

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**“ ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ  
ΟΔΗΓΗΣΗΣ DC ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ”**



**Επιβλέπων Καθηγητής:** Γεώργιος Ιωαννίδης, Αν. Καθηγητής  
**Σπουδαστής:** Κοντόπουλος Νικόλαος AM: 29792

**Πειραιάς**  
**Δεκέμβριος – 2013**



Copyright © Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ όσους πίστεψαν σε εμένα και με στήριξαν σε όλη αυτή την προσπάθεια. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γ. Ιωαννίδη, ο οποίος συνέβαλλε τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής. Ευχαριστώ το ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ καθώς και όλο το έμψυχο υλικό του για το έργο που προσφέρει.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	i
Περιεχόμενα .....	ii
Λίστα σχημάτων.....	iv
Summary .....	xiv
Πρόλογος .....	1
<b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Εισαγωγή στα συστήματα κίνησης” .....</b>	<b>1</b>
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής κίνησης στη βιομηχανία.....	1
1.2 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης .....	2
<b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Ηλεκτρικοί κινητήρες” .....</b>	<b>4</b>
2.1 Γενικά .....	4
2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC).....	4
2.2.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	5
2.2.2 Κύρια μέρη κινητήρα συνεχούς ρεύματος .....	5
2.2.3 Μέρη του στάτη.....	6
2.2.4 Μέρη του δρομέα .....	7
2.2.5 Χαρακτηριστικά κινητήρων συνεχούς ρεύματος .....	7
2.2.5.1 Λειτουργία εν κενώ.....	7
2.2.5.2 Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (AHEΔ).....	8
2.2.5.3 Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	8
2.2.5.4 Λειτουργία με φορτίο .....	9
2.2.5.5 Απώλειες κινητήρων συνεχούς ρεύματος .....	10
2.2.6 Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος .....	11
2.2.6.1 Κινητήρες παράλληλης διέγερσης .....	11
2.2.6.2 Κινητήρες διέγερσης σειράς.....	14
2.2.6.3 Κινητήρες σύνθετης διέγερσης.....	17
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Κυκλώματα οδήγησης DC κινητήρων” .....</b>	<b>18</b>
3.1 Ηλεκτρονικά ισχύος και ημιαγωγικά στοιχεία.....	18
3.2 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος .....	19
3.2.1 Δίοδος.....	19
3.2.2 Τρανζίστορ .....	20
3.2.3 Θυρίστορ .....	21
3.2.4 GTO.....	22
3.2.5 Triac.....	23
3.2.6 MOSFET .....	24
3.2.7 IGBT.....	24
3.3 Κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος .....	26
3.3.1 Ανορθωτές AC-DC.....	27
3.3.1.1 Απλή ανόρθωση (μισού κύματος) .....	27
3.3.1.2 Ημιαλεγχόμενη γέφυρα.....	31
3.3.1.3 Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.....	32
3.3.2 Τριφασικοί ανορθωτές.....	36
3.3.2.1 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με διόδους .....	37
3.3.2.2 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με SCR .....	38
3.3.2.3 Τριφασικός μερικός ελεγχόμενος μετατροπέας γέφυρας .....	40
3.3.2.4 Τριφασικός πλήρης ελεγχόμενος μετατροπέας γέφυρας .....	42
3.3.3 Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC).....	44
3.3.3.1 Καταμητής υποβιβασμού ενός τεταρτημορίου (One-Quadrant Chopper, 1Q) .....	45
3.3.3.2 Καταμητής δύο τεταρτημορίων (Two Quadrant Chopper, 2Q).....	49
3.3.3.3 Καταμητής (Chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων (Four-Quadrant Chopper, 4Q) .....	50
3.3.4 Καταμητές (choppers) soft switching .....	52
3.3.4.1 Καταμητής 2Q ZVT.....	52

3.3.4.2	<i>Καταμητής 2Q ZCT</i> .....	55
3.3.4.3	<i>Καταμητής 4Q ZVT</i> .....	58
<b>4 °</b>	<b>Κεφάλαιο “Προσομοίωση με χρήση Matlab”</b> .....	<b>60</b>
4.1	Matlab - Simulink.....	60
4.2	Ανάλυση και προσομοίωση κυκλωμάτων .....	61
4.2.1	Ημιελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης .....	62
4.2.2	Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης .....	95
4.2.3	Καταμητής (chopper) ενός τεταρτημορίου .....	128
4.2.4	Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων.....	153
4.2.5	Καταμητής (chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων .....	178
4.2.6	Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων ZVT .....	227
4.2.7	Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων ZCT .....	234
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>241</b>

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Βιομηχανικές εγκαταστάσεις.....	1
Σχήμα 1.2 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης.....	2
Σχήμα 2.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες.....	4
Σχήμα 2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	4
Σχήμα 2.3 Ηλεκτροφόρος αγωγός σε μαγνητικό πεδίο.....	5
Σχήμα 2.4 Τομή ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος.....	6
Σχήμα 2.5 Κινητήρας με παράλληλη διέγερση.....	12
Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική $n=f(I_s)$ κινητήρα με παράλληλη διέγερση.....	13
Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστική $n=f(I_T)$ κινητήρα με παράλληλη διέγερση.....	13
Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική $n=f(T)$ κινητήρα με παράλληλη διέγερση.....	14
Σχήμα 2.10 Κινητήρας με διέγερση σειράς.....	14
Σχήμα 2.11 Χαρακτηριστική $n=f(I_T)$ κινητήρα με διέγερση σειράς.....	15
Σχήμα 2.12 Χαρακτηριστική $n=f(T)$ κινητήρα με διέγερση σειράς.....	16
Σχήμα 2.13 Χαρακτηριστική $T=f(I_T)$ κινητήρα με διέγερση σειράς.....	16
Σχήμα 2.14 Κινητήρας με σύνθετη διέγερση.....	17
Σχήμα 3.1 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος.....	18
Σχήμα 3.2 α) Δίοδος β) Χαρακτηριστική διόδου.....	19
Σχήμα 3.3 α) Τρανζίστορ Bjt β) Χαρακτηριστικές εξόδου npn τρανζίστορ.....	20
Σχήμα 3.4 α) Θυρίστορ β) Χαρακτηριστική V-I θυρίστορ.....	21
Σχήμα 3.5 α) GTO β) Χαρακτηριστική V-I GTO.....	22
Σχήμα 3.6 α) Triac β) Χαρακτηριστική V-I Triac.....	23
Σχήμα 3.7 α) MOSFET β) Χαρακτηριστική V-I MOSFET.....	24
Σχήμα 3.8 α) IGBT β) Χαρακτηριστική V-I IGBT (25 °C).....	25
Σχήμα 3.9 Κινητήρες στα τέσσερα τεταρτημόρια λειτουργίας.....	26
Σχήμα 3.10 Διάταξη απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό φορτίο.....	27
Σχήμα 3.11 Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό φορτίο.....	28
Σχήμα 3.12 Διάταξη απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	29
Σχήμα 3.13 Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	29
Σχήμα 3.14 Διάταξη απλής ανόρθωσης με SCR και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	29
Σχήμα 3.15 Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης με SCR και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	30
Σχήμα 3.16 Διάταξη απλής ανόρθωσης SCR, δίοδο ελευθέρως ροής και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	30
Σχήμα 3.17 Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης SCR, δίοδο ελευθέρως ροής και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	31
Σχήμα 3.18 Συμμετρική και ασύμμετρη ημιελεγχόμενη γέφυρα.....	32
Σχήμα 3.19 Κυματομορφές εξόδου ημιελεγχόμενης γέφυρας.....	32
Σχήμα 3.20 Ανορθωτής γέφυρας SCR με ωμικό φορτίο.....	33
Σχήμα 3.21 Κυματομορφές τάσης-ρεύματος ανορθωτή γέφυρας SCR με ωμικό φορτίο.....	34
Σχήμα 3.22 Ανορθωτής γέφυρας SCR με άπειρη επαγωγή.....	34
Σχήμα 3.23 Κυματομορφές τάσης-ρεύματος ανορθωτή γέφυρας SCR με άπειρη επαγωγή.....	35
Σχήμα 3.24 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με διόδους.....	37
Σχήμα 3.25 Κυματομορφές τριφασικού μετατροπέα απλής ανόρθωσης με διόδους.....	37
Σχήμα 3.26 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με SCR.....	38
Σχήμα 3.27 Κυματομορφές τριφασικού μετατροπέα με SCR α) επαγωγικό φορτίο β) ωμικό φορτίο.....	39
Σχήμα 3.28 Μερικός ελεγχόμενος τριφασικός μετατροπέας.....	40

<b>Σχήμα 3.29</b> Κυματομορφές εξόδου μερικός ελεγχόμενου τριφασικού μετατροπέα ( $\alpha=30^\circ$ )	41
<b>Σχήμα 3.30</b> Πλήρης ελεγχόμενος τριφασικός μετατροπέας	42
<b>Σχήμα 3.31</b> Κυματομορφές των φασικών τάσεων α) πολικών τάσεων με την τάση εξόδου β) των ρευμάτων	43
<b>Σχήμα 3.32</b> Τεταρτημόρια λειτουργίας	44
<b>Σχήμα 3.33</b> Καταμητής υποβιβασμού ενός τεταρτημορίου	45
<b>Σχήμα 3.34</b> Ισοδύναμο κύκλωμα DC-DC μετατροπέα ενός τεταρτημορίου	45
<b>Σχήμα 3.35</b> Χρόνοι αγωγής της τάσης	46
<b>Σχήμα 3.36</b> Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων	49
<b>Σχήμα 3.37</b> Παραδείγματα μετατροπέα δύο τεταρτημορίων: α) στο πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας β) στο δεύτερο τεταρτημόριο λειτουργίας	50
<b>Σχήμα 3.38</b> Καταμητής (chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων	51
<b>Σχήμα 3.39</b> Καταμητής δύο τεταρτημορίων με μηδενική τάση κατά την μετάβαση των διακοπών (ZVT)	52
<b>Σχήμα 3.40</b> Κυματομορφές εξόδου καταμητή δύο τεταρτημορίων ZVT	53
<b>Σχήμα 3.41</b> Επιμέρους τοπολογίες κατά τη λειτουργία του ZVT	53
<b>Σχήμα 3.42</b> Καταμητής δύο τεταρτημορίων με μηδενικό ρεύμα κατά την μετάβαση των διακοπών (ZCT)	55
<b>Σχήμα 3.43</b> Κυματομορφές εξόδου καταμητή δύο τεταρτημορίων ZCT	56
<b>Σχήμα 3.44</b> Επιμέρους τοπολογίες κατά τη λειτουργία του καταμητή δύο τεταρτημορίων ZCT	56
<b>Σχήμα 3.45</b> Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων με μηδενική τάση κατά την μετάβαση των διακοπών	59
<b>Σχήμα 3.46</b> Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων με μηδενικό ρεύμα κατά την μετάβαση των διακοπών	59
<b>Σχήμα 4.1</b> Λογισμικό Matlab	60
<b>Σχήμα 4.2</b> Διάγραμμα ημιελεγχόμενης γέφυρας ανόρθωσης	62
<b>Σχήμα 4.3</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=0$ , load 50%	63
<b>Σχήμα 4.4</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=0$ , load 50%	64
<b>Σχήμα 4.5</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $\alpha=0$ , load 50%	64
<b>Σχήμα 4.6</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $\alpha=0$ , load 50%	65
<b>Σχήμα 4.7</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=0$ , load 50%	66
<b>Σχήμα 4.8</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=0$ , load 50%	66
<b>Σχήμα 4.9</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=0$ , load 100%	67
<b>Σχήμα 4.10</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=0$ , load 100%	68
<b>Σχήμα 4.11</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $\alpha=0$ , load 100%	68
<b>Σχήμα 4.12</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $\alpha=0$ , load 100%	69
<b>Σχήμα 4.13</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=0$ , load 100%	70
<b>Σχήμα 4.14</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=0$ , load 100%	70
<b>Σχήμα 4.15</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=60$ , load 50%	71
<b>Σχήμα 4.16</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=60$ , load 50%	72

<b>Σχήμα 4.17</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $\alpha=60$ , load 50% .....	72
<b>Σχήμα 4.18</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $\alpha=60$ , load 50%.....	73
<b>Σχήμα 4.19</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=60$ , load 50% .....	74
<b>Σχήμα 4.20</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=60$ , load 50% .....	74
<b>Σχήμα 4.21</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $\alpha=60$ , load 70% .....	75
<b>Σχήμα 4.22</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=60$ , load 70%.....	76
<b>Σχήμα 4.23</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $\alpha=60$ , load 70% .....	76
<b>Σχήμα 4.24</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $\alpha=60$ , load 70%.....	77
<b>Σχήμα 4.25</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=60$ , load 70% .....	78
<b>Σχήμα 4.26</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M1, $\alpha=60$ , load 70% .....	78
<b>Σχήμα 4.27</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=0$ , load 50% .....	79
<b>Σχήμα 4.28</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	80
<b>Σχήμα 4.29</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=0$ , load 50% .....	80
<b>Σχήμα 4.30</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	81
<b>Σχήμα 4.31</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 50% .....	82
<b>Σχήμα 4.32</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 50% .....	82
<b>Σχήμα 4.33</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=0$ , load 100% .....	83
<b>Σχήμα 4.34</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	84
<b>Σχήμα 4.35</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=0$ , load 100% .....	84
<b>Σχήμα 4.36</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	85
<b>Σχήμα 4.37</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 100% .....	86
<b>Σχήμα 4.38</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 100% .....	86
<b>Σχήμα 4.39</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 50% .....	87
<b>Σχήμα 4.40</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	88
<b>Σχήμα 4.41</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=60$ , load 50% .....	88
<b>Σχήμα 4.42</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	89
<b>Σχήμα 4.43</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=60$ , load 50% .....	90
<b>Σχήμα 4.44</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=60$ , load 50% .....	90
<b>Σχήμα 4.45</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 70% .....	91
<b>Σχήμα 4.46</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	92



<b>Σχήμα 4.47</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	92
<b>Σχήμα 4.48</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, <math>\alpha=60</math>, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	93
<b>Σχήμα 4.49</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M2, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	94
<b>Σχήμα 4.50</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M2, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	94
<b>Σχήμα 4.51</b>	<i>Διάγραμμα πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας ανόρθωσης</i> .....	95
<b>Σχήμα 4.52</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	96
<b>Σχήμα 4.53</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	97
<b>Σχήμα 4.54</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	97
<b>Σχήμα 4.55</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	98
<b>Σχήμα 4.56</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	99
<b>Σχήμα 4.57</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	99
<b>Σχήμα 4.58</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 100%</i> .....	100
<b>Σχήμα 4.59</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 100%</i> .....	101
<b>Σχήμα 4.60</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, <math>\alpha=0</math>, load 100%</i> .....	101
<b>Σχήμα 4.61</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, <math>\alpha=0</math>, load 100%</i> .....	102
<b>Σχήμα 4.62</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=0</math>, load 100%</i> .....	103
<b>Σχήμα 4.63</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=0</math>, load 100%</i> .....	103
<b>Σχήμα 4.64</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 50%</i> .....	104
<b>Σχήμα 4.65</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 50%</i> .....	105
<b>Σχήμα 4.66</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, <math>\alpha=60</math>, load 50%</i> .....	105
<b>Σχήμα 4.67</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 50%</i> .....	106
<b>Σχήμα 4.68</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=60</math>, load 50%</i> .....	107
<b>Σχήμα 4.69</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=60</math>, load 50%</i> .....	107
<b>Σχήμα 4.70</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	108
<b>Σχήμα 4.71</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	109
<b>Σχήμα 4.72</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	109
<b>Σχήμα 4.73</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	110
<b>Σχήμα 4.74</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	111
<b>Σχήμα 4.75</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1, <math>\alpha=60</math>, load 70%</i> .....	111
<b>Σχήμα 4.76</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, <math>\alpha=0</math>, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, <math>\alpha=0</math>, load 50%</i> .....	112

<b>Σχήμα 4.77</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	113
<b>Σχήμα 4.78</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	113
<b>Σχήμα 4.79</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	114
<b>Σχήμα 4.80</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	115
<b>Σχήμα 4.81</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 50%.....	115
<b>Σχήμα 4.82</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	116
<b>Σχήμα 4.83</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	117
<b>Σχήμα 4.84</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	117
<b>Σχήμα 4.85</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	118
<b>Σχήμα 4.86</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	119
<b>Σχήμα 4.87</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=0$ , load 100%.....	119
<b>Σχήμα 4.88</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	120
<b>Σχήμα 4.89</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	121
<b>Σχήμα 4.90</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	121
<b>Σχήμα 4.91</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	122
<b>Σχήμα 4.92</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	123
<b>Σχήμα 4.93</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=60$ , load 50%.....	123
<b>Σχήμα 4.94</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	124
<b>Σχήμα 4.95</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	125
<b>Σχήμα 4.96</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	125
<b>Σχήμα 4.97</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	126
<b>Σχήμα 4.98</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	127
<b>Σχήμα 4.99</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2 <sup>ου</sup> Thyristor M2, $\alpha=60$ , load 70%.....	127
<b>Σχήμα 4.100</b> Διάγραμμα Καταμητή (chopper) ενός τεταρτημορίου.....	128
<b>Σχήμα 4.101</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 50%.....	129
<b>Σχήμα 4.102</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 50%.....	130
<b>Σχήμα 4.103</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=50\%$ , load 50%.....	130
<b>Σχήμα 4.104</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $d=50\%$ , load 50%.....	131
<b>Σχήμα 4.105</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, $d=50\%$ , load 50%.....	132
<b>Σχήμα 4.106</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $d=70\%$ , load 70%.....	133
<b>Σχήμα 4.107</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=70\%$ , load 70%.....	134

<b>Σχήμα 4.108</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=70\%$ , load 70% .....	134
<b>Σχήμα 4.109</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $d=70\%$ , load 70%.....	135
<b>Σχήμα 4.110</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, $d=70\%$ , load 70% .....	136
<b>Σχήμα 4.111</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=100\%$ , load 50%.....	137
<b>Σχήμα 4.112</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=100\%$ , load 50%.....	137
<b>Σχήμα 4.113</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=100\%$ , load 50% .....	138
<b>Σχήμα 4.114</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, $d=100\%$ , load 50% .....	138
<b>Σχήμα 4.115</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=100\%$ , load 100%.....	139
<b>Σχήμα 4.116</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=100\%$ , load 100% .....	139
<b>Σχήμα 4.117</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=100\%$ , load 100% .....	140
<b>Σχήμα 4.118</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, $d=100\%$ , load 100% .....	140
<b>Σχήμα 4.119</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $d=50\%$ , load 50% .....	141
<b>Σχήμα 4.120</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $d=50\%$ , load 50%.....	142
<b>Σχήμα 4.121</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $d=50\%$ , load 50% .....	142
<b>Σχήμα 4.122</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $d=50\%$ , load 50% .....	143
<b>Σχήμα 4.123</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, $d=50\%$ , load 50% .....	144
<b>Σχήμα 4.124</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $d=70\%$ , load 70%β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, $d=70\%$ , load 70%.....	145
<b>Σχήμα 4.125</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $d=70\%$ , load 70%.....	146
<b>Σχήμα 4.126</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $d=70\%$ , load 70% .....	146
<b>Σχήμα 4.127</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, $d=70\%$ , load 70%.....	147
<b>Σχήμα 4.128</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, $d=70\%$ , load 70% .....	148
<b>Σχήμα 4.129</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $d=100\%$ , load 50%.....	149
<b>Σχήμα 4.130</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $d=100\%$ , load 50%.....	149
<b>Σχήμα 4.131</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας M2, $d=100\%$ , load 50%.....	150
<b>Σχήμα 4.132</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, $d=100\%$ , load 50% .....	150
<b>Σχήμα 4.133</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, $d=100\%$ , load 100%.....	151
<b>Σχήμα 4.134</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, $d=100\%$ , load 100%.....	151
<b>Σχήμα 4.135</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, $d=100\%$ , load 100% .....	152
<b>Σχήμα 4.136</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, $d=100\%$ , load 100% .....	152
<b>Σχήμα 4.137</b> Διάγραμμα Κατατμητή (chopper) δύο τεταρτημορίων.....	153
<b>Σχήμα 4.138</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 50 .....	154
<b>Σχήμα 4.139</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 50%.....	155
<b>Σχήμα 4.140</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=50\%$ , load 50% .....	155
<b>Σχήμα 4.141</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $d=50\%$ , load 50%.....	156
<b>Σχήμα 4.142</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, $d=50\%$ , load 50% .....	157

<b>Σχήμα 4.143</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70%.....	158
<b>Σχήμα 4.144</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=70%, load 70%.....	159
<b>Σχήμα 4.145</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=70%, load 70% .....	159
<b>Σχήμα 4.146</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, d=70%, load 70%.....	160
<b>Σχήμα 4.147</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=70%, load 70% .....	161
<b>Σχήμα 4.148</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 50%.....	162
<b>Σχήμα 4.149</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 50%.....	162
<b>Σχήμα 4.150</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=100%, load 50% .....	163
<b>Σχήμα 4.151</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=100%, load 50% .....	163
<b>Σχήμα 4.152</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 100%.....	164
<b>Σχήμα 4.153</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 100%.....	164
<b>Σχήμα 4.154</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=100%, load 100%.....	165
<b>Σχήμα 4.155</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=100%, load 100% .....	165
<b>Σχήμα 4.156</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, d=50%, load 50%.....	166
<b>Σχήμα 4.157</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50%.....	167
<b>Σχήμα 4.158</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=50%, load 50% .....	167
<b>Σχήμα 4.159</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=50%, load 50%.....	168
<b>Σχήμα 4.160</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=50%, load 50% .....	169
<b>Σχήμα 4.161</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, d=70%, load 70%.....	170
<b>Σχήμα 4.162</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70%.....	171
<b>Σχήμα 4.163</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=70%, load 70% .....	171
<b>Σχήμα 4.164</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=70%, load 70%.....	172
<b>Σχήμα 4.165</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=70%, load 70% .....	173
<b>Σχήμα 4.166</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=100%, load 50%.....	174
<b>Σχήμα 4.167</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=100%, load 50%.....	174
<b>Σχήμα 4.168</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=100%, load 50% .....	175
<b>Σχήμα 4.169</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=100%, load 50% .....	175
<b>Σχήμα 4.170</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=100%, load 100%.....	176
<b>Σχήμα 4.171</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=100%, load 100%.....	176
<b>Σχήμα 4.172</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=100%, load 100% .....	177
<b>Σχήμα 4.173</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=100%, load 100% .....	177
<b>Σχήμα 4.174</b> Διάγραμμα Καταμητή (chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων .....	178
<b>Σχήμα 4.175</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=50%, load 50%.....	179
<b>Σχήμα 4.176</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=50%, load 50%.....	180
<b>Σχήμα 4.177</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=50%, load 50%.....	180

<b>Σχήμα 4.178</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, d=50%, load 50%	181
<b>Σχήμα 4.179</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=50%, load 50%	182
<b>Σχήμα 4.180</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70%	183
<b>Σχήμα 4.181</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=70%, load 70%	184
<b>Σχήμα 4.182</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=70%, load 70%	184
<b>Σχήμα 4.183</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, d=70%, load 70%	185
<b>Σχήμα 4.184</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=70%, load 70%	186
<b>Σχήμα 4.185</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 50%	187
<b>Σχήμα 4.186</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 50%	187
<b>Σχήμα 4.187</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=100%, load 50%	188
<b>Σχήμα 4.188</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=100%, load 50%	188
<b>Σχήμα 4.189</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 100%	189
<b>Σχήμα 4.190</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 100%	189
<b>Σχήμα 4.191</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=100%, load 100%	190
<b>Σχήμα 4.192</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=100%, load 100%	190
<b>Σχήμα 4.193</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, d=50%, load 50%	191
<b>Σχήμα 4.194</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50%	192
<b>Σχήμα 4.195</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=50%, load 50%	192
<b>Σχήμα 4.196</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=50%, load 50%	193
<b>Σχήμα 4.197</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=50%, load 50%	194
<b>Σχήμα 4.198</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, d=70%, load 70%	195
<b>Σχήμα 4.199</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70%	196
<b>Σχήμα 4.200</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=70%, load 70%	196
<b>Σχήμα 4.2.5.6.6</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=70%, load 70%	197
<b>Σχήμα 4.201</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=70%, load 70%	198
<b>Σχήμα 4.202</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=100%, load 50%	199
<b>Σχήμα 4.203</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=100%, load 50%	199
<b>Σχήμα 4.204</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=100%, load 50%	200
<b>Σχήμα 4.205</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=100%, load 50%	200
<b>Σχήμα 4.206</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=100%, load 100%	201
<b>Σχήμα 4.207</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=100%, load 100%	201
<b>Σχήμα 4.208</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=100%, load 100%	202
<b>Σχήμα 4.209</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=100%, load 100%	202
<b>Σχήμα 4.210</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=50%, load 50%	203

<b>Σχήμα 4.211</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=50%, load 50%</i> .....	204
<b>Σχήμα 4.212</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=50%, load 50%</i> .....	204
<b>Σχήμα 4.213</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, d=50%, load 50%</i> .....	205
<b>Σχήμα 4.214</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=50%, load 50%</i> .....	206
<b>Σχήμα 4.215</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70%</i> .....	207
<b>Σχήμα 4.216</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=70%, load 70%</i> .....	208
<b>Σχήμα 4.217</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=70%, load 70%</i> .....	208
<b>Σχήμα 4.218</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, d=70%, load 70%</i> .....	209
<b>Σχήμα 4.219</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=70%, load 70%</i> .....	210
<b>Σχήμα 4.220</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 50%</i> .....	211
<b>Σχήμα 4.221</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 50%</i> .....	211
<b>Σχήμα 4.222</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=100%, load 50%</i> .....	212
<b>Σχήμα 4.223</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=100%, load 50%</i> .....	212
<b>Σχήμα 4.224</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 100%</i> .....	213
<b>Σχήμα 4.225</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 100%</i> .....	213
<b>Σχήμα 4.226</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, d=100%, load 100%</i> .....	214
<b>Σχήμα 4.227</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1, d=100%, load 100%</i> .....	214
<b>Σχήμα 4.228</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, d=50%, load 50%</i> .....	215
<b>Σχήμα 4.229</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50%</i> .....	216
<b>Σχήμα 4.230</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=50%, load 50%</i> .....	216
<b>Σχήμα 4.231</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=50%, load 50%</i> .....	217
<b>Σχήμα 4.232</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=50%, load 50%</i> .....	218
<b>Σχήμα 4.233</b>	<i>α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2, d=70%, load 70%</i> .....	219
<b>Σχήμα 4.234</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70%</i> .....	220
<b>Σχήμα 4.235</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=70%, load 70%</i> .....	220
<b>Σχήμα 4.236</b>	<i>α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=70%, load 70%</i> .....	221
<b>Σχήμα 4.237</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=70%, load 70%</i> .....	222
<b>Σχήμα 4.238</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=100%, load 50%</i> .....	223
<b>Σχήμα 4.239</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=100%, load 50%</i> .....	223
<b>Σχήμα 4.240</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=100%, load 50%</i> .....	224
<b>Σχήμα 4.241</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=100%, load 50%</i> .....	224
<b>Σχήμα 4.242</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2, d=100%, load 100%</i> .....	225
<b>Σχήμα 4.243</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2, d=100%, load 100%</i> .....	225
<b>Σχήμα 4.244</b>	<i>Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2, d=100%, load 100%</i> .....	226
<b>Σχήμα 4.245</b>	<i>Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2, d=100%, load 100%</i> .....	226

<b>Σχήμα 4.246</b> Διάγραμμα Καταμητή ( <i>chopper</i> ) 2 τεταρτημορίων ZVT.....	227
<b>Σχήμα 4.247</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 25% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	228
<b>Σχήμα 4.248</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	229
<b>Σχήμα 4.249</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=50\%$ , load 25%.....	229
<b>Σχήμα 4.250</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 25% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	230
<b>Σχήμα 4.251</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βασικού MOSFET M1, $d=50\%$ , load 25%.....	231
<b>Σχήμα 4.252</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βοηθητικού MOSFET M1, $d=50\%$ , load 25%.....	231
<b>Σχήμα 4.253</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα της διόδου D' M1, $d=50\%$ , load 25%.....	232
<b>Σχήμα 4.254</b> Κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή M1, $d=50\%$ , load 25%.....	232
<b>Σχήμα 4.255</b> Κυματομορφή ρεύματος του πηνίου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	233
<b>Σχήμα 4.256</b> Διάγραμμα Καταμητή ( <i>chopper</i> ) 2 τεταρτημορίων ZVT.....	234
<b>Σχήμα 4.257</b> α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 25% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	235
<b>Σχήμα 4.258</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	236
<b>Σχήμα 4.259</b> Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1, $d=50\%$ , load 25%.....	236
<b>Σχήμα 4.260</b> α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, $d=50\%$ , load 25% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	237
<b>Σχήμα 4.261</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βασικού IGBT M1, $d=50\%$ , load 25%.....	238
<b>Σχήμα 4.262</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βοηθητικού IGBT M1, $d=50\%$ , load 25%.....	238
<b>Σχήμα 4.263</b> Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα της διόδου D' M1, $d=50\%$ , load 25%.....	239
<b>Σχήμα 4.264</b> Κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή M1, $d=50\%$ , load 25%.....	239
<b>Σχήμα 4.265</b> Κυματομορφή ρεύματος του πηνίου M1, $d=50\%$ , load 25%.....	240

## SUMMARY

This thesis deals with the analysis and simulation of DC motor driving circuits. In the first chapter, a brief description of electrical drive systems is given and how those can be choosed.

In the second chapter, electric DC motors are presented. Their structure, main characteristics and particular features depending on their wiring configuration is included.

In the third chapter, main semiconductor elements and the characteristics of their operation is presented. Power electronics as: AC-DC rectifiers and step-down DC-DC converters are mainly presented in this chapter. Single and three phase full wave rectifiers, one, two and four quadrant chopper, hard or soft switching are presented and analyzed.

In the fourth and last chapter the simulation of electrical DC motor driving circuits using software Matlab-Simulink is presented. Single phase full wave rectifiers, one, two and four quadrant choppers, two quadrant zero voltage transition as well as two quadrant zero current transition choppers are simulated and analyzed.

**Keywords:** matlab, simulink, power electronics, DC motor drives, IGBT, Thyristor, MOSFET, ZVT, ZCT



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την ανάλυση και την προσομοίωση των κυκλωμάτων οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης, τα τμήματα τα οποία περιλαμβάνουν καθώς και ο τρόπος επιλογή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Παρουσιάζεται η δομή τους, τα κύρια χαρακτηριστικά τους καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ανάλογα με τη συνδεσμολογία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια ημιαγωγικά στοιχεία καθώς και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους. Στη συνέχεια πραγματοποιείται εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος και παρουσιάζονται τα κυκλώματα που μπορούν να οδηγήσουν ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Παρουσιάζονται οι ανορθωτές AC-DC καθώς και οι DC-DC κατατμητές υποβιβασμού. Στους ανορθωτές πραγματοποιείται ανάλυση της απλής ανόρθωσης, των ημιελεγχόμενων και των πλήρως ελεγχόμενων γεφυρών σε μονοφασικό και τριφασικό δίκτυο. Στους κατατμητές υποβιβασμού γίνεται ανάλυση του κατατμητή ενός, δύο και τεσσάρων τεταρτημορίων καθώς και των αντίστοιχων, νέας γενιάς, κατατμητών χαμηλών απωλειών κατά την αγωγή-αποκοπή των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο πραγματοποιείται η προσομοίωση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων οδήγησης κινητήρων συνεχούς ρεύματος, σε H/Y με τη χρήση του λογισμικού Matlab-Simulink. Παρουσιάζονται και προσομοιώνονται οι μερικώς και πλήρως ελεγχόμενοι ανορθωτές σε μονοφασικό δίκτυο, οι κατατμητές συνεχούς ρεύματος ενός, δύο και τεσσάρων τεταρτημορίων καθώς και οι κατατμητές χαμηλών απωλειών, δύο τεταρτημορίων, με μηδενική τάση ή μηδενικό ρεύμα κατά την μετάβαση των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος.

**Λέξεις κλειδιά:** προσομοίωση H/Y, ηλεκτρονικά ισχύος, κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ημιαγωγικά στοιχεία, κατατμητές χαμηλών απωλειών

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ”

### 1.1 Συστήματα ηλεκτρικής κίνησης στη βιομηχανία



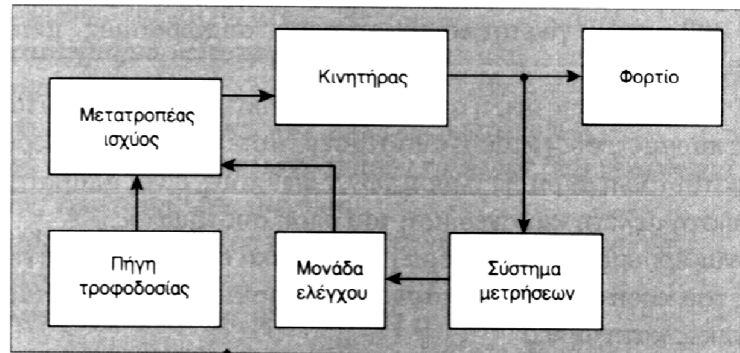
Σχήμα 1.1 Βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Ο άνθρωπος για την ικανοποίηση των αναγκών του, χρησιμοποιεί ενέργεια σε διάφορες μορφές. Η σημαντικότερη όλων είναι η **ηλεκτρική** ενέργεια καθώς μπορεί κανείς να τη συναντήσει σχεδόν παντού. Μέσω αυτής ο άνθρωπος μπορεί να πραγματοποιήσει μια πληθώρα εφαρμογών που αναβαθμίζουν τη ζωή του. Εμείς θα ασχοληθούμε, κατά κύριο λόγο, με την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε **κινητική**, η οποία είναι το κυρίως θέμα της παρούσας πτυχιακής.

Ηλεκτρική κίνηση στη βιομηχανία συναντάμε σε πολλούς τομείς, από απλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ένα παλάγκο ανύψωσης, μέχρι πολύπλοκες και σύνθετες εφαρμογές, όπως ένα ταινιόδρομο σε γραμμή παραγωγής υψηλής ακρίβειας. Μπορεί ακόμα κάποιος να συναντήσει ηλεκτρική κίνηση σε πολλές στιγμές της καθημερινότητάς του. Τραμ, μετρό, τρόλεϊ, ασανσέρ είναι λίγες από τις άπειρες εφαρμογές της.

Δεδομένου των αναγκών της κάθε εφαρμογής πραγματοποιείται ένα **σύστημα ηλεκτρικής κίνησης** το οποίο καλείται να ανταποκριθεί στις απαιτούμενες αυτές ανάγκες.

## 1.2 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης



Σχήμα 1.2 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης αποτελείται από ένα σύνολο εξαρτημάτων και συσκευών με κύριο στόχο την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Ένα τέτοιο σύστημα χωρίζεται σε δύο βασικά υποσυστήματα:

- το **υποσύστημα ισχύος**: εξασφαλίζει την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική σύμφωνα πάντα με τις απαιτήσεις μας. Σε αυτό το υποσύστημα περιλαμβάνονται:
  - ο **ηλεκτρικός μετατροπέας** ο οποίος μετατρέπει τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής ενέργειας (τάση, συχνότητα κτλ)
  - ο **ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας** ο οποίος μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (ηλεκτρικός κινητήρας)
  - ο **μηχανικός μετατροπέας** ο οποίος μετατρέπει τα χαρακτηριστικά της μηχανικής ενέργειας (ροπή, ταχύτητα κτλ)
- το **υποσύστημα ενέργειας**: εξασφαλίζει τον έλεγχο και ρύθμιση της ενέργειας και περιλαμβάνει:
  - τη **μονάδα καταγραφής - πληροφόρησης** η οποία επικοινωνεί με το σύστημα ισχύος και τροφοδοτεί τον ελεγκτή με τις κατάλληλες μεταβλητές
  - τον **ελεγκτή** ο οποίος συγκρίνει τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών με τις επιθυμητές και επεμβαίνει αναλόγως.

Ο κινητήρας μαζί με τον μετατροπέα ισχύος αποτελούν το **σύστημα οδήγησης** του μηχανικού φορτίου. Αναλόγως των αναγκών του χρήστη και των συνθηκών θα πρέπει να επιλέγεται το καταλληλότερο σύστημα ξεχωριστά για κάθε περίπτωση. Η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος γίνεται με τα παρακάτω κριτήρια:

- **το αγοραστικό κόστος**
- **την περιοχή μεταβολής των στροφών**
- **την απόδοση**
- **την ρύθμιση της ταχύτητας**
- **τα τεταρτημόρια λειτουργίας**
- **την αξιοπιστία**
- **τον συντελεστής φόρτισης και κύκλος λειτουργίας**
- **την ονομαστική ισχύς ως προς το βάρος (διαστάσεις, όγκος κτλ)**
- **το είδος της τάσης του δικτύου**
- **την επίδραση στο δίκτυο**
- **το λειτουργικό κόστος.**

Όλα τα παραπάνω παίζουν σημαντικό ρόλο στη σωστή σχεδίαση ενός συστήματος οδήγησης και η σωστή μελέτη όλων αυτών των παραμέτρων μας οδηγεί στην καταλληλότερη επιλογή, αποφεύγοντας τυχόν υπερδιαστασιολογήσεις, υπερβολικά μεγάλα κόστη κοκ.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ”

#### 2.1 Γενικά



Σχήμα 2.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες

Ηλεκτρική μηχανή είναι μια συσκευή που μπορεί να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική αλλά και το αντίστροφο. Όταν αυτή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται **κινητήρας** ενώ όταν λειτουργεί αντίστροφα ονομάζεται **γεννήτρια**.

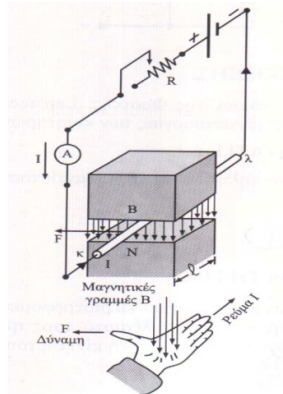
#### 2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)



Σχήμα 2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

### 2.2.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος στηρίζεται στη δύναμη Laplace. Σε ένα αγωγό, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται στην μαγνητική ροή που δημιουργείται μεταξύ των μαγνητικών πόλων, αναπτύσσονται ζεύγη ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων Laplace, δηλαδή ροπή στρέψης (σχήμα 2.3)



**Σχήμα 2.3** Ηλεκτροφόρος αγωγός σε μαγνητικό πεδίο

Το μέγεθος της δύναμης που ασκείται στον αγωγό είναι ([5]):

$$F = B \cdot I \cdot l \quad \text{σε Newton (N)} \quad (2.1)$$

Όπου:

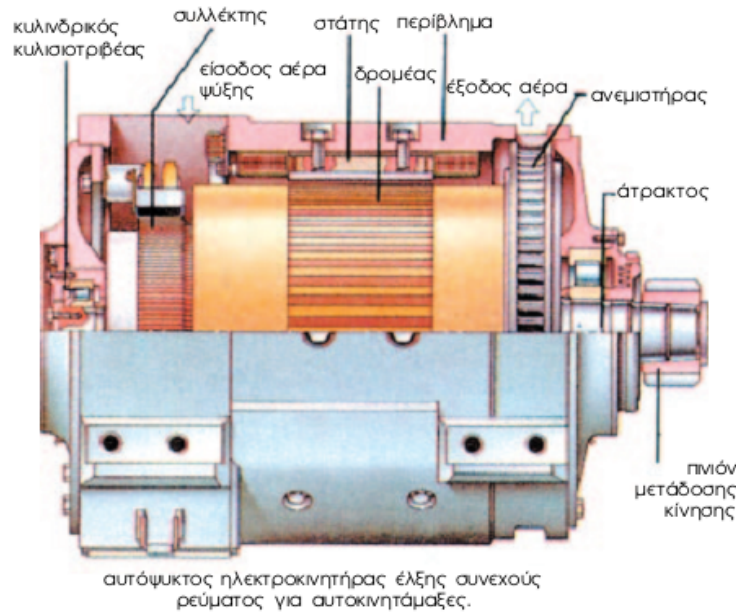
B: η μαγνητική επαγωγή του πεδίου σε τέσλα (T)

I: η ένταση του ρεύματος του που διαρρέει τον αγωγό σε αμπέρ (α)

l: το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο σε μέτρα (m)

### 2.2.2 Κύρια μέρη κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Τα κύρια μέρη ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος (σχήμα 2.4) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τον στάτη (σταθερό μέρος του κινητήρα) και τον δρομέα (κινητό μέρος του κινητήρα).



**Σχήμα 2.4** Τομή ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος

### 2.2.3 Μέρη του στάτη

Ο στάτης, ο οποίος όπως είπαμε είναι το σταθερό μέρος της μηχανής αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

**Ζύγωμα:** αποτελεί τον κορμό της μηχανής και κατασκευάζεται κυρίως από χυτοχάλυβα. Εν μέσω του ζυγώματος κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα

**Μαγνητικοί πόλοι:** αποτελούνται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Οι πόλοι εξασφαλίζουν τη μαγνητική ροή που δημιουργείται από τα τυλίγματα, τα οποία περιβάλλουν τους πόλους. Το τύλιγμα αποτελείται από μονωμένο χάλκινο αγωγό ενώ οι πυρήνες συνήθως κατασκευάζονται από μονωμένα ειδικά ελάσματα σιδήρου.

**Πέδιλα των πόλων:** το πλατύτερο μέρος των πόλων το οποίο στερεώνεται κάτω από τα τυλίγματα. Σκοπός τους είναι να διαχέουν τη ροή σε ένα μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας του δρομέα. Κατασκευάζονται από μονωμένα φύλλα σιδήρου.

**Ψηκτροφορέας:** αποτελείται από τις ψηκτροθήκες και τις ψήκτρες. Στερεώνεται επάνω στο κάλυμμα της μηχανής από τη μεριά του συλλέκτη.

**Ψήκτρες:** κατασκευάζονται από σκληρό άνθρακα ή γραφίτη και βρίσκονται μέσα στις ψηκτροθήκες. Σκοπός τους είναι να επιτυγχάνεται σωστά η ροή του ρεύματος από τον συλλέκτη και ρυθμίζονται ώστε να αποφεύγονται οι σπινθηρισμοί.

#### 2.2.4 Μέρη του δρομέα

Ο δρομέας, ο οποίος όπως αναφέρθηκε είναι το κινητό μέρος της μηχανής αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

**Άξονας:** φέρει το επαγωγικό τύμπανο, τον συλλέκτη τον ανεμιστήρα και στρέφεται πάντα μαζί με αυτά.

**Πυρήνας επαγωγικού τυμπάνου:** κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα τα οποία μονώνονται μεταξύ τους. Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου φέρει το τυλίγμα του τυμπάνου και σκοπός του είναι να παρέχει μια οδό μικρής μαγνητικής αντίστασης για την δίοδο των μαγνητικών γραμμών των πόλων.

**Τυλίγμα επαγωγικού τυμπάνου:** κατασκευάζεται από μονωμένο χάλκινο αγωγό κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής.

**Συλλέκτης:** κατασκευάζεται από χάλκινα ελάσματα (τομείς συλλέκτη) και έχει σκοπό να μεταβιβάζει το ρεύμα.

**Ανεμιστήρας:** τοποθετείται στον άξονα και περιστρέφεται μαζί του. Σκοπός του είναι να παράγει ροή αέρα προς τα τυλίγματα για την ψύξη αυτών.

#### 2.2.5 Χαρακτηριστικά κινητήρων συνεχούς ρεύματος

##### 2.2.5.1 Λειτουργία εν κενώ

Όταν ένας κινητήρας λειτουργεί εν κενώ, δηλαδή χωρίς να υπάρχει φορτίο στον άξονά του, τότε ο κινητήρας έχει μόνο να υπερνικήσει την αντίσταση των τριβών του επομένως η ένταση που απορροφά  $I_T$  είναι πολύ μικρή.



### 2.2.5.2 Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ)

Καθώς το επαγωγικό τύμπανο στρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη στους αγωγούς η οποία είναι αντίθετη από αυτή που τη δημιούργησε σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz. Έτσι για να διατηρηθεί το ρεύμα σταθερό και να συνεχισθεί η κίνηση θα πρέπει η πηγή να μπορεί να υπερνικήσει αυτή καθώς και τις πτώσεις τάσης που δημιουργούνται στις ωμικές αντιστάσεις του κινητήρα ([5]).

$$U = E_a + I_T \cdot R_T \quad (2.2)$$

Όπου:

U: η τάση της πηγής

$E_a$ : αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ

$I_T$ : ένταση ρεύματος τυμπάνου

$R_T$ : ωμική αντίσταση τυμπάνου

Η αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί ([5]):

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot n \quad (2.3)$$

Όπου:

k: σταθερά

$\Phi$ : μαγνητική ροή

n: στροφές κινητήρα

### 2.2.5.3 Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Κατά την εκκίνηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος δεν υπάρχει ΑΗΕΔ (εφόσον ο κινητήρας δεν περιστρέφεται) συνεπώς το ρεύμα εκκίνησης θα είναι πολύ μεγάλο αφού η αντίσταση του τυμπάνου είναι πολύ μικρή και ισχύει η σχέση ([5]):

$$I_e = \frac{U}{R_T} \quad (2.4)$$

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο πραγματοποιούμε διάφορα συστήματα εκκίνησης είτε ελέγχοντας την τάση είτε προσθέτοντας κάποια αντίσταση (ροοστάτη) σε

σειρά. Σαφώς και ο δεύτερος τρόπος είναι και ο πιο ενεργοβόρος και γι'αυτό πλέον δε χρησιμοποιείται τόσο συχνά.

### Ροπή στρέψης κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας των κινητήρων, οι αναπτυσσόμενες στους αγωγούς δυνάμεις σχηματίζουν ζεύγος δυνάμεων το οποίο ασκεί ροπή στρέψης ([5]).

$$T = F \cdot r \quad (2.5)$$

Όπου:

T: ροπή (Nm)

F: δύναμη (N)

r: απόσταση δύναμης από τον άξονα (m)

Η ροπή που ασκείται σε ένα πραγματικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι ([5]):

$$T = \kappa \cdot \Phi \cdot I_T \quad (2.6)$$

#### 2.2.5.4 Λειτουργία με φορτίο

Όταν ο κινητήρας εργάζεται με φορτίο τότε η ηλεκτρική ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο εξαρτάται και είναι ανάλογη προς αυτό. Η ένταση που απορροφάται από το επαγωγικό τύμπανο είναι ([5]):

$$I_T = \frac{U - E_a}{R_T} \quad (2.7)$$

Με την επιρροή κάποιου φορτίου στον κινητήρα θα μεταβληθούν οι στροφές καθώς και η ΑΗΕΔ του. Ελάττωση της  $E_a$  ταυτόχρονα σημαίνει αύξηση της έντασης  $I_T$ . Αύξηση της έντασης σημαίνει και αύξηση της ροπής.

Παρατηρούμε πως με μια μικρή ελάττωση της ταχύτητας, έχουμε αύξηση της κινητήριας ροπής. Η ελάττωση της ταχύτητας θα σταματήσει, μόλις η ροπή γίνει ίση με τη ροπή του

φορτίου και τις απώλειες του κινητήρα. Συνεπώς, κάθε μεταβολή του μηχανικού φορτίου θα επιφέρει μεταβολή της έντασης και συνεπώς της ισχύος που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο.

#### 2.2.5.5 Απώλειες κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Στις ηλεκτρικές μηχανές, όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, κατά τη διαδικασία της μετατροπής της ισχύος, από μηχανική σε ηλεκτρική (γεννήτριες) και το αντίστροφο (κινητήρες), εμφανίζονται απώλειες ισχύος. Αυτές χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες όπως αυτές προκύπτουν:

**Απώλειες χαλκού ( $P_{cu}$ ):** οφείλονται στη ροή των ρευμάτων του δρομέα και της διέγερσης καθώς στα αντίστοιχα τυλίγματα υπάρχουν αρκετά μέτρα σύρματος με αποτέλεσμα να είναι υπολογίσιμη η ωμική τους αντίσταση.

**Απώλειες σιδήρου ή πυρήνα ( $P_{fe}$ ):** περιλαμβάνουν τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων στα μεταλλικά τμήματα της μηχανής στο στάτη και το δρομέα. Το μέγεθος των απωλειών σιδήρου εξαρτάται από την ταχύτητα της μηχανής και τη μαγνητική ροή αυτής

**Μηχανικές απώλειες:** περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών και αερισμού της μηχανής και εξαρτώνται από την ταχύτητα αυτής.

**Απώλειες ψηκτρών:** οφείλονται στην πτώση τάση επαφής των ψηκτρών

**Κατανεμημένες απώλειες:** πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες δεν μπορούν να ενταχθούν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών είναι εξαιρετικά δύσκολος και έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, σε λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο.

Εφόσον πλέον γνωρίζουμε τις συνολικές απώλειες της μηχανής μπορούμε πλέον να γνωρίζουμε τη συνολική ισχύ εξόδου η οποία είναι ([5]):

$$P_{out} = P_{in} - P_{loss} \quad (2.8)$$

Όπου:

$P_{out}$ : η ισχύς εξόδου της μηχανής

$P_{in}$ : η ισχύς εισόδου της μηχανής

$P_{loss}$ : οι συνολικές απώλειες της μηχανής

Τέλος η μηχανές χαρακτηρίζονται από τον συντελεστή απόδοσής τους ( $\eta$ ) ο οποίος έχει να κάνει με την ικανότητά τους στη μετατροπή της εξερχόμενης ισχύος ως προς την εισερχόμενη και αυτή είναι ([5]):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

### 2.2.6 Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Αναλόγως του τρόπου σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος διακρίνονται σε 4 κατηγορίες:

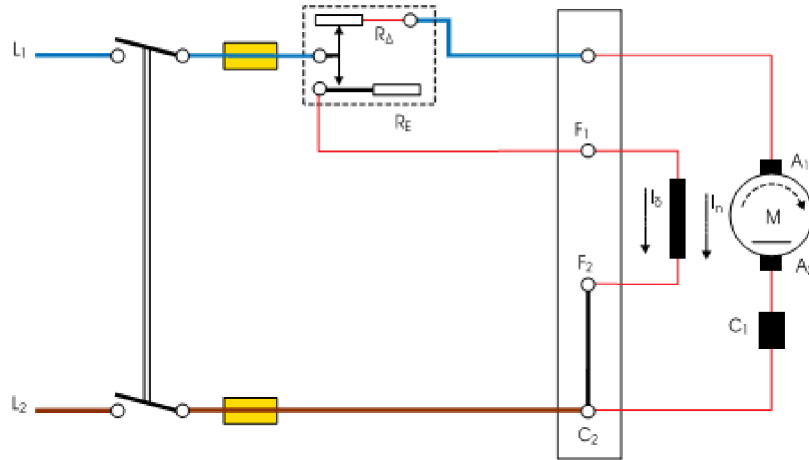
- κινητήρες ξένης διέγερσης
- κινητήρες παράλληλης διέγερσης
- κινητήρες διέγερσης σειράς
- κινητήρες σύνθετης διέγερσης

#### 2.2.6.1 Κινητήρες παράλληλης διέγερσης

Οι κινητήρες παράλληλης και ξένης διέγερσης παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά μεταξύ τους γι' αυτό και αναλύονται μαζί στην ενότητα των κινητήρων παράλληλης διέγερσης. Θεωρώντας δηλαδή ότι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος διέγερσης σε παράλληλη διάταξη, εφαρμοσθεί ακριβώς η ίδια τάση από ξένη πηγή τότε δεν υπάρχει καμία διαφορά. Στην περίπτωση των κινητήρων παράλληλης διέγερσης (σχήμα 2.5) παρατηρούμε ότι το ρεύμα διέγερσης προκαλείται από τη σταθερή τάση εφαρμογής της μηχανής, που σημαίνει ότι η διέγερση δρα ανεξάρτητα από το φορτίο. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα των συγκεκριμένων κινητήρων σε περιπτώσεις όπου καλούνται να κινήσουν μεταβλητά φορτία ή και να διατηρήσουν σταθερές ταχύτητες περιστροφής. Στους κινητήρες παράλληλης

διέγερσης μπορούμε να επιτύχουμε την αλλαγή φοράς περιστροφής τους με τους παρακάτω δύο τρόπους:

- με αλλαγή φορά του ρεύματος διέγερσης χωρίς να μεταβληθεί η φορά ρεύματος του τυμπάνου
- με αλλαγή φορά του ρεύματος τυμπάνου χωρίς να μεταβληθεί η πολικότητα των μαγνητικών πόλων

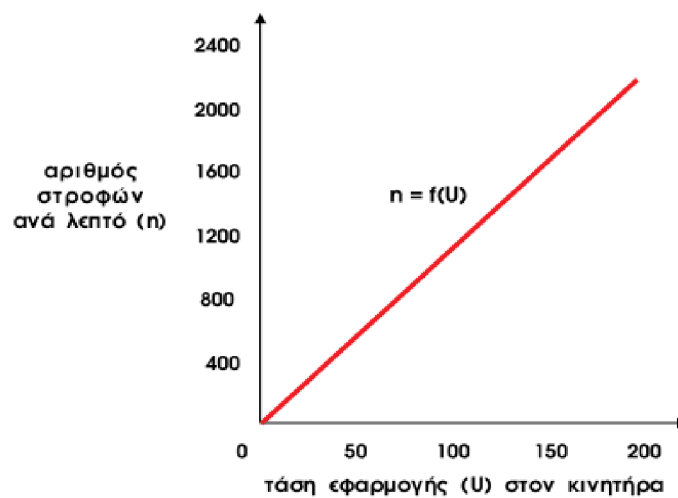


Σχήμα 2.5 Κινητήρας με παράλληλη διέγερση

### Χαρακτηριστικές καμπύλες κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες των μηχανών παράλληλης διέγερσης και μέσω αυτών εξετάζονται κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

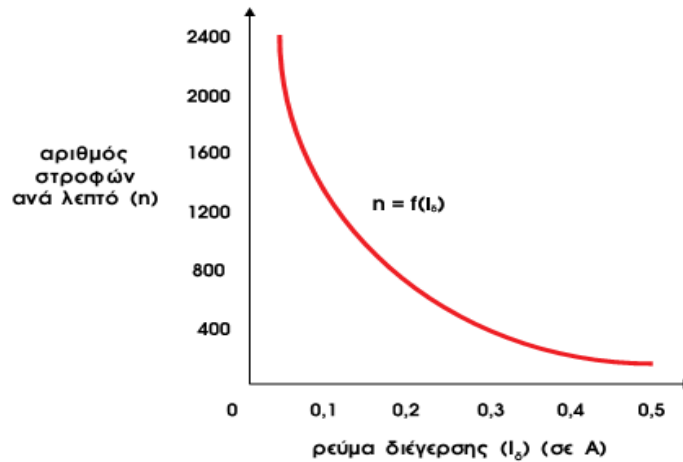
#### Χαρακτηριστική τάσης - στροφών $n=f(U)$



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική  $n=f(U)$  κινητήρα με παράλληλη διέγερση

Από αυτή τη χαρακτηριστική (σχήμα 2.6) της τάσης ως προς τις στροφές του κινητήρα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το μέγεθος της τάσης αυξάνεται ο αριθμός των στροφών και μάλιστα γραμμικά.

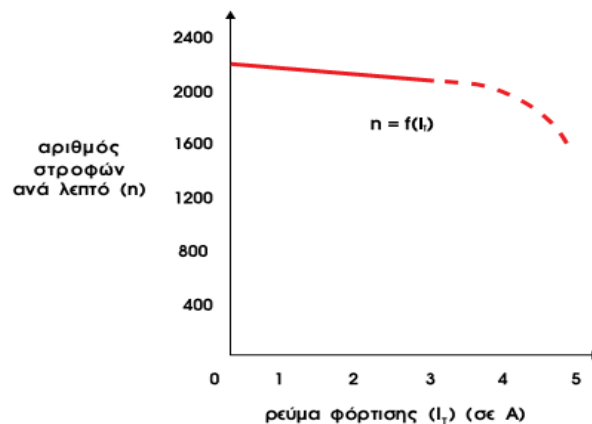
### Χαρακτηριστική ρεύματος διέγερσης - στροφών $n=f(I_{\delta})$



Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική  $n=f(I_{\delta})$  κινητήρα με παράλληλη διέγερση

Από αυτή τη χαρακτηριστική του ρεύματος διέγερσης ως προς τις στροφές του κινητήρα (σχήμα 2.7), παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το ρεύμα διέγερσης ελαττώνονται οι στροφές του κινητήρα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση (όταν μειώνεται το ρεύμα διέγερσης) οι στροφές τείνουν προς το άπειρο. Για αυτό το λόγο οι συγκεκριμένοι κινητήρες δεν πρέπει να μένουν ποτέ χωρίς διέγερση κατά τη λειτουργία τους.

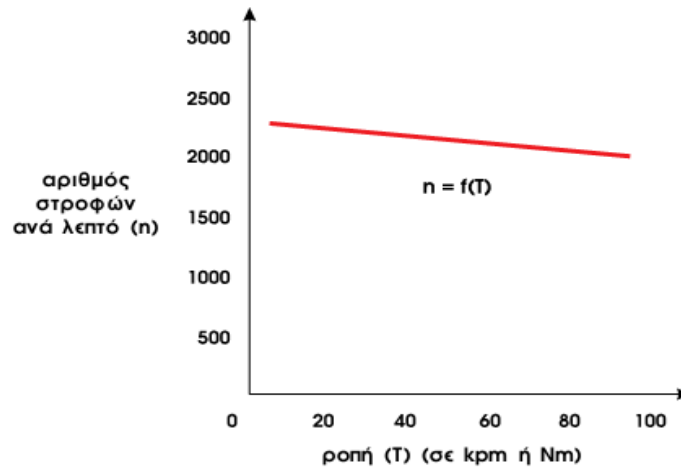
### Χαρακτηριστική ρεύματος φόρτισης – στροφών $n=f(I_T)$



Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστική  $n=f(I_T)$  κινητήρα με παράλληλη διέγερση

Από αυτή τη χαρακτηριστική του ρεύματος φόρτισης ως προς τις στροφές του κινητήρα (σχήμα 2.8), παρατηρούμε ότι στην περιοχή κανονικής λειτουργίας οι στροφές μεταβάλλονται ανεπαίσθητα όταν υπάρχουν μεταβολές στο ρεύμα φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αύξηση της πτώσης τάσης του τυμπάνου (μείωση της ΑΗΕΔ).

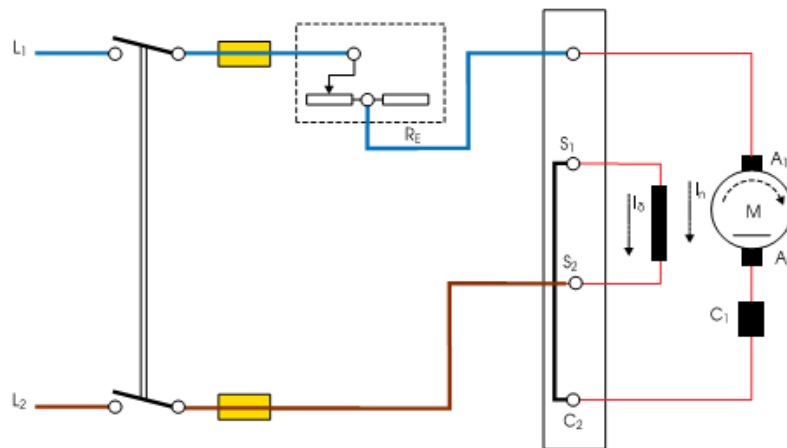
### Χαρακτηριστική ροπής – στροφών $n=f(T)$



Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική  $n=f(T)$  κινητήρα με παράλληλη διέγερση

Από αυτή τη χαρακτηριστική της ροπής ως προς τις στροφές του κινητήρα (σχήμα 2.9), παρατηρούμε ότι ακόμα και σε μεγάλες ροπές ο αριθμός στροφών του κινητήρα μεταβάλλεται ελάχιστα.

#### 2.2.6.2 Κινητήρες διέγερσης σειράς



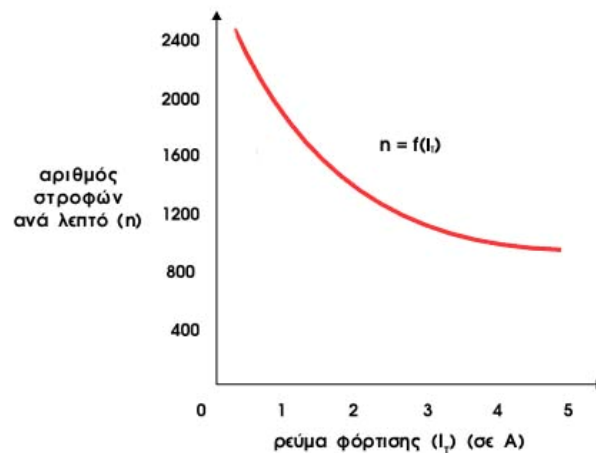
Σχήμα 2.10 Κινητήρας με διέγερση σειράς

Στην περίπτωση των κινητήρων με διέγερση σειράς (σχήμα 2.10) παρατηρούμε ότι το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται εν σειρά με το επαγωγικό τύμπανο. Το τύλιγμα διέγερσης σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από λίγες σπείρες και διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα με το τύλιγμα του τυμπάνου. Στους κινητήρες με διέγερση σειράς αν επιθυμούμε να αλλάξουμε τη φορά περιστροφή τους, τότε αυτό μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας τη φορά του ρεύματος τυμπάνου χωρίς όμως να αλλάξουμε τη φορά του ρεύματος στο τύλιγμα της διέγερσης.

### Χαρακτηριστικές καμπύλες κινητήρα με διέγερση σειράς

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες των μηχανών με διέγερση σειράς και μέσω αυτών εξετάζονται κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

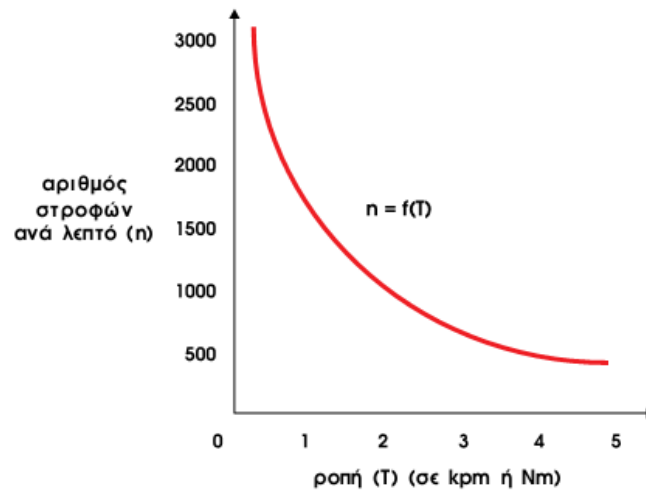
#### Χαρακτηριστική ρεύματος – φόρτισης $n=f(I_T)$



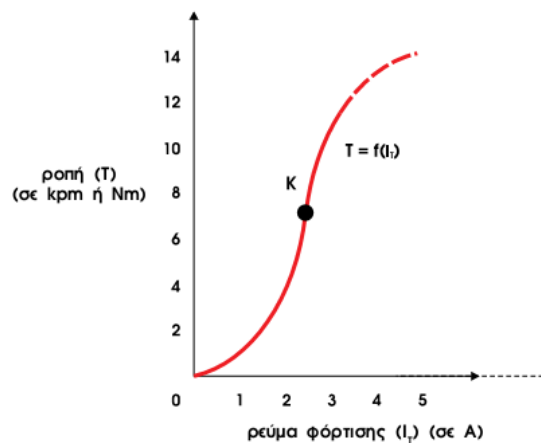
**Σχήμα 2.11** Χαρακτηριστική  $n=f(I_T)$  κινητήρα με διέγερση σειράς

Από αυτή τη χαρακτηριστική του ρεύματος φόρτισης ως προς τις στροφές του κινητήρα (σχήμα 2.11), παρατηρούμε ότι οι στροφές του κινητήρα είναι αντιστρόφως ανάλογες του ρεύματος φόρτισης. Όσο λιγότερο το ρεύμα, τόσο περισσότερες οι στροφές, έτσι για ρεύμα φόρτισης μηδενικό ο κινητήρας υπερταχύνεται μέχρι καταστροφής



**Χαρακτηριστική ροπής – στροφών  $n=f(T)$** **Σχήμα 2.12** Χαρακτηριστική  $n=f(T)$  κινητήρα με διέγερση σειράς

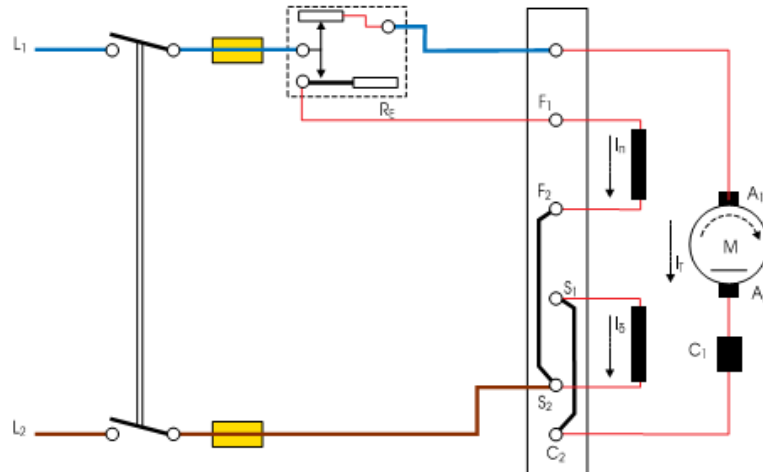
Από αυτή τη χαρακτηριστική της ροπής ως προς τις στροφές του κινητήρα (σχήμα 2.12), παρατηρούμε ότι όταν η ροπή αυξάνει ο αριθμός των στροφών μειώνεται εν αντίθεση των κινητήρων παράλληλης και ξένης διέγερσης. Ο κινητήρας με διέγερση σειράς προσφέρει τη δυνατότητα μεγάλης ροπής σε μικρό αριθμό στροφών και αυτό τον κάνει κατάλληλο σε περιπτώσεις έλξης.

**Χαρακτηριστική ρεύματος φόρτισης – ροπής  $T=f(I_T)$** **Σχήμα 2.13** Χαρακτηριστική  $T=f(I_T)$  κινητήρα με διέγερση σειράς

Από αυτή τη χαρακτηριστική του ρεύματος φόρτισης του κινητήρα ως προς τη ροπή του κινητήρα (σχήμα 2.13), παρατηρούμε ότι η ροπή αυξάνει συναρτήσει του ρεύματος φόρτισης.

Η καμπύλη από τη μηδενική τιμή έως το σημείο κορεσμού (K) του κινητήρα ακολουθεί μεταβολή του τετραγώνου της έντασης φόρτισης.

### 2.2.6.3 Κινητήρες σύνθετης διέγερσης



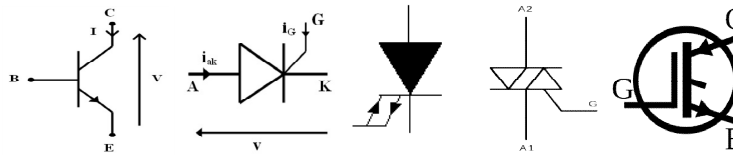
**Σχήμα 2.14** Κινητήρας με σύνθετη διέγερση

Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρούμε ότι η διέγερση του κινητήρα αποτελείται από δύο τυλίγματα, ένα σε σειρά και ένα παράλληλα (σχήμα 2.14). Με αυτό τον τρόπο το ένα τύλιγμα αντισταθμίζει τα μειονεκτήματα του άλλου (παράλληλο αντί σειράς και το αντίστροφο) αλλά στην πραγματικότητα παρουσιάζουν μεγάλες αστάθειες και συνήθως δε χρησιμοποιούνται οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης. Η αλλαγή φοράς περιστροφής στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης μπορεί να πραγματοποιηθεί αλλάζοντας τη φορά του ρεύματος που διαρρέει το επαγωγικό τύμπανο και τους βοηθητικούς πόλους, χωρίς να αλλάξει η φορά του ρεύματος στα δύο τυλίγματα της διέγερσης.

## 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### “ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ DC ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ”

#### 3.1 Ηλεκτρονικά ισχύος και ημιαγωγικά στοιχεία



Σχήμα 3.1 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια τεχνολογία η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στα ηλεκτρικά κυκλώματα και περιλαμβάνει πληθώρα εφαρμογών στο σύγχρονο κόσμο. Πρόκειται για τα **Ηλεκτρονικά Ισχύος**. Μέσω των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, εκμεταλλεύοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε κυκλώματα ισχύος ιδιαίτερα χρήσιμα για τις ανάγκες μας. Τα κυριότερα ημιαγωγικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι:

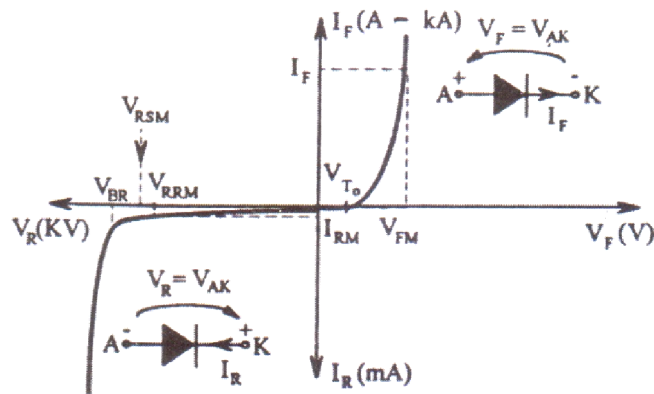
- Δίοδος
- Τρανζίστορ
- Θυρίστορ
- GTO
- Triac
- MOSFET
- IGBT

Η επιλογή του ημιαγωγικού στοιχείου του οποίου θα χρησιμοποιηθεί σε ένα κύκλωμα ηλεκτρονικών ισχύος εξαρτάται από τις απαιτήσεις ισχύος, τάσης, ρεύματος και διακοπτικής συχνότητας.

## 3.2 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

### 3.2.1 Δίοδος

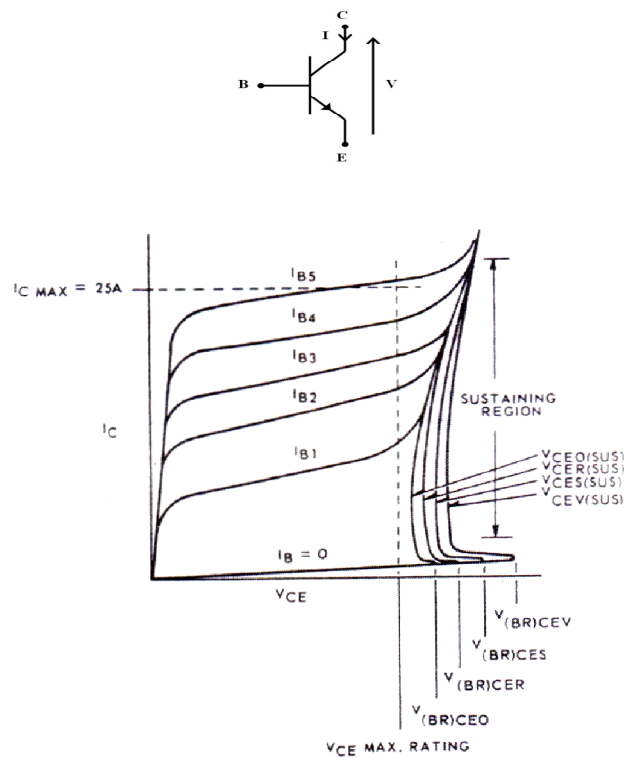
Η δίοδος (σχήμα 3.2α) είναι ένα στοιχείο το οποίο χρησιμοποιείται σε μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν δίοδος ελεύθερης διέλευσης σε αντιστροφείς ισχύος. Η δίοδος έρχεται σε αγωγή όταν το δυναμικό στην άνοδο της (A) είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό στην κάθοδό της (K). Ουσιαστικά η δίοδος συμπεριφέρεται σαν ένας διακόπτης On-Off αναλόγως του δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της. Μπορούμε να συναντήσουμε διόδους ισχύος που έχουν ονομαστικό ρεύμα 5.000 A και ονομαστική τάση 5.000 V. Η διακοπτική τους συχνότητα, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της ισχύος, μπορεί να είναι μερικές δεκάδες nsec (χαμηλής ισχύος) ενώ οι μεγαλύτερης ισχύος είναι περίπου στο 1msec. Παρακάτω παρουσιάζεται η V-I (τάσης-ρεύματος) χαρακτηριστική της διόδου (σχήμα 3.2β).



Σχήμα 3.2 α) Δίοδος β) Χαρακτηριστική διόδου

### 3.2.2 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ (σχήμα 3.3α) είναι το πρώτο ημιαγωγικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε σαν στοιχείο ενίσχυσης. Διαθέτει 3 ακροδέκτες την βάση (B), τον συλλέκτη(C) και τον εκπομπού (E). Η λειτουργία ενός τρανζίστορ εξαρτάται από τον τύπο αυτού(npn ή pnp) καθώς και από την πόλωση που εφαρμόζεται στα άκρα του. Οι καμπύλες του τρανζίστορ, όπου εμφανίζονται παρακάτω (σχήμα 3.3β), παράγονται από τις αλλαγές στο ρεύμα το οποίο εφαρμόζεται στη βάση, γι'αυτό και το τρανζίστορ αποκαλείται ημιαγωγικό στοιχείο ρεύματος:



**Σχήμα 3.3** α) Τρανζίστορ Bjt β) Χαρακτηριστικές εξόδου npn τρανζίστορ

**α) Ενεργός περιοχή:** όταν εφαρμοστεί ορθή πόλωση μεταξύ εκπομπού-βάσης και ανάστροφη πόλωση μεταξύ βάσης-συλλέκτη

**β) Περιοχή αποκοπής:** όταν και οι δύο επαφές n-p είναι αρνητικά πολωμένες και το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν ανοικτός διακόπτης (off)

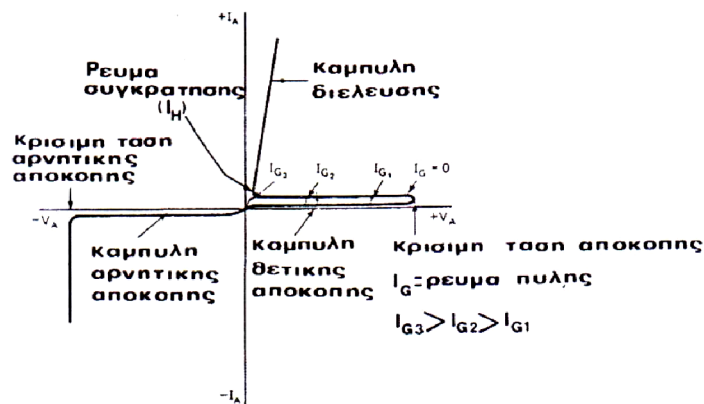
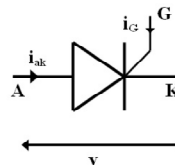
**γ) Περιοχή κορεσμού:** όταν η θετική πόλωση μεταξύ εκπομπού-βάσης δημιουργεί αρκετό ρεύμα συλλέκτη το οποίο μαζί με το εξωτερικό κύκλωμα προκαλεί την ορθή πόλωση

μεταξύ συλλέκτη-βάση. Το τρανζίστορ σε αυτή την περίπτωση συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης (on)

Στα ηλεκτρονικά ισχύος ωστόσο το τρανζίστορ χρησιμοποιείται σαν διακόπτης On-Off δηλαδή στις περιοχές αποκοπής ή κορεσμού.

### 3.2.3 Θυρίστορ

Το θυρίστορ (σχήμα 3.4α) από πλευρά δομής είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n) το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί και σαν συνδυασμός 2 τρανζίστορ. Αποτελείται από 3 ακροδέκτες, την άνοδο (A), την κάθοδο (K) και την πύλη (G). Για να βρεθεί σε κατάσταση αγωγής το θυρίστορ θα πρέπει να υπάρξει ορθή πόλωση μεταξύ ανόδου και καθόδου καθώς και να δοθεί κάποιος παλμός έναυσης στην πύλη αυτού. Το θυρίστορ εξακολουθεί να άγει, ακόμα και όταν δεν υπάρχει πλέον παλμός στην πύλη, έως ότου μηδενιστεί το ρεύμα που διέρχεται από το θυρίστορ ή όταν υπάρξει ανάστροφη πόλωση μεταξύ ανόδου και καθόδου. Παρακάτω παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική ενός τυπικού θυρίστορ καθώς και περιγράφονται οι καταστάσεις αυτού (σχήμα 3.4β):



Σχήμα 3.4 α) Θυρίστορ β) Χαρακτηριστική V-I θυρίστορ

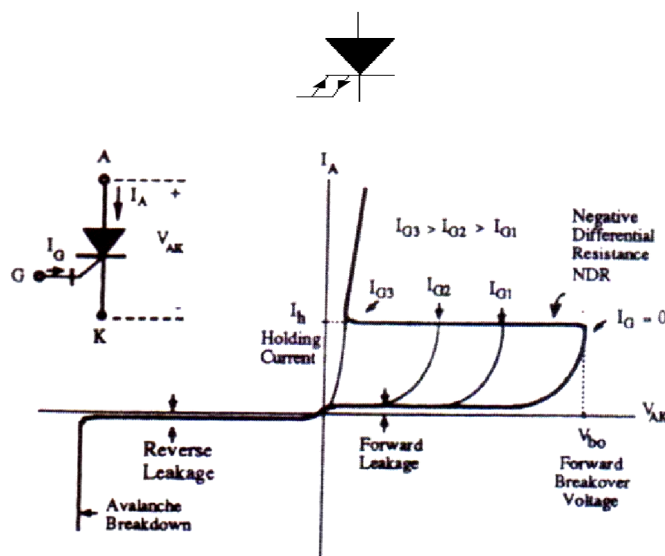
**α) Κατάσταση αγωγής:** όπου το θυρίστορ άγει

**β) Κατάσταση θετικής αποκοπής:** το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο και πλέον η αγωγή του εξαρτάται από τον παλμό στην πύλη

**γ) Κατάσταση αρνητικής αποκοπής:** το θυρίστορ είναι πολωμένο ανάστροφα και είτε μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής (εφόσον βρισκόταν σε αγωγή) είτε δεν επιτρέπει την αγωγή ακόμα και όταν δοθεί παλμός στην πύλη

### 3.2.4 GTO

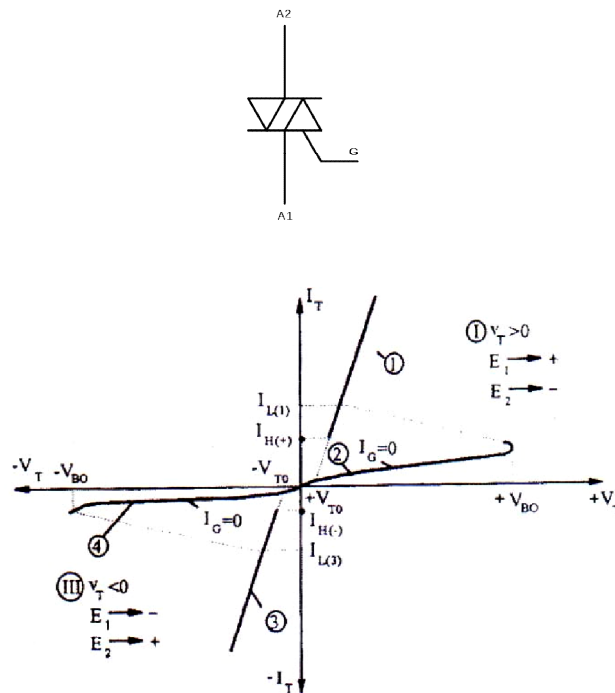
Το GTO (σχήμα 3.5α) είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο, το οποίο συμπεριφέρεται σαν θυρίστορ με τη βασική διαφορά ότι σε αυτό η σβέση ή αποκοπή επιτυγχάνεται μέσω της πύλης του εν αντιθέσει του θυρίστορ που είδαμε παραπάνω. Είναι ένα στοιχείο όπου βρίσκει εφαρμογή σε ισχύεις μεταξύ 3 - 10MW ενώ η διακοπτική του ταχύτητα φτάνει έως και τα 10KHz. Το GTO είναι σε θέση να διατηρεί πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του και να διεγείρεται από ένα πολύ μικρής διάρκειας παλμό ρεύματος όμως παρουσιάζει μεγάλους χρόνους μετάβασης, κάτι που σημαίνει υψηλές διακοπτικές απώλειες και έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζει την διακοπτική του συχνότητα χρήσης στα μερικές εκατοντάδες Hz . Το GTO μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής όταν μια θετική τάση εφαρμοστεί μεταξύ πύλης και καθόδου ενώ διέρχεται σε κατάσταση αποκοπής όταν εφαρμοσθεί μια αρνητική τάση μεταξύ της πύλης και της καθόδου. Παρακάτω παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική του GTO (σχήμα 3.5β):



Σχήμα 3.5 α) GTO β) Χαρακτηριστική V-I GTO

### 3.2.5 Triac

Το Triac είναι ακόμα ένα ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο. Αποτελείται από 3 άκρα την πύλη (G) και τους 2 ακροδέκτες ισχύος (A1-A2). Το Triac αναλόγως της πόλωσης και του παλμού που θα πάρει στην πύλη του μπορεί να επιτρέψει τη ροή ρεύματος και προς τις 2 κατευθύνσεις. Αν υπάρχει μεγαλύτερο δυναμικό στον A1 ακροδέκτη από τον A2 και πάρει θετικό παλμό στην πύλη, τότε επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς τον A2. Αν υπάρχει μεγαλύτερο δυναμικό στον A2 από τον A1 και πάρει αρνητικό παλμό στην πύλη, τότε επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς τον A1. Παρακάτω παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική του Triac καθώς και οι πιθανές καταστάσεις όπου αυτό μπορεί να βρίσκεται (σχήμα 3.6β):



Σχήμα 3.6 α) Triac β) Χαρακτηριστική V-I Triac

**α) Κατάσταση 1:** Το Triac μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής όπου το θετικό ρεύμα αρχίζει να ρέει ενώ μειώνεται η τάση

**β) Κατάσταση 2:** Το Triac λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης και αποκόπτει θετική τάση

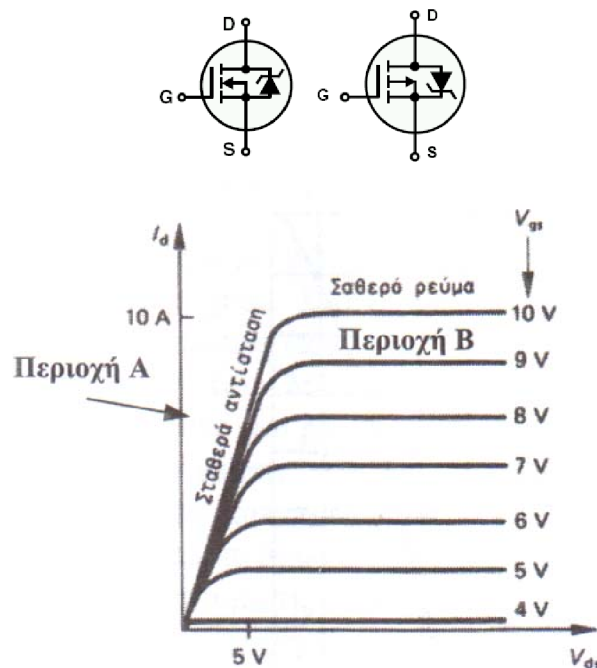
**γ) Κατάσταση 3:** Το Triac μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής όπου το αρνητικό ρεύμα αρχίζει να ρέει ενώ μειώνεται η αρνητική τάση

**δ) Κατάσταση 4:** Το Triac λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης και αποκόπτει αρνητική τάση



### 3.2.6 MOSFET

Το MOSFET (σχήμα 3.7α) είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο 3 ακροδεκτών, της πύλης (G), της υποδοχής (D) και της πηγής (S). Το MOSFET συμπεριφέρεται περίπου σαν το τρανζίστορ με τη διαφορά ότι σε αυτό τον έλεγχο πραγματοποιεί η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη αυτού και για αυτό το λόγο το MOSFET καλείται και σαν ημιαγωγικό στοιχείο τάσης. Παρακάτω παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική ενός MOSFET (σχήμα 3.7β):



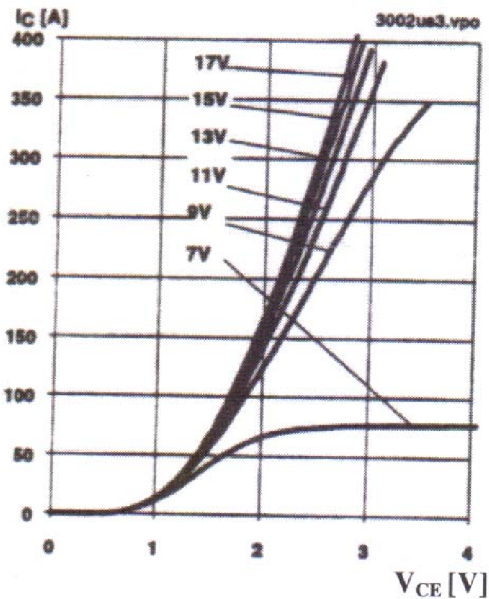
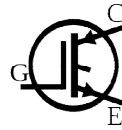
Σχήμα 3.7 α) MOSFET β) Χαρακτηριστική V-I MOSFET

Όπως και τα τρανζίστορ έτσι και τα MOSFET χρησιμοποιούνται σαν διακόπτες στα ηλεκτρονικά ισχύος, δηλαδή εργάζονται στις περιοχές αποκοπής ή αγωγής.

### 3.2.7 IGBT

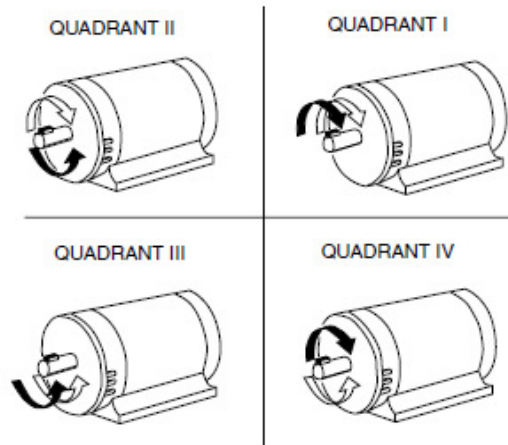
Το IGBT (σχήμα 3.8α) είναι το ίσως σημαντικότερο αλλά και το πιο διαδεδομένο ημιαγωγικό στοιχείο των ημερών μας. Το IGBT θα μπορούσε κανείς να πει ότι προέκυψε σαν ένας συμβιβασμός μεταξύ των χαρακτηριστικών των MOSFET και των τρανζίστορ ισχύος. Με αυτό το συνδυασμό το IGBT κατάφερε να πετύχει πάρα πολύ μεγάλες διακοπτικές

συχνότητες αλλά και τον χειρισμό υψηλότερων τάσεων-ρευμάτων. Έχει μικρές απαιτήσεις ισχύος στο κύκλωμα οδήγησης ενώ οι μετατροπείς ισχύος με IGBT μπορούν να ξεπερνούν το 1MW. Διαθέτει 3 ακροδέκτες, την πύλη (G), τον συλλέκτη (C) και τον εκπομπό (E). Ουσιαστικά το IGBT επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος από τον συλλέκτη προς τον εκπομπό όσο στην πύλη εφαρμόζεται δυναμικό. Παρακάτω παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική ενός IGBT σε θερμοκρασία 25 °C (σχήμα 3.8β):



Σχήμα 3.8 α) IGBT β) Χαρακτηριστική V-I IGBT (25 °C)

### 3.3 Κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος



Σχήμα 3.9 Κινητήρες στα τέσσερα τεταρτημόρια λειτουργίας

Με τα ηλεκτρονικά ισχύος και τα ημιαγωγικά στοιχεία που αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα μπορούμε να φτιάξουμε διατάξεις με τις οποίες θα μετατρέπουμε μια μορφή μιας ηλεκτρικής ενέργεια σε μια άλλη (πχ AC - DC). Αυτές οι διατάξεις, βάση της μετατροπής της οποίας πραγματοποιούν, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

**Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC - DC converters ή choppers):** Μπορούν να κάνουν έλεγχο του μεγέθους αλλά και της πολικότητας της εφαρμοζόμενης τάσης

**Αντιστροφείς (DC - AC inverters):** Μπορούν να μετατρέψουν μια συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη κάνοντας έλεγχο στο μέγεθος της τάσης, τη συχνότητα αλλά και τον αριθμών των φάσεων αυτής

**Ανορθωτές (AC - DC rectifiers):** Μπορούν να μετατρέψουν μια εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή

**Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (cycloconverters):** Μπορούν να μετατρέψουν μια εναλλασσόμενη τάση σε εναλλασσόμενη κάνοντας έλεγχο του μεγέθους της τάσης, της συχνότητας και του αριθμού των φάσεων αυτής

Η χρήση όλων των παραπάνω μας έχει εξυπηρετήσει τα τελευταία χρόνια και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά σύγχρονα συστήματα όπως:

- Συστήματα ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών
- Συστήματα μεταφοράς ενέργειας
- Συστήματα φωτοβολταϊκών κ.α.

### 3.3.1 Ανορθωτές AC-DC

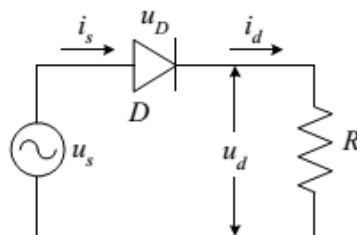
Σε αρκετές περιπτώσεις όπου το κύριο δίκτυο μας είναι εναλλασσόμενο και δεν υπάρχει άμεση τροφοδότηση συνεχούς τάσης χρησιμοποιούνται οι ανορθωτές εναλλασσόμενης τάσης. Αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος, σε φορτιστές συσσωρευτών καθώς και στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανορθωτές μπορούν να διακριθούν:

- **σύμφωνα με τον έλεγχο που υφίστανται:**
  - μη ελεγχόμενοι: το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου είναι σταθερό και εξαρτάται από την εναλλασσόμενη τάση εισόδου
  - ημιελεγχόμενοι : έχουν τη δυνατότητα να ελέγξουν το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου αλλά έχουν δυνατότητα λειτουργίας μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο
  - πλήρως ελεγχόμενοι: έχουν τη δυνατότητα να ελέγξουν το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου όπως και τη δυνατότητα να λειτουργούν και στα δύο τεταρτημόρια(λειτουργία και ως αντιστροφή)
- **με την τάση λειτουργία τους :** διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς
- **με το είδος της ανόρθωσης που πραγματοποιούν:** διακρίνονται σε ανορθωτές μισού κύματος (ημιανόρθωση) και ανορθωτές διπλού κύματος (πλήρης ανόρθωση)

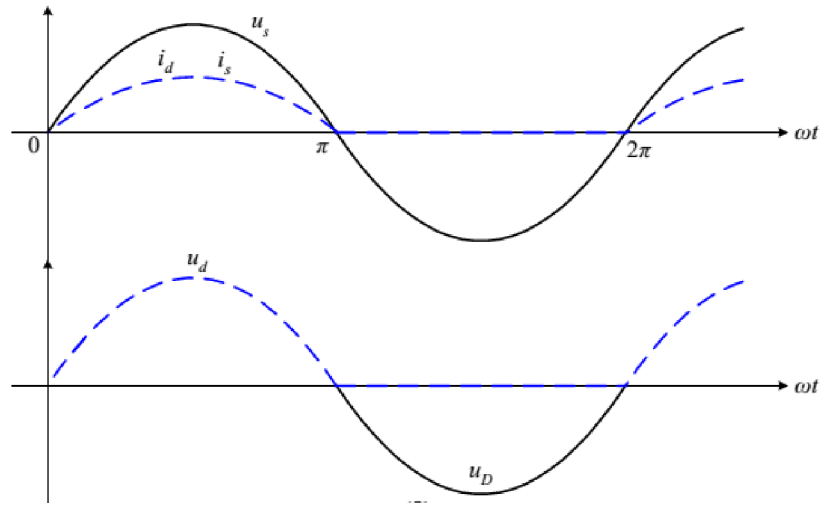
#### 3.3.1.1 Απλή ανόρθωση (μισού κύματος)

Πρόκειται για την απλούστερη διάταξη ενός τέτοιου είδους μετατροπέα. Η απλή ανόρθωση περιλαμβάνει μόνο ένα διακόπτη, ο οποίος μπορεί να είναι ελεγχόμενος ή μη (δίοδος ή SCR). Η απλή ανόρθωση εκμεταλλεύεται μόνο τη θετική ημιπερίοδο του ημιτονοειδούς σήματος για αυτό και άλλωστε καλείται μισού κύματος. Επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς το φορτίο όταν το σήμα είναι θετικό ενώ αποτρέπει την αντίστροφη φορά.

#### Ανόρθωση μισού κύματος διόδου με ωμικό φορτίο



Σχήμα 3.10 Διάταξη απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό φορτίο



**Σχήμα 3.11** Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό φορτίο

Η μέση τιμή της τάσης σε ένα τέτοιο ανορθωτή υπολογίζεται ([6]):

$$V_{do}^h = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{V_{sm}}{\pi} \quad (3.1)$$

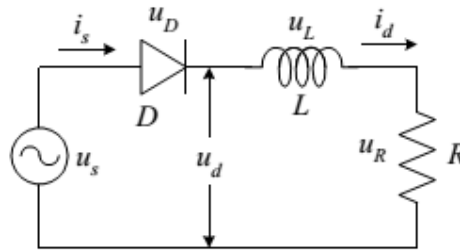
Η μέση τιμή του ρεύματος ([6]):

$$I_{so}^h = I_{do}^h = \frac{V_{do}^h}{R} \quad (3.2)$$

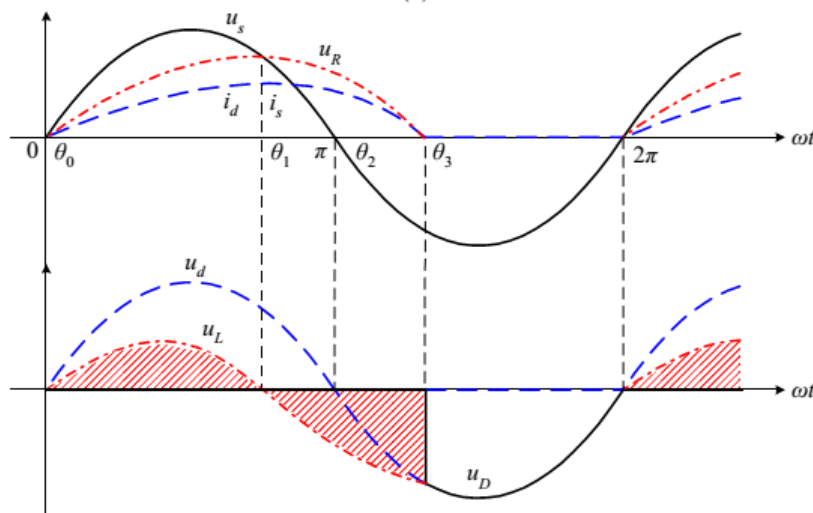
Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιηθεί θυρίστορ (SCR) στη θέση της διόδου, τότε μπορεί να γίνει και έλεγχος στο πλάτος της τάσης εξόδου η οποία ορίζεται βάση της γωνίας έναυσης  $\alpha$  ([6]):

$$V_{da}^h = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{V_{sm}}{\pi} \left[ \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right] = V_{do}^h \left[ \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right] \quad (3.3)$$

**Ανόρθωση μισού κύματος διόδου με ωμικό-επαγωγικό φορτίο**



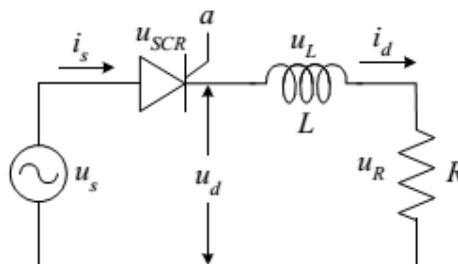
**Σχήμα 3.12** Διάταξη απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό-επαγωγικό φορτίο



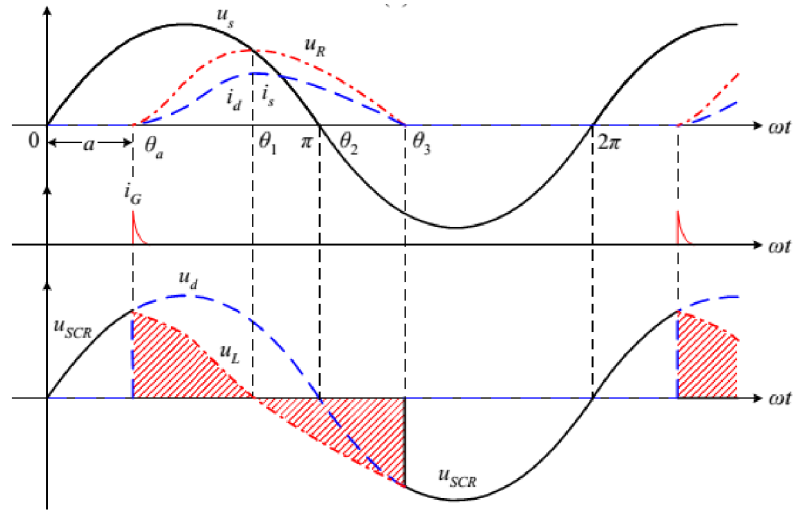
**Σχήμα 3.13** Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης με δίοδο και ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Παρατηρούμε σε αυτή τη διάταξη (σχήμα 3.12) ότι λόγω της προσθήκης του επαγωγικού φορτίου και της ενέργειας που αυτό αποθηκεύει, το ρεύμα συνεχίζει να άγει και μετά το διάστημα  $\pi$  (σχήμα 3.13). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση στο φορτίο να περιλαμβάνει και ένα αρνητικό τμήμα στο διάστημα  $\theta_2 - \theta_3$ .

**Ανόρθωση μισού κύματος SCR με ωμικό-επαγωγικό φορτίο**

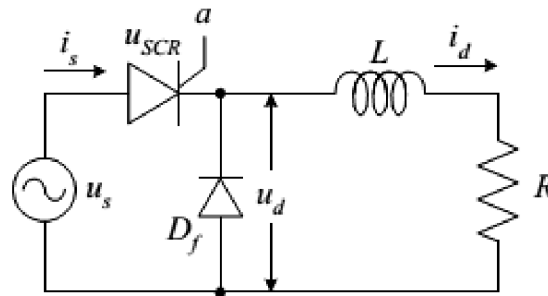


**Σχήμα 3.14** Διάταξη απλής ανόρθωσης με SCR και ωμικό-επαγωγικό φορτίο

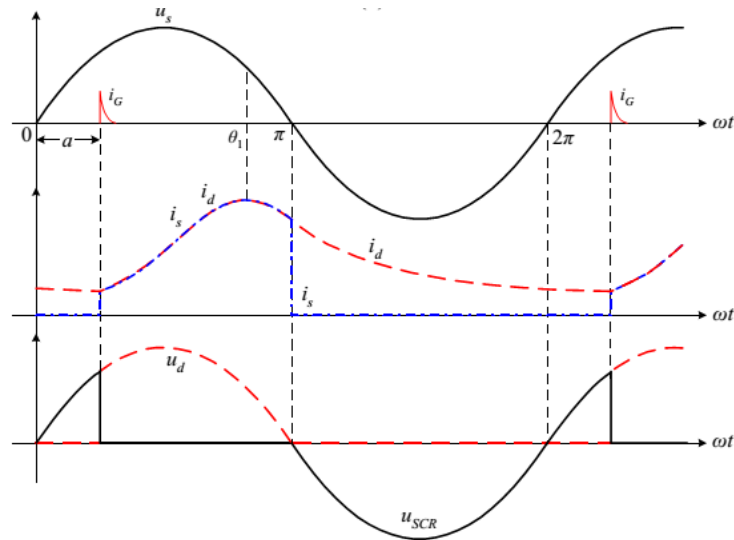


**Σχήμα 3.15** Κυματομορφές V-I απλής ανόρθωσης με SCR και ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Όταν η διόδος αντικατασταθεί από θυρίστορ (σχήμα 3.14), παρατηρούμε πως η γωνία έναυσης του καθυστερεί κατά μια γωνία  $\alpha$  (σχήμα 3.15). Κατά το διάστημα όπου η τάση γίνεται αρνητική ( $\theta_2 - \theta_3$ ) τότε έχουμε αναστροφή ισχύος από το φορτίο προς το δίκτυο. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί προσθέτοντας στο κύκλωμα μια **δίοδο ελευθέρως ροής**.



**Σχήμα 3.16** Διάταξη απλής ανόρθωσης SCR, δίοδο ελευθέρως ροής και ωμικό-επαγωγικό φορτίο



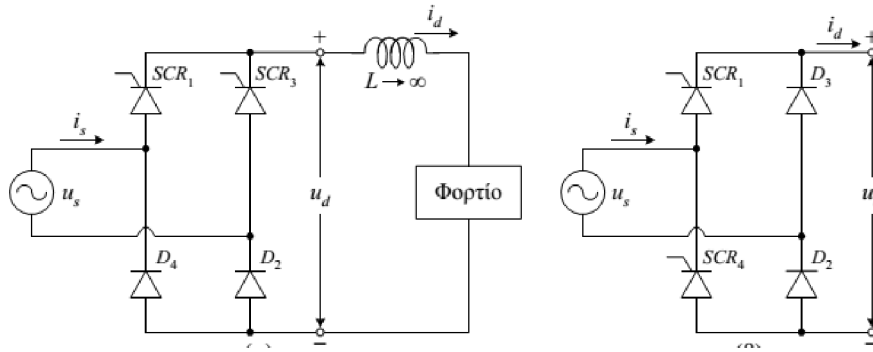
**Σχήμα 3.17** Κυματομορφές  $V-I$  απλής ανόρθωσης SCR, δίοδο ελευθέρως ροής και ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Η δίοδος ελευθέρως ροής (σχήμα 3.16) δεν αποτρέπει την επιστροφή της τάσης προς το δίκτυο, επανακυκλοφορεί την αποθηκευμένη ενέργεια προς το φορτίο και έχει ως αποτέλεσμα την εξομάλυνση του ρεύματος σε αυτό (σχήμα 3.17).

### 3.3.1.2 Ημιελεγχόμενη γέφυρα

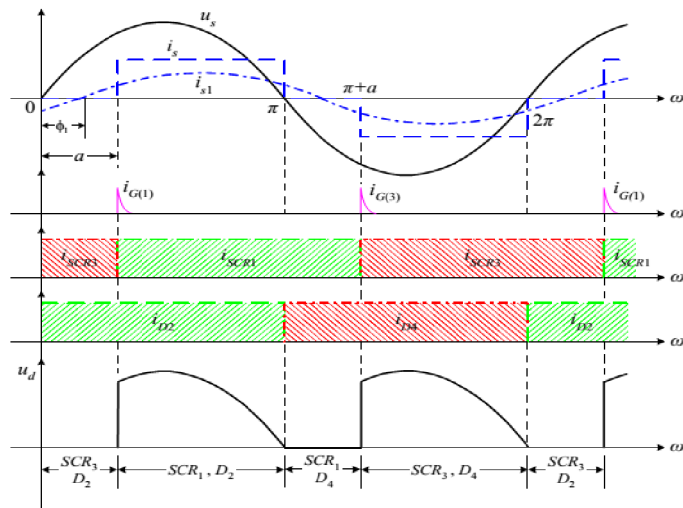
Σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε τις γέφυρες οι οποίες δεν είναι πλήρως ελεγχόμενες. Αυτή η διάταξη γέφυρας δε μπορεί να λειτουργήσει στο δεύτερο τεταρτημόριο λειτουργίας. Η γέφυρα αποτελείται από τέσσερα στοιχεία, δύο ελεγχόμενα (SCR στην προκειμένη περίπτωση) και δύο μη ελεγχόμενα (δίοδοι). Αναλόγως της θέσης των ελεγχόμενων αυτών στοιχείων η γέφυρα μπορεί να χωριστεί σε δύο υποκατηγορίες αναλόγως της τοπολογίας των θυρίστωρ σε συμμετρική ή ασύμμετρη (σχήμα 3.18). Οι ασύμμετρες ημιελεγχόμενες γέφυρες πλεονεκτούν έναντι των συμμετρικών διότι τα θυρίστωρ άγουν σε μικρότερα διαστήματα, οπότε το μέσο ρεύμα σε αυτά να είναι μικρότερο κάτι που σημαίνει ότι για ένα κύκλωμα ίδιας ισχύς μπορούν να χρησιμοποιηθούν θυρίστωρ μικρότερης ισχύος. Αυτού του είδους ανορθωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φορτία έως 15kW. Παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά στο πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας από τις πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες, παράγουν μεγαλύτερη μέση τάση στην έξοδό τους, για την ίδια γωνία έναυσης, ενώ παρουσιάζουν λιγότερες αρμονικές παραμορφώσεις στο ρεύμα εισόδου ([11]).





Σχήμα 3.18 Συμμετρική και ασύμμετρη ημieleγχόμενη γέφυρα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές εξόδου μιας τέτοιας γέφυρας.



Σχήμα 3.19 Κυματομορφές εξόδου ημieleγχόμενης γέφυρας

Η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο σε αυτή την περίπτωση είναι ([6]):

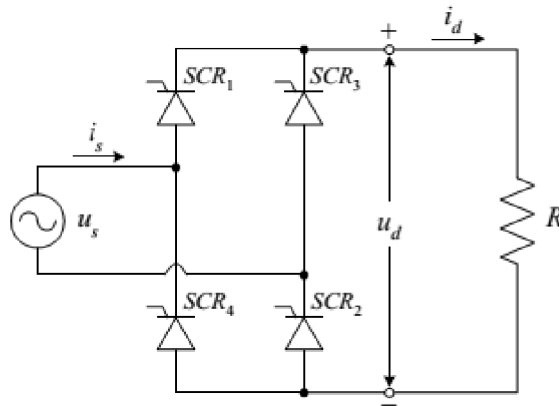
$$V_{da}^s = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{V_{sm}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \tag{3.4}$$

### 3.3.1.3 Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

Οι ανορθωτές γέφυρας είναι οι πιο διαδεδομένοι μετατροπείς της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε συνεχή τάση. Αυτού του τύπου οι ανορθωτές μπορούν να ελέγξουν το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου. Στην περίπτωση της πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας, αυτή αποτελείται από τέσσερα ελεγχόμενα στοιχεία θυρίστωρ. Έτσι αυτού του τύπου οι ανορθωτές μπορούν όχι μόνο να ελέγξουν το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου αλλά να λειτουργήσουν

και στο δεύτερο τεταρτημόριο λειτουργίας ως αντιστροφείς. Αυτού του είδους ανορθωτές μπορούν να ελέγξουν φορτία έως 15kW. Ακολουθεί ανάλυση της λειτουργίας μιας πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας, αποτελούμενη από SCR, με διαφορετικούς τύπους φορτίων. Για την απλοποίηση της ανάλυσης θεωρούμε αρχικά ότι το φορτίο του ανορθωτή είναι είτε καθαρά ωμικό ή περιλαμβάνει μια άπειρη επαγωγή εξομάλυνσης, ώστε το ρεύμα να είναι σταθερό.

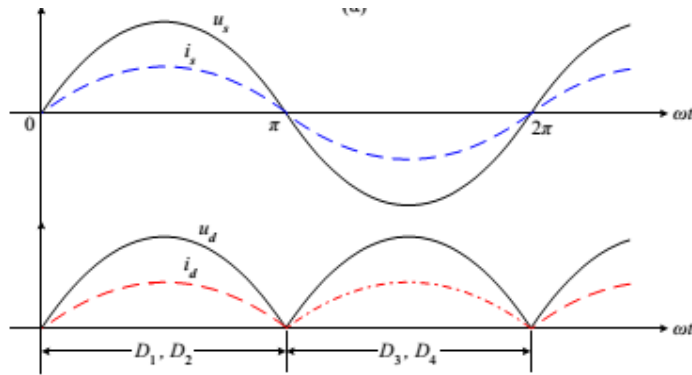
### *Ελεγχόμενη γέφυρα (ανορθωτής) SCR με ωμικό φορτίο*



**Σχήμα 3.20** Ανορθωτής γέφυρας SCR με ωμικό φορτίο

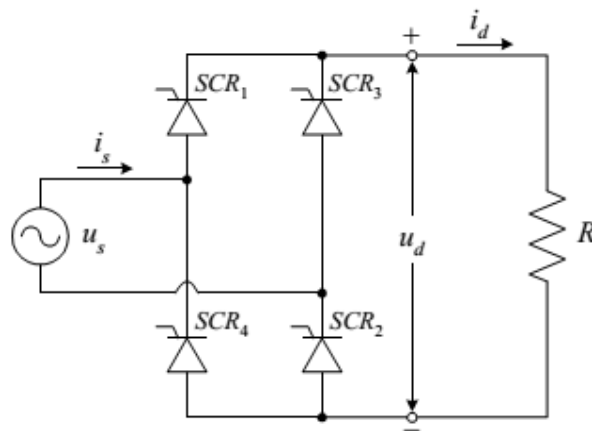
Σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε τη γέφυρα σε λειτουργία ανορθωτή με ωμικό φορτίο στην έξοδο (σχήμα 3.20). Κατά το πρώτο μισό της περιόδου, σκανδαλίζονται τα θυρίστορ  $SCR_1$  και  $SCR_2$ , ενώ κατά το δεύτερο μισό της περιόδου, όταν η τάση γίνεται αρνητική, σκανδαλίζονται τα θυρίστορ  $SCR_3$  και  $SCR_4$ . Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουμε να έχουμε πάντα θετική συνεχή τάση το φορτίο μας. Η μέση τιμή της τάσης αυτής ελέγχεται μέσω της γωνία έναυσης  $\alpha$  σκανδαλισμού των θυρίστορ και υπολογίζεται ([6]):

$$V_{da}^f = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_x t) d(\omega_x t) = \frac{V_{sm}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.21 Κυματομορφές τάσης-ρεύματος ανορθωτή γέφυρας SCR με ωμικό φορτίο

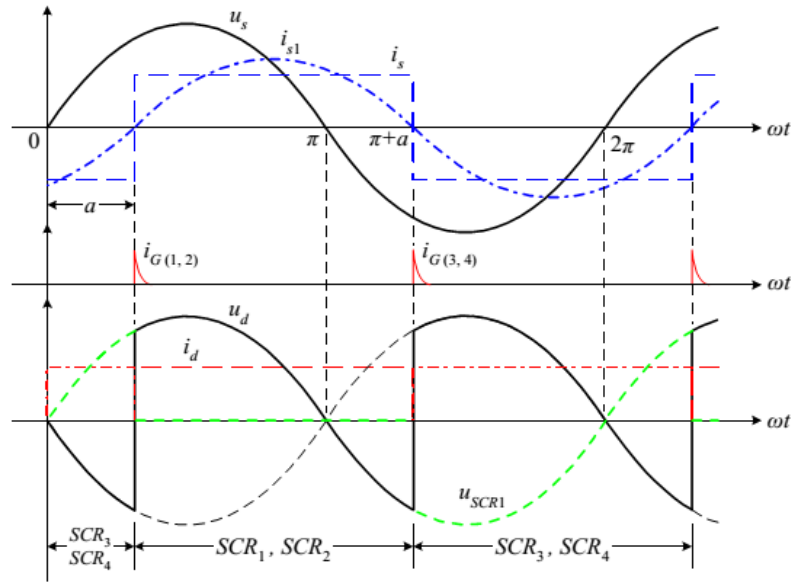
**Ελεγχόμενη γέφυρα SCR με άπειρη επαγωγή**



Σχήμα 3.22 Ανορθωτής γέφυρας SCR με άπειρη επαγωγή

Σε αυτή τη περίπτωση θεωρούμε ότι η μετάβαση των SCR γίνεται με καθυστέρηση, σε σχέση με τη φυσική τους μετάβαση, με γωνία  $\alpha$ . Λόγω της συνεχούς ροής του ρεύματος τα thyristor SCR<sub>1</sub> και SCR<sub>2</sub> άγουν στο διάστημα  $\alpha$  έως  $\pi + \alpha$  ενώ στο υπόλοιπο άγουν τα thyristor SCR<sub>3</sub> και SCR<sub>4</sub>. Η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο είναι ([6]):

$$V_{da}^f = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \alpha} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{2V_{sm}}{\pi} \cos \alpha = V_{do}^f \cos \alpha \tag{3.6}$$



**Σχήμα 3.23** Κυματομορφές τάσης-ρεύματος ανορθωτή γέφυρας SCR με άπειρη επαγωγή

Όταν η γωνία έναυσης  $\alpha$  υπερβεί τις  $90^\circ$ , η τάση  $V_{da}^f$  όπως και η μέση τιμή της ισχύος εξόδου  $P_d = V_{do}^f I_d \cos \alpha$ , λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Η αρνητική μέση ισχύς  $P_d$  σημαίνει ότι ο μετατροπέας μεταφέρει ισχύ από την έξοδο, προς την είσοδο. Επομένως, ο μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής για  $0 < \alpha < 90^\circ$ , και ως αντιστροφέας για  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ . Η ενεργός τιμή του ρεύματος  $i_s$ , το αρμονικό του περιεχόμενο, η ολική αρμονική παραμόρφωση καθώς ο συντελεστής ισχύος και οι σχέσεις ισχύων δίνονται παρακάτω ([6]):

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_s^2 d(\omega_s t)} = I_d \quad (3.7)$$

$$i_s = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_s t)_{k=0, 1, 2, \dots} \quad (3.8)$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} = \frac{\sqrt{I_d^2 - (2\sqrt{2}I_d/\pi)^2}}{2\sqrt{2}I_d/\pi} \quad (3.9)$$

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos a \quad (3.10)$$

$$P_s = V_s I_{s1} \cos \phi_1 = V_{da} I_d = \frac{2V_{sm}}{\pi} I_d \cos a \quad (3.11)$$

$$Q_1 = V_s I_{s1} \sin \phi_1 = \frac{2V_{sm}}{\pi} I_d \sin a \quad (3.12)$$

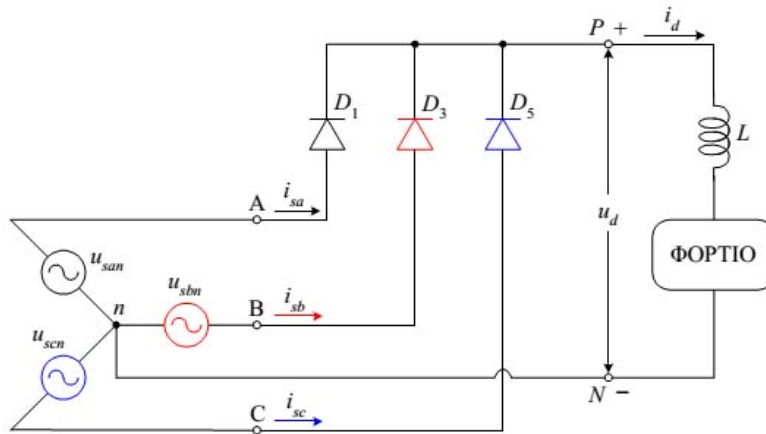
$$S_1 = V_s I_{s1} = \frac{2V_{sm}}{\pi} I_d = \sqrt{P_s^2 + Q_1^2} \quad (3.13)$$

$$S = V_s I_s = V_s I_d \quad (3.14)$$

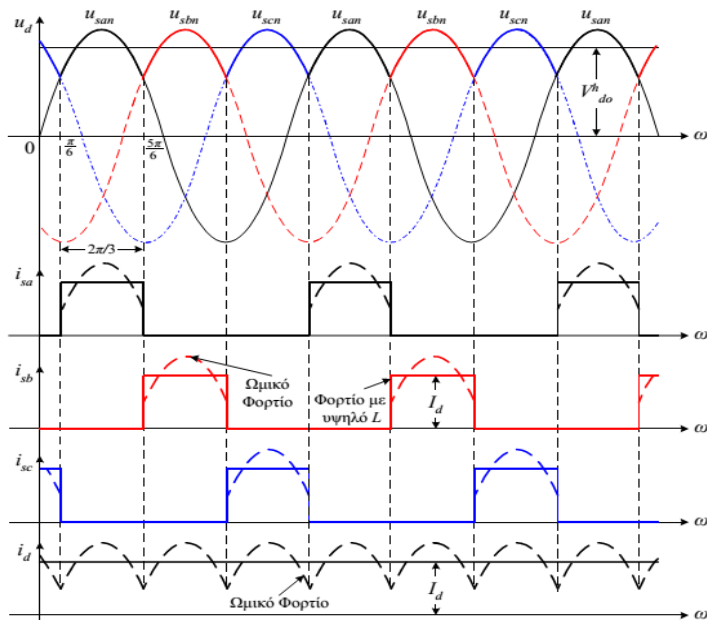
### 3.3.2 Τριφασικοί ανορθωτές

Εκτός από τους μονοφασικούς ανορθωτές που εξετάσαμε υπάρχουν και αντίστοιχοι τριφασικοί. Αυτοί μας εξυπηρετούν στην βιομηχανία, όπου η παροχή συνηθίζει να είναι τριφασική και έχουμε μεγαλύτερα φορτία ενώ πλεονεκτούν έναντι των μονοφασικών καθώς η παραμόρφωση του ρεύματος δικτύου, η κυμάτωση του ρεύματος αλλά και της τάσης στην DC μεριά του κυκλώματος είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των μονοφασικών μετατροπέων.

3.3.2.1 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με διόδους



Σχήμα 3.24 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με διόδους



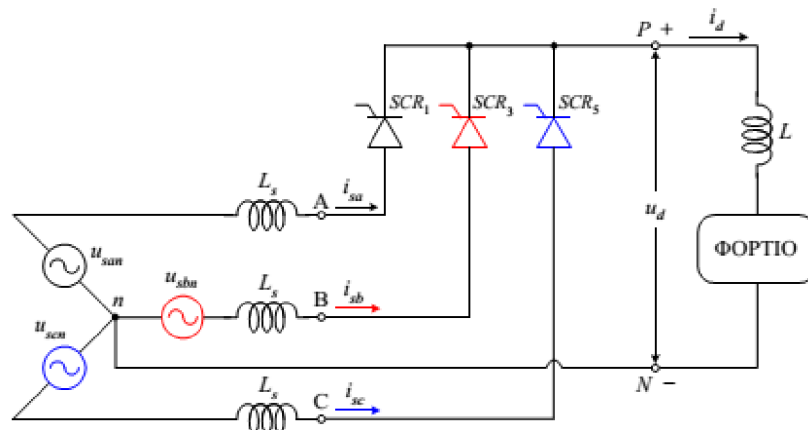
Σχήμα 3.25 Κυματομορφές τριφασικού μετατροπέα απλής ανόρθωσης με διόδους

Ο τριφασικός μετατροπέας με διόδους (σχήμα 3.24) δεν παρουσιάζει κάποια πρακτική εφαρμογή καθώς εισάγει στο δίκτυο τη συνεχή συνιστώσα του ρεύματος στο φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση κάθε διόδος άγει για διάστημα  $1/3$  της περιόδου (σχήμα 3.25). Σε κάθε χρονική στιγμή άγει η διόδος με τη θετικότερη τάση και το αποτέλεσμα είναι αυτό της παραπάνω κυματομορφής. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου ενός τέτοιου μετατροπέα είναι ([6]):

$$V_{do}^h = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_{phsm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{phsm} \tag{3.15}$$

όπου  $V_{phsm}$  είναι η τιμή κορυφής των φασικών τάσεων.

### 3.3.2.2 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με SCR



Σχήμα 3.26 Τριφασικός μετατροπέας απλής ανόρθωσης με SCR

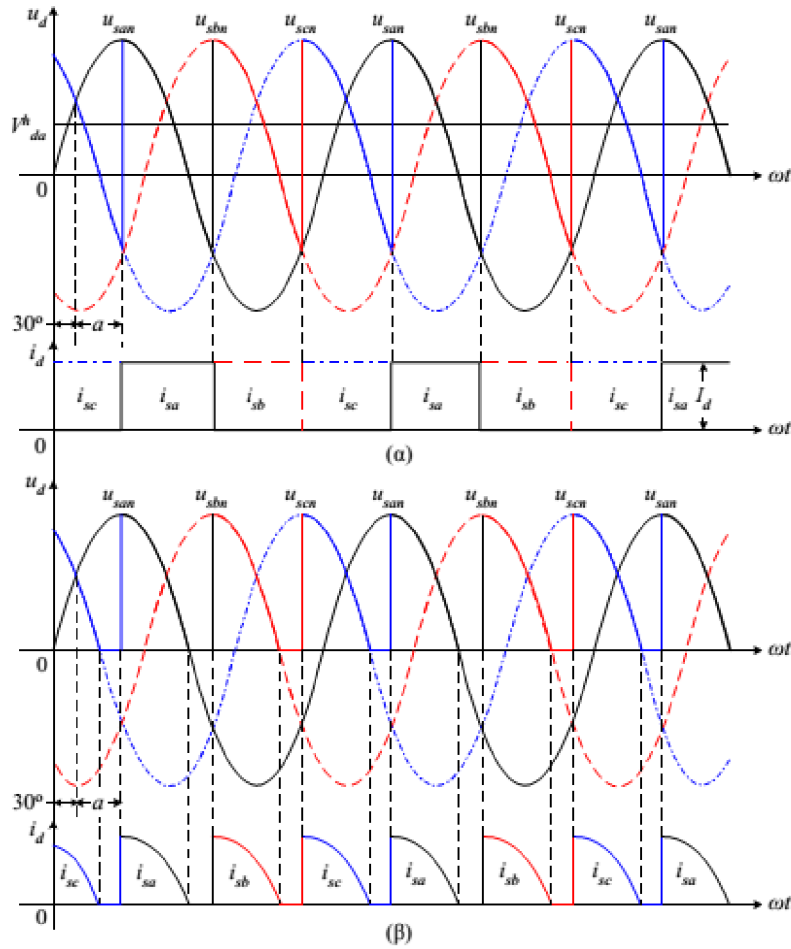
Αυτού του είδους ο μετατροπέας (σχήμα 3.26) χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να έχουμε έλεγχο της μέσης τάσης εξόδου στο κύκλωμά μας. Όταν ένα θυρίστορ αρχίζει να άγει τότε το ρεύμα του φορτίου μεταφέρεται άμεσα σε αυτό ενώ μια ανάστροφη τάση εφαρμόζεται στο ήδη άγον θυρίστορ οδηγώντας το στην αποκοπή. Ο μετατροπέας έχει συνεχή αγωγή του ρεύματος όταν το φορτίο είναι ισχυρά επαγωγικό ενώ παρουσιάζει ασυνεχή αγωγή όταν το φορτίο είναι ωμικό.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε συνεχή αγωγή είναι ([6]):

$$V_{da}^h = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6+a}^{5\pi/6+a} V_{phsm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{phsm} \cos a = V_{do}^h \cos a \tag{3.16}$$

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε ασυνεχή αγωγή είναι ([6]):

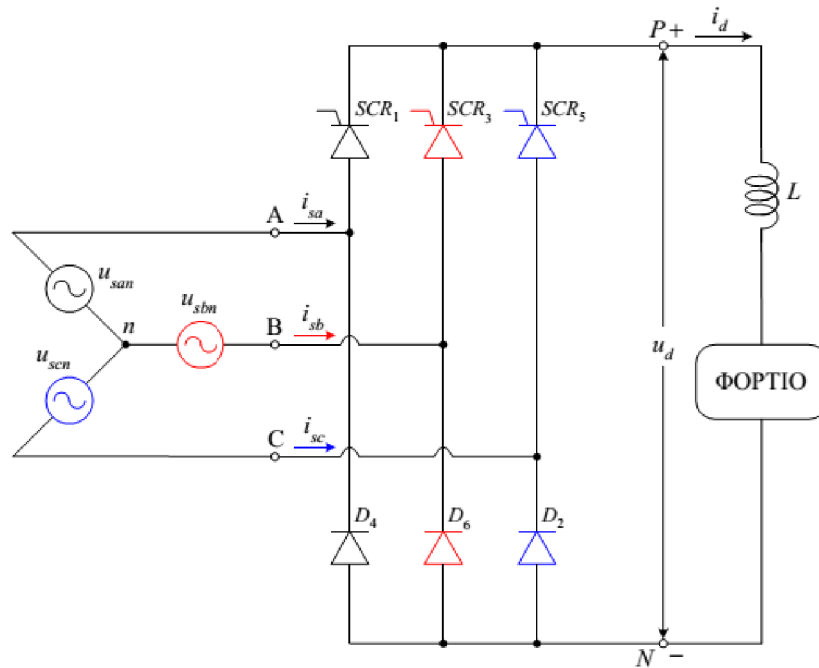
$$\begin{aligned}
 V_{do}^k &= \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6+a}^{\pi} V_{phsm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{3}{2\pi} V_{phsm} [1 + \cos(\pi/6 + a)] = \\
 &= V_{do}^k \frac{1 + \cos(\pi/6 + a)}{\sqrt{3}}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$



**Σχήμα 3.27** Κυματομορφές τριφασικού μετατροπέα με SCR α) επαγωγικό φορτίο β) ωμικό φορτίο



## 3.3.2.3 Τριφασικός μερικός ελεγχόμενος μετατροπέας γέφυρας



Σχήμα 3.28 Μερικός ελεγχόμενος τριφασικός μετατροπέας

Αυτός ο μετατροπέας (σχήμα 3.28) λειτουργεί ως ανορθωτής όταν η γωνία έναυσης είναι μικρότερη των  $90^\circ$  ενώ για γωνίες μεγαλύτερες των  $90^\circ$  λειτουργεί ως αντιστροφέας. Το κύκλωμά του αποτελείται από δύο τριφασικούς μετατροπείς απλής ανόρθωσης. Ο θετικός μετατροπέας είναι ελεγχόμενος ενώ ο αρνητικός μη ελεγχόμενος.

Η μέση τάση του αρνητικού μετατροπέα είναι ([6]):

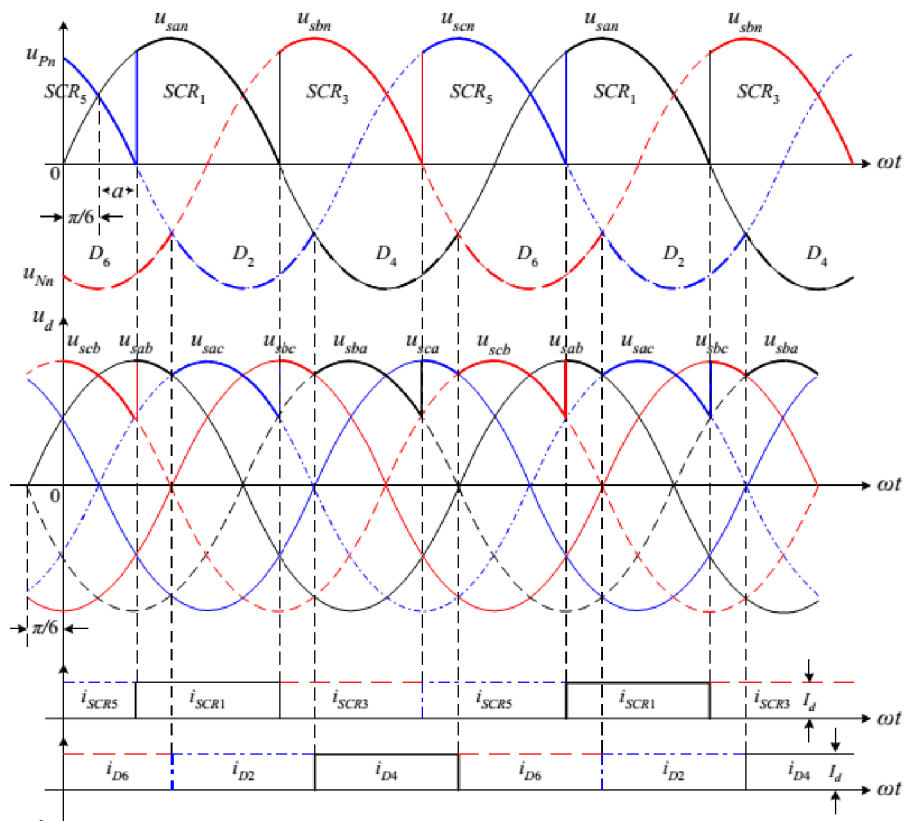
$$V_{do}^{Nn} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{phsm} \quad 3.18$$

Η μέση τάση του θετικού μετατροπέα είναι ([6]):

$$V_{da}^{Pn} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{phsm} \cos \alpha \quad 3.19$$

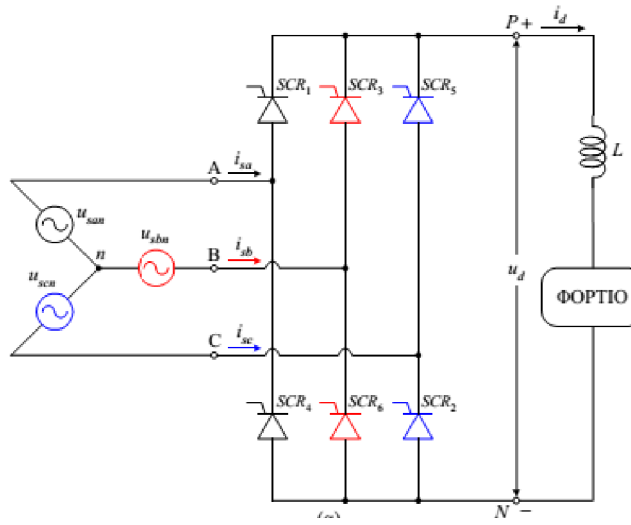
Το άθροισμα τους μας δίνει την τάση εξόδου του μετατροπέα ([6]):

$$V_{da}^{sb} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{phsm} (1 + \cos a) \tag{3.20}$$



Σχήμα 3.29 Κυματομορφές εξόδου μερικός ελεγχόμενου τριφασικού μετατροπέα ( $\alpha=30^\circ$ )

3.3.2.4 Τριφασικός πλήρης ελεγχόμενος μετατροπέας γέφυρας

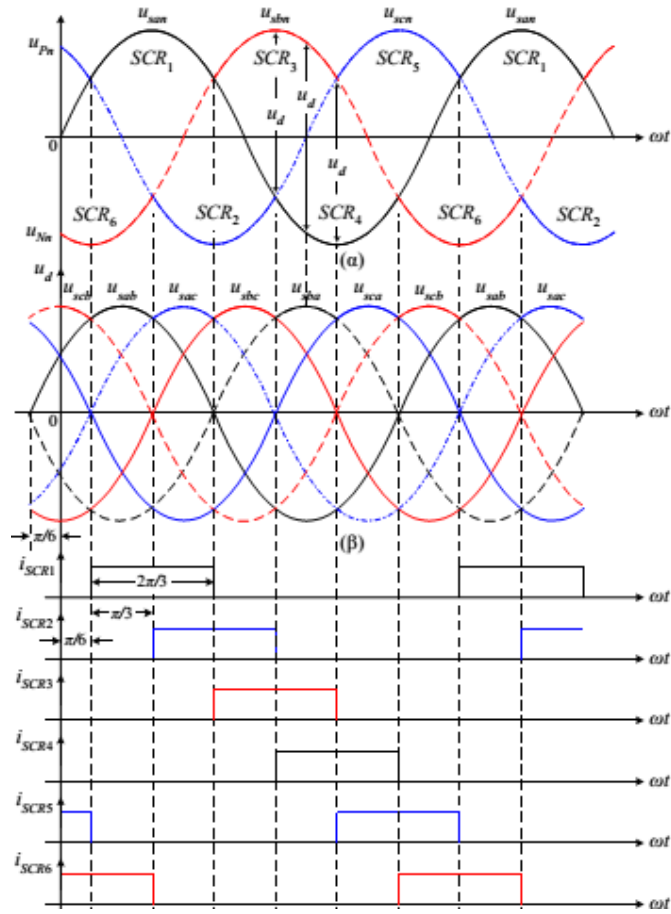


Σχήμα 3.30 Πλήρης ελεγχόμενος τριφασικός μετατροπέας

Σε αυτόν τον τριφασικό μετατροπέα (σχήμα 3.30) ελέγχουμε τόσο τον θετικό μετατροπέα όσο και τον αρνητικό. Αυτός ο μετατροπέας αποκαλείται και μετατροπέας έξι παλμών καθώς η τάση εξόδου του έχει κυμάτωση σε συχνότητα εξαπλάσια της συχνότητας του δικτύου. Η μέση τάση της εξόδου του τριφασικού μετατροπέα γέφυρας είναι διπλάσια από αυτή του απλού μετατροπέα και είναι ([6]):

$$V_{do}^f = 2V_{do}^h = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{phsm} = \frac{3}{\pi} V_{LLsm} \tag{3.21}$$

όπου  $V_{phsm}$  η τιμή κορυφής των φασικών τάσεων και  $V_{LLsm}$  η τιμή κορυφής των πολικών τάσεων



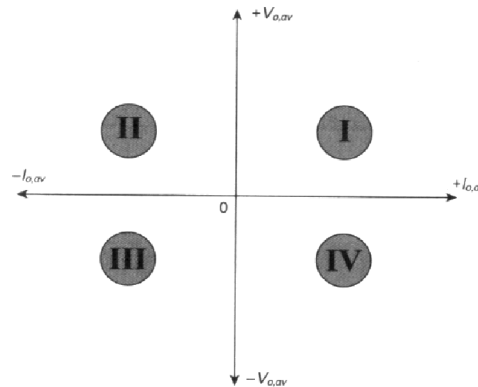
**Σχήμα 3.31** Κυματομορφές των φασικών τάσεων α) πολικών τάσεων με την τάση εξόδου β) των ρευμάτων

### 3.3.3 Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC)

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα της τάσης εξόδου ως προς την είσοδο, σε τρεις κατηγορίες:

- **Καταμητές υποβιβασμού:** σε αυτή την κατηγορία η τάση της εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη έως το πολύ ίση με την τάση εισόδου
- **Καταμητές ανύψωσης:** σε αυτή την κατηγορία η τάση της εξόδου μπορεί να είναι μεγαλύτερη έως το πολύ ίση με την τάση εισόδου
- **Καταμητές υποβιβασμού - ανύψωσης:** σε αυτή την κατηγορία η τάση της εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη ή και μεγαλύτερη από την τάση εισόδου

Επίσης οι μετατροπείς συνεχούς τάσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως του τεταρτημορίου λειτουργίας τους.



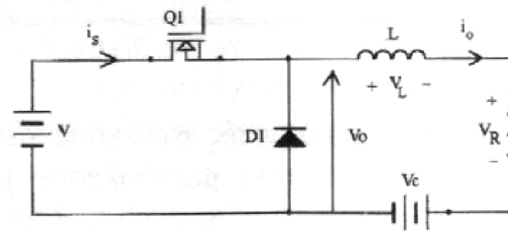
**Σχήμα 3.32** Τεταρτημόρια λειτουργίας

- **1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας:** η τάση είναι θετική και το ρεύμα στο φορτίο επίσης. Πρακτικά σε ένα κινητήρα αυτό σημαίνει θετική φορά περιστροφής.
- **2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας:** η τάση είναι θετική ενώ το ρεύμα είναι αρνητικό. Ο κινητήρας σε αυτή την περίπτωση συνεχίζει να περιστρέφεται σε θετική φορά όμως το ρεύμα γυρίζει προς την πηγή και λειτουργεί η αναγεννητική πέδηση.
- **3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας:** η τάση είναι αρνητική καθώς επίσης και το ρεύμα. Στον κινητήρα αυτό σημαίνει ανάστροφη περιστροφή.

- **4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας:** η τάση είναι αρνητική ενώ το ρεύμα θετικό. Ο κινητήρας κινείται ανάστροφα ενώ παράλληλα πραγματοποιείται αναγεννητική πέδηση.

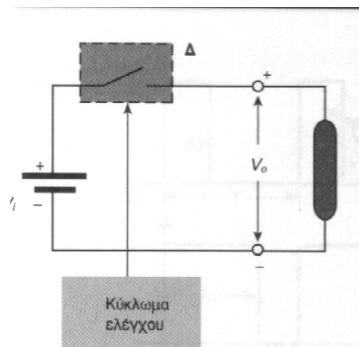
Αυτού του είδους οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται αρκετά στη σημερινή βιομηχανία, όπου υπάρχει παροχή συνεχούς τάσης. Παρουσιάζουν μεγάλη αποδοτικότητα και έχουν γρήγορη ανταπόκριση. Λόγω της μεγάλης συχνότητας λειτουργίας τους παρουσιάζουν μικρότερη κυμάτωση στην έξοδο τους. Αυτοί οι μετατροπείς επίσης καλούνται και **“Hard Switching”** λόγω της μεταβασης των ημιαγωγικών τους διακοπών υπό τάση και ρεύματος στα άκρα τους, κάτι που καταπονεί τους διακόπτες, επιφέρει απώλειες κατά την αγωγή-αποκοπή τους ενώ περιορίζει τη συχνότητα λειτουργίας τους έως 50kHz ([11]).

### 3.3.3.1 Καταμητής υποβιβασμού ενός τεταρτημορίου (One-Quadrant Chopper, 1Q)



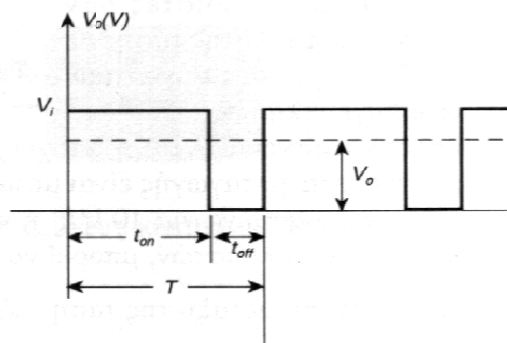
Σχήμα 3.33 Καταμητής υποβιβασμού ενός τεταρτημορίου

### Αρχή λειτουργίας



Σχήμα 3.34 Ισοδύναμο κύκλωμα DC-DC μετατροπέα ενός τεταρτημορίου

Παραπάνω βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ενός DC-DC μετατροπέα (σχήμα 3.34) ενός τεταρτημορίου. Μεταξύ του φορτίου και της πηγής βλέπουμε πως παρεμβάλλεται ένας διακόπτης ( $\Delta$ ). Στη θέση του διακόπτη ουσιαστικά θα τοποθετηθεί το ηλεκτρονικό στοιχείο εκείνο το οποίο είναι καταλληλότερο για τη χρησιμοποίηση και τις ανάγκες μας. Προτιμάται η χρήση των τρανζίστορ ισχύος (MOSFET, IGBT, GTO) καθώς αποφεύγονται τα κυκλώματα εξαναγκασμένης μεταγωγής που απαιτεί η χρήση των θυρίστορ. Το φορτίο παίζει σημαντικό ρόλο αν είναι ωμικό ή επαγωγικό και στην δεύτερη περίπτωση χρειάζεται να τοποθετηθεί μια δίοδος ελευθέρως ροής ώστε να αποφεύγονται οι υπερτάσεις αλλά και να επιτυγχάνεται η συνεχής αγωγή του ρεύματος. Σύμφωνα με το παραπάνω ισοδύναμο (σχήμα 3.34) ανοιγοκλείνοντας τον διακόπτη η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται σε ένα «τρένο» παλμών (σχήμα 3.35), δηλαδή σε μια μεταβαλλόμενη τάση με θετική μέση τιμή.



**Σχήμα 3.35** Χρόνοι αγωγής της τάσης

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, τότε η τάση εισόδου μεταφέρεται απευθείας στο φορτίο και αυτός είναι ο χρόνος αγωγής  $t_{on}$ . Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός τότε η τάση στο φορτίο είναι μηδενική και αυτός λέμε ότι είναι ο χρόνος διακοπής  $t_{off}$ . Το σύνολο των δύο αυτών χρόνων μας δίνει την περίοδο  $T$ . Ο λόγος του χρόνου αγωγής ( $t_{on}$ ) ως προς την περίοδο ( $T$ ) μας δίνει τον βαθμό χρησιμοποίησης  $\alpha$  ενώ αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την τάση εισόδου μας δίνει την μέση τάση εξόδου στο φορτίο. Από τα παραπάνω εύκολα συμπεραίνουμε πως μπορούμε να κάνουμε έλεγχο της τάσης εξόδου μεταβάλλοντας τον βαθμό χρησιμοποίησης ενώ αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

1. με σταθερή συχνότητα  $f$  και μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής  $t_{on}$ .
2. έχοντας σταθερούς του χρόνους αγωγής και διακοπής ( $t_{on}$ ,  $t_{off}$ ), μεταβάλλοντας την περίοδο  $T$  του παλμού.

Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα και δεν συνηθίζει να χρησιμοποιείται διότι:

- η συχνότητα πρέπει να μεταβάλλεται σε αρκετά μεγάλη κλίμακα και αυτό δυσκολεύει στη σχεδίαση των απαιτούμενων φίλτρων
- στις υψηλές συχνότητες παρουσιάζεται έντονη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση.

### Συνεχής αγωγή

Για την συνεχή αγωγή του ρεύματος έχουμε:

η μέση τιμή της τάσης εξόδου ([2]):

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{t_{on}} V_i \cdot dt + \int_{t_{on}}^T 0 \cdot dt \right] = \frac{t_{on}}{T} \cdot V_i = a \cdot V_i \quad (3.22)$$

ενεργό τιμή της τάσης ([2]):

$$V_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_a^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_i^2 dt} = \sqrt{\frac{t_{on}}{T}} \cdot V_i \quad (3.23)$$

η τάση εξόδου από την ανάλυση Fourier ([2])

$$V_a(t) = aV_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_i}{n\pi} [\sin 2n\pi\alpha \cos n\omega t + (1 - \cos 2n\pi\alpha) \sin n\omega t] \quad (3.24)$$

η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου ([2])

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} \quad (3.25)$$



η καταναλισκόμενη ισχύς ([2])

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) i_a(t) dt = I_{a,rms}^2 R_a + E_a I_a \quad (3.26)$$

### Ασυνεχής αγωγή

Για την ασυνεχή αγωγή του ρεύματος έχουμε:

η μέση τιμή της τάσης εξόδου ([2]):

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{t_{on}} V_i \cdot dt + \int_{t_{on}}^X 0 \cdot dt + \int_X^T E_a \cdot dt \right] \rightarrow \\ V_a &= \frac{1}{T} [t_{on} V_i + (T - X) E_a] = a V_i + \left(1 - \frac{X}{T}\right) E_a \end{aligned} \quad (3.27)$$

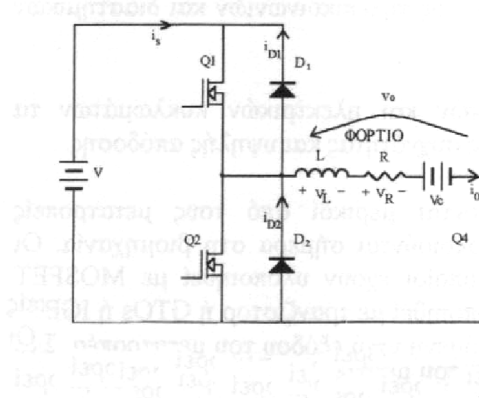
ενεργό τιμή της τάσης ([2]):

$$\begin{aligned} V_{a,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_a^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{t_{on}} V_i^2 dt + \int_X^T E_a^2 dt \right)} \rightarrow \\ V_{a,rms} &= \sqrt{a V_i^2 + \left(1 - \frac{X}{T}\right) E_a^2} \end{aligned} \quad (3.28)$$

η τάση εξόδου κατά Fourier ([2])

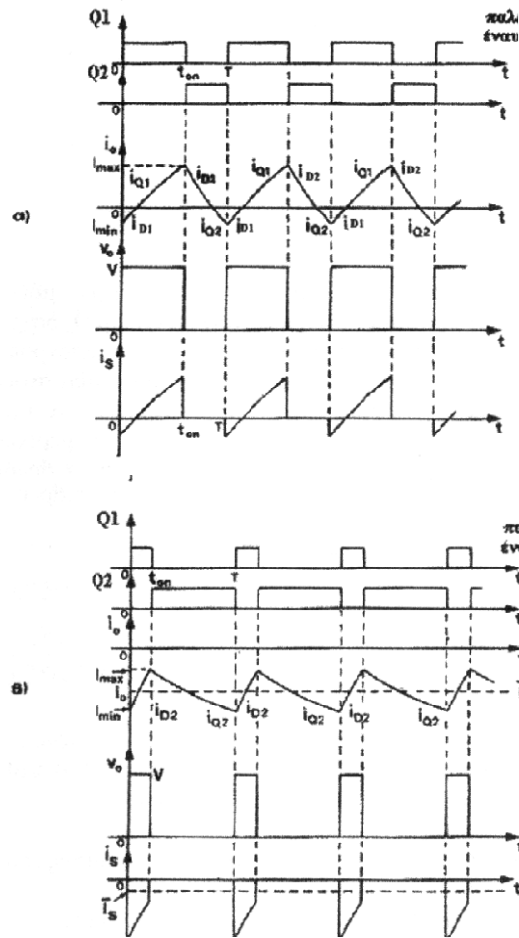
$$\begin{aligned} V_a(t) &= a V_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_i}{n\pi} [\sin 2n\pi a \cos n\omega t + (1 - \cos 2n\pi a) \sin n\omega t] - \\ &- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_a}{n\pi} [\sin n\omega X \cos n\omega t + (1 - \cos n\omega X) \sin n\omega t] \end{aligned} \quad (3.29)$$

### 3.3.3.2 Καταμητής δύο τεταρτημορίων (Two Quadrant Chopper, 2Q)



**Σχήμα 3.36** Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων

Η συνδεσμολογία του καταμητή 2 τεταρτημορίων εμφανίζεται παραπάνω (σχήμα 3.36). Σε αυτούς τους μετατροπείς υπάρχει πάντα μια πηγή συνεχούς τάσης στο φορτίο. Το κυριότερο χαρακτηριστικό αυτού του μετατροπέα είναι ότι ενώ η τάση εξόδου είναι πάντα θετική, το ρεύμα μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές, δηλαδή υπάρχει δυνατότητα της επιστροφής του ρεύματος προς την πηγή εισόδου. Κατά την πρώτη περίοδο λειτουργίας, όταν δηλαδή άγει το Q1 (το Q2 είναι ανοικτό και δεν άγει) βλέπουμε ότι το ρεύμα  $i_o$  είναι θετικό και επιστρέφει (κλείνει κύκλωμα) στην πηγή εισόδου. Όταν το Q1 σταματάει να άγει τότε το ρεύμα επανακυκλοφορεί στο φορτίο μέσω της D2. Κατά τη δεύτερη περίοδο λειτουργίας και όταν άγει το Q2 (ενώ το Q1 είναι ανοικτό και δεν άγει) τότε βλέπουμε ότι ρεύμα του φορτίου επιστρέφει μέσω του Q2 προς την πηγή του φορτίου. Όταν το Q2 σταματάει να άγει τότε το ρεύμα επιστρέφει προς την πηγή εισόδου μέσω της D1. Σημαντικό που πρέπει να θυμόμαστε είναι ότι τα Q1 και Q2 δουλεύουν πάντα αντιπαράλληλα και ποτέ ταυτόχρονα. Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα του μετατροπέα δύο τεταρτημορίων, ένα κατά τη λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο και ένα κατά τη λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο (σχήμα 3.37).

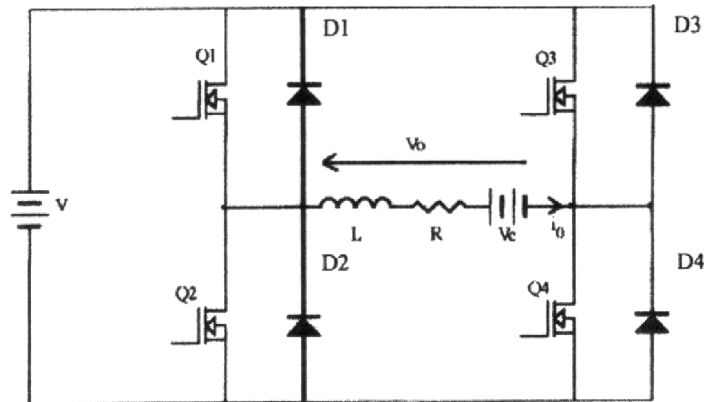


**Σχήμα 3.37** Παραδείγματα μετατροπέα δύο τεταρτημορίων: α) στο πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας β) στο δεύτερο τεταρτημόριο λειτουργίας

Η ανάλυση της τάσης και του ρεύματος αυτού του μετατροπέα είναι ίδια με αυτές που προκύπτουν στο μετατροπέα ενός τεταρτημορίου κατά τη συνεχή αγωγή, αφού στο μετατροπέα δύο τεταρτημορίων το ρεύμα δε μηδενίζει ποτέ λόγω της συνδεσμολογίας του. Η μόνη διαφορά με τον μετατροπέα ενός τεταρτημορίου είναι ότι οι μέγιστες τιμές του ρεύματος μπορεί να είναι τόσο θετικές όσο και αρνητικές.

### 3.3.3.3 Καταμητής (Chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων (Four-Quadrant Chopper, 4Q)

Η συνδεσμολογία του μετατροπέα 4 τεταρτημορίων εμφανίζεται παρακάτω (σχήμα 3.38). Ο συγκεκριμένος μετατροπέας, όπως ακριβώς προσδιορίζεται μπορεί να λειτουργήσει και στα 4 τεταρτημόρια λειτουργίας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η τάση και το ρεύμα μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική.



Σχήμα 3.38 Καταμητής (chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων

### Τεταρτημόρια λειτουργίας 4Q chopper

#### 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας

Σε αυτή την περίπτωση έχοντας τον Q4 κλειστό και ενεργοποιώντας τον Q1 (ενώ οι Q2 και Q3 παραμένουν ανοιχτοί) το ρεύμα κλείνει κύκλωμα στην πηγή εισόδου. Όταν απενεργοποιήσουμε τον Q1 τότε το ρεύμα επανακυκλοφορεί στην πηγή του φορτίου μέσω του Q4 και D2.

#### 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας

Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιούμε μόνο τον Q2 ενώ οι υπόλοιποι 3 (Q1,Q3,Q4) παραμένουν ανοιχτοί. Έτσι όταν ο Q2 είναι κλειστός αρνητικό ρεύμα θα αρχίσει να περνάει μέσα από το φορτίο. Όταν ο Q2 ανοίξει τότε το ρεύμα θα επιστρέψει προς την πηγή εισόδου μέσω των D1 και D4.

#### 3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας

Σε αυτή την περίπτωση ο Q1 και Q4 παραμένουν ανοιχτοί, ο Q2 θα παραμείνει κλειστός ενώ θα ενεργοποιείται ο Q3. Όταν κλείσουμε τον Q3 το ρεύμα και η τάση θα είναι αρνητική ως προς το φορτίο (θα έχει αντίθετη φορά).

#### 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας

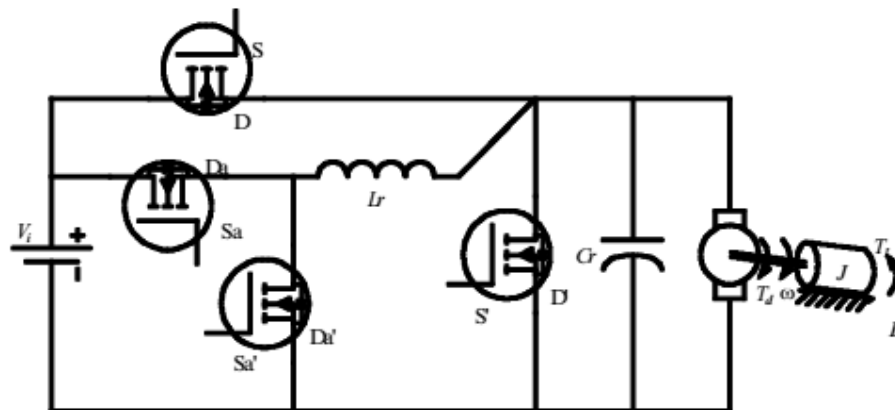
Σε αυτή την περίπτωση οι Q1, Q2 και Q3 παραμένουν ανοιχτοί ενώ ενεργοποιούμε τον Q4. Όταν ενεργοποιήσουμε τον Q4 θετικό ρεύμα θα περάσει μέσω του φορτίου. Όταν ο Q4 ανοίξει τότε το ρεύμα επιστρέφει προς την πηγή μέσω των D2 και D3. Η διαδικασία

βρίσκεται στο 4 τεταρτημόριο λειτουργίας αφού το ρεύμα είναι θετικό αλλά τάση στο φορτίο αρνητική.

### 3.3.4 Καταμητές (choppers) soft switching

Μια νέα γενιά καταμητών (chopper) κάνει εμφανή την παρουσία της τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται για καταμητές οι οποίοι παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες κατά τη μεταγωγή των διακοπών ισχύος. Η αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των κλασικών chopper με τη μόνη διαφορά ότι στα κυκλώματά τους προστίθενται ένα φίλτρο συντονισμού LC καθώς και κάποιοι βοηθητικοί διακόπτες, ώστε η μετάβαση των διακοπών ισχύος (IGBT, MOSFET κτλ) να γίνεται υπό συνθήκες μηδενικής τάσης (Zero Voltage Transition, ZVT) ή ρεύματος (Zero Current Transition, ZCT) με σκοπό την μείωση των απωλειών των διακοπών κατά τις συνεχείς μεταβάσεις.

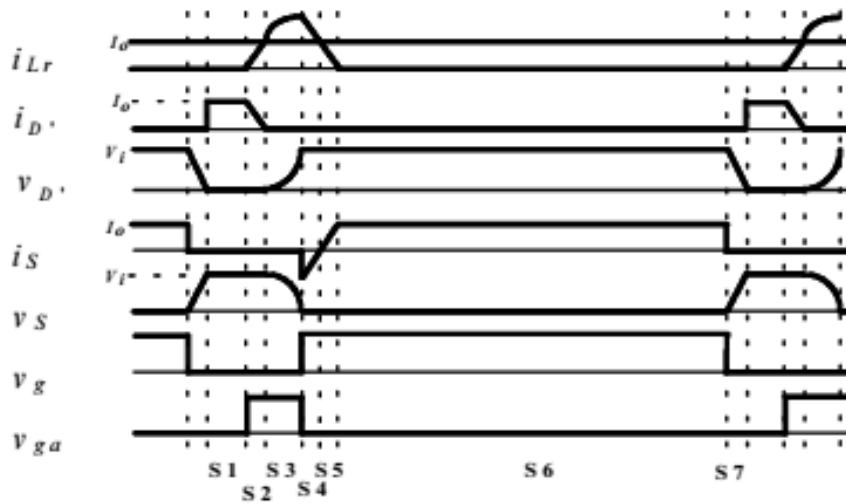
#### 3.3.4.1 Καταμητής 2Q ZVT



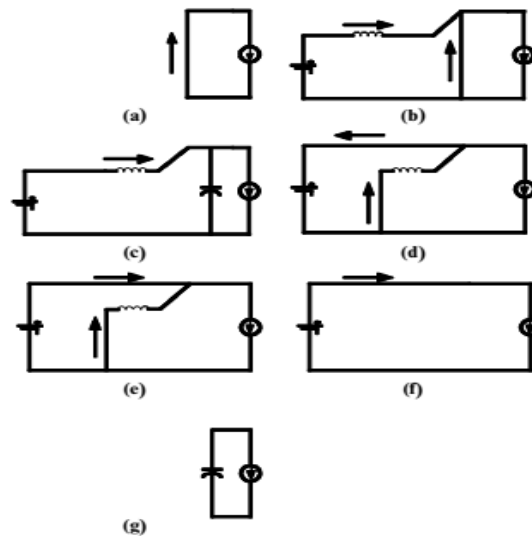
**Σχήμα 3.39** Καταμητής δύο τεταρτημορίων με μηδενική τάση κατά την μετάβαση των διακοπών (ZVT)

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας (σχήμα 3.39), με την προσθήκη δύο βοηθητικών διακοπών καθώς και του φίλτρου συντονισμού επιτυγχάνει την μετάβαση των κυρίων διακοπών S και S' υπό μηδενική τάση. Αυτή η συνθήκη λειτουργίας επιτρέπει στον παραπάνω μετατροπέα να λειτουργεί σε συχνότητες μεγαλύτερες των 100kHz ενώ συνιστάται για ημιαγωγικούς διακόπτες MOSFET οι οποίοι πάσχουν από σοβαρές χωρητικές απώλειες τάσης κατά τη μεταγωγή τους.

**Λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**



**Σχήμα 3.40** Κυματομορφές εξόδου καταμητή δύο τεταρτημορίων ZVT



**Σχήμα 3.41** Επιμέρους τοπολογίες κατά τη λειτουργία του ZVT

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, το κύκλωμα διαχωρίζεται σε 7 τοπολογίες (σχήμα 3.41), κατά τη λειτουργία ενός κύκλου, ώστε να επιτευχθεί η μετάβαση με μηδενική τάση στους κυρίως διακόπτες (σχήμα 3.40) ([7]).

- 1<sup>η</sup> φάση: στο φορτίο ανακυκλοφορεί το ρεύμα εξόδου μέσω της διόδου ελευθέρως ροής D'. Η διάρκεια αυτής της φάσης εξαρτάται από την ενεργοποίηση του βοηθητικού διακόπτη Sa

- 2<sup>η</sup> φάση: παλμοδοτείται ο βοηθητικός διακόπτης Sa και το ρεύμα στο πηνίο αυξάνει γραμμικά έως ότου του ρεύμα εξόδου να γίνει ίσο με αυτό. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{1-2} = \frac{I_o Lr}{V_i} \quad 3.22$$

- 3<sup>η</sup> φάση: η δίοδος D' παύει να άγει έτσι το κύκλωμα LC αρχίζει να συντονίζεται. Η φάση αυτή σταματάει όταν η τάση στα άκρα του πυκνωτή γίνει ίση με την τάση εισόδου. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{2-3} = \frac{\pi}{2\omega} \quad 3.23$$

- 4<sup>η</sup> φάση: ο βασικός διακόπτης S παλμοδοτείται και αρχίζει να άγει με συνθήκες μηδενικής τάσης ενώ ο βοηθητικός διακόπτης Sa παύει να άγει και η αποθηκευμένη ενέργεια ανακυκλοφορεί μέσω των διόδων D&Da'. Το ρεύμα στο πηνίο μειώνεται γραμμικά ενώ το ρεύμα στο διακόπτη μεταβαίνει από αρνητικό σε θετικό. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{3-4} = \frac{I_m Lr}{V_i} \quad 3.24$$

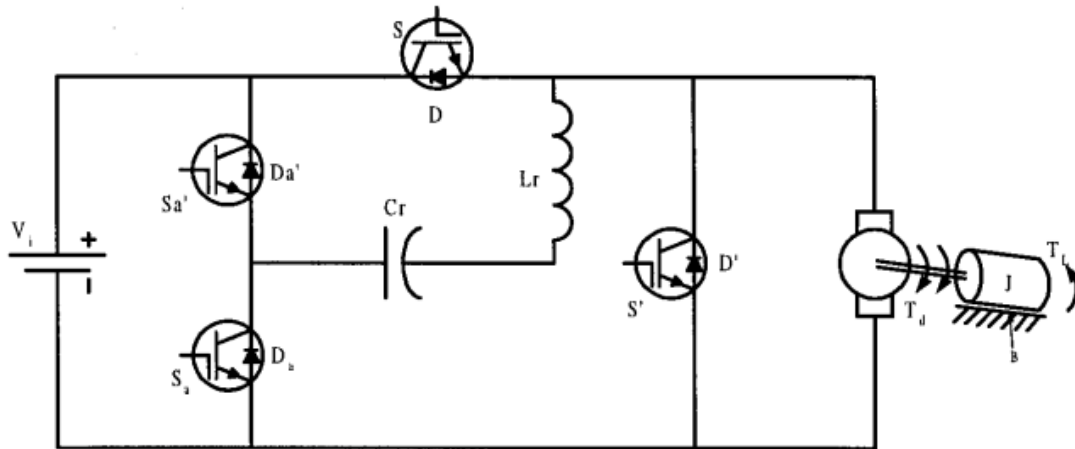
- 5<sup>η</sup> φάση: Το ρεύμα στο πηνίο συνεχίζει να μειώνεται έως ότου γίνει ίσο με το μηδέν. Η δίοδος Da' σταματάει να άγει. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{4-5} = \frac{I_o Lr}{V_i} \quad 3.25$$

- 6<sup>η</sup> φάση: ο κινητήρας δουλεύει στο πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας. Η διάρκεια αυτής της φάσης εξαρτάται από τον χρόνο αγωγής ( $t_{on}$ ) του κυρίως διακόπτη S.
- 7<sup>η</sup> φάση: ο βασικός διακόπτης σταματάει να άγει. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται γραμμικά και μόλις η τάση στα άκρα του γίνει μηδενική η δίοδος D' ξεκινά να άγει υπό συνθήκες μηδενικής τάσης. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{6-7} = \frac{V_i C r}{I_o} \quad 3.26$$

### 3.3.4.2 Καταμητής 2Q ZCT



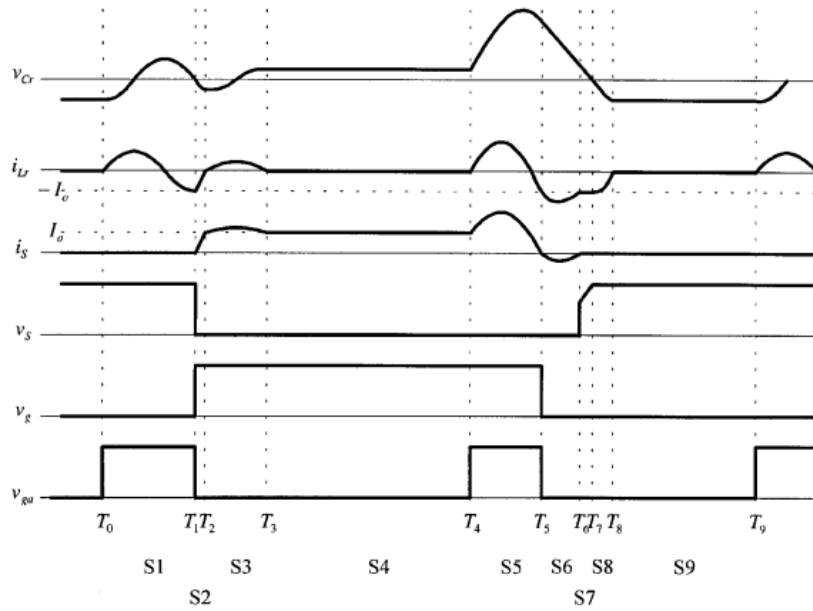
**Σχήμα 3.42** Καταμητής δύο τεταρτημορίων με μηδενικό ρεύμα κατά την μετάβαση των διακοπών (ZCT)

Ακολουθώντας την ίδια λογική του καταμητή με μετάβαση των διακοπών υπό μηδενική τάση, επαναπροσδιορίζοντας την θέση του φίλτρου συντονισμού επιτεύχθηκε ο συγκεκριμένος μετατροπέας (σχήμα 3.42) όπου αντί για μηδενική τάση επιτυγχάνουμε μηδενικό ρεύμα κατά τη μετάβαση όλων των διακοπών ισχύος. Πάλι έχουμε την παρουσία δύο βοηθητικών διακοπών ώστε η μετάβαση στους κύριους αλλά και στους βοηθητικούς διακόπτες να πραγματοποιείται υπό μηδενικό ρεύμα. Με αυτό το απλό και χαμηλού κόστους κύκλωμα έχουμε τις μικρότερες δυνατές απώλειες στους διακόπτες ενώ μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη διακοπτική συχνότητα, μεγάλη ισχύ και μεγάλο συντελεστή απόδοσης.

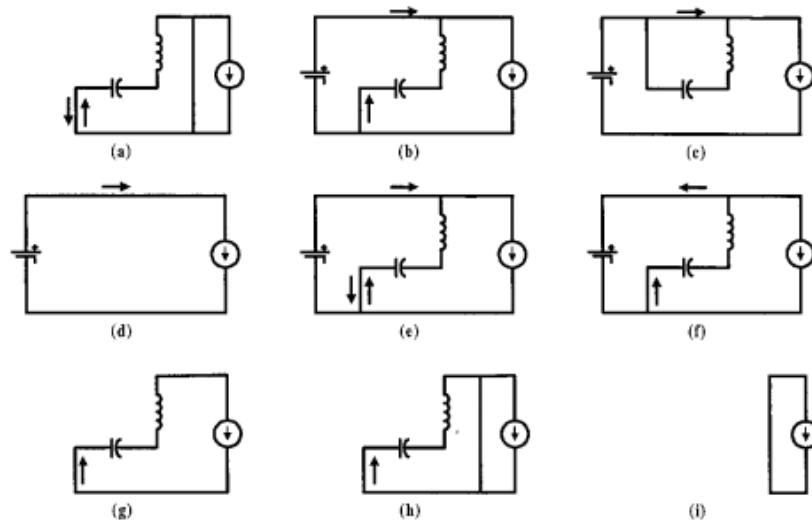
#### Λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.44, το κύκλωμα διακρίνεται σε 9 τοπολογίες ώστε να επιτευχθεί η μετάβαση με μηδενικό ρεύμα στους κυρίως διακόπτες (σχήμα 3.43) ([8]).





**Σχήμα 3.43** Κυματομορφές εξόδου καταμητή δύο τεταρτημορίων ZCT



**Σχήμα 3.44** Επιμέρους τοπολογίες κατά τη λειτουργία του καταμητή δύο τεταρτημορίων ZCT

- 1<sup>η</sup> φάση: Ο βοηθητικός διακόπτης Sa ενεργοποιείται με συνθήκες μηδενικού ρεύματος. Το φίλτρο L-C αρχίζει τον συντονισμό. Το ρεύμα του πηνίου αυξάνει από μηδέν έως ότου κορυφωθεί, μειώνεται έως ότου μηδενιστεί και μετά γίνεται αρνητικό. Η φάση αυτή ολοκληρώνεται όταν  $I_{Lr} = -I_O$  και σταματάει η αγωγή της διόδου D'. Η φάση αυτή ορίζεται:

$$T_{0-1} = \frac{3\pi}{2\omega} \quad 3.27$$

- 2<sup>η</sup> φάση: Ο βοηθητικός διακόπτης Sa απενεργοποιείται και ο κύριος διακόπτης S ενεργοποιείται, σε συνθήκες μηδενικού ρεύματος και για τους δύο αυτούς διακόπτες. Το ρεύμα του πηνίου αυξάνει έως ότου γίνει μηδέν όπου ολοκληρώνεται αυτή η φάση. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{1-2} = \frac{\tan^{-1} \lambda_m}{\omega} \quad 3.28$$

- 3<sup>η</sup> φάση: Από τη στιγμή που το ρεύμα του πηνίου γίνεται θετικό, η διάδος Da είναι απενεργοποιημένη ενώ η διάδος Da' ενεργοποιείται. Το φίλτρο L-C συνεχίζει το συντονισμό. Όταν το ρεύμα του πηνίου γίνει ξανά μηδέν η διάδος Da' σταματάει να άγει. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{2-3} = \frac{\pi}{\omega} \quad 3.29$$

- 4<sup>η</sup> φάση: Σε αυτή τη φάση έχουμε τη λειτουργία το κινητήρα στο πρώτο τεταρτημόριο. Η διάρκεια αυτής της φάσης είναι ελεγχόμενη από τον χρήστη και εξαρτάται από τον χρόνο αγωγής ( $t_{on}$ ) του κυρίως διακόπτη.
- 5<sup>η</sup> φάση: Ο βοηθητικός διακόπτης Sa ενεργοποιείται με συνθήκες μηδενικού ρεύματος. Το φίλτρο L-C αρχίζει τον συντονισμό. Το ρεύμα του πηνίου αυξάνει από μηδέν έως ότου κορυφωθεί, μειώνεται έως ότου μηδενιστεί και μετά γίνεται αρνητικό. Όταν  $I_{Lr} = -I_o$  ενεργοποιείται η διάδος Da. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{4-5} = \frac{\pi + \sin^{-1} \left[ \frac{I_o Z}{V_i - v_{Cr}(T_4)} \right]}{\omega} \quad 3.30$$

- 6<sup>η</sup> φάση: Ο κύριος διακόπτης S απενεργοποιείται με συνθήκες μηδενικού ρεύματος. Καθώς το ρεύμα του πηνίου συνεχίζει να μειώνεται το αρνητικό του πλεόνασμα ρέει μέσω της διάδου D. Όταν γίνει πάλι  $I_{Lr} = -I_o$  η διάδος D σταματάει να άγει. Ο χρόνος αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{5-6} = \frac{2}{\omega} \tan^{-1} \left[ \frac{v_{C_r}(T_5) - V_i}{I_o Z} \right] \quad 3.31$$

- 7<sup>η</sup> φάση: Καθώς το ρεύμα του πηνίου παραμένει  $I_L = -I_o$  η τάση στον πυκνωτή εκφορτίζεται γραμμικά προς το μηδέν και η φάση αυτή τελειώνει όταν η τάση του γίνει ίση με αυτό. Η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{6-7} = \frac{C_r}{I_o} v_{C_r}(T_6) \quad 3.32$$

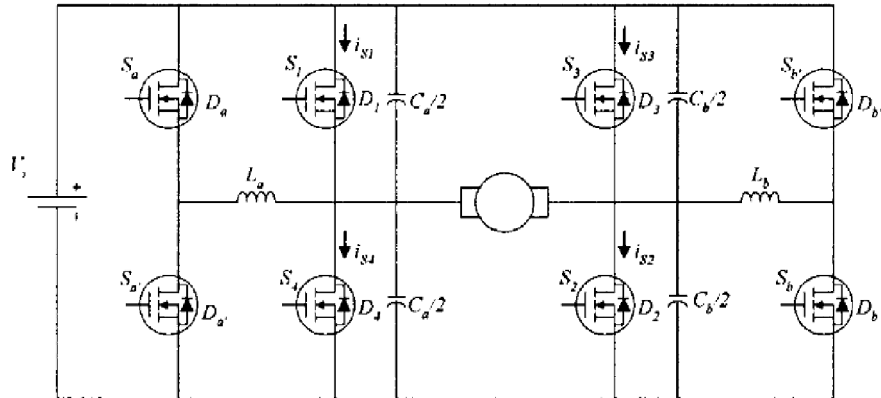
- 8<sup>η</sup> φάση: Η διόδος D' αρχίζει να άγει και το φίλτρο αρχίζει να συντονίζει ξανά. Η φάση σταματάει όταν το ρεύμα του πηνίου γίνει ίσο με το μηδέν και η διάρκεια αυτής της φάσης ορίζεται:

$$T_{7-8} = \frac{\pi}{2\omega} \quad 3.33$$

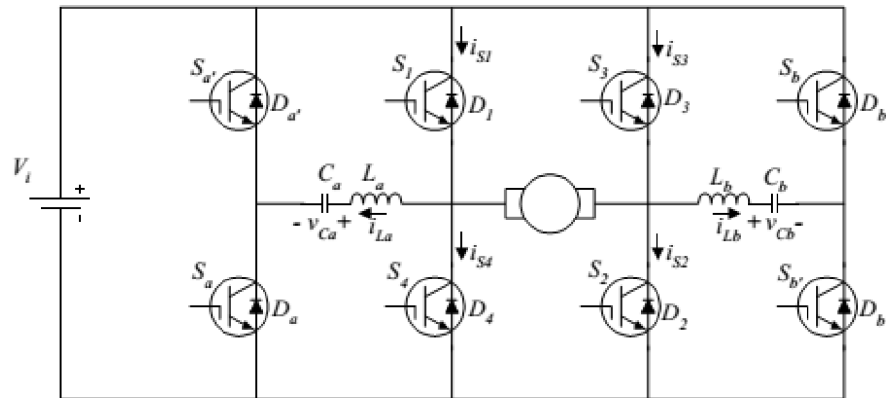
9<sup>η</sup> φάση: σε αυτή τη φάση του κυκλώματος η διόδος D' λειτουργεί ως διόδος ελευθέρως ροής.

#### 3.3.4.3 Καταμητής 4Q ZVT

Στην αντίστοιχη λογική των καταμητών 2 τεταρτημορίων μετάβασης υπό μηδενική τάση ή ρεύμα δημιουργήθηκαν αντίστοιχοι μετατροπείς τεσσάρων τεταρτημορίων. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται περισσότερα φίλτρα καθώς και οι διπλοί βοηθητικοί διακόπτες ώστε να επιτευχθεί η χαμηλών απωλειών μετάβαση των διακοπών. Οι δύο αυτοί μετατροπείς (σχήματα 3.45 – 3.46) έχουν σαν αποτέλεσμα τις δυνατότερες χαμηλές απώλειες κατά τη μετάβαση των διακοπών(κυρίων και βοηθητικών), την επίτευξη υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων, την επίτευξη μεγαλύτερης ισχύος καθώς και του μεγαλύτερου συντελεστή απόδοσης.



Σχήμα 3.45 Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων με μηδενική τάση κατά την μετάβαση των διακοπών

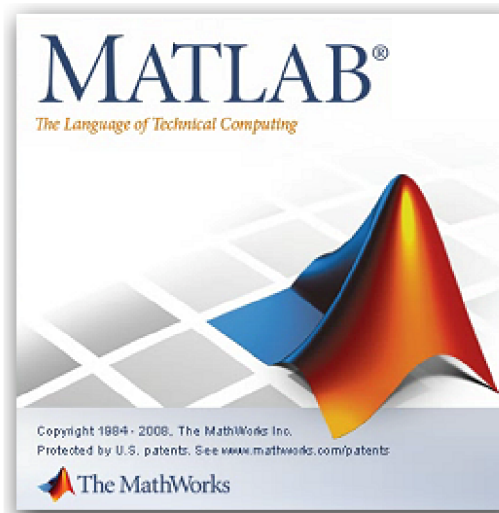


Σχήμα 3.46 Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων με μηδενικό ρεύμα κατά την μετάβαση των διακοπών

## 4<sup>Ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ MATLAB”

#### 4.1 Matlab - Simulink



Σχήμα 4.1 Λογισμικό Matlab

Το λογισμικό **Matlab** παίρνει την ονομασία του από τις λέξεις **MATrix** & **LABoratory**. Είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και για κατασκευή γραφημάτων, αλλά παρέχει κι επίσης δυνατότητες προγραμματισμού, κάτι που το καθιστά πολύ δυνατό εργαλείο. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως επίλυση γραμμικών συστημάτων, εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων κλπ. Επίσης επιλύει μη γραμμικά συστήματα, προβλήματα με διαφορικές εξισώσεις κλπ.

Το λογισμικό **Simulink** είναι επέκταση του ίδιου λογισμικού Matlab. Το Simulink προσομοιώνει και μοντελοποιεί διάφορα συστήματα(φυσικά, ηλεκτρικά κα) .Έχει εύκολο γραφικό περιβάλλον κάτι που το καθιστά εύκολο στη χρήση του και μπορεί να το χρησιμοποιήσει κάποιος ο οποίος δεν είναι απαραίτητα γνώστης του λογισμικού Matlab. Πάνω σε αυτό το λογισμικό (Simulink) θα προσομοιώσουμε τα διάφορα ηλεκτρικά - ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

## 4.2 Ανάλυση και προσομοίωση κυκλωμάτων

Για την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όπως ήδη προαναφέρθηκε, έγινε χρήση του λογισμικού Simulink. Σε αυτό προσομοιώνονται τα συστήματα τα οποία αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Για την ανάπτυξη του θέματος, θα παρουσιαστούν τα κυκλώματα με δύο διαφορετικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τα εξής στοιχεία:

### **Κινητήρας M1:**

Κινητήρας παράλληλης διέγερσης, συνεχούς ρεύματος, ονομαστικής τάσης 240V και ονομαστικής ισχύος 5HP ( $\approx 3,8\text{KW}$ ).

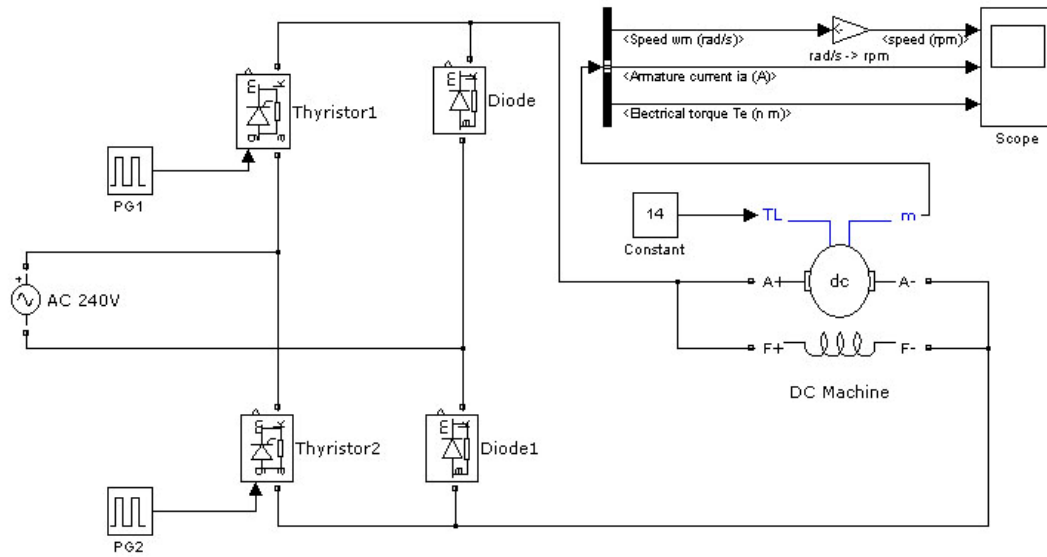
### **Κινητήρας M2:**

Κινητήρας διέγερσης σειράς, συνεχούς ρεύματος, ονομαστικής τάσης 500V και ονομαστικής ισχύος 800KW

Τα κυκλώματα DC-DC μετατροπέων (chopper) που θα παρουσιαστούν, πραγματοποιούνται με την χρήση ημιαγωγικών διακοπών **IGBT's** σε συχνότητα **1KHz**. Τα κυκλώματα των κλασικών AC-DC μετατροπέων που θα παρουσιαστούν, πραγματοποιούνται με την χρήση ημιαγωγικών διακοπών **Θυρίστρορ** σε συχνότητα **50Hz**.

Για την επίλυση των παραπάνω επιλέχτηκε προσομοίωση με **Solver Fixed-Step, Discrete** με χρόνο δείγματος στα  $1^{-5}\text{sec}$ . Για την πραγματοποίηση των γραφικών παραστάσεων έγινε χρήση του λογισμικού Microsoft Office **Excel**, αφού πρώτα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξάχθηκαν προς αυτό. Όλες οι κυματομορφές και οι αναλύσεις που ακολουθούν αφορούν το σύστημα, όταν αυτό έχει επέλθει στην **μόνιμη** του κατάσταση.

### 4.2.1 Ημιελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης

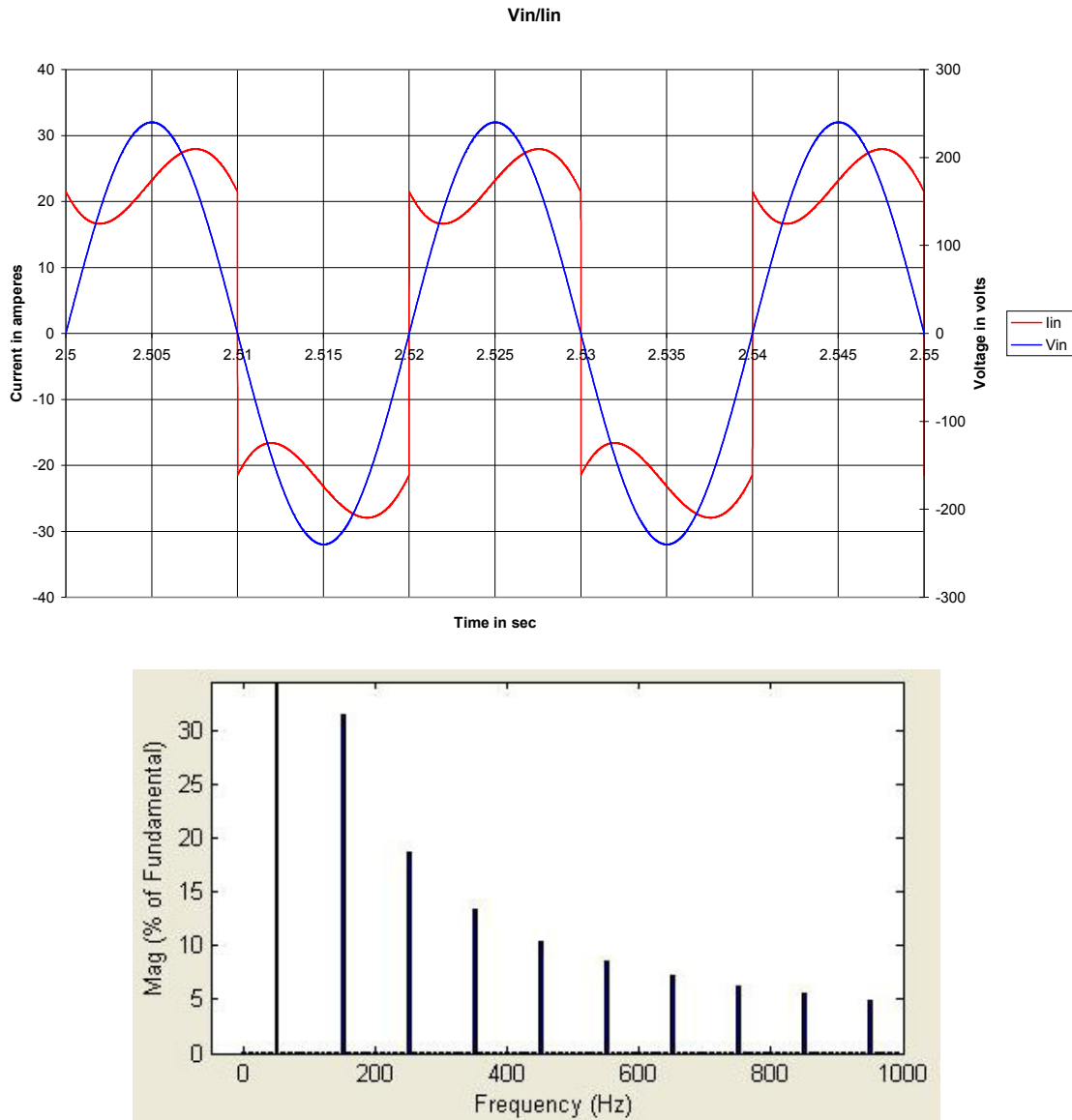


**Σχήμα 4.2** Διάγραμμα ημιελεγχόμενης γέφυρας ανόρθωσης

Πραγματοποιήσαμε στο Simulink το διάγραμμα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Έχουμε σχηματίσει μια γέφυρα μερικός ελεγχόμενη από δύο Thyristor και δύο διόδους τα οποία άγουν σε ζεύγη. Ελέγχοντας το εύρος του παλμού καθώς και τον χρόνο έναυσης αυτού στις παλμογεννήτριες ορίζουμε τη γωνία έναυσης των Thyristor. Από την τιμή Constant στην είσοδο TL του κινητήρα ορίσαμε το φορτίο στον κινητήρα. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις στην είσοδο και έξοδο του κυκλώματος, στα άκρα των ημιαγωγικών διακοπών, στον κινητήρα καθώς και ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου-εξόδου και τάσεως εξόδου.

**Ημιελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 50%**

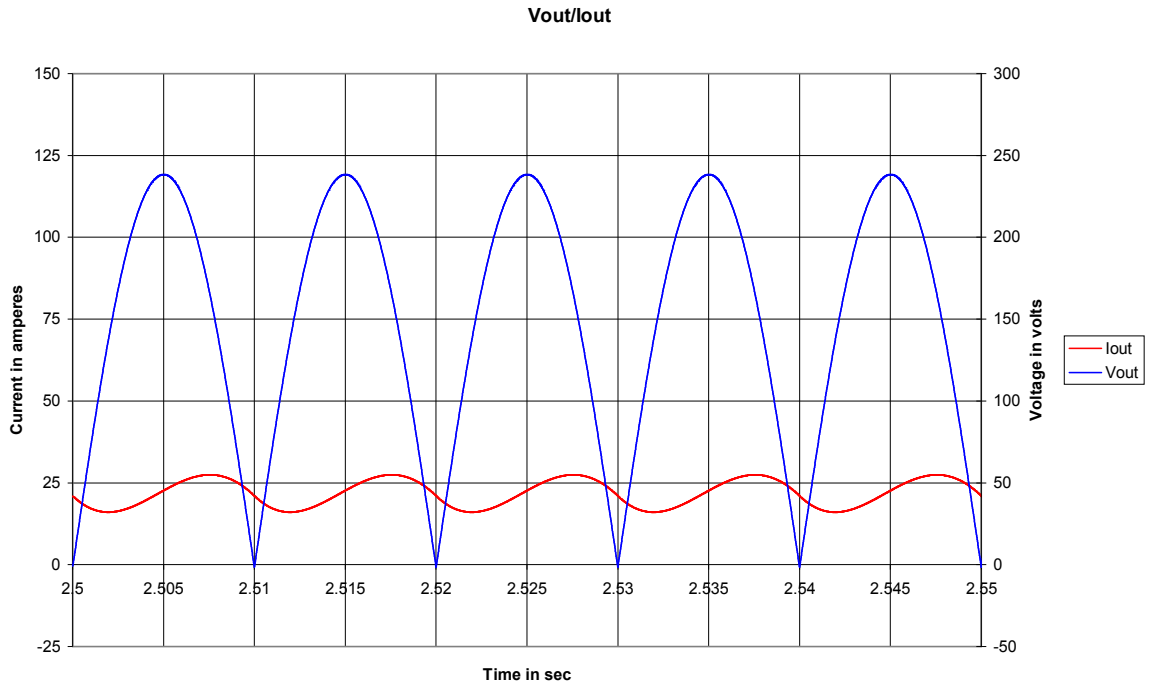
Με γωνία έναυσης  $\alpha^\circ$  και φορτίο ίσο με τον 50% του ονομαστικού του κινητήρα πραγματοποιήσαμε την προσομοίωση και πήραμε τα αποτελέσματα.



**Σχήμα 4.3** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50%

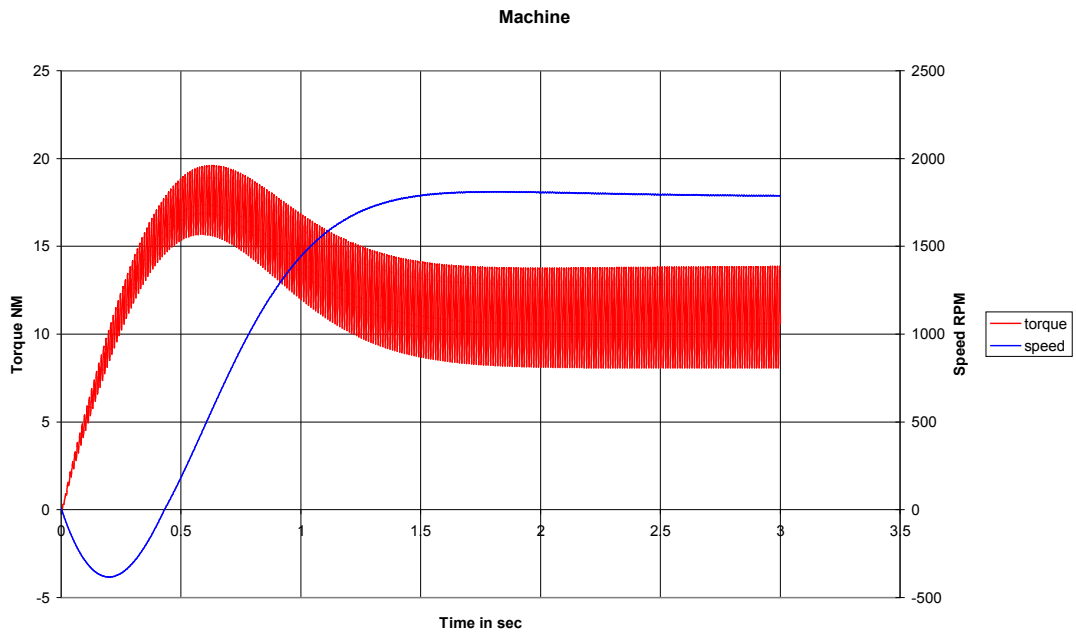
Στα παραπάνω σχήματα φαίνονται τα σήματα εισόδου της τάσης και του ρεύματος και η ανάλυση FFT που μας δείχνει τις αρμονικές συνιστώσες σε αυτό. Η τάση εισόδου είναι 240V εναλασσόμενη με συχνότητα 50HZ.





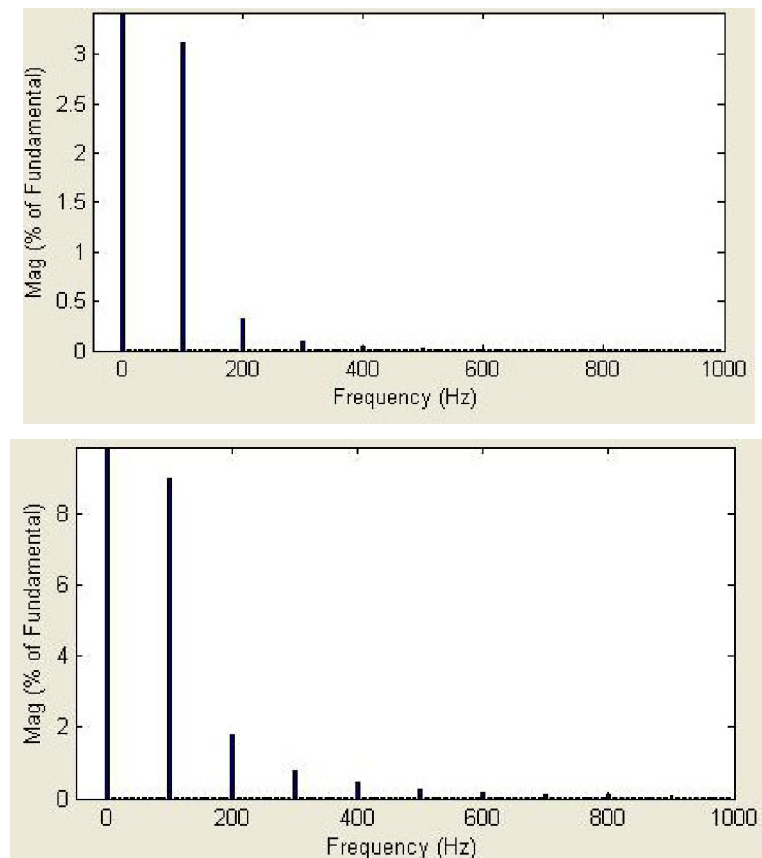
**Σχήμα 4.4** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50%

Παρατηρούμε την ανόρθωση της τάσης που επήλθε στην αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Παρατηρούμε πως το ρεύμα βρίσκεται σε συνεχή αγωγή ενώ παρουσιάζει μια κυμάτωση η οποία οφείλεται στο ημιτονικό σήμα της τάσης.



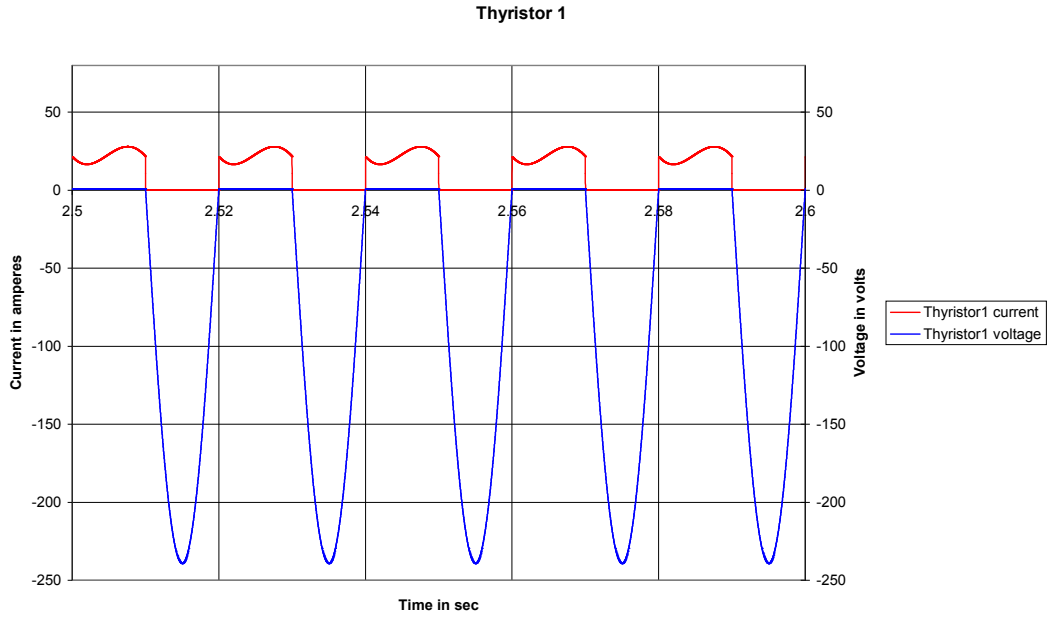
**Σχήμα 4.5** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=0$ , load 50%

Παρατηρούμε πως υπάρχει μεγάλη ταλάντωση στη ροπή του κινητήρα και αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην κυμάτωση της τάσης και του ρεύματος. Οι στροφές είναι χαμηλότερες από τις αναμενόμενες των ονομαστικών του κινητήρα και είναι λογικό αφού η μέση τιμή της τάσης είναι χαμηλότερη από την τάση λειτουργίας του κινητήρα. Στο κύκλωμά μας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί καθόλου φίλτρα εξομάλυνσης της τάσης. Οι αρνητικές τιμές των στροφών στην αρχή της προσομοίωσης οφείλεται στην μη ύπαρξη κάποιου εκκινήτη στο κύκλωμα μας.

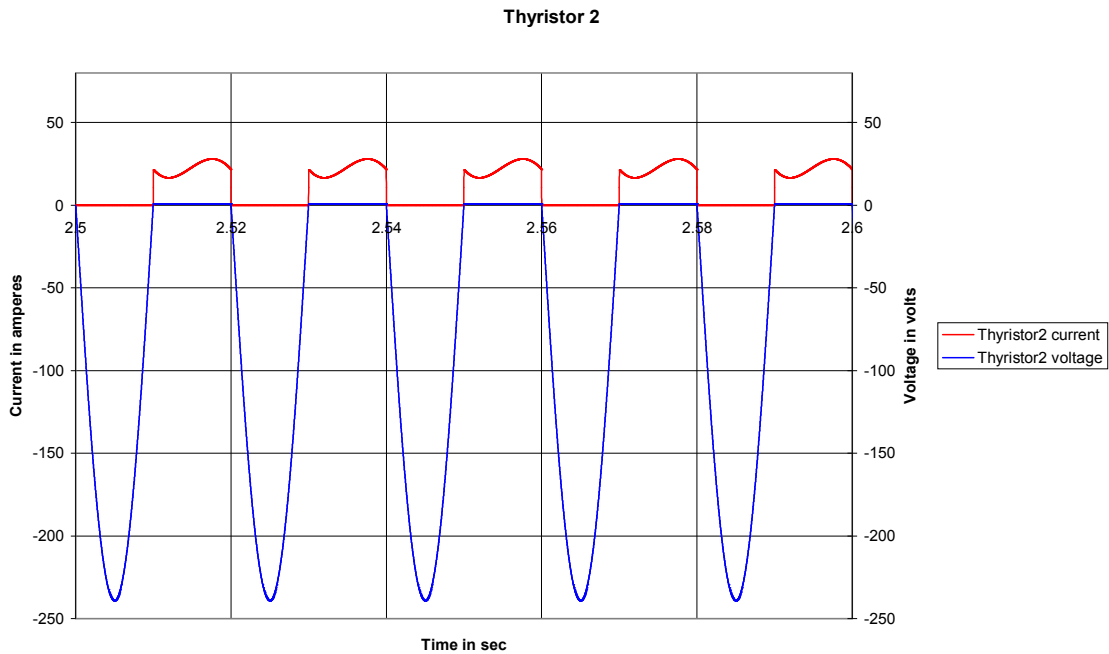


**Σχήμα 4.6** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50%

Από τις αναλύσεις FFT στα σήματα εξόδου μπορούμε να παρατηρήσουμε την μείωση των αρμονικών σε σχέση με το σήμα εισόδου καθώς ο κινητήρας(πηγίο) επενεργεί ως φίλτρο στο κύκλωμα εξόδου.



**Σχήμα 4.7** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 50%

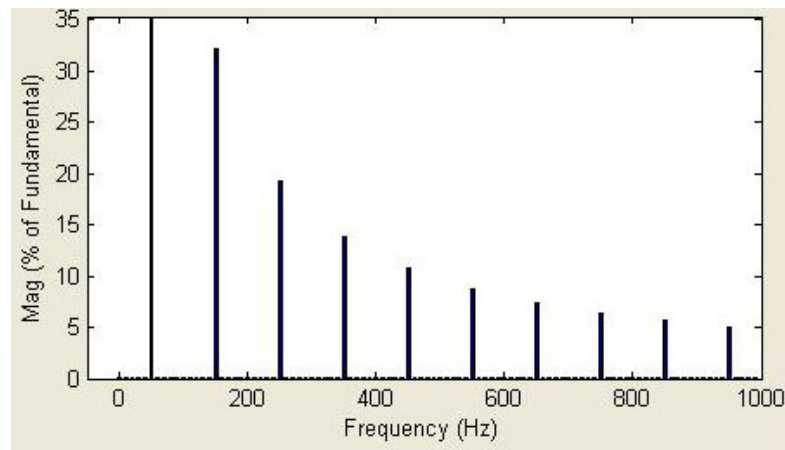
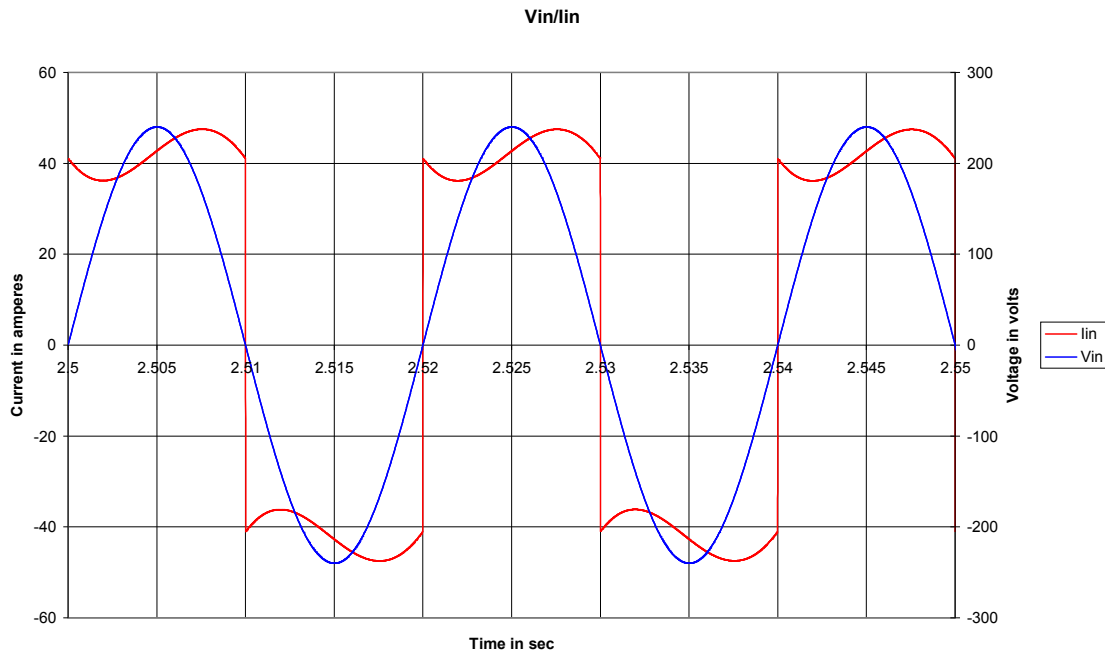


**Σχήμα 4.8** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 50%

Από τις παραπάνω κυματομορφές μπορούμε να διακρίνουμε τους χρόνους αγωγής των Thyristor καθώς και σε ποια ημιπερίοδο άγει το καθένα από αυτά.

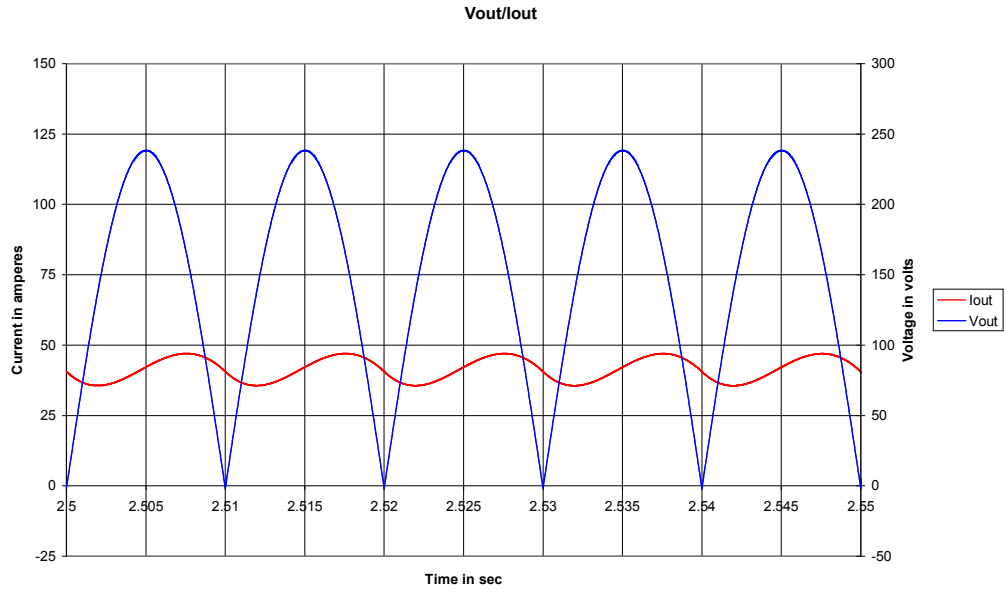
**Ημιαλεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 100%**

Μεταβάλλουμε το φορτίο ώστε αυτό να είναι ίσο με το 100% του ονομαστικού φορτίου του κινητήρα. Πραγματοποιήσαμε την προσομοίωση και πήραμε τα αποτελέσματα.



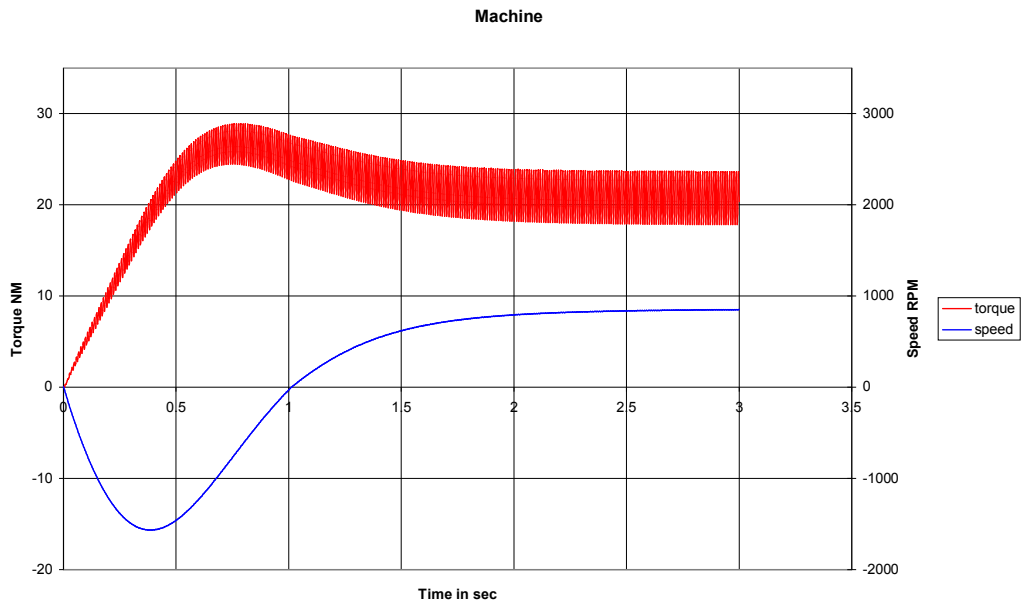
**Σχήμα 4.9** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100%

Παρατηρούμε την αύξηση του ρεύματος λόγω της αύξησης του φορτίου στον κινητήρα.



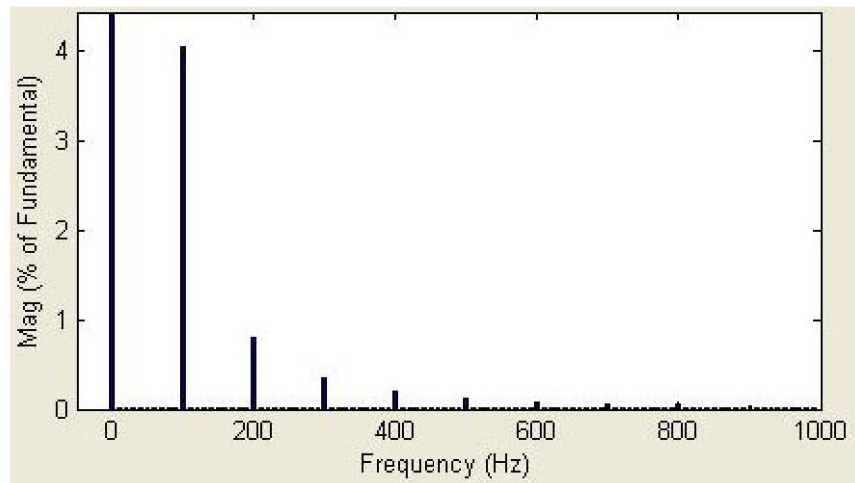
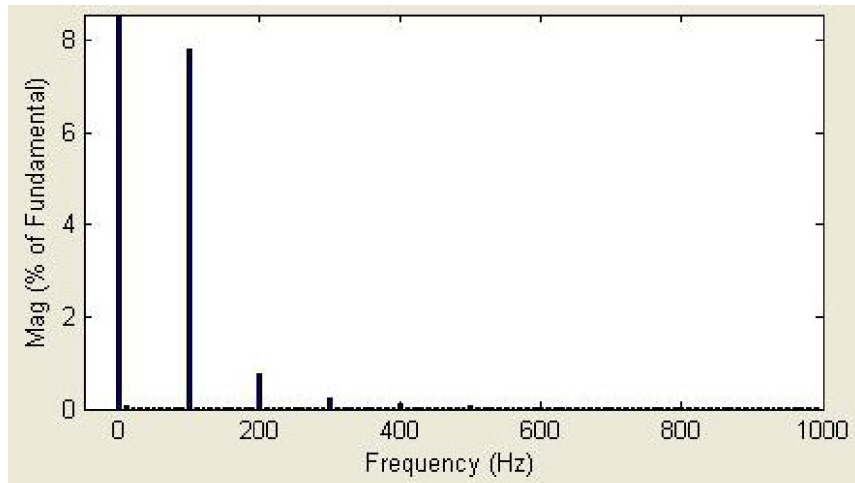
**Σχήμα 4.10** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100%

Το ρεύμα εξόδου εξακολουθεί να είναι σε συνεχή αγωγή και με κυμάτωση.



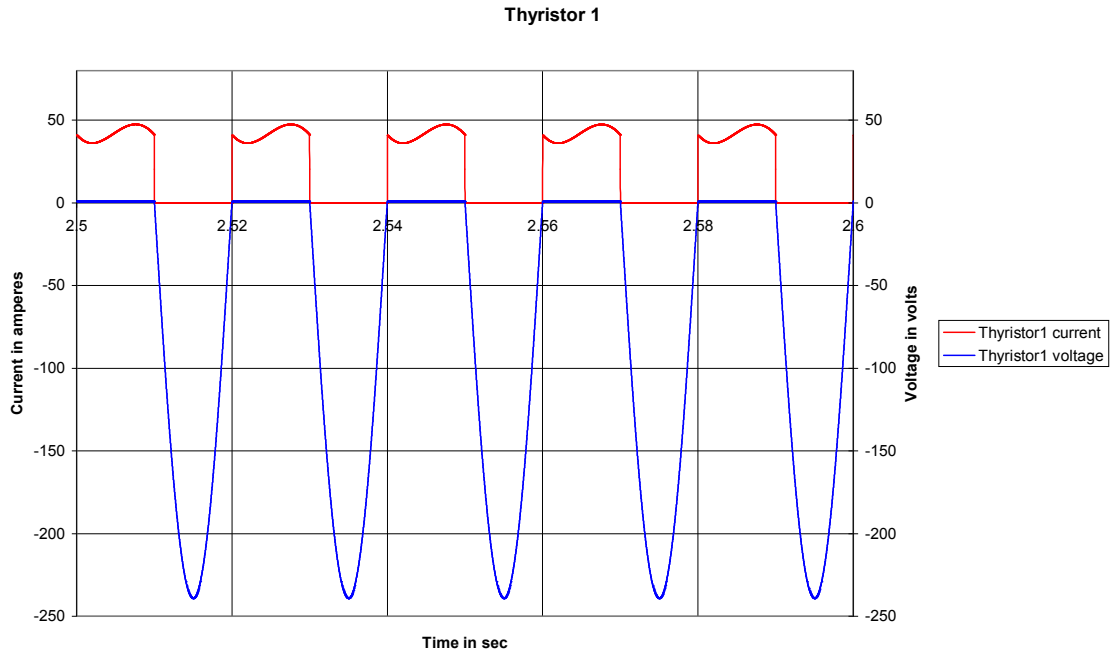
**Σχήμα 4.11** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=0$ , load 100%

Παρατηρούμε μια μείωση των στροφών λόγω του αυξημένου φορτίου στον κινητήρα.

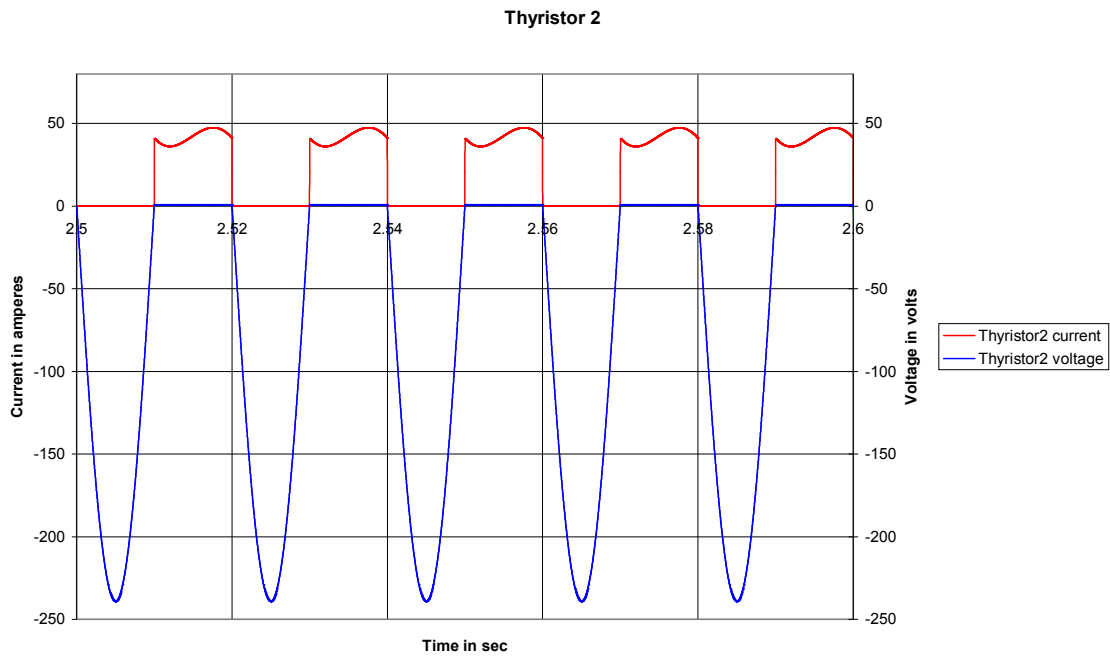


**Σχήμα 4.12** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου  $M1$ ,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου  $M1$ ,  $\alpha=0$ , load 100%

Παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση την μείωση των αρμονικών στην έξοδο λόγω της επαγωγής του κινητήρα.



**Σχήμα 4.13** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 100%

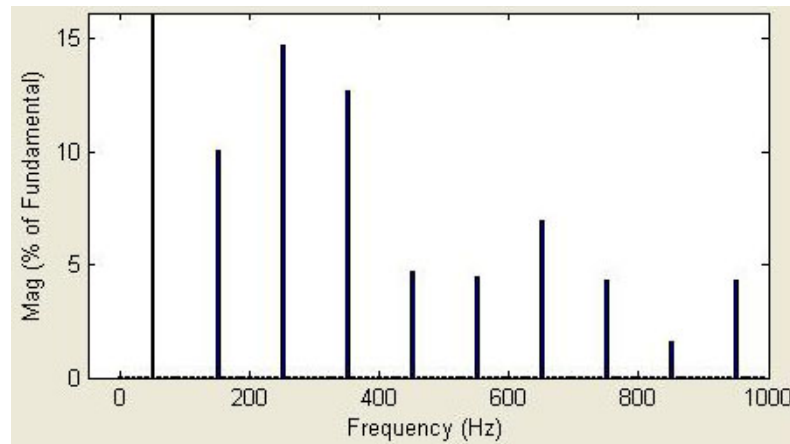
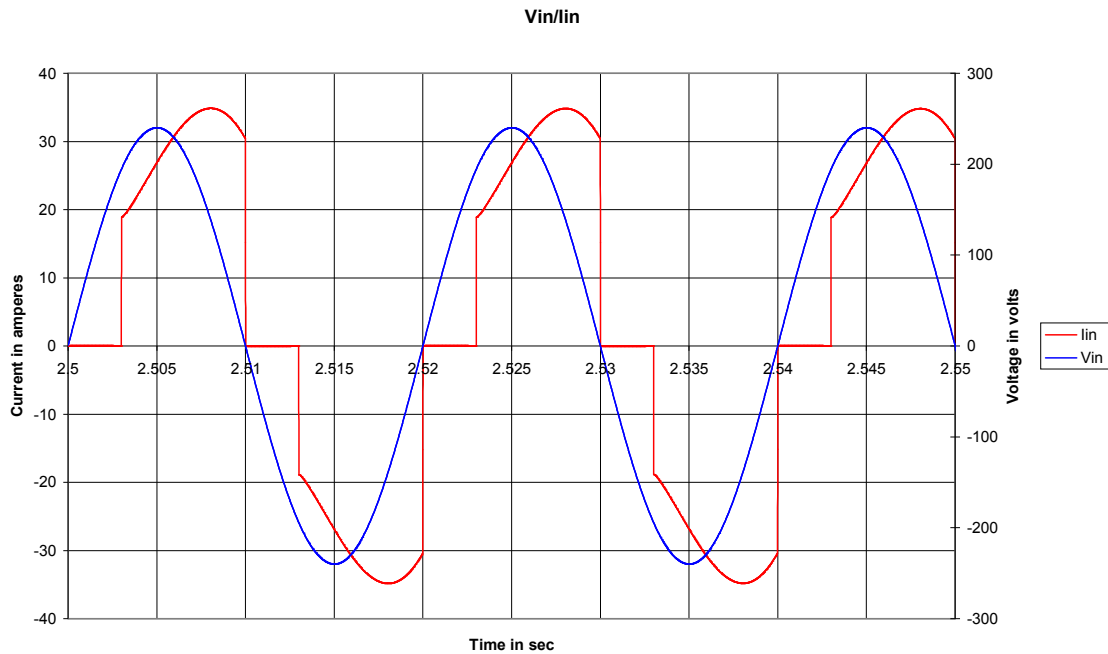


**Σχήμα 4.14** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 100%

Παρατηρούμε και εδώ την αλληλεπίδραση των 2 Θυρίστορ σε κάθε ημιπερίοδο. Το ρεύμα που τα διαρρέει είναι αυξημένο και αυτό οφείλεται όπως ήδη αναφέραμε στο αυξημένο φορτίο του κινητήρα.

**Ημιελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης  $60^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 50%**

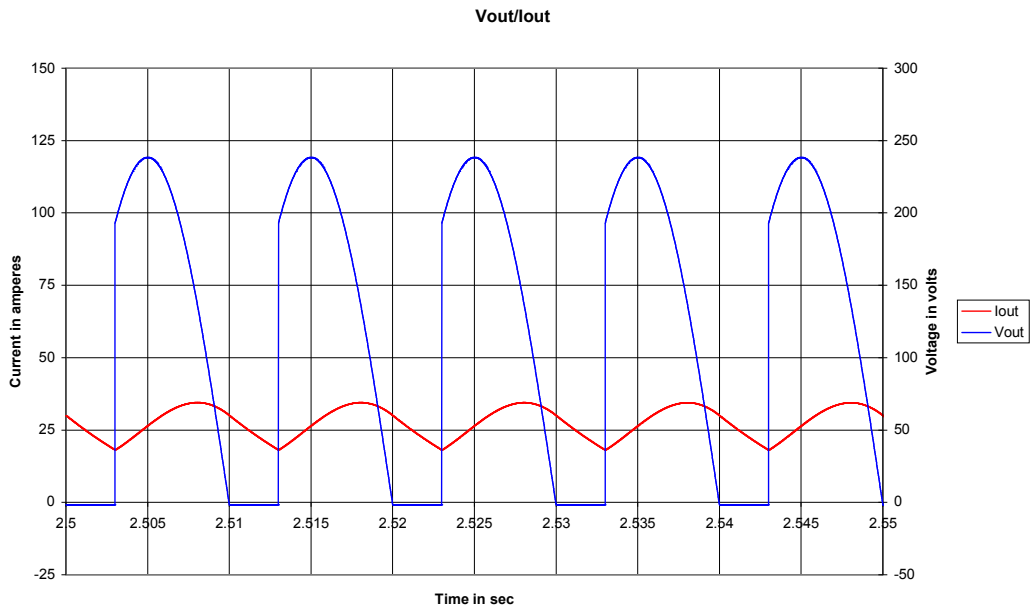
Μέσω των παλμογεννητριών μεταβάλλουμε τη γωνία έναυσης  $\alpha=60^\circ$ . Το φορτίο ορίζεται στον 50% του ονομαστικού φορτίου του κινητήρα. Πραγματοποιήσαμε την προσομοίωση και πήραμε τα αποτελέσματα.



**Σχήμα 4.15** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60$ , load 50%

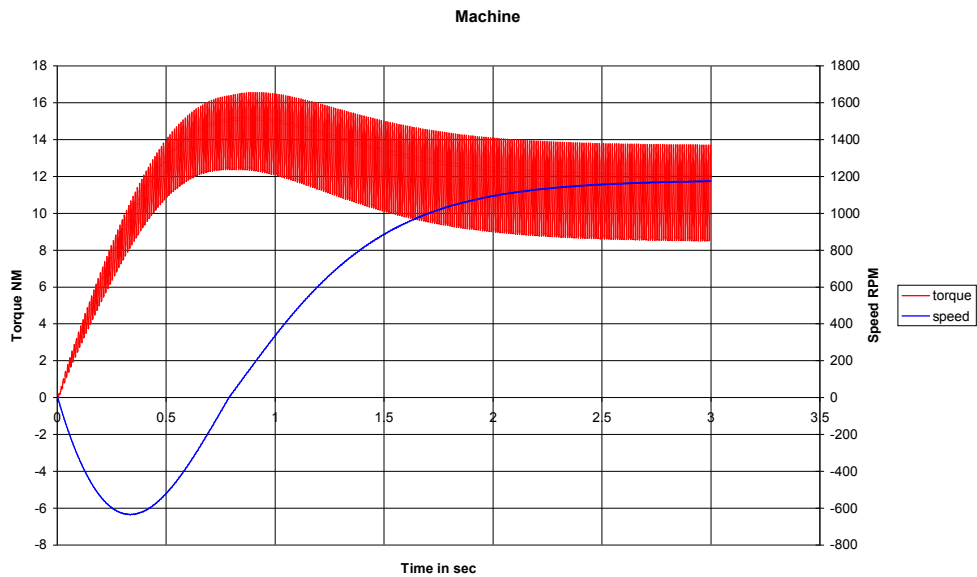
Από τις παραπάνω κυματομορφές μπορούμε να διακρίνουμε τη γωνία έναυσης των θυρίστωρ παρατηρώντας την καθυστερημένη αγωγή του ρεύματος συγκριτικά με το ημιτονοειδές σήμα της τάσης εισόδου. Παρατηρούμε επίσης μια αύξηση των αρμονικών συχνοτήτων σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.





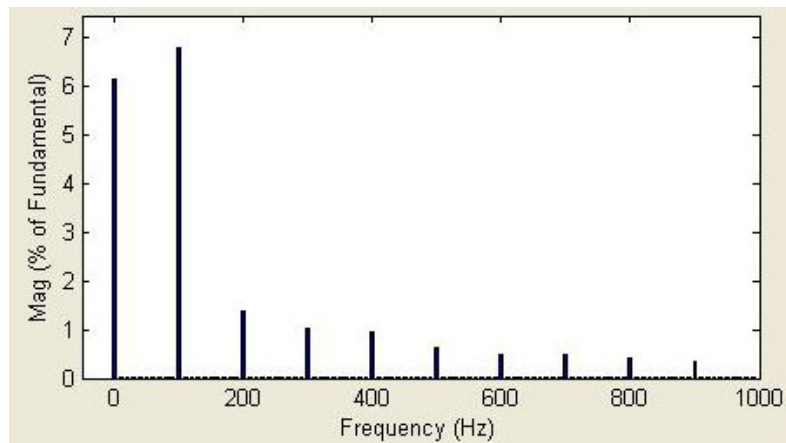
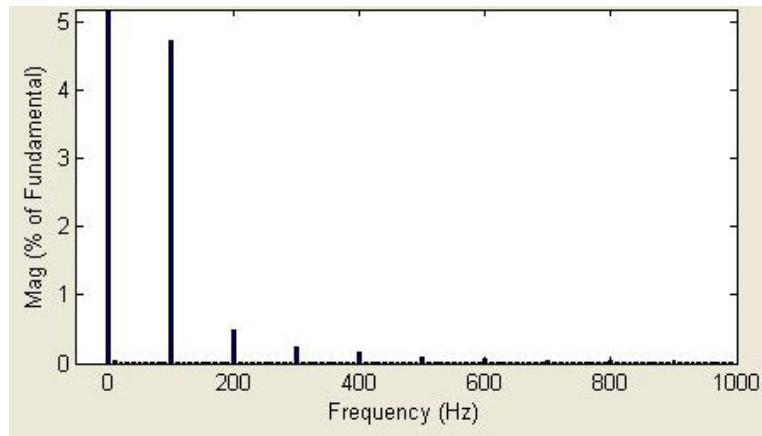
**Σχήμα 4.16** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=60$ , load 50%

Στις κυματομορφές τάσης εξόδου διακρίνουμε πλέον καθαρά τη γωνία έναυσης των θυρίστωρ. Το ημίτονο έχει πλέον ψαλιδιστεί, το ρεύμα ωστόσο διατηρεί τη συνεχή αγωγή του.



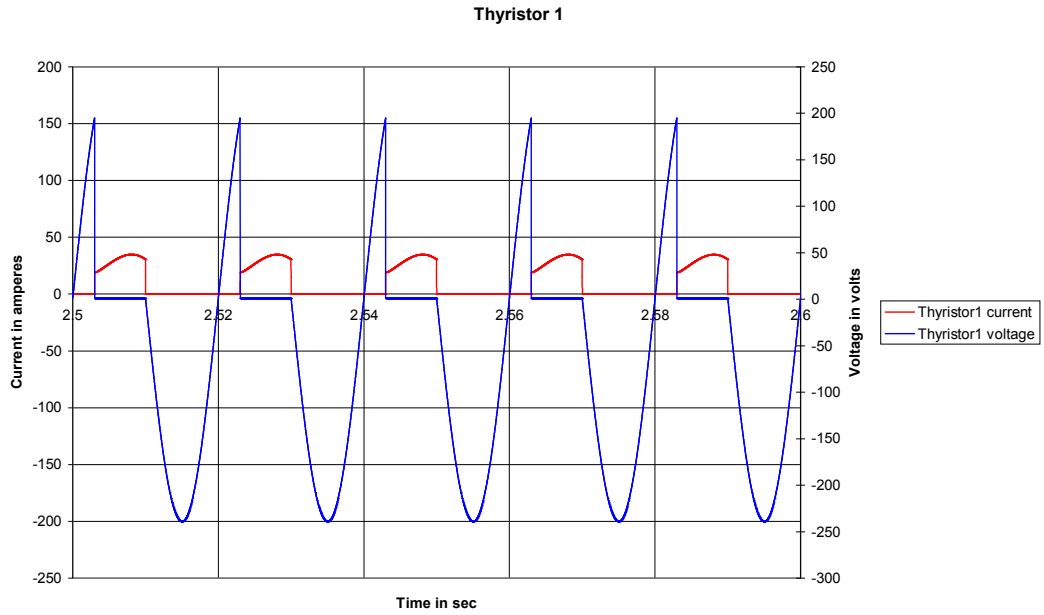
**Σχήμα 4.17**Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=60$ , load 50%

Παρατηρούμε για ακόμη μια φορά την μεγάλη ταλάντωση στην ροπή του κινητήρα. Οι στροφές είναι μειωμένες σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση όπου η γωνία έναυσης  $\alpha$  ήταν ίση με 0, διότι ο ψαλιδισμός του ημιτόνου έχει επιφέρει μείωση της μέσης τάσης εξόδου του κυκλώματος.

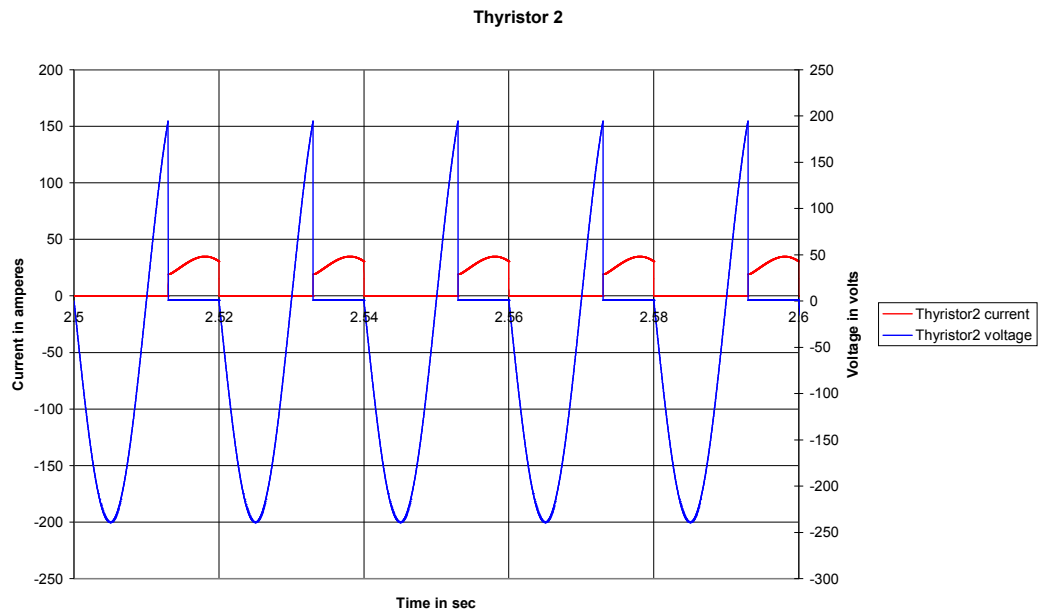


**Σχήμα 4.18** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου  $M_I$ ,  $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου  $M_I$ ,  $\alpha=60$ , load 50%

Παρατηρούμε την μείωση των αρμονικών του ρεύματος στην έξοδο του κυκλώματος.



**Σχήμα 4.19** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 50%

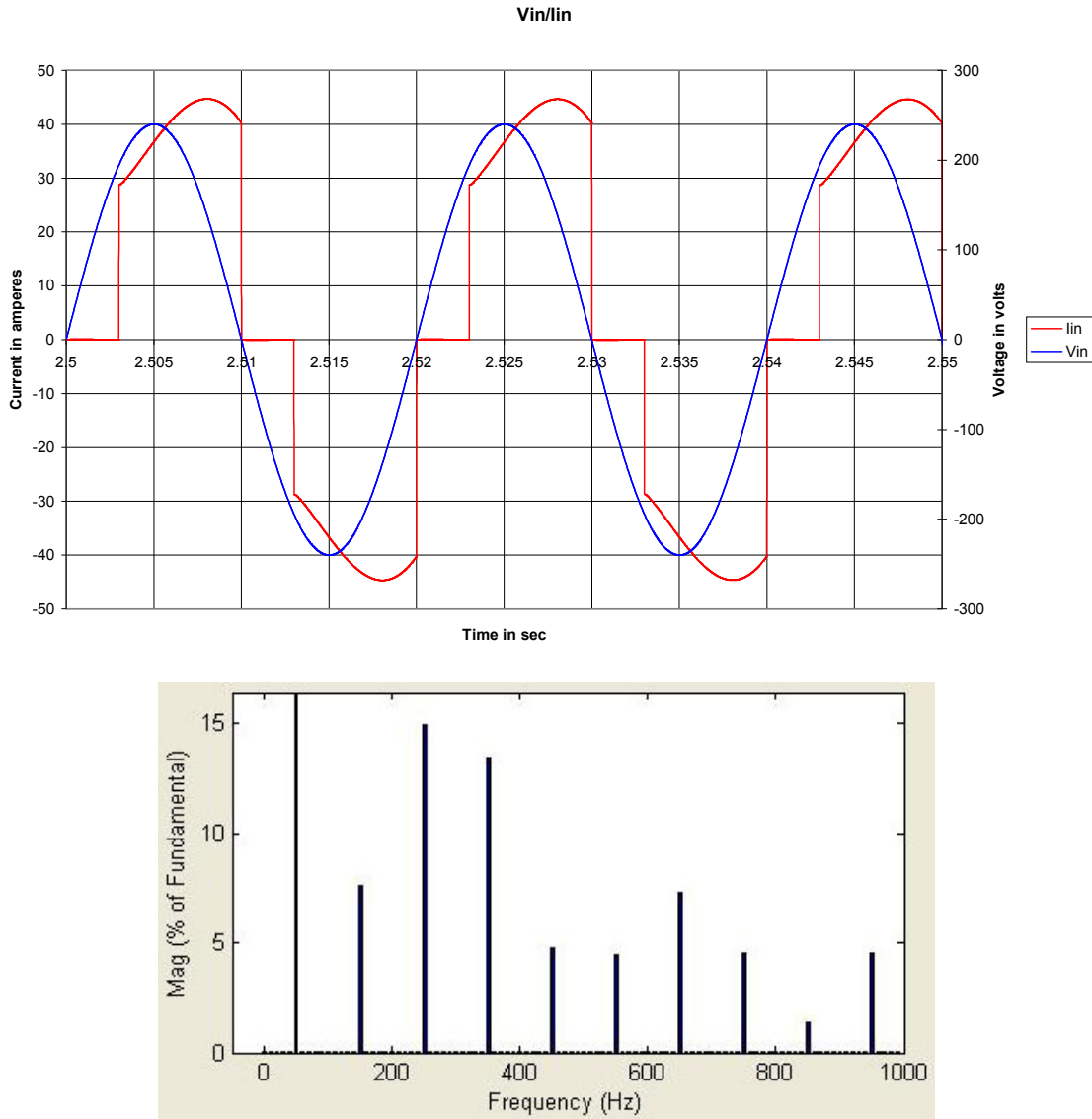


**Σχήμα 4.20** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 50%

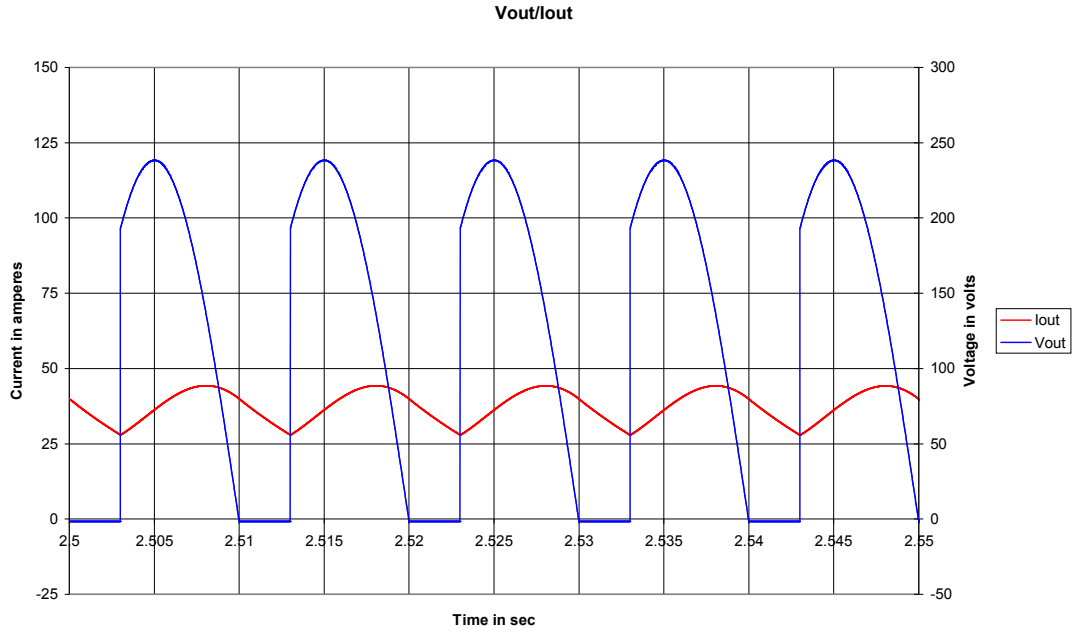
Παρατηρούμε την καθυστερημένη σβέση των Thyristor λόγω της συνεχούς αγωγής του ρεύματος και λόγω της επαγωγής του κινητήρα.

**Ημιελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 70%**

Διατηρώντας τη γωνία έναυσης  $\alpha$  και αλλάζοντας το φορτίο στο 70% του ονομαστικού του κινητήρα πραγματοποιήσαμε την προσομοίωση και πήραμε τα αποτελέσματα.

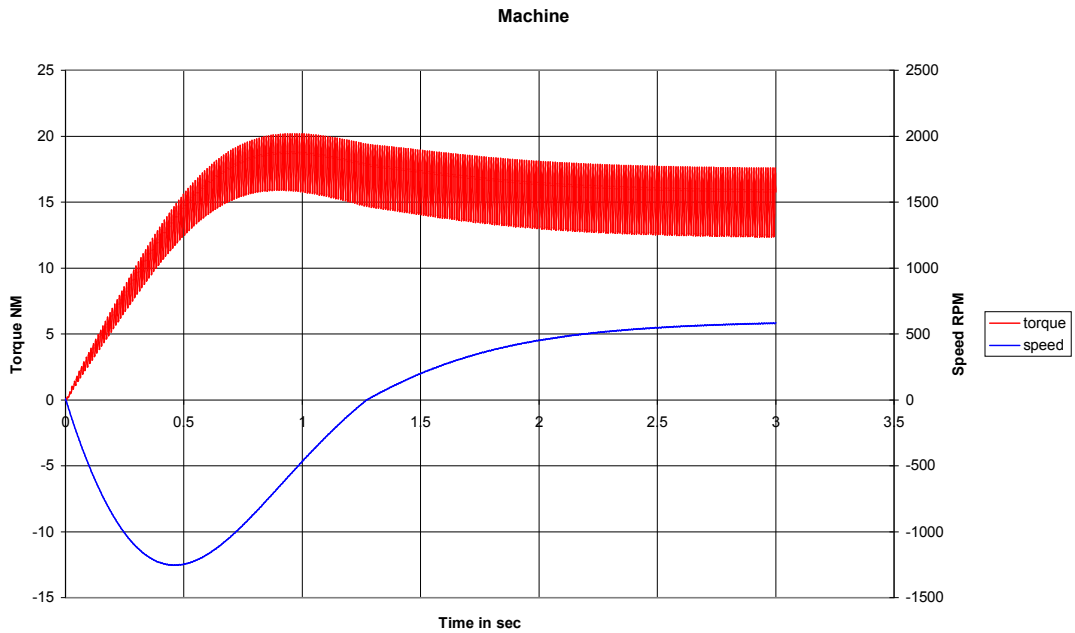


**Σχήμα 4.21** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60^\circ$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60^\circ$ , load 70%



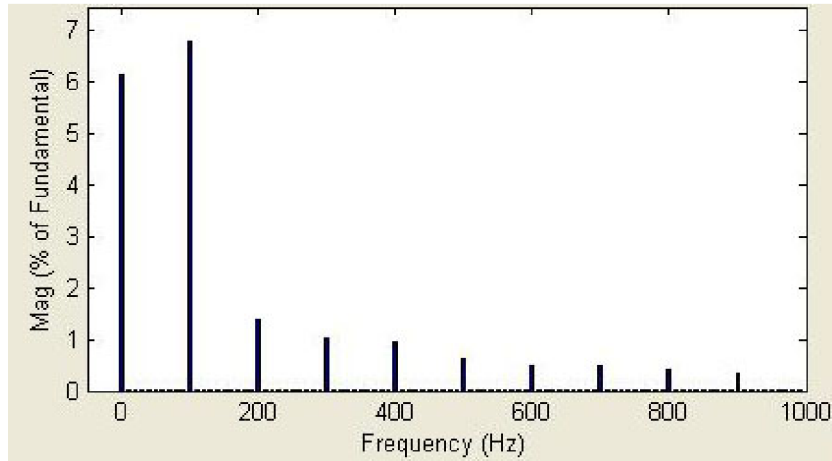
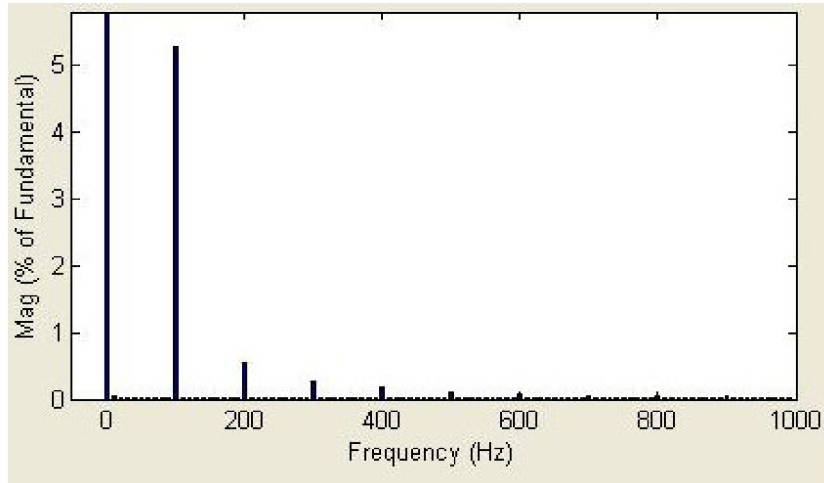
**Σχήμα 4.22** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=60$ , load 70%

Παρατηρούμε την αύξηση του ρεύματος λόγω του αυξημένου φορτίου στον κινητήρα.

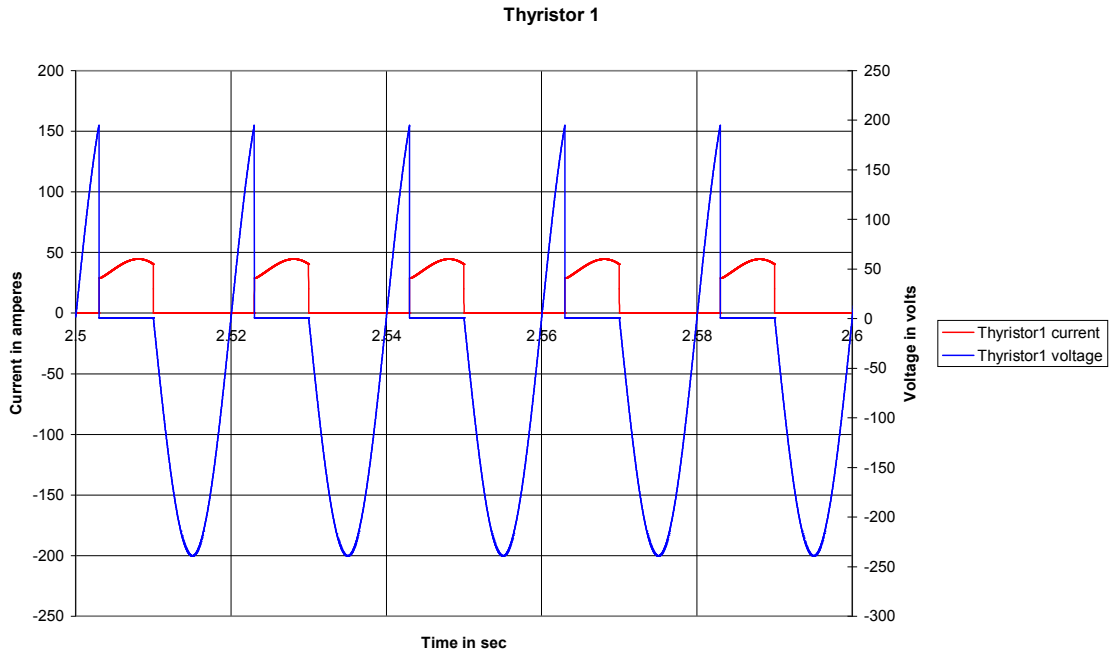


**Σχήμα 4.23** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=60$ , load 70%

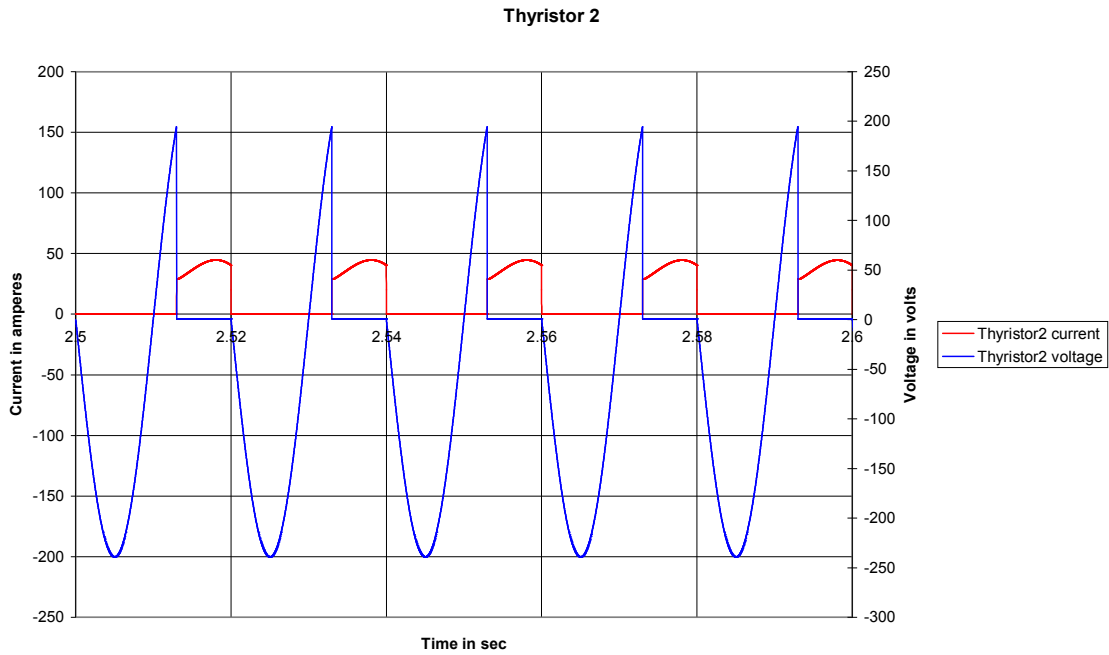
Οι στροφές μειώνονται πλέον δραματικά και ο κινητήρας δυσκολεύεται πολύ να λειτουργήσει. Το φορτίο είναι αρκετά μεγάλο ενώ η μέση τιμή της τάσης εξόδου πολύ μικρή.



**Σχήμα 4.24 α)** Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=60$ , load 70% **β)** Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $\alpha=60$ , load 70%



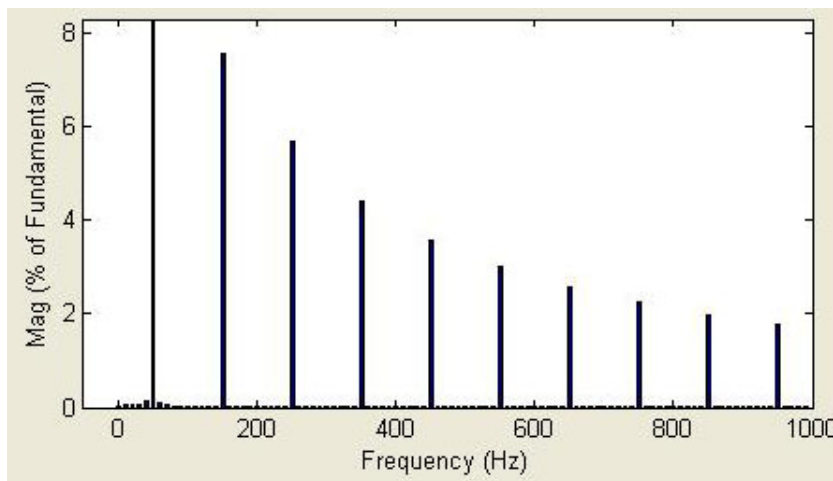
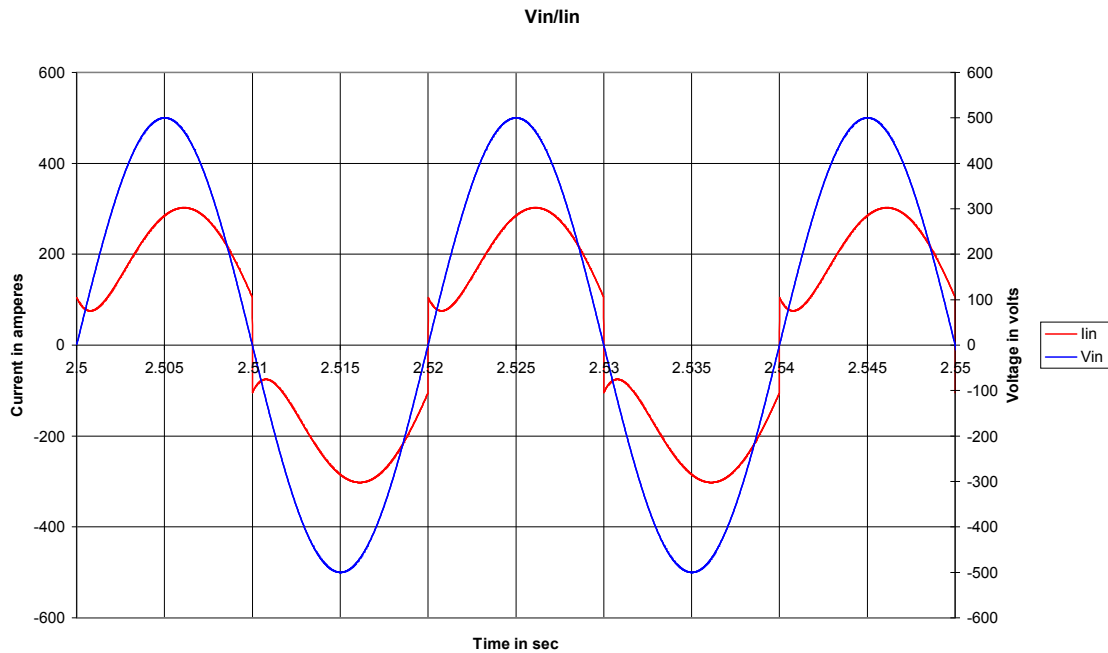
Σχήμα 4.25 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 70%



Σχήμα 4.26 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 70%

**Ημιελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 50%**

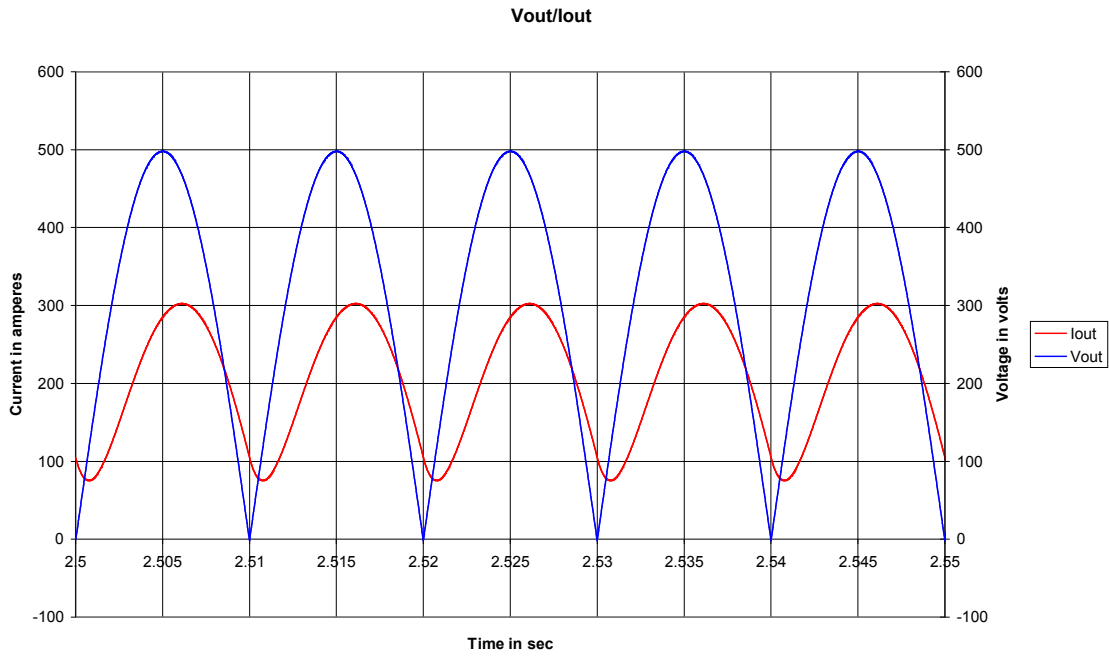
Για το ίδιο κύκλωμα, αντικαθιστώντας τον κινητήρα και την συνδεσμολογία σε κινητήρα σειράς, πραγματοποιήσαμε τις προσομοιώσεις και πήραμε τα αποτελέσματα.



**Σχήμα 4.27** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50%

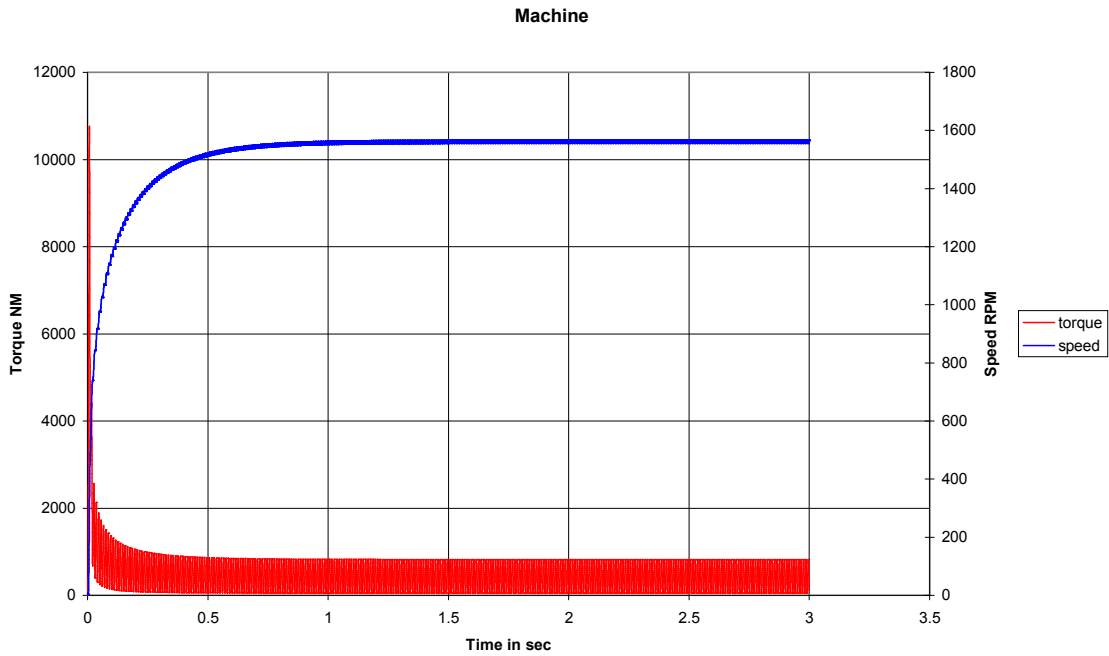
Οι κυματομορφές της τάσης αλλά και του ρεύματος εισόδου είναι παρόμοιες με την αντίστοιχη περίπτωση του κινητήρα M1 με τη διαφορά ότι εδώ τα μεγέθη είναι αυξημένα. Η τάση εισόδου, η οποία είναι και η τάση λειτουργίας του κινητήρα, είναι στα 500V ενώ το ρεύμα είναι σημαντικά αυξημένο λόγω της ισχύς του κινητήρα M2.



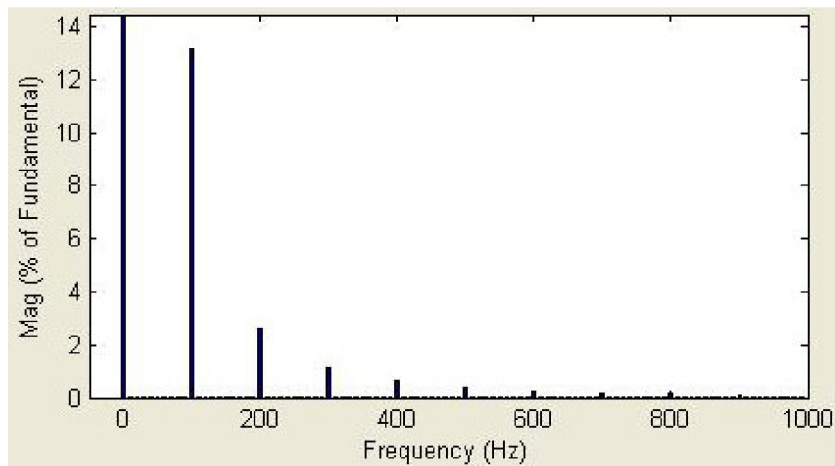
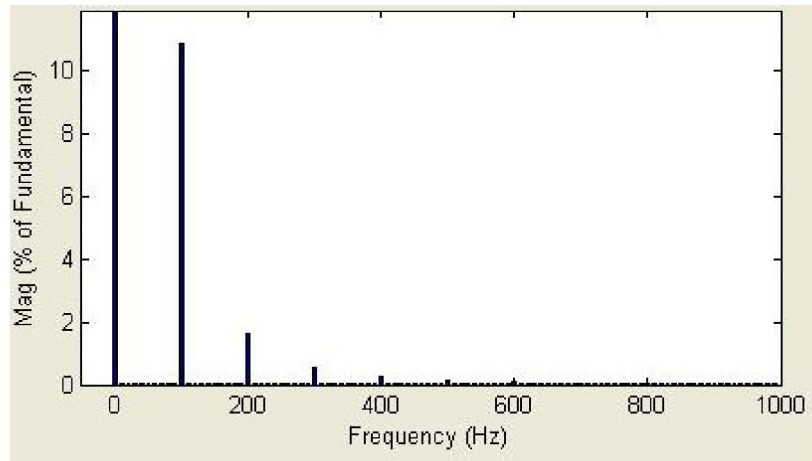


**Σχήμα 4.28** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50%

Παρατηρούμε την σημαντική αύξηση του ρεύματος λόγω της αυξημένης ισχύος του κινητήρα M2.

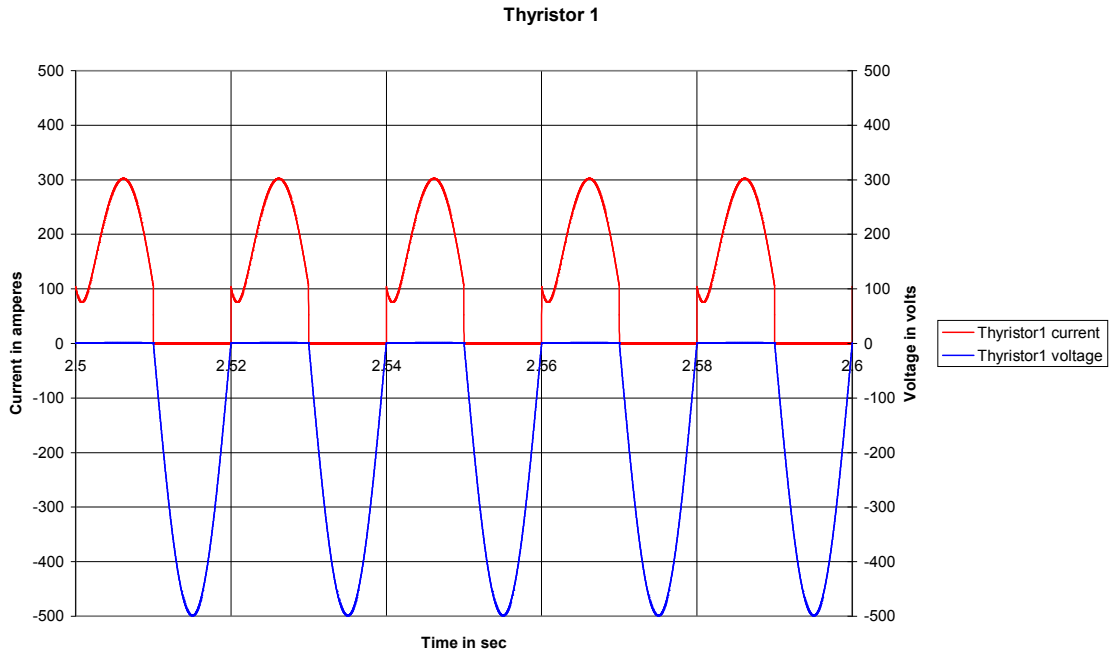


**Σχήμα 4.29** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=0$ , load 50%

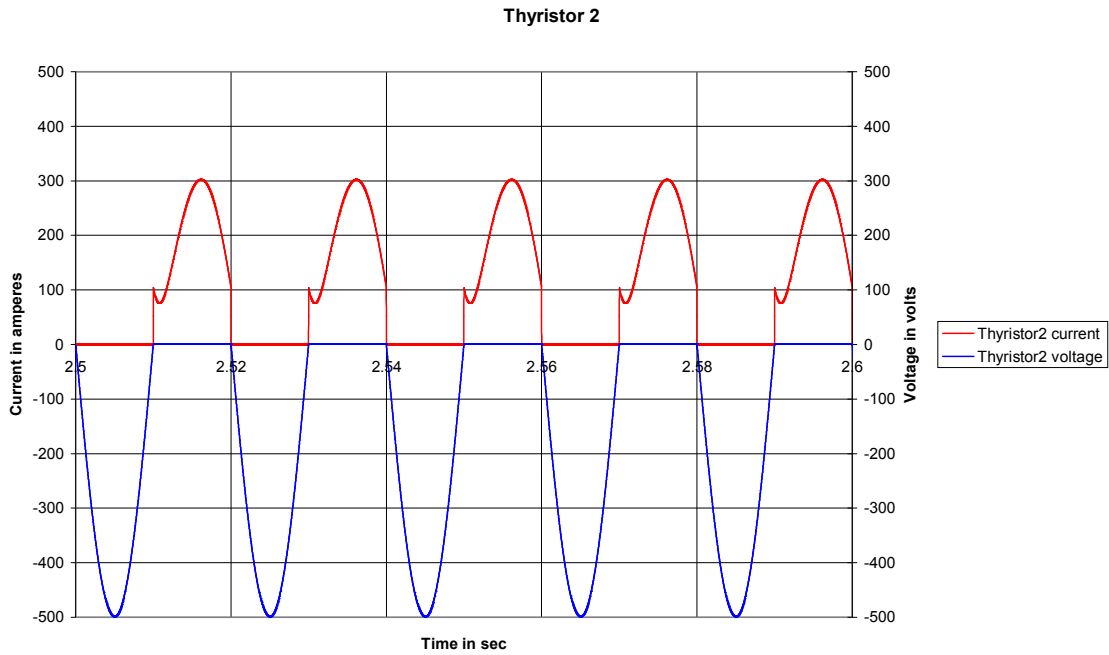


**Σχήμα 4.30** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50%

Παρατηρούμε την μεγάλη μείωση των αρμονικών που πραγματοποιείται στην έξοδο του κυκλώματος λόγω της μεγάλης επαγωγής του κινητήρα M2.

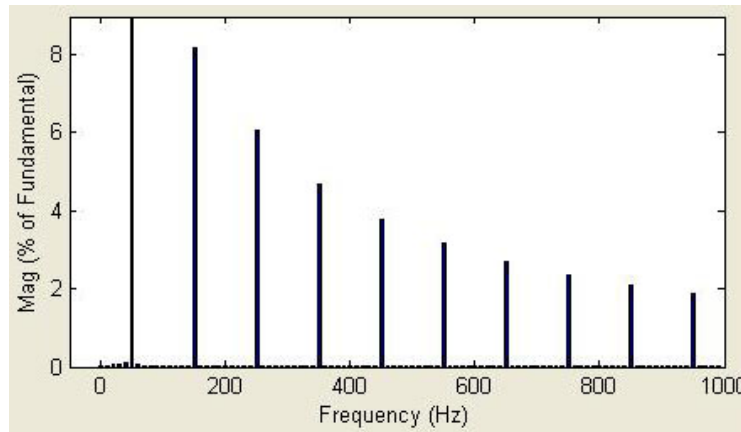
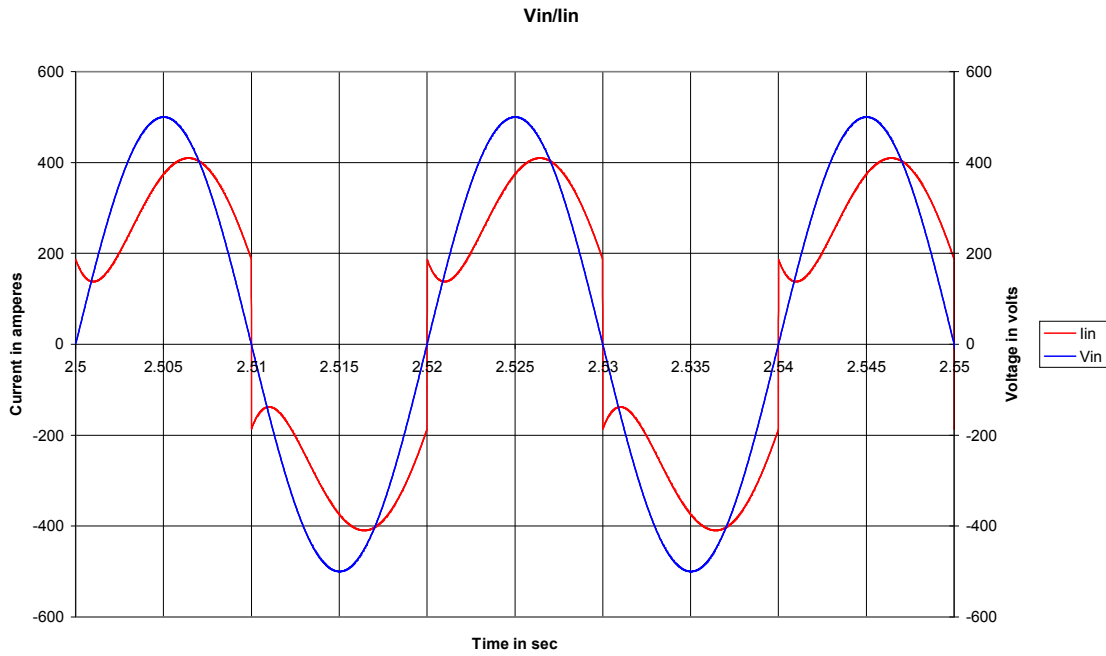


**Σχήμα 4.31** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ο</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 50%

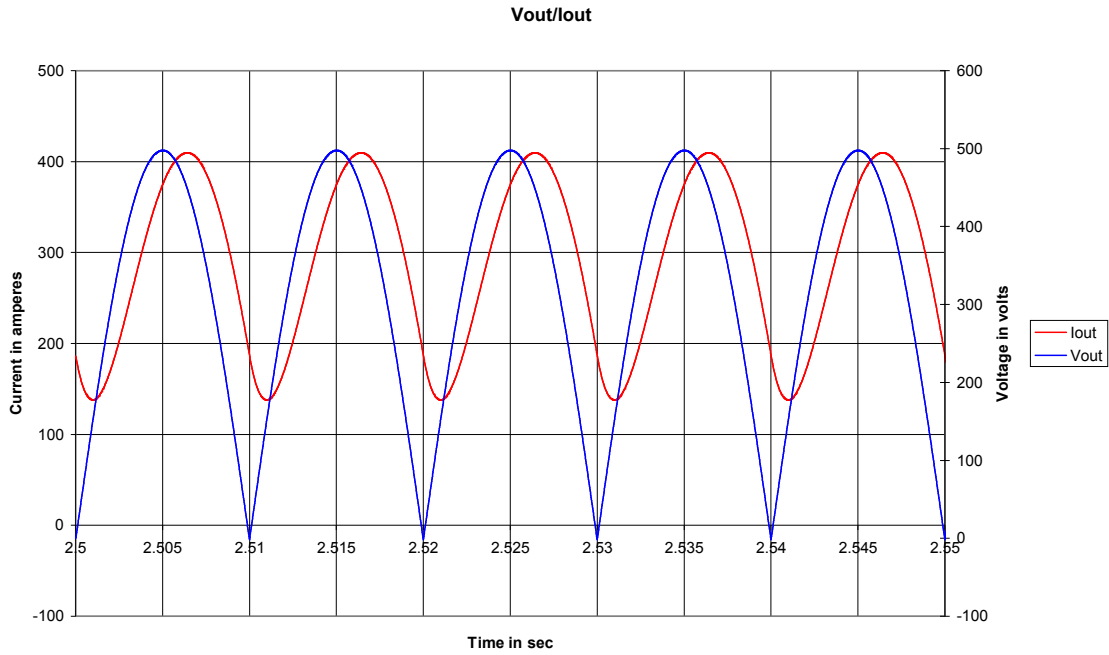


**Σχήμα 4.32** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ο</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 50%

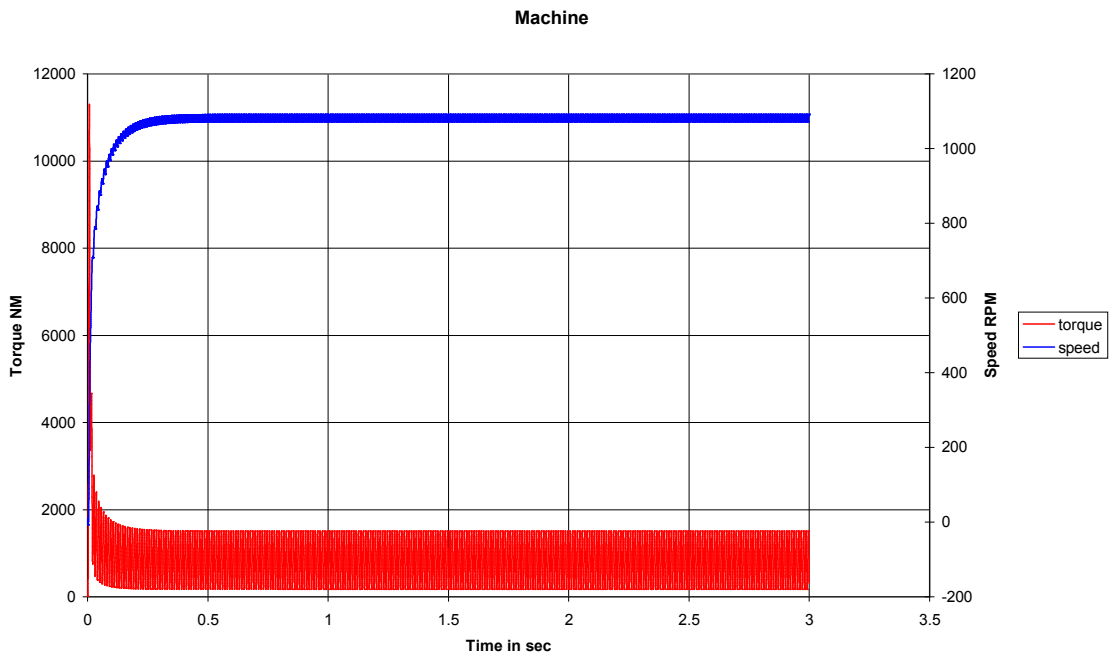
**Ημιαεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 100%**



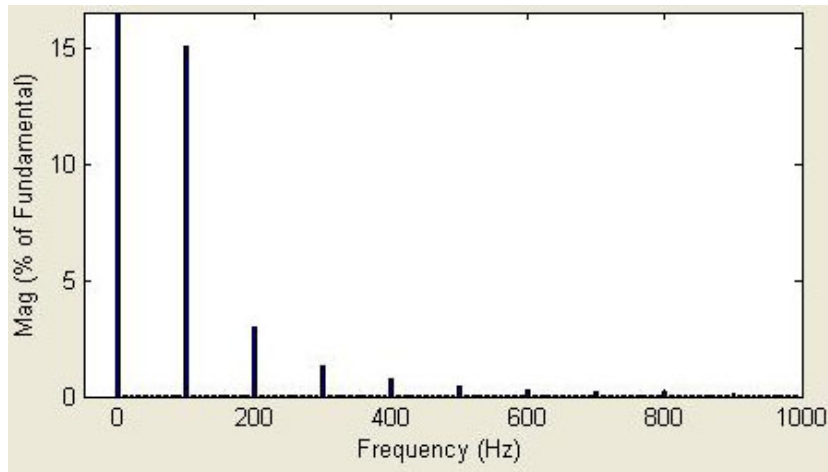
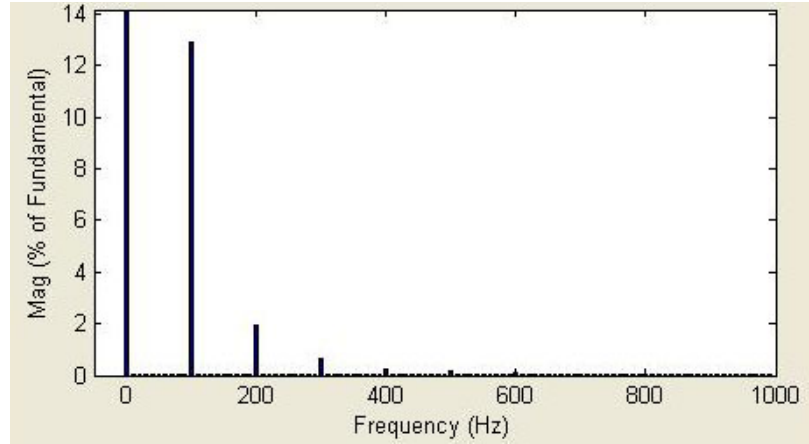
**Σχήμα 4.33** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100%



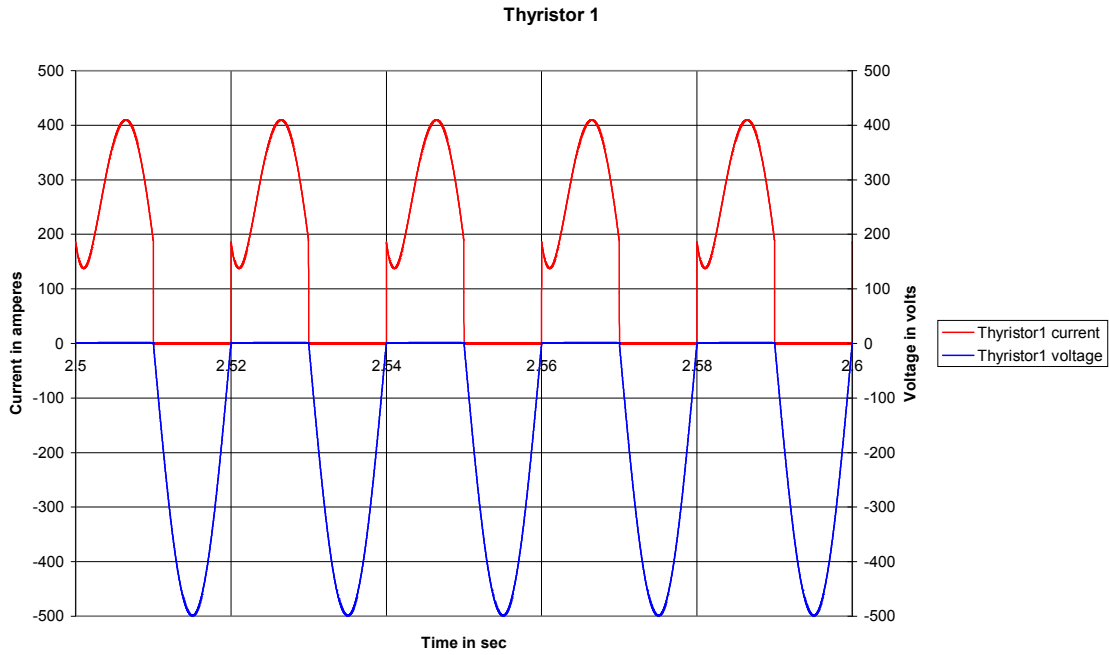
Σχήμα 4.34 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100%



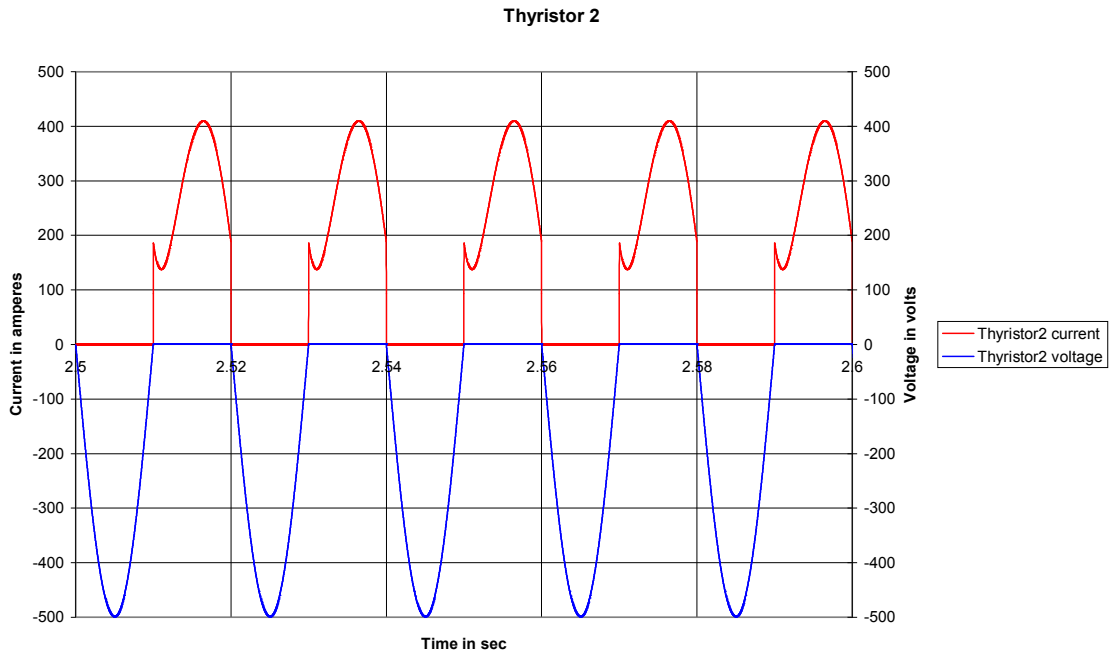
Σχήμα 4.35 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=0$ , load 100%



**Σχήμα 4.36** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100%

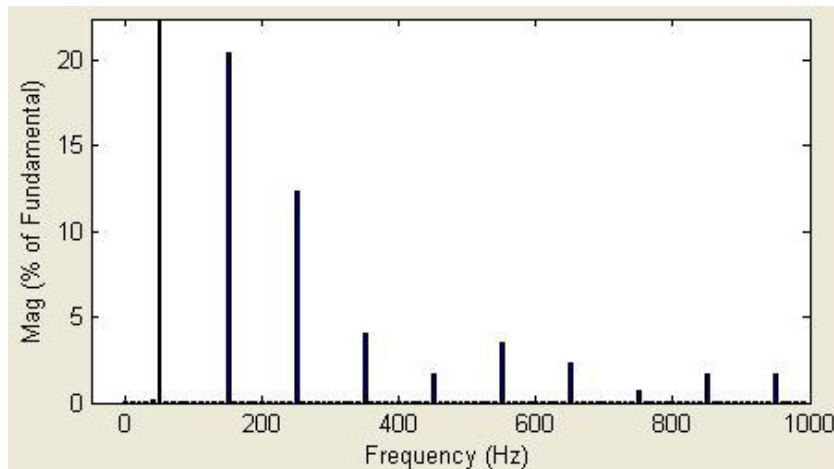
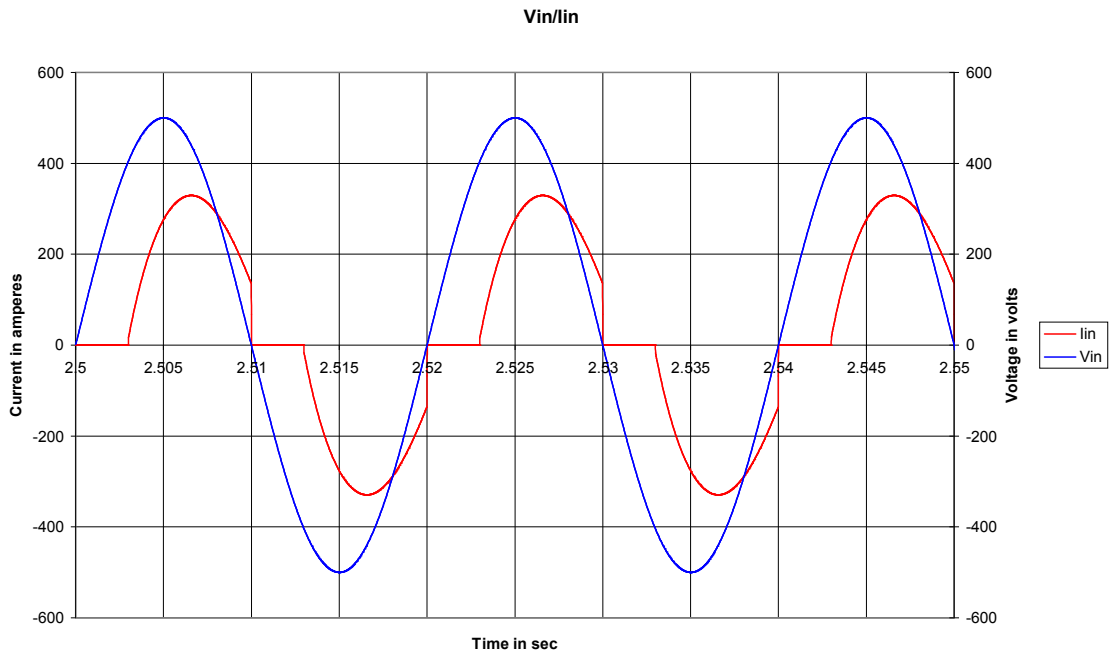


**Σχήμα 4.37** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ο</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 100%



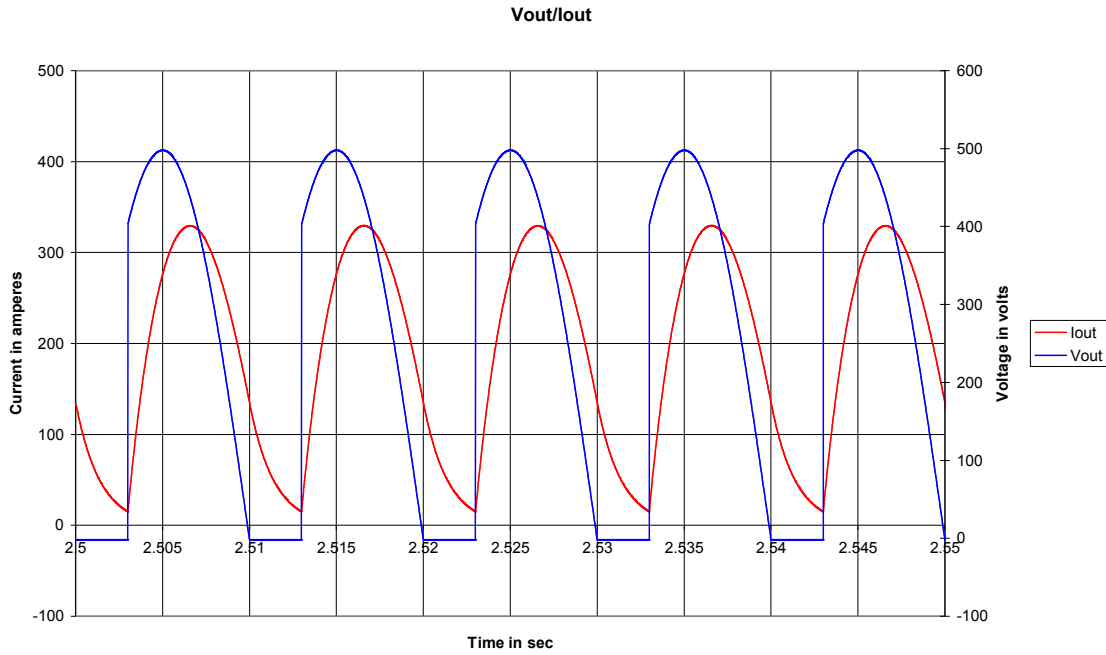
**Σχήμα 4.38** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ο</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 100%

**Ημιελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 50%**

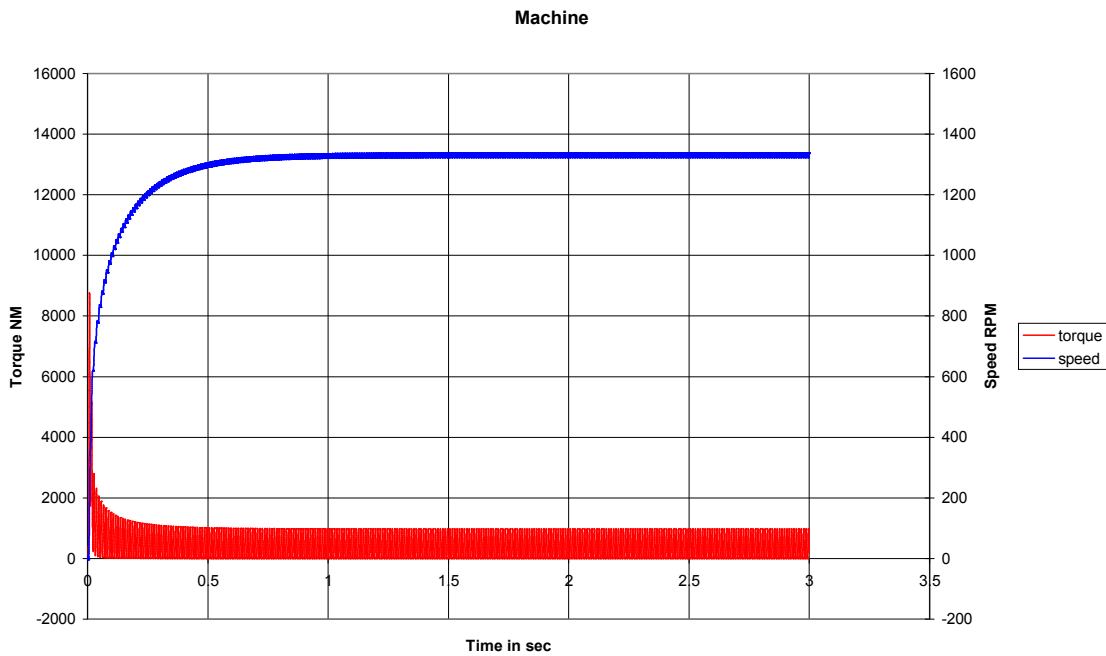


**Σχήμα 4.39** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60^\circ$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60^\circ$ , load 50%

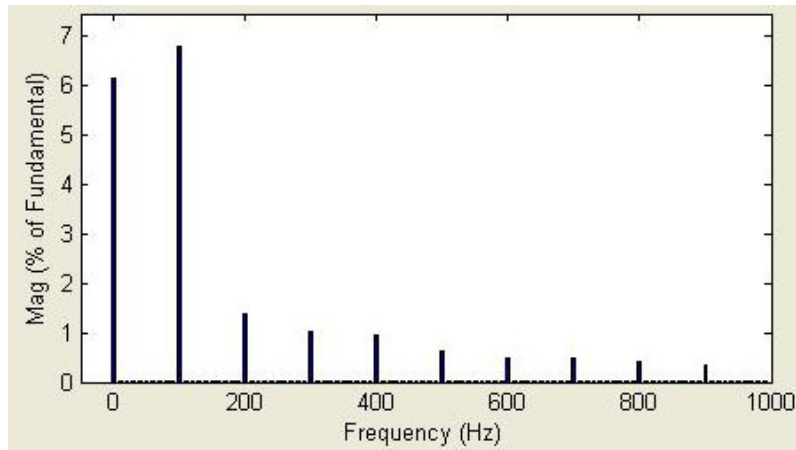
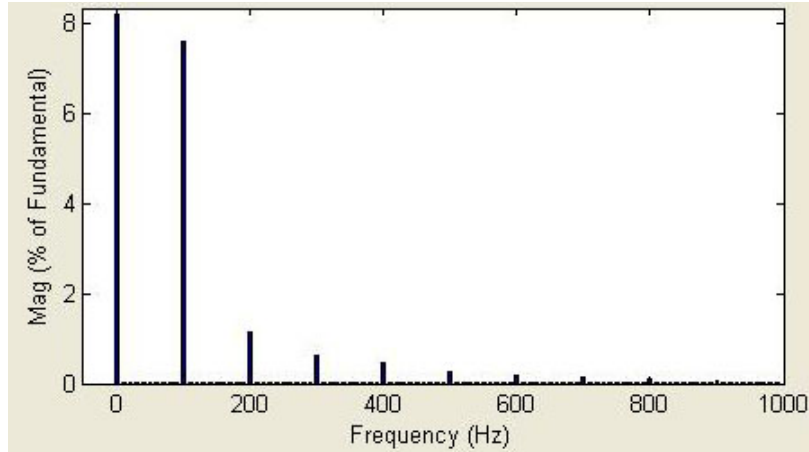




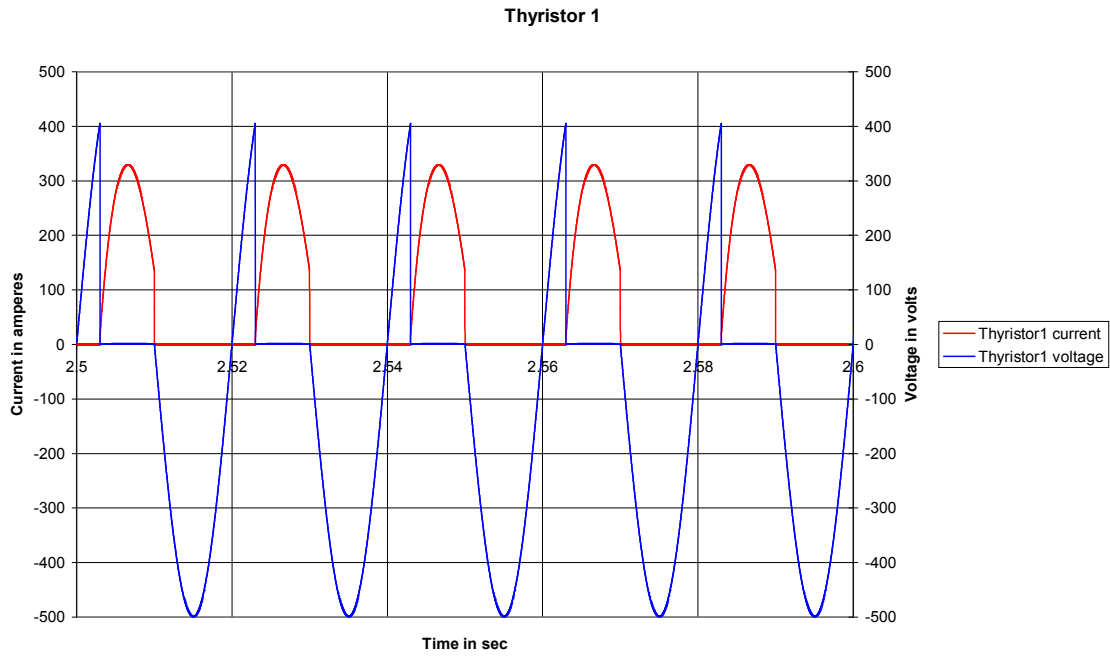
**Σχήμα 4.40** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 50%



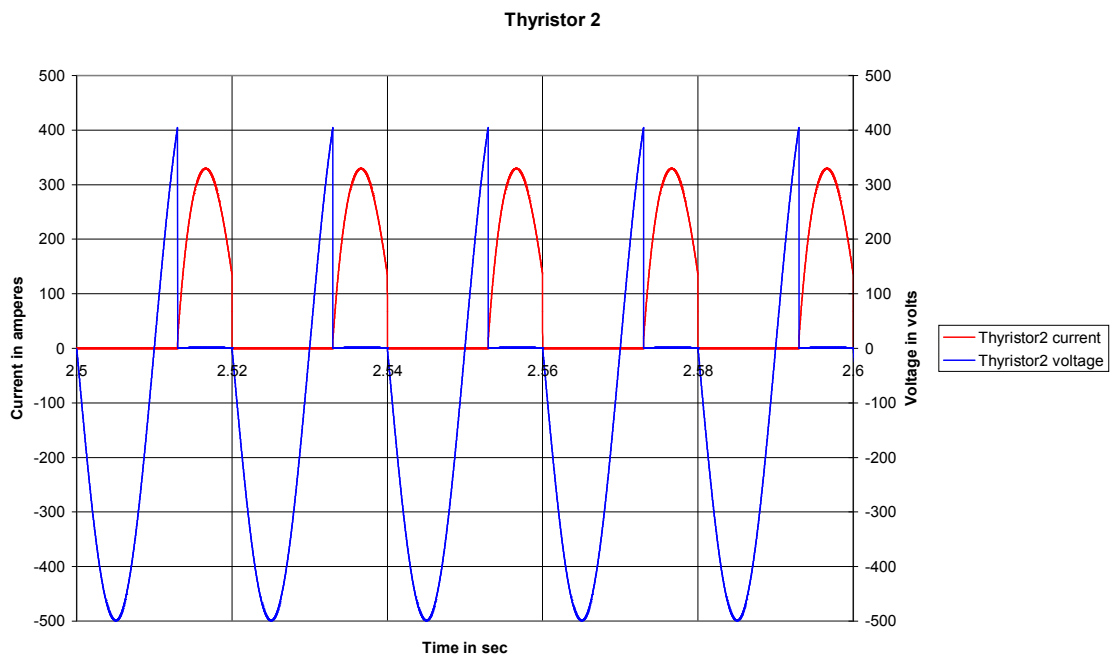
**Σχήμα 4.41** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=60$ , load 50%



**Σχήμα 4.42** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 50%

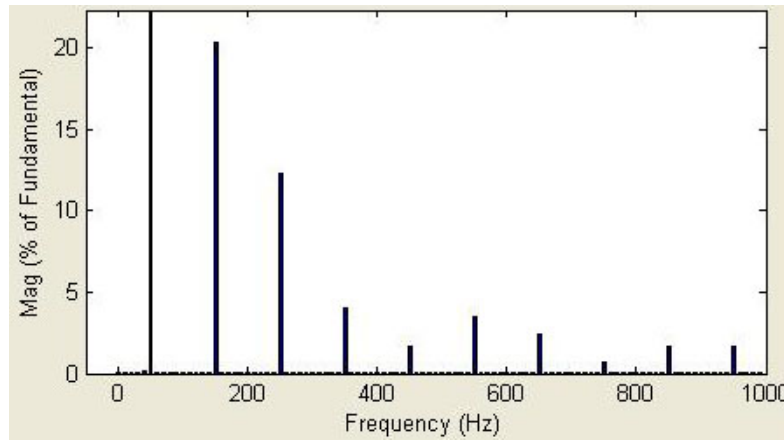
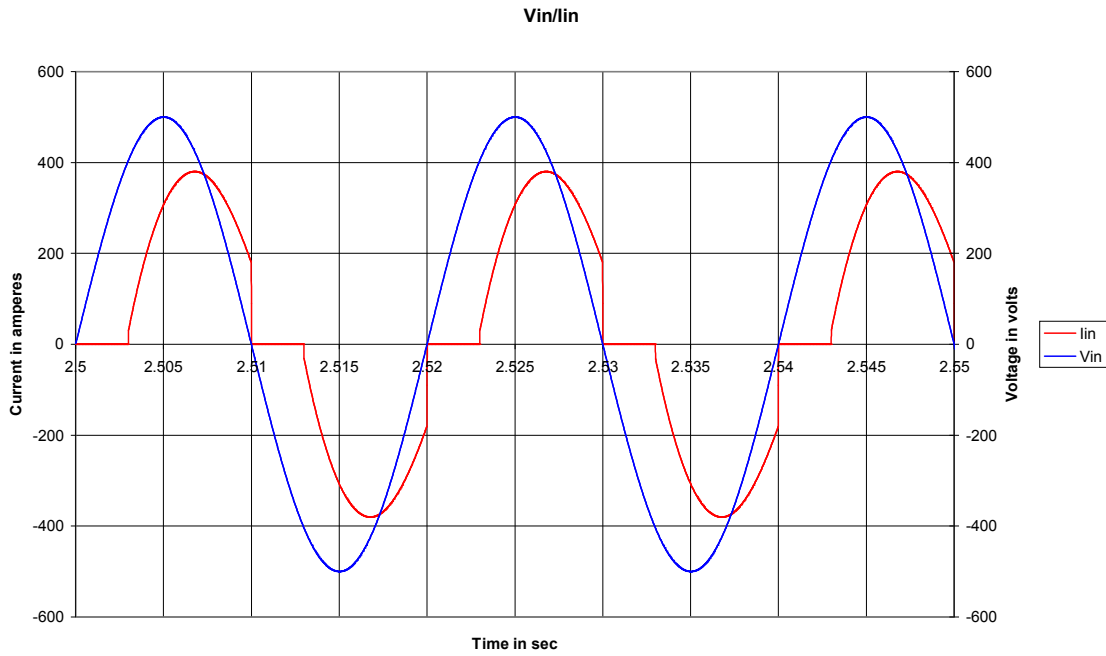


**Σχήμα 4.43** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60$ , load 50%

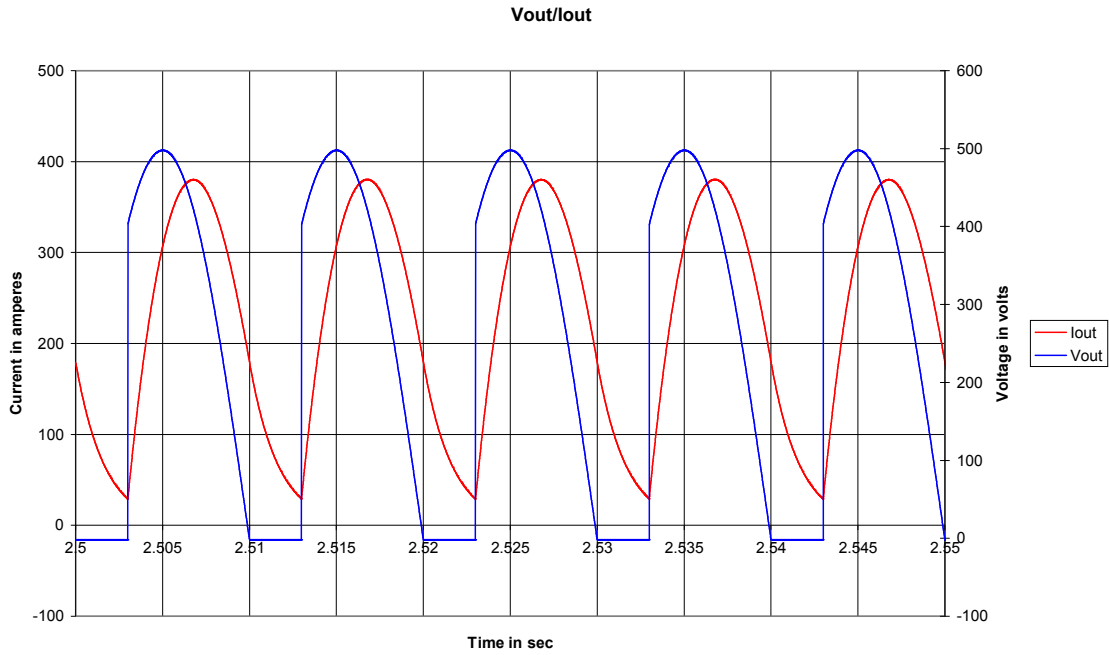


**Σχήμα 4.44** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60$ , load 50%

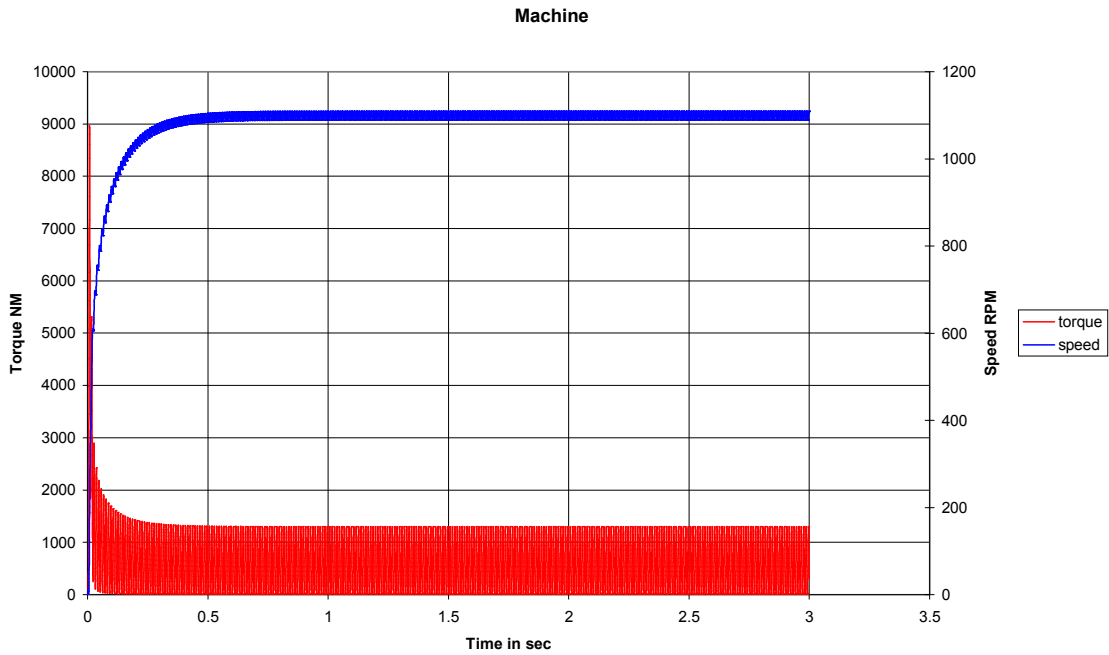
**Ημιελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 70%**



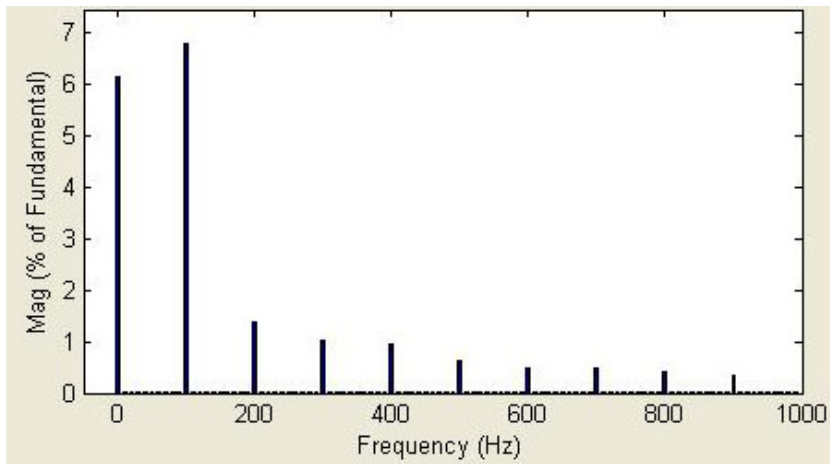
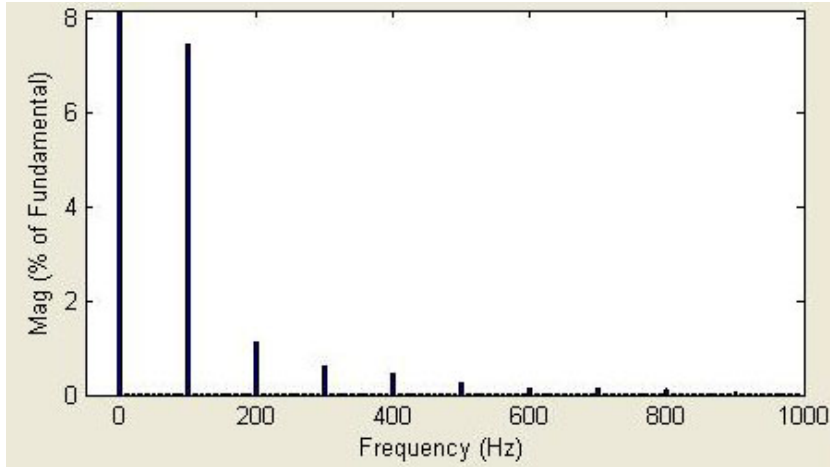
**Σχήμα 4.45** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70%



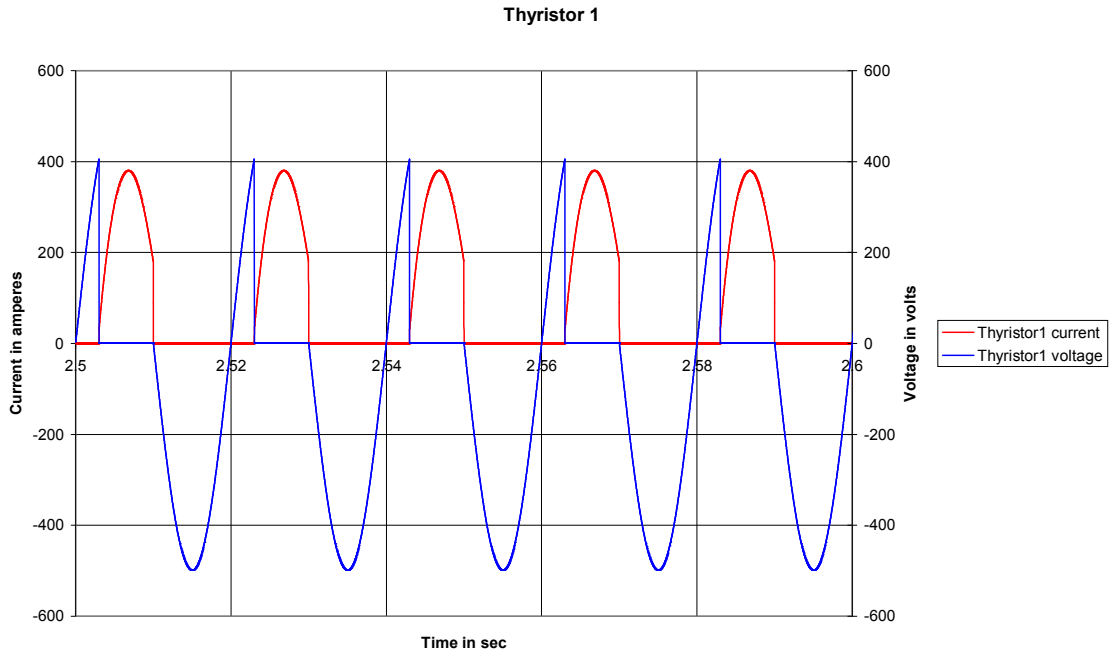
**Σχήμα 4.46** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70%



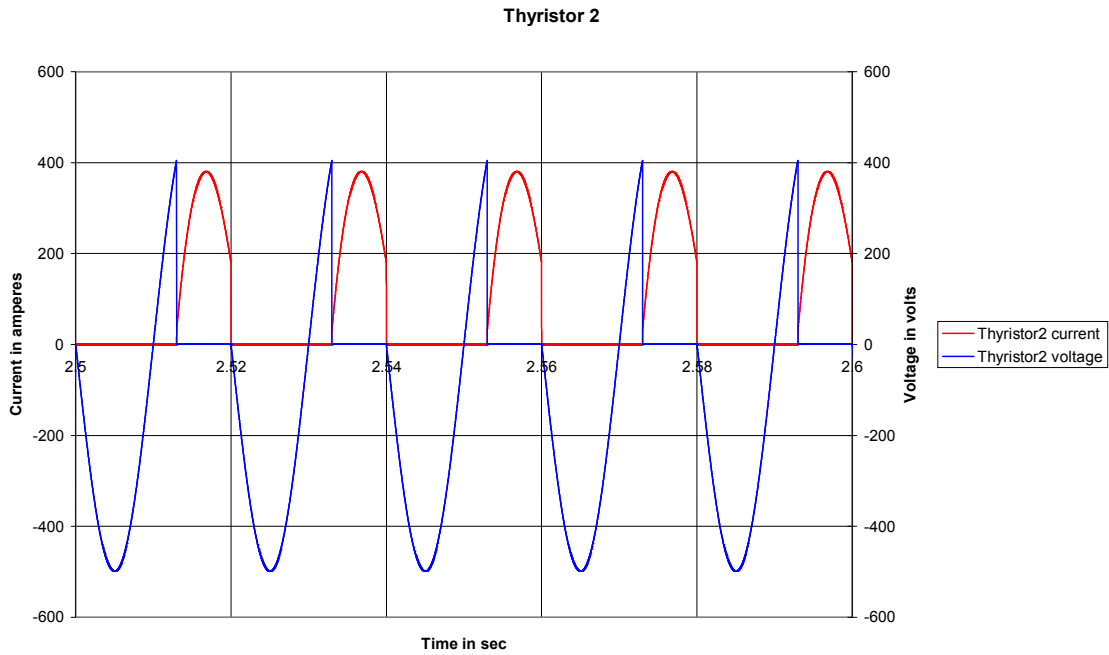
**Σχήμα 4.47** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=60$ , load 70%



**Σχήμα 4.48** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70%

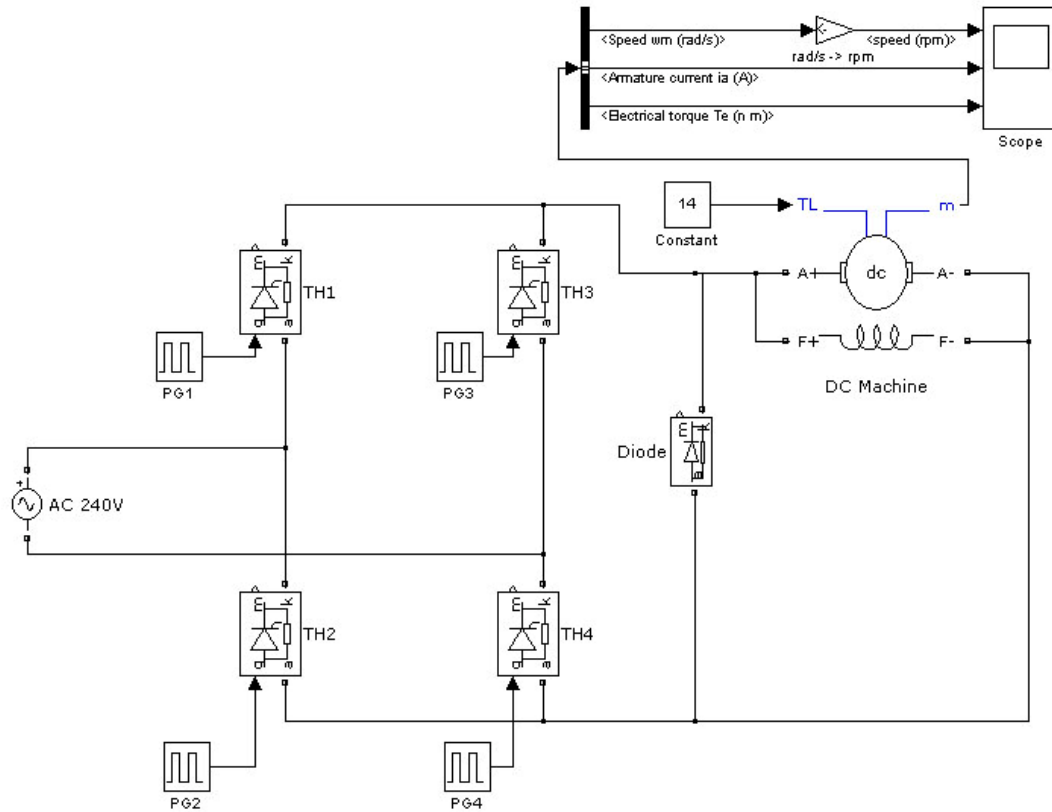


**Σχήμα 4.49** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60$ , load 70%



**Σχήμα 4.50** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60$ , load 70%

### 4.2.2 Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης

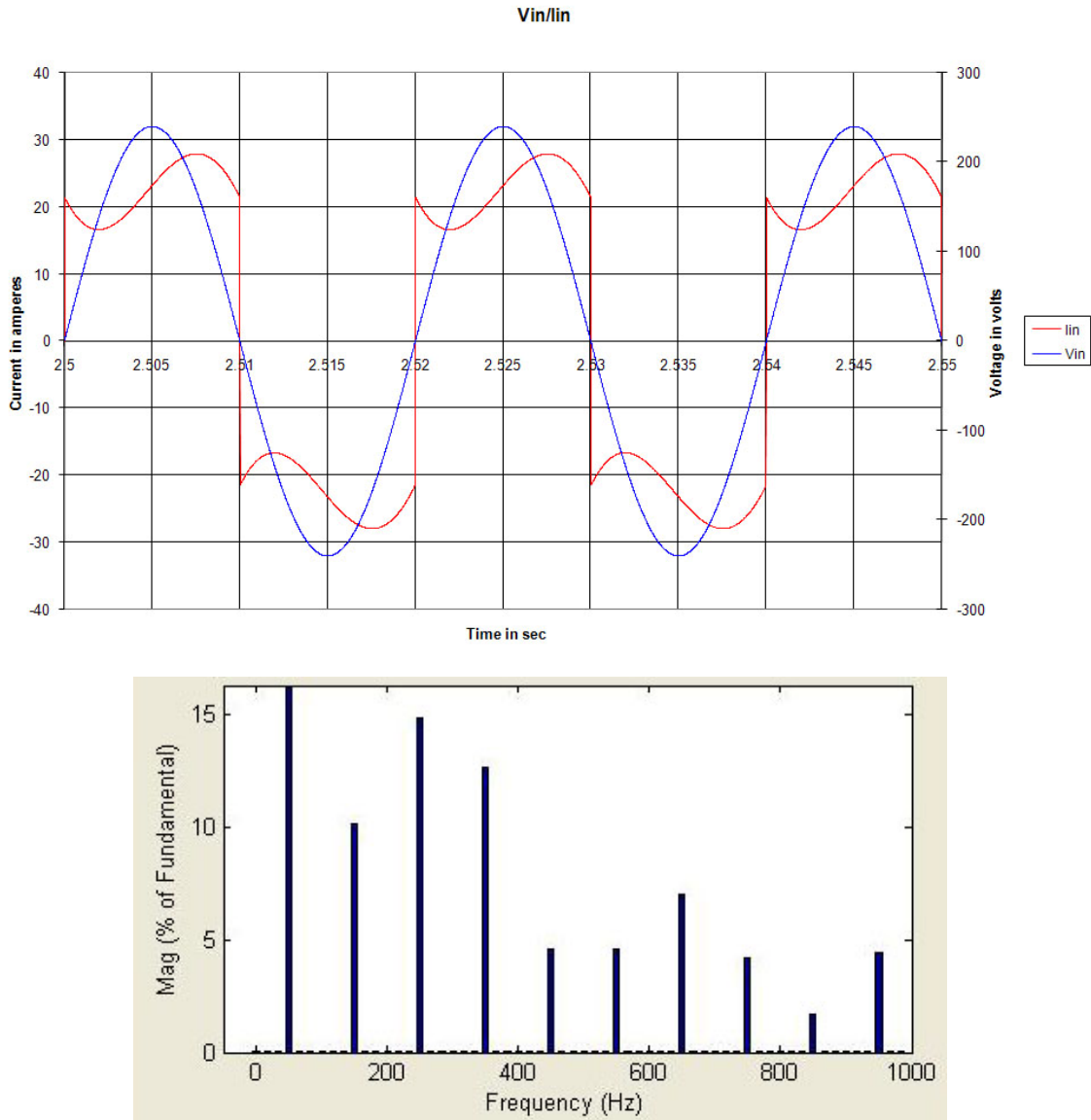


**Σχήμα 4.51** Διάγραμμα πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας ανόρθωσης

Πραγματοποιήσαμε το παραπάνω κύκλωμα στο Simulink. Η αρχή λειτουργία του κυκλώματος είναι ίδια με αυτή της ημιελεγχόμενης γέφυρας. Τη θέση των διόδων παίρνουν τα Θυρίστορ τα οποία άγουν σε ζεύγη 1&4, 2&3. Στο κύκλωμα πλέον προστίθεται και μια διάδος ελευθέρως ροής όπου θα πραγματοποιεί την ανακυκλοφορία του ρεύματος του κινητήρα. Όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα η πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ανταποκρίνεται σχεδόν το ίδιο με την ημιελεγχόμενη γέφυρα.

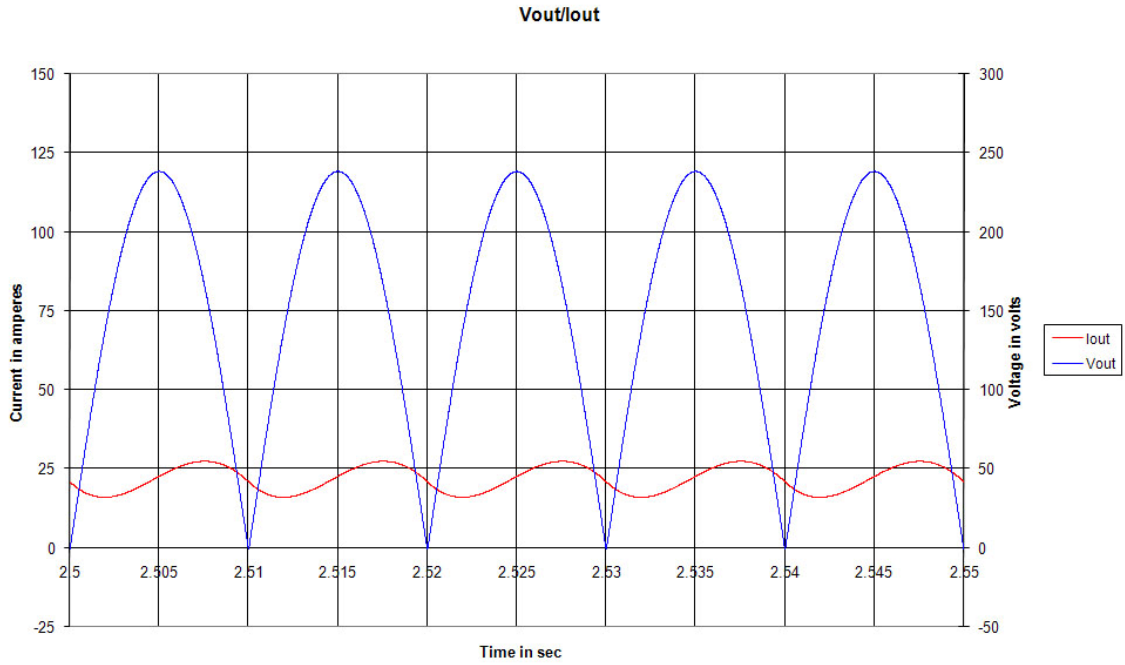


**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 50%**

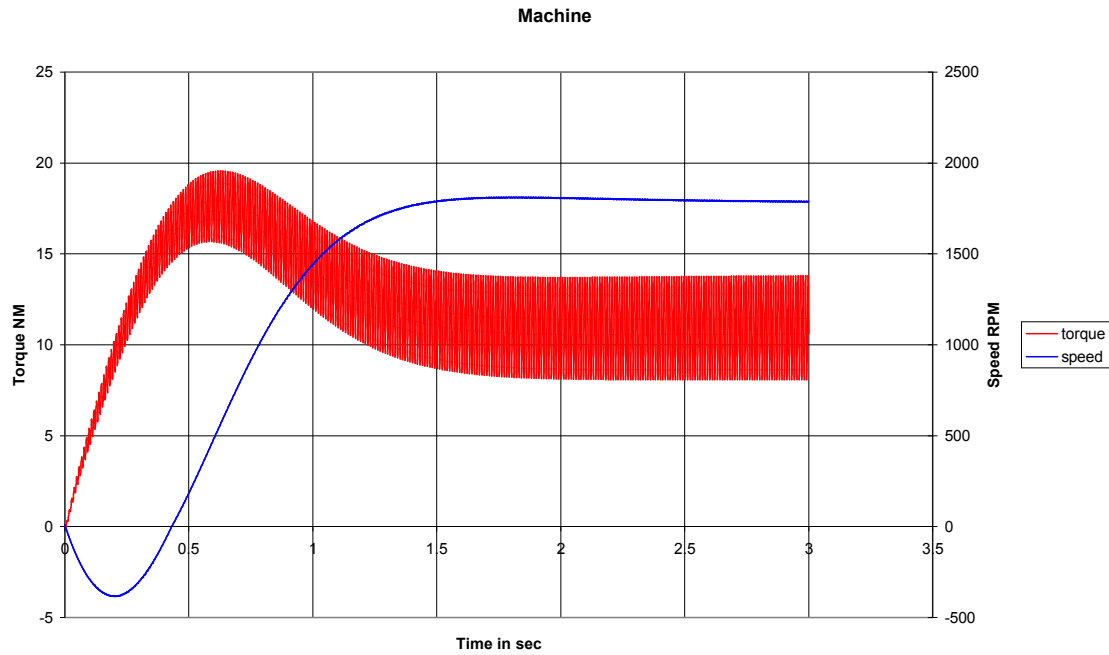


**Σχήμα 4.52** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50%

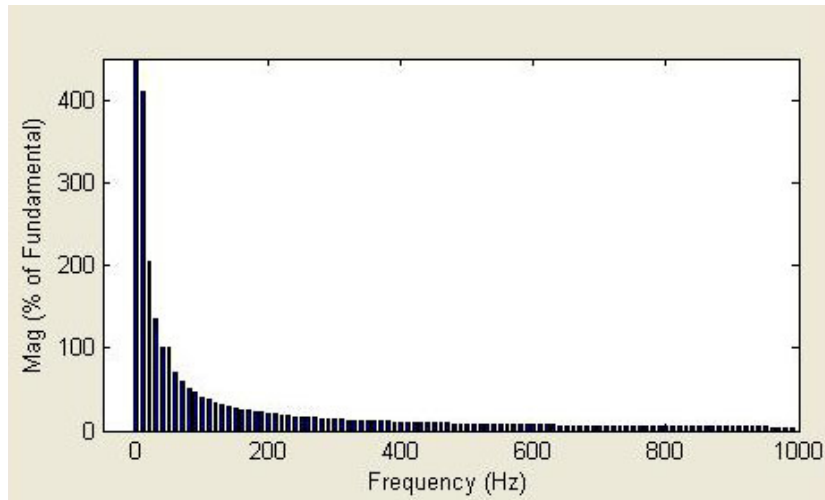
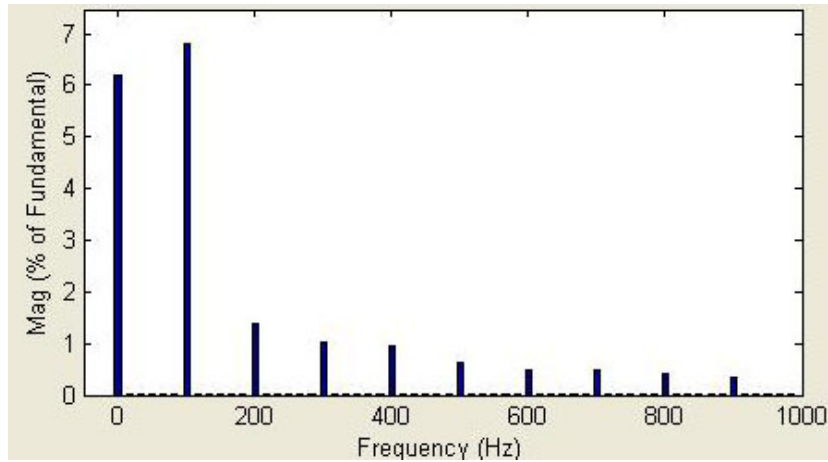
Παρατηρούμε πως η είσοδος στην πλήρως ελεγχόμενη είναι παρόμοια με αυτή της ημιελεγχόμενης γέφυρας όμως παρουσιάζεται μια διαφοροποίηση στις αρμονικές του ρεύματος εισόδου και αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην προσθήκη των δύο επιπλέον ημιαγωγικών διακοπών στο κύκλωμά μας.



**Σχήμα 4.53** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 50%

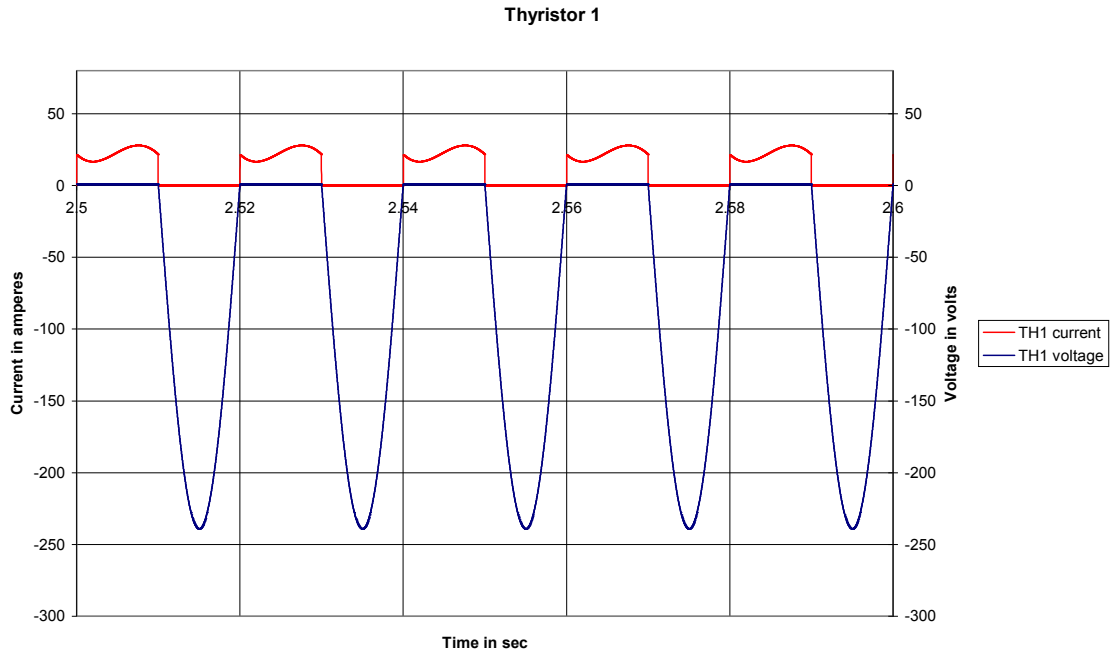


**Σχήμα 4.54** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=0$ , load 50%

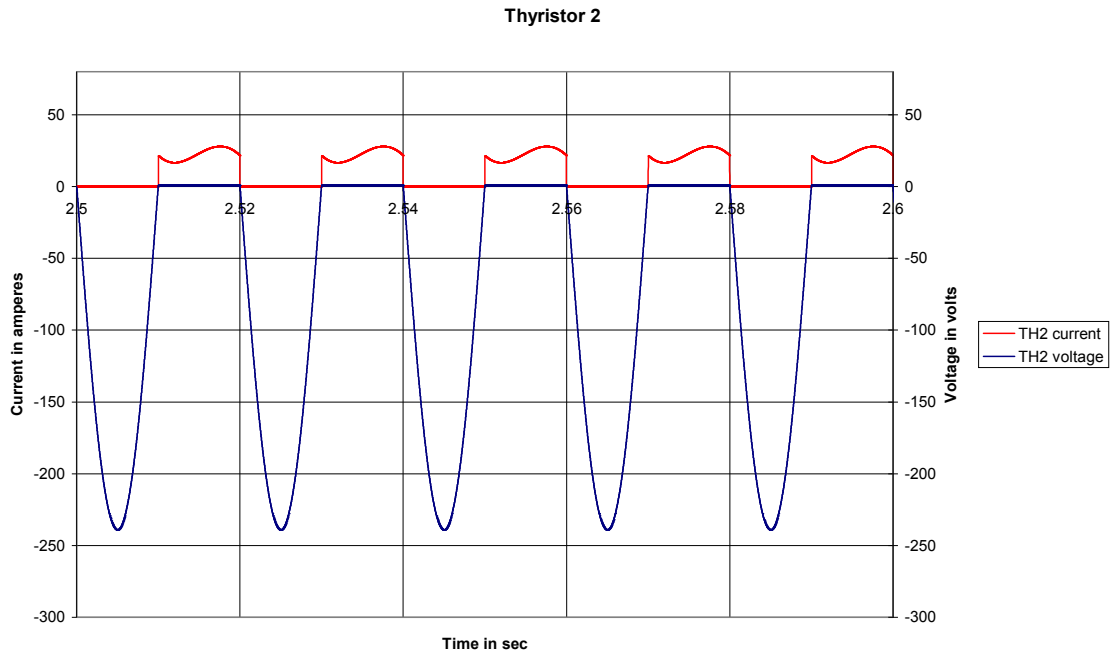


**Σχήμα 4.55** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου  $M1$ ,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου  $M1$ ,  $\alpha=0$ , load 50%

Παρατηρούμε μια διαφοροποίηση των αρμονικών στην έξοδο του κυκλώματος συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση της ημιελεγχόμενης γέφυρας. Παράλληλα παρατηρούμε την μείωσή τους στην έξοδο του κυκλώματος, συγκριτικά πάντα με τις αρμονικές των σημάτων εισόδου.

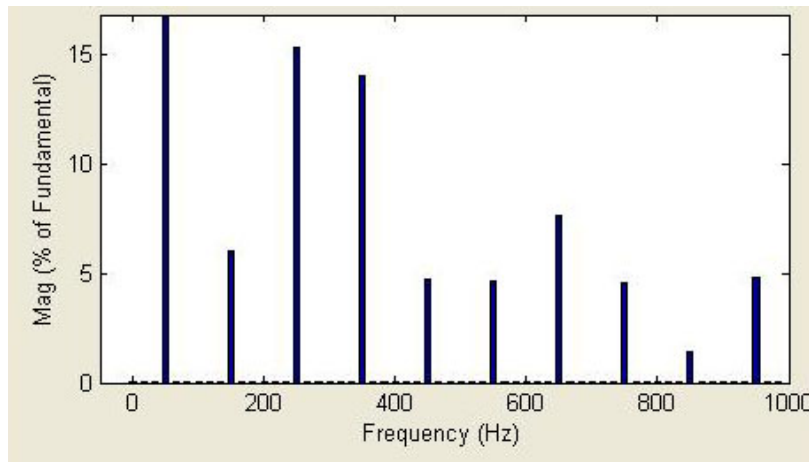
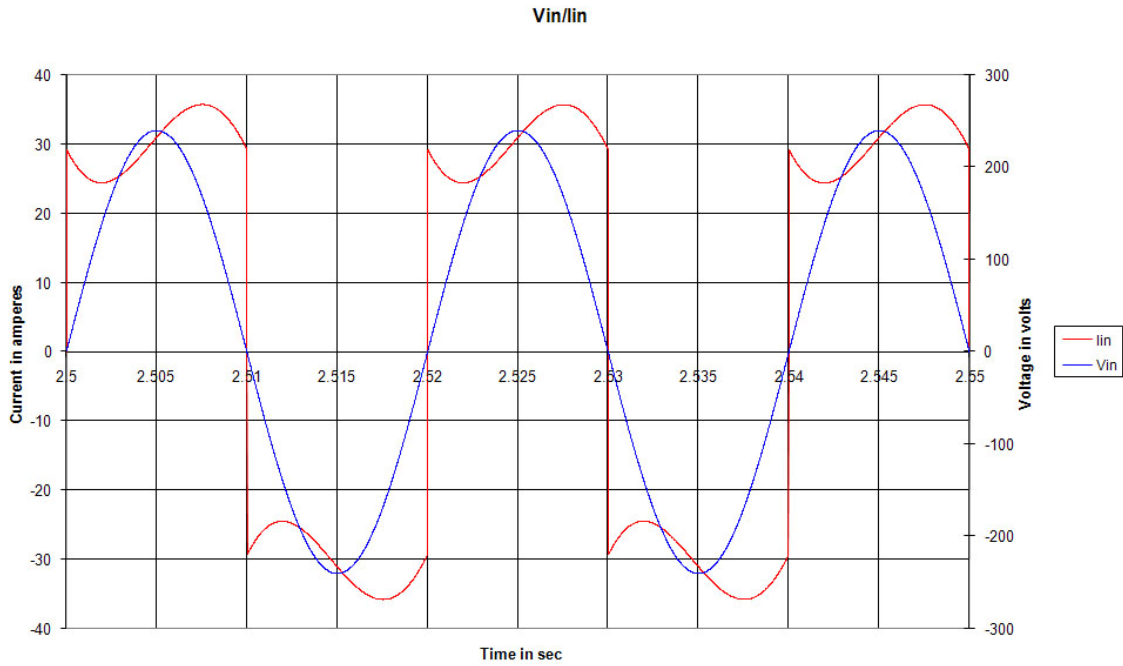


**Σχήμα 4.56** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 50%

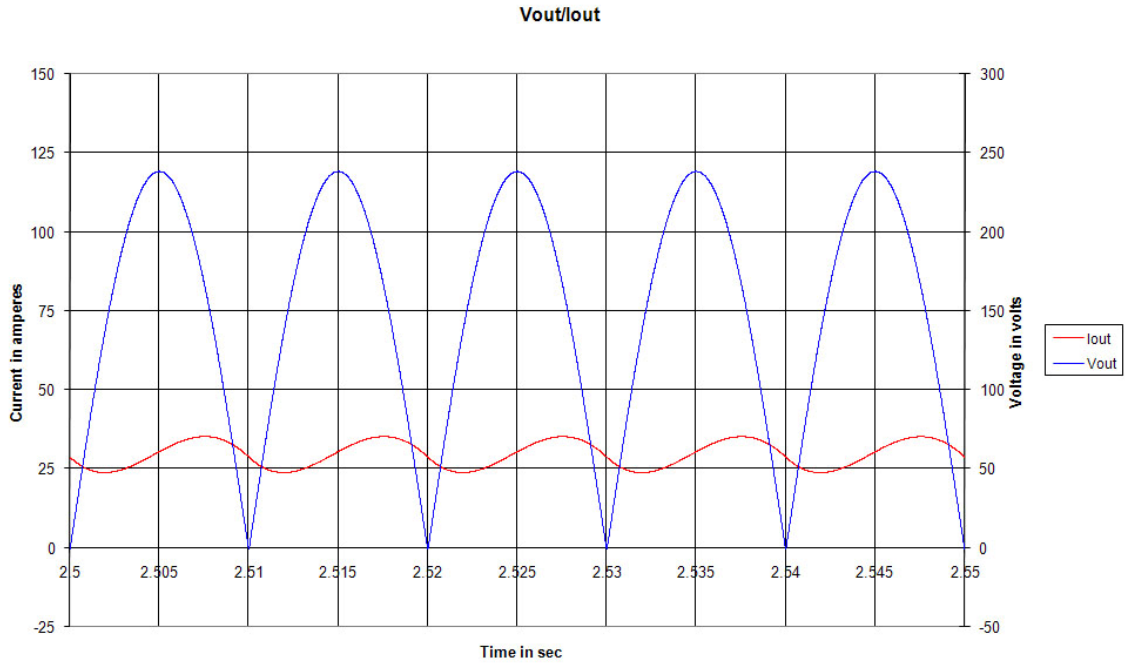


**Σχήμα 4.57** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 50%

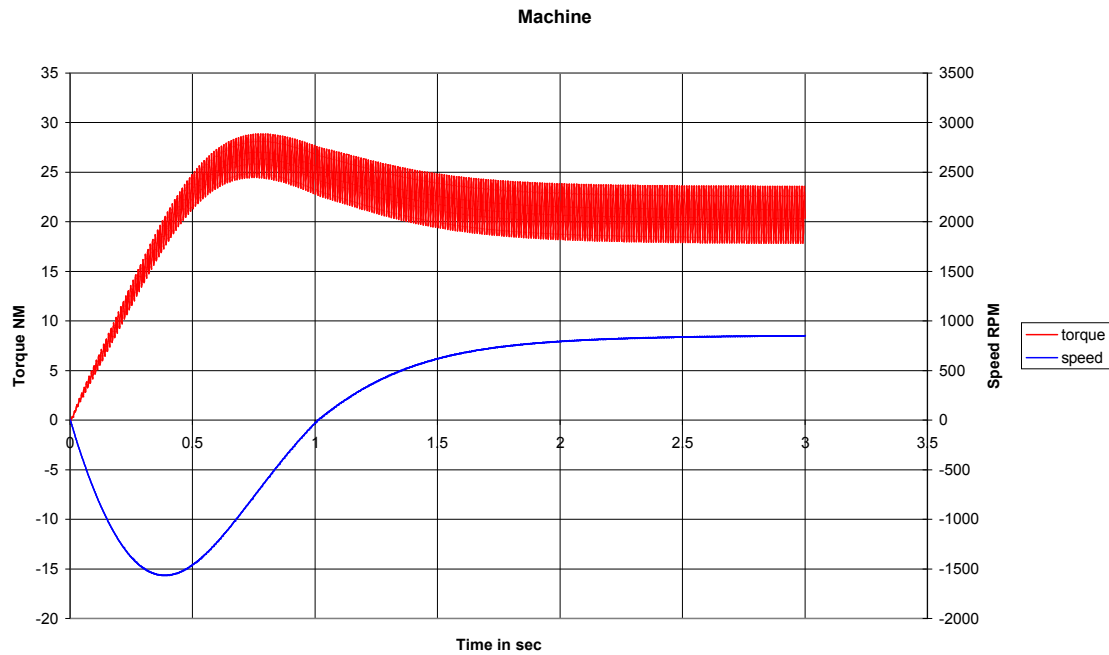
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 100%**



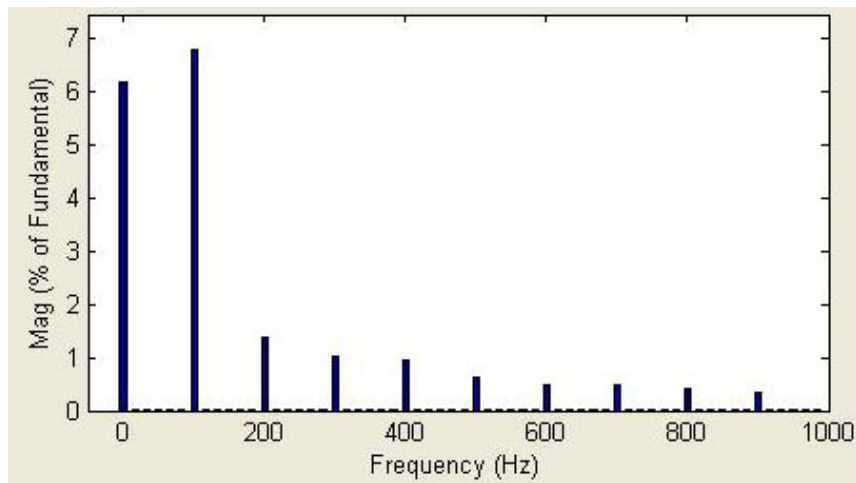
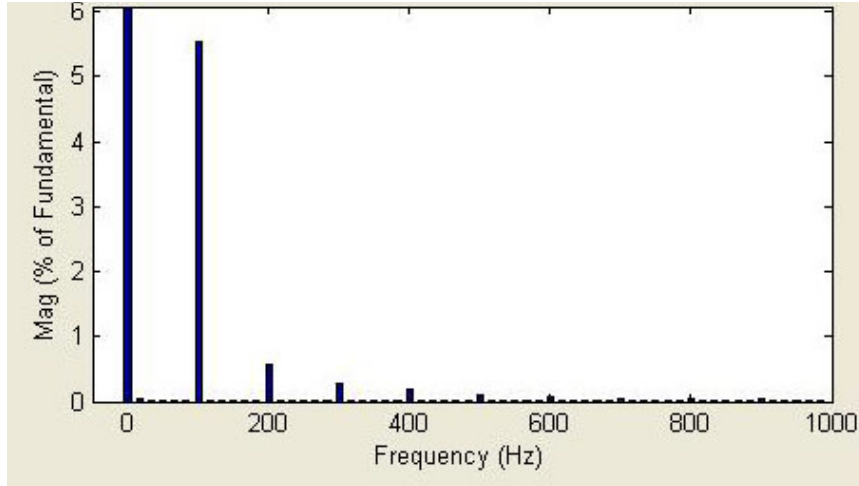
**Σχήμα 4.58** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100%



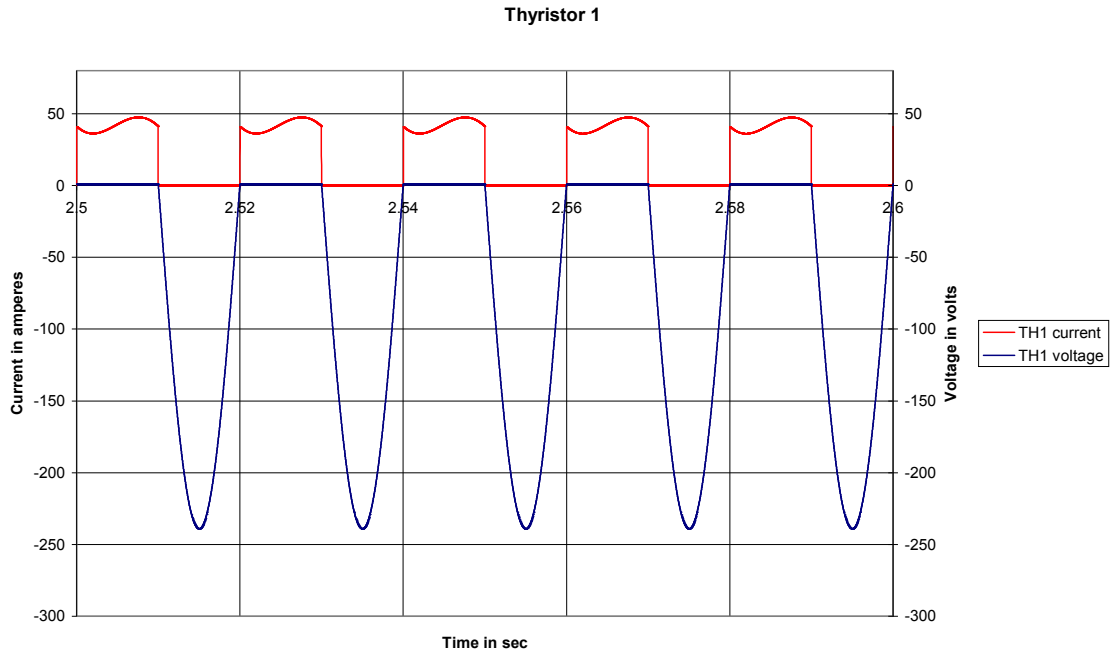
**Σχήμα 4.59** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100%



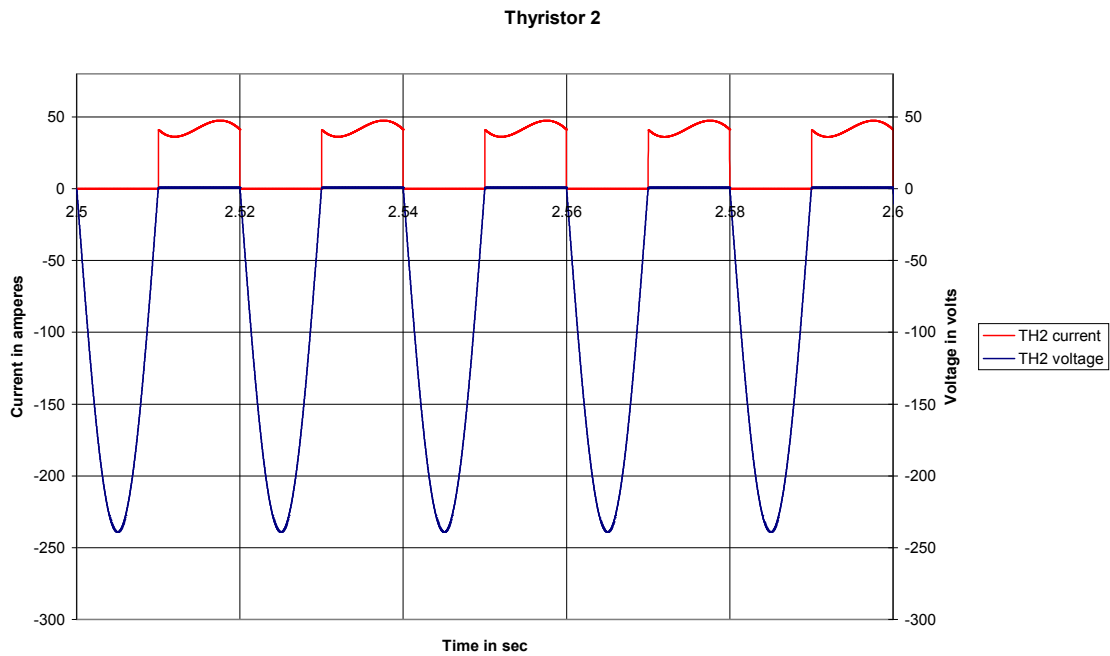
**Σχήμα 4.60** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=0$ , load 100%



**Σχήμα 4.61** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $\alpha=0$ , load 100%



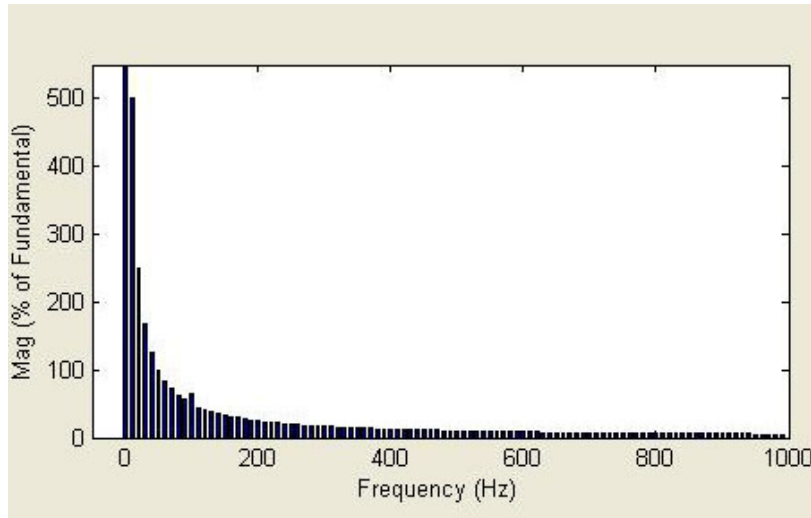
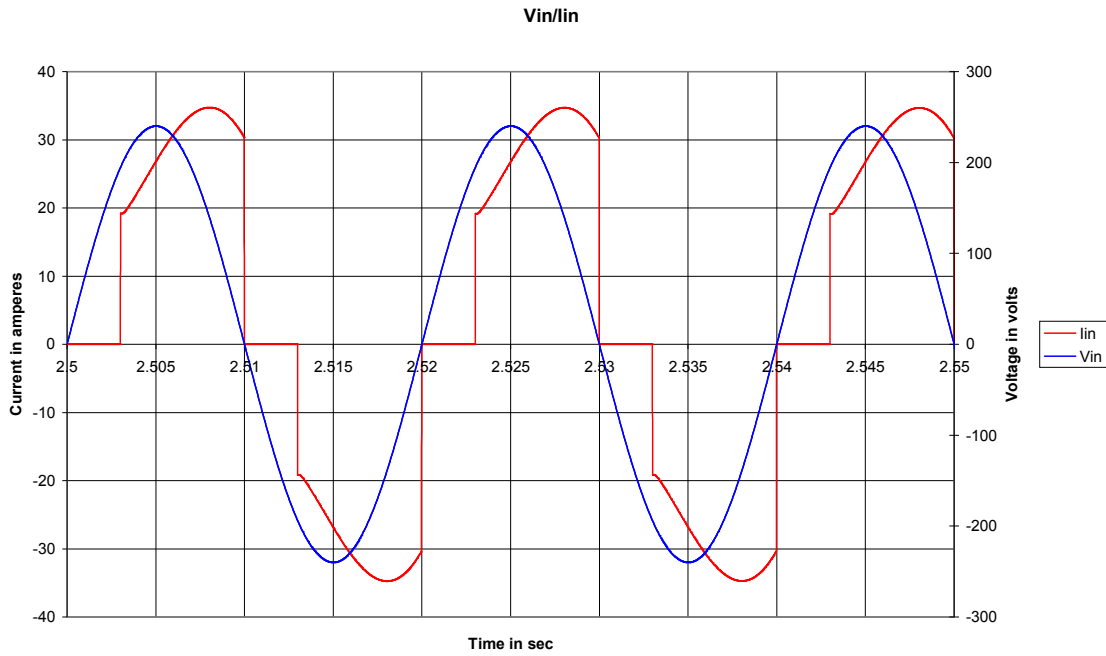
Σχήμα 4.62 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ο</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 100%



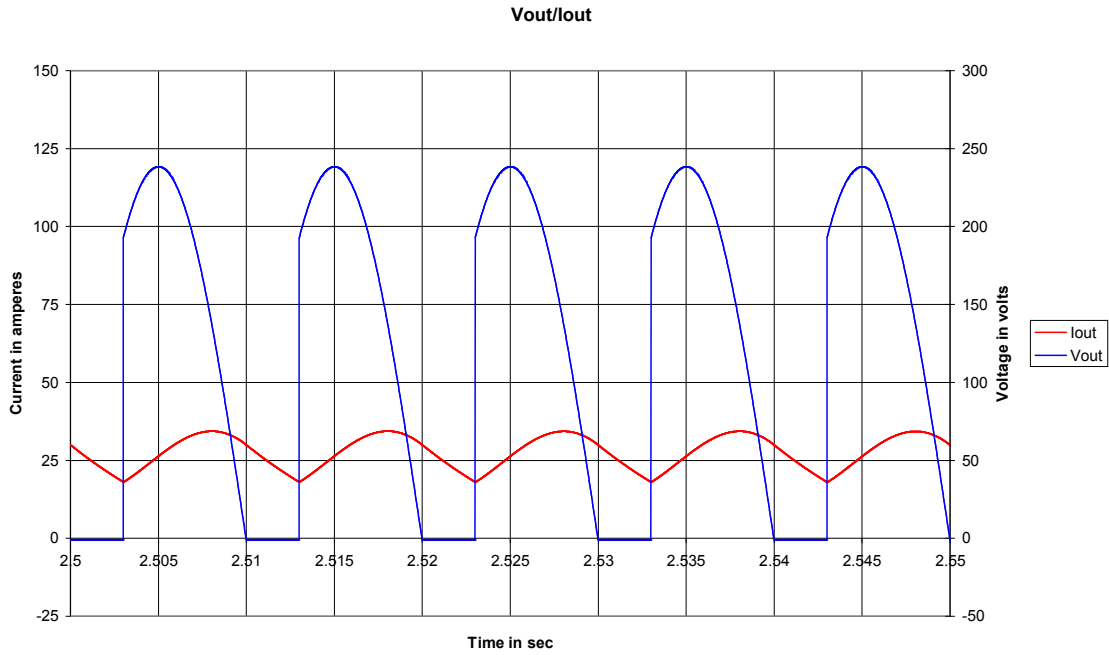
Σχήμα 4.63 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ο</sup> Thyristor M1,  $\alpha=0$ , load 100%



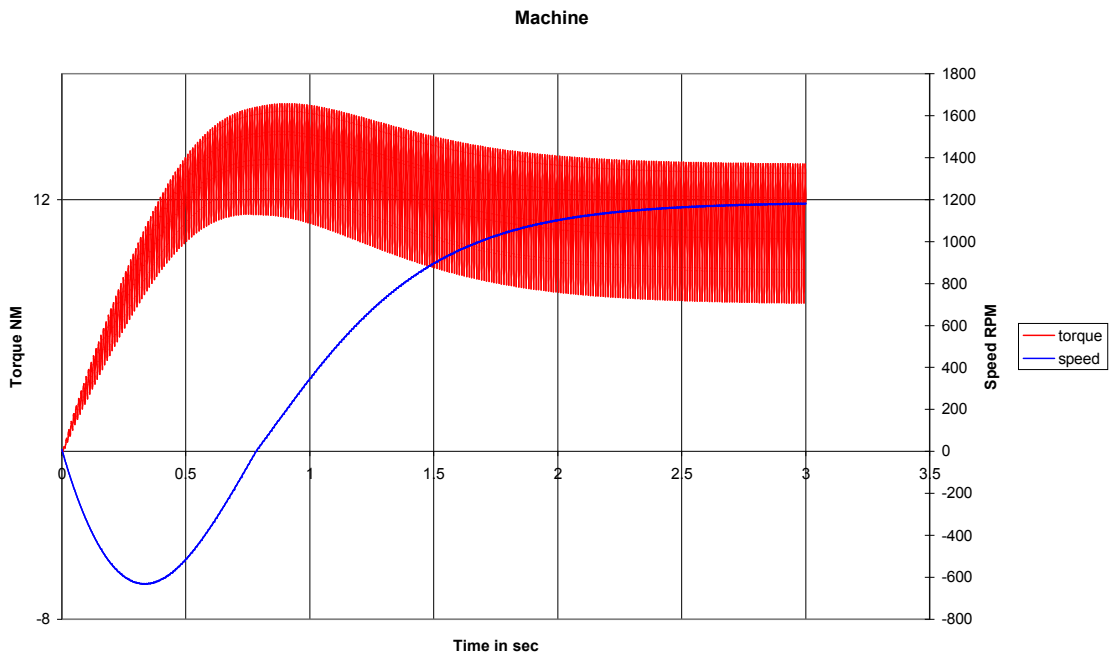
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 50%**



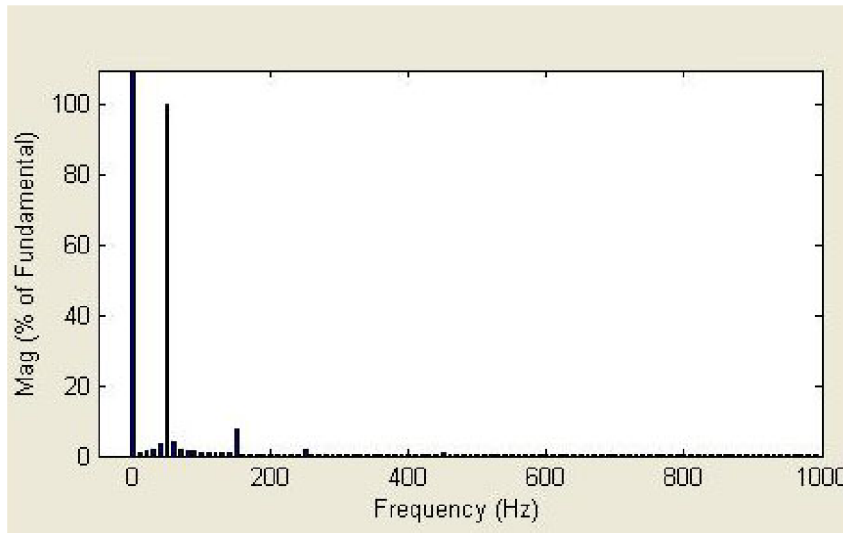
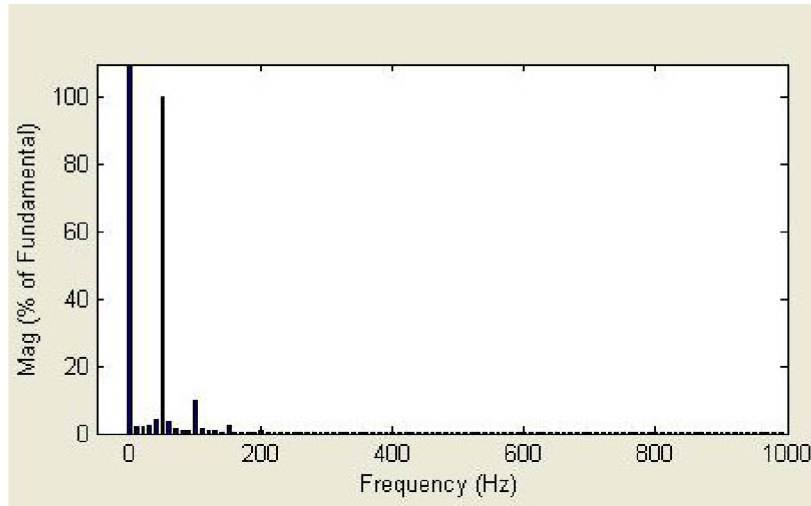
**Σχήμα 4.64** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60^\circ$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60^\circ$ , load 50%



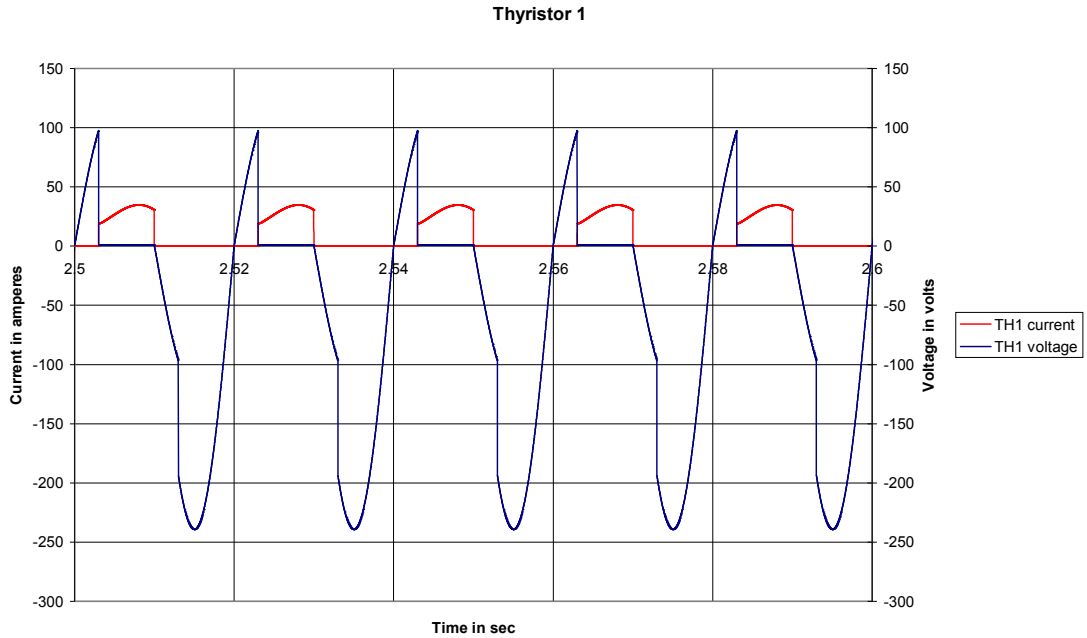
**Σχήμα 4.65** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=60$ , load 50%



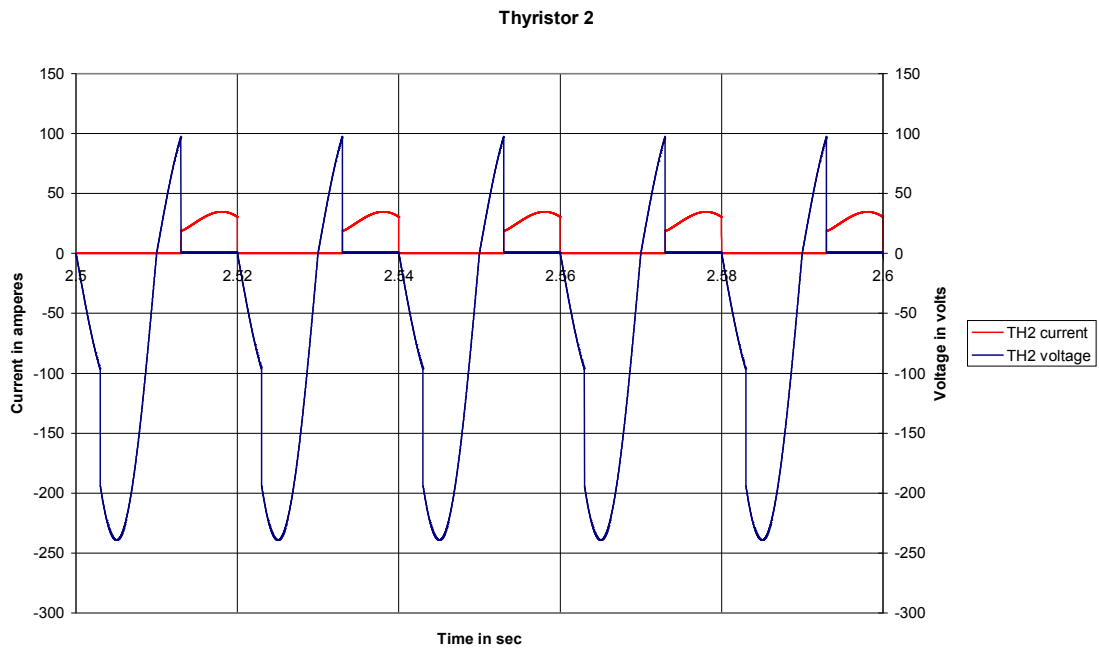
**Σχήμα 4.66** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=60$ , load 50%



**Σχήμα 4.67** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $\alpha=60$ , load 50%



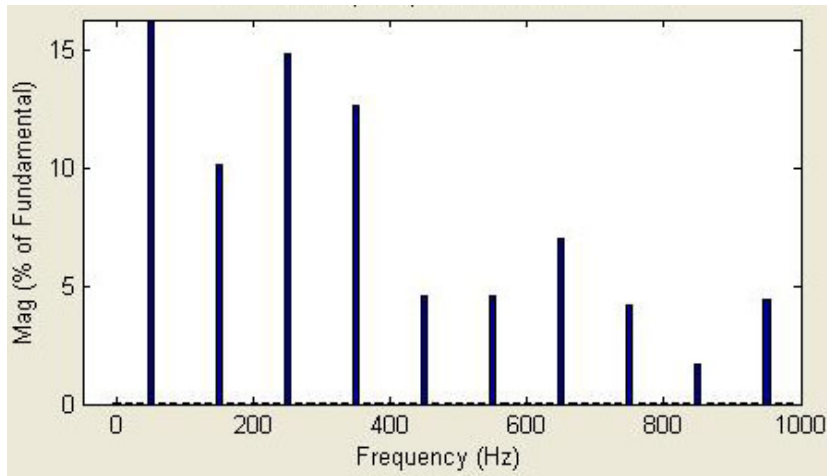
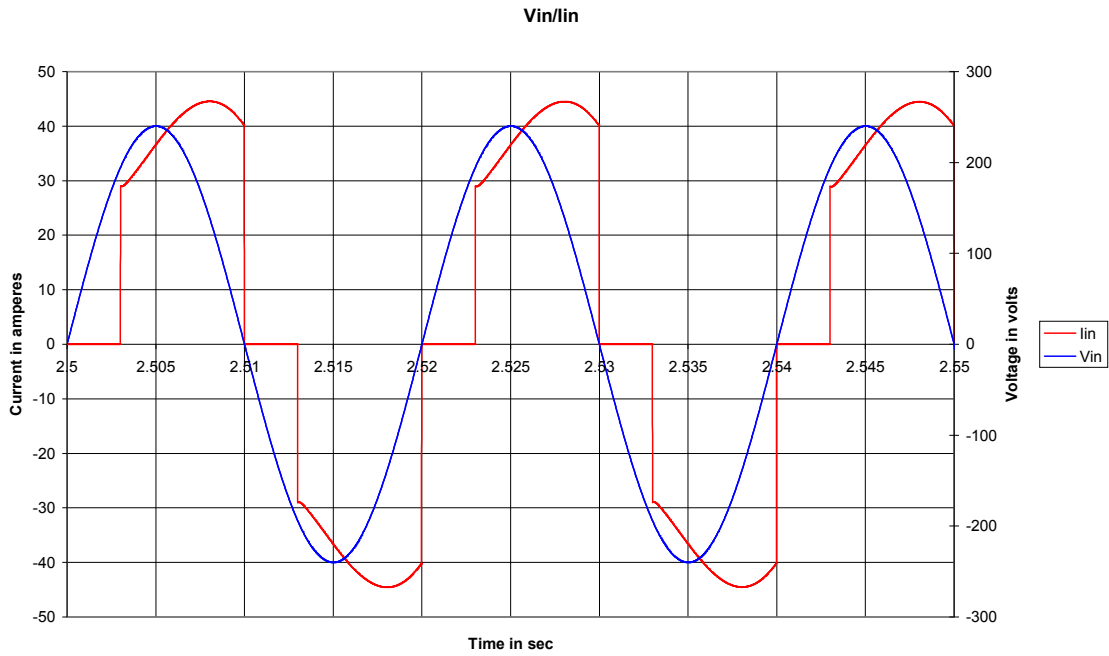
**Σχήμα 4.68** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 50%



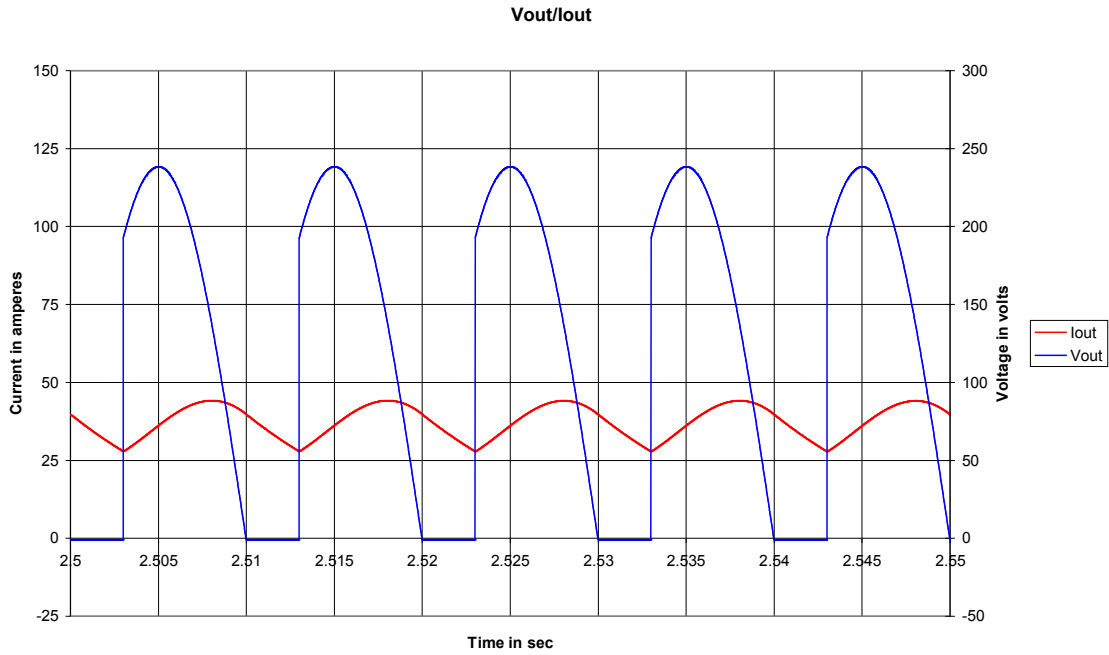
**Σχήμα 4.69** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 50%

Στα άκρα των Θυρίστορ παρατηρούμε μια διαφοροποίηση σε αυτή την περίπτωση συγκριτικά με την ημieleγόμενη γέφυρα. Το ημιτονοειδές σήμα υπόκειται σε μια μικρή παραμόρφωση ενώ τα Θυρίστορ παρουσιάζουν καλύτερη σβέση.

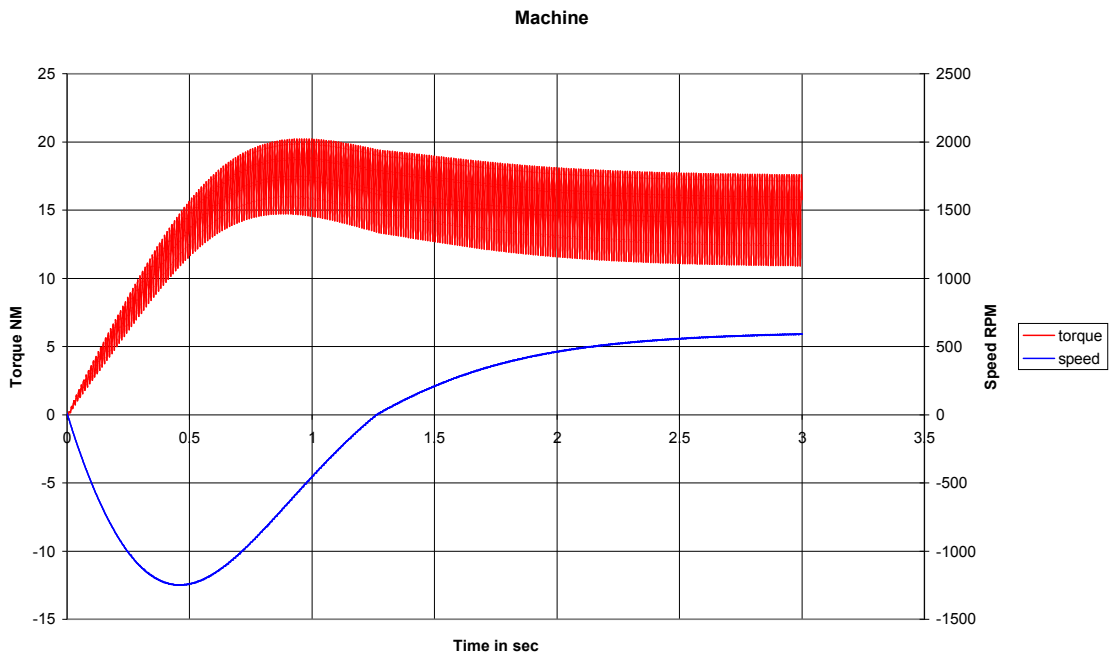
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M1, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 70%**



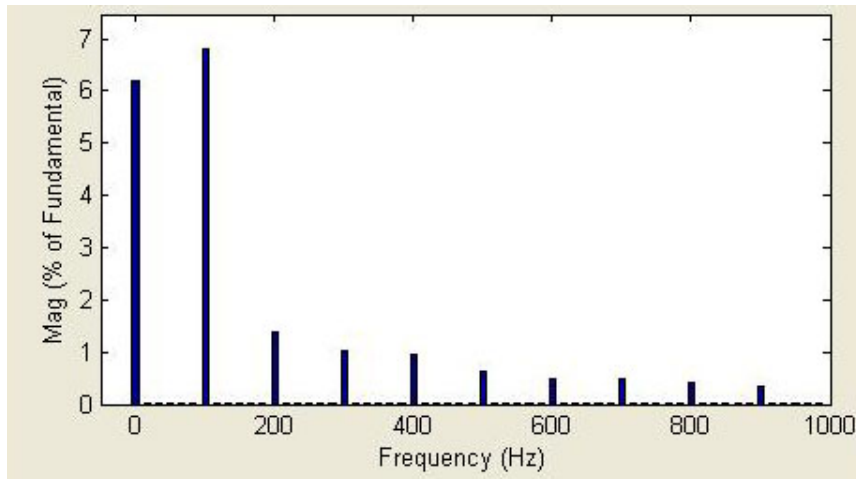
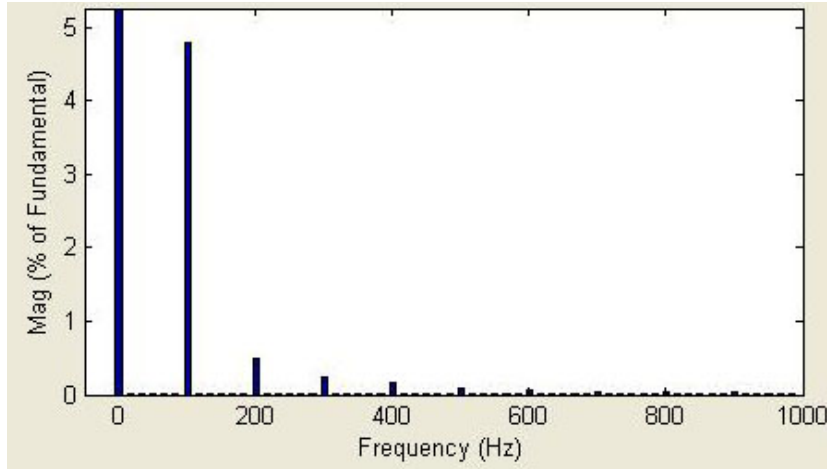
**Σχήμα 4.70** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60^\circ$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $\alpha=60^\circ$ , load 70%



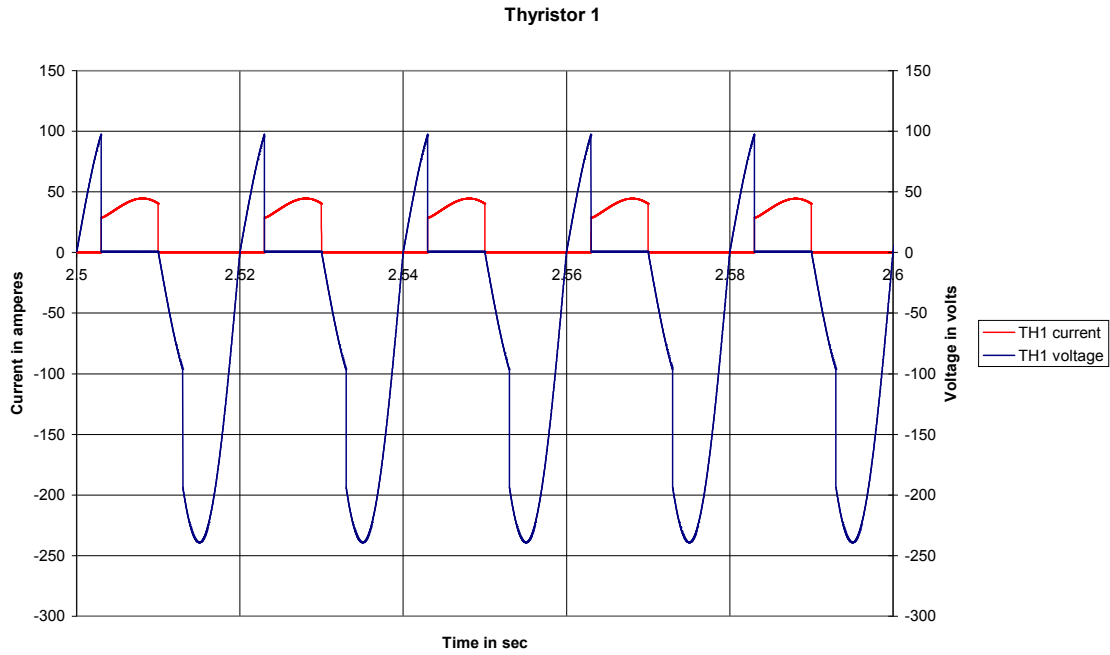
**Σχήμα 4.71** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $\alpha=60$ , load 70%



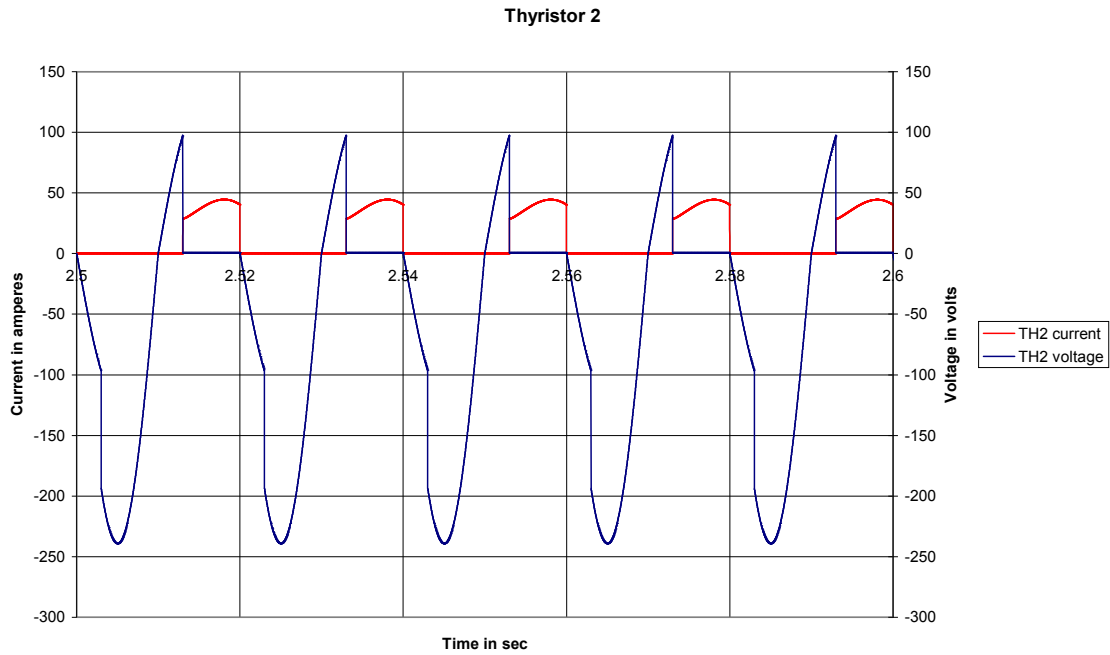
**Σχήμα 4.72** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $\alpha=60$ , load 70%



**Σχήμα 4.73** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $\alpha=60$ , load 70%



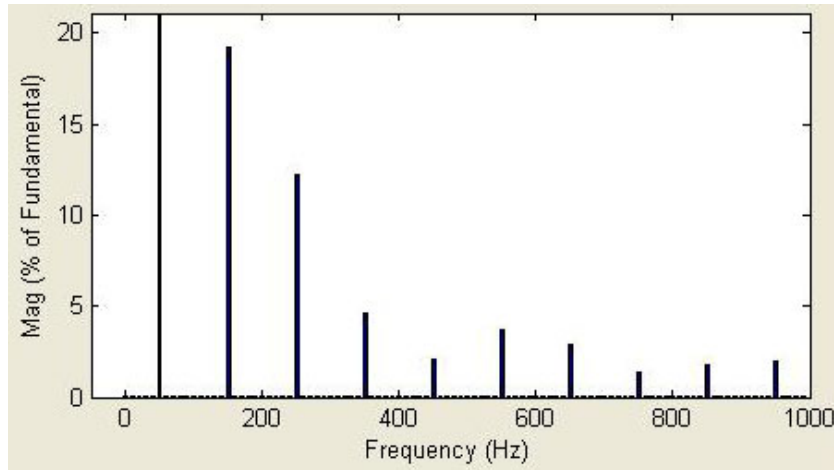
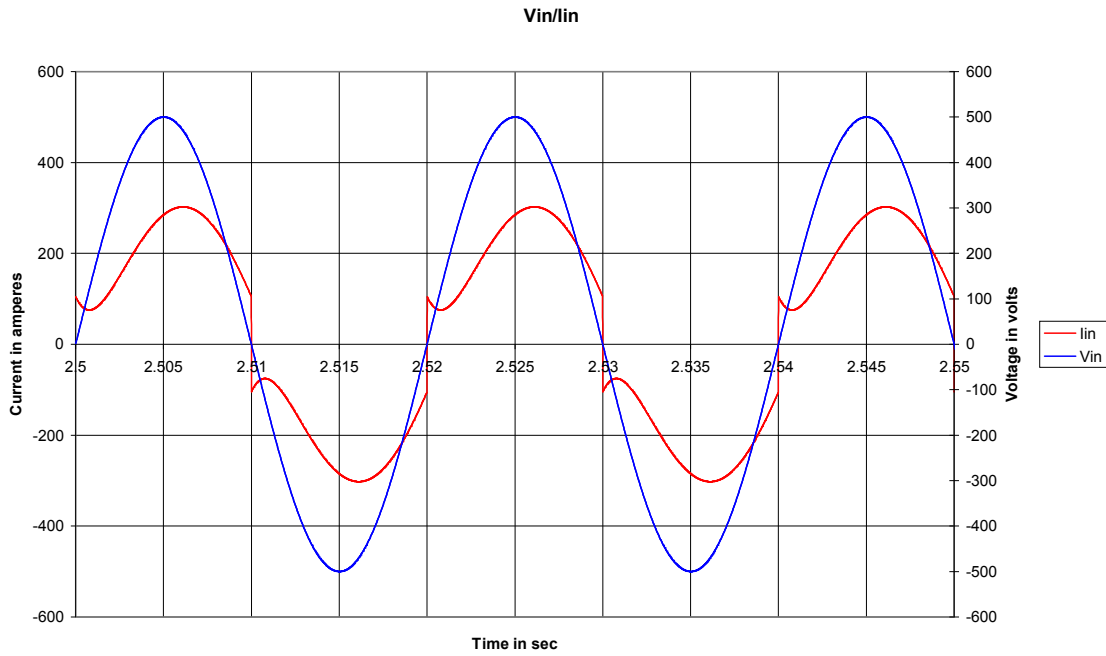
Σχήμα 4.74 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 70%



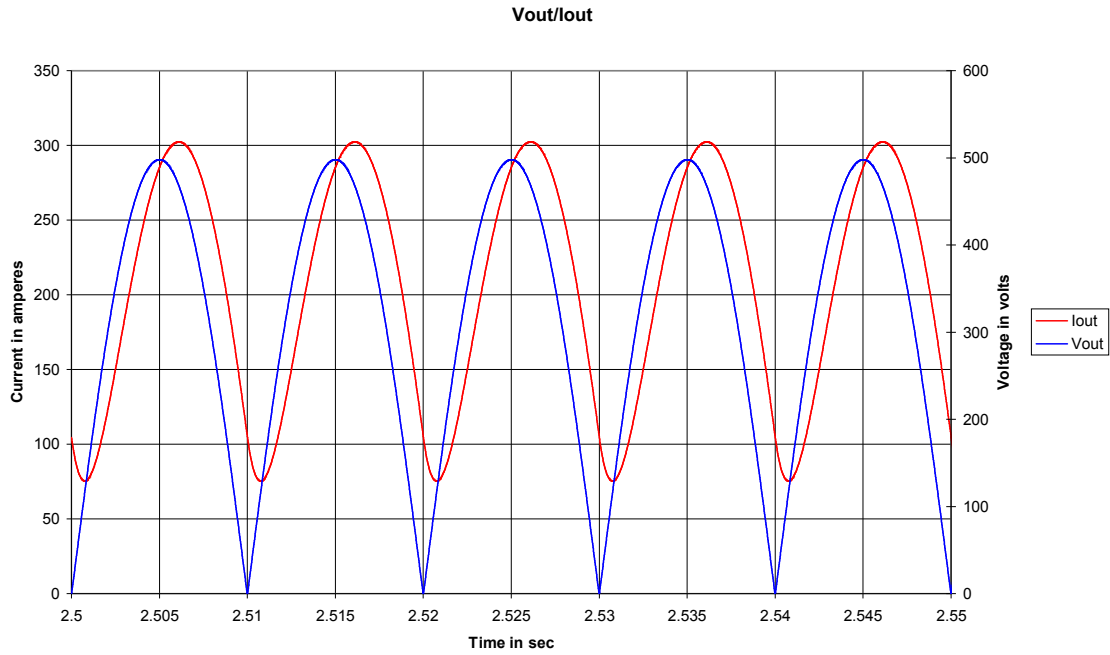
Σχήμα 4.75 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M1,  $\alpha=60$ , load 70%



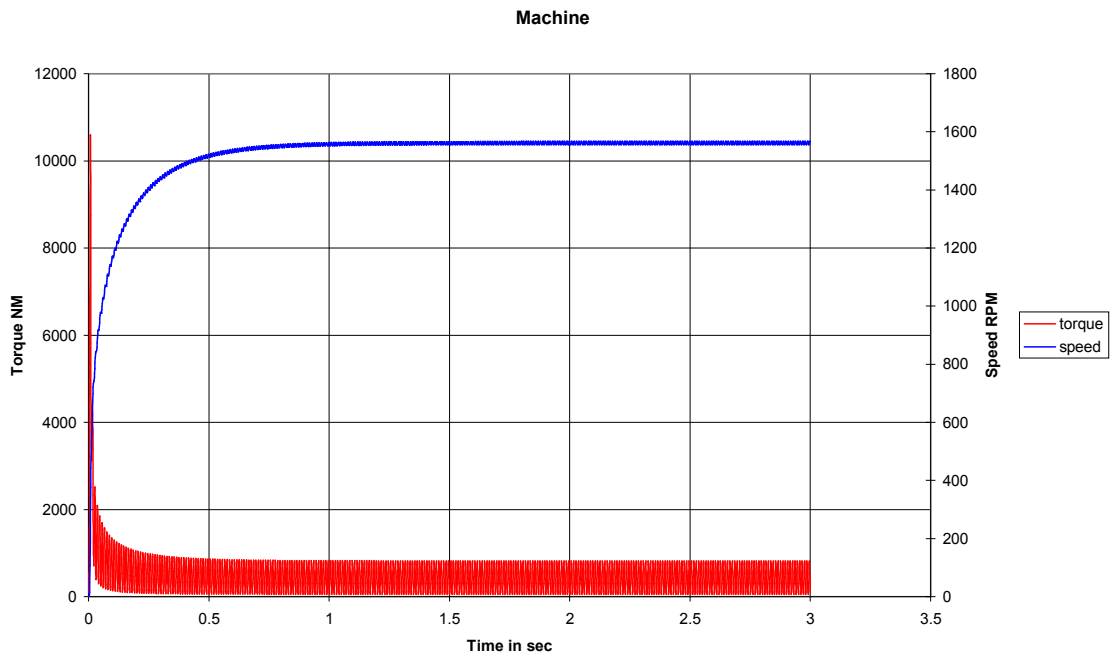
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 50%**



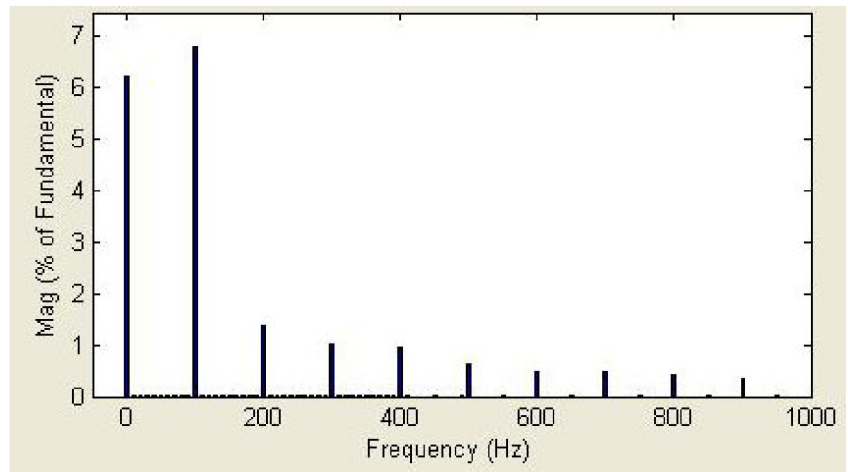
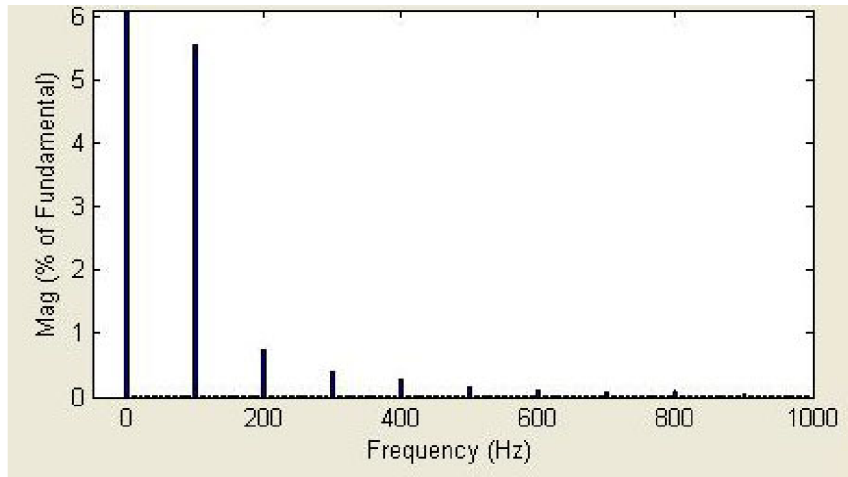
**Σχήμα 4.76** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50%



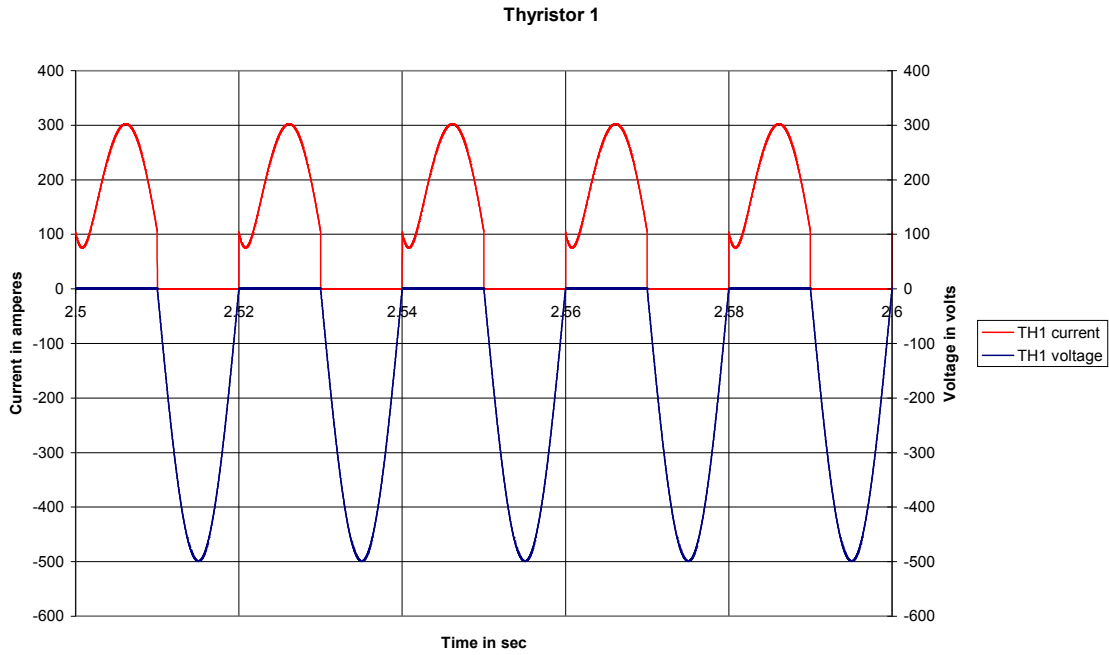
Σχήμα 4.77 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50%



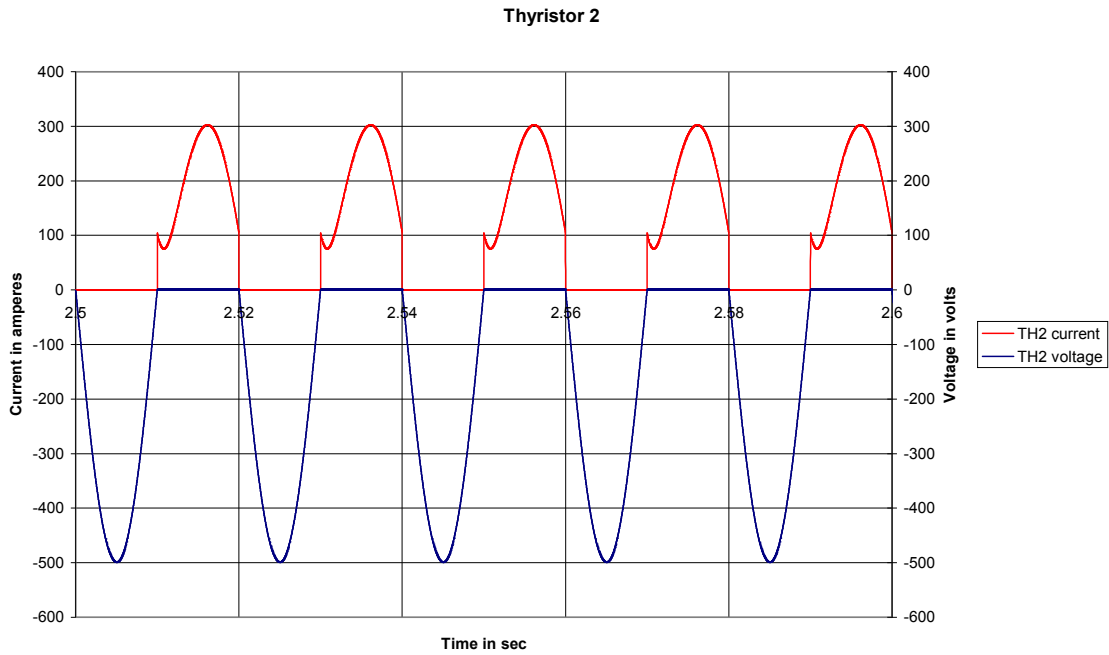
Σχήμα 4.78 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=0$ , load 50%



**Σχήμα 4.79** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 50%

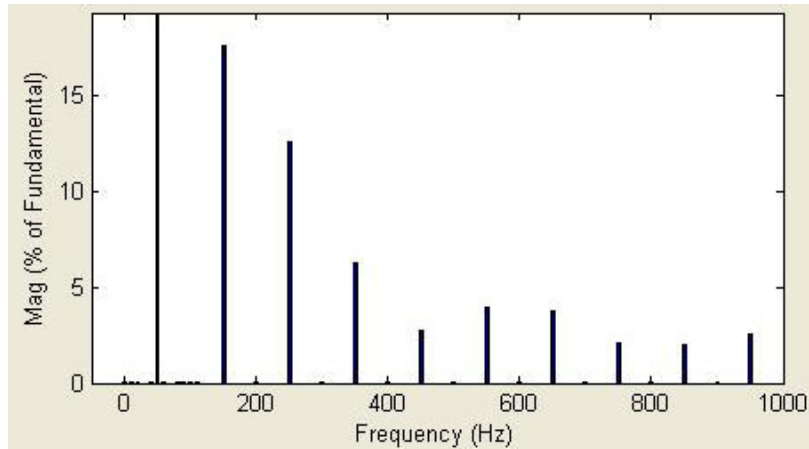
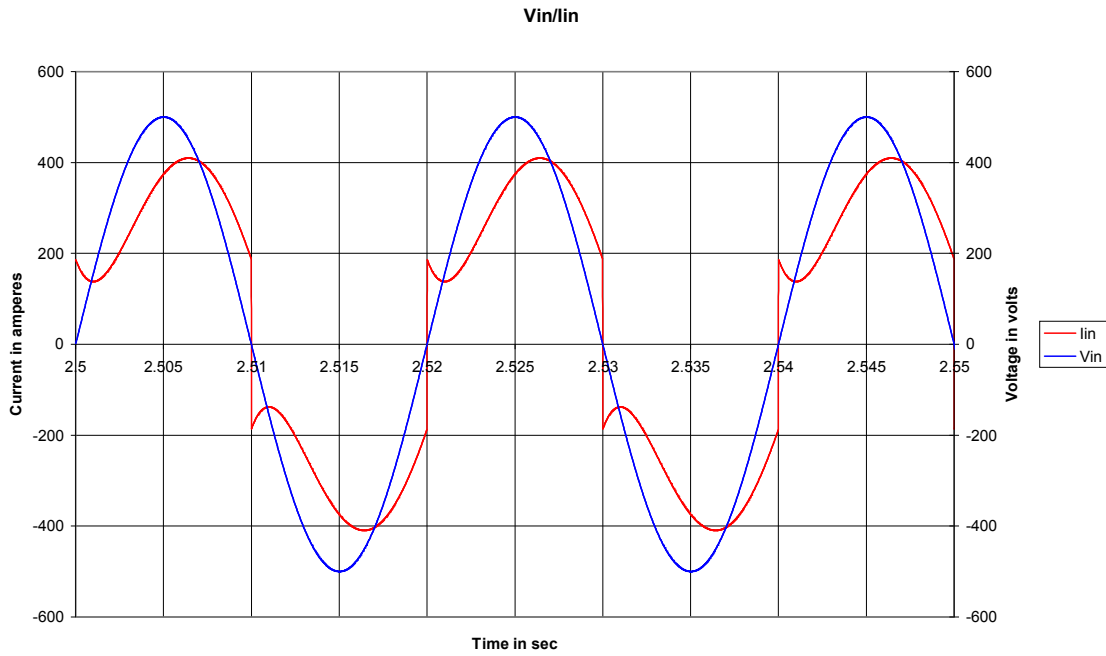


Σχήμα 4.80 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 50%

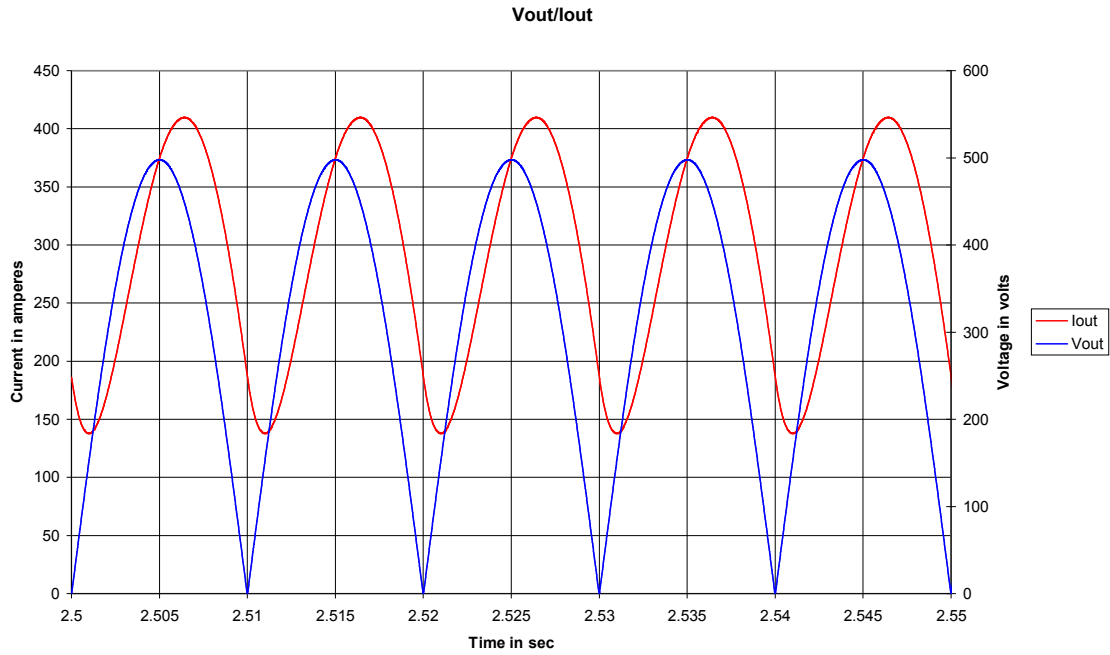


Σχήμα 4.81 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 50%

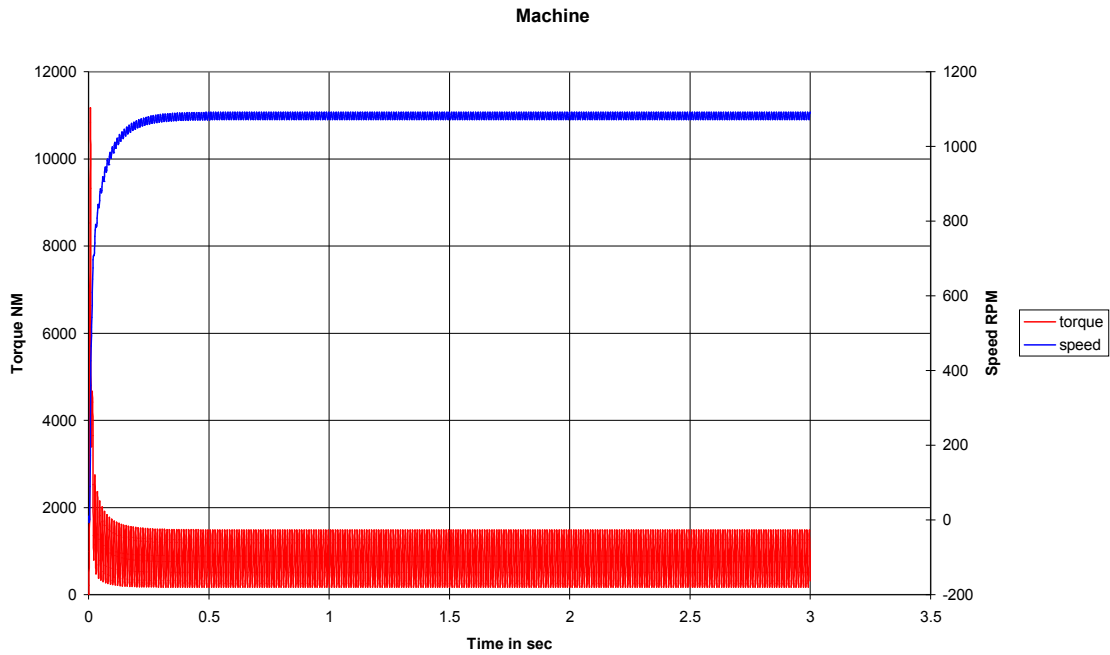
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης  $0^\circ$ , ονομαστικό φορτίο 100%**



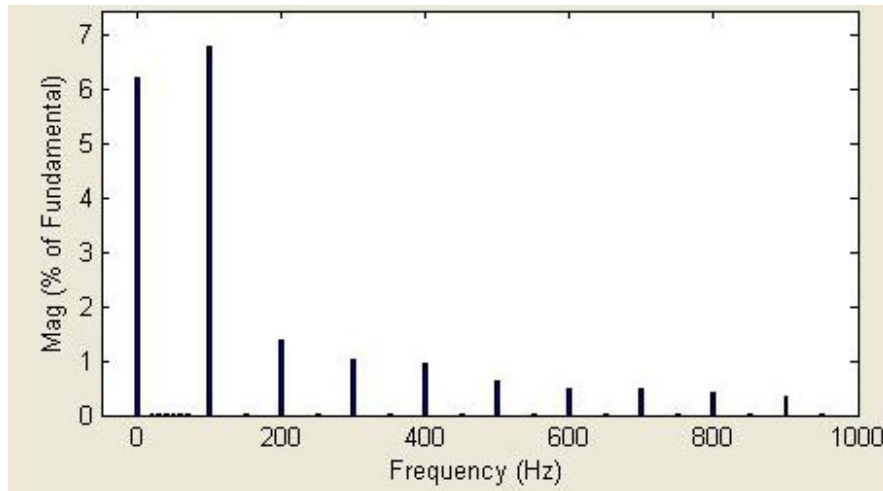
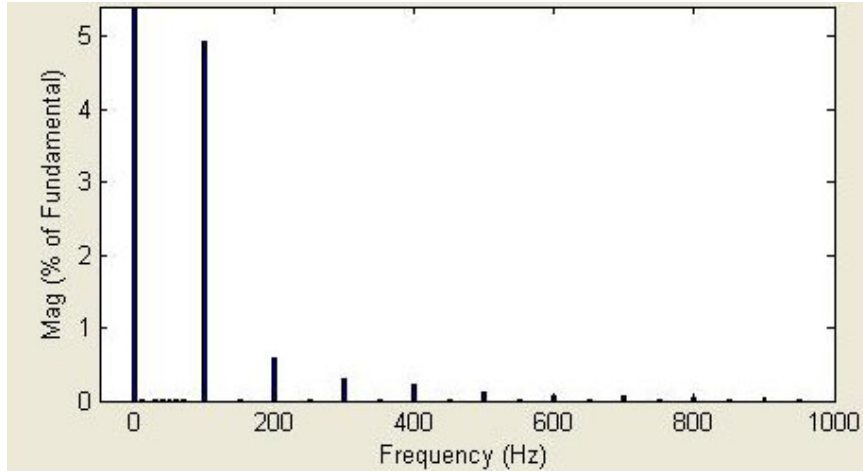
**Σχήμα 4.82** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100%



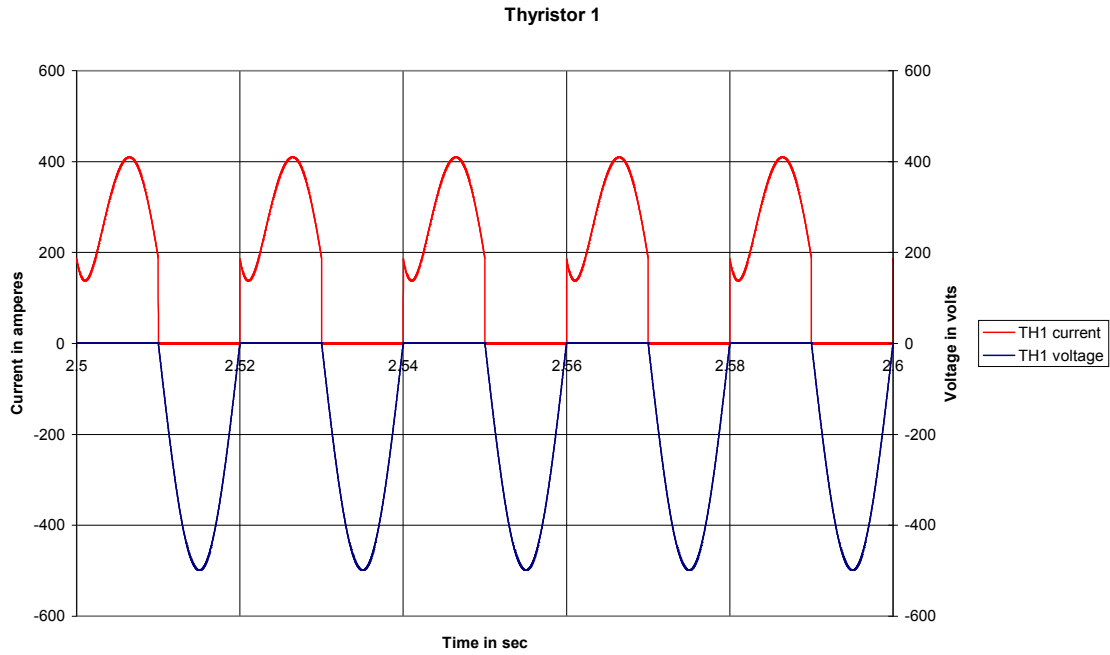
Σχήμα 4.83 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100%



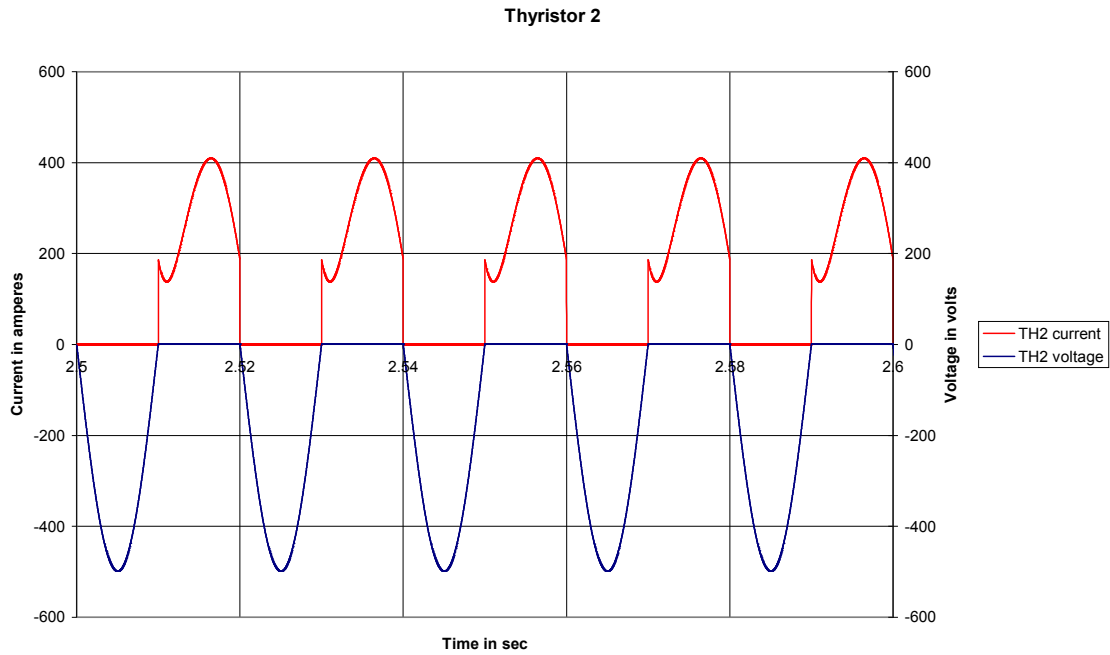
Σχήμα 4.84 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=0$ , load 100%



**Σχήμα 4.85** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=0$ , load 100%



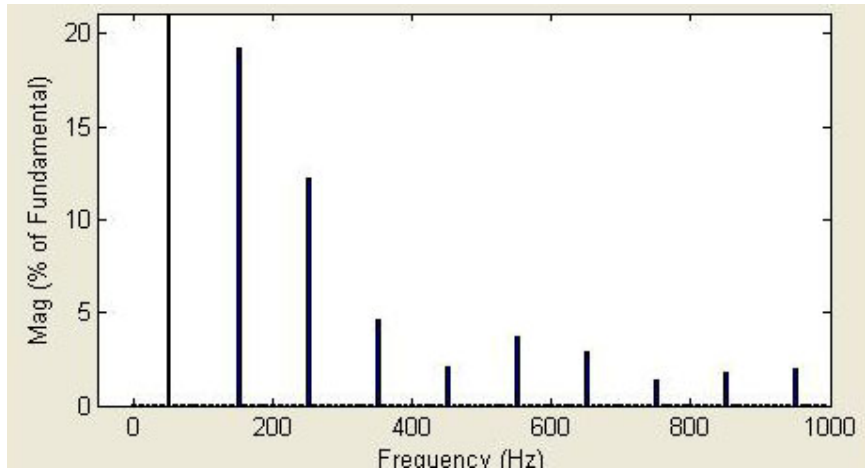
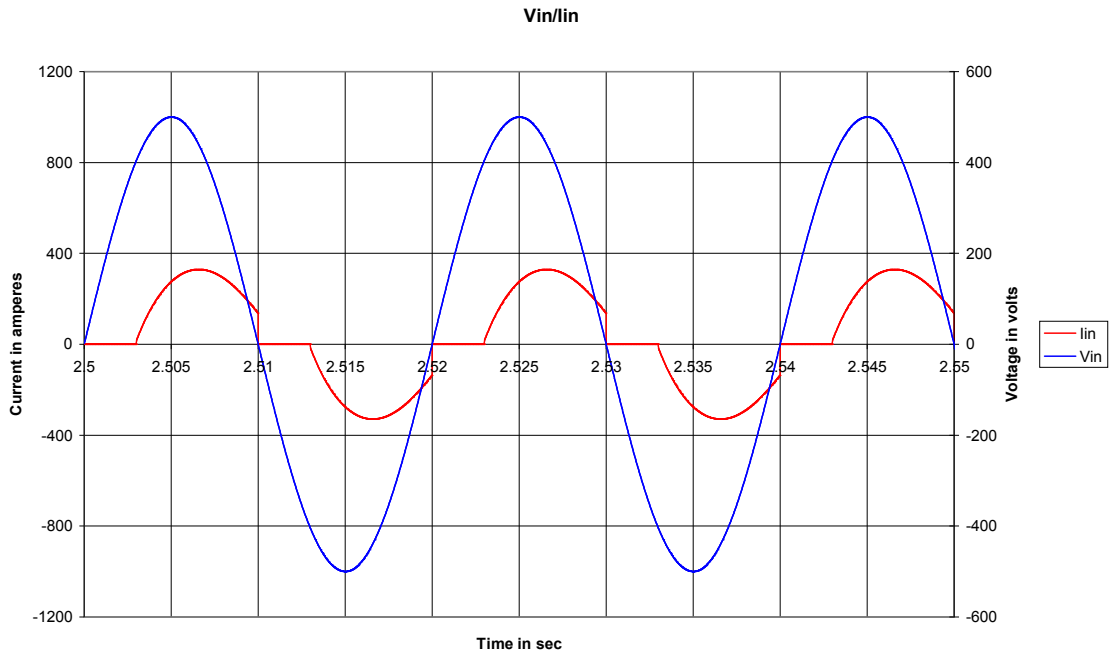
**Σχήμα 4.86** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 100%



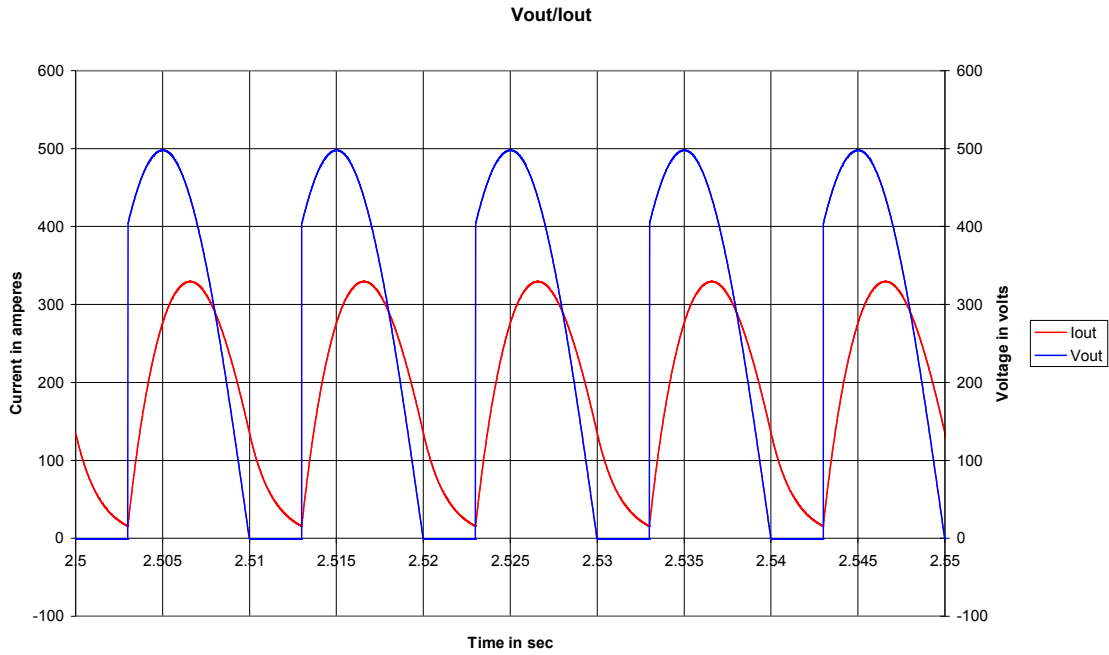
**Σχήμα 4.87** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=0$ , load 100%



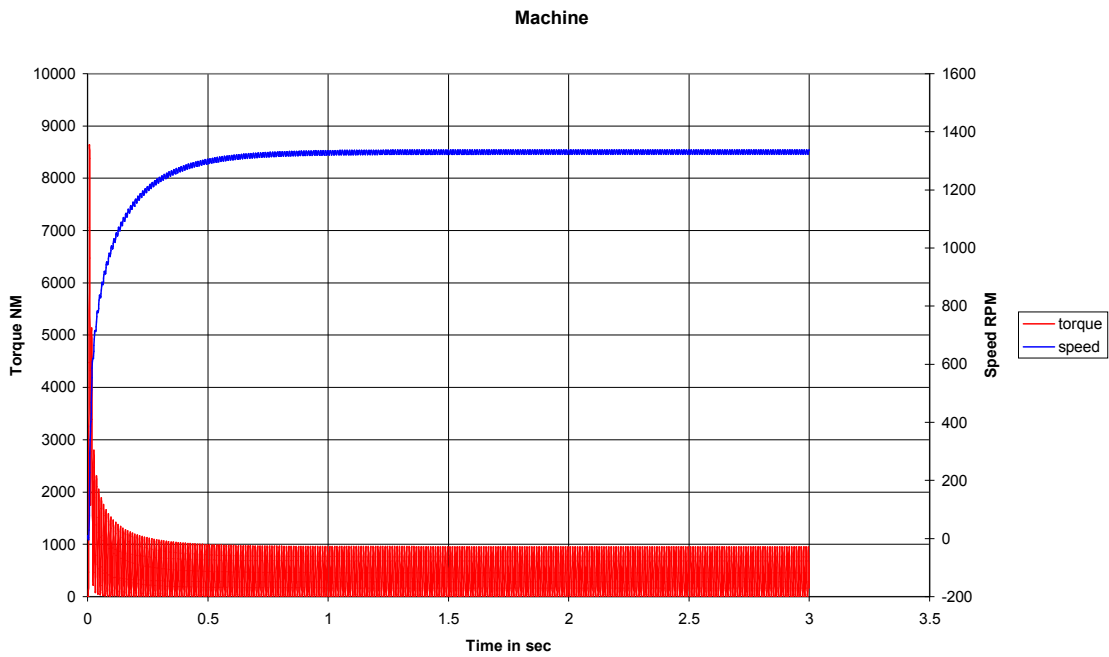
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 50%**



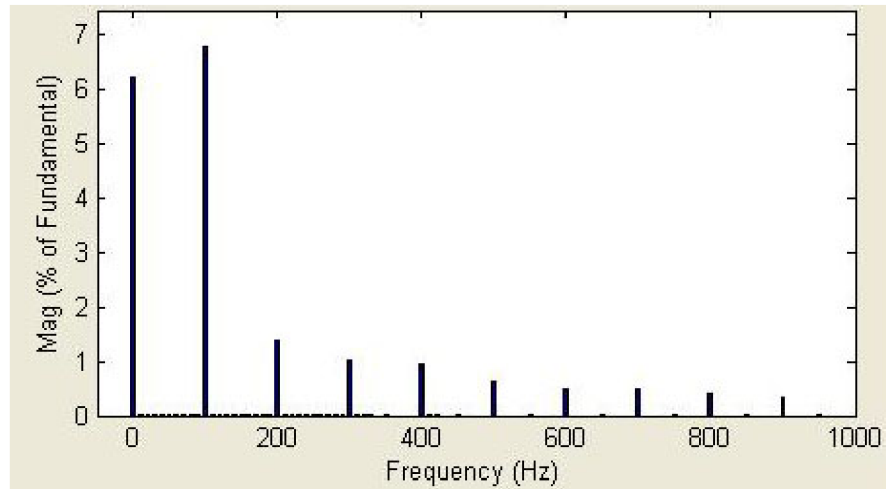
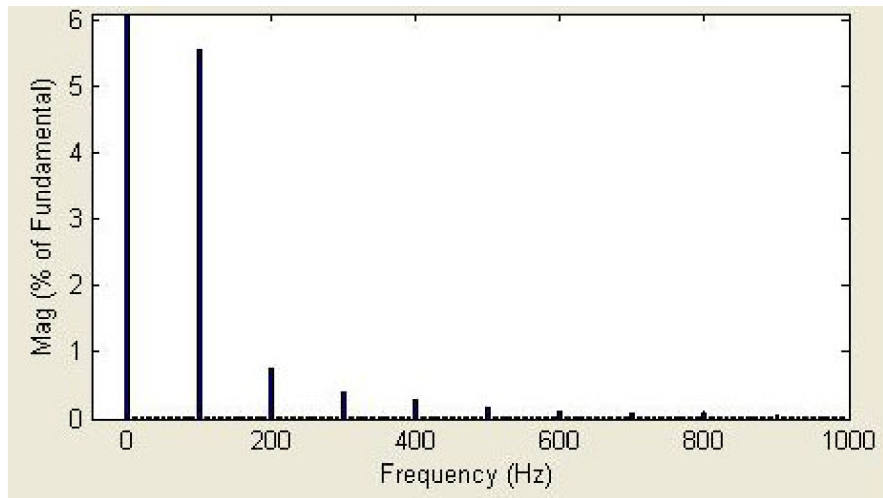
**Σχήμα 4.88** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60^\circ$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60^\circ$ , load 50%



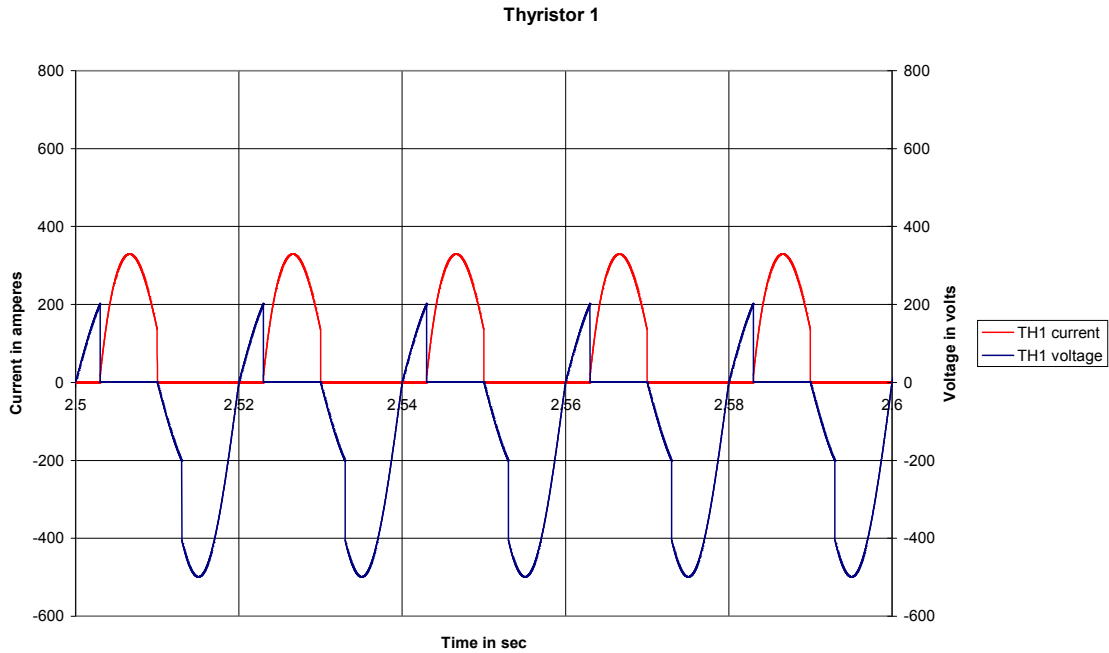
Σχήμα 4.89 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 50%



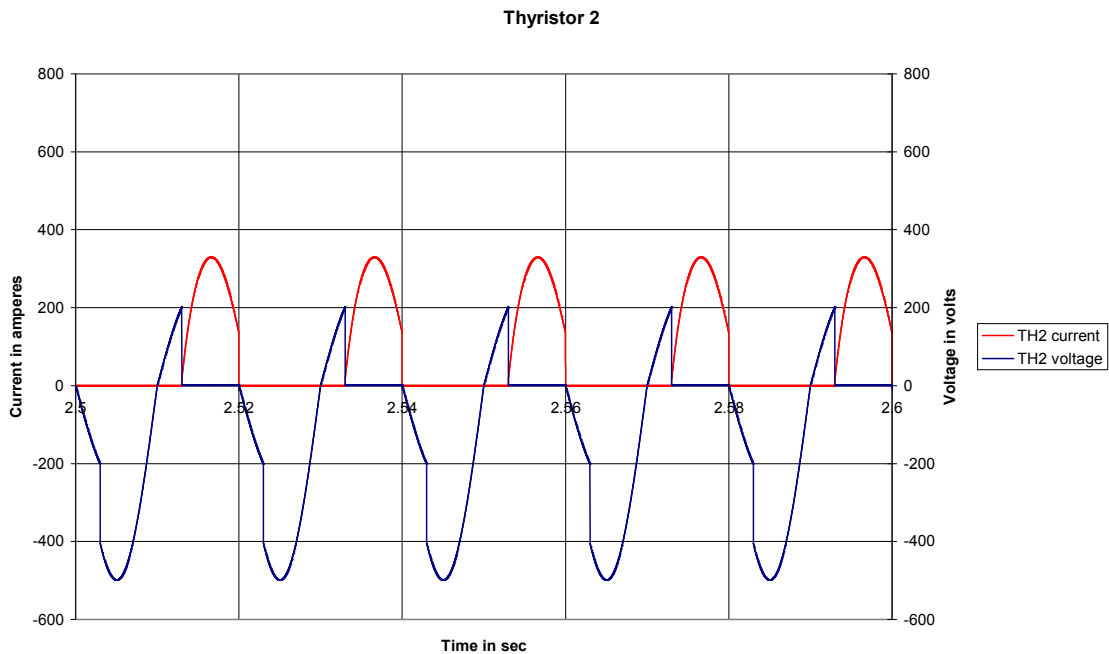
Σχήμα 4.90 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=60$ , load 50%



**Σχήμα 4.91** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 50%



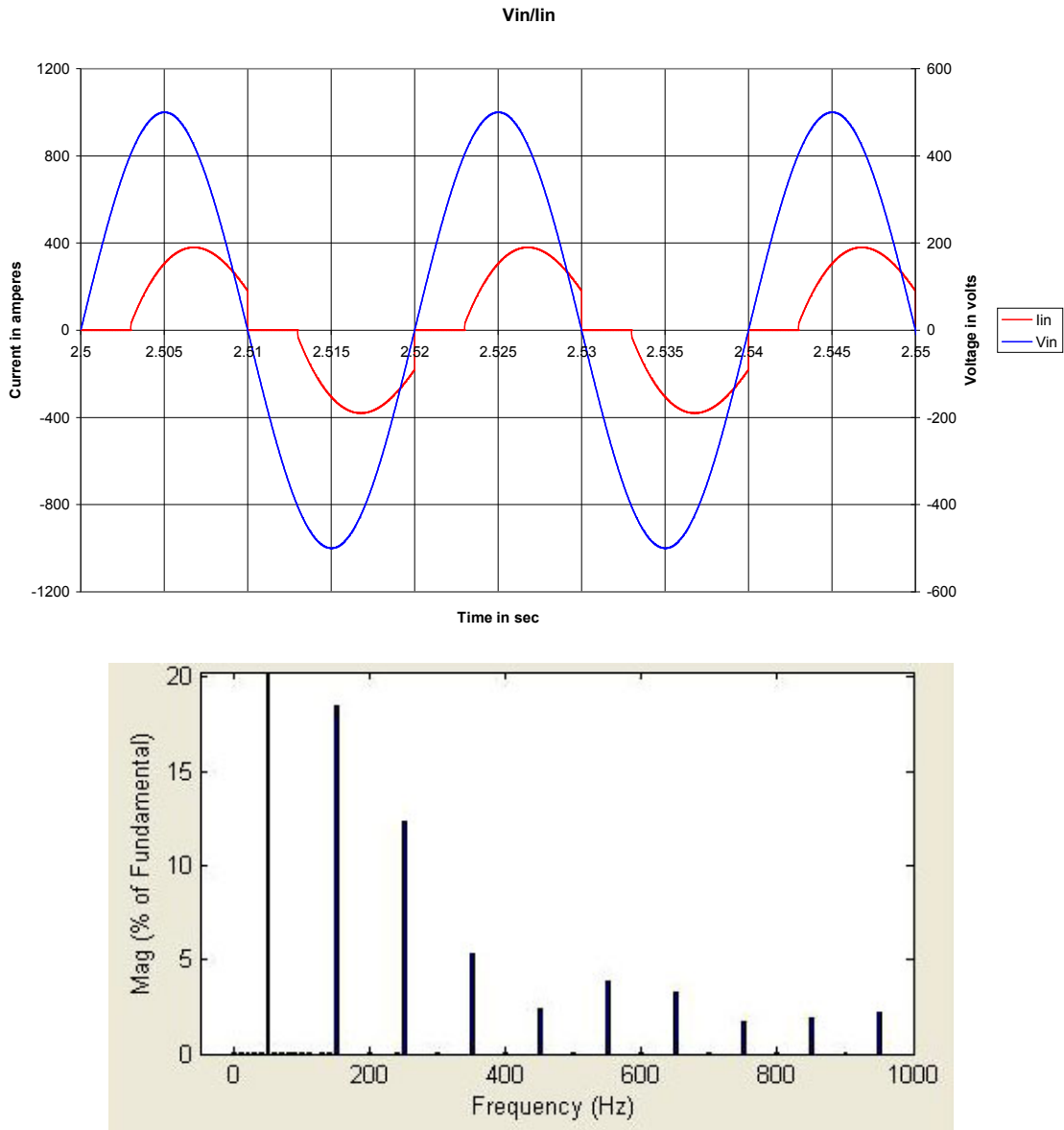
**Σχήμα 4.92** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 1<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60^\circ$ , load 50%



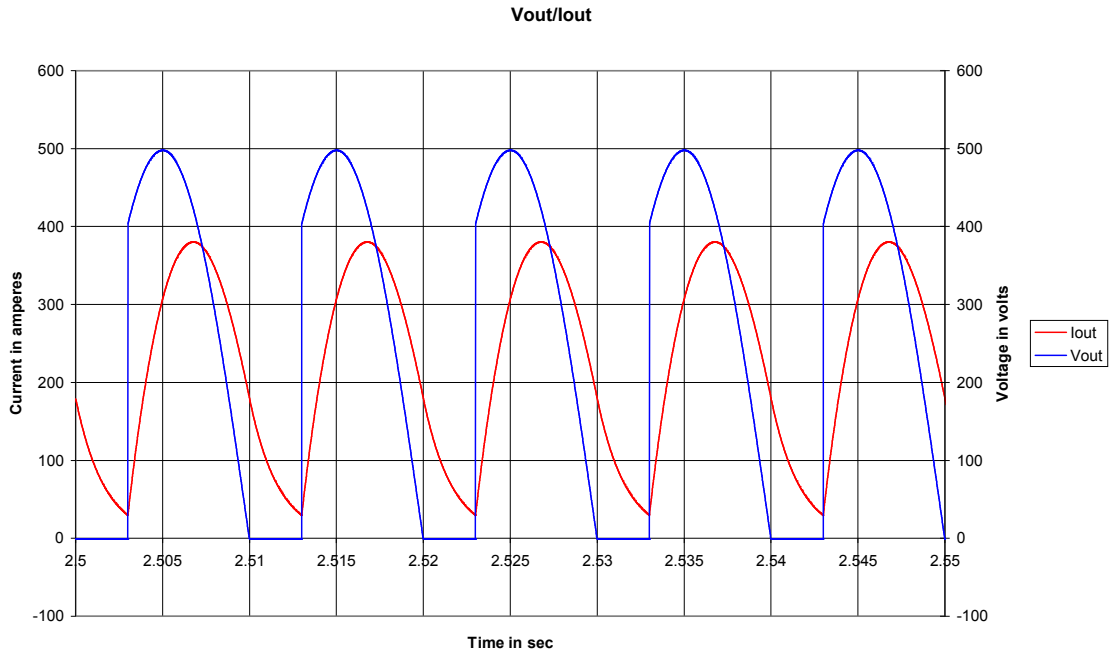
**Σχήμα 4.93** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του 2<sup>ου</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60^\circ$ , load 50%

Παρατηρούμε ακόμη μία φορά πως στην περίπτωση της γωνίας έναυσης  $\alpha=60^\circ$  έχουμε καλύτερη σβέση των Thyristor από την αντίστοιχη περίπτωση της ημieleγχόμενης γέφυρας.

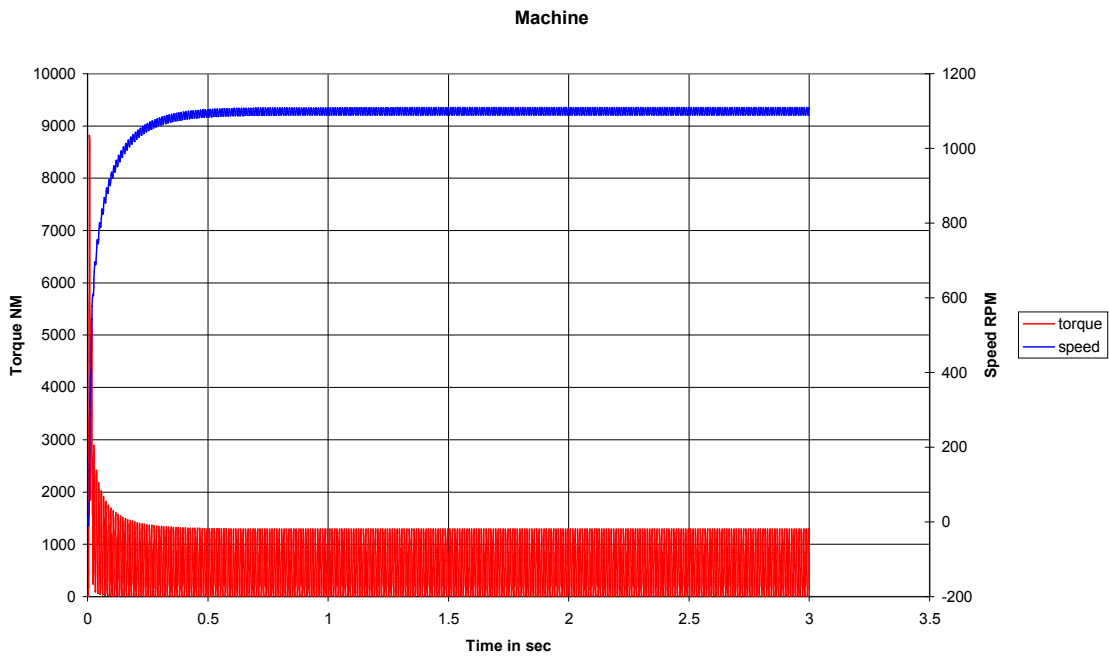
**Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, κινητήρας M2, γωνία έναυσης 60°, ονομαστικό φορτίο 70%**



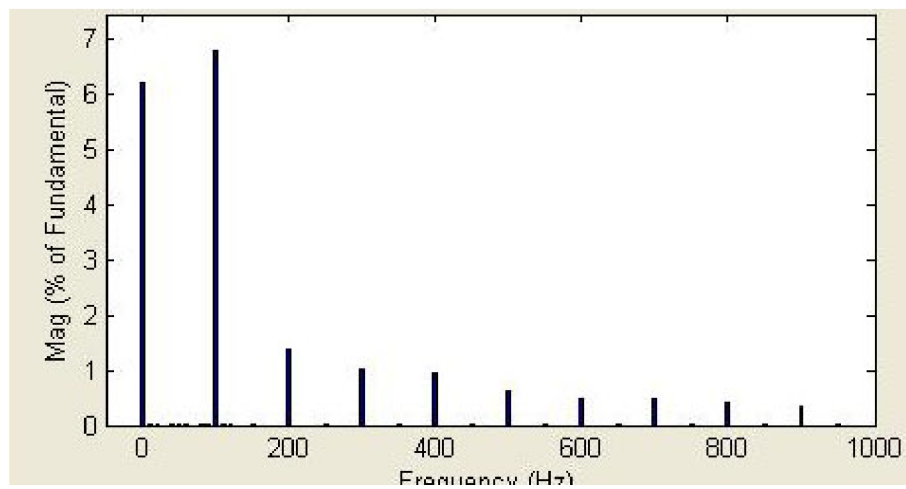
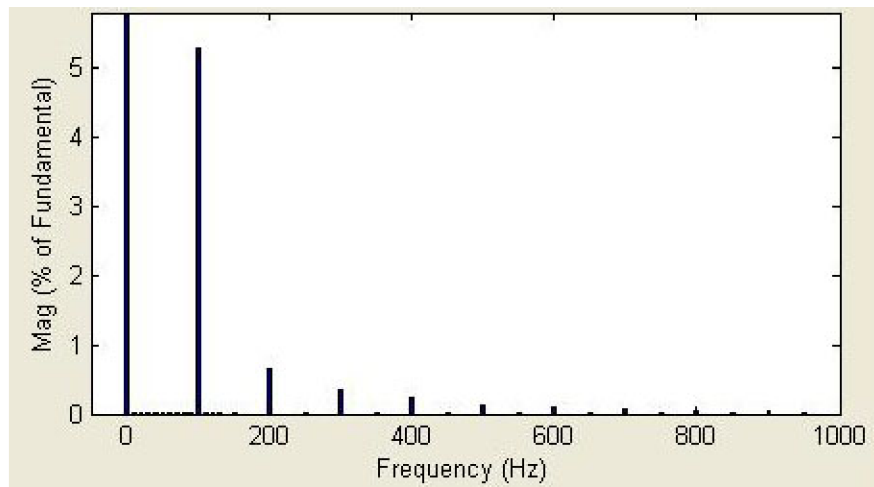
**Σχήμα 4.94** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70%



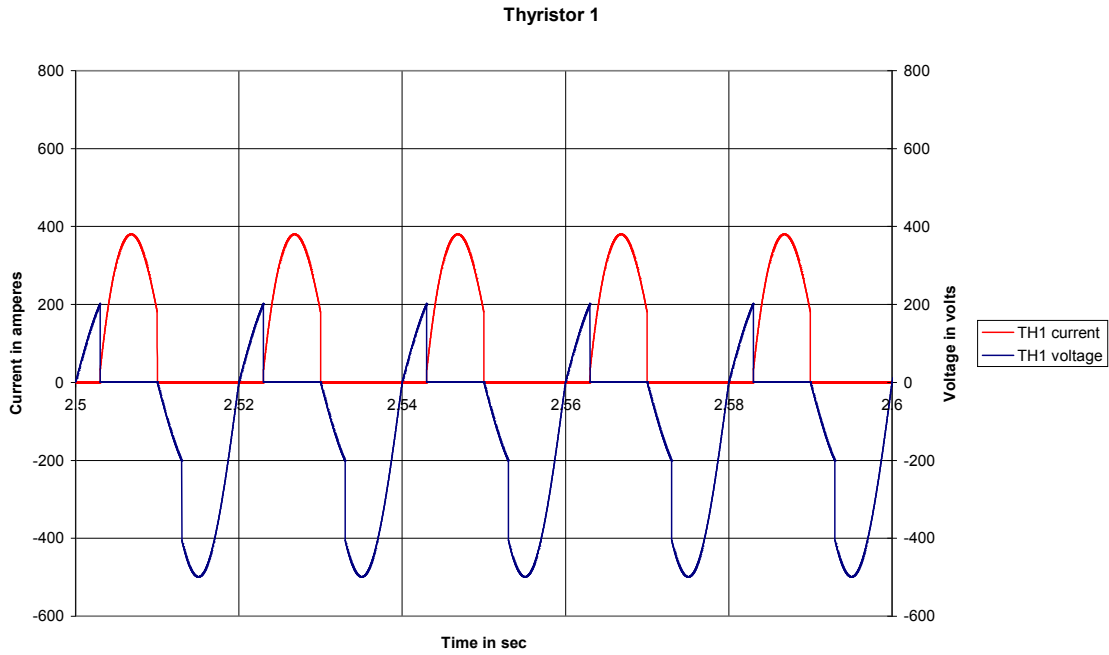
Σχήμα 4.95 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70%



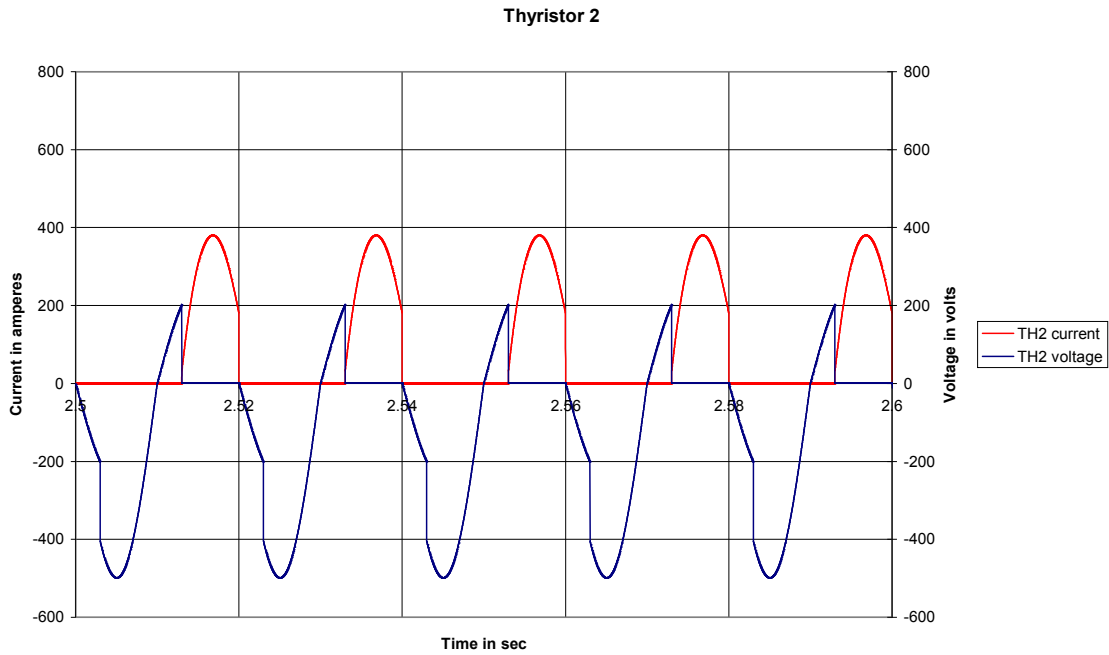
Σχήμα 4.96 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $\alpha=60$ , load 70%



**Σχήμα 4.97** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $\alpha=60$ , load 70%



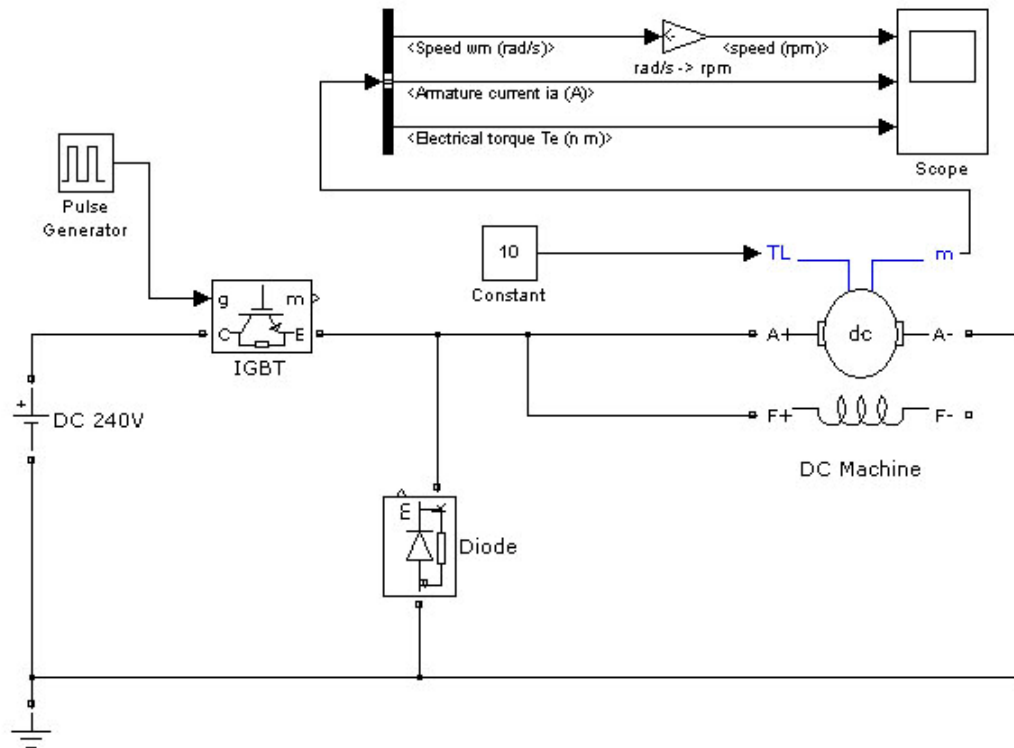
Σχήμα 4.98 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα τον 1<sup>ο</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60$ , load 70%



Σχήμα 4.99 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα τον 2<sup>ο</sup> Thyristor M2,  $\alpha=60$ , load 70%

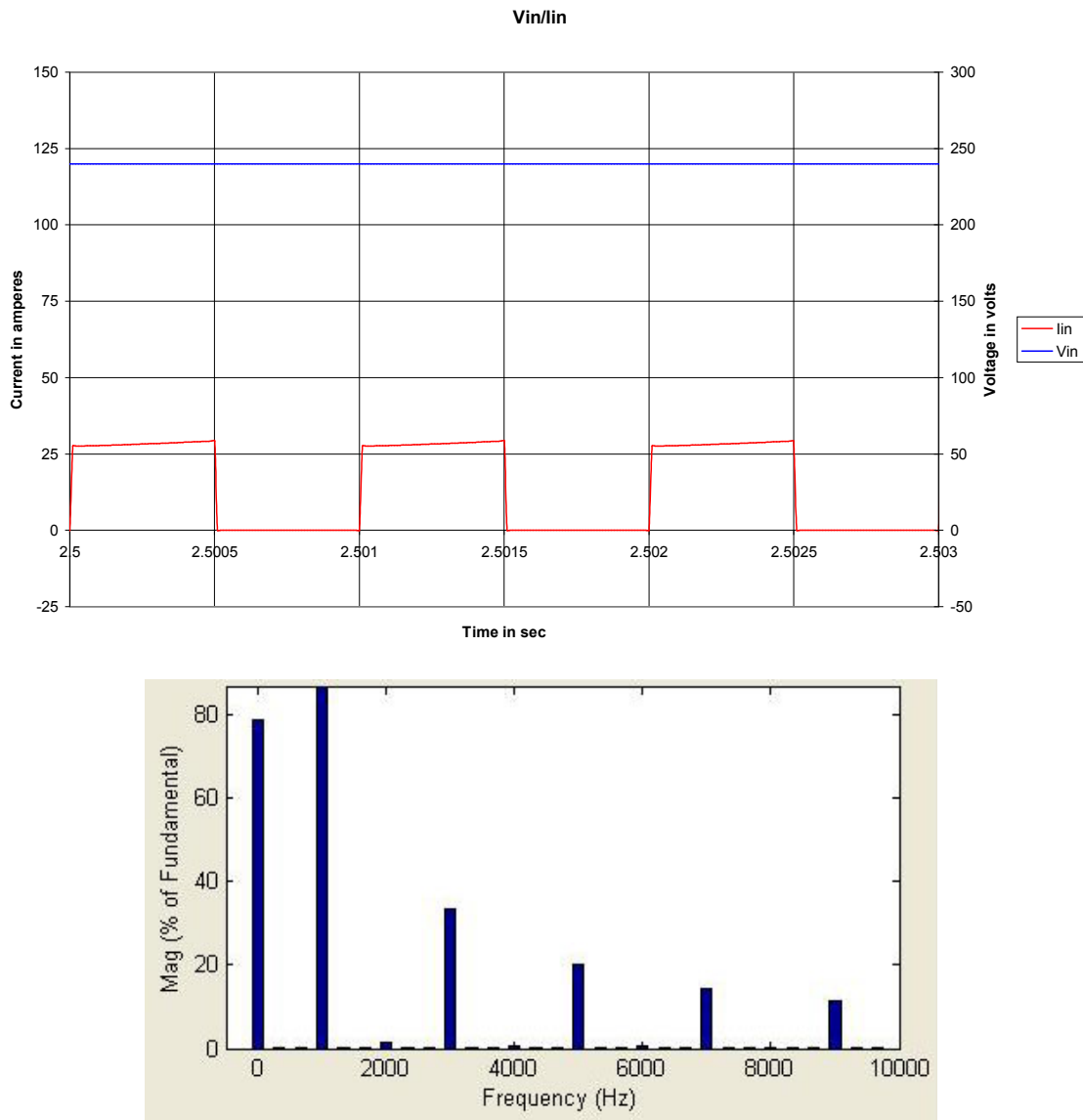


### 4.2.3 Καταμητής (chopper) ενός τεταρτημορίου



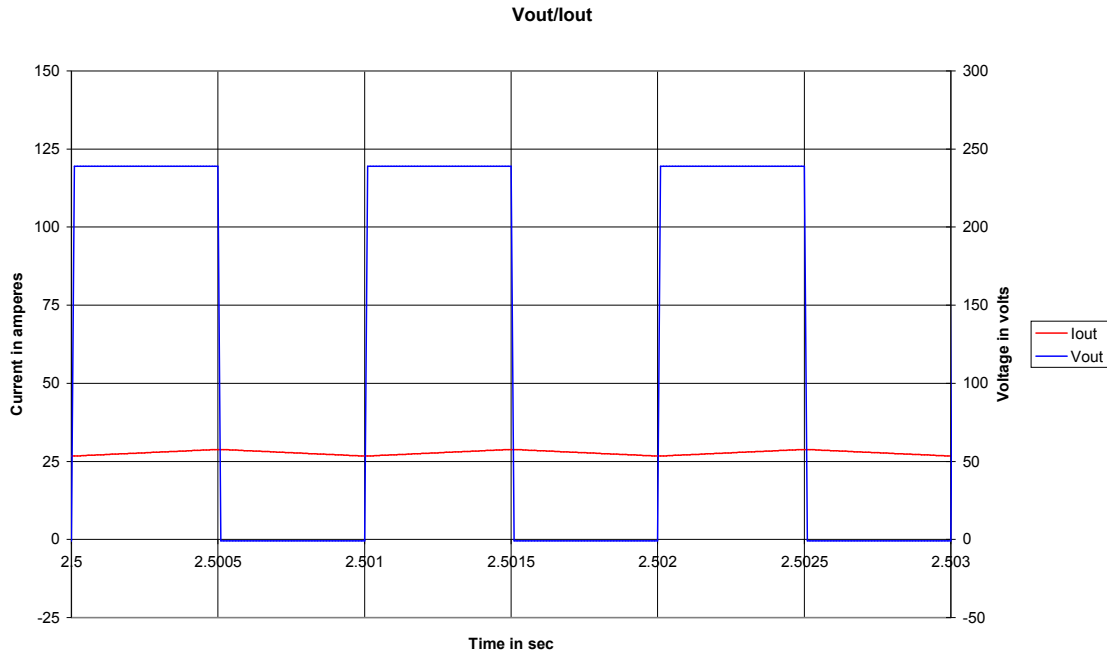
Σχήμα 4.100 Διάγραμμα Καταμητή (chopper) ενός τεταρτημορίου

Πραγματοποιήσαμε το παραπάνω διάγραμμα στο Simulink. Ο κλασικός καταμητής αποτελείται από ένα IGBT, ελεγχόμενο από μια παλμογεννήτρια η οποία ορίζει τον χρόνο αγωγής αυτού σε συχνότητα 1KHz. Παράλληλα με τον κινητήρα χρησιμοποιήσαμε μια δίοδο ελευθέρως ροής για την ανακυκλοφορία του ρεύματος σε αυτόν.

**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M1, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%**

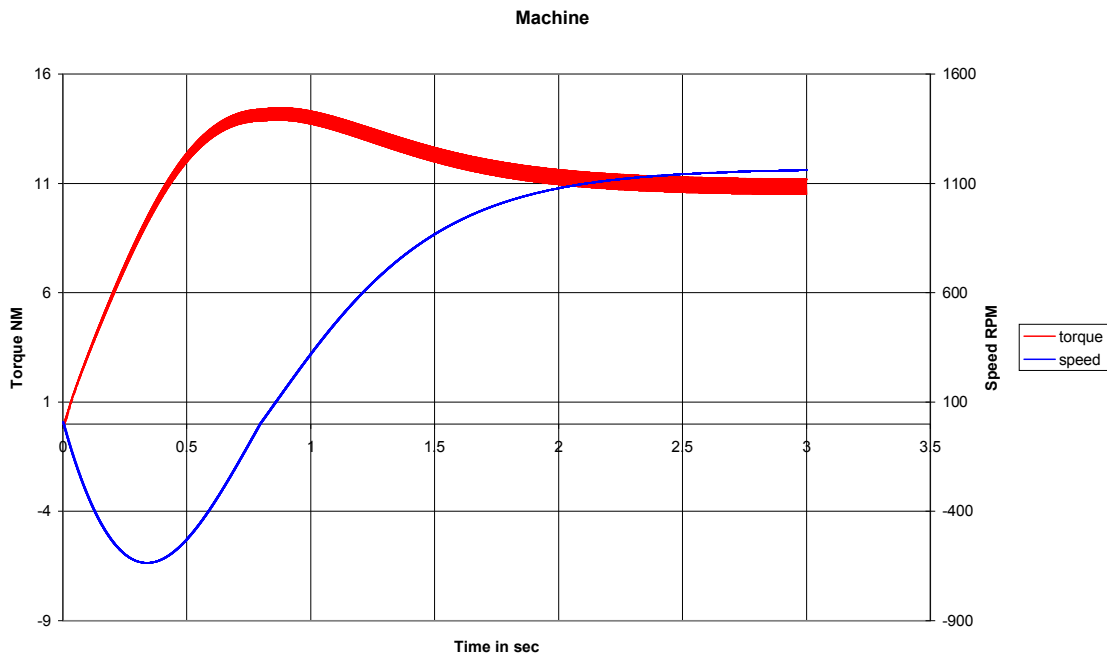
**Σχήμα 4.101** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%

Η είσοδος της τάσης, όπως παρατηρούμε, είναι σταθερή καθώς μιλάμε για πηγή συνεχούς τάσης. Το ρεύμα ακολουθεί τον χρόνο αγωγής του IGBT και είναι σχεδόν τετραγωνικό σαν τον παλμό της τροφοδοσίας του.

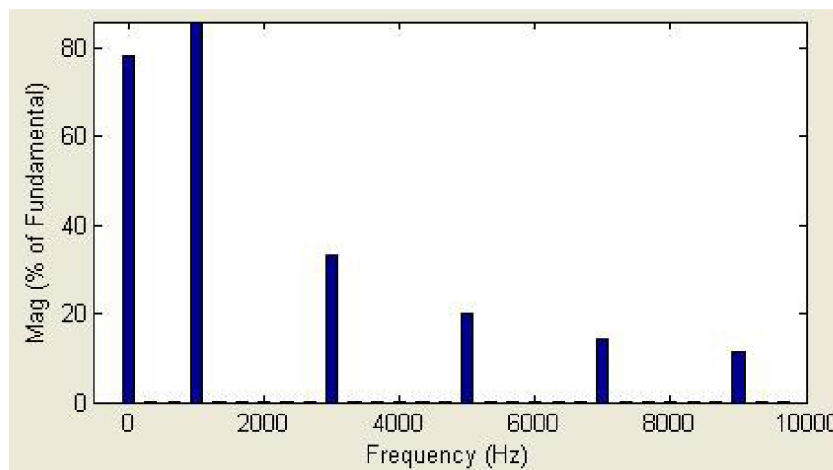
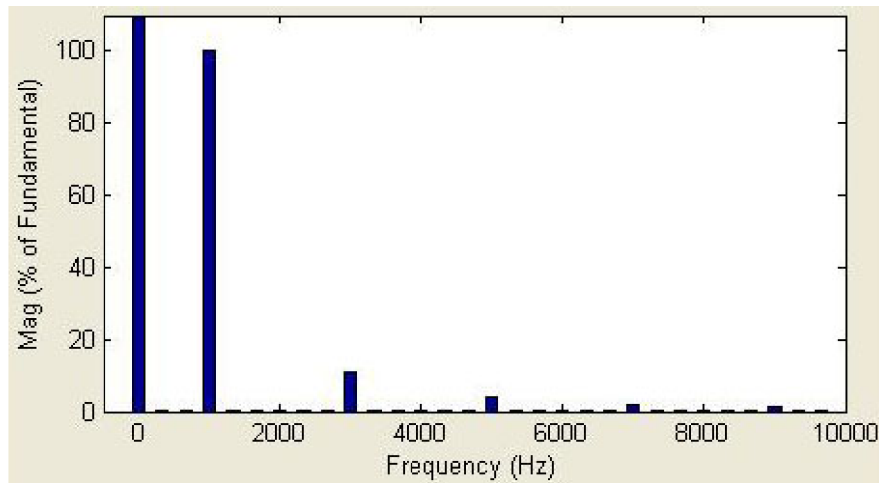


**Σχήμα 4.102** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%

Παρατηρούμε πως το ρεύμα βρίσκεται σε συνεχή αγωγή ενώ η κυμάτωση είναι μειωμένη αισθητά συγκριτικά με τους ανορθωτές AC-DC. Αυτό οφείλεται στο ότι η τάση είναι σταθερή όπως ήδη αναφέραμε αλλά και στη διακοπτική συχνότητα η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη.

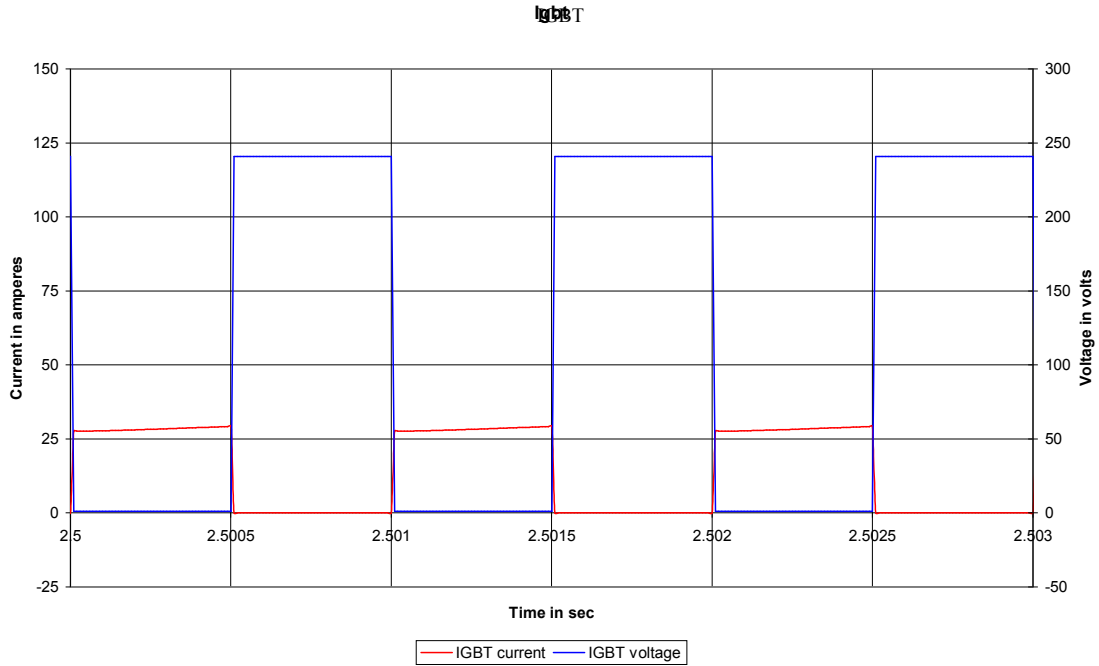


**Σχήμα 4.103** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=50\%$ , load 50%



**Σχήμα 4.104** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%

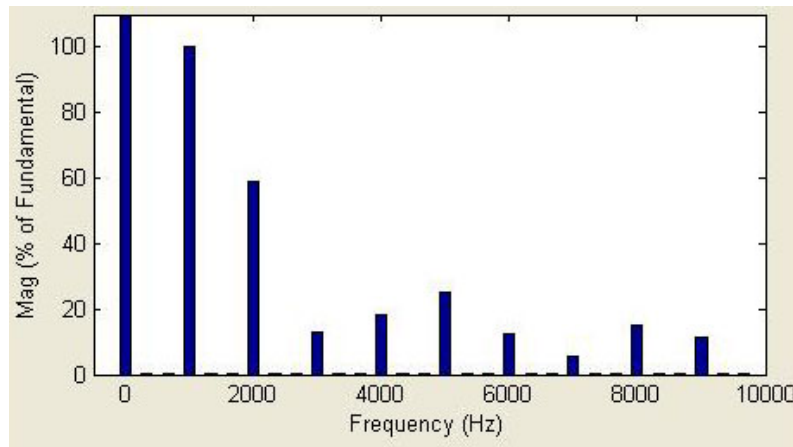
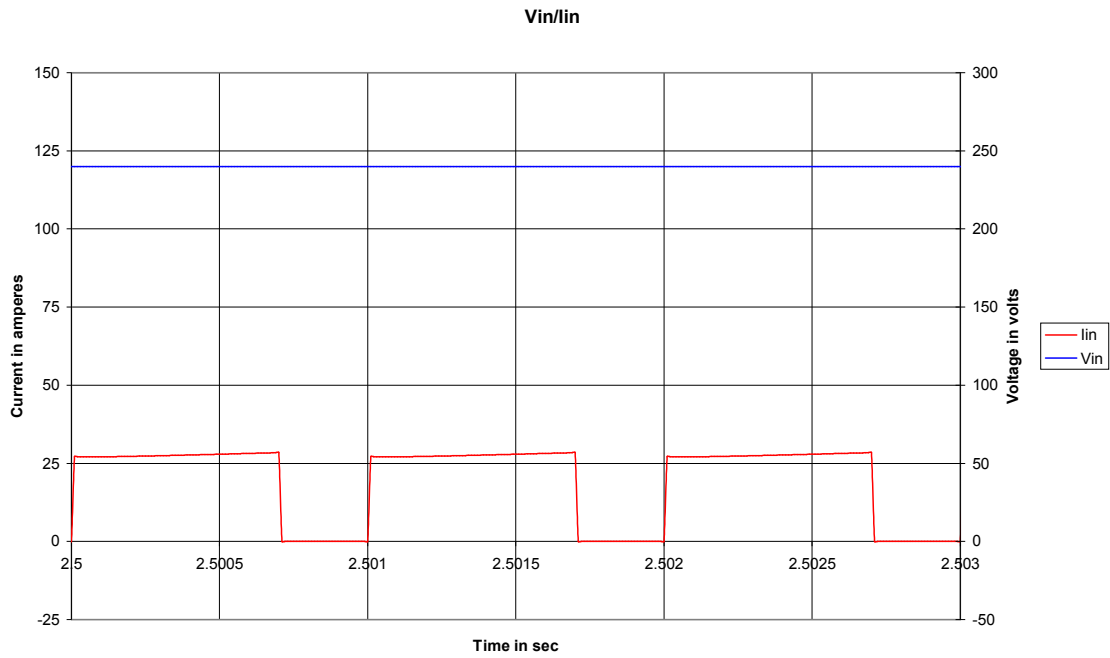
Οι αρμονικές του ρεύματος εξόδου είναι μειωμένες συγκριτικά με αυτές της εισόδου του κυκλώματος όπως και στα προηγούμενα κυκλώματα λόγω του κινητήρα.



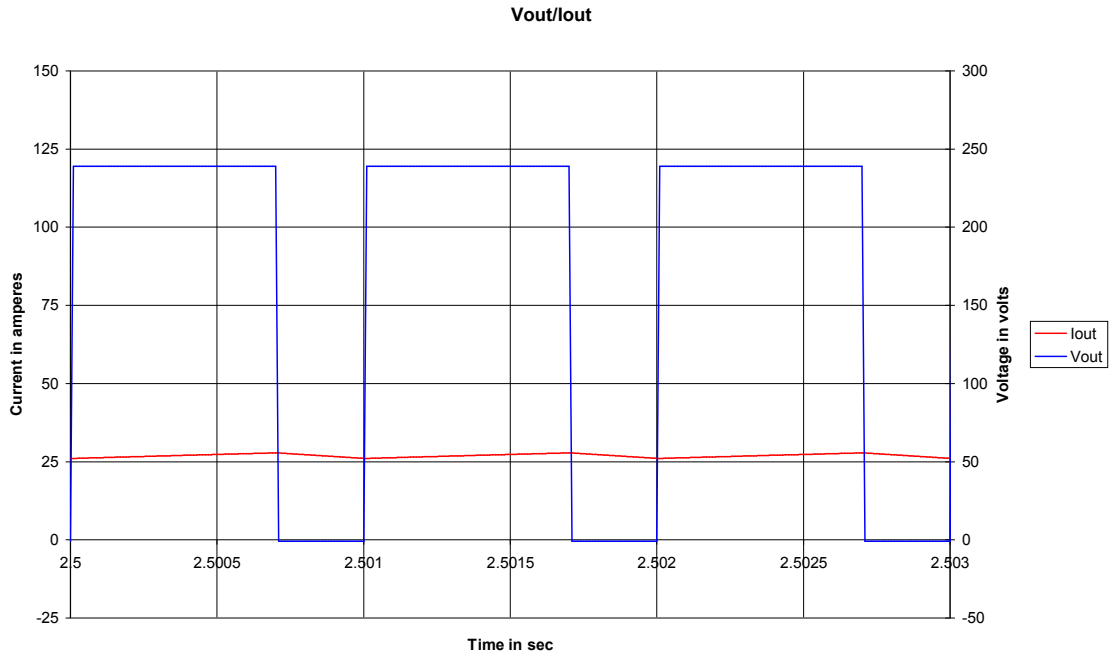
**Σχήμα 4.105** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=50\%$ , load 50%

Παρατηρούμε την αγωγή του ρεύματος και της τάσης στα άκρα του IGBT. Όταν αυτό άγει η τάση στα άκρα του είναι μηδενική.

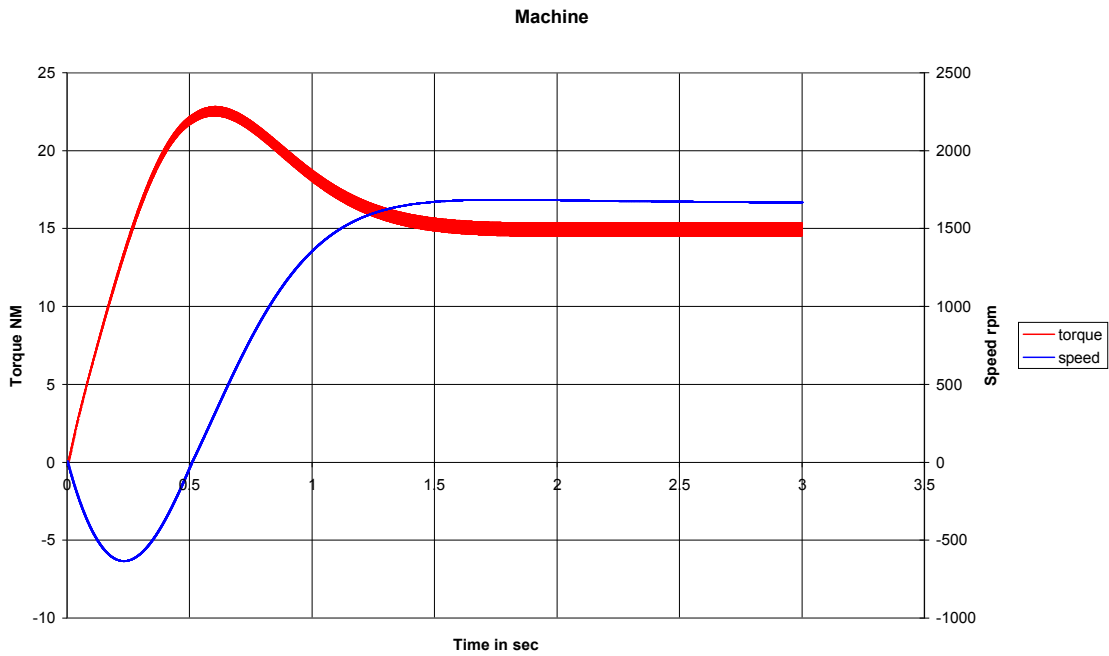
**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M1, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%**



**Σχήμα 4.106** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%

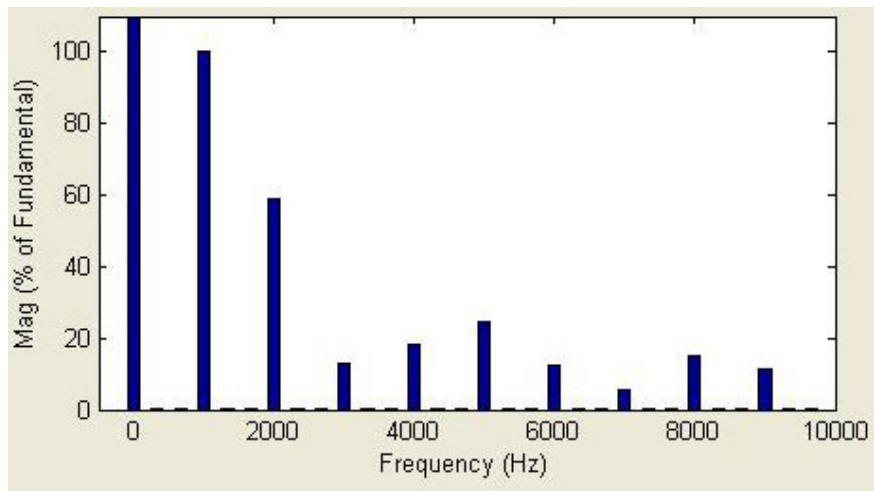
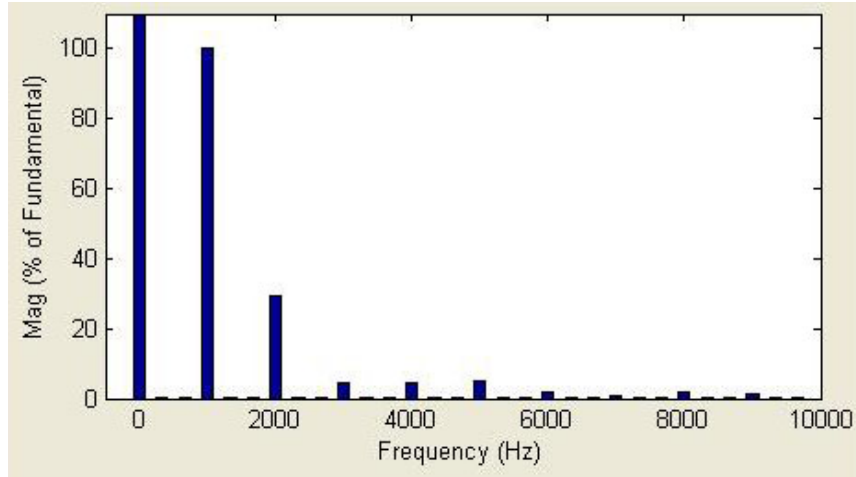


**Σχήμα 4.107** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%



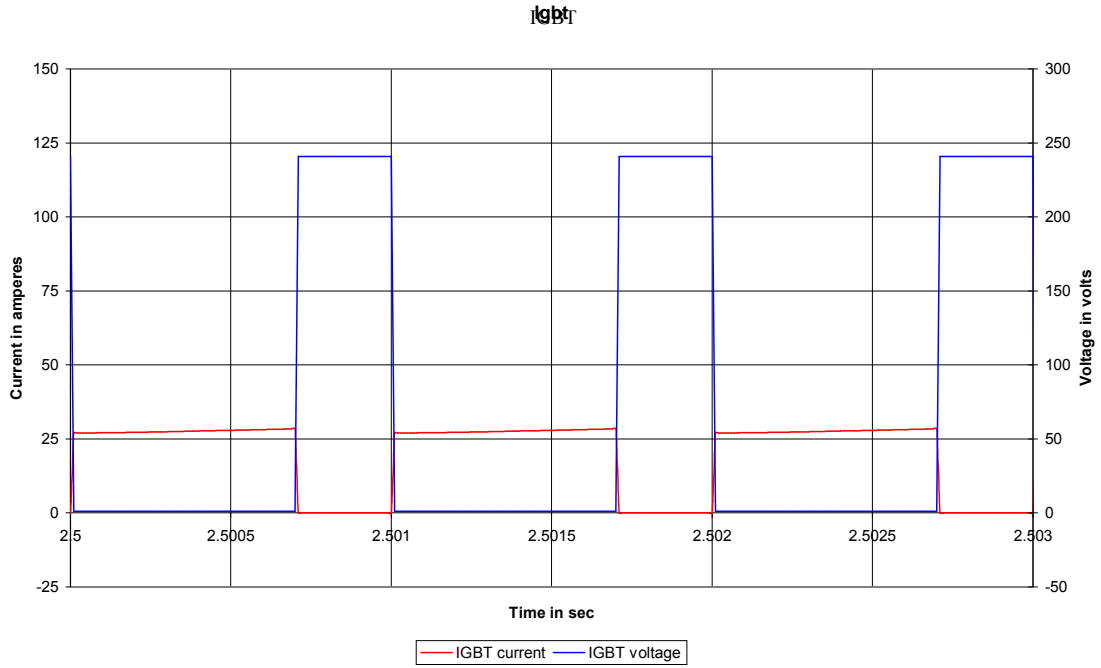
**Σχήμα 4.108** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=70\%$ , load 70%

Παρατηρούμε την αύξηση των στροφών του κινητήρα λόγω του αυξημένου χρόνου αγωγής καθώς και την αύξηση της ροπής λόγω του αυξημένου φορτίου.



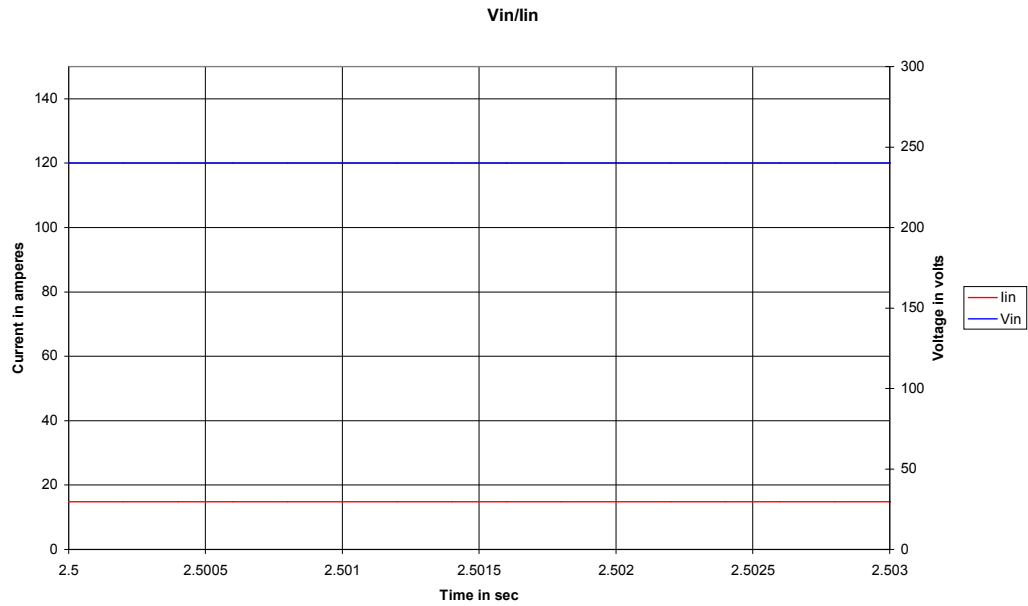
**Σχήμα 4.109** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70%





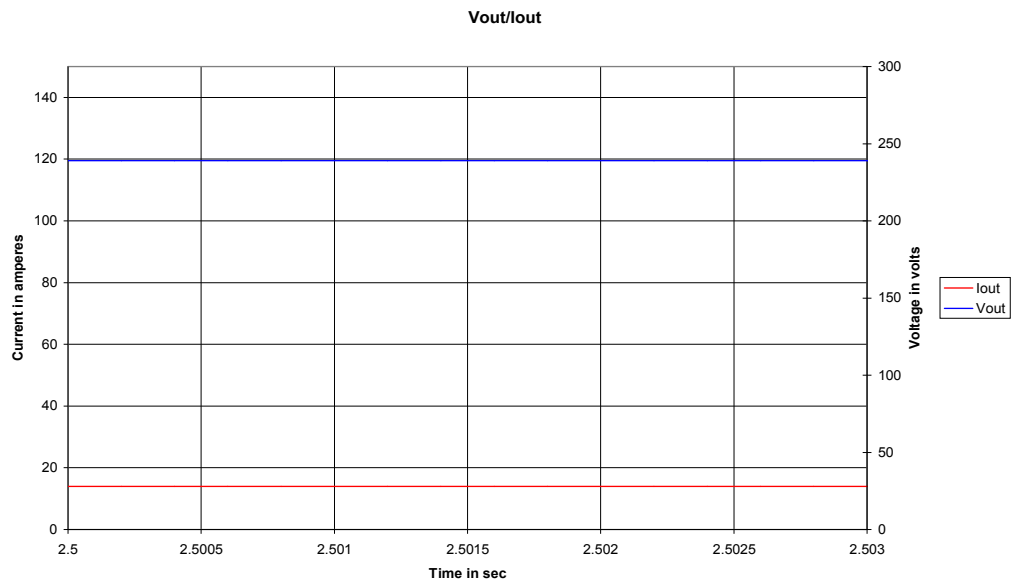
**Σχήμα 4.110** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=70\%$ , load 70%

**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%**

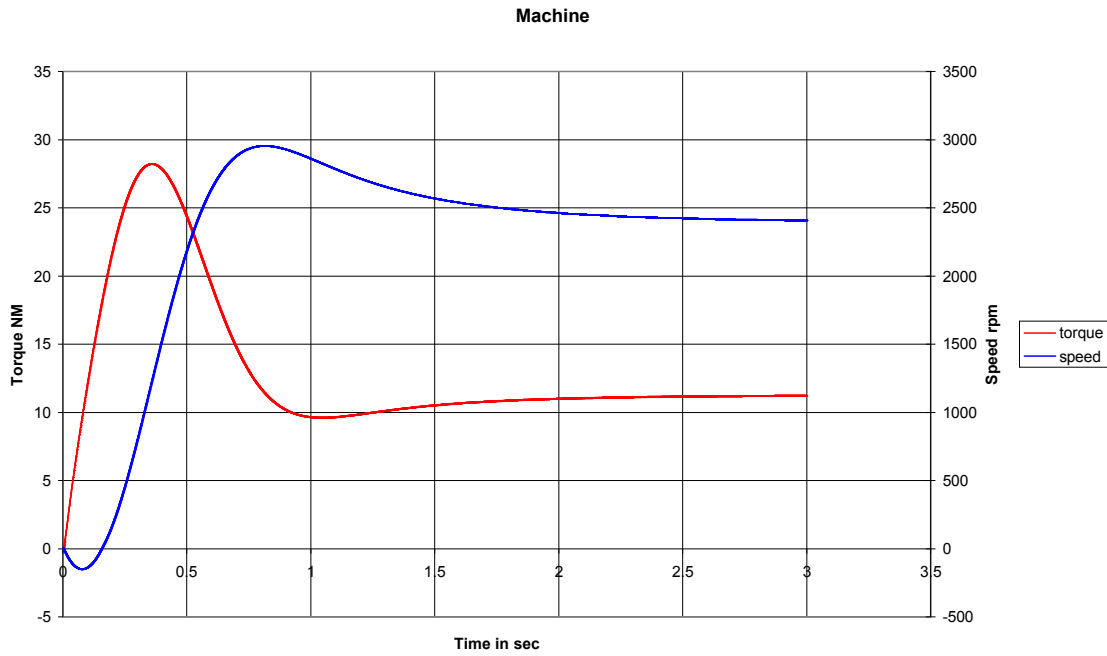


**Σχήμα 4.111** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=100\%$ , load 50%

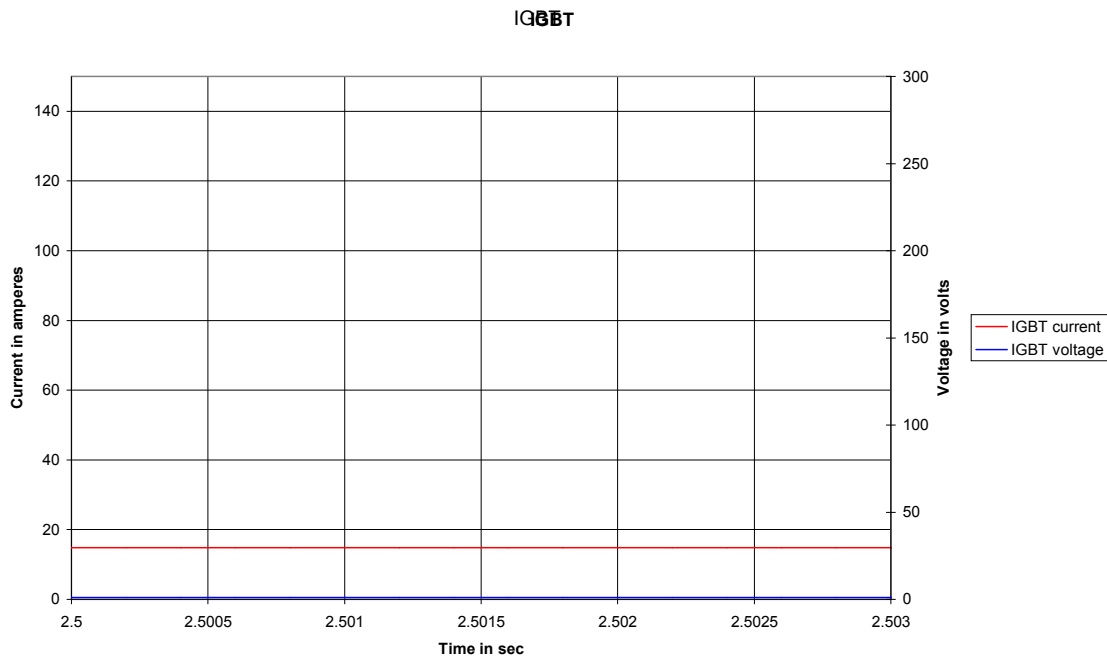
Σε αυτή την περίπτωση δίνουμε συνεχές παλμό στην παλμογεννήτρια και το IGBT βρίσκεται μόνιμα σε αγωγή. Το ρεύμα και η τάση είναι σταθερά, χωρίς κυμάτωση, αφού το σύστημα έχει επέλθει στη μόνιμή του κατάσταση και για αυτό το λόγο ωστόσο δεν εμφανίζονται και αρμονικές.



**Σχήμα 4.112** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=100\%$ , load 50%



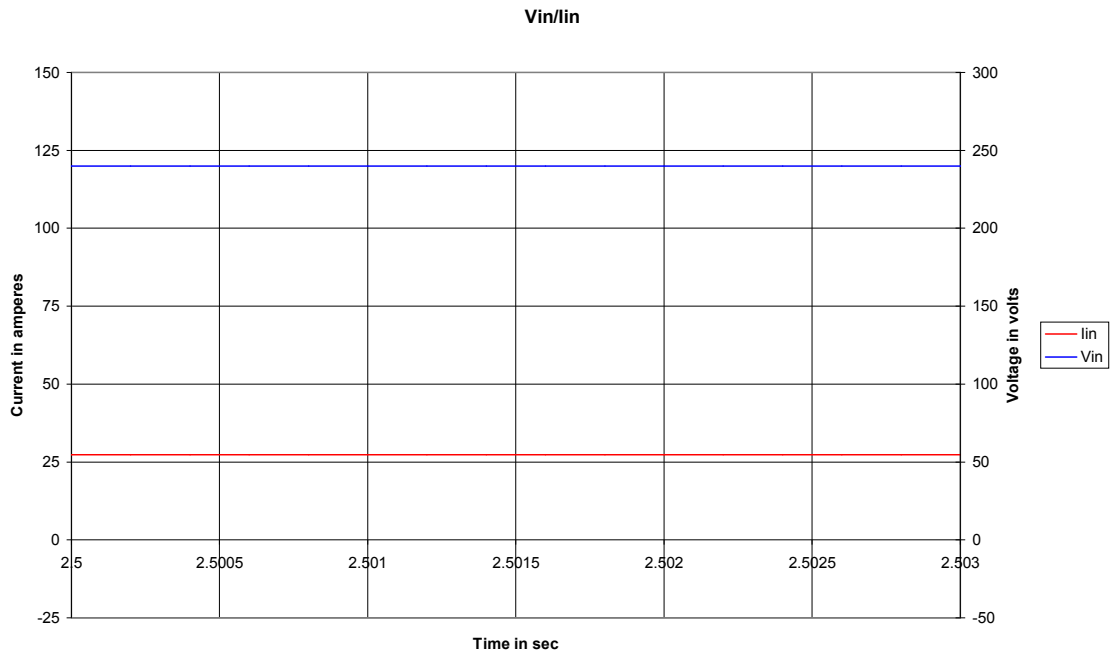
**Σχήμα 4.113** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 50%



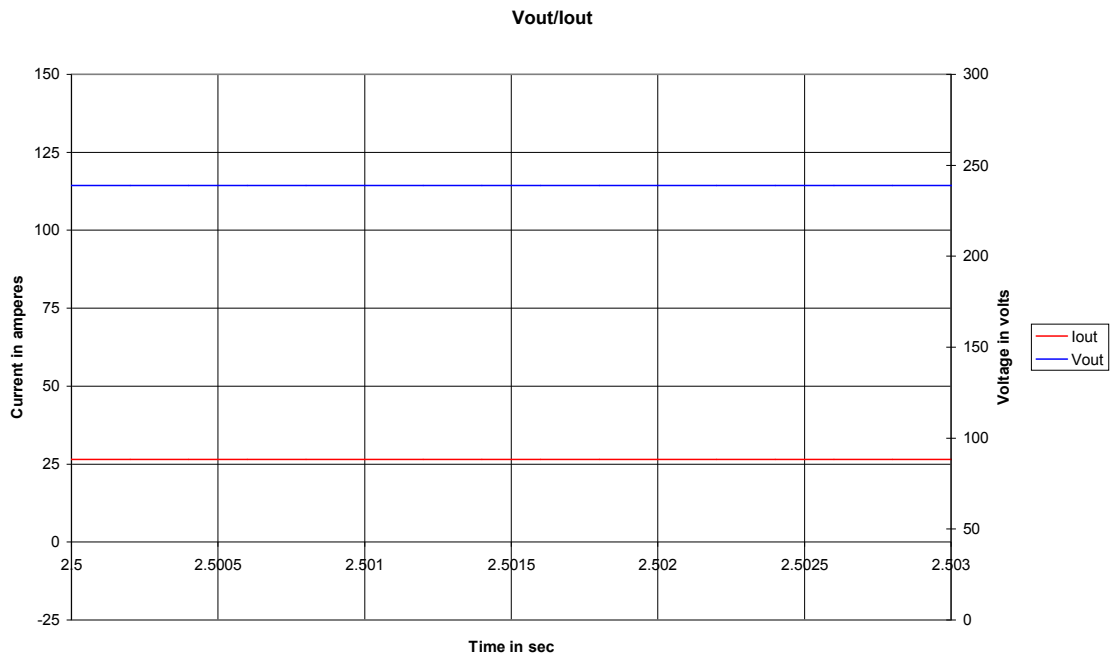
**Σχήμα 4.114** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 50%

Το IGBT βρίσκεται σε συνεχή αγωγή, η τάση στα άκρα του είναι σχεδόν μηδενική ενώ το ρεύμα που το διαρρέει είναι σταθερό.

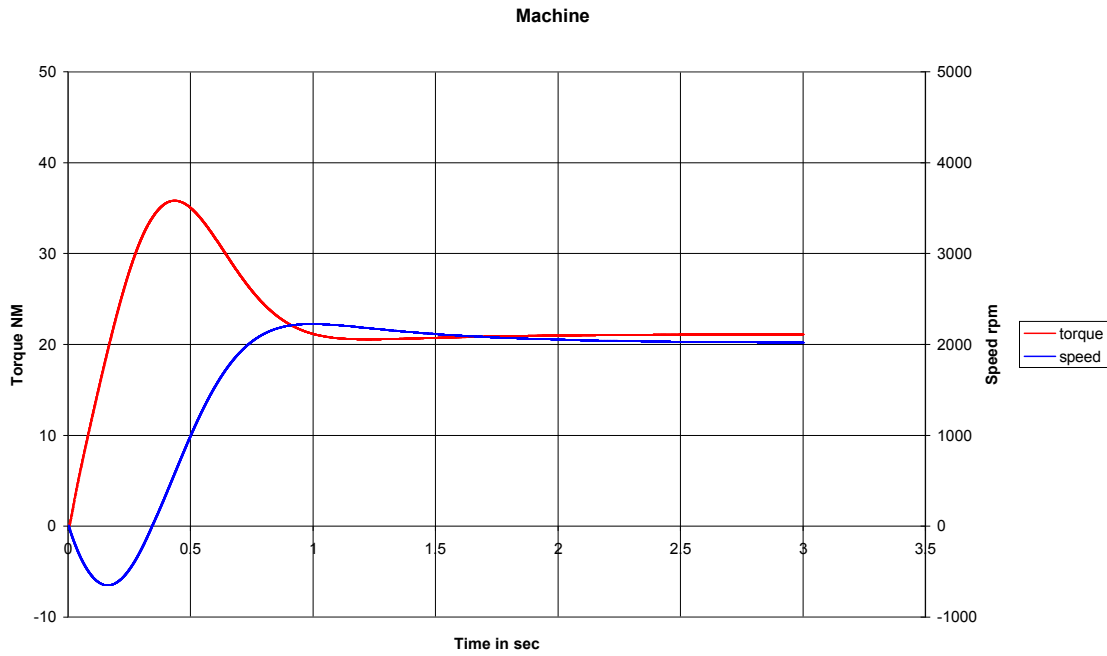
**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%**



**Σχήμα 4.115** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=100\%$ , load 100%

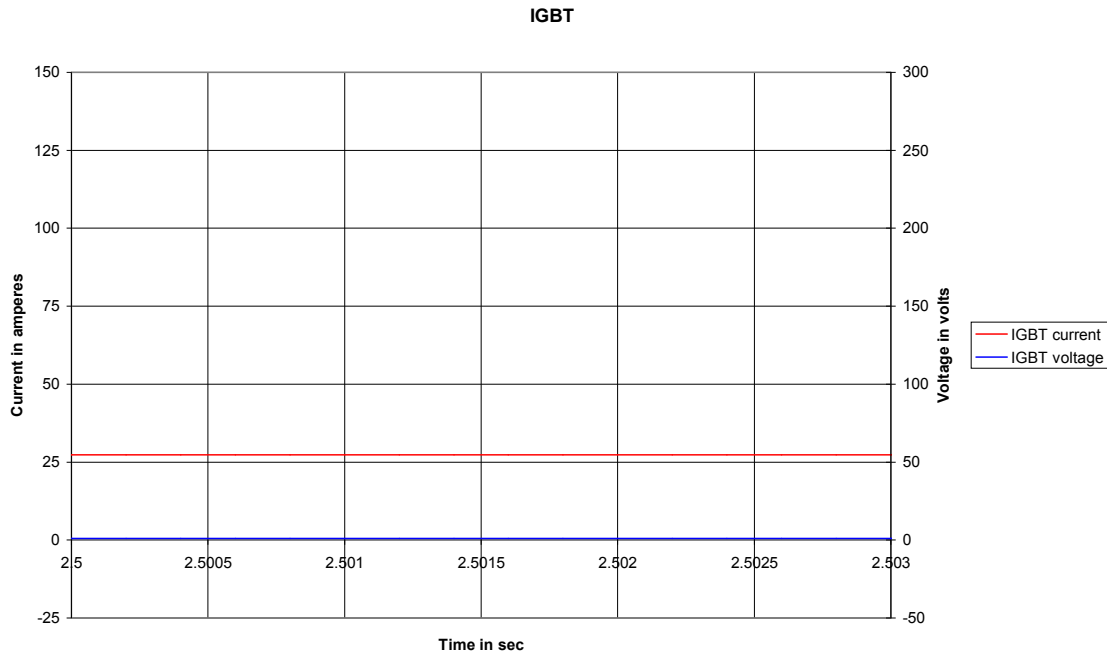


**Σχήμα 4.116** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=100\%$ , load 100%

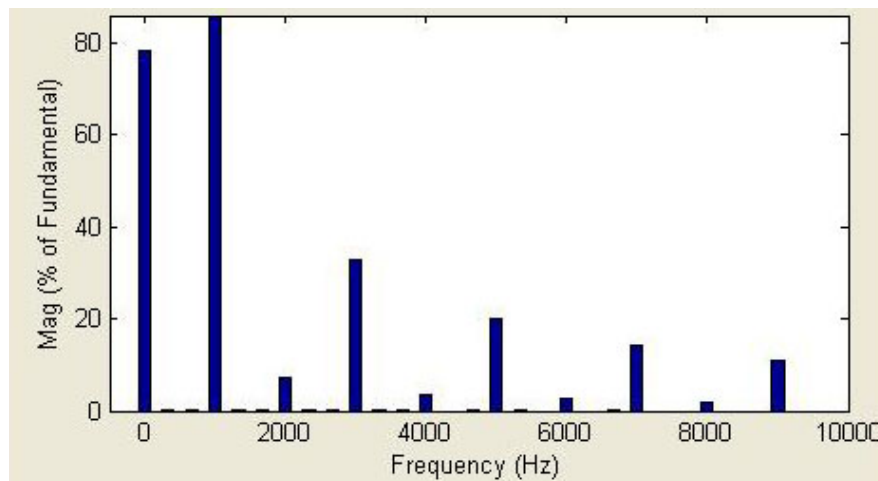
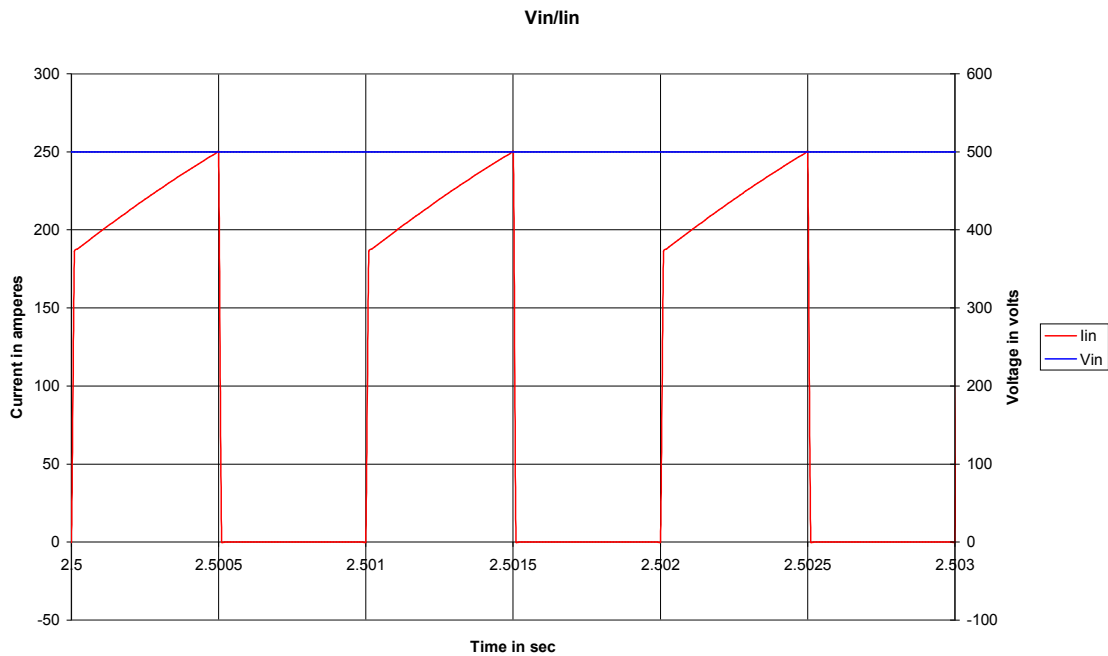


**Σχήμα 4.117** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 100%

Ο κινητήρας δουλεύει κοντά στις ονομαστικές του στροφές αφού η τάση και το φορτίο είναι ίσα με τα ονομαστικά του στοιχεία.

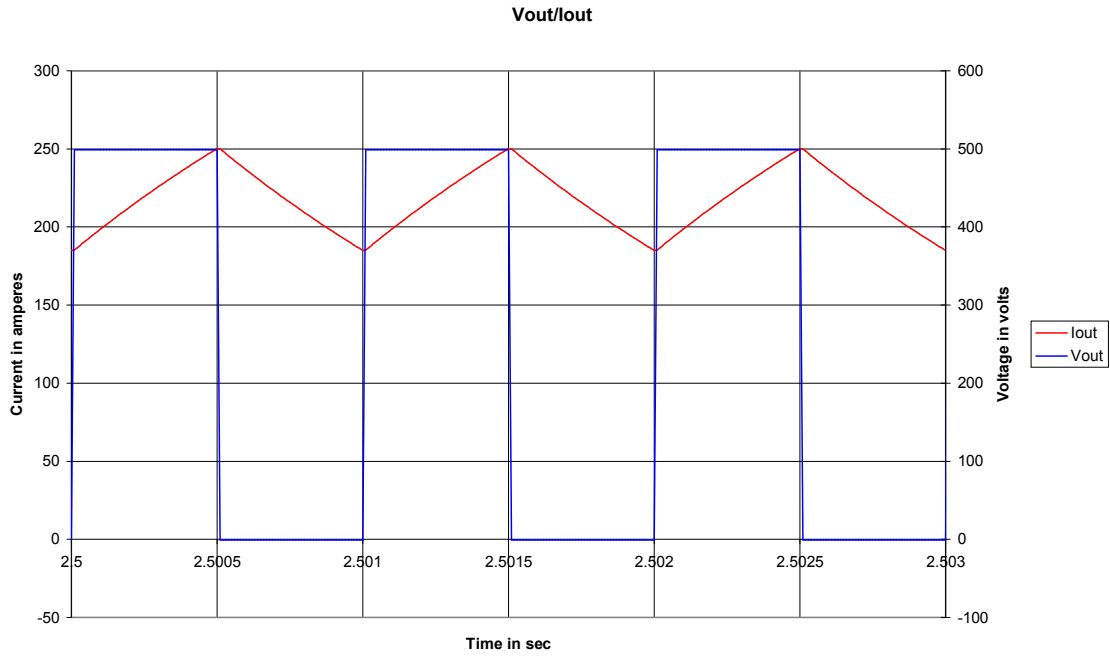


**Σχήμα 4.118** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 100%

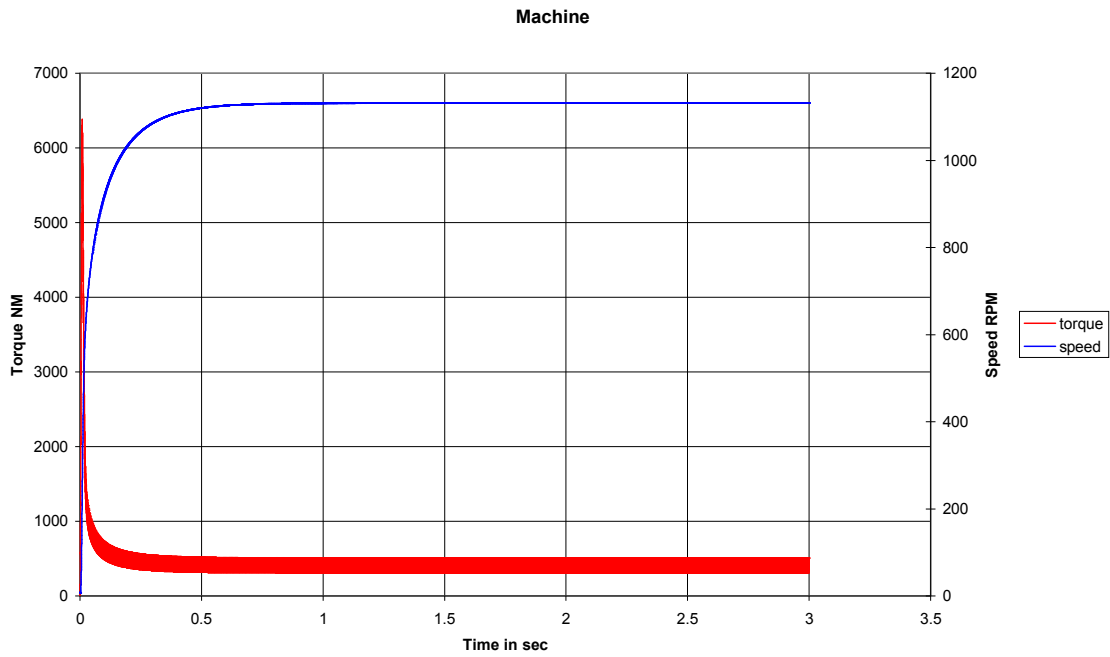
**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M2, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%**

**Σχήμα 4.119** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

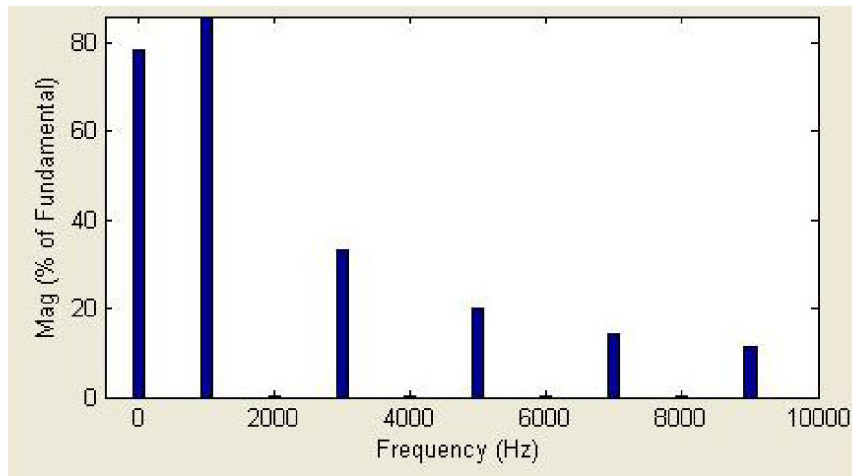
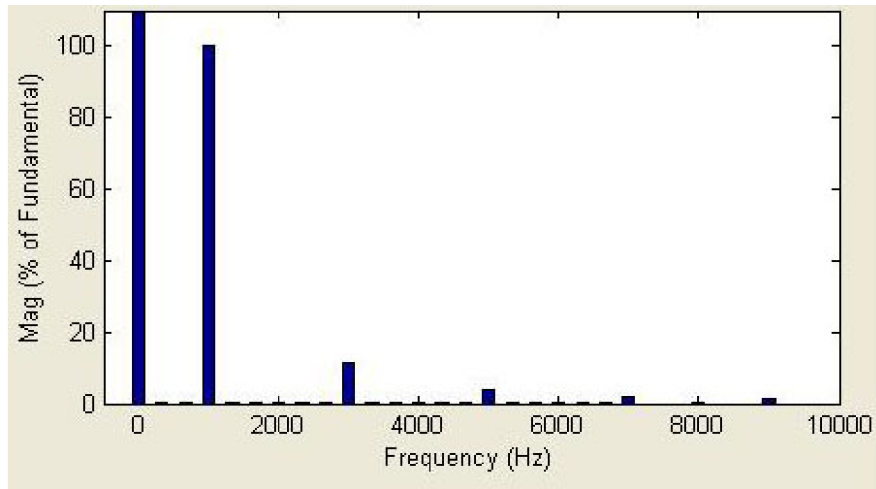
Παρατηρούμε στο ρεύμα ότι υπάρχει μια αυξημένη κλίση συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση του κινητήρα M1. Το φορτίο είναι πολύ μεγάλο και αυτό προκαλεί πέδηση στον κινητήρα κατά τη διάρκεια του χρόνου διακοπής της αγωγής του IGBT.



Σχήμα 4.120 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

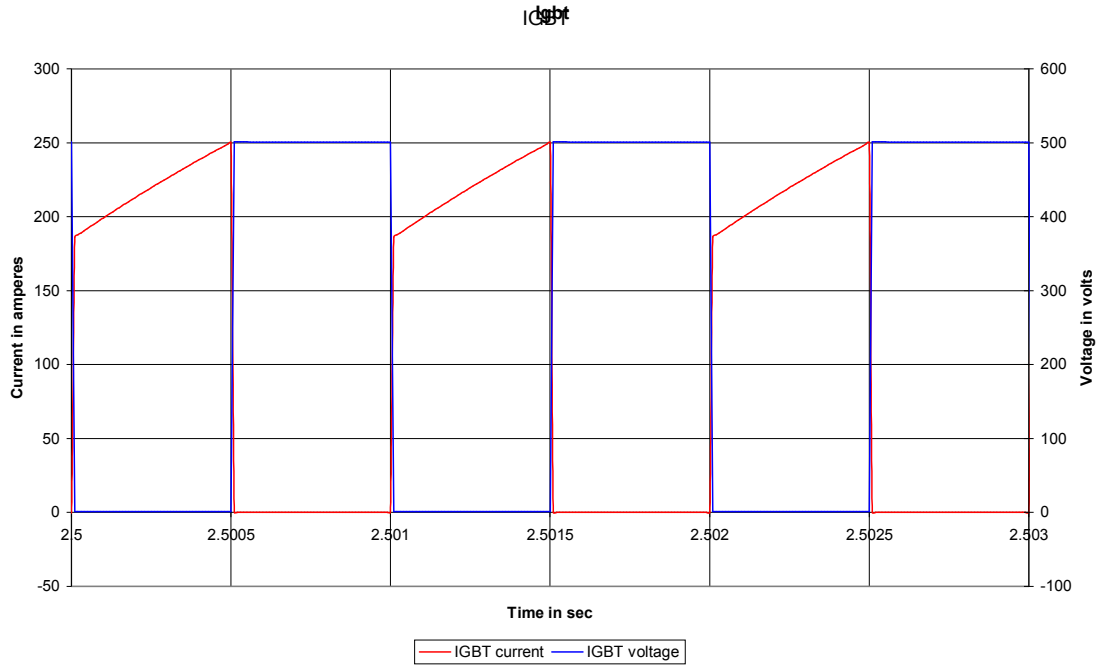


Σχήμα 4.121 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=50\%$ , load 50%



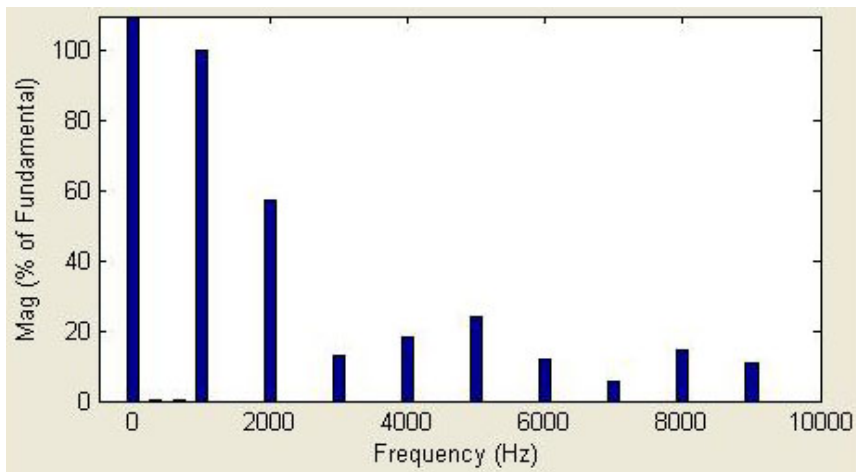
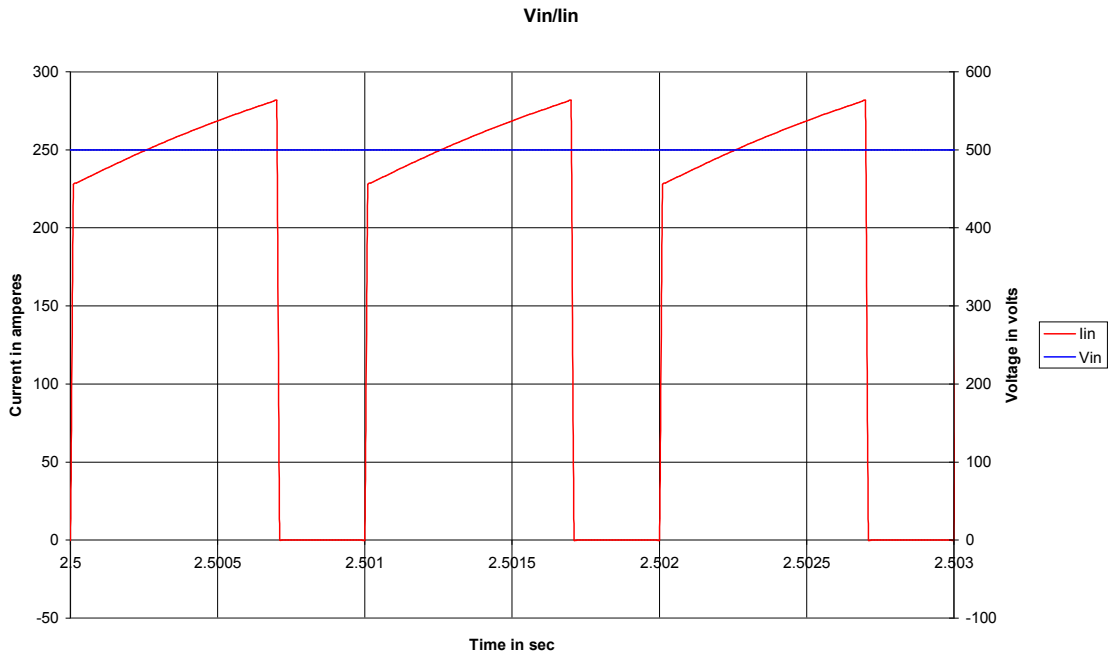
**Σχήμα 4.122** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=50%, load 50%



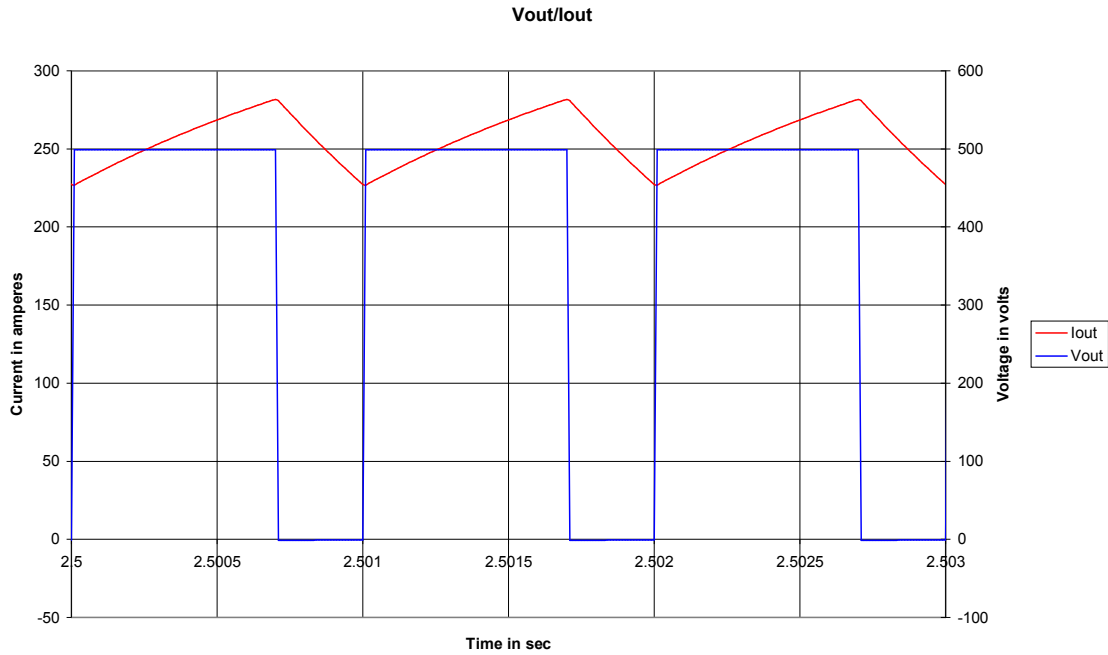


**Σχήμα 4.123** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=50\%$ , load 50%

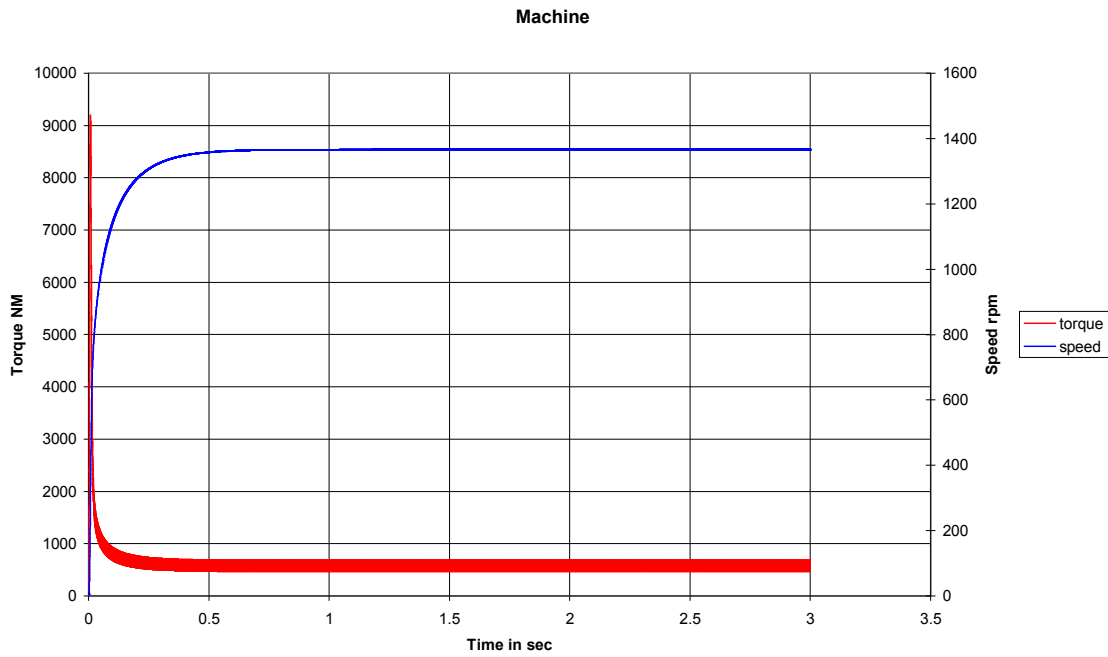
**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M2, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%**



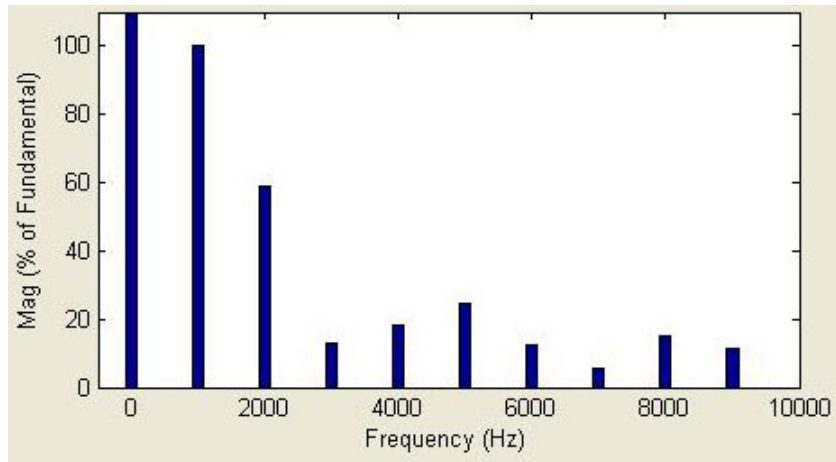
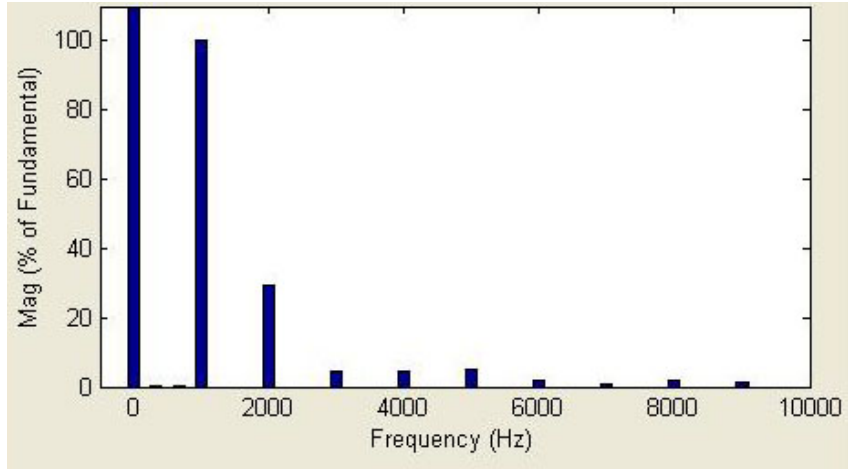
**Σχήμα 4.124** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



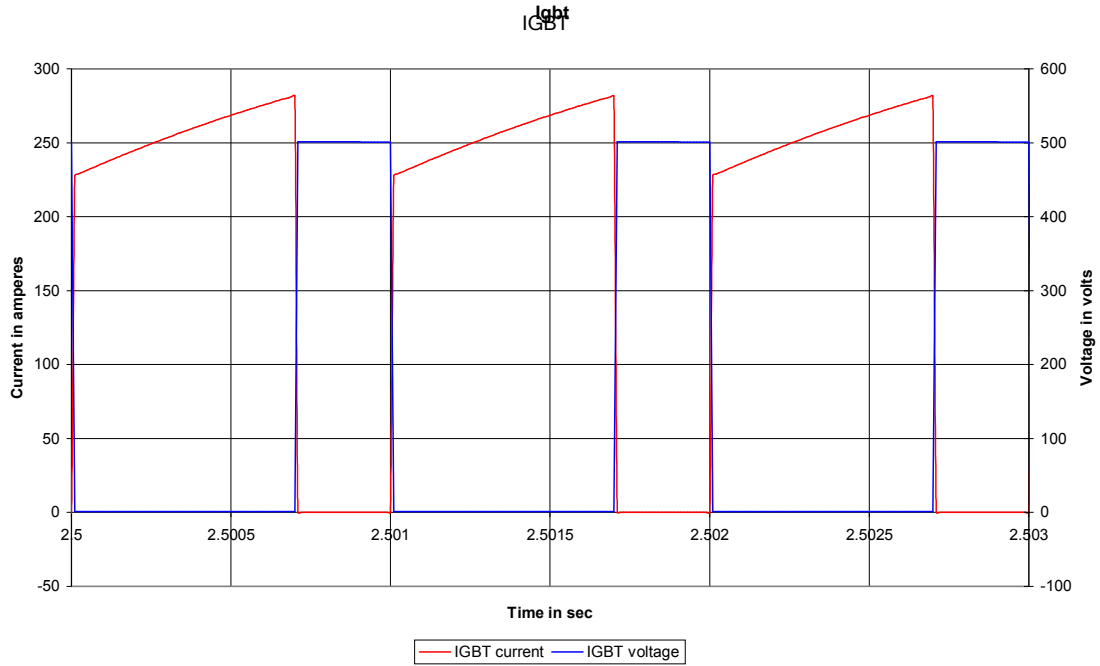
Σχήμα 4.125 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



Σχήμα 4.126 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=70\%$ , load 70%

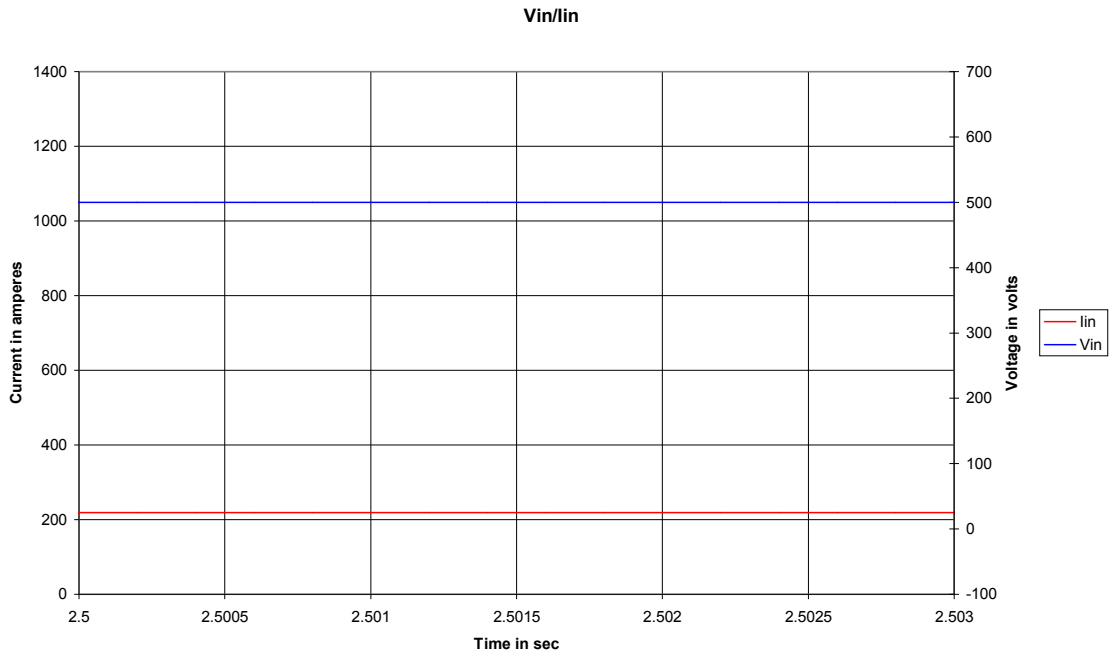


**Σχήμα 4.127** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%

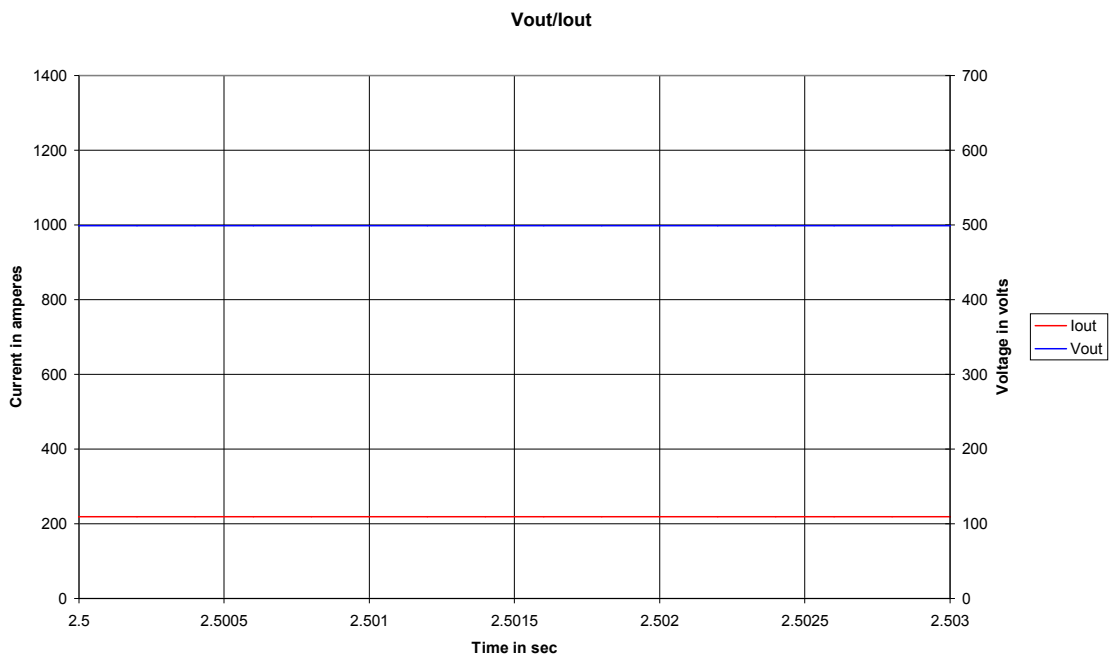


**Σχήμα 4.128** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=70\%$ , load 70%

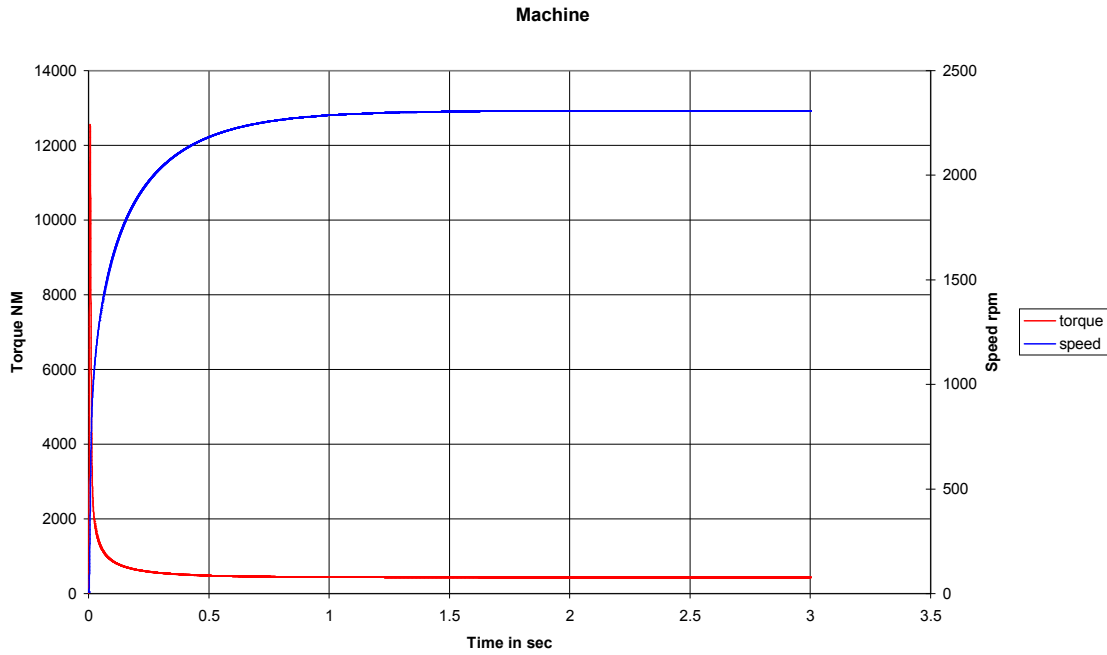
**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%**



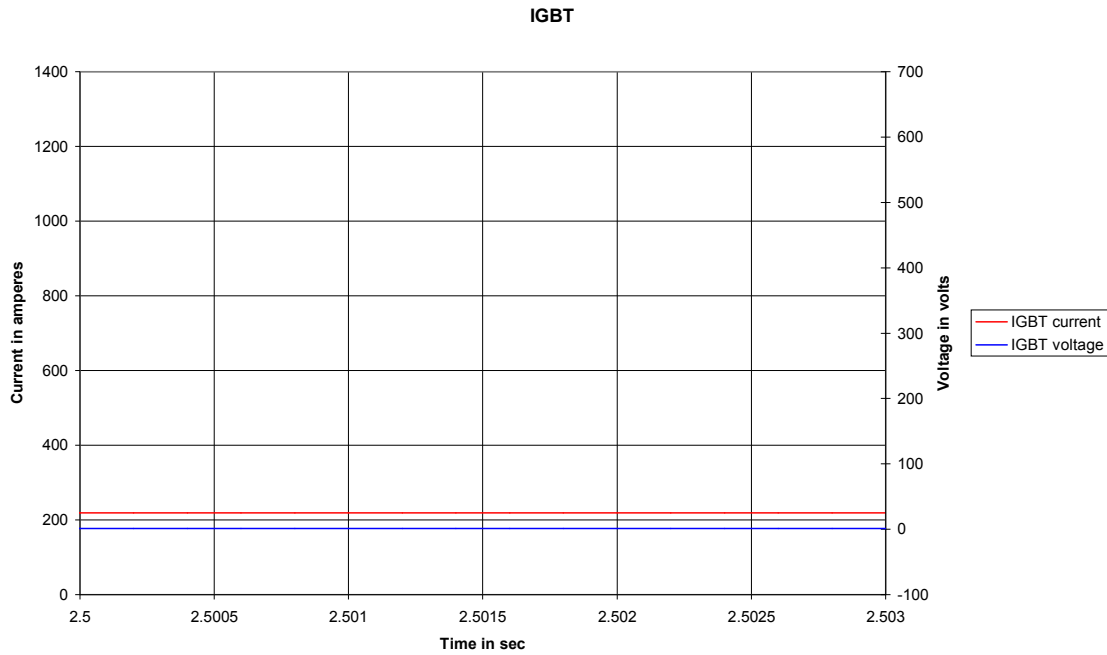
**Σχήμα 4.129** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100\%$ , load 50%



**Σχήμα 4.130** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100\%$ , load 50%

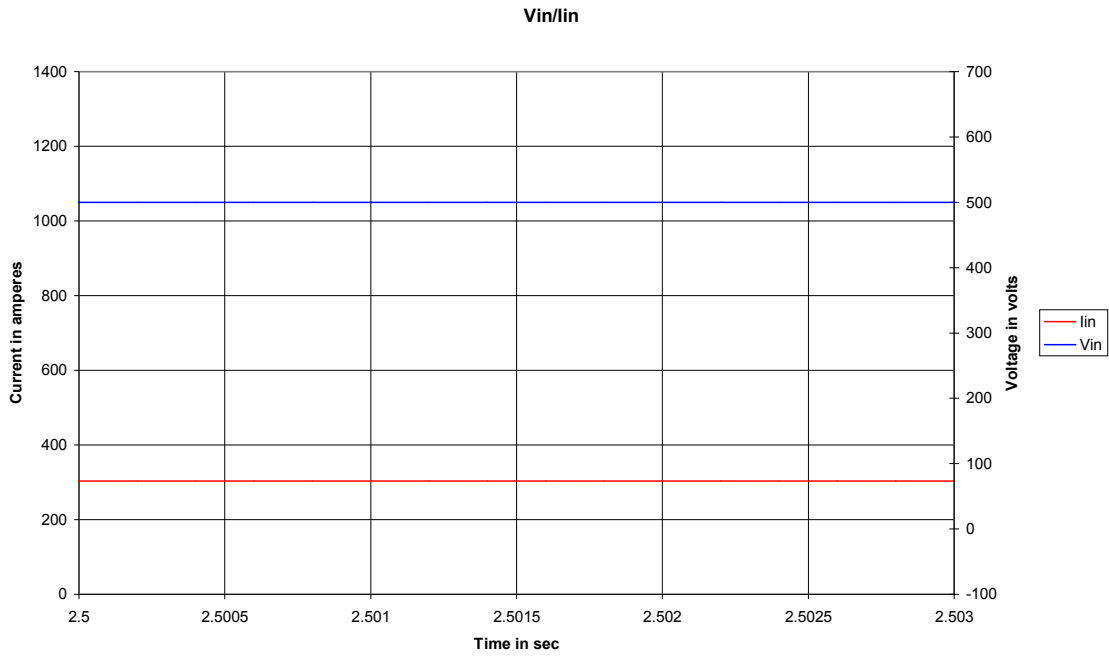


Σχήμα 4.131 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας M2,  $d=100\%$ , load 50%

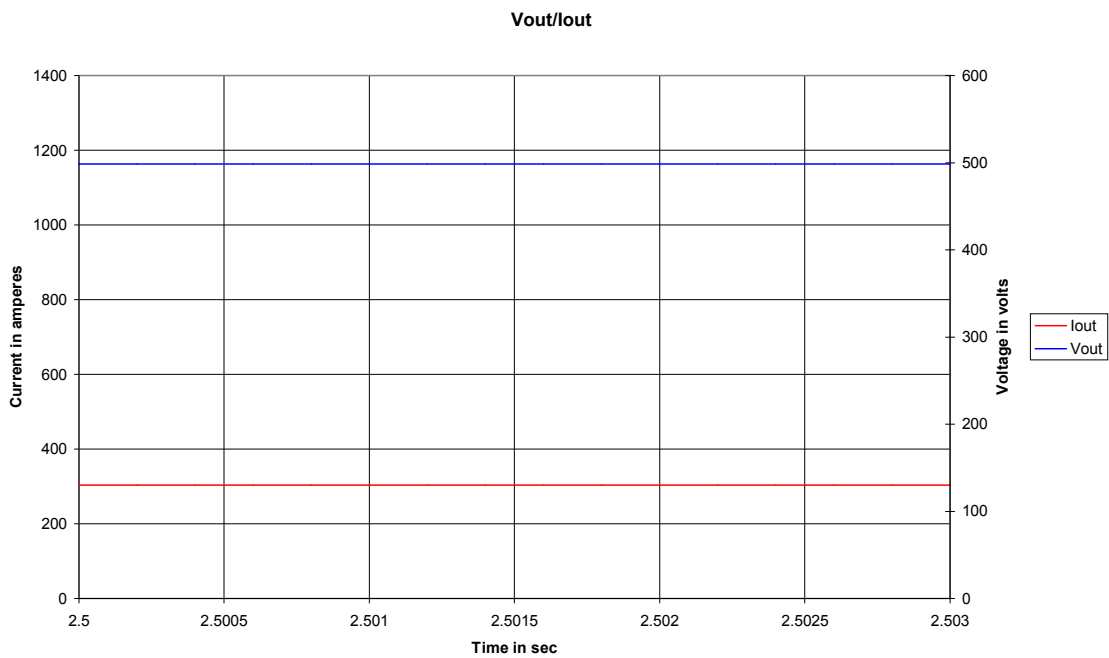


Σχήμα 4.132 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 50%

**Καταμητής ενός τεταρτημορίου, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%**

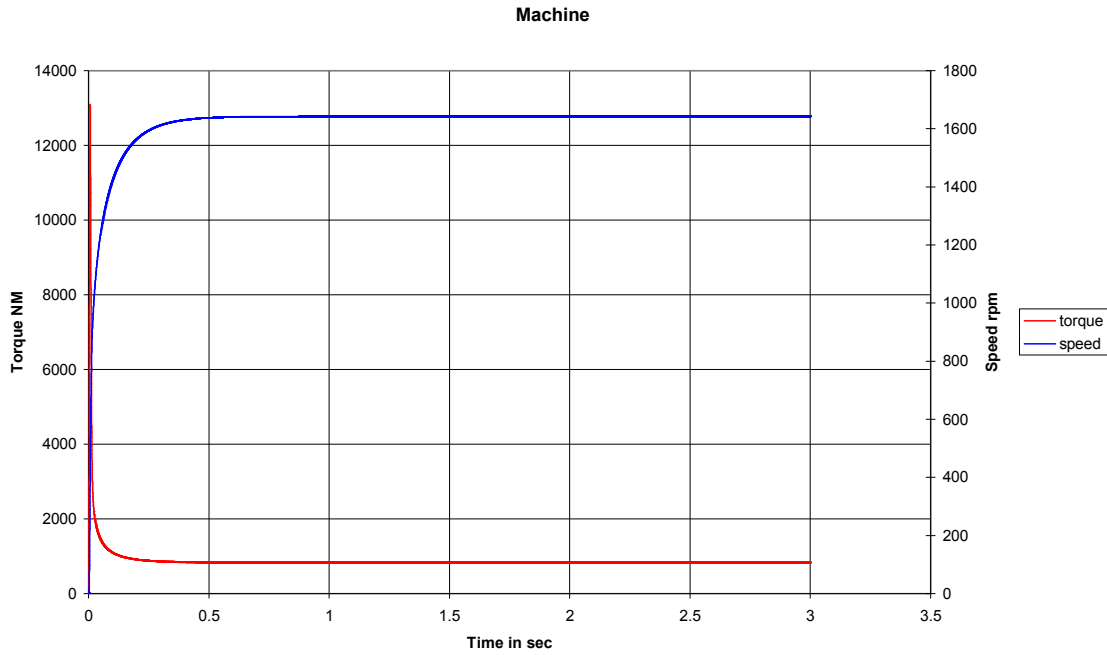


**Σχήμα 4.133** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100\%$ , load 100%

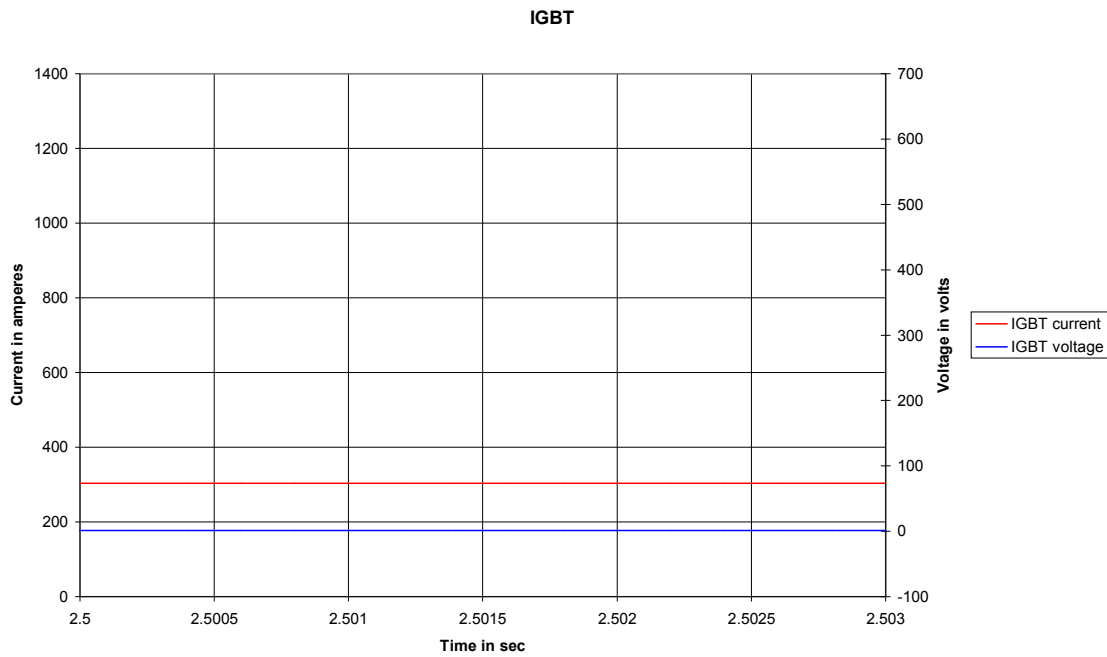


**Σχήμα 4.134** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100\%$ , load 100%



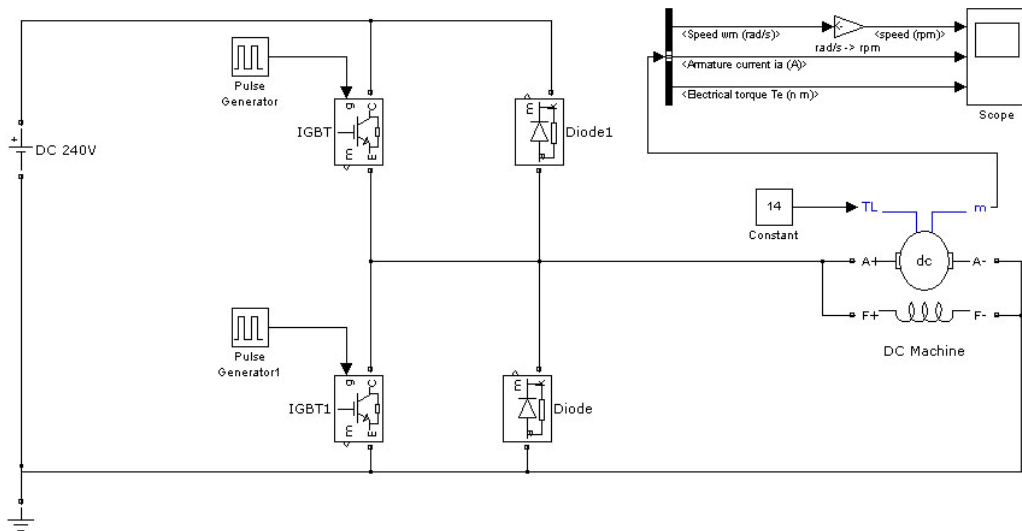


Σχήμα 4.135 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 100%



Σχήμα 4.136 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 100%

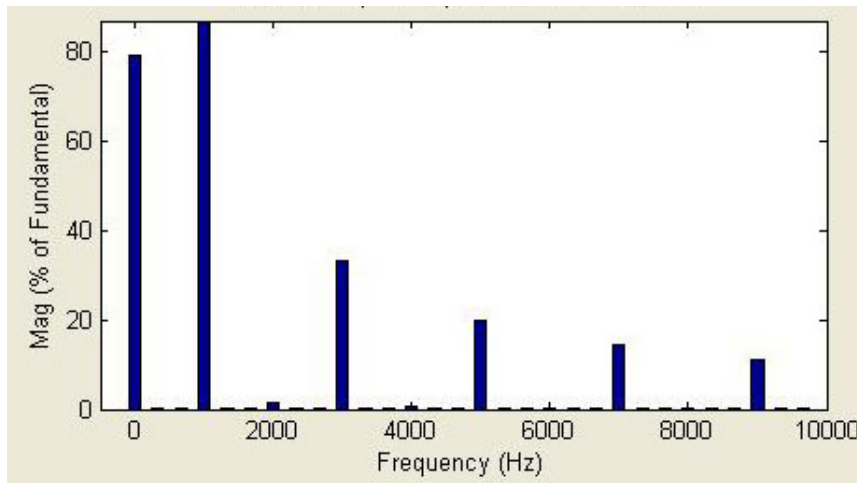
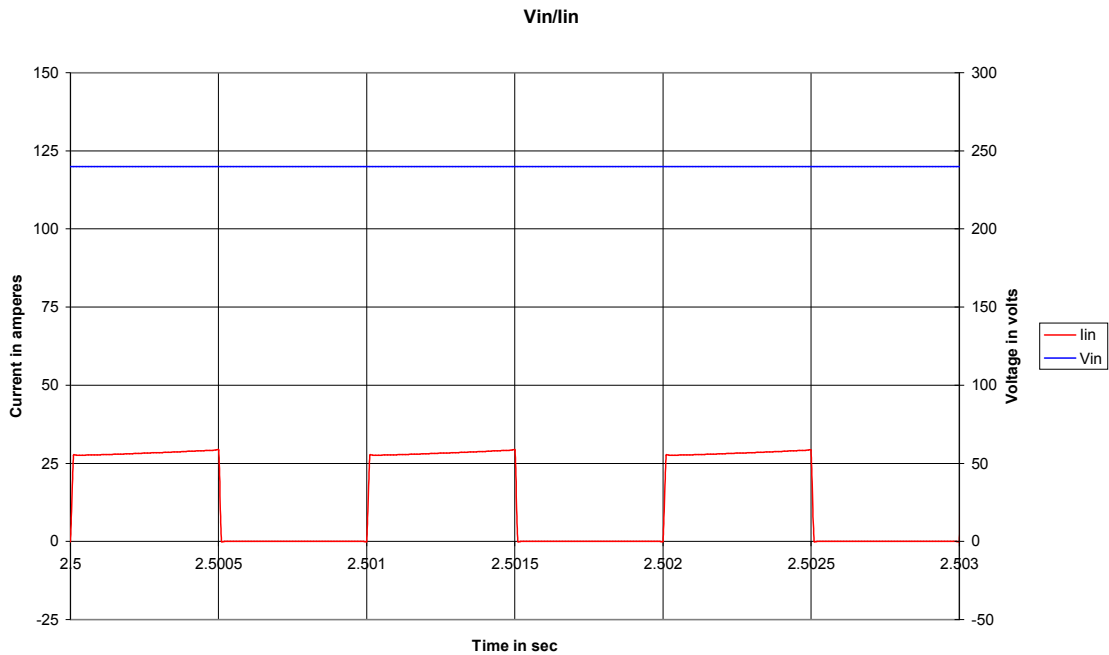
#### 4.2.4 Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων



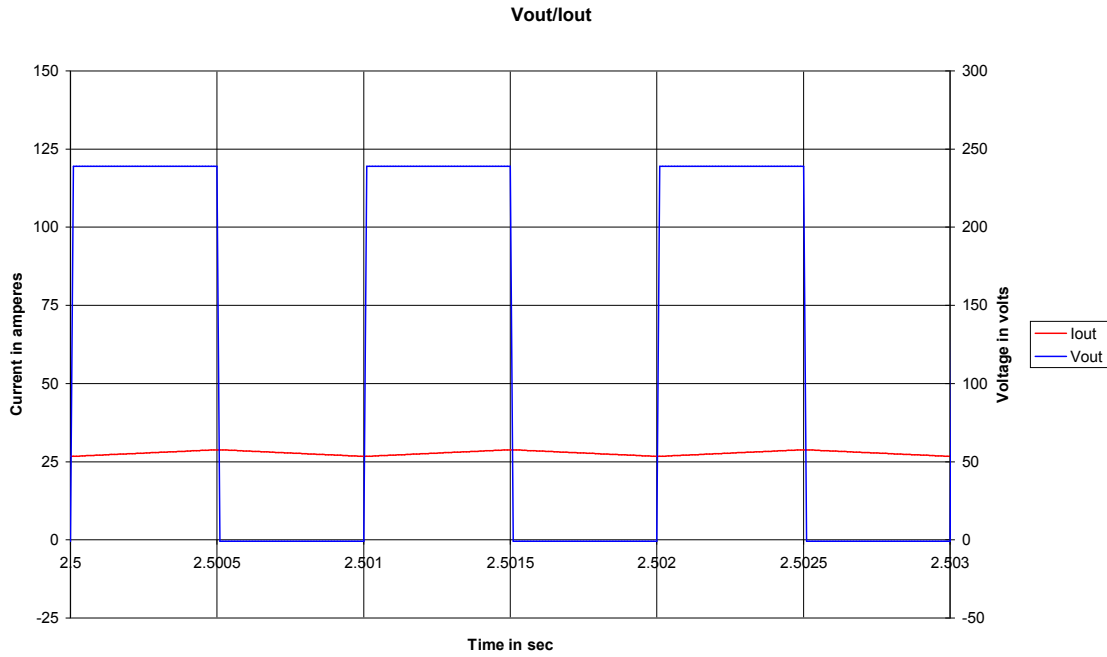
**Σχήμα 4.137** Διάγραμμα Καταμητή (chopper) δύο τεταρτημορίων

Πραγματοποιήσαμε το παραπάνω διάγραμμα. Ο καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων έχει τη δυνατότητα της επιστροφής του ρεύματος προς την πηγή. Το ρεύμα μπορεί να γίνει και αρνητικό ενώ η τάση παραμένει θετική. Στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο λειτουργίας, το οποίο και θα εξεταστεί, άγουν τα IGBT&Diode (ως δίοδος ελευθέρως ροής) ενώ στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο τα IGBT1&Diode1. Ο χρόνος αγωγής των IGBT καθορίζει την μέση τάση της εξόδου και όπως θα δούμε το κύκλωμα, κατά τη λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο, έχει την ίδια περίπου συμπεριφορά όπως ο αντίστοιχος καταμητής ενός τεταρτημορίου παρουσιάζοντας απειροελάχιστες διαφορές.

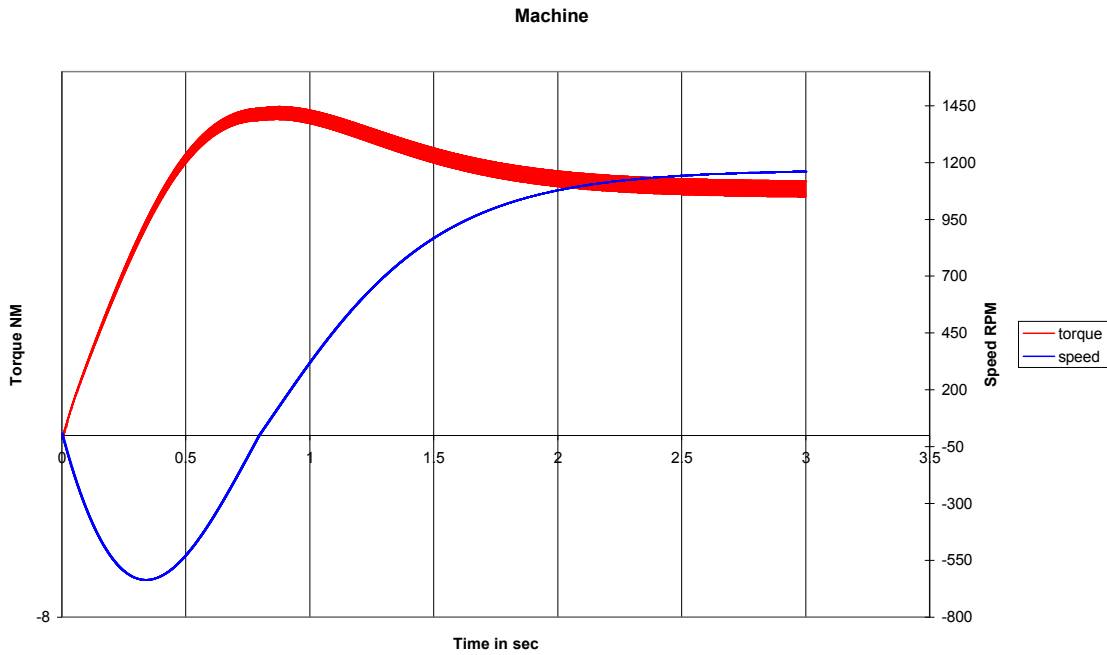
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%**



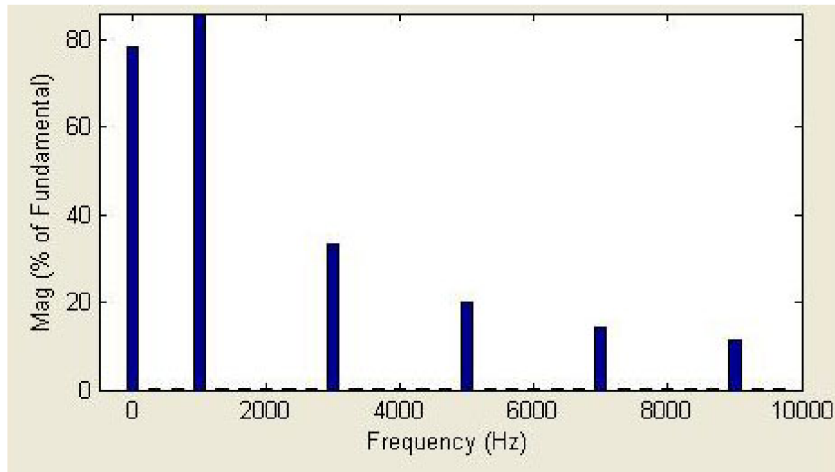
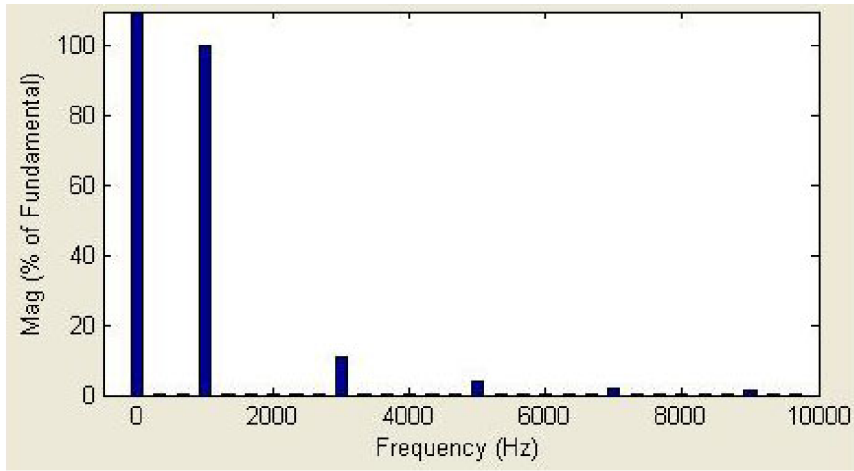
**Σχήμα 4.138** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50



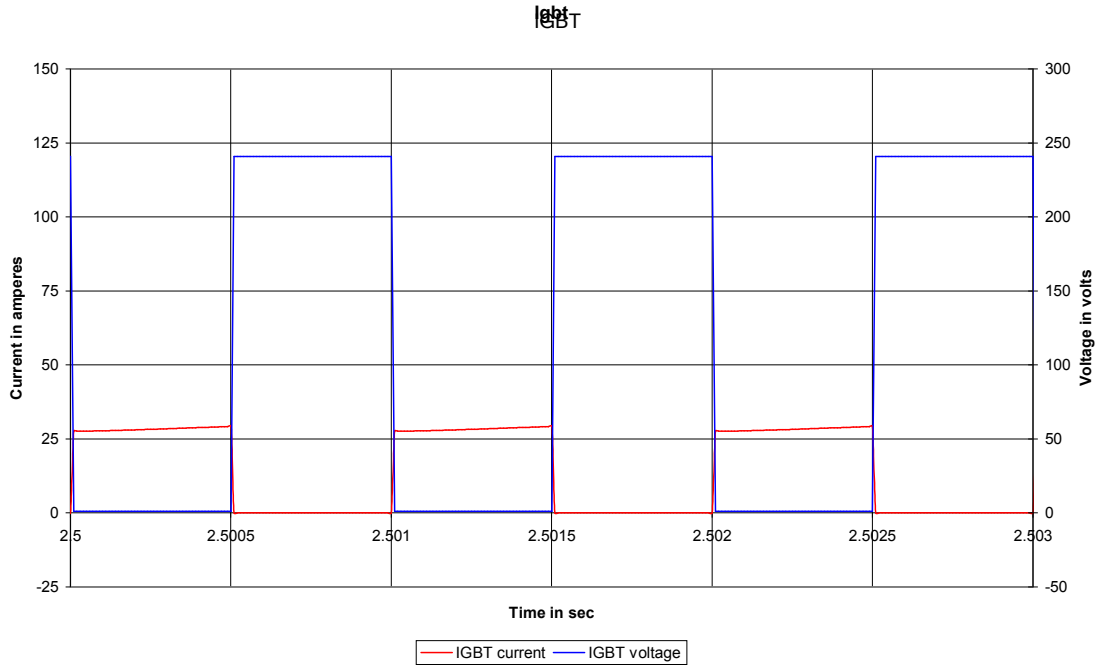
Σχήμα 4.139 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%



Σχήμα 4.140 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=50\%$ , load 50%



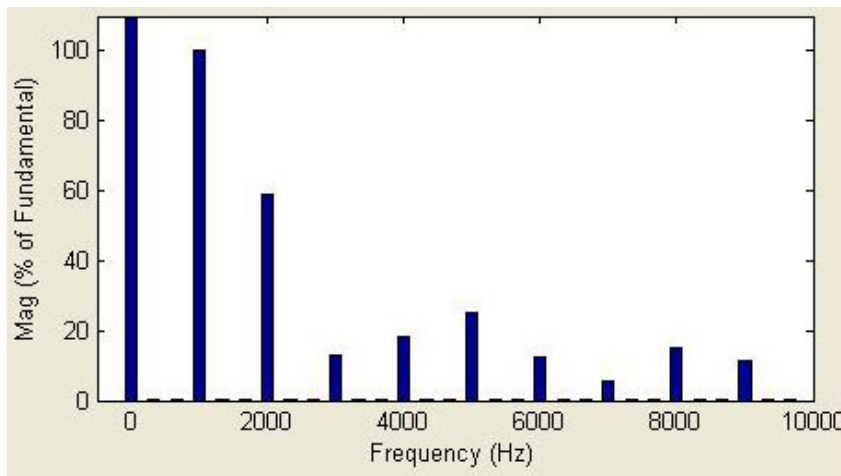
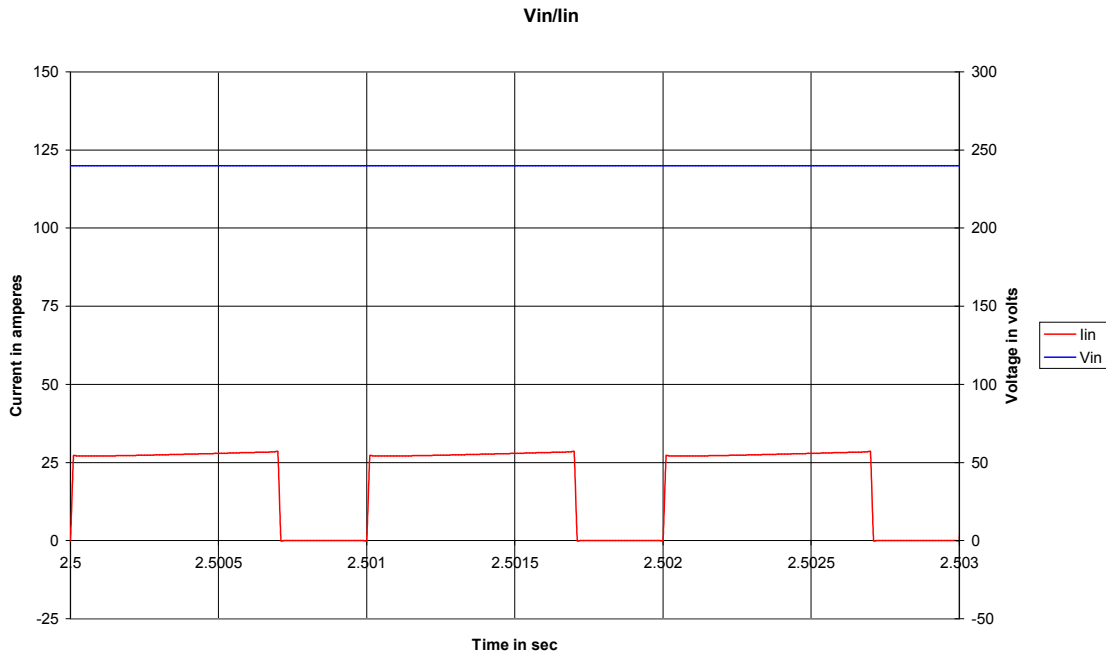
**Σχήμα 4.141** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%



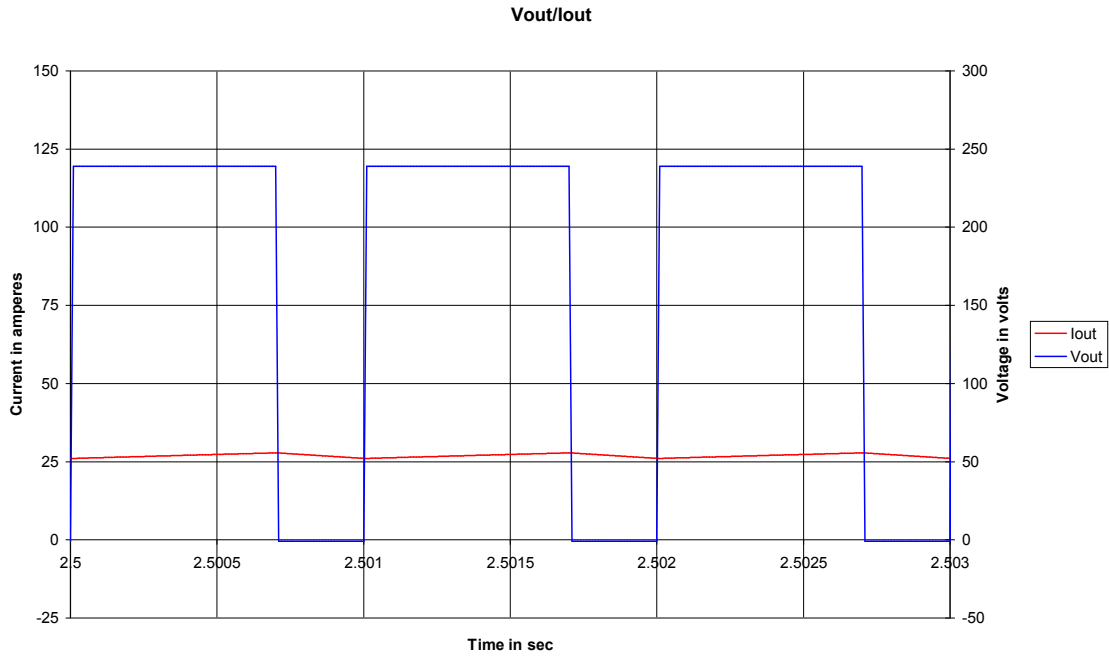
**Σχήμα 4.142** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=50\%$ , load 50%

Από την προσομοίωση και τις μετρήσεις που πήραμε μπορούμε να διακρίνουμε πόσο έντονη είναι ομοιότητα του καταμητή ενός τεταρτημορίου, με τον καταμητή δύο τεταρτημορίων, όταν αυτός λειτουργεί στο πρώτο τεταρτημόριο

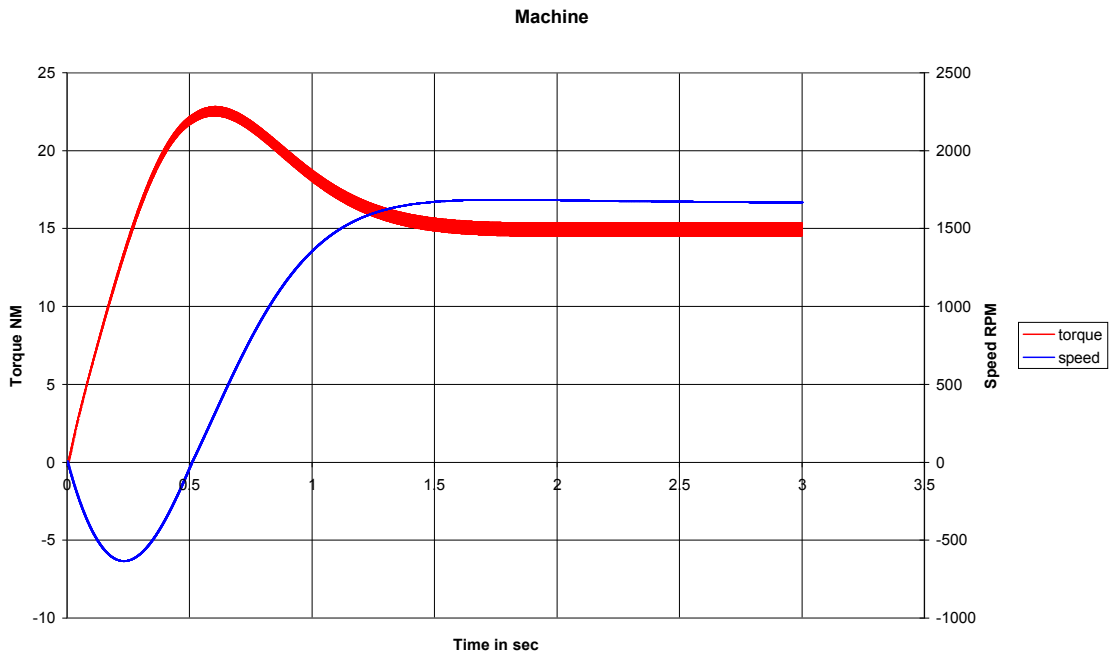
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%**



**Σχήμα 4.143** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%

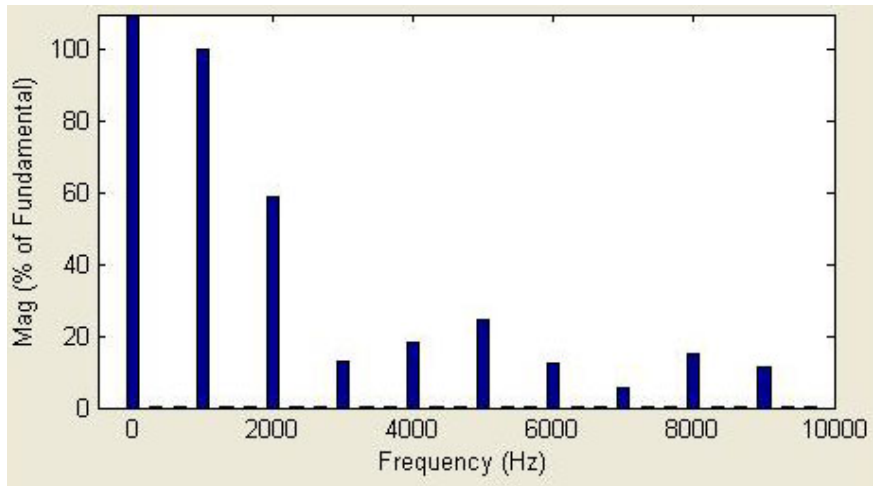
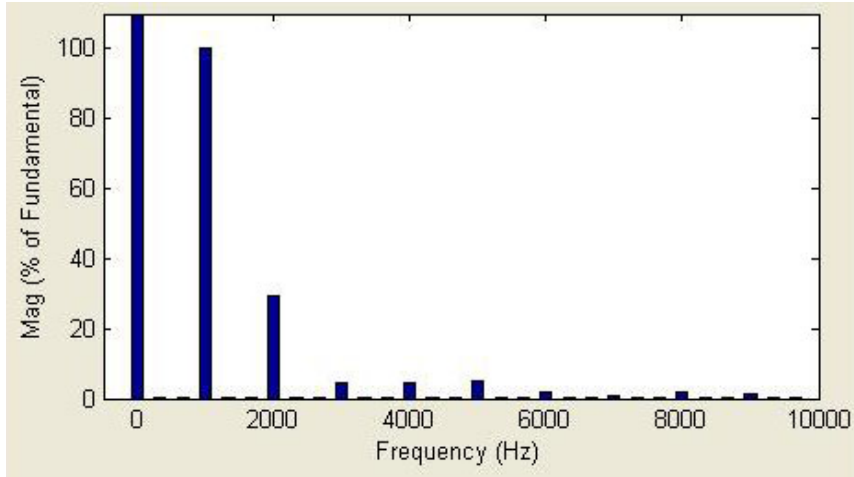


**Σχήμα 4.144** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%

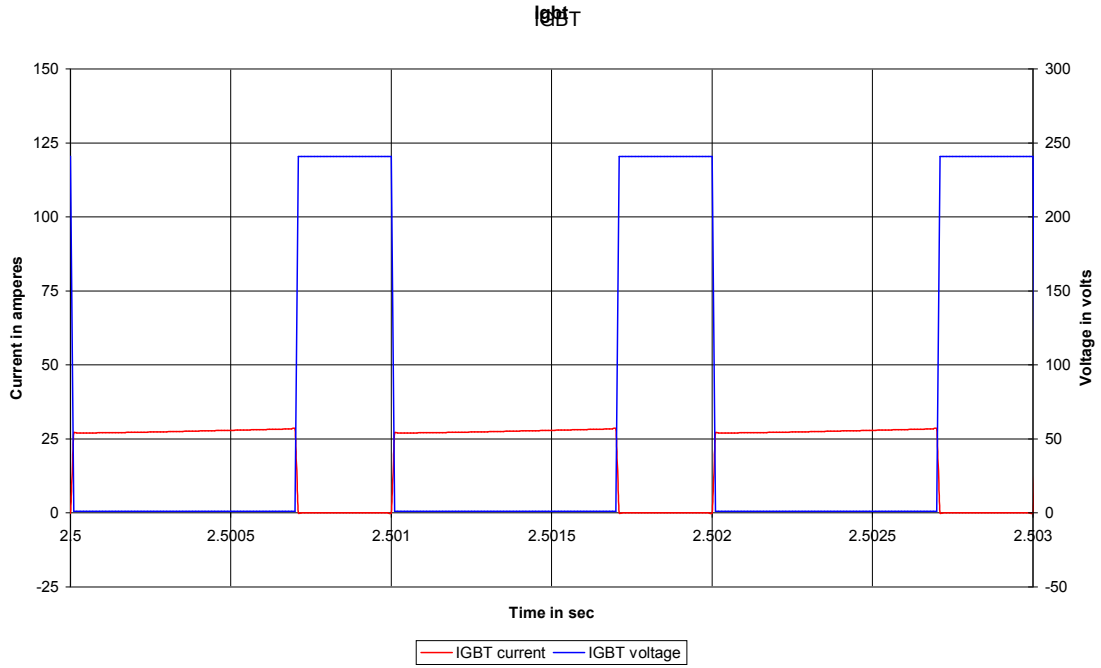


**Σχήμα 4.145** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=70\%$ , load 70%



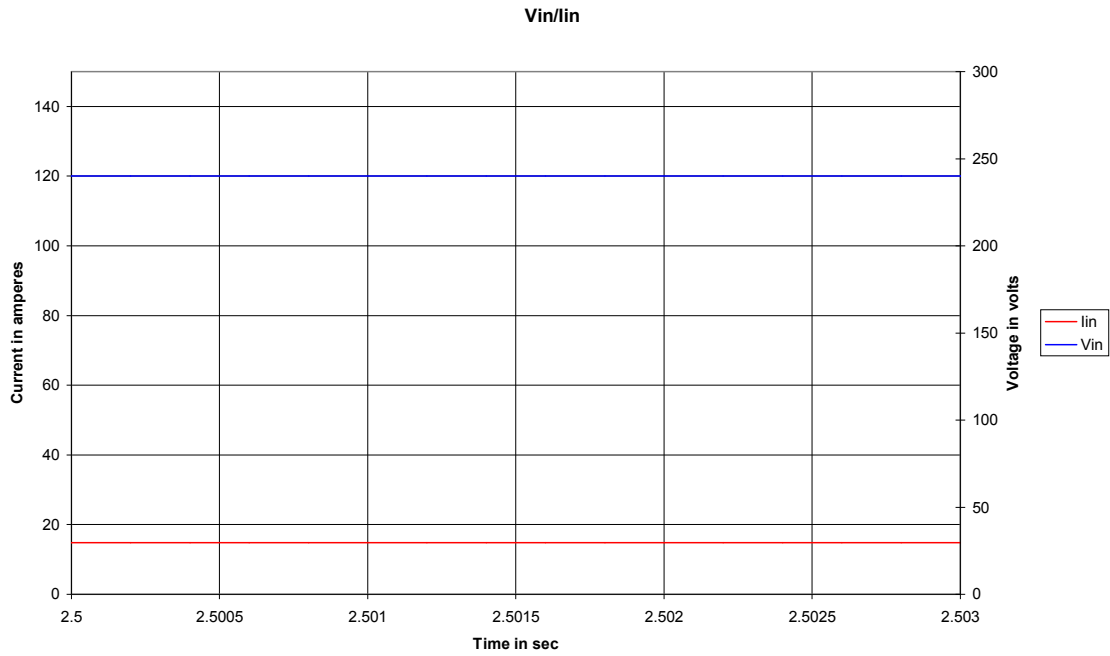


**Σχήμα 4.146** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70%

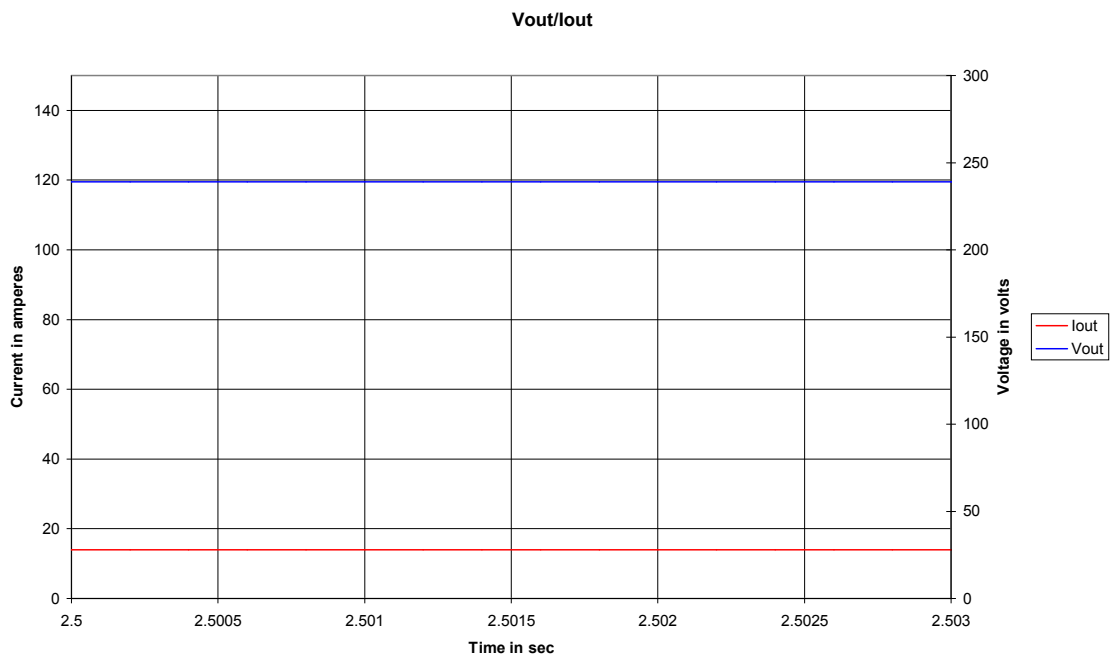


**Σχήμα 4.147** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=70\%$ , load 70%

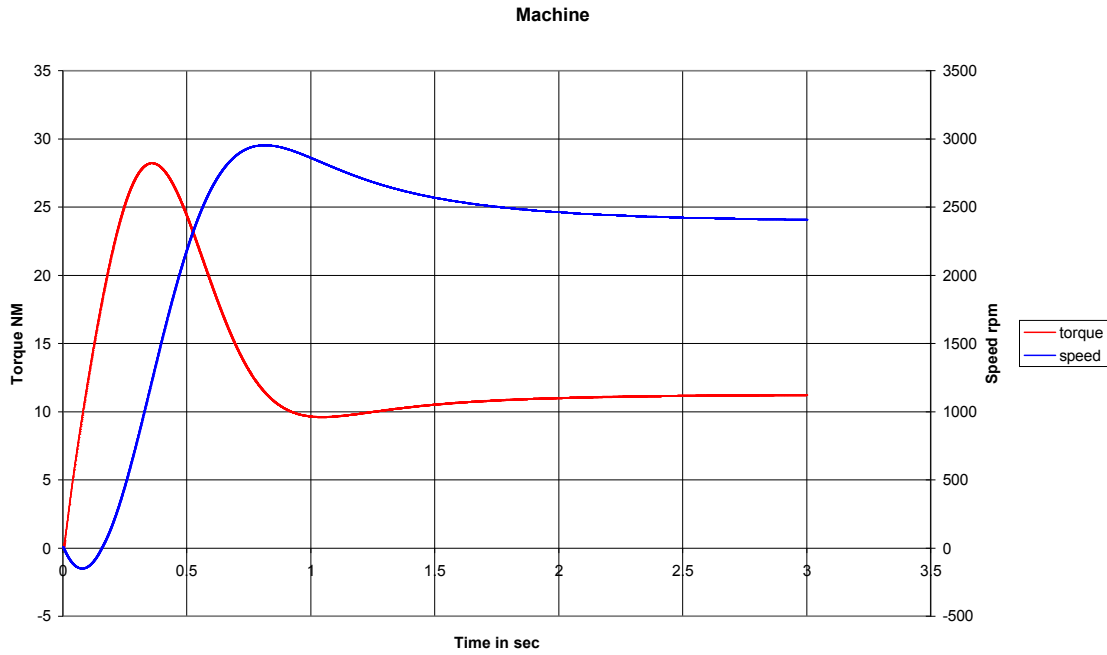
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%**



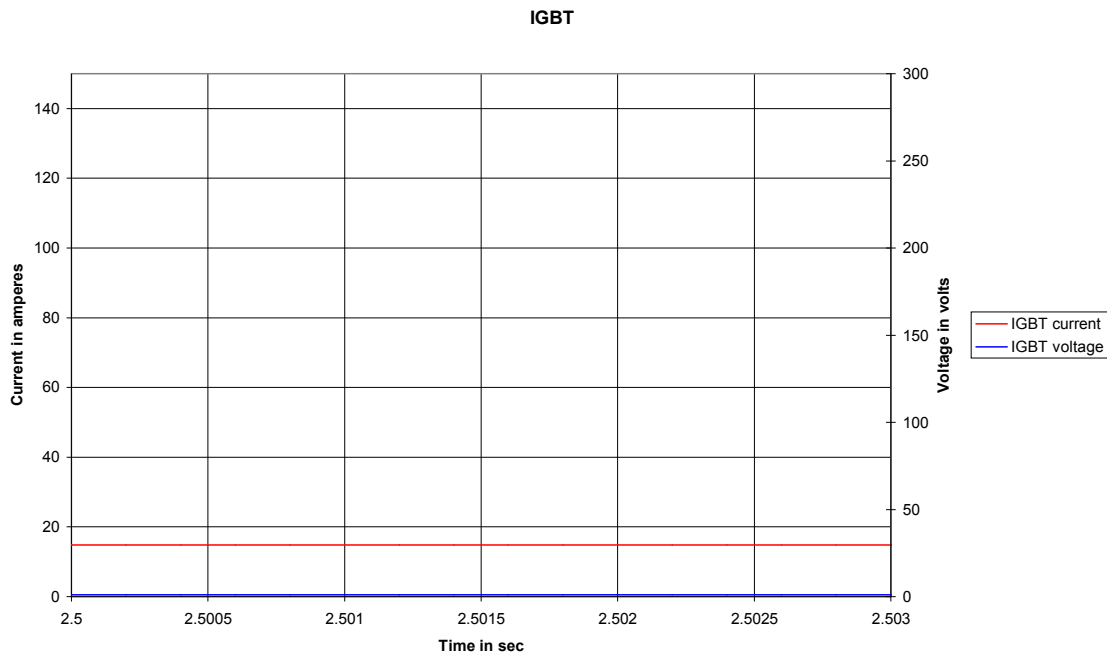
**Σχήμα 4.148** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=100%$ , load 50%



**Σχήμα 4.149** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=100%$ , load 50%

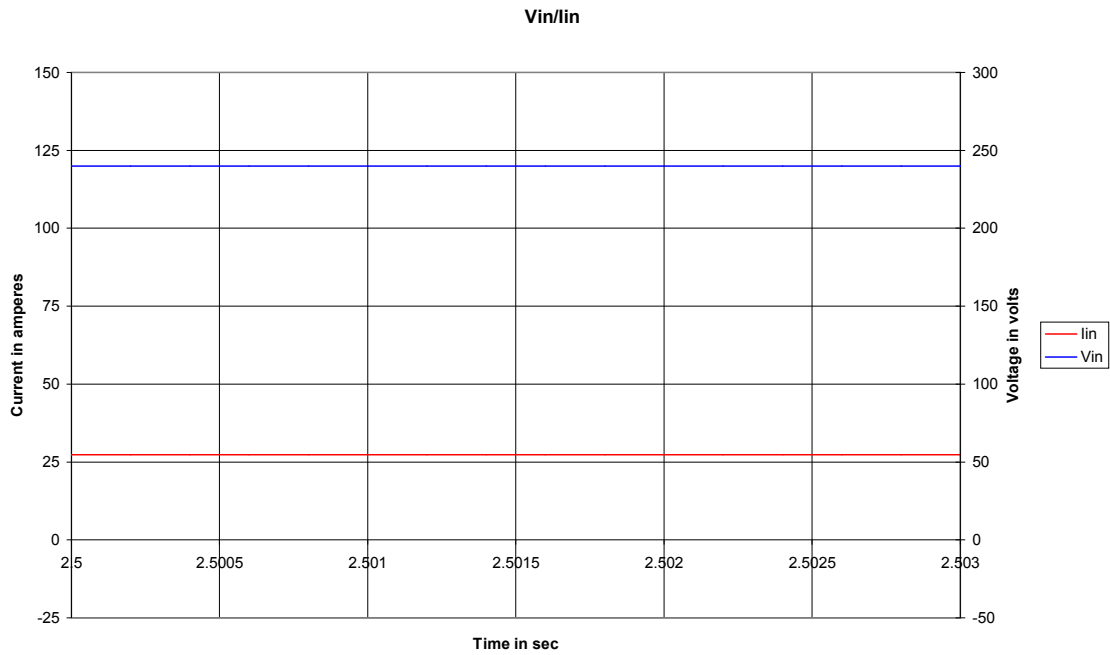


Σχήμα 4.150 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 50%

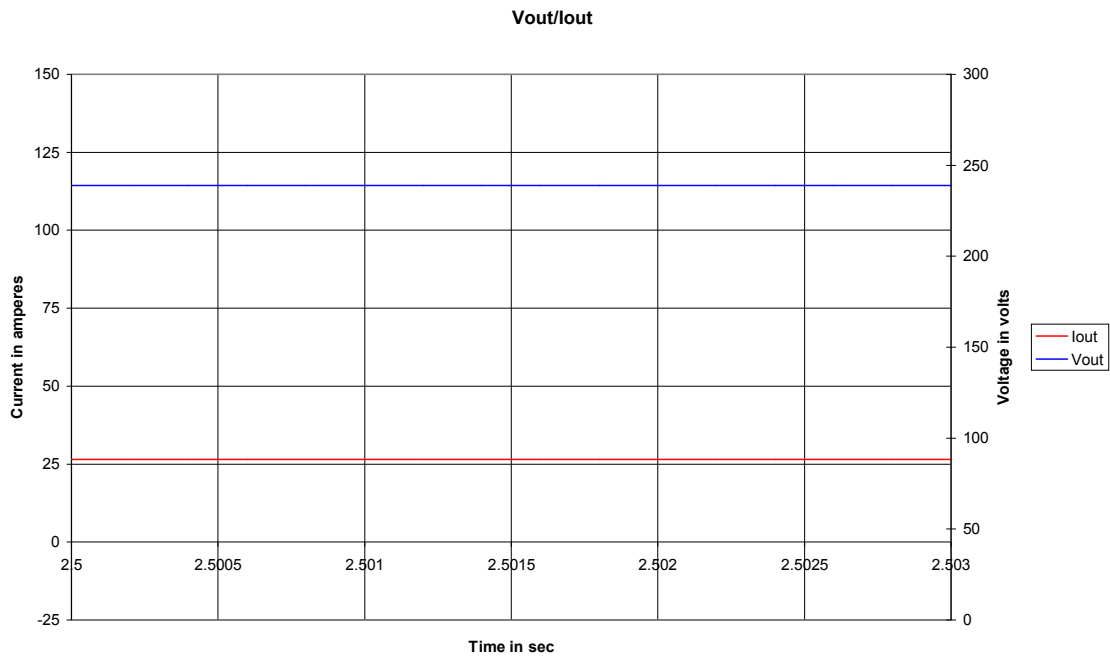


Σχήμα 4.151 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 50%

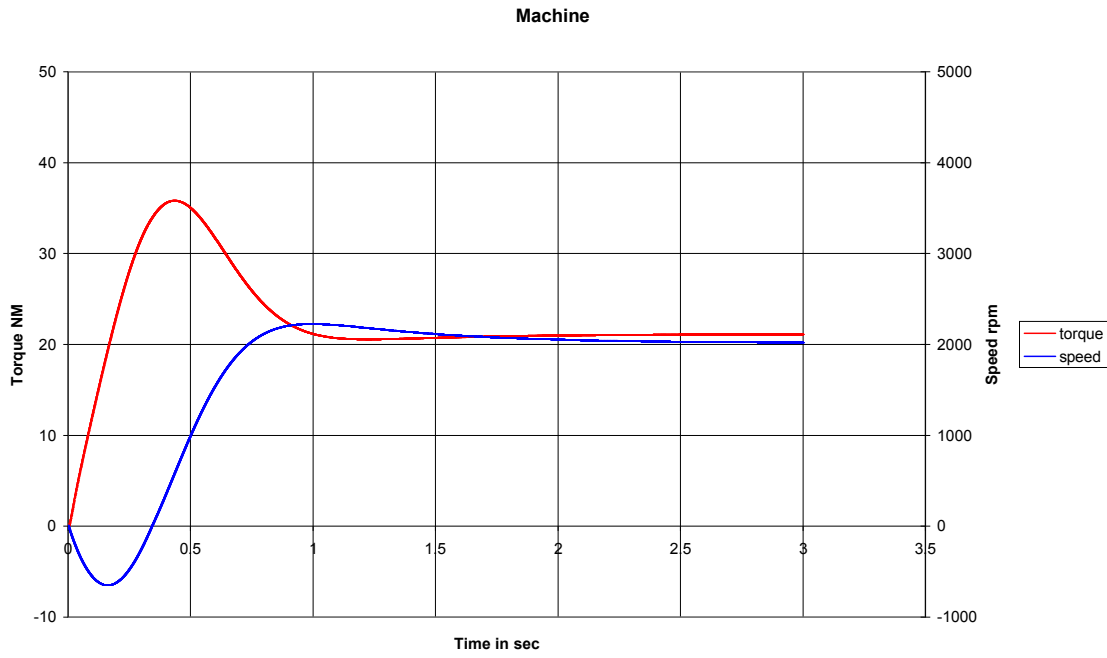
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%**



**Σχήμα 4.152** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=100\%$ , load 100%



**Σχήμα 4.153** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=100\%$ , load 100%

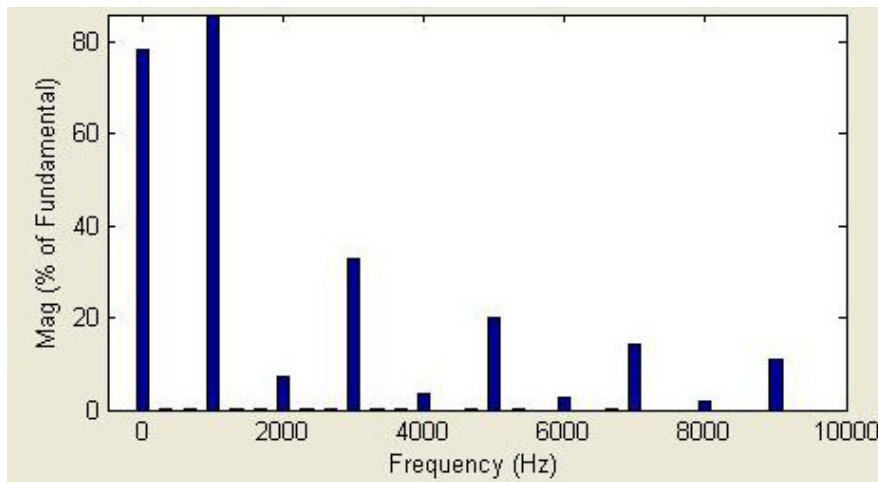
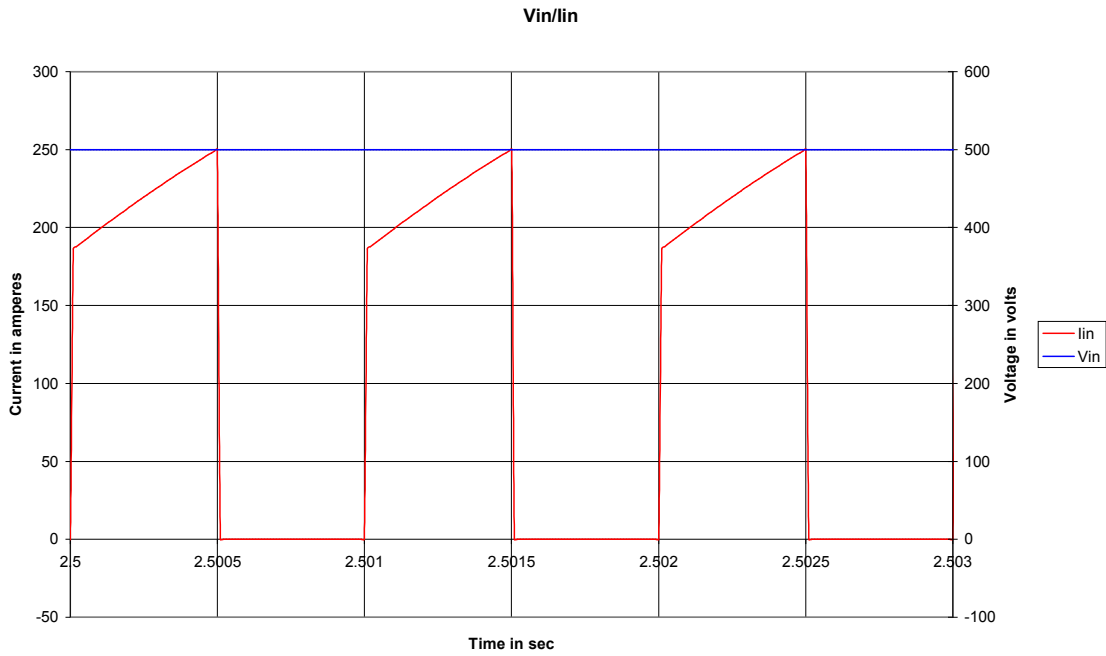


Σχήμα 4.154 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 100%

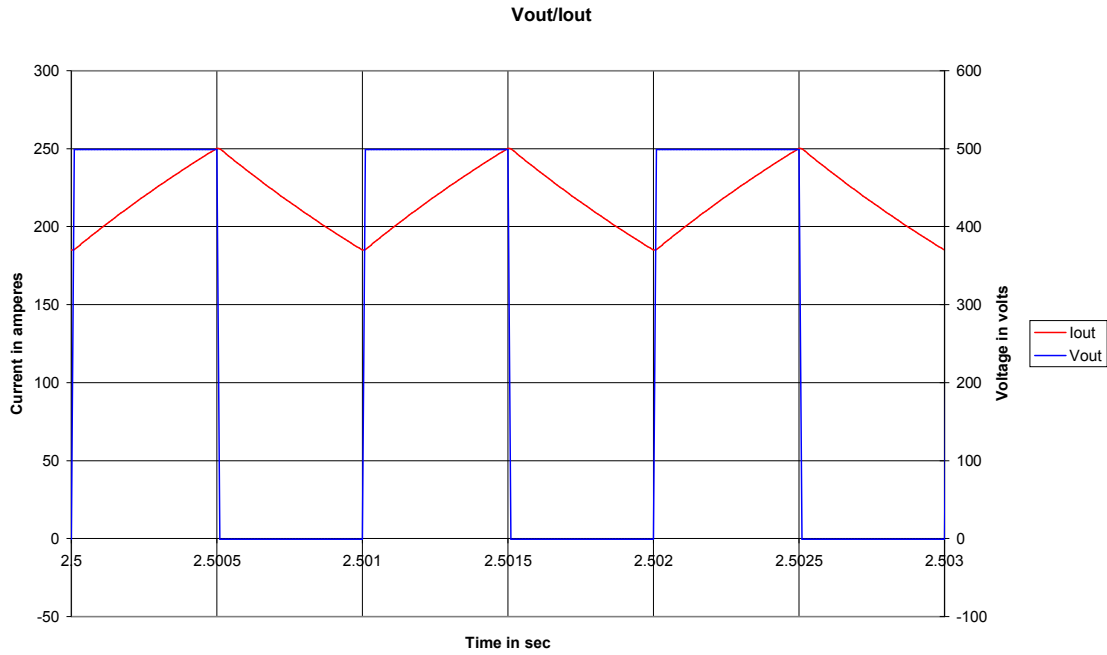


Σχήμα 4.155 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 100%

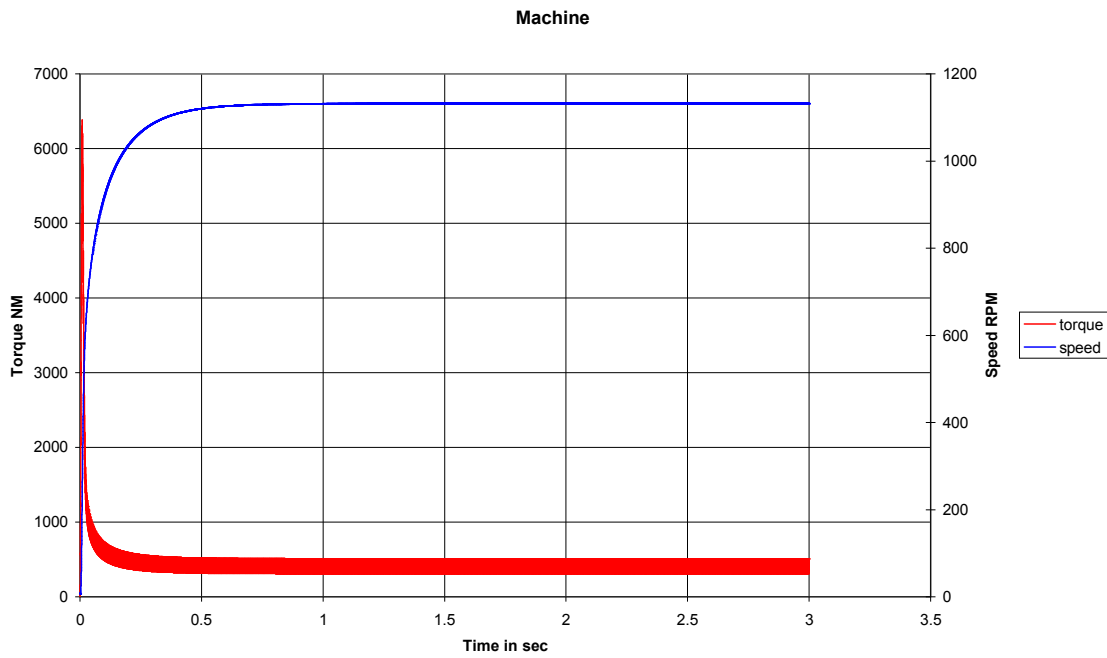
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%**



**Σχήμα 4.156** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

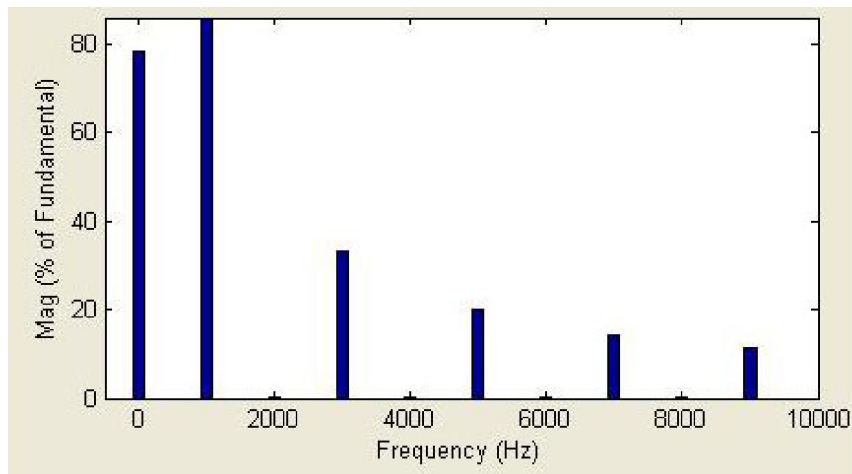
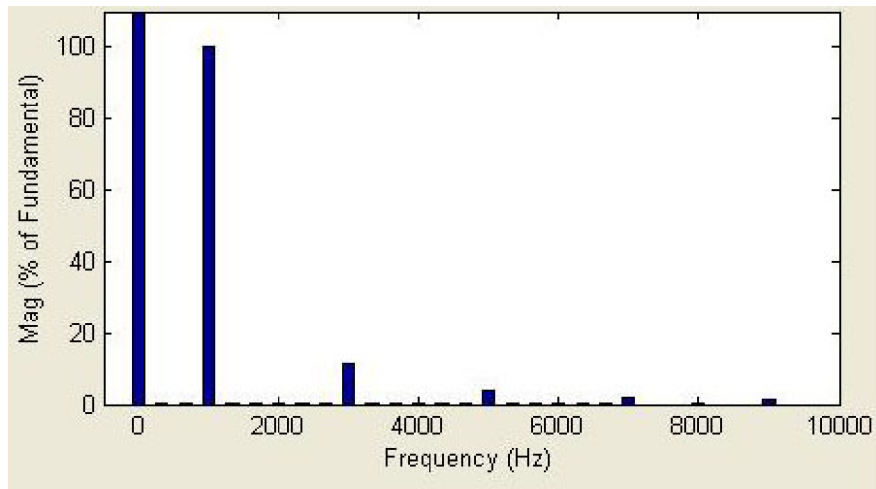


Σχήμα 4.157 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

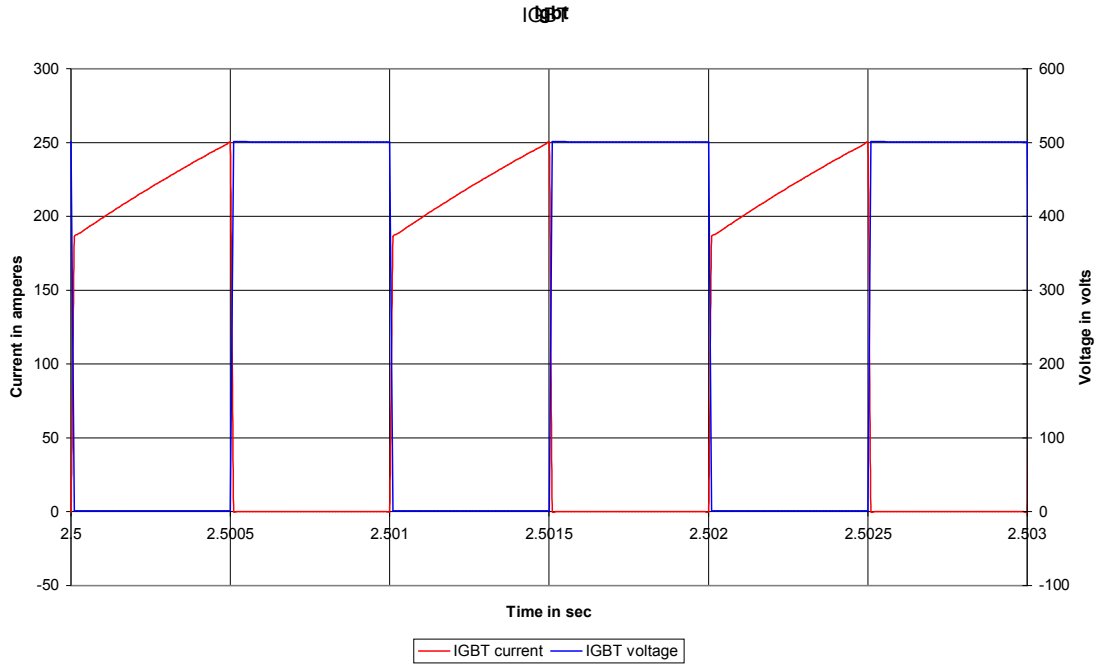


Σχήμα 4.158 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=50\%$ , load 50%



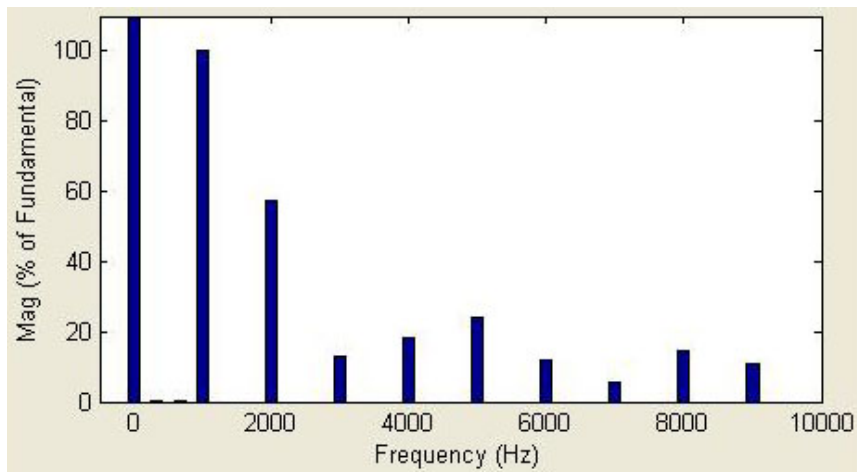
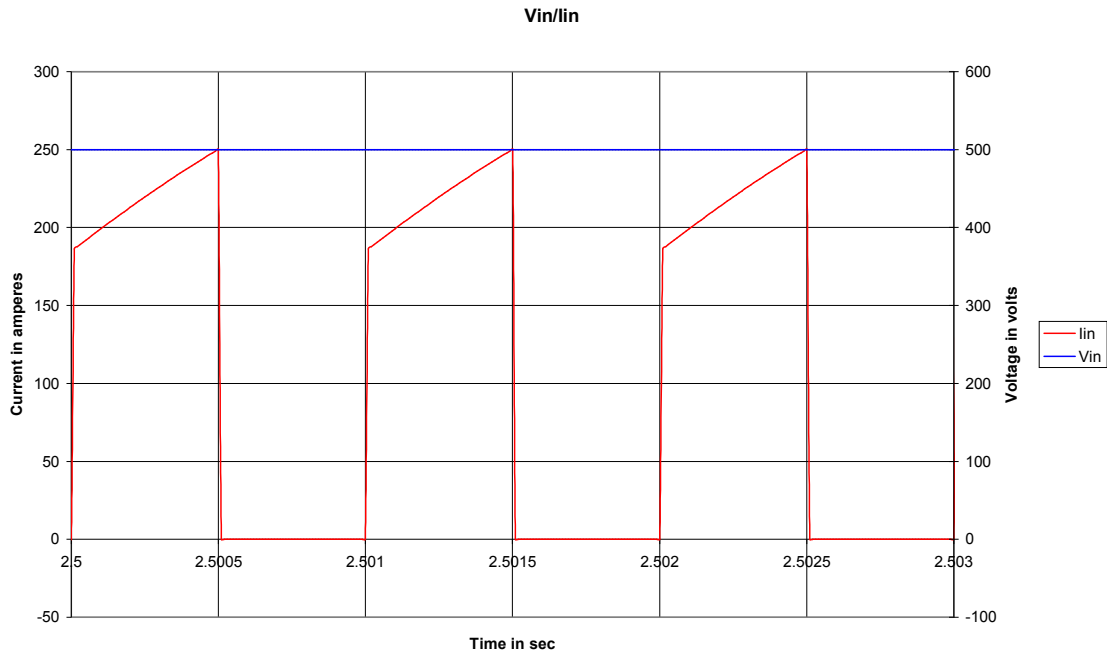


**Σχήμα 4.159** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

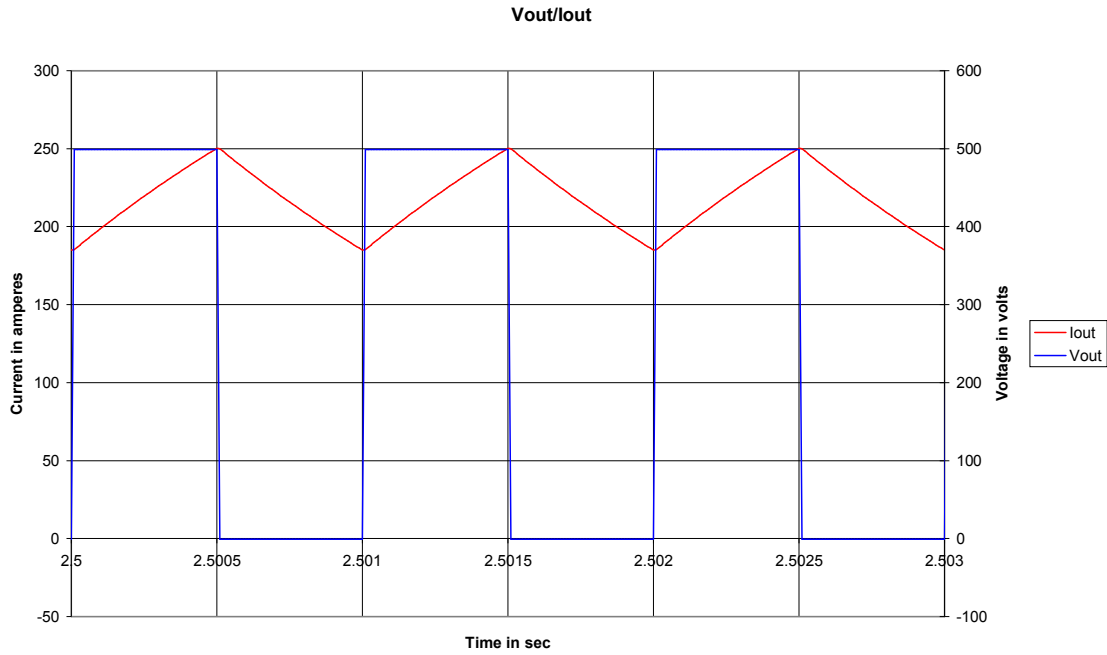


**Σχήμα 4.160** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=50\%$ , load 50%

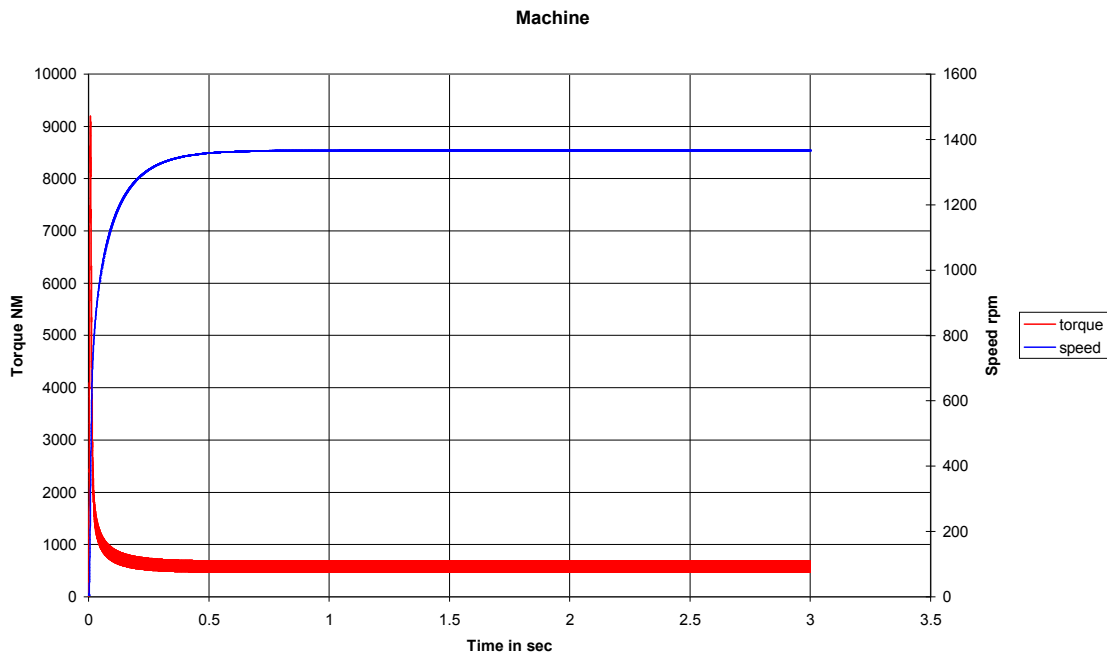
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%**



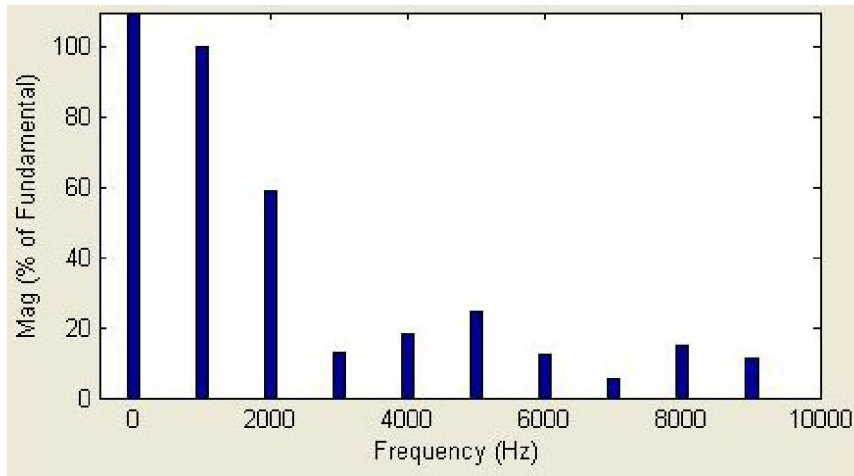
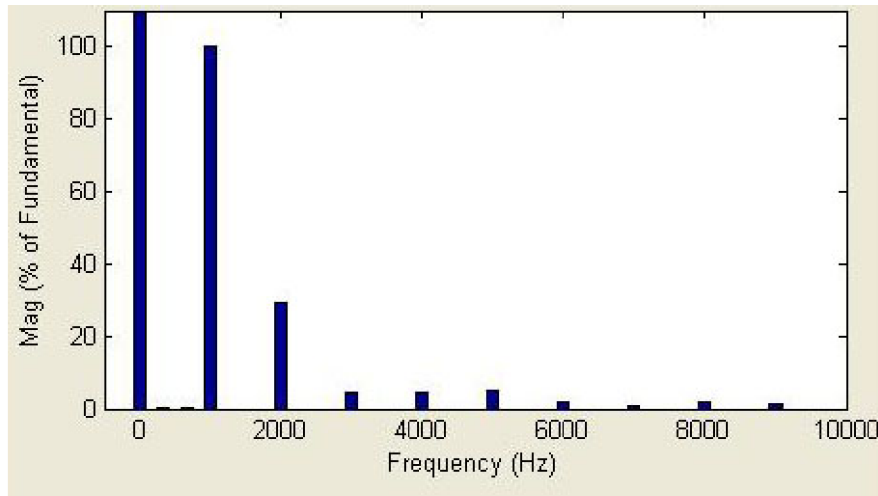
**Σχήμα 4.161** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



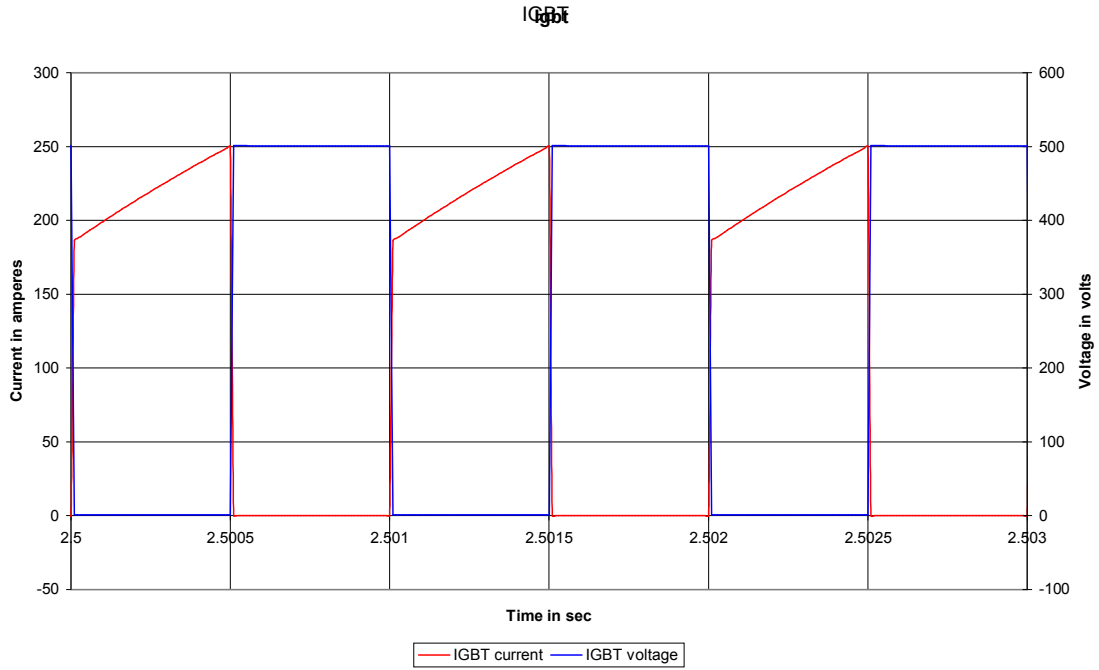
Σχήμα 4.162 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



Σχήμα 4.163 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=70\%$ , load 70%

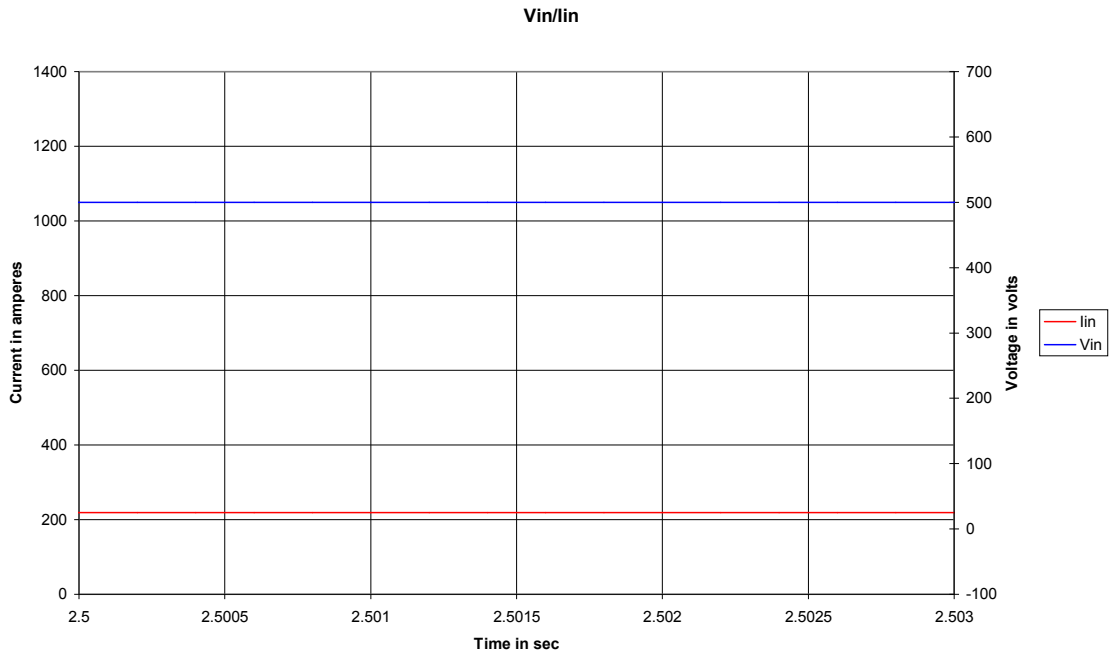


**Σχήμα 4.164** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2, d=70%, load 70%

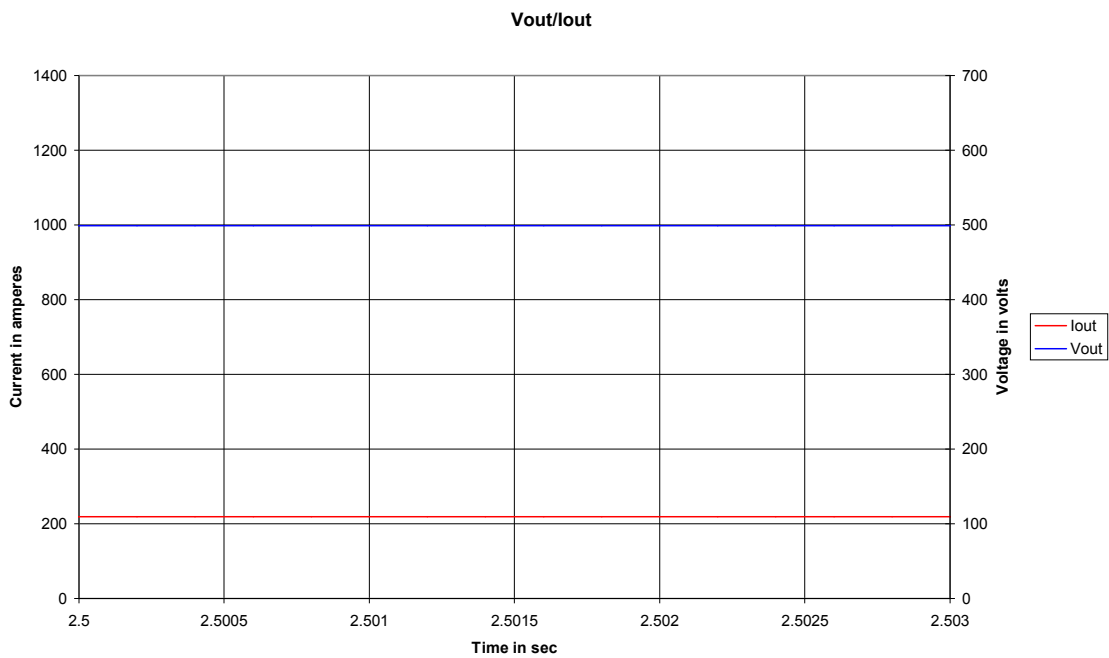


**Σχήμα 4.165** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=70\%$ , load 70%

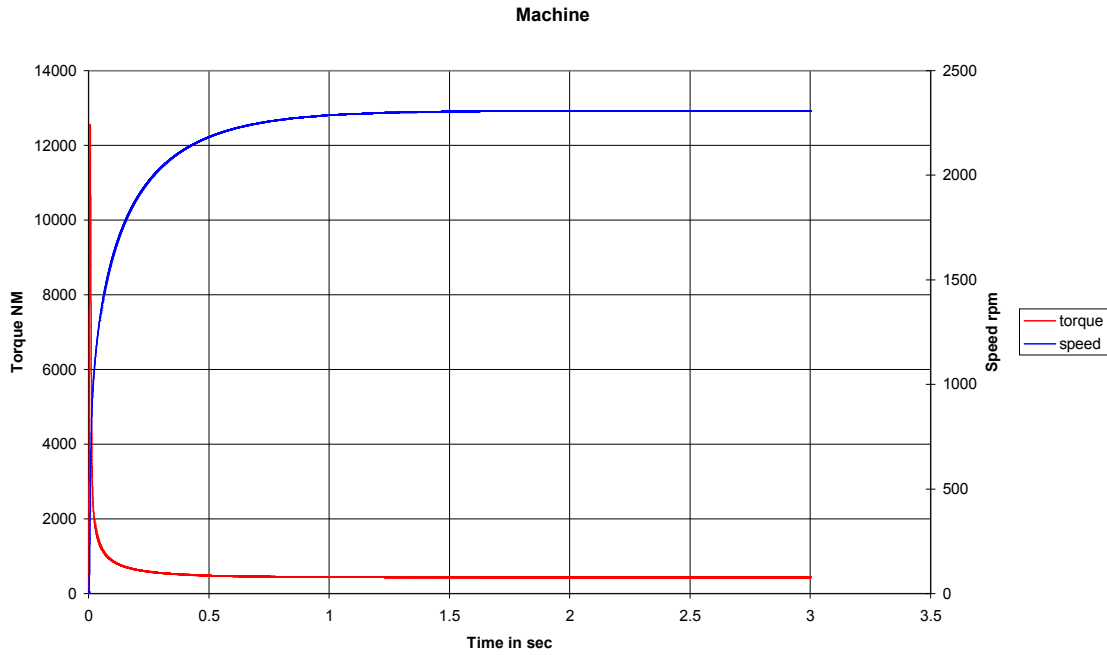
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%**



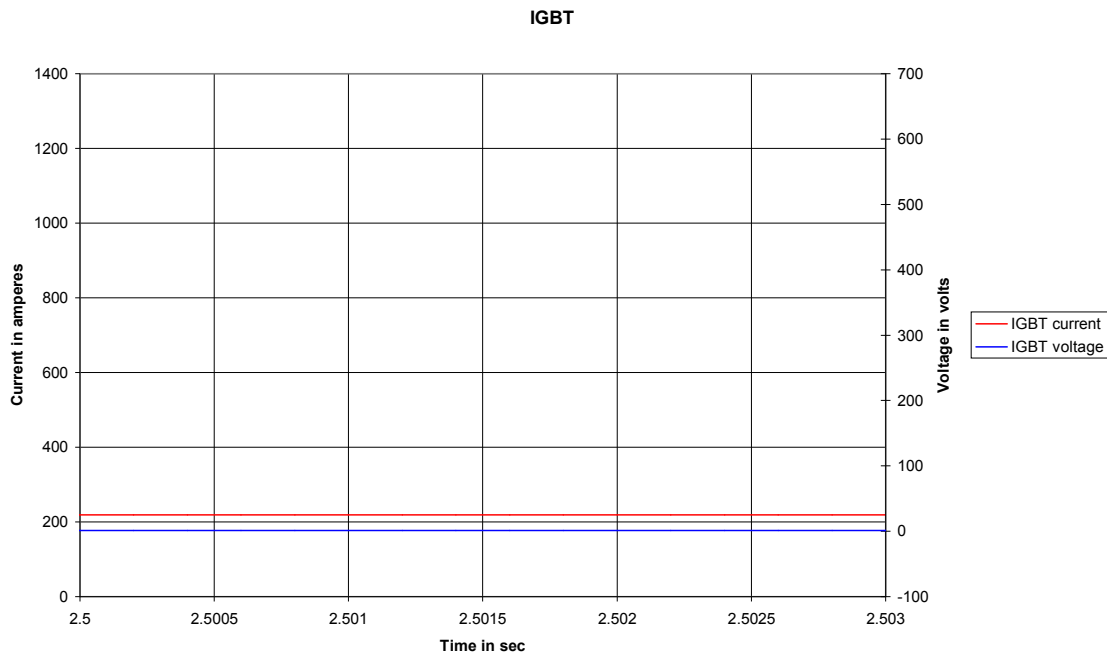
**Σχήμα 4.166** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100%$ , load 50%



**Σχήμα 4.167** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100%$ , load 50%



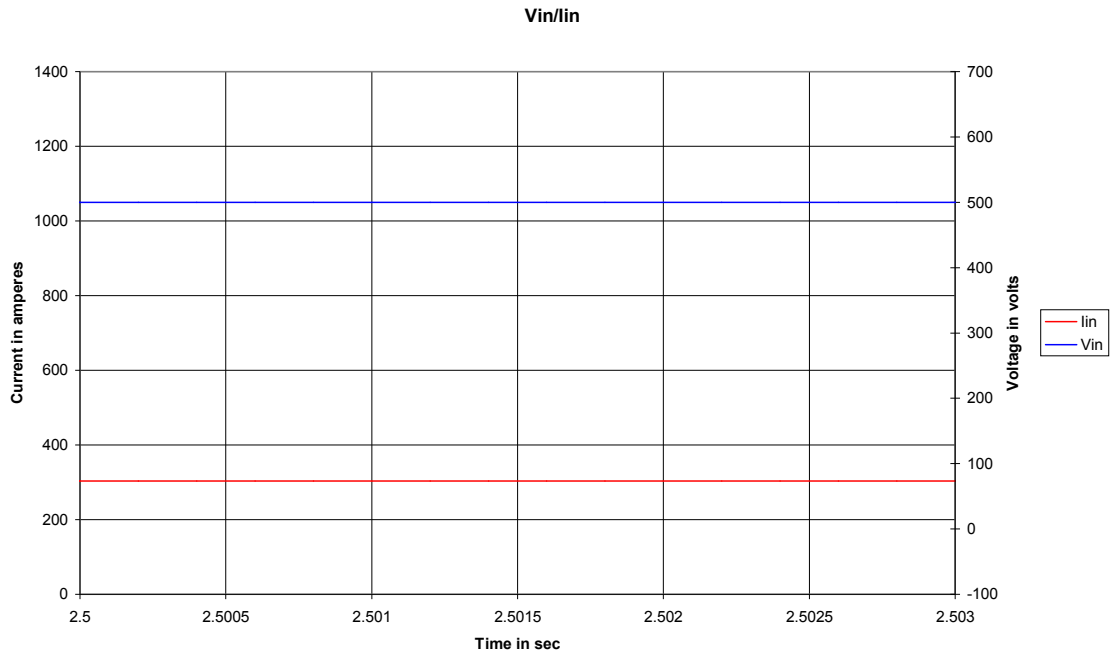
Σχήμα 4.168 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 50%



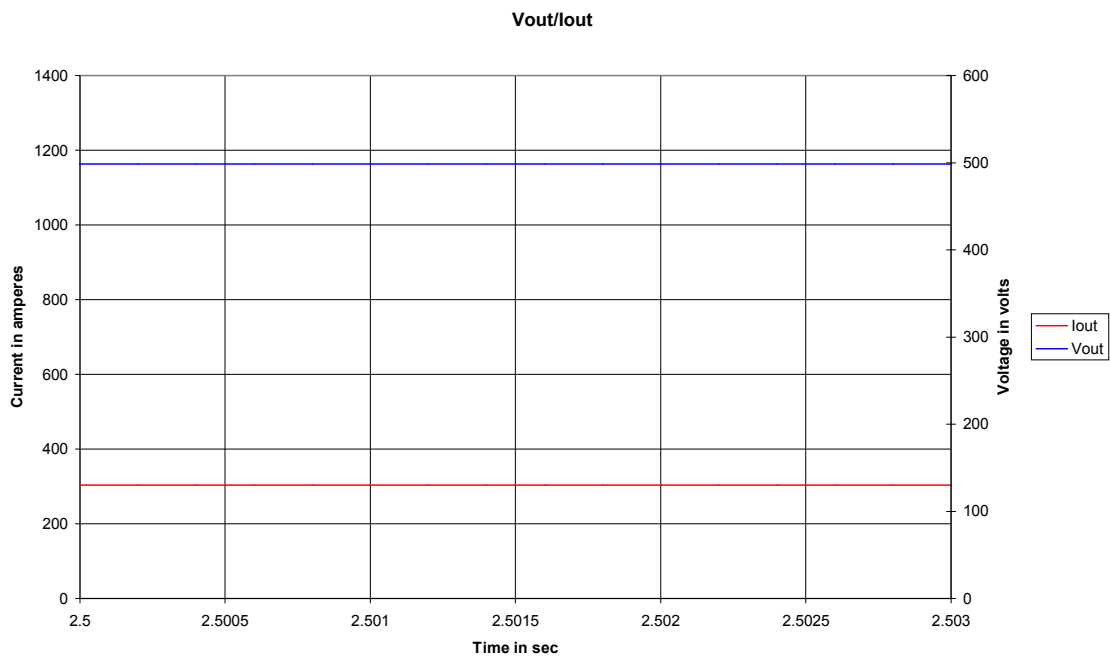
Σχήμα 4.169 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 50%



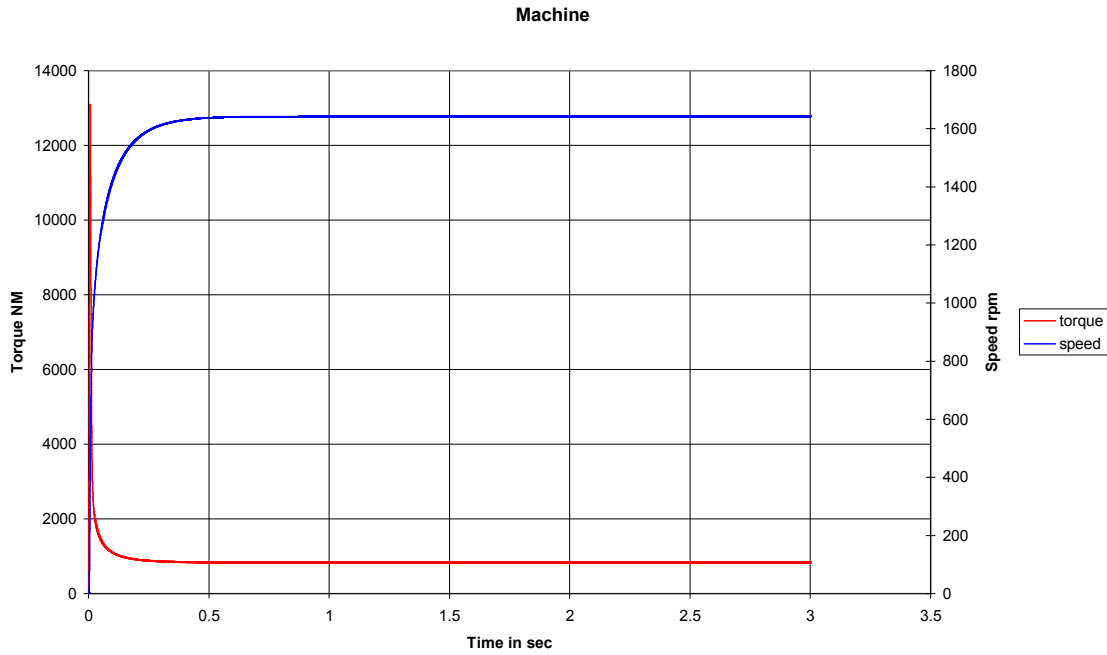
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%**



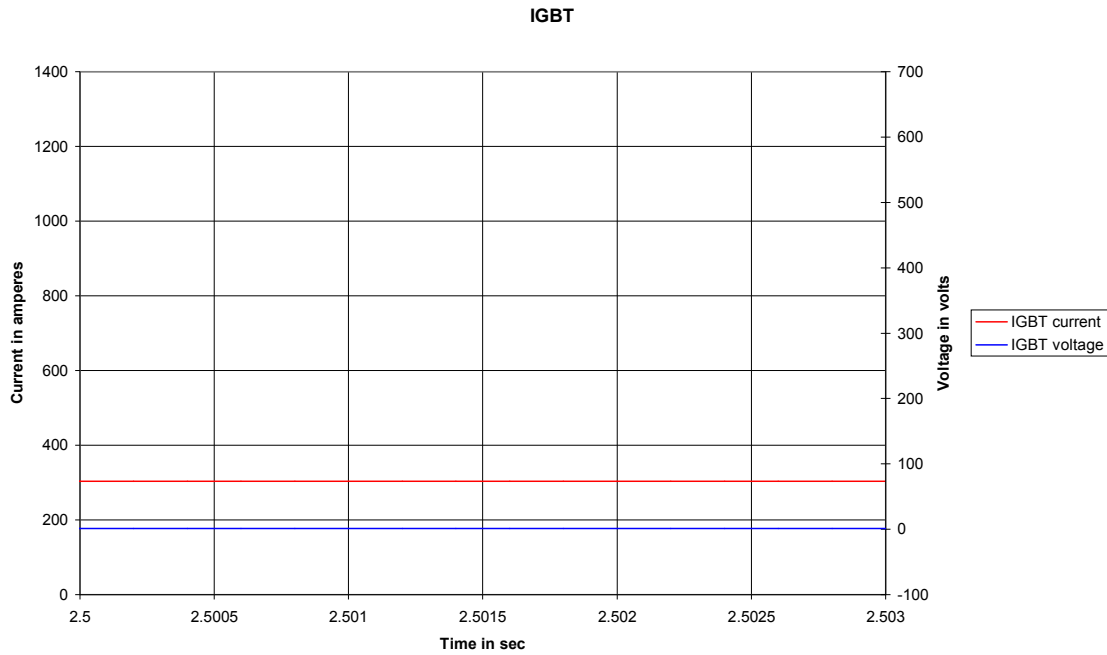
**Σχήμα 4.170** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100\%$ ,  $load\ 100\%$



**Σχήμα 4.171** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100\%$ ,  $load\ 100\%$

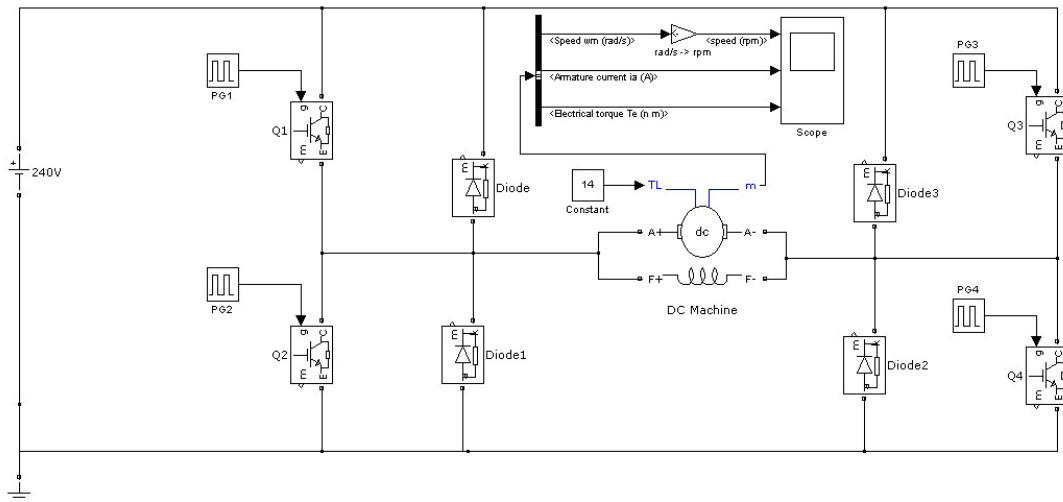


Σχήμα 4.172 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 100%



Σχήμα 4.173 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 100%

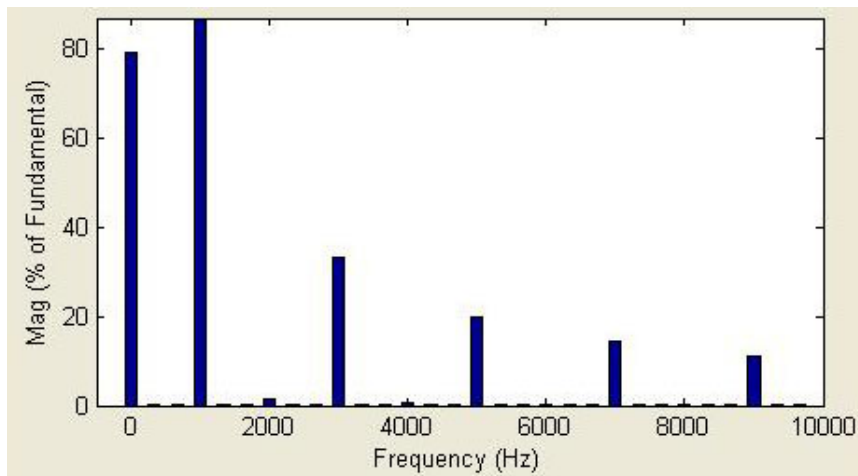
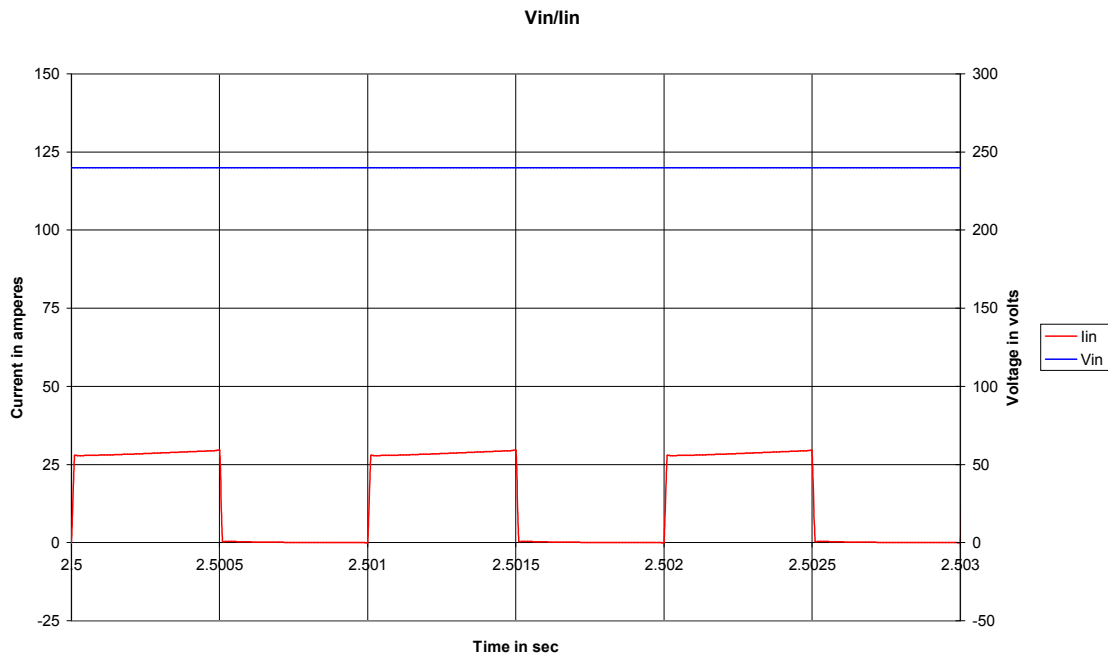
### 4.2.5 Καταμητής (chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων



**Σχήμα 4.174** Διάγραμμα Καταμητή (chopper) τεσσάρων τεταρτημορίων

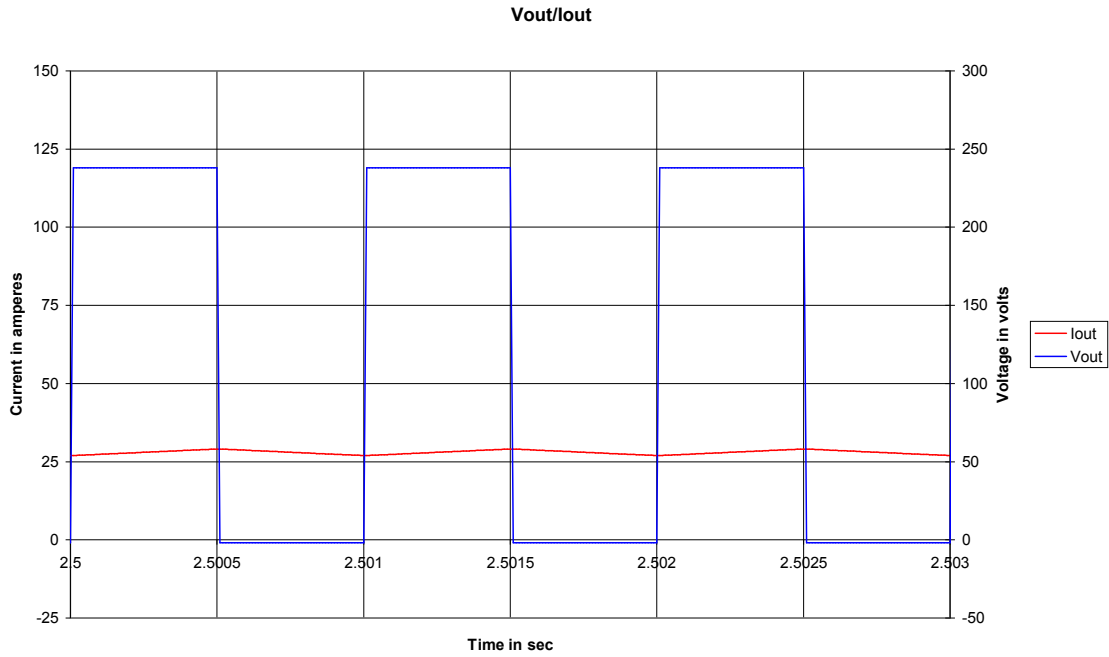
Πραγματοποιήσαμε το παραπάνω διάγραμμα του καταμητή τεσσάρων τεταρτημορίων. Θα εξετάσουμε τη λειτουργία του στο πρώτο και στο τρίτο τεταρτημόριο. Κατά τη λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο άγουν οι διακόπτες Q1-Q4. Έχοντας τον διακόπτη Q4 πάντα κλειστό ορίζουμε το Duty Cycle μέσω του διακόπτη Q1. Κατά τη λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο άγουν οι διακόπτες Q2-Q3. Έχοντας τον διακόπτη Q3 πάντα κλειστό ορίζουμε το Duty Cycle μέσω του διακόπτη Q2.

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**

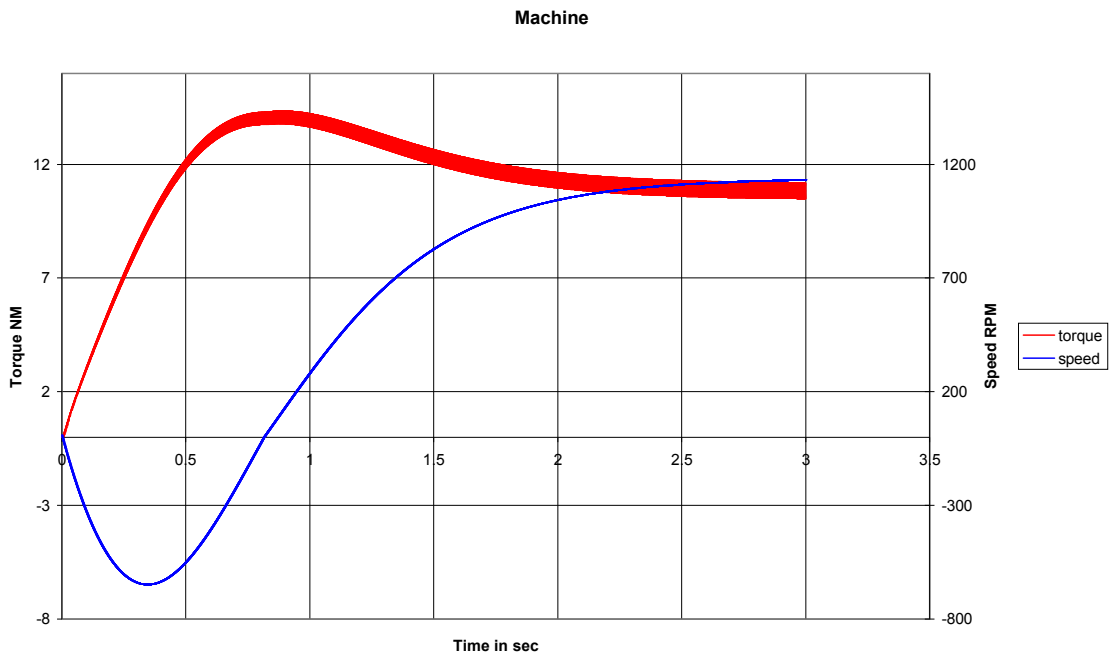


**Σχήμα 4.175** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%

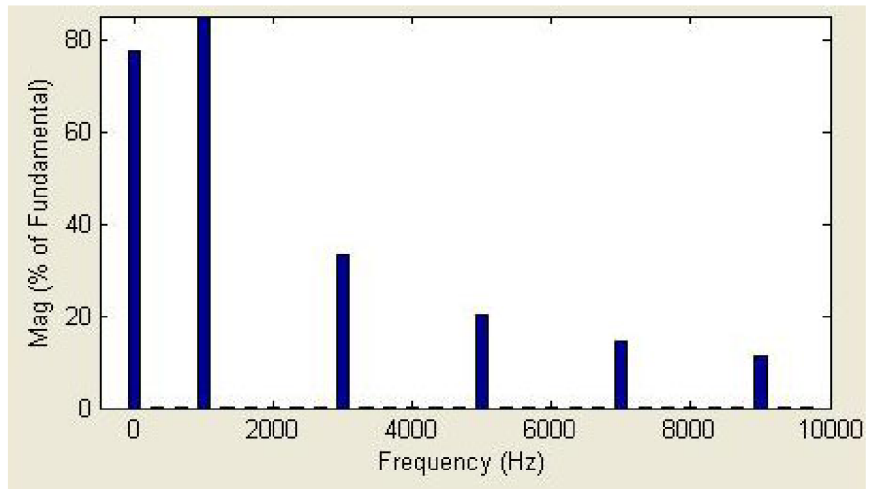
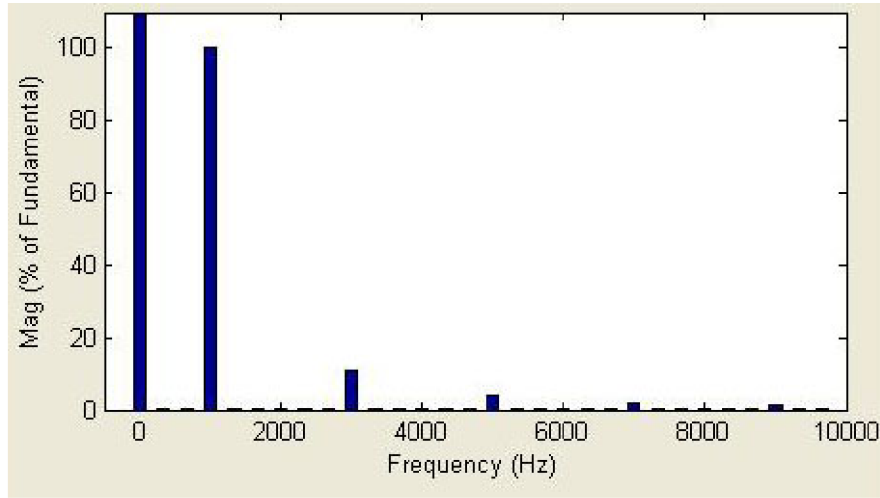
Παρατηρούμε πως και στον καταμητή τεσσάρων τεταρτημορίων, η λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο, είναι παρόμοια με αυτή των προηγούμενων δύο περιπτώσεων καταμητών, ενός και δύο τεταρτημορίων.



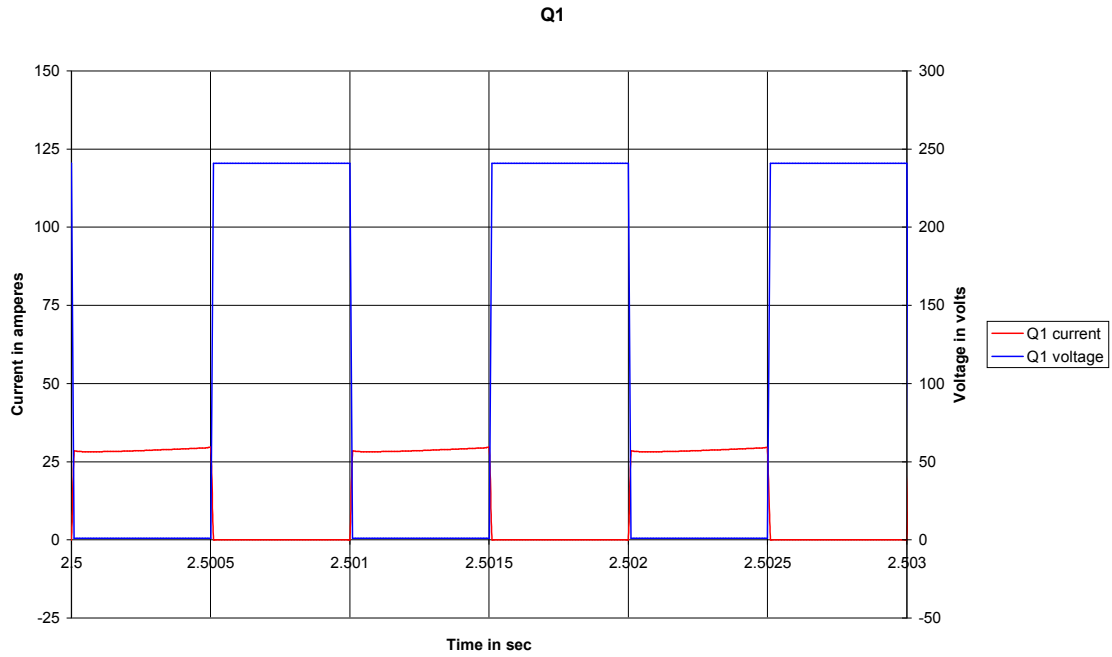
Σχήμα 4.176 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%



Σχήμα 4.177 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=50\%$ , load 50%

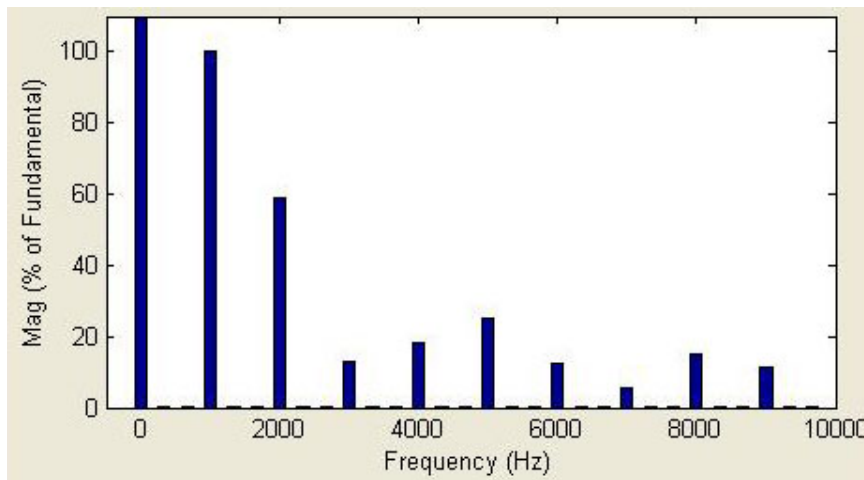
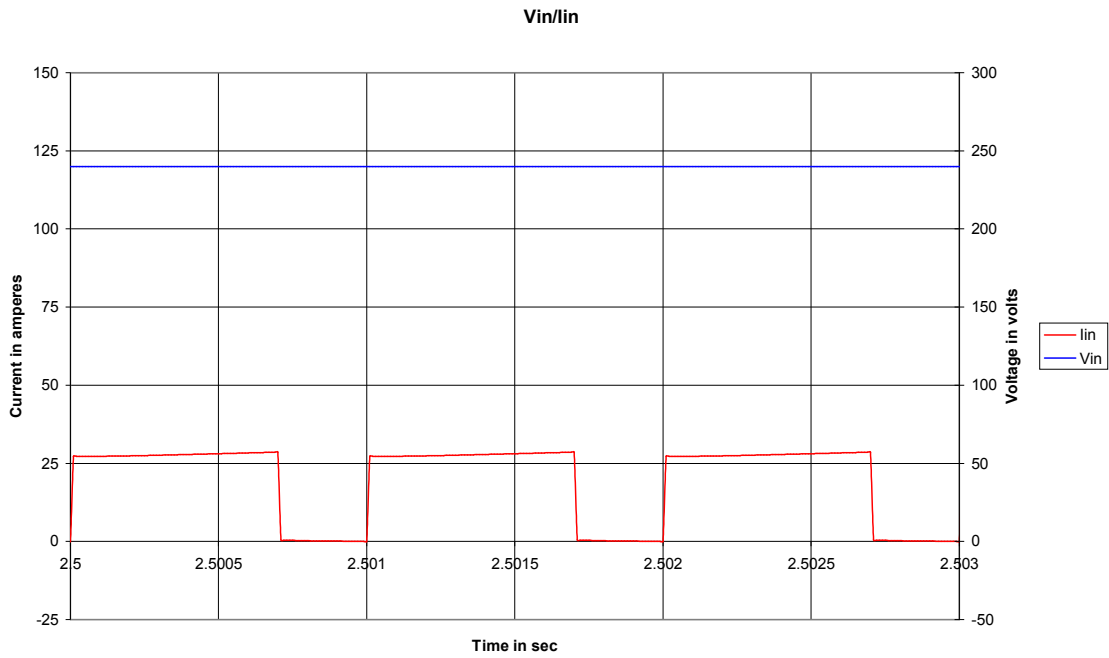


**Σχήμα 4.178** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%



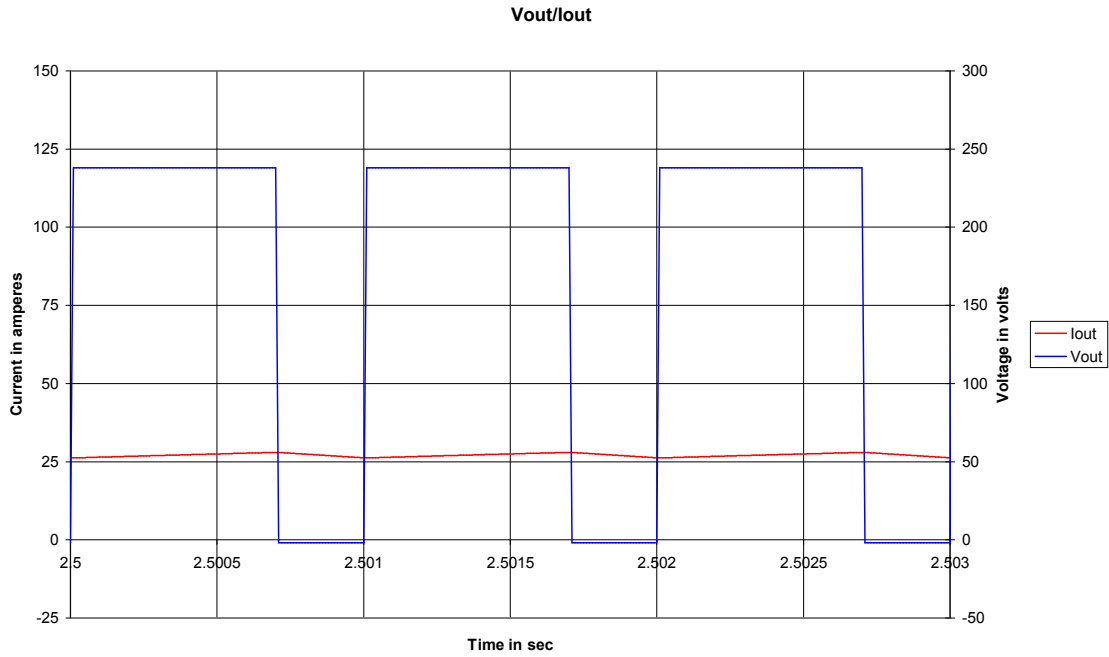
**Σχήμα 4.179** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=50\%$ , load 50%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**

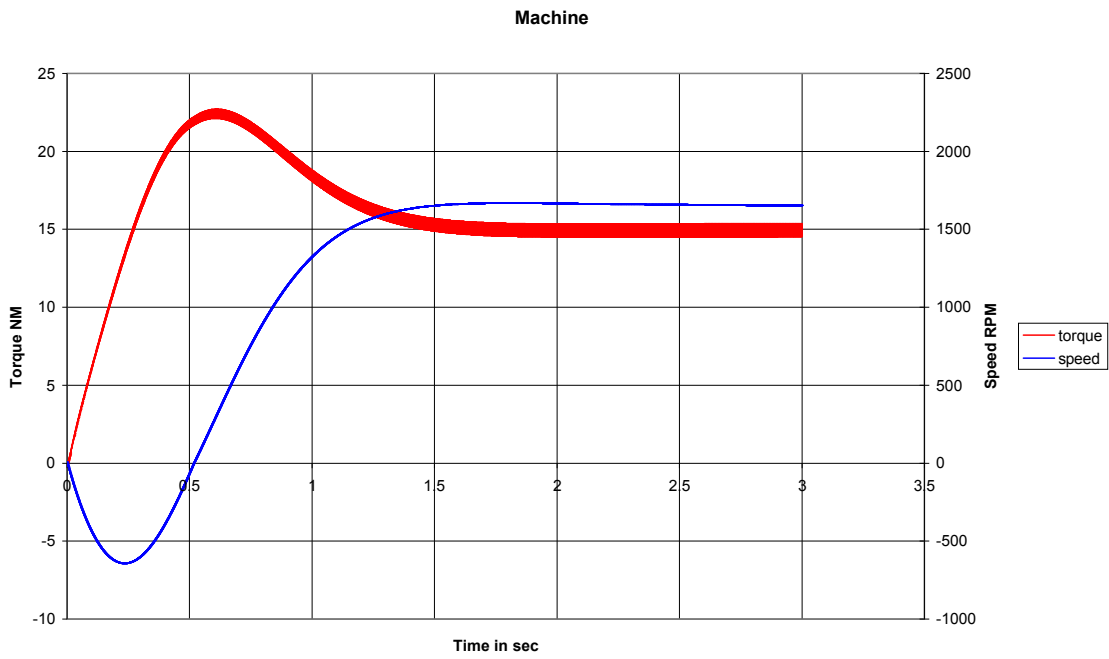


**Σχήμα 4.180** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=70%, load 70%

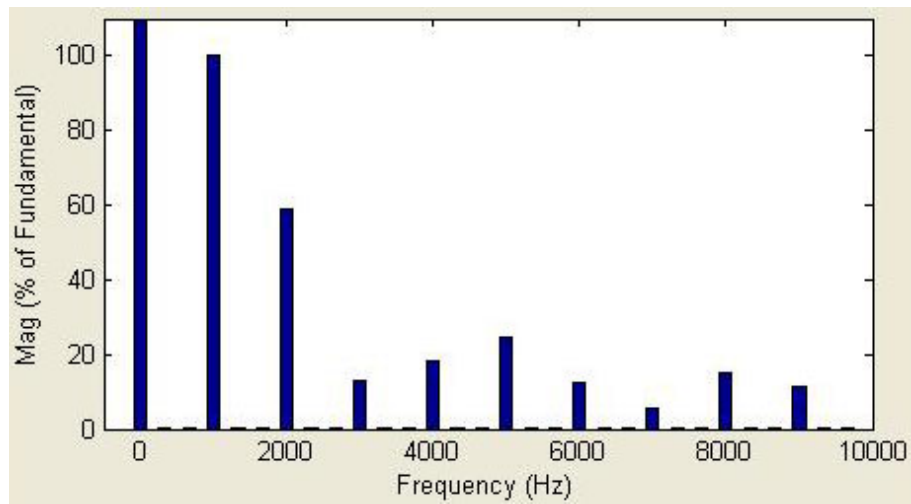
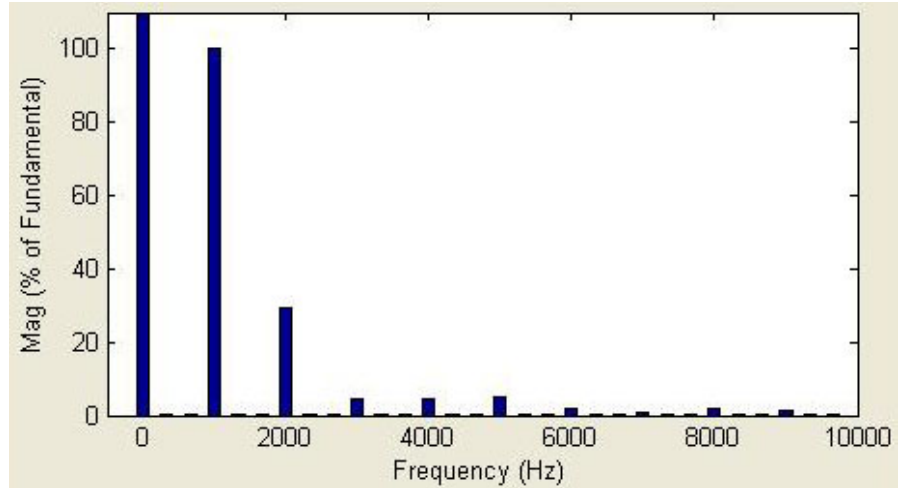




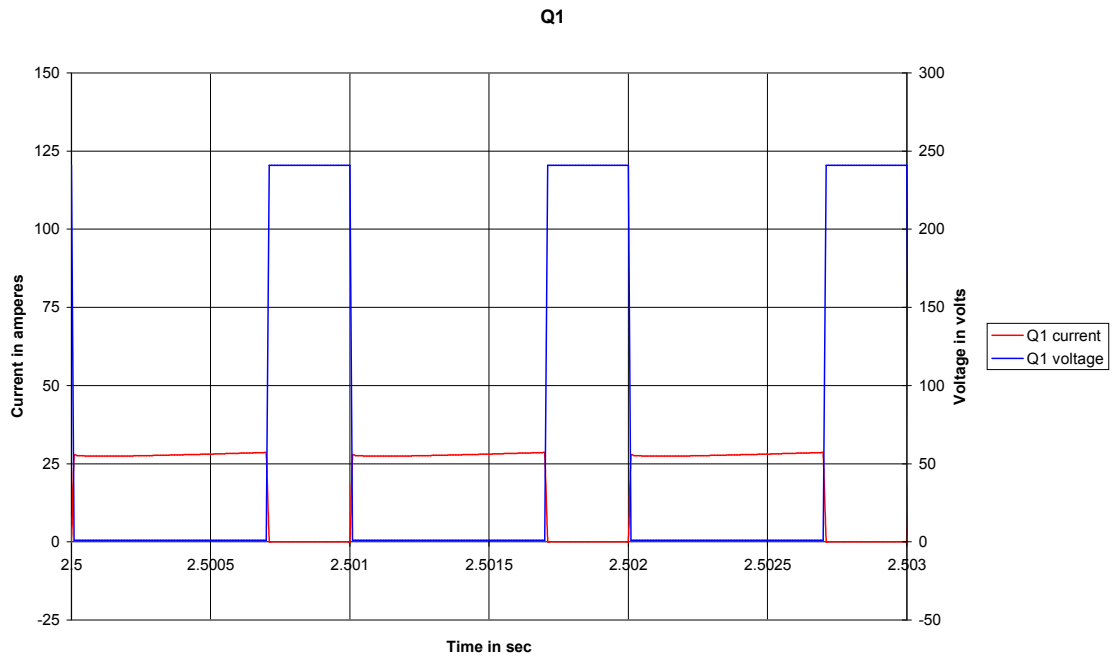
**Σχήμα 4.181** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%



**Σχήμα 4.182** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=70\%$ , load 70%

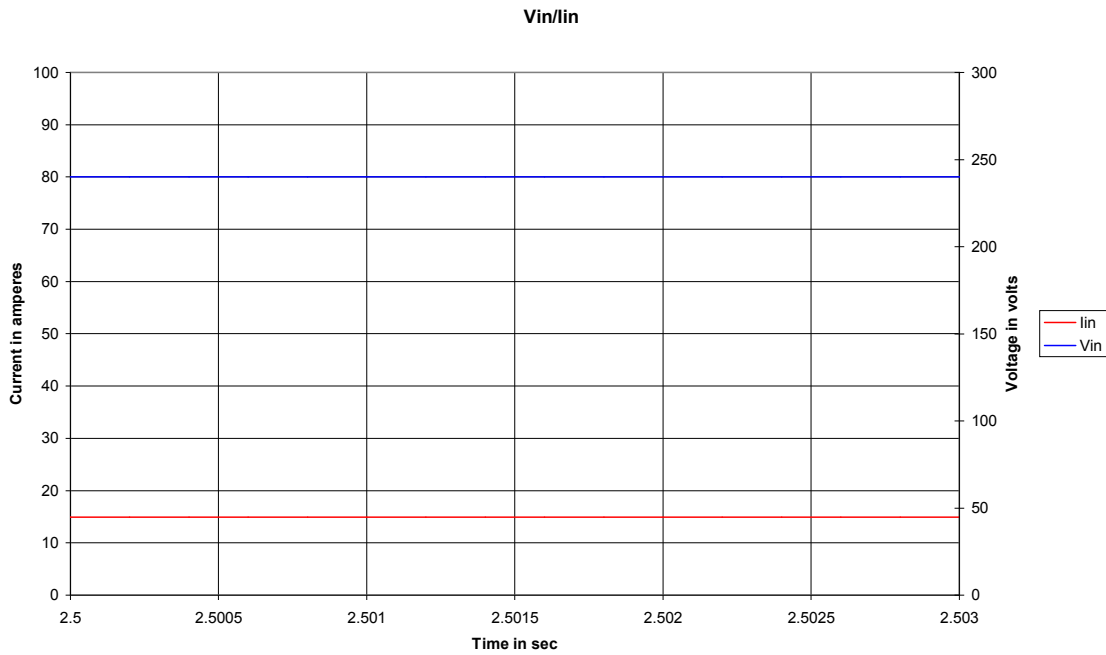


**Σχήμα 4.183** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70%

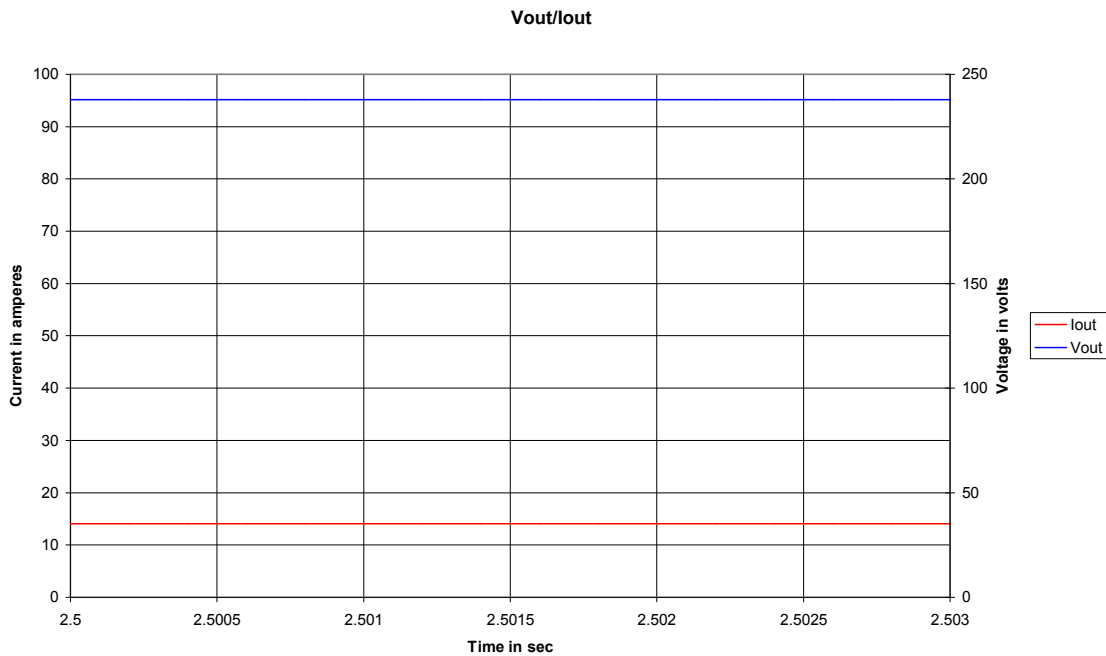


**Σχήμα 4.184** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=70\%$ , load 70%

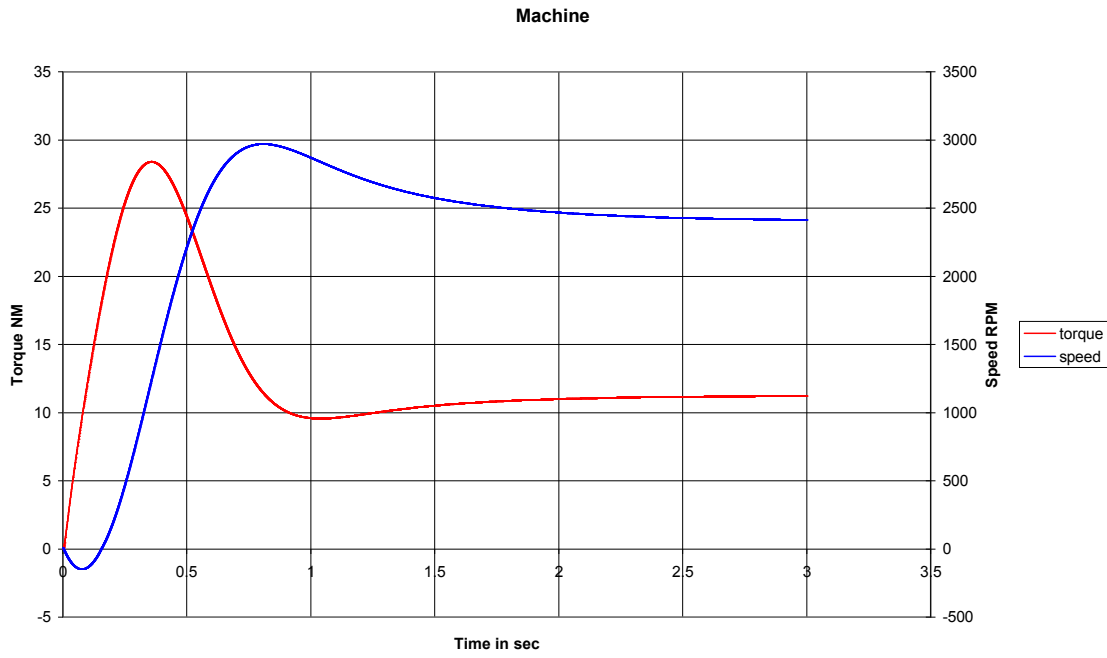
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**



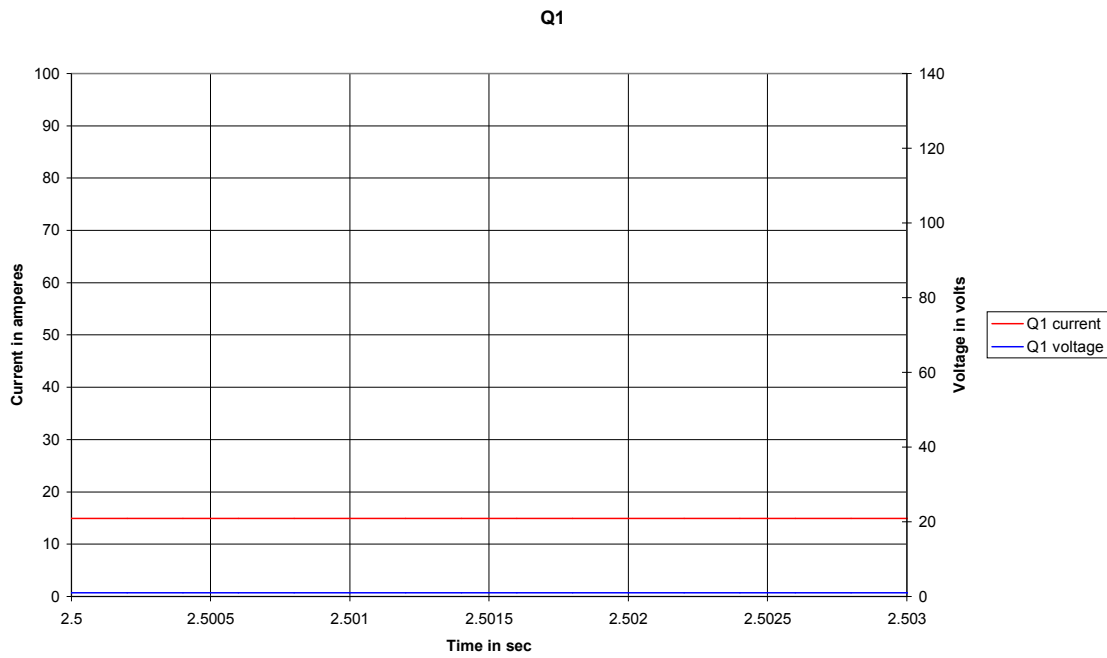
**Σχήμα 4.185** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=100\%$ , load 50%



**Σχήμα 4.186** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=100\%$ , load 50%

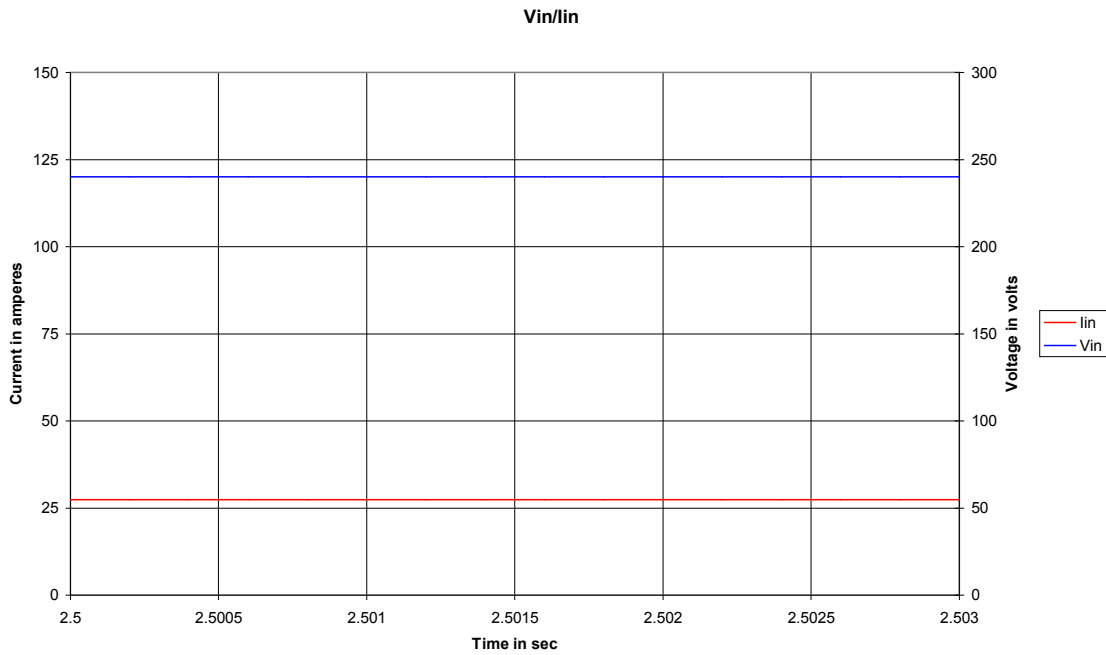


Σχήμα 4.187 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 50%

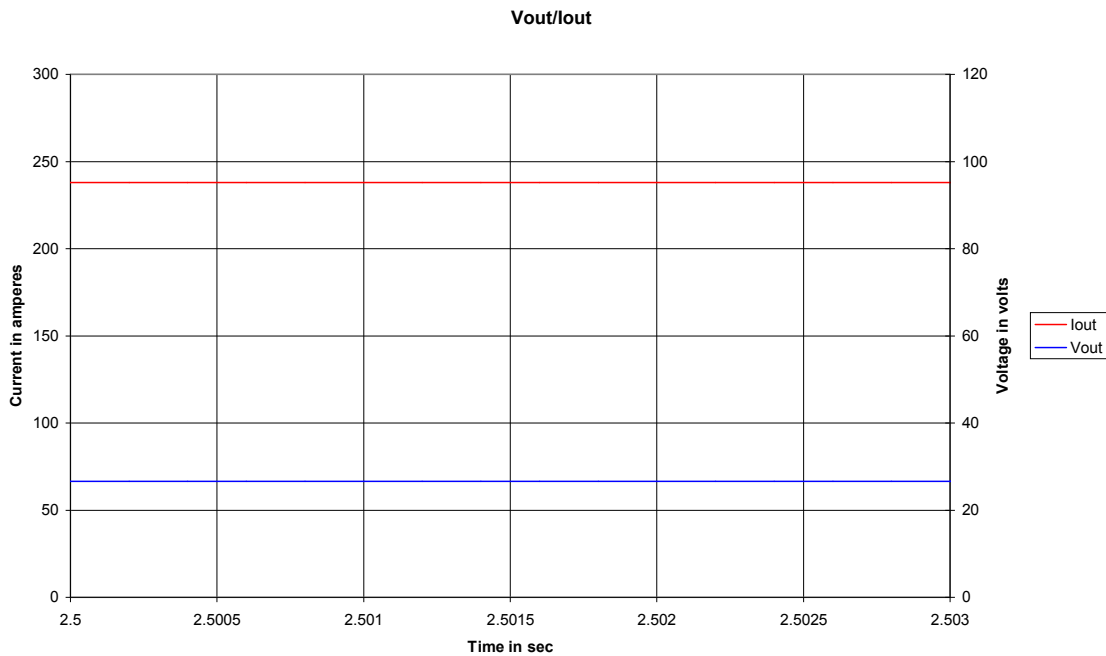


Σχήμα 4.188 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 50%

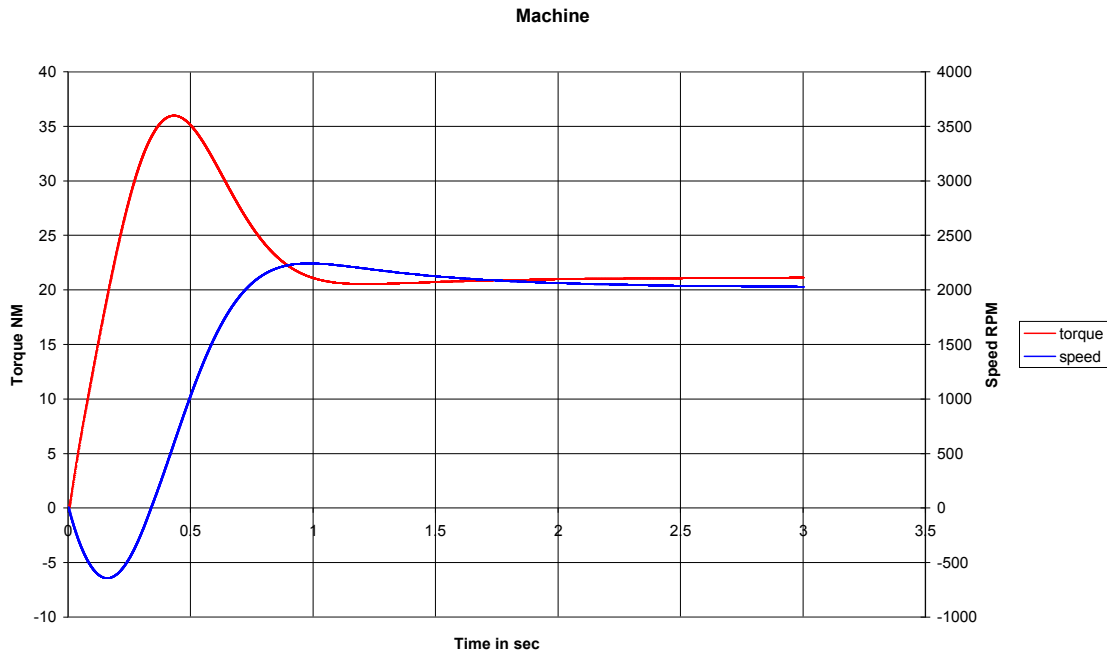
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**



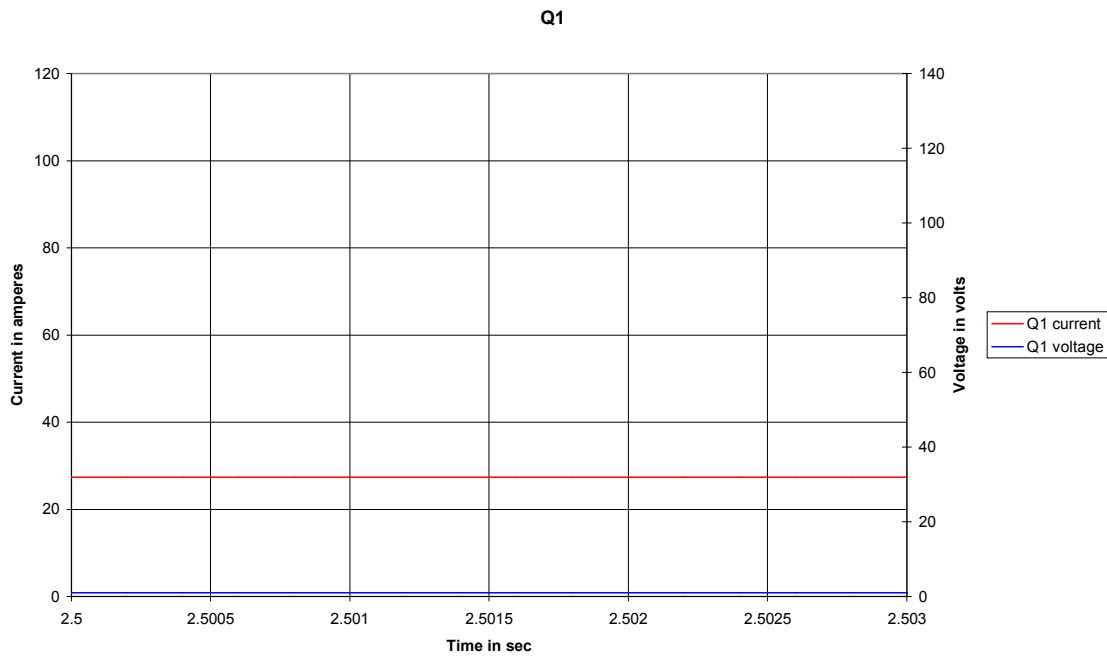
**Σχήμα 4.189** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 100%



**Σχήμα 4.190** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 100%

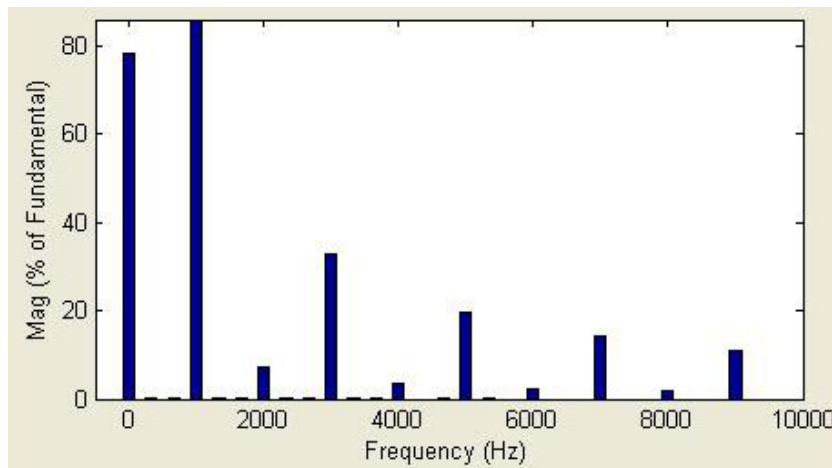
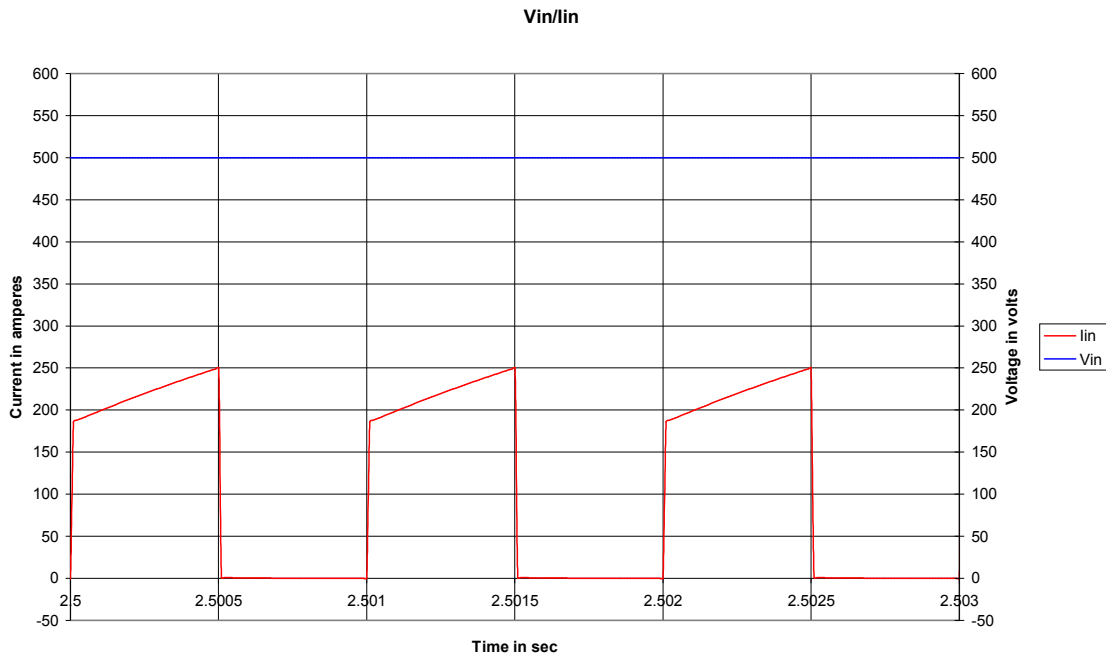


Σχήμα 4.191 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 100%



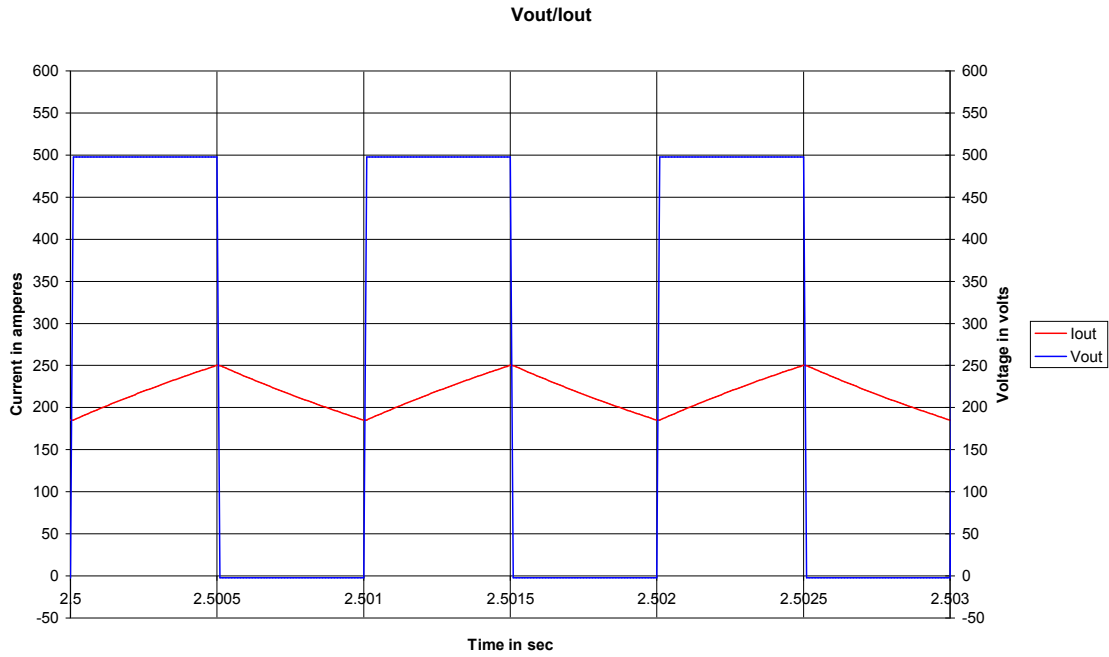
Σχήμα 4.192 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 100%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50% , λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**

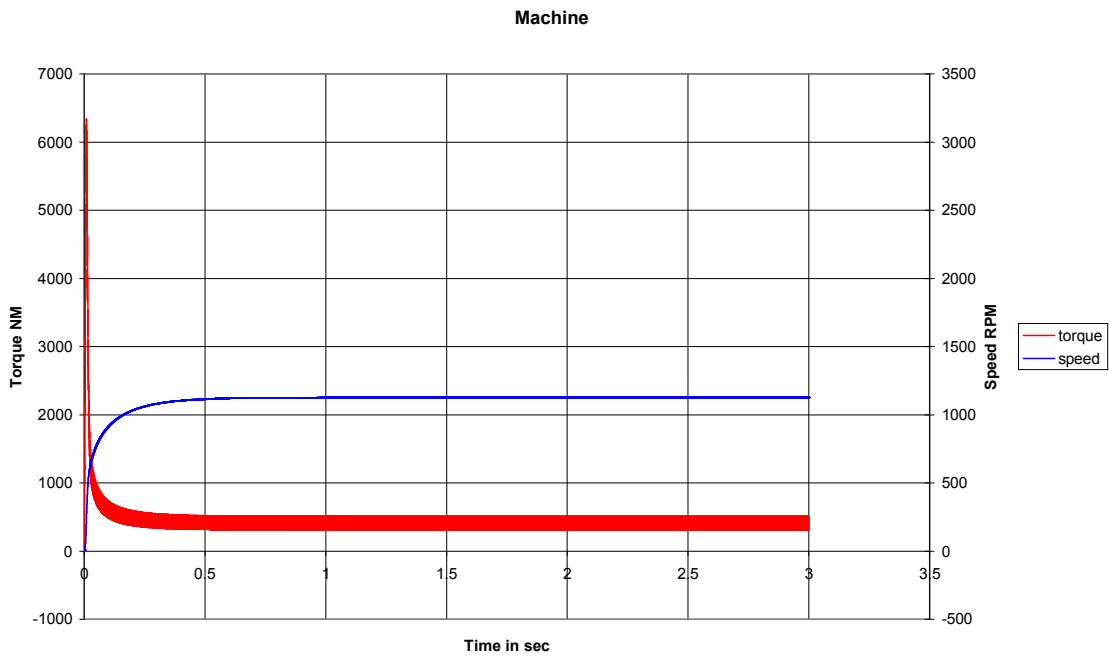


**Σχήμα 4.193** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ ,  $load\ 50\%$  β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ ,  $load\ 50\%$

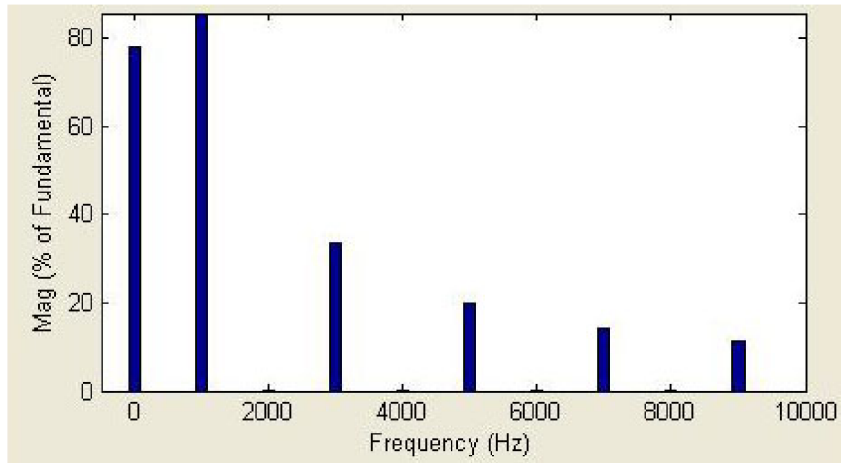
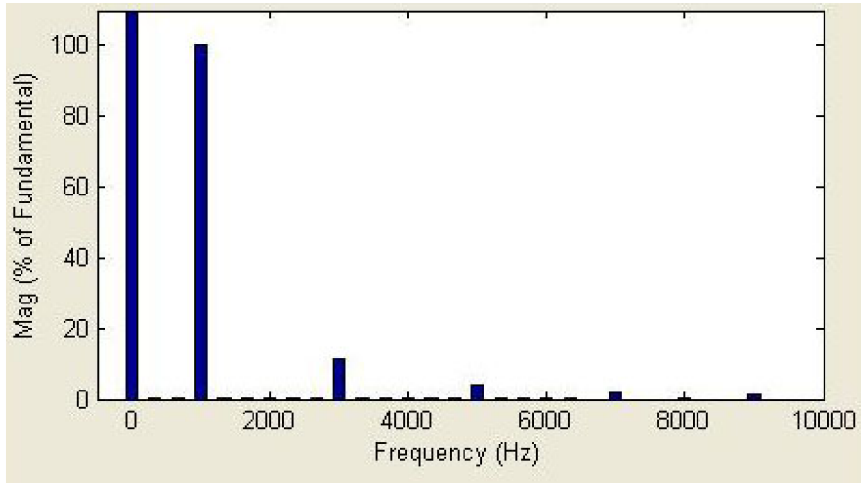




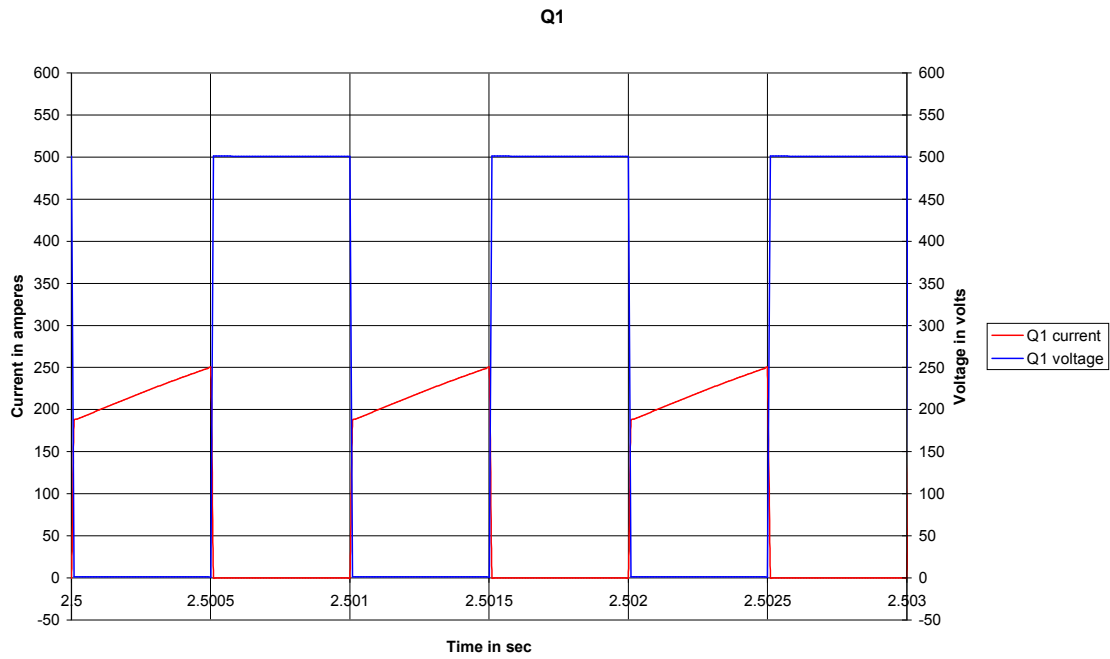
Σχήμα 4.194 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%



Σχήμα 4.195 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=50\%$ , load 50%

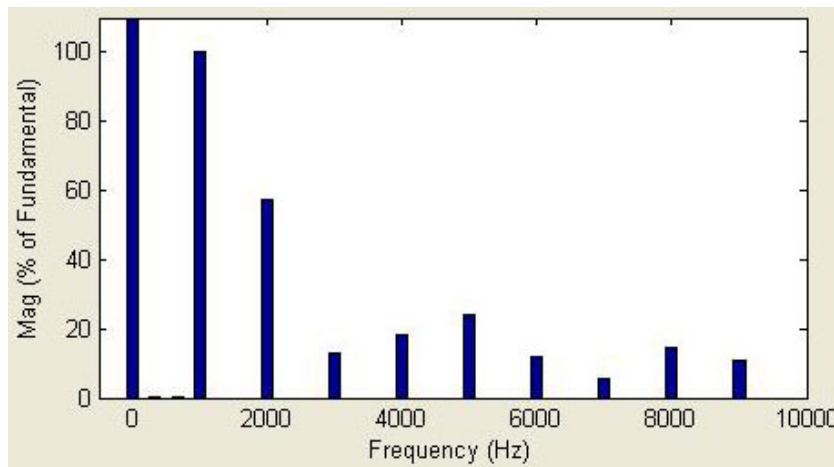
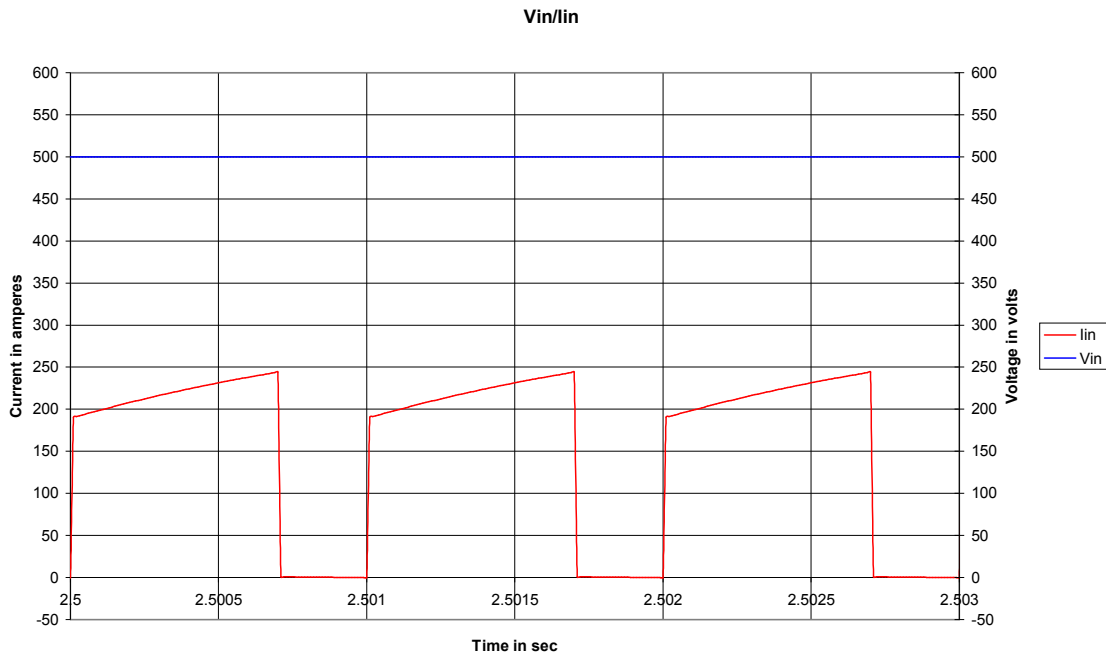


**Σχήμα 4.196** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

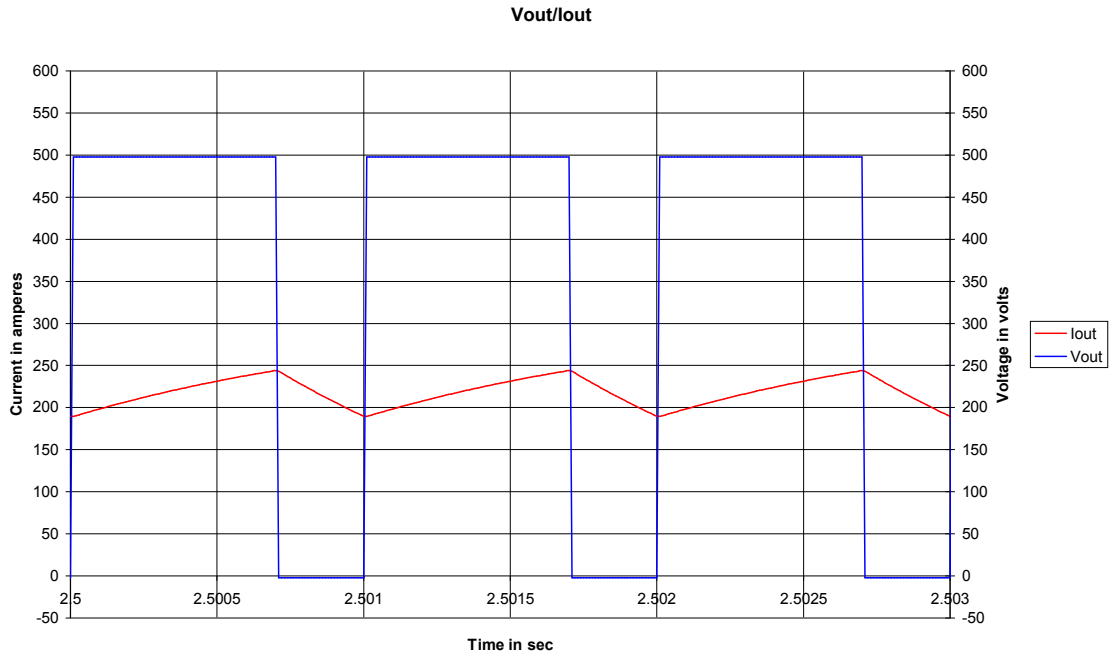


**Σχήμα 4.197** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=50\%$ , load 50%

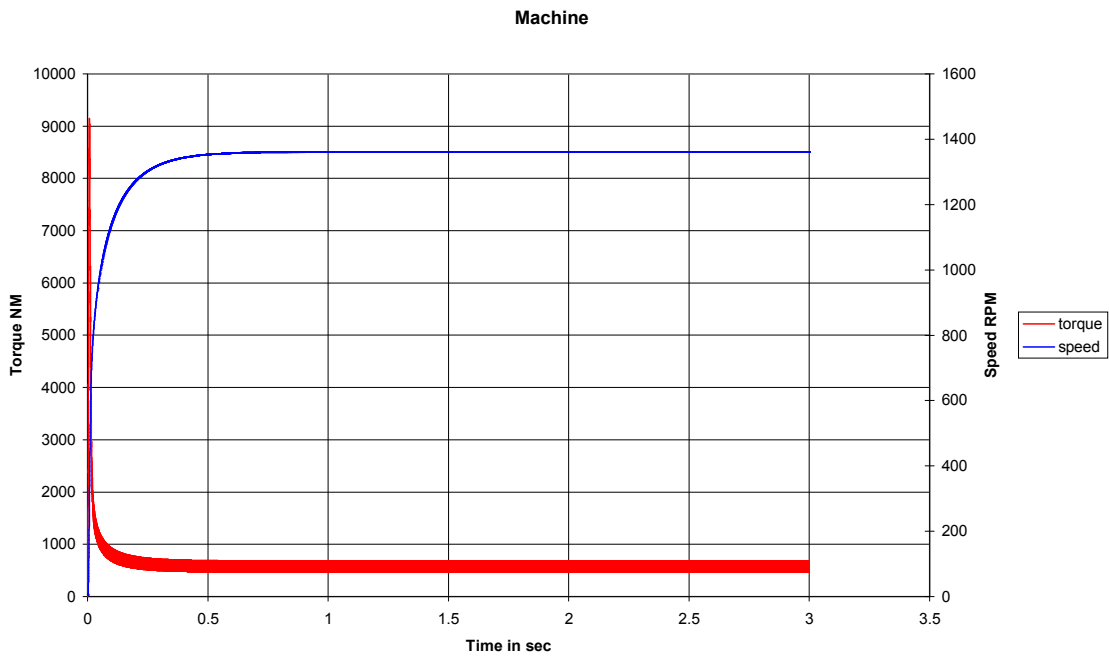
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**



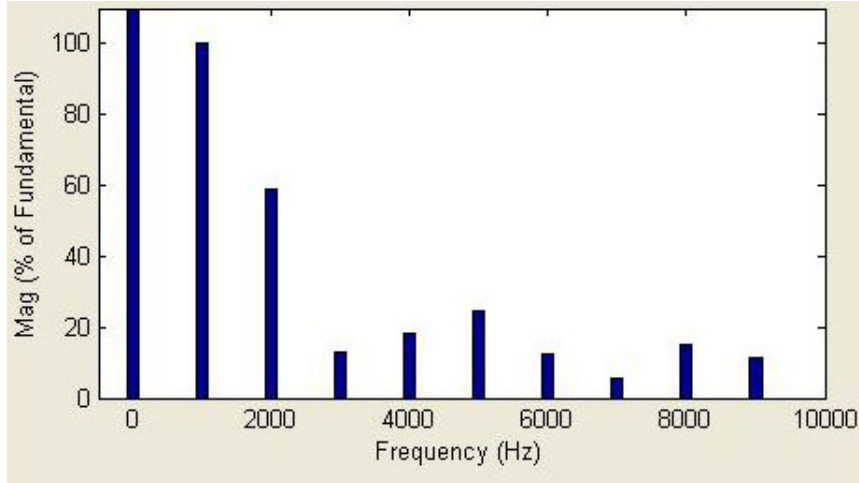
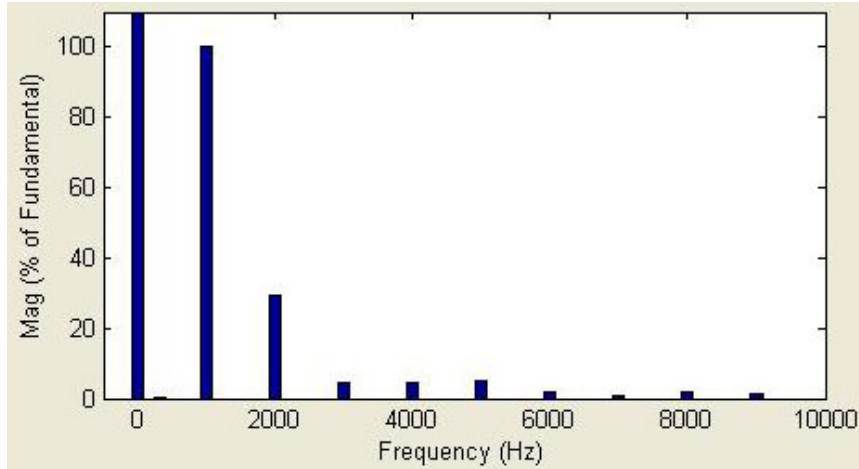
**Σχήμα 4.198** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



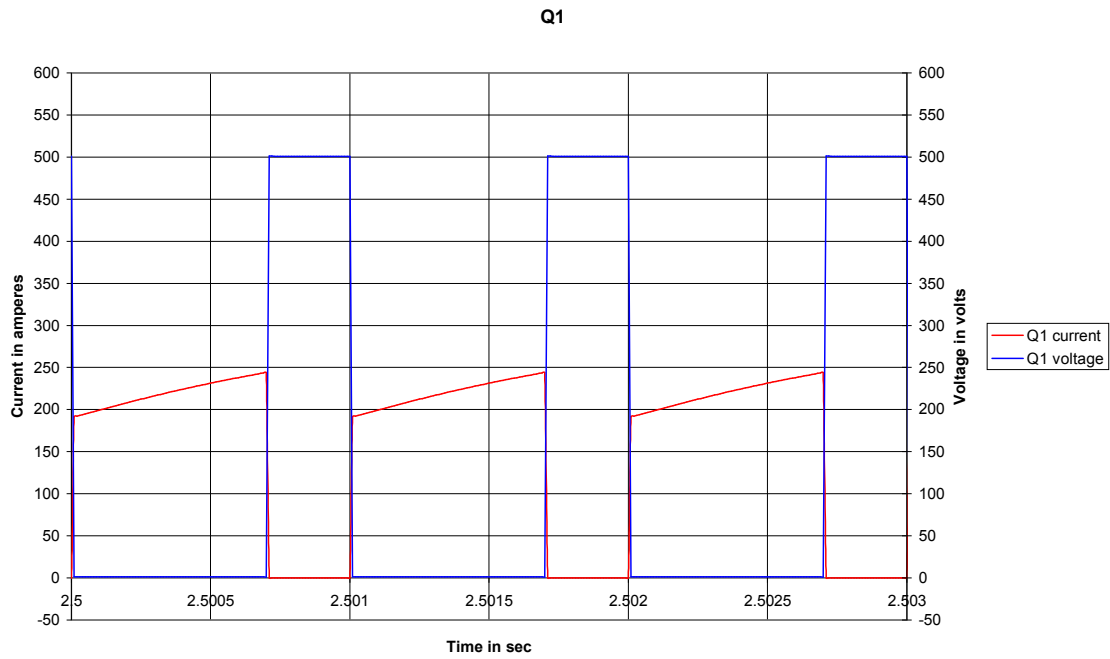
Σχήμα 4.199 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



Σχήμα 4.200 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=70\%$ , load 70%

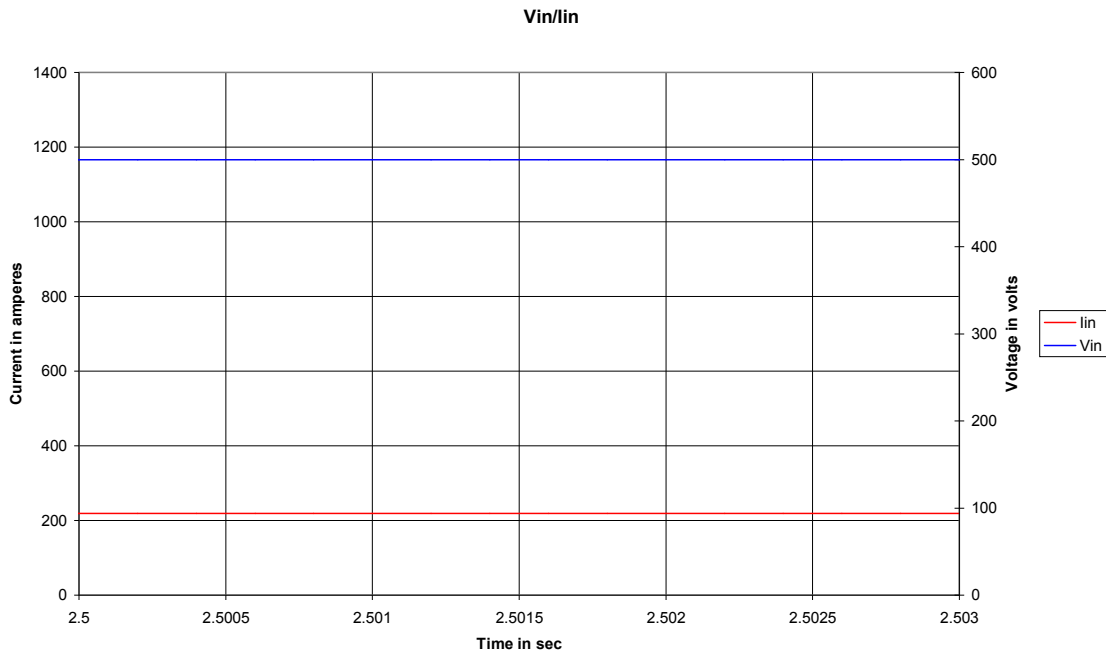


Σχήμα 4.2.5.6.6 α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%

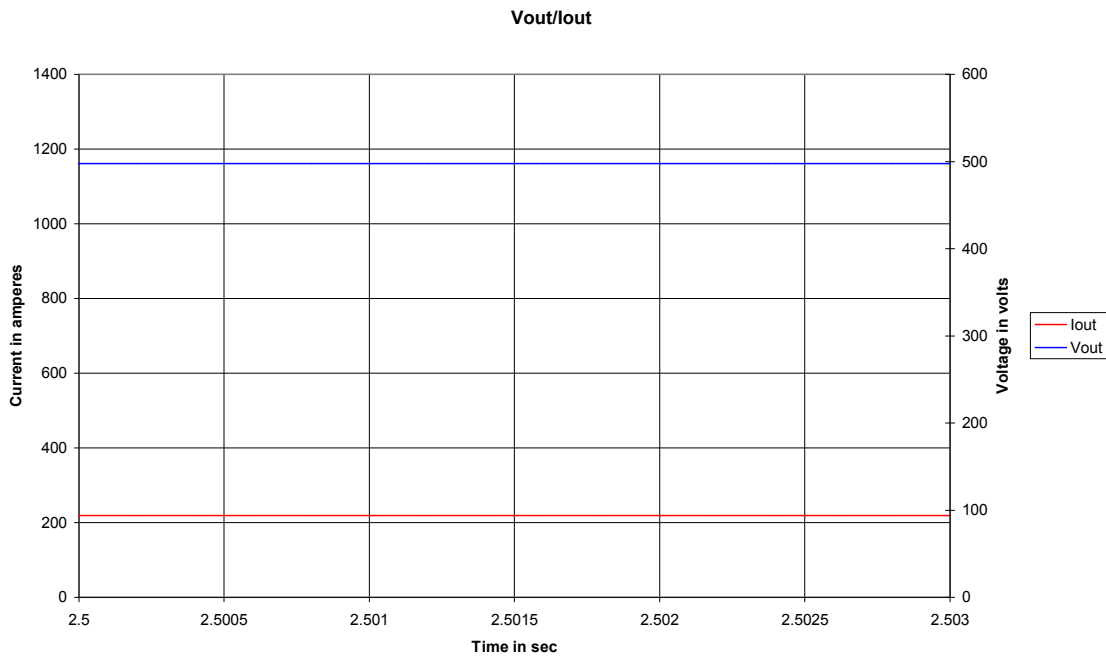


**Σχήμα 4.201** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=70\%$ , load 70%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**

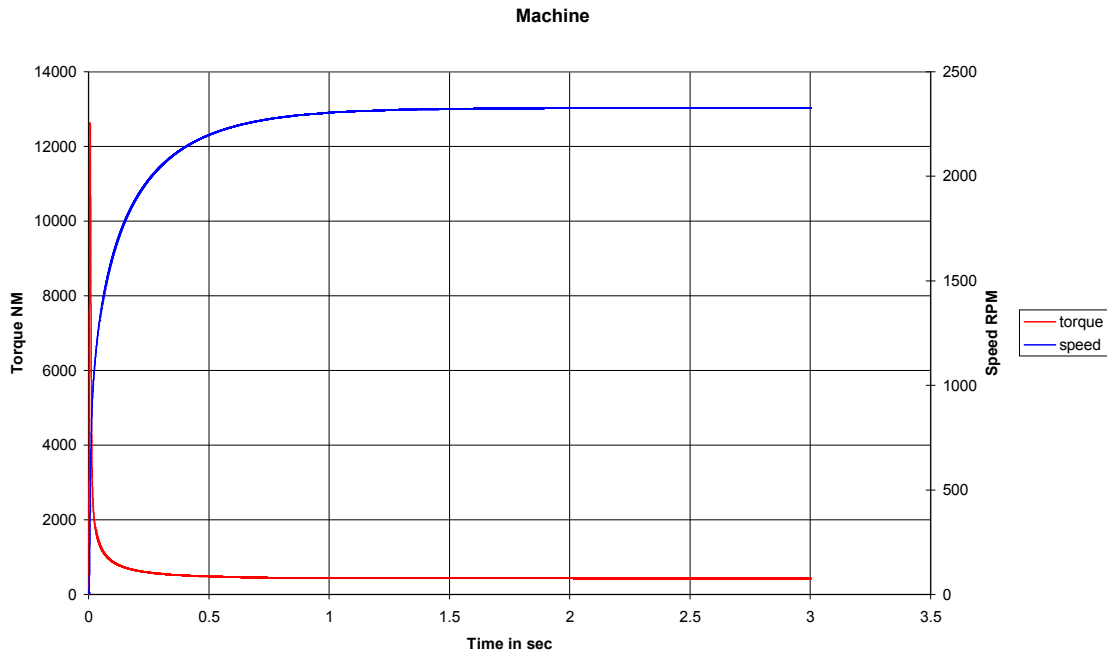


**Σχήμα 4.202** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100\%$ , load 50%

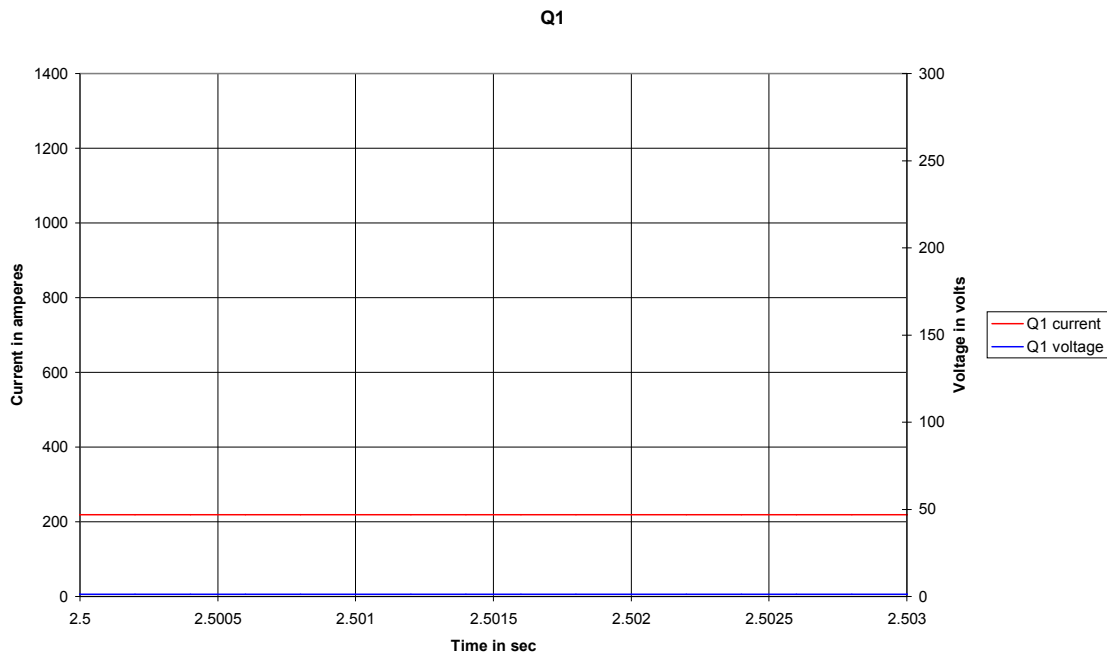


**Σχήμα 4.203** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100\%$ , load 50%



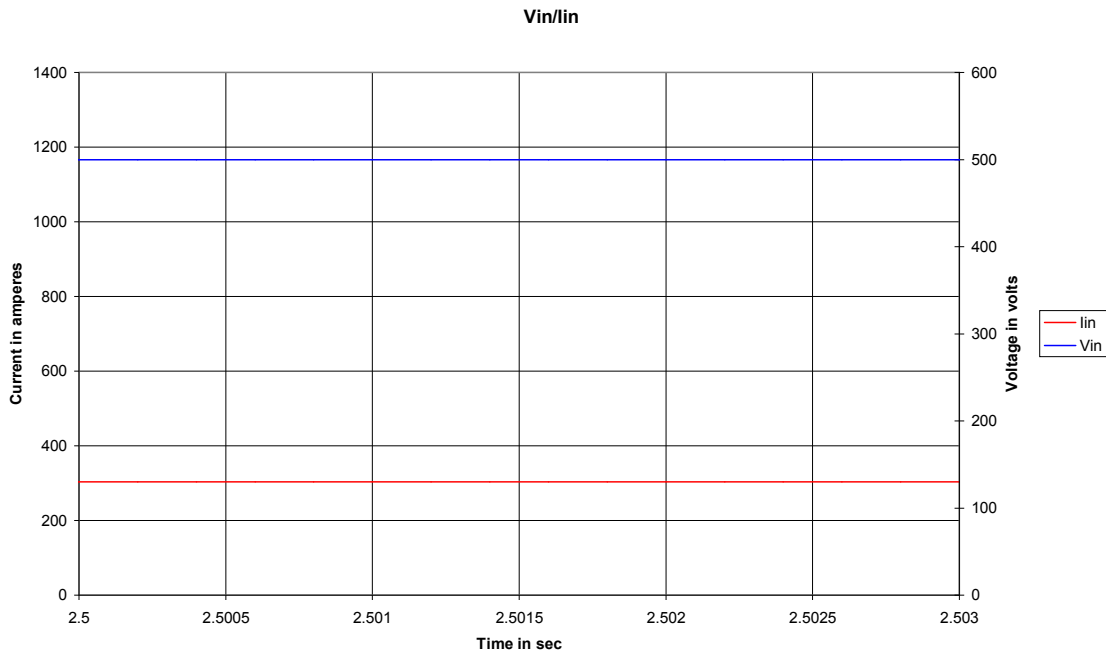


Σχήμα 4.204 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 50%

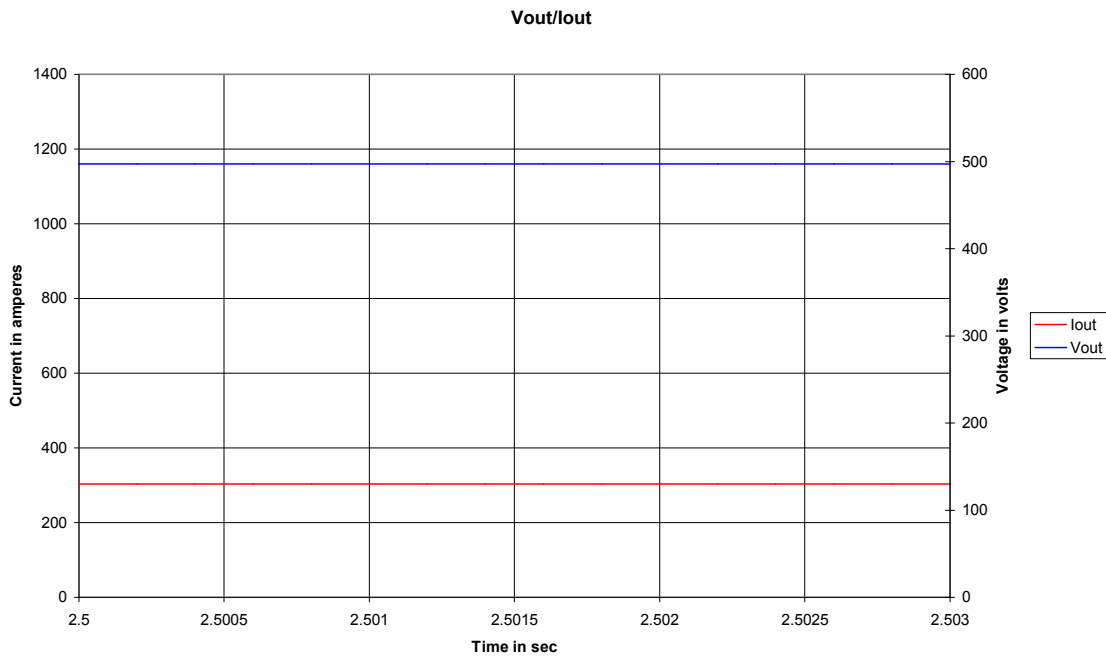


Σχήμα 4.205 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 50%

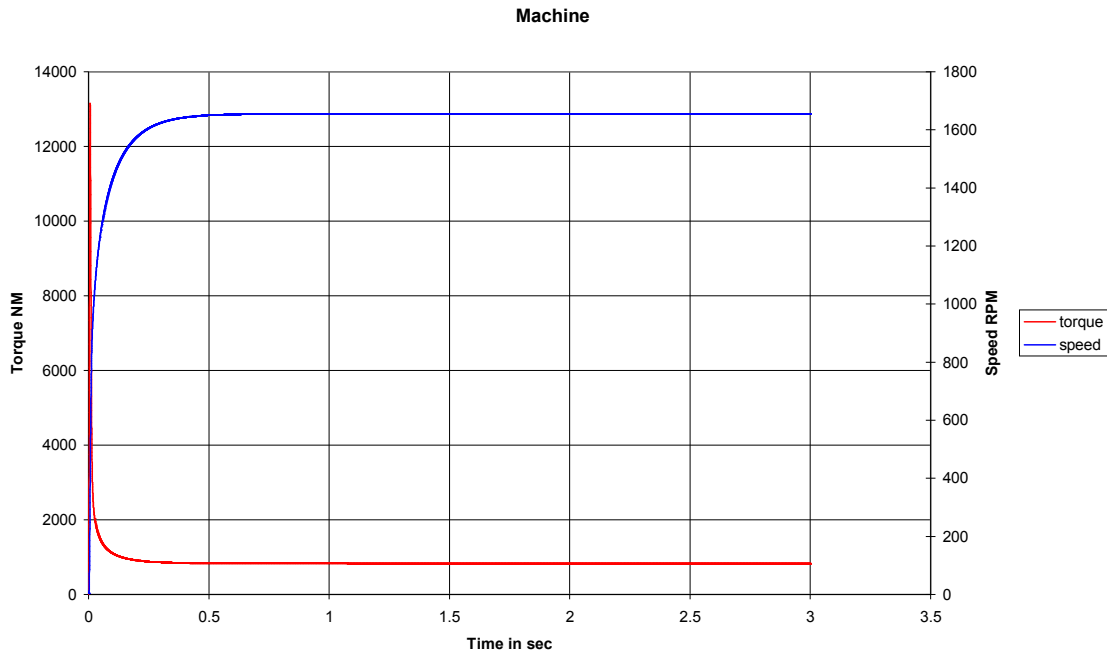
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%, λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο**



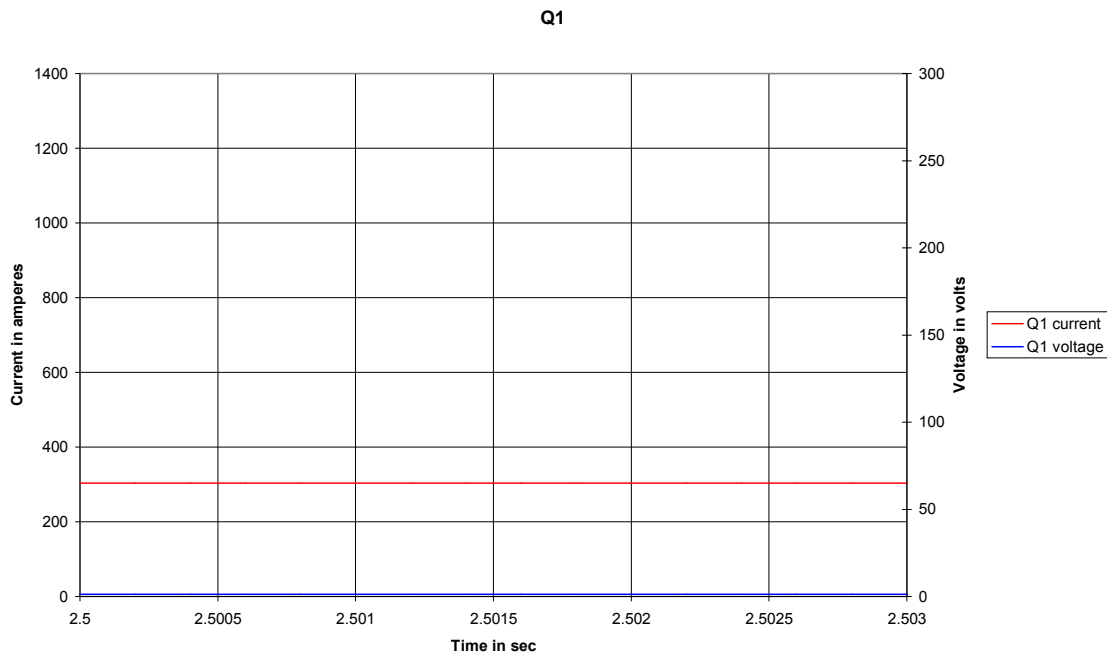
**Σχήμα 4.206** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100%$ , load 100%



**Σχήμα 4.207** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100%$ , load 100%



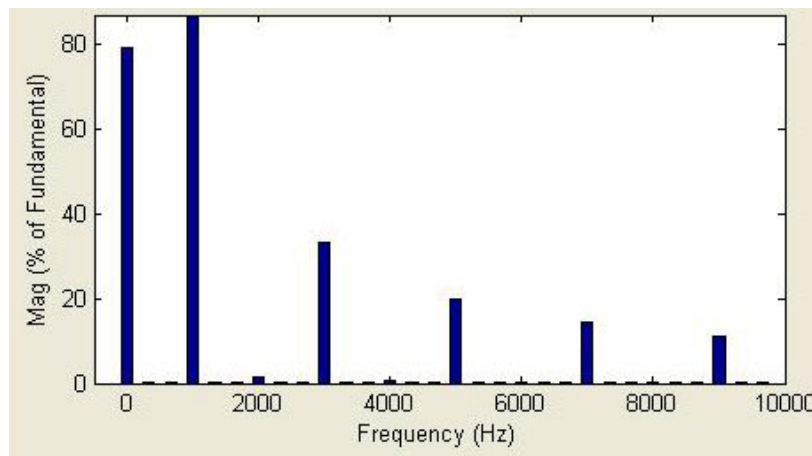
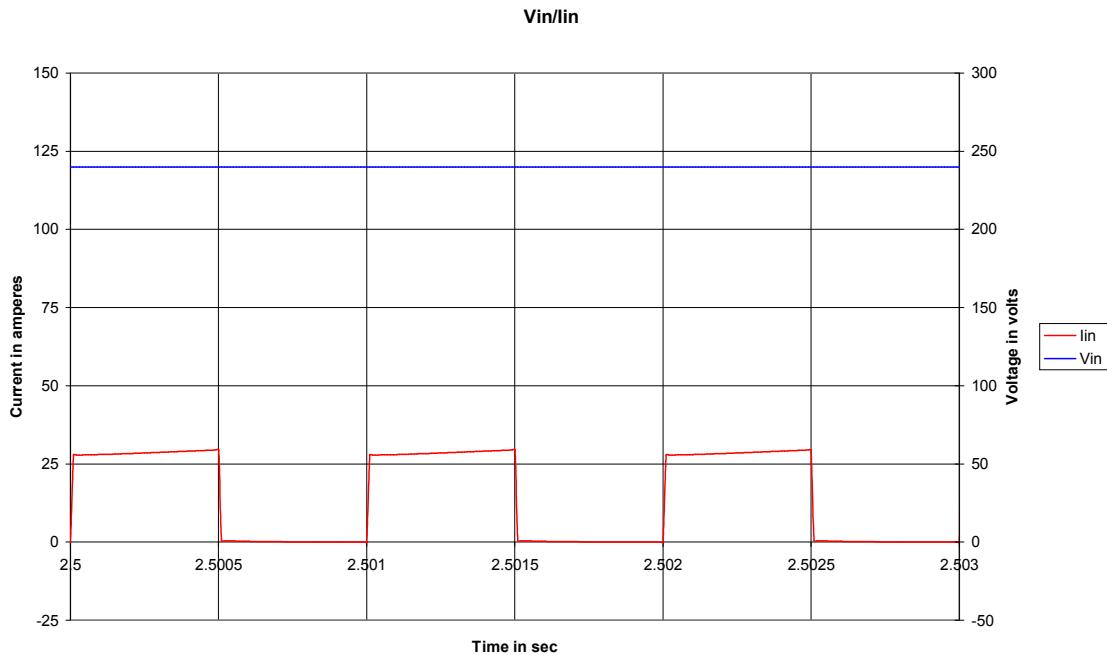
Σχήμα 4.208 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 100%



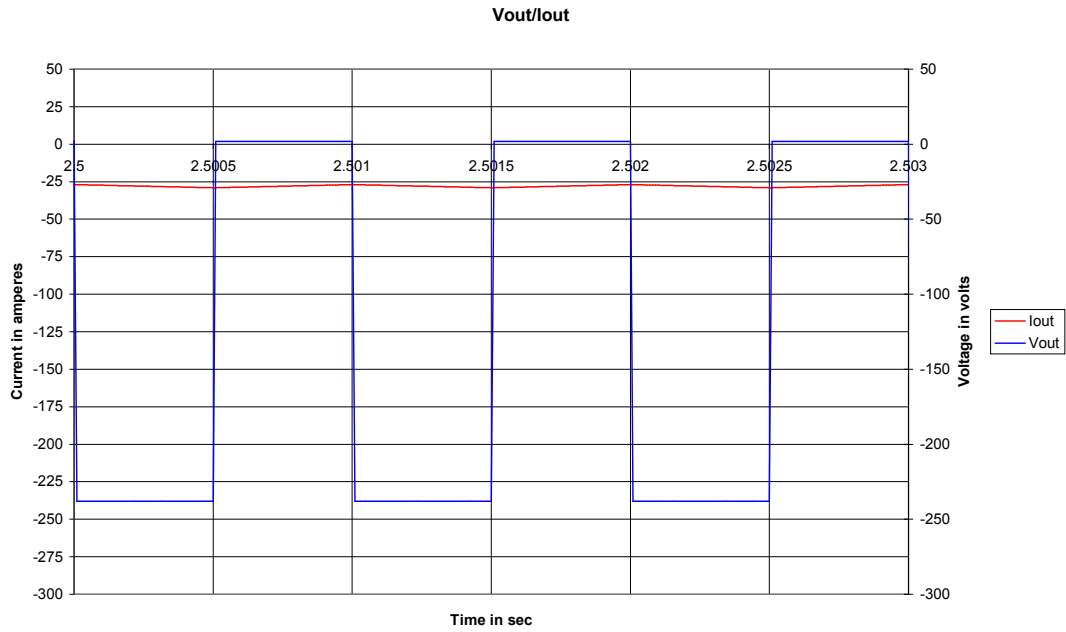
Σχήμα 4.209 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 100%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**

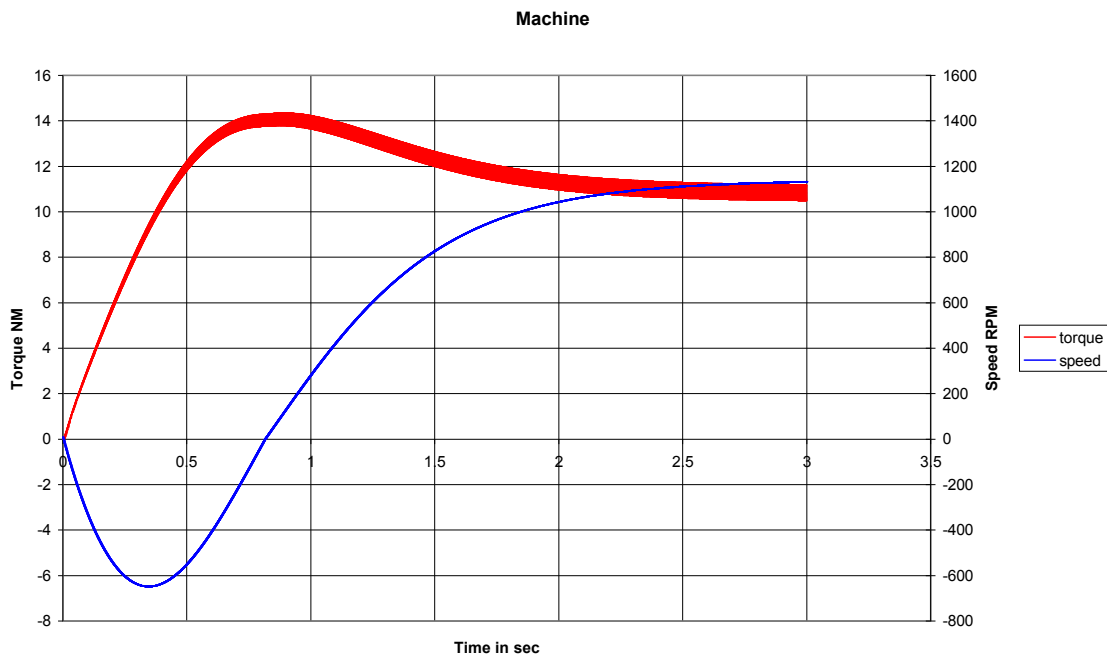
Σε αυτή την περίπτωση, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο, ο καταμητής ακολουθεί την ίδια λογική λειτουργίας με αυτή της λειτουργίας στο πρώτο τεταρτημόριο, με τη διαφορά ότι στην έξοδό του αντιστρέφει την τάση και το ρεύμα. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε, υπό συνθήκες, να σημαίνει αλλαγή της φοράς περιστροφής του κινητήρα.



**Σχήμα 4.210** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%

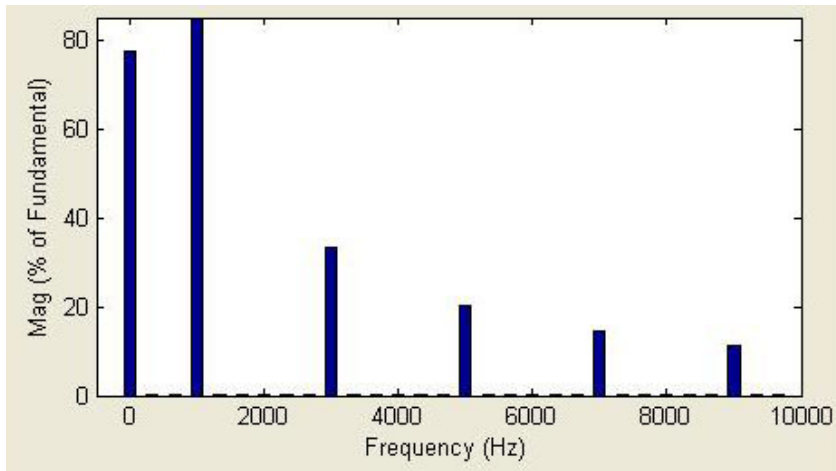
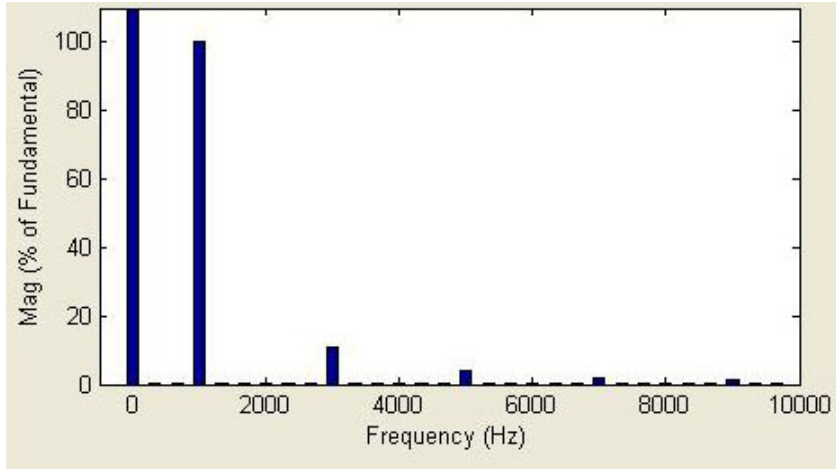


**Σχήμα 4.211** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 50%

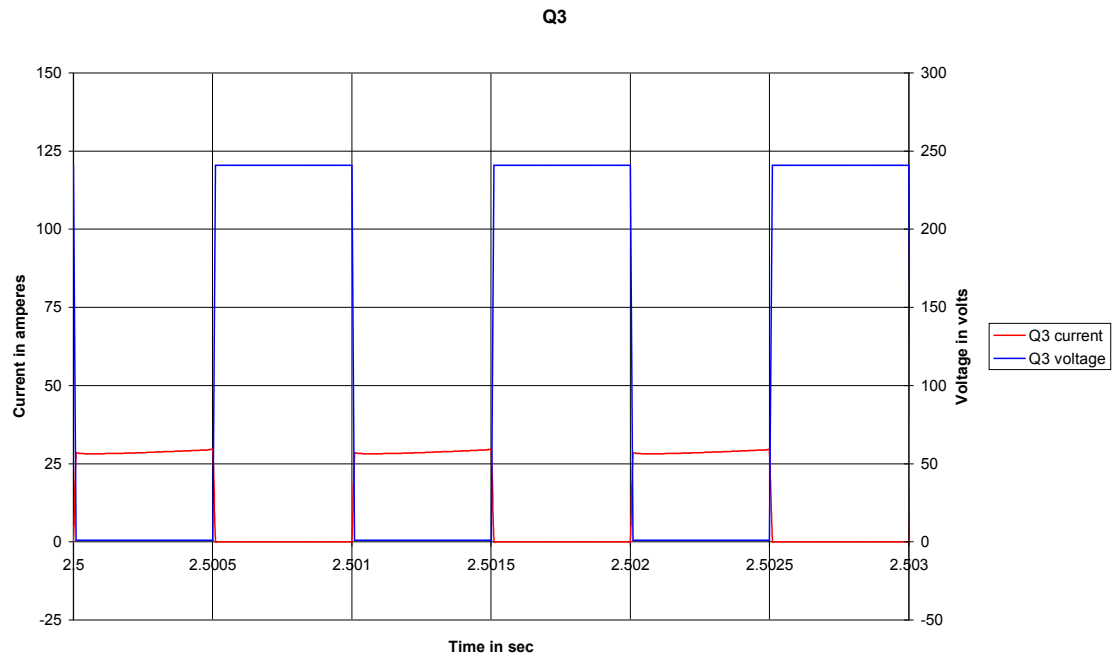


**Σχήμα 4.212** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=50\%$ , load 50%

Παρατηρείται η αναστροφή της τάσης και του ρεύματος εξόδου, ωστόσο οι στροφές του κινητήρα παραμένουν θετικές. Αυτό συμβαίνει διότι στον κινητήρα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε παράλληλης διέγερσης, αλλάζει ταυτόχρονα η φορά του ρεύματος διέγερσης αλλά και του τυμπάνου.

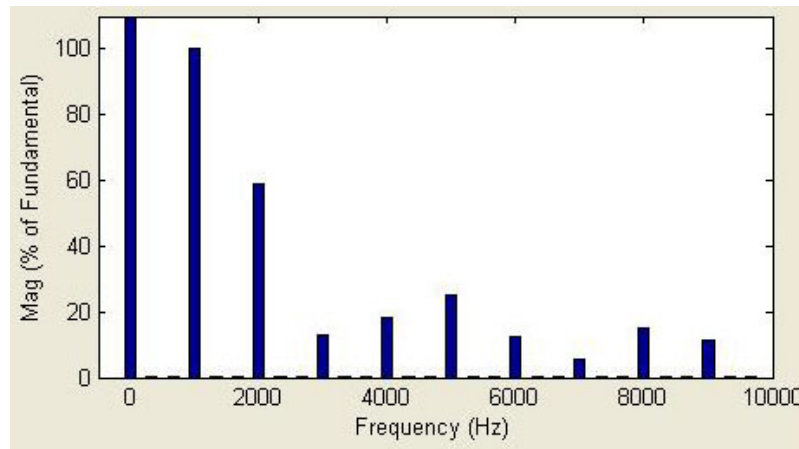
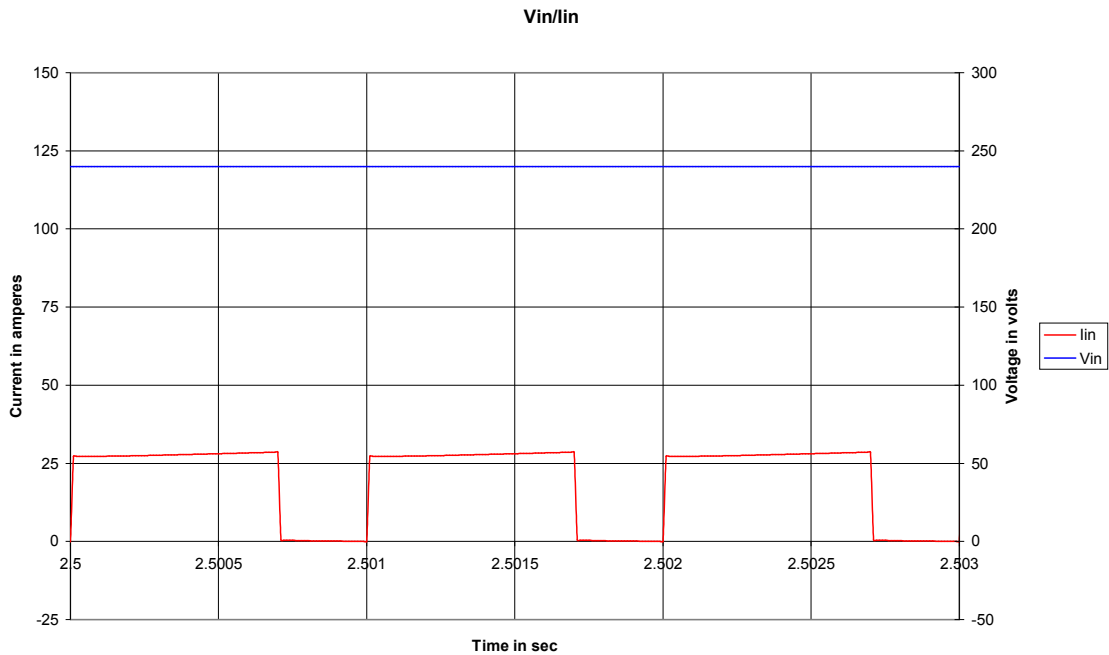


**Σχήμα 4.213** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $d=50\%$ , load 50%



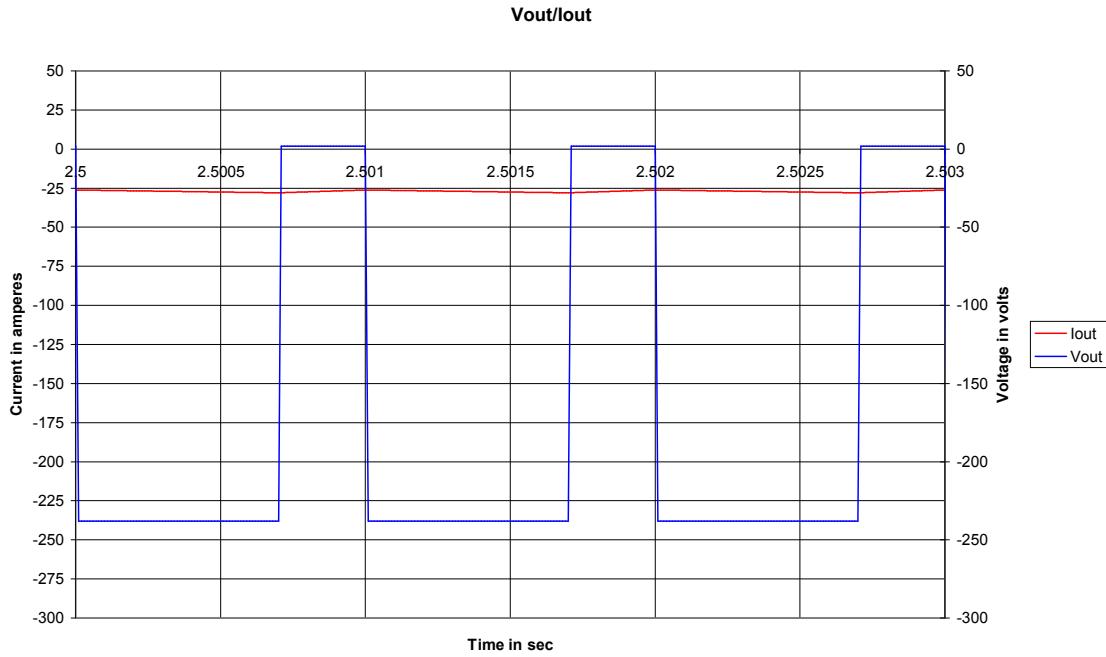
**Σχήμα 4.214** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=50\%$ , load 50%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**

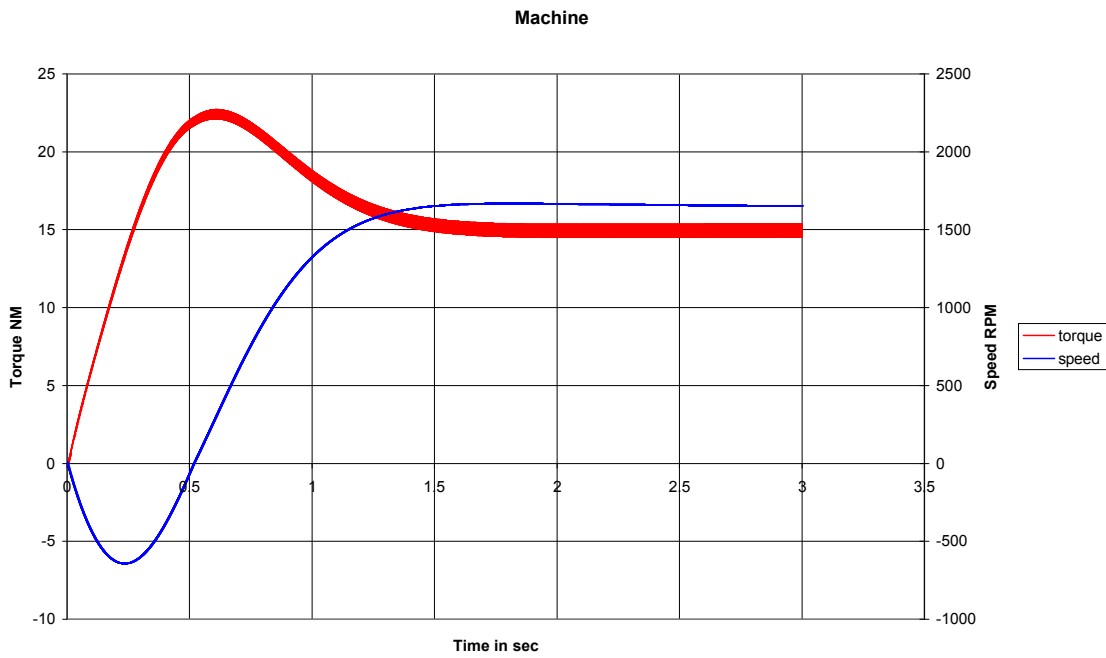


**Σχήμα 4.215** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%

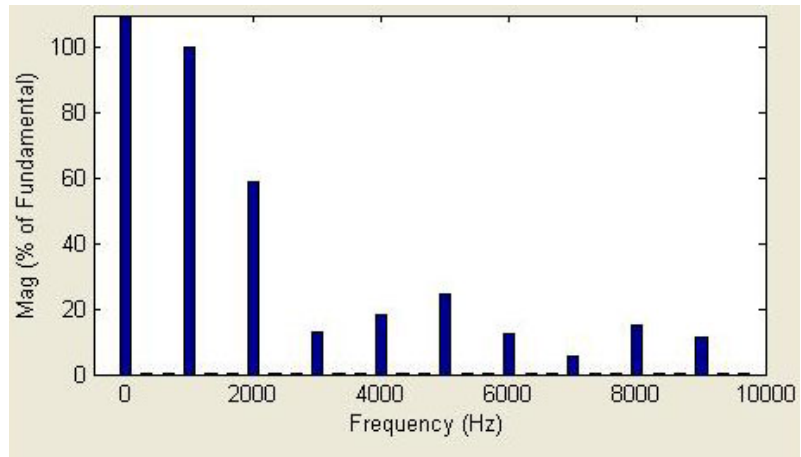
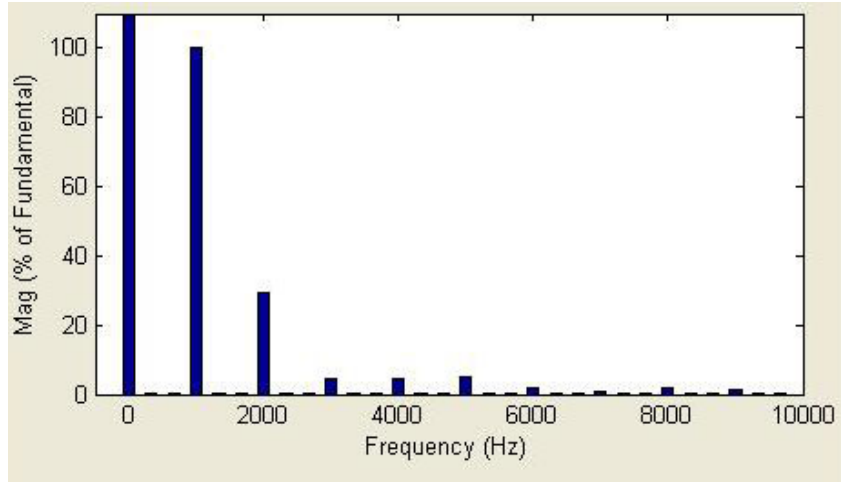




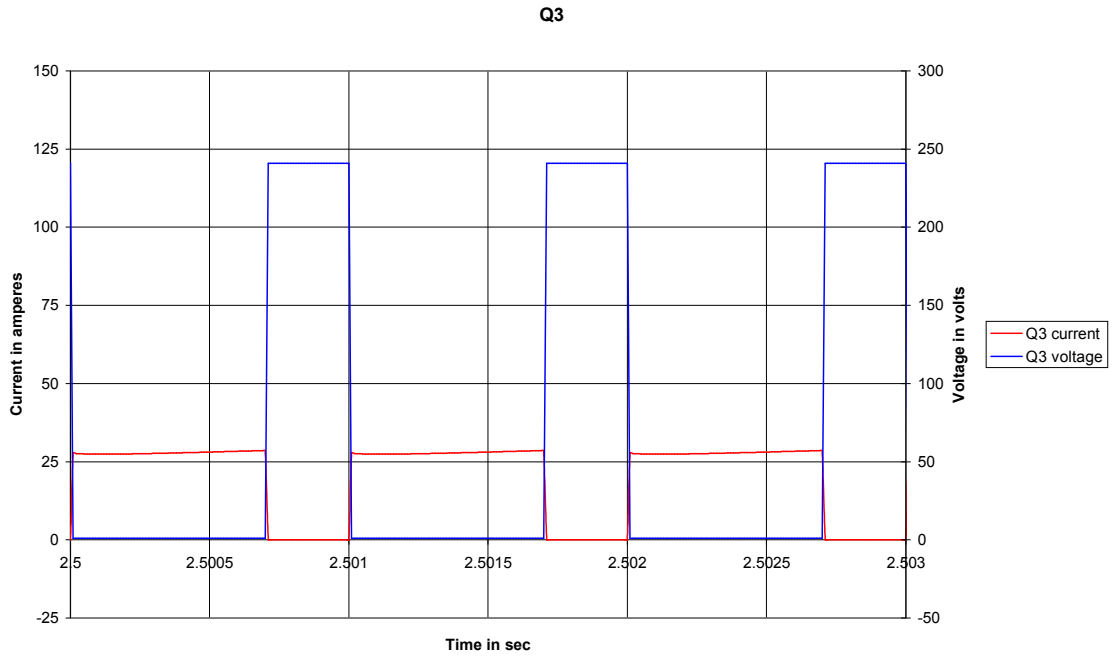
**Σχήμα 4.216** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=70\%$ , load 70%



**Σχήμα 4.217** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=70\%$ , load 70%

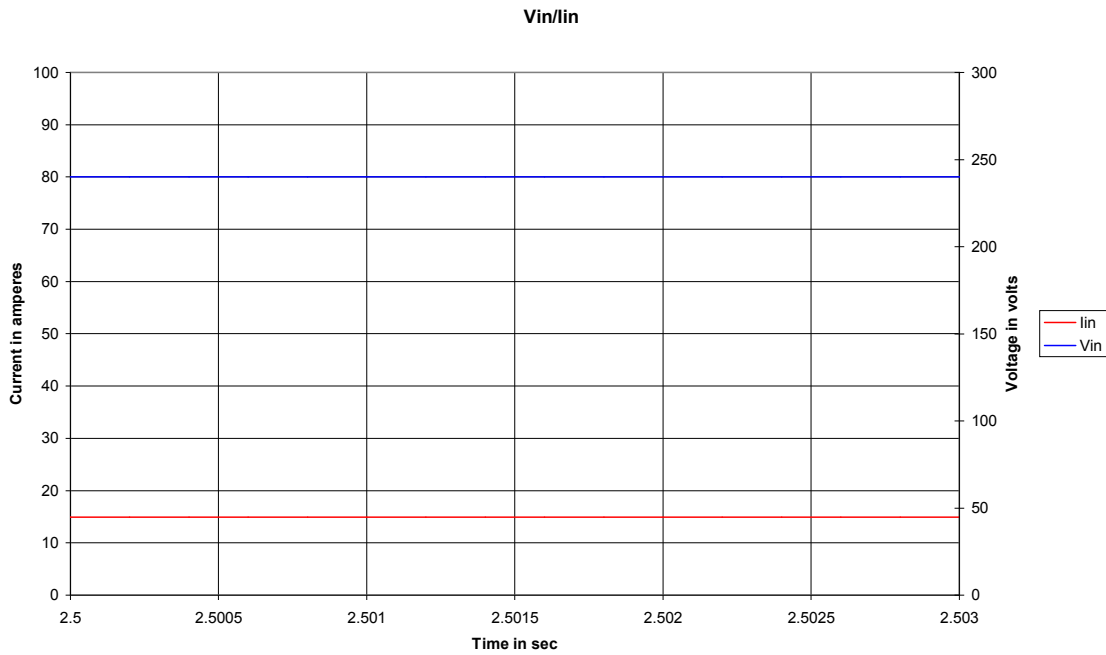


**Σχήμα 4.218** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου MI,  $d=70\%$ , load 70%

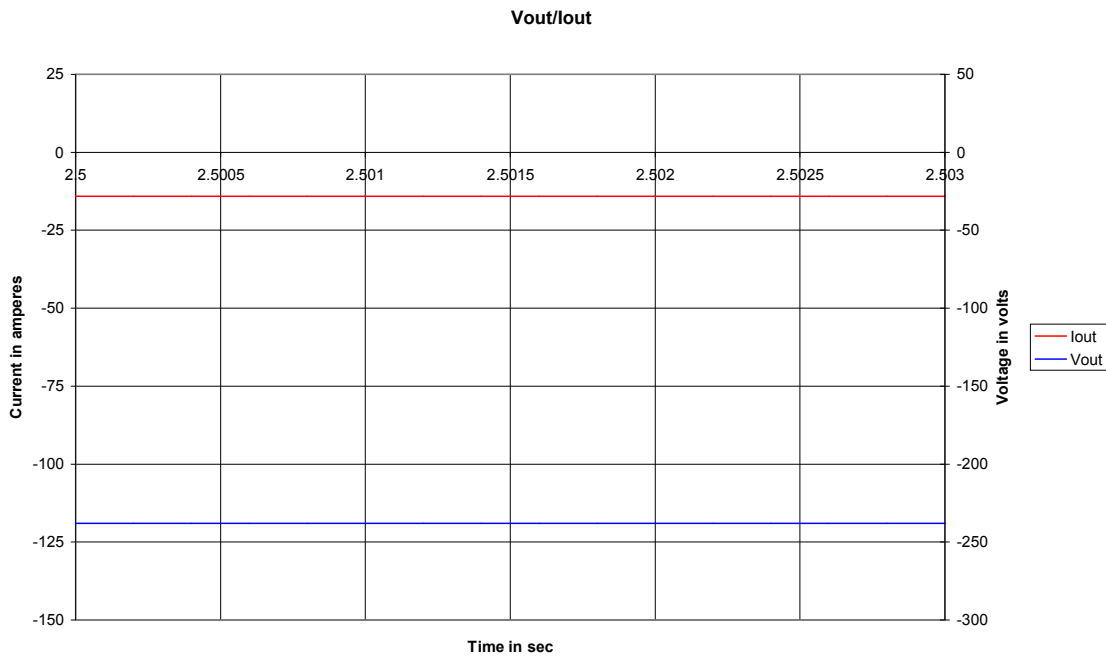


**Σχήμα 4.219** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=70\%$ , load 70%

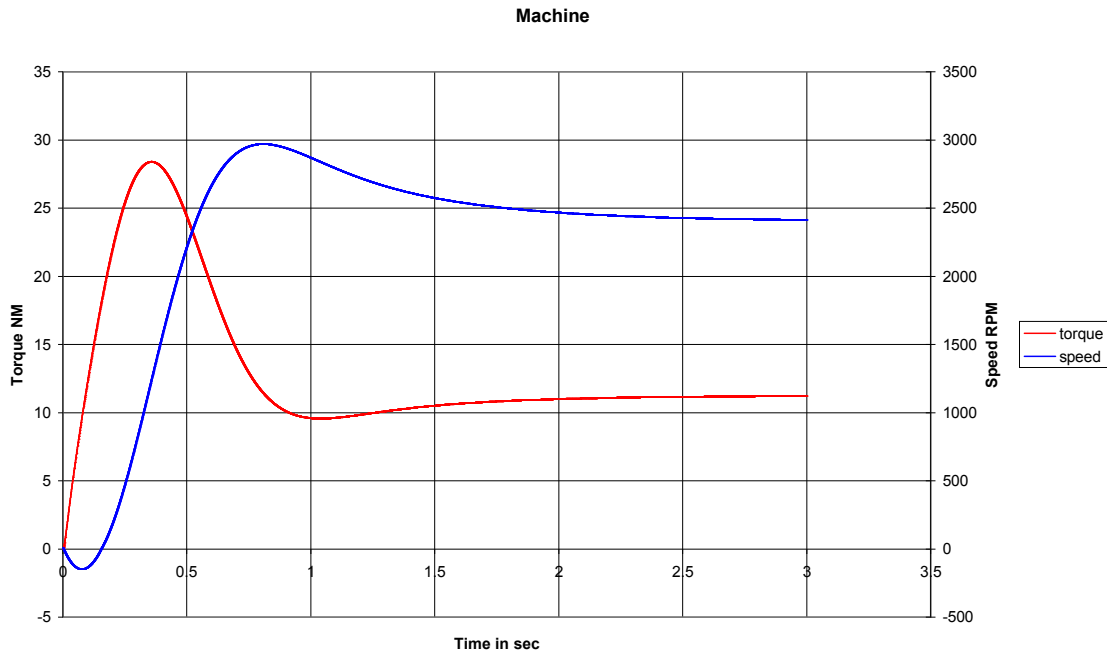
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**



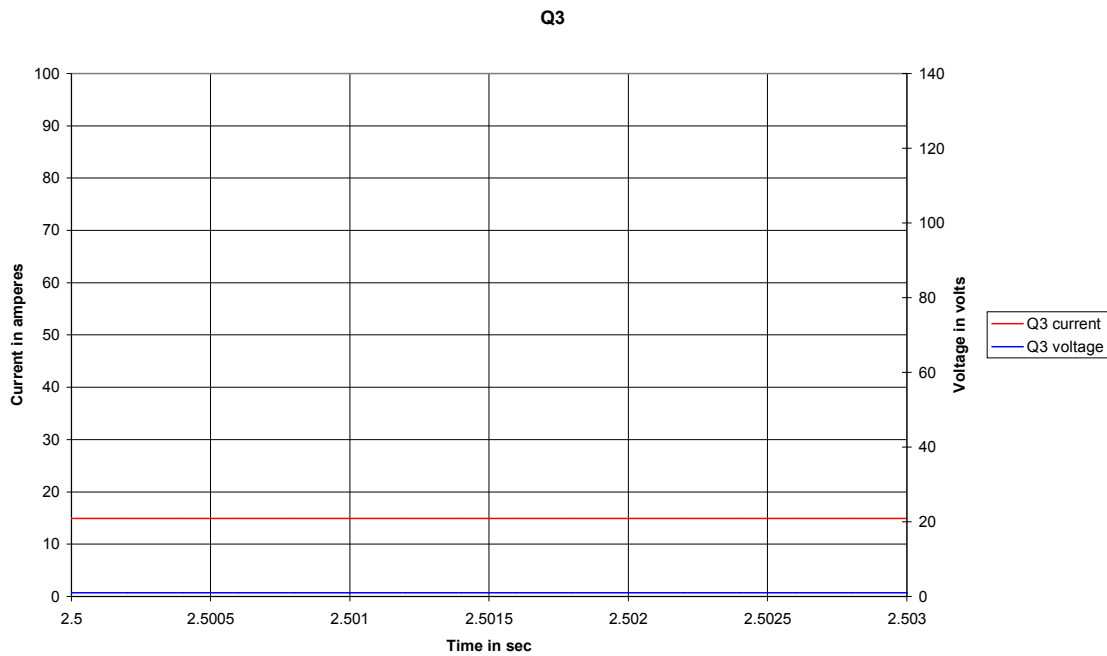
**Σχήμα 4.220** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=100%, load 50%



**Σχήμα 4.221** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1, d=100%, load 50%

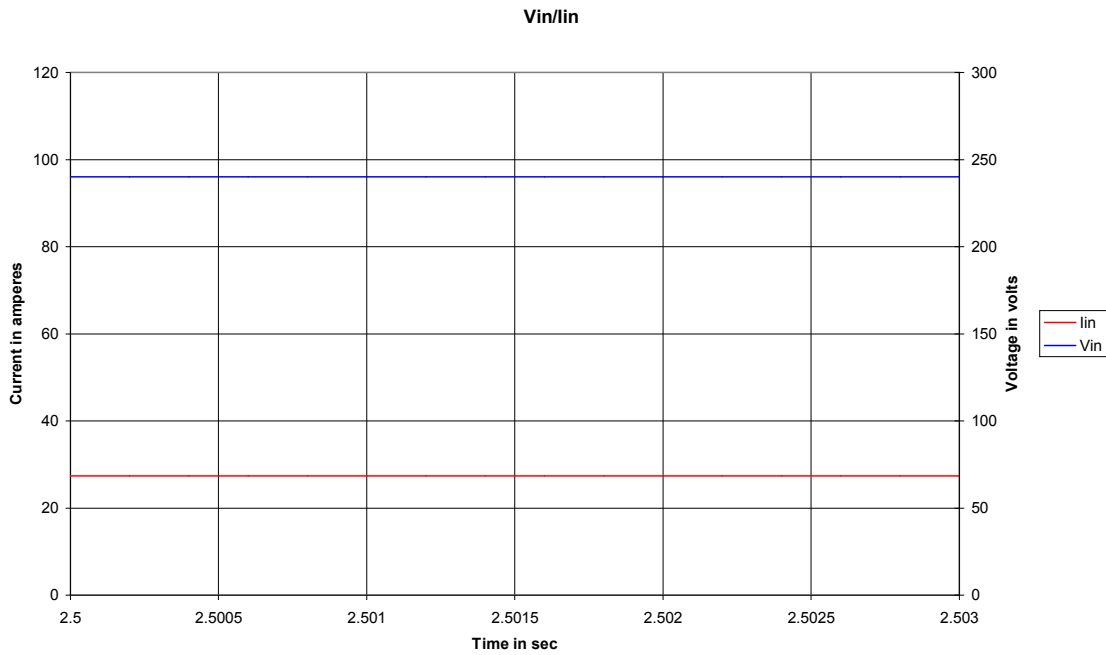


Σχήμα 4.222 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 50%

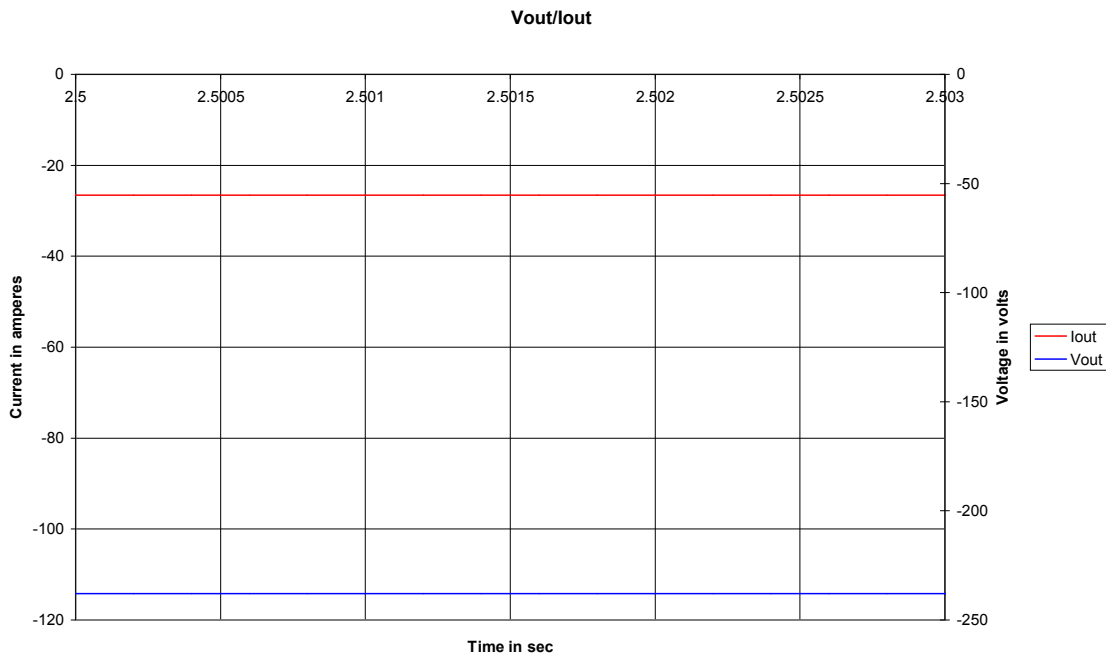


Σχήμα 4.223 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 50%

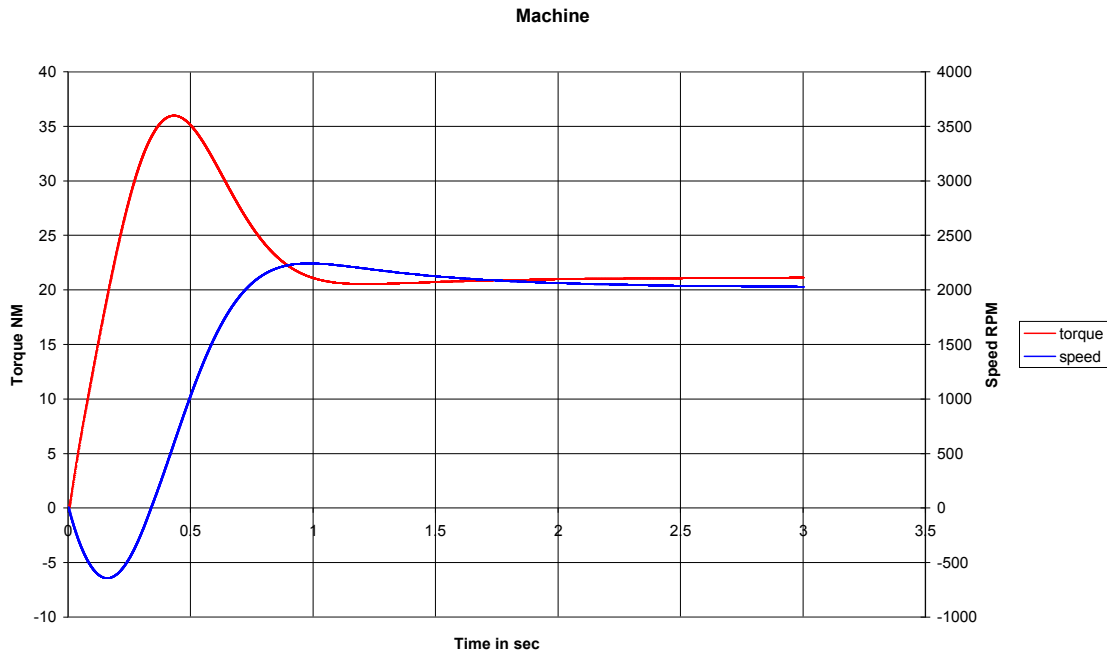
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M1, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**



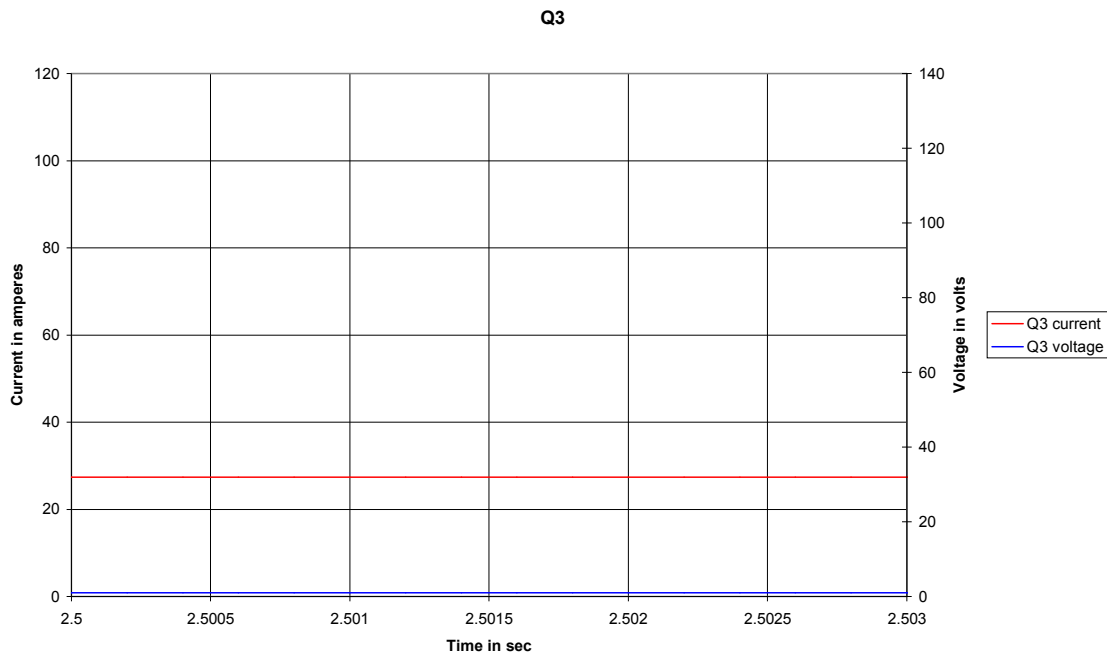
**Σχήμα 4.224** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=100\%$ , load 100%



**Σχήμα 4.225** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=100\%$ , load 100%

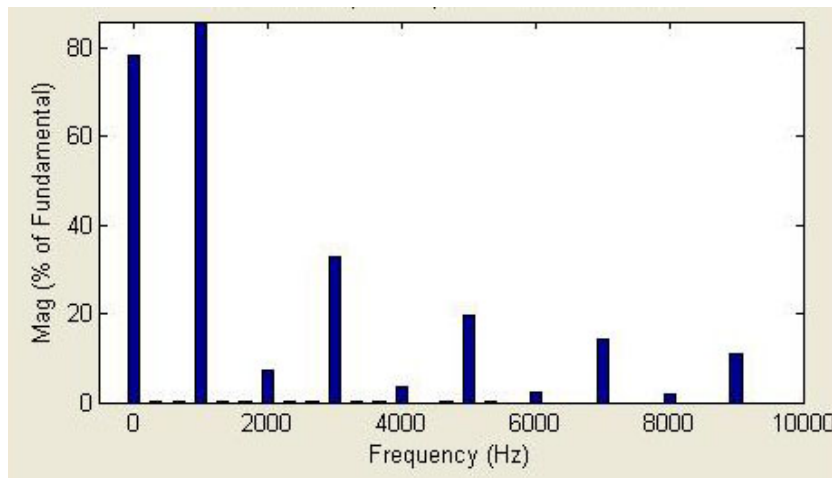
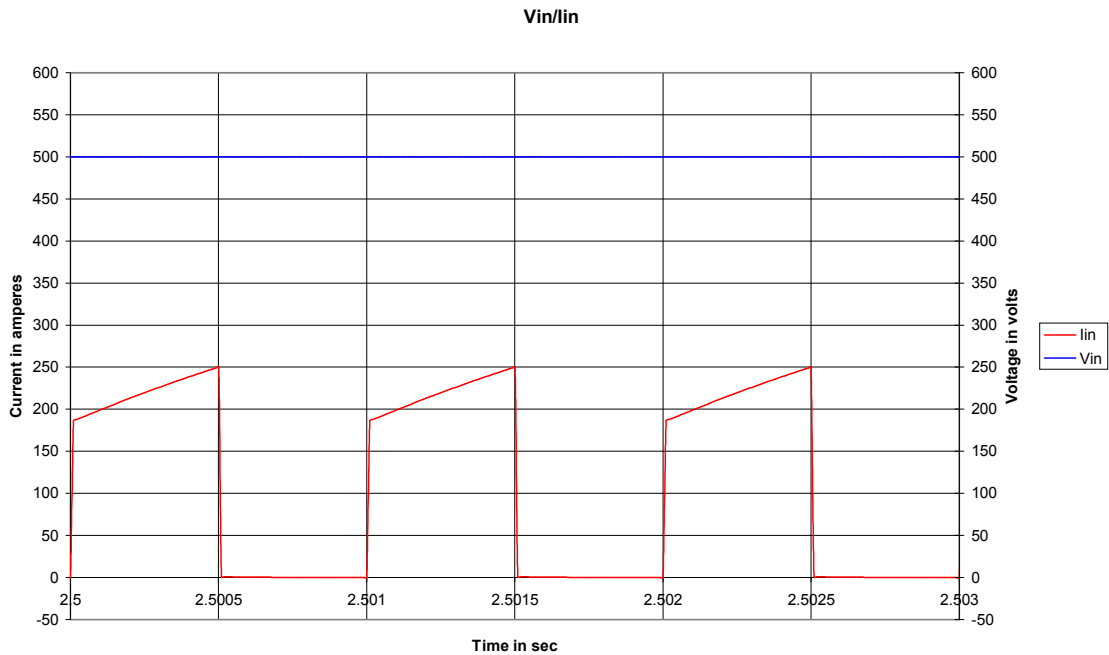


Σχήμα 4.226 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=100\%$ , load 100%



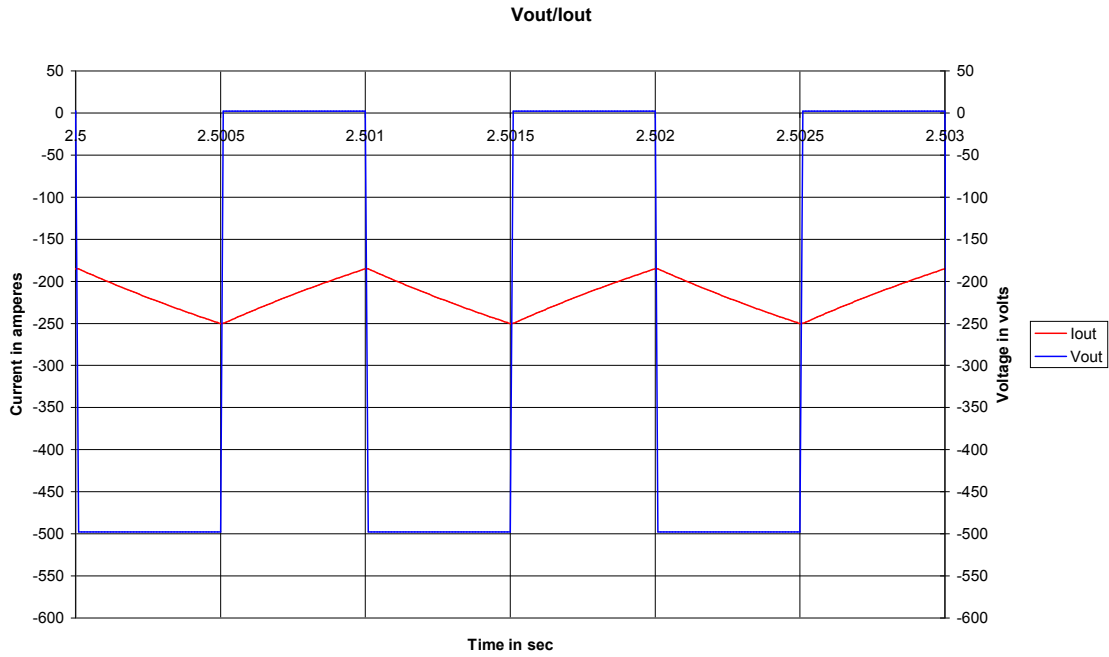
Σχήμα 4.227 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M1,  $d=100\%$ , load 100%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**

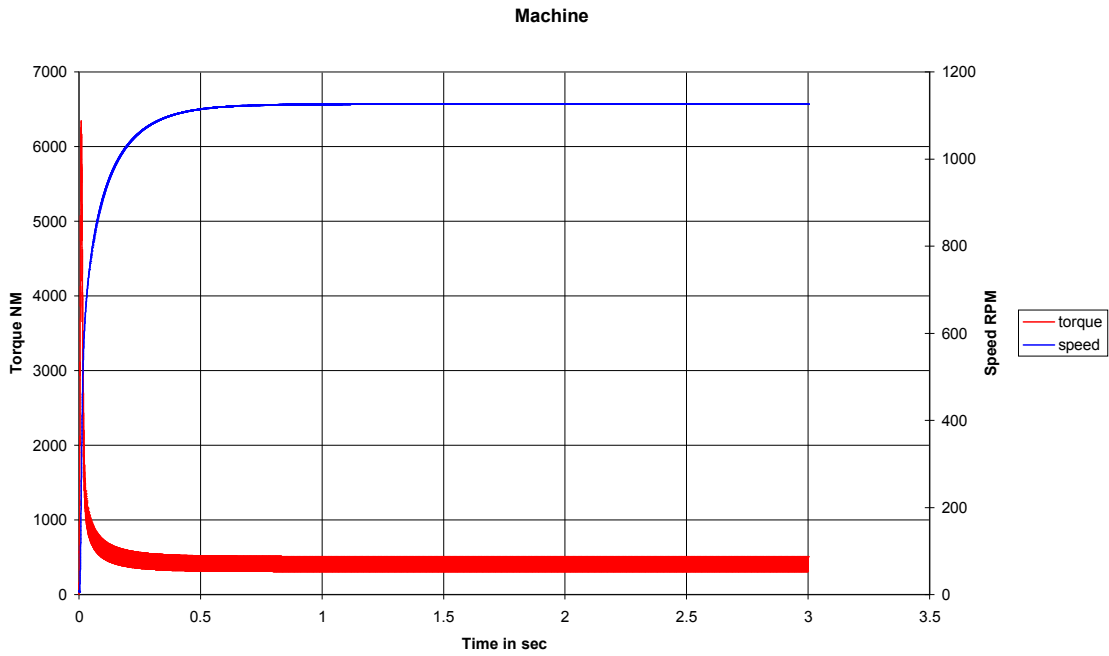


**Σχήμα 4.228** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ , load 50% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%

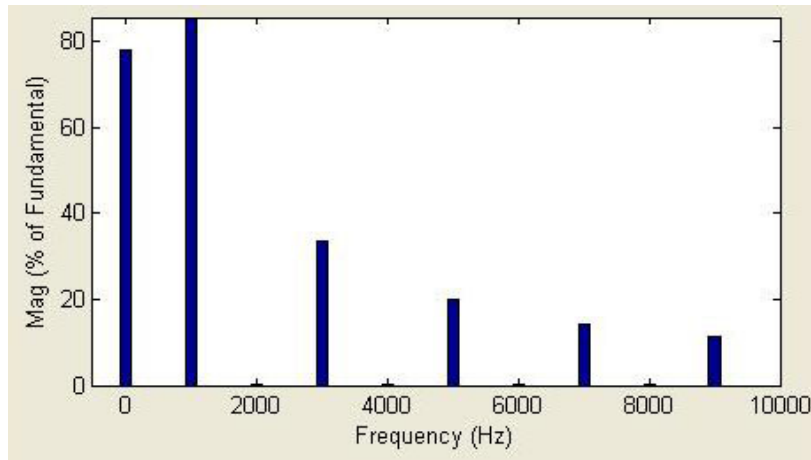
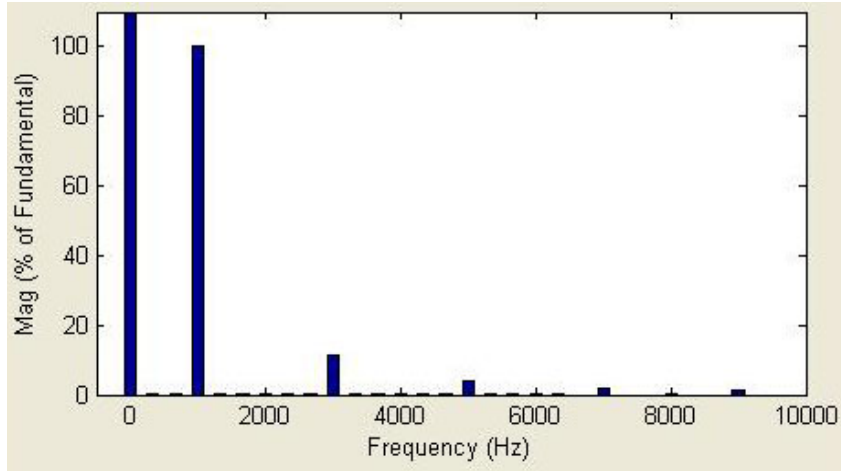




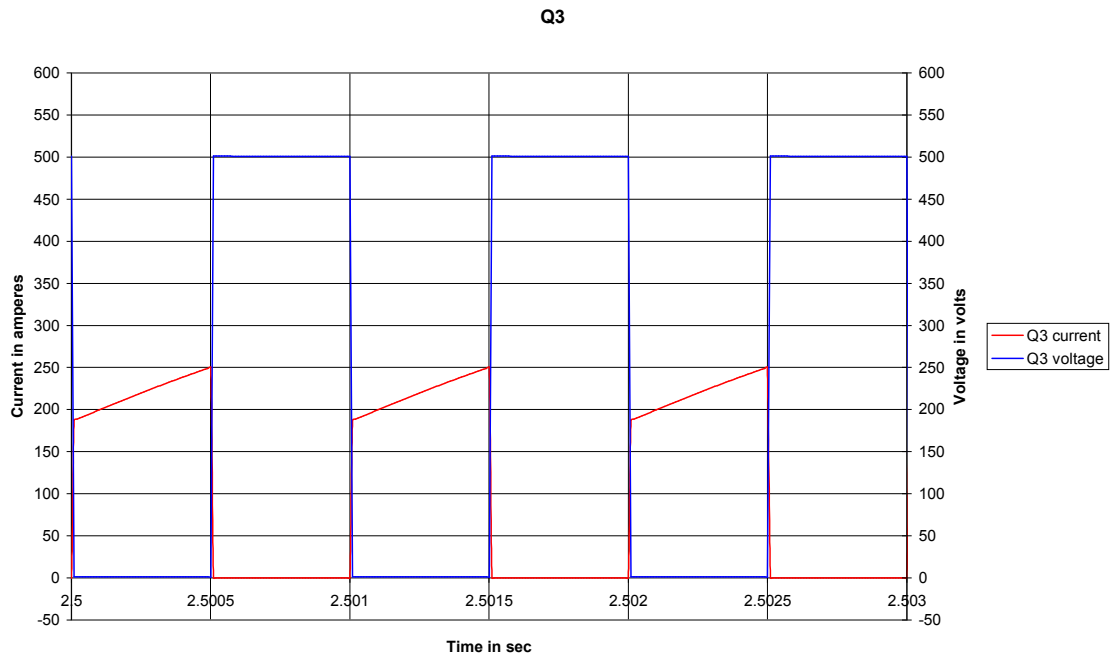
Σχήμα 4.229 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=50\%$ , load 50%



Σχήμα 4.230 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=50\%$ , load 50%

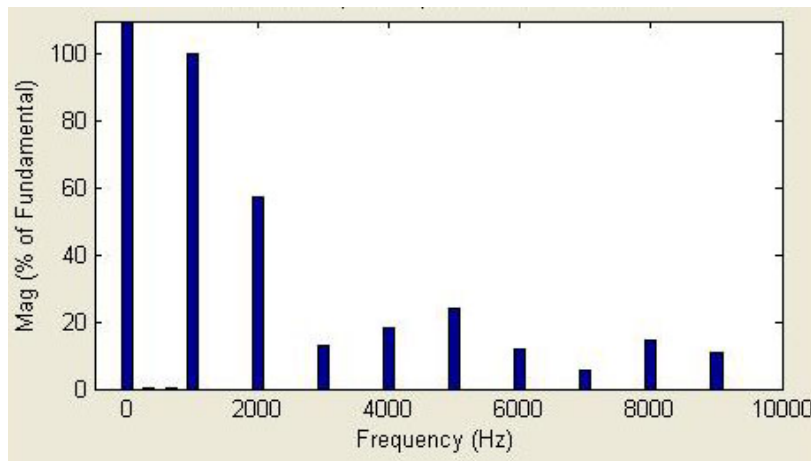
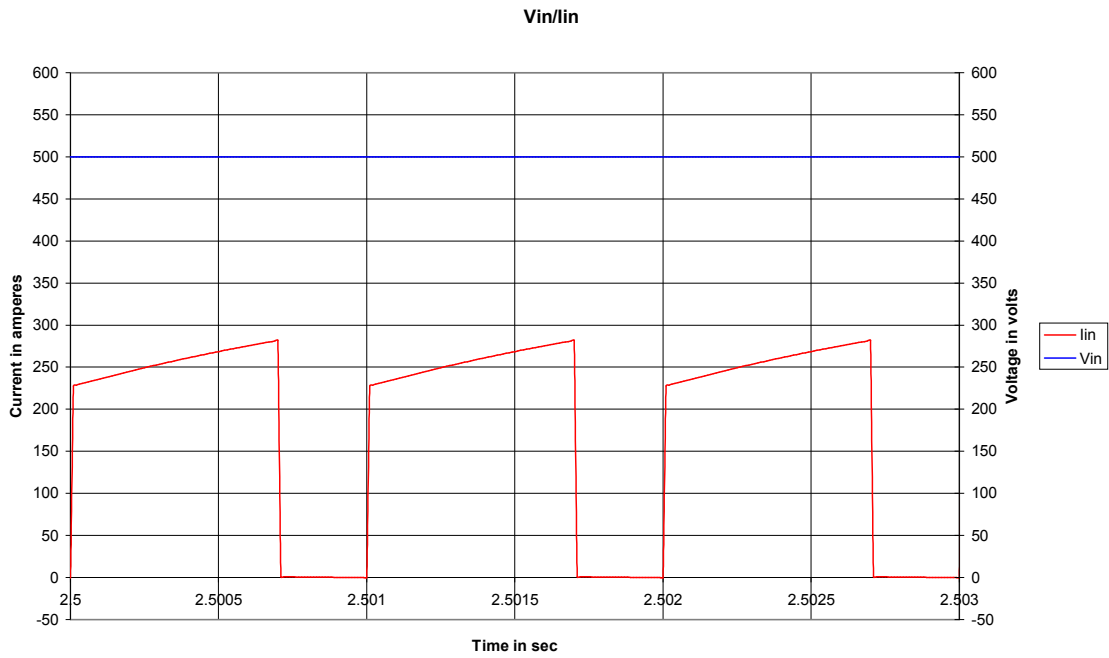


**Σχήμα 4.231** α) Ανάλυση *FFT* του ρεύματος εξόδου M2, d=50%, load 50% β) Ανάλυση *FFT* της τάσης εξόδου M2, d=50%, load 50%

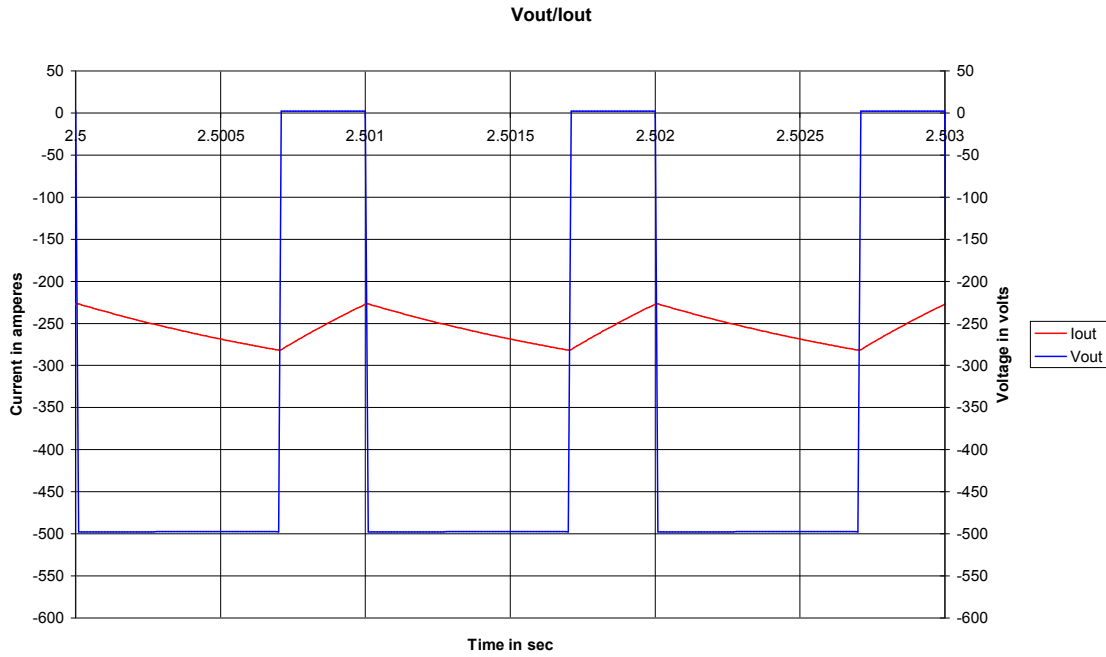


**Σχήμα 4.232** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=50\%$ , load 50%

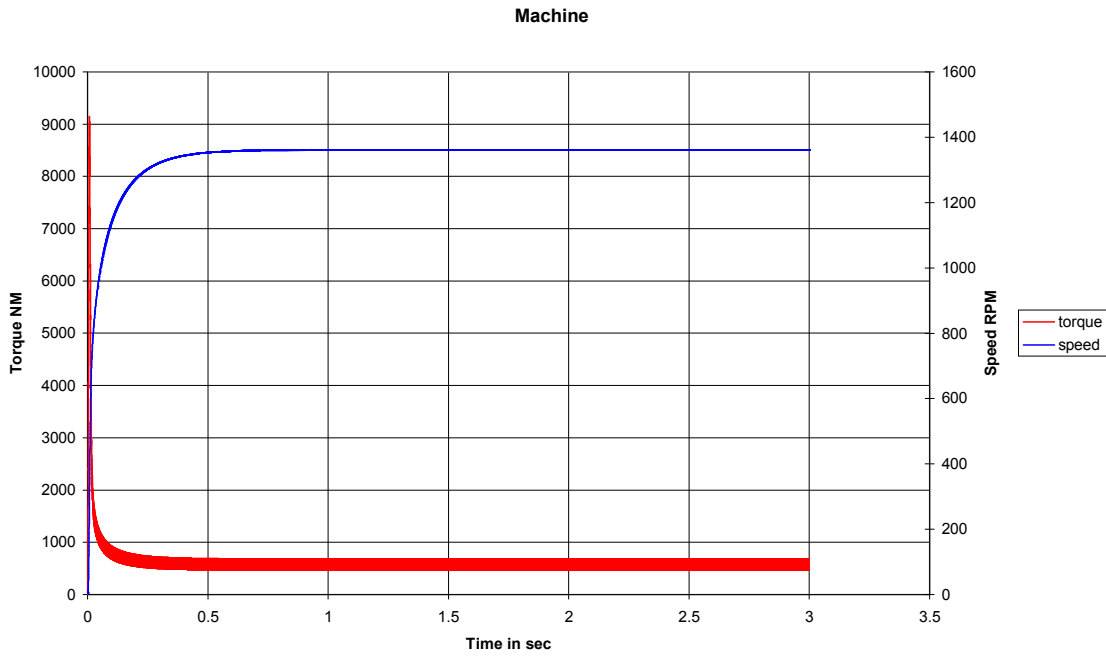
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 70%, ονομαστικό φορτίο 70%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**



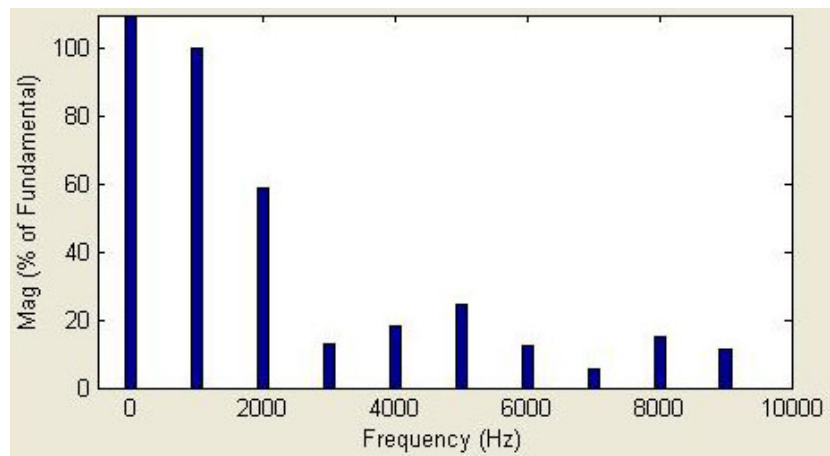
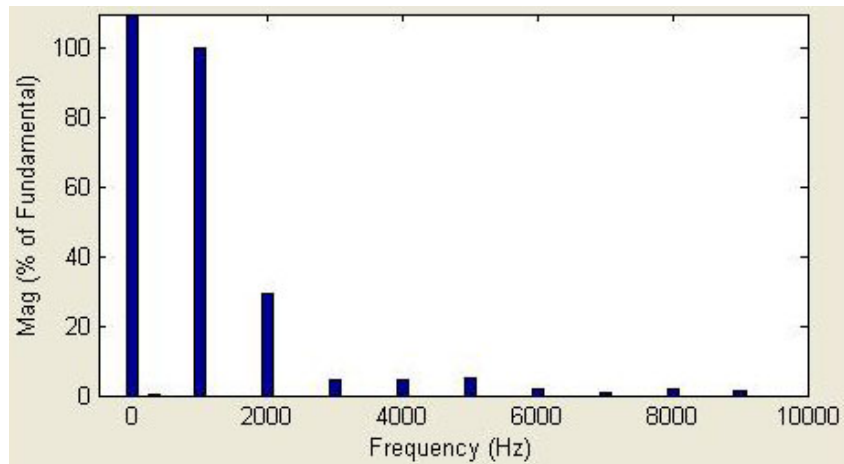
**Σχήμα 4.233** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



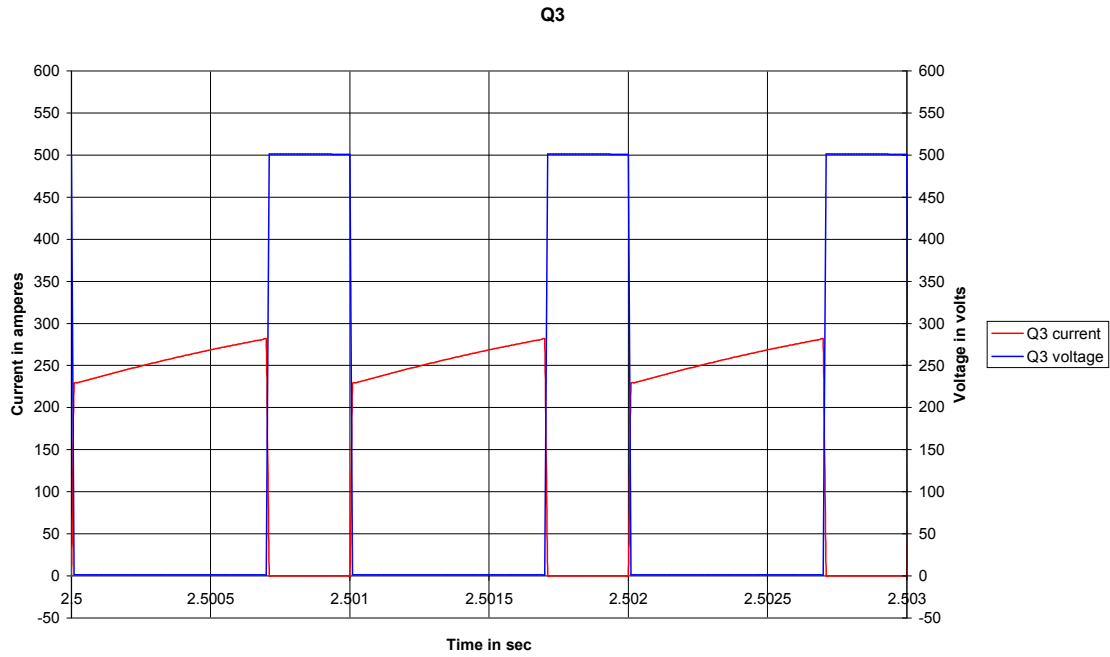
**Σχήμα 4.234** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%



**Σχήμα 4.235** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=70\%$ , load 70%

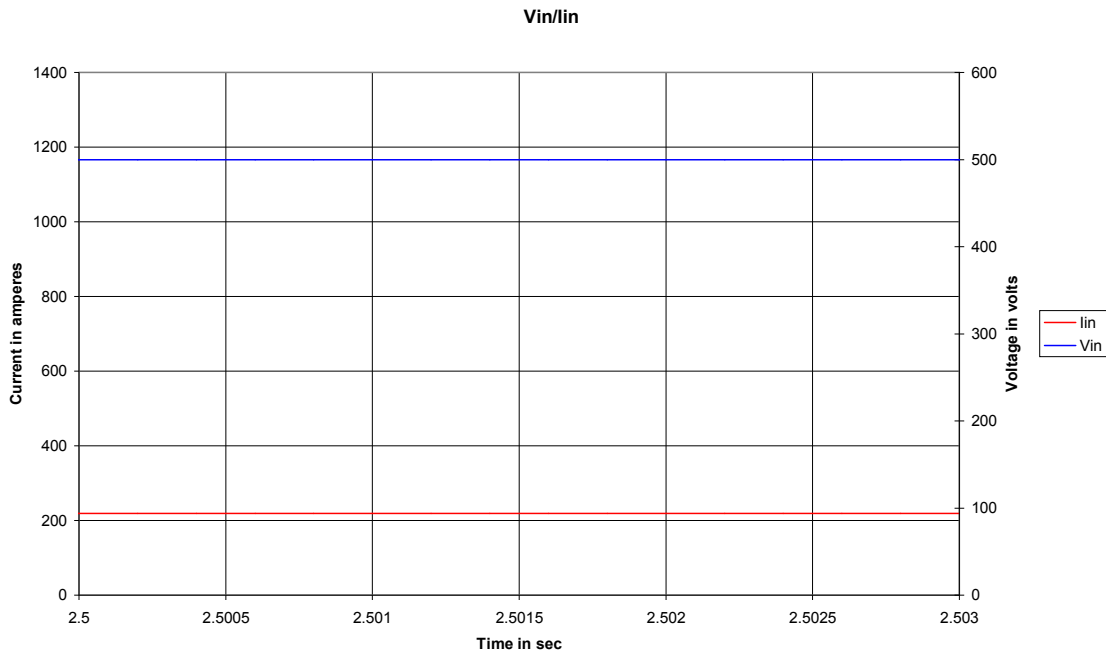


**Σχήμα 4.236** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M2,  $d=70\%$ , load 70%

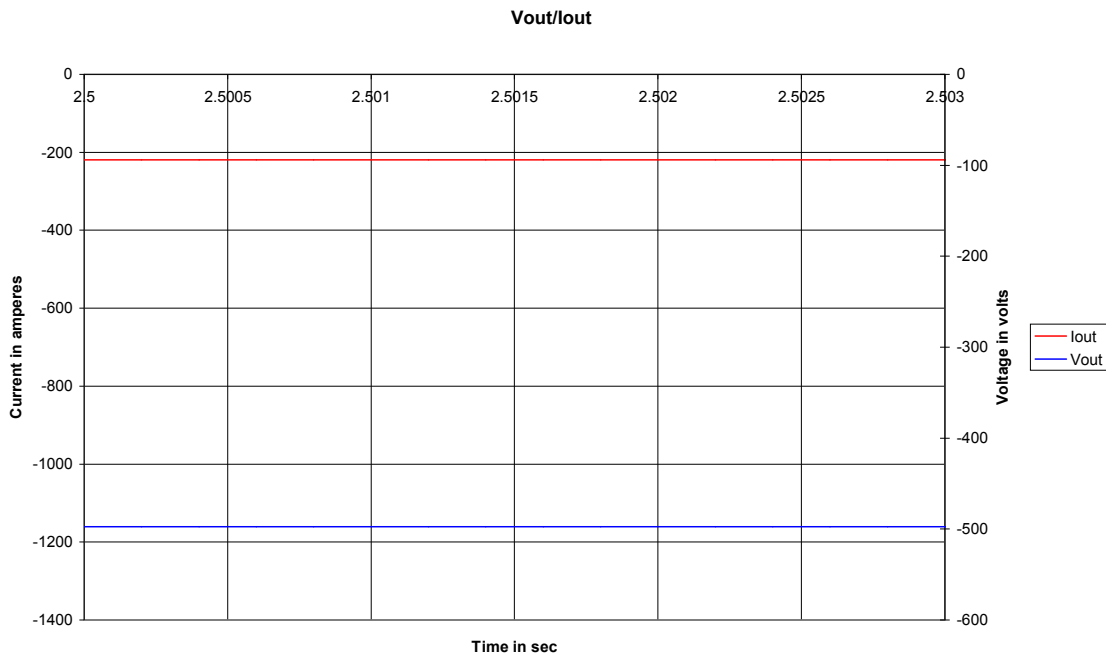


**Σχήμα 4.237** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=70\%$ , load 70%

**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 50%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**

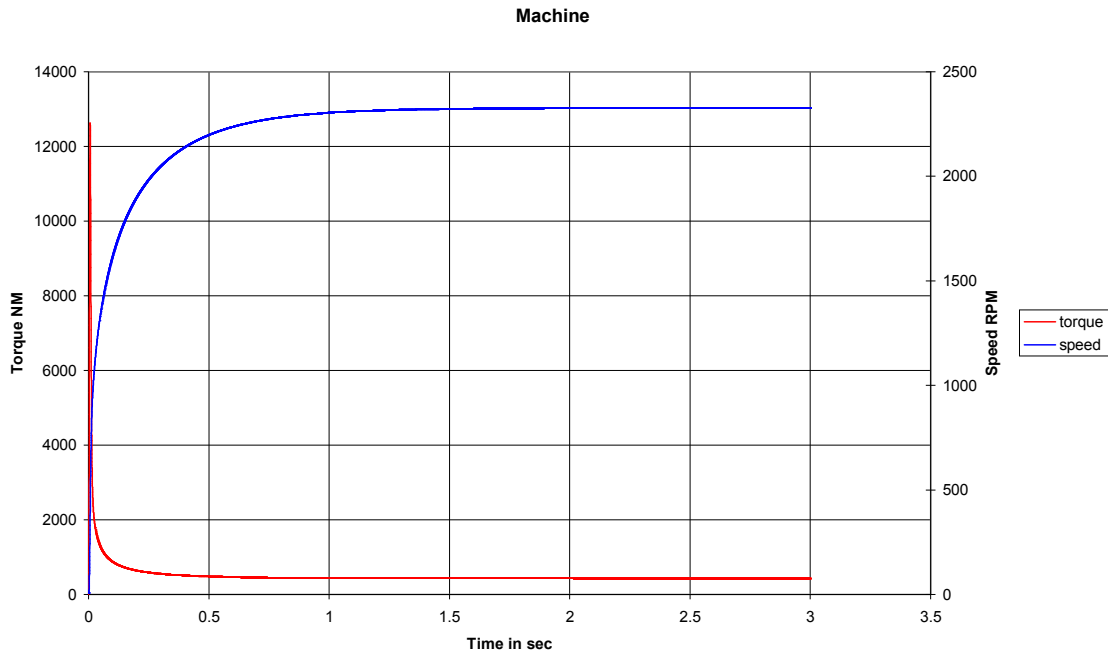


**Σχήμα 4.238** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100\%$ , load 50%

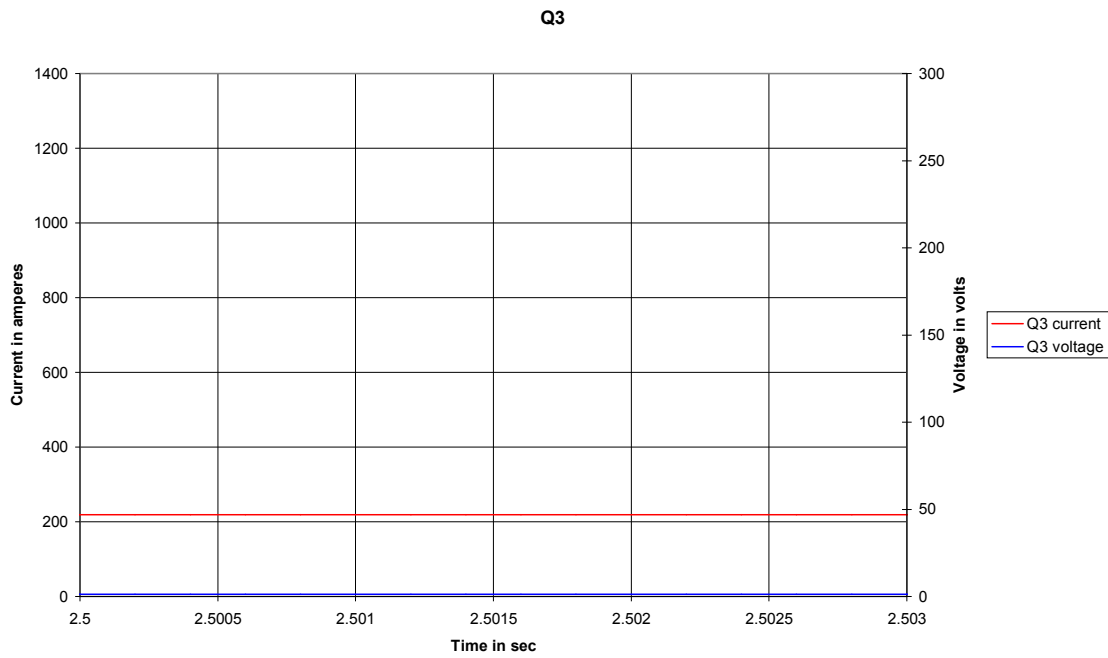


**Σχήμα 4.239** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100\%$ , load 50%



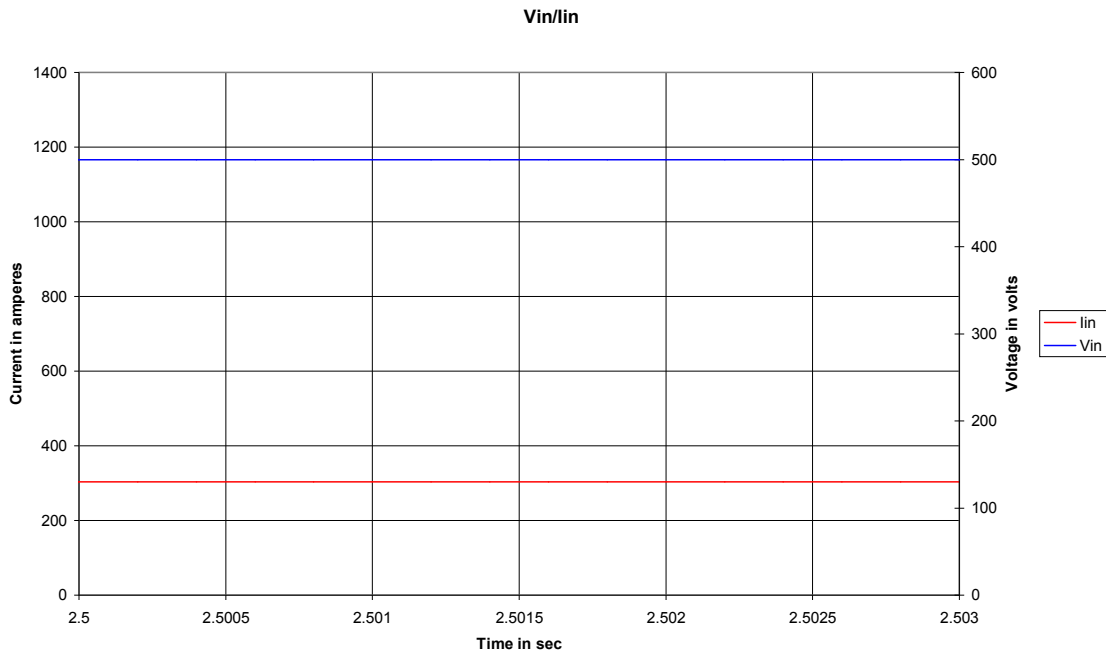


Σχήμα 4.240 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 50%

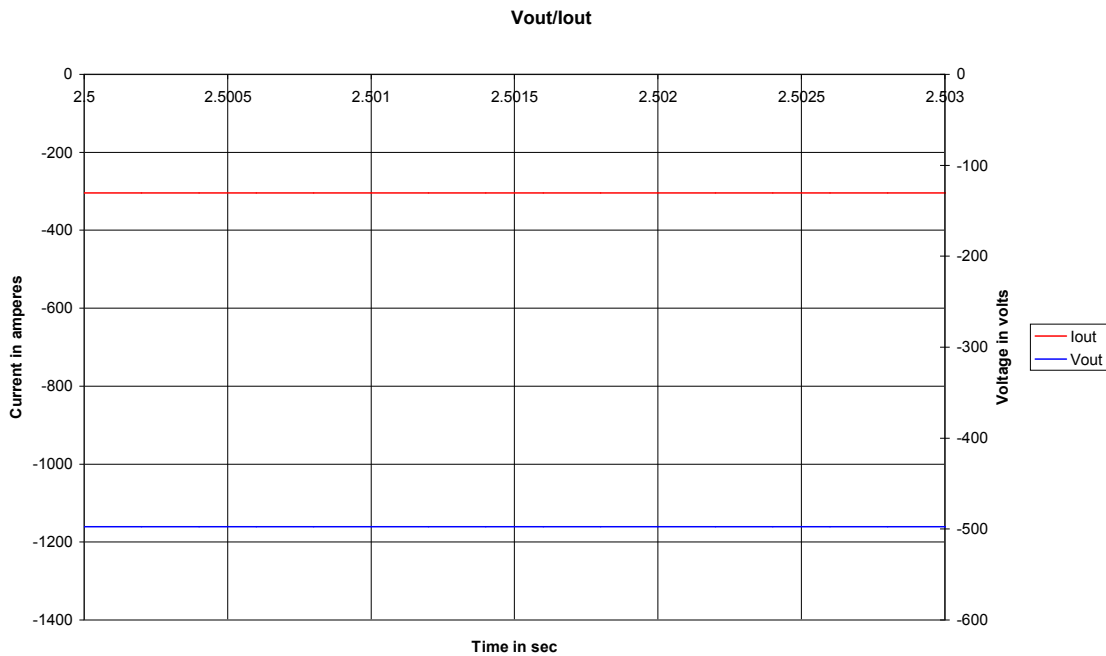


Σχήμα 4.241 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 50%

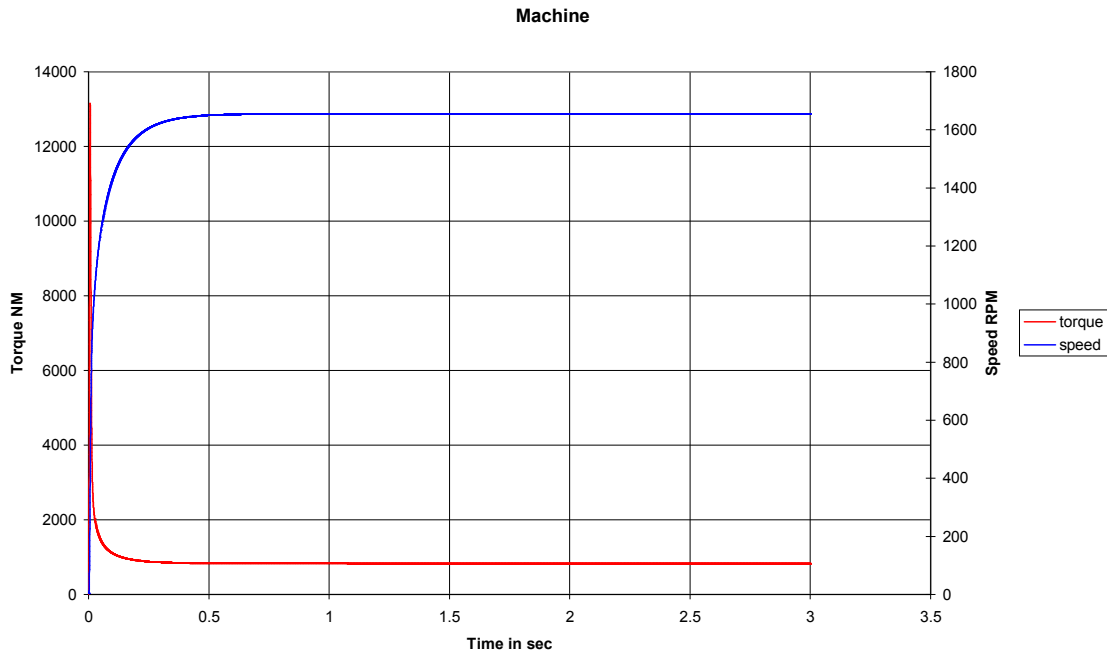
**Καταμητής τεσσάρων τεταρτημορίων, κινητήρας M2, duty cycle 100%, ονομαστικό φορτίο 100%, λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο**



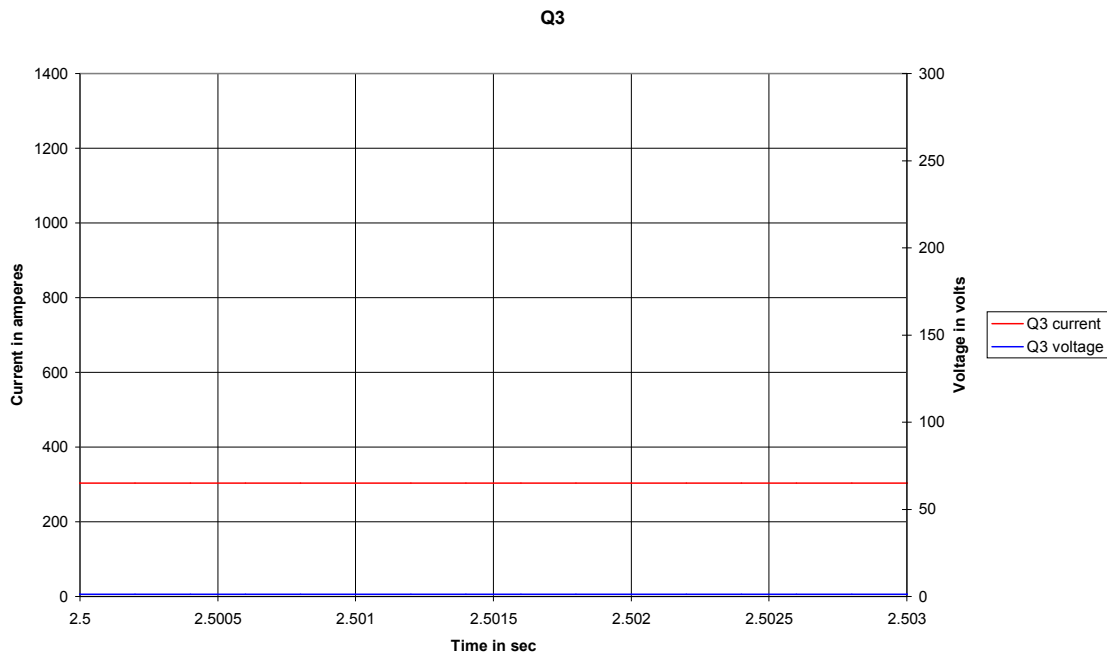
**Σχήμα 4.242** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M2,  $d=100%$ , load 100%



**Σχήμα 4.243** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M2,  $d=100%$ , load 100%

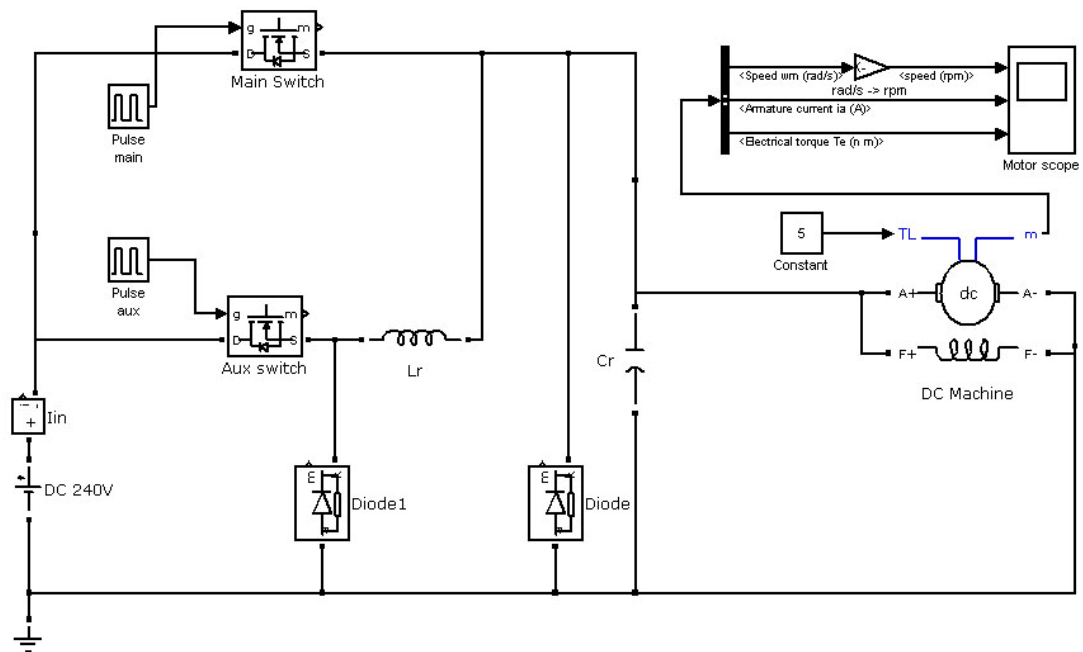


Σχήμα 4.244 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M2,  $d=100\%$ , load 100%



Σχήμα 4.245 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του IGBT M2,  $d=100\%$ , load 100%

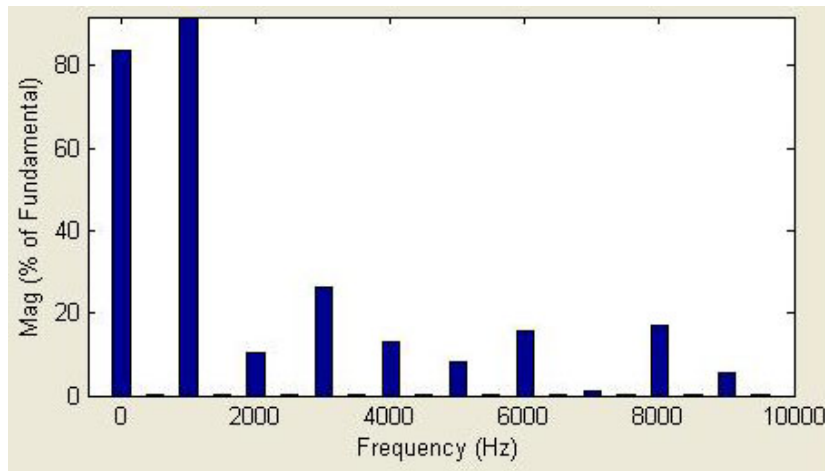
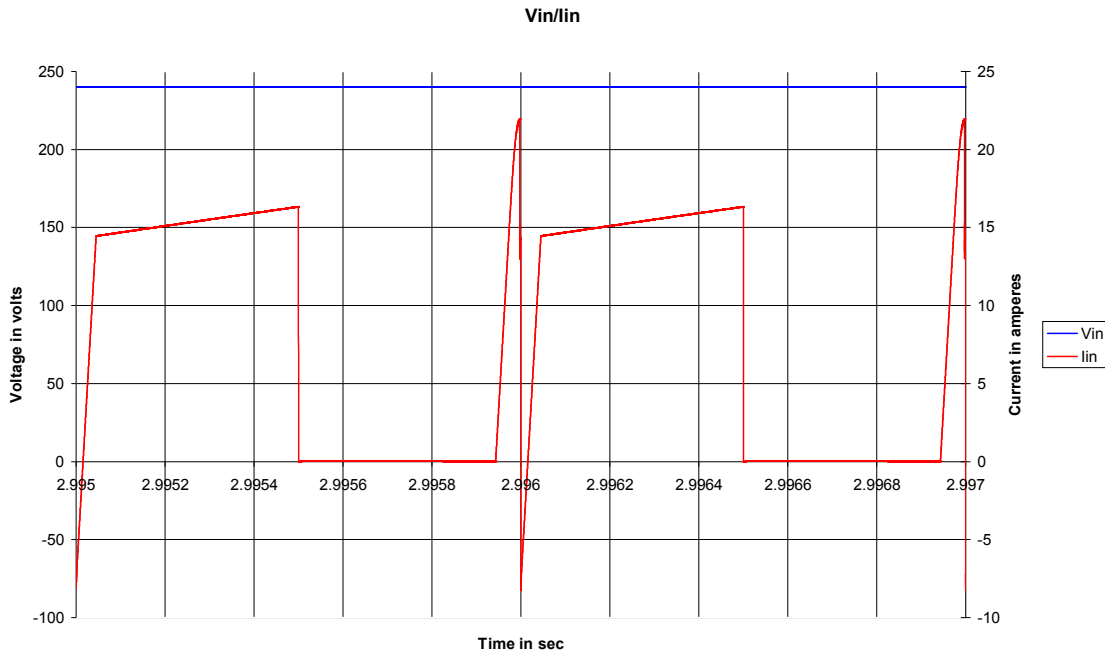
#### 4.2.6 Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων ZVT



Σχήμα 4.246 Διάγραμμα Καταμητή (chopper) 2 τεταρτημορίων ZVT

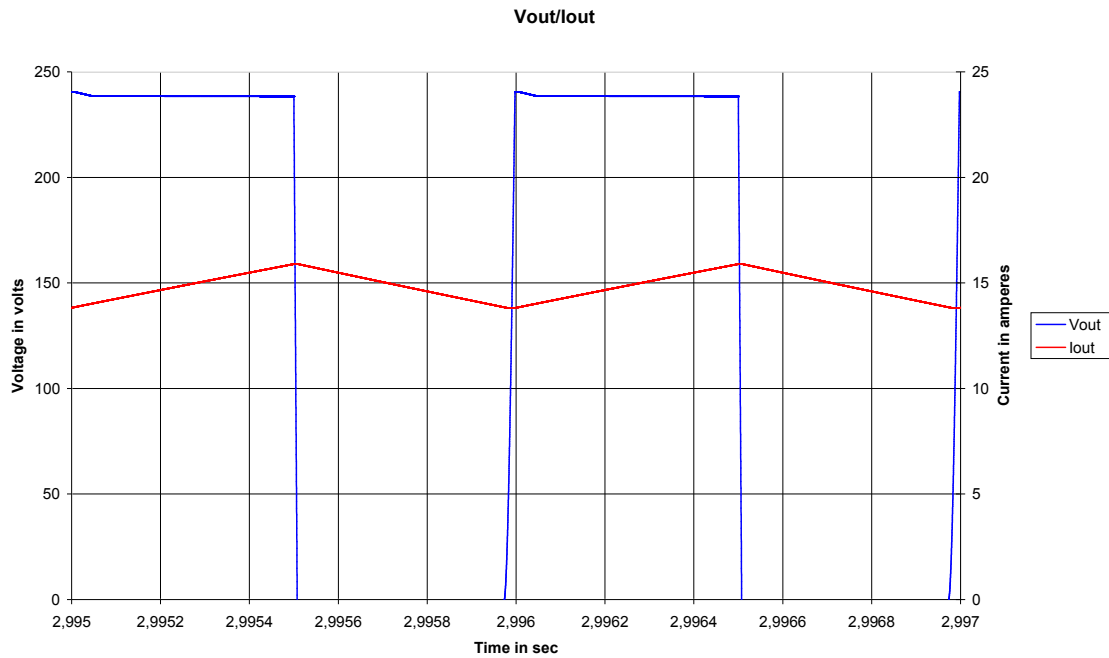
Πραγματοποιήσαμε το παραπάνω διαγράμματος καταμητή δύο τεταρτημορίων ZVT, κάνοντας χρήση ημιαγωγικών διακοπών MOSFET, σε συχνότητα λειτουργίας 1KHz και θα παρουσιαστεί η προσομοίωσή του κατά το πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας.

**Καταμητής δύο τεταρτημορίων ZVT, κινητήρας M1, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 25%,**

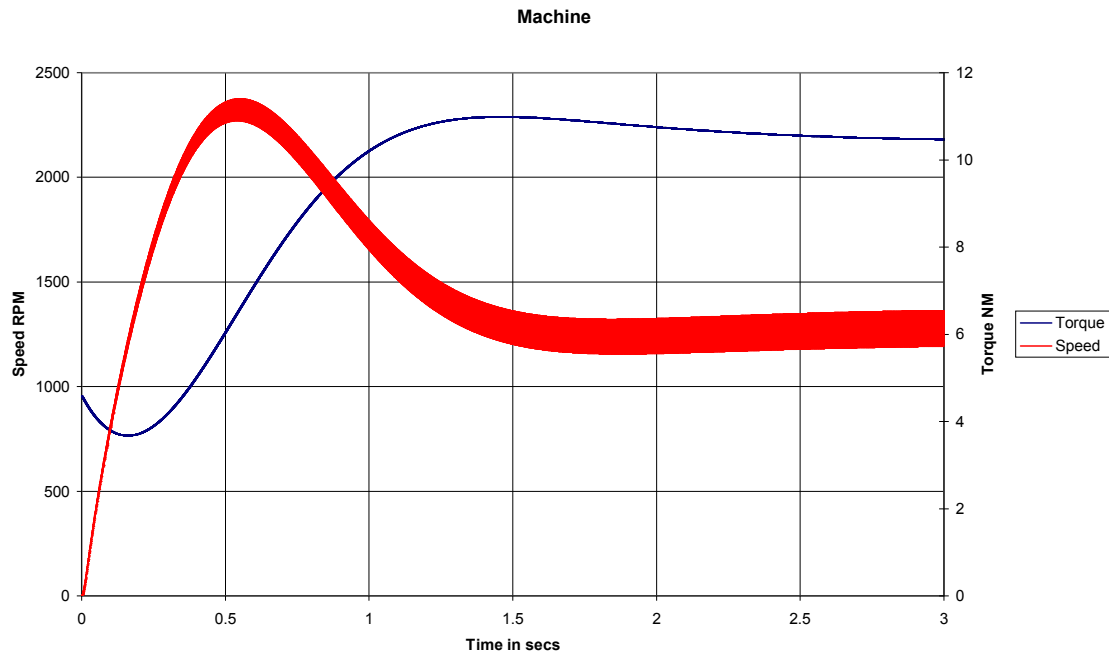


**Σχήμα 4.247** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1, d=50%, load 25% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1, d=50%, load 25%

Παρατηρούμε μια διαφοροποίηση στο ρεύμα εισόδου σε σύγκριση με τον κλασικό καταμητή δύο τεταρτημορίων. Το ρεύμα πραγματοποιεί μια απότομη άνοδο και γίνεται μεγαλύτερο από το ρεύμα λειτουργίας, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιεί μια απότομη κάθοδο και γίνεται αρνητικό. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην προσθήκη του φίλτρου συντονισμού στο κύκλωμά μας, που όπως θα παρατηρήσουμε παρακάτω, μας βοηθάει στη επίτευξη της μεταγωγής των διακοπών υπό συνθήκες μηδενικής τάσης.

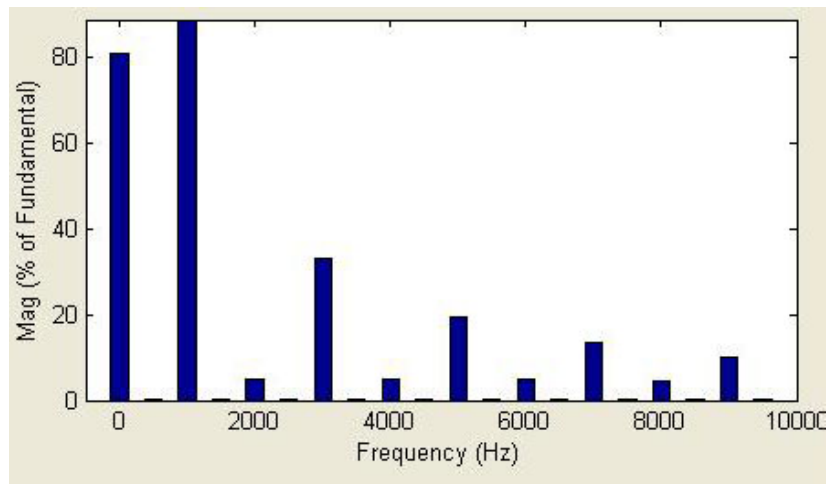
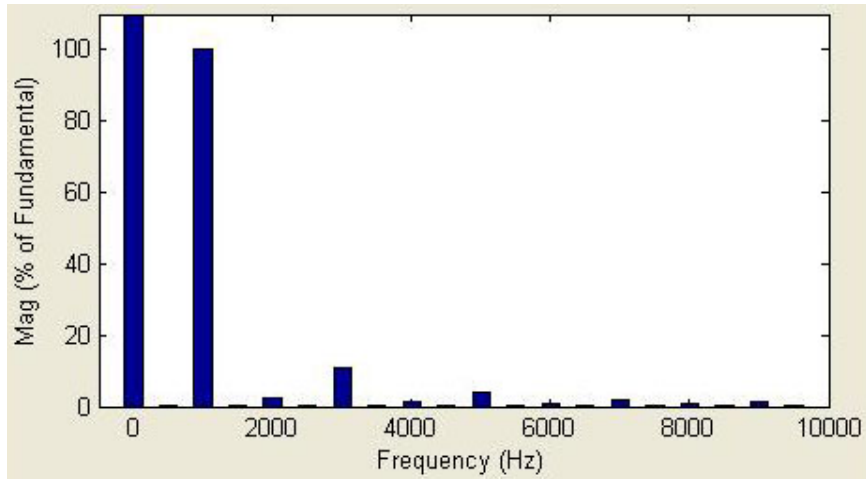


**Σχήμα 4.248** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 25%



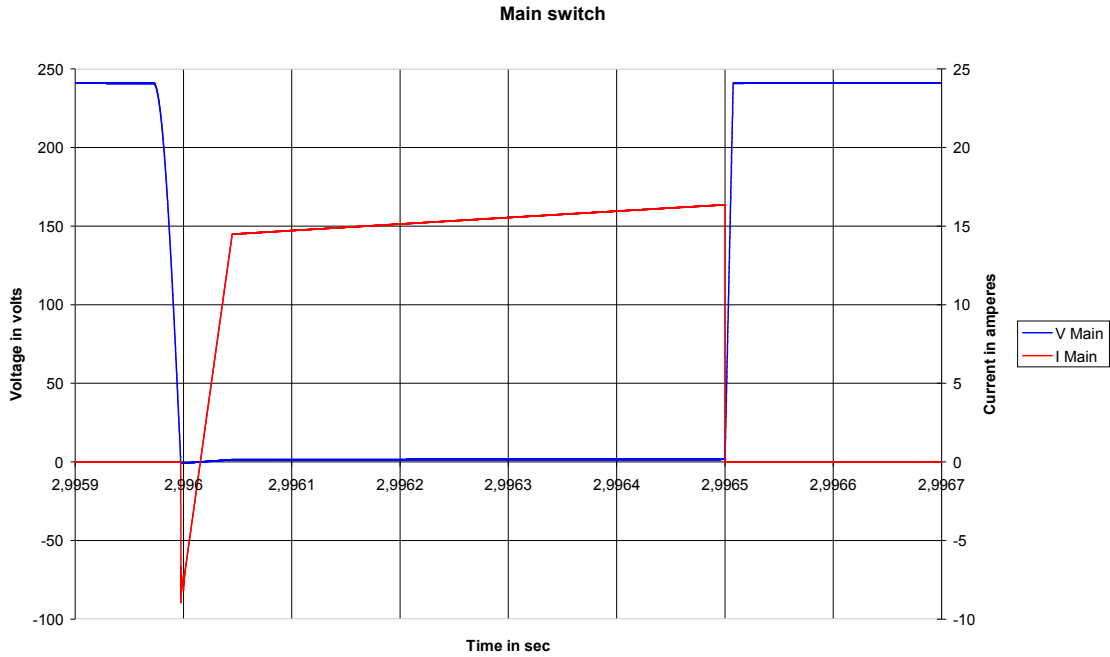
**Σχήμα 4.249** Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=50\%$ , load 25%

Στην τάση εξόδου παρατηρούμε πως η τάση παρουσιάζει μια μικρή κλίση ενώ το ρεύμα ακολουθεί μια μικρή κλίση λόγω του χρόνου αγωγής των διακοπών. Οι στροφές δείχνουν αναμενόμενες ενώ η ροπή του κινητήρα παρουσιάζει ταλάντωση.

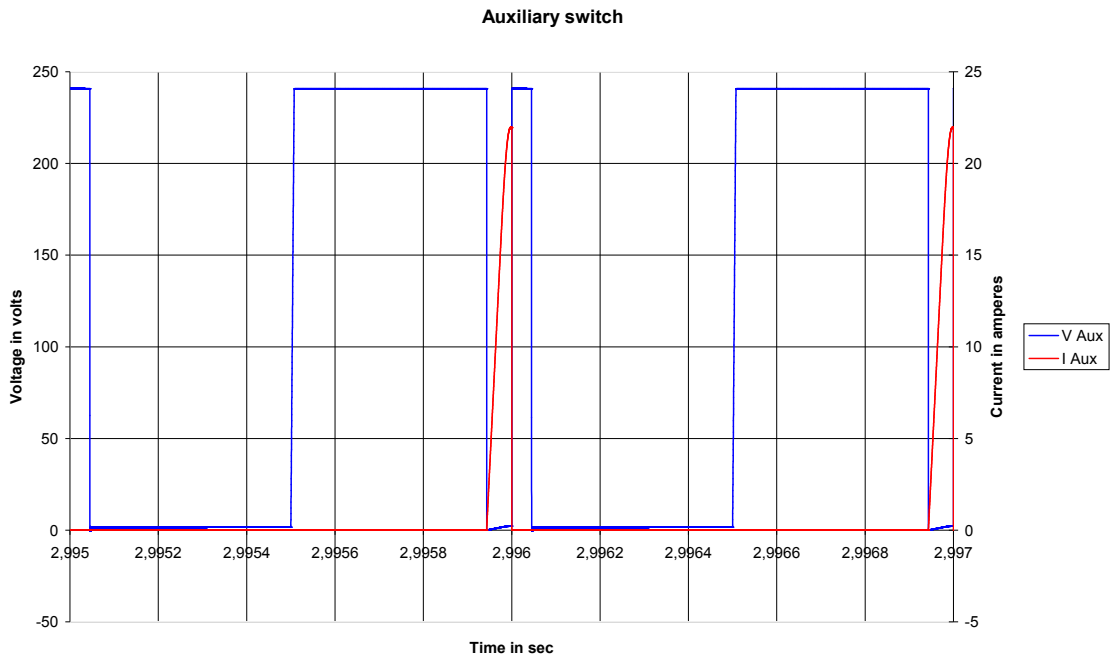


**Σχήμα 4.250** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 25% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 25%

Οι αρμονικές δείχνουν να είναι παρόμοιες με αυτές του κλασσικού καταμητή δύο τεταρτημορίων.



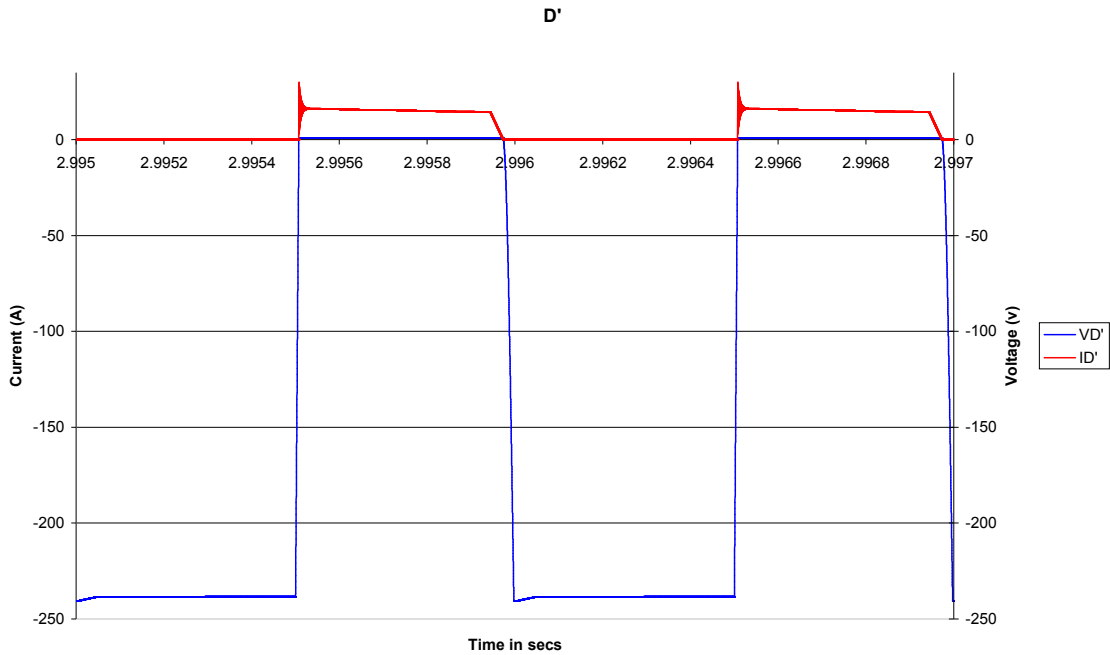
**Σχήμα 4.251** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βασικού MOSFET M1,  $d=50\%$ , load 25%



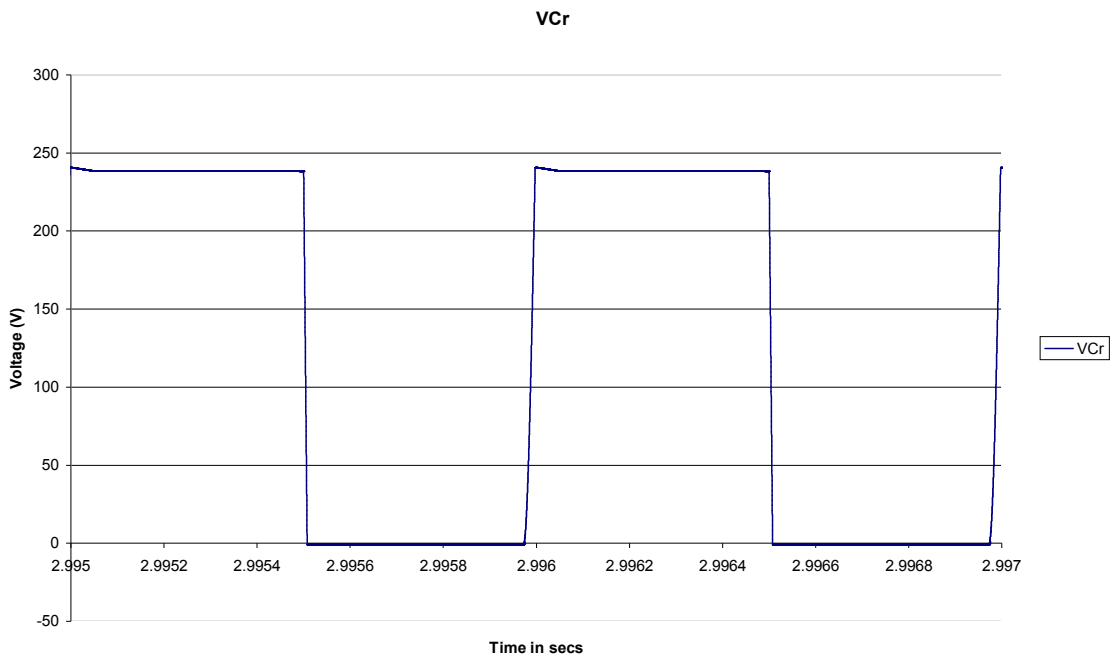
**Σχήμα 4.252** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βοηθητικού MOSFET M1,  $d=50\%$ , load 25%



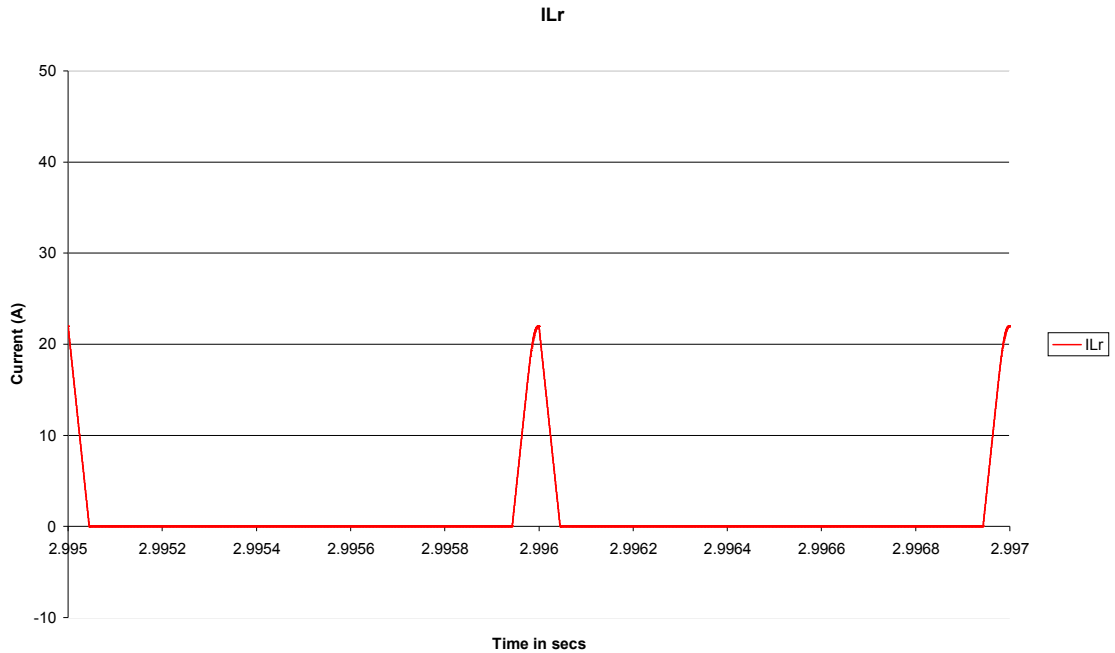
Παρατηρούμε την επίτευξη της μετάβασης υπό μηδενική τάση στον κύριο διακόπτη ενώ στον βοηθητικό παρατηρούμε πως διαρρέεται από ένα μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό του ρεύματος λειτουργίας.



Σχήμα 4.253 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα της διόδου D' M1, d=50%, load 25%



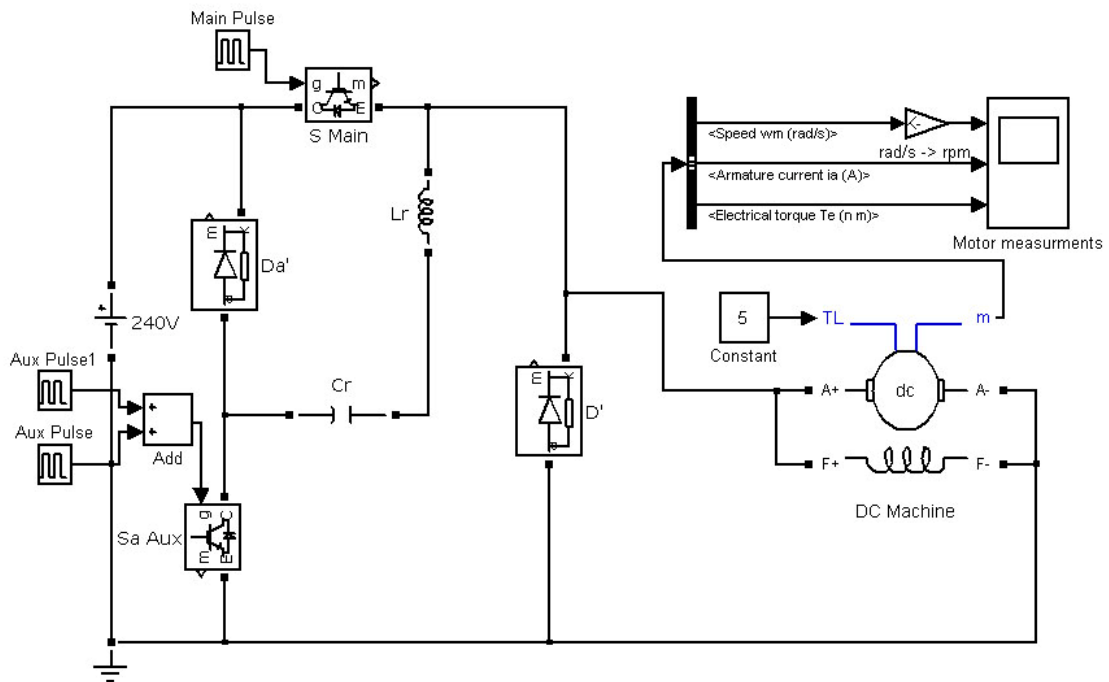
Σχήμα 4.254 Κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή M1, d=50%, load 25%



**Σχήμα 4.255** Κυματομορφή ρεύματος του πηνίου  $M1$ ,  $d=50\%$ ,  $load\ 25\%$

Από τις παραπάνω κυματομορφές μπορούμε να παρατηρήσουμε πως συνεργάζονται η δίοδος, το πηνίο και ο πυκνωτής, για την πραγματοποίηση της μετάβασης του κύριου διακόπτη υπό μηδενική τάση στα άκρα του, όπως περιγράφεται και στο θεωρητικό μέρος.

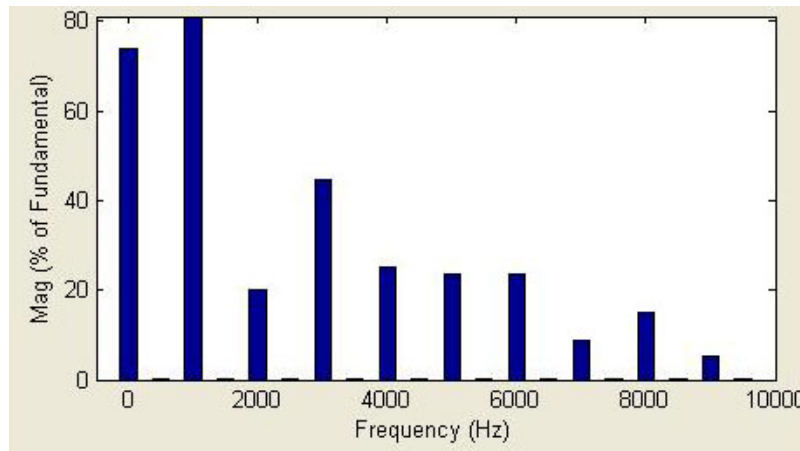
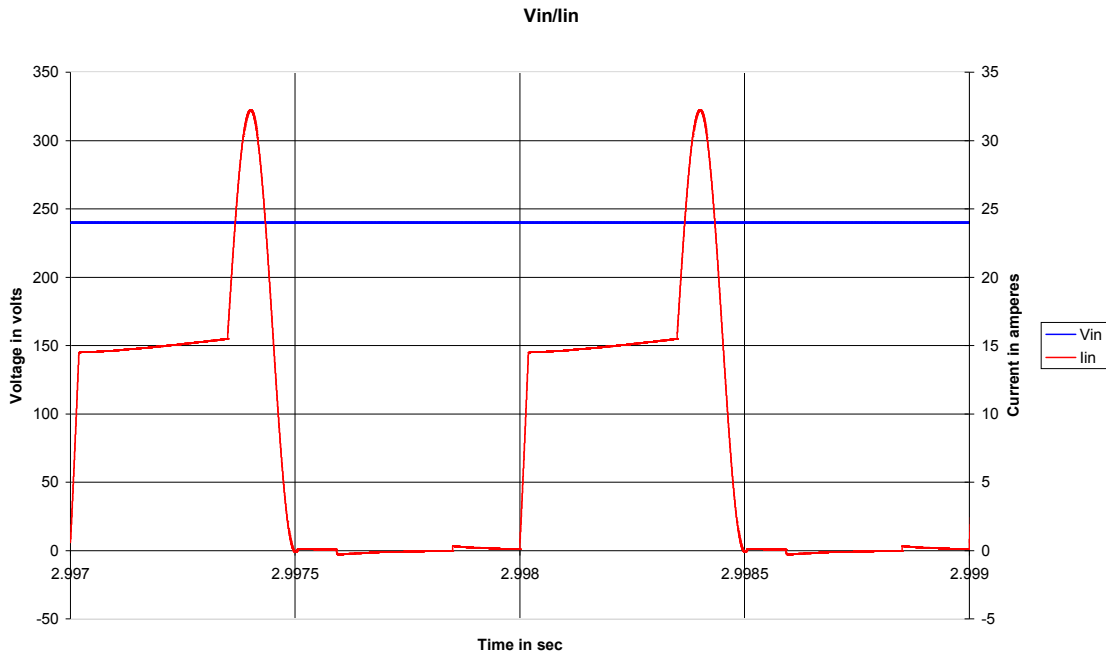
**4.2.7 Καταμητής (chopper) δύο τεταρτημορίων ZCT**



**Σχήμα 4.256** Διάγραμμα Καταμητή (chopper) 2 τεταρτημορίων ZVT

Πραγματοποιήσαμε το παραπάνω διαγράμματος καταμητή δύο τεταρτημορίων ZCT, κάνοντας χρήση ημιαγωγικών διακοπών IGBT σε συχνότητα λειτουργίας 1KHz και θα παρουσιαστεί η προσομοίωσή του κατά το πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας.

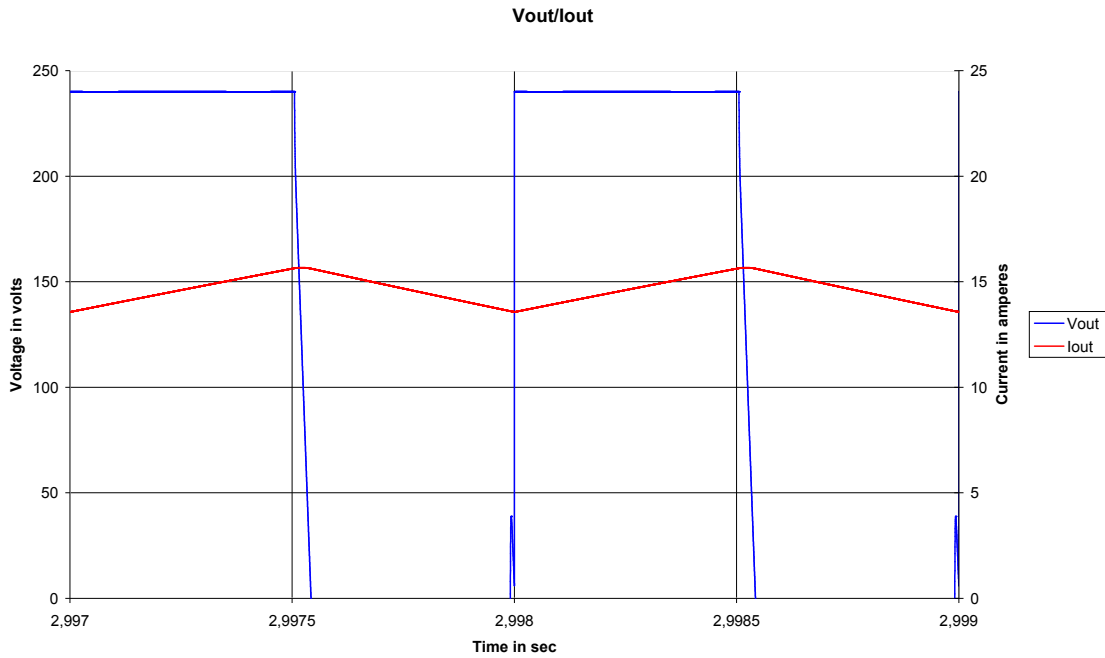
**Καταμητής δύο τεταρτημορίων ZCT, κινητήρας M1, duty cycle 50%, ονομαστικό φορτίο 25%,**



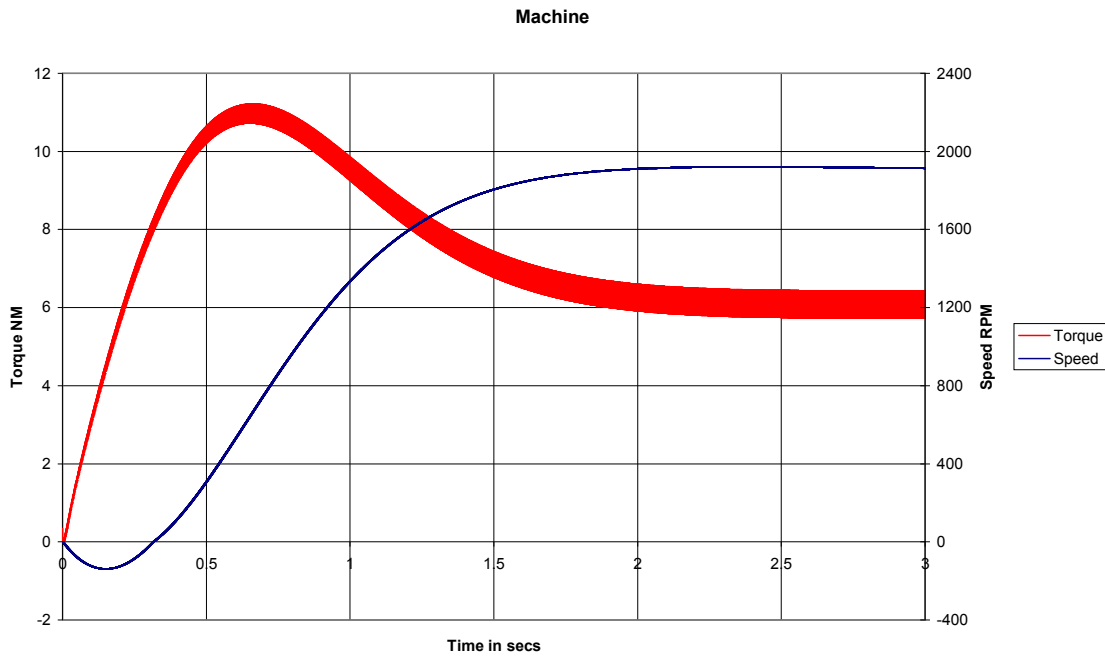
**Σχήμα 4.257** α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 25% β) Ανάλυση FFT του ρεύματος εισόδου M1,  $d=50\%$ , load 25%

Παρατηρούμε την διαφοροποίηση της κυματομορφής του ρεύματος εισόδου στο κύκλωμά μας λόγω του φίλτρου συντονισμού, όπως και στο προηγούμενο(ZVT), σε σύγκριση με τον

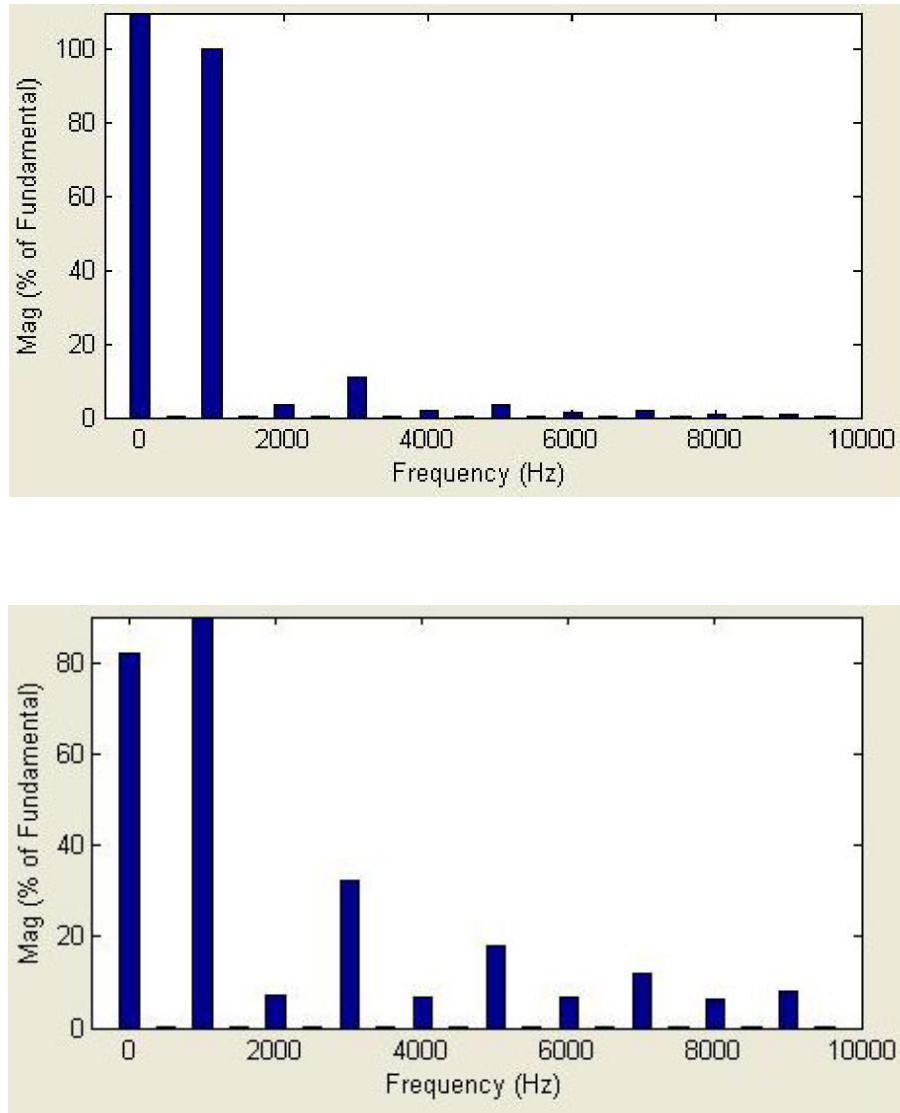
κλασικό καταμητή δύο τεταρτημορίων. Οι αρμονικές δείχνουν περισσότερες και αυξημένες από αυτές του αντίστοιχου καταμητή.



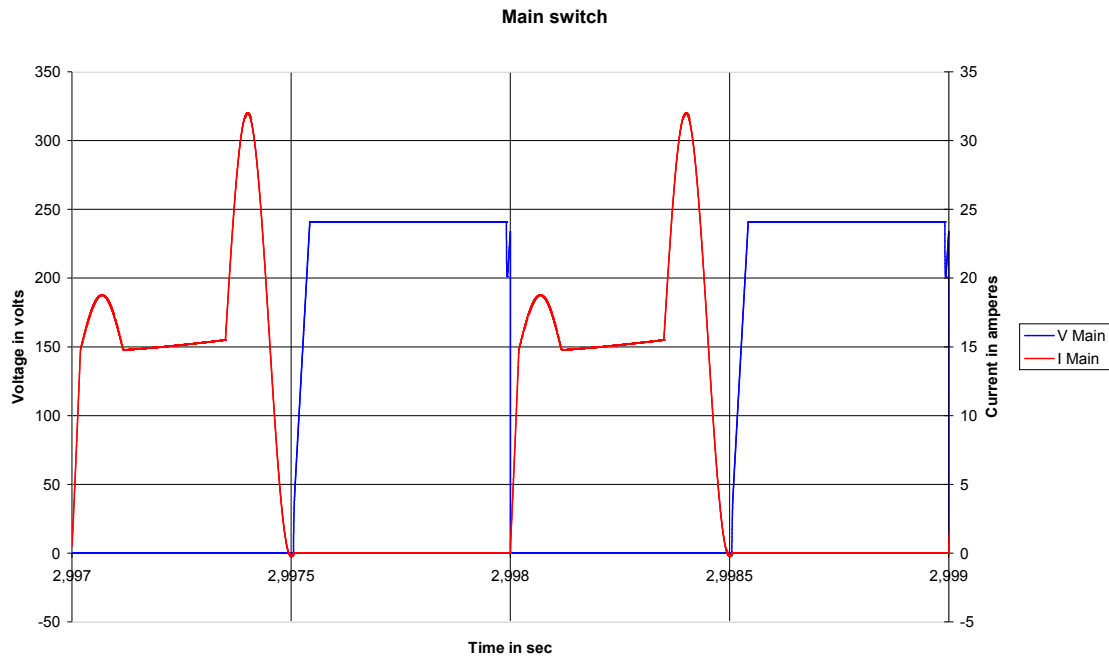
Σχήμα 4.258 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου M1,  $d=50\%$ , load 25%



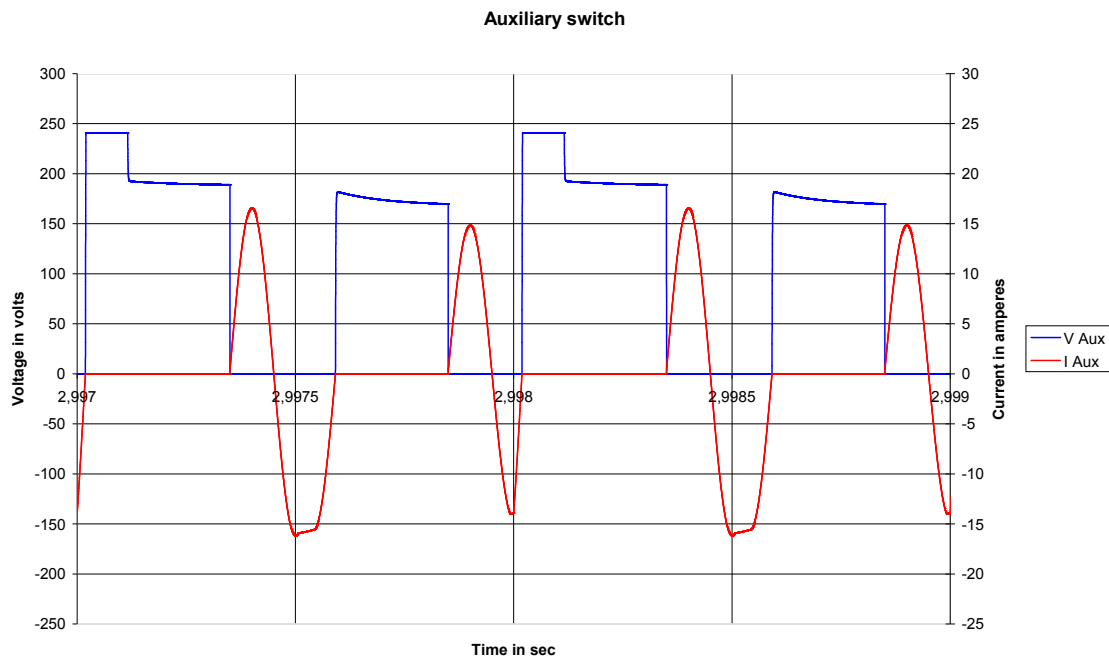
Σχήμα 4.259 Κυματομορφές ροπής και ταχύτητας κινητήρα M1,  $d=50\%$ , load 25%



**Σχήμα 4.260** α) Ανάλυση FFT του ρεύματος εξόδου M1, d=50%, load 25% β) Ανάλυση FFT της τάσης εξόδου M1, d=50%, load 25%

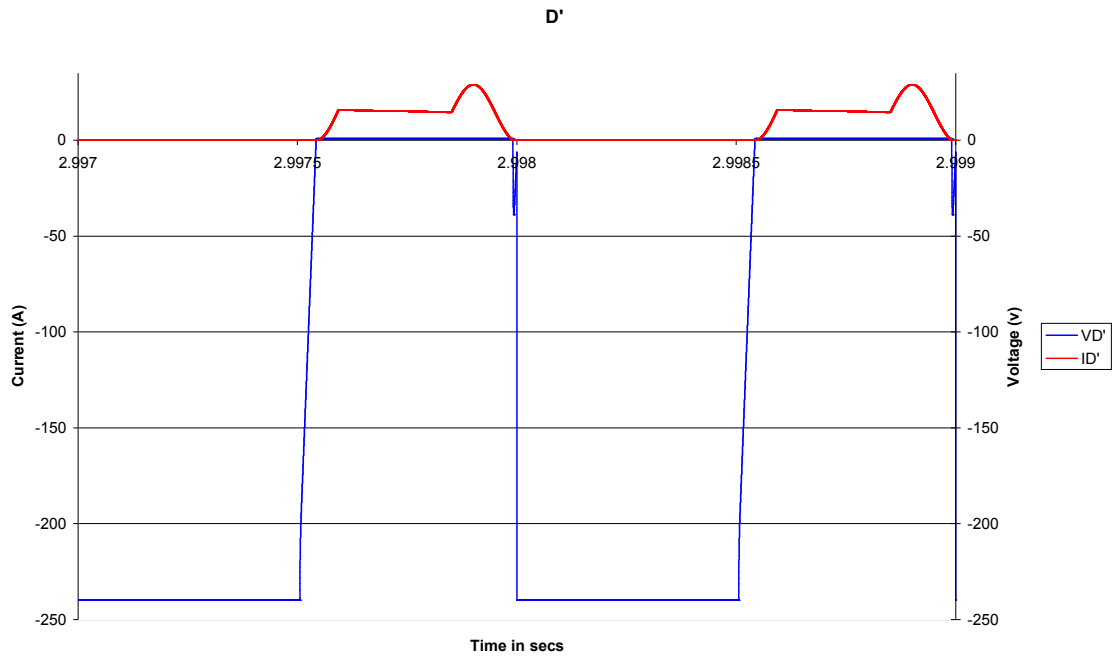


Σχήμα 4.261 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βασικού IGBT M1,  $d=50\%$ , load 25%

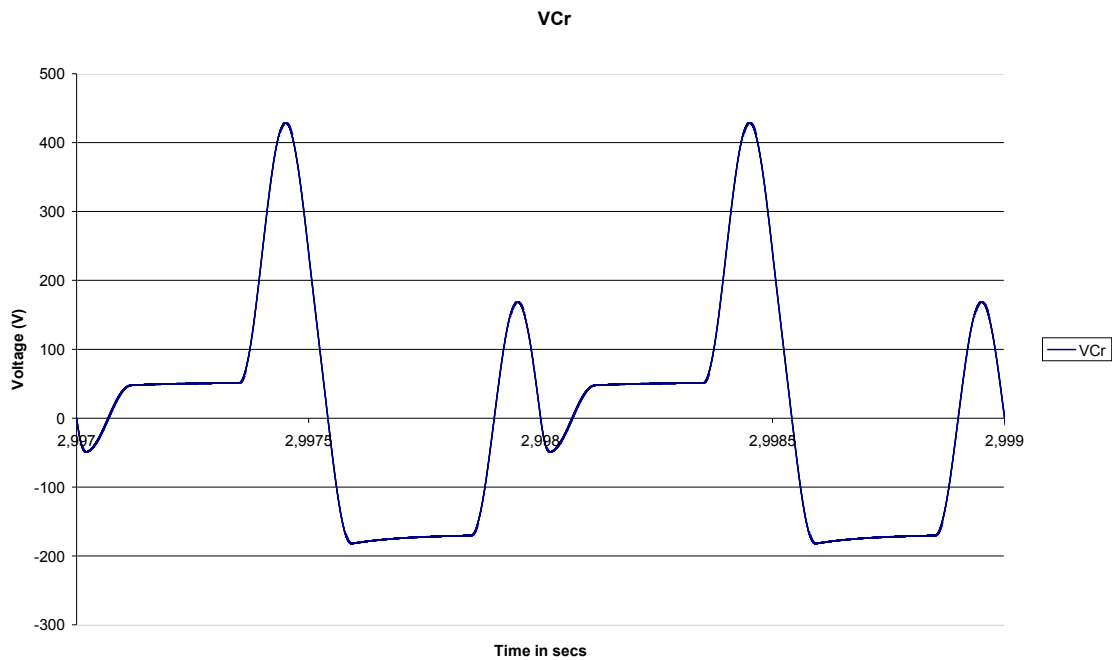


Σχήμα 4.262 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα του βοηθητικού IGBT M1,  $d=50\%$ , load 25%

Από τις παραπάνω κυματομορφές μπορούμε να διακρίνουμε την μετάβαση και των δύο διακοπών, κύριου και βοηθητικού, υπό συνθήκες μηδενικού ρεύματος στα άκρα τους.

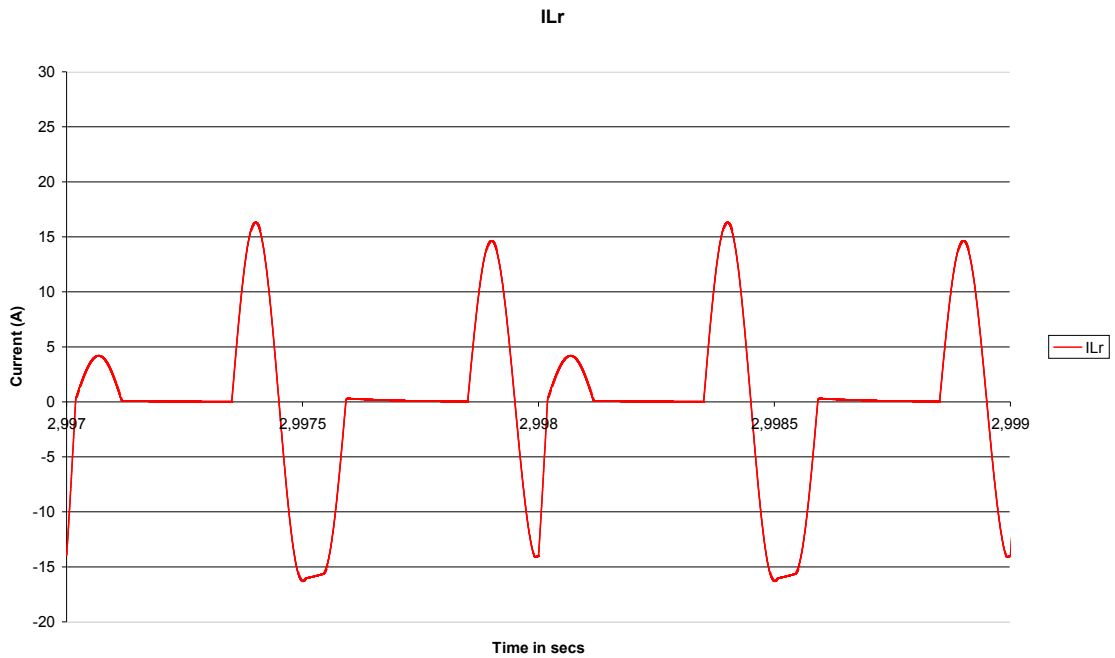


**Σχήμα 4.263** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στα άκρα της διόδου  $D'$   $M1$ ,  $d=50\%$ , load 25%



**Σχήμα 4.264** Κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή  $M1$ ,  $d=50\%$ , load 25%





**Σχήμα 4.265** Κυματομορφή ρεύματος του πηνίου  $M1$ ,  $d=50\%$ ,  $load\ 25\%$

Παρουσιάζονται παραπάνω οι κοιματομορφές της διόδου, του πηνίου και του πυκνωτή. Μπορεί κανείς εύκολα να διακρίνει πως αυτά συνεργάζονται για την επίτευξη του μηδενικού ρεύματος στα άκρα των διακοπών αλλά και την ομοιότητα των κυματομορφών με τις αντίστοιχες θεωρητικές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης, ‘Εργαστηριακές ασκήσεις Ηλεκτρικής κίνησης’, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005
- [2] Στέφανος Ν. Μανιάς, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, Εκδόσεις Συμεών, 2000
- [3] Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης, ‘Εργαστηριακές ασκήσεις Ηλεκτρονικών Ισχύος’, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004
- [4] Σπυρίδωνος Ν. Βασιλακόπουλου, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές’, Ίδρυμα Ευγενίδου, 2006
- [5] Γαντζούδης Σωτήρης, Λαγουδάκος Μιχαήλ, Μπίνιαρης Αθανάσιος, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές’, ΟΕΔΒ
- [6] Κιοσκερίδης Ιορδάνης, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, ηλεκτρονικές σημειώσεις, <http://chaos.c4lab.el.teithe.gr/kioskeridis>
- [7] K. T. CHAU (1999), ‘A new two-quadrant zero-voltage transition converter for DC motor drives’, International Journal of Electronics, 86:2, 217-231
- [8] T. W. Ching & K. T. Chau (2001) ‘A new two-quadrant zero current transition converter for DC motor drives’, International Journal of Electronics, 88:6, 719-735
- [9] T. W. Ching, ‘Four-quadrant Zero-current-transition Converter-fed DC Motor Drives for Electric Propulsion’, Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 4, Num. 2, 2006
- [10] T. W. Ching, ‘Four-quadrant Zero-voltage-transition Converter-fed DC Motor Drives for Electric Propulsion’, Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 34, Num. 1, 2005
- [11] G.Ch. Ioannidis et al, “AC-DC & DC-DC Converters for DC Motor Drives, Review of basic topologies”, 2013 International Conference on Electronics and Communication Systems, July 16-19, 2013, Rhodes (Rodos) Island, Greece

**Πειραιάς**  
**Δεκέμβριος – 2013**