

Nouvelle méthode de détection des perturbations dans les signaux électriques basée sur la transformée de Stockwell

ZIED BOUGUILA, ALI MOUKADEM, DJAFFAR OULD ABDESLAM, PATRICE WIRA, ALAIN DIETERLEN

Laboratoire MIPS (EA 2332) de l'Université de Haute Alsace,
68093 Mulhouse Cedex, France

Zied.Bouguila@uha.fr

Résumé - Ce travail présente une méthode originale pour la détection de changements des signaux non stationnaires. Le critère utilisé est non paramétrique. Il est basé sur l'énergie de Shannon du spectre local (SSE : Stockwell Shannon Energy) qui est issue d'une analyse multi-résolution grâce à la transformée de Stockwell. L'approche est évaluée sur un courant non stationnaire mesuré aux bornes d'un variateur et d'une lampe halogène. Les résultats montrent que le détecteur SSE proposé permet d'obtenir une détection fiable avec une bonne robustesse face au bruit.

Abstract - This paper presents a novel method for detection of changes in non-stationary signals. The criterion used is nonparametric. It is based on the local Shannon energy spectrum (SSE: Stockwell Shannon Energy) who comes from a multi-resolution analysis using the Stockwell transform. The approach is evaluated on a non-stationary current measured at a drive terminal and a halogen lamp. The results show that the proposed SSE detector provides reliable detection with robustness to noise.

1 Introduction

Au cours de ces dernières années, la qualité de l'énergie électrique est devenue un enjeu important dans le fonctionnement des systèmes électriques. Son analyse couvre plusieurs types de problèmes tels que l'approvisionnement en électricité et la suppression des perturbations dans le réseau électrique. Les principales perturbations, définies par la norme IEEE Std. 1159-2009 [1] et susceptibles d'altérer le bon fonctionnement des équipements sont les creux de tension, les surtensions, les déséquilibres de tension, les fluctuations de tension, les harmoniques et inter-harmoniques...

La localisation des perturbations de nature non stationnaires [2,3] consiste à détecter les perturbations temporelles dans le signal. La Transformée de Fourier (TF) [4] fournit la fréquence correspondante avec des informations sur l'amplitude et la phase, mais sans localisation temporelle. La Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT) peut en partie résoudre ce problème, mais la définition de la fenêtre à largeur fixe a priori impose des limites à l'analyse des signaux non stationnaires [5]. La Transformée temps-fréquence de Stockwell (TS) [5], permet de résoudre ce problème. Elle consiste à faire varier la fenêtre d'analyse en fonction de la fréquence. Cette nouvelle conception effectue ainsi une analyse multi-résolution du signal.

On présente dans cet article une méthode originale pour extraire l'enveloppe du signal électrique afin de localiser les perturbations dans les signaux non stationnaires. Le critère utilisé est non paramétrique et

basé sur l'énergie de Shannon du spectre local (SSE : Stockwell Shannon Energy) [6] issu de la TS.

2 Méthode

2.1 Analyse multi-résolution

La transformée de Stockwell relève de la large gamme d'outils d'analyse multi-résolution. Elle peut être vue comme une TFCT à fenêtre d'analyse variable ou comme une transformée en ondelette avec information de phase [5].

La TS notée $S(\tau, f)$ de la série temporelle $h(t)$, est définie par :

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

La TS est obtenue par multiplication de la transformée en ondelette avec le facteur de phase $\exp(i2\pi ft)$

$$S(\tau, f) = \exp(i2\pi ft)W(t, \alpha) \quad (2)$$

avec l'ondelette mère, dans ce cas particulier, est définie par :

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2 f^2}{2}\right) \exp(-i2\pi ft) \quad (3)$$

L'ondelette mère (3) ne satisfait pas la condition d'admissibilité (moyenne nulle). En d'autres termes, l'équation (2) n'est pas strictement une transformée en ondelettes.

La fréquence zéro de la TS est identiquement égal à zéro. Ceci n'ajoute aucune information. Par conséquent, $S(\tau, f)$ est définie comme étant indépendante du temps et est égal à la moyenne de la fonction, à savoir :

$$S(\tau, f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} h(t) dt \quad (4)$$

En utilisant le théorème de convolution et en calculant la transformée de Fourier de la transformée en S, on peut établir une relation directe entre la TS et la TF :

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha, f \neq 0 \quad (5)$$

Ceci facilite l'implémentation de la TS en profitant de la rapidité algorithmique de la TF rapide. L'expression (1) à valeurs complexes, se décompose en :

$$S(\tau, f) = A(\tau, f) e^{i\phi(\tau, f)} \quad (6)$$

où $A(\tau, f)$ est le spectre d'amplitude et $e^{i\phi(\tau, f)}$ est le spectre de phase.

2.2 Critère énergétique local

L'énergie de Shannon atténue les basses et hautes valeurs en favorisant les valeurs moyennes. La SSE, défini dans [6], applique l'énergie de Shannon sur le spectre local, généré par la TS, afin d'extraire l'enveloppe du signal. Cette méthode, contrairement à la méthode de Shannon Radial Basis Function (SRBF) [7], ne nécessite aucune phase d'apprentissage ou de système de classification.

La SSE, d'un signal temporel $x(t)$, est définie par :

$$SSE(x(t)) = - \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |S(t, f)|^2 \log(|S(t, f)|^2) df \quad (7)$$

avec f_{\min} et f_{\max} la bande de fréquence où la TS est calculée, fonctions de la bande passante du signal analysé.

2.3 Transformée de Hilbert

La transformée de Hilbert [8] est utilisée pour générer un signal analytique à partir d'un signal réel. Elle est obtenue par convolution du signal réel avec la fonction $(1/\pi t)$ comme indiqué ci-dessous :

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (8)$$

En conséquence, la résultante de la transformée de Hilbert est un signal en quadrature de phase par rapport au signal $x(t)$.

Ainsi, le signal analytique $B[x(t)]$ du signal $x(t)$ à pour expression :

$$B[x(t)] = x(t) + jH[x(t)] \quad (9)$$

Le module de $B[x(t)]$ définit l'enveloppe de Hilbert du signal $x(t)$:

$$E(t) = \sqrt{x(t)^2 + H[x(t)]^2} \quad (10)$$

3 Application et résultats

3.1 Acquisition du signal

Afin de localiser les perturbations présentes dans le courant électrique d'une lampe halogène la première phase consiste à extraire l'enveloppe du signal. Dans ce papier, on compare la robustesse d'extraction de l'enveloppe du signal par la méthode SSE avec celle de Hilbert [6] pour différents rapports signal à bruit (SNR).

Le signal collecté, par une carte dSPACE DS1104, sur une période de 2 s. est discrétisé à la fréquence d'échantillonnage de 10 KHz. Durant l'acquisition, l'intensité du courant est variée pour créer différents types de perturbations comme le montre la figure (1.a).

3.2 Résultats

L'approche est évaluée avec un courant généré par un variateur et une lampe halogène. On voit sur la figure (1.a) qu'il est stationnaire pendant 0,45s. (ce sera la référence), puis il est suivi d'une diminution et d'une augmentation d'amplitude avant de passer par une coupure de durée 0,2s. et finit avec de nouvelles variations d'amplitudes. Ces perturbations sont rendues difficilement identifiables à partir du signal original en présence de bruit. La TS, figure (1.b), représente la variation de l'amplitude du signal sur chaque voie ainsi que les différentes harmoniques. On retrouve les aspects de variation de l'amplitude et la coupure de tension entre 1,1s. et 1,3s. En exploitant l'amplitude de chaque voie de la transformée en S, la méthode SSE permet de retrouver la variation du signal des spectres locaux. Le signal résultant de la méthode SSE est lissé par un filtre médian, figure (1.c).

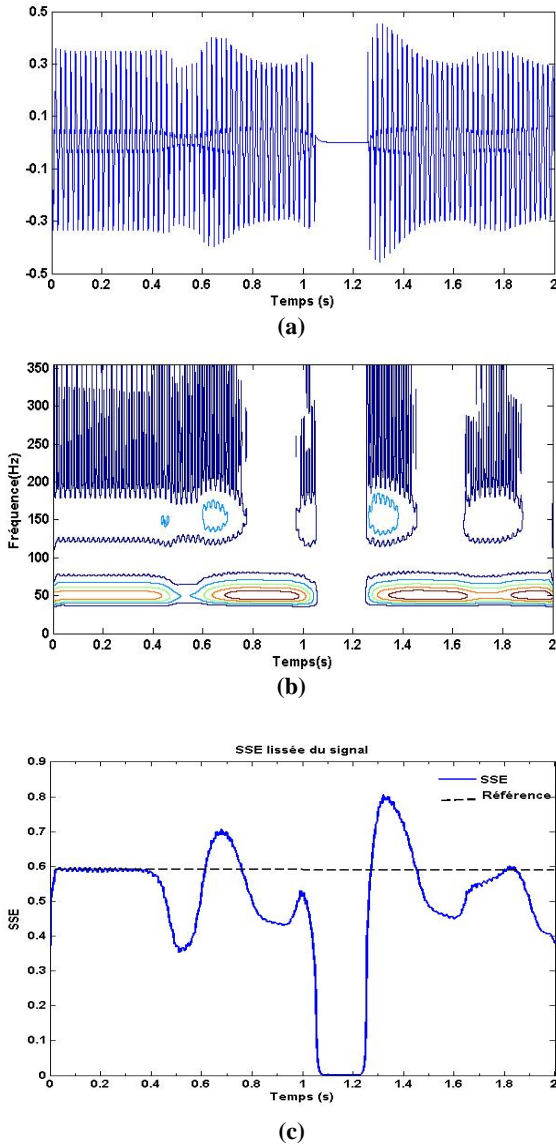


Figure 1 : (a)Variation de l'intensité du courant électrique de la lampe halogène, (b) TS du signal, (c) Variation SSE lissée

Le tableau 1 présente les performances vis-à-vis du bruit de la détection de l'enveloppe par les méthodes SSE et de Hilbert. Pour différentes valeurs de SNR (5, 10, 20, 30 et 40dB) appliquées au signal temporel de référence, on calcule l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) par rapport au signal de référence pour les méthodes SSE et Hilbert :

$$EQM_{Méthode} = \sqrt{\frac{(Méthode - Méthode_{bruitée})^2}{N}} \quad (11)$$

Tab 1 : Performances de l'algorithme SSE

| SNR(dB) | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| EQM _{SSE} (%) | 6.38 | 2.93 | 0.74 | 0.21 | 0.02 |
| EQM _{Hilbert} (%) | 8.39 | 4.42 | 1.30 | 0.68 | 0.03 |

Il est quasiment impossible de diagnostiquer la variation du courant à partir de l'enveloppe de Hilbert du signal à fort bruit (5 dB), figure 2 (a), que celle de

l'enveloppe de Shannon, figure 2 (b), même si on voit les variations apparentes. De plus, l'enveloppe de Shannon caractérise mieux les changements manifestant le signal à (20 dB), figure 2 (d), que l'enveloppe de Hilbert, figure 2 (c).

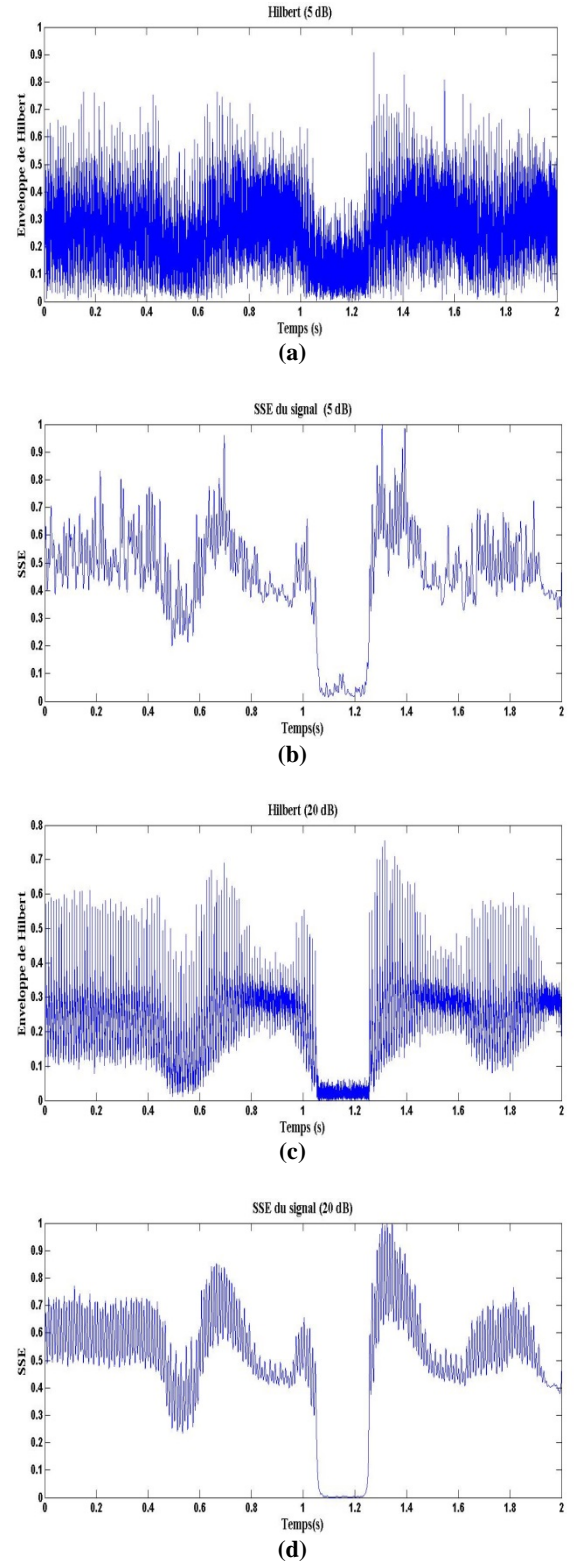


Figure 2 : (a), (c) Enveloppe de Hilbert avec bruit (respectivement 5 dB et 20 dB) (b), (d) enveloppe SSE avec bruit (respectivement 5 dB et 20 dB)

La méthode, SSE, montre une meilleure robustesse que la transformée de Hilbert face aux bruits pour la

détection de l'enveloppe du signal. Elle est ainsi capable de mieux caractériser le changement abrupt présent dans la variation de l'intensité du courant électrique de ce fait permettra une localisation plus précise des perturbations sur l'amplitude du signal.

4 Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la localisation des perturbations des signaux non stationnaires présents dans le courant électrique d'une lampe halogène. Ces perturbations qui se manifestent par une variation lente de l'amplitude sont détectées dans un espace temps-fréquence par la transformée de Stockwell.

Le détecteur SSE proposé, basé sur le critère d'énergie locale utilisé en analyse multi-résolution, permet d'obtenir une localisation fiable avec une bonne robustesse au bruit. Les résultats de la localisation sur le courant électrique d'une lampe halogène vont induire un gain en termes de bonnes détections d'apparition d'évènements et faciliter par la suite la classification de ces évènements.

Les principes de base et le potentiel de la méthode SSE ont été décrits et validés en vue d'une implémentation sur cible FPGA pour des applications pratiques temps réels.

Références

- [1] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE std. 1159-2009.
- [2] F. Zhao, R. Yang, Power quality disturbance recognition using S-Transform, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 22, no. 2, , pp. 944-950, April 2007. doi: 10.1109/TPWRD.2006.881575.
- [3] P. K. Dash et al., "Power quality analysis using S-transform," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 406-411, 2003.
- [4] J. Ville, Théorie et applications de la notion de signal analytique, *Câbles et transm.*, 2^{ème} A., no. 1, pp. 61-74, 1948.
- [5] R. G. Stockwell et al., Localization of the complex spectrum: the S-Transform, *IEEE Transactions On Signal Processing*, Vol. 44, no. 4, pp. 998-1001, April 1996.
- [6] A. Moukadem, et al., A robust heart sounds segmentation module based on S-transform, *Biomed. Signal Process. Control* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.bspc.2012.11.008>.
- [7] A. Moukadem, et al., Localization of Heart Sounds Based on S-Transform and Radial Basis Function Neural Network, *IFMBE Proceedings*, Vol. 34, 2011, pp 168-171.
- [8] S. L. Hahn, Hilbert transforms, in *The Transforms and Applications Handbook* (Alexander D. Poularikas, Ed.), Boca Raton FL: CRC Press, 3rd ed., ch. 7.