

# Diagnostic des capteurs pour la commande des entraînements électriques

Sidath Diao<sup>1,2</sup>, Demba Diallo<sup>2</sup>, Zaatar Makni<sup>1</sup>, Claude Marchand<sup>2</sup>,

- 1) Valeo/ Groupe d'Expertise en Electronique et en Développement de Services, 2 rue André Boulle, 94000 Créteil France
- 2) Laboratoire de Génie Electrique de Paris CNRS UMR 8507, Univ. Paris-Sud, SUPELEC, Univ. UPMC; 11, rue Joliot Curie, Plateau du Moulon, 91192 Gif-Sur-Yvette, France, (e-mail: [sidath.diao@lgep.supelec.fr](mailto:sidath.diao@lgep.supelec.fr))

**RESUME** – Ce papier traite de la détection des défauts sur les capteurs pour un ensemble Machine Synchrone et Onduleur par des méthodes d'estimation pour des systèmes modélisés sous forme de représentation d'état. Les capteurs à surveiller dans notre cas sont ceux de la position/vitesse et des courants de phase. Des résultats expérimentaux illustrent l'approche utilisée.

**MOTS-CLES** – Diagnostic, Détection et Isolation de défaut, Machine Synchrone, capteurs, Estimateurs

## 1. Introduction

De nombreuses applications industrielles exigent une tolérance aux défauts et une continuité de service [1]. Cela est dû à la nécessité croissante d'améliorer la disponibilité des systèmes. Par conséquent, des stratégies sont définies dès les premières étapes de conception, de manière à faciliter la détection de défaut, leur localisation et la reconfiguration de la commande. Dans le milieu automobile, les entraînements électriques sont de plus en plus présents et remplissent de plus en plus de fonctionnalités. Pour les rendre disponibles, à la fois la redondance matérielle et des stratégies de contrôle doivent être envisagées. En effet, plusieurs récents travaux [2, 3] traitent de commande tolérante aux défauts des entraînements électriques. Une méthode largement utilisée pour la détection et isolation de défauts est la méthode basée sur des observateurs ([4, 5]). Cet article utilise cette approche et détaille les principales composantes d'une stratégie de commande tolérante aux défauts (CTD) des capteurs. Elle se décompose en trois étapes : détection, isolation et reconfiguration. Elle est appliquée à un entraînement électrique, composé d'un onduleur et d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP), dédié aux applications de transport. Les capteurs qui font l'objet de notre étude sont ceux de la position/vitesse, des courants de phase.

## 2. Commande des Machines Synchrones

Le fonctionnement des entraînements électriques est très dépendant de la fiabilité des capteurs. D'après [6], le circuit de commande a le plus grand taux de défaut dans la chaîne de conversion d'énergie. Un schéma typique de commande de la MSAP est donné dans la figure 1. Les signaux issus des capteurs sont les entrées de l'algorithme de contrôle qui pilote l'électronique de puissance de façon à alimenter la machine avec les tensions appropriées. Cette boucle fermée utilise ainsi les mesures de position/vitesse, de courants et du bus de tension continue pour calculer les tensions de référence correspondant au point de fonctionnement. Dans les applications automobiles, en raison du haut niveau de sûreté de fonctionnement requis par les standards, trois capteurs de courant sont implémentés.

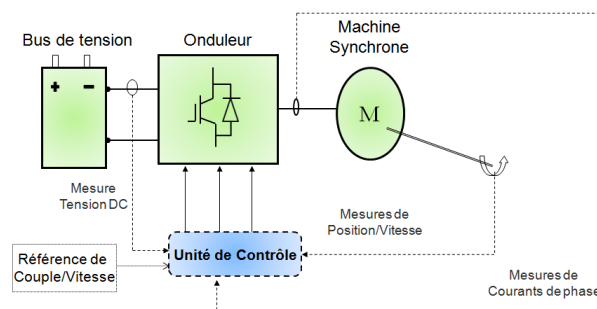


Fig. 1: Schéma de contrôle d'une MSAP

A l'apparition d'un défaut capteur, un module redondant est activé. L'estimation basée sur la théorie des observateurs semble être un outil approprié pour le diagnostic. L'objectif est d'avoir un système capable de se réadapter à l'apparition d'un défaut. La sortie du capteur défaillant est ainsi remplacée par un signal reconstruit à partir des données de la commande et des autres mesures. L'utilisation d'observateurs est due au fait qu'elle est très appropriée pour la détection de défaut puisqu'elle cause un très faible retard dans le processus de prise de décision [7].

## 2.1 Détection d'un défaut capteur de position

Pour diagnostiquer le capteur de position/vitesse, un filtre de Kalman est utilisé comme observateur. Ensuite, un algorithme de vote est utilisé pour activer la détection de défauts et effectuer la sélection entre les signaux mesurés et les signaux estimés.

### 2.1.1 Synthèse du capteur logiciel à base d'observateur

Pour l'implémentation de l'estimateur en temps réel, un modèle discret est nécessaire. Il est défini à chaque instant  $k$  par :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (2)$$

$A_d$  est une matrice d'évolution contenant des paramètres électriques ( $R_s$  : résistance statorique,  $L_d$  et  $L_q$  des inductances),  $B_d$  est une matrice de commande et  $C$  est une matrice d'observation. L'état  $x$  contient les courants, la vitesse et la position. La méthode utilise la théorie du Filtre de Kalman étendu à l'estimation des systèmes non linéaires [8]. L'estimation de la position/vitesse est effectuée en utilisant les tensions de référence associées aux mesures de courants de phase. Elle se décrit avec une étape de prédiction et une étape de correction comme suit:

Prédiction:

$$\hat{x}(k/k-1) = A_d(k-1)\hat{x}(k-1/k-1) + B_d(k-1)u(k-1) \quad (3)$$

$$\Sigma(k/k-1) = A(k-1)\Sigma(k-1/k-1)A(k-1)^T + Q(k-1)$$

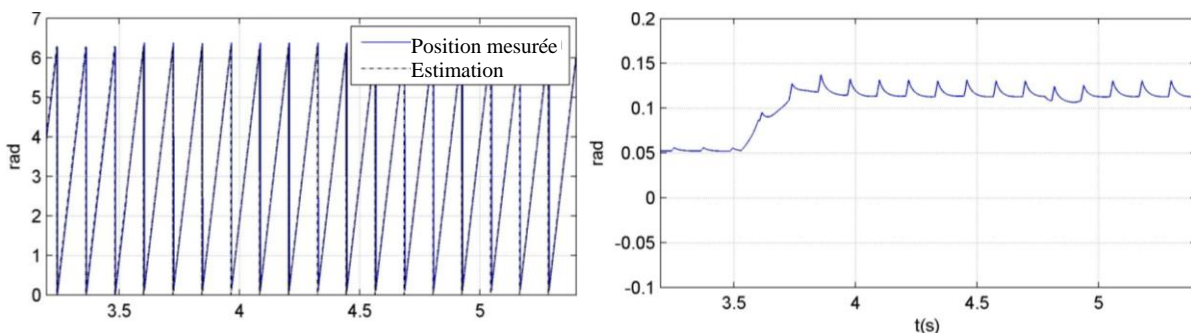
Correction:

$$\begin{aligned} K(k) &= \Sigma(k-1)C_d^T(k) \left( C_d(k)\Sigma(k-1)C_d^T(k) + R(k) \right)^{-1} \\ \Sigma(k/k) &= \Sigma(k/k-1) - K(k)C(k)\Sigma(k/k-1) \\ \hat{x}(k/k) &= \hat{x}(k/k-1) + K(k)[y(k) - C_d(k)\hat{x}(k/k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

Dans les équations (3), (4), les matrices de covariance  $Q$  et  $R$  caractérisent les bruits de mesure et les incertitudes du modèle électrique.

### 2.1.2 Validation Expérimentale

La validation sur banc est effectuée sur une MSAP de 1.1 kW. Un biais de +0.1 radian mécanique sur la mesure de position est inséré pendant quelques secondes en régime permanent. Les résultats sont tracés sur la Figure 2. A l'apparition du défaut ( $t=3.53s$ ), l'erreur d'estimation varie significativement.



Position Mécanique et son estimation

Erreur d'estimation de la position mécanique

Fig.2 Estimation de la position

Ainsi, cette information peut être utilisée pour activer une détection de défaut capteur.

## 2.2 Détection d'un défaut capteur de courant

Considérant le modèle électrique de la MSAP, les courants de phase peuvent être exprimés comme une fonction des tensions, de la position et de la vitesse. Les position/vitesse estimées par le filtre de Kalman sont utilisées avec les

tensions de référence pour estimer les trois courants triphasés  $(\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{i}_c)$ . Une commande adaptative par modèle de référence est utilisée avec un retour d'état. L'objectif est une commande en boucle fermée avec des paramètres variables pour modifier le modèle ajustable grâce à une comparaison avec un modèle de référence.

### 2.2.1 Modèle d'observateur

Le modèle de référence détermine les états désirés (courants de phase) et le modèle ajustable génère les états estimés [9]. La MSAP avec les courants dans le repère tournant comme variable d'états est maintenant considérée :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$x = [x_1, x_2] = [i_d + \frac{\phi}{L_d}, i_q] \quad u = [u_d, u_q] = [u_d + \frac{R_s}{L_d} \phi, u_q]$$

La loi de commande par retour d'état s'écrit:  $u = -Kx$  où  $K = [k_1, k_2]$  est le gain du retour d'état. Les courants peuvent donc être estimés par:

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = (A - BK)\hat{x} \quad (6)$$

Ainsi, en appliquant les transformées inverses de Park et de Concordia, on estime les trois courants triphasés  $[\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{i}_c]$ .

### 2.2.2 Validation Expérimentale

La validation de la méthode de détection de défauts capteurs de courant est effectuée avec la même MSAP présentée précédemment.

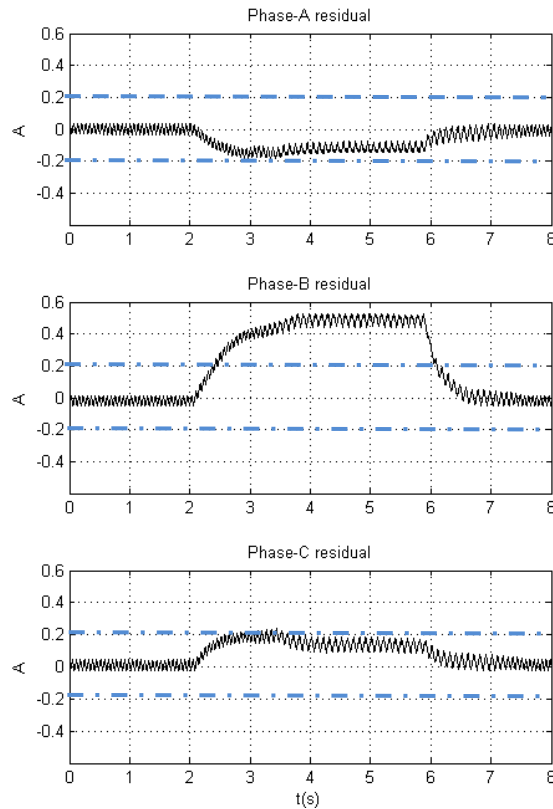


Fig.3: Résidus des défauts de capteur de courant

Un biais de 0.5 A (soit 20 % sur l'amplitude du courant) est inséré en cours de fonctionnement au niveau du capteur de la phase B de  $t=2s$  à  $t=6s$ . Les résultats sont tracés sur la Figure 3 avec les trois résidus  $[\hat{i}_a - \hat{i}_a, \hat{i}_b - \hat{i}_b, \hat{i}_c - \hat{i}_c]$ . Le seuil de détection est représenté en pointillé sur chaque résidu. La variation la plus importante est remarquée sur le deuxième

résidu qui indique que le défaut de mesure affecte le capteur de la phase B. Les variations dans les résidus restants sont dues à la boucle fermée. La structure de CTF est décrite en Fig.4.

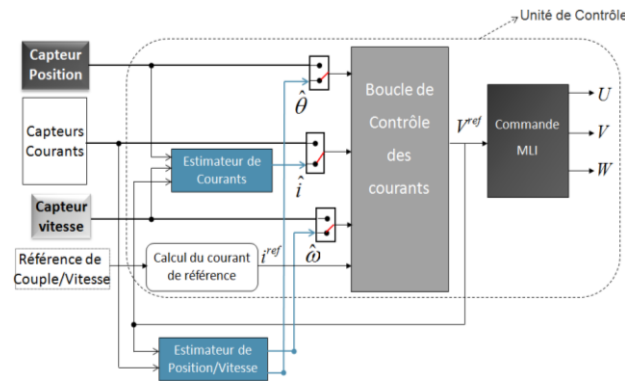


Fig. 4. Structure de Commande Tolérante aux défauts

### 3. Conclusion

Ce papier décrit une structure de détection de défauts de capteurs pour une MSAP. La détection de défaut est basée sur un observateur adaptatif pour le courant et un filtre de Kalman étendu pour la position/vitesse. La décision est faite grâce au calcul de résidus. Enfin, la structure de détection a montré son efficacité par des résultats expérimentaux dans le cas d'un défaut capteur (position ou courant). La prochaine étape sera la mise en œuvre de la commande tolérante aux défauts complète avec une reconfiguration en ligne grâce à l'algorithme de vote.

### 4. Références

- [1] Benbouzid, M.E.H., Diallo, D., Zeraoulia, M.; "Advanced Fault-Tolerant Control of Induction-Motor Drives for EV/HEV Traction Applications: From Conventional to Modern and Intelligent Control Techniques," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol.56, n° 2, pp.519-528, March 2007
- [2] Green, S.; Atkinson, D.J.; Jack, A.G.; Mecrow, B.C.; King, A.; "Sensorless operation of a fault tolerant PM drive," Electric Power Applications, IEE Proceedings, vol.150, n° 2, pp. 117- 125, Mar 2003
- [3] Abolhassani, M.T., Toliyat, H.A., "Fault tolerant permanent magnet motor drives for electric vehicles," Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, pp.1146-1152, 3-6 May 2009
- [4] Chen, J., Patton, R., "Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems", Kluwer Academic, Boston, 1999.
- [5] J. Holtz, "Methods for speed sensorless control of AC drives ", in Sensorless Control of AC Motor Drives, Piscataway, NJ, IEEE Press, 1996
- [6] J.C. Trigeassou, "Electrical Machines Diagnosis", Chapter 9 (Faults Detection and Diagnosis in a Static Converter) , Wiley 2011
- [7] Jiang, J., & Zhao, Q. "Should we use parameter estimation or state estimation based methods for FDI". In Proceedings of IFAC Symposium on SAFEPROCESS'97, (pp. 474–479).
- [8] Akrad, A.; Hilaret, M.; Diallo, D.; "Design of a Fault-Tolerant Controller Based on Observers for a PMSM Drive," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.58, n° 4, pp.1416-1427, April 2011
- [9] Zhang Bingyi, Chen Xiangjun, Sun Guanggui, Feng Guihong, "A Position Sensorless Vector-control System Based on MRAS for Low Speed and High Torque PMSM Drive" , Electrical Machines and Systems, ICEMS, Proceedings of the Eighth International Conference on , vol.2, no., pp.1682,1686, 29-29 Sept. 2005