

COMPONENTES ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICAS

Conceptos, norma vigente en Chile y alternativas de solución al problema

*Francisco Acevedo Donoso **

Introducción.

Normalmente se cometen errores al utilizar términos como “Calidad de Servicio Eléctrico” y “Componentes Armónicas en redes Eléctricas”, debido a que encierran variados conceptos y definiciones, los cuales serán abordados en el presente trabajo. Luego, dentro de este conocimiento, al estudiar las perturbaciones eléctricas, es importante introducir algunas nociones para entender el origen, el mecanismo de generación y la posible solución al problema armónico en instalaciones eléctricas.

La calidad de servicio es el conjunto de propiedades y estándares normales que, conforme a la ley y el reglamento vigentes, son inherentes a la actividad de distribución de electricidad concesionada, y constituyen condiciones bajo las cuales dicha actividad debe desarrollarse.

La utilización de energía eléctrica requiere un suministro de potencia con frecuencias y tensiones controlables, mientras que su generación y transmisión se realizan a niveles nominalmente constantes.

Esta discrepancia necesita un acondicionamiento o conversión de la potencia que, en general, se realiza mediante circuitos no lineales. Estos circuitos están constituidos por semiconductores que distorsionan las ondas de tensión y corriente.

El comportamiento de circuitos con variaciones topológicas que afectan a las formas de onda no pueden ser analizados mediante la teoría fasorial de frecuencia única, se aplica la transformada de Fourier para representar este fenómeno. En estos casos, el estado estacionario es una sucesión de estados transitorios, cuyo estudio requiere de un modelo matemático representado con la herramienta antes mencionada.

Es importante conocer, antes de estudiar la importancia de estas perturbaciones presentes en las redes eléctricas, que los armónicos son los subproductos de la electrónica moderna, y se manifiestan especialmente donde hay un gran número de computadores, impresoras, motores de velocidad regulable, equipos médicos, ascensores y otros equipos que absorben corriente en forma de impulsos cortos. Estos equipos están diseñados para absorber corriente durante sólo una fracción controlada de la onda de tensión de alimentación. Esto provoca armónicos en la corriente de carga y, por ende, la distorsión de dicha onda de tensión, además el sobrecalentamiento de transformadores y conductores neutros y, en ocasiones, el disparo de interruptores automáticos.

Localizar el problema es relativamente fácil una vez que se conoce qué es lo que hay que buscar, y donde buscarlo. Normalmente, los síntomas de los armónicos no son precisamente sutiles, y existen procedimientos de medición para localizar estas anomalías.

Definición de calidad de servicio eléctrico.

De acuerdo a lo expresado en la introducción anterior, es necesario analizar el siguiente esquema básico:

De acuerdo al esquema anterior, podemos definir tres conceptos:

- Calidad del Producto Técnico: persigue analizar las características y nivel de la señal de voltaje en el punto de acoplamiento común, además de las perturbaciones, que a la vez se separan en tres: Variaciones rápidas de tensión (flicker), Variaciones lentas de tensión y Armónicas.
- Calidad del Servicio Técnico Prestado: persigue analizar, controlar y sancionar lo referente a cortes de suministro, frecuencia de las interrupciones y duración de éstas.
- Calidad de Servicio Comercial: busca dar plazos y cualidades de la atención por parte de la compañía generadora o distribuidora, para el cumplimiento de las solicitudes e información requerida por el usuario.
- El propósito de las guías y estándares, relacionados con la limitación de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, incluido en el punto de "Calidad del producto Técnico", puede resumirse en la necesidad de:
 - i) Controlar la distorsión de tensión y corriente a niveles que los equipos conectados al sistema puedan tolerar.
 - ii) Garantizar que los clientes reciban una tensión con una forma de onda adecuada a sus necesidades.
 - iii) Limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red.
 - iv) Asegurar que las armónicas no interfieran con otros sistemas, como por ejemplo en los sistemas telefónicos.

Definición del problema de armónicos.

Los armónicos son corrientes o tensiones cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la alimentación. Por ejemplo si la frecuencia fundamental es de 50 Hz, la segunda armónica será de 100 Hz, la tercera de 150 Hz, etc. Las armónicas son originadas por cargas no lineales que absorben corriente en impulsos bruscos, a diferencia de hacerlo suavemente en forma sinusoidal, como lo haría una carga resistiva pura. Estos impulsos crean ondas de corriente distorsionadas que originan a su vez corrientes de armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de distribución eléctrica.

Este fenómeno se manifiesta especialmente en los equipos provistos de fuentes de alimentación de entrada con condensadores y diodos, por ejemplo, computadores, impresoras y material electromédico.

Las causas eléctricas del fenómeno son que la tensión alterna de entrada, una vez rectificadas por los diodos, se utiliza para cargar un condensador de gran capacidad. Después de un semiperíodo, el condensador se carga al valor "peak" de voltaje de la onda sinusoidal, por ejemplo, a 332 V en una línea de alterna a 230 V. Entonces el equipo electrónico absorbe corriente de esta tensión continua para alimentar al resto del circuito.

Armónicos de corriente.

Un equipo puede alcanzar corriente hasta un mínimo regulado. Normalmente, antes que se alcance este límite el condensador se recarga hasta el valor de "peak" en el siguiente semiperíodo de la onda sinusoidal. Este proceso se repite una y otra vez. Básicamente, el condensador sólo absorbe un impulso de corriente durante la cresta de la onda; durante el tiempo restante de la misma, cuando la tensión es inferior al valor residual del condensador, éste no absorbe corriente. Normalmente las fuentes de alimentación con condensador y diodos que llevan incorporados los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. En las plantas industriales, por el contrario, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS).

Armónicos de tensión.

Una red de alimentación puede ser fuente indirecta de armónicas de tensión. La relación entre la corriente armónica absorbida por cargas no lineales y la impedancia de fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm, lo que provoca armónicas de tensión. La impedancia de fuente la constituyen el transformador de alimentación y los componentes de la línea.

Todas las cargas que compartan un transformador o una barra con fuente de carga de armónicas podrán ser afectadas por las armónicas de tensión producidas por los distintos componentes del sistema. Se da la irónica circunstancia de que un computador personal es particularmente sensible a las armónicas de tensión. El rendimiento de la fuente de alimentación por condensador y diodos depende críticamente de la magnitud del peak de la onda de tensión. Las armónicas de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de ese modo el peak de tensión. En el peor de los casos puede llegar a "resetearse" el computador a causa de la falla de alimentación.

En el entorno industrial, los motores de inducción y los condensadores para corrección del factor de potencia también pueden resultar gravemente afectados por las armónicas de tensión. Los condensadores de corrección del factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas de un sistema de distribución de corriente. Si la frecuencia resonante es coincidente con la frecuencia de la tensión armónica, la corriente armónica podrá aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de éstos. Luego, en caso de ocurrir esto la falla del condensador desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.

Clasificación de los armónicos.

Cada armónica tiene un nombre, frecuencia y secuencia. La secuencia se refiere al giro del foso con respecto a la fundamental (F), por ejemplo, en un motor de inducción, la armónica de secuencia positiva generaría un campo magnético que gira en la misma dirección que la fundamental. Una armónica de secuencia negativa giraría en forma contraria.

A continuación se indican las nueve primeras armónicas y sus efectos:

N o t a : Las Armónicas 2a, 4a, 6a, 8a, etc., desaparecen cuando las ondas son simétricas (típico para circuitos eléctricos).

Dependiendo de su secuencia y rotación, las armónicas presentan diferentes efectos:

- SECUENCIA (+): Rotación Directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.
- SECUENCIA (-) : Rotación Inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor.
- SECUENCIA (0) : No tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento. La secuencia de armónicas cero (múltiplos de la 3a) son llamados "Triplens".

Síntomas de contenido armónico en componentes de la red de distribución eléctrica.

Los síntomas de los armónicos suelen presentarse en el equipo de distribución de corriente que soporta las cargas no lineales. Estas son básicamente de dos tipos: monofásicas y trifásicas. En las oficinas predominan las cargas monofásicas no lineales, mientras que en el ámbito industrial las más extendidas son las cargas trifásicas.

1. Conductores neutros.

En condiciones normales, con una carga trifásica lineal equilibrada, las porciones fundamentales a 50 Hz de las corrientes de cada fase se anulan mutuamente en el conductor neutro.

En un sistema de cuatro conductores con cargas no lineales, ciertas armónicas impares denominadas “triplens” (múltiplos impares de los terceros armónicos: 3^o, 9^o, 15^o, etc.) no se anulan entre sí, sino que se suman en el conductor neutro. En sistemas con muchas cargas monofásicas no lineales, la corriente del neutro puede llegar a superar el valor de las corrientes de fase. En este caso, el peligro es un excesivo calentamiento, al no existir en el conductor neutro ningún interruptor automático que limite la corriente como ocurre en los conductores de las fases.

Una corriente excesiva en el conductor neutro puede provocar también caídas de tensión superiores a lo normal entre el conductor neutro y tierra en la toma de corriente a 230 V.

2. Interruptores automáticos.

Los interruptores magnetotérmicos ordinarios tienen un mecanismo de disparo que reacciona al calentamiento producido por la corriente del circuito. Dicho mecanismo está diseñado para responder al valor eficaz de la onda de corriente de manera que se dispare si se calienta demasiado. Este tipo de interruptor ofrece una mayor protección frente a sobrecargas por corrientes armónicas. Los interruptores automáticos electrónicos detectores de “peaks” reaccionan frente a estas elevaciones de corriente.

Como el valor de peak de la corriente armónica suele ser superior al de la normal, este tipo de interruptor automático puede dispararse prematuramente con valores de corriente bajos. Por otro lado, si el nivel de peak es inferior al normal puede que el automático no reaccione cuando deba hacerlo.

3. Barras colectoras y bornes de conexión.

Las barras colectoras neutras y los bornes de conexión están dimensionados para soportar el valor máximo de la corriente de fase, pero pueden sufrir sobrecarga si se agrega a los conductores neutros la suma de los armónicos “triplens”.

4. Tableros eléctricos.

Los tableros pueden presentar resonancia debido a los campos magnéticos generados por corrientes armónicas de alta frecuencia. Cuando esto sucede el tablero empieza a vibrar y emite un zumbido producido, la mayoría de las veces, por corrientes armónicas.

5. Circuitos de comunicaciones.

El o los cables de telecomunicaciones, suelen tenderse muy cerca de los cables de alimentación eléctrica. Para reducir al mínimo la interferencia inductiva provocada por la corriente de las fases, los cables de telecomunicaciones se tienden cerca del conductor neutro. Con frecuencia los “triplens” de este conductor originan una interferencia inductiva que escuchamos en algunas líneas telefónicas. Este síntoma suele ser el primer indicio de la existencia de un problema de armónicas.

6. Transformadores.

Los transformadores utilizados en grandes instalaciones normalmente son del tipo estrella-triángulo. Las cargas monofásicas no lineales conectadas a estas tomas de corriente producen

armónicos “triplens” que se suman algebraicamente en el conductor neutro. Cuando esta corriente del neutro llega al transformador se refleja en el devanado del primario en delta (triángulo) del mismo y circula por él con el consiguiente sobrecalentamiento y averías del transformador.

Normalmente los transformadores sólo están diseñados para una carga de corriente de fase de 50 Hz. Al ser más alta su frecuencia, la corriente armónica provoca un mayor calentamiento con la misma corriente.

Estos efectos de calentamiento obligan a modificar el diseño de los transformadores ordinarios utilizados para alimentar cargas no lineales o a sustituir dichos transformadores por otros de diseño especial.

7. Generadores.

Los generadores de Emergencia están sujetos al mismo tipo de problemas de sobrecalentamiento que los transformadores, pero debido a que se utilizan como fuente de alimentación de emergencia para cargas productoras de armónicas, a menudo son incluso más vulnerables. Además de sobrecalentamiento, algunos tipos de armónicas provocan distorsión en los cruces por cero de la onda de corriente, lo que origina perturbación e inestabilidad de los circuitos de control del generador.

La norma chilena.

A contar de la Publicación en el Diario Oficial el 10 de septiembre de 1998, se encuentra disponible la Reglamentación de los niveles de perturbación permitida para las empresas de distribución y consumidores. Dicho Reglamento entró en vigencia 60 días después de su publicación, es decir, desde el 7 de diciembre de 1998, pero es decisión de cada empresa eléctrica el plazo concedido a los consumidores para su cumplimiento.

Esta Norma define en el artículo 241, que las mediciones y el registro para determinar la calidad de suministro deberán ser polifásicas según sea el número de fases existentes y simultáneas en cuanto a voltaje y corriente. Además, deberán utilizarse equipos adecuados para el rango de precisión esperado en las variables a obtener.

Según lo indicado en las disposiciones transitorias, artículo 18, en condiciones normales de operación, el registro deberá efectuarse durante una semana completa o siete días consecutivos de cualquier período del año y deberá cumplir al menos con el 95% de los valores estadísticos de las corrientes o voltajes armónicos individuales más el Índice de Distorsión Total (I.D.T.), llamado en inglés Total Harmonic Distortion (T.H.D.). El valor estadístico de las corrientes armónicas y de su I.D.T. será obtenido después de evaluar los resultados del conjunto de mediciones con intervalos de 10 minutos durante todo el período.

1. Armónicos de corriente según reglamento vigente.

- Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares.
- * = Todos los equipos de generación de potencia están limitados a los valores indicados de distorsión armónica de corriente, independiente de la razón ISC/IL .
- H = Armónica.
- ISC = Máxima corriente de cortocircuito en el punto común de conexión PCC.
- PCC = El nudo más cercano de la red donde dos o más usuarios obtienen energía eléctrica.
- IL = Máxima corriente de carga (valor efectivo) de frecuencia fundamental en el PCC. - Para el caso de clientes en puntos comunes de conexión comprendidos entre 69 kV y 154 kV, los límites son el 50% de los límites establecidos en la tabla. Para el caso de clientes PCC superiores a 154 kV se aplicarán los límites de 110 kV en tanto el Ministerio a proposición de la Comisión no fije la Norma respectiva. Si la fuente productora de armónicas es un convertidor con un número de

pulsos “q” mayor que seis, lo límites indicados en la tabla deberán ser aumentados por un factor igual a la raíz cuadrada de un sexto de “q”.

2. Armónicos de voltaje según reglamento vigente.

Los valores de los voltajes armónicos se expresan en porcentaje del voltaje nominal, se deben cumplir las mediciones en forma idéntica al registro de armónicos de corriente, es decir una semana completa durante el año durante intervalos de diez minutos, con las siguientes limitaciones:

Alternativas de soluciones para el control de armónicas en redes eléctricas.

Existen métodos que minimizan la distorsión armónica en las redes eléctricas, pero casi todos los eliminan en forma parcial, y no representan una solución integral al problema; algunos de estos métodos son los siguientes:

Máxima Distorsión Armónica de CORRIENTE en el Sistema Eléctrico.

Cifras en % de valor de Corriente Máxima de Carga a frecuencia fundamental.

Orden de la armónica (armónicas impares).

Isc/IL H<11 11<H<17 17<H<23 23<H<35 35<H I.D.T.

<20* 4.0 2.0 1.5 0.6 0.3 5.0

20-50 7.0 3.5 2.5 1.0 0.5 8.0

50-100 10.0 4.5 4.0 1.5 0.7 12.0

100-1000 12.0 5.5 5.0 2.0 1.0 15.0

>1000 15.0 7.0 6.0 2.5 1.4 20.0

Tabla 2: Limitación de corrientes armónicas en la norma chilena vigente.

Armónicas IMPARES NO Armónicas IMPARES PARES

múltiplos de 3 múltiplos de 3

ORDEN ARMÓNICA DE VOLTAJE % ORDEN VOLTAJE % ORDEN VOLTAJE %

<=110 kV >110 kV <=110 kV >110 kV <=110 kV >110 kV

5 6 2 3 5 2 2 2 1.5

7 5 2 9 1.5 1 4 1 1

11 3.5 1.5 15 0.3 0.3 6 0.5 0.5

13 3 1.5 21 0.2 0.2 8 0.5 0.4

17 2 1 >21 0.2 0.2 10 0.5 0.4

19 1.5 1 12 0.2 0.2

23 1.5 0.7 >12 0.2 0.2

25 1.5 0.7

>25 0.2+1.3*(25h) 0.2+0.5*(5h).

Tabla 3: Limitación de voltajes armónicos en la norma chilena vigente.

1. Sobredimensionamiento del neutro del sistema.

Esta solución no elimina las corrientes armónicas que fluyen en los sistemas de distribución eléctrica de bajo voltaje (menos de 1000 V), sino que es una manera de enmascarar el problema y evitar sus consecuencias.

Cuando se diseña una nueva instalación, el plan es sobredimensionar algunos elementos, con el objeto de soportar las corrientes armónicas. La más amplia solución de implementación utilizada es sobredimensionar el conductor neutro.

En instalaciones existentes, la solución más comúnmente utilizada es reducir la capacidad normal del equipo eléctrico sujeto a las armónicas de corriente. La consecuencia es una instalación que no puede usar su máximo potencial, el resultado es un mayor incremento en el costo del sistema de distribución eléctrica.

2. Transformadores conectados en forma especial.

Esta solución inhibe la propagación de armónicos de corriente de tercer orden y sus múltiplos. Esta solución es una solución centralizada para un conjunto de cargas monofásicas. Sin embargo, ésta no produce efectos sobre armónicos de otro orden que no sean múltiplos de tres (o de sentido de rotación inversa). Al contrario, esta solución limita la disponibilidad de la fuente e incrementa la impedancia de la línea.

La consecuencia es un incremento en la distorsión de las armónicas de voltaje de otro orden.

3. *Uso de filtros.*

Otra de las opciones que existen es la de utilizar filtros pasivos, ya que éstos presentan un camino de menor impedancia que la red, para la frecuencia de la armónica que se desea eliminar; además de este modo la corriente armónica se va por el filtro preferentemente y la impedancia total equivalente del sistema, a esa frecuencia determinada, es menor; como la corriente armónica produce una caída de tensión menor en la impedancia de la red, ello significa que la distorsión de tensión disminuye. A continuación se detallará el funcionamiento de las alternativas de filtros.

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros pasivos que son utilizados para limitar la distorsión armónica. Las configuraciones más comunes son el filtro *Sintonizado Simple*, el filtro *Pasa Altos de 2º Orden*, y en la actualidad se está utilizando filtros *Activos* para el control de esta contaminación.

El filtro "*Sintonizado Simple*" es el más sencillo, y consiste en un banco de condensadores conectados en serie con un inductor. Ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar. Se debe considerar que se usan para eliminar solamente una armónica determinada.

El "*Pasa Alto de 2º Orden*" es el más común de los filtros que presenta una característica amortiguada. La conexión de una resistencia en paralelo con el inductor le da un comportamiento amortiguado para un amplio rango de frecuencias. Estos filtros también tienen una frecuencia de sintonía, y se usan para eliminar un amplio rango de armónicas.

Uno de los tópicos que ha recibido mayor atención en la compensación de armónicas en los últimos años, es el de los "*Filtros Activos*" de potencia. Estos filtros están formados por convertidores estáticos PWM

FILTRO VENTAJAS DESVENTAJAS

SINTONIZADO - Máxima atenuación a - Desintonía (tolerancia SIMPLE armónicas individuales. de elementos a Temp°).

- Bajas pérdidas asociadas a - Resonancia paralela con la resistencia del inductor. banco de condensadores.

PASA ALTOS - Atenuan amplio espectro - Resonancia paralela al DE 2º ORDEN de armónicas. interactuar con la red

- Robusto frente a desintonías. - Pérdidas adicionales debido a la resistencia.

ACTIVOS - Eliminan amplio rango de - Mayor costo que los Armónicas. filtros pasivos.

- Compensan armónicas y potencia reactiva.

- Mantenimiento mínima.

- No sufren desintonía.

(Pulse Width Modulated), los que, a diferencia de los filtros pasivos, son capaces de sensor la información de corrientes y voltaje armónico presente en los alimentadores para inyectarle corrientes armónicas con un desfase de 180°, es decir, corriente armónica inversa, lo que compensa a las formas de onda de voltaje y corriente de las redes.

Las ventajas y desventajas de los distintos filtros se pueden resumir en el cuadro anterior.

Conclusiones.

Dentro del concepto de Calidad de Servicio Eléctrico es importante conocer los conceptos, los propósitos y los estándares relacionados con la Calidad del Producto Técnico en el punto de empalme común, ya que en un futuro muy cercano las empresas que distribuyen Energía

comenzarán a exigir a los clientes mantener los niveles de distorsión dentro de los parámetros establecidos por la Norma vigente.

Es bueno conocer cómo se manifiestan las componentes armónicas en los distintos componentes de la red de distribución eléctrica, ya que en la actualidad, dada la tendencia a la automatización de procesos en nuestro diario vivir, se está viviendo un explosivo crecimiento de la población de equipos computarizados en Chile, los que pueden llegar a influir en la calidad del voltaje en todo el Sistema Interconectado Central.

Al revisar los conceptos que incluye la "Norma Chilena de Componentes Armónicas" y compararla con Estándares vigentes en países con verdadera conciencia acerca de este tema, como Estados Unidos, Japón y otros países Europeos, la conclusión es que se intentó copiar idénticamente la reglamentación europea, sin lograr hasta el momento mayores resultados; puesto que ninguna de las empresas distribuidoras de Energía en la V Región está exigiendo la Norma vigente hace 2 años a sus clientes.

De todas las alternativas que existen en la actualidad para filtrar armónicas, las grandes ventajas que presentan los filtros activos han desplazado casi totalmente a sus antecesores pasivos, porque significa disminuir los costos de mantención, eliminar la totalidad de las armónicas presentes en los alimentadores, compensar en forma automática la potencia reactiva y además disponer de mayor espacio libre en los tableros.

Teniente 2º. Ingeniero Naval Electricista.

BIBLIOGRAFÍA

1. "Análisis de Sistemas de Potencia". (John Grainer - William Stevenson).
2. "Introducción al Proyecto Eléctrico". (Jorge Valenzuela A.).
3. "Armónicas en Sistemas Eléctricos" (Seminario dictado por U.T.F.S.M. los días 25 y 26 de julio de 1996).
4. "Armónicos en Sistemas de Potencia". (J. Arrillaga - L.I. Eguiluz).
5. "Electrónica, Teoría de Circuitos". (R. Boylestad - L. Nashelsky).
6. "Máquinas Eléctricas". (A. Fitzgerald - C. Kingsley - S. Umas) .
7. "Introduction to continous and digital control systems". (Roberto Saucedo - Earl Schiring).
8. "Ingeniería de Control Moderna". (Katsuhiko Ogata).
9. "Dispositivos Electrónicos de Potencia". (R.V. Honorat).
10. "Racionalización de Consumos Eléctricos en la Base Aeronaval "Viña del Mar" (Teniente 2º G. Téllez R.).