



**HAL**  
open science

# Détection et Diagnostic de défauts sur un système onduleur triphasé NPC-Moteur asynchrone par l'analyse statistique des courants

Mehdi Baghli, Claude Delpha, Demba Diallo, Abdelhamid Hallouche

## ► To cite this version:

Mehdi Baghli, Claude Delpha, Demba Diallo, Abdelhamid Hallouche. Détection et Diagnostic de défauts sur un système onduleur triphasé NPC-Moteur asynchrone par l'analyse statistique des courants. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981837

**HAL Id: hal-02981837**

**<https://hal.science/hal-02981837>**

Submitted on 28 Oct 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Détection et Diagnostic de défauts dans un onduleur NPC par l'analyse statistique des courants

M. Baghli<sup>1,3</sup>, C. Delpha<sup>2</sup>, D. Diallo<sup>3</sup>, A. Hallouche<sup>1</sup>

1. Laboratoire IRECOM, Univ. Djillali Liabès, Sidi Bel Abbes, Algérie

2. Laboratoire des Signaux et Systèmes, UMR 8506 CNRS, CentraleSupélec, Univ. Paris Sud

3. Laboratoire GeePs, UMR 8507 CNRS, CentraleSupélec, Univ. Paris Sud, Université Paris Saclay, Sorbonne Université

**RESUME** -Les travaux présentés ici s'inscrivent dans le cadre de la détection et du diagnostic de défauts électroniques de type circuit ouvert sur un onduleur NPC triphasé associé à une machine asynchrone. L'approche utilisée se base sur l'analyse des propriétés statistiques des courants de phase. Les quatre premiers moments statistiques sont appliqués sur les mesures et évalués dans le domaine temporel. Deux méthodes de détection et diagnostic de défaut sont évaluées. La première se basant sur l'analyse des caractéristiques du défaut et son évolution dans le domaine temporel. Avec cette méthode, les défauts sont détectés avec une probabilité de détection supérieure à 80% lorsque la machine tourne à une vitesse supérieure au tiers de la vitesse nominale et pour un rapport de bruit  $SNR \geq 40dB$ . Malheureusement, les performances de cette méthode se dégradent à basse vitesse et lorsque le bruit dans les mesures devient trop important ( $SNR \leq 20dB$ ). Pour améliorer les performances, nous avons utilisé l'algorithme de la somme cumulée des résidus récurrents (CUSUM) appliqué aux moments statistiques. La méthode de détection est efficace avec une probabilité de détection avoisinant les 100%, même pour la plus petite durée de défaut égale à  $100\mu s$  avec un  $SNR = 20dB$ .

*Mots-clés*—machine asynchrone, onduleur trois niveaux à structure NPC, défaut de type circuit ouvert (DCO), défaut intermittent, détection et diagnostic des défaut, CUSUM.

## 1. INTRODUCTION

Les machines à courant alternatif sont très répandues dans l'industrie et les moyens de transport. Cependant leurs performances sont fortement liées à la robustesse des systèmes d'alimentation notamment les onduleurs de tension [1].

Au cours des dernières décennies, les onduleurs multi-niveaux sont devenus de plus en plus populaires car ils ont l'avantage d'améliorer la qualité de la tension de sortie, de réduire les contraintes électriques sur les commutateurs de puissance et de réduire aussi la fréquence de commutation. En effet, ils génèrent moins de perturbations électromagnétiques ce qui se traduit par une minimisation de la taille et du coût du filtre principal [2]. Cependant, les principaux inconvénients sont le nombre élevé de composants (par rapport à l'onduleur

classique à 2 niveaux) et un contrôle plus complexe [3]. Dans [2] les auteurs ont fait une comparaison entre quatre topologies d'onduleurs en termes de pertes dans les semi-conducteurs et les condensateurs: la structure classique, la structure entrelacée à deux niveaux; la structure trois niveaux à point neutre (NPC) et la structure trois niveaux en cascade en pont H. L'onduleur NPC s'est avéré le plus efficace.

Dans cet article, l'onduleur NPC à trois niveaux est choisi car il présente l'avantage d'avoir moins de pertes et moins de contraintes sur les interrupteurs de puissance qu'un onduleur à deux niveaux à des fréquences de commutation élevées pour une application au véhicule électrique [4].

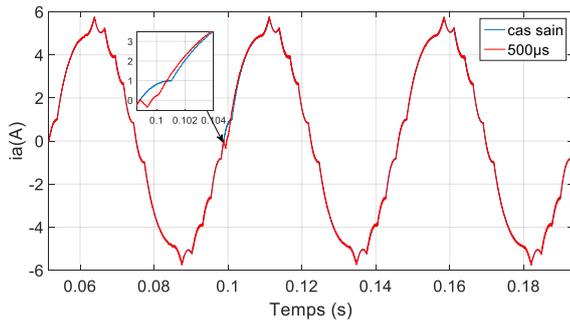
Il est estimé que 38% des défauts dans les entraînements électriques industriels sont dus aux défauts des interrupteurs de puissance [5, 6]. Il est important de détecter le défaut au plus tôt afin d'éviter des défauts en cascade qui peuvent s'avérer dangereux pour l'actionneur ou son environnement. Nous pouvons classer les fautes en trois groupes: les défauts brusques, graduels et intermittents. L'impact des défauts brusques sur les machines électriques a été largement traité [7] contrairement aux défauts intermittents.

Dans ce travail on s'intéresse aux défauts intermittents de type circuit ouvert. Même s'il n'en résulte pas de modifications critiques (comme on peut le voir sur la Fig.1 sur le courant de sortie de l'onduleur  $I_s$  ou sur le couple électromagnétique  $C_e$ ), leur fréquente apparition peut générer une contrainte cumulative dont l'effet à long terme peut être négatif pour les composants de l'actionneur.

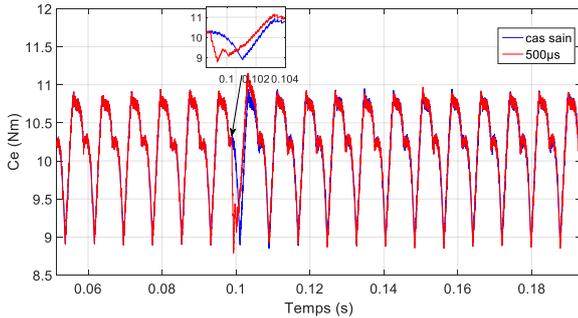
Récemment, plusieurs méthodes ont été développées pour la détection de défauts dans les convertisseurs de puissance. Les méthodes basées sur le vecteur de Park [8, 9] nécessitent malheureusement des algorithmes de reconnaissance de formes complexes. Les méthodes basées sur les tensions nécessitent l'utilisation de capteurs supplémentaires [10]. Nous proposons ci-après d'utiliser les mesures de courant toujours disponibles.

Ce papier est organisé comme suit. La section I présente l'introduction et les différents contextes existants dans la littérature. La section II introduit les moments statistiques utilisés comme des indicateurs de détection et de diagnostic de défauts. Dans la section III, la méthode de diagnostic basée sur

le CUSUM est détaillée et ses performances globales sont discutées. Enfin une conclusion est donnée dans la section IV.



(a) Courant dans le cas sain et le cas en défaut



(b) Couple électromagnétique dans le cas sain et le cas en défaut

Fig. 1. Impact du défaut intermittent de 500µs sur le courant et le couple

## 2. DETECTION DES DEFAUTS EN UTILISANT LES MOMENTS STATISTIQUE :

### 2.1 Decomposition du système

L'onduleur NPC à trois niveaux est une structure d'onduleur multi-niveaux largement traitée dans la littérature [11-13]. La figure 2 montre la topologie d'un onduleur NPC à trois niveaux. L'onduleur est composé de trois bras (A, B et C) chacun comporte quatre commutateurs actifs avec des diodes en anti parallèle. Le bus DC a 2 condensateurs, fournissant ainsi le point central "O".

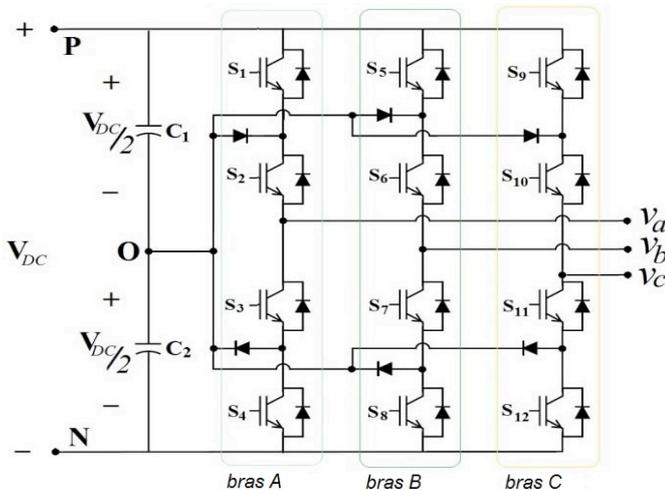


Fig. 2. Schéma de l'onduleur trois niveaux NPC

Ce travail est centré sur l'étude de défaut de type circuit ouvert (CO) sur le premier interrupteur S1 du bras A (fig. 2).

L'onduleur NPC est commandé à une fréquence de commutation de 10kHz avec une fréquence d'échantillonnage de 100kHz. Cet onduleur alimente une machine asynchrone dans une boucle de régulation de vitesse (Fig. 3).

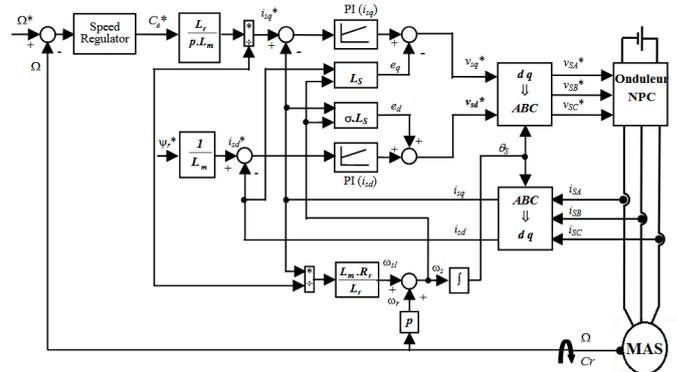


Fig. 3. Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte

Les principales caractéristiques de la machine asynchrone utilisée sont résumées dans le tableau 1.

Table 1 Paramètres de la machine asynchrone

Caractéristiques	Valeurs
Tension nominale	$U_n = 220/380$ V
Vitesse nominale	$n_n = 1420$ tr/min
Puissance nominale	$P_n = 1.5$ kW
Couple nominale	$C_n = 10$ N.m
Fréquence nominale	$f = 50$ Hz
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Résistance du stator	$R_s = 4.85$ $\Omega$
Résistance du rotor	$R_r = 3.805$ $\Omega$
Inductance du stator	$L_s = 0.274$ H
Inductance du rotor	$L_r = 0.274$ H
Inductance mutuelle (stator-rotor)	$L_m = 0.258$ $\Omega$
Moment d'inertie	$J = 0.031$ kg.m <sup>2</sup>

Les courants de sortie alimentant le moteur asynchrone sont analysés et pris en compte pour l'étude du diagnostic.

La méthode indirecte à flux rotorique orientée est adoptée comme indiqué sur la figure 3 [14].

### 2.2 Application des moments statistiques sur les courants mesurés

Les quatre premiers moments statistiques du courant circulant dans la phase A sont calculés.

Si nous désignons le courant comme une variable  $X = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_N)$  composée de N échantillons, les quatre premiers moments statistiques sont définis ci-dessous:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \text{ est la valeur moyenne et représente le centre}$$

de la distribution,

$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_1^N (x_j - \mu)^2$  désigne la variance et mesure la

dispersion au sein de la distribution,

$Skw = \frac{1}{N} \sum_1^N \left(\frac{x_j - \mu}{\sigma}\right)^3$  est le skewness qui mesure la

dissymétrie de la distribution,

$Kur = \frac{1}{N} \sum_1^N \left(\frac{x_j - \mu}{\sigma}\right)^4$  est le Kurtosis qui mesure

l'aplatissement de la distribution.

Les défauts peuvent être classés en fonction de leur durée. Dans le cadre de cette étude dix cas suivants sont traités de 100µs à 1ms avec un pas de 100µs (100µs, 200µs, ..., 900µs, 1ms). La durée minimale du défaut est liée à la fréquence de commutation réglée à 10 kHz.

Les analyses des dix cas de défauts sont effectuées pour:

- Trois vitesses de rotation (20, 40 and 60rad/s) selon le cycle européen de conduite urbaine.
- Trois différentes charges (à vide, 50% et 100% du couple nominal de la machine).

Dans ce qui suit, seule une partie des résultats obtenus sera présentée. Ceux choisis mettent en évidence le comportement global et les performances de détection avec l'occurrence d'avoir des défauts pour les différentes conditions de vitesse et de charge.

La Fig. 4 montre l'évolution des quatre premiers moments statistiques pour deux défauts intermittents (de durée de 100µs et 500µs) à 60 rad/s à charge nominale.

A partir de la figure 4 on peut noter :

- Pour les deux défauts, le skewness et le kurtosis présentent des variations significatives entre les cas sains et les cas en défauts,
- Pour les deux défauts, la variance a des variations moins significatives,
- Pour les deux défauts, la moyenne est un indicateur qui n'est pas fiable.

Pour les mêmes durées de défaut, nous n'avons évalué que le skewness et le kurtosis avec des SNR plus faibles (35, 30, 25 et 20 dB), ce qui signifie un niveau de bruit plus élevé dans les mesures. Les résultats sont représentés sur la figure 5 uniquement pour 20 dB (conditions avec le bruit le plus élevé) pour les mêmes points de fonctionnement.

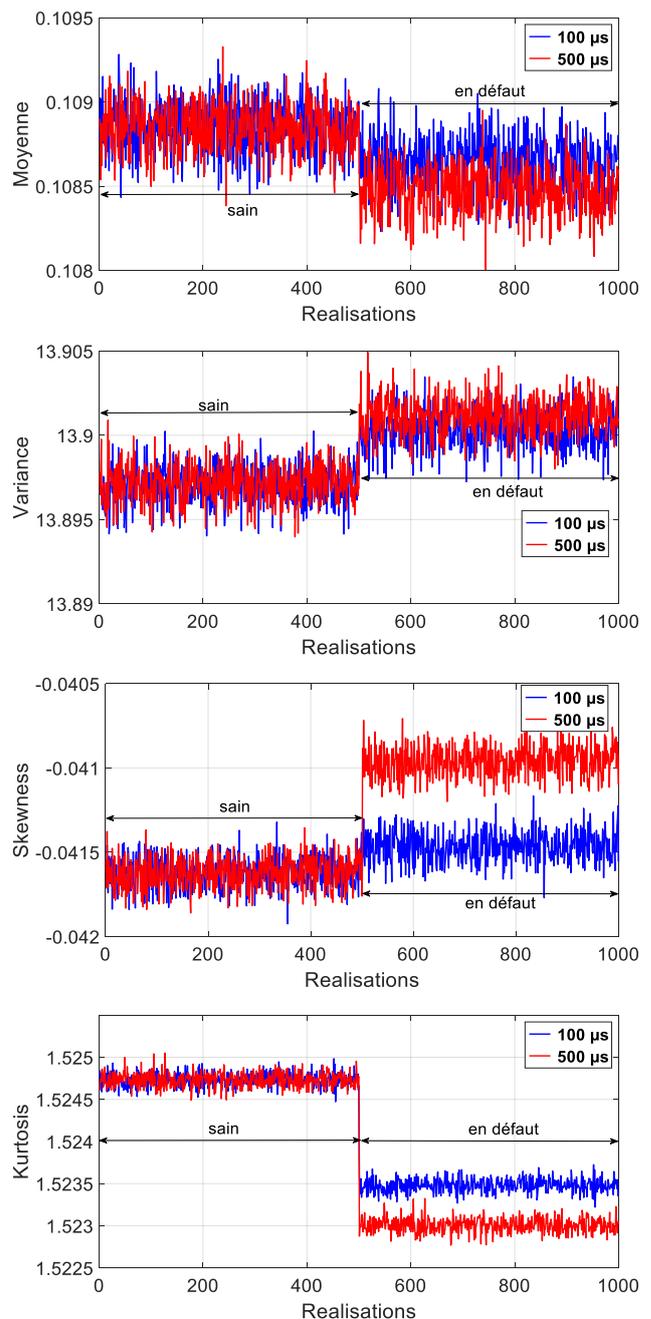


Fig. 4. Moments statistiques pour deux cas de défauts pour SNR= 40dB

À partir de la figure 5, nous pouvons remarquer que le kurtosis présente une petite variation entre les cas sains et les cas en défaut, mais les performances de la détection des défauts sont très faibles (en termes de fausse probabilité de détection et de fausses alarmes). Les autres réalisations en utilisant le skewness sont presque égaux dans les deux cas (sain et en défaut). Nous pouvons alors conclure que la détection de défauts est presque impossible avec ces quatre caractéristiques dans ces conditions extrêmes de bruit (SNR faible).

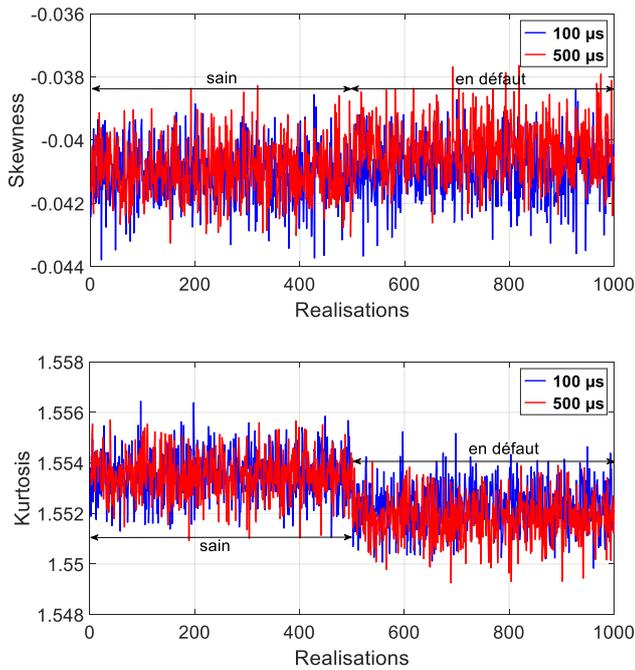


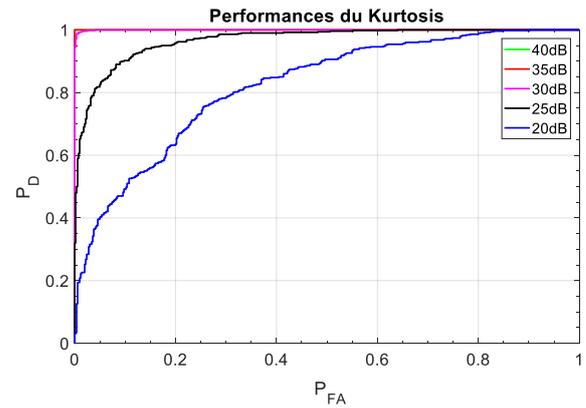
Fig. 5. Moments statistiques pour deux défauts avec SNR=20dB

On calcule la probabilité de détection ( $P_D$ ) et la probabilité de fausse alarme ( $P_{FA}$ ) comme suit :

$$P_D = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{et} \quad P_{FA} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (1)$$

Où TP est le vrai positif et représente le nombre de réalisations pour les cas en défaut (501 à 1000) qui sont supérieurs ou égaux au seuil de détection, alors que FN est le faux négatif et est calculé par  $FN = (\text{nombre de réalisations}) - TP$ . Le FP est le faux positif et représente le nombre de réalisations pour les cas sains (1 à 500) supérieurs ou égaux au seuil et le vrai négatif  $TN = (\text{nombre de réalisations}) - FP$ .

Les performances concernant l'évolution selon le SNR sont calculées pour les deux indicateurs. La courbe ROC (Receiver Operating Characteristics) est ensuite calculée et présentée dans la Fig. 6 pour la plus petite durée de défaut (100µs), pour une vitesse de 60rd/s et un couple de 10Nm.



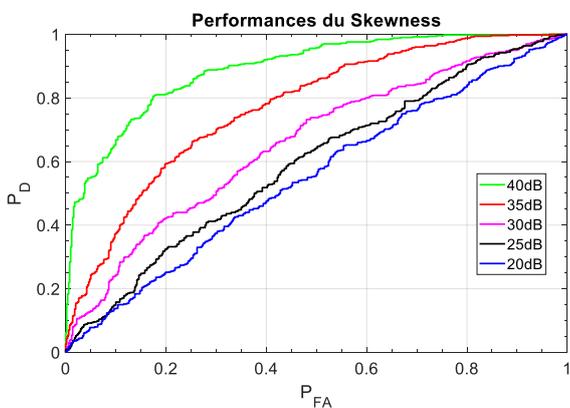
(b) Performances pour le Kurtosis

Fig. 6. Performances pour différents niveaux de bruits (60rd/s)

Avec ces courbes ROC (figure 6), nous pouvons choisir un seuil de détection de défaut optimal pour ces indicateurs, conduisant à la meilleure valeur de compromis entre  $P_D$  et  $P_{FA}$ . Il est clair qu'avec l'augmentation du niveau de bruit (diminution du SNR), la détection des défauts optimale conduirait à avoir une  $P_D < 0,7$  et une  $P_{FA} > 0,3$ . Cela signifie que l'efficacité de la détection des défauts utilisant ces caractéristiques sélectionnées dans des conditions de bruit sévères sera réduite.

Néanmoins, dans ces conditions, l'indicateur permettant d'obtenir les meilleures performances est le kurtosis même pour le défaut le plus petit (Fig. 6).

Lorsque la vitesse de rotation est faible, ces performances vont diminuer. La figure 7 montre les performances du kurtosis pour les mêmes conditions de charge (couple nominale) et de bruit (SNR = 20 dB). Cela confirme que les performances de détection se dégradent avec la diminution de la vitesse d'entraînement de la machine. A 20 rd/s, le seuil optimal conduira à une  $P_D=0,56$  et une  $P_{FA}=0,44$ . Cela doit être amélioré pour un processus de détection et de diagnostic de défauts efficace. En utilisant le skewness, les résultats sont presque similaires ( $P_D = 0,63$  et  $P_{FA} = 0,4$ ).



(a) Performances pour le Skewness

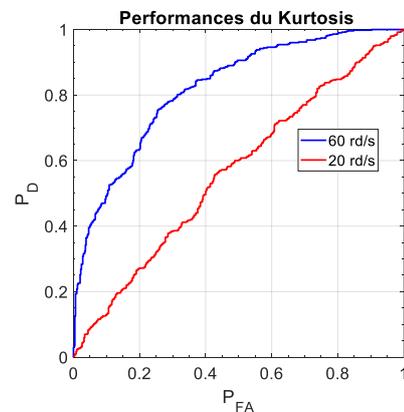


Fig. 7. Performances du Kurtosis pour différentes vitesses de rotations avec (SNR=20 dB)

Par conséquent, il est nécessaire d'améliorer le processus de détection et de diagnostic des défauts avec ces indicateurs pour ces conditions particulières de bruit élevé et de faible

vitesse. Pour ce faire, nous proposons dans la section suivante d'appliquer l'algorithme du CUSUM aux moments statistiques.

### 3. DETECTION EN UTILISANT LE CUSUM ALGORITHME

Le CUMulative SUM (CUSUM) est largement utilisé pour détecter les changements dans la valeur moyenne ou la variance d'une distribution gaussienne indépendante. Il est basé sur le rapport de vraisemblance [15-17].

#### 3.1. Etude des fonctions de Densité de Probabilité (PDF)

Le plus souvent, une PDF est utilisée pour spécifier la probabilité d'une variable aléatoire sur une plage de valeurs. Sa variation à travers un intervalle donne la probabilité que la valeur de la variable se trouve dans le même intervalle.

Afin d'utiliser le CUSUM d'une façon optimale, la fonction de densité de probabilité (PDF) des variables étudiées doit être gaussienne. Ceci est vérifié avec le test de Kolmogorov-Smirnov sur les PDF affichés sur la figure 8. Ce test est un critère non paramétrique utilisé pour évaluer la différence entre deux distributions normales standards, et également pour comparer une distribution de référence avec une distribution normale.

La figure 8 montre les PDF des 4 moments statistiques en conditions saines et en défauts (avec des durées de 100, 200 et 500  $\mu\text{s}$ ) pour une vitesse de 20rd/s à charge nominale avec un SNR = 20dB.

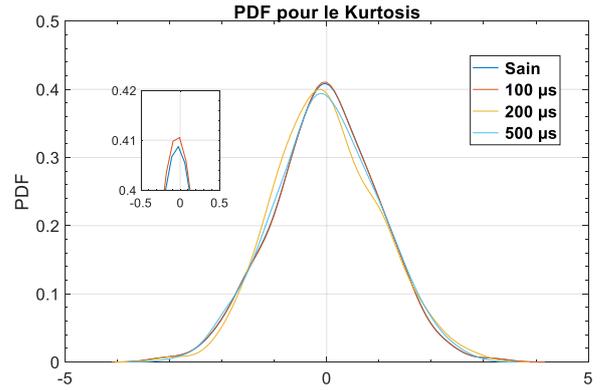
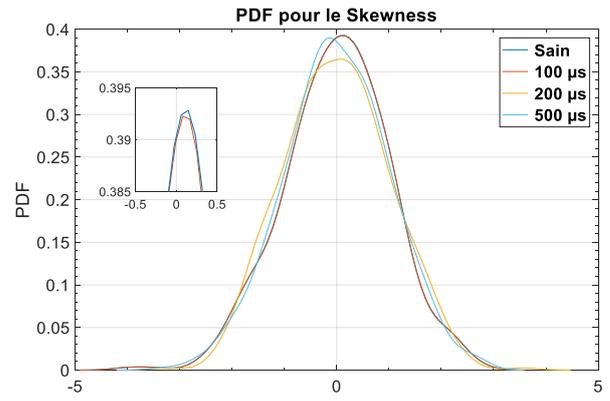


Fig. 8. PDF des quatre premiers moments statistiques avec un SNR=20dB (20rd/s)

Les résultats de l'application du Kolmogorov-Smirnov test sur les PDF pour toutes les conditions de fonctionnement (vitesse et charge) et pour les SNR considérés (20 à 40 dB) confirment que les PDF des indicateurs peuvent être considérées comme gaussiennes. Ce qui traduit que le CUSUM peut être appliqué de manière optimale.

#### 3.2. Le CUSUM

Le CUSUM est appliqué à chacun des 4 moments statistiques ( $\mu$ ,  $\sigma^2$ ,  $Skw$ ,  $Kur$ ) [16, 17]. Seuls les résultats sur le skewness seront présentés dans la suite. La fonction CUSUM notée  $S_N$  est calculée de manière optimale comme la somme des statistiques  $s_k$  telle que:

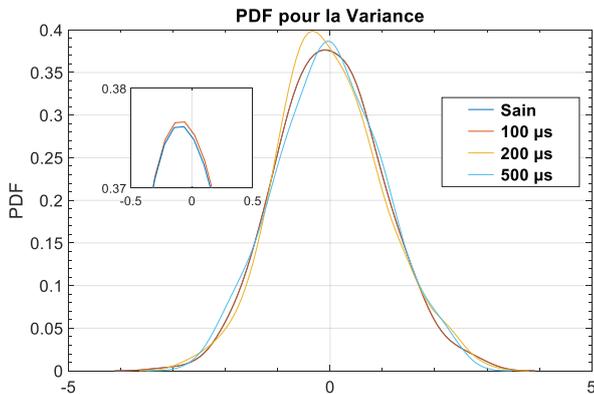
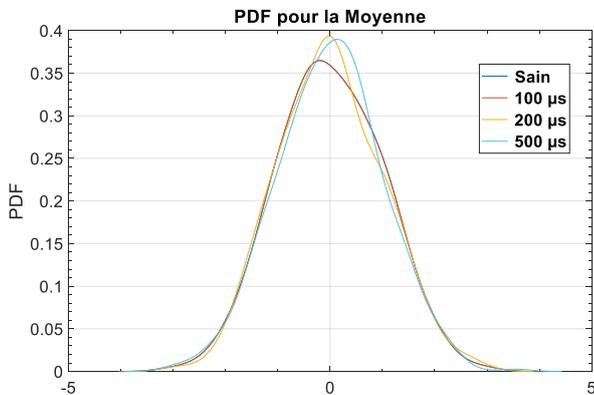
$$S_N = \sum_{k=1}^N s_k \quad (2)$$

Où  $N$  est le nombre des réalisations et  $s_k$  peut être considéré dans le cadre de changement de la valeur moyenne ( $s_{k_\mu}$ ) ou de la variance ( $s_{k_\sigma}$ ) pour les quatre premiers moments statistiques. Ils sont définis comme suit:

$$s_{k_\mu} = \left( \frac{\mu_f - \mu_h}{\sigma^2} \right) \times \left( x_k - \frac{\mu_f + \mu_h}{2} \right) \quad (3)$$

$$s_{k_\sigma} = \ln \frac{\sigma_h}{\sigma_f} + \left( \frac{1}{\sigma_h^2} - \frac{1}{\sigma_f^2} \right) \times (x_k - \mu_h) \quad (4)$$

Où  $\mu_h$  et  $\mu_f$  sont respectivement la valeur moyenne dans les cas sains et les cas en défaut,  $\sigma_h$  et  $\sigma_f$  sont respectivement l'écart type dans les cas sains et les cas en défaut,  $x_k$  représente le moment



statistique considéré pour la  $k$ ème observation sur  $N$ . Lors du calcul du CUSUM  $S_N$ , on peut alors choisir le seuil  $T_h$  à 99% de la valeur maximale  $S_{max}$  du CUSUM dans le cas sain. Si la valeur du CUSUM est supérieure à  $T_h$  cela signifie qu'un comportement incorrect a été détecté.

Les figures 9 et 10 présentent respectivement l'application du  $s_{k_\mu}$  et  $s_{k_\sigma}$  sur les réalisations effectuées pour le Kurtosis avec un SNR=20dB et pour une vitesse de 20rad/s et une charge nominale. Les 500 premières réalisations correspondent aux cas sains et les 500 autres ceux en défauts.

Le défaut est détecté efficacement par les deux indicateurs après 23 réalisations en défaut pour le CUSUM sur la valeur moyenne et 35 réalisations en défaut pour le CUSUM sur la variance. En termes de performances de détection, il n'y a qu'une fausse alarme pour le CUSUM variance et seulement deux pour le CUSUM sur la valeur moyenne de l'indicateur.

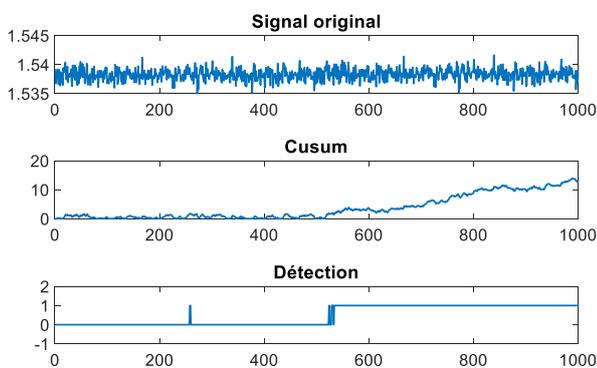


Fig. 9. La détection du défaut de 100µs en utilisant le CUSUM moyenne sur le kurtosis

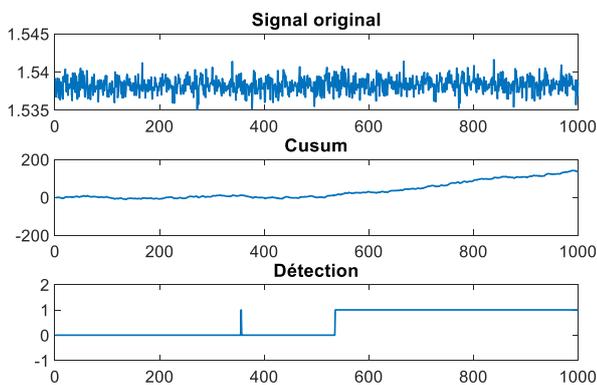


Fig. 10. La détection du défaut de 100µs en utilisant le CUSUM variance sur le kurtosis

Des résultats de même nature sont obtenus en appliquant le CUSUM aux réalisations du skewness.

#### 4. CONCLUSIONS

Ce travail traite de la détection et du diagnostic des défauts de type circuit ouvert d'un interrupteur de puissance dans un onduleur NPC à trois niveaux dans un entraînement électrique. Deux techniques statistiques ont été proposées pour la

méthodologie de détection et de diagnostic des défauts, puis évaluées.

Dans un premier temps, une solution basée sur l'extraction et l'analyse des quatre premiers moments statistiques du courant circulant dans les phases de la machine est proposée. Avec cette méthode, le défaut est détecté avec une probabilité de détection supérieure à 80% lorsque la vitesse de rotation est supérieure au tiers de la vitesse nominale. Cependant, les performances sont dégradées à une vitesse plus faible et pour un SNR plus faible (niveaux de bruit élevés).

Puis, en second lieu, nous avons utilisé le CUSUM pour évaluer les variations de la moyenne et de la variance pour les réalisations du troisième et quatrième moment statistique (skewness et kurtosis) afin d'améliorer la détection. De meilleures performances sont obtenues pour la détection des défauts naissants dans des conditions de faible vitesse et de bruit élevé.

#### 5. REFERENCES

- [1] J.P. Ferrieux, F. Forest. "Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance: principes, composants, modélisation", Dunod, 2006
- [2] S. M. Sharkh, M. A. Abusara, G. I. Orfanoudakis, et B. Hussain. "Power Electronic Converters For Microgrids," IEEE Wiley, pp. 1-72, 2014.
- [3] M. Ikonen, O. Laakkonen, et M. Kettunen, "Two-Level and Three-Level Converter Comparison in Wind Power Application," www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf, Finland, (23 Oct. 2013).
- [4] A. Choudhury, "Three-level neutral point clamped traction inverter drive for electric vehicles," thèse en génie électrique et informatique, soutenue par Dr. P. Pillay, Montréal, Concordia Université, Avril 2015.
- [5] R. Errabelli et P. Mutschler, "Fault-tolerant voltage source inverter for permanent magnet drives," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 27, n°2, pp. 500-508, Février 2012.
- [6] J.M. Trigeassou. "Diagnostic des machines électriques", Hermès, 2011
- [7] S. E. Varghese et Reema N, "Effects of Switching Faults on Induction Motor Drive System," International research journal of engineering and technology (IRJET), vol. 3, n°5, pp. 607-611, Mai 2016.
- [8] K. Rothenhagen et F. W. Fuchs, "Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers," IEEE PESC proc, pp.4348-4354, 2004.
- [9] A. M. S. Mendes, A. J. M. Cardoso et E. S. Saraiva, "Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach," IEEE IEMDC Proc, pp.704-706, 1999.
- [10] K. S. Kim, M. J. Jang, N. T. Hai, N. B. Lai, J. H. Song et K. H. Kim, "Open-switch fault detection and faulty switch identification of PWM inverter in PMSM drives using DOB based voltage information," International journal of applied engineering research, Research India Publications, vol. 11, n°2, pp. 1494-1502, 2016.
- [11] D. W. Feng, B. Wu, et al., "Space Vector Modulation for Neutral Point Clamped Multilevel Inverter with Even Order Harmonic Elimination", Conférence Canadienne en Electrical en génie électrique et informatique, pp. 1471-1475, 2004.
- [12] B. Wu, "High Power Converters and AC Drives", IEEE Press/Wiley ISBN: 0-4717-3171- 4 Nov. 2005.
- [13] J. H. Seo, C. H. Choi, et al., "A New Simplified Space Vector PWM Method for Three-Level Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 4, pp. 545-555, 2001.
- [14] H. Athar, I. B. Aamer, Y. Abdul Rehman, M. Ghulam, et A. Qadeer, "Sliding mode-based observer design for field-oriented control of induction machine drive for applications in hybrid electric vehicles," IEEE Proceedings de la 33ème Conférence Chinoise de Control, Nankin, Chine, pp. 263-268, Juillet 28-30, 2014.
- [15] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze et M. Staroswiecki, "Diagnosis and fault-tolerant control", Springer , Seconde Edition, Chapter 6, pp. 238-263, 2006.
- [16] M. Basseville et I. Nikiforov, "Detection of Abrupt Changes-Theory and Applications", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1993.
- [17] C. Delpha, D. Diallo, H. Al Samrout, N. Moubayed "Incipient fault detection and diagnosis in a three-phase electrical system using statistical signal processing", IEEE Industrial Electronics Conference (IECON 2017), Oct. 29-Nov 1, Pékin, Chine, pp. 3828-3833, 2017.