

Diagnostic des capteurs pour la commande des entraînements électriques

Sidath Diao^{1,2}, Demba Diallo², Zaatat Makni¹, Claude Marchand²,

- 1) Valeo/ Groupe d'Expertise en Electronique et en Développement de Services, 2 rue André Bouille, 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)

RESUME - Ce papier traite de la détection des défauts sur les capteurs pour un ensemble Machine Synchrone et Onduleur par des méthodes d'estimation 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-clés— 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, la redondance matérielle et des stratégies de contrôle doivent être à la fois envisagées. En effet, plusieurs récents travaux [2, 3] traitent de la 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]). Une structure complète de détection et de reconfiguration des principaux capteurs d'un entraînement électrique est présentée dans ([6], [7], [8]). Les cas des machines synchrones et asynchrones sont évalués. Pour le diagnostic du capteur de position, différentes méthodes ont été appliquées dans ([9], [10], [11]). Les observateurs sont souvent utilisés pour reconstruire la position du rotor à partir des courants de phase et des tensions.

Pour les courants de phase, [12] propose une approche simple de détection basée sur le traitement des signaux issus du capteur. Toutefois, cette approche permet de diagnostiquer uniquement dans le cas d'une commande en boucle ouverte.

Cet article détaille les principales composantes d'une stratégie de commande tolérante aux défauts (CTD) des capteurs. Cette dernière 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 et des courants de phase.

2. DIAGNOSTIC DES CAPTEURS POUR LA MSAP

Le fonctionnement des MSAP est très dépendant de la disponibilité des capteurs. Quand la mesure du capteur est perdue, le contrôle standard s'arrête ou est considérablement perturbé. Dans ces conditions, une CTD assure un fonctionnement continu du système, même avec des performances diminuées. Un module de détection et de diagnostic de défauts détecte la perte du capteur et la CTD reconfigure le contrôle pour maintenir la meilleure performance de contrôle avec les signaux disponibles restants. Un schéma typique d'un contrôle MSAP est donné dans la figure 1.

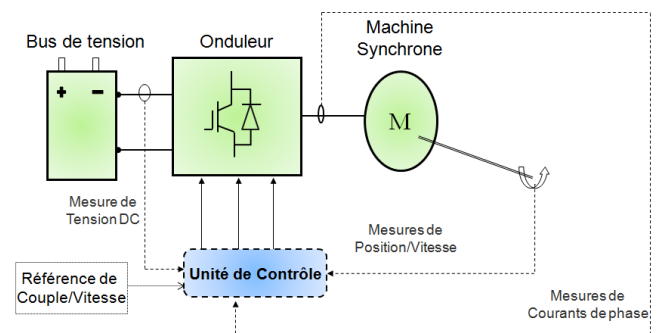


Fig.1 Schéma de contrôle d'une MSAP

L'entraînement électrique est équipé d'un capteur pour le bus tension continue, trois capteurs de courant (en raison des exigences de sûreté) et un capteur de position. La vitesse est généralement calculée à partir de la position. Afin d'améliorer la fiabilité du système en ce qui concerne ses

capteurs, des redondances matérielle et logicielle sont généralement adoptées. L'objectif est d'avoir un système adaptatif qui peut se réorganiser tout en traitant avec un défaut de capteur. Le capteur défaillant est ainsi reconstruit à partir des données de commande associées aux capteurs sains restants.

La redondance matérielle a souvent été utilisée dans le passé et ajoute de la complexité à la conception et augmente le coût du système. Malgré le surcoût en temps de calcul, la redondance logicielle est devenue une alternative prometteuse. Cette solution est plus intéressante en raison de sa flexibilité et sa capacité d'évolution. Ainsi, l'estimation d'état ou de paramètres semble être un outil approprié pour la CTD. De plus, elle est bien indiquée pour de la détection de défaut parce qu'elle ne cause qu'un très court retard sur le processus de prise de décision [13]. Son principal avantage est sa capacité à détecter des défauts partiels en comparaison aux méthodes traditionnelles qui ne détectent qu'une panne complète du capteur. Ils offrent aussi une détection rapide des types de défaut suivant: biais, saturation, déconnexion complète.

3. DIAGNOSTIC DU 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.

3.1. Synthèse de l'estimateur de position/vitesse

La MSAP est modélisée dans le référentiel (d,q) par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d}\omega & 0 & 0 \\ -\frac{L_d}{L_q}\omega & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\phi}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \quad (1a)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta)}{L_d} & \frac{\sin(\theta)}{L_q} \\ \frac{\sin(\theta)}{L_q} & \frac{\cos(\theta)}{L_d} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1b)$$

Avec $x = [i_d, i_q, \omega, \theta]$, $u = [v_\alpha, v_\beta]$ $y = [i_\alpha, i_\beta]$

Dans ces équations, v_α , v_β , i_α and i_β sont respectivement les tensions et les courants dans le référentiel (α,β) , i_d and i_q les courants dans le repère tournant (d,q) . L_d et L_q sont

respectivement les inductances dans l'axe direct et en quadrature, R_s la résistance statorique et ϕ le flux produit par les aimants. ω est la vitesse électrique en radians par seconde et θ est la position électrique. 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. 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 [14]. 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:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k/k-1) &= A_d(k-1)\hat{x}(k-1/k-1) + B_d(k-1)u(k-1) \\ \Sigma(k/k-1) &= A(k-1)\Sigma(k-1/k-1)A(k-1)^T + Q(k-1) \end{aligned} \quad (3)$$

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. Dans certains travaux sur le filtre de Kalman, une approche physique est utilisée pour obtenir un réglage plus réaliste qui permet d'évaluer à peu près les incertitudes des variables d'état et de paramètres. Toutefois, une évaluation fine est très difficile, et généralement, une analyse simplifiée est utilisée. Sans plus d'informations, les bruits sont considérés comme décorrélés et indépendant du temps.

3.2. 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. Cette valeur de biais est choisie car en dessous de cette dernière, l'impact du défaut capteur sur le contrôle est négligeable. Les résultats sont tracés sur la Figure 2a. A l'apparition du défaut ($t = 3.53s$), l'erreur d'estimation varie significativement. Pour activer la détection, le seuil est choisi à 0,1 rad.

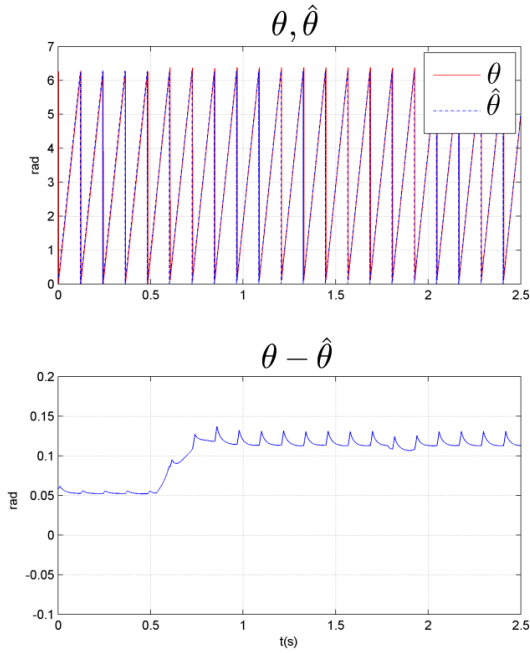


Fig. 2a Estimation de la position par le filtre de Kalman

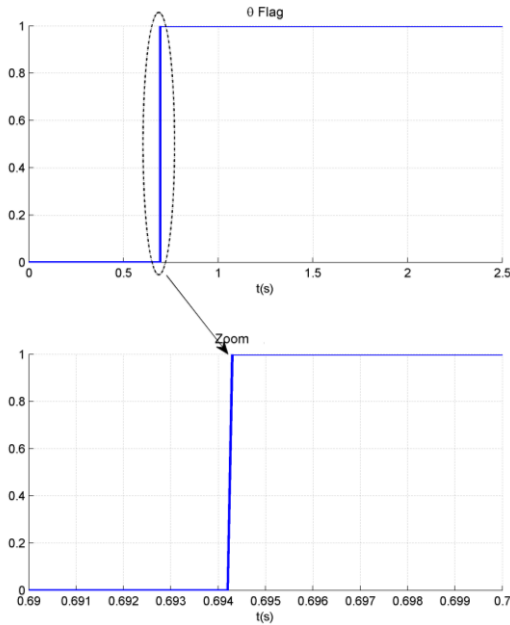


Fig. 2b Drapeau pour le capteur de position

La détection de la panne du capteur de position est accomplie avec un drapeau représenté par la figure 2b avec un temps de détection $\Delta t = 0.694 - 0.53 = 0.164$ s. On remarque un impact sur la vitesse (Fig.3) uniquement à l'apparition du défaut avec un pic de 2 rad/s.

4. DIAGNOSTIC DU CAPTEUR DE COURANT

A l'apparition d'un défaut sur le capteur de courant, une variation du courant de la phase concernée est attendue et l'objectif est de repérer rapidement cette variation de manière à assurer une commande tolérante aux défauts efficace ([15],

[16]). La sévérité de la distorsion par rapport à la forme d'onde saine dépend principalement du type de défaut. Parce que les courants estimés par le filtre de Kalman lors de l'estimation de position / vitesse tendent à converger vers les valeurs données par les capteurs de courant par conception de l'observateur, ils ne peuvent pas être ré-utilisés pour le diagnostic du capteur de courant. Ainsi, l'estimation actuelle doit être complètement décorrélée des capteurs de courants.

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.

4.1. Modèle d'Observateur

Le modèle de référence détermine les états désirés (courants de phase) et le modèle ajustable génère les états estimés. 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:

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

Analyse de Stabilité:

Pour un système non linéaire, l'existence d'une fonction de Lyapunov est une condition suffisante pour garantir la stabilité asymptotique. Une fonction de Lyapunov V est une fonction définie positive avec sa dérivée de Lie \dot{V} , qui est définie négative. Pour la MSAP, une fonction de Lyapunov candidate est:

$$V(x) = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2) \quad \text{avec } V(x) \geq 0 \quad (7)$$

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{L_d}(R_s + k_1)x_1^2 - \frac{1}{L_q}(R_s + k_2)x_2^2 \\ & + x_1x_2\left(-\frac{k_1 + L_d\omega}{L_q} + \frac{L_q\omega - k_2}{L_d}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

En choisissant K tel que $k_1 = -L_d\omega$, $k_2 = L_q\omega$, la stabilité est assurée. Ainsi, en appliquant les transformées inverses de Park et de Concordia, on estime les trois courants triphasés $[\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{i}_c]$.

4.2. Validation Expérimentale

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

Un couple de charge de 0.5 N.m soit 15% du couple nominal est appliquée à la MSAP. Un biais de 0.5 A (20 % sur l'amplitude du courant) est inséré en cours de fonctionnement au niveau du capteur de la phase B de $t=2s$ à $t=6s$. Fig.4 montre le courant sur la phase B et les vitesses (réelle et celle estimée par le filtre de Kalman). En dépit du défaut sur le capteur de courant, l'estimation de vitesse n'est pas très affectée.

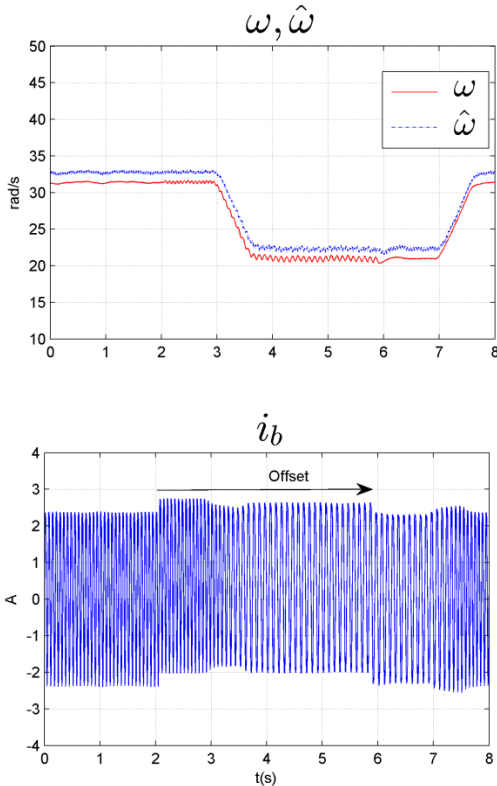


Fig.4. Vitesse mécanique et courant sur la phase B

Les trois résidus $[i_a - \hat{i}_a, i_b - \hat{i}_b, i_c - \hat{i}_c]$ sont tracés sur la Figure 5.

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.

De $t=7s$ à $t=8s$, on remarque un transitoire de vitesse et l'estimation de courant a été robuste vis-à-vis de cette variation. Ainsi, l'observateur de courant est globalement précis aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent. Finalement, en réglant un seuil à 0.18 pour chaque phase, on obtient les signaux logiques qui permettent d'activer la détection.

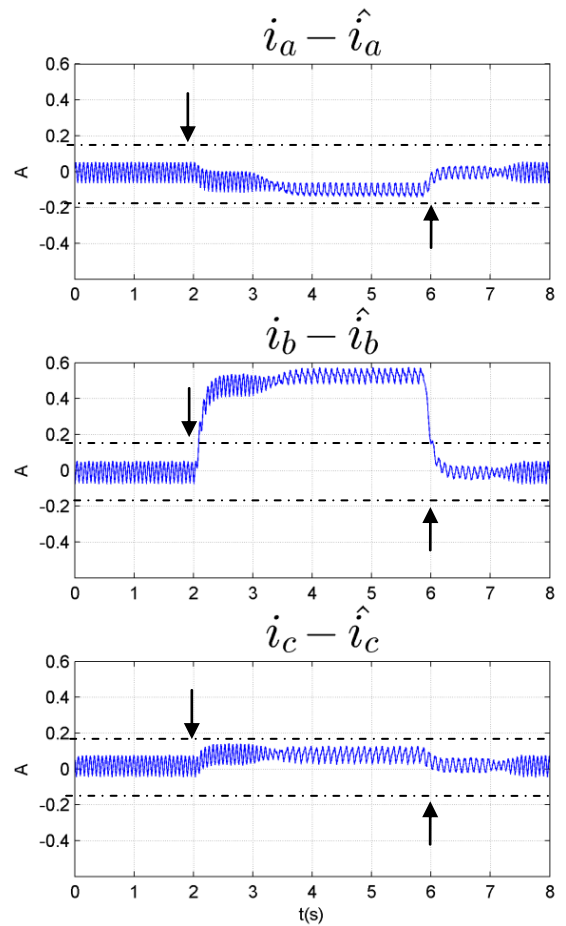


Fig.5: Résidus des capteurs de courant

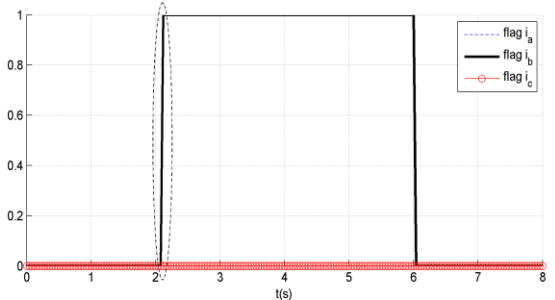


Fig.6. Drapeaux pour les capteurs de courant

Fig.6 illustre la détection et l'isolation du défaut sur le capteur de courant avec un temps de détection $\Delta t=0.098s$.

5. 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).

Les principaux avantages sont:

- Discrimination entre un défaut de capteur mécanique et un défaut de courant de phase grâce à l'utilisation de sources décorréliées.
- Robustesse de la méthode de détection vis-à-vis d'une variation de vitesse/couple

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.

6. REFERENCES

[1] Benbouzid, M.E.H., Diallo, D., Zeraouia, 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] Bennett, J.W.; Mecrow, B.C.; Atkinson, D.J.; Atkinson, G.J., "Safety-critical design of electromechanical actuation systems in commercial aircraft," *Electric Power Applications, IET*, vol.5, no.1, pp.37,47, January 2011

[3] Gaeta, A.; Scelba, G.; Consoli, A., "Sensorless Vector Control of PM Synchronous Motors During Single-Phase Open-Circuit Faulted Conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.48, no.6, pp.1968,1979, Nov.-Dec. 2012

[4] Chen, J., Patton, R., "Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems", *Kluwer Academic*, Boston, 1999.

[5] Campos-Delgado, D. U.; Espinoza-Trejo, D. R.; Palacios, E., "Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey," *Electric Power Applications, IET*, vol.2, no.2, pp.121,134, March 2008

[6] Y. Jeong, S. Sul, S. Schulz, and N. Patel, "Fault detection and fault-tolerant control of interior permanent-magnet motor drive system for electric vehicle", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 41, no. 1, pp. 46–51, Jan./Feb. 2005.

[7] Foo, G.H.B. ; Xinan Zhang ; Vilathgamuwa, D.M.; " A Sensor Fault Detection and Isolation Method in Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on an Extended Kalman Filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.60, no.8, pp.3485-3495, 2013

[8] Najafabadi T., Salmasi F., Jabehdar-Maralani P., "Detection and Isolation of Speed-, DC-Link Voltage and Current-Sensor Faults Based on an Adaptive Observer in Induction-Motor Drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, 2011

[9] Diao, S.; Diallo, D.; Makni, Z.; Marchand, C.; Bisson, J.-F., "A differential algebraic approach for position/speed estimation in

PMSM," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, pp.1149,1154, 12-15 May 2013

[10] Wallmark, O.; Harnefors, Lennart; Carlson, O., "Control Algorithms for a Fault-Tolerant PMSM Drive," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* vol.54, no.4, pp.1973-1980, Aug. 2007

[11] 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

[12] Nuno M. A. Freire, Jorge Estima, A. J. M. Cardoso;"New Approach for Current Sensor Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Energy Conversion Systems" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Mar 2014

[13] Isermann, R., "Fault Diagnosis Applications: Model Based Condition Monitoring, Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault tolerant Systems". *Springer, 1st Edition*, 2011.

[14] 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

[15] Lee B.; Jeon N.; Lee H., "Current sensor fault detection and isolation of the driving motor for an in-wheel motor drive vehicle" International conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), vol., no., pp.486, 491, 26-29 Oct. 2011

[16] Rothenhagen, K., F. W. Fuchs; " Current Sensor Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration for Doubly Fed Induction Generators", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.56, no.10, pp.4239-4245, Oct 2009