

Montage 27 : Systèmes Bouclés

Romain Maccary et Valentin Dumaire

Decembre 2020

1 Asservissement en vitesse d'un moteur à courant continu

1.1 Identification du système en boucle ouverte

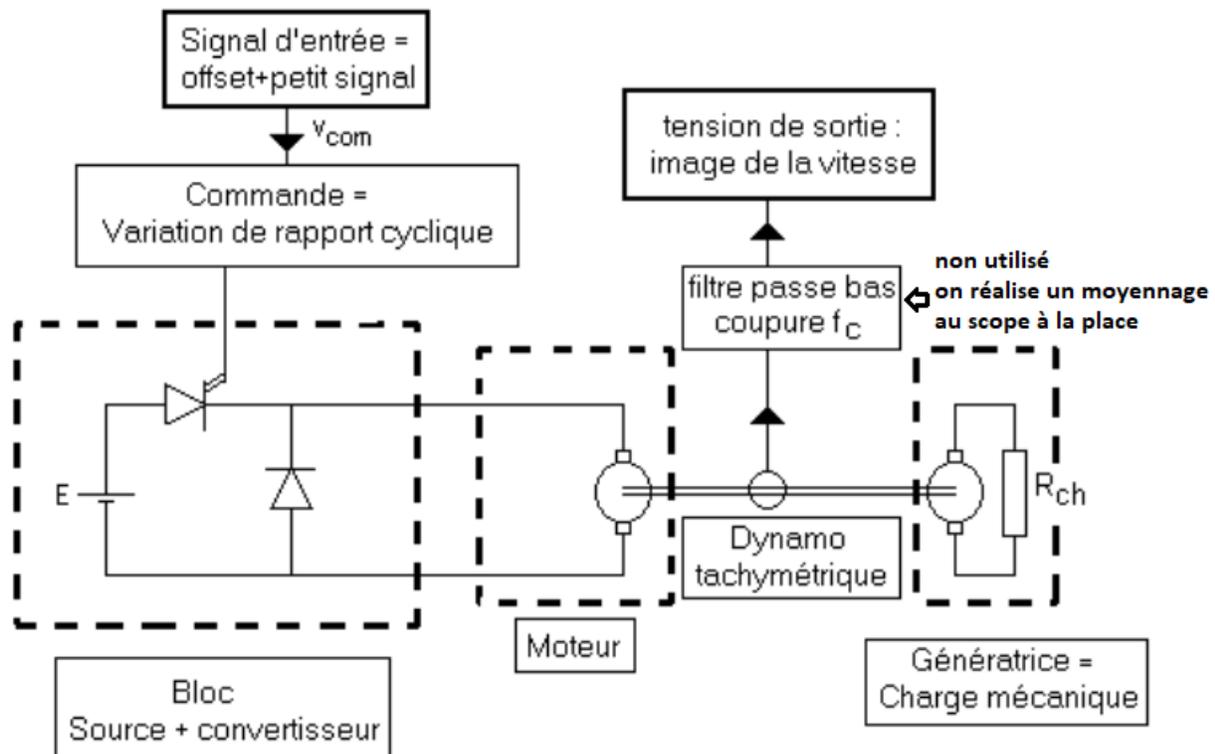


Figure 1: Boucle ouverte du montage

Manipulations à faire en direct le jour du montage :

On se place en boucle ouverte, la plupart des branchements étant effectués au préalable.

Pour mesurer la constante de temps et le gain du moteur, on observe à l'oscilloscope la tension à la sortie de la dynamo tachymétrique, ce qui nous donne une image de la vitesse de rotation du moteur.

Pour observer un signal propre et faire une mesure de qualité, voici les différentes manipulations qu'il faut faire en direct et le discours qui justifie ces manipulations :

- En entrée, envoyer sur le GBF un signal créneau de 5V d'offset et 1V d'amplitude afin de rester dans la plage de réponse linéaire du système.
- Synchroniser sur la voie externe de l'oscilloscope (Menu Trigger)
- Se placer en mode normal (Menu Trigger) pour le niveau de déclenchement du trigger (il faudra bien penser après la mesure à rebasculer en mode auto par la suite)
- Aller dans le Menu Acquire et choisir "Moyennage". Désactiver cette option à la fin de la mesure.
- Placer la référence à 0 du signal en bas de l'écran de l'oscilloscope et augmenter la plage de tension afin que le signal occupe une grande partie de l'écran (prendre garde à ce que les signaux d'entrée et de sortie aient le même nombre de Volts/carreaux)
- Mesurer le temps de réponse à 63 % à l'aide des curseurs. En profiter pour mesurer en même temps le gain du système pour ne pas perdre de temps. Eventuellement baisser la fréquence du signal d'entrée pour bien avoir le régime permanent sur l'oscilloscope.
- Mesurer le gain K en prenant la variation de la tension de sortie sur la tension d'entrée. On peut également décider d'appliquer une tension continue en entrée, de mesurer la tension de sortie et d'en faire le rapport.

Voilà comment faire pour obtenir une mesure précise devant le jury. Maintenant, c'est bien de savoir expliquer pourquoi on procède de cette manière. Voici quelques éléments explicatifs :

- Le signal obtenu en sortie est bruité, de basse fréquence, avec une composante continue importante devant la valeur moyenne du signal. Le réglage du déclenchement dans ce cas n'est pas si évident. Lorsque l'on règle le niveau de déclenchement, il est possible de synchroniser le signal avec n'importe quel

signal de même fréquence que le signal que l'on cherche à visualiser. Ainsi, il est préférable de synchroniser avec un signal de grande amplitude et non bruité. C'est pour cela qu'on choisit de synchroniser sur la voie externe de l'oscilloscope, qui est un créneau d'amplitude 0 à 3V de même fréquence que le signal d'entrée.

- Pour un signal de basse fréquence, en mode auto, l'oscilloscope risque de déclencher prématurément. On passe alors en mode normal et on place le niveau de déclenchement entre les deux valeurs extrêmes du signal. Attention : quand on a fini cette mesure, on rebascule en mode auto car on aura besoin de visualiser des tensions continues, ce qui ne marche pas en mode normal (car l'oscilloscope n'affiche rien en mode normal si le niveau de déclenchement ne se trouve pas entre deux valeurs extrêmes du signal à observer. Ainsi, pour une tension constante, si le niveau de déclenchement n'est pas pile sur la valeur du signal, l'oscilloscope ne déclenche pas et le signal n'apparaît pas à l'écran).

- Le processus de moyennage à l'oscilloscope consiste à conserver plusieurs traces de l'oscilloscope et à en faire la moyenne. Si le bruit est aléatoire, de moyenne nulle (ce qui est le cas ici), alors le bruit disparaît après moyennage. Bien évidemment, il faut penser à désactiver cette option dès qu'on a fini la mesure et qu'on veut observer d'autres signaux.

On trouve $K = 1$ et $\tau = 100ms$ (ce sont des ordres de grandeurs), ce qui permet de calculer les paramètres du correcteur. On donne ici les paramètres qu'on a trouvés sur la M.C.C qu'on a utilisée, il ne faut pas prendre ces valeurs au pied de la lettre, mais ce sont des valeurs qui permettent de faire fonctionner le système en boucle fermée sans problème.

Avant de passer en boucle fermée, on teste l'effet d'une perturbation sur le système. Pour cela, il faut encore une fois s'assurer de déclencher en mode auto, car on va utiliser des tensions continues.

Pour obtenir des tensions continues sur le GBF, on va dans le mode "Utility" et on se met en mode "DC On".

Ensuite, on fait brutalement varier la résistance du potentiomètre placé en sortie. Pour cela, on réalise un court-circuit en plaçant un fil entre la borne noire (potentiel fixe) et la borne rouge (potentiel variable) du potentiomètre. On voit alors la sortie augmenter ou décroître suivant si on a diminué ou augmenté la résistance de sortie (qui joue le rôle de charge mécanique)

1.2 Réglage du correcteur

La fonction de transfert du correcteur, réalisé avec le circuit (déjà monté sur plaquette) ci-dessous, s'écrit

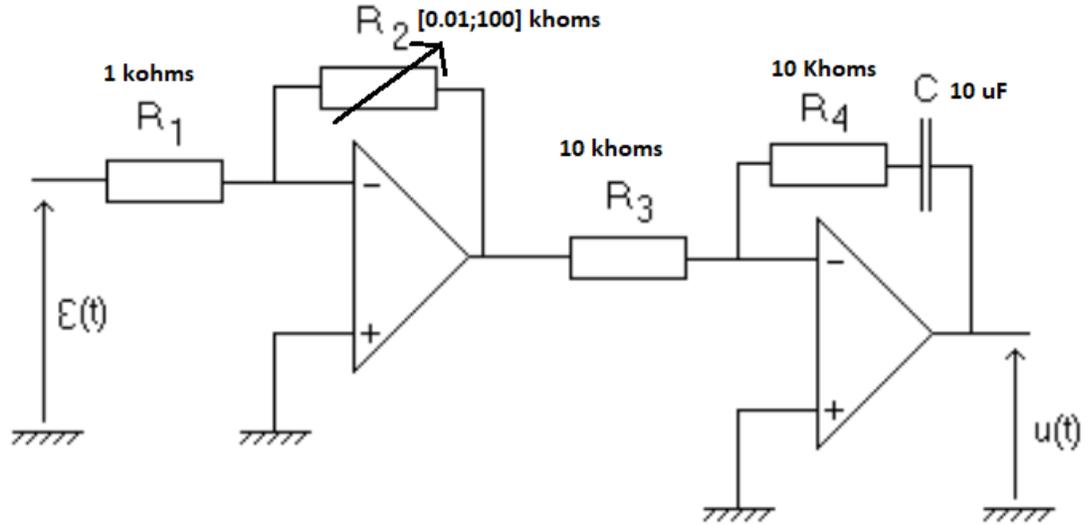


Figure 2: Boucle ouverte du montage

$$C(p) = \frac{R_2}{R_1} * \frac{R_3}{R_4} * (1 + \frac{1}{R_4 C p}) \quad (1)$$

$$K_c = \frac{R_2}{R_1} * \frac{R_3}{R_4} \quad (2)$$

$$\tau_c = R_4 C \quad (3)$$

On prend $R_3 = R_4$ comme cela on peut dissocier le réglage de K_c du réglage de τ . On prend par exemple $R_3 = R_4 = 10k\Omega$ (on prend des résistances importantes pour limiter l'intensité du courant passant dans l'A.L.I). On prend par exemple, $R_1 = 1k\Omega$ et pour R_2 on utilise une des résistances variables sur la plaquette. Au choix on a une résistance variant sur $[0.01k\Omega; 10k\Omega]$ ou $[0.1k\Omega; 100k\Omega]$, on peut donc faire varier notre gain soit sur la plage $[0, 01; 10]$, soit sur la plage $[0, 1; 100]$ selon la résistance variable que l'on choisit. Au départ on prendra $R_2 = R_1$ pour avoir un gain de 1 et ne pas trop modifier le temps de réponse du système par rapport à celui en boucle ouverte. Pour régler

$$\tau_c = \tau = 100ms \quad (4)$$

on peut prendre une capacité de $C = 1\mu F$. Le choix de R_4 et C peut être affiné pour être plus cohérent avec la valeur de τ que l'on a obtenue lors de

l'identification de la boucle ouverte, mais si on prend ces valeurs là, en principe ça devrait marcher sans trop de problème.

1.3 Etude en boucle fermée

Manipulation en direct :

- Il faudra en pratique passer en direct de la boucle ouverte à la boucle fermée. Ça ne présente pas beaucoup de difficulté, mais il faut quand même bien comprendre que l'entrée du système n'est plus l'entrée de la boucle ouverte, donc Le GBF est d'abord relié à l'entrée "+" du comparateur, l'entrée v_{com} est reliée à la sortie du correcteur

- Une fois que ceci est fait, on détermine la plage d'asservissement (plage de tensions d'entrée pour laquelle la sortie est égale à l'entrée). Attention à bien placer les références à zéro des deux signaux aux mêmes niveaux, régler les mêmes échelles de tensions pour les deux signaux pour pouvoir les comparer... Si on n'arrive pas à faire décrocher le moteur, il faut diminuer la tension d'alimentation, ce qui diminue la plage d'asservissement. On peut relier la plage d'asservissement expérimentale à la plage d'asservissement théorique. En effet, la force électromotrice E_m à l'induit du moteur est reliée à la tension d'alimentation par $E_m = \alpha E$ (si on néglige la résistance d'induit). Or on a également $E_m = K_m \Omega$ et donc

$$\Omega = \frac{\alpha E}{K_m} \quad (5)$$

, On en déduit donc que la plage d'asservissement, limitée par $\alpha = 0$ et $\alpha = 1$, s'exprime comme $[0, \frac{E}{K_m}]$, soit en multipliant par la constante multiplicatrice de la génératrice tachymétrique K_g , on peut vérifier que la plage d'asservissement est donnée par

$$V_\Omega \in [0, \frac{K_g E}{K_m}] \quad (6)$$

V_Ω étant la valeur en sortie de la génératrice tachymétrique, que l'on observe en sortie de l'oscilloscope. La valeur numérique de K_g se lit directement sur la génératrice tachymétrique (6V pour 1000 tour/min, à vérifier), la valeur de K_m peut se mesurer.

- Une fois qu'on a déterminé la plage d'asservissement, on se place au milieu de celle-ci et on teste l'effet d'une perturbation sur le système. Pour cela on fait de nouveau varier la charge avec le réhostat. Pour que cela se voit bien, prendre un gain faible au départ pour que le système soit lent et que la sortie mette du temps à raccrocher, sinon on ne voit rien à l'oscilloscope. Ensuite, on peut augmenter le gain pour montrer que le système est plus rapide et donc raccroche plus vite. Pour que l'effet soit visible, il faut penser à augmenter la base de temps (prendre une base de temps de l'ordre de quelques secondes) et à

se mettre en haute résolution. Il faut optimiser la visualisation au scope avant de montrer l'effet pour pouvoir être plus efficace.

Enfin, on mesure la constante de temps du système, on regarde l'influence du gain sur celui-ci. On envoie un créneau dont l'amplitude est comprise dans la plage d'asservissement, on voit que le temps de réponse diminue si on augmente le gain.

2 Contrôle du flux lumineux d'une LED avec une photodiode

2.1 A propos des branchements – A lire surtout en cas de problèmes techniques sur le montage

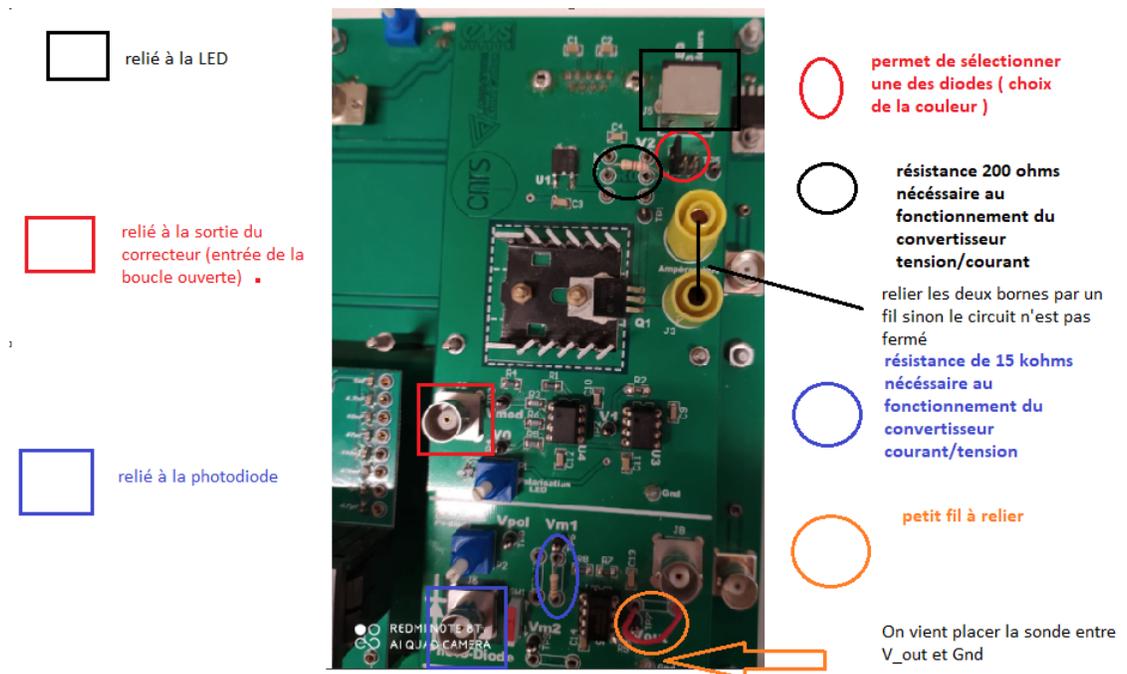


Figure 3: Boucle ouverte du montage

- Vérifier que le cavalier à coté du branchement de la LED est bien mis (sert à régler la couleur de la lumière de la LED que l'on veut utiliser), que toutes les résistances sont bien branchées sur la carte.

-Si la LED ne s'allume pas au moment de la boucle ouverte, même en augmentant l'intensité à l'aide du bouton de réglage de la polarisation de la LED (petit

bitogno bleu), c'est qu'il y a un certainement un composant manquant sur la carte. Il faut également un petit fil au niveau de la sortie.

- On peut utiliser une sonde de tension sur la sortie pour aller à l'oscilloscope, c'est plus sûr pour la carte que d'utiliser un T, pensez à régler l'atténuation de la sonde dans les paramètres de l'oscilloscope dans ce cas (sur certaines sondes, on peut également régler l'atténuation sur la sonde directement).

- On n'étudie pas le montage en boucle ouverte, mais on fabrique un oscillateur en se mettant en boucle fermée et en mettant l'entrée à la masse, on n'a donc pas besoin de GBF pour le début du montage.

- Lorsqu'on cherche à obtenir des oscillations, mettre le bouton réglant la polarisation de la LED à mi-course.

2.2 Obtention des oscillations

Lorsqu'on cherche à obtenir les oscillations, il vaut mieux régler le bouton de polarisation de la LED (on règle le courant incident dans la LED et donc l'intensité lumineuse de la LED) à mi-course. Par contre, lorsqu'on travaillera en boucle fermée, c'est mieux de le mettre à zéro (minimum d'intensité lumineuse) pour que la seule intensité lumineuse vienne de l'entrée du système, c'est-à-dire du GBF.

Le correcteur utilisé est le même que celui de la première partie et le réglage est assez similaire.

Au départ, pour trouver les oscillations, on utilise ce correcteur pour fabriquer un gain variable, on n'utilise donc pas la capacité mais on met une résistance entre les deux bornes extrêmes (sinon le circuit de la branche "R-C" du correcteur n'est pas fermé, ce passage est plus compréhensible avec la maquette sous les yeux).

Ce n'est qu'après avoir trouvé les oscillations qu'on utilise le correcteur en PI en mettant une capacité en série de R_4

On réalise un oscillateur en fermant le système et en mettant l'entrée à la masse. Augmenter le gain, généralement aux alentours de $K_c = 0.1$, on a apparition de l'oscillation (attention au réglage de la polarisation de la LED, si elle est mal réglée à ce moment-là, on risque de louper l'oscillation).

Quand on obtient l'oscillation, on note la valeur de la résistance et on calcule le gain K_{osc} ayant permis les oscillations. On peut à ce moment là montrer qualitativement que si on éloigne la LED, l'oscillation disparaît et réapparaît quand on augmente le gain.

Si on est doué on peut aussi chercher à obtenir le départ des oscillations en utilisant le mode SINGLE

On mesure aussi la période de l'oscillation T_{osc} . On calcule alors grâce à la méthode de Ziegler-Nichols les paramètres du correcteur PI ($K_c = 0.45 * K_{osc}$, $T_c = 0.83 * T_{osc}$) que l'on utilisera lorsque le système sera utilisé en boucle fermée avec l'entrée reliée au GBF.

2.3 Réglage du correcteur

On travaille sur la même carte sauf qu'en plus de R_4 , on ajoute C en série pour faire un correcteur PI au lieu d'un correcteur proportionnel.

Pour dimensionner $T_c = 3\mu s$ (ordre de grandeur trouvé en TP), on peut par exemple garder $R_3 = R_4 = 1 k\Omega$ et prendre $C = 3.3n s$ pour avoir τ environ égal à T_c . On règle K_c à sa valeur corrigée simplement avec la résistance variable qui est déjà branchée. De cette manière, on limite le nombre d'éléments à changer et donc le nombre d'erreurs potentielles. Quand on utilise les résistances, il vaut mieux avoir à côté une page avec le code couleur des résistances, elles sont souvent mal rangées dans les tiroirs ...

2.4 Montage en boucle fermé

On peut résumer les trois manip' à faire une fois qu'on arrive au montage en boucle fermée

- Déterminer la plage d'asservissement
- Montrer qualitativement que le système est asservi en perturbant le système.
- Montrer que la dynamique du système est influencée par le gain du correcteur

On va maintenant détailler ces trois manipulations

-Une fois le correcteur réglé, on commence par envoyer une entrée constante (bouton Utility du GBF puis régler DC sur ON) à des tensions assez faibles (quelques centaines de mV) afin de déterminer la plage d'asservissement (= gamme de tension de l'entrée pour laquelle tension d'entrée = tension de sortie). Pour voir si les signaux sont égaux, il faut bien fixer la référence à zéro au même endroit sur les deux signaux et utiliser le même calibre sur les deux voies.

-Lorsque la plage d'asservissement a été déterminée, on se met au milieu de celle-ci afin d'être sûr de ne pas en sortir et on peut faire plusieurs expériences qualitatives qui permettent de discuter de l'asservissement du système et les non linéarités : Si on éloigne la LED, celle-ci va se mettre à briller plus intensément (l'effet est plus visible avec la LED verte) En effet, la photodiode reçoit moins de lumière donc comme le système est asservi, il va compenser en envoyant plus de lumière en entrée). Lorsque l'on s'éloigne trop, la LED ne peut plus briller plus fort et le système sort de sa zone d'asservissement.

Si on éclaire la photodiode avec une source de lumière extérieure, la LED s'éteint afin de compenser l'excès de lumière sur le capteur de la photodiode. Le système n'est alors plus précis, car la LED ne peut pas envoyer de puissance optique négative, c'est une autre source de non linéarité, la sortie ne peut suivre l'entrée que sur une certaine plage de tension limitée.

On peut enfin mettre en évidence le compromis entre rapidité et stabilité. Le

temps de réponse du système diminue avec le gain (la rapidité du système augmente). Par contre, on a un système en boucle fermée d'un ordre assez élevé, en tout cas plus grand que 2, donc on sait que celui-ci peut être rendu instable pour une valeur de gain trop importante (cf les diagrammes de Niquist de JBD). Pour montrer ce compromis, on peut partir d'un gain faible, on envoie en entrée un signal carré en faisant attention au choix de l'amplitude et de l'offset: le signal ne doit pas sortir de la plage d'asservissement. On peut mesurer un temps de réponse à 63 % puis on augmente le gain et on voit que le temps de réponse diminue. On continue à augmenter jusqu'à ce que le signal de sortie parte en vrille, on peut alors conclure sur l'instabilité et sur l'ordre du système (cf cours de JBD : système en boucle fermée d'ordre > 2 potentiellement instable en boucle fermée si le gain est trop élevé).

3 Questions-Remarques-Commentaires-Rapport de Jury

3.1 Questions éventuelles pouvant être posées par le jury

On a essayé d'imaginer les questions qu'un jury pourrait poser lors de l'entretien. Nous ne garantissons pas l'exactitude et la pertinence de toutes nos réponses et nous ne prétendons pas avoir couvert toutes les questions que le jury pourrait poser ...

Pourquoi le signal obtenu en sortie est asymétrique ?

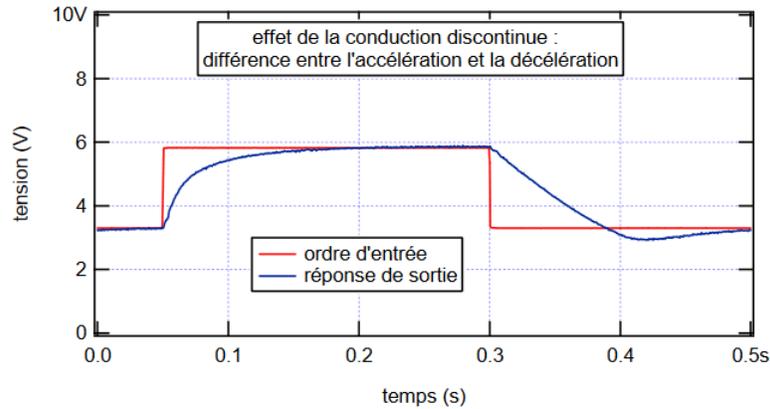


Figure 4: Réponse asymétrique due à la non-linéarité en courant

L'asymétrie du signal en sortie est le signe qu'un élément du système est non linéaire.

Cet effet non-linéaire est dû à la non réversibilité en courant. Lors des phases d'accélération, le moteur appelle davantage de courant et tant que le courant appelé reste inférieur au courant maximal que l'alimentation peut fournir, l'alimentation n'introduit aucune non linéarité. La réponse ressemble à celle d'un premier ordre si on ne regarde pas trop en détail. Elle est en tout cas linéaire. Lors des phases de décélération, le courant appelé diminue, mais dans le cas présenté sur la figure suivante, il atteint une valeur nulle. Or, le système n'étant pas réversible en courant, ce dernier ne peut pas devenir négatif et reste à zéro. Dans ce cas, lors de la décélération, le système ralentit avec son inertie et ses frottements, comme lors d'un essai de lâché. Lors de cette phase, le système asservi n'a plus de moyen d'action pour accomplir ce qu'on lui demande. Il n'y a plus d'asservissement, tant qu'il n'est pas dans une situation demandant une action qu'il peut accomplir. Lorsque la vitesse devient trop faible devant la consigne, l'asservissement impose au moteur de réaccélérer, ce qui demande un courant positif que l'alimentation peut fournir. Le système fonctionne à nouveau en régime linéaire et il rattrape le niveau de consigne demandé.

Quel est le rôle du hacheur ?

Le hacheur permet de réaliser une conversion tension continue (E de l'alimentation) en un courant continu (légèrement découpé) à l'entrée de la MCC (on parle de hacheur série dans ce cas là) sans perte d'énergie, ce qu'un simple montage potentiométrique (pont diviseur de tension) ne permet pas. Il permet par ailleurs de contrôler le système grâce au rapport cyclique α . Les calculs relatifs au hacheur série sont fait dans le Dunod de PSI, à partir de la page 831 et surement aussi quelque part dans le cours de JBD. Ce qu'il faut retenir c'est que la tension à l'entrée du moteur, vaut en moyenne $\langle u_s \rangle = \alpha * E$, et est découpée à la fréquence choisie. Cette tension va imposer la vitesse de rotation du moteur. Nous on peut jouer sur α grâce à v_{com} , si $v_{com} = 0$, $\alpha = 0$, si $v_{com} = 10V$, $\alpha = 1$.

Pourquoi peut-on considérer que le système en boucle ouverte est d'ordre 1 ?

Si on prend les équations de la M.C.C :

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + E \quad (7)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - f\Omega \quad (8)$$

avec

$$E = K\Omega \quad (9)$$

$$C_m = KI \quad (10)$$

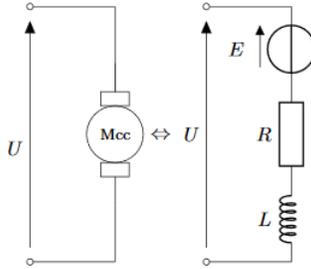


Figure 5: Schéma électrocinétique d'une machine à courant continu

On obtient (pour $C_r = 0$) pour $H(p) = \frac{(p)}{U(p)}$ une fonction de transfert d'ordre 2

où l'on peut faire apparaître une constante de temps mécanique $\tau_m \propto J$ proportionnelle à l'inertie du moteur et une constante de temps électrique $\tau_e = \frac{L}{R}$. Dans la limite où $\tau_m \gg \tau_e$, on peut mettre cette fonction de transfert sous la forme

$$H(p) \simeq \frac{K_0}{(1 + \tau_e p)(1 + \tau_m p)} \quad (11)$$

. Si on trace le diagramme de bode, on aura une première coupure à $\frac{1}{\tau_m}$ et une seconde à $\frac{1}{\tau_e}$. Si on se place à des fréquences de l'ordre du Hz, on ne verra pas l'influence de la constante de temps électrique, on pourra alors considérer que la fonction de transfert est du premier ordre. Numériquement, $L \simeq 1mH$, $R \simeq 1\Omega$, donc $\tau_e \simeq 10^{-3}s$ alors que τ_m est de l'ordre de 1 s donc les constantes de temps sont bien séparables. Néanmoins, on peut voir expérimentalement qu'on a pas un premier ordre en augmentant le gain, on aperçoit un dépassement, signe qu'on a plutôt un deuxième ordre.

Comment fonctionne une M.C.C ?

Ici on donne le minimum vital, pour plus de détails sur la M.C.C, voir le Dunod de PSI et/ou le cours de JBD ...

La M.C.C est constituée de deux grandes parties principales :

- La partie fixe, le stator, est parcourue par un courant permanent et produit un champ magnétique radial dans l'entrefer, périodique par rapport à θ , la variable angulaire décrivant la position d'un point M de l'entrefer $B(\theta)$, dont la forme dépend de la structure magnétique des pôles (forme géométrique et type de matériau).

- La partie mobile, le rotor, possède des spires conductrices parcourues par des courants continus, qui vont tourner autour de l'axe du moteur et donc voir un champ variable au cours du temps. La rotation de la spire dans le champ magnétique inducteur engendre une force électromotrice dont l'expression est

simplement donnée par la loi de Faraday.

Cette f.e.m induite est une fonction alternative de θ . Pour obtenir une tension continue, un système de balais-collecteur joue le rôle de redresseur mécanique. La tension aux bornes d'une spire garde toujours un signe positif. Si on reproduit le raisonnement avec N spires déphasées de $\frac{2\pi}{N}$, on obtient une tension continue (on somme toutes les contributions des différentes spires, ces contributions vont lisser la tension résultante).

3.2 Remarques personnelles

- Ce montage se prête assez mal à des incertitudes et à des mesures très quantitatives. On ne trace aucune droite. Dans le montage photodiode, on ne connaît même pas la fonction de transfert du système ...
- Vous pouvez remplacer une des deux manip par un oscillateur quasi-sinusoïdal, type pont de Wien et vérifier la condition de démarrage des oscillations.
- Le jury précise qu'il n'aime pas trop les cartes électroniques du type "boîte noire", donc dans la deuxième manip, il faut certainement s'attendre à des questions sur le convertisseur courant/tension, sur l'inverseur contenu sur la plaquette.
- Par contre, ce montage nécessite d'être à l'aise avec le déclenchement, le moyennage et plus globalement avec un oscilloscope. Je pense qu'il est important d'être capable d'expliquer clairement comment on fait nos mesures, de montrer (en tout cas de faire semblant) qu'on maîtrise le scope.