

---

# Ηλεκτρονικά Ισχύος

4η Άσκηση

---

Ζαφειράκης Κωνσταντίνος 2019030035  
Δούνης Λουκάς 2018030127  
Σταυρόπουλος Αλέξανδρος Ανδρέας 2019030109

Διδάσκων:  
Φώτιος Κανέλλος

Υπεύθυνος εργαστηρίου:  
Δήμητρα Κυριακού



HMMT  
Πολυτεχνείο Κρήτης  
Εαρινό εξάμηνο 2022-2023

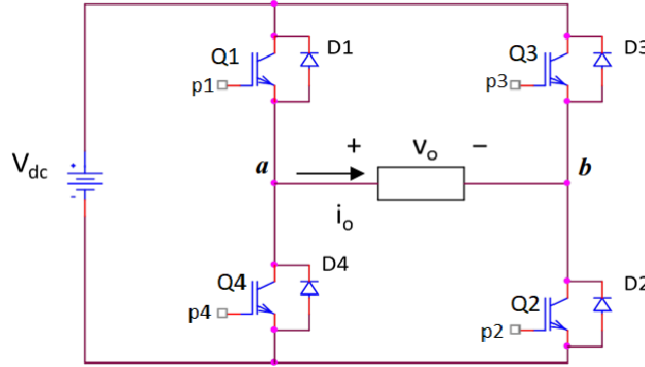
## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Περιγραφή Λειτουργίας Αντιστροφών</b>	<b>1</b>
1.1	Μονοφασικός Αντιστροφέας	1
1.1.1	Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού	1
1.1.2	Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM	1
1.2	Τριφασικός Αντιστροφέας	2
1.2.1	Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού	2
1.2.2	Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM	2
<b>2</b>	<b>Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού</b>	<b>3</b>
2.1	Κυματομορφές Κυκλώματος	3
2.2	Συντελεστής Ισχύος	3
	Συντελεστής Ισχύος	3
<b>3</b>	<b>Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM</b>	<b>4</b>
3.1	Κυματομορφές Κυκλώματος	4
3.2	Συντελεστής Ισχύος	7
3.3	Αρμονικές Τάσης Εξόδου	7
<b>4</b>	<b>Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Εξαπαλμικής Λειτουργίας</b>	<b>9</b>
4.1	Κυματομορφές Κυκλώματος	9
4.2	Συντελεστής Ισχύος	9
<b>5</b>	<b>Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM</b>	<b>10</b>
5.1	Κυματομορφές	10
5.2	Συντελεστής Ισχύος	10

# 1 Περιγραφή Λειτουργίας Αντιστροφέων

## 1.1 Μονοφασικός Αντιστροφέας

Ο μονοφασικός Αντιστροφέας αποτελεί μία συσκευή η οποία μετατρέπει DC τάση και ρεύμα σε AC. Το κύκλωμα κατασκευάζεται από τέσσερεις ελεγχόμενους διακόπτες και τέσσερεις διόδους συνδεδεμένες ως εξής:



### 1.1.1 Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού

### 1.1.2 Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM

Για την παραγωγή της AC τάσης και AC ρεύματος εξόδου, σε αυτή την περίπτωση, δημιουργούνται τετραγωνικοί παλμοί διαφορετικού εύρους μέσω των οποίων, ανάλογα με το εύρος τους, ελέγχεται το πλάτος της τάσης εξόδου.

Στην παραπάνω διάταξη τα transistor ενεργοποιούνται με συγκεκριμένο σειρά ώστε οι παλμοί ελέγχου να κατασκευάζουν την επιθυμητή τάση εξόδου, ενώ οι διόδους χρησιμοποιούνται για την ροή ρεύματος προς αντίθετη φορά από αυτή των ενεργοποιημένων transistor, λόγω της εναλλασσόμενης μορφής του ρεύματος.

Για την παραγωγή των παλμών ελέγχου, κατασκευάζεται το επιθυμητό ημιτονοειδές σήμα εξόδου καθώς και ένας τριγωνικός παλμός (Φέρον) πλάτους  $V_{dc}$ , συχνότητας ίση με την διακοπτική ( $m_f \cdot f$ ). Συγκρίνοντας το φέρον με το θετικό ημίτονο εξόδου προκύπτουν οι παλμοί ελέγχου των transistor  $Q_1, Q_4$  ενώ συγκρίνοντάς το με το αρνητικό προκύπτουν οι παλμοί ελέγχου των transistor  $Q_2, Q_3$ , όπως αυτοί φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Condition	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
$V_{ref} > V_{carrier}$	ON	-	-	OFF
$V_{ref} < V_{carrier}$	OFF	-	-	ON
$-V_{ref} > V_{carrier}$	-	OFF	ON	-
$-V_{ref} < V_{carrier}$	-	ON	OFF	-

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει η τιμή της τάσης στο κόμβο a και στον κόμβο b, εφόσον τα ενεργά transistor δρουν ως βραχυκύκλωμα. Μέσω των τάσεων  $V_a$  και  $V_b$  η τάση εξόδου στο φορτίο:

$$V_{out} = V_a - V_b \quad (1)$$

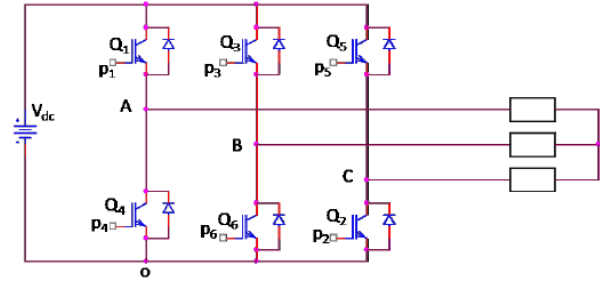
Τέλος, για την καλύτερη ανάλυση του συστήματος ορίζεται ο δείκτης διαμόρφωσης πλάτους ( $m_a$ ) και ο δείκτης διαμόρφωσης συχνότητας ( $m_f$ ). Ο  $m_a$  ορίζεται ως το πηλίκο μεταξύ του πλάτους του σήματος αναφοράς και του πλάτους του φέροντος και σύμφωνα με την θεωρία, για τιμές μικρότερες της μονάδας επηρεάζει το πλάτος της βασικής αρμονικής ως εξής:

$$V_1 = m_a \cdot V_{dc} \quad (2)$$

Αντίστοιχα, ο  $m_f$  ορίζεται ως το πηλίκο μεταξύ της συχνότητας του σήματος αναφοράς και της συχνότητας του φέροντος και σύμφωνα με την θεωρία, αυξάνοντας τον οι αρμονικές του σήματος μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες.

## 1.2 Τριφασικός Αντιστροφέας

Ο Τριφασικός Αντιστροφέας αποτελεί μία παραλλαγή του μονοφασικού, ο οποίος και πάλι μετατρέπει DC τάση και ρεύμα σε τριφασικό AC. Το κύκλωμα κατασκευάζεται από έξι ελεγχόμενους διακόπτες και έξι διόδους συνδεδεμένες ως εξής:



### 1.2.1 Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού

### 1.2.2 Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM

Σε αντίθεση με τον μονοφασικό, εφόσον υπάρχουν τρεις φάσεις, κατασκευάζονται τρία ημίτονα αναφοράς τα οποία συγκρίνονται με τον ίδιο τριγωνικό παλμό και ανάλογα ανάλογα το αποτέλεσμα της σύγκρισης, κατασκευάζονται οι παλμοί ελέγχου των transistor σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί:

Condition	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$
$V_{a\_sin} > shark\_tooth$	ON	-	-	-	-	-
$V_{a\_sin} < shark\_tooth$	-	-	-	ON	-	-
$V_{b\_sin} > shark\_tooth$	-	-	ON	-	-	-
$V_{b\_sin} < shark\_tooth$	-	-	-	-	-	ON
$V_{c\_sin} > shark\_tooth$	-	-	-	-	ON	-
$V_{c\_sin} < shark\_tooth$	-	ON	-	-	-	-

## 2 Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού

### 2.1 Κυματομορφές Κυκλώματος

### 2.2 Συντελεστής Ισχύος



(a) subcaption 1



(b) subcaption 1

Figure 1: Caption 1

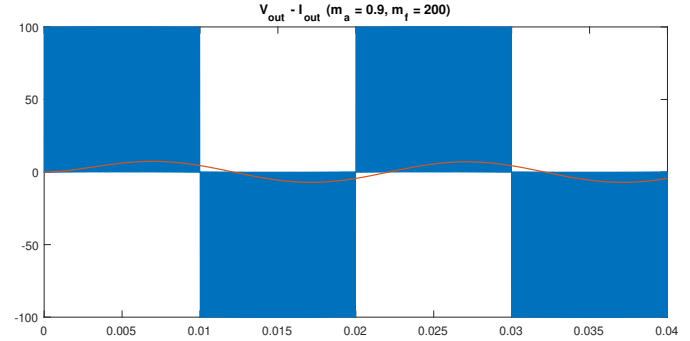
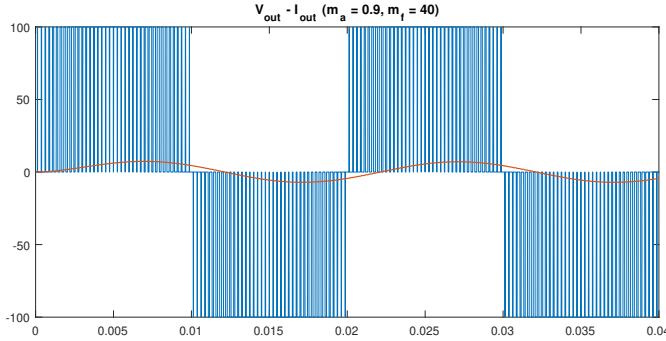
$$a \leq \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad (3)$$

### 3 Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM

Μοντελοποιήθηκε ένας μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με μονοπολική PWM τάσης εισόδου 100V και συχνότητα 50Hz στο οποίο εφαρμόζεται το ίδιο RL φορτίο ( $R = 10\Omega$ ,  $L = 0.025H$ ). Για την καλύτερη κατανόηση του, προσομοιώθηκε η λειτουργία του για  $m_a = 0.9$  και  $m_f = 40$  και  $m_f = 200$  και καταγράφηκαν οι ακόλουθες κυματομορφές.

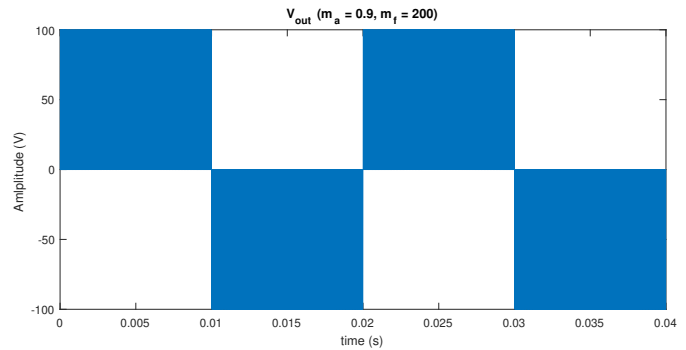
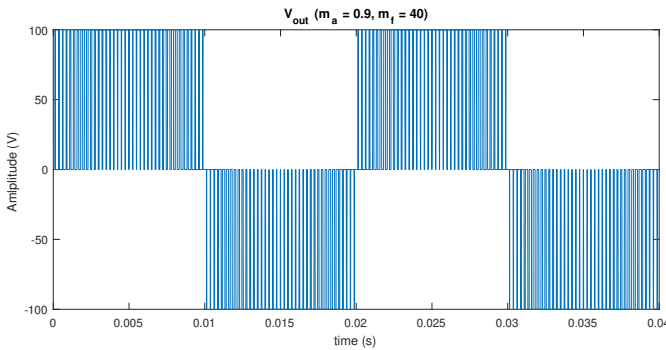
#### 3.1 Κυματομορφές Κυκλώματος

##### Τάση και Ρεύμα εξόδου



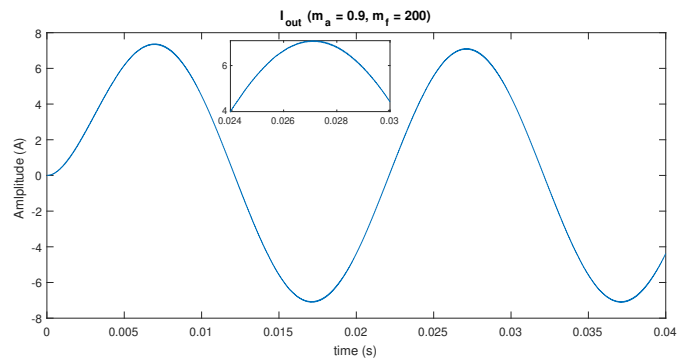
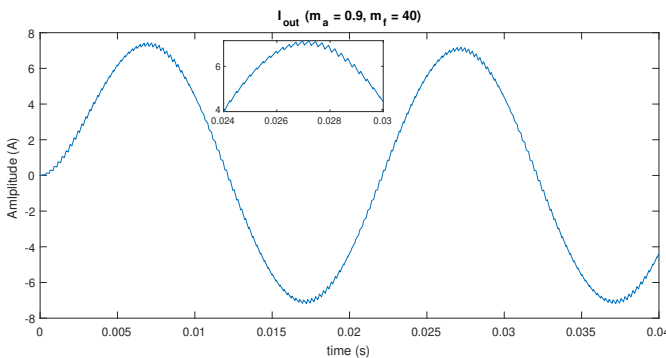
Σύμφωνα με τα παραπάνω figures, τόσο η τάση όσο και το ρεύμα εξόδου έχουν την αναμενόμενη μορφή εφόσον το σήμα της τάσης αποτελείται από διακριτούς παλμούς και το ρεύμα εξόδου παρουσιάζει ημιτονοειδή μορφή.

##### Τάση εξόδου



Όπως προαναφέρθηκε, η τάση εξόδου αποτελείται από διακριτούς παλμούς διαφορετικού εύρους. Αυξάνοντας τον  $m_f$  παρατηρείται ανάλογη αύξηση του αριθμού των παλμών τάσης. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη καθώς όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 1.1.2, αυξάνοντας τον  $m_f$  αυξάνεται ανάλογα η συχνότητα του τριγωνικού παλμού και σε συνδυασμό με την σταθερή συχνότητα του επιθυμητού ημιτόνου. Έτσι, εφόσον οι παλμοί προκύπτουν μέσω σύγκρισης των δύο σημάτων οι παλμοί αυξάνονται.

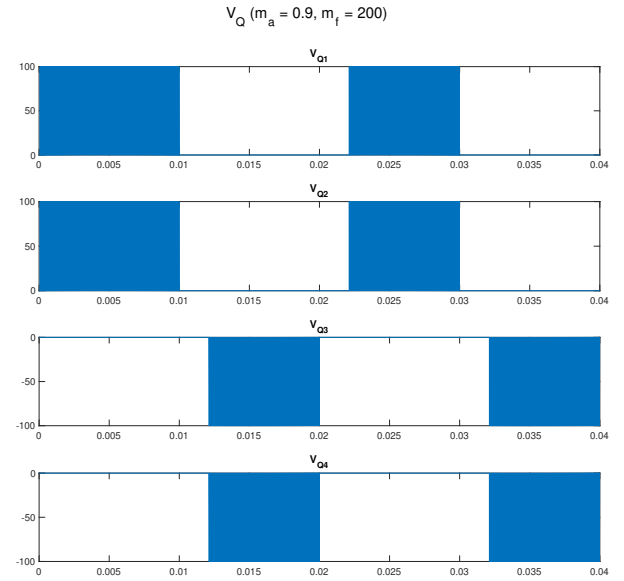
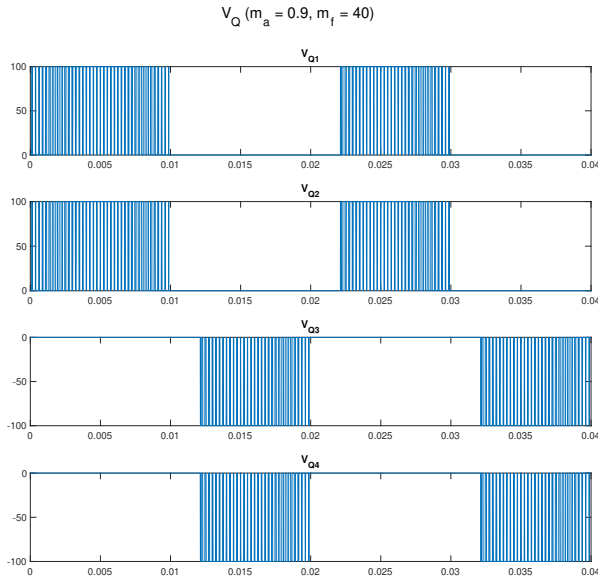
##### Ρεύμα εξόδου



Όσον αφορά το ρεύμα εξόδου παρουσιάζει την αναμενόμενη ημιτονοειδή μορφή. Αυξάνοντας το  $m_f$  παρατηρείται μείωση των διακυμάνσεων η οποία συνεπάγεται με μείωση των αρμονικών στο σήμα.

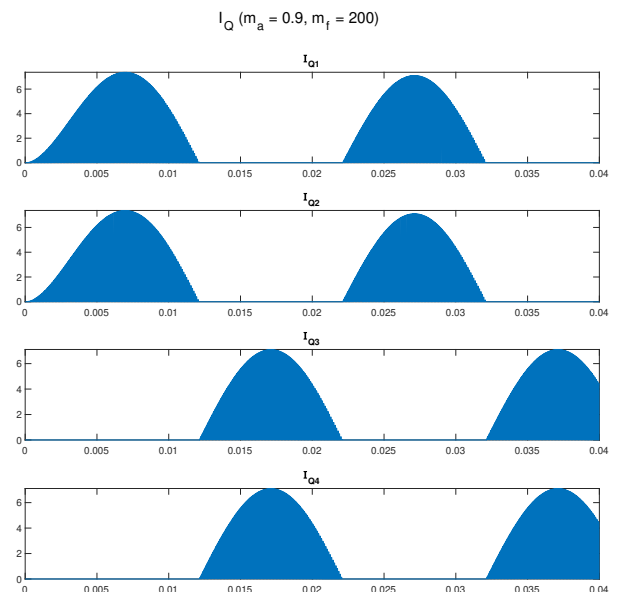
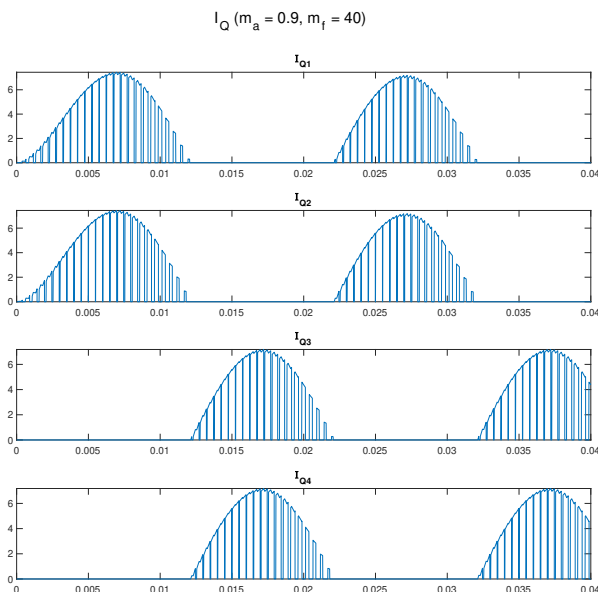
Η μείωση αυτή οφείλεται εν μέρη στο γεγονός πως το φορτίο είναι ωμικοεπαγωγικό και όπως είναι γνωστό, η σύνθετη αντίσταση του ισούται με  $R + j\omega L$ , οπότε αυξάνοντας τον  $m_f$ , αυξάνοντας δηλαδή την συχνότητα του φέροντος, αυξάνεται και η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, μειώνοντας έτσι την επίδραση των ανώτερων αρμονικών. Ο δεύτερος λόγος μείωσης των αρμονικών είναι πως αυξάνοντας τον  $m_f$  οι αρμονικές του σήματος εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερη επιρροή στο σήμα.

## Τάση Transistor



Μέσω της τάσης των transistor, παρατηρείται πως άγουν σε ζεύγη (1-2 και 3-4) όπως ήταν αναμενόμενο καθώς και πως αποτελείται από παλμούς διαφορετικού εύρους. Αυξάνοντας τον  $m_f$  παρατηρείται και πάλι πενταπλασιασμός των παλμών. Ακόμα, σε σχέση με τον **Μετατροπέα Quasi**, οι παλμοί έχουν τό ίδιο πλάτος τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές καθώς προκύπτουν ακολουθώντας την ίδια διαδικασία.

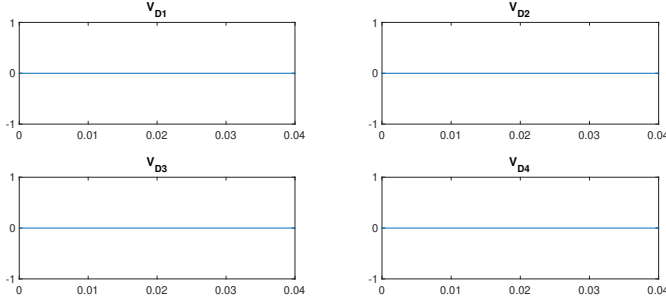
## Ρεύμα Transistor



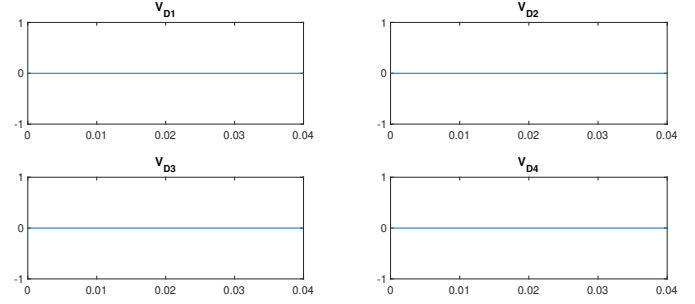
Παρατηρώντας τις κυματομορφές ρεύματος των transistor είναι και πάλι εμφανές πως άγουν σε ζεύγη ανάλογα την φάση λειτουργίας. Επίσης, ομοίως με την τάση, για πενταπλασιασμό του  $m_f$  πενταπλασιάζονται οι παλμοί.

## Τάση Διόδων

$V_D (m_a = 0.9, m_f = 40)$



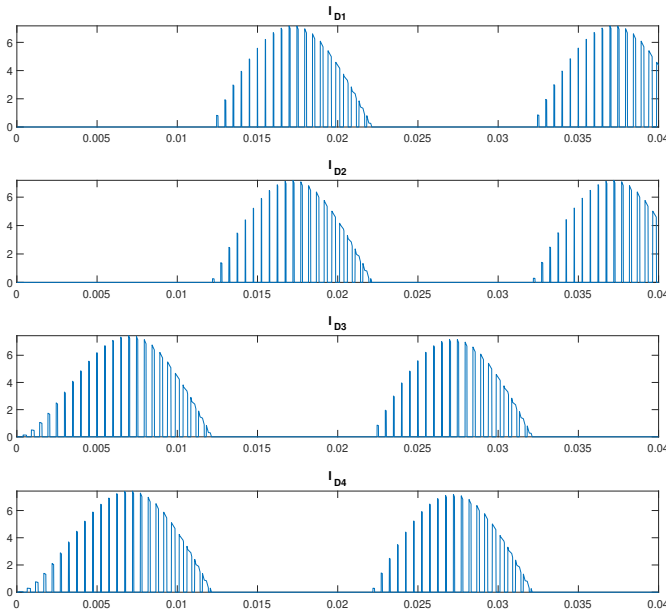
$V_D (m_a = 0.9, m_f = 200)$



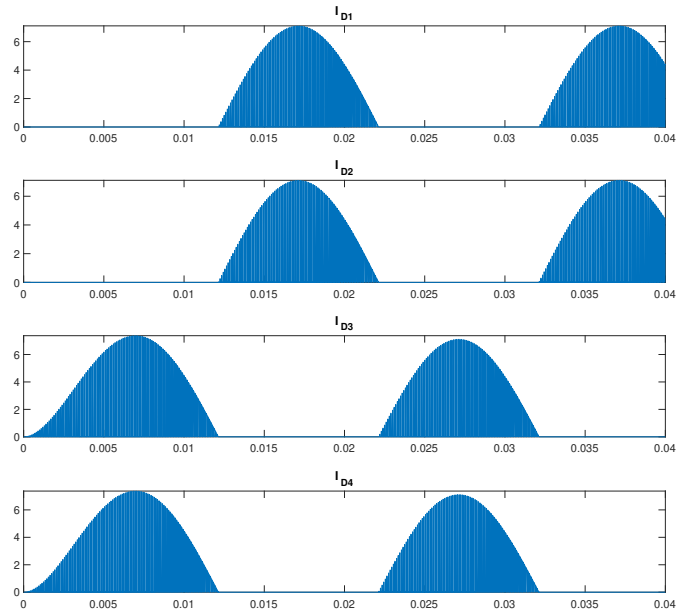
Ομοίως με τον **Quasi wave** (υποενοότητα ??), η τάση των διόδων είναι ίση με 0 καθώς οι διόδοι άγουν μόνο στις περιπτώσεις όπου η τάση εξόδου είναι ίση με 0.

## Ρεύμα Διόδων

$I_D (m_a = 0.9, m_f = 40)$



$I_D (m_a = 0.9, m_f = 200)$



Σε αντίθεση με την τάση των διόδων, το ρεύμα δεν είναι μηδενικό αλλά παρουσιάζει όμοια μορφή με το ρεύμα των transistor. Βασική διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων είναι πως όταν ρέει ρεύμα μέσω transistor, το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν και αντίστροφα ενώ και πάλι για αύξηση του  $m_f$ , αυξάνεται το πλήθος των παλμών.

## Ισχύς Εισόδου - Εξόδου

Για τον υπολογισμό της ισχύς απαιτείται γνώση του ρεύματος. Όσον αφορά την έξοδο του κυκλώματος, το ρεύμα είναι γνωστό ωστόσο όσον αφορά την είσοδο, το ρεύμα είναι απαραίτητο να βρεθεί.

Εφαρμόζοντας νόμο ρευμάτων του Kirchhoff, προκύπτει η εξής σχέση για το ρεύμα εισόδου  $I_{in}$ :

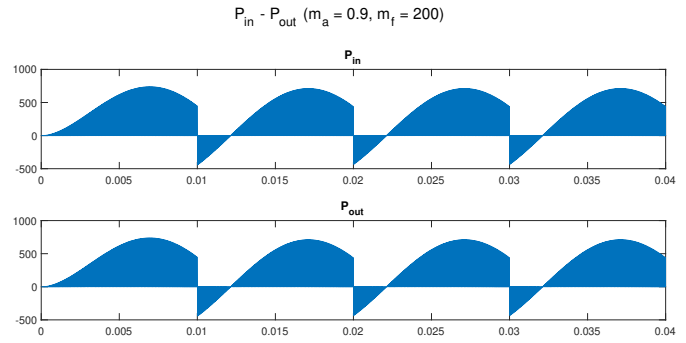
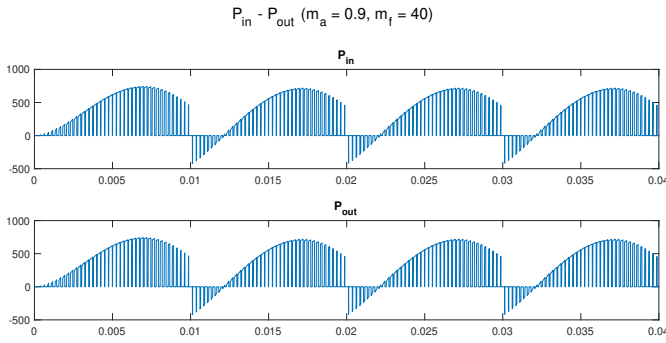
$$I_{in} - I_{Q1} + I_{D1} - I_{Q3} + I_{D3} = 0 \Rightarrow I_{in} = I_{Q1} - I_{D1} + I_{Q3} - I_{D3} \quad (4)$$

οπότε εφόσον η ισχύς υπολογίζεται ως το γινόμενο μεταξύ τάσης και ρεύματος, οι ισχύς προκύπτουν ως εξής:

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} = V_{dc} \cdot I_{in}$$

$$P_{in} = V_{out} \cdot I_{out}$$





Παρατηρώντας τις κυματομορφές ισχύος εισόδου εξόδου για τις δύο περιπτώσεις, είναι εμφανές και πάλι πως αυξάνοντας τον  $m_f$  το πλήθος των παλμών αυξάνεται. Ακόμα, συγκρίνοντας την ισχύ εισόδου με την ισχύ εξόδου κάθε περίπτωσης παρατηρείται πως είναι ακριβώς ίδιες, κάτι το οποίο οφείλεται στην παραδοχή πως οι δίοδοι και τα transistor θεωρούνται ιδανικά.

### 3.2 Συντελεστής Ισχύος

Σύμφωνα με την θεωρία ο υπολογισμός του συντελεστή ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{I_{out,rms}^2 \cdot R}{I_{out,rms} \cdot V_{out,rms}} = \frac{I_{out,rms} \cdot R}{V_{out,rms}} \text{ όπου } \begin{cases} I_{out,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{out}^2(t) dt} \\ V_{out,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{out}^2(t) dt} \end{cases}$$

Αντικαθιστώντας, προκύπτουν τιμές με πολύ μικρή διαφορά (0.6630 και 0.6633 αντίστοιχα για τις δύο περιπτώσεις) η οποία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

### 3.3 Αρμονικές Τάσης Εξόδου

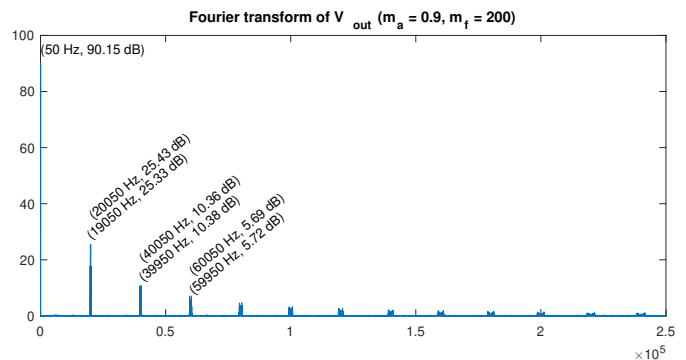
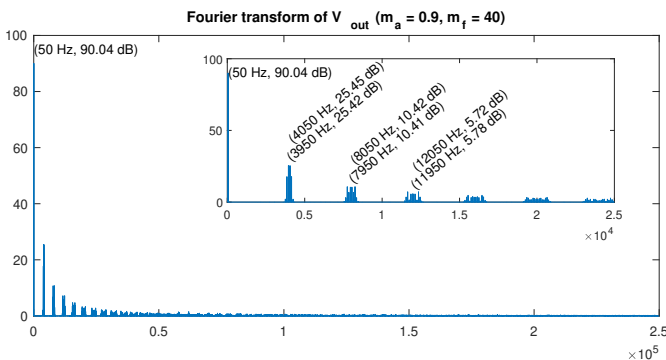
Είναι γνωστό από την θεωρία πως η αρμονικές πέραν της βασικής εμφανίζονται σε συχνότητες με:

$$f_n = f_s(n \cdot m_f \pm 1) \quad (5)$$

οπότε αναμένεται να εμφανίζονται αρμονικές στις εξής συχνότητες:

	$f_2$ (Hz)	$f_4$ (Hz)	$f_6$ (Hz)
$m_f = 40$	3950	7950	11950
	4050	8050	12050
$m_f = 200$	19950	39950	59950
	20050	40050	60050

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier στη σήμα της τάσης εξόδου, προκύπτουν οι ακόλουθες κυματομορφές:



Παρατηρώντας τις δύο κυματομορφές είναι εμφανές πως οι θεωρητικές τιμές εμφάνισης αρμονικών που εμφανίζονται στο πίνακα συμφωνούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, για πενταπλασιασμό του  $m_f$ , οι αρμονικές πέραν της βασικής εμφανίζονται σε πενταπλάσιες συχνότητες μειώνοντας έτσι την επίδραση του στο σήμα εξόδου. Η ιδιότητα αυτή συναρτίζει του ωμικοεπαγωγικού φορτίου το οποίο δρα ως low-pass φίλτρο έχουν ως αποτέλεσμα το σήμα ρεύματος να προσεγγίζει αρκετά αυτό του ημιτόνου, όπως είναι εμφανές παρατηρώντας την αντίστοιχη κυματομορφή.

## 4 Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Εξαπαλμικής Λειτουργίας

### 4.1 Κυματομορφές Κυκλώματος

### 4.2 Συντελεστής Ισχύος

## 5 Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM

### 5.1 Κυματομορφές

### 5.2 Συντελεστής Ισχύος