

I ARMÓNICOS
EN
LÍNEAS DE
BAJA
TENSIÓN

AUTOR:

HÉCTOR R. ESTIGARRIBIA B.

hectorpyco@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de los armónicos es un problema creciente, tanto para los suministradores de electricidad como para los usuarios.

Este fenómeno relativamente nuevo, debido al cada vez mayor uso de equipos electrónicos en todos los ambientes, concierne a todas las redes eléctricas de los sectores, terciario, industrial y doméstico. Ningún entorno moderno puede escapar a esta distorsión debida a equipos tales como : microordenadores, servidores, tubos fluorescentes, climatizadores, variadores de velocidad, lámparas de descarga, rectificadores, sistemas de alimentación ininterrumpida, hornos microondas, televisores, iluminación halógena ... Todas estas cargas se denominan "no lineales" o deformantes". En este trabajo se explican que son los armónicos, sus causas, efectos, formas de medirlos y las posibles soluciones a ser tomadas para contrarrestar dichos efectos.

CAPITULO I

DEFINICIONES

DEFINICIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA ELÉCTRICO

Una función periódica no senoidal puede ser descompuesta en la suma de una función senoidal de la frecuencia fundamental y de otras funciones senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas funciones adicionales son conocidas como componentes armónicas o simplemente como Armónicos.

En sistemas eléctricos la palabra Armónicos se utiliza para designar corrientes o tensiones de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de la alimentación.

Si la frecuencia de la señal eléctrica es inferior a la fundamental, recibe el nombre de subarmónico, ésta podría ocasionar parpadeos luminosos, perceptibles visualmente, denominados Flicker

Los armónicos son distorsiones de las ondas senosoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal

Teoría de armónicos

Cualquier onda no senoidal puede ser representada como la suma de ondas senoidales (armónicos) teniendo en cuenta que su frecuencia corresponde a un múltiplo de la frecuencia fundamental (en el caso de la red = 50Hz), según la relación:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

donde:

V0 = Valor medio de v(t) (onda en estudio)

V1 = Amplitud de la fundamental de v(t)

Vk = Amplitud del armónico de orden k de v(t)

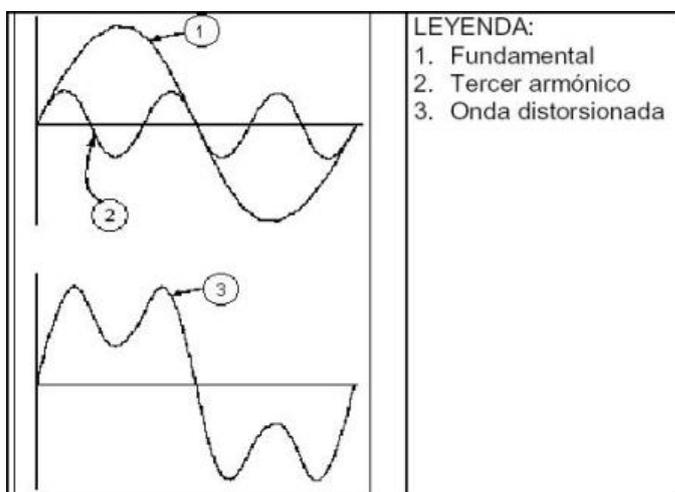


Figura 1: Efecto de la suma de 2 frecuencias múltiples

En la tensión de alimentación la frecuencia fundamental es de 50Hz, el segundo armónico tiene una frecuencia de 100Hz, el tercer armónico una frecuencia de 150Hz y así sucesivamente. La distorsión debida a la presencia de armónicos es un problema constante y no debe confundirse con fenómenos de corta duración como picos, reducciones o fluctuaciones. Es necesario notar que en (1) los límites de la suma (sigma) son desde 1 hasta infinito. Lo que sucede en la práctica es que no existe un número ilimitado de componentes armónicas, sino que a partir de cierta componente (orden) su valor es despreciable. La norma EN 50160 recomienda no tener en cuenta los índices de la expresión (1) superiores al orden 40°.

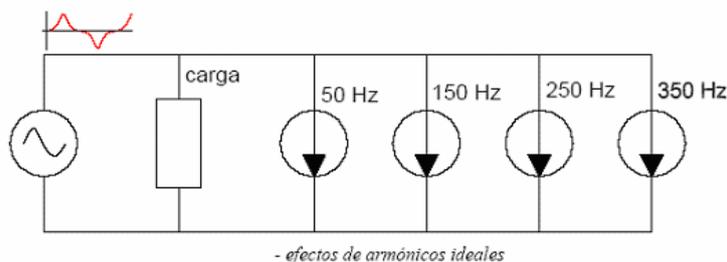
Un índice fundamental para anotar la presencia de armónicos es el THD definido como:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1}$$

Tal índice tiene en cuenta la presencia de todos los armónicos y es mucho más elevado cuanto más deformada sea la forma de onda.

Los armónicos se comportan como fuentes de intensidad dispuestas en paralelo y a diferentes frecuencias donde la suma de todas las intensidades es la corriente que alimenta a la carga (múltiplos enteros de una frecuencia fundamental).

La frecuencia fundamental es la única que produce potencia activa.



Obtenemos una corriente distorsionada con armónicos y podemos observar que el circuito absorbe corriente en los picos de tensión, provocando unos impulsos de intensidad, variables según la carga.

CAUSAS

Origen y efectos de los armónicos

El origen del problema de armónicos son los receptores que consumen corrientes distorsionadas (no senoidales). A pesar de que la tensión en origen suele ser senoidal, las caídas de tensión provocadas por dichas corrientes no senoidales hacen que en los puntos de consumo (PCC, "Point of common coupling, en fig. 2) se tenga una tensión distorsionada y por tanto los usuarios conectados a la red distorsionada sufren los efectos de los usuarios que generan la distorsión de corriente.

Cualquier aparato que altere la forma de la onda senoidal o que sólo use una parte de la onda causa distorsiones de la forma de onda y en consecuencia armónicos. Todas las señales quedarán afectadas. La situación más común es la distorsión armónica debida a cargas no lineales como equipos electrodomésticos, ordenadores personales, controladores de velocidad de motores. La distorsión armónica produce corrientes de valores significativos a las frecuencias de orden impar de la frecuencia fundamental. Las distorsiones armónicas afectan considerablemente al conductor de neutro de las instalaciones eléctricas.

En la mayoría de países la red de alimentación es trifásica con 50/60Hz con conexión triángulo en el primario y conexión estrella en el secundario del transformador. El secundario generalmente entrega 230V AC entre fase y neutro y 400V AC entre fases. El balanceado de las cargas para cada fase es el problema de los diseñadores de sistemas eléctricos.

El incremento en el uso de las cargas no lineales principalmente, la incorporación de sistemas de transmisión de CD y la proliferación de diversas fuentes de generación de armónicos está causando un incremento de problemas armónicos en los sistemas de potencia

Fuentes de Armónicas

Existe un gran número de dispositivos que distorsionan el estado ideal de las redes eléctricas. Algunos de ellos han existido desde la formación de los sistemas de potencia, y otros son producto de la aplicación de dispositivos de electrónica de

potencia utilizados para el control moderno de las redes eléctricas. Como ejemplo se puede mencionar el convertidor de línea. Este dispositivo se utiliza tanto como rectificador (ac-dc) como inversor (dc-ac) y en aplicaciones de alta y baja potencia. Otra fuente principal de armónicas, particularmente en áreas metropolitanas, es la iluminación a base de gas (fluorescente, arco de mercurio, sodio de alta presión, etc) [9].

Las fuentes de armónicas las podemos clasificar en:

- * Fuentes tradicionales
- * Nuevas fuentes de armónicas
- * Futuras fuentes armónicas

Fuentes Tradicionales

Antes del desarrollo de los convertidores estáticos, la distribución armónica se asociaba con el diseño y la operación de máquinas eléctricas y transformadores. De hecho la principal fuente de armónicas en esos días. De hecho la principal fuente de armónicas en esos días era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia.

Los transformadores y máquinas rotatorias modernas bajo operación en estado estable no ocasionan por sí mismas distorsión significativa en la red. Sin embargo, durante disturbios transitorios y cuando operan en rangos fuera de su estado normal, entonces pueden incrementar su contenido en forma considerable. Otras dos cargas lineales que conviene considerar debido a su contribución armónica son los hornos de arco y la luz fluorescente.

*** Transformadores**

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionadas entre sí mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aún en estas condiciones, si graficamos la corriente de magnetización vs. el tiempo para cada valor de flujo, la forma de onda dista mucho de ser senoidal.

Cuando se incluye el efecto de histéresis, esta corriente magnetizante no senoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se observa se debe a las armónicas triples (3a., 9a., 12a., etc.), pero principalmente a la 3a. Por lo que para mantener una alimentación de voltaje necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta.

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización se elevan a sus niveles máximos en las horas de la madrugada, cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de tensión es alto.

Al desenergizar un transformador, es posible que tenga flujo magnético residual en el núcleo. Cuando se re-energiza la unidad, la densidad de flujo puede alcanzar niveles de pico de hasta tres veces el flujo de operación normal.

Esto puede llevar al núcleo del transformador a niveles extremos de saturación y producir amperes-vuelta excesivos en el núcleo.

Este efecto da lugar a corrientes de magnetización de 5 a 10 p.u. de la corriente nominal (comparada con la corriente de magnetización nominal de apenas el 1% ó 2% de la corriente nominal).

El decremento de esta corriente con el tiempo es función

principalmente de la resistencia del devanado primario. Para transformadores muy grandes, esta corriente puede permanecer por muchos segundos, debido a su baja resistencia.

*** Máquinas rotatorias**

Si tomamos el devanado trifásico de una máquina rotatoria suponiendo un entrehierro constante y la ausencia de saturación del acero, en un análisis de Fourier de la distribución de las fuerzas magnetomotrices (f.m.m.'s) se observa que la f.m.m. fundamental es una onda viajera moviéndose en la dirección positiva, las armónicas triples están ausentes; y la quinta armónica es una onda viajera en la dirección negativa, la 7a. armónica viaja en la dirección positiva, etc. Como resultado del contenido armónico de la distribución de la f.m.m. se producen armónicas en el tiempo que son dependientes de la velocidad. Estas armónicas inducen una f.e.m. (fuerza electromotriz) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda.

*** Hornos de Arco**

El sistema de potencia contiene una gran cantidad de aparatos que funcionan por medio de la descarga de arco. Algunos ejemplos de ellos son: los hornos de arco, las soldadoras de arco y las lámparas fluorescentes.

De todos los aparatos que producen arco eléctrico en un sistema de potencia, son los hornos de arco eléctrico los que pueden causar los problemas más severos, porque representan una fuente armónica de gran capacidad concentrada en un lugar específico. Un horno de arco eléctrico es mostrado en la figura, estos equipos según sus características de diseño pueden fundir acero, minerales y en general material de desecho metálico y el método de fundición consiste en la producción de un arco de gran energía que permite fundir el acero.

Una combinación del retraso en la ignición del arco con las características altamente no lineales de la curva voltaje del arco vs. corriente, introduce armónicas de la frecuencia fundamental.

Adicionalmente, los cambios de voltaje ocasionados por alteraciones en la longitud del arco producen una gama de frecuencias, predominantemente de 0.1 a 30 khz, este efecto se hace más evidente en la fase de la fundición, en la interacción de las fuerzas electromagnéticas entre los arcos.

Los niveles de corrientes armónicas varían en forma marcada con el tiempo y se presentan comúnmente en formas de gráficas probabilísticas. Un punto importante es que la armónica "n", como por ejemplo la 5a., no solamente varían con el tiempo, sino con respecto a la componente fundamental. Por tal motivo los hornos de arco eléctrico son cargas que no se encuentran en estado estable, por lo general estos hornos inyectan armónicas del orden mostradas en la tabla 3.1.

Luz Fluorescente

Los tubos de la luz fluorescente son altamente no-lineales y dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante. En una carga trifásica de 4 hilos, las armónicas triples básicamente se suman en el neutro, siendo al 3a. la más dominante, en la figura se muestra el espectro típico de una lámpara fluorescente con balastro magnético.

Los circuitos de iluminación involucran frecuentemente grandes distantes y tienen muy poca diversidad de carga. Con capacitores individuales para corrección de factor de potencia, el circuito complejo LC se puede aproximar a una condición de resonancia en la 3a. armónica. Una solución para eliminar esto es aumentar la reactancia del neutro y aislar el punto de la estrella en el capacitor (banco flotante) o conectarlo en delta. Los bancos de capacitores se deben situar adyacentes a las otras cargas y no instalarlos como compensación individual de las lámparas.

Cargadores de baterías

Las armónicas individuales que generan el circuito en un cargador de baterías dependen del voltaje inicial en la misma y el contenido armónico global varía de acuerdo al tiempo e involucra probabilidad aleatoria.

Así como en televisores, radios, estéreos y otros artículos que emplean corriente directa, los cargadores de baterías producen corrientes de secuencia cero de armónicas triples, las cuales sobrecargan al circuito neutro. Para empeorar las cosas, la luz fluorescente también produce armónicas triples con la misma relación de fase. Más aún, el ángulo de fase de la tercera armónica no varía lo suficiente como para sumar cancelación de armónicas al operar varios cargadores de baterías, de tal manera que las terceras armónicas se suman casi algebraicamente.

Fuentes de poder en modo de conmutación.

La mayoría de los equipos electrónicos tales como **computadores personales, máquinas copadoras y fax**, cuentan con una fuente regulada por conmutación (switch-mode power supply). Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo. Cuando el voltaje se encuentra cerca de su valor máximo. La corriente demandada por estas fuentes tienen una alta distorsión armónica total y un alto contenido de tercera armónica.

Lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes son otro tipo de carga que genera armónicas, estas armónicas son generadas por el efecto de los balastos y los dispositivos no lineales y electrónicos que utilizan para su funcionamiento.

EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

El incremento en el uso de las cargas no lineales principalmente, la incorporación de sistemas de transmisión de CD y la proliferación de diversas fuentes de generación de armónicos está causando un incremento de problemas armónicos en los sistemas de potencia.

El efecto de distorsión de voltaje puede ser dividido de manera general en 3 categorías:

- Esfuerzos en el aislamiento debido a los efectos de voltaje.
- Esfuerzos térmicos debido al flujo de corriente.
- Trastornos en la carga.

Factor de Distorsión Armónica Total (THD).-

Determina el grado de distorsión de una señal periódica con respecto a la senoidal y se define en términos de la amplitud de los armónicos.

THD para voltaje (THD_v)

(2)

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}$$

THD para Corriente (THD_I):

(3)

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

EFFECTOS DE LAS ARMONICAS

Los efectos de las armónicas se dividen en general en tres categorías:

- Efectos en el propio sistema de potencia
- Efectos en la carga consumida
- Efectos en los circuitos de comunicación

EFFECTOS EN LOS APARATOS DEL SISTEMA DE POTENCIA

TRANSFORMADORES

Los efectos de las armónicas en los transformadores son:

1. Incremento en las pérdidas del cobre
2. Incremento en las pérdidas del hierro
3. Posible resonancia entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea
4. Esfuerzos de aislamiento

Las pérdidas en el cobre en la presencia de armónicas pueden calcularse por la ecuación (5), de manera similar las pérdidas en el hierro pueden calcularse por las ecuaciones (7), (8) ó (9).

EFFECTOS EN MAQUINAS ROTATORIAS

Fundamentalmente las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas rotatorias de C.A.:

- Incremento en el calentamiento debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre.
- Cambios en el par electromagnético que afecta a:
- La eficiencia de la máquina.
- Las oscilaciones torsionales de la máquina.

EFEECTO EN MOTORES DE INDUCCION

1. Pérdidas I^2R en el estator: Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R .

2. Pérdidas I^2R en el rotor: éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque.

Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

1. Pérdidas de núcleo: estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina

2. Pérdidas adicionales.

3. Torque en el motor de inducción

EFECTOS EN CABLES Y CONDUCTORES

Al circular corriente a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, I^2R donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable disminuye el área efectiva por donde está circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.

MAL FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE ESTADO SOLIDO

La distorsión armónica puede causar el mal funcionamiento de los dispositivos de estado sólido si sus controles son sensibles al cruce por cero de la onda de voltaje. Las condiciones de resonancia y distorsión típicas del problema de las armónicas pueden originar que las formas de corriente y voltaje crucen por cero más de una vez en el medio ciclo.

Otros problemas de mal funcionamiento son:

- Inducción de errores en equipos de medición
- Disparo en falso de relés e interruptores
- Operación inestable de circuitos de disparo que utilizan el cruce por cero.
- Interferencia sobre controladores de motores.

EFEECTO EN APARATOS DE MEDICION

Los medidores e instrumentos son afectados por la presencia de voltajes y corrientes armónicas. Aparatos de disco de inducción, tales como wattorímetros y relevadores de sobrecorriente son diseñados y calibrados solamente para la corriente y el voltaje fundamental.

La presencia de corrientes y voltajes armónicas generan un par electromagnético adicional en el disco causando operaciones erróneas. La distorsión debe ser severa (mayor del 20%) para que se detectan errores importantes.

*Aumento de tamaño
y de pérdidas en los transformadores*

En los transformadores, reactancias, etc., las pérdidas en el hierro en caso de existir armónicos crecen muy significativamente, esto hace que deban sobredimensionarse los kVA nominales de forma notable. El factor que se suele emplear para ello es el llamado factor K de los transformadores que se define

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I_{ef}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

como:

donde e es un factor que representa la relación entre pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro del transformador. Este factor puede obtenerse de los datos de ensayo del transformador, o en su defecto puede tomarse como valor aproximado e=0,3 y el exponente q suele tomarse de 1,7 a 1,8.

En cuanto a las pérdidas en el hierro, también son muy significativas ya que aumentan con la frecuencia a una potencia q entre 1 y 2.

$$P_{Fe} = k_{Fe} \cdot \sum h^q \cdot I_n^2$$

En el mismo ejemplo anterior, con 100A de fundamental y 20A de 5° armónico por ejemplo, las pérdidas en el hierro debidas al armónico 5°, serían
Pérdidas de I fundamental = k .100² = k . 10.000
Pérdidas de I fundamental = k.51,5 20² = k.4472 (44,72% adicional de pérdidas)

Incidencia en el coste de la energía

En la mayor parte de países del mundo, no existe actualmente ningún concepto en la tarifa para penalizar el consumo de armónicos de corriente. No obstante, dada la magnitud del problema, son muchos los países que están en vías de estudio de algún tipo de recargo en caso

de que se sobrepasen los límites de la norma.

LÍMITES ESTABLECIDOS

LÍMITES DE DISTORSIÓN

La CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) y el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) han establecido normas que limitan perturbaciones de baja frecuencia en redes industriales y domésticas, como las normas IEC 61000 y EN 61000. Los parámetros manejados por la normativa para establecer los límites de la perturbación por armónicos son:

Orden de un armónico (n): Relación entre la frecuencia del armónico (f_n) y la frecuencia fundamental (f_1).

$$n = f_n/f_1$$

Tasa de distorsión individual (%U ó %I): Relación entre el valor eficaz de la tensión o corriente armónica (U_n ó I_n) y el valor eficaz de la correspondiente componente fundamental.

$$\%U_n = 100 U_n/U_1$$

$$\%I_n = 100 I_n/I_1$$

Distorsión Armónica Total (THD%U ó THD%I): Relación entre el valor eficaz de las componente armónicas de tensión o intensidad y el correspondiente valor fundamental. En EEUU ya está vigente la normativa IEEE 519 que limita la cantidad de corriente armónica inyectada a la red general, y responsabiliza al cliente por la misma. En España, el límite aceptado por UNIPEDA (Unión de productores y distribuidores de energía eléctrica) es de $THD(U) = 5\%$ para redes industriales en baja tensión, mientras que en alta tensión el nivel máximo recomendado por los organismos internacionales es de $THD(U) = 3\%$.

$$THD\%(U) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} U_n^2}}{U_1} 100$$

$$THD\%(I) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} I_n^2}}{I_1} 100$$

Normativa vigentes en la UE

a fin de atenuar rápidamente la penetración de la distorsión armónica, existe hoy día un triple dispositivo normativo con :

- ▶ normas para el aparellaje eléctrico
 - CEI 1000-3-2 o EN 61000-3-2
- para los aparatos de baja tensión que consuman una corriente inferior a 16 A,
- CEI 1000-3-4 o EN 61000-3-4

para los aparatos o instalaciones de baja tensión que consuman una corriente superior a 16 A.

► normas para la calidad de las redes eléctricas

- EN 50160 que define las características de la tensión suministrada por las redes públicas en baja tensión,
- IEEE 519 (Recommended Practices for Harmonics Control in Electrical Power Systems) aproximación conjunta entre la compañía eléctrica y el cliente para limitar el impacto de las cargas no lineales. Esta recomendación es un compromiso entre ambas partes para la limitación de los armónicos.

► normas de compatibilidad entre redes eléctricas y productos

- CEI 1000-2-2 y recomendaciones CIGRE (Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas) para las redes públicas en baja tensión,
- CEI 1000-2-4 para las instalaciones industriales en baja y media tensión.

Por otro lado, las compañías eléctricas fomentan las acciones de prevención afín de reducir la degradación en la calidad de la electricidad, los calentamientos y las alteraciones del factor de potencia.

MEDICIÓN

4.-Medición de armónicos:

Para medir armónicos utilizaremos multímetros de valor eficaz de pico de 1 ms con un factor de cresta igual a 3, y que indiquen la frecuencia de la corriente: ya que los multímetros normales sólo miden valores eficaces en señales sinusoidales (valor I_{111}), en señales cuadradas realizan la lectura a un 10% por encima del valor real, y en señales distorsionadas hasta 40% por debajo, ya que este tipo de multímetro tiene la siguiente característica:

$$\text{TRUE RMS : F.C.} = V \text{ pico} / V \text{ efic.} = 1,414 = \sqrt{2}$$

Donde F.C.: valor de cresta

EQUIPOS DE MEDIDA

Cuando se habla de valores de corriente alterna deben referirse al valor RMS (valor cuadrático medio) o calentamiento efectivo. Esta magnitud es equivalente al valor de una corriente continua con el mismo calentamiento que el producido por la corriente alterna que está siendo medida. La manera más habitual de medir este valor RMS con un multímetro es rectificar la corriente alterna, determinar el valor medio de la señal rectificada y multiplicar este valor por 1.1. Este factor es la constante que relaciona el valor medio y el valor RMS de una señal senoidal perfecta. Sin embargo, si la forma de la señal está distorsionada esta relación es falsa. Esta es la razón por la cual los medidores que están basados en el valor medio dan lecturas incorrectas en presencia de armónicos. Fluke ofrece una amplia gama de medidores de verdadero valor eficaz. Además existe en el mercado una amplia variedad de equipos de medición tales como POWERLOGIC, SINEWAVE, etc.

SOLUCIONES

1. Las soluciones a este problema se realizan en forma Jerarquizada; primero en forma particular, resolviendo el problema de inyección de armónicos por parte del usuario al sistema (diseñando y ubicando filtros en el lado de baja tensión, usando el transformador como barrera); y segundo, resolviendo el problema en forma global, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un problema de optimización donde se determina la ubicación de los compensadores (condensadores, filtros pasivos, filtros activos). Independientemente del tipo de compensador utilizado para reducir los niveles de armónicos en el sistema o en el usuario, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia, esto con el fin de determinar resonancias serie (baja impedancia al paso de corriente) y paralelo (baja admitancia a la tensión de alimentación).

2. FILTROS PASIVOS PARA COMPONENTES ARMÓNICAS.

El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas potencia tiene dos objetivos: Servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas; y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita. Los filtros pasivos pueden ser, según el propósito particular que se persigue, de dos tipos:

- Filtros Series.
- Filtros Shunt o paralelo.

Los Filtros Series evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde el contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Estos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger.

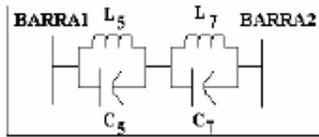


Figura 1. Filtro pasivo serie.

de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros.

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque: Es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

2.1. Filtros Shunt o Paralelos Pasivos:

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros, pero las más utilizadas son los "Filtros Sintonizados Simples" y los "Pasa Altos".

2.1.1. Filtro Sintonizado Simple.

Elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor.

$$\omega_h = 2\pi fh \quad (1)$$

donde, h es el armónico al cual se quiere sintonizar, ω es la frecuencia angular y f es la frecuencia fundamental.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{|V|^2}{Q_c} \quad (2)$$

donde, X_C es la reactancia capacitiva, Q_c es el valor de la potencia reactiva que el filtro va a suministrar en cada rama, V es la tensión nominal.

$$C_p = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (3)$$

$$L_F = \left[\frac{1}{2\pi 60h \sqrt{C_F}} \right]^2 \quad (4)$$

$$X_{Lh} = \omega_h L_F \quad (5)$$

$$R_F = \frac{X_{Lh}}{Q} \quad (6)$$

donde, Q es el factor de calidad del filtro, R es la resistencia interna del inductor, ver referencias [1] a [9].

Este filtro se sintoniza a la frecuencia armónica h que se desea eliminar; o sea que, para esta frecuencia, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales y por lo tanto se anulan, entonces la impedancia que presentará el filtro para esta frecuencia es mínima (valor igual a la resistencia), y absorberá gran parte de la corriente armónica contaminante.

El factor de calidad del filtro, determina la forma de la característica de impedancia, y hace que ésta sea más o menos estrecha o abrupta.

La impedancia de la configuración del filtro sintonizado simple mostrada es:

$$Z = R_F + j \left(\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right) \quad (7)$$

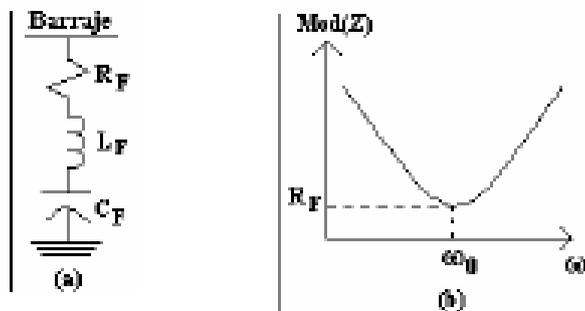


Figura 2. (a) Filtro sintonizado simple, (b) comportamiento en frecuencia.

2.1.2. Filtros Pasa Altos. Son utilizados para eliminar un amplio rango de frecuencias, y se emplean cuando las armónicas no tienen frecuencia fija. Los parámetros se calculan con las ecuaciones (1) ~ (6), ver referencias [1], [9].

La impedancia de este filtro viene dada por:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_F} + \left(\frac{1}{R_F} + \frac{1}{j\omega L_F} \right)^{-1} \quad (8)$$

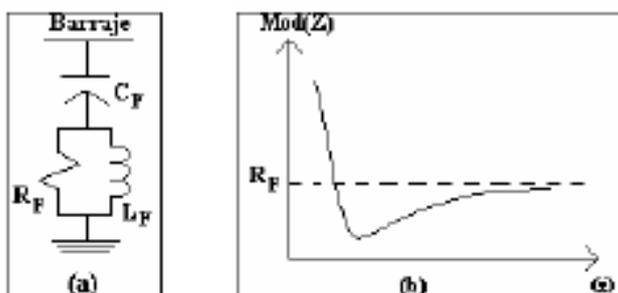


Figura 3. (a) Filtro pasa alto, (b) comportamiento en frecuencia.

Este filtro, al igual que el sintonizado simple, se sintoniza a alguna frecuencia específica; pero debido a que posee una característica amortiguada producto de la resistencia en paralelo con la inductancia, presenta una baja impedancia para la frecuencia de sintonía y superiores a ésta. O sea que, absorbe corrientes armónicas -si existende frecuencias desde la de sintonía en adelante. Para frecuencias menores a la sintonía, el filtro presenta impedancias altas. El factor de calidad de este filtro es bajo (0.5-5), y al igual que el sintonizado simple, controla la característica de la impedancia.

Ventajas:

- Atenúa un amplio espectro de frecuencias armónicas de acuerdo a la elección del valor de la resistencia, sin la necesidad de subdivisión en ramas paralelas.
- Es muy robusto frente a problemas de pérdida de sintonía comparado con el filtro sintonizado simple.

Desventajas:

- Origina una frecuencia de resonancia paralela al interactuar con la red.
- Las pérdidas en la resistencia y en el inductor son generalmente altas.
- Para alcanzar un nivel similar de filtrado (de una armónica específica), que el sintonizado simple, el filtro pasa altos necesita ser diseñado para una mayor potencia reactiva.

2.2. SELECCIÓN DE FILTROS PASIVOS

La utilización de un filtro como solución al problema de armónicos requiere de un análisis detallado de la respuesta en frecuencia del sistema. Entre los criterios de selección del filtro se tienen los siguientes:

2.2.1. El número de armónicos del sistema a atenuar.

Dependiendo del número de armónicos existentes en el sistema, se puede determinar la cantidad de filtros (filtro sintonizado o dual) que se podrían ubicar para obtener una atenuación de las componentes armónicas. Esta minimización debe estar acorde con los límites establecidos por las normas.

2.2.2. Los requerimientos del filtro. Se hace referencia a la acción correctiva que se desee del filtro (compensación de reactivos, reducción de la distorsión armónica, regulación de tensión o todos). Cada requerimiento del filtro implica un diseño específico, tal que el objetivo para el cual se quiere se cumpla.

2.2.3. La energía de cada armónico. La magnitud de cada armónico está directamente relacionada con las pérdidas que estas componentes armónicas ocasionan

en el sistema de potencia.

2.3. UBICACIÓN DE FILTROS PASIVOS.

Existen dos opciones para ubicar un filtro pasivo para armónicos (ver Figura 4):

- El alimentador de media tensión con el fin de disminuir las pérdidas del sistema.
- Cerca de la carga no lineal (baja tensión), para evitar la inyección de componentes armónicas de corriente al sistema por parte de la carga.

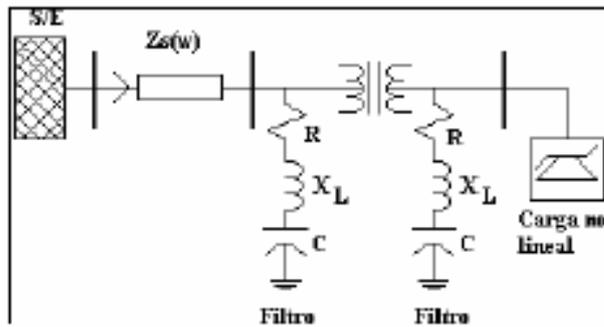


Figura 4. Posibles ubicaciones de los filtros pasivos.

Los criterios de ubicación del filtro son:

2.3.1. La existencia de cargas altamente contaminantes.

Se debe ubicar el filtro en el lado de baja tensión; de esta forma el transformador de potencia sirve de amortiguador (aislante de armónicos) tanto de las corrientes armónicas provenientes de otras cargas como de las corrientes armónicas generada por la carga, lográndose aislar el problema.

2.3.2. La existencia de cargas armónicas distribuidas.

Los filtros deben ser ubicados en media tensión y en **lugares estratégicos (óptimos)** para evitar la excesiva circulación de corrientes armónicas por el sistema.

2.4. PROBLEMAS DE LOS FILTROS

Uno de los mayores problemas de los filtros es que se produzca la desintonía de éstos. Los cuatro eventos más comunes que pueden dar como resultado una desintonización del filtro son:

- Deterioro de los condensadores, lo cual disminuye la capacitancia total y con esto aumenta la frecuencia a la cual el filtro fue sintonizado.
- Tolerancia de fabricación tanto en el reactor como en los condensadores.
- Variación de temperatura.
- Variación en el sistema.

Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia deseada, ver referencias[1], [2], [7] y [9]. Esto para tener la opción de una buena operación del filtro en un rango mayor de tiempo de vida útil.

De los cuatro eventos mencionados anteriormente los tres

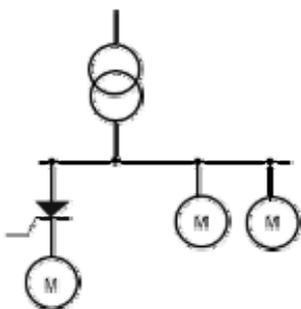
primeros tienen que ver con variaciones propias de los elementos constitutivos de los filtros, mientras que el último depende de las variaciones del equivalente del sistema.

FILTROS DE ARMONICOS

La presencia de armónicos puede plantear problemas tanto para los condensadores instalados como para el resto de aparatos conectados a la red. Por un lado las condiciones de trabajo de los condensadores pueden llegar a ser extremadamente duras o inadmisibles y por otro aparecen perturbaciones y distorsiones en el funcionamiento de equipos electrónicos e informáticos, redes de telecomunicaciones, transformadores, elementos de maniobra, etc.

La solución de la compensación de energía reactiva en redes con armónicos se realiza protegiendo los condensadores mediante filtros de protección o reduciendo el nivel de armónicos mediante filtros de eliminación.

Por último, también se puede pretender reducir el nivel de armónicos de una instalación sin considerar la corrección del factor de potencia.



Generalmente, los armónicos provienen de los convertidores estáticos presentes en la propia industria, aunque también pueden ser inyectados a través de la red desde el exterior. En servicio, los convertidores estáticos consumen energía reactiva, que debe ser compensada mediante condensadores, y además generan corrientes armónicas.

Sobre intensidades en los condensadores.

Resonancia

La impedancia en los condensadores disminuye al aumentar la frecuencia presentando un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas. Estas corrientes superpuestas a la corriente fundamental, pueden provocar sobreintensidades perjudiciales para los condensadores.

La instalación de los condensadores para la corrección del factor de potencia hace que se forme un circuito paralelo entre estos, las impedancias de cortocircuito del transformador de alimentación-red, las cargas conectadas y el convertidor estático.

El convertidor estático impone la frecuencia y el valor de cada corriente armónica y esta se reparte entre ambas ramas del circuito según sea la impedancia que presenten para ese armónico. Se ha de destacar que la

corriente que circula por cualquiera de ellas puede ser superior a la corriente del convertidor según lo cercana que este la frecuencia de armónico del punto de resonancia del circuito paralelo. Este hecho se presenta para cada una de las corrientes armónicas que genera el convertidor lo que en conjunto puede suponer una sobre intensidad perjudicial para el condensador. En el peor de los casos, cuando la frecuencia de alguna de las corrientes armónicas del convertidor estático coincide o es muy próxima a la de resonancia del circuito paralelo, la corriente que circula por ambas ramas alcanza valores inadmisibles que pueden dañar seriamente la instalación.

La corriente que para cada armónico absorbe el condensador puede ser calculada mediante las siguientes expresiones:

$$I_{cn} = \frac{I_n}{1 - \frac{n^2 * X_1}{X_c}} = \frac{I_n}{1 - \frac{n^2 * Q_c}{S_k}}$$

Siendo :

I_{cn} = Corriente armónica de orden «n» atraviesa el condensador.

I_n = Corriente armónica de orden «n» generada por la carga.

X_c = Reactancia capacitiva del condensador a la frecuencia fundamental.

X_1 = Reactancia de cortocircuito de la red a la frecuencia fundamental.

Q_c = Potencia reactiva del condensador.

S_k = Potencia de corto circuito de la red.

Esta expresión muestra que las corrientes armónicas que circulan por el condensador pueden en determinadas circunstancias ser muy elevadas. La peor situación se da cuando el condensador y la inductancia de la red forman un circuito resonante. Esto ocurrirá cuando

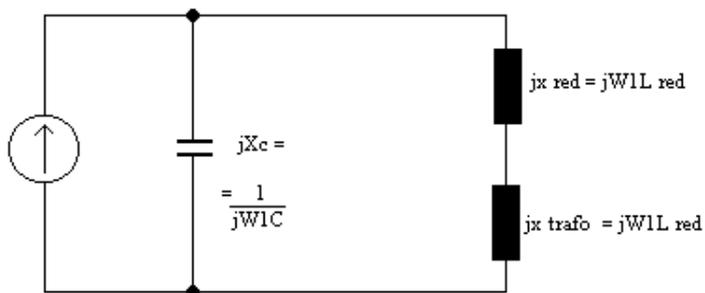
$$n = \frac{\sqrt{X_c}}{\sqrt{X_1}} = \frac{\sqrt{S_k}}{\sqrt{Q_c}}$$

También a de tenerse en cuenta que la tensión aplicada al condensador se vera incrementada por la circulación de las corrientes armónicas y su valor de cresta viene dado por la siguiente expresión según normas CEI:

$$U = \sum_1^n \frac{\sqrt{2 * I_{cn}}}{2 * f * n * C}$$

C = Capacidad del condensador

f = Frecuencia fundamental (50 Hz)



SOLUCIONES

Condensadores con aislamiento reforzado tipo FMR

Estos condensadores se emplean cuando el nivel de armónicos presente, aun siendo reducido, es suficiente para provocar sobretensiones y sobreintensidades en los condensadores que superen lo indicado en las normas. Estos condensadores están fabricados con dieléctrico reforzado especialmente seleccionado para trabajar en condiciones adversas presentan gran resistencia a las sobrecargas permanentes. Sus principales características son:

U trabajo max = 2 UN

I trabajo max = 2,2 IN

Filtros de protección de condensador

Los filtros de protección de condensadores se emplean cuando el objetivo final es la compensación de energía reactiva, a la frecuencia fundamental, en redes con un alto contenido en armónicos. Su misión consiste en evitar que las corrientes armónicas sobrecarguen el condensador desviándolas hacia la red.

Los filtros de protección de condensadores se realizan conectando una reactancia en serie con los condensadores de forma que la frecuencia de resonancia del conjunto se situé en un valor entre la fundamental y la del armónico inferior que es generalmente el de 5.º orden. De esta manera el conjunto presenta una elevada impedancia inductiva para todos los armónicos.

La conexión provoca que el condensador trabaje a una tensión superior a la de la red. Por este motivo los condensadores que se instalen con reactancias de protección deberán ser diseñados para soportar las sobretensiones que estas provocan.

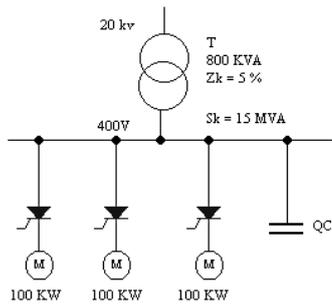
A una instalación de condensadores diseñada para trabajar a tensión de red no se le puede instalar reactancias de protección standard, ya que se haría trabajar a los condensadores a una tensión superior a la del diseño.

La elección del punto de resonancia del conjunto LC es un compromiso entre la cantidad de armónicos rechazados por el filtro y el incremento

de tensión que la frecuencia fundamental se produce en el condensador. Las corrientes armónicas también provocan sobre tensiones que afectan a la tensión total aplicada al condensador. Además se ha de tener en cuenta que la potencia reactiva que a 50Hz absorbe el conjunto es diferente a la que absorbería sin la reactancia. Atendiendo a todo esto la reactancia de filtro se elige de manera que su impedancia a 50Hz sea del orden de 6 o 7 % de la impedancia del condensador que protege.

Ejemplo

La necesidad del empleo de los filtros de protección de condensadores puede verse en el siguiente caso.



Supongamos que la corriente eficaz que consume el convertidor de la figura son 550 A con la siguiente distribución de armónicos:

- $I_5 = 20 \% I = 110 \text{ A}$
- $I_7 = 14 \% I = 77 \text{ A}$
- $I_{11} = 9 \% I = 50 \text{ A}$
- $I_{13} = 8 \% I = 44 \text{ A}$

Para una batería instalada de 250 Kvar 400 V 361 A, las corrientes que debidas a cada armónico, atravesaran el condensador se pueden calcular a partir de las formulas anteriores:

- $I_{C5} = 79 \text{ A}$
- $I_{C7} = 343 \text{ A}$
- $I_{C11} = 99 \text{ A}$
- $I_{C13} = 68 \text{ A}$

Entonces el valor eficaz de la corriente que absorberá la batería será:

$$I_c = \sqrt{361^2 + 79^2 + 343^2 + 99^2 + 68^2} = 518 \text{ A}$$

muy superior a los 361 A que señala la placa de características, lo que hace imposible su utilización sin filtro de protección de condensadores.

Reactancias tipo INR para filtros de protección

Diseñadas para esta clase de trabajo, se dispone de una gama normalizada para proteger condensadores desde 10 hasta 100 Kvar, 230 V y 400 V.

Baterías automáticas con filtros de protección de condensadores

Diseñada para esta clase de trabajo, se dispone de una gama normalizada para proteger condensadores desde 10 hasta 100 Kvar, 230 V y 400 V.

Baterías automáticas con filtros de protección de condensadores

UNDER FIRE ELECTRIC dispone de una gama normalizada de baterías automáticas para la mejora del factor de potencia diseñadas para trabajar en redes eléctricas con presencia de armónicos de manera que permitan una operación fiable y segura de los condensadores.

Las baterías automáticas de condensadores equipadas con filtros de protección contra armónico se componen de:

- Condensadores FILMETAL de aislamiento reforzado y tensión superior a la red.
- Reactancias de filtro trifásicas con núcleo de chapa magnética de alta calidad.
- Protección contra sobrecarga mediante control de la temperatura de la reactancia.
- Regulador de energía reactiva de la serie MCR con filtro de armónicos en las entradas de señal de tensión e intensidad.
- Fusible de alta capacidad de ruptura tipo NH.

Filtros de eliminación de armónicos

Estos filtros se emplean cuando el objetivo perseguido no es la compensación de la reactiva a la frecuencia fundamental sino la reducción de los armónicos presentes en la red. La total eliminación no es posible, puesto que los filtros siempre presentan una pequeña impedancia.

Los filtros de eliminación de armónicos están constituidos por filtros serie de reactancia condensador para la frecuencias inferiores a 500 Hz o filtros de banda ancha para frecuencias superiores a 500 Hz, sintonizados a la frecuencia del armónico que se desea eliminar. En la practica, los filtros se sintonizan a una frecuencia ligeramente inferior a la del armónico correspondiente.

Los rectificadores son los generadores de armónicos mas comunes que se encuentran en la industria.

Como un primer valor de calculo se puede considerar que los rectificadores presentan una distribución de corrientes armónicas tal como se muestra en la tabla. También se pueden hallar mediante las siguientes fórmulas:

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

$$n = kq \pm 1$$

donde:

n = orden del armónico

k = 1,2,3,4....

q = numero de pulsos del rectificador

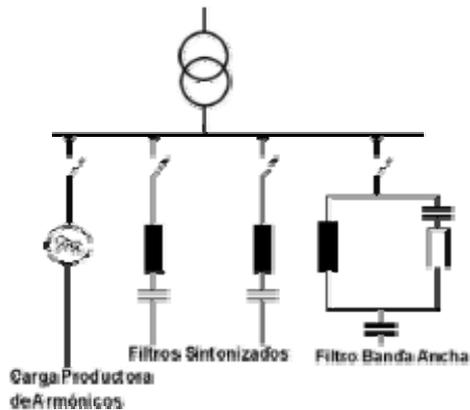
I₁ = corriente a la frecuencia fundamental

PORCENTAJE DE CORRIENTE ARMONICA RESPECTO A LA FUNDAMENTAL (I_n/I₁) %

| Orden | Número de pulsos | |
|-------|------------------|-----------|
| | 6 pulsos | 12 pulsos |
| 5 | 20,0% | ---- |
| 7 | 14,3 | ---- |
| 11 | 9,1 | 9,1% |
| 13 | 7,7 | 7,7 |
| 17 | 5,9 | ---- |
| 19 | 5,3 | ---- |
| 23 | 4,3 | 4,3 |
| 25 | 4,0 | 4,0 |

una solución típica para la reducción del nivel de inyección de armónicos de un rectificador de 6 pulsos podría consistir en dos circuitos serie sintonizados para

el 5.º y 7.º y un filtro de banda ancha para la eliminación de 11.º, 3.º y superiores.



Hay que destacar que la impedancia de cada una de las ramas del filtro es capacitiva por debajo de la frecuencia de resonancia, por lo que también contribuyen siempre, aunque limitadamente, a la compensación de energía reactiva a la frecuencia fundamental. La instalación de filtros supone un cambio en la topología del sistema eléctrico con la aparición de puntos indeseados de resonancia paralelo. Esto puede provocar que se amplifiquen algunos armónicos presentes en el espectro, disminuyendo considerablemente la eficacia del filtro.

Tanto la selección de equipos de compensación de energía reactiva en redes industriales con presencia de armónicos, como el diseño de filtros para la eliminación de éstos, requieren en cada caso un estudio específico

Los filtros armónicas pueden usarse para:

- Mejorar el factor de potencia
- Reducir armónicos
- Reducir corrientes de retorno por el neutro en sistemas trifásicos
- Minimizar el impacto sobre los transformadores de distribución.
- Generador depósitos de los efectos armónicos.
- Liberar capacidad de distribución.

Algunos filtros agregan aspectos útiles tales como regulación de voltaje y corrección momentánea por "sags" de voltaje. En las áreas con alta incidencia de tormentas, una combinación de filtro armónico y estabilizador de voltaje puede resultar beneficioso tanto para la compañía de electricidad como para la carga. La evaluación y la planificación cuidadosa del tipo de filtro que se utilizará para controlar problemas con armónicos es esencial. Una de manera para reducir problemas armónicas está con la prevención activa. Si la selección de nuevo equipo contiene posibilidad de controlar internamente el factor de potencia, entonces el impacto de estas cargas sobre la empresa

será mínimo. Este es el curso de acción adoptado por países Europeos. El equipo vendido en Europa debe reducir armónicos y controlar el factor de potencia.

Resistencias para filtrado de armónicos

Muchos de los modernos componentes industriales que incorporan convertidores estáticos generan armónicos en las redes de alimentación.

El fuerte incremento que en los últimos años ha experimentado la utilización de este tipo de componentes y las modernas técnicas de transmisión en corriente continua para largas distancias, han obligado a las compañías distribuidoras de energía eléctrica al control y limitación de la tasa de armónicos presentes en las redes de distribución siguiendo las recomendaciones de diversos organismos nacionales e internacionales: CEI, CENELEC, IEEE, CIGRE, etc., para evitar los daños que estas alteraciones de la forma de onda producen.

En las redes de filtrado de armónicos se introducen resistencias con objeto de ampliar el espectro de frecuencias atenuadas y que su eficacia no se vea afectada por las variaciones de las condiciones de funcionamiento, incrementando así su eficacia.

Las características básicas a conocer para el diseño de una resistencia para filtrado de armónicos son:

- Valor óhmico.
- Potencia a disipar.
- Ciclo de trabajo.
- Nivel de aislamiento.
- Grado de protección de la envolvente.

CONCLUSIONES

A pesar de que la compañía suministradora proporcione un voltaje puramente senoidal (sin distorsión alguna), la alimentación de sistemas que contienen cargas no lineales o inyectan corrientes no senoidales, produce una propagación de las armónicas hacia toda la red del sistema si no se mitigan dentro del sistema que los genera.

Estos armónicos perturban cada vez más todo tipo de actividades :
fabricación de componentes, estaciones de bombeo, sistemas informáticos, estaciones de telecomunicaciones, estudios de televisión... ya que estas representan una parte significativa de la corriente consumida. Las consecuencias para el usuario son de 3 tipos :

Impacto sobre las instalaciones eléctricas

con calentamientos importantes engendrados en los alternadores, transformadores, condensadores, cables... Los costes debidos al envejecimiento acelerado de estos equipos pueden ser muy elevados.

Impacto sobre el funcionamiento de las aplicaciones

como por ejemplo, el disparo intempestivo de disyuntores o la imposibilidad de alimentar receptores muy sensibles a la calidad de la energía. Los costes económicos que siguen a tales disfunciones son a menudo inaceptables para una empresa.

Impacto sobre la potencia eléctrica disponible

ya que los armónicos consumen en puras pérdidas una parte de la corriente (sobreconsumo hasta del 30%). El usuario paga entonces más caro, una potencia disponible reducida.

En la mayor parte de países del mundo, no existe actualmente ningún concepto en la tarifa para penalizar el consumo de armónicos de corriente.

No obstante, dada la magnitud del problema, son muchos los países que están en vías de estudio de algún tipo de recargo en caso de que se sobrepasen los límites de la norma.

A las compañías de distribución, la existencia de armónicos de corriente les supone un coste significativo en pérdidas y en pérdida de aprovechamiento de sus instalaciones, por lo que este tema merece una especial atención y debe entrar en consideración a la hora de hacer estudios referentes a las protecciones a ser implementadas en los diseños de las instalaciones.