
Introducción

Desde el descubrimiento de la electricidad, 400 años atrás aproximadamente, la generación, distribución y uso de la electricidad ha estado involucrada en problemas de calidad de la energía. En un principio, las máquinas eléctricas y los dispositivos eran muy robustos pero muy útiles; consumían gran cantidad de energía eléctrica y funcionaban perfectamente bien. Probablemente eran susceptibles a algún problema de calidad de la energía existente en ese tiempo, pero los efectos no eran lo suficientemente claros, debido en parte a la robustez de las máquinas y a la falta de medios para medir los parámetros de la calidad de la energía.¹

A finales de los 50's, la era industrial demandó productos económicamente competitivos, lo cual significó que las máquinas eléctricas llegaran a ser más pequeñas y más eficientes y que fueran diseñadas sin márgenes de funcionamiento. Al mismo tiempo, la demanda de energía por parte del sector industrial y residencial, condujo a incrementar la generación y distribución de energía. Esto llevó a las empresas suministradoras a formar una gran red de distribución y no operar de forma independiente como lo venían haciendo.²

En los últimos años, tanto las empresas suministradoras de energía eléctrica como los usuarios finales han incrementado su interés por la calidad de la energía eléctrica. El término calidad de la energía se convirtió en un concepto general en la década de los 80's y comprende distintos tipos de disturbios que pueden presentarse en un sistema eléctrico.³

Las principales razones por las cuales se ha incrementado la preocupación en su estudio son:

- El incremento de cargas con controles basados en microprocesadores y dispositivos de electrónica de potencia, los cuales son más sensibles a variaciones en la calidad de la energía que el equipo usado en el pasado.⁴
- La demanda de mayor eficiencia en los sistemas eléctricos ha llevado a la aplicación de dispositivos de alta eficiencia como controladores de velocidad en motores eléctricos y capacitores en derivación para corregir el factor de potencia y reducir las pérdidas.⁵
- Un mayor conocimiento por parte de los usuarios finales acerca de problemas en la calidad de la energía, tales como interrupciones, depresiones de tensión y transitorios.⁶
- El uso de sistemas interconectados, lo cual significa que una falla en algún componente de la red tiene consecuencias mayores.⁷

Calidad de la energía es un término con diferente significado para diferentes personas.⁸ Por ejemplo, desde el punto de vista de una empresa suministradora, un problema de calidad de la energía puede ser percibido como el incumplimiento con varios estándares, como la tensión RMS o los niveles de distorsión armónica. Para un usuario, un problema de calidad de la energía puede ser definido como cualquier condición en el suministro de energía que cause mal funcionamiento en el equipo.⁹

En general, la calidad de la energía es definida como la ausencia de problemas manifestados en tensión, corriente y frecuencia que pueden conducir a una falla o salida de operación en el equipo de los usuarios finales.¹⁰ Una buena calidad de la energía es una perfecta senoide con frecuencia y amplitud constante.¹¹

La calidad de la energía es difícil de cuantificar.¹² Ésta dificultad es explicada por la naturaleza de la interacción entre la calidad de la energía y la susceptibilidad del equipo. Es decir, dos equipos idénticos pueden funcionar de forma distinta para el mismo parámetro de calidad de la energía debido a las diferencias en su manufactura o la tolerancia de sus componentes.¹³

Los distintos disturbios que involucra la calidad de la energía son: interrupciones, sags, swells, transitorios, ruido, flicker, variaciones en la frecuencia y la distorsión armónica.¹⁴

Las armónicas causan distorsión en la forma de onda de tensión y corriente, lo cual tiene efectos perjudiciales en el equipo. La estimación de armónicas de cargas no lineales es el primer paso en un análisis armónico y éste puede ser no seguro, ya que existe una interacción entre el equipo que genera las armónicas y el sistema eléctrico.¹⁵

El problema de las armónicas no es un fenómeno nuevo en los sistemas eléctricos, es tan viejo como el sistema eléctrico mismo;¹⁶ ya que ha existido desde el comienzo de la utilización de la corriente alterna. Sin embargo, es recientemente que su trato ha llegado a ser un problema para un pequeño segmento de la industria eléctrica. La razón es que la mayoría de las cargas en el sistema eléctrico de potencia eran lineales. Por ejemplo, las lámparas incandescentes y los motores de inducción, demandan corrientes senoidales cuando es aplicada una tensión senoidal. Con la introducción de dispositivos semiconductores, para incrementar la eficiencia y control de la energía, las condiciones cambiaron. La utilización de cargas no-lineales tiene ventajas muy importantes para el control de los procesos y potencia aunque demandan corrientes distorsionadas con alto contenido de corrientes armónicas.¹⁷

Hasta los años 60's, las principales fuentes de armónicas en el sistema eléctrico eran los hornos de arco y algunas cargas que incluían convertidores.¹⁸ Además, había muchos capacitores conectados en derivación usados para la compensación de potencia reactiva de un gran número de sistemas de potencia a nivel industrial, conectados sin el conocimiento de los problemas de resonancia armónica que generaban. A finales de los 60's, las aplicaciones de tracción ya usaban tiristores y diodos; sin embargo, fue hasta la siguiente década que cobró auge con el desarrollo de componentes electrónicos de potencia más rápidos, baratos y confiables.¹⁹

En los 70's, con el uso de tiristores y compensadores estáticos de potencia, muchos dispositivos variadores de velocidad fueron introducidos en todas las industrias, provocando el flujo de corrientes armónicas de los convertidores al sistema de AC.²⁰

El desarrollo de los transistores bipolares de potencia Darlington a inicios de los 80's, junto con el desarrollo del tiristor GTO y el transistor IGBT, convirtieron a la electrónica de potencia en la inseparable compañía de los sistemas eléctricos de potencia.²¹

Paradójicamente, la electrónica de potencia, principal causa de problemas armónicos, está siendo usada hoy en día efectivamente para incrementar la confiabilidad en el suministro de energía y para entregar formas de onda de corriente y tensión senoidales a

los usuarios finales. Es decir, se está usando para mejorar la calidad de la energía, de la cual las armónicas son uno de sus mayores preocupaciones.²²

Se estima que para el año 2010, 50% de la energía producida será modificada por semiconductores, especialmente tecnologías basadas en silicio, para modificar su característica senoidal y mejorar la eficiencia de su uso. Sin embargo, cuando esto ocurra, la corriente resultante demandada al sistema de potencia será no senoidal.²³

Actualmente, en los sistemas de distribución, los convertidores de AC-DC, convertidores moduladores del ancho de pulso, cicloconvertidores, hornos de arco, compensadores estáticos de vars y el switcheo en el suministro de energía son cargas no lineales típicas que producen armónicas.²⁴ Asimismo, el uso de lámparas fluorescentes para el ahorro de energía y computadoras personales ha provocado la proliferación de corrientes armónicas en edificios comerciales.²⁵

Una vez que las fuentes de armónicas son identificadas, éstas deben interpretarse en términos de sus efectos en el resto del sistema y equipo externo al mismo. Cada elemento del sistema debe ser examinado por su sensibilidad a las armónicas como una base para establecer recomendaciones que permitan ubicarse dentro de los niveles permisibles de distorsión armónica.²⁶ Los efectos de las armónicas pueden dividirse en tres categorías, los ocasionados al sistema de potencia, efectos en las cargas y por último, los efectos en los circuitos de comunicación.²⁷

La resonancia serie y paralelo, reducción en la eficiencia de la generación, transmisión y utilización de la energía y disminución de la vida útil de los componentes de las plantas son los principales efectos de las armónicas dentro del sistema de potencia.²⁸

Las cargas que con frecuencia se ven afectadas por las armónicas son motores, generadores, transformadores, cables de potencia, bancos de capacitores, reactores, equipo de medición y relevadores de protección.²⁹

Cuando se planea la instalación de una planta con componentes no lineales, se hace considerando la opción de diseñar los dispositivos no lineales para bajos niveles de distorsión en la forma de onda o instalando un equipo de compensación armónica en las terminales. La primera opción puede llevarse a cabo por medio del cambio de fase de transformadores o el control de puentes convertidores. La compensación armónica externa es realizada por medio de filtros. En cualquier caso, la decisión dependerá de factores como la potencia y el rango de tensión del equipo que será instalado y del efecto de la distorsión en la forma de onda en el resto de la planta.³⁰

Además de diseñar el equipo de tal forma que soporte el efecto de las armónicas, existen otras técnicas para su mitigación. Filtros pasivos, filtros activos y tecnologías alternativas pueden utilizarse para minimizar o, mejor dicho, controlar el flujo de corrientes armónicas de cargas no lineales a los sistemas eléctricos.³¹

Los filtros pasivos en lugares adecuados, de preferencia cercanos a la fuente de generación armónica, son instalados para que las corrientes armónicas sean atrapadas en la fuente, de manera que la propagación de corrientes en el sistema sea reducida.³² Existen diferentes configuraciones de filtros pasivos conectados en derivación, reactores con bancos de capacitores trifásicos conectados en delta, estrella flotante y aterrizada, con una y doble sintonía.³³

Los filtros activos son equipos que inyectan distorsión armónica al sistema, de igual magnitud que la distorsión causada por la carga no lineal pero de polaridad opuesta, así la forma de onda es corregida a una senoide.³⁴ De acuerdo a la forma en que están conectados a la red, pueden clasificarse en filtros tipo serie y filtros activos en derivación.³⁵

Otras técnicas aplicadas para limitar las armónicas son la multiplicación de fases, aplicación de reactores de línea o choque y transformadores con conexión zig-zag y sobredimensionamiento del neutro para armónicas de secuencia cero.³⁶

Además de los filtros y técnicas aplicadas para reducir la distorsión armónica, existen métodos para corregir otros problemas de calidad de la energía. Las fuentes ininterrumpibles de energía (UPS), por ejemplo, se aplican para variaciones de tensión, interrupciones y variaciones en la frecuencia. Los dispositivos de energía almacenada también son aplicables para variaciones de tensión e interrupciones.³⁷ Otros sistemas utilizados para el mismo fin son los interruptores de estado sólido, restauradores dinámicos de voltaje (DVR) y compensadores estáticos de distribución (DSTATCOM), entre otros.

Referencias

- ¹ SANKARAN, C. *"Power Quality"*. USA, CRC Press, 2002, pp. 1-2
- ² Sankaran, op. cit., p. 2
- ³ DUGAN, Roger C. (et al). *"Electrical Power Systems Quality"*. 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 1
- ⁴ Idem
- ⁵ Idem
- ⁶ Idem
- ⁷ Idem
- ⁸ Sankaran, op. cit., p. 1 y BROWN, Richard E. *"Electric Power distribution Reliability"*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, p. 39.
- ⁹ Brown, op. cit., p. 39
- ¹⁰ Dugan, op. cit., p. 3
- ¹¹ Brown, op. cit., p. 40
- ¹² Dugan, op. cit., p. 5
- ¹³ Sankaran, op. cit., p. 2
- ¹⁴ Ibidem, p. 41
- ¹⁵ DAS, J. C. *"Power System Analysis: Short circuit load flow and harmonics"*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, p. 554
- ¹⁶ ACHA, Enrique y MADRIGAL, Manuel. *"Power Systems Harmonics"*. Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2001, p. 3 y Dugan, op. cit., p. 168
- ¹⁷ IEEE Std 141-1993, *"Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants"*, p. 443
- ¹⁸ NATARAJAN, Ramasamy. *"Power System Capacitors"*. USA, Taylor & Francis Group, 2005, p. 389
- ¹⁹ Acha, op. cit., p. 4
- ²⁰ Natarajan, op. cit., p. 389
- ²¹ Acha, op. cit., p. 4
- ²² Idem
- ²³ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 443
- ²⁴ Natarajan, op. cit., p. 390
- ²⁵ Sankaran, op. cit., p. 84
- ²⁶ ARRILLAGA, J. y WATSON, Neville R. *"Power System Harmonics"*. 2da. Ed., Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2003, p. 143
- ²⁷ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 458
- ²⁸ Arrillaga, op. cit., p. 143

²⁹ IEEE Std 141-1993, op. cit., pp. 459-464

³⁰ Arrillaga, op. cit., p 219

³¹ Das, op. cit., p. 664 y IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 467

³² Das, op. cit., p. 664

³³ Ibidem, pp. 689-694; Arrillaga, op. cit., pp. 219-237 y Dugan, op. cit., pp. 252-262

³⁴ Das, op. cit., pp. 664, 698

³⁵ Das, op. cit., pp. 698-700 y Arrillaga, op. cit., pp. 255-258

³⁶ Das, op. cit., pp. 694-696, 706-708 y Dugan, op. cit., pp. 248-252

³⁷ ALSTOM, "*Protective Relay Application Guide*". 1987, pp. 417-419