

APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Horacio Nelson Díaz Rojas
Departamento de Electrónica
U. de Tarapacá, Casilla 6-D
Arica – Chile
hdiaz@uta.cl

Rosa Mª de Castro Fernández
Departamento de Ingeniería Eléctrica
ETSII, Universidad Politécnica de Madrid
Madrid - España
rcastro@inel.etsii.upm.es

RESUMEN

La transformada wavelet ha suscitado gran interés en el área de los sistemas de potencia en los últimos años, dado que su empleo es más adecuado para el análisis de ciertos tipos de ondas transitorias que el proporcionado por otro tipo de transformadas. En este trabajo se presenta una visión descriptiva de las aplicaciones de la transformada wavelet en los sistemas eléctricos de potencia. Las principales publicaciones realizadas en este campo han sido analizadas y clasificadas por áreas, presentándose además una lista de 116 referencias.

Keywords: Procesamiento de señales, transformada wavelet, análisis tiempo-frecuencia, sistemas de potencia.

1.- INTRODUCCIÓN

La aparición de la transformada Wavelet (WT) como herramienta matemática ha sido bastante reciente, aunque las ideas esenciales en las que se basa han sido objeto de análisis durante bastante tiempo antes de que se plasmaran de forma analítica. Se trata de una transformación lineal, al igual que la transformada de Fourier (FT), sin embargo a diferencia de la anterior, proporciona la localización en el dominio del tiempo de las diferentes componentes en frecuencia presentes en una señal dada. La transformada de Fourier enventanada (STFT) consigue parcialmente identificación frecuencia-tiempo, pero la anchura fija de la función ventana que emplea supone una limitación. En el caso

de la WT, las funciones de análisis llamadas wavelets, realizan la correlación tiempo-frecuencia de tal forma que las wavelets de alta frecuencia serán más estrechas y las de baja frecuencia serán más anchas.

La teoría wavelet se puede presentar principalmente de dos formas: la consideración de la forma integral de la transformada (forma continua) y la consideración del análisis multiresolución basado en filtros (forma discreta).

El empleo de esta herramienta se ha utilizado en varios trabajos que cubren áreas diversas, y sobre todo en los últimos diez años se han logrado beneficios en la aplicación de esta transformada a los sistemas eléctricos de potencia, sobre todo, entre otras cosas debido al interés en el análisis y procesamiento de señales tensión-corriente para realizar una identificación de fenómenos transitorios en tiempo real de forma rápida y exacta.

El objetivo de este trabajo es proporcionar una visión descriptiva de las aplicaciones de la transformada wavelet en los sistemas de potencia a aquellos que deseen introducirse por primera vez en este tema. Para lo cual, las principales publicaciones existentes en este campo han sido analizadas y clasificadas por áreas. Por razones de espacio, los autores han seleccionado un grupo de 116 referencias eligiendo aquellas más representativas de cada área, bien por sus contribuciones o porque representen una continuidad en una determinada línea de investigación.

2 APLICACIÓN DE LAS WAVELETS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Las wavelets se aplicaron por primera vez a los sistemas de potencia eléctricos en 1994 por Robertson [17] y Ribeiro [4]. A partir de este año el número de publicaciones en esta área han mostrado una tendencia creciente tal como muestra la Fig. 1.

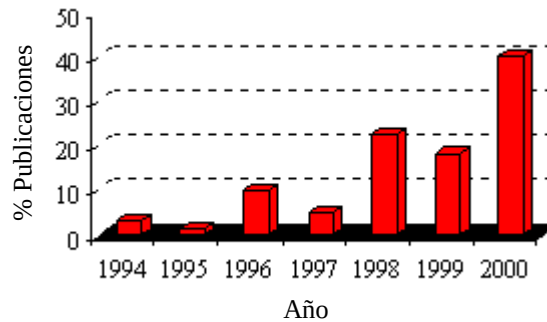


Fig.1.- Evolución de las publicaciones empleando la transformada wavelet en sistemas eléctricos de potencia.

La mayor parte de los trabajos publicados se centran en el análisis de métodos de identificación y clasificación de las señales medidas, sin embargo, hasta ahora pocos estudios emplean la transformada wavelet como técnica de análisis de fenómenos transitorios para la solución de tensiones e intensidades que se propagan a lo largo del sistema.

Las aplicaciones más relevantes de la transformada wavelet a los sistemas eléctricos de potencia se han centrado en las siguientes áreas de estudio:

- Protección de sistemas eléctricos de potencia
- Calidad del servicio
- Transitorios en sistemas eléctricos de potencia
- Descargas parciales
- Estimación de la demanda
- Medida de potencia

La Fig. 2 muestra el porcentaje de publicaciones que existen en cada una de las áreas indicadas anteriormente, donde se observa que las protecciones y calidad de servicio son los campos donde se han realizado más estudios.

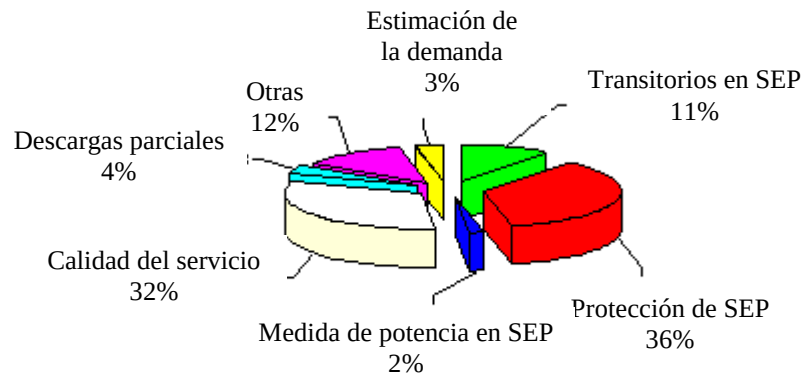


Fig.2.- Porcentaje de las publicaciones que emplean la transformada wavelet agrupadas en diferentes áreas de los sistemas eléctricos de potencia.

Las próximas secciones presentan una descripción general de la aplicación de las wavelets a las distintas áreas antes mencionadas.

2.1. Calidad del servicio

En el área de la calidad del servicio, se han desarrollado varios estudios para la detección y localización de perturbaciones empleando la transformada wavelet como herramienta útil para el análisis de interferencias, impulsos, interrupciones, armónicos, parpadeo (flicker), etc. de señales no estacionarias causantes del deterioro del servicio.

El análisis de los armónicos y del parpadeo “flicker” se ha realizado de acuerdo a dos líneas de estudio: la primera emplea el análisis multiresolución (MRA) a partir de un banco de filtros como primera etapa para posteriormente emplear la transformada wavelet continua a las sub-bandas; la segunda emplea un análisis de una transformada wavelet compleja.

De acuerdo a la primera línea de trabajo, en 1999 se presenta un estudio [5] para evaluar armónicos desarrollando un algoritmo para la identificación de todos ellos, incluyendo enteros, no enteros y subarmónicos. En la primera etapa de este análisis, el espectro de frecuencias de la señal se descompone en dos sub-bandas empleando la técnica de filtrado de la transformada wavelet packet discreta con funciones Daubechies de alto grado, para posteriormente aplicar la transformada continua a las subbandas no

nulas, alcanzándose resultados satisfactorios a partir de un sistema de prueba real. En trabajos posteriores [6]-[7], se presenta una mejora para eliminar el efecto de la respuesta en frecuencia imperfecta de los filtros empleados y para un mejor análisis de los subarmónicos. [9]-[14] son otros estudios que muestran el análisis de armónicos y “flicker” de forma similar a los comentados anteriormente. También existen trabajos en la misma línea que emplean la transformada madre diferente [11].

De acuerdo a la segunda línea de investigación, [8] realiza un análisis de armónicos con una función wavelet trapezoidal compleja y la transformada trapezoidal asociada. [15]-[16] muestran un estudio del parpadeo “flicker” empleando la transformada wavelet continua Morlet y gaussiana.

Los trabajos anteriores muestran la ventaja del uso de esta técnica para el estudio de los fenómenos anteriores sin embargo la efectividad de esta transformada para el estudio de las perturbaciones de tensión es cuestionado en [10], señalando que la STFT es más apropiada para estos análisis eligiendo apropiadamente el ancho de la ventana.

En el área de las perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia, los primeros trabajos desarrollados emplean la transformada wavelet para detectar y localizar diferentes tipos de perturbaciones que afectan a la calidad del servicio, descomponiendo la perturbación en sus coeficientes wavelets empleando un análisis multiresolución. Santoso et al comienzan una línea de investigación en este campo con el trabajo referenciado en [33], para posteriormente hacer la propuesta recogida en [25], [28]-[29], de una herramienta de clasificación para las perturbaciones que afectan a la calidad de servicio basada en redes neuronales, basándose en la unicidad de los coeficientes cuadrados de la transformada wavelet para cada escala. Además, en [26], el mismo autor desarrolla una aplicación para comprimir las señales que afectan a la calidad del servicio.

Otros autores también han desarrollado estudios similares a los anteriores en este área, [30-32].

Sin embargo, también existen trabajos que concluyen que el empleo de la transformada wavelet no siempre es adecuado para el análisis de todo tipo de

perturbaciones, como es el caso del hueco de tensión, “voltaje sag” que los autores de [22] señalan ya que los filtros wavelet no son capaces de detectar la profundidad del hueco, parámetro de extrema importancia para el análisis completo de esta perturbación.

2.2 Descargas parciales

Las descargas parciales son señales difíciles de detectar debido a su corta duración, alta frecuencia y baja amplitud, pero la capacidad de la transformada wavelet para ampliar en el tiempo las señales con discontinuidades en clara ventaja respecto a la transformada de Fourier, permite la identificación de variaciones locales de una señal. Los trabajos presentados en [36-40] aplican estos principios para detectar descargas parciales en los devanados de transformadores, cables y subestaciones aisladas con gas (GIS).

2.3 Estimación de la demanda

La estimación de la demanda es clave para la eficiente gestión de los sistemas eléctricos de potencia. Los trabajos se han centrado en la predicción de la carga en el corto plazo empleando la transformada wavelet en combinación con redes neuronales. Como la demanda eléctrica en cualquier instante se puede asumir como una combinación lineal de diferentes componentes, desde el punto de vista del análisis de la señal, la carga puede ser también considerada como una combinación lineal de diferentes frecuencias. Cada componente de la carga puede ser representado por tanto por una o diferentes frecuencias.

Los estudios realizados emplean la transformada wavelet para descomponer la carga histórica en una parte aproximada asociada con las bajas frecuencias y diferentes detalles asociados con las altas frecuencias. Posteriormente, la predicción de la parte de la carga futura se desarrolla ,o bien, mediante una aproximación neuronal, tal como muestran [42]-[43], o ajustando la carga mediante métodos de regresión, [44].

2.4 Medida de potencia

La ventaja del empleo de la transformada wavelet para la medida de potencia/energía y valores eficaces es que proporciona una distribución de la potencia y energía con respecto a las bandas individuales de frecuencia asociadas a cada nivel del análisis wavelet.

No existen muchos estudios centrados en la medida de potencia y valores eficaces de la señales empleando esta herramienta.

El algoritmo de la transformada wavelet discreta para obtener el valor eficaz de tensiones e intensidades, así como, la medida de potencia activa se emplea por primera vez en [47]-[48], para conseguir una separación en frecuencia en diferentes niveles empleando filtros IIR; sin embargo, esta técnica proporciona unas bandas de frecuencia no uniformes que no pueden ser empleadas para la medida del valor eficaz de tensiones e intensidades y la potencia de las componentes individuales de los armónicos.

En el trabajo presentado en [46] se resuelve el problema anterior desarrollando el algoritmo wavelet packet para descomponer la señal en bandas de frecuencia uniformes, de forma que esta técnica si puede pueda medir el valor eficaz de tensiones e intensidades, así como la potencia de las componentes individuales de los armónicos.

2.5 Protección de los sistemas eléctricos de potencia

Las ventajas en la aplicación de la transformada wavelet para la mejora en el funcionamiento de los relés de protección ha sido destacada en los últimos años, como muestran los trabajos [49-80]. En 1996, Chaari et al. [71] introducen la técnica wavelet para el campo de las protecciones de los sistemas eléctricos de distribución para analizar las señales transitorias producidas en faltas a tierra en una red resonante con neutro a tierra de 20 kV generada a partir del programa EMTP. En el mismo año Momoh et al presentan un algoritmo para desarrollar un extractor de características adecuado para el entrenamiento de una red neuronal artificial para la diagnosis de faltas empleando la transformada wavelet, en este caso los datos del caso se obtuvieron de forma experimental.

En 1998 Magnago y Abur desarrollan una nueva línea de investigación en el área de la localización de faltas empleando las wavelets, para lo cual la onda viajera asociada a la falta generada se procesa con la transformada wavelet para mostrar los tiempos que existen entre el instante en que se produce la falta y la localización de la misma por los relés. Para comprobar y validar el método de localización de faltas propuesto emplean simulaciones en el programa EMTP. En 1999 los mismos autores extienden el método a la identificación de faltas laterales en sistemas radiales de distribución [65] y en 2000 presentan un método mejorado para sus anteriores trabajos [67].

Métodos similares al anterior para la localización de faltas se pueden encontrar en los trabajos presentados en [66] y [68].

La identificación de faltas de alta impedancia [72]-[73]-[75] es otra área de aplicación de la transformada wavelet, así Charytoniuk presenta en [75] un análisis comparativo para la localización de las faltas con arco en el dominio del tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia (wavelet), el autor concluye que la alternativa wavelet es fuertemente dependiente de la familia wavelet escogida, nivel de descomposición, velocidad de muestreo y del comportamiento de la falta con arco.

El empleo de las wavelets al estudio del disparo monopolar de protecciones [76]-[77] se desarrolla para acelerar la apertura de las líneas de transmisión. La transformada wavelet se emplea para analizar los transitorios asociados a la falta generados por un segundo arco y las faltas permanentes; los resultados numéricos revelan que ciertos componentes de la wavelet pueden ser usados para detectar e identificar de forma eficiente las características relevantes de la falta en los sistemas eléctricos de transmisión, como también para la distinción entre faltas transitorias y permanentes.

La transformada wavelet también se ha aplicado a la protección de barras [49], de motores [54-57], de generadores [52]-[53] y de transformadores [58-63], en la mayoría de estos casos, el espectro de las señales se analiza con la transformada wavelet para desarrollar un algoritmo en línea para la detección de la degradación del aislante,

corriente de conexión (inrush) y para una precisa discriminación entre faltas internas y externas.

2.6 Transitorios en sistemas eléctricos de potencia

Las wavelets fueron por primera vez aplicadas al estudio de los transitorios de los sistemas eléctricos de potencia en 1994 [17]. En este trabajo, los autores presentan una metodología para desarrollar un software que clasifique las perturbaciones en los sistemas de potencia a partir de la forma de onda de la señal transitoria. La forma de la onda se obtiene a partir de la transformada wavelet aplicada a la señal transitoria.

En 1996, Robertson et al [83] aplican las wavelets para el análisis de los transitorios derivados de la conexión de bancos de condensadores. Los autores realizan una implementación digital de la transformada wavelet mediante un análisis a partir de un conjunto de filtros, poniendo de manifiesto que cualquier wavelet válida puede ser empleada en esta implementación.

Hasta este momento, los estudios se han centrado en métodos de identificación de transitorios, es decir, identificar una perturbación transitoria y en algunos casos clasificarla de acuerdo a su espectro wavelet. En [84]-[86], Heydt y Galli proponen el empleo de la wavelet Morlet como técnica de análisis de los transitorios en los sistemas eléctricos de potencia como herramienta de solución analítica. Pero en este caso el término análisis se refiere a encontrar la solución de tensiones y corrientes que se propagan a lo largo del sistema debido a una perturbación transitoria.

En 2000, Meliopoulos [87], presenta un método alternativo para el análisis de los transitorios en los sistemas eléctricos de potencia. Esta alternativa se basa en las series wavelets de expansión y reconstrucción. La matriz del sistema se desarrolla a partir del empleo de las series wavelets de expansión en las ecuaciones integrodiferenciales del sistema de potencia. El procedimiento da como resultado un conjunto de ecuaciones algebraicas para la red entera. La solución se presenta en función de los coeficientes wavelets de expansión para la tensión en los nudos de la red. Las tensiones además, pueden ser reconstruidas a partir de las series wavelets de reconstrucción.

La identificación de la corriente de conexión en los transformadores (inrush) [89]-[90] basada en wavelet tiene la ventaja de que diferentes clases de corrientes de conexión en estos equipos pueden ser correctamente identificadas frente a faltas internas en el mismo; además, faltas externas en transformadores pueden distinguirse de las faltas internas.

Aparte de la aplicación de las wavelets para el desarrollo de métodos de identificación, clasificación y análisis como los presentados anteriormente, en este momento se está estudiando la aplicación de las wavelets para el desarrollo de nuevos modelos para componentes. Así, en 2001, Abur et al [92] extienden los resultados de trabajos previos [91] y describen un modelo para línea de transmisión basado en la transformada wavelet teniendo en cuenta la dependencia con la frecuencia de las matrices de transformación modales en la simulación de transitorios.

Se presenta un enfoque diferente para la simulación de la dependencia de la frecuencia de los transitorios en las líneas de transmisión no transpuestas. El efecto de la fuerte dependencia con la frecuencia de las matrices modales de transformación en los transitorios de las líneas de transmisión se tiene en cuenta para la simulación en el dominio del tiempo mediante el empleo de la transformada wavelet aplicada a las señales. Esto permite el uso de matrices modales de transformación exactas que varían con la frecuencia y que todavía se mantienen en el dominio del tiempo durante las simulaciones.

3.- CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una descripción resumen de la aplicación de la transformada wavelet a los sistemas eléctricos de potencia para facilitar la búsqueda de información en esta área. Para ello, se han revisado las últimas publicaciones que existen en este campo y se ha realizado una clasificación de las aplicaciones en diferentes áreas de los sistemas de potencia. Se incluye una breve descripción para cada área para mostrar la forma en la que se ha empleado la transformada wavelet para resolver problemas típicos de protecciones, de calidad del servicio y otros presentes en los sistemas eléctricos de potencia.

De acuerdo a los criterios de los autores de este trabajo, sólo se presentan algunas publicaciones por motivos de espacio, sin embargo la documentación entera analizada, incluido un resumen de cada trabajo se encuentra en el CD entregado.

Como resultado del análisis de la documentación analizada de la aplicación de las wavelets a los sistemas eléctricos de potencia se puede concluir lo siguiente:

- La mayor parte de las aplicaciones desarrolladas en esta área emplean datos de señales obtenidas a partir de programas de análisis de transitorios como el EMTP/ATP y programas específicos de manejo de wavelets como el wavelet toolbox de Matlab.
- Uno de los desarrollos más prometedores en esta área es el realizado en el campo de las protecciones para la detección y localización de faltas de alta rapidez.
- El futuro de la aplicación de la teoría wavelet a los sistemas eléctricos de potencia se encuentra en el desarrollo de nuevos modelos para el análisis de los transitorios en los sistemas de potencia.
- Los desarrollos teóricos necesarios para adentrarse y mejorar en este campo se encaminarán hacia la elección adecuada de la transformada wavelet para cada aplicación específica.
- El empleo de las multiwavelets y las wavelets de segunda generación deberían ser el nuevo camino a desarrollar para mejorar las aplicaciones actuales y futuras.

REFERENCIAS

Antecedentes matemáticos

- [1] Daubechies, I. "Ten lectures on wavelets", Capital City Press, 1992.
- [2] Mallat, S.G. "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 11, No 7, Jul. 1989, pp. 674-693.
- [3] IEEE, "Special No. on wavelets", Proceedings of the IEEE, Apr. 1996, pp. 507-688.

Listado

A. Calidad del servicio

A1. Armónicos

- [4] P.F. Ribeiro, "Wavelet transform: an advanced tool for analysing non-stationary harmonic distortion in power system", Proceedings of IEEE ICHPS, VI, Bologna, Sep. 21-23, 1994.
- [5] Pham, V.L.; Wong, K.P. "Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms", IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 3, May 1999, pp. 249 –254.
- [6] Pham, V.L.; Wong, K.P. "Antidistortion method for wavelet transform filter banks and nonstationary power system waveform", IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 2, Mar. 2001, pp. 117 –122.
- [7] Van Long Pham; Kit Po Wong; Watson, N.; Arrillaga, J. "Sub-harmonic state estimation in power systems", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 2 , pp. 1168 –1173.
- [8] Ren Zhen; Huang Qungu; Guan Lin; Huang Wenying, "A new method for power systems frequency tracking based on trapezoid wavelet transform", International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000, Vol. 2, pp. 364 –369.
- [9] Tongxin Zheng; Makram, E.B.; Girgis, A.A. "Power system transient and harmonic studies using wavelet transform", IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 14, No. 4 , Oct. 1999, pp. 1461 –1468.
- [10] Gu, Y.H.; Bollen, M.H.J. "Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4 , Oct. 2000, pp. 1279 –1284.
- [11] Driesen, J.; Van Craenenbroeck, T.; Reekmans, R.; Van Dommelen, D. "Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform", Conference Proceedings IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1996, Vol. 1, pp. 474 –479.
- [12] Wang Jianze; Ran Qiwen; Wang Fei; Ji Yanchao, "Time-varying transient harmonics measurement based on wavelet transform", Proceedings International Conference on Power System Technology, 1998, Vol. 2, pp. 1556 –1559.
- [13] Shyh-Jier Huang and Cheng-Tao Hsieh, "Visualizing time-varying power system harmonics using a Morlet wavelet transform approach", Electric Power Systems Research, Vol. 58, No 2, 21 June 2001, pp. 81-88.

A2. Parpadeo

- [14] Tongxin Zheng and Elham B. Makram, "Wavelet representation of voltage flicker", *Electric Power Systems Research*, Vol. 48, No. 2, 15 Dec. 1998, pp. 133-140.
- [15] Shyh-Jier Huang; Cheng-Tao Hsieh, "Application of continuous wavelet transform for study of voltage flicker-generated signals", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 36, No. 3 Part: 1, Jul. 2000, pp. 925 –932.
- [16] Ming-Tang Chen; Sakis Meliopoulos, A.P. "Wavelet-based algorithm for voltage flicker analysis", *Proceedings Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2000, Vol. 2, pp. 732 –738.

A3. Perturbaciones de los sistemas eléctricos de potencia

- [17] D. Robertson, O. Camps, and J. Mayer, "Wavelets and power system transients", *SPIE international symposium on optical engineering in aerospace sensing*, Apr. 1994, pp. 474-487.
- [18] Hong-Tzer Yang; Chiung-Chou Liao, "A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 3, Jul. 2001, pp. 353 –360.
- [19] Angrisani, L.; Daponte, P.; D'Apuzzo, M.; Testa, A. "A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998, pp. 990 –998.
- [20] Kopparapu, C.; Chandrasekaran, A. "A study on the application of wavelet analysis to power quality", *Proceedings of the Thirtieth Southeastern Symposium on System Theory*, 1998, pp. 350 –353.
- [21] Shyh-Jier Huang; Cheng-Tao Hsieh; Ching-Lien Huang, "Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 1, Jan. 1999, pp. 235 –243.
- [22] Chung, J.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Bhatt, S.C. "New robust voltage sag disturbance detector using an adaptive prediction error filter", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999, Vol. 1, pp. 512 –517.
- [23] Poisson, O.; Rioual, P.; Meunier, M. "New signal processing tools applied to power quality analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, Apr. 1999, pp. 561 –566.
- [24] A. M. Gaouda, S. H. Kanoun and M. M. A. Salama, "On-line disturbance classification using nearest neighbour rule", *Electric Power Systems Research*, Vol. 57, No. 1, 31 Jan. 2001, pp. 1-8.
- [25] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Hofmann, P. "Power quality assessment via wavelet transform analysis", *Transactions on Power Delivery*, IEEE, Vol. 11, No. 2, Apr. 1996, pp. 924 –930.
- [26] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M. "Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, Jul. 1997, pp. 1250 –1257.
- [27] Perunicic, B.; Mallini, M.; Wang, Z.; Liu, Y. "Power quality disturbance detection and classification using wavelets and artificial neural networks", *Proceedings. 8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, 1998, Vol. 1, pp. 77 –82.
- [28] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Parsons, A.C. "Power quality disturbance

- waveform recognition using wavelet-based neural classifier. I. Theoretical foundation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, Jan. 2000, pp. 222 –228.
- [29] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Parsons, A.C. “Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. II. Application”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, Jan. 2000, pp. 229 –235.
 - [30] Elmitwally, A.; Farghal, S.; Kandil, M.; Abdelkader, S.; Elkateb, M. “Proposed wavelet-neurofuzzy combined system for power quality violations detection and diagnosis”, IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 1, Jan. 2001, pp. 15 –20.
 - [31] Borrás, D.; Castilla, M.; Moreno, N.; Montano, J.C. “Wavelet and neural structure: a new tool for diagnostic of power system disturbances”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, Jan.-Feb. 2001, pp. 184 –190.
 - [32] Shyh-Jier Huang, Cheng-Tao Hsieh and Ching-Lien Huang, “Application of wavelets to classify power system disturbances”, Electric Power Systems Research, Vol. 47, No. 2, 15 Oct. 1998, pp. 87-93.
 - [33] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M. “Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis”, IEEE-SP Proceedings of International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 1994, pp. 166 –169.
 - [34] Karimi, M.; Mokhtari, H.; Iravani, M.R. “Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, Oct. 2000, pp. 1212 –1220.
 - [35] Littler, T.B.; Morrow, D.J. “Wavelets for the analysis and compression of power system disturbances”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, Apr. 1999, pp. 358 –364.
 - [36] Gaouda, A.M.; Salama, M.M.A.; Sultan, M.R.; Chikhani, A.Y. “Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, Oct. 1999, pp. 1469 –1476.
 - [37] Cano Plata, E.A.; Tacca, H.E. “Power quality assessment and load identification”, Proceedings. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, Vol. 3, pp. 840 –845.

B. Descargas parciales

- [38] Kawada, M.; Tungkanawanich, A.; Kawasaki, Z.-I.; Matsu-Ura, K. “Detection of wide-band E-M signals emitted from partial discharge occurring in GIS using wavelet transform”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, Apr. 2000, pp. 467 –471.
- [39] Shim, I.; Soragan, J.J.; Siew, W.H.; Sludden, K.; Gale, P.F. “Robust partial discharge measurement in MV cable networks using discrete wavelet transforms”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000., Vol. 1, pp. 718 –723.
- [40] Li, Z.M.; Feng, Y.P.; Chen, J.Q.; Zheng, X.G. “Wavelet analysis used in UHF partial discharge detection in GIS [gas insulated substations]”, International Conference on Power System Technology, 1998. Proceedings, Vol. 1, pp. 163 –166.
- [41] Tungkanawanich, A.; Hamid, E.Y.; Kawasaki, Z.-I.; Matsuura, K. “Analysis of VHF-wideband electromagnetic noises from partial discharge using discrete wavelet transform”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, Vol. 1, 2001, pp. 263 –268.

C. Estimación de la demanda

- [42] S. J. Yao, Y. H. Song, L. Z. Zhang and X. Y. Cheng, “Wavelet transform and neural networks for short-term electrical load forecasting”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, No. 18, 1 Dec. 2000, pp. 1975-1988.
- [43] Huang, C.-M.; Yang, H.-T. “Evolving wavelet-based networks for short-term load forecasting”, , *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution* , Vol. 148, No. 3 , May 2001, pp. 222 –228.
- [44] In-Keun Yu ; Chang-Il Kim ; Y. H. Song, “A Novel Short-Term Load Forecasting Technique Using Wavelet Transform Analysis”, *Electric Machines and Power Systems*, Taylor & Francis Inc., 2000, pp. 537–549.
- [45] Bai-Ling Zhang and Zhao-Yang Dong, “An adaptive neural-wavelet model for short term load forecasting”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 59, No. 2, 28 September 2001, pp. 121-129.

D. Medida de potencia

- [46] Hamid, E.Y.; Kawasaki, Z.-I. “Wavelet packet transform for RMS values and power measurements”, *IEEE Power Engineering Review* , Vol. 21, No. 9, Sept. 2001, pp. 49 –51.
- [47] Weon-Ki Yoon; Devaney, M.J. “Power measurement using the wavelet transform”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 47 No. 5, Oct. 1998, pp. 1205 –1210.
- [48] Weon-Ki Yoon; Devaney, M.J. “Reactive power measurement using the wavelet transform”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 49 No. 2, Apr. 2000, pp. 246 –252.

E. Protección de los sistemas eléctricos de potencia

E1. Detección y clasificación de faltas en componentes

E1.1. Protección de barras

- [49] Jiang, F.; Bo, Z.Q.; Redfern, M.A.; Weller, G.; Chen, Z.; Dong Xinzhou, “Application of wavelet transform in transient protection-case study: busbar protection”, *Seventh International Conference on (IEE) Developments in Power System Protection*, 2001, pp. 197 –200.

E1.2. Protección de ferrocarriles

- [50] Chang, C.S.; Feng, T.; Khambadkone, A.M.; Kumar, S. “Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform”, *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol. 147, No. 6, Nov. 2000, pp. 520 – 526.
- [51] Chang, C.S.; Kumar, S.; Liu, B.; Khambadkone, A. “Real-time detection using wavelet transform and neural network of short-circuit faults within a train in DC transit systems”, *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol. 148, No. 3 , May 2001, pp. 251 –256.

E1.3. Protección de generadores

- [52] Wu Guopei; Guan, L.; Ren Zhen; Huang Qungu, “A Novel method for large turbine generator protection based on wavelet transformation”, International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000. Vol. 1, pp. 254–258.
- [53] Lin Tao; Ying Xianggeng; Chen Deshu, “Study on wavelet analysis and its application to numerical protection for large synchronous generator”, Proceedings of International Conference on Power System Technology, 1998., Vol. 2, pp. 1121–1129.

E.1.4. Protección de motores

- [54] Zhongming Ye; Bin Wu, “Online rotor bar breakage detection of three phase induction motors by wavelet packet decomposition and artificial neural network”, IEEE 32nd Annual Conference on Power Electronics Specialists, 2001, Vol. 4, pp. 2209–2216.
- [55] Wang, J.; McInerny, S.; Haskew, T. “Insulation fault detection in a PWM controlled induction motor-experimental design and preliminary results”, Proceedings of Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, Vol. 2, pp. 487–492.
- [56] Zhang, X.H.; Cao, Y.N.; Li, Y.L. “A new project for motor fault detection and protection”, IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, 2001, pp. 145–148.
- [57] Eren, L.; Devaney, M.J. “Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient”, Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001, Vol. 3, pp. 1797–1800.

E.1.5. Protección de transformadores

- [58] Jiang, F.; Bo, Z.Q.; Chin, P.S.M.; Redfern, M.A.; Chen, Z. “Power transformer protection based on transient detection using discrete wavelet transform (DWT)”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 3, pp. 1856–1861.
- [59] Vanaja, R.; Udayakumar, K. “A new paradigm for impulse testing of power transformers”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 3, pp. 2206–2210.
- [60] Pandey, S.K.; Satish, L. “Multiresolution signal decomposition: a new tool for fault detection in power transformers during impulse tests”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13 No. 4, Oct. 1998, pp. 1194–1200.
- [61] Gomez-Morante, M.; Nicoletti, D.W. “A wavelet-based differential transformer protection”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, Oct. 1999, pp. 1351–1358.
- [62] Shaohua Jiao; Wanshun Liu; Peipu Su; Qixun Yang; Zhenhua Zhang; Jianfei Liu, “A new principle of discrimination between inrush current and internal short circuit of transformer based on fuzzy sets”, Proceedings of International Conference on Power System Technology, 1998, Vol. 2, pp. 1086–1090.
- [63] Mao, P.L.; Aggarwal, R.K. “A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, Oct 2001, pp.

E2. Detección y clasificación de faltas en el sistema

E2.1. Detección de faltas

- [64] Magnago, F.H.; Abur, A. “Fault location using wavelets”, IEEE Transactions on Power Delivery, , Vol. 13, No. 4, Oct. 1998, pp. 1475 –1480.
- [65] Magnago, F.H.; Abur, A. “A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, Vol. 1, pp. 426 –431.
- [66] Silveira, P.M.; Seara, R.; Zurn, H.H. “An approach using wavelet transform for fault type identification in digital relaying”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, Vol. 2, pp. 937 –942.
- [67] A. Abur and F. H. Magnago, “Use of time delays between modal components in wavelet based fault location”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 22, No. 6, Aug. 2000, pp. 397-403.
- [68] W. Zhao, Y. H. Song and W. R. Chen, “Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 23, No. 5, Jun. 2001, pp.403-411.
- [69] Zhao, Y.H. Song and Y. Min, “Wavelet analysis based scheme for fault detection and classification in underground power cable systems”, Electric Power Systems Research, Vol. 53, No 1, 2000, pp. 23-30.
- [70] Dong Xinzhou; Ge Yaozhong; Xu Bingyin, “Fault position relay based on current travelling waves and wavelets”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 3, pp. 1997-2004.

E2.2. Faltas a tierra

- [71] Chaari, O.; Meunier, M.; Brouaye, F. “Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3 , Jul. 1996, pp. 1301 –1308.
- [72] David Chan Tat Wai; Xia Yibin, “A novel technique for high impedance fault identification”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, Jul. 1998, pp. 738 –744.
- [73] Solanki, M.; Song, Y.H.; Potts, S.; Perks, A. “Transient protection of transmission line using wavelet transform”, IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, 2001, pp. 299 –302.
- [74] S. Hanninen, M. Lehtonen, T. Hakola, R. Rantanen, “Comparison of wavelet and differential equation algorithms in earth fault distance computation”, Proceedings of Conference on Power System Computation, Norway 1999.

E2.3. Faltas con arco

- [75] Charytoniuk, W.; Wei-Jen Lee; Mo-Shing Chen; Cultrera, J.; Theodore Maffetone, “Arcing fault detection in underground distribution networks-feasibility study”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 6, Nov.-Dec. 2000, pp. 1756 –1761.

E2.4. Autoreclosure

- [76] Shi, T.H.; Zhang, H.; Liu, P.; Zhang, D.J.; Wu, Q.H. "Accelerated trip of power transmission line based on biorthogonal wavelet analysis", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, Vol. 3, pp. 1333–1337.
- [77] I. K. Yu and Y. H. Song, "Development of novel adaptive single-pole autoreclosure schemes for extra high voltage transmission systems using wavelet transform analysis", Electric Power Systems Research, Vol. 47, No. 1, Oct. 1998, pp. 11-19.
- [78] I.K. Yu and Y.H. Song, "Wavelet analysis and neural networks based adaptive single-pole autoreclosure scheme for EHV transmission systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Jul. 1998, pp. 465-474.
- [79] Yu, I.K.; Song, Y.H. "Wavelet transform and neural network approach to developing adaptive single-pole auto-reclosing schemes for EHV transmission systems", IEEE Power Engineering Review, Vol. 18, No. 11, Nov. 1998, pp. 62 – 64.
- [80] Li Youyi; Dong Xinzhou; Bo, Z.Q.; Chin, N.F.; Ge Yaozhang, "Adaptive reclosure using high frequency fault transients", IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, 2001, pp. 375-378.

F. transitorios en sistemas eléctricos de potencia

F1. Conexión de condensadores

- [81] Styvaktakis, E.; Bollen, M.H.J.; Gu, I.Y.H. "Classification of power system transients: synchronised switching", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 4, pp. 2681–2686.

F2. Test de onda impulso

- [82] Satish, L.; Gururaj, B.J. "Wavelet analysis for estimation of mean-curve of impulse waveforms superimposed by noise, oscillations and overshoot", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, Jan. 2001, pp. 116–121.

F3. Análisis de transitorios en general

- [83] Robertson, D.C.; Camps, O.I.; Mayer, J.S.; Gish, W.B. "Wavelets and electromagnetic power system transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, Apr. 1996, pp. 1050–1058.
- [84] Galli, Anthony Wayne, Gerald T. Heydt. "Analysis of electrical transients in power systems via a novel wavelet recursion method", Thesis at Purdue University graduate School, Oct. 1997.
- [85] Wilkinson, W.A.; Cox, M.D. "Discrete wavelet analysis of power system transients", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996, pp. 2038–2044.
- [86] Heydt, G.T.; Galli, A.W. "Transient power quality problems analyzed using wavelets", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12 No. 2, Apr. 1997, pp. 908–915.
- [87] Meliopoulos, A.P.S.; Chien-Hsing Lee, "An alternative method for transient

analysis via wavelets”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, Jan. 2000, pp. 114–121.

- [88] J. Liu ; P. Pillay; P. Ribeiro, “Wavelet Analysis of Power Systems Transients Using Scalograms and Multiresolution Analysis”, Electric Machines and Power Systems, 1, Taylor & Francis Inc. 1999, pp. 1331–1334.

F4. Corriente de conexión en transformadores

- [89] Xiangning Liu; Pei Liu; Shijie Cheng, “A wavelet transform based scheme for power transformer inrush identification”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 3, pp. 1862–1867.
- [90] Qi Li; Chan, D.T.W. “Investigation of transformer inrush current using a dyadic wavelet”, Proceedings of International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998, Vol. 2, pp. 426–429.

F5. Líneas de transmisión

- [91] Magnago, F.H.; Abur, A. “Wavelet-based simulation of transients along transmission lines with frequency dependent parameters”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, Vol. 2, pp. 689–694.
- [92] Abur, A.; Ozgun, O.; Magnago, F.H. “Accurate modeling and simulation of transmission line transients using frequency dependent modal transformations”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, Vol. 3, pp. 1443–1448.
- [93] Raugi, M. “Wavelet transform solution of multiconductor transmission line transients”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3 Part: 1, May 1999, pp. 1554–1557.
- [94] Kit Po Wong; Lee, K. “Visualizing wavelet transformed travelling waves on power transmission line using JAVA”, International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000, Vol. 2, 2000, pp. 349–353.

E. Otras aplicaciones

- [95] Fedrigo, S.; Gandelli, A.; Monti, A.; Ponci, F. “A unified wavelet-based approach to electrical machine modelling”, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2000, 2001, pp. 765–769.
- [96] Mori, Y.; Torii, S.; Ebihara, D. “End effect analysis of linear induction motor based on the wavelet transform technique”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 5 Part: 2, Sept. 1999, pp. 3739–3741.
- [97] Pengju Kang; Birtwhistle, D. “Condition assessment of power transformer on-load tap-changers using wavelet analysis”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 3, Jul. 2001, pp. 394–400.

G. Tutoriales sobre la transformada wavelet

- [98] Sarkar, T.K.; Su, C. “A tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective .2. The continuous case”, IEEE Antennas and Propagation Magazine , Vol. 40, No. 6, Dec. 1998, pp. 36–49.
- [99] Burrus, C.S. “Wavelet based signal processing: where are we and where are we

- going?”, Proceedings of 13th International Conference on Digital Signal Processing, 1997, Vol. 1, 1997, pp. 3–5.
- [100] Hess-Nielsen, N.; Wickerhauser, M.V. “Wavelets and time-frequency analysis”, Proceedings of the IEEE , Vol. 84, No. 4, Apr. 1996, pp. 523–540.
 - [101] Daubechies, I. “Where do wavelets come from? A personal point of view”, Proceedings of the IEEE , Vol. 84, No. 4, Apr. 1996, pp. 510–513.
 - [102] Chul Hwan Kim; Raj Aggarwal, “Wavelet transforms in power systems. I. General introduction to the wavelet transforms”, Power Engineering Journal , Vol. 14, No. 2, Apr. 2000, pp. 81–87.
 - [103] Chul Hwan Kim; Aggarwal, R. “Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients”, Power Engineering Journal , Vol. 15, No. 4, Aug. 2001, pp. 193–202.
 - [104] Sarkar, T.K.; Su, C.; Adve, R.; Salazar-Palma, M.; Garcia-Castillo, L.; Boix, R.R. “A tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective. I. Discrete wavelet techniques”, IEEE Antennas and Propagation Magazine , Vol. 40, No. 5, Oct. 1998, pp. 49–68.
 - [105] Galli, A.W.; Heydt, G.T.; Ribeiro, P.F. “Exploring the power of wavelet analysis”, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 9, No. 4, Oct. 1996, pp. 37–41.
 - [106] Galli, A.W.; Nielsen, O.M. “Wavelet analysis for power system transients”, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 12, No. 1, Jan. 1999, pp. 16-25.
 - [107] Ribeiro, P.F.; Rogers, D.A. “Power electronics, power quality and modern analytical tools: the impact on electrical engineering education”, Proceedings of Twenty-fourth Annual Conference Frontiers in Education Conference, 1994, pp. 448–451.
 - [108] Graps, A. “An introduction to wavelets”, IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 2 No. 2 , Summer 1995, pp. 50–61.
 - [109] Sweldens, W. “Wavelets: What next?”, Proceedings of the IEEE , Vol. 84, No. 4, April 1996, pp. 680–685.
 - [110] Kilmer, W. “A Friendly Guide To Wavelets”, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 11, Nov. 1998, pp. 2387–2387.

H. Páginas web de interés sobre wavelet

- [111] Applying the Haar Wavelet Transform to Time Series Information, http://www.bearcave.com/misl/misl_tech/wavelets/haar.html
 - [112] WAVELAB 802 for Matlab5.x., <http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/>
 - [113] Robi Polikar, “The engineer's ultimate guide to wavelet analysis”, <http://engineering.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>
 - [114] Amara's wavelet page, <http://www.amara.com/current/wavelet.html>
 - [115] Stéphane Mallat, “A wavelet tour of signal processing”, Academic Press, 1998. http://cas.ensmp.fr/~chaplais/Wavetour_presentation/Wavetour_presentation_US.html
- Jacques Lewalle, “Tutorial on continuous wavelet analysis of experimental data”, <http://www.ecs.syr.edu/faculty/lewalle/tutor/tutor.html>