



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ηλεκτρονικά Ισχύος

2^η Εργασία

Λογισμικό

MATLAB

Θωμάς Χατζής 2018030134

Χρήστος Παυλόπουλος 2018030139

Μάριος Σαλίνας 2018030049

Ερώτημα 1

Στο ερώτημα αυτό περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του συστήματος που απεικονίζεται στο σχήμα 1.

Το σύστημα που απεικονίζεται είναι ένα κύκλωμα ανορθωτή. Οι ανορθωτές ως κυκλώματα μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση (AC) σε συνεχή (DC). Οι ανορθωτές που στο κύκλωμα τους έχουν διόδους ονομάζονται μη ελεγχόμενοι, ενώ αυτοί που στο κύκλωμα τους έχουν θυρίστορ ονομάζονται ελεγχόμενοι. Η είσοδος ενός ανορθωτή μπορεί να είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική. Το πλήθος των στοιχείων που προαναφέρθηκαν εξαρτάται από το είδος της ανόρθωσης (ημιανόρθωση ή πλήρης ανόρθωση), αλλά και την είσοδο του ανορθωτή (μονοφασική ή τριφασική).

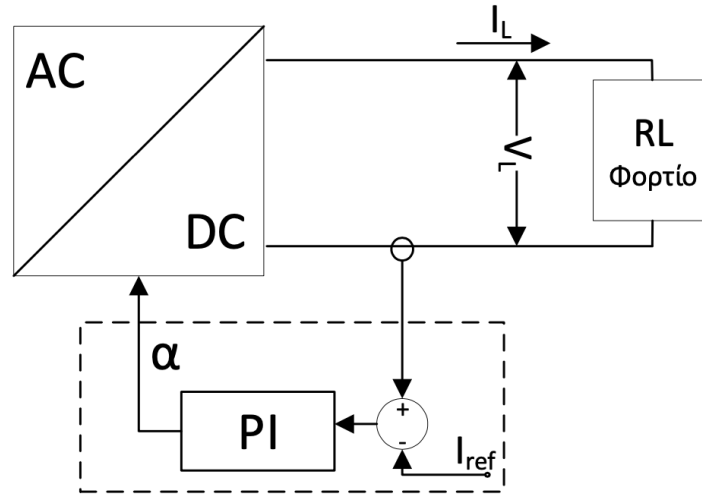
1.1 Μονοφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής

Στην περίπτωση της ελεγχόμενης ανόρθωσης γίνεται χρήση θυρίστορ έτσι ώστε να γίνεται ο έλεγχος της χρονικής στιγμής που θα άγουν (ρύθμιση της γωνίας έναυσης α) μέσω του παλμού έναυσης στην είσοδο. Ο μονοφασικός ανορθωτής αποτελείται από 4 συνολικά θυρίστορ εκ των οποίων τα 2 άγουν σε κάθε φάση Φ_1 και Φ_2 αντίστοιχα. Κατά την φάση Φ_1 άγουν τα T_1, T_2 ενώ κατά την φάση Φ_2 άγουν τα T_3, T_4 . Κατά την συνεχή λειτουργία το ρεύμα δεν μηδενίζεται. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχει συνεχής αλλαγή των ζευγαριών θυρίστορ που άγουν, έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερή η μέση τάση εξόδου. Ακόμα όταν η γωνία έναυσης α είναι μεγαλύτερη από 90° η μέση τάση εξόδου είναι αρνητική, ενώ όταν η γωνία έναυσης είναι μικρότερη από 90° η τάση εξόδου είναι θετική. Όσον αφορά την ασυνεχή λειτουργία, παρατηρείται ότι υπάρχουν κάποιες χρονικές περίοδοι όπου το ρεύμα μηδενίζεται. Στα σημεία που μηδενίζεται το ρεύμα ορίζεται και γωνία σβέσης β . Όμως, εκτός από το ρεύμα που μηδενίζεται, μηδενίζεται και η τάση δημιουργώντας ένα χρονικό διάστημα ασυνέχειας, μέχρις ότου να τα θυρίστορ να λάβουν ξανά παλμό έναυσης και να τα διαπεράσει ρεύμα. Ο μηδενισμός αυτός του ρεύματος οφείλεται στην αδυναμία του πηνίου (μικρή αυτεπαγωγή) να σταθεροποιήσει το ρεύμα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι είναι φανερό ότι η καλύτερη σταθεροποίηση του ρεύματος επιτυγχάνεται με την επιλογή μεγαλύτερης αυτεπαγωγής.

1.2 Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής

Ο τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής έχει τριφασική είσοδο και κυκλωματικά αποτελείται από 2 περισσότερα θυρίστορ, μιας και η είσοδος αποτελείται από 3 φάσεις και κάθε περιοχή λειτουργία άγουν 2 θυρίστορ. Η αρχή λειτουργίας του τριφασικού ελεγχόμενου ανορθωτή βασίζεται σε αυτή του μονοφασικού ελεγχόμενου ανορθωτή. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι τα θυρίστορ δέχονται παλμό έναυσης κάθε 60° , με αποτέλεσμα η συχνότητα του σήματος εξόδου να είναι 6 φορές μεγαλύτερη από αυτή της συχνότητας εισόδου. Ως εκ τούτου, ένας τριφασικός ανορθωτής έχει πιο σταθερό σήμα εξόδου και ως αποτέλεσμα αυτού μεγαλύτερη απόδοση.

Εξισώσεις Διακριτού Χρόνου Περιγραφής του Συστήματος



Σχήμα 1

Για την εύρεση της εξίσωσης διακριτού χρόνου που διέπει την λειτουργία του ανορθωτή, είναι αναγκαία η περιγραφή της τάσης του R-L φορτίου και έπειτα επίλυση ως προς την παράγωγο του ρεύματος του πηνίου $\frac{dI_L}{dt}$. Το ρεύμα στην αντίσταση και στο πηνίο θα είναι κοινό, καθώς τα δύο στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Έτσι, για το ρεύμα στο κύκλωμα θα ισχύει:

$$I = I_L = I_R.$$

Στην συνέχεια γίνεται μετατροπή της εξίσωσης σε σύστημα στον χώρο κατάστασης. Άρα, θα είναι:

$$V_L = R \cdot I_L + L \cdot \frac{dI_L}{dt} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = -I_L \cdot \frac{R}{L} + \frac{V_L}{L} \\ y = I_L \end{cases}$$

$$\text{Με } A = -\frac{R}{L}, B = \frac{1}{L}, C = 1, D = 0$$

Από το σύστημα στον χώρο και χρησιμοποιώντας την συνάρτηση c2d της MATLAB το εν λόγω σύστημα μπορεί να μετατραπεί σε σύστημα διακριτού χρόνου, με χρόνο δειγματοληψίας T_s . Το σύστημα εξισώσεων διακριτού χρόνου είναι:

$$I_L \cdot ((k+1) \cdot T_s) = A_d \cdot I_L(k \cdot T_s) + B_d \cdot V_L(k \cdot T_s)$$

$$y(k \cdot T_s) = C_d x(k \cdot T_s) + D_d \cdot V_L(k \cdot T_s)$$

Ερώτημα 2

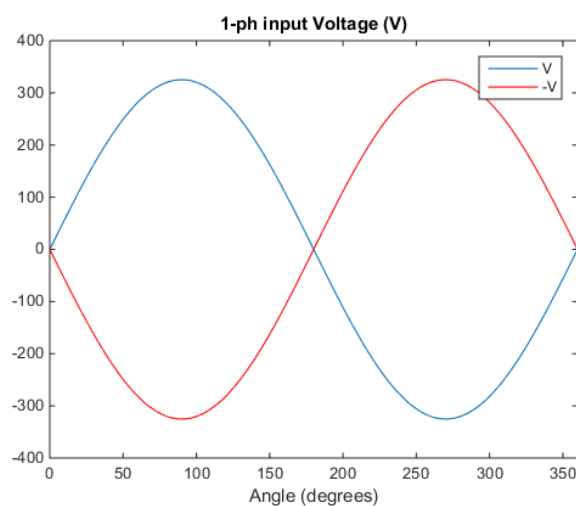
2.1 Μονοφασικός Ανορθωτής

Στις δύο περιπτώσεις που μελετώνται το μόνο που αλλάζει είναι η γωνία έναυσης που παίρνει διαφορετικές τιμές 0° και 90° αντίστοιχα, ενώ η τιμή της αντίστασης R , του πηνίου L παραμένουν σταθερά με τιμές:

$$R = 2.5 \, \Omega$$

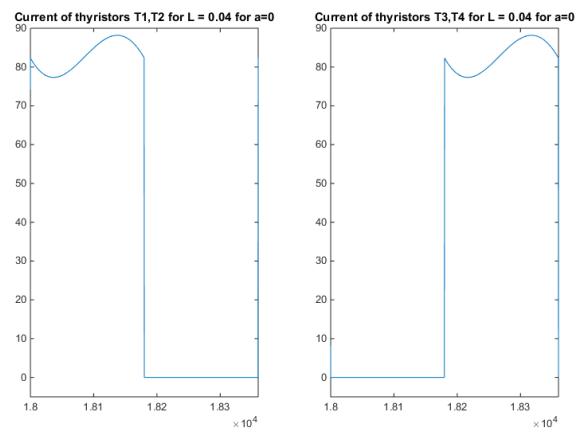
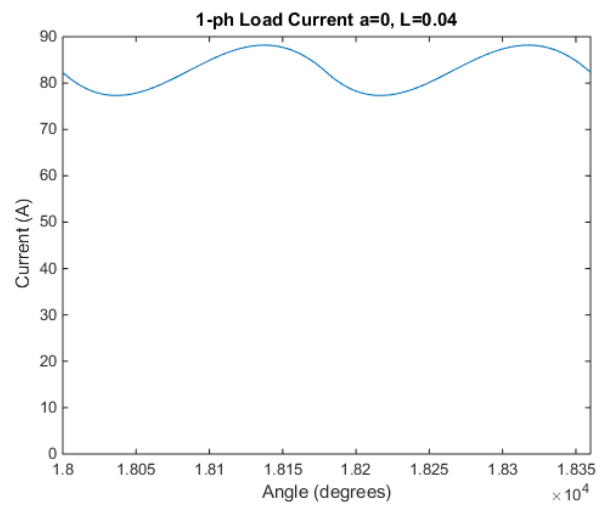
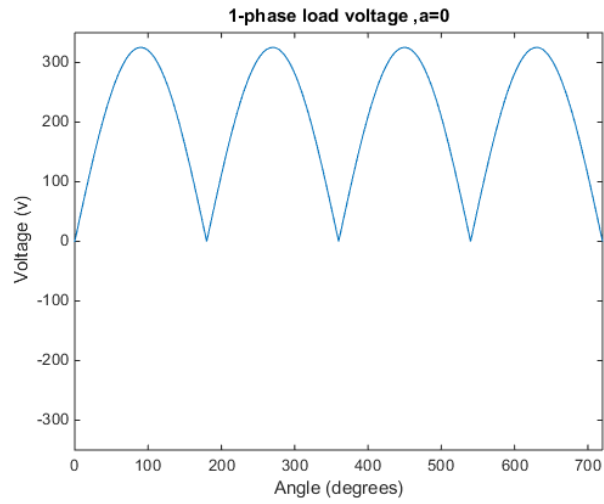
$$L = 0.04 \, \text{H} \, \text{ή} \, 0.08 \, \text{H}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η τάση εισόδου και η αρνητική της του μονοφασικού ανορθωτή

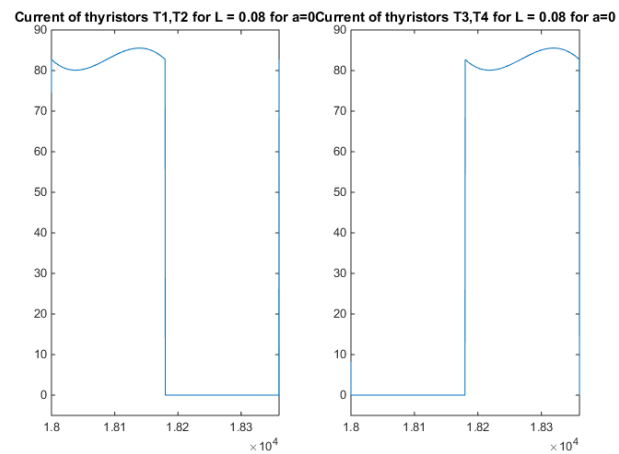
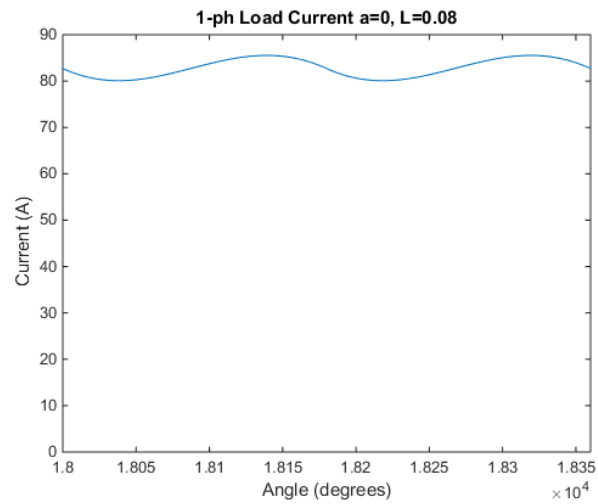


Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο και των ρευμάτων στα θυρίστορ για όλες τις περιπτώσεις.

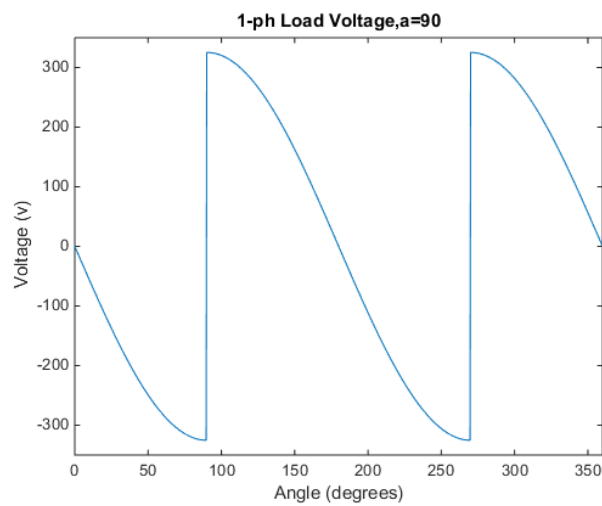
2.1.1 Για γωνία έναυσης $\alpha=0^\circ$, $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.04 H$

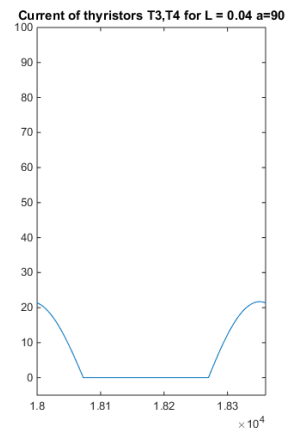
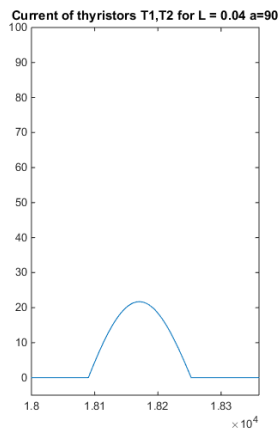
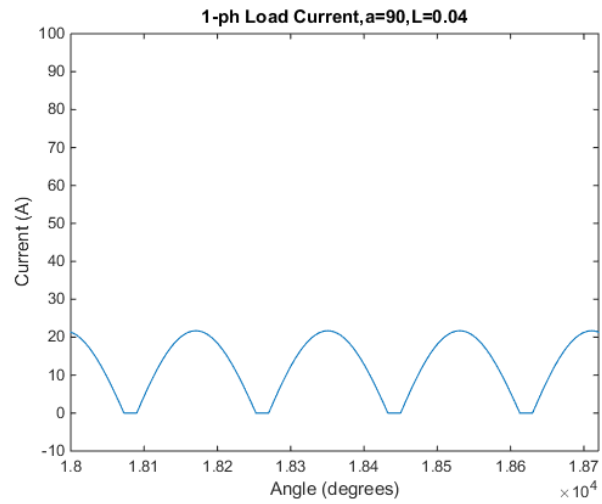


2.1.2 Για γωνία έναυσης $\alpha=0^\circ$, $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.08H$

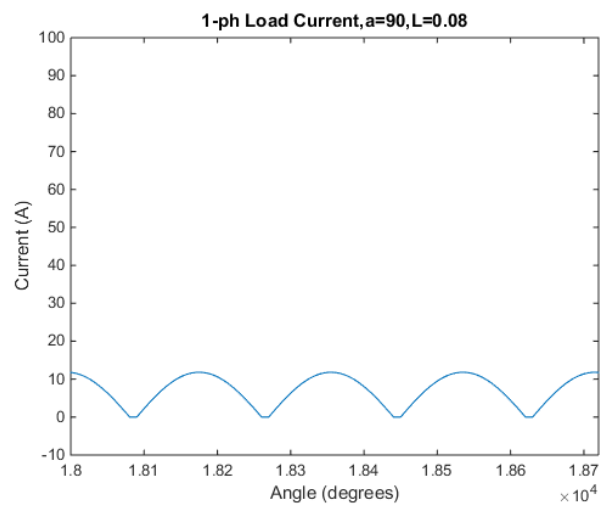


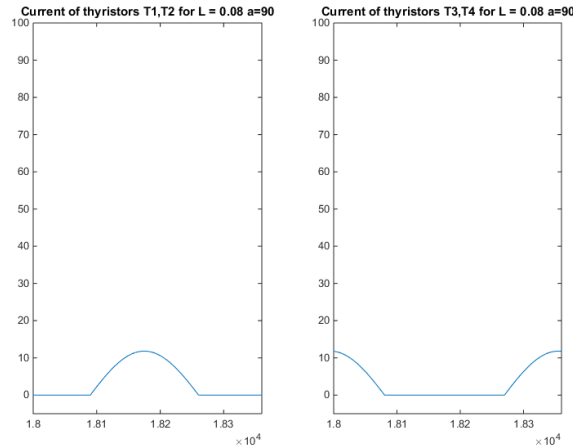
2.1.3 Για γωνία έναυσης $\alpha=90^\circ$, $R=2.5 \Omega$, $L = 0.04H$





2.1.4 Για γωνία έναυσης $\alpha=90^\circ$, $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.08H$





2.2 Σχολιασμός Μονοφασικού Ανορθωτή

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου η γωνία έναυσης των θυρίστορ είναι $\alpha=0^\circ$ και η τιμή της αυτεπαγωγής L αυξάνεται από 0.04 H σε 0.08 H, η κυματομορφή του ρεύματος στο φορτίο και στα θυρίστορ έχει μικρότερη διακύμανση με αποτέλεσμα η σταθεροποίηση να είναι καλύτερη, αλλά να γίνεται και πιο αργά. Η καλύτερη σταθεροποίηση οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αυτεπαγωγής, τόσο λιγότερο επιρρεπές είναι το πηνίο στις μεταβολές. Στην περίπτωση όπου $\alpha=90^\circ$ το ρεύμα μειώνεται για μεγαλύτερη τιμή του L , για τον λόγο που αναφέρθηκε και παραπάνω. Επιπρόσθετα, το μέγιστο ρεύμα του φορτίου και που άγουν τα θυρίστορ έχει αρκετά χαμηλότερη τιμή σε σύγκριση με αυτό για $\alpha=0^\circ$, αφού με την καθυστέρηση την γωνία έναυσης ο χρόνος που άγουν τα θυρίστορ είναι μειωμένος, με αποτέλεσμα το ρεύμα να μην μπορεί να λάβει μεγάλες τιμές. Τέλος, το ρεύμα όταν η γωνία έναυσης είναι 90° μηδενίζεται, αφού προλαβαίνει να αποφορτιστεί το πηνίο πλήρως σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η γωνία έναυσης είναι 0° και το πηνίο δεν προλαβαίνει να αποφορτιστεί.

Παρατηρήσεις

- Για την Φ_1 άγουν τα T_1, T_2 , ενώ τα T_3, T_4 είναι ανάστροφα πολωμένα και έτσι δεν άγουν, ενώ για την Φ_2 συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή τα T_3, T_4 άγουν και T_1, T_2 δεν άγουν.
- Το ρεύμα που διαπερνά το φορτίο έχει την ίδια τιμή με αυτό που διαπερνά τα θυρίστορ.

Ερώτημα 3

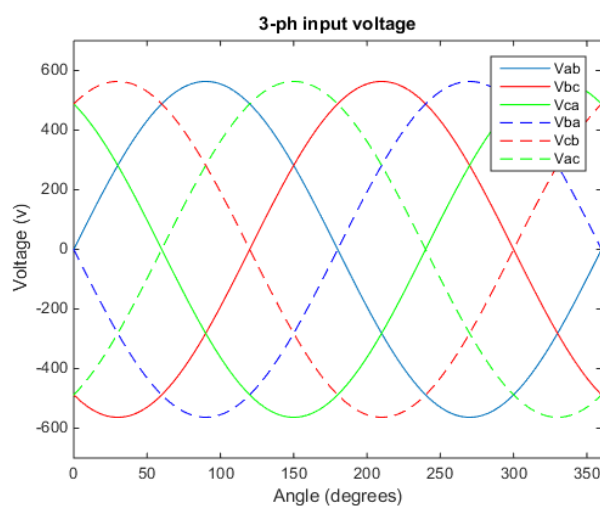
3.1 Τριφασικός Ανορθωτής

Στις δύο περιπτώσεις που μελετώνται το μόνο που αλλάζει είναι η γωνία έναυσης που παίρνει διαφορετικές τιμές 0° και 67° αντίστοιχα, ενώ η τιμή της αντίστασης R , του πηνίου L παραμένουν σταθερά με τιμές:

$$R = 2.5 \, \Omega$$

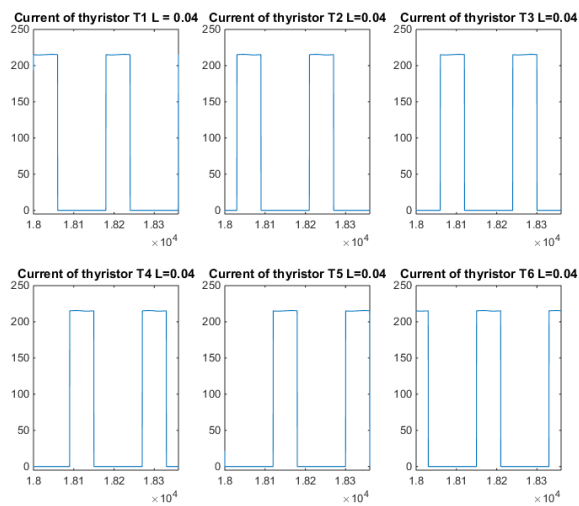
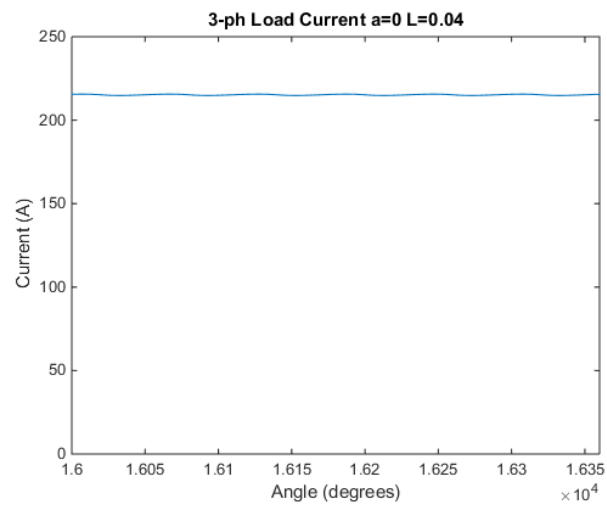
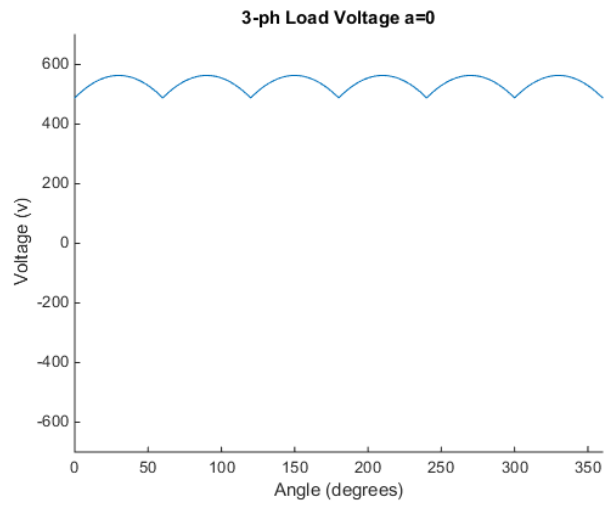
$$L = 0.04 \, \text{H} \, \text{ή} \, 0.08 \, \text{H}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η τάση εισόδου και η αρνητική της του τριφασικού ανορθωτή

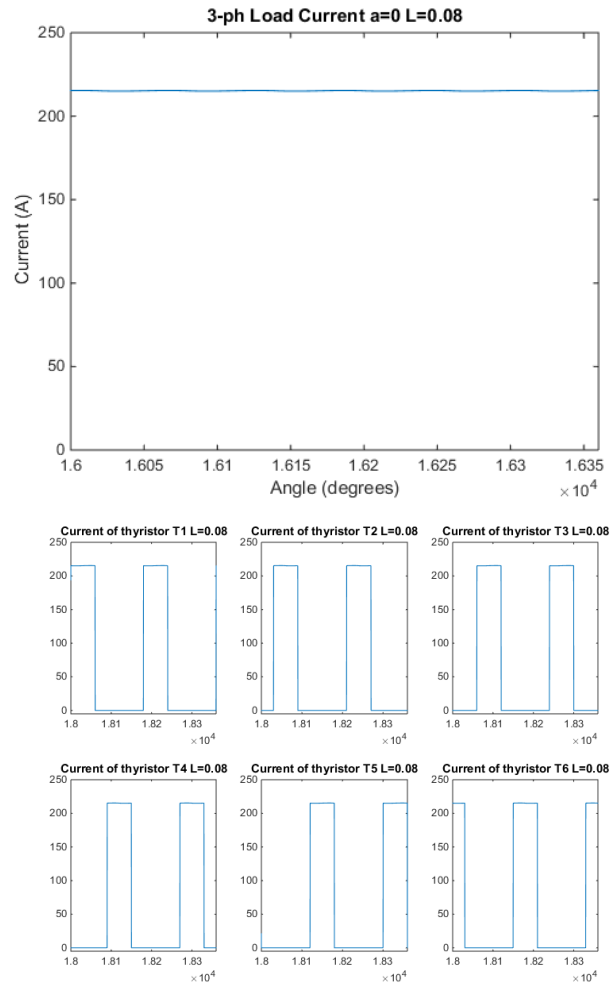


Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο και των ρευμάτων στα θυρίστορ για όλες τις περιπτώσεις.

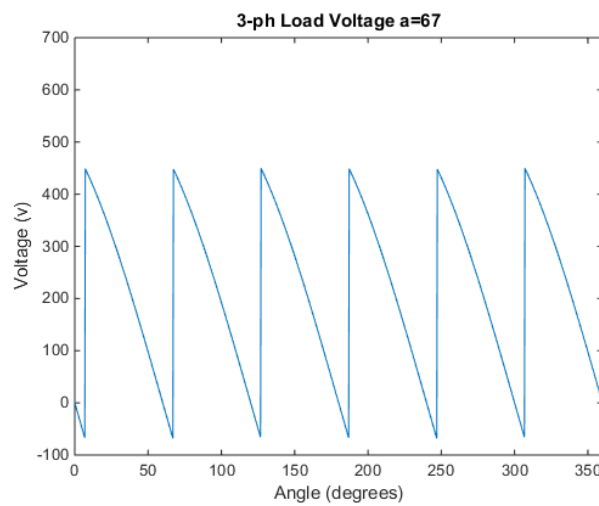
3.1.1 Για γωνία έναυσης $\alpha=0^\circ$, $R = 2.5 \, \Omega$, $L = 0.04 \, H$

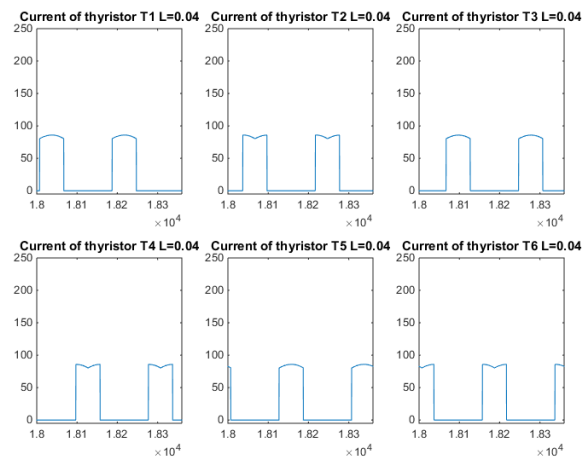
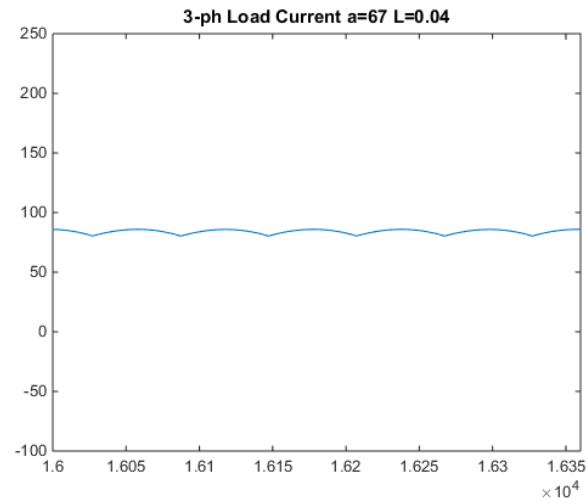


3.1.2 Για γωνία έναυσης $\alpha=0^\circ$, $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.08H$

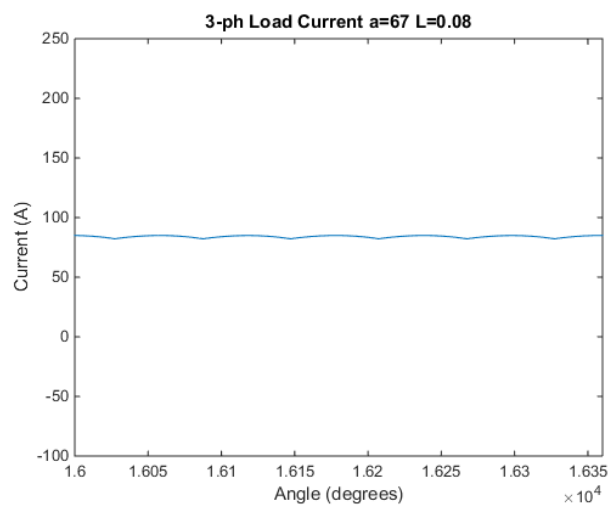


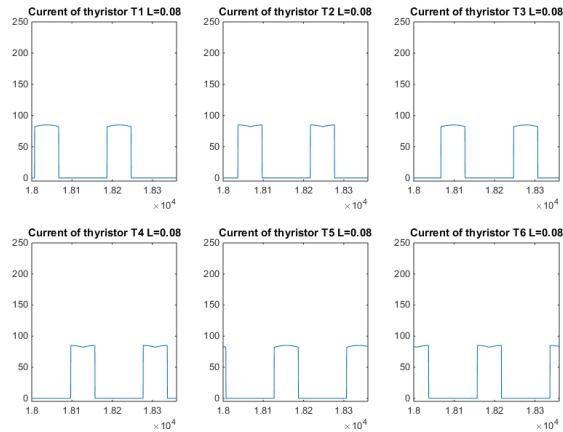
3.1.3 Για γωνία έναυσης $\alpha=67^\circ$, $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.04H$





3.1.4 Για γωνία έναυσης $\alpha=67^\circ$, $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.08H$





3.2 Σχολιασμός Τριφασικού Ανορθωτή

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου η γωνία έναυσης των θυρίστορ είναι $\alpha=0^\circ$ και η τιμή της αυτεπαγωγής L αυξάνεται από 0.04 H σε 0.08 H, η κυματομορφή του ρεύματος στο φορτίο και τα θυρίστορ παραμένει σχεδόν ίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο τριφασικός ανορθωτής έχει μεγάλη απόδοση. Στην περίπτωση όπου η γωνία έναυσης $\alpha=67^\circ$ το ρεύμα τόσο στο φορτίο όσο και στα θυρίστορ παραμένει ίδιο για μεγαλύτερη τιμή του L για τον λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω. Ακόμα, το μέγιστο ρεύμα του φορτίου και που άγουν τα θυρίστορ έχει αρκετά χαμηλότερη τιμή σε σύγκριση με αυτό για $\alpha=0^\circ$, αφού με την καθυστέρηση την γωνία έναυσης ο χρόνος που άγουν τα θυρίστορ είναι μειωμένος, με αποτέλεσμα το ρεύμα να μην μπορεί να λάβει μεγάλες τιμές.

Παρατηρήσεις

- Τα θυρίστορ T1,T3,T5 και T2,T4,T6 δεν άγουν ταυτόχρονα, καθώς έχουν κοινή κάθοδο και άνοδο αντίστοιχα. Σε κάθε περιοχή λειτουργίας άγουν ακριβώς 2 θυρίστορ.
- Το ρεύμα που διαπερνά το φορτίο έχει την ίδια τιμή με αυτό που διαπερνά τα θυρίστορ.

Ερώτημα 4

4.1 Πρόταση κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους P,I του ελεγκτή

Τα K_I, K_p επιλέχθηκαν με σκοπό την σταθερότητα και την σωστή απόκριση του συστήματος. Με αρκετούς ελέγχους καταλήξαμε στις τιμές $K_p = 0.2$ και $K_I = 7$.

4.1.2 Σχολιασμός επιλογής τιμών

Χρησιμοποιήθηκε ο PI ελεγκτής για να διατηρηθεί η μέση τιμή του ρεύματος στο φορτίο σταθερή. Έτσι, η επιθυμητή λειτουργία του συστήματος είναι να γίνεται η μέτρηση του ρεύματος στην έξοδο του κυκλώματος και έπειτα να συγκρίνεται με την τιμή που θέλουμε, δηλαδή τα 75 A. Η γωνία έναυσης α του θυρίστορ είναι η έξοδος του ελεγκτή.

$$\alpha = K_I \cdot x(t) + K_p \cdot e(t) \quad (1) \quad , \text{ με } x(t) = \int e(t) dt$$

Δημιουργήθηκε ένα σύστημα στο χώρο κατάστασης μαζί με την παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{dx}{dt} = 0 \cdot x + 1 \cdot e(t) \quad (2)$$

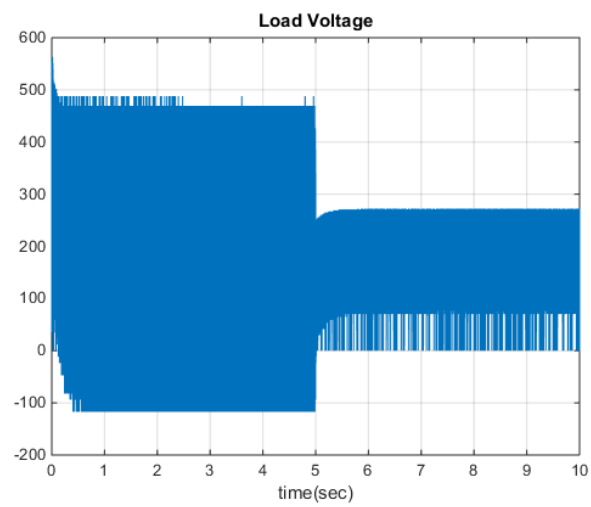
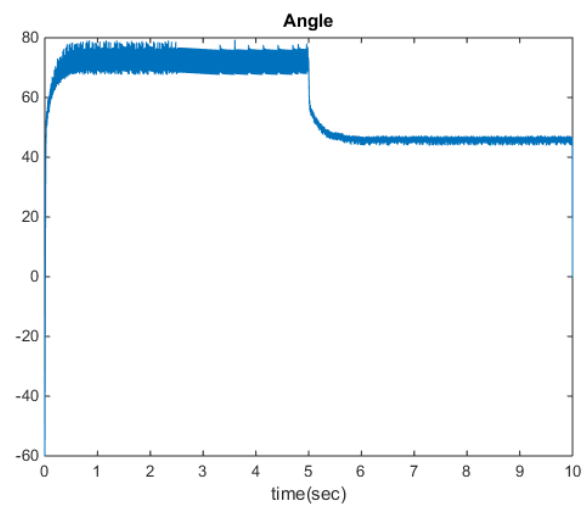
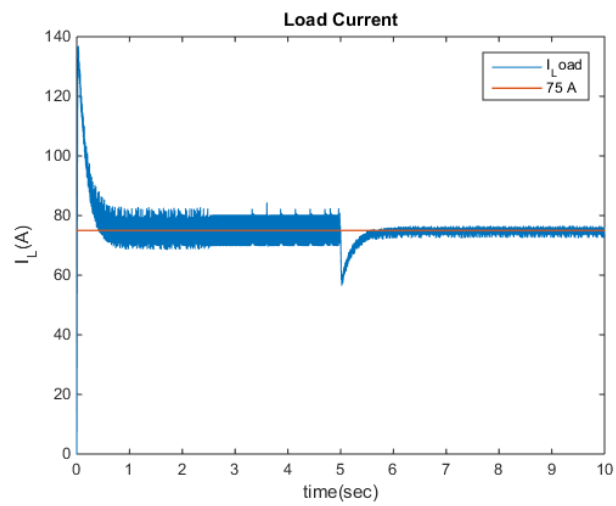
Έπειτα , από (1),(2) βρέθηκαν οι πίνακες A,B,C,D όπου $A=0$, $B=1$, $C=K_I$, $D=K_p$ και με την μετατροπή σε σύστημα διακριτού χρόνου προέκυψε το εξής σύστημα εξισώσεων :

$$x((k+1) \cdot T_s) = A_d \cdot x(k \cdot T_s) + B_d \cdot e(k \cdot T_s)$$

$$\alpha(k \cdot T_s) = C_d \cdot x(k \cdot T_s) + D_d \cdot e(k \cdot T_s)$$

Με μια for-loop υπολογίστηκε η τάση στο φορτίο, η τιμή του ρεύματος και η γωνία έναυσης των θυρίστορ. Αναπαραστάθηκε το σήμα για 10 δευτερόλεπτα εκ των οποίων τα πρώτα 5 έχουν ως τάση $V_{rms} = 230V$ και τα τελευταία 5 έχουν μειωμένη τάση $V_{rms} = 200V$.

4.2 Κυματομορφές ρεύματος και τάσης στο φορτίο και της γωνίας α των θυρίστωρ



4.2.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρείται ότι η κυματομορφή του ρεύματος δίνει αποτελέσματα κοντά στην τιμή των 75 A για τα πρώτα 5 δευτερόλεπτα. Στο 5^ο δευτερόλεπτο έχουμε την αλλαγή τάσης στα 200V και παρουσιάζεται μια μικρή αστάθεια στην τιμή του ρεύματος. Ωστόσο, η αστάθεια είναι τόσο μικρή όσο και σταθεροποιείται ξανά στα 75 A γρήγορα.

Η κυματομορφή της τάσης κυμαίνεται γύρω από τις πολικές τιμές V_{rms} (230 και 200 V). Φαίνεται ξανά η γρήγορη απόκριση του ελεγκτή στην αλλαγή της τιμής της τάσης.