

Note sur la commande des moteurs Maxon à commutation électronique

Les moteurs **Maxon** à commutation électronique (EC) sont des machines synchrones qui, une fois associées à leur électronique de commande, deviennent équivalentes à des moteurs à courant continu à aimants permanents. Leur construction est cependant différente de celle des moteurs DC classiques à aimants en ce sens que le bobinage est réalisé sur le stator tandis que, pour les moteurs classiques, il est réalisé sur le rotor – Figure 1. Ceci évite l'utilisation parfois problématique de systèmes collecteur - balai.

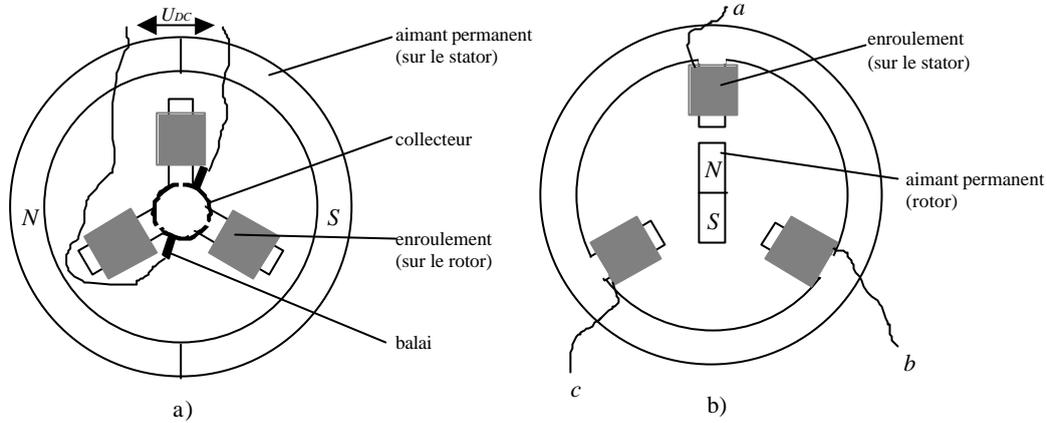


Figure 1 Moteur DC classique (a) et moteur DC à commutation électronique (b)

Pour une position donnée du rotor, la mise en mouvement résulte de l'alimentation de deux phases statoriques, celles-ci créant un champ magnétique quasiment en quadrature avec le champ de l'aimant rotorique (ce qui assure un couple de démarrage maximum). Pour entretenir le mouvement du rotor, il faut bien sûr faire tourner le champ statorique en alimentant successivement toutes les paires de phases du moteur (le champ tourne par bonds de 60°). Pour un sens de rotation donné, c'est donc la position du rotor qui impose le choix approprié des 2 phases à alimenter.

L'alimentation successive des phases est assurée par un onduleur de tension (qui joue le rôle de collecteur des moteurs DC classiques) – Figure 2.

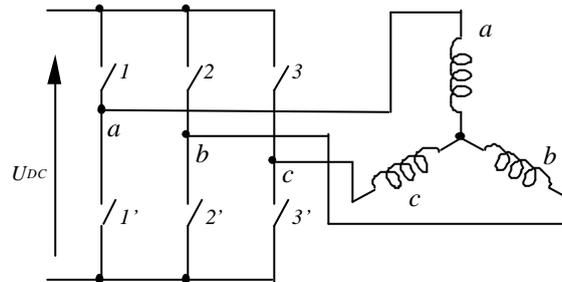


Figure 2 Alimentation des moteurs à commutation électronique

Commande des interrupteurs à semiconducteurs. Commande en pleine onde

Il est évident que les commutations des interrupteurs constituant l'onduleur dépendent de la position du rotor. L'indication de celle-ci est générée par un codeur qui, pour les moteurs dont on dispose, est formé de 3 capteurs à effet Hall (solidaires du stator) et d'un aimant de commande (solidaire du rotor). Ces capteurs (H_1, H_2, H_3), disposés à 120°, délivrent six combinaisons de signaux à chaque tour du rotor qui servent à commander les six interrupteurs de l'onduleur alimentant le stator (Figure 3.a). Pour assurer la meilleure orientation possible (aussi proche que possible de 90°) entre les champs statorique et rotorique, les positions de commutation sont décalées de 30° de part et d'autre de la position idéale correspondant à l'orientation du champ statorique pour la combinaison des deux enroulements de phase correspondant (Figure 3.b).

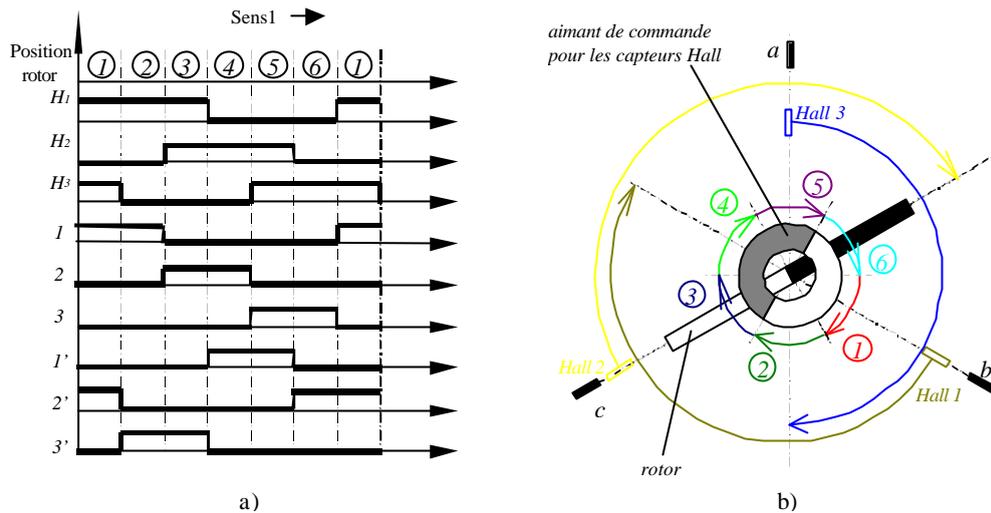


Figure 3 Signaux des capteurs et la commande des interrupteurs (a) et disposition des capteurs Hall, d'aimant de commande et du rotor

Cette disposition a bien pour conséquence que le couple sera maximum à la position médiane du secteur concerné et que sa diminution sera raisonnable (14%) en approchant de la position de commutation.

Pour entraîner le rotor dans le sens horlogique, il faut commander les 6 interrupteurs suivant la séquence présentée à la Figure 3.a. On observe que 2 interrupteurs conduisent simultanément (celui du haut et celui du bas appartiennent à des bras différents), que chaque interrupteur est autorisé à conduire sur un intervalle de 120° ($1/3$ de la période électrique) et qu'il n'y a jamais de commutation successive entre 2 interrupteurs d'un même bras (il n'est donc pas nécessaire de prévoir de temps morts entre chaque changement de paires d'interrupteurs en conduction).

Pour entraîner le moteur dans le sens anti-horlogique, il faut changer le sens de rotation du champ magnétique, ce qui revient à inverser le sens du courant circulant dans les enroulements du stator. Ainsi, partant d'une position donnée (par exemple, la position 1 de la Figure 3.a), pour entraîner le moteur dans le sens horlogique, il faut commander les interrupteurs 1-2' (le courant est alors positif dans l'enroulement *a* et négatif dans l'enroulement *b*), tandis que pour entraîner le moteur dans le sens anti-horlogique, il faut fermer les interrupteurs 2-1' (le courant est alors négatif dans l'enroulement *a* et positif dans l'enroulement *b*). Cette opération revient donc à inverser la polarité de la tension d'alimentation des phases *a* et *b*.

On constate que de point de vue de la commande des interrupteurs, le démarrage dans l'autre sens de rotation équivaut à faire un saut de 180° (Figure 4).

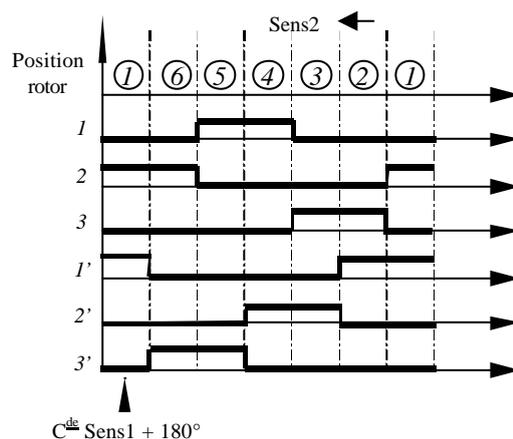


Figure 4 Synthèse de la commande à partir des 3 signaux des capteurs Hall avec bit de signe

Pour synthétiser la commande des interrupteurs de telle manière que le moteur puisse démarrer et tourner dans les deux sens de rotation, en plus des signaux des capteurs Hall, nous avons besoin d'un signal supplémentaire qui indique le sens de rotation. Les commandes des interrupteurs, fonction de ces quatre signaux, sont synthétisées ci-après (le signal $S=1$ impose une rotation dans le sens horlogique) :

$$\begin{aligned}
C^{de} 1 &= S \cdot A \cdot \bar{B} + \bar{S} \cdot \bar{A} \cdot B \\
C^{de} 2 &= S \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{S} \cdot \bar{B} \cdot C \\
C^{de} 3 &= S \cdot C \cdot \bar{A} + \bar{S} \cdot \bar{C} \cdot A \\
C^{de} 1' &= S \cdot \bar{A} \cdot B + \bar{S} \cdot A \cdot \bar{B} \\
C^{de} 2' &= S \cdot \bar{B} \cdot C + \bar{S} \cdot B \cdot \bar{C} \\
C^{de} 3' &= S \cdot \bar{C} \cdot A + \bar{S} \cdot C \cdot \bar{A}
\end{aligned}
\tag{1}$$

Contrôle de la vitesse de la machine.

La vitesse de rotation de la machine est proportionnelle à la valeur de la tension appliquée entre les phases du stator. Il est clair que le contrôle de la vitesse doit se faire en agissant sur la valeur de cette tension (Figure 5).

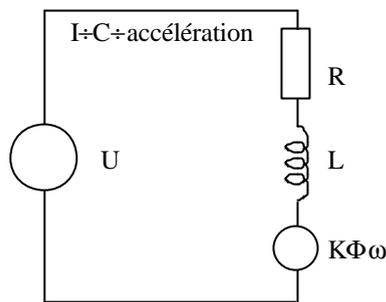


Figure 5 Schéma équivalent d'un moteur EC lorsque deux phases statoriques sont alimentées

Hachage unipolaire

La valeur de cette tension (valeur moyenne) peut être contrôlée par la technique de modulation en largeur d'impulsions (MLI ou PWM). Comme on l'a dit précédemment, chaque interrupteur conduit pendant 1/3 de la période électrique (c.-à-d. : la période de rotation du moteur) et la séquence de commande met en conduction successivement les 3 interrupteurs du haut ainsi que les 3 interrupteurs du bas. En appliquant la technique de modulation soit aux interrupteurs du haut soit aux interrupteurs du bas (il faut bien sûr que la fréquence MLI \gg 1/6 de la fréquence électrique), on peut régler la tension appliquée aux enroulements statoriques et, in fine, la vitesse de rotation du moteur.

La Figure 6 illustre le cas où l'on effectue un découpage MLI sur les transistors bas de l'onduleur, la tension appliquée au moteur est alors, en moyenne, égale à $d U_{DC}$ (d étant le rapport cyclique de la MLI et U_{DC} la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur).

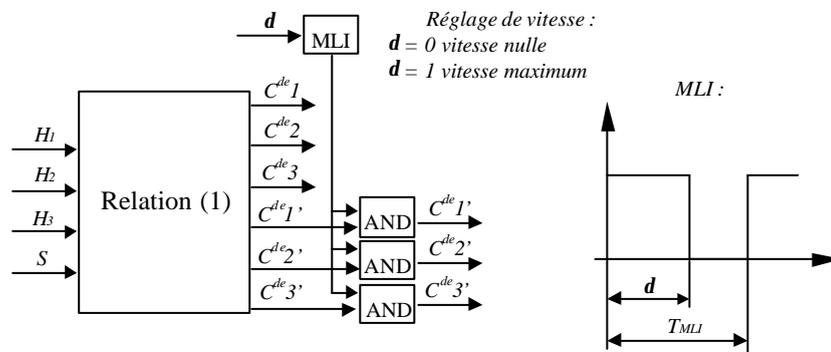


Figure 6 Réglage de vitesse par hachage unipolaire

Hachage bipolaire

Une autre possibilité de régler la valeur moyenne de la tension appliquée au moteur est d'utiliser une commande push-pull sur les deux interrupteurs d'un même bras. On combine la séquence de commande correspondant à **un sens de rotation au choix** au signal MLI contrôlant la tension moyenne appliquée à chaque phase du moteur par la commande complémentaire du transistor du bas et du transistor du haut d'un même bras.

Ainsi pour un rapport cyclique de 0.5, le courant moyen dans les deux enroulements alimentés est nul et le moteur est à l'arrêt. Lorsque le rapport cyclique est supérieur à 0.5 le moteur tourne dans le sens horlogique et lorsqu'il est inférieur à 0.5 il tourne dans le sens anti-horlogique (le bit de sens n'est plus nécessaire).

La tension moyenne appliquée au moteur (sur 2 bornes d'alimentation) vaut alors $2(d \cdot 0.5) U_{DC}$.

Les expressions suivantes reprennent la logique de commande des transistors de l'onduleur lors d'un contrôle de vitesse par hachage bipolaire.

$$\begin{aligned}C^{de}1 &= d \cdot A \cdot \bar{B} + \bar{d} \cdot \bar{A} \cdot B \\C^{de}2 &= d \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{d} \cdot \bar{B} \cdot C \\C^{de}3 &= d \cdot C \cdot \bar{A} + \bar{d} \cdot \bar{C} \cdot A \\C^{de}1' &= d \cdot \bar{A} \cdot B + \bar{d} \cdot A \cdot \bar{B} \\C^{de}2' &= d \cdot \bar{B} \cdot C + \bar{d} \cdot B \cdot \bar{C} \\C^{de}3' &= d \cdot \bar{C} \cdot A + \bar{d} \cdot C \cdot \bar{A}\end{aligned} \tag{2}$$

Il faut remarquer qu'en dépit du fait que le hachage unipolaire réduise les pertes par commutation (puisqu'on effectue un découpage MLI sur 1 seul transistor à la fois), cette technique présente l'inconvénient d'un contrôle non linéaire de la vitesse en fonction du rapport cyclique puisque, pour des rapports cycliques inférieurs au seuil donné, la vitesse est nulle (ce seuil correspond à la limite de conduction lacunaire). Dans la technique de hachage bipolaire, cet inconvénient disparaît.

Notons encore que, comme sur chaque bras de l'onduleur les deux transistors sont commandés de manière complémentaire, il faut assurer des retards (temps morts) entre le blocage d'un transistor et la mise en conduction de l'autre pour éviter de brèves mises en court-circuit de la source d'alimentation (cet aspect sera développé dans l'exemple d'une électronique de commande donné par ailleurs).