

Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones

M.C. Jesús Alejandro Mata Guerrero, M.C. Mario Salvador Esparza González
CIME Aguascalientes, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica.
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 las corrientes armónicas 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.

INTRODUCCION

Actualmente la utilización de sistemas electrónicos para la ejecución de tareas, esto cada día más frecuente provocando distorsiones en el voltaje y la corriente lo cual produce la deficiencia en la calidad de energía, la cual es un factor muy importante para la exitosa operación de diversas cargas, entendiéndose calidad de energía como un bajo nivel de disturbios en la red o sea con el mínimo de distorsiones armónicas, variaciones de voltaje, interrupciones, sobretensiones, tanto en el suministro como en la recepción o utilización. Hoy en día las cargas especialmente las compuestas por dispositivos de estado sólido, son más sensibles a las variaciones de tensión, lo cual conduce a crear distorsiones en el sistema, además de que puede dar lugar al envejecimiento de los componentes electrónicos en sistemas digitales y errores durante el almacenamiento o lectura de la información o la pérdida total de datos. Actualmente existen cargas tanto industriales como comerciales y residenciales que hacen un uso intensivo de controles basados en la electrónica de potencia y en los microprocesadores, los cuales son fuentes emisoras de distorsión armónica en la red, ya que bajo ciertas condiciones puede deteriorar la magnitud, la forma de onda, la amplitud, y simetría del voltaje en donde estos dispositivos son utilizados.

La problemática generada por el incremento de la distorsión armónica a conllevando a la disminución de la calidad de energía, sin embargo la utilización de equipo más eficiente y rápido que esta construido con equipo electrónico es cada día más frecuente y lo será debido a su mayor eficiencia y bajo costo. Por lo que la sociedad actual es dependiente del comportamiento de sus dispositivos automatizados y en general por los equipos controlados principalmente con electrónica.

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 masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales: 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 conlleva 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

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. Este concepto proviene del Teorema de Fourier al mostrar que, bajo ciertas condiciones analíticas una función periódica cualquiera que se considere integrada por una suma de funciones senoidales, siendo la primera función sinusoidal (fundamental) del mismo periodo (o 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 3 componentes considerables armónicos. 3ª armónica (con un 79.3% de amplitud respecto a la onda fundamental), 5ª armónica (con un 52.3% de amplitud respecto a la onda fundamental). La armónica 7ª (27.1% de con respecto a la fundamental y 9ª armónica (11% de amplitud). 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. Conforme se va incrementando el orden, la frecuencia de las armónicas crece y su magnitud normalmente disminuye. Por lo que las armónicas de orden inferior 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. A las armónicas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de tres se denominan armónicas triples. El modelo matemático según Fourier para el análisis de la distorsión armónica implica las siguientes ecuaciones de la forma trigonométrica, siendo ak para el análisis de

componentes pares y bk para las componentes impares según la forma de onda que se analice.

$$f(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} Ak \cos(k\omega_1 t + \phi k), \text{ donde: } ak = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega_1 t) dt, \text{ } bk = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega_1 t) dt$$

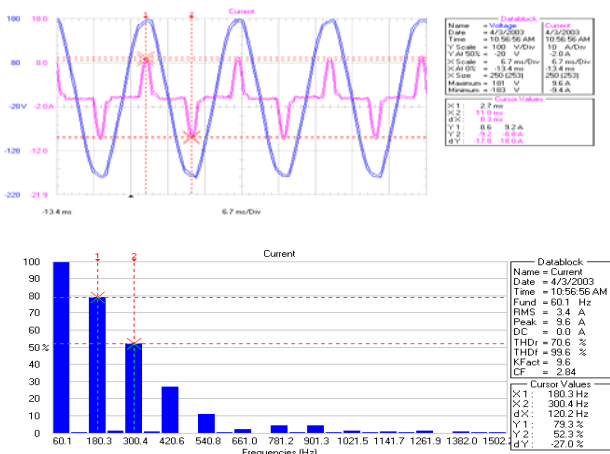


figura 1 Formas de onda de voltaje (azul) y de corriente (rosa) típicas de una PC, abajo el espectro de armónicos de la corriente

El problema de la THD (Distorsión Armónica Total) esta aunado a las condiciones de diseño y construcción de las Máquinas eléctricas que consideran solamente la frecuencia fundamental, La THD es una forma de determinar el contenido armónico del voltaje o de la corriente en una onda periódica, La ecuación matemática es la siguiente:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} M_h^2}}{M_1}$$

Donde M_h es el valor rms de la componente armónica h de la cantidad M . La distorsión armónica total es una medida del valor efectivo de las componentes armónicas de una onda distorsionada, de tal forma que es el valor eficaz de las armónicas relativas a la fundamental. La THD en forma de porcentaje se manifiesta de la siguiente manera:

$$\% THD = \frac{\text{Valor rms de las armónicas}}{\text{Valor rms de la fundamental}} * 100$$

El THD se relaciona con el valor RMS de la onda con la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h \max} M_h^2} = M_1 * \sqrt{1 + THD^2}$$

La THD es de gran utilidad en muchas especificaciones, ya que puede proveer la cantidad de energía disipada al aplicar un voltaje distorsionado a una carga resistiva, también indica las pérdidas adicionales causadas por la corriente en un conductor, sin embargo no es un buen indicador del esfuerzo que el voltaje ejerce en un capacitor, por que se refiere a un valor pico de la onda de tensión, y no a su valor rms.

Los voltajes amónicos 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 lleno de significado, este no es el caso de la corriente, ya que una pequeña corriente puede tener un valor muy alto de THD, pero esto no es un riesgo del sistema. En los análisis de THD se debe considerar la “ distorsión de la demanda total ” TDD y no solo el THD de la muestra presente para evitar el error en el análisis de armónicos de la corriente que reportan los dispositivos de monitoreo.

La THD se puede clasificar en dos tipos:

1.- Distorsión armónica de estado estable:

la cual se produce con la operación normal (continua), del sistema de potencia.

2.- Distorsión armónica de estado transitoria:

La cual es generada por corto circuito, descargas atmosféricas, apertura y cierre de interruptores. En cualquiera de estos dos casos, la distorsión opera en forma crítica lo que provoca que el equipo eléctrico no opere satisfactoriamente.

En general, la distorsión de la corriente define la relación entre la corriente total armónica y la corriente fundamental de la misma forma como la distorsión del voltaje. Sin embargo, hay algunas diferencias de aplicaciones las cuales necesitan ser reconocidas. Estas incluyen.

- Los límites de corriente armónica dependen de la capacidad de corriente de sistema de corto circuito al punto de interés.
- Los porcentajes de corriente armónica aplican a corrientes armónicas individuales. Están expresadas relativamente al sistema total de corriente de carga fundamental.

La distorsión total de la demanda TDD es la distorsión de corriente de armónicos total es obtenida:

$$TDD = IH / IL$$

Donde IL es la corriente de carga de mayor demanda (componente de frecuencia fundamental) en el PCC derivada de un rango de demanda de 15 a 30 minutos e IH es dado por

$$IH = \sqrt{\sum_{h=2}^{25} I_h^2}$$

El límite más alto de sumatoria de $h=25$ es escogido para propósitos de cálculo. Da muy buenos resultados de práctica.

2.- NORMATIVIDAD.

En la actualidad existen reglamentos que pretenden controlar y dar un estándar, establecer un control sobre la distorsión armónica permisible generada y circulante a través de los dispositivos eléctricos y electrónicos interconectados a la red eléctrica que proporciona la compañía suministradora de energía.

La normalización 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. Dentro de las normativas registradas a nivel mundial, la mayoría son de organizaciones tales como la IEEE en EUA. Las demás son de cumplimiento obligatorio en la Unión Europea (EN 61000-3-2). Dentro de los estándares u normas que rigen o recomiendan estos niveles están en la unión Americana se encuentran los siguientes las publicaciones efectuadas en la unión Americana, "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, esto 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 se deben referirse a distorsiones máximas permisibles en la onda de la corriente.

Dentro de la norma americana se establecen los siguientes parámetros:

- ✓ Corriente de corto circuito en el punto de conexión común "Isc ó Icc"
- ✓ Corriente de carga a la frecuencia fundamental "IL"
- ✓ Distorsión total de la demanda en el punto de conexión común PPC, En un periodo de 15 a 30 minutos, "TDD"

Matemáticamente la expresión es:
$$TDD = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_{ML}}$$

Ih = corrientes armónicas

IML = máxima corriente demandada a 60 hz

Dentro de las normas internacionales. Esta la Europea, y dentro de las publicaciones 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 1000-3-2" en 1995. "IEC 61000-3-4" en 1998, la cual está enfocada a limitar equipos con corrientes superiores de línea 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. De manera general, se puede observar que la norma Europea está enfocada a limitar la corriente armónica en los equipos, a diferencia de la americana que se enfoca a los usuarios, consumidores y suministrador. La norma Europea trata de mejorar y cubrir más a fondo los aspectos de las recomendaciones americanas. El código eléctrico internacional "IEC" concretamente el IEC 1000-3-2 (Norma Europea), marca cinco clases para determinadas cargas con distorsión armónica. Estas clases están determinadas de la siguiente manera:

- ✓ Clase A: equipos trifásicos no incluidos en las clases B, C y D.
- ✓ Clase B : Herramientas portátiles.
- ✓ Clase C : Equipos de alumbrado incluyendo dispositivos de potencia activa de entrada mayor que 25 watts.
- ✓ Clase D: Equipos con corriente de entrada con una forma de onda especial (no puramente senoidal), con una potencia fundamental en el rango de 75w hasta 600w.

3.- Principales Fuentes Emisoras de Corrientes Armónicas.

La norma IEEE S19-1992. Relativa a "Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia". Agrupa las fuentes emisoras de corrientes armónicas en 3 categorías diferentes:

- 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.)

A estas 3 categorías podemos agregar una cuarta:

- 4) Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (molinos de laminación, trituradoras, etc.)

Mencionando solo algunos de los niveles de distorsión armónica dentro de una instalación eléctrica convencional podemos encontrar lo siguiente:

- ❖ Alumbrado fluorescente, nivel de distorsión armónica de hasta 26 % con referencia a la fundamental.
- ❖ Equipos de comunicaciones tienen una distorsión armónica de hasta un 26% respecto a su fundamental.
- ❖ Controladores para edificios inteligentes: hasta un 58 % respecto a la fundamental
- ❖ Grandes equipos de computo: tiene una distorsión armónica de hasta 81 %.
- ❖ Pc's , 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

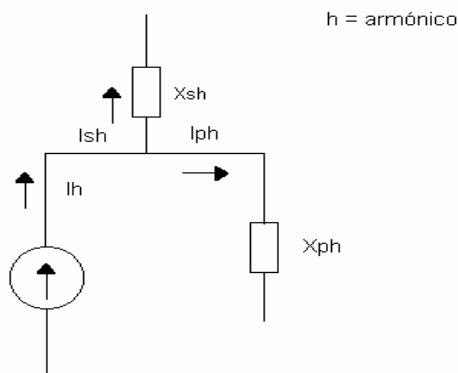


Figura 2. Diagrama de bloques reflejando la distribución de las corrientes armónicas que se producen por cargas no lineales.

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 perjuicios de las corrientes reactivas a frecuencia fundamental responsables del bajo factor de potencia, adicionalmente, pueden producir, otra serie de problemas graves que se tratarán más adelante. El análisis de estos flujos de corriente se efectúa aplicando las leyes de kirchhoff 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 esta 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 Z_L , de neutro Z_n e impedancias internas Z_s . De las fuentes de tensión de la red. Incluso pueden fluir por las redes de tierra si existe acoplamiento

con líneas o neutro. 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 mas pequeña, que generalmente es la fuente de la compañía eléctrica. La impedancia de la fuente de la compañía suministradora en este caso de C.F.E. es más pequeña que los circuitos de otras cargas, 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 la los elementos capacitivos, por que presentan pequeñas impedancias a altas frecuencias.

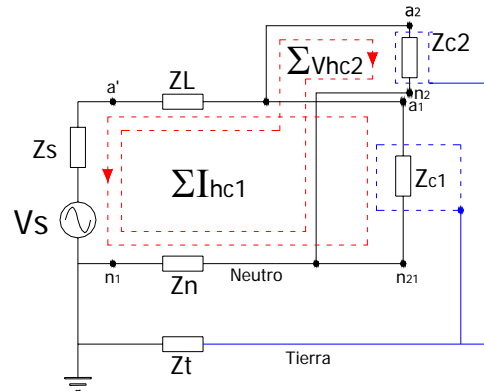


Figura 3. Distribución de armónicas en las redes de un sistema eléctrico (armónicas de tensión, corriente y corrientes de neutro)

5.- Efectos provocados por las corrientes armónicas

Los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas son cada día más significativos en los sistemas eléctricos de potencia, dichos efectos dependen de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y pueden resumirse en la forma siguiente:

- ✓ 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
- ✓ Sobre calentamiento 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 en forma de calor.
- ✓ Fallo de capacitores de potencia
- ✓ Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar

accidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallas destructivas de equipos de potencia.

A continuación se describen algunos de ellos:

Influencia de los capacitores de potencia

Por una parte, los capacitores de potencia conectados a una red conteniendo corrientes armónicas, tienden a tomar sobrecorrientes significativas, debido a la baja impedancia que muestra un capacitor al ser alimentado con ondas de tensión de alta frecuencia, otro fenómeno importante y nocivo, para la red eléctrica y los equipos operando en la misma que puede originarse al operar capacitores de potencia en presencia de armónicos son las resonancias locales.

Sobrecorriente en el neutro

La mayor parte de las cargas como las computadoras personales, impresoras, copiadoras, emplean fuentes monofásicas. Sus ventajas son los tamaños compactos, peso ligero, eficiencia operativa y carencia de necesidad de un transformador de baja frecuencia, sin embargo tienen un alto contenido de terceras armónicas de la corriente; estas son aditivos a los neutros del sistema trifásico, motivo de preocupación para las instalaciones con neutros de calibres pequeños.

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 corrientes 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 las corrientes armónicas, 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. A continuación describiremos el filtro de choque y el de absorción para citar un ejemplo.

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 8:

$$X_{sh} = (h)(X_{si}), X_{Lh} = (h)(X_{LI}),$$

$$X_{Ch} = \frac{X_{Cl}}{h}, X_{Ll} \cong \frac{X_{Cl}}{h^2},$$

$$I_{Ch} = \frac{I_h}{1 - \frac{X_{Cl}}{h^2 X_{S1}} + \frac{X_{Ll}}{X_{S1}}}$$

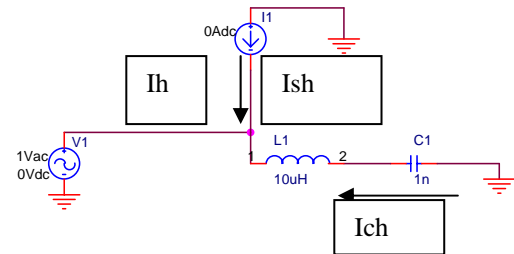


Figura 8. Filtro de choque para eliminación de resonancias y protección de capacitores

La conexión en serie de los capacitores se instala un reactor de inductancia L, sintonizado con la capacitancia C del capacitor a una frecuencia inferior a la de cualquier armónico significativo existente en el sistema, este dispositivo hace imposible la resonancia e impide que los capacitores absorban una corriente armónica excesiva ya que este arreglo protege a los capacitores, evita resonancias y corrige el factor de potencia a frecuencia fundamental.

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 permite: Evitar las resonancias, proteger a los capacitores, eliminar 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 con esto se evita el flujo de la corriente armónica por la red, Cuando se tiene un variador con rectificación de 6 pulsos, se

producen niveles de distorsión armónica de 45% en la onda de corriente. La instalación de variadores en paralelo hace necesaria una protección individual para cada motor con reactores de choque que impidan presentarse problemas de operación en el motor debido al flujo de corrientes armónicas que provienen de los demás variadores conectados al sistema, se debe de revisar la caída de tensión del motor ya que los reactores comerciales se ofrecen con caídas de tensión dependiendo o según la corriente nominal del variador que puede ser de 3% a 5% el cual lo define el usuario, los reactores de 5% pueden ser lo mas eficaces pro tal motivo se requiere de revisar la caída de tensión sobre el motor. Estos reactores amortiguan un poco las corrientes armónicas generados por el variador las cuales son: de 4% a 6% para el caso de reactores 3% de caída de tensión y de 8% a 10% para reactores de 5% el filtro a proponer es conveniente instalarlo entre el reactor y el variador. En los sistemas con filtros de armónicas las configuraciones de estos varían dependiendo lo que se quiera proteger, una forma de colocar los filtros es en la carga de los motores, estos filtros se conectan en paralelo con los motores, el filtro que se utiliza es pasivo, circuito LC, de esta forma el filtro compensa la distorsión individual producida por la carga este caso los motores, la función de los reactores es que hacen que aumente la impedancia de la fuente y además impide el paso de armónicas provenientes de cargas no lineales.

- ❖ Corrige el Factor de Potencia a frecuencia fundamental.

Bloqueo con transformadores zig-zag.

Este transformador consiste en que e devanado en zig-zag, proporciona un desplazamiento angular 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 una bobina adicional en serie en cada una de las fases y estas bobinas forman un ángulo de 120° con respecto a la bobina de la fase correspondiente. Con lo cual se produce el desplazamiento angular al igual que un devanado delta. Además de proporcionar como es de configuración estrella, un hilo de neutro para cargas monofásicas. Es transformador es otra alternativa para sustituir a un transformador convencional cuando esté represente perdidas y sobrecalentamientos productos de la distorsión armónica de las cargas. Como pueden ser las más comunes las computadoras personales y alumbrado fluorescente. Además de que 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. La desventaja de este transformador es su costo ya que para su construcción requiere de un 15% más de material conductor.

Sobredimensionamiento del neutro (hilo puesto a tierra).

Esta técnica esta empleado para disminuir las caídas de tensión que producen las armónicas de secuencia cero en cargas monofásicas. Esto ya que los diferentes equipos electrónicos tales como las computadoras personales, balastras electrónicas , fuentes de poder de pc's, estaciones de monitoreo, copadoras, y de más equipo electrónico alimentados con fuentes de poder rectificadas provocan una considerable distorsión, estas armónicas como ya se sabe fluyen por el conductor del neutro los cuales pueden alcanzar valores eficaces de corriente del doble del valor comparados con las corrientes de fase. Estas referencias hacen que el conductor de neutro se redimensione, además se tiene una recomendación que hace el código NEC en su inciso 210-4ª indicando que el conductor de neutro debe ser de un calibre igual o mayor al de los conductores de fase. También es importante tener en cuenta la caída de tensión que producen estas corrientes de secuencia cero, a través de la impedancia del hilo de puesto a tierra (neutro). Se considera alta cuando se tienen valores del 10% valor pico, respecto a la amplitud fase/neutro de la onda de tensión. En el caso de instalaciones que contenga grandes cargas de equipos electrónicos se debe de seleccionar el calibre del hilo de puesto a tierra de una ampacidad del doble comparado con los conductores de fase y se debe tomar como un conductor activo para efectos de cálculos.

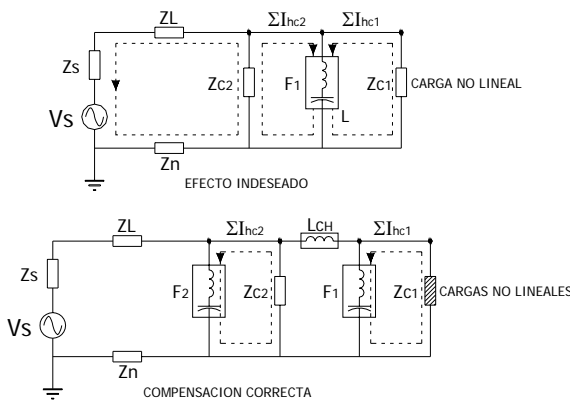


Figura 9 el esquemático de un filtro de absorción respecto a cargas no lineales y adyacentes.

Compensadores Estáticos.

Las ventajas de utilizar estos dispositivos son:

- ❖ Eliminan corrientes Armónicas.
- ❖ Controla el flicker.
- ❖ Evita las resonancias.
- ❖ Proteger los capacitores.
- ❖ Regula el nivel de tensión en el punto de conexión del sistema

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 de 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, de potencia 2ª. Otra forma es dividiendo los rectificadores de 6 pulsos en dos grupos idénticos alimentados cada uno con un transformador delta/delta y delta/estrella, respectivamente. Su forma de operar consiste en que se alimentan la carga con dos variadores, A y B, idénticos y cada uno de ellos se energiza por medio de un transformador delta / delta y delta/estrella, respectivamente. El defase de 30° que ambos transformadores provocan en sus secundarios a la onda principal genera bloquea la 5ª y 7ª Armónica en las barras, simulando el conjunto un solo variador de 12 pulsos.

Degradación de la potencia nominal de un transformador estándar.

Esta técnica esta basada en la normativa ANSI/IEEE C57, 110-1986., Consiste en un calculo de los KVA utilizables en un transformador estándar sometido a un flujo determinado de corrientes armónicas, 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 un factor K, el cual esta referido a las armónicas en el sobrecalentamiento del transformador.

Matemáticamente se puede expresar :

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

Donde:

P_T = son las 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. Este tipo de transformadores ocupan más espacio que los transformadores estándar de igual capacidad de potencia, esto se debe por la mayor cantidad de alambre y mayor tamaño de sus devanados, estos pueden ocupar desde un

130% a un 140% más de espacio que los convencionales y pueden pesar 115% que un transformador estándar, con esto también se produce un incremento en su costo de aproximadamente el doble a los convencionales de igual potencia. Para el cálculo de un transformador factor K se recomienda hacer el promedio de los diferentes niveles de distorsión ponderándolos con la cantidad de kva instalados de cada nivel. Estos cálculos se hace involucrando valores de pu (por unidad), de la corriente rms para cada una de las frecuencias armónicas, la ecuación es la siguiente:

$$I_h(pu) = \% HD(h) \div \sqrt{(THD)^2} \times (100)^2$$

Donde:

h = frecuencia armónica (1,3,5,etc), $I_h(pu)$ = corriente rms en por unidad a la armónica h, %HD (h) = porcentaje de distorsión de la armónica h, THD = distorsión armónica total, Básicamente cada $I_h(pu)$ es elevado al cuadrado y luego multiplicado por el cuadrado de la armónica (h^2).

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

Esto se hace para cada una de las armónicas presentes en el sistema, después se suman todas, esta sumatoria es el actor K., El factor K se multiplica por las pérdidas debido alas corrientes de Eddy, que produce el incremento de calor en el transformador debido a la distorsión armónica, las pérdidas por corrientes de Eddy se pueden conocer restando las pérdidas por efecto joule $I^2 R$ de la medición de las pérdidas por impedancia..

7.- Bibliografía.

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