

REALIZACIÓN DE LOS FILTROS DE PONDERACIÓN DEL FLICKERMETRO DE LA NORMA IEC-61000-4-15 MEDIANTE LA TRANSFORMADA WAVELET

DAN EL MONTOYA

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica,
Caracas, Venezuela.

e-mail: danel.montoya@ucv.ve

Recibido: junio de 2008

Recibido en forma final revisado: septiembre de 2009

RESUMEN

La fluctuación de voltaje es la primera causa del efecto lumínico flicker. Algunas definiciones y estándares han sido propuestos para medir el grado del flicker. Uno de los más importantes es el estándar IEC-61000-4-15 que plantea un medidor de flicker de cinco etapas. En la última década se ha usado la Transformada de Ondícula (TO) en muchos tópicos sobre sistemas eléctricos de potencia. Las aplicaciones han sido enfocadas principalmente en la clasificación de perturbaciones de la calidad de potencia. A través de este artículo se explica la implementación de los filtros de ponderación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 mediante la Transformada Rápida de Fourier (TRF) y la Transformada de Ondícula Discreta (TOD). Se realiza, además, un análisis comparativo de los valores de la sensación instantánea de flicker arrojados por ambas técnicas encontrándose diferencias despreciables en los resultados.

Palabras clave: Flicker, Flickermetro, Ondícula, Calidad de potencia, Calidad de servicio eléctrico.

IMPLEMENTATION OF THE FLICKERMETER BASED ON THE STANDARD IEC-61000-4-15 THROUGH THE DISCRETE WAVELET TRANSFORM

ABSTRACT

Voltage fluctuation is the first cause of the flicker light effect. Some definitions and standards have been proposed to measure the grade of the flicker. One of the most important standards is the IEC-61000-4-15 that described a flickermeter of five blocks. In the last decade the wavelet transform (WT) has been implemented in many issues on power electric systems. The applications have focused on the classification of the disturbances in measurement on power quality. In this paper the implementation of the weighting filters of the flickermeter of the standard IEC-61000-4-15 is explained either through the Fast Fourier Transform (FFT) or Discrete Wavelet Transform (DWT). Furthermore, a comparative analysis of the flicker instantaneous values is done with both techniques. In both analyses, negligible differences were found.

Keywords: Flicker, Flickermeter, Wavelet, Power quality, Energy quality.

INTRODUCCIÓN

La fluctuación en magnitud de la tensión es la primera causa del efecto lumínico flicker. El principal problema en el análisis del flicker es el cálculo de esta fluctuación en función de la frecuencia. En este sentido es importante la extracción con una buena precisión de las componentes flicker desde las mediciones de voltaje del sistema. Los algoritmos basados en la TRF han sido ampliamente usados en el análisis digital del voltaje flicker. Así lo reseñan los trabajos de Srinivasan, 1991; Bishop *et al.* 1994 y Girgis *et al.* 1995. Recientemente se ha aplicado la Transformada Ondícula en

el análisis de fenómenos que tienen que ver con los sistemas eléctricos de potencia. La mayoría de las aplicaciones se han enfocado en la clasificación de las perturbaciones típicas en las mediciones de calidad de potencia. Esto se observa en los trabajos de Robertson *et al.* 1995; Santoso *et al.* 1996; Liu *et al.* 1999; Gaouda *et al.* 1999; Poisson *et al.* 2000; Karimi *et al.* 2000; Angrisani, 2001; Hamid *et al.* 2002; Huang *et al.* 2002 y Ece *et al.* 2004.

El análisis ondícula se ha usado también en el procesamiento de señales en régimen permanente. En este sentido se ha aplicado la Transformada de Ondícula para identificar

armónicos, subarmónicos e interarmónicos como se puede apreciar en el trabajo de Pham *et al.* 1999.

La transformada de Fourier se ha usado en el modelado del flickermetro de la norma IEC 61000-4-15 (2003), como se puede apreciar en el trabajo de Rogóz (2003). En la determinación del voltaje flicker se ha usado también el análisis ondícula. Se ha usado la ondícula de Morlet y la Gaussiana en la determinación del espectro de magnitud de la fluctuación de tensión que origina el flicker. Ejemplo de esto son los trabajos de Huang *et al.* 2000; Chen *et al.* 2000; Chen, 2002 y Huan *et al.* 2004. Estas aplicaciones han dado resultados más precisos para la determinación del estándar limitador del voltaje flicker ΔV_{10} que los encontrados a través de la TRF. Dado que las Ondículas de Morlet y la Gaussiana no son ortogonales no se puede obtener la fluctuación de voltaje flicker antitransformando el espectro encontrado. Esto sería vital en la determinación de la sensación instantánea de flicker del estándar IEC-61000-4-15.

Los trabajos de Nassif & Tayjasant (2006) y de Wen & Chen (2007), describen la aplicación de la TO en la caracterización de las fluctuaciones de voltaje que originan el efecto flicker en el plano tiempo-frecuencia.

En este trabajo se plantea la determinación de la sensación instantánea de flicker de la norma IEC-61000-4-15, implementando los filtros de ponderación del flickermetro, a través de la TRO.

TRANSFORMADA DE ONDÍCULA

La TO se ha convertido en la última década en una herramienta común en aplicaciones que involucran análisis de señales. Dada una función variante con el tiempo $f(t)$ la TO puede ser vista como el cálculo de los coeficientes del producto interno de la señal con las funciones basadas en familias ondículas. Por definición las familias de funciones ondículas se originan al escalar y desplazar en el tiempo una ondícula madre o prototipo $\psi(t)$. La teoría que se expone a continuación ha sido extraída del trabajo de Mallat (1998). En este sentido la TO continua se define como:

$$TO_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \quad (1)$$

$$TO_f(a,b) = \int f(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

La familia de ondículas es:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (3)$$

donde:

$\psi(t)$ es la función ondícula que tiene características de función pasabanda. El factor $1/a^{1/2}$ tiene como finalidad preservar o mantener la energía de la señal.

Si se eligen para el escalamiento y el desplazamiento en tiempo los valores $a=a_0^j$ y $b=na_0^j b_0$ con m y n valores enteros obtenemos la fórmula de la Transformada de Ondícula Discreta (TOD) presentada en la ecuación (4).

$$DWT_f(j,n) = \left\langle f(t), \psi_{j,n}(t) \right\rangle = a_0^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(a_0^{-j} t - nb_0) dt \quad (4)$$

Si se asignan los valores $a_0=2$ y $b_0=1$ se obtiene una representación compacta, es decir, no redundante de la TOD:

$$TOD_f(j,n) = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^j t - n) dt \quad (5)$$

Para estos valores de a_0 y b_0 Mallat demuestra que la reconstrucción de la señal a partir de los coeficientes de la TOD es perfecta y puede calcularse con la ecuación (6).

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} TOD_f(j,n) \psi_{j,n}(t) \quad (6)$$

Los coeficientes de la $TOD_f(j,n)$ se suelen denominar $d_j(n)$ y pueden calcularse mediante la formula:

$$d_j(n) = \left\langle f(t), \psi_{j,n}(t) \right\rangle \quad (7)$$

Estos coeficientes proveen los detalles discretos de la función $f(t)$ a la escala 2^j o resolución 2^{-j} . La aproximación discreta $a_j(n)$ de la función $f(t)$ a la escala 2^j o resolución 2^{-j} está determinada por el producto interno de $f(t)$ con la familia de funciones escalamiento $\phi_{j,n}(t)$:

$$a_j(n) = \left\langle f(t), \phi_{j,n}(t) \right\rangle \quad (8)$$

La función escalamiento $\phi(t)$, la función ondícula $\psi(t)$ y los filtros espejos conjugados $h(n)$ y $g(n)$ están relacionados entre sí por medio de las expresiones:

$$h(n) = \left\langle \frac{1}{\sqrt{2}} \phi \left(\frac{t}{2} \right), \phi(t-n) \right\rangle \quad (9)$$

$$g(n) = \left\langle \frac{1}{\sqrt{2}} \psi \left(\frac{t}{2} \right), \phi(t-n) \right\rangle \quad (10)$$

$$g(n) = (-1)^{1-n} h(1-n) \quad (11)$$

A través del análisis multiresolución se puede determinar la TOD de una señal. Si asumimos que inicialmente la aproximación discreta de la señal es:

$$a_0(n) = \langle f(t), \varphi(t - n) \rangle \quad (12)$$

Se pueden obtener los coeficientes de aproximación y de detalle (TOD) a una escala 2^{j+1} mediante el filtrado de los coeficientes de la aproximación a la escala 2^j con los filtros espejos conjugados $h(n)$ y $g(n)$ seguido de un proceso de submuestreo con un factor 2:

$$a_{j+1}(n) = a_j(n) * \bar{h}(2n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_j(k)h(k - 2n) \quad (13)$$

$$d_{j+1}(n) = a_j(n) * \bar{g}(2n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_j(k)g(k - 2n) \quad (14)$$

En la ecuación (14) la TOD se expresa a través de los coeficientes d_{j+1} . El índice j se asocia con el nivel de descomposición ondícula y corresponde al escalamiento 2^j y a la aproximación de la señal a la resolución 2^{-j} .

Para reconstruir la señal original se realiza un proceso de sobremuestreo o inserción de ceros para luego filtrar con $h(n)$ y $g(n)$:

$$a_j(n) = a_{j+1}\left(\frac{n}{2}\right) * h(n) + d_{j+1}\left(\frac{n}{2}\right) * g(n) \quad (15)$$

$$a_j(n) = \sum a_{j+1}\left(\frac{k}{2}\right)h(n - k) + \sum d_{j+1}\left(\frac{k}{2}\right)g(n - k) \quad (16)$$

FLICKERMETRO DE LA NORMA IEC-61000-4-15

La norma IEC-61000-4-15 (2003) plantea el diseño de un medidor de flicker de cinco etapas. La etapa 1 consta de un adaptador de tensión y un circuito para comprobación de calibración. La etapa 2 es un demodulador cuadrático recuperador de la fluctuación de tensión. La etapa 3 se compone de dos filtros dispuestos en cascada y un selector de margen. El primer filtro elimina las componentes de corriente continua y de rizado al doble de la frecuencia de salida del demodulador. El segundo filtro simula la respuesta en frecuencia a las fluctuaciones del sistema de visión humana. La etapa 4 está compuesta por un multiplicador cuadrático y un filtro pasabajo de primer orden. La salida de esta etapa representa la sensación instantánea de flicker. La etapa 5 realiza un análisis estadístico del nivel de flicker permitiendo el cálculo de parámetros de evaluación significativos. En el presente trabajo nos hemos propuesto realizar el filtro digital de ponderación de la etapa 3 mediante la TO. Dado que la TO permite una mejor caracterización de las señales en el dominio de la frecuencia su aplicación en este filtro permitirá una mejor discriminación de la fluctuación propia de las señales flicker.

REALIZACIÓN DIGITAL DEL FILTRO DE PONDERACIÓN

La función de transferencia del filtro de ponderación de la norma IEC 61000-4-15 (2003), para el sistema de alimentación de 120 V a 60 Hz, se presenta en la siguiente ecuación:

$$H(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (17)$$

donde:

$$k=1,74802; \omega_1=2\pi 9,15494; \omega_3=2\pi 1,22535; \lambda=2\pi 4,05981; \\ \omega_2=2\pi 2,27979 \text{ y } \omega_4=2\pi 21,9.$$

Antitransformando en el dominio de Laplace la ecuación (17) obtenemos la respuesta impulsiva del filtro:

$$h(t) = (2e^{-4,17t}(25,25\cos(8,06t) + 7,6\text{Sen}(8,06t)) \\ -1,43e^{-2\pi 1,39t} - 49,66e^{-2\pi 17,32t})u(t) \quad (18)$$

El valor de $h(t)$ se utilizó para filtrar la señal a la salida del primer filtro de la etapa 3 por el método de solapamiento y suma usando la TRO. Para esto se muestrea con un retenedor de orden cero la señal a una frecuencia de 400 Hz formándose secciones de 1024 muestras de longitud.

Adicionalmente se muestrea la respuesta impulsiva del filtro a la misma frecuencia formándose tramas de la misma longitud. Por el método de solapamiento y suma, la señal que se va a filtrar se divide en secciones de longitud finita. Cada sección se convoluciona con la respuesta impulsiva del filtro de longitud finita combinándose luego las secciones filtradas de forma que se solapen y sumen para construir la salida. El filtrado lineal de cada bloque se realiza a través de la TRF. Asumiendo que los bloques $x(n)$ tienen longitud "L" y el filtro $h(n)$ longitud "M" a cada bloque de datos se le añaden "M-1" ceros y a la respuesta impulsiva del filtro se le añaden "L-1" ceros. El solapamiento se produce debido a que la convolución lineal de cada sección aumentada con la respuesta al impulso aumentada es de longitud "L+M-1", que es mayor que la longitud de la sección. El Simulink dispone de un bloque que realiza el filtrado TRF con el método de solapamiento y suma sobre el que se puede especificar la respuesta impulsiva del filtro.

El modelo del filtro de ponderación digital implementado a través del método de solapamiento y suma, se inicia con la formación de la trama de 1024 muestras a partir del muestreo a 400 Hz de la señal de entrada $x(n)$. Si se muestrea la respuesta impulsiva $h(n)$ del filtro a la misma frecuencia y

se forman tramas de la misma longitud se deben insertar a las tramas de $x(n)$ y $h(n)$ 1023 ceros para aplicar el método de solapamiento y suma.

Se puede demostrar que para un filtro con respuesta impulsiva $h(n)$:

$$TOD_y(m,n) = TOD_x(m,n) * h(n2^m) \quad (19)$$

La ecuación (19) nos muestra que la TOD a la salida del filtro será la TOD de la entrada procesada mediante el filtro de ponderación con respuesta impulsiva $h(n)$ submuestreada por el factor 2^m . El coeficiente “m” representa el nivel de descomposición en la TOD. El filtro TOD de solapamiento y suma recibe la señal muestreada a 400 Hz en un primer bloque que se encarga de formar la trama de muestras. A continuación se completa la longitud de la trama con la inserción de 1023 ceros. Una vez hecho esto se aplica la TOD que en el Matlab arroja tanto los coeficientes de baja y alta frecuencia. Estas tramas de coeficientes se procesan aplicando el método de solapamiento y suma mediante la TRF con el filtro $h(n)$ submuestreado. Los coeficientes filtrados forman la TOD de la salida del filtro que se invierte con el bloque IDWT del Matlab. Luego se solapan y suman las sucesivas tramas generadas.

Para aplicaciones donde la información de la señal que quiere ser analizada mediante la Transformada de Ondícula ocurre en un período corto de tiempo, es recomendable usar una ondícula con pocos coeficientes. Por ejemplo, se ha demostrado que la ondícula Daubechies 4 (db 4) es una buena elección para detectar transitorios y señales de corta duración, como se expone en el trabajo de Parameswariah & Cox (2002). En cambio, cuando la información que quiere analizarse, a través de la Transformada de Ondícula, está esparcida sobre un largo período de tiempo, como una señal con presencia de armónicos, subarmónicos o interarmónicos en régimen permanente, es mejor elección una ondícula con un mayor número de coeficientes. En el trabajo de Parameswariah & Cox (2002) se muestra que la ondícula Daubechies 20 (db 20) se ajusta adecuadamente para este tipo de análisis.

La wavelet de Daubechies tiene un soporte de tamaño mínimo (compacto) para un número específico “p” de momentos nulos. Esta característica se logra asociando a ésta un filtro espejo conjugado $g(n)$ de respuesta impulsiva finita.

Para la realización del filtro a través de la Transformada de Ondícula Discreta se utilizó la ondícula de Daubechies con momentos nulos $p=20$ como lo recomiendan Parameswariah & Cox (2002). Para la señal analizada y el filtro aplicado

(0,5 a 40 Hz) la energía se concentra en los coeficientes de aproximación del primer nivel de descomposición (0 a 100 Hz). Por esta razón se realizó el filtrado ondícula de la ecuación (19) con $n=1$.

RESULTADOS

Para validar los filtros de ponderación realizados a través del procesamiento con la TOD se trabajó conjuntamente con la TRF para comprobar las pruebas de sensación instantánea de flicker sugeridas por la norma IEC-61000-4-15. Para ciertos valores de frecuencia y de amplitud relativa de la fluctuación de tensión $\Delta V/V$, mostrados en la norma IEC-61000-4-15, el valor de la sensación instantánea de flicker ideal es uno. El modelo del flickermetro propuesto se sometió a las fluctuaciones de tensión senoidales y a las rectangulares descritas en la norma.

En la tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión senoidales implementando el filtro de ponderación a través de la TRF y la TOD. En estas pruebas el error promedio porcentual usando la TRF fue de 1,1622%. Mientras que el error promedio porcentual usando la TOD fue de 1,16%. En base a los resultados anteriores se puede decir que se logró una mejora poco significativa en la implementación del filtro de ponderación del flickermetro usando la TOD respecto al uso de la TRF en la determinación de la respuesta del flickermetro a fluctuaciones de tensión senoidales.

En la tabla 2 se muestran los resultados de las pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares implementando el filtro de ponderación a través de la TRF y la TOD.

En las pruebas de respuesta del flickermetro, ante variaciones de tensión rectangulares, el error porcentual promedio usando la TRF en la realización del filtro de ponderación fue de 1,2238%. Mientras que el error porcentual promedio usando la TOD fue de 1,1975%. En base a los resultados anteriores se puede decir que a través del filtro de ponderación del flickermetro mediante la TOD se obtiene una mejora poco significativa en la respuesta del mismo ante variaciones de tensión rectangulares.

Tabla 1. Pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión senoidales.

Hz	Flicker instantáneo	
	TRF	TOD
0,5	4622	0,994870
1	0,989329	0,989214
1,5	0,988531	0,988686
2	0,988343	0,988343
2,5	0,991035	0,990338
3	0,991140	0,991350
3,5	0,991276	0,991339
4	0,990798	0,990670
4,5	0,996465	0,996529
5	0,990229	0,991365
5,5	0,996457	0,996530
6	0,997268	0,997423
6,5	0,995628	0,995662
7	0,997997	0,997964
7,5	1,000338	1,000264
8	0,997642	0,997671
8,8	1,000000	1,000000
9,5	1,004287	1,004294
10,0	0,990239	0,991468
10,5	0,999825	0,999823
11,0	1,005951	1,005923
11,5	1,002665	1,002678
12,0	1,017281	1,017277
13,0	1,007988	1,008034
14,0	1,014206	1,014194
15,0	1,010403	1,011210
16,0	1,012663	1,012748
17,0	1,018887	1,012748
18,0	1,021243	1,021370
19,0	1,023479	1,023602
20,0	1,021110	1,021246
21,0	1,024145	1,024275
22,0	1,025006	1,025180
23,0	1,027921	1,028004
24,0	1,032320	1,032353
25,0	1,028305	1,036190
40	1,224181	1,244799

Tabla 2. Pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares.

Hz	Flicker instantáneo	
	TRF	TOD
0,5	0,99976	1,003696
1	0,99226	0,992739
1,5	1,00189	1,001913
2	1,00645	1,002793
2,5	0,99591	0,995524
3	1,0059	1,005365
3,5	0,99156	0,990608
4	0,99814	0,999804
4,5	0,9905	0,990642
5	1,00228	0,999711
5,5	0,98838	0,99085
6	0,99724	0,997649
6,5	0,98707	0,988783
7	0,99565	0,99429
7,5	0,99542	0,995243
8	1,01206	1,011969
8,8	1,01118	1,011102
9,5	0,98942	0,989794
10	0,98872	0,987327
11	1,01386	1,014639
11	1,03242	1,031019
12	1,01053	1,010379
12	0,99657	0,996773
13	1,01402	1,013446
14	1,00029	1,003696
15	1,01284	1,012742
16	1,02277	1,022938
17	1,02681	1,028247
18	1,02979	1,030229
19	1,02036	1,018037
20	1,02734	1,027558
21	1,02181	1,022895
22	1,01608	1,007174
23	1,01361	1,016357
24	1,03266	1,03266
40	1,21149	1,211821

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) y de la Transformada de Ondícula Discreta (TOD), en la implementación digital de los filtros de ponderación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15, se concluye lo siguiente:

Para la frecuencia de muestreo de 400 Hz, tramas de 1024 muestras, la wavelet madre de Daubechies veinte (20 momentos nulos) y el primer nivel de descomposición la implementación del filtro de ponderación a través de la TRF y de la TOD del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 arroja un error promedio menor al 3% en la determinación de la sensación instantánea de flicker. Este error está por debajo del mínimo permitido (menor al 5%).

Para la frecuencia de muestreo de 400 Hz, tramas de 1024 muestras, la ondícula madre de Daubechies veinte (20 momentos nulos) y el primer nivel de descomposición, la Transformada de Ondícula Discreta (TOD) no reduce de manera significativa el error que se puede cometer en la determinación de la sensación instantánea de flicker del medidor de flicker de la norma IEC-61000-4-15 respecto a la Transformada Rápida de Fourier.

Con base en las conclusiones obtenidas se pueden recomendar las siguientes actividades para completar la investigación iniciada en este trabajo:

Se recomienda extender el estudio a otras frecuencias de muestreo, tamaños de tramas, niveles de descomposición superiores y otras ondículas madre con el fin de reducir el error en la implementación del filtro de ponderación mediante la TOD.

Se recomienda diseñar una ondícula que permita reducir de manera significativa el error en la implementación del filtro de ponderación mediante la TOD.

REFERENCIAS

- ANGRISANI, L. (2001). Wavelet network-based detection and classification of transients. *IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement* 50(5), pp. 1425–1435.
- BISHOP, M., DO, A., MENDIS, S. (1994). Voltage flicker, measurement and analysis system. *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 34–37.
- CHEN, M. & MELIPOULOS, P. (2002). Hybrid digital algorithm for harmonic and flicker measurements. *IEEE PES Winter Meeting*. pp. 1488–1493.
- CHEN, M. & MELIPOULOS, P. (2000). Wavelet-based algorithm for voltage flicker analysis. *Proceedings of Ninth International Conference on Harmonics and Quality Power*. pp. 732–738.
- ECE, D. & GEREK, O. (2004). Power quality event detection using joint 2-dwavelet subspaces. *IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement* 53(4), pp. 1040–1046.
- GAOUDA, A., SALAMA, M., SULTAN, M., CHIKHANI, A. (1999). Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition. *IEEE Transactions on Power Delivery* 14(4), pp. 1469–1476.
- GIRGIS, A., STEPHENS, J., MAKRAM, E. (1995). Measurement and prediction of voltage flicker, magnitude and frequency. *IEEE Transactions on Power Delivery* 10(3), pp. 1600–1605.
- HAMID, E. & KAWASAKI, Z. (2002). Instrument for the quality analysis of power systems based on the wavelet packet. *IEEE Power Engineering Review*, pp. 52–54.
- HUANG, S. & WEN, C. (2004). Enhancement of digital equivalent voltage flicker measurement via continuous wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery* 19(2), pp. 663–670.
- HUANG, S. & HSIEH, C. (2000). Application of continuous wavelet transform for study of voltage flicker-generated signals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 36(3), pp. 925–932.
- HUANG, S. & HSIEH, C. (2002). Coiflet wavelet transform applied to inspect power system disturbance-generated signal. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 38(1), pp. 204–210.
- IEC (2003). International Standard IEC 61000-4-15 (1.1 ed.). IEC International Electrotechnical Commission.
- KARIMI, M., MOKHTARI, H., IRAVANO, R. (2000). Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications. *IEEE Transactions on Power Delivery* 15(4), pp. 1212–1220.
- LIU J. & PILLAY, P. (1999). An insight into power quality disturbances using wavelet multiresolution analysis. *IEEE Power Engineering Review*, pp. 59–60.
- MALLAT, S. (1998). *Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press. First Edition, pp. 220–262.

- NASSIF, A. & TAYJASANANT, T. (2006). Flicker representation via STFT and wavelet. IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 7-11.
- PARAMESWARIAH, C. & COX, M. (2002). Frequency characteristics of wavelets. IEEE Transactions on Power Delivery 17(3), pp. 800–804.
- PHAM, V. & WONG, K. (1999). Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms. Proceeding of Generation, Transmission and Distribution, pp. 249–254.
- POISSON, O., ROUAL, P., MEUNIER, M. (2000). Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform. IEEE Transactions on Power Delivery 15(3), pp. 1039–1044.
- ROBERTSON, D., CAMPS, O., MAYER, J. (1995). Wavelets and electromagnetics power system transients. IEEE Transactions on Power Delivery 11(2), pp. 1050–1058.
- ROGÓZ, M. (2003). The IEC flickermeter model. Technical report, Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics at the University of Science and Technology in Krakow.
- SANTOSO, S., POWERS, E., GRADY, W., HOFMANN, P. (1996). Power quality assessment via wavelet transform analysis. IEEE Transactions and Power Delivery 11(2), pp. 924–930.
- SRINIVASAN, K. (1991). Digital measurement of voltage flicker. IEEE Transactions on Power Delivery 6(4), pp.1593–1598.
- WEN, X. & CHEN, Y. (2007). Measurement of voltage fluctuation and flicker in electric power system based on wavelet transform. International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, pp.1822-1826.