και μπορεί να προσδιοριστεί από την κλίση της χαρακτηριστικής (Σχήμα 1.16) καθώς και με χρήση της κατάλληλης εξίσωσης (Εξίσωση 1.7).

Το varistor, έχει προσδιοριστεί ως εξαρτώμενη από την τάση αντίσταση, για το λόγο αυτό μια άλλη πιθανή ερμηνεία της φυσικής αρχής που διέπει αυτές τις καμπύλες προκύπτει ως εξής (Σχήμα 1.17):

$$R = \frac{V \text{ (Εξίσωση 1.3)}}{I}$$

$$R = \frac{V}{K V^{\alpha}} = \frac{1}{K} V^{1-\alpha}$$

(Εξίσωση 1.4)

Οι δύο αυτές εξισώσεις (Εξίσωση 1.3),(Εξίσωση 1.4) μπορούν να παρασταθούν λεπτομερώς χρησιμοποιώντας μια λογαριθμική κλίμακα (log-log scale), όπου εμφανίζονται ως ευθείες γραμμές παρέχοντας αντιπροσωπευτικότερη απεικόνιση (Σχήμα 1.18,Σχήμα 1.19).

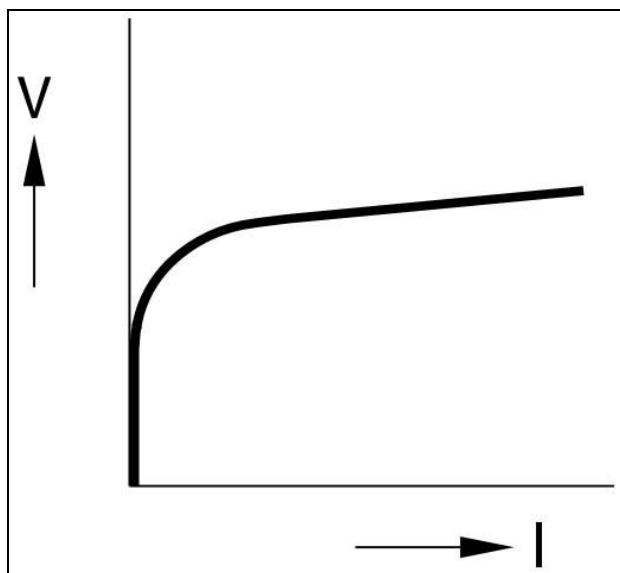
$$\log(I) = \log(K) + \alpha \log(V)$$

(Εξίσωση 1.5)

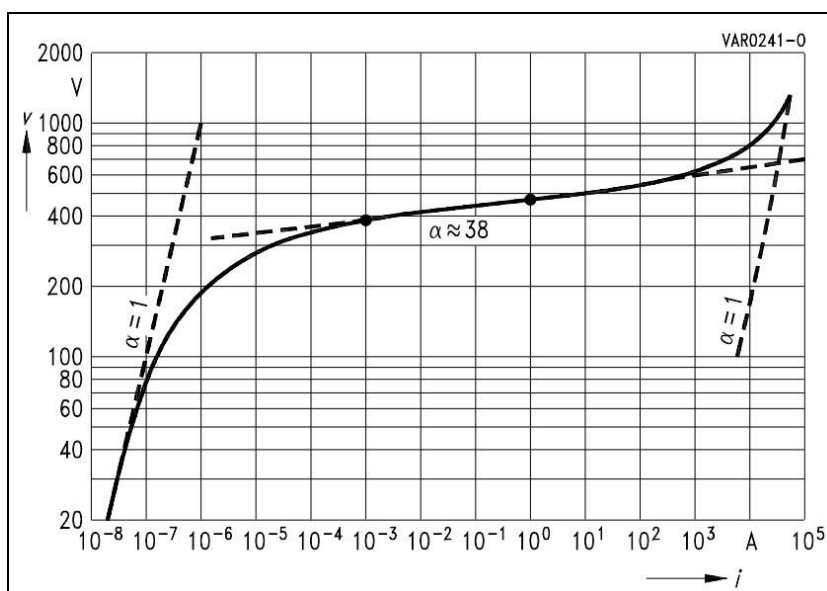
$$\log(R) = \log\left(\frac{1}{K}\right) + (1 - \alpha)\log(V)$$

(Εξίσωση 1.6)

Ο ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ VARISTOR



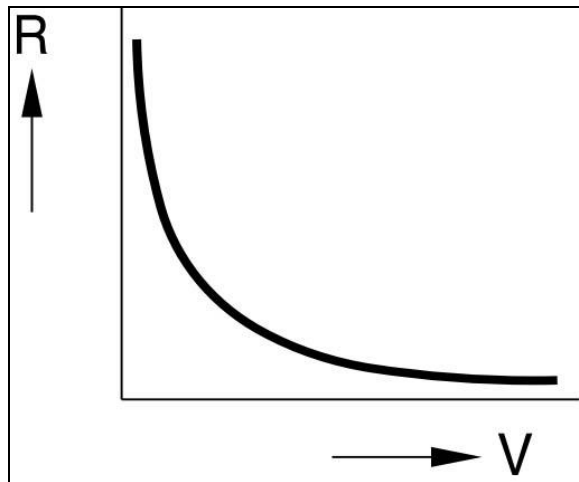
Σχήμα 1.15: Τυπική I-V Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία.¹



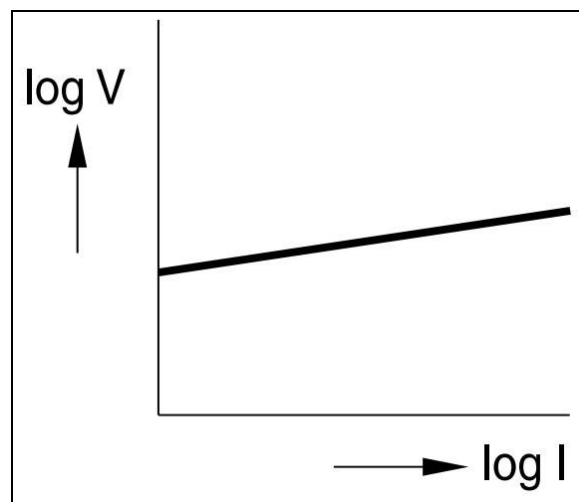
Σχήμα 1.16: Συντελεστής μη Γραμμικότητας “α”.²

¹ Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS:
<http://www.epcos.com/>

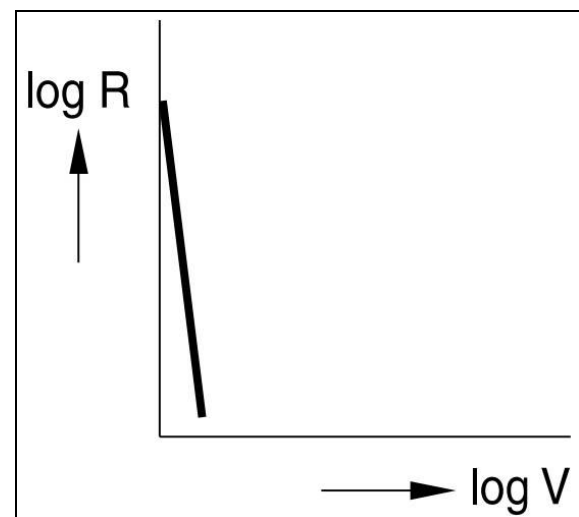
² Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY:
<http://www.vishay.com/>



Σχήμα 1.17: Τυπική V-R Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία.¹



Σχήμα 1.18: Τυπική I-V Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία σε Λογαριθμική Κλίμακα (log).



Σχήμα 1.19: Τυπική V-R Χαρακτηριστική στην Κανονική Λειτουργία σε Λογαριθμική Κλίμακα (log).

¹ Πηγές σχημάτων: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

Επιλέγοντας δύο ζεύγη τιμών I, V από την χαρακτηριστική και τοποθετώντας τα στην 1.5 (Εξίσωση 1.5) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή του συντελεστή a .

$$a = \frac{\log(I_2) - \log(I_1)}{\log(V_2) - \log(V_1)}$$

(Εξίσωση 1.7)

Επιλύοντας την 1.3 (Εξίσωση 1.3), ως προς V έχουμε:

$$I = KV^a$$

$$\frac{I}{K} = V^a$$

$$\frac{1}{a} \ln \frac{I}{K} = \ln V$$

$$\ln \left(\frac{I}{K} \right)^{\frac{1}{a}} = \ln V$$

$$I^{\frac{1}{a}} \frac{1}{K^{\frac{1}{a}}} = V$$

θέτοντας:

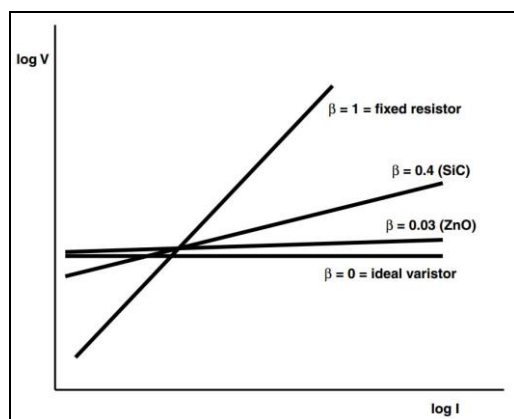
- $\frac{1}{K^{\frac{1}{a}}} = C$
- $\frac{1}{a} = \beta$

η εξίσωση έχει την τελική μορφή:

$$V = CI^\beta$$

(Εξίσωση 1.8)

όπου και πάλι το β εκφράζει τη μη γραμμικότητα της συνάρτησης (Σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.20: Χαρακτηριστικά Ημιαγωγού για Διάφορες Τιμές του β .¹

¹ Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>

Η σημασία της 1.8 (Εξίσωση 1.8) είναι διττή, αφενός εκφράζει την τάση στα άκρα του ημιαγωγού σε συναρτήσει με το ρεύμα που τον διαρρέει, αφετέρου είναι πολύ πιο εύκολη στη χρήση της από την 1.3 (Εξίσωση 1.3) στην οποία η σταθερά K είναι πολύ μικρός αριθμός. Ένα απλό παράδειγμα, στην χαρακτηριστική του σχήματος 1.16 (Σχήμα 1.16) επιλέγουμε δύο ζεύγη τιμών για να προσδιορίσουμε το συντελεστή α .

- $I_2 = 1 \text{ A}$ και $V_2 = 470 \text{ V}$
- $I_1 = 10^{-3} \text{ A}$ και $V_1 = 390 \text{ V}$

Με χρήση της 1.7 (Εξίσωση 1.7), υπολογίζουμε τον συντελεστή α :

$$\alpha = \frac{\log(I_2) - \log(I_1)}{\log(V_2) - \log(V_1)} = \frac{\log(1) - \log(10^{-3})}{\log(470) - \log(390)} = \frac{0 + 3}{2,67 - 2,59} = \frac{3}{0,08} \approx 38$$

Με χρήση της 1.3 (Εξίσωση 1.3), υπολογίζουμε τον συντελεστή K :

$$I = KV^a \Rightarrow K = \frac{I}{V^a} = \frac{1}{470^{38}}$$

αντιθέτως από τις σχέσεις της 1.8 (Εξίσωση 1.8):

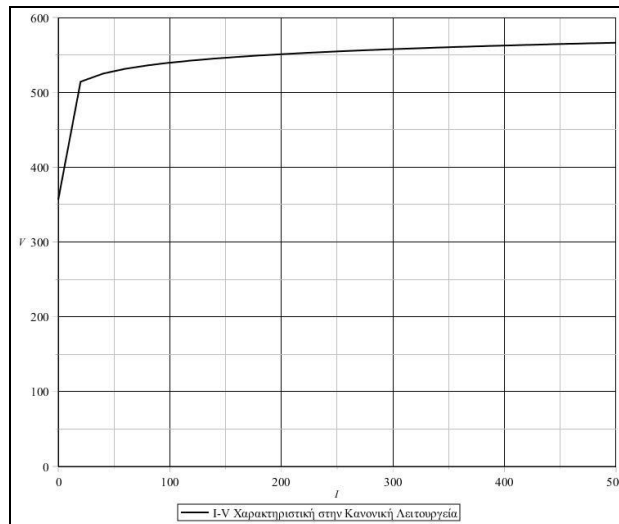
$$\beta = \frac{1}{\alpha} \approx 0,03$$

$$C = \frac{1}{K^{\frac{1}{\alpha}}} = 470^1$$

και τελικά η εξίσωση παίρνει την τελική μορφή:

$$V = 470I^{0,03}$$

με τη βοήθεια του Matlab εξάγουμε τη γραφική της παράσταση (Σχήμα 1.21), που είναι σε συμφωνία με την χαρακτηριστική I-V του ημιαγωγού στην κανονική λειτουργία (Σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.21: Μαθηματική Προσέγγιση I-V Χαρακτηριστικής στην Κανονική Λειτουργία όπως Προκύπτει από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα MATLAB.

¹ Ο συντελεστής C μπορεί ευκολότερα να προσδιοριστεί από την τάση του ημιαγωγού σε κρουστικό ρεύμα 1 A.

Περιοχή Β (Περιοχή Διαρροής Μικρών Ρευμάτων):

Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση που ορίστηκε στην κανονική λειτουργία δεν ισχύει απόλυτα καθώς η τάση στα άκρα του varistor εξαρτάται κυρίως από την ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση της κεραμικής ύλης, R_{IG} , όπως αυτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 1.6.1. Από μαθηματικής σκοπιάς μπορούμε να πούμε ότι ισχύει η σχέση:

$$V = \alpha I^1$$

(Εξίσωση 1.9)

Περιοχή C (Ανώτερη περιοχή):

Ισχύει ότι και στην περιοχή Β, εδώ η τάση του varistor εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την εν σειρά ισοδύναμη αντίσταση των κόκκων ZnO , R_B , όπως αυτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 1.6.3. Εδώ ισχύει η σχέση:

$$V = CI^{\beta} + IR_B$$

(Εξίσωση 1.10)

1.8. Πρόσθετα Χαρακτηριστικά

Έχοντας αποσαφηνίσει βασικές λειτουργίες του varistor μπορούμε να ολοκληρώσουμε την παράγραφο 1.5 παρουσιάζοντας όλες τις τεχνικές προδιαγραφές που διέπουν την λειτουργία του ημιαγωγού.

1.8.1. Επίδραση Θερμοκρασίας (Temperature Coefficient)

Όπως κάθε ημιαγωγός έτσι και το varistor εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας του, η επίδραση αυτή είναι ωστόσο διαφορετική για κάθε περιοχή λειτουργίας του.

Στην περιοχή διαρροής μικρών ρευμάτων η επίδραση από την θερμοκρασία είναι μεγάλη, αυτό οφείλεται στην ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση, R_B , (1.6.1) η οποία παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση από την θερμοκρασία λειτουργίας. Τα όσα αναφέρθηκαν σχετικά με την λειτουργία του ημιαγωγού αναφέρονται σε θερμοκρασία αναφοράς 25°C , αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση των ρευμάτων διαρροής. Η σχέση μεταξύ των ρευμάτων διαρροής και της θερμοκρασίας δίνεται από την σχέση:

$$I = I_0 e^{KT}$$

(Εξίσωση 1.11)

όπου:

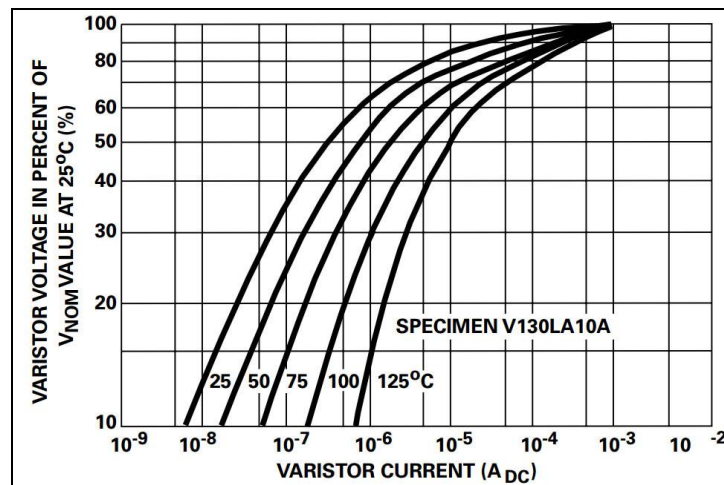
- I_0 μια σταθερά που εκφράζει το ρεύμα διαρροής σε θερμοκρασία 0 K
- K σταθερά του Boltzmann
- T η θερμοκρασία σε βαθμούς K

¹ Υπενθυμίζουμε τη σημασία του συμβόλου α : «Ανάλογο του»

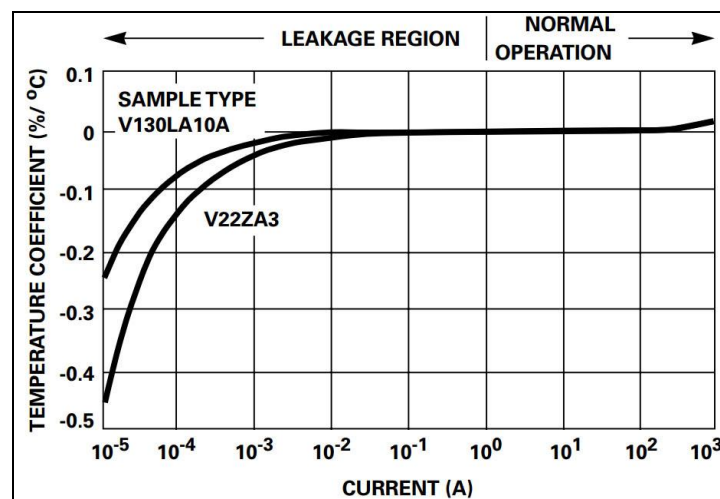
Στο σχήμα (Σχήμα 1.22) δίνεται η εξάρτηση των ρευμάτων διαρροής για ένα τυπικό varistor. Στις δύο εναπομείναντες περιοχές η εξάρτηση αυτή γίνεται μικρότερη και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (Σχήμα 1.23). Παρόλα αυτά όταν ο ημιαγωγός λειτουργεί σε μεγάλες θερμοκρασίες (συνήθως πάνω από 85°C) θα πρέπει να κάνουμε αναπροσαρμογή των χαρακτηριστικών του (τάση λειτουργίας, μέγιστο μη επαναλαμβανόμενο κρουστικό ρεύμα, μέγιστη απορροφούμενη ενέργεια) καθώς η θερμοκρασία αυτή επιδρά στη λειτουργία του. Ένα τέτοιο παράδειγμα επίδρασης δίνεται στο σχήμα (Σχήμα 1.24), για ένα τυπικό varistor.

1.8.2. Ανέχεια Σφάλματος (Tolerance)

Τα χαρακτηριστικά ενός ημιαγωγού, όπως συμβαίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων, εμφανίζουν αποκλίσεις ακόμη και όταν έχουμε να συγκρίνουμε δύο ακριβώς ίδια varistor. Από τεχνικής άποψης θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν τις αποκλίσεις αυτές ή οποίες δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνουν το μέγιστο επιτρεπτό όριο σφάλματος $\pm 10\%$. Τα όρια αυτά δίνονται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1.25) για ένα τυπικό varistor.

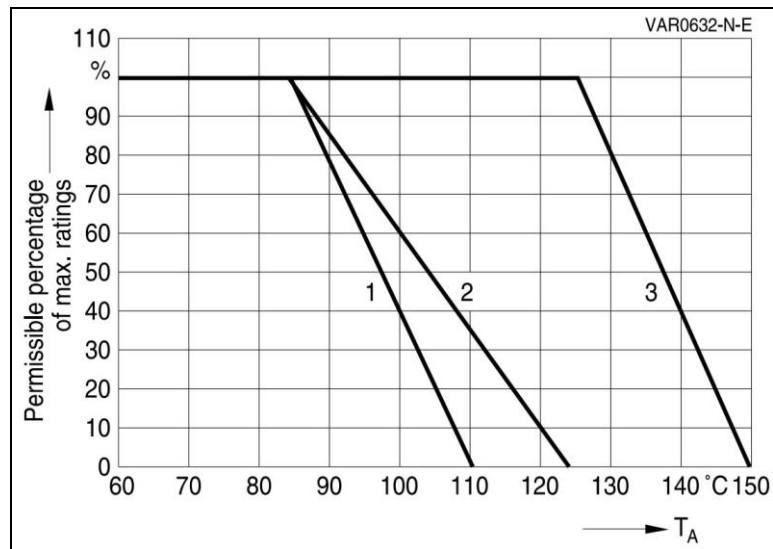


Σχήμα 1.22: Επίδραση Θερμοκρασίας στην Περιοχή Διαρροής Ρευμάτων.¹

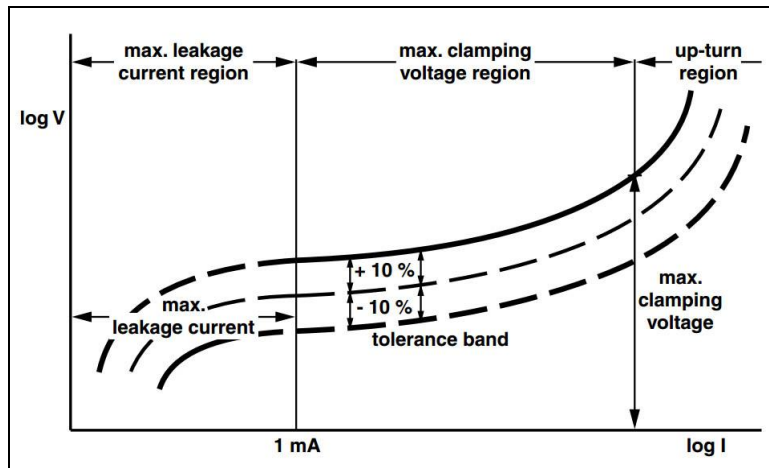


Σχήμα 1.23: Επίδραση Θερμοκρασίας στην Περιοχή Κανονικής Λειτουργίας.

¹ Πηγές Σχημάτων: Littelfuse. (2015). MOV Technical Notes. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Littelfuse: <http://www.littelfuse.com/>



Σχήμα 1.24: Επίδραση Θερμοκρασίας στα Χαρακτηριστικά του Varistor.¹



Σχήμα 1.25: Όρια Σφάλματος για Ένα Τυπικό Varistor.²

1.8.3. Καταναλισκόμενη Ισχύς (Power Dissipated)

Όσο αναφορά τα DC κυκλώματα η ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$W = I \cdot V \xrightarrow{\text{(Εξίσωση 1.3)}}$$

$$W = K \cdot V^{a+1}$$

$$\text{(Εξίσωση 1.12)}$$

$$W = I \cdot V \xrightarrow{\text{(Εξίσωση 1.8)}}$$

$$W = C \cdot I^{\beta+1}$$

$$\text{(Εξίσωση 1.13)}$$

¹ Πηγή: Littelfuse. (2015). MOV Technical Notes. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Littelfuse: <http://www.littelfuse.com/>

² Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>

Η τιμή του β είναι γενικά μικρή, σε όλες τις περιοχές λειτουργίας, σε σχέση με τον προσθετικό όρο (1) οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η καταναλισκόμενη ισχύς είναι ανάλογη κυρίως του ρεύματος διαρροής.

Όσο αναφορά την περιοχή διαρροής ρευμάτων, η τιμή των ρευμάτων είναι πολύ μικρή οπότε η καταναλισκόμενη ισχύς είναι αμελητέα. Ωστόσο, στις επόμενες περιοχές λειτουργίας τα ρεύματα διαρροής γίνονται αρκετά μεγάλα και κατ' επέκταση η καταναλισκόμενη ισχύς είναι σημαντική. Κατά συνέπεια, είναι πολύ σημαντικό, η εφαρμοζόμενη τάση να μην αυξάνεται πάνω από μία ορισμένη μέγιστη τιμή. Ας μη ξεχνάμε επίσης, ότι καθώς οι αντιστάσεις έχουν ένα αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας, πράγμα που σημαίνει ότι σε μια υψηλότερη κατανάλωση ισχύος, (και κατά συνέπεια σε υψηλότερη θερμοκρασία) η τιμή της αντίστασης θα μειωθεί και η ισχύς θα αυξηθεί περαιτέρω.

Όταν μια ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται σε ένα varistor, η καταναλισκόμενη ισχύς δεν μπορεί να υπολογιστεί από τον ίδιο τύπο όπως σε μια εφαρμογή DC. Για τον υπολογισμό απαιτείται η ολοκλήρωση της σχέσης. Η στιγμιαία ισχύς όμως θα δίνεται από τον τύπο:

$$P_{INST} = K \cdot V^{a+1}$$

ισχύει φυσικά η σχέση:

$$V = V_{peak} \sin(\omega t)$$

καθώς και:

$$V_{peak} = V_{RMS} \sqrt{2}$$

επομένως κατά τη διάρκεια μιας ημιπεριόδου:

$$P_{RMS} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} K (V_{peak})^{a+1} (\sin(\omega t))^{a+1} dt$$

$$P_{RMS} = \frac{1}{\pi} K (V_{RMS})^{a+1} (\sqrt{2})^{a+1} \int_0^{\pi} (\sin(\omega t))^{a+1} dt$$

(Εξίσωση 1.14)

Η παραπάνω εξίσωση είναι πολύ δύσκολο να επιλυθεί λόγω του εκθετικού όρου $(a+1)$. Έτσι συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο λόγος:

$$P = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

(Εξίσωση 1.15)

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του ημιαγωγού αυτού, είναι ότι δεν εξαρτάται από τον συντελεστή K (Εξίσωση 1.16) παρά μόνο από το συντελεστή a , ενώ η τιμή του δίνεται συνήθως σε πίνακες (Πίνακας 1.2).

$$P = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

$$P = \frac{\frac{1}{\pi} K (V_{RMS})^{\alpha+1} (\sqrt{2})^{\alpha+1} \int_0^{\pi} (\sin(\omega t))^{\alpha+1} dt}{K \cdot V^{\alpha+1}}$$

$$P = \frac{\frac{1}{\pi} K (V_{RMS})^{\alpha+1} (\sqrt{2})^{\alpha+1} \int_0^{\pi} (\sin(\omega t))^{\alpha+1} dt}{K \cdot V^{\alpha+1}}$$

$$P = \frac{(\sqrt{2})^{\alpha+1} \int_0^{\pi} (\sin(\omega t))^{\alpha+1} dt}{\pi}$$

(Εξίσωση 1.16)

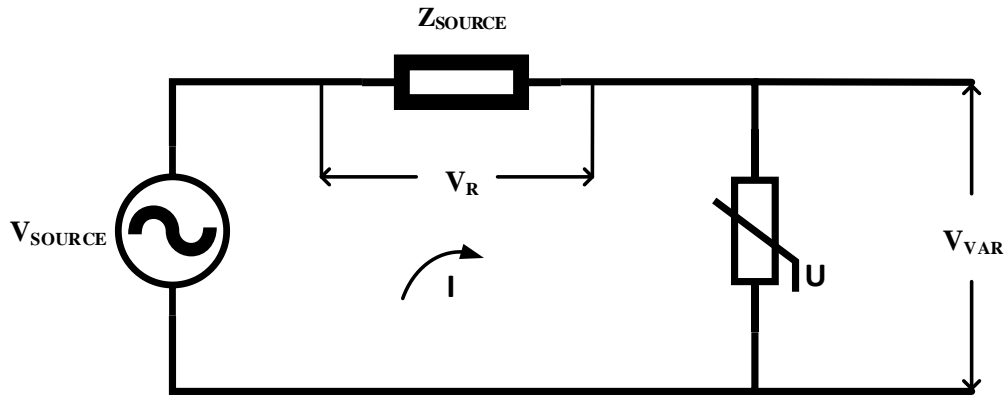
Πίνακας 1.2: Πίνακας Υπολογισμού Πηλίκου Ισχύος, για Διάφορες Τιμές του Συντελεστή α.¹

POWER RATIOS									
α	P	α	P	α	P	α	P	α	P
1	1.0	11	14.4	21	344	31	9135	41	255 646
2	1.2	12	19.6	22	477	32	12 776	42	358 778
3	1.5	13	26.8	23	658	33	17 734	43	499 673
4	1.92	14	36.7	24	915	34	24 822	44	701 611
5	2.5	15	50.3	25	1264	35	34 482	45	977 622
6	3.29	16	69	26	1763	36	48 301	46	1 373 365
7	4.375	17	95	27	2439	37	67 149	47	1 914 510
8	5.85	18	131	28	3404	38	94 126	48	2 690 675
9	7.875	19	180	29	4715	39	130 941	49	3 752 439
10	10.64	20	249	30	6587	40	183 660	50	5 275 834

1.9. Αρχή Λειτουργίας – Προστασίας

Η αρχή της προστασίας έναντι υπερτάσεων με varistor βασίζεται στη σύνδεση εν σειρά δύο αντιστάσεων, μίας ανεξάρτητη της τάσεως και μίας εξαρτώμενη από την τάση. Γίνεται χρήση του γεγονότος ότι κάθε πραγματική πηγή τάσεως, και επομένως κάθε παροδική, έχει μία αντίσταση ανεξάρτητη της τάσεως, μεγαλύτερη του μηδενός. Αυτή η αντίσταση μπορεί να είναι η ωμική αντίσταση ενός καλωδίου ή η επαγωγική αντίσταση ενός πηνίου ή τα σύνθετα χαρακτηριστικά μιας γραμμής μεταφοράς (Σχήμα 1.26).

¹ Πηγή: VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). Varistors Introduction. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>



Σχήμα 1.26: Αρχή Προστασίας Varistor.

Με χρήση του διαιρέτη τάσης:

$$V_R = \frac{Z_{SOURCE}}{Z_{SOURCE} + Z_{VAR}} V_{SOURCE}$$

(Εξίσωση 1.17)

$$V_{VAR} = \frac{Z_{VAR}}{Z_{SOURCE} + Z_{VAR}} V_{SOURCE}$$

(Εξίσωση 1.18)

Ενώ με χρήση της 1.8 (Εξίσωση 1.8):

$$V_{SOURCE} = V_R + V_{VAR}$$

$$V_{SOURCE} = I Z_{SOURCE} + C I^\beta$$

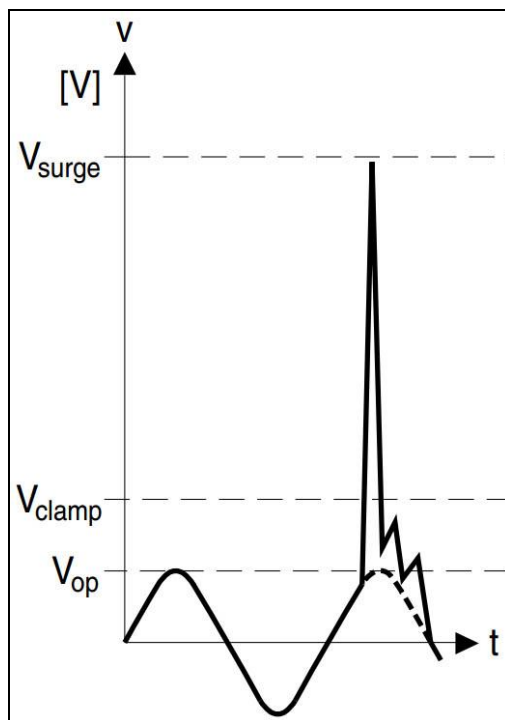
(Εξίσωση 1.19)

Αύξηση της τάσης της πηγής, κατά ΔV , οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος κατά ΔI , οπότε:

$$V_{SOURCE} + \Delta V = (I + \Delta I) Z_{SOURCE} + C (I + \Delta I)^\beta$$

(Εξίσωση 1.20)

Όταν συμβαίνουν μεγάλες μεταβολές της τάσης η αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος (ΔI) είναι επίσης μεγάλη. Επίσης, η τιμή του β στην περίπτωση του varistor είναι πολύ μικρή ($\approx 0,03$). Έτσι, ο όρος $(I + \Delta I)^\beta$ είναι αρκετά μικρότερος από τον όρο $(I + \Delta I)$, και σαν επακόλουθο η τάση V_{VAR} αποκτά πολύ μικρότερες τιμές απ' ό τι η τάση V_R . Θα λέγαμε δηλαδή ότι η μεταβολή της τάσης κατανέμεται κατά μεγαλύτερο ποσοστό στην αντίσταση παρά στον ημιαγωγό. Κατ' αυτό τον τρόπο η τάση στα άκρα του varistor παραμένει περίπου σταθερή.



Σχήμα 1.27: Γραφική Απεικόνιση Λειτουργίας MOV.¹

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τον τρόπο λειτουργίας ενός MOV. Όταν συμβαίνει μια κρουστική υπέρταση με εύρος V_{surge} το varistor την ψαλιδίζει στο επίπεδο που επιτρέπουν οι προδιαγραφές του. Στην ιδανική περίπτωση η τάση θα παρέμενε στο επίπεδο της τάσης λειτουργίας του, V_{op} , κάτι τέτοιο όμως είναι πρακτικά αδύνατο. Η τάση ψαλιδίζεται φτάνοντας σε ένα κατώτερο επίπεδο ίσο με το επίπεδο προστασίας του ημιαγωγού, όπως αυτό ορίστηκε στην 1.5.4.

1.10. Διατάξεις Πολλαπλών MOV

Σε πολλές εφαρμογές, με σκοπό να επιτύχουμε τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε περισσότερα του ενός MOV για την προστασία της διάταξης. Η συνηθέστερη συνδεσμολογία είναι αυτή εν παραλλήλω. Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών MOV μειώνει το βαθμό αξιοπιστίας του συστήματος προστασίας [4].

1.10.1. Συνδεσμολογία σε Σειρά

Τα varistors μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να ικανοποιήσουν απαιτήσεις για μέγιστη συνεχόμενη τάση λειτουργίας υψηλότερη από τις διαθέσιμες. Για το σκοπό αυτό τα είδη που επιλέγονται θα πρέπει να είναι ίδια (δηλαδή ίδιας διαμέτρου). Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας σε διάταξη σειράς παράγεται με την προσθήκη των ανώτατων DC ή AC τάσεων των varistors. Η συνδεσμολογία αυτή λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών που μπορεί να παρουσιάζουν ακόμη και δύο ίδια varistors (ανέχεια σφάλματος, 1.8.2) δεν προτείνεται.

¹ Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>

1.10.2. Συνδεσμολογία Παράλληλων MOV

Τα MOV ψευδαργύρου μπορούν να συνδεθούν επίσης παράλληλα (Εικόνα 1.5) αυξάνοντας την ικανότητα που μπορεί να επιτευχθεί σε απορρόφηση ενέργειας σε σύγκριση με ένα MOV ή αύξηση της μέγιστης δυνατής κρουστικής ικανότητας. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το προβλεπόμενο σημείο λειτουργίας των συνδεδεμένων varistors στη ζώνη προστασίας ώστε να επιτύχουν, όσο το δυνατόν, ίση πτώση τάσης.

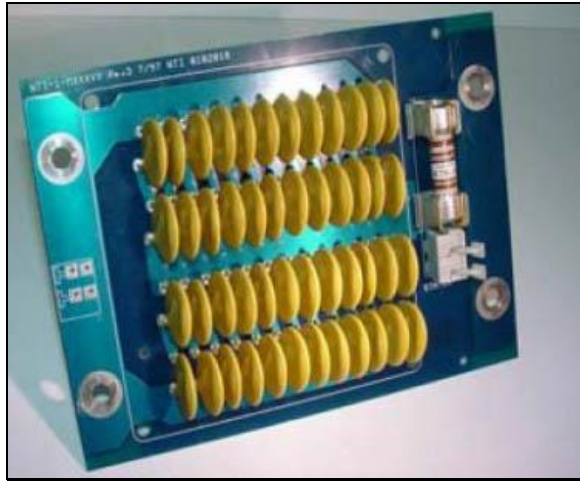
Αποτελεί τη συνηθέστερη συνδεσμολογία πολλαπλών MOV. Το κρουστικό ρεύμα θεωρείται ότι μοιράζεται ισόποσα μεταξύ των παράλληλα συνδεδεμένων varistors. Θεωρείται επίσης ότι η μέγιστη ένταση του κρουστικού ρεύματος που μπορεί να δεχθεί η διάταξη είναι ίση με το γινόμενο του αριθμού των παράλληλων MOV επί τη μέγιστη ένταση του κάθε MOV. Οι δύο αυτές υποθέσεις είναι εσφαλμένες. Τα varistors, όπως είδαμε, εμφανίζουν διαφορές όσο αφορά τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα το ρεύμα που διαρρέει κάθε ένα από τα παράλληλα varistors να είναι διαφορετικό. Το varistor το οποίο δέχεται το μεγαλύτερο ρεύμα είναι αυτό που θα καταστραφεί γρηγορότερα, ακολουθεί στη συνέχεια το varistor με το αμέσως μικρότερο ρεύμα κ.ο.κ. Επομένως, η μέγιστη κρουστική ικανότητα της διάταξης ελαττώνεται σταδιακά μέχρι την οριστική καταστροφή της διάταξης.

1.11. Συνοπτικά Χαρακτηριστικά - Κίνδυνοι

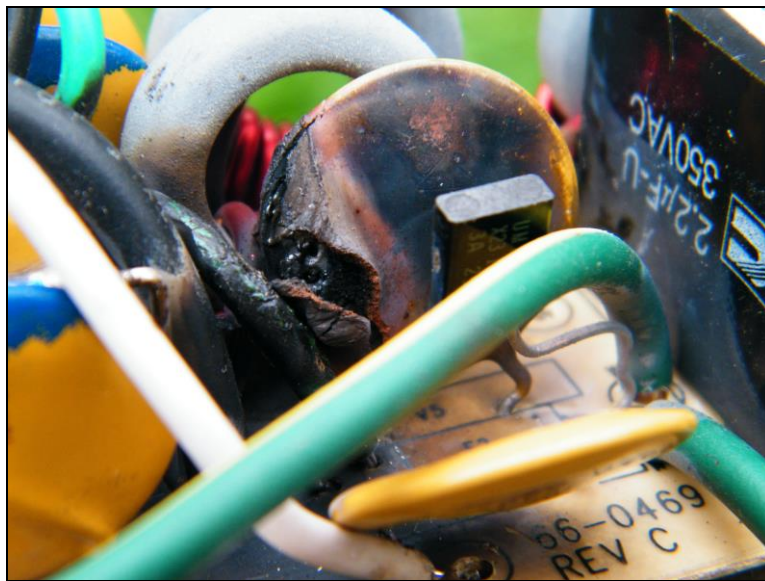
Μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά των varistors ως εξής:

- Ευρεία εμβέλεια τάσης - από 14 V_{RMS} σε 680 V_{RMS} επιτρέποντας την εύκολη επιλογή του σωστού τύπου για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.
- Μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε συνάρτηση με το μέγεθος τους.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών (Ηλεκτρονόμοι, Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές, Τηλεπικοινωνίες, Τροφοδοτικά κ.α.)
- Πολύ μικρός χρόνος απόκρισης (<20 ns), ψαλιδίζοντας την υπέρταση την ίδια στιγμή που συμβαίνει χωρίς χρονική καθυστέρηση.
- Αμελητέα κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση μη αγωγής, στην κανονική λειτουργία του κυκλώματος, παρέχοντας εξαιρετικό βαθμό απόδοσης.
- Εντελώς μη εύφλεκτο, σύμφωνα με το πρότυπο IEC, ακόμα και υπό ακραίες συνθήκες φόρτισης.
- Φιλικό στο περιβάλλον σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60068-2-45

Δεν θα πρέπει να αμελούμε όμως, σε καμία περίπτωση, τους κινδύνους που μπορούν να προκληθούν από την λανθασμένη χρήση τους. Οι κίνδυνοι αυτοί, είναι κυρίως η έκλυση καπνού καταστρέφοντας το MOV και σπανιότερα η έκλυση φωτιάς (Εικόνα 1.6). Συνήθως οφείλονται είτε σε γήρανση των MOV, είτε σε έκθεση σε κρουστικές υπερτάσεις που δεν ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές τους, λόγω μη αναμενόμενων υπερτάσεων ή λόγω κακής πρόβλεψης. Είθισται, κυρίως σε συνδεσμολογία παράλληλων MOV, να τοποθετείται ασφάλεια για την προστασία των MOV. Γίνεται σαφές, ότι η ασφάλεια αυτή, παρέχει προστασία μόνο στα MOV αφήνοντας όμως απροστάτευτο τον εξοπλισμό από υπερτάσεις. Ο έλεγχος, η σωστή ανάλυση του υπό προστασία εξοπλισμού και η επιλογή των κατάλληλων MOV είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία τους.

Ο ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ VARISTOR

Εικόνα 1.5: Συστοιχία Παράλληλων MOV με Συμβατική Διάταξη Προστασίας.¹



Εικόνα 1.6: Καταστροφική Αστοχία Διάταξης MOV.

¹ Πηγές εικόνων: Κουλαξουζίδης, Α. (2009). ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ. Raycap Corporation.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [1]. Millman, S. (1983). *A HISTORY of ENGINEERING and SCIENCE in the BELL SYSTEM: Physical Sciences (1925-1980)*. Bell Telephone Laboratories.
- [2]. MALVINO. (2006). *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ*. ΤΖΙΟΛΑ.
- [3]. ΚΟΚΙΔΗΣ, Δ. (2011). Διερεύνηση της λειτουργίας της γεννήτριας ισχυρών κρουστικών ρευμάτων του εργαστηρίου υψηλών τάσεων Α.Π.Θ. *Διπλωματική Εργασία*.
- [4]. Κουλαξουζίδης, Α. (2009). ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ. *Raycap Corporation*.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. EPCOS. (2008). *SIOV Metal Oxide Varistors*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: <http://www.epcos.com/>
- [2]. Littelfuse. (2015). *MOV Technical Notes*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Littelfuse: <http://www.littelfuse.com/>
- [3]. VISHAY BCCOMPONENTS. (2010). *Varistors Introduction*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της VISHAY: <http://www.vishay.com/>
- [4]. ElectronicsBeliever. (2016). *Varistor Design Considerations and Selection*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web: <http://www.electronicbeliever.com/>
- [5]. ElectronicsTutorials. (2008). *Varistor Tutorial*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web: <http://www.electronics-tutorials.ws/>
- [6]. Wikipedia. (2015). *Varistor*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web: <https://en.wikipedia.org/>

2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1. Εισαγωγή

Ο ηλεκτρονόμος (relay) είναι ένας ηλεκτρικός διακόπτης που ανοίγει και κλείνει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κάτω από τον έλεγχο ενός άλλου ηλεκτρικού κυκλώματος [1]. Πολλοί ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρομαγνήτη για να ενεργοποιήσουν μηχανικά έναν διακόπτη, αλλά νεότερες τεχνολογίες χρησιμοποιούν ημιαγωγούς χωρίς κινούμενα μέρη (solid state relays – στέρεας κατάστασης ηλεκτρονόμοι). Οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται ο έλεγχος ενός κυκλώματος από ένα σήμα χαμηλής ισχύος (με πλήρη απομόνωση μεταξύ ελεγχόμενου κυκλώματος και κυκλώματος ελέγχου) ή όπου πολλά κυκλώματα πρέπει να ελέγχονται από ένα σήμα. Επειδή ένας ηλεκτρονόμος είναι ικανός να ελέγχει ένα κύκλωμα εξόδου υψηλής ισχύος από το κύκλωμα εισόδου, μπορεί να θεωρηθεί μια μορφή ηλεκτρικού ενισχυτή [1]. Τον ρόλο αυτό ακριβώς επιτελούσαν στην αρχική τους χρήση, σε συστήματα τηλεγράφου, όπου επαναλαμβάνανε το σήμα που προερχόταν από ένα κύκλωμα και το μετέδιδαν εκ' νέου σε ένα άλλο κύκλωμα. Οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιήθηκαν επίσης εκτενώς σε τηλεφωνικά κέντρα και στους αρχικούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές ως μέσα εκτελέσεως λογικών πράξεων. Σήμερα η χρήση των ηλεκτρονόμων είναι ευρεία, στον έλεγχο λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων, σε ανελκυστήρες, αντλιοστάσια, στη βιομηχανία, στο εσωτερικό διάφορων μηχανημάτων, στην προστασία γραμμών μεταφοράς και γενικά όπου απαιτείται χειρισμός από απόσταση (τηλεχειρισμός). Επίσης ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται εκεί όπου η εντολή για το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός κυκλώματος δε δίνεται από τον άνθρωπο αλλά από άλλα εξαρτήματα ή κυκλώματα πχ. θερμοστάτες, χρονοδιακόπτες, φωτοδιακόπτες, ηλεκτρονικούς υπολογιστές κλπ.

2.1.1. Ιστορική Αναδρομή

Ο Αμερικανός επιστήμονας Joseph Henry θεωρείται ότι είχε εφεύρει έναν ηλεκτρονόμο το 1835 με σκοπό τη βελτίωση του ηλεκτρικού τηλεγράφου, που είχε αναπτυχθεί ωρίτερα το 1831 [2],[3],[4],[5]. Ωστόσο, υπάρχει ένας μικρός ισχυρισμός, που βασίζεται σε επίσημα έγγραφα, ότι η ανακάλυψή του έγινε πριν το 1837 από τον Άγγλο εφευρέτη Edward Davy για χρήση στον ηλεκτρικό του τηλεγράφο το 1835 [6].

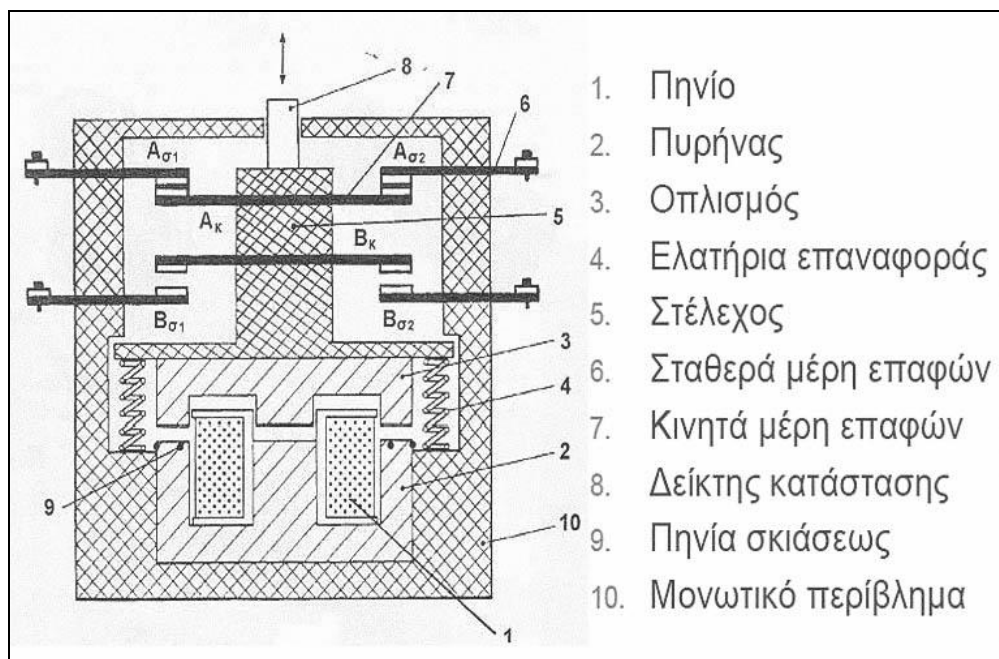
Η συνήθης συσκευή που σήμερα αποκαλούμε ηλεκτρονόμο, συμπεριλαμβάνεται στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του 1840 του Samuel Mors σχετικά με τον τηλεγράφο [7]. Ο μηχανισμός που περιγράφεται ενήργησε ως ψηφιακός ενισχυτής, επαναλαμβάνοντας το σήμα του τηλεγράφου ξεπερνώντας το πρόβλημα του περιορισμένου εύρους των προηγούμενων τηλεγράφων. Ο αγγλικός όρος relay (ηλεκτρονόμος) χρησιμοποιείται από το 1860 [8].

2.2. Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρονόμων

Η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου μπορεί είτε να οφείλεται σε ηλεκτρομαγνήτη και τότε μιλάμε για ηλεκτρομαγνητικούς ηλεκτρονόμους (relay) είτε σε ημιαγωγούς όπου αναφερόμαστε σε στατικούς ηλεκτρονόμους (solid state relays). Οι ηλεκτρομαγνητικοί ηλεκτρονόμοι είναι ο τύπος που αναφέρεται στην συνέχεια κατά κύριο λόγο.

2.2.1. Εσωτερική Δομή Ηλεκτρονόμου με Ηλεκτρομαγνήτη

Ένας απλός ηλεκτρομαγνητικός ηλεκτρονόμος αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία :



Σχήμα 2.1: Εσωτερική Δομή Ενός Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου.¹

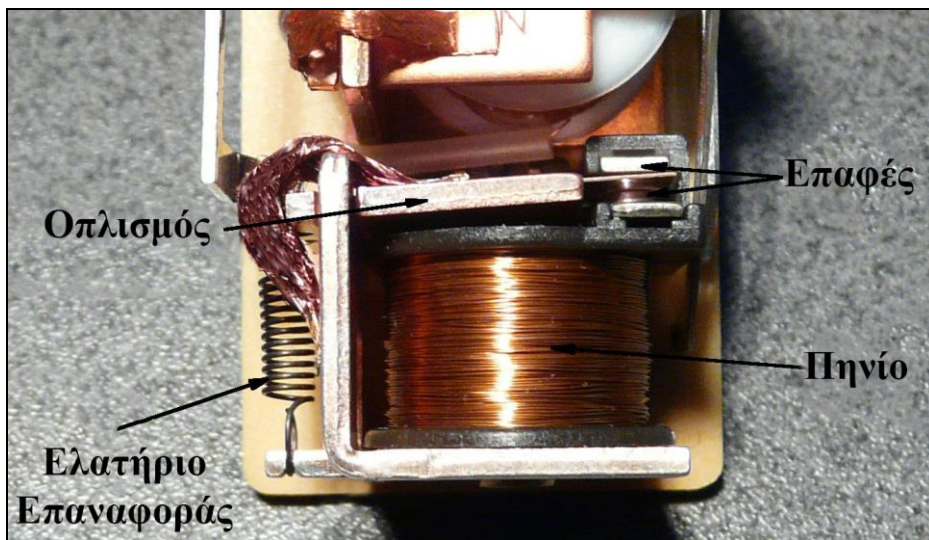
1. Πηνίο: Είναι το πιο σημαντικό στοιχείο του ηλεκτρονόμου, δημιουργεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο είναι απαραίτητο για τη δημιουργία της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.
2. Πυρήνας: Είναι μια σιδερένια μάζα η οποία γίνεται ηλεκτρομαγνήτης μόλις βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο. Ο πυρήνας είναι το σταθερό τμήμα του ηλεκτρομαγνήτη.
3. Οπλισμός: Αποτελεί το κινητό μέρος του ηλεκτρομαγνήτη. Όταν βρεθεί υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου κινείται στον πυρήνα.
4. Ελατήριο: Παρέχει τη δύναμη επαναφοράς στον οπλισμό, σε κάποιες εφαρμογές μπορεί να παραλείπεται και τη δύναμη επαναφοράς αναλαμβάνει η βαρύτητα.
5. Στέλεχος: Φέρει τα κινητά μέρη των ηλεκτρικών επαφών και συνδέεται σταθερά με το κινητό μέρος του ηλεκτρομαγνήτη.
6. Σταθερά Μέρη Επαφών: Αποτελούν τις σταθερές άκρες μέσα από τις οποίες θα περάσει το φορτίο που θα συνδεθεί μέσω του ηλεκτρονόμου.
7. Κινητά Μέρη Επαφών: Αποτελούν το δεύτερο τμήμα των επαφών του ηλεκτρονόμου. Είναι μηχανικά συνδεδεμένες με τον οπλισμό του ηλεκτρομαγνήτη και όταν αυτός κινείται, συνδέονται με τις σταθερές επαφές και αποκαθιστούν το κύκλωμα.
8. Δείκτης Κατάστασης: Δείχνει την κατάσταση του ηλεκτρονόμου (ενεργοποιημένος – μη ενεργοποιημένος).
9. Πηνία Σκίασεως: Ένα ή δυο δακτυλίδια απόκλισης φάσεων.
10. Μονωτικό Περιβλήμα: Το εξωτερικό περίβλημα του ηλεκτρονόμου αποτελούμενο από μονωτικό υλικό.

¹ Πηγή: Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.

Το σταθερό και το κινητό τμήμα (πυρήνας, οπλισμός) είναι συμπαγή σε ηλεκτρονόμους με πηνίο συνεχούς ρεύματος, ενώ σε ηλεκτρονόμους με πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από ελάσματα για να περιορισθούν τα δινορεύματα (ρεύματα Foucault) που δημιουργούνται στα σιδηρομαγνητικά υλικά, όταν βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε ηλεκτρονόμους μικρής ικανότητας το σταθερό και το κινητό μέρος του σιδηρομαγνητικού υλικού συνήθως είναι συμπαγής χάλυβας.

Όσο αναφορά το πηνίο, αυτό είναι κατασκευασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχει την μηχανική καταπόνηση (μηχανική κραδασμοί κατά τη διάρκεια ενεργοποίησης – απενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου), και κατά το πλείστον, αντέχει σε όλη τη διάρκεια ζωής του ηλεκτρονόμου χωρίς να απαιτείται αντικατάσταση.

Το σημαντικότερο όμως πρόβλημα παρουσιάζεται στις επιφάνειες επαφής μεταξύ των κινητών και των σταθερών μερών των ηλεκτρικών επαφών ενός ηλεκτρονόμου καθώς υπόκεινται σε συνεχή καταπόνηση (μηχανική φθορά και διάβρωση) λόγω των δημιουργούμενων ηλεκτρικών τόξων. Για το λόγο αυτό, το υλικό κατασκευής είναι συνήθως το οξειδίο του αργύρου ή το οξειδίο του καδμίου, υλικά που αντέχουν στην φθορά ενώ, οι περισσότεροι ηλεκτρονόμοι που τροφοδοτούν σημαντικά από άποψη ισχύος φορτία είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε οι επαφές αυτές, να μπορούν να αλλαχθούν (κάτι τέτοιο στην πράξη είναι απαραίτητο τουλάχιστον μια φορά στην διάρκεια ζωής τους). Τέλος, ένα άλλο επικουρικό μέτρο, για την αύξηση του χρόνου ζωής των επαφών είναι η χρήση κατάλληλων ελατηρίων απόσβεσης, που πρακτικά εξαλείφουν την αναπήδηση του κινητού μέρους των επαφών πάνω στα σταθερά μέρη αυτών κατά την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου, μειώνοντας, με αυτόν τον τρόπο, τη δημιουργία ηλεκτρικών τόξων.



Εικόνα 2.1: Εσωτερική Δομή ενός Πραγματικού Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου.¹

2.2.2. Τρόπος Λειτουργίας Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου

Όταν το πηνίο του ηλεκτρονόμου δεν διαρρέεται από ρεύμα τότε λέμε ότι ο ηλεκτρονόμος είναι αποδιεργεμένος ή σε κατάσταση ηρεμίας. Συνήθεις όροι που μπορεί να συναντάμε είναι επίσης,

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

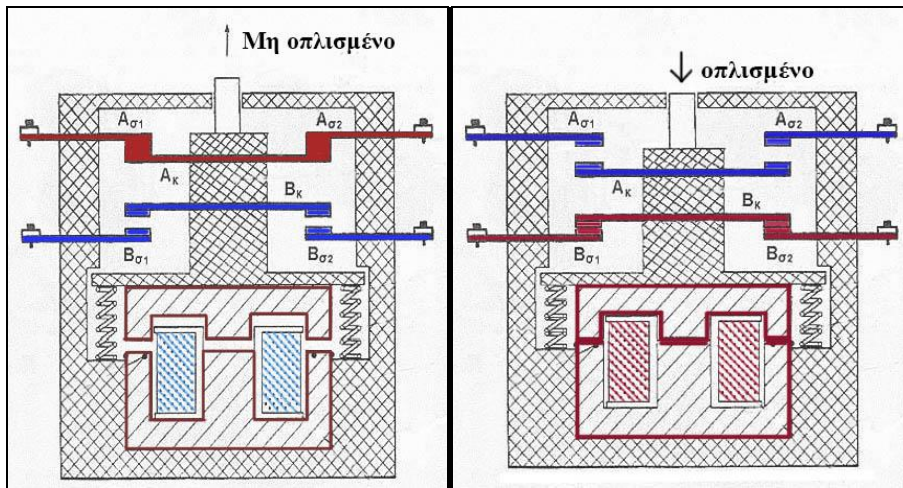
μη ενεργοποιημένος ή μη οπλισμένος. Επειδή το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα, δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο και επομένως μαγνητική δύναμη. Κατά συνέπεια ο οπλισμός βρίσκεται στην «κανονική» του θέση, την θέση δηλαδή που προσδιορίζεται από τη δύναμη που του ασκεί το ελατήριο (ή η δύναμη της βαρύτητας). Στο σχήμα της παραπάνω εικόνας (Σχήμα 2.1) ο μη ενεργοποιημένος ηλεκτρονόμος θα έχει συνέχεια μεταξύ των επαφών $A_{\sigma 1}$ και $A_{\sigma 2}$ (συνέχεια η οποία εξασφαλίζεται από τη θέση του οπλισμού σε κατάσταση αποδιέγερσης). Αντιθέτως το κύκλωμα που μετέχει η κάτω επαφή $B_{\sigma 1}$ και $B_{\sigma 2}$ δεν θα έχει συνέχεια και επομένως θα είναι ανοιχτό (Σχήμα 2.2).

Απ' την άλλη, όταν το πηνίο διαρρέεται με ρεύμα, λέμε ότι ο ηλεκτρονόμος είναι διεγερμένος ή ενεργοποιημένος ή καλύτερα οπλισμένος. Στην κατάσταση αυτή του ηλεκτρονόμου υπάρχει μια δύναμη λόγω μαγνητικού πεδίου, η οποία υπερνικά την δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου (ή την δύναμη της βαρύτητας) και έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση του οπλισμού προς τον πυρήνα. Η μετατόπιση αυτή του οπλισμού έχει ως αποτέλεσμα την εξασφάλιση συνέχειας μεταξύ των επαφών $B_{\sigma 1}$ και $B_{\sigma 2}$ και ασυνέχειας μεταξύ των επαφών $A_{\sigma 1}$ και $A_{\sigma 2}$ σε αντιδιαστολή με την κατάσταση αποδιέγερσης (Σχήμα 2.2).

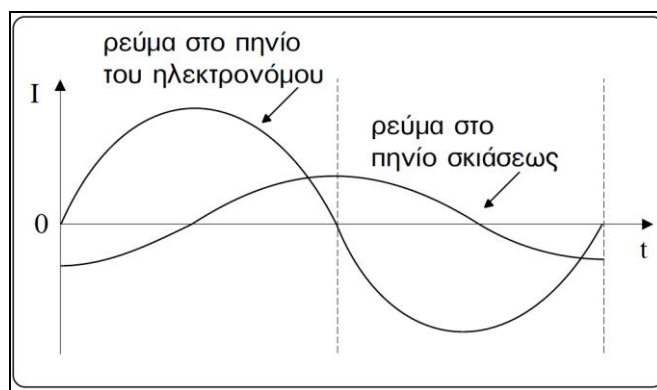
Κατά αυτό τον τρόπο ένας ηλεκτρονόμος λειτουργεί σαν ένας ηλεκτρικός διακόπτης που ανοίγει και κλείνει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα από την επίδραση ενός άλλου κυκλώματος που ελέγχει το ρεύμα του πηνίου του. Όπως είδαμε, ο παραπάνω ηλεκτρονόμος έχει τις επαφές $A_{\sigma 1}$ και $A_{\sigma 2}$ κλειστές όταν είναι σε κατάσταση αποδιέγερσης και τις επαφές $B_{\sigma 1}$ και $B_{\sigma 2}$ ανοιχτές. Η πρώτη επαφή ονομάζεται «κανονικά κλειστή» ή «επαφή ηρεμίας» ενώ αντίστοιχα η δεύτερη «κανονικά ανοιχτή» ή «επαφή εργασίας». Υπάρχει και ένας τρίτος τύπος επαφής που ονομάζεται μεταγωγικός.

Για τη λειτουργία του πηνίου και τη μετακίνηση των επαφών απαιτείται σχετικά μεγάλη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά μόλις ο οπλισμός κλείσει το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται για να κρατήσει τον οπλισμό κλειστό είναι ένα μικρό κλάσμα του αρχικού, τυπικά το 1/10.[1] Όταν το πηνίο διεγείρεται υπό εναλλασσόμενη τάση, το εναλλασσόμενο ρεύμα μηδενίζεται αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Τις χρονικές αυτές στιγμές που το ρεύμα μηδενίζεται, το μαγνητικό πεδίο μηδενίζεται επίσης με αποτέλεσμα η μαγνητική δύναμη να μην είναι ικανή να διατηρήσει σταθερά τον οπλισμό στον πυρήνα. Για να είναι η θέση του οπλισμού αμετάβλητη στις μεταβολές αυτές τοποθετείται το πηνίο σκιάσεως (shading coil) σε καθένα από τους δύο κορμούς του πυρήνα του σιδηρομαγνητικού υλικού. Το πηνίο αυτό είναι μια σπείρα από αγωγίμα υλικά (χαλκό, αλουμίνιο) που τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά των άκρων των κορμών του πυρήνα. Στο πηνίο σκιάσεως επάγονται ρεύματα από το κύριο μαγνητικό πεδίο που παράγεται στον πυρήνα εξ αιτίας του εναλλασσόμενου ρεύματος το οποίο το διαρρέει. Αποτέλεσμα των ρευμάτων αυτών, δια επαγωγής, είναι η δημιουργία δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου, χρονικά μετατοπισμένο κατά 90° ως προς το κύριο (Σχήμα 2.3) το οποίο έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ενός συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου ικανό σε κάθε χρονική στιγμή να διατηρεί τον οπλισμό στον πυρήνα του ηλεκτρονόμου σταθερό (σε κατάσταση διέγερσης) [9].

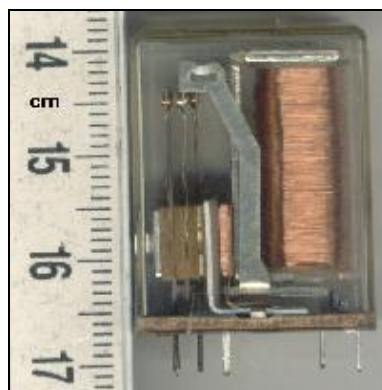
Το μέγεθος και ο αριθμός των επαφών των ηλεκτρομαγνητικών ηλεκτρονόμων ποικίλει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, ένας τυπικός ηλεκτρονόμος φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 2.2).



Σχήμα 2.2: Σχηματική Απεικόνιση Καταστάσεων Ηλεκτρομαγνητικού Ηλεκτρονόμου.¹



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα Ρεύματος Πηνίου Ηλεκτρονόμου και Ρεύματος Πηνίου Σκιάσεως.²



Εικόνα 2.2: Μικρός Ηλεκτρονόμος που Χρησιμοποιείται στην Ηλεκτρονική.³

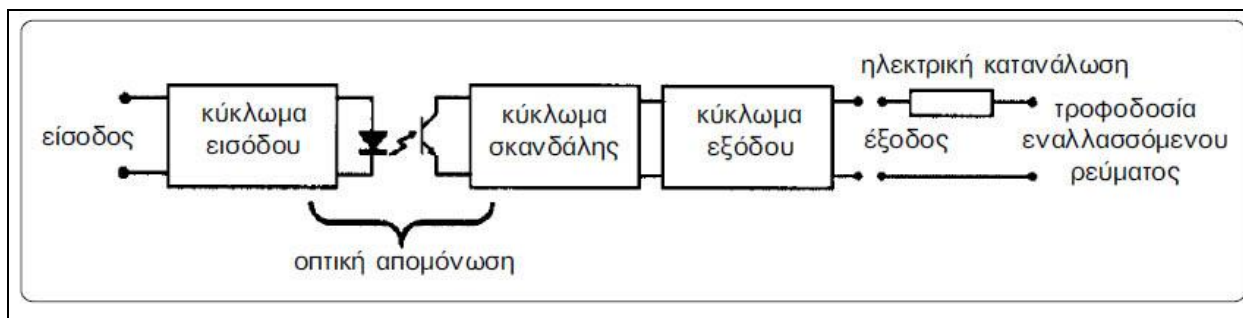
2.2.3. Συνοπτική Περιγραφή Ηλεκτρονόμου Στέρεας Κατάστασης

Όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς και καθόλου κινούμενα μέρη. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί ονομάζονται στέρεας κατάστασης (SSR) και το μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας τους φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

¹ Πηγή: Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.

² Πηγή: Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.

³ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page



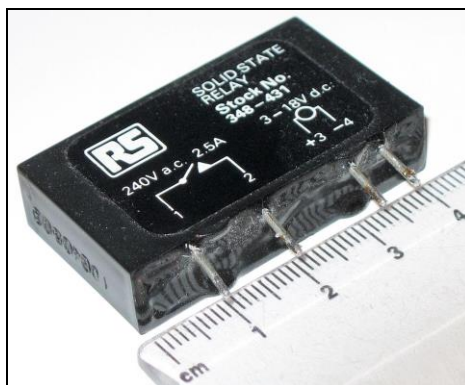
Σχήμα 2.4: Απλοποιημένο Διάγραμμα Λειτουργίας Ηλεκτρονόμου Στέρεας Κατάστασης.¹

Η λειτουργία ενός ηλεκτρονόμου στέρεας κατάστασης βασίζεται σε αυτήν των ηλεκτρομαγνητικών διακρίνοντας πλήρη αντιστοιχία μεταξύ των μερών του.

Αρχικά διακρίνουμε το κύκλωμα εισόδου κατ' αντιστοιχία με την λειτουργία του πηνίου στον ηλεκτρομαγνητικό ηλεκτρονόμο. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμοζόμενη διέγερση στην είσοδο (τάση ή ρεύμα) ρυθμίζει (αποκαθιστά ή ενεργοποιεί) τη λειτουργία ενός άλλου κυκλώματος (όπως μια ηλεκτρική κατανάλωση). Στον ηλεκτρομαγνητικό ηλεκτρονόμο η διάταξη πηνίο – οπλισμός – πυρήνας σε συνδυασμό με το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ ελεγχόμενου κυκλώματος και κυκλώματος ελέγχου, στοιχείο πολύ σημαντικό για τη λειτουργία των ηλεκτρονόμων. Εδώ, το κύκλωμα εισόδου ενεργοποιεί οπτοηλεκτρονικά στοιχεία φωτοδιόδων – φωτοτρανζίστορ (ή triac κλπ.) εξασφαλίζοντας την απαραίτητη απομόνωση. Το κύκλωμα σκανδάλης, ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί το κύκλωμα εξόδου του ηλεκτρονόμου ανάλογα με τα σήματα (παλμούς) που δέχεται από το κύκλωμα εισόδου. Τέλος, το κύκλωμα εξόδου περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία τα οποία αποκαθιστούν ή διακόπτουν την λειτουργία του κυκλώματος ελέγχου ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο ημιαγωγός (αγωγής ή αποκοπής), Συνήθη ημιαγωγικά στοιχεία για έλεγχο κυκλωμάτων συνεχούς ρεύματος είναι το διπολικό τρανζίστορ, MOSFET κλπ. ενώ για εναλλασσόμενο μπορεί να είναι δύο ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου σε διάταξη back to back ή ένα triac κλπ.

Η διέγερση των ηλεκτρονόμων στέρεας κατάστασης μπορεί να είναι DC ή AC ενώ σε σύγκριση με τους ηλεκτρομαγνητικούς ηλεκτρονόμους, μπορούν να αποκόπτουν ή να ενεργοποιούν ρεύματα μεγαλύτερης τάξης (περίπου 10A), ενώ για μικρότερες τάξεις ρευμάτων κρίνονται αντικοινωνικοί (σε σχέση με τους ηλεκτρομαγνητικούς). Τα βρίσκουμε εύκολα στο εμπόριο σε πλαστικά περιβλήματα που συνήθως έχουν μία μεταλλική έδρα, πάνω στην οποία προσαρμόζουμε μία ψήκτρα καθώς η υψηλή θερμοκρασία τους είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα τους και είναι ένα στοιχείο που μπορεί να μειώσει το χρόνο ζωής τους ο οποίος θεωρητικά είναι άπειρος (αν πληρούνται οι προδιαγραφές του) αφού δεν διαθέτουν καθόλου κινούμενα μέρη. Τέλος, το μέγεθος τους είναι μικρότερο από αυτό των ηλεκτρομαγνητικών (Εικόνα 2.3).

¹ Πηγή: Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.



Εικόνα 2.3: Τυπικός Ηλεκτρονόμος Στέρεας Κατάστασης.¹

2.3. Τύποι Επαφών Ηλεκτρονόμου

Από τη στιγμή που ένας ηλεκτρονόμος λειτουργεί ως ένας ελεγχόμενος διακόπτης, μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά των επαφών του. Σε αναφορά με τα όσα αναφέρθηκαν σχετικά με την λειτουργία των ηλεκτρομαγνητικών ηλεκτρονόμων (2.2.3) τα οποία βρίσκουνε πλήρη εφαρμογή και στους ηλεκτρονόμους στέρεας κατάστασης, κάθε επαφή ενός ηλεκτρονόμου μπορεί να είναι κανονικά ανοικτή (normally open, «NO»), κανονικά κλειστή (normally closed, «NC») ή μεταγωγική (change over).

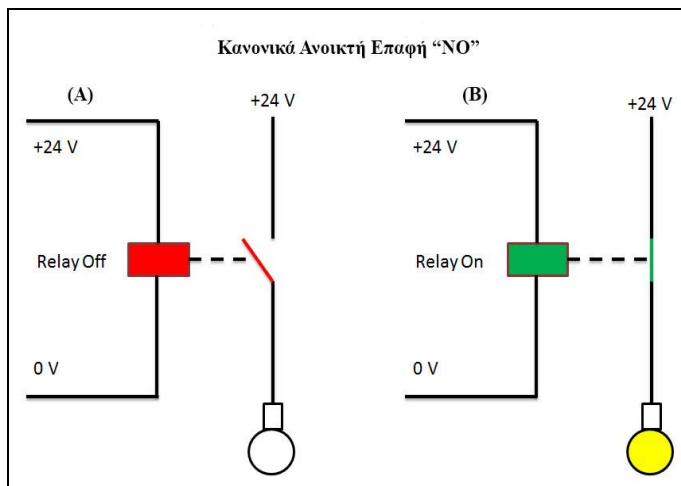
- Μια επαφή κανονικά ανοικτή συνδέει το κύκλωμα όταν ο ηλεκτρονόμος είναι οπλισμένος, ειδάλλως το κύκλωμα είναι μη ενεργό – αποσυνδεδεμένο. Η επαφή αυτή καλείται επίσης επαφή μορφής A ή επαφή «make» [1]. Η επαφή μορφής A είναι ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν την ενεργοποίηση μια πηγής υψηλής τάσης (Σχήμα 2.5).
- Μια επαφή κανονικά κλειστή συνδέει το κύκλωμα όταν ο ηλεκτρονόμος είναι αποδιεργεμένος, ειδάλλως το κύκλωμα είναι μη ενεργό – αποσυνδεδεμένο. Η επαφή αυτή καλείται επίσης επαφή μορφής B ή επαφή «brake» [1]. Η επαφή μορφής B είναι ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν το κύκλωμα να παραμένει ενεργό (κλειστό) μέχρι ο ηλεκτρονόμος να ενεργοποιηθεί (Σχήμα 2.6).
- Μια επαφή μεταγωγική, ελέγχει δύο κυκλώματα και είναι ισοδύναμη με μια επαφή μορφής A και μία επαφή μορφής B που έχουν ένα κοινό ακροδέκτη. Μια τέτοια επαφή καλείται επίσης επαφή μορφής C (Σχήμα 2.7) [1].

Η πρώτη αυτή διάκριση έχει να κάνει με τα χαρακτηριστικά των επαφών του και το ρόλο τους στο κύκλωμα ελέγχου. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ένας ηλεκτρονόμος είναι δυνατό να έχει περισσότερες επαφές.

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

Οι επαφές του ανάλογα με τον ρόλο τους μπορούν να διακριθούν επίσης σε κύριες και δευτερεύουσες [9].

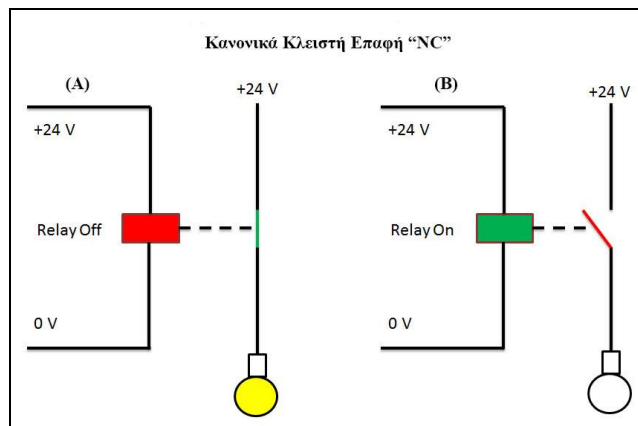
- Κύριες ονομάζονται οι επαφές οι οποίες χρησιμεύουν για την αποκοπή του κυκλώματος ελέγχου και διαρρέονται από ισχυρά ρεύματα (συνήθως “NO”).
- Δευτερεύουσες ονομάζονται οι επαφές που έχουν επικουρικό ρόλο ώστε να βοηθούν στον έλεγχο λειτουργίας της διάταξης (π.χ. ενδεικτική λυχνία LED για την ένδειξη διέγερσης ή μη του ηλεκτρονόμου).



Σχήμα 2.5: Κυκλωματικό Διάγραμμα Επαφής Τύπου «NO» στις Δύο Καταστάσεις.¹

A) Αποδιέγερσης.

B) Διέγερσης.

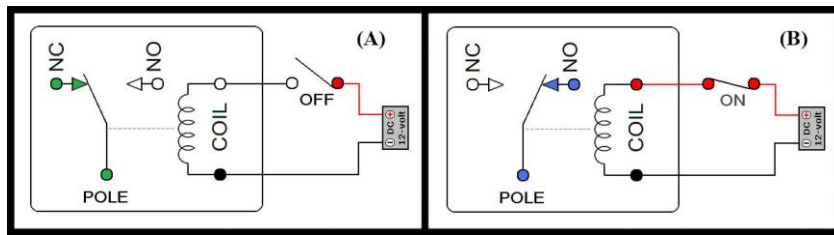


Σχήμα 2.6: Κυκλωματικό Διάγραμμα Επαφής Τύπου «NC» στις Δύο Καταστάσεις.

A) Αποδιέγερσης.

B) Διέγερσης.

¹ Πηγές Σχημάτων: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page



Σχήμα 2.7: Κυκλωματικό Διάγραμμα Μεταγωγικής Επαφής στις Δύο Καταστάσεις:¹

A) Αποδιέγερσης.

B) Διέγερσης.

Αναφέρουμε στο σημείο αυτές συνηθισμένες ονομασίες που μπορούμε να συναντάμε στους ηλεκτρονόμους και οφείλονται στον τύπο των επαφών του:

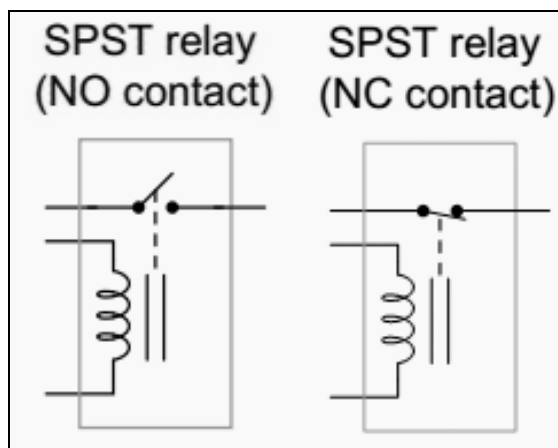
- **SPST (Single Pole Single Throw):** Αποτελείται από τους κοινούς τύπους επαφών, κανονικά ανοικτή ή κανονικά κλειστή. Ένας ηλεκτρονόμος SPST διαθέτει τέσσερις ακροδέκτες, δύο για το πηνίο και δύο για τις επαφές. Ο τύπος της επαφής συνήθως αναφέρεται ως SPNO (για κανονικά ανοικτή επαφή) ή ως SPNC (για κανονική κλειστή επαφή) (Σχήμα 2.8).
- **SPDT (Single Pole Double Throw):** Αποτελείται από μία μεταγωγική επαφή. Ένας τέτοιος ηλεκτρονόμος διαθέτει πέντε ακροδέκτες, δύο για το πηνίο, μία επαφή κοινή και μία επαφή για κάθε μία για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας (Σχήμα 2.9) Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την επαφή που είναι κλειστή ή ανοικτή στην διάρκεια ηρεμίας. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση διαγράμματος ή με την αρίθμηση των επαφών του με μονοσήμαντο τρόπο βάση συγκεκριμένων προτύπων. Σύμφωνα με το πρώτο πρότυπο² η κοινή επαφή έχει τον αριθμό 11, η επαφή κανονικά κλειστή τον αριθμό 12, 14 η κανονικά ανοικτή επαφή και τέλος A1,A2 για τις επαφές του πηνίου. Σύμφωνα με το δεύτερο πρότυπο³ έχουμε αντίστοιχα: 87 για την κοινή επαφή, 87a για την κανονικά κλειστή επαφή και 87b για την κανονικά ανοικτή επαφή. Οι επαφές του πηνίου συμβολίζονται με τους αριθμούς 85,86.
- **DPST (Double Pole Single Throw):** Αποτελείται από δύο επαφές κανονικά ανοικτές ή κανονικά κλειστές ή συνδυασμός των δύο. Ένας ηλεκτρονόμος τέτοιου τύπου έχει έξι ακροδέκτες, δύο για το πηνίο, και δύο ζεύγη για καθεμία από τις δύο επαφές. Και εδώ πρέπει ασφαλώς να γνωρίζουμε τον τύπο και τους ακροδέκτες κάθε επαφής. Το κυκλωματικό διάγραμμα ενός τέτοιου ηλεκτρονόμου είναι ίδιο με αυτόν τύπου SPST με τη διαφορά ότι διαθέτει δύο επαφές.
- **DPDT (Double Pole Double Throw):** Αποτελείται από δύο μεταγωγικές επαφές, διαθέτει οκτώ ακροδέκτες, δύο εκ των οποίων αναφέρονται στο πηνίο, δύο ζεύγη για κάθε (μεταγωγική) επαφή και δύο κοινές επαφές. Το κυκλωματικό διάγραμμα ενός τέτοιου ηλεκτρονόμου είναι ίδιο με αυτόν τύπου SPDT με τη διαφορά ότι διαθέτει δύο επαφές.

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

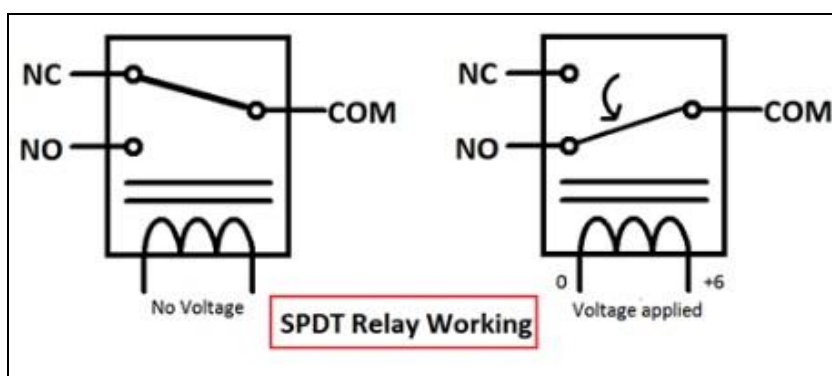
² Κατά EN 5005

³ Κατά DIN 72552

Πολλές φορές οι χαρακτήρες “S” και “D” μπορούν να αντικατασταθούν από αριθμούς, υποδηλώνοντας το πλήθος των διακοπών που μπορεί να διαθέτει ο ηλεκτρονόμος. Για παράδειγμα ο ηλεκτρονόμος 4PDT διαθέτει 4 μεταγωγικούς διακόπτες, και 14 ακροδέκτες (οκτώ για κάθε μία από τις δύο καταστάσεις λειτουργίας των τεσσάρων διακοπών, τέσσερις κοινούς ακροδέκτες και δύο για το πηνίο).



Σχήμα 2.8: Κυκλωματικό Διάγραμμα Ηλεκτρονόμου Τύπου SPST.¹



Σχήμα 2.9: Κυκλωματικό Διάγραμμα Ηλεκτρονόμου Τύπου SPDT.

2.4. Ειδικοί Τύποι Ηλεκτρονόμων

Όπως είδη αναφέρθηκε, εκτός από τους ηλεκτρομαγνητικούς ηλεκτρονόμους, υπάρχουν και οι ηλεκτρονόμοι στέρεας κατάστασης οι οποίοι αποτελούν έναν πρώτο τύπο ηλεκτρονόμων. Ωστόσο υπάρχουν πολλοί ακόμη διαφορετικοί τύποι ηλεκτρονόμων, η διάκριση των οποίων γίνεται κατά κύριο λόγο με βάση τον ρόλο που επιτελούν. Η αρχή λειτουργίας τους ωστόσο είναι ίδια παρότι μπορεί να συναντάμε πολύ μικρές διαφορές. Στην παρούσα ενότητα θα δούμε κάποιους ειδικούς τύπους ηλεκτρονόμων η λειτουργία των οποίων παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις σε σχέση με την κλασική λειτουργία των ηλεκτρομαγνητικών ηλεκτρονόμων και στην επόμενη ενότητα θα διακρίνουμε τα είδη των ηλεκτρονόμων με βάση το ρόλο που επιτελούν.

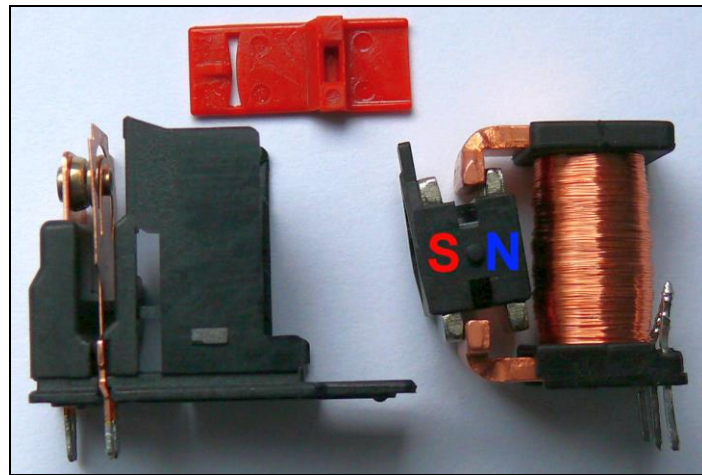
¹ Πηγή σχημάτων: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

2.4.1. Ηλεκτρονόμοι Μανδάλωσης (Latching Relay)

Ο ηλεκτρονόμος έχει την δυνατότητα να ελέγχει τη λειτουργία ενός κυκλώματος μέσω ενός άλλου κυκλώματος με τη βοήθεια του πηνίου ενεργοποίησης, από την περιγραφή ωστόσο φαίνεται ότι απαιτείται συνεχής διέγερση στο πηνίο ώστε ο ηλεκτρονόμος να διατηρεί σταθερή την κατάσταση του. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκε ο ηλεκτρονόμος μανδάλωσης.

Η ιδιαιτερότητα του ηλεκτρονόμου αυτού είναι ότι διατηρεί την κατάσταση του ακόμη και αν αφαιρεθεί η διέγερση στο πηνίο. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι το πηνίο καταναλίσκει ισχύ μόνο μια μικρή στιγμή, ενώ παράλληλα σε μια ενδεχόμενη απρόσμενη διακοπή της τροφοδοσίας, δεν επανέρχεται σε κατάσταση αποδιέγερσης. Η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στον έλεγχο βιομηχανικού φωτισμού όπου αποφεύγεται ο ενοχλητικός θόρυβος που μπορεί να εμφανίζεται εξαιτίας ενός AC πηνίου ενεργοποίησης.

Ο τρόπος αυτός λειτουργίας τους βασίζεται στις ιδιότητες των μόνιμων μαγνητών. Σε πολλές περιπτώσεις κατασκευάζονται με δύο πηνία όπου ο παλμός διέγερσης σε καθένα από αυτά επαναφέρει ή διεγείρει τον ηλεκτρονόμο. Είναι επίσης σύνηθες φαινόμενο η αποδιέγερση να πραγματοποιείται με εφαρμογή αντίθετης τάσης (ή ρεύματος) στα άκρα του πηνίου(Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Τυπικός Ηλεκτρονόμος Μανδάλωσης.¹

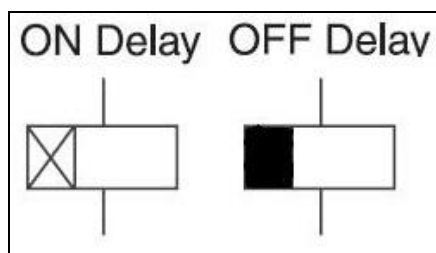
2.4.2. Ηλεκτρονόμοι Χρονικής Καθυστέρησης (Time Delay Relay)

Σε πολλές περιπτώσεις όταν σχεδιάζουμε ένα κύκλωμα που περιέχει διατάξεις ηλεκτρονόμων είναι απαραίτητο να εξασφαλίσουμε την δυνατότητα ελέγχου της τροφοδοσίας ενός ή περισσότερων στοιχείων του κυκλώματος ύστερα από ένα ορισμένο ελεγχόμενο χρόνο ή αντίθετα της διακοπής τροφοδοσίας ενός ή περισσότερων στοιχείων του κυκλώματος ύστερα από ένα ορισμένο ελεγχόμενο χρόνο. Την δυνατότητα αυτή μας την προσφέρουν ειδικοί μηχανισμοί, οι οποίοι ονομάζονται ηλεκτρονόμοι χρονικής καθυστέρησης ή εν συντομία χρονικά. Τα χρονικά αποτελούνται από ένα πηνίο, το οποίο όταν βρεθεί υπό τάση, ελέγχει μέσω ενός ελατήριου ή πνευματικού μηχανισμού, την λειτουργία μίας μεταγωγικής επαφής, η οποία συνδέεται κατάλληλα στο κύκλωμα. Η ηλεκτρονόμοι αυτοί βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε κυκλώματα

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

αυτοματισμού [10]. Υπάρχουν δύο κύρια είδη χρονικών ηλεκτρονόμων αυτοί με καθυστέρηση κατά την εκκίνηση και με καθυστέρηση κατά την διακοπή.

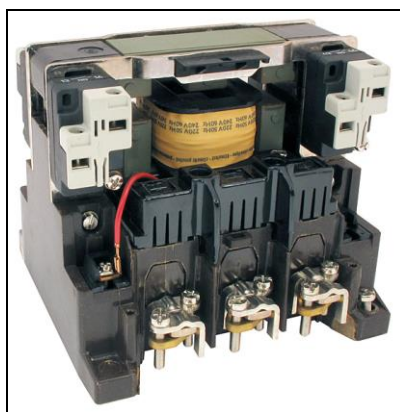
Στους ηλεκτρονόμους με σκόπιμη καθυστέρηση κατά την εκκίνηση, όταν το πηνίο διεγερθεί, γίνεται μετάβαση σε κατάσταση διέγερσης μετά από έναν προκαθορισμένο χρόνο ενώ αντίθετως, στην καθυστέρηση κατά την διακοπή γίνεται μετάβαση σε κατάσταση αποδιέγερσης αφού περάσει ο προκαθορισμένος χρόνος. Στη πρώτη περίπτωση ο χρόνος αρχίζει να μετρά αντίστροφα από την στιγμή που το πηνίο διεγερθεί ενώ στην δεύτερη όταν σταματήσει η τροφοδοσία του πηνίου. Ο επιθυμητός χρόνος ρυθμίζεται με ένα ρυθμιστικό κουμπί που υπάρχει στα χρονικά.



Σχήμα 2.10: Κυκλωματικός Συμβολισμός Χρονικών Ηλεκτρονόμων.¹

2.4.3. Επαφές (Contactor)

Οι ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται για τη διακοπή ηλεκτρικών κινητήρων και των φορτίων φωτισμού συνηθίζονται να ονομάζονται contactors. Παρότι αποτελούν ένα κοινό τύπο ηλεκτρονόμου, ο τύπος αυτός είναι φτιαγμένος ώστε να αντέχει σε μεγάλα φορτία τα οποία κυμαίνονται για συνεχές ρεύμα από 10A έως εκατοντάδες Amperes. Οι υψηλού ρεύματος επαφές γίνονται με κράματα που περιέχουν άργυρο ώστε να αντέχουν στα αναπόφευκτα προβλήματα που προκαλούνται από την εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου. Ωστόσο ένα σημαντικό τους πρόβλημα είναι η ύπαρξη υψηλού θορύβου, κατά την μετάβαση στις καταστάσεις λειτουργίας τους, καθιστώντας τα ακατάλληλα για χρήση σε χώρους όπου ο θόρυβος είναι ένα κύριο μέλημα [11].



Εικόνα 2.5: Τυπικός Contactor.²

¹ Πηγή: Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.

² Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

2.4.4. Ηλεκτρονόμος Buchholz

Μια από τις βασικότερες χρήσεις των ηλεκτρονόμων, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, είναι αυτή της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από ανεπιθύμητες μεταβατικές ή μόνιμες καταστάσεις (π.χ. παροδικά ή μόνιμα βραχυκυκλώματα). Δυστυχώς όμως, είναι αδύνατη η προληπτική προστασία του εξοπλισμού, δηλαδή η διακοπή της λειτουργίας του πριν την εμφάνιση του σφάλματος, μιας και οι ηλεκτρονόμοι ανιχνεύουν το σφάλμα όταν αυτό εμφανιστεί. Κύρια επιδίωξη είναι η γρήγορη ανίχνευση του, η αποτελεσματική και σχεδόν ακαριαία εκκαθάριση του με ταυτόχρονη απομόνωση του όσο το δυνατόν μικρότερου τμήματος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια ιδιαίτερη περίπτωση ηλεκτρονόμου είναι αυτή του ηλεκτρονόμου buchholz ο οποίος χρησιμοποιείται για την προστασία μετασχηματιστών που ψύχονται δια του ελαίου. Οι μετασχηματιστές ως μέρος του διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, υφίστανται υπερφορτίσεις, που δημιουργούν παροδικές υπερθερμάνεις και ελάττωση του χρόνου ζωής τους. Μικρή διάσπαση της μόνωσης του πυρήνα ή κακή ηλεκτρική σύνδεση δημιουργούν τοπική θέρμανση, που στους 350 °C προκαλεί διάσπαση του λαδιού σε εύφλεκτα αέρια, που συσσωρεύονται στο πάνω μέρος του μετασχηματιστή [12]. Ο ηλεκτρονόμος αερίων του buchholz, θέτει σε λειτουργία ένα σήμα κινδύνου, όταν συσσωρευτεί ένα ορισμένο ποσό αερίων. Η ανίχνευση και η ανάλυση των αερίων αυτών, ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο buchholz παρέχοντας προληπτική και αποτελεσματική προστασία στους μετασχηματιστές. Τονίζουμε στο σημείο αυτό ότι οι επαφές του δεν λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά από την πίεση του αερίου ή της συσσώρευση ροής του λαδιού [11].



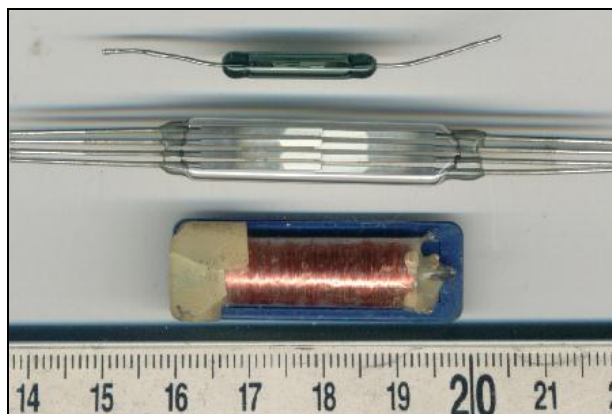
Εικόνα 2.6: Ηλεκτρονόμος Buchholz για την Προστασία Μετασχηματιστών Ελαίου.¹

2.4.5. Μαγνητικός Διακόπτης (Reed Relay)

Ο διακόπτης του ηλεκτρονόμου reed είναι κλεισμένος σε ένα σωληνοειδές, ο οποίος παρέχει ένα αεροστεγές περιβάλλον προσφέροντας προστασία έναντι ατμοσφαιρικής διάβρωσης. Οι επαφές κατασκευάζονται από μαγνητικό υλικό που τους κάνει να κινούνται υπό την επίδραση του πεδίου του σωληνοειδούς ή από έναν εξωτερικό μαγνήτη.

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

Στα κυριότερα πλεονεκτήματα τους συγκαταλέγεται η πολύ γρήγορη απόκριση τους και η μικρή κατανάλωση ισχύος στο κύκλωμα ελέγχου καθότι κατασκευάζονται από πηνία που διεγείρονται σε πολύ μικρά μεγέθη [11]. Ωστόσο, οι μέγιστες τιμές των ρευμάτων που μπορεί να διαχειριστεί ο διακόπτης τους είναι συνήθως πολύ μικρές βρίσκοντας εφαρμογή κυρίως σε τηλεπικοινωνιακές διατάξεις.



Εικόνα 2.7: Τυπικός Ηλεκτρονόμος τύπου Reed.¹

2.5. Διάκριση Ηλεκτρονόμων με Βάση το Ρόλο που Επιτελούν

Όπως αναφέρθηκε, η χρήση των ηλεκτρονόμων στην βιομηχανία και στα συστήματα ηλεκτρικές ενέργειας είναι ευρεία. Ανάλογα με το ρόλο και την εφαρμογή που επιτελούν μπορούμε να τους διακρίνουμε στις ακόλουθες κατηγορίες.

2.5.1. Διακοπτικοί Ηλεκτρονόμοι (Switching Relays)

Στο σημείο αυτό αναφερόμαστε στην τυπική χρήση των ηλεκτρονόμων δηλαδή του χειρισμού συσκευών (απενεργοποίηση ή ενεργοποίηση ηλεκτρικών συσκευών όπως κινητήρες, γεννήτριες κλπ.) δια μέσου ενός άλλου κυκλώματος ελέγχου. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί δηλαδή χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται ο έλεγχος ενός κυκλώματος από ένα σήμα χαμηλής ισχύος (με πλήρη απομόνωση μεταξύ ελεγχόμενου κυκλώματος και κυκλώματος ελέγχου) ή όπου πολλά κυκλώματα πρέπει να ελέγχονται από ένα σήμα.

2.5.2. Ηλεκτρονόμοι Κατεύθυνσης (Directional Relays)

Σε ορισμένες συσκευές, όπως π.χ. γεννήτριες, η ισχύς ρέει προς μια πάντα κατεύθυνση. Αναφερόμενοι σε μια γεννήτρια, η ισχύς ρέει από την γεννήτρια, εκτός και αν συμβεί ένα σφάλμα ή αν απωλέσει την μηχανική κινητήρια δύναμη της, όποτε λειτουργεί σαν κινητήρας με αποτέλεσμα να απορροφά ισχύ. Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης, είναι σχεδιασμένοι ώστε να ανιχνεύουν τις καταστάσεις αυτές και να ενεργοποιούν τις επαφές τους έτσι ώστε να αποσυνδέονται οι συσκευές που η ισχύς τους ρέει προς την αντίθετη από την προσδοκώμενη κατεύθυνση [12].

Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι επιτηρούν το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος, εξετάζοντας κάθε φορά αν το γινόμενο αυτό είναι θετικό ή αρνητικό.

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

2.5.3. Ηλεκτρονόμοι Απόστασης (Distance Relays)

Γενικά, κάθε ηλεκτρονόμος που σχεδιάζεται να λειτουργεί για την προστασία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ρυθμίζεται με συγκεκριμένο τρόπο έτσι ώστε να προστατεύει ένα συγκεκριμένο τμήμα του συστήματος (επιλεκτικότητα ηλεκτρονόμων) και ταυτόχρονα να εφαρμόζει εφεδρική (back up), προστασία σε έναν άλλον γειτονικό ηλεκτρονόμο, αν αυτός για κάποιον απροσδόκητο λόγο δεν επενεργήσει.

Για μια γραμμή με μία σύνθετη αντίσταση Z_L , η ροή ρεύματος μέσω της γραμμής για ένα βραχυκύκλωμα στο τέλος της γραμμής δημιουργεί μια τάση $V=I Z_L$. Ο ηλεκτρονόμος απόστασης, συγκρίνει το V με το I και είναι ρυθμισμένος να ενεργοποιείται όταν $V<I Z_L$, που ισχύει μόνο όταν το βραχυκύκλωμα είναι εντός της γραμμής που προστατεύει. Στην πραγματικότητα ο ηλεκτρονόμος αυτός, μετρά συνέχεια το $Z_L=V/I$, που είναι η σύνθετη αντίσταση από τη θέση του ηλεκτρονόμου μέχρι το σημείο του βραχυκυκλώματος. Επειδή το Z είναι ανάλογο με το μήκος της γραμμής, ο ηλεκτρονόμος μπορεί να ρυθμιστεί να ενεργοποιηθεί μόνο για βραχυκυκλώματα μέσα στην προστατευόμενη γραμμή [12].

Ένας ηλεκτρονόμος απόστασης λοιπόν χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την προστασία γραμμών μεταφοράς έναντι βραχυκυκλωμάτων παρέχοντας μεγάλη επιλεκτικότητα.

2.5.4. Ηλεκτρονόμοι Υπερέντασης (Overcurrent Relays)

Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε συστήματα διανομής χαμηλής τάσης. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί εκμεταλλεύονται την ιδιότητα ότι, όταν έχουμε ένα βραχυκύκλωμα σε ένα τμήμα του δικτύου, ρεύμα ρέει σε αυτό απ' όλα τα γειτονικά τμήματα του δικτύου, έτσι ώστε το βραχυκυκλωμένο τμήμα θα έχει το περισσότερο ρεύμα. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί μπορεί να είναι ορισμένου χρόνου ή αντίστροφου χρόνου.

Σε έναν ηλεκτρονόμο υπερέντασης αντίστροφου χρόνου, ο χρόνος λειτουργίας είναι αντιστρόφως ανάλογος της έντασης του ρεύματος. Δηλαδή μεγαλύτερη ένταση ρεύματος σημαίνει και μικρότερο χρόνο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η επιλεκτικότητα, καθώς ο ηλεκτρονόμος με το μεγαλύτερο ρεύμα, δηλαδή αυτός που είναι πιο κοντά στο βραχυκύκλωμα, θα λειτουργήσει ταχύτερα για να καθαρίσει το βραχυκύκλωμα πριν οι απομακρυσμένοι προς το σφάλμα ηλεκτρονόμοι κάνουν το ίδιο.

Ωστόσο για την προστασία των ακτινικών γραμμών ή βρόχων, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ορισμένου χρόνου. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ρεύματα βραχυκυκλωμάτων σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος των γραμμών δεν αλλάζουν πολύ. Η λειτουργία των ηλεκτρονόμων ορισμένου χρόνου είναι ανεξάρτητη από την ένταση του ρεύματος και η επιλεκτικότητα εξασφαλίζεται συνήθως με σκόπιμη χρονική καθυστέρηση στη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων [12].

2.5.5. Διαφορικοί Ηλεκτρονόμοι (Differential Relays)

Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί κάνουν χρήση του γεγονότος ότι το αλγεβρικό άθροισμα του ρεύματος που εισέρχεται σε μια συσκευή είναι ίσο με αυτό που εξέρχεται, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ή βραχυκυκλώματα εκτός από το τμήμα του προστατευόμενου εξοπλισμού παρέχοντας έτσι αποτελεσματικότερη επιλεκτική προστασία. Σε αυτό τον τύπο προστασίας, τον προστατευόμενο εξοπλισμό τον αντιμετωπίζουμε σαν ενιαίο σύνολο για τον λόγο αυτό συχνά

χρησιμοποιείται η ονομασία ενιαίας προστασίας (unit protection) [12]. Όταν η ενιαία προστασία εφαρμόζεται για την προστασία του εξοπλισμού τότε αναφερόμαστε σε διαφορική προστασία ρεύματος (differential current protection) ενώ όταν εφαρμόζεται σε γραμμές και καλώδια σε διαφορική προστασία οδηγού (pilot differential protection) [12].

Οι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι ποικίλουν ανάλογα με την συσκευή που προστατεύουν. Ο συνηθέστερος τύπος είναι αυτού του διαφορικού ρεύματος το οποίο συγκρίνει το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από το προστατευμένο τμήμα της εγκατάστασης. Ένας κοινός διαφορικός ηλεκτρονόμος ρεύματος είναι το ρελέ διαφυγής που χρησιμοποιείται στις εσωτερικές εγκαταστάσεις.

2.5.6. Ηλεκτρονικά Θερμικά

Αποτελούν ιδιαίτερη μορφή ηλεκτρονόμων οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι ώστε να παρέχουν προστασία στους κινητήρες έναντι υπερφορτίσεων, απώλεια ή ασυμμετρία φάσεων, υπερθέρμανση των τυλιγμάτων τους ή κάποιο άλλο μηχανικό πρόβλημα. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε, ότι οι ασφάλειες βραδείας τήξεως που προστατεύουν το κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα από βραχυκυκλώματα δεν παρέχουν προστασία έναντι υπερεντάσεων, διότι όπως προκύπτει από τις χαρακτηριστικές καμπύλες αυτών των ασφαλειών, ο χρόνος που θα χρειαστεί για να ενεργοποιηθούν είναι εξαιρετικά μεγάλος ιδιαίτερα για μικρές υπερεντάσεις. Για την προστασία των κινητήρων από υπερεντάσεις χρησιμοποιούμε στα κυκλώματα τροφοδοσίας ειδικούς μηχανισμούς που ονομάζονται ηλεκτρονικά θερμικά.

Η κατασκευή και χρήση τους γίνεται κάτω από συγκεκριμένα πρότυπα¹ και προτείνονται για την αντικατάσταση των διμεταλλικών θερμικών ρελέ υπερφόρτισης γιατί εξασφαλίζουν πλήρη προστασία ακόμη και σε εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες τροφοδοσία [13].

2.6. Ηλεκτρονόμοι Προστασίας και Αυτόματοι Διακόπτες

Η έννοια του ηλεκτρονόμου μπορούμε να πούμε ότι είναι διττή, από τη μια αναφέρεται ως μέσο ελέγχου ενός άλλου κυκλώματος από ένα κύκλωμα ελέγχου με τη βοήθεια του πηνίου διεγέρσεως, ενώ από την άλλη έχουμε έναν ηλεκτρονόμο προστασίας, όπου μια συσκευή (ηλεκτρονόμος) παίζει το ρόλο ενός ακούραστου επόπτη, που μετράει συνεχώς τις υπό έλεγχο ηλεκτρικές ποσότητες του συστήματος που προστατεύει και είναι έτοιμος, να δώσει εντολή σε έναν διακόπτη να ανοίξει (το άνοιγμα αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα κινητήρα ή άλλες διατάξεις), ώστε να αποσυνδεθεί το κύκλωμα (που προστατεύει) όταν μια τιμή (ελέγχου) πάρει μια ασυνήθιστη τιμή. Κατά το πλείστον, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας είναι δευτερογενείς συσκευές, στις οποίες οι ηλεκτρικές ποσότητες που μετρούνται, υποβιβάζονται μέσω μετασχηματιστών (τάσεως ή ρεύματος) Είδαμε σε προηγούμενο εδάφιο τις κατηγορίες των ηλεκτρονόμων προστασίας συνοπτικά, στη συνέχεια θα αναφέρουμε τις κατηγορίες των αυτόματων διακοπών (οι οποίοι μπορούν να οδηγούνται από έναν ηλεκτρονόμο) [13].

¹ Αναφερόμαστε στο πρότυπο IEC 255 και 947

2.6.1. Αυτόματι Διακόπτες Ισχύος

Οι αυτόματι διακόπτες ισχύος, είναι διακόπτες ισχύος (ΔΙ) που ανοίγουν αυτόματα το κύκλωμα σε προκαθορισμένο χρόνο αν το ρεύμα του κυκλώματος που προστατεύουν υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή. Η συνηθέστερη χρήση τους είναι έναντι προστασίας υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων αποτελούμενοι από:

- ένα Διακόπτη Ισχύος (ΔΙ)
- ένα θερμικό στοιχείο που δίνει εντολή στον διακόπτη ισχύος να ανοίξει, το ρόλο του θερμικού στοιχείου μπορεί σαφώς να αναλάβει και ένας ηλεκτρονόμος.
- ένα ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο που δίνει εντολή στον διακόπτη ισχύος να ανοίξει ακαριαία (σε περίπτωση βραχυκυκλώματος), ο χρόνος απόκρισης τους είναι της τάξης των 10-100ms όταν το ρεύμα υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή του ονομαστικού(2-15I_N).

Οι αυτόματι διακόπτες ισχύος δύναται επίσης να συνδεθούν με ηλεκτρονόμους υπότασης ή υπέρτασης παρέχοντας αντίστοιχη προστασία (συνηθέστερα για την προστασία κινητήρων) [14].

2.6.2. Αυτόματι ή Μικροαυτόματι Ασφαλειοδιακόπτες

Πρόκειται για συσκευές προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων η υπερευμάτων, διακόπτουν αυτόματα το κύκλωμα τροφοδοσίας και τίθενται σε λειτουργία μετά την αντικατάσταση της βλάβης [13]. Οι μικροαυτόματι παρουσιάζουν περιορισμένη ικανότητα απόξευξης (3-10KA) με τυπική τιμή τα 6KA [14]. Αν το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο, πρέπει να παρέχεται προστασία στον μικροαυτόματο με ασφάλεια τήξης η οποία προτάσσεται εξασφαλίζοντας την επιλεκτική προστασία των μέσων προστασίας.

2.6.3. Αυτόματι Διακόπτες Διαρροής

Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για προστασία έναντι εμφάνισης επικίνδυνων τάσεων επαφών σε μεταλλικά μέρη συσκευών (που μπορεί να εμφανιστεί λόγω φθοράς της μονώσεως κλπ.) και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό χρόνο λειτουργίας.

2.6.4. Διακόπτες Μέσης και Υψηλής Τάσεως

Στα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος μέσης τάσεως (1-22kV) και υψηλής/υπερυψηλής τάσεως (66-400kV) οι διακόπτες σύμφωνα με την βιβλιογραφία [15] ταξινομούνται ως εξής:

- Αποζεύκτες-γειωτές: Οι αποζεύκτες δεν έχουν δυνατότητα διακοπής ή αποκατάστασης αξιόλογου ρεύματος, όμως έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ των επαφών και εξασφαλίζουν (σε συνεργασία με τους γειωτές) ότι ένα κύκλωμα είναι ασφαλές ώστε να εργασθεί προσωπικό σε αυτό. Οι γειωτές είναι διακόπτες με ανάλογα χαρακτηριστικά με τους αποζεύκτες, με τους οποίους αλληλομανδλώνονται και εξασφαλίζουν ότι όταν ο αποζεύκτης είναι ανοικτός, το κύκλωμα συνδέεται στη γείωση.
- Διακόπτες φορτίου: Έχουν δυνατότητα διακοπής μόνο του κανονικού ρεύματος λειτουργίας ενώ μπορούν να κλείσουν χωρίς βλάβη ακόμα και αν υπάρχει βραχυκύκλωμα. Είναι εφοδιασμένοι με ελατήριο για την γρήγορη απομάκρυνση των επαφών. Αποτελούν μέσα χειρισμού και χρησιμοποιούνται για χειρισμό ηλεκτροκινητήρων, ζεύξη αναχωρήσεων γραμμών, συγχρονισμένη σύνδεση ηλεκτρογεννητριών κλπ.

- Διακόπτες ισχύος ή αυτόματοι: Οι διακόπτες ισχύος αποτελούν μέσα προστασίας και σπανίως χρησιμοποιούνται για χειρισμούς. Έχουν δυνατότητα ταχείας διακοπής του πολύ μεγάλου ρεύματος που ρέει στα δίκτυα ΜΤ και ΥΤ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, μέσω ειδικών διατάξεων που σβήνουν το τόξο που σχηματίζεται ανάμεσα στις επαφές τους. Οι συνηθέστεροι τύποι σήμερα είναι οι διακόπτες πτωχού ελαίου και οι διακόπτες SF6. Οι διακόπτες ισχύος διαθέτουν ισχυρότατο ελατήριο το οποίο εξασφαλίζει την ταχεία απομάκρυνση των επαφών εντός ελάχιστου χρόνου, κάτω των 5 ms. Αν ο μηχανισμός του ελατηρίου ενεργοποιηθεί και ο διακόπτης ανοίξει, πρέπει να οπλίσει εκ νέου, πράγμα που επιτυγχάνεται με χρήση ηλεκτροκινητήρα ή βοηθητικού χειροστροφάλου.

2.6.5. Διακόπτες Χαμηλής Τάσεως

Στα δίκτυα ΧΤ (τυπικά έως 1000V) δεν υπάρχει ιδιαίτερη κατηγορία αποζευκτών, διότι αφενός είναι δυνατή η εργασία προσωπικού υπό τάση, αφετέρου δε οι διακόπτες φορτίου εξασφαλίζουν επαρκή απόζευξη. Υπάρχουν μόνο διακόπτες φορτίου (χειρισμού) και διακόπτες ισχύος (προστασίας) ή αυτόματοι. Αυτοί έχουν τις ίδιες βασικές ιδιότητες με τους αντίστοιχους διακόπτες μέσης τάσης αλλά είναι πολύ απλούστεροι και φθηνότεροι. Σε απλές εγκαταστάσεις και για ρεύματα μέχρι 100Α χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι μικροαυτόματοι, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα χαμηλού κόστους [15].

Εκτός από απλές εφαρμογές (οικιακές, φωτισμός κλπ.) στις περισσότερες περιπτώσεις ο χειρισμός και έλεγχος των φορτίων γίνεται με ηλεκτρονόμους (ρελέ) ισχύος αντί για απλούς χειροκίνητους διακόπτες. Ο λόγος είναι ότι οι ηλεκτρονόμοι συνεργάζονται άμεσα με συστήματα αυτοματισμού, από τα απλούστερα με πιεστικούς διακόπτες START-STOP μέχρι προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC) και περίπλοκα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.



Εικόνα 2.8: Διακόπτες Ισχύος Υψηλής Τάσεως Τύπου Πτωχού Ελαίου.¹

¹ Πηγή: Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

2.7. Προβλήματα κατά την Χρήση Ηλεκτρονόμων

Είδαμε τον τρόπο με τον οποίον οι ηλεκτρονόμοι λειτουργούν, στην συνέχεια θα δούμε τα προβλήματα που συχνά παρατηρούνται στην χρήση των ηλεκτρονόμων και των τρόπων με τον οποίο αυτά αντιμετωπίζονται.

2.7.1. Υπερτάσεις στο Πηνίο Ενεργοποίησης

Το κύκλωμα ελέγχου ενός ηλεκτρονόμου περιλαμβάνει ένα πηνίο ή καλύτερα μια αυτεπαγωγή. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η τάση διέγερσης του, δηλαδή η τάση που διαρρέει το πηνίο, είναι συνεχής, η διακοπή, αποδιέργεση, της τάσης του πηνίου θα οδηγήσει σε μια απότομη εκτόνωση της αποθηκευμένης ενέργειας του, ως αποτέλεσμα της αντίστασης του στην βίαιη μεταβολή της κατάστασης του. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο λοιπόν, γεννά ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το λεγόμενο επαγωγικό, που έχει αντίθετη φορά από εκείνο που παρέχεται στο πηνίο. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα, αν δεν περιοριστεί, θα δημιουργήσει με τη σειρά του, κρουστικές υπερτάσεις, ικανές να καταστρέψουν τα στοιχεία που περιλαμβάνει το κύκλωμα ελέγχου (ημιαγωγοί κλπ.).

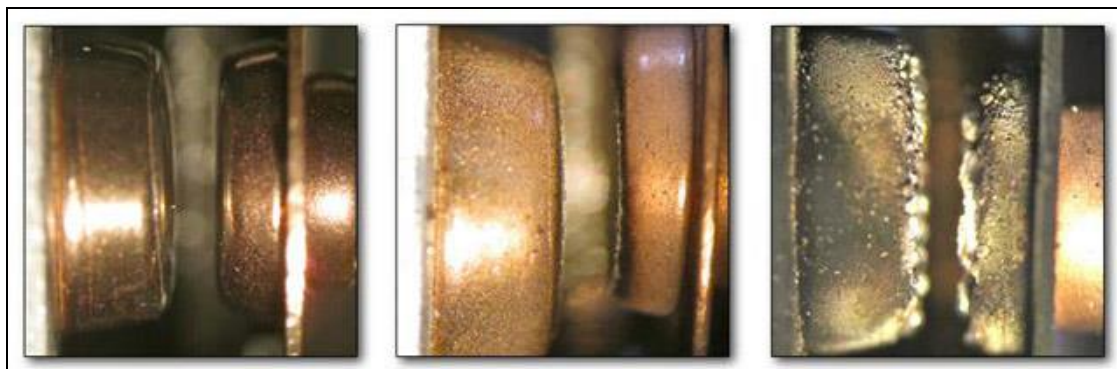
2.7.2. Αντιμετώπιση Υπέρτασης στο Πηνίο Ενεργοποίησης

Εφόσον τα στοιχεία του πηνίου είναι γνωστά (τάση, αυτεπαγωγή) το πρόβλημα εμφάνισης της κρουστικής υπέρτασης κατά την αποδιέργεση του πηνίου μπορεί εύκολα να αντιμετωπιστεί με προσθήκη μια διόδου στα άκρα του πηνίου. Σε πολλές εφαρμογές (ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες) η διόδος αυτή έρχεται ενσωματωμένη στο σώμα του ηλεκτρονόμου [11].

2.7.3. Υπερτάσεις στις Επαφές του Ηλεκτρονόμου

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, που δημιουργούνται κρουστικές υπερτάσεις κατά την αποδιέργεση στο πηνίο ενεργοποίησης, έτσι, και στις επαφές του ηλεκτρονόμου, μπορεί να δημιουργηθεί το αντίστοιχο πρόβλημα, όταν καλείται να αποκόψει επαγωγικά φορτία ή όταν εμφανίζεται μια οποιασδήποτε μορφής αυτεπαγωγή στο κύκλωμα που ελέγχει. Η υπέρταση αυτή, είναι ικανή να παράγει ηλεκτρικό τόξο (το ηλεκτρικό τόξο επιτυγχάνεται εφόσον δύο ηλεκτρόδια που βρίσκονται σε επαφή, έτσι ώστε να αποτελούν, μαζί με μια πηγή ρεύματος, ένα κλειστό κύκλωμα, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης μερικών αμπερ, απομακρυνθούν κατά μερικά χιλιοστά), φαινόμενο καταστροφικό για τη λειτουργία του διακόπτη του ηλεκτρονόμου. Η δημιουργία ηλεκτρικού τόξου ανάμεσα στα άκρα του διακόπτη παράγει ένα σπινθήρα, ο οποίος σταθεροποιείται αν στα άκρα των ηλεκτροδίων διατηρηθεί μια κατάλληλη διαφορά δυναμικού (45-50 βολτ). Το αέριο που βρίσκεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια εξασφαλίζει τη συνέχιση της κυκλοφορίας του ηλεκτρικού ρεύματος στο διάστημα αυτό, λειτουργεί δηλαδή ως γέφυρα. Αν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες τότε το ηλεκτρικό τόξο σταθεροποιείται και γίνεται συνεχές.

Βλέπουμε λοιπόν ότι το πρόβλημα αυτό δημιουργεί πρόβλημα στο διακόπτη του ηλεκτρονόμου, αφενός μπορεί να εξασφαλίσει μια συνέχεια της ροής του ρεύματος, όντας μη ικανός να επιτελέσει το ρόλο του, αφετέρου, η έκθεση των επαφών στους δημιουργούμενους αυτούς σπινθήρες, είναι ικανή να τις διαβρώσει, μειώνοντας δραματικά το χρόνο ζωής του (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Εξέλιξη Διάβρωσης Επαφών Ηλεκτρονόμου Λόγο Έκθεσης σε Κρουστικές Υπερτάσεις.¹

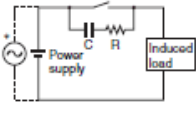
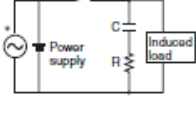
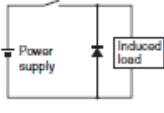
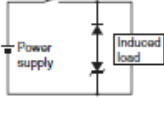
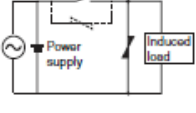
2.7.4. Αντιμετώπιση Υπέρτασης στις Επαφές του Ηλεκτρονόμου

Σε αντίθεση με το προηγούμενο πρόβλημα που παρουσιάζεται στο πηνίο ενεργοποίησης, εδώ, η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού φαντάζει πιο περίπλοκη διότι πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος που ελέγχει ο ηλεκτρονόμος. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.1) βλέπουμε συνοπτικά τις μεθόδους προστασίας που χρησιμοποιούνται, διακρίνουμε τις εξής μεθόδους:

- **Snubber:** Πρόκειται για ένα συμπληρωματικό κύκλωμα που αποτελείται από έναν πυκνωτή και μια αντίσταση εν σειρά, συνδεδεμένο παράλληλα με τις επαφές του ηλεκτρονόμου. Η λογική της λειτουργίας του είναι απλά, όταν οι επαφές ανοίγουν, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην παρασιτική αυτεπαγωγή μεταβαίνει στον πυκνωτή και ύστερα με τη σειρά της καταναλίσκεται πάνω στον αντιστάτη. Συχνά δύναται να χρησιμοποιείται και μια διάδος ώστε να αποτρέψει το συντονισμό του LC κυκλώματος. Ένας εμπειρικός κανόνας για την επιλογή των κατάλληλων μεγεθών είναι η χρήση πυκνωτή μεγέθους από 0,5-1μF, για κάθε 1A κρουστικού ρεύματος και η χρήση αντίστασης από 0,5-1Ω για κάθε τάση που απαιτείται να αποκοπεί [16]. Η χρήση του προτείνεται περισσότερο για κυκλώματα DC.
- **Δίοδος:** Τοποθετείται παράλληλα στις επαφές και σκοπό έχει να αποτρέψει την δημιουργία ανάστροφου κρουστικού ρεύματος, επιστρέφοντας, κατά κάποιον τρόπο, την ενέργεια στο πηνίο όπου καταναλίσκεται στα ωμικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος. Εδώ η χρήση της προτείνεται μόνο σε κυκλώματα DC. Η χρήση της διόδου μπορεί όμως να οδηγήσει σε καθυστέρηση μετάβασης της κατάστασης του ηλεκτρονόμου [16].
- **Δίοδος και Δίοδος Zener:** Πρόκειται για διάταξη μιας διόδου και μιας διόδου Zener που τοποθετείται παράλληλα. Η χρήση και ο τρόπος λειτουργίας είναι ίδια με αυτή της διόδου, ωστόσο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η καθυστέρηση της μετάβασης του ηλεκτρονόμου είναι σημαντική.
- **Varistor:** Σε συνδεσμολογία παράλληλη, εκτενείς αναφορά σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η χρήση του ενδείκνυται τόσο σε κυκλώματα AC και DC.

¹ Πηγή: Arc suppression. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

Πίνακας 2.1: Πίνακας Μεθόδων Προστασίας Επαφών Ηλεκτρονόμου.

Item Type	Circuit example	Applicability	
		AC	DC
CR type		*	OK
		OK	OK
Diode type		NG	OK
Diode + Zener diode type		NG	OK
Varistor type		OK	OK

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [1]. Wikipedia. (2015). *Ηλεκτρονόμος*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Ελληνικής Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/>
- [2]. Klooster, J. W. (2009). *Icons of Invention: The Makers of the Modern World from Gutenberg to Gates*. GREENWOODS ICONS. p. 153
- [3]. Carlisle, R. (2004). *Scientific American Inventions and Discoveries*. Scientific American. p. 311
- [4]. *The electromechanical relay of Joseph Henry*. (2005). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της history-computer.com: <http://history-computer.com/ModernComputer/Basis/relay.html>
- [5]. Coulson, T. (1950). *Joseph Henry: His Life and Work*. Princeton: Princeton University Press
- [6]. Gibberd, William (1966). "Edward Davy". *Australian Dictionary of Biography*. Canberra: Australian National University.
- [7]. Εφευρέτης Samuel F. B. Moesb, Αριθμός δημοσίευσης US1647 A, Ημερομηνία δημοσίευσης: 20 Ιουν. 1840, UNITED STATES 'PATENT OFFICE, "IMPROVEMENT IN THE MODE OF COMMUNICATING *llilFCHIM/TIN BY SIGNALS BY THEAPPLICATION Ioi' ELECTR-MAGN ETISM*".
- [8]. *Online Etymology Dictionary* . (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της etymonline.com: http://www.etymonline.com/index.php?allowed_in_frame=0&search=relay&searchmode=none
- [9]. Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). *Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος*. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.
- [10]. *ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ (ΡΕΛΕ) ή ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΓΕΝΙΚΑ*. (2005). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της docplayer: <http://docplayer.gr/92591-Kefalaio-a-ilektronomoi-rele-i-tileheirizomenoi-diakoptes-genika.html>
- [11]. *Relay*. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- [12]. ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΒΩΒΟΣ (2009). *ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.
- [13]. ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ν. ΜΑΝΙΑΣ. (2013). *ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ*. Αθήνα: Συμεών.
- [14]. Γεώργιος, Π. (2012). *Παρουσίαση Μαθήματος: Ηλεκτροτεχνία - Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Parousiasi10.pdf
- [15]. Ντοκόπουλος, Π. (1992). *Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης (Β' έκδοση)*. Θεσσαλονίκη: Π. Ζήτη & ΣΙΑ Ο.Ε.
- [16]. Omron. (2015). *Φυλλάδιο Κατασκευαστή OMRON*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία Web της OMRON: <https://www.ia.omron.com/support/faq/answer/36/faq02804/>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Wikipedia. (2015). *Ηλεκτρονόμος*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Ελληνικής Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/>
- [2] Relay. (2016). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- [3]. Ζούλης Νικόλαος, Κ. Π. (2000). *Συστήματα Αυτοματισμών Α' Τόμος*. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.
- [4]. *Στοιχεία Βιομηχανικών Αυτοματισμών*. (2015). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web του Μουρούτσου Σ.: <http://technicaldrawing.mouroutsos.net/designs/industrial/industrial-elements/>
- [5]. *ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ – ΡΕΛΕ*. (2010). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web του Ευθυμίου Δ.: <http://dimitrisefthimiou.weebly.com/etalambdaepsilonkappataurhoomicronnuomicronmuomicroniota.html>
- [6]. ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ (ΡΕΛΕ) ή ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΓΕΝΙΚΑ. (2005). Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της docplayer: <http://docplayer.gr/92591-Kefalaio-a-ilektronomoi-rele-i-tileheirizomenoi-diakoptes-genika.html>
- [7]. ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΒΩΒΟΣ (2009). ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.
- [8]. ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ν. ΜΑΝΙΑΣ. (2013). *ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ*. Αθήνα: Συμεών.
- [9]. Γεώργιος, Π. (2012). *Παρουσίαση Μαθήματος: Ηλεκτροτεχνία - Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Parousiasi10.pdf
- [10]. Wikipedia. (2016). Ηλεκτρικό τόξο. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki/>

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΠΑΦΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΥ

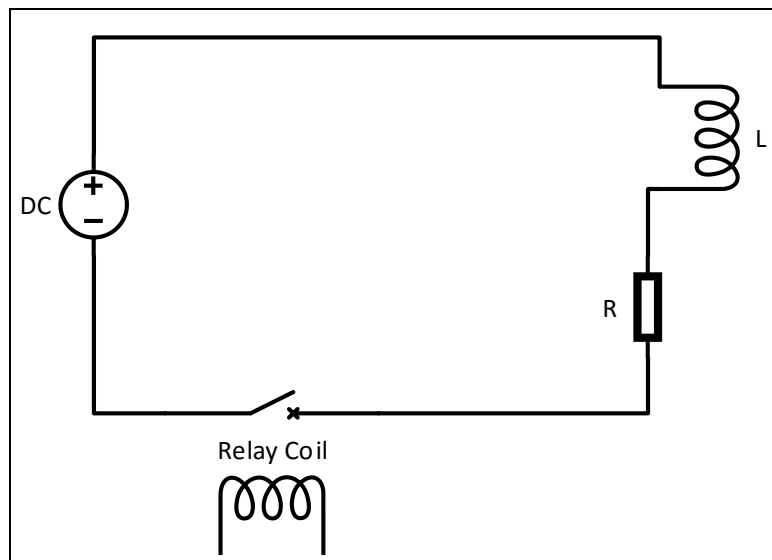
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1. Εισαγωγή

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε τη σημασία της προστασίας των επαφών του ηλεκτρονόμου και συνοπτικά τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Στην παρούσα ενότητα θα εξετάσουμε αναλυτικά δύο εκ' των μεθόδων αυτών, δηλαδή την προστασία με χρήση MOV και την προστασία με χρήση κυκλώματος snubber, σε θεωρητικό επίπεδο.

3.2. Εμφάνιση Κρουστικών Υπερτάσεων στο Χειρισμό Επαγωγικών Φορτίων

Θεωρούμε το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, η λειτουργία του οποίο ρυθμίζεται από έναν ηλεκτρομαγνητικό ηλεκτρονόμο.



Σχήμα 3.1: Σχηματική Διάταξη Χειρισμού Επαγωγικού Φορτίου από Ηλεκτρονόμο.

Όπως είναι γνωστό, η ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή μια τυχαία χρονική στιγμή t_0 θα είναι ίση με:

$$W_c = \frac{1}{2} C V_c^2$$

(Εξίσωση 3.1)

όπου V_c η τάση στα άκρα του πυκνωτή τη χρονική στιγμή t_0 .

Αντίστοιχα, η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο μια τυχαία χρονική στιγμή t_0 θα είναι ίση με:

$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2$$

(Εξίσωση 3.2)

όπου i_L η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο τη χρονική στιγμή t_0 .

Θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t_0=0s$ ο ηλεκτρονόμος είναι διεγερμένος και ο διακόπτης κλειστός. Η ένταση του ρεύματος θα είναι σαφώς:

$$i_{max} = \frac{V_{DC}}{R}$$

(Εξίσωση 3.3)

Τη χρονική στιγμή t_1 αφαιρείται η διέγερση στο πηνίο του ηλεκτρονόμου, και ο διακόπτης μεταβαίνει σε ανοιχτή κατάσταση, το ρεύμα με τη σειρά του αρχίζει να μειώνεται και το πηνίο, αντιδρώντας στην μεταβολή αυτή, δημιουργεί μια αντίθετη τάση προσπαθώντας να διατηρήσει την προηγούμενη κατάσταση του ρεύματος και απελευθερώνοντας ταυτοχρόνως την αποθηκευμένη του ενέργεια ((Εξίσωση 3.2)δημιουργώντας έτσι μια στιγμιαία υπέρταση στα άκρα του διακόπτη. Σε περίπτωση κατά την οποία το πηνίο ήταν συνδεδεμένο παράλληλα με ένα πυκνωτή χωρητικότητας C (η χωρητικότητα αυτή μπορεί επίσης να είναι η ίδια χωρητικότητα του πηνίου [1],[2]), η ενέργεια αυτή θα φόρτιζε σταδιακά τον πυκνωτή C . Αρχικά, αγνοώντας της ωμικές απώλειες, με χρήση των εξισώσεων (Εξίσωση 3.1) (Εξίσωση 3.2) προκύπτει μια στιγμιαία τάση ίση με:

$$W_L = W_C \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2}Li_L^2 = \frac{1}{2}CV_c^2 \Leftrightarrow$$

$$V_c = V_{max} = i_{max} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

(Εξίσωση 3.4)

Η στιγμιαία αυτή υπέρταση λόγω της ύπαρξης των ωμικών απωλειών θα εμφανίζει μια συνεχόμενη εξασθένηση, απόσβεση, και τα χαρακτηριστικά της θα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος. Οι τιμές οι οποίες μπορεί να λάβει είναι αρκετά μεγάλες, σε σύγκριση πάντα με την τάση λειτουργίας του κυκλώματος, επομένως κρίνεται απαραίτητη μια μέθοδος προστασίας των επαφών.

3.3. Προστασία με Χρήση MOV

Αρχικά θα δούμε κάποιους γενικούς κανόνες που διέπουν την χρήση των MOV στην προστασία έναντι κρουστικών υπερτάσεων όταν αυτές δημιουργούνται από το χειρισμό επαγωγικών φορτίων.

Όπως είδαμε, όταν ο διακόπτης ανοίξει, η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο δεν μπορεί να αλλάξει ακαριαία, επομένως, το ρεύμα αυτό θα πρέπει να διαρρέει το varistor με μία αρχική-μέγιστη τιμή όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (Εξίσωση 3.3) και να μειώνεται εκθετικά, ωστόσο στην τιμή της αντίστασης R , θα πρέπει τώρα να συμπεριλάβουμε και την αντίσταση του MOV (ο τρόπος υπολογισμού αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο) και τελικά θα προκύπτει ένα ρεύμα μικρότερο από την τιμή του i_{max} . Η διαδρομή αυτή του ρεύματος και του κυκλώματος προστασίας είναι γνωστή με την αγγλική ορολογία “flywheel path”[1]. Ένας γενικός κανόνας για να γνωρίζουμε το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθεί η τιμή του ρεύματος στο $\frac{1}{e}$ (περίπου στο 37%) (Σχήμα 3.2) δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

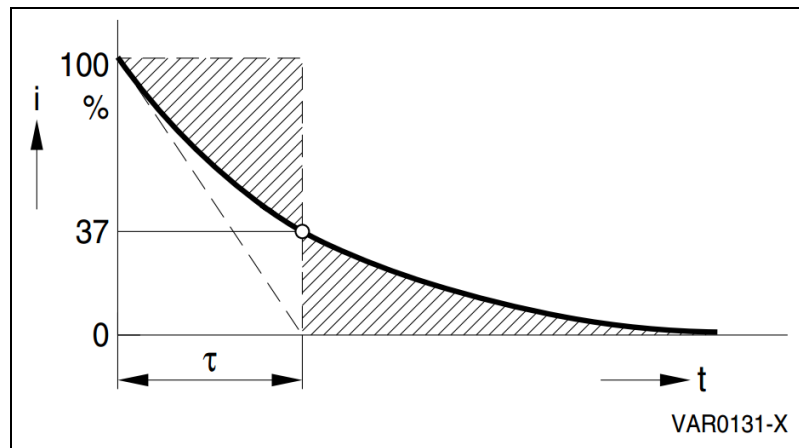
(Εξίσωση 3.5)

όπου R η συνολική αντίσταση του κυκλώματος η οποία θα συμπεριλαμβάνει σαφώς και την αντίσταση του MOV. Σύμφωνα λοιπόν με το παράδειγμα της εικόνας (Σχήμα 3.1) ο χρόνος αυτός θα δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{L}{R + R_{MOV}} = t_r$$

(Εξίσωση 3.6)

Είναι σαφές ότι ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την αντίσταση του MOV η οποία δεν είναι σταθερή αφού εξαρτάται από το ρεύμα που το διαρρέει κάθε στιγμή και αυξάνεται καθώς αυτό μειώνεται. Χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να θεωρήσουμε όμως την αντίσταση του MOV ίση με την αντίσταση του ημιαγωγού τη χρονική στιγμή που διαρρέεται από το κρουστικό ρεύμα όταν αυτό έχει το μέγιστο εύρος του. Η τιμή της αντίστασης αυτής προσδιορίζεται εύκολα από τη χαρακτηριστική V,I.

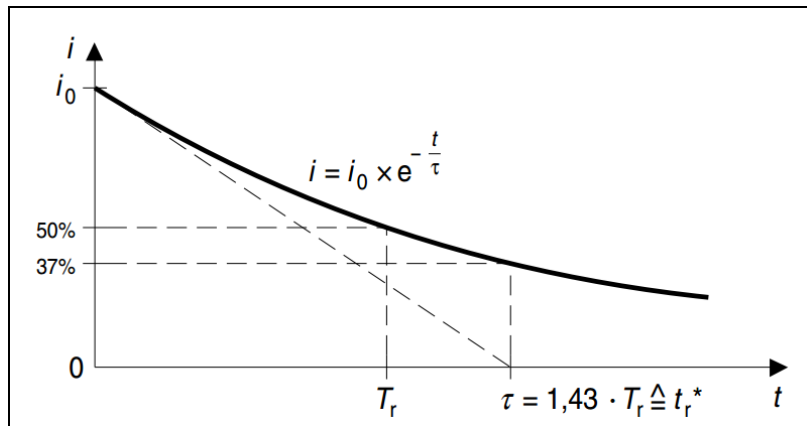


Σχήμα 3.2: Σταθερά Χρόνου «τ» του Κυκλώματος Προστασίας.¹

Για τον υπολογισμό της αντοχής του varistor έναντι στο κρουστικό ρεύμα το οποίο διαρρέεται, (1.5.5), θα πρέπει να γνωρίζουμε τη μορφή της κρουστικής κυματομορφής, και τον απαιτούμενο αριθμό των επαναλήψεων. Ο αριθμός των επαναλήψεων συνήθως είναι ίσως με τη μέγιστη διάρκεια ζωής των επαφών του ηλεκτρονόμου ενώ και το εύρος του κρουστικό ρεύματος μπορεί εύκολα να υπολογιστεί (Εξίσωση 3.3) αγνοώντας αρχικά την αντίσταση του MOV. Αυτό το οποίο χρειαζόμαστε για να μπορέσουμε να επιλέξουμε τον κατάλληλο τύπο είναι μια προσαρμογή της καμπύλης της κρουστικής έντασης του ρεύματος στο οποίο εκτίθεται στις πρότυπες που έχουν τα φυλλάδια των κατασκευαστών. Σε πολλές περιπτώσεις ο χρόνος ο οποίος υπολογίστηκε στην προηγούμενη σχέση (t_r) είναι αρκετός, καθώς οι καμπύλες αναπροσαρμογής αναφέρονται στον χρόνο αυτό, ωστόσο θέλει ιδιαίτερη προσοχή όταν οι καμπύλες αναφέρονται σε εκθετικές κυματομορφές. Στην περίπτωση αυτή χρειαζόμαστε το χρόνο ημίσεως εύρους (Decay Time to Half

¹ Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: www.epcos.com

Value) [Tr] όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα (1.5.1). Για το σκοπό αυτό εφαρμόζουμε την παρακάτω τεχνική (Σχήμα 3.3) [1]:



Σχήμα 3.3: Γράφημα Ευρέσεως Χρόνου Ημίσεος Εύρους.¹

Με χρήση των εξισώσεων που διέπουν την καμπύλη εύκολα προκύπτει ότι:

$$\frac{t_{37\%}}{t_{50\%}} = \frac{\ln 0,37}{\ln 0,50} = 1,43 = \frac{t_r}{T_r} \Rightarrow$$

$$T_r = \frac{t_r}{1,43}$$

(Εξίσωση 3.7)

Η μέγιστη ικανότητα απορροφούμενης ενέργειας του MOV υπολογίζεται εύκολα με χρήση της σχετικής εξίσωσης (1.5.6)(Εξίσωση 1.2). Όταν η κρουστική υπέρταση δημιουργείται από το χειρισμό επαγωγικών φορτίων, ένας γενικός εμπειρικός κανόνας είναι ότι στη δυσμενέστερη των περιπτώσεων σε κάθε λειτουργία του varistor θα απορροφάτε ενέργεια ίση με την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο (Εξίσωση 3.2). Τέλος, η καταναλισκόμενη ισχύς υπολογίζεται με χρήση της 1.13 (Εξίσωση 1.13).

3.3.1. Βήματα Επιλογής Κατάλληλου Τύπου MOV

Έχοντας αποφασίσει τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζουμε τα απαραίτητα μεγέθη θα πρέπει να είμαστε σε θέση να επιλέξουμε τον κατάλληλο τύπο varistor ο οποίος θα τοποθετηθεί στο κύκλωμα “flywheel”. Η σειρά που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να γίνει η σωστή επιλογή είναι περιληπτικά η εξής:

- Προσδιορισμός της συνεχόμενης τάσης που θα δέχεται το MOV και εκλογεί κατάλληλου τύπου/τύπων ώστε να αντέχει στην συνεχόμενη αυτή τάση. (Πρέπει πάντα να λαμβάνουμε επίσης υπόψιν τυχόν διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας)
- Από τα MOV που επιλέξαμε στο πρώτο βήμα, αφού υπολογίσουμε την αναμενόμενη μορφή του κρουστικού ρεύματος διαρροής, απορρίπτουμε εκείνα που δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις για το επιθυμητό επίπεδο προστασίας και τη διάρκεια ζωής, ξεκινώντας από αυτά με το μικρότερο μέγεθος.

¹ Πηγή: EPCOS. (2008). SIOV Metal Oxide Varistors. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: www.epcos.com


- Τελευταίο στάδιο είναι ο έλεγχος της απορροφούμενης ενέργειας, σε περίπτωση κατά την οποία η απορροφούμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ικανότητα, επαναλαμβάνουμε το δεύτερο βήμα, για το αμέσως επόμενο σε μέγεθος varistor. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε επίσης τη λύση της συνδεσμολογίας εν παράλληλο με σκοπό την αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

Για τις ανάγκες του παραδείγματος που ακολουθεί έχουμε επιλέξει MOV της εταιρίας TDK – EPCOS. Σε όλη την υπόλοιπη έκταση αναφερόμαστε στο παράδειγμα της εικόνας (Σχήμα 3.1) με τα σχετικά θεωρητικά μεγέθη που αναφέρονται παρακάτω:

- $V_{DC}=24\text{ V}$
- $L=0,1\text{ H}$
- $R=24\ \Omega$
- $V_{clamp}<65\text{ V}$
- Διάρκεια Ζωής: 10^6 επαναλήψεις

3.3.2. Προσδιορισμός Συνεχόμενης Τάσης

Το ισοδύναμο κατά Thevenin κύκλωμα στην περίπτωση που το MOV τοποθετηθεί σε παράλληλη με τις επαφές σύνδεση δίνει μια συνεχόμενη τάση $V_{DC}=24\text{ V}$. Λαμβάνοντας υπόψιν μια διακύμανση $\pm 5\%$ οι απαιτήσεις για μέγιστη συνεχόμενη DC τάση θα είναι περίπου 26 V . Έτσι αρχικά επιλέγουμε τα εξής MOV (Εικόνα 3.1): S05K20, S07K20, S10K20, S14K20, S20K20.



Leaded varistors
Standard series

Maximum ratings ($T_A = 85^\circ\text{C}$)

Ordering code	Type (untaped) SIOV-	V_{RMS} V	V_{DC} V	i_{max} (8/20 μs) A	W_{max} (2 ms) J	P_{max} W
B72205S0110K101	S05K11	11	14	100	0.3	0.01
B72207S0110K101	S07K11	11	14	250	0.8	0.02
B72210S0110K101	S10K11	11	14	500	1.7	0.05
B72214S0110K101	S14K11	11	14	1000	3.2	0.10
B72220S0110K101	S20K11	11	14	2000	10.0	0.20
B72205S0140K101	S05K14	14	18	100	0.4	0.01
B72207S0140K101	S07K14	14	18 ¹⁾	250	0.9	0.02
B72210S0140K101	S10K14	14	18 ¹⁾	500	2.0	0.05
B72214S0140K101	S14K14	14	18 ¹⁾	1000	4.0	0.10
B72220S0140K101	S20K14	14	18 ¹⁾	2000	12.0	0.20
B72205S0170K101	S05K17	17	22	100	0.5	0.01
B72207S0170K101	S07K17	17	22	250	1.1	0.02
B72210S0170K101	S10K17	17	22	500	2.5	0.05
B72214S0170K101	S14K17	17	22	1000	5.0	0.10
B72220S0170K101	S20K17	17	22	2000	14.0	0.20
B72205S0200K101	S05K20	20	26	100	0.6	0.01
B72207S0200K101	S07K20	20	26	250	1.3	0.02
B72210S0200K101	S10K20	20	26	500	3.1	0.05
B72214S0200K101	S14K20	20	26	1000	6.0	0.10
B72220S0200K101	S20K20	20	26	2000	18.0	0.20
B72205S0250K101	S05K25	25	31	100	0.7	0.01
B72207S0250K101	S07K25	25	31	250	1.6	0.02
B72210S0250K101	S10K25	25	31	500	3.7	0.05
B72214S0250K101	S14K25	25	31	1000	7.0	0.10
B72220S0250K101	S20K25	25	31	2000	22.0	0.20
B72205S0300K101	S05K30	30	38	100	0.9	0.01
B72207S0300K101	S07K30	30	38	250	2.0	0.02
B72210S0300K101	S10K30	30	38	500	4.4	0.05
B72214S0300K101	S14K30	30	38	1000	9.0	0.10
B72220S0300K101	S20K30	30	38	2000	26.0	0.20

Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά MOV για την Επιλογή του με Βάση τη Συνεχόμενη Τάση.

3.3.3. Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής

Με χρήση της σχετικής εξίσωσης (Εξίσωση 3.3), υπολογίζουμε το i_{max} :

$$i_{\text{max}} = \frac{V_{\text{DC}}}{R} = 1\text{A}$$

και λαμβάνοντας υπόψιν μας και την αντίσταση του MOV, αναμένουμε ένα κρουστικό ρεύμα διαρροής μικρότερο του 1A.

Για τα διάφορα MOV που επιλέχθηκαν βρίσκουμε την εσωτερική αντίσταση στην περιοχή προστασίας μέσω της χαρακτηριστικής V-I, ταυτόχρονα υπολογίζουμε το επίπεδο προστασίας που παρέχει το κάθε MOV. Ένα σχετικό παράδειγμα για το MOV “S05K20” δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (Σχήμα 3.4) από την οποία προκύπτει:

$$V_{\text{max}} = 66$$

$$R_{\text{S05K20}} = 66\Omega$$

Εργαζόμαστε κατά τον ίδιο τρόπο και τελικά βρίσκουμε:

- $R_{S05K20} = 66\Omega$ και $V_{max} = 66V$
- $R_{S07K20} = 60\Omega$ και $V_{max} = 60V$
- $R_{S10K20} = 55\Omega$ και $V_{max} = 55V$
- $R_{S14K20} = 53\Omega$ και $V_{max} = 53V$
- $R_{S20K20} = 51\Omega$ και $V_{max} = 51V$

Παρατηρούμε ότι το πρώτο varistor δεν εξασφαλίζει το επίπεδο προστασίας $<65V$ όπως απαιτούν οι περιορισμοί επομένως η τελική επιλογή θα γίνει ανάμεσα στα υπόλοιπα MOV ξεκινώντας από το μικρότερο σε μέγεθος (εδώ κριτήριο είναι η διατομή).

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τους χρόνους t_r και T_r με τη βοήθεια των εξισώσεων (Εξίσωση 3.6),(Εξίσωση 3.7). Ξεκινώντας από το MOV “S07K20”:

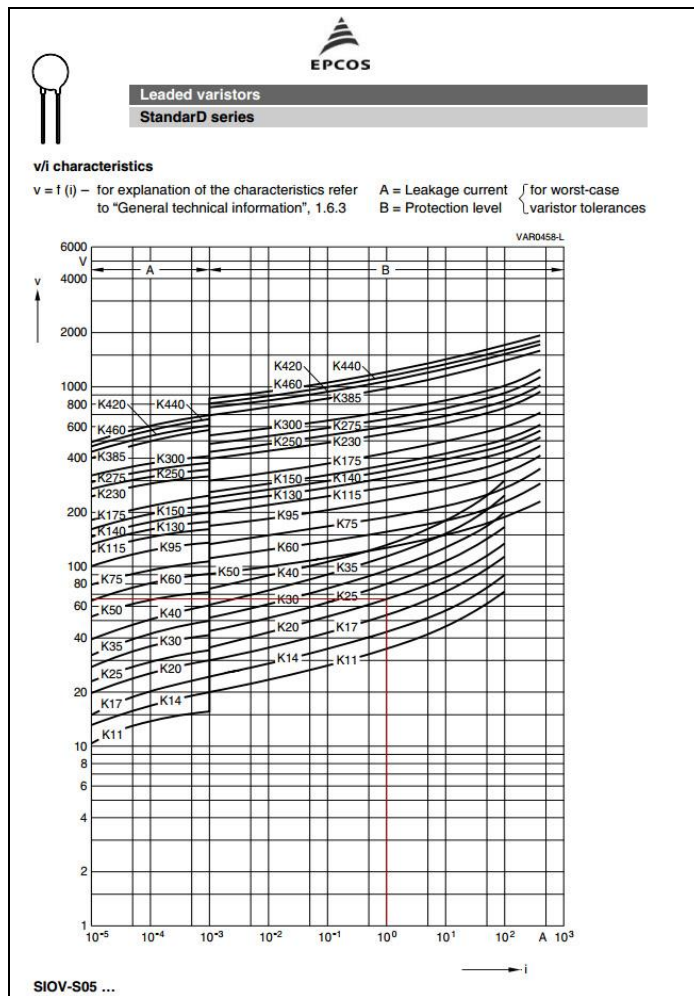
$$t_r = \frac{L}{R + R_{S10K20}} = 1300\mu s$$

$$T_r = \frac{t_r}{1,43} = 900\mu s$$

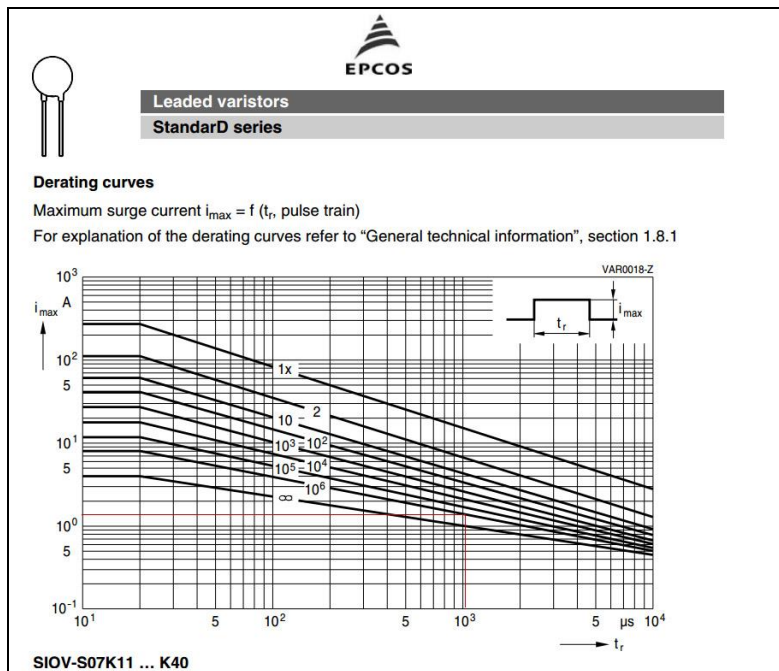
3.3.4. Έλεγχος Απαιτήσεων Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής

Σαν πρώτο βήμα μπορούμε να ελέγξουμε το μέγιστο εύρος κρουστικού ρεύματος το οποίο αντέχει η επιλογή. Από την σχετική εικόνα (Εικόνα 3.1) λαμβάνουμε ένα $i_{max} < 250 A$ το οποίο σίγουρα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις. Ωστόσο δεν μπορούμε να σταθούμε σε αυτό το μέγεθος μόνο, καθώς πρέπει να εξετάσουμε και αν ανταποκρίνεται στον περιορισμό σχετικά με τον ελάχιστο χρόνο ζωής. Για $t_r = 10\mu s$ και αριθμό επαναλήψεων 10^6 η σχετική καμπύλη (Σχήμα 3.5) δίνει:

$i_{max} < 1,5A$ οπότε η επιλογή κρίνεται αποδεκτή και με βάση το κριτήριο αυτό.



Σχήμα 3.4: Εύρεση Εσωτερικής Αντίστασης MOV από τη Χαρακτηριστική V-I.



Σχήμα 3.5: Διάρκεια Ζωής MOV.

3.3.5. Υπολογισμός Απορροφούμενης Ενέργειας

Η μέγιστη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας θα δίνεται με χρήση της σχετικής εξίσωσης (Εξίσωση 1.2) από τη σχέση:

$$E = V_{peak} \cdot I_{peak} \cdot t_2 \cdot K = 60 \cdot 1,5 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 0,11J$$

3.3.6. Έλεγχος Απαιτήσεων Απορροφούμενης Ενέργειας

Στη δυσμενέστερη των περιπτώσεων το MOV θα απορροφά ενέργεια ίση με την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο (Εξίσωση 3.2):

$$W_L = \frac{1}{2} Li_L^2 = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 1^2 = 0,05J < E$$

Άρα η επιλογή του MOV κρίνεται ικανοποιητική.

3.4. Προστασία με Χρήση Snubber

Ο ρόλος ενός κυκλώματος snubber είναι να μειώσει τις ηλεκτρικές καταπονήσεις που επιβάλλονται σε ένα στοιχείο από τον μετατροπέα ισχύος κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων σε επίπεδα που βρίσκονται κάτω από τις ηλεκτρικές προδιαγραφές του στοιχείου. Πιο αναλυτικά, ένα κύκλωμα snubber μειώνει τις καταπονήσεις μετάβασης σε ασφαλή επίπεδα με τους εξής τρόπου [3]:

- Μειώνει τις τάσεις που εμφανίζονται στα στοιχεία κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων σβέσης.
- Μειώνει τα ρεύματα που εμφανίζονται στο στοιχείο κατά τη διάρκεια των μεταβατικών των φαινομένων έναυσης.
- Μειώνει το ρυθμό αύξησης του ρεύματος (di/dt) στα στοιχεία τη στιγμή της έναυσης,
- Μειώνει τον ρυθμό αύξησης των τάσεων (dv/dt) στους ακροδέκτες του στοιχείου κατά τη διάρκεια της σβέσης ή κατά τη διάρκεια επανεφαρμοζόμενων ορθών τάσεων αποκοπής.
- Διαμορφώνει τη διαδρομή μετάβασης του στοιχείου, καθώς αυτό ανοίγει και κλείνει.

Από άποψης τοπολογίας του κυκλώματος, υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες κυκλωμάτων snubber, αυτές περιλαμβάνουν [3]:

- Μη πολωμένα κυκλώματα σειράς R-C, τα οποία χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν διόδους και thyristor με περιορισμό της μέγιστης τάσης και του ρυθμού dv/dt κατά την αναστροφή αποκατάσταση.
- Πολωμένα R-C snubber. Αυτά χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν της τροχιά αποκοπής της διαδρομής μετάβασης, για να συγκρατήσουν τις τάσεις που εφαρμόζονται στα στοιχεία σε ασφαλή επίπεδα, ή για να περιορίσουν το ρυθμό μεταβολής dv/dt κατά την αποκοπή του στοιχείου.
- Πολωμένα R-L snubber. Ο ρόλος τους είναι να διαμορφώσουν την διαδρομή έναυσης ελεγχόμενων διακοπών και/ ή να περιορίσουν τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος dv/dt κατά την έναυση του στοιχείου.

Οι καταπονήσεις που προέρχονται από φαινόμενα μετάβασης, ελέγχονται επίσης χρησιμοποιώντας μια ευρεία κατηγορία ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που ονομάζονται μετατροπείς συντονισμού ή ημισυντονισμού.

Πρέπει στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι τα snubber δεν αποτελούν θεμελιώδες τμήμα του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Αποτελούν μια προσθήκη με σκοπό να μειώσουν τις καταπονήσεις ενός ηλεκτρικού στοιχείου, που συνήθως είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμούς ή μεμονωμένα ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

3.4.1. Βήματα Επιλογής Κατάλληλων Μεγεθών

Για την εφαρμογή μας θα επιλέξουμε snubber τύπου R-C. Τρία είναι τα κύρια χαρακτηριστικά, η επιλογή κατάλληλου μεγέθους πυκνωτή, αντίστασης, καθώς και η καταλισκόμενη ισχύς στον αντιστάτη.

Η λογική του πυκνωτή στο snubber είναι της αποθήκευσης της παρασιτικής αυτεπαγωγής του πηνίου και στη συνέχεια η κατανάλωση της στον αντιστάτη. Επομένως ο πυκνωτής πρέπει να έχει τέτοια χωρητικότητα έτσι ώστε να αποθηκεύσει όλη την ενέργεια του πηνίου. Εξισώνοντας τις δύο σχετικές σχέσεις (Εξίσωση 3.1),(Εξίσωση 3.2) προκύπτει μια τιμή χωρητικότητας C:

$$c = \frac{LI^2}{V^2}$$

(Εξίσωση 3.8)

όπου:

- L η αυτεπαγωγή του πηνίου
- I το ρεύμα του πηνίου
- V η διαφορά της επιθυμητής τάσης προστασίας από την μέγιστη τάση που εμφανίζεται στα άκρα των επαφών

Η συνθήκη ώστε η αντίσταση να μπορέσει να καταναλώσει τουλάχιστον το 90% της ενέργειας του πυκνωτή είναι [4]:

$$R = \frac{1}{6cf}$$

(Εξίσωση 3.9)

όπου:

- c η χωρητικότητα του πυκνωτή
- f η συχνότητα του διακόπτη

Ωστόσο, μια πιο λεπτομερή και πληρέστερη προσέγγιση γίνεται με την ανάλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το κύκλωμα. Για την εύρεση των απαραίτητων μεγεθών του κυκλώματος snubber υπολογίζουμε τις εξής παραμέτρους [7],[8]:

Λόγος απόσβεσης (damping ratio) δ :

$$\delta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

(Εξίσωση 3.10)

όπου:

- R η αντίστασή του κυκλώματος snubber.
- C η χωρητικότητα του πυκνωτή του κυκλώματος snubber.
- L η παρασιτική αυτεπαγωγή.

Συντελεστής ρεύματος (Current Factor) d:

$$d = \frac{i_{max}}{V_s} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

(Εξίσωση 3.11)

όπου:

- V_s η τάση του διακόπτη όταν αυτός είναι ανοιχτός στη μόνιμη κατάσταση.

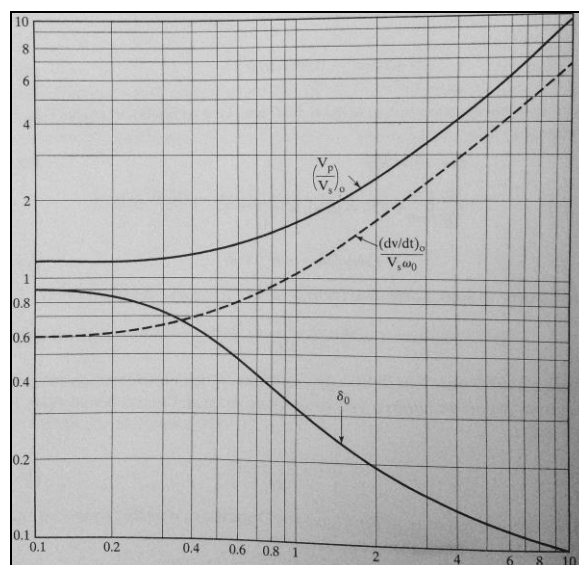
Λόγος τάσεων (voltage ratio) V_r :

$$V_r = \frac{V_p}{V_s}$$

όπου:

- V_p το επιθυμητό επίπεδο προστασίας.

Οι τιμές των C,R προκύπτουν επιλύοντας τις άνωθεν εξισώσεις για $d=d_0$ και $\delta=\delta_0$ με τις τιμές των d_0, δ_0 να προκύπτουν από το παρακάτω διάγραμμα [7]:



Σχήμα 3.6: Γράφημα Ευρέσεως Βέλτιστων Ποσοτήτων d, δ .

3.4.2. Τιμές Μεγεθών για τη Συγκεκριμένη Εφαρμογή

Κάνοντας χρήση των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει

$$c = 25\mu F$$

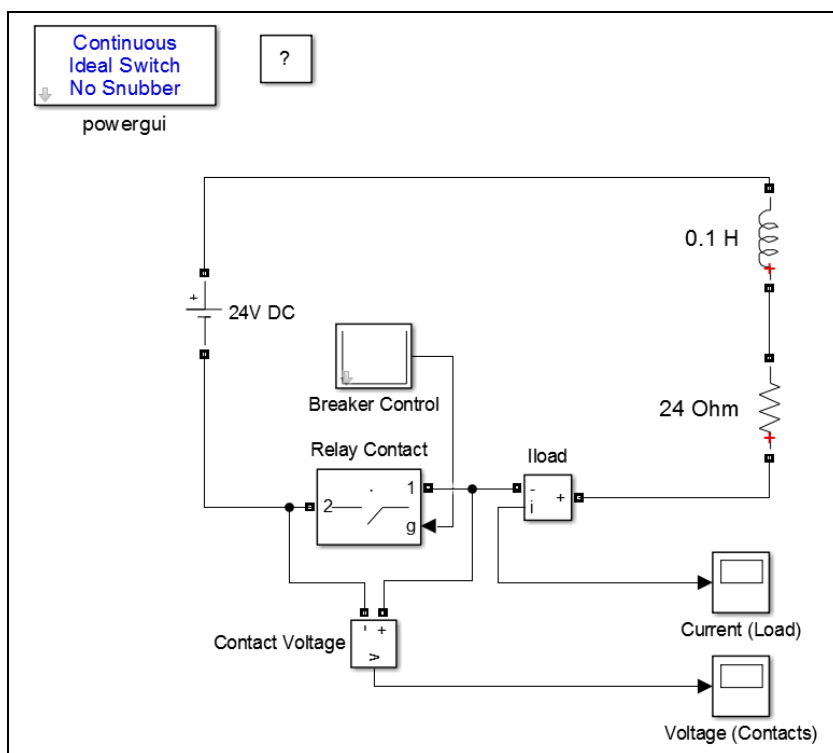
$$R = 30\Omega$$

3.5. Προσομοιώσεις με Χρήση Matlab – Simulink

Στην παρούσα ενότητα θα κάνουμε μια προσομοίωση με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Matlab – Simulink , θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με το θεωρητικό μέρος και τέλος, θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση του τρόπου προσομοίωσης ενός MOV.

3.5.1. Προσομοίωση Χωρίς την Ύπαρξη Προστασίας

Δημιουργούμε το κύκλωμα της προσομοίωσης στο Simulink (Σχήμα 3.7) και στη συνέχεια θα δούμε την μεταβολή του ρεύματος και τάσης στα άκρα του διακόπτη όπως αυτά προκύπτουν από το πρόγραμμα προσομοίωσης ():



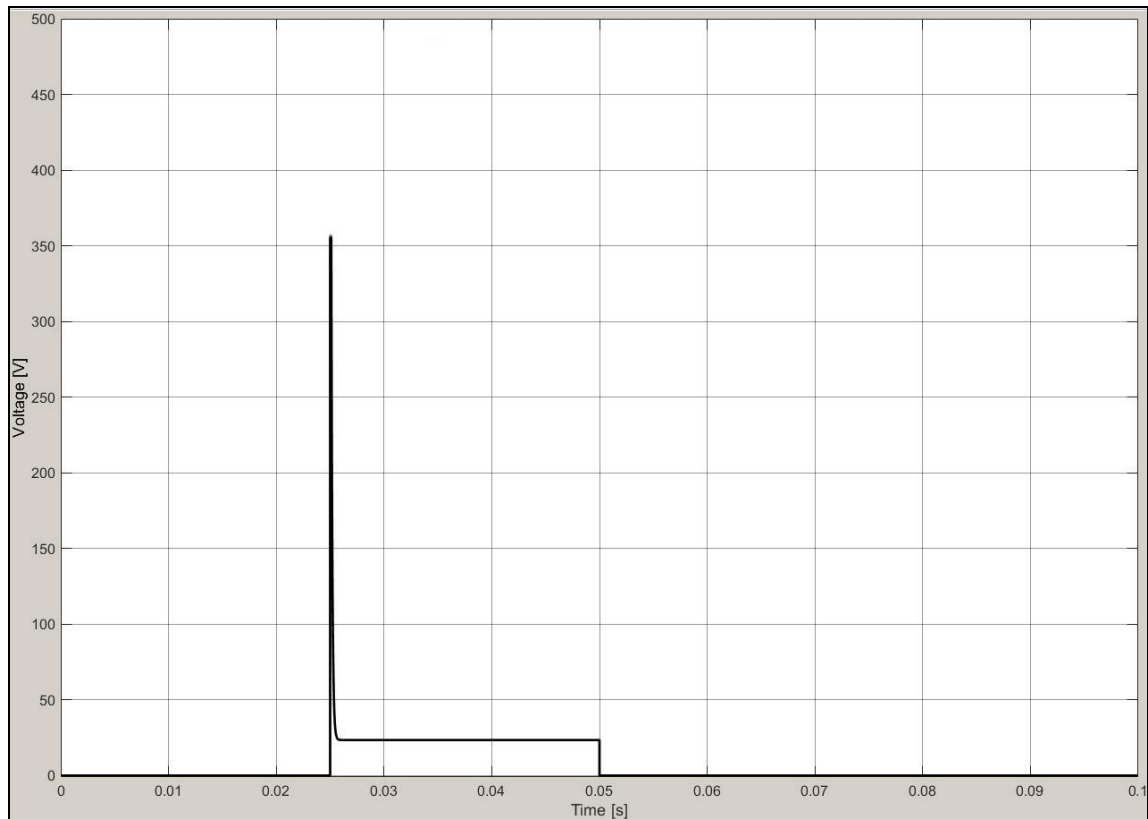
Σχήμα 3.7: Κύκλωμα Προσομοίωσης στο Simulink Χωρίς Προστασία¹.

¹ Για την αφαίρεση του εγκατεστημένου snubber στον διακόπτη προσομοίωσης του ηλεκτρονόμου, το Matlab δίνει δύο επιλογές [5]:

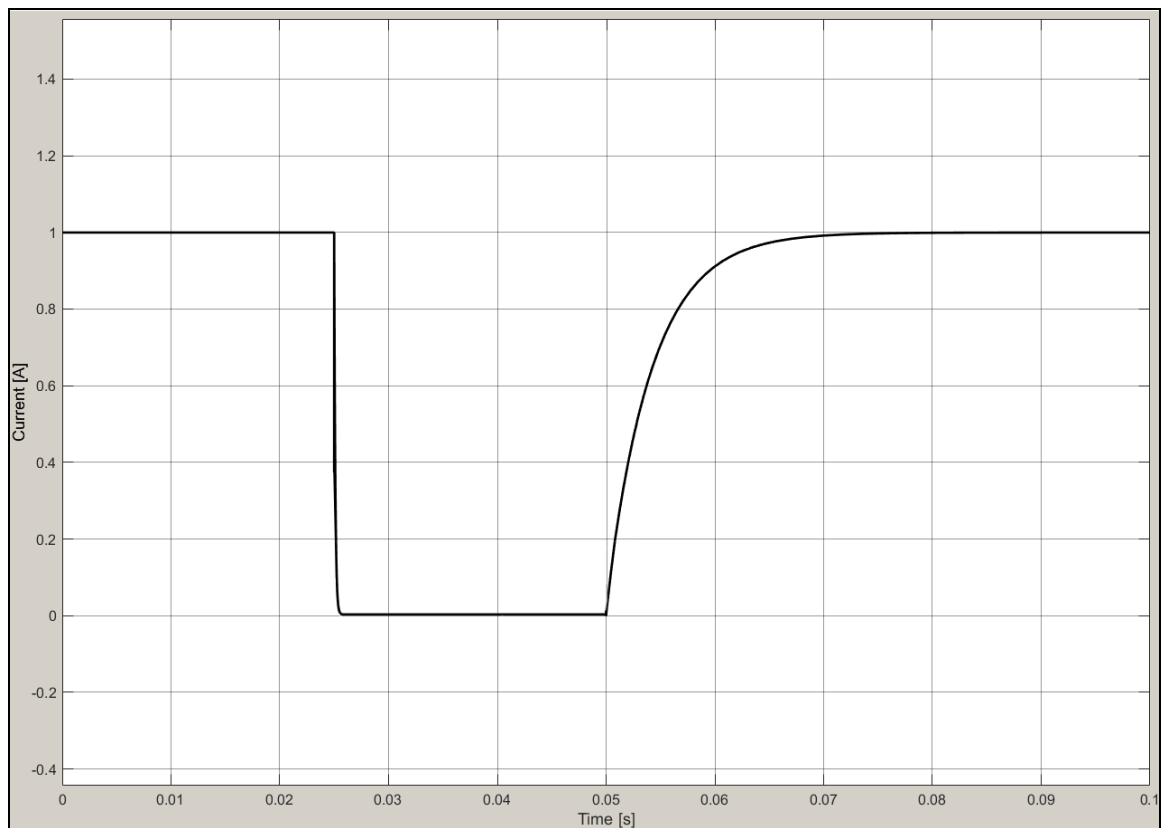
1. Την αφαίρεση του, με την αλλαγή των διακοπών σε “Ideal Switch” στις επιλογές του PowerGui.
2. Την τοποθέτηση άπειρου αντιστάτη στις επιλογές του snubber και μηδενικής χωρητικότητας πυκνωτή

Η ύπαρξη διακοπών χωρίς snubber στο κύκλωμα προσομοίωσης του Simulink ίσως δημιουργήσει πρόβλημα κατά την αποκοπή του διακόπτη. Το πρόβλημα αυτή επιλύεται με την τοποθέτηση μιας πολύ μεγάλης αντίστασης στα άκρα του διακόπτη [6].

Εικόνα 3.2:



Σχήμα 3.8: Τάση στα Άκρα των Επαφών Χωρίς την Ύπαρξη Προστασίας όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 3.9: Ρεύμα Φορτίου Χωρίς την Ύπαρξη Προστασίας όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.

Βλέπουμε την εμφάνιση μια πολύ μεγάλης υπέρτασης ικανή για τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξο και την σταδιακή καταστροφή του διακόπτη, είναι προφανές ότι η υπέρταση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη της αυτεπαγωγής του πηνίου. Όσο η τιμή της αυτεπαγωγής αυξάνεται η τιμή της υπέρτασης λαμβάνει ακόμη μεγαλύτερες τιμές. Παρατηρούμε επίσης μια πολύ απότομη κλίση της καμπύλης του ρεύματος (di/dt) την στιγμή της αποκοπής.

3.5.2. Προσομοίωση MOV σε Simulink

Το Simulink¹ ενσωματώνει στη βιβλιοθήκη του ένα βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων στη βιβλιοθήκη του Power System με την ονομασία “surge arrester”. Στην εικόνα (Εικόνα 3.3) βλέπουμε τις διαθέσιμες παραμέτρους (κατά σειρά κατάταξης από πάνω):

- **Protection Voltage:** Στην επιλογή αυτή εισάγουμε την τάση στην οποία ο ημιαγωγός μεταβαίνει από την περιοχή διαρροής μικρών ρευμάτων στην περιοχή προστασίας όπως οι έννοιες αυτές αποσαφηνίστηκαν στην παράγραφο 1.7.1.
- **Number of Columns:** Στην καρτέλα αυτή εισάγουμε τον αριθμό των MOV που δύναται να είναι συνδεδεμένα εν παραλλήλω. Σχετικά με την σύνδεση των βαρίστορ και τα οφέλη που προκύπτουν στην συνδεσμολογία αυτή γίνεται εκτενής αναφορά στην παράγραφο 1.10.2.
- **Reference Current per Column:** Από την χαρακτηριστική V-I του βαρίστορ εισάγουμε το ρεύμα διαρροής στην προσδιορισθείσα τάση της επιλογής «Protection Voltage». Σε περίπτωση παράλληλης συνδεσμολογίας εισάγουμε το ρεύμα διαρροής καθενός από το varistor.
- **Segment 1 Characteristic, Segment 2 Characteristic, Segment 3 Characteristic:** Στις επιλογές αυτές τοποθετούμε τους συντελεστές K και a για κάθε μία από τις 3 περιοχές λειτουργίας του βαρίστορ με χρήση της χαρακτηριστικής και των εξισώσεων που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 1.7.2.
- **Measurements:** Δίνει την επιλογή μέτρησης τάσης και ρεύματος χωρίς την χρήση ειδικών οργάνων.
- **Brake Algebraic Loop in Discrete model:** Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η μέθοδος επίλυσης είναι σε διακριτό χρόνο, η επαναληπτική, αλγοριθμική μέθοδος επίλυσης του κυκλώματος του βαρίστορ είναι αδύνατο να ολοκληρωθεί. Η επιλογή αυτή εισάγει μια χρονική καθυστέρηση στην επαναληπτική διαδικασία, εξασφαλίζοντας την ολοκλήρωση της επίλυσης χωρίς ωστόσο να εγγυάται τα αποτελέσματα².

Για καλύτερη κατανόηση θα δούμε τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για το MOV «S07K20» (Εικόνα 3.4), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην επόμενη προσομοίωση και η χαρακτηριστική του δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (Σχήμα 3.10).

¹ Αναφερόμαστε σε έκδοση 2013b ή νεότερη.

² Σαν πρώτη επιλογή είναι ίσως ιδανικότερο να μειώσουμε το χρόνο δειγματοληψίας ή να αλλάξουμε τον τύπο του επιλύτη προτού επιλέξουμε την επιλογή αυτή.

Block Parameters: Surge Arrester

Surge Arrester (mask) (link)

Implements a metal-oxide surge arrester.

Parameters

Protection voltage $V_{ref}(V)$:
500e+03

Number of columns:
2

Reference current per column $I_{ref}(A)$:
500

Segment 1 characteristics [k_1 α_1]:
[.955 50]

Segment 2 characteristics [k_2 α_2]:
[1.0 25]

Segment 3 characteristics [k_3 α_3]:
[.9915 16.5]

Measurements: None

----- Show additional parameters -----

Break Algebraic loop in discrete model

OK Cancel Help Apply

Εικόνα 3.3: Παράμετροι Εισαγωγής MOV στο Simulink.

Block Parameters: MOV "S07K20"

Surge Arrester (mask) (link)

Implements a metal-oxide surge arrester.

Parameters

Protection voltage $V_{ref}(V)$:
35

Number of columns:
1

Reference current per column $I_{ref}(A)$:
1e-3

Segment 1 characteristics [k_1 α_1]:
[.957 50]

Segment 2 characteristics [k_2 α_2]:
[1.05 23]

Segment 3 characteristics [k_3 α_3]:
[.9919 68]

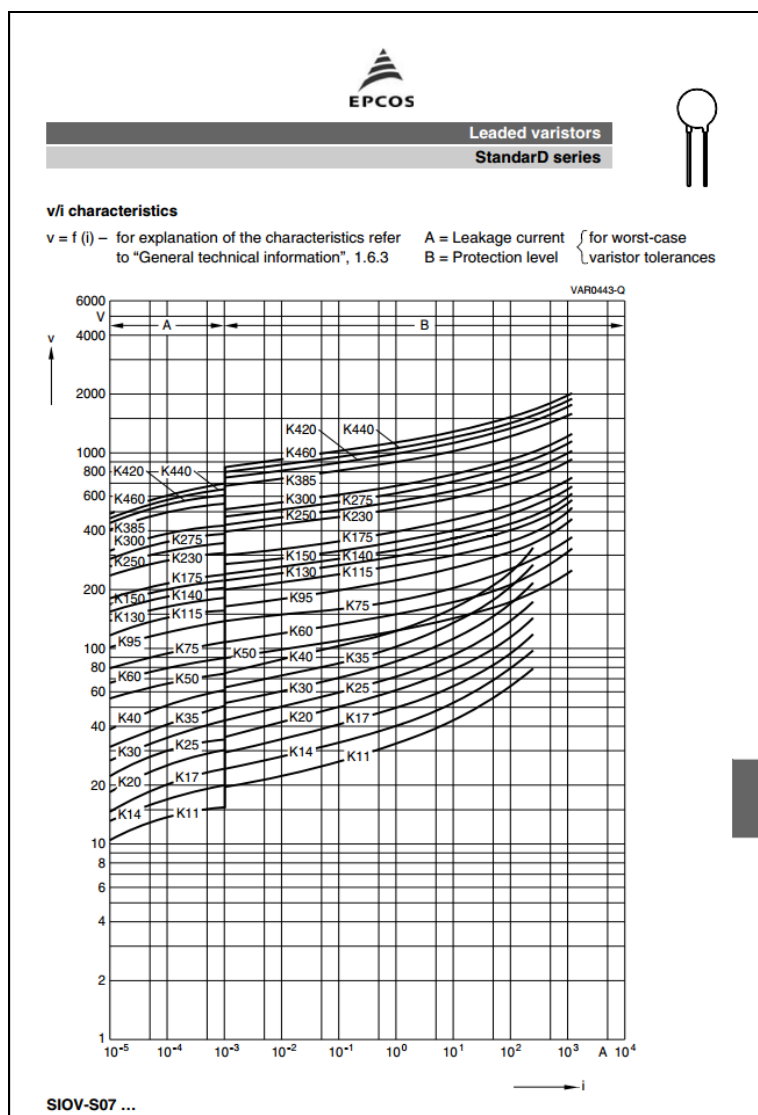
Measurements: None

----- Show additional parameters -----

Break Algebraic loop in discrete model

OK Cancel Help Apply

Εικόνα 3.4: Παράμετροι S07K20 στο Simulink.

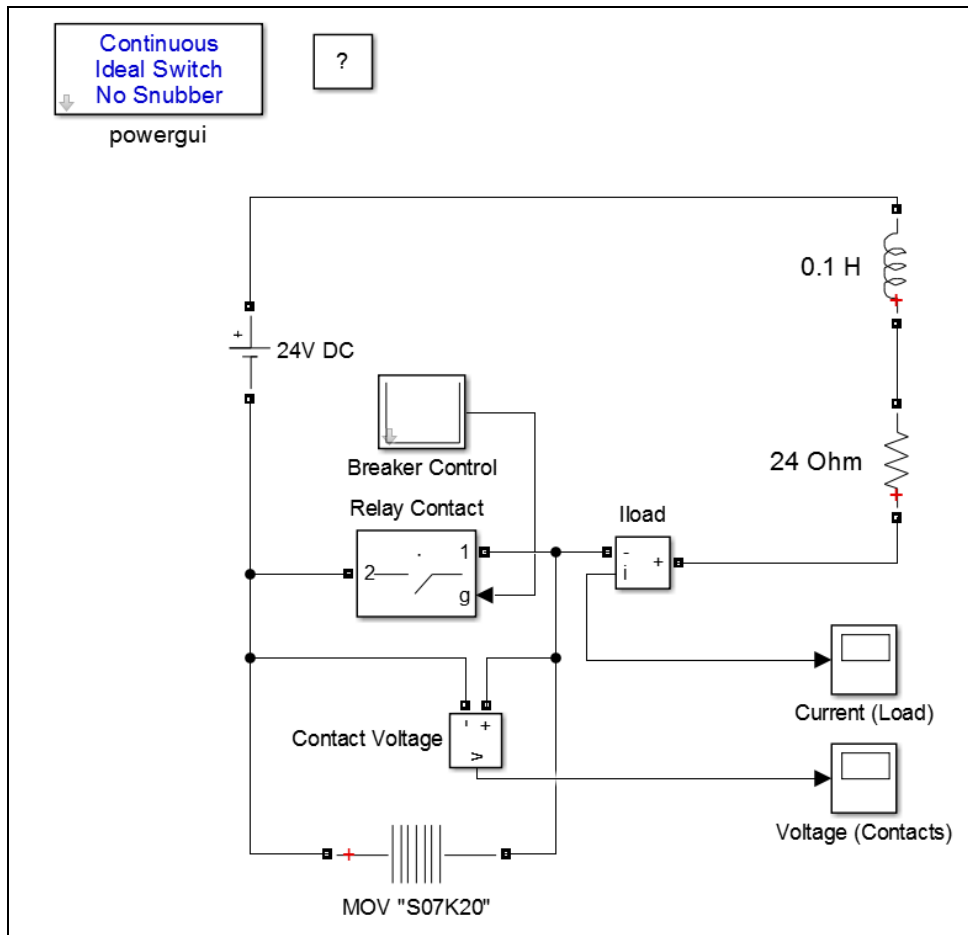


Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστική V-I του Βαρίστορ S07K20.

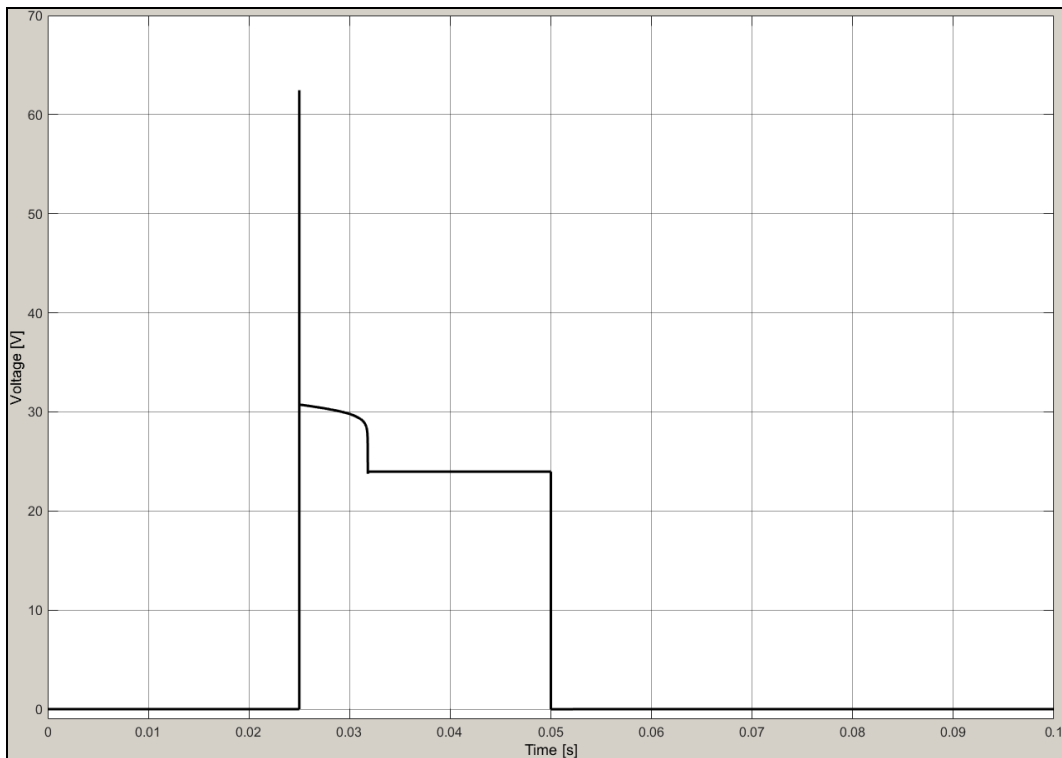
3.5.3. Προσομοίωση με Χρήση MOV

Το βαρίστορ, όπως έχει είδη αναφερθεί, θα πρέπει να συνδεθεί παράλληλα με τις επαφές του ηλεκτρονόμου. Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε τη σχηματική διάταξη του κυκλώματος με την προσθήκη του βαρίστορ, και τη διαμόρφωση της τάσης και του ρεύματος. Για να μπορέσουμε να κάνουμε σύγκριση με το θεωρητικό μοντέλο, υπολογίζουμε επίσης το κρουστικό ρεύμα διαρροής του βαρίστορ καθώς επίσης και την καταναλισκόμενη ισχύ του, μέσω της οποίας βρίσκουμε την απορροφούμενη ενέργεια.

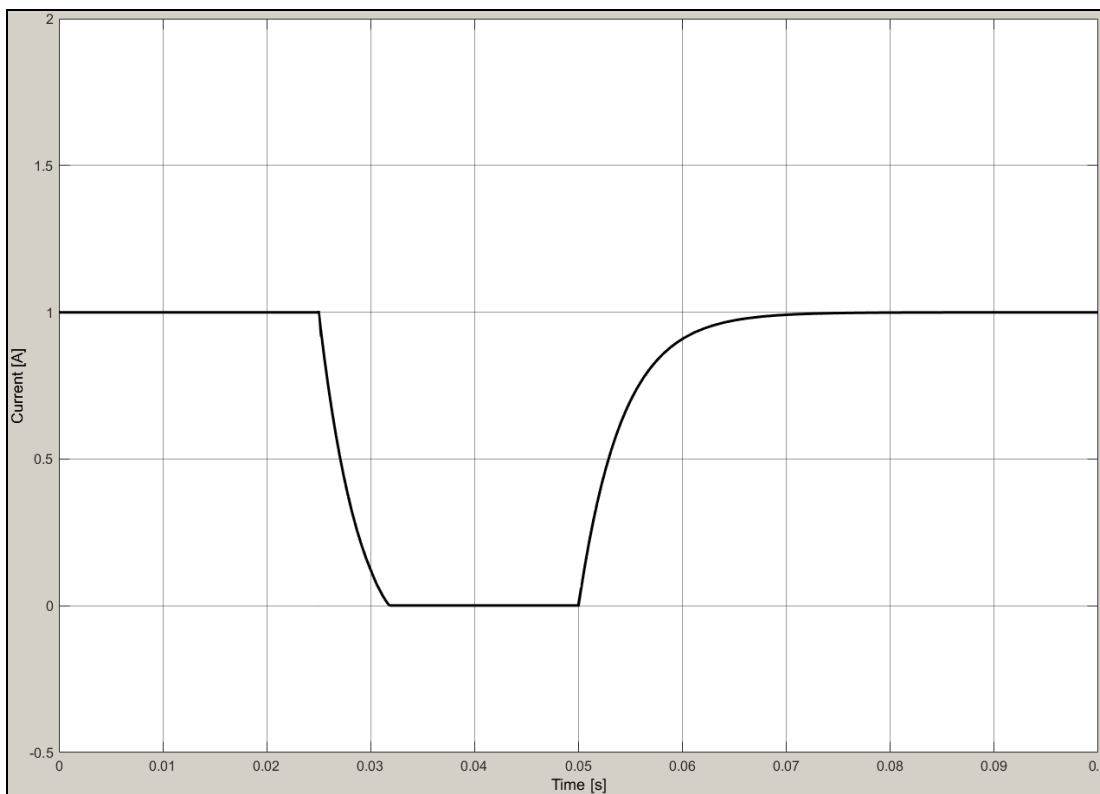
Βλέπουμε ότι υπάρχει απόλυτη αντιστοιχία μεταξύ των θεωρητικών υπολογισμών και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, ενώ, παρουσιάζεται επίσης η βελτίωση της κλίσης di/dt του ρεύματος.



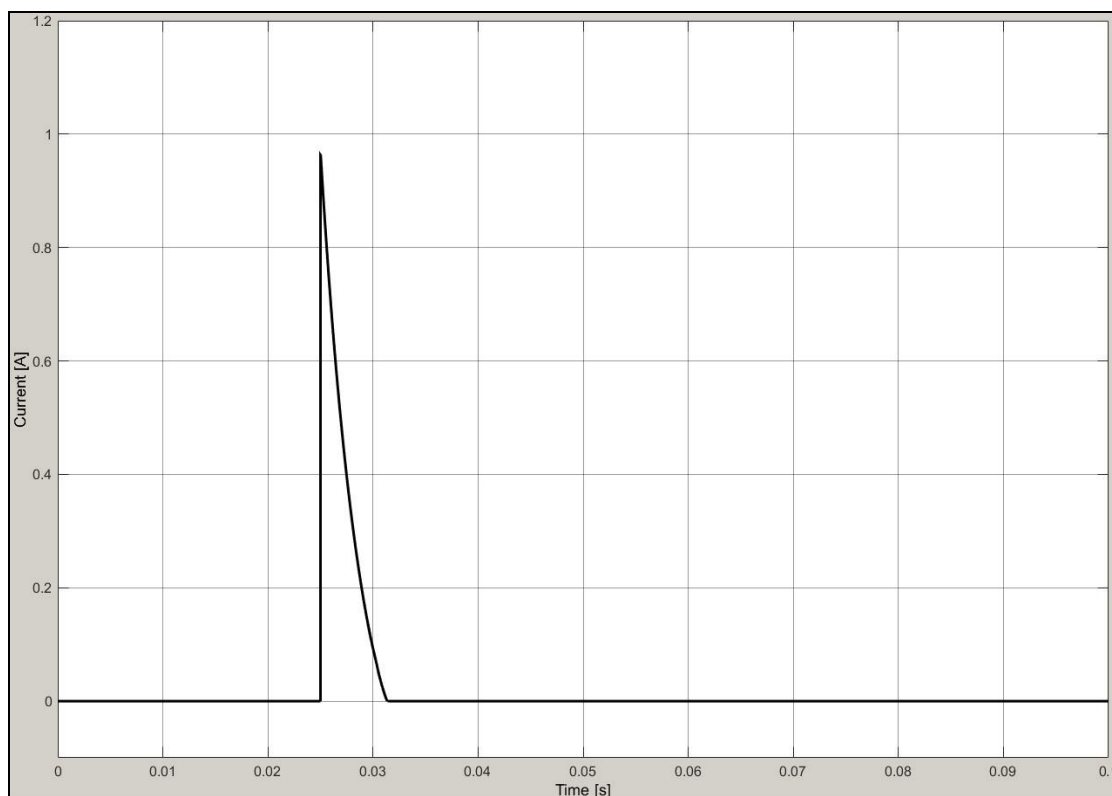
Σχήμα 3.11: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink με την Προσθήκη MOV Παράλληλα.



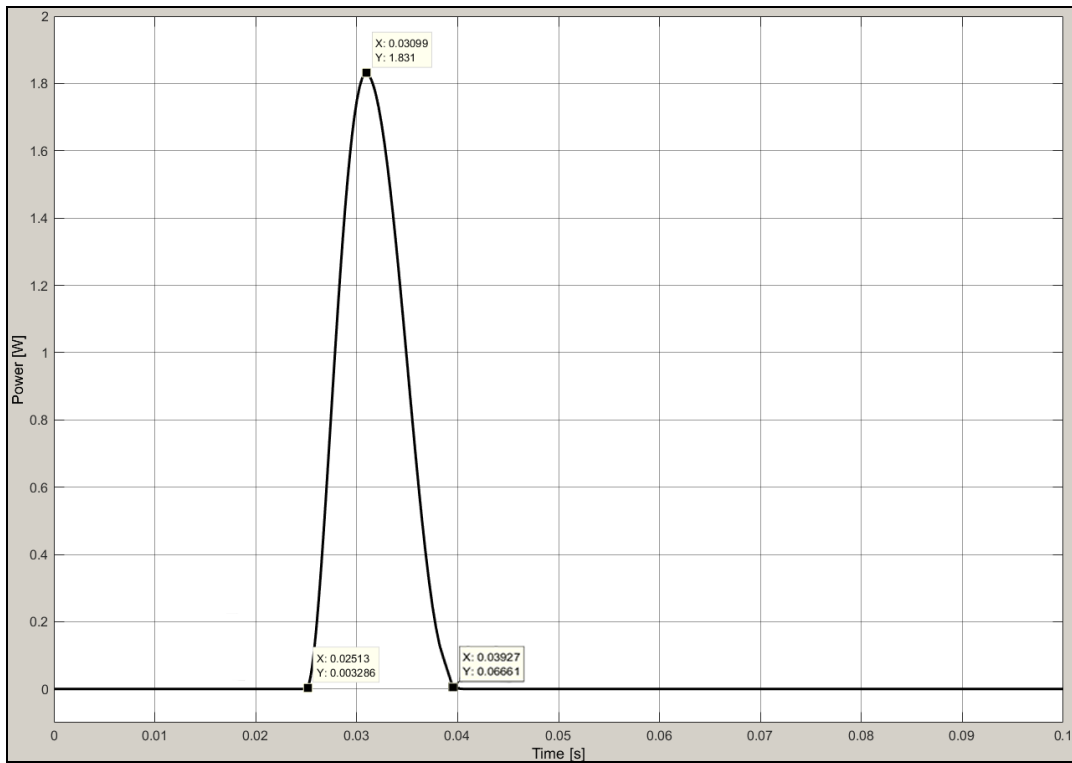
Σχήμα 3.12: Τάση στα Άκρα των Επαφών μετά την Προσθήκη του MOV όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα



Σχήμα 3.13: Ρεύμα Φορτίου μετά την Προσθήκη του MOV όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



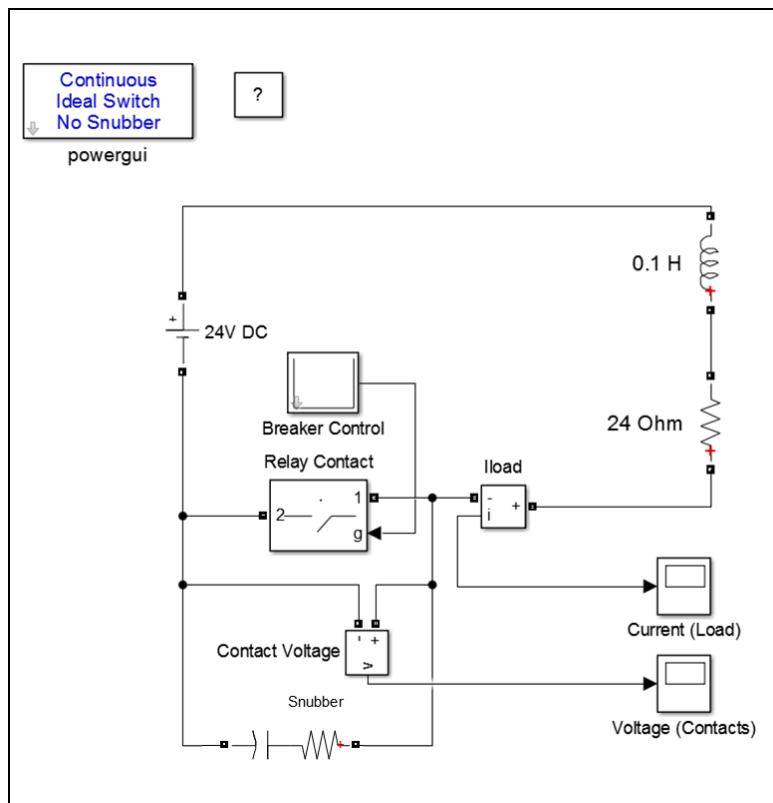
Σχήμα 3.14: Κρουστικό Ρεύμα Διαρροής MOV όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



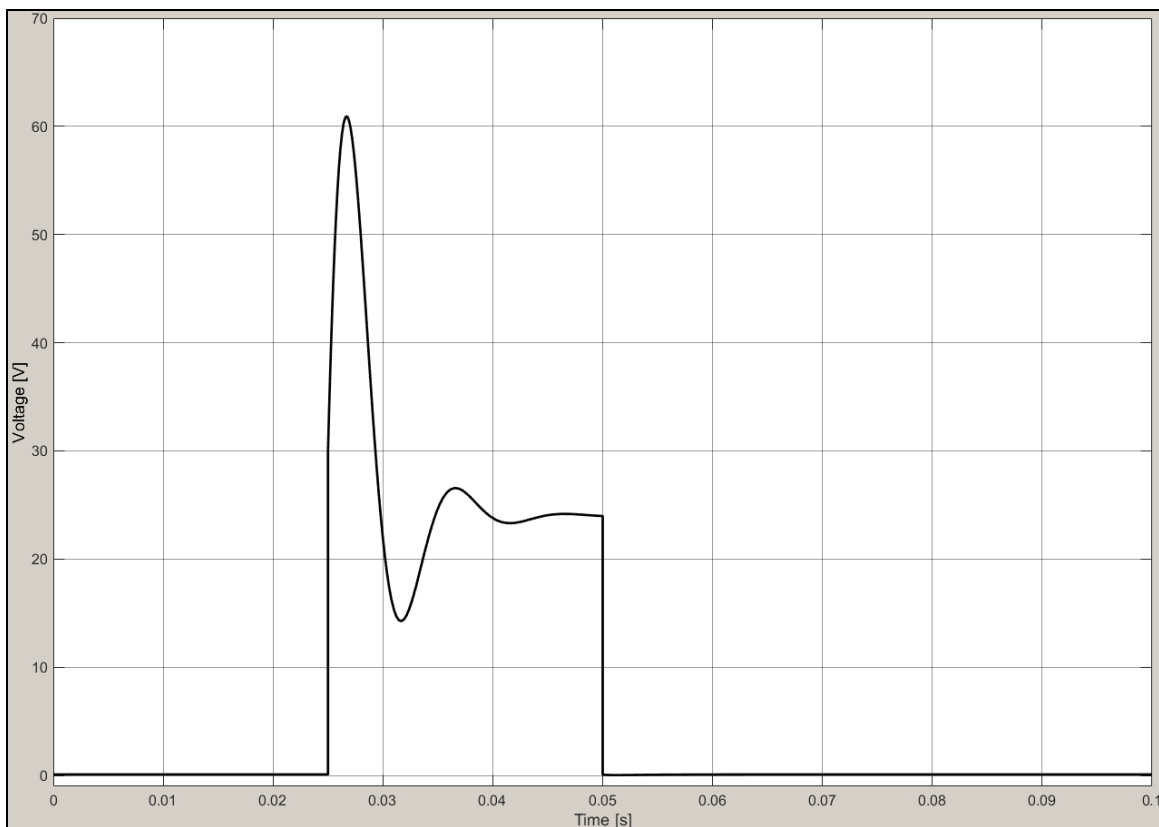
Σχήμα 3.15: Ισχύς που Καταναλώνεται στο Βαρίστορ όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.

3.5.4. Προσομοίωση με Χρήση Snubber

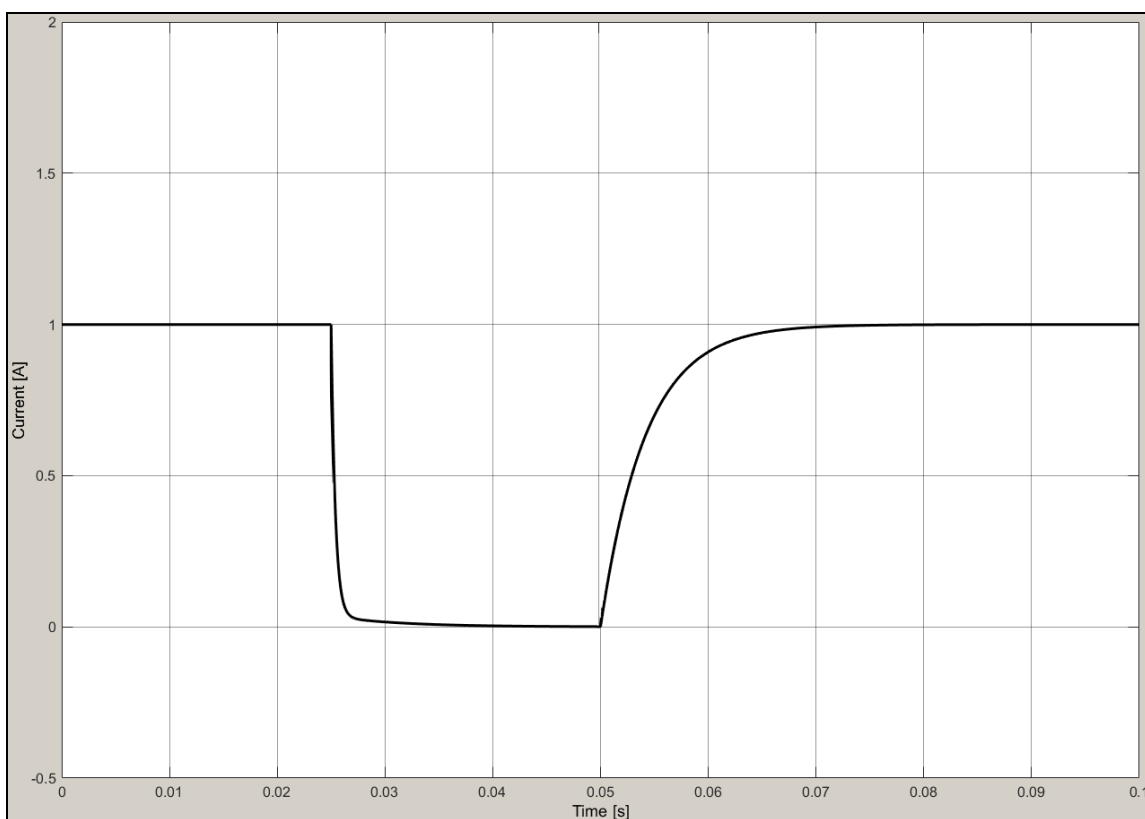
Με την προσθήκη του Snubber το κύκλωμα παίρνει τη μορφή:



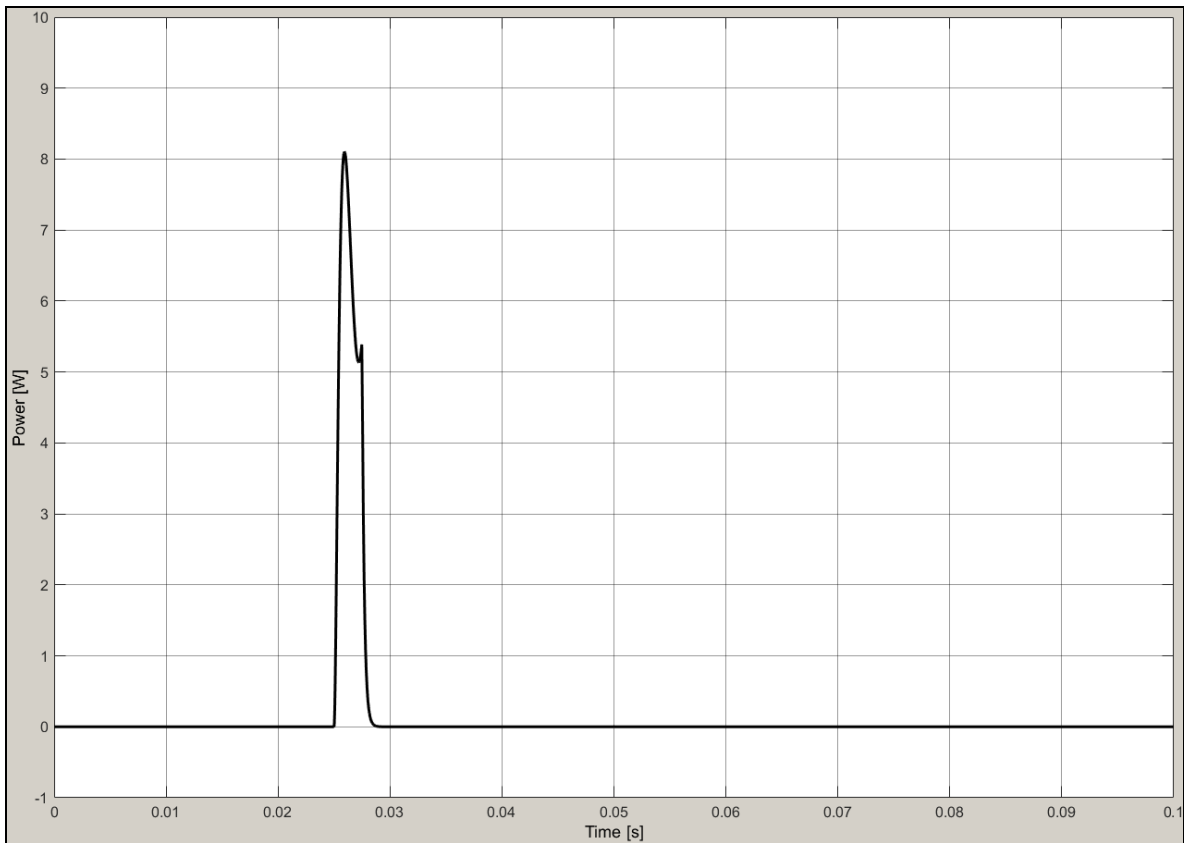
Σχήμα 3.16: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink με την Προσθήκη Snubber.



Σχήμα 3.17: Τάση στα Άκρα των Επαφών μετά την Προσθήκη του Snubber όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 3.18: Ρεύμα Φορτίου μετά την Προσθήκη του Snubber όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 3.19: Ισχύς που Καταναλώνεται στον Αντιστάτη όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.

3.6. Σύγκριση Μεθόδων

Παρατηρώντας τις προσομοιώσεις, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι και οι δύο μέθοδοι προσφέρουν το ίδιο επιθυμητό αποτέλεσμα, η ισχύς που καταναλώνει ο αντιστάτης είναι μικρή και με τη σειρά της θα οδηγήσει σε μια μικρή (σε μέγεθος) αντίσταση (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**). Το πρόβλημα ωστόσο δημιουργείται όταν ο αντιστάτης καλείται να καταναλώσει μια πολύ μεγάλη ποσότητα ισχύος με αποτέλεσμα να προκύπτει μια πολύ μεγάλη αντίσταση, σε δυσαναλογία με το μήκος του διακόπτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [1]. EPCOS. (2008). *SIOV Metal Oxide Varistors*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: www.epcos.com σελ. 93
- [2]. Knight, D. W. (2016, May). *The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils*.
- [3]. ΜΟΗΑΝ. (1996). *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα σελ. 752.
- [4]. Γερμανάκης, Σ. (2015). *Διπλεματική Εργασία: Λειτουργία Μετατροπέα Ισχύος Τύπου M2C και Προστασία των Ημιαγωγικών Διακοπών του με Χρήση Βαρίστορ Μεταλικών Οξειδίων*. Ανάκτηση από:
<http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/7709/1/DT2016-0062.pdf>
- [5]. Mathwork. (2016). *Ideal Switch*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/idealswitch.html>
- [6]. Mathwork. (2016). *Breaker*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/breaker.html>
- [7]. McMurray, W. (1972). Optimum Snubbers for Power Semiconductors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, σελ. 503-510.
- [8]. RASHID, M. (2009). *Ηλεκτρονικά Ισχύος / Κυκλώματα Εξαρτήματα και Εφαρμογές*. Αθήνα: Ίων σελ. 805.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. EPCOS. (2008). *SIOV Metal Oxide Varistors*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της EPCOS: www.epcos.com
- [2]. RASHID, M. (2009). *Ηλεκτρονικά Ισχύος / Κυκλώματα Εξαρτήματα και Εφαρμογές*. Αθήνα: Ίων.
- [3]. Μάργαρης, Ν. (2010). *Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.
- [4]. Παπαμάρκος, Ν. (2007). *Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων - Τόμος Β*. Αθήνα: Γκιούρδας.
- [5]. ΜΟΗΑΝ. (1996). *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.
- [6]. ΜΑΝΙΑΣ, Σ. (2012). *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*. Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ.
- [7]. Mathwork. (2016). *Surge Arrester*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/surgearrester.html>

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1. Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία, γίνεται αρκετός λόγος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αξιοποίησή τους. Η επικείμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, η αυξανόμενη μόλυνση του πετρελαίου, οι διακυμάνσεις της τιμής του πετρελαίου, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και γενικώς η βούληση των κρατών για εθνική κυριαρχία και ενεργειακή ανεξαρτησία οδηγούν ολοένα και περισσότερο στην χρήση και αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αναφερόμαστε σε πηγές ενέργειας όπως, ηλιακή, αιολική, που από τη φύση τους ανανεώνονται συνεχώς και προσφέρονται στον άνθρωπο δωρεάν για εκμετάλλευση.

Ένα δεύτερο ιδιαίτερα ευπρόσδεκτο χαρακτηριστικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ότι οι τεχνολογίες εκμετάλλευσής τους, βρίσκονται μέσα στις κατασκευαστικές δυνατότητες των αναπτυσσόμενων τεχνολογικά χωρών, συνεπώς εκτός από τη συνεισφορά τους στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας συνεισφέρουν σημαντικά, αν αναπτυχθούν κατάλληλα, και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Αποτελεί ιστορική πρόκληση για τον τόπο η δημιουργία μιας εθνικής βιομηχανίας για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Να αναφέρουμε δε ακόμη ένα χαρακτηριστικό τους και όχι το τελευταίο, ότι δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον οπότε η εκμετάλλευσή τους είναι συνεπής προς μία οικολογικά σωστή αντιμετώπιση της σχέσης του ανθρώπου με το περιβάλλον, μια σχέση που τα τελευταία χρόνια της συνεχής αλόγιστης χρήσης έχει οδηγήσει σε έντονα οικολογικά προβλήματα [1].

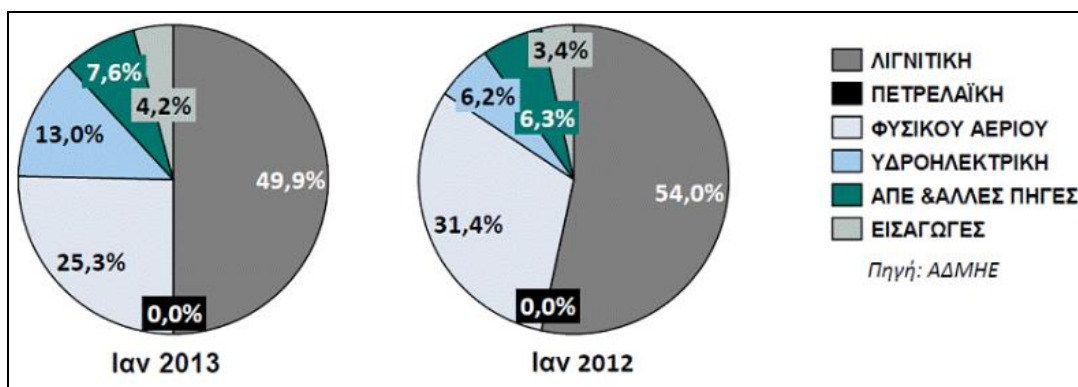
4.1.1. Ο Ενεργειακός Χάρτης της Ελλάδος

Η χώρα μας στην προσπάθεια της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την εξοικονόμηση φυσικών πόρων, έχει θέσει ως στόχο έως το 2020 οι ΑΠΕ να αποτελούν το 20% της παραγόμενης ενέργειας. Ας δούμε πως διαμορφώνεται ο ενεργειακός χάρτης της χώρας μας¹ (Σχήμα 4.1) τα τελευταία χρόνια και την ταχύτατη εξάπλωση της αιολικής ενέργειας (Σχήμα 4.2).

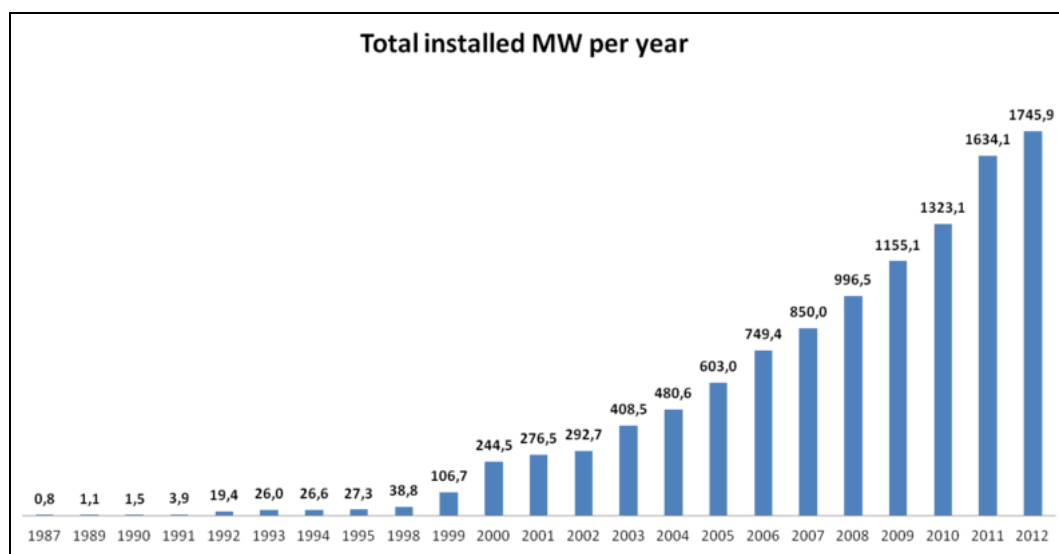
4.2. Τύποι και Υποσυστήματα Ανεμογεννητριών

Η ανεμογεννήτρια από την εποχή της εμφάνισης της μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματά της (περύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί γεννήτρια κλπ.). Εξελίξεις έχουν επίσης παρατηρηθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς την ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από την ανεμογεννήτρια σε άλλη μορφή ενέργειας.

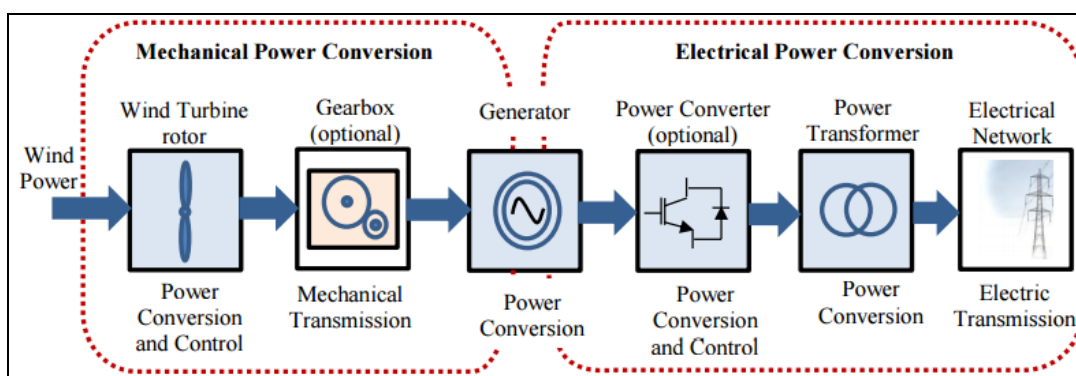
¹ Τελευταία ενημέρωση 2013



Σχήμα 4.1: Η Συμμετοχή των ΑΠΕ στην Συνολική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας¹.



Σχήμα 4.2: Η Συνολική Εγκαταστημένη Ισχύς των Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα ανά Χρόνο².



Σχήμα 4.3: Διάταξη Εκμετάλλευσης Αιολικής Ενέργειας.³

¹ Πηγή ΑΔΜΗΕ

² Πηγή HWEA WIND Energy Statistics 2012

³ Πηγή: Παπαοικονόμου, Δ. (2010). Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης. Ανάκτηση από http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0130/DT2010-0130.pdf

Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής της ισχύος φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 4.3). Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. έλικας). Τη μετατροπή του μηχανικού έργου σε ηλεκτρική ενέργεια αναλαμβάνει η διάταξη μιας γεννήτριας (σύγχρονη ή ασύγχρονη) μεταξύ της οποίας πολλές φορές παρεμβάλλεται ένα κιβώτιο ταχυτήτων.

Είναι γνωστές οι μεγάλες διακυμάνσεις του ανέμου με το χρόνο καθώς επίσης και η ασυμφωνία της παραγόμενης ενέργειας με τη ζήτηση. Οι ηλεκτρικές διατάξεις ισχύος που παρεμβάλλονται μεταξύ του δικτύου και της γεννήτριας έχουν σκοπό να μετατρέψουν την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε συμφωνία με το πρότυπο που ορίζουν οι προδιαγραφές.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πλήρους συστήματος εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει [2]:

- Μελέτη των χαρακτηριστικών του ανέμου με σκοπό την εκλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του ανεμοκινητήρα και την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας.
- Σχεδιασμός της αεροδυναμικής διάταξης, που μετατρέπει κατά τον αποδοτικότερο τρόπο την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο.
- Μελέτης της περίπτωσης μετατροπής του μηχανικού έργου σε άλλη, πιο συμφέρουσα μορφή ενέργειας και βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα.
- Εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ενέργειας του ανέμου.
- Μελέτη του βέλτιστου τρόπου μεταφοράς ενέργειάς, αν απαιτείται.
- Διερεύνηση της καλύτερης προσαρμογής της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς την κατανάλωση.

4.2.1. Τύποι Συλλογής Αιολικής Ενέργειας

Με βάση τον τρόπο με τον οποίο οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο ταξινομούνται σε:

- Οριζόντιου άξονα: στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου (Εικόνα 4.1). Με τη σειρά τους οι οριζόντιου άξονα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους σε:
 - Μονοπτέρυγες
 - Διπτέρυγες
 - Τριπτέρυγες
 - Πολυπτέρυγες

Αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στην πλειοψηφία είναι οι τριπτέρυγες. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η σταθερότητα τους, μιας και το αεροδυναμικό φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα ενώ και το μηχανικό εξισορροπείται. Οι μονοπτέρυγες, καθώς και οι διπτέρυγες, αν και έχουν χαμηλότερο κόστος εμφανίζουν πρόβλημα στην εξισορρόπηση δυνάμεων της όλης κατασκευής. Οι πολυπτέρυγες λόγω της ευκολίας στην εκκίνηση προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης. Όμως η ισχύς που παράγουν είναι μικρότερη σε σχέση με ανεμογεννήτριες με λιγότερα πτερύγια

λόγω αεροδυναμικών απωλειών. Γενικά τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών με οριζόντιο άξονα είναι η δυνατότητα εκκίνησής τους για μικρές τιμές της ταχύτητας ανέμου, στις οποίες τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, η εμφάνιση υψηλού αεροδυναμικού συντελεστή και η ευκολία στη συναρμολόγησή τους. Από την άλλη, σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να τοποθετηθούν πάνω στο πύργο, γεγονός που αυξάνει το κόστος και την δυσκολία κατασκευής. Επιπροσθέτως, χρειάζονται έναν ενεργό μηχανισμό περιστροφής ή ένα ουριαίο πτερύγιο για τον προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου. [3].

- Οριζόντιου άξονα (Cross – Wind): στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στη διεύθυνση ροής του ανέμου.
- Κάθετου άξονα: στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στην ροή του ανέμου (Εικόνα 4.2). Βασικό πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι ότι η μηχανή δεν χρειάζεται να προσανατολίζεται προς τον άνεμο για να είναι αποτελεσματική, συνεπώς δεν χρειάζεται μηχανισμός περιστροφής. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στο έδαφος, επομένως το κόστος και η δυσκολία κατασκευής μειώνονται. Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι ο μη απαραίτητος έλεγχος βήματος όταν χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια. Τα μειονεκτήματα που εμφανίζει όμως είναι και ο λόγος που έχει επικρατήσει η οριζόντιου άξονα, μιας και την καθιστούν μη λειτουργική. Τα σπουδαιότερα είναι η μικρή σχετικά απόδοσή τους και το γεγονός ότι αδυνατούν να ξεκινήσουν να περιστρέφονται μερικές φορές, χωρίς εξωτερική παρέμβαση αφού η ροπή εκκίνησης τους είναι πάρα πολύ υψηλή [3].



Εικόνα 4.1: Ανεμογεννήτρια Τριών Πτερυγίων Οριζόντιου Άξονα.¹

¹ Πηγή: Παπαιοικονόμου, Δ. (2010). Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης. Ανάκτηση από http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0130/DT2010-0130.pdf



Εικόνα 4.2: Ανεμογεννήτρια Κάθετου Άξονα.¹

4.2.2. Τύποι Ταχύτητας Περιστροφής

Στην κατηγορία αυτή διακρίνουμε δύο τύπους ανεμογεννήτριας:

- **Σταθερής ταχύτητας:** Αποτελούνται από έναν ανεμοκινητήρα και μια επαγωγική γεννήτρια, συνήθως βραχυκυκλωμένου κλωβού, που είναι συνδεδεμένη απευθείας στο δίκτυο. Σε πραγματικές συνθήκες η ταχύτητα δεν είναι απολύτως σταθερή λόγω της ολίσθησης της γεννήτριας. Η ταχύτητα του δρομέα, δεν προσαρμόζεται στην ταχύτητα του ανέμου, αλλά στην συχνότητα του δικτύου, το κιβώτιο ταχυτήτων, και των αριθμό των πόλων της γεννήτριας. Η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται από συστοιχία πυκνωτών. Η ύπαρξη της ολίσθησης, εξασφαλίζει ομαλότητα σύνδεσης στο δίκτυο, ενώ πρόκειται για μια διάταξη απλή με χαμηλό κόστος. Σημαντικό της μειονέκτημα ωστόσο, είναι η ανάγκη ύπαρξης πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος η οποία αυξάνεται με την αύξηση της παρεχόμενης ισχύος. Επιπροσθέτως, παρουσιάζει σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις οι οποίες επιδρούν στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι μερικοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο επαγωγικές γεννήτριες, μία για τις περιόδους που υπάρχουν χαμηλές ταχύτητες αέρα και μία μεγαλύτερη για τις περιόδους με υψηλότερες τιμές ταχύτητας αέρα. Ένας άλλος σχεδιασμός είναι οι επαγωγικές γεννήτριες με μεταβαλλόμενους πόλους ώστε να μπορούν να λειτουργούν με διαφορετική ταχύτητα.

¹ Πηγή: Παπαοικονόμου, Δ. (2010). Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης. Ανάκτηση από http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0130/DT2010-0130.pdf

- **Μεταβλητής ταχύτητας:** Στις ανεμογεννήτριες αυτές η ταχύτητα του δρομέα αλλάζει σύμφωνα με την ταχύτητα του ανέμου. Σε αντίθεση με την διάταξη σταθερών στροφών, η ροπή διατηρείται σταθερή και οι όποιες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, εμφανίζονται στην ταχύτητα της γεννήτριας. Σημαντικό μειονέκτημα των ανεμογεννητριών αυτών είναι η ύπαρξη πολύπλοκων και δαπανηρών διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, η ύπαρξη των οποίων όμως εξασφαλίζει καλύτερη ποιότητα ισχύος. Ο τύπος της γεννήτριας είναι τόσο σύγχρονη ή επαγωγική ενώ υπάρχει επίσης η δυνατότητα ρυθμίσεως της άεργου ισχύος. Η ανεμογεννήτρια αυτή έχει κυριαρχήσει σήμερα στην αγορά παρόλο το αυξημένο κόστος της.

4.2.3. Τύποι Γεννητριών

Γενικά, για ισχύ της τάξης των MW, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τριφασική γεννήτρια. Ο πιο κοινός τύπος ωστόσο, που συναντάμε σήμερα, είναι αυτός της ασύγχρονης μηχανής και σπανιότερα της σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη. Οι ανεμογεννήτριες που παράγονται περισσότερο είναι οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητό έλεγχο γωνίας κλίσης των πτερυγίων που χρησιμοποιούν επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδοσίας (DFIG). Στην συνέχεια θα δούμε εν συντομία τους διαφόρους τύπους γεννητριών που χρησιμοποιούνται όπως αυτές παρουσιάζονται από τη σχετική βιβλιογραφία [3]:

- **Σύγχρονες γεννήτριες:** που με τη σειρά του χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
 - ο **Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG):** Πρόκειται για αυτοδιεγειρόμενες γεννήτριες που παράγουν ισχύ με υψηλότερη απόδοση και για κάθε ταχύτητα ανέμου. Το σύστημα ωστόσο έχει αυξημένο κόστος κατασκευής λόγω των μόνιμων μαγνητών αλλά και αυξημένο κόστος συντήρησης λόγω ανάγκης ψύξης των μαγνητών, οι λειτουργία των οποίων επηρεάζεται εύκολα από τη θερμοκρασία. Επιπλέον, η χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη απαιτεί τη χρήση ενός μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας, προκειμένου να προσαρμόσει την τάση και τη συχνότητα της γεννήτριας στην τάση και στη συχνότητα γραμμής αντίστοιχα.
 - ο **Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG):** Είναι ο βασικότερος τύπος γεννήτριας στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τα τυλίγματα στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο και τα τυλίγματα δρομέα να διεγείρονται από συνεχές ρεύμα με τη χρήση δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών ή μέσω ενός διεγέρτη με ένα στρεφόμενο ανορθωτή, χωρίς ψήκτρες.
- **Ασύγχρονες (επαγωγικές) γεννήτριες:** που με τη σειρά τους χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
 - ο **Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG):** Χρησιμοποιούνται ευρέως σε απλές εφαρμογές λόγω της απλότητας τους, της υψηλής τους απόδοσης και του μειωμένου κόστους συντήρησης που απαιτούν. Οι ανεμογεννήτριες με γεννήτριες SCIG, έχουν συνήθως και ένα μηχανισμό με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο εκκινήτη και πυκνωτές για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Η γεννήτρια και ο άξονας της ανεμογεννήτριας συνδέονται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς η βέλτιστη προσδοκώμενη τιμή της ταχύτητας του άξονα είναι διαφορετική από αυτή της γεννήτριας. Ειδικό χαρακτηριστικό τους είναι οι απότομες αλλαγές στην ροπή, με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να περνούν κατευθείαν στο δίκτυο,

πρόβλημα αρκετά σημαντικό κατά την σύνδεση στο δίκτυο λόγω της μεγάλης τιμής του μεταβατικού ρεύματος. Ιδιαίτερο επίσης χαρακτηριστικό, είναι ότι η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει μεγαλύτερα ποσά ενεργού ισχύος μόνο αν απορροφήσει περισσότερη άεργο ισχύ. Αυτό το ποσό χορηγείται είτε μέσω πυκνωτών είτε προέρχεται από το δίκτυο, με την πιθανότητα να προκληθούν επιπρόσθετες απώλειες μεταφοράς και σε ορισμένες περιπτώσεις να γίνει το δίκτυο ασταθές. Όμως η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος, στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας με SCIG, επιφέρει εξαιρετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος πλέον, και είναι δυνατός ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος και η προσαρμογή τους στις συνθήκες του ανέμου και τις απαιτήσεις του δικτύου.

- Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) : Σε αυτήν την περίπτωση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δρομέα μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικά από την τάση του δρομέα αφού τα τυλίγματα συνδέονται εξωτερικά μέσω δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών. Με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος η ισχύς μπορεί να εξαχθεί ή και να εισαχθεί στο κύκλωμα του δρομέα και η γεννήτρια μπορεί να μαγνητιστεί είτε από το κύκλωμα του στάτη είτε από το κύκλωμα του δρομέα. Κύριο μειονέκτημά της είναι το σχετικά υψηλό κόστος σε σύγκριση με την αντίστοιχη βραχυκυκλωμένου δρομέα. Στην βιομηχανία χρησιμοποιούνται δύο τύποι WRIG:
 - Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG), Εισήχθηκε στην αγορά προκειμένου να μειωθεί το φορτίο στην ανεμογεννήτρια εξαιτίας των ριπών ανέμου. Αποτελεί τον πρόγονο της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας και έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την ολίσθηση (θετική) και να επιλέγει τη βέλτιστη τιμή για αυτή, με αποτέλεσμα μικρότερες διαταραχές στην ροπή και στην εξαγόμενη ενέργεια. Ωστόσο το εύρος της μεταβολής της ταχύτητας εξαρτάται από την αντίσταση του δρομέα και είναι απαραίτητο ένα κύκλωμα αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Τέλος, δεν υπάρχει αξιόλογος έλεγχος της ενεργούς και άεργου ισχύος και οι απώλειες πάνω στην αντίσταση του δρομέα μπορεί να είναι σημαντικές.
 - Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG) : Σε αυτήν την περίπτωση αντί της μεταβλητής αντίστασης του δρομέα υπάρχει ένας back-to-back IGBT μετατροπέας πηγής τάσης συνδεδεμένος στο δίκτυο και τα τυλίγματα του στάτη είναι απευθείας συνδεδεμένα στο τριφασικό δίκτυο. Το εύρος μεταβολής της ταχύτητας είναι αρκετά μεγάλο και τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και σε περίπτωση σφάλματος, η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται πλήρως από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του. Συγκεκριμένα, ο ελεγκτής στην πλευρά του δρομέα ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ και ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση στη dc διασύνδεση και διασφαλίζει λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο μετατροπέας δεν χρειάζεται να διαχειριστεί πάνω από το 30% της συνολικής ισχύος, συνεπώς και το κόστος του μετατροπέα μειώνεται, καθώς και οι απώλειες του. Δηλαδή το μέγεθος του δεν σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ρύθμισης της

ταχύτητας. Αυτό αποτελεί ταυτόχρονα και μειονέκτημα, μιας και μειώνοντας το κόστος χάνεται η δυνατότητα για μεγάλο εύρος ρύθμισης της ταχύτητας. Επιπλέον μειονέκτημα είναι οι δακτύλιοι ολίσθησης που είναι απαραίτητοι. Ανάλογα με τη λειτουργία η ισχύς του δρομέα μπορεί να μεταφερθεί και ως προς τις δύο κατευθύνσεις ενώ ο στάτης παρέχει ενέργεια στο δίκτυο. Έτσι, η DFIG οδηγεί στο δίκτυο την αυξημένη ισχύ του δρομέα χωρίς αυτή να χάνεται σε ωμικές αντιστάσεις. Επίσης μπορεί να μαγνητίζεται και από το κύκλωμα του δρομέα και είναι ικανή να παράγει άεργο ισχύ.

4.3. Μηχανικός Έλεγχος Ισχύος Ανεμοκινητήρα

Για τη ρύθμιση της ισχύος της ανεμογεννήτριας διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Έλεγχος βήματος πτερυγίου (pitch control): Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει συνεχή έλεγχο ισχύος, εύκολες εκκινήσεις καθώς και άμεσο αεροδυναμικό φρενάρισμα σε περίπτωση κινδύνου. Μέρος ή ολόκληρο το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, μεταβάλλοντας έτσι τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου άρα και την παραγόμενη ενέργεια. Ο μηχανισμός του ελέγχου βήματος πτερυγίου πραγματοποιείται με τη χρήση υδραυλικών ή και ηλεκτρικών ενεργοποιητών. Τα μειονεκτήματά του όμως είναι η πολυπλοκότητα που εισάγει ο μηχανισμός των στρεφόμενων πτερυγίων και οι μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ, για μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου σε μεγάλες ταχύτητες. Η στιγμιαία τιμή της ισχύος, εξαιτίας των ριπών του ανέμου και της περιορισμένης ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων, κυμαίνεται γύρω από τη μέση τιμή της.
- Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης (passive stall control) : Απλό εύρωστο και φθινό σύστημα που προκαλεί μικρότερες διαταραχές στην ισχύ από ότι μια γρήγορη μεταβολή στη γωνία των πτερυγίων. Η γωνία κλίσης των πτερυγίων είναι σταθερή και επιλέγεται τέτοια τιμή ώστε σε μεγάλες ταχύτητες να διασφαλίζεται η εμφάνιση δινών και στροβιλισμών στα πλάγια των πτερυγίων από την αντίθετη πλευρά πρόσπτωσης. Οι διαταραχές αυτές αντισταθμίζουν τις δυνάμεις άντωσης στα πτερύγια και τις περιορίζουν στο να επενεργήσουν στο δρομέα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται απώλεια στήριξης. Βέβαια αυτός ο τρόπος μηχανικού ελέγχου εμφανίζει μικρή απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες, δεν βοηθάει την εκκίνηση και δεν επιτυγχάνεται ακριβής έλεγχος στην ισχύ.
- Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control). Στην συγκεκριμένη περίπτωση η απώλεια στήριξης των πτερυγίων ελέγχεται ενεργά με την περιστροφή τους, δηλαδή η μέθοδος αυτή συνδυάζει τις δύο παραπάνω μεθόδους. Σε χαμηλές ταχύτητες τα πτερύγια περιστρέφονται με τον ίδιο τρόπο όπως σε ανεμογεννήτριες με pitch control, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση. Σε μεγάλες ταχύτητες τα πτερύγια πηγαίνουν σε μεγαλύτερη απώλεια στήριξης, στρεφόμενα ελάχιστα σε αντίθετη φορά από αυτή που θα στρέφονταν αν είχαν έλεγχο γωνίας βήματος, επιτυγχάνοντας πιο ομαλό περιορισμό της ενέργειας χωρίς μεγάλες διαταραχές. Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι διαχειρίζεται τις αυξομειώσεις στην πυκνότητα του αέρα. Ο συνδυασμός με τον μηχανισμό γωνίας βήματος κάνει πιο εύκολη τη διαχείριση

καταστάσεων που χρειάζεται άμεση διακοπή της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και επιπλέον βοηθά κατά την εκκίνηση. Ο μηχανισμός είναι είτε υδραυλικός είτε ηλεκτρικός, ο οποίος όμως εισάγει πολυπλοκότητα στον έλεγχο και ανάγκη για συντήρηση.

4.4. Εξαγωγή Ισχύος

Οι μεγάλες μάζες του ανέμου που διαρκώς μετακινούνται στην ατμόσφαιρα περιέχουν τεράστια ποσά ενέργειας που προσφέρονται περισσότερο από κάθε άλλη μορφή ενέργειας για μετατροπή και εκμετάλλευση.

Η στιγμιαία ισχύς που περιέχεται σε ένα ρεύμα αέρα διατομής A ομοιόμορφης στιγμιαίας ταχύτητας V και πυκνότητας ρ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = \frac{\rho}{2} V^3 A$$

(Εξίσωση 4.1)

και είναι ανάλογη του κύβου της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου. Αυτό όμως έχει τεράστια σημασία αφού η ταχύτητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σε ευρύτατα όρια με το χρόνο. Το γεγονός της ευρύτατης χρονικής μεταβολής μας επιβάλλει ένα ξεχωριστό τρόπο επεξεργασίας των μετεωρολογικών δεδομένων όταν ενδιαφερόμαστε για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου και την εύρεση του κατάλληλου ανεμοκινητήρα για μια ορισμένη περιοχή.

Η ισχύς όμως που παρέχει η έλικα είναι μικρότερη από την ισχύ του ανέμου σύμφωνα με την σχέση:

$$P_{A/K} = C_p \frac{\rho}{2} V^3 A$$

(Εξίσωση 4.2)

Το μέγεθος C_p λέγεται συντελεστής ισχύος. Προσοχή χρειάζεται στο ότι το μέγεθος αυτό δεν είναι αυστηρά ο βαθμός απόδοσης του δρομέα, αφού αναφέρεται σε μια ισχύ που δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ολόκληρη, ακόμη και σε μια ιδανική έλικα. Όπως έδειξε ο Betz, η μέγιστη τιμή του είναι:

$$C_{pmax} = \frac{19}{27}$$

το οποίο καλείται και όριο του Betz.

Στην πραγματικότητα ο συντελεστής του δρομέα θα είναι ακόμη μικρότερος λόγω φαινομένων συνεκτικότητας, πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων και της υπάρχουσας συστροφής του ρεύματος του αέρα πίσω από το δρομέα η οποία τελικά αποτελεί απώλεια ενέργειας λόγω μη μετατροπής της σε πίεση.

4.5. Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης (Doubly Fed Induction Generator – DFIG)

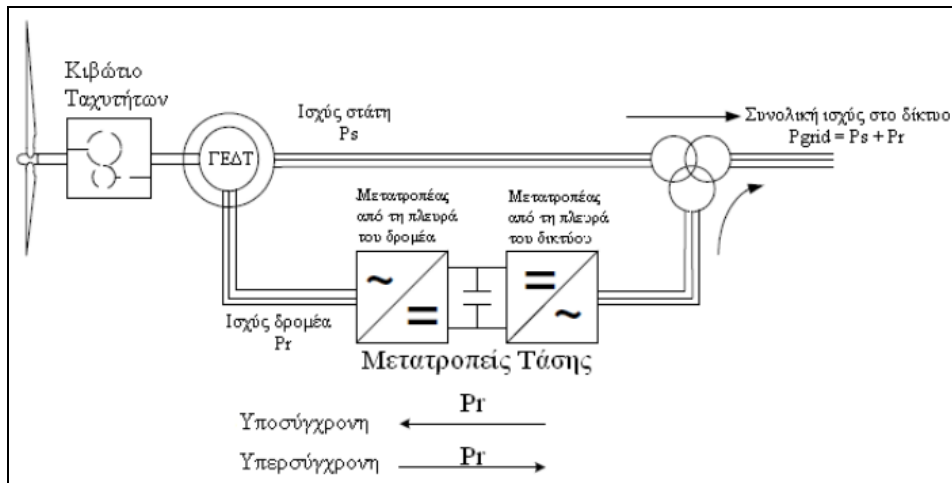
Στο κύκλωμα της προσομοίωσης που θα περιγράψει παρακάτω, έχουν χρησιμοποιηθεί ανεμογεννήτριες τύπου DFIG, για να γίνει καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων και των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια πιο εκτενής αναφορά στο μοντέλο αυτό.

Με τον όρο γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, αναφερόμαστε σε μια συνδεσμολογία επαγωγικής γεννήτριας στην οποία ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο ενώ το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται στο μετατροπέα μέσω δαχτυλιδιών (slip rings). Ένα τέτοιο σύστημα είναι ιδιαίτερα δημοφιλές στον τομέα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών διότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος χειρίζεται μόνο ένα ποσοστό (περίπου 30%) της ολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν σε σύγκριση με σύστημα όπου ο μετατροπέας χειρίζεται την ολική ισχύ ενώ το κόστος του μετατροπέα μειώνεται σημαντικά.

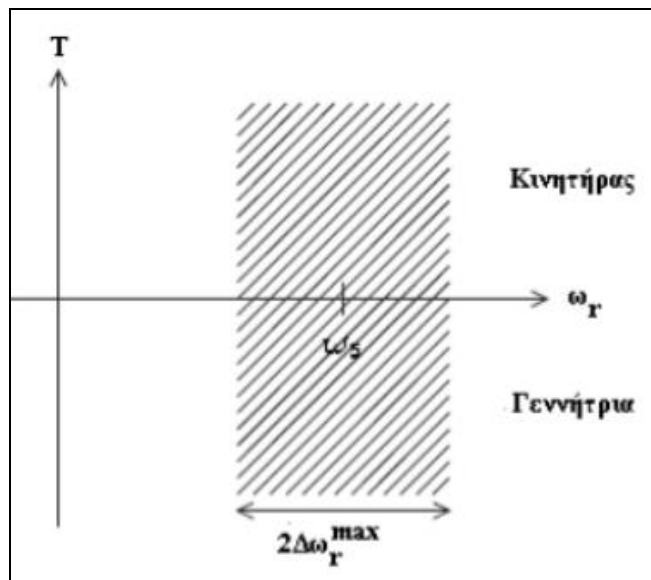
Η γεννήτρια είναι επαγωγική χωρίς βραχυκυκλωμένο δρομέα. Ο δρομέας συνδέεται με το δίκτυο μέσω δύο μετατροπέων τάσης (Back to Back Voltage Source Converter). Ο μετατροπέας παρέχει μια επιπλέον τάση με συχνότητα τη συχνότητα ολίσθησης (Slip Frequency) στα τερματικά του δρομέα. Η δυνατότητα μεταβολής της τάσης του δρομέα επιτρέπει τη λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα καθώς επίσης και τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος η οποία παράγεται από τη γεννήτρια επαγωγής, στοιχείο που δίνει ένα πολύ σημαντικό προτέρημα στις γεννήτριες του τύπου αυτού. Η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει σε ταχύτητα είτε μεγαλύτερη της σύγχρονης, υπερσύγχρονη λειτουργία, είτε μικρότερη από τη σύγχρονη, υποσύγχρονη λειτουργία. Στη πρώτη περίπτωση η ισχύς του δρομέα εγχέεται μέσω των μετατροπέων στο δίκτυο, ενώ στη δεύτερη η ροή της ισχύος στο δρομέα έχει αντίθετη κατεύθυνση όπως φαίνεται και από το σχήμα της εικόνας που ακολουθεί (Σχήμα 4.4). Επομένως η ροή της ισχύος στο μετατροπέα μπορεί να είναι και ως προς τις δύο κατευθύνσεις. Κατά συνέπεια, ο μετατροπέας πρέπει να αποτελείται από ενεργά ημιαγωγικά στοιχεία όπως για παράδειγμα IGBT, GTO, επιτρέποντας τη ροή της ισχύος προς τις δύο κατευθύνσεις. Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχύτητας ($\pm 30\%$) της σύγχρονης ταχύτητας η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση.

Ο μετατροπέας που συνδέεται ανάμεσα στο δρομέα και στον τερματικό ζυγό της ανεμογεννήτριας, αποτελείται από δύο μετατροπείς δηλαδή, το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία το σχήμα αυτό των μετατροπέων είναι γνωστό ως back to back converter. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται ένας πυκνωτής σαν αποθήκη ενέργειας με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στην τάση της συνεχούς σύνδεσης. Με το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕΔΤ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη ενώ ο βασικός στόχος για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Το εύρος ταχύτητας της μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδότησης φαίνεται στο σχήμα (Σχήμα 4.5), όπως επίσης φαίνεται ότι η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως κινητήρας αλλά και ως γεννήτρια με ένα εύρος στην ταχύτητα του δρομέα $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα [8].

Το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας αποτελείται πολύπλοκα συστήματα τα οποία το σύστημα του simulink αφενός διαθέτει προεγκατεστημένα, αφετέρου δεν για τις ανάγκες τις προσομοίωσης δεν θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.¹

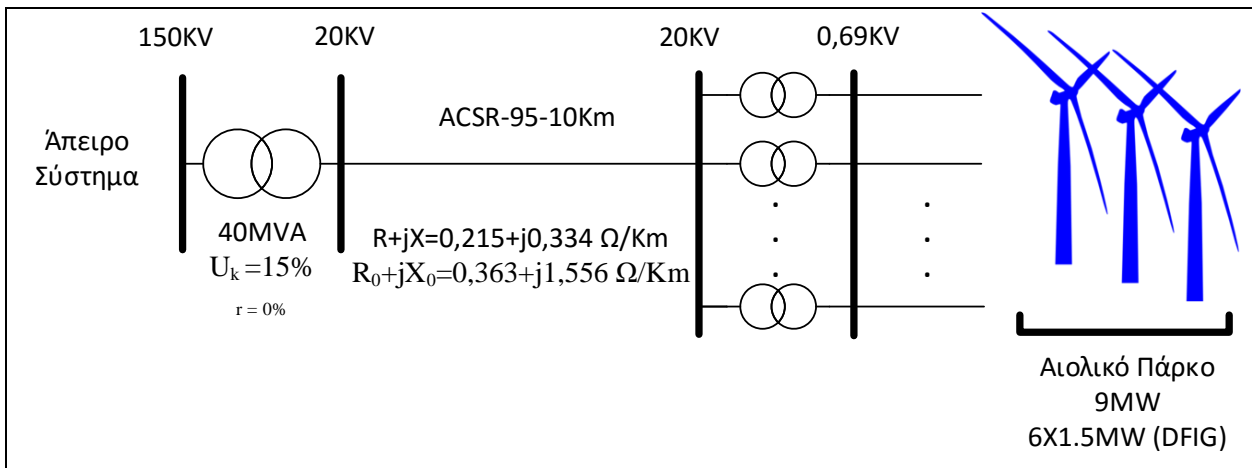


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα Εύρους Ταχύτητας μιας Γεννήτριας DFIG.

4.6. Κύκλωμα Προσομοίωσης

Θεωρούμε ένα αιολικό πάρκο που συνδέεται στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.6) στη συνέχεια θα κατασκευάσουμε το σύστημα αυτό στο υπολογιστικό πρόγραμμα simulink. Διακρίνουμε ένα (9 MW) αιολικό πάρκο αποτελούμενο από έξι (1,5 MW) ανεμογεννήτριες που συνδέονται με ένα σύστημα διανομής μέσης τάσης 20 kV και διαχέει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα δίκτυο 150 kV μέσω γραμμής 10 χιλιομέτρων.

¹ Πηγή σχημάτων: Παπαϊκονόμου, Δ. (2010). Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης. Ανάκτηση από http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0130/DT2010-0130.pdf



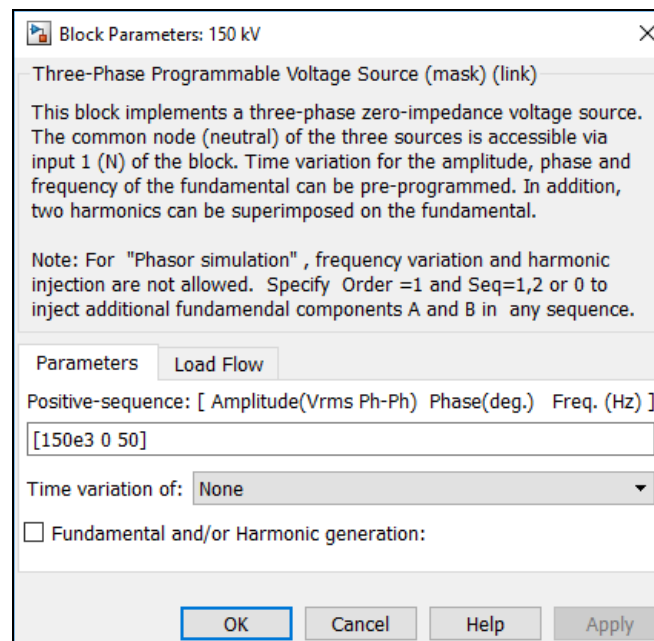
Σχήμα 4.6: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης Αιολικού Πάρκου στο Δίκτυο Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.

4.7. Δημιουργία Κυκλώματος στο Simulink

Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ενότητα έχουν αντληθεί από τη βιβλιοθήκη Simscape → Power Systems.

4.7.1. Άπειρο Σύστημα

Για την προσομοίωση του άπειρου συστήματος χρησιμοποιούμε μια προγραμματιζόμενη τριφασική πηγή τάσης¹, με σταθερή πολική τάση 150KV (RMS), συχνότητα 50Hz και γείωση ουδετέρου (Εικόνα 4.3) [4].



Εικόνα 4.3: Παράμετροι Εισαγωγής Άπειρου Συστήματος στο Simulink.

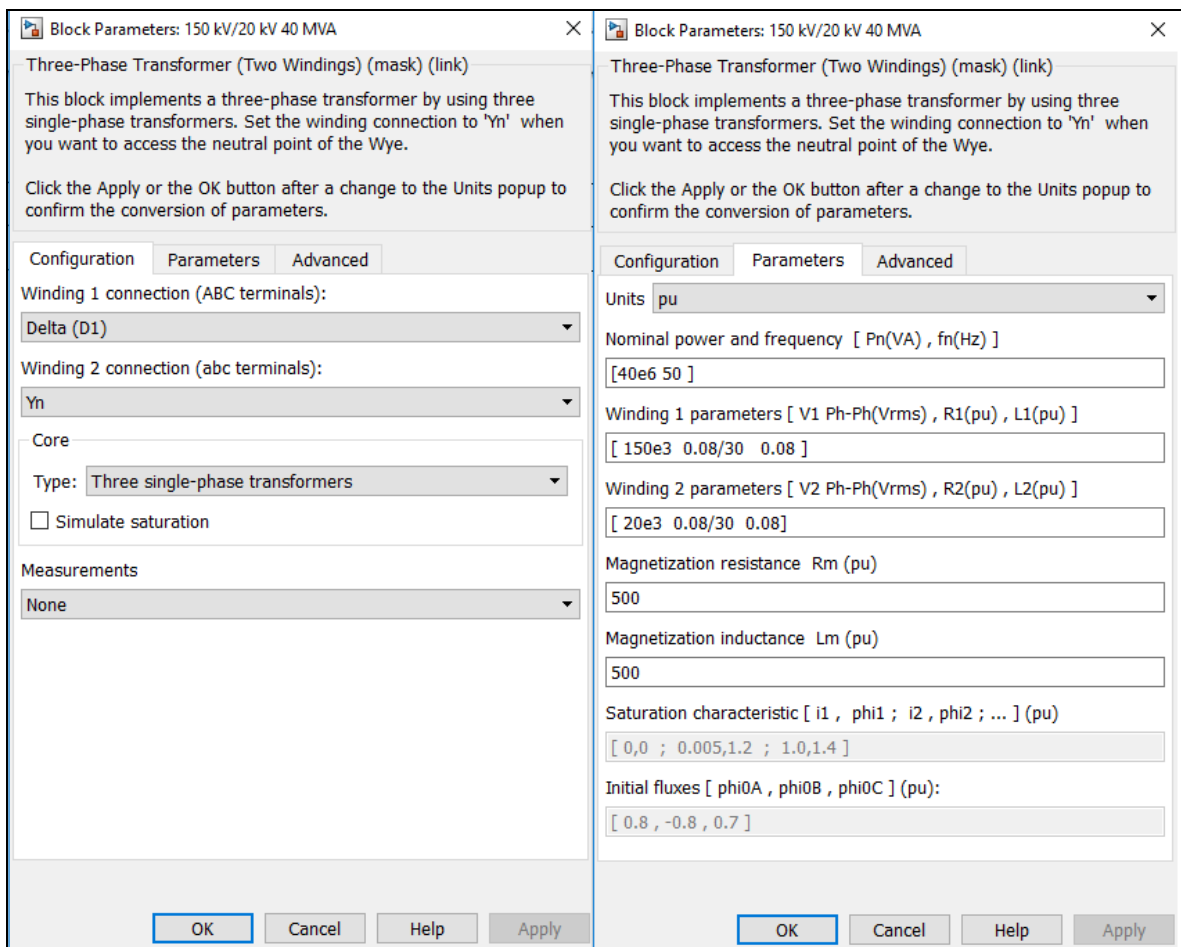
¹ Three-Phase Programmable Voltage Source

4.7.2. Μετασχηματιστής Υποβιβασμού Τάσης 150/20 KV

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης είναι τα εξής:

- Συνδεσμολογία: Dy1
- Γειωμένος ουδέτερος με αντίσταση: 12 Ω
- Ονομαστική Ισχύς: 40 MVA
- Τάση βραχυκυκλώσεως: 15%

Τα χαρακτηριστικά του προκύπτουν εκ' της δοκιμής βραχυκυκλώσεως [5] σε pu, για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε τριφασικό μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων¹ τα πλήρη χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.4: Παράμετροι Εισαγωγής Μετασχηματιστή Υποβιβασμού στο Simulink.

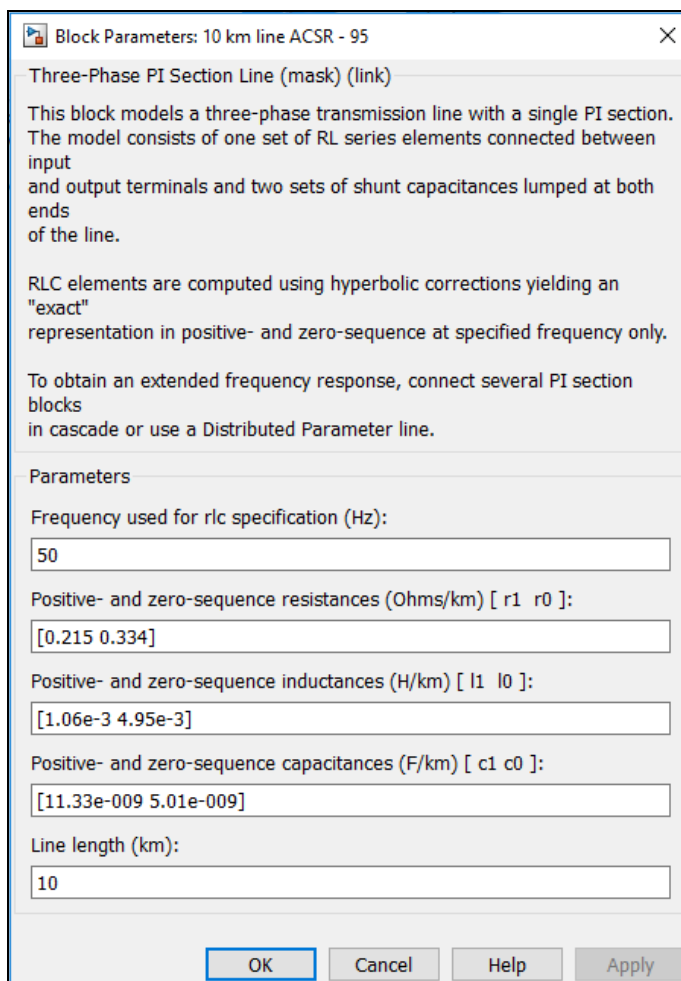
¹ Three-Phase Transformer (Two Windings)

4.7.3. Γραμμή Μεταφοράς Μέσης Τάσης

Η γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης είναι ACSR-95 με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μήκος: 10 Km
- Αντίσταση θετικής ακολουθίας: $0,215+j0,334 \Omega/\text{Km}$
- Αντίσταση μηδενικής ακολουθίας: $0,363+j1,556 \Omega/\text{Km}$

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το π ισοδύναμο τριφασικής γραμμής συχνότητας¹ 50Hz με τις παραμέτρους της όπως προκύπτουν από τα προηγούμενα χαρακτηριστικά ($z=2\pi f L$) [6]:



Εικόνα 4.5: Παράμετροι Εισαγωγής Γραμμής Μέσης Τάσης στο Simulink.

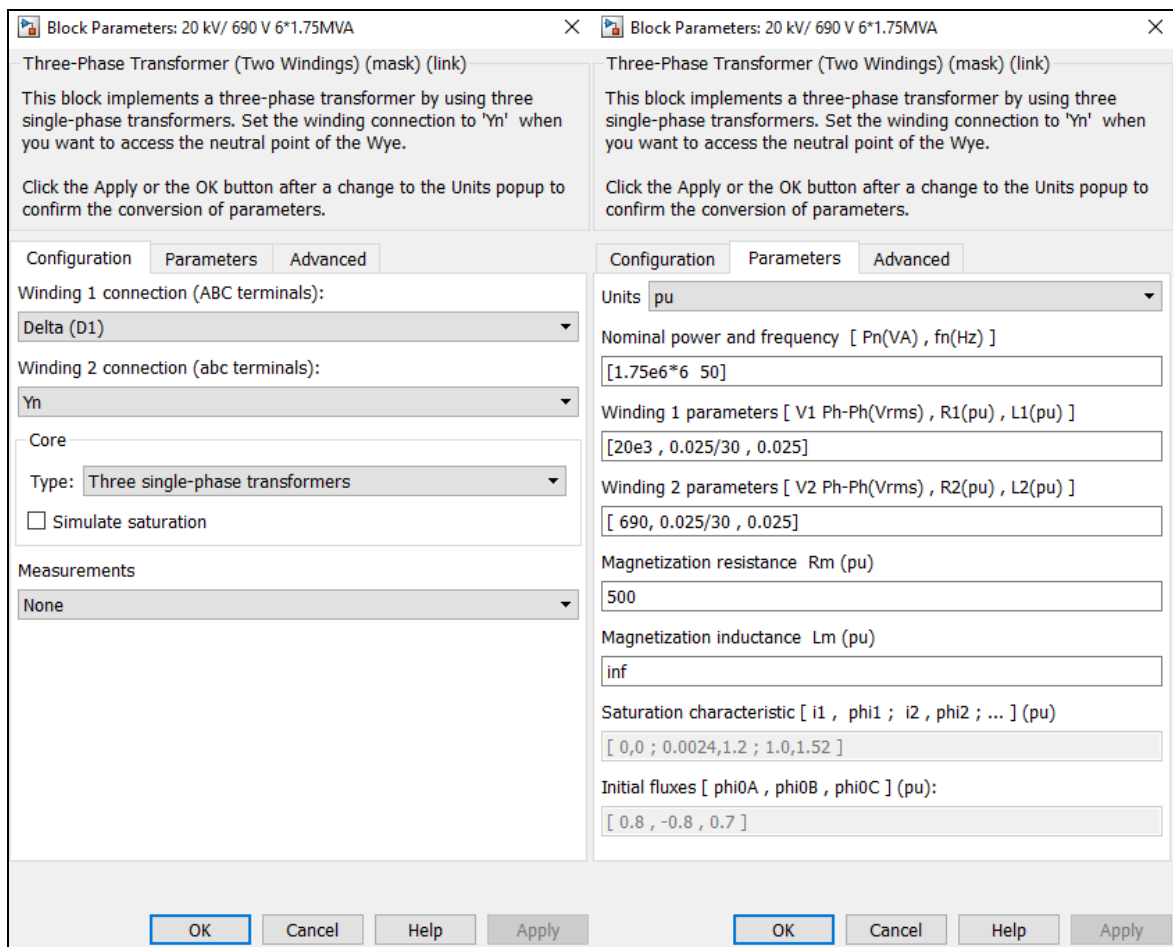
¹ Three-Phase PI Section Line

4.7.4. Μετασχηματιστής Ανύψωσης Ανεμογεννήτριας 0,69/20 KV

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης είναι τα εξής:

- Συνδεσμολογία: Dy1
- Γειωμένος ουδέτερος με αντίσταση: 5 Ω
- Ονομαστική Ισχύς: 6X1,75 MVA
- Τάση βραχυκυκλώσεως: 6%

Τα χαρακτηριστικά του προκύπτουν εκ' της δοκιμής βραχυκυκλώσεως [5] σε pu, για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε τριφασικό μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων¹ τα πλήρη χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.6: Παράμετροι Εισαγωγής Μετασχηματιστή Ανύψωσης στο Simulink.

¹ Three-Phase Transformer (Two Windings)

4.7.5. Ανεμογεννήτρια (DFIG)

Δεδομένου ότι το υπολογιστικό πρόγραμμα διαθέτει προεγκατεστημένα όλα τα συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, τα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος κλπ. αρκεί να επιλέξουμε τις κατάλληλες παραμέτρους για τις ανάγκες της προσομοίωσης¹ (Εικόνα 4.7). Σε αυτό το παράδειγμα η ταχύτητα του ανέμου διατηρείται σταθερή στους 15 m/s ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή ισχύ (Σχήμα 4.7). Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή ροπής προκειμένου να διατηρηθεί η ταχύτητα του στάτη στα 1,2 pu. Η άεργος ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια ρυθμίζεται σε 0 Mvar [9].

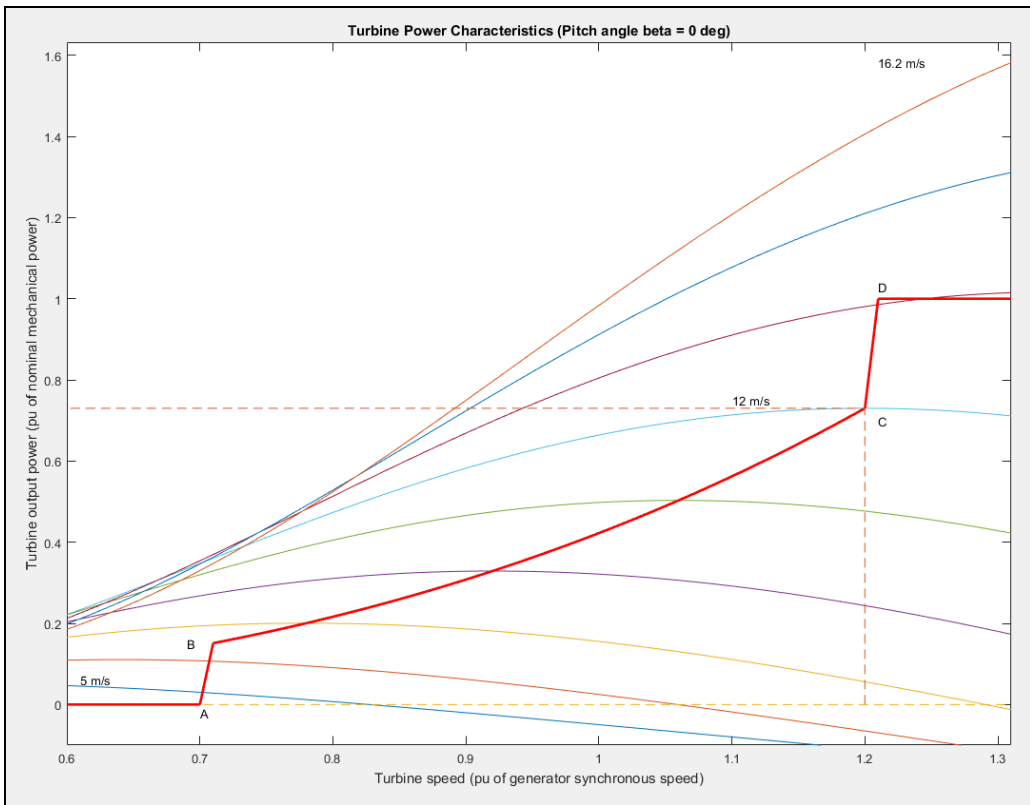
The screenshot shows the 'Block Parameters: DFIG Wind Turbine' dialog box. The title bar reads 'Block Parameters: DFIG Wind Turbine'. Below the title bar, there is a description: 'DFIG Wind Turbine (mask)' and 'This block implements a model of a variable speed pitch controlled wind turbine using a doubly-fed induction generator (DFIG)'. The 'Parameters' section includes the following fields:

- Number of wind turbines: 6
- Display: Generator data for 1 wind turbine
- Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn (VA), Vs_nom (Vrms), Vr_nom (Vrms), fn (Hz)]: [1.5e6/.9 690 2370 50]
- Stator [Rs, Lls] (p.u.): [0.023 0.18]
- Rotor [Rr', Llr'] (p.u.): [0.016 0.16]
- Magnetizing inductance Lm (p.u.): 2.9
- Inertia constant, friction factor, and pairs of poles [H(s) F(p.u.) p]: [0.685 0.01 3]
- Initial conditions [s th ias ibs ics phaseas phasebs phasecs]: [-0.2,0 0,0,0 0,0,0]

At the bottom of the dialog box, there are four buttons: OK, Cancel, Help, and Apply.

Εικόνα 4.7: Παράμετροι Εισαγωγής Ανεμογεννήτριας στο Simulink.

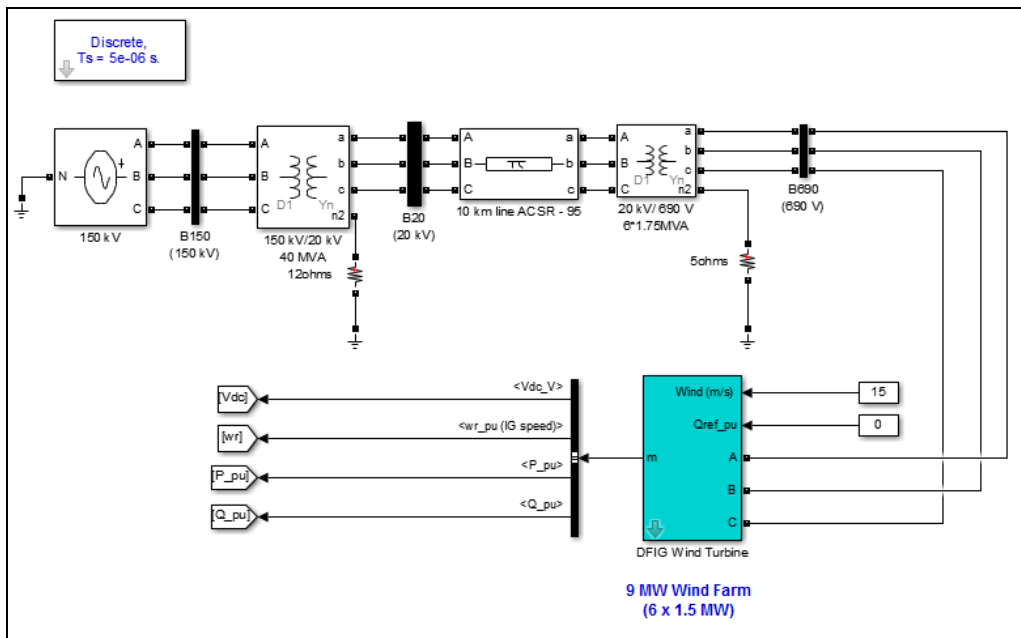
¹ Wind Farm - DFIG Detailed Model



Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστική Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.

4.7.6. Κατασκευή Κυκλώματος Προσομοίωσης

Συνθέτοντας όλα τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν προκύπτει το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος:



Εικόνα 4.8: Σχηματική Διάταξη Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink.

4.8. Υπολογιστική Προσομοίωση

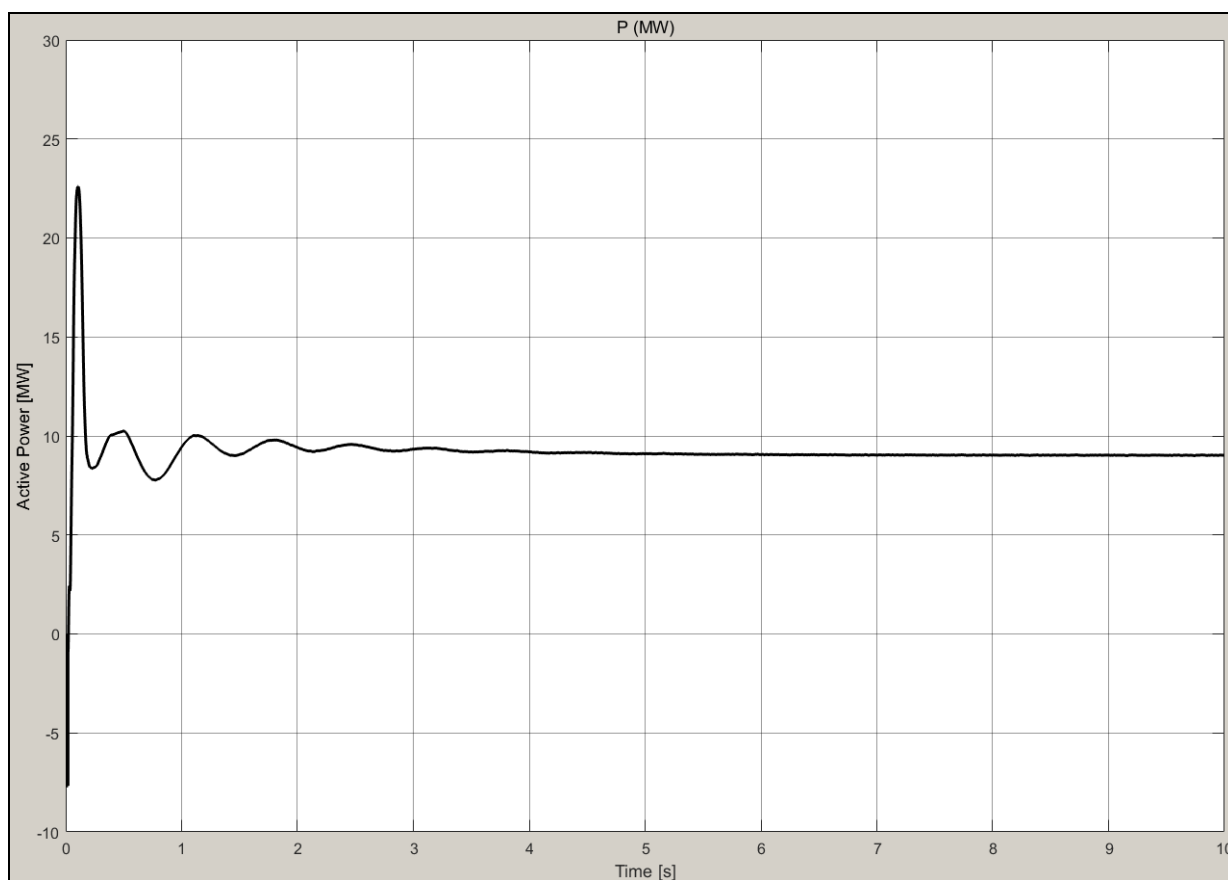
Το 9 MW αιολικό πάρκο αποτελείται από έξι 1,5 MW ανεμογεννήτριες (DFIG) που συνδέονται με ένα σύστημα διανομής 20 kV και παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα δίκτυο 150 kV μέσω γραμμής μεταφοράς 10 χιλιομέτρων.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (DFIG) και ένα μετατροπέα PWM AC / DC / AC και έναν ημιαγωγό τύπου IGBT. Ο στάτης συνδέεται απευθείας με το δίκτυο 50 Hz, ενώ ο ρότορας τροφοδοτείται με μεταβαλλόμενη συχνότητα από το μετατροπέα AC / DC / AC. Ο τύπος DFIG επιτρέπει την παραγωγή μέγιστης ενέργειας από τον άνεμο για χαμηλές ταχύτητες, βελτιστοποιώντας την ταχύτητα του στροβίλου, ελαχιστοποιώντας παράλληλα μηχανικές καταπονήσεις από την τουρμπίνα κατά τη διάρκεια μεταβολών του ανέμου.

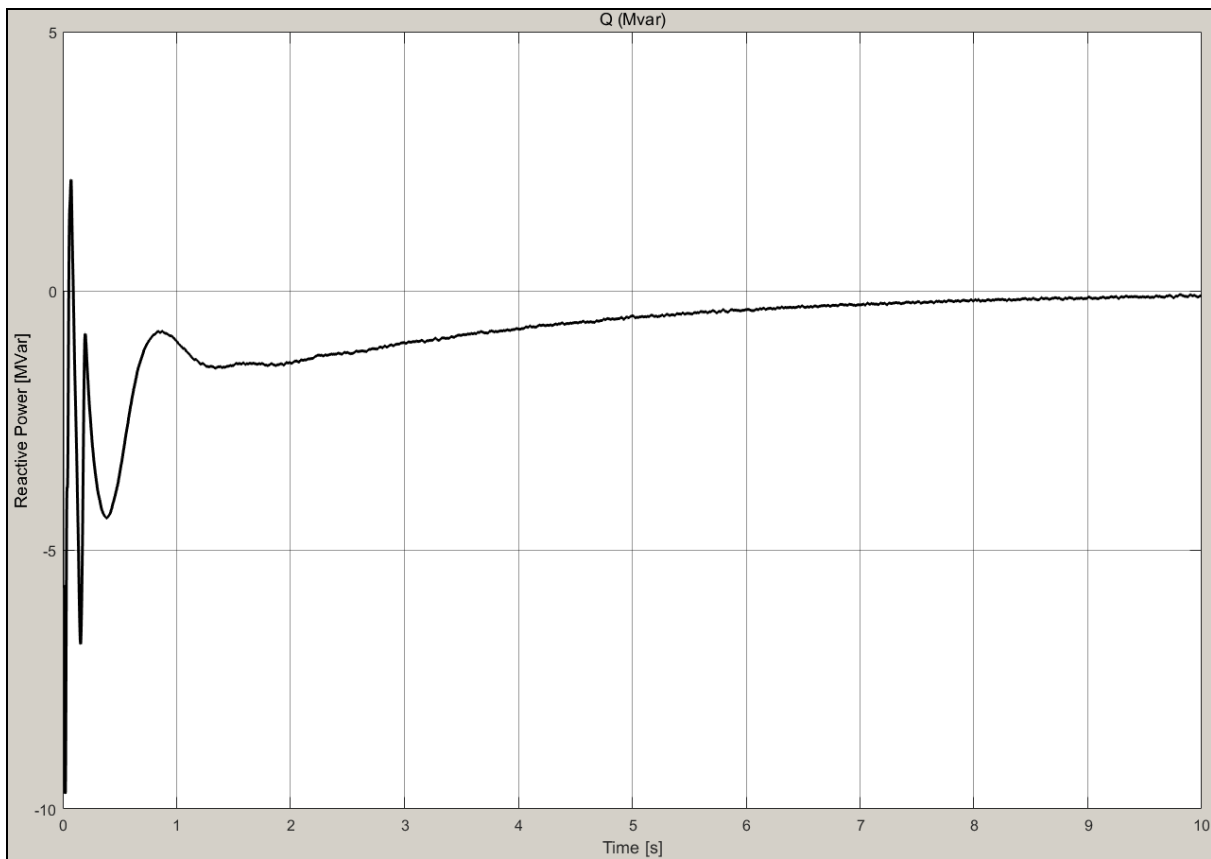
Σε αυτό το παράδειγμα η ταχύτητα του ανέμου διατηρείται σταθερή στα 15 m/s. Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή προκειμένου να διατηρηθεί η ταχύτητα στα 1,2 pu. Η άεργος ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια ρυθμίζεται σε 0 Mvar.

Τέλος, Ο χρόνος δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται για το μοντέλο είναι πολύ μικρός, ($T_s = 50 \mu s$) και επιτάσσεται από τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας [9].

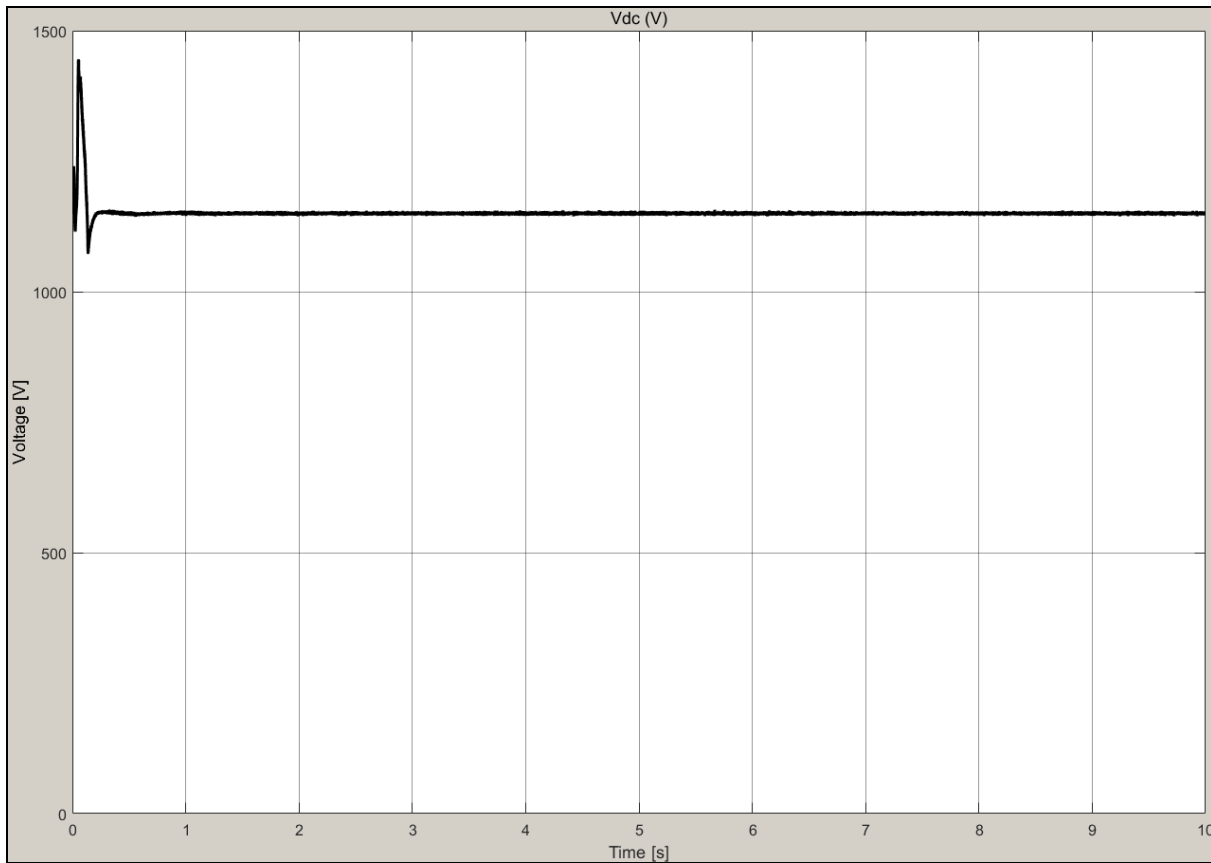
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται, η πορεία της ενεργούς ισχύος, της άεργου ισχύος καθώς και η DC τάση του μετατροπέα από την ηρεμία στη μόνιμη κατάσταση.



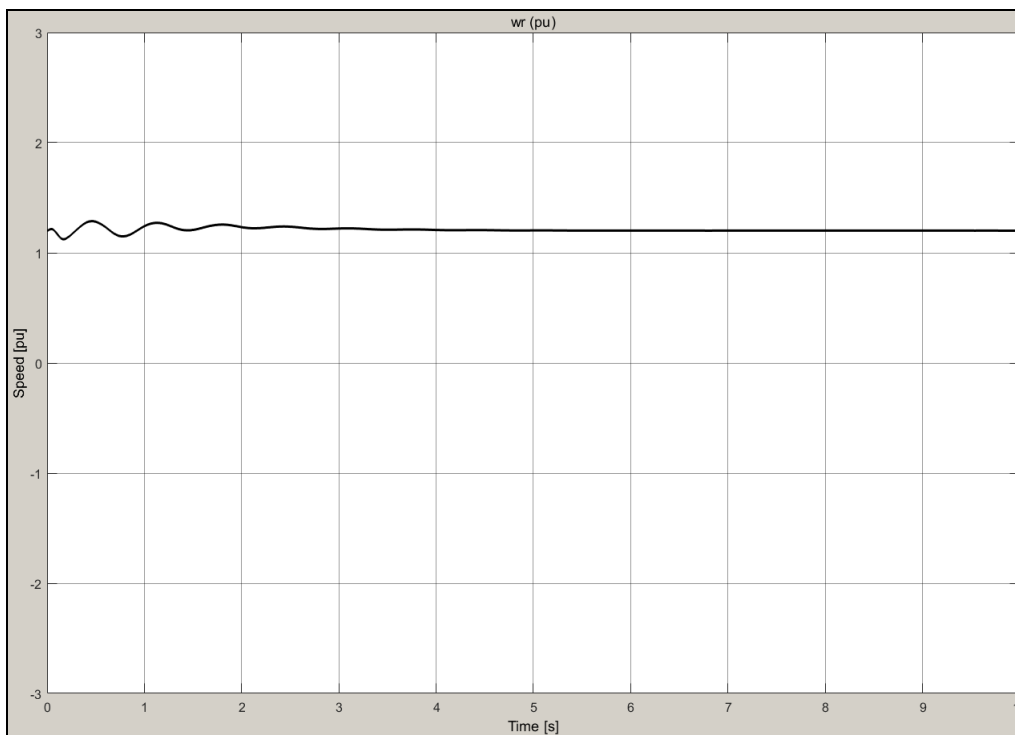
Σχήμα 4.8: Πορεία Ενεργούς Ισχύος από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 4.9: Άεργος Ισχύς από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



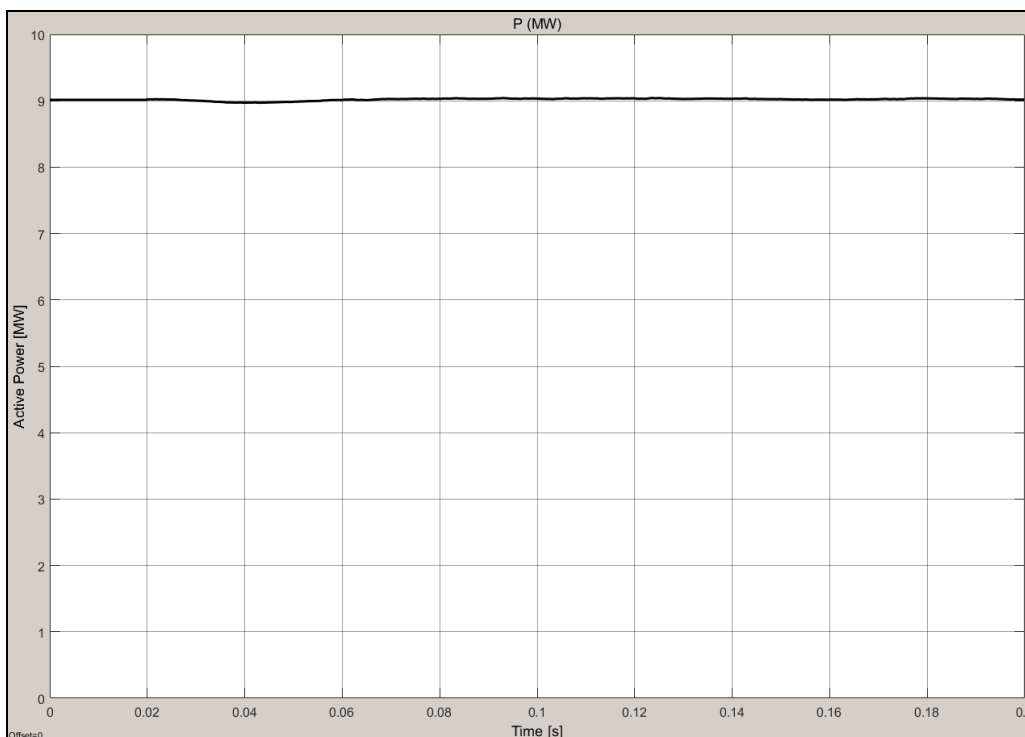
Σχήμα 4.10: DC Τάση Μετατροπέα από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



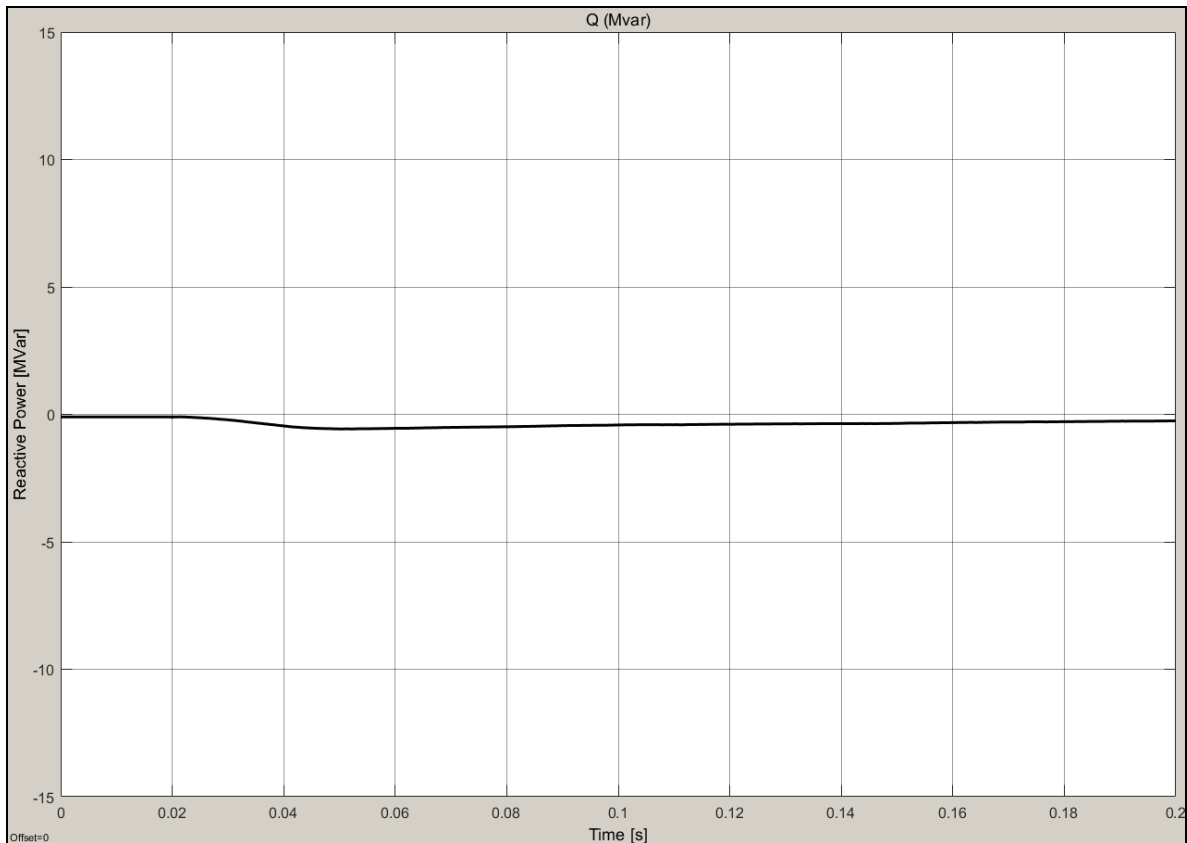
Σχήμα 4.11: Ταχύτητα Περιστροφής Ρότορα από την Κατάσταση Ηρεμίας στην Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Εκφρασμένη σε Ποσοστό της Σύγχρονης.

4.8.1. Προσομοίωση στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας

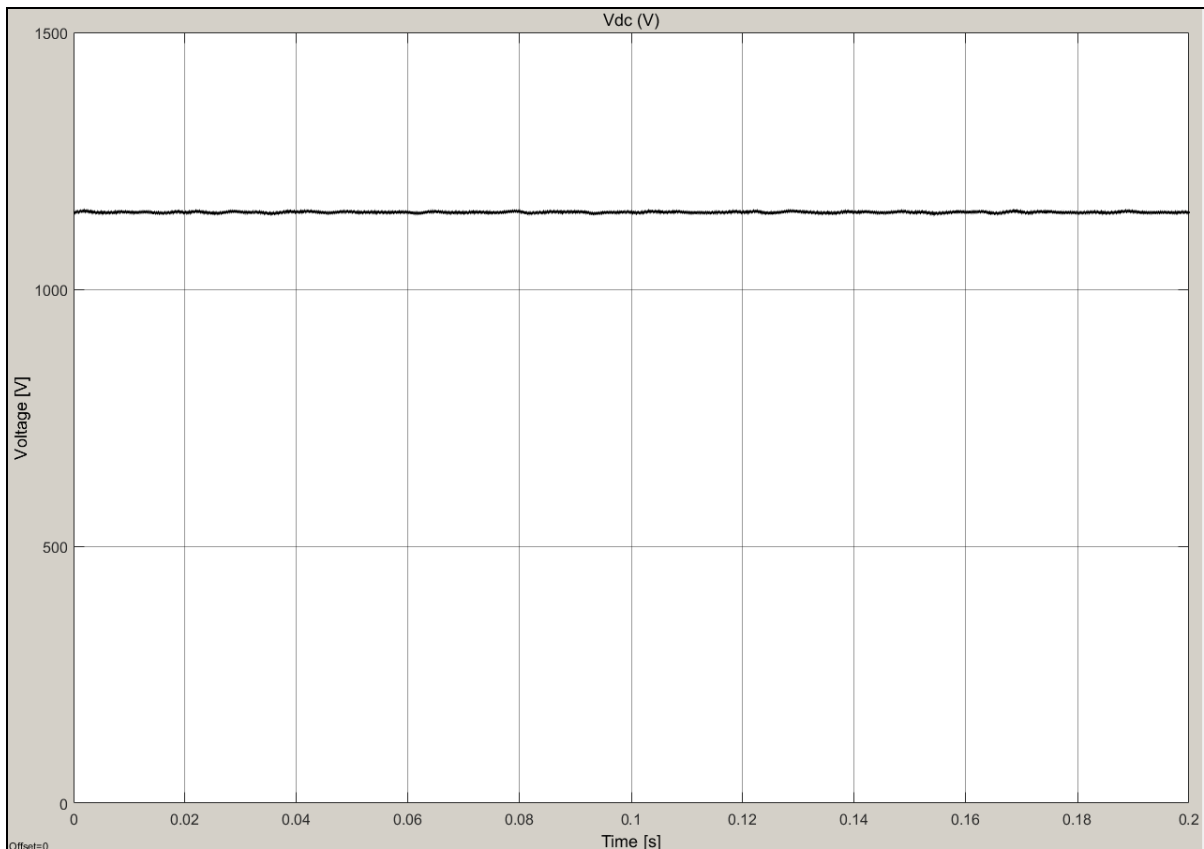
Αποθηκεύοντας τις τιμές της υπολογιστικής προσομοίωσης του προηγούμενου παραδείγματος, θα δούμε τα αποτελέσματα για υπολογιστική προσομοίωση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι αρχικές αυτές τιμές (Initial Values) θα χρησιμοποιηθούν για τα παραδείγματα της επόμενης ενότητας.



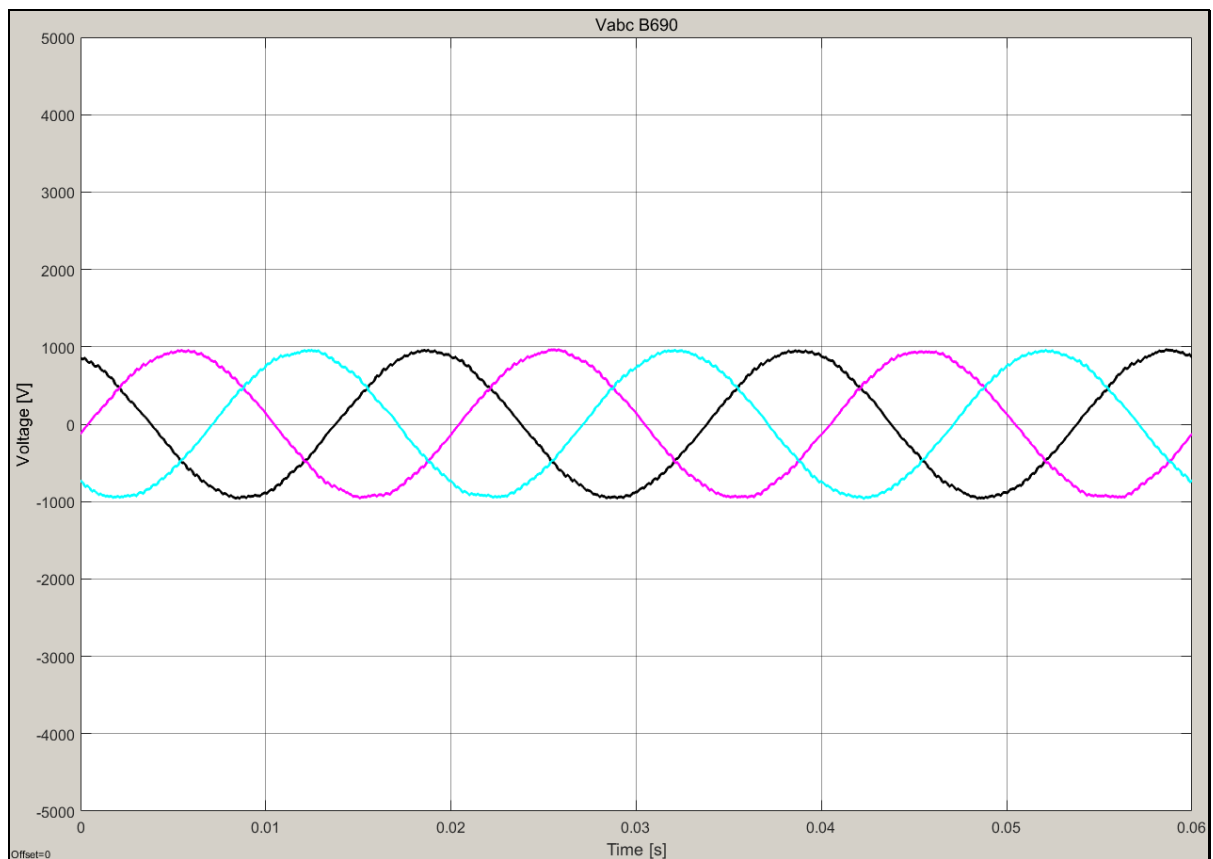
Σχήμα 4.12: Ενεργός Ισχύς στη Μόνιμη Κατάσταση όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



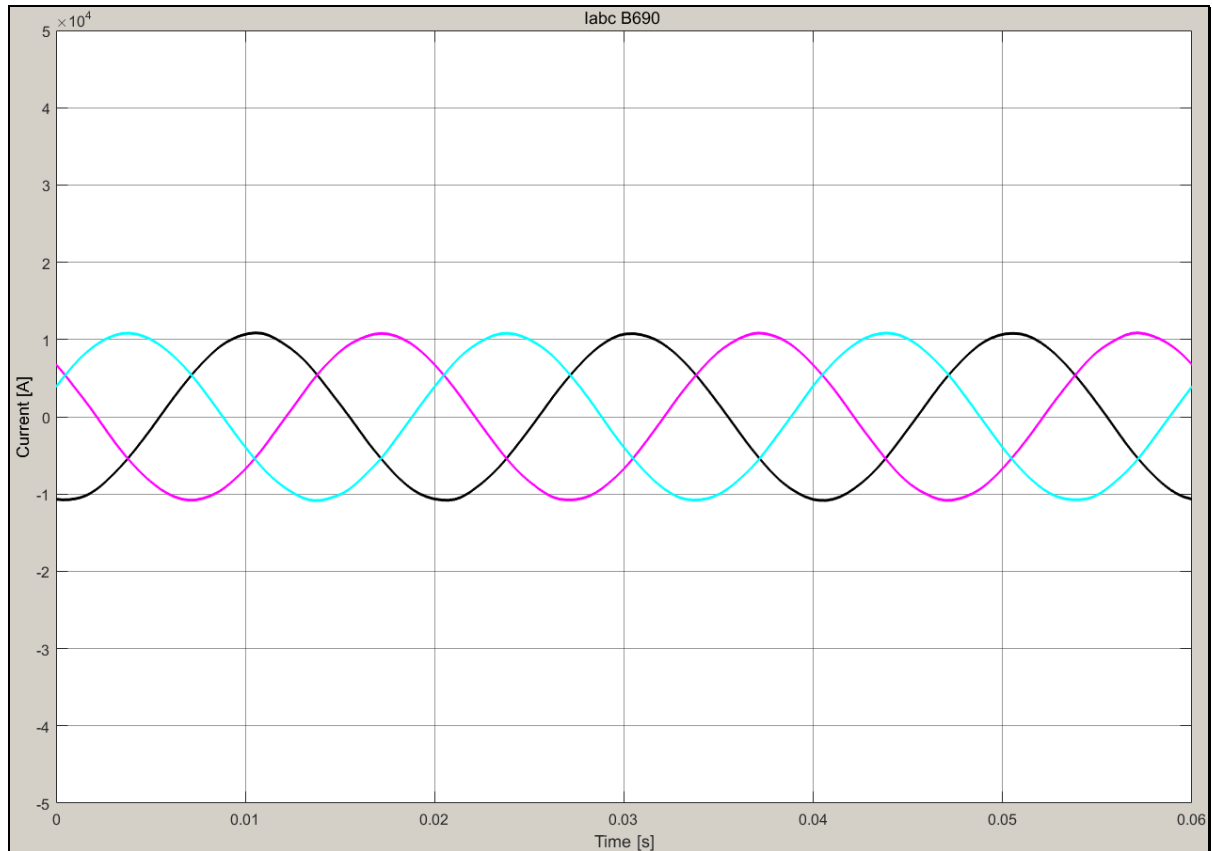
Σχήμα 4.13: Άεργος Ισχύς στη Μόνιμη Κατάσταση όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



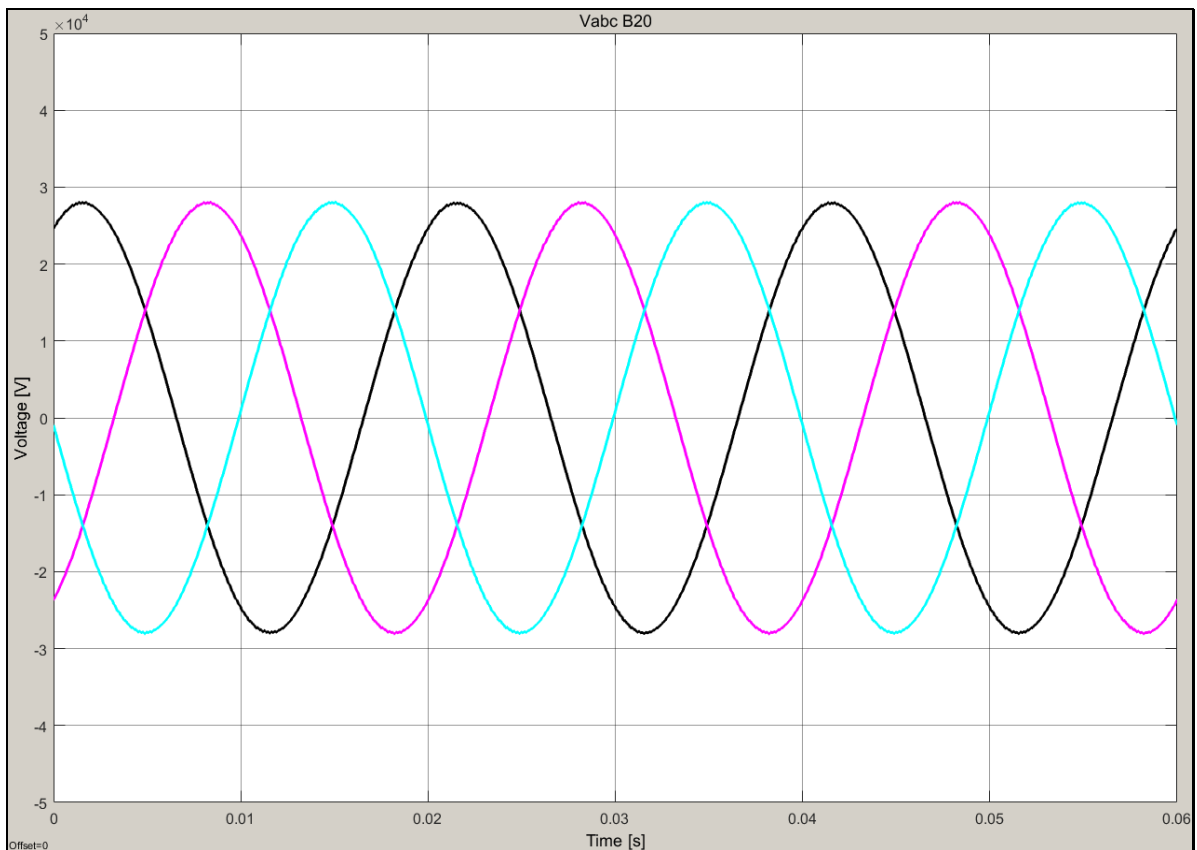
Σχήμα 4.14: DC Τάση Μετατροπέα στη Μόνιμη Κατάσταση όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



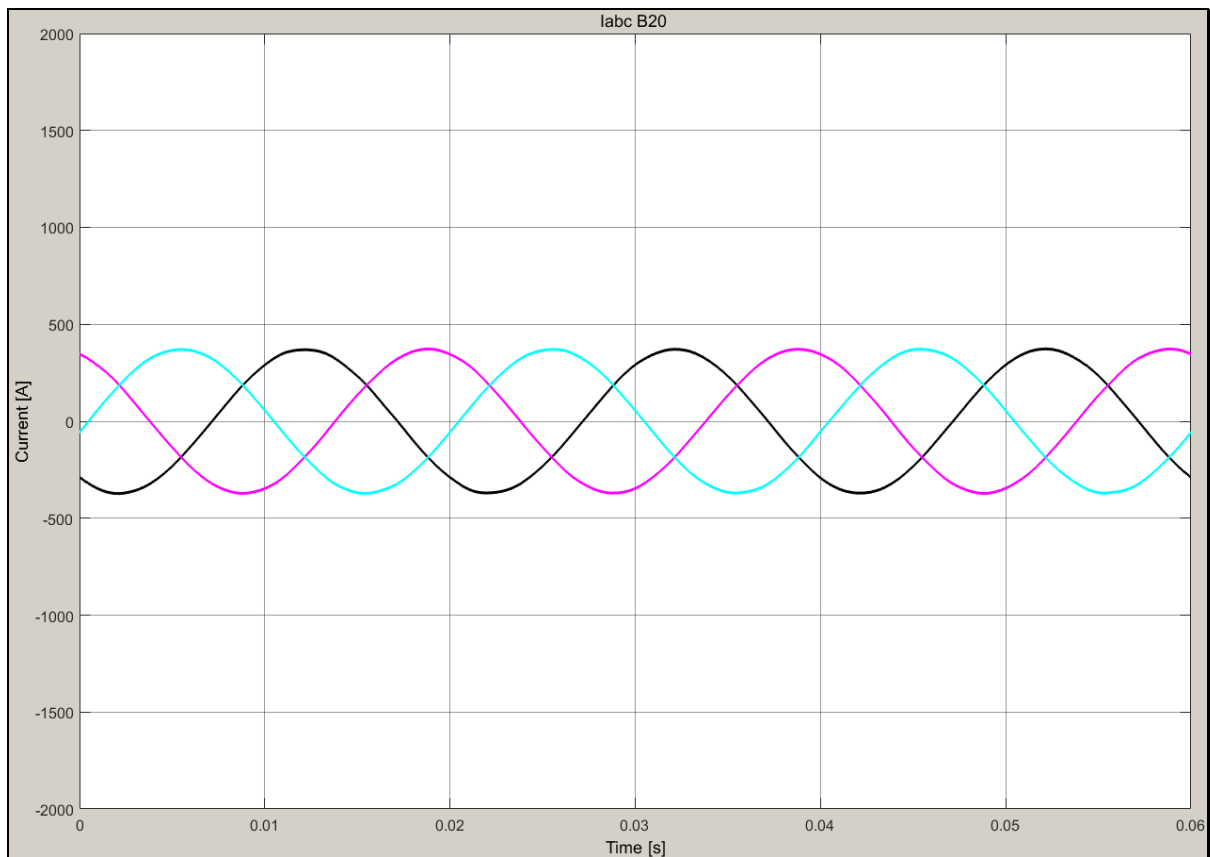
Σχήμα 4.15: Πολικές Τάσεις στο Ζυγό B690 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτές Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



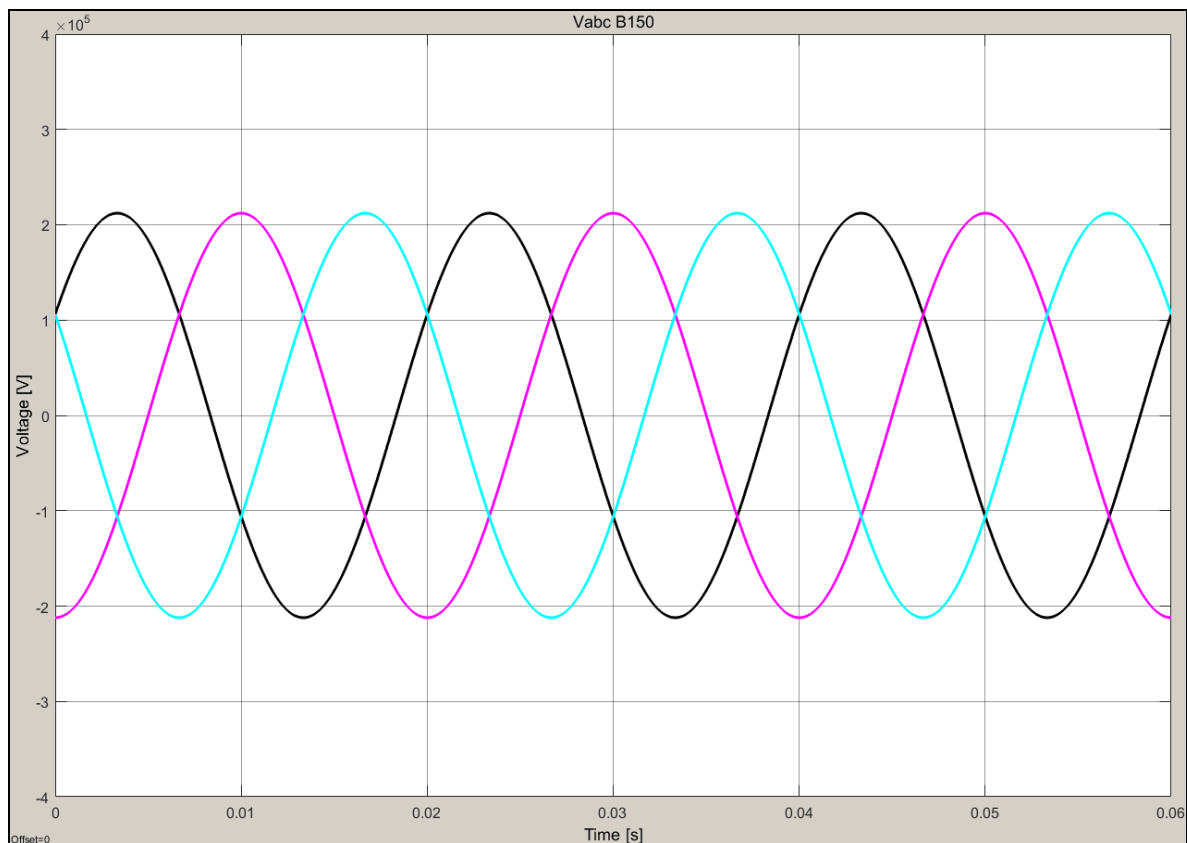
Σχήμα 4.16: Πολικά Ρεύματα στο Ζυγό B690 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτά Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



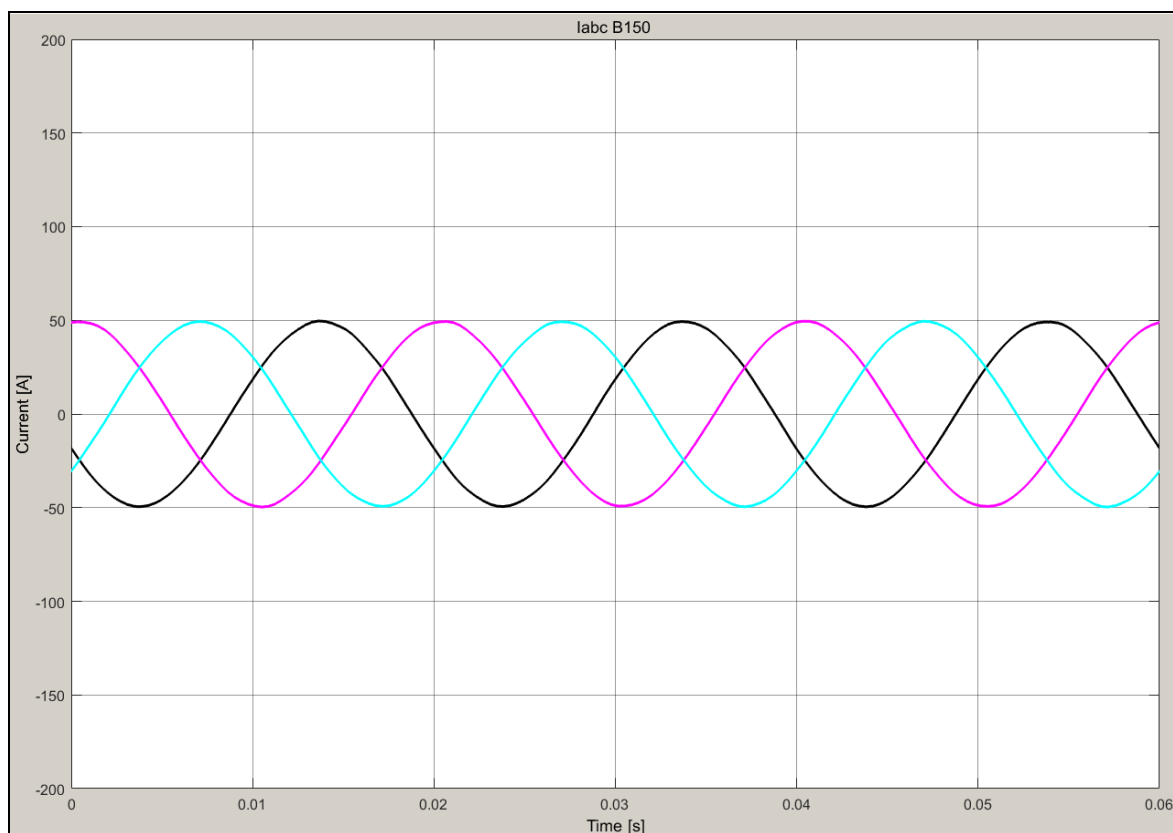
Σχήμα 4.17: Πολικές Τάσεις στο Ζυγό B20 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτές Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



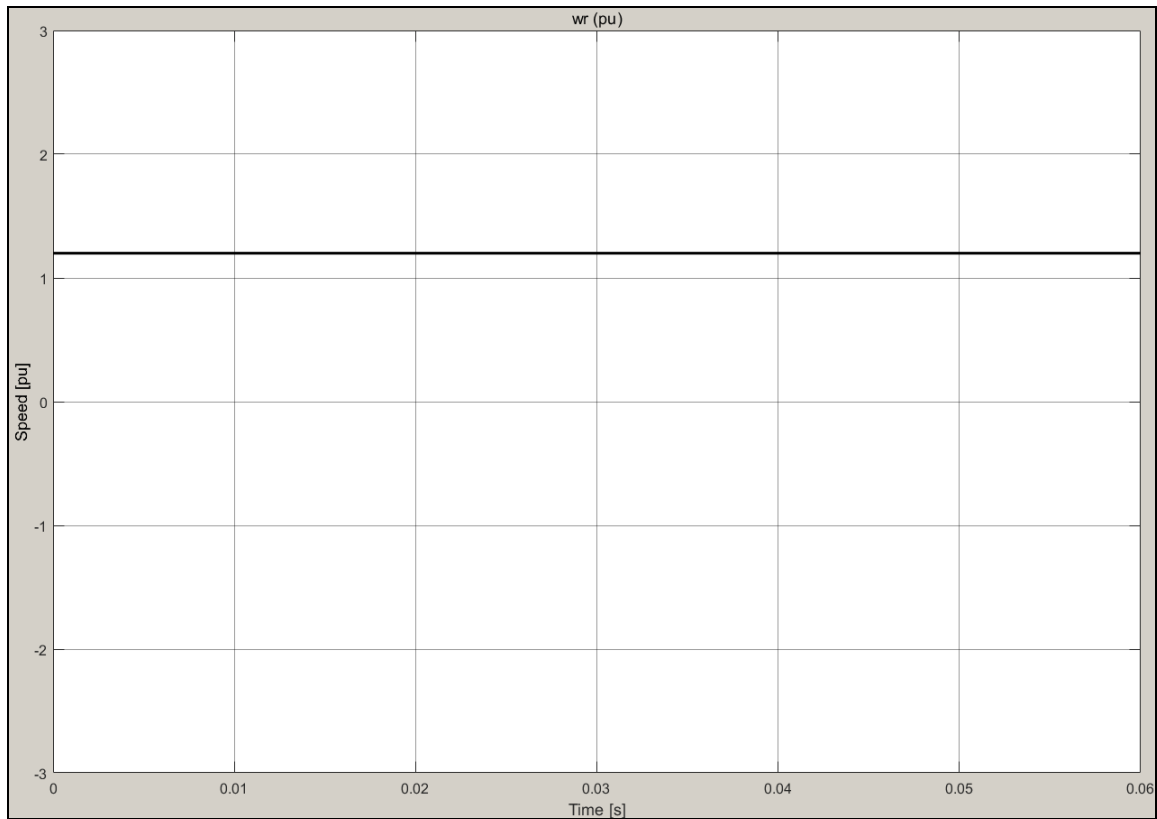
Σχήμα 4.18: Πολικά Ρεύματα στο Ζυγό B20 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτά Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 4.19: Πολικές Τάσεις στο Ζυγό B150 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτές Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 4.20: Πολικά Ρεύματα στο Ζυγό B150 στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας όπως αυτά Υπολογίζονται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.



Σχήμα 4.21: Ταχύτητα Περιστροφής Ρότορα στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Εκφρασμένη σε Ποσοστό της Σύγχρονης (+20%).

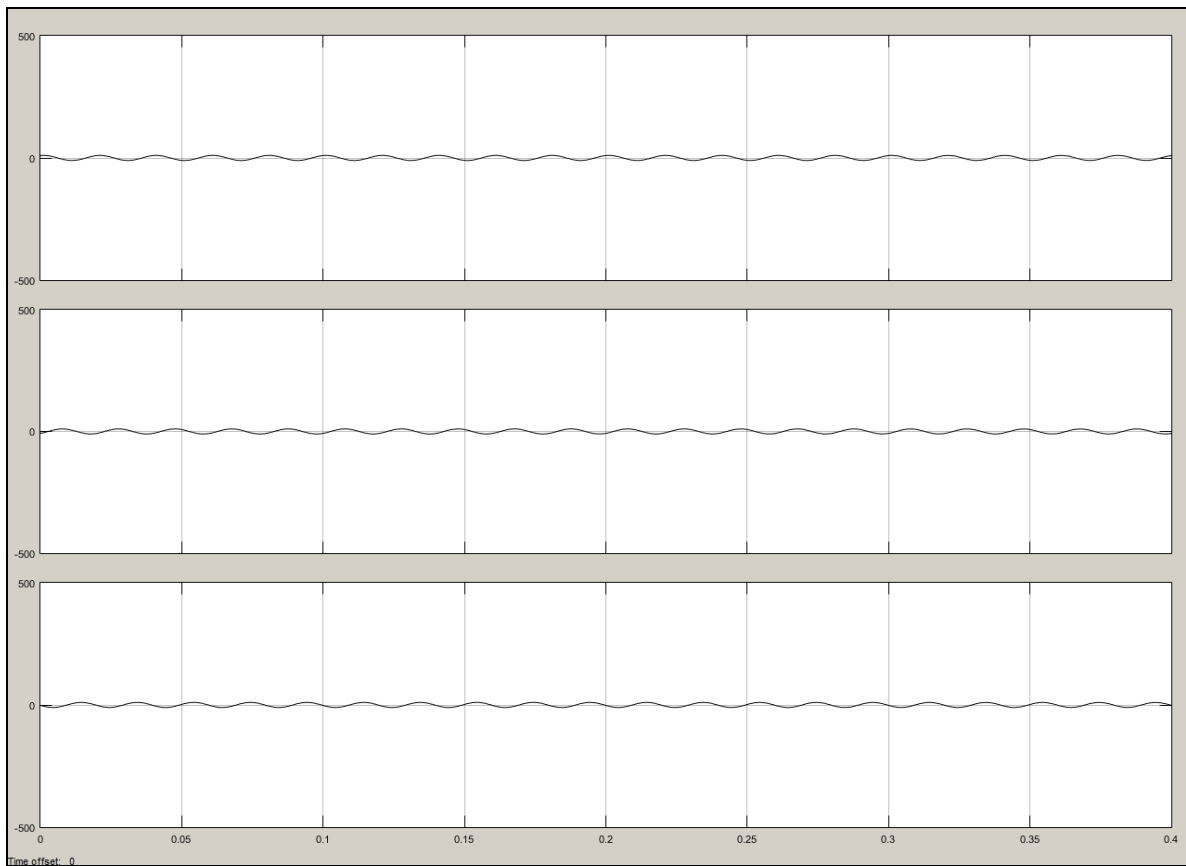
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [1]. Μπεργελές, Γ. (2005). *ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ*. Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ. σελ. 1
- [2]. Μπεργελές, Γ. (2005). *ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ*. Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ. σελ. 92
- [3]. Κεραμιδάς, Α. (2014). *Διπλωματική Εργασία: Ανάλυση και Σχεδίαση Απευθείας Ελέγχου Πραγματικής και Άεργου Ισχύος σε Αιολικό Σύστημα με Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας*. Ανάκτηση από: <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream>
- [4]. Mathwork. (2016). *Three-Phase Programmable Voltage Source*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephaseprogrammablevoltagegesource.html>
- [5]. Mathwork. (2016). *Three-Phase Transformer (Two Windings)*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformertwowingdings.html>
- [6]. Mathwork. (2016). *Three-Phase PI Section Line*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasepissectionline.html>
- [7]. Mathwork. (2016). *Three-Phase PI Section Line*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasepissectionline.html>
- [8]. Παπαοικονόμου, Δ. (2010). *Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης*. Ανάκτηση από http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0130/DT2010-0130.pdf σελ. 65.
- [9]. Mathwork. (2016). *Wind Farm - DFIG Detailed Model*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-dfig-detailed-model.html>

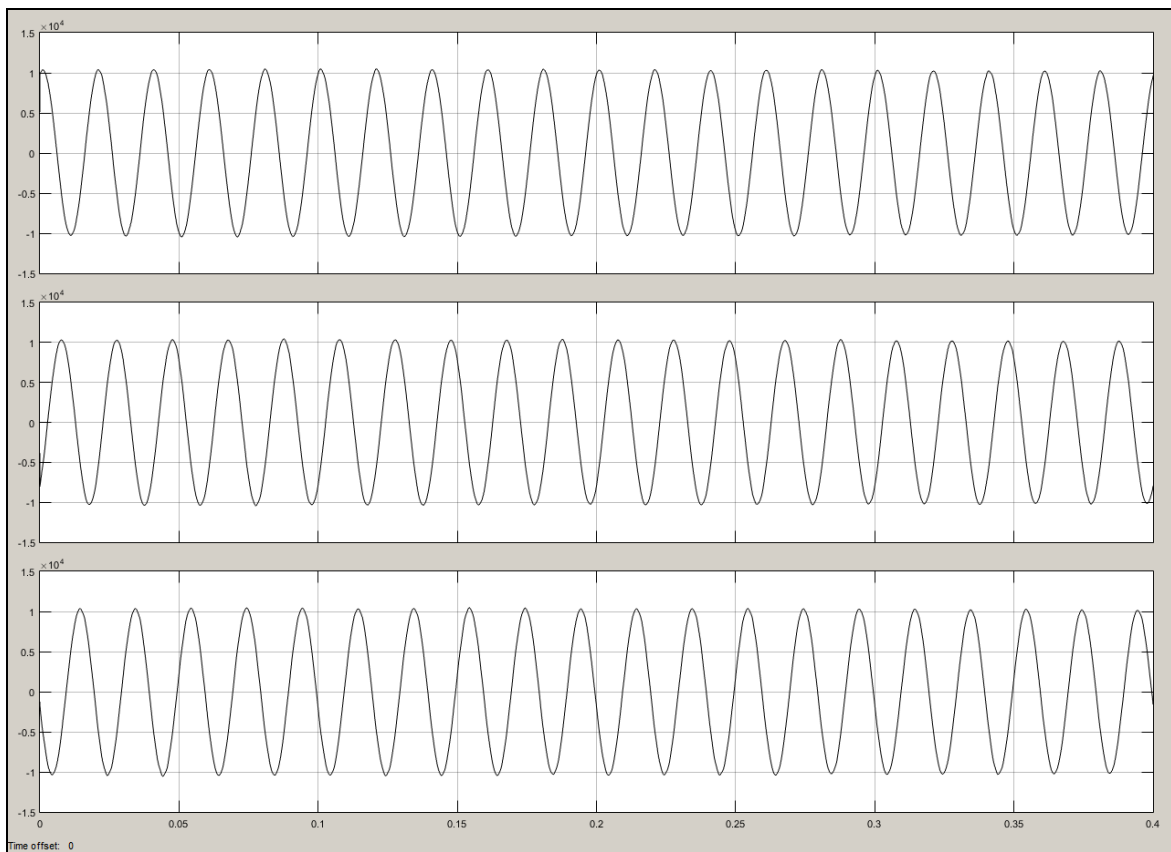
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Μπεργελές, Γ. (2005). *ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ*. Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ.
- [2]. Κεραμιδάς, Α. (2014). *Διπλωματική Εργασία: Ανάλυση και Σχεδίαση Απευθείας Ελέγχου Πραγματικής και Άεργου Ισχύος σε Αιολικό Σύστημα με Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας*. Ανάκτηση από: <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream>
- [3]. Παπαοικονόμου, Δ. (2010). *Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης*. Ανάκτηση από http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0130/DT2010-0130.pdf

- [4]. SALARPOUR, S. (2012). *Διπλωματική Εργασία: Ανάλυση Αιολικών Συστημάτων με Ασύγχρονη Μηχανή Διπλής Τροφοδότησης*. Ανάκτηση από http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/5943/salarpours_converter.pdf?sequence=3
- [5]. Mathwork. (2016). *Manual*. Ανάκτηση από Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/>
- [6]. Παπαθανασίου, Σ. (2014). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Σημειώσεις Παραδόσεων*. Αθήνα.



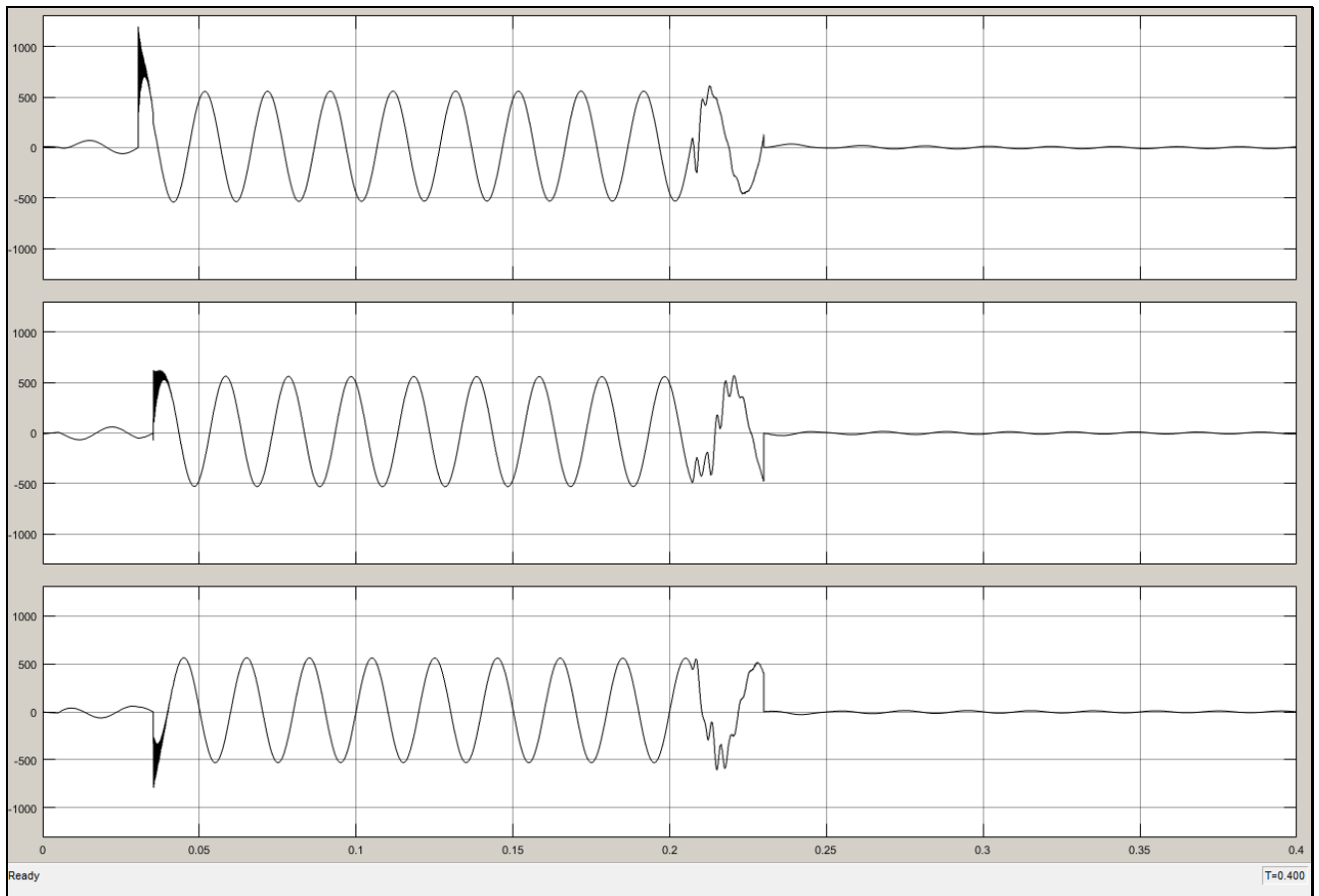
Σχήμα 5.2: Τάση Επαφών (V) σε Συνθήκες Κανονικής Λειτουργίας με το Διακόπτη Κλειστό στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας.



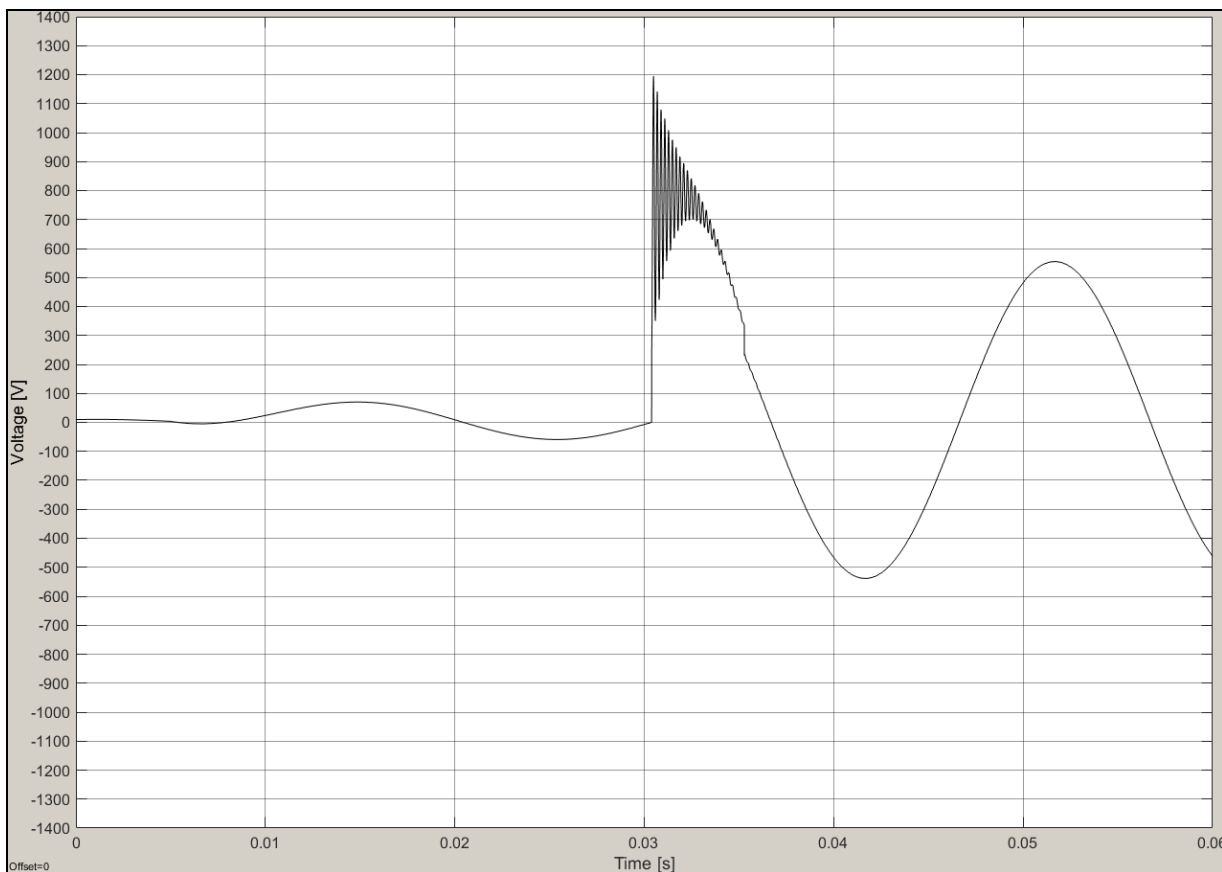
Σχήμα 5.3: Ρεύμα Φάσεων (A) (A,B,C) σε Συνθήκες Κανονικής Λειτουργίας με το Διακόπτη Κλειστό στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας.

5.2. Προσομοίωση κατά την Απόζευξη και την Ζεύξη

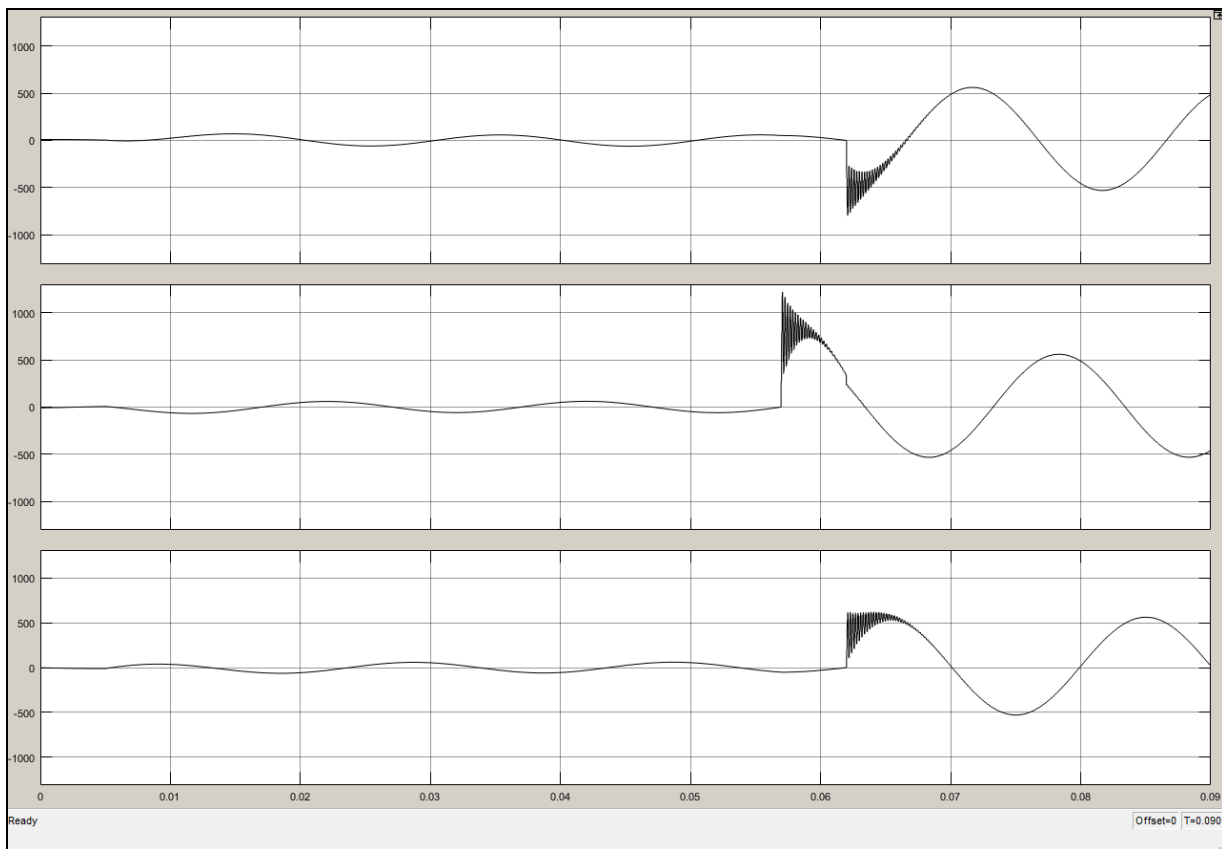
Για τις ανάγκες των αποτελεσμάτων που ακολουθούν θα θεωρήσουμε ένα παροδικό συμμετρικό σφάλμα στην πλευρά της ανεμογεννήτριας το οποίο οδηγεί στην ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου προστασίας (trip), και τελικά στο άνοιγμα του διακόπτη ισχύος. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος ο διακόπτης κλείνει και πάλι. Παρατηρούμε μια απότομη έξαρση της τάσης στα άκρα του διακόπτη (A) (Σχήμα 5.4, Σχήμα 5.5), το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται στα άκρα των υπόλοιπων επαφών για διαφορετικούς χρόνους ανοίγματος του διακόπτη ισχύος (Σχήμα 5.6), επομένως, η προστασία πρέπει να γίνει και για τους τρεις διακόπτες ισχύος.



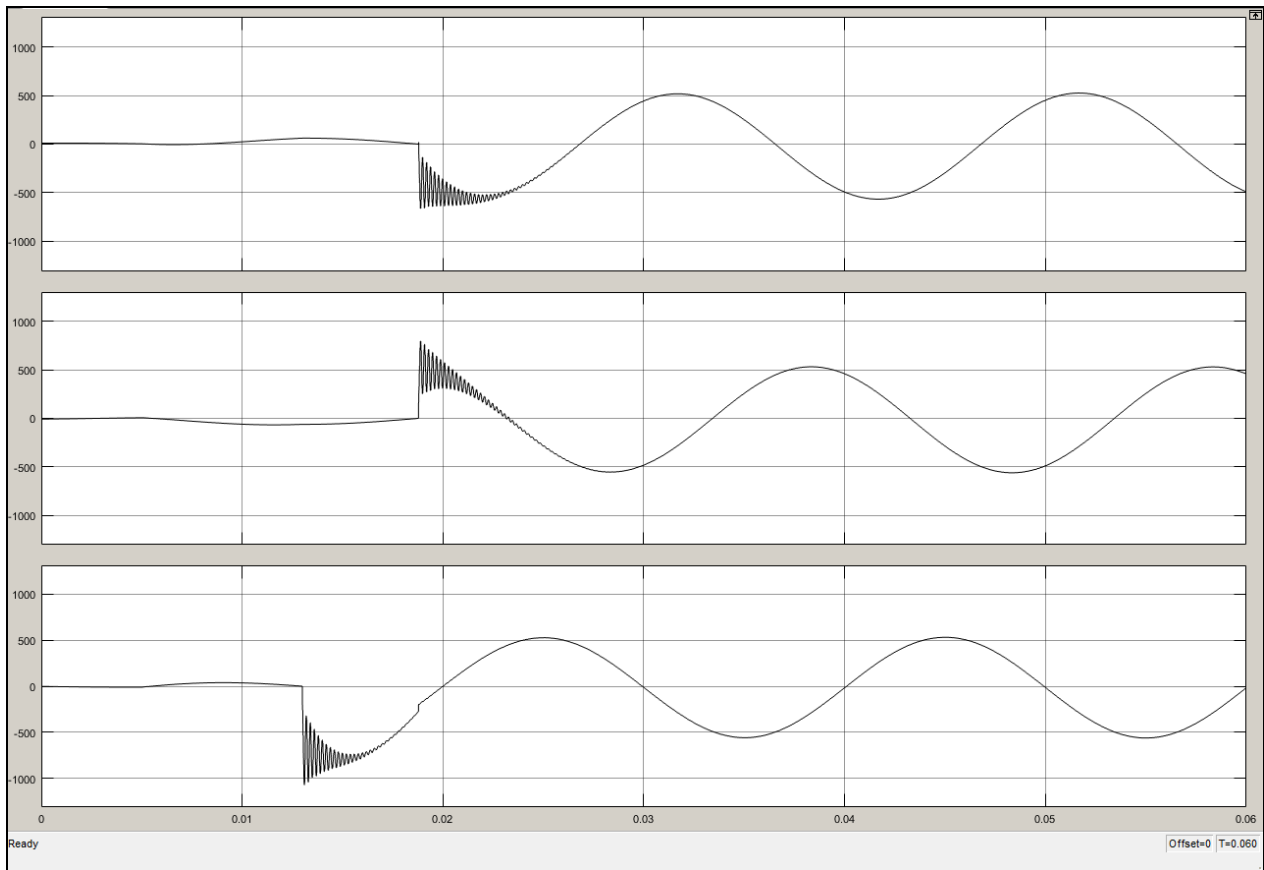
Σχήμα 5.4: Τάση Επαφών Διακόπτη (V) για κάθε Φάση (A,B,C), στην Αρχή της Προσομοίωσης ο Διακόπτης είναι Κλειστός και το Κύκλωμα στη Μόνιμη Κατάσταση, στη Συνέχεια Εμφανίζεται ένα Συμμετρικό Σφάλμα που Οδηγεί στην Απόζευξη, Άνοιγμα του Διακόπτη, ο οποίος Παραμένει Ανοικτός μέχρι την Εκκαθάριση του Σφάλματος και Τελικά το Κλείσιμο του, Ζεύξη.



Σχήμα 5.5: Εμφάνιση Υπέρτασης στις Επαφές (V) του Διακόπτη (A) για το Φαινόμενο που Περιεγράφηκε στο Προηγούμενο Σχήμα.



Σχήμα 5.6: Εμφάνιση Υπέρτασης (V) στις Επαφές του Διακόπτη (B) για Διαφορετικούς Χρόνους Ανοίγματος του Διακόπτη Ισχύος.



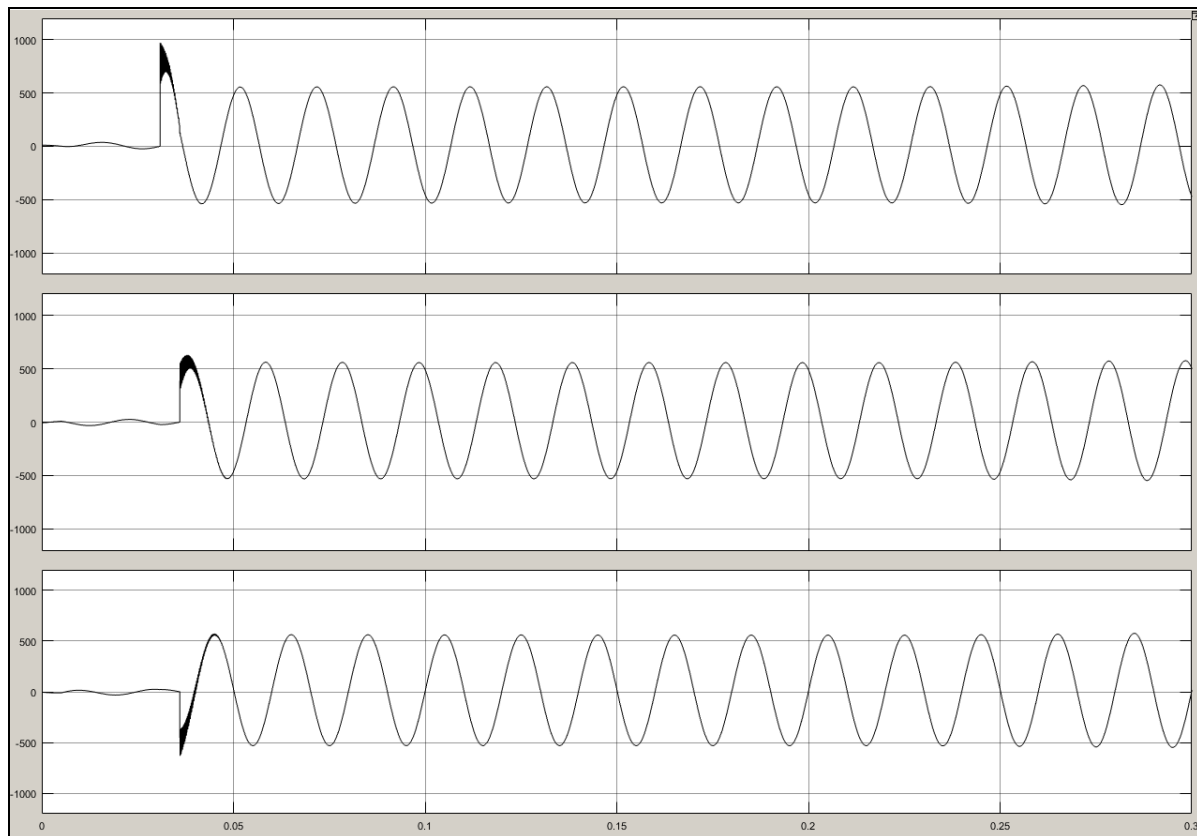
Σχήμα 5.7: Εμφάνιση Υπέρτασης (V) στις Επαφές του Διακόπτη (C) για Διαφορετικούς Χρόνους Ανοίγματος του Διακόπτη Ισχύος.

5.3. Προστασία με Χρήση MOV

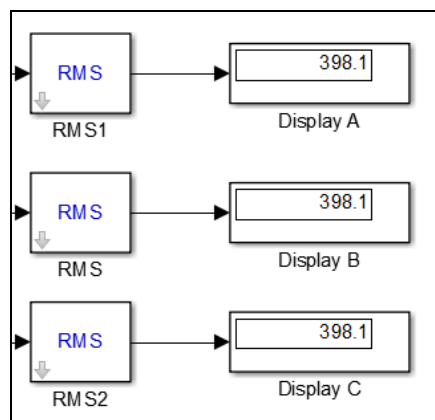
Με βάση τα όσα ελέγχθησαν σε προηγούμενη ενότητα (3.3.1) πρέπει πρώτα να προσδιορίζουμε τη συνεχόμενη τάση (RMS) στην οποία εκτίθεται ο ημιαγωγός καθώς και το κρουστικό ρεύμα που τον διαρρέει κατά τη διάρκεια αγωγής. Η τιμή της υπέρτασης είναι 1200V, 2,5pu από την μέγιστη τάση του διακόπτη όταν παραμένει ανοιχτός (Σχήμα 5.5). Το επιθυμητό επίπεδο προστασίας με την προσθήκη του MOV είναι 1,5pu (περίπου 800V).

5.3.1. Προσδιορισμός Συνεχόμενης Τάσης (RMS)

Η τάση που διαμορφώνεται, όταν ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός, φαίνεται στην εικόνα του σχήματος (Σχήμα 5.8), με την ενεργό τιμή της όπως υπολογίζεται από το υπολογιστικό πρόγραμμα να ανέρχεται στα 400V (Εικόνα 5.1).



Σχήμα 5.8: Διαμορφούμενη Τάση στα Άκρα των Επαφών (V) του Διακόπτη των Φάσεων (A,B,C) για Συνθήκες Μόνιμου Συμμετρικού Σφάλματος, Διακόπτης Ανοιχτός.



Εικόνα 5.1: Ενεργός Τιμή Τάσης Επαφών (V) όπως Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα για Συνθήκες Μόνιμου Σφάλματος.

5.3.2. Επιλογή MOV με Κριτήριο τη Μέγιστη Επιτρεπόμενη Συνεχόμενη Τάση

Λαμβάνοντας υπόψιν μας μια τυπική διακύμανση $\pm 10\%$ θα πρέπει να επιλέξουμε ένα βαρίστορ με $V_{AC} > 440V$. Για τις ανάγκες, θα επιλέξουμε βαρίστορ της εταιρίας littelfuse¹, μεγάλης δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας, και αυξημένης ικανότητας σε επίπεδο μέγιστης συνεχόμενης τάσης. Επιλέγεται το “V481BA60”, μερικά από τα στοιχεία του οποίου παρουσιάζονται σε εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 5.2),(Εικόνα 5.3).

¹ Industrial High Energy Terminal Varistors (BA/BB Series)

BA/BB Series Ratings & Specifications									
Part Number	Maximum Rating (85°C)				Specifications (25°C)				
	Continuous		Transient		Varistor Voltage at 1mA DC Test Current			Maximum Clamping Volt V_c at 200A Current (8/20 μ s)	Typical Capacitance $f = 1$ MHz
	V_{RMS}	V_{DC}	Energy (2ms)	Peak Current 8 x 20 μ s					
	$V_{M(AC)}$ (V)	$V_{M(DC)}$ (V)	W_{TM} (J)	I_{TM} (A)	Min (V)	$V_{N(DC)}$ (V)	Max (V)	V_c (V)	C (pF)
BA Series									
V131BA60	130	175	450	50000	184.5	205	225.5	340	20000
V151BA60	150	200	530	50000	216	240	264	400	16000
V251BA60	250	330	880	50000	351	390	429	620	10000
V271BA60	275	369	950	50000	387	430	473	680	9000
V321BA60	320	420	1100	50000	459	510	561	760	7500
V421BA60	420	560	1500	70000	612	680	748	1060	6000
V481BA60	480	640	1600	70000	675	750	825	1160	5500
V511BA60	510	675	1800	70000	738	820	902	1300	5000
V571BA60	575	730	2100	70000	819	910	1001	1420	4500
V661BA60	660	850	2300	70000	945	1050	1155	1640	4000
V751BA60	750	970	2600	70000	1080	1200	1320	1880	3500
V881BA60	880	1150	3200	70000	1350	1500	1650	2340	2700
BB Series									
V112BB60	1100	1400	3800	70000	1665	1850	2035	2940	2200
V142BB60	1400	1750	5000	70000	2070	2300	2530	3600	1800
V172BB60	1700	2150	6000	70000	2500	2765	3030	4300	1500
V202BB60	2000	2500	7500	70000	2970	3300	3630	5200	1200
V242BB60	2400	3000	8600	70000	3510	3900	4290	6200	1000
V282BB60	2800	3500	10000	70000	4230	4700	5170	7400	800

Εικόνα 5.2: Επιλογή MOV εκ των Διαθέσιμων με Κριτήριο τη Μέγιστη Επιτρεπόμενη Τάση.

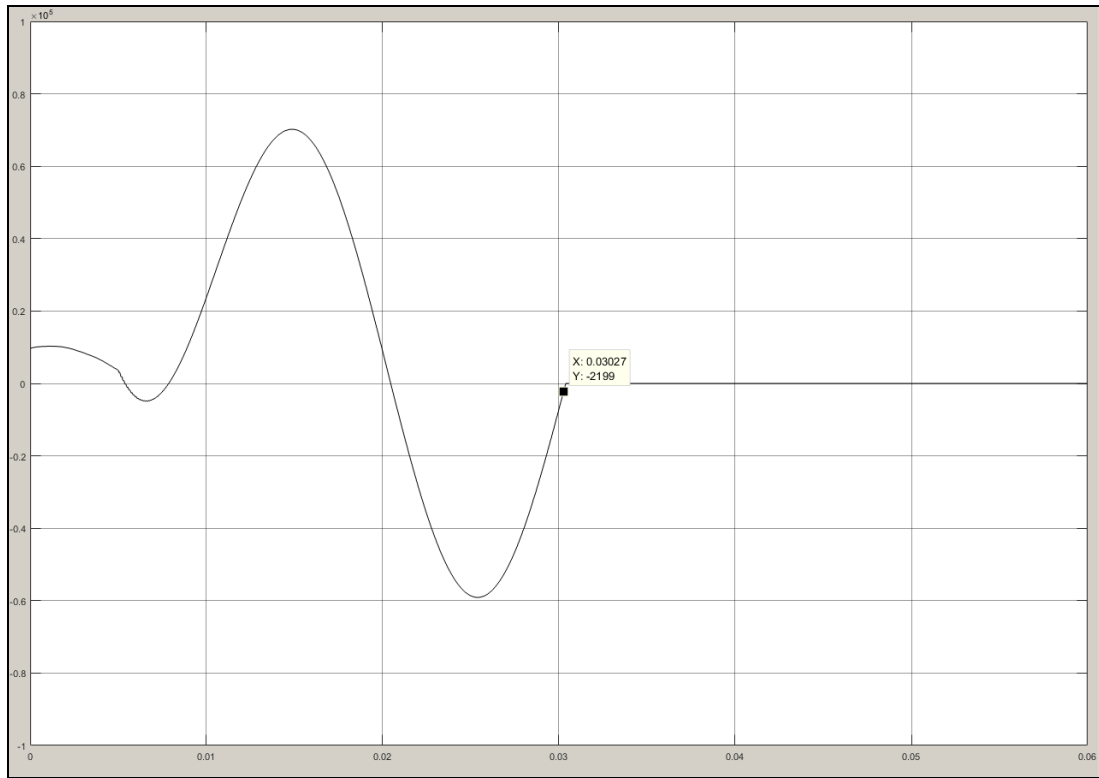
Absolute Maximum Ratings			
* For ratings of individual members of a series, see Device Ratings and Specifications chart			
Continuous	BA Series	BB Series	Units
Steady State Applied Voltage:			
AC Voltage Range (V_{MACRMS})	130 to 880	1100 to 2800	V
DC Voltage Range ($V_{M(DC)}$)	175 to 1150	1400 to 3500	V
Transients:			
Peak Pulse Current (I_{TM})			
For 8/20 μ s Current Wave (See Figure 2)	50,000 to 70,000	70,000	A
Single Pulse Energy Range			
For 2ms Current Squarewave (W_{TM})	450 to 3200	3800 to 10000	J
Operating Ambient Temperature Range (T_a)	-55 to +85	-55 to +85	°C
Storage Temperature Range (T_{STG})	-55 to +125	-55 to +125	°C
Temperature Coefficient (α) of Clamping Voltage (V_c) at Specified Test Current	<0.01	<0.01	%/°C
Hi-Pot Encapsulation (COATING Isolation Voltage Capability) (Dielectric must withstand indicated DC voltage for one minute per MIL-STD-202, Method 301)	5000	5000	V
COATING Insulation Resistance	1000	1000	MΩ

Εικόνα 5.3: Συνοπτικά Χαρακτηριστικά MOV “V481BA60” που Επιλέχθηκε.

5.3.3. Χαρακτηριστικά Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής

Η θεωρητική ανάλυση του ρεύματος που διαρρέει τον ημιαγωγό στη διάρκεια αγωγής, είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ενότητας 3.3.3, αυτό που μπορούμε όμως εύκολα να υπολογίσουμε, είναι το αναμενόμενο εύρος του, καθώς και το αναμενόμενο επίπεδο προστασίας.

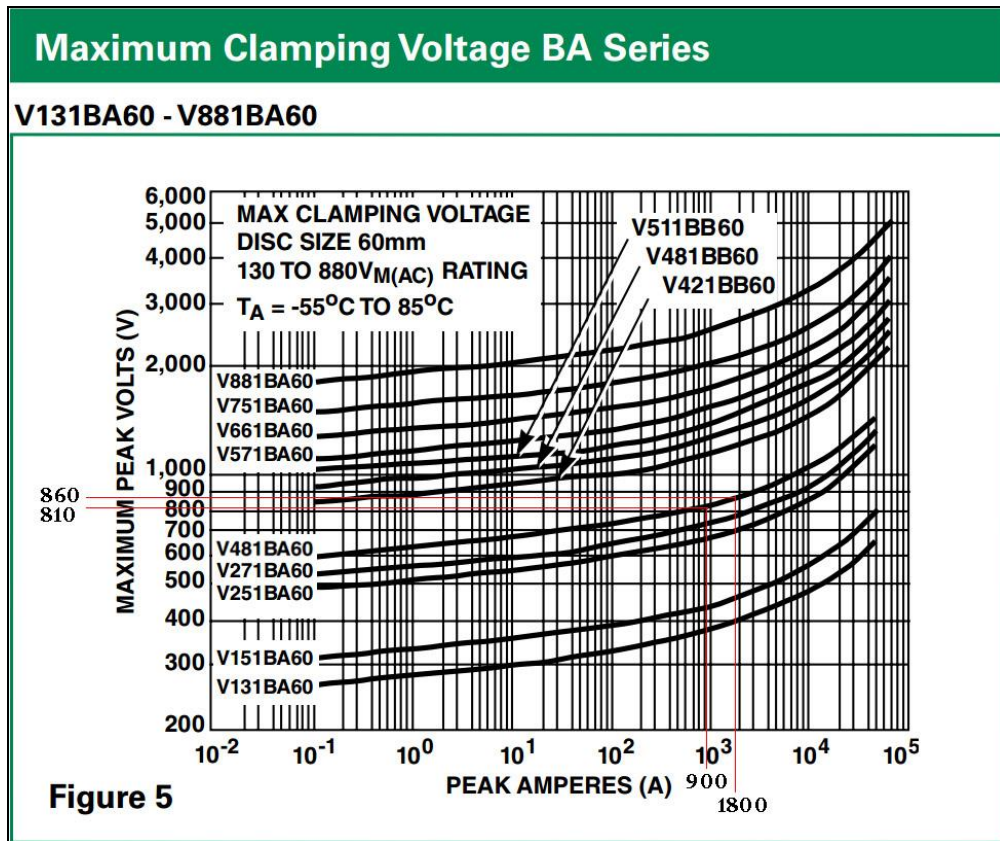
Τη στιγμή κατά την οποία ο διακόπτης ανοίγει, το ρεύμα έχει την τιμή των -2 KA (Σχήμα 5.9). Λαμβάνοντας υπόψιν την εσωτερική αντίσταση του βαρίστορ, αναμένεται ένα κρουστικό ρεύμα με εύρος μικρότερο των 2 KA.



Σχήμα 5.9: Τιμή Ρεύματος (A) τη Στιγμή της Απόξευξης.

5.3.4. Επίπεδο Προστασίας

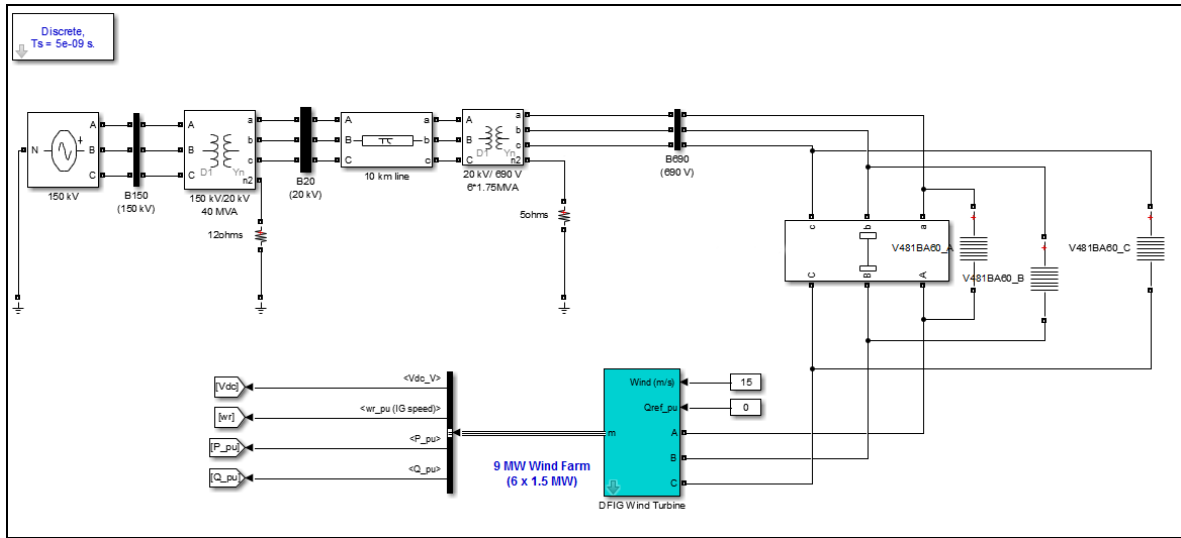
Η χαρακτηριστική του MOV δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, για εύρος κρουστικό ρεύματος 2KA αναμένεται μια πτώση τάσης, επίπεδο προστασίας, κοντά στα 850V.



Σχήμα 5.10: Χαρακτηριστική I-V MOV “V481BA60” που Επιλέχθηκε για την Προστασία.

5.4. Προσομοίωση με Χρήση MOV

Με την παράλληλη συνδεσμολογία των βαρίστορ το κύκλωμα παίρνει τη μορφή του σχήματος¹:



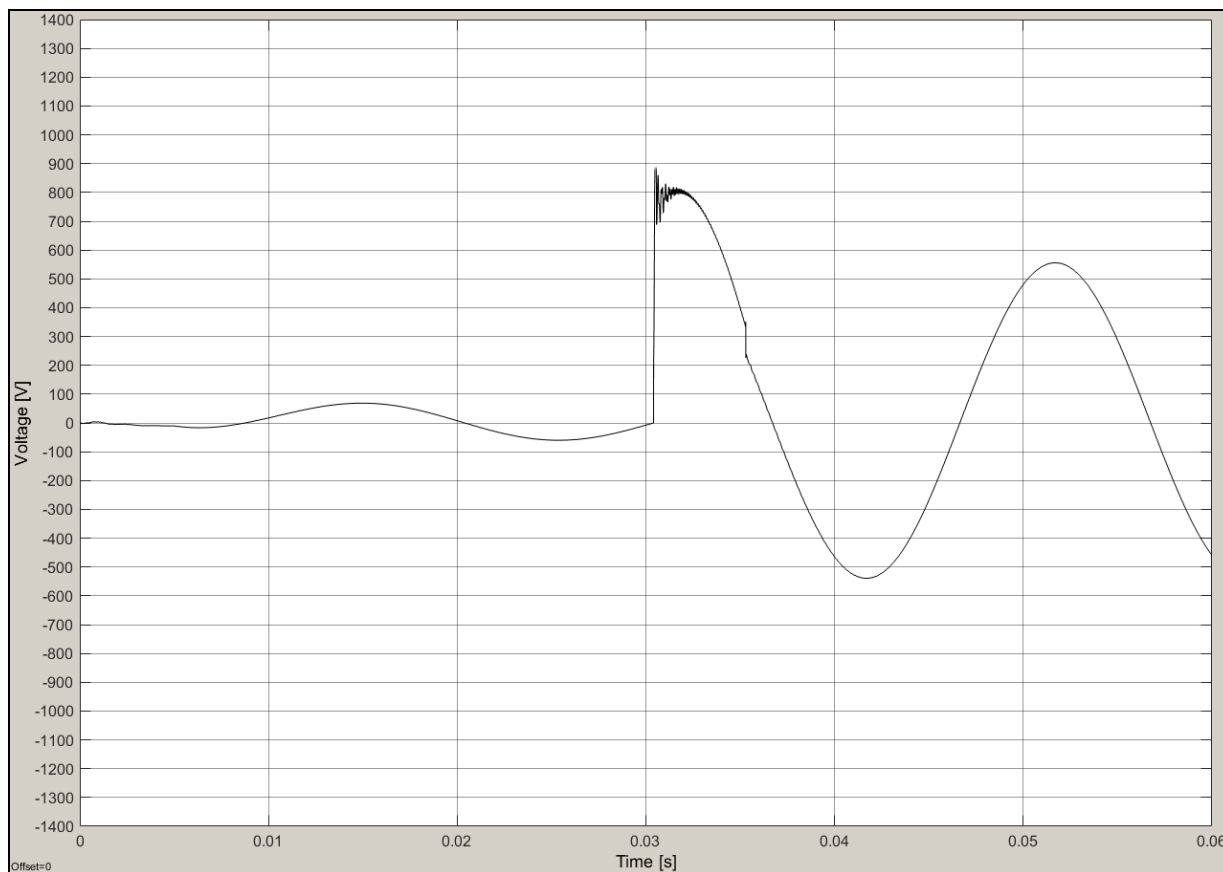
Σχήμα 5.11: Σχηματική Αναπαράσταση Κυκλώματος Προσομοίωσης στο Simulink με Χρήση MOV για την Προστασία.

¹ Η επίλυση του παραπάνω κυκλώματος στο υπολογιστικό πρόγραμμα του simulink σε διακριτό χρόνο είναι αρκετά δύσκολη. Προτείνονται οι παρακάτω ρυθμίσεις:

- Επιλογή επιλύτη (Integration Method) με μεταβλητό βήμα ολοκλήρωσης (variable time step), με ανέχεια σφάλματος μικρότερη από 10^{-4} [1].
- Επίλυση σε συνεχή χρόνο είναι σχεδόν αδύνατη (λόγο της ανεμογεννήτριας), παρόλο που η χρήση του διακριτού χρόνου δεν ενδείκνυται για επίλυση κυκλωμάτων που περιέχουν «algebraic loop», όπως είναι το στοιχείο MOV, η μείωση του χρόνου δειγματοληψίας συνήθως επιλύει το πρόβλημα [1],[2].
- Σε κάθε περίπτωση δεν συνιστάται η επιλογή «break algebraic loop» στις επιλογές του MOV καθώς θα οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα, παρά μόνο η χρήση σκόπιμης καθυστέρησης (delay) στην επαναληπτική διαδικασία επίλυσης [1],[3],[4].

5.4.1. Διαμόρφωση Τάσης με την Προσθήκη του MOV

Η τάση μετά την προσθήκη του βαρίστορ διαμορφώνεται στα 900V. Διακρίνουμε επίσης μια μικρή ταλάντωση η οποία όμως δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Για να μπορέσουμε να δούμε αν η τιμή αυτή που διαμορφώνεται είναι σωστή πρέπει να δούμε τη μορφή της κυματομορφής του κρουστικού ρεύματος διαρροής του MOV και συγκεκριμένα την τιμή του εύρους του.



Σχήμα 5.12: Διαμόρφωση Τάσης στα Άκρα των Επαφών του Διακόπτη (A) μετά την Προσθήκη του MOV.

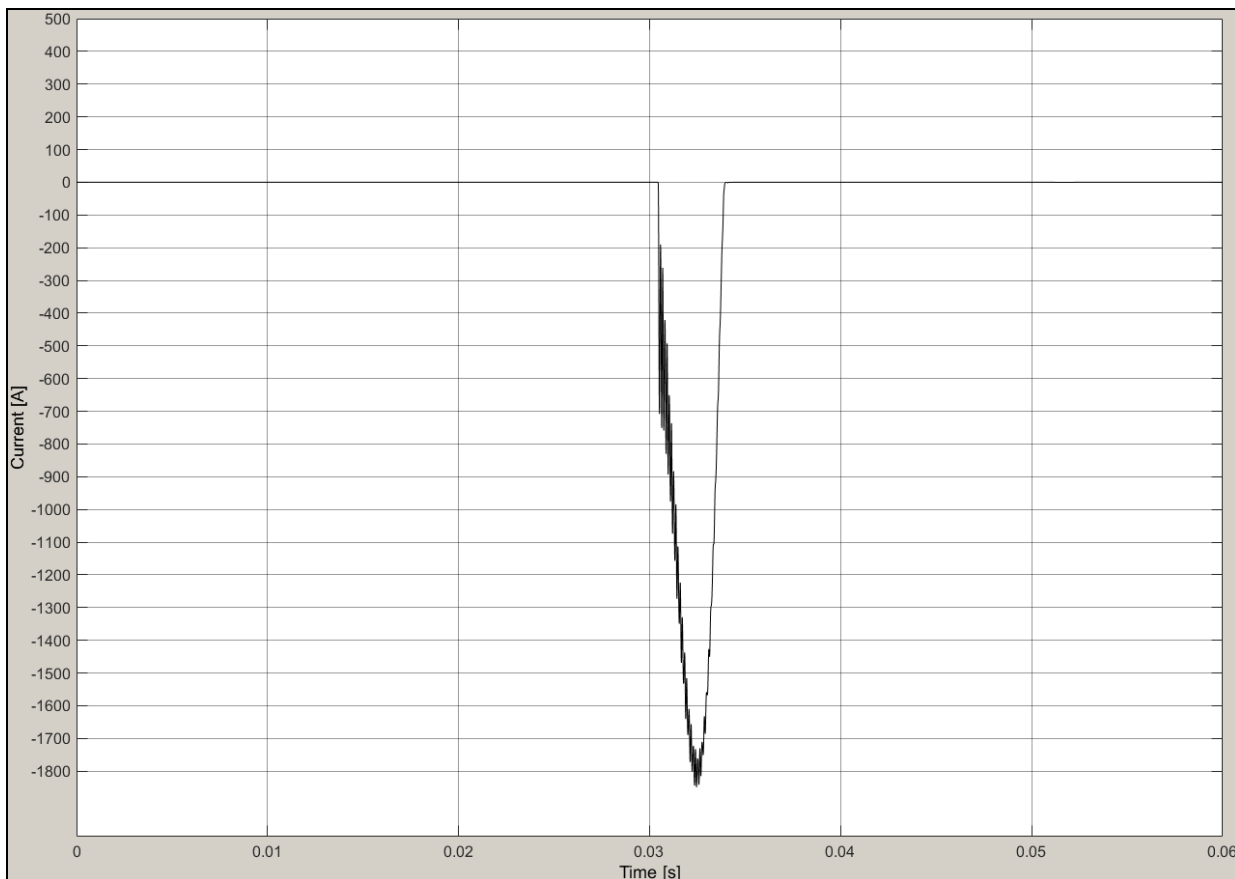
5.4.2. Κρουστικό Ρεύμα Διαρροής

Όπως αναμενόταν, το εύρος είναι κοντά στα 2kA (1850A) (Σχήμα 5.13). Από την ανάλυση της κυματομορφής προκύπτει ένας χρόνος ημίσειος εύρους 3000μs (Σχήμα 5.14).

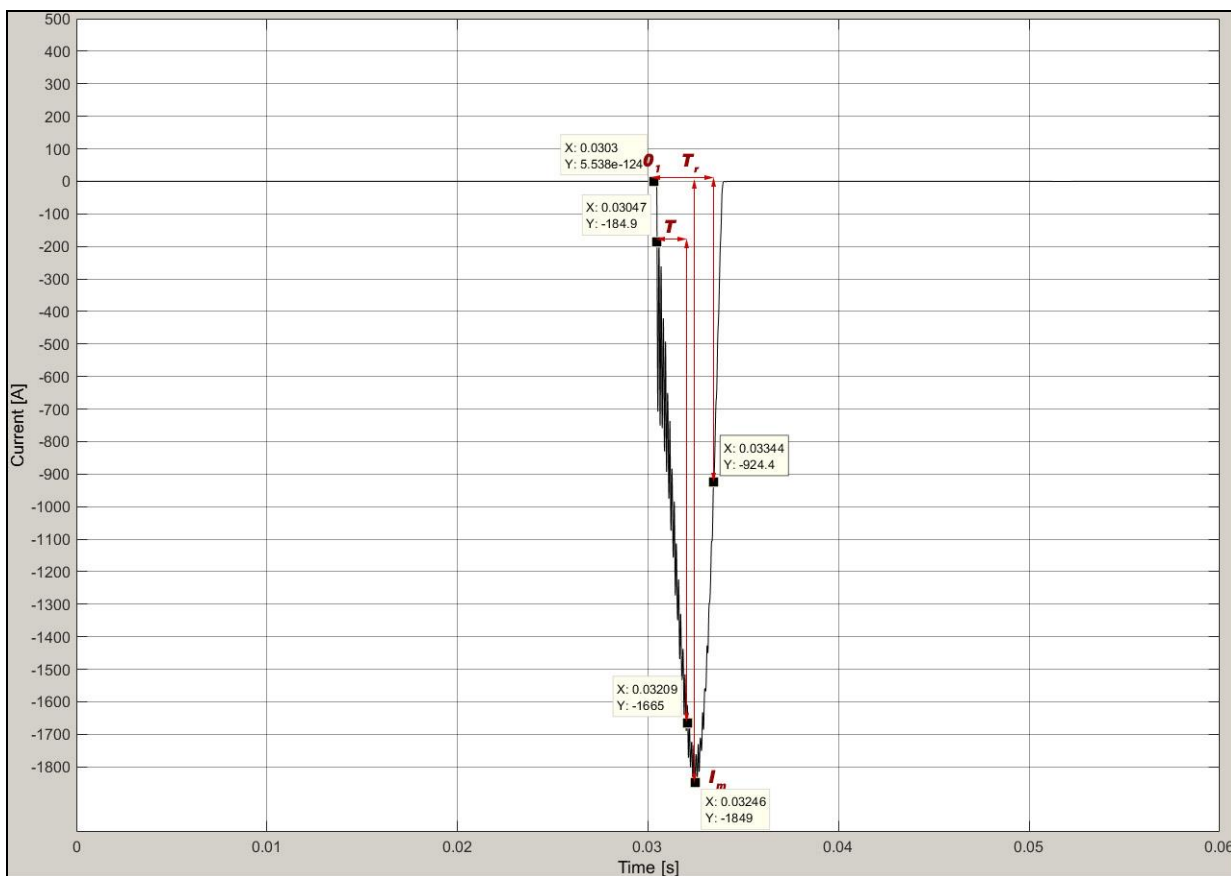
Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του είναι:

- $I_m = 1850 \text{ A}$
- $T_r = 3000 \mu\text{s}$

Για τα δεδομένα αυτά, από την ανάλυση της V-I χαρακτηριστικής, αναμένεται μια πτώση τάσης 860V (Σχήμα 5.10), επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.13: Κρουστικό Ρεύμα Διαρροής MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας.



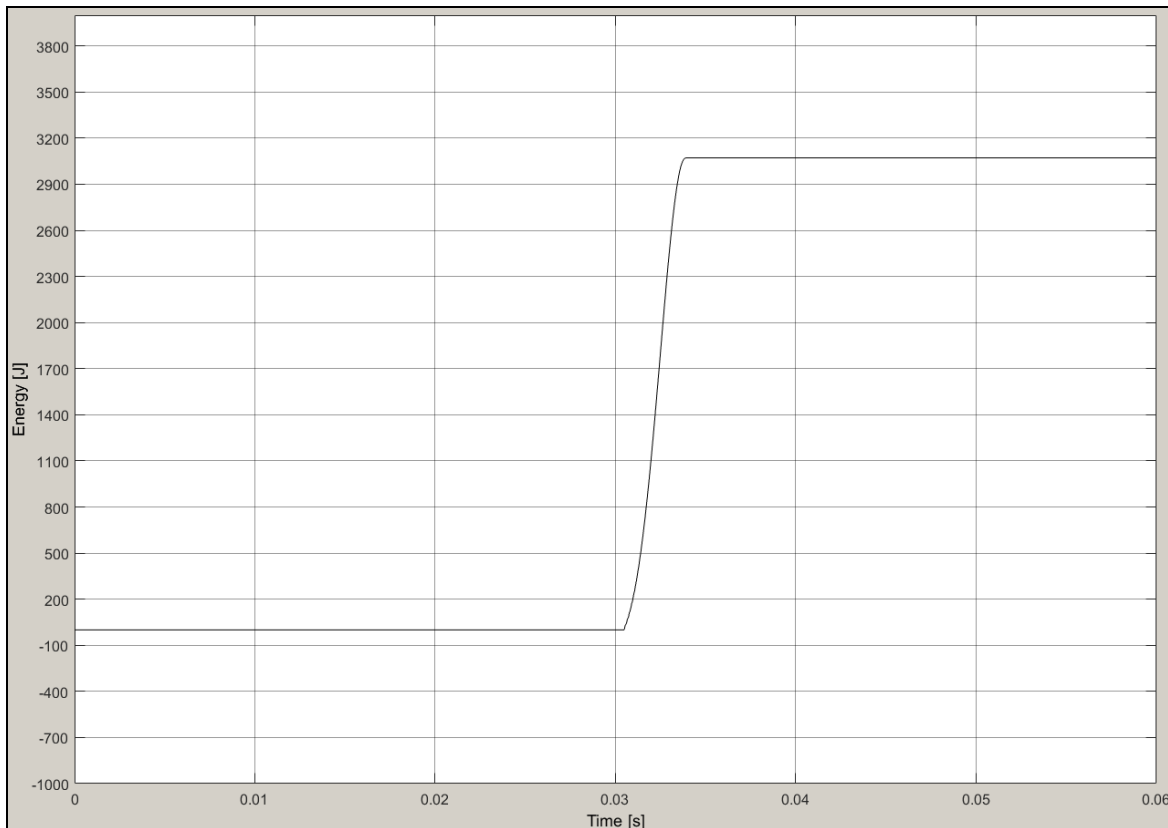
Σχήμα 5.14: Λεπτομερής Ανάλυση Κρουστικού Ρεύματος Διαρροής MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας, εκ της οποίας Προκύπτει $I_m = 1850$ A και $T_t = 3000\mu s$.

5.4.3. Υπολογισμός Μέγιστης Ικανότητας Απορροφούμενης Ενέργειας

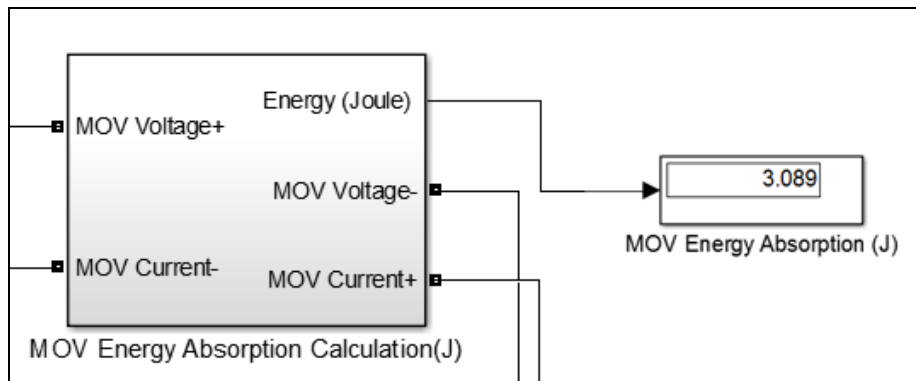
Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (Εξίσωση 1.2) που περιεγράφηκε στην ενότητα 1.5.6 η μέγιστη ικανότητα του ημιαγωγού είναι:

$$E = V_{peak} \cdot I_{peak} \cdot t_2 \cdot K = 900 \cdot 1950 \cdot 1300 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 = 3500J$$

Για να μπορέσουμε να αποφανθούμε αν επαρκεί για την συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να εξετάσουμε την απορροφούμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια αγωγής η οποία εύκολα μετράτε από το υπολογιστικό πρόγραμμα στα 3100J (Σχήμα 5.15,Εικόνα 5.4). Οπότε η μέθοδος προστασίας που επιλέχθηκε είναι επαρκής.



Σχήμα 5.15: Απορροφούμενη Ενέργεια MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας (3100J).



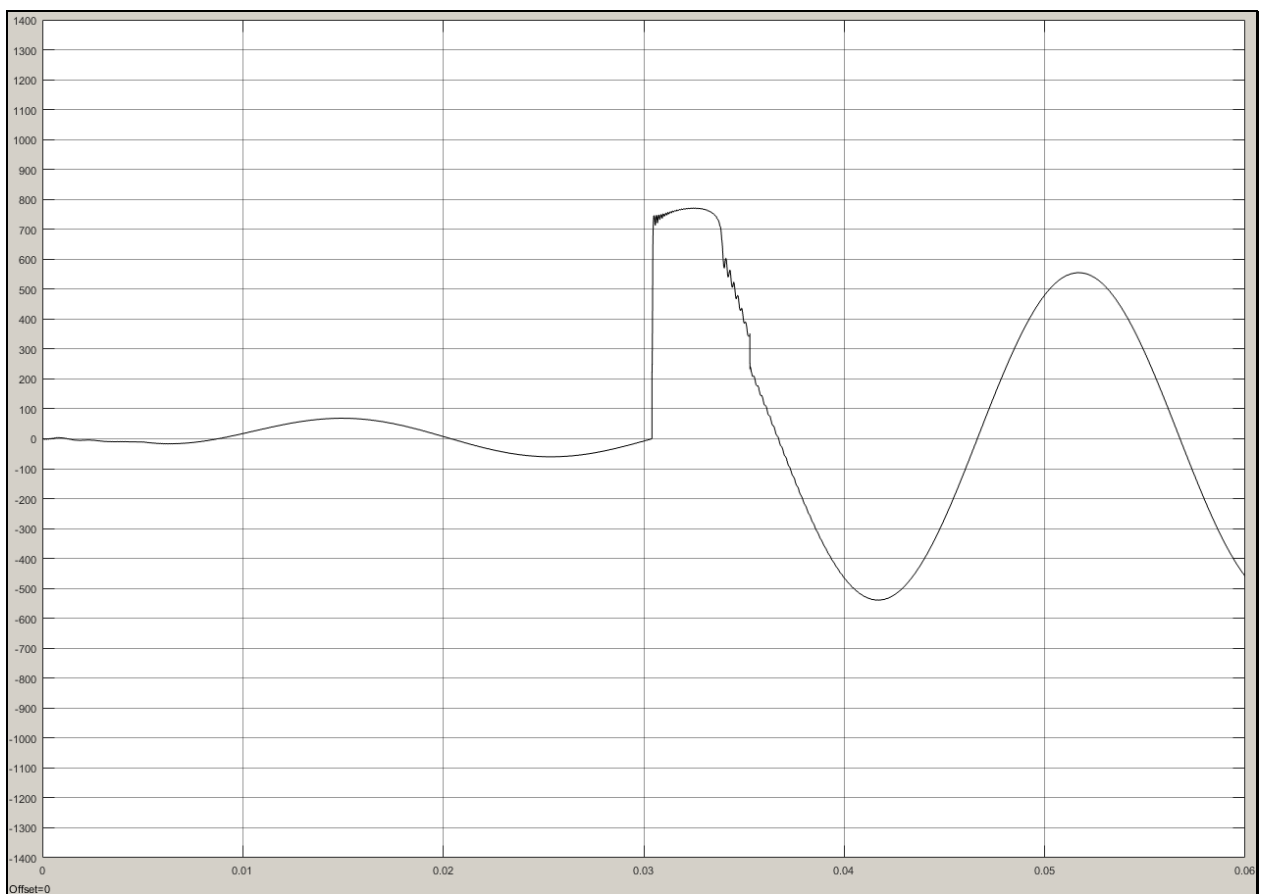
Εικόνα 5.4: Απορροφούμενη Ενέργεια του MOV κατά τη Διάρκεια της Προστασίας, όπως αυτή Υπολογίζεται από το Υπολογιστικό Πρόγραμμα.

5.4.4. Χρήση Παράλληλων MOV – Διάρκεια Ζωής

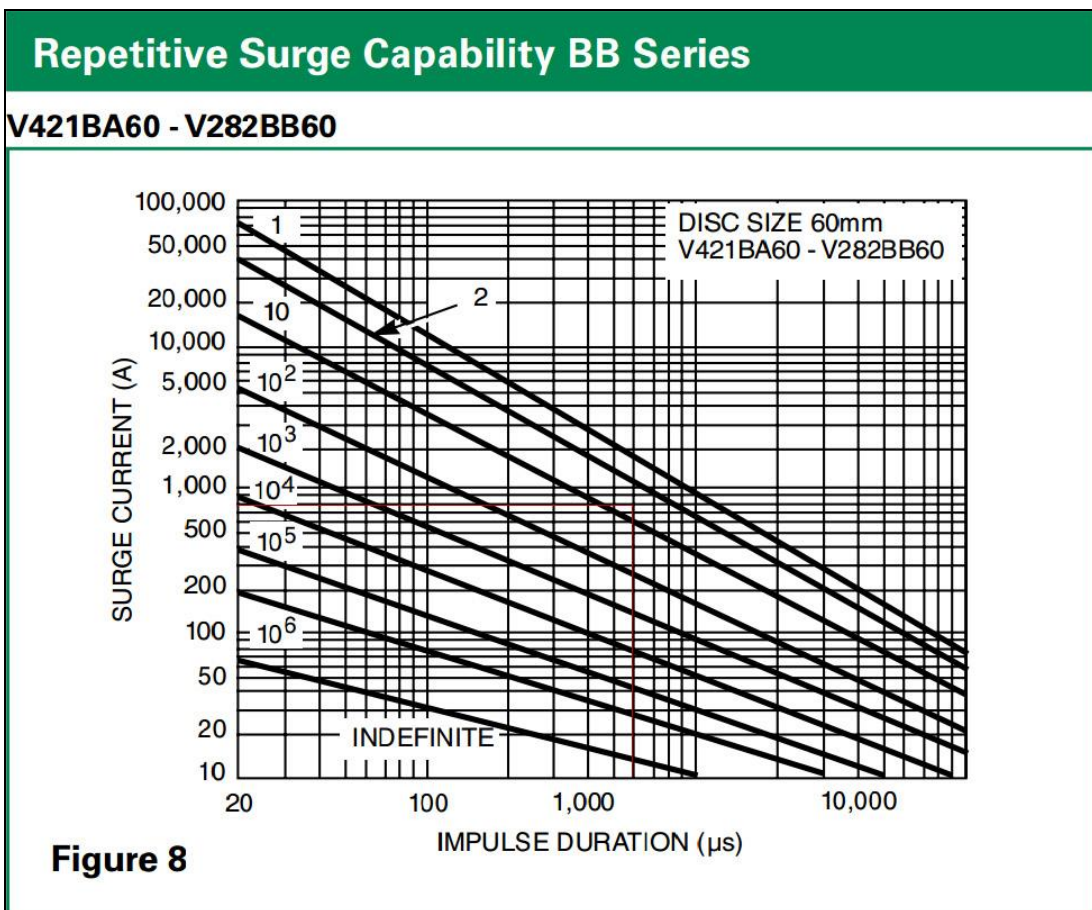
Με χρήση παράλληλων MOV (ίδιων χαρακτηριστικών) μπορούμε να βελτιώσουμε το επίπεδο της προστασίας καθώς και τη διάρκεια ζωής τους (1.10.2). Ωστόσο, στην συνδεσμολογία αυτή κρίνεται απαραίτητη η χρήση μιας ασφάλειας για τους λόγους που παρουσιάστηκαν εκτενώς στην παράγραφο 1.11.

Υποθέτοντας ότι το ρεύμα ίσομοιράζεται στα παράλληλα MOV μπορούμε να μειώσουμε το εύρος του κρουστικού παλμού, και επομένως να βελτιώσουμε το επίπεδο προστασίας αλλά και τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε ενδεικτικά το επίπεδο προστασίας που επιτυγχάνεται με χρήση 2 παράλληλων MOV ίδιου τύπου (Σχήμα 5.16) καθώς και τη διάρκεια ζωής της προστασίας (Σχήμα 5.17), παρατηρούμε ότι η διάρκεια ζωής της προστασίας βελτιώθηκε από 10 περίπου επαναλήψεις στις 100.



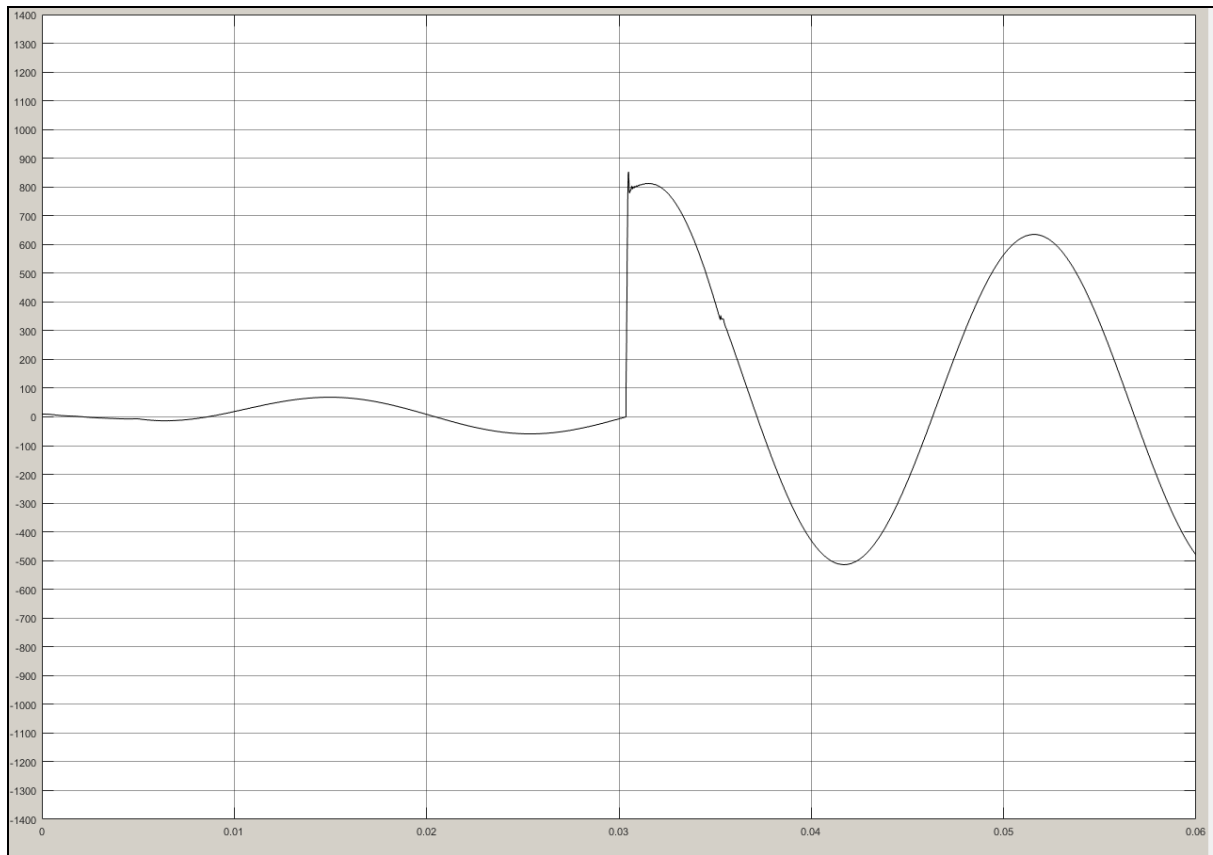
Σχήμα 5.16: Διαμόρφωση Τάσης (V) στα Άκρα των Επαφών (A) μετά την Προσθήκη Δύο Παράλληλων MOV Ίδιου Τύπου.



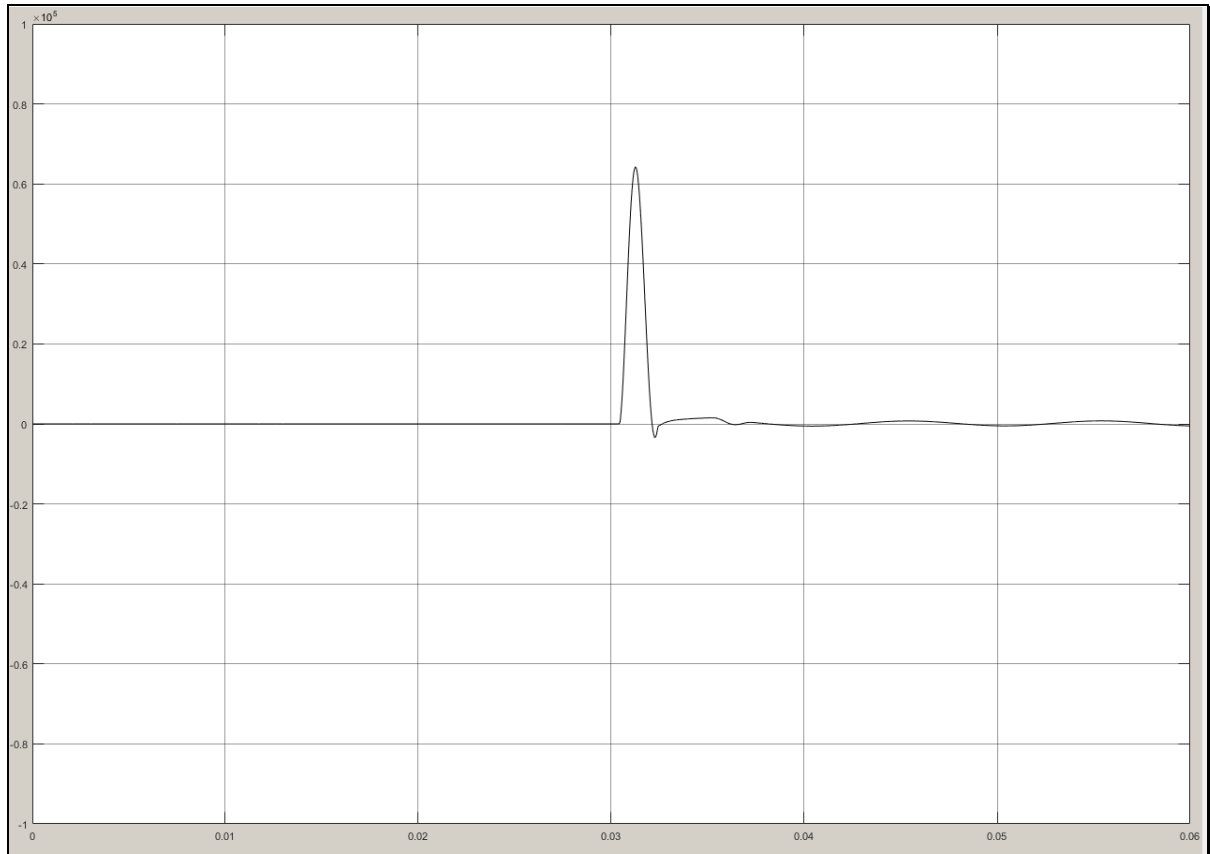
Σχήμα 5.17: Διάγραμμα Ευρέσεως Χρόνου Ζωής MOV που Επιλέχθηκε από την Οποία Προκύπτει μια Διάρκεια Ζωής 10 Επαναλήψεων για την Συγκεκριμένη Εφαρμογή ή 100 για Χρήση δύο Παράλληλων MOV ίδιου Τύπου.

5.5. Προσομοίωση με Χρήση Snubber

Με χρήση των εξισώσεων της παραγράφου 3.4.1 προκύπτει μια αντίσταση 10Ω και ένας πυκνωτής $500\mu\text{F}$, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μετά την προσθήκη του snubber είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 5.18: Διαμόρφωση Τάσης (V) στα Άκρα των Επαφών του Διακόπτη (A) μετά την Προσθήκη του Snubber για Αντιστάτη $R=10\Omega$.



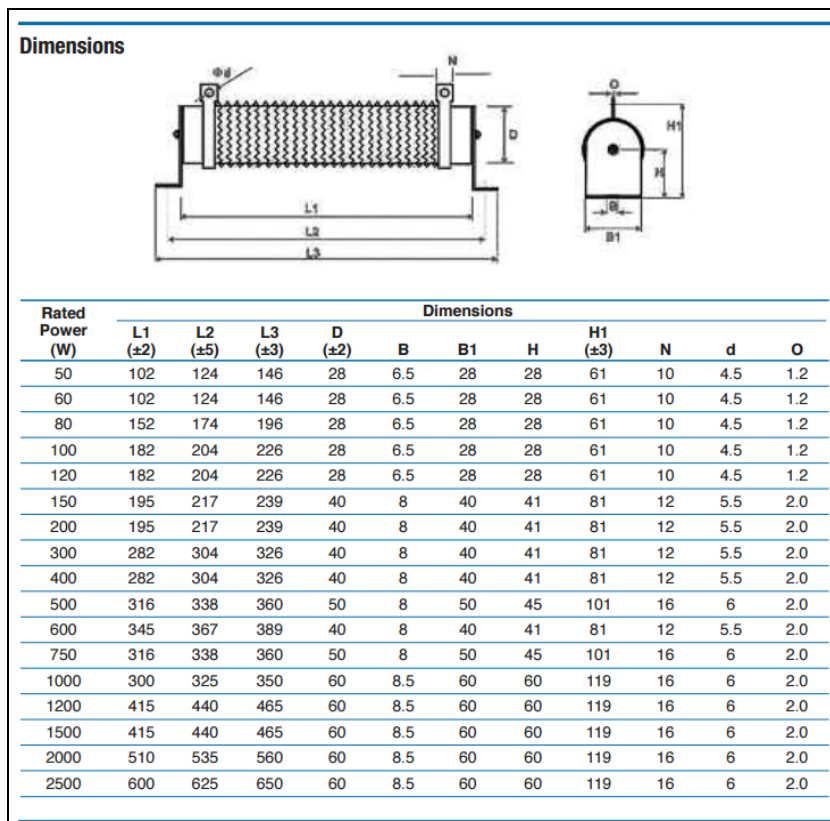
Σχήμα 5.19: Η Ισχύς (W) που Καταναλίσκεται στον Αντιστάτη των 10Ω Ανέρχεται στα 65KW.

5.6. Σύγκριση Μεθόδων

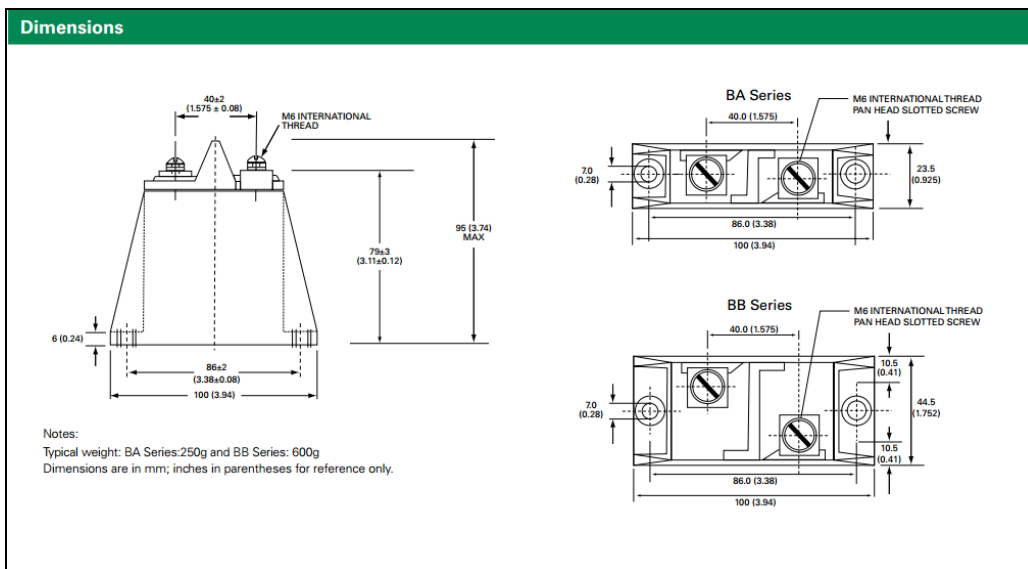
Κοιτώντας τις προσομοιώσεις, φαίνεται ότι και οι δύο μέθοδοι επιτυγχάνουν το ίδιο αποτέλεσμα και μάλιστα το snubber έχει το σημαντικό προτέρημα της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής (σε σύγκριση με το MOV). Ωστόσο η αντίληψη αυτή δεν είναι σωστή.

Όπως αναφέρθηκε, η αντίσταση καλείται να καταναλώσει την ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή και μάλιστα σε πολύ μικρό χρόνο, προκύπτει λοιπόν μια πολύ μεγάλη ποσότητα ισχύος (Σχήμα 5.19), η οποία έχει άμεση συνέπεια την αύξηση του μεγέθους της. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή προκύπτει μια καταλισκόμενη ισχύς 65KW. Στην εικόνα που ακολουθεί (Σχήμα 5.20) φαίνεται το μέγεθος των αντιστάσεων (σε χιλιοστά) σε συνάρτηση με την ισχύ από την οποία προκύπτει ότι η προσπάθεια διαστασιολόγησης του snubber είναι πρακτικά αδύνατη [5] εν αντιθέσει με αυτή του MOV (Σχήμα 5.21). Ενδεικτικά βλέπουμε ότι για αντιστάτη 10Ω και καταναλισκόμενη ισχύ 2,5KW προκύπτει ένα μήκος αντίστασης 600mm, διάμετρο 6mm και πάχος 120mm.

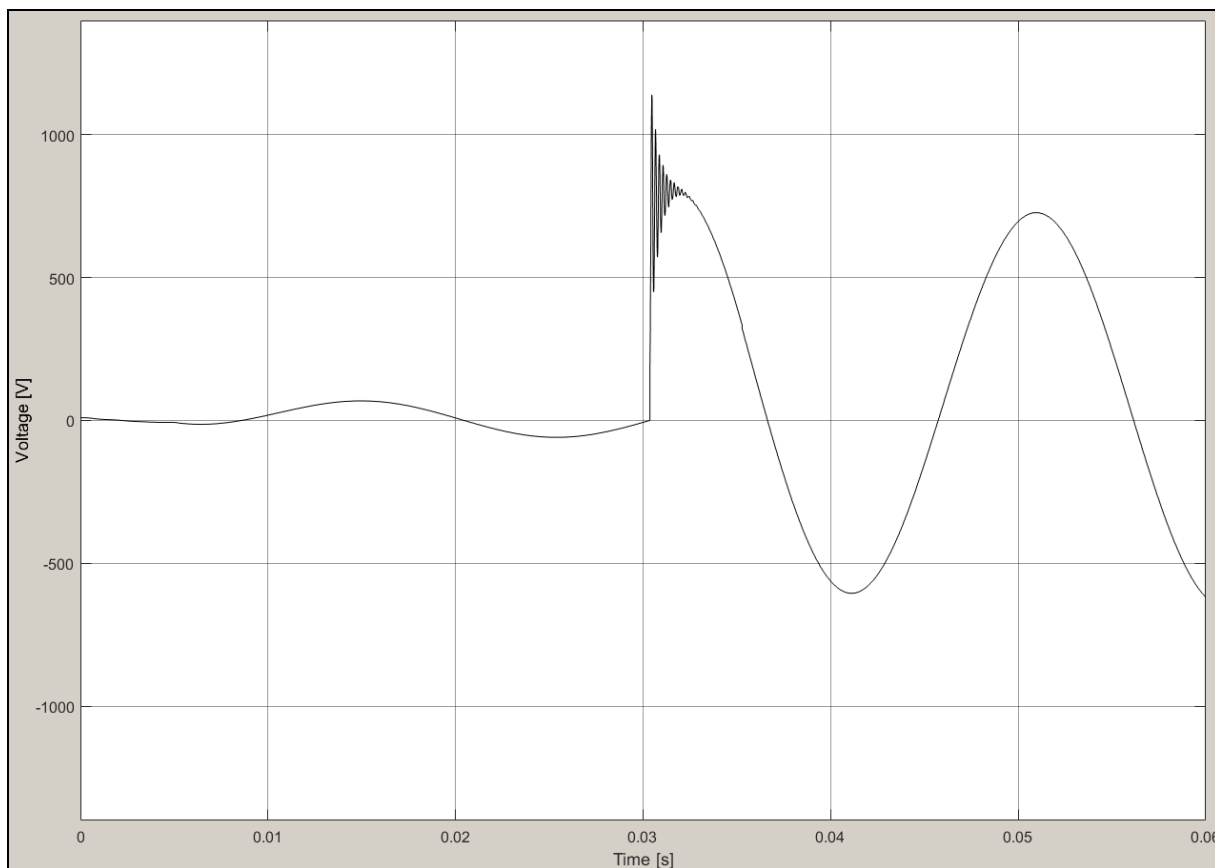
Για την λύση του προβλήματος αυτού, μπορούμε να αυξήσουμε το μέγεθος του αντιστάτη, αυξάνοντας το χρόνο της εκφόρτισης του πυκνωτή με άμεση συνέπεια την μείωση της ισχύος του. Η αύξηση όμως της τιμής της αντιστάσεως δεν θα προσφέρει την επιθυμητή προστασία. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δεκαπλασιασμό του αντιστάτη (100Ω) στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 5.22, Σχήμα 5.20).



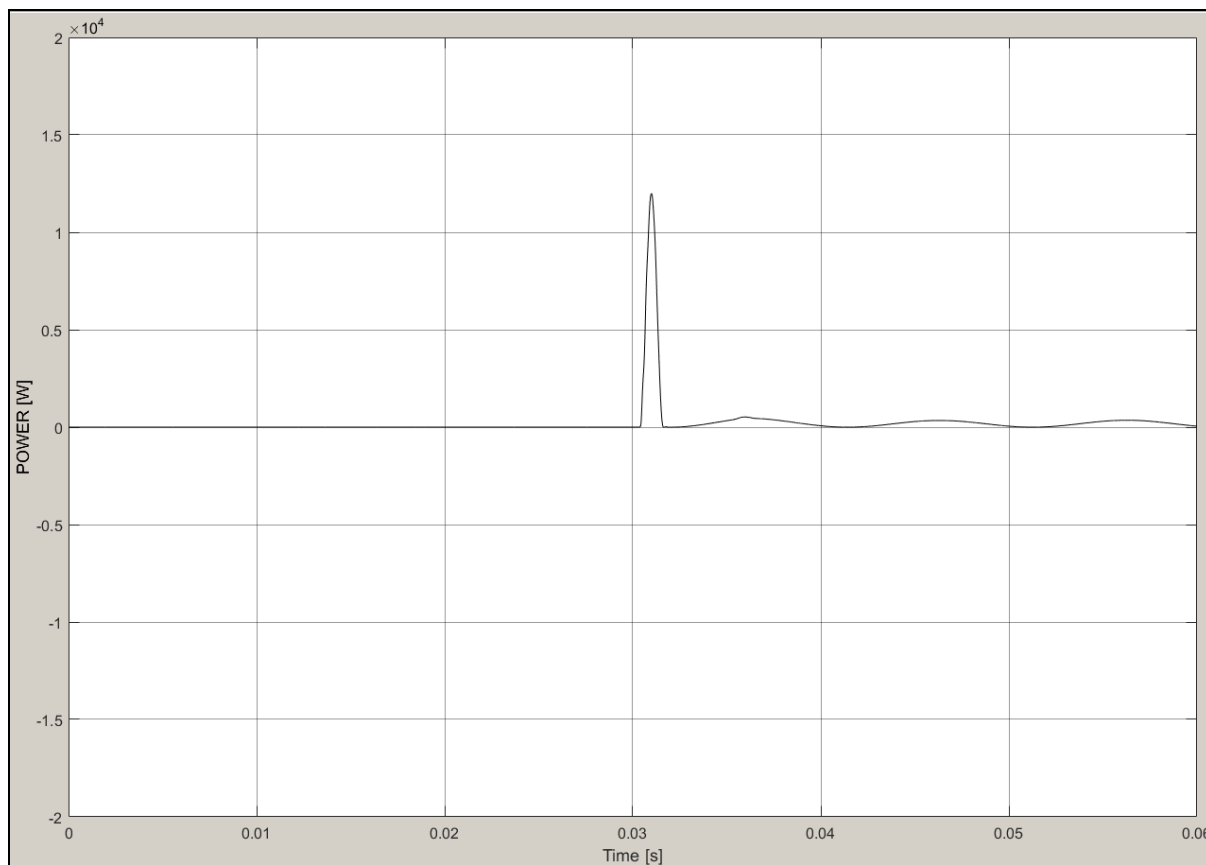
Σχήμα 5.20: Μέγεθος Αντιστάτης σε Συνάρτηση με την Καταναλισκόμενη Ισχύ της.



Σχήμα 5.21: Μέγεθος MOV που Επιλέχθηκε για την Συγκεκριμένη Εφαρμογή.



Σχήμα 5.22: Τάση στα Άκρα των Επαφών του Διακόπτη (A), με Χρήση Προστασίας Snubber με Μέγεθος Αντιστάτη 100Ω, εκ του Οποίου Προκύπτει ότι η Αύξηση της Τιμής του Αντιστάτη δεν Προσδίδει το Αναμενόμενο Επίπεδο Προστασίας.



Σχήμα 5.23: Ισχύς που Καταναλίσκεται στον Αντιστάτη των 100Ω είναι 12KW , Ωστόσο το Μέγεθος αυτό δεν Παρέχει καμία Ουσιαστική Προστασία στο Διακόπτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΑΝΑΦΟΡΕΣ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [1]. Mathwork. (2016). *Surge Arrester*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/surgearrester.html>
- [2]. Mathwork. (2016). *Simulation Phases in Dynamic Systems*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/simulink/ug/simulating-dynamic-systems.html>
- [3]. Mathwork. (2016). *Algebraic Loops*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/simulink/ug/algebraic-loops.html>
- [4]. Mathwork. (2016). *Delay*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/delay.html?searchHighlight=delay>
- [5]. CONNECTIVITY, T. (2015). *High Power Wire Wound Resistor*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της TE Connectivity: <http://www.tteurope.com/docs/IO/32219/TE-0611.pdf>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. ElectronicsBeliever. (2016). *Varistor Design Considerations and Selection*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web: <http://www.electronicbeliever.com/>
- [2]. Littelfuse. (2015). *MOV Technical Notes*. Ανάκτηση από Τοποθεσία Web της Littelfuse: <http://www.littelfuse.com/>
- [3]. Γερμανάκης, Σ. (2015). *Διπλωματική Εργασία: Λειτουργία Μετατροπέα Ισχύος Τύπου M2C και Προστασία των Ημιαγωγικών Διακοπών του με Χρήση Βαρίστορ Μεταλικών Οξειδίων*. Ανάκτηση από <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/7709/1/DT2016-0062.pdf>
- [4]. Mathwork. (2016). *Algebraic Loops*. Ανάκτηση από τοποθεσία web του Mathwork: <http://www.mathworks.com/help/simulink/ug/algebraic-loops.html>
- [5]. Martinez-Velasco, J. (2001). *Computer Analysis of Electric Power System Transients*. BARCELONA: IEE.
- [6]. ΜΑΝΙΑΣ, Σ. (2012). *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*. Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσαμε δύο μεθόδους καταστολής κρουστικών υπερτάσεων, τη μέθοδο του snubber και τη μέθοδο των βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων. Σαν ένα συνοπτικό συμπέρασμα, θα λέγαμε ότι η χρήση των MOV υπερέρχει αυτής των snubbers στην περίπτωση κατά την οποία ο αντιστάτης καλείται να διαχειριστεί πολύ μεγάλες ποσότητες ισχύος με αποτέλεσμα το πολύ μεγάλο μέγεθος του, που καθιστά πρακτικά αδύνατη την εφαρμογή του. Μελετήθηκε επιπλέον η δυνατότητα σύνδεσης MOV παράλληλα για διαμοιρασμό της ισχύος σε αυτά. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το μειονέκτημα της ανισοκατανομής των ρευμάτων που διαρρέουν τα MOV παρόλα αυτά βελτιώνει το επίπεδο προστασίας και τη διάρκεια ζωής. Τέλος, έγινε προσπάθεια μείωσης του μεγέθους του αντιστάτη του snubber μέσο αύξησης της τιμής του, το αποτέλεσμα όμως δεν ήταν το επιθυμητό όσο αναφορά το επίπεδο προστασίας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα:

Πίνακας 6.1: Συνοπτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων Προσομοιώσεων.

Προστασία που εφαρμόστηκε	Επίπεδο υπέρτασης που παρατηρήθηκε	Επίπεδο προστασίας μεθόδου	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)	Διαστασιολόγηση
MOV	1200 V	890 V	10	Μήκος 100mm Πλάτος: 24mm Ύψος: 95mm Βάρος: 250gr
2xMOV	1200 V	790 V	100	2xMOV
Snubber με R=10Ω	1200 V	850V	>>0	Πρακτικά Αδύνατη
Snubber με R=100Ω	1200 V	1050 V	>>0	Πρακτικά Αδύνατη

Σαν μελλοντική έρευνα προτείνεται ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, η χρήση MOV σε διάταξη σειράς καθώς επίσης και η χρήση των μεθόδων καταστολής υπερτάσεων σε ημιαγωγικά στοιχεία. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προκύπτει από την αντιστάθμιση των θετικών και αρνητικών στοιχείων που παρουσιάζει η κάθε μέθοδος η οποία συνοψίζεται παρακάτω και προκύπτει από τα υπολογιστικά παραδείγματα και τη θεωρία:

Πλεονεκτήματα MOV :

- Χαμηλό κόστος και μέγεθος.
- Μικρά επίπεδα καταναλισκόμενης ισχύος στην κατάσταση μη αγωγής λόγω του πολύ μικρού ρεύματος διαρροής (της τάξης των mA).
- Πολύ γρήγορος χρόνος απόκρισης καθιστώντας τα πρακτικά εφαρμόσιμα σε όλες τις εφαρμογές καταστολής κρουστικών υπερτάσεων.
- Μεγάλο εύρος διαθεσιμότητας.

Μειονέκτημα MOV :

- Μικρή διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τα snubbers.
- Χαμηλά επίπεδα προστασίας.
- Μικρή δυνατότητα απορροφούμενης ενέργειας, καθιστώντας τα μη εφαρμόσιμα σε εφαρμογές επαναλαμβανόμενων υπερτάσεων.
- Πολύπλοκη ανάλυση του κυκλώματος για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους.

Πλεονεκτήματα Snubber :

- Μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Η τάση προστασίας παρουσιάζει μια «ομαλότερη» αποκοπή χωρίς φαινόμενα ταλαντώσεων που παρατηρούνται στο MOV.
- Υψηλά επίπεδα προστασίας.
- Μεγάλη δυνατότητα απορροφούμενης ισχύος, καθιστώντας τα ιδανικά σε εφαρμογές επαναλαμβανόμενων υπερτάσεων.

Μειονέκτημα Snubber:

- Μέγεθος αντιστάτη.
- Δυσκολία στην Επιλογή κατάλληλης τιμής αντιστάτη.