

MEDICIÓN DE POTENCIA ACTIVA EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un algoritmo para la obtención de la potencia activa a partir de las muestras de tensión y corriente en sistemas bajo condiciones no sinusoidales utilizando las transformadas *wavelet* y *wavelet packet*, que tienen la ventaja de descomponer las señales en bandas uniformes de frecuencia obteniendo los valores RMS de cada una de las componentes armónicas asociándoles los coeficientes *wavelet*. Se presenta además la implementación del algoritmo mencionado incluyendo la adquisición de los datos y una interfaz gráfica de usuario en MATLAB.

PALABRAS CLAVES: wavelet, wavelet packet, potencia activa, no sinusoidal.

ABSTRACT

This paper presents an algorithm used to obtain the active power from voltage and current signals samples under nonsinusoidal conditions using wavelet transforms and wavelet packet transform. The advantage of the wavelet packet transform is that it can decompose a power system waveform into uniform frequency bands to obtain the RMS values of each component associated to the wavelet coefficients. The implementation of the algorithm is validated with data acquisition and graphical user interface in Matlab.

KEYWORDS: wavelet, wavelet packet, active power, nonsinusoidal.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento continuo en el uso de los equipos electrónicos trajo consigo una serie de problemas en la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Las cargas no lineales son una fuente considerable de armónicos para las señales de voltaje y de corriente.

La mayoría de los equipos de medida convencionales no pueden entregar información real y completa de las variables, pues están contruidos para trabajar a una frecuencia determinada y suponen que las ondas son perfectamente sinusoidales. Los que pueden hacerlo, por ahora son equipos de análisis muy especializados y cuyos costos están fuera del alcance de la mayoría de las pequeñas y medianas empresas.

El grupo Control e Instrumentación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica ha realizado, y adelanta actualmente, proyectos tendientes a la implementación de sistemas de instrumentación digital basados en la arquitectura de los PCs para la medición de voltajes, corrientes y potencias en forma segura y económica en ambientes industriales.

En estos ambientes, donde predominan las cargas no lineales y por consiguiente los armónicos en los voltajes y especialmente en las corrientes, es crucial la utilización de algoritmos de cálculo más eficientes que extraigan la mayor cantidad de información posible y la procesen de

acuerdo con las definiciones de potencia activa y reactiva más reconocidas para el caso no sinusoidal.

En la actualidad se ha utilizado la transformada *wavelet* como herramienta para estudios de calidad de energía debido a su habilidad de descomponer mejor las señales mediante un análisis multiresolución. Esta propiedad, más el hecho que con la transformada *wavelet* se puede analizar la señal en el dominio tiempo frecuencia, permite determinar parámetros como los valores RMS de las señales de voltaje y de corriente para el rango de frecuencias que se requiere.

2. MARCO TEÓRICO

Cuando se emplea la transformada *wavelet* para descomponer una señal, se obtiene un conjunto de coeficientes (aproximación y detalle), cada uno de ellos en determinado nivel. Estos coeficientes representan parte de la señal original para cierto intervalo de tiempo y a un ancho de frecuencia y son empleados para calcular los valores efectivos de una señal en forma similar como se obtendría en el dominio de la frecuencia utilizando series de Fourier.

El análisis de señales mediante la transformada *wavelet* se desarrolló como alternativa para superar los problemas de resolución de la Transformada de Fourier, haciendo posible una buena representación de una señal tanto en tiempo como en frecuencia de forma simultánea, con lo

ÁLVARO Á. OROZCO G.

Profesor Titular
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
aaog@utp.edu.co

GERMÁN A. HOLGUÍN L.

Profesor Asistente
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
gahol@utp.edu.co

ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA

Estudiante de Maestría
Profesor catedrático
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
andreses1@utp.edu.co

**Grupo de Investigación en
Control e Instrumentación.
Facultad de Ingeniería Eléctrica.**

que se puede determinar el intervalo de tiempo en el cual aparecen determinadas componentes espectrales, lo cual lo hace muy importante en el análisis de señales como las electrofisiológicas y las que tienen alto contenido de frecuencia.

Básicamente, lo que hace la transformada *wavelet* es filtrar una señal en el dominio del tiempo mediante filtros pasa alto y pasa bajo que eliminan componentes de alta o baja frecuencia de la señal, con lo cual se obtienen niveles que contienen los coeficientes *wavelet*. Este proceso se repite para obtener nuevos coeficientes a otras frecuencias.

La transformada *wavelet* tiene una versión análoga, Transformada *Wavelet* Continua (CWT), y una digital, Transformada *Wavelet* Discreta (DWT). La diferencia entre ellas radica en la forma en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados. Sin embargo la DWT es más empleada ya que ella permite hacer un análisis multiresolución (MRA) de la señal de estudio [2].

La transformada *wavelet packet* WPT es una expansión de la transformada *wavelet* discreta (DWT). En el algoritmo de la DWT los coeficientes de detalle (los cuales son la salida de un filtro pasa alto) no son utilizados para posteriores descomposiciones, solo los coeficientes de aproximación (los cuales son la salida de un filtro pasa bajo) son tenidos en cuenta para futuras descomposiciones.

Mediante el algoritmo WPT los coeficientes de aproximación y de detalle son descompuestos para obtener los valores de los coeficientes del siguiente nivel. Por tal razón, los coeficientes de aproximación y de detalle son normalmente llamados los coeficientes *wavelet*.

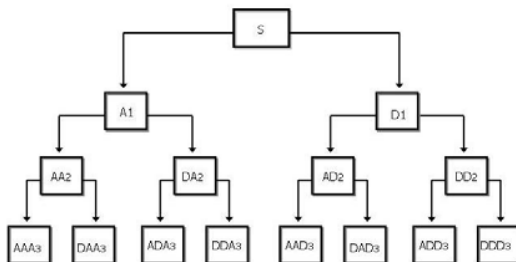


Figura 1. Coeficientes de la WPT para cada nivel.

En la figura 1, se observa como la señal original S es descompuesta en dos niveles, los de aproximación y de detalle. Luego, cada nuevo nivel es descompuesto de nuevo en sus coeficientes. Se mostrará como con estos coeficientes se pueden calcular los valores RMS de la señal en estudio.

3. MEDICIÓN DE POTENCIA

Las definiciones tradicionales para la medición de la potencia han sido desarrolladas en el dominio del tiempo y, en menor proporción, en el dominio de la frecuencia utilizando técnicas como la transformada de Fourier.

Los métodos utilizados en el dominio de la frecuencia permiten determinar la distorsión y las componentes armónicas de la señal. Sin embargo, ellos dependen de intervalos constantes de tiempo generando un espectro con componentes que están espaciadas a iguales frecuencias, con lo cual no se pueden detectar cambios en las señales [1].

La ventaja de medir potencia utilizando la transformada *wavelet packet* radica en que cada elemento de voltaje y de corriente conserva la relación espectral y temporal asociada con la potencia resultante. Esto significa que provee la distribución de la potencia y energía con respecto a cada componente de frecuencia asociada con cada nivel que se obtiene mediante el análisis *wavelet*, lo cual divide el espectro de la señal en bandas uniformes. Cada sub-banda representa la potencia instantánea para cada ancho de banda [6].

Aunque existe un consenso general para determinar la potencia activa en casi todos los casos, actualmente se pueden encontrar gran cantidad de definiciones para la potencia reactiva bajo condiciones no sinusoidales, siendo el método de Budeanu uno de los más destacados por la literatura [4] y [5].

Tradicionalmente, para la medición de la potencia activa P es necesario obtener los valores eficaces de las señales de voltaje y corriente, V_{rms} e I_{rms} , definidos según (1) y (2) respectivamente.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_t^2 dt} \quad (1)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_t^2 dt} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_t i_t dt \quad (3)$$

Donde v_t e i_t son las señales de voltaje y la corriente respectivamente en un periodo T.

Aplicando la transformada *wavelet* a v_t e i_t se tiene:

$$i_t = \sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (4)$$

Donde

$$c_{j_0,k} = \langle i_t, \phi_{j_0,k} \rangle, \quad d_{j,k} = \langle i_t, \psi_{j,k} \rangle \quad (5)$$

$$v_t = \sum_k c'_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d'_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

Donde

$$c'_{j_0,k} = \langle v_t, \phi_{j_0,k} \rangle, \quad d'_{j,k} = \langle v_t, \psi_{j,k} \rangle \quad (7)$$

El nivel de escala j_0 representa la banda más baja de la señal original e incluye la componente fundamental de frecuencia del sistema de potencia. La función de escala $\phi_{j_0,k}$ y la wavelet madre $\psi_{j,k}$, son bases ortonormales que tienen las propiedades del producto punto.

Ahora si se tiene que i_n y v_n representan la digitalización de las formas de onda de i_t y v_t respectivamente, con $n=0,1,\dots, 2^N-1$ y N es el número de niveles en los cuales se puede descomponer la señal, se obtiene:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_t^2 dt} \cong \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i_n^2} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^i)^2} \quad (8)$$

$$I_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^i)^2} \quad (9)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_t^2 dt} \cong \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} v_n^2} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^{*i})^2} \quad (10)$$

$$V_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^{*i})^2} \quad (11)$$

Donde $d_{j,k}^i$ y $d_{j,k}^{*i}$ son los coeficientes wavelets de i_n y v_n respectivamente.

I_j^i y V_j^i son, respectivamente, los valores RMS de corriente y voltaje para la banda de frecuencias del nodo i y del nivel j .

Para el cálculo de la potencia en el dominio de la transformada *wavelet*, se multiplican los coeficientes

wavelet obtenidos de las señales de corriente y de voltaje para cada nodo y que están ubicados en el mismo nivel [7].

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_t i_t dt \cong \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i_n v_n \quad (12)$$

Entonces

$$P = \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k}^i d_{j,k}^{*i} = \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} p_j^i \quad (13)$$

De donde p_j^i es la potencia para la banda de frecuencia nodo i y del nivel j .

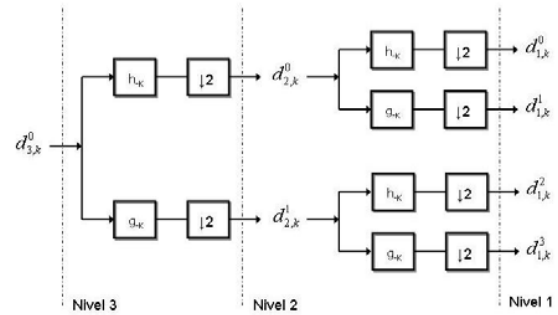


Figura 2. Descomposición usando la WPT

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

Las tareas que realiza el algoritmo desarrollado son esencialmente tres: La adquisición de los datos, el procesamiento de la señal y la presentación de resultados.

Para la realización de las pruebas se utilizó el sistema automático de conmutación de cargas descrito en [8], desarrollado por el grupo para este tipo de estudios.

Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de la firma *National Instruments* modelo PCI-6040E, que posee 16 canales análogos de entrada, 250 kM/s, 12 bits de resolución, 2 circuitos de temporización de 24 bits y 8 bits de entrada/salida.

Los parámetros de adquisición escogidos fueron 1024 muestras a 10240 muestras por segundo. Con esta combinación se obtienen seis periodos de una señal con componente fundamental de frecuencia de 60 Hz. El disparo de la adquisición fue configurado en el cruce por cero subiendo de la señal de voltaje.

Una vez se dispone de los vectores con las muestras de las señales de tensión y corrientes adquiridas, éstas deben