



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ «ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΕΣΩ ΈΡΕΥΝΑΣ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Θεοδωράκης Αντώνιος
ΑΜ: msres-44

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Γεώργιος Βόκας
Καθηγητής

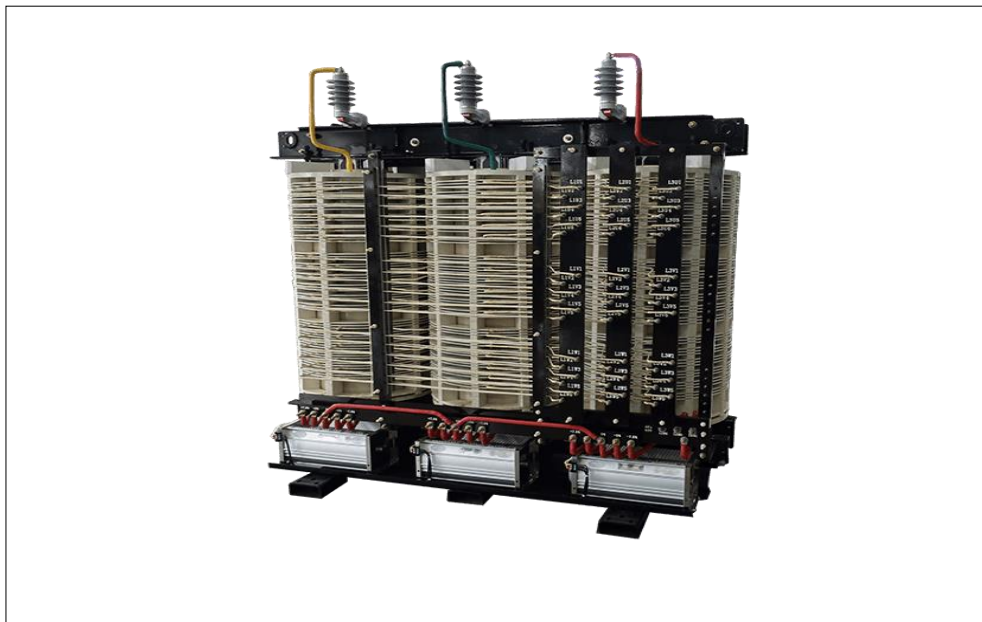
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2024



MSc BY RESEARCH IN ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

MSc Diploma Thesis

Design and simulation of special power rectifiers



Post Graduate Student: Theodorakis Antonios
Registration Number: msres-44

Supervisor

Dr. Georgios Vokas
Professor

ATHENS-EGALEO, NOVEMBER 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

| Βόκας Γεώργιος, Καθηγητής | Ιωαννίδης Γεώργιος Καθηγητής | Γουστουρίδης Δημήτριος, Καθηγητής |
|--------------------------------------|---|--|
| | | |

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Θεοδωράκης Αντώνιος, Νοέμβριος, 2024

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Θεοδωράκης Αντώνιος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου mscres-44 μεταπτυχιακός φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του ΠΜΣ «Ηλεκτρολόγου και Ηλεκτρονικού Μηχανικού μέσω Έρευνας»,

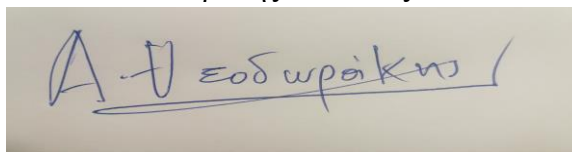
δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 31/12/2024 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών
Θεοδωράκης Αντώνιος

A photograph of a handwritten signature in blue ink on a light-colored background. The signature reads 'Α. Θεοδωράκης' (A. Theodorakis) and is underlined.

*«Δια του πειράματος η απόδειξις...»
Αριστοτέλης*

Περίληψη

Εις την παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος», μελετώνται οι Πολυπαλμικές Ανορθωτικές Διατάξεις, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και οι εφαρμογές στην βιομηχανία, την ιατρική τεχνολογία, και την πειραματική έρευνα (Industrial applicability, medical, experimental research).

Λέξεις – κλειδιά

Προσομοίωση, Πολυπαλμικές Ανορθωτικές Διατάξεις, Μη ελεγχόμενες, Ημιελεγχόμενες, Πλήρως Ελεγχόμενες, Δίοδοι, Θυρίστορες, Πολλαπλασιαστικές Ανορθωτικές Διατάξεις, Επαυξητικές Ανορθωτικές Διατάξεις.

Abstract

In this Master's Thesis entitled "Design and Simulation of Special Power Rectifiers", Multipulse Rectifiers, their electrical characteristics, as well as applications in industry, medical technology, and experimental research are studied (industrial applicability, medical, experimental research).

Keywords

Simulation, Multipulse rectifiers, uncontrolled, semi-controlled, fully controlled, diodes, thyristors, Multiplying Rectifiers.

| | |
|---|-----------|
| Κατάλογος Εικόνων..... | 10 |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | 10 |
| Κατάλογος Πινάκων..... | 13 |
| Κατάλογος Νομογραφημάτων..... | 13 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 14 |
| Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας..... | 14 |
| Σκοπός και στόχοι..... | 14 |
| Μεθοδολογία..... | 14 |
| Καινοτομία..... | 14 |
| Δομή 14 | |
| 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΥΤΩΝ .. | 15 |
| 1.1 Ένα σύντομο ιστορικό του SPICE..... | 15 |
| 1.2 Σύνοψη των επί του παρόντος διαθέσιμων Λογισμικών προσομοίωσης..... | 16 |
| 1.2.1 Xyce (SandiaNational Laboratories)..... | 16 |
| 1.2.2 HSPICE (Synopsys)..... | 18 |
| 1.2.3 Spectre (Cadence)..... | 18 |
| 1.2.4 Ngspice..... | 18 |
| 1.2.5 Multisim (NI)..... | 18 |
| 1.2.6 LTspice (AnalogDevices)..... | 18 |
| 1.2.7 Συμπεράσματα..... | 19 |
| 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ LTSpice..... | 20 |
| 2.1 Γενικά περί προσομοιώσεων..... | 20 |
| 2.2 Προσομοίωση κυκλωμάτων στο SPICE..... | 20 |
| 2.3 Προσομοίωση στο LTSPICE διόδων και θυρίστορ ισχύος – παραδοχές, υποθέσεις και απλοποιήσεις..... | 21 |
| 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ – ΠΟΛΥΠΑΛΜΙΚΩΝ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ..... | 24 |
| 3.1 Παραδοχές, Υποθέσεις και Απλοποιήσεις..... | 24 |
| 3.2 Τριφασικοί Μετασχηματιστές Ανορθωτικών Διατάξεων – Διανυσματικές Κατηγορίες..... | 25 |
| 3.3 Light Triggered Thyristor..... | 33 |
| 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ – ΠΟΛΥΠΑΛΜΙΚΩΝ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ..... | 35 |
| 4.1 Τριφασική Ανόρθωση 6 Διόδων..... | 35 |
| 4.1.1 Μετάβαση Του Υπό Ανόρθωση Ρεύματος Από Κλάδο Σε Κλάδο..... | 36 |
| 4.2 Τριφασική Ημιελεγχόμενη Ανόρθωση (3 Θυρίστορ - 3 Διόδων) Και Διόδου Ελευθέρως Διελεύσεως..... | 40 |
| 4.2.1 Με κύκλωμα πυροδότησης των Thyristor μέσω optocoupler MOC8204..... | 40 |
| 4.2.2 Πυροδότηση των Thyristor με μια κοινή ανεξάρτητη DC πηγή..... | 43 |
| 4.3 Τριφασική Ανόρθωση 6 Thyristor..... | 47 |
| 4.3.1 Κυκλώματα και Αποτελέσματα Προσομοίωσης..... | 47 |
| 4.4 Επαυξητική ανορθωτική διάταξη 6 Thyristor - 6 διόδων..... | 59 |
| 4.5 12-Παλμική ανορθωτική διάταξη κοινού κόμβου..... | 60 |
| 4.6 12-Παλμικός Ανορθωτής..... | 64 |
| 4.7 Ανορθωτικές διατάξεις με επιβαλλόμενη σβέση (Quenching Controlable Rectifiers)..... | 67 |
| 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΕΠΑΥΞΗΤΙΚΕΣ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ..... | 68 |
| 5.1 Πολλαπλασιαστική Ανόρθωση Με 6 Διπλασιαστές Τάσεως και Ηλεκτρικώς Απομονωμένα Δευτερεύοντα Τυλίγματα..... | 74 |

5.2 Πολλαπλασιαστικές Ανορθωτικές Διατάξεις Τύπου Γέφυρας Πολλαπλών Συμμετρικών Σταδίων 75

5.2.1 Πολλαπλασιαστική Ανορθωτική Διάταξη 4-Θυρίστορ Με Επαυξητή 12 Συμμετρικών Σταδίων 76

5.2.2 Πολλαπλασιαστική Ανορθωτική Διάταξη 12-Θυρίστορ Με Επαυξητή 12 Συμμετρικών Σταδίων και Ανεξάρτητο Κλάδο Περιορισμού Μέγιστης Τάσεως Δια 12 Διόδων. 77

5.3 Κυκλώματα Πυροδότησης Ελεγχόμενων Ανορθωτικών Διατάξεων.....79

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 90

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές..... 91

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1. Πυκνωτές ισχύος | 22 |
| Εικόνα2. Press Pack I.G.B.T P3000ZL45X168 (INFINEON – EUPEC)..... | 23 |
| Εικόνα3. PRESS PACK IGCT + GATE DRIVER CIRCUIT (ABB POWER SEMICONDUCTORS) ... | 23 |
| Εικόνα 4. DistributedGateThyristors | 30 |
| Εικόνα 5. ABBthyristor 5STH30J4501 | 32 |
| Εικόνα6. Light Triggered Thyristor T4003NH EUPEC – INFINEON [20]..... | 34 |
| Εικόνα 7. Τεχνικές πληροφορίες οπτικής πυροδότησης thyristor[20]..... | 34 |
| Εικόνα 8. Μ/Σ δισκοειδών τυλιγμάτων δευτερεύοντος..... | 73 |
| Εικόνα 9. Μ/Σ εξαιρετικά χαμηλής σκέδασης..... | 81 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1. Μοντέλα LTspice | 21 |
| Σχήμα 2. Μοντέλο Διόδου Ισχύος | 21 |
| Σχήμα 3. Διάταξη εξαναγκαζόμενης μετάβασης | 22 |
| Σχήμα 4. Διανυσματικές κατηγορίες τριφασικών Μ/Σ..... | 26 |
| Σχήμα 5. Μοντελοποίηση διανυσματικών κατηγοριών τριφασικών Μ/Σ | 27 |
| Σχήμα 6. Κύκλωμα αξιολόγησης σύγκλισης μοντέλων thyristors..... | 27 |
| Σχήμα 7. Κυματομορφές προσομοιώσεων αξιολόγησης μοντέλων thyristors | 28 |
| Σχήμα 8. Τυπική μεταβολή αρχικής τάσης σε κατάσταση αγωγής συναρτήσει χρόνου ThyristorACR44U[15] | 31 |
| Σχήμα9. Ring amplification gate-cathode structure..... | 33 |
| Σχήμα 10. LightTriggeredThyristor..... | 33 |
| Σχήμα 11. Κάθετη τομή ενός οπτικώς πυροδοτούμενουThyristor μέσω οπτικής ίνας [12] | 35 |
| Σχήμα 12. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 36 |
| Σχήμα 13. Κυματομορφές προσομοίωσης | 37 |
| Σχήμα 14. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 37 |
| Σχήμα 15. Οπτικός ζεύκτης MOC8204 [23]..... | 41 |
| Σχήμα 16. Τριφασική Ανορθωτική Διάταξη 3-Thyristor-3-Διόδων μετά διόδου Ελευθέρως Διελεύσεως..... | 42 |
| Σχήμα 17. Κυματομορφές προσομοίωσης | 42 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 18. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 43 |
| Σχήμα 19. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 43 |
| Σχήμα 20. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 44 |
| Σχήμα 21. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 45 |
| Σχήμα 22. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 46 |
| Σχήμα 23. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 47 |
| Σχήμα 24. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 48 |
| Σχήμα 25. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 49 |
| Σχήμα 26. Διάγραμμα κυκλικής εναλλαγής πυροδότησης..... | 50 |
| Σχήμα 27. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 51 |
| Σχήμα 28. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 51 |
| Σχήμα 29. Κυματομορφές προσομοίωσης (CIRCULAR-FIRING-SEQUENCE-OF-6-THYRISTOR-RECTIFIER)..... | 52 |
| Σχήμα 30. Κύκλωμα προσομοίωσης 6-THYRISTOR-3-PHASE_FULL_CONTROLLED..... | 53 |
| Σχήμα 31. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 54 |
| Σχήμα 32. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 55 |
| Σχήμα 33. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 56 |
| Σχήμα 34. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 58 |
| Σχήμα 35. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 59 |
| Σχήμα 36. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 60 |
| Σχήμα 37. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 61 |
| Σχήμα 38. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 62 |
| Σχήμα 39. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 62 |
| Σχήμα 40. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 63 |
| Σχήμα 41. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 64 |
| Σχήμα 42. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 65 |
| Σχήμα 43. Κυματομορφή Τάσεως στο DC φορτίο, (άνω), και ρεύματα γραμμής από την πλευρά του Εναλλασσομένου Ρεύματος..... | 65 |
| Σχήμα 44. 12-Παλμική ανορθωτική Διάταξη 12 Διόδων..... | 66 |
| Σχήμα 45. Κυματομορφή της τάσεως εξόδου στην 12-παλμική..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 46. Μονοφασική ασύμμετρη χωρητικά σβενυόμενη γέφυρα και κυματομορφές τάσης και ρεύματος [8]..... | 67 |
| Σχήμα 47. Δίοδοι ταχείας ανάκαμψης με ικανότητα διαχείρισης ενέργειας κατά την υπέρβαση της αναστροφής τάσης (fastrecovery AVALANCHE DIODE)[23]..... | 69 |
| Σχήμα 48. Δίοδοι ταχείας ανάκαμψης με ικανότητα διαχείρισης ενέργειας κατά την υπέρβαση της αναστροφής τάσης (fast recovery AVALANCHE DIODE) [26]..... | 70 |
| Σχήμα 49. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 71 |
| Σχήμα 50. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 72 |
| Σχήμα 51. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 74 |
| Σχήμα 52. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 75 |
| Σχήμα 53. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 75 |
| Σχήμα 54. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 76 |
| Σχήμα 55. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 76 |
| Σχήμα 56. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 77 |
| Σχήμα 57. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 78 |
| Σχήμα 58. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 78 |
| Σχήμα 59. Κυματομορφές προσομοίωσης..... | 79 |
| Σχήμα 60. Κύκλωμα προσομοίωσης..... | 79 |
| Σχήμα 61. Κυματομορφή τάσεως εξόδου του υπο μελέτη ταλαντωτή, πριν και μετά τον ηλεκτρονόμο ζεύξεως..... | 80 |
| Σχήμα 62. Ταλαντωτής ισχύος χαμηλής εξαιρετικά αντίστασης εξόδου..... | 80 |
| Σχήμα 63. Κύκλωμα επιτήρησης ακολουθίας – χρονισμού, για την ορθή λειτουργία της μονάδας πυροδότησης..... | 82 |
| Σχήμα 64. Υποκύκλωμα αναλογικού υπολογισμού γωνίας καθυστέρησης έναυσης..... | 83 |
| Σχήμα 65. Υποκύκλωμα αναλογικού υπολογισμού γωνίας καθυστέρησης έναυσης - εσωτερικό διάγραμμα..... | 84 |
| Σχήμα 66. Κυματομορφές του αναλογικού υπολογιστή γωνίας καθυστέρησης έναυσης. . | 84 |
| Σχήμα 67. Οπτικός αποζεύκτης απομόνωσης τάσεως CNY21Exi, μεγάλης απομονωτικής ικανότητας, [33]..... | 85 |
| Σχήμα 68. Ταλαντωτής ισχύος, Μ/Σ μεταβίβασης τάσεως πυροδότησης, και οπτικοί μεταβιβαστές παλμών..... | 85 |
| Σχήμα 69. Μεταβιβαστής παλμών δια υψίσυχνων Μ/Σ και οπτικού αποζεύκτη - Προσομοιωτικά αποτελέσματα..... | 86 |

| | |
|--|----|
| <i>Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος</i> | |
| Σχήμα 70. Πλήρες Κύκλωμα 3-φασικής γέφυρας, Ισχύος και πυροδότησης. | 87 |
| Σχήμα 71. Πραγματικό κυκλωματικό ισοδύναμο συγκριτή τάσεως LM311 – σύμβολο. | 88 |
| Σχήμα 72. Πραγματικό κυκλωματικό ισοδύναμο συγκριτή τάσεως LM311 – εσωτερικό κύκλωμα. | 88 |
| Σχήμα 73. Σταθεροποιητής έντασης υψηλής ακριβείας - σύμβολο..... | 89 |
| Σχήμα 74. Σταθεροποιητής έντασης υψηλής ακριβείας - Εσωτερικό κύκλωμα..... | 89 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά thyristors | 29 |
| Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ABBthyristor 5STH30J4501 | 32 |

Κατάλογος Νομογραφημάτων

| | |
|-------------------------|----|
| Νομογράφημα 1 [8] | 39 |
|-------------------------|----|

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εις την παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος», μελετώνται οι Πολυπαλμικές Ανορθωτικές Διατάξεις, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και οι εφαρμογές στην βιομηχανία, την ιατρική τεχνολογία, και την πειραματική έρευνα (Industrial applicability, medical, experimental research).

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η μελέτη δια προσομοιώσεων όπου αυτό είναι δυνατόν, ειδικών πολυπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων. Παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των εκτεταμένων βιομηχανικών και ιατρικών εφαρμογών καθώς και πεδία πειραματικής έρευνας.

Σκοπός και στόχοι

Βασικός σκοπός είναι τόσο η θεωρητική όσο και η υπολογιστική μελέτη των διαφόρων τοπολογιών των ειδικών πολυπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων. Οι επιμέρους στόχοι αφορούν την εκτεταμένη μελέτη των διαφόρων τοπολογιών των ειδικών πολυπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων με έμφαση στην προσομοίωσή τους και την εξαγωγή υπολογιστικών συμπερασμάτων.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η κατασκευή προσομοιωτικών μοντέλων των επιμέρους στοιχείων των ανορθωτικών διατάξεων, η οποία ήταν απαραίτητη για την περάτωση των προσομοιώσεων αφού οι διατάξεις αυτές και τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία τους, εκφεύγουν των κοινώς χρησιμοποιούμενων και παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες στην συμπεριφορά τους αλλά και στον χειρισμό τους.

Καινοτομία

Πολλά υποκυκλώματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα είναι πρωτότυπα και αδημοσίευτα και χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς στο λογισμικό προσομοίωσης LTspice, για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Δομή

Η δομή της διπλωματικής εργασίας οργανώνεται σε κεφάλαια και υποκεφάλαια, ως εξής:

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στα λογισμικά προσομοίωσης με μια συνοπτική περιγραφή τους και την ιστορική τους εξέλιξη.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το χρησιμοποιούμενο λογισμικό προσομοίωσης LTspice και παραδοχές, υποθέσεις και απλοποιήσεις για την προσομοίωση διόδων και θυρίστορ ισχύος

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται προπαρασκευαστικά στοιχεία για την προσομοίωση των πολυφασικών – πολυπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων, οι τριφασικοί μετασχηματιστές ανορθωτικών διατάξεων και οι διανυσματικές κατηγορίες τους, αλλά και τα Light Triggered Thyristors.

Στο 4^ο Κεφάλαιο υλοποιείται η προσομοίωση διαφόρων τοπολογιών πολυφασικών – πολυπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων 35

Στο 5^ο Κεφάλαιο υλοποιείται η προσομοίωση διαφόρων τοπολογιών επαυξητικών ανορθωτικών διατάξεων.

Στο τέλος εξάγονται τα συμπεράσματα από όλες τις προσομοιώσεις των τοπολογιών των ειδικών ανορθωτικών διατάξεων ισχύος.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΥΤΩΝ

1.1 Ένα σύντομο ιστορικό του SPICE

Η ανάγκη για ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κυκλωμάτων, επιστήμονες, φοιτητές στο Berkeley και επαγγελματίες από διάφορες εταιρείες, συνέβαλαν στην πραγματοποίηση και εξέλιξη του SPICE. Παρακάτω είναι ένα σύντομο, αποσπασματικό ιστορικό αυτού του ισχυρού προσομοιωτή οργανωμένο κυρίως σύμφωνα με τις διαφορετικές εκδόσεις του SPICE.

Το SPICE (Πρόγραμμα προσομοίωσης με έμφαση στο ολοκληρωμένο κύκλωμα) εισήχθη τον Μάιο του 1972 από το Πανεπιστήμιο του Berkeley της Καλιφόρνια. Το SPICE ("Πρόγραμμα προσομοίωσης με έμφαση στο ολοκληρωμένο κύκλωμα") είναι ένας αναλογικός προσομοιωτής ηλεκτρονικών κυκλωμάτων γενικής χρήσης, ανοιχτού κώδικα.

CANCER

- Αρχές της δεκαετίας του 1970, ο RonRohrer ελπίζει να αναπτύξει ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για τη δουλειά του στην βελτιστοποίηση στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Berkeley.
- Οιοφίτητες του Rohrer, συμπεριλαμβανομένου του Larry Nagel, δημιουργούντο CANCER (Computer Analysis of Non-Linear Circuits Excluding Radiation).
- Εκτελεί DC, AC και Transient Analysis.
- Τα στοιχεία περιλαμβάνουν διόδους (εξισώσεις Shockley) και διπολικά τρανζίστορ (εξισώσεις Ebers-Moll).
- Άλλα προγράμματα προσομοίωσης της εποχής περιλαμβάνουν το ECAP της IBM και το TRAC της Autonetics.

SPICE1

- Το 1972, οι Nagel και Pederson κυκλοφορούν το SPICE1 (SimulationProgramwith IC Emphasis) στον δημόσιο τομέα.
- Το SPICE γίνεται το βιομηχανικό πρότυπο εργαλείο προσομοίωσης.
- Τα μοντέλα για τα διπολικά τρανζίστορ αλλάζουν σε εξισώσεις Gummel-Poon.
- Προστίθενται συσκευές JFET και MOSFET.
- Βασισμένο στην Ανάλυση Κόμβων.
- Γραμμένο σε κώδικα FORTRAN που τρέχει σε μεγάλους κύριους υπολογιστές.

SPICE2

- Η κυκλοφορία του Nagel το 1975 προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις.
- Η Τροποποιημένη Ανάλυση Κόμβων (MNA), αντικαθιστώντας την παλιά ανάλυση, υποστηρίζει τώρα πηγές τάσης και επαγωγείς.
- Η μνήμη κατανέμεται δυναμικά για να φιλοξενήσει το αυξανόμενο μέγεθος και την πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων.
- Ο έλεγχος του ρυθμού βήματος προσαρμόζεται για να επιταχύνει την προσομοίωση.
- Τα μοντέλα MOSFET και διπολικών τρανζίστορ ανανεώνονται και επεκτείνονται.
- Η έκδοση SPICE2G.6 (1983) είναι η τελευταία έκδοση σε FORTRAN (ακόμα διαθέσιμη σήμερα από το Berkeley).

- Πολλοί εμπορικοί προσομοιωτές σήμερα βασίζονται στο SPICE2G.6.

SPICE3

- Ο κώδικας του SPICE ξαναγράφεται στη γλώσσα προγραμματισμού C (1985).
- Περιλαμβάνει ένα γραφικό περιβάλλον για την προβολή των αποτελεσμάτων.
- Περιλαμβάνει πολυωνυμικούς πυκνωτές, επαγωγείς και πηγές ελεγχόμενες από τάση.
- Η νέα έκδοση εξαλείφει πολλά προβλήματα σύγκλισης.
- Προστέθηκαν μοντέλα: MESFET, γραμμή μετάδοσης με απώλειες και μη ιδανικός διακόπτης.
- Βελτιωμένα μοντέλα ημιαγωγών φιλοξενούν μικρότερες γεωμετρίες τρανζίστορ.
- Δεν είναι συμβατό με την προηγούμενη έκδοση SPICE2.

ΔΕΚΑΕΤΙΑ ΤΟΥ 1980 ΚΑΙ ΜΕΤΑ

- Κυκλοφορούν εμπορικές εκδόσεις όπως: HSPICE, IS_SPICE και MICROCAP.
- Η MicroSim κυκλοφορεί το PSPICE, την πρώτη έκδοση SPICE για PC.
- Το SPICE προσελκύει περισσότερους χρήστες στη βιομηχανία και την ακαδημία.

Οι εταιρείες ενσωματώνουν εκδόσεις του SPICE στα πακέτα εισαγωγής και διάταξης σχημάτων.

1.2 Σύνοψη των επί του παρόντος διαθέσιμων Λογισμικών προσομοίωσης

1.2.1 Xyce (SandiaNational Laboratories)

- **Χαρακτηριστικά:** Το Xyce είναι ένας παράλληλος SPICE simulator σχεδιασμένος για μεγάλης κλίμακας αναλογικές και ψηφιακές προσομοιώσεις. Είναι εξαιρετικά ταχύς σε πολυπύρηννα συστήματα και διαχειρίζεται πολύ μεγάλα κυκλώματα καλύτερα από πολλά άλλα εργαλεία.
- **Πλεονεκτήματα:** Πολύ καλός για παράλληλες προσομοιώσεις, κλιμακώνεται καλά σε μεγάλα clusters και HPC (High-Performance Computing) συστήματα.
- **Μειονεκτήματα:** Απαιτεί εξειδικευμένη γνώση για τη βέλτιστη χρήση και είναι περισσότερο προσανατολισμένος σε ακαδημαϊκή ή βιομηχανική χρήση παρά για γενική χρήση.

1.2.1.1 Ένα σύντομο ιστορικό του XYCE

Το XYCE είναι ένας παράλληλος ηλεκτρονικός προσομοιωτής κυκλωμάτων που αναπτύχθηκε από τα SandiaNational Laboratories. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε από την ανάγκη για ένα εργαλείο προσομοίωσης που να μπορεί να χειριστεί τα αυξανόμενα μεγέθη και την πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε υψηλής απόδοσης υπολογιστικά περιβάλλοντα.

1.2.1.2 Αρχική ανάγκη και ανάπτυξη

- **Δεκαετία 1990:** Οι αυξανόμενες απαιτήσεις των ηλεκτρονικών συστημάτων και η ανάγκη για ταχύτερη και πιο αξιόπιστη προσομοίωση οδήγησαν στην ανάπτυξη του XYCE από τα SandiaNational Laboratories.
- **Ανάπτυξη σε Υπερυπολογιστές:** Το XYCE σχεδιάστηκε για να εκτελείται σε παράλληλα συστήματα υπολογιστών, αξιοποιώντας την υπολογιστική ισχύ των υπερυπολογιστών.

1.2.1.3 Κύριες εκδόσεις και χαρακτηριστικά

XYCE 1.0

- **Αρχική Κυκλοφορία:** Οι πρώτες εκδόσεις του XYCE επικεντρώθηκαν στην επίλυση μεγάλων γραμμικών συστημάτων με χρήση παράλληλης επεξεργασίας.
- **Βασικές Δυνατότητες:** Περιλάμβανε θεμελιώδεις αλγόριθμους για την προσομοίωση κυκλωμάτων και τη διαχείριση δεδομένων σε παράλληλα περιβάλλοντα.

XYCE 2.0 ΚΑΙ ΜΕΤΑ

- **Επέκταση Λειτουργικότητας:** Οι νεότερες εκδόσεις πρόσθεσαν υποστήριξη για μη γραμμικά και δυναμικά συστήματα, καθώς και βελτιώσεις στην αποδοτικότητα και την επεκτασιμότητα (scalability).
- **Συμβατότητα με SPICE:** Παράλληλα με την ανάπτυξη του XYCE, διατηρήθηκε συμβατότητα με τα αρχεία SPICE, επιτρέποντας στους χρήστες να μεταβαίνουν εύκολα από άλλους προσομοιωτές κυκλωμάτων.

1.2.1.4 Σύγχρονη εξέλιξη

- **Υποστήριξη για Νέες Αρχιτεκτονικές:** Οι πιο πρόσφατες εκδόσεις του XYCE περιλαμβάνουν υποστήριξη για υπολογιστικά συστήματα GPU και βελτιώσεις στην παράλληλη επεξεργασία για ακόμα μεγαλύτερη απόδοση.
- **Ευρεία Χρήση:** Το XYCE χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς όπως η αεροδιαστημική, η ηλεκτρονική και οι επιστήμες υλικών, προσφέροντας τα εργαλεία για την προσομοίωση πολύπλοκων κυκλωμάτων σε μεγάλη κλίμακα.

1.2.1.5 Επιρροή και μέλλον

- **Ακαδημαϊκή και Βιομηχανική Υιοθέτηση:** Το XYCE έχει υιοθετηθεί τόσο από την ακαδημαϊκή όσο και από τη βιομηχανική κοινότητα λόγω της ικανότητάς του να χειρίζεται πολύπλοκα κυκλώματα και της ευελιξίας του.
- **Συνεχής Ανάπτυξη:** Με συνεχιζόμενη υποστήριξη και ανάπτυξη, το XYCE παραμένει στην πρώτη γραμμή των εργαλείων προσομοίωσης κυκλωμάτων, βοηθώντας τους επιστήμονες και τους μηχανικούς να επιλύσουν μερικά από τα πιο απαιτητικά προβλήματα στην ηλεκτρονική και την τεχνολογία.

Το XYCE είναι ένα από τα πιο εξελιγμένα εργαλεία προσομοίωσης κυκλωμάτων που υπάρχουν σήμερα, προσφέροντας απaráμιλλη απόδοση και ευελιξία για την επίλυση σύνθετων ηλεκτρονικών προβλημάτων.

Κατά την άποψη του συντάσσοντος, κατάλληλα εργαλεία είναι τα ανοικτού κώδικα (όπως το XYCE), τα οποία είναι εντελώς ελεύθερα, ασχολείται μια ολόκληρη κοινότητα ακαδημαϊκών και εταιρειών ηλεκτρονικής, και ανεξαρτήτων ερευνητών με αυτά, και δεν υπάρχει θέμα δικαιωμάτων για την χρήση αυτών. Ένα από αυτά είναι και το ως άνω αναφερόμενο XYCE.

Πέραν τούτου, οι πιθανές αστοχίες των ανοικτών λογισμικών, είναι λίαν ενδιαφέροντες, και από ακαδημαϊκής απόψεως. Έτσι στον ανοικτό κώδικα του SPICE, μπορούν να προταθούν βελτιώσεις – διορθώσεις, οι οποίες αναγνωρίζονται από την κοινότητα. Ένα τέτοιο λογισμικό είναι και το LTspice το οποίο το αναπτύσσει ο Καθ. Dr. Mike Engelhardt, για την εταιρεία Linear Technology. Προσφάτως, (2024) το πρόγραμμα αυτό βελτιώθηκε εκ νέου και ονομάζεται QSPICE υποστηριζόμενο από μια καινούργια εταιρεία ηλεκτρονικών την Qorvo[1].

1.2.2 HSPICE (Synopsys)

- **Χαρακτηριστικά:** Το HSPICE είναι ένα από τα πιο δημοφιλή εργαλεία προσομοίωσης και είναι γνωστό για την ταχύτητά του και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για αναλογικά, ψηφιακά και μικτά σήματα.
- **Πλεονεκτήματα:** Πολύ γρήγορο και ακριβές, ειδικά για προσομοιώσεις μεγάλων, περίπλοκων κυκλωμάτων. Έχει επίσης εκτεταμένη υποστήριξη για σύνθετα μοντέλα και βιβλιοθήκες.
- **Μειονεκτήματα:** Είναι εμπορικό προϊόν, οπότε υπάρχει κόστος αδειοδότησης. Επίσης, είναι πιο περίπλοκο στη χρήση από δωρεάν εργαλεία όπως το LTspice.

1.2.3 Spectre (Cadence)

- **Χαρακτηριστικά:** Το Spectre είναι γνωστό για την υψηλή απόδοση και ακρίβεια, ιδιαίτερα στις RF και αναλογικές προσομοιώσεις. Είναι μέρος της πλατφόρμας Cadence Virtuoso, η οποία προσφέρει εργαλεία για πλήρη σχεδίαση αναλογικών και μικτών σημάτων.
- **Πλεονεκτήματα:** Πολύ καλή υποστήριξη για μικτά σήματα και αναλογικά κυκλώματα, εξαιρετική ακρίβεια και ταχύτητα.
- **Μειονεκτήματα:** Είναι επίσης εμπορικό προϊόν, με υψηλό κόστος, και απαιτείται η πλατφόρμα Cadence για τη χρήση του.

1.2.4 Ngspice

- **Χαρακτηριστικά:** Το Ngspice είναι ένας ανοιχτού κώδικα SPICE simulator, ο οποίος είναι ελαφρύς και μπορεί να είναι αρκετά γρήγορος, ειδικά σε μικρότερα κυκλώματα. Υποστηρίζει μοντέλα από διαφορετικά SPICE-based εργαλεία.
- **Πλεονεκτήματα:** Δωρεάν και ανοιχτού κώδικα, ευέλικτο, με δυνατότητα χρήσης σε διάφορες πλατφόρμες.
- **Μειονεκτήματα:** Μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτικό για πολύ μεγάλα και πολύπλοκα κυκλώματα σε σύγκριση με εμπορικά εργαλεία.

1.2.5 Multisim (NI)

- **Χαρακτηριστικά:** Το Multisim της National Instruments είναι γνωστό για την ταχύτητα προσομοίωσης του και την ευκολία χρήσης του, ειδικά σε εκπαιδευτικό πλαίσιο και μικρές έως μεσαίες προσομοιώσεις κυκλωμάτων.
- **Πλεονεκτήματα:** Εύκολο στη χρήση, καλή ταχύτητα για μικρά έως μεσαία κυκλώματα, ενσωμάτωση με το NI LabVIEW.
- **Μειονεκτήματα:** Μπορεί να είναι λιγότερο ισχυρό για πολύ μεγάλα και σύνθετα κυκλώματα σε σχέση με άλλα επαγγελματικά εργαλεία.

1.2.6 LTspice (AnalogDevices)

- **Χαρακτηριστικά:** Το LTspice είναι γρήγορο και πολύ αξιόπιστο για αναλογικά και ηλεκτρονικά ισχύος κυκλώματα, ενώ είναι δωρεάν και έχει εκτεταμένη κοινότητα χρηστών.
- **Πλεονεκτήματα:** Πολύ γρήγορο για προσομοιώσεις αναλογικών κυκλωμάτων, ειδικά σχετικών με ηλεκτρονικά ισχύος. Είναι δωρεάν και ευρέως διαδεδομένο.
- **Μειονεκτήματα:** Έχει κάποιους περιορισμούς σε σχέση με την προσομοίωση ψηφιακών κυκλωμάτων και δεν είναι τόσο ευέλικτο όσο τα πιο ακριβά εμπορικά εργαλεία.

1.2.7 Συμπεράσματα

Για την ταχύτερη απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές, το **HSPICE** και το **Spectre** θεωρούνται γενικά τα πιο γρήγορα εργαλεία για βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ το **Xyce** μπορεί να είναι το ταχύτερο για εξαιρετικά μεγάλα κυκλώματα και εξειδικευμένες χρήσεις. Το **LTspice** παραμένει μια εξαιρετική επιλογή λόγω της ταχύτητας και της ευκολίας του, ειδικά όταν δεν απαιτείται προσομοίωση εξαιρετικά μεγάλων κυκλωμάτων.

Στο SandiaUniversity αναπτύσσεται εδώ και πολλά χρόνια ένα πανίσχυρο πρόγραμμα πολλαπλών τομέων φυσικής (MULTI-PHYSICS SIMULATOR), με το όνομα TRILINOS [2] ενώ το τμήμα προσομοίωσης των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ονομάζεται XYCE. Είναι το μόνο λογισμικό (από όσο μας είναι γνωστό) όπου έχει την δυνατότητα να προβλέψει την συμπεριφορά των ημιαγωγών υπό το καθεστώς ιονίζουσας, ή και ραδιενεργού ακτινοβολίας.

Παρ όλη την προσπάθεια που έχει καταβληθεί, από την πλευρά των επιστημόνων του SANDIA UNIVERCITY το λογισμικό αυτό δεν έχει διαδοθεί αρκετά, καθότι είναι και αρκετά δαιδαλώδες, και απαιτεί τεράστια γνωστικά αποθέματα, στην περιοχή της ηλεκτρονικής, ηλεκτρολογίας, αλλά και άλλων κλάδων την φυσικής επιστήμης γενικότερα,

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ LTSpice

2.1 Γενικά περί προσομοιώσεων

Είναι βέβαιο ότι η προσομοιωτική μέθοδος μελέτης, από μόνη της δεν είναι επαρκής, διότι δεν είναι κάτι περισσότερο από μια μαθηματική προεκβολή – ή παρεμβολή - των ήδη παραδεδεγμένων θεωρητικών υποθέσεων, που κατά πάσα πιθανότητα (για να μην πούμε βεβαιότητα) αποκλίνουν από την πραγματικότητα. Παρόλο που τα μοντέλα μπορούν να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης των, δεν μπορούν να προβλέψουν την ακριβή απόδοση (και συμπεριφορά) των σχεδιαζόμενων κυκλωμάτων κάτω από όλες τις συνθήκες, ούτε προορίζονται να αντικαταστήσουν την πειραματική επιβεβαίωση για τελική επαλήθευση.

Όμως η συσχέτιση των προσομοιωτικών αποτελεσμάτων με τις πειραματικές μετρήσεις, (ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΟΠΟΙΟΥΔΗΠΟΤΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ), καταδεικνύει τις αποκλίσεις από τις υποθέσεις, και πιθανώς να οδηγήσει σε πλήρη αναθεώρηση αυτών, γεγονός το οποίο αποτελεί σοβαρή επιστημονική πρόοδο. Ταυτόχρονα όμως συγκρούεται με την τρέχουσα καθυστετική επιστημονική τάξη. Είναι δε σίγουρο ότι ο χρήστης του λογισμικού προσομοίωσης πρέπει να είναι γνώστης του αντικειμένου που μελετά, τόσο για να έχει την ικανότητα να εκτιμά τα αποτελέσματα, όσο για να δύναται να συσχετίζει τις υπολογιστικές παραμέτρους με τα φυσικά πειραματικά δεδομένα.

Ακόμη και σε περίπτωση αστοχίας σύγκλησης του πυρήνα του SPICE, υπάρχει η δυνατότητα διόρθωσης αυτού, διά υποδείξεως (της αστοχίας), εις την κοινότητα, και έτσι νέα θέματα ειδικότερων μελετών και δημοσιεύσεων για την ακαδημαϊκή κοινότητα μπορούν να προκύψουν.

Σε αντίθεση με την σχεδίαση σε επίπεδο πλακέτας όπου το κύκλωμα αποτελείται από διακριτά εξαρτήματα, δεν είναι πρακτικό να κατασκευάζονται πειραματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα κατ' επανάληψη, λόγω του υψηλού κόστους των φωτολιθογραφικών μασκών και άλλων προαπαιτούμενων κατασκευής. Έτσι είναι απαραίτητο ο σχεδιασμός του κυκλώματος να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο τελικό, πριν κατασκευαστεί για πρώτη φορά το ολοκληρωμένο κύκλωμα, και να μειωθεί ο αριθμός των διορθωτικών επαναλήψεων, ο οποίος κοστίζει τα μέγιστα.

Το θέμα των προσομοιώσεων είναι λίαν σοβαρό ειδικά στην περίπτωση της μελέτης των πυρηνικών φαινομένων, όπου εμφανίζονται προβλήματα διαφόρων φυσικών προβλημάτων. (π.χ. Ηλεκτρομαγνητισμός και θερμοδυναμική, ή ακόμη και ακουστική).

2.2 Προσομοίωση κυκλωμάτων στο SPICE

Το SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis "Πρόγραμμα προσομοίωσης με έμφαση στο ολοκληρωμένο κύκλωμα") είναι ένας αναλογικός προσομοιωτής ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων γενικής χρήσης, ανοιχτού κώδικα. Χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και σε επίπεδο πλακέτας για τον έλεγχο της ακεραιότητας των σχεδίων των κυκλωμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών.

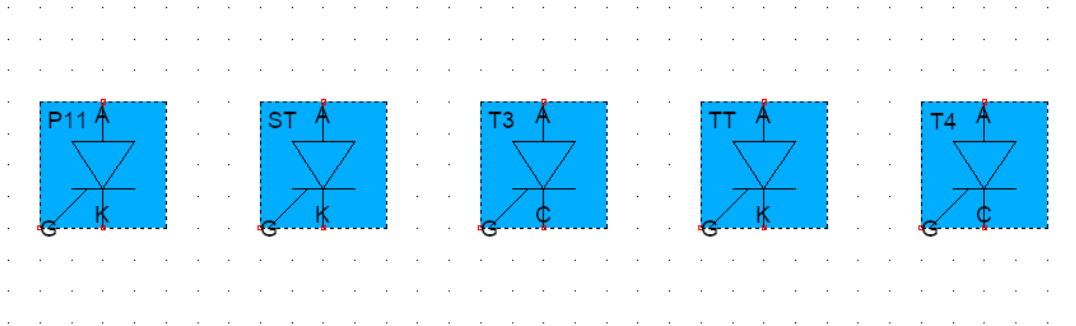
Όπως ακριβώς απορρέει και από τον τίτλο του, το σπουδαίο αυτό λογισμικό αρχικώς απευθυνόταν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς κυρίως ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων, με έμφαση στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αργότερα έγιναν και επεκτάσεις επ' αυτού. Δεν έχει επεκταθεί αρκετά στα μαγνητικά κυκλώματα, και αναμένονται εδώ βελτιώσεις, αλλά και επεκτάσεις σε μέλλοντα χρόνο.

Επειδή η φύση των Ηλεκτρομαγνητικών και Ηλεκτρικών φαινομένων είναι χωροχρονική, για την ακριβέστερη προσομοίωση απαιτούνται 3-διάστατα λογισμικά. Η συνεκτίμηση της γεωμετρικής διάταξης είναι υποχρεωτική. Το SPICE δεν έχει αυτές τις δυνατότητες στις τρέχουσες εκδόσεις. Κατάλληλα προγράμματα για τον σκοπό αυτό είναι τα ακόλουθα:

1. Elmer FEM, Elmer version 9.0 [3]
2. Finite Element Method Magnetics (FEMM) [4]

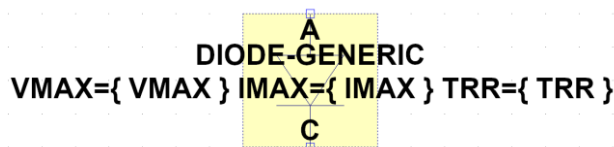
2.3 Προσομοίωση στο LTSPICE διόδων και θυρίστορ ισχύος – παραδοχές, υποθέσεις και απλοποιήσεις

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν αυτά τα βασικά υλικά των υπό μελέτη διατάξεων, πρέπει να τεθούν κατάλληλα μοντέλα για αυτά. Δεν υπάρχει διακριτό μοντέλο Thyristor στο LTSpice αλλά και στο SPICE γενικότερα [5], [6], [7]. Παρατηρήθηκε ότι πολλά ενυπάρχοντα μοντέλα τα οποία είτε παραδίδονται από διάφορους κατασκευαστές είτε υπάρχουν στην βιβλιογραφία αστοχούν όταν εφαρμόζονται σε πολυπαλμικές ανορθωτικές διατάξεις. Στην παρούσα εργασία μερικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν, ως ακολούθως:



Σχήμα 1. Μοντέλα LTSpice

Των οποίων το εσωτερικό ισοδύναμο ευρίσκεται στο αρχείο παραρτήματος της παρούσης εργασίας. Πρέπει να τονισθεί εδώ ότι τεράστια προσπάθεια καταβλήθηκε προκειμένου να συγκεντρωθούν, και αξιολογηθούν τα διάφορα μοντέλα της αυτής εργασίας. Τα σχηματικά σύμβολα των Μετασχηματιστών, των διακοπών, και των διαφόρων άλλων υλικών επίσης είναι σχεδιασμένα από τον συντάσσοντα την παρούσα εργασία, καθώς και μια τεράστια βιβλιοθήκη για την υποστήριξη των προσομοιώσεων. Για την Δίοδο ισχύος εφαρμόστηκε επιτυχώς το μοντέλο που αντιστοιχεί στο ακόλουθο σύμβολο:



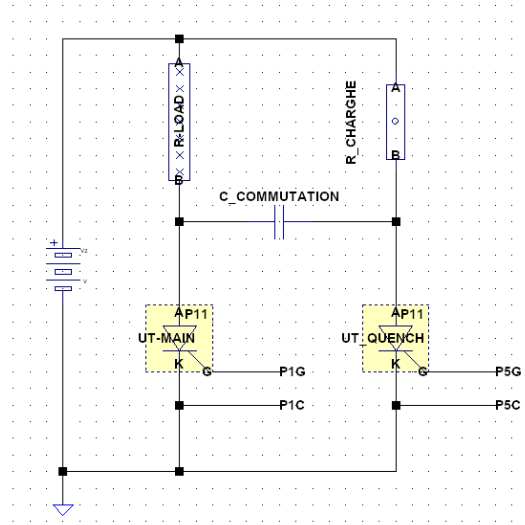
Σχήμα 2. Μοντέλο Διόδου Ισχύος

Το οποίο περιέχεται επίσης στο αρχείο παραρτήματος. Το γενικό αυτό μοντέλο διόδου είναι παραμετροποιήσιμο διά ορισμού των VMAX, IMAX, TRR. (Μέγιστη αποδεκτή ανάστροφη τάση μεταξύ ανόδου – καθόδου, Μέγιστο ρεύμα ορθής φοράς, Μέγιστος χρόνος Ανάκαμψης).

Λόγω της βασικής του ιδιότητας (όπου το Thyristor δεν σβήνει εγγενώς), καθίσταται δύσκολη (αλλά όχι αδύνατη) η ανάπτυξη κυκλωμάτων αντιστροφών ισχύος. Η σβέση αυτού επιτυγχάνεται με την πυροδότηση ενός άλλου Thyristor, το οποίο καλείται Thyristor σβέσεως, και παρακάμπτει το κύριο ρεύμα ισχύος σε βοηθητικό κλάδο, στον οποίο υπάρχει ο πυκνωτής σβέσεως. Το

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

κύριο ρεύμα προοδευτικώς αποσβένει έως ότου να μηδενιστεί πλήρως στον πυκνωτή, ο οποίος πρέπει να είναι ανθεκτικός και μεγάλης ισχύος. Η ικανότητα διακοπής ρεύματος αυτής της διάταξης είναι τεράστια. Πρακτικά το σοκ της σβέσεως αποσβένει σε έναν πυκνωτή ισχύος, ΚΑΙ ΟΧΙ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ, ο οποίος είναι σχετικά περιορισμένος σε διαστάσεις, άρα και περιορισμένης ικανότητας διακοπής ρεύματος. Στο ακόλουθο σχήμα αυτό γίνεται σαφέστερο:



Σχήμα 3. Διάταξη εξαναγκασόμενης μετάβασης

Συμπερασματικώς, αυτές οι διατάξεις (Εξαναγκασόμενης μετάβασης), είναι λίαν αξιόπιστες. Το γεγονός αυτό δεν αναφέρεται ευρέως στην επιστημονική βιβλιογραφία, και μια φωτογραφία πυκνωτών ισχύος ακολουθεί:



Εικόνα 1. Πυκνωτές ισχύος

Σε αντίθεση με τα εξωτερικώς σβενδόμενα στοιχεία ισχύος (Thyristors), υπάρχουν και τα εσωτερικώς σβενδόμενα στοιχεία, (internally commutated) όπως το G.T.O, το I.G.B.T, και το I.G.C.T. Αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε μετατροπείς Συνεχούς σε Εναλλασσόμενο, και ανορθωτές που παρέχουν αντιστάθμιση αέργου ισχύος προς το δίκτυο. Επίσης χρησιμοποιούνται ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Θεοδωράκης Αντώνιος

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

σε ανορθωτικές διατάξεις όπου παρέχουν και αντιστάθμιση άεργου ισχύος στο δίκτυο που τα τροφοδοτεί [8][9]. Φωτογραφίες αυτών των εξαρτημάτων φαίνονται ακολούθως:

Key Parameters

| | |
|--------------|------------|
| V_{CES} | 4500 V |
| $I_{c\ nom}$ | 3000 A |
| I_{CRM} | 6000 A |
| I_{sc} | 17,5kA |
| R_{thJC} | 4,4 K/kW |
| F | 50 – 80 kN |



Εικόνα2. Press Pack I.G.B.T P3000ZL45X168 (INFINEON – EUPEC)



Εικόνα3. PRESS PACK IGCT + GATE DRIVER CIRCUIT (ABB POWER SEMICONDUCTORS)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ – ΠΟΛΥΠΑΛΜΙΚΩΝ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Εις την παρούσα μελέτη ήδη αρκετά (σημεία απόκλισης από την πειραματική πραγματικότητα) έχουν εντοπιστεί στο πρόγραμμα LTspice, και ειδικότερα, στην προσομοίωση των μονοφασικών και πολυφασικών μετασχηματιστών με ελασματοποιημένο ή φερριτικό πυρήνα ενός ή περισσοτέρων σκελών, με άνιση μαγνητική ζεύξη μεταξύ των.

3.1 Παραδοχές, Υποθέσεις και Απλοποιήσεις

Επίσης, τα περισσότερα προγράμματα προσομοίωσης δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τους τον γειτνιάζοντα ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, που αναπτύσσεται κατά την λειτουργία του κυκλώματος. Τέτοια κυκλώματα είναι όλα τα κυκλώματα μετατροπών ισχύος με μαγνητικό στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας. (Fly-Back converters, και air inductor circuits), καθότι το διάκενο του πηνίου ισχύος, διαχέει αυτά (μαγνητικά πεδία), στον περιβάλλοντα χώρο, και κυριολεκτικώς “μολύνει” ηλεκτρομαγνητικώς τον χώρο που εργάζεται ο ελεγκτής του μετατροπέα, με τελικό αποτέλεσμα την αποτυχία της ορθής λειτουργίας του μετατροπέα. Αλλά ακόμη και στην περίπτωση περισσοτέρων πηνίων των δύο, δεν δύνανται να προσομοιωθούν, ως έχοντα άνιση μαγνητική ζεύξη μεταξύ των. Ένεκα της αδυναμίας του Ltspice να προσομοιώσει μαγνητικούς πυρήνες, με δύο και πλέον τυλίγματα (με ένα δύναται δια της χρήσεως του μοντέλου Chan[1] , για τις πολυφασικές πολυ-παλμικές ανορθωτικές διατάξεις υιοθετήθηκε το μοντέλο του γραμμικού πυρήνα.

Στο μοντέλο του Μ/Σ γραμμικού πυρήνα, ισχύουν οι ακόλουθες υποθέσεις – παραδοχές (οι οποίες βεβαίως αποκλίνουν από την πραγματικότητα):

1. Ο πυρήνας δεν κορδύνεται ποτέ.
2. Οι σύμφυτες παρασιτικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων είναι συγκεντρωτικές και όχι κατανεμημένες κατά μήκος του τυλίγματος.
3. Οι σύμφυτες παρασιτικές χωρητικότητες των τυλιγμάτων είναι συγκεντρωτικές και όχι κατανεμημένες κατά μήκος του τυλίγματος, και σίγουρα δεν συνεκτιμάται η ανισοκατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, στο εκάστοτε τυλίγμα γεγονός πολύ σοβαρό, διότι η διάρρηξη (διάτρηση) της μόνωσης αυτού έχει ακριβώς αυτό το αίτιο.
4. Δεν υπάρχουν απώλειες πυρήνα. (απώλειες δινορρευμάτων, και απώλειες υστέρησης)
5. Δεν συνεκτιμάται το φαινόμενο μαγνητοσυστολής.
6. Δεν συνεκτιμάται το φαινόμενο ηλεκτρομαγνήτη, το οποίο είναι λίαν κρίσιμο, στην περίπτωση του ελασματοποιημένου, ή και φερριτικού πυρήνα με διάκενο, όπου το μήκος του μεταβάλλεται δυναμικά λόγω μηχανικής παραμόρφωσης του υλικού του διακένου, λόγω της ισχυρής ελκτικής δύναμης που αναπτύσσεται από την όδευση του ρεύματος εντός του τυλίγματος. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει πάντοτε χώρα στα πηνία εξομάλυνσης.
7. Ο συντελεστής σύζευξης που είναι εγγενής σε όλους τους Μ/Σ (είτε ισχύος είτε σήματος) ορίζεται διά της παραμέτρου K (coupling factor), αλλά δεν συνεκτιμώνται οι γεωμετρικές ιδιότητες του πυρήνα, που σφόδρα επηρεάζουν αυτόν, αλλά ορίζεται απλώς σαν μια υφερετική υπολογιστική σταθερά. Στους Μ/Σ Ισχύος άμεσα μετρήσιμη είναι η (σχετική)

τάση βραχυκύκλωσης, που εμπεριέχει τον συντελεστή σύζευξης (αναπαριστάμενο ως L_k , μαζί με τα στοιχεία σειράς R_k .

8. Δεν δύναται να προσομοιωθούν οι μαγνητικοί παρακάμπτες (magnetic shunt), γεγονός που απορρέει από την μη γεωμετρική συνεκτίμηση των στοιχείων.

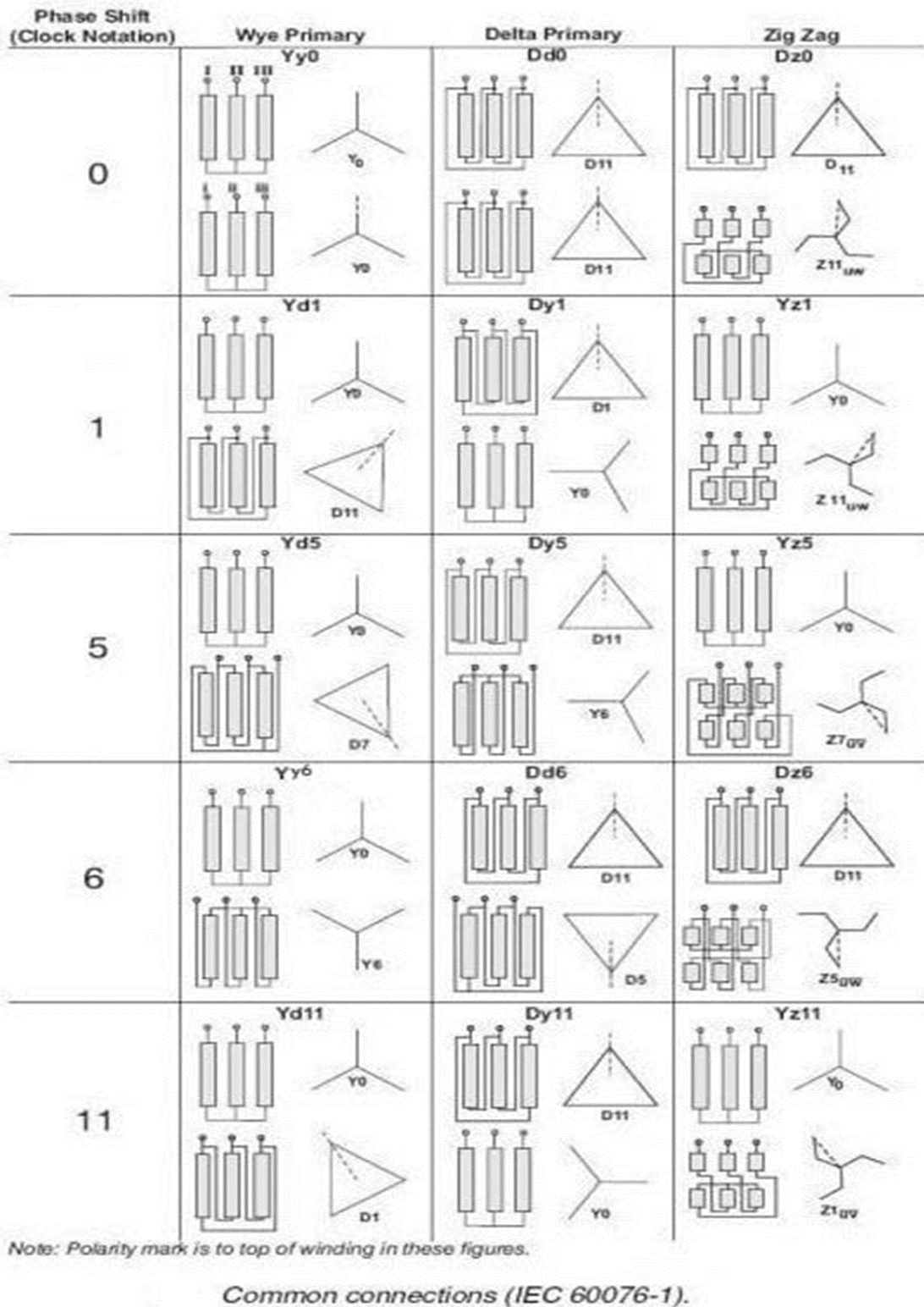
Ακόμα και στην περίπτωση των πηνίων χωρίς πυρήνα, πολλές εξ-απλοποιήσεις γίνονται, που επίσης απέχουν κατά πολύ από την πραγματικότητα:

1. Η αυτεπαγωγή του πηνίου, και τα σύμφυτα παρασιτικά, είναι συγκεντρωμένα σε ένα σημείο.
2. Το ρεύμα που διατρέχει το πηνίο εισέρχεται στο ένα άκρο, και εξέρχεται από το άλλο ακαριαία, γεγονός εξόχως εξωπραγματικό, δηλαδή δεν συνεκτιμώνται φαινόμενα διάδοσης.
3. Το πηνίο δεν έχει κάποια πόλωση στο χώρο, δεν επάγει μαγνητικά πεδία, αλλά ούτε και περισυλλέγει από αυτόν.
4. Στην περίπτωση των 3-φασικών Μ/Σ, τριών (3) ή και πέντε (5) σκελών, δεν είναι εφικτή η συνεκτίμηση της μαγνητικής ζεύξης από την μια κολώνα περιέλιξης σε κάποια άλλη, γεγονός το οποίο επίσης διαφεύγει της πραγματικότητας.

Η επίλυση και εφαρμογή μοντελοποίησης του καθενός από των ως άνω υπολογιστικών – θεωρητικών θεμάτων αποτελούν μέγα επιστημονικό θέμα. Για την ειδική μελέτη των ανωτέρω φαινομένων λίαν σπουδαίες είναι οι πηγές [10], [11].

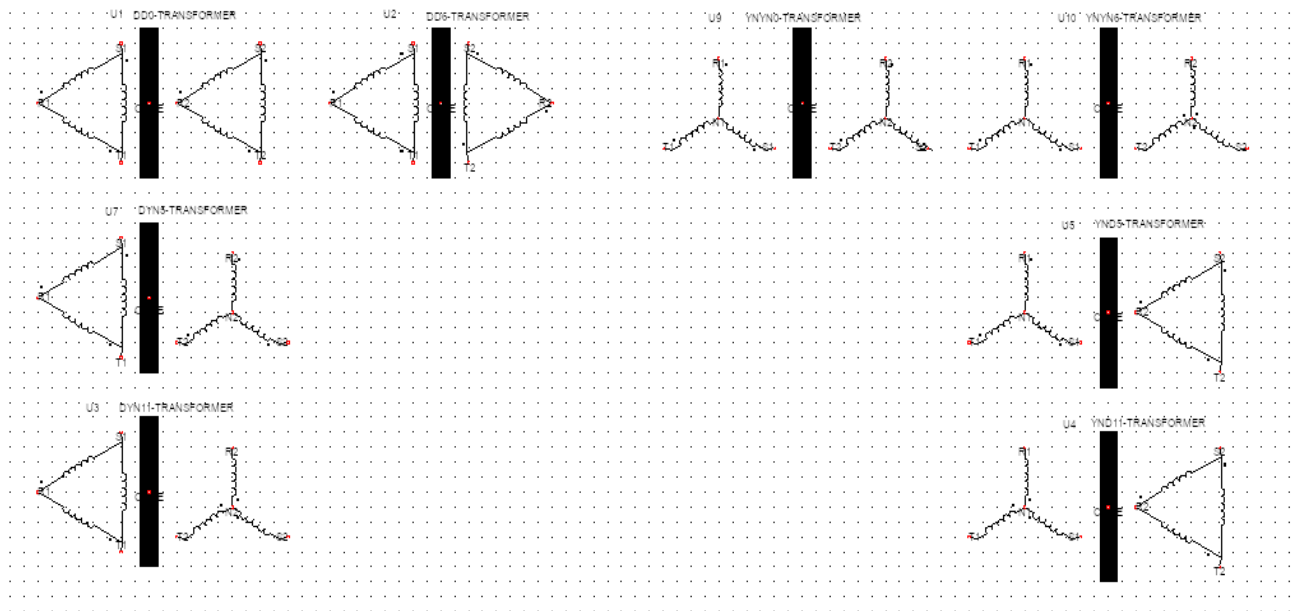
3.2 Τριφασικοί Μετασχηματιστές Ανορθωτικών Διατάξεων – Διανυσματικές Κατηγορίες

Στις διάφορες ανορθωτικές διατάξεις χρησιμοποιούνται διάφορες διανυσματικές κατηγορίες τριφασικών Μ/Σ. Για λόγους αρτιότητας, στον κατωτέρω πίνακα αναφέρονται μερικές.



Σχήμα 4. Διανυσματικές κατηγορίες τριφασικών Μ/Σ

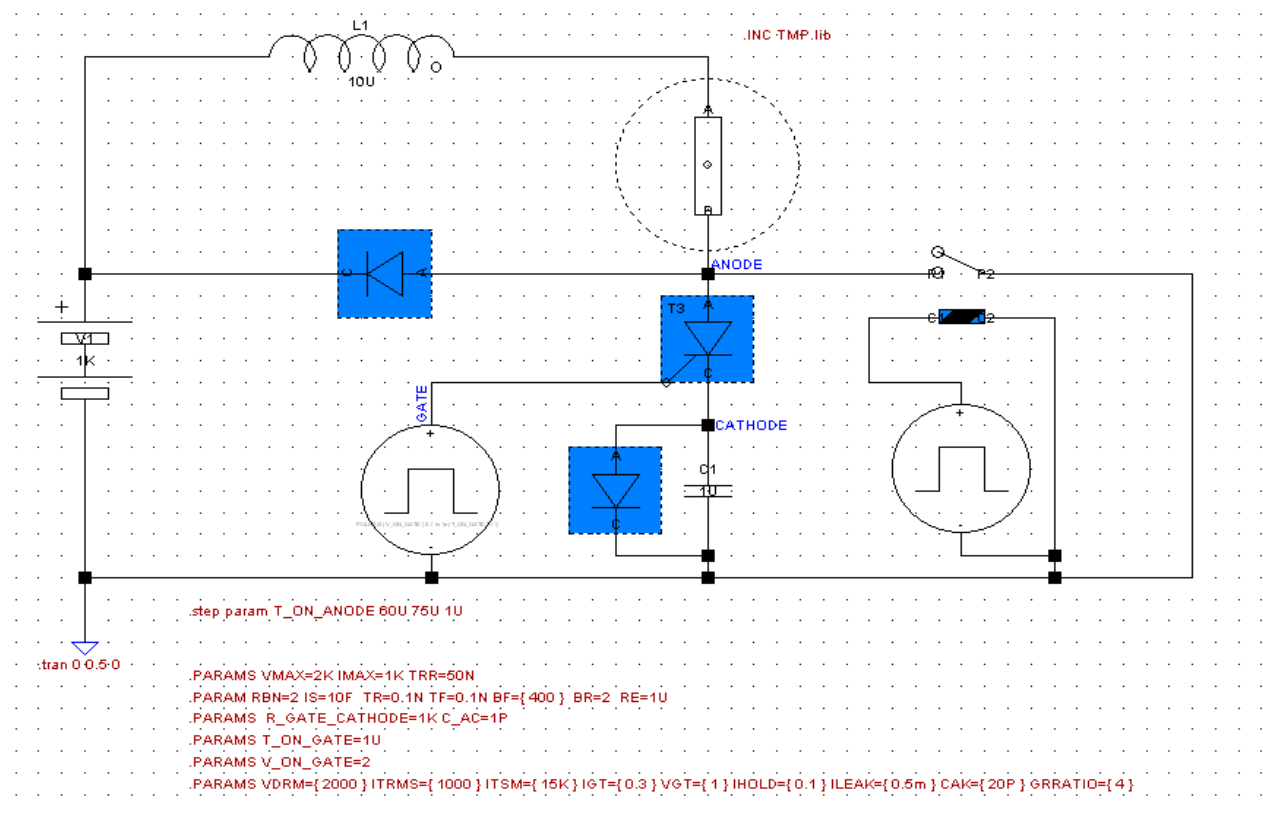
Και η μοντελοποίηση τους έγινε ως ακολούθως, τόσο συμβολικά όσο και υποκυκλωματικά (subcircuits).



Σχήμα 5. Μοντελοποίηση διανυσματικών κατηγοριών τριφασικών Μ/Σ

Όλων των ανωτέρω συμβόλων τα υποκυκλώματα βιβλιοθήκης ευρίσκονται στο αρχείο παραρτήματος. Βεβαίως υπάρχουν και άλλες ομάδες τριφασικών Μ/Σ.

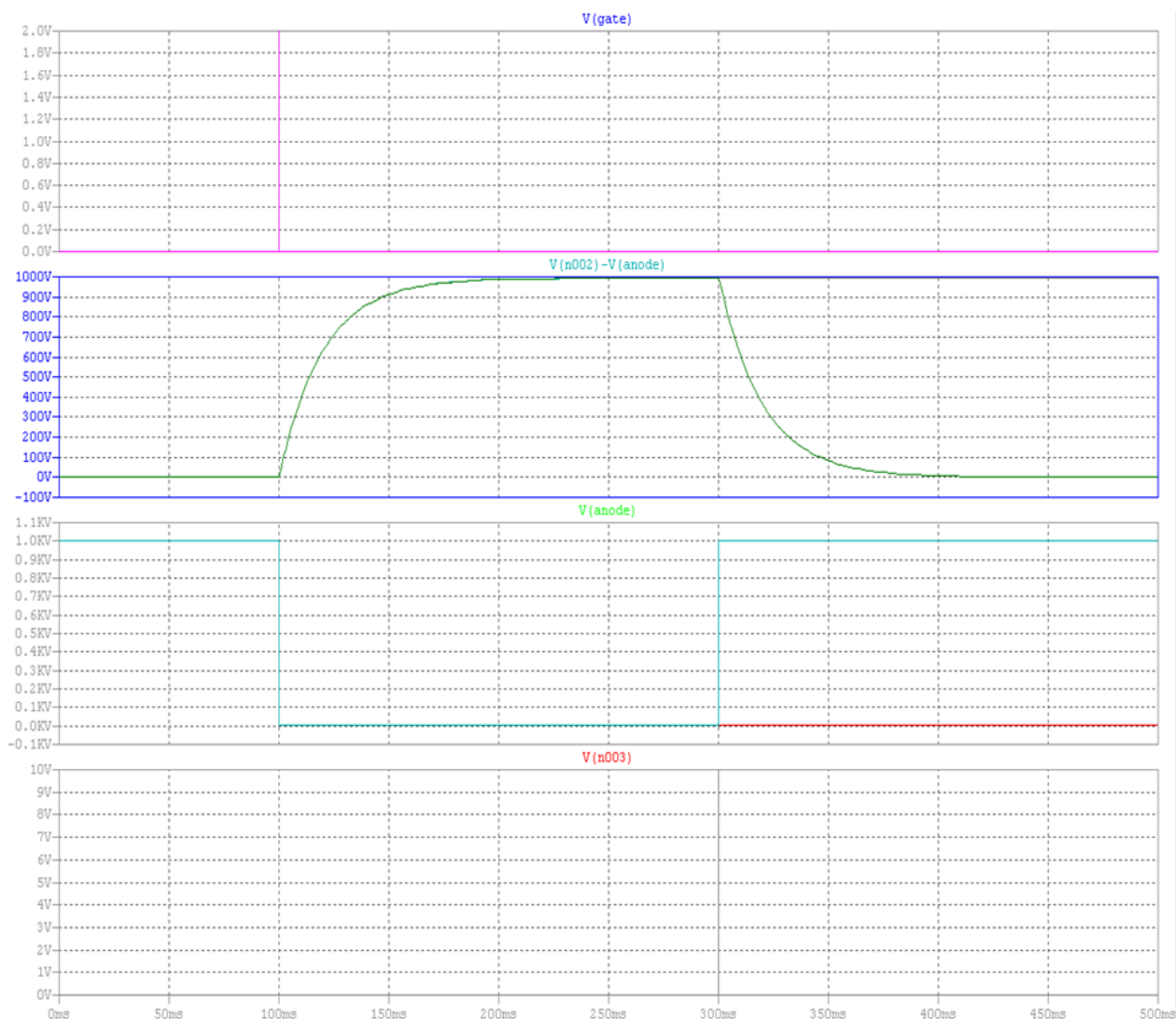
Προκειμένου να επιτευχθούν οι διάφορες προσομοιώσεις πέραν των ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων, διάφορα ημιαγωγικά μοντέλα είναι απαραίτητα. Για την αξιολόγηση της σύγκλισης και της ακρίβειας των ως άνω μοντέλων, το ακόλουθο κύκλωμα τίθεται προς προσομοίωση:



Σχήμα 6. Κύκλωμα αξιολόγησης σύγκλισης μοντέλων thyristors

Διά του αυτού κυκλώματος, αξιολογούνται οι λειτουργικές παράμετροι στα διάφορα μοντέλα των thyristor, όπως π.χ. απαιτούμενη τάση και ρεύμα έναυσης, πτώση τάσης του thyristor σε κατάσταση πλήρους αγωγιμότητας, χρόνος σβέσης αυτού, και άλλα.

Ειδικότερα διά της χρήσεως της εντολής .STEP PARAM, αυξάνεται μικρο-μετρικά ο χρόνος που είναι ON (αγώγιμος) ο ηλεκτρονόμος ο οποίος παρακάμπτει το ρεύμα που άγει το Thyristor, και ελέγχεται από μια ηλεκτρονική γεννήτρια παλμών μεταβλητού Ton, και δια αυτού του τρόπου εκτιμάται ο χρόνος που είναι αναγκαίος για να καταστεί το Thyristor, μη αγώγιμο (Tq), κατόπιν διέλευσης μεγάλου ρεύματος από την άνοδο προς την κάθοδο. (Εδώ 2000A). Είναι λίαν ενδιαφέροντες οι ακόλουθες προσομοιωτικές κυματογραφίες:



Σχήμα 7. Κυματομορφές προσομοιώσεων αξιολόγησης μοντέλων thyristors

Η πρώτη κυματομορφή είναι η πυροδότηση στο GATE του Thyristor. Αυτό δεν καθίσταται αγώγιμο με διάρκεια πυροδότησης $< 10\mu\text{s}$, διότι φέρει στην άνοδό του “βαρέα” αυτεπαγωγή 10Mili-Henry, και ορθώς (δεν καθίσταται αγώγιμο), ενώ καθίσταται αγώγιμο με διάρκεια παλμού έναυσης άνω των 10 micro-sec. Εάν μειωθεί η τιμή της αυτεπαγωγής ανόδου τότε μειώνεται και η αναγκαία διάρκεια του παλμού πυροδότησης για έναυση.

Επειδή η αντίσταση φορτίου είναι 0.5Ω , το ρεύμα ανόδου φτάνει τα 2000Amps, πριν την σβέση (Δεύτερη κυματομορφή). Εάν η διάρκεια όπου το thyristor δεν άγεται από ρεύμα (αλλά οδεύει από τον ηλεκτρονόμο παράκαμψης) είναι μικρότερη από 75Micro-sec, τότε αυτό δεν σβήνει. Το φαινόμενο αυτό καλείται **COMMUTATION FAULT**, και είναι καταστροφικό όταν συμ-

βαίνει σε πρακτικά κυκλώματα, για τον λόγο αυτό ο σχεδιαστής του κυκλώματος πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός.

Το μοντέλο Thyristor “THYRISTOR-T3” έδειξε σχετικά καλή συμπεριφορά, παρουσιάζοντας πτώση τάσης ορθής φοράς περίπου 1.9Volt, στα 2000Amps, και χρόνο σβέσης 75Micro-sec. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι η κυκλωματική μοντελοποίηση Thyristor πολύ μεγάλης ισχύος είναι εξαιρετικά δυσχερείς και δεν συναντάται εύκολα στην βιβλιογραφία.

Στα μεγάλης ισχύος thyristor, η διάταξη του προσμειγμένου κρυστάλλου, έχει τέτοια γεωμετρική διάταξη, αλλά και κατανομή πρόσμιξης (doppingprofile), ώστε να ελαχιστοποιεί τις διακοπτικές απώλειες, και τις απώλειες αγωγής. Αυτά αναπτύσσονται επαρκώς στην πηγή [12].

Κατά την έναυση του Thyristor, ένας ισχυρός παλμός έναυσης έρχεται στο ηλεκτρόδιο πύλης (gate) αυτού, και ένα μικρό μέρος του δίσκου καθίσταται αγωγίμο στην περιοχή της πύλης και πέριξ αυτής. Εάν στο κύκλωμα ανόδου – καθόδου υπάρχει μικρή (ή καθόλου) αυτεπαγωγή, τότε το μέγεθος $dI(\text{anode})/dt$, λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές, (το ανοδικό ρεύμα λαμβάνει μεγάλες τιμές σε ελάχιστο χρόνο). Το αγωγίμο μέρος (επί του συνολικού δίσκου του Thyristor) πέριξ του ηλεκτροδίου πύλης, πρέπει υποχρεωτικώς να διαχειριστεί μεγάλο ρεύμα, εντός της μικρής αυτής περιοχής. Η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τεράστιες τιμές, πολύ μεγαλύτερες από $0.45\text{A}/\text{mm}^2$ η οποία είναι η μέγιστη αποδεκτή τιμή εντός του ημιαγωγού [13] κι έτσι έχουμε **δημιουργία θερμού πλάσματος** στην περιοχή αυτή, **τουτέστιν βέβαιη καταστροφή του Thyristor**. Οι κατασκευαστές δίνουν ένα μέγιστο όριο για την αποφυγή του φαινομένου αυτού. Ακολουθεί ένας χαρακτηριστικός πίνακας με τα δεδομένα αυτά. Η τιμή μεγίστου ρυθμού ανόδου ρεύματος dI_a/dt , δηλώνεται τόσο σαν άπαξ τιμή (Non – Repetitive), όσο και επαναλαμβανόμενα (Repetitive).

Distributed Gate Thyristors ~ All types

| Type | V_{DRM}/V_{RRM} Range (Note 3) (V) | T_q 200V/ μ s (μ s) | I_{TAV} T_{HS} 55°C (A) | I_{TRM} (A) 50% Duty Cycle $T_{SINK} 55^\circ\text{C}$ | | | | | | di/dt Rep/Non-Rep (A/ μ s) | I_{TRMS} 25°C (A) | I_T 25°C (A) | $I_{TSM(1)}$ $V_R \leq 60\%$ V_{RRM} $T_j 125^\circ\text{C}$ 10ms (Note 1) (A) | $I_{TSM(2)}$ $V_R \leq 10V$ $T_j 125^\circ\text{C}$ 10ms (Note 1) (A) |
|---------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--|-------|--------|---------------------------------|-------|--------|--|---------------------------|----------------------|--|--|
| | | | | Sine wave | | | Square wave 100 A/ μ sec | | | | | | | |
| | | | | 1 KHz | 5 KHz | 10 KHz | 1 KHz | 5 KHz | 10 KHz | | | | | |
| R210CHx | 200-1400 | 20-30 | 425 | 1200 | 1060 | 890 | 800 | 685 | 670 | 500/1000 | 870 | 690 | 4300 | 4700 |
| R185CHx | 200-1200 | 20-25 | 500 | 1500 | 1350 | 1200 | 1000 | 850 | 820 | 500/1000 | 1030 | 820 | 6000 | 6600 |
| R216CHx | 200-1200 | 20-30 | 560 | 1750 | 1550 | 1300 | 1180 | 1000 | 975 | 500/1000 | 1125 | 925 | 6300 | 6900 |
| R180CHx | 200-1000 | 12-20 | 810 | 2200 | 1700 | 1400 | 1500 | 1200 | 1050 | 1000/1500 | 1690 | 1260 | 8000 | 8800 |
| R190CHx | 200-1400 | 25-35 | 830 | 2600 | 2050 | 1650 | 1650 | 1450 | 1350 | 1000/1500 | 1715 | 1320 | 8500 | 9350 |
| R200CHx | 1200-2100* | 60-75 | 880 | 2600 | 1900 | 1500 | 1700 | 1400 | 1200 | 1000/1500 | 1765 | 1455 | 7500 | 8250 |
| R219CHx | 200-1200 | 15-25 | 930 | 2700 | 2100 | 1650 | 1800 | 1500 | 1350 | 1000/1500 | 1895 | 1505 | 9000 | 9900 |
| R220CHx | 200-1200 | 20-30 | 959 | 3000 | 2300 | 1800 | 1950 | 1700 | 1500 | 1000/1500 | 1950 | 1550 | 9400 | 10800 |
| R270CHx | 200-800 | 10-20 | 990 | 3000 | 2500 | 2150 | 2000 | 1950 | 1900 | 1000/1500 | 2000 | 1628 | 11000 | 12000 |

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά thyristors

Για την απομείωση των διακοπτικών απωλειών, την αύξηση του μεγίστου ρυθμού ανόδου ρεύματος ως προς τον χρόνο, ($dI/dt_{critical}$), και την αποφυγή του ως άνω περιγραφόμενου φαινομένου

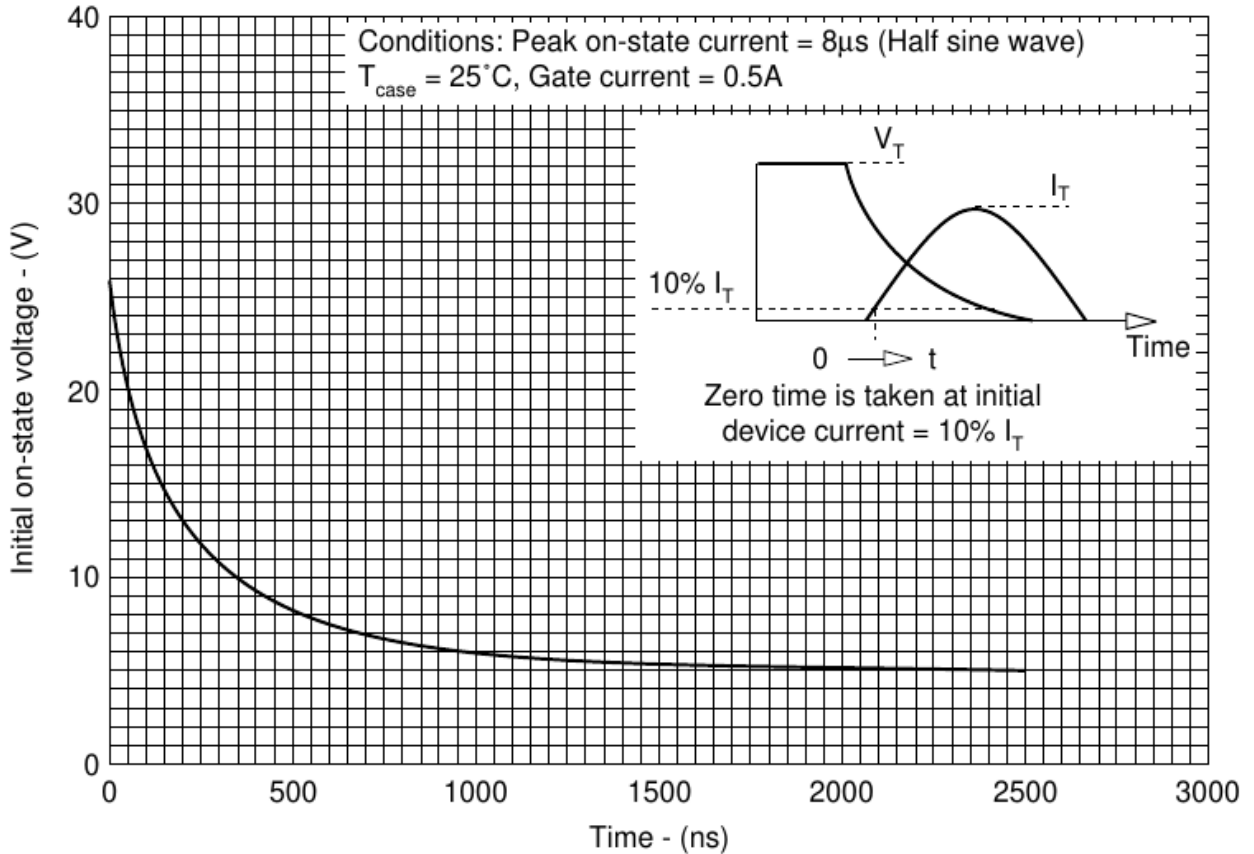
νου, χρησιμοποιείται η ακόλουθη τεχνοτροπία, η οποία ονομάζεται distributed gate – cathode structure. Κατά την τεχνική αυτή, το ηλεκτρόδιο της πύλης δεν είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του δίσκου, αλλά κατανέμεται (**distributed gate**) με τρόπο βέλτιστο σε όλη την επιφάνειά του. Τα θυρίστορς αυτού του τύπου είναι βέλτιστα για την κατασκευή μετατροπέων DC/AC υψηλής συχνότητας (επαγωγική θέρμανση) [13]. Τα ακόλουθα σχήματα που σχεδιάζονται από τους κατασκευαστές έχουν την ιδιότητα να καθιστούν αγωγή την μέγιστη επιφάνεια του δίσκου, στον συντομότερο δυνατό χρόνο, κατά τον τρόπο που παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4. Distributed Gate Thyristors

Είναι προφανές και εδώ ότι όλα τα συγκεντρωτικά μοντέλα των Thyristor απέχουν από την πραγματικότητα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα αναφερόμενα Thyristor, είναι ήδη βελτιστοποιημένα για λειτουργία σε υψηλές συχνότητες, της τεχνοτροπίας distributed gate Thyristor, της κατασκευάστριας εταιρείας West Code Semiconductors (Τώρα ονομάζεται Litle-Fuse) [14].

Στο ακόλουθο γράφημα που δημοσιεύει η DYNEX SEMICONDUCTOR, φαίνεται σαφέστατα ότι η τάση μεταξύ ανόδου – καθόδου του Thyristor ACR44U, δεν καταρρέει άμεσα μετά την προ-ροδότηση, αλλά ακολουθεί την εικονιζόμενη καμπύλη, και με την πάροδο χρόνου 1.5 micro-second, φτάνει στην ονομαστική τάση ορθής φοράς. Η μέτρηση αυτή αποδεικνύει στιβαρώς, ότι ΔΕΝ ΚΑΘΙΣΤΑΤΑΙ ΑΓΩΓΙΜΗ Η ΟΛΗ ΎΔΡΑ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΑΚΑΡΙΑΙΑ, αλλά μέρος αυτής, (περιοχή πύλης και πέριξ), και οπωσδήποτε η αγωγιμότητα του Thyristor αυξάνεται προοδευτικά, με την διέλευση ορισμένου χρόνου, σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 8. Τυπική μεταβολή αρχικής τάσης σε κατάσταση αγωγής συναρτήσει χρόνου ThyristorACR44U[15]

Παρότι το φαινόμενο είναι λίαν σοβαρό, μικρός αριθμός κατασκευαστών το αναφέρει. Βέβαια στην περίπτωση των ανορθωτικών διατάξεων, πάντοτε υπάρχουν αυτεπαγωγές στο κύκλωμα, οι συχνότητες είναι χαμηλές, και τα κατασκευαστικά όρια αυτά δεν προσεγγίζονται εξ αιτίας της ύπαρξης της εγγενούς αυτεπαγωγής της ανορθωτικής διάταξης (Μετασχηματιστές, Αυτεπαγωγή Γραμμής), όντως όμως λίαν κρίσιμα.

Για την περίπτωση όπου το thyristor εκτελεί λειτουργία διακόπτη ισχύος χωρητικής εκφόρτισης (Power Capacitor Discharge), ειδικά thyristor κατασκευάζονται όπως το ακόλουθο:

$$\begin{aligned} V_{DRM} &= 4.5 \text{ kV} \\ V_{RRM} &= 18 \text{ V} \\ I_{PULSE} &= 110 \text{ kA} \\ V_{Dcmax} &= 2.8 \text{ kV} \end{aligned}$$

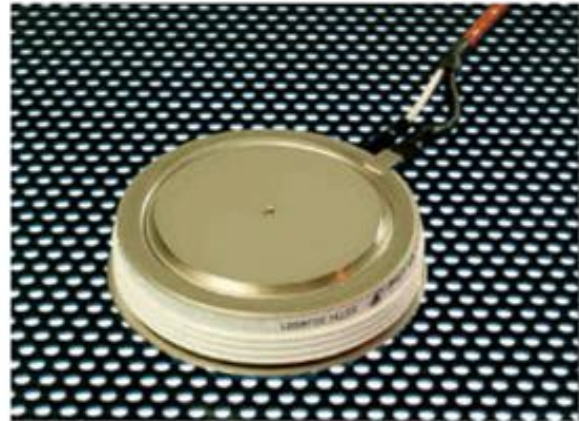
High Current High di/dt Switch for Pulsed Power Applications

5STH 30J4501

Doc. No. 5SYA 08PP-01 Oct. 01

Features

- Asymmetric Design
- For Single or Repetitive Pulse Applications
- Very High di/dt Capability
- Free Floating Silicon Technology
- Glazed Ceramic Presspack Housing
- High Interdigitated Gate Structure
- Optimized as Closing Switch
- High Reliability



Εικόνα 5. ABBthyristor 5STH30J4501

Με τα ακόλουθα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

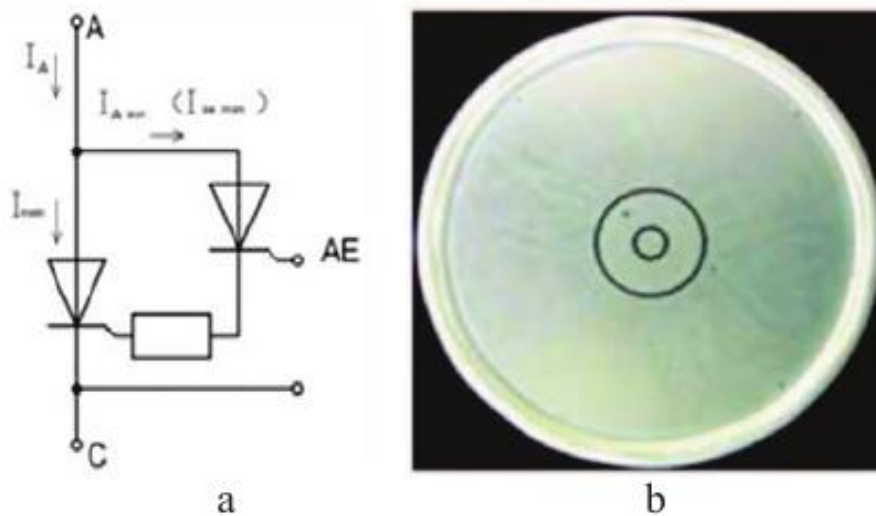
Electrical Data

| | | | |
|-------------|---|---------------------------------------|---|
| V_{DRM} | Repetitive peak of-state voltage | 4.5 kV | $T_j = 125^\circ\text{C}$ |
| V_{RRM} | Repetitive reverse blocking voltage | 18 V | $T_j = 125^\circ\text{C}$ |
| V_{DC} | Permanent DC voltage for 100 FIT failure rate | 2.8 kV | At $T_j \leq 125^\circ\text{C}$. Ambient cosmic radiation at sea level in open air. |
| I_{PULSE} | Max. Pulse Current | 110 kA | Half sine wave, $T_j \leq 50^\circ\text{C}$, $t_p \leq 250 \mu\text{s}$ |
| di/dt | Max. current rate of rise | 20 kA/ μs | 1 Hz |
| V_{GT} | Max. Gate trigger voltage | 4.0 V | di/dt (min) 100 A/ μs $T_j = 25^\circ$ |
| I_{GT} | Recomm. Gate trigger current | 120 A | $T = 20 \mu\text{s}$ |
| I^2t | Limiting load integral | $1.5 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ | $T_p = 250 \mu\text{s}$, $T_j = 50^\circ\text{C}$ |
| V_{T0} | Threshold voltage | 1.24 V | $T_j = 50^\circ\text{C} / T_j = 125^\circ\text{C}$ |
| r_T | Slope resistance | 0.28 m Ω 0.30 m Ω | $T_j = 50^\circ\text{C}$ $T_j = 125^\circ\text{C}$ |
| V_T | Voltage Drop | 2.08 V 2.15 V | $T_j = 50^\circ\text{C}$, $I_r = 3000\text{A}$ $T_j = 125^\circ\text{C}$, $I_r = 3000\text{A}$ |
| T_{Don} | Turn-on delay time | $\leq 0.9 \mu\text{s}$ | |

Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ABBthyristor 5STH30J4501

Στον ανωτέρω τύπο **διακοπτικού Thyristor 5STH30J4501**, η κατασκευάστρια εταιρεία δηλώνει το **εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος di/dt 20,000AMPS/micro-sec**, και χαρακτηρίζεται σαν **IGNITRON REPLACEMENT**. Πρόκειται για πάρα πολύ ισχυρό εξάρτημα, και μάλλον είναι διαβαθμισμένο, καθότι χρησιμοποιείται στους Μαγνητικούς επιταχυντές, και στα RailGun, που προσφάτως αναπτύσσουν οι Η.Π.Α., για πολεμικούς σκοπούς. Πέραν αυτής της τεχνοτροπίας,

και για την ευχερέστερη πυροδότηση των μεγάλων Thyristor, εφαρμόστηκε η τεχνική **ring amplification gate-cathode structure**, όπου ένα μικρό Pilot-Thyristor πυροδοτείται πρώτο, και αυτό με την σειρά του πυροδοτεί μια μεγαλύτερη περιοχή του συνολικού δίσκου, και κατ' αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται κάπως το μέγιστο επιτρεπτό di/dt , όχι όμως τόσο όσο η ανωτέρω τεχνολογία.



Σχήμα9. Ring amplification gate-cathode structure

Προκειμένου να συνεκτιμηθούν τα ανωτέρω πραγματικά – γεωμετρικά στοιχεία **ένα τρισδιάστατο μοντέλο είναι απαραίτητο**, αλλά λείπει από την βιβλιογραφία, ή τουλάχιστον διαφεύγει της γνώσεώς μας και τα υπάρχοντα μοντέλα μελετούν αυτά αποσπασματικώς. Απόπειρες για την επίλυση των αυτών θεμάτων μπορούν να μελετηθούν στις πηγές [16], [17], [18], [19].

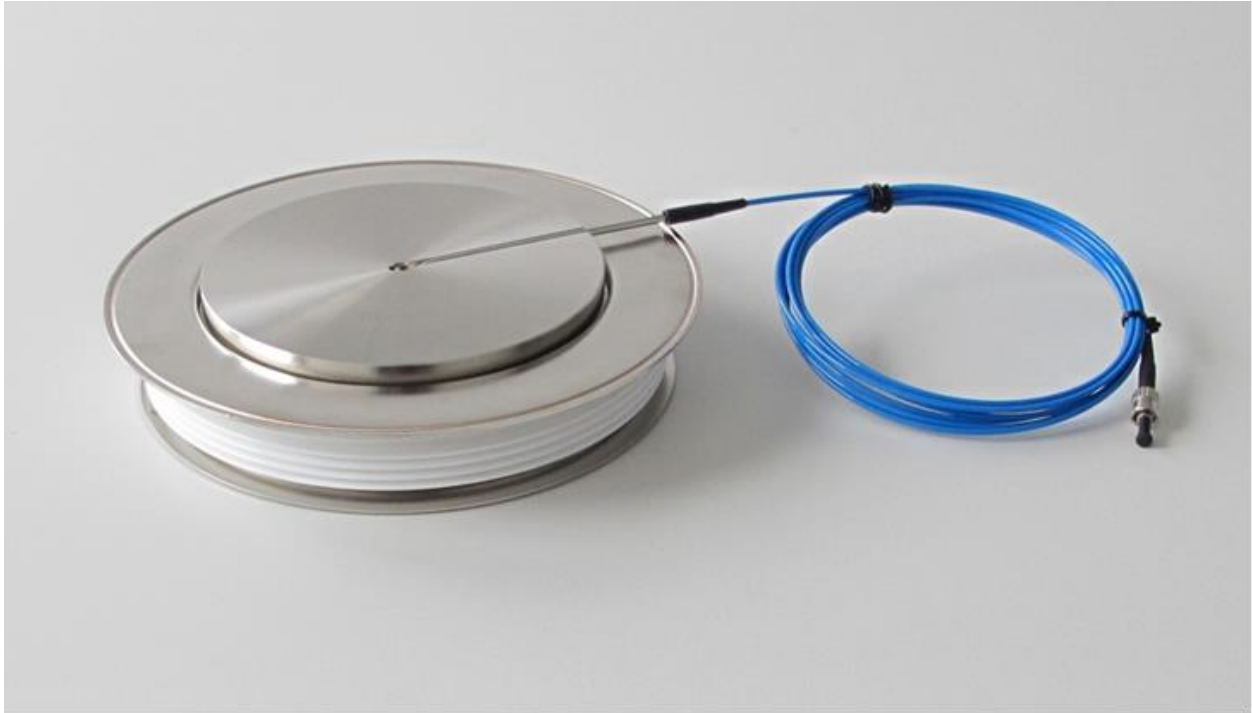
3.3 Light Triggered Thyristor

Πρόκειται για ένα Thyristor μεγάλης ισχύος, που πυροδοτείται μέσω οπτικής ίνας, και επιτυγχάνει ισχυρότατη απομόνωση του κυκλώματος ισχύος από το κύκλωμα ελέγχου. Είναι κατάλληλο για ανορθωτικές διατάξεις πολύ Υψηλής τάσεως και Ισχύος, με εφαρμογή σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διά μέσω συνεχούς ρεύματος (HVDC power transmission). Στον σχηματιζόμενο αύλακα που φαίνεται στην ακόλουθη φωτογραφία εισέρχεται η οπτική ίνα και πυροδοτεί το οπτο-Thyristor στο κέντρο του. Το ηλεκτρονικό σύμβολό του είναι:





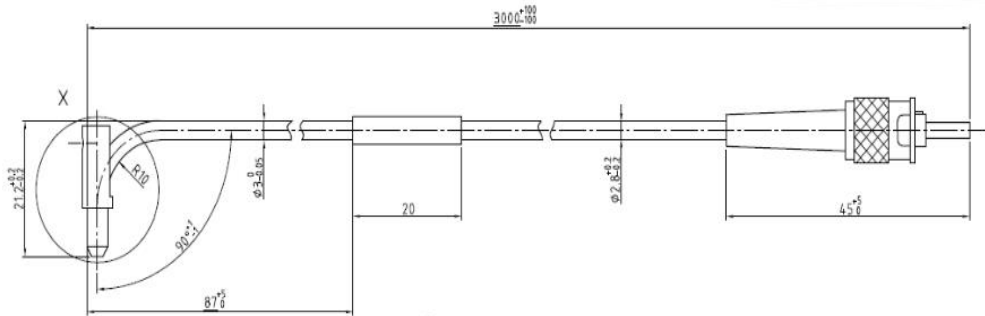
Σχήμα 10. LightTriggeredThyristor

Και μια τυπική φωτογραφία αυτού ακολουθεί: (T4003NH EUPEC – INFINEON)



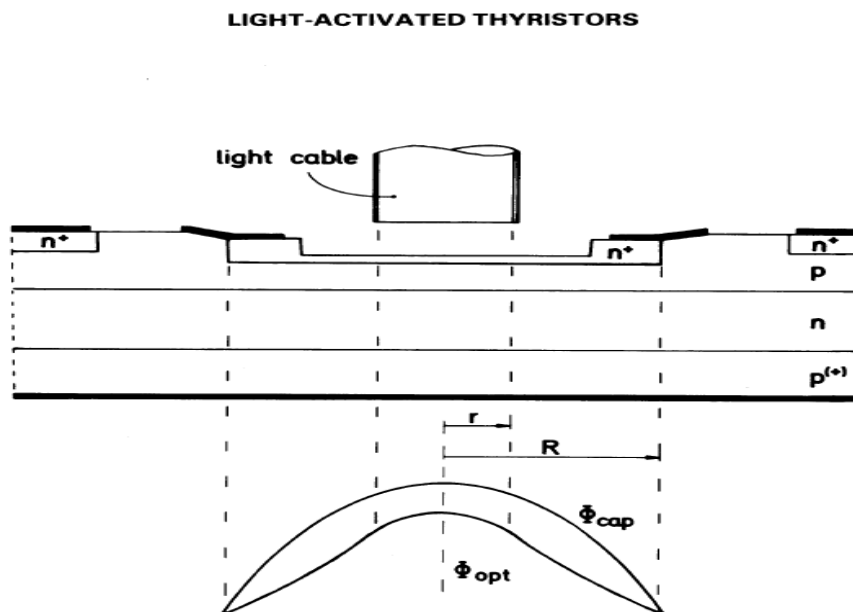
Εικόνα6. Light Triggered Thyristor T4003NH EUPEC – INFINEON [20]

Διά του εξαρτήματος αυτού επετεύχθη η ανόρθωση πολύ υψηλών τάσεων, στα συστήματα μεταφοράς Ηλεκτρικής ενεργείας Συνεχούς ρεύματος, διά πολύ-παλμικών ανορθωτικών διατάξεων. Η τυπική μορφή μιας οπτικής ίνας είναι ως ακολούθως:

| Zubehör Accessories | Technische Information / technical information |  Infineon Technologies Bipolar GmbH & Co. KG |
|---|---|---|
| Lichtwellenleiter LTT 150mm,172mm Fiber-optic cables LTT 150mm,172mm | | |
| <p>Key Parameters</p> <p>Length 3000mm</p> <p>Mono glass fiber 200µm</p> <p>Pre tested with pull force of 350N/mm²</p> <p>Compatible with Laser diode SPL PL90</p> <div style="text-align: right;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> | | |

Εικόνα 7. Τεχνικές πληροφορίες οπτικής πυροδότησης thyristor[20]

Διά μέσω δικτύου Συνεχούς Ρεύματος Υψηλής Τάσεως είναι εφικτό να διασυνδεθούν Δίκτυα εναλλασσόμενου διαφορετικής συχνότητας. Π.χ. Η.Π.Α. 60 Hz, με Ευρώπη 50 Hz. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η κάθετος τομή ενός οπτικώς πυροδοτούμενου μέσω οπτικής ίνας Thyristor (LIGHT-ACTIVATED THYRISTOR):



Σχήμα 11. Κάθετη τομή ενός οπτικώς πυροδοτούμενου Thyristor μέσω οπτικής ίνας [12]

Η τέλεια απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων ισχύος και ελέγχου στους μετατροπείς υψηλής τάσης επιτυγχάνεται διά της οπτικής πυροδότησης Thyristor. Η οπτική ίνα είναι άριστος ηλεκτρικός μονωτής, ενώ είναι άριστος αγωγός του φωτός, ακόμη και καμπύλινη. Η άμεση οπτική πυροδότηση των Thyristor με λέιζερ ή LEDs, δηλαδή η πυροδότηση με εσωτερικά παραγόμενο φωτορεύμα, απαιτεί την ανάπτυξη πυλών Thyristor υψηλής ευαισθησίας πυροδότησης. Η υψηλή ενίσχυση ισχύος πυροδότησης και οι διαφορετικές μέθοδοι αποφυγής εσφαλμένης πυροδότησης (falsetriggering) επιβάλλουν το σχεδιασμό Thyristor, τα οποία μπορούν να πυροδοτηθούν με ισχύ στην περιοχή των milliwatt. Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία του μηχανισμού πυροδότησης, λαμβάνονται σοβαρά υπόψη από τους κατασκευαστές [21].

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ – ΠΟΛΥΠΑΛΜΙΚΩΝ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν όλες οι προσομοιώσεις πολυφασικών – πολυπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων ισχύος.

4.1 Τριφασική Ανόρθωση 6 Διόδων

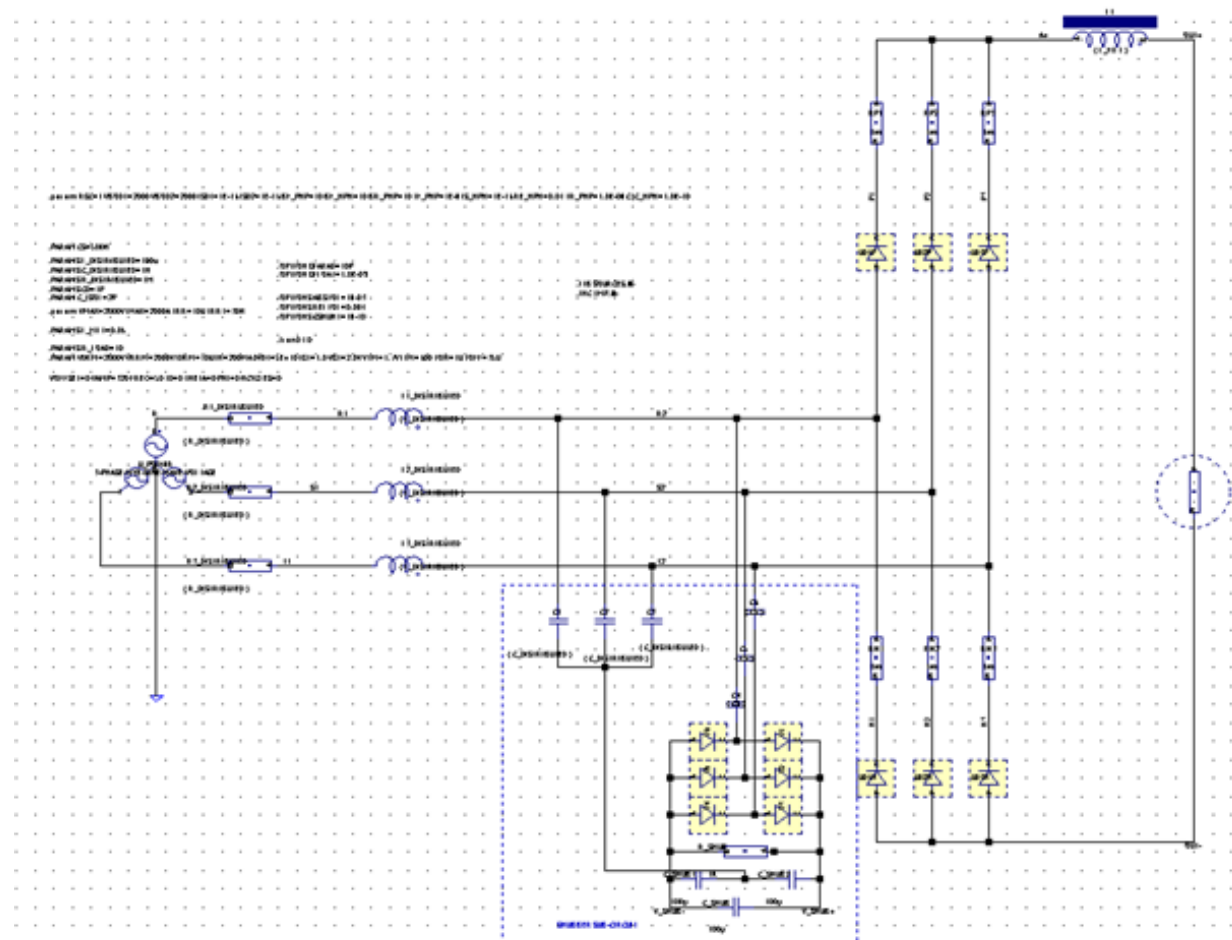
Η ύπαρξη του πηνίου L_DISTRIBUTED, αναπαριστά (ως σωρευτική τιμή) την κατανεμημένη αυτεπαγωγή του αγωγού που παραδίδει ρεύμα στην ανορθωτική διάταξη, από την 3-φασική πηγή, και εμπεριέχει την αυτεπαγωγή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ της ανορθωτικής διάταξης, και την αυτεπαγωγή περιορισμού ανωτέρων αρμονικών προς το δίκτυο. **Η αυτεπαγωγή αυτή (ως σωρευτική τιμή), περιορίζει τον ρυθμό μεταβολής ρεύματος (di/dt) στα ανορθωτικά στοιχεία. Σε κάθε περίπτωση μια ελάχιστη τιμή είναι ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΗ, από όπου και αν προέρχεται.** Έτσι η μετάβαση του ρεύματος από στοιχείο σε στοιχείο δεν είναι ακαριαία αλλά διαρκεί

κάποιον χρόνο (t_u). Η γωνία που αντιστοιχεί στον χρόνο αυτό ορίζεται σαν γωνία μετάβασης (μ). Το φαινόμενο αυτό που συμβαίνει σε όλες τις ανορθωτικές διατάξεις είναι η **μετάβαση του ανορθωμένου ρεύματος από έναν βρόγχο σε ένα άλλο (commutation)**. Υποχρεωτικώς μέρος του βρόγχου είναι το φορτίο εξόδου DC. Από την πλευρά του εναλλασσομένου, ο βρόγχος αλλάζει διαδρομή. Το αίτιο αυτού είναι η τάση μετάβασης (commutation voltage). Στην κατωτέρω 3-φασική ανορθωτική διάταξη η τάση μετάβασης είναι η Πολική τάση, δηλαδή η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο διαδοχικών φάσεων που τελείται η μετάβαση.

4.1.1 Μετάβαση Του Υπό Ανόρθωση Ρεύματος Από Κλάδο Σε Κλάδο

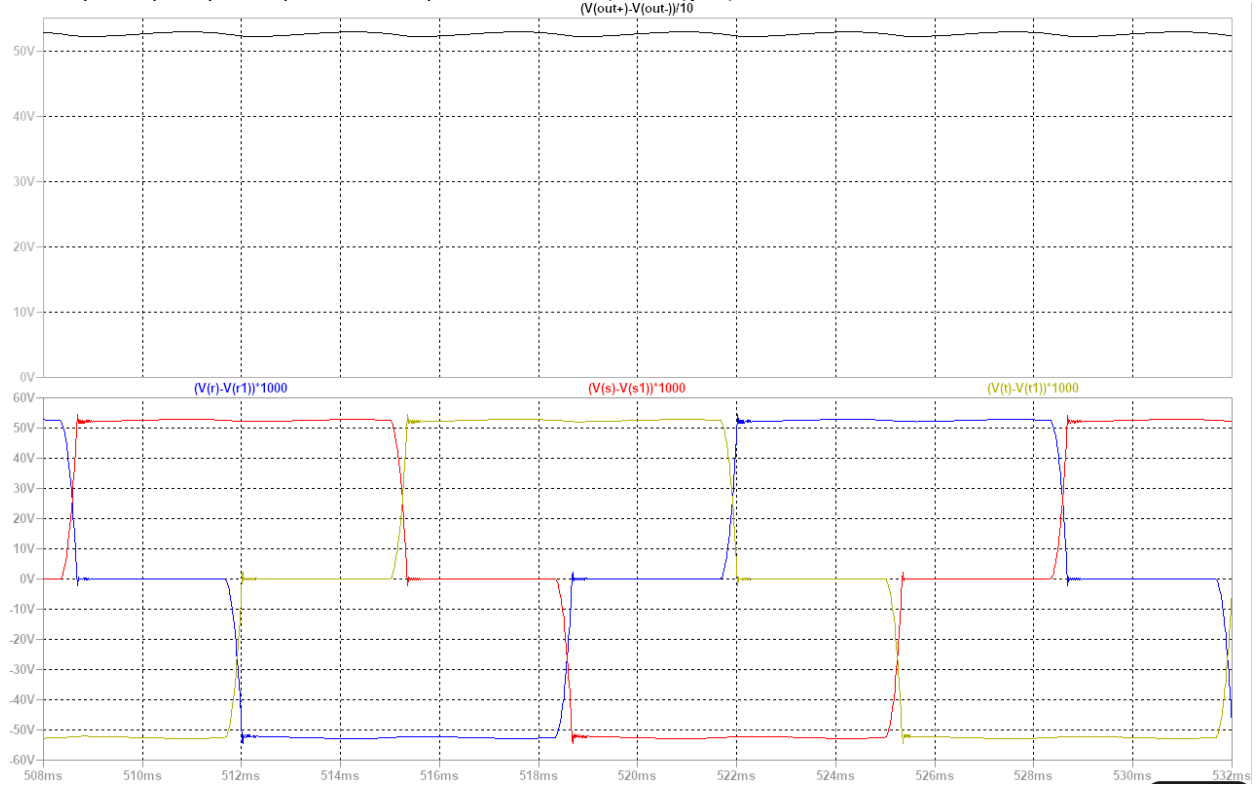
Κείμενο. Κατωτέρω αναπαρίσταται το κύκλωμα μιάς 3-φασικής ανόρθωσης με 6 διόδους, με συγκεντρωμένα τα παρασιτικά στοιχεία, φίλτρο εξομάλυνσης αρκετά μεγάλο, ώστε το ρεύμα εξόδου να είναι χωρίς διακοπές, **και έναν πρωτότυπο αποσβέστη μεταβατικών υπερτάσεων**. (Transient Voltage Supression Circuit, or Snubber Circuit). Οι τιμές των στοιχείων είναι ως ακολούθως:

L_DISTRIBUTED=100u, R_DISTRIBUTED=1Mili-OHM, C_DISTRIBUTED=1N, 3-PHASE-WYE-SINE-WAVE-VOLTAGE=320Volt (Amplitude), R_LOAD=10 OHM, L_FILT=50 Mili-Henry.



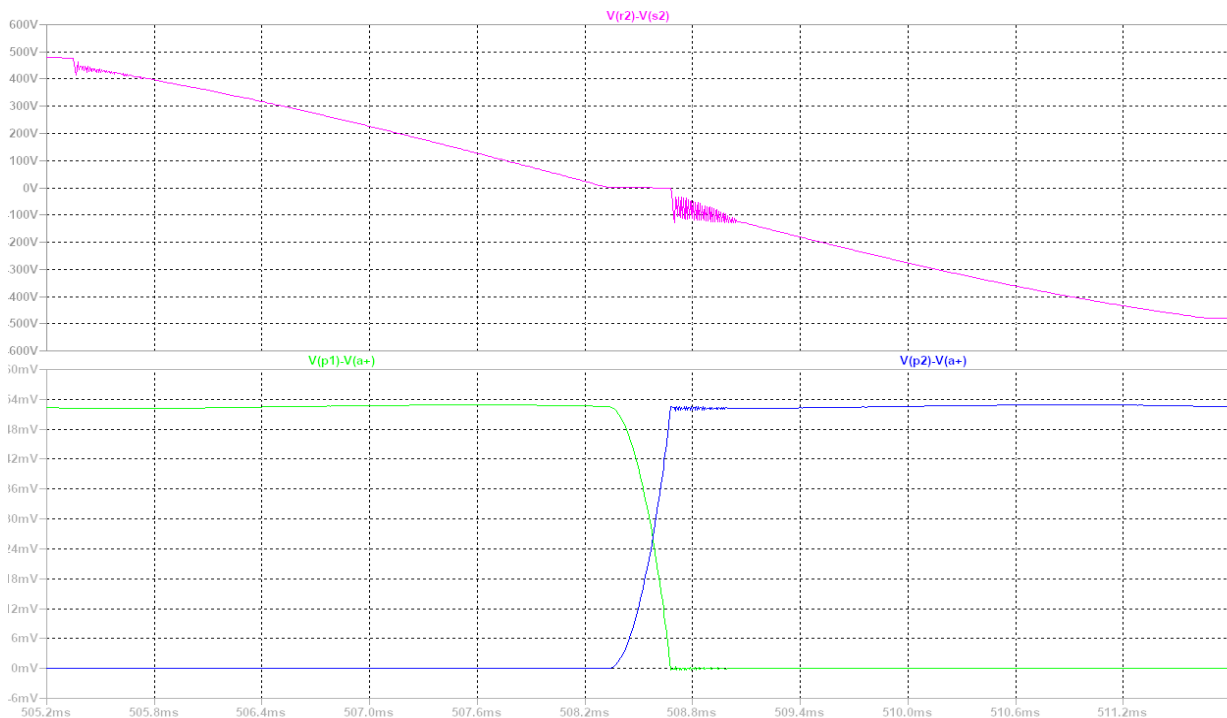
Σχήμα 12. Κύκλωμα προσομοίωσης

Η κυματομορφή του ρεύματος από την πλευρά του εναλλασσόμενου, και DC ρεύμα στο φορτίο 10Ω:



Σχήμα 13. Κυματομορφές προσομοίωσης

Στην πάνω κυματομορφή φαίνεται διά της προσομοιωτικής απεικόνισης ότι το συνεχές ρεύμα φορτίου, είναι σχετικά σταθερό, λόγω της σχετικά μεγάλης αυτεπαγωγής L_{filt} , η δε τιμή του είναι περί τα 54Amps, και στην κάτω προσομοιωτική απεικόνιση παρατηρούμε ότι για κάποιο χρονικό διάστημα (t_u) άγουν ταυτόχρονα δύο διαδοχικά ανορθωτικά στοιχεία, και κατά συνέπεια η τάση μεταξύ των δύο αυτών διαδοχικών στοιχείων είναι μηδέν (πρακτικά είναι η πτώση τάσεως ορθής φοράς των στοιχείων), όπως άλλωστε φαίνεται και στην ακόλουθη προσομοιωτική απεικόνιση:

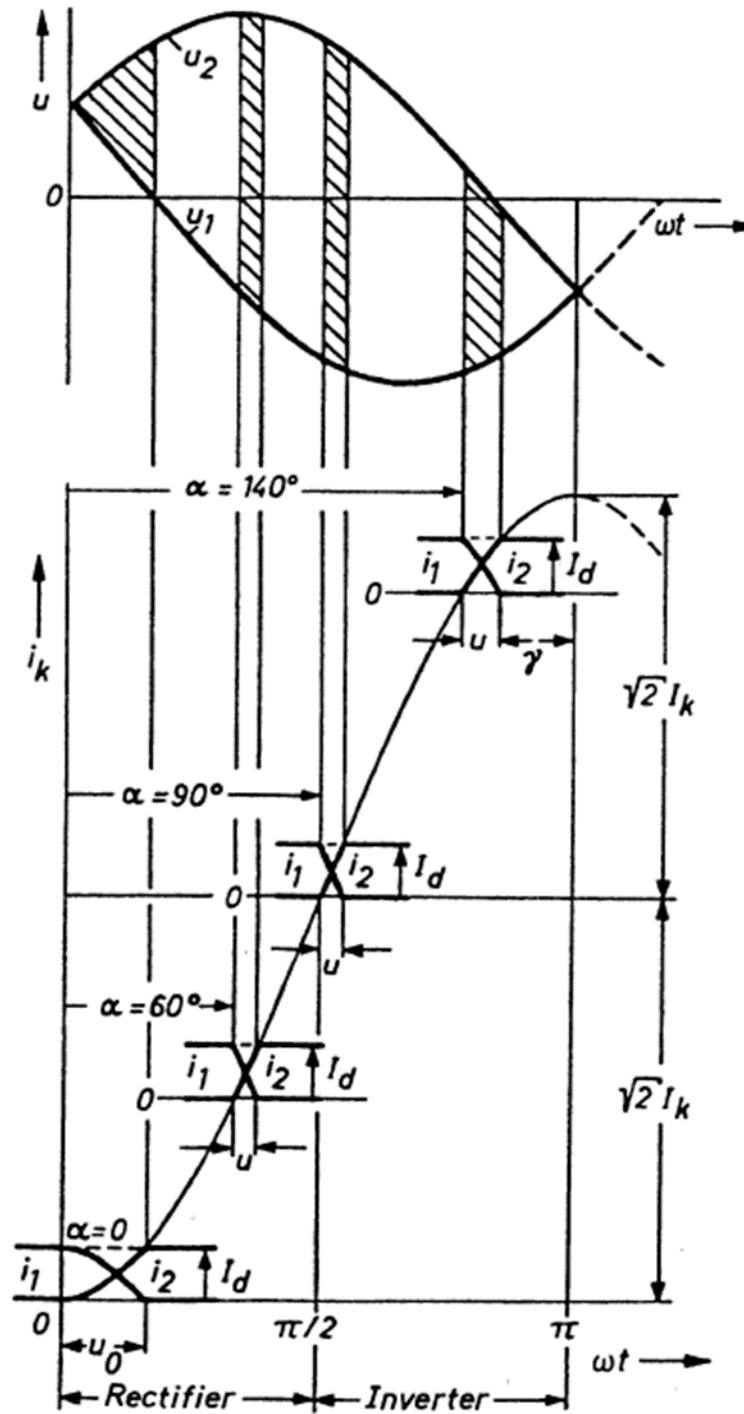


Σχήμα 14. Κυματομορφές προσομοίωσης

Κατά την διάρκεια της μετάβασης ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$i_1(\omega t) + i_2(\omega t) = I_{DC}$$

Σε αυτό το χρονικό διάστημα που ονομάζεται διάστημα αλληλεπικάλυψης (over-lap time ή commutation time), άγουν ταυτόχρονα δύο ανορθωτικά στοιχεία, και μπορεί να εκφραστεί σε ηλεκτρική γωνία (over-lap angle ή commutation angle) μ . Εάν τώρα η μετάβαση γίνεται με γωνία καθυστέρησης έναυσης α , (Delay Angle DA), ισχύει το ακόλουθο νομογράφημα στο οποίο αναπαρίσταται γραφικώς η μεταβολή της γωνίας μετάβασης μ , σε σχέση με την γωνία καθυστέρησης έναυσης α , στην τριφασική ανόρθωση έξι στοιχείων [22]. Το φαινόμενο της μετάβασης, (που είναι η αλλαγή βρόγχου του ανορθωμένου ρεύματος από τον έναν κλάδο σε έναν άλλο), διαρκεί κάποιο χρόνο (t_u), έχει αίτιο την σωρευτική αυτεπαγωγή (L_k) που υπάρχει μεταξύ της εναλλασσόμενης τάσης της πηγής AC, και της εισόδου της ανορθωτικής διάταξης, αλλά προκαλεί και πτώση τάσης στην έξοδο αυτής. Έτσι κατά την διάρκεια της μετάβασης ισχύουν τα ακόλουθα, που μας επιτρέπουν τον καθορισμό της μ .



Νομογράφημα 1 [8]

Επεξήγηση συμβόλων:

- u_k : Τάση βραχυκύκλωσης (συνάρτηση του χρόνου)
- $U_{k(rms)}$: Πλάτος τάσης βραχυκύκλωσης
- L_k : Συνολική αυτεπαγωγή μεταξύ πηγής τάσεως και δυο διαδοχικών πόλων της ανορθωτικής διάταξης
- I_{DC} : Συνεχές ρεύμα παρεχόμενο στο φορτίο
- u : γωνία κατά την οποία άγουν ταυτόχρονα δύο ανορθωτικά στοιχεία, (γωνία μετάβασης)

Και για γωνία καθυστέρησης έναυσης 0 DEG, ισχύουν τα κάτωθι:

$$u_k = \sqrt{2} U_{k(rms)} \sin(\omega t)$$

$$\int_0^u u_k d(\omega t) = \int_0^{I_{DC}} L_k di_k$$

$$\sqrt{2} U_{k(rms)} \int_0^u \sin(\omega t) d(\omega t) = L_k I_{DC}$$

$$\sqrt{2} U_{k(rms)} (1 - \cos(u)) = L_k I_{DC}$$

$$\cos(u) = \frac{\sqrt{2} U_{k(rms)} - L_k I_{DC}}{\sqrt{2} U_{k(rms)}}$$

$$\cos(u) = 1 - \frac{L_k I_{DC}}{\sqrt{2} U_{k(rms)}}$$

Για γωνία καθυστέρησης έναυσης α , γίνεται:

$$\cos(u) = \cos(\alpha) - \frac{L_k I_{DC}}{\sqrt{2} U_{k(rms)}}$$

Η μέση τιμή της τάσης DC στο φορτίο θα είναι για $\alpha=u=0^\circ$:

$$U_{DC}(a=0, u=0) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{k(rms)} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{k(rms)} \left[\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{3}\right) \right]$$

$$U_{DC}(a=0, u=0) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{k(rms)} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

Ενώ για $0^\circ > \alpha > 60^\circ$

$$U_{DC}(a, u) = U_{DC}(a=0, u=0) \cdot \frac{\cos(\alpha) + \cos(\alpha + u)}{2}$$

4.2 Τριφασική Ημιαλεγχόμενη Ανόρθωση (3 Θυρίστορ - 3 Διόδων) Και Διόδου Ελευθέρως Διελεύσεως

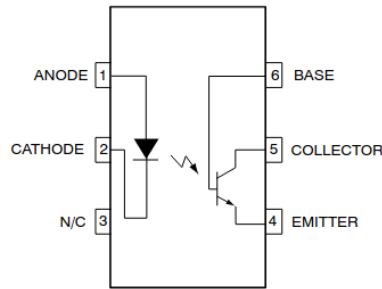
Η ως άνω τιλούμενη ανορθωτική διάταξη είναι αρκετα διαδεδομένη σε δύο διαφορετικές μορφές:

Δια θυρίστορ κοινής καθόδου (4.2.2), και Διά θυρίστορ κοινής ανόδου (4.2.1) . Περιγράφονται ακολούθως με τα σχετικά κυκλώματα πυροδότησης.

4.2.1 Με κύκλωμα πυροδότησης των Thyristor μέσω optocoupler MOC8204

Στο κύκλωμα κατωτέρω φαίνεται η 3-φασική ημιαλεγχόμενη ανορθωτική διάταξη, και ένα πρωτότυπο κύκλωμα πυροδότησης των Thyristor μέσω optocoupler MOC8204 (400VOLT, 50mA), χωρίς Μετασχηματιστές απομόνωσης στην πυροδότηση), όπου η απομονωμένη πυροδότηση ε-

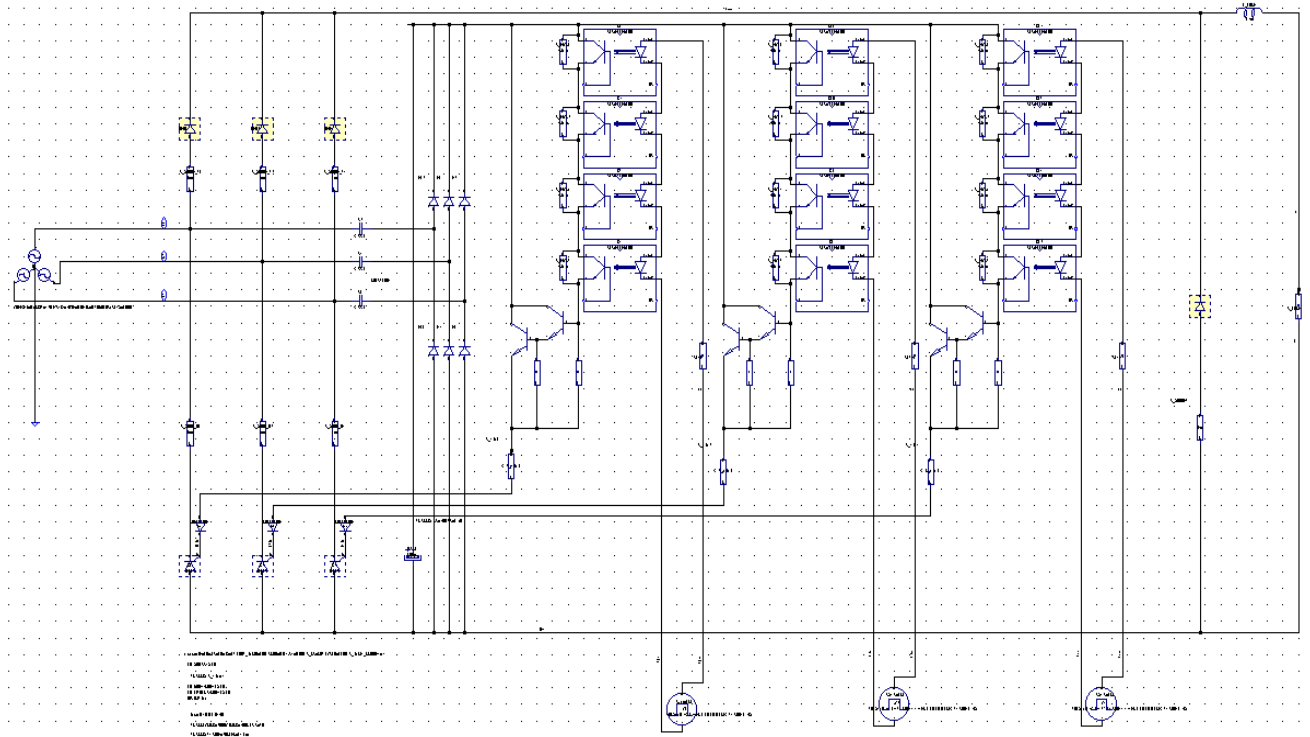
πιτυγχάνεται διά του **οπτικού ζεύκτη MOC8204**, μέγιστης (απο)μονωτικής ικανότητας 2500Vrms. Το εσωτερικό του ισοδύναμο φαίνεται κατωτέρω:



Σχήμα 15. Οπτικός ζεύκτης MOC8204 [23]

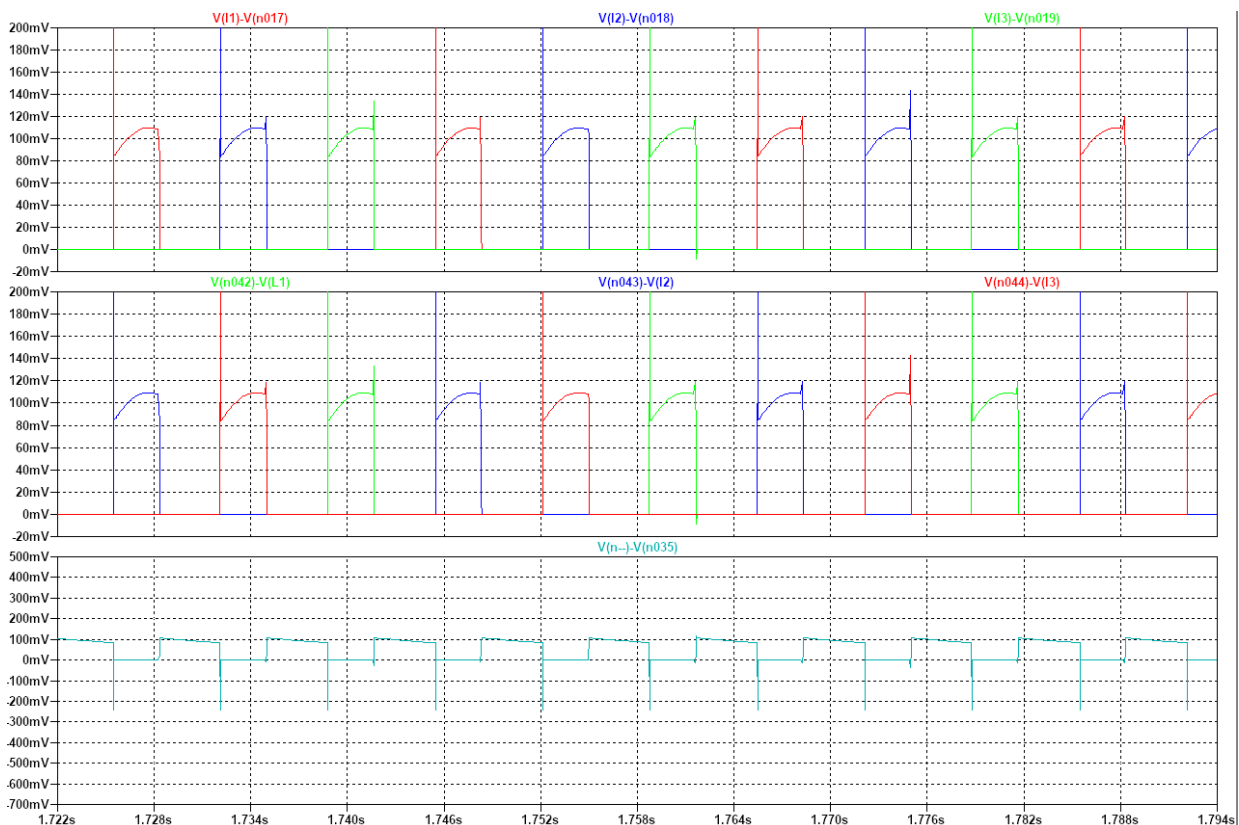
Ανά κλάδο συνδέονται 4 εν σειρά, και η συνολική διαχειριζόμενη τάση φτάνει τα 1200Volt. Για την ισοκατανομή τάσεως σε αυτά μια αντίσταση 5MΩ συνδέεται μεταξύ του Collector και του Emitter εκάστου optocoupler. Στην περίπτωση που το υπό πυροδότηση στοιχείο είναι σχετικά δυσευαίσθητης πύλης (μεγάλης ισχύος), το Darlington δύο διαδοχικών Transistor BU508A (1500 VOLT 8A, HFE~6), ενισχύει το ρεύμα πυροδότησης κατά 25 φορές περίπου. Έτσι το ακόλουθο κύκλωμα είναι γενικού σκοπού. Ένα σημαντικότερο γεγονός το οποίο διερευνήθηκε διά του προσομοιωτού, είναι **ότι ο χρόνος αποκατάστασης (recovery time, trr) της διόδου ελευθέρως διελεύσεως σφόδρα επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης της ανορθωτικής διατάξεως.** Απαιτείται δηλαδή εδώ Δίοδος ταχείας ανάκαμψης (Fast Recovery Time). Η παρατήρηση αυτή είναι λίαν λογική διότι **η δίοδος ελευθέρως διελεύσεως καλείται σχεδόν ακαριαία να αποκόψει την εφαρμοζόμενη σε αυτή ανάστροφη τάση ενώ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής του ρεύματος που ανακυκλώνει, το προερχόμενο από την συσσωρευμένη ενέργεια στο πηνίο εξομάλυνσης.** Οι αντιστάσεις 0.001Ω είναι συνδεδεμένες προκειμένου να αναπαρασταθούν τα αντίστοιχα ρεύματα. **Τα στοιχεία προσομοίωσης είναι: Τάση εισόδου 3 X 400Vac (Line to Line Voltage) 50Hz Φορτίο R_LOAD=1 OHM, L_LOAD=15 mH.**

Το κύκλωμα και τα προσομοιωτικά αποτελέσματα ακολουθούν:



Σχήμα 16. Τριφασική Ανορθωτική Διάταξη 3-Thyristor-3-Διόδων μετά διόδου Ελευθέρως Διέλευσης.

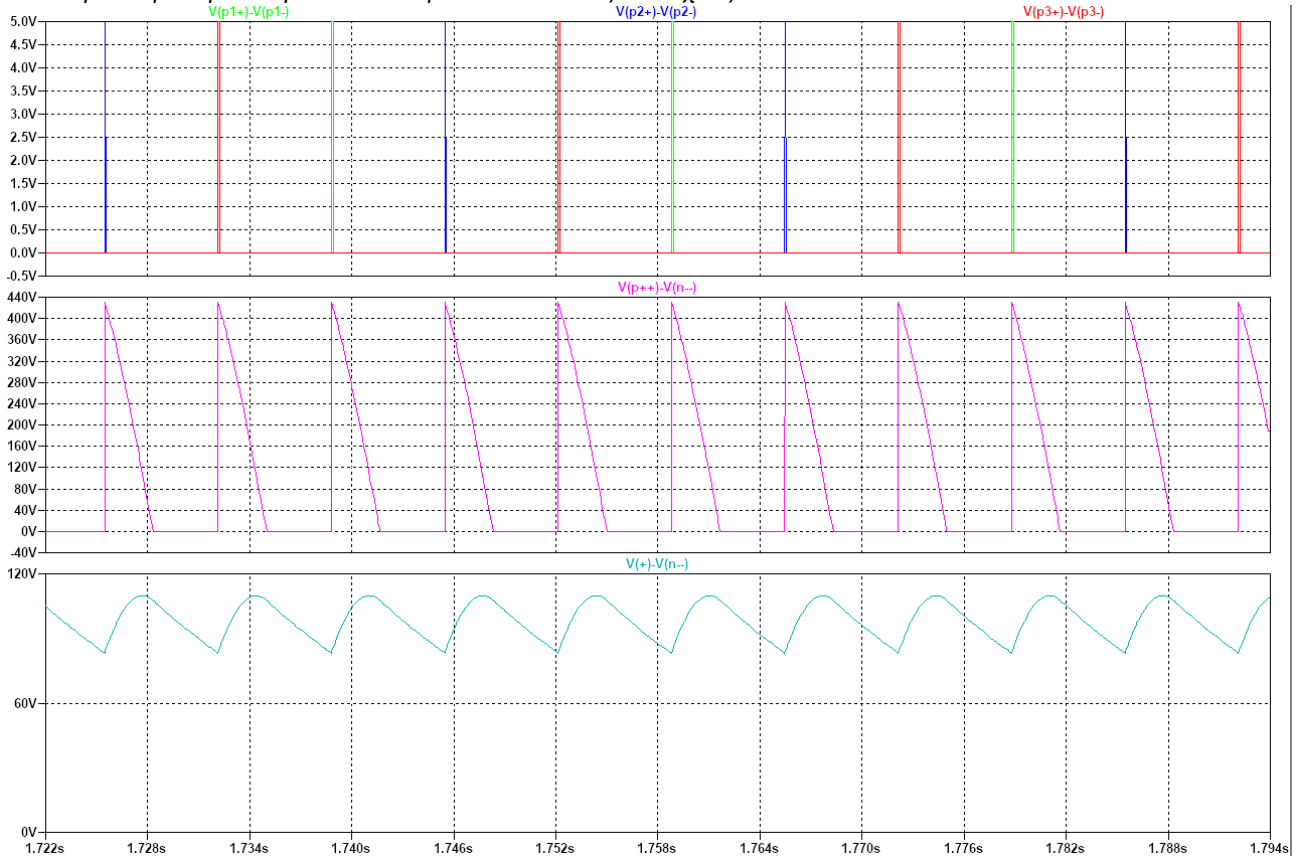
Κατωτέρω φαίνονται οι κυματομορφές των ρευμάτων ανά Thyristor, δίοδο ανόρθωσης, και διόδου ελευθέρως διέλευσης, με κλίμακα 1A/mV.



Σχήμα 17. Κυματομορφές προσομοίωσης

Οι τρεις ανωτέρω κυματομορφές των ρευμάτων εάν προστεθούν συνθέτουν το συνολικό ρεύμα φορτίου, ενώ οι κυματομορφές των τάσεων πυροδότησης, εξόδου πριν το πηνίο εξομάλυνσης, και μετά από αυτό, καθώς και τάση εξόδου στο φορτίο, φαίνονται ακολούθως:

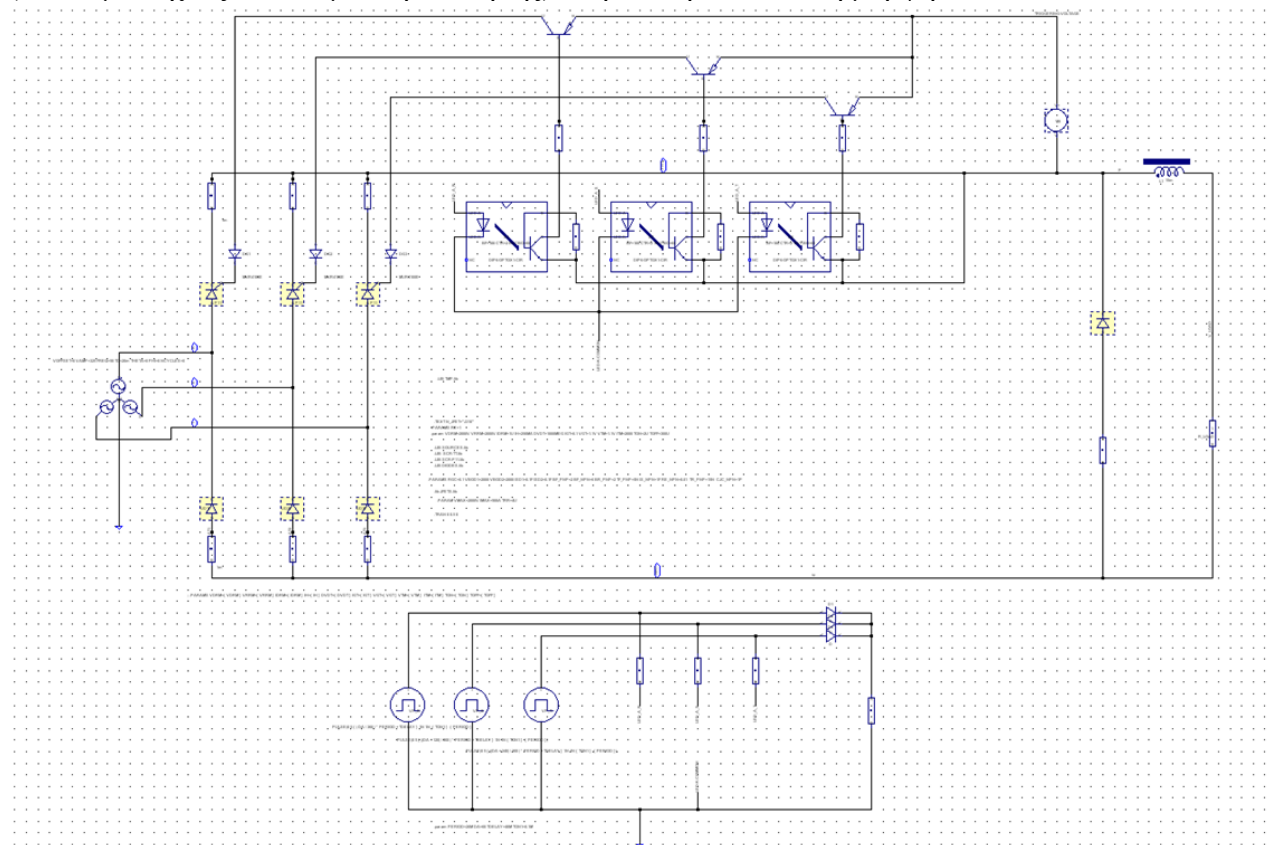
Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος



Σχήμα 18. Κυματομορφές προσομοίωσης

4.2.2 Πυροδότηση των Thyristor με μια κοινή ανεξάρτητη DC πηγή

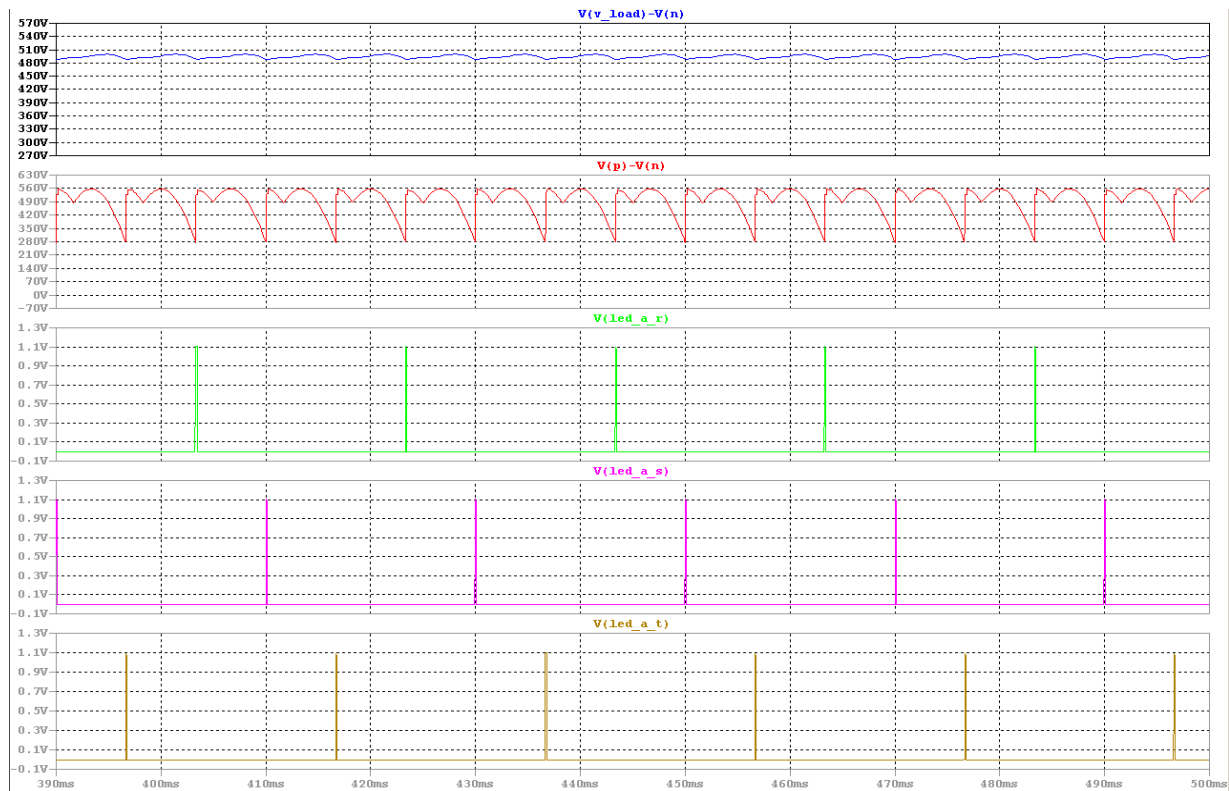
Εναλλακτικώς εάν θέλουμε πυροδότηση με μια κοινή ανεξάρτητη DC πηγή, τότε το κύκλωμα (κύκλωμα ισχύος, κύκλωμα πυροδότησης) παίρνει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 19. Κύκλωμα προσομοίωσης

Ένας ανεξάρτητος Μ/Σ για την παροχή της ενέργειας πυροδότησης με υψηλή μονωτική ικανότητα είναι επίσης απαραίτητος. Οι κυματομορφές λειτουργίας επεξηγούνται κατωτέρω:

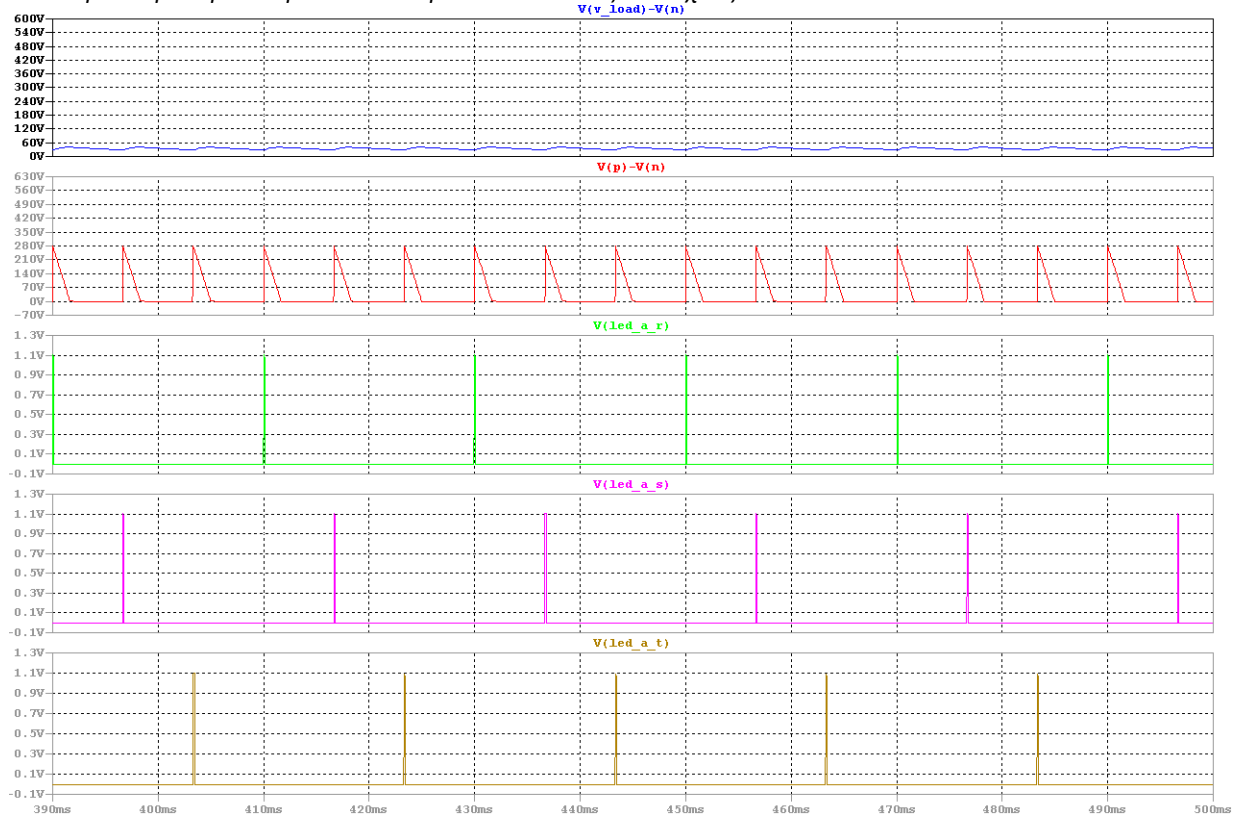
Για γωνία καθυστέρησης έναυσης 60DEG σε σχέση με την φασική τάση (πλήρη γωνία αγωγής) έχουμε τις κάτωθι κυματομορφές:



Σχήμα 20. Κυματομορφές προσομοίωσης

Με μέση τιμή της τάσης στο φορτίο 496.1 VDC. Ενώ για γωνία καθυστέρησης έναυσης 180 DEG σε σχέση με την φασική τάση (ελάχιστη γωνία αγωγής) έχουμε:

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

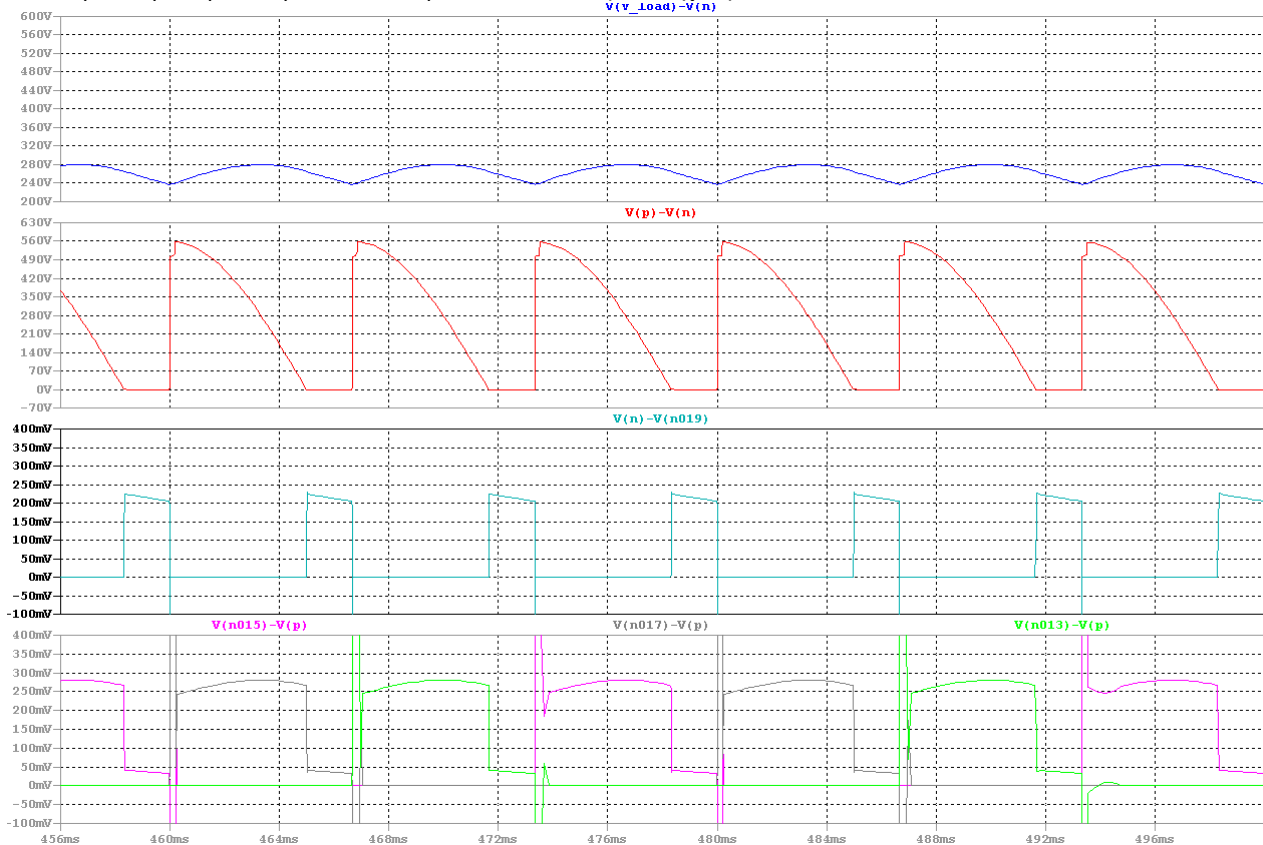


Σχήμα 21. Κυματομορφές προσομοίωσης

Μέση τιμή τάσης στο φορτίο 35 Volt περίπου. Παρατηρούμε ότι η ελάχιστη παρεχόμενη τάση στο φορτίο δεν ξεκινά από τα 0 Volts, αλλά ούτε και η μέγιστη τα φτάνει στα αναμενόμενα 550 Volt DC, αλλά περιορίζεται στα 496 Volts. Κατά συμπέρασμα η 3-φασική γέφυρα 3-Thyristor-3-διόδων+διόδου ελευθέρως διελεύσεως παρουσιάζει έναν μικρό περιορισμό στην περιοχή τάσεως DC εξόδου.

Για γωνία καθυστέρησης έναυσης 120 DEG, (ενδιάμεση κατάσταση) οι προσομοιωτικές κυματομορφές απεικονίζονται κατωτέρω:

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

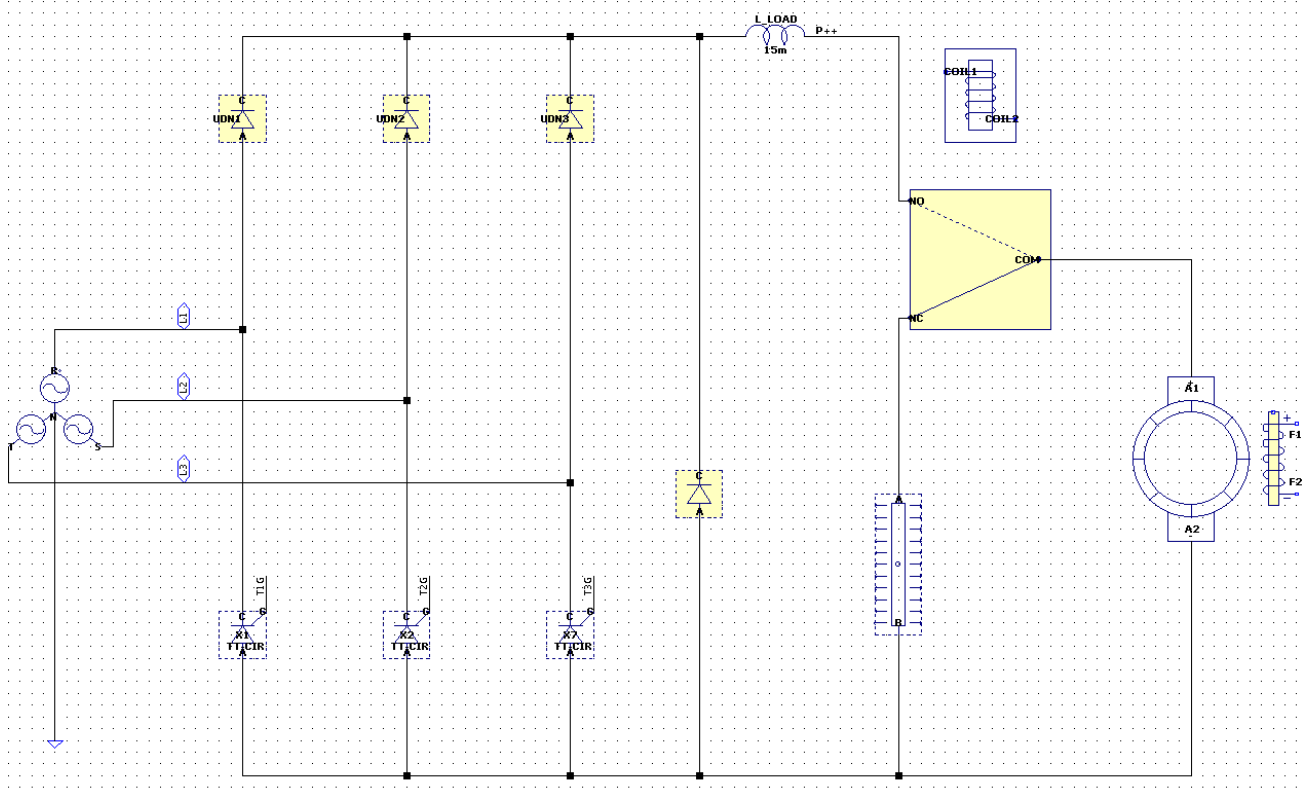


Σχήμα 22. Κυματομορφές προσομοίωσης

Με κάτω κυματομορφή ρεύματα στα Thyristor, στην δίοδο ελεύθερης διέλευσης, τάση στο φορτίο, πριν και μετά από το πηνίο εξομάλυνσης 15 mH. Η κλίμακα των ρευμάτων είναι 1A/mV. Παρατηρούμε εδώ ότι και η δίοδος ελευθέρως διελεύσεως παραδίδει ένα σεβαστό ποσοστό DC ρεύματος στο φορτίο. Όλα αυτά αναλύονται επαρκώς στην αναφορά [24].

Οι βασικές ιδιότητες της τριφασικής ανορθωτικής διάταξης 3-Thyristor-3-Diode+FWD, συνοψίζονται ακολούθως:

1. Μικρότερη απορρόφηση Άεργου Ισχύος σε σχέση με αυτήν των 6-Thyristor, από το 3-φασικό δίκτυο.
2. Ευκολότερη μετάβαση από την πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος (δεν απαιτείται διπλός παλμός ή (π-α) εύρους παλμός. Σε περίπτωση περιορισμένης περιοχής ρύθμισης τάσεως εξόδου το κύκλωμα πυροδότησης απλοποιείται περαιτέρω.
3. Δεν επιτρέπεται η αντιστροφή της ενεργείας από την πλευρά DC προς το δίκτυο. (Λειτουργία υποχρεωτικώς μόνο σαν ανορθωτική διάταξη).
4. Δεν δύναται να μειώσει ταχέως το ρεύμα φορτίου. Το μόνο στοιχείο που απομειώνει αυτό, είναι η δίοδος ελευθέρως διελεύσεως συν ωμικές απώλειες στο κύκλωμα εξόδου DC.
5. Δύναται να χρησιμοποιηθεί σαν ρυθμιστής στροφών μοτέρ DC, ακόμα και μεγάλης ισχύος όπου το μοτέρ DC συνδέεται στην έξοδο του μετατροπέα μέσω ηλεκτρονόμο ισχύος μεταγωγικό όπως στο ακόλουθο σχήμα, όπου όταν ο ηλεκτρονόμος είναι απενεργοποιημένος, το μοτέρ είναι συνδεδεμένο με αντίσταση ισχύος (αντίσταση πέδης, ή ηλεκτρόφρενο — braking resistor), και επιβραδύνει το φορτίο, ενώ όταν είναι ενεργοποιημένος, συνδέει το μοτέρ με την έξοδο του 3-φασικού μετατροπέα, και κινεί το φορτίο.
6. Η κυμάτωση από την πλευρά του συνεχούς είναι 150Hz.



Σχήμα 23. Κύκλωμα προσομοίωσης

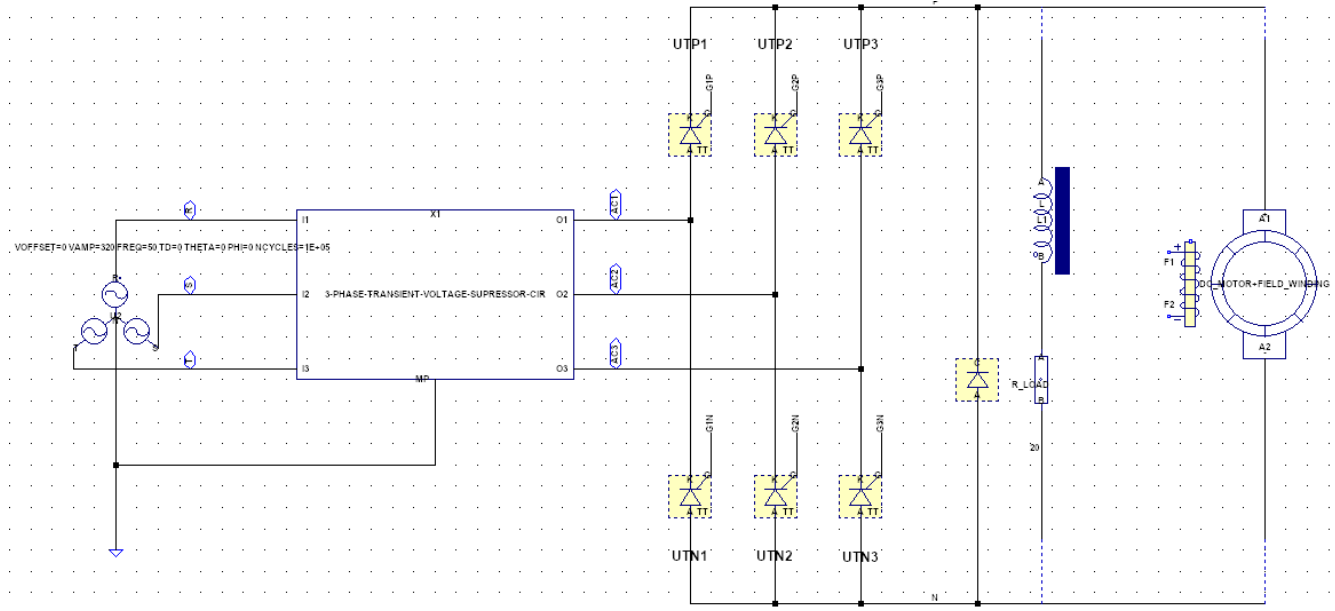
Τέτοιες διατάξεις (3-Thyristor-3-Diode+FWD) εφαρμόστηκαν με μεγάλη επιτυχία στα κινητήρια συστήματα εκτυπωτικών μηχανημάτων γραφικών τεχνών και πιεστηρίων εφημερίδων. Στις Η.Π.Α αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται από την εταιρεία Goss Printing Machinery. Κατά την ηλεκτροπέδη (φρενάρισμα), απαγορεύεται η ανάστροφη περιστροφή του άξονα του πιεστηρίου, και η ως άνω τοπολογία είναι βέλτιστη, καθότι η αντίσταση πέδης ουδέποτε παραδίδει ανάστροφη τάση στο DC motor, και έτσι επιτυγχάνεται η αυστηρή αυτή απαίτηση.

Στην περίπτωση όπου η ρύθμιση της τάσεως εξόδου δεν χρειάζεται να ξεκινά από 0 Volts, (φορτιστές, έλεγχος ρεύματος διέγερσης σε εναλλακτικές και μοτέρ συνεχούς ρεύματος, και άλλες διατάξεις) το κύκλωμα πυροδότησης απλοποιείται ακόμα περισσότερο.

4.3 Τριφασική Ανόρθωση 6 Thyristor

4.3.1 Κυκλώματα και Αποτελέσματα Προσομοίωσης

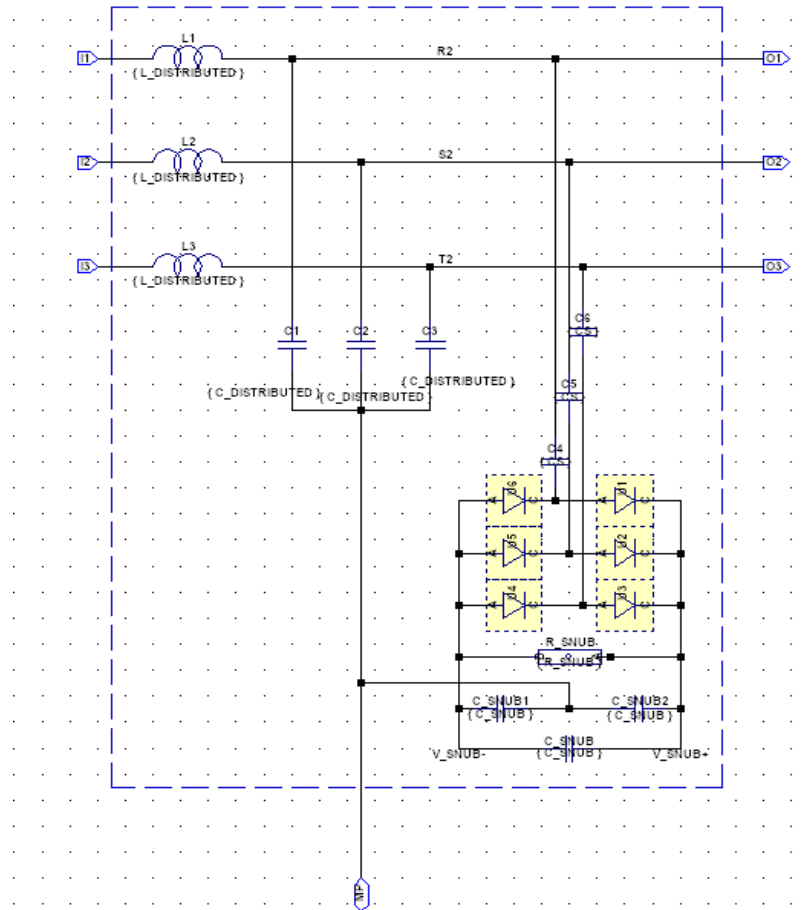
Το γενικό διάγραμμα της 3-φασικής πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας 6-Thyristor φαίνεται ακολούθως:



Σχήμα 24. Κύκλωμα προσομοίωσης

Η ως άνω διάταξη δύναται να τροφοδοτεί είτε μικτά (ωμικά - επαγωγικά φορτία), είτε DC Motors, με δυνατότητα επιστροφής ενεργείας στο δίκτυο. (Regenerative Breaking, or Operation in Generating Mode). Τουποκύκλωμα “3-PHASE-TRANSIENT-VOLTAGE-SUPPRESSOR-CIR” προτάσσεται στο κύκλωμα της 3-φασικής γέφυρας 6-Thyristor προκειμένου να:

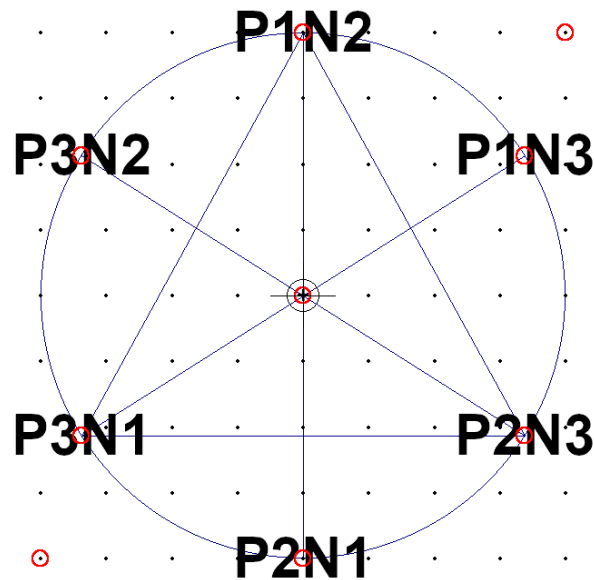
1. (περιορίσει τον μέγιστο ρυθμό ανόδου ρεύματος ($\frac{dI_{ANODE}}{dt}$) των Thyristor ως προς τον χρόνο.
2. περιορίσει τις παραγόμενες από την ανόρθωση ανώτερες αρμονικές προς το δίκτυο.
3. περιορίσει τον μέγιστο ρυθμό ανόδου τάσεως ($\frac{dV_{AK}}{dt}$) μεταξύ ανόδου - καθόδου των Thyristor ως προς τον χρόνο.
4. περιορίσει τις κορυφώσεις μεταβατικών υπερτάσεων, και το εσωτερικό του κύκλωμα είναι:



Σχήμα 25. Κύκλωμα προσομοίωσης

Ο μηχανισμός πυροδότησης της υπό προσομοίωση διάταξης αναλύεται ως εξής:

1. Με την ορθή ακολουθία φάσεων πυροδοτούνται ταυτόχρονα δύο Thyristor, προκειμένου να κλείνει ο βρόχος ανόρθωσης, και το ρεύμα να μεταβαίνει από τον έναν κλάδο στον άλλο. (μετάβαση).
2. Τα δύο αυτά στοιχεία που πυροδοτούνται ταυτόχρονα ακολουθούν την δεξιόστροφη (εκ της διαδοχής φάσεων του δικτύου οριζόμενη) κυκλική εναλλαγή του σχήματος:



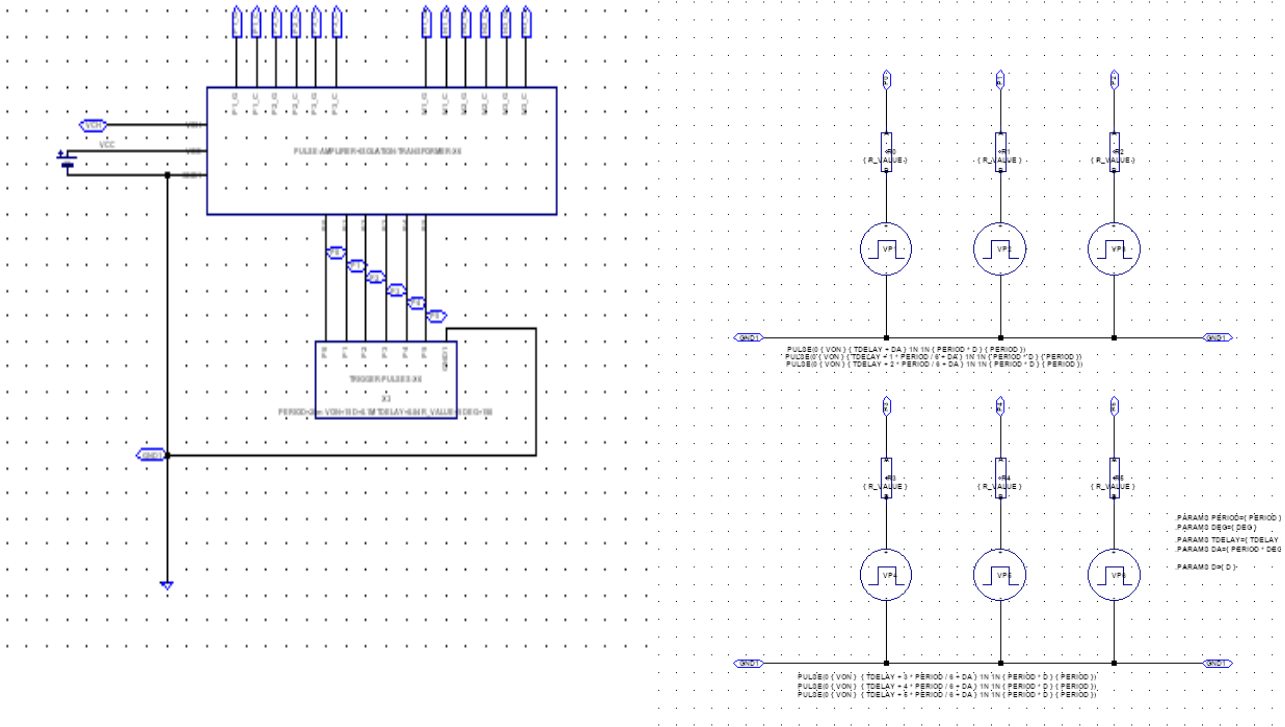
Σχήμα 26. Διάγραμμα κυκλικής εναλλαγής πυροδότησης

Με τα σύμβολα P1, P2, P3, εννοούμε τα άνω Thyristor που είναι ενωμένα με τον θετικό κόμβο P, ενώ με τα N1, N2, N3, εννοούμε τα κάτω Thyristor που είναι ενωμένα με τον αρνητικό κόμβο N.

3. Παρατηρούμε ότι για (γεωμετρική στο σχήμα - ηλεκτρική στο κύκλωμα) γωνία α , το κάθε ένα από τα Thyristors πυροδοτείται με διπλό παλμό (απεχόντων μεταξύ τους κατά 60 μοίρες). Εναλλακτικώς μπορεί να εφαρμοστεί παλμός διάρκειας $(180 - \alpha)$ DEG.
4. Η κυκλική διαδοχή των πυροδοτήσεων πρέπει υποχρεωτικώς να ακολουθεί την κυκλική διαδοχή των τριών φάσεων που την τροφοδοτούν. Κάθε ένα σημείο της περιφέρειας του κύκλου αναπαριστά κάποια χρονική στιγμή λειτουργίας του μετατροπέα. Στις διακεκριμένες στιγμές (P1N2, P1N3, P2N3, P2N1, P3N1, P3N2) πυροδοτούνται τα αντίστοιχα Thyristors. Η γέφυρα δεν λειτουργεί εάν αυτό δεν συμβαίνει.

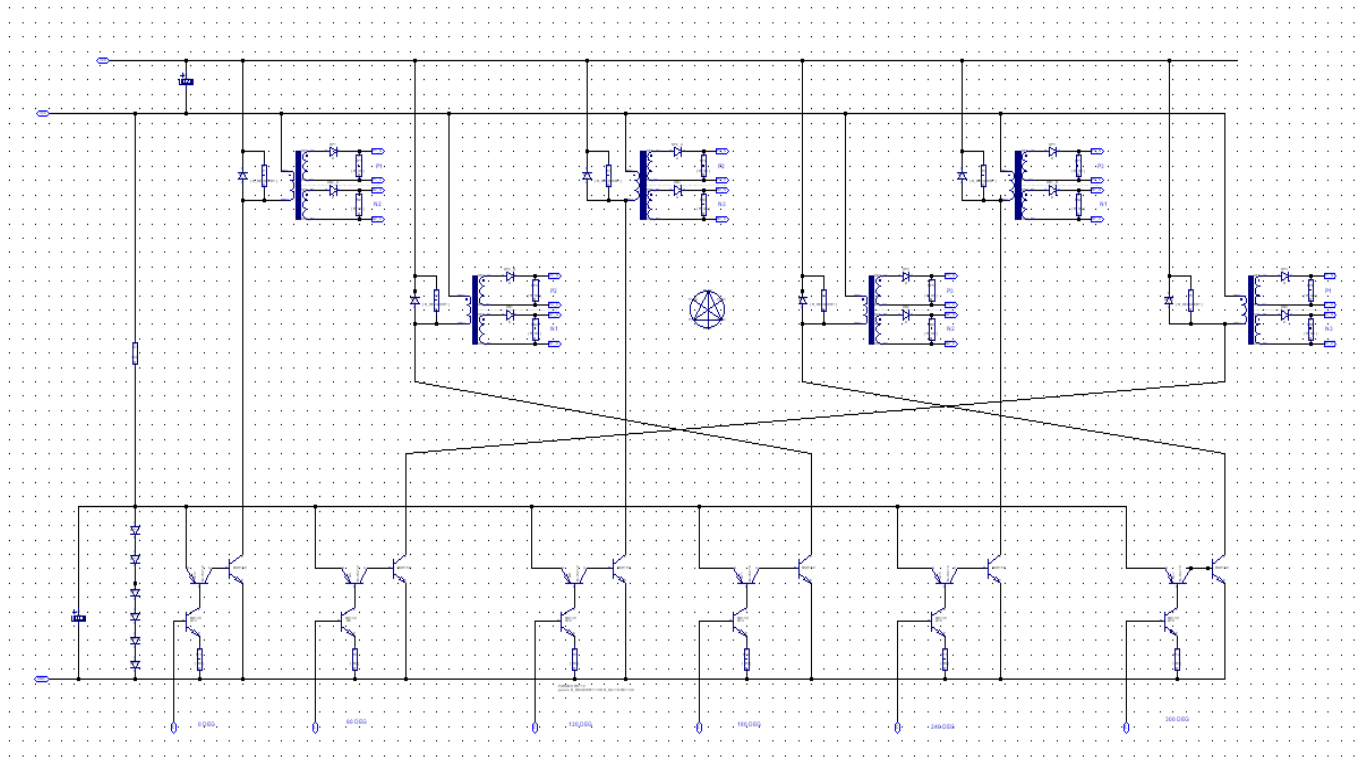
Έχοντας αυτά υπόψιν μπορούμε να σχεδιάσουμε το κύκλωμα πυροδότησης της γέφυρας έξι στοιχείων, το οποίο ακολουθεί, αναλυόμενο σε διάφορα υποκυκλώματα:

1. Παλμοί απέχοντας χρονικά κατά 60 DEG μεταξύ των: (TRIGGER-PULSES-X6)



Σχήμα 27. Κύκλωμα προσομοίωσης

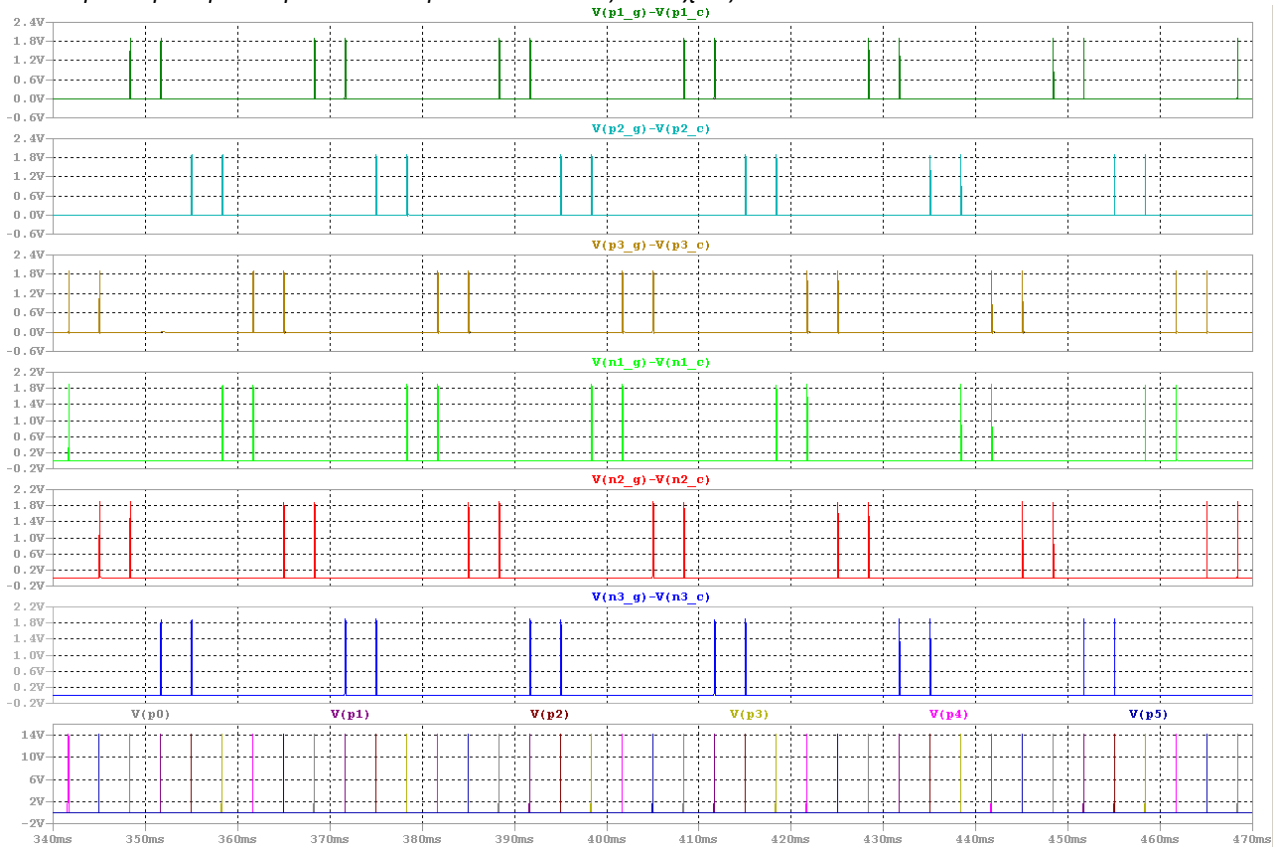
- Υποκύκλωμα ενίσχυσης και απομόνωσης παλμών πυροδότησης, όπου μια προσεκτική σχεδίαση φαίνεται ακολούθως:



Σχήμα 28. Κύκλωμα προσομοίωσης

Τα προσομοιωτικά αποτελέσματα φαίνονται κατωτέρω:

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

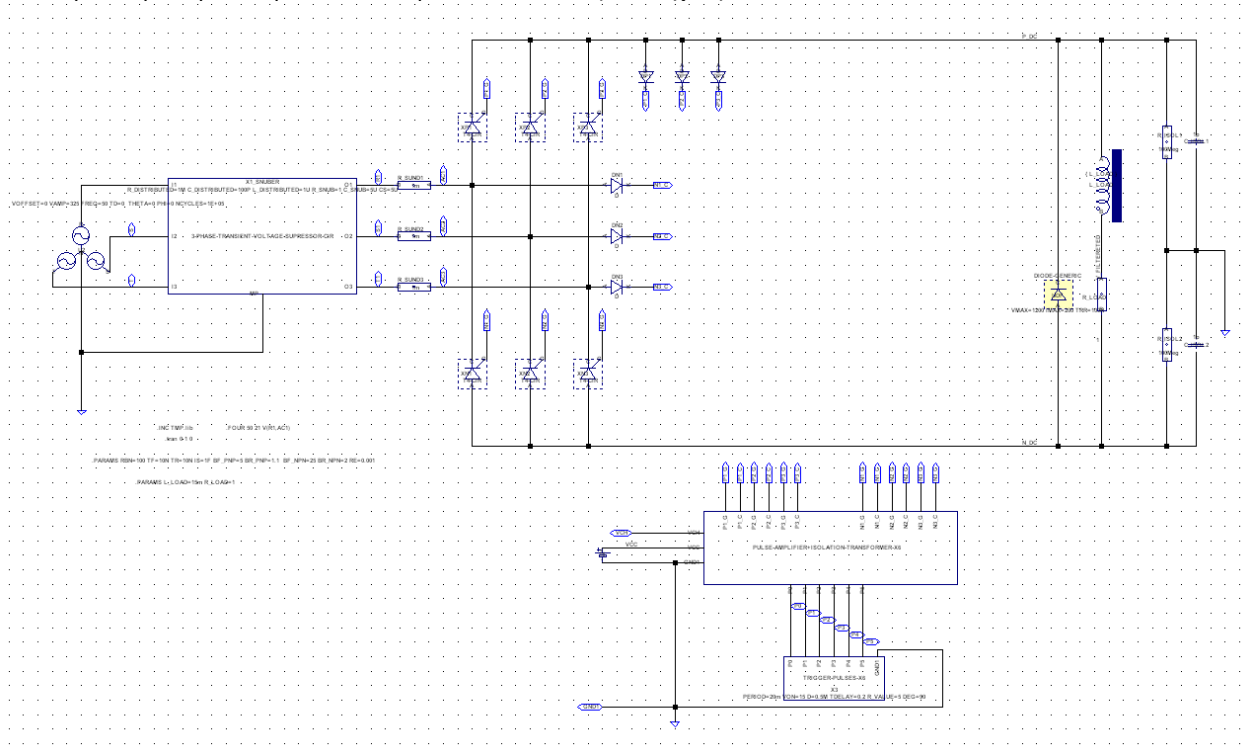


Σχήμα29. Κυματομορφές προσομοίωσης (CIRCULAR-FIRING-SEQUENCE-OF-6-THYRISTOR-RECTIFIER)

Οι πρώτες έξι κυματομορφές αναπαριστούν τις πυροδοτήσεις των 6 Thyristor, ενώ η 7η κυματομορφή αναπαριστά τους παλμούς πυροδότησης, σε ακολουθιακή μορφή, (p0, p1, p2, p3, p4, p5), με καθυστέρηση 60 ηλ. μοίρες. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής C1 περισυλλέγει την διαχεόμενη ενέργεια σκέδασης του Μ/Σ πυροδότησης ($\frac{1}{2} * L_k * I_{peek}^2$), και την επαναχρησιμοποιεί για την μαγνητική επαναφορά του πυρήνα που εδώ πρέπει να είναι ένας φερριτικός τοροειδής. Προκειμένου ο παλμός πυροδότησης να επιτυγχάνει άμεση πυροδότηση, πρέπει να είναι σύντομης ανερχομένης παρυφής ($\frac{di_g}{dt}$). Ο τοροειδής πυρήνας είναι βέλτιστος για αυτήν την χρήση, λόγω της εξαιρετικά μικρής σκέδασης που παρουσιάζει.

Το κύκλωμα αυτό αναφέρεται στην βιβλιογραφία σαν “Passive Clamp and Reset Circuit”[25].

Σε αυτήν την ανορθωτική διάταξη η περιοχή ελέγχου της γωνίας πυροδότησης είναι από **30 ~ 150 DEG**, σε σχέση με την φασική τάση, και το πλήρες κύκλωμα της 3-φασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας 6-Thyristor μετά διόδου ελευθέρως διελεύσεως, μαζί με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα ακολουθούν:



Σχήμα30. Κύκλωμα προσομοίωσης 6-THYRISTOR-3-PHASE_FULL_CONTROLLED

Στην ακόλουθη κυματομορφή τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν με τα ακόλουθα στοιχεία προσομοίωσης:

$L_FILT=15mH$, $R_LOAD=1ohm$, $DelayAngle=90$ DEG, $ConductionAngle=60$ DEG, $Vload(avg)=263Volt$, και η παραμόρφωση από την πλευρά του εναλλασσόμενου είναι:

Fourier components of V(r1,ac1)

DC component:2.15682e-05

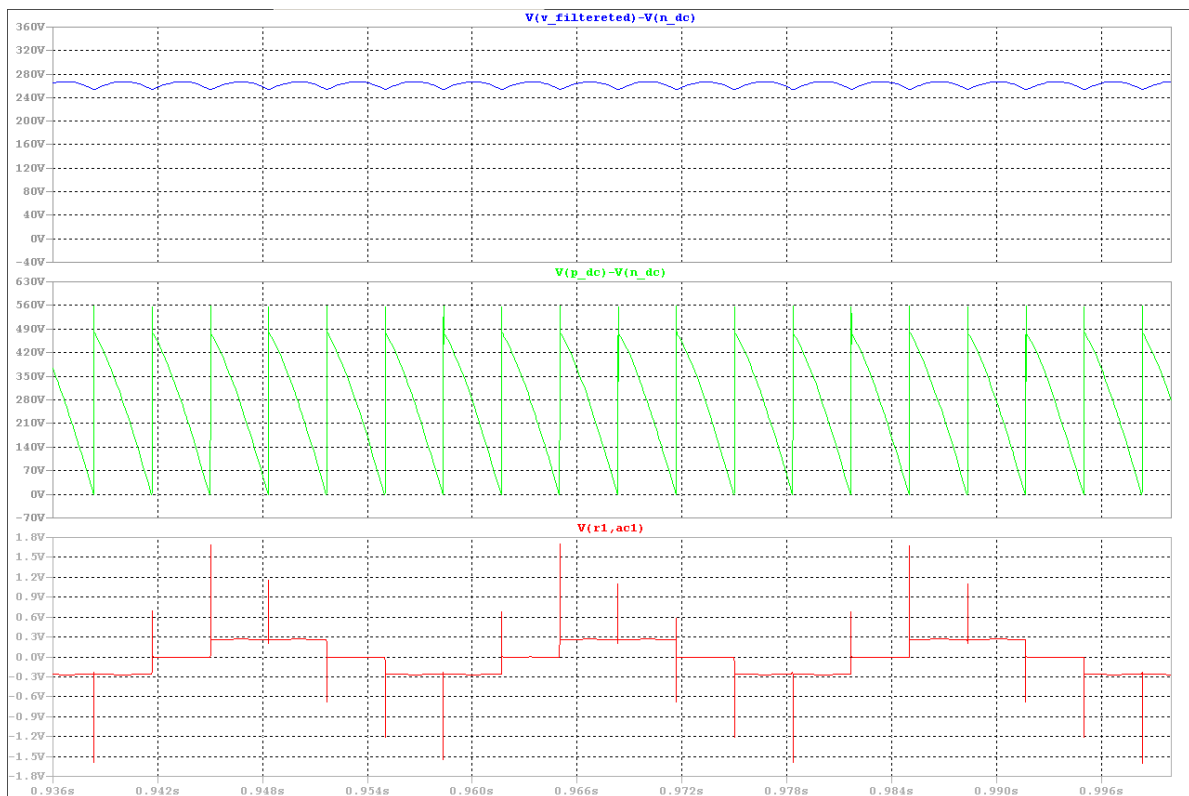
| Harmonic Number | Frequency [Hz] | Fourier Component | NormalizedComponent | NormalizedPhase [degree] | Normalized Phase [deg] |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 5.000e+1 | 2.894e-1 | 1.000e+0 | 150.21 | 0.00 |
| 2 | 1.000e+2 | 4.055e-5 | 1.401e-4 | -127.64 | -277.86 |
| 3 | 1.500e+2 | 3.448e-5 | 1.191e-4 | 171.58 | 21.37 |
| 4 | 2.000e+2 | 2.134e-5 | 7.372e-5 | 111.37 | -38.84 |
| 5 | 2.500e+2 | 6.094e-2 | 2.105e-1 | -148.82 | -299.03 |
| 6 | 3.000e+2 | 3.074e-5 | 1.062e-4 | -94.91 | -245.12 |
| 7 | 3.500e+2 | 3.795e-2 | 1.311e-1 | -28.95 | -179.17 |
| 8 | 4.000e+2 | 2.371e-5 | 8.191e-5 | 154.23 | 4.01 |
| 9 | 4.500e+2 | 4.448e-5 | 1.537e-4 | 53.85 | -96.37 |
| 10 | 5.000e+2 | 4.487e-5 | 1.550e-4 | -20.19 | -170.40 |
| 11 | 5.500e+2 | 2.644e-2 | 9.133e-2 | 32.00 | -118.21 |
| 12 | 6.000e+2 | 3.076e-5 | 1.063e-4 | -121.11 | -271.32 |
| 13 | 6.500e+2 | 2.080e-2 | 7.187e-2 | 152.40 | 2.19 |

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|---------|---------|
| 14 | 7.000e+2 | 3.990e-5 | 1.378e-4 | 60.82 | -89.39 |
| 15 | 7.500e+2 | 2.918e-5 | 1.008e-4 | -3.68 | -153.89 |
| 16 | 8.000e+2 | 2.026e-5 | 6.999e-5 | -68.98 | -219.19 |
| 17 | 8.500e+2 | 1.696e-2 | 5.860e-2 | -146.85 | -297.06 |
| 18 | 9.000e+2 | 5.161e-5 | 1.783e-4 | 129.09 | -21.13 |
| 19 | 9.500e+2 | 1.428e-2 | 4.933e-2 | -26.18 | -176.39 |
| 20 | 1.000e+3 | 2.616e-5 | 9.037e-5 | 11.86 | -138.36 |
| 21 | 1.050e+3 | 3.440e-5 | 1.188e-4 | -86.73 | -236.94 |

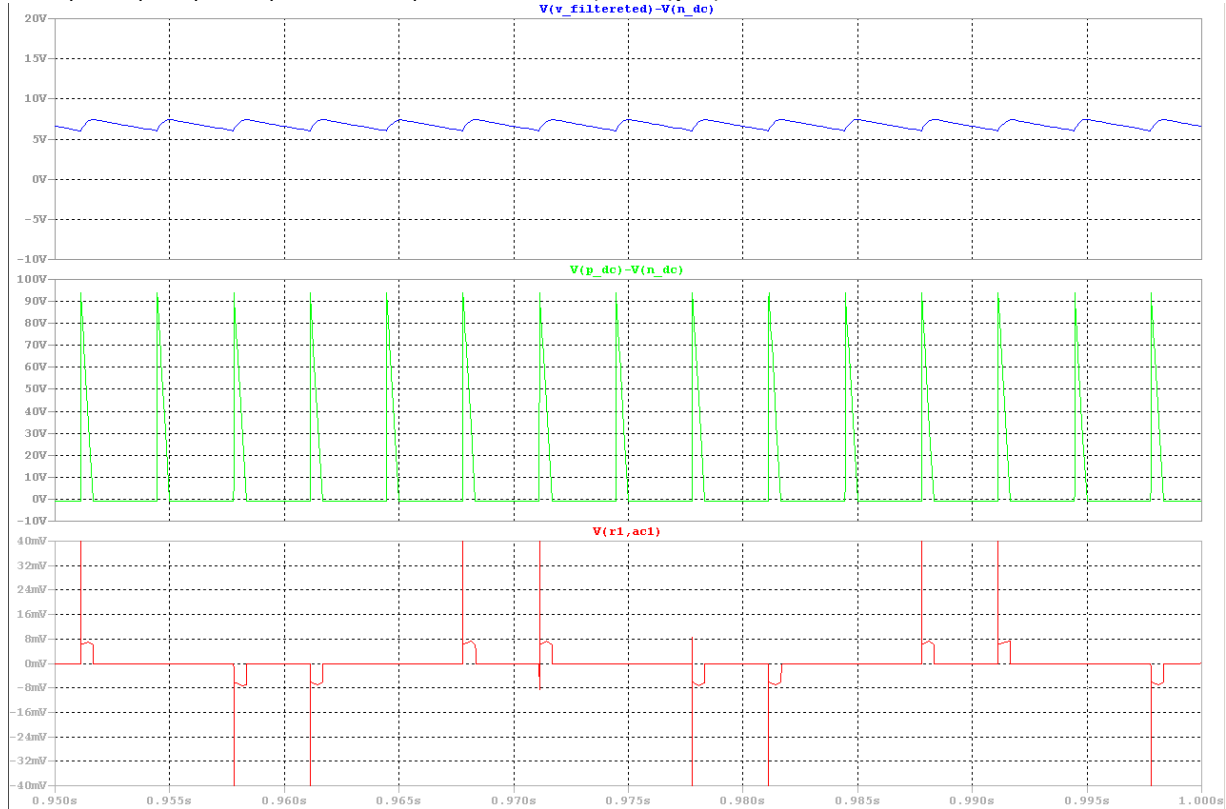
Partial Harmonic Distortion: 28.442637%

Total Harmonic Distortion: 30.893039%



Σχήμα 31. Κυματομορφές προσομοίωσης

Για: $L_{\text{FILT}}=15\text{mH}$, $R_{\text{LOAD}}=1\text{ohm}$, $\text{DelayAngle}=140 \text{ DEG}$, $\text{ConductionAngle}=10 \text{ DEG}$, $V_{\text{load(avg)}}=6.3\text{Volt}$, και η παραμόρφωση από την πλευρά του εναλλασσόμενου είναι:



Σχήμα32. Κυματομορφέςπροσομοίωσης

Fourier components of V(r1,ac1)

DC component:1.79421e-06

| Harmonic Number | Frequency [Hz] | Fourier Component | Normalized Component | Phase [degree] | Normalized Phase [deg] |
|-----------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 5.000e+1 | 1.285e-3 | 1.000e+0 | 175.16 | 0.00 |
| 2 | 1.000e+2 | 1.461e-6 | 1.136e-3 | 43.49 | -131.67 |
| 3 | 1.500e+2 | 1.590e-6 | 1.237e-3 | 22.84 | -152.32 |
| 4 | 2.000e+2 | 3.485e-6 | 2.711e-3 | 169.65 | -5.51 |
| 5 | 2.500e+2 | 1.250e-3 | 9.728e-1 | -24.08 | -199.24 |
| 6 | 3.000e+2 | 4.285e-6 | 3.334e-3 | -164.41 | -339.56 |
| 7 | 3.500e+2 | 1.212e-3 | 9.432e-1 | -33.78 | -208.94 |
| 8 | 4.000e+2 | 2.690e-6 | 2.093e-3 | -78.98 | -254.14 |
| 9 | 4.500e+2 | 4.047e-6 | 3.148e-3 | 164.97 | -10.19 |
| 10 | 5.000e+2 | 6.026e-6 | 4.689e-3 | -17.11 | -192.27 |
| 11 | 5.500e+2 | 1.113e-3 | 8.658e-1 | 127.05 | -48.10 |
| 12 | 6.000e+2 | 5.762e-6 | 4.483e-3 | 16.51 | -158.65 |
| 13 | 6.500e+2 | 1.043e-3 | 8.112e-1 | 117.29 | -57.87 |
| 14 | 7.000e+2 | 4.916e-6 | 3.825e-3 | 99.02 | -76.14 |
| 15 | 7.500e+2 | 6.348e-6 | 4.939e-3 | -37.31 | -212.46 |
| 16 | 8.000e+2 | 8.342e-6 | 6.490e-3 | 149.75 | -25.41 |
| 17 | 8.500e+2 | 8.936e-4 | 6.953e-1 | -81.67 | -256.83 |
| 18 | 9.000e+2 | 7.283e-6 | 5.667e-3 | -171.69 | -346.85 |

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

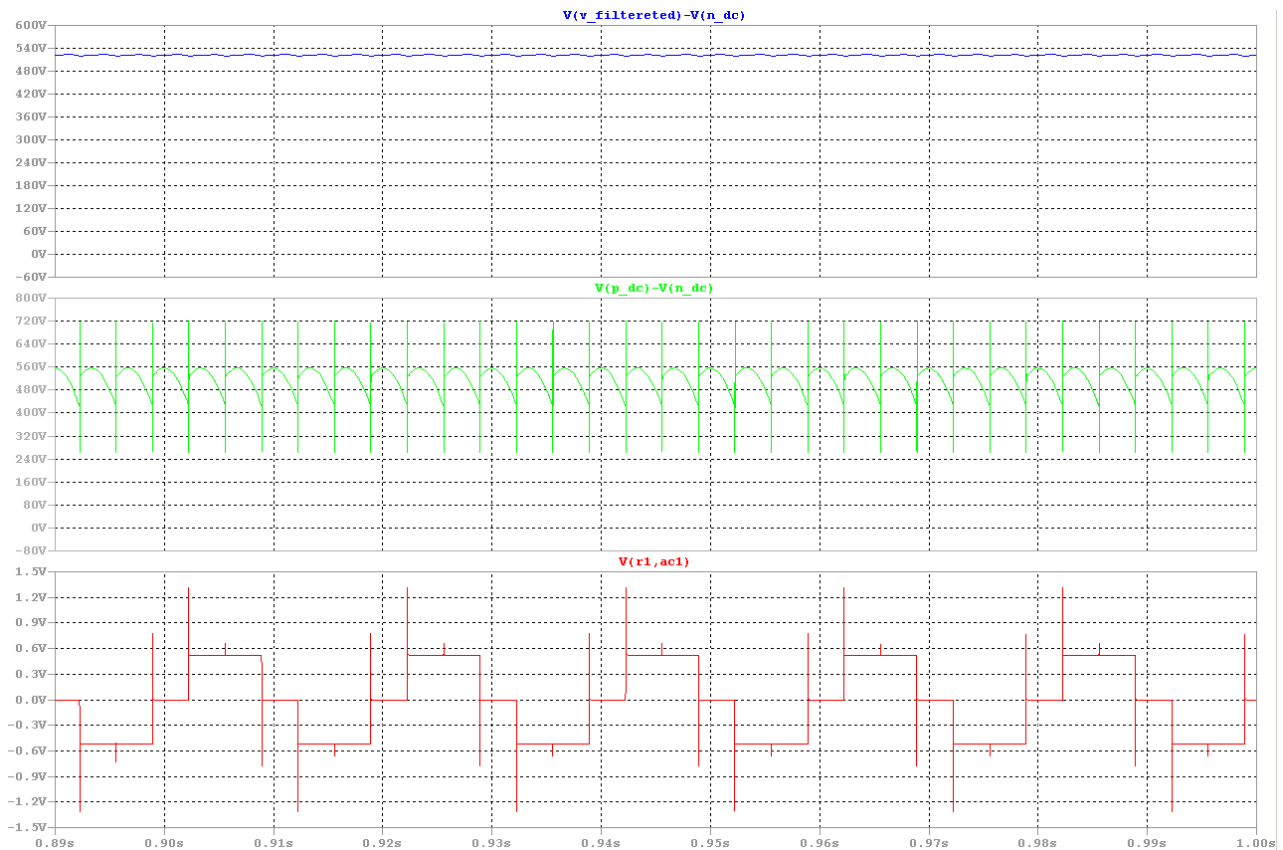
| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|--------|---------|
| 19 | 9.500e+2 | 8.021e-4 | 6.240e-1 | -91.55 | -266.71 |
| 20 | 1.000e+3 | 6.830e-6 | 5.314e-3 | -92.83 | -267.98 |
| 21 | 1.050e+3 | 8.242e-6 | 6.413e-3 | 123.20 | -51.96 |

Partial Harmonic Distortion: 202.899179%

Total Harmonic Distortion: 227.118403%

Είναι προφανές εδώ ότι για πολύ μικρές γωνίες αγωγής (εδώ 10 DEG), η αρμονική παραμόρφωση είναι τεράστια. Γενικώς οι περισσότερες ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις παρουσιάζουν ισχυρά παραμόρφωση στο ρεύμα του δικτύου, με βαρέα επαγωγική συμπεριφορά. Αυτό το πρόβλημα ξεπερνάται με κάποιες ειδικές ανορθωτικές διατάξεις που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. **(Ανορθωτικές διατάξεις με επιβαλλόμενη σβέση, Quenching Controlable Rectifiers).**

Γιά: $L_{\text{FILT}}=15\text{mH}$, $R_{\text{LOAD}}=1\text{ohm}$, $\text{DelayAngle}=10 \text{ DEG}$, $\text{ConductionAngle}=140 \text{ DEG}$, $V_{\text{load(avg)}}=523\text{Volt}$, και η παραμορφωση από την πλευρά του εναλασομένου είναι:



Σχήμα33. Κυματομορφές προσομοίωσης

Fourier components of V(r1,ac1)

DC component:2.37866e-06

| Harmonic Number | Frequency [Hz] | Fourier Component | NormalizedPhase Component | NormalizedPhase [degree] | Normalized Phase [deg] |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 5.000e+1 | 5.756e-1 | 1.000e+0 | 100.23 | 0.00 |
| 2 | 1.000e+2 | 3.594e-6 | 6.245e-6 | -164.06 | -264.29 |

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

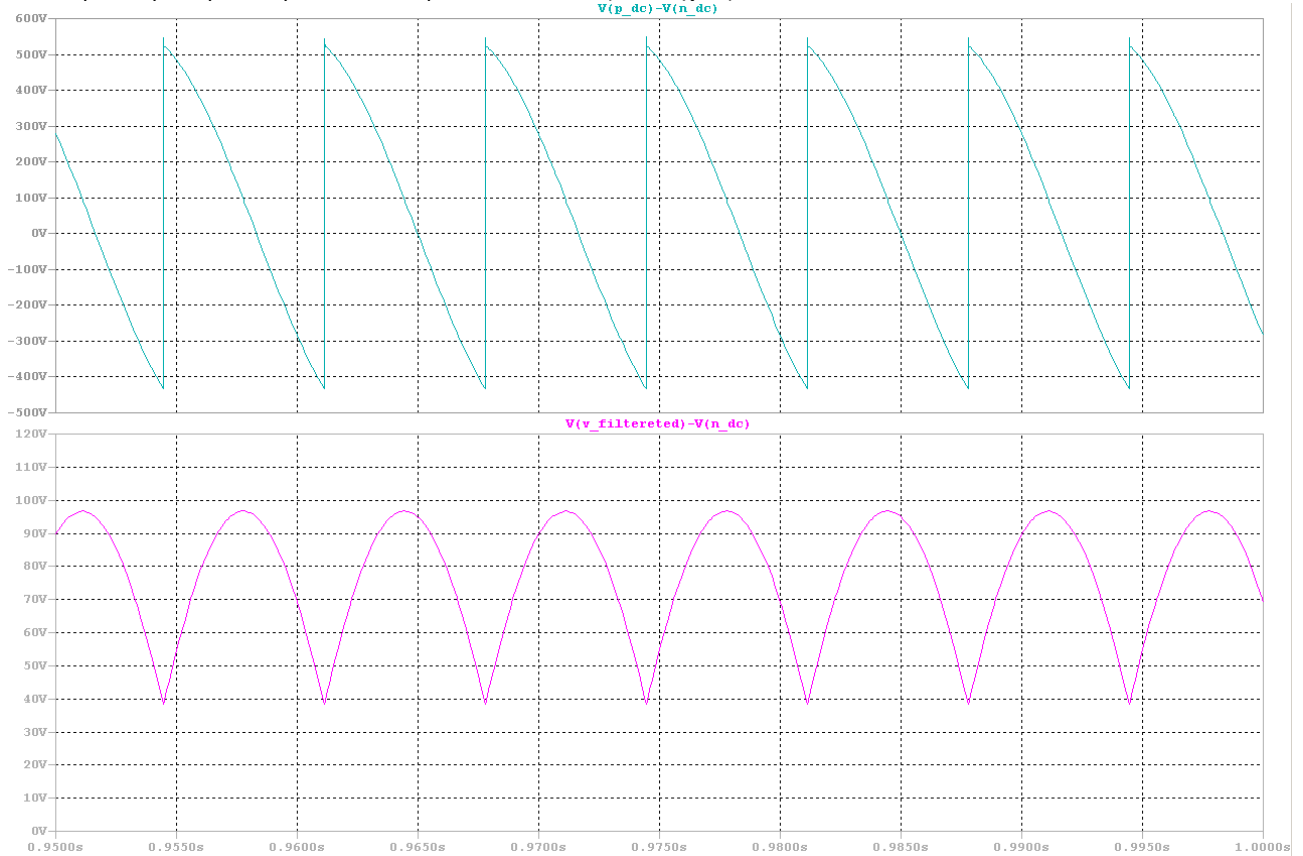
| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|---------|---------|
| 3 | 1.500e+2 | 6.302e-6 | 1.095e-5 | 154.83 | 54.60 |
| 4 | 2.000e+2 | 5.011e-6 | 8.707e-6 | 15.97 | -84.26 |
| 5 | 2.500e+2 | 1.157e-1 | 2.011e-1 | -38.64 | -138.87 |
| 6 | 3.000e+2 | 5.555e-6 | 9.652e-6 | -126.56 | -226.79 |
| 7 | 3.500e+2 | 8.153e-2 | 1.417e-1 | -18.89 | -119.12 |
| 8 | 4.000e+2 | 2.557e-6 | 4.443e-6 | 146.63 | 46.40 |
| 9 | 4.500e+2 | 4.560e-6 | 7.923e-6 | 35.50 | -64.73 |
| 10 | 5.000e+2 | 2.517e-6 | 4.374e-6 | 24.72 | -75.51 |
| 11 | 5.500e+2 | 5.232e-2 | 9.090e-2 | -157.70 | -257.93 |
| 12 | 6.000e+2 | 2.956e-6 | 5.137e-6 | -170.49 | -270.72 |
| 13 | 6.500e+2 | 4.399e-2 | 7.644e-2 | -137.42 | -237.65 |
| 14 | 7.000e+2 | 2.087e-6 | 3.626e-6 | 107.34 | 7.11 |
| 15 | 7.500e+2 | 5.768e-6 | 1.002e-5 | 105.96 | 5.73 |
| 16 | 8.000e+2 | 5.967e-6 | 1.037e-5 | 37.75 | -62.48 |
| 17 | 8.500e+2 | 3.380e-2 | 5.873e-2 | 83.53 | -16.70 |
| 18 | 9.000e+2 | 4.483e-6 | 7.790e-6 | -89.28 | -189.51 |
| 19 | 9.500e+2 | 3.013e-2 | 5.234e-2 | 103.90 | 3.67 |
| 20 | 1.000e+3 | 1.707e-6 | 2.966e-6 | -64.22 | -164.45 |
| 21 | 1.050e+3 | 3.382e-6 | 5.877e-6 | -3.02 | -103.25 |

Partial Harmonic Distortion: 28.423971%

Total Harmonic Distortion: 31.061365%

Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση του ρεύματος γραμμής μειώνεται με την αύξηση της γωνίας αγωγής. Οι κυματομορφές της τάσεως εξόδου, στην γέφυρα 6 Thyristor χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης και για γωνία καθυστέρησης έναυσης 140 DEG,(γωνία αγωγής 10DEG) με ίδια τα υπόλοιπα κατασκευαστικά στοιχεία αυτής είναι:

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος



Σχήμα 34. Κυματομορφές προσομοίωσης

Όπου η μέση τιμή της τάσεως εξόδου στο DC φορτίο είναι 79 VDC, και η παραμόρφωση ανωτέρων αρμονικών είναι:

Fourier components of V(r1,ac1)

DC component: 1.0297e-06

| Harmonic Number | Frequency [Hz] | Fourier Component | NormalizedComponent | NormalizedPhase [degree] | Normalized Phase [deg] |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 5.000e+1 | 7.603e-2 | 1.000e+0 | 170.11 | 0.00 |
| 2 | 1.000e+2 | 4.618e-2 | 6.074e-1 | 70.17 | -99.94 |
| 3 | 1.500e+2 | 2.709e-6 | 3.563e-5 | -116.49 | -286.60 |
| 4 | 2.000e+2 | 6.253e-3 | 8.224e-2 | -128.05 | -298.16 |
| 5 | 2.500e+2 | 1.006e-2 | 1.323e-1 | 131.27 | -38.85 |
| 6 | 3.000e+2 | 4.471e-6 | 5.881e-5 | 68.60 | -101.51 |
| 7 | 3.500e+2 | 4.171e-3 | 5.486e-2 | -67.97 | -238.08 |
| 8 | 4.000e+2 | 5.527e-3 | 7.270e-2 | -168.08 | -338.20 |
| 9 | 4.500e+2 | 1.776e-6 | 2.336e-5 | -103.58 | -273.70 |
| 10 | 5.000e+2 | 3.111e-3 | 4.091e-2 | -7.68 | -177.79 |
| 11 | 5.500e+2 | 3.803e-3 | 5.002e-2 | -107.61 | -277.73 |
| 12 | 6.000e+2 | 1.025e-6 | 1.349e-5 | 111.24 | -58.87 |
| 13 | 6.500e+2 | 2.477e-3 | 3.258e-2 | 53.06 | -117.06 |
| 14 | 7.000e+2 | 2.891e-3 | 3.803e-2 | -46.82 | -216.94 |

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

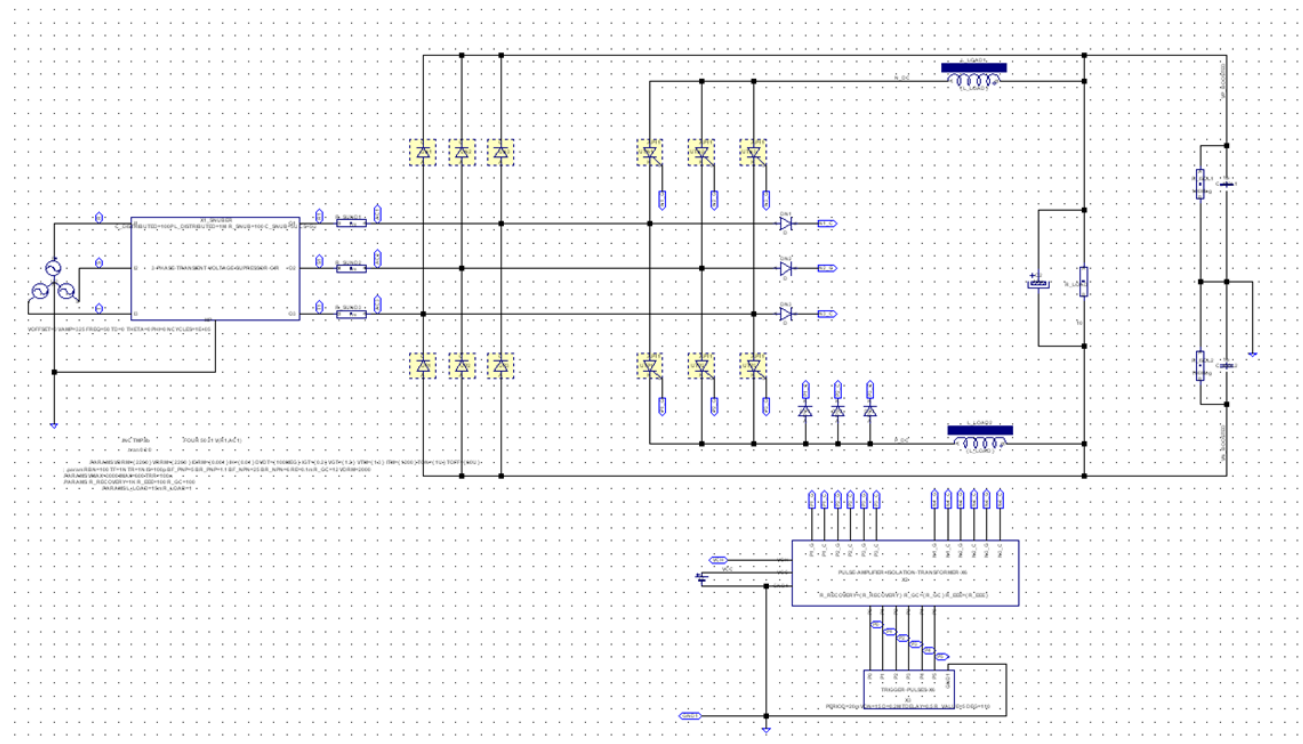
| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|---------|---------|
| 15 | 7.500e+2 | 3.860e-6 | 5.077e-5 | 7.02 | -163.10 |
| 16 | 8.000e+2 | 2.060e-3 | 2.709e-2 | 113.47 | -56.65 |
| 17 | 8.500e+2 | 2.342e-3 | 3.081e-2 | 13.56 | -156.56 |
| 18 | 9.000e+2 | 6.329e-6 | 8.324e-5 | -152.52 | -322.64 |
| 19 | 9.500e+2 | 1.762e-3 | 2.317e-2 | 174.07 | 3.95 |
| 20 | 1.000e+3 | 1.962e-3 | 2.581e-2 | 74.39 | -95.72 |
| 21 | 1.050e+3 | 4.275e-6 | 5.623e-5 | 106.61 | -63.50 |

Partial Harmonic Distortion: 64.109725%

Total Harmonic Distortion: 64.669064%

4.4 Επαυξητική ανορθωτική διάταξη 6 Thyristor - 6 διόδων

Υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες πρέπει να τροφοδοτήσουμε το DC φορτίο με τάση μεγαλύτερη από αυτήν που παραδίδει η ανόρθωση 6 διόδων. Η χρήση Μ/Σ (ή Α/Μ/Σ) ανόδου τάσεως είναι δαπανηρή, και καταλαμβάνει όγκο και βάρος. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η ακόλουθη ΕΠΑΥΞΗΤΙΚΗ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ 6 ΘΥΡΙΣΤΟΡ + 6 ΔΙΟΔΩΝ:



Σχήμα 35. Κύκλωμα προσομοίωσης

Η ανωτέρω ανορθωτική διάταξη αναφέρεται και σαν Line Generating Unit. Τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι τα ακόλουθα:

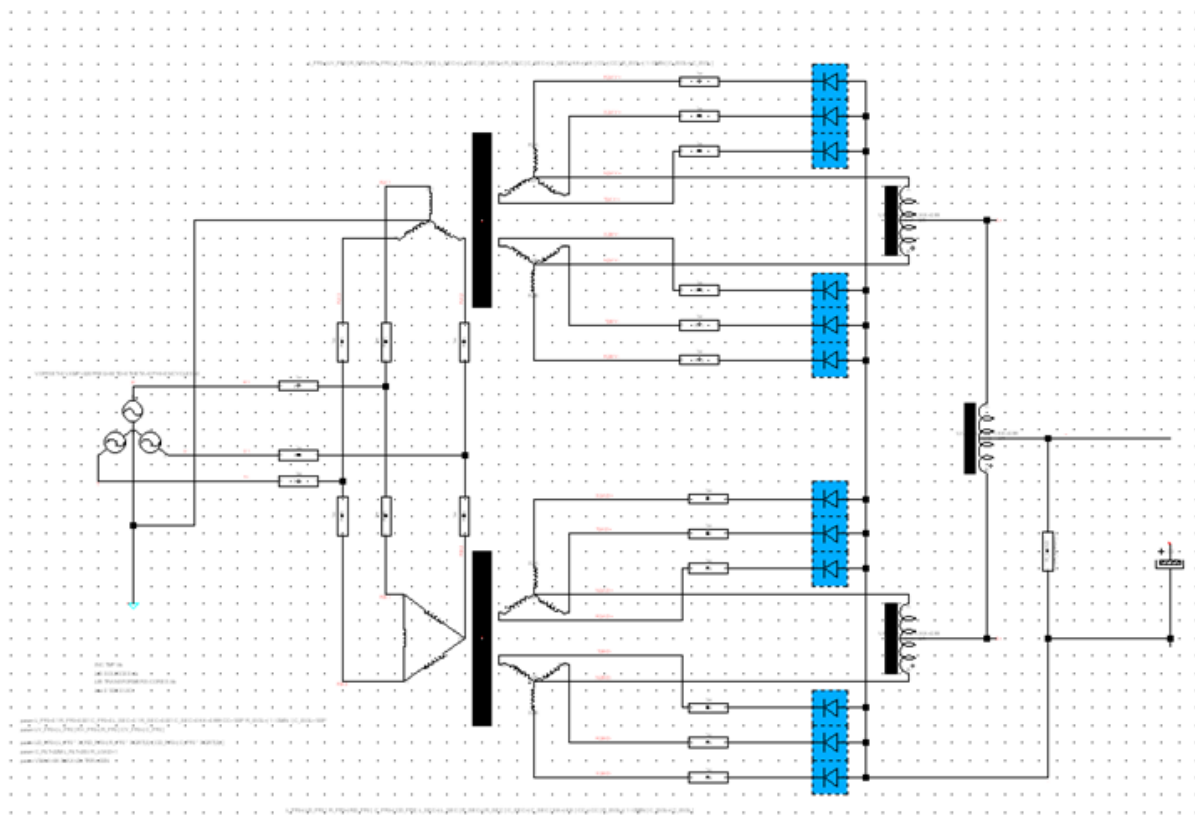
1. Αποτελεί τροποποιημένη ανορθωτική διάταξη, η οποία επιτυγχάνει επιστροφή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ασκώντας πέδη στην κινητήρια μηχανή. (Regenerating Breaking)
2. Το κύκλωμα πυροδότησης πρέπει να συγχρονίζεται από την τάση δικτύου, τόσο κατά ακολουθία (sequence) όσο και κατά ακριβή χρονική στιγμή (momentum).
3. Η αυτεπαγωγή από την πλευρά του δικτύου είναι υποχρεωτική, και δρα τόσο σαν περιοριστής $\frac{di}{dt}$, όσο και σαν απομειωτής παραμόρφωσης ρεύματος γραμμής (Line Current

Distortion Reducer), αλλά και σαν αυτεπαγωγή επαύξησης τάσης (boosting inductor), στην περίπτωση που απαιτείται υψηλότερη τάση στο ανορθωμένο DC (DC link Voltage).

4. Η προστασία υπερέντασης είναι υποχρεωτική, προκειμένου να αποφευχθεί ισχυρό βραχυκύκλωμα προερχόμενο από σφάλμα μετάβασης ρεύματος (commutation fault), των θυρίστρος.
5. Είναι δυνατή η αντιστάθμιση άεργου ισχύος, όταν η ανορθωμένη τάση DC έχει επαυξηθεί κατά 20% από την μέγιστη τάση που επιτυγχάνει η γέφυρα ανόρθωσης 6 διόδων.
6. Στην περίπτωση τροφοδοσίας αντιστροφέων ρύθμισης στροφών τριφασικών επαγωγικών κινητήρων, δεν χρειάζεται υπερδιαστασιολόγηση ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα, διότι η ανορθωμένη DC τάση δεν εξαρτάται από την οποιαδήποτε πτώση τάσης της τριφασικής τροφοδοσίας εισόδου.
7. Η ροή της πραγματικής ισχύος είναι αμφίδρομη. (Regenerative Rectifier)
8. Απομείωση της παραμόρφωσης του ρεύματος γραμμής τροφοδοσίας.

4.5 12-Παλμική ανορθωτική διάταξη κοινού κόμβου

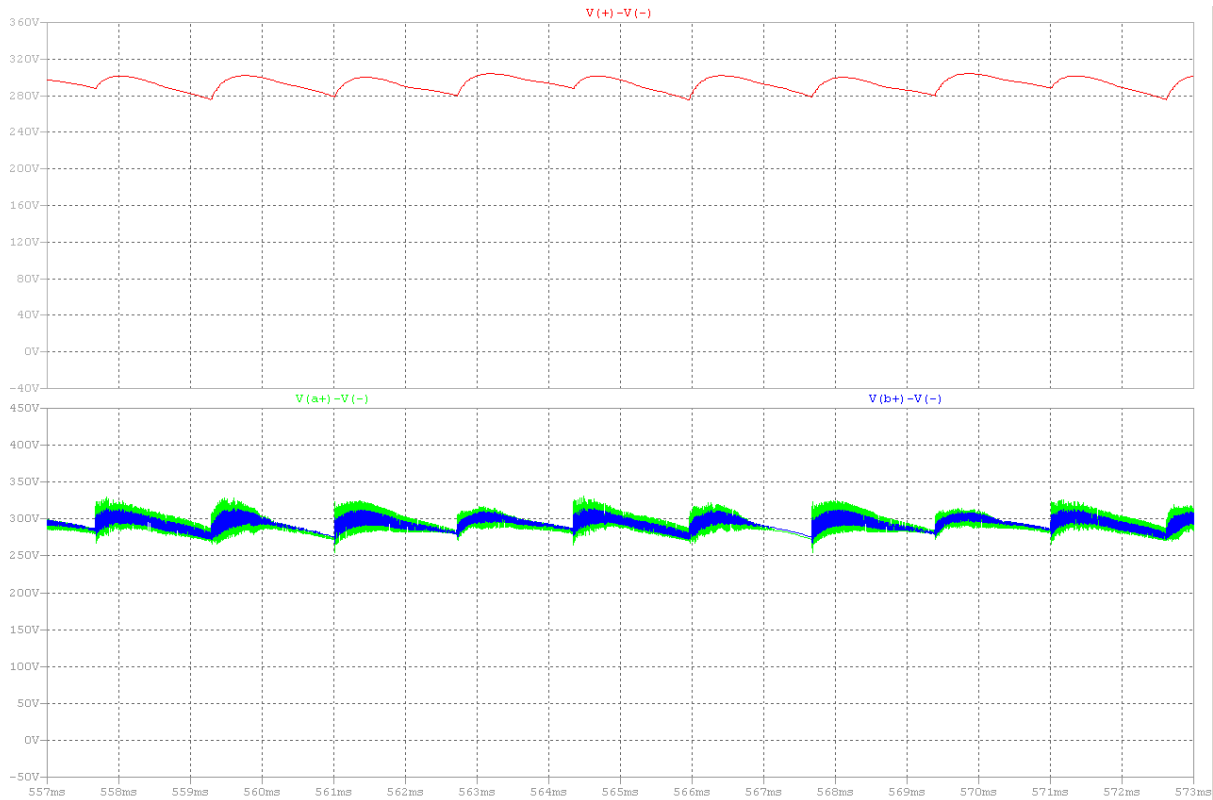
Σε περιπτώσεις ηλεκτρολύσεως, ή ταχείας φόρτισης συσσωρευτών ηλεκτροκίνητων Οχημάτων, και γενικά όπου απαιτούνται πολύ υψηλά ρεύματα σε σχετικά χαμηλή τάση, βέλτιστη διάταξη αποτελεί η 12-Παλμική ανορθωτική διάταξη κοινού κόμβου. Σε αυτήν, το συνολικό παρεχόμενο ρεύμα φορτίου είναι περίπου το 12πλάσιο του ρεύματος του ενός ανορθωτή. Έτσι η συγκεκριμένη τοπολογία κρίνεται βέλτιστη, για φορτία χαμηλής τάσεως, πολύ υψηλού ρεύματος. (Χημική βιομηχανία, Ηλεκτρολυτικές διατάξεις, Ταχυφορτιστές).



Σχήμα 36. Κύκλωμα προσομοίωσης

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

Τα προσομοιωτικά αποτελέσματα φαίνονται κατωτέρω, όπου δεν έχει συνδεθεί ο πυκνωτής εξομάλυνσης, και τα πηνία εξομάλυνσης έχουν τιμή μόνο 20 micro-Henry. Σε αυτήν την τοπολογία τα πηνία εξομάλυνσης δεν είναι προαιρετικά αλλά υποχρεωτικά, δηλαδή αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της ανορθωτικής διάταξης. Οι αντιστάσεις 1mΩ, που είναι συνδεδεμένες στα διάφορα σημεία του κυκλώματος έχουν τεθεί προκειμένου να απεικονιστούν τα ρεύματα στους αντίστοιχους κλάδους.

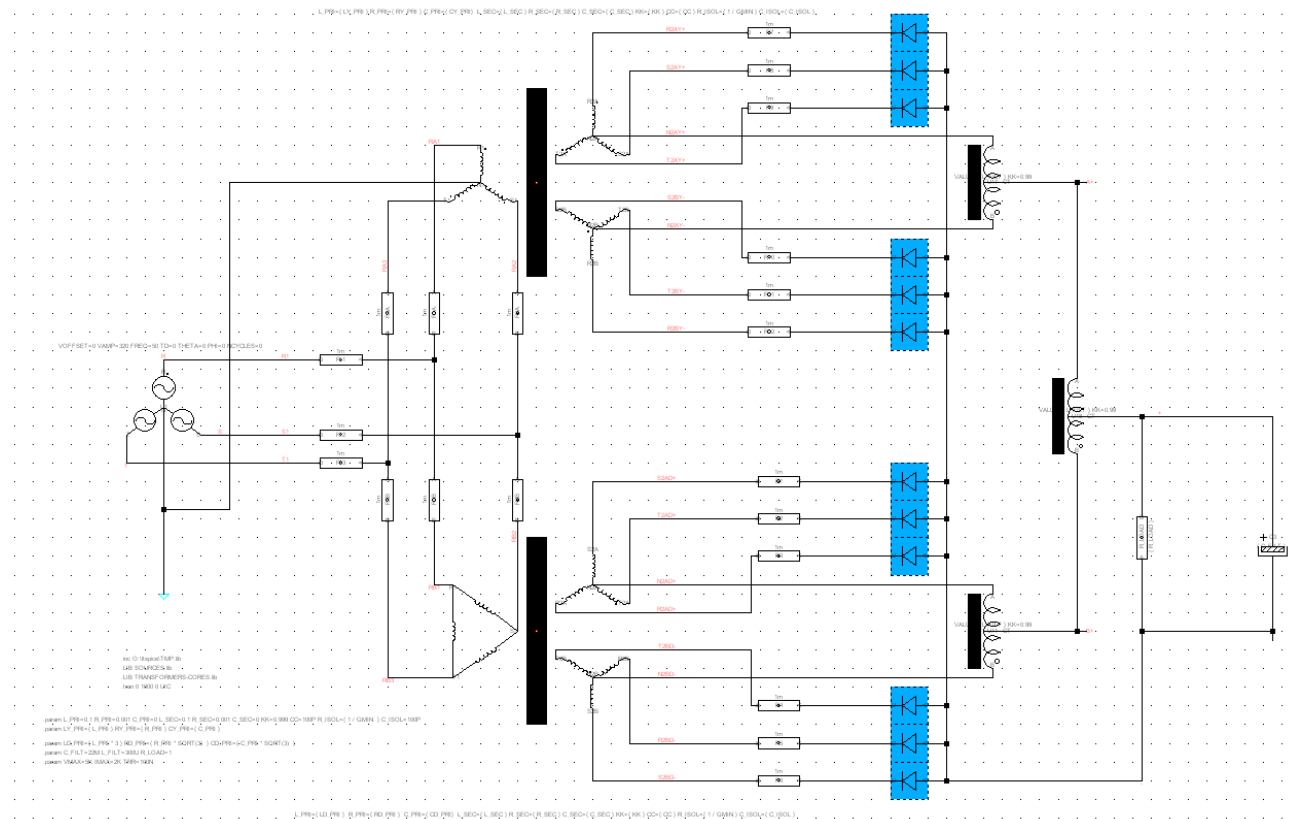


Σχήμα 37. Κυματομορφές προσομοίωσης

Στις ως άνω κυματομορφές, είναι προφανής η δραστική απομείωση της κυμάτωσης, χωρίς καθόλου πυκνωτή εξομάλυνσης, και ελάχιστο πηνίο 20 mH. Τα πηνία εξομάλυνσης είναι υποχρεωτικά (μέρος του μετατροπέα), και δεν μπορούν να παραληφθούν. Η πάνω κυματομορφή είναι η συνολική έξοδος DC, ενώ η κάτω, είναι οι επιμέρους DC τάσεις πριν το τελικό πηνίο εξομάλυνσης.

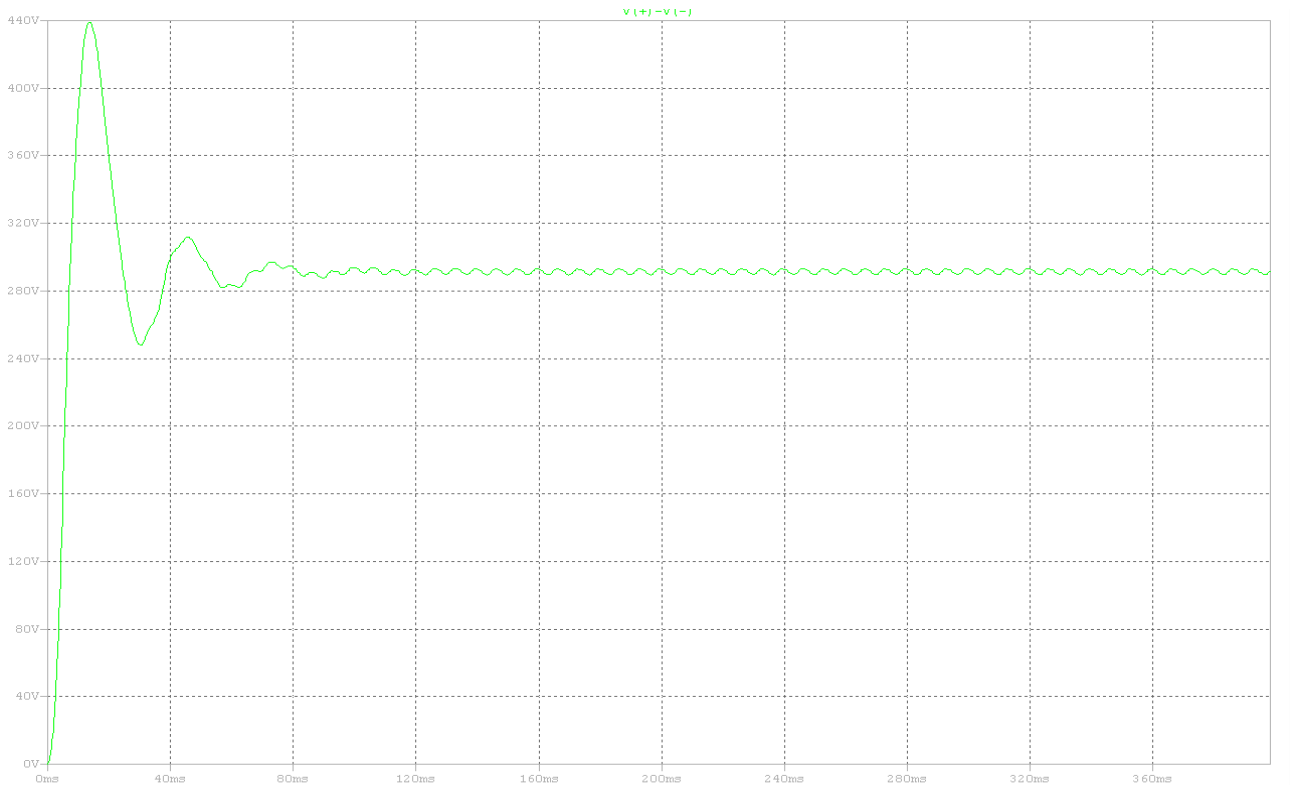
Τάση εξόδου περί τα 300volt σε φορτίο 1Ωμ, δηλαδή 300A συνολικό ρεύμα. Δηλαδή πρόκειται για συνολική ισχύ εξόδου 90KW.

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος



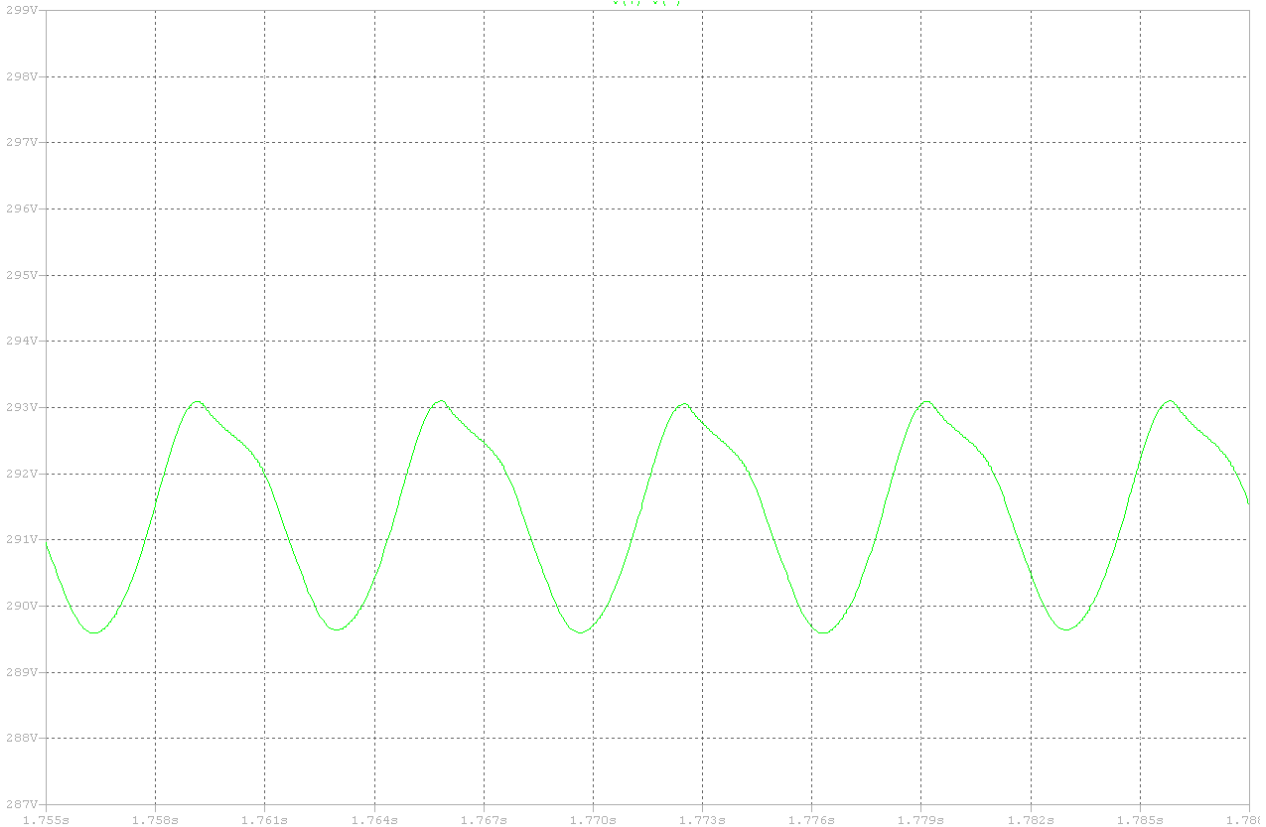
Σχήμα 38. Κύκλωμα προσομοίωσης

Τα προσομοιωτικά αποτελέσματα για $L_FILT=300mH$, και $C_FILT=22000micro-Farad$ είναι:



Σχήμα 39. Κυματομορφές προσομοίωσης

Πρέπει να παρατηρηθεί εδώ η μεταβατική υπέρταση που παρέχεται στο φορτίο στα πρώτα 100msec της λειτουργίας, ενώ η κυμάτωση της τάσεως εξόδου φαίνεται λεπτομερέστερα κατωτέρω, και είναι περίπου $5.5V / 292V$.



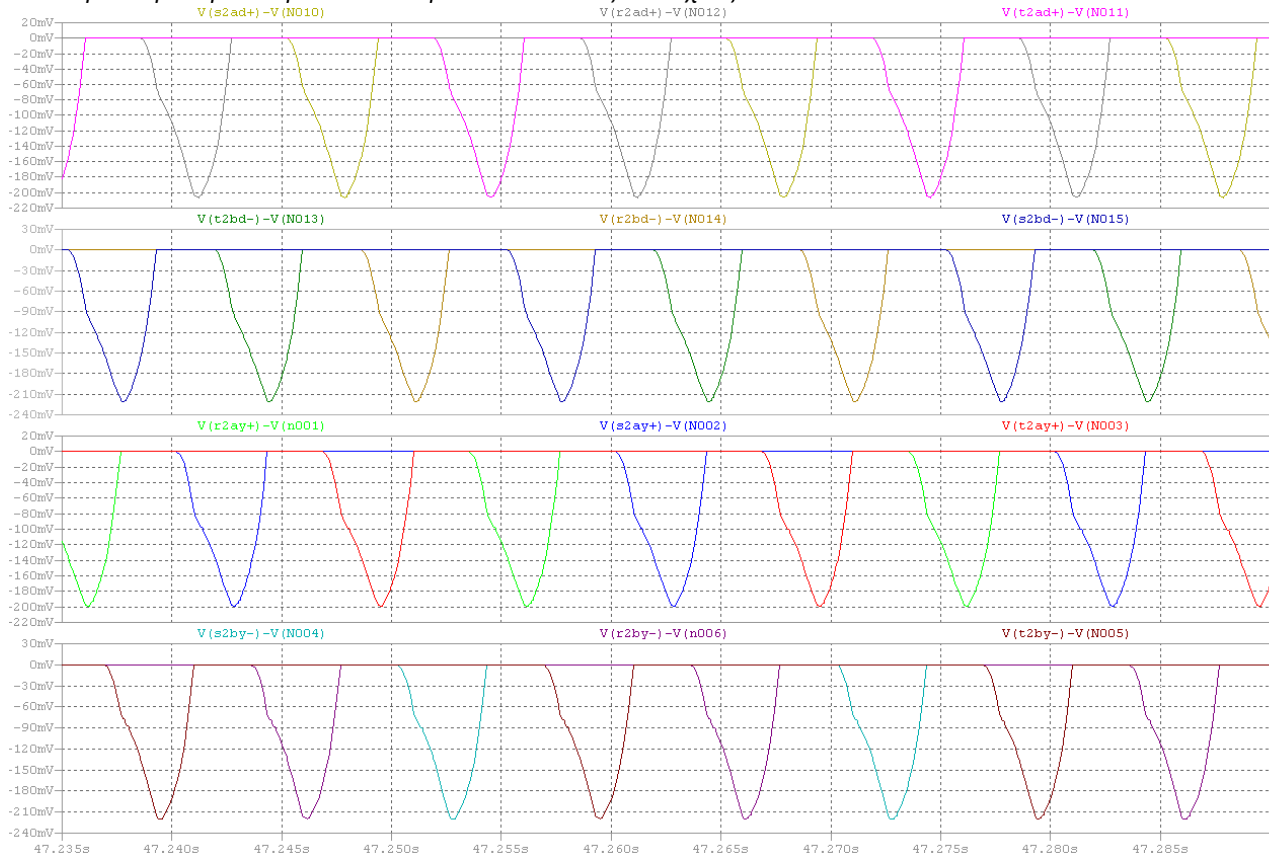
Σχήμα 40. Κυματομορφές προσομοίωσης

Υπάρχει μια κατασκευαστική δυσκολία στην υλοποίηση των δύο επιμέρους Μ/Σ, όπου αυτοί θα πρέπει να έχουν ακριβώς την ίδια τάση βραχυκύκλωσης, και την ίδια ακριβώς τάση δευτερεύοντος, προκειμένου να είναι ίσα τα παρεχόμενα ρεύματα των δύο 6-παλμικών ανορθωτών, παρότι η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων είναι διαφορετική. Ειδικές τεχνολογίες για την κατασκευή αυτών των Μ/Σ έχουν εφαρμοσθεί, όπως η κατασκευή αυτών με μικρο-μετρική τάση βραχυκύκλωσης (u_k).

Σε αυτήν την περίπτωση τα ρεύματα που διατρέχουν τις διόδους, έχουν φασική διαφορά 60 ηλ. μοίρες, η παρεχόμενη DC τάση είναι αρκετά καλά εξομαλυμένη, και οι ανώτερες αρμονικές από την πλευρά του εναλλασσόμενου είναι αρκετά περιορισμένες.

Το συνολικό DC ρεύμα της 12-παλμικής ανορθωτικής διάταξης συντίθεται από το ρεύμα των 12 ανορθωτών οι οποίοι συνεισφέρουν στο DC φορτίο, εξίσου. Για να επιτευχθεί αυτό πρακτικά, οι 2 Μ/Σ, πρέπει να έχουν μικρο-μετρική ρύθμιση της τάσης βραχυκύκλωσης, (προκειμένου να εξισωθούν), γεγονός που αποτελεί μεγάλη κατασκευαστική δυσκολία. Μετά την πάροδο αρκετού χρονικού διαστήματος, οι κυματομορφές των ρευμάτων των 12 διόδων είναι ως ακολούθως:

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος



Σχήμα 41. Κυματομορφές προσομοίωσης

Τα απεικονιζόμενα ρεύματα έχουν ληφθεί σαν πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης $1\text{m}\Omega$, η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τους αντίστοιχους ανορθωτές. **Ο ετεροχρονισμός των ρευμάτων είναι προφανής.** Τα ρεύματα κορυφής είναι περί τα 210Amps , με τις αρχικώς τιθέμενες τιμές των στοιχείων. ($230\text{V rms Phase Voltage}$, 50Hz , $R_{\text{LOAD}}=10\Omega$, $L_{\text{FILT}}=300\text{MICRO-HENRY}$, $C_{\text{FILT}}=22\text{MILI-FARAD}$)

Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο το οποίο κατέγραψε ο προσομοιωτής είναι η μεταβατική ασυμμετρία στα ρεύματα των διόδων, η οποία αποσβένει σε μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, **στον πρώτο Μ/Σ Υ/ΥΥ, η σύνδεση του ουδέτερου κόμβου του πρωτεύοντος Υ, είναι υποχρεωτική διότι αν δεν συνδεθεί αναπτύσσονται άνισες τάσεις στα δευτερεύοντα. Πρέπει δηλαδή, ο ουδέτερος αγωγός του Υ, να διατρέχεται από ανώτερες αρμονικές, προκειμένου να συντεθεί ορθώς η σωστή τάση δευτερεύοντος.**

Η ως άνω ανορθωτική διάταξη βρίσκει απ' ευθείας εφαρμογή στην βιομηχανία παραγωγής Αλουμινίου, και γενικότερα σε ηλεκτρολυτικές χημικές Βιομηχανίες, καθώς και στους ταχυφορτιστές ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

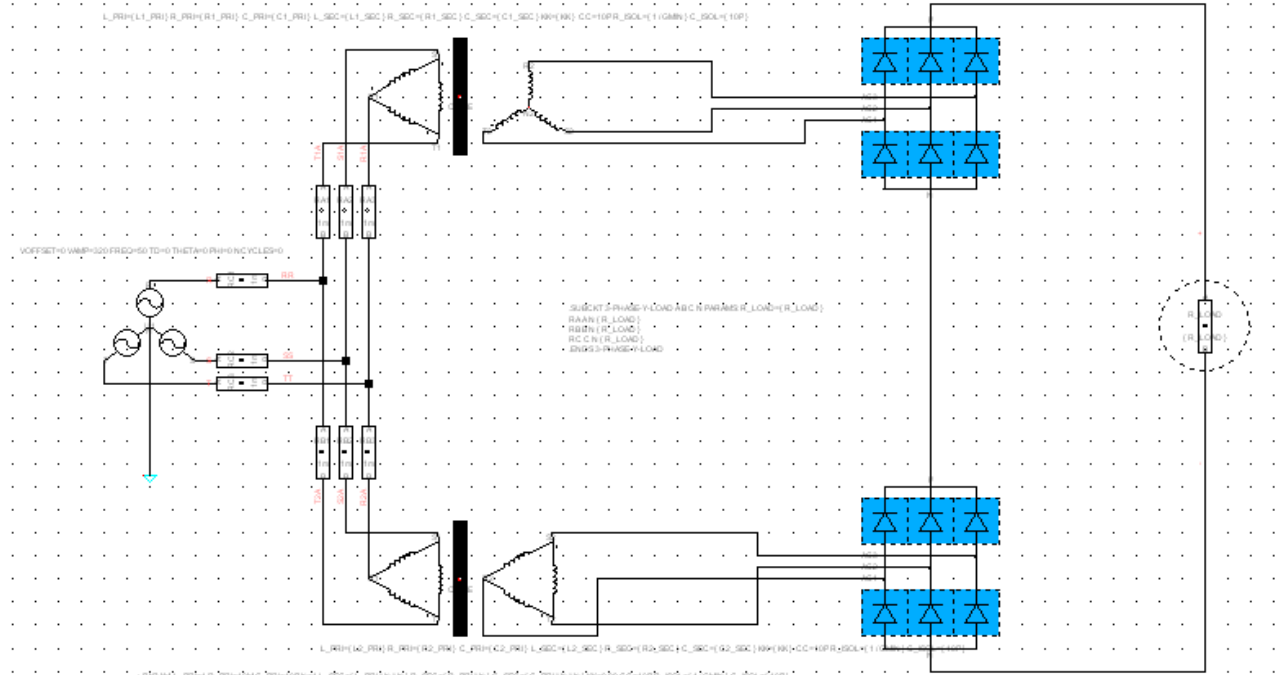
4.6 12-Παλμικός Ανορθωτής

Η ανάγκη βελτίωσης του συντελεστού ισχύος, η μείωση των ανωτέρων αρμονικών από την πλευρά του εναλλασσομένου, οδήγησε στην εξέλιξη και κατασκευή ειδικών πολυ-παλμικών ανορθωτικών διατάξεων. Αυτές βρίσκουν εφαρμογή στα συστήματα Δικτύων Μεταφοράς Συνεχούς ρεύματος, τόσο σαν ανορθωτές όσο και σαν αντιστροφείς (οδηγούμενοι από την εναλλασσόμενη τάση δικτύου παράδοσης ηλ. ενέργειας). (Load side Commutated Current Source Inverter).

Κύριος αντιπρόσωπος αυτής είναι η 12-παλμική 3-φασική.

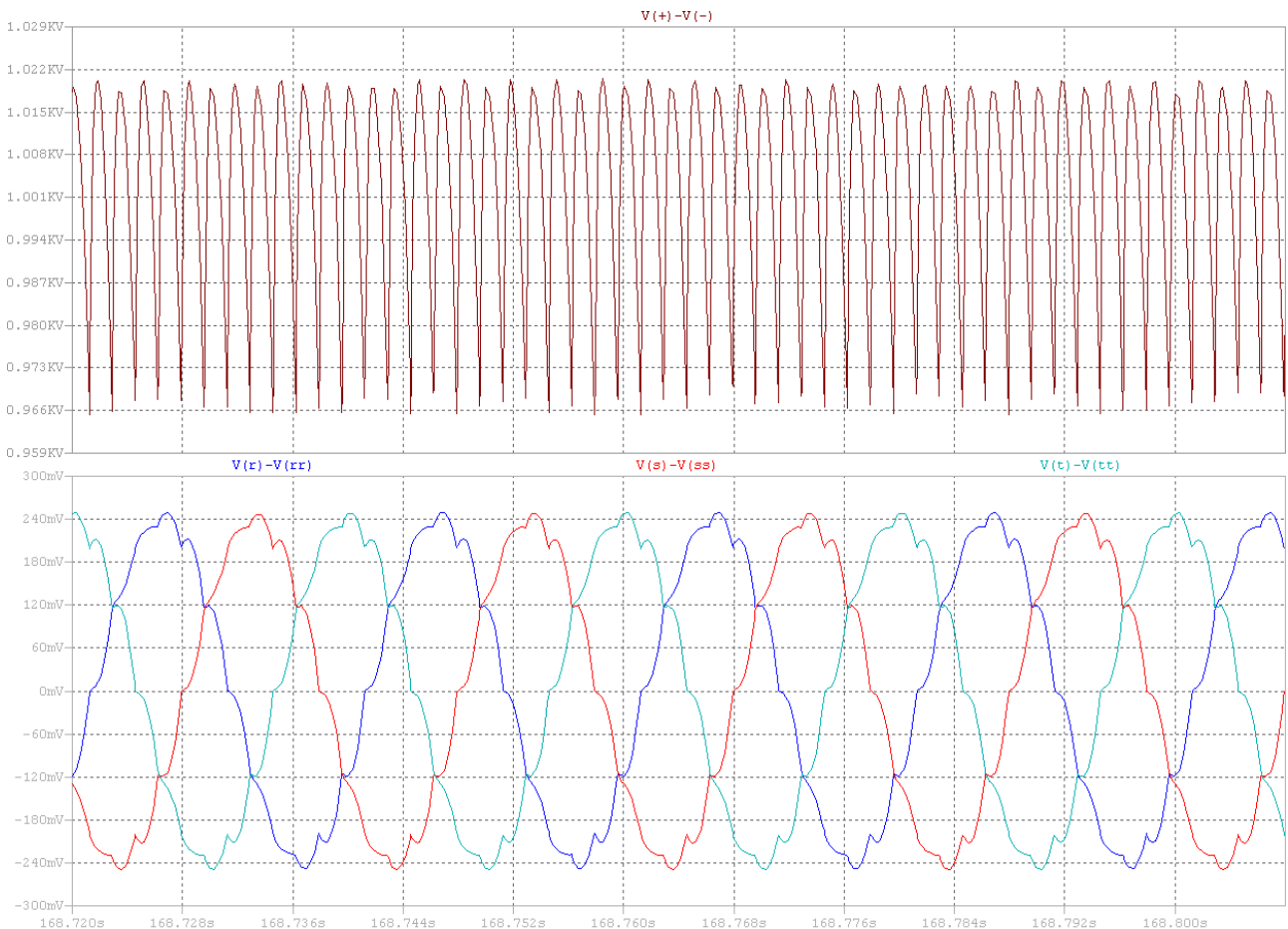
Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

Οι προσομοιωτικές παράμετροι στο ακόλουθο κύκλωμα είναι ως εξής, με Τάση εισόδου: 3-φασική 230Vac, 50Hz, Φορτίο εξόδου 10Ω.



Σχήμα 42. Κύκλωμα προσομοίωσης

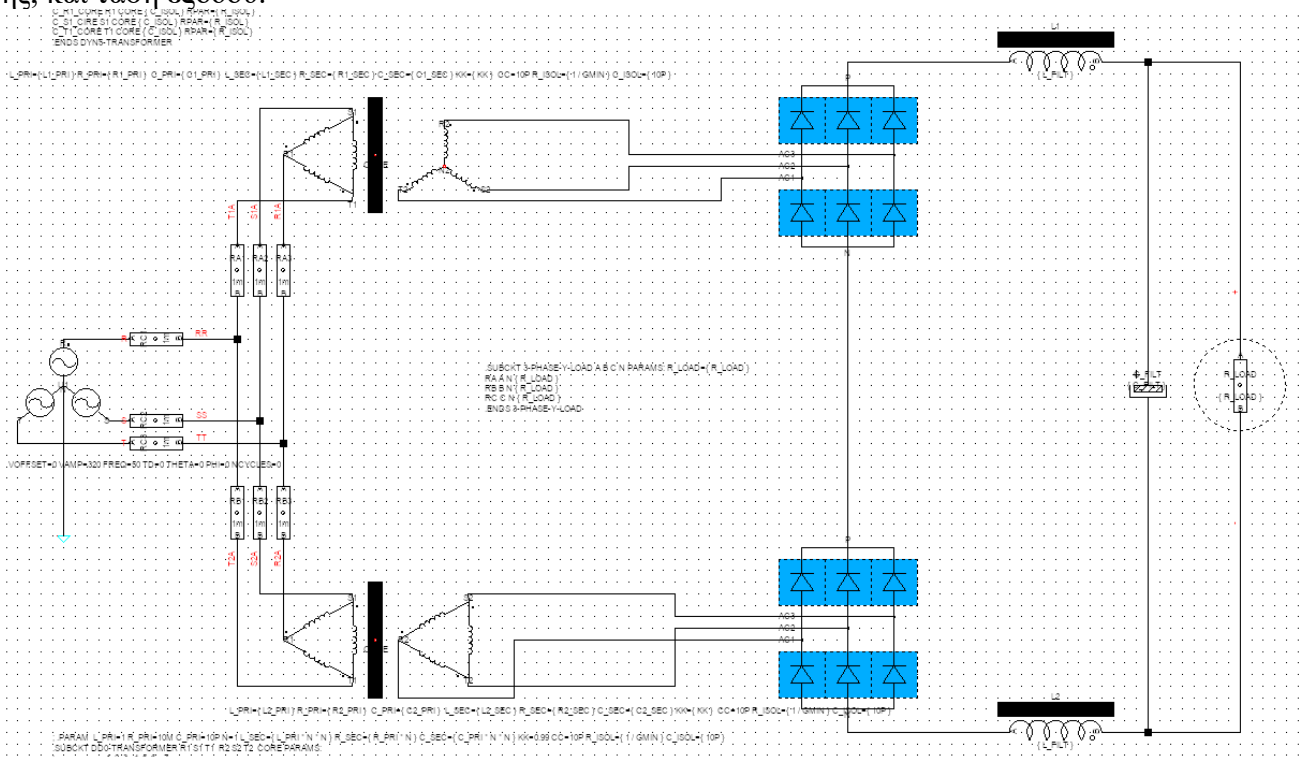
Τα προσομοιωτικά αποτελέσματα αυτής είναι ως ακολούθως, με:



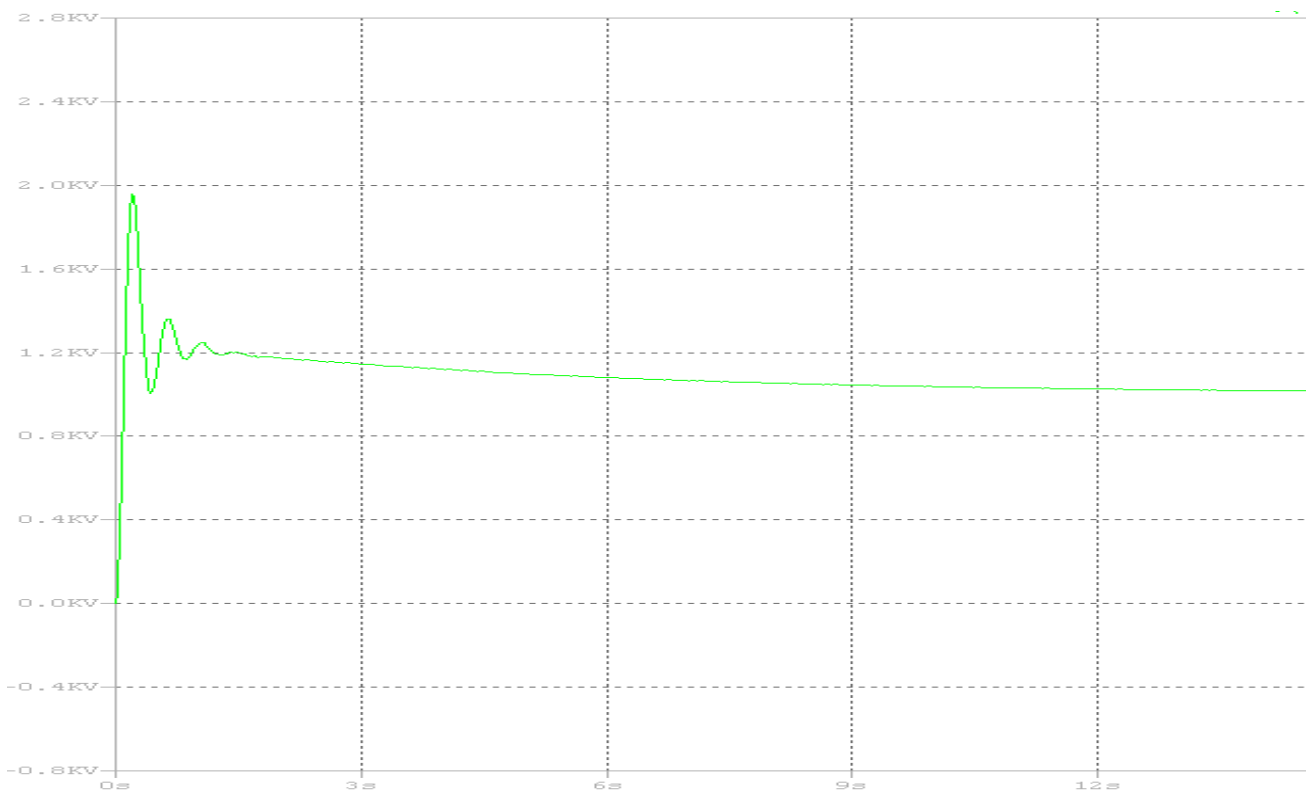
Σχήμα 43. Κυματομορφή Τάσεως στο DC φορτίο, (άνω), και ρεύματα γραμμής από την πλευρά του Εναλλασσομένου Ρεύματος.

Μελέτη και Προσομοίωση Ειδικών Ανορθωτικών Διατάξεων Ισχύος

Μέση τιμή της Τάσης εξόδου είναι 1000Volts περίπου σε φορτίο 10Ω, (άνω κυματομορφή), και στην κάτω φαίνονται οι κυματογράφους των ρευμάτων στις 3 φάσεις. Ρεύματα ανά φάση (ρεύματα γραμμής): 170.5Amps. Ρεύματα κορυφής 260Amps περίπου. **Κυμάτωση από την πλευρά του DC: 50V περίπου, 5% περίπου, χωρίς καθόλου φίλτρο. Η παραδιδόμενη ισχύς στο DC φορτίο είναι 100KW, και είναι προφανές ότι η DC τάση είναι αρκετά εξομαλυσμένη.** Επίσης οι κυματομορφές των ρευμάτων έχουν μικρή επιφόρτιση ανωτέρων αρμονικών. Οι κατωτέρω κυματομορφές αφορούν την 12-παλμική διπλής γέφυρας με φίλτρο. Κύκλωμα αυτής, και τάση εξόδου.



Σχήμα 44. 12-Παλμική ανορθωτική Διάταξη 12 Διόδων.

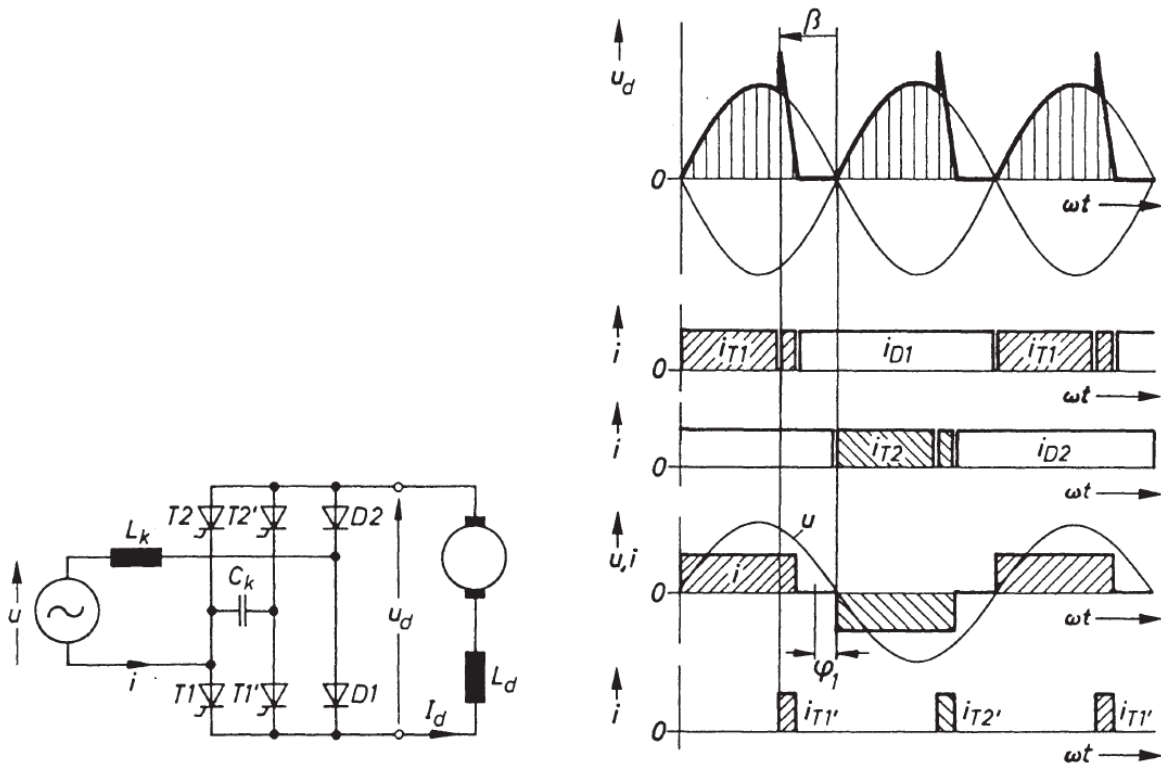


Σχήμα 45. Κυματομορφή της τάσεως εξόδου στην 12-παλμική.

Είναι εμφανής η μεταβατική υπέρταση, κατά τα πρώτα 2sec της λειτουργίας αυτής. Η τάση εξόδου είναι περίπου 1000V DC, με $R_LOAD=10\Omega$, $L_FILT=100\text{MILI-HENRY}$, $C_FILT=22000\text{MICRO-FARAD}$. Και σε αυτήν την περίπτωση της 12-παλμικής Ανορθωτικής Διάταξης πρέπει η τάσεις βραχυκύκλωσης των δύο Μ/Σ να είναι ακριβώς ίσες μεταξύ των παρότι παρέχουν κοινό ρεύμα στο φορτίο, (λόγω σύνδεσης εν σειρά), διότι αυτή η ανισότητα εμφανίζει διαφορές στην υπό ανόρθωση τάση, και κυμάτωση (διαφοροποίηση των τάσεων κορυφής).

4.7 Ανορθωτικές διατάξεις με επιβαλλόμενη σβέση (Quenching Controlable Rectifiers)

Οι παρακάτω εικονιζόμενες ανορθωτικές διατάξεις επιφορτίζουν με χωρητικό συντελεστή ισχύος το δίκτυο (ως προς τη βασική αρμονική), ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετούν το DC φορτίο. Αυτό γίνεται δια της επιβολής της ανορθωμένης τάσης από την έναρξη της ημιτονοειδούς τάσεως μέχρι την γωνία $\pi-\beta$, όπου β είναι η γωνία παύσης αγωγής. Η σβέση των θυρίστωρ επιτυγχάνεται δια του εσωτερικού πυκνωτή μετάβασης C_k . Αυτές οι ειδικές ανορθωτικές διατάξεις εφαρμόστηκαν στα ηλεκτροκίνητα τραίνα στην πρώην Δ. Γερμανία.



Σχήμα 46. Μονοφασική ασύμμετρη χωρητικά σβενδύμενη γέφυρα και κυματομορφές τάσης και ρεύματος [8].

Η ασύμμετρη γέφυρα αποτελείται από τα κύρια θυρίστωρ $T1$, $T2$, τις κύριες διόδους $D1$, $D2$ και τα βοηθητικά στοιχεία σβέσεως $T1'$, $T2'$ (quenching thyristors) και τον πυκνωτή μετάβασης C_k [8].

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΕΠΑΥΞΗΤΙΚΕΣ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται ειδικές ανορθωτικές διατάξεις και μετατροπείς, οι οποίοι παράδουν τάση εξόδου στο φορτίο, αρκετές φορές μεγαλύτερη από την AC τάση εισόδου. Συνήθως η AC τάση εισόδου είναι σχετικά υψηλής συχνότητας, και παράγεται είτε από πολύ-πολικές γεννήτριες, είτε από αντιστραφείς ισχύος σχετικώς υψηλών συχνοτήτων (Ακτινολογικά Μηχανήματα). Ένας κατάλληλος συντονιζόμενος αντιστροφέας 4 Thyristor, εμπεριέχεται στις υπό προσομοίωση διατάξεις, και τα σωρευτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται ακολούθως.

Τεράστιο είναι το πλήθος των εφαρμογών αυτών των κυκλωμάτων, όπως εφαρμογές υπερυψηλής τάσης (ΥΥ-Τ), ακτινολογικών μηχανημάτων, (X-ray UHV power supplies), όργανα διακρίβωσης αντίστασης μόνωσης, (high voltage with-stand insulation testers) και μελέτης διηλεκτρικής αντοχής υλικών.

Οι δίοδοι ανόρθωσης που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διατάξεις είναι δίοδοι ταχείας ανάκαμψης (fast recovery time). Λόγω της πιθανής ανισοκατανομής της ανάστροφου τάσεως, αυτές πρέπει να έχουν την ιδιότητα να μην καταστρέφονται όταν η μέγιστη (επιτρεπόμενη από τον κατασκευαστή) εφαρμοζόμενη ανάστροφη τάση ξεπερνιέται, αλλά να αποσβένουν αυτήν την ενέργεια, **ερχόμενες σε κατάσταση AVALANCHE**. Εναλλακτικώς, δίκτυο RC εν παραλλήλω ισοκατανομής τάσεως πρέπει να συνδέεται παραλλήλως της κάθε διόδου ξεχωριστά.

Ορισμένοι χαρακτηριστικοί τύποι τέτοιων διόδων ακολουθούν:

MUR480EG, MUR4100EG

SWITCHMODE Power Rectifiers

Ultrafast “E” Series with High Reverse Energy Capability

These state-of-the-art devices are designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes.

Features

- 20 mJ Avalanche Energy Guaranteed
 - Excellent Protection Against Voltage Transients in Switching Inductive Load Circuits
 - Ultrafast 75 Nanosecond Recovery Time
 - 175°C Operating Junction Temperature
 - Low Forward Voltage
 - Low Leakage Current
 - High Temperature Glass Passivated Junction
 - Reverse Voltage to 1000 V
 - These are Pb-Free Devices*
- ##### Mechanical Characteristics:
- Case: Epoxy, Molded
 - Weight: 1.1 Gram (Approximately)
 - Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
 - Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
 - Shipped in Plastic Bags, 5,000 per Bag
 - Available Tape and Reel, 1,500 per Reel, by Adding a “RL” Suffix to the Part Number
 - Polarity: Cathode indicated by Polarity Band

MAXIMUM RATINGS

| Rating | Symbol | Value | Unit |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|------|
| Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage | V_{RRM} V_{RWM} V_R | 800 1000 | V |
| Average Rectified Forward Current (Square Wave; Mounting Method #3 Per Note 2) | $I_{F(AV)}$ | 4.0 @ $T_A = 35^\circ\text{C}$ | A |
| Non-Repetitive Peak Surge Current (Surge Applied at Rated Load Conditions Halfwave, Single Phase, 60 Hz) | I_{FSM} | 70 | A |
| Operating Junction and Storage Temperature Range | T_J, T_{stg} | -65 to +175 | °C |

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

Σχήμα 47. Δίοδοι ταχείας ανάκαμψης με ικανότητα διαχείρισης ενέργειας κατά την υπέρβαση της αναστροφής τάσης (fastrecovery AVALANCHE DIODE)[23]



ON Semiconductor®

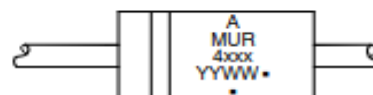
<http://onsemi.com>

ULTRAFAST RECTIFIER 4.0 AMPERES, 800-1000 VOLTS



AXIAL LEAD
CASE 267
STYLE 1

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location
MUR4xxx = Device Number (see page 2)
YY = Year
WW = Work Week
• = Pb-Free Package
(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 2 of this data sheet.



5SDA 14F5007

Old part no. DA 808-1410-50

Avalanche Diode

Properties

- low on-state voltage
- avalanche reverse characteristics
- high operational reliability
- suitable for parallel operation

Key Parameters

| | | |
|------------|---|----------|
| V_{RRM} | = | 5 000 V |
| I_{FAVm} | = | 1 410 A |
| I_{FSM} | = | 17 500 A |
| V_{TO} | = | 1.130 V |
| r_T | = | 0.440 mΩ |

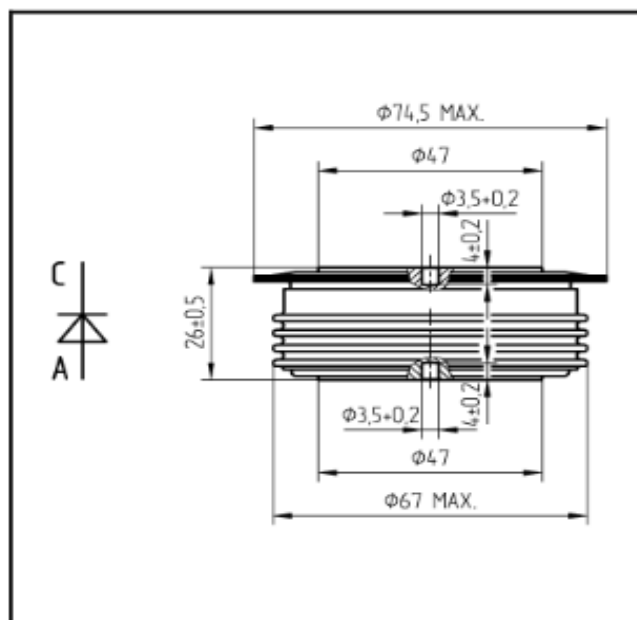
Types

| | V_{RRM} |
|--------------|-----------|
| 5SDA 14F5007 | 5 000 V |
| 5SDA 14F4407 | 4 400 V |

Conditions: $T_j = -40 \div 160 \text{ }^\circ\text{C}$,
half sine waveform,
 $f = 50 \text{ Hz}$

Mechanical Data

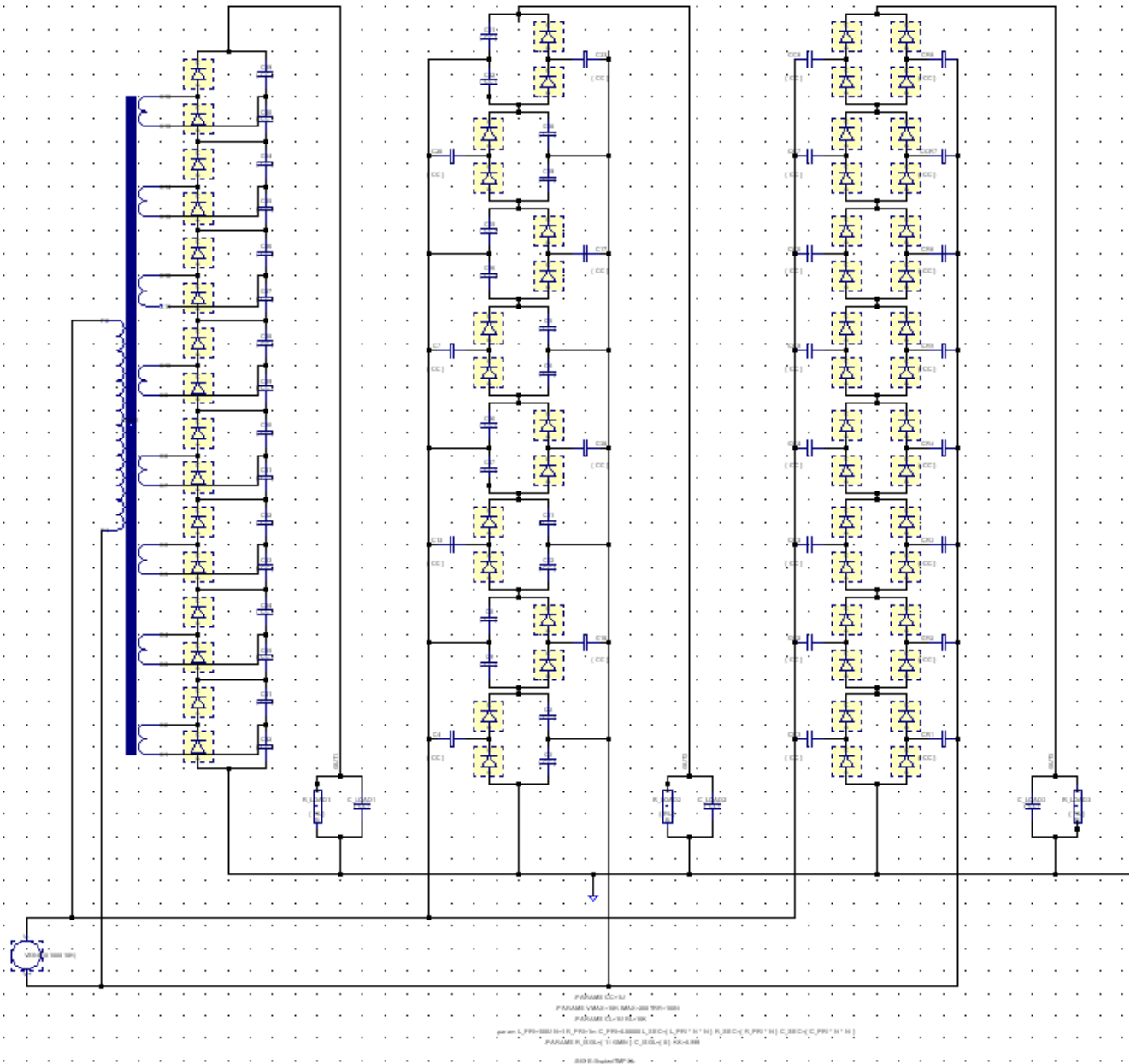
| F_m | Mounting force | 22 ± 2 kN |
|-------|---------------------------|-----------|
| m | Weight | 0.46 kg |
| D_S | Surface creepage distance | 30 mm |
| D_a | Air strike distance | 20.5 mm |



Σχήμα 48. Δίοδοι ταχείας ανάκαμψης με ικανότητα διαχείρισης ενέργειας κατά την υπέρβαση της αναστροφής τάσης (fast recovery AVALANCHE DIODE) [26]

Αναφορές επί του σημαντικότητας αυτού θέματος είναι [27], [28]:

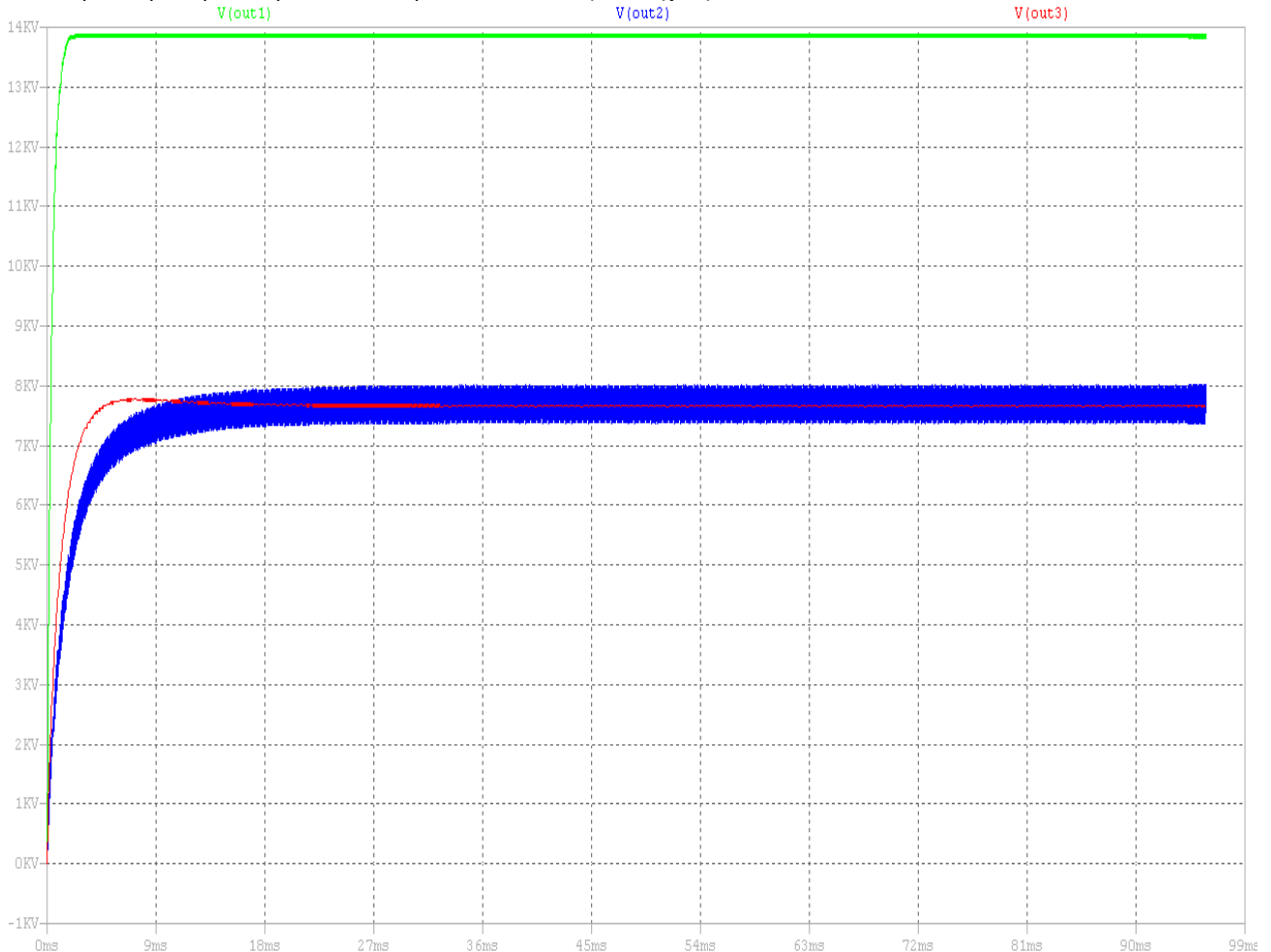
Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνονται και έχουν προσομοιωθεί διά του LTspice τρεις βελτιστοποιημένες μέθοδοι παραγωγής ΥΥΤ, τροφοδοτούμενες με κοινή πηγή.



Σχήμα 49. Κύκλωμα προσομοίωσης

Και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των αναπαρίστανται κατωτέρω:

Το κύκλωμα προσομοιώθηκε για $C=1\mu\text{F}$, $R_{\text{load}}=10\text{K}$, $C_{\text{load}}=1\mu\text{f}$, ενώ η πηγή HF AC, είναι 10KHz, 2KV_{pp}, και προσομοιώνονται ταυτόχρονα τρεις διατάξεις, τροφοδοτούμενες από αυτήν την κοινή πηγή HF AC.



Σχήμα 50. Κυματομορφές προσομοίωσης

όπου:

- πράσινη κυματομορφή είναι η έξοδος του πολλαπλού διπλασιαστή πλήρους κύματος, (V(out1)),
- μπλέ κυματομορφή είναι η έξοδος του παράλληλου χωρητικού διπλασιαστή, (V(out2)),
- κόκκινη κυματομορφή είναι του πολλαπλού τύπου γέφυρας, (V(out3))

Είναι προφανές ότι η τοπολογία (1), στο αριστερό μέρος του σχήματος, παραδίδει ταχύτερα μεγαλύτερη τάση DC στο φορτίο. Απαιτεί όμως την ύπαρξη ενός Μ/Σ δισκοειδών τυλιγμάτων δευτερεύοντος, με ειδική τεχνοτροπία στον τρόπο περιέλιξης, όπου ένας τέτοιος φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία.



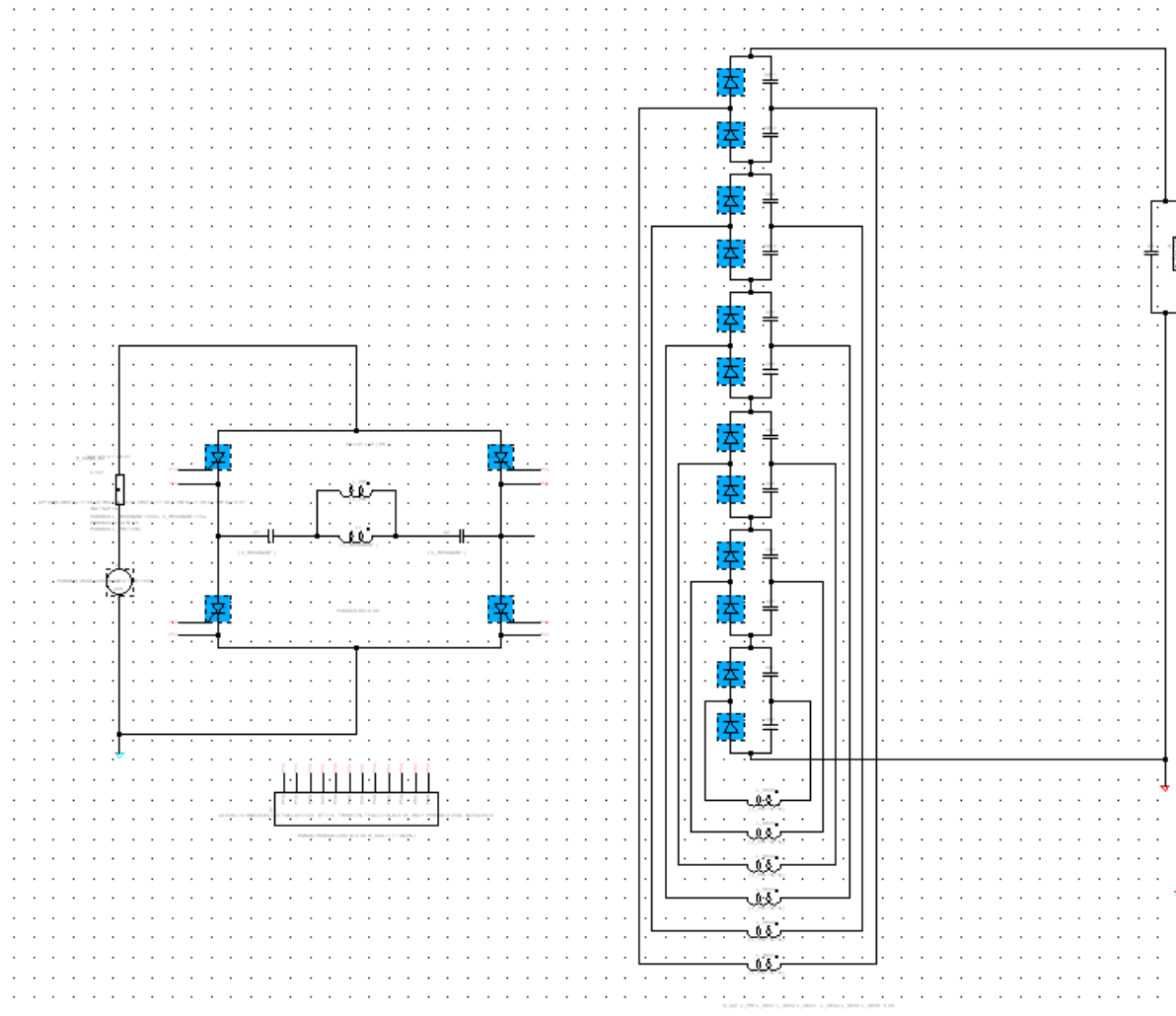
Εικόνα 8. Μ/Σ δισκοειδών τυλιγμάτων δευτερεύοντος

Οι τοπολογίες (2), και (3) είναι περίπου εφάμιλλες, με μικρότερη παραδοτέα τάση εξόδου, με διόδους και πυκνωτές υψηλότερης αντοχής, και βραδύτερο χρόνο ανύψωσης της ΥΥΤ, δεν απαιτούν όμως την ύπαρξη ειδικού μετασχηματιστή.

Η πρώτη τοπολογία χρησιμοποιείται ευρέως σε ακτινολογικά μηχανήματα παραγωγής ακτίνων Χ, αλλά κυρίως σε αξονικούς τομογράφους, όπου η απαίτηση αρκετών ακτινοβολήσεων ανά μονάδα χρόνου είναι σημαντική.

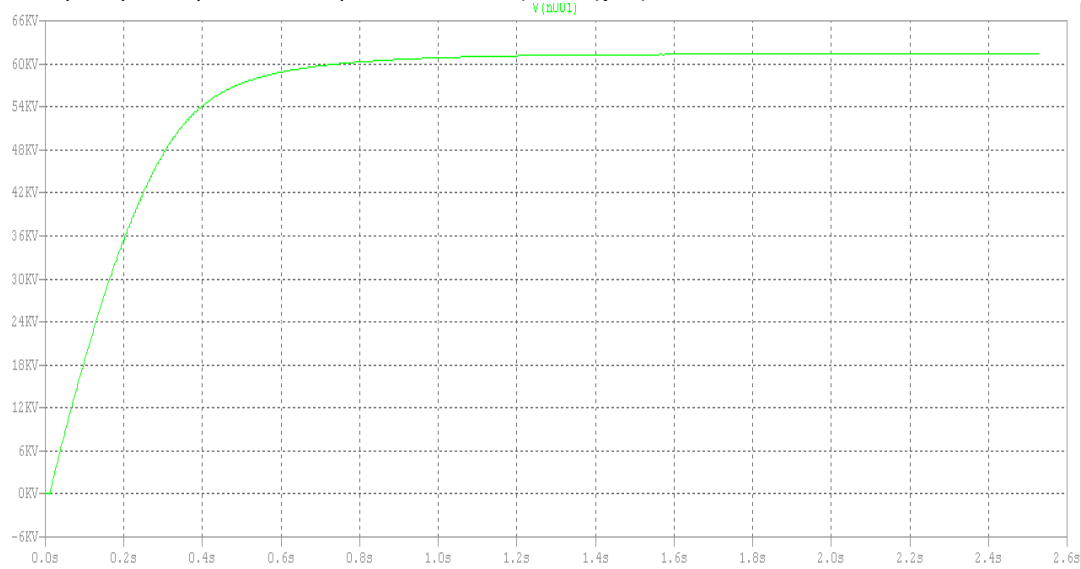
Απεικονίζεται και προσομοιώνεται ακολούθως ένα κύκλωμα συντονιζόμενου αντιστροφέα ισχύος με 6 διπλασιαστές τάσεως, τροφοδοτούμενα από 6 ανεξάρτητα, ηλεκτρικώς απομονωμένα δευτερεύοντα τυλίγματα, και ένα με πολλαπλασιαστές τάσεως τύπου γέφυρας, 6 σταδίων.

5.1 Πολλαπλασιαστική Ανόρθωση Με 6 Διπλασιαστές Τάσεως και Ηλεκτρικώς Απομονωμένα Δευτερεύοντα Τυλίγματα



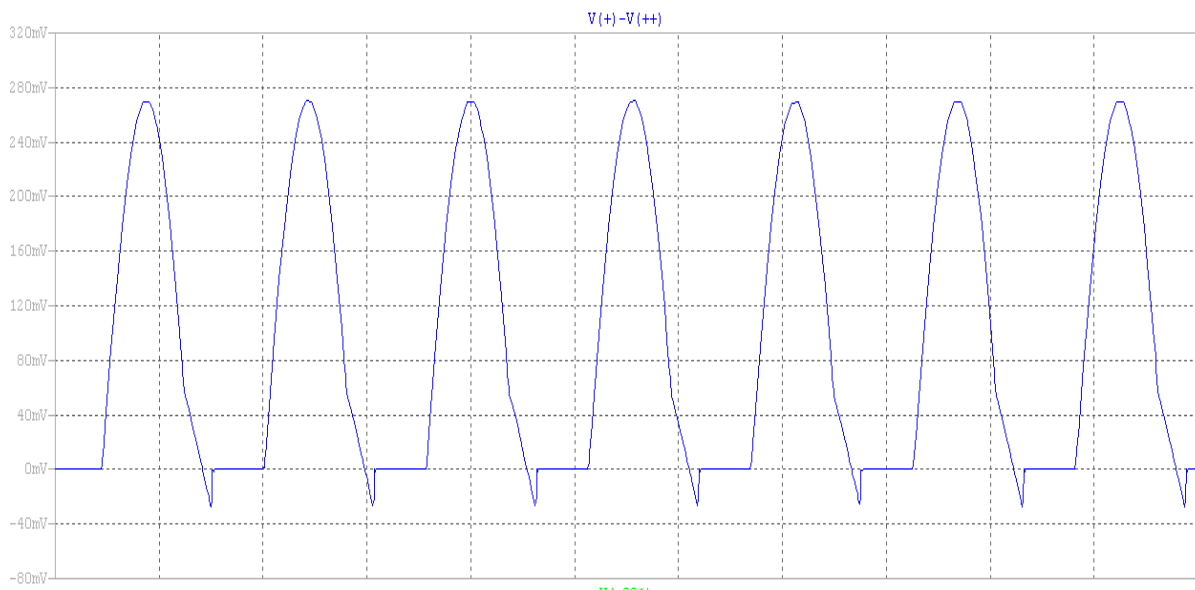
Σχήμα 51. Κύκλωμα προσομοίωσης

Η παραδοτέα DC τάση εξόδου είναι περί τα 61.5 kV, σε φορτίο 100 kΩ. Παρεχόμενη ισχύ στο φορτίο:



Σχήμα 52. Κυματομορφές προσομοίωσης

$P_{out} = (61500 \cdot 61500) / 100000 = 37822.5$ Watts και η κυματομορφή του ρεύματος εισόδου είναι ως ακολούθως:



Σχήμα 53. Κυματομορφές προσομοίωσης

Μέση τιμή ρεύματος εισόδου 95.05Amps, με 400Volts DC τάση εισόδου.

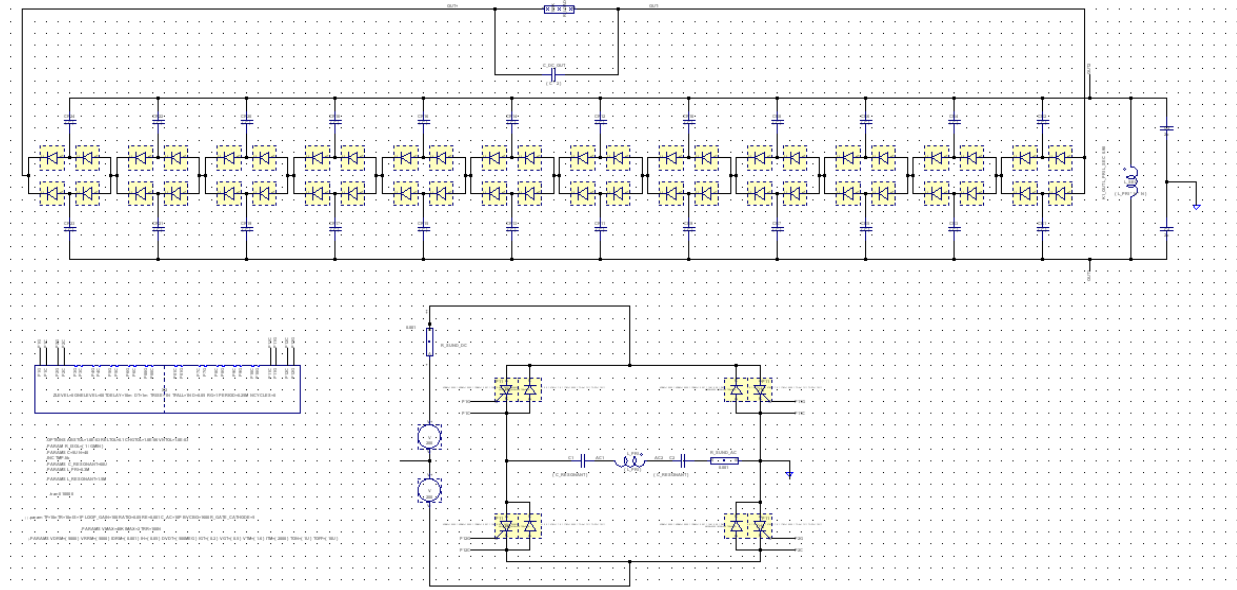
$$P_{in} = 95.05 \cdot 400 = 38020 \text{ Watts.}$$

Υπολογιζόμενος Βαθμός απόδοσης: Power efficiency = $37822.5 / 38020 = \sim 99.4\%$

5.2 Πολλαπλασιαστικές Ανορθωτικές Διατάξεις Τύπου Γέφυρας Πολλαπλών Συμμετρικών Σταδίων

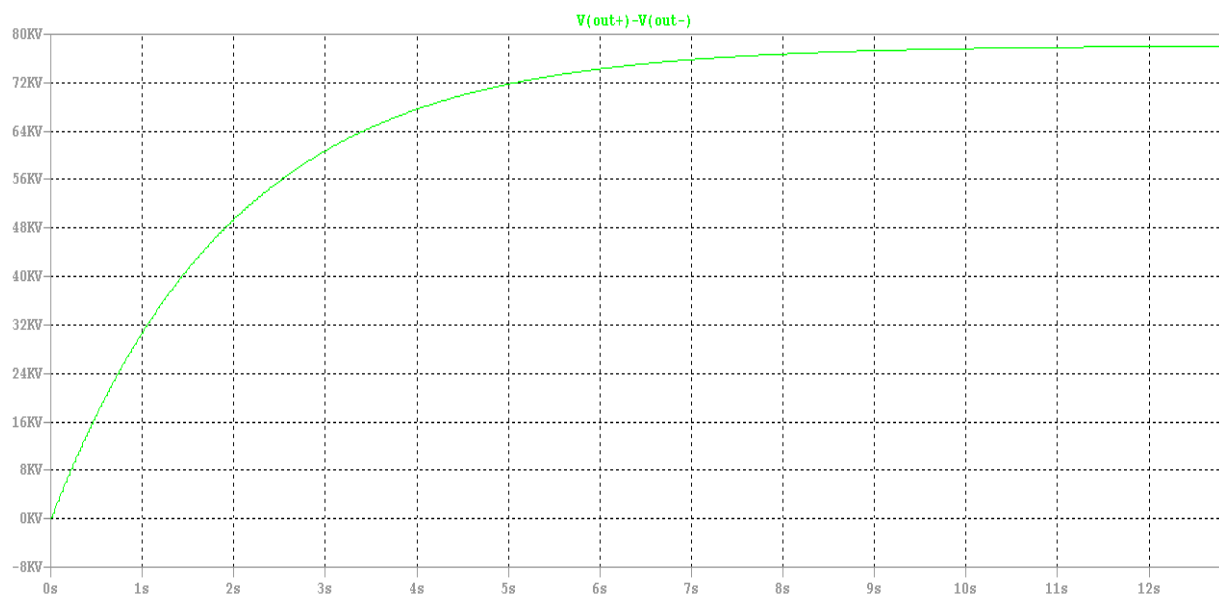
Απολύτως αναγκαίες για την τροφοδοσία των λυχνιών δημιουργίας ακτίνων X των ακτινολογικών μηχανημάτων αποτελούν οι κατωτέρω διατάξεις. Διαγράμματα και προσομοιωτικά αποτελέσματα ακολουθούν:

5.2.1 Πολλαπλασιαστική Ανορθωτική Διάταξη 4-Θυρίστορ Με Επαυξητή 12 Συμμετρικών Σταδίων



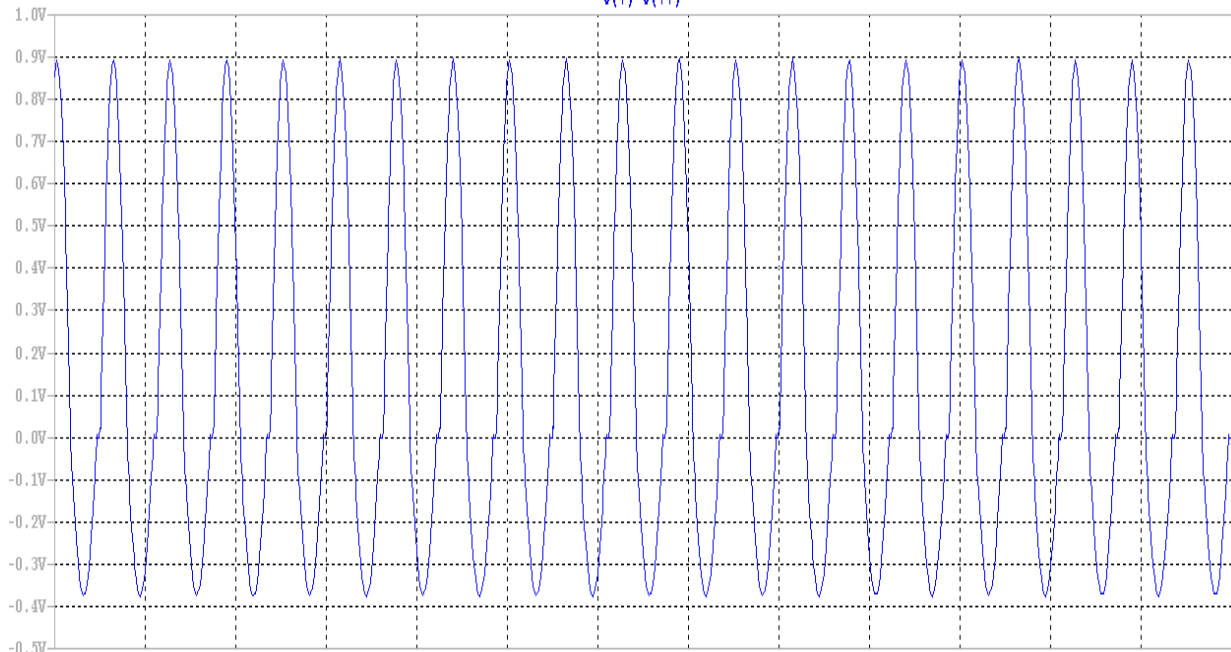
Σχήμα 54. Κύκλωμα προσομοίωσης

Στην ανωτέρω διάταξη το ρεύμα πρωτεύοντος του Μ/Σ ανύψωσης τάσεως, είναι ρεύμα συντονισμού σειράς μεταξύ L_{pri} , και $C_{resonant}$, και η επιπλέον ενέργεια επιστρέφει στην πηγή συνεχούς διά των αντιπαράλληλων διόδων. Έτσι ένα ισχυρό κυκλικό ρεύμα ρέει μεταξύ πηγής και φορτίου AC. Στη θέση του κλάδου που αποτελείται από θυρίστορ και αντιπαράλληλη δίοδο μπορεί να τεθεί ένα ACSR θυρίστορ (asymmetrical thyristor), με σοβαρή βελτίωση στον βαθμό απόδοσης [29]. Εάν δε το κύκλωμα αυτό τροφοδοτηθεί με υψηλότερη DC τάση, η απόδοσή του αυξάνει σημαντικά. Αντιθέτως, εάν οι αντιπαράλληλες δίοδοι καταργηθούν, τότε η απόδοση του κυκλώματος αυξάνει υπέρμετρα, αλλά τα Thyristor ισχύος καταπονούνται από μη ελεγχόμενη παραγόμενη υψηλή τάση. Το ακόλουθο κύκλωμα ξεπερνά αυτά τα προβλήματα και αυξάνει την απόδοση (σε παραδοτέα ΥΥΤ), με επιπλέον Thyristor εν σειρά (3 ανά κλάδο), και ανεξάρτητο κλάδο φραγής μέγιστης τάσεως. Η παραδιδόμενη στο φορτίο DC τάση αναπτύσσεται ως ακολούθως:



Σχήμα 55. Κυματομορφές προσομοίωσης

Και φτάνει περί τα 78.15 kV σε φορτίο 100 kΩ, σε χρόνο 12 sec περίπου, ενώ η κυματομορφή του ρεύματος εισόδου είναι ως ακολούθως:



Σχήμα 56. Κυματομορφές προσομοίωσης

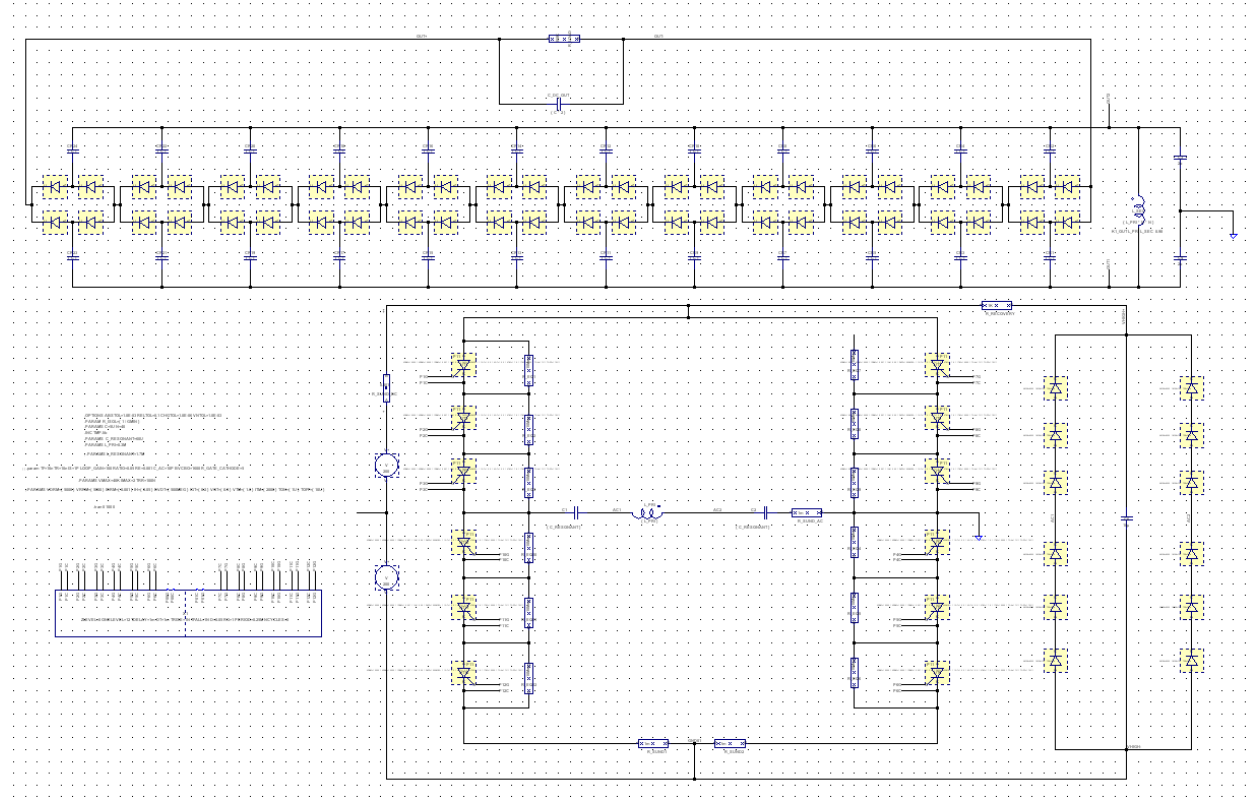
Και έχει μέση τιμή 153.1 Amps, σε τάση εισόδου 400 VDC.

$P_{out} = 61074$ Watts, $P_{in} = 61240$ Watts

Υπολογιζόμενος Βαθμός απόδοσης: Powerefficiency = ~99.7%

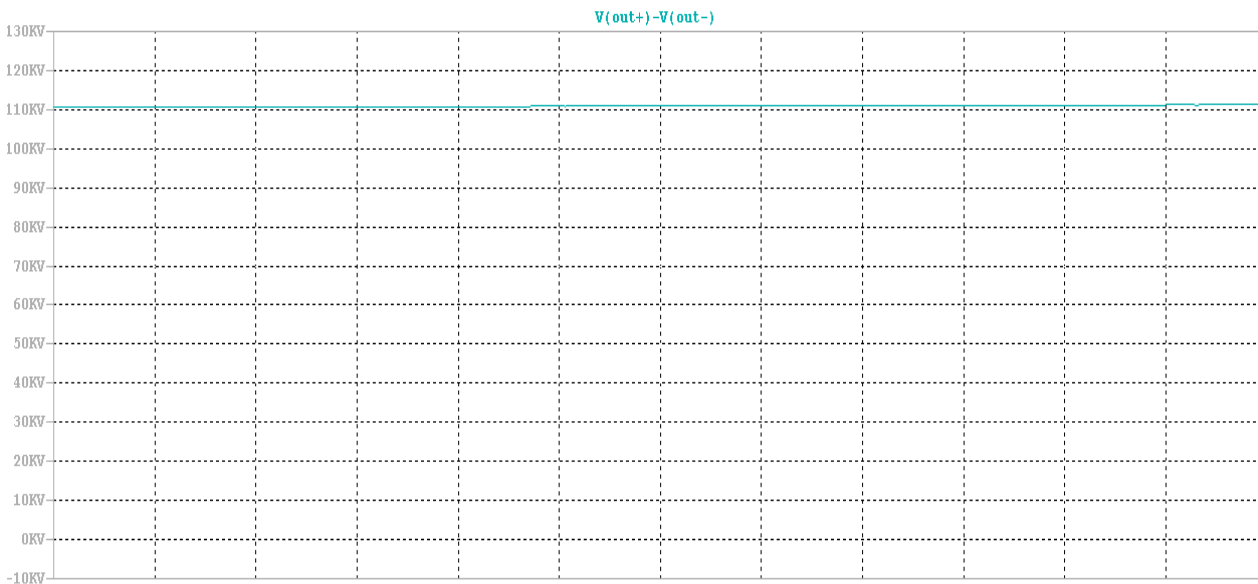
5.2.2 Πολλαπλασιαστική Ανορθωτική Διάταξη 12-Θυρίστορ Με Επαυξητή 12 Συμμετρικών Σταδίων και Ανεξάρτητο Κλάδο Περιορισμού Μέγιστης Τάσεως Δια 12 Διόδων.

Προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος ανάπτυξης της ανοδικής τάσης η κατωτέρω τοπολογία μπορεί να εφαρμοστεί. Χρησιμοποιεί περισσότερα εξαρτήματα αλλά αναπτύσσει συντομότερα την ΥΥΤ.

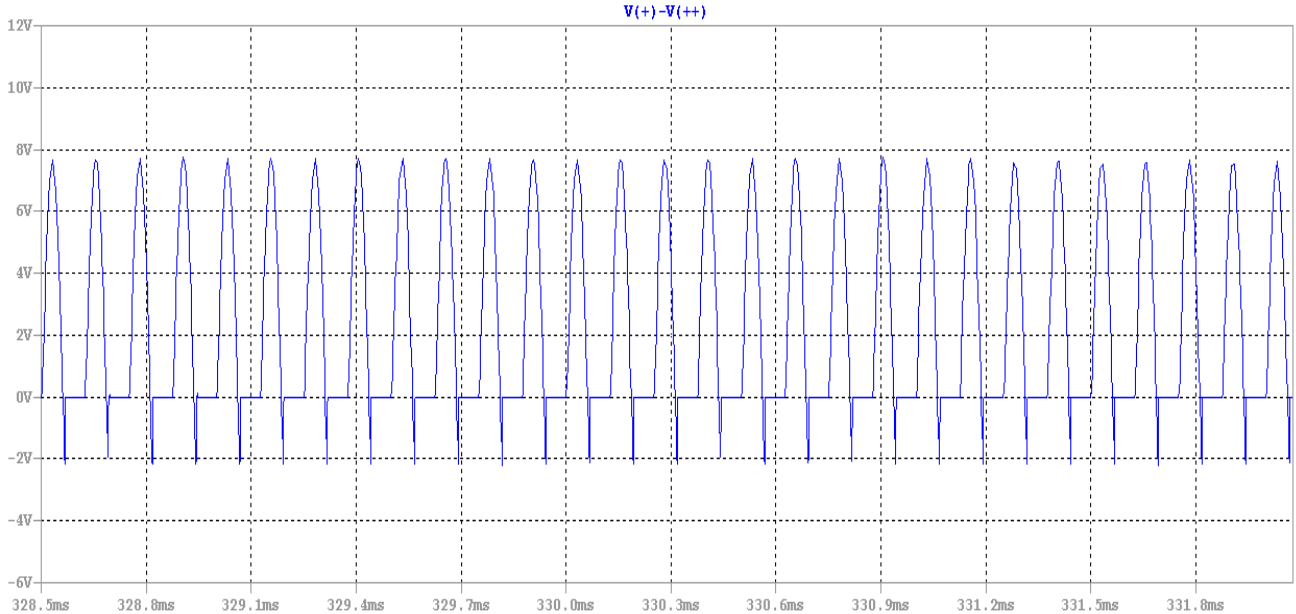


Σχήμα 57. Κύκλωμα προσομοίωσης

Αναπτύσσει περίπου 114 kV σε 0.35 sec, και φορτίο 100K, με κυματομορφή ρεύματος ως ακολούθως:



Σχήμα 58. Κυματομορφές προσομοίωσης



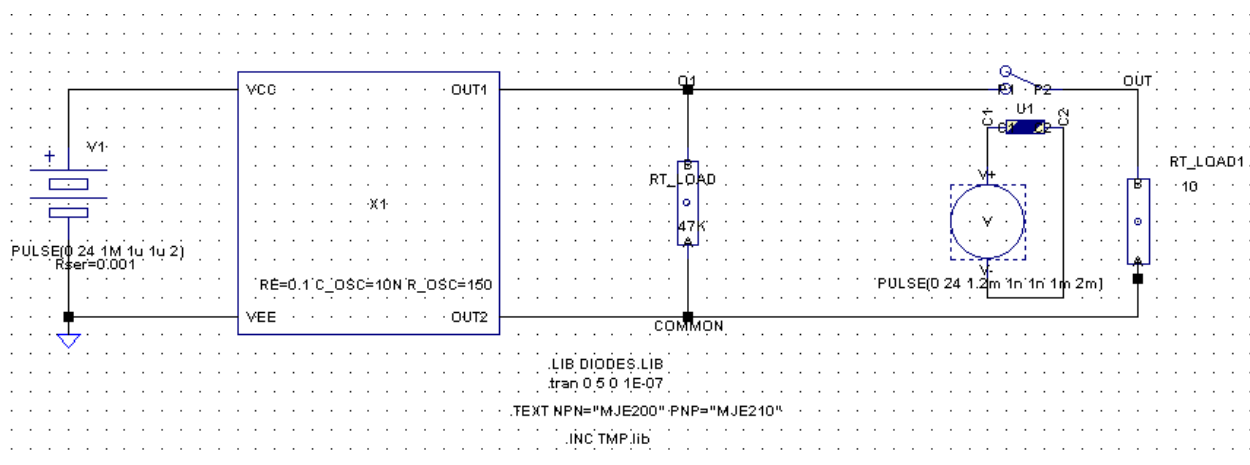
Σχήμα 59. Κυματομορφές προσομοίωσης

Ιδιαίτερα σημασίας είναι το κύκλωμα αρπαγής Υψηλής Τάσης του συντονιζόμενου επαυξητικού αντιστροφέα. Η πιθανή αστοχία αυτού θα καταστρέψει τον συντονιζόμενο αντιστροφέα, και οπωσδήποτε πρέπει να περιορίζει την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση, σε ασφαλή για τον μετατροπέα τάση, είτε καταναλώνοντας την σε κάποιο φορτίο (dissipative), είτε επιστρέφοντας την στην πηγή συνεχούς DC (regenerative).

Οι μετρήσεις βαθμού απόδοσης δεν είναι ρεαλιστικές διότι ο αλγόριθμος υπολογισμού του μη γραμμικού συστήματος αστοχεί με την πάροδο 0.35 sec (προσομοιωτικού χρόνου). Ακόμα και έτσι όμως δίνεται η βασική ιδέα μείωσης του χρόνου ανάπτυξης της παραδιδόμενης ΥΥΤ, προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός φωτοβολήσεων ανά μονάδα χρόνου. (Αυστηρή απαίτηση στο τροφοδοτικό ΥΥΤ στους Αξονικούς τομογράφους). Οι τιμές των άλλων εξαρτημάτων είναι οι ίδιες, για να υπάρχει ένα συγκριτικό μέτρο [30], [31], [32].

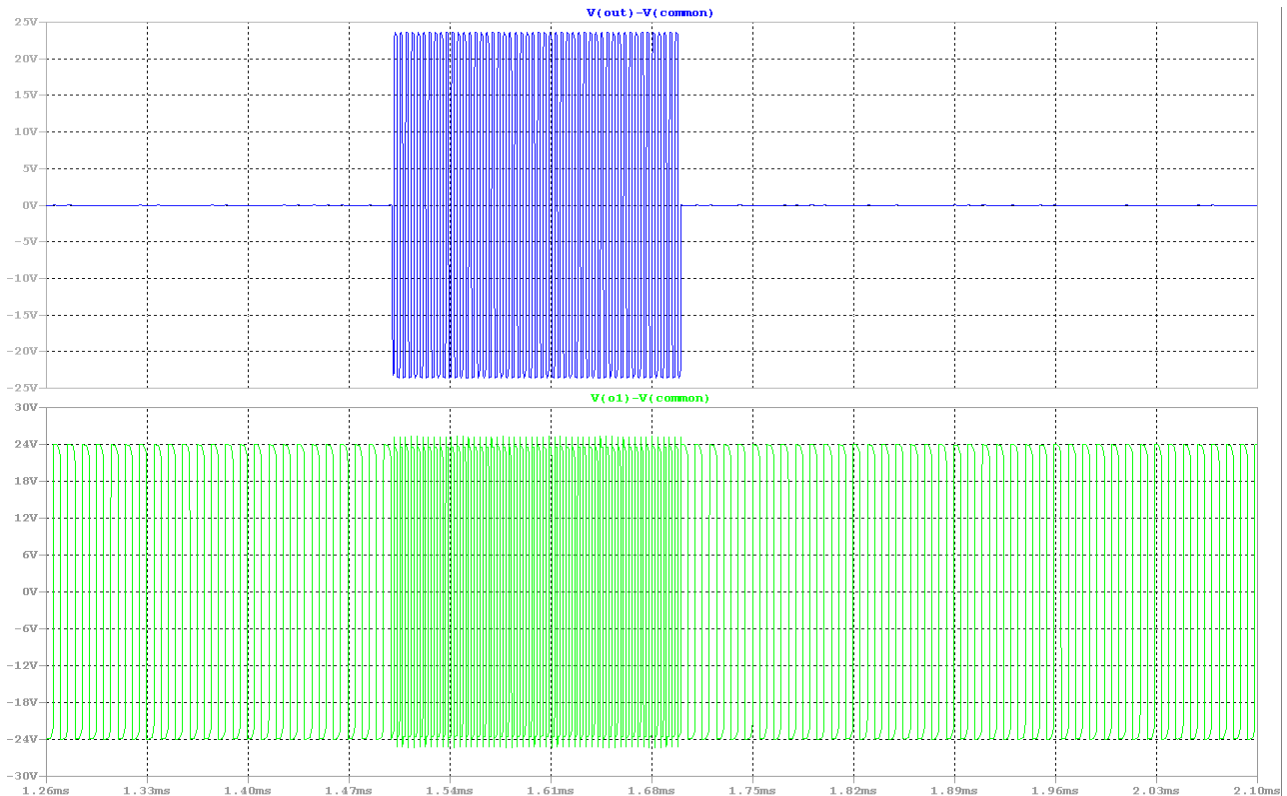
5.3 Κυκλώματα Πυροδότησης Ελεγχόμενων Ανορθωτικών Διατάξεων

Το πρώτο που είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί είναι ένας αξιόπιστος ταλαντωτής – μετατροπέας DC – AC, αρκετά χαμηλής σύνθετης αντίστασης εξόδου:



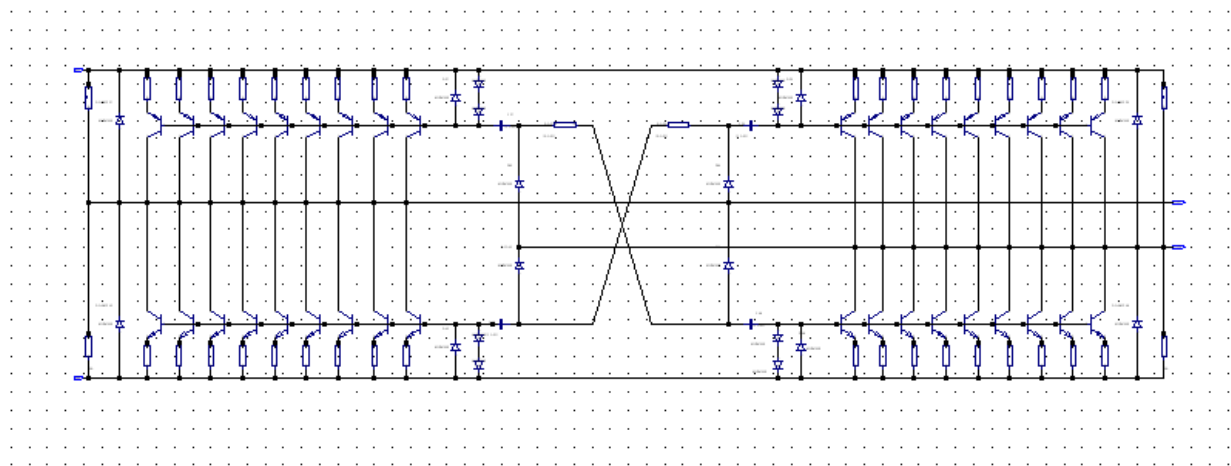
Σχήμα 60. Κύκλωμα προσομοίωσης

Όπου ο υπό μελέτη ταλαντωτής παρουσιάζει άριστη συμπεριφορά στις μεταβολές του φορτίου. (χρονική στιγμή πυροδότησης – μέγιστο φορτίο, ή παύση – ελάχιστο φορτίο).



Σχήμα 61. Κυματομορφή τάσεως εξόδου του υπο μελέτη ταλαντωτή, πριν και μετά τον ηλεκτρονόμο ζεύξεως.

Και έχει το ακόλουθο εσωτερικό κύκλωμα:



Σχήμα 62. Ταλαντωτής ισχύος χαμηλής εξαιρετικά αντίστασης εξόδου.

Σύμφωνα με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα αυτός ταλαντώνει στους 110KHz περίπου. Εξαιρετική συμπεριφορά παρουσιάζει στις μεταβολές φορτίου. Όταν ο ηλεκτρονόμος U1 είναι ανοικτός (ελάχιστο φορτίο) παραδίδει περίπου 48 Volt_{peak-peak}, και την ίδια παραδίδει όταν το φορτίο είναι 10 Ohms. Το μόνο που μεταβάλλεται είναι η συχνότητα ταλάντωσης η οποία αυξάνεται όταν ζευγνύετε το φορτίο 10Ω, γεγονός το οποίο ουδόλως ενδιαφέρει στην παρούσα ανάγκη. Κατά συμπέρασμα ο ως άνω ταλαντωτής ισχύος είναι κατάλληλος για τις απαιτήσεις της εν λόγω ανάγκης. Ο συντάσσων έχει δοκιμάσει την ανωτέρω διάταξη και πειραματικώς.

Η πράσινη κυματομορφή είναι πριν τον ηλεκτρονόμο, και η μπλε μετά από αυτόν. Τα διπολικά τρανζίστορ είναι τα συμπληρωματικά 2SC6144, 2SA2222. Ο ταλαντωτής είναι δυσ-ευαίσθητος σε “βαρέα φορτία” εξόδου, και η παραλληλία πολλών τρανζίστορ ανα κλάδο παρέχει εξαιρετικά μικρή αντίσταση εξόδου.

Ύστερα ένας υψίσυχνος Μ/Σ απομόνωσης ενός πρωτεύοντος, και ενός ή δύο δευτερευόντων πρέπει να παρεμβληθεί. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις μονώσεις, διότι αυτές φέρουν όλο το δυναμικό απομόνωσης μεταξύ κυκλώματος ισχύος, και κυκλώματος ελέγχου. Ταυτόχρονα πρέπει να έχει και εξαιρετικά χαμηλή σκέδαση. Μια άριστη μέθοδος για την κατασκευή αυτού είναι η χρήση ενός ομοαξονικού αγωγού, ο οποίος περιελίσσεται εντός φερριτικού τοροειδή πυρήνα, όπου η αρχή και το πέρας του κεντρικού αγωγού του ομοαξονικού αγωγού αποτελούν το πρωτεύον, ενώ η αρχή και το πέρας του περιφερειακού κυλινδρικού αγωγού αποτελούν το δευτερεύον. Το πλήθος των απαιτούμενων Μ/Σ είναι ίσο με το πλήθος των υπό πυροδότηση Thyristors. Φωτογραφία ιδιοκατασκευής (επινοήσεως του συντάσσοντος) του ως άνω περιγραφόμενου Μ/Σ εξαιρετικά χαμηλής σκέδασης για μεταβίβαση παλμών υψηλού ρυθμού ανόδου ρεύματος ως προς το χρόνο (dI_G/dt) ακολουθεί:



Εικόνα 9. Μ/Σ εξαιρετικά χαμηλής σκέδασης

Η ανωτέρω τεχνοτροπία κατασκευής μετασχηματιστών μεταβίβασης παλμών με βραχύ ανερχόμενο μέτωπο έχει δοκιμαστεί και πειραματικώς με απόλυτη επιτυχία.

Ο παλμός που εφαρμόζεται στην πύλη του θυρίστορ πρέπει να πυροδοτεί το θυρίστορ σε ακριβή χρονική στιγμή. Στους μετατροπείς AC/AC που οδηγούν φορτίο 1Φ ή 3Φ Μ/Σ, υπάρχει μια **αυστηρότατη απαίτηση: Η παραδιδόμενη στο πρωτεύον τύλιγμα τάση πρέπει να είναι απόλυτως απαλλαγμένη από συνεχή συνιστώσα τάσεως. Η οποιαδήποτε DC τάση στο πρωτεύον δεν περιορίζεται από τη σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) αυτού, αλλά από την ωμική αντίσταση αυτού.**

Ένα τεράστιο ρεύμα έχων συνεχή συνιστώσα κορύγγει τον πυρήνα του Μ/Σ και η αντίσταση του πρωτεύοντος συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα, με καταστροφικά αποτελέσματα. Το πρόβλημα αυτό ξεπερνάται με την εφαρμογή παλμών υψηλού dI_G/dt , στις πύλες των θυρίστορ και ακριβέ-

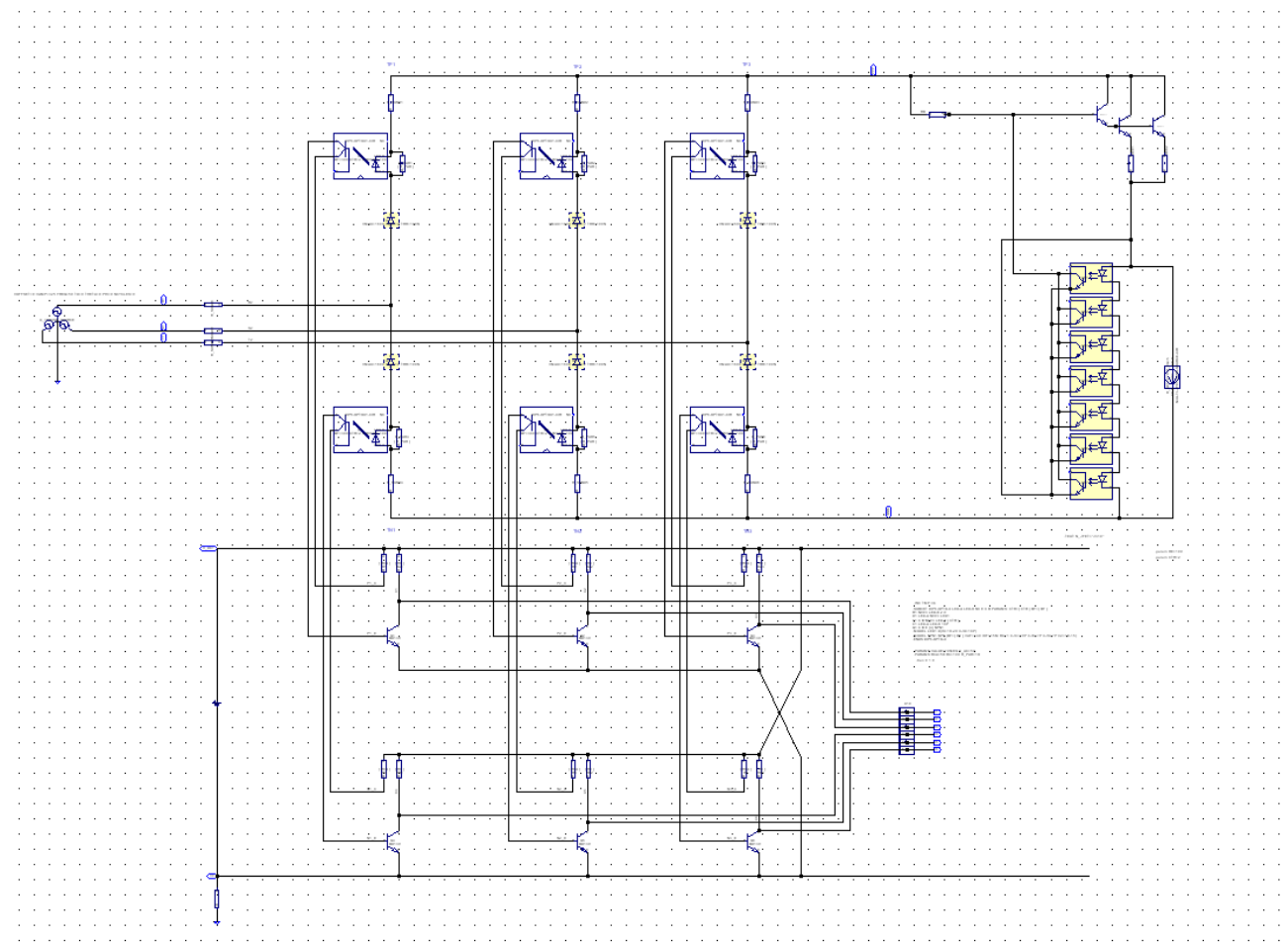
στατο υπολογισμό της γωνίας καθυστέρησης έναυσης και στις δύο ημιπερίοδους των δύο αντι-παραλλήλως συνδεδεμένων θυρίστωρ ανά φάση. Αυτά αναλύονται πλήρως στην πηγή [24] .

Τέτοιου είδους φαινόμενα ουδόλως μπορεί να καταγράψει το λογισμικό προσομοίωσης LTspice.

Η μέτρηση της αυτεπαγωγής σκέδασης μπορεί να γίνει διά του οργάνου LCR, συνδέοντας το όργανο στο πρωτεύον, με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον. Όσο λιγότερη είναι η αυτεπαγωγή σκέδασης τόσο ευχερέστερα αναπτύσσεται ο παλμός πυροδότησης. Με την πιο πάνω εικονιζόμενη τεχνοτροπία ελάχιστη σκέδαση μετριέται (κάτω από 1μH).

Η μεταβίβαση διά πλήρους ηλεκτρικής απομόνωσης του παλμού πυροδότησης από το κύκλωμα ελέγχου στις πύλες των Thyristor, είναι σύνθετο θέμα εάν μια βιομηχανική μονάδα πυροδότησης είναι απαίτηση. Η μονάδα δημιουργίας απομονωμένων παλμών πυροδότησης θα πρέπει να λειτουργεί ακόμα και σε συνθήκες διαφόρων συχνοτήτων εισόδου, π.χ. 50Hz, 60Hz, δικτύων διαφόρων τάσεων, η ακόμη και μεταβλητή συχνότητα τριφασικής τάσεως εισόδου. (Τροφοδοσία από δακτυλίους Δακτυλιοφόρου Επαγωγικού Κινητήρα).

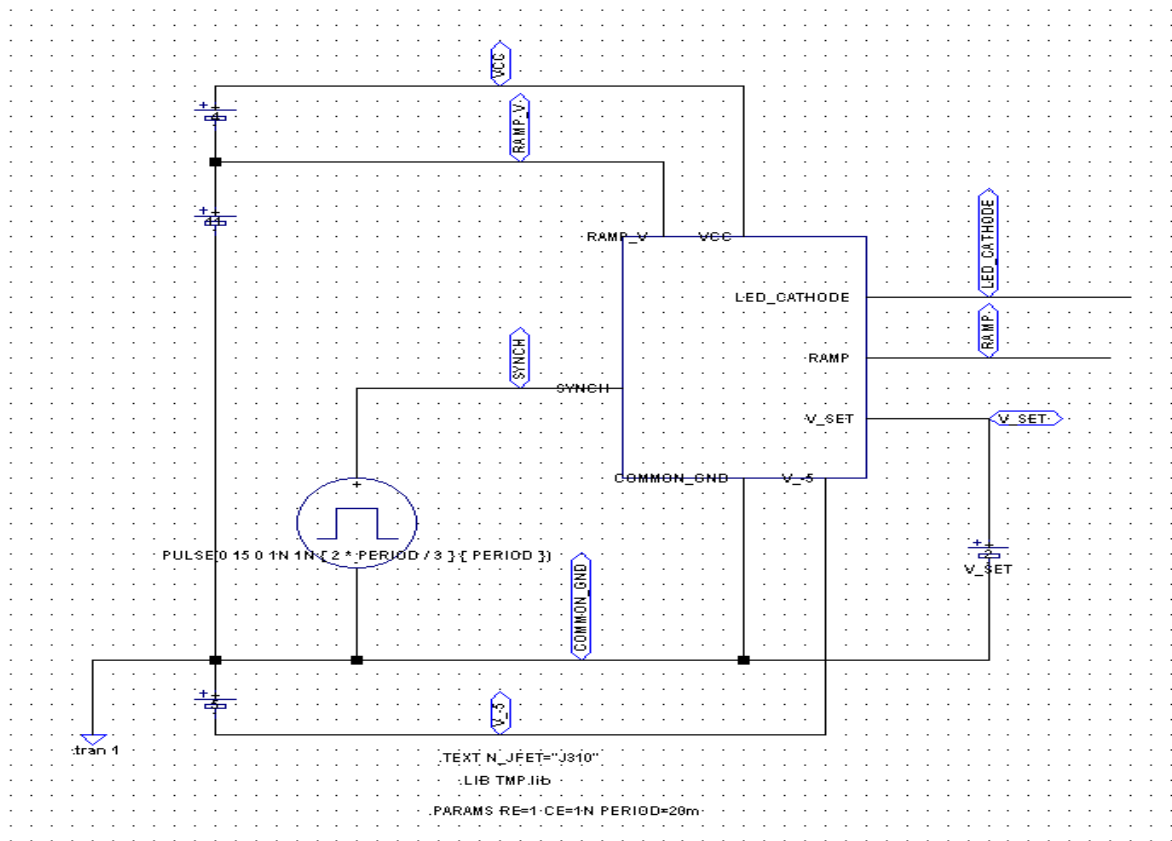
Η μονάδα συγχρονισμού πρέπει να λειτουργεί μέσω κυκλωμάτων που δεν επηρεάζονται από τις μεταβαλλόμενες αυτές συνθήκες τάσεως ή και συχνότητας. Άρα συγχρονισμός μέσω Μ/Σ απαγορεύεται. Η ακόλουθη μονάδα CURRENT_FLOW_DETECTOR έχει αυτές τις ιδιότητες, παραδίδοντας τους παλμούς χρονισμού στην κλέμα εξόδου, με πλήρη απομόνωση φάσεως:



Σχήμα 63. Κύκλωμα επιτήρησης ακολουθίας – χρονισμού, για την ορθή λειτουργία της μονάδας πυροδότησης.

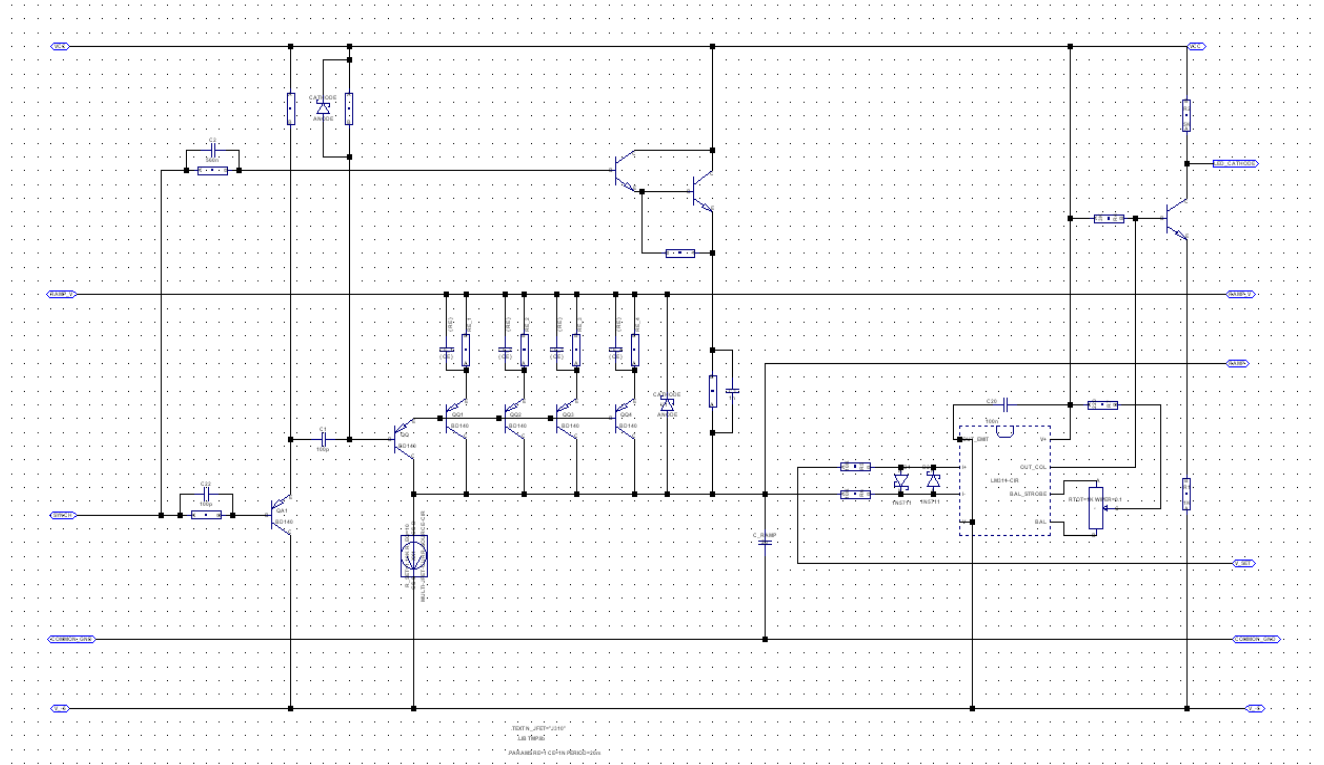
Το ανωτέρω εικονιζόμενο κύκλωμα αναγνωρίζει την φορά ρεύματος στην 3-φασική γέφυρα (η λογική αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε οποιαδήποτε ανορθωτική διάταξη), θέτοντας σαν φορ-

τίο έναν σταθεροποιητή έντασης(δεξιά πλευρά του σχήματος). Το κύκλωμα σταθεροποίησης έντασης υπό συνθήκες υψηλής τάσης (εδώ ~ 550 VDC) είναι πρωτότυπο. Τα τρανζίστορ ενίσχυσης ρεύματος BU508A, παραλληλίζονται για να μοιραστεί η απώλεια σε δύο. Αυτή είναι περίπου 4Watt ανά τρανζίστορ. Το τιθέμενο ρεύμα 12 mA, οδηγεί τα LED των OPTO-COUPLER, την κατάλληλη χρονική στιγμή και διάρκεια, και μεταβιβάζει την πληροφορία αυτή διά απομόνωσης στην έξοδο. Εν συνεχεία οι (απομονωμένοι) 6 παλμοί χρονισμού χρησιμοποιούνται για την δημιουργία τριγωνικής κυματομορφής κατερχόμενης κλίσεως, διά της κατωτέρω περιγραφείσας μονάδας NEGATIVE_RAMP_GENERATOR, όπου για τον αναλογικό υπολογισμό της γωνίας καθυστέρησης έναυσης θεωρούμε το παρακάτω κύκλωμα:



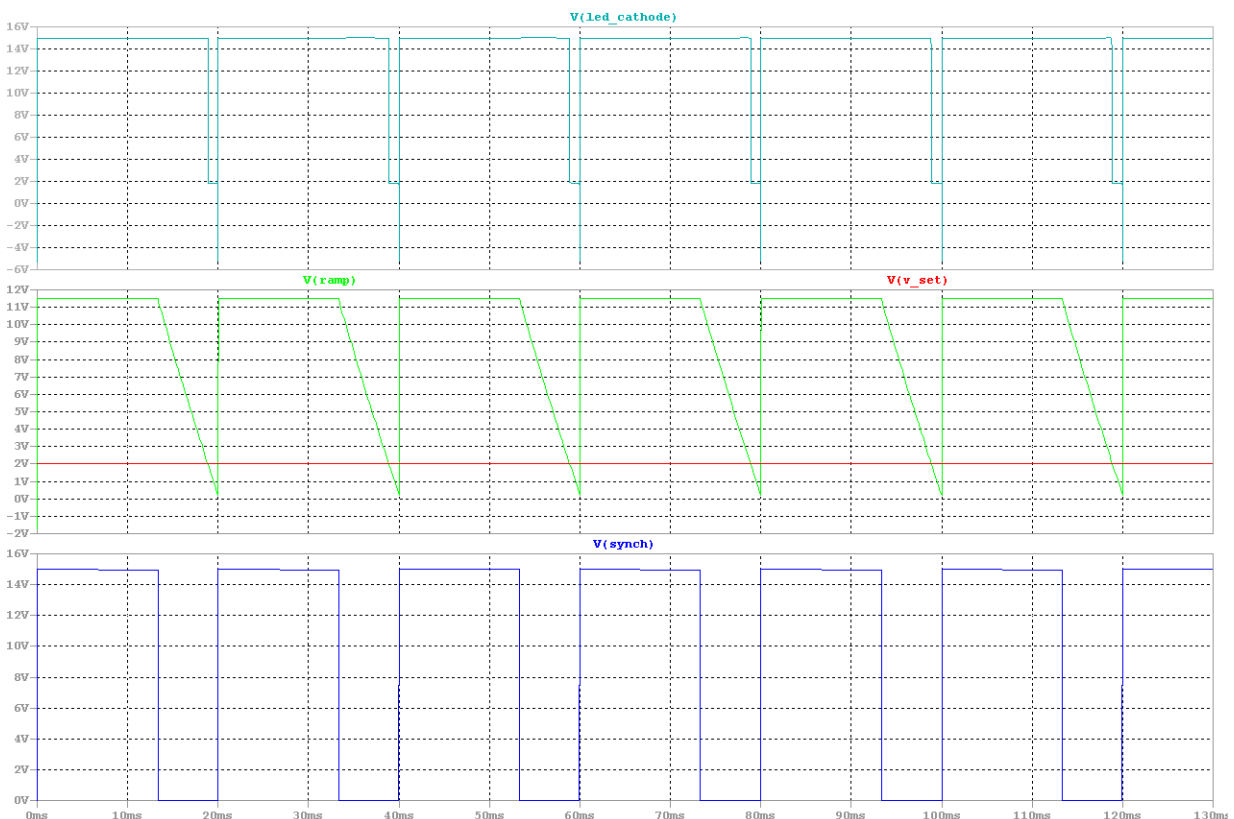
Σχήμα 64. Υποκύκλωμα αναλογικού υπολογισμού γωνίας καθυστέρησης έναυσης.

Της οποίας το εσωτερικό υποκύκλωμα είναι:



Σχήμα 65. Υποκύκλωμα αναλογικού υπολογισμού γωνίας καθυστέρησης έναυσης - εσωτερικό διάγραμμα.

Και λειτουργεί ως εξής:



Σχήμα 66. Κυματομορφές του αναλογικού υπολογιστή γωνίας καθυστέρησης έναυσης. .

Με την εφαρμογή της τάσεως V_SYNCH (κάτω μπλε κυματομορφή) η οποία παράγεται από την προηγούμενη μονάδα (CURRENT_FLOW_DETECTOR), εφαρμόζεται στην αντίστοιχη είσοδο, και δημιουργεί (κατά την διάρκεια όπου η V_SYNCH είναι σε χαμηλή στάθμη), την κυματομορφή κατωφερικής σκάλας V_RAM . Αυτή διά συγκρίσεως με την τάση V_SET παράγει τον

παλμό πυροδότησης στην κάθοδο του LED του OPTO-COUPLER πυροδότησης (πάνω κυματομορφή V_LED_CATHODE). Τελικώς, η μεταβολή της στάθμης V_SET, μεταβάλλει την γωνία καθυστέρησης έναυσης (delay angle α).

Ένας άριστος οπτικός (απο)ζεύκτης με μεγάλη ικανότητα (από)μόνωσης τάσεως (10KVolt) μεταξύ του κυκλώματος πυροδότησης και του ισχύος είναι ο CNY21Exi:

TEMIC

TELEFUNKEN Semiconductors

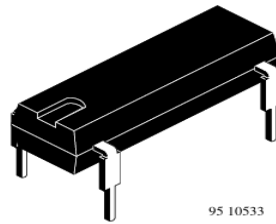
CNY21Exi

Optocoupler with Phototransistor Output

Description

The CNY21Exi consists of a phototransistor optically coupled to a gallium arsenide infrared emitting diode in a 4 lead plastic dual inline packages.

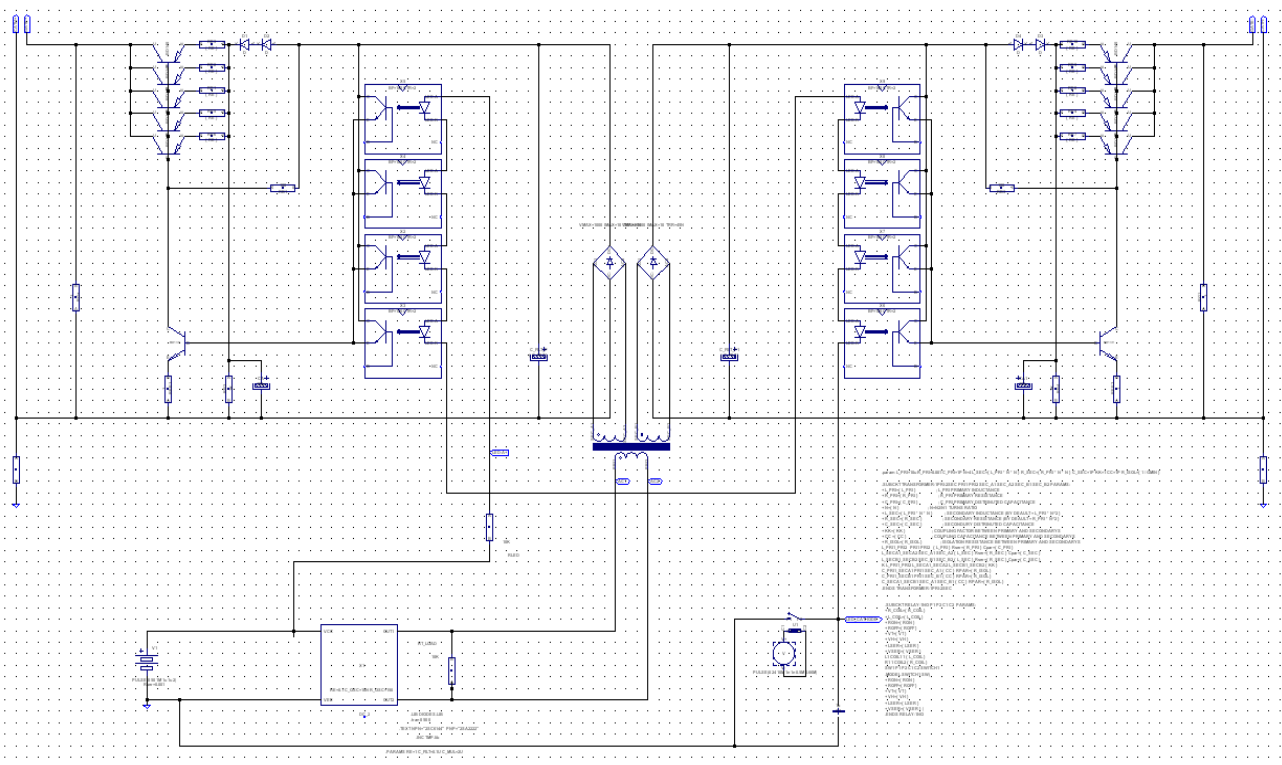
The single components are mounted on one leadframe in opposite position, providing a fixed distance between input and output for highest safety requirements of > 3 mm.



95 10533

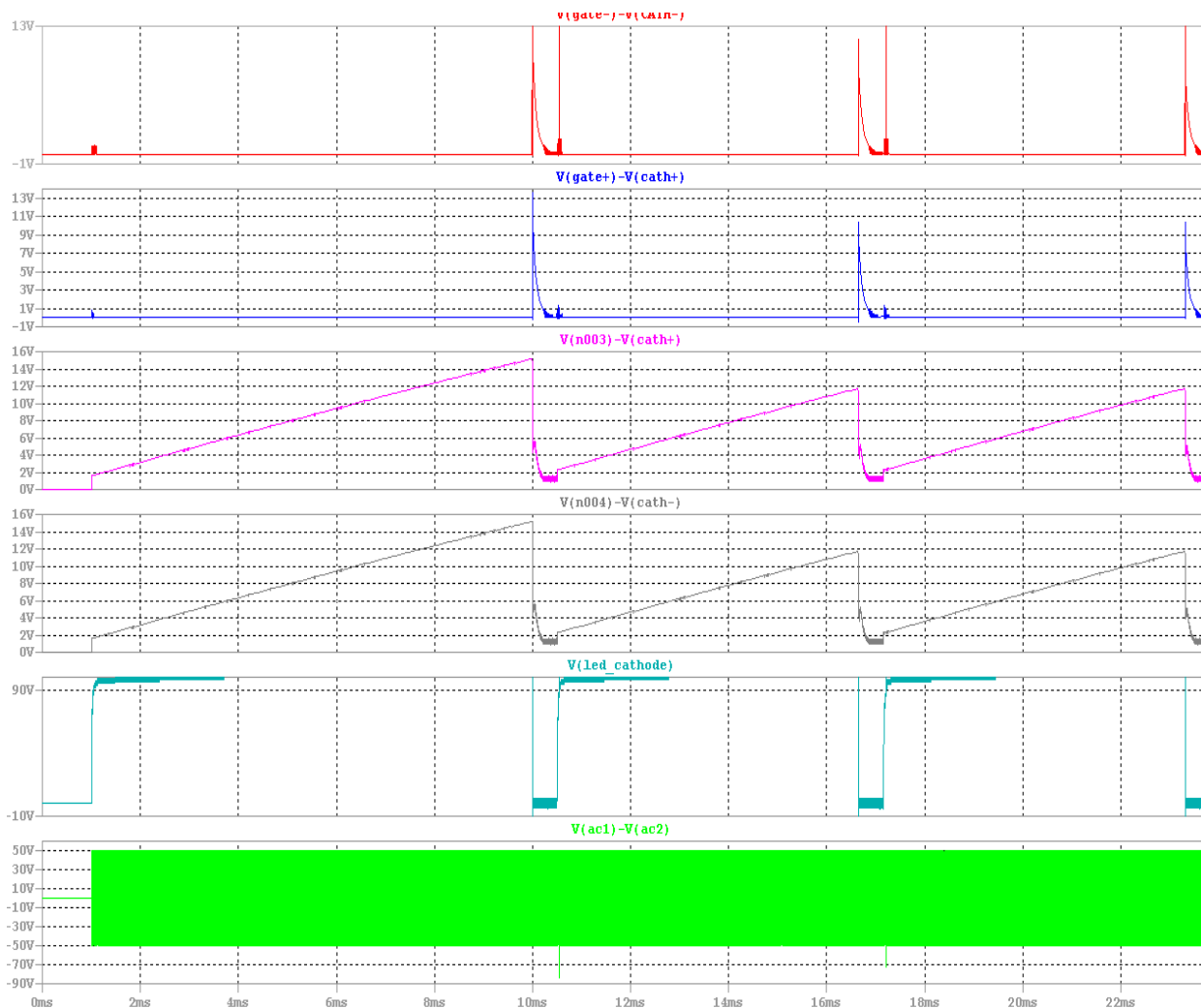
Σχήμα 67. Οπτικός αποζεύκτης απομόνωσης τάσεως CNY21Exi, μεγάλης απομονωτικής ικανότητας. [33]

Η έξοδος αυτού (photo-transistor) ζευγνύει την ανεξάρτητη ηλεκτρικώς τάση πυροδότησης στα άκρα πύλη - κάθοδος των αντιστοίχων Thyristor. Κάθε ένα ζεύγος άκρων πύλης – καθόδου, απαιτεί και την αντίστοιχη ανεξάρτητη ηλεκτρικώς τάση πυροδότησης, σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 68. Ταλαντωτής ισχύος, Μ/Σ μεταβίβασης τάσεως πυροδότησης, και οπτικοί μεταβιβαστές παλμών.

Στην ανωτέρω μονάδα ένας Μ/Σ με δύο δευτερεύοντα έχει σχεδιαστεί, για τις ανάγκες της τριφασικής γέφυρας 6-thyristor, όπου τρεις τέτοιες διατάξεις είναι απαραίτητες. Ένεκα της λειτουργίας του ταλαντωτή σε υψηλή συχνότητα, ο χρόνος εξομοίωσης αυξάνει σημαντικά, και έτσι αποτρέπεται η δυνατότητα συνολικής προσομοίωσης.

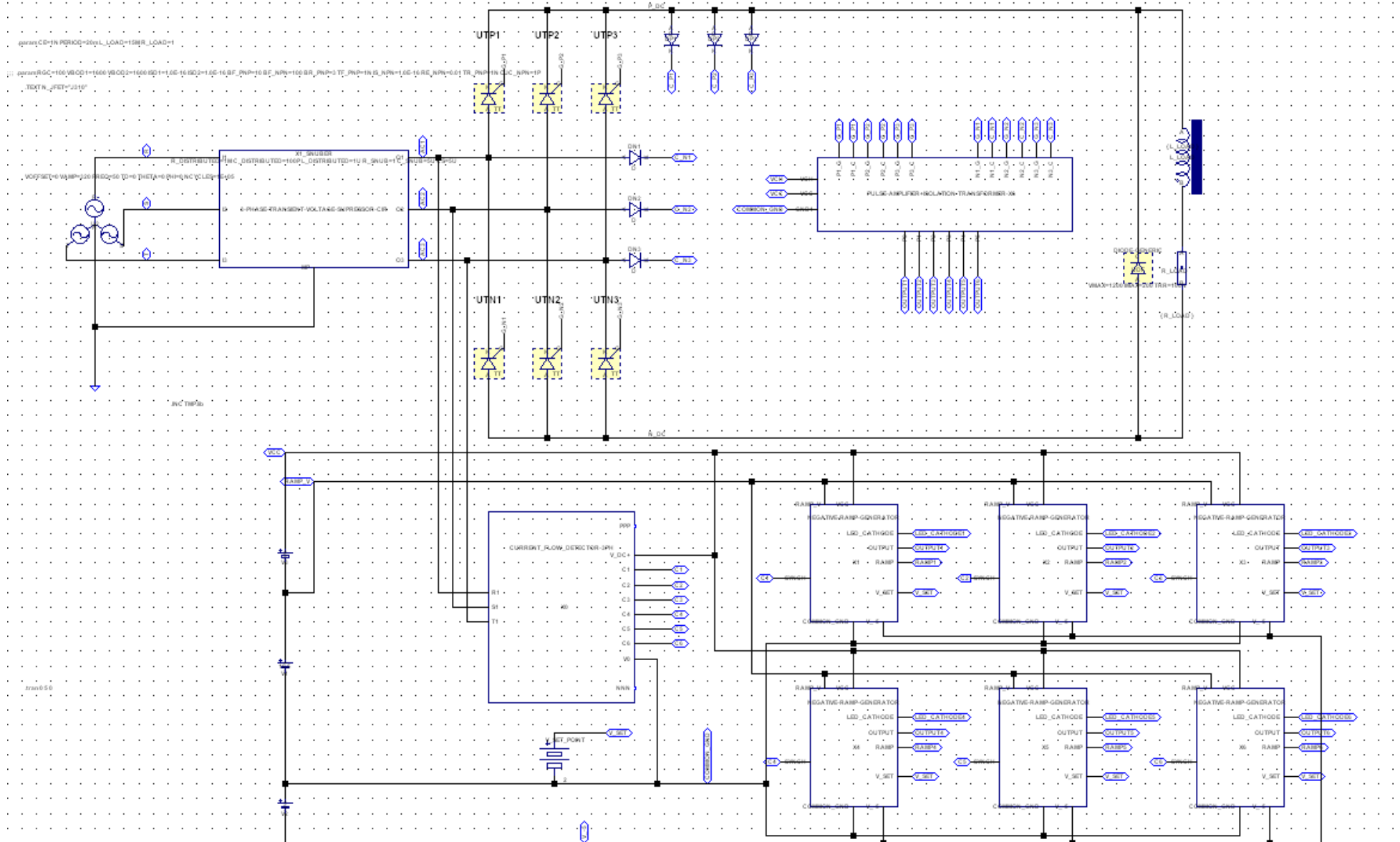


Σχήμα 69. Μεταβιβαστής παλμών δια υψίσυχνων Μ/Σ και οπτικού αποζεύκτη - Προσομοιωτικά αποτελέσματα.

Πέραν τούτου, επειδή η παρούσα μονάδα έχει αρκετά ηλεκτρικά σημεία απομονωμένα από το σημείο αναφοράς 0 της προσομοίωσης, εμφανίζει αδικαιολόγητες επικαθήσεις υπερτάσεων στα παλμογραφήματα, και αδικαιολόγητα σύντομη βύθιση τάσεως στην έξοδο αμέσως μετά από την πυροδότηση, παρότι ο συντελεστής σύζευξης (coupling factor K) του Μ/Σ απομόνωσης τέθηκε.

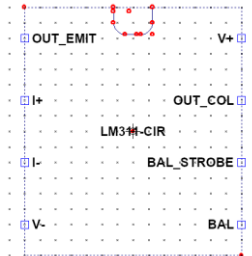
Κατά τα λοιπά φαίνεται να λειτουργεί κανονικά. Εδώ είναι απαραίτητη μια πειραματική επιβεβαίωση, και αξιολόγηση αυτού του υποκυκλώματος.

Έτσι το συνολικό κύκλωμα πυροδότησης μιας γέφυρας 6 παλμών παίρνει την ακόλουθη μορφή:

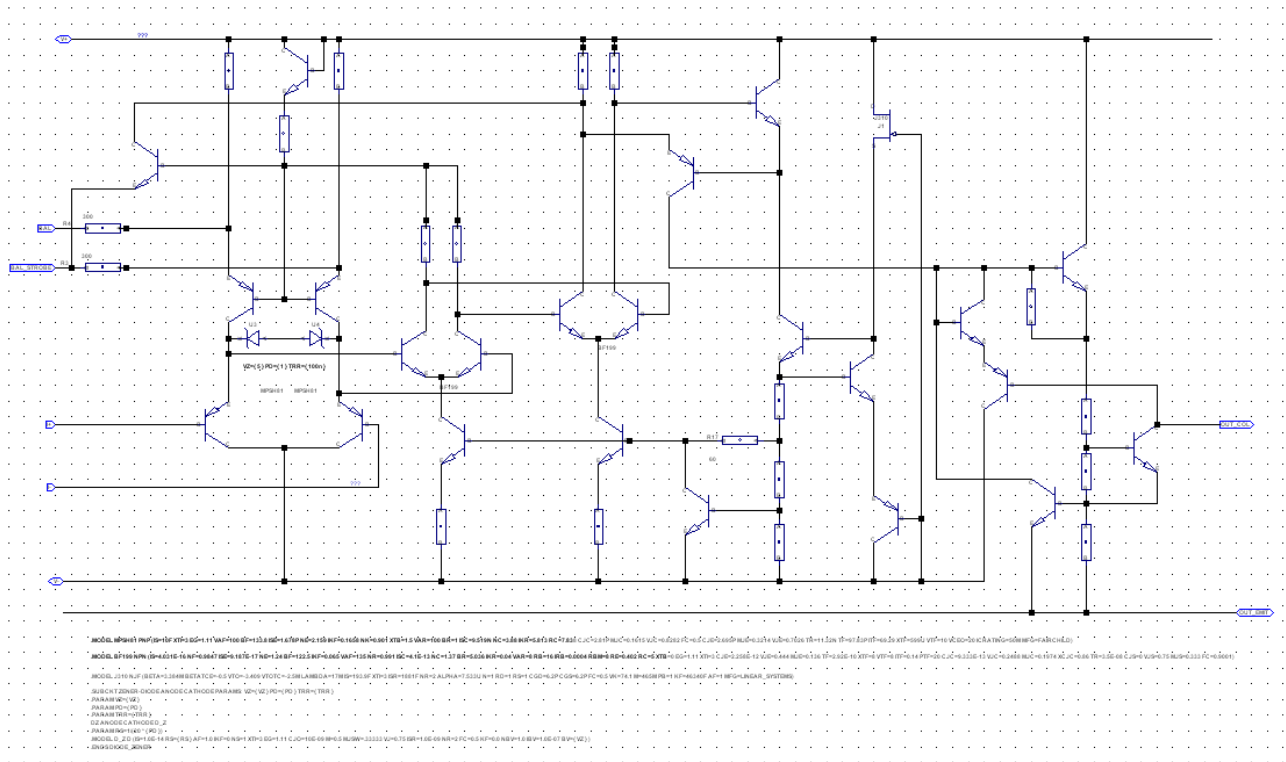


Σχήμα 70. Πλήρες Κύκλωμα 3-φασικής γέφυρας, Ισχύος και πυροδότησης.

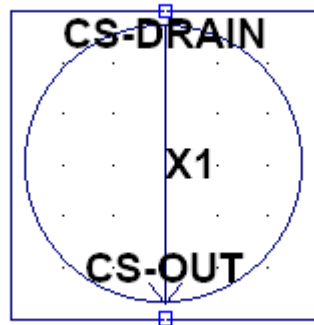
Κατά πάσα πιθανότητα το ως άνω κύκλωμα λειτουργεί άριστα αλλά δεν είναι εφικτό σε εύλογο χρόνο, να παραδώσει τα τελικά προσομοιωτικά αποτελέσματα. Οι επιμέρους ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχθηκαν διά του προσομοιωτού, και έδειξαν άριστα αποτελέσματα. Το κύκλωμα ισχύος προσομοιώθηκε διά χρήσεως ημι-συμπεριφοριακών (semi-beheavoral) μοντέλων. Για τον συγκριτή τάσεως χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό κυκλωματικό ισοδύναμο:



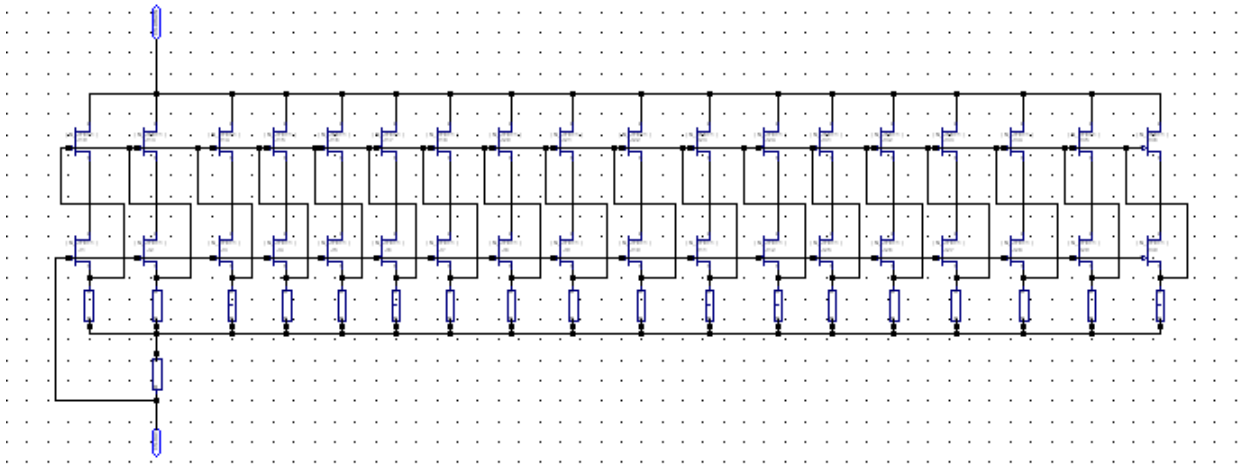
Σχήμα 71. Πραγματικό κυκλωματικό ισοδύναμο συγκριτή τάσεως LM311 – σύμβολο.



Σχήμα 72. Πραγματικό κυκλωματικό ισοδύναμο συγκριτή τάσεως LM311 – εσωτερικό κύκλωμα.



Σχήμα 73. Σταθεροποιητής έντασης υψηλής ακριβείας - σύμβολο



Σχήμα 74. Σταθεροποιητής έντασης υψηλής ακριβείας - Εσωτερικό κύκλωμα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διά της προσομοίωσης μελέτη κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος είναι εφικτή, αλλά απαιτεί τεράστια εργασία για την περισυλλογή, αξιολόγηση, και τελικώς εφαρμογή των διαφόρων υποκυκλωμάτων. Το thyristor αποτελεί ένα τέτοιο αντικείμενο μελέτης, όπου διάφορα μοντέλα δοκιμάστηκαν.

Ένας άλλος σοβαρός λόγος για τον οποίον επιβραδύνεται η προσομοίωση (ειδικά στα κυκλώματα ισχύος όπου η κατάσταση αγωγιμότητας των διακοπτικών στοιχείων μεταβαίνει από την πλήρους αγωγιμότητας στην αποκοπή), είναι ότι οι διάφορες αυτεπαγωγές που υπάρχουν στο κύκλωμα δημιουργούν αποσβενυόμενες υψίσυχνες ταλαντώσεις τάσεως την χρονική στιγμή που το στοιχείο ισχύος αλλάζει κατάσταση από αγωγιμότητα σε αποκοπή.

Η υπέρθεση (επικάθιση) αυτής της τάσεως εμφανίζεται σαν “χιόνι” στην κυματομορφή τάσεως του στοιχείου. **Το γεγονός αυτό πρέπει ασφαλώς να καταγράψει ο προσομοιωτής, αλλά επιβραδύνει σφόδρα τα αποτελέσματα, σε βαθμό τέτοιο όπου αρκετές φορές την καθιστά αδύνατη.**

Αρκετές φορές το LTspice αστοχεί κατά την διαδικασία υπολογιστικής προσομοίωσης, αρκετό χρόνο μετά την έναρξη αυτής. Έτσι τεράστιος χρόνος και προσπάθεια δαπανάται χωρίς επιτυχία. Διότι το πρόγραμμα αυτό είναι ελεύθερο, (αλλά αρκετά ισχυρό), οι σχεδιαστές αυτού λίαν βραδέως ανταποκρίνονται στις υποδείξεις των χρηστών. Αυτό συνέβη και σε μια αναφορά του συντάσσοντος την παρούσα εργασία, και ακόμη αναμένει την προτεινόμενη διόρθωση η οποία βεβαίως έγινε δεκτή [34].

Συχνά και χωρίς να έχει το υποπροσομοίωση κύκλωμα κάποιο σφάλμα, ο προσομοιωτής, σταματά δηλώνοντας: “timesteptoosmall, problematnode ___”, το οποίο πιθανότατα είναι αδυναμία του προγράμματος. Αναμένονται βελτιώσεις και εδώ σε μελλοντικό χρόνο.

Οι απαιτήσεις του προγράμματος σε υπολογιστική ισχύ προκειμένου να καταλήξουν οι προσομοιώσεις (αλλά και η συνολική μελέτη) σε εύλογο χρόνο (π.χ. 1 ημέρα) είναι τεράστιες.

Προκειμένου να παρέλθουν τα μεταβατικά φαινόμενα, ένα μεγάλο χρονικό διάστημα θα πρέπει να δαπανηθεί.

Τέλος πολλά πρωτότυπα (και αδημοσίευτα) υποκυκλώματα χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Για διάφορα υποκυκλώματα στα οποία υπάρχουν επιφυλάξεις απόκλισης από την πραγματικότητα, η πειραματική επιβεβαίωση είναι ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΗ.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] “QSPICE™ Simulator - Qorvo.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/design-hub/design-tools/interactive/qspice>
- [2] “Trilinos – Center for Computing Research (CCR).” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.sandia.gov/ccr/project/trilinos/>
- [3] “Elmer version 9.0 – Elmer FEM.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.elmerfem.org/blog/general/elmer-version-9-0/>
- [4] “HomePage:Finite Element Method Magnetics.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [5] C. McAndrew *et al.*, “VBIC95: An improved vertical, IC bipolar transistor model,” *Proceedings of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, pp. 170–177, 1995, doi: 10.1109/BIPOL.1995.493891.
- [6] C. C. McAndrew *et al.*, “VBIC95, the vertical bipolar inter-company model,” *IEEE J Solid-State Circuits*, vol. 31, no. 10, pp. 1476–1482, Oct. 1996, doi: 10.1109/4.540058.
- [7] “Q. Bipolar transistor.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://ltwiki.org/LTspiceHelp/LTspiceHelp/Q_Bipolar_transistor.htm
- [8] Klemens Heumann, *Basic Principles of Power Electronics*. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [9] G. Thyristors, M. Azuma, and M. Kurata, “GTO Thyristors,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 4, pp. 419–427, 1988, doi: 10.1109/5.4427.
- [10] K. L. Corum and J. F. Corum, “Tesla Coils and the Failure of Lumped-Element Circuit Theory,” 1899.
- [11] K. L. Corum and J. F. Corum, “RF Coils, Helical Resonators and Voltage Magnification by Coherent Spatial Modes,” *TELSIKS*, 2001.
- [12] P. Roggwiller, “Semiconductor Devices for Power Conditioning,” 1982, Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Semiconductor_Devices_for_Power_Conditio.html?hl=el&id=Z8HeBwAAQBAJ
- [13] A. G. Theodorakis, G. A. Vokas, and P. Fergadiotis, “Basic operating principals and pilot prototype development of a medium scale induction heating machine,” *IET Conference Publications*, vol. 2016, no. CP711, 2016, doi: 10.1049/CP.2016.1112.
- [14] “High Power Devices Semiconductors - Littelfuse.” Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.littelfuse.com/products/power-semiconductors/high-power.aspx>
- [15] “Dynex High Power Semiconductors and Power Assemblies.” Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.dynexsemi.com/>
- [16] A. A. Zekry, G. T. Sayah, and F. A. Soliman, “SPICE model of thyristors with amplifying gate and emitter-shorts; SPICE model of thyristors with amplifying gate and emitter-shorts,” 2013, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0158.

- [17] F. J. Gracia, F. Arizti, and F. J. Aranceta, "A Nonideal Macromodel of Thyristor for Transient Analysis in Power Electronic Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 6, pp. 514–520, 1990, doi: 10.1109/41.103456.
- [18] M. S. Adler and G. E. Possin, "Achieving Accuracy in Transistor and Thyristor Modeling," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 28, no. 9, pp. 1053–1059, 1981, doi: 10.1109/T-ED.1981.20484.
- [19] S. Schröder, D. Detjen, and R. W. A. A. De Doncker, "Multicell circuit model for high-power thyristor-type semiconductor devices," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 39, no. 6, pp. 1641–1647, Nov. 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.818974.
- [20] "Semiconductor & System Solutions - Infineon Technologies." Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.infineon.com/>
- [21] V. A. K. Temple, "Controlled Turn-on Thyristors," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 30, no. 7, pp. 816–824, 1983, doi: 10.1109/T-ED.1983.21215.
- [22] G. Massobrio and P. Antognetti, *Semiconductor device modeling with SPICE*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993. [Online]. Available: http://books.google.com/books?id=_QZTAAAAMAAJ
- [23] "Intelligent Power and Sensing Technologies | onsemi." Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/>
- [24] Mac Kellar and J. Merret, *Power engineering using thyristors*. Torrington Place, London, England: Central Application Laboratory, Industrial Electronics Division MULLARD L.T.D., 1970.
- [25] P. C. Todd, "May 93 Snubber Circuits: Theory , Design and Application".
- [26] "Semiconductor | ABB US." Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://electrification.us.abb.com/your-business/oem/semiconductor>
- [27] J. Lutz, "Fast recovery diodes - Reverse recovery behaviour and dynamic avalanche," *Proceedings of the International Conference on Microelectronics*, vol. 24 I, pp. 11–16, 2004, doi: 10.1109/ICMEL.2004.1314549.
- [28] H. Benda and E. Spenke, "Reverse Recovery Processes in Silicon Power Rectifiers," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 8, pp. 1331–1354, 1967, doi: 10.1109/PROC.1967.5834.
- [29] D. J. Chamund and N. Y. A. Shamma, "Design, tests and applications of 3.3 kV asymmetrical thyristor," *Microelectronics J*, vol. 32, no. 5–6, pp. 463–471, May 2001, doi: 10.1016/S0026-2692(01)00016-7.
- [30] S. Iqbal, "A three-phase symmetrical multistage voltage multiplier," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 30–33, Mar. 2005, doi: 10.1109/LPEL.2005.845174.
- [31] J. S. Brugler, "Theoretical performance of voltage multiplier circuits," *IEEE J Solid-State Circuits*, vol. 6, no. 3, pp. 132–135, 1971, doi: 10.1109/JSSC.1971.1049670.
- [32] S. Iqbal, "A hybrid symmetrical voltage multiplier," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, no. 1, pp. 6–12, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2251474.
- [33] "Empowering Innovation | Microchip Technology." Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/>

- [34] “Suggestion for Improving the Error log file output report of LTspice - Q&A - LTspice - EngineerZone.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://ez.analog.com/design-tools-and-calculators/ltspace/f/q-a/572827/suggestion-for-improving-the-error-log-file-output-report-of-ltspace>