

Approche statistique et fréquentielle corrélées avec le filtre de Wiener pour un débruitage et une détection des défauts des machines asynchrones

[Statistical and frequency approach correlated with Wiener filter for denoising and detection of defects of asynchronous machines]

Jean Claude Mukaz Ilunga

Mécanique, Institut Supérieur des Techniques Appliquées, Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The electrical current signal can be seen as a useful signal, disturbed by a mechanical noise signal or other measurement noises. In this case, noise reduction methods such as the Wiener filter can provide solutions to detect mechanical defects. It will be assumed that the electrical signals are decorated with the rotation of the rotor and therefore of any mechanical event related to the rotation. This can be verified in the case of an asynchronous machine. This property is important for estimating the Wiener filter whose basic assumption is that the useful signal must be decorated with noise.

KEYWORDS: Statistical, frequency, Wiener filter, denoise, asynchronous machine.

RESUME: Le signal courant électrique peut être vu comme un signal utile, perturbé par un signal bruit d'origine mécanique ou d'autre bruits de mesures. Dans ce cas de figure, les méthodes de réduction de bruit tel que le filtre de Wiener peuvent apporter des solutions pour détecter des défauts mécaniques. On supposera que les signaux électriques sont décorrés de la rotation du rotor donc de tout événement mécanique lié à la rotation. Ce qui peut être vérifié dans le cas d'une machine asynchrone. Cette propriété est importante pour l'estimation du filtre de Wiener dont l'hypothèse de base est que le signal utile doit être décorré du bruit.

MOTS-CLEFS: Statistique, fréquentielle, filtre de Wiener, débruitage, machine asynchrone.

1 INTRODUCTION

Les méthodes de réduction de bruit sont des outils attrayants pour réduire le bruit en exploitant les connaissances a priori. Dans ce concept, le bruit est défini comme tout type de perturbation indésirable, qu'il soit d'origine électrique, acoustique, vibratoire, ou de toute autre origine. Les algorithmes de réduction du bruit impliquent habituellement un système numérique qui annule le bruit primaire basé sur le principe de la superposition; spécifiquement, un bruit estimé d'amplitude égale et de même phase (ou en opposition) est généré et soustrait (ou ajouté) au bruit primaire, ainsi ayant pour résultat l'annulation des deux bruits. La figure 1 montre un système typique de réduction du bruit.

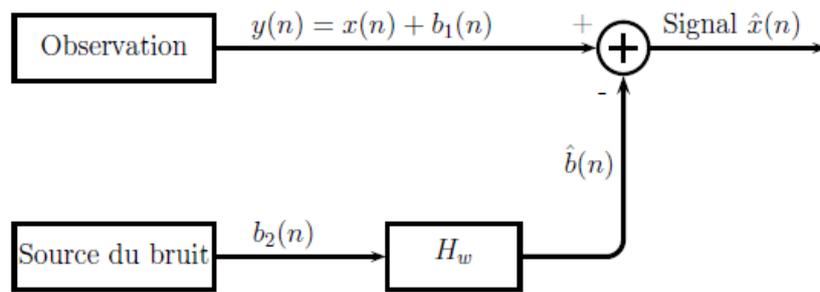


Fig. 1. Modèle de réduction du bruit en utilisant deux capteurs

2 FILTRAGE DE WIENER

On cherche à construire un système linéaire invariant en temps permettant d'extraire au mieux le signal du bruit en rendant maximal le rapport signal sur bruit. On dispose du signal d'observation $y(t)$, qu'on va filtrer pour rendre maximal le rapport signal sur bruit. Le filtre qu'on va appliquer est le filtre de Wiener [1], [2].

En développant on obtient

$$J = C_{xx}(0) + C^{\hat{x}\hat{x}}(0) - C_{x\hat{x}}(0) - C^{\hat{x}x}(0)$$

Soit en fréquence et en tenant compte des relations du filtrage et du fait que:

$$C_{xy}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xy}(v) dv$$

$$J = J = C_{xx}(0) + C^{\hat{x}\hat{x}}(0) - C_{x\hat{x}}(0) - C^{\hat{x}x}(0)$$

$$C_{xy}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xy}(v) dv$$

En minimisant l'intégrale pour tout v , on obtient le gain complexe du filtre de Wiener:

$$H_w(v) = \frac{S_{xy}}{S_{yy}}$$

Considérons le cas d'un signal $x(t)$ et d'un bruit $b(t)$ décorrélés alors:

$$S_{xy}(v) = S_{xx}(v)$$

3 APPLICATION AUX SIGNAUX ÉLECTRIQUES

3.1 POSITION DU PROBLÈME

L'utilisation conjointe de la tension et du courant peut nous permettre d'éliminer en grande partie la composante du 50 Hz en utilisant les techniques de réduction de bruit tel que le spectrofiltre [2], [3]. Nous exploitons de plus la cyclo stationnarité des signaux électriques pour l'estimation du filtre [4] ce qui permet d'être plus performant au niveau des résultats. La tension est prise comme référence et nous construisons le filtre de Wiener qui va nous permettre d'estimer le courant électrique corrélé à la tension. Ce courant estimé ne porte pas l'information mécanique qui est décorrélée du signal électrique d'alimentation. Il sera par la suite soustrait du courant mesuré afin d'atténuer le 50 Hz et ses harmoniques; le signal ainsi obtenu est un signal résiduel dont les contributions d'origine mécanique ont été renforcées par réduction du 50 Hz et de ses harmoniques.

3.2 ESTIMATION DU FILTRE DE WIENER POUR LES SIGNAUX ÉLECTRIQUES [4]

On désire estimer la contribution du courant fortement corrélée à la tension d'alimentation et donc peu sensible au défaut de la machine; Ceci revient à estimer le filtre $h(t)$, appliqué à la tension $u_1(t)$ fournissant le signal $\hat{i}(t)$, sous contrainte de minimisation de l'erreur quadratique entre \hat{i} et i mesuré.

Le filtre s'écrit sous la forme suivante:

$$H(\nu) = \frac{S_{i_1 u_1}(\nu)}{S_{u_1 u_1}(\nu)}$$

S symbolise la densité spectrale de puissance.

Avec :

$$S_{i_1 u_1} = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{i_1 u_1}(\tau) \exp -2j\pi\nu\tau d\tau$$

$$S_{u_1 u_1} = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{u_1}(\tau) \exp -2j\pi\nu\tau d\tau$$

$C_{i_1 u_1}(\nu)$ et $C_{u_1}(\nu)$ sont l'auto et l'inter corrélation, $i(t)$ sera finalement:

$$\hat{i}(t) = TF^{-1}[U_1](\nu)H(\nu)$$

Avec TF^{-1} est la transformée de Fourier inverse et $U_1(\nu)$ est la transformée de Fourier de $u_1(t)$. La mise en œuvre utilisée pour estimer ce filtre, consiste à diviser les deux signaux courant et tension en des blocs proportionnels à une période du 50 Hz, à calculer la densité.

Spectrale d'inter corrélation de chaque bloc, $S_{u_1 u_1, k}(\nu)$, d'une part et $S_{i_1 u_1, k}(\nu)$, d'autre part; à moyenner les $S_{u_1 u_1, k}(\nu)$ entres eux; les $S_{i_1 u_1, k}(\nu)$ entres eux et enfin estimer le filtre selon l'expression $G = S_{i_1 u_1} / S_{u_1 u_1}$. Le courant estimé peut-être obtenu en convoluant la tension avec la réponse impulsionnelle du filtre. A partir du courant estimé par le filtre de Wiener, on va générer un signal résiduel noté $b(t)$ tel que $b(t) = i_1(t) - i_e(t)$; Dans ce cas, le signal $b(t)$ ne contient que du bruit décorréolé du signal électrique avec en particulier des informations liées à la partie mécanique.

4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1 DÉBRUITAGE

Les fréquences liées au défaut de roulement sont localisées dans le spectre du courant aux

Fréquences $|fs \pm k.f_{ex}|$, où f_s est la fréquence du secteur électrique égale à 50 Hz, f_{ex} est la fréquence du défaut de bague externe de roulement égale à 62, 89 Hz et $k = 1, 2, \dots$

L'information sur le défaut est masquée par la forte dynamique des composantes fréquentielles présentent dans le spectre (figure 6) multiples de la fréquence d'alimentation. Nous proposons d'utiliser le filtre de Wiener pour faire ressortir ces composantes. Nous montrons les résultats obtenus par filtrage de Wiener dans le cas d'estimation du filtre par 2 techniques différentes. La première technique est obtenue sans correction des fluctuations de la période du réseau (figure 5), la seconde est obtenue par correction des fluctuations (figure 5 et 6). Il est clair que la correction des fluctuations de la fréquence d'alimentation apporte une amélioration indéniable sur l'estimation du courant corrélé à la tension. Comme le courant à une forte composante 50 Hz, il est préférable d'observer le spectre (figures 7 et 8) d'autant plus que le signal qui nous intéresse est le signal résiduel en dehors des fréquences du réseau.

Ce signal obtenu par différence entre le courant mesuré et le courant estimé. L'analyse spectrale du signal résiduel, présentée à la figure 8, montre que la dynamique du 50 Hz a été éliminé et que la différence d'amplitude est réduite à 27, 6 dB entre le 50 Hz et le 112, 89 Hz. En outre, un gain de 1, 55 dB de la fréquence de 112, 89 Hz permet de la distinguer des

autres fréquences très proches. Un autre aspect important signalé au paragraphe 3.6.3, ce que nous arrivons à extraire la signature du glissement (50 ± 1 , 17Hz) masquée au préalable par le 50 Hz. Le filtre de Wiener a permis d'améliorer encore plus ce résultat en réduisant mieux le 50 Hz.

4.2 APPLICATION DU KURTOSIS

Le kurtosis ou coefficient d'aplatissement décrit la forme de la distribution d'une variable aléatoire réelle. Il est défini comme étant le rapport entre le moment centré d'ordre 4 et le carré du moment centré d'ordre 2 de la distribution en question; plus il est élevé, plus la distribution est "pointue".

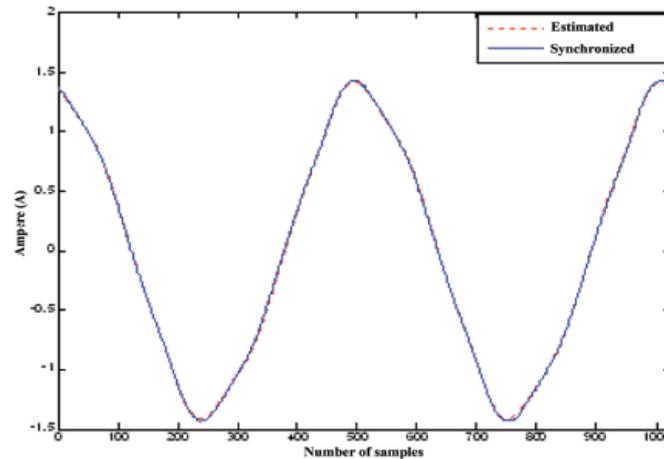


Fig. 2. Courant estimé, -Courant observé synchronisé

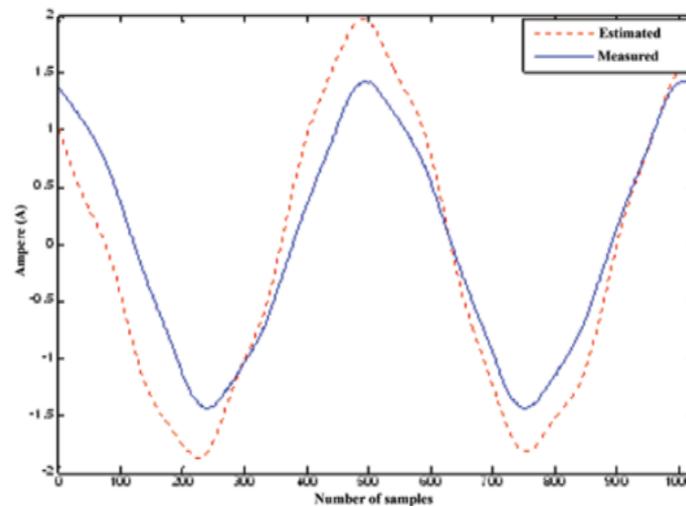


Fig. 3. Courant estimé, -Courant observé non synchronisé

$$kurt(X) = \frac{E[(X - \mu)^4]}{\sigma^4}$$

Où μ et σ sont la moyenne et l'écart type de X. Le kurtosis d'une variable aléatoire normale vaut 3 et pour une sinusoïde vaut 1,5 [5]. C'est un indicateur sensible dans la détection des impulsions périodiques [6] Pour l'analyse des vibrations, la valeur du kurtosis devrait être proche de 3 en fonctionnement sain. L'introduction d'un défaut génère des impulsions, modifiant ainsi la distribution des signaux de vibration et l'augmentation de la valeur du kurtosis. Dans notre application, nous

avons associé le kurtosis avec le filtre de Wiener pour détecter les défauts en utilisant les signaux électriques. Il a été appliqué à différents signaux acquis dans des conditions de fonctionnement différentes; les résultats sont classés dans le tableau 1.

Tableau 1. Résultats

Signal :	Sain	Défaut
Courant	1.46	1.57
Accéléromètre	2.83	3.51
Résidu	2.16	8
Enveloppe du signal vibratoire	12.33	66

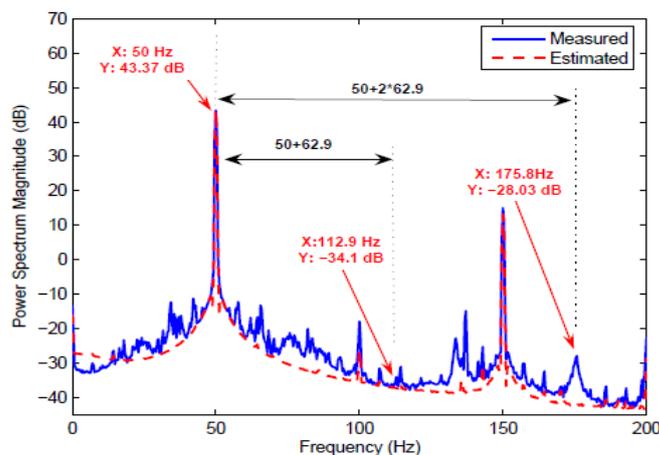


Fig. 4. DSP de deux courants: Agrandissement entre 100 et 200 Hz

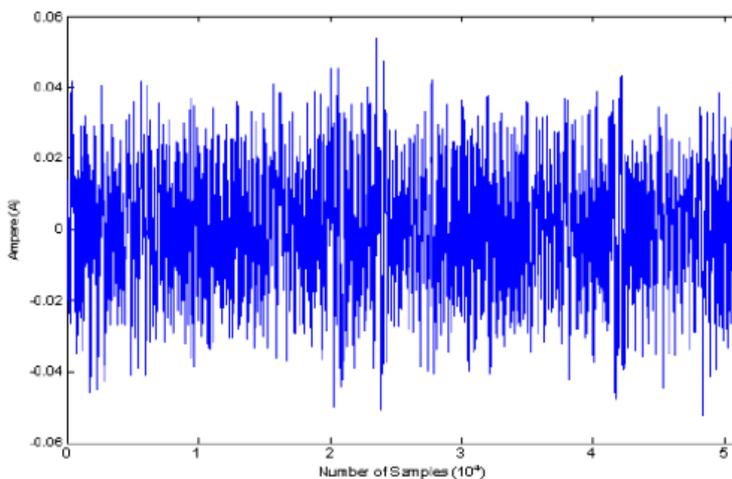


Fig. 5. Signal-estimé

Pour le signal électrique, le kurtosis est proche de 1, 5 et par contre nous ne pouvons pas détecter les anomalies. Par contre, en appliquant sur le signal résiduel, la valeur du kurtosis augmente de 2 dans le cas sain à 8 pour un fonctionnement avec un défaut de roulement. Notons également que le kurtosis est plus sensible sur l’enveloppe du signal vibratoire que sur le signal électrique, c’est un résultat tout à fait normal puisque le défaut de roulement impacte plus directement les vibrations que le courant de la machine. Par contre, le facteur d’accroissement en présence d’un défaut est du même ordre de grandeur sur le signal vibratoire et le signal résiduel.

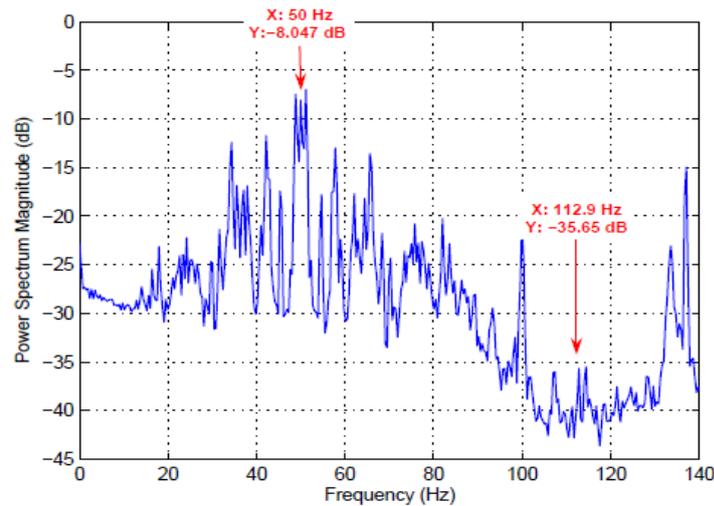


Fig. 6. DSP signal-résiduel

5 CONCLUSION

L'influence des défauts de roulement sur les courants statorique dépend du type de défaut et des conditions de fonctionnement de la machine. Il s'avère donc difficile de détecter une panne en observant tout simplement le signal du courant surtout que l'information sur la mécanique contenue dans le courant électrique est masquée par la forte dynamique de la fréquence d'alimentation.

La prise en compte explicite de la non stationnarité des signaux électriques dans l'estimation du filtre optimal de Wiener nous a permis de séparer la contribution résultante des effets mécaniques impulsionsnels (défaut) de celle résultant de l'alimentation électrique. Par la suite pour caractériser la contribution mécanique, nous avons utilisé le Kurtosis qui permet de mettre en évidence des signaux dont la signature s'éloigne d'une gaussienne, c'est le cas typique de défaut de roulement impulsif de type écaillage.

REFERENCES

- [1] Norbert Wiener. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. The technology press of the MIT, New York, John Wiley & sons Inc., 1950.
- [2] J. Max and J. L. Lacoume. *Méthodes et techniques du traitement du signal et application aux mesures physiques*. Tome 1. Masson, Paris, 1996.
- [3] Monson H. Hayes. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling* New York: Wiley, 1996.
- [4] Ali Ibrahim, Mohamed Elbadaoui, François Guillet, and Mohamed Zoeter, *Using the cyclostationarity of electrical signal for bearing fault detection in induction machine*, In Proceedings of IEEE, ICIT 2006, pages pp. 3008–3013, Mumbai, India, 15-17 Dec. 2006.
- [5] C. Pachaud, R. Salvétat, and C. Fray. Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces. *Mechanical Systems and Signal Processing*. vol. 11 (no. 6): pp. 903–916, 1997.
- [6] R. B. W. Heng and M. J. M. Nor. Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition, *Applied Acoustics*, vol. 53 (no. 1-3): pp. 211–226, January-March 1998.