

Détection de fautes par redondance analytique de l'alimentation en air d'une pile à combustible de type PEM

Quan YANG¹, Abdel AITOUCHE¹, Belkacem OULD BOUAMAMA²

¹Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal,
UMR 8146 CNRS
Hautes Etudes d'ingénieur, 13, rue de Toul, 59046, Lille, France.
quan.yang@hei.fr, abdel.aitouche@hei.fr

²Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal
UMR 8146 CNRS
Polytech-Lille, Rue Paul Langevin, 59655, Villeneuve d'Ascq, France.
belkacem.ouldbouamama@polytech-lille.fr

Résumé— Cet article présente une procédure de la génération des résidus basée sur les redondances analytiques non linéaires. Ces relations sont utilisées pour détecter et localiser des défaillances de capteurs et d'actionneurs. La méthode est basée sur l'élimination des variables inconnues du système et en particulier sur des états du système. Le système non linéaire d'alimentation en air de pile à combustible (PAC) est un système complexe initialement en 4 états que nous avons ramené en équation d'état classique en 3 états pour notre étude. L'algorithme d'espace de parité non linéaire est programmé sous Matlab et expliqué en détail. Des défauts de capteur de pression et une surtension du compresseur ont été simulés. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette méthode.

Mots-clés— compresseur d'air, pile à combustible, l'espace de parité, génération des résidus, redondance analytique non linéaire, table de signature de défauts, détection et isolation de pannes.

I. INTRODUCTION

L'alimentation en oxygène de PAC est généralement fournie par un compresseur d'air. Par conséquent, il est nécessaire d'installer le système d'alimentation en air qui contient généralement plusieurs dispositifs électriques et mécaniques pour la pressurisation et la purification de l'air en vue d'obtenir de l'oxygène. Généralement, le système d'alimentation en air fonctionne comme un processus de régulation du débit d'air de circulation. Dans cet article, un compresseur de type volumétrique est utilisé. Ces compresseurs d'air peuvent être utilisés, par exemple, pour la propulsion marine, pour la production de puissance dans les moteurs à combustion interne, ou dans une grande variété de procédés industriels [1,2]. Deux types de compresseur pour le système pile à combustible ont été comparés par Kulp [3].

Cet article traite le problème de la détection et localisation des défauts pour un système d'alimentation en air basé sur le compresseur volumétrique. Les procédures de surveillance mises en œuvre dans les plates-formes de supervision industrielle sont basées sur la comparaison entre le comportement réel du système et le comportement de référence. Les méthodes de détection et de diagnostic peuvent

être classées en deux catégories: celles qui n'utilisent pas de modèle mathématique et celles qui reposent sur des modèles. Dans le domaine du diagnostic des piles à combustible (PAC), des approches expérimentales sont les plus couramment utilisées [4]. Comme exemple, les méthodes à base de traitement de signal qui consistent à observer un signal fréquentiel de la chute de pression entre la cathode et l'anode de la pile et permet donc de détecter le noyage ou l'assèchement de la pile. En plus, via le test de pression, des fuites de gaz entre l'anode et la cathode de la pile peuvent être détectées [5]. D'autres approches expérimentales utilisent la caractérisation de composants électriques (circuit électrique équivalent à une réaction électrochimique) basée sur les caractéristiques de l'impédance spectrométrie [6]. En règle générale, un banc de test est nécessaire pour la plupart de ces méthodes expérimentales. D'où l'intérêt d'utiliser les méthodes à base de modèle qui ne nécessitent pas des signaux d'excitation. Ces méthodes de diagnostic utilisent un modèle mathématique explicite du système surveillé.

Dans ces dernières années, la plupart des travaux dans le cas non linéaire sont basés sur les observateurs non linéaires et les observateurs à mode glissant. Les méthodes à base d'observateur consistent à estimer l'état du système contrairement à l'espace de parité qui consiste à éliminer et donc d'obtenir des relations dans tous les éléments sont connus. Ces relations sont appelées relations de redondance analytique ou relations de parité. Magni et Mouyon [7] ont démontré que les méthodes d'espace de parité et d'observateur sont équivalentes dans le cas linéaire. Jusqu'à présent, l'équivalence entre l'observateur non linéaire et l'espace de parité non linéaire n'a pas été prouvée. D'autres chercheurs ont développé des relations de parité basées sur le modèle flou de Takagi-Sugeno [8].

Ce papier traite de la redondance analytique (RA). Cette méthode est utilisée souvent dans la détection de défauts. La méthode de l'espace de parité appartient aux méthodes de redondance analytique, particulièrement destinée aux systèmes linéaires. Une extension de cette méthode peut être appliquée au système non linéaire dans des conditions

particulières [9]. Le comportement d'un système non linéaire est difficile à prévoir et à contrôler, entraînant la diminution de la sécurité et la fiabilité, ce qui rend la détection de pannes plus importantes. Toutefois, les techniques de détection de défaillance à base de modèle nécessitent des modèles précis pour être efficace; la redondance analytique traditionnellement en linéaire est généralement insatisfaisante pour les systèmes avec des composantes non linéaires significatives.

Ces calculs utilisent les mesures actuelles et/ou les mesures précédentes des autres variables, et le modèle mathématique décrivant leur relation nominale à la variable mesurée. L'idée peut être étendue à la comparaison de deux quantités générées analytiquement, obtenue à partir de différents ensembles de variables: les résidus qui sont des indicateurs de la présence de défauts dans le système. Une autre classe de méthodes à base de modèle s'appuie directement sur des méthodes de l'estimation des paramètres. Parfois, les modèles mathématiques peuvent être représentés graphiquement [10] ou sous forme de réseau de neurones [11] pour la génération et l'évaluation des résidus.

Cet article est organisé comme suit: dans la section 2, la description d'un compresseur volumétrique alimentant une pile à combustible est donnée. À la section 3, un modèle mathématique du système d'alimentation en air est développé sous forme d'espace d'état adapté à la procédure de détection de défauts. La section 4 présente la procédure de génération de résidus par des relations de redondance analytique non-linéaires (RRAN). Dans la section 5, les résultats de simulation numérique en présence de défaillances de capteurs et d'actionneurs sont donnés.

II. SYSTEME D'ALIMENTATION EN AIR

Le système d'alimentation en air constitué d'un compresseur volumétrique muni de capteurs (vitesse angulaire et pression du manifold d'entrée) est présenté dans la figure 1. L'entrée de la cathode de la pile à combustible est considérée comme source de l'un des gaz réactif. Généralement, il existe un humidificateur fonctionnant pour l'humidification de l'air qui n'est pas représenté. Par la suite, nous nous concentrons sur la détection de pannes et le diagnostic du système d'alimentation en air (Fig. 1).

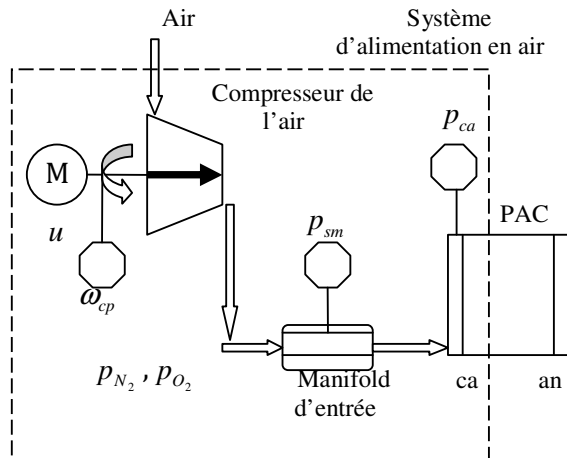


Fig. 1. Système d'alimentation en air

Le système est composé d'un compresseur d'air qui est actionné par un moteur électrique et d'un manifold d'entrée. L'air est sous pression dans le compresseur avant d'entrer dans le manifold. Avec ce manifold, l'air est distribué uniformément dans la cathode de la pile à combustible. Toutes les variables du système sont définies ci-dessous :

- u : la tension d'entrée,
- ω_{cp} : la vitesse angulaire du compresseur,
- p_{sm} : la pression d'air dans le manifold d'entrée,
- p_{N_2} , p_{O_2} : les pressions partielles de l'azote et de l'oxygène vers la cathode de la pile à combustible,
- p_{ca} : la pression atmosphérique totale à l'intérieur de la cathode.

Dans ce papier, seul le compresseur d'air et le manifold avec l'entrée de la cathode de la PAC sont considérés dans la modélisation. Toutefois, les pressions partielles dans la cathode seront utilisées comme les connections entre le système d'alimentation en air et la cathode de pile à combustible. De nombreux défauts pourraient avoir lieu dans le système d'alimentation en air. Par la suite, nous proposons deux types de défaillances qui peuvent survenir :

- Surtension du moteur de compresseur Δu ,
- Défaut du capteur de la pression à la cathode Δp_{ca} ,

La détectabilité et l'isolabilité des deux défauts seront discutées à la section 4 ainsi que la sensibilité des résidus par rapport aux défaillances.

III. MODELE MATH EMATIQUE DE SYSTEME D'ALIMENTATION EN AIR

A. Modèle de connaissance

Les états dynamiques de la pression d'air prennent une position importante dans la modélisation du système d'alimentation en air [12]. D'après les phénomènes physiques qui se produisent dans le système, les dérivations des pressions partielles de l'oxygène et de l'azote à l'intérieur du volume de la cathode sont décrites comme suit:

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{RT_{st}}{M_{O_2} V_{ca}} (W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,rc}) \quad (1)$$

$$\frac{dp_{N_2}}{dt} = \frac{RT_{st}}{M_{N_2} V_{ca}} (W_{N_2,in} - W_{N_2,out}) \quad (2)$$

où V_{ca} est le volume localisé de la cathode, R est la constante universelle des gaz, et M_{O_2} avec M_{N_2} sont respectivement les masses molaires de l'oxygène et de l'azote. $W_{O_2,in}$, $W_{O_2,out}$ et $W_{O_2,rc}$ sont respectivement les flux d'oxygène d'entrée, de sortie et de réaction. $W_{N_2,in}$ et $W_{N_2,out}$ sont respectivement les flux d'azote d'entrée et de sortie. L'état du moteur de compresseur est associé à la dynamique de rotation du moteur par des équations mécanique.

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{1}{J_{cp}} (\tau_{cm} - \tau_{cp}) \quad (3)$$

où ω_{cp} est la vitesse angulaire de moteur du compresseur, τ_{cm} est le couple du moteur de compresseur et τ_{cp} est le couple de

charge du compresseur. En supposant un modèle simplifié de moteur à courant continu avec une relation électromécanique statique de la tension d'entrée v_{cm} appliquée au moteur et à la force contre-électromotrice, le couple du moteur τ_{cm} peut être écrit comme suit :

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (4)$$

où k_t et k_v sont des constantes du moteur, tandis que R_{cm} est la résistance du moteur. Le paramètre η_{cm} représente le rendement du moteur du compresseur mécanique. Le couple consommé utile est donné par :

$$\tau_{cp} = \frac{C_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[\left(\frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (5)$$

où C_p et γ correspondent à la pression constante et au rapport de la capacité spécifique de chaleur de l'air. p_{atm} et T_{atm} représentent la pression et la température atmosphérique, respectivement. W_{cp} est le débit massique du compresseur au manifold d'entrée. Le taux de changement de pression de l'air dans le manifold d'entrée qui relie le compresseur avec la pile à combustible (Fig. 1) dépend du débit W_{cp} , le flux du manifold à l'intérieur de la cathode $W_{ca,in}$ et la température du flux de compresseur T_{cp} .

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{RT_{cp}}{M_{a,atm} V_{sm}} (W_{cp} - W_{ca,in}) \quad (6)$$

où p_{sm} est la pression du manifold d'entrée, V_{sm} est le volume du manifold d'entrée et $M_{a,atm}$ est la masse molaire de l'air atmosphérique.

Le modèle mathématique du système d'alimentation en air reposant sur le compresseur volumétrique [13] a été transformé sous forme d'équations d'état structurelles qui sont orientées vers la détection et localisation de défauts grâce à la génération des relations de redondance analytique (RRAs).

B. Modèle sous forme d'état réduit

Étant donné que la complexité du modèle entrave l'application de la méthode de redondance, il est nécessaire de réduire l'ordre des équations du modèle, pour pouvoir générer des résidus. Tous les détails de la réduction sont donnés par [13]. Comme conséquence de cette simplification, l'ordre du modèle est réduit de 4 à 3 états, en remplaçant les pressions partielles d'oxygène et d'azote par la pression d'air totale.

Selon la thermodynamique des mélanges de gaz, la pression du mélange est la somme des pressions partielles des composants individuels. Par conséquent, nous définissons le vecteur d'espace $Z = [z_1, z_2, z_3]^T$ où z_1 représente la pression totale de l'air interne à la cathode, z_2 est la vitesse angulaire de moteur du compresseur et z_3 est la pression de l'air dans le manifold d'entrée. Après réduction, les équations d'état non linéaires sont les suivantes:

$$\frac{dz_1}{dt} = c_1 z_1 + c_2 z_3 \quad (7)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = c_3 z_2 + \frac{c_4}{z_2} \left[\left(\frac{z_3}{c_5} \right)^{c_6} - 1 \right] (z_2 + z_3) + c_7 u \quad (8)$$

$$\frac{dz_3}{dt} = \left\{ c_8 + c_8 c_9 \left[\left(\frac{z_3}{c_5} \right)^{c_6} - 1 \right] \right\} \times [c_{10} z_1 + z_2 + (1 - c_{10}) z_3] \quad (9)$$

Toutes les variables d'état (z_1 , z_2 et z_3) sont supposés mesurées respectivement par trois capteurs (y_1 , y_2 et y_3) et tous les paramètres sont fournis dans les annexes A et B.

IV. GENERATION DES RESIDUS PAR DES RELATIONS DE REDONDANCE ANALYTIQUE NON-LINEAIRES

Si le système est observable, l'observabilité peut être exprimée en termes de capteurs, d'actionneurs, en plus de l'état et des paramètres du modèle. Cette expression est connue comme étant la matrice dérivée d'observabilité dynamique. La multiplication de cette matrice avec une matrice nulle à gauche, appelée aussi matrice de projection ou matrice de parité, va donner des relations de redondance analytique non linéaires. Ces relations nous permettent de générer des résidus non linéaires. Ces résidus sont proches de zéro si le comportement du système est modélisé correctement. Quand un défaut se produit, le résidu dévie considérablement de zéro (écart beaucoup plus grand que l'écart causé par les incertitudes du modèle et les bruits de mesures). Dans ce cas, on dit qu'il y a détection. Des seuils doivent être bien choisis, en vue de réduire les problèmes de fausses alarmes et de non détection. Il existe plusieurs méthodes de calcul de seuils dans la littérature. Dans notre cas, nous supposons que les incertitudes et les bruits de mesures n'ont pas une grande influence sur ce test. Cette méthode peut être appliquée à des modèles linéaires ou non linéaires [14] et seul le calcul de ces relations de redondance analytique est différent. Dans le cas non linéaire, il n'est pas facile de générer analytiquement tous les résidus. La plupart des auteurs préfèrent générer les relations numériques.

Dans le cas non linéaire, les étapes de l'algorithme de calcul des résidus avec la méthode de redondance analytique non linéaire est donné comme suit :

- Déterminer la forme triangulaire d'observabilité non linéaire et la matrice de parité Ω après vérification de l'observabilité du système.
- Déterminer le vecteur dérivé d'observabilité dynamique O_{DD}
- Trouver le rang n_j de chaque matrice d'observabilité individuelle pour chaque capteur.
- Calculer les résidus en utilisant l'équation : $R = \Omega O_{DD}$.
- Utiliser $N = \sum_{j=1}^n (n_j) + (p - n)$ pour déterminer le nombre de tests (résidus) indépendants qui existent avec p le nombre de capteurs et n la dimension du vecteur d'état.
- Supprimer les résidus redondants.

Si les rangs des matrices d'observabilité non linéaire individuelle de chaque capteur sont supérieurs ou égaux à ceux des matrices d'observabilité linéaires ($n_j(\text{nonlin}) \geq n_j(\text{lin})$), la méthode de redondance analytique non linéaire nous assure de générer au moins autant de résidus que la méthode linéaire.

Les relations des résidus indépendants sont données par les équations suivantes :

$$r_1 = a_1 y_2 + a_2 y_3^{\frac{2}{7}} + \frac{a_4 y_3^{\frac{9}{7}}}{y_2} + a_5 \left(1 + \frac{y_3}{y_2}\right) + a_6 u + \dot{y}_2 \quad (10)$$

$$r_2 = \frac{a_7 y_2^2}{y_3^{\frac{5}{7}}} + a_8 u + a_9 y_1 + a_{10} u y_3^{\frac{2}{7}} + a_{11} \frac{y_1^2}{y_3^{\frac{7}{3}}} + a_{12} \frac{y_2 y_1}{y_3^{\frac{7}{3}}} + a_{13} y_1 y_3^{\frac{4}{7}} + a_{14} \frac{y_3^{\frac{11}{7}}}{y_2} + a_{15} y_3^{\frac{11}{7}} + a_{16} y_3 \quad (11)$$

$$+ a_{17} \frac{y_3}{y_2} + a_{18} y_3^{\frac{9}{7}} + a_{19} y_2 + a_{20} y_3^{\frac{2}{7}} + a_{21} \frac{y_3^{\frac{9}{7}}}{y_2} + a_{22} \frac{y_1^2}{y_3^{\frac{5}{7}}} + a_{23} \frac{y_1 y_2}{y_3^{\frac{5}{7}}} + a_{24} y_2 y_3^{\frac{2}{7}} + a_{25} + a_{26} y_1 y_3^{\frac{2}{7}} + a_{27} \frac{y_2^2}{y_3^{\frac{3}{7}}} + a_{28} y_2 y_3^{\frac{4}{7}} + a_{29} y_3^{\frac{4}{7}} + \ddot{y}_3$$

$$r_3 = a_{30} u + a_{31} y_2 + a_{32} y_3^{\frac{2}{7}} + a_{33} \frac{y_3}{y_2} + a_{34} \left(\frac{y_3^2}{y_2} + \frac{y_3}{y_2^2}\right) + a_{35} \frac{y_1}{y_2} + a_{36} \dot{u} + a_{37} \frac{y_3^{\frac{11}{7}}}{y_2} \quad (12)$$

$$+ a_{38} y_3^{\frac{4}{7}} + a_{39} \frac{y_2}{y_3^{\frac{5}{7}}} + a_{40} \frac{y_3^{\frac{18}{7}}}{y_3^{\frac{3}{7}}} + a_{41} \frac{y_3^{\frac{11}{7}}}{y_2^2} + a_{42} \frac{y_3^{\frac{16}{7}}}{y_2^2} + a_{43} \frac{y_2}{y_3^{\frac{7}{3}}} + a_{44} \frac{y_3^{\frac{9}{7}}}{y_2^2} + \ddot{y}_2 + a_{45} \frac{y_1}{y_3^{\frac{5}{7}}} + a_{46} \frac{y_1}{y_3^{\frac{7}{3}}}$$

$$+ a_{47} \frac{y_3^{\frac{2}{7}} y_1}{y_2} + a_{48} \frac{y_1 y_3^{\frac{4}{7}}}{y_2} + a_{49} \frac{y_3^{\frac{9}{7}} u}{y_2^2} + a_{50} + a_{51} \frac{y_3^{\frac{9}{7}}}{y_2}$$

$$r_4 = a_{52} y_1 + a_{53} y_3 + \dot{y}_1 \quad (13)$$

$$r_5 = \left\{ c_8 + c_8 c_9 \left[\left(\frac{y_3}{c_5} \right)^{c_6} - 1 \right] \right\} \times [c_{10} y_1 + y_2 + (1 - c_{10}) y_3] - \dot{y}_3 \quad (14)$$

$$r_6 = c_1^2 y_1 + c_1 c_2 y_3 + \left\{ c_2 c_8 + c_2 c_8 c_9 \left[\left(\frac{y_3}{c_5} \right)^{c_6} - 1 \right] \right\} \times [c_{10} y_1 + y_2 + (1 - c_{10}) y_3] - \ddot{y}_1 \quad (15)$$

Tous les coefficients constants a_i sont calculés numériquement par le programme de Matlab avec l'approche de redondance analytique non linéaire. On remarque que parmi ces six résidus, trois d'entre eux (r_1 , r_4 et r_5) sont directement générés à partir des équations du modèle tandis que les trois autres (r_2 , r_3 et r_6) sont produits à partir de l'espace de parité.

Lorsque le système est en fonctionnement normal, les résidus sont proches de zéro (Fig. 2). La Table I représente la table de signatures de défauts pour ces résidus. Sous l'hypothèse que des défauts simultanés ne peuvent se produire, nous constatons donc que les signatures pour chacune des défaillances sont bien différentes. Les défauts de

chacun de ces capteurs et actionneur sont donc détectables et localisables. Le système est donc surveillable.

Si la signature de la défaillance est $[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, il n'y a que l'actionneur qui est en défaut. Si la signature de la défaillance est $[0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, le capteur de pression à l'entrée de la cathode.

TABLE I
SIGNATURE DES DEFAUTS

Résidus	y_1	y_2	y_3	u
r_1	0	1	1	1
r_2	1	1	1	1
r_3	1	1	1	1
r_4	1	0	1	0
r_5	1	1	1	0
r_6	1	1	1	0

V. SIMULATION NUMERIQUE

Les tests sont faits à partir de simulations numériques. L'objectif est de détecter et de localiser les défaillances de capteur et d'actionneur.

Les valeurs des paramètres utilisées sont données en Annexe A et B.

A. Fonctionnement du système sans défaut

La figure 2 représente le système sans défaut où l'on constate que tous les résidus sont proches de zéro.

Le système sans défaut est donc satisfaisant, nous pouvons alors simuler des défauts d'actionneur et de capteurs.

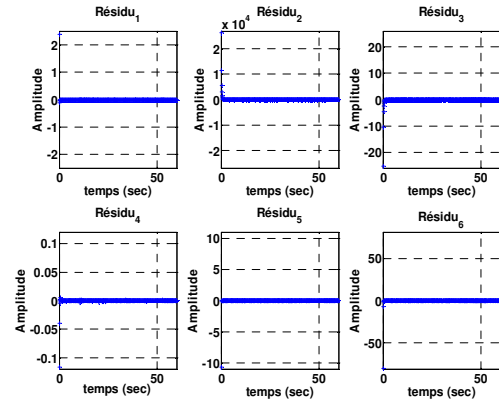


Fig. 2. Evolution des résidus du système sans défaut

B. Fonctionnement du système avec défauts

Deux types de défauts sont simulés :

- Un défaut de surtension du compresseur
- Un biais sur un capteur

Par la suite, nous nous ne tenons pas compte du retard à la détection et nous supposons que l'algorithme de surveillance détecte et localise le défaut sans retard.

VI. CONCLUSION

Les différentes simulations effectuées sur le système non linéaire : alimentation en air d'une pile à combustible montrent que l'algorithme de surveillance à base de RRAN détecte et localise les défaillances d'actionneur et de capteur.

Cependant la méthode de l'espace de parité non linéaire engendre des résidus qui sont fonction des dérivées des sorties et des entrées et peuvent donc engendrer des fausses alarmes. Différentes méthodes sont utilisées pour l'approximation de ces dérivées comme par exemple celles utilisant l'observateur à mode glissant [15] et celles basées sur l'approximation polynomiale [16]. Une nouvelle méthode pour estimer des dérivées d'un signal bruité est développée à base des techniques d'élimination et des polynômes orthogonaux de Jacobi [17].

Ce papier a pour objectif de montrer à la communauté "Systèmes de Pile à Combustible" l'utilisation des méthodes avec modèles qui restent très peu utilisées. La prochaine étape consiste à appliquer l'algorithme de surveillance sur un système réel de compresseur d'air alimentant une pile à combustible de type PEM situé dans les locaux du FCLAB à Belfort.

VII. REMERCIEMENTS

Cette étude de recherche a été soutenue par le département de recherche de la région Nord Pas de Calais, Hautes Eudes d'Ingénieur de Lille et le Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) en France et qui sont appréciés.

REFERENCES

- [1] Cohen H., Rogers G. F. C., et Saravanamuttoo H. I. H. *Gas Turbine Theory*, Addison Wesley Longman Limited, Harlow, fourth edition, 1996.
- [2] Whitfield A., et Baines N. C. *Design of Radial Turbomachines*, Longman Scientific & Technical, Harlow, 1990.
- [3] Kulp G. W. A Comparison of Two Air Compressors for PEM Fuel Cell Systems. Thèse du Master de l'Institut et Université d'Etat du Polytechnique de Virginia. 2001.
- [4] Chen J. X., et Zhou B. Diagnosis of PEM fuel cell stack dynamic behaviors. *Journal of Power Sources*, vol. 177, pp. 83-95, 2008.
- [5] Tian G. Y., Wasterlain S., Endichi I., Candusso D., Harel F., François X., Péra M. C., Hissel D., et Kauffmann J. M. Diagnosis methods dedicated to the localization of failed cells within PEMFC stacks. *Journal of Power Sources*, vol. 182, pp. 449-461, 2008.
- [6] Brunetto C., Tina C., Squadruto G., et Moschetto A. PEMFC Diagnostics and modeling by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *IEEE MELECOM*, pp. 1045-1050, 2004.
- [7] Magni J. F., et Mouyon P. On Residual Generation by Observer and Parity Space Approaches. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, n°2, pp. 441-447, 1994.
- [8] Nguang S. K., Zhang P., et Ding S. X. Parity Relation Based Fault Estimation for Nonlinear Systems: An LMI Approach. *International Journal of Automation and Computing*, vol. 04(2), pp. 164-168, 2007.
- [9] Yu D. L., et Shields D. N. Extension of the parity-space method to fault diagnosis of bilinear systems. *International Journal of Systems Science*, Vol. 32, Issue 8, pp. 953-962, 2001.
- [10] Yang Q., Aitouche A., et Ould Bouamama B. Structural Diagnosability of Fuel Cell Stack System Based on Bond Graph Tool. IFAC SAFEPROCESS, 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, 2009.
- [11] Patton R. J., Lopez-Toribio C. J., et Uppal, F. J. Artificial intelligence approaches to fault diagnosis. *Update on Developments in Intelligent Control*, vol. 513, pp. 294-312, 1998.
- [12] Suh K. W., et Stefanopoulou A. G. Coordination of Converter and Fuel Cell Controllers. Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, Limassol, Cyprus, 2005.
- [13] Talj R., Hissel D., Ortega R., Becherif M., et Hilairat M. A Reduced-Order Model and a Higher-Order Sliding-Mode Control of the Air

B.1 Défaillance d'actionneur

Une panne de surtension est simulée entre les instants 20s et 40s. La figure 3 représente l'évolution des résidus. On constate que les résidus (r_4 , r_5 , r_6) sont nuls et le résidu r_2 détecte bien le défaut. A l'apparition et à l'extinction du défaut, les résidus r_1 et r_3 varient fortement. On peut expliquer ceci par le fait que par exemple le résidu r_1 dépend de la dérivée de y_2 et celle-ci est fonction de u (équation 8).

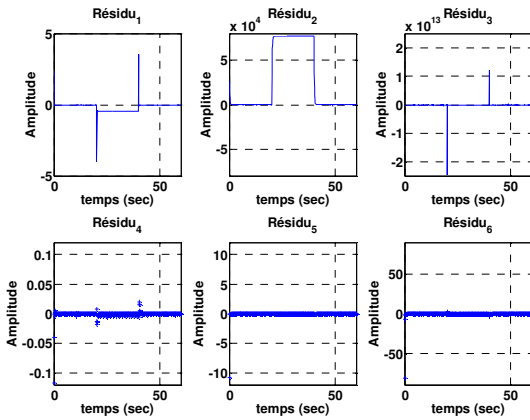


Fig. 3. Evolution des résidus du système avec le défaut de surtension Δu

B.2 Défaillance de capteur

Un signal additif est introduit dans le capteur y_1 entre les instants 5s et 35s. On constate sur la figure 3 que le résidu r_1 est nul ce qui était attendu et que les résidus (r_2 , r_3 , r_5) détectent la défaillance tandis que les résidus r_4 et r_6 engendrent des amplitudes importantes pour chaque variation du signal additif en créneau. Les explications sont les mêmes que précédemment.

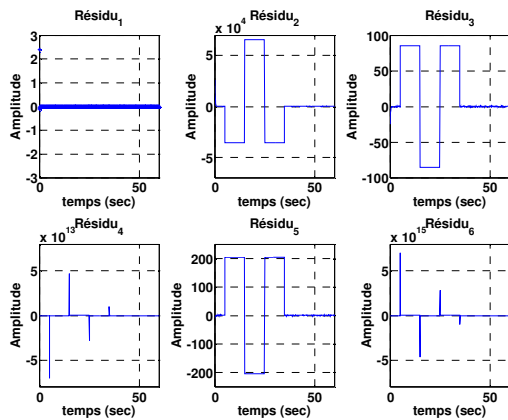


Fig. 4. Evolution des résidus du système avec le défaut du capteur y_1

Supply System of a Proton-Exchange-Membrane Fuel Cell with Experimental Validation. ELETROMOTION 2009-EPE Chapter 'Electric Drives' Joint Symposium, Lille, 2009.

- [14] Leuschen M. L., Walker I. D., et Cavallaro J. R. Fault Residual Generation via Nonlinear Analytical Redundancy. *IEEE Transactions on System Technology*, Vol. 13, n° 3, pp. 452-458, 2005.
- [15] Levant, A. (1998). Robust Exact Differentiation via Sliding Mode Technique. *Automatica*, Vol. 34, n°3, pp. 379-384, 1998.
- [16] Christophe C. Surveillance des systèmes non linéaires - Application à la machine asynchrone. Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Novembre 2001.
- [17] Mamadou M., Cédric J., et Michel F. A revised look at numerical differentiation with an application to nonlinear feedback control. Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens-Greece, July 27-29, 2007.

ANNEXE A

Dans cette annexe, nous définissons tous les coefficients c_i des équations d'état, $i=1,2,\dots,10$ qui apparaissent dans le modèle réduit et la génération des résidus (nomenclature de vérifier les valeurs numériques des paramètres physiques).

TABLE II
ANNEXE B

Symbole	Description	Valeur
R	Constant général de gaz	8.3145J/(mol*K)
J_{cp}	Inertie de compresseur	$5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
V_{ca}	Volume de la cathode	0.01m ³
$k_{ca,in}$	Constant d'orifice d'entrée à la cathode	0.2177kg/(s*pa)
γ	Rapport de la capacité spécifique de chaleur de l'air	1.4
$\chi_{O_2,air}$	Fraction massique d'oxygène de l'air d'entrée	0.23
M_{N_2}	Mass molaire de nitrogène	2800kg/mol
M_{O_2}	Mass molaire d'oxygène	3200kg/mol
C_p	Constant de pression de la capacité spécifique de chaleur de l'air	1.004J/(mol*K)
T_{st}	Température de la pile	333K
C_D	Coefficient de décharge de pointe du manifold d'entrée	0.0124
A_T	Surface de pointe du manifold d'entrée	0.002m ²
η_{cp}	L'efficacité du compresseur	80%
k_t	Constant du moteur	153N-m/Amp
k_v	Constant du moteur	153V/(rad/sec)
p_{atm}	Pression atmosphérique	0.0101325Mpa
T_{atm}	Température atmosphérique	298K
p_{sat}	Pression saturée de l'air	149.44kpa

$$c_1 = - \left[\frac{RT_{st} k_{ca,in}}{M_{O_2} V_{ca}} \left(\frac{x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} \right) + \frac{RT_{st} k_{ca,in}}{M_{N_2} V_{ca}} \left(\frac{1 - x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} \right) + \frac{RT_{st} C_p T_{atm}}{V_{ca} J_{cp} \eta_{cp} k} \right]$$

$$c_2 = \frac{RT_{st} k_{ca,in}}{M_{O_2} V_{ca}} \left(\frac{x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} \right) + \frac{RT_{st} k_{ca,in}}{M_{N_2} V_{ca}} \left(\frac{1 - x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} \right)$$

$$c_3 = - \frac{\eta_{cm} k_t k_v}{J_{cp} R_{cm}} \quad c_4 = - \frac{C_p T_{atm}}{J_{cp} \eta_{cp}} \quad c_5 = p_{atm}$$

$$c_6 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad c_7 = \frac{\eta_{cm} k_t}{J_{cp} R_{cm}} \quad c_8 = \frac{RT_{atm}}{M_{a,atm} V_{sm}} \quad c_9 = \frac{1}{\eta_{cp}} \quad c_{10} = k_{ca,in}$$

η_{cm}	Efficacité mécanique du moteur de compresseur	98%
k	Constant de réduction d'ordre	10000
ω_{atm}	Rapport d'humidité de l'air d'entrée	1.75
R_{cm}	Résistance du moteur de compresseur	0.82Ω
$M_{a,atm}$	Mass molaire atmosphérique	2897kg/mol
V_{sm}	Volume du manifold d'entrée	0.02m ³
T_{cp}	Température de compresseur	670.5K