

Une nouvelle approche d'identification pour la surveillance d'un entraînement électrique à courant continu

Abdallah HABBADI, Francisco CARRILLO, Arnaud BAYSSE

Laboratoire Génie de Production, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes E.N.I.T.
47, Avenue d'Azereix, 65016 Tarbes Cedex, FRANCE. FAX: (33) 05 62 44 27 08

habbadi@enit.fr, carrillo@enit.fr, arnaud.baysse@enit.fr
http://www.enit.fr

Résumé— *La surveillance et le diagnostic de robots et de machines-outils est un sujet d'intérêt croissant à cause des besoins industriels de contrôle, de fiabilité et de disponibilité de ces machines. Les principaux constituants de ces systèmes sont les entraînements électriques. La surveillance et le diagnostic de ces entraînements peut être effectuée à partir de l'estimation de leurs paramètres physiques. Dans cet article nous proposons une nouvelle approche d'estimation paramétrique basée sur la connaissance a priori de la structure des lois de commande par boucles imbriquées et des lois de mouvement à profil de vitesse trapezoïdale [1] et son extension à un profil à jerk commandé.*

Mots-clés— *entraînement électrique, surveillance, estimation de paramètres, boucles imbriquées, vitesse trapézoïdale, jerk commandé*

I. INTRODUCTION

Les entraînements électriques sont les composants principaux des robots et machines-outils. Ils sont directement impliqués dans le processus de production. La précision, la fiabilité et la disponibilité de ces machines dépendent de l'état des entraînements. Différentes fonctions ou activités comme la planification, la maintenance, le contrôle adaptatif et le diagnostic nécessitent des informations fiables sur les paramètres de la machine. Cela permet une meilleure aide pour prendre des décisions et les actions correspondantes : arrêt du processus, réglage de la machine, maintenance... Le but de cet article est d'identifier les paramètres physiques et leurs variations pour fournir des informations nécessaires aux fonctions précitées. L'approche d'identification que nous proposons est très simple à mettre en oeuvre et utilise seulement les informations fournies par les capteurs qui sont nécessaires pour l'asservissement par boucles imbriquées (capteur de courant, capteur de vitesse, capteur de tension). Le principal avantage de cette approche est son application lorsque l'entraînement est en fonctionnement normal durant chaque déplacement point à point avec un profil de déplacement connu. Il n'y a donc pas besoin de signaux d'excitation spécifiques (comme les séquences binaires pseudo aléatoires "SBPA") nécessaires pour les méthodes d'identification existantes [2]. L'avantage est de ne pas accélérer le vieillissement de la machine par vibrations. Tout d'abord nous présenterons l'entraînement électrique que nous considérons dans cette étude, la structure de commande de position, les profils de mouvement et les paramètres physiques sensibles aux défauts. Ensuite nous présenterons le principe théorique de la nouvelle approche d'identification.

Nous présenterons et commenterons à la fin des résultats de simulation de cette approche.

II. ENTRAÎNEMENT ÉLECTRIQUE

Dans les domaines tels que la robotique ou les machines-outils, différentes structures de commande et différents profils de mouvement peuvent être appliqués aux entraînements électriques. Il existe également plusieurs technologies pour concevoir ces entraînements : les entraînements rotatifs directs et indirects, les entraînements linéaires directs et indirects. Nous nous intéressons dans cet article au cas le plus intéressant du point de vue du diagnostic, celui des entraînements linéaires indirects puisqu'il implique plusieurs organes mécaniques tels que réducteur, vis-écrou, glissière, guidage, paliers etc.

A. Les entraînements électriques linéaires indirects

De nos jours deux types d'entraînements électriques sont utilisés pour obtenir un déplacement linéaire : les entraînements directs et indirects. L'entraînement direct utilise une coûteuse machine électrique linéaire, le second, conventionnel, utilise un moteur rotatif classique et plusieurs éléments de transmission mécanique pour transformer le mouvement rotatif du moteur en mouvement linéaire. Grâce à sa faculté de fournir un positionnement précis à un coût raisonnable, ce type d'entraînement est le plus répandu. Les composants mécaniques sont soumis à différents phénomènes physiques lents (usure, vieillissement, échauffement...) qui conduisent à une dégradation des performances ou à des défauts. Dans ce travail nous nous focaliserons sur l'estimation des paramètres physiques pour la surveillance et le diagnostic d'un entraînement électrique indirect semblable à celui de la figure 1 possédant un moteur à courant continu à aimants permanents.

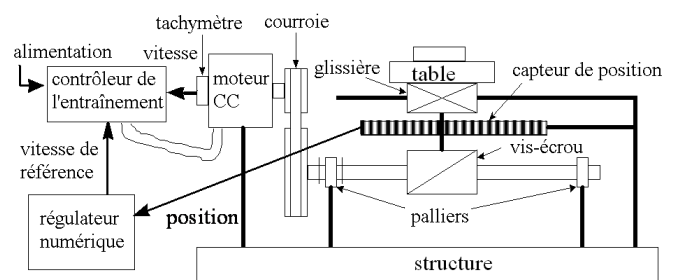


Fig. 1. Entraînement électrique linéaire indirect

La vitesse linéaire de l'entraînement est :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = k\omega(t) \quad (1)$$

où $x(t)$ est la position linéaire et k le coefficient de transformation de la vitesse angulaire $\omega(t)$ en vitesse linéaire $v(t)$.

B. Structure de commande de position par boucles imbriquées

Le modèle de l'entraînement électrique à courant continu est décrit par deux équations fondamentales :

l'équation électrique

$$u(t) - K\omega(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (2)$$

l'équation mécanique

$$Ki(t) - T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + f\omega(t) + C \text{sign}(\omega(t)) \quad (3)$$

avec : $u(t)$: tension d'alimentation d'induit du moteur, $i(t)$: courant d'induit du moteur, L : inductance de l'induit, R : résistance de l'induit, K : constante de couple et de force contre-électromotrice, J : inertie totale de l'entraînement, f : coefficient de frottements visqueux total, C : couple de frottements secs total et $T(t)$: couple instantané de charge. Nous nous intéressons dans cet article à la seule surveillance des éléments électriques et mécaniques de l'entraînement et non pas à celle de la charge $T(t)$. Par ailleurs, les mouvements à vide des axes de robots et de machines-outils sont fréquemment rencontrés (changement d'outil, avance rapide...). C'est durant ces mouvements que sera effectuée l'identification des paramètres physiques. L'équation (3) devient :

$$Ki(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + f\omega(t) + C \text{sign}(\omega(t)) \quad (4)$$

La plupart des structures de commande utilisées pour le positionnement de l'entraînement électrique sont de deux formes [3] [4] : régulation en parallèle ou par boucles imbriquées. La seconde forme est la plus employée en positionnement. Elle utilise trois boucles imbriquées : la boucle interne, la plus rapide, utilise une structure de régulateur PI (proportionnel intégral) pour la commande du courant ; la boucle intermédiaire emploie elle aussi une structure de régulateur PI pour commander la vitesse ; enfin la boucle externe régule la position à l'aide d'un simple régulateur proportionnel. Cette structure de commande est bien connue et les régulateurs sont faciles à régler [3]. Elle permet une réponse rapide en positionnement, une bonne stabilité, des propriétés de robustesse et la limitation du courant.

La figure 2 représente cette structure de commande qui sera utilisée pour l'approche d'identification présentée à la section III.

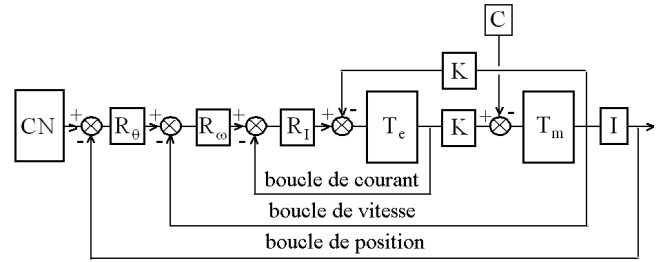


Fig. 2. Structure de commande par boucles imbriquées

R_{Θ} , R_{ω} et R_I à la figure 2 représentent respectivement les régulateurs de position, de vitesse et de courant. T_e et T_m sont les fonctions transferts de premier ordre de la partie électrique et de la partie mécanique de l'entraînement obtenues à partir des équations (2) et (4). I est l'intégrateur qui relie la vitesse à la position.

C. Profils de mouvement

En robotique et en commande d'axes de machines-outils, il existe plusieurs types de mouvements appliqués à l'entraînement électrique en fonction de l'utilisation [6] [7]. Parmi ces profils, deux sont les plus couramment utilisés : le profil à vitesse trapézoïdale et le profil à jerk commandé. Le jerk est la dérivée de l'accélération. L'utilisation du deuxième profil constitue une extension des travaux présentés en [1].

C.1 Profil à vitesse trapézoïdale

Ce profil permet d'adoucir les contraintes de charge (mécaniques et électriques) pendant la phase d'accélération. Il est fréquemment utilisé, par exemple dans le cas d'une machine-outil, pendant chaque mouvement avant usinage, ou pendant chaque changement d'outil, et dans le cas d'un robot durant chaque mouvement avant l'exécution d'une tâche. Pour obtenir le profil à vitesse trapézoïdale, la position désirée $x_r(t)$ illustrée à la figure 3 est divisée en trois phases. Durant la première phase (de t_0 à t_b) la trajectoire est un polynôme quadratique, et la vitesse est linéaire avec une accélération constante notée " a_{xacc} ". Pendant la deuxième phase (de t_b à $t_f - t_b$) la trajectoire devient une fonction linéaire correspondant à une vitesse constante notée " V_r ". Durant la troisième phase (de $t_f - t_b$ à t_f) la trajectoire est un nouveau polynôme quadratique qui conduit à une vitesse linéaire. La figure 4 montre le profil de vitesse correspondant.

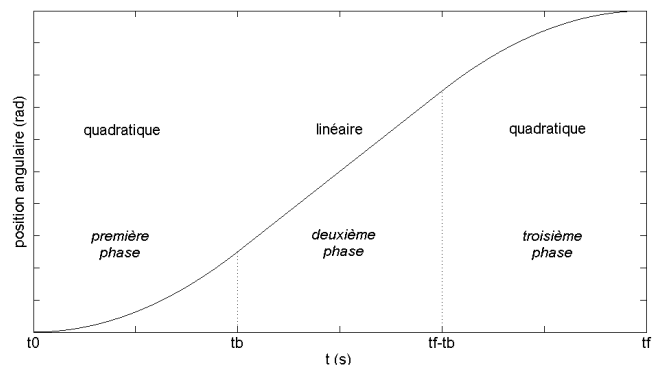


Fig. 3. Trajectoire pour un profil à vitesse trapézoïdale

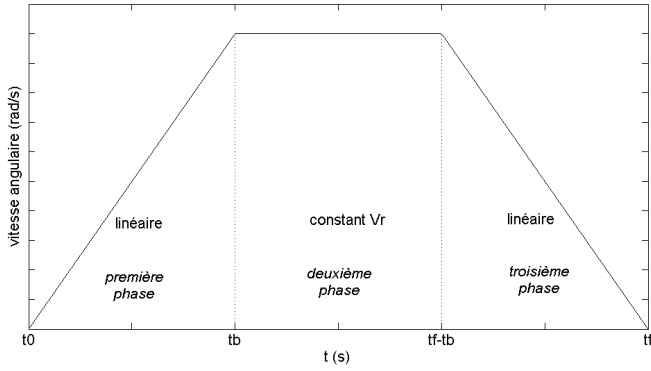


Fig. 4. Profil de vitesse trapézoïdale

Les expressions mathématiques de la trajectoire $x_r(t)$ et de la vitesse $\frac{dx_r(t)}{dt}$ sont données par les équations suivantes :

– dans l'intervalle $[t_0, t_b]$

$$x_r(t) = \frac{a_{xacc}}{2}t^2 + x_0 \quad (5)$$

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = V_r t \quad (6)$$

avec $a_{xacc} = \frac{V_r}{t_b}$ l'accélération linéaire.

– dans l'intervalle $[t_b, t_f - t_b]$

$$x_r(t) = V_r t + \frac{x_f + x_0 - V_r t_f}{2} \quad (7)$$

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = V_r \quad (8)$$

– et dans l'intervalle $[t_f - t_b, t_f]$

$$x_r(t) = -\frac{a_{xacc}}{2}t^2 + a_{xacc}t_f t + x_f - \frac{a_{xacc}t_f^2}{2} \quad (9)$$

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = -a_{xacc}t + a_{xacc}t_f \quad (10)$$

C.2 Profil à jerk commandé

Ce type de profil permet de limiter les vibrations qui sont sources d'erreurs de précision et d'usure des éléments mécaniques. Il est particulièrement employé pour des déplacements rapides de grandes inerties. La trajectoire désirée $x_r(t)$, décrite à la figure 5, se décompose en cinq phases. La figure 6 représente le profil de vitesse correspondant à ce type de mouvement.

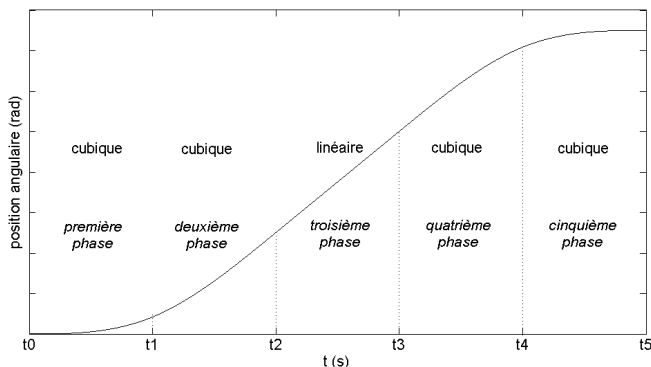


Fig. 5. Profil de position à jerk commandé

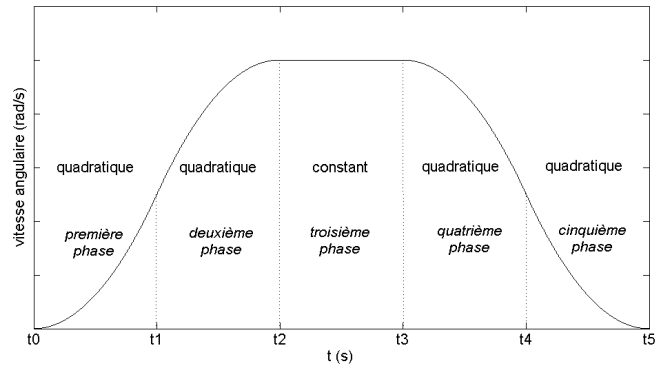


Fig. 6. Profil de vitesse à jerk commandé

Nous montrerons plus loin que seule la première phase (de t_0 à t_1) est suffisante pour l'identification de l'ensemble des paramètres physiques. Par conséquent, nous nous limitons à la seule mise en équation de la trajectoire durant cette phase :

– dans l'intervalle $[t_0, t_1]$

$$x_r(t) = a_{xacc}t^3 \quad (11)$$

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = 3a_{xacc}t^2 \quad (12)$$

D. Surveillance et diagnostic

Les défaillances d'un entraînement électrique indirect possédant les caractéristiques définies aux sections II-A et II-B sont pour la plupart liées à des variations des paramètres physiques. La mesure de ces paramètres et surtout de leurs variations permet de créer un modèle de détection des défaillances. Le tableau I résume les relations entre les paramètres physiques et les défaillances de l'entraînement.

Défaillances	Paramètres sensibles
Usure du chemin des glissières	Couple de frottements secs C, Coefficient de frottements visqueux f
Manque et/ou vieillissement de lubrification	Couple de frottements secs C, Coefficient de frottements visqueux f
Absence du montage d'usinage, Rupture de la transmission	Moment d'inertie J
Usure des balais	Résistance R
Court-circuit de spires d'induit	Résistance R, inductance L, constante de couple K
Echauffement du moteur	Résistance R, inductance L, constante de couple K
Démagnétisation	Inductance L, constante de couple K

TABLE I
DÉFAILLANCES DU SYSTÈME ET PARAMÈTRES SENSIBLES

III. NOUVELLE APPROCHE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE FERMÉE

L'approche que nous allons décrire est basée sur la connaissance *a priori* de l'évolution dans le temps des variables

d'entrée-sortie de la partie mécanique de l'entraînement en boucle fermée $i(t)$ et $\omega(t)$ et des variables de la partie électrique $u(t)$ et $i(t)$. Ces variables sont des polynômes dont le degré est fonction des profils de mouvement décrits aux parties II-C.1 et II-C.2. Le diagramme de la figure 7 illustre le principe utilisé.

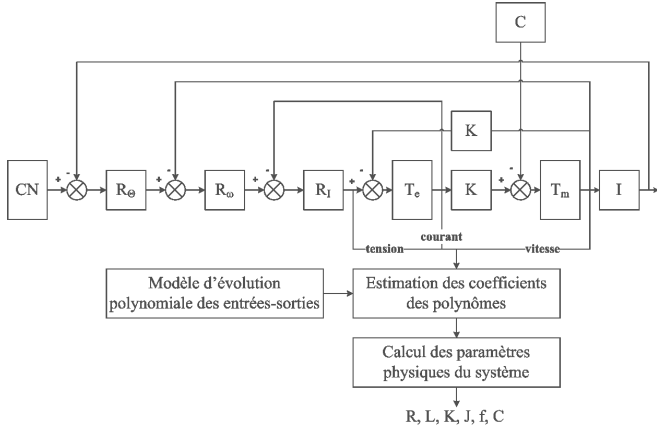


Fig. 7. Principe de l'identification

A. Evolution des variables d'entrée-sortie pour un profil à vitesse trapézoïdale

A.1 Phase d'accélération

D'après les équations (1) correspondant à la relation entre la vitesse linéaire et angulaire et (5) correspondant à la phase d'accélération linéaire, la vitesse angulaire du moteur a la forme idéale :

$$\omega(t) = a_{\omega acc} t$$

avec :

$$a_{\omega acc} = \frac{a_{x acc}}{k}$$

l'accélération angulaire.

En tenant compte de l'erreur de poursuite entre la vitesse désirée et la vitesse réelle durant cette phase, une extrapolation de la vitesse réelle (figure 8) donne un polynôme de premier degré de forme plus générale :

$$\omega(t) = a_{\omega acc} t + b_{\omega acc} \quad (13)$$

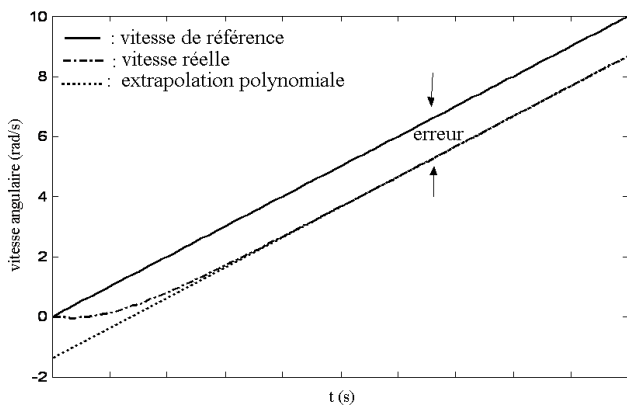


Fig. 8. Erreur de poursuite et extrapolation de la vitesse angulaire

En introduisant l'équation (13) dans l'équation (4) nous obtenons l'expression du courant suivante :

$$i(t) = \frac{a_{\omega acc} f}{K} t + \frac{a_{\omega acc} J + b_{\omega acc} f + C}{K} \quad (14)$$

Le courant $i(t)$ est aussi un polynôme de premier degré :

$$i(t) = a_{i acc} t + b_{i acc} \quad (15)$$

$$\text{avec : } a_{i acc} = \frac{a_{\omega acc} f}{K} \quad (16)$$

$$\text{et : } b_{i acc} = \frac{a_{\omega acc} J + b_{\omega acc} f + C}{K} \quad (17)$$

En substituant (13) et (15) dans (2) la tension d'alimentation du moteur peut être obtenue facilement :

$$u(t) = (a_{i acc} R + a_{\omega acc} K) t + b_{i acc} R + a_{i acc} L + b_{\omega acc} K \quad (18)$$

La variable d'entrée $u(t)$ a la même forme polynomiale que la vitesse angulaire $\omega(t)$ et le courant $i(t)$:

$$u(t) = a_{u acc} t + b_{u acc} \quad (19)$$

$$\text{avec : } a_{u acc} = a_{i acc} R + a_{\omega acc} K \quad (20)$$

$$\text{et : } b_{u acc} = b_{i acc} R + a_{i acc} L + b_{\omega acc} K \quad (21)$$

Les coefficients des polynômes des équations (13), (15) et (19) sont directement fonctions des paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement comme le montrent les équations (16), (17), (20) et (21). Durant cette phase d'accélération, l'identification des coefficients des polynômes n'est pas suffisante pour calculer les six paramètres physiques R , L , K , J , f , C . Pour obtenir une solution unique et plus rapide, il est préférable d'utiliser la deuxième phase de mouvement à vitesse constante qui suit immédiatement la phase d'accélération.

A.2 Phase à vitesse constante

Dans cette phase la vitesse linéaire désirée $\frac{dx_r(t)}{dt}$ générée par la boucle de position est constante. Par conséquent, la vitesse angulaire correspondante $\omega_r(t)$ l'est aussi :

$$\omega_r(t) = \frac{V_r}{k}$$

La vitesse réelle, considérant l'erreur statique, est constante :

$$\omega(t) = \omega_{ss} \quad (22)$$

Avec $\frac{d\omega(t)}{dt}$ égal à zéro dans l'équation (4), le courant réel $i(t)$ est aussi une constante :

$$i(t) = i_{ss} = \frac{\omega_{ss} f}{K} + \frac{C}{K} \quad (23)$$

Par conséquent, en substituant (22) et (23) dans l'équation (2) avec $\frac{di(t)}{dt}$ égal à zéro, la variable d'entrée $u(t)$ est de la forme :

$$u(t) = u_{ss} = i_{ss} R + \omega_{ss} K \quad (24)$$

qui est également une constante.

A.3 Identification

L'identification est effectuée à partir de la mesure des trois variables $u(t)$, $i(t)$ et $\omega(t)$ dont les évolutions sont connues et présentées à la figure 9. La phase d'accélération est décrite avec les équations polynomiales (13), (15) et (19). Les coefficients de ces polynômes peuvent être estimés facilement par la méthode des moindres carrés [2] ou par la méthode des moindres valeurs absolues [5]. Nous noterons ces coefficients estimés $\hat{a}_{\omega acc}$, $\hat{b}_{\omega acc}$, $\hat{a}_{i acc}$, $\hat{b}_{i acc}$, $\hat{a}_{u acc}$, $\hat{b}_{u acc}$. La phase à vitesse constante est décrite par les équations (22), (23) et (24). Les coefficients constants sont estimés par la moyenne arithmétique des données. Nous noterons les paramètres estimés $\hat{\omega}_{ss}$, \hat{i}_{ss} , \hat{u}_{ss} .

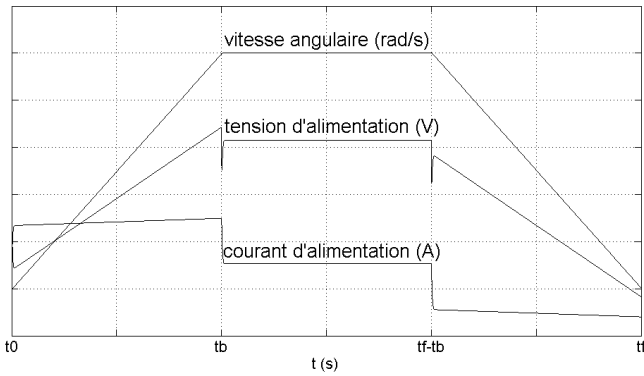


Fig. 9. Profils des variables électriques et mécaniques

Les équations (20), (21) et (24) peuvent être représentées par le système linéaire suivant :

$$\hat{A}_e \hat{\Theta}_e = \hat{B}_e \quad (25)$$

avec

$$\begin{aligned} \hat{B}_e &= [\hat{a}_{u acc} \quad \hat{b}_{u acc} \quad \hat{u}_{ss}]^T \\ \hat{A}_e &= \begin{bmatrix} \hat{a}_{i acc} & 0 & \hat{a}_{\omega acc} \\ \hat{b}_{i acc} & \hat{a}_{i acc} & \hat{b}_{\omega acc} \\ \hat{i}_{ss} & 0 & \hat{\omega}_{ss} \end{bmatrix} \\ \hat{\Theta}_e &= [\hat{R} \quad \hat{L} \quad \hat{K}]^T \end{aligned}$$

$\hat{\Theta}_e$ est le vecteur des paramètres électriques de l'entraînement. Ces paramètres peuvent être calculés aisément par inversion du système linéaire :

$$\hat{\Theta}_e = \hat{A}_e^{-1} \hat{B}_e$$

De la même manière les équations (16), (17) et (23) peuvent se mettre sous la forme :

$$\hat{A}_m \hat{\Theta}_m = \hat{B}_m$$

avec

$$\begin{aligned} \hat{B}_m &= [\hat{a}_{i acc} \quad \hat{b}_{i acc} \quad \hat{i}_{ss}]^T \\ \hat{A}_m &= \frac{1}{\hat{K}} \begin{bmatrix} 0 & \hat{a}_{\omega acc} & 0 \\ \hat{a}_{\omega acc} & \hat{b}_{\omega acc} & 1 \\ 0 & \hat{\omega}_{ss} & 1 \end{bmatrix} \\ \hat{\Theta}_m &= [\hat{J} \quad \hat{f} \quad \hat{C}]^T \end{aligned}$$

$\hat{\Theta}_m$ est le vecteur des paramètres mécaniques. Ces paramètres sont alors calculés par :

$$\hat{\Theta}_m = \hat{A}_m^{-1} \hat{B}_m$$

B. Evolution des variables d'entrée-sortie pour un profil à jerk commandé

B.1 Première phase (à jerk constant)

D'après les équation (1) et (12) la vitesse de rotation réelle a la forme idéale :

$$\omega(t) = a_{\omega acc} t^2$$

avec $a_{\omega acc} = \frac{a_{x acc}}{k}$ l'accélération angulaire.

Si on tient compte de l'erreur de poursuite entre la vitesse de référence et la vitesse réelle (figure 10), une extrapolation de la vitesse réelle donne un polynôme de deuxième degré de forme générale :

$$\omega(t) = a_{\omega acc} t^2 + b_{\omega acc} t + c_{\omega acc} \quad (26)$$

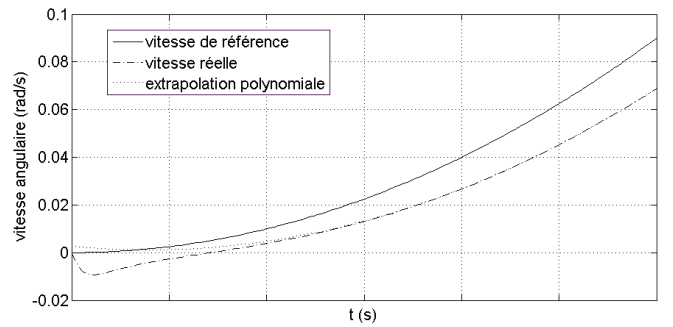


Fig. 10. Extrapolation au deuxième ordre de la vitesse angulaire

En remplaçant l'expression (26) dans l'équation (4) on obtient l'expression du courant sous forme d'un polynôme de second degré :

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{a_{\omega acc} f}{K} t^2 + \frac{2J a_{\omega acc} + b_{\omega acc} f}{K} t + \\ &\quad + \frac{C + b_{\omega acc} J + c_{\omega acc} f}{K} \\ i(t) &= a_{i acc} t^2 + b_{i acc} t + c_{i acc} \end{aligned} \quad (27)$$

En introduisant les expression (26) et (27) dans (2), on obtient l'expression de la tension :

$$\begin{aligned} u(t) &= (R a_{i acc} + K a_{\omega acc}) t^2 + \\ &\quad + (2L a_{i acc} + R b_{i acc} + K b_{\omega acc}) t + \\ &\quad + L b_{i acc} + R c_{i acc} + K c_{\omega acc} \\ u(t) &= a_{u acc} t^2 + b_{u acc} t + c_{u acc} \end{aligned} \quad (28)$$

Nous obtenons alors 6 équations qui sont suffisantes pour calculer les 6 paramètres physiques de l'entraînement électrique :

$$\begin{cases} a_{uacc} = Ra_{iacc} + Ka_{\omega acc} \\ b_{uacc} = 2La_{iacc} + Rb_{iacc} + Kb_{\omega acc} \\ c_{uacc} = Lb_{iacc} + Rc_{iacc} + Kc_{\omega acc} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} a_{iacc} = \frac{a_{\omega acc} f}{2J\hat{K} + b_{\omega acc} f} \\ b_{iacc} = \frac{C + b_{\omega acc} J + c_{\omega acc} f}{K} \\ c_{iacc} = \frac{a_{\omega acc} f}{K} \end{cases} \quad (30)$$

B.2 Identification

Nous notons $\hat{a}_{\omega acc}$, $\hat{b}_{\omega acc}$, $\hat{c}_{\omega acc}$, \hat{a}_{iacc} , \hat{b}_{iacc} , \hat{c}_{iacc} , \hat{a}_{uacc} , \hat{b}_{uacc} , \hat{c}_{uacc} les coefficients estimés des polynômes de deuxième degré des variables mesurées d'entrée-sortie. Les profils de ces variables sont illustrés à la figure 11.

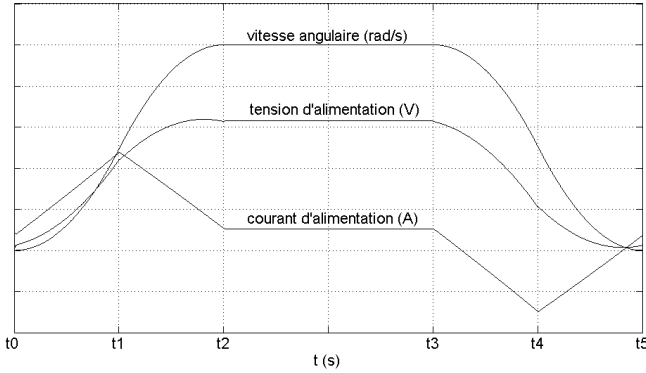


Fig. 11. Variables électriques et mécaniques pour un profil de commande à jerk commandé

La relation entre ces coefficients estimés et les paramètres physiques peut être représentée par deux systèmes linéaires. Le premier, décrivant la partie électrique, correspond au système d'équations (29) et peut être mis sous la forme :

$$\hat{A}_e \hat{\Theta}_e = \hat{B}_e \quad (31)$$

avec :

$$\begin{aligned} \hat{B}_e &= [\hat{a}_{uacc} \quad \hat{b}_{uacc} \quad \hat{c}_{uacc}]^T \\ \hat{A}_e &= \begin{bmatrix} \hat{a}_{iacc} & 0 & \hat{a}_{\omega acc} \\ \hat{b}_{iacc} & 2\hat{a}_{iacc} & \hat{b}_{\omega acc} \\ \hat{c}_{iacc} & \hat{b}_{iacc} & \hat{c}_{\omega acc} \end{bmatrix} \\ \hat{\Theta}_e &= [\hat{R} \quad \hat{L} \quad \hat{K}]^T \end{aligned}$$

La résolution du système est donnée par :

$$\hat{\Theta}_e = \hat{A}_e^{-1} \hat{B}_e$$

Le second système, décrivant la partie mécanique, correspond aux relations (30) et peut s'écrire sous la forme :

$$\hat{A}_m \hat{\Theta}_m = \hat{B}_m$$

avec :

$$\begin{aligned} \hat{B}_m &= [\hat{a}_{iacc} \quad \hat{b}_{iacc} \quad \hat{c}_{iacc}]^T \\ \hat{A}_m &= \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 0 & \hat{a}_{\omega acc} & 0 \\ 2\hat{a}_{\omega acc} & \hat{b}_{\omega acc} & 0 \\ \hat{b}_{\omega acc} & \hat{c}_{\omega acc} & 1 \end{bmatrix} \\ \hat{\Theta}_m &= [\hat{J} \quad \hat{f} \quad \hat{C}]^T \end{aligned}$$

La solution du système est de la forme :

$$\hat{\Theta}_m = \hat{A}_m^{-1} \hat{B}_m$$

IV. RÉSULTATS DE SIMULATION

Les valeurs des paramètres physiques des équations (2) et (4) proviennent d'un entraînement électrique expérimental. Le modèle du système et la stratégie de contrôle sont décrits par le schéma bloc de la figure 2.

Afin de comparer l'utilisation des deux types de profils de commande dans le cadre d'un déplacement point à point, les valeurs initiales et finales de la position sont les mêmes et ont pour valeurs numériques $x_0 = 0$ rad et $x_f = 100$ rad. Le système est simulé à l'aide de l'outil Simulink et l'identification des paramètres est effectué avec MatlabR11.

A. Profil de commande à vitesse trapézoïdale

A partir des signaux non bruités de la figure 12 nous obtenons par simulation les résultats des paramètres physiques qui sont résumés dans le tableau II. Les coefficients des polynômes sont estimés par la méthode des moindres carrés.

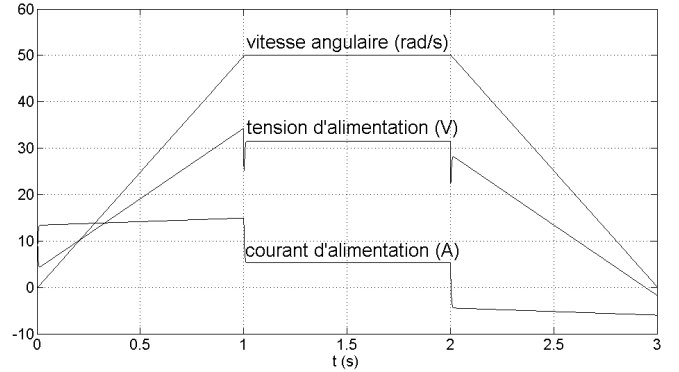


Fig. 12. Signaux non bruités avec un mouvement à vitesse trapézoïdale

Paramètres physiques	Valeurs utilisées en simulation	Valeurs estimées
R (Ω)	0.3	0.3
L (H)	0.004	0.004
K (Nm/A)	0.598	0.598
J (kgm^2)	0.1159	0.1159
f (Nm/rad)	0.0186	0.0186
C (Nm)	2.2189	2.2189

TABLE II
RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC UN PROFIL DE COMMANDE À VITESSE TRAPÉZOÏDALE

Les résultats obtenus à partir de signaux idéaux sont exacts, confirmant l'intérêt de cette nouvelle approche. Néanmoins dans la réalité les paramètres changent à cause de dérives liées à l'usure et aux échauffements, et les signaux sont bruités avec parfois des erreurs de gain et d'offset.

Le tableau III montre les résultats obtenus en modifiant les valeurs des paramètres utilisées en simulation.

Paramètres physiques	Valeurs utilisées en simulation	Valeurs estimées
R (Ω)	0.45	0.45
L (H)	0.004	0.004
K (Nm/A)	0.4784	0.4784
J (kgm^2)	0.1159	0.1159
f (Nm/rad)	0.0279	0.0279
C (Nm)	1.7751	1.7751

TABLE III

RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC VARIATION DES PARAMÈTRES POUR UN PROFIL À VITESSE TRAPÉZOÏDALE

Les paramètres physiques estimés doivent leurs exactitudes à la robustesse de la régulation des trois boucles imbriquées, qui est nécessaire dans le cas du positionnement.

A partir de variables possédant un bruit aléatoire Gaussien, comme illustré sur la figure 13, les résultats obtenus sont présentés au tableau IV.

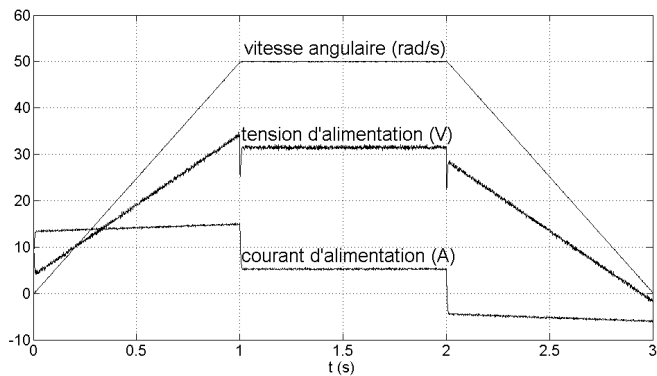


Fig. 13. Signaux bruités avec un profil à vitesse trapézoïdale

Paramètres physiques	Valeurs utilisées en simulation	Valeurs estimées	Erreurs relatives (%)
R (Ω)	0.3	0.3428	14.3
L (H)	0.004	-0.5937	NA
K (Nm/A)	0.598	0.5948	0.5
J (kgm^2)	0.1159	0.1144	1.3
f (Nm/rad)	0.0186	0.0172	7.5
C (Nm)	2.2189	2.3276	4.9

TABLE IV

RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC UN MOUVEMENT À VITESSE TRAPÉZOÏDALE ET DES SIGNAUX BRUITÉS

L'ensemble des paramètres est estimé avec une très faible erreur à l'exception de la résistance R et de l'inductance L . En effet, la méthode des moindres carrés utilisée pour estimer les coefficients des polynômes présente un biais dû à ce bruit de mesure. De plus, la matrice \hat{A}_e de l'équation (25) est mal conditionnée ($\text{cond}\hat{A}_e = 300$). Une diminution ou un filtrage du bruit de mesure donnerait de meilleurs résultats d'ensemble. Un changement des caractéristiques du profil de commande (accélération, vitesse constante V_r) améliorerait le conditionnement de la matrice \hat{A}_e et l'estimation des paramètres.

B. Profil à jerk commandé

A partir des signaux non bruités mesurés représentés à la figure 14, nous obtenons les résultats résumés au tableau V.

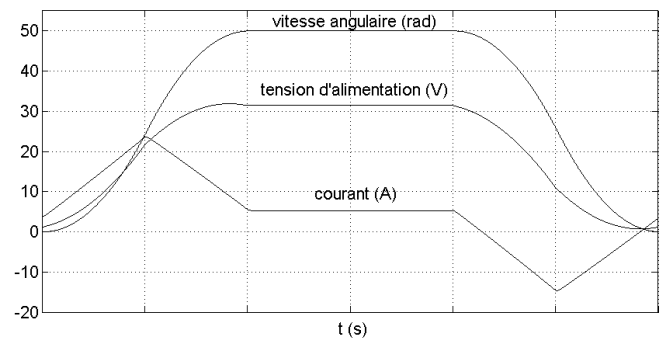


Fig. 14. Signaux non bruités avec un profil à jerk commandé

Paramètres physiques	Valeurs utilisées en simulation	Valeurs estimées
R (Ω)	0.3	0.3
L (H)	0.004	0.004
K (Nm/A)	0.598	0.598
J (kgm^2)	0.1159	0.1159
f (Nm/rad)	0.0186	0.0186
C (Nm)	2.2189	2.2189

TABLE V

RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC UN PROFIL À JERK COMMANDÉ

Les résultats sont exacts et obtenus seulement durant la première partie de la phase d'accélération (de 0 s à 0.5 s dans ce cas). Ceci est très intéressant par rapport au profil trapézoïdal qui nécessite plus de temps puisqu'il exploite la phase d'accélération et la phase de fonctionnement à vitesse constante.

Nous effectuons aussi une simulation avec des signaux bruités avec une distribution aléatoire Gaussienne. La figure 15 illustre ces signaux et le tableau VI résume les résultats obtenus.

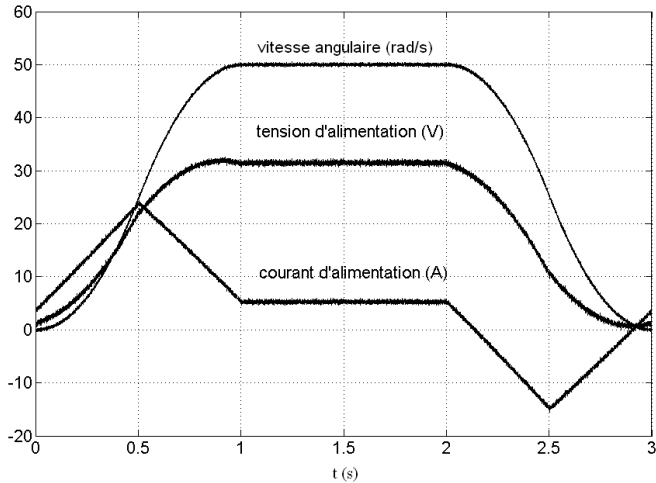


Fig. 15. Signaux bruités avec profil de commande à jerk contrôlé

Paramètres physiques	Valeurs utilisées en simulation	Valeurs estimées	Erreurs relatives (%)
R (Ω)	0.3	0.2986	0.5
L (H)	0.004	0.0043	7.5
K (Nm/A)	0.598	0.5989	0.2
J (kgm^2)	0.1159	0.1156	0.3
f (Nm/rad)	0.0186	0.0197	5.9
C (Nm)	2.2189	2.2357	0.8

TABLE VI

RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC UN PROFIL À JERK COMMANDÉ ET DES SIGNAUX BRUITÉS

Les erreurs d'estimation sur l'ensemble des paramètres sont très faibles. Le biais d'estimation par la méthode des moindres carrés est toujours présent mais le conditionnement de la matrice \hat{A}_e de l'équation (31) est plus faible que dans le cas du profil trapézoïdal ($\text{cond}\hat{A}_e = 3$ par rapport à 300 précédemment) ce qui explique ces bons résultats des paramètres électriques.

Les mêmes remarques concernant l'amélioration des résultats dans le cas du profil trapézoïdal peuvent être appliquées au cas du profil à jerk commandé : un meilleur conditionnement de matrice A_e par le changement des caractéristiques du profil et un meilleur filtrage permettrait une amélioration des résultats.

V. CONCLUSIONS

Une nouvelle approche d'identification des paramètres physiques en vue de la détection de fautes et du diagnostic d'un entraînement électrique à courant continu est présentée dans cet article. Cette approche est basée sur la connaissance de la structure de commande par trois boucles imbriquées de l'entraînement et sur la connaissance des profils de mouvement. Les mouvements considérés sont fréquemment utilisés en positionnement : le profil à vitesse trapézoïdale et le profil à jerk commandé. Les variables d'entrée-sortie du système sont des polynômes de premier degré pour le profil trapézoïdal et de

deuxième degré pour le profil à jerk commandé. Les coefficients de ces polynômes dépendent directement des paramètres physiques recherchés pour le diagnostic. L'estimation de ces coefficients permet l'identification des paramètres physiques.

L'approche proposée est originale dans le sens où l'identification est effectuée quand le système fonctionne normalement en boucle fermée, il n'y a pas besoin d'utiliser de signal d'excitation supplémentaire, et enfin les seules informations utilisées sont celles nécessaires à la régulation par boucles imbriquées.

Les perspectives de cette approche sont : la détermination d'intervalles de confiance pour les paramètres identifiés, la validation expérimentale, l'étude de l'influence des coefficients des polynômes sur les paramètres obtenus, la détermination du profil de commande optimal qui donne les meilleurs résultats, l'application de l'approche à d'autres types d'entraînements électriques asynchrones et synchrones, et finalement l'obtention d'une version récursive de l'approche d'identification. Ces travaux de recherches futurs seront effectués dans le cadre de la réalisation d'une thèse.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Habbadi and F.J. Carrillo. A new approach for closed loop dc electrical drive using prior knowledge. In *IEEE-International Symposium on Industrial Electronics 04*, Ajaccio, France, mai 2004.
- [2] L. Ljung. *System identification : theory for the user*. Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [3] J.P. Louis, B. Multon, and M. Lavabre. Commande des machines à courant continu à vitesse variable. In *Techniques de l'Ingénieur*. France, 2002. D3610.
- [4] P.J. Riedo. Cascade digital control by state variable feed-back method applied to a dc motor. *Microelectronics in power electronics and electrical drives*, pages 249–255, October 1982.
- [5] F. Rotella and F.J. Carrillo. Régression linéaire par moindres valeurs absolues. In *IEEE-CIFA*, Lille, France, juillet 2000.
- [6] M.W. Spong. Robot and dynamics. *John Wiley & Sons*, pages 195–207, January 1989.
- [7] G. Sprinrler. Conception des machines : principes et applications. In *Presse polytechnique et universitaire Romande*, pages 118–129. Suisse, 1998.