

Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones

Nota de Divulgación

M.C. Mario Salvador Esparza González, M.C. Jesús Alejandro Mata Guerrero, M.C. Luis Antonio Castañeda Ramos
 Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica.
 Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av.López Mateos No. 1801 Ote. Fracc.Balcones de Ojocaliente.
 Aguascalientes, Ags.
 Tel: (014)-9-10-50-02,Fax (014)-9-70-04-23 msepa@ieee.org

Resumen

Este artículo presenta la problemática que se puede tener en las instalaciones eléctricas debido a las cargas no lineales que actualmente se han incrementado en las diferentes instalaciones. Se muestran los principios matemáticos, los parámetros involucrados en la toma de decisiones, algunas cargas típicas que generan armónicos, los problemas que pueden indicarnos la presencia de armónicos en una red así como la manera de disminuirlos ó eliminarlos.

Introducción

Actualmente la utilización de sistemas electrónicos diversos en la red ha provocado distorsiones en el voltaje y la corriente. Esto produce una deficiencia en la calidad de la energía, factor muy importante para la exitosa operación de diversas cargas. La calidad de la energía se entiende como un bajo nivel de disturbios en la red, es decir con el mínimo de distorsiones armónicas, variaciones de voltaje, interrupciones, sobretensiones, tanto en el suministro como en la recepción o utilización. Actualmente existen cargas tanto industriales como comerciales y residenciales que hacen un uso intensivo de controles basados en la electrónica de potencia, los cuales son fuentes emisoras de distorsión armónica en la red, ya que bajo ciertas condiciones pueden deteriorar la magnitud, la forma de onda, la amplitud, y la simetría del voltaje donde son utilizados estos dispositivos [1]. La problemática generada por el incremento de la distorsión armónica ha disminuido la calidad de la energía, la cual se considera puede seguir disminuyendo ya que la utilización de equipo electrónico más eficiente y rápido es cada día más frecuente y lo será debido a su mayor eficiencia y bajo costo. La proliferación de las cargas no lineales (aquellas que tienen consumos de corriente no senoidales), se ha dado en ausencia de normas completas que limiten las señales armónicas que el sistema de potencia, generación, cogeneración, transmisión y distribución, deba ser capaz de soportar y de absorber. Algunos ejemplos de ellas son la introducción de controles de motores de corriente

directa, inversores, variadores de velocidad en motores de c.a., así como la operación cada vez más extendida de grandes hornos de arco, usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras y electrónica de control. Esta situación lleva a la problemática de la calidad de energía, tanto para los clientes como para la empresa suministradora de energía.

1.- Definición y análisis de las corrientes armónicas

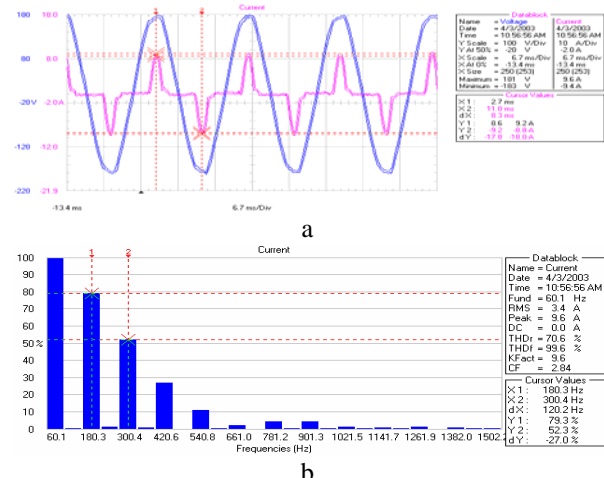


Figura 1. a) Formas de onda de voltaje y corriente típicas, b) Espectro de armónicos de la corriente.

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema se encuentra distorsionada con la relación a la onda senoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicos. El Teorema de Fourier demuestra que una función periódica cualquiera puede descomponerse en una suma de funciones senoidales, siendo la primera función senoidal (fundamental) de la misma frecuencia que la función original y el resto de frecuencias múltiplos exactos de la frecuencia fundamental. Estos son los componentes armónicos de la función periódica original. La figura 1 muestra, como ejemplo una computadora, esta carga tiene una señal de corriente periódica con relación al tiempo

resultante de la integración de la onda fundamental y sus componentes armónicos. Cada armónica se expresa en función de su orden, las armónicas de segundo orden, tercer y quinto, tienen frecuencias de 120, 180 y 300 Hz respectivamente en sistemas eléctricos con frecuencias de generación de 60 Hz [2]. Generalmente la tercera, quinta y la séptima tienen mayor influencia en los sistemas de potencia. Las armónicas cuyas frecuencias son múltiplos de dos se denominan armónicas pares, y al resto armónicas impares. El modelo matemático según Fourier para el análisis de una señal periódica no senoidal implica la ecuación de la forma trigonométrica, definida por:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} ak \cos(k\omega_1 t) + bk \sin(k\omega_1 t),$$

Donde:

$$ak = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega_1 t) dt$$

representa las componentes senoidales pares de la señal y:

$$bk = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega_1 t) dt$$

Las componentes impares; $k = 1$ representa la señal fundamental y $k > 1$ los armónicos.

La distorsión armónica total (THD) es una medida del valor efectivo de las componentes armónicas, de tal forma que es el valor eficaz de las armónicas relativas a la fundamental es una forma de determinar el contenido armónico del voltaje o de la corriente en una onda periódica, la ecuación matemática es:

$$\% \text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} M_h^2}}{M_1} \times 100$$

Donde M_h representa el valor rms de la componente armónica h de la cantidad M . Los voltajes armónicos por lo general se refieren al valor de la onda fundamental, como el voltaje cambia en un pequeño porcentaje la cantidad de THD es casi siempre un valor significativo; en el caso de la corriente, si es pequeña puede tener un valor muy alto de THD, sin ser un riesgo al sistema [1]. La distorsión armónica se clasifica en dos tipos:

a) Distorsión armónica de estado estable:

Es la producida con la operación continua de la carga.

b) Distorsión armónica de estado transitoria:

Es la generada por corto circuito, descargas atmosféricas, apertura y cierre de interruptores. Su duración es corta.

En cualquier caso, la distorsión puede provocar que el equipo eléctrico no opere correctamente.

2.- Normatividad.

La normatividad para limitar la proliferación de las corrientes armónicas en los sistemas de distribución eléctrica se propuso a finales de la década de los 70's y principios de los 80's. Sin embargo en la actualidad se le ha brindado mayor importancia debido al gran incremento de cargas no lineales aunado al incremento en la demanda de la calidad de energía en la red eléctrica de distribución [3]. Dentro de las normativas registradas a nivel mundial, la mayoría son de organizaciones tales como la IEEE en EUA ó IEC en Europa. Dentro de los estándares o normas que rigen o recomiendan estos niveles están: "IEEE Guide for Harmonic Control" publicado en 1979, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" en 1989, "IEEE 519-1992" realizado en 1992. De cualquier forma estos impresos están dirigidos hacia la limitación de la distorsión armónica de los consumidores, en función del tamaño relativo de la carga y la distorsión del suministro de potencia, proporcionando niveles de distorsión basados en la tensión de utilización. Los límites impuestos al usuario deben referirse a distorsiones máximas permisibles en la onda de la corriente.

Dentro de la norma Europea, podemos destacar las siguientes: "IEC 55-2" Norma Europea aprobada en el año de 1991, para limitar las corrientes armónicas en equipos de línea menores a 16 A. "IEC 61000-3-4" en 1998, la cual está enfocada a limitar equipos con corrientes mayores de 16 A. "EN 61000-3-2", en enero 2001, la cual establece los límites para emisiones armónicas para equipos con 16 A por fase como máximo.

3.- Principales Fuentes Emisoras de Armónico.

Podemos establecer las siguientes 4 categorías [1]:

- 1) Dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, etc.)
- 2) Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, luz fluorescente, máquinas soldadoras, etc.)
- 3) Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, motores de inducción, etc.)
- 4) Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (molinos de laminación, trituradoras, etc.)

Algunos de los niveles de distorsión armónica dentro de una instalación eléctrica convencional son [1]:

- ❖ Alumbrado fluorescente, hasta un 26%.
- ❖ Equipos de comunicaciones hasta un 26%.
- ❖ Controladores para edificios inteligentes: hasta un 58 %
- ❖ PC, impresoras, mini computadoras, etc. Producen una distorsión armónica de hasta 124%.
- ❖ Fuentes de energía ininterrumpida (UPS): producen hasta 26% de distorsión armónica.

4.- Distribución de las corrientes armónicas en las redes eléctricas de potencia

Cuando existen en una red eléctrica fuentes emisoras de corrientes armónicas de potencia significativa, se llegan a producir grandes flujos de este tipo de corrientes a través de la misma que, en primera instancia ocasionan los mismos inconvenientes y prejuicios de las corrientes reactivas a frecuencia fundamental responsables del bajo factor de potencia. Adicionalmente, pueden producir, otra serie de problemas graves. El análisis de estos flujos de corriente se efectúa aplicando las leyes de Kirchoff para cada componente armónica existente en la red y tomando en cuenta la variación de impedancia a diferentes frecuencias de los elementos componentes de la misma. La figura 3 muestra el flujo de corrientes armónicas en un sistema eléctrico el cual está representada con impedancias. (Z_{c2} = carga lineal y Z_{c1} = carga No lineal). Se muestra la generación de armónicas de tensión y corrientes de neutro. Las armónicas fluyen por I_{hc1} (carga 1) en las líneas de fase y neutro, provocando caídas de tensión en las impedancias de línea $z1$, de neutro Z_n e impedancias internas Z_s [2].

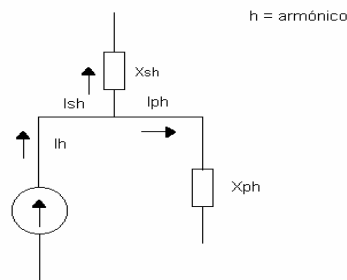


Figura 2. Distribución de las corrientes armónicas que se producen por cargas no lineales.

Si existe acoplamiento con líneas o neutro las armónicas pueden fluir por este acoplamiento, estas caídas de tensión se combinan con la onda sinusoidal de la fuente V_s , resultando fuentes de voltaje distorsionado para otras cargas lineales que operan en

paralelo. Las corrientes armónicas tienden a fluir de las cargas no lineales hacia la impedancia más pequeña, que generalmente es la fuente de suministro, el flujo de las corrientes armónicas es tal, que se fracciona o se divide dependiendo de las relaciones de impedancia, dichas relaciones son las características propias de la carga, por ejemplo, las armónicas de alto orden fluyen hacia los elementos capacitivos.

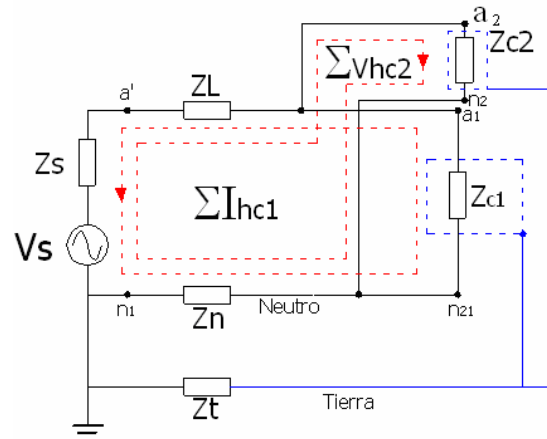


Figura 3. Distribución de armónicas en las redes de un sistema eléctrico.

5.- Efectos provocados por las corrientes armónicas

Los efectos nocivos producidos por el flujo de armónicos son cada día más significativos en los sistemas eléctricos, dependiendo de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y se resumen en [4]:

- ✓ Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de regulación, tanto de potencia como de control.
- ✓ Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de protección y medición.
- ✓ Interferencias en sistemas de comunicación y telemando.
- ✓ Sobrecalentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, generadores, etc.) y el cableado de potencia con la disminución consecuente de la vida útil de los mismos, e incremento considerable de pérdidas de energía.
- ✓ Fallo de capacitores de potencia.
- ✓ Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar accidentes eléctricos, fallas destructivas de equipos de potencia ó mal funcionamiento.

6.- Técnicas de eliminación de armónicos.

Existen varias técnicas para la corrección de la distorsión armónica en las redes eléctricas, unas son

para bloquear el paso de las armónicas que fluyen hacia los equipos sensibles como son los equipos electrónicos, los cuales quedan protegidos de la influencia de las mismas, aunque estas corrientes armónicas sigan circulando por el resto de la red. Otra medida son los dispositivos que tienden a absorber la corriente armónica, los cuales se confinan para circular por zonas limitadas de la red, preferentemente circunscritas a los focos emisores de las mismas. Y la otra forma es vivir con el problema pero “protegido” esto se hace cuando se toman medidas de sobredimensionamiento, recurriendo incluso hasta diseños especiales, cuando se tienen sometidos equipos y conductores al flujo de corrientes armónicas, se pretenden minimizar sus efectos nocivos provocados por su distorsión armónica. En general las técnicas que se emplean hacen la función de un filtro, algunas de ellas son: Filtros de choque, Filtros de absorción, Protección de instalaciones de variadores de frecuencia por medio de reactores de choque, Compensadores estáticos, Bloqueo de corrientes armónicas de secuencia cero con transformadores estrella/delta, Bloqueo de corrientes armónicas con transformadores de aislamiento, Bloqueo con transformadores zig-zag., Sobredimensionamiento de la capacidad del hilo de neutro, Variadores de frecuencia sintonizados, Degradación de potencia en transformadores ordinarios, Degradación de la ampacidad nominal de los conductores eléctricos, Transformadores tipo K.

Filtros de choque: Este filtro utiliza reactancias capacitivas e inductivas para la eliminación de resonancias, el diagrama del circuito es el mostrado en la figura 4.

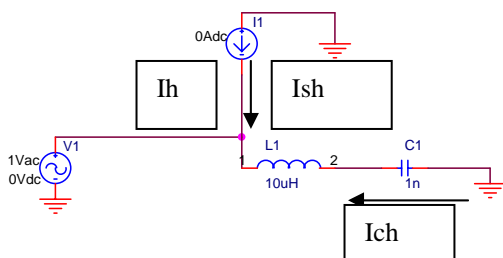


Figura 4. Filtro de choque para eliminación de resonancias y protección de capacitores

Se conecta en serie con el capacitor un reactor de inductancia L, sintonizado a una frecuencia inferior a la de cualquier armónico significativo existente en el sistema.

Filtro de absorción: Este filtro tiene una configuración de reactor y capacitor conectados en serie, esos elementos se sintonizan a las frecuencias armónicas más significativas del sistema en cuestión,

el diseño de los reactores y capacitores debe ser tal que permita el paso de toda la energía que fluye por el sistema para cada armónica, por lo que se debe de presentar una impedancia casi nula para poder absorber las armónicas. Con este tipo de filtro se evita la resonancia, se protege a los capacitores, se eliminan armónicas en el sistema y corregir el factor de potencia a una frecuencia fundamental. Un reactor de choque provoca la desintonización del filtro, por lo que presentan frecuencias más bajas de sintonía serie, esto bloquea el paso de las armónicas, además se evita el flujo de la corriente armónica por la red [2]. Ver figura 5.

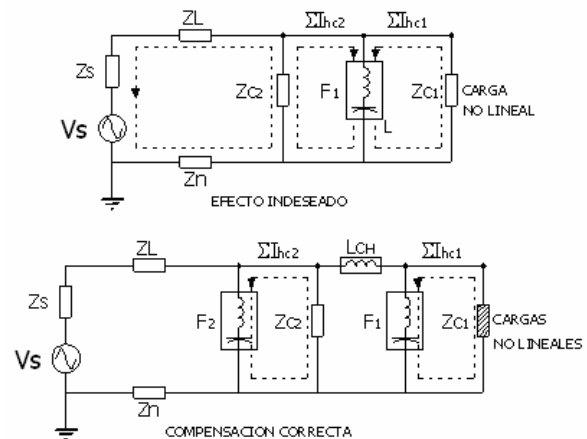


Figura 5. Filtro de absorción respecto a cargas no lineales y adyacentes.

Compensadores Estáticos. Dispositivos de electrónica de potencia capaces de eliminar corrientes armónicas, controlar distorsión en la tensión, evitar las resonancias, proteger los capacitores, regular el nivel de tensión en el punto de conexión del sistema y corregir el Factor de Potencia en la fuente de suministro a frecuencia fundamental.

Bloqueo con transformadores zig-zag. Este transformador consiste en un devanado en zig-zag; este proporciona un desplazamiento angular igual que un devanado en delta, este transformador es de gran ayuda para combatir las armónicas de secuencia cero, es un transformador con devanados delta en la parte de la fuente y devanado estrella en la parte de la carga no lineal, lo adicional en este devanado estrella es que tiene una bobina en serie en cada fase y estas forman un ángulo de 120° con respecto a la bobina de la fase correspondiente, produciéndose un desplazamiento angular igual que un devanado delta; además de proporcionar un hilo de neutro para cargas monofásicas. El transformador es una alternativa para sustituir a uno convencional cuando presente pérdidas y sobrecalentamientos debidos a la distorsión

armónica de las cargas. Además si se combina con filtros de 5ª y 7ª armónicas en sustitución de los reactores de choque puede constituir un sistema de bloqueo o filtro generalmente muy eficiente.

Sobredimensionamiento del neutro (hilo puesto a tierra). Esta técnica es empleada para disminuir las caídas de tensión que producen las armónicas de secuencia cero en cargas monofásicas (Se considera alta cuando se tienen valores del 10% valor pico respecto a la amplitud fase/neutro de la onda de tensión); la corriente alcanza valores superiores al de la corriente de fase; se vuelve necesario redimensionar el conductor neutro, además el código NEC en su inciso 210-4a lo recomienda indicando utilizar un calibre igual o mayor al de los conductores de fase, además debe ser considerado como conductor activo para el cálculo de la instalación.

Técnica de bloqueo para la 5ª y 7ª armónica. Esta técnica se emplea usando doble variador de frecuencia con defases de +15° y -15° en el disparo de ambos rectificadores de 6 pulsos. Considerando un variador A y B idénticos para la alimentación en paralelo a la carga, con 15° de adelanto, respecto a una referencia común, y 15° de atraso en el variador B, el comportamiento ante las barras de alimentación es como el de un solo variador de 12 pulsos. Otra forma es dividir los rectificadores de 6 pulsos en dos grupos idénticos alimentados cada uno con un transformador delta/delta y delta/estrella, respectivamente. El defase de 30° que ambos transformadores provocan en sus secundarios un bloqueo a la 5ª y 7ª Armónicas [3].

Degradación de la potencia nominal de un transformador estándar. Esta técnica está basada en la normativa ANSI/IEEE C57, 110-1986., Consiste en un cálculo de los KVA utilizables en un transformador estándar sometido a un flujo determinado de corriente armónica, este método inicia con los cálculos de las pérdidas del transformador a su frecuencia nominal y determina los KVA utilizables, en relación a los KVA nominales, por medio de una expresión algebraica que enfatiza la influencia de las pérdidas por corrientes parásitas e introduce el factor K, asociado al sobrecalentamiento del transformador. Matemáticamente se puede expresar:

$$P_T = P_W + P_C + P_{OSL}$$

Donde: P_T = Pérdidas totales en el transformador,

P_W = son las pérdidas en el devanado, P_C = pérdidas en el núcleo, incluyendo las pérdidas por histéresis,

P_{OSL} = son pérdidas por dispersión del flujo magnético.

Transformador factor k. Estos transformadores están diseñados para soportar sobrecalentamientos en los devanados producidos por las armónicas, el factor K indica la capacidad de la distorsión armónica que el transformador soporta; ocupan más espacio que los transformadores estándar. Para el cálculo de un transformador factor K se hace el promedio de los diferentes niveles de distorsión ponderándolos con la cantidad de KVA instalados de cada nivel. Estos cálculos se hacen involucrando valores de pu (por unidad) de la corriente rms para cada una de las frecuencias armónicas; básicamente cada I_h (pu) es elevado al cuadrado y luego multiplicado por el cuadrado de la armónica (h^2) [1].

$$K = \sum_n [I_h(pu)]^2 \times h^2$$

El factor K, se multiplica por las pérdidas debido a las corrientes de Eddy, que produce el incremento de calor en el transformador debido a la distorsión armónica.

Conclusiones

La proliferación de cargas no lineales en las redes eléctricas representa un nuevo reto para los ingenieros eléctricos en el diseño de las instalaciones eléctricas, el mantenimiento y la solución de problemas, la normatividad actual en América marca límites en forma general mientras que la europea se enfoca a mejorar el diseño de los equipos de forma tal que no se genere el problema, es decir lo ataca desde su origen. La selección de la alternativa de solución dependerá de un estudio minucioso del problema tanto técnica como económicamente.

Referencias

- [1] Madrigal Martínez Manuel, (Junio 2002). *Calidad de la Energía Eléctrica y análisis armónico en Sistemas Eléctricos*, curso, México.
- [2] Pascual John, (2001) *Practical Guide to power factor correction and harmonics*, Intertec Publishing Corp.
- [3] Cárdenas Galindo Víctor Manuel, (2001) *Análisis de corrientes armónicas en sistemas trifásicos*, Notas complementarias., Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- [4] Skvarenina, (2004) *Power Electronic Handbook* CRC Press.