

CORRIGE DE L'EXAMEN DE COMMANDE DES MACHINES A COURANT CONTINU

UN AUTRE MODE DE COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU A DEUX BRAS DE PONT

Le schéma de la figure 1 représente une chaîne indirecte de conversion de l'énergie utilisant un pont triphasé à six diodes, portant le nom de convertisseur amont, suivi d'une interface, et enfin d'un convertisseur continu-continu quatre quadrants portant le nom de convertisseur aval. Le convertisseur aval alimente un moteur à courant continu à aimants qui entraîne une charge mécanique dont la caractéristique importe peu. On sait simplement que le moteur fournit son couple nominal lorsqu'il tourne à sa vitesse nominale. La commande du convertisseur est une commande classique en H.

La chaîne de conversion ne fonctionne plus et vous êtes appelé pour effectuer un diagnostic général et proposer une solution grâce à laquelle la chaîne de conversion pourra être à nouveau utilisée.

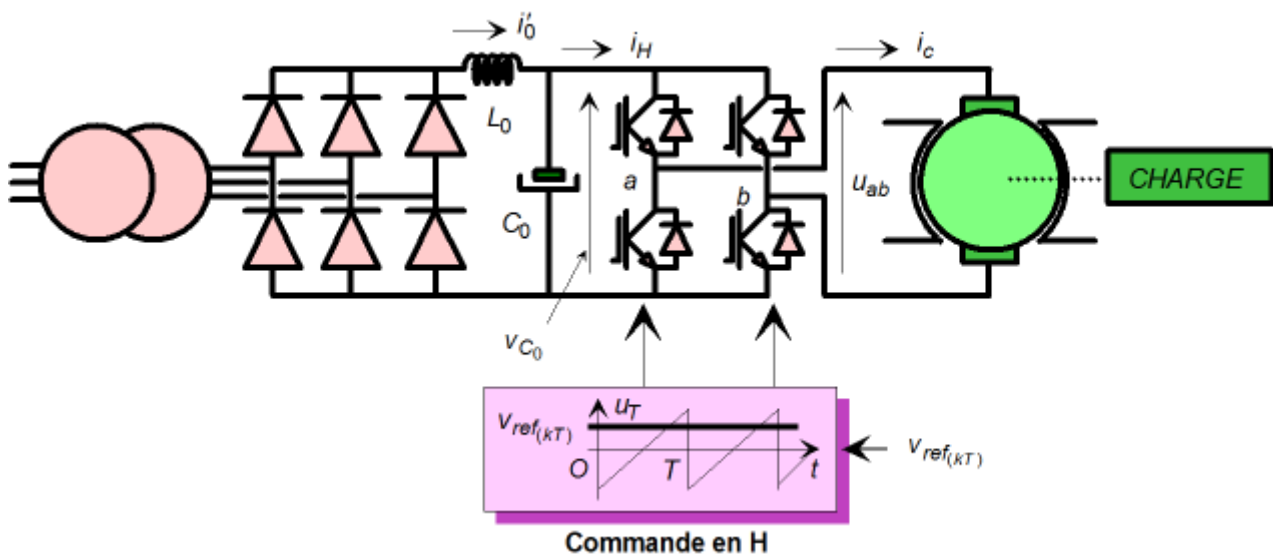


Figure 1 : Une chaîne indirecte de conversion de l'énergie avec commande en H.

- On reconnaît, sur le schéma de la figure 1, cinq sous ensembles :
 - ❑ Un moteur à courant continu dont les valeurs nominales de la tension d'alimentation et du courant absorbé sont notées respectivement U_n et I_n , et sa charge. U_n vaut 110V, I_n vaut 30A et la valeur de l'inductance de l'induit de la machine à courant continu est 1 mH.
 - On sait, compte tenu de la puissance de la machine à courant continu qu'il n'est pas forcément nécessaire de placer, en série avec le moteur, une inductance de filtrage du courant absorbé par celui-ci. En effet, la fréquence de fonctionnement du convertisseur est alors suffisamment élevée pour que l'inductance de l'induit du moteur suffise à limiter l'ondulation du courant qu'il absorbe à une valeur acceptable.
 - ❑ Un convertisseur continu-continu quatre quadrants à commande en H ,

- ❑ Une interface comportant une inductance dont le coefficient d'inductance propre est L_0 et la résistance R_{L_0} , et un condensateur de capacité C_0 . La valeur de L_0 est 25 mH , la valeur de R_{L_0} est $73,3\text{ m}\Omega$, et la valeur de C_0 est $6,6\text{ mF}$.
 - ❑ Un pont à six diodes.
 - ❑ Un transformateur caractérisé par sa tension nominale secondaire U_{2n} , son courant nominal I_{2n} , et sa tension de court-circuit u_{cc} . U_{2n} vaut 120V , I_{2n} vaut $19,5\text{ A}$ et u_{cc} vaut $3,5\%$.
- On rappelle l'expression de la valeur moyenne de la tension engendrée par un pont à six diodes fonctionnant en conduction continue :

$$\langle u_c \rangle = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2n} \cdot \left[k - 1,16 \cdot u_{cc} \cdot i_0^* \right]$$

Les paramètres contenus dans cette expression ont la signification suivante :

- ❑ U_{2n} est la valeur nominale de la tension composée au secondaire du transformateur,
 - ❑ k est le facteur de stabilité du réseau d'alimentation, dont la valeur minimale peut atteindre $0,9$,
 - ❑ u_{cc} est la tension de court-circuit du transformateur,
 - ❑ i_0^* est la valeur moyenne du courant I_0 circulant dans l'inductance L_0 , réduite à sa valeur maximale I_{0M} ,
- On rappelle également l'expression de la valeur moyenne de la tension v_{C_0} aux bornes du condensateur :

$$U = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2n} \cdot \left[k - 1,16 \cdot u_{cc} \cdot \frac{I_0}{I_{0M}} \right] - R_{L_0} \cdot I_0$$

- On suppose en outre que les composants de l'interface située entre les deux convertisseurs sont tels que les ondulations de la tension v_{C_0} et courant i_{L_0} sont négligeables. Ces grandeurs se confondent donc avec leurs valeurs moyennes.

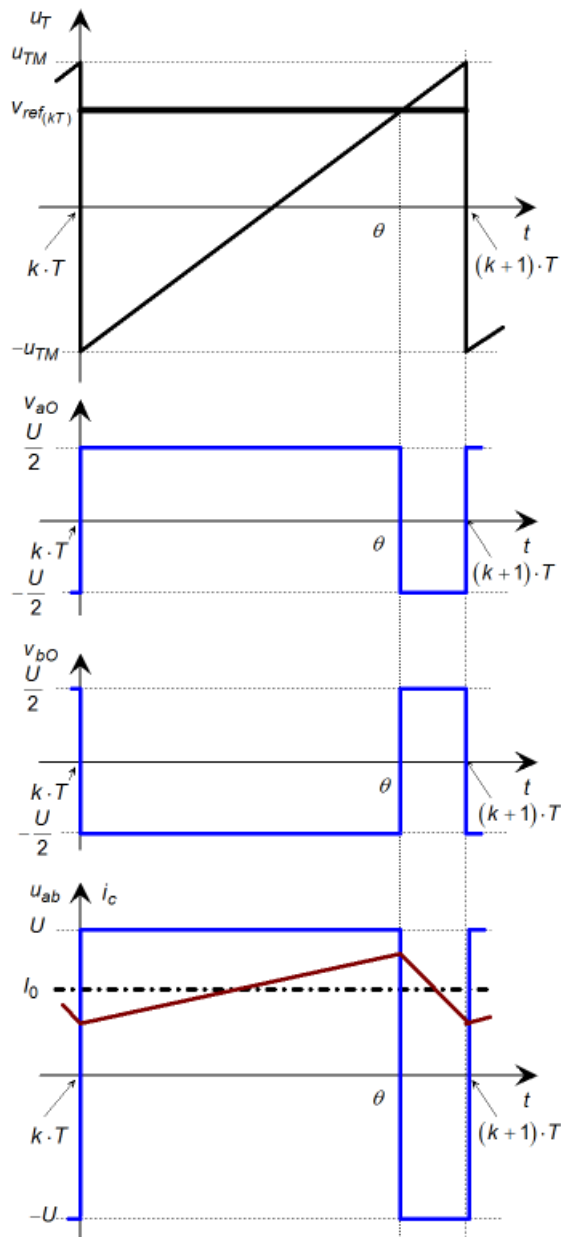
Compte tenu de la puissance de la chaîne de conversion de l'énergie, la valeur de la fréquence de fonctionnement du convertisseur est de 16 kHz . Le rapport cyclique de fonctionnement du hacheur η est par définition égale à $\frac{\theta}{T}$, θ étant défini sur les figures de l'annexe 1 et T étant la période de fonctionnement du hacheur. On considérera que la forme d'onde du courant absorbé par le moteur est constituée de segments de droite.

- On rappelle également que l'ondulation du courant absorbé par le moteur, est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta i_c = \frac{2 \cdot U}{L \cdot f'} \cdot \eta \cdot [1 - \eta]$$

où U est la valeur moyenne de la tension aux bornes du condensateur de l'interface, L la valeur de l'inductance dans le circuit de la machine (ici l'inductance propre de l'induit), f' la fréquence de fonctionnement du convertisseur aval, et η la valeur de son rapport cyclique de fonctionnement.

1. VERIFICATION DE LA PERTINENCE DU DIMENSIONNEMENT DE LA CHAÎNE DE CONVERSION.



- Compléter la partie de **gauche** de la feuille jointe en annexe 1, en représentant les formes d'ondes des tensions v_{aO} , v_{bO} et u_{ab} , ainsi que du courant i_c absorbé par le moteur. Ces deux dernières courbes sont associées au même système d'axes, et la valeur moyenne du courant absorbé par le moteur est représentée en traits mixtes. Il faut noter que l'ondulation du courant absorbé par le moteur n'a aucune raison d'être négligée puisqu'elle existe, comme cela sera vu ultérieurement. On rappelle que O est le point milieu du bus continu.

Voir ci-contre

- Calculer la valeur moyenne de la tension u_{ab} engendrée par le convertisseur aval.

$$\langle u_c \rangle = U \cdot [2\eta - 1]$$

- Pourquoi le rapport cyclique maximal de fonctionnement du convertisseur aval est-il limité à une valeur maximale que l'on note η_M ?

A cause des temps morts nécessaires à la commande des interrupteurs situés dans des demi-bras de pont superposés, et pour éviter le phénomène de focalisation.

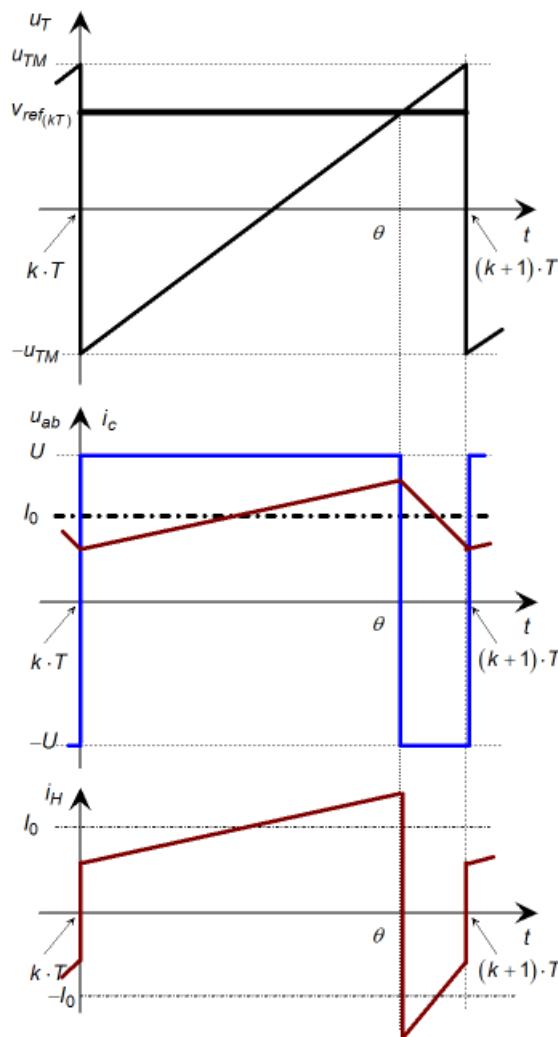
- Représenter, en utilisant la partie de **gauche** de l'annexe 2 et en tenant compte de l'ondulation du courant absorbé par le moteur, la forme d'onde du courant i_H absorbé par le hacheur à sa source.

Voir ci-après.

- Montrer que la valeur moyenne de ce courant se met sous la forme suivante :

$$\langle i_H \rangle = I_0 \cdot [2\eta - 1]$$

Il suffit de faire le calcul, ou de constater que, le courant étant formé de segments de droites, certaines surfaces sont égales.



- En déduire la valeur maximale de la valeur moyenne du courant i_H , que l'on note I_{HM} , en fonction de la valeur maximale du rapport cyclique η_M , et de la valeur maximale de la valeur moyenne du courant consommée par le moteur I_{0M} , qui est égale à I_n .

$$I_{HM} = I_n \cdot [2\eta_M - 1]$$

- Montrer que la valeur moyenne maximale I'_{0M} du courant i'_0 circulant dans l'inductance L_0 se met sous la forme :

$$I'_{0M} = I_n \cdot [2\eta_M - 1]$$

Evident puisque la valeur moyenne du courant circulant dans le condensateur est nulle.

- En déduire la valeur moyenne de la tension aux bornes du condensateur lorsque le facteur de stabilité du réseau est égal à 1, que le moteur absorbe son courant nominal, et que le rapport cyclique de fonctionnement du hacheur est maximal. Quelle en est la valeur numérique compte tenu des données du problème ?

$$U = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2n} \cdot \left[1 - 1,16 \cdot u_{cc} \cdot \frac{I'_{0M}}{I_{0M}} \right] - R_{L_0} \cdot I'_{0M}$$

$$U = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2n} \cdot [1 - 1,16 \cdot u_{cc}] - R_{L_0} \cdot I_n \cdot [2\eta_M - 1]$$

$$U = 153,7 \text{ V}$$

- Donner l'expression analytique de la valeur maximale de l'ondulation du courant absorbé par le moteur.

$$[\Delta i_c]_M = \frac{U}{2 \cdot L \cdot f'}$$

- Quelle est, compte tenu des données numériques du problème, la valeur maximale de l'ondulation du courant que le moteur absorbe. Cette valeur vous semble-t-elle correcte ?

$$[\Delta i_c]_M = 4,8 \text{ A} = 16\% I_n$$

Valeur tout à fait acceptable, puisqu'inférieure à 30% du courant nominal.

2. LE DIAGNOSTIC. LA SOLUTION.

Selon les considérations et les calculs menés plus haut, le dimensionnement des éléments de la chaîne de conversion a été fait correctement.

Par ailleurs, un test sur les composants de puissance (qui sont ici des IGBT) a montré que ceux-ci semblent être en parfait état de fonctionnement. Par contre, un examen plus approfondi de la commande, qui utilisait un microcontrôleur 16 bits et un EPROM externe, montre que les bits de commande ne sont plus produits. Une inspection plus approfondie montre que la fenêtre permettant d'effacer l'EPROM par ultraviolets n'est pas masquée.

- *A quoi peut-on attribuer le fait que la commande ne fonctionne plus ?*
 A l'action des UV de la lumière ambiante.

Pour moderniser le dispositif de commande, on envisage d'utiliser un processeur de signal 32 bits et, tant qu'à faire, d'utiliser une commande diphasée au lieu et place de la commande en H, conformément au schéma de la figure 2.

Dans une commande diphasée, le bras de pont associé à la phase a est commandé par la tension échantillonnée $v_{ref(kT)}$ et le bras de pont associé à la phase b est commandé par la tension $[-v_{ref(kT)}]$.

Le rapport cyclique η de fonctionnement du hacheur est encore donné par $\frac{\theta}{T}$, θ étant associé à la tension $v_{ref(kT)}$ et $[T - \theta]$ étant associé à $[-v_{ref(kT)}]$, comme le montre clairement la partie de droite de l'annexe 1.

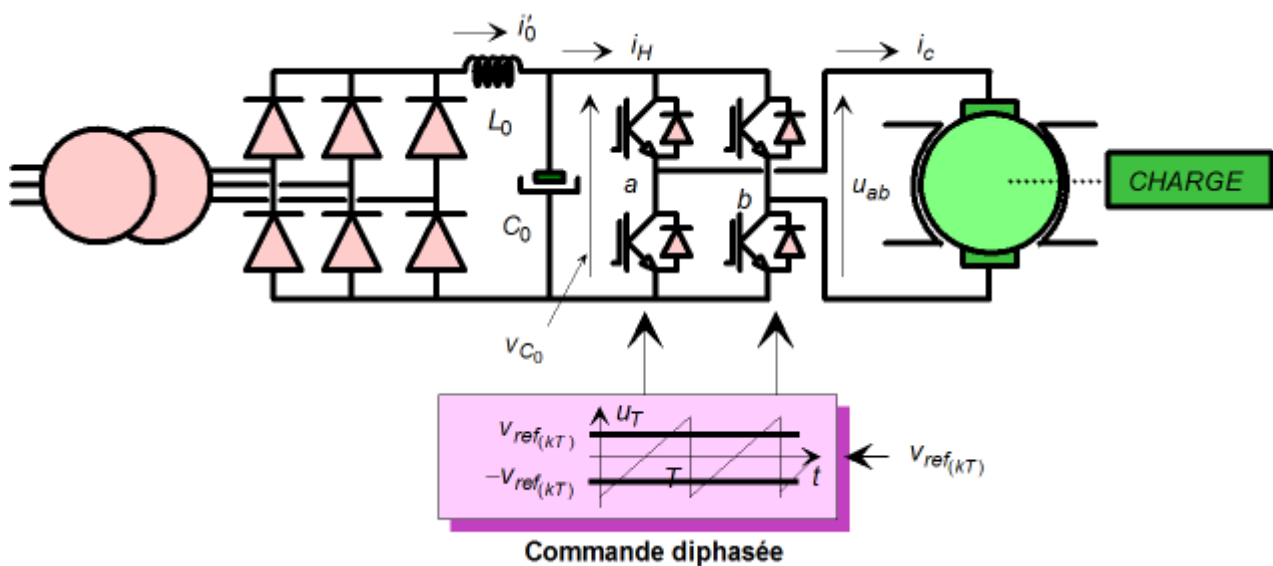
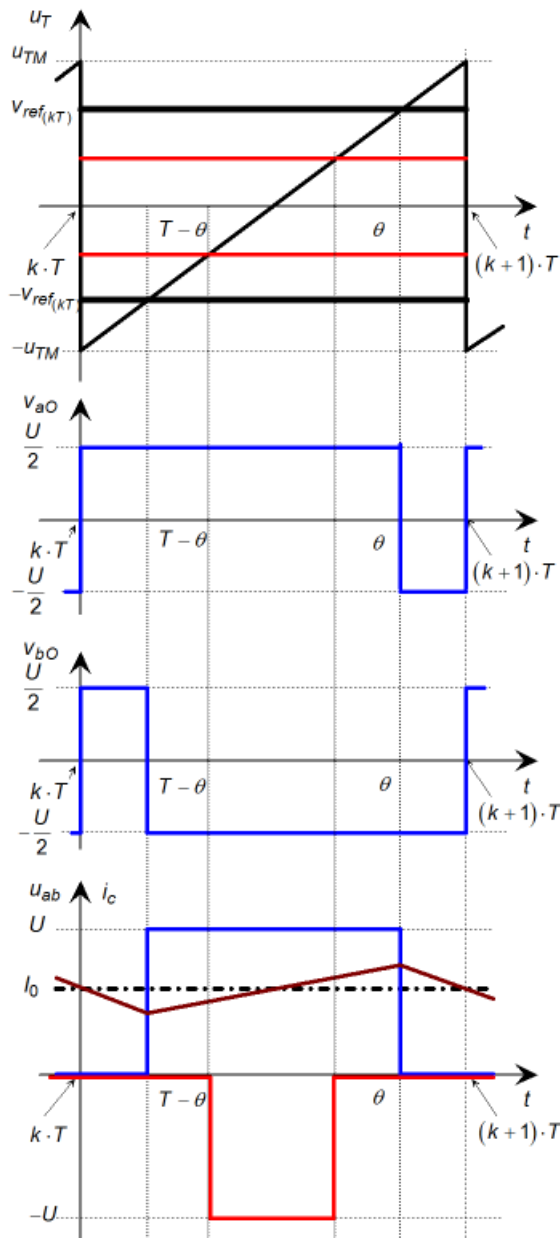


Figure 2 : Une chaîne indirecte de conversion de l'énergie avec commande diphasée.



- Compléter la partie de **droite** de la feuille jointe en annexe 1, en représentant les formes d'ondes des tensions v_{aO} , v_{bO} et u_{ab} , ainsi que du courant i_c absorbé par le moteur. Ces deux dernières courbes sont associées au même système d'axes, et la valeur moyenne du courant absorbé par le moteur est représentée en traits mixtes. Il faut noter que l'ondulation du courant absorbé par le moteur n'a aucune raison d'être négligée puisqu'elle existe, comme cela a été vu précédemment. On rappelle que O est le point milieu du bus continu.

Voir figure ci-contre.

- Calculer la valeur moyenne de la tension u_{ab} engendrée par le convertisseur aval.

$$\langle u_c \rangle = U \cdot [2\eta - 1]$$

- Représenter sur le même graphe que précédemment, la forme d'onde de la tension u_{ab} associée à une tension de référence $v_{ref(kT)}$ négative, dont la valeur absolue est la moitié de celle qui est représentée sur l'annexe 1.

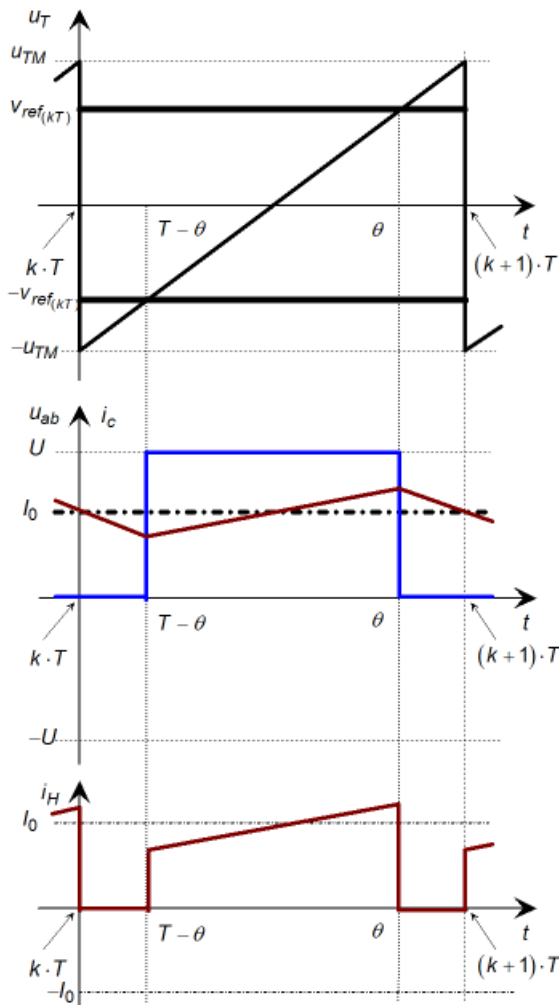
Voir en rouge figure ci-contre.

- Pourquoi le rapport cyclique maximal de fonctionnement du convertisseur aval est-il limité à une valeur maximale que l'on note η_M ?

Toujours à cause des temps morts nécessaires à la commande des interrupteurs situés dans des demi-bras de pont superposés, et pour éviter le phénomène de focalisation.

- Représenter, en utilisant la partie de **droite** de l'annexe 2 et en tenant compte de l'ondulation du courant absorbé par le moteur, la forme d'onde du courant i_H absorbé par le hacheur à sa source.

Voir figure ci-après.



- Montrer que la valeur moyenne de ce courant se met sous la forme suivante :

$$\langle i_H \rangle = I_0 \cdot [2\eta - 1]$$

Il suffit de faire le calcul, ou de constater que, le courant étant formé de segments de droites, certaines surfaces sont égales.

- En déduire la valeur maximale de la valeur moyenne du courant i_H , que l'on note I_{HM} , en fonction de la valeur maximale du rapport cyclique η_M , et de la valeur maximale de la valeur moyenne du courant consommée par le moteur I_{0M} , qui est égale à I_n .

$$I_{HM} = I_n \cdot [2\eta_M - 1]$$

- Montrer que la valeur moyenne maximale I'_{0M} du courant i'_0 circulant dans l'inductance L_0 se met sous la forme :

$$I'_{0M} = I_n \cdot [2\eta_M - 1]$$

Evident puisque la valeur moyenne du courant circulant dans le condensateur est nulle.

- Ce nouveau mode de commande remet-il en question le dimensionnement de la chaîne de conversion de l'énergie ?

Non.

3. PROPRIETES DE LA COMMANDE DIPHASEE.

3.1. Propriétés vis-à-vis du filtrage du courant côté moteur.

- Rappeler l'approximation qu'il convient de faire pour le calcul de l'ondulation du courant côté continu ?

Après avoir écrit l'équation de fonctionnement de la « maille moteur », on lui applique le théorème de la valeur moyenne.

$$u_{c(t)} = R \cdot i_{c(t)} + L \cdot \frac{di_{c(t)}}{dt} + E_M$$

$$\langle u_{c(t)} \rangle = R \cdot \langle i_{c(t)} \rangle + E_M$$

On écrit ensuite que le courant est la somme de sa valeur moyenne et de sa composante alternative, puis on néglige le terme $[R \cdot i_{c\approx(t)}]$ devant les autres termes du membre de droite.

$$u_{c(t)} = R \cdot [\langle i_{c(t)} \rangle + i_{c_s(t)}] + L \cdot \frac{di_{(c)}}{dt} + E_M$$

$$u_{c(t)} = \langle u_{c(t)} \rangle + L \cdot \frac{di_{(c)}}{dt}$$

- Déterminer, en fonction de U , de la valeur L de l'inductance dans le circuit de la machine (ici l'inductance propre de l'induit), de la fréquence f' de fonctionnement du convertisseur aval, et de la valeur η de son rapport cyclique de fonctionnement, l'expression de Δi_c pour une commande diphasée.

On se place entre les abscisses $[T - \theta]$ et θ , et compte tenu de :

$$\langle u_c \rangle = U \cdot [2\eta - 1] \qquad 2U \cdot [1 - \eta] = L \cdot \frac{di_{(c)}}{dt}$$

$$\int_{T-\theta}^{\theta} 2U \cdot [1 - \eta] \cdot dt = L \cdot \Delta i_{(c)} \qquad 2U \cdot [1 - \eta] \cdot [\theta - [T - \theta]] = L \cdot \Delta i_{(c)}$$

$$\Delta i_{(c)} = \frac{2U}{L \cdot f'} \cdot [1 - \eta] \cdot [2\eta - 1]$$

- En déduire la valeur maximale $[\Delta i_c]_M$ de Δi_c . Donner la valeur de $\eta_{[\Delta i_c]_M}$ correspondante.

$$[\Delta i_c]_M = \frac{U}{4 \cdot L \cdot f'} \qquad \eta_{[\Delta i_c]_M} = \frac{3}{4}$$

- Que peut-on en déduire en ce qui concerne la valeur numérique de la valeur maximale de l'ondulation du courant absorbé par le moteur, compte tenu des données du problème ?

L'ondulation maximale du courant absorbé par le moteur est deux fois plus faible que dans le cas d'un hacheur en H. Ici 2,4 A soit $[8\% I_n]$, ce qui est excellent pour le moteur.

3.2. Propriétés vis-à-vis du moteur et de la nature de son refroidissement ?

- A quelle vitesse le moteur tourne-t-il lorsque l'ondulation du courant qu'il absorbe est maximale ?

$$\langle u_c \rangle = U \cdot [2\eta - 1] \qquad \eta_{[\Delta i_c]_M} = \frac{3}{4} \qquad \langle u_c \rangle_{\eta_{[\Delta i_c]_M}} = \frac{U}{2}$$

et le moteur tourne à la moitié de sa vitesse nominale et donc est correctement refroidi.

- Quelle est la valeur de l'ondulation du courant absorbé par le moteur lorsque celui-ci est à l'arrêt ?

$$\eta_{[\langle u_c \rangle = 0]} = \frac{1}{2} \qquad [\Delta i_c]_{[\eta=0]} = 0$$

Pas d'échauffement supplémentaire du moteur à l'arrêt.

- Que peut-on en conclure quant au type de moteur requis lorsque l'on utilise une commande diphasée ?

On peut utiliser un moteur sans ventilation extérieure, ce qui est très utile en robotique.

3.3. Propriétés vis-à-vis du dimensionnement de l'interface entre les deux convertisseurs.

- *En observant simultanément les formes d'ondes du courant i_H selon que l'on utilise une commande en H ou une commande diphasée, que peut-on en conclure en ce qui concerne le dimensionnement du condensateur de l'interface ?*

L'ondulation de ce courant étant deux fois moins élevée, la capacité du condensateur de l'interface pourra être divisée par 2 pour une même qualité de filtrage de la tension à ses bornes.

3.4. Complexité de la mise en œuvre d'une commande diphasée.

- *Est-il plus simple ou plus compliqué de mettre en œuvre une commande en H ou une commande diphasée ?*

La programmation est sensiblement la même.

4. CHOIX DEFINITIF.

- *Alors, commande en H ou commande diphasée ?*

La commande diphasée s'impose de toute manière en forte puissance parce que le coût du filtrage du courant consommé par le moteur peut être élevé en basse fréquence.

Dans le cas présent, c'est au choix du concepteur.

NOM : LABORNE

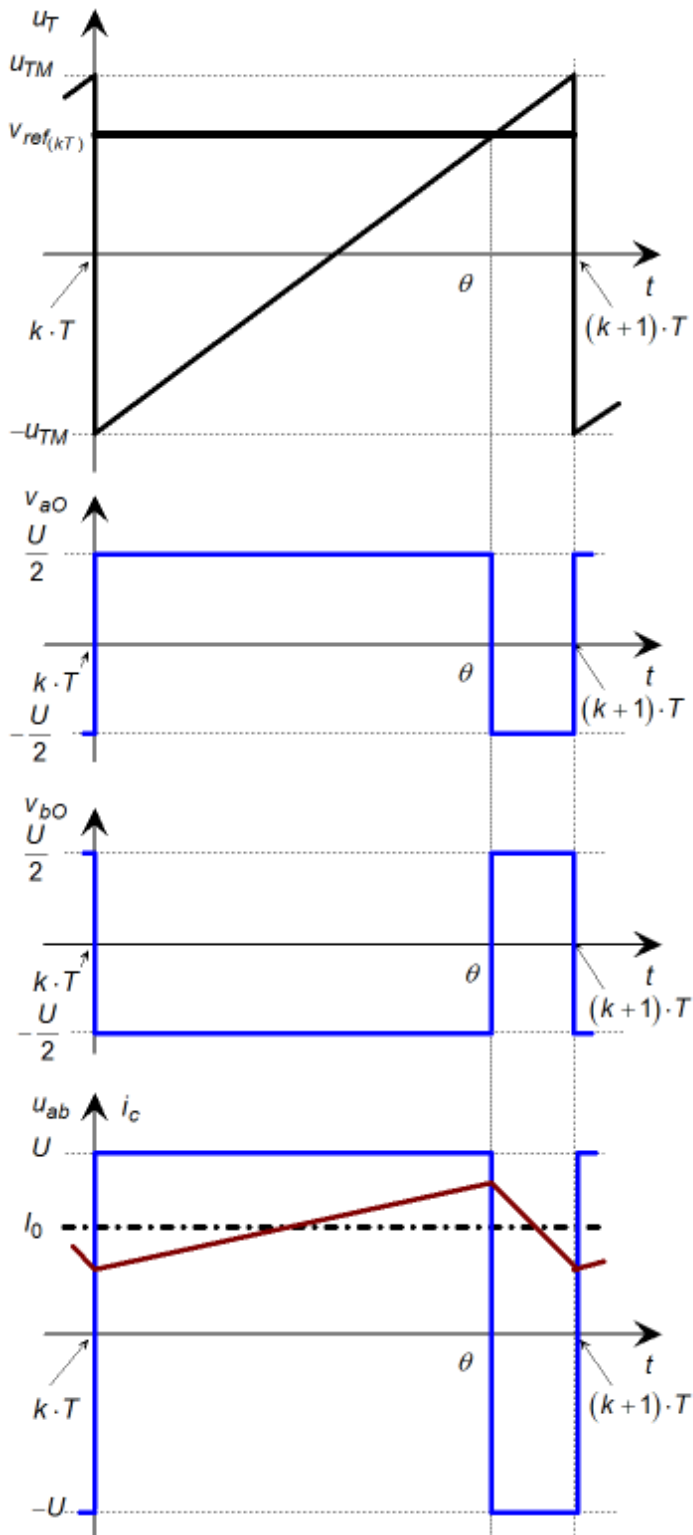
Prénom : Hervé

Classe : ESME Sudria

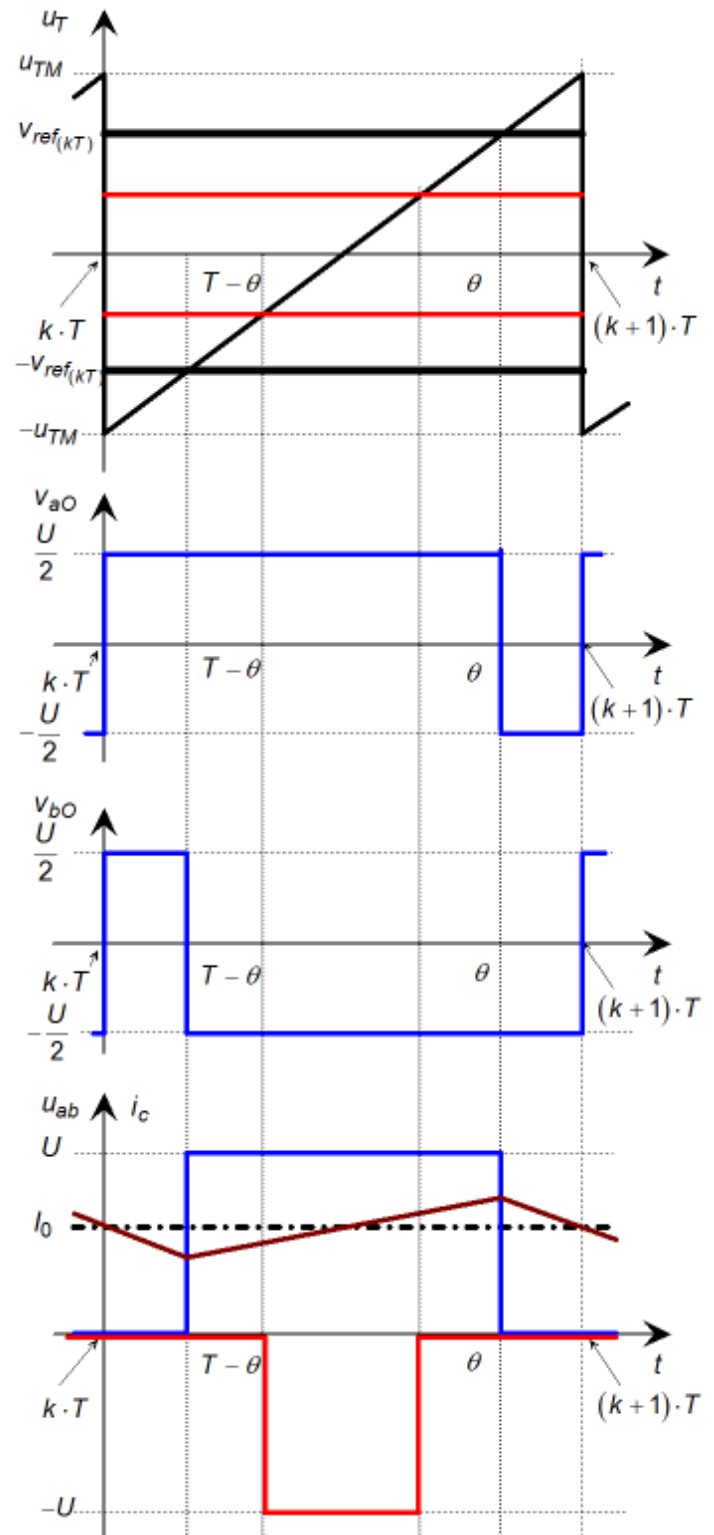
ANNEXE 1

à rendre avec la copie

Commande en H



Commande diphasée



NOM : LABORNE

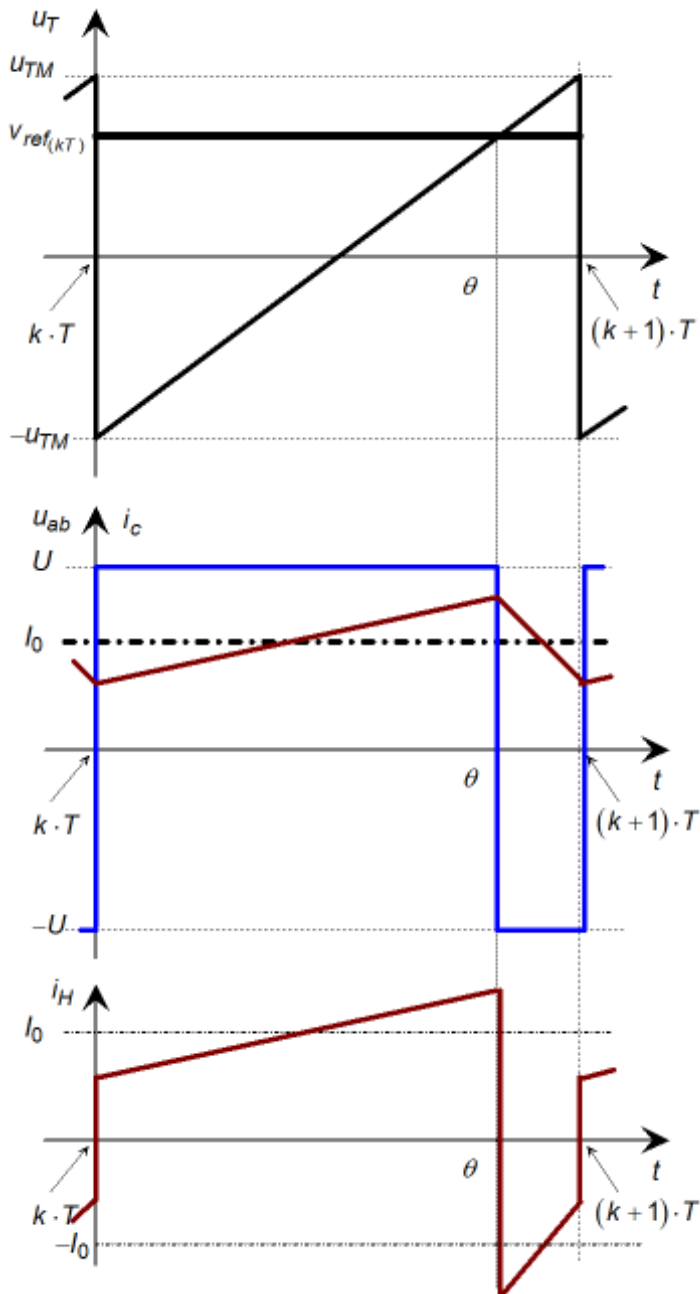
Prénom : Hervé

Classe : ESME Sudria

ANNEXE 2

à rendre avec la copie

Commande en H



Commande diphasée

