

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 1

Introducción

En este capítulo se expone, en primer lugar, la situación actual de la calidad del suministro de energía eléctrica y los principales retos a los que se enfrentan las empresas de generación y distribución de energía eléctrica para garantizar dicha calidad de suministro. En segundo lugar se presentan las motivaciones y objetivos que se han tenido a la hora de realizar el trabajo contenido en esta memoria.

1.1. LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Desde hace algunos años se está registrando en los países industrializados una creciente sensibilidad hacia “la calidad de la energía eléctrica”. El consumo de energía eléctrica está creciendo en la actualidad de forma considerable y continuada en todos los países del mundo y el desarrollo de las nuevas tecnologías está transformando la sociedad en general y están aumentando continuamente la productividad. Históricamente este desarrollo tecnológico ha estado unido a la utilización de la energía eléctrica, siendo cada vez mayor el porcentaje de utilización de la electricidad en el conjunto del consumo energético total. Las alteraciones en la “calidad de la onda” tienen lugar en los propios procesos de producción, transporte y distribución, así como en la utilización de determinados receptores que generan perturbaciones. Son, por tanto, inevitables y se han convertido en un motivo de preocupación.

Dentro del marco socio-económico actual las empresas de generación y distribución de energía eléctrica tienen que afrontar dos importantes retos:

- aumentar la capacidad de generación y distribución de energía eléctrica para responder a la demanda creciente.
- asegurar la calidad de la energía eléctrica suministrada.

En cuanto al primer aspecto, se está produciendo una crisis debido al aumento de la demanda en el consumo eléctrico y las limitaciones de las compañías eléctricas en cuanto a su capacidad de expansión de la generación y transmisión de la energía eléctrica. Esta situación se está produciendo en España y en otros países industrializados, donde los sistemas de distribución están funcionando muy cerca del límite de su capacidad máxima debido entre otros factores a la falta de las inversiones necesarias.

El segundo aspecto que deben afrontar las compañías eléctricas es asegurar la calidad de la energía eléctrica suministrada. No solo la electricidad entendida como un producto tiene que cumplir unos parámetros de calidad que aseguren el correcto funcionamiento de los equipos conectados a las redes de distribución, sino que la demanda general de una mayor calidad de la energía eléctrica es fundamental debido al desarrollo tecnológico.

No existe hasta el momento una definición completamente aceptada del término calidad del suministro eléctrico o calidad de la energía eléctrica (“power quality”) en la comunidad internacional. En las referencias [1-5] se puede comprobar como a pesar del tiempo

transcurrido, sigue existiendo la indefinición en la utilización del término. A destacar por su excesiva vaguedad son las definiciones genéricas empleadas en los más importantes estándares internacionales de medida de la calidad de la energía eléctrica. El estándar IEC 61000-4-30 [6] define *power quality* como las “*características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia*”, mientras que el estándar IEEE 1159-1995 [7] define la calidad de la energía eléctrica como “*una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica*”.

En general, la calidad del suministro de energía eléctrica se puede considerar como la combinación de la disponibilidad del suministro eléctrico junto con la calidad de la tensión y la calidad de la corriente suministradas, entendiendo la falta de calidad como la desviación de esas magnitudes de su forma ideal, de forma que cualquier desviación se considera como una perturbación o como una pérdida en su calidad.

El problema es complejo por naturaleza, ya que una característica importante de la electricidad, y que no se presenta en otros productos, es que su utilización por parte de los consumidores modifica sus características. La conexión de los aparatos de los clientes al sistema de distribución de energía eléctrica da origen a que circulen corrientes eléctricas proporcionales a la demanda de esos clientes. Estas corrientes al circular por los conductores de la red van a dar origen a caídas de tensión. La amplitud de la tensión suministrada a un cliente va a ser función en todo momento de las caídas de tensión acumuladas en todos los elementos de la red por el que se alimenta el cliente, y que va a estar afectada por su propia demanda y por la demanda simultánea de otros clientes. Como la demanda de cada cliente está variando continuamente, la tensión suministrada también lo hace en la misma forma.

La posibilidad de daños o averías en los elementos que componen el sistema de generación, transporte o distribución de la energía eléctrica, debidos a múltiples causas, como condiciones climáticas, desgaste, envejecimiento, la propia actividad humana, el efecto de los animales u otros, también puede afectar o interrumpir el suministro de energía eléctrica a los clientes.

Por tanto, los factores que definen la calidad de la energía eléctrica dependen tanto del generador y del distribuidor como del propio cliente, por lo para asegurar unos niveles mínimos de calidad en el suministro eléctrico es necesaria la cooperación de todos los agentes que intervienen en el proceso.

El efecto más importante que produce la pérdida de la calidad de la energía eléctrica es el mal funcionamiento o la avería de los equipos conectados a la red de distribución. Los equipos eléctricos y electrónicos, como los computadores personales, autómatas programables, equipos de iluminación, equipos de electrónica de consumo, etc, pueden funcionar de forma incorrecta si la energía eléctrica suministrada se interrumpe solamente durante unas décimas de segundo o incluso centésimas de segundo. Este mal funcionamiento de los equipos puede originar problemas importantes en un entorno residencial o comercial, pero los efectos económicos que pueden producir en los procesos industriales la parada o la avería de los equipos pueden ser muy importantes.

No hay estudios exhaustivos sobre el coste de la calidad de la energía eléctrica en las industrias, pero se estima que el coste anual en los Estados Unidos solamente por la no atención a la compatibilidad se eleva a decenas de miles de millones de dólares [8]. Antes de que la electrónica irrumpiera en todo tipo de equipos industriales y de consumo, la compatibilidad significaba únicamente comprobar que la tensión y la frecuencia en la placa del equipo fuesen consistentes con la alimentación a la que este se conectaba. En la actualidad, y desgraciadamente, los equipos electrónicos proporcionan mucho mayores capacidades que requieren mucha mayor atención en sus aplicaciones en los sistemas eléctricos. Fenómenos que antes eran secundarios como sobretensiones, distorsión armónica, variaciones de frecuencia..., son ahora significativos.

La liberalización del sector eléctrico también va a afectar a la calidad de la energía eléctrica, y la utilización de otras formas para la generación de energía, como la utilización de fuentes procedentes de energía eólica o de energía solar, también va a aumentar los niveles de distorsión en las redes de distribución [9].

Otro problema importante que puede surgir asociado a la liberalización del sector eléctrico, será el de la asignación de la responsabilidad por la falta o la pérdida de la calidad de la energía eléctrica. Hasta ahora la responsabilidad del suministro de energía eléctrica con ciertos niveles de calidad es, en la mayor parte de los casos, asignable a la propia compañía generadora o distribuidora de la electricidad. Sin embargo, en el futuro la responsabilidad de la calidad del suministro al cliente puede quedar en parte difuminada. Puede ser responsabilidad de alguno de los generadores, del distribuidor o del propio cliente. Esta responsabilidad difusa puede llevar a cierta confusión y a un posible aumento de los conflictos entre las distintas partes, si no se determina adecuadamente mediante la medida de la calidad de la energía en distintos puntos de la red.

Dentro de este marco general, la definición de índices y objetivos en la calidad de la energía eléctrica [10] y el desarrollo de técnicas de medida para la determinación de esos índices [11-13] se ha convertido no solo en una necesidad en los sistemas eléctricos actuales, para así poder evaluar las características del propio sistema, evaluar la compatibilidad del sistema con las cargas o poder diseñar estrategias de mitigación de esas perturbaciones, si no que en muchos casos se va a convertir en una obligación, ya que en muchos contratos se está empezando a incluir o se van a incluir objetivos en la calidad de la energía eléctrica a cumplir por el suministrador y penalizaciones en el caso de no cumplimiento.

1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS

Esta tesis doctoral se desarrolla en el marco del proyecto de investigación “*Estudio y desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento aplicadas a la detección, medida y evaluación de la calidad de la energía eléctrica*” (DPI2003-08869-C02), actualmente en fase de desarrollo, que se realiza conjuntamente por nuestro grupo de investigación de la Universidad de Cantabria junto con un grupo de investigación del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del País Vasco.

Este proyecto de investigación comienza en el año 2003 y recoge la experiencia del grupo en la utilización de nuevas herramientas de procesamiento de señal adquirida en proyectos de investigación anteriores, también relacionados con la medida y el análisis de la calidad de la energía eléctrica, para desarrollar nuevas técnicas para la detección y evaluación de distintos aspectos de la calidad de la energía eléctrica. Los aspectos que se analizan en el proyecto son:

- La detección y medida de eventos en la tensión de alimentación, definiendo los eventos como variaciones repentinas de la tensión fuera de sus valores normales. En este grupo se consideran los huecos de tensión, las interrupciones breves en el suministro y las sobretensiones.
- La medida y caracterización del flicker de tensión y
- La medida y caracterización del espectro armónico, interarmónico y subarmónico en la tensión de suministro.

A partir de los métodos desarrollados en este proyecto y de la experiencia previa, se plantea esta tesis doctoral, cuyo objetivo fundamental es, partiendo del estado actual de las técnicas de detección y análisis de eventos en la tensión de distribución de energía eléctrica, presentar un nuevo método que permita mejorar las características de los métodos empleados hasta ahora,

tanto en el tiempo de detección, como en el análisis de la magnitud y fase de la tensión durante el evento y en la determinación de la duración temporal de ese evento.

Para realizar este objetivo se emplean nuevas técnicas de procesado de señal utilizando wavelets y filtros de Kalman extendidos. El análisis wavelet proporciona la precisión y exactitud en la detección y en la determinación de las características temporales de un evento en la tensión de alimentación, mientras que el filtro de Kalman extendido permite obtener la mayor exactitud en la determinación de la magnitud y fase de la tensión durante el evento. La aplicación simultánea de ambas técnicas de procesado sobre las muestras de la tensión del suministro eléctrico constituye el núcleo del método propuesto en esta tesis.

Otra característica fundamental del método que se propone en este trabajo es su implementación en tiempo real en un sistema DSP, de forma que se adquieren las muestras de la tensión de suministro y se analizan sus valores en el intervalo de muestreo para la detección y análisis de los posibles eventos en el menor tiempo posible. Esto va a permitir un mejor conocimiento del propio sistema y poder desarrollar estrategias de protección de los distintos equipos conectados a esa red de distribución.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está organizada en un conjunto de cinco capítulos, de la siguiente forma:

En el primer capítulo de introducción se define cual es el campo de aplicación de la tesis doctoral, el punto de partida y la motivación y los objetivos que se persiguen con su realización.

En el segundo capítulo se definen las distintas perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica y se analiza el estado de la normativa internacional en los aspectos de la calidad de la energía eléctrica relacionados con la medida y análisis de los eventos en la tensión de distribución. Posteriormente en este capítulo se estudia el efecto de las variaciones en la tensión sobre los equipos conectados a la red de distribución y se analiza la forma de caracterizar su tolerancia frente a esas variaciones de tensión, así como las pruebas para asegurar esa tolerancia. En el tercer capítulo se estudian y comparan los métodos más importantes empleados en la detección y medida de eventos en la tensión de distribución de la energía eléctrica. El primer método que se estudia es el cálculo del valor eficaz de la tensión, pues es este el método de detección y medida propuesto en los estándares internacionales. En segundo lugar se hace un estudio del cálculo de la componente fundamental de la tensión empleando el análisis de

Fourier. Finalmente se estudian métodos más recientes como son el filtrado de Kalman y el análisis wavelet para el cálculo de la componente fundamental o del valor eficaz de la tensión respectivamente. En cada caso se estudian las características del método en cuanto al tiempo en la detección de la existencia de un evento y a la evaluación de las características de la tensión durante el evento, magnitud y duración, para el caso de eventos simulados y para el caso de eventos reales registrados en la red de distribución de energía eléctrica, destacando en cada caso las ventajas y las limitaciones de cada método.

En el capítulo cuatro se presenta el método que se propone para la detección y análisis de eventos en la tensión de distribución de energía eléctrica. A partir de las limitaciones que presentan los métodos existentes, en el método propuesto se emplea simultáneamente y en paralelo un filtro de Kalman extendido y el análisis wavelet de las muestras de tensión para detectar de forma inequívoca la existencia de un evento en la tensión de alimentación y para analizar la magnitud de la tensión y la duración del evento con la mayor exactitud. En la detección del comienzo y del final del evento se emplea el análisis wavelet y simultáneamente los resultados del cálculo de la componente fundamental de la tensión obtenido por medio de un filtro de Kalman extendido. La magnitud del evento se calcula empleando los resultados que presenta el filtro de Kalman extendido y su duración se determina por medio de la utilización combinada de los resultados del análisis wavelet y del filtro de Kalman extendido.

El capítulo presenta los resultados obtenidos sobre eventos simulados y compara estos resultados con los obtenidos con los métodos descritos en el capítulo anterior, mostrando la superioridad del método propuesto tanto en la determinación de los parámetros temporales del evento como en la determinación de su magnitud.

En este capítulo se presenta también la implementación del método propuesto en esta tesis en un sistema DSP. Se presenta la estructura y características del hardware utilizado y la estructura del software desarrollado para la detección y análisis de eventos en la tensión de alimentación en tiempo real. El capítulo también analiza las limitaciones en cuanto a la velocidad máxima de muestreo que se puede emplear y al tiempo de procesado que impone el hardware utilizado. Por último, se presentan los resultados en cuanto a tiempo de detección, magnitud y duración de distintos tipos de eventos registrados en la tensión de alimentación.

Por último el capítulo 5 contiene las conclusiones obtenidas en la realización del trabajo y se presentan futuras líneas de trabajo.

1.4. LISTA DE PUBLICACIONES

Parte del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis ha sido difundido en distintas revistas y congresos de ámbito internacional. Las publicaciones generadas han sido las siguientes:

J. Barros, E. Pérez and A. Pigazo, “Real Time System for Identification of Power Quality Disturbances”, 17th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2003), Barcelona, Spain, May 12-15, 2003. Paper 29, Session 2.

J. Barros, E. Pérez, “Measurement and Analysis of Voltage Events in a Low-Voltage Distribution Network”, 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 2004, May 12-15, 2004, Dubrovnik, Croatia, pp. 1083-1086, ISBN: 0-7803-8272-2.

J. Barros, R.I. Diego, E. Pérez, “Measuring Voltage Tolerance of Equipment under Practical Conditions”, 2002 IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Crete, Greece, pp. 289-293.

J. Barros and E. Pérez, “A Combined Wavelet - Kalman Filtering Scheme for Automatic Detection and Analysis of Voltage Dips in Power Systems”, PowerTech2005, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005, Paper 141, pp. 1-5, ISBN: 5-93208-034-0.

J. Barros and E. Pérez, “Automatic Detection and Analysis of Voltage Events in Power Systems”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (aceptado y pendiente de publicación).

E. Pérez and J. Barros, “Limitations in the use of r.m.s. value for power quality analysis”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC2006, Sorrento, Italia, April 2006 (aceptado).

E. Pérez and J. Barros, “Voltage Event Detection and Characterization Methods: A Comparative Study”, 2006 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition Latin America, August 15-18, 2006, Caracas, Venezuela (aceptado).

1.5. REFERENCIAS

- [1] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty, "Electric Power Quality", Ed. McGraw Hill. 1996.
- [2] G.T. Heydt, "Electric Power Quality: A Tutorial Introduction", IEEE Computer Applications in Power, January 1998, pp. 15-19.
- [3] J. Arrillaga, N.R. Watson, S. Chen, "Power System Quality Assessment", Ed. John Wiley & Sons, 2000.
- [4] M.H.J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press Series on Power Engineering, IEEE, 2000.
- [5] M.H.J. Bollen, "What is power quality?", Electric Power Systems Research, Vol. 66, 2003, pp. 5-14.
- [6] IEC Standard 61000-4-30, 2003. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques. Section 30: Power quality measurement methods".
- [7] IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE New York, USA, 1995.
- [8] M.F. McGranaghan, B. Roettger, "Economic Evaluation of Power Quality", IEEE Power Engineering Review, Vol. 22, No. 2, February 2002, pp. 8-12.
- [9] J. Arrillaga, M.H.J. Bollen, "Power Quality Following Deregulation", Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 2, February 2000, pp. 246-261.
- [10] Joint Working Group Cigré C4.07/Cired, Power Quality Indices and Objectives, Final report, January 2004.
- [11] M. McGranaghan, "Trends in Power Quality Monitoring", IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, No. 10, October 2001, pp. 3-9, 21.

-
- [12] J. Barros, “Medida y Regulación de la Calidad de la Energía Eléctrica: Nuevas Tendencias”, *Mundo Electrónico*, No. 336, Noviembre 2002, pp. 32-40.
- [13] I.Y.H. Gu, E. Styvaktakis, “Bridge the Gap: Signal Processing for Power Quality Applications”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 66, 2003, pp. 83-96.