

Exercice 12

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC

On considère un moteur à courant continu, parfaitement compensé, alimenté par l'intermédiaire d'un pont monophasé à 4 thyristors dont l'entrée alternative est de 400 V pour une fréquence de 50 Hz. Il a pour caractéristiques nominales :

$U = 240 \text{ V}$; $I = 100 \text{ A}$; $R = 0,14 \text{ } \Omega$; $L = 27 \text{ mH}$; $P = 22 \text{ kW}$; $N = 1800 \text{ tr/mn}$

1° - En admettant la conduction continue, déterminer le retard à l'amorçage β pour obtenir le fonctionnement nominal; vérifier l'hypothèse de la conduction continue grâce à l'abaque fournie.

2° - Toujours en admettant la conduction continue, calculer le courant et l'angle β pour avoir un couple utile sur l'arbre de 100 N.m à la vitesse de 900 tr/mn.

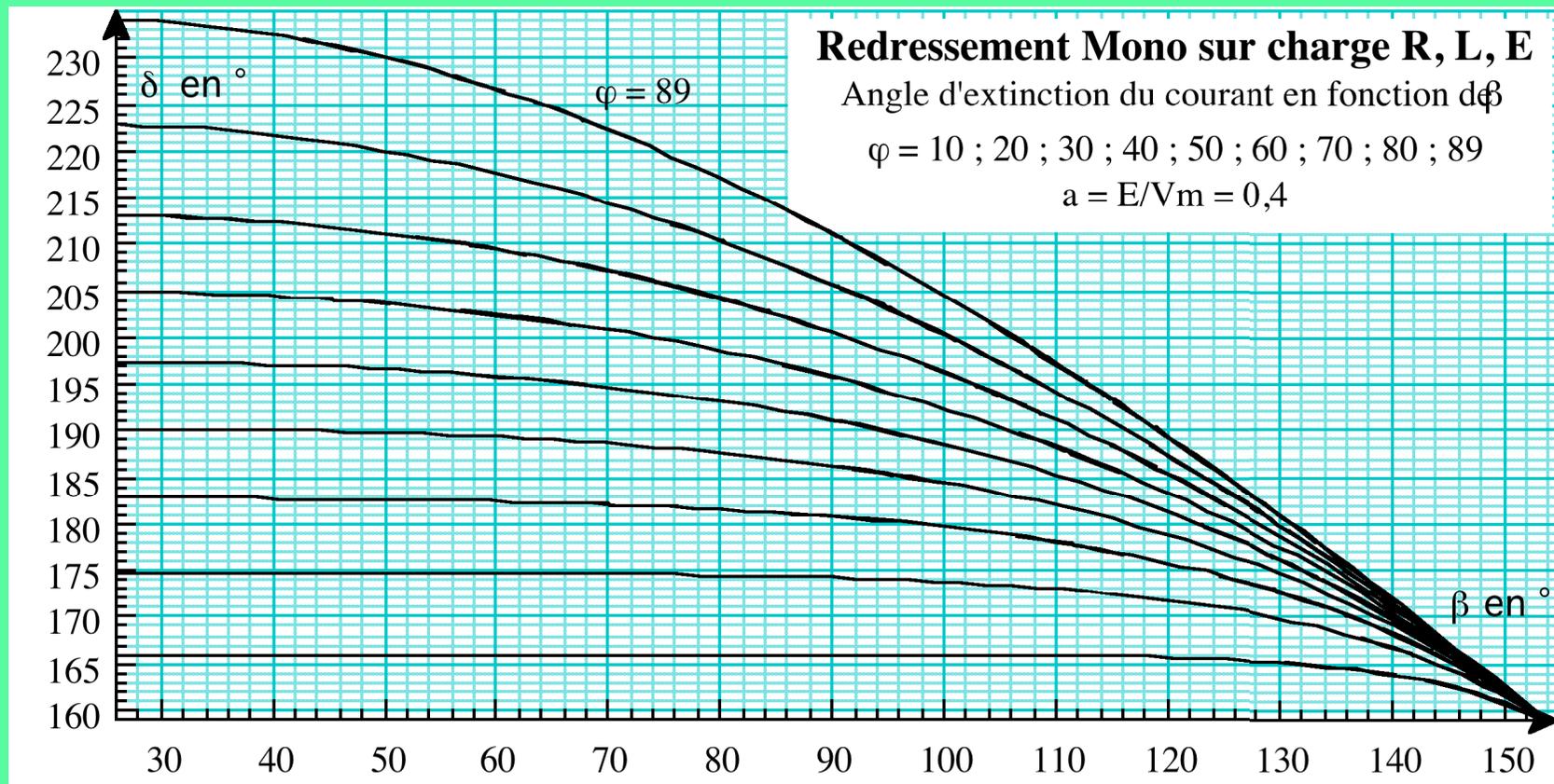
3° - Rappeler l'expression et calculer, à l'aide de l'abaque, le courant moyen obtenu pour la vitesse nominale et un angle β de 110° .

4° - Pour un fonctionnement au courant nominal pour lequel la conduction est à la limite de la continuité ($\hat{I}_{c1} = \bar{I}_c$ en se limitant au 1er harmonique), déterminer la puissance thermique à dissiper au niveau des 4 thyristors.

On donne pour chaque thyristor : $U_o = 0,8 \text{ V}$; $r_d = 0,01 \text{ } \Omega$; $R_{th\text{ JC}} + R_{th\text{ CR}} = 0,05 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Pour une température maximale de jonction de $125 \text{ } ^\circ\text{C}$ et une température ambiante de $25 \text{ } ^\circ\text{C}$, proposer une valeur de résistance thermique pour le refroidisseur les recevant.

Exercice 12

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC



Exercice 12

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC

1° Si la conduction est continue, alors :

$$\bar{U}_C = \frac{2\hat{V}}{\pi} \cos \beta$$

D'où :

$$\left. \begin{array}{l} \hat{V} = 400\sqrt{2} \text{ V} \\ \bar{U}_C = U = 240 \text{ V} \end{array} \right\} \Rightarrow \beta = 48,2^\circ$$

$$\left. \begin{array}{l} E_n = U - RI_n = 226 \text{ V} \Rightarrow \frac{E}{\hat{V}} = \frac{226}{400\sqrt{2}} = 0,4 \\ \tan \varphi = \frac{L\omega}{R} = 60,6 \Rightarrow \varphi = 89^\circ \end{array} \right\} \Rightarrow \left(\begin{array}{l} \text{abaque} \\ \beta = 48^\circ \end{array} \right) \delta = 230,6^\circ > \pi + \beta = 228^\circ$$

La conduction est donc bien continue.

Exercice 12

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC

2° Si $N = 900$ tr/mn, alors $E = E_n / 2$ et la puissance électromagnétique s'écrit :

$$P_{em} = \frac{E_n}{2} I = C \Omega + P_C \quad \text{avec :} \quad P_C = \frac{P_{Cn}}{2} \left(\text{car } \frac{N_n}{2} \right) = \frac{P_{abs} - P_U - R I_n^2}{2} = 300 \text{ W}$$

Alors :

$$I = \frac{1}{113} \left(100 \times 900 \times \frac{\pi}{30} + 300 \right) = 86,06 \text{ A}$$
$$\Rightarrow U = 113 + 0,14 \times 86,06 = 125 \text{ V} \Rightarrow \beta = 69,7^\circ$$

Exercice 12

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC

$$3^\circ \quad N = N_n \Rightarrow E = E_n \Rightarrow \frac{E}{\hat{V}} = 0,4$$

$$\left. \begin{array}{l} \beta = 110^\circ \\ \varphi = 89^\circ \end{array} \right\} \Rightarrow \delta = 197,25^\circ \Rightarrow \text{Conduction discontinue}$$

L'arche de courant dure de β à δ et durant cette conduction la tension redressée est :

$$u_C = \hat{V} \sin \theta \quad \text{et le reste du temps} \quad u_C = E$$

$$\Rightarrow \bar{U}_C = \frac{1}{\pi} \left(\int_{\beta}^{\delta} \hat{V} \sin \theta d\theta + \int_{\delta}^{\pi+\beta} E d\theta \right) = \frac{\hat{V}}{\pi} (\cos \beta - \cos \delta) + E \left(1 + \frac{\beta - \delta}{\pi} \right)$$

$$\Rightarrow \bar{I}_C = \frac{\bar{U}_C - E}{R} = \frac{\hat{V}}{\pi R} (\cos \beta - \cos \delta) + E \frac{\beta - \delta}{\pi R} = 5,94 \text{ A}$$

Exercice 12

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC

4° Pour un thyristor, on a : $P_{cal} = U_0 \bar{I}_{Th} + r_d I_{Theff}^2$ avec :

$\hat{I}_{C1} = \bar{I}_C =$ Amplitude du fondamental

$$\bar{I}_{Th} = \frac{\bar{I}_C}{2} = 50 \text{ A}$$

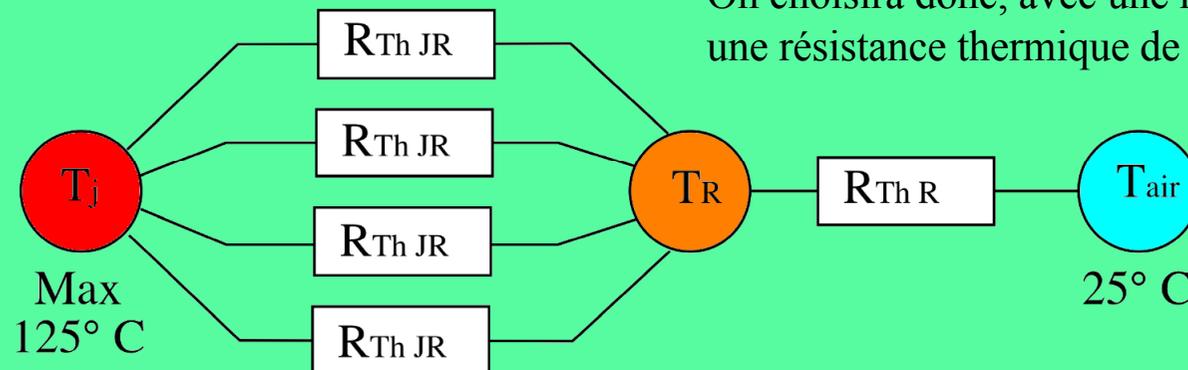
$$I_{Theff}^2 = \frac{I_{Ceff}^2}{2} = \frac{\bar{I}_C^2 + I_{C1eff}^2}{2} = \bar{I}_C^2 \frac{3}{4}$$

On obtient par thyristor : $P_{cal} = 115 \text{ W}$
 donc pour le pont complet : 460 W

$$R_{ThR} = \frac{125 - 25}{460} - \frac{0,05}{4} = 0,205 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

4 fois 0,05 °C/W en //

On choisira donc, avec une marge de sécurité, une résistance thermique de **0,15 °C/W**



Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

Un pont redresseur à 4 thyristors, branché sur le réseau 220 V - 50 Hz, alimente l'induit d'un moteur à courant continu de caractéristiques :

$$P_n = 1500 \text{ W} ; U_n = 170 \text{ V} ; N_n = 1500 \text{ tr/mn} ; \eta = 77 \%$$

$$R = 2 \Omega \text{ et } L = 39 \text{ mH.}$$

Les composants ainsi que le réseau sont supposés parfaits.

1° - Pour le point de fonctionnement nominal et en admettant que la conduction est continue :

- déterminer le retard β à la mise en conduction;
- donner la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge;
- le courant I_c dans le moteur étant supposé parfaitement lissé, donner la forme d'onde du courant absorbé par le réseau ainsi que sa valeur efficace. Déterminer de plus la valeur efficace de son fondamental (il transporte toute la puissance active);
- calculer la puissance réactive absorbée.

2° - Pour un couple fourni égal au couple nominal et toujours pour une conduction continue, construire la courbe donnant la vitesse de rotation N en fonction de α . Donner la valeur de α pour obtenir une vitesse de 500 tr/mn.

3° - Le pont complet est remplacé par un pont mixte; répondre aux mêmes questions qu'au 1° (conduction continue et courant I_c parfaitement lissé).

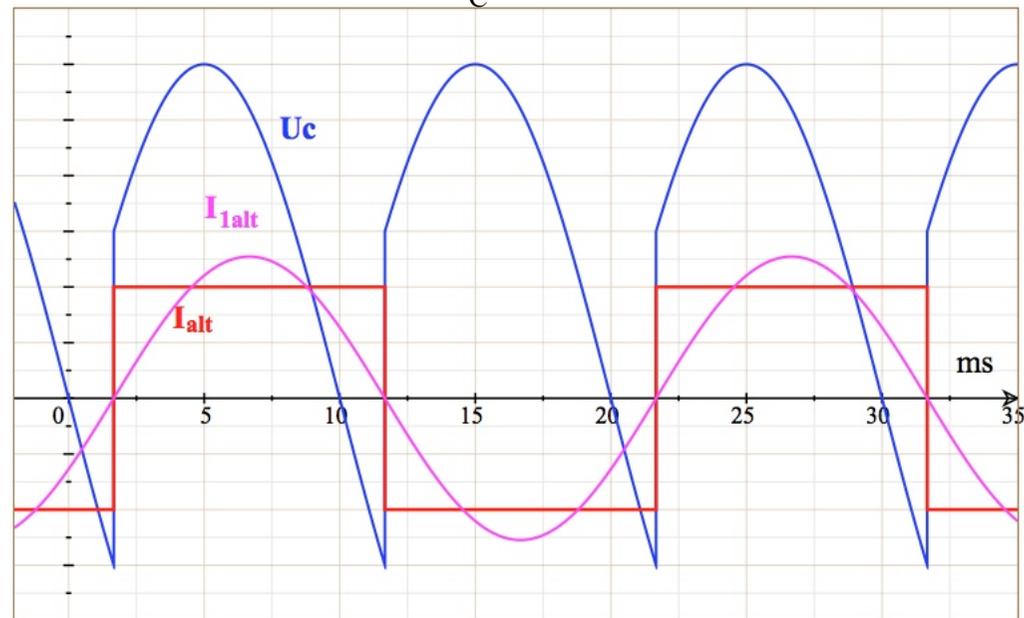
Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

1° Si la conduction est continue, la tension redressée s'écrit :

$$\bar{U}_C = \frac{2\hat{V}}{\pi} \cos \beta = U_n = 170 \text{ V} \Rightarrow \beta = 30,87^\circ$$

Formes d'onde de U_C et du courant côté alternatif :



Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

1° (suite) Le courant côté alternatif est assimilé à un signal carré; sa valeur efficace est donc égale à sa valeur crête, soit :

$$I_{alt} = \bar{I}_C = \frac{P_U}{\eta U_n} = \frac{1500}{0,77 \times 170} = 11,46 \text{ A}$$

Il est clair que son fondamental I_{1alt} est déphasé de β par rapport à la tension, d'où :

$$P_{abs} = \frac{P_U}{\eta} = V I_{1alt} \cos \beta \Rightarrow I_{1alt} = 10,32 \text{ A}$$

Quant à la puissance réactive, elle vaut :

$$Q = V I_{1alt} \sin \beta = 1165 \text{ Var}$$

Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

2° La vitesse d'un moteur à courant continu s'exprime par : $N = \frac{E}{k} = \frac{U - RI}{k}$

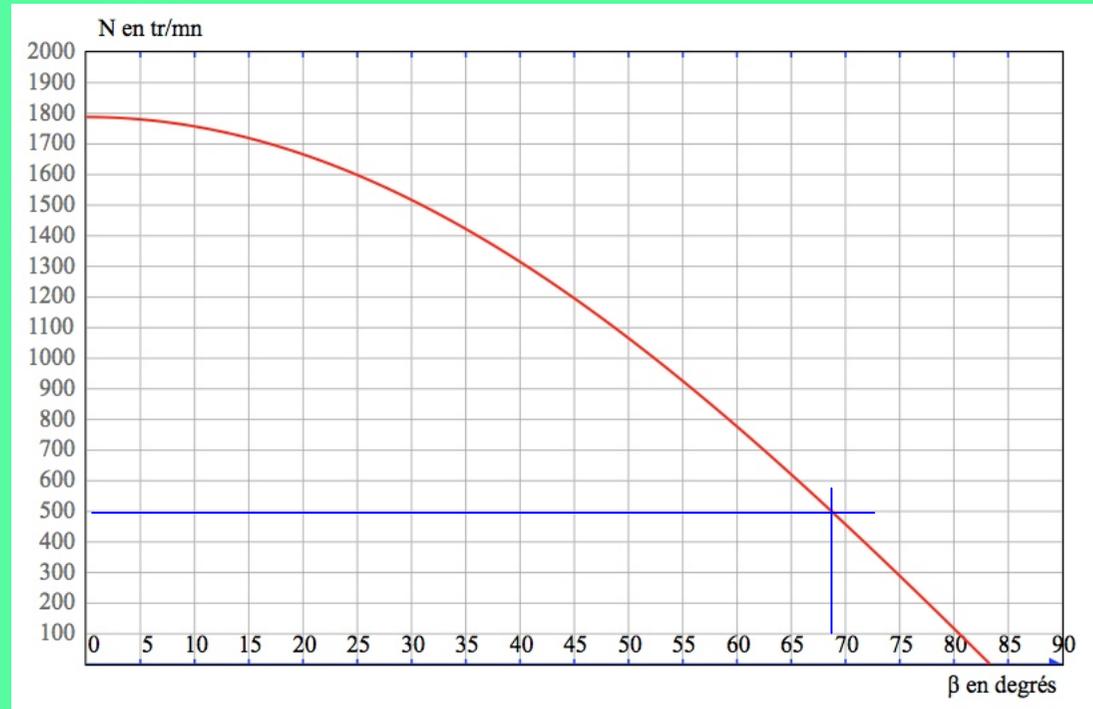
avec : $k = \frac{E_n}{N_n} = \frac{170 - 2 \times 11,46}{25} = \frac{147,08}{25} = 5,8832$

Il vient : $N = \frac{1}{5,8832} \left(\frac{2\hat{V}}{\pi} \cos \beta - RI \right) = 33,7 \cos \beta - 3,9$

Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

D'où la courbe :



Pour une vitesse de 500 tr/mn :

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{1}{33,7} \left(\frac{500}{60} + 3,9 \right) \right) = 68,7^\circ$$

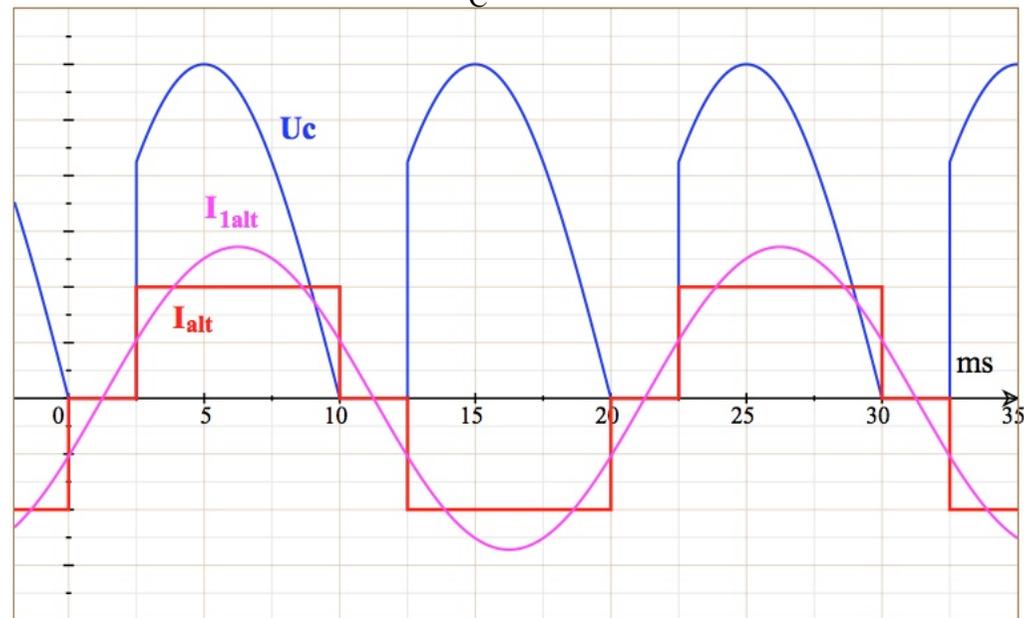
Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

3° Si la conduction est continue, la tension redressée s'écrit :

$$\bar{U}_C = \frac{\hat{V}}{\pi} (1 + \cos \beta) = U_n = 170 \text{ V} \Rightarrow \beta = 44,23^\circ$$

Formes d'onde de U_C et du courant côté alternatif :



Exercice 13

Pont mono commandé sur moteur CC

La valeur efficace du courant côté alternatif s'obtient aisément à partir de sa forme d'onde :

$$I_{alt} = \bar{I}_C \sqrt{\frac{\pi - \beta}{\pi}} = 9,95 \text{ A}$$

On peut de plus en déduire que son fondamental, I_{1alt} , est déphasé de $\beta/2$ par rapport à la tension, d'où :

$$P_{abs} = \frac{P_U}{\eta} = V I_{1alt} \cos \frac{\beta}{2} \Rightarrow I_{1alt} = 9,56 \text{ A}$$

Quant à la puissance réactive, elle vaut :

$$Q = V I_{1alt} \sin \frac{\beta}{2} = 792 \text{ Var}$$

Exercice 14

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC : N°2

Soit le schéma ci-après, où la charge R L E modélise un moteur à courant continu de puissance 11 kW pour un rendement de 91 %. Sa tension nominale est de 190 V et sa vitesse de 1200 tr/mn.

1° - Donner la valeur maximale du courant moyen possible si le moteur reste à sa vitesse nominale (la conduction sera supposée continue).

2° - Lors d'un fonctionnement à vide, on relève une vitesse de 1500 tr/mn et un courant moyen de 2,5 A. La conduction est discontinue avec des arches de courant de 18° de large (que l'on pourra assimiler à des demi sinusoïdes). Déterminer le retard à l'amorçage des thyristors ainsi que la valeur crête des arches de courant.

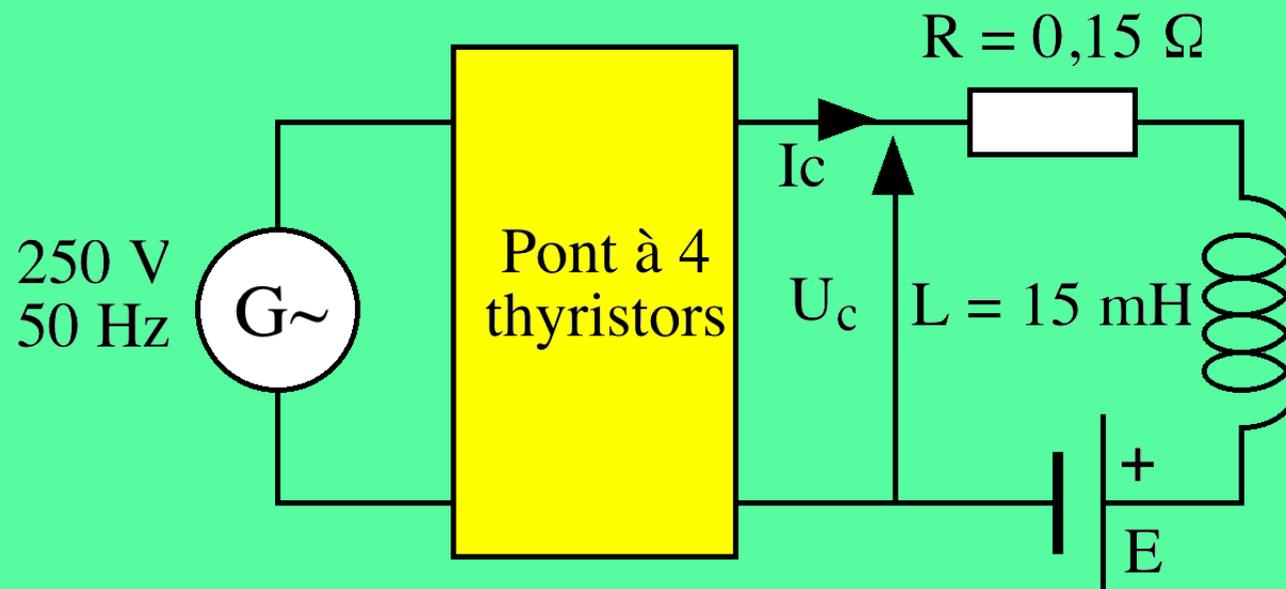
3° - Pour le fonctionnement nominal du moteur, on admettra être en conduction continue. Calculer le retard à l'amorçage et justifier cette hypothèse en calculant l'amplitude du fondamental du courant coté continu

On donne l'amplitude du fondamental de U_c :
$$\hat{U}_{c1} = \frac{4\hat{V}}{3\pi} \cos \beta \sqrt{1 + 4 \tan^2 \beta}$$

Déterminer la valeur efficace du fondamental du courant coté alternatif.

Exercice 14

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC : N°2



Exercice 14

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC : N°2

1° Le courant moyen a pour expression : $\bar{I}_C = \frac{\bar{U}_C - E}{R}$ avec ici $E = Cte = E_n$

Le calcul de E_n donne :

$$\left. \begin{array}{l} E_n = U - R I_n \\ I_n = \frac{P_U}{\eta U} = 63,6 \text{ A} \end{array} \right\} \Rightarrow E_n = 180,5 \text{ V}$$

De plus la valeur max de U_C est obtenue pour $\beta = 0$:

$$\bar{U}_{CMax} = \frac{2\hat{V}}{\pi} \cos \beta = \frac{2 \times 250\sqrt{2}}{\pi} = 225,08 \text{ V}$$

D'où : $\bar{I}_{CMax} = 297,5 \text{ A}$ ce qui est très élevé, soit **4,7 fois I_n** .

Exercice 14

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC : N°2

2° Conduction discontinue avec approximation des demi-sinusoïdes; on a alors :

$$\bar{I}_C = \frac{2\hat{V}}{\pi} \frac{18}{180} = 2,5 \text{ A} \Rightarrow \hat{I}_C = 39,3 \text{ A}$$

Pour une vitesse de 1500 tr/mn, la f.e.m. est de :

$$E = 180,5 \times \frac{1500}{1200} = 225,6 \text{ V}$$

D'où la tension U_C :
$$\bar{U}_C = E + R\bar{I}_C = 225,95 \text{ V}$$

En conduction discontinue, avec $\delta = \beta + 18^\circ$, la tension moyenne s'écrit :

$$\bar{U}_C = 225,95 = \frac{\hat{V}}{\pi} (\cos \beta - \cos \delta) + E \left(1 - \frac{\delta - \beta}{\pi} \right) \Rightarrow \beta = 130,4^\circ$$

Exercice 14

Pont mono 4 thyristors sur moteur CC : N°2

3° Si la conduction est continue, la tension redressée s'écrit :

$$\bar{U}_C = \frac{2\hat{V}}{\pi} \cos \beta = U_n = 190 \text{ V} \Rightarrow \beta = 32,4^\circ$$

Le fondamental du courant s'écrit :

$$\hat{I}_{C1} = \frac{\hat{U}_{C1}}{Z_1} \text{ avec } \begin{cases} \hat{U}_{C1} = \frac{4\hat{V}}{3\pi} \cos \beta \sqrt{1 + 4 \tan^2 \beta} \\ Z_1 = \sqrt{R^2 + (L2\omega)^2} = R\sqrt{1 + 4 \tan^2 \varphi} \end{cases}$$

$$\tan \varphi = \frac{L\omega}{R} \Rightarrow \varphi = 88,2^\circ \Rightarrow Z_1 = 9,426 \Omega \text{ d'où } \hat{I}_{C1} = 21,72 \text{ A}$$

On a bien : $\hat{I}_{C1} < \bar{I}_C = I_n = 63,6 \text{ A}$ La conduction est donc bien continue.

Côté alternatif, le fondamental du courant « transporte » la puissance active et il présente un déphasage égal à β par rapport à la tension. D'où :

$$P = U_n I_n = V I_{1alt} \cos \beta \Rightarrow I_{1alt} = \frac{190 \times 63,6}{250 \cos 32,4^\circ} = 57,3 \text{ A}$$

Exercice 15

Redressement monophasé commandé sur charge R-L

La figure ci-après représente la tension et le courant dans une charge R - L en série à la sortie d'un pont double monophasé à 4 thyristors.

1° - On exprime le fondamental de U_c sous la forme : $u_{c1}(t) = \hat{U}_{c1} \sin(2\omega t + \varphi_1)$

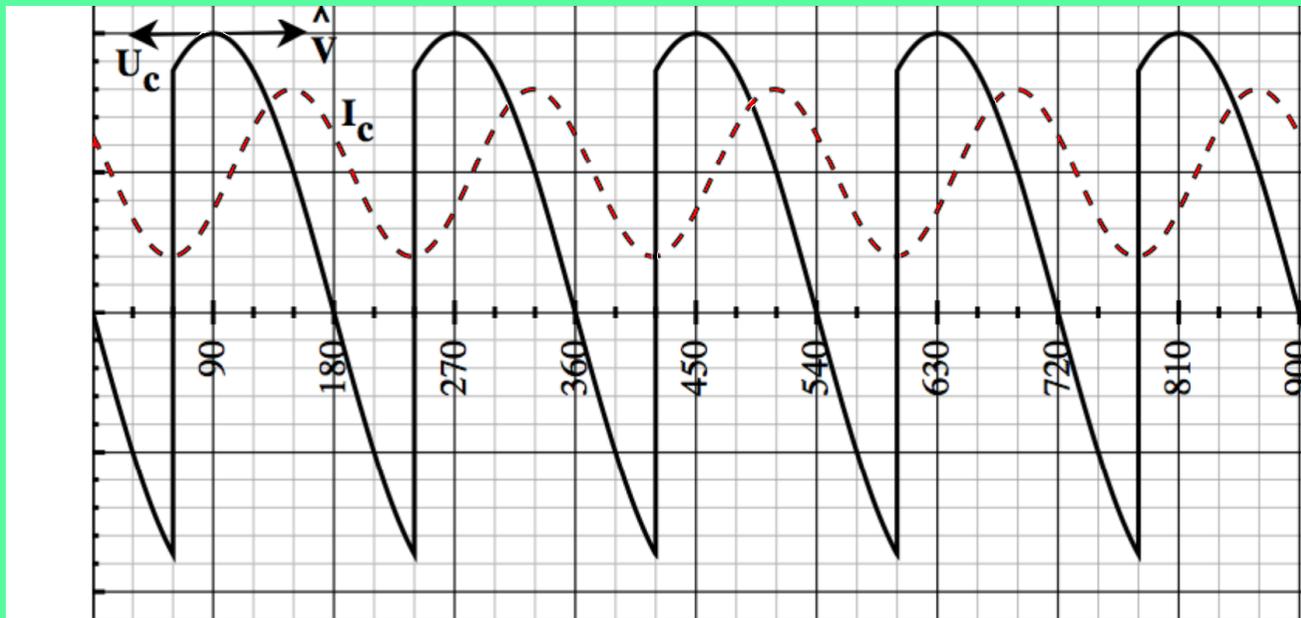
Montrer que : $\hat{U}_{c1} = \frac{4\hat{V}}{3\pi} \sqrt{1 + 3\sin^2 \beta}$ et donner sa valeur numérique. Déterminer, à l'aide de $\cos\varphi_1$ et $\sin\varphi_1$, la valeur algébrique précise de φ_1 . Tracer $u_{c1}(t)$ et $u_c(t)$ sur un même graphe.

2° - En supposant la conduction continue, déterminer la valeur moyenne de I_c , sa valeur efficace et ses valeurs extrémales en se limitant au premier harmonique. Justifier alors l'hypothèse de la conduction continue et donner la valeur limite de α au delà de laquelle le courant est discontinu.

3° - Les thyristors du pont, à l'état passant, présente une tension à leur bornes de la forme : $v_{th}(t) = 0,8 + 0,02i_{th}(t)$. Calculer la puissance thermique dissipée par l'ensemble du pont et préciser la température de jonction atteinte si les 4 boîtiers ($R_{th_{jc}} = 0,5^\circ\text{C}/\text{W}$ et $R_{th_{cr}} = 0,3^\circ\text{C}/\text{W}$) sont montés sur un même refroidisseur de résistance $R_{th_{ra}} = 1^\circ\text{C}/\text{W}$ et si la température ambiante est $T_a = 30^\circ\text{C}$.

Exercice 15

Redressement monophasé commandé sur charge R-L



$$\hat{V} = 180 \text{ V} ; \beta = 60^\circ - f_{\text{source}} = 50 \text{ Hz} - R = 2,2 \Omega ; L = 20 \text{ mH}$$

Rappel : $\sin b \cos a = \frac{1}{2}(\sin(a+b) - \sin(a-b))$ et $\sin a \sin b = \frac{1}{2}(\cos(a-b) - \cos(a+b))$

Exercice 15

Redressement monophasé commandé sur charge R-L

1° Dans la décomposition de U_C , les coefficients de l'harmonique 1 s'écrivent :

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_{\beta}^{\pi+\beta} (\hat{V} \sin \theta) \cos 2\theta d\theta = \frac{2\hat{V}}{3\pi} (\cos 3\beta - 3\cos \beta)$$
$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_{\beta}^{\pi+\beta} (\hat{V} \sin \theta) \sin 2\theta d\theta = \frac{2\hat{V}}{3\pi} (\sin 3\beta - 3\sin \beta)$$

$$\text{D'où : } \hat{U}_{C1} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \frac{4\hat{V}}{3\pi} \sqrt{1 + 3\sin^2 \beta} = 137,7 \text{ V}$$

Détermination
de φ_1 :

$$\left. \begin{array}{l} \sin \varphi_1 = \frac{a_1}{\hat{U}_{C1}} = -0,6934 < 0 \\ \cos \varphi_1 = \frac{b_1}{\hat{U}_{C1}} = -0,7206 < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow -\pi < \varphi_1 < -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \varphi_1 = -136,1^\circ$$

Exercice 15

Redressement monophasé commandé sur charge R-L

2° Dans l'hypothèse de la conduction continue, le courant moyen est :

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{U}_C}{R} = \frac{2\hat{V}}{\pi R} \cos \beta = \frac{2 \times 180}{2,2\pi} \times \frac{1}{2} = 26,04 \text{ A}$$

En se limitant au 1er harmonique, de fréquence 100 Hz, on a :

$$I_C = \sqrt{\bar{I}_C^2 + I_{C1}^2} \text{ où } \hat{I}_{C1} = \frac{\hat{U}_{C1}}{Z_{100}} = 10,8 \text{ A}$$
$$\text{avec } Z_{100} = \sqrt{R^2 + (L2\omega)^2} = 12,76 \text{ } \Omega$$

Il vient : $I_C = 27,14 \text{ A}$ avec

$$\begin{cases} I_{CMax} = \bar{I}_C + \hat{I}_{C1} = 36,84 \text{ A} \\ I_{Cmin} = \bar{I}_C - \hat{I}_{C1} = 15,25 \text{ A} \end{cases}$$

$I_{Cmin} > 0$ donc la conduction est bien continue. L'équation donnant l'angle de conduction δ pour la valeur limite $\delta = \pi + \beta$ conduit à $\sin(\varphi - \beta) = 0$ soit :

$$\beta_{Lim} = \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{L\omega}{R} \right) = 70,7^\circ$$

Exercice 15

Redressement monophasé commandé sur charge R-L

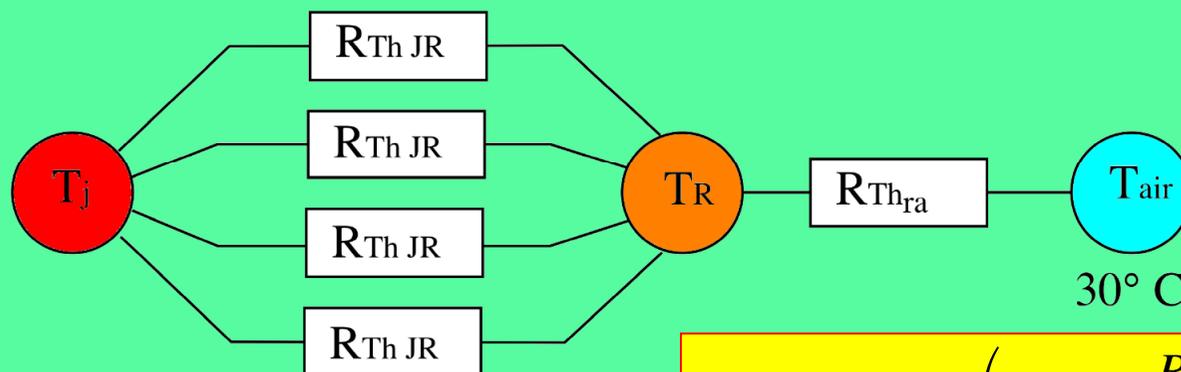
3° Pour chaque thyristor :

$$P_{Cal} = 0,8 \bar{I}_{Th} + 0,02 I_{Th}^2 = 17,783 \text{ W avec } \begin{cases} \bar{I}_{Th} = \frac{\bar{I}_C}{2} = 13,02 \text{ A} \\ I_{Th} = \frac{I_C}{\sqrt{2}} = \frac{27,14}{\sqrt{2}} = 19,19 \text{ A} \end{cases}$$

Soit pour le pont complet, **P = 71,13 W.**

La chaîne thermique peut se schématiser sous la forme ($R_{th_{jc}} + R_{th_{cr}} = R_{th_{jr}} = 0,8^\circ\text{C/W}$) :

4 fois $0,8^\circ\text{C/W}$ en //



$$T_J = T_{Air} + P_{Cal} \left(R_{th_{ra}} + \frac{R_{th_{Jr}}}{4} \right) = 115,4^\circ$$