

Una revisión a las soluciones para una evaluación probabilística de los armónicos en los sistemas de potencia

Luis Hernando Correa Salazar*

Fecha de envío: 20 de enero de 2009
Fecha de aceptación: 1º de marzo de 2010

RESUMEN

El clásico tratamiento determinístico para la evaluación de distorsiones armónicas de corriente y tensión sólo permite tener una primera aproximación a la realidad, situación que ha llevado a que en los últimos años tomen fuerza evaluaciones probabilísticas, que si se hacen con rigor, proporcionan unos resultados más reales. Infortunadamente, muchas investigaciones y trabajos en esta dirección han estado cargados de determinación empírica de parámetros de distribuciones de datos, énfasis sólo en magnitudes de los armónicos, poco rigor en la verificación de las condiciones que debe cumplir un grupo de datos para esta evaluación, y suposiciones simplistas no siempre aceptables. En este artículo se presenta una revisión de este tratamiento probabilístico durante los últimos treinta años, y se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes que se han generado para tener unas mejores evaluaciones probabilísticas. Los principales resultados y conclusiones apuntan a que para hacer evaluaciones probabilísticas que arrojen resultados confiables deben satisfacerse las condiciones de estacionariedad, independencia de aportes y contar con un número grande de usuarios que estén inyectando corrientes armónicas a las redes. Especialmente crítico es el caso de la suposición que casi siempre se hace con respecto a que se tenga independencia de los datos de las componentes armónicas de corriente. Según la revisión efectuada, últimamente muchos autores cuestionan esta suposición y recomiendan ser cuidadosos al verificar el cumplimiento de este requerimiento.

Palabras clave: armónico, estacionalidad, evaluación determinística, evaluación probabilística, independencia, distorsión.

A REVIEW ABOUT FEASIBLE SOLUTIONS FOR BEST PROBABILISTIC EVALUATION OF HARMONICS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

ABSTRACT

Deterministic approach to carry out a probabilistic evaluation of levels of distortion of currents and harmonic voltages in the power systems has some problems associated, principally, with a first approach to reality, emphasis in magnitudes and empirical determination of various parameters. For these reasons in recent years a great number of works and investigations deal with probabilistic aspects of harmonics and stochastic evaluations of them. These evaluations must comply with three necessary conditions: Evaluations must comply with central limit theorem (a great number of users), stationary and independence in data of different users. These paper present a detailed review about probabilistic aspects of electric harmonics and conclusions and recommendations for best results.

Keywords: harmonic, stationary, independence, deterministic evaluation, probabilistic evaluation, distortion.

* Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Automatización de Procesos Industriales. Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes. Profesor del Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle. Correo electrónico: lcorrea@unisalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los armónicos, en el contexto de la ingeniería eléctrica, son corrientes y voltajes que tienen una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental con que normalmente se genera, transmite, transforma y distribuye la energía eléctrica. Los armónicos son originados por cargas eléctricas de naturaleza no lineal (electrónica de potencia, hornos de arco y equipos de soldadura), y en las instalaciones eléctricas originan una gran cantidad de problemas que van desde pérdidas por calentamiento, mala operación de dispositivos y daño en equipos. A lo largo de estos últimos treinta años se han desarrollado importantes trabajos de investigación y se han tenido importantes contribuciones relacionadas con su conceptualización (Rice, 1986; Stratford, 1980; Cameron, 1993; Toth y Velásquez, 1986; Guerin et ál., 1998; Mendis y González, 1992); los problemas que ocasionan (Wagner, 1993); la normalización para mitigación y control (IEEE, 1992; Key y Lai, 1993; Duffey y Stratford, 1989; Correa, 2002); el modelamiento de la problemática (Hiyama et ál., 1998; Thunberg y Soder, 1998; Thunberg y Soder, 1999) y diferentes metodologías de estudio (Ma y Girgis, 1996; Ribeiro, 1992; McGranaghan et ál., 1984; Lamedica et ál., 1997; Heydt et ál., 1991; Cortés et ál., 2008). Todo el trabajo que se ha realizado hasta la fecha ha permitido ganar una gran cantidad de conocimiento y experiencia que se ha orientado, obviamente, a buscar soluciones para los problemas que se ocasionan en los sistemas de potencia y de distribución.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la literatura técnica sobre armónicos en sistemas eléctricos existe un gran número de trabajos (Williams y Brownfield, 1993; Yan et ál., 1994; Xu, 2003; Duffey y Stratford, 1989; González y McCall, 1987) que recomiendan usar herramientas computacionales para estudiar, analizar e inferir conclusiones

importantes sobre la naturaleza y dinámica del problema de los armónicos en estos sistemas, pero desafortunadamente, una gran parte de la experiencia que se ha tenido ha hecho uso de programas determinísticos, cuyos resultados difieren grandemente de las mediciones efectuadas sobre las instalaciones y que solamente permiten identificar tendencias en los porcentajes totales de distorsión de corrientes y voltajes armónicos en escasos escenarios de simulación. Varias razones explican estas diferencias: los programas empleados hacen uso de modelos simplificados de equipos y componentes; se usan espectros determinísticos preestablecidos para las fuentes de corriente; se parte de la suposición de considerar las fuentes de corrientes armónicas con la misma fase (Cavallini et ál., 1994; Caramia et ál., 2002; Ghezelayah y Gosbell, 2000) (escenario del peor caso). Es por las razones anteriores que la confiabilidad de los resultados de estos programas es baja y éstos pueden usarse para tener una primera aproximación a un entendimiento más completo del impacto de las cargas no lineales sobre la red de distribución.

Además de considerar valores fijos para las fuentes de inyección de corrientes armónicas (sólo pocas cargas constantes tienen este comportamiento), los programas determinísticos mencionados anteriormente no permiten la modelación de la incertidumbre en los valores de las magnitudes y ángulos de las fuentes de corrientes y voltajes armónicos.

Lo anteriormente expuesto refleja la presencia de un problema, dado que los resultados llevan sólo a tener una primera aproximación a la problemática que los armónicos ocasionan en las instalaciones. Además de lo comentado, la experiencia ganada y el conocimiento generado hasta la fecha han dado cuenta de la naturaleza aleatoria de los armónicos y ponen de manifiesto la aparición de diversas fuentes de incertidumbre que ocurren con su tratamiento. En el contexto anterior, en los últimos años

ha habido importantes contribuciones tendientes a obtener unas evaluaciones probabilísticas (con procedimientos analíticos y con el uso de software) para poder contar con resultados más confiables. Las evaluaciones probabilísticas con procedimientos analíticos presentan el inconveniente de aplicar a instalaciones o situaciones muy sencillas, mientras que las evaluaciones probabilísticas apoyadas con el uso de software (técnica de simulación de Monte Carlo, por ejemplo) necesitan satisfacer las condiciones de estacionariedad, independencia de aportes y cumplimiento del teorema central del límite. La no satisfacción de estas condiciones lleva a obtener unos resultados no enteramente confiables (si bien estos resultados puedan lograr un mayor acercamiento a la realidad, comparados con los obtenidos con procedimientos determinísticos). Además de las condiciones referidas, en el tratamiento probabilístico de los armónicos están involucrados otros términos y situaciones importantes como son la atenuación (Maswood y Jun, 2003), la agregación de carga, la diversidad, etc.

El presente artículo está enfocado en la revisión de los aspectos probabilísticos más importantes que se involucran en su tratamiento, con la finalidad de solucionar la problemática presentada. Luego de una revisión, que cubre los últimos treinta años, se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes a tener en cuenta en la evaluación probabilística de los armónicos eléctricos.

SOLUCIONES PLANTEADAS

Los primeros trabajos de investigación advirtiendo sobre la naturaleza aleatoria de los armónicos en sistemas de potencia se dan en la década de los setenta (Sherman, 1972; Rowe, 1974); sin embargo, el trabajo profundo en aspectos probabilísticos comienza en la década de los ochenta.

A mediados de la década de los ochenta Emmanuel y Kaprielian (1986) publican un trabajo en donde concluyen que en las instalaciones de los usuarios se pueden identificar ciertas periodicidades y patrones de comportamiento de la carga, que influyen en el comportamiento de los armónicos; es decir, se pueden identificar periodicidades, patrones de comportamiento y tendencias similares a los que presenta la carga en general. La duración de estos periodos, patrones y tendencias depende del número de usuarios y de la naturaleza de la carga. Como aporte de interés, mencionan que el conocimiento de la función de distribución acumulada de probabilidad, para cada armónico, permite predecir el efecto de los mismos en las pérdidas eléctricas y en la pérdida de vida útil de los componentes de la instalación.

En el año siguiente Baghzous y Tan (1987) hacen una propuesta para el modelamiento determinístico y probabilístico de las corrientes y voltajes armónicos. En la propuesta primero se clasifican las cargas no lineales en cuatro categorías y se determinan las distribuciones de probabilidad de los armónicos de corriente y voltaje de cada una de ellas. En el método formulan las ecuaciones matriciales relacionadas con las inyecciones de corrientes armónicas involucrando las funciones de densidad de probabilidad, pero advierten que la solución analítica es complicada por lo que se debe recurrir a técnicas computacionales. El artículo publicado establece que prácticamente cualquier función de distribución de probabilidad puede obtenerse con base en manipulaciones sobre la distribución uniforme.

A comienzos de la década de los noventa se publican dos artículos (Emmanuel et ál., 1991; Emmanuel et ál., 1993) en donde se examinan los voltajes y corrientes armónicas en las subestaciones y puntos de conexión de usuarios en circuitos de distribución de media tensión.

En el trabajo de Emmanuel et ál. (1991) (relacionado con corrientes y tensiones armónicas en cabeceras de circuitos, en subestaciones) se hacen monitoreo sobre cinco alimentadores, con tiempo total de monitoreo de una semana). El trabajo establece los siguientes resultados significativos:

- Los armónicos de orden superior presentan distribuciones multimodales (no estacionariedad) atribuibles a energización/desenergización de bancos de condensadores o a grandes cargas que permanecen energizadas/desenergizadas durante tiempos prolongados.
- Los armónicos de corriente de orden 3 y 5 fluyen desde el usuario hacia el sistema de potencia durante el día y fluyen desde el sistema de potencia hacia el usuario durante la noche.
- El máximo nivel de distorsión en corriente se registró en un alimentador en la noche de un fin de semana (baja demanda), cuando el quinto armónico alcanzó un 9,3% de la fundamental. Con gran demanda, el mismo quinto armónico cayó al 3,8%.
- En los alimentadores examinados, el 99% del tiempo el porcentaje de distorsión de corriente estuvo por debajo del 2%.

En el trabajo de Emmanuel et ál. (1993) (relacionado con usuarios comerciales e industriales) los autores registran las distribuciones de los datos y caracterizan su comportamiento estocástico con ayuda de los estadísticos básicos (máximo, media, mínimo). El trabajo llega a lo siguiente:

- Se encontró que el 99% del tiempo el porcentaje de distorsión de tensión estuvo por debajo del 5%.
- En tensión, el armónico dominante fue el quinto (en un edificio comercial) con una magnitud máxima de 2,2%, seguido del tercero, con 1,54%, en un supermercado.

- Los porcentajes de distorsión de corriente varían grandemente entre usuarios. Máximo el 30% en un taller y el mínimo en un supermercado, con porcentaje de distorsión de corriente inferior al que establece la norma IEEE-519 como límite.
- Los usuarios industriales superan levemente los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se detectó un incremento importante del tercer armónico de tensión, desde el 0,25% en el trabajo de 1991 a más del 1% en el trabajo de investigación de ese año (1993).

Otra información interesante que se muestra en este último trabajo de Emmanuel et ál. (1993) es que:

- El intervalo de variación del ángulo aumenta con el aumento del orden del armónico (h mayor que 11). Para armónicos de menor frecuencia (h menor que 7) el ángulo de fase está distribuido en un intervalo menor.
- Aparecen distribuciones bimodales (condiciones no estacionarias) debido a que se consideran los fines de semana.

A mediados de la década de los noventa Wang et ál. (1994) presentan una propuesta metodológica para analizar el comportamiento asintótico de la suma de corrientes aleatorias de cargas no lineales. Ellos estudiaron y vieron que cuando el número de fuentes de corrientes armónicas es suficientemente grande, y en virtud al teorema central del límite, la función de distribución resultante de la suma vectorial (considerando magnitud y ángulo) de las corrientes armónicas en los diferentes nodos de una instalación se aproxima a una distribución normal conjunta (dos variables). El trabajo de estos investigadores se centra en la determinación de los parámetros de esta distribución y en una comparación con los mismos parámetros obtenidos mediante una simulación de Monte Carlo. Los resultados muestran unos resultados satisfactorios cuando N es grande ($N > 5$).

Por esta misma época surgen varios investigadores italianos que en adelante harán contribuciones importantes en el tema del tratamiento probabilístico de los armónicos. Uno de los primeros trabajos de Cavallini et ál. (1994) comienza estableciendo que la premisa de asumir todas las corrientes armónicas con la misma fase (evaluación del peor caso) es conservativa y que evaluaciones más realistas se pueden hacer con las funciones de densidad de probabilidad de las corrientes y fases. De esta forma, entonces, la evaluación de los niveles de armónicos se reduce al estudio de las propiedades estadísticas de las sumatorias resultantes. Técnicas existentes para lograr lo anterior, según estos autores, son las de Monte Carlo, convolución, aplicación del teorema central del límite y el uso de procedimientos simplificados con consideraciones semiempíricas.

El trabajo se centra en criticar la primera propuesta semiempírica de 1976 debida a Lemoine (1976), en la que se recurre a un parámetro empírico para ajustar las distribuciones de los datos de las sumatorias de corrientes armónicas. Este método, sin embargo, presentaba un ajuste muy bajo respecto de lo que se observaba en el mundo real. Un refinamiento del procedimiento anterior se debe al trabajo de Crucq y Robert (1989), quienes recurrieron a dos parámetros para ajustar la relación entre los valores observados en varias ramas de una instalación, respecto de la sumatoria de las mismas. El método probó ser más exacto que el primero de Lemoine, pero con la desventaja de que necesita validación, al estar basado en consideraciones semiempíricas.

En el artículo se hace una comparación entre los resultados obtenidos con la aproximación anterior, la de Crucq y Robert, y técnicas de simulación de Monte Carlo, ambos aplicados sobre instalaciones de plantas industriales.

Para profundizar en la aproximación de Crucq y Robert de 1989, ésta asume distribuciones uniformes

y normales y parte de la hipótesis de que se tienen distribuciones idénticas en las magnitudes y fases de las componentes que se quieren sumar.

Otros aspectos de interés en la aproximación tienen que ver con el hecho de que si el ángulo de disparo de la electrónica de potencia de los dispositivos se mantiene constante, las magnitudes sí se pueden sumar con la misma fase y la función de distribución tenderá a ser gaussiana o normal. Si los ángulos de disparo se incrementan y el orden de los armónicos también lo hace, entonces las fases varían y ya no se puede hacer lo mismo, y la distribución tiende a parecerse más a una distribución tipo Rayleigh. Los resultados, en todo caso, muestran que el modelo simplificado funciona aceptablemente cuando las cargas son parecidas en tamaño (carga uniforme). En otras circunstancias no funciona la aproximación.

Hacia mediados de los años noventa Chen et ál. (1995) presentan un trabajo cuyo enfoque es el desarrollo de una solución integrada que permita estimar la polución armónica y eliminar datos erráticos de armónicos al momento de hacer un procesamiento de la información con que se cuenta. El artículo que publican discute la aplicación de diferentes métodos estadísticos para eliminar esta información errática y describe la tecnología del momento para la medición de armónicos. Ellos llegan a ser propositivos, en el sentido de plantear que se incorporen estadísticos en la aplicación de la norma IEEE-519 de 1992.

En una parte del trabajo recalcan la característica de no estacionariedad de las componentes armónicas de los usuarios (algo que ya se había puesto de manifiesto en Emanuel et ál. (1991) y Emanuel et ál., (1993), pero sugieren que una estimación estadística sea agregada a la norma.

También hacia mediados de los noventa Cavallini et ál. (1995) publican un nuevo artículo con importantes conclusiones y recomendaciones:

- Según estos autores, las distribuciones de los datos de las series de tiempo asociadas con las componentes real e imaginaria de las corrientes armónicas son, en general, no estacionarias. Esto hace que las herramientas propuestas en la literatura para determinar las funciones de densidad de probabilidad de la suma de componentes imaginarias puedan resultar inexactas.
- Otros aspectos de interés que critican es que con frecuencia se asume, para evitar el uso de funciones de distribución de probabilidad conjunta o multidimensionales, que las componentes real e imaginaria de las corrientes de las fuentes son independientes y que los datos son estrictamente estacionarios. Cuando los datos son estacionarios la media y la varianza son constantes con el tiempo.
- Los autores también encontraron que las corrientes armónicas de bajo orden tienen unas componentes estacionales importantes superpuestas a componentes aleatorias con baja varianza, y que cuando el orden del armónico se incrementa, la varianza de las componentes aleatorias aumenta.
- El aspecto propositivo del trabajo es que recomiendan un enfoque mixto probabilístico-determinístico para obtener unos resultados más precisos. Según ellos, una distribución de probabilidad se puede descomponer en dos componentes: una determinística que resulta del ajuste de los datos a una curva (usualmente un polinomio de grado dos) y una componente totalmente estocástica, que resulta de la diferencia entre la original y la componente determinística anterior.

Más tarde, Cavallini et ál. (1997) vuelven nuevamente a publicar un trabajo relacionado con evaluación probabilística de armónicos en sistemas eléctricos. En esta ocasión comienzan mencionando que gran parte del trabajo desarrollado hasta esa fecha se ha basado en la suposición fundamental de que las corrientes armónicas inyectadas en los diferentes

nodos de una red son estocásticamente independientes, lo cual lleva a que los datos de las sumatorias resultantes tengan una distribución multinormal con componentes ortogonales. Esto lleva a una distribución de probabilidad de la resultante que es unimodal y que en muchos casos puede ser aproximada a una distribución chi-cuadrado. Mediciones en media y alta tensión lo confirman.

Hacia mediados de 1998 se presenta un aporte de IEEE (1998), concretamente de un importante grupo de trabajo en aspectos probabilísticos de armónicos, subgrupo de trabajo del comité de distribución y transmisión de potencia. En el trabajo en cuestión se mencionan los tipos de errores que se pueden presentar en el procesamiento de información capturada con medidores y procesada mediante la transformada rápida de Fourier. Después de mencionar las condiciones (que la frecuencia de muestreo sea alta; que se satisfaga el teorema de muestreo; que la señal sea estacionaria; que el número de períodos de muestreo sea entero y que la onda no tenga interarmónicos) con las cuales se tiene un buen procesamiento, se pasa a mencionar los posibles errores en que se puede incurrir: *aliasing* (solapamiento), atraso y aparición de componentes armónicas en las vecindades de las componentes relevantes.

En cuanto a la caracterización que se debe hacer de la información, establece algunas recomendaciones interesantes:

- Se pueden identificar algunos patrones generales o tendencias. Si esto ocurre, es síntoma de que existe una componente determinística. De ser así lo recomendable es expresar la señal como una suma de dos componentes: una determinística y una aleatoria.
- Si la señal es completamente aleatoria, entonces la suposición fundamental sobre un comportamiento con distribución normal es correcta.

- Cuando hay varios picos e irregularidades (varios modos) en la función de densidad de probabilidad, estas son debidas a componentes determinísticas y por consiguiente se tiene no estacionariedad.
- La componente determinística se puede hallar mediante el ajuste de la señal original a un polinomio (es recomendable que sea de bajo orden).

El trabajo sobre aspectos probabilísticos de armónicos en los últimos siete años se puede resumir de la siguiente forma:

Comenzando el siglo XXI BaSudan y Hegazy (2001) presentan un método para analizar el comportamiento probabilístico de armónicos que varían en forma aleatoria. Primero desarrollan un modelo probabilístico y después se formulan las funciones de densidad de probabilidad de las componentes real e imaginaria de las corrientes. Al final se presentan unos resultados de simulación.

El trabajo comenta que aún en ese año, 2001, se siguen haciendo estudios de armónicos con enfoques determinísticos porque la exactitud de estos enfoques son representativos de los componentes y cargas, pero cuando las cargas varían en forma fluctuante, estos enfoques fallan y los enfoques probabilísticos son más realistas.

El trabajo hace un análisis detallado de las magnitudes y ángulos de las corrientes armónicas producidas por los convertidores en función del ángulo de disparo de la electrónica de potencia y de la resistencia interna del convertidor. Comentan entonces que las partes imaginaria y real de estas corrientes están en función de la variable aleatoria ángulo de disparo y por consiguiente llegan a ser variables aleatorias también.

Después de esta formulación se concentran en hacer la sumatoria de estas corrientes en un nodo y establecen que, por el teorema central del límite, la suma de las componentes imaginaria y real también sigue distribuciones de probabilidad normal (que se caracteriza por tener una media y una varianza) si se considera el ángulo de disparo con distribución uniforme.

En el trabajo de Caramia et ál. (2002) están interesados en un índice probabilístico armónico que trate de cuantificar el efecto térmico sobre máquina rotatoria. En unos apartes del trabajo consideran la parte probabilística del comportamiento de los armónicos. Según estos autores:

- El ángulo de fase de los armónicos ejerce una gran influencia (cambia la forma de onda y por consiguiente el valor pico).
- Los ángulos de fase varían en grandes rangos (principalmente los de orden superior).
- La tradicional suposición con valores del peor caso (todos los armónicos en fase) producen unos resultados excesivamente conservativos.
- Índices que incluyan el valor pico de corrientes y tensiones implícitamente están teniendo en cuenta amplitud y ángulo de los armónicos.

En años más recientes (Chen et ál., 2003; IEEE, 2002) publican un trabajo interesante que se centra en el análisis probabilístico de las distorsiones de corrientes y tensiones observadas en el sistema eléctrico de un sistema masivo de transporte sujeto a cambios drásticos de carga, en virtud a la naturaleza dinámica de su operación.

Los autores proponen un algoritmo para efectuar este análisis consistente en tres etapas bien definidas: en la primera se hace una simulación de la operación del sistema masivo de transporte con el objetivo de identificar sus estados más representativos; la segunda

tiene que ver con la ejecución de flujos de carga AC (corriente alterna) y DC (corriente continua) en el sistema eléctrico; y la tercera es el análisis de flujo de carga armónico estocástico como tal. En este último se parte de unos valores medios de las corrientes armónicas inyectadas, junto con su desviación estándar. El objetivo es determinar los valores esperados de porcentajes de distorsión de corrientes y tensiones en todos los nodos y ramas del sistema eléctrico, conjuntamente con sus intervalos de confianza asociados.

También en el 2003, Ribeiro introduce el concepto de espectro de evolución en el cual hace una analogía entre las funciones de densidad de probabilidad de los armónicos y el espectro de energía de las señales. Una recomendación importante de este autor está relacionada con el hecho de que considerar sólo la magnitud de los armónicos puede llevar a que se impongan limitaciones severas y mala interpretación del fenómeno.

En el trabajo de Carpinelli et ál. (2003) los autores tratan aspectos probabilísticos de armónicos. Los aportes están enfocados en lo siguiente:

- Las funciones de densidad de probabilidad de los porcentajes totales de distorsión de corrientes y tensiones pueden tener muchas formas y no hay una regla general para seleccionar una función de densidad que se ajuste lo mejor posible (gaussiana, uniforme, normal). Muchas han sido probadas para lograr la mejor aproximación, pero ninguna de estas puede ser aplicada en forma general.
- Las funciones de densidad de probabilidad de los porcentajes de distorsión totales de corrientes y tensiones pueden tener patrones monomodales y multimodales (generalmente bimodales).
- Cuando los periodos de monitoreo son amplios (por ejemplo una semana) las desviaciones estándar pueden ser altas (alta variabilidad).

Finalmente, Baghzous (2005) resume los aspectos probabilísticos que se deben contemplar en el estudio y análisis de los armónicos cuando varían con el tiempo:

- La resultante de distorsiones de tensión en un nodo (cuando hay varias contribuciones de corriente) puede obtenerse por la suma de los efectos de cada componente.
- Procedimientos analíticos para análisis probabilístico de armónicos están restringidos a casos muy básicos y sencillos.
- El procedimiento de simulación de Monte Carlo es la herramienta preferida a otros métodos por su simplicidad. Se convierte en la mejor selección en situaciones prácticas.
- Se pueden asumir funciones de densidad de probabilidad normales si la señal es aleatoria y no contiene componentes determinísticas.
- Asumir distribuciones uniformes para los ángulos lleva a distorsiones de corriente que son más bajas que si se consideran todas las fases de los armónicos con el mismo ángulo.
- En situaciones reales la distorsión de tensión no sobrepasa un porcentaje bajo (del orden del 3 al 4%). En estas condiciones se puede asumir que las fuentes de armónicos de corriente no se ven afectadas por los armónicos de tensión resultante.

CONCLUSIONES

En resumen, se puede decir lo siguiente respecto del estado del arte del tratamiento probabilístico de los armónicos en sistemas de distribución de potencia eléctrica:

- Varias investigaciones (Emmanuel y Kaprielian, 1986; Emmanuel et ál., 1991; Chen et ál., 1995; Cavallini et ál., 1995; Carpinelli et ál., 2003) han confirmado que los armónicos tienen un comportamiento no estacionario, razón por la cual

la simple observación de la distribución de sus datos puede contener patrones o tendencias, y sus funciones de densidad de probabilidad son bimodales o multimodales.

- Un aspecto interesante en la evaluación probabilística de armónicos eléctricos es que varios trabajos han encontrado que algunos comportamientos dominantes, identificados como de mediciones (Toth y Velásquez, 1986), deben ser considerados con gran interés cuando se trata de ver sus niveles y su propagación (Xu, 2003) o cuando se modelan las componentes de la red de distribución (Ribeiro, 1992).
 - En cuanto al algoritmo para la determinación del flujo de corrientes armónicas Xu (2003) menciona el hecho de que después de varios años de estar usándose, la técnica no iterativa (considerar los armónicos como inyecciones de corriente) ha mostrado ser efectiva en la producción de resultados confiables. El cuidado que se debe tener con la aplicación de esta técnica es cuando se tienen condiciones parciales de carga, distorsiones de tensión excesiva o condiciones desequilibradas de la red (Xu, 2003).
 - Emmanuel et ál. (1993) y Baghzous (2005) confirman el hecho de que los porcentajes de distorsión de tensión no sobrepasan el 5% en el 99% del tiempo total de captura de información. En estas condiciones las fuentes de armónicos de corriente no se ven afectadas por los armónicos de tensión resultante.
 - Para la sumatoria de corrientes desde diferentes ramas, hay consenso en la comunidad científica de que siguen una función de densidad normal (Lamedica et ál., 1997; BaSudan y Hegazy, 2001; Xu, 2003).
 - Para las fuentes de armónicos, si la señal es completamente aleatoria, diversos trabajos han confirmado que se puede usar la función de distribución normal (IEEE, 1998; Baghzous, 2005).
- ## RECOMENDACIONES
- Para la evaluación probabilística de armónicos diversos trabajos (Baghzous y Tan, 1987; Baghzous, 2005; Cavallini et ál., 1995) consideran que la técnica de simulación de Monte Carlo es la preferida por presentar resultados reales y por su sencillez de implantación. Si bien se han hecho esfuerzos importantes por desarrollar una metodología analítica (Chen et ál., 2003; Guerin et ál., 1998) varios autores concuerdan en su gran dificultad de implantación (Baghzous y Tan, 1987) y en que estos serían aplicables a casos básicos sencillos (Baghzous, 2005).
 - En cuanto al modelamiento probabilístico con técnicas de simulación de Monte Carlo, diversos trabajos (Baghzous y Tan, 1987; Wang et ál., 1994; Cavallini y Montanari, 1997; IEEE, 1998; Xu, 2003) han sido críticos con el hecho de que se asuma independencia (correlación baja o nula) en las componentes de las corrientes armónicas cuando se trata de ver su efecto neto en un nodo. Esto pone en entredicho, según estos trabajos, la aplicación del método de simulación de Monte Carlo para la evaluación, ya que éste debe aplicarse cuando se tiene estacionariedad e independencia en las corrientes armónicas. De no cumplirse estas dos condiciones los procedimientos que se usen deben considerarse como simplificados y funcionan cuando las cargas son parecidas en tamaño (Cavallini et ál., 1995). No tener estacionariedad es indicio de tener componentes determinísticas. Evaluaciones bien precisas de niveles de armónicos deben considerar entonces unos tratamientos híbridos determinísticos/probabilísticos (Cavallini et ál., 1995; Cavallini y Montanari, 1997).
 - Hay consenso en cuanto a que se debe considerar el ángulo de las corrientes armónicas en un análisis probabilístico porque de no ser así se producen unos resultados conservativos

(Cavallini et ál., 1994; Caramia et ál., 2002; Ghezlayah y Gosbell, 2000). Diversos trabajos concuerdan en la gran variabilidad de los ángulos de las corrientes armónicas (Emmanuel et ál., 1993; Caramia et ál., 2002) y algunos proponen el uso (en simulaciones de Monte Carlo) de funciones de densidad de probabilidad uniforme (BaSudan y Hegazy, 2001; Baghzous, 2005) para el ángulo de los armónicos de corriente.

- Con el propósito de encontrar resultados más realistas, otras preocupaciones que tienen que ver con el ángulo son las concernientes a su influencia en la forma de onda (Caramia et ál., 2002) y en lo concerniente a la diversidad (Maswood y Jun, 2003) la cual puede incidir en la cancelación parcial de armónicos.
- En la modelación de componentes ha habido importantes contribuciones (Ribeiro, 1992; Guerin

et ál., 1998; Lamedica et ál., 1997; Thunberg y Soder, 1998) encontrándose que en este campo todavía se pueden hacer contribuciones adicionales para obtener unos mejores resultados. Un enfoque interesante en el tratamiento de los modelos es el que propone Ribeiro (1992), orientado a estudios de penetración de armónicos con modelos simples pero realistas que consideren con gran atención las características dominantes de la red.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo está asociado con la tesis de maestría “Flujo probabilístico de armónicos para evaluación del THDv y THDi en circuitos industriales de media tensión” desarrollada en la Universidad de los Andes entre los años 2007 y 2008, con apoyo financiero de la Universidad de La Salle.

REFERENCIAS

- Baghzous, Y. (2005): “An overview on probabilistic aspects of harmonics in power systems”. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 3. 2394-2396.
- Baghzous, Y. y Tan, O. (1987): “Probabilistic Modeling of Power System Harmonics”. *IEEE Transactions on Industry Applications IA-23*. 1. 173-180.
- BaSudan, O. y Hegazy, Y. (2001): “Probabilistic Modeling of Distribution System Loads for Harmonic Studies”. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. 3. 1778-1781.
- Cameron, M. (1993): “Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volumen 29. 1 60-65.
- Caramia, P. et ál. (2002): “An Integrated Probabilistic Harmonic Index”. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. 2. 1084-1089.
- Carpinelli, G. et ál. (2003): “Some Considerations on Single Site and System Probabilistic Harmonic Indices for Distribution Networks”. *IEEE Power Engineering Society Meeting*. 2. 1165.
- Cavallini, A. et ál. (1994): “Evaluation of Harmonic Levels in Electrical Networks by Statistical Indexes”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volumen 30. 4 1116-1126.
- Cavallini, A. et ál. (1995): “Stochastic evaluation of harmonics at network buses”. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 10. 3 1606-1613.
- Cavallini, A. y Montanari, G. (1997): “A deterministic/stochastic framework for power system harmonic

- modeling". *IEEE Transactions on Power Systems*. Volumen 12. 1 407-415.
- Chen, C. et ál. (2003): "Stochastic harmonic analysis of mass rapid transit power systems with uncontrolled rectifiers". *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. 150. 224-232.
- Chen, M. et ál. (1995): "Statistical Standards and Pollution Estimation of Harmonics in a Power System". 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery. IEEE. *Proceedings of EMPD apos; 1995*. 2 21-23. 662-667.
- Correa, L. (2002): "Metodología propuesta para la implantación de la norma IEEE 519 en el medio industrial colombiano". *Revista de Investigación*, Departamento de Investigaciones, Universidad de La Salle. Volumen 2. 2 49-56.
- Cortés, A. et ál. (2008): "Comparación de cuatro metodologías para la estimación de fuentes armónicas desconocidas en redes industriales usando pocas mediciones". *Revista de Investigación*, Departamento de investigaciones, Universidad de La Salle. Volumen 7. 2 261-275.
- Crucq, J. y Robert, A. (1989): "Statistical approach for harmonic measurement and calculation". *CIREL*. Volumen 2. 2 91-96.
- Duffey, C. y Stratford, R. (1989): "Update of Harmonic Standard IEEE 519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volumen 25. 6 1025-1034.
- Emanuel, A. et ál. (1991): "A survey of Harmonic voltages and currents at distribution substations". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 6. 4 1883-1890.
- Emanuel, A. et ál. (1993): "A survey of Harmonic voltages and currents at the customer's bus". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 8. 1 411-421.
- Emanuel, A. y Kaprielian, S. (1986): "Contribution to the theory of stochastically periodic harmonics in power systems". *IEEE Transactions on Power Delivery PWRd-1*. 3. 285-293.
- Ghezelayah, M. y Gosbell, V. (2000): "Harmonic modeling of distortion loads on distribution feeders and in a large power systems". *Proceedings of the 5th International Conference in Power Systems Control, Operation and Management, APSCOM 2000*. 96-100.
- González, D y McCall, J. (1987): "Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems". *IEEE Transactions on Industry Applications, IA-23*. 3. 504-511.
- Guerin, P. et ál. (1998): "Stochastic Study of Line Harmonic Currents Produced by rectifiers". *Mathematics and computers in simulation*. 46. 387-396.
- Heydt, G. et ál. (1991): "A Methodology for Assessment of Harmonic Impact and Compliance with Standards for Distribution Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 6. 4 1748-1754.
- Hiyama, T. et ál. (1998): "Distribution System Modeling with Distributed Harmonic Sources". *IEEE Transaction on Power Delivery*. Volumen 4. 2 1297-1304.
- IEEE Probabilistic Aspects Task Force of the Harmonics Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. (1998): "Time-Varying Harmonics: Part I-Characterizing Measured Data". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 13. 3 938-944.
- IEEE Probabilistic Aspects Task Force of the Harmonics Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. (2002): "Time Varying Harmonics: Part II-Harmonic Summation and Propagation". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 17. 1 279-285.

- IEEE Standard Board. (1992) *IEEE Standard 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems*. NJ: Piscataway. 1-93.
- Key, T. y Lai, J. (1993): "Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power Systems". *IEEE Transactions on Industry Applications* Volumen 29. 4 312-318.
- Lamedica, R. et ál. (1997): "A model of Large load areas for harmonic studies in Distribution Networks". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 12. 1 418-425.
- Lemoine, M. (1976): "Quelques aspects de la pollution des reseaux par les distorsion harmonique de la clientele". *Revue General de Electricité*. Volumen 85. 3 247-255.
- Ma, H. y Girgis, A. (1996): "Identification and tracking of harmonic sources in a power system using Kalman filter". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 11. 3 1659-1665.
- Maswood, A. y Jun, Z. (2003): "Attenuation and Diversity Effect in Harmonic Current Propagation Study". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 3. 1480-1485.
- McGranaghan, M. et ál. (1984): "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Volumen 103. 12 3663-3671.
- Mendis, S. y González, D. (1992): "Harmonic and Transient Over voltage Analyses in Arc Furnace Power Systems". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volumen 28. 2 336-342.
- Ribeiro, P. (1992): "Guidelines on distribution system and load representation for harmonic studies". *V International Conference on Harmonics in Power Systems*. 272-280.
- Ribeiro, P. (2003): "A novel way for dealing with time-varying harmonic distortions: the concept of evolutionary spectra". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2. 1153.
- Rice, L. (1986): "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components". *IEEE Transactions on Industry Applications IA-22*. 1. 161-179.
- Rowe, N. (1974): "The Summation of randomly varying phasors or vectors with particular reference to harmonic level". *IEE Conf. pub.* 110. 177-181.
- Sherman, W. (1972): "Summation of harmonics with random phase angles". *Proceedings IEE 1972*. 119. 11 1643-1648.
- Stratford, R. (1980): "Rectifier Harmonics in Power Systems". *IEEE Transactions on Industry Applications IA-16*. 2. 271-275.
- Thunberg, E. y Soder, L. (1998): "A Harmonic Norton Model of a Real Distribution Network". *8a International Conference on Harmonic and Quality of Power, ICHQP'98, IEEE/PES* 1. 279-284.
- Thunberg, E. y Soder, L. (1999): "A Harmonic Norton Model of a Real Distribution Network". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 14. 1 272-277.
- Toth, J. y Velásquez, D. (1986): "Benefits of an Automated On-Line Harmonic Measurements System". *IEEE Transactions on Industry Applications IA-22*. 5. 952-963.
- Wagner, V. (1993): "Effects of Harmonics on Equipment, Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 8. 2 672-680.
- Wang, Y. et ál. (1994): "Summation of Harmonic currents produced by AC/DC static power converters with randomly fluctuations loads". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 9. 2 1129-1135.

Williams, S. et ál. (1993): "Harmonic Propagation on an Electric Distribution System: field measurements compared with computer simulation". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volumen 8. 2 547-552.

Xu, W. (2003): "Status and future directions of power system harmonic analysis". *IEEE Power Engineering General Meeting Proceedings*. 2. 178-184.

Yan, Y. et ál. (1994): "Harmonic Analysis for Industrial Customers". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volumen 30. 2 462-467.