

## RÉGULATION DE VITESSE D'UN MOTEUR

## À COURANT CONTINU ALIMENTÉ PAR UN VARIATEUR INDUSTRIEL DMV2342

JM ROUSSEL, P REBEIX, B EMILE : IUT de l'Indre, Département GEII, 2 avenue François Mitterrand 36000 CHATEAUROUX

mail : [jean-marc.rousseau@univ-orleans.fr](mailto:jean-marc.rousseau@univ-orleans.fr) ; [pascal.rebeix@univ-orleans.fr](mailto:pascal.rebeix@univ-orleans.fr) ; [bruno.emile@univ-orleans.fr](mailto:bruno.emile@univ-orleans.fr)

**Résumé :** Cet article présente un TP destiné à des étudiants de deuxième année DUT GEII. Durant ce TP, ces derniers doivent effectuer le réglage d'une boucle de régulation de vitesse d'un variateur de vitesse industriel de la société Leroy Somer. La démarche pédagogique a pour objectif de familiariser les étudiants aux concepts de base de l'automatique dans le cadre des travaux pratiques d'électrotechnique et de montrer la

transversalité de la formation GEII. De plus, elle bouscule les idées reçues des étudiants sur l'enseignement de l'électrotechnique qui serait basée selon eux seulement sur l'étude physique des machines !

Mots clés : modélisation, régulateur PI, méthode de Ziegler Nichols

## 1. Introduction

Les moto-variateurs à courant alternatif ont peu à peu supplanté leurs homologues à courant continu. Ces derniers représentent aujourd'hui une infime part du marché de la variation de vitesse. Mais l'électronique de contrôle incluse dans le variateur alternatif est complexe et nécessite des connaissances de niveau master (transformation de Park).

Néanmoins, on trouve des asservissements de vitesse à base de moteurs DC (à courant continu) dans la quasi-totalité des industries. Les moteurs DC doivent leur utilisation dans les asservissements de vitesse aux performances dynamiques élevées qu'ils offrent ainsi qu'à la précision et à la simplicité de la commande.

L'objet de cet article est de décrire les travaux effectués par des étudiants dans le cadre des travaux pratiques du module ET3 en deuxième année DUT GEII. Les étudiants doivent mettre en oeuvre la boucle de régulation vitesse ainsi que les réglages du correcteur PI.

Après une présentation générale de la plate-forme d'essais, l'article détaille la modélisation du moteur DC et du variateur de vitesse associé. Les réglages proposés sont ensuite expliqués, ainsi que les différents essais en régulation à vide et en charge réalisés pour évaluer les performances.

## 2. Plate-forme expérimentale

### 2.1. Descriptif du système étudié

La figure 1 donne le schéma synoptique de la plate-forme expérimentale utilisée dans le cadre de ce TP.

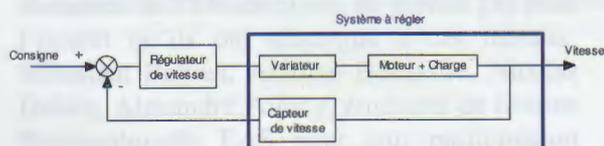


Figure 1 : Synoptique de la plate-forme expérimentale

La figure 1 donne le schéma synoptique de la plate-forme expérimentale utilisée dans le cadre de ce TP.

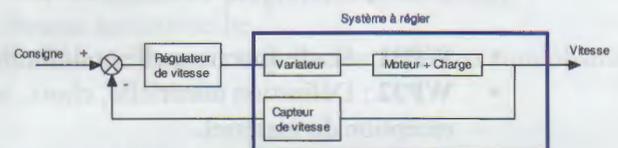


Figure 1 : Synoptique de la plate-forme expérimentale

L'ensemble est constitué d'un variateur de vitesse industriel triphasé permettant un fonctionnement dans les 4 quadrants du plan couple vitesse d'une machine à courant continu entraînant une charge présentant un couple simulé par un frein à courant de Foucault.

La partie puissance du variateur de vitesse DMV 2342 est constituée de deux ponts PD3 à thyristors, montés tête-bêche aux bornes de l'induit, permettant de fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple - vitesse. L'inducteur du moteur est alimenté par un pont mixte.

La partie commande et régulation est gérée par un microprocesseur 8 bits fonctionnant à 12 MHz. Le dialogue se fait à partir de 6 touches et de 8 afficheurs à 7 segments, pour accéder aux 450 paramètres de réglage et codes d'erreur.

### 2.2. Moteur

Le moteur est à excitation séparée, tension d'induit de 220 V DC, courant nominal de 6,5A, sa puissance nominale est de 1,5 kW.

3. Modélisation de l'entraînement réglé

3.1. Modélisation du moteur DC

Le moteur DC à collecteur est constitué d'une partie fixe (le stator) et d'une partie tournante (le rotor).

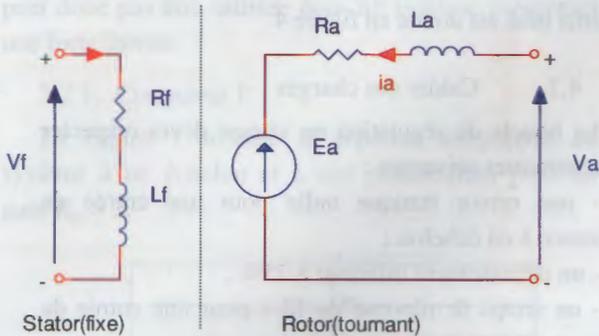


Figure 2: Schéma électrique d'un moteur DC

Le stator joue le rôle de l'inducteur, sa fonction est de créer un flux magnétique  $\Phi_f$  dans lequel seront plongées les spires du circuit d'induit. Si celles-ci sont parcourues par un courant d'induit  $i_a(t)$ , un flux d'induit va être produit au rotor. L'interaction des deux flux produit un couple qui fait tourner l'induit du moteur.

La relation mathématique caractérisant la relation entre la tension  $v_a$  aux bornes de l'induit du moteur DC et le courant  $i_a$  qui le parcourt est donnée par l'équation suivante :

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1)$$

Où  $R_a$  et  $L_a$  sont respectivement la résistance et l'inductance du circuit d'induit.

La tension  $e_a$  est appelée force contre-électromotrice. Elle est liée à la vitesse  $\Omega$  et au flux d'excitation  $\Phi_f$  par la relation suivante :

$$e_a = k_f \Phi_f \Omega \quad (2)$$

Où  $k_f$  est une constante propre à la construction du moteur. La relation (2) montre qu'à excitation constante la force contre-électromotrice  $e_a$ , proportionnelle à  $\Omega$ , est une image de la vitesse.

Le couple est lié au flux d'inducteur et au courant d'induit par la relation :

$$T_{em} = k_f \Phi_f i_a \quad (3)$$

Les trois équations ci-dessus, complétées par l'équation de la dynamique, décrivent complètement le comportement dynamique du moteur DC.

$$T_{em} - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (4)$$

Où  $J$  est l'inertie totale entraînée. En appliquant la transformée de Laplace aux équations (1) et (4), on peut représenter sous forme de schéma fonctionnel les équations précédentes.

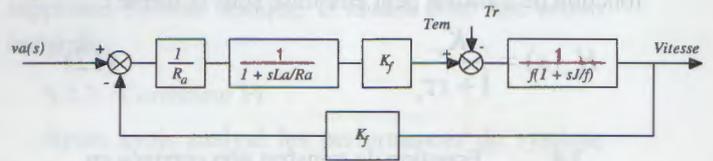


Figure 3: Schéma bloc moteur DC

Le moteur étant alimenté à excitation constante, le produit  $k_f \Phi_f$  est constant et l'on pose :

$$K_f = k_f \Phi_f \quad (5)$$

A partir du schéma bloc présenté à la figure 3, nous obtenons la fonction de transfert suivante :

$$H_m(s) = \frac{K_m}{1 + \tau_{em}s + \tau_e \tau_{em} s^2} \quad (6)$$

Avec  $K_m$  le gain statique du moteur,  $\tau_e$  la constante de temps électrique et  $\tau_{em}$  la constante électromécanique.

$$K_m = \frac{K_f}{fR_a + K_f^2} \quad (7)$$

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (8)$$

$$\tau_{em} = \frac{JR_a}{fR_a + K_f^2} \quad (9)$$

3.2. Modélisation du variateur

Le comportement statique du variateur est modélisé par un gain  $K_{dmv}$ . En ce qui concerne le comportement dynamique, il faut remarquer qu'une variation de la tension de commande se répercute sur la tension continue  $v_a$  seulement après un certain de temps de retard. Pour un montage en pont triphasé, le temps de retard  $\tau_h$  le plus défavorable est  $T/6$  ( $T$  période du réseau = 20 ms).

La fonction de transfert du variateur est donc :

$$H_{dmv}(s) = K_{dmv} e^{-s\tau_h} \quad (10)$$

Il est admissible de remplacer le temps mort par une petite constante de temps, la fonction de transfert est donc :

$$H_{dmv}(s) = \frac{K_{dmv}}{1 + s\tau_h} \quad (11)$$

3.3. Modélisation de la partie retour de vitesse

La vitesse du moteur est mesurée grâce à une génératrice tachymétrique. Elle est mise à l'échelle via un réseau de résistances suivi d'un filtre passe-bas. La fonction de transfert peut être mise sous la forme :

$$H_v(s) = \frac{K_v}{1 + s\tau_v} \quad (12)$$

3.4. Fonction de transfert non corrigée en boucle ouverte

L'ensemble moto variateur pour la boucle vitesse peut se mettre sous la forme du schéma bloc donné en figure 4.

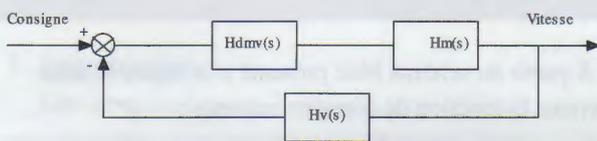


Figure 4: Schéma bloc moto-variateur

La fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée est le produit des fonctions de transfert.

$$H_{bo}(s) = H_{dmv}(s)H_m(s)H_v(s) \quad (13)$$

4. Régulation

4.1. Structure de la boucle de régulation

Les variateurs de vitesse DMV comportent un régulateur de vitesse et de courant très performant englobant les principes d'un PID. La figure ci-dessous décrit la structure du régulateur de vitesse et de courant.

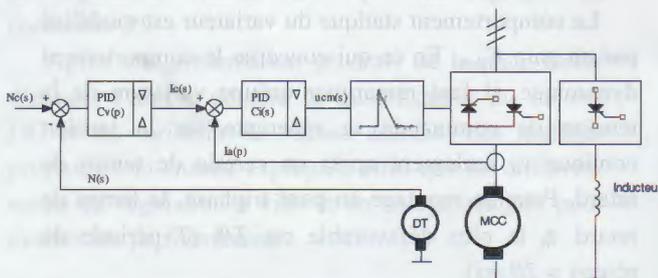


Figure 5: Structure boucle de régulation cascade

Le régulateur de courant  $C_i(s)$  règle le courant d'induit  $i_a$  sur la grandeur de consigne  $i_c$ . Ce régulateur intervient avec son signal de commande  $u_{cm}$ , sur le dispositif de commande de gâchettes. La grandeur de consigne interne  $i_c$  provient du régulateur de vitesse  $C_v(s)$  qui a la tâche de régler la vitesse de rotation  $n$  sur la grandeur de consigne  $n_c$ .

Les grandeurs principales régissant les gains de boucle sont les suivantes :

- boucle de courant : inductance du moteur, circuit commande des thyristors, tension d'alimentation, calibre du courant variateur ;
- boucle de vitesse : inertie totale, rigidité de la chaîne cinématique, caractéristiques variateurs.

On limitera l'étude à la boucle de vitesse dont le schéma bloc est donné en figure 4.

4.2. Cahier des charges

La boucle de régulation en vitesse devra respecter les contraintes suivantes :

- une erreur statique nulle pour une entrée de référence à un échelon ;
- un dépassement inférieur à 25% ;
- un temps de réponse de 12 s pour une entrée de référence à un échelon.

4.3. Correcteur PI

Le correcteur proposé est un correcteur PI, dont la fonction de transfert est de la forme (équation 13)

$$C_v(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \quad (13)$$

Avec :

- $K_p$  : gain proportionnel ;
- $T_i$  : constante d'intégration en seconde.

5. Résultats

5.1. Essai en boucle fermée sans correcteur

La figure 6 montre la réponse du système à un échelon de consigne.

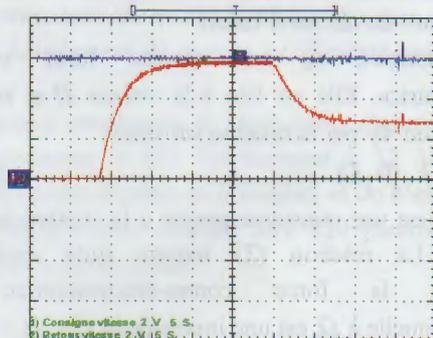


Figure 6 : Réponse indicielle en boucle fermée : retour vitesse et niveau de la consigne

Le temps de réponse à 5% à un échelon de consigne est 7 s. Le système possède une erreur statique de 4% qui est accentuée lors d'un impact de charges ( $\mathcal{E}_{s,perturbation} = 52\%$ ). Cet essai confirme la nécessité d'un correcteur PI.

5.2. Correcteur PI par la méthode essai – erreur

La méthode consiste à modifier les actions PI et observer les effets sur la mesure (retour vitesse), jusqu'à obtenir la réponse optimale. Cette méthode ne nécessite pas la connaissance des paramètres du système. Les actions seront réglées dans l'ordre P, I. Cette méthode conduit à effectuer plusieurs essais et ne peut donc pas être utilisée pour un système présentant une forte inertie.

5.2.1. Correcteur P

La figure 7 montre la réponse temporelle du système à un échelon et à une perturbation pour un gain  $K_p = 2$ .

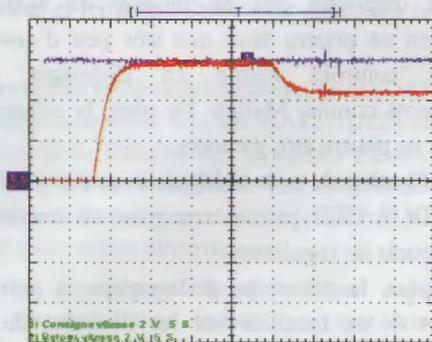


Figure 7: Réponse indicielle en boucle fermée avec correcteur P ( $K_p = 2$ ) : retour vitesse

Le relevé confirme un résultat bien connu théoriquement, l'augmentation du gain  $K_p$  accélère la réponse du système ( $t_{r,5\%} = 5s$ ) et provoque une diminution de l'erreur statique. On constate que la régulation proportionnelle a diminué l'effet de la perturbation de couple sur la vitesse ( $\epsilon_{s, perturbation} = 26\%$ ).

Un essai avec une valeur élevée du gain proportionnel ( $K_p = 4$ ) rend la correction énergique mais provoque des oscillations et du dépassement qui peuvent être dommageables pour le moteur et la charge entraînée.

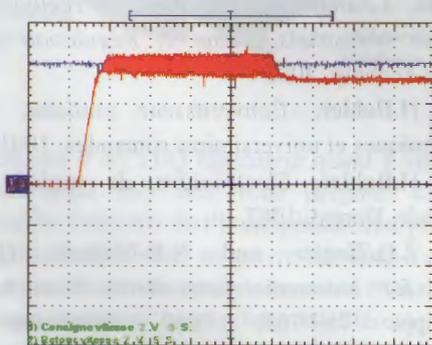


Figure 8: Réponse indicielle en boucle fermée avec correcteur P ( $K_p = 4$ ) : retour vitesse

Au contraire une valeur faible du gain proportionnel rend la correction lente mais sans danger.

Le réglage de l'action proportionnelle sera donc un compromis entre la rapidité, le rejet de la perturbation et la stabilité.

De plus, l'action proportionnelle ne permet pas de supprimer l'erreur statique. Il faudra donc une action intégrale.

5.2.2. Correcteur PI

Après avoir analysé les performances du système en boucle fermée corrigé par un correcteur P, on se propose de mettre en œuvre un correcteur PI.

La figure 9 montre la réponse du système à un échelon de consigne suivi d'une perturbation. Le temps de réponse à 5% à un échelon de consigne est de 3,6 s. Le système ne possède plus d'erreur statique. On constate que la perturbation provoque un ralentissement momentané qui est effacé en moins de 7 s. Cet essai confirme le rôle d'un correcteur PI.

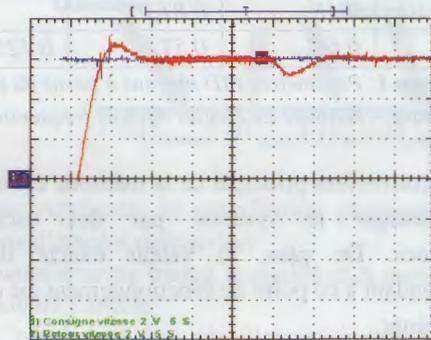


Figure 9: Réponse indicielle en boucle fermée avec correcteur PI ( $K_p = 2$  et  $T_i = 4,5 s$ ) : retour vitesse

5.3. Correcteur PI par la méthode de Ziegler Nichols

Afin d'éviter les tâtonnements précédents, on propose aux étudiants d'utiliser la méthode de Ziegler Nichols. Le réglage précédent avait pour objectif de voir l'influence des paramètres P et I et d'effectuer leur réglage sur une boucle de régulation.

La méthode de Ziegler Nichols [6] consiste à boucler le système sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain (gain intégral et gain dérivée à 0), jusqu'à l'obtention d'une oscillation entretenue de période  $T_{cr}$  correspondant au gain critique  $K_{cr}$ .

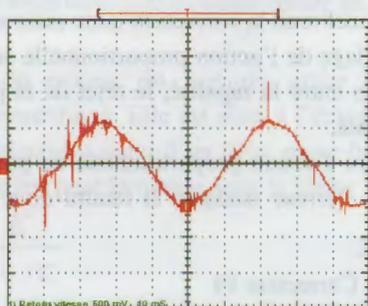


Figure 10: Méthode du gain critique : retour vitesse

Une fois ce régime obtenu, on note  $K_{cr} = 3,25$  le gain proportionnel critique et la période des oscillations  $T_{cr} = 46$  ms lui correspondant. On règle alors les paramètres du correcteur comme expliqué par le tableau de Ziegler Nichols.

Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{cr}$		
PI	$0,4K_{cr}$	$0,8T_{cr}$	
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5T_{cr}$	$0,125T_{cr}$

Tableau 1: Paramètres PID obtenus à partir du point critique – Méthode de Ziegler Nichols fréquentielle

L'inconvénient principal de la méthode est le risque d'endommager le système par des oscillations entretenues. De plus, la valeur exacte du gain correspondant à ce point de fonctionnement est difficile à déterminer.

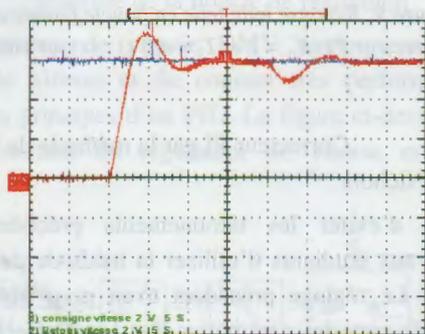


Figure 11: Réponse indicielle en BF avec correcteur PI ( $K_p = 1,3$  et  $T_i = 1$  s) par la méthode de Ziegler Nichols

On obtient une réponse indicielle présentant un dépassement de 23 %, un temps de réponse de 11 s et un temps de rejet de la perturbation de 10 s. Le correcteur PI conçu par la méthode de Ziegler Nichols respecte le cahier des charges mais les performances dynamiques obtenues sont inférieures à celles obtenues par la méthode d'essai - erreur.

Il y a eu de nombreuses évolutions de la méthode de Ziegler Nichols afin d'améliorer la robustesse et d'obtenir une réponse sans dépassement ou avec un dépassement inférieure à 20%.

## 6. Conclusion

L'article a présenté le réglage d'une boucle de régulation de vitesse d'un variateur industriel équipant un banc moteur à courant continu par la méthode de Ziegler-Nichols. Cette méthode est très largement répandue dans l'industrie car elle demande très peu de temps et d'effort au technicien pour le choix des paramètres du correcteur. En effet, ce type de méthode requiert simplement un essai en boucle fermée, qui permet l'obtention de deux ou trois grandeurs relatives à l'essai. Les paramètres du correcteur dont la structure est imposée, sont alors déterminés par des formules très simples.

Le principal inconvénient de ce type de méthode est que, ne disposant pas du modèle du système, le technicien ne pourra faire que très peu d'analyse du système contrôlé même en disposant d'outils performants comme Matlab. De plus, la robustesse du système ne pourra être garantie.

L'utilisation de cette méthode avec des étudiants de niveau DUT GEII permet une mise en œuvre rapide d'une boucle de régulation.

De plus, la démarche pédagogique a permis aux étudiants de se focaliser sur les concepts de boucle ouverte et de boucle fermée, de comprendre la notion d'erreur et faire la différence entre asservissement et régulation. L'usage de l'action intégrale lors des impacts de charge a été significatif.

Ce type de manipulation a permis aux étudiants d'appréhender le réglage d'une boucle de régulation avec un maximum de confiance et d'opter pour le choix de réglage le plus judicieux.

## 7. Références

- [1] K.J.Aström and T.Hägglund, *Advanced PID Control*, Editions ISA, 2006
- [2] K.J.Aström and T.Hägglund, *Feedback Systems*, Editions Princeton, 2008
- [3] B.Borne, G.Dauphine-Tanguy, JP.Richard, F.Rotella, I.Zambettakis *Analyse et régulation des processus industriels, Tome 1, Régulation continu*, Editions Technip, 2001
- [4] H.Buhler, *Convertisseur statique*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991
- [5] H.Buhler, *Electronique de réglage et de commande*, Dunod, 1987
- [6] Z.G.Ziegler and N.B.Nichols, *Optimum settings for automatic controllers. Trans.A.S.M.E., Vol.64 :pp. 759-765, 1942. Available from www.driedger.ca.*