



Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής Εφαρμογών

Μελέτη συστημάτων ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος

(Research of control systems for dc motors)

Πτυχιακή Εργασία:

Χαράλαμπος Τσικλίδης (Α.Μ. 44865)

Κωνσταντίνος Τσαρχόσι (Α.Μ. 44864)

**ΑΙΓΑΛΕΩ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2017**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι πλέον καθημερινά παρών στον τρόπο ζωής μας. Τους συναντάμε από το αυτοκίνητο μας ή το ασανσέρ της πολυκατοικίας μας έως και σε βιομηχανικούς μηχανισμούς. Οι κινητήρες αυτοί έχουν δυο μεγάλα πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι η μεγάλη ευκολία στον έλεγχο της ταχύτητας του άξονά τους και το δεύτερο είναι η μεγαλύτερη ροπή σε δεδομένη ταχύτητα σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτά τα πλεονεκτήματα τους καθιστούν πολύ αξιόπιστους σε θέματα χειρισμών φορτίων.

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η βαθύτερη κατανόηση και ανάλυση των μεθόδων και συστημάτων που χρησιμοποιούνται την σημερινή εποχή για τον έλεγχο λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος και ανάλυση διαφόρων ορολογιών που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις όπως αγωγοί, ημιαγωγοί, οπές, πόλωση κλπ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται ηλεκτρονικά στοιχεία, καθώς και οι συμπεριφορές τους, που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις όπως δίοδοι, θυρίστορ, SCR, MOSFET, IGBT, GTO θυρίστορ και οι τρόποι μετάβασης των θυρίστορ.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι κατηγορίες των κινητήρων συνεχούς ρεύματος που συναντάμε και διάφορα χαρακτηριστικά αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα σχέδια των βασικών μετατροπέων και γεφυρών τα οποία θα εξετάσουμε (τρόπος λειτουργίας και μπλοκ διαγράμματα).

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις των μετατροπέων και γεφυρών του τέταρτου κεφαλαίου με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab Simulink.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αγωγοί, ημιαγωγοί, ομοιοπολικός δεσμός, οπές, ελεύθερα ηλεκτρόνια, εξωγενείς ημιαγωγοί, ενδογενείς ημιαγωγοί, δίοδος, θυρίστορ, SCR, MOSFET, IGBT, GTO θυρίστορ, τρόποι μετάβασης θυρίστορ, μετατροπέας AC/DC, μετατροπέας DC/DC, μετατροπέας AC/AC, μετατροπέας DC/AC, 1Φ πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, 3Φ πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.

ABSTRACT

DC motors are a daily-used apply nowadays. They are used from car engines or elevators to heavy duty industrial facilities. These kind of motors have two advantages. Firstly, they give the operator a very big ease at controlling their rotor speed and secondly they have a much greater torque output at specific speed in comparison to AC motors. These two advantages make them very reliable in handling different loads.

The aim of this study is the deeper understanding and analysis of methods and systems that are being used nowadays for controlling DC motors.

In the first chapter there is an introduction to power electronics and an analysis to the terminology that will be used in circuitries.

In the second chapter electronic parts that are used are being analyzed, as well as their behavior, such as diodes, thyristors, SCRs, MOSFETs, IGBTs, GTO thyristors and transition modes of thyristors.

In the third chapter we analyze the categories of direct current motors we encounter and various characteristics of them.

In the fourth chapter we will analyze the designs of the basic inverters and bridges that we will examine (mode of operation and block diagrams).

In the fifth chapter simulations will be made of the inverters and bridges of the fourth chapter with the help of the Matlab Simulink program.

KEY WORDS

Conductors, semiconductors, covalent bond, holes, free electrons, extrinsic semiconductors, intrinsic semiconductor, diode, thyristor, SCR, MOSFET, IGBT, GTO thyristors, ways transition thyristor converters AC / DC, DC / DC converter, inverter AC / AC, inverter DC / AC, one-phase fully controlled bridge, three-phase fully controlled bridge.

Περιεχόμενα

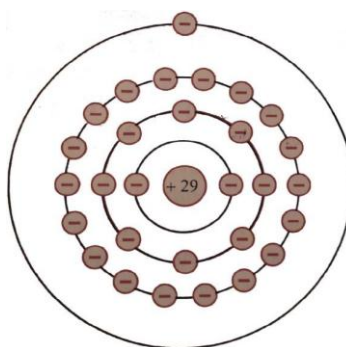
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος – Βασικές αρχές.....	7
1.1.1 Αγωγοί	7
1.1.2 Ημιαγωγοί	7
1.1.3 Κρύσταλλοι πυριτίου.....	8
1.1.4 Ομοιοπολικός δεσμός	9
1.1.5 Οπές.....	9
1.1.6 Επανασύζευξη και χρόνος ζωής.....	10
1.1.7 Ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων σε ενδογενή ημιαγωγό.....	10
1.1.8 Εμπλουτισμός ενός ημιαγωγού	11
1.1.9 Αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων.....	11
1.2.0 Αύξηση των οπών.....	11
1.2.1 Τύποι εξωγενών ημιαγωγών.....	11
1.2.2 Δίοδος χωρίς πόλωση	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δίοδοι & θυρίστορ.....	15
2.1.1 Δίοδος.....	15
2.1.2 Θυρίστορ	17
2.1.3 Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (Silicon Controlled Rectifier - SCR).....	17
2.1.4 FET ημιαγωγού οξειδίου – μετάλλου (MOSFET).....	20
2.1.5 Διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT)	21
2.1.6 GTO θυρίστορ.....	22
2.1.7 Τρόποι μετάβασης του θυρίστορ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος	25
3.1.1 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος	25
3.1.2 Κατασκευή.....	25
3.1.3 Αρχή λειτουργίας.....	30
3.1.4 Αρχή λειτουργίας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.....	35
3.1.5 Συνδεσμολογίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	36
3.1.6 Κινητήρες ξένης διέγερσης – 1 ^η βασική εξίσωση	36
3.1.7 2 ^η βασική εξίσωση.....	38
3.1.8 3 ^η βασική εξίσωση.....	38
3.1.9 Ρύθμιση των στροφών με μεταβολή της αντίστασης R_A	39
3.2 Ρύθμιση των στροφών με μεταβολή της τάσης τυμπάνου	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μετατροπείς & γέφυρες.....	42

4.1 Μετατροπείς	42
4.1.1 Μετατροπείς AC/DC (Ανορθωτικές διατάξεις)	42
4.1.2 Μετατροπέας DC/DC.....	48
4.1.3 Μετατροπέας DC/AC.....	56
4.1.4 Μετατροπέας AC/AC (TRIAC) και γέφυρα τεσσάρων διόδων	57
4.1.5 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.....	61
4.1.6 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προσομοίωση συστημάτων ελέγχου κινητήρων Σ.Ρ. με Matlab-Simulink	73
5.1 Μετατροπείς και γέφυρες για τον έλεγχο κινητήρων συνεχούς ρεύματος	73
5.1.1 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα	73
5.1.1.1 Συνεχής αγωγή	74
5.1.1.2 Ασυνεχής αγωγή.....	80
5.1.2 Ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα.....	84
5.1.2.1 Συνεχής αγωγή	84
5.1.2.2 Ασυνεχής αγωγή.....	88
5.1.3 Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα	91
5.1.3.1 Συνεχής αγωγή	91
5.1.3.2 Ασυνεχής αγωγή.....	99
5.2 Μετατροπείς DC/DC για τον έλεγχο κινητήρων Σ.Ρ.....	104
5.2.1 Μετατροπέας DC/DC (ενός τεταρτημορίου).....	104
5.2.1.1 Συνεχής αγωγή	104
5.2.1.2 Ασυνεχής αγωγή.....	110
5.2.2 Μετατροπέας DC/DC (δύο τεταρτημορίων)	113
5.2.2.1 Λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο	114
5.2.2.2 Λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο	116
5.2.3 Μετατροπέας DC/DC(τεσσάρων τεταρτημορίων)	118
5.2.3.1 Λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο	119
5.2.3.2 Λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο	120
5.2.3.3 Λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο.....	122
5.2.3.4 Λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο	123
Βιβλιογραφία	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος – Βασικές αρχές

1.1.1 Αγωγοί

Ως αγωγοί χαρακτηρίζονται τα στοιχεία εκείνα τα οποία, αν εξετάσουμε την ατομική τους δομή, στην εξωτερική τους στοιβάδα (ή στοιβάδα σθένους) θα παρατηρήσουμε πως έχουν ένα ηλεκτρόνιο σθένους (ή ελεύθερο ηλεκτρόνιο). Τέτοια στοιχεία είναι ο χαλκός, ο χρυσός και ο άργυρος. Γενικότερα, ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.1 το οποίο απεικονίζει το άτομο του χαλκού.



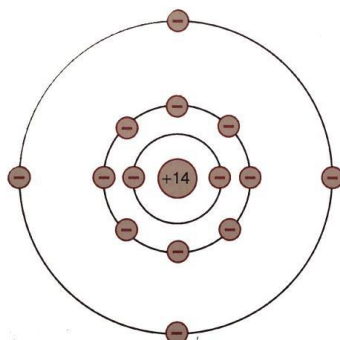
Σχήμα 1.1

Ως ηλεκτρόνιο σθένους (ή ελεύθερο ηλεκτρόνιο) χαρακτηρίζεται το ηλεκτρόνιο εκείνο το οποίο, όντας στην εξωτερική στοιβάδα, υπό την επίρροια δύναμης (πχ κάποιας μικρής τιμής τάσης), αποδεσμεύεται από το άτομο του προκαλώντας έτσι ροή ελευθέρων ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση αλλάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του ατόμου. Η τιμή της δύναμης αυτής που απαιτείται για την αποδέσμευση του ηλεκτρονίου καθορίζει την τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης. Θεωρούμε πως ο πυρήνας είναι συμπαγής και θετικά φορτισμένος, έχοντας έτσι 29 πρωτόνια. Όταν το άτομο δεν είναι φορτισμένο (ουδέτερο φορτίο) τότε γύρω από τον πυρήνα περιστρέφονται 29 ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια παρουσιάζουν αντίθετες δυνάμεις (ελκτικές και αντίθετων κατευθύνσεων) συγκρατώντας έτσι την δομή του ατόμου αέραια. Συγκεκριμένα, το άτομο του χαλκού αποτελείται από 2 ηλεκτρόνια στην 1^η στοιβάδα, 8 ηλεκτρόνια στην 2^η, 18 στην 3^η και ένα στην εξωτερική στοιβάδα.

1.1.2 Ημιαγωγοί

Όπως προαναφέρθηκε οι αγωγοί έχουν ένα ηλεκτρόνιο στην στοιβάδα σθένους ενώ οι μονωτές έχουν οκτώ ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους. Οι ημιαγωγοί είναι στοιχεία τα οποία κατατάσσονται ανάμεσα στους αγωγούς και τους μονωτές, προσδίδοντας τους έτσι τις ηλεκτρικές ιδιότητες και των αγωγών και των μονωτών. Τα πιο καλά ημιαγωγικά στοιχεία έχουν στην στοιβάδα σθένους τέσσερα ηλεκτρόνια, όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2, και το κύριο υλικό κατασκευής

τους είναι το πυρίτιο (το οποίο αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου) το οποίο είναι το 2^ο σε μεγαλύτερη αφθονία χημικό στοιχείο στον πλανήτη μας, με το οξυγόνο να είναι στην 1^η θέση.

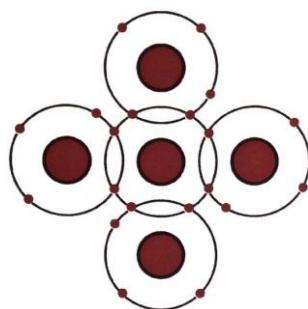


Σχήμα 1.2

Όπως παρατηρούμε αποτελείται από 2 ηλεκτρόνια στην 1^η στοιβάδα, 8 στην δεύτερη και 4 στην στοιβάδα σθένους, δικαίως χαρακτηρίζοντας το ως ημιαγωγό στοιχείο. Άλλα στοιχεία ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται είναι ο άνθρακας και το γερμάνιο. Ο άνθρακας χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή των αντιστάσεων. Το γερμάνιο ήταν το πρώτο χημικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε ως ημιαγωγό στοιχείο, αφού είχε ίδια ατομική δομή με αυτή του πυριτίου. Το σημαντικό μειονέκτημά του όμως είναι ότι διαρρέεται από ανάστροφο ρεύμα μεγάλης τιμής το οποίο είναι καταστροφικό και μη εξουδετερώσιμο και οδήγησε στην αντικατάσταση του από το πυρίτιο.

1.1.3 Κρύσταλλοι πυριτίου

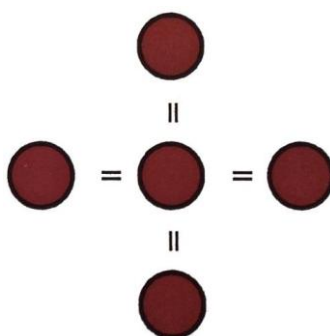
Ως κρύσταλλο ονομάζουμε την διάταξη των ατόμων πυριτίου εκείνη κατά την οποία σχηματίζεται ένα στερεό κανονικό σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κεντρικό άτομο πυριτίου θα μοιράζεται τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής του στοιβάδας με άλλα 4 γειτονικά άτομα, χωρίς να τα χάνει, αποκτώντας έτσι συνολικά 8 ελεύθερα ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους του, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3

1.1.4 Ομοιοπολικός δεσμός

Κάθε πυρήνας έχει φορτίο +4 ηλεκτρόνια. Αν παρατηρήσουμε το κεντρικό και το δεξιά του άτομο θα παρατηρήσουμε πως μοιράζονται ένα ζεύγος ελεύθερων ηλεκτρονίων. Στο ζεύγος των ελεύθερων ηλεκτρονίων αυτό ασκούνται δυνάμεις ίσες και αντίθετες συγκρατώντας έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σταθερά. Οι δυνάμεις αυτές που ασκούνται σε κάθε κοινό ηλεκτρόνιο αποτελούν ένα είδος χημικού δεσμού, γνωστό ως ομοιοπολικό δεσμό. Οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ των ηλεκτρονίων που συναντάμε στα δισεκατομμύρια άτομα σε έναν κρύσταλλο πυριτίου είναι η αιτία της σταθερότητας και στερεότητας του κρυστάλλου. Για να καταλάβουμε τον ομοιοπολικό δεσμό παρατίθεται το Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4

Παρατηρήθηκε πως κάθε κεντρικό ηλεκτρόνιο θα έχει 8 ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους του. Αξίζει να σημειωθεί πως η στοιβάδα σθένους μπορεί να συγκρατήσει μόνο μέχρι 8 ηλεκτρόνια τα οποία καλούνται δεσμευμένα καθώς συγκρατούνται ισχυρά από τα άτομα. Τα ηλεκτρόνια αυτά χαρακτηρίζονται ως δεσμευμένα. Όταν η στοιβάδα σθένους συνδυαστεί και αποκτήσει 8 ηλεκτρόνια τότε χαρακτηρίζουμε την κατάσταση της στοιβάδας ως κορεσμένη.

1.1.5 Οπές

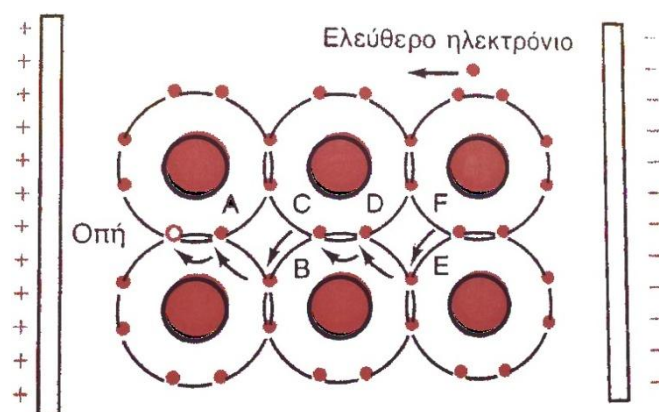
Έχει οριστεί ως θερμοκρασία περιβάλλοντος η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Όταν η θερμοκρασία αυτή είναι πάνω από την τιμή του απόλυτου μηδέν (-273°C) τότε η θερμική ενέργεια που υπάρχει αναγκάζει τα άτομα ενός κρυστάλλου πυριτίου να ταλαντώνονται και να παράγουν μηχανικές δονήσεις. Οι δονήσεις αυτές είναι πιο ισχυρές όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία. Αποτέλεσμα αυτών των δονήσεων είναι και η απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από την στοιβάδα σθένους του ατόμου. Το ηλεκτρόνιο τότε χαρακτηρίζεται ως ελεύθερο ηλεκτρόνιο καθώς μπορεί να μεταβεί σε μια ανώτερη τροχιά. Ταυτόχρονα με την απελευθέρωση του ηλεκτρονίου δημιουργείται ένα κενό, μια οπή, στην θέση την οποία αυτό βρισκόταν. Καθώς το ηλεκτρόνιο έχει αρνητικό φορτίο, η οπή συμπεριφέρεται σαν να έχει θετικό φορτίο και θα έλκει κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο κοντά της. Οι οπές είναι και η κύρια διαφορά μεταξύ αγωγών και ημιαγωγών. Για να αυξήσουμε τον αριθμό των οπών και των ελεύθερων ηλεκτρονίων θα πρέπει να προστεθούν προσμίξεις στον κρύσταλλο.

1.1.6 Επανασύζευξη και χρόνος ζωής

Η θερμική ενέργεια που προκαλεί το φαινόμενο των οπών δημιουργεί ίσο αριθμό οπών και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Ως επανασύζευξη ορίζεται η συγχώνευση μιας οπής και ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου το οποίο έλκεται από αυτήν. Ως χρόνο ζωής ορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της δημιουργίας και επανασύζευξης ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου.

1.1.7 Ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων σε ενδογενή ημιαγωγό

Ένας ημιαγωγός ο οποίος δεν έχει προσμίξεις, περιέχει δηλαδή μόνο άτομα ενός στοιχείου, ονομάζεται ενδογενής ημιαγωγός. Συγκεκριμένα, ένας κρύσταλλος πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου συμπεριφέρεται ως μονωτής επειδή έχει λίγες οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.5 παρατηρούμε τις ροές ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου και μιας οπής μέσα σε ένα φορτισμένο ημιαγωγό. Η ροή ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου είναι προς την θετική πλάκα. Αυτό συμβαίνει διότι, καθώς το ελεύθερο ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε μεγάλη τροχιά μακριά από το άτομο που διασπάστηκε και έχοντας αρνητικό φορτίο, απωθείται από την αρνητική πλάκα και έλκεται από την θετική. Η ροή μιας οπής είναι αντίθετη καθώς όπως προαναφέρθηκε συμπεριφέρεται σαν θετικό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, η οπή έλκει το κοντινότερο ελεύθερο ηλεκτρόνιο να πέσει μέσα σε αυτή. Με τη σειρά του, στο σημείο που διασπάστηκε το τελευταίο ελεύθερο ηλεκτρόνιο δημιουργείται μια καινούρια οπή. Θα μπορούσαμε να πούμε πως «μετακινήθηκε» η 1^η οπή ενώ τεχνικά δημιουργήθηκε μια καινούρια καθώς εξαφανίστηκε η προηγούμενη. Με αυτή την επανάληψη μέχρι το τελευταίο άτομο πυριτίου η οπή έχει ροή προς την αρνητική πλάκα.



Σχήμα 1.5

Σε έναν ενδογενή ημιαγωγό υπάρχει ίσος αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών κατά ζεύγη. Με την εφαρμογή μιας τάσης ξεκινάει η αντίθετη ροή των οπών και των ηλεκτρονίων προς τα αντίστοιχα άκρα. Ο συνδυασμός των δυο αυτών ροών είναι ο ορισμός του ηλεκτρικού ρεύματος σε έναν ημιαγωγό. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές σε αυτήν την περίπτωση ονομάζονται φορείς επειδή μεταφέρουν ένα φορτίο από μια θέση σε μια άλλη.

1.1.8 Εμπλουτισμός ενός ημιαγωγού

Για να αυξήσουμε την αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού μπορούμε να επηρεάσουμε την δομή του με την προσθήκη προσμίξεων. Ο ημιαγωγός τότε χαρακτηρίζεται ως εξωγενής ημιαγωγός. Υπάρχουν δυο τρόποι εμπλουτισμού: η αύξηση ελεύθερων ηλεκτρονίων και η αύξηση οπών.

1.1.9 Αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων

Για τη μέθοδο αυτή αρχικά πρέπει να μεταβληθεί η φυσική κατάσταση του πυριτίου από στερεό σε υγρό για να υποστούν ρήξη οι ομοιοπολικοί δεσμοί. Στη συνέχεια προστίθονται πεντασθενή άτομα στο υγρό πυρίτιο. Τα πεντασθενή άτομα έχουν πέντε ελεύθερα ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους τους. Τέτοια στοιχεία είναι το αρσενικό, το αντιμόνιο και ο φώσφορος. Καθώς αυτά τα στοιχεία προσφέρουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στο πυρίτιο χαρακτηρίζονται ως δότες. Εφόσον όμως στην στοιβάδα σθένους του πυριτίου χωράνε μόνο 8 ηλεκτρόνια, το επιπλέον ηλεκτρόνιο παραμένει σε μεγαλύτερη τροχιά (είναι δηλαδή ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο). Με την σταθερά του ότι κάθε δότης δίνει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο μπορούμε να ελέγξουμε την αγωγιμότητα ενός εμπλουτισμένου ημιαγωγού, καθιστώντας τον ημιαγωγό ισχυρά ή ελαφρά εμπλουτισμένο. Ένας ελαφρά εμπλουτισμένος αγωγός έχει πολύ μικρή αντίσταση ενώ ένας ισχυρά εμπλουτισμένος έχει πολύ μεγάλη αντίσταση.

1.2.0 Αύξηση των οπών

Αντίστοιχα για να εμπλουτίσουμε τον ημιαγωγό με την μέθοδο της αύξησης των οπών χρησιμοποιούμε στην διαδικασία της πρόσμιξης τρισθενή άτομα. Τέτοια στοιχεία είναι το αργίλιο, το βόριο και το γάλλιο. Καθώς είναι τρισθενή τα άτομα (τρία ελεύθερα ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους) ελκύουν ελεύθερα ηλεκτρόνια από τα γειτονικά άτομα για να συμπληρώσουν την στοιβάδα σθένους τους και δημιουργούν οπές στις στοιβάδες σθένους των γειτονικών ατόμων. Αυτά τα στοιχεία χαρακτηρίζονται ως δέκτες.

1.2.1 Τύποι εξωγενών ημιαγωγών

Όπως προαναφέρθηκε οι εμπλουτισμένοι ημιαγωγοί ανάλογα με την μέθοδο εμπλουτισμού τους διακρίνονται σε δυο κατηγορίες.

Τύπου n

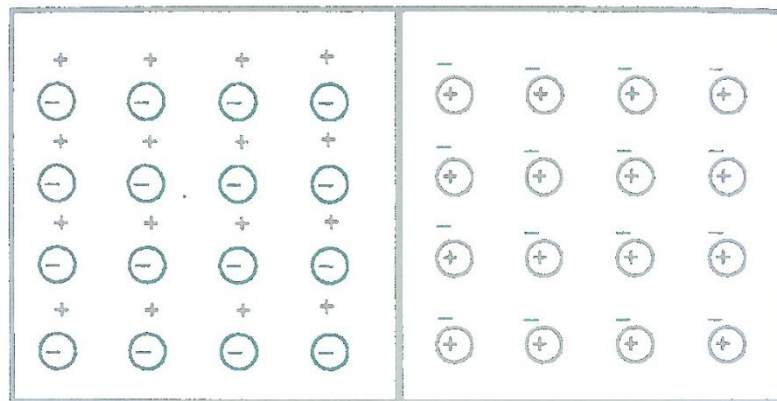
Η πρώτη κατηγορία αφορά την πρόσμιξη πεντασθενών ατόμων στον κρύσταλλο. Αυτός ο τύπος ημιαγωγού ονομάζεται τύπου n, από τον όρο negative που σημαίνει αρνητικό λόγω των περίσσιων ηλεκτρονίων τα οποία έχουν αρνητικό φορτίο.

Τύπου p

Ομοίως, η δεύτερη κατηγορία αφορά την πρόσμειξη τρισθενών ατόμων στον κρύσταλλο. Αυτός ο τύπος ημιαγωγού ονομάζεται τύπου p, από τον όρο positive που σημαίνει θετικό λόγω των περισσίων οπών οι οποίες έχουν θετικό φορτίο.

1.2.2 Δίοδος χωρίς πόλωση

Καθώς μελετήθηκαν ξεχωριστά κομμάτια ημιαγωγού τύπου p και τύπου n παρατηρήθηκε πως η συμπεριφορά τους δεν διαφέρει από αυτήν μιας αντίστασης άνθρακα. Παραταύτα, όταν ένας εμπλουτισμένος κρύσταλλος αποτελείται και από τους δυο τύπου ημιαγωγού τότε δημιουργείται κάτι νέο. Η οριακή περιοχή μεταξύ των ημιαγωγών p και n ονομάζεται επαφή pn. Από αυτήν την επαφή έχουν δημιουργηθεί δίοδοι, τρανζίστορ και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η κατανόηση της περιοχής αυτής είναι κρίσιμης σημασίας για την κατανόηση όλων των ημιαγωγικών διατάξεων. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6, μπορούμε να φανταστούμε την ένωση των δυο τύπων ημιαγωγών ως εξής.



Σχήμα 1.6: Τύπου p τύπου n

Αριστερά βλέπουμε τα τρισθενή άτομα και τις οπές ενός ημιαγωγού τύπου p. Κάθε κύκλος με (-) αναπαριστά το τρισθενές άτομο και το (+) που βρίσκεται κοντά του την οπή. Ομοίως δεξιά βλέπουμε τα πεντασθενή άτομα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ενός ημιαγωγού τύπου n. Κάθε κύκλος με (+) αναπαριστά το πεντασθενές άτομο και το (-) που βρίσκεται κοντά του το ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Η διάταξη αυτή του κρυστάλλου ονομάζεται δίοδος επαφής.

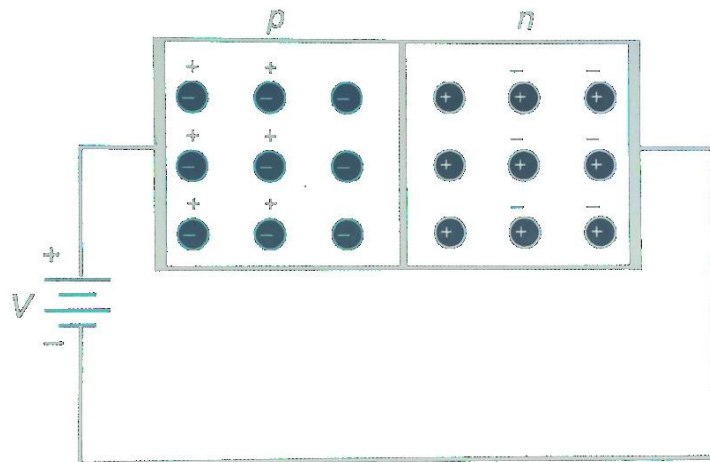
Περιοχή απογύμνωσης

Καθώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην πλευρά τύπου n έχουν ίδιο φορτίο απωθούνται μεταξύ τους και διαχέονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Μέσω αυτής της διάχυσης κάποια ηλεκτρόνια μεταπηδούν στην πλευρά τύπου p και γίνονται φορείς μειονότητας. Εκεί με τόσες πολλές οπές γύρω τους έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής καθώς γρήγορα θα επανασυζευκτούν με μια οπή και το ηλεκτρόνιο θα γίνει ένα ηλεκτρόνιο σθένους. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο διαχέεται διαμέσου της επαφής

δημιουργείται ένα ζεύγος ιόντων. Τα ιόντα αυτά τίθονται εκτός κίνησης και έτσι εξαφανίζονται οι φορείς (φορτία) σταδιακά δημιουργώντας μια περιοχή. Η περιοχή που δημιουργείται ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης.

Ορθή πόλωση

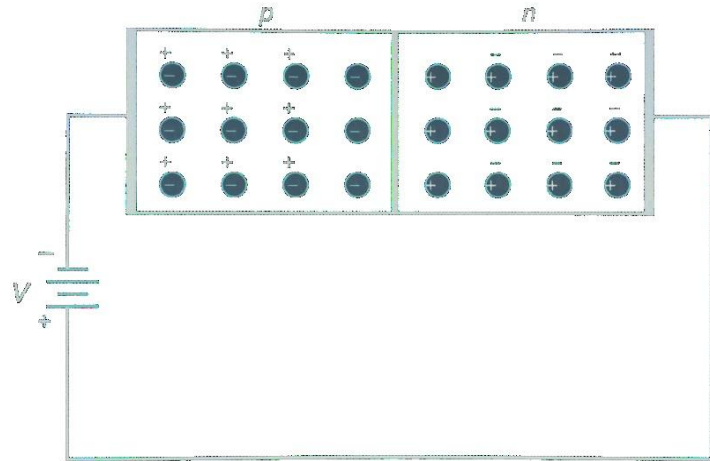
Όταν συνδέσουμε το αρνητικό άκρο μιας πηγής τάσης στην πλευρά τύπου p και το θετικό άκρο στην πλευρά τύπου n η διάδος χαρακτηρίζεται ως ορθά πολωμένη. Αυτό σημαίνει πως αν η πηγή δώσει την απαραίτητη ενέργεια στα ηλεκτρόνια, αυτά θα μεταπηδήσουν την περιοχή απογύμνωσης και θα συζευκτούν με οπές δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7

Ανάστροφη πόλωση

Όταν συνδέσουμε το αρνητικό άκρο μιας πηγής τάσης στην πλευρά τύπου p και το θετικό άκρο στην πλευρά τύπου n η διάδος χαρακτηρίζεται ως ανάστροφα πολωμένη. Το θετικό άκρο έλκει τα ηλεκτρόνια μακριά από την περιοχή απογύμνωσης και οι οπές έλκουν ηλεκτρόνια από το αρνητικό άκρο. Έτσι διευρύνεται η περιοχή απογύμνωσης και σχεδόν διακόπτεται το ρεύμα. Στην πραγματικότητα όμως συνεχίζει να διαρρέει ένα πολύ μικρό ρεύμα την διάοδο το ανάστροφο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό εξαρτάται μόνο από την θερμική ενέργεια που παρέχεται στον αγωγό και το πλήθος των φορέων μειονότητας. Η ανάστροφη πόλωση φαίνεται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8

Διάσπαση

Γενικά οι διόδοι έχουν μια μέγιστη τιμή τάσης που μπορούν να αντέξουν, η οποία είναι συνήθως γύρω στα 50 V. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή λέμε πως έχουμε κατάρρευση της διόδου και η τάση που εφαρμόζεται ονομάζεται τάση διάσπασης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι φορείς μειονότητας είναι πάρα πολλοί στην περιοχή απογύμνωσης και η διόδος άγει πάρα πολύ ρεύμα.

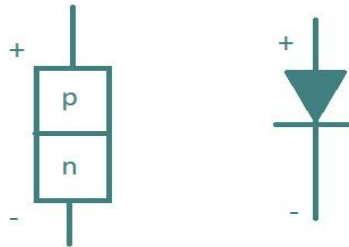
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δίοδοι & θυρίστορ

2.1.1 Δίοδος

Ορισμός:

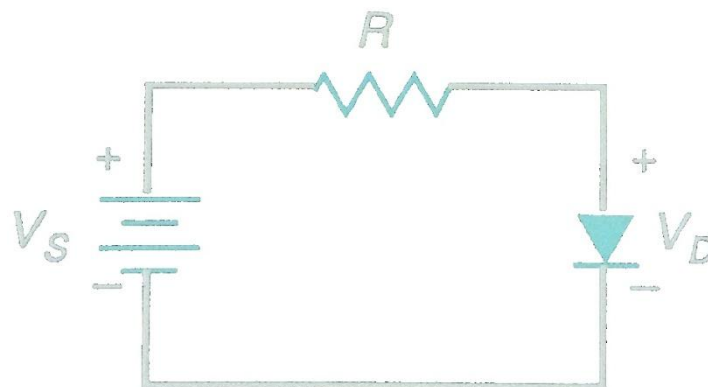
Η δίοδος είναι ένα μη γραμμικό ηλεκτρονικό εξάρτημα, σε αντίθεση με μια ωμική αντίσταση, το οποίο οφείλεται στο φράγμα δυναμικού (περιοχή απογύμνωσης).

Αυτό σημαίνει πως η γραφική απεικόνιση του ρεύματος – τάσης της δεν θα είναι της μορφής ευθείας γραμμής. Πιο συγκεκριμένα όταν η τάση της διόδου είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού τότε υπάρχει ένα μικρό ρεύμα που τη διαρρέει. Όταν η τιμή της τάσης υπερβεί το φράγμα δυναμικού τότε το ρεύμα αυξάνεται γρήγορα. Στο Σχήμα 2.1 βλέπουμε το βασικό κύκλωμα διόδου σχηματικά (αριστερά) και συμβολικά στο κύκλωμα (δεξιά).



Σχήμα 2.1

Εάν τοποθετήσουμε την δίοδο σε ένα πολύ απλό ηλεκτρικό κύκλωμα θα έχουμε το κύκλωμα του Σχήματος 2.2.

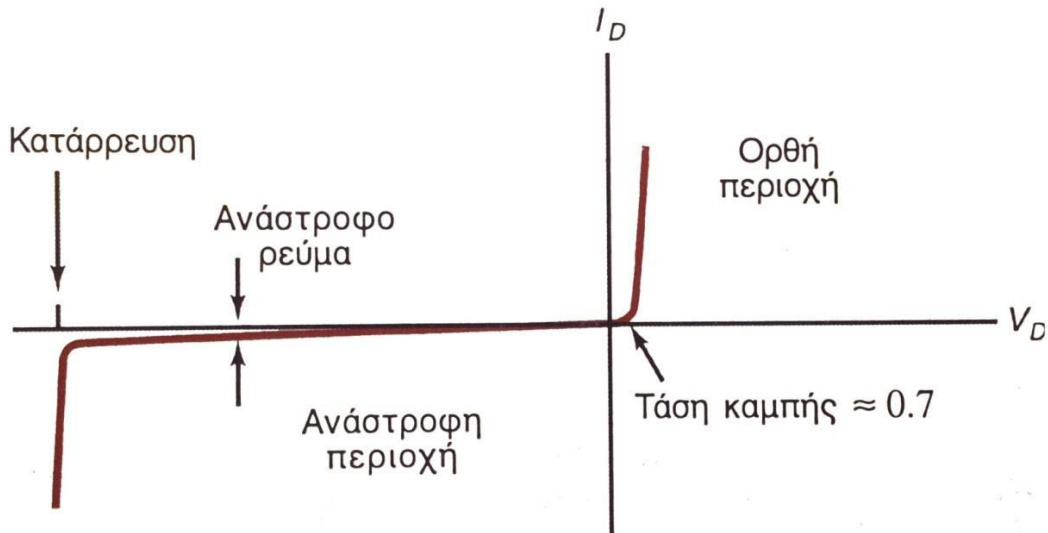


Σχήμα 2.2

Σε αυτό το κύκλωμα παρατηρούμε πως η δίοδος είναι **ορθά πολωμένη**. Όπως προαναφέρθηκε όταν το θετικό άκρο της πηγής τάσης είναι συνδεδεμένο με το θετικό άκρο της διόδου και το αρνητικό άκρο της πηγής τάσης με το αρνητικό άκρο της διόδου η δίοδος χαρακτηρίζεται ως ορθά πολωμένη καθώς όπως και ηλεκτρόνια

Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος

προσπαθούν να συνδεθούν. Πραγματοποιώντας τη συνδεσμολογία αυτή και συνδέοντας ένα παλμογράφο στα άκρα της διόδου, και πάρουμε μετρήσεις για κανονική και ανάστροφη πολικότητα της πηγής τάσης, θα παρούμε την εξής καμπύλη του Σχήματος 2.3.



Σχήμα 2.3

Σε αυτή την καμπύλη απεικονίζονται πλήρως αυτά που σχολίασαμε στις προηγούμενες ενότητες. Όταν η διάδος βρίσκεται στην περιοχή της ορθής πόλωσης δεν υπάρχει σημαντικό ρεύμα παρά μόνο όταν ξεπεραστεί το φράγμα δυναμικού. Αφού ξεπεραστεί η τάση καμπής (η οποία για διόδους πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 0,7 V) κάθε μικρή μεταβολή της τάσης αυξάνει το ρεύμα με πολύ μεγάλο ρυθμό. Κάθε κατασκευαστής ορίζει την τιμή μέγιστου ρεύματος που μπορεί να υποστεί η διάδος σε ορθή πόλωση χωρίς να αλλάξει τα χαρακτηριστικά της ή να μειωθεί ο χρόνος ζωής της. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται μέγιστο DC ορθό ρεύμα. Όταν βρίσκεται στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης το ρεύμα είναι σχεδόν μηδενικό (και σε τιμές μεταξύ της αλλαγής πολικότητας της πηγής και πριν την κατάρρευση) εφαρμόζεται το φαινόμενο της διεύρυνσης της περιοχής απογύμνωσης και συμπεριφέρεται ως μονωτής. Αυτό συμβαίνει μέχρις ότου η τιμή της τάσης φτάσει την τιμή της τάσης κατωφλίου και η διάδος καταστραφεί λόγω του πολύ μεγάλου ανάστροφου ρεύματος. Δεν είναι επιθυμητό να φτάσει η διάδος κοντά στην τιμή της τάσης που οδηγεί στην κατάρρευση επειδή δημιουργεί σφάλματα (μόνιμα και μη) στο κύκλωμα και κατ' επέκτασιν στα εξαρτήματα.

Μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την τιμή της καταναλισκόμενης ισχύος με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζουμε της ωμικής αντίστασης.

Δηλαδή:

$$P_D = V_D \cdot I_D$$

όπου:

P_D = κατανάλωση ισχύος διόδου

V_D = τάση διόδου

I_D = ρεύμα διόδου

Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε την τάξη ισχύος, την μέγιστη ισχύ που μπορεί να δεχθεί η διάδος χωρίς αυτή να καταστραφεί, από τον τύπο:

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max}$$

όπου:

P_{max} = μέγιστη τάση διόδου

V_{max} = μέγιστη τάση

I_{max} = μέγιστο ρεύμα

Το μέγιστο ρεύμα εδώ αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση.

2.1.2 Θυρίστορ

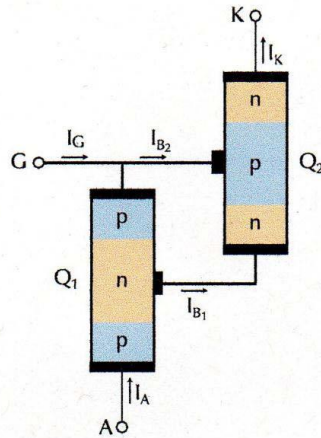
Ορισμός:

Το θυρίστορ είναι μια ημιαγωγική διάταξη που μέσω εσωτερικής ανάδρασης συμπεριφέρεται μεταγωγικά, όπως ένας κλειστός ή ανοικτός διακόπτης.

Τη συμπεριφορά του θυρίστορ την καθορίζουμε εμείς με τη μεταβολή της τάσης εισόδου. Υπάρχουν κατηγορίες θυρίστορ που μπορούν να διακόπτουν την ροή του ρεύματος προς μια ή προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα θυρίστορ που χρησιμοποιούνται πιο πολύ είναι οι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου (SCR). Δεν πρέπει να συγχέονται όμως τα διπολικά τρανζίστορ και τα τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου (FET) με τα SCR. Τα FET μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές με διακόπτες ως διακοπτικά στοιχεία ή για την ενίσχυση τους. Παρόλα αυτά δεν έχουν την ικανότητα να χειριστούν μεγάλα ρεύματα ή την ικανότητα διακοπής και χειρισμού της ισχύος που έχουν τα θυρίστορ. Επίσης σημαντική διαφορά είναι ο τρόπος που τίθενται εκτός λειτουργίας τα δυο στοιχεία. Στα FET η τάση πύλης μπορεί να μετάνιωσε τη διάταξη σε κατάσταση on και off. Στα SCR η τάση πύλης μπορεί μόνο να τα θέσει σε κατάσταση on. Πιο αναλυτικά, στα FET όταν η τάση εισόδου είναι υψηλή τότε η τάση εξόδου είναι χαμηλή και όταν η τάση εισόδου είναι χαμηλή η τάση εξόδου είναι υψηλή. Ένας τετραγωνικός παλμός θα έδινε έναν αντεστραμμένο τετραγωνικό παλμό. Στα SCR όμως, είτε η τάση εισόδου είναι υψηλή ή χαμηλή, η τάση εξόδου είναι πάντα χαμηλή. Τα SCR λόγω αυτής της δομής τους επιλέγονται σε εφαρμογές που είναι σημαντική η μανδάλωση. Γι' αυτό το λόγο προτιμάμε τα θυρίστορ SCR.

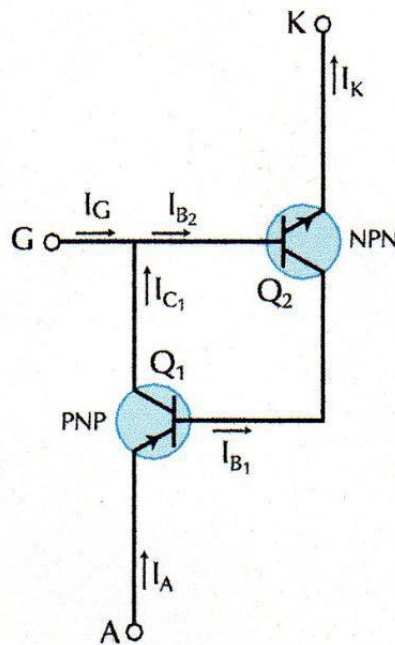
2.1.3 Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (Silicon Controlled Rectifier - SCR)

Το SCR, κυρίως λόγω του χαρακτηριστικού που διαθέτει να ελέγχει και να μετάνιωσε πολύ μεγάλα ρεύματα σε κατάσταση on και off, χρησιμοποιείται σε διατάξεις ελέγχου κινητήρων και γενικά σε διατάξεις με πολύ μεγάλα ρεύματα της τάξεως ακόμα και των 1,5 kA. Για την αρχή αγωγής του SCR αρκεί να εφαρμόσουμε μια μικρή τιμή τάσης και ένα ρεύμα σκανδαλισμού πύλης. Το σχηματικό ισοδύναμο ενός SCR φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



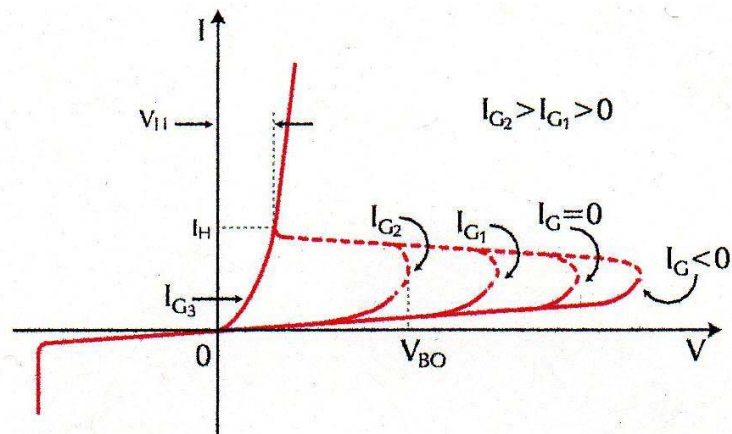
Σχήμα 2.4

Παρατηρούμε πως η **δομή** του μοιάζει με αυτήν της διόδου P-N-P-Ναλλά έχει ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο, την πύλη, η οποία έχει συνδεθεί με το ενδιάμεσο στρώμα του ημιαγωγού τύπου P. Επίσης παρατηρούμε τα τρία ηλεκτρόδια, την κάθοδο (K), την πύλη (G), και την άνοδο (A). Το ηλεκτρικό ισοδύναμο φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5

Χαρακτηρίζεται ως ελεγχόμενος διότι στην ανάστροφη πόλωση συμπεριφέρεται όπως μια διάδος ενώ στην ορθή πόλωση μπορούμε να ελέγξουμε και να διαμορφώσουμε την τάση σκανδαλισμού από το ρεύμα πύλης όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6

Παρατηρούμε πως για τιμές τάσης μικρότερες του μηδενός η καμπύλη είναι ίδια με αυτή της διόδου στην ανάστροφη πόλωση και το ρεύμα έχει αρνητικές τιμές. Όταν διαρρέεται ρεύμα θετικής τιμής στο SCR τότε η τάση σκανδαλισμού ελαττώνεται. Το ρεύμα και η τάση σκανδαλισμού μεταβάλλονται αντίστροφα. Όσο περισσότερο αυξάνεται το ρεύμα, μειώνεται η τάση σκανδαλισμού, όχι όμως πάντα ισόποσα. Παρατηρούμε επίσης πως στην τιμή ρεύματος I_{G3} τάση σκανδαλισμού είναι τόσο μικρή που η χαρακτηριστική σε εκείνο το σημείο μοιάζει με αυτήν της διόδου.

Η δομή του και ο χαρακτηρισμός του ως ελεγχόμενος αποτελούν την αρχή λειτουργίας του ανορθωτή πυριτίου. Πιο συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, το SCR είναι μια διάταξη τεσσάρων στρωμάτων (όπως η P-N-P-N) που έχει προστεθεί ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο, αυτό της πύλης, στο ενδιάμεσο στρώμα του ημιαγωγού P. Μεταξύ πύλης και καθόδου σχηματίζεται μια διόδος που καθιστά εύκολη την αρχή αγωγής του θυρίστορ με μια μικρή τάση εισόδου της τάξης των 0,7 V. Μέσω της πύλης διαρρέει ρεύμα το τρανζίστορ Q_2 και αν διοχετευτεί ρεύμα I_G όταν το SCR είναι σε κατάσταση off ξεκινά η διαδικασία μανδάλωσης του. Παρατηρούμε πως η διάταξη του τρανζίστορ Q_1 είναι τύπου PNP και του Q_2 τύπου NPN. Με αυτή τη διάταξη επιτυγχάνουμε θετική ανάδραση. Πιο αναλυτικά, οποιαδήποτε μεταβολή στο ρεύμα βάσης του Q_2 ενισχύεται και ανατροφοδοτείται μέσω του Q_1 και κλιμακώνει την αρχική μεταβολή. Αυτό σημαίνει πως αν πχ αυξηθεί η τάση στην βάση του Q_2 , θα αυξηθεί η τάση στον συλλέκτη του Q_2 και κατ' επέκτασιν στη βάση του Q_1 . Με τη σειρά του θα αυξηθεί η τάση στον συλλέκτη του Q_1 και περισσότερο ρεύμα θα διοχετευτεί στην βάση του Q_2 . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου και τα δυο τρανζίστορ φτάσουν στον κόρο. Με αντίστοιχη διαδικασία επιτυγχάνεται και η αποκοπή (σβέση), με τη διαφορά ότι πρέπει να ελαττωθεί η τάση στην βάση του Q_2 . Επειδή με τον τρόπο αυτό το κύκλωμα μπορεί να μείνει για άπειρο χρονικό διάστημα σε όποια κατάσταση εμείς θέλουμε, ονομάζεται διαδικασία μανδάλωσης.

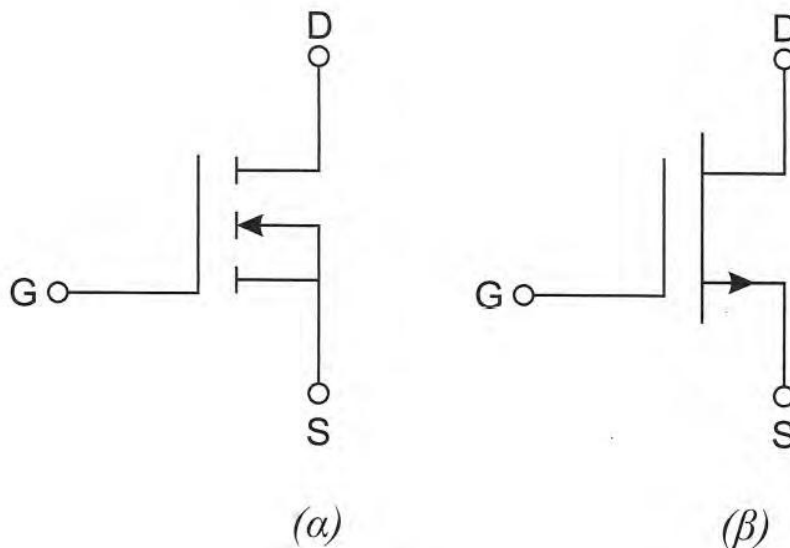
Για να τεθεί το SCR σε λειτουργία off είναι αρκετή η εφαρμογή αρνητικού ρεύματος στην πύλη. Αυτό συμβαίνει διότι όταν το ρεύμα της πύλης είναι αρνητικό, το ρεύμα στην βάση του Q_2 θα ελαττωθεί απαιτώντας έτσι μεγαλύτερη τάση για τη διαδικασία της μανδάλωσης. Το μεγαλύτερο πρόβλημα με τα θυρίστορ είναι η δημιουργία θερμότητας που προκαλείται σε ένα θυρίστορ, το οποίο έχει πολύ μικρή επιφάνεια άρα η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι σημαντική.

2.1.4 FET ημιαγωγού οξειδίου – μετάλλου (MOSFET)

Το FET ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου (MOSFET) αποτελείται από πηγή, πύλη και απαγωγό.

Η διαφορά του από το JFET είναι ότι η πύλη του είναι μονωμένη από το κανάλι, γι' αυτό και το ρεύμα πύλης του είναι μικρότερο απ' ότι σε ένα JFET. Χαρακτηρίζεται και ως IGFET (insulated-gate FET) που σημαίνει FET Μονωμένης πύλης. Υπάρχουν δυο κατηγορίες MOSFET. Τα MOSFET τύπου πύκνωσης και τα MOSFET τύπου αραιώσης.

Τα MOSFET τύπου πύκνωσης (E-MOSFET) είναι συνήθως σε κατάσταση off. Το ρεύμα του MOSFET ρέει σε μια συγκεκριμένη περιοχή του σώματος του MOSFET που ονομάζεται κανάλι. Τα MOSFET χαρακτηρίζονται ως μονοπολικά τρανζίστορ, δηλαδή το ρεύμα οφείλεται σε έναν μόνο τύπο φορτίου, σε ηλεκτρόνια (n-καναλιού) ή σε οπές (p-καναλιού). Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τις κυκλωματικές διατάξεις για MOSFET πύκνωσης n-καναλιού (α) και p-καναλιού (β).



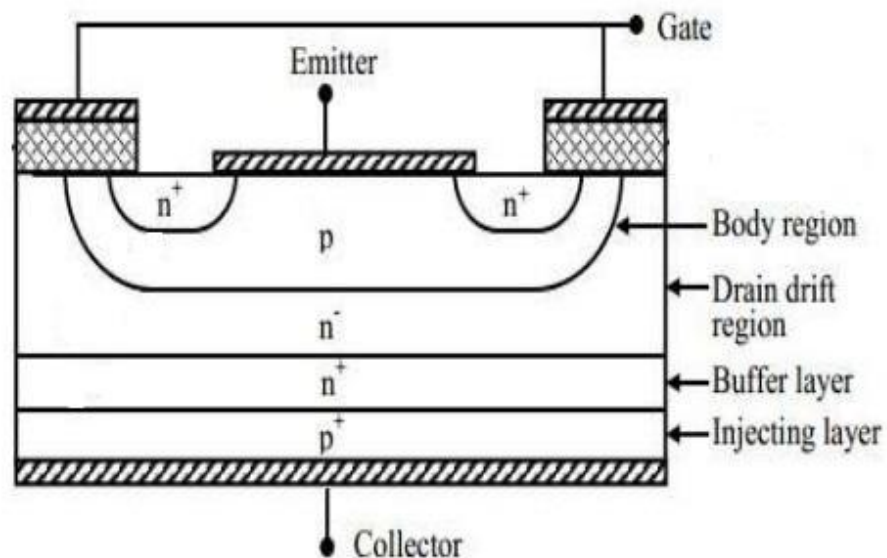
Όταν η τάση πύλης ισούται με την τάση κατωφλίου, ένα ανάστροφο στρώμα τύπου - n συνδέει την πηγή με τον απαγωγό. Όταν η τάση πύλης είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου τότε η διάταξη άγει έντονα. Λόγω όμως του λεπτού μονωτικού στρώματος καταστρέφονται εύκολα. Έχουν μεγάλο εύρος χρήσης σε διακριτά και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στα διακριτά κυκλώματα η κύρια χρήση τους είναι στη μεταγωγή ισχύος, θέτουν δηλαδή σε κατάσταση on και off ρεύματα μεγάλων τιμών. Στα δε ολοκληρωμένα κυκλώματα τα συναντάμε στην ψηφιακή μεταγωγή, τη βασική διαδικασία πίσω από κάθε H/Y.

Τα MOSFET τύπου αραιώσης (D-MOSFET) δεν χρησιμοποιούνται πια τόσο συχνά αλλά τα συναντάμε στο κύκλωμα εισόδου τηλεπικοινωνιακών κυκλωμάτων ως RF ενισχυτές. Πλεονέκτημα τους είναι η καλή απόκριση συχνότητας, τα χαμηλά επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικού θορύβου και οι υψηλές τιμές σύνθετης αντίστασης εισόδου.

2.1.5 Διπολικά τρανζίστρο μονωμένης πύλης (IGBT)

Στις εφαρμογές διακοπών υψηλής ισχύος χρησιμοποιούμε διατάξεις MOSFETs και BJT. Τα MOSFETs έχουν ως κύριο πλεονέκτημά τους την μεγαλύτερη ταχύτητα μεταγωγής και τα BJTστο χαρακτηριστικό της λιγότερης απώλειας αγωγιμότητας. Ο ιδανικός διακόπτης συνδυάζει τα πλεονεκτήματα κάθε κατηγορίας και η υβριδική αυτή διάταξη ονομάζεται διπολικό τρανζίστρο μονωμένης πύλης. Ουσιαστικά αποτελεί εξέλιξη του MOSFET ισχύος καθώς η δομή του και η λειτουργία του είναι όμοιες. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται η διάταξη του IGBT.

Construction of IGBT

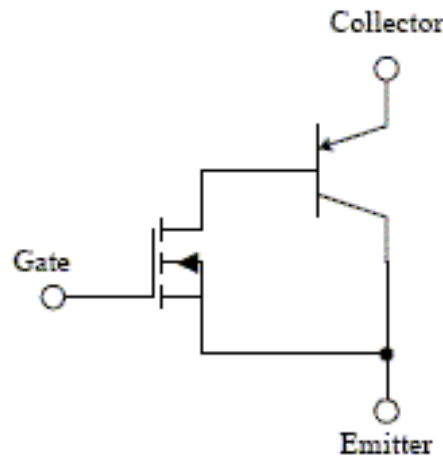


Σχήμα 2.7

Όπως παρατηρούμε η δομή του μοιάζει με ένα MOSFET ισχύος πκαναλιού κατασκευασμένο σε υπόστρωμα p-τύπου. Αποτελείται από ακροδέκτες πύλης (gate), εκπομπού (emmitter) και συλλέκτη (collector). Υπάρχουν δυο εκδοχές της συγκεκριμένης διάταξης. Το IGBT με διάτρηση (punch-through, PT) και το IGBT χωρίς διάτρηση (nonpunch-through, NPT). Το απεικονιζόμενο ανήκει στην πρώτη κατηγορία (IGBTPT). Τα IGBTPTέχουν ένα n+ στρώμα απομόνωσης μεταξύ των p+ και n- περιοχών του, ενώ τα IGBT NPT δεν την έχουν. Αυτό τους δίνει το πλεονέκτημα της υψηλότερης μεταγωγικής ταχύτητας.Μια άλλη διαφορά που παρουσιάζουν μεταξύ τους οι δυο κατηγορίες είναι οτι τα NPTέχουν υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας $V_{CE(on)}$ από τις PTκαι θετικό συντελεστή θερμοκρασίας, πράγμα

που το καθιστά ιδανικό για παραλληλία. Τα PT έχουν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 2.8 βλέπουμε το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του IGBT.



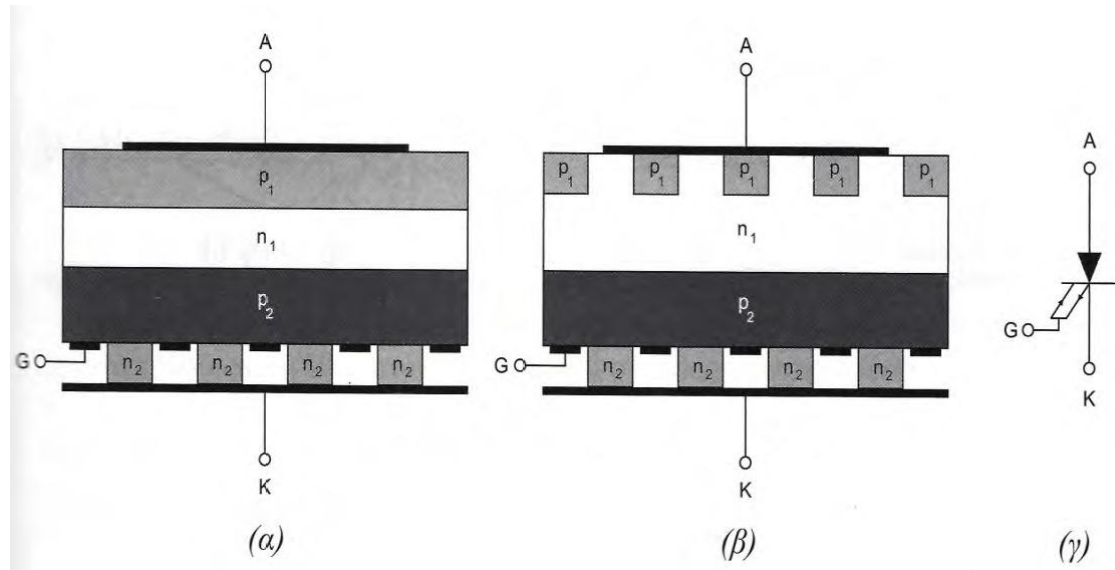
Σχήμα 2.8

Παρατηρούμε πως το IGBT είναι ένα MOSFET ισχύος στην πλευρά της εισόδου και ένα BJT στην πλευρά της εξόδου. Ο έλεγχος της εισόδου επιτυγχάνεται μέσω της τάσης μεταξύ των ακροδεκτών πύλης και εκπομπού. Σε κανονικές συνθήκες το IGBT βρίσκεται σε off κατάσταση υψηλής αντίστασης. Το ρεύμα συλλέκτη θα αρχίσει να ρέει όταν η τάση εισόδου γίνει αρκετά μεγάλη. Τα MOSFETs λόγω του ότι βασίζονται στις τιμές της $R_{DS(on)}$ έχουν αυξημένες απώλειες αγωγιμότητας, αντιθέτως από τα IGBT που δεν παρουσιάζουν αυτό το χαρακτηριστικό. Επίσης τα IGBT έχουν πολύ μεγαλύτερη τάση διάσπασης συλλέκτη – εκπομπού από των MOSFETs, το οποίο είναι πολύ σημαντικό στον χειρισμό υψηλής τάσης επαγωγικών φορτίων. Τέλος, συγκριτικά με τα BJTs, τα IGBTs έχουν πολύ μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση εισόδου και απλούστερες απαιτήσεις για την οδήγηση της πύλης. Συνοψίζοντας λοιπόν, τα IGBTs είναι η βέλτιστη λύση για εφαρμογές υψηλής τάσης και ρεύματος σε μέτριες συχνότητες.

2.1.6 GTO θυρίστορ

Μέσω της απλής διάταξη θυρίστορ μπορούμε να ελέγξουμε την έναυση του θυρίστορ αλλά δεν επιτρέπει τον έλεγχο της σβέσης του. Η σβέση των απλών θυρίστορ εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος και επιτυγχάνεται μόνο όταν το ρεύμα που το διαρρέει γίνει μικρότερης τιμής από το ρεύμα συγκράτησης. Το GTO θυρίστορ (gateturn-off thyristor) αποτελείται από δυο ηλεκτρόδια μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ο έλεγχος έναυσης και σβέσης του. Υπάρχουν δυο τύποι GTO. Η μια κατηγορία είναι τα GTO reverse blocking type, τα οποία έχουν την δυνατότητα να μπλοκάρουν τάσεις σχεδόν του ίδιου μεγέθους, τόσο στην ορθή όσο και στην ανάστροφη πόλωση. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα GTO anode short type των οποίων η ικανότητα αποκοπής τάσης στην ανάστροφη πόλωση είναι πολύ μικρή της τάξεως των 15V. Τα GTO βρίσκουν μεγάλο εύρος εφαρμογών στους μετατροπείς DC/DC.

Στο Σχήμα 2.9 (α) απεικονίζεται το GTO reverse blocking type, στο Σχήμα 2.9 (β) το GTO anode short type και στο Σχήμα 2.9 (γ) το κυκλωματικό σύμβολο.



Σχήμα 2.9

Για την έναυση του GTO απαιτείται ένα μικρό ρεύμα στην πύλη του, το οποίο είναι ανεξάρτητο από το ρεύμα που θα διέλθει μέσα από το θυρίστωρ αργότερα. Για την σβέση του GTO απαιτείται ρεύμα ανάλογο του ρεύματος που διαρρέει το θυρίστωρ την συγκεκριμένη στιγμή. Ισχύει:

$$I_G = \frac{I}{\beta_{off}}$$

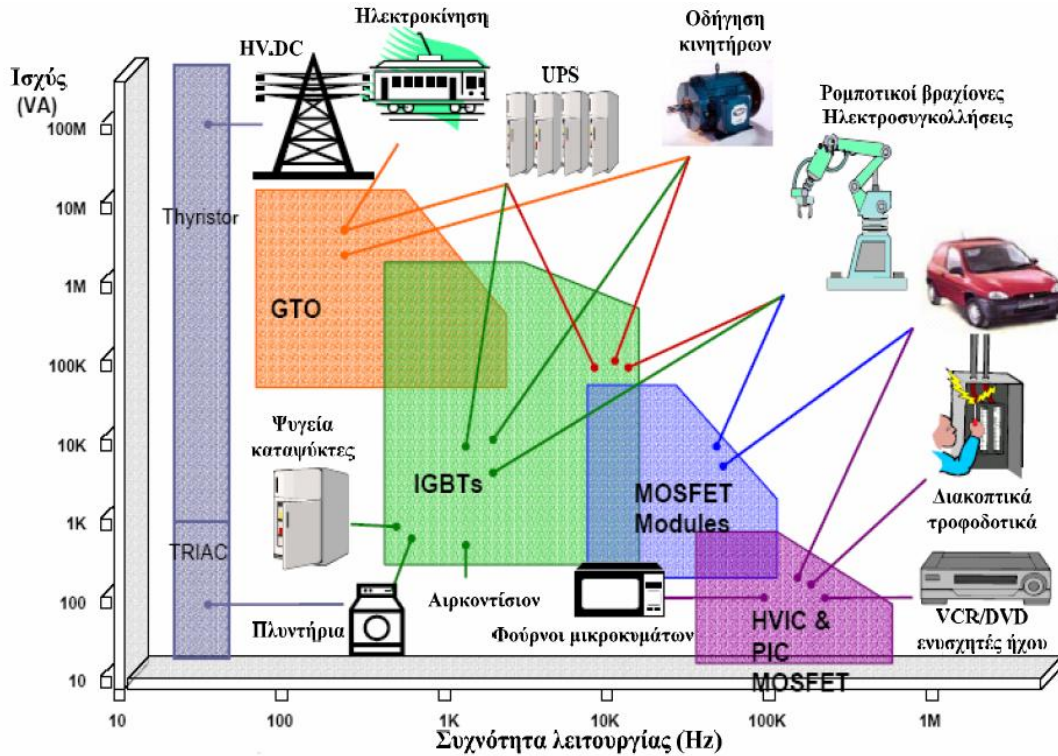
όπου

I = το διερχόμενο ρεύμα του GTO

β_{off} = το κέρδος ρεύματος κατά την σβέση

Εφαρμογές των θυρίστορ

Στο Σχήμα 2.10 βλέπουμε διάφορες εφαρμογές των θυρίστορ και την ισχύ σε σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας τους.



Σχήμα 2.10

Όπως παρατηρούμε σε υψηλή τάση DC χρησιμοποιούμε απλές διατάξεις θυρίστορ (TRIAC). Τα GTO έχουν χαμηλό εύρος συχνότητας λειτουργίας (της τάξης 100 – 1.000 Hz) με υψηλό εύρος τιμών ισχύος εξόδου. Η χρήση τους συναντάται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, UPS, οδήγηση κινητήρων. Τα IGBT έχουν εύρος συχνότητας λειτουργίας από 1.000 – 10.000 Hz με μέσο εύρος τιμών ισχύος εξόδου. Συναντώνται σε εφαρμογές όπως UPS, οδήγηση κινητήρων και οικιακών συσκευών. Τα MOSFET έχουν ακόμα υψηλότερο εύρος συχνότητας λειτουργίας (10.000 – 100.000 Hz) με χαμηλό εύρος τιμών ισχύος εξόδου.

2.1.7 Τρόποι μετάβασης του θυρίστορ

Με τον όρο μετάβαση εννοούμε την παύση λειτουργίας του θυρίστορ (μετάβαση σε κατάσταση off). Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες που αποτελούνται από τεχνικές σβέσης. Μιλώντας για φυσική μετάβαση έχουμε τη μετάβαση λόγω φορτίου και τη μετάβαση λόγω της πηγής εισόδου. Μιλώντας για εξαναγκασμένη μετάβαση έχουμε τη μετάβαση με παλμό έναυσης και μετάβαση με παλμό ρεύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

3.1.1 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

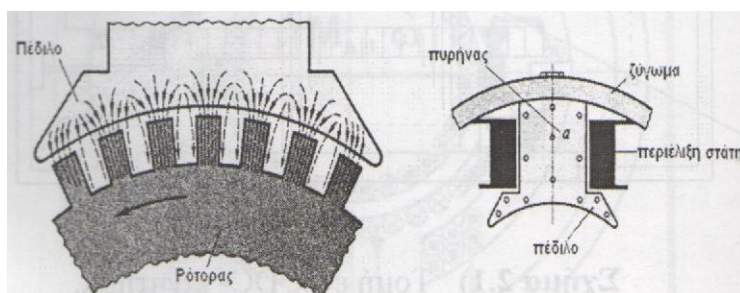
Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι μηχανές που μετατρέπουν τη συνεχή ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (κινητήρας) και τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική συνεχή (γεννήτρια).

Στο εσωτερικό των μηχανών συνεχούς ρεύματος τα ρεύματα και οι τάσεις είναι εναλλασσόμενα. Όμως έχουμε συνεχή έξοδο γιατί στις μηχανές συνεχούς ρεύματος υπάρχει ο συλλέκτης, ο οποίος μετατρέπει τις εναλλασσόμενες τάσεις που υπάρχουν στο εσωτερικό των μηχανών σε συνεχείς.

3.1.2 Κατασκευή

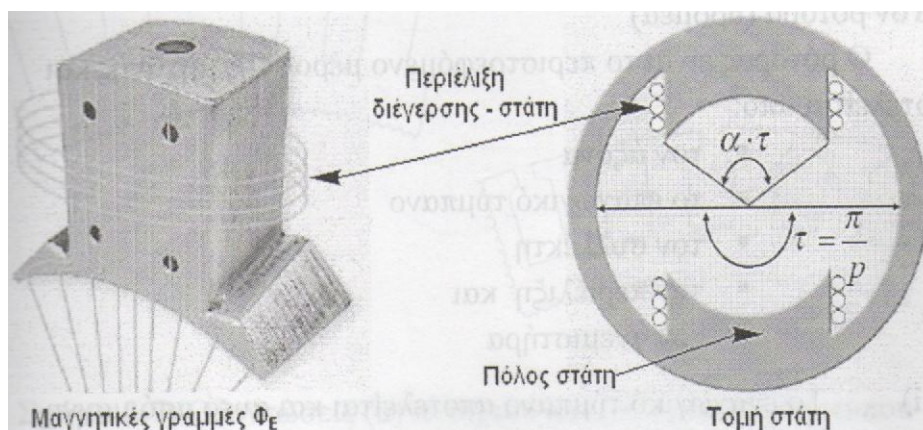
Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος αποτελείται από το στάτη, ο οποίος είναι το κομμάτι των σταθερών τμημάτων της μηχανής και τον ρότορα (δρομέας), ο οποίος είναι το κομμάτι των κινητών τμημάτων της μηχανής.

Ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, τους μαγνητικούς πόλους, την περιέλιξη, το κλεμοκιβώτιο, το περίβλημα και τον ψηκτροφορέα με τις ψήκτρες. Το ζύγωμα αποτελεί τον κορμό της μηχανής και κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο κι έχει σχήμα δακτυλαιοειδούς κυλίνδρου. Μέσω του ζυγώματος ενώνονται μηχανικά και μαγνητικά οι πόλοι. Μέσα από το ζύγωμα λαμβάνει χώρα η ροή της μαγνητικής ροής, η οποία παράγεται από την περιέλιξη των πόλων του στάτη. Οι μαγνητικοί πόλοι κατασκευάζονται από λεπτά ελάσματα, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχουν απώλειες λόγω δινορευμάτων. Οι μαγνητικοί πόλοι χωρίζονται σε κύριους και βοηθητικούς. Οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται μεταξύ των κύριων πόλων ώστε να αποφεύγονται οι σπινθηρισμοί του συλλέκτη από τη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης όταν λειτουργεί η μηχανή με φορτίο. Το μέρος των πόλων που είναι προς τη πλευρά του ρότορα είναι πλατύτερο και ονομάζεται πέλδιλο. Το πέλδιλο χρειάζεται για να διατηρεί μικρές τις αμπεροστροφές της μηχανής.



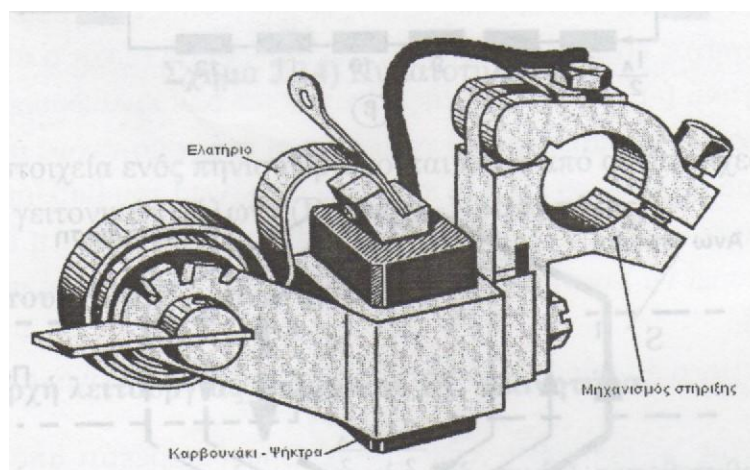
Σχήμα 3.1: Τομή ενός πόλου

Η περιέλιξη του στάτη ονομάζεται διέγερση γιατί διαρρέεται από συνεχές ρεύμα που παράγει την απαιτούμενη σταθερή ροή.



Σχήμα 3.2: Πόλος με περιέλιξη και Τομή στάτη

Στο κλεμοκιβώτιο γίνεται η σύνδεση της μηχανής. Εκεί καταλήγουν τα άκρα της περιέλιξης διέγερσης και ρότορα. Η σύνδεση μεταξύ του ρότορα και του στάτη γίνεται με τις ψήκτρες, οι οποίες εφάπτονται πάνω στην περιφέρεια του συλλέκτη. Ο ψηκτροφορέας με τις ψήκτρες χρησιμεύει για την προσαγωγή ή απαγωγή του ρεύματος των τυλιγμάτων του δρομέα της μηχανής. Οι ψήκτρες κατασκευάζονται από σκληρό άνθρακα, από γραφίτη ή από μίγμα άνθρακα και χαλκού και τοποθετούνται στο χώρο μεταξύ των πόλων, όπου δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο.

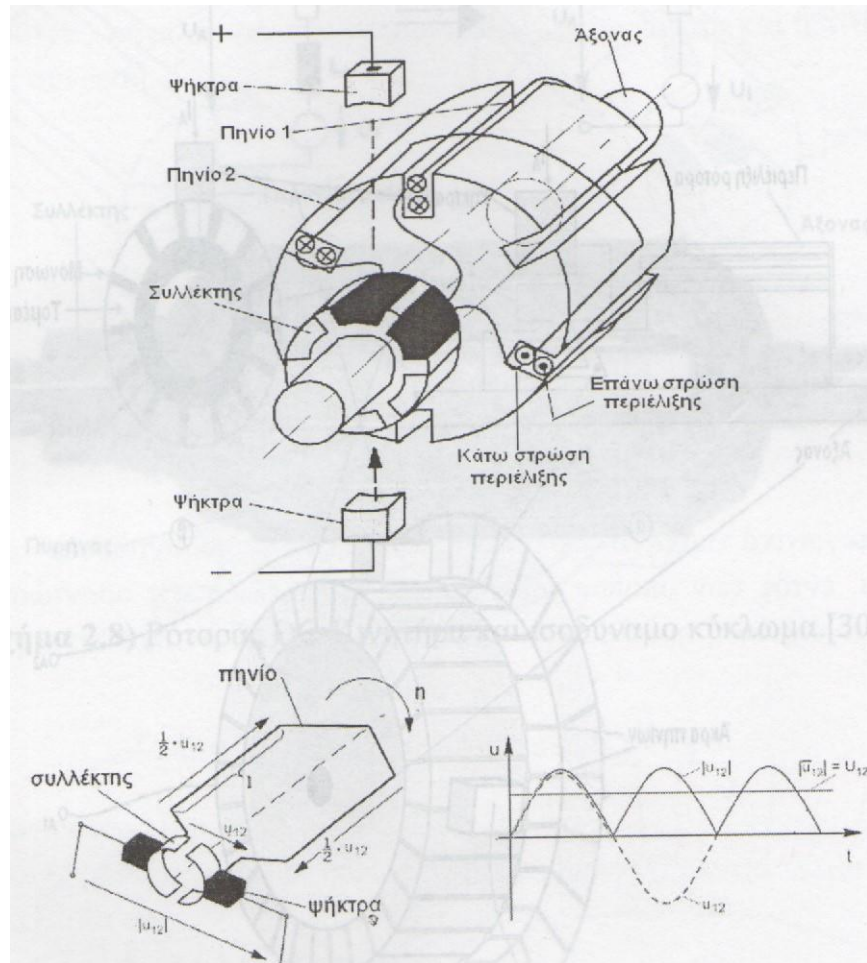


Σχήμα 3.3: Ψήκτρα

Ο ρότορας αποτελείται από τον άξονα, το επαγωγικό τύμπανο, τον συλλέκτη, την περιέλιξη και τον ανεμιστήρα.

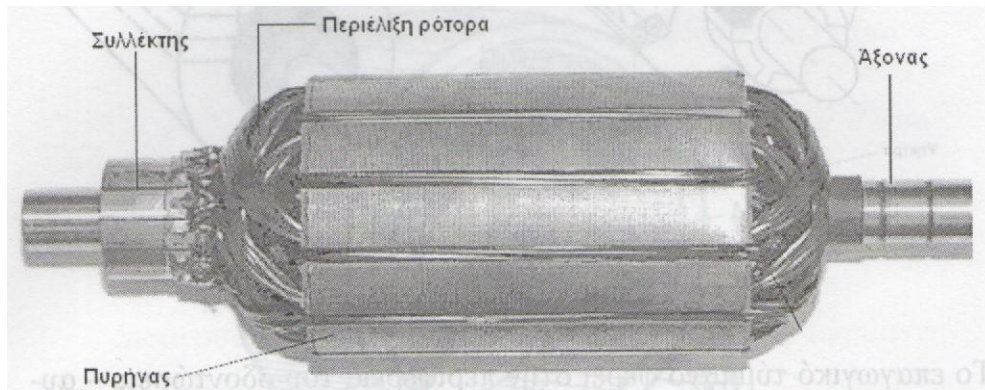
Το επαγωγικό τύμπανο κατασκευάζεται από μαγνητικά ελάσματα που έχουν μικρή μαγνητική αντίσταση. Τα ελάσματα είναι μονωμένα μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχουν απώλειες λόγω δινορευμάτων. Στη περιφέρεια του το επαγωγικό τύμπανο έχει οδοντώσεις (αυλάκια), όπου μέσα στις οδοντώσεις τοποθετείται η περιέλιξη. Οι οδοντώσεις ανάλογα με την ισχύ της μηχανής χωρίζονται σε ανοιχτού τύπου και ημίκλειστου τύπου. Ο συλλέκτης κατασκευάζεται από χάλκινα ελάσματα τα οποία ονομάζονται τομείς του συλλέκτη. Τα ελάσματα είναι μονωμένα τόσο μεταξύ τους, όσο και ως προς τον άξονα του ρότορα. Σκοπός του συλλέκτη είναι να μετατρέψει

την τάση εξ επαγωγής της περιέλιξης του ρότορα, η οποία είναι εναλλασσόμενη, σε συνεχή τάση.

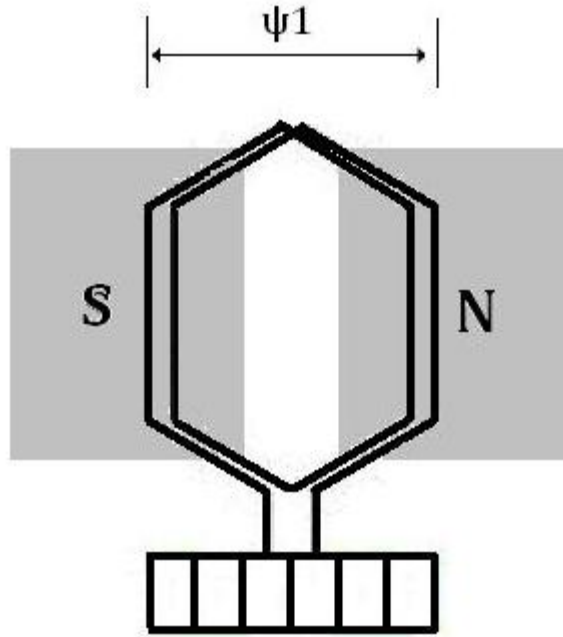


Σχήμα 3.4: Ρότορας – επαγωγικό τύμπανο με συλλέκτη

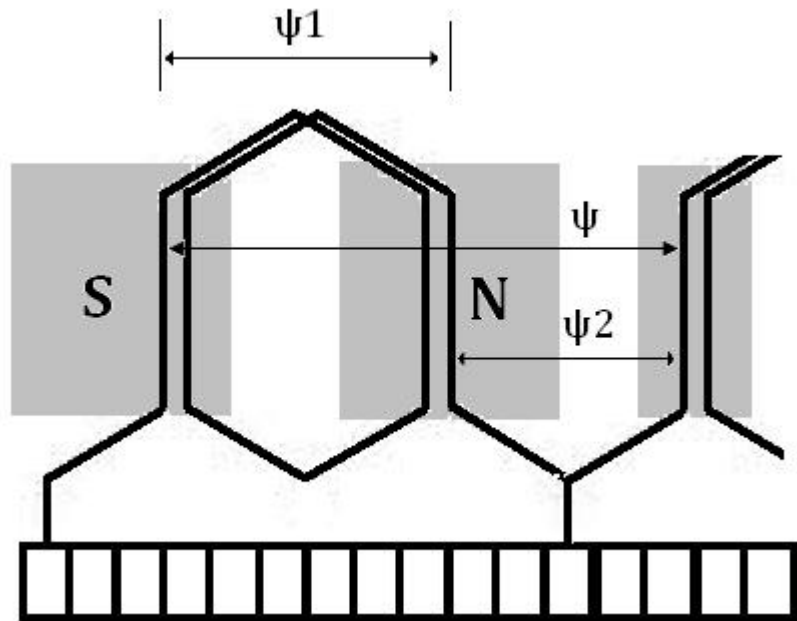
Η περιέλιξη του ρότορα κατασκευάζεται σε δύο μορφές, σε απλό βρογχοτύλιγμα και σε κυματοτύλιγμα. Στο απλό βρογχοτύλιγμα τα δύο άκρα κάθε πηνίου συνδέονται σε δύο γειτονικούς τομείς ενώ στο κυματοτύλιγμα, τα άκρα του κάθε πηνίου προχωράνε από πόλο σε πόλο υπό μορφή κύματος.



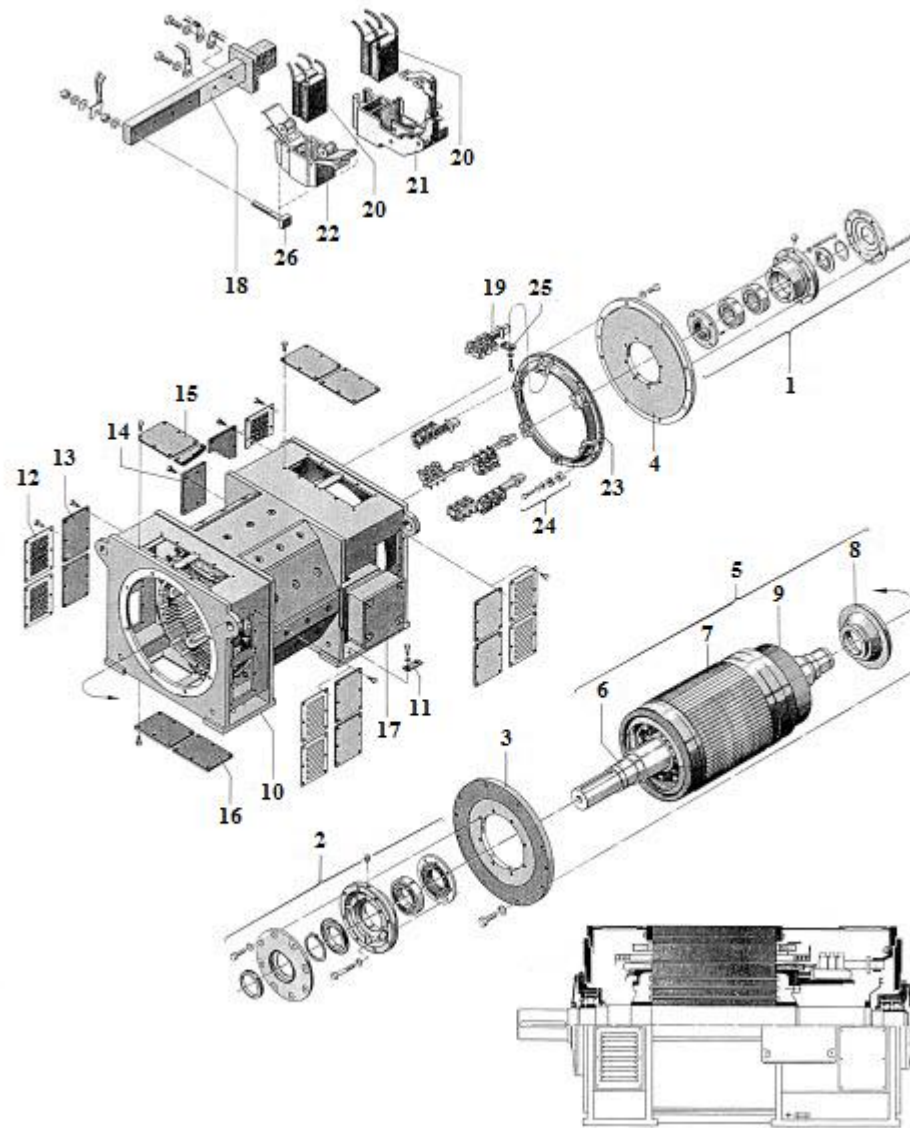
Σχήμα 3.5: Ρότορας



Σχήμα 3.6: Βρογχοτόλιγμα



Σχήμα 3.7: Κυματοτόλιγμα

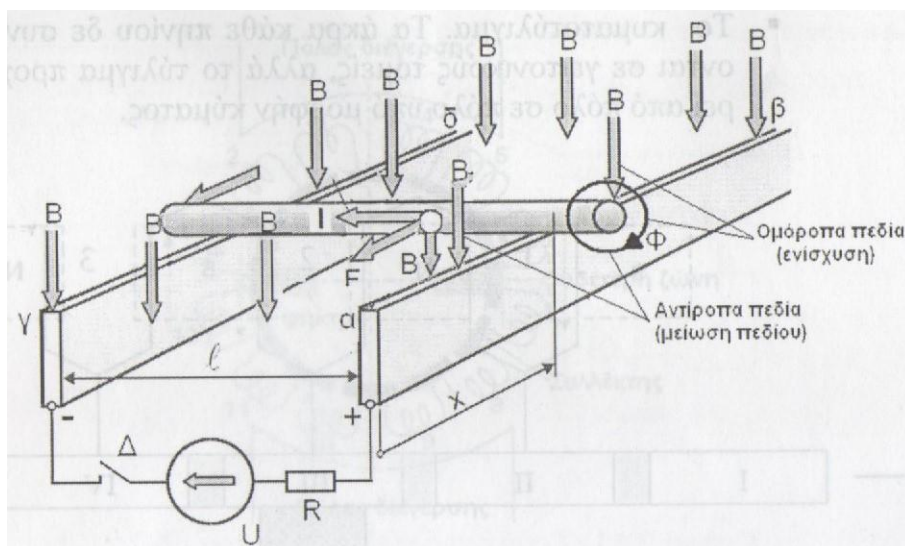


Σχήμα 3.8: Αποσυναρμολογημένη μηχανή συνεχούς ρεύματος

(1) σταθερό έδρανο (2) κινούμενο έδρανο (3) ακραίο προστατευτικό κάλυμμα (4) ακραίο προστατευτικό κάλυμμα (5) σύνολο δρομέα (6) άξονας (7) πυρήνας δρομέα με την περιέλιξή του (8) δακτύλιος σταθεροποίησης του άξονα (9) συλλέκτης (10) πλαίσιο στάτη με τους κύριους πόλους και τους πόλους αντιστάθμισης (11) μάντας σύσφιξης γείωσης (12) έλασμα ρύθμισης αέρα (13-14) πλευρικό κάλυμμα με τσιμούχα (15-16) επάνω κάλυμμα με τσιμούχα (17) κιβώτιο ακροδεκτών (18) βραχίονας ψηκτροφορέα (19) βραχίονας με τον ψηκτροφορέα και τις ψήκτρες άνθρακα (20) ψήκτρες άνθρακα (21) ψηκτροθήκη (22) διαδοχικά ελατήρια πίεσης ψηκτροφορέα (23) δακτύλιος ψήκτρας (24) ατομικώς ενεργούντες γάντζοι σύσφιξης για το δακτύλιο της ψήκτρας (25) μάντας σύσφιξης για το βραχίονα του ψηκτροφορέα (26) βίδες στερέωσης ψηκτροφορέα

3.1.3 Αρχή λειτουργίας

Όταν ένας αγωγός (ή πηνίο) που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα τοποθετηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε να τέμνει τις μαγνητικές γραμμές, τότε αναπτύσσεται στον αγωγό από το μαγνητικό πεδίο δύναμη που τείνει να τον κινήσει.



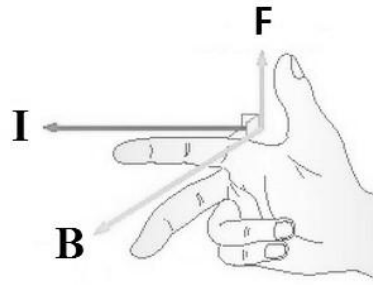
Σχήμα 3.9: Διάταξη αρχής λειτουργίας κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Στο παραπάνω σχήμα έχουμε μια διάταξη η οποία αποτελείται από μια πηγή συνεχούς τάσης (U), από μια αντίσταση (R) και από δύο λείους κυλινδρικούς αγωγούς. Ο ένας αγωγός είναι συνδεδεμένος με τον θετικό πόλο της πηγής κι ο άλλος με τον αρνητικό πόλο της πηγής. Υπό την επίδραση ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου B , με φορά κάθετη προς την επιφάνεια του βιβλίου, βρίσκεται ένα τμήμα των κυλινδρικών αγωγών ($\alpha\beta$ και $\gamma\delta$). Αυτά τα τμήματα συνδέονται κάθετα με μία ράβδο που μπορεί να κινείται ελεύθερα χωρίς τριβή πάνω στους αγωγούς $\alpha\beta$ και $\gamma\delta$.

Όταν ο διακόπτης (Δ) είναι ανοικτός, τότε η ράβδος δε κινείται. Όταν κλείσουμε το διακόπτη (Δ), τότε το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα (I). Σύμφωνα με τον Lorentz στον αγωγό ασκείται δύναμη (F), η οποία είναι ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής B , του μήκους (l), του αγωγού και του ρεύματος (I).

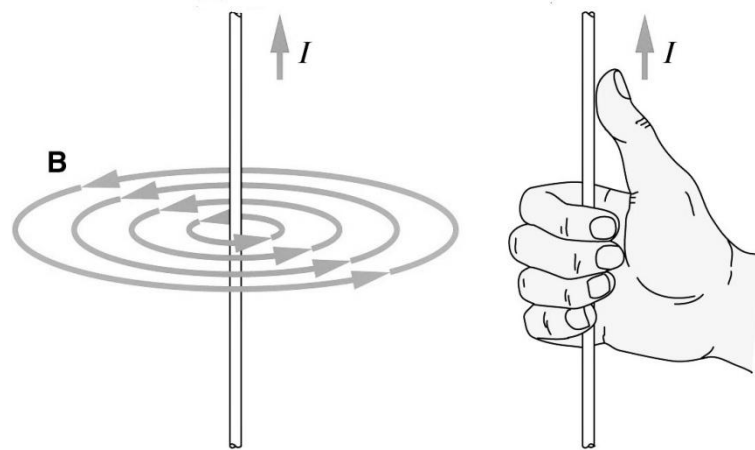
$$F = I \cdot (l \times B) \quad (3.1)$$

Η φορά της δύναμης (F) βρίσκεται με το κανόνα του δεξιού χεριού. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο δείκτης δείχνει τη φορά της ροής του ρεύματος (I), το μεσαίο δάχτυλο τη μαγνητική επαγωγή (B) και ο αντίχειρας τη δύναμη F .



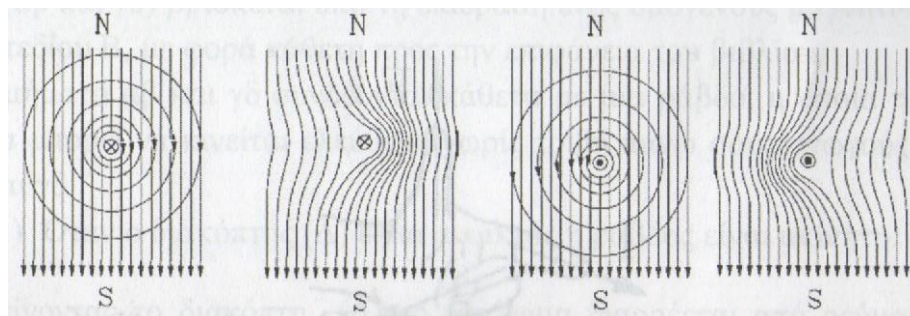
Σχήμα 3.10: Κανόνας δεξιού χεριού

Σύμφωνα με το Maxwell, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα τότε γύρω του δημιουργείται ένα κυκλικό μαγνητικό πεδίο. Η φορά αυτή του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αν πιάσουμε τον αγωγό με το δεξί μας χέρι, έτσι ώστε ο αντίχειρας να δείχνει τη φορά της ροής του ρεύματος (I). Όταν γίνει αυτό τα δάχτυλα θα δείχνουν τη φορά του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 3.11: Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούμε ότι το πεδίο του αγωγού στο αριστερό του μέρος έχει αντίθετη φορά από το ομογενές πεδίο, ενώ στο δεξιό μέρος τα πεδία είναι ομόρροπα. Δηλαδή το πεδίο αριστερά μειώνεται και δεξιά ενισχύεται με αποτέλεσμα ο αγωγός να κινείται προς την πλευρά του εξασθενημένου πεδίου.



Σχήμα 3.12: Ρευματοφόρος αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο

Από τον νόμο της επαγωγής ξέρουμε, ότι όταν ένας αγωγός κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στα άκρα του αγωγού αναπτύσσεται τάση εξ' επαγωγής (u_i), η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας (v) του αγωγού, της μαγνητικής επαγωγής (B) και του μήκους (l) του αγωγού.

$$u_i = (v \times B) \cdot l \quad (3.2)$$

Σύμφωνα με το Lenz η τάση εξ' επαγωγής (u_i) είναι αντίθετη της τάσης τροφοδοσίας και αναπτύσσεται στα άκρα κάθε πηνίου που περιστρέφεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, ανεξάρτητα από τον αν το πηνίο τροφοδοτείται με εξωτερική τάση (κινητήρας) ή όχι (γεννήτρια).

Εφαρμόζοντας το νόμο του Kirchhoff στο κύκλωμα του σχήματος 3.9, έχουμε:

$$u = I \cdot R + u_i \quad (3.3)$$

Από το νόμο του Νεύτωνα γνωρίζουμε ότι, όταν σε ένα σώμα εφαρμόζεται μια δύναμη F ισχύει

$$F = m \cdot a \quad (3.4)$$

Όπου: m η μάζα του σώματος και a η επιτάχυνση του αγωγού

Εκκίνηση μιας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος

Όταν κλείσουμε το διακόπτη Δ (σχήμα 3.9), τότε η ράβδος διαρρέεται από ρεύμα (I), όπου υπολογίζεται ως εξής:

$$I = \frac{(u - u_i)}{R} \quad (3.4)$$

Θεωρούμε ότι η επαγόμενη τάση (u_i) είναι μηδέν κατά την έναρξη της εκκίνησης της ράβδου, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$I = I_a = \frac{U}{R} \cong 10I_n \quad (3.6)$$

Όπου:

I_a = ρεύμα εκκίνησης

I_n = ονομαστική τιμή ρεύματος

Από αυτήν τη σχέση παρατηρούμε ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι σχεδόν δέκα φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα, το οποίο περιορίζεται από τις ωμικές αντιστάσεις της περιέλιξης του ρότορα και του συλλέκτη. Η τιμή του ρεύματος εκκίνησης είναι πολύ σημαντική για την προστασία του κινητήρα και την ομαλή εκκίνησή του.

Πάνω στη ράβδο αναπτύσσεται δύναμη, που έχει ως αποτέλεσμα αυτή να κινείται προς τα δεξιά αναπτύσσοντας στα άκρα της τάση εξ' επαγωγής (u_i). Επειδή η

τάση εξ' επαγωγής είναι αντίθετη προς την τάση τροφοδοσίας της μηχανής (u), το ρεύμα (I) μειώνεται.

$$I = \frac{(u - u_i)}{R} \quad (3.7)$$

Θεωρούμε ότι η ράβδος εκτελεί ομαλή επιταχυνόμενη κίνηση γιατί εφαρμόζεται πάνω της η δύναμη εξ' επαγωγής (F) ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η τάση εξ' επαγωγής (u_i) και μειώνεται το ρεύμα (I). Η μείωση της τάσης (u_i) και του ρεύματος (I) έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η δύναμη (F) και η ταχύτητα (v) της ράβδου.

Τα παραπάνω μεγέθη αυξομειώνονται αλληλάλληλα μέχρις ότου μηδενισθεί η δύναμη (F) που ασκείται πάνω στη ράβδο και σταθεροποιηθεί η ταχύτητα της ράβδου (ομαλή ευθύγραμμη κίνηση).

$$F = 0 \Rightarrow v = v_c \quad (3.8)$$

Επειδή τα μεγέθη B και l είναι σταθερά θεωρούμε ότι:

$$F = 0 \Rightarrow I = 0 \quad (3.9)$$

Όμως από τη σχέση (3.7) έχουμε $I=0$, όταν $u_i=u$, οπότε η εξίσωση της επαγόμενης τάσης γίνεται:

$$u_i = u_c \cdot B \cdot l \quad (3.10)$$

όπου u_c = σταθερή ταχύτητα

$$u_c = \frac{u_i}{B \cdot l} \quad (3.11)$$

Καθώς η ράβδος κινείται με σταθερή ταχύτητα, εφαρμόζουμε στη ράβδο μια αντίθετη δύναμη (φορτίο) FL , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

Θεωρούμε ότι η δύναμη του φορτίου (FL), είναι μεγαλύτερη από την επαγόμενη δύναμη (F). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κινητήρας να αρχίσει να μειώνει τη ταχύτητά του ($a=F/m<0$). Η μείωση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επαγόμενης τάσης (u_i) και κατά συνέπεια αύξηση του ρεύματος (I).

$$I = \frac{(u - u_i)}{R} \quad (3.12)$$

Η δύναμη εξ' επαγωγής που αναπτύσσεται πάνω στη ράβδο και το ρεύμα (I) είναι ανάλογα μεγέθη, δηλαδή αν αυξηθεί το ρεύμα τότε θα αυξηθεί κι δύναμη (F).

Οι διαδοχικές αυτές αυξομειώσεις συνεχίζονται μέχρι να μηδενιστεί η συνισταμένη δύναμη

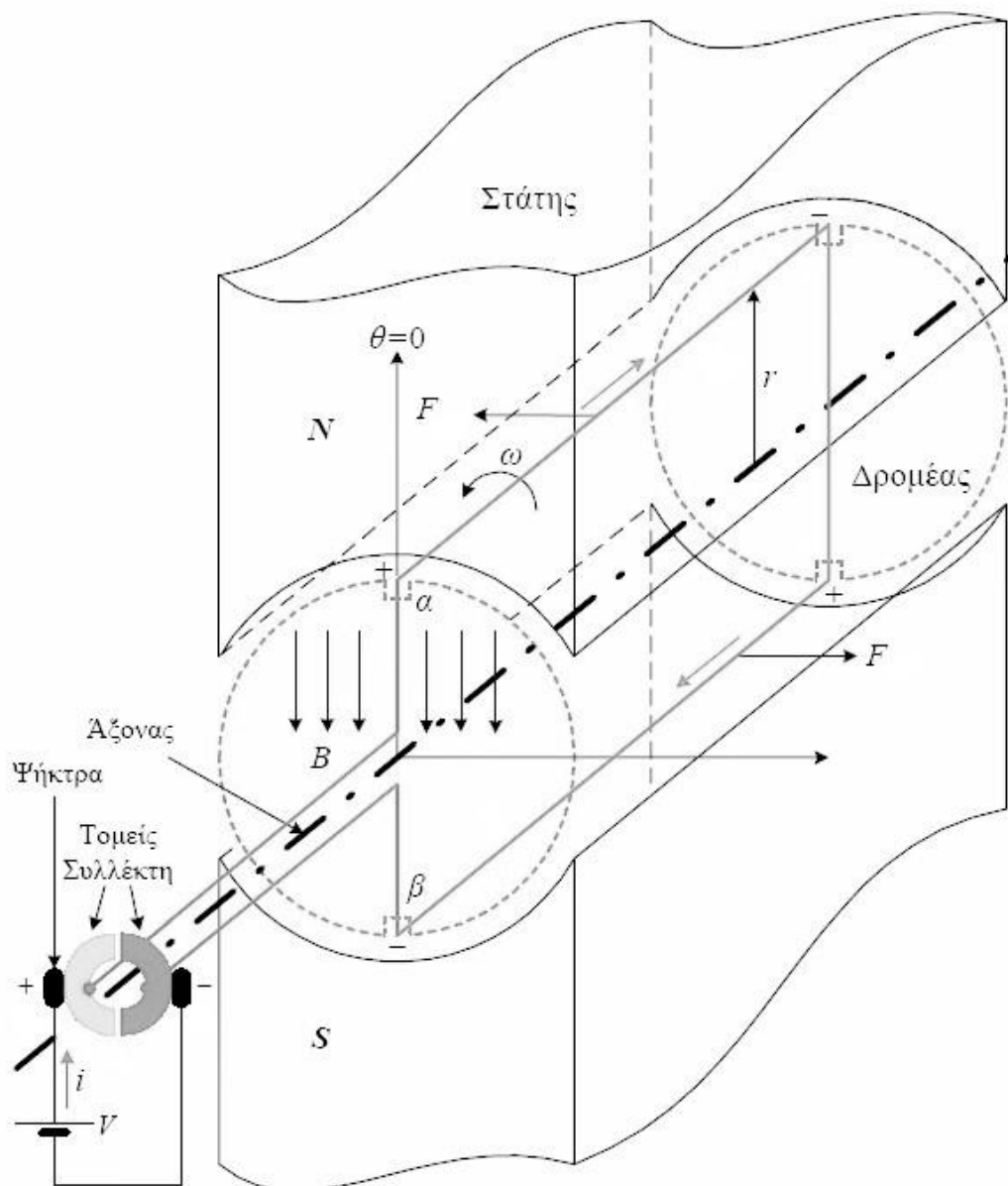
$$\Sigma F = F_L - F = 0 \Rightarrow F_L = F \quad (3.13)$$

$\alpha=0$ και $v=v_c'$ σταθερή ταχύτητα. Τελικά ο κινητήρας σταθεροποιείται με μια ταχύτητα v_c' , η οποία είναι μικρότερη της ταχύτητας (v) χωρίς φορτίο (εν κενώ λειτουργία).

Επειδή η κινούμενη ράβδος διαρρέεται από ρεύμα (I) και στα άκρα της αναπτύσσεται η τάση εξ' επαγωγής (u_i), πάνω στη ράβδο καταναλώνεται ηλεκτρική ισχύς (P), η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ, για τη κίνηση της ράβδου.

$$P = I \cdot u_i = F \cdot v \quad (3.14)$$

3.1.4 Αρχή λειτουργίας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος



Σχήμα 3.13: Αρχή λειτουργίας κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Όπως παρατηρούμε από το παρακάτω σχήμα, όταν ένα πηνίο που είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής B και μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον άξονά του, το τροφοδοτήσουμε με μια συνεχή τάση τα άκρα του, τότε το άκρο α γίνεται θετικό και το άκρο β αρνητικό. Στις δύο πλευρές του πηνίου σχηματίζεται ένα ζεύγος δυνάμεων, το οποίο τείνει να περιστρέψει το πηνίο γύρω από τον άξονά του.

Όταν το πηνίο περιστραφεί κατά μισή στροφή γύρω από τον άξονά του, τότε τα άκρα α και β θα αλλάξουν θέση. Μαζί με το πηνίο θα περιστραφεί κι ο συλλέκτης, ενώ οι ψήκτρες θα μείνουν ακίνητες πάντα στην ίδια θέση, τότε το άκρο β γίνεται

Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος

θετικό και το άκρο α αρνητικό, δηλαδή αλλάζει η φορά του ρεύματος για κάθε μισή περιστροφή του πηνίου. Οπότε έχουμε εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο ανεξάρτητα το αν η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας ή γεννήτρια. Ο συλλέκτης στην περίπτωση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος λειτουργεί σαν αντιστροφέας, ενώ στην περίπτωση του της γεννήτριας σαν ανορθωτής.

Τάση εξ' επαγωγής:

Από το νόμο της επαγωγής ξέρουμε ότι όταν ένα πηνίο κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό, τότε στα άκρα του πηνίου δημιουργείται τάση εξ' επαγωγής u_i :

$$u_i = N \cdot B_m \cdot l \cdot v \quad (3.15)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με την κατασκευή του κινητήρα.

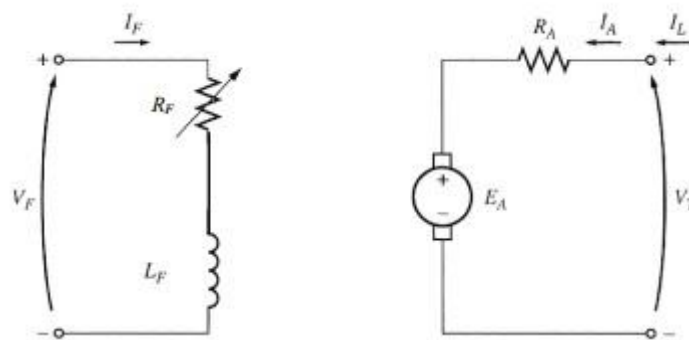
3.1.5 Συνδεσμολογίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

1. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης
2. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης
3. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς
4. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης

Επειδή στις προσομοιώσεις χρησιμοποιούμε κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, θα αναφερθούμε μόνο σε αυτόν.

3.1.6 Κινητήρες ξένης διέγερσης - 1^η βασική εξίσωση



Σχήμα 3.14: Ισοδύναμο κύκλωμα DC κινητήρα ξένης διέγερσης

Το παραπάνω κύκλωμα είναι το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Η ωμική αντίσταση R_F και η αυτεπαγωγή L_F σε σειρά αναπαριστούν την περιέλιξη του στάτη. Η ωμική αντίσταση R_A και η αυτεπαγωγή L_A σε σειρά αναπαριστούν τη περιέλιξη του ρότορα. Η πηγή E_A αναπαριστά τη τάση εξ' επαγωγής.

Εάν θεωρήσουμε την αυτεπαγωγή L_A του ρότορα στη στατική κατάσταση αμελητέα, τότε από το νόμο τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα του ρότορα ισχύει

$$V_T = I_A \cdot R_A + E_A \quad (3.16)$$

Όπου:

V_T η τάση τροφοδοσίας του ρότορα

R_A η ωμική αντίσταση κυκλώματος ρότορα

E_A η τάση εξ' επαγωγής του ρότορα

Η τάση εξ' επαγωγής E_A είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής διέγερσης Φ_e του στάτη, των στροφών n και μιας μηχανικής σταθεράς K .

$$E_A = K \cdot \Phi_e \cdot n \quad (3.17)$$

ή

$$E_A = K_1 \cdot \Phi_e \cdot \omega \quad (3.18)$$

Όπου

$$\omega = 2\pi n$$

K_1 και K = μηχανικές σταθερές

Τώρα πολλαπλασιάζοντας στη σχέση (3.16) με το ρεύμα I_A έχουμε

$$V_T \cdot I_A = I_A^2 \cdot R_A + E_A \cdot I_A \quad (3.19)$$

Δηλαδή η παραπάνω σχέση μας δίνει την ισχύ τροφοδοσίας, τις θερμικές απώλειες, και την ηλεκτρική ισχύ που μετατρέπεται σε μηχανική (περιστροφόμενη κίνηση)

$$P_1 = I_A \cdot V_T$$

$$P_R = I_A^2 \cdot R_A$$

$$P_2 = I_A \cdot E_A$$

Η ροπή στον άξονα της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{P_2}{\omega} = \frac{E_A \cdot I_A}{\omega} = \frac{K \cdot \Phi_e \cdot n \cdot I_A}{2\pi n} = \frac{K \cdot \Phi_e \cdot I_A}{2\pi}$$

$$T = \frac{K \cdot \Phi_e \cdot I_A}{2\pi} \quad (3.20)$$

3.1.7 2^η βασική εξίσωση

Θεωρούμε ότι η ροή διέγερσης (Φ_e) είναι σταθερή γιατί το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με σταθερή τάση. Για αυτό το λόγο η ροπή T στον άξονα του κινητήρα είναι ανάλογη του ρεύματος (I_A) της περιέλιξης του ρότορα.

$$T \sim I_A \quad (3.21)$$

Αντικαθιστούμε τις σχέσεις της τάσης

$$E_A = K \cdot \Phi_e \cdot n \quad (3.22)$$

και του ρεύματος

$$I_A = \frac{2\pi \cdot T}{K \cdot \Phi_e} \quad (3.23)$$

στην εξίσωση της τάσης V_T και λαμβάνουμε

$$V_T = I_A \cdot R_A + E_A$$

$$V_T = I_A \cdot R_A + K \cdot \Phi_e \cdot n$$

$$n = \frac{V_T - I_A \cdot R_A}{K \cdot \Phi_e} = \frac{V_T}{K \cdot \Phi_e} - \frac{I_A \cdot R_A}{K \cdot \Phi_e} \quad (3.24)$$

$$n = \frac{V_T}{K \cdot \Phi_e} - \frac{2\pi \cdot T \cdot R_A}{(K \cdot \Phi_e)^2}$$

$$n = \frac{V_T}{K \cdot \Phi_e} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(K \cdot \Phi_e)^2} \cdot T \quad (3.25)$$

3.1.8 3^η βασική εξίσωση

Από τη δεύτερη βασική εξίσωση παρατηρούμε ότι οι στροφές του κινητήρα είναι συνάρτηση της τάσης τροφοδοσίας (V_T), της μαγνητικής ροής (Φ_e), της ωμικής αντίστασης (R_A) του ρότορα και του φορτίου ($T \sim I_A$)

$$\omega \sim n = f(V_T, \Phi_e, R_A)$$

Ο πρώτος όρος της σχέσης (3.25) μας δίνει τις στροφές του κινητήρα στην εν κενό λειτουργία (λειτουργία χωρίς φορτίο).

$$n_0 = \frac{V_T}{K \cdot \Phi_e} \quad (3.26)$$

Στο δεύτερο όρο της σχέσης (3.25) παρατηρούμε τη μείωση των στροφών (Δn) κατά τη λειτουργία με φορτίο.

$$\Delta n = \frac{2\pi R_A}{(K \cdot \Phi_e)^2} \cdot T \quad (3.27)$$

Οι σχέσεις (3.24) και (2.25) γίνονται:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \quad (3.28)$$

$$n = n_0 - \Delta n \quad (3.29)$$

Από τις εξισώσεις (3.24) και (3.25) παρατηρούμε ότι αν αυξήσουμε το ρεύμα (I_A) του ρότορα, δηλαδή το φορτίο, θα αυξηθεί η πτώση τάσης στην αντίσταση (R_A) με αποτέλεσμα να μειωθούν οι στροφές. Μπορεί να έχουμε μείωση λόγω της μεταβολής φορτίου αλλά αυτή η μεταβολή είναι μικρή. Για αυτό το λόγο οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου χρειάζονται σταθερές στροφές κατά τη μεταβολή του φορτίου.

3.1.9 Ρύθμιση των στροφών με μεταβολή της αντίστασης R_A

Μια μέθοδος ελέγχου των στροφών του κινητήρα είναι αυτή που χρησιμοποιούμε μια μεταβαλλόμενη ωμική αντίσταση σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου.

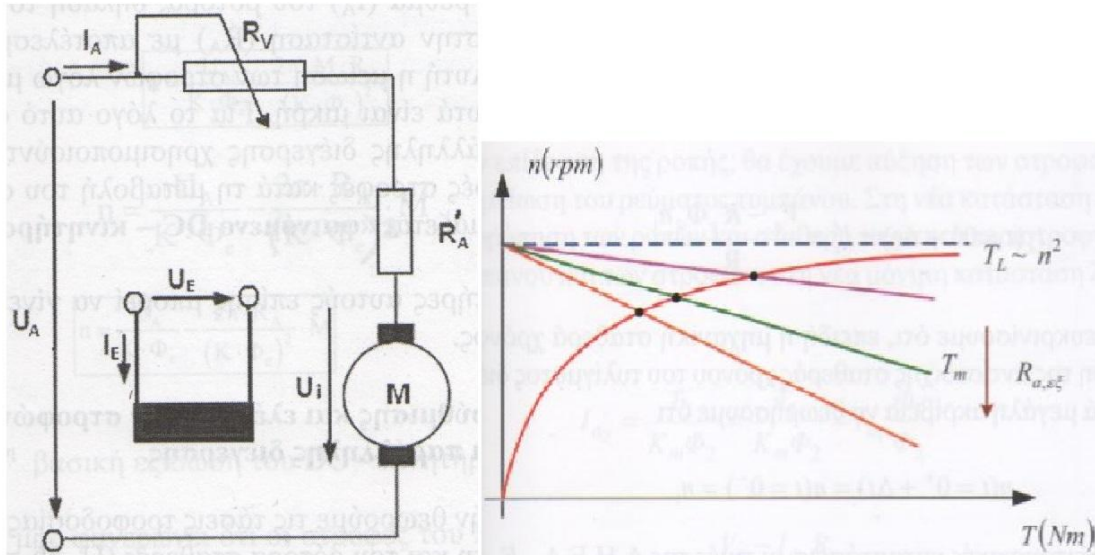
Ας υποθέσουμε ότι οι τάσεις τροφοδοσίας του ρότορα και του στάτη είναι σταθερές. Οπότε οι στροφές εξαρτώνται από το φορτίο (T) και την αντίσταση (R_v) (Σχήμα 3.15). Η συνολική αντίσταση του ρότορα αυξάνεται καθώς συνδέεται σε σειρά με αυτήν η αντίσταση R_v . Οπότε θα έχουμε:

$$R_A = R_v + R'_A$$

Από την εξίσωση των στροφών:

$$n = \frac{V_T}{K \cdot \Phi_e} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(K \cdot \Phi_e)^2} \cdot T \quad (3.30)$$

παρατηρούμε, ότι μεταβάλλοντας την αντίσταση R_A , οι στροφές μεταβάλλονται στην περιοχή $0 < n < n_N$, όπου n_N οι ονομαστικές στροφές. Η χαρακτηριστική στροφών-ροπής $n=f(T)$, με παράμετρο την αντίσταση R_A , είναι ευθεία. Η κλίση της ευθείας μεταβάλλεται όταν μεταβάλουμε την αντίσταση R_v . Όπως φαίνεται στο σχημα (3.15), οι στροφές μεταβάλλονται γραμμικά με το φορτίο.



Σχήμα 3.15: Χαρακτηριστική ροπής-στροφών, $V_a = \text{σταθ.}$, $\Phi = \text{σταθ.}$

Λόγω μεγάλων απωλειών στην αντίσταση R_v , η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μικρών κινητήρων.

Επίσης η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για να περιορίσουμε το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης $I_{εκ. \max}$.

$$I_{εκ \max} = \frac{V_T}{R_A} \cong 10 \cdot I_N \quad (3.31)$$

Επειδή η τάση εξ' επαγωγής που αναπτύσσεται στο ρότορα είναι μηδέν κατά την εκκίνηση, το ρεύμα εκκίνησης περιορίζεται από τη συνολική αντίσταση.

$$\begin{aligned} E_A &= C \cdot \Phi \cdot n \\ E_A &= 0 \\ n &= 0 \\ I_{εκ} &= \frac{V_T}{R_A} = \frac{V_T}{R'_A + R_v} \end{aligned} \quad (3.32)$$

3.2 Ρύθμιση των στροφών με μεταβολή της τάσης τυμπάνου

Μια άλλη μέθοδος ελέγχου των στροφών είναι η μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του ρότορα.

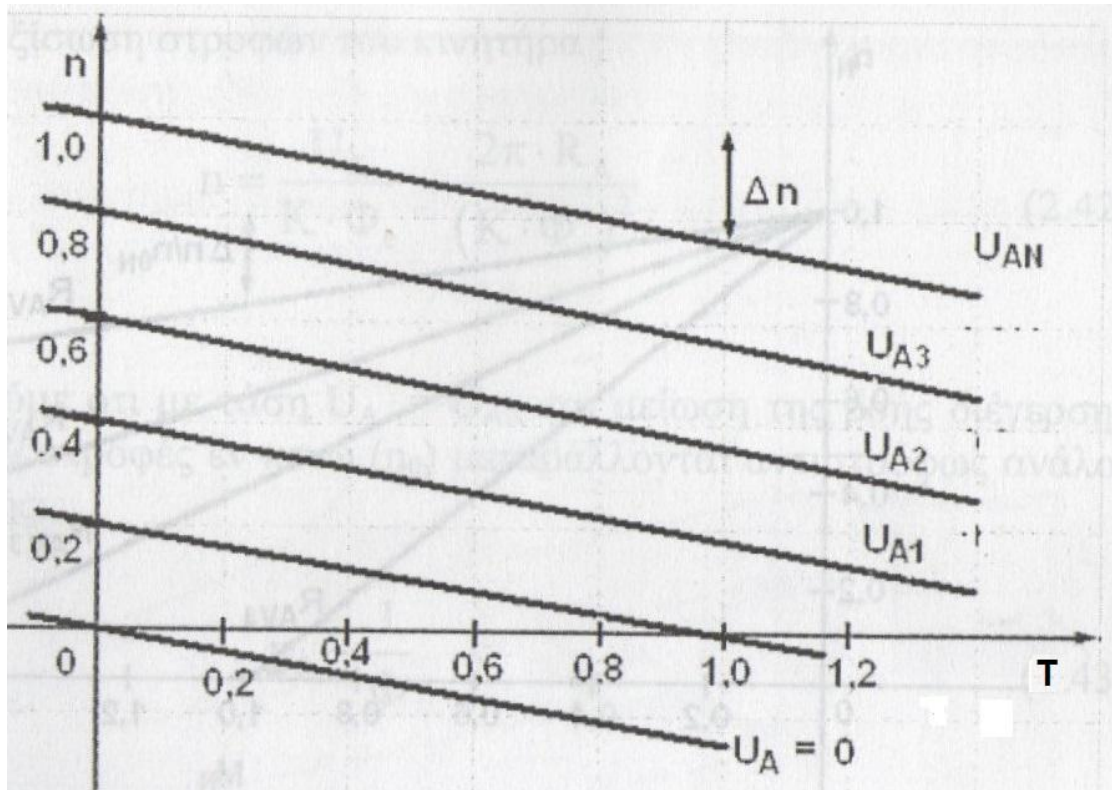
$$n = \frac{V_T}{C \cdot \Phi_e} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(C \cdot \Phi_e)^2} \cdot T \quad (3.33)$$

Όταν μεταβάλουμε την τάση τροφοδοσίας του ρότορα V_T , τότε μεταβάλλεται το σημείο τομής της χαρακτηριστικής με τον άξονα των στροφών (n). Η χαρακτηριστική μεταβάλλεται παράλληλα γιατί ο συντελεστής $\alpha = (2\pi \cdot R_A) / (C \cdot \Phi_e)^2$ μένει σταθερός (Σχήμα 3.16). Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο ($T=0$), περιστρέφεται με το μέγιστο αριθμό των στροφών n_0 .

$$n_0 = \frac{V_A}{C \cdot \Phi_e} \quad (3.34)$$

Οι στροφές n_0 είναι ανάλογες της τάσης V_{AN} , ($0 < V_{AN} < V_A$) και μειώνονται με την αύξηση του φορτίου κατά Δn .

$$\Delta n = \frac{R_A}{C_2 \cdot \Phi_e^2} \cdot T \quad (3.35)$$



Σχήμα 3.16: Χαρακτηριστικές ροπής-στροφών για διάφορες τιμές της τάσης V_A

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μετατροπείς & γέφυρες

4.1 Μετατροπείς

Υπάρχουν τέσσερα είδη μετατροπέων:

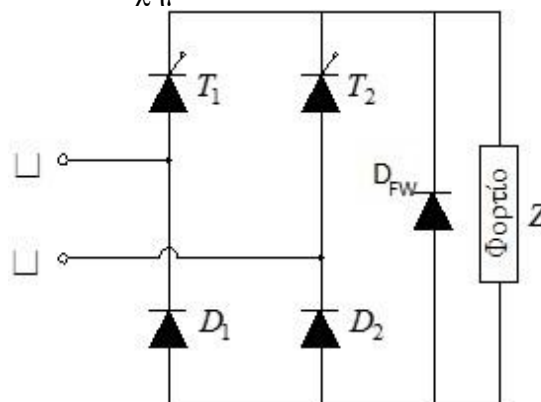
1. Μετατροπείς AC/DC
2. Μετατροπείς DC/DC
3. Μετατροπείς AC/AC
4. Μετατροπείς DC/AC

4.1.1 Μετατροπείς AC/DC (Ανορθωτικές διατάξεις)

Πολλές φορές ανάλογα με τον τύπο και την τιμή της ισχύος που απαιτείται σε μια διάταξη, καθίσταται αναγκαία η μετατροπή και η ρύθμιση της τάσης για τον έλεγχο DC κινητήρων. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρησιμοποιούμε ανορθωτικές διατάξεις (γέφυρες και μετατροπείς). Γενικά οι διατάξεις αυτές των γεφυρών και των μετατροπέων αποτελούνται από διόδους, θυρίστορ (SCR>O), διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT) κ.ά.

Μετατροπέας AC/DC(συμμετρική ημieleγχόμενη γέφυρα)

Ο μετατροπέας AC/DC, γνωστός ως και ανορθωτής, είναι όπως αντιλαμβανόμαστε από την ονομασία του, μια διάταξη η οποία μετατρέπει την AC τάση που λαμβάνει στην είσοδό του σε DC τάση στην έξοδό του για να τροφοδοτήσει κάποιο DC φορτίο (συνήθως κινητήρα DC). Η διάταξη αυτή αποτελείται από θυρίστορ και διόδους. Πιο αναλυτικά, χαρακτηρίζεται ως ημieleγχόμενη γιατί περιέχει ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα στοιχεία (θυρίστορ και διόδους αντίστοιχα). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ημieleγχόμενες διατάξεις λειτουργούν στο 1^ο τεταρτημόριο προσδίδοντας έτσι συγκριμένη πολικότητα στην πλευρά της εξόδου τους, δικαιολογώντας έτσι την ονομασία τους ως ανορθωτές. Επίσης χαρακτηρίζεται συμμετρική επειδή σε κάθε κλάδο έχει από ένα θυρίστορ και μια δίοδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

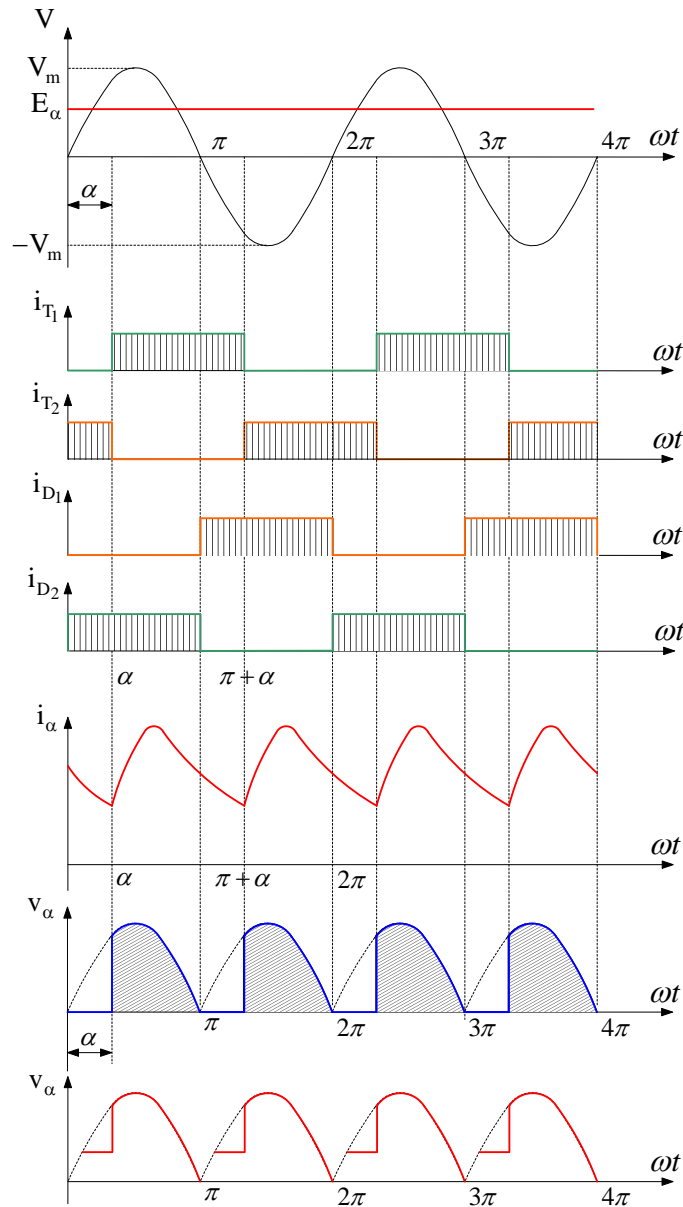


Σχήμα 4.1

Παρατηρούμε πως τοποθετείται και μια διόδος ελευθέρως ροής στην έξοδο της γέφυρας.

Συνεχής αγωγή

Αν υποθέσουμε ότι η αυτεπαγωγή στο τύλιγμα τυμπάνου του κινητήρα, που είναι συνδεδεμένος ως φορτίο, είναι πολύ μεγάλη τότε θα έχουμε συνεχή αγωγή του ρεύματος καθ'όλη τη διάρκεια λειτουργίας του μετατροπέα. Έτσι θα έχουμε τις εξής κυματομορφές(Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2

Η έναυση των θυρίστορ επιτυγχάνεται συμμετρικά σε χρόνους α για το θυρίστορ T1 και α+π για το θυρίστορ T2. Παρατηρούμε πως για χρονική περίοδο α<ωt<π ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ορθή τάση δικτύου καθώς άγουν το

θυρίστορ T1 και η δίοδος D2 η οποία έχει πολωθεί ορθά. Στη χρονική περίοδο $\pi < \omega t < \pi + \alpha$ αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσης εισόδου με αποτέλεσμα να σταματά η αγωγή της διόδου D2 (καθώς είναι πολωμένη ανάστροφα τώρα) και πολώνεται ορθά η δίοδος ελευθέρως ροής με αποτέλεσμα να αρχίσει να άγει εγκλωβίζοντας έτσι το ρεύμα που αποθηκευόταν στο πηνίο του τυμπάνου και δημιουργώντας έτσι έναν κλειστό βρόγχο. Με αυτό τον τρόπο βραχυκυκλώνει το τυλίγμα τυμπάνου και καταναλώνεται η άεργος ισχύς που είχε αναπτυχθεί. Σχηματικά απαλοοίφονται οι αρνητικές τιμές στην τάση εξόδου, ανορθώνοντας έτσι την τάση εξόδου. Τη χρονική στιγμή $\pi + \alpha$ δίνεται ένας δεύτερος παλμός έναυσης ο οποίος, καθώς η τάση εισόδου έχει αλλάξει πολικότητα, αναγκάζει την αγωγή του θυρίστορ T2 και της διόδου D1 η οποία τώρα είναι πολωμένη ορθά. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με πριν, συνεχίζεται δηλαδή η αγωγή μέχρι την χρονική στιγμή 2π όπου αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσης εισόδου και μέσω του κλειστού βρόγχου που δημιουργεί η δίοδος ελεύθερης ροής η τάση που παίρνουμε στην έξοδο είναι ανορθωμένη και θετικής τιμής.

Γενικά ισχύουν:

Για $\alpha < \omega t < \pi$

$$V_a(t) = u(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$$

Για $\omega t > \pi$

$$V_a(t) = 0 = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$$

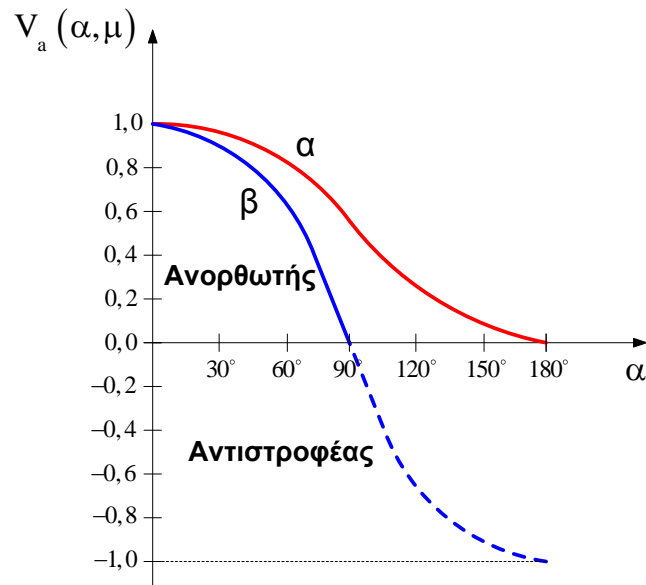
Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου είναι:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_a(t) dt = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\alpha} V_a(t) d\omega t + \int_{\alpha}^{\pi} V_a(t) d\omega t \right]$$

$$V_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_a(t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha] = \frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

Από τις σχέσεις αυτές μπορούμε να συγκρίνουμε σχηματικά την μέση τάση εξόδου της συμμετρικής ημιελεγχόμενης και της πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας (Σχήμα 4.3).



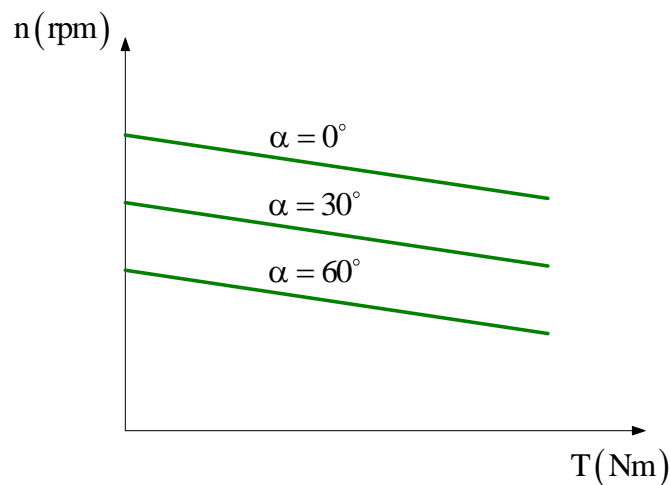
Σχήμα 4.3

Στο σχήμα αυτό η κυματομορφή με ένδειξη α είναι της ημieleγχόμενης γέφυρας και με ένδειξη β της πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας. Παρατηρούμε πως για λειτουργία στο 1^ο τεταρτημόριο ($0 < \alpha < 90^\circ$) η μέση τιμή της τάσης της ημieleγχόμενης γέφυρας είναι μεγαλύτερη από αυτήν της πλήρους ελεγχόμενης (μεγαλύτερες ενεργές τιμές). Αυτό αποδίδει το πλεονέκτημα στην ημieleγχόμενη γέφυρα στην εκκίνηση κινητήρων καθώς ελέγχουμε καλύτερα την ασκούμενη ισχύ. Προφανώς αποδεικνύεται από το σχήμα ότι η ημieleγχόμενη γέφυρα δεν μπορεί να λειτουργήσει ως αντιστροφείας.

Οι στροφές του κινητήρα δίνονται από την σχέση:

$$n = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K_g \cdot \Phi} = \frac{(\sqrt{2}V_{rms}/\pi) \cdot (1 + \cos \alpha)}{K_g \cdot \Phi} - \frac{R_a \cdot T}{K_g \cdot K_m \cdot \Phi^2}$$

Αξίζει να μελετηθεί η χαρακτηριστική στροφών – ροπής του κινητήρα για διάφορες τιμές γωνίας έναυσης α (Σχήμα 4.4).

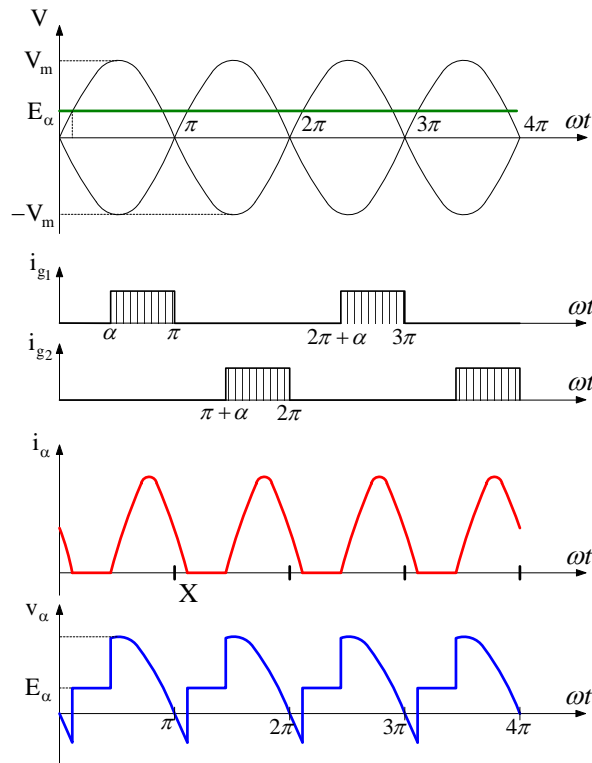


Σχήμα 4.4

Παρατηρούμε πως όσο μειώνεται η ροπή που απαιτείται (δηλαδή μειώνεται το φορτίο) τόσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα για διάφορες τιμές γωνιών έναυσης.

Ασυνεχής αγωγή

Ως ασυνεχή αγωγή ορίζουμε την ασυνέχεια του ρεύματος τυμπάνου στην διάταξη της ημιελεγχόμενης γέφυρας. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο ασυνεχή αγωγή εννοούμε την εκφόρτιση του ρεύματος τυμπάνου i_a , μέσω της διόδου ελευθέρως ροής, σε τυχαία χρονική στιγμή εντός του χρονικού διαστήματος $\pi < \omega t < \pi + \alpha$. Η εκφόρτιση αυτή οφείλεται συνήθως σε πολύ μικρά φορτία και ενδεχομένως υψηλές ταχύτητες ή σε πολύ μικρή αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου. Επιδιώκουμε την αποφυγή αυτής της κατάστασης λειτουργίας καθώς μειώνεται η ταχύτητα απόκρισης της διάταξής μας και κατ' επέκτασιν της ακριβούς ρύθμισης της ταχύτητας του κινητήρα. Για το λόγο αυτό είναι συνηθέστερη η χρήση εξωτερικά σε σειρά συνδεδεμένων αυτεπαγωγών. Λαμβάνουμε λοιπόν τις εξής κυματομορφές (Σχήμα 4.5):



Σχήμα 4.5

Παρατηρούμε πως για χρονικό διάστημα $\alpha < \omega t < \pi$ η συμπεριφορά της διάταξης είναι όμοια με αυτήν της συνεχούς αγωγής. Για $\omega t = X < \pi + \alpha$ έχουμε πλήρη εκφόρτιση του ρεύματος και η σταθερή τάση που εμφανίζεται είναι η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (Α.Η.Ε.Δ.) (E_a).

Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου δίνεται από τη σχέση:

$$V_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \alpha} V_a(\omega t) d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha] + E_a \left[\frac{\pi + \alpha - X}{\pi} \right]$$

Η πραγματική ισχύς είναι:

$$P = V_{rms} \cdot I_p = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{rms} \cdot I_a}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Η Α.Η.Ε.Δ. του κινητήρα είναι:

$$E_a = V_a - I_a R_a$$

Η εσωτερική ισχύς είναι:

$$P_e = E_a \cdot I_a$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα θα είναι:

$$P_e = T_e \cdot \omega = T_e \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow T_e = \frac{60 P_e}{2\pi n}$$

Η άεργος ισχύς που αναπτύσσεται θα είναι:

$$Q = V_{rms} \cdot I_Q = \frac{\sqrt{2} V_{rms} I_a}{\pi} \sin a$$

$$Q = V_{\epsilon\iota\sigma} \cdot I_{\epsilon\iota\sigma} \cdot \sin \varphi$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta(\%) = \frac{P_{\epsilon\xi}}{P_{\epsilon\iota\sigma}} \cdot 100 = \frac{P_e}{P_{\epsilon\iota\sigma}} \cdot 100$$

4.1.2 Μετατροπέας DC/DC

Πολλές φορές είναι απαραίτητη η μετατροπή DC τάσης σε DC τάση διαφορετικής τιμής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεσσάρων μεθόδων:

- Με ελεγχόμενη ωμική αντίσταση. Παρεμβάλλοντας δηλαδή μια ωμική αντίσταση και επηρεάζοντας την τιμή της τάσης εξόδου.
- Με ζεύγος κινητήρα – γεννήτριας DC. Ελέγχουμε δηλαδή το πεδίο διέγερσης της γεννήτριας.
- Με αντιστροφέα – ανορθωτή. Χρησιμοποιώντας Μ/Σ με τις απαραίτητες λήψεις και μια ανορθωτική διάταξη ελέγχουμε την τάση εξόδου.
- Με μετατροπέα DC/DC (ψαλιδιστή). Ο μετατροπέας αυτός είναι το ισοδύναμο του Μ/Σ στο AC αλλά με συνεχή μεταβαλλόμενο λόγο μετασχηματισμού.

Οι μετατροπείς DC/DC (ψαλιδιστές) μπορούν να διακριθούν σε κατηγορίες:

Ανάλογα με τη σχέση της τάσης εξόδου:

- Ψαλιδιστές υποβιβασμού (Step-down dc/dc converter) ή εν σειρά ψαλιδιστές (Buckdc/dcconverter). Οι μετατροπείς αυτής της κατηγορίας έχουν τάση εξόδου μικρότερης ή ίσης τιμής σε σύγκριση με την τάση εισόδου τους.
- Ψαλιδιστές ανύψωσης (Step-up dc/dc converter) ή εν παραλλήλω ψαλιδιστές (Boost dc/dc converter). Οι μετατροπείς αυτής της κατηγορίας έχουν τάση εξόδου μεγαλύτερης ή ίσης τιμής σε σύγκριση με την τάση εισόδου τους.
- Ψαλιδιστές υποβιβασμού - ανύψωσης (Step down/up dc/dc converter) ή εν σειρά - εν παραλλήλω ψαλιδιστές (Buck-Boost dc/dc converter)

Ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας:

- Ψαλιδιστής για ένα τεταρτημόριο: $+U_{0,av} + I_{0,av}$ (Κλάση A , B)
- Ψαλιδιστής για δύο τεταρτημόρια: $\pm U_{0,av} + I_{0,av}$ ή $+U_{0,av} \pm I_{0,av}$ (Κλάση C , D)
- Ψαλιδιστής για τέσσερα τεταρτημόρια: $\pm U_{0,av} \pm I_{0,av}$ (Κλάση E)

Ανάλογα με τον τρόπο μεταφορά ενέργειας:

- Ψαλιδιστής με απ' ευθείας σύνδεση
- Ψαλιδιστής με έμμεση σύνδεση (ή με αποθήκευση)

Ο μετατροπέας DC/DC, γνωστός ως και ψαλιδιστής (ή chopper), είναι μια κυκλωματική διάταξη η οποία επιτρέπει την μετατροπή μιας DC τάσης συγκεκριμένης τιμής σε μια διαφορετικής τιμής DC τάσης. Επιπλέον μπορεί να αλλάξει η πολικότητα της τάσης αυτής εάν το επιθυμούμε. Για την κατασκευή και σύνθεση των μετατροπέων αυτών, συνήθως χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά στοιχεία όπως τρανζίστορ ισχύος, IGBT (internal box gate transistor), MOSFET ισχύος, GTO (gate turn-off thyristor), δίοδοι, LC κυκλώματα κ.ά. Σκοπός των μετατροπέων αυτών είναι η σταθερή και ελεγχόμενη τάση εξόδου τους ανεξαρτήτως από την κατάσταση (αυξομείωση) της τάσεως εισόδου τους. Συχνότερες εφαρμογές τους είναι η χρήση τους σαν πηγή τροφοδοσίας

μεταβλητής τάσης για αντιστροφείς. Επίσης, τους συναντούμε και σε ηλεκτροσυγκολλήσεις. Οι μετατροπείς αυτοί πλεονεκτούν έναντι άλλων τεχνικών ελέγχου DC τάσης επειδή παρουσιάζουν:

- Μικρό κόστος
- Υψηλό βαθμό απόδοσης
- Γρήγορη δυναμική απόκριση

Επειδή το φορτίο ως επί το πλείστον έχει επαγωγική συμπεριφορά, η τιμή της μέσης τάσης δίνεται από την σχέση:

$$U_{0,av} = \frac{1}{T} \int_0^T U_o(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} U_i dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right] = \frac{t_{on}}{T} U_i = a U_i$$

όπου a είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης ο οποίος ορίζεται ως:

$$a = \frac{t_{on}}{T}$$

Επομένως για την μεταβολή της τάσης εξόδου έχουμε δυο μεθόδους:

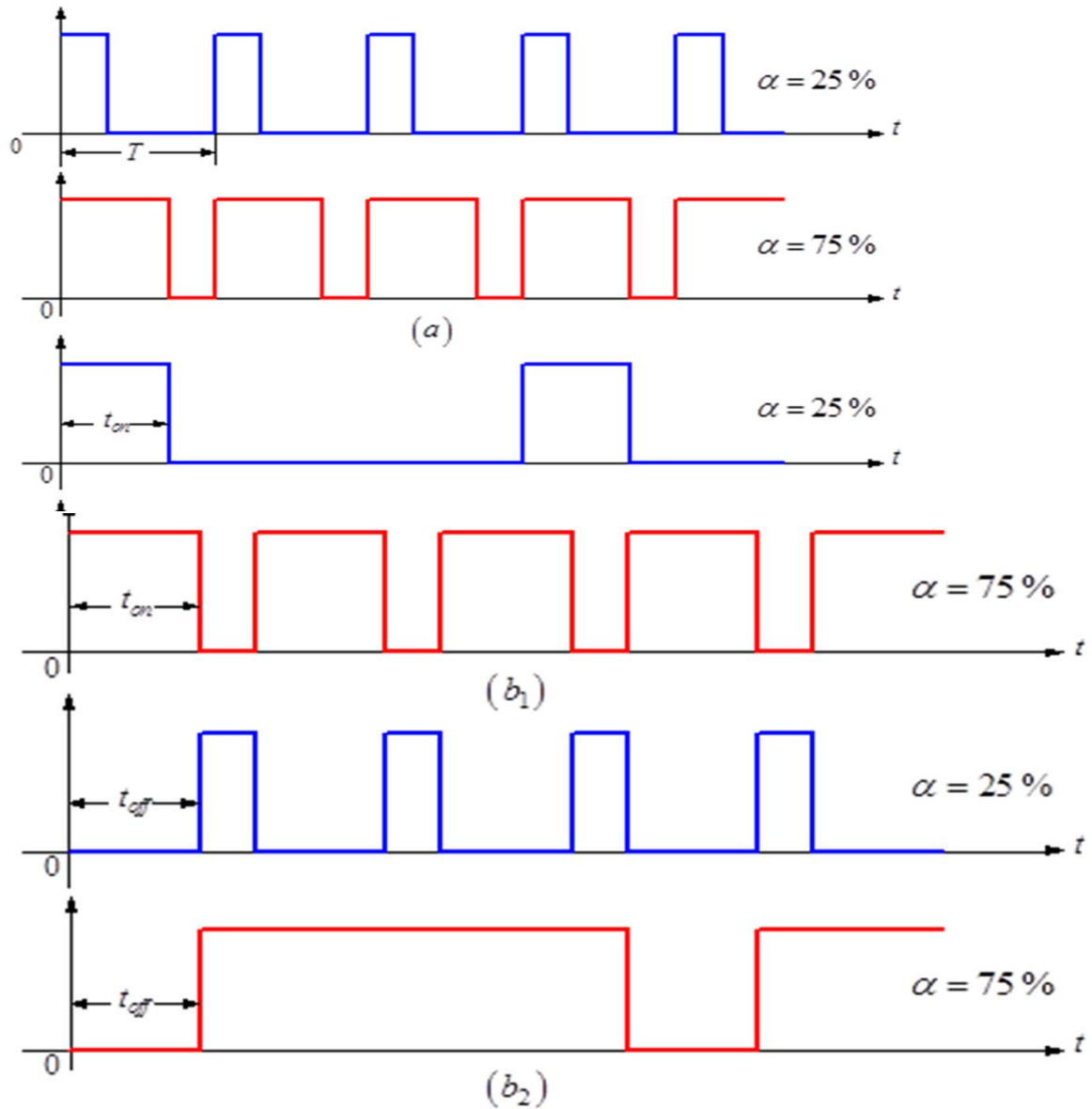
- Την διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM : PulseWidthModulation)
- Την διαμόρφωση συχνότητας (FM : FrequencyModulation)

Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM : PulseWidthModulation)

Με τη χρήση της μεθόδου της διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) μεταβάλλουμε τον χρόνο αγωγής (t_{on}) ενώ παράλληλα η συχνότητα ($f = 1/T$, δηλαδή το T) παραμένει σταθερή (Σχήμα 4.6 α).

Διαμόρφωση συχνότητας (FM : Frequency Modulation)

Με τη χρήση της μεθόδου της διαμόρφωσης συχνότητας (FM) μεταβάλλουμε την περίοδο T και επομένως την συχνότητα φενώ έχουμε σταθερή τιμή στο t_{on} ή στο t_{off} (Σχήμα 4.6β₁ και β₂).



Σχήμα 4.6

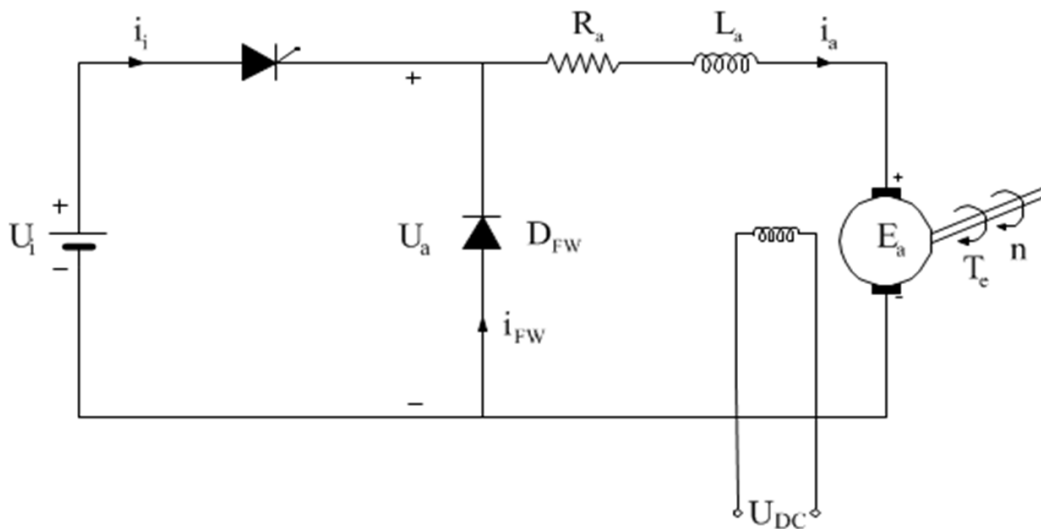
Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει δυο μειονεκτήματα:

- Για να μεταβάλλουμε την τάση απαιτείται η μεταβολή της συχνότητας σε πολύ μεγάλη κλίμακα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δυσκολία σχεδίασης φίλτρων και την έντονη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση.

- Οι μεγάλες χρονικές περίοδοι μη αγωγής (t_{off}) σε χαμηλά επίπεδα τάσης προκαλούν ασυνέχεια στην ροή του ρεύματος τυμπάνου, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο.

Μετατροπέας κλάσης A

Ο μετατροπέας κλάσης A είναι ένας μετατροπέας ο οποίος δουλεύει στο 1^ο τεταρτημόριο και ανήκει στους μετατροπείς υποβιβασμού (step-downconverter). Όπως προαναφέρθηκε η τάση εξόδου του δεν μπορεί να ξεπερνάει την τάση εισόδου του. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η κυκλωματική διάταξη του μετατροπέα κλάσης A.

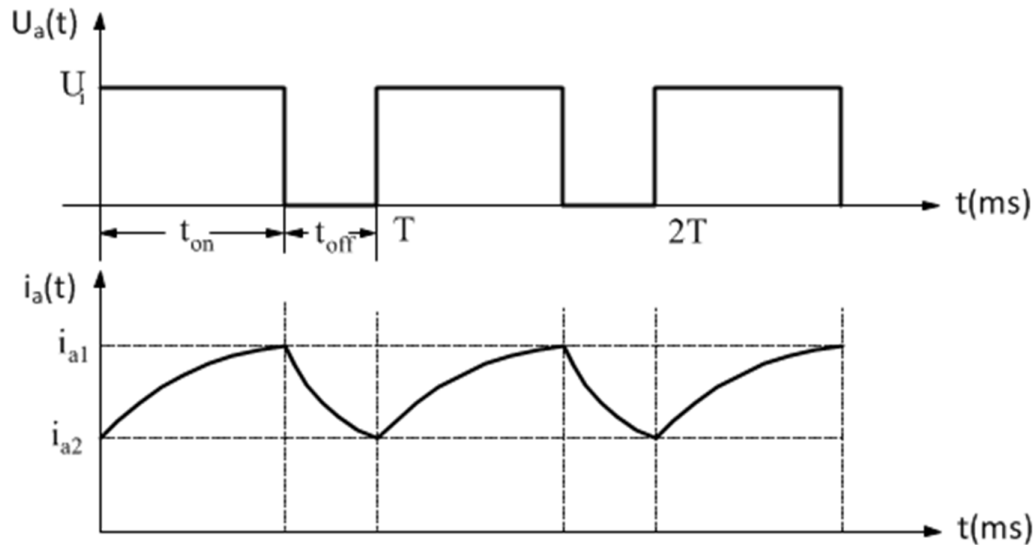


Σχήμα 4.7

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα όταν παλμοδοτείται το θυρίστορ η τάση εισόδου εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος του τυμπάνου. Στα διαστήματα μη αγωγής του θυρίστορ, λόγω της συσσωρευμένης ενέργειας στην αυτεπαγωγή, το τύλιγμα τυμπάνου βραχυκυκλώνεται λόγω της αγωγής μέσω της διόδου ελεύθερης ροής. Η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής ανάλογα τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα και την τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης. Επιθυμούμε την συνεχή αγωγή εφόσον αυτή είναι πρακτικά και οικονομικά εφικτή, καθώς βελτιώνει την δυναμική απόκριση του συστήματος.

Συνεχής αγωγή

Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου καθώς και του ρεύματος του μετατροπέα είναι ως εξής(Σχήμα 4.8):



Σχήμα 4.8

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} V_i dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right] = \frac{t_{on}}{T} V_i = aV_i \quad (4.1)$$

Μεταβάλλοντας επομένως τον βαθμό χρησιμοποίησης λαμβάνουμε γραμμική μεταβολή της μέσης τιμής τάσης εξόδου.

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_a^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_i^2 dt} = \sqrt{\frac{t_{on}}{T}} V_i \quad (4.2)$$

Από την ανάλυση σε σειρά Fourier, η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου του μετατροπέα είναι:

$$V_a(t) = aV_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_i}{n\pi} [\sin 2n\pi\alpha \cos n\omega t + (1 - \cos 2n\pi\alpha) \sin n\omega t] \quad (4.3)$$

όπου

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Η διαφορική εξίσωση του κινητήρα εάν αμελήσουμε την κυμάτωση της Α.Η.Ε.Δ. είναι:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a \quad (4.4)$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.8 στο διάστημα $0 < t < t_{on}$ έχουμε

Για $t = 0^+$ είναι $V_a = V_i$ και $i_a = I_{a2}$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω συνθήκες στην διαφορική εξίσωση θα έχουμε:

$$i_a(t) = I_{a2} e^{-t/T_a} + \left(\frac{V_i - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-t/T_a} \right) \quad (4.5)$$

όπου

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

η σταθερά χρόνου τυλίγματος τυμπάνου.

Σύμφωνα με το ίδιο σχήμα, για $t = t_{on}^-$ είναι $i_a = I_{a1}$.

Αντικαθιστώντας στην (4.5) έχουμε:

$$i_a(t = t_{on}^-) = I_{a1} = I_{a2} e^{-t_{on}/T_a} + \left(\frac{V_i - E_a}{R_a}\right) (1 - e^{-t_{on}/T_a}) \quad (4.6)$$

Στο διάστημα $t_{on} < t < T$ λειτουργεί η δίοδος ελεύθερης ροής ($V_a(t) = 0$). Επομένως για $t = t_{on}^+$ είναι:

$$i_a(t_{on}^-) = i_a(t_{on}^+) = I_{a1} \quad (4.7)$$

και για $t = T$ είναι:

$$i_a(t') = C' e^{-t'/T_a} - \frac{E_a}{R_a} \quad (4.8)$$

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω η γενική μορφή του ρεύματος στο διάστημα $t_{on} < t < T$ είναι:

$$i_a(t') = C' e^{-t'/T_a} - \frac{E_a}{R_a} \quad (4.9)$$

όπου

$$t' = t - t_{on}$$

Στο διάστημα αυτό οι οριακές συνθήκες είναι:

- Για $t' = 0^+$ είναι:

$$i_a(t_{on}^-) = i_a(t_{on}^+) = I_{a1}$$

- Για $t' = t_{off}$ είναι:

$$i_a(T) = i_a(0) = I_{a2}$$

Επομένως

$$i_a(t') = I_{a1} e^{-t'/T_a} - \frac{E_a}{R_a} (1 - e^{-t'/T_a}) \quad (4.10)$$

και

$$i_a(t' = t_{off}) = I_{a2} = I_{a1} e^{-(T-t_{on})/T_a} - \frac{E_a}{R_a} (1 - e^{-(T-t_{on})/T_a})$$

Οι τιμές των I_{a1} και I_{a2} μπορούν να υπολογιστούν από την επίλυση του συστήματος των (4.6) και (4.10). Επομένως:

$$I_{a1} = \frac{V_i}{R_a} \left[\frac{1 - e^{-t_{on}/T_a}}{1 - e^{-T/T_a}} \right] - \frac{E_a}{R_a} \quad (4.11)$$

και

$$I_{a2} = \frac{V_i}{R_a} \left[\frac{e^{t_{on}/T_a} - 1}{e^{T/T_a} - 1} \right] - \frac{E_a}{R_a} \quad (4.12)$$

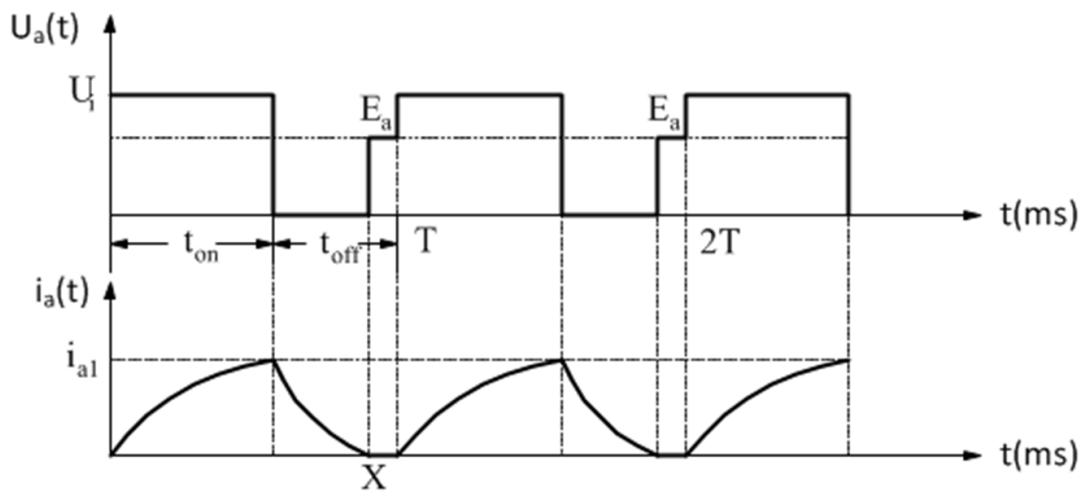
Για $\alpha = 1$, δηλαδή για $t_{on} = T$ έχουμε:

$$I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_i - E_a}{R_a}$$

Έχοντας υπολογίσει τις οριακές τιμές του ρεύματος τυμπάνου (I_{a1} , I_{a2}) μπορούμε μέσω των (4.5) και (4.10) να υπολογίσουμε το ρεύμα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της περιόδου λειτουργίας.

Ασυνεχής αγωγή

Οι κυματομορφές τάσης-ρεύματος στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής είναι (Σχήμα 4.9):



Σχήμα 4.9

Παρατηρούμε πως στο διάστημα μη αγωγής πλήρους εκφόρτισης ($X < t < T$) παρουσιάζεται η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (αντι-HEΔ) λόγω της αυτεπαγωγής στο τυλίγμα τυμπάνου.

Η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου στην ασυνεχή αγωγή είναι:

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

Σύμφωνα με το σχήμα η μέση και η ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου είναι:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} V_i dt + \int_{t_{on}}^X 0 dt + \int_X^T E_a dt \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow V_a = \frac{1}{T} [t_{on} V_i + (T - X) E_a] = a V_i + (1 - \frac{X}{T}) E_a$$

και

$$V_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{t_{on}} V_i^2 dt + \int_X^T E_a^2 dt \right)} = \sqrt{a V_i^2 + (1 - \frac{X}{T}) E_a^2}$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος τυμπάνου στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής είναι διαφορετική από αυτήν της συνεχούς αγωγής. Προφανώς στην ασυνεχή αγωγή η ελάχιστη τιμή του ρεύματος θα είναι μηδέν.

Για $0 < t < t_{on}$, ισχύουν οι (4.2) και (4.4). Θέτοντας $i_a(0^+) = I_{a2} = 0$ από την (4.5) προκύπτει:

$$i_a(t) = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[1 - e^{-t/T_a} \right] \quad (4.13)$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος, είναι για $t = t_{on}$

$$I_{a1} = i_a(t = t_{on}) = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[1 - e^{-t_{on}/T_a} \right] \quad (4.14)$$

Στο διάστημα, $t_{on} < t < X$ της μη αγωγής του θυρίστορ, η μαγνητική ενέργεια της αυτεπαγωγής εκφορτίζεται μέσω της διόδου ελευθέρως ροής. Μέρος της ενέργειας αυτής, καταναλίσκεται ως θερμότητα στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου R_a και του πόλοιπο ως μηχανική ισχύς στον άξονα της μηχανής. Σε όλο το διάστημα αυτό, η τάση των ακροδεκτών παραμένει μηδενική. Η τιμή του μέγιστου ρεύματος θα είναι:

$$i_a(t') = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[1 - e^{-t_{on}/T_a} \right] e^{-t'/T} - \frac{E_a}{R_a} \left[1 - e^{-t'/T_a} \right] \quad (4.15)$$

όπου $t' = t - t_{on}$ και $t_{on} < t < X$.

Έστω ότι για $t = X$ έχουμε μηδενισμό του ρεύματος. Αντικαθιστώντας στην (4.14) όπου

$t' = X - t_{on}$ και θέτοντας όπου $i_a = 0$ υπολογίζουμε τον χρόνο X από τη σχέση:

$$X = T_a \ln \left[e^{t_{on}/T_a} \left[1 + \frac{V_i - E_a}{E_a} \left[1 - e^{-t_{on}/T_a} \right] \right] \right] \quad (4.16)$$

Τα όρια μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής συναρτήσεως του βαθμού χρησιμοποίησης βρίσκονται από την (4.12) αν θέσουμε $I_{a2} = 0$ ή από την (4.16) αν θέσουμε $X = T$. Επομένως:

$$\frac{E_a}{V_i} = \frac{\left[e^{t'_{on}/T_a} - 1 \right]}{\left[e^{T/T_a} - 1 \right]} \rightarrow e^{a' T/T_a} = 1 + \frac{E_a}{V_a} \left[e^{T/T_a} - 1 \right] \quad (4.17)$$

όπου

$$a' = \frac{t'_{on}}{T} = \frac{T_a}{T} \ln \left[1 + \frac{E_a}{V_i} \left[e^{T/T_a} - 1 \right] \right] \quad (4.18)$$

Επομένως αν το κύκλωμα λειτουργεί με έναν ορισμένο βαθμό χρησιμοποίησης a' , θα ισχύουν:

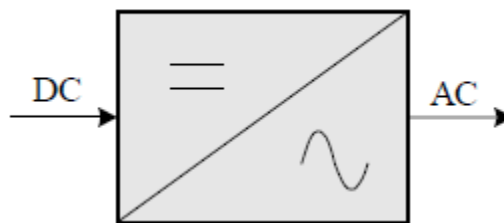
- Εάν $a > a'$ η αγωγή θα είναι συνεχής
- Εάν $a < a'$ η αγωγή θα είναι ασχυνεχής

4.1.3 Μετατροπέας DC/AC

Οι μετατροπείς αυτοί είναι γνωστοί και ως αντιστροφείς (ή inverters). Δεν θα εμβαθύνουμε σε αυτούς τους μετατροπείς καθώς η λειτουργία τους ουσιαστικά είναι αντίθετη από τη λειτουργία των ανορθωτών, μετατρέπουν δηλαδή την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Η έξοδος τους μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική. Διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Αντιστροφείς πηγής τάσης
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος

Η συχνότητα και το πλάτος τάσης ή ρεύματος στην έξοδο είναι ελεγχόμενα. Μεταβάλλοντας την συχνότητα και την τάση στην είσοδο μεταβάλλουμε την ταχύτητα στην έξοδο. Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο κινητήρων AC (σε συνδυασμό με ένα μετατροπέα AC/DC στην είσοδο τους).

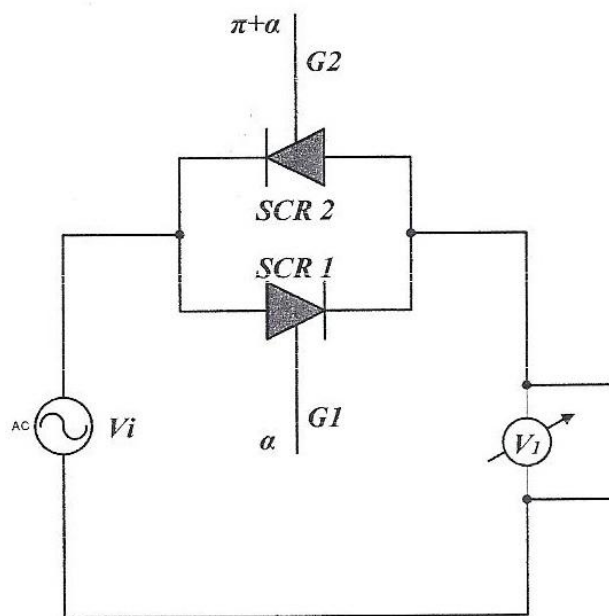


4.1.4 Μετατροπέας AC/AC (TRIAC) και γέφυρα τεσσάρων διόδων

Με τον μετατροπέα αυτό για να επιτύχουμε εφαρμογή σε DC κινητήρα χρησιμοποιούμε πάντα μια γέφυρα τεσσάρων διόδων ώστε να ανορθωθεί η εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση η οποία προέρχεται από το TRIAC.

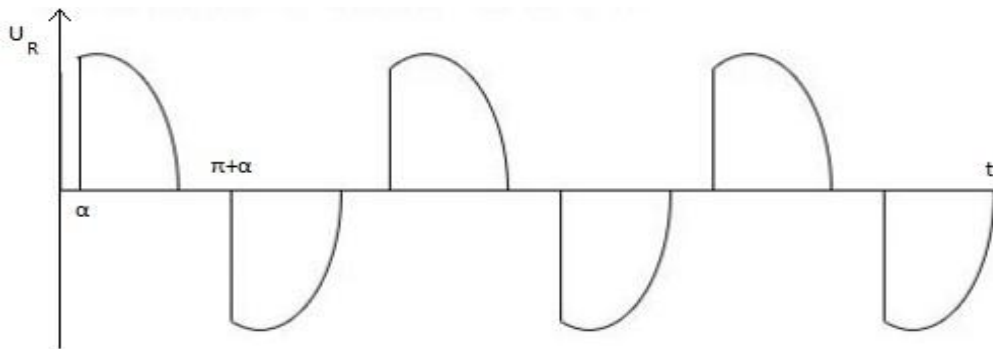
Ο μετατροπέας AC/AC (TRIAC)

Ο μετατροπέας AC/AC (γνωστός και ως TRIAC) ουσιαστικά αποτελείται από δυο αντιπαράλληλα θυρίστορ. Τα θυρίστορ αυτά λαμβάνουν ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση στην είσοδο τους και στην έξοδό τους αποδίδουν ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση διαφορετικού πλάτους. Μέσω αυτής της διάταξης επιτυγχάνουμε τον έλεγχο και τη ρύθμιση της τιμής της τάσης που μέσω της γέφυρας τεσσάρων διόδων που συνδέουμε στην έξοδο της διάταξης αυτής θα ανορθώσουμε σε DC τάση. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της γωνίας έναυσης τόσο μικρότερη είναι η τιμή της τάσης εξόδου. Η συνδεσμολογία του κυκλώματος του TRIAC φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10

Η τάση εξόδου του TRIAC φαίνεται στο Σχήμα 4.11.

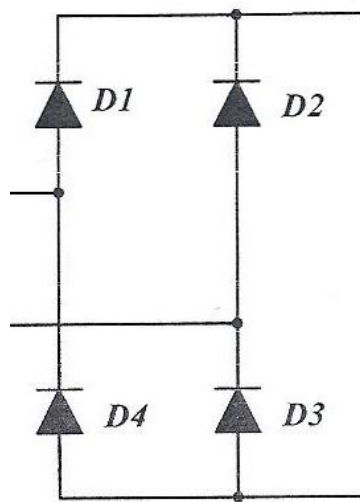


Σχήμα 4.11

Ο παλμός έναυσης α είναι ο παλμός έναυσης στο θυρίστορ G1. Ο παλμός έναυσης $\pi + \alpha$ είναι ο παλμός έναυσης στο θυρίστορ G2. Στην αρχή της αγωγής του ρεύματος, όταν η πολικότητα είναι ορθή, το θυρίστορ G1 πολώνεται ορθά και άγει ενώ το θυρίστορ G2 είναι σε κατάσταση μη αγωγής. Στην αλλαγή πολικότητας της τάσης το θυρίστορ G2 πολώνεται ορθά και άγει και σταματά να άγει το θυρίστορ G1.

Η γέφυρα τεσσάρων διόδων

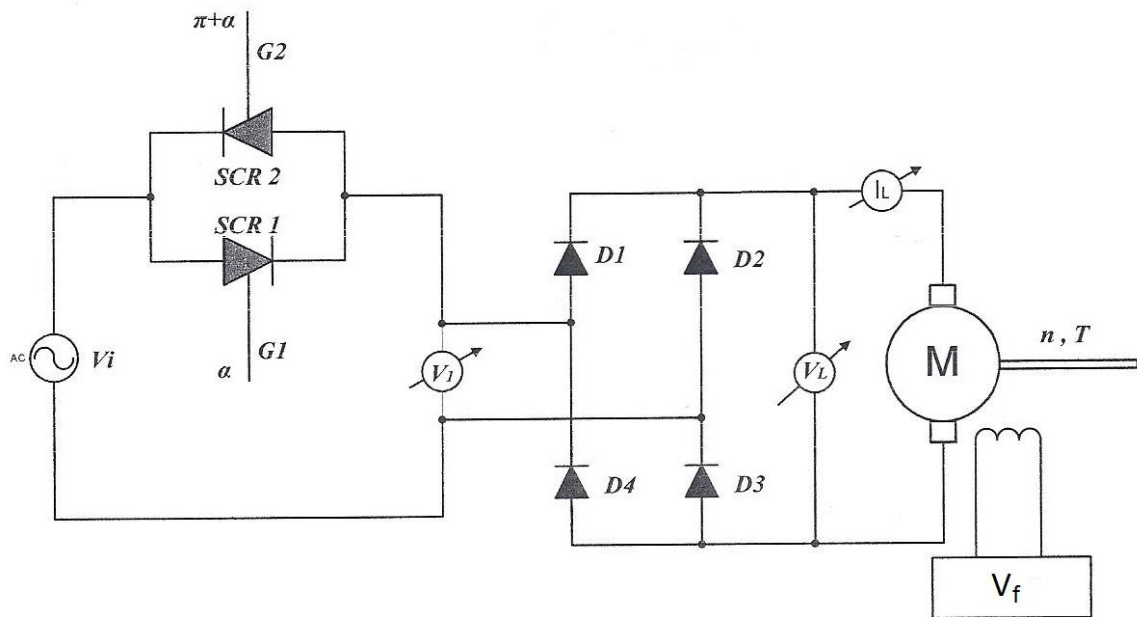
Όπως προαναφέρθηκε η γέφυρα αυτή συνήθως συνδέεται σε AC διατάξεις έτσι ώστε να αναλάβει την ανόρθωση της AC τάσης σε DC. Όπως εκφράζει το όνομα της αποτελείται από τέσσερις διόδους. Η διάταξη της φαίνεται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12

Ολοκληρωμένη διάταξη

Η ολοκληρωμένη διάταξη θα είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.

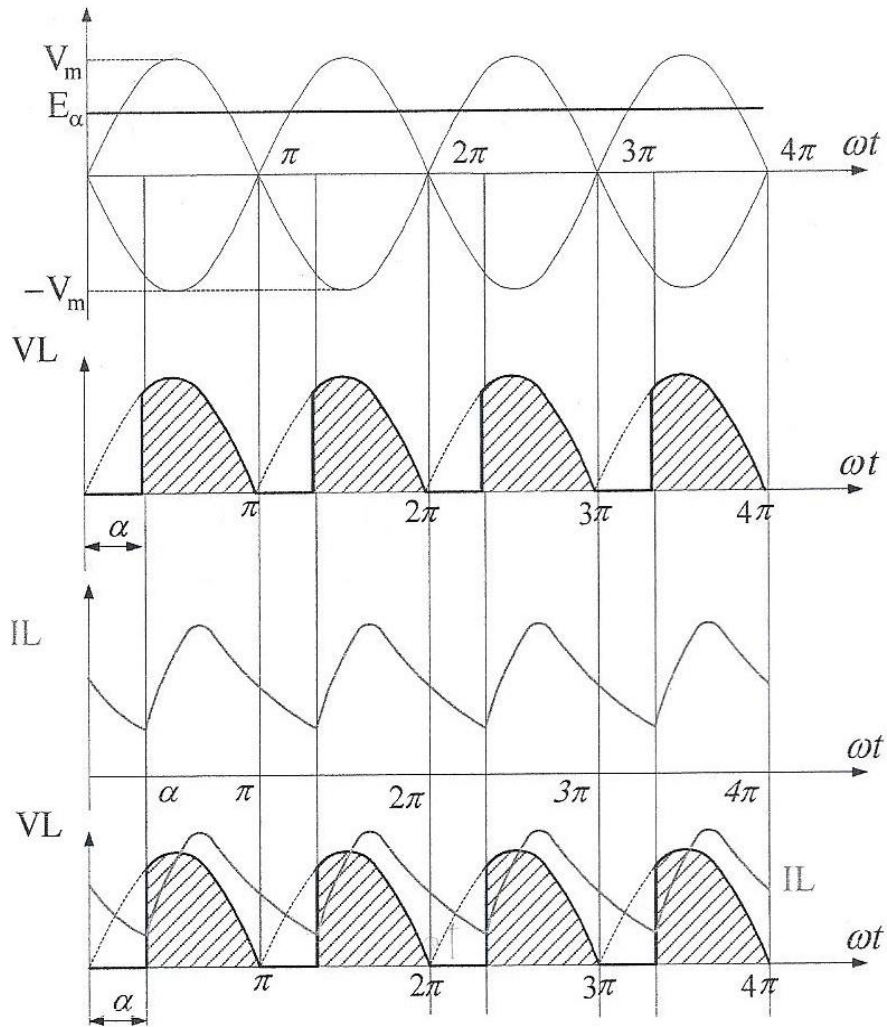


Σχήμα 4.13

Παρατηρώντας το σχήμα μπορούμε να δούμε πως στην ορθή πολικότητα θα άγουν οι δίοδοι D1 και D3. Αντίστοιχα όταν αντιστραφεί η πολικότητα θα άγουν οι δίοδοι D2 και D4. Υπάρχει όμως μια χρονική στιγμή η οποία αξίζει να επισημανθεί. Την χρονική στιγμή μεταξύ (π) και ($\pi+\alpha$) κανονικά θα έπρεπε να δούμε την αρνητική καμπύλη στο διάγραμμα της τάσης. Επειδή όμως εκείνη την στιγμή (στην αλλαγή της πολικότητας της τάσης) άγουν ταυτόχρονα και η D2 και η D3 δημιουργούν (θεωρητικά) ως μια δίοδος ελεύθερας ροής εγκλωβίζοντας το ρεύμα μέσα στο βρόχο που δημιουργείται και βραχυκυκλώνουν την V_a . Έτσι εξαλείφεται το αρνητικό κομμάτι της εναλλασσόμενης τάσης.

Συνεχής αγωγή

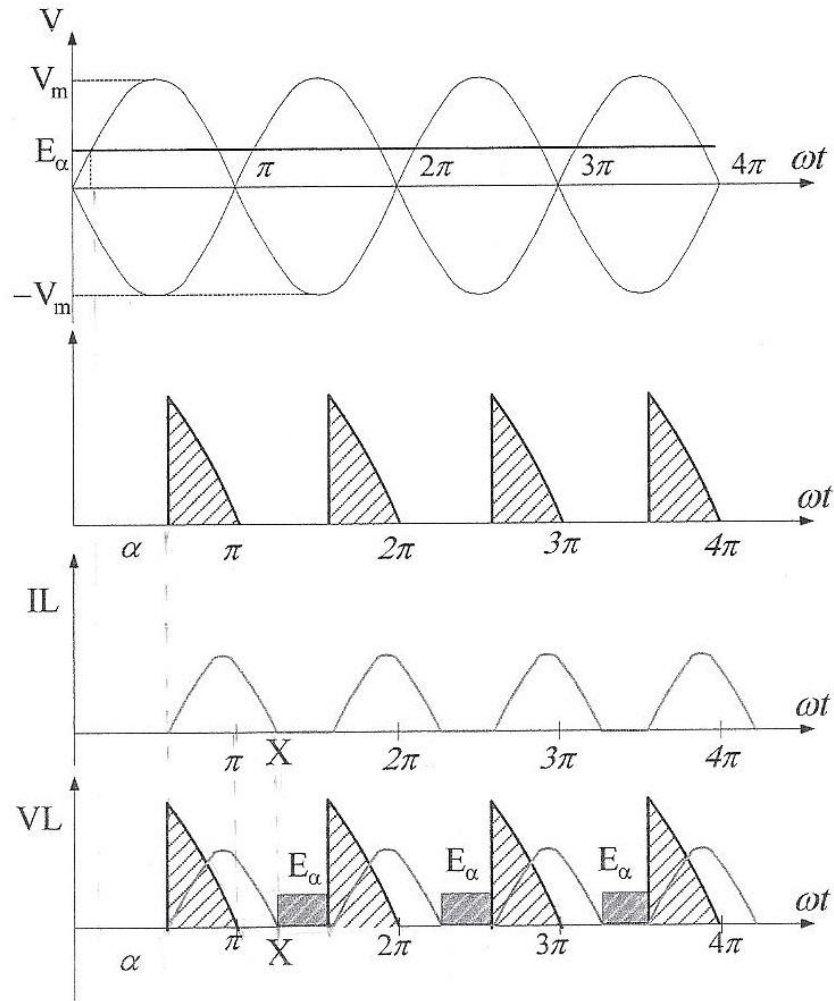
Στην περίπτωση όπου η αυτεπαγωγή κατά τη χρονική διάρκεια μη αγωγής των διακοπτικών στοιχείων μπορεί να διατηρήσει το ρεύμα του κινητήρα (χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη σε αυτή ενέργεια) χωρίς αυτό να μηδενιστεί, χαρακτηρίζεται ως συνεχής αγωγή. Οι κυματομορφές της συνεχής αγωγής φαίνονται στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14

Ασυνεχής αγωγή

Στην περίπτωση όπου η αυτεπαγωγή δεν μπορεί να διατηρήσει το ρεύμα του κινητήρα στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν άγουν τα διακοπτικά στοιχεία, το ρεύμα θα μηδενιστεί σε κάποια χρονική στιγμή X και η κατάσταση λειτουργίας θα χαρακτηρίζεται ως ασυνεχής αγωγή. Οι κυματομορφές της ασυνεχούς αγωγής φαίνονται στο Σχήμα 4.15.

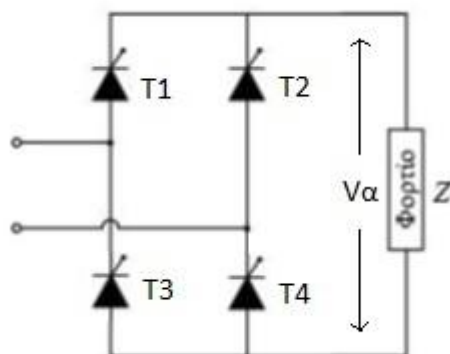


Σχήμα 4.15

Παρατηρούμε πως στο διάστημα κατά το οποίο το ρεύμα έχει μηδενιστεί εμφανίζεται στα άκρα του τυμπάνου η E_α , η ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα.

4.1.5 Μονοφασική πλήρους ελεγχόμενη γέφυρα

Με την χρήση της μονοφασικής πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας, ο κινητήρας Σ.Ρ. που έχουμε συνδεδεμένο στην έξοδο της διάταξής μας, μπορεί να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια. Στο Σχήμα 4.16 βλέπουμε την κυκλωματική διάταξη της γέφυρας μας.



Σχήμα 4.16

Για να έχουμε ρεύμα στο φορτίο θα πρέπει να άγουν ταυτόχρονα τα θυρίστορ T1 και T2 στην θετική ημιπερίοδο και τα T3 και T4 στην αρνητική ημιπερίοδο. Οι παλμοί έναυσης των θυρίστορ που ανήκουν στην ίδια γέφυρα θα έχουν διαφορά φάσης 180° .

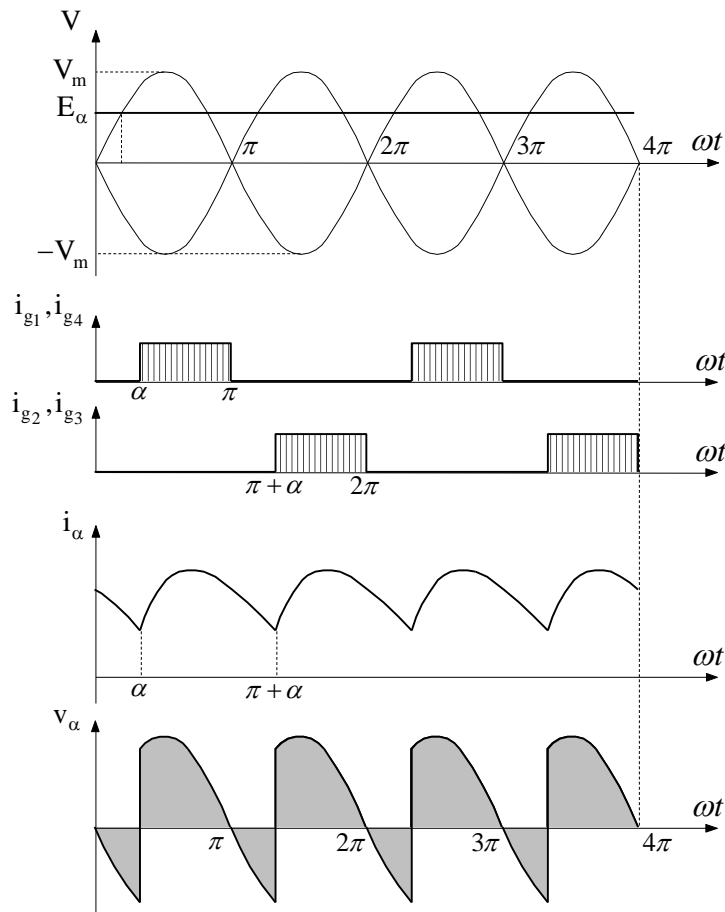
Συνεχής αγωγή

Για την ανάλυση της συνεχούς αγωγής θεωρούμε ότι η αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου είναι αρκετά μεγάλη ώστε το ρεύμα τυμπάνου να μην μηδενίζεται.

Λειτουργία ανορθωτή

Για τιμές γωνίας έναυσης $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ έχουμε λειτουργία στο 1^ο τεταρτημόριο, δηλαδή η γέφυρα λειτουργεί ως ανορθωτής απορροφώντας ισχύ από το δίκτυο.

Οι κυματομορφές των συνιστωσών του συστήματος (τάσης εξόδου, ρεύματος εξόδου) δίνονται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17

Παρατηρούμε ότι η κυμάτωση της τάσης $V_a(t)$ και του ρεύματος $i_a(t)$ είναι διπλάσια της συχνότητας της τάσης εισόδου.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου για τυχαία γωνία έναυσης θα είναι:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_a(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \theta d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (4.19)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου θα είναι:

$$I_a = \frac{v_a - E_a}{R_a} = \frac{2V_m}{\pi R_a} - \frac{E_a}{R_a} \quad (4.20)$$

Η διαφορική εξίσωση του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα αγωγής $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$ είναι:

$$V_a(t) = V_m \sin \omega t = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (4.21)$$

Θεωρώντας την κυμάτωση των στροφών αμελητέα και κατ' επέκταση της Α.Η.Ε.Δ. ($e_a(t)$) μπορούμε να θέσουμε ως $e_a(t)$ την μέση τιμή δηλαδή την E_a .

Υποθέτοντας μερική λύση της διαφορικής εξίσωσης της μορφής:

$$i_{a,\mu}(t) = A + B \sin \omega t + C \cos \omega t \quad (4.22)$$

Τότε προκύπτει:

$$i_a(t) = D e^{-t/T_a} - \frac{E_a}{R_a} + \frac{V_m}{Z_a} \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.23)$$

όπου

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_a}{R_a} \right] \quad (4.24)$$

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.25)$$

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2} \quad (4.26)$$

και D σταθερά ολοκλήρωσης της γενικής λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.17 έχουμε τις εξής οριακές συνθήκες:

$$I_{a,min} = i_a(\omega t = a) = i_a(\omega t = a + \pi) \quad (4.27)$$

Αντικαθιστώντας στην (4.23) μπορούμε να υπολογίσουμε την D :

$$D = \frac{2V_m \sin(\alpha - \varphi)}{Z_a e^{-\alpha/\omega T_a} [e^{-\pi/\omega T_a} - 1]} \quad (4.28)$$

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα η τελική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου είναι:

$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \frac{2 \sin(\alpha - \varphi) e^{-(\omega t - \alpha)/\omega T_a}}{(1 - e^{-\pi/\omega T_a})} \right] - \frac{E_a}{R_a} \quad (4.29)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος τυμπάνου, η οποία συμπίπτει με την ενεργό τιμή εισόδου, μπορεί να υπολογιστεί με τις εξής δυο σχέσεις:

- Με βάση τον ορισμό

$$I_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_a^2(t) dt} \quad (4.30)$$

- Από τη σχέση

$$I_{a,rms} = \sqrt{I_a^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{an,rms}^2)} \quad (4.31)$$

όπου

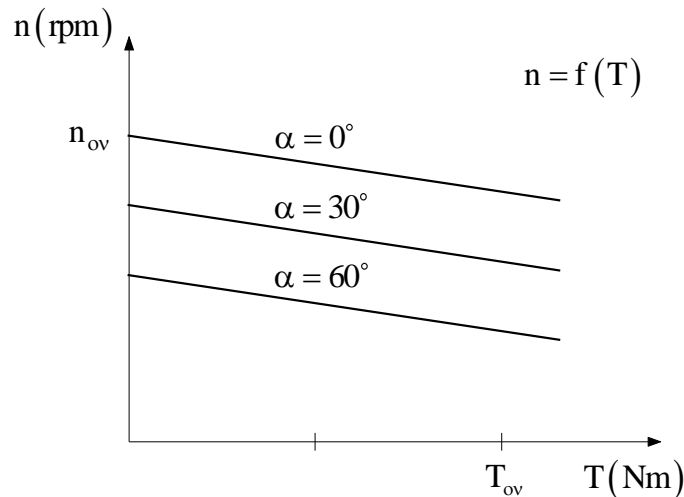
$$I_{an,rms} = \frac{V_{an,rms}}{Z_{a,n}} \quad \text{και} \quad Z_{an} = \sqrt{R_a^2 + (n\omega L_a)^2} \quad (4.32)$$

Η σχέση ροπών - στροφών δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{2\sqrt{2}V_{rms} \cos a}{\pi K_g \Phi_f} - \frac{R_a}{K_m K_g \Phi_f} T \quad (4.33)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης παριστά την ταχύτητα όταν δεν υπάρχει φορτίο. Ο δεύτερος όρος παριστά την μείωση των στροφών λόγω του φορτίου. Η ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο μεταβάλλεται με τη γωνία έναυσης.

Οι χαρακτηριστικές ροπής – στροφών φαίνεται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18

Λειτουργία αντιστροφέα

Για τιμή γωνίας έναυσης μεγαλύτερη των 90° η τάση του τυλίγματος τυμπάνου γίνεται αρνητική. Εάν αντιστραφεί και η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ. τότε πληρούνται οι προϋποθέσεις και έχουμε λειτουργία αντιστροφέα (λειτουργία στο 2° τεταρτημόριο).

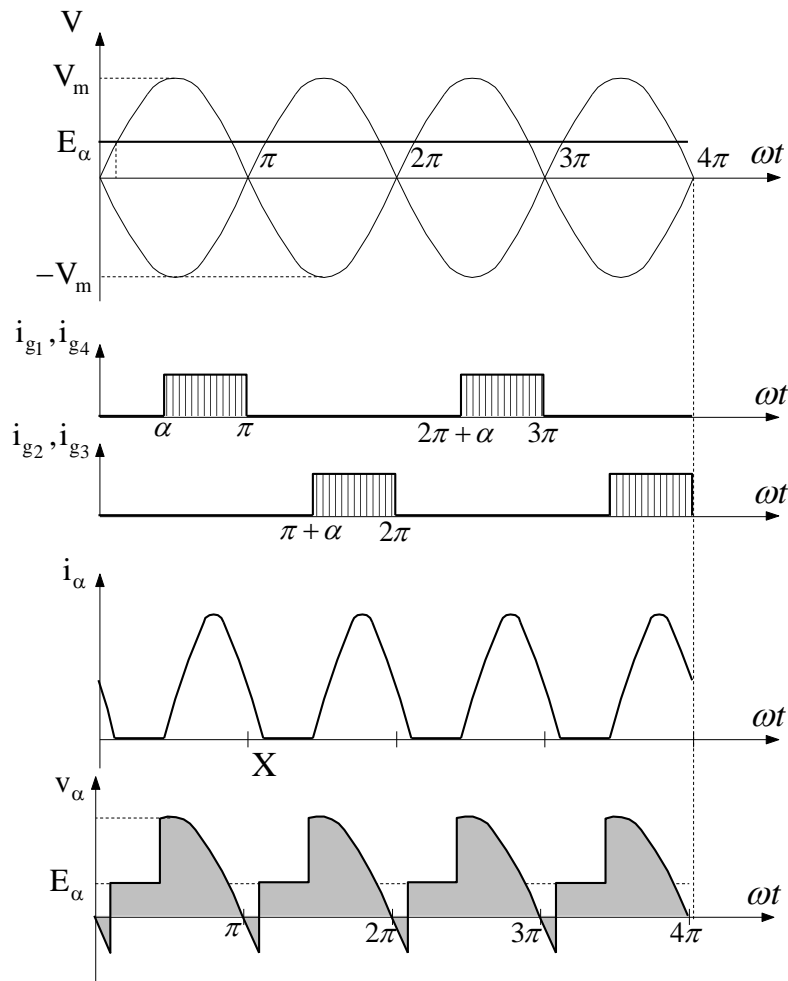
Η μηχανή μπορεί να έχει μια από τις δυο λειτουργίες:

1. Εάν το μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα είναι παθητικό έχουμε λειτουργία δυναμικής πέδης
2. Εάν το μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα είναι ενεργητικό (συντήρηση της ροπής του άξονα) έχουμε λειτουργία γεννήτριας παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο.

Εάν η γωνία έναυσης υπερβεί τις 90° και δεν αναστραφεί η φορά της $e_a(t)$ τότε το ρεύμα θα μηδενιστεί και ο κινητήρας θα συμπεριφερθεί σαν να αποσυνδέεται από το δίκτυο (ελεύθερη πέδηση).

Ασυνεχής λειτουργία

Στο Σχήμα 4.19 απεικονίζονται οι κυματομορφές τάσεων – ρευμάτων στην κατάσταση ασυνεχούς αγωγής



Σχήμα 4.19

Στο χρονικό διάστημα $\alpha < \omega t < X$ άγουν τα θυρίστορ T1 και T4. Τη χρονική στιγμή $\omega t = X$ το ρεύμα τυμπάνου μηδενίζεται οπότε έχουμε σβέση των T1 και T4. Στο διάστημα $X < \omega t < \pi + \alpha$ το ρεύμα παραμένει μηδενικής τιμής. Ο κινητήρας σε αυτό το διάστημα καλύπτει την μηχανική ενέργεια που απαιτεί από την προϋπάρχουσα κινητική ενέργεια των εξαρτημάτων του και έτσι εμφανίζεται η E_a .

Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου είναι:

$$V_a = \frac{1}{\pi} \int_a^{\pi+\alpha} v_a(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \left[\int_a^X V_m \sin \omega t d\omega t + \int_X^{\pi+\alpha} E_a d\omega t \right] \rightarrow$$

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} (\cos a - \cos X) + \frac{E_a}{\pi} (\pi + \alpha - X) \quad (4.33)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου είναι:

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{V_m}{\pi R_a} (\cos a - \cos X) + \frac{E_a}{\pi R_a} (\alpha - X) \quad (4.34)$$

Η διαφορική εξίσωση του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα αγωγής ($\alpha < \omega t < X$) είναι ίδια με αυτήν της συνεχής αγωγής (4.21), άρα η αναλυτική έκφραση θα δίνεται από την (4.23). Οι οριακές τιμές, για $\omega t = \alpha$ και $\omega t = X$ θα είναι:

Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος

$$i_a(a) = i_a(X) = 0 = I_{a,min} \quad (4.35)$$

Επομένως η σταθερά Daπό τις (4.35) και (4.23) θα είναι:

$$D = \left[\frac{E_a}{R_a} - \frac{V_m}{Z_a} \sin(a - \varphi) \right] e^{a/\omega T_a} \quad (4.36)$$

Άρα η γενική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου είναι:

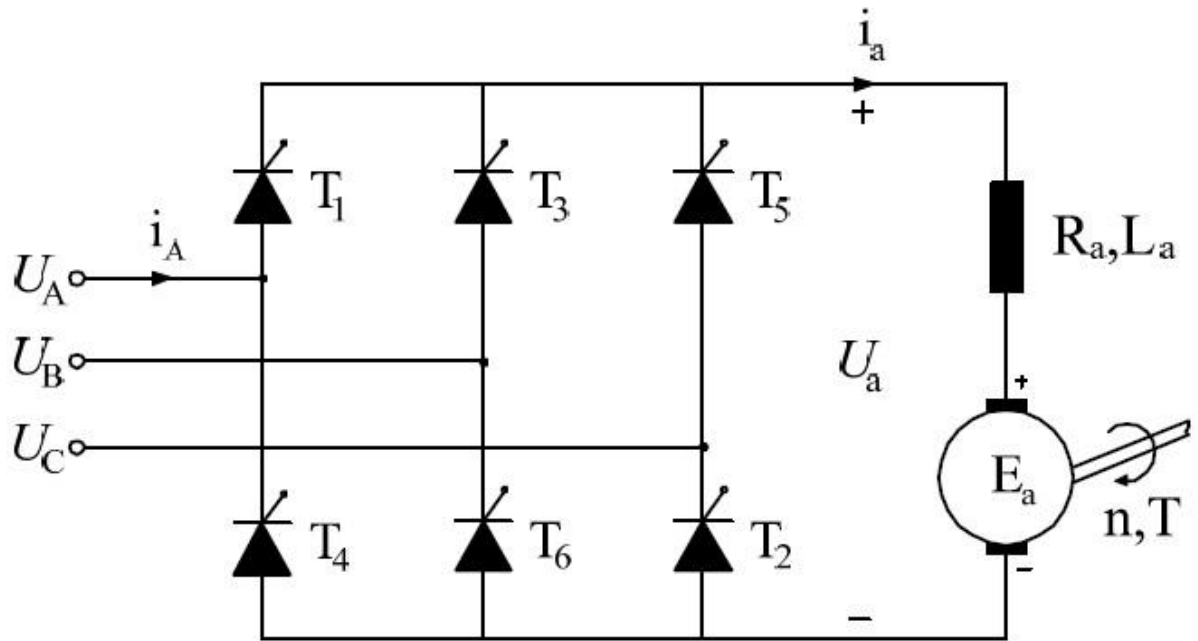
$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(a - \varphi) e^{-(\omega t - a)/\omega T_a} \right] - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-(\omega t - a)/\omega T_a} \right) \quad (4.37)$$

Η χαρακτηριστική ροπής – στροφών για την ασυνεχή αγωγή θα είναι:

$$n = \frac{V_m}{\pi K_m \Phi_f} (\cos a - \cos X) + \frac{E_a}{\pi K_g \Phi_f} (\pi + \alpha - X) - \frac{R_a T}{K_g K_m \Phi_f} \quad (4.38)$$

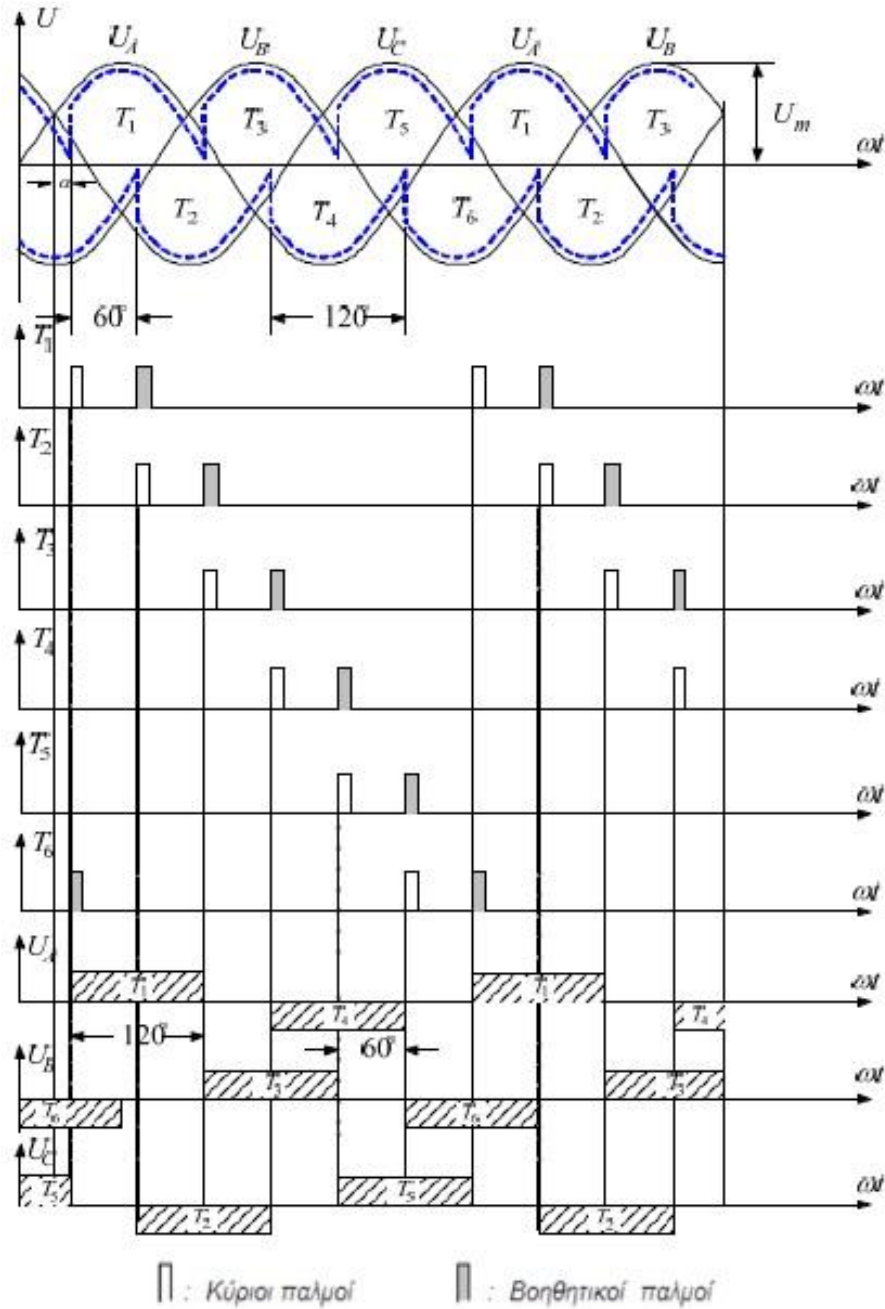
4.1.6 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

Η τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα υπερέχει έναντι των υπολοίπων ανορθοτικών διατάξεων ελεγχόμενης φάσης τόσο σε τάση εξόδου όσο και σε ποιότητα ανορθωμένης τάσης. Χαρακτηρίζεται ως μετατροπέας δυο τεταρτημορίων. Αυτό σημαίνει πως εκτός από τη λειτουργία ανορθωτή μπορεί να λειτουργήσει και σαν αντιστροφέας εφόσον εκπληρωθούν οι κατάλληλες προϋποθέσεις (γωνία έναυσης $\alpha > 90^\circ$ και ενεργητικό φορτίο στην πλευρά του φορτίου). Η κυκλωματική διάταξη της γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20

Χαρακτηρίζεται και ως γέφυρα έξι παλμών καθώς δίνει έξι παλμούς ανά λεπτό. Η αρίθμηση των θυρίστορ ορίζεται από την χρονική διαδοχή λειτουργίας τους, δηλαδή την διαδοχή των φάσεων. Εάν έχουμε κατάσταση συνεχούς αγωγής η μέγιστη δυνατότητα αγωγής των θυρίστορ είναι 120° . Σε κάθε χρονική στιγμή άγουν δυο θυρίστορ, ένα από την άνω ημιγέφυρα και ένα από την κάτω ημιγέφυρα. Ποτέ δεν άγουν δυο θυρίστορ του ίδιου κλάδου (πχ T1 και T4) αλλιώς θα έχουμε βραχυκύκλωμα. Τα θυρίστορ της άνω ημιγέφυρας (T1, T3 και T5) συνδέονται από κοινού στον θετικό ακροδέκτη του φορτίου και κάθε χρονική στιγμή άγει αυτό με την θετικότερη τιμή φασικής τάσης και συγχρόνως τα άλλα δυο πολώνονται ανάστροφα. Ομοίως συνδέονται και τα θυρίστορ της κάτω ημιγέφυρας στον αρνητικό ακροδέκτη του φορτίου και άγει το θυρίστορ με την αρνητικότερη τάση καθώς τα άλλα δυο είναι ανάστροφα πολωμένα και δεν άγουν. Αρχικά άγει το θυρίστορ T1 για χρονική διάρκεια U_a . Το ρεύμα περνάει από το θυρίστορ T1 και το φορτίο και «κλείνει κύκλωμα» μέσω του θυρίστορ T6. Στη συνέχεια παλμοδοτείται το θυρίστορ T2 και αρχίζει την αγωγή του και το ρεύμα πλέον επιστρέφει από το T2 και όχι το T6, καθώς το θυρίστορ T6 πολώνεται ανάστροφα και σταματά η αγωγή του. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται με την έναυση και σβέση των θυρίστορ με βάση την διαδοχή των φασικών τάσεων έως ότου ολοκληρωθεί μία περίοδος. Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται η διαδοχή των φάσεων, τα διαστήματα αγωγής και οι παλμοί έναυσης των θυρίστορ.



Σχήμα 4.22

Είναι προφανές πως για την ταυτόχρονη έναυση δυο θυρίστωρ απαιτείται η χρήση βοηθητικών παλμών. Οι κύριοι παλμοί μεταξύ τους και οι βοηθητικοί παλμοί μεταξύ τους διαφέρουν κατά 60° . Η ανορθωμένη τάση εξόδου αποτελείται από έξι ημιτονικά τόξα και ως αποτέλεσμα της τάσης αυτής είναι η εξαπλάσια συχνότητα που έχει η διάταξη. Στην περίπτωση καθαρά ωμικού φορτίου η περιοχή μεταβολής της γωνίας έναυσης είναι $0 \leq \alpha \leq 120^\circ$. Για γωνίες έναυσης μεγαλύτερες των 60° έχουμε ασυνεχή αγωγή του ρεύματος τυμπάνου. Αυτό συμβαίνει διότι μέχρι να παλμοδοτηθεί το επόμενο θυρίστωρ έχει ήδη σβήσει το προηγούμενο. Για την αποφυγή του μηδενισμού του ρεύματος και επομένως την αποφυγή της ασυνεχούς λειτουργίας μπορούμε να τοποθετήσουμε μια δίοδο ελευθέρως ροής παράλληλα με το

Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος

φορτίο μετά την γέφυρα. Έτσι το ρεύμα θα εγκλωβίζεται σε βρόγχο και θα αποφευχθεί ο μηδενισμός του.

Συνεχής αγωγή

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου της γέφυρας στην περίπτωση της συνεχής αγωγής είναι:

$$U_a = \frac{1}{T} \int_0^T U_a(t) dt = \frac{6}{2\pi} \int_{\alpha+30^\circ}^{90^\circ} U_{AB}(\omega t) d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30^\circ}^{90^\circ} \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + 30^\circ) d\omega t$$
$$U_a = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} \cos \alpha = \frac{3\sqrt{2}(\sqrt{3}U_{rms})}{\pi} \cos \alpha = 1,35 U_{L,rms} \cos \alpha$$

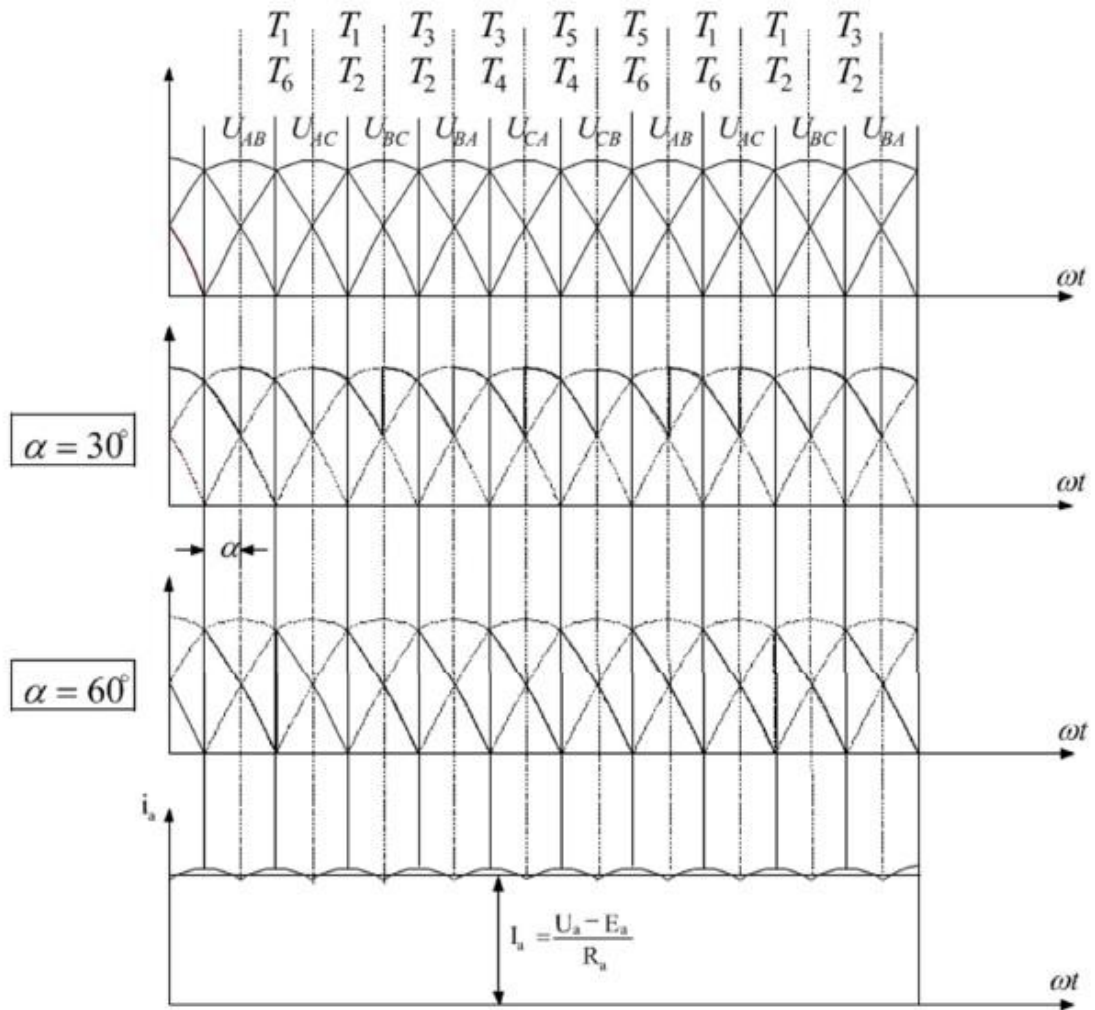
όπου $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$

$U_{AB} = U_A - U_B$ η διαφορά των φασικών τάσεων

$U_m =$ η μέγιστη τιμή της φασικής τάσεως εισόδου

$U_{L,rms} =$ η ενεργός τιμή της πολικής τάσης εισόδου

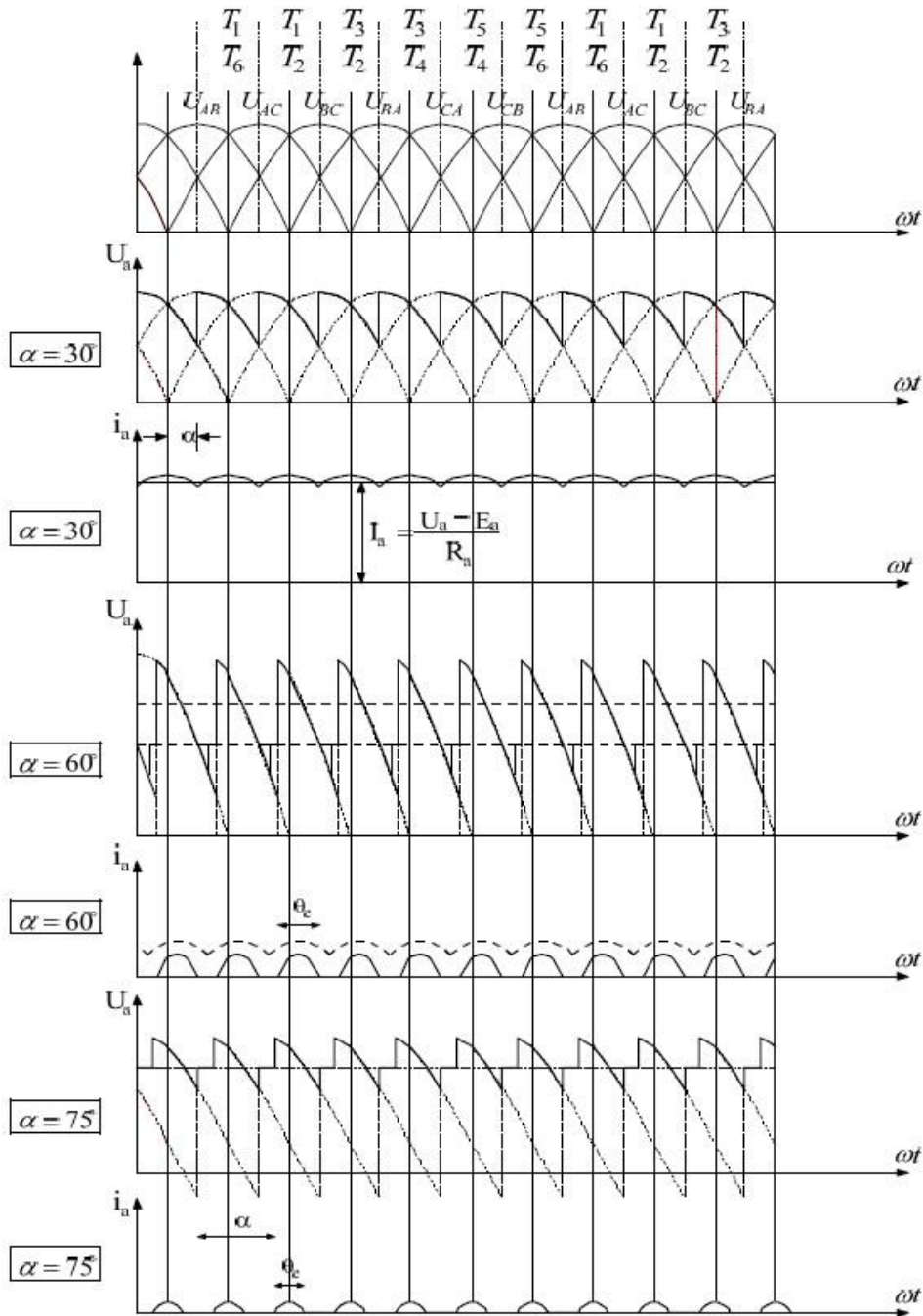
Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται οι κυματομορφές για γωνίες έναυσης $\alpha = 30^\circ$ και $\alpha = 60^\circ$.



Σχήμα 4.23

Ασυνεχής αγωγή

Εάν η αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου έχει μικρή τιμή, τότε για διάφορες καταστάσεις (μικρά φορτία, υψηλός αριθμός στροφών) μπορεί να δημιουργηθεί ασυνέχεια στο ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου. Στο σχήμα 4.24 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης – ρεύματος για διάφορες τιμές γωνιών έναυσης.



Σχήμα 4.24

Παρατηρούμε πως για μεγαλύτερες γωνίες έναυσης ο μηδενισμός του ρεύματος τυμπάνου είναι πιο διακριτός καθώς και η εμφάνιση της E_a στις περιόδους μη αγωγής του ρεύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προσομοίωση συστημάτων ελέγχου κινητήρων Σ.Ρ. με Matlab-Simulink

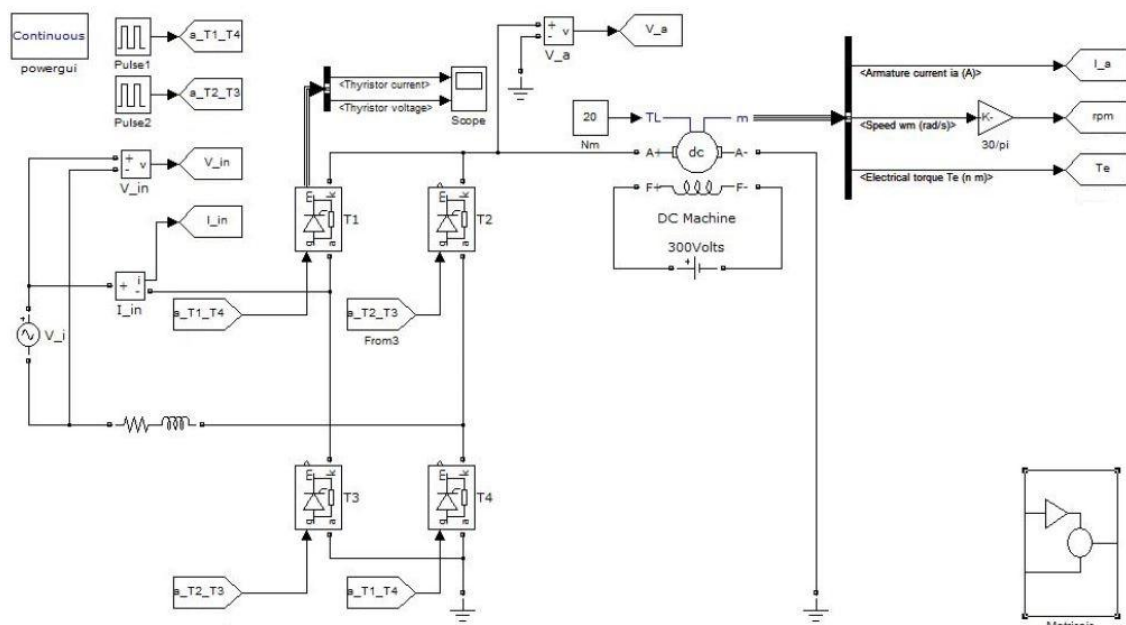
5.1 Μετατροπείς και γέφυρες για τον έλεγχο κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των μετατροπών και γεφυρών που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τον έλεγχο κινητήρων Σ.Ρ. και οι αναλύσεις των κυκλωμάτων των μετατροπών για όλες τις λειτουργίες τους.

Οι μετατροπείς και γέφυρες που αναλύσαμε είναι οι πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα, ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα, πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα, μετατροπέας DC/DC ενός τεταρτημορίου, μετατροπέας DC/DC δύο τεταρτημορίων και μετατροπέα DC/DC τεσσάρων τεταρτημορίων.

5.1.1 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

Η πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα είναι ένας μετατροπέας AC/DC που λειτουργεί σε δύο τεταρτημόρια και όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχει η πιθανότητα της συνεχής και της ασυνεχής αγωγής την οποία θα αναλύσουμε στο simulink και για τις δύο περιπτώσεις. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη της πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας για τον έλεγχο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 5.1: Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα για τον έλεγχο κινητήρα Σ.Ρ.

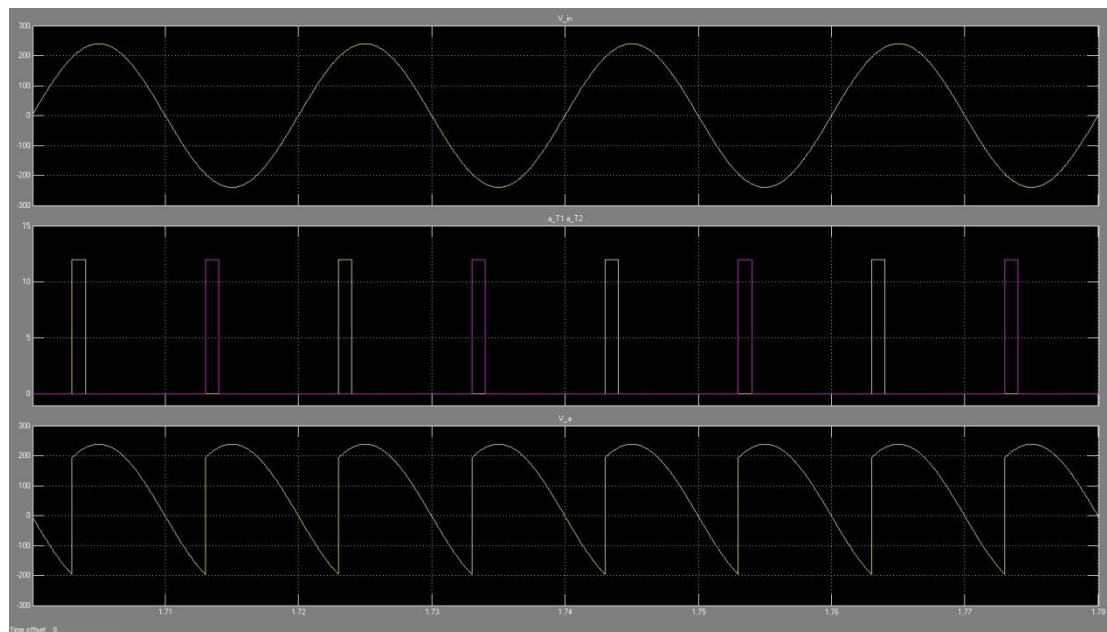
5.1.1.1 Συνεχής αγωγή

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες κυματομορφές της εφαρμογής του σχήματος 5.1. Οι κυματομορφές αυτές είναι για λειτουργία στο πρώτο και δεύτερο τεταρτημόριο. Για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο επιλέγουμε γωνία έναυσης των θυρίστορ 54° η οποία θεωρείται σταθερή. Επίσης σταθερές θεωρούνται η ροπή του φορτίου, $T_L=T_{ov}=20\text{Nm}$, και η διέγερση του κινητήρα.

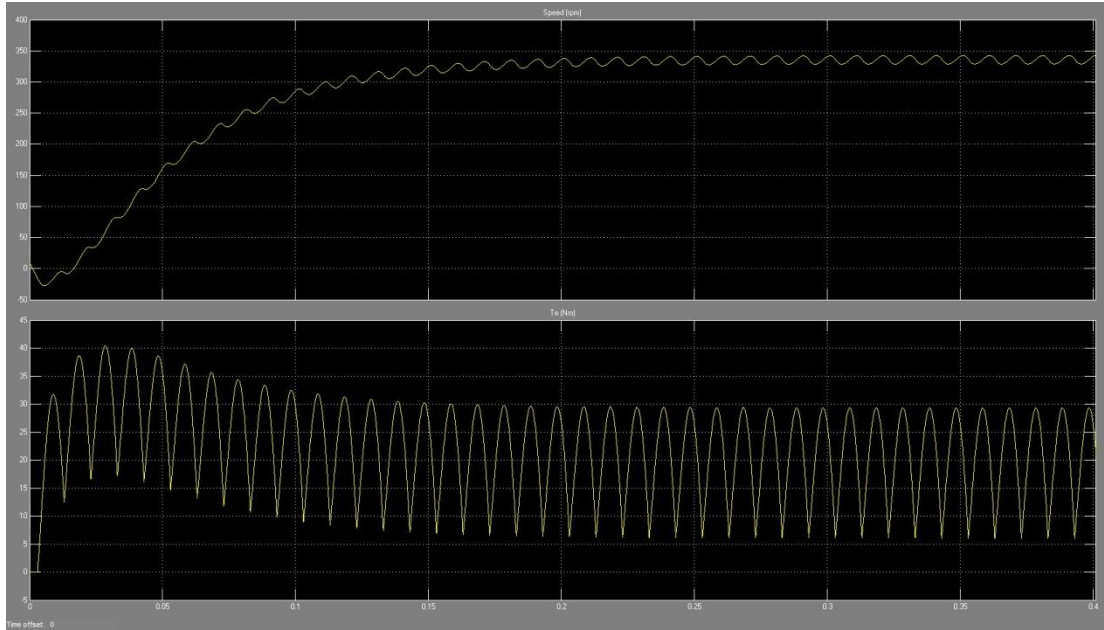
Στην προσομοίωση χρησιμοποιούμε μηχανή συνεχούς ρεύματος με τα εξής στοιχεία: 5HP , 1750rpm , $V_a=240\text{V}$, $V_f=300\text{V}$, $R_a=2.581\Omega$, $L_a=0.028\text{H}$, $R_f=281.3\Omega$, $L_f=156\text{H}$, $L_{af}=0.9483\text{H}$, $J=0.02215\text{kgm}^2$, $B=0.002953\text{Nms}$.

Επίσης η αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου του κινητήρα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, για να έχουμε συνέχεια στο αντίστοιχο ρεύμα τυμπάνου.

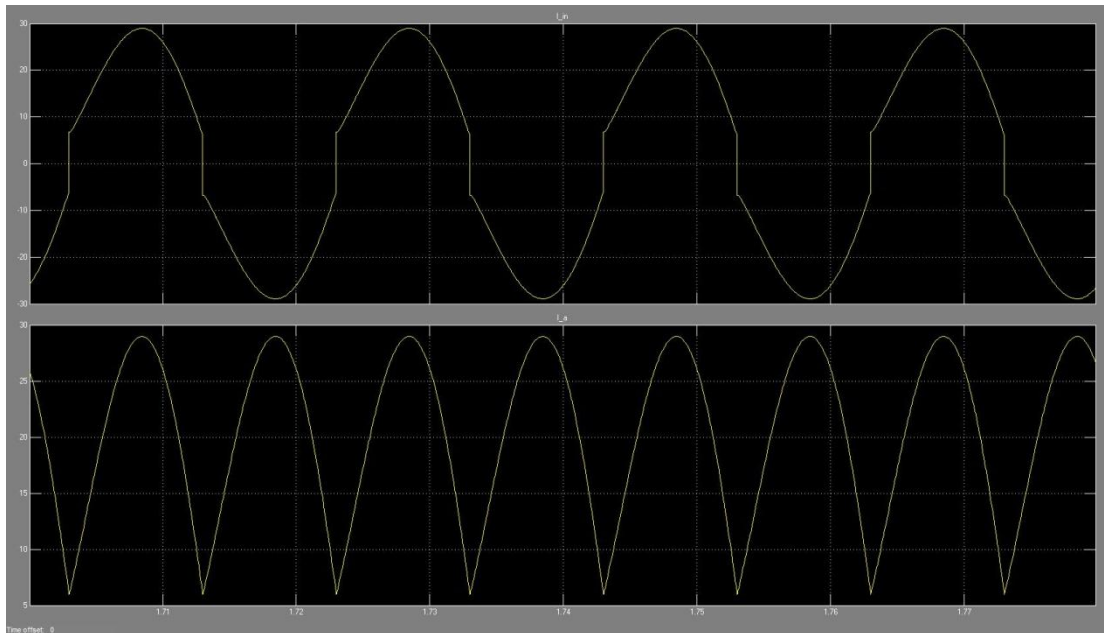
Οι παρακάτω κυματομορφές που παρουσιάζονται είναι για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο.



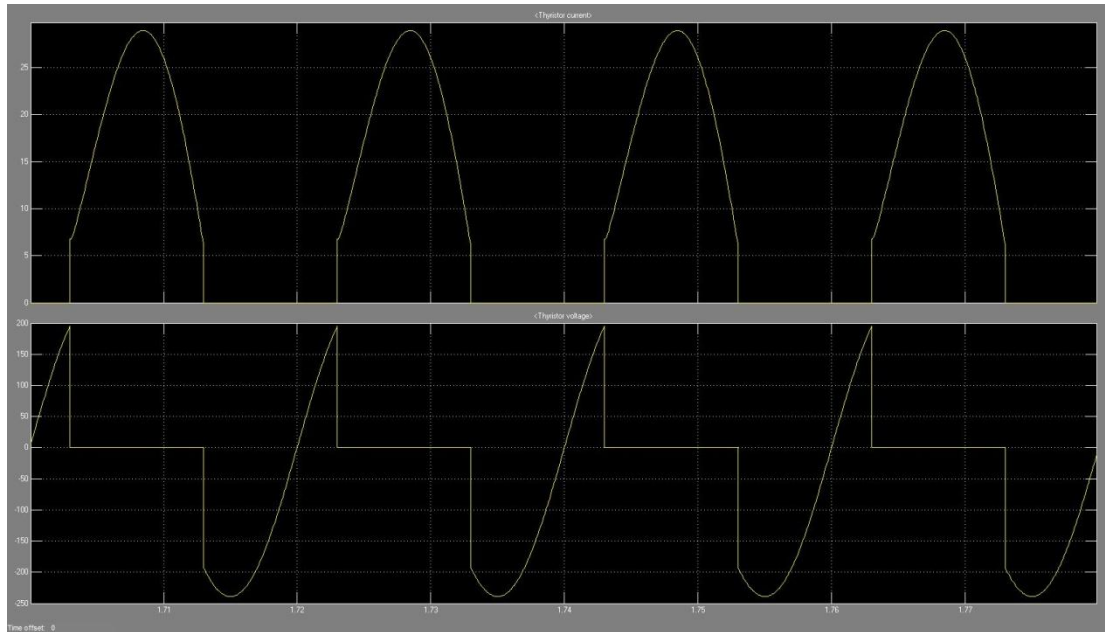
Σχήμα 5.2: Κυματομορφές τάσης εισόδου, τάσης τυμπάνου και οι παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=54^\circ$



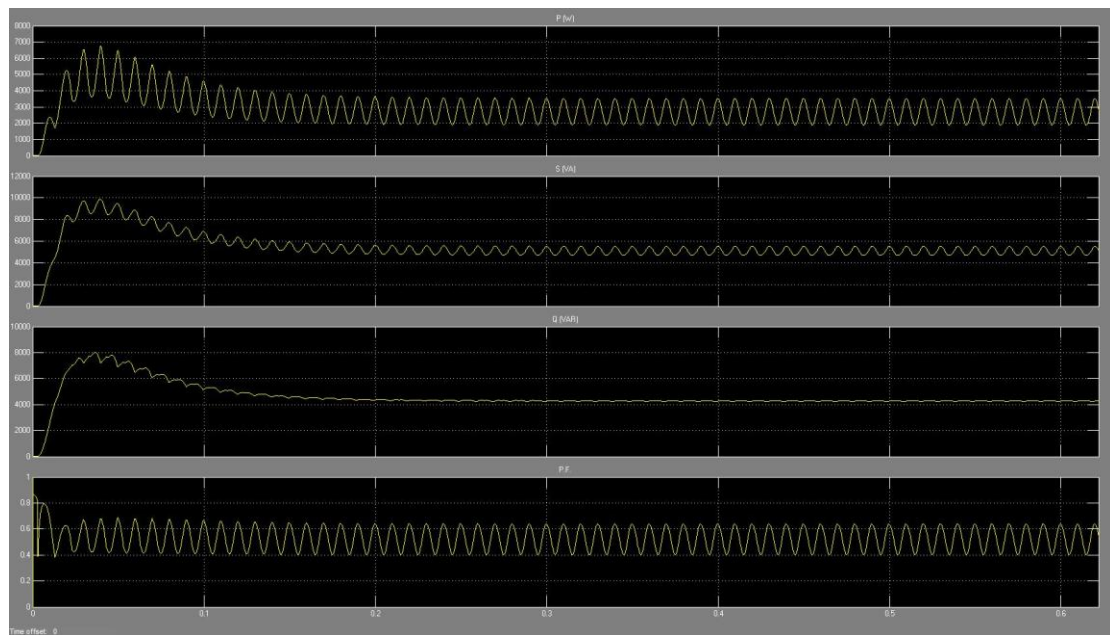
Σχήμα 5.3: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



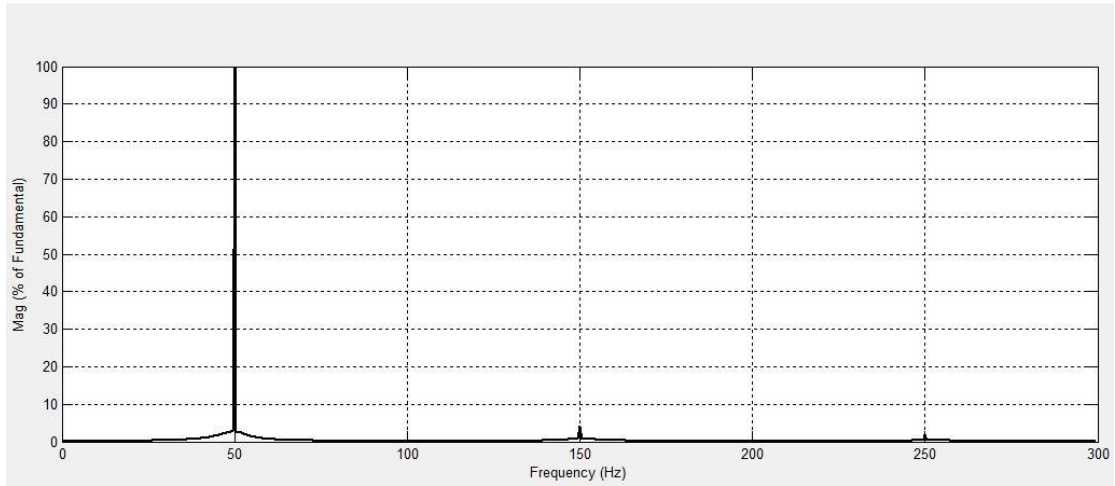
Σχήμα 5.4: Κυματομορφές ρεύματος εισόδου και ρεύματος τυμπάνου για $\alpha=54^\circ$



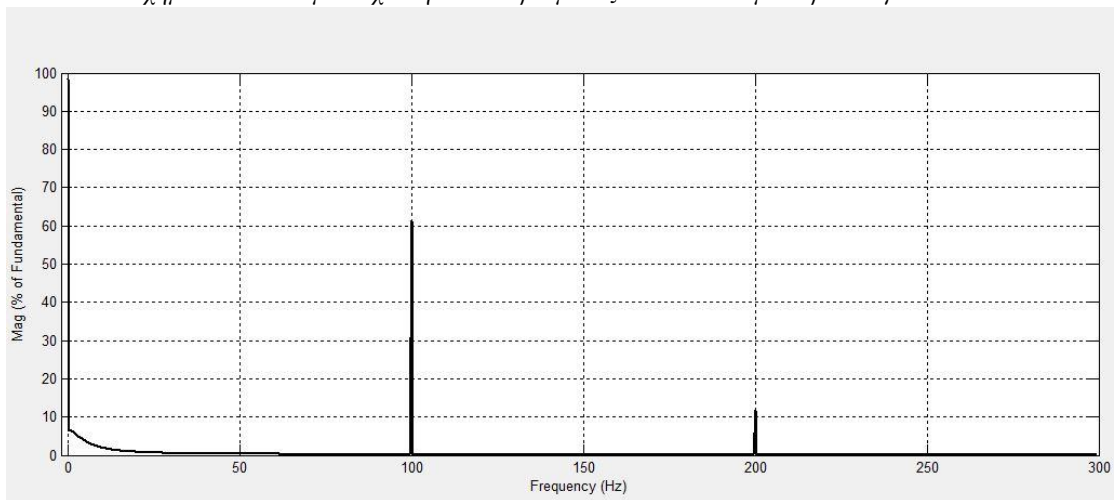
Σχήμα 5.5: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του θυρίστορ



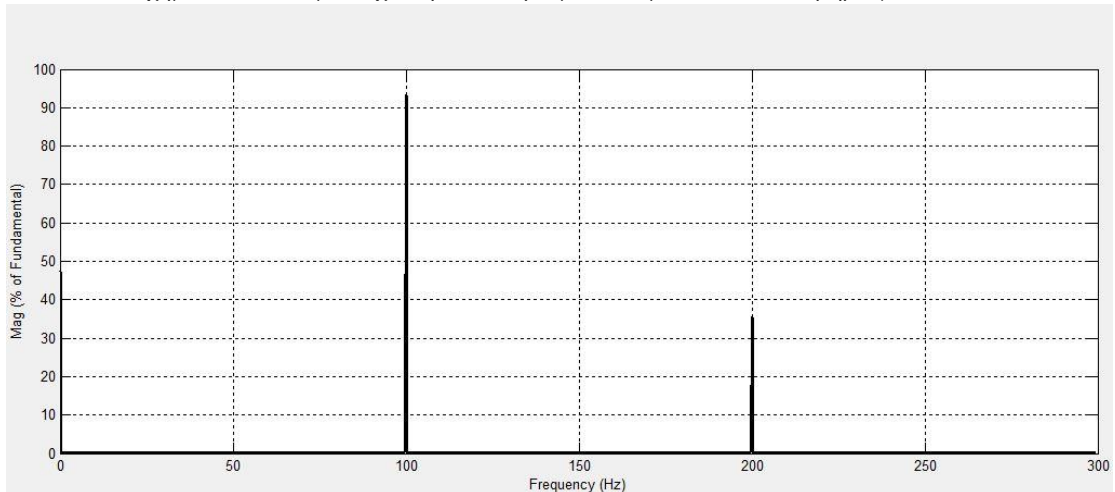
Σχήμα 5.10: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$



Σχήμα 5.11: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$

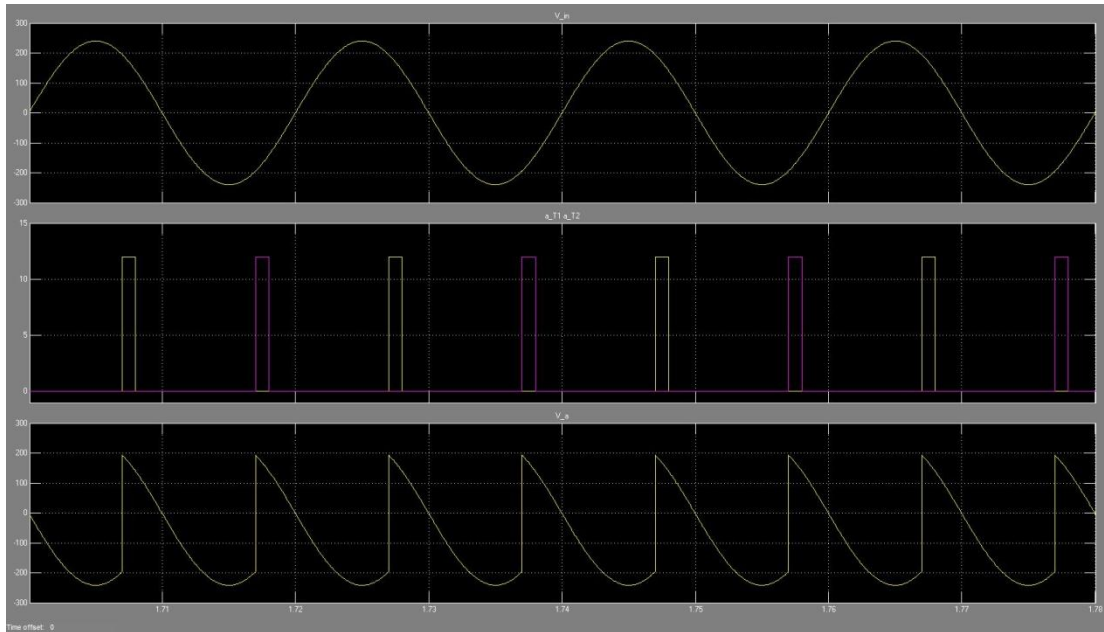


Σχήμα 5.12: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

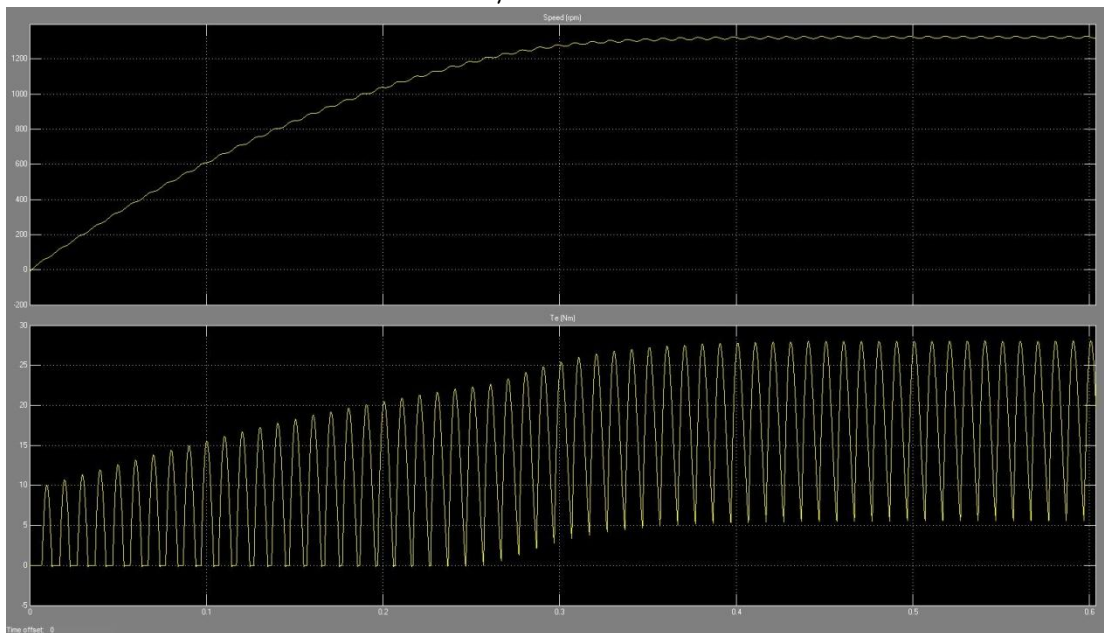


Σχήμα 5.13: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

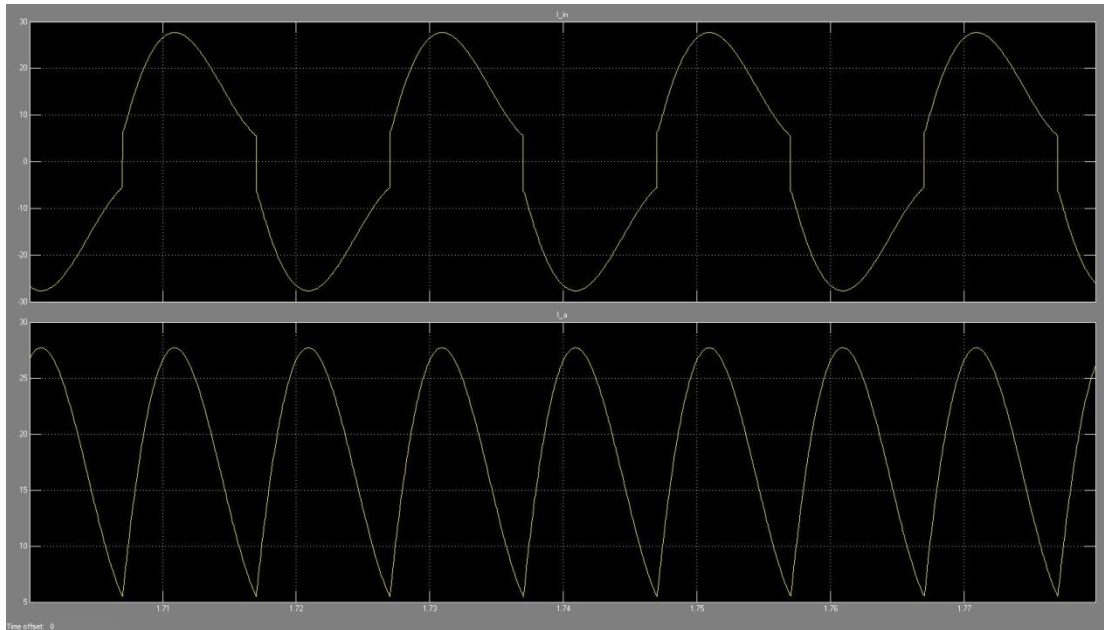
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές για λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο. Για αυτό το λόγο πυροδοτούμε τα θυρίστορ στις 126° μετά τις 90° , ενώ ταυτόχρονα αντιστρέφεται κι η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ.



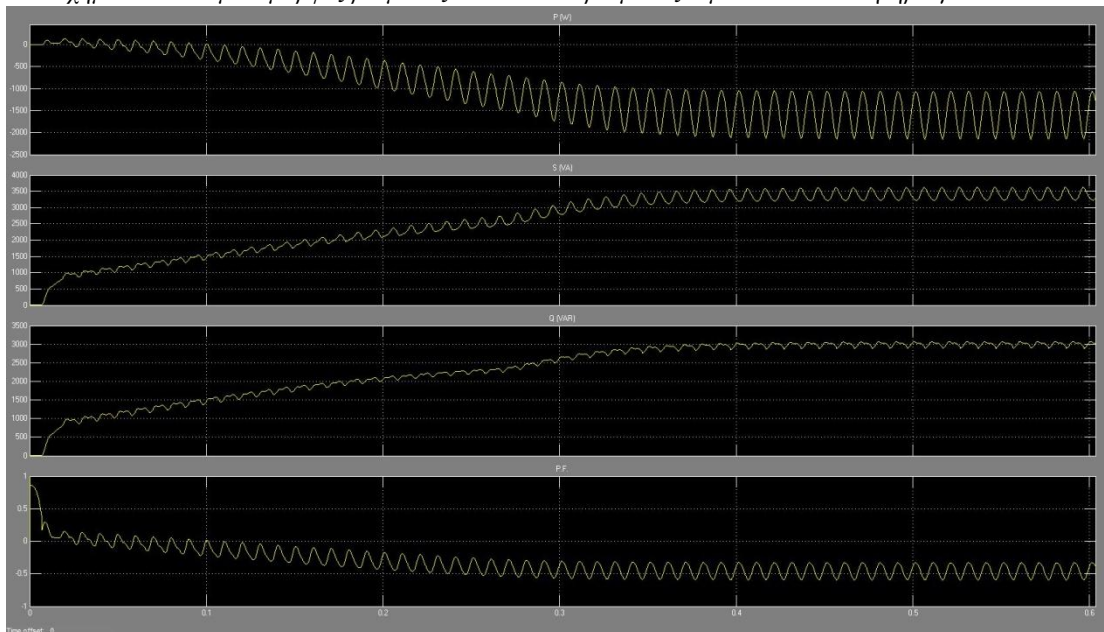
Σχήμα 5.14: Κυματομορφές τάσης εισόδου, τάσης τυμπάνου και οι παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=126^\circ$



Σχήμα 5.15: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=126^\circ$

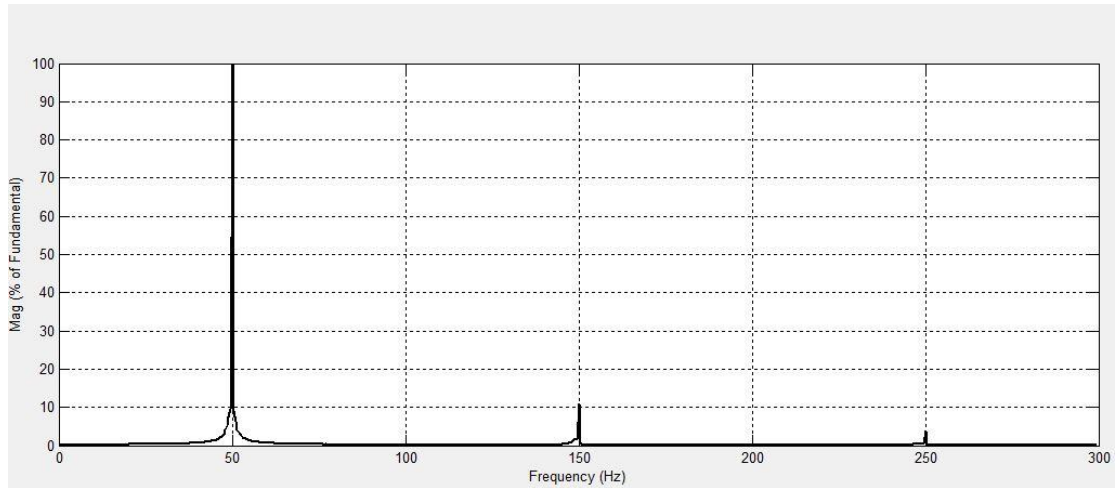


Σχήμα 5.16: Κυματομορφές ρεύματος εισόδου και ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=126^\circ$

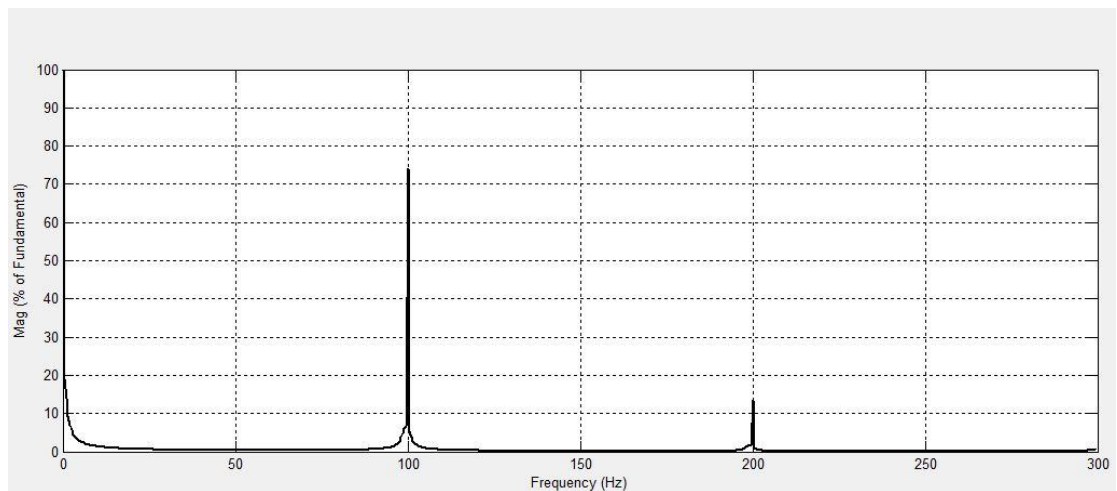


Σχήμα 5.17: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=126^\circ$

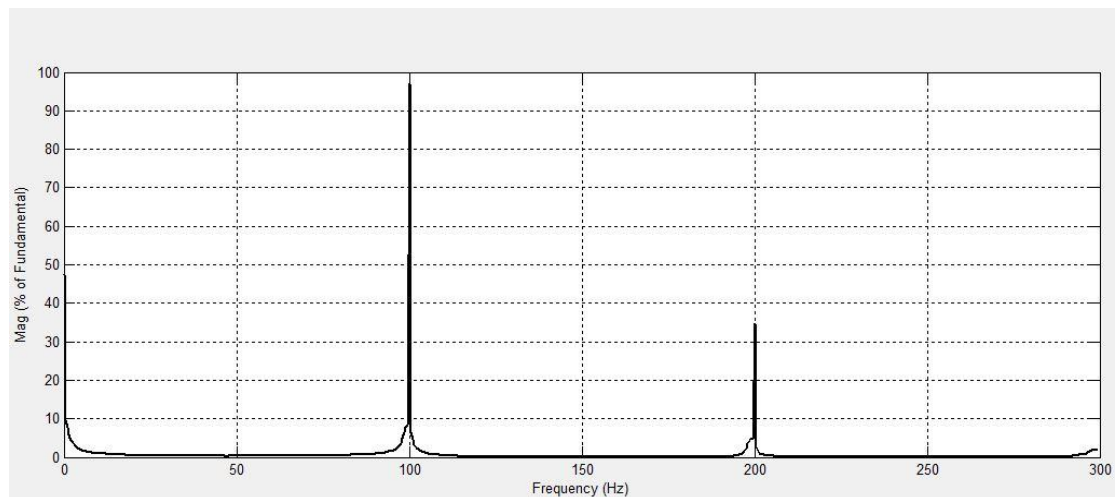
Όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία, στο δεύτερο τεταρτημόριο η γέφυρα λειτουργεί ως αντιστροφέας. Αυτό αποδεικνύεται κι από το σχήμα 5.9 στις κυματομορφές της μεταβολής της ισχύος όπου παρατηρούμε ότι η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια κι η γέφυρα ως αντιστροφέας. Για αυτό το λόγο έχουμε αρνητική ισχύ, δηλαδή ο αντιστροφέας τροφοδοτεί με ισχύ από τη μηχανή το δίκτυο ενώ παράλληλα απορροφά άεργη ισχύ από το δίκτυο.



Σχήμα 5.18: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=126^\circ$



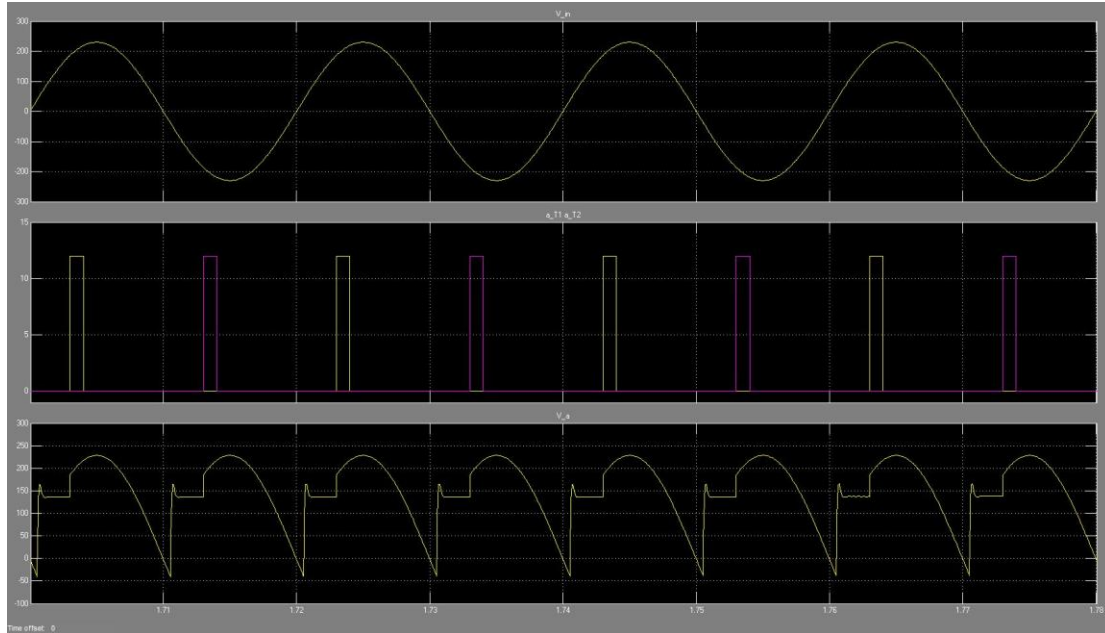
Σχήμα 5.19: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=126^\circ$



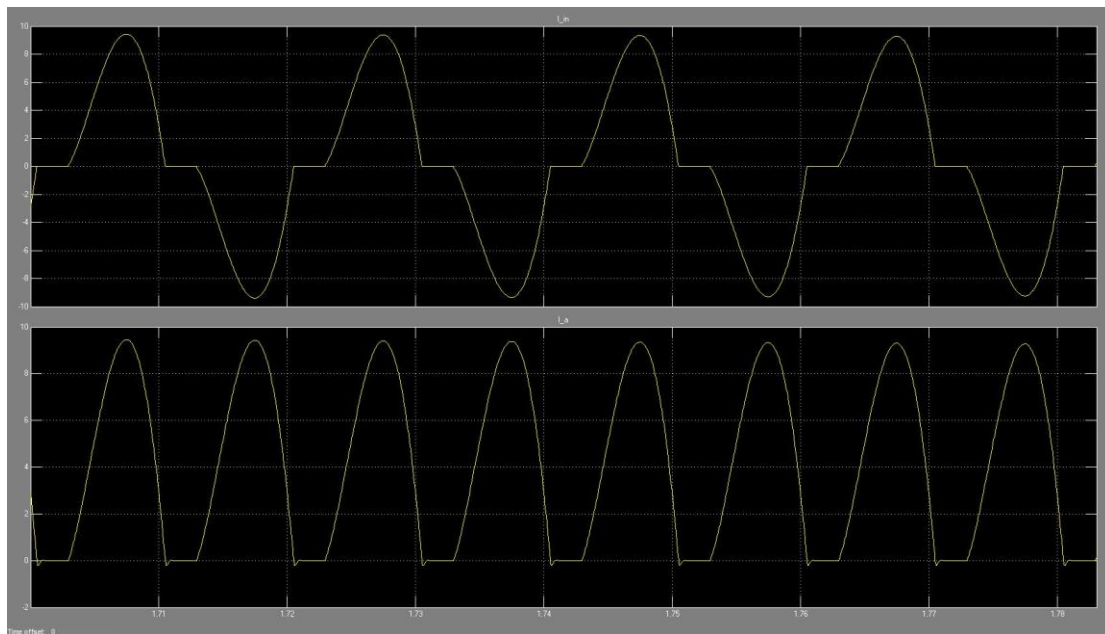
Σχήμα 5.20: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=126^\circ$

5.1.1.2 Ασυνεχής αγωγή

Για να έχουμε ασυνεχή αγωγή θα πρέπει η αυτεπαγωγή του φορτίου να μην είναι μεγάλη και το φορτίο του κινητήρα να είναι πολύ μικρότερο από το ονομαστικό. Παρακάτω έχουμε τις κυματομορφές για ασυνεχή αγωγή και γωνία έναυσης 54° της διάταξης του σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.21: Κυματομορφές τάσης εισόδου, τάσης τυμπάνου και οι παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=54^\circ$

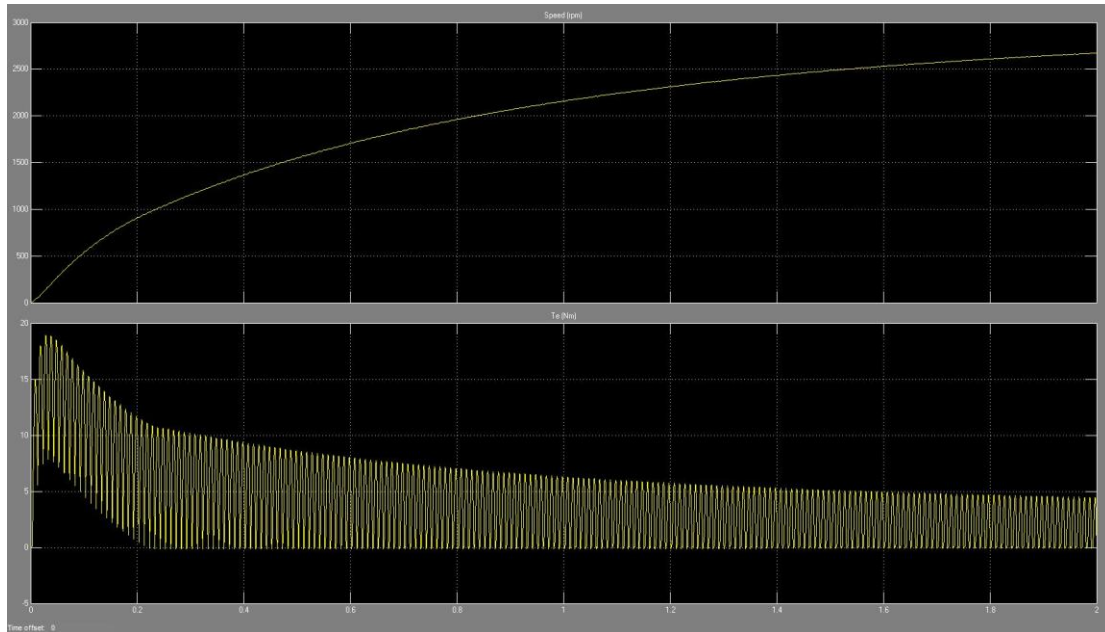


Σχήμα 5.22: Κυματομορφές ρεύματος εισόδου και ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

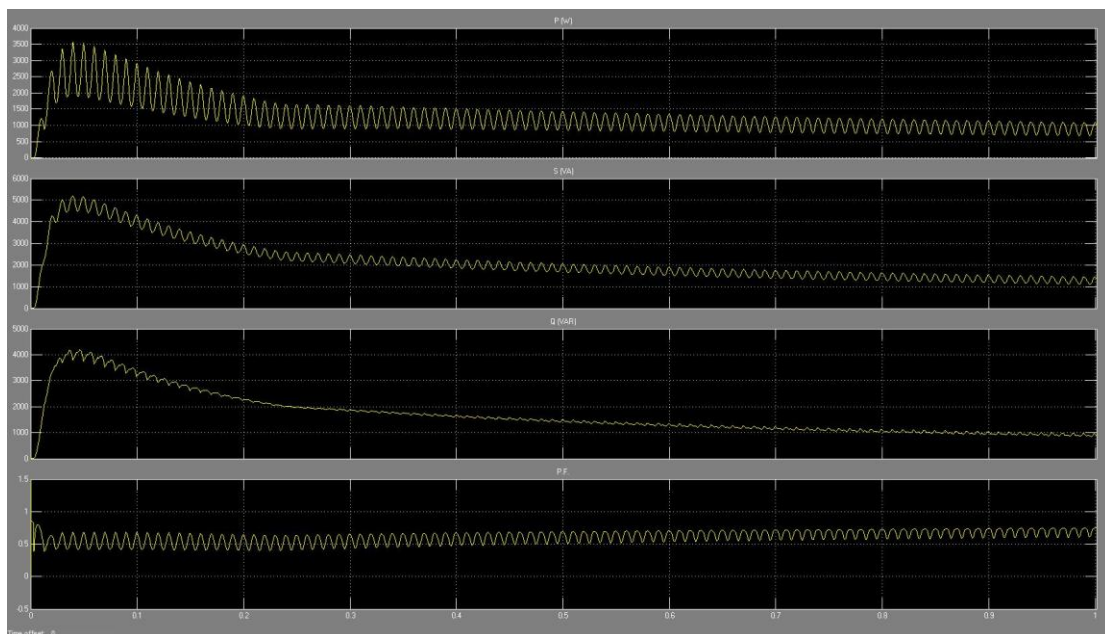
Όπως παρατηρούμε από τις παραπάνω κυματομορφές, στο διάστημα $\alpha < \omega t < \beta$ (όπου α είναι η γωνία έναυσης και β η γωνία σβέσης του θυρίστορ) η σύνδεση του

Πτυχιική Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος

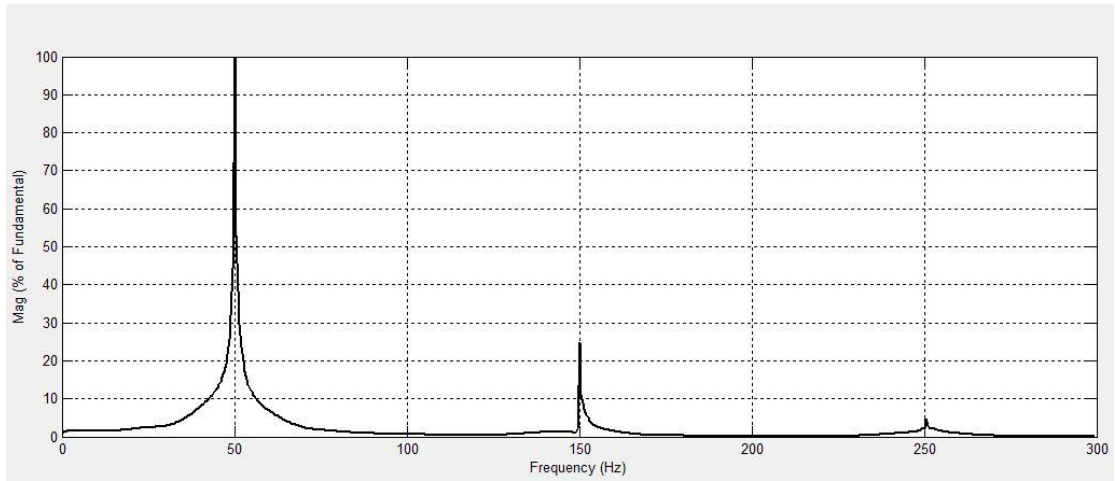
κινητήρα με το δίκτυο γίνεται μέσω των θυρίστορ T_1 και T_4 . Όταν έχουμε την σβέση των θυρίστορ T_1 και T_4 ($\omega t = \beta$), το ρεύμα εξόδου μηδενίζεται και παραμένει μηδενισμένο μέχρι τον επόμενο παλμό ($\beta < \omega t < \pi + \alpha$). Στο διάστημα αυτό η τάση στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου είναι $v_a(t) = e_a(t)$, δηλαδή η μηχανική ενέργεια του φορτίου καλύπτεται από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών.



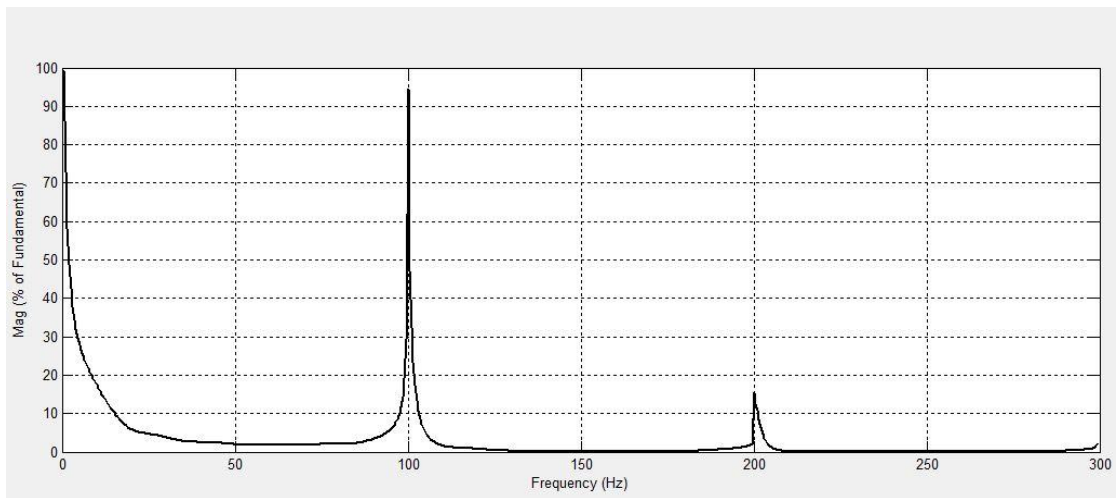
Σχήμα 5.23: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha = 54^\circ$



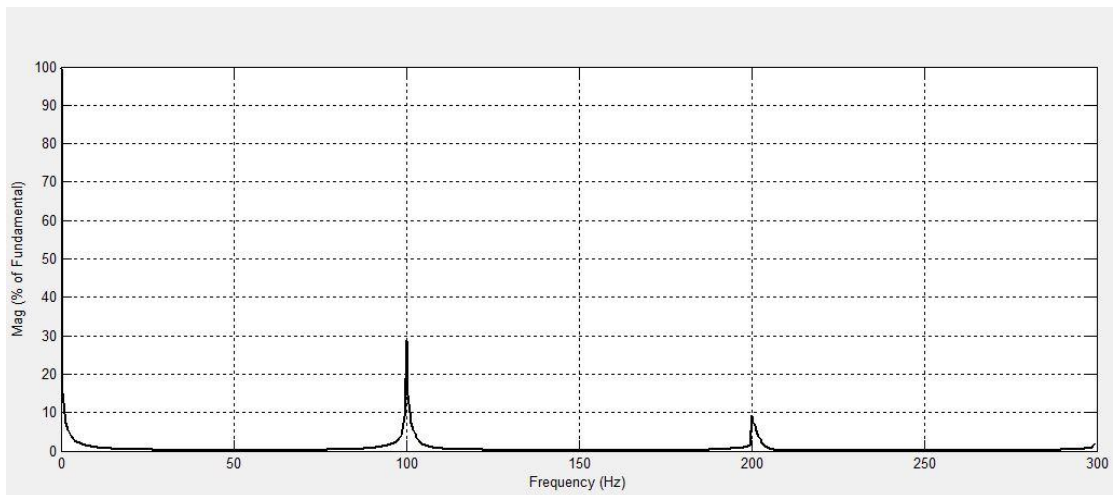
Σχήμα 5.24: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha = 54^\circ$



Σχήμα 5.25: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$



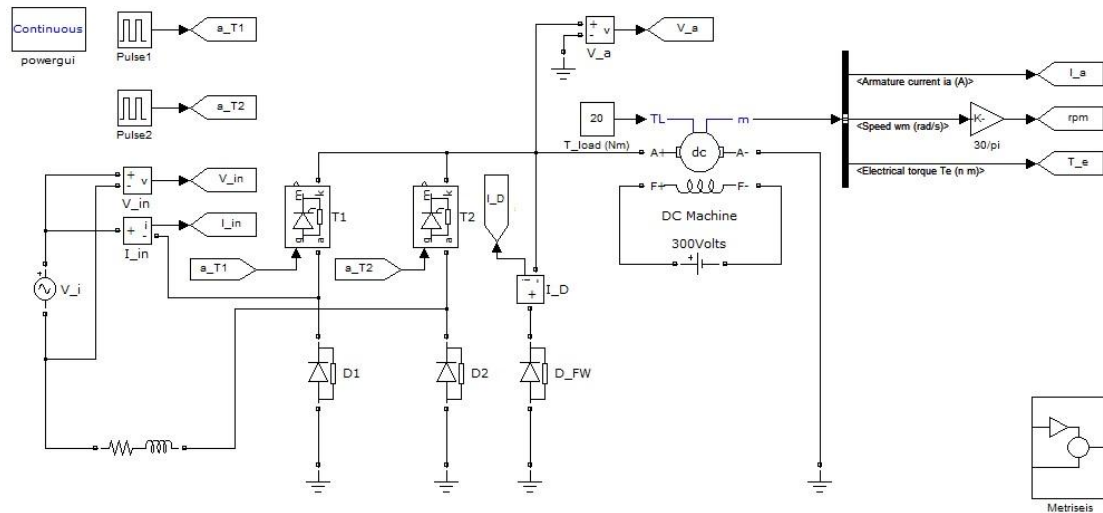
Σχήμα 5.26: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



Σχήμα 5.27: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

5.1.2 Ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

Η ημιελεγχόμενη γέφυρα είναι ένας μετατροπέας AC/DC. Η διαφορά από την πλήρη ελεγχόμενη γέφυρα είναι ότι αυτή λειτουργεί μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή ως ανορθωτική διάταξη. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχει η πιθανότητα της συνεχής και της ασυνεχής αγωγής την οποία θα αναλύσουμε στο simulink και για τις δύο περιπτώσεις. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το κύκλωμα μιας ημιελεγχόμενης γέφυρας για τον έλεγχο ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.



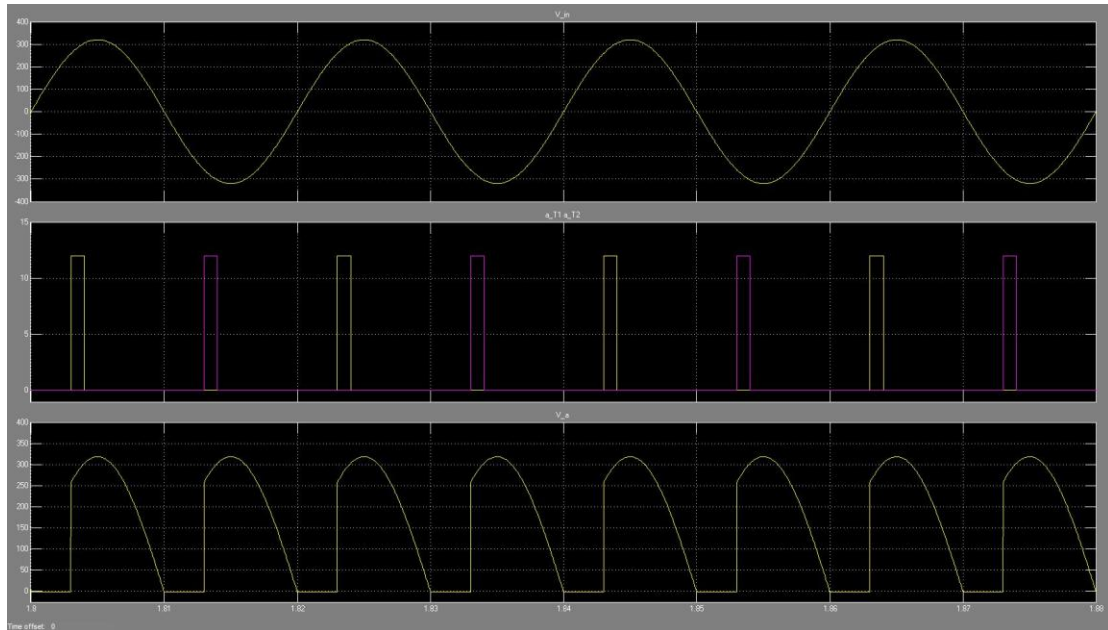
Σχήμα 5.28: Ημιελεγχόμενη γέφυρα για τον έλεγχο κινητήρα Σ.Ρ.

5.1.2.1 Συνεχής αγωγή

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες κυματομορφές της εφαρμογής του σχήματος 5.28. Οι κυματομορφές αυτές είναι για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο. Για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο επιλέγουμε γωνία έναυσης των θυρίστορ 54° η οποία θεωρείται σταθερή. Επίσης σταθερές θεωρούνται η ροπή του φορτίου, $T_L = T_{ov} = 20\text{Nm}$, και η διέγερση του κινητήρα.

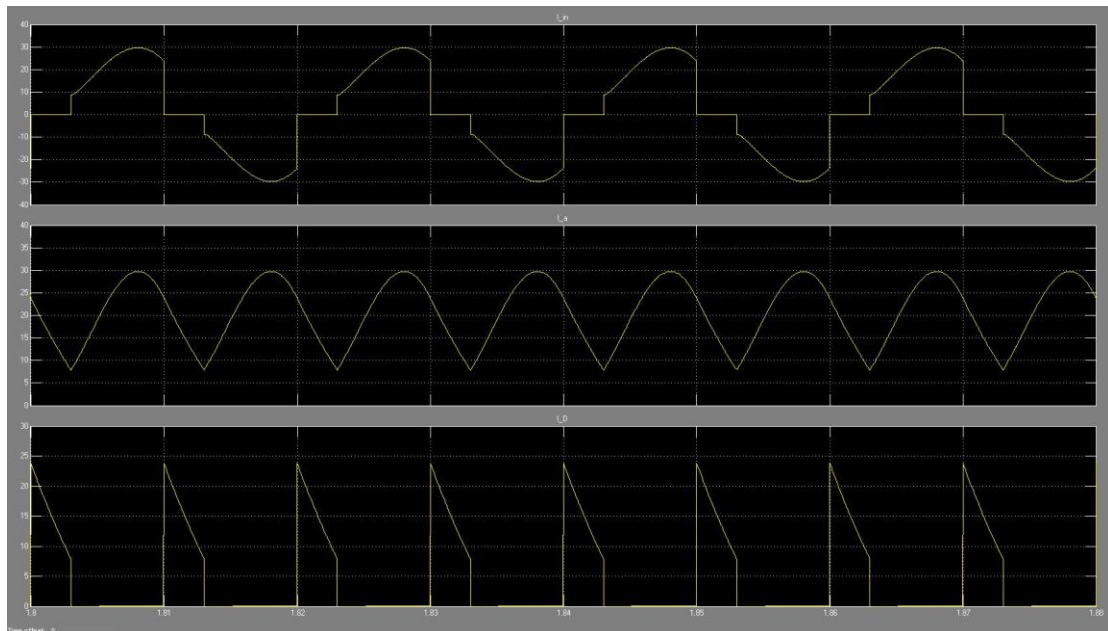
Στην προσομοίωση χρησιμοποιούμε μηχανή συνεχούς ρεύματος με τα εξής στοιχεία: 5HP, 1750rpm, $V_a = 240\text{V}$, $V_f = 300\text{V}$, $R_a = 2.581\Omega$, $L_a = 0.028\text{H}$, $R_f = 281.3\Omega$, $L_f = 156\text{H}$, $L_{af} = 0.9483\text{H}$, $J = 0.02215\text{kgm}^2$, $B = 0.002953\text{Nms}$.

Επίσης η αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου του κινητήρα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, για να έχουμε συνέχεια στο αντίστοιχο ρεύμα τυμπάνου.

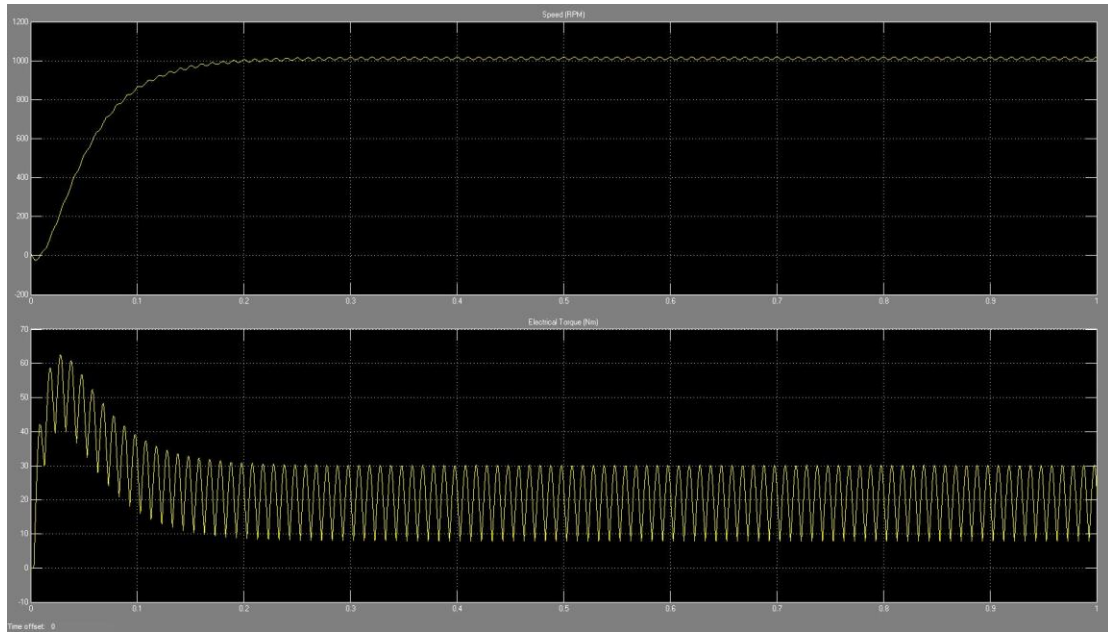


Σχήμα 5.29: Κυματομορφές τάσης εισόδου, τάσης τυμπάνου και οι παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=54^\circ$

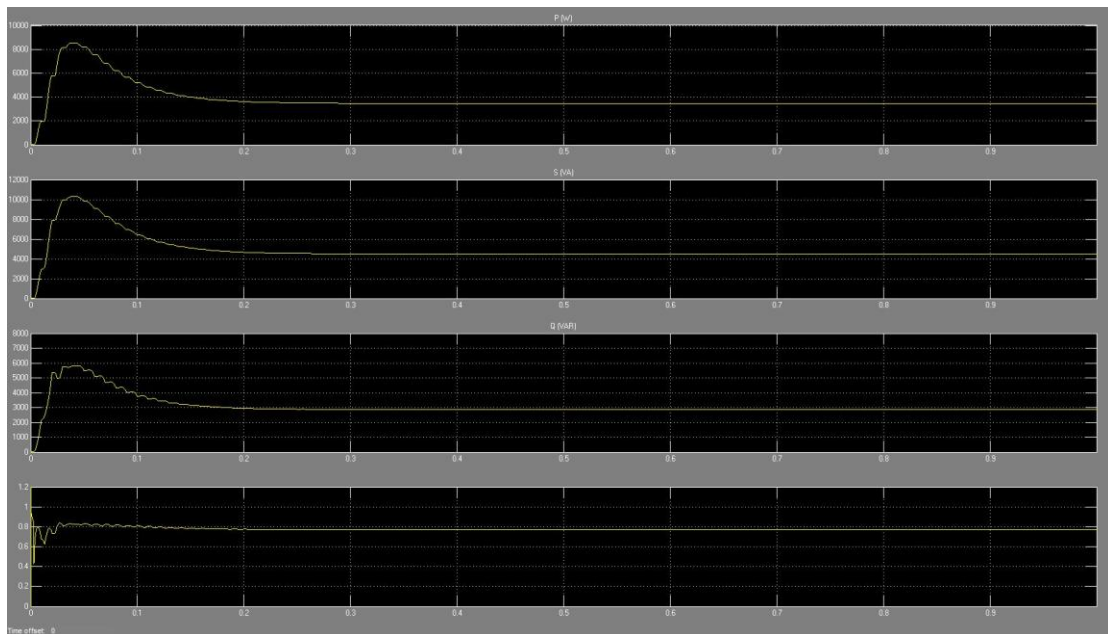
Στην ημieleγχόμενη γέφυρα η έναυση του θυρίστορ T_1 γίνεται σε γωνία α και του T_2 σε γωνία $\alpha+\pi$ (συμμετρικά). Ο κινητήρας στο διάστημα $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ τροφοδοτείται από το δίκτυο μέσω των διακοπών T_1 και D_2 . Στο διάστημα $\alpha \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ εξακολουθούμε να έχουμε ροή του ηλεκτρικού ρεύματος γιατί μέρος της ενέργειας που απορρόφησε από το δίκτυο ο κινητήρας στο διάστημα $\alpha \leq \omega t \leq \pi$, αποθηκεύτηκε στην αυτεπαγωγή του φορτίου ως μαγνητική ενέργεια, με αποτέλεσμα να βραχυκυκλώνεται το φορτίο μέσω της διόδου ελευθέρας ροής.



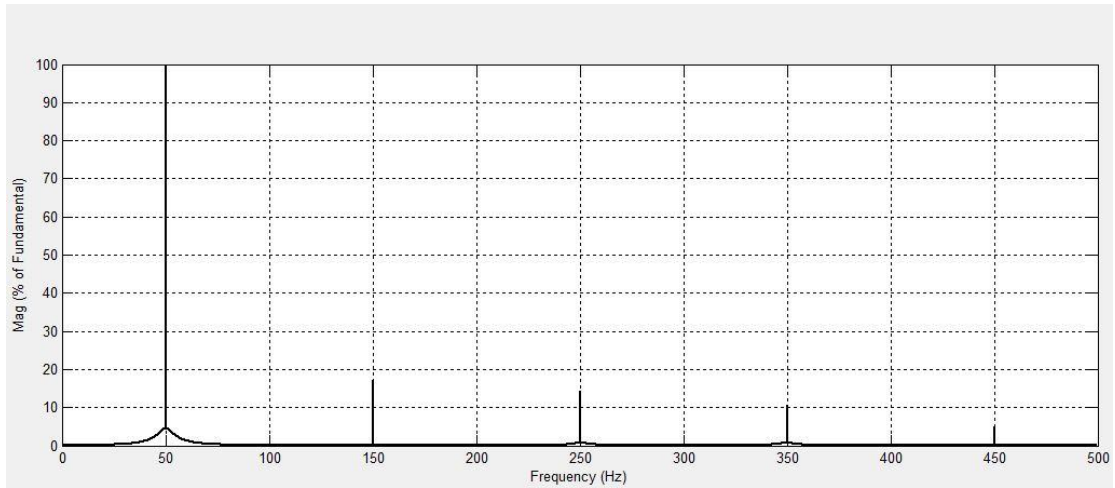
Σχήμα 5.30: Κυματομορφές ρεύματος εισόδου, ρεύματος τυμπάνου και ρεύματος διόδου ελευθέρας ροής του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



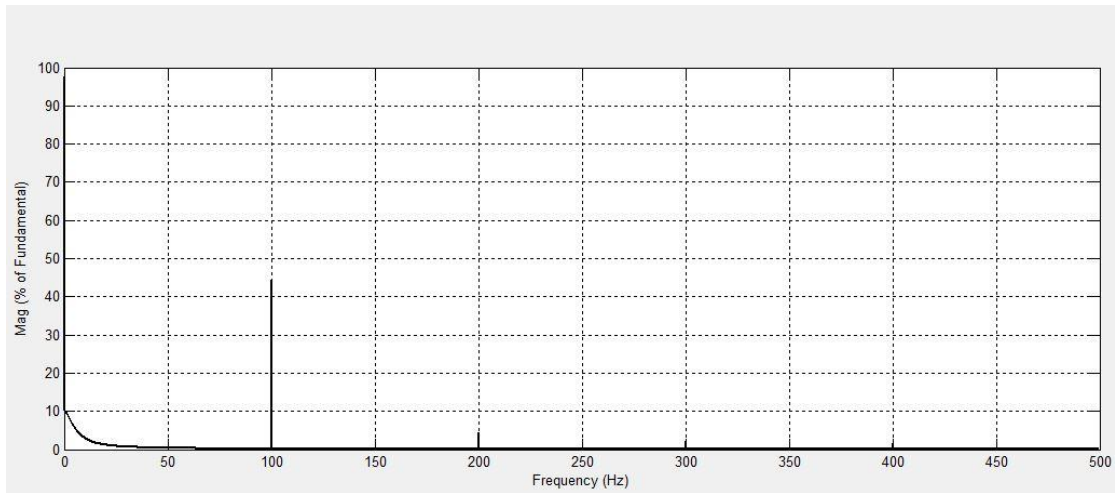
Σχήμα 5.31: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



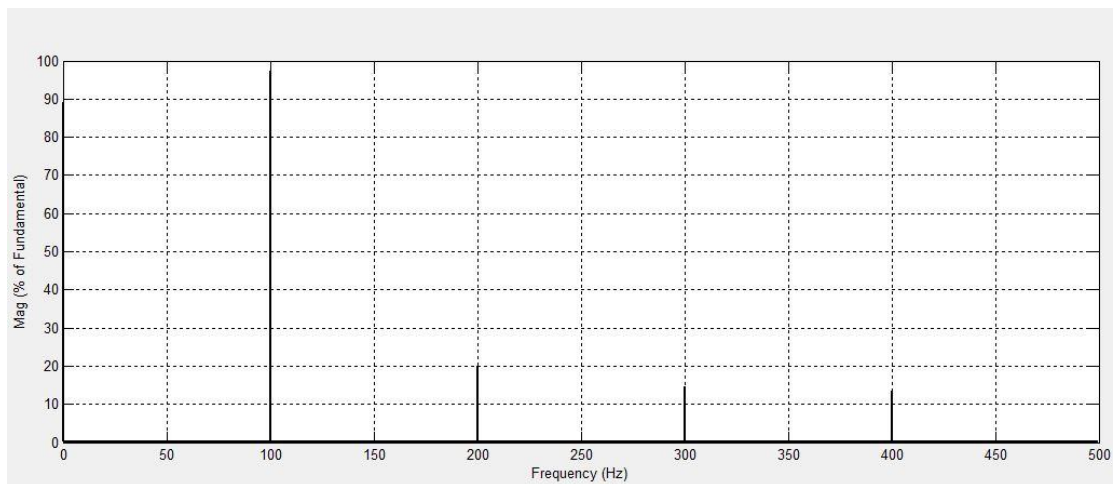
Σχήμα 5.32: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$



Σχήμα 5.33: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$



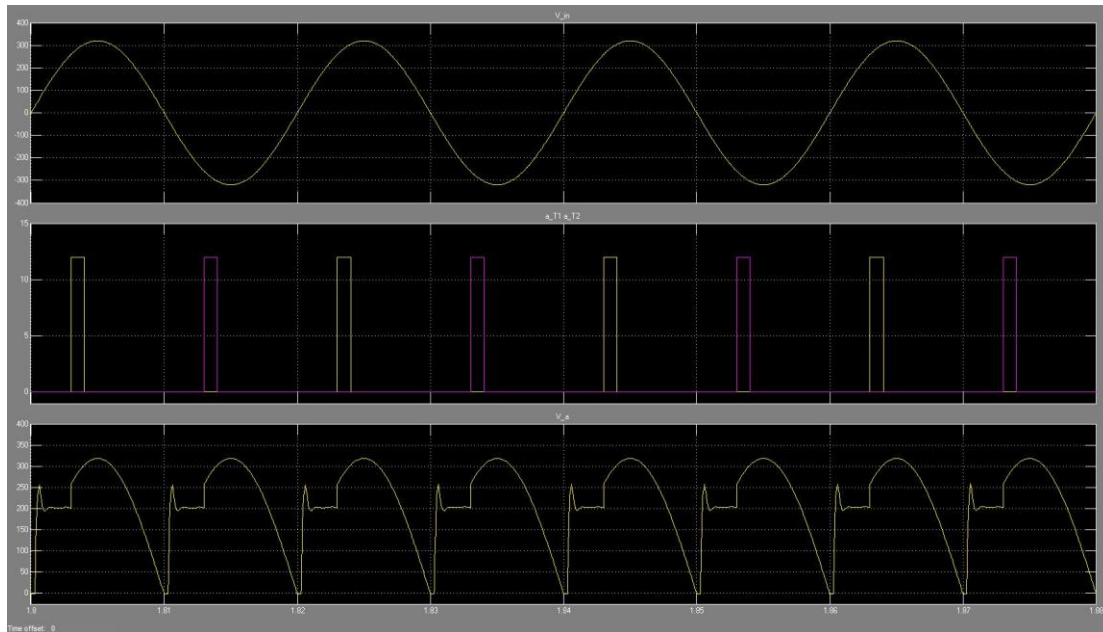
Σχήμα 5.34: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



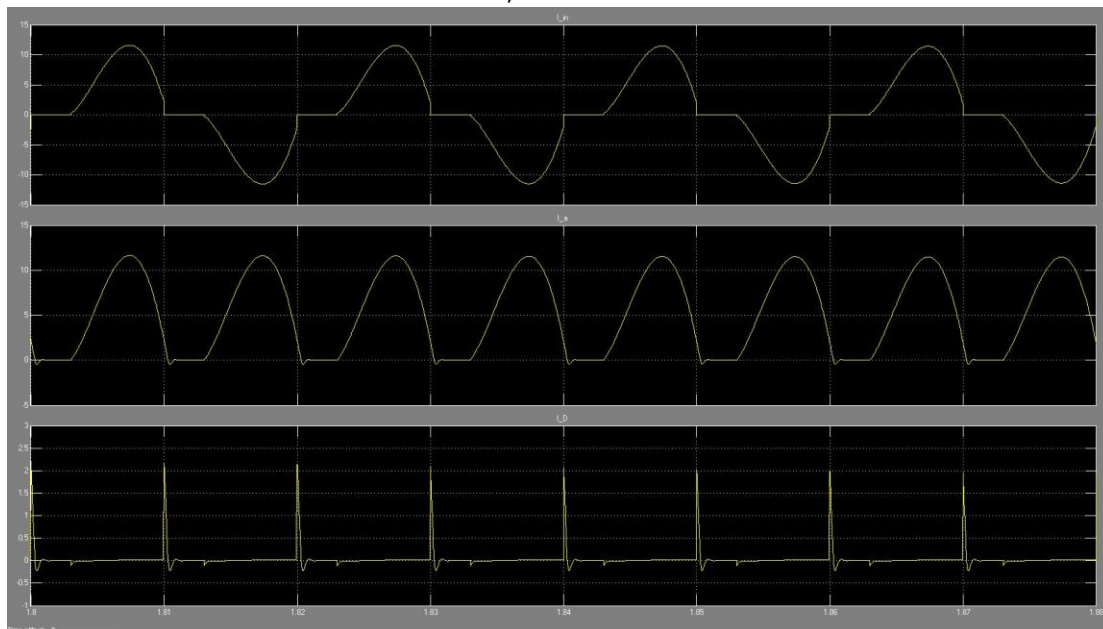
Σχήμα 5.35: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

5.1.2.2 Ασυνεχής αγωγή

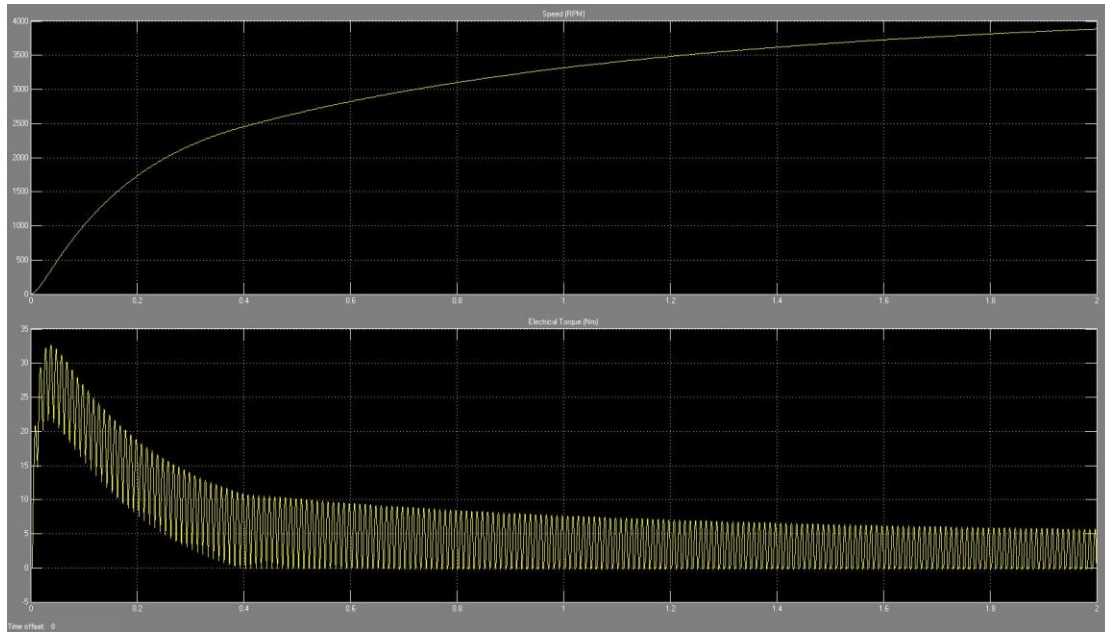
Για να έχουμε ασυνεχή αγωγή θα πρέπει η αυτεπαγωγή του φορτίου να μην είναι μεγάλη και το φορτίο του κινητήρα να είναι πολύ μικρότερο από το ονομαστικό. Για αυτό το λόγο η εκφόρτιση του ρεύματος τυμπάνου, μέσω της διόδου ελευθέρως ροής, μπορεί να γίνει στο διάστημα $\pi < \omega t < \pi + \alpha$. Παρακάτω έχουμε τις κυματομορφές για ασυνεχή αγωγή και γωνία έναυσης 54° της διάταξης του σχήματος 5.28.



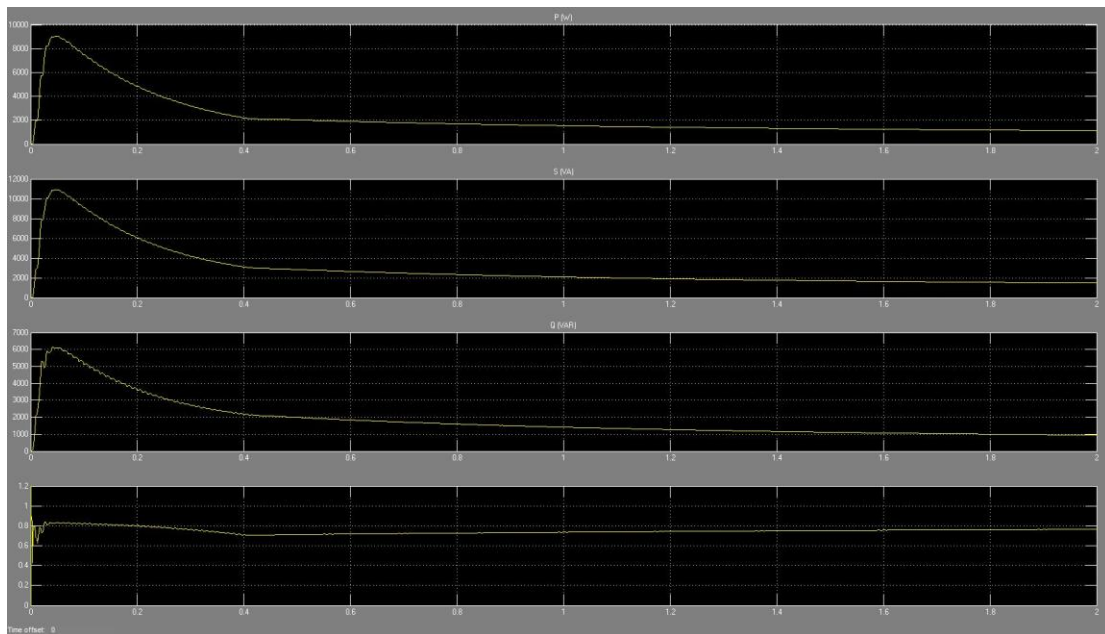
Σχήμα 5.36: Κυματομορφές τάσης εισόδου, τάσης τυμπάνου και οι παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=54^\circ$



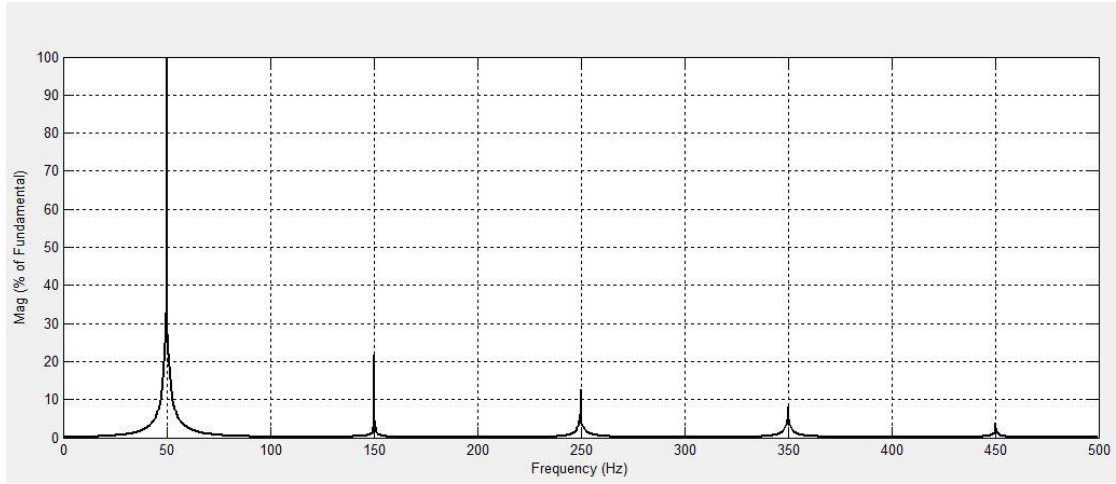
Σχήμα 5.37: Κυματομορφές ρεύματος εισόδου, ρεύματος τυμπάνου και ρεύματος διόδου ελευθέρως ροής του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



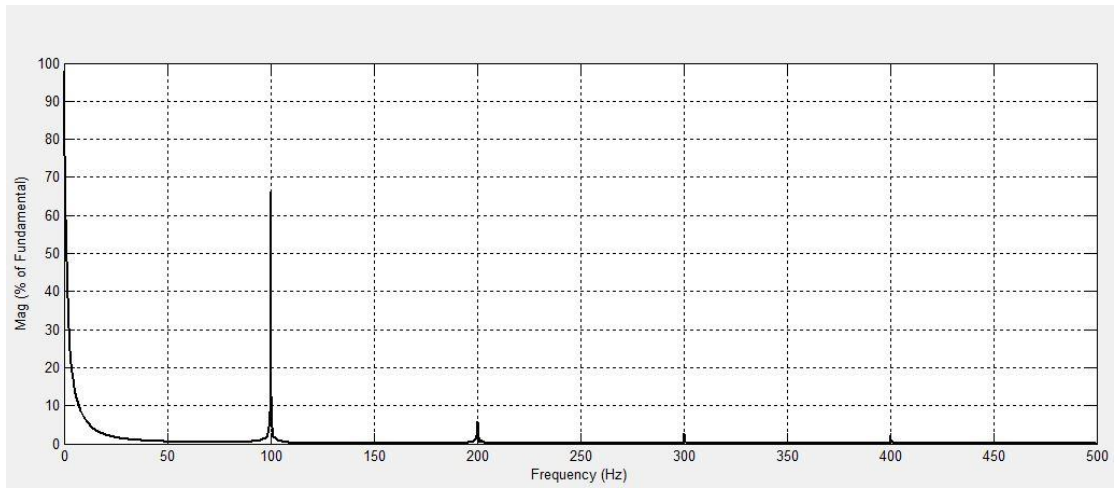
Σχήμα 5.38: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$



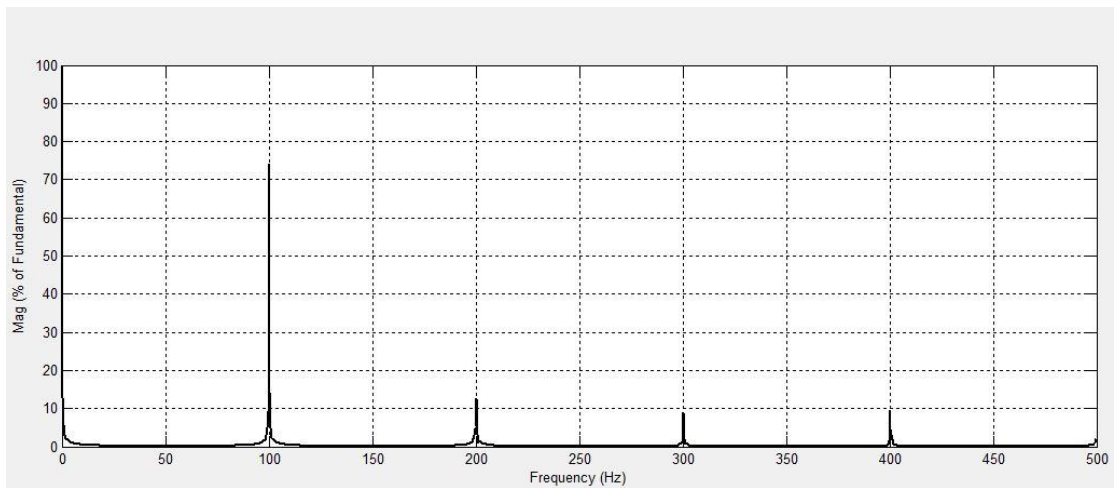
Σχήμα 5.39: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$



Σχήμα 5.40: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=54^\circ$



Σχήμα 5.41: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

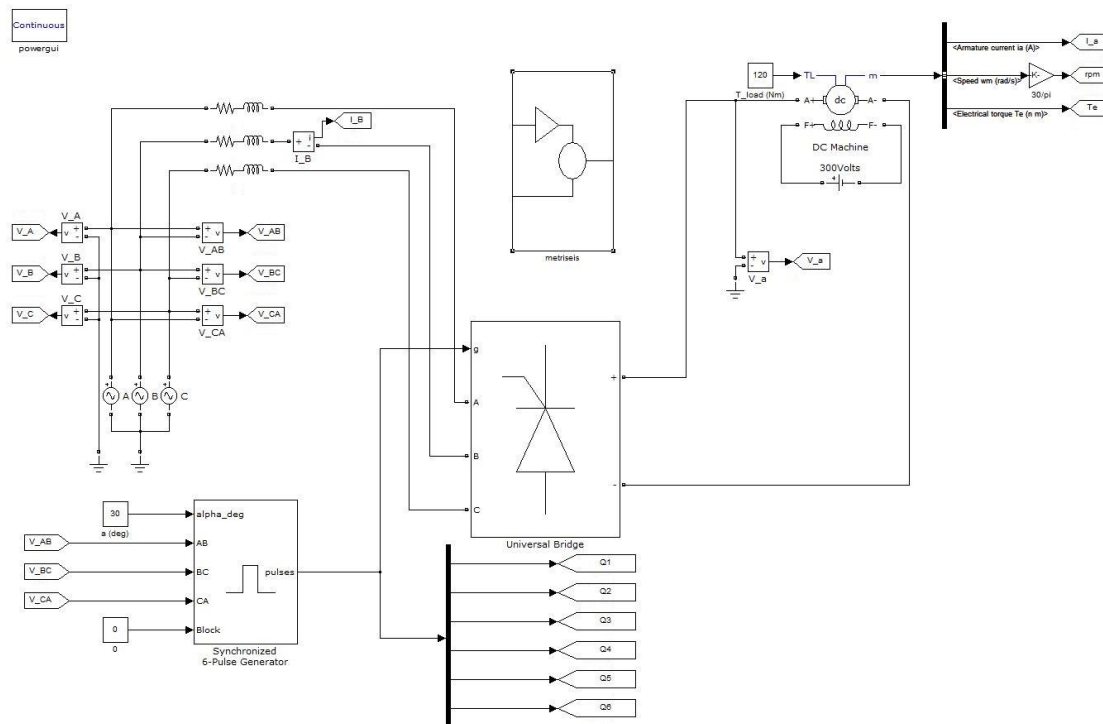


Σχήμα 5.42: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=54^\circ$

5.1.3 Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα

Η τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα έχει δυο πλεονεκτήματα που την καθιστούν να υπερτερεί έναντι των υπολοίπων διατάξεων. Το πρώτο είναι ότι μας επιτρέπει να τροφοδοτήσουμε φορτία μεγάλης ισχύος. Το δεύτερο είναι ότι κατά τη λειτουργία της προσδίδει έξι παλμούς ανά λεπτό, μειώνοντας έτσι την περίπτωση ασυνέχειας του ρεύματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης στο simulink.



Σχήμα 5.43: Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση για τον έλεγχο κινητήρα συνεχούς ρεύματος

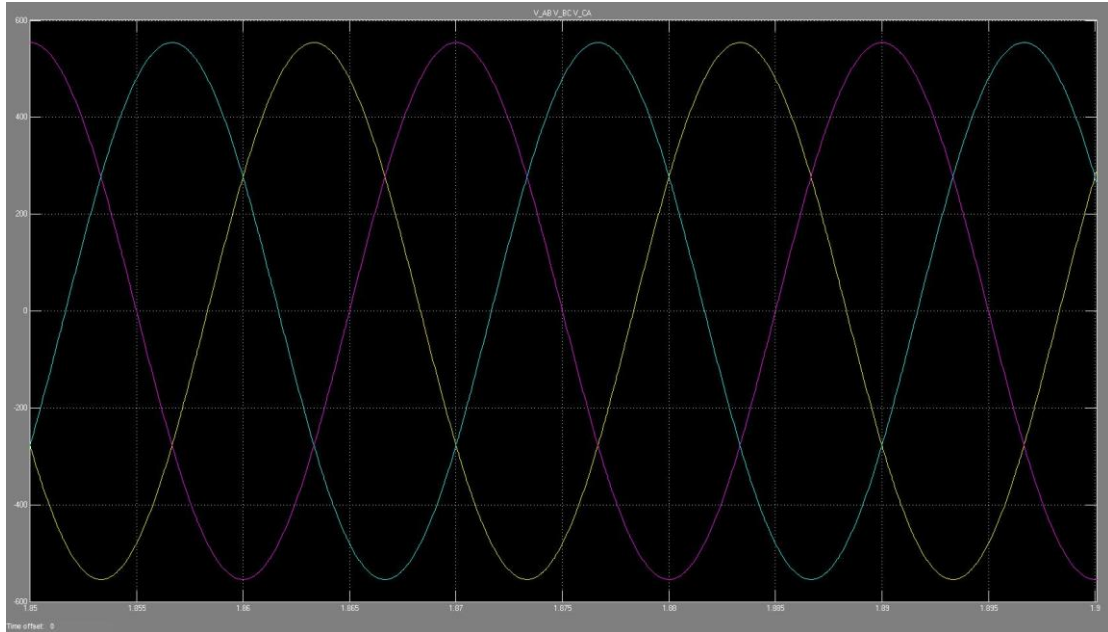
5.1.3.1 Συνεχής αγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε χρονική στιγμή άγουν δυο θυρίστορ ταυτόχρονα. Συνεπώς, οι παλμοί έναυσης δυο διαδοχικών προς έναυση θυρίστορ διαφέρουν κατά 60° . Τα ζευγάρια αγωγής των θυρίστορ είναι: $T_6 - T_1, T_1 - T_2, T_2 - T_3, T_3 - T_4, T_4 - T_5, T_5 - T_6$.

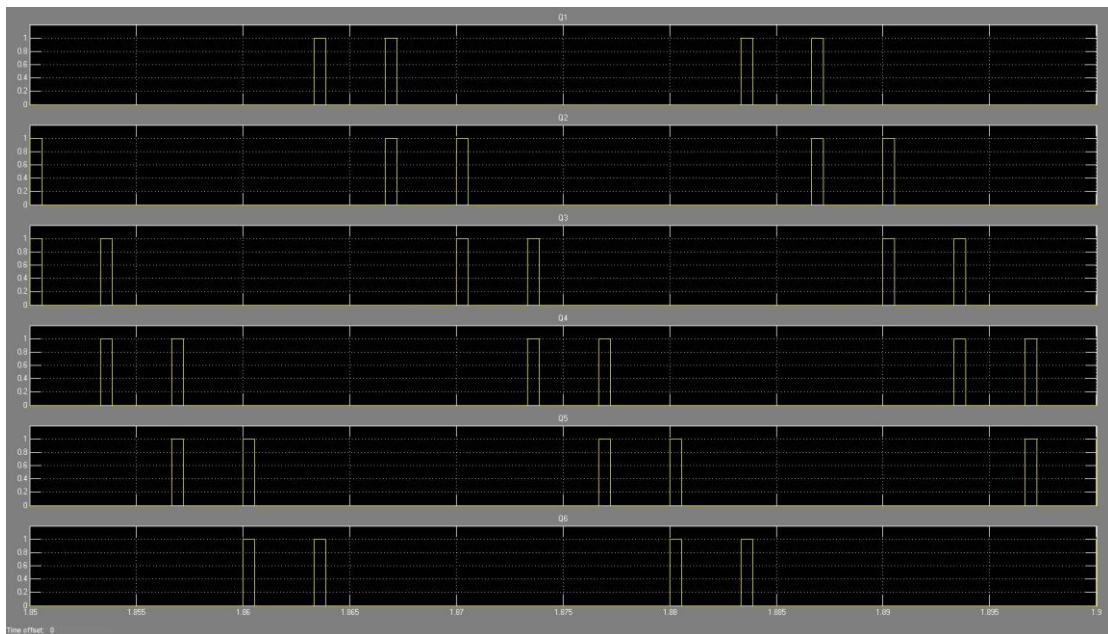
Η διάταξη αυτή έχει δυο τεταρτημόρια λειτουργίας:

- Για $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ έχουμε λειτουργία ανορθωτή δίνοντας ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα
- Για $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ έχουμε λειτουργία αντιστροφέα επιστρέφοντας ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα, με την προϋπόθεση ότι αντιστρέφεται η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ.

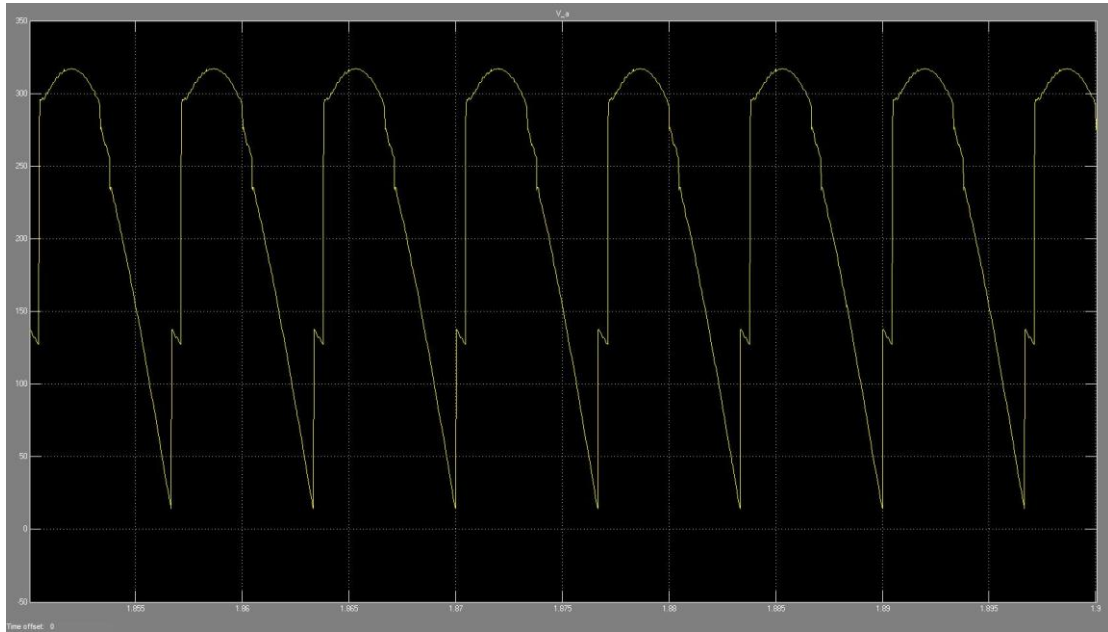
Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μηχανή Σ.Ρ. με τα εξής στοιχεία:
30HP, 1750rpm, $V_a=500V$, $V_f=300V$, $R_a=0.9875\Omega$, $L_a=0.01244H$, $R_f=102.3\Omega$,
 $L_f=20.82H$, $L_{af}=0.8355H$, $J=0.1239kgm^2$, $B=0.005219Nms$
Η γωνία έναυσης των θυρίστορ και η ροπή φορτίου θεωρούνται σταθερά ($\alpha = 30^\circ$, $T_L = T_{ov} = 120 Nm$). Ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή διέγερση.
Λαμβάνουμε τις εξής κυματομορφές.



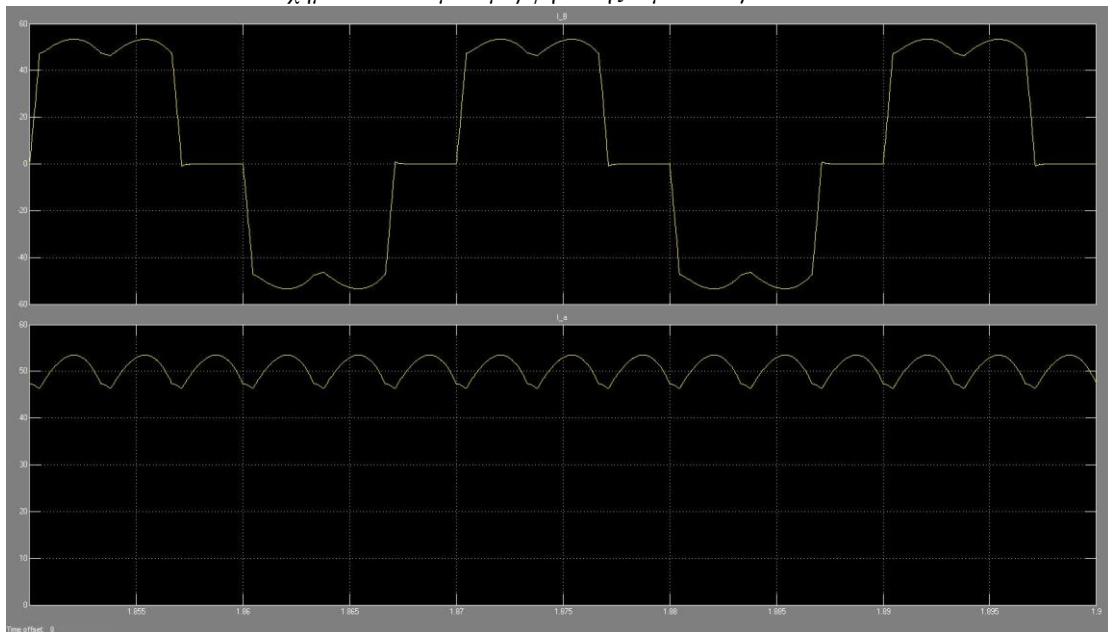
Σχήμα 5.44: Κυματομορφές τάσεων εισόδου για $\alpha=30^\circ$



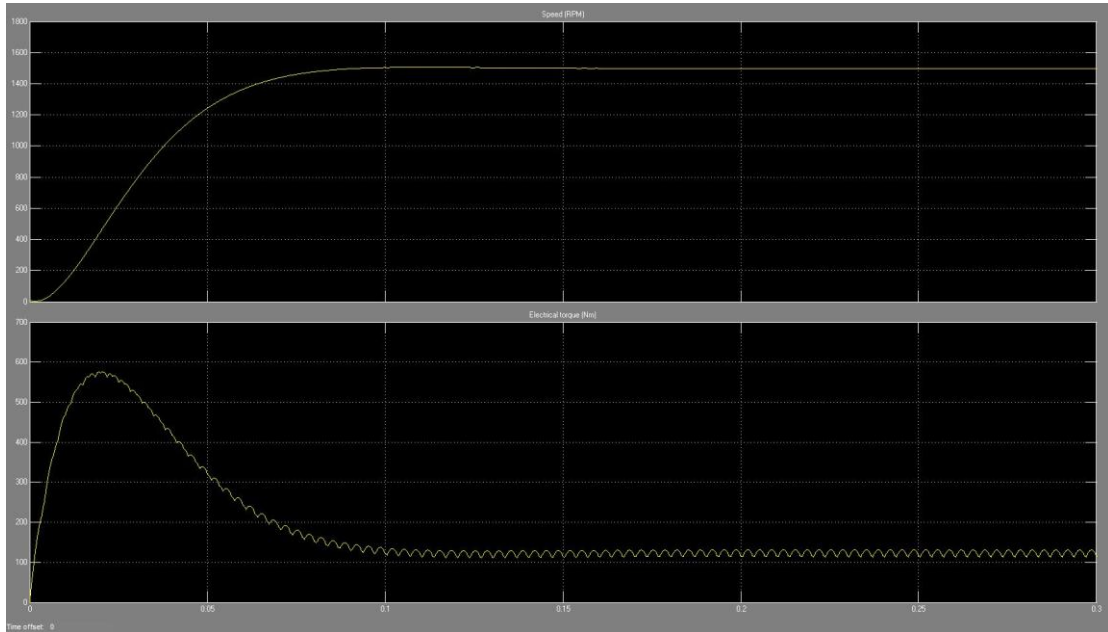
Σχήμα 5.45: Παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=30^\circ$



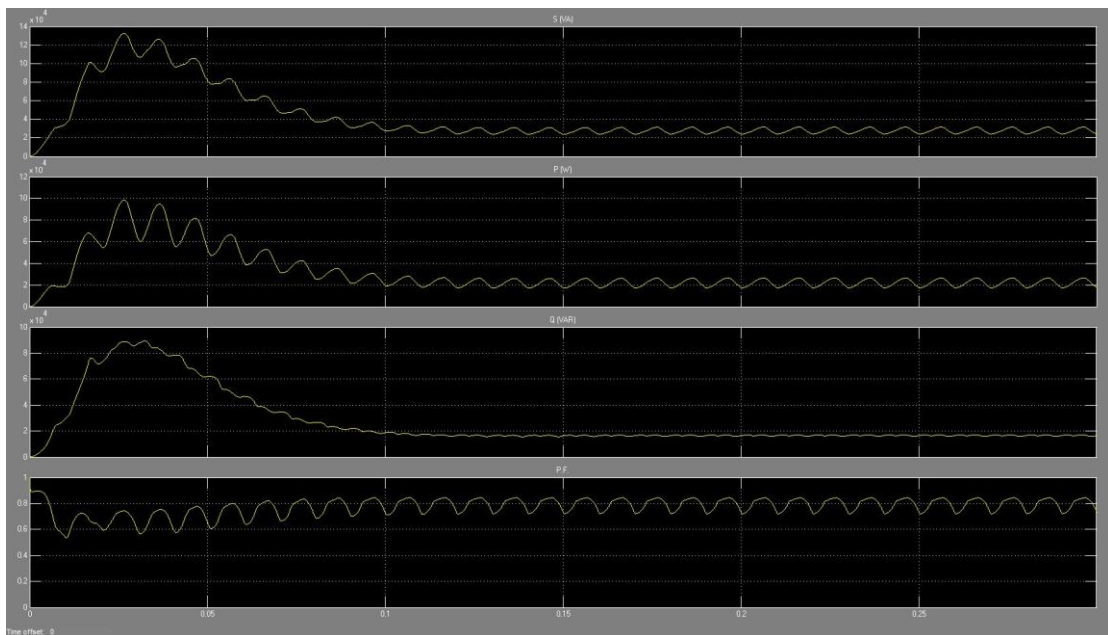
Σχήμα 5.46: Κυματομορφή τάσης τυμπάνου για $\alpha=30^\circ$



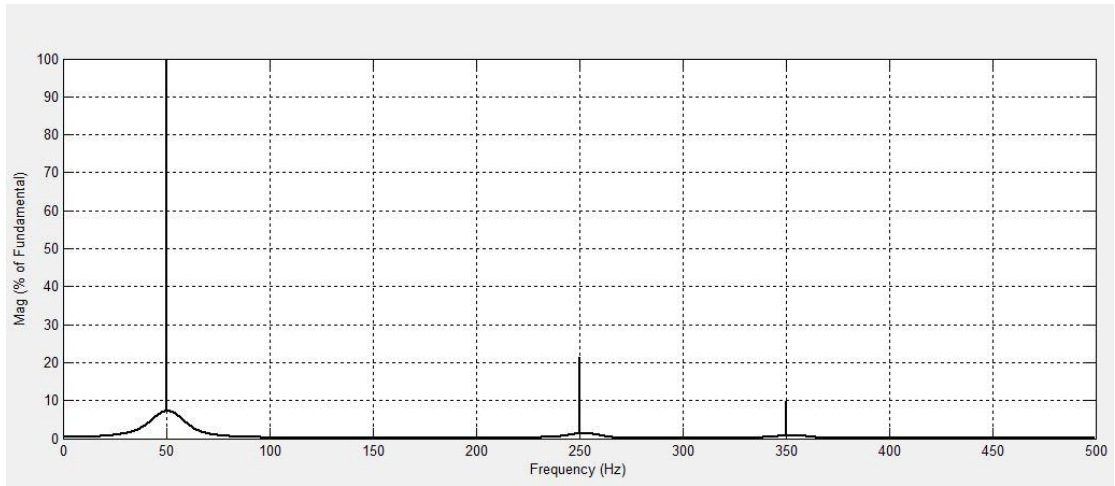
Σχήμα 5.47: Κυματομορφές ρευμάτων εισόδου και τυμπάνου για $\alpha=30^\circ$



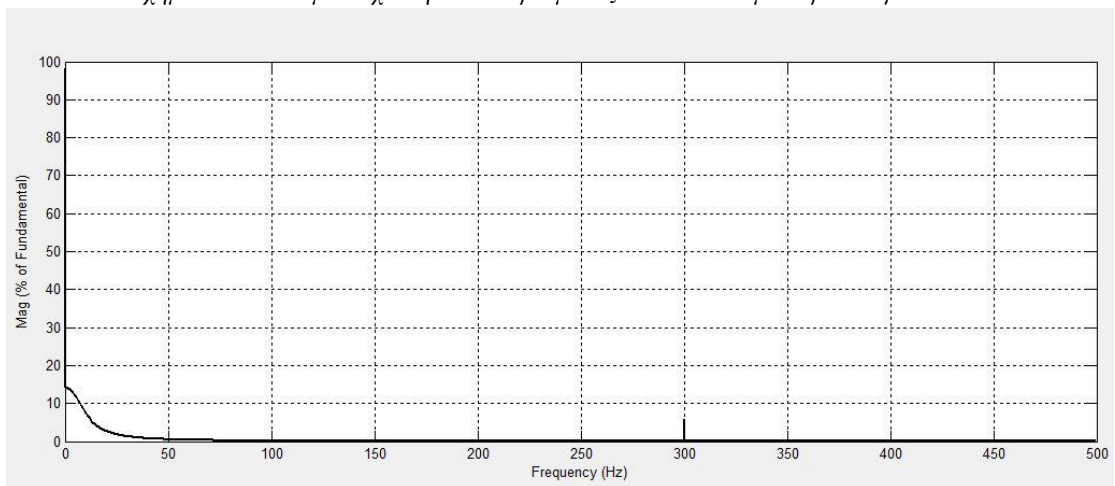
Σχήμα 5.48: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=30^\circ$



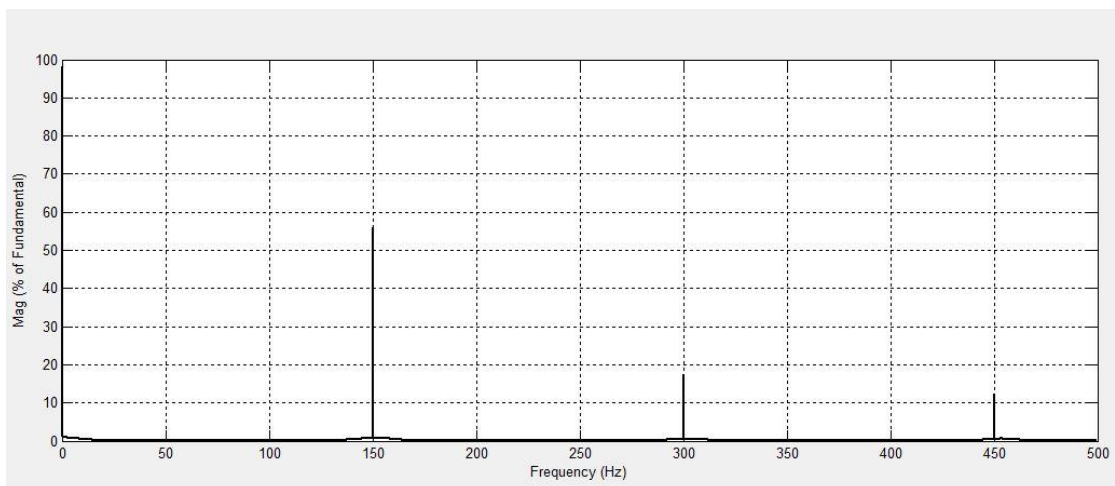
Σχήμα 5.49: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=30^\circ$



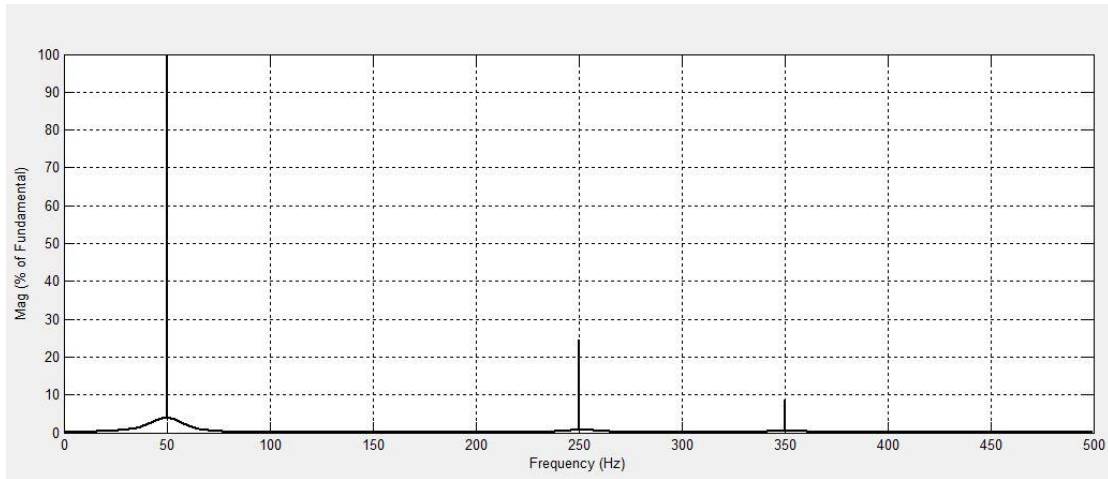
Σχήμα 5.50: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=30^\circ$



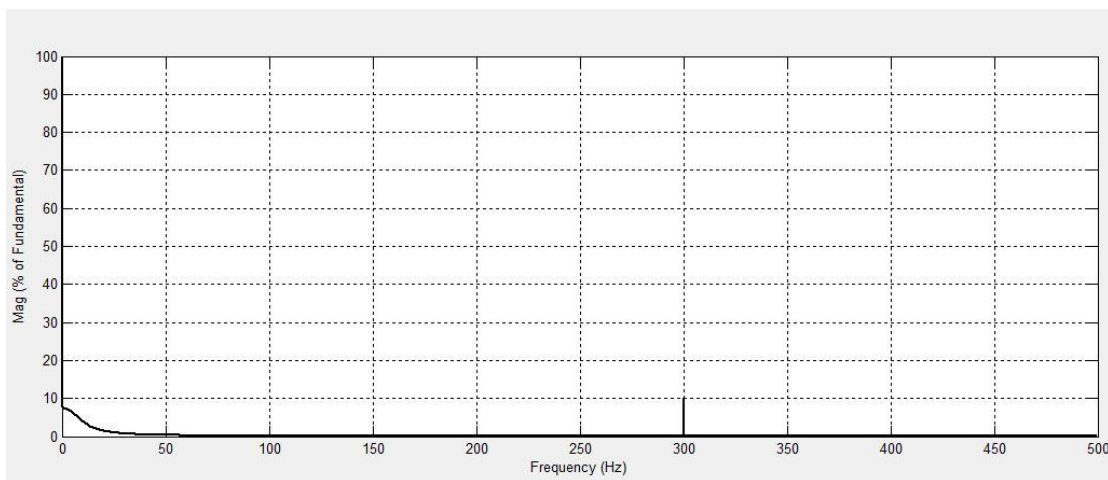
Σχήμα 5.51: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του μετατροπέα για $\alpha=30^\circ$



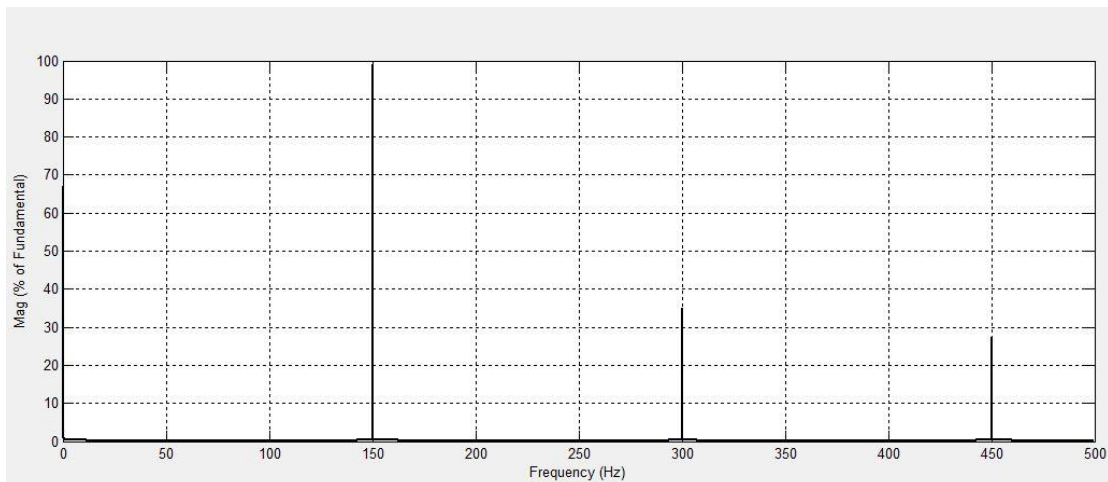
Σχήμα 5.52: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=30^\circ$



Σχήμα 5.53: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=60^\circ$

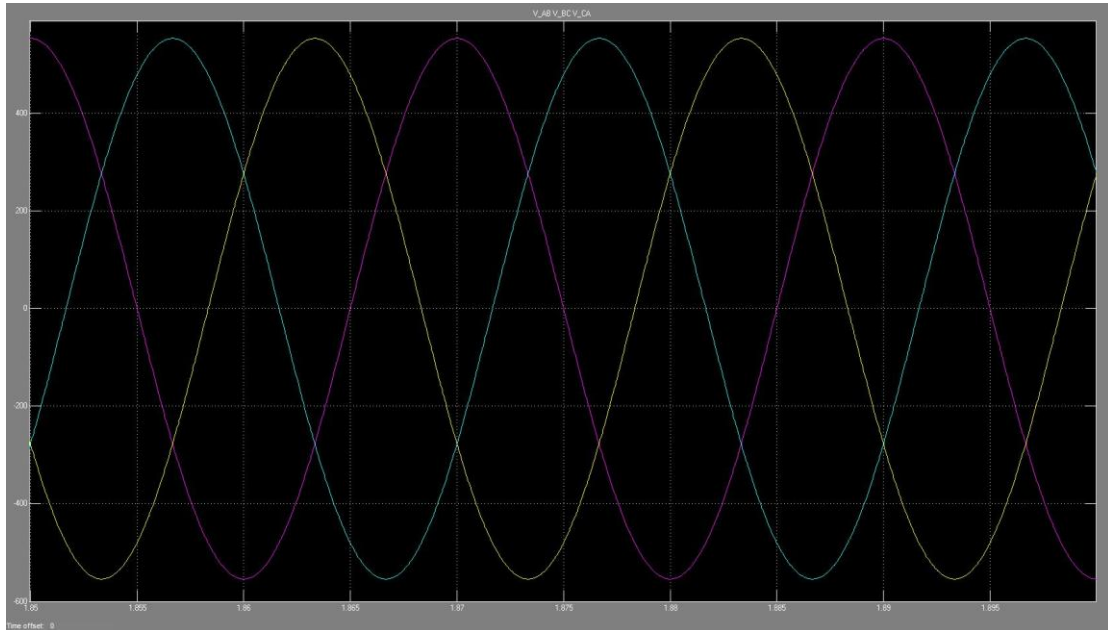


Σχήμα 5.54: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του μετατροπέα για $\alpha=60^\circ$

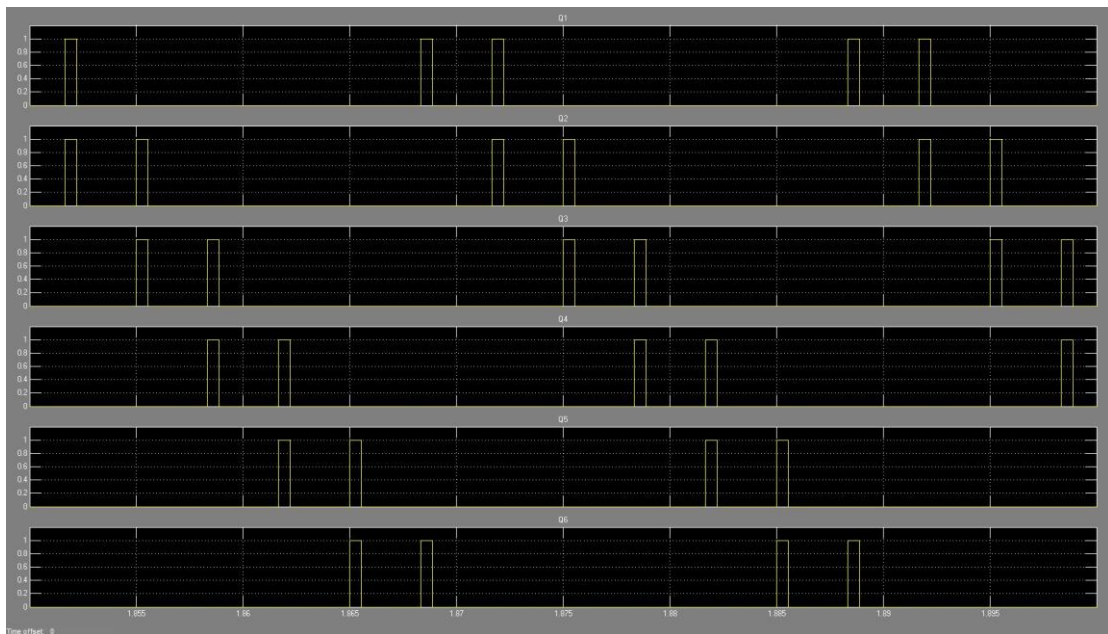


Σχήμα 5.55: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=60^\circ$

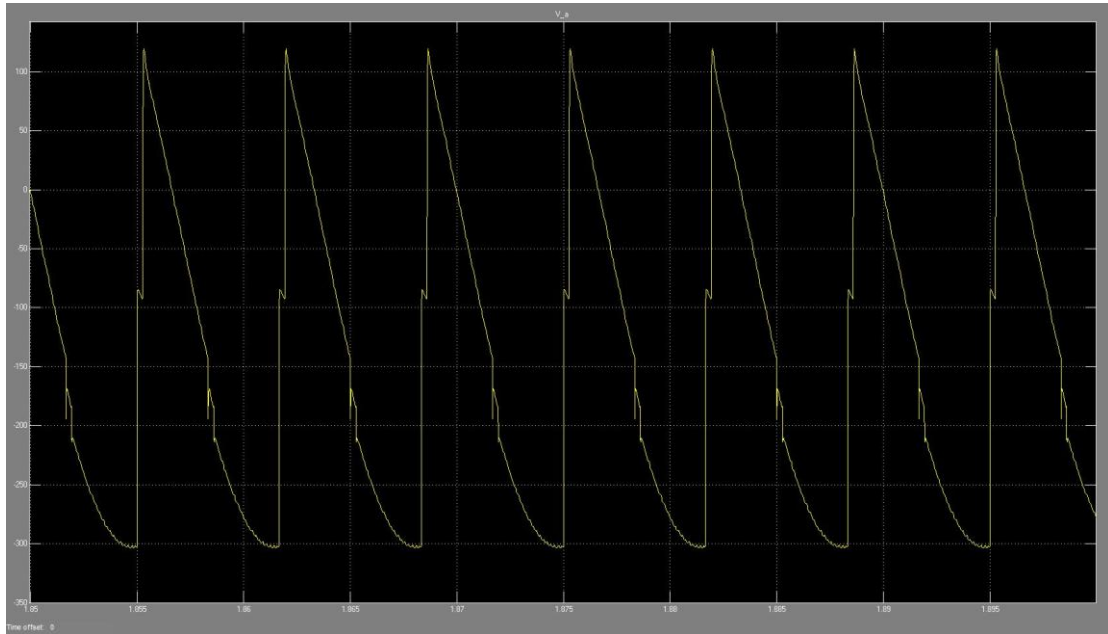
Για τιμές έναυσης $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ έχουμε λειτουργία αντιστροφέα με την προϋπόθεση ότι αντιστρέφεται η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ. . Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές για λειτουργία στο 2^ο τεταρτημόριο, $\alpha = 120^\circ$.



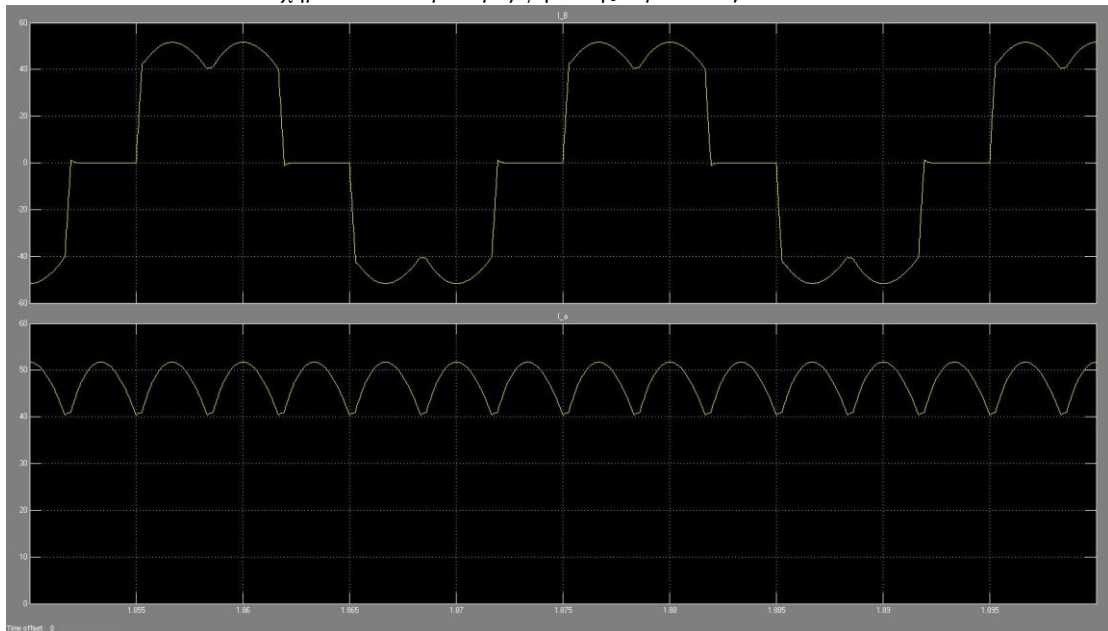
Σχήμα 5.56: Κυματομορφές τάσεων εισόδου για $\alpha=120^\circ$



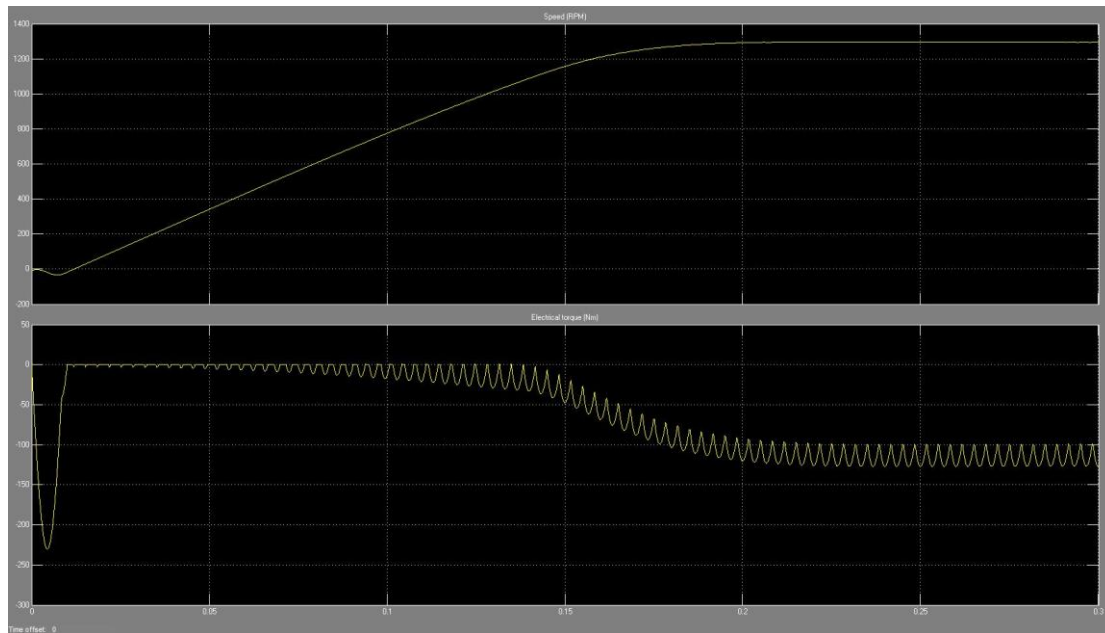
Σχήμα 5.57: Παλμοί πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=120^\circ$



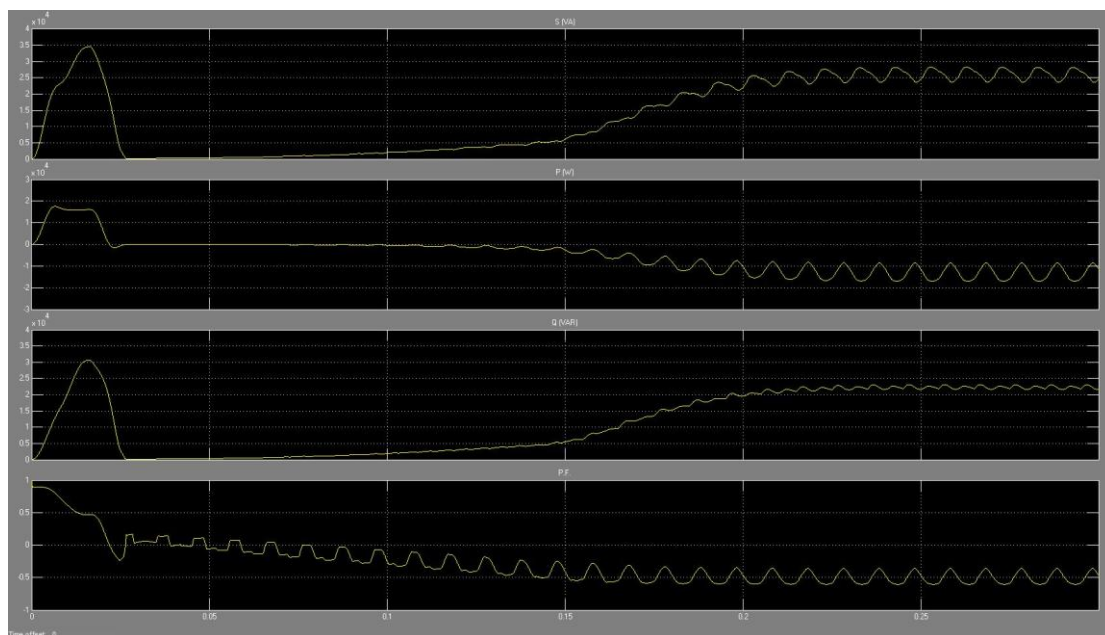
Σχήμα 5.58: Κυματομορφή τάσης τυμπάνου για $\alpha=120^\circ$



Σχήμα 5.59: Κυματομορφές ρευμάτων εισόδου και τυμπάνου για $\alpha=120^\circ$



Σχήμα 5.60: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=120^\circ$



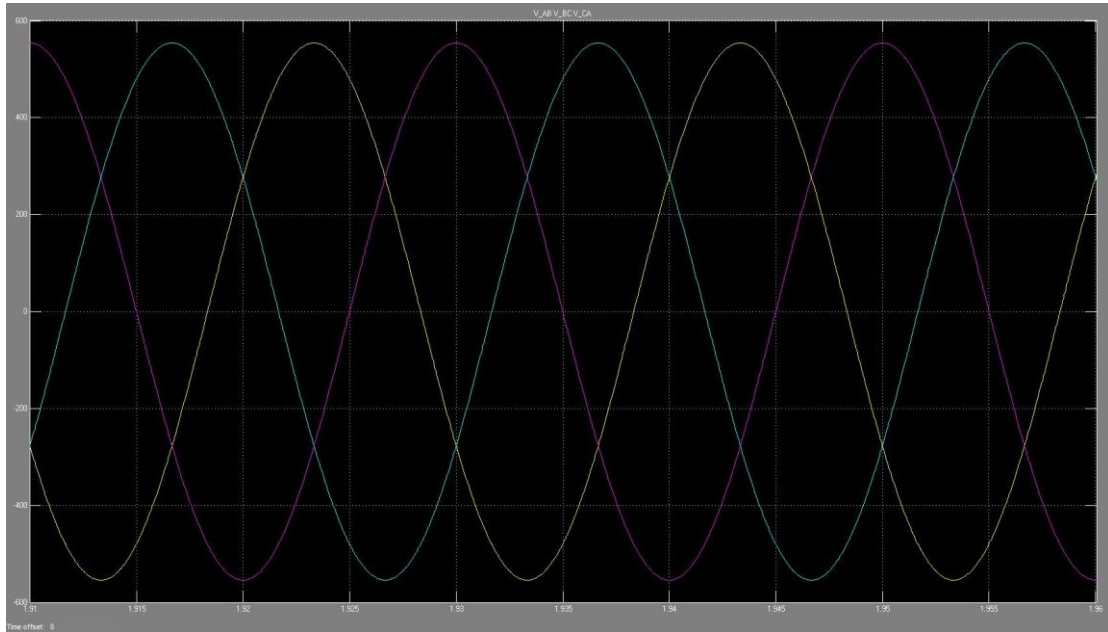
Σχήμα 5.61: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=120^\circ$

5.1.3.2 Ασυνεχής αγωγή

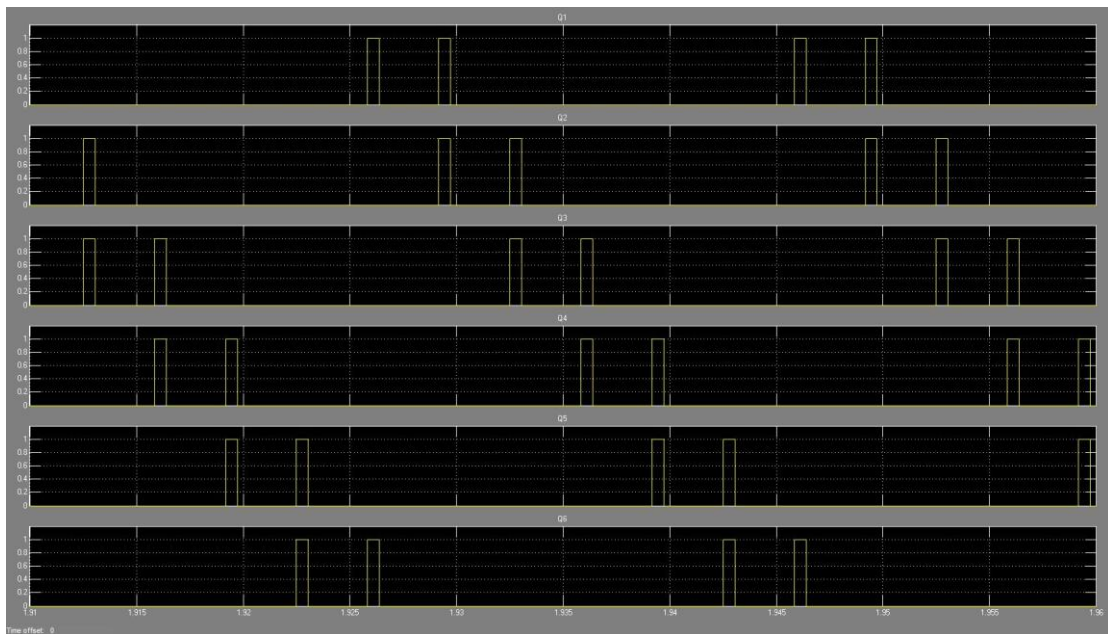
Στην περίπτωση που η αυτεπαγωγή τυμπάνου είναι μικρή, υπάρχει πιθανότητα να υπάρξει ασυνέχεια στο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα. Η πιθανότητα ασυνέχειας υπάρχει όταν η ροπή φορτίου είναι μικρότερη του ονομαστικού και η ταχύτητα περιστροφής είναι αρκετά μεγάλη.

Παρακάτω παρουσιάζονται κυματομορφές για ασυνεχή αγωγή του μετατροπέα ($\alpha = 75^\circ$, $T_L = 0$).

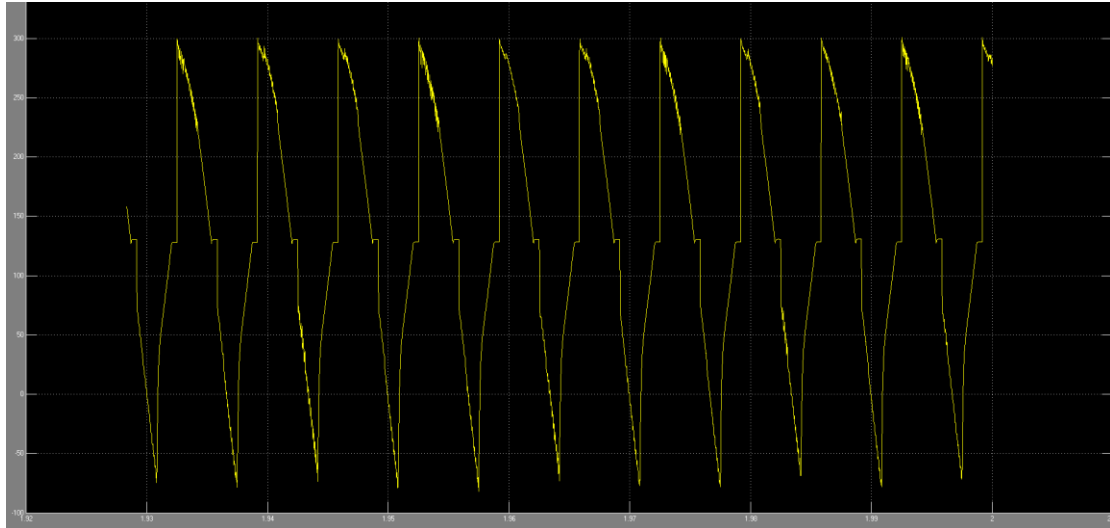
Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος



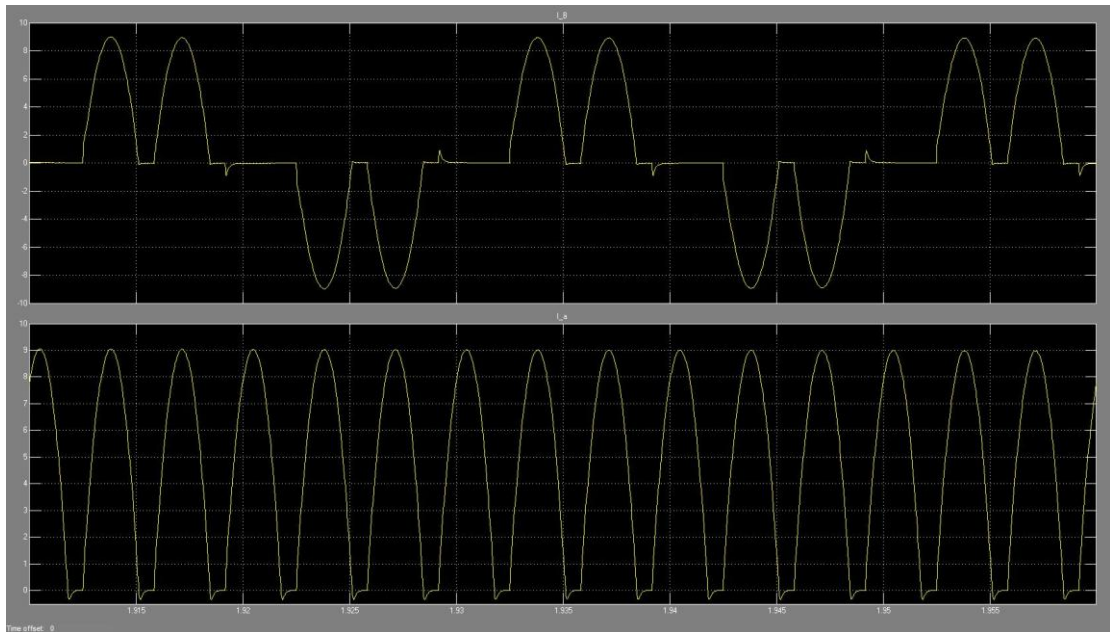
Σχήμα 5.62: Κυματομορφές τάσεων εισόδου για $\alpha=75^\circ$



Σχήμα 5.63: Πάλμοι πυροδότησης των θυρίστορ για $\alpha=75^\circ$

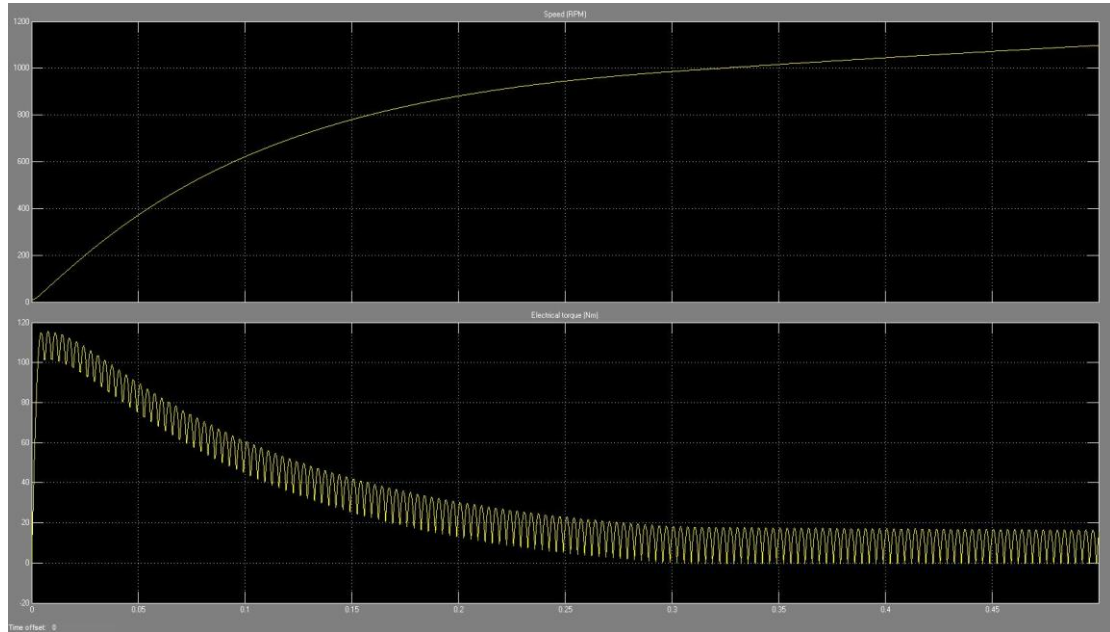


Σχήμα 5.64: Κυματομορφή τάσης τυμπάνου για $\alpha=75^\circ$

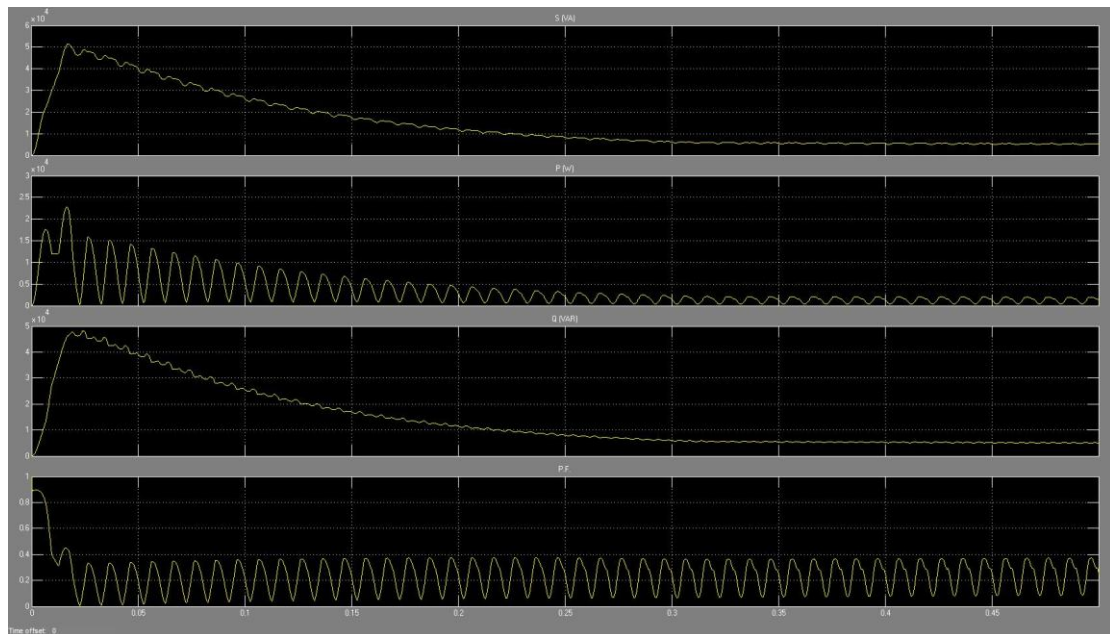


Σχήμα 5.65: Κυματομορφές ρευμάτων εισόδου και τυμπάνου για $\alpha=75^\circ$

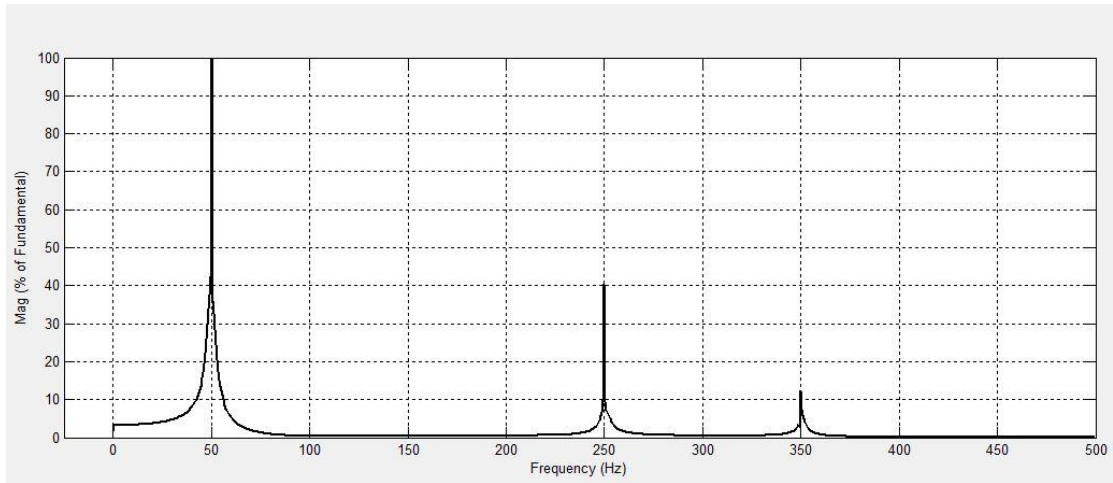
Παρατηρούμε ότι όσο η Α.Η.Ε.Δ. πλησιάζει την τιμή της τάσης τυμπάνου, τόσο οι παλμοί του ρεύματος ελαττώνονται σε μέγεθος και διάρκεια.



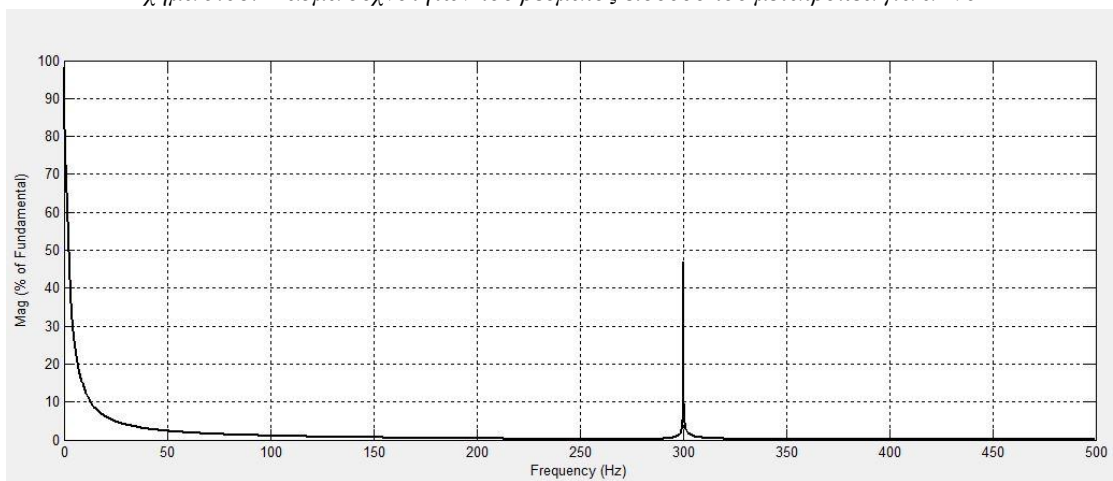
Σχήμα 5.66: Κυματομορφές ταχύτητας περιστροφής και ροπής του κινητήρα για $\alpha=75^\circ$



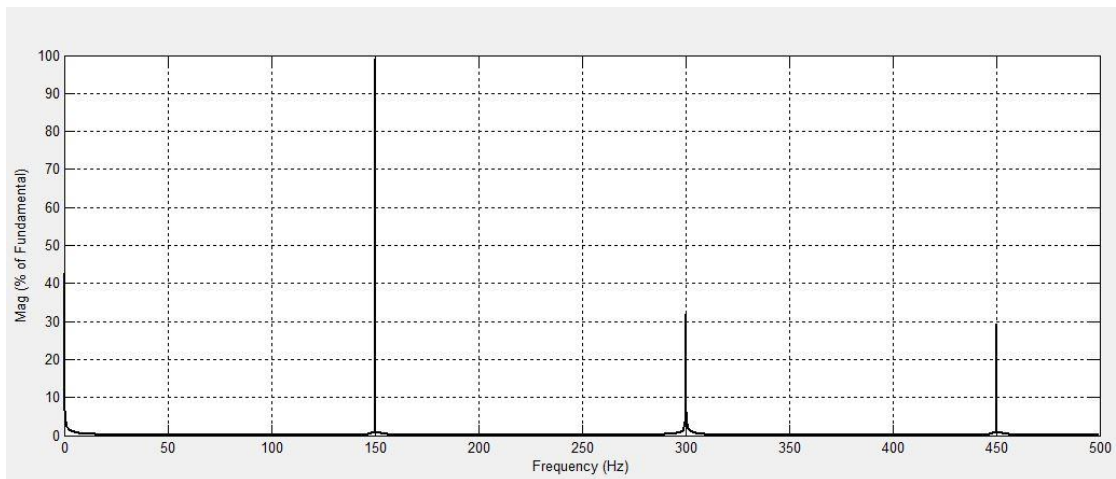
Σχήμα 5.67: Κυματομορφές μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα για $\alpha=75^\circ$



Σχήμα 5.68: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $\alpha=75^\circ$



Σχήμα 5.69: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του μετατροπέα για $\alpha=75^\circ$



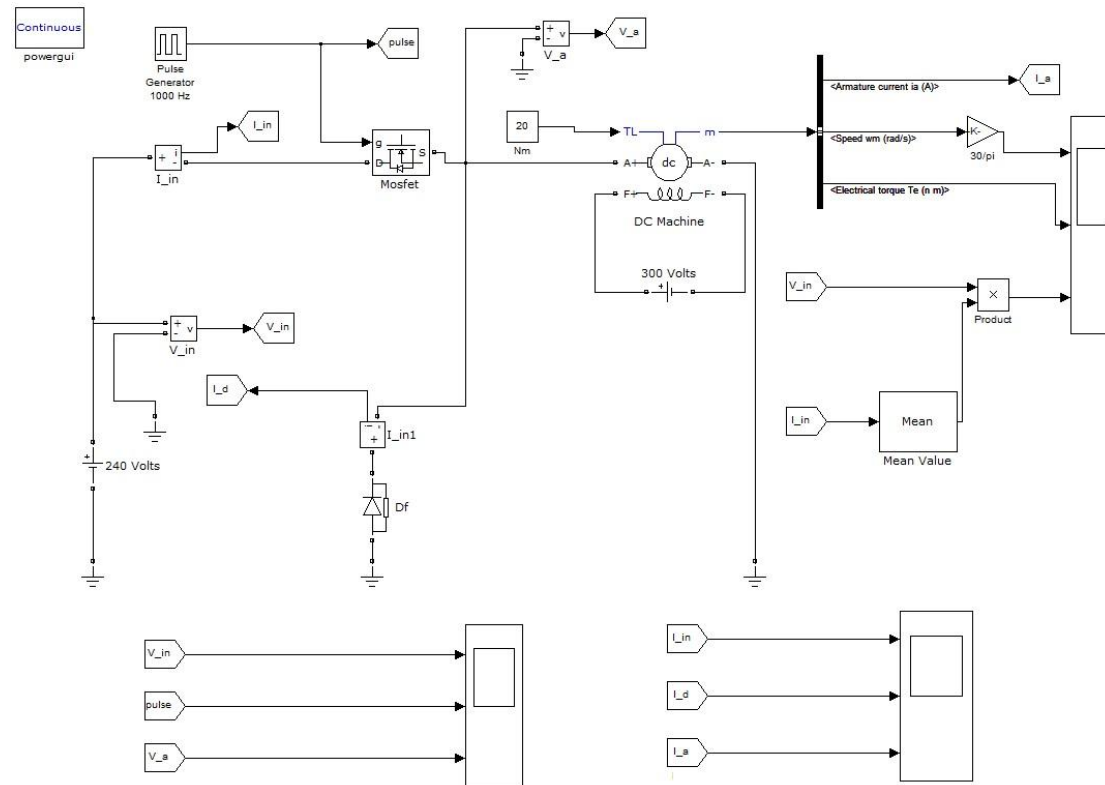
Σχήμα 5.70: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $\alpha=75^\circ$

5.2 Μετατροπείς DC/DC για τον έλεγχο κινητήρων Σ.Ρ.

5.2.1 Μετατροπέας DC/DC (ενός τεταρτημορίου)

Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί στο πρώτο τεταρτημόριο (κινητήρας). Ο μετατροπέας DC/DC έχει έναν διακόπτη ο οποίος όταν είναι κλειστός, τότε ρέει ρεύμα από την πηγή προς το τύλιγμα τυμπάνου του κινητήρα ενώ όταν είναι ανοικτός, τότε το ρεύμα εξόδου ρέει μέσω της διόδου ελευθέρως ροής. Για αυτόν το λόγο το ρεύμα τυμπάνου και η τάση εξόδου του μετατροπέα είναι θετικά. Επίσης υπάρχει η πιθανότητα της συνεχής και της ασυνεχής αγωγής την οποία θα αναλύσουμε στο simulink και για τις δύο περιπτώσεις.

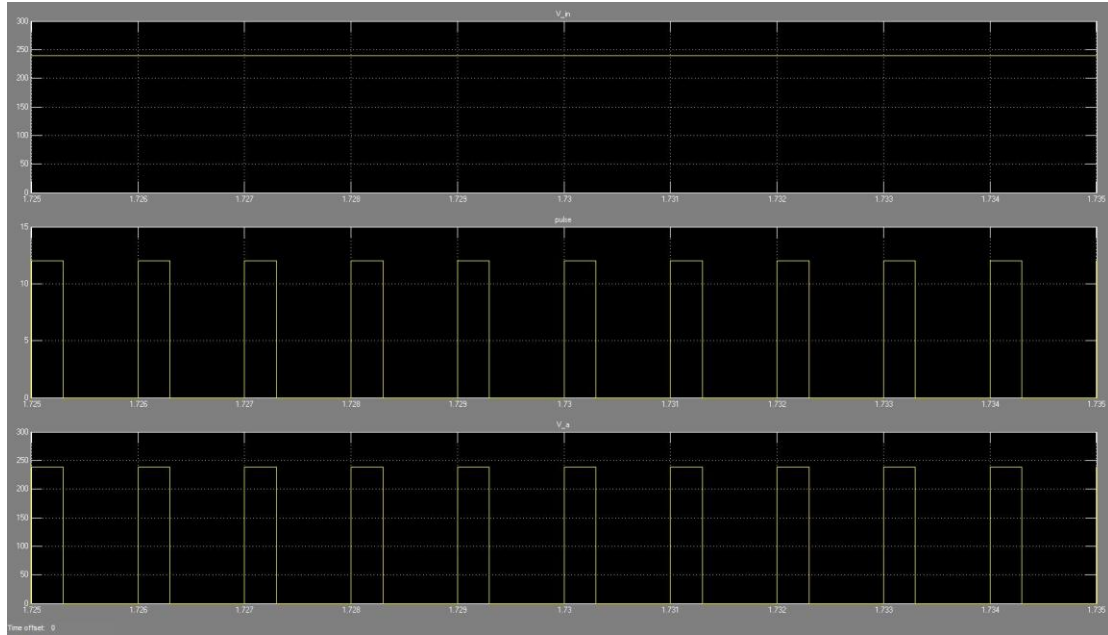
Στην προσομοίωση χρησιμοποιούμε μηχανή συνεχούς ρεύματος με τα εξής στοιχεία: 5HP, 1750rpm, $V_a=240V$, $V_f=300V$, $R_a=2.581\Omega$, $L_a=0.028H$, $R_f=281.3\Omega$, $L_f=156H$, $L_{af}=0.9483H$, $J=0.02215kgm^2$, $B=0.002953Nms$.



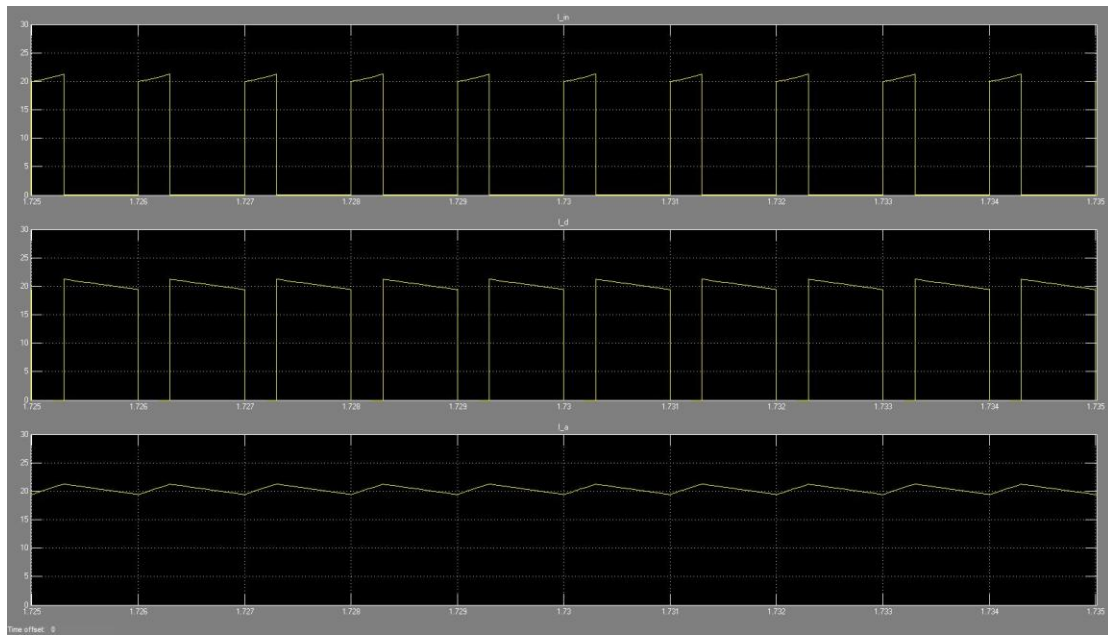
Σχήμα 5.71: Μετατροπέας DC/DC (ενός τεταρτημορίου) για τον έλεγχο κινητήρα συνεχούς ρεύματος

5.2.1.1 Συνεχής αγωγή

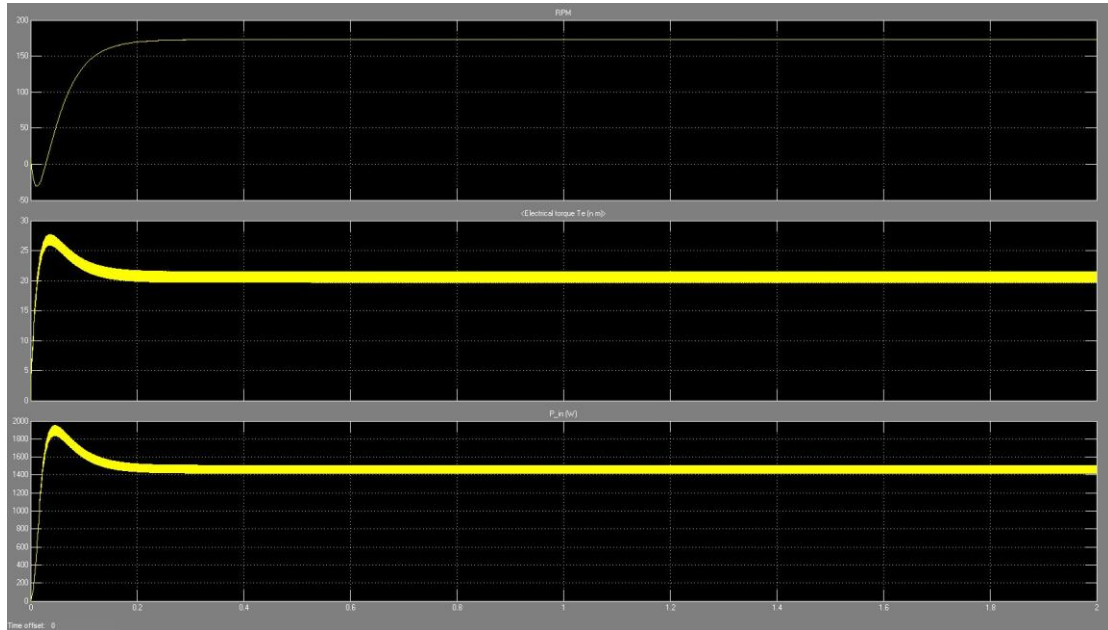
Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες κυματομορφές της εφαρμογής του σχήματος 5.71 για βαθμό χρησιμοποίησης $D=30\%$ και $D=60\%$. Για τη λειτουργία του κινητήρα θεωρούνται σταθερές η ροπή του φορτίου, $T_L=T_{ov}=20Nm$, και η διέγερση του κινητήρα. Η διακοπτική συχνότητα του mosfet είναι $f_{sw}=1000Hz$.



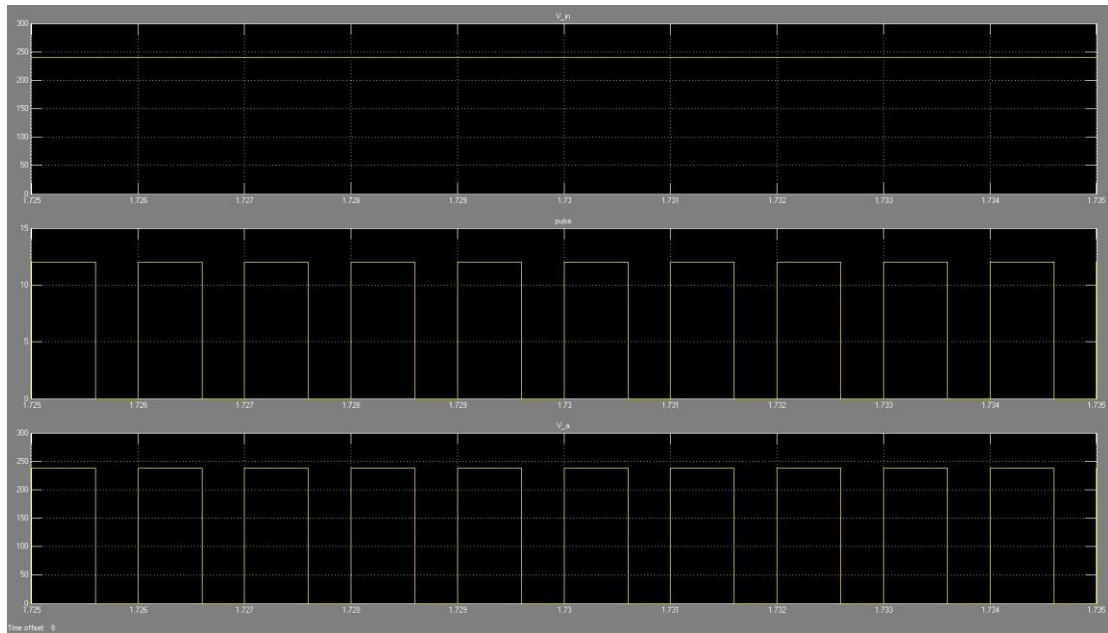
Σχήμα 5.72: Κυματομορφές τάσης εισόδου και τάσης τυμπάνου για $D=30\%$



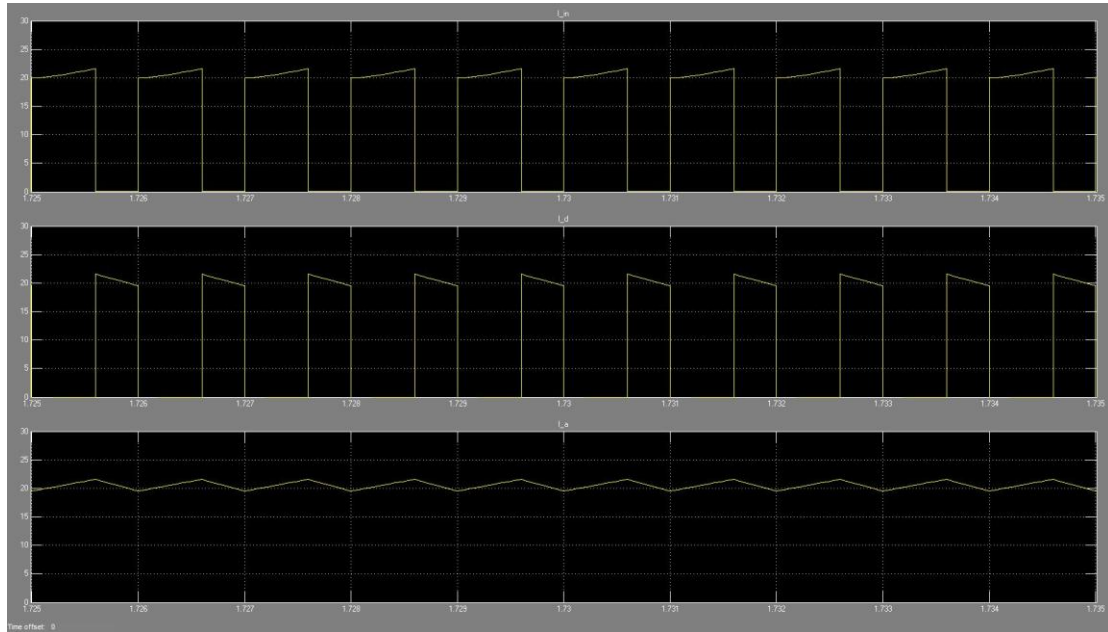
Σχήμα 5.73: Κυματομορφές ρευμάτων για $D=30\%$



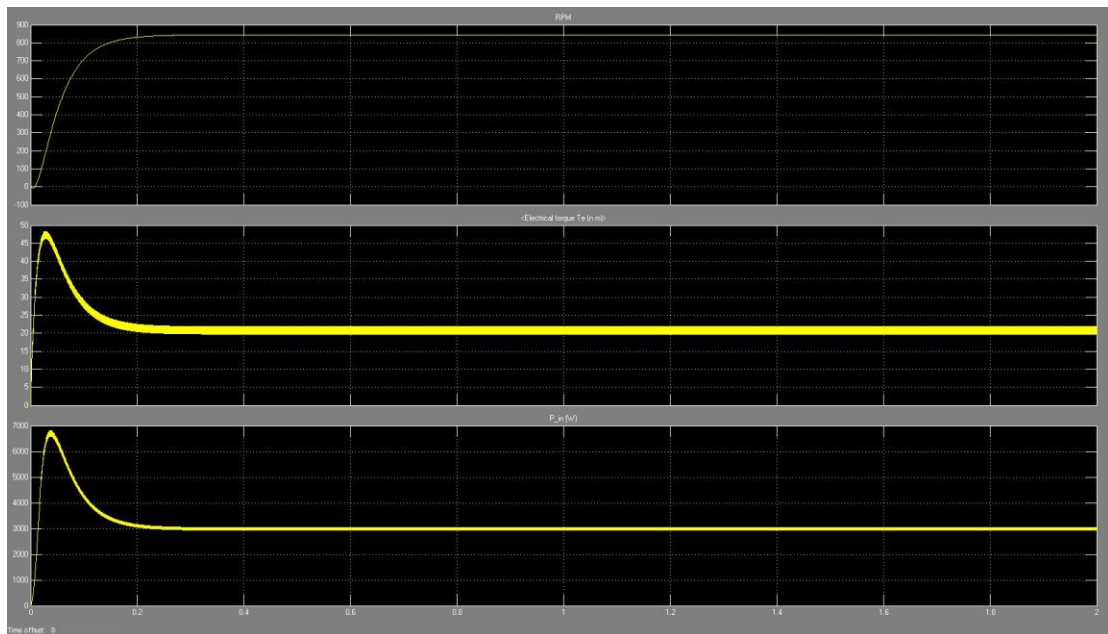
Σχήμα 5.74: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής, ισχύος του κινητήρα, για $D=30\%$



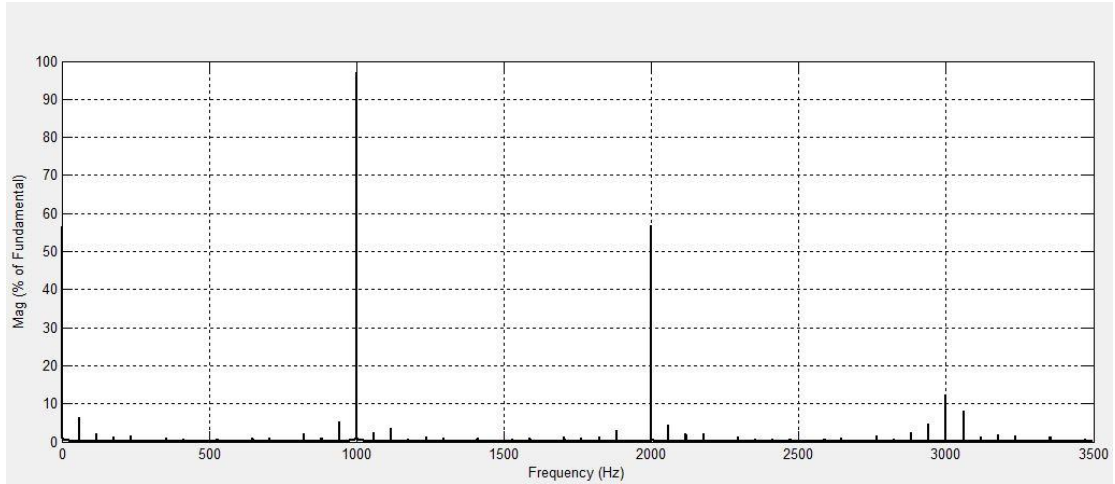
Σχήμα 5.75: Κυματομορφές τάσης εισόδου και τάσης τυμπάνου για $D=60\%$



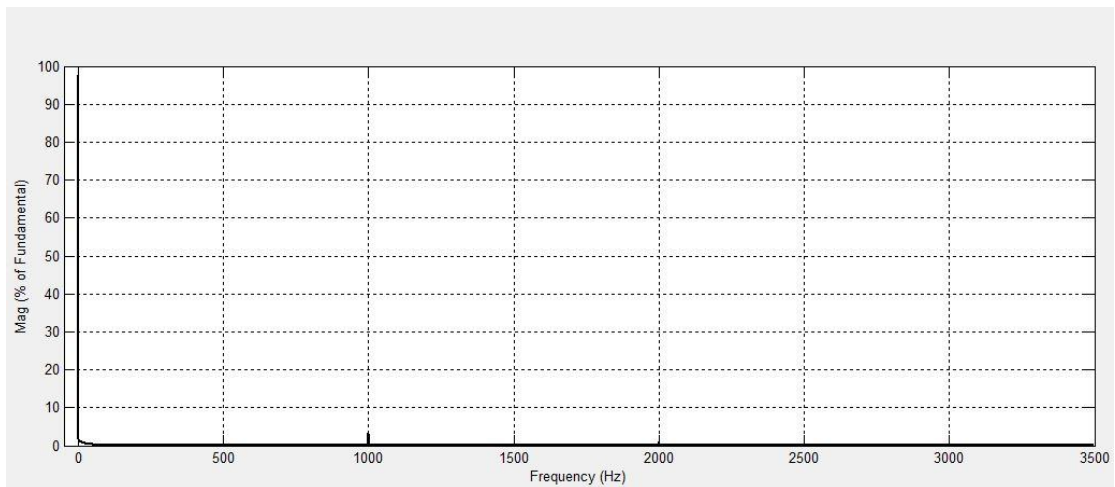
Σχήμα 5.76: Κυματομορφές ρευμάτων για $D=60\%$



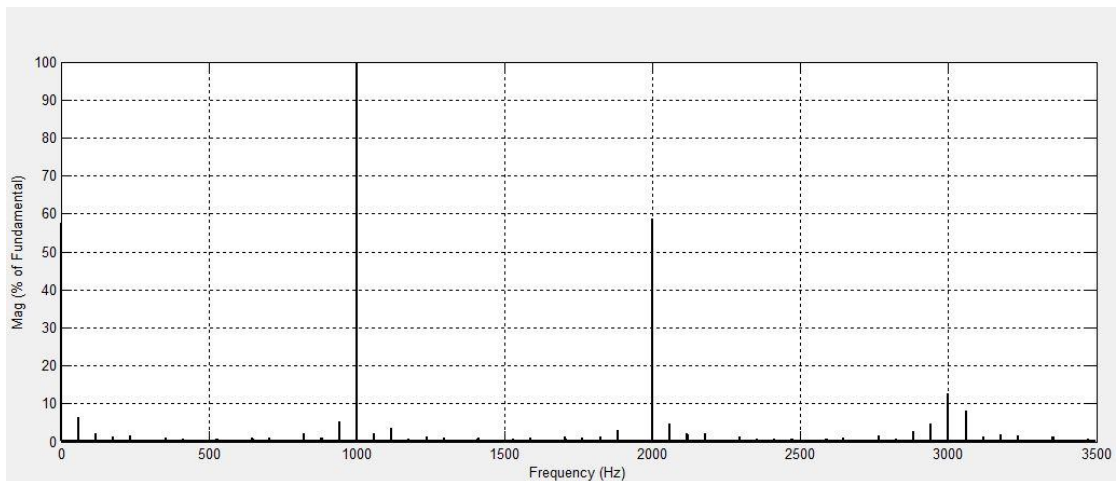
Σχήμα 5.77: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής, ισχύος του κινητήρα, για $D=60\%$



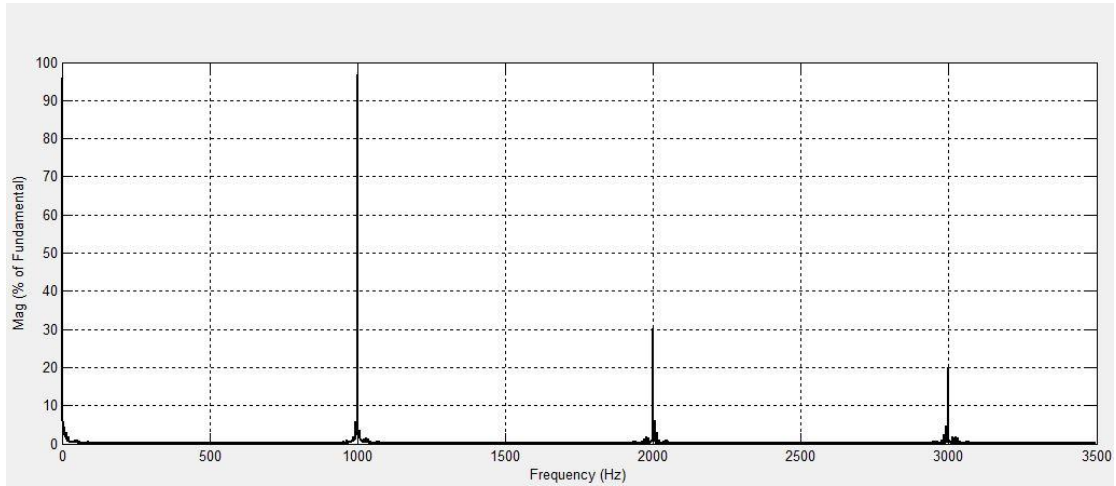
Σχήμα 5.78: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου μετατροπέα για $D=30\%$



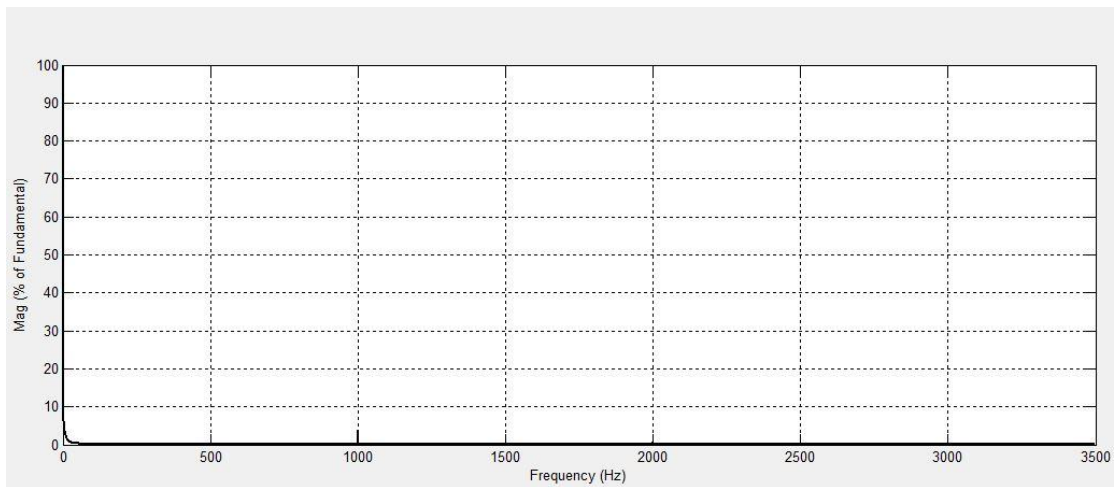
Σχήμα 5.79: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $D=30\%$



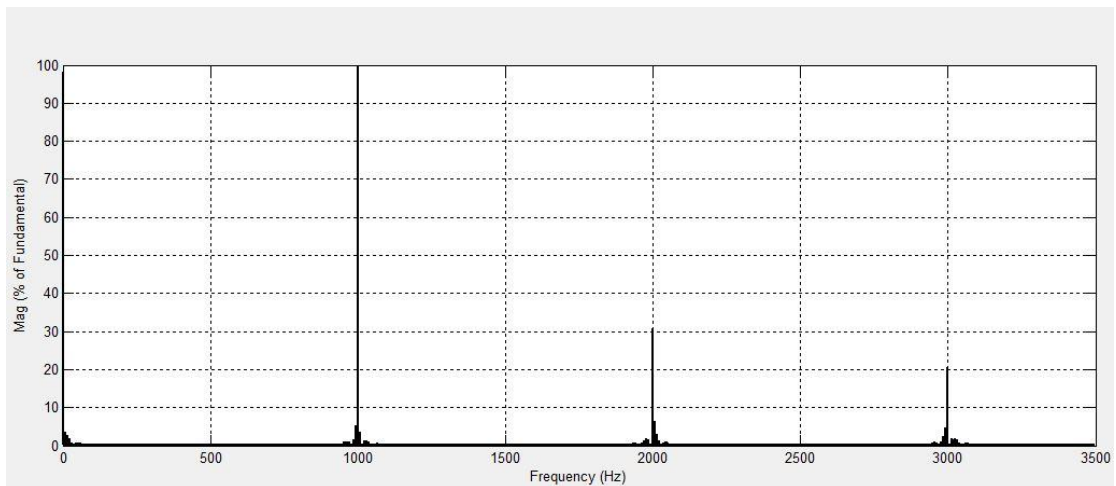
Σχήμα 5.80: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $D=30\%$



Σχήμα 5.81: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $D=60\%$



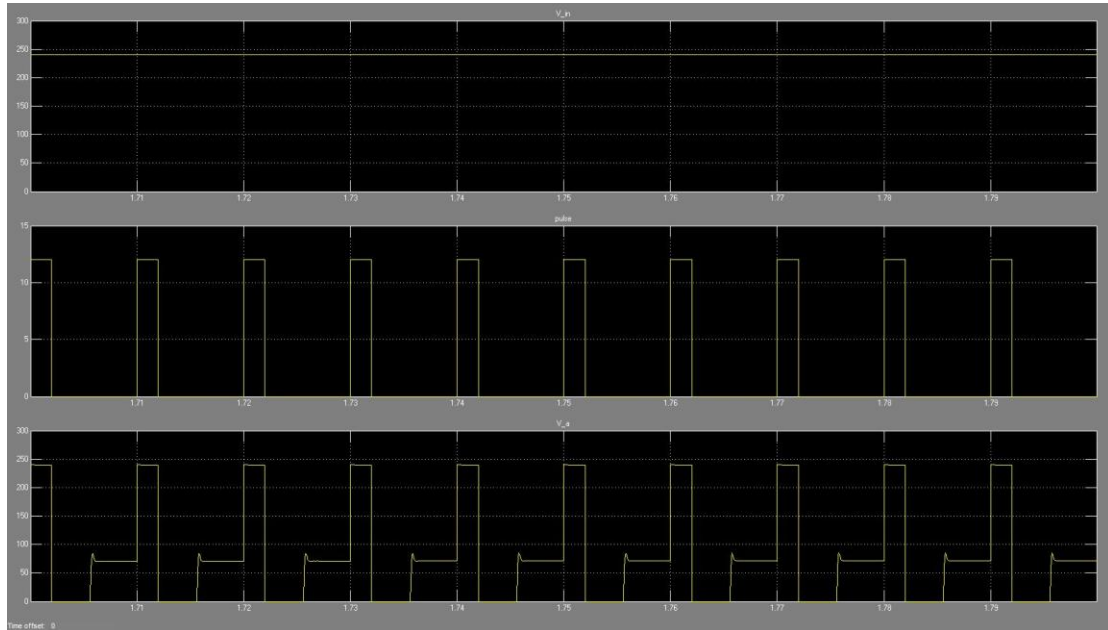
Σχήμα 5.82: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $D=60\%$



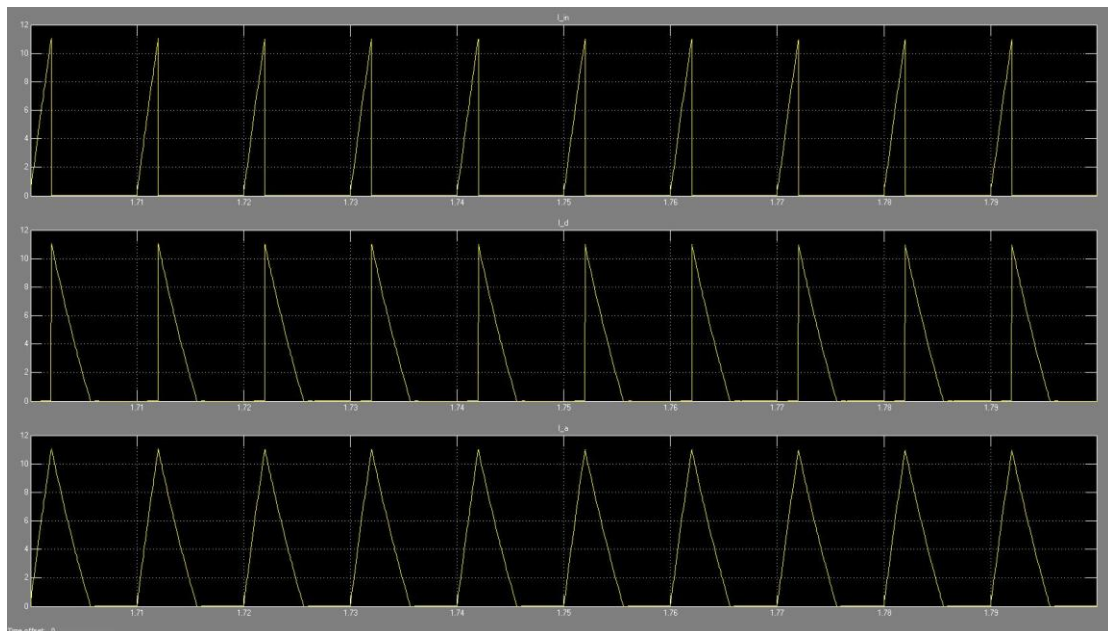
Σχήμα 5.83: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $D=60\%$

5.2.1.2 Ασυνεχής αγωγή

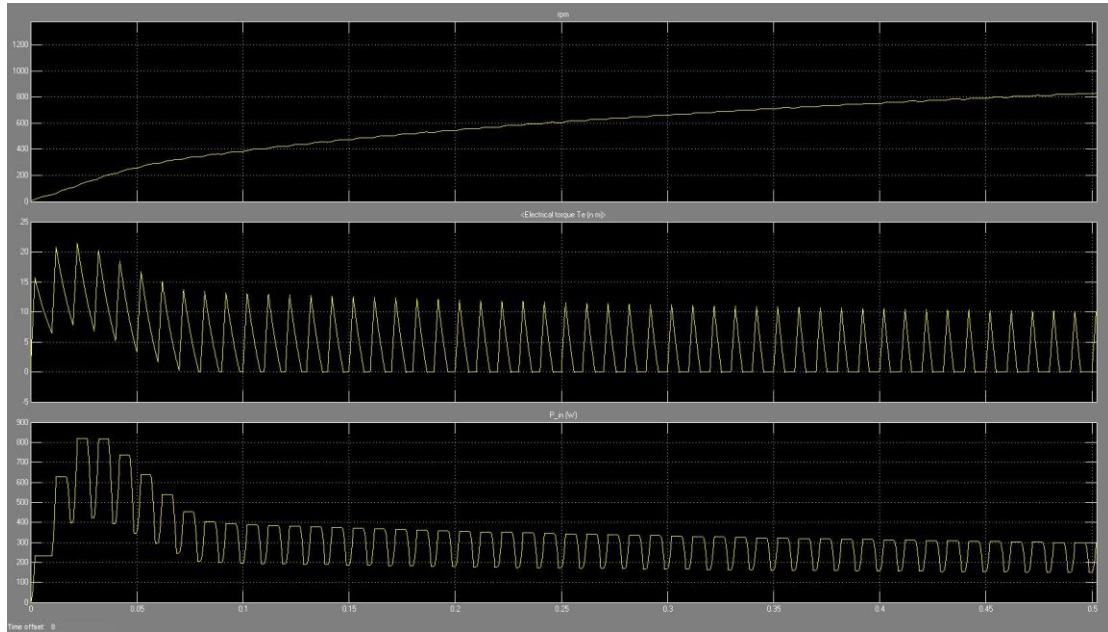
Για να έχουμε ασυνεχή αγωγή θα πρέπει η αυτεπαγωγή του φορτίου να μην είναι μεγάλη και το φορτίο του κινητήρα να είναι πολύ μικρότερο από το ονομαστικό. Παρακάτω έχουμε τις κυματομορφές για ασυνεχή αγωγή με σταθερή διέγερση και βαθμό χρησιμοποίησης $D=20\%$, $T_L=0$ και $f_{sw}=100\text{Hz}$ της διάταξης του σχήματος 5.71.



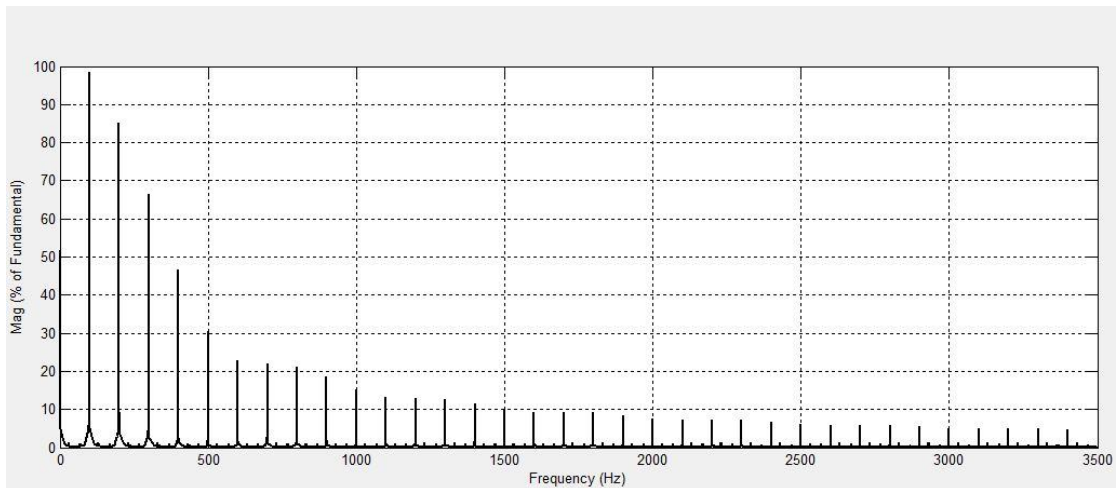
Σχήμα 5.84: Κυματομορφές τάσης εισόδου και τάσης τυμπάνου για $D=20\%$



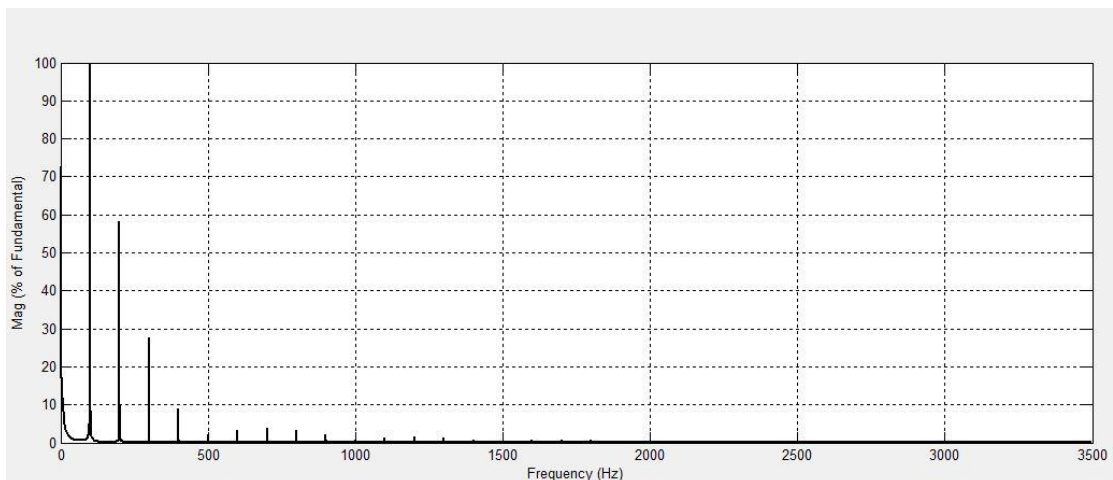
Σχήμα 5.85: Κυματομορφές ρευμάτων για $D=20\%$



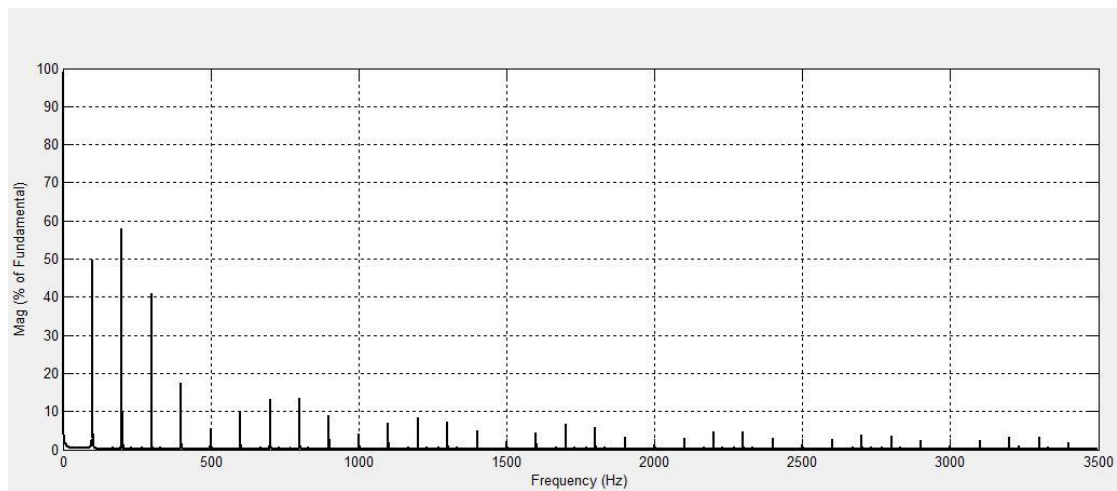
Σχήμα 5.86: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής, ισχύος του κινητήρα, για $D=20\%$



Σχήμα 5.87: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα για $D=20\%$



Σχήμα 5.88: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα για $D=20\%$



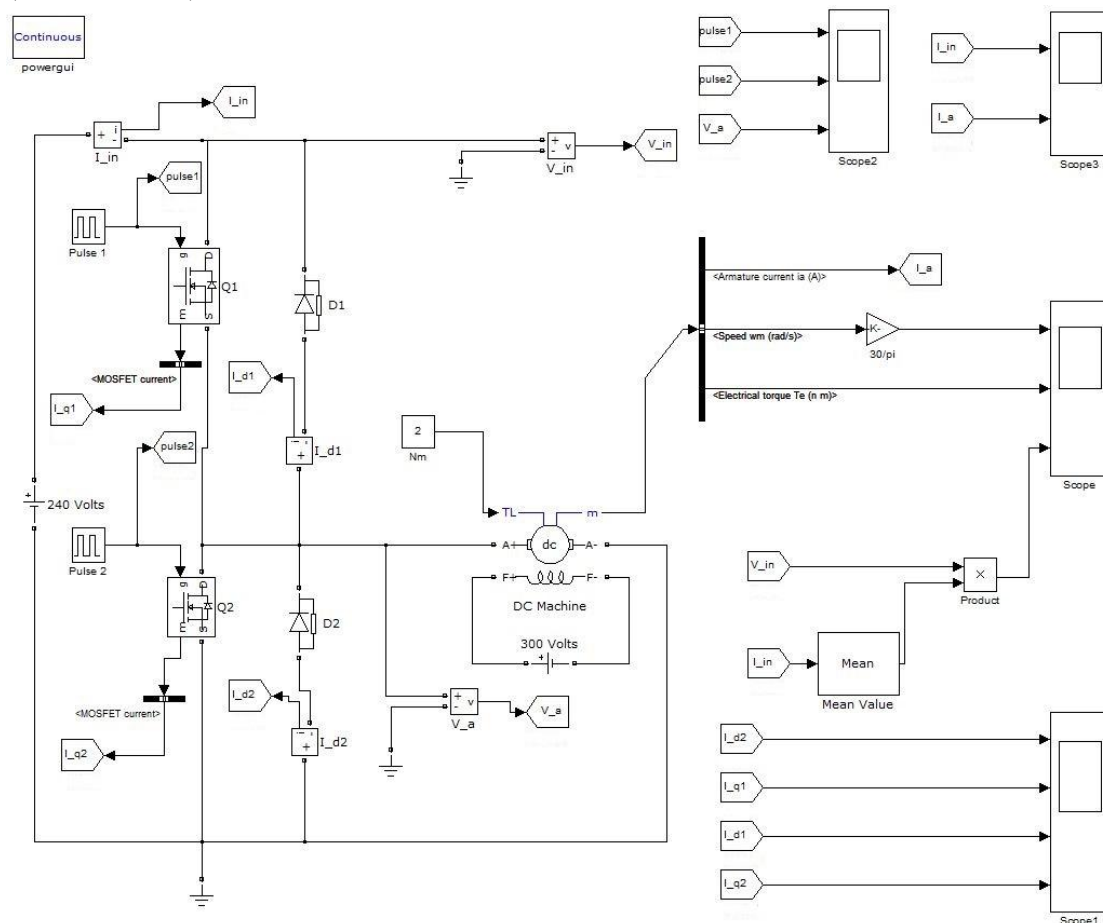
Σχήμα 5.89: Φάσμα συχνοτήτων της τάσης τυμπάνου του κινητήρα για $D=20\%$

5.2.2 Μετατροπέας DC/DC (δύο τεταρτημορίων)

Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να λειτουργήσει στα δυο πρώτα τεταρτημόρια. Αυτό του δίνει το κύριο χαρακτηριστικό του, ότι δηλαδή ενώ η τάση τυμπάνου είναι πάντα θετική, το ρεύμα τυμπάνου μπορεί να παίρνει και θετικές και αρνητικές τιμές. Επομένως έχει τη δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος από τη μηχανή προς την πηγή εισόδου.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η προσομοίωση του μετατροπέα στην οποία χρησιμοποιήθηκε μηχανή συνεχούς ρεύματος με τα εξής στοιχεία: 5HP, 1750rpm, $V_a=240V$, $V_f=300V$, $R_a=2.581\Omega$, $L_a=0.028H$, $R_f=281.3\Omega$, $L_f=156H$, $L_{af}=0.9483H$, $J=0.02215kgm^2$, $B=0.002953Nms$.

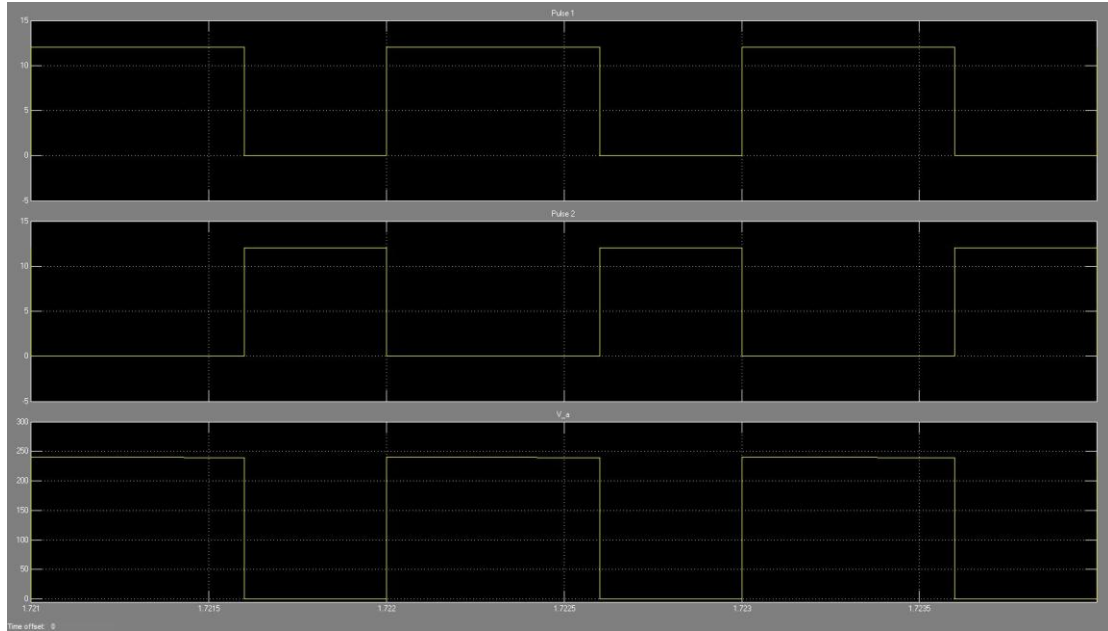
Στη προσομοίωση έχουμε σταθερή διέγερση και σταθερό φορτίο ($T_L=T_{ov}=2Nm$).



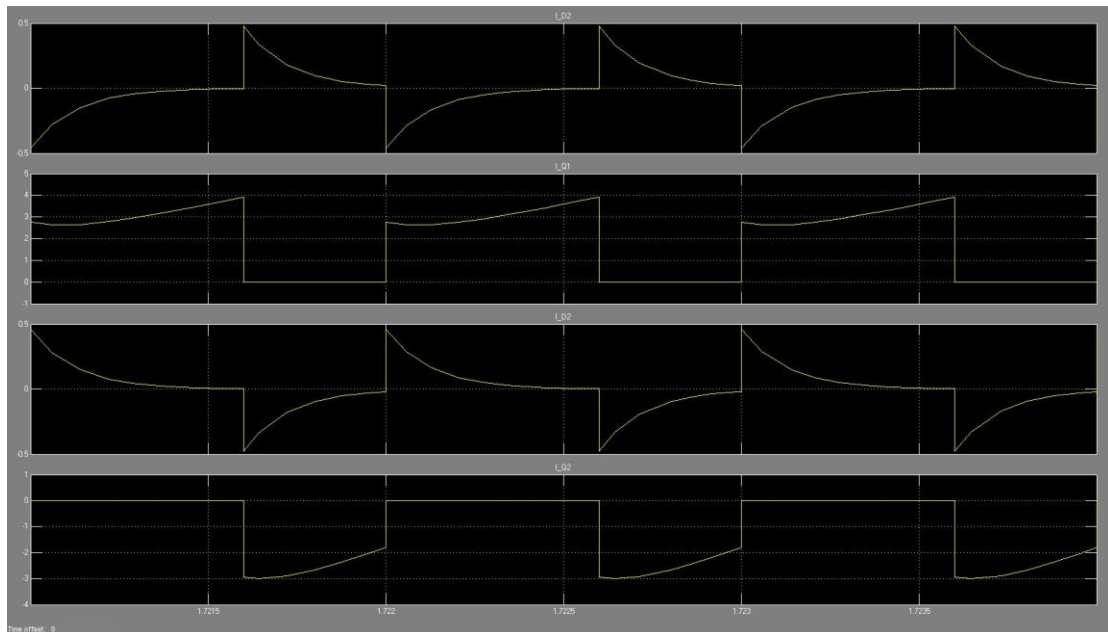
Σχήμα 5.90: Μετατροπέας DC/DC (δύο τεταρτημορίων) για τον έλεγχο κινητήρα συνεχούς ρεύματος

5.2.2.1 Λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο

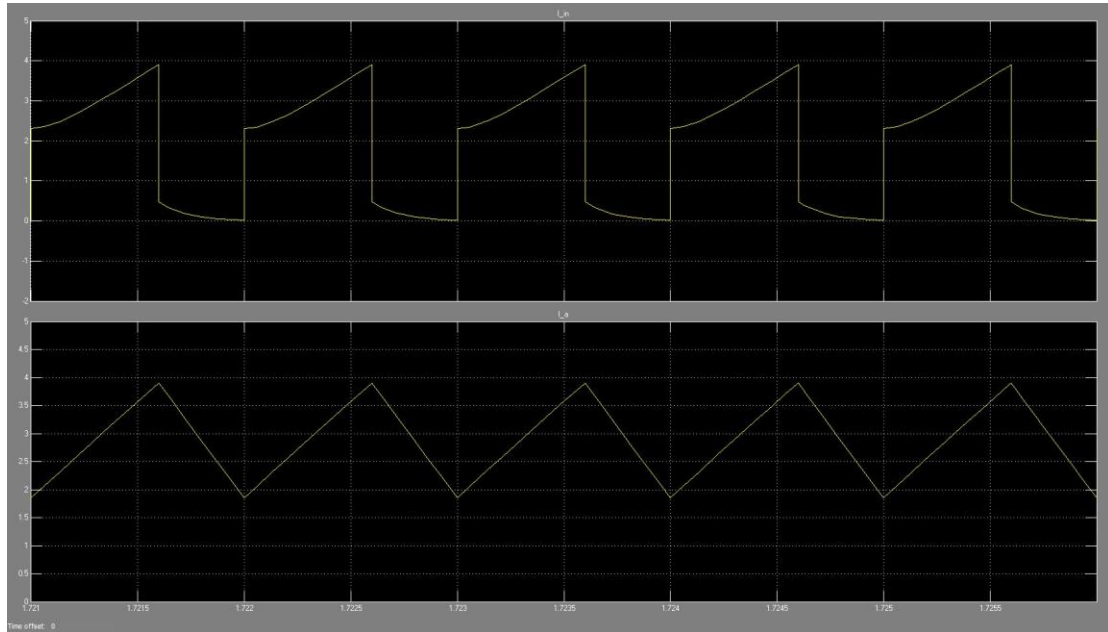
Για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο θα χρησιμοποιήσουμε σταθερή ροπή φορτίου $T_L = 2 \text{ Nm}$, με ρεύμα διέγερσης σταθερό και διακοπτική συχνότητα των $\text{mosfet}_{\text{sw}} = 1 \text{ KHz}$ και βαθμό χρησιμοποίησης $D = 60\%$. Λαμβάνουμε τις εξής κυματομορφές.



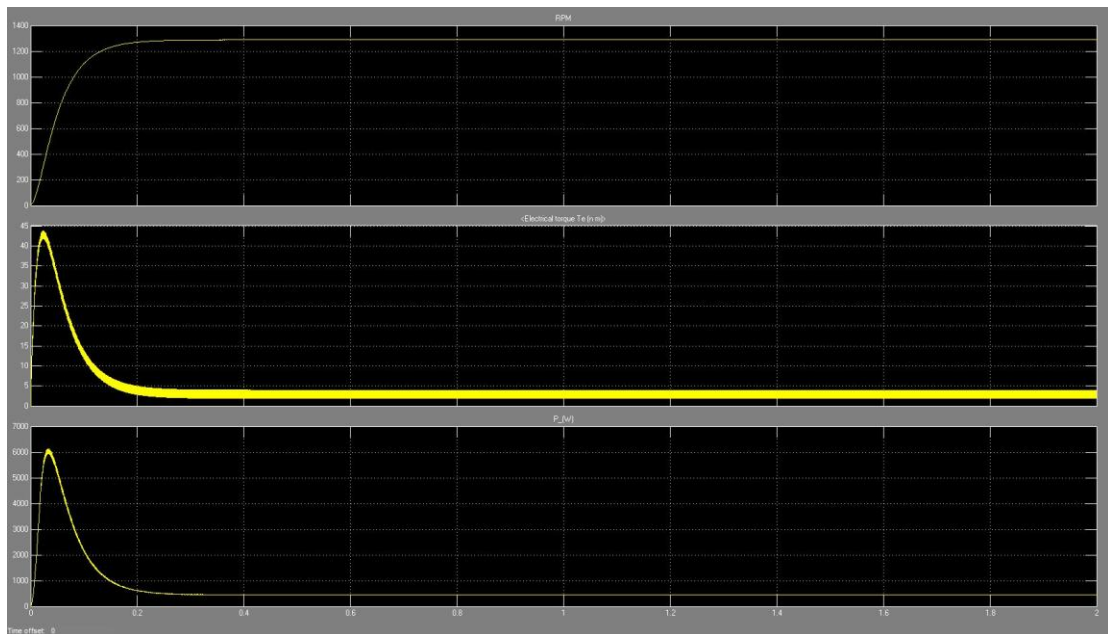
Σχήμα 5.91: Παλμοί έναυσης και κυματομορφή τάσης τυμπάνου κινητήρα



Σχήμα 5.92: Κυματομορφές ρευμάτων αγωγής διόδων και τρανζίστορ



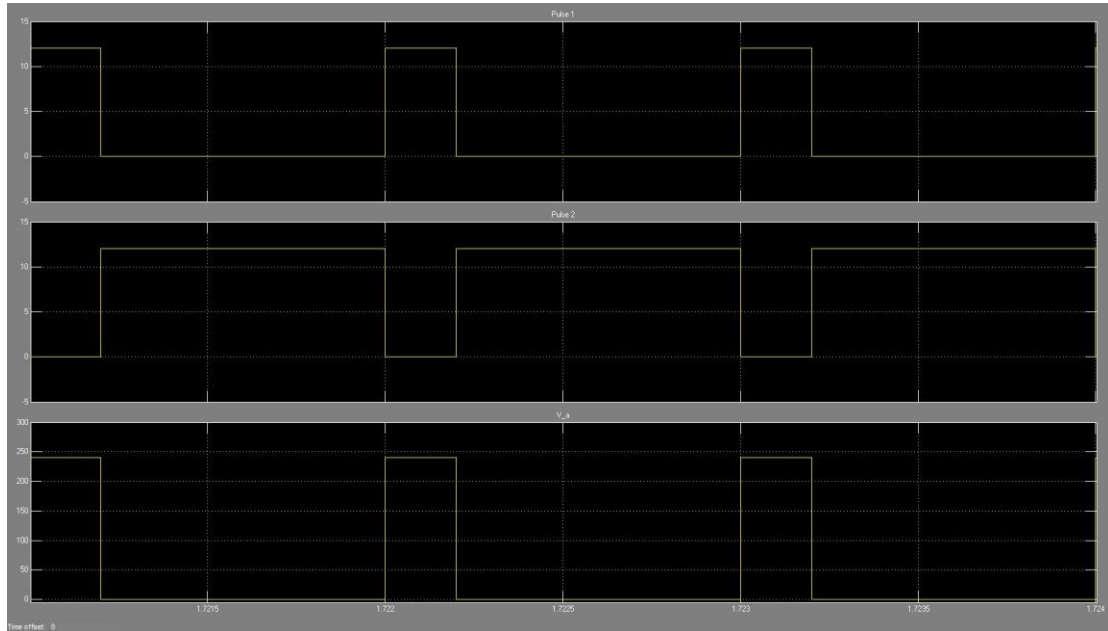
Σχήμα 5.93: Κυματομορφές ρευμάτων εισόδου και τυμπάνου κινητήρα



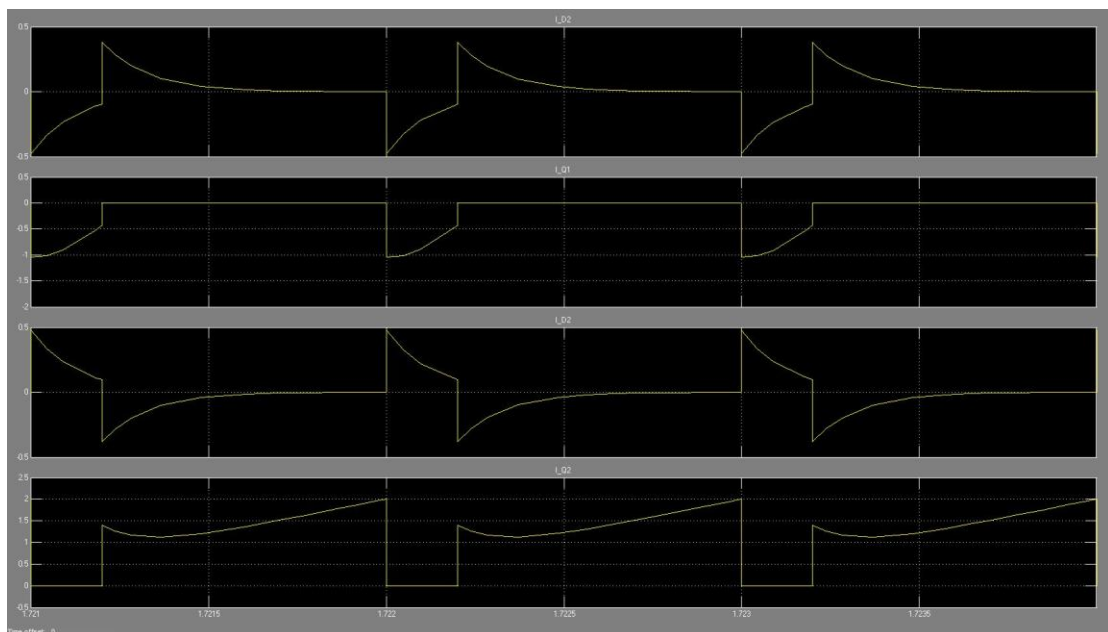
Σχήμα 5.94: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής και ισχύος του κινητήρα

5.2.2.2 Λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο

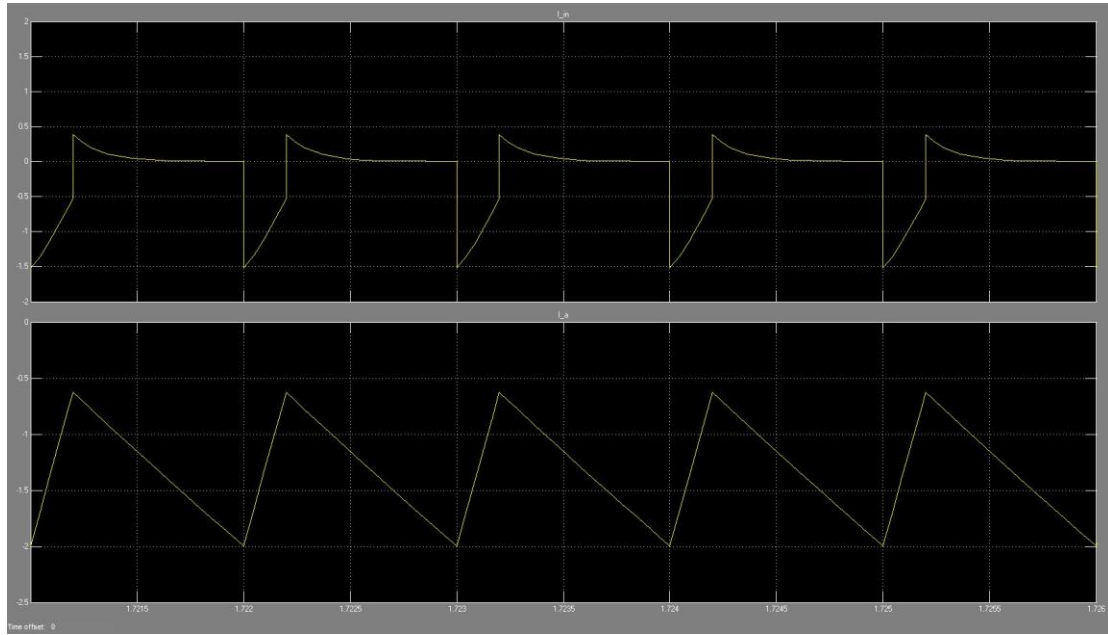
Για λειτουργία στο 2^ο τεταρτημόριο έχουμε αγωγή των Q_2-D_2 . Εάν οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε η μέση τιμή του ρεύματος έχει μια επαρκή αρνητική τιμή, τα στοιχεία Q_1-D_1 δεν άγουν ή άγουν για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



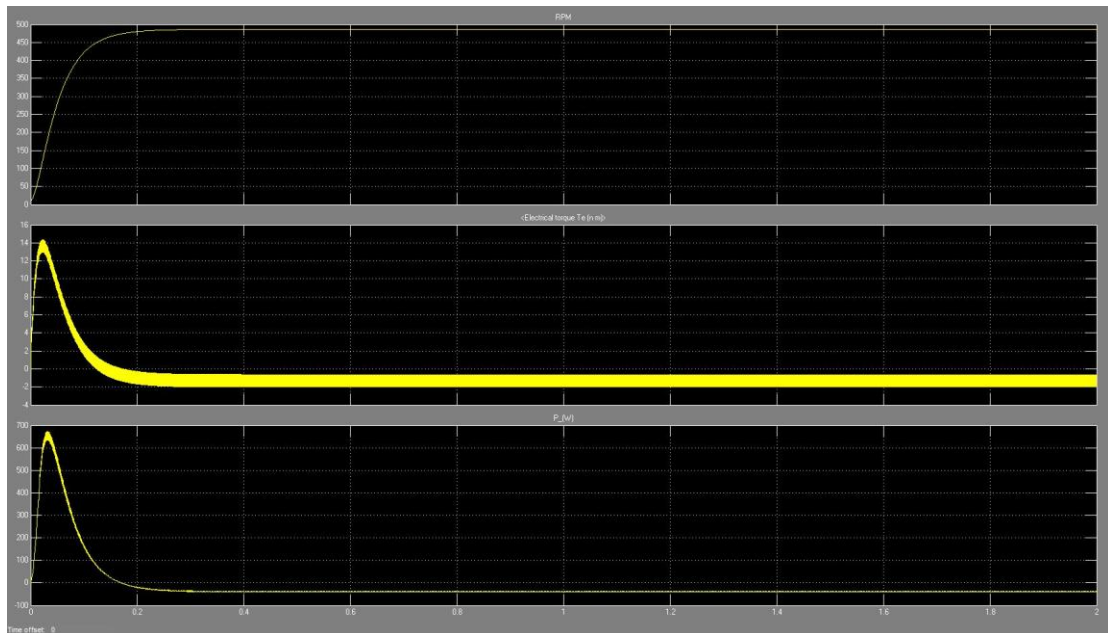
Σχήμα 5.95: Παλμοί έναυσης και κυματομορφή τάσης τυμπάνου



Σχήμα 5.96: Κυματομορφές ρευμάτων αγωγής διόδων και τρανζίστορ



Σχήμα 5.97: Κυματομορφές ρευμάτων εισόδου και τυμπάνου κινητήρα



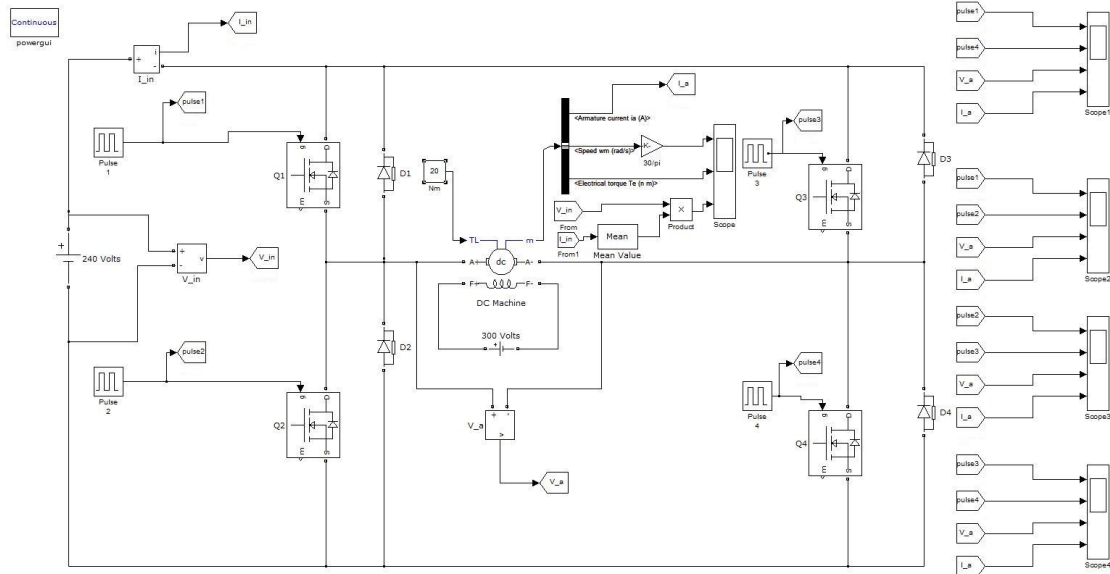
Σχήμα 5.98: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής και ισχύος του κινητήρα

5.2.3 Μετατροπέας DC/DC(τεσσάρων τεταρτημορίων)

Αυτός ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Υπάρχει ένας όμως περιορισμός. Ο περιορισμός αυτός είναι το ότι τα διαστήματα αγωγής των διακοπών Q_1 - Q_2 και Q_3 - Q_4 δεν πρέπει να συμπίπτουν γιατί θα προκληθεί βραχυκύκλωμα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η προσομοίωση του μετατροπέα στην οποία χρησιμοποιήθηκε μηχανή συνεχούς ρεύματος με τα εξής στοιχεία: 5HP, 1750rpm, $V_a=240V$, $V_f=300V$, $R_a=2.581\Omega$, $L_a=0.028H$, $R_f=281.3\Omega$, $L_f=156H$, $L_{af}=0.9483H$, $J=0.02215kgm^2$, $B=0.002953Nms$.

Στη προσομοίωση έχουμε σταθερή διέγερση και σταθερό φορτίο ($T_L=T_{ov}=20Nm$).

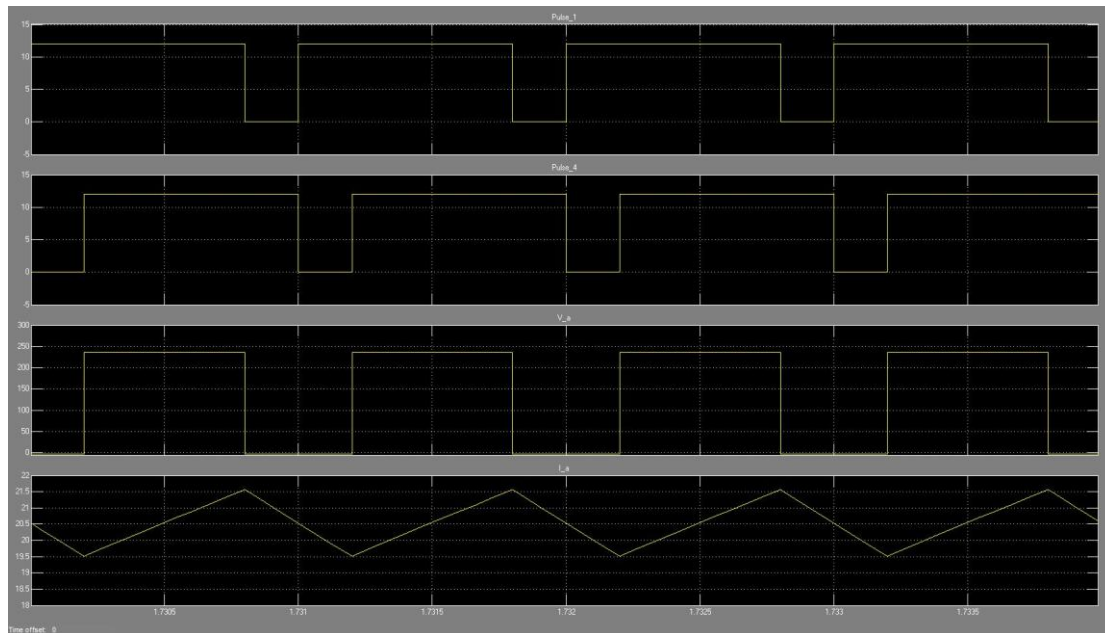


Σχήμα 5.99: Μετατροπέας DC/DC (τεσσάρων τεταρτημορίων) για τον έλεγχο κινητήρα συνεχούς ρεύματος

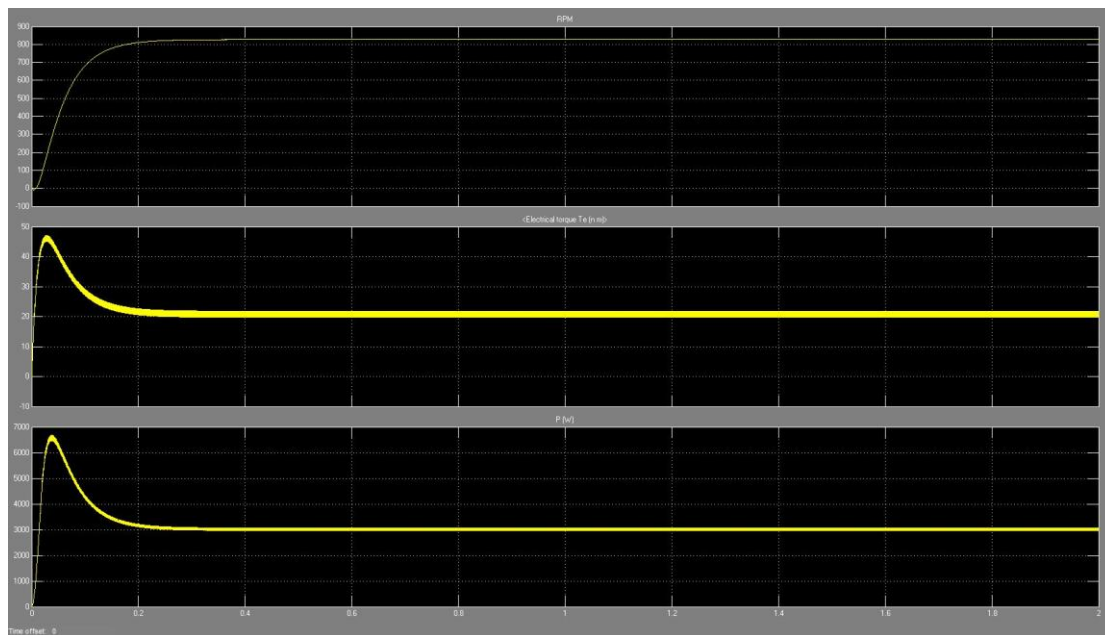
5.2.3.1 Λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο

Το κριτήριο που θα πρέπει να ισχύει για να έχουμε λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο είναι να έχουμε μεταφορά ισχύος από την πηγή στη μηχανή, δηλαδή η μηχανή να λειτουργεί ως κινητήρας. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να άγουν οι διακόπτες Q_1 και Q_4 , των οποίων το διάστημα όπου και οι δύο μαζί άγουν καθορίζουν την τάση τυμπάνου του κινητήρα. Όταν άγει μόνο ο ένας από τους δύο (Q_1 ή Q_4), τότε το ρεύμα τυμπάνου βρίσκει δρόμο αγωγής μέσω μιας εκ των δύο διόδων D_2 ή D_3 και των διακοπών Q_1 ή Q_4 .

Παρακάτω παρουσιάζονται οικοματομορφές τάσης τυμπάνου, ρεύματος τυμπάνου και η χρονική μεταβολή ροπής, στροφών και ισχύος, για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο.



Σχήμα 5.100: Παλμοί έναυσης και κυματομορφές τάσης - ρεύματος τυμπάνου

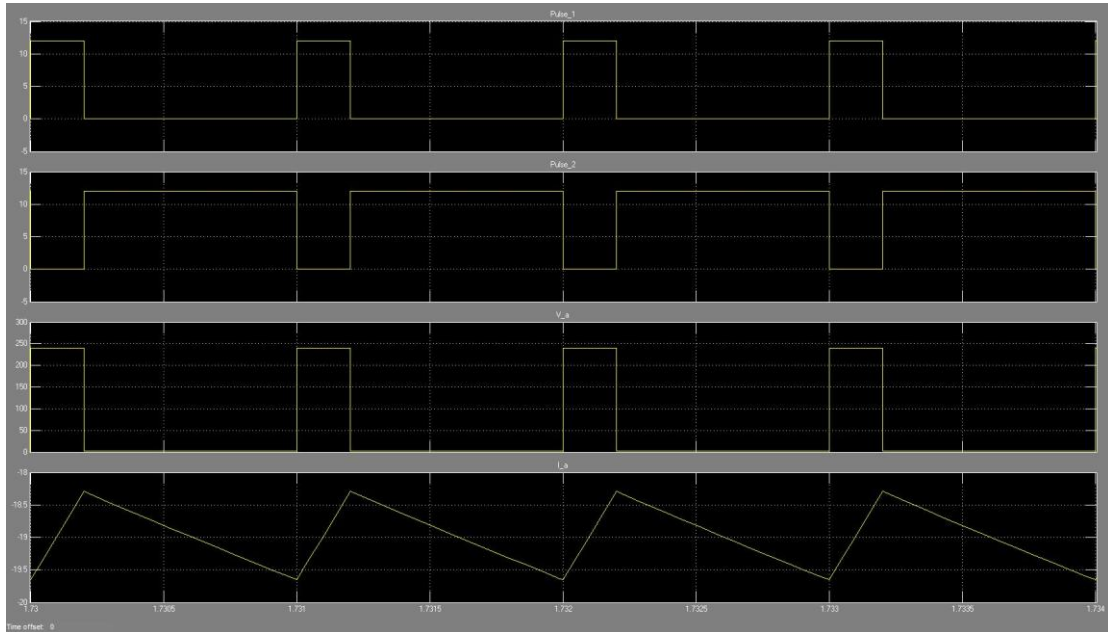


Σχήμα 5.101: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής και ισχύος του κινητήρα

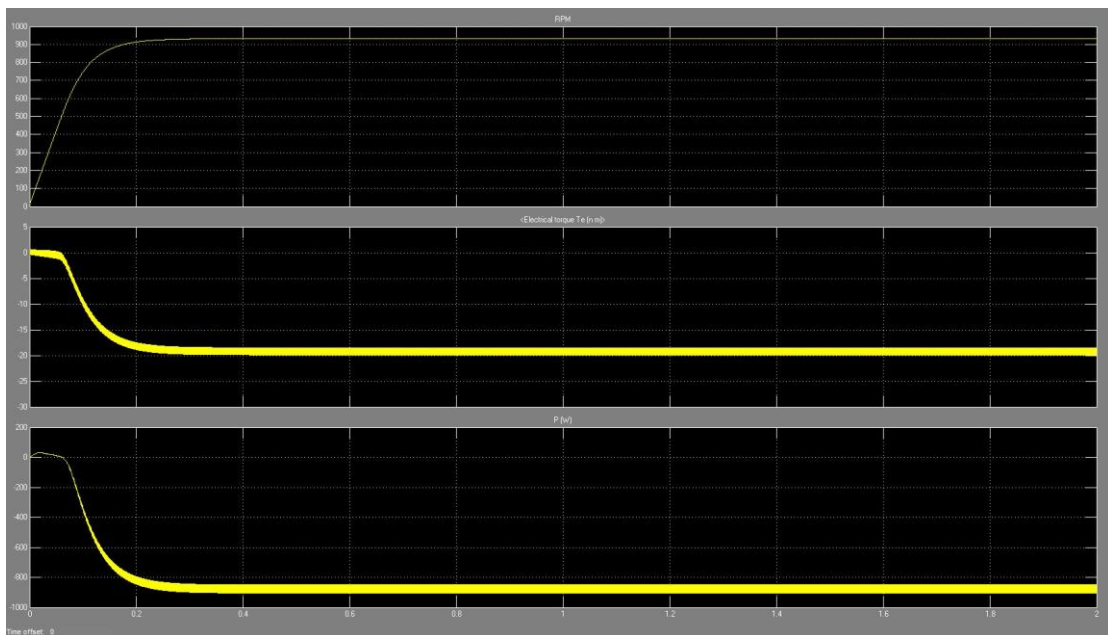
5.2.3.2 Λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο

Κατά τη λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο ο κινητήρας ενώ έχει στροφές θετικών τιμών υπόκειται σε ροπή αρνητικών τιμών (φορά περιστροφής αντίθετη στη φορά ροπής), αναγκάζοντας τον έτσι να «φρενάρει» (αναγεννητική πέδη). Ο κινητήρας εδώ λειτουργεί ως γεννήτρια. Παρακάτω μπορούμε να το δούμε αυτό στις κυματομορφές τάσης τυμπάνου, ρεύματος τυμπάνου και η χρονική μεταβολή ροπής, στροφών και ισχύος, για λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο.

Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος



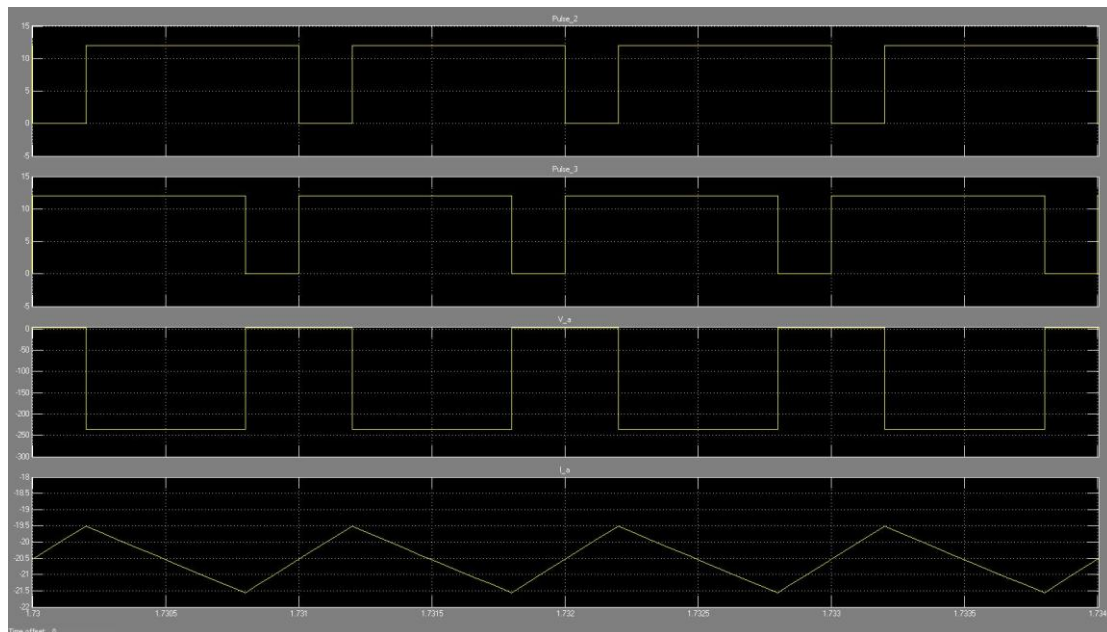
Σχήμα 5.102: Παλμοί έναρξης και κυματομορφές τάσης - ρεύματος τριπόλου



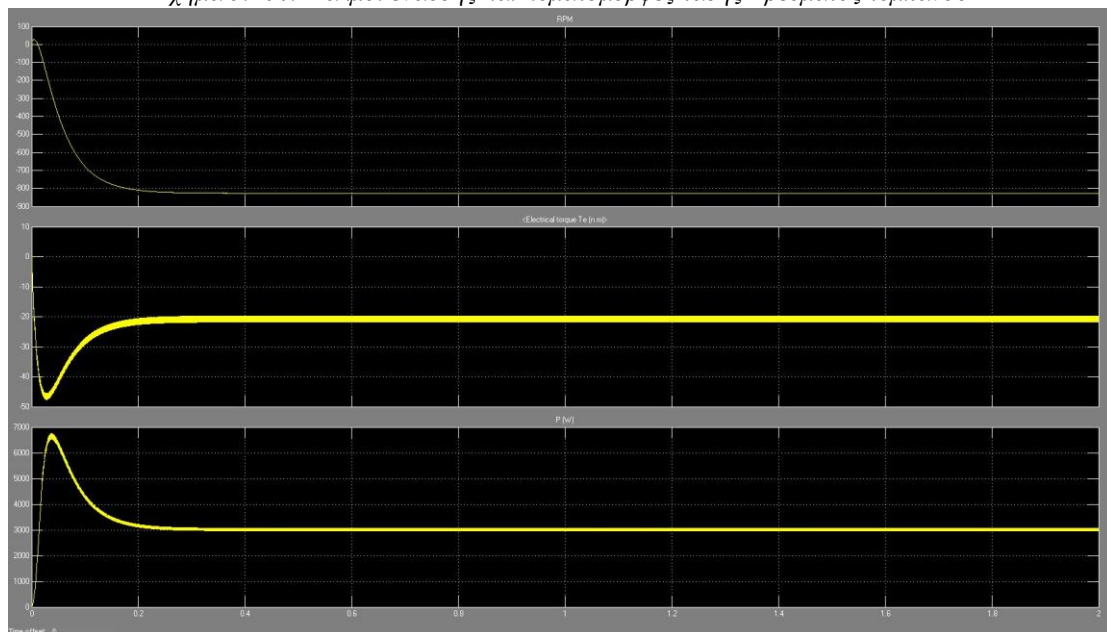
Σχήμα 5.103: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής και ισχύος του κινητήρα

5.2.3.3 Λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο

Κατά τη λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο ο κινητήρας έχει αρνητική φορά περιστροφής και η ροπή έχει και αυτή αρνητική φορά οπότε ο κινητήρας κινείται αντίστροφα. Δηλαδή η διαφορά από το πρώτο τεταρτημόριο είναι το ότι τώρα άγουν οι διακόπτες Q_3 και Q_2 , όπου όταν άγουν μαζί καθορίζουν τη τάση τυμπάνου κι όταν άγει ο ένας από τους δύο τότε το ρεύμα τυμπάνου βρίσκει δρόμο αγωγής μέσω του ενός διακόπτη που άγει και μιας εκ των δύο διόδων D_1 ή D_4 . Παρακάτω μπορούμε να το δούμε αυτό στις κυματομορφές τάσης τυμπάνου, ρεύματος τυμπάνου και η χρονική μεταβολή ροπής, στροφών και ισχύος, για λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο.



Σχήμα 5.104: Παλμοί έναυσης και κυματομορφές τάσης - ρεύματος τυμπάνου

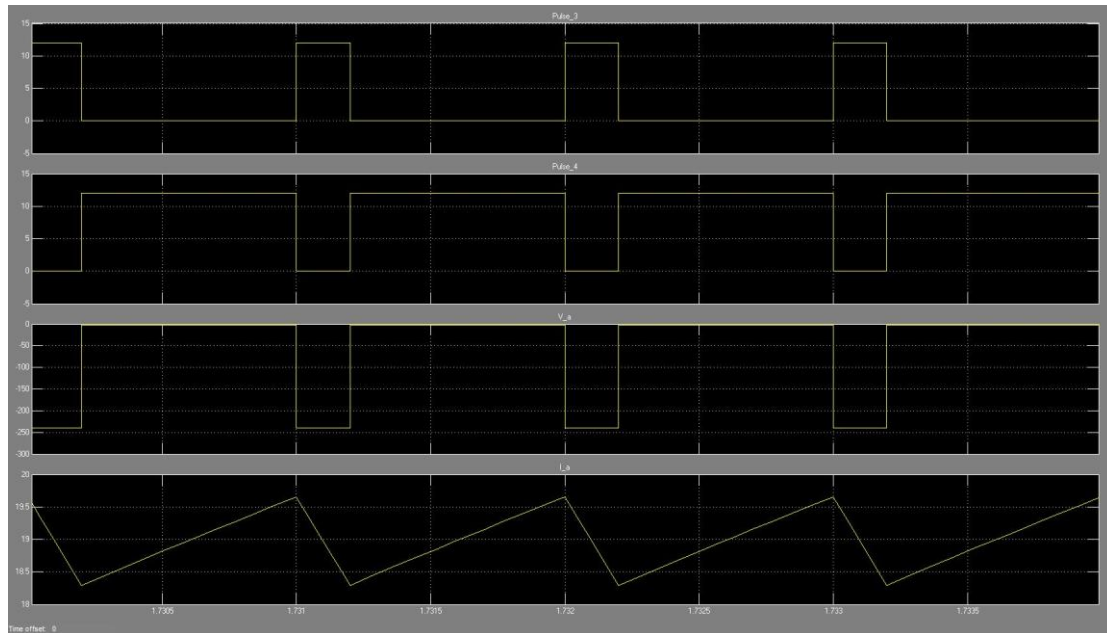


Σχήμα 5.105: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής και ισχύος του κινητήρα

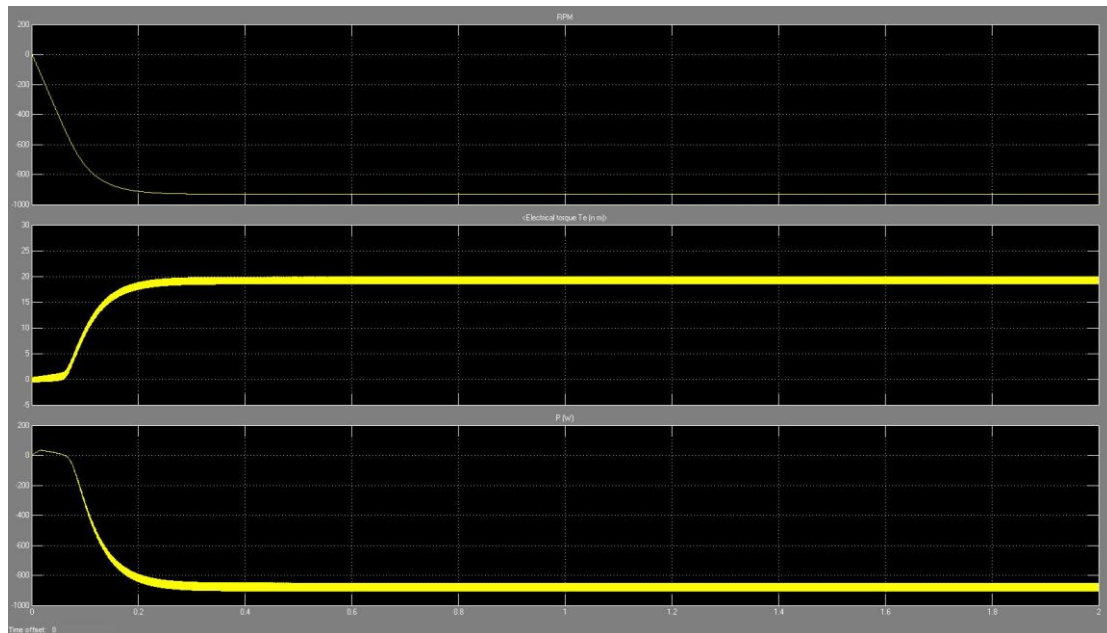
Πτυχιακή Εργασία: Τσικλίδης Χαράλαμπος & Τσαρχόσι Κωνσταντίνος

5.2.3.4 Λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο

Κατά τη λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο ο κινητήρας έχει αρνητική φορά περιστροφής και θετική φορά ροπής, οπότε «φρενάρει» και επιστρέφει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο (αναγεννητική πέδη). Εδώ ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια. Παρακάτω μπορούμε να το δούμε αυτό στις κυματομορφές τάσης τυμπάνου, ρεύματος τυμπάνου και η χρονική μεταβολή ροπής, στροφών και ισχύος, για λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο.



Σχήμα 5.106: Παλμοί έναρξης και κυματομορφές τάσης - ρεύματος τυμπάνου



Σχήμα 5.107: Χρονική μεταβολή των στροφών, ροπής και ισχύος του κινητήρα

Βιβλιογραφία

- «Ηλεκτρική Κίνηση», Π. Β. Μαλατέστας, 3^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
 - «Ηλεκτρονική», Malvino Bates, 7^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
- «Ηλεκτρικές Μηχανές», Stephen Chapman, 4^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
 - «Ηλεκτρικές Μηχανές», Hubert, 1^η Ελληνική έκδοση, εκδόσεις ΙΩΝ
- «Ηλεκτρικά κυκλώματα», Γ. Χατζαράκης, 3^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
- «Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος», Mohand Undeland Robbins, 3^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
 - «Ηλεκτρονικά ισχύος», Στέφανος Ν. Μανιάς, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ
 - «Ηλεκτρικές Μηχανές», Γ. Πολίτης & Γ. Τσεκούρας
- «Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος με χρήση MATLAB και SIMULINK», Διονύσιος Γ. Πυλαρινός, Διδακτικές σημειώσεις Πανεπιστημίου Πατρών