
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

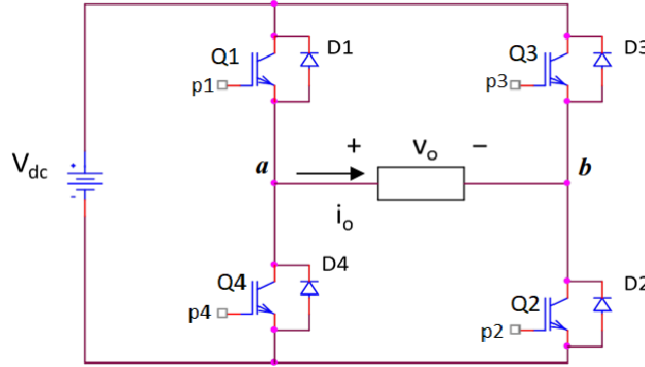
Πίνακας Περιεχομένων

1	Περιγραφή Λειτουργίας Αντιστροφών	1
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
2	Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Τετραγωνικού Παλμού	3
2.1	Κυματομορφές Κυκλώματος	3
2.2	Συντελεστής Ισχύος	3
	Συντελεστής Ισχύος	3
3	Μονοφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM	4
3.1	Κυματομορφές Κυκλώματος	4
3.2	Συντελεστής Ισχύος	7
3.3	Αρμονικές Τάσης Εξόδου	7
4	Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Εξαπαλμικής Λειτουργίας	9
4.1	Κυματομορφές Κυκλώματος	9
4.2	Συντελεστής Ισχύος	9
5	Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM	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:

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

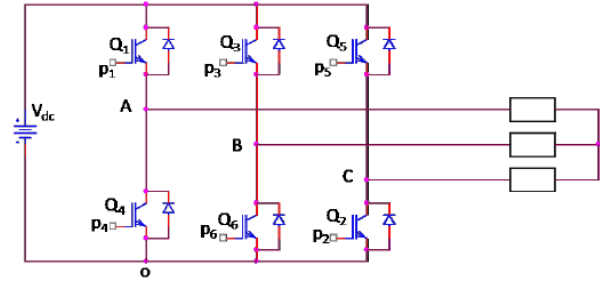
Τέλος, για την καλύτερη ανάλυση του συστήματος ορίζεται ο δείκτης διαμόρφωσης πλάτους (m_a) και ο δείκτης διαμόρφωσης συχνότητας (m_f). Ο m_a ορίζεται ως το πηλίκο μεταξύ του πλάτους του σήματος αναφοράς και του πλάτους του φέροντος και σύμφωνα με την θεωρία, για τιμές μικρότερες της μονάδας επηρεάζει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

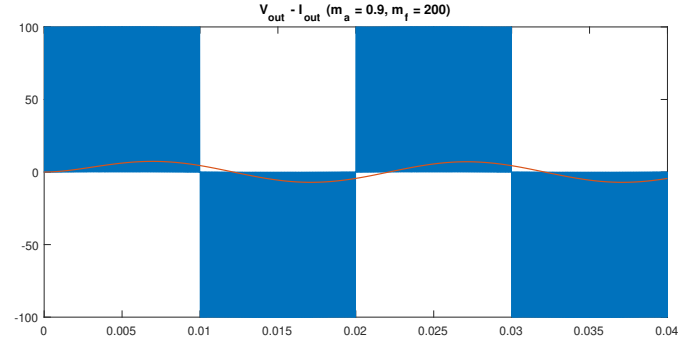
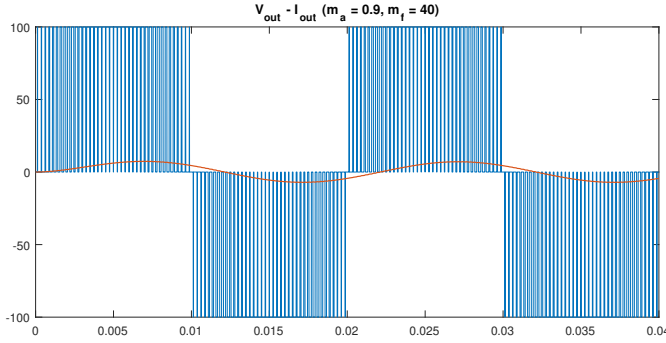
$$a \leq \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (3)$$

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.

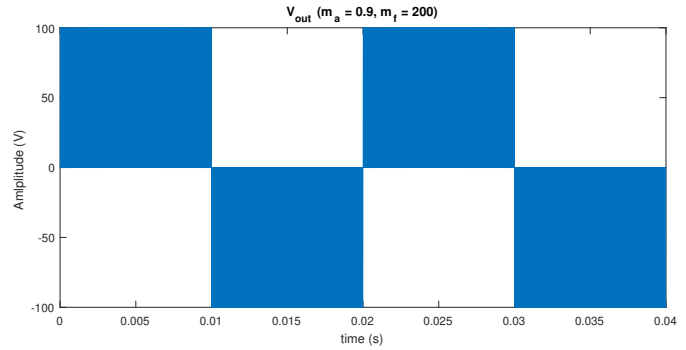
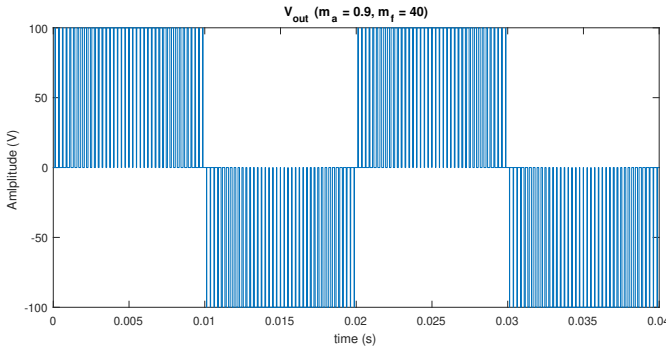
3.1 Κυματομορφές Κυκλώματος

Τάση και Ρεύμα εξόδου



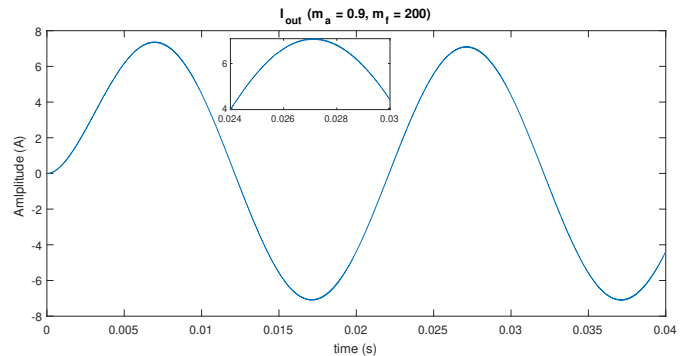
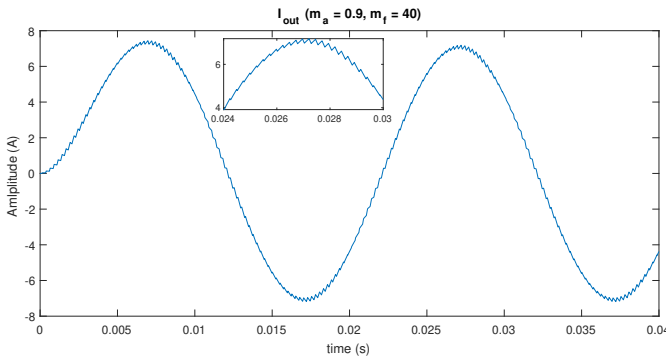
Σύμφωνα με τα παραπάνω figures, τόσο η τάση όσο και το ρεύμα εξόδου έχουν την αναμενόμενη μορφή εφόσον το σήμα της τάσης αποτελείται από διακριτούς παλμούς και το ρεύμα εξόδου παρουσιάζει ημιτονοειδή μορφή.

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.

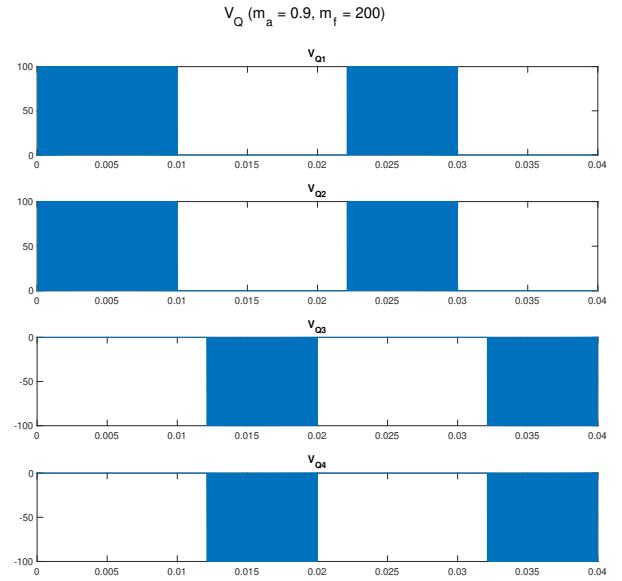
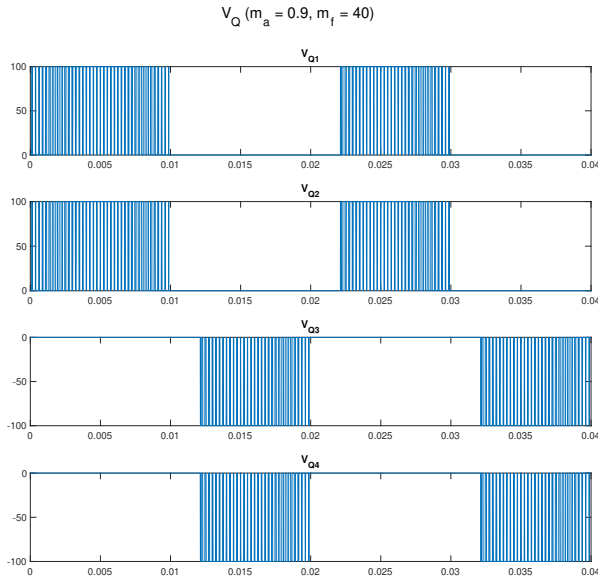
Ρεύμα εξόδου



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.

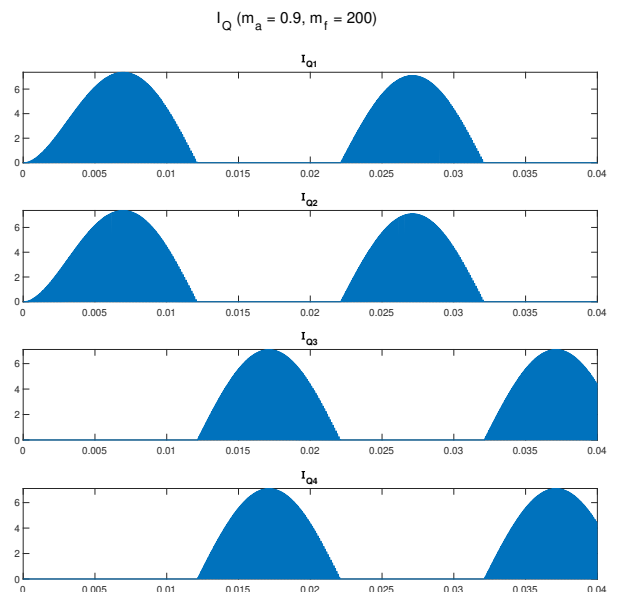
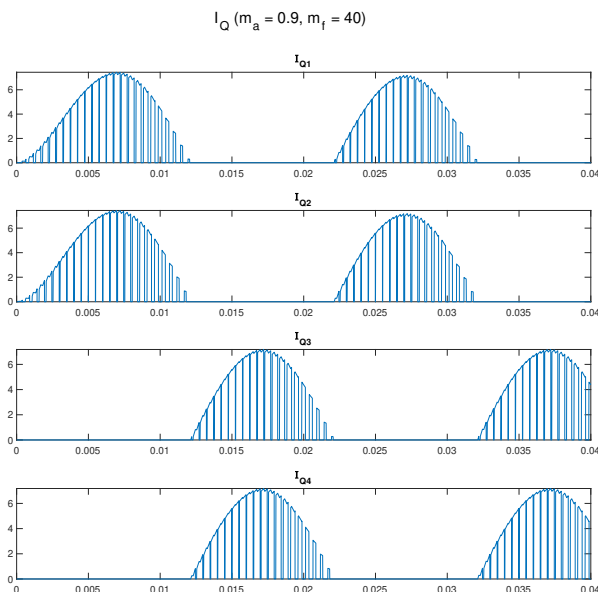
Η μείωση αυτή οφείλεται εν μέρη στο γεγονός πως το φορτίο είναι ωμικοεπαγωγικό και όπως είναι γνωστό, η σύνθετη αντίσταση του ισούται με $R + j\omega L$, οπότε αυξάνοντας τον m_f , αυξάνοντας δηλαδή την συχνότητα του φέροντος, αυξάνεται και η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, μειώνοντας έτσι την επίδραση 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.

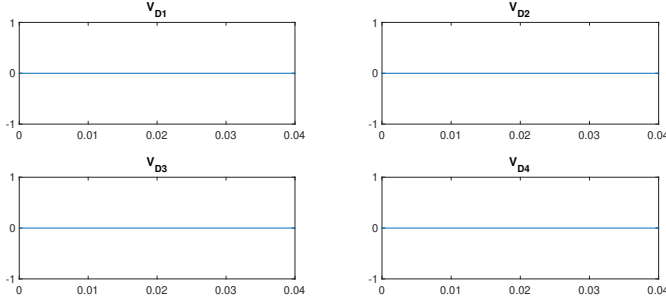
Ρεύμα Transistor



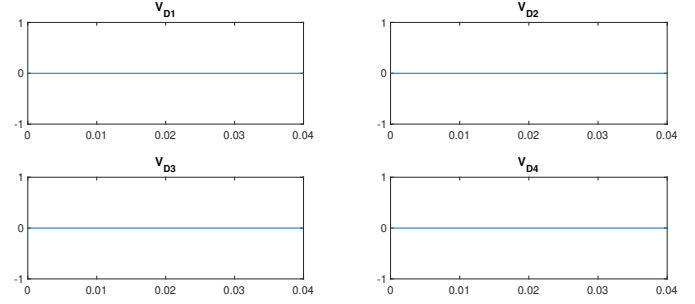
Παρατηρώντας τις κυματομορφές ρεύματος των transistor είναι και πάλι εμφανές πως άγουν σε ζεύγη ανάλογα την φάση λειτουργίας. Επίσης, ομοίως με την τάση, για πενταπλασιασμό του m_f πενταπλασιάζονται οι παλμοί.

Τάση Διόδων

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



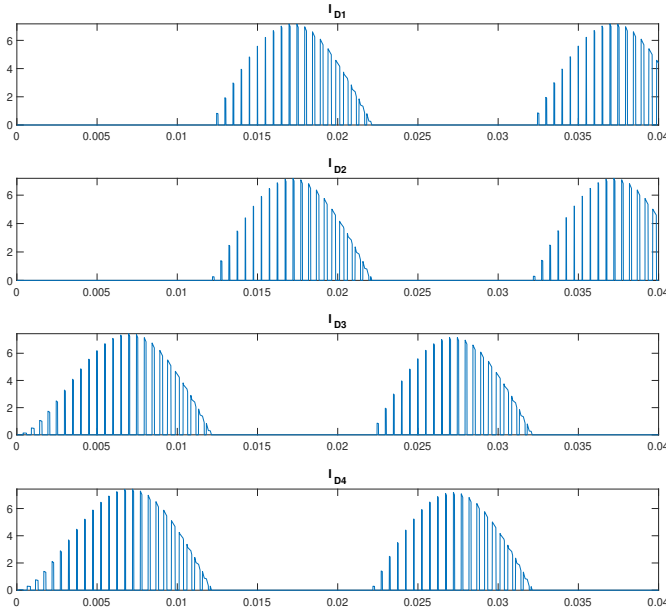
$V_D (m_a = 0.9, m_f = 200)$



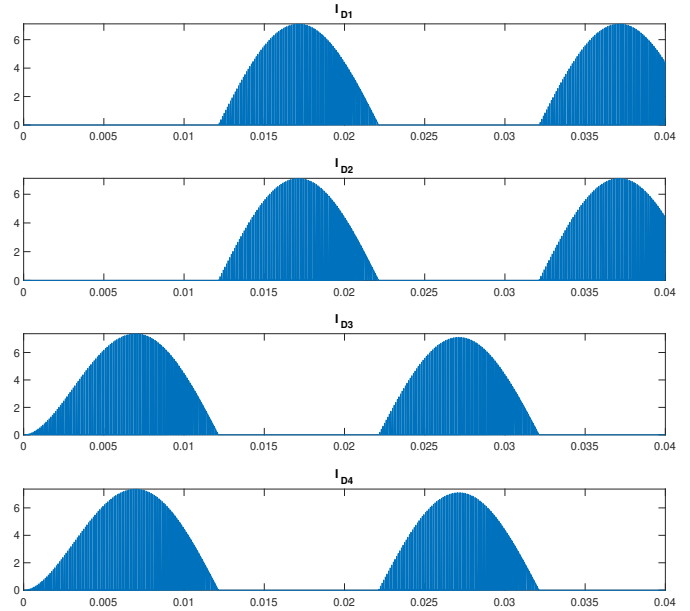
Ομοίως με τον **Quasi wave** (υποενοότητα ??), η τάση των διόδων είναι ίση με 0 καθώς οι διόδοι άγουν μόνο στις περιπτώσεις όπου η τάση εξόδου είναι ίση με 0.

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.

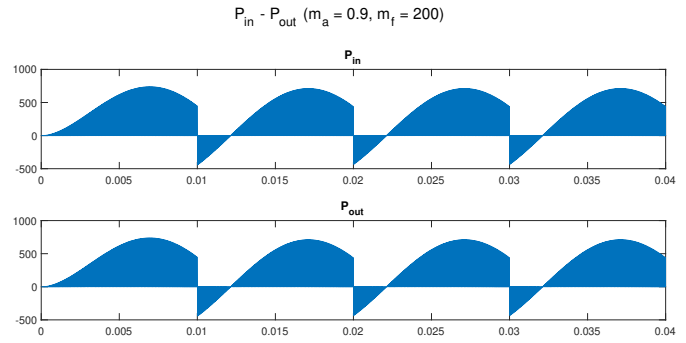
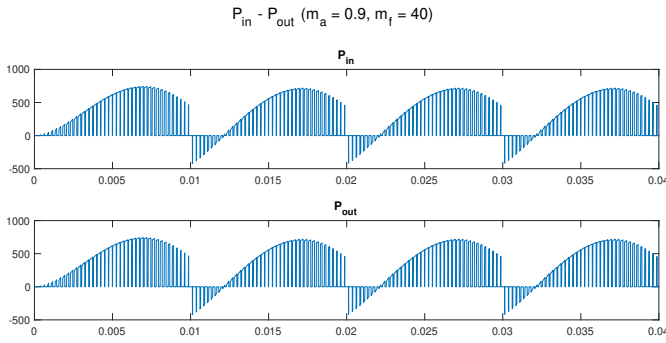
Εφαρμόζοντας νόμο ρευμάτων του Kirchhoff, προκύπτει η εξής σχέση για το ρεύμα εισόδου I_{in} :

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

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 διόδοι 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

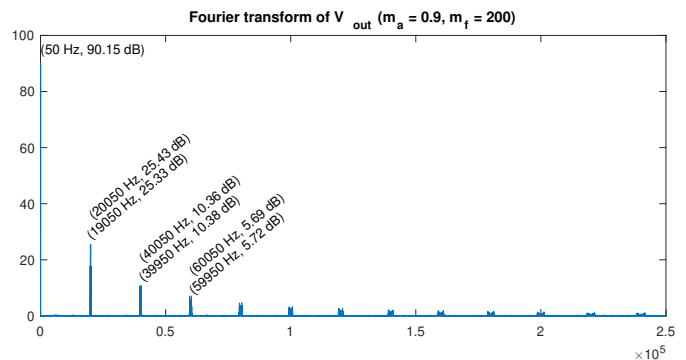
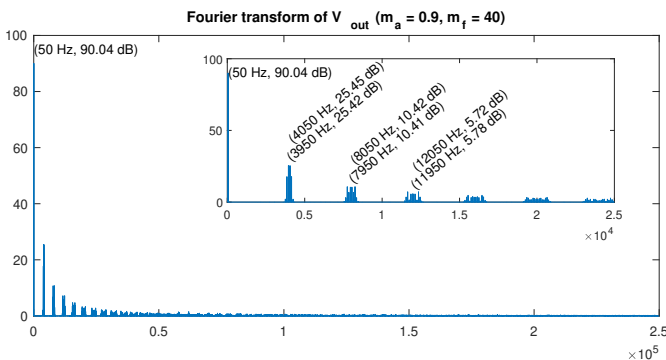
Είναι γνωστό από την θεωρία πως η αρμονικές πέραν της βασικής εμφανίζονται σε συχνότητες με:

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

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.

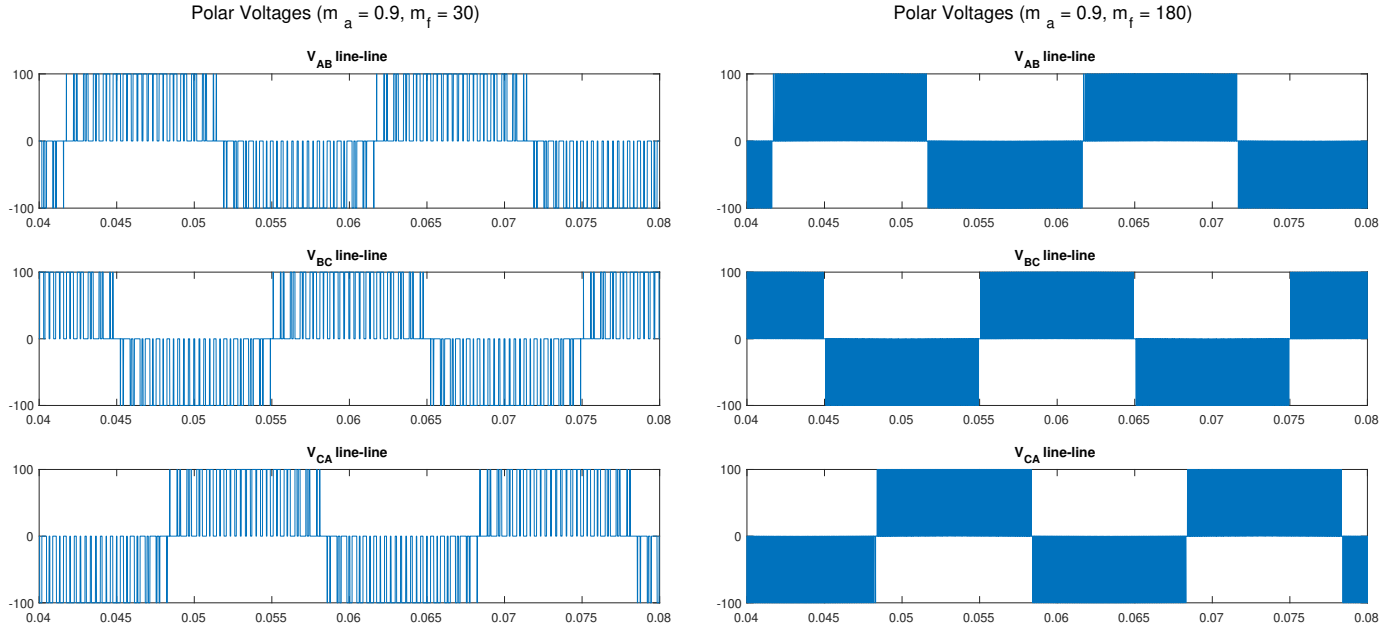
4 Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας Εξαπαλμικής Λειτουργίας

4.1 Κυματομορφές Κυκλώματος

4.2 Συντελεστής Ισχύος

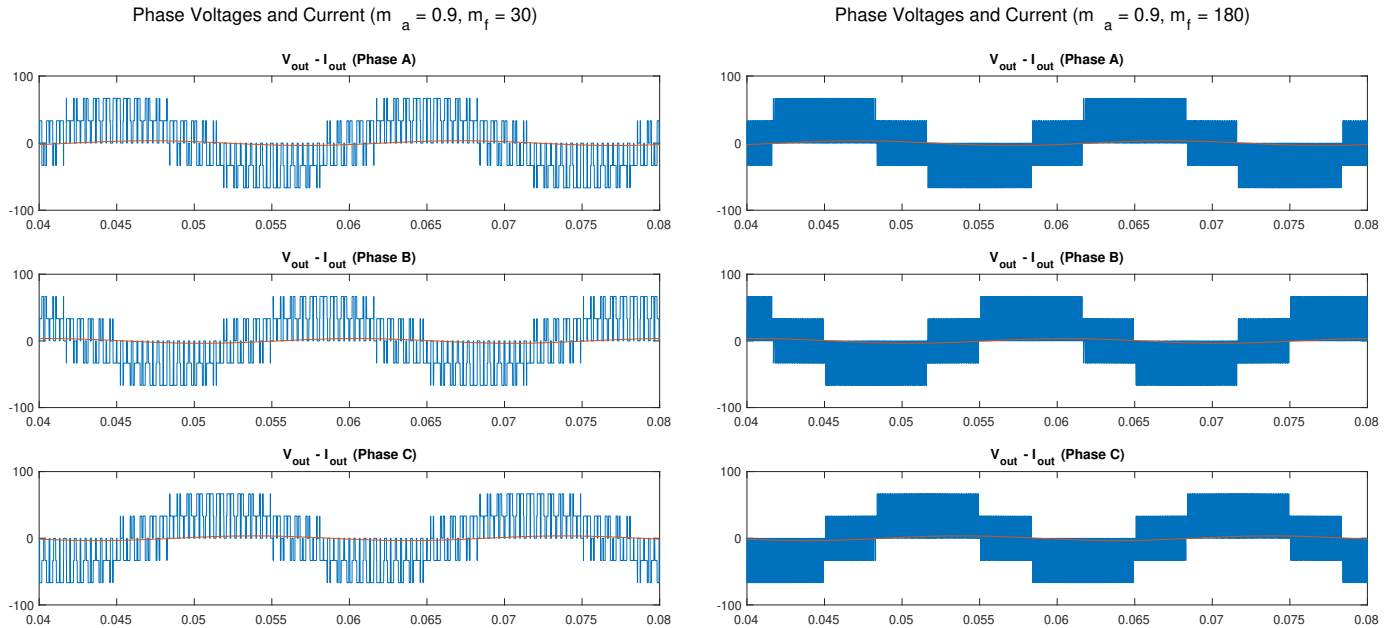
5 Τριφασικός Αντιστροφέας Γέφυρας με μονοπολική PWM

Πολικές τάσεις εξόδου αντιστροφέα



Όπως φαίνεται στα διαγράμματα από πάνω οι πολικές τάσεις εξόδου έχουν πλάτος V_{dc} όπως και η μονοφασική PWM

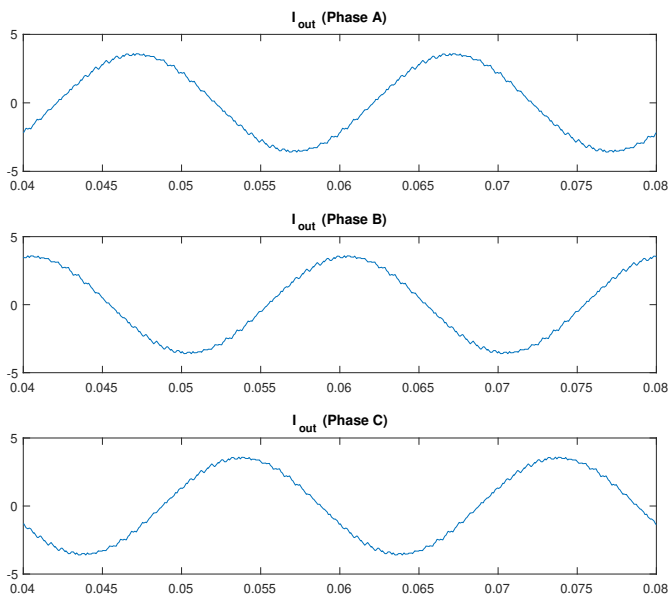
Τάση εξόδου αντιστροφέα



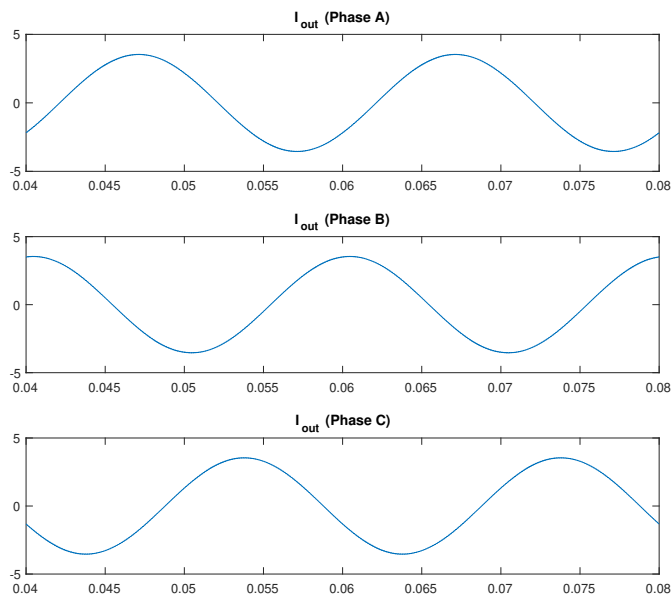
Παρατηρείται σύμφωνα με τα γραφήματα ότι η τάση εξόδου έχει το ίδιο πλάτος και σχήμα και στις δύο περιπτώσεις m_f . Όμως στην τάση εξόδου που αντιστοιχεί σε $m_f = 180$ παρατηρείται μεγάλη αύξηση της συχνότητας. Ο λόγος αυτής της αύξησης είναι γιατί η συχνότητα είναι γραμμικά ανάλογη του m_f έτσι όταν το m_f εξαπλασιάστηκε από 30 σε 180 το ίδιο έπαυε και η συχνότητα τάσης εξόδου.

[illegible]

Phase Current ($m_a = 0.9, m_f = 30$)

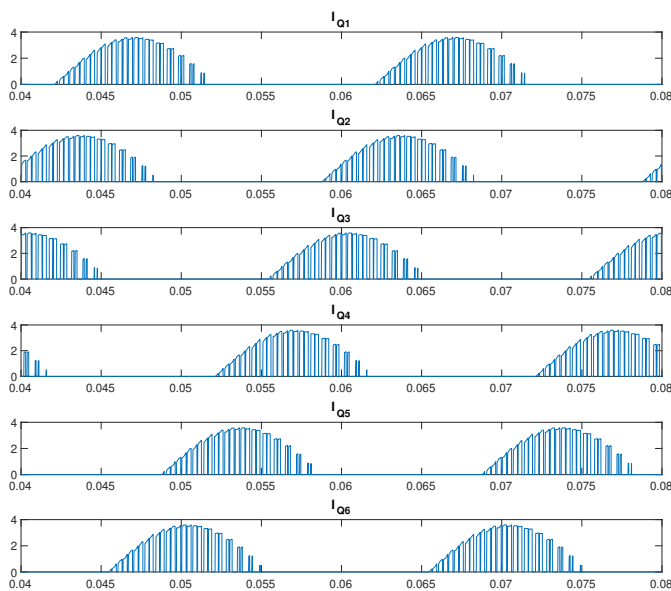


Phase Current ($m_a = 0.9, m_f = 180$)

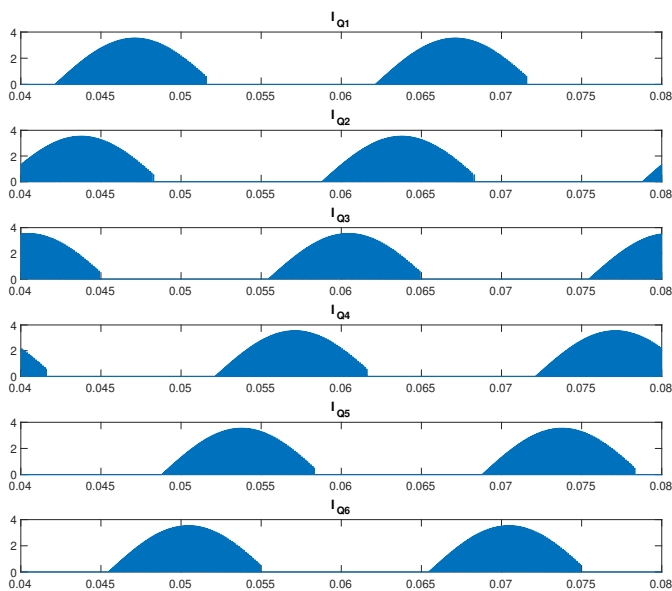


Ρεύμα διακοπτικών στοιχείων αααααααααααααααααααααααααααααα

Transistor Current ($m_a = 0.9, m_f = 30$)

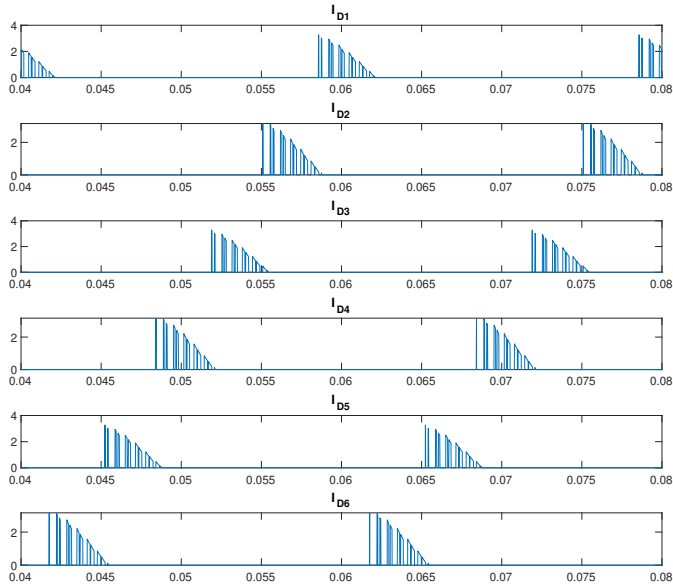


Transistor Current ($m_a = 0.9, m_f = 180$)

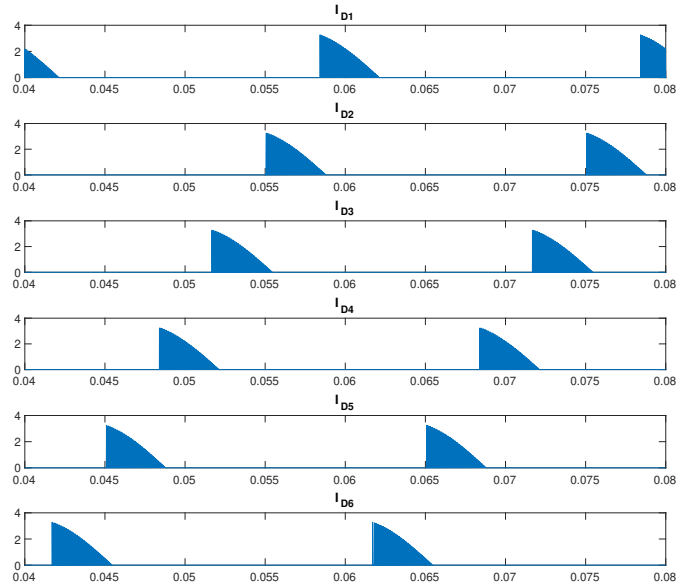


Τα διακοπτικά στοιχεία άγουν όπως έχει προαναφερθεί και ανεξαρτήτως τιμής m_f και το άγων ρεύμα έχει ίδιο πλάτος και σχήμα. Μοναδική διαφορά που παρατηρείται ανάλογα της τιμής m_f είναι η συχνότητα. Η συχνότητα είναι ανάλογη με την m_f και συνεπώς για όσο μεγαλύτερες τιμές της m_f τόσο μεγαλύτερη η συχνότητα ρεύματος των διακοπτικών στοιχείων.

Diode Current ($m_a = 0.9, m_f = 30$)



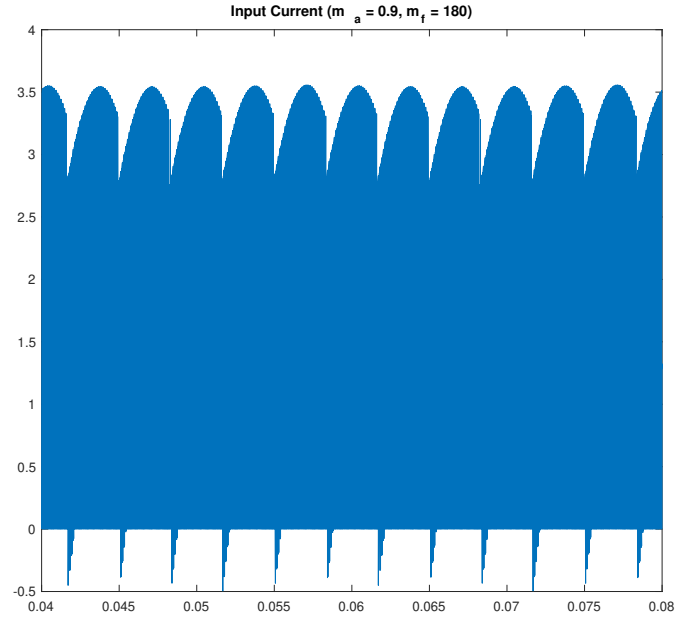
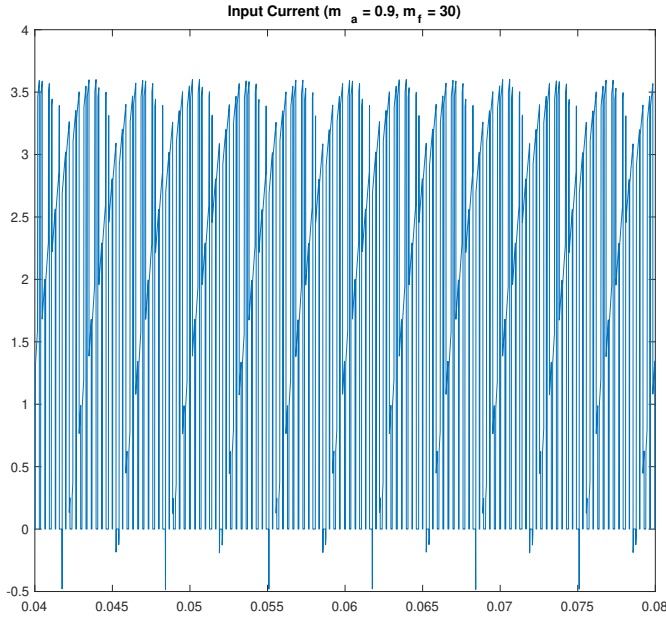
Diode Current ($m_a = 0.9, m_f = 180$)



Ρεύματα Εισόδου

Τα ρεύματα εισόδου υπολογιστήκαν μέσω του νόμου ρευμάτων Kirchhoff και προκύπτουν σύμφωνα με τον τύπο που φαίνεται παρακάτω

$$I_{in} = I_{Q5} + I_{Q3} + I_{Q1} - I_{D5} - I_{D3} - I_{D1}$$

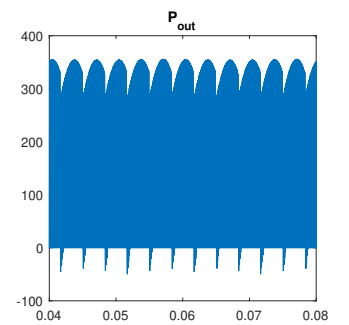
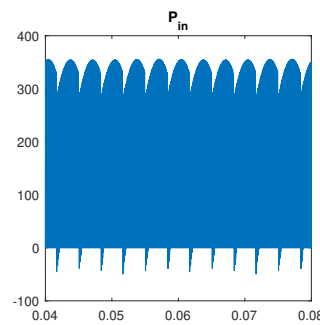
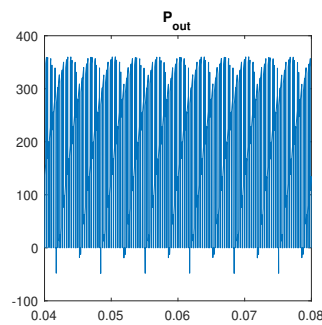
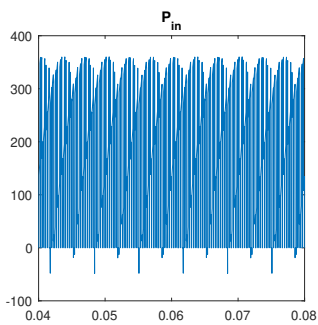


Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα το πλάτος είναι ελάχιστα μεγαλύτερο στην περίπτωση όπου $m_f = 30$ όμως η κύρια ειδοποιός διαφορά των ρευμάτων στις δυο περιπτώσεις είναι η συχνότητα η οποία στην περίπτωση όπου $m_f = 180$ είναι κατά πολύ μεγαλύτερη αυτής της περίπτωσης $m_f = 30$. Ο λόγος όπως και πριν είναι ότι η συχνότητα είναι ανάλογη με το m_f . Τέλος το πλάτος και στις δύο περιπτώσεις είναι κατά ελάχιστα μεγαλύτερο στην πρώτη περίοδο ενώ σταθεροποιείται στις περιόδους που έπονται.

Ισχύς

Η ισχύς εξόδου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο ενώ η ισχύς εισόδου είναι το γινόμενο τάσης και ρεύματος εισόδου

$$P_{out} = V_C \cdot I_C + V_B \cdot I_B + V_A \cdot I_A$$



Η ισχύς εισόδου και εξόδου και για τις δύο περιπτώσεις m_f είναι ίδια λόγω της αρχής διατήρησης ενέργειας. Σημειώνεται ακόμη ότι η μορφή της γραφικής της ισχύς είναι ίδια με την μορφή της γραφικής του ρεύματος για την έκαστη περίπτωση και αφού η ισχύς είναι το γινόμενο ρεύματος και τάσης το πλάτος της ισχύς είναι μεγαλύτερο από αυτό του ρεύματος. Ακόμη προφανώς η συχνότητα των ισχύων με $m_f = 180$ είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα των ισχύων με $m_f = 30$ καθώς όπως έχει προαναφερθεί η συχνότητα είναι ανάλογη της m_f .

Αρμονικές

Οι αρμονικές εκτός της βασικής αρμονικής βρίσκονται στα σημεία $2 \cdot k \cdot m_f \cdot f_1$, όπου k θετικός ακέραιος αριθμός και f_1 η τιμή της πρώτης αρμονικής $f_1 = 50\text{Hz}$

Συνεπώς για $m_f = 30$ οι αρμονικές εκτός της βασικής θα βρίσκονται στα σημεία $2 \cdot k \cdot m_f \cdot f_1 = 2 \cdot k \cdot 30 \cdot 50 = 3000k$
Αυτά είναι τα σημεία 3000Hz, 6000Hz, 9000Hz κτλ

Ομοίως για $m_f = 180$ οι αρμονικές εκτός της βασικής θα βρίσκονται στα σημεία $2 \cdot k \cdot m_f \cdot f_1 = 2 \cdot k \cdot 180 \cdot 50 = 9000k$
Αυτά είναι τα σημεία 9000Hz, 18000Hz, 27000Hz κτλ

Συντελεστής ισχύος

Η τιμή του συντελεστή Ισχύος προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{R \cdot (I_{a,rms}^2 + I_{b,rms}^2 + I_{c,rms}^2)}{V_{C,rms} \cdot I_{c,rms} + V_{B,rms} \cdot I_{b,rms} + V_{A,rms} \cdot I_{a,rms}}$$

Για να γίνει υπολογισμός σε μια σταθερή κατάσταση επιλέχθηκε αυθαίρετα η 5η περίοδος(?????? ALAZEI ANALOGA ME TON KODIKA) και σε με αυτή υπολογίστηκε ο συντελεστής ισχύος για τις δύο περιπτώσεις των α ως εξής:

$$PF = \begin{cases} 0.6155 & , m_a = 0.9m_f = 30 \\ 0.6154 & , m_a = 0.9m_f = 180 \end{cases}$$

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ισχύος για $m_f = 30$ είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από τον συντελεστή για $m_f = 180$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα και η τάση έχουν μεγαλύτερο πλάτος για μικρότερες τιμές του α όπως φαίνεται και στα διαγράμματα ισχύος.