

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

(2019-2020)

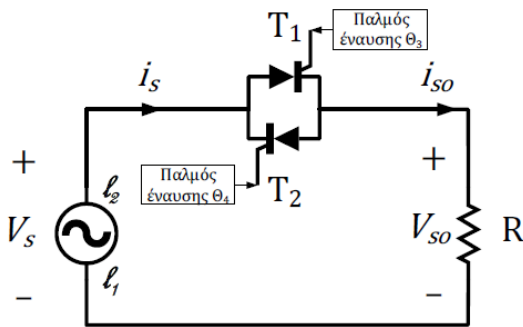
2^η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

AC Ρυθμιστής

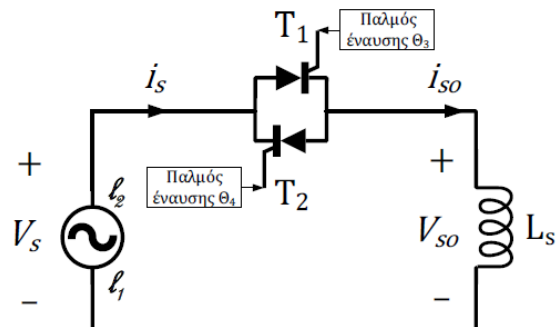
Ομάδα: Κωνσταντίνος Παπαϊωάννου - 03117005

Χρήστος Τσούφης - 03117176

Εκτέλεση Εργαστηρίου: 17/12/2019 12:00 – 14:00



Σχ. 1: Ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης με ωμικό φορτίο στην έξοδο.



Σχ. 2: Κύκλωμα ελεγχόμενης αυτεπαγωγής με θυρίστορ

Στόχος της άσκησης

Στόχος της άσκησης είναι η κατανόηση της λειτουργίας του ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης και του κυκλώματος ελεγχόμενης επαγωγής με θυρίστορ.

Προεργασία άσκησης

A Μέρος: Δίνονται: $V_s = 70 \text{ V}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$, $R = 50 \text{ } \Omega$, $L = 0 \text{ mH}$

Απαραίτητοι τύποι: $V_{so} = V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$, $I_{so} = \frac{V_{so}}{R}$, $P_{so} = V_{so} * I_{so}$, $S = I_{so} * V_i$, $\lambda = \frac{P_{so}}{S}$

Επίσης, για $i = 0$ και λύνοντας τον τύπο (3.94) του βιβλίου ($\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = 0$), προκύπτει ότι $\beta = \kappa\pi$ για $\kappa = 0, 1, 2, \dots$ και επιλέγοντας κατάλληλα την λύση $\beta = \pi$ ισχύει $\gamma = \pi - \alpha$.

B Μέρος: Δίνονται: $V_s = 70 \text{ V}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$, $R = 0 \text{ } \Omega$, $L = 150 \text{ mH}$

Απαραίτητοι τύποι: $V_{so} = V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)}$

Επίσης, για $i = 0$ και λύνοντας τον τύπο (3.94) του βιβλίου ($\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \frac{\pi}{2}$), προκύπτει ότι $\sin(\beta - \frac{\pi}{2}) = \sin(\alpha - \frac{\pi}{2})$. Άρα $\beta = 2\kappa\pi + \alpha$ ή $\beta = 2\kappa\pi + 2\pi - \alpha$ για $\kappa = 0, 1, 2, \dots$

Οι λύση που γίνεται δεκτή είναι η $\beta = 2\kappa\pi + 2\pi - \alpha$ για $\kappa = 0$, δηλαδή η $\beta = 2\pi - \alpha$. Έτσι, $\gamma = 2\pi - 2\alpha$.

Για το πλάτος ρεύματος εξόδου για $\alpha = 90^\circ$ γίνεται χρήση του τύπου:

$\widehat{I}_{so} = \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi f L} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\gamma(2 + \cos 2\alpha) - \sin 2\alpha)}$ και στην συνέχεια για την rms τον $I_{so} = \frac{\widehat{I}_{so}}{\sqrt{2}}$. Για τις άλλες δύο περιπτώσεις μετά την μελέτη του σήματος προκύπτει ότι $\widehat{I}_{so} = \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi f L} (1 - \sin(\alpha - \frac{\pi}{2}))$.

Γ Μέρος: Δίνονται: $V_s = 70 \text{ V}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$, $R = 50 \text{ } \Omega$, $L = 150 \text{ mH}$

Επίσης, η ελάχιστη τιμή γωνίας έναυσης α_{\min} προκύπτει όταν $\alpha = \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$.

Άρα, $\alpha_{\min} = 0,755 \text{ rad} = 43,25^\circ$

Μέγιστη ενεργό τιμή $V_{so, \max}$ θα προκύψει για α_{\min} . Δηλαδή, $V_{so, \max} = 70 \text{ V}$

Θεωρητική προετοιμασία:

	Υπολογισμοί προεργασίας – Μέρος Α, R = 50 Ω, L = 0 mH					
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 36^\circ$	$\alpha = 72^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 108^\circ$	$\alpha = 144^\circ$
Γωνία αγωγής γ για θυρίστορ T ₁	180°	144°	108°	90°	72°	36°
Ενεργός τιμή V _{so}	70 V	68.28 V	58.3 V	49.5 V	38.75 V	15.4 V
Ενεργός τιμή I _{so}	1.4 A	1.37 A	1.16 A	0.99 A	0.77 A	0.32 A
Ενεργός ισχύς P _{so}	98 W	93.54 W	67.63 W	49 W	29.84 W	4.93 W
Φαινόμενη ισχύς στην είσοδο S	98 VA	95.9 VA	81.2 VA	69.3 VA	53.9 VA	22.4 VA
Συντελεστής ισχύς στην είσοδο λ	1	0.96	0.83	0.71	0.55	0.22
	Υπολογισμοί προεργασίας – Μέρος Β, R = 0 Ω, L = 150 mH					
	$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 108^\circ$		$\alpha = 144^\circ$	
Γωνία αγωγής γ για θυρίστορ T ₁	180°		144°		72°	
Ενεργός τιμή V _{so}	70 V		54.8 V		21.83 V	
Πλάτος ρεύματος εξόδου \widehat{I}_{so}	2.10 A		1.45 A		0.4 A	
Ενεργός τιμή ρεύματος εξόδου I _{so}	1,485 A					
	Υπολογισμοί προεργασίας – Μέρος Γ, R = 50 Ω, L = 150 mH					
	Ελάχιστη τιμή γωνίας έναυσης α_{\min}					
Μέγιστη ενεργός τιμή V _{so,max}	70 V					

Μετρήσεις Εργαστηρίου:

	Εργαστηριακές Μετρήσεις – Μέρος Α, $R = 50 \Omega$, $L = 0 \text{ mH}$					
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 36^\circ$	$\alpha = 72^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 108^\circ$	$\alpha = 144^\circ$
Ενεργός τιμή V_{so}	68.45 V	64.82 V	51.7 V	41.1 V	30.8 V	10.7 V
Ενεργός τιμή I_{so}	1.3 A	1.27 A	1.15 A	0.98 A	0.8 A	0.36 A
Ενεργός ισχύς P_{so}	88.98 W	82.32 W	59.45 W	40.27 W	24.64 W	3.85 W
Φαινόμενη ισχύς στην είσοδο S	91 VA	88.9 VA	80.5 VA	68.6 VA	56 VA	25.2 VA
Συντελεστής ισχύς στην είσοδο λ	0.97	0.92	0.73	0.58	0.44	0.15
	Εργαστηριακές Μετρήσεις – Μέρος Β, $R = 0 \Omega$, $L = 150 \text{ mH}$					
	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 108^\circ$		$\alpha = 144^\circ$		
Ενεργός τιμή V_{so}	69.7 V	53 V		19.4 V		
Ενεργός τιμή ρεύματος εξόδου I_{so}	1.2 A	0.85 A		0.22 A		
Πλάτος ρεύματος εξόδου \widehat{I}_{so}	1.8 A	1.2 A		0.4 A		

Έκθεση Αναφοράς:

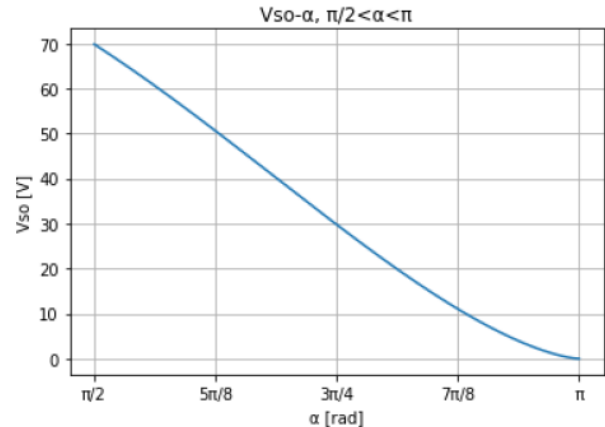
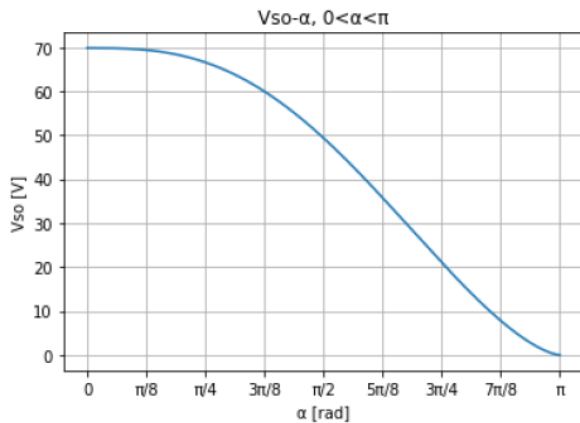
Υπολογίστηκε με χρήση οργάνων ότι: $R = 52,7 \Omega$, $V_s = 69,8 \text{ V}$

1. Συμπληρώστε τους πίνακες υπολογισμών και μετρήσεων. Συγκρίνετε και σχολιάστε τη συνέπεια των μετρήσεων που λάβατε στο εργαστήριο με τις θεωρητικές τιμές των αντίστοιχων μεγεθών.

Μετά την εκτέλεση των υπολογισμών και των μετρήσεων προκύπτει ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών τιμών και των τιμών που μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Αυτό συμβαίνει λόγω σφαλμάτων στα όργανα και στα κυκλωματικά στοιχεία αλλά και της διάταξής τους στην άσκηση. Επίσης, η τιμή της αντίστασης στο πείραμα ($R = 52,7 \Omega$) είναι διαφορετική από την θεωρητική τιμή ($R = 50 \Omega$) γεγονός που επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ακόμη, τα όργανα για τη μέτρηση των μεγεθών παρουσιάζουν ποσοστιαίο σφάλμα. Τέλος, κατά την διάρκεια των αριθμητικών πράξεων προκύπτουν σφάλματα μέσω των στρογγυλοποιήσεων.

2. Υπολογίστε την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου για την περίπτωση του ωμικού και την περίπτωση του (πλήρως) επαγωγικού φορτίου, για κάθε τιμή της γωνίας α .

Για την εύρεση της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου για τις περιπτώσεις Α και Β θα δημιουργήθηκαν οι γραφικές παραστάσεις $V_{SO-\alpha}$ για κάθε μια από τις περιπτώσεις:

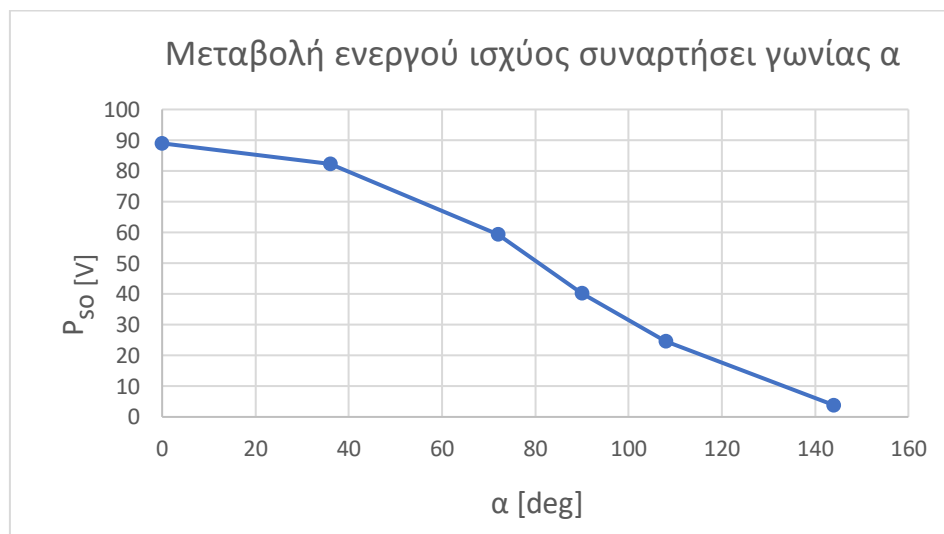


Με βάση την θεωρία προκύπτει ότι:

Για ωμικό φορτίο: $V_{so} = V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$

Για επαγωγικό φορτίο: $V_{so} = V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)}$

3. Σχεδιάστε, με βάση τις μετρήσεις σας, τη γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού ισχύος, ως συνάρτηση της γωνίας α για την περίπτωση του ωμικού φορτίου.



4. Ποια από τα μεγέθη ισχύος P , Q_1 , D και S εμφανίζονται στην είσοδο του κυκλώματος στην περίπτωση του ωμικού φορτίου και ποια στην περίπτωση της ελεγχόμενης επαγωγής ($R = 0 \Omega$);

Για το ωμικό φορτίο στην είσοδο του κυκλώματος εμφανίζονται τα μεγέθη: η ενεργός ισχύς (P) λόγω τάσης και ρεύματος ίδιας συχνότητας, η ισχύς παραμόρφωσης από το θυρίστορ (D) λόγω ύπαρξης ανώτερων αρμονικών καθώς και η φαινόμενη ισχύς (S). Λόγω του ωμικού φορτίου το ρεύμα και η τάση είναι συμφασικά και έτσι δεν εμφανίζεται η άεργος ισχύς (Q_1).

Για την ελεγχόμενη επαγωγή εμφανίζονται τα εξής μεγέθη ισχύος: η άεργος ισχύς (Q_1) λόγω της διαφοράς φάσης ρεύματος και τάσης, η ισχύς παραμόρφωσης (D) λόγω ύπαρξης ανώτερων αρμονικών καθώς και η φαινόμενη ισχύς (S). Λόγω του πλήρως επαγωγικού φορτίου $\varphi = \frac{\pi}{2}$ δεν υπάρχει ενεργός ισχύς (P).

5. Ποια είναι η επιτρεπτή περιοχή ρύθμισης της γωνίας έναυσης α για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος στις τρεις περιπτώσεις φορτίου που είδατε στο εργαστήριο;

Για την περίπτωση Α, η επιτρεπτή γωνία έναυσης α είναι $\alpha \geq \varphi = 0^\circ$.

Για την περίπτωση Β, η επιτρεπτή γωνία έναυσης α είναι $\alpha \geq \varphi = 90^\circ$.

Για την περίπτωση Γ, η επιτρεπτή γωνία έναυσης α είναι $\alpha \geq \varphi = 43.25^\circ$.

Και για τις τρεις περιπτώσεις το άνω όριο είναι οι 180° .

6. Για τη λειτουργία με φορτίο $R=0 \Omega$, $L=150 \text{ mH}$, ποιο είναι το μέγιστο ενεργό (RMS) ρεύμα ενός θυρίστορ; Μπορείτε να υπολογίσετε το ενεργό (RMS) ρεύμα του θυρίστορ T_1 για τις τιμές της γωνίας α για τις οποίες έχετε καταγράψει τιμές για το συνολικό ενεργό ρεύμα εξόδου I_{so} ; Ποια είναι η σχέση του ενεργού ρεύματος ενός θυρίστορ με το ενεργό ρεύμα εξόδου στο κύκλωμα αυτό;

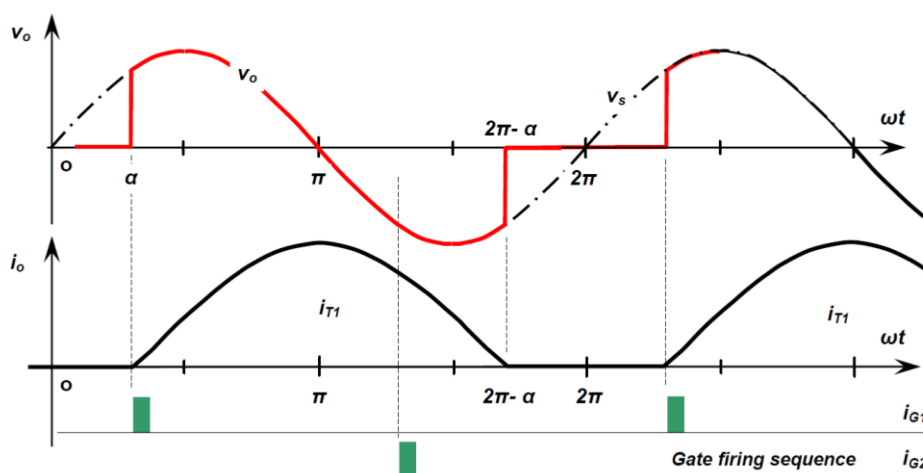
Για την περίπτωση Β, το μέγιστο ενεργό ρεύμα ενός θυρίστορ θα προκύψει για την ελάχιστη γωνία έναυσης $\alpha_{\min} = \varphi = \frac{\pi}{2}$ και θα ισούται με $I_{th,rms,max} = \frac{I_{so,rms,max}}{\sqrt{2}} = 1.27 \text{ A}$

Με όμοιο τρόπο γίνεται ο υπολογισμός και για τις γωνίες 108° και 144° και προκύπτουν 0.85 A και 0.28 A αντίστοιχα.

Η σχέση που συνδέει το ενεργό ρεύμα ενός θυρίστορ με το ενεργό ρεύμα εξόδου (πλάτη) είναι η $I_{so,rms} = I_{th,rms} \sqrt{2}$ και προκύπτει από τον αναλυτικό υπολογισμό της rms των ρευμάτων, αλλά και από το γεγονός ότι η θετική ημιπερίοδος του ρεύματος εξόδου συνδέεται με το ρεύμα του T_1 , ενώ η αρνητική με το ρεύμα του T_2 .

7. Περιγράψτε τη λειτουργία του κυκλώματος για ωμικό-επαγωγικό φορτίο με $R=50 \Omega$, $L=300 \text{ mH}$ και γωνία έναυσης $\alpha=30^\circ$.

Για την ορθή λειτουργία του AC-ρυθμιστή για R-L φορτίο θα πρέπει η γωνία έναυσης του θυρίστορ να είναι: $\alpha \geq \varphi$ όπου $\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$. Εδώ, για $f = 50 \text{ Hz}$, $L = 300 \text{ mH}$, $R = 50 \Omega$ προκύπτει $\varphi = 62.05^\circ$. Επειδή $\alpha = 30^\circ < 62.05^\circ$, ο AC-ρυθμιστής δεν θα λειτουργεί όπως πρέπει. Δηλαδή η έναυση του παλμού του δεύτερου θυρίστορ T_2 γίνεται μέσα στο χρονικό διάστημα που το θυρίστορ T_1 άγει. Επειδή όμως οι παλμοί μικρής διάρκειας δεν μπορούν να μεταβάλλουν τη φορά του ρεύματος και να προκαλέσουν αγωγή στο T_2 , χάνεται η ευκαιρία να δράσει στην αρνητική ημιπερίοδο του ρεύματος εισόδου. Συνεπώς, προκύπτει ένα ημιανορθωμένο ημίτονο που μοιάζει με του παρακάτω σχήματος.



8. Το κύκλωμα του Σχ. 2 αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία ως *Thyristor-Controlled Reactor (TCR)* και συνήθως χρησιμοποιείται η σύνδεση τριών τέτοιων κλάδων σε συνδεσμολογία Δ για τριφασικά συστήματα. Ποια είναι η χρησιμότητα ενός τέτοιου κυκλώματος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο;

Σε ένα ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς ενέργειας, το TCR είναι μια επαγωγική ηλεκτρική αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με δύο αμφίδρομα θυρίστορ. Αυτά ελέγχονται μέσω της φάσης και λειτουργούν σαν διακόπτες, γεγονός που επιτρέπει στην τιμή της διανεμόμενης αέργου ισχύος να προσαρμόζεται ευέλικτα και ομαλά ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος. Για παράδειγμα, τα TCR χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ανόδου της τάσης στις ελαφρώς φορτωμένες γραμμές μεταφοράς. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με φίλτρα αρμονικών για να πετύχουν εκ νέου έλεγχο του συστήματος αντιστάθμισης της αέργου ισχύος, μέσω των γωνιών έναυσης, ανάλογα με τη ζήτηση του φορτίου. Τέλος, μια κύρια χρησιμότητα τριών συνδεδεμένων TCR σε συνδεσμολογία δέλτα σε τριφασικά συστήματα είναι η μερική ακύρωση αρμονικών καθώς οι τριπλές αρμονικές κυκλοφορούν μέσα στο τρίγωνο και δεν παρουσιάζονται στο ρεύμα των φάσεων στο δίκτυο.