

COMMANDE DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS SANS CAPTEURS DE VITESSE ET DE POSITION

W. LAALA, A.R DEBILOU, S. GUEDIDI

Departement d'Electrotechnique, Université de Biskra, Algérie.

E-mail : GUEDIDI SALIM @ djazair-connect.com

RESUME

Une approche pour la commande d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) sans capteurs de position et de vitesse est présentée dans cet article. L'utilisation des phaseurs spatiaux s'est avéré utile pour l'étude du modèle de la MSAP dans différents référentiels et sa translation des uns aux autres. L'approche est basée sur le concept de la «technique de l'état électrique stable». Son utilisation a permis la réduction du modèle de la MSAP. Ce qui a favorisé sans calcul complexe d'aboutir à des algorithmes assez simples d'estimations de la position et de la vitesse. Introduits dans une chaîne de régulation numérique pour la commande d'une MSAP, l'ensemble est simulé sur Simulink de Matlab et testé pour différentes valeurs de consignes allant des faibles jusqu'aux fortes vitesses. De plus l'ajout d'algorithme de démarrage, a comblé le problème lié à l'incertitude de l'angle initial de démarrage quoi que l'algorithme d'estimation peut lui même contrer l'erreur dans certaines proportions. Les résultats obtenus sont plus que satisfaisants et prouvent sans aucune méfiance que ces techniques peuvent en toute rigueur se substituer aux capteurs.

Mots clés : Machine synchrone à aimants permanents, commande sans capteurs.

1. INTRODUCTION

Pendant plusieurs décennies et jusqu'à nos jours, les capteurs de position et de vitesse sont utilisés dans les entraînements à vitesse variable et font toujours l'objet de recherches intensives en vue de nouvelles améliorations pouvant rendre encore plus performants les systèmes d'entraînements. Pourtant ces dernières années et sous l'influence croissante de la demande industrielle et grâce aux performances spectaculaires des calculateurs à microprocesseurs très rapides (DSP et autres) on arrive à un tournant vis à vis de ces capteurs qui semblent causer divers problèmes inhérents à leur structure et à leur coût. Ces problèmes tels que l'encombrement, l'entretien ou par exemple pour celui de type encodeur, l'humidité et la vibration font en sorte qu'ils dégradent les performances du système. Donc, et dans le concept de toujours améliorer, innover et parfaire de nouvelles techniques basées sur la théorie d'estimation de l'automatisme voient leur apparition et se substituent de plus en plus aux capteurs dans les systèmes de régulation[2-8]. Ces nouvelles techniques, appelées communément «commande sans capteurs», et grâce aux travaux continus et acharnés, sont en perpétuelle expansion et voient leur performance grandir. Dans ce contexte, ce présent travail est consacré à l'étude et à la simulation d'une approche pour la commande de la machine à aimants permanents sans capteurs de vitesse et de position.

La principale stratégie d'estimation proposée dans ce travail est développée sur la base de la théorie du référentiel

(d , q) et de ces transformations conformes [1]. En introduisant l'opération de rejet du courant dynamique appelée «technique de l'état électrique stable», la position actuelle du rotor aussi bien que la vitesse de la machine peuvent être estimées avec précision même lors du régime transitoire.

2. MODELE DE LA MACHINE (MSAP)

Dans le référentiel liée au stator (d^s , q^s), le modèle de la machine s'exprime par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 \\ 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} + K_e \omega_r \begin{bmatrix} -\sin(\vartheta_r) \\ \cos(\vartheta_r) \end{bmatrix} \quad (1)$$

En addition, le modèle de la machine lié au référentiel fixe (d^f , q^f) est donné par :

$$\begin{bmatrix} v_d^r \\ v_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r \cdot L_s \\ \omega_r \cdot L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix} + K_e \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Le diagramme vectoriel équivalent à la MSAP est illustré à la figure (1). Dans cette figure, le référentiel $\{r\}$, avec les coordonnées rectangulaires représentées par les axes (q^f , d^f), est orienté à la position électrique réelle du rotor. La majorité de la littérature montre que le modèle de la machine lié à ce référentiel est largement utilisé. Cependant, dans la commande des machines sans capteurs,

la position actuelle exacte du rotor n'est pas disponible, ce modèle ne peut être utilisé. Notons, pour le modèle lié au référentiel fixe, que les quantités finales (tensions et courants) sont directement mesurables.

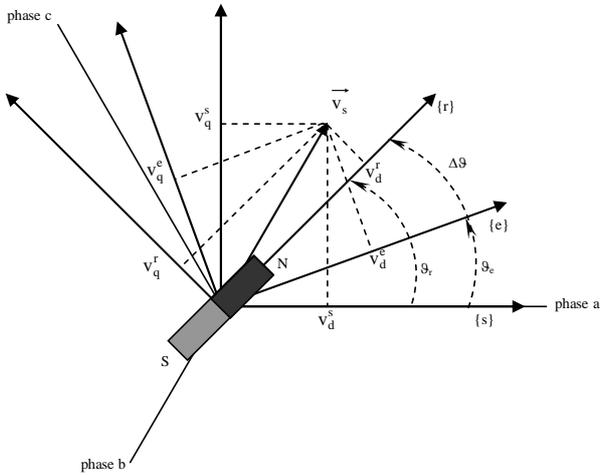


Figure 1: Diagramme vectoriel de la machine synchrone à aimants permanents.

A cet aspect, à défaut de capteur de position réelle, un référentiel arbitraire est suggéré dans [3] pour la commande de machines sans capteurs. Dans cette étude, le concept précédent est introduit pour estimer directement la position actuelle du rotor. Au lieu du référentiel $\{r\}$ lié au rotor, un nouveau référentiel $\{e\}$ avec les coordonnées rectangulaires (d_e, q_e) , orienté suivant la position angulaire électrique estimée du rotor \mathcal{G}_e (figure.1), est adopté pour l'algorithme de contrôle. Ce nouveau référentiel est appelé «référentiel d'estimation» et, il est désigné par l'indice supérieur «e» dans ce travail. L'ensemble des algorithmes de commande, y compris celui d'estimation et celui de la régulation du courant travaille dans ce référentiel.

Etant donné que le système de coordonnées $\{s\}$ est décalé, de l'angle $-\mathcal{G}_r$ par rapport au système de coordonnées $\{r\}$, est de $-\mathcal{G}_e$ par rapport au système de coordonnées $\{e\}$, il y a les relations suivantes :

$$\Delta\mathcal{G} = \mathcal{G}_r - \mathcal{G}_e \quad (3)$$

$$\vec{v}_s^s = \vec{v}_s^r \cdot e^{j\mathcal{G}_r} \quad (4)$$

$$\vec{v}_s^e = \vec{v}_s^s \cdot e^{-j\mathcal{G}_e} \quad (5)$$

$$\vec{i}_s^r = \vec{i}_s^s \cdot e^{-j\mathcal{G}_r} \quad (6)$$

$$\vec{i}_s^e = \vec{i}_s^s \cdot e^{-j\mathcal{G}_e} \quad (7)$$

La substitution de (4) et (6) respectivement dans (5) et (7) donne les relations suivantes :

$$\vec{v}_s^e = \vec{v}_s^r \cdot e^{j\Delta\mathcal{G}} \quad (8)$$

$$\vec{i}_s^e = \vec{i}_s^r \cdot e^{j\Delta\mathcal{G}} \quad (9)$$

La séparation des parties réelles et imaginaires de (8) et (9) et après quelque étape de calcul, on aboutit au modèle du moteur dans le référentiel d'estimation :

$$\begin{bmatrix} v_d^e \\ v_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + \frac{d\mathcal{G}_e}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + K_e \omega_r \begin{bmatrix} -\sin \Delta\mathcal{G} \\ \cos \Delta\mathcal{G} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Comme le montre le modèle de la relation (10), la tension statorique représentée dans le référentiel d'estimation $\{e\}$, se compose de deux termes. Le premier représente une chute de tension, le second la force contre électromotrice (f.c.e.m). L'équation (10) indique que les informations sur l'écart angulaire $(\Delta\mathcal{G})$ et la vitesse ω_r de la machine sont comprises dans le terme de la f.c.e.m. Par conséquent, sans calcul complexe, l'information sur l'angle actuel du rotor \mathcal{G}_r , peut être obtenue à partir de $\Delta\mathcal{G}$ qui est extraite de la f.c.e.m dans (10) pour un angle d'estimation \mathcal{G}_e donné. L'idée immédiate qui vient à l'esprit pour trouver la valeur de la f.c.e.m, est de soustraire le terme correspondant à la chute de tension (après l'avoir trouvé), de la tension totale. Cependant, la recherche de ce terme, en particulier l'identification des paramètres R_s et L_s et l'obtention de la chute de tension due à la variation dynamique du courant $(L_s \cdot di/dt)$, a fait l'objet de plusieurs études et s'avère très difficile, que se soit du point de vue précision sur les résultats obtenus ou du point de vue augmentation du temps de calcul, ce qui nuit à la précision sur la valeur de la f.c.e.m, par suite à l'estimation en temps réel, et par conséquent se répercute sur la dynamique de la commande.

De plus, le terme de couplage représenté par $(L_s \cdot d\mathcal{G}_e/dt \cdot i)$ appelé «tension vitesse», rend encore plus difficile, la tâche d'extraction des informations sur la f.c.e.m.

3. STRATEGIE DE COMMANDE SANS CAPTEURS

Dans l'ordre de faciliter la tâche de détection de la position et de la vitesse, on introduit la technique de "l'état d'équilibre électrique stable" [11] où on élimine les variations du courant durant une certaine période afin d'obtenir une meilleure information sur la f.c.e.m. (comme le montre la figure 2)

Ainsi, à la fin de chaque intervalle d'estimation (T_s) , les expressions suivantes doivent être satisfaites :

$$\frac{di_q^e}{dt} \cong 0, \quad \frac{di_d^e}{dt} \cong 0, \quad \frac{d\mathcal{G}_e}{dt} = 0 \quad (11)$$

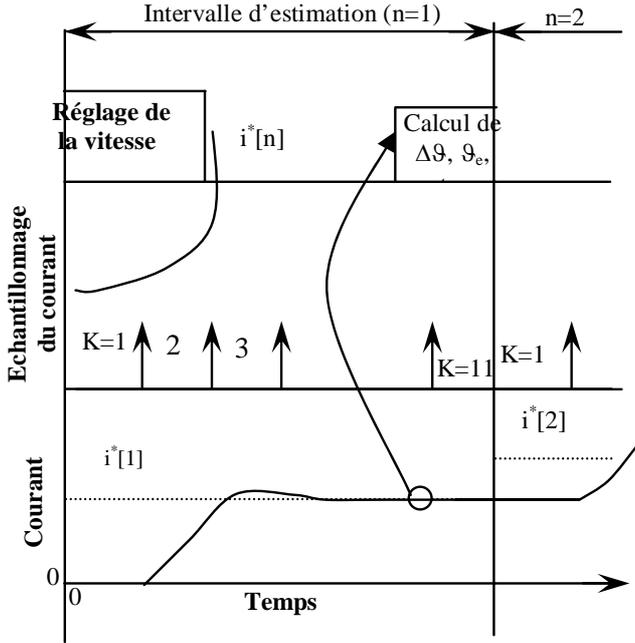


Figure 2 Diagramme temporel de l'opération de l'état d'équilibre électrique.

Par conséquent le système d'équation (10) peut être simplifiée comme :

$$\begin{bmatrix} v_d^e \\ v_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + K_e \omega_r \begin{bmatrix} -\sin \Delta \theta \\ \cos \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

On présume que la différence angulaire est suffisamment petite. Ainsi, à la fin de chaque période d'estimation, cet écart peut être calculé par une simple division comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{-(v_d^e - R_s \cdot i_d^e)}{(v_q^e - R_s \cdot i_q^e)} &= \frac{k_e \cdot \omega_r \cdot \sin(\Delta \theta)}{k_e \cdot \omega_r \cdot \cos(\Delta \theta)} = \\ &= \frac{\sin(\Delta \theta)}{\cos(\Delta \theta)} = \tan(\Delta \theta) \cong \Delta \theta \end{aligned} \quad (13)$$

Par conséquent, sans méthode de calcul compliquée, l'angle d'estimation peut être forcé à se synchroniser avec l'angle actuel du rotor à chaque période d'estimation par la règle suivante :

$$\theta_e(n+1) = \theta_e(n) + \Delta \theta \quad (14)$$

De l'autre coté, la vitesse angulaire peut être calculée par la relation suivante :

$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{k_e} \sqrt{(E_d^e)^2 + (E_q^e)^2} \cdot \text{sign}(E_q^e) \quad (15)$$

avec

$$\begin{aligned} E_d^e &= v_d^e - R_s \cdot i_d^e = -k_e \cdot \omega_r \cdot \sin(\Delta \theta) \\ E_q^e &= v_q^e - R_s \cdot i_q^e = k_e \cdot \omega_r \cdot \cos(\Delta \theta) \end{aligned} \quad (16)$$

4. ALGORITHME DE DEMARRAGE

Pour la mise en œuvre pratique de la technique précédente dans la commande de la MSAP, il est nécessaire d'introduire un algorithme de démarrage au début de l'algorithme de commande.

L'idée de base de cette méthode [10] est de détecter la petite fluctuation de la tension de la f.c.e.m en injectant un courant test de haute fréquence à la machine à l'arrêt. A la fin du test, la machine subit une légère rotation dans une direction arbitraire. Le modèle utilisé sur lequel repose cette stratégie est donné par l'équation (1) à la fin de la courte impulsion du courant test, le modèle se réduit à :

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = k_e \omega_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

Par suite le calcul de l'angle de rotation s'obtient de :

$$\frac{-v_d^s}{v_q^s} = \frac{k_e \omega_r \sin \theta_r}{k_e \omega_r \cos \theta_r} = \frac{\sin \theta_r}{\cos \theta_r} = \tan(\theta_r) \quad (18)$$

D'où :

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{E_d^s}{E_q^s} \right)$$

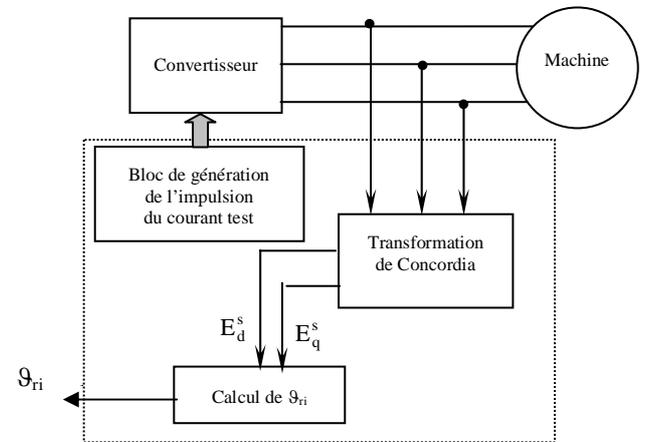


Figure 3: Bloc de génération de l'impulsion de courant test et calcul de θ_{ri}

5. STRUCTURE ET SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME GLOBAL

5.1 Description du système :

La figure (4) représente la stratégie de la commande vectorielle sans capteurs, pour des raisons de rapidité, de simplicité et de robustesse vis à vis des variations des paramètres de la machine, le régulateur à hystérésis s'impose comme solution efficace.

Le bloc d'estimation fournit, à partir des grandeurs mesurées (courants et tensions), la vitesse, la position et

l'écart angulaire à la fin de chaque période d'estimation.

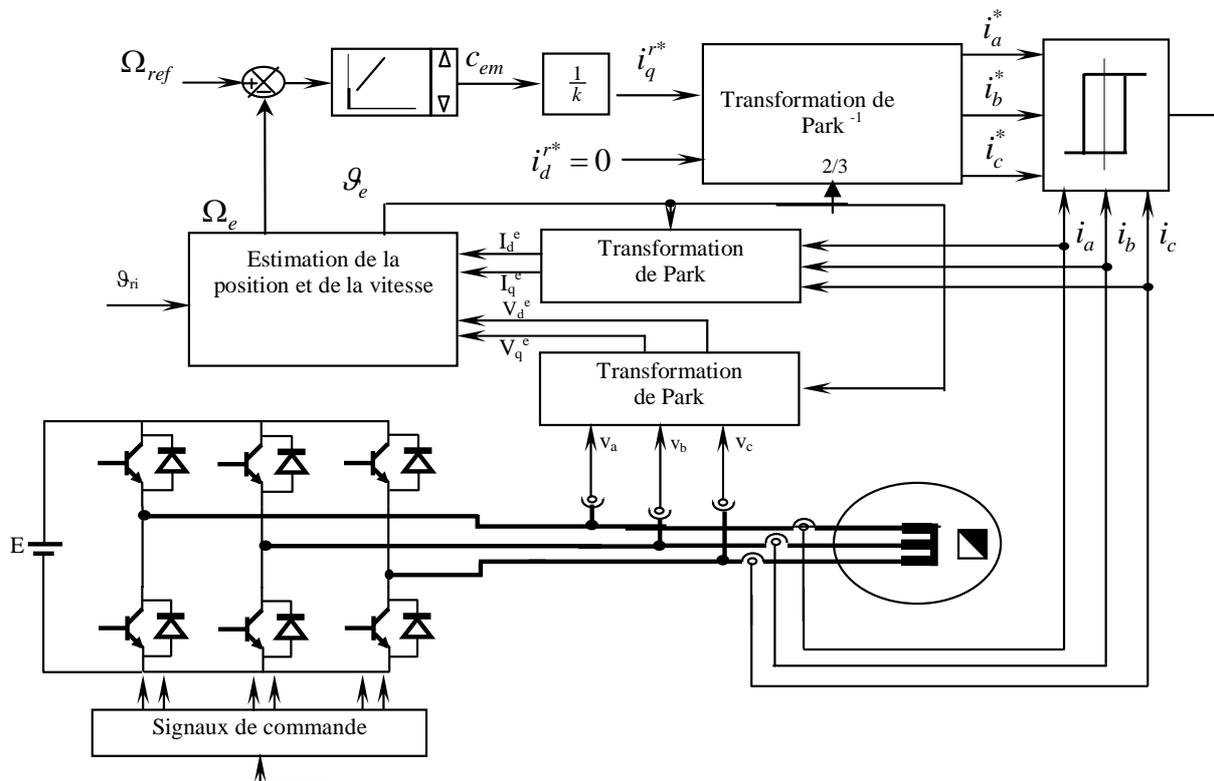


Figure 4: Système d'entraînement à vitesse variable à machine synchrone à aimants.

5.2 Résultats de la simulation numérique

Afin d'évaluer les performances et les capacités de l'algorithme d'estimation proposé, nous avons soumis notre système à divers tests de simulation.

Les figures (5) et (6) illustrent la réponse du système pour des consignes de vitesse allant des faibles jusqu'aux fortes vitesses. Pour chaque cas, on présente les graphes de l'angle réel et estimé du rotor ainsi que les graphes des vitesses réelle et estimée correspondantes, avec des changements du sens de rotation. Il est bien clair, d'après ces résultats, que l'algorithme de réglage sans capteurs proposé possède une large capacité de réglage de vitesse et une bonne réponse aussi bien en régime transitoire qu'en régime statique.

De plus la capacité de démarrage de l'algorithme d'estimation proposé pour un angle initial de 5 rd électrique (soit 286.45°) où l'on voit bien que l'algorithme suit à partir de cette valeur (figure 7).

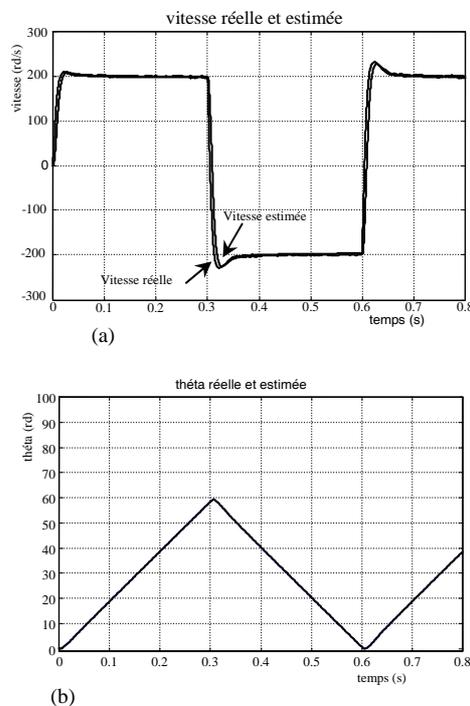


Figure 5: Résultats de simulation avec inversion du sens de rotation aux instants $t = 0.3s$ et $t=0.6s$.

(a). Vitesse réelle et estimée pour une valeur de consigne ± 200 rd/s.

(b). Position angulaire réelle et estimée du rotor correspondant à la vitesse ± 200 rd/s.

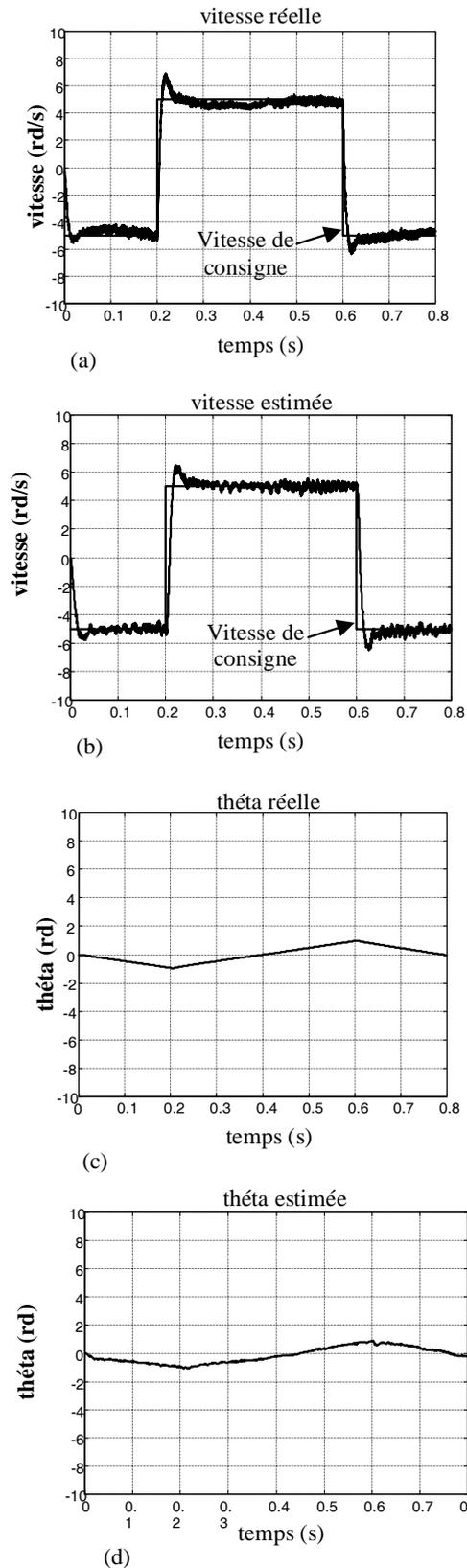


Figure 6: Résultats de simulation pour des vitesses de consignes de ± 5 rd/s avec inversion du sens de rotation aux instants $t = 0.2$ s et à $t = 0.6$ s.

- Vitesse réelle et de consigne
- Vitesse estimée et de consigne
- Position angulaire réelle du rotor
- Position angulaire estimée du rotor.

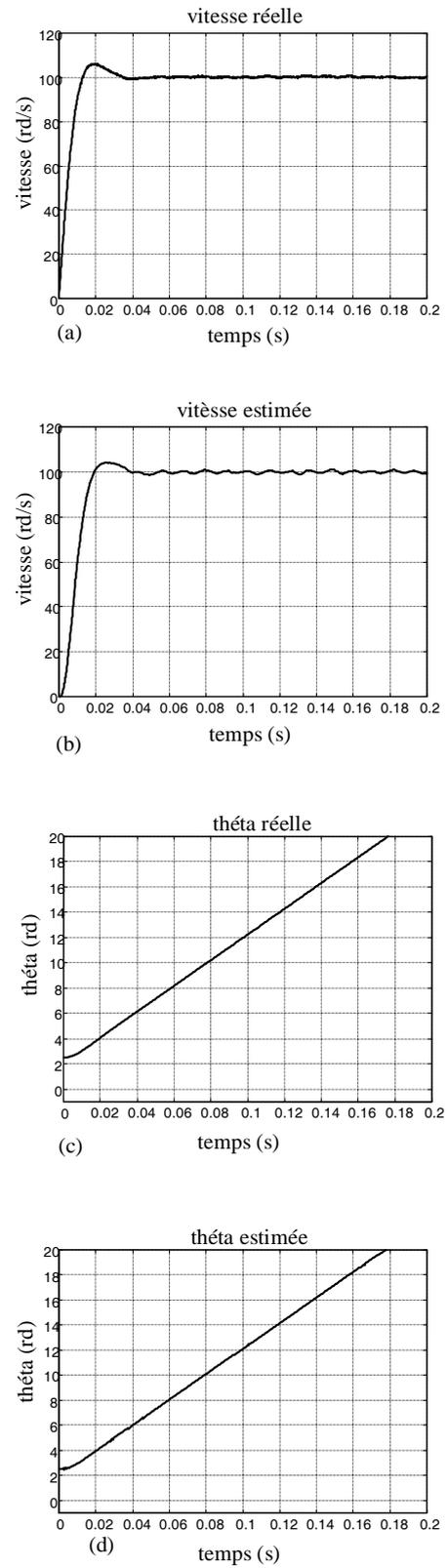


Figure 7: Résultats de simulation pour une position angulaire initiale du rotor de 2.5 rd.

- Vitesse réelle.
- Vitesse estimée.
- Position angulaire réelle du rotor avec une valeur initiale de 2.5 rd.
- Position angulaire estimée du rotor avec une valeur initiale de 2.5 rd.

CONCLUSION

L'introduction du fameux concept de l'attente de l'équilibre électrique a porté ses fruits : par l'élimination de deux termes vraiment gênants d'une manière simple et élégante. La complémentarité des deux idées a pu aboutir à commander un système d'entraînements à vitesse variable à MSAP sans capteurs de position et de vitesse avec un degré de performance élevé, de plus l'ajout de l'algorithme de démarrage a comblé le problème lié à l'incertitude de l'angle initial de démarrage, quoi que l'algorithme d'estimation peut lui même contrer l'erreur dans certaines proportions. Vu les résultats obtenus, on peut conclure que ce travail a apporté une sérieuse contribution dans cet axe et que l'on peut se passer concrètement des capteurs de position et de vitesse.

PARAMETRES DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS

Les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents étudiés en simulation sont les suivants [9] :

Puissance nominale :	$P_n = 1.38 \text{ Kw}$
Tension nominale :	$V_n = 100 \text{ v.}$
Résistance de phase :	$R_s = 0.8 \Omega.$
Inductance cyclique sur l'axe direct :	$L_d = L_s = .0011 \text{ H.}$
Inductance cyclique sur l'axe transverse :	$L_q = L_s = .0011 \text{ H.}$
Nombre de paire de pôles	$p = 2.$
Amplitude des flux des aimants permanents :	$K_e = 0.2 \text{ Wb.}$
Moment d'inertie :	$J = 0.00011 \text{ Kg.m}^2.$
Coefficient de frottement visqueux :	$f = 0.000019 \text{ N.m/rd/s.}$
Période d'échantillonnage du courant :	$T_c = 50 \mu\text{s}$
Période d'estimation :	$T_s = 12.T_c$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Buhler, «Conception des systèmes automatiques», Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1995.
- [2] I. Awaya and A.I., «New notion control with inertia identification function using disturbance observer», in Proc. IECon'92, vol.1, pp. 77-81.
- [3] N.Matsui and M.Shigyo, «Brushless dc motor control without position and speed sensors», IEEE Trans,Ind, Applicat, vol.28, pp. 120-127, Jan 1992.
- [4] P.E.Moraal and J.W.Grizzle, «Observer design for non linéaire systems with discret time measurments», IEEE trans, Automat, Contr, vol. 40, pp. 395-404, 1995.
- [5] K.R. Shouse and O.G. Taylor, «Discrete-time observer for singularly perturbed continous time systems», IEEE trans, Automat. Contr, vol. 40, pp. 224-235, 1995
- [6] R. Wu and G. R. Slemon, «A permanent motor drive without a shaft sensor», IEEE Transaction. Ind. Applicat, vol. 27, pp. 1005-1011 may 1991.
- [7] P.P. Acarnley and N. Ertugrul, «Rotor position estimation in PM motors», in Int. Conf. Electrical Machines, Manchester, 1992, pp. 622-626. ,
- [8] T.H. Lui and C.P.Cheng, «Controller design for a sensorless permanent-magnet synchronous drive systems», Proc. Int. Elect. Eng. vol. 140, n°6, Nov 1993.
- [9] A. Y. Achour, «Synthèse de commande et d'observateur par la passivité : application à la machine synchrone à aimants permanents», thèse de magister, EMP, Alger 1999.
- [10] M. Matsui and T. Takeshita, «A new starting method of sensorless salient-pole brushless motor», IAS. Conf. Rec, pp. 386-394, 1994.
- [11] J.S.Kim and S.K.Sul, «New approach for high performance PMSM Drives without rotational position sensors», IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 12, n°5, September 1997.
- [12] H. Buhler, «Réglage échantillonnés», vol. 1, Presses polytechniques romandes,