

Universidad de Cantabria
Departamento de Electrónica y Computadores



TESIS DOCTORAL

**Nuevo Método de Detección y Análisis
en Tiempo Real de Eventos
en la Tensión de Suministro de Energía
Eléctrica Empleando un Modelo Combinado
Wavelets-Filtro de Kalman Extendido**

Autor: Enrique Pérez Fernández

Santander, Marzo de 2006

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo. Se destacan las principales aportaciones e innovaciones y las líneas de trabajo abiertas a futuras investigaciones en el campo de la calidad de la energía eléctrica.

La calidad de la energía eléctrica es en la actualidad un factor fundamental para asegurar el desarrollo tecnológico. El coste de una mala calidad de la energía eléctrica en el comercio y en la industria se estima que es de millones de euros anuales, y es por ello que la implementación de nuevos métodos de medida que permitan analizar en el menor tiempo posible las características de la energía eléctrica suministrada y el desarrollo de medidas preventivas es de vital importancia.

Dentro de las distintas perturbaciones que afectan a la calidad de la energía, las interrupciones en el suministro, los huecos de tensión y las sobretensiones son las más importantes, tanto por su frecuencia de repetición como por los efectos económicos que producen.

En la tesis doctoral se analizan las técnicas más importantes empleadas en la detección y análisis de este tipo de eventos en la tensión de suministro eléctrico y se presenta un nuevo método que permite mejorar las características de los métodos actuales, tanto en el tiempo de detección, como en la estimación de la duración y la magnitud y fase de la tensión durante el evento.

Las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis son las siguientes:

- Se han analizado las características de los principales métodos de detección y análisis de eventos en la tensión de suministro eléctrico.
- El método $U_{\text{rms}(1/2)}$, propuesto en los estándares internacionales de detección y medida de eventos, es el más sencillo de implementar, pero presenta importantes limitaciones en la detección y en la estimación de la magnitud y duración de eventos de corta duración. El método siempre presenta un retraso en la detección de un evento y un error en la estimación de su duración, que es función del punto de la onda de comienzo del evento. Este método proporciona una estimación exacta de la magnitud del evento cuando la duración del evento es superior a la ventana de análisis empleada. Una limitación adicional de este método es que no proporciona información del instante de la onda en que comienza el evento ni tampoco proporciona información de la variación de la fase durante el evento.
- Se han analizado las características del análisis de Fourier en la detección y estimación de eventos y la dependencia de los resultados con el tamaño de la ventana de muestreo empleada. Se ha implementado la Short-Time Discrete Fourier Transform con una ventana deslizante de un ciclo de duración que actualiza sus valores con cada muestra obtenida y se

han caracterizado los resultados obtenidos sobre señales simuladas y sobre señales reales, obteniendo resultados similares superiores a los obtenidos con el método $U_{\text{rms}(1/2)}$, pero también con importantes limitaciones en el caso de la detección y análisis de ventos de corta duración.

- La utilización de wavelets presenta importantes ventajas en cuando a la detección y determinación de los parámetros temporales de los eventos en la tensión de suministro eléctrico, empleando para ello los coeficientes de aproximación del primer nivel de descomposición. La elección de la función wavelet más adecuada y la elección del umbral de detección de eventos son factores fundamentales en la aplicación de este método. Sin embargo, y como se ha demostrado en la tesis, la presencia de ruidos de alta frecuencia y la existencia de escalones en el inicio o en final del evento puede dar origen a importantes errores en el método que invalidan su utilización directa en sistemas automáticos de detección y medida. La utilización de los coeficientes del análisis wavelet para la determinación del valor eficaz de la tensión durante el evento presenta la limitación de proporcionar un solo valor de la magnitud de la tensión durante el evento y de no dar información de la fase de la tensión durante el evento.
- Se han analizado las características de la utilización de filtros de Kalman lineales para la detección y análisis de eventos. Se ha comprobado como afecta en las características de los métodos la elección y los parámetros del modelo del sistema empleado y se ha llegado a la conclusión que un modelo de doce estados, con la componentes en fase y en cuadratura de la componente fundamental y los armónicos impares de la tensión de suministro hasta el de orden 13, es el que presenta las mejores características. Este modelo presenta siempre un retraso en la detección del comienzo y del final del evento, inferior a los del método $U_{\text{rms}(1/2)}$ y que de nuevo es función del punto de la onda de comienzo del evento. El método presenta errores en la estimación de la magnitud, que son importantes, aunque inferiores a los del método $U_{\text{rms}(1/2)}$, en el caso de eventos de corta duración. Una ventaja de este método frente a los anteriores, es que permite conocer el perfil de la tensión durante el evento y también permite conocer la fase de la tensión durante el evento.
- Se han analizado las características de distintos modelos empleando filtros de Kalman extendidos para mejorar las propiedades de detección y análisis de los filtros de Kalman lineales. Se ha comprobado que los filtros de Kalman extendidos presentan una mejor respuesta en la detección del comienzo y del final del evento y que no se producen inestabilidades en la convergencia del filtro aunque los eventos sean de muy corta duración.

La estimación de los parámetros temporales del evento es mucho mejor que la obtenida en los restantes métodos aunque inferior que la obtenida con el método wavelet. Por otro lado, el error en la determinación de la magnitud del evento es muy pequeño, incluso en el caso de eventos de muy corta duración.

- Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se propone como método de detección y análisis de eventos en la tensión de suministro, un método combinado que utiliza simultáneamente y en paralelo el análisis wavelet y un filtro de Kalman extendido aplicados sobre las muestras de la tensión. El análisis wavelet proporciona la precisión y exactitud en la detección y en la determinación de las características temporales del evento, mientras que el filtro de Kalman extendido se utiliza para confirmar o detectar la existencia del evento y para obtener la mayor exactitud en la determinación de la magnitud y fase de la tensión durante el evento.
- Se han analizado distintas funciones wavelet y distintas frecuencias de muestreo para determinar que la función wavelet Daubechies con 6 coeficientes es la que presenta mejores características para la detección de eventos en la tensión de suministro.
- Se ha caracterizado el método propuesto sobre señales simuladas y sobre señales reales obtenidas de la tensión de suministro de energía eléctrica obtenida de la red de distribución de baja tensión de nuestro edificio, y se han obtenido los mejores resultados tanto en la detección y en la estimación de las características temporales del evento, como en la estimación de la magnitud y de la fase de la tensión durante el evento.
- Se ha implementado el método propuesto sobre un sistema de adquisición de datos sobre DSP. Las principales características del método desarrollado son las siguientes: se realiza un muestreo continuo de la tensión por medio de la tarjeta DSP controlado por interrupciones. Sobre las muestras obtenidas se aplica simultáneamente la descomposición wavelet, empleando la función Daubechies con 6 coeficientes, y un filtro de Kalman extendido de 13 estados. Se ha desarrollado una doble estrategia de detección del comienzo y del final del evento empleando los coeficientes del primer nivel de descomposición del análisis wavelet y de la componente fundamental de la tensión de suministro proporcionada por el filtro de Kalman extendido, para asegurar una detección y evaluación mas exacta. Se han evaluado los límites del hardware empleado en la implementación en tiempo real del sistema propuesto.

Los resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral permiten abrir futuras líneas de investigación en el campo de la calidad de la energía eléctrica. Como ampliación de este trabajo se propone la aplicación del método propuesto al desarrollo de un sistema experto que, basándose en algoritmos de clasificación automática de eventos, permita realizar una toma de decisiones en caso de producirse cualquier evento en la tensión de suministro de energía eléctrica.