

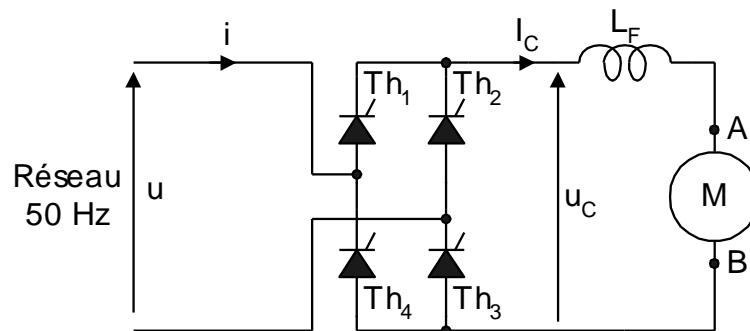
Travaux dirigés N°2 : Commande de la MCC par des convertisseurs Alternatif – continu monophasés

Exercice N°1: Amélioration du facteur de puissance en utilisant un pont à thyristors

Une installation de levage est entraînée par un moteur à courant continu dont la variation de vitesse est assurée par un pont monophasé à thyristors. On s'intéressera principalement au problème du facteur de puissance de cette installation et aux moyens mis en œuvre pour l'améliorer

I. Étude du pont tout thyristors

Le pont est alimenté par le réseau qui fournit une tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 400V$ et de fréquence 50 Hz.



Les thyristors sont considérés comme parfaits : Th_1 et Th_3 d'une part, Th_2 et Th_4 d'autre part, sont commandés de manière complémentaire avec un retard à l'amorçage noté ψ .

On admet que le courant I_c fourni par le pont à thyristors est parfaitement lissé grâce à l'inductance L_F ($I_c = \text{constante}$).

- 1- Pour $\psi = \pi/3$, représenter sur le document réponse n°1 :
 - la tension u_c à la sortie du pont en indiquant les thyristors passants ;
 - le courant i fourni par le réseau.
- 2- Montrer que, pour une valeur quelconque de ψ la tension moyenne à la sortie du pont a pour expression :

$$U_{Cmoy} = \frac{2}{\pi} \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cos \psi$$

Quel type de fonctionnement obtient-on pour $\psi > \pi/2$ si on parvient, en modifiant le dispositif, à maintenir constant le courant I_c ?

- 3- Application numérique :

Pour $\psi = \pi/3$ et $I_c = 40 \text{ A}$, calculer :

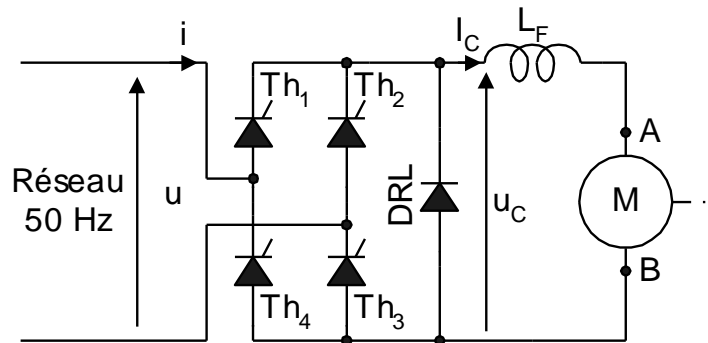
- la tension U_{Cmoy} ;

- la puissance P absorbée par le moteur ;
- la valeur efficace I du courant i prélevé au réseau ;
- la puissance apparente S de l'installation ;

Le facteur de puissance $k = \frac{P}{S}$ de l'installation.

II. Fonctionnement en pont mixte

Afin d'améliorer le facteur de puissance de l'installation, on place à la sortie du pont précédent une diode de «roue libre» D_{RL} .



La tension sinusoïdale du réseau est inchangée ($U = 400 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$).

On admet encore que le courant I_C fourni par le pont à thyristors est parfaitement lissé grâce à L_F .

- 1- Pour un angle de retard à l'amorçage $\psi = \pi/2$, représenter sur le document réponse n°1 :
 - la tension u_C à la sortie du pont, en indiquant les composants passants ;
 - le courant i fourni par le réseau alternatif.
- 2- La tension moyenne à la sortie du pont a pour expression :

$$U_{C\text{moy}} = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \psi)$$

Calculer la valeur de l'angle de retard à l'amorçage ψ donnant $U_{C\text{moy}} = 180 \text{ V}$.

- 3- Montrer que pour une valeur quelconque de ψ la valeur efficace du courant i a pour expression :

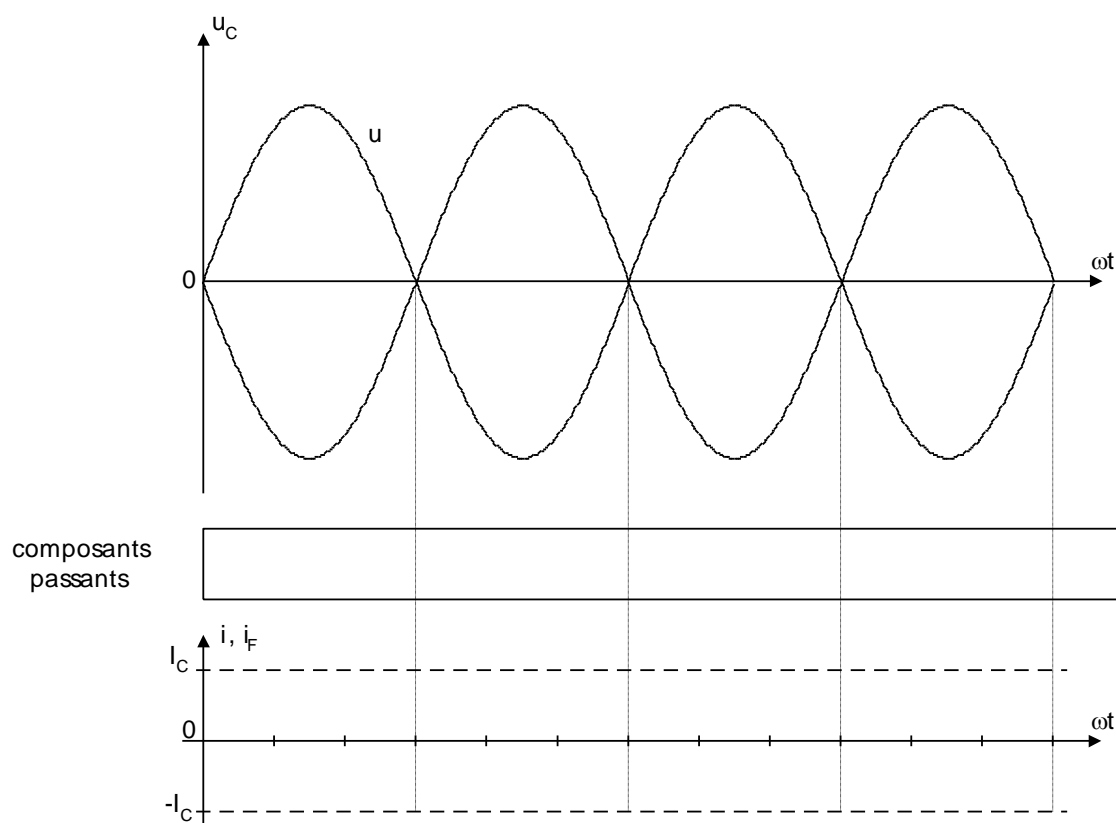
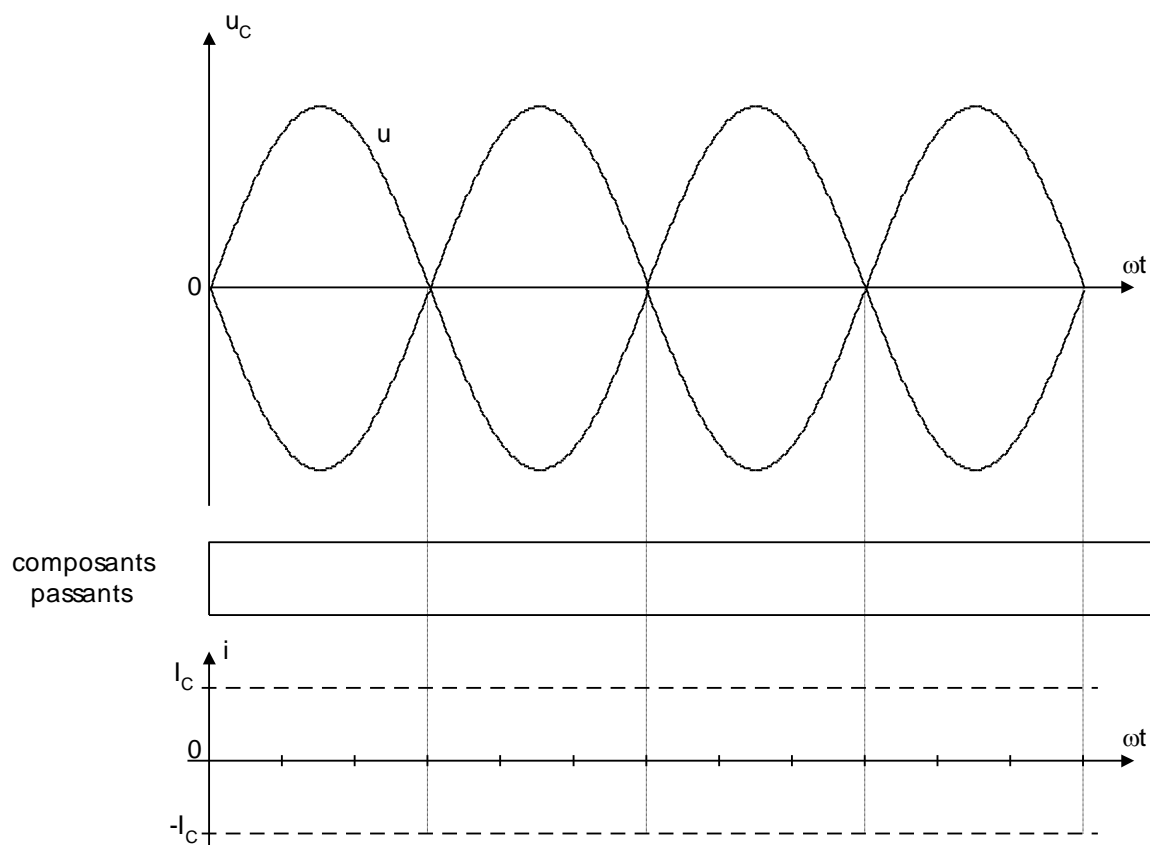
$$I = I_C \sqrt{\frac{\pi - \psi}{\pi}}$$

- 4- Application numérique :

Pour $I_C = 50 \text{ A}$ et $U_{\text{moy}} = 180 \text{ V}$ calculer :

- la puissance P absorbée par le moteur ;
- la valeur efficace I du courant i débité par le réseau ;
- la puissance apparente S mise en jeu par le réseau ;
- le facteur de puissance $k = \frac{P}{S}$ de l'installation.

Ce pont est-il réversible (susceptible de fonctionner en onduleur) ? Justifier votre réponse

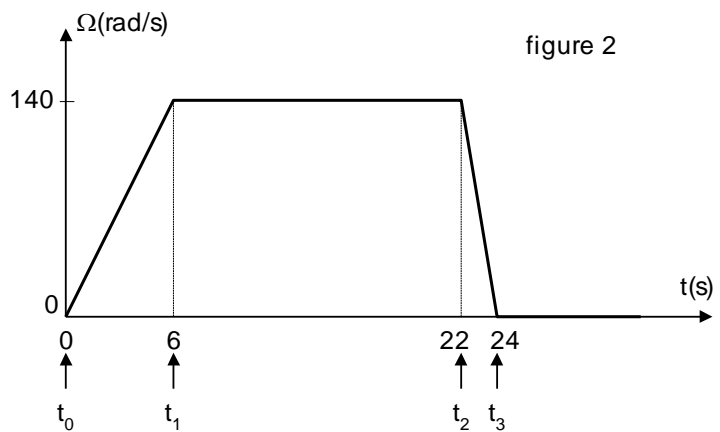
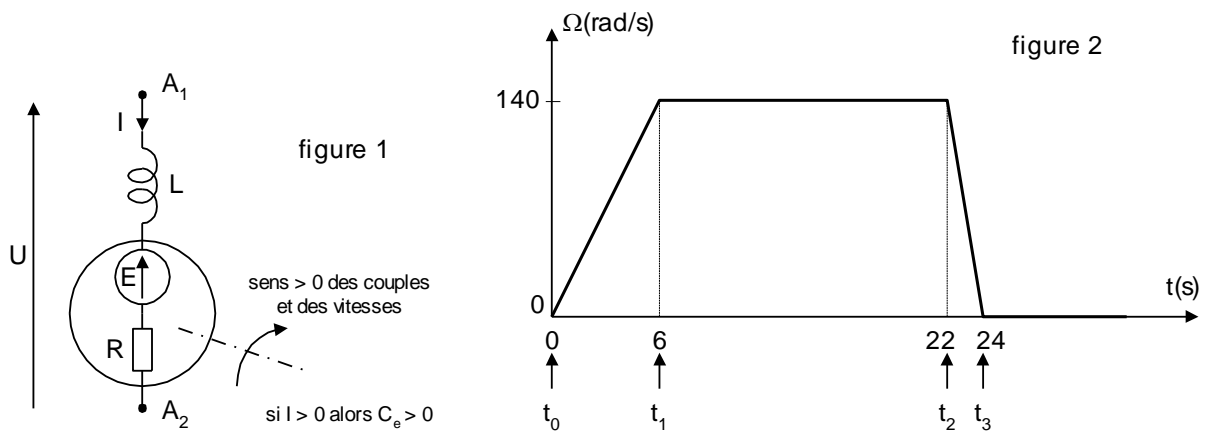
DOCUMENT REPONSE N°1**Partie I****Partie 2**

Exercice N°2: Etude d'une commande d'une machine CC

Une machine CC à excitation indépendante constante, (figure 1) est accouplée à une charge imposant un couple résistant indépendant de la vitesse. Le couple de pertes est également constant. On néglige la réaction d'induit. Le moteur désaccouplé de sa charge à une fréquence de rotation de $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ lorsque le circuit d'induit (inductance de lissage et induit) est alimenté sous 143 V en absorbant $0,9 \text{ A}$.

Une mesure de la résistance totale du circuit d'induit (inductance de lissage comprise) a donné $1,2 \Omega$.

- A vitesse stable dans la plage de variation utilisée, (0 - 1600 tr/min) la machine absorbe 16 A .
- Un essai de mise en vitesse de l'ensemble est effectué à courant constant d'intensité 25 A . Au bout de $4,8 \text{ s}$ la fréquence de rotation atteint 1200 tr/min .
- La machine, associée à sa charge, doit dans l'utilisation qui en est faite avoir une évolution de vitesse $\Omega(t)$ satisfaisant au cycle de la figure 2. Au delà de 24 s , un système mécanique maintient l'ensemble à l'arrêt.



I. ETUDE DE LA MACHINE

- 1- Décrire et justifier une méthode de mesure permettant de déterminer la résistance totale du circuit d'induit.
- 2- Exprimer la relation liant le moment du couple électromagnétique T_{em} à l'intensité du courant d'induit I . Calculer la constante de proportionnalité à partir de l'essai à vide.
- 3- Calculer la valeur numérique du moment du couple électromagnétique lorsque l'ensemble machine-charge a atteint un fonctionnement stable. Quelle est alors la valeur du moment du couple résistant total ?
- 4- Écrire la loi fondamentale de la dynamique des systèmes en rotation en faisant apparaître le couple électromagnétique T_{em} et le couple résistant total T_r incluant le couple de pertes considéré constant. Calculer le moment d'inertie J de l'ensemble en utilisant l'essai de mise en vitesse.

II. COMMANDE DE LA MACHINE

Le convertisseur pilotant la machine doit permettre à celle-ci de suivre l'évolution de vitesse $\Omega(t)$ décrite sur la figure 2.

On désigne par ΔT_1 l'intervalle de temps entre t_0 et t_1 , ΔT_2 celui entre t_1 et t_2 , ΔT_3 celui entre t_2 et t_3 .

1- Dans les trois intervalles de temps ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 :

- Calculer les valeurs numériques de $\frac{d\Omega}{dt}$.
- En appliquant l'équation fondamentale de la dynamique, calculer T_{em} ; en déduire I .
On prendra $J = 0,31 \text{ kg.m}^2$.
- Préciser le mode de fonctionnement de la machine à courant continu.
Dans la suite du problème on prendra les valeurs de courant suivantes :
 - intervalle ΔT_1 : $I = 24 \text{ A}$
 - intervalle ΔT_3 : $I = -8 \text{ A}$.
- Compléter le tableau suivant :

	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3
$\frac{d\Omega}{dt} \text{ (rad/s}^2\text{)}$			
$T_{em} \text{ (Nm)}$			
$I \text{ (A)}$			
Fonctionnement			

5- Calculer numériquement les valeurs de U , tension aux bornes du moteur, aux instants :

$t_0, t_1 - \varepsilon, t_1 + \varepsilon, t_2 - \varepsilon, t_2 + \varepsilon, t_3$ avec $\varepsilon \ll 1 \text{ s}$.

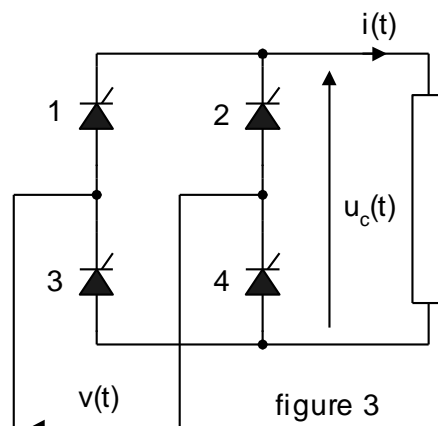
Instants	t_0	$t_1 - \varepsilon$	$t_1 + \varepsilon$	$t_2 - \varepsilon$	$t_2 + \varepsilon$	t_3
$U \text{ (V)}$						
$E \text{ (V)}$						

6- Tracer les graphes de la fonction $T_{em}(t)$ et de la correspondance entre C_e et Ω .

7- Dans l'intervalle ΔT_2 où la vitesse est constante, déterminer la puissance utile P_u et le moment du couple utile T_u sur l'arbre de la machine.

III. ETUDE DES CONVERTISSEURS

Le pont représenté figure 3 alimente une charge appelant un courant pouvant être considéré parfaitement lissé. On néglige les régimes transitoires. On note α l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.



- 1- Pour des angles α de $\frac{\pi}{3}$ et de $\frac{2\pi}{3}$ préciser les intervalles de conduction des thyristors et tracer l'allure de la tension $u_c(t)$.
- 2- Calculer la valeur de la tension moyenne en sortie du pont U_c en fonction de V et de α .
- 3-
 - a. Calculer la puissance moyenne P fournie par le pont à la charge en fonction de α et de I_0 valeur moyenne de $i(t)$ sachant que $V = 220V$.
 - b. En déduire, en fonction de α , la nature de la charge alimentée par le pont.
- 4- La machine étudiée en **1.** et **2.** est alimentée par deux convertisseurs P1 et P2. Dessiner un schéma de principe d'alimentation de la machine. Préciser et justifier pour chacun des intervalles ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 étudiés en **2.**, le convertisseur en fonctionnement.
- 5- Ce montage entraîne des contraintes. Préciser lesquelles (en 5 lignes au maximum).

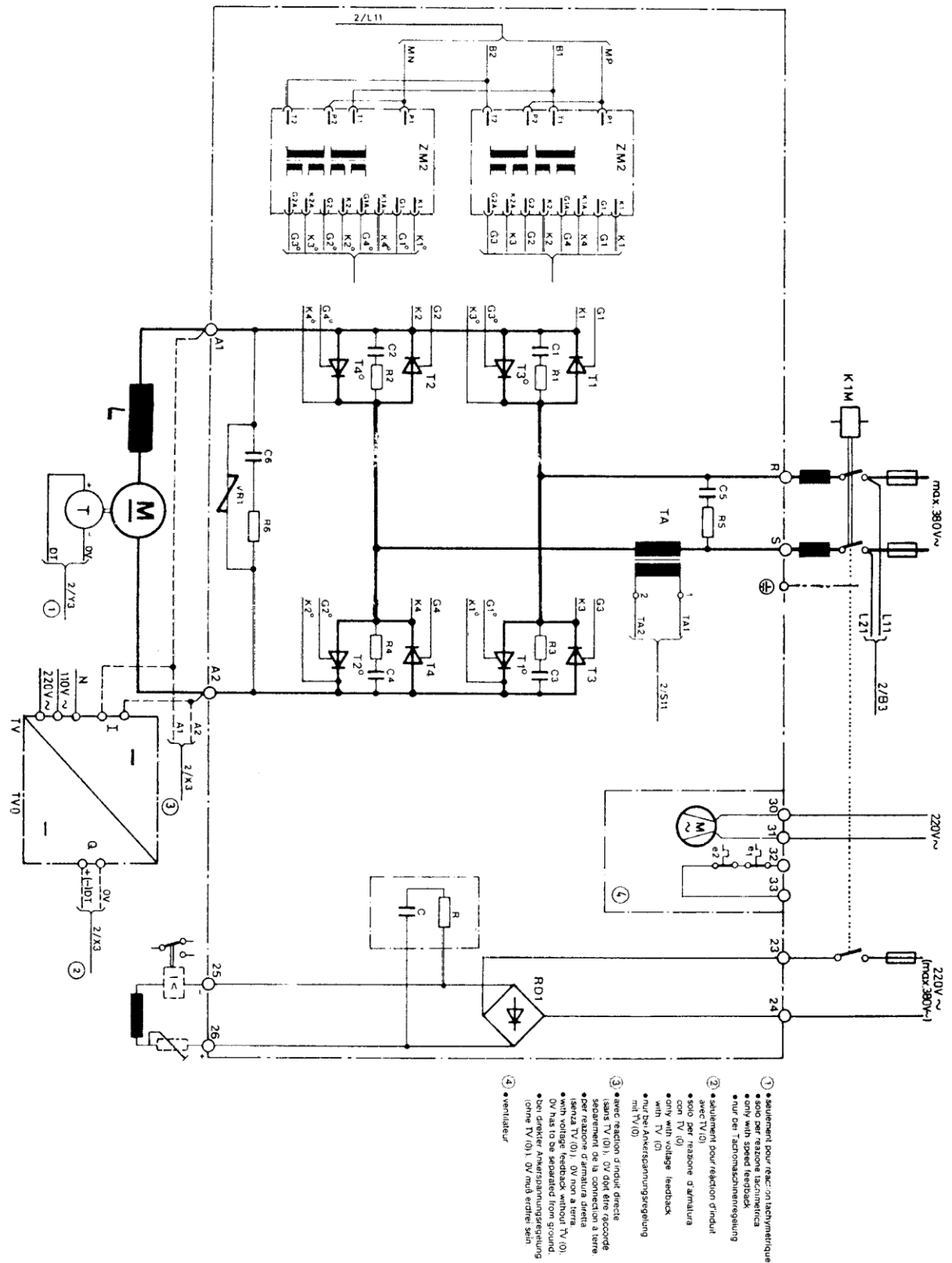
IV. SOLUTION INDUSTRIELLE

Le montage réel est représenté figure 4.

- 6- Montrer que le circuit de puissance constitue une réponse à la question **4.** On indiquera les thyristors constituant chaque convertisseur P1 et P2.
- 7- Calculer les angles de retard à l'amorçage α aux instants cités à la question **2.** Préciser à chaque fois le pont concerné (P1 ou P2).

Instants	t_0	$t_1 - \varepsilon$	$t_1 + \varepsilon$	$t_2 - \varepsilon$	$t_2 + \varepsilon$	t_3
Signe de I						
$U(V)$						
α						
Pont concerné						

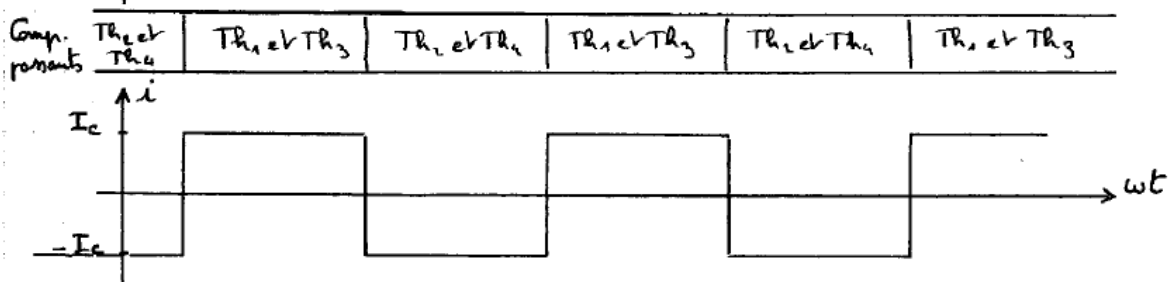
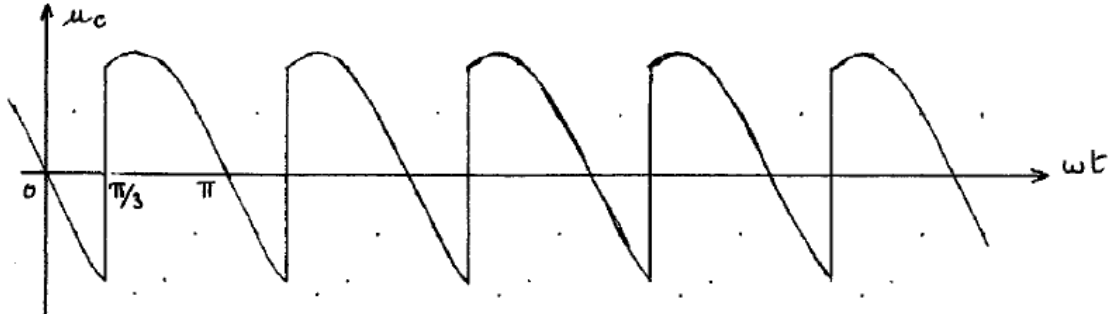
- 8- Pour chacune des phases de fonctionnement, établir la relation $\cos(\alpha) = f(t)$. Quel est le type de commande qui vous semble le mieux satisfaire au problème posé (α proportionnel à la tension continue de commande - commande simple - ou $\cos(\alpha)$ proportionnel à la tension de commande - commande en arc cosinus) ? Pourquoi ?



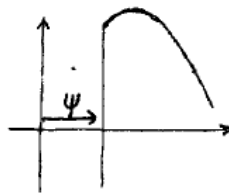
Corrigé Exercice 1

Deuxième partie : Etude du pont tout thyristors.

21 - le pont est en conduction ininterrompue donc u_c s'appuie à chaque instant sur $\pm u$.



22 - Calcul de la tension moyenne à la sortie du pont



$$U_{cmoy} = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\psi+\pi} U\sqrt{2} \sin \theta d\theta \quad \text{en posant } \theta = wt$$

$$U_{cmoy} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \left[-\cos \theta \right]_{\psi}^{\psi+\pi}$$

$$\text{donc } U_{cmoy} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \cdot 2 \cos \psi \Rightarrow \left\{ U_{cmoy} = \frac{2U\sqrt{2}}{\pi} \cos \psi \right.$$

Si on a $\psi > \frac{\pi}{2}$ en maintenant la conduction ininterrompue, on a alors $U_{cmoy} < 0$.

{ le pont fonctionne en onduleur assisté'.

23 - Application numérique. Pour $\psi = \frac{\pi}{3}$ et $I_c = 40A$ avec $U = 400V$.

$$\text{tension } \Rightarrow U_{cmoy} = \frac{2 \cdot 400 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cos \frac{\pi}{3} \Rightarrow \left\{ U_{cmoy} = 180V \right.$$

$$\text{Puissance absorbée par le moteur : } P = U_{cmoy} \cdot I_c \Rightarrow \left\{ P = 7200W \right.$$

$$\text{Valeur efficace I du courant i : } I = I_c \Rightarrow \left\{ I = 40A \right.$$

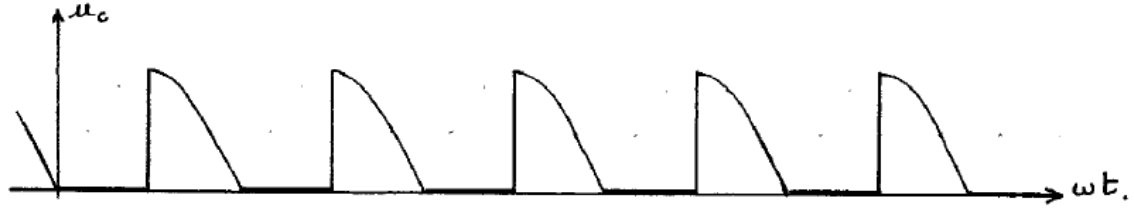
$$\text{Puissance apparente } S = U \cdot I \Rightarrow \left\{ S = 16000VA \right.$$

$$\text{Facteur de puissance de l'installation : } \cos \phi = P/S \Rightarrow \left\{ \cos \phi = 0,45 \right.$$

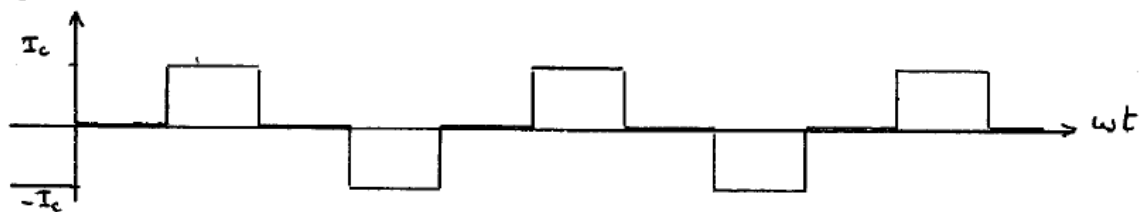
Troisième partie : Fonctionnement en pont mixte.

Alors le courant I_c emprunte le passage par la diode D_{RL} lors des passages de la tension réseau en négatif.

31- Pour $\psi = \frac{\pi}{2}$



Composants	D_{RL}	TR_1 TR_3	D_{RL}	TR_2 TR_4	D_{RL}	TR_1 TR_3	D_{RL}	TR_2 TR_4	D_{RL}	TR_1 TR_3	D_{RL}
------------	----------	------------------	----------	------------------	----------	------------------	----------	------------------	----------	------------------	----------



32- Calcul de ψ : $U_{cmoy} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \psi)$. On veut $U_{cmoy} = 180V$

$$\Rightarrow 180 = \frac{400\sqrt{2}}{\pi} [1 + \cos \psi] \Rightarrow \cos \psi \approx 0 \Rightarrow \psi = \frac{\pi}{2}$$

33- Calcul de la valeur efficace de i :

on définit: $I^2 = I_c^2 \frac{\pi - \psi}{\pi} \Rightarrow I = I_c \sqrt{\frac{\pi - \psi}{\pi}}$

34- Application numérique. Pour $I_c = 50A$ et $U_{cmoy} = 180V$

La puissance P absorbée par le moteur est: $P = 180 \cdot 50 \Rightarrow P = 9000W$

La valeur efficace $I = 50 \sqrt{\frac{\pi - \frac{\pi}{2}}{\pi}} \Rightarrow I = 35,4A$.

La puissance apparente $S = U \cdot I \Rightarrow S = 14140VA$.

le facteur de puissance $\cos \phi = \frac{P}{S} \Rightarrow \cos \phi = 0,636$.

35- Ce pont ne permet pas à U_{cmoy} d'être négative. Il ne peut donc pas fonctionner en onduleur.

Corrigé exercice 2

1. Etude de la machine :

1.1. Mesure de la résistance totale du circuit d'induit : La présence du système collecteur-balais introduit un contact glissant qui nécessite un courant de mesure suffisant, voisin du courant nominal (ce qui exclut l'utilisation d'un ohmmètre). On effectue, rotor calé, une méthode VAmétrique à froid et on fait la correction de température : $R_{\text{chaud}} = R_{\text{froid}} \cdot \frac{\theta_{\text{chaud}} + 234,5}{\theta_{\text{froid}} + 234,5}$. La mesure est la moyenne de relevés obtenus après avoir fait tourner légèrement l'induit à la main. Le passage du courant sera le plus bref possible pour éviter tout échauffement notable.

1.2. $C_e = k I$; $k = 0,903 \text{ Wb}$

1.3. $C_e = 14,5 \text{ Nm}$; $C_r = -14,5 \text{ Nm}$.

1.4. $J \frac{d\Omega}{dt} = C_e + C_r$; $J = 0,309 \text{ kg.m}^2$

2. Commande de la machine :

2.1.

	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3
$\frac{d\Omega}{dt} \text{ (rad/s}^2\text{)}$	23,3	0	-70
$C_e \text{ (Nm)}$	21,7	14,5	-7,2
$I \text{ (A)}$	24,1	16	-7,97
Fonctionnement	Moteur	Moteur	Générateur

2.2.

Instants	t_0	$t_1 - \varepsilon$	$t_1 + \varepsilon$	$t_2 - \varepsilon$	$t_2 + \varepsilon$	t_3
U (V)	28,8	155	146	146	117	-9,6
E (V)	0	126	126	126	126	0

2.3. Graphes $C_e(t)$ et $\Omega(C_e)$

$C_e(t)$ est constitué de trois segments de droite parallèles à l'axe des temps :

De $t = 0$ à 6 s , $C_e = 21,7 \text{ Nm}$; de $t = 6$ à 22 s , $C_e = 14,5 \text{ Nm}$; de $t = 22$ à 24 s , $C_e = -7,2 \text{ Nm}$.

$\Omega(C_e)$ est constitué de trois segments de droite :

De $\{21,7\text{Nm}, 0 \text{ rad/s}\}$ à $\{21,7\text{Nm}, 140 \text{ rad/s}\}$; de $\{21,7\text{Nm}, 140 \text{ rad/s}\}$ à $\{-7,2\text{Nm}, 140 \text{ rad/s}\}$; de $\{-7,2\text{Nm}, 140 \text{ rad/s}\}$ à $\{-7,2\text{Nm}, 0 \text{ rad/s}\}$.

2.4. $P_u = 1,92 \text{ kW}$; $C_u = 13,7 \text{ Nm}$.

3. Etude des convertisseurs :

3.1. Sur une période de $v(t)$ et pour $\alpha = \pi/3$:

- Th2 et Th3 conduisent pour $0 \leq \omega t \leq \pi/3$ et $u_c(t) = -v(t)$
- Th1 et Th4 conduisent pour $\pi/3 \leq \omega t \leq \pi + \pi/3$ et $u_c(t) = v(t)$
- Th2 et Th3 conduisent pour $\pi + \pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi$ et $u_c(t) = -v(t)$

Sur une période de $v(t)$ et pour $\alpha = 2\pi/3$:

- Th2 et Th3 conduisent pour $0 \leq \omega t \leq 2\pi/3$ et $u_c(t) = -v(t)$

- Th1 et Th4 conduisent pour $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi + 2\pi/3$ et $u_c(t) = v(t)$
- Th2 et Th3 conduisent pour $\pi + 2\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi$ et $u_c(t) = -v(t)$

3.2. $U_c = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cdot \cos \alpha \rightarrow U_c = 0,9 V \cos \alpha$

3.3.

3.3.1. $P_{\text{moy}} = 198 I_0 \cos \alpha$

3.3.2. Pour $0 \leq \alpha \leq \pi/2$: la charge absorbe de la puissance électrique : la MCC fonctionne en moteur.

Pour $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$: la charge fournit de la puissance électrique : la MCC fonctionne en génératrice.

3.4. Montage « tête-bêche » des deux convertisseurs. Le pont « tête » fonctionne en redresseur durant ΔT_1 et ΔT_2 . Le pont « bêche » fonctionne en onduleur durant ΔT_3 .

3.5. Les deux ponts ne doivent pas fonctionner en simultané. On doit assurer le blocage de la commande du pont qui ne doit pas fonctionner.

4. Solution industrielle :

4.1. P1 est constitué des thyristors T_1, T_2, T_3 et T_4

P2 est constitué des thyristors $T_1^\circ, T_2^\circ, T_3^\circ$ et T_4° .

4.2.

Instants	t_0	$t_1 - \varepsilon$	$t_1 + \varepsilon$	$t_2 - \varepsilon$	$t_2 + \varepsilon$	t_3
Signe de I	>0	>0	>0	>0	<0	<0
U(V)	28,8	155	146	146	117	-9,6
α	81,6°	38,5°	42,5°	42,5°	126°	87,2°
Pont concerné	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₂	P ₂

4.3. Durant ΔT_1 : $198 \cos \alpha = k\Omega + 28,8 \rightarrow \cos \alpha = 0,106 t + 0,145$

Durant ΔT_2 : $198 \cos \alpha = 146 \rightarrow \cos \alpha = 0,74$

Durant ΔT_3 : $198 \cos \alpha = -k\Omega + 9,6 \rightarrow \cos \alpha = 0,319 t - 7,6$

La commande la mieux adaptée est la commande en arccosinus car il est simple de produire des rampes de tension. Si la tension de commande est une fonction affine du temps, alors $\cos \alpha$ sera elle aussi une fonction affine du temps.