

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Causas y efectos de
armónicos en sistemas
eléctricos de potencia**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico-electrónico

P R E S E N T A

Arturo Abundis Couoh

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Antonio Manuel
Macías Herrera

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Agradezco de manera muy especial y sincera...

... Al Ing. Marco Antonio Manuel Macías Herrera, por dedicar su tiempo, esfuerzo y conocimiento para llevar a cabo éste trabajo.

... Al Ing. Carlos Jiménez Lezama, por el apoyo, orientación y dedicación para concluir éste trabajo.

... Al Ing. Arturo Martínez Acosta, por sus invaluable aportaciones a ésta tesis.

... A mis sinodales, por su disponibilidad para revisar y enriquecer éste trabajo.

... A la Facultad de Ingeniería, por brindar los conocimientos y experiencias para mi formación.

... A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación profesional, valores y cultura que me brindó durante mi estancia en ella.

... A mis abuelos paternos, Reyes y Apolonia, mis abuelos maternos Gabriel y Dulce por todo el cariño y el amor por la familia que me inculcaron.

... A mi familia, por estar conmigo en cada paso de mi vida y ayudarme a lograr mis objetivos y saber que la familia es incondicional.

Agradezco también a todos los profesores, amigos y personas que en general han estado en mi vida, aportando un poco de sí a la persona que ahora soy y por su apoyo en situaciones buenas y malas.

A todos ustedes muchas gracias.

Dedicada a mi padre Arturo Abundis Villagomez por su comprensión, apoyo incondicional y enseñanzas de vida, a mi madre Claudia María Couoh Herrera por su cariño, apoyo y orientación y a mi hermano Gabriel Alejandro Abundis Couoh con quien he crecido en todos los aspectos desde la infancia. Por impulsarme a ser mejor persona, para ustedes con cariño.

Arturo

Índice

Introducción	(1)
Capítulo 1. Mecanismo de generación de armónicos	(4)
• Definición del término	(4)
• Introducción al problema	(4)
• Definiciones	(5)
• Aspectos importantes	(6)
Capítulo 2. Normatividad	(10)
• Referencias a armónicos en norma oficiales Mexicanas	(10)
Capítulo 3. Fuentes de armónicos	(13)
• Cargas lineales y no lineales	(13)
• No linealidades del transformador	(14)
• Máquinas rotatorias	(15)
• Variadores de frecuencia	(17)
• Dispositivos de Arco	(18)
• Rectificación monofásica	(18)
• Conversión trifásica	(19)
• Lámparas de descarga	(21)
• Lámparas LED	(21)
• Compensadores estáticos de VAR	(22)
Capítulo 4. Efectos de la distorsión armónica	(24)
• Resonancias	(24)
• Resonancia en paralelo	(24)
• Resonancia en serie	(25)
• Comportamiento del sistema en situaciones de resonancia	(26)
• Resonancias compuesta y complementaria	(27)
• Efectos en máquinas rotatorias	(27)
• Efectos en plantas generadoras	(29)
• Medición de potencia con formas de onda distorsionadas	(29)
• Interferencias con sistemas de protección	(33)
• Efectos de los armónicos en equipo	(35)
Capítulo 5. Efectos de armónicos en sistemas de distribución	(46)
• Efectos térmicos en los transformadores	(46)
• Efectos en bancos de capacitores	(47)
• Operación anormal de protecciones	(48)
• Efectos térmicos en máquinas rotatorias	(49)
• Efectos de torques pulsantes en máquinas rotatorias	(49)
• Operación anormal de dispositivos de estado sólido	(52)
• Consideraciones para cable y equipo bajo entornos de armónicos	(52)

Capítulo 6. Eliminación de armónicos	(55)
• Definiciones	(55)
• Configuración pasa banda	(58)
• Filtros sintonizados	(59)
• Filtros amortiguados	(65)
• Configuraciones convencionales de filtros	(67)
• Filtros activos	(67)
• Otros métodos para disminuir los niveles de distorsión armónica	(69)
Capítulo 7. Medición de armónicos	(72)
• Equipamiento	(75)
• Transductores	(76)
• Aspectos relevantes	(76)
• Ejemplo de aplicación	(77)
Capítulo 8. Conclusiones	(83)
Referencias bibliográficas	(i)

Introducción

Los sistemas eléctricos han evolucionado a un ritmo frenético prácticamente desde que comenzaron a utilizarse. Han pasado de ser formados simplemente por cables conductores hasta llegar a tener incontables dispositivos que los hacen seguros, eficientes y confiables.

Éste incremento de complejidad no solo trajo consigo el desarrollo relacionado a los sistemas eléctricos, sino que incluyó problemas como los armónicos, que no es nuevo, pero ha cobrado importancia debido a que los equipos que son sensibles a dicha distorsión se instalan cada vez con mayor frecuencia, así como también se instalan cargas no lineales que producen distorsión armónica.

En éste punto, cabe destacar, se trata de un problema ineludible dado que los equipos sensibles a la presencia de armónicos están compuestos total o parcialmente por piezas que son del tipo de las mencionadas cargas no lineales, creando así un círculo vicioso.

Por lo tanto, los armónicos se estudian ahora desde un punto de vista global del sistema, y no solo en un punto específico, permitiendo encontrarlas características de la señal eléctrica en cualquier punto del sistema y determinar la calidad que se proporciona a los usuarios del servicio eléctrico.

Precisamente la calidad del servicio es un tema que contempla la ley del servicio público de energía eléctrica, entonces, se convierte en una necesidad desarrollar el estudio de los armónicos en sistemas de potencia.

Éste trabajo pretende:

- Estudiar y analizar algunas de las causas de las distorsiones armónicas
- Analizar algunos de los efectos que dicho tipo de distorsión tiene en los sistemas de potencia y en equipo de utilización
- Encontrar las principales soluciones utilizadas para cumplir los parámetros de calidad del servicio establecidos en la legislación y en normatividad vigente.
- Determinar los principales métodos para asegurar la confiabilidad del sistema eléctrico, dado como resultado la segura y correcta operación del mismo.

Éste trabajo se realizó para dar a conocer de forma concisa las causas de los armónicos tanto en equipo eléctrico como electrónico, sus efectos en los sistemas de potencia relacionados con los fallos funcionamientos de sistemas de medición, de protección y descomposturas de equipo, que puede repercutir en pérdidas importantes para medios de producción modernos. Esto se logró mediante el análisis de diferentes tipos de equipo, partiendo por los más clásicos hasta llegar a equipo moderno usados en distintos ámbitos industriales, comerciales y de uso particular. Posteriormente se pasó a analizar las soluciones encontradas hasta el momento en distintos ámbitos, mencionando cuál es la mejor solución para cada caso. Después se mencionan los aspectos a tomar en cuenta para realizar

mediciones de parámetros eléctricos bajo la influencia de la distorsión armónica. Finalmente se emite una conclusión con base a los objetivos planteados al inicio del trabajo.

El objetivo de éste trabajo es ser un primer contacto con los armónicos en sistemas de potencia, desde la generación de energía eléctrica hasta el punto de uso, ya sea por el sector industrial o doméstico, analizando sus causas y efectos, haciendo el análisis de un caso de aplicación, para finalmente dar una conclusión respecto a cómo se trata el tema de armónicos en la actualidad. Esto mediante el estudio exploratorio para finalmente diagnosticar el estado de la problemática de armónicos en la actualidad. Partiendo del estudio realizado del problema planteado, se espera desarrollar herramientas para obtener resultados que ayuden a comprender la naturaleza de las corrientes armónicas en sistemas de distribución y transmisión, para ayudar a su eliminación que a su vez, derivaría en una mayor calidad del servicio y confiabilidad del mismo, todo esto bajo el contexto de normas y recomendaciones internacionales como las emanadas de la IEEE y de normas oficiales mexicanas para asegurar el funcionamiento de sistemas de potencia en rangos tolerables y seguros. La importancia de ser una introducción al tema de armónicos en sistemas de potencia nace por la importancia del tema que se evidencia en el estudio del plan de estudios, donde se menciona el tema y su relevancia para distintos aspectos en el desarrollo de proyectos y temas de ingeniería eléctrica, pero la profundización en él es mínima. De ésta inquietud, nace la idea de desarrollar un trabajo en que se desarrollen algunas bases para desarrollos más profundos en el tema de armónicos.

La estrategia de investigación necesaria para realizar ésta tesis, se basó en el estudio e interpretación de textos técnicos dedicados al estudio de armónicos, así como especificaciones técnicas provenientes de normatividad nacional e internacional y especificaciones de los equipos más comunes. Se encontraron los límites de armónicos que los sistemas son capaces de soportar y la cantidad de distorsión armónica que aportan a su respectivo sistema de alimentación y al sistema de potencia en general y a partir de esto podremos dar una conclusión general que sería el mejor método para eliminar o controlar la cantidad de armónicos y cómo proteger a los equipos. El enfoque principal fue el uso de textos especializados en el tema para comenzar a conocer el tema para encontrar los puntos comunes que tienen y en caso de encontrar puntos de vista divergentes, profundizar en ellos para aclararlos y emitir un juicio propio. En éste trabajo la normatividad tiene un papel fundamental dado que, aunque estemos tratando un tema de ingeniería, es justamente la normatividad la que nos da la pauta en cuanto a seguridad y calidad.

En el primer capítulo se explica el mecanismo de generación de armónicos, describiendo el proceso incluyendo las bases del análisis matemático que respalda lo descrito en el texto.

En el segundo capítulo, se mencionan algunos de las normas y referencias más importantes a nivel nacional.

El tercer capítulo abarca el cómo se generan los armónicos en equipos específicos, comenzando por describir las diferencias entre cargas lineales y no lineales, para proseguir con la descripción de la generación de distorsión en equipos que son considerados como lineales y que idealmente no producen armónicos, para seguir con cargas no lineales, que son consideradas las clásicas aportadoras

de distorsión al sistema. Se da un panorama general de qué tipo de distorsión causa cada uno de los equipos mencionados.

En el capítulo cuatro se profundiza en los efectos que la distorsión armónica tiene sobre equipos específicos, las interferencias que causa con las comunicaciones y en equipo de medición propios de los sistemas.

Para el capítulo cinco se da un panorama más general de los efectos de los armónicos en los sistemas de potencia y los elementos que los componen, incluyendo sus sistemas de protección e iluminación. También se analizará los efectos que tienen en equipo dando un punto de vista para tener consideraciones generales para el diseño propio del sistema de potencia.

En el capítulo seis se revisan los métodos de eliminación de armónicos, centrándonos en el filtrado de la distorsión, describiendo el equipo que lleva a cabo dicho trabajo y cómo lo hace, conoceremos los diferentes tipos de filtros que hay y mencionaremos para qué casos es más adecuado su uso, para finalmente revisar otros métodos para eliminar armónicos.

En el penúltimo capítulo, el siete, se mencionan los métodos que se usan para medir parámetros eléctricos bajo condiciones de armónicos, el equipo especializado para realizar las mediciones de manera confiable aun con distorsión y los transductores que se usa.

Finalmente, en el capítulo ocho, después de haber revisado los aspectos más relevantes de los armónicos, se dan las conclusiones que se han podido emitir con base en todo lo anteriormente descrito, pero tomando en cuenta la normatividad que regula los parámetros que un sistema puede contener en cuanto armónicos se refiere.

Además éste texto busca analizar la distorsión armónica desde un enfoque práctico y de normatividad, sin dejar de lado el carácter matemático que lo relaciona con el mundo físico. También se incluye, para tal fin un breve estudio de un caso de estudio, que nos permita relacionar el estudio teórico con la práctica de ingeniería.

Capítulo 1. Mecanismo de generación de armónicos

Definición del término

El término “armónico” proviene de la acústica y se define como la frecuencia de vibración que es múltiplo de la frecuencia base de un sonido. En electricidad se define como la componente senoidal de una forma de onda periódica que tiene frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia base a la que trabaja el sistema.

Idealmente, el suministro de energía eléctrica debería ser, en cualquier punto donde se haga una medición de una forma senoidal perfecta, por diferentes razones, la forma de onda que se mide en la mayoría de los casos, es una onda senoidal distorsionada. A ésta distorsión que se encuentra tanto en las mediciones de voltaje como de corriente, se la llama distorsión armónica. La figura (1.1) muestra que la distorsión armónica es la suma de las ondas fundamentales con sus armónicas. Las armónicas son también ondas senoidales cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia de la onda fundamental. El resultado de ésta suma es una onda distorsionada respecto a la forma senoidal original.

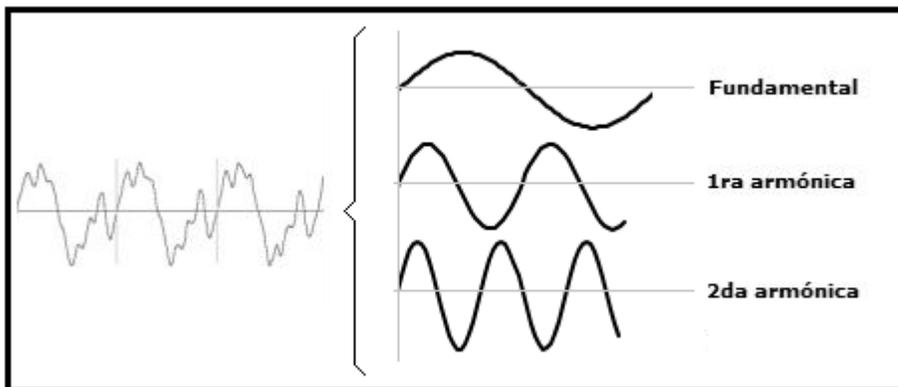


Figura (1.1) Onda fundamental, sus primeras armónicas y la suma de éstas.

Introducción al problema

La distorsión armónica no es un tema que se haya planteado recientemente, pero ha cobrado importancia en los últimos años dada la gran cantidad de distorsión que añaden equipos modernos que contienen cargas no lineales, y que, por su concentración tan elevada, ha comenzado a causar problemas en todo tipo de equipos a tal grado que se han tenido que tomar consideraciones para el diseño de sistemas de potencia y de instalaciones, que van desde el aumento del calibre de conductores, hasta el diseño de filtros especializados en armónicos.

En los sistemas eléctricos antiguos, los armónicos eran causados por la saturación de los transformadores, motores y generadores, principalmente, pero su efecto se consideraba despreciable dada la cantidad relativamente pequeña que había, pero en los sistemas eléctricos

modernos, las fuentes de armónicos están presentes en prácticamente cualquier punto, pues las cargas no lineales son cada vez más comunes, debido a su gran abanico de aplicaciones, aunque con la gran desventaja que significa que éste tipo de cargas sean, en la mayoría de los casos, las más sensibles a la distorsión que provocan.

Definiciones

Para un sistema eléctrico, las formas de onda fundamentales se expresan como [1.1] y [1.2]:

$$i = I_m \sin(\omega t) \quad \text{Para la corriente} \quad [1.1]$$

$$v = V_m \sin(\omega t) \quad \text{Para el voltaje} \quad [1.2]$$

Por lo tanto, las armónicas se expresan como [1.3] y [1.4]:

$$i_a = I m_a \sin(a\omega t - \delta_a) \quad \text{Para la corriente} \quad [1.3]$$

$$v_a = V m_a \sin(a\omega t - \delta_a) \quad \text{Para el voltaje} \quad [1.4]$$

Donde el subíndice a significa en número de la armónica y m_a son los valores RMS de la respectiva armónica, ya sea en voltaje o corriente.

Para encontrar el valor total de voltaje o de corriente se suma el valor respectivo que tiene en la frecuencia fundamental, más los valores de todas las armónicas que se tengan. Para ilustrarlo, la figura (1.2) muestra un circuito rectificador de puente trifásico y la gráfica de las ondas de cada fase, con la resultante remarcada en negro. La distorsión se produce debido a éste desfase, pues la onda resultante no es completamente plana.

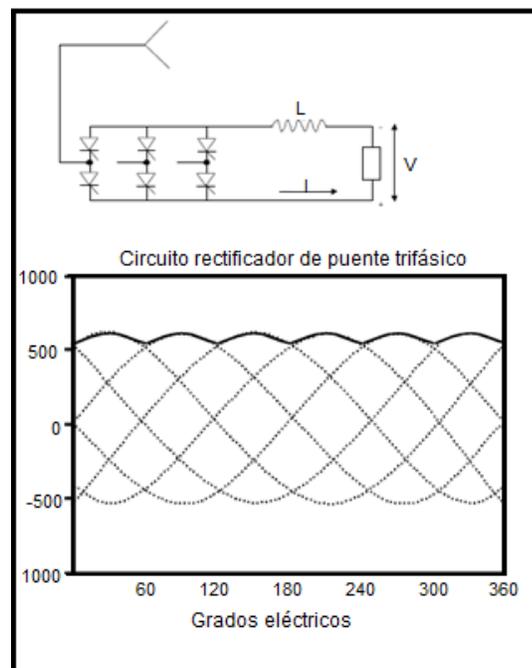


Figura (1.2) Circuito rectificador trifásico y su comportamiento.

Pero, para entender un poco más a detalle cómo se generan los armónicos, debemos analizar el tipo de cargas que son conectadas en los sistemas actuales y por tal motivo, se dividen en dos grandes grupos, las cargas lineales y las cargas no lineales.

Aspectos importantes

Para los sistemas de potencia, en que se usan tres fases idealizaremos las formas de onda de voltaje y corrientes ideales, es decir, perfectamente sinusoidales y con 120° grados entre cada fase. Cuando pasa por un rectificador, la resultante de DC pasa de una fase a otra en el momento que la primera, se hace más pequeña que la segunda. Para hallar las componentes armónicas resultantes de la rectificación se usan las dos siguientes expresiones [1.5] y [1.6]:

$$h = kq \pm 1 \quad [1.5]$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad [1.6]$$

Donde: h es el orden del armónico, k es algún entero positivo, q es el número de pulso del circuito rectificador, I_h es la amplitud de la corriente armónica de orden h , I_1 es la amplitud de la corriente fundamental.

Cuando se lleva a cabo una rectificación y hay algún tipo de carga inductiva, caso contrario al anterior, la conmutación de una fase a otra no es inmediata, produciendo un cortocircuito que se detiene por la corriente inversa a la salida del dispositivo, la duración de dicho cortocircuito depende del ángulo de la corriente que circule por la carga inductiva. Éste fenómeno se conoce como de conmutación.

El cambio del rectificador de una fase a otra también produce lo que se conoce como escalonamiento de voltaje. Este escalonamiento se obtiene multiplicando el escalonamiento de corriente, en cualquiera de los casos que revisamos antes, por la impedancia del sistema. Aunque para el análisis de armónicos es más relevante el escalonamiento en corriente, el escalonamiento de voltaje es un dato significativo para el diseño de sistemas e instalaciones eléctricas.

Las cargas de DC producen a su salida ondulaciones en la señal de corriente que repercuten en la forma de onda de voltaje, estas se producen en equipo con constantes de tiempo baja, es decir con poca inductancia. La componente armónica depende del número de pulsos del circuito convertidor, es decir, si el convertidor es, por ejemplo de 6 pulsos, generará la sexta armónica. También se generan armónicas en líneas de transmisión, dado el efecto capacitivo que hay entre los conductores de las líneas.

Resulta evidente que, al modificarse las formas de onda de las señales, también se modifica la manera en que se obtienen los valores de los parámetros eléctricos del sistema, pues se debe de tomar en cuenta la contribución de todas las componentes armónicas presentes para tener así un valor real. Los parámetros eléctricos se encuentran con las siguientes expresiones. Para el voltaje o la corriente instantáneos se usan, respectivamente [1.7] y [1.8]:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \text{sen}(h\omega_0 t + \theta_h) \quad [1.7]$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \text{sen}(h\omega_0 t + \theta_h) \quad [1.8]$$

Donde: h está relacionado con el valor del respectivo armónico que estemos calculando, V_h es el valor de voltaje del armónico que estemos calculando, I_h es el valor de corriente que estemos calculando y θ_h es el desplazamiento angular del armónico en que estemos trabajando.

Para la potencia instantánea se usa [1.9]

$$p(t) = v(t)i(t) \quad [1.9]$$

La potencia activa se calcula con [1.10]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad [1.10]$$

Donde: T es el periodo que calcularemos, δ_h el valor del desplazamiento total causado por las armónicas, P_h la potencia activa del armónico correspondiente.

Y la potencia reactiva con [1.11]:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \text{sen}(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \quad [1.11]$$

Donde: Q_h es la potencia reactiva del armónico correspondiente

En cuanto a la potencia aparente se refiere hay discrepancias en cuanto a cuál es la expresión más adecuada, pero se llegó a un consenso en la IEEE en el estándar para utilizar [1.12] que fue propuesta por Budeanu:

$$S^2 = P^2 + \sum_{i=1}^n V_n I_n \text{sen}(\varphi_1) + D^2 \quad [1.12]$$

Donde: V_n es el valor del voltaje del armónico con el que se trabaje, I_n el valor de la corriente del armónico con el que se trabaje, φ_1 el valor del ángulo de la señal, incluyendo ya los desplazamientos y D el valor de la distorsión.

Finalmente, para encontrar los valores RMS de voltaje y corriente tenemos [1.13] y [1.14]:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad [1.13]$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad [1.14]$$

Por lo tanto, al distorsionarse las formas de voltaje y corriente, también cambia la manera en que se mide el factor de potencia. En condiciones normales, la medición que se obtiene es llamada factor de potencia de desplazamiento (DFP, por sus siglas en ingles), que es la relación entre los ángulos que hay entre las potencias activa y reactiva. Cuando la medición se hace en ambientes con armónicos, se

deben considerar los valores RMS de las potencias, para obtener el valor llamado factor de potencia verdadero (TFP, por sus siglas en inglés), a partir de ambas mediciones de factor de potencia que acabamos de mencionar, se obtiene el factor de potencia total (FP_{total}) que es el producto de los 2 primeros.

Las cargas lineales pueden llegarse a comportar como no lineales cuando la densidad del campo magnético (H) no crece o crece muy poco mientras el flujo magnético (B) sigue creciendo, es decir, se satura. Por lo tanto, solo actúan de tal modo mientras dure ésta condición. Sobra decir que éste fenómeno se presenta en las cargas lineales que funcionan con un núcleo magnético.

Analizando la curva de histéresis del núcleo de un transformador vemos como un pequeño incremento en la densidad del flujo se traduce en un crecimiento importante en la intensidad del campo magnético, lo que provoca que la corriente comience a distorsionarse, al igual que la señal de voltaje.

Tomando en cuenta que los transformadores están diseñados para operar en niveles un poco superiores a los nominales, es decir, que pueden operar sobrecargados, es normal pensar que en las horas pico, cuando se alcanzan éstas condiciones, se puedan saturar con relativa facilidad, produciendo armónicos. También se debe mencionar que los transformadores se saturan cuando comienzan a energizarse, aunque la condición solo prevalece durante unos cuantos ciclos. De la misma forma alcanzan la saturación cuando se tienen condiciones de carga desbalanceadas y alguna de las fases demanda una mayor cantidad de corriente.

Ahora que analizamos las bases de la generación de armónicos, profundizaremos un poco en los parámetros de calidad en situación de armónicos. Comenzaremos refiriéndonos a un índice llamado distorsión total armónica (TDH, por sus siglas en inglés), que considera la contribución de todas las armónicas existentes y es ampliamente considerado para resolver problemas en redes de distribución y transmisión. Se define, para voltaje y corriente respectivamente, como [1.15] y [1.14]:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad [1.15]$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad [1.16]$$

Éstas ecuaciones nos dicen que la distorsión total es la relación entre el valor RMS de la señal, incluyendo armónicos y el valor de dicha señal tomando en cuenta solo la frecuencia fundamental. Un segundo índice importante es el de la distorsión total de la demanda, que es [1.17]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad [1.17]$$

Que se basa en la corriente demandada (I_L) en un cierto periodo de tiempo, normalmente de 15 a 30 minutos. También es necesario mencionar un índice muy útil para el área de comunicaciones, el llamado factor de influencia telefónica, que mide la interferencia en el audio de una línea telefónica causado por la interferencia con los armónicos de un sistema eléctrico cercano. Se representa con [1.18]:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} w_h^2 I_h^2}}{I_{rms}} \quad [1.18]$$

Un último índice relevante para revisar, es el llamado factor k , que es usado para mantenerse dentro de especificaciones térmicas de normatividad como el NEC estadounidense o la NOM-001 mexicana [4]. El factor K se calcula con [1.19]:

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} [I_h(p.u.)]^2 (h^2) \quad [1.19]$$

Entonces, podemos decir que los armónicos se generan principalmente en las cargas, aunque hay un número de dispositivos que son parte del sistema eléctrico que pueden generarlos, además el efecto que causen y su aportación a la distorsión de las formas de onda dependen de cómo y dónde se conectan, pues no solo se presentan armónicas como tal, sino que pueden causar resonancias. Algunos factores más que podemos mencionar que influyen en el comportamiento de los armónicos son los bancos de capacitores que encontramos en subestaciones, sean de la compañía suministradora o colocadas por consumidores de carga considerables para controlar su factor de potencia que también pueden generar resonancias en serie o en paralelo. Terminaremos éste capítulo mencionando la clasificación de problemas que causan los armónicos, que son:

- Calentamiento en máquinas síncronas
- Interferencias en comunicaciones
- Fallas por rompimiento de dieléctricos
- Pérdidas en núcleos magnéticos y devanados de máquinas eléctricas
- Interferencias en sistemas de protección y de control
- Errores de medición de parámetros eléctricos
- Oscilaciones mecánicas en máquinas síncronas y motores de inducción
- Errores en dispositivos que operan con detección de cruce por cero
- Resonancias que generan sobrecorrientes o sobrevoltaje

Ésta clasificación está dada por el equipo encargado del estudio de armónicos de la IEEE, plasmado en el estándar IEEE-519-2014 [8] y en próximos capítulos profundizaremos en cada uno de ellos.

Capítulo 2. Normatividad

En éste capítulo se mencionarán los principales estándares internacionales y normas que se aplican para obtener estándares de calidad en el servicio eléctrico y para asegurar el correcto funcionamiento de equipo, protecciones y del propio sistema de potencia.

Comenzaremos con el estándar 519-2014 [8] de la IEEE donde se emiten recomendaciones prácticas y lineamientos a seguir para controlar armónicos en sistemas eléctricos de potencia, y tiene como objetivo establecer lineamientos de diseño de sistemas eléctricos con cargas lineales y no lineales. Además describe los límites de voltaje y corriente que son tolerables en los sistemas. Describe, además, los principios de diseño para evitar la interferencia armónica entre equipos de utilización, todo lo anterior limitados por el estado de uso continuo, ya que se pueden encontrar condiciones transitorias que excedan las limitaciones anteriores. Las recomendaciones hechas por ésta norma están dadas para que un sistema soporte operaciones en estado continuo en condiciones de “el peor de los casos”. Aporta nociones de la generación de armónicos, respuesta de los sistemas a distorsiones, efectos que provocan, cómo compensar la potencia reactiva y controlar la cantidad de armónicos, métodos de medición y prácticas recomendadas tanto para consumidores individuales como para subestaciones alimentadoras y sus respectivos sistemas de potencia.

Referencias a armónicos en normatividad mexicana

La normatividad mexicana incluye apartados que especifican la tolerancia de equipos e instalaciones a distorsión armónica, para asegurar la correcta y segura operación de éstos, además de minimizar los efectos que éstos causan a los sistemas de potencia, con el objetivo de hacerlos fiables. A continuación se revisarán algunas de las más importantes.

En el artículo 4.3 Titulo 4 de la NOM-001-SEDE-2012 [4], se señalan los lineamientos a seguir en la selección del equipo a usarse y se menciona en el apartado 4.3.4, Prevención de efectos nocivos, que *“Todos los materiales y equipos eléctricos deben seleccionarse de manera tal que no causen efectos nocivos a otros equipos y a la alimentación durante condiciones normales de operación, incluyendo las maniobras de conexión y desconexión”*. Entre éstos efectos nocivos se enlistan las armónicas.

La NOM-001-SEDE-2012 [4] en su Artículo 210 Circuitos derivados, sección 210-4. A modo de nota se señala que: *“Un sistema de 3 fases, 4 hilos, conectado en estrella, utilizado para suministrar potencia a cargas no lineales, puede requerir que el sistema esté diseñado para soportar altas corrientes armónicas en el conductor neutro.”*

Para la NOM-001-SEDE-2012 [4], Artículo 310, Conductores para alambrado en general, sección 310-10, en una nota a la excepción 2 del inciso h) se aclara que se permitirá el uso de conductor paralelo de tamaño 33.6 mm² (2 AWG) y 42.4 mm² (1 AWG), en instalaciones previamente existentes únicamente para el conductor neutro puesto a tierra, recordando que en las generalidades de dicho

inciso se aclara que el tamaño mínimo para un conductor en paralelo es de 42.4 mm² (1 AWG). Dicha nota se aplica para evitar el sobrecalentamiento de instalaciones ya existentes que trabajan bajo un gran régimen de armónicas.

La NOM-017-ENER/SCFI-2012 [5], que trata de eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastadas. Límites y métodos de prueba. Esta norma establece los límites mínimos de eficacia y seguridad para lámparas fluorescentes autobalastadas, dentro de estas especificaciones se encuentra un cierto límite tolerable de corrientes armónicas, pues influye tanto en la eficacia como en la seguridad de dichos equipos. Nos dice que:

“6.2.5 Distorsión Armónica

En caso de que en el producto o empaque se establezca el valor de distorsión armónica total (THD) de la corriente de alimentación, éste no debe exceder el 10 % de lo indicado en el mismo, calculándose de acuerdo con lo descrito en 8.3.6, con la LFCA base arriba. La información relativa a distorsión armónica debe ser cuantitativa”.

Además:

“8.3.6 Distorsión Armónica

El objetivo de esta prueba es verificar que una LFCA con un factor armónico (HF) o una distorsión armónica total (THD) de la corriente de alimentación y que se energiza a la tensión y frecuencia de entrada de acuerdo con 8.1 el HF o THD no debe ser mayor al 10 % de lo que especifica el fabricante.

8.3.6.1 Instrumentos y equipos

- a) Fuente de alimentación que tenga una distorsión de tensión menor del 0,5 % e impedancia de 0.08Ω.*
- b) El equipo de medición debe ser capaz de medir hasta la armónica 32, con una exactitud de ±5%”.*

Establece también, para el procedimiento:

“8.3.6.2.1 Debido a que la tensión de alimentación de la fuente afecta la magnitud de la distorsión armónica, para propósitos de medición, la impedancia de la alimentación debe ser de 0,08 Ω. Para algunas fuentes electrónicas puede ser necesario añadir resistencia para obtener la impedancia de la alimentación que se especifica.

8.3.6.2.2 Registrar la magnitud de las diferentes armónicas de la frecuencia de alimentación hasta la armónica 33. El factor armónico es la relación del contenido armónico al valor eficaz de la fundamental. El factor armónico (HF) debe calcularse como sigue:

$$HF = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1}$$

La distorsión total armónica (THD) se calcula como sigue:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}$$

Donde: I_1 es el 100 % a la frecuencia fundamental de la corriente; I_2 es la magnitud, en porcentaje de la corriente fundamental, de la segunda armónica; I_3 es la magnitud, en por ciento de la corriente fundamental, de la tercera armónica”.

Finalmente:

“8.3.6.3 Resultados

El factor armónico (HF) o la distorsión armónica total (THD) no debe ser mayor al 10 % de lo que especifica el fabricante.”

La NOM-031-ENER-2012 [6], “Eficiencia energética de lámparas para uso general, límites y métodos de prueba”. En cuanto a armónicos en su artículo 6.7 menciona que: “*La distorsión armónica total en corriente eléctrica, debe ser menor a 20%*”.

Capítulo 3. Fuentes de armónicos.

En éste tercer capítulo ahondaremos en las fuentes de armónicos que hemos mencionado anteriormente, revisando detenidamente que efectos específicos tiene cada tipo particular de carga y equipo.

Cargas lineales y no lineales

Comenzaremos por describir las cargas lineales, que son aquellas en las que la caída de voltaje está relacionada por una proporción lineal de la corriente que pasa por una resistencia constante, es decir la ley de ohm, descrita por [3.1]:

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad [3.1]$$

Por lo tanto, al cumplirse ésta relación es fácil calcular las caídas de voltaje o corriente, incluso la potencia usada en un sistema o la que se pierde en forma de calor, dado que la ecuación es lineal.

En los motores y transformadores los armónicos se pueden generar en los núcleos ferromagnéticos, dadas las propiedades físicas del cobre y el hierro, cuando se operan en valores nominales considerables, saturando el núcleo. Cuando se alimenta una carga lineal, el voltaje y la corriente se encuentran en fase, excepto en los conocidos casos en que al pasar por un capacitor, la corriente se “adelanta” al voltaje y en un inductor, la corriente se desfasa “hacia atrás” con respecto al voltaje, pero en ningún caso se produce una distorsión en las formas de voltaje ni de corriente. El ejemplo más cotidiano de una carga no lineal es una lámpara incandescente como la mostrada en la figura (2.1). Éste tipo de cargas son cada vez menos usuales.



Figura (3.1) Lámpara incandescente, ejemplo de carga lineal.

Por otro lado, en las cargas no lineales, la forma de la corriente no se parece en lo absoluto a la forma de voltaje aplicado, porque por ejemplo, en el caso de los semiconductores, solo conducen durante una determinada ventana del ciclo de la señal, entonces para efectos prácticos, diremos que una carga no lineal es aquella donde la forma de corriente a la salida difiere de la forma de voltaje que se

aplica a la entrada. Las cargas no lineales, son aquellas que contienen semiconductores, es decir, todos los dispositivos que usen la electrónica de potencia, o bien, aquellos dispositivos que para su funcionamiento usen arco eléctrico. Las computadoras, como la de la figura (2.2) son ejemplos clásicos de cargas no lineales, dada la gran cantidad de dispositivos semiconductores que las componen. Del primer grupo de cargas no lineales podemos mencionar a variadores de frecuencia, controladores de motores de DC, fuentes de voltaje, inversores y cargadores de batería como las principales que podemos encontrar, y en los dispositivos de arco encontramos por ejemplo, los hornos de arco y las lámparas fluorescentes. El caso de los controladores de un motor se presenta la curiosidad de que, si se trata de un sistema trifásico y la cantidad de carga es considerable, la forma de voltaje medida a la salida también se distorsiona.



Figura (3.2) Las computadoras son ejemplos de cargas no lineales.

No linealidades del transformador

Cuando tenemos un transformador trifásico balanceado, el cual trabaja con una forma de onda de voltaje es sinusoidal y puede describirse mediante [3.2]:

$$v_1 = -E_m \text{sen}\omega t = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad [3.2]$$

Entonces el flujo en el núcleo se describiría por [3.3]:

$$\varphi = - \int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \text{cos}\omega t = \varphi_m \text{cos}\omega t \quad [3.3]$$

Donde φ representa el flujo, e_1 la fuerza electromotriz, N_1 El número de conductores del transformador, φ_m el flujo de una onda senoidal y E_m la fuerza electromotriz inducida.

Por lo tanto se nota que un voltaje senoidal produce un flujo senoidal. Para el caso de la corriente, no sucede lo mismo dada la histéresis que existe en el núcleo y evidentemente ésta histéresis depende del materias usado y del número de láminas que lo componen. Esto se explica analizando la curva de histéresis y su incidencia en la corriente de magnetización, que hace que no sea simétrica en su máximo valor. Esto se debe a las armónicas múltiplos de tres, especialmente la tercera, que provienen dela corriente de secuencia cero.

El fenómeno se resuelve conectando a los devanados en delta, de modo que, como los armónicos múltiplos de 3, que actúen en fase entre ellos, circulan por la delta, retornando por el aire o aceite del transformador reduciendo su valor al mínimo y manteniendo formas de onda senoidales prácticamente en cualquier caso si aseguramos que los voltajes están balanceados.

Dada la alta eficiencia con la que opera un transformador, que se debe a la alta calidad del material con el que está hecho su núcleo y el diseño eficiente es normal encontrar elevaciones de hasta el 30% en el voltaje debido a la gran densidad de flujo magnético que permite la mencionada eficiencia. A consecuencia de lo anteriormente descrito el núcleo llega a experimentar valores cercanos a los 2T por lo cual se satura con facilidad. La corriente simétrica de magnetización que causada en éste proceso está íntimamente relacionado con todas las componentes armónicas impares. Si un transformador está conectado a un rectificador de tamaño considerable, con la mencionada saturación, el voltaje a la salida del rectificador puede alcanzar valores cercanos a 1.4 en por unidad.

Otro fenómeno relacionado con armónicos sucede cuando se desenergiza un transformador, como resultado existe un flujo magnético remanente en el núcleo. Cuando se vuelve a energizar el transformador, el flujo magnético resultado de la elevación de la energía, sumado al flujo remanente alcanzan un valor de hasta 3 veces el valor nominal. Esto causa que se alcancen valores de corriente de magnetización en por unidad de hasta 5. Por lo tanto es normal encontrar saturaciones extremadamente elevadas, que a su vez provocan una gran cantidad de armónicos. Ésa corriente, llamada corriente inrush, tiene un periodo corto de duración, pues desaparece cuando se elimina el flujo magnético residual del núcleo, lo cual depende de la impedancia del primario del transformador.

El último caso destacable que provoca armónicos en el transformador es cuando se dan condiciones desbalanceadas pues se encuentra lo que se considera una componente de corriente directa en el flujo magnético, que a su vez incide en la forma de onda de la corriente de excitación, que genera armónicos de componentes pares e impares. Es importante mencionar que éstas armónicas con independientes a las que causa la componente de AC. Para disminuir la cantidad de armónicos causados por las no linealidades del transformador, se usa la ya mencionada conexión en delta de los devanados, principalmente para aquellas componentes que son múltiplos de 3. Además se usan filtros rectificadores de 6 y 12 pulsos que estudiaremos más adelante. Es necesario hacer mención que, despreciando la señal fundamental, aún después de usar la conexión delta y los filtros, siguen existiendo armónicas como la 5ª y 7ª que deben ser soportados por el sistema.

Máquinas rotatorias

Otro tipo de equipo que se cuanta entre las cargas lineales y que produce armónicos en su operación son las máquinas rotativas. Para encontrar la mayor fuerza magneto-motriz de un motor utilizamos [3.4]:

$$f_{mm} = \frac{iN}{2} \quad [3.4]$$

Donde i es la corriente máxima por conductor y N es en número de conductores por ranura en la carcasa del motor.

Estos armónicos aparecen debido a pequeñas irregularidades en las ranuras del rotor, asimetrías en el estator o en los devanados de las máquinas, principalmente si se trata de tres fases. Hay que señalar que éstos armónicos son diferentes a los provocados por variadores de frecuencia con los que operan muchas veces los motores. Los armónicos se producen cuando el hierro en el rotor o en su caso en el estator se satura. Por éste medio se produce una cantidad relativamente pequeña de armónicos, si se comparan con los producidos por los devanados del motor, como anteriormente se mencionó. Los armónicos provenientes de los devanados producen una fuerza electromotriz (fem) proporcional a la velocidad de giro dividido entre la longitud de onda del estator. Éstos a su vez crean fuerzas magnetomotrices (fmm) que producen armónicos en función de la velocidad. Como resultado de éstos armónicos, se tienen en la máquina efectos térmicos y torques pulsantes, que se analizarán más adelante.

Para analizar la fuerza magnetomotriz asumimos que para la corriente alterna se tiene una frecuencia angular $\omega = 2\pi f$. Para obtener su representación en el dominio de la frecuencia se usa [3.5]:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} \text{sen}(\omega t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \text{sen}\left(n \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad [3.5]$$

Donde λ es la longitud de onda y ω es el valor RMS de la corriente. Para n pares.

Profundizando en lo mencionado párrafos arriba, asumiendo que los devanados están distribuidos en la superficie en un número n de ranuras por polo por fase, y la fuerza magnetomotriz de dichos devanados son desplazados por la del devanado siguiente en el espacio, se tienen diferentes ángulos de desplazamiento para los varios armónicos que difieren de polo. En máquinas trifásicas, donde las fases están separadas $(\frac{2\pi}{3})$ en ángulo, físicamente y las corrientes están desplazadas en $(\frac{2\pi}{3})$ en tiempo, se tienen fuerzas magnetomotrices iguales a [3.6], [3.7] y [3.8]:

$$F_1(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} g \text{sen} \omega t \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right] \quad [3.6]$$

$$F_2(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} g \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right] \quad [3.7]$$

$$F_3(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} g \text{sen}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \right] \quad [3.8]$$

Donde: K_{dn} es cada factor de distribución, g es el número de ranura,

Entonces, la fuerza magnetomotriz total es [3.9]:

$$F_3(x) = \frac{3\sqrt{2}IN}{\pi} g \left[(k_{d1}) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t\right) + \left(\frac{k_{d5}}{5}\right) \cos\left(5 \cdot \frac{2\pi x}{\lambda} + \omega t\right) + \dots \right] \quad [3.9]$$

Para las máquinas de éste tipo las armónicas múltiplos de 3 no existen, la quinta armónica se mueve en sentido negativo y la séptima en positivo. Una máquina con un número n de ranuras por polo por fase genera armónicas de órdenes $2n \pm 1$.

En las máquinas síncronas los armónicos están dados por los flujos armónicos en los devanados, es decir, la efectividad del campo en éstos. El espacio entre los enrollamientos de las ranuras y la conexión. Para una superficie con n ranuras por polo por fase, m fases, y un ángulo θ (eléctrico) entre ranuras, es factor de distribución se calcula con [3.10]:

$$K_{dn} = \frac{\text{sen}\left(\frac{mn}{2}\right)}{n \text{sen}\left(\frac{m}{2}\right)} \quad [3.10]$$

Donde: n es el número de ranuras y m en número de fases.

El factor de separación para devanados es [3.11]:

$$k_{sn} = \text{COS}(n\theta/2) \quad [3.11]$$

En el caso que exista flujo sobresaliente o prominente (todos los campos son iguales en ángulo y magnitud) dicho flujo se concentra en el mismo eje del rotor. Dada ésta condición, si en el estator hay una corriente de secuencia positiva, se produce una corriente estática, con la cual se produce solo una fuerza en la armadura. Si la secuencia es negativa, se producen 2 corrientes de dirección opuesta, una en sentido negativo, en la frecuencia nominal y otra relacionada con la tercera armónica, en dirección positiva. Por efecto de resonancia puede producirse quinta e incluso séptima armónica. Este efecto es en la práctica extremadamente difícil de hallar dadas las condiciones de los devanados y que se considera a la línea de alimentación como simétrica o muy cercana a ésta condición. En caso que se alimente una carga desbalanceada se tiene, muchas veces una fuente de armónicos bastante considerable.

Otra fuente de armónicos en los motores es la cantidad de distorsión en la fuerza magnetomotriz que depende de la velocidad de giro. Éste tipo de armónicos crean fuerzas electromotrices en el estator, cuyo valor se encuentra dividiendo la velocidad de giro entre la longitud de onda.

Variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia son, en esencia rectificadores de señal, pero tienen la particularidad de poder cambiar, como su nombre lo indica, la frecuencia de la señal a la salida. Estos dispositivos son indispensables en la industria actual que utiliza motores eléctricos como fuente de fuerza para realizar prácticamente cualquier proceso. Éste equipo, compuesto por diodos, tiristores u otro tipo de semiconductores se clasifican en aquellos que toman una señal de AC y la convierten en otra señal de AC, pero con frecuencia a la salida diferente y aquellos que convierten una señal de AC a una señal de DC con diferentes valores de voltaje. Los armónicos se generan cuando la corriente que demanda la

carga, cambia de una fase a otra, por lo que se producen cortes que generan gran cantidad de distorsión y provocan muescas en la señal de voltaje.

En los variadores de frecuencia es imposible eliminar la generación de armónicos, entonces se diseñan de modo que exista solo distorsión de voltaje o de corriente, en la medida de lo posible, dependiendo de la necesidad de la aplicación de evitar uno u otro, por lo tanto en los equipos comerciales no existe distorsión considerable en ambas señales.

Dispositivos de arco

La distorsión armónica se genera en los dispositivos de arco a causa del gran impacto que supone la gran cantidad de voltaje y la gran elevación de corriente que puede llegar hasta los 60 KA. La corriente en dispositivos como hornos de arco se limita por los conductores que lo alimentan, el transformador y en general la impedancia del sistema, la magnitud de la distorsión se relaciona con la longitud de arco. Cuando se presenta el arco en los hornos, las frecuencias en éste y cada una de ellas genera una cantidad diferente de armónicos, Arrillaga [2] nos dice que *“las frecuencias en un horno de arco varían de los 0.1 a los 30 Hz predominantemente con armónicos en cada valor entero, prácticamente”* (p. 74, 2003). Aunque la vida promedio del arco se mantiene estable en cuanto a frecuencias excepto al principio y al final. Aun así los niveles de armónicos varían con el tiempo. Entonces la generación de armónicos se relaciona con la combinación entre el retardo en la ignición del arco y las características no lineales del horno. El espectro de frecuencias armónicas se muestra en la figura (3.3)

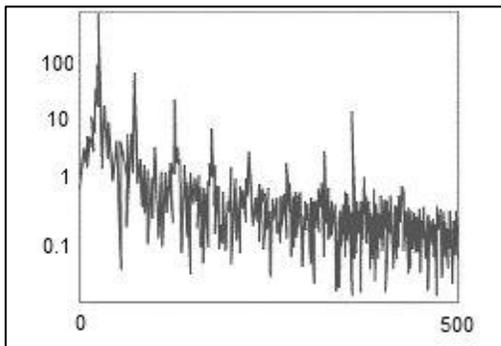


Figura (3.3) Espectro de frecuencias de un horno de arco. “Power system harmonics” [2]

Rectificación monofásica

Gran cantidad de aplicaciones industriales, comerciales y domésticas actuales, utilizan alimentación de corriente directa. El método más extendido para convertir corriente alterna en corriente directa es la rectificación de la señal mediante diodos, dado su bajo costo y fiabilidad bajo condiciones de operación normales, aunque existen varios tipos de rectificadores con elementos semiconductores distintos a los diodos, que tiene aplicaciones más específicas.

Una fuente de AC conectada a un puente rectificado de diodos con una capacitancia en paralelo a una carga produce pulsos de corriente estrechas, dependiendo del valor de tal capacitancia, dado que el capacitor que simula su carga sólo cuando se excede el nivel de DC del sistema, es decir, cerca

del pico de onda senoidal. La expresión para encontrar la representación de la corriente en serie de Fourier es [3.12]:

$$I_n = \frac{8\alpha I}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\frac{\cos n\alpha\pi}{1-n^2\alpha^2\pi^2} \right) \cos n\omega t \quad [3.12]$$

Donde: 1 es el pico de la corriente y $\alpha = \theta/T$

Su duración depende de la onda fundamental. En equipo antiguo se usaba una etapa de adecuación de voltaje con un transformador, cuya inductancia suavizaba la generación de armónicos.

Aplicaciones modernas han permitido reducir el tamaño de la etapa rectificadora la llamada aplicación de modo de swicheo consiste en rectificar el voltaje de AC directamente al valor en que es alimentado el dispositivo, posteriormente se reconvierte a una señal de AC de muy alta frecuencia que se rectifica una última vez, lo que permite una gran gama de voltajes de la entrada y la mencionada reducción en el tamaño, vital para los compactos y altamente portables dispositivos modernos. Como desventaja tiene la gran cantidad de distorsión que aparta al sistema, generada por conectar semiconductores directamente a la fuente de AC y la consiguiente falta de inductancias del transformador en la entrada del dispositivo, por lo cual la distorsión pasa directamente a la línea de alimentación. La principal armónica aportada por este tipo de rectificación es la tercera armónica, que pasa al sistema trifásico de distribución y su suma en el neutro de la red.

Conversión trifásica

La conversión trifásica se lleva a cabo en dispositivos llamados convertidores de fuente de corriente, caracterizados por tener gran inductancia en el lado de DC respecto al lado de AC, lo que se logra conectando capacitancia en éste lado del convertidor con el propósito de lograr una corriente de DC constante. Este diseño provoca armónicos de corriente en el lado de AC. Los conductores de fuente de corriente son los más utilizados dado a que su diseño, basado en transistores permite conducir de corriente en un solo sentido de manera controlada. En condiciones balanceadas del sistema las corrientes resultante son iguales idealmente, estos convertidores deben tener impedancia cero e inductancia de acoplamiento infinita, de éste modo, se logran formas cuadradas de corriente, puramente positivas de ancho igual a $\omega = 2\pi/\rho$. Sus coeficientes de Fourier se calculan con [3.13] y [3.14]:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega/2}^{\omega/2} d(\omega t) = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\rho} \quad [3.13]$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\omega}{2}}^{\frac{\omega}{2}} \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{\rho}\right) \quad [3.14]$$

Y su frecuencia con [3.15]:

$$F_p = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\omega}{4} + \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\omega}{2}\right) \cos(2\omega t) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\omega}{2}\right) \cos(3\omega t) + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{4\omega}{2}\right) \cos(4\omega t) + \dots \right) \quad [3.15]$$

Para el caso de un convertidor de dos vías, se producen pulsos de corriente, positivos y negativos y su serie de Fourier es [3.16]:

$$F = F_p + F_n = \frac{4}{\pi} \left(\sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\omega}{2}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\omega}{2}\right) \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin\left(\frac{5\omega}{2}\right) \cos(5\omega t) + \dots \right) \quad [3.16]$$

Bajo ésta configuración se eliminan los componentes de DC e incluso algunos armónicos en el lado de DC. Hay varias configuraciones de estos convertidores, dependiendo de la cantidad de pulsos por ciclo. La configuración básica consiste en generar seis pulsos por ciclo en un convertidor de dos vías. Usando la ecuación para calcular sus coeficientes de Fourier con $\omega = 2\pi/3$ su representación en el dominio de la frecuencia es [3.17]:

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \right) \quad [3.17]$$

En sus 3 fases con los respectivos desfases.

Analizando la ecuación [3.17] se nota que no hay armónicos múltiplos de 3 los que existen son positivos para valores enteros de K en $6K+1$ y negativos para K en $6K-1$. De lo anterior $6K\pm 1$ se usa para determinar el orden del armónico, usando la variable K, en configuraciones de filtros de 6 pulsos El valor RMS corriente de onda fundamental es [3.18]:

$$I_1 = \left(1/\sqrt{2}\right) \left(2\sqrt{3}/\pi\right) I_d = \left(\sqrt{6}/\pi\right) I_d \quad [3.18]$$

y el valor RMS de la máxima armónica es [3.19]:

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad [3.19]$$

La configuración de 12 pulsos consiste en 2 convertidores de seis pulsos alimentados por un par de transformadores en parábola. En ésta configuración las fases están separadas 30° . Su representación en el dominio de la frecuencia es [3.10]:

$$(i_a)_{12} = 2 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) I_d \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) \dots \right) \quad [3.20]$$

Es decir, matemáticamente es considerado con la suma de 2 transformadores conectados en estrella. Analizando su representación en frecuencia se evidencia que el sistema contiene armónicos de orden

$12K+1$, donde k es la variable para obtener el orden de armónico en un filtro de 12 pulsos. También que hay configuraciones de 24 y 48 pulsos, aunque son muy raras y prácticamente sin justificación de uso pues es complicado conseguir y coordinar transformadores con 15° y 75° respectivamente, además de que los beneficios son mínimos.

Lámparas de descarga

La iluminación que usa arco eléctrico para su funcionamiento es una importante fuente de distorsión armónica, especialmente el tercer armónico y demás componentes impares que son un efecto importante cuando se produce el arco. Éstos armónicos se suman principalmente al neutro del sistema. Los circuitos donde se montan tienden a ser largos, y combinados con los capacitores que regulan el factor de potencia, se obtiene un circuito propenso a la resonancia en frecuencias cercanas a la del tercer armónico. Se usa el efecto de los núcleos magnéticos en la balastro o estranguladores para controlar el área en el tubo, que a su vez limita la corriente. La cuestión con las balastras electrónicas es que usan alta frecuencia, lo que posibilita reducir el tamaño de sus componentes, pero generan armónicos en otras frecuencias.

Para eliminar los armónicos de corriente en la balastro se toma como referencia la norma IEC-61000-3-2 [10]. Esta norma establece los valores máximos permisibles en los armónicos de línea de los equipos electrónicos, dentro de esta norma las balastras electrónicas quedan incluidos en la clase C. La aparición de esta normativa sobre la emisión de armónicos de corriente para equipos conectados a la red ha impuesto una norma sobre balastras electrónicas. Por ello es necesario implementar balastras electrónicas con alto factor de potencia, típicamente por encima de 0.9 y baja distorsión armónica, por debajo del 30%

Lámparas LED

El objetivo principal de la fuente de alimentación del LED es transformar la corriente alterna suministrada de forma externa, en corriente continua, del voltaje especificado para cada LED, de la forma más “limpia”, económica y reducida en tamaño posible. Como veremos más adelante, estos tres adjetivos tienen graves conflictos entre sí: una corriente continua “limpia” rara vez es económica, y los componentes necesarios no caben en envoltorios pequeños.

El primer paso es convertir la corriente alterna en continua, que se suele hacer con diodos. Según el precio y el espacio disponible, obtendremos corriente continua de media onda o de onda completa. Ambos tipos de onda son aceptables para cargadores de batería, pero si los usamos directamente para alimentar al LED, tendremos un efecto estroboscópico insoportable, y la vida del LED, al encenderlo y apagarlo 50 veces por segundo, puede verse seriamente afectada. Todos sabemos que el efecto estroboscópico es fuente de migrañas e incluso de ataques epilépticos. Una vez obtenida la onda completa, tendremos que “suavizarla” hasta obtener un voltaje constante, sin ondulaciones.

Esto se suele hacer con condensadores, y si queremos que la vida del producto alcance o supere las 40.000 horas, estos condensadores no pueden ser electrolíticos. Ya se está aumentando el tamaño del envoltorio.

Factor Potencia: si el valor está por debajo de 0,9, la compañía eléctrica lo factura como reactiva, salvo que se disponga de condensadores para su corrección. Para obtener un buen factor de potencia en una fuente de alimentación LED, es necesaria la incorporación de un circuito APFC (Active Power Factor Control) Si el THD de corriente supera el 12%, se deben analizar los armónicos impares individualmente. Los armónicos en una instalación tienen los siguientes impactos: hacen saltar los diferenciales, pueden afectar aparatos sensibles como la informática, quirófanos, audio, etc. Pero lo más importante es que causan sobrecalentamiento en los motores (aire acondicionado, frío, bombas, extractores, ascensores, escaleras mecánicas...) cuyo resultado pueden ser fallos prematuros, aumento en gasto de mantenimiento, etc.

En muchas instalaciones donde se ha sustituido la iluminación fluorescente con LED, se ha descubierto que operan las protecciones, principalmente las termomagnéticos, a pesar de que el consumo de potencia es netamente inferior. Esto se debe al pico de arranque, generalmente causado por un transformador “barato” y de reducidas dimensiones. Esta circunstancia nos obligará a aumentar la capacidad de los termomagnéticos, o a separar circuitos para que el arranque sea progresivo. A la hora de diseñar la fuente de alimentación, un transformador mayor y con más cobre bajará el pico de arranque.

Compensadores estáticos de VAR

Los compensadores estáticos de VAR; se utilizan en sistemas de potencia para conseguir de manera rápida efectos con corrección del factor de potencia, reducción en los pulsos de voltaje además que ayuda a dar estabilidad al sistema incluyendo en el balance del sistema. Cuando se conecta uno de estos dispositivos, se producen retrasos de disparo, que reducen el valor de la corriente y la distorsiona, en condiciones normales de operación. Es decir cuando están desconectados los CEV o han pasado los retrasos de disparo, las formas de onda no se deforman. La corriente de disparo se obtiene con [3.21]:

$$i = \sqrt{2} \frac{V}{X_L} (\cos(\alpha) + \cos(\omega t)) \quad [3.21]$$

$$\text{Para } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma$$

Donde V es el valor de RMS de la fuente de alimentación X_L es la reactancia del devanado en la frecuencia fundamental y α es el retraso de disparo respecto al voltaje.

La corriente de retraso de disparo produce armónicos de componentes impares, cuyos valores de RMS se encuentran con [3.22]:

$$I_n = \frac{4V}{\pi X_L} \left[\frac{\sin((n+1)\alpha)}{2(n+1)} + \frac{\sin((n-1)\alpha)}{2(n-1)} - \cos \alpha \frac{\sin(n\alpha)}{n} \right] \text{ Para } n = 3,5,7, \dots \quad [3.22]$$

La tabla (2.1) muestra los valores porcentuales de los primeros 31 armónicos.

Orden de armónica	%
1	100
3	13.78
5	5.05
7	2.59
9	1.57
11	1.05
13	0.75
15	0.57
17	0.44
19	0.35
21	0.29
23	0.24
25	0.20
27	0.17
29	0.15
31	0.13

Tabla 3.1. Power system harmonics [2]

En condiciones simétricas, los valores en cada fase, los valores en los “soportes” se presentan pero se aíslan conectando los dispositivos en delta.

Capítulo 4. Efectos de distorsión armónica

En los anteriores capítulos se analizaron los armónicos desde un punto de vista matemático, definimos que son y los equipos que los causan, profundizando en el tipo de distorsión generada en cada caso particular. En éste capítulo se describirán analítica y matemáticamente los efectos que la distorsión armónica causa en el sistema y en los equipos; además de los problemas que causan con sistemas independientes como los de comunicaciones. Los efectos que causan los armónicos son variados, por lo que plantean diferentes retos tanto de diseño del sistema, como de mejora continua en equipos sensibles a ellos y a equipos que los generan.

Resonancias

El primero problema que causan los armónicos son las resonancias, revisaremos los tipos de resonancias que hay y las consecuencias que tienen en el sistema de potencia. La resonancia es un fenómeno que se presenta cuando un sistema, en éste caso eléctrico, trabaja a una frecuencia que coincide con la frecuencia natural del propio sistema, dada por la combinación de los componentes que lo forma; se debe, en gran medida a los capacitores de los CEV's y causa en éste caso de estudio, picos de corriente que paulatinamente dañan los componentes y en especial los mismos capacitores. Un ejemplo de señal resonante se muestra en la figura (4.1)

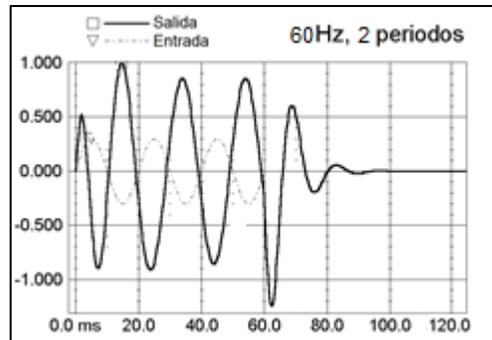


Figura (4.1) Señal resonante a 60 Hz.

Resonancia en paralelo

Éste tipo de resonancia produce una alta impedancia en la fuente de armónicos respecto a frecuencias resonantes. Hay muchas formas de producir resonancias en paralelo, pero entre ellas las más destacadas se encuentran conectar capacitores al mismo bus que una fuente de armónicos. Suponiendo que la impedancia del sistema es completamente inductiva la resonancia se encuentra con [4.1]:

$$f_{\rho} = f \sqrt{\left(\frac{S_s}{S_c}\right)} \quad [4.1]$$

Donde f es la frecuencia nominal (Hz), f_p la frecuencia de resonancia en paralelo (Hz), S_c el valor del capacitor en VARs y S_s el valor en VARs del cortocircuito.

Para determinar si hay resonancia se mide la cantidad de distorsión de voltaje en el sistema además de la cantidad de distorsión en corriente en la fuente alimentadora y en las cargas. Para que se produzca la resonancia, en general tienen que cumplirse relaciones entre el voltaje y corriente. Prácticamente se reducen a un par de cosas que son:

1. Corriente baja en la barra del bus combinado con alta distorsión armónica en voltaje en el sistema.
2. Grandes cantidades de armónicos de corriente en las cargas y cables con gran distorsión de voltaje en el bus, la resonancia se encuentra en los capacitores.

Resonancia en serie

La resonancia en serie se presenta en sistemas como los mostrados en la figura (4.2):

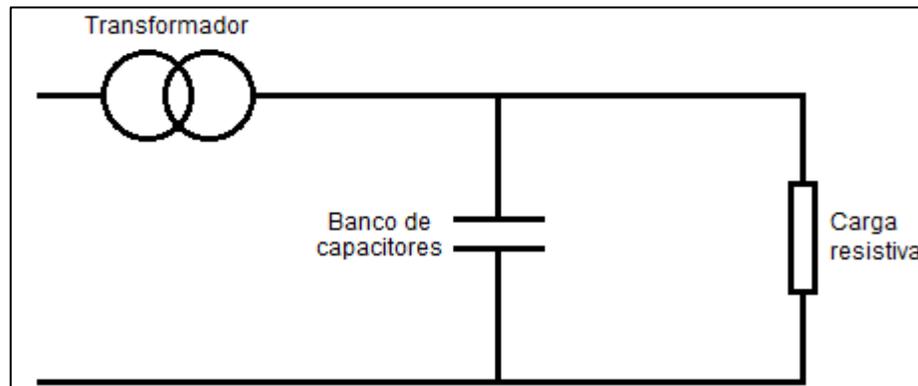


Figura (4.2) Circuito resonante en serie. “Power system harmonics” [2].

El gran problema de éste tipo de resonancia es que con pequeños niveles de armónicos de la señal de voltaje se pueden producir grandes flujos de corriente en los capacitores, lo que terminará por dañarlos. La frecuencia de resonancia en serie se encuentra con [4.2]:

$$f_s = f \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_t^2}{S_c^2}\right)} \quad [4.2]$$

Donde: S_t es el valor del transformador, Z_t la impedancia en por unidad del transformador, S_c el valor del capacitor y t_s el valor resistivo de la carga.

El valor de corriente real depende del factor de calidad del circuito (Q) y su frecuencia está normalmente entre 5 y 500 Hz.

Comportamiento del sistema en condiciones de resonancia

Como ya lo mencionamos, el principal efecto de la resonancia armónica es el daño a los capacitores de los compensadores estáticos de VAR's, que puede derivar en su destrucción cuando su dieléctrico se rompe, pero hay otro tipo de daños a los componentes de la red y están asociados con el control del sentido de la onda (señalización de la línea), es decir, bajo ciertas condiciones de distorsión se da el caso en el que por el ángulo de la señal total, la suma de la fundamental más las armónicas, el voltaje y la corriente se mueven en sentido contrario al que se necesita. Esto es, vuelven al generador en lugar de moverse al sitio de la carga.

Algunas veces se usan filtros sintonizados para evitar que elementos de baja impedancia absorban la frecuencia de señalización. Cuando hay resonancias en casos como éste, existen flujos grandes de corriente que dañan los capacitores de sintonización de los filtros. La falla en los capacitores puede producirse hasta en 2 días, operando en éstas condiciones, dependiendo de la frecuencia de resonancia en serie. Hay casos donde la resonancia amplifica el valor de los armónicos de bajo orden.

Considerado una fuente de corriente con armónicos con una impedancia interna Z_r en la armónica h . Asumimos que: La admitancia en la frecuencia fundamental es predominantemente inductivo. Es decir [4.3]:

$$Y_r = G_r - jB_r \quad [4.3]$$

Con estas condiciones la corriente armónica genera un voltaje armónico en las conexiones de amplitud [4.4]:

$$V_h = Z_r I_h = I_h / Y_r \quad [4.4]$$

Cuando se suma el efecto de la admitancia de filtros y los capacitores, el voltaje armónico se obtiene con [4.5]:

$$V'_h = I_h / (Y_r + Y_f) \quad [4.5]$$

Entonces la admitancia se vuelve, lógicamente capacitiva, con lo que Y_f , admitancia de capacitores y filtros es igual a jB_f , que apareció en la ecuación de la admitancia, por lo tanto queda [4.6]:

$$V'_h = I_h / (G_r - jB_r + jB_f) \quad [4.6]$$

Si el voltaje se limita por resistencia para (Es decir $B_r = B_f$) el voltaje armónico es casi inexistente pero cuando $Y_r + Y_f < Y_r$ el voltaje distorsionado se amplifica, principalmente en armónicos de bajo componente.

Resonancias compuesta y complementaria

Para comprender la resonancia complementaria, hay que tener presente que cuando el sistema está en una frecuencia resonante, las resonancias en serie presentan baja impedancia y las resonancias en paralelo presentan altas impedancias. Con base en esto se puede suponer un sistema de conversión de AC a DC con resonancia en paralelo en el lado AC y resonancia en serie del lado de DC. Al interactuar las impedancias de ambos lados, se obtienen frecuencias resonantes diferentes en cada lado en comparación a cuando se analizan por partes. Por lo tanto la resonancia compuesta se presenta en convertidores estáticos de VARs. La figura (4.3) es un esquema de un convertidor de AC a DC, el lado de AC, del generador a los diodos presenta resonancia en paralelo, después de los diodos, el lado de DC, suele presentar resonancia en serie.

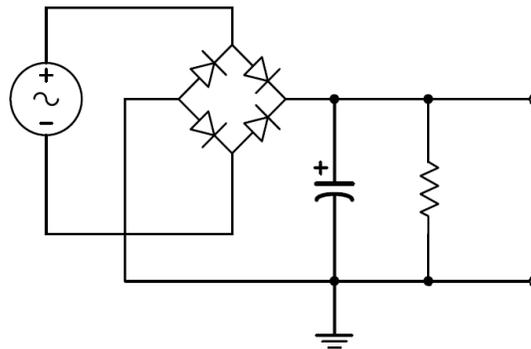


Figura (4.3) Esquema de un puente convertidor.

Esta resonancia es peligrosa pues puede generarse con distorsiones pequeñas comprometiendo la operación del convertidor. Si llegan a presentarse frecuencias no enteras, la impedancia puede ser negativa. Este caso es provocado por dispositivos de control del sistema y la interacción de impedancias del lado de AC y DC, dando como resultado una grave inestabilidad del sistema.

Un último efecto de las resonancias se genera cuando existen bajas impedancias que combinadas con cargas de valor constante generan caídas de corriente que a su vez provoca la pérdida de amortiguamiento del sistema. La consecuencia de esta pérdida de amortiguamiento es que, al perder la capacidad de absorber energía causa un desempeño pobre de los equipos a largo plazo.

Efectos en máquinas rotatorias

El efecto más notable en las máquinas rotativas es la pérdida por calentamiento, la cual aparece cuando la distorsión armónica supera el 5%. En las máquinas rotativas, picos de corrientes y voltajes armónicos causan pérdidas en los devanados del estator en el circuito del rotor y en las laminaciones tanto del rotor como del estator. El de la figura (4.4) es un motor trifásico con variador de frecuencia, cuyas armónicas pueden afectar al motor.



Figura (4.4) Motor trifásico.

Los motores de AC tienen pérdidas significativamente más grandes que los de DC a causa de las corrientes de Eddy y el efecto piel. Las corrientes armónicas producen campos en el estator y en las conexiones de los devanados que también pérdidas. En motores de inducción, armónicos de frecuencias altas producen pérdidas en el hierro dependiendo de la magnitud del ángulo de sesgo de los devanados y las características del hierro laminado. La pérdida térmica más grave, producida por efecto de armónicos, es la pérdida de potencia por fatiga de los devanados que se alcanza por un gran factor de distorsión relacionado con la inductancia de los mismos. Una medición aproximada de la fatiga térmica en los devanados se puede obtener con el TDH adaptado a la inductancia [4.7]:

$$THD_L = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{V_n^2}{n^\alpha}\right)}}{V_1} \quad [4.7]$$

Donde α es 1 ó 2, V_n es el valor RMS del voltaje en la frecuencia de la armónica n . N es la máxima armónica considerada y V_1 es el valor de RMS del voltaje de la frecuencia fundamental. La capacidad de la máquina de soportar éstas pérdidas, depende de la temperatura. Otro tipo de efectos que los armónicos causan en las máquinas rotativas son los torques armónicos. Las corrientes armónicas del estator producen movimiento en el eje del motor, que físicamente es producido por torque mecánico. Éstos torques giran en la misma dirección que los campos causado por los armónicos. Si los armónicos son de secuencia positiva giraran en ése sentido, si son de secuencia negativa giraran en sentido contrario. En valor de torque armónico se encuentran con [4.8]:

$$T_n = \left(\frac{V_n^2}{n^3}\right) \left(\frac{r'^{2n}}{X_1^2}\right) \quad [4.8]$$

Donde el signo de n nos da el sentido en que el torque aplica la fuerza, X la reactancia des dispositivo.

Sus efectos no son tan notables dado que los torques producen deslizamientos muy pequeños, además, estos torques se anulan, al producirse en pares. Sin embargo hay ocasiones que los torques no pueden ser despreciados, dado que producen pulsos, es decir torques grandes, pero de duración muy breve. Éste tema se profundizará más adelante.

Efectos en plantas generadoras

Como se ha mencionado anteriormente la mayoría de las cargas actuales son de naturaleza no lineal, por lo tanto, los generadores de energía eléctrica deben cumplir con especificaciones diseñadas para garantizar su operación sin calentamiento excesivo o vibraciones torsionales, que afectarían gravemente su operación.

El problema en los generadores se ubica en sus terminales, donde pueden producirse corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa que contribuyen a la aparición de torques pulsantes y vibraciones torsionales. También se presenta calentamiento a causa de la distorsión, lo que provoca la fatiga en el barniz aislante de los devanados, y por tanto se acorta la vida útil o el tiempo de mantenimiento del generador. Hablando de la regulación de voltaje se produce por la forma en que se provoca el exceso de corrientes de secuencia negativa que también desbalancea el sistema. Para una operación sin problemas se requiere:

- Rotor horneado con barras de amortiguamiento de cobre.
- Asegurar una reactancia transitoria entre 16% y 18%.
- Factor de potencia superior a 0.85.
- Distorsión armónica menor al 2%.

Un ejemplo es el presentado en la figura (4.5) que muestra el rotor de un generador eléctrico. Se pueden apreciar las barras de cobre que se insertan al hornear el material, y que ayudan a amortiguar efectos mecánicos y magnéticos de los armónicos en el dispositivo.

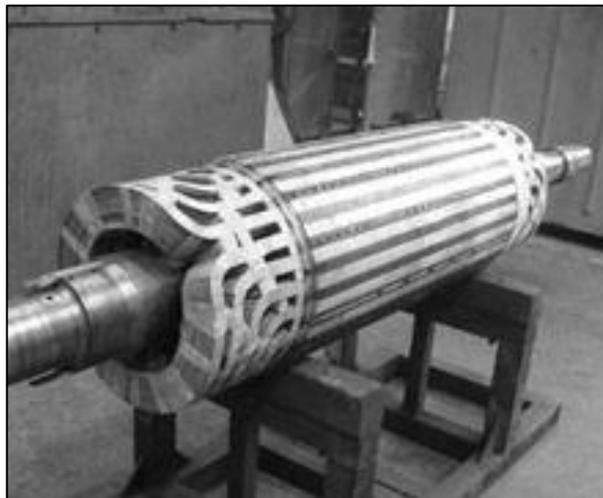


Figura (4.5). Rotor de un generador.

Medición de potencia con formas de onda distorsionada

Como es evidente al distorsionarse la formada onda, la medición de los parámetros eléctricos debe hacerse bajo ciertas consideraciones, pues normalmente el equipo de medición se basa en formas de onda periódicas para realizar su función y al haber distorsión armónica es imposible tener dicha

periodicidad y menos aún, formas de onda senoidales, para las que se diseñan los equipos en cuanto a funcionamiento. Para evaluar la potencia en una señal distorsionada, en su publicación de 1972, Shepherd y Zakikhani [17] proponen descomponer la potencia aparente como sigue [4.9]:

$$S = S_R^2 + S_I^2 + S_D^2 \quad [4.9]$$

y a su vez, sus componentes se definen como [4.10], [4.11] y [4.12]:

$$S_R^2 = \sum_1^n V_n^2 \sum_1^n I_n^2 \cos^2(\varphi n) \quad [4.10]$$

$$S_X^2 = \sum_1^n V_n^2 \sum_1^n I_n^2 \sin^2(\varphi n) \quad [4.11]$$

$$S_D^2 = \sum_1^n V_n^2 \sum_1^p I_p^2 + \sum_1^m V_m^2 (\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2) \quad [4.12]$$

Donde cada una son potencia activa, potencia reactiva y potencia distorsionada respectivamente de este modo los autores lograron minimizar la potencia reactiva (S_X) por lo cual se optimiza el factor de potencia con la parte lineal que se suma a la definición.

En 1990, A.E. Emanuel [13] establece que:

- *Todas las formas de potencia no activa vienen de manifestaciones de energía con marca común: oscilaciones de energía entre diferentes fuentes, fuentes y cargas o cargas y cargas. Toda la energía transferida ligada a potencia no activa es nula.*
- *Debido a la significancia única de las potencias, fundamentalmente S_1 , P_1 , Q_1 que viene del hecho que la energía eléctrica es un producto generado, transmitido y consumido en 50 Hz ó 60 Hz (dependiendo del caso) el campo electromagnético es utilizable por separado por la potencia aparente (S) en la frecuencia fundamental (S_1) y en frecuencias no fundamentales (S_N) la potencia aparente es: $S^2 = S_1^2 + S_N^2$.*
- *Como todas las potencias no activas, el término de S_N contiene también un leve registro de potencia activa armónica (P_H). La potencia activa armónica rara vez excede el 0.5% de P_1 . Entonces, una primera aproximación una carga no lineal industrial puede ser evaluada por las mediciones de P_1 , Q_1 y S_N .*
- *La división más profunda de S_N en otros componentes nos provee de la información que se requiere para un compensador dinámico o un filtro estático, con lo cual determinamos la capacidad y nivel de corriente y voltaje distorsionados.*

Es importante hacer notar que el análisis anterior está basado en el estudio de una fase, pero es factible aplicarlos individualmente a un sistema trifásico. En el caso de sistemas trifásicos desbalanceados se consideran expresiones donde se toma en cuenta que cada fase tiene un factor de potencia diferente de los otros dos. Retomando los trabajos de Budeanu y Fryze, en su libro llamado L.S. Czarnecki [14] propone 4 expresiones para la potencia reactiva, obteniendo 2 del trabajo de cada uno de los científicos que comparó. Las expresiones son [4.13], [4.14], [4.15] y [4.16]:

$$S_v = \sqrt{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_{bk})^2 + (\sum_k D_k)^2} \quad [4.13]$$

$$S_a = \sum_k \sqrt{(P_k^2 + Q_{bk}^2 + D_k^2)} \quad [4.14]$$

$$S_e = \sum_k \sqrt{(P_k^2 + Q_f^2)} = \sum_k V_k I_k \quad [4.15]$$

$$S_s = \sqrt{(P^2 + Q_f^2)} = \sqrt{\sum_k V_k^2} \sqrt{\sum_k I_k^2} \quad [4.16]$$

Las primeras dos refieren a la potencia aparente en forma vectorial y aritmética, respectivamente. En ambas expresiones P_k representa la potencia activa. Q_{bk} la potencia reactiva propuesta por Budeanu, pero expuesto por Antoniu [15], y D_k es la potencia de la distorsión en cada fase.

La tercera ecuación considera independientemente el consumo de potencia en cada fase, finalmente la cuarta expresión considera la red trifásica como una unidad. Las ecuaciones 3 y 4 se basan en el triángulo de Fryze y las potencias reactivas que son parte de ellas, consideran los efectos de la distorsión, no sólo la potencia reactiva.

El factor de potencia es la relación entre la potencia eléctrica de un sistema que se transforma en otro tipo de energía. Respecto a las 4 ecuaciones dadas anteriormente se cumple: $S_v \leq S_a \leq S_e \leq S_s$

Relacionándolo con sus correspondientes factores de potencia se tiene que $FP_v \geq FP_a \geq FP_e \geq FP_s$. Finalmente para el factor de potencia de un sistema trifásico con neutro, debe incluirse la corriente de éste último en el cálculo total, pues las armónicas circulan en éste cable.

Después de advertir la íntima relación que tiene el factor de potencia en el cálculo de potencia en condiciones de distorsión, es importante también analizar el cálculo de éste factor en las mismas condiciones. Partiendo de la definición del factor de potencia [4.17]:

$$f_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{V_{rms} I_{rms}} \quad [4.17]$$

Tomando en cuenta [4.18] y [4.19]:

$$v = \sum_1^n \sqrt{2} V_n \sin(n\omega t + \alpha_n) + \sum_0^m \sqrt{2} V_m \sin(m\omega t + \alpha_m) \quad [4.18]$$

$$i = \sum_1^n \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n + \phi_n) + \sum_0^p \sqrt{2} I_p \sin(p\omega t + \alpha_p) \quad [4.19]$$

Obtenemos que [4.20]:

$$p.f. = \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos(\phi_n)}{\{(\sum_1^n V_n^2 + \sum_0^m V_m^2)(\sum_1^n I_n^2 + \sum_0^p I_p^2)\}^{1/2}} \quad [4.20]$$

En la expresión anterior tenemos que ϕ_n es el factor de potencia en el voltaje y la corriente de componente fundamental y μ es el factor de distorsión de la corriente.

Dado lo aleatorio de la distorsión, la compensación se vuelve muy difícil por lo que se procura minimizar la potencia aparente mediante dispositivos con pérdidas despreciables. También se usa la compensación agregando capacitancia al sistema pero agregando filtros, pues solo funciona de onda senoidal.

La figura (4.6) muestra una señal fundamental y sus primeras armónicas, la suma de éstas es la que tiene efecto sobre los equipos. Se hace evidente que la medición en estas condiciones sería errónea al no ser una senoidal pura.

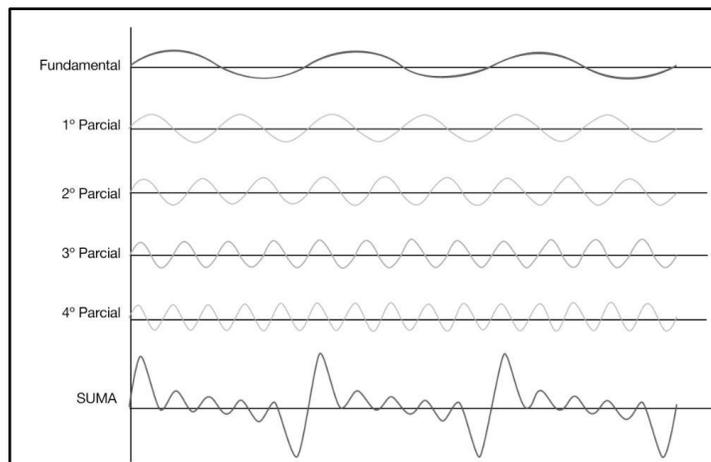


Figura (4.6) Onda senoidal distorsionada como suma de la fundamental y sus armónicas.

Como se mencionó anteriormente, los instrumentos de medición de parámetros eléctricos están diseñados para operar con señales puramente senoidales por lo que al ser utilizados en ambientes con señales distorsionadas pueden presentarse errores en las lecturas que registran. Dependiendo de la magnitud de la distorsión y de la dirección de los flujos armónicos será el tamaño del error de medición. El error también depende del tipo de medición pues dependiendo de cuál sea pueden presentarse de magnitud positiva y negativa a la vez. El elemento básico para medir la potencia y el más difundido por su simplicidad es el motor Ferraris, de tipo medición de Kilowatts-hora. Funciona haciendo calcular por sus devanados la corriente que utilizará el sistema que vayamos a medir. Esa corriente genera flujos de impulso y de ruptura que a su vez crean torque en el rotor del motor. Una parte del motor está diseñada para producir flujos secundarios, que compensan las pérdidas por fricción. Éste es el dispositivo en el que se basan los mediadores que se usan aún en la actualidad, pero están siendo sustituidos por instrumentos electrónicos. Tienen como desventaja que son sensibles a la frecuencia, por lo que se ven afectados de gran forma por la distorsión armónica, pues al operar en frecuencias diferentes a la de diseño la medición no es confiable. Para aclarar lo que se acaba de mencionar analizaremos una expresión de la potencia total del sistema [4.21].

$$PT = V_{DC}I_{DC} + V_F I_f \cos \phi_F + V_H I_H \cos \phi_H \quad [4.21]$$

Entonces, la potencia total del sistema es la suma de la potencia en corriente directa, si está presente, más la potencia en la frecuencia fundamental más la potencia de frecuencias armónicas. La parte de DC está presente por efectos en los sistemas de potencia o porque se generan en el punto de

consumo. Al igual que la componente armónica la componente de DC no causa torque en el rotor del medidor, pero causan que la componente de frecuencia fundamental pierda cierta capacidad de generarlo. Además la potencia de DC causa un error proporcional a la relación [4.22]:

$$P_{DC}/P_T \quad [4.22]$$

Por lo tanto la medición basada en motores Ferraris es usada en cargas relativamente pequeñas con flujos armónicos mínimos.

Interferencias con sistemas de protección

Como se ha visto, los armónicos incrementan los valores RMS de voltaje y corriente, además de pulsos momentáneos que pueden causar que, desde el punto de vista de las protecciones del sistema, causan operaciones anormales.

El primer efecto notable por mencionar es la falla en la operación de los fusibles a causa de pulsos de corriente o el incremento en los valores de voltaje a causa de la distorsión. Éste fenómeno es particularmente sensible cuando se da en los fusibles de los bancos de capacitores, pues si opera el fusible una fase, el sistema queda desbalanceado lo que produce sobrevoltaje en la red. Además se daña la calibración de filtros pasivos que no cuenten con detector de desbalance.

Los sistemas de protección están diseñados para evitar daños cuando se presentan sobrecorrientes, incrementos repentinos en la demanda de potencia o cuando las cargas tienen una gran inercia eléctrica, principalmente. Para estas situaciones se calcula un punto a partir del cual la operación no es aceptable y tal punto es el punto de operación de los sistemas de protección. La problemática que se presenta con los sistemas de protección, desde el punto de vista de los armónicos, es que pueden producir los mismos efectos que si el sistema operara en condiciones que acabamos de describir, y por lo tanto las protecciones operan. En la figura (4.7) se muestra un ejemplo de las curvas que se usan para calibrar la operación de fusibles. Es importante cuidar que la distorsión armónica no rebese los límites de esa calibración.

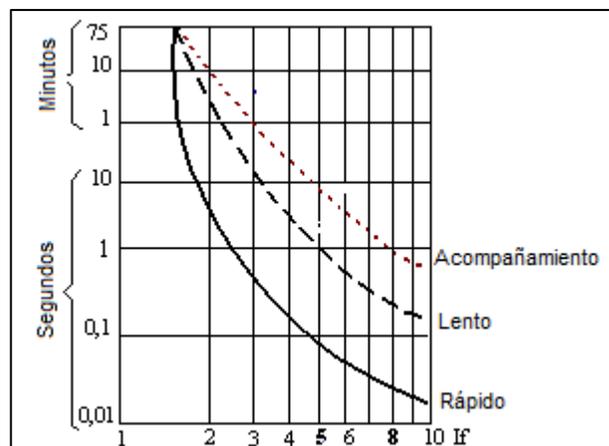


Figura (4.7) Ejemplo de curvas de calibración de fusibles.

Si las protecciones llegan a operar en éstas condiciones se pueden producir sobrecargas que en ocasiones se agravan por el nivel de armónicos que se tienen en el sistema, entrando en un ciclo de crecimiento en su magnitud a causa de las cargas no lineales.

Una situación frecuente y de alto riesgo se presenta con el desbalance en un sistema trifásico. Éste desbalance crea una fuerte corriente relacionada con la tercera armónica. Lo suficientemente grande como para accionar las protecciones lo que incrementa el desbalance, esta situación se da casi exclusivamente en cargas industriales, aunque no en todas, por lo que su presencia indica la necesidad de filtros.

Los relevadores modernos se basan en dispositivos electrónicos que muestrean la señal o detectan cruces por cero para llevar a cabo su labor. En ambientes con armónicos, los parámetros que censan los relevadores electrónicos sufren importantes afectaciones por lo que operan fácilmente. Para que ésta situación se desarrolle se necesita una distorsión cercana al 20%, lo que ocurre pocas veces.

Dispositivos que usan propiedades térmicas para su operación como fusibles e interruptores termomagnéticos tienen problemas en instalaciones grandes pues los armónicos tienen también efectos térmicos que se revisarán más adelante. A diferencia de los dispositivos digitales los relevadores electromecánicos son poco sensibles a grandes cantidades de armónicos, pues están diseñados para operar en voltajes y corrientes de frecuencia específica, lo que les confiere una gran inercia magnética en presencia de distorsión armónica. En la figura (4.8) se aprecia el detalle de los devanados de uno de éstos dispositivos. Su inmunidad a los armónicos se debe a que la distorsión se anula en sus devanados. De éste modo, los relevadores electromecánicos son utilizados ampliamente para proteger de sobrecorrientes.

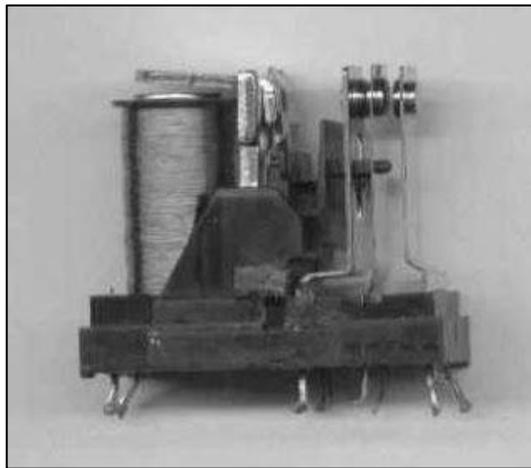


Figura (4.8) Relevador electromecánico.

Cuando se presenta una falla en el sistema predomina la frecuencia fundamental, pero en los transformadores el secundario reduce offset de DC en el primario y armónicos de baja componente. Si hay armónicos en el secundario es muy difícil encontrar la forma fundamental a causa de esta retroalimentación entre ambos lados del transformador.

Con la correcta elección de equipo y cables pueden evitarse ciertas situaciones que generan armónicos. Es necesario cuidar la relación entre los requerimientos del sistema y su diseño para evitar, por ejemplo las situaciones de desbalance, pues como se ha notado, son estados donde las señales son propensas a la distorsión. Algunas, bajo ciertas condiciones solo producen armónicos de componente par, mientras que en las fallas, se producen cualquier componente de armónicos.

Prácticamente el único caso en donde hay armónicos considerables que dependan del equipo que compone el sistema es cuando se energiza un transformador. Entre más grande sea éste más grandes son los armónicos que generan, debido a que la corriente de inrush es mayor, aunque el gran factor para determinar el tamaño de la distorsión, es la inductancia del aire del núcleo, pues de ésta depende la magnitud de la corriente de inrush, que provoca los armónicos. Un factor más que puede agravar o subsanar la magnitud de la corriente, es la cantidad de flujo residual. Finalmente, cuando la corriente en el secundario es cero la corriente del primario disparará la protección con seguridad, por lo que se calibra para estar “inactiva” en ese período de tiempo.

Efectos de los armónicos en equipo

En ésta sección abordaremos los efectos que causan los armónicos en distintos equipos, pues varían de uno a otro dependiendo de los componentes con que esté hecho.

Comenzaremos por mencionar equipos comunes en prácticamente cualquier lugar, pues son hechos para uso en el hogar, pero su cantidad es tal, que afectan de manera importante a los sistemas de potencia. En primer lugar está el equipo de cómputo, que puede dañar sus componentes electrónicos, dada la distorsión armónica, por lo que es altamente recomendable usar reguladores con supresores de picos, aunque, por diseño, cada marca tiene un nivel de tolerancia nunca superior al 5% de distorsión. Los televisores que usaban cinescopio tenían problemas con el brillo si la distorsión tiene picos de valor considerable y con el tamaño de la imagen, causada por el efecto de la distorsión en el enrollamiento de alambre del cinescopio. Dichos problemas fueron solucionados con el uso de tecnología digital. La iluminación fluorescente, que es una fuente de armónicos, también sufre consecuencias con estos, pues en dichos dispositivos causan sobrecalentamientos con la posible falla subsecuente, además de que en ocasiones presentan ruido perfectamente audible. Una forma de proteger cualquier equipo a nivel doméstico es usar un regulador de corriente, como el mostrado en la figura (4.9) que rectifica la forma de la corriente para evitar daños en los dispositivos



Figura (4.9) Acción de un regulador de corriente.

La acumulación de estos equipos en una misma barra del bus causa que la suma de la pequeña distorsión de cada equipo llegue a ser un problema considerable. Considerando efectos en sistemas más grandes, destacan, por su importancia los efectos que los armónicos tienen en los sistemas de comunicaciones.

La interferencia con circuitos de comunicación se da a causa de la cercanía entre sistemas que trabajan en megawatts, que conviven con sistemas que están por debajo del watt de potencia, como lo son los sistemas de comunicaciones. Dicha cercanía permite que campos del sistema de potencia, al ser grandes, influyan sobre el sistema de comunicación, especialmente si su blindaje es pobre o defectuoso. Como se muestra en la figura (4.10) el cableado del suministro eléctrico y de comunicaciones coexisten a distancias considerablemente cortas, por lo que es importante usar blindajes robustos para evitar la pérdida de información, por lo que la inversión en ése rubro es considerable.

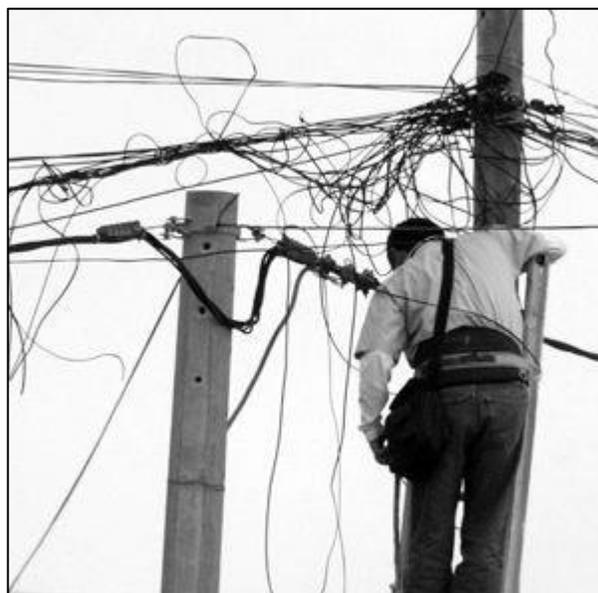


Figura (4.10) Convivencia de líneas de comunicación y conductores de sistemas de potencia.

A frecuencias fundamentales un sistema eléctrico no interfiere con las comunicaciones, pues éstas funcionan a frecuencias muy superiores, pero los armónicos de alta frecuencia pueden llegar a causar afectaciones, dependiendo del ruido eléctrico que causen, que va desde molestia, si el ruido es de baja potencia, hasta pérdidas de información, si el ruido es intenso.

Por si solos, los armónicos de un sistema de potencia no bastan para interferir en un sistema de comunicación. Se tienen que dar un par de condiciones extra además de que los armónicos deben de tener una frecuencia en los niveles de audio y, por supuesto, la magnitud de la distorsión de voltaje y corriente en las cercanías del sistema. Las otras dos condiciones que debe cumplir son:

1. Acoplamiento: Es un factor que relaciona, como su nombre lo dice, el acoplamiento que existe entre los voltajes y las corrientes armónicas y la interferencia que causan en el sistema de comunicación.

2. Susceptibilidad: Es la característica que no dice que tanto permite un equipo o el propio sistema, la interacción con corrientes armónicas.

Como se mencionó antes es necesario que se cumplan tres condiciones descritas para que el ruido tenga lugar. Dada ésta situación, es más fácil evitar una o varias de esas condiciones que tratar al ruido dentro del sistema.

El acoplamiento indica que hay una impedancia entre el sistema de potencia y el sistema de comunicación, cuya magnitud depende de la distancia entre ambos sistemas, la longitud o área que están expuestas entre sí, frecuencia y la resistencia de la tierra física de ambos.

A continuación mencionaremos las formas en que los armónicos se introducen en los sistemas de comunicación.

Primero se mencionará la llamada inducción del circuito que se presenta cuando componentes armónicos de voltaje del sistema de potencia induce las partes metálicas del circuito de comunicación, principalmente, los dos cables que conectan los componentes de la línea. La inducción del circuito se evita transponiendo los cables o usando cable de tipo par trenzado por lo que no representa un riesgo para la transmisión de la línea de comunicación.

La inducción electromagnética longitudinal se da a causa de los campos electromagnéticos que se producen por la corriente en la línea de transmisión. Éste campo magnético induce una fuerza electromagnética en la línea de comunicación, que es la fuente de ruido más común en un línea telefónica. Corrientes residuales que circulan por el neutro o el conductor de puesta a tierra también produce el mismo efecto. Para calcular la fuerza electromotriz en la línea telefónica se usa $V_m = MI_R$ donde M representará la impedancia que relaciona la línea de potencia con la línea de comunicación.

El modelo que se usa para estudiar éste fenómeno es usualmente, el obtenido por J.R. Carson [16], que se ilustra en la figura (4.11) y las distancias de referencia se obtienes como se ilustra en la figura (4.12)

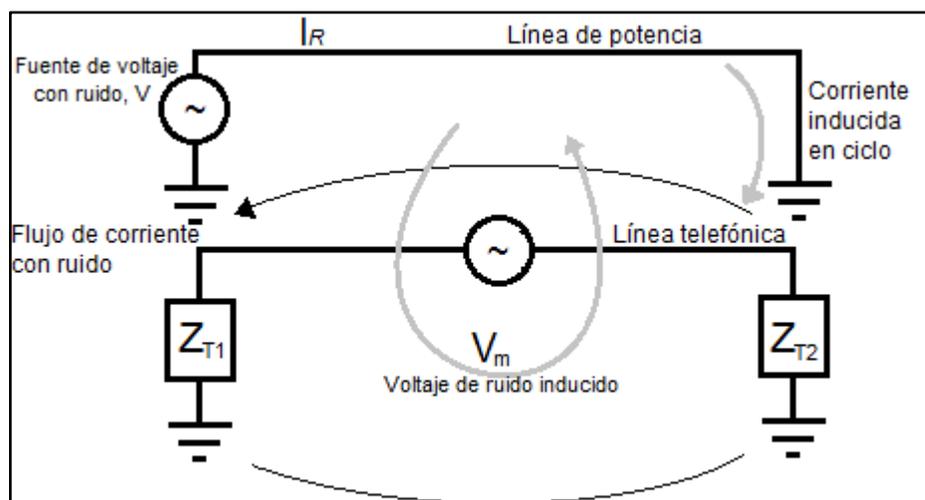


Figura (4.11) Inducción electromagnética. "Power systems harmonics" [2].

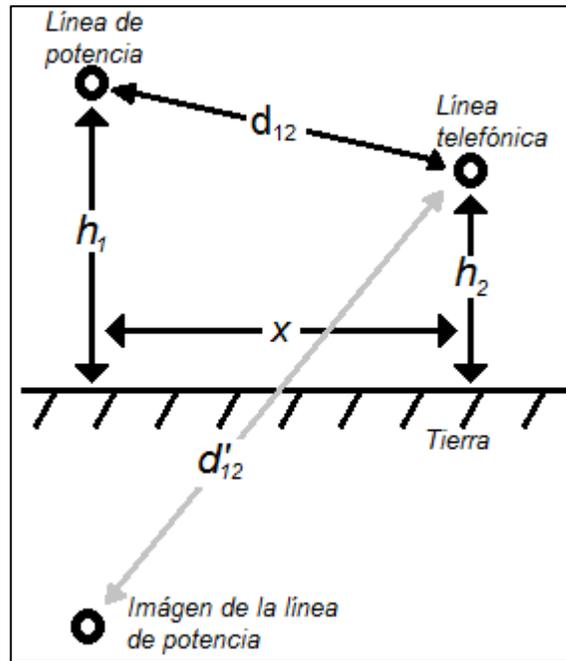


Figura (4.12) Configuración de líneas de potencia y de comunicación. “Power system harmonics” [2].

Dicho modelo es válido para la mayoría de los casos con un nivel de tierra uniforme además que es poco sensible a cambios de estructura y resistividad. Del modelo de Carson se obtiene la siguiente expresión matemática [4.23]:

$$M = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{d'_{12}}{d_{12}} - 2j \int_0^\infty [\sqrt{(u^2 + j)} - u] e^{-u\alpha(h_1+h_2)} \cos(u\alpha x) du \right] \quad [4.23]$$

Donde M es la impedancia mutua por unidad de longitud y x es la separación entre ambos sistemas, h_1 es la altura del sistema de potencia, respecto a tierra y h_2 es la altura de la línea telefónica, respecto al nivel de tierra d_{12} es la distancia (radial) entre líneas y se calcula con [4.24]:

$$d_{12} = \sqrt{[(h_1 - h_2)^2 + x^2]} \quad [4.24]$$

d'_{12} se calcula igual que d_{12} y es la distancia radian entre una línea y la imagen bajo tierra de la otra línea, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular de la corriente que induce al sistema de comunicación, μ_0 la permeabilidad del espacio entre sistemas es [4.25]:

$$\alpha = \sqrt{2}/\delta \quad [4.25]$$

Donde δ es [4.26]:

$$\delta = \sqrt{(2\rho/\mu_0\omega)} \quad [4.26]$$

Es el grosor de la capa de la tierra en ohms sobre metro.

Revisando la ecuación de Carson se nota que la primera parte es afectada por la tierra con resistividad prácticamente cero y la segunda parte es afectada por resistividades “reales”, entonces la segunda parte aparece siempre en problemas prácticos y la primera desaparece.

Otro tipo de inducción que presenta un sistema de comunicación a causa de un sistema de potencia es la inducción longitudinal electrostática que consiste en la inducción de una fuerza electromotriz entre los conductores y la tierra. Analizaremos la siguiente, Figura (4.13)

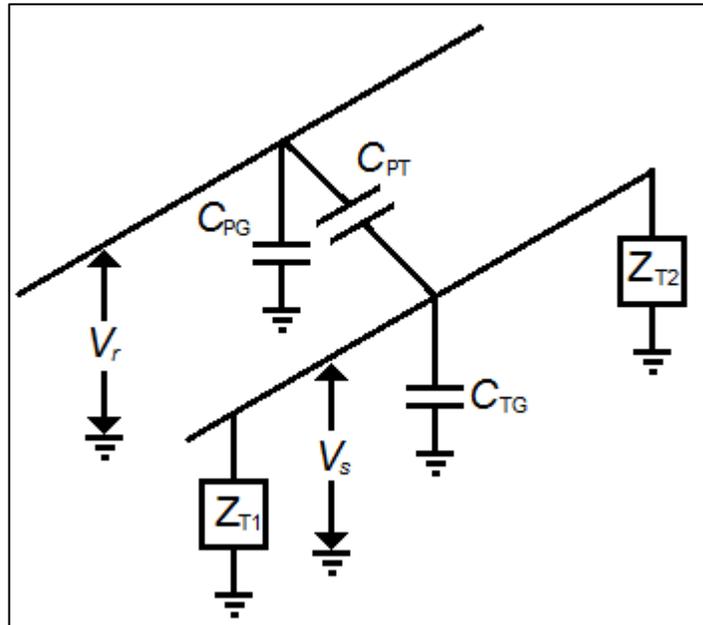


Figura (4.13) Inducción electrostática. “Power system harmonics” [2].

Se nota que existen capacitancias entre ambos cables y entre cada cable y tierra. La diferencia de potencia entre el cable de potencia y tierra, llamado voltaje residual (\$V_r\$) sirve para calcular el voltaje que hay entre la línea de comunicación y tierra (\$V_s\$). Para esto se usa [4.27]:

$$V_s = \frac{Z_T}{1/(j\omega C_{PT}) + Z_T} \cdot V_r \quad [4.27]$$

Donde \$Z_T\$ se calcula con [4.28]:

$$Z_T = \frac{1}{j\omega C_{TG} + (1/Z_{T1}) + (1/Z_{T2})} \quad [4.28]$$

El término \$Z_T\$ es importante pues en él se incluyen los efectos de las impedancias \$Z_{T1}\$ y \$Z_{T2}\$. El resultado de \$V_s\$ es muy pequeño, por lo cual debe de ser eliminado mediante el uso de una capa en el cable que actúe como blindaje (como jaula de Faraday). La inducción longitudinal electrostática es peligrosa cuando \$V_r\$ o \$C_{PT}\$ son grandes, y tales situaciones se evitan con impedancias en la línea de comunicación comparativamente pequeña respecto a las impedancias correspondientes a las capacitancias del sistema, lo que reduce significativamente el voltaje inducido (\$V_s\$), es decir, procurando guardar una

distancia significativa con el sistema de potencia y cables en el sistema de comunicación de baja resistividad. Otro efecto que produce ruido eléctrico es el “Acoplamiento conductivo”.

Como es perfectamente sabido en situaciones de desbalance, ya sea por falla, por armónicos o cualquier otra situación, por el neutro circulan corrientes residuales que regresan al transformador. Estas corrientes causan picos de voltaje en los electrodos de puesta a tierra. Si una línea de comunicación está aterrizada en el área de influencia del electrodo del sistema de potencia, puede presentarse una diferencia de potencial en la referencia a tierra de la línea telefónica, como se muestra en la figura (4.14)

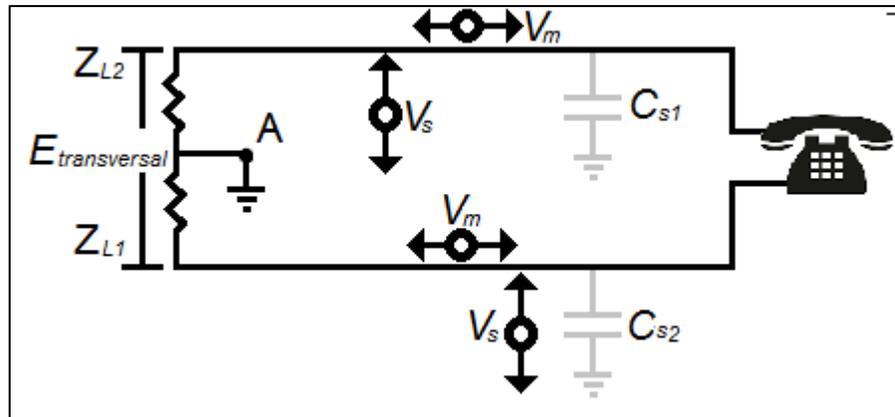


Figura (4.14). Modelo simple de circuito telefónico “Power system harmonics” [2].

La figura anterior (4.14) es el modelo de la situación que se acaba de describir. De ella es importante destacar que el potencial que en el electrodo de puesta a tierra causan flujos de corriente desiguales respecto a Z_{L1} y Z_{L2} , lo que genera ruido en el sistema de comunicación. Este fenómeno se conoce como acoplamiento conductivo. El área de influencia del electrodo de puesta a tierra del sistema depende de la resistividad del terreno. Lo conveniente en éste caso es interconectar todas las puestas a tierra, si los sistemas son cercanos entre sí.

Existen ciertas condiciones que agravan esta situación como cantidades de corrientes residuales circulando por el neutro del sistema, resistencia del sistema de puesta a tierra de la línea telefónica.

Ahora que sabemos cómo se produce el ruido en las líneas de comunicación, a causa de los armónicos, revisaremos que tanto afectan a la calidad del mensaje transmitido, es decir, la susceptibilidad.

La susceptibilidad depende de factores como: el balance de la línea de comunicación, la efectividad del blindaje de los cables y de la puesta a tierra del equipo que lo compone y las frecuencias de armónicas en el ambiente.

Como mencionamos antes, un sistema de comunicación trabaja en frecuencias diferentes a las del sistema eléctrico, típicamente entre los 30 y 3000Hz. La interferencia se da porque a pesar de que la frecuencia fundamental del sistema eléctrico está lejos de esas frecuencias armónicas de ciertos componentes, pueden tener aún un valor lo suficientemente grande para afectar sistemas de

comunicaciones relativamente cercanos. Es decir, mayor sea el voltaje de la línea más alcance tendrán sus componentes aunque sean de múltiplos grandes.

Existen estándares de ponderación de la respuesta de equipo de comunicación y del oído humano a frecuencias armónicas. El equipo norteamericano se ajusta al criterio de ponderación “C-message” emitido por Bell Telephone Systems y el instituto eléctrico Edison. El equipo europeo usa el estándar CCITT para ponderación de frecuencias audibles. Estándares como los recién mencionados fueron emitidos dado que la interacción entre el oído humano con un aparato telefónico tiene una sensibilidad valuado en 1000Hz. Lo que representa pérdida en la fidelidad del mensaje recibido, tomando en cuenta que el ser humano en promedio capta frecuencias audibles entre los 30 y 3000Hz. Este problema es de especial cuidado en frecuencia que se encuentran entre 1KHz y 3KHz pues estas frecuencias son difíciles de disminuir en curvas de ponderación. A continuación se presenta un ejemplo de curvas de ponderación con los estándares mencionados. Sus correspondientes gráficas se muestran en la figura (4.15)

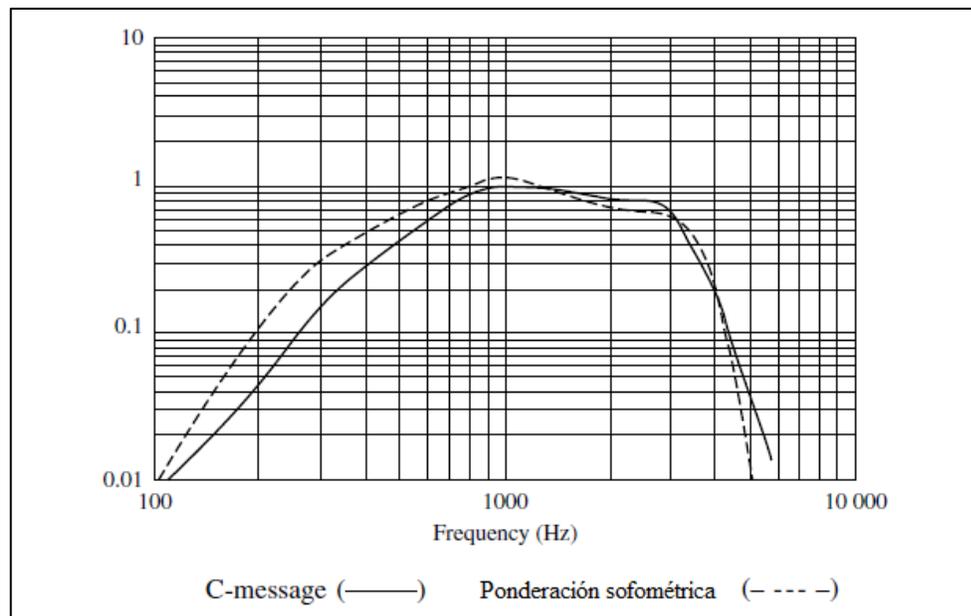


Figura 4.15. Gráfica de ponderaciones “Power system harmonics” [2].

Con esta tabla se calcula el ruido transversal o metálico, tomando sus factores ponderados y usando la expresión [4.29]:

$$V_m = \sqrt{\sum_{n=1}^N (V_{cn} K_n B_n C_n)^2} \quad [4.29]$$

De dicha expresión tenemos que C_n es un factor ponderado del armónico n , V_c es el voltaje longitudinal inducido en el armónico de componente más grande considerado para cada caso K_n es factor de protección del circuito de comunicación y B_n es el factor de balance del circuito.

Ahora que se ha comenzado a asumir que las afectaciones de los armónicos a los sistemas de comunicación están siempre presentes y que se busca normalizarlas para que la calidad del audio no

sea perceptiblemente comprometida en sistemas telefónicos debemos de mencionar la ponderación sofométrica, es decir, en las frecuencias audibles para el ser humano. Para la sofometría, la distorsión dada por un valor adicional llamado de adquisición telefónica (TFF por sus siglas en ingles), se calcula con [4.30]:

$$TFF = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\frac{U_n}{U} \cdot F_n\right)^2} \quad [4.30]$$

Donde U_n es el componente de un voltaje que enturbia la calidad en el armónico y N es el armónico más alto considerado y $F_n = p_n n f_o(800)$ con p_n como es factor sofométrico y f_o la frecuencia eléctrica fundamental. Para la anterior expresión del voltaje RMS línea-neutro se calcula con [4.31]:

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2} \quad [4.31]$$

El TFF por lo general debe ser menor al 1% en el límite de tolerancia. Normalmente, la normativa exige que el valor de ruido sofométrico sea menor a 1mV. El TFF se vuelve una causa típica de interferencia telefónica si supera los 0.5mV. El estándar CCITT define otro factor, llamado corriente equivalente de perturbación simbolizada por I_p y se obtiene con [4.32]:

$$I_P = (1/p_{800}) \cdot \sqrt{\sum_f (h_f p_f I_f)^2} \quad [4.32]$$

En la ecuación anterior I_f es la componente de la frecuencia f y h_f es un factor que es función de la frecuencia, por convención se usa $h_{800}=1$. Siguiendo con el estudio de estándares que se apoyan en la sofometría, es importante analizar los factores que se incluyen en la ponderación estadounidense o "C-message". El primero de ellos es el Factor de influencia telefónica o TIF, por sus siglas en ingles equivalente al TFF europeo y, al igual que éste, es un valor adimensional. Para obtenerse la expresión [4.33]:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N (U_n W_n)^2}}{U} \quad [4.33]$$

Donde U_n es el valor RMS del voltaje en el armónico n , N es el máximo orden de armónico considerado y U es el valor RMS de la línea al neutro, f_o la frecuencia del sistema eléctrico y W_n es la frecuencia en el armónico n obtenida de la tabla TIF, mostrada a continuación, en la tabla (4.1)

Frecuencia (Hz)	Armónica	C-message C	TIF W
60	1	0.0017	0.5
120	2	0.0167	10
180	3	0.0333	30
240	4	0.0875	105
300	5	0.15	225
360	6	0.222	400
420	7	0.31	650
480	8	0.396	950
540	9	0.489	1320
600	10	0.597	1790
660	11	0.685	2260
720	12	0.767	2760
780	13	0.862	3360
840	14	0.912	3830
900	15	0.967	4350
960	16	0.977	4690
1020	17	1	5100
1080	18	1	5400
1140	19	0.988	5630
1200	20	0.977	5860
1260	21	0.96	6050
1320	22	0.944	6230
1380	23	0.923	6370
1440	24	0.924	6650
1500	25	0.891	6680

Tabla (4.1) Coeficientes TIF y C-message. Power system harmonics [2].

El TIF modula la efectividad de la inducción en circuitos adyacentes y encuentran su utilidad para medir la interferencia entre un sistema de potencia y sistema de comunicación analógico, aunque actualmente ha caído en desuso, pues los sistemas de comunicaciones son digitales. El TIF está expresado en términos de corriente y la presentación de la secuencia es:

$$\begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \\ I^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_Y \\ I_B \end{bmatrix}$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

Los estándares de la calidad de comunicación tienen tolerancia muy pequeña para el ruido causado por la secuencia cero porque está en fase y se suma aritméticamente. Las secuencias positiva y negativa no son tomadas en cuenta fuertemente dado que un sistema de comunicación no distingue entre ambos y sus efectos se cancelan. Finalmente si se proyecta que un sistema balanceado aportará

ruido a un sistema de comunicación, debe incluirse éste factor en el cálculo TIF, aunque no se sume algebraicamente, sino de forma vectorial. Esto es [4.34]:

$$TIF = \sqrt{TIF_b^2 + TIF_r^2} \quad [4.34]$$

Donde los TIF son balanceado y residual respectivamente.

Otro factor relevante es la corriente equivalente de perturbación (I_{eq}) y se calcula con [4.35]:

$$I_{eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (H_n C_n I_n)^2} \quad [4.35]$$

Dando I_n es la corriente de perturbación en la armónica n , N es el armónico máximo considerado, C_n el factor de ponderación del "C-message" obtenido de una tabla, como la anteriormente citada. De la misma forma que con el TIF armónicos de sistemas balanceados son considerados y sumados vectorialmente como se muestra en [4.35]:

$$I_n = \sqrt{(I_{rn})^2 + (K_{bn} I_{bn})^2} \quad [4.35]$$

Donde I_{rn} y I_{bn} son respectivamente, la corriente residual y del balance en la armónica n y K_{bn} es el factor de acoplamiento de la parte residual con la parte balanceada en frecuencia fundamental.

Una vez revisado los factores que causa ruido en un sistema de comunicación y cómo se evalúan, se pasara a revisar las soluciones que reducen sus efectos. El primero y más obvio es el blindado de los cables y equipo que consiste en una capa o malla de conductor, que al estar aterrizada elimina por este medio las corrientes causadas por voltajes longitudinales del sistema de blindado solo elimina parcialmente los efectos sobre el sistema de comunicación, además pueden presentarse resonancias entre el cable y la capa de blindaje si la corriente es más grande y hay acoplamiento entre el conductor y el blindado. Este fenómeno se conoce como factor de blindaje y se representa con la letra K y matemáticamente es el cociente de la suma de la resistencia en DC del blindado más la resistencia de la tierra. Del análisis de la forma en que se obtiene el factor de blindaje se concluye que puede reducirse en tres formas.

- 1) Reduciendo el valor de la resistencia de tierra.
- 2) Reduciendo la resistencia del blindaje.
- 3) Incrementando la inductancia del encapsulado.

Pueden combinarse varias de éstas condiciones para lograr mejores resultados.

En una situación práctica, se recomienda que la lectura de tierra en el o los puntos donde se aterriza el blindaje debe de ser menor a 2 ohms y en equipo se usa cinta de acero para blindar puntos focalizados que son sensibles al ruido. Como se había mencionado, el blindaje de los cables es solo parte de la solución al problema que representa el ruido externo inducido en el sistema de comunicación. Su principal desventaja es el costo, pues cables de este tipo pueden llegar a costar un 50% más que aquellos que carecen de ésta protección, aunque usarlo es más recomendable. El ruido

que no alcanza a ser eliminado por el blindaje y pasa al cable del sistema de comunicación, aún puede ser nocivo para la transmisión del mensaje. Si su valor es menor a 1mV se encuentra en un rango tolerable. Si rebasa éste valor se deben de determinar algunos parámetros y a partir de las lecturas obtenidas se puede tomar acciones.

Las mediciones que deben de llevar incluyen: el nivel de tierra, es decir, que no existen potenciales en ésta y se considera una referencia; y encontrar si al voltaje es de origen electrostático o electromagnético. Si hay un potencial eléctrico en tierra se recomienda reducir el acoplamiento al punto que incluso las puestas a tierra deben evitarse. En cualquier otro caso, la reducción del acoplamiento no es práctica ni recomendable. En ese caso, puede reducirse la susceptibilidad, como ya se había hecho mención, y que en la práctica se logra usando estranguladores, transformadores con neutralizadores de ruido y circuitos derivados.

Capítulo 5. Efectos de armónicos en sistemas de distribución.

En el capítulo anterior se describieron los efectos de los armónicos desde un punto de vista general. En este capítulo se abordaran las consecuencias que se tienen en sistemas de distribución enfocándose en el equipo que lo compone.

Efectos térmicos en transformadores.

A lo largo de éste texto se ha podido notar que el sobrecalentamiento es una consecuencia común en equipos que operan en ambientes de armónicos. Actualmente toda red eléctrica está expuesta a una cantidad grande de armónicos, ya sea en una zona industrial, donde destacan por su aportación de armónicos los hornos de arco, variadores de velocidad de motores, iluminación no incandescente y los mismos motores o en zonas residenciales, llenas de equipos basados en semiconductores, como televisores, computadoras, equipos de audio e iluminación balastrada, y un prolongado etcétera.

Por lo tanto, los transformadores que son piezas importantes en las líneas eléctricas están siempre expuestos a distorsión. Si la distorsión llega a saturar al transformador ésta se convierte en una fuente de armónicos. Estos armónicos son peligrosos porque causan sobrecalentamiento en el neutro del sistema. Particularmente los de secuencia cero. Esto se retiene conectado los transformadores en delta-delta o delta-estrella, pues los armónicos de secuencia cero quedan “circulando en deltas”. Desafortunadamente las corrientes que quedan atrapadas en las en las deltas se suman a las corrientes del circuito, provocando valores RMS tan altos que se provocan el calentamiento en el transformador completo. Esto se nota principalmente al medir las corrientes del lado del primario, donde la secuencia cero no aparece, pero la temperatura se eleva sensiblemente. Este sobrecalentamiento, que se debe a la magnificación de efectos como las corrientes de Eddy y el efecto piel. El sobrecalentamiento es muy perjudicial para los transformadores, pues acortan su vida útil significativamente. Por esta razón, con el correr del tiempo el diseño de los transformadores ha evolucionado al punto de ser uno de los equipos que menos se ven afectados por los armónicos. Incluso así hay ambientes con distorsión armónica tan intensa, que requiere un tipo de transformador llamado transformador tipo K, diseñados para uso casi exclusivo para alimentar cargas no lineales y tienen como principal característica el uso del blindaje electrostático y que soportan hasta 200% de la corriente nominal en uso continuo, sin sobrecalentarse.

Una vez analizada la situación en un sistema trifásico, es necesario revisar lo que ocurre en el caso de sistemas monofásicos, donde la única vía de desahogar las corrientes armónicas es por el neutro que al llegar al transformador también incrementan el valor RMS, con el esperado sobrecalentamiento. Es decir, en sistemas monofásicos no hay modo de eliminar las corrientes armónicas de secuencia cero, en éste caso los múltiplos impares de 3, y éstas se suman al neutro. En sistemas trifásicos la operación es prácticamente obligada con un neutro si se trata de transformadores conectados en

estrella pues de éste modo cuando se opera en situaciones de desbalance el cuarto hilo se encarga de las corrientes causadas por el desbalance y por las corrientes de secuencia cero, de origen armónico. El neutro evita entonces la pérdida de referencia de tierra por la sobrecarga.

Este cable normalmente es del mismo calibre que el usado en las fases para que sea capaz de soportar el desbalance y principalmente evitar el sobrecalentamiento que se vería agravado por las corrientes de secuencia cero. Si los armónicos o el desbalance que causan son intensos, el neutro es del tamaño de las fases, usualmente. Entonces si la temperatura del neutro incrementa cuando opera el balance es un signo de armónicos de secuencia cero.

Efectos en bancos de capacitores

Dejando de lado a los transformadores se describirán ahora los efectos de los armónicos en bancos de capacitores. El primero de ellos es el sobre estrés que causa el incremento del valor RMS del voltaje. No solo el voltaje se ve afectado, pues el valor de la corriente y el de la temperatura se ven incrementados. La suma de estos tres factores compromete el punto de falla del dieléctrico reduciéndolo sensiblemente. La IEEE es su estándar de octubre de 2002, denominado 18-2002 [9], estándar para capacitores de potencia, emite los límites de operación para bancos de capacitores en la figura (5.1)

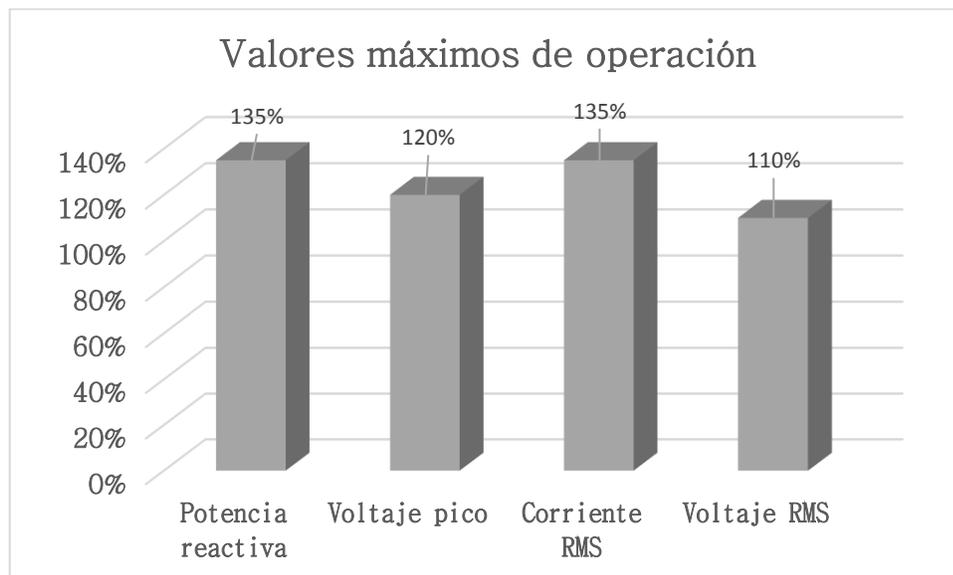


Figura (5.1) Límites de operación de bancos de capacitores. "Harmonics and power systems" [1].

El análisis de los bancos de capacitores se basa en el voltaje porque de éste parámetro depende del valor de potencia reactiva a la salida del dispositivo. Dicho valor se encuentra con la siguiente expresión [5.1]:

$$VAR = \frac{V^2}{X_c} \quad [5.1]$$

Como la salida de potencia depende del cuadrado del voltaje de entrada una pequeña variación significa un incremento importante en la potencia reactiva. El origen de esta variación en el voltaje puede ser una carga “ligera” en comparación a la capacidad del sistema o la operación de una protección únicamente causando el desbalance del sistema, además de, obviamente la distorsión armónica, que a su vez es causa del problema con las protecciones, por ésta razón es que cobra importancia la IEEE 18-2002 [9], pues a partir de, por ejemplo, la escala antes vista, se diseñan filtros sintonizados de acuerdo a las necesidades del sistema. Si la resonancia que se presenta es en serie, la resonancia se limita a la parte resistiva. Del valor de la componente resistiva depende el valor de la corriente que produce la resonancia, siendo inversamente proporcional una respecto a la otra. Si la resonancia es en paralelo, el valor de la corriente crece a valores que el sistema no puede manejar, por los voltajes tan altos que provoca, cuyo efecto compromete aislamientos de cables, devanados y dieléctricos de capacitores. Para encontrar las frecuencias de resonancia se usa [5.2]:

$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_{\text{corto circuito}}}{kVAR_{\text{banco de capacitores}}}} \quad [5.2]$$

Donde: h_r es la frecuencia de resonancia, $kVA_{\text{corto circuito}}$ es el valor del corto circuito del sistema, $kVAR_{\text{banco de capacitores}}$ es la potencia reactiva del banco de capacitores.

Si h_r coincide con la frecuencia de un armónico característico, se generara una impedancia que se incrementa y que se junta con el voltaje distorsionado se logra una amplificación de la distorsión total. Para suavizar este efecto se usa un reactor en serie con el banco de capacitores para que de éste modo, el sistema quede sintonizado como filtro de armónicos para carga principalmente para 5° y 7° armónicos.

Operación anormal de protecciones

Un aspecto muy importante para hacer énfasis es la ya mencionada operación no esperada de fusibles que protegen a los bancos de capacitores en áreas con cargas no lineales de consideración. Como consecuencia de la falla y el consiguiente desbalance, está la gran cantidad de distorsión que éste provoca, que son peligrosos si los filtros que tiene el sistema no tienen detector de desbalance.

Las nuevas tecnologías de generación como paneles solares, de los cuales se obtiene corriente directa y que cuentan con inversores para convertir esa señal en corriente alterna, se debe de considerar que éstos dispositivos, al realizar el swicheo generan distorsiones armónicas, para que al realizar el diseño del sistema no representan un problema en cuanto a protecciones se refiere. Pasando de los fusibles a relevadores electrónicos. En todos los casos que se puede plantear, donde se presenten sobrecorrientes, las protecciones operan para desconectar equipo y/o líneas para evitar daños físicos. Los relevadores electrónicos son particularmente útiles en aplicaciones donde repentinos incrementos en la demanda de potencia son comunes, y las cargas sufren inercia eléctrica considerable. Estas condiciones se dan también en ambientes armónicos con valores tanto de corriente como de voltaje excediendo los límites para las cuales las protecciones han sido calibradas.

El momento ideal para medir la distorsión armónica es cuando los relevadores operan a causa de una carga no lineal, pues es el instante en que la distorsión llega a un valor pico con el cual podrá trabajarse el diseño del sistema sin la interrupción de sus parámetros. Como ya se ha mencionado, la iluminación que usa balastras para funcionar genera distorsión armónica de corriente, y aunque por consiguiente, se altera la potencia utilizada en la intensidad luminosa no se ve afectada, debido a que el voltaje se ve más afectado por distorsiones de frecuencias no enteras, llamados interarmónicos. Si el voltaje se ve distorsionado mayormente por armónicos de componente no entera se creará un efecto de parpadeo en los dispositivos de iluminación. Se ha identificado que los cicloconvertidores son grandes fuentes de armónicos y para describir su comportamiento se usa [5.3]:

$$f_i = (p_1 \cdot m \pm 1)f_1 \pm p_2 \cdot n \cdot f_0 \quad (2) \quad [5.3]$$

Donde: f_i es frecuencia interarmónica, f_1 la frecuencia fundamental, p_1 y p_2 es el número de pulsos del rectificador, y de salida, respectivamente, m y n son números enteros y f_0 la frecuencia del cicloconvertidor. El parpadeo se da debido a la modulación del estado estable entre voltaje interarmónicos y la potencia a frecuencia fundamental. De acuerdo con IEEE las fluctuaciones de voltaje RMS producidas por distorsión interarmónica se describe por [5.4]:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} [(\sin 2\pi f_i t) + a \sin(2\pi f_i t)]^2} dt \quad [5.4]$$

Donde a es la amplitud de los voltajes interarmónicos, es por unidad; normalmente $a=1$ para la frecuencia fundamental.

Las lámparas incandescentes parpadean con la variación del voltaje RMS y las balastradas a la variación del valor RMS del voltaje.

Efectos térmicos en máquinas rotatorias.

La resistencia de los devanados de un motor eléctrico crece de la misma forma en que lo hace la frecuencia por lo que la energía que no se convierte en movimiento se disipa en forma de calor, aunado a que la suma de los armónicos de corriente causan calentamiento de forma sensiblemente mayor que si se tratara de una onda de corriente puramente senoidal con el mismo valor RMS. Sobra decir que estas pérdidas térmicas disminuyen la vida del transformador.

Torques pulsantes en máquinas rotatorias.

Este fenómeno se debe a que los armónicos de secuencias positivas y negativas se suman a los valores nominales, que en ocasiones provocan picos de voltaje y corriente que a su vez generan fuerzas magnetomotrices equivalentes a esos picos. Estas fuerzas magnetomotrices se manifiesta en la máquina como torques que provienen de diferentes frecuencias y por lo tanto su valor es distinto.

Estos torques tienen efectos torsionales sobre la máquina y entre sus principales consecuencias se encuentran:

- Vibraciones.
- Fatiga del metal, prácticamente todo el cuerpo del motor.
- Desgaste en baleros y rodamientos.
- Ruptura de enganches que usan turbina con el eje de la máquina.

Aunque todas las consecuencias son peligrosas para la operación de máquinas rotativas, la última es especialmente destacable en esquemas de plantas eléctricas es que se hacen conexiones turbino-generador de varios equipos como se muestra la figura (5.2)

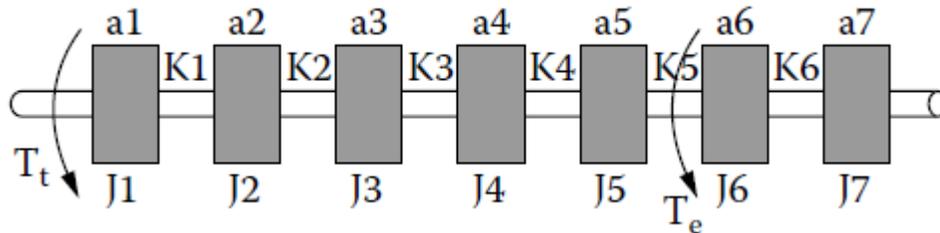


Figura (5.2) Modelo de sistema Turbina-Generador. “Harmonics and power systems” [1].

Comenzando con el análisis de la configuración de la figura (5.2) la ecuación que describe el torque T en función del desplazamiento angular D , movimiento K y una constante de inercia J :

$$J\theta + D\dot{\theta} + K\theta = T \quad [5.5]$$

Para describir las frecuencias naturales se obtienen los valores propios del vector, pero sin considerar el amortiguamiento y para tal propósito se usan [5.6] y [5.7]:

$$\Delta = |K - j\omega^2 I| = 0 \quad [5.6]$$

$$\lambda = |\omega^2 \omega^2 \omega^2 \dots \omega^2| \quad [5.7]$$

Considerando la matriz D de la ecuación de movimiento como la combinación lineal de amortiguamientos viscosos se tiene:

$$\theta = Xq \quad [5.8]$$

De esta expresión X es la matriz de valores propios.

Usando la ortogonalidad se desacopla la ecuación, resultando [5.9]:

$$j^{-1}(X'JXq + X'DXq + X'KXq = X'T) \quad [5.9]$$

La es una ecuación diferencial de segundo orden de la forma [5.10]:

$$q + 2\zeta_1\omega_1q + \omega_1^2q = Q_1 \quad [5.10]$$

A partir de esta ecuación podemos darnos una idea del comportamiento en el dominio del tiempo. Cuando se trabaja en estado estable, pero aparecen torques causados por oscilaciones repentinas se tiene que [5.11]:

$$T_e = T_b + T_i \text{sen}(\omega_f t) \quad [5.11]$$

Donde: ω_f es la frecuencia del torque oscilante, T_b los torques oscilantes y T_i son los torques pulsantes

Para obtener la solución del torque con componentes estables se usa la solución de la forma [5.12]:

$$Q_1 = C_{1i} + C_{2i} \text{sen}(\omega_f t) \quad [5.12]$$

Donde C_{1i} y C_{2i} Son las matrices de torques oscilantes y pulsantes, respectivamente

Entonces, la solución para excitación senoidal en estado estable es [5.13]:

$$q_1(t) = \frac{C_{1i}}{\omega_i^2} + |q| \text{sen}(\omega_f t - \varphi) \quad [5.13]$$

Donde ω_i es la frecuencia del torque pulsante y φ el ángulo de las frecuencias armónicas.

La expresión [5.13] es una ecuación cuyo resultado es la interpretación matemática de los efectos físicos de torques pulsantes. Basándose en el análisis anterior, De la Rosa [1] desarrollo una tabla tomando en cuenta gran parte del espectro de armónicos que se pueden presentar en un sistema de potencia. Dicha tabla se presenta a continuación. Tabla (5.1)

Orden de armónico	Amplitud de la corriente (%)	Amplitud del torque (%)
1	100	
5	2.247	
6		1.162
7	1.492	
11	0.89	
12		0.8137
13	0.742	
17	0.558	
18		0.524
19	0.497	
23		0.39
24	0.408	
25		0.313
29	0.375	
30	0.322	

Tabla (5.1) Espectro de corriente y torque eléctrico. Harmonics and power systems [1].

De esta tabla hay que notar que los torques pulsantes aparecen a causa de los componentes que resultan de convertidores de 6 pulsos. Como se nota en la tabla, hay torques considerables que llegan a causar resonancias mecánicas que incrementan la vibración de la máquina. Retomando el ejemplo de la múltiple conexión turbina generador, se puede calcular el torque en por unidad en las diferentes secciones. La distorsión total en el sistema de este tipo se acerca al 3% que está dentro del rango de la normatividad (5% máximo).

Para calcular los torques de cada sección se usa [5.14]:

$$T_m = K_{(i,i+1)}(\theta_{i+1} + \theta_i) \quad [5.14]$$

Una vez teniendo estas herramientas de análisis se está en posibilidad de decir que las mayores oscilaciones se esperan en el eje entre los elementos 2 y 3 y las oscilaciones más leves entre los elementos 6 y 7.

El problema de los torques pulsantes se ve maximizado porque las máquinas eléctricas prácticamente carecen de amortiguamiento mecánico, pues se diseñan de modo que exista la menor cantidad de fricción posible, para evitar pérdidas de energía mecánica y sobrecalentamientos, pero esta la característica que aporta en gran medida al amortiguamiento de torques en el eje. Dado que en el eje de máquinas eléctricas la fricción debe de ser mínima y los diseñadores no sacrificarían esa característica en sus desarrollos, lo más conveniente es cambiar la frecuencia natural de los equipos, para evitar que entren en resonancia (mecánica), a causa de troques con origen armónico.

Operación anormal de dispositivos de estado sólido.

Anteriormente se describieron los efectos que tienen los armónicos en relevadores y sistemas de protección electrónicos. Como es evidente los armónicos afectan a todos los equipos que cuenten con un componente de estado sólido. Al igual que en los sistemas de control, las fallas en otros dispositivos se deben a que los armónicos modifican el cruce por cero de la señal de voltaje, ya sea causando varios cruces que “confundan” al sistema, pues el tiempo entre cada cruce se ve reducido, o el valor total de la señal se ve afectado a tal grado que el cruce por cero ya no es posible. También se causan alteraciones cuando los armónicos interfieren en los variadores de velocidad de motores, al verse alterados sus parámetros totales. Lo recién mencionado tiene como consecuencia el incremento de costos pues deben de incluirse reajustes en el sistema y protección extra.

Consideraciones para cable y equipo que operan en ambientes armónicos.

Las principales consideraciones que se hacen es el sobredimensionamiento del calibre de conductores para evitar el estrés por sobrecalentamiento y reducir las reactancias subtransitivas, para evitar la fatiga del equipo. Las normativas están pensadas para que el equipo opere en el límite de los peor de

los casos de ambientes armónicos, tanto en condiciones transitorias, es decir, situaciones que superan los límites de operación en condiciones normales.

Para el caso de los generadores, comenzaremos diciendo que deben de cumplir con ciertos lineamientos pensados para las condiciones de carga que el generador alimenta en la actualidad, es decir, cargas no lineales, para evolución tecnológica ha llevado al extremo contrario, es decir, la gran mayoría de las cargas son no lineales. Los mencionados lineamientos están dirigidos a asegurar operación en estado estable, evitar calentamiento excesivo y estrés mecánico por vibraciones.

El problema de los armónicos en las plantas generadoras se focaliza en sus terminales donde se generan corrientes de secuencia positiva y negativa que generan pares torsionales en el eje del motor. Al salir del generador, la distorsión genera causa problemas de regulación de voltaje y desbalance entre las fases, principalmente con grandes corrientes de secuencia negativa. En su libro *"Harmonics and Power systems"*, De la Rosa [1] (página 82), proporciona una lista de características, usando como ejemplo generadores síncronos, que garantizan una operación sin problemas. Se muestra la lista a continuación.

- La excitación estática independiente está siempre presente.
- El rotor del generador debe de tener integradas barras de cobre que actúan como amortiguadores.
- La reactancia transitiva (X'_d) se deberá de situar entre 16 y 18%.
- El eje de reactancia subtransitoria (X''_d) debe de estar entre 13 y 15%. Para cargas puramente lineales el valor puede crecer hasta 25%.
- Factor de potencia 0.85 en atraso. Es importante dada la fatiga a la que es sometido el sistema de potencia y todos sus componentes en zonas con cargas grandes, como zonas industriales.
- THD máximo del 8% para asegurar el buen funcionamiento con cargas no lineales. Hay que notar que excede el 5% recomendado por la IEEE, pero tal porcentaje no es nocivo en las terminales del generador.
- La distorsión debe de ser menor a 2% cuando el circuito opera normalmente.
- Los generadores deben de estar provistos de amortiguadores sobredimensionados, consistentes en barras de cobre que además disipan el calor causado por los mismos armónicos.
- Diodos rectificadores sobredimensionados aproximadamente 10% en sistemas sin cepillos (DC).

Generación magnética permanente en un tipo de excitación siempre presente, por lo que el regulador debe soportar los armónicos característicos de convertidores de 12 pulsos. La lista anterior es una referencia para diseñadores y constructores de equipo eléctrico. Son consideraciones útiles cuando el generador síncrono alimentará cargas no lineales, hecho muy común en la actualidad.

En el caso de los conductores, estos deben de ser capaces de conducir voltajes y corrientes armónicos sin sobrecalentarse. Esta característica es especialmente importante en los sistemas de transmisión y de distribución dada su relevancia logística. Dicha importancia se ve reflejada en la normatividad

mencionada en este texto. En cualquier caso el sobredimensionamiento llega fácilmente a un 25% del calibre. Cuando se utilizan cables con blindaje aterrizado, también es necesario considerar un sobredimensionamiento para el blindaje que ronda el 10% que es suficiente para drenar armónicos en redes industriales. También es recomendable calcular ambos tipos de sobredimensionamiento cuando se espera el crecimiento de la carga instalada. En estos casos se ha desarrollado software especializado que lleva el registro de información de todos los parámetros la red.

Refiriéndose a equipos de medición, se sigue discutiendo actualmente la magnitud de la afectación que las deformaciones de voltaje y corriente tienen sobre motores Ferraris, en los que se basa la medición electromecánica. En cuanto a la medición electrónica es importante hacer consideraciones de a offset de DC, el tamaño de la distorsión (valor RMS) y prestar atención a los cambios de frecuencia que se presentan. Las discusiones actuales están enfocadas en definir cómo deben realizarse las mediciones de potencia activa y reactiva.

CAPITULO 6. Eliminación de armónicos.

Definiciones.

Llegado este punto, se han revisado los criterios de diseño de equipo para que generen distorsión armónica menor a lo que producirían sino se atendieran esas indicaciones. Esos criterios de diseño son considerados actualmente como parte de una solución integral, de un problema que ha crecido a tal grado que ha sido necesario diseñar e implementar equipo especial como complemento al diseño de equipo de utilización. En éste capítulo se analizará a fondo en el diseño, implementación y configuraciones de equipos tales como filtros que se conforman una solución integral a la cuestión de los armónicos en sistemas de potencia. Los principales equipos usados son los filtros.

La clasificación de los filtros se divide en dos grupos, los pasivos, que actúan en un ancho de banda definido y fijo desde el momento del diseño y los activos, cuyo ancho de banda varía como resultado del monitoreo en tiempo real de la red. A su vez los filtros pasivos se dividen en sintonizados y pasa banda. Se diferencian en que los sintonizados tienen una baja impedancia que “guía” los armónicos y los pasa-banda eliminan los armónicos de frecuencias determinadas. Para implementar filtros pasivos se debe de considerar el orden del filtro y se categorizan como habíamos dicho en sintonizados y pasa banda, para comprender esta clasificación se incluye la figura (6.1)

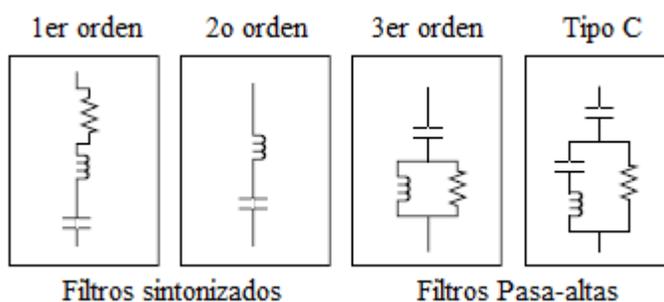


Figura (6.1) Diagramas de filtros. “Harmonics and power systems” [1].

Los filtros pasivos son los más utilizados a nivel industrial y para diseñar un filtro de este tipo hay criterios que deben seguirse. Estos criterios son expuestos por Francisco De la Rosa en su libro “Harmonics and power systems” [1] (2006, página 107) y son:

“Los requerimientos de corrección de factor de potencia en cuanto a capacitancia, pues los capacitores de los filtros modifican el factor de potencia, de hecho, la mejoran, es decir, hay relación en el diseño cuando se consideran filtros.”

En filtros sintonizados hay que vigilar la resonancia en serie dada la interacción entre filtros y la fuente de generación. Se deben considerar las tolerancias de los componentes de los filtros, pues pueden producir resonancias. También hay que estar atentos a los cambios de impedancia en la red y la carga, pues pueden modificar los parámetros establecidos de “el peor de los casos” de armónicos.

Se pueden requerir bancos de capacitores sobredimensionados para los diseños de filtros paso-altas con un rango de frecuencias estrechos y armónicos característicos de mayor orden. Estar atentos a los factores de calidad de los filtros para poder medir a partir de ellos la cantidad de corrientes armónicas trazadas para el sistema. Evitar la sobrecarga de bancos de capacitores, usando una resistencia en serie dentro de los filtros sintonizados.

Redes grandes pueden tener cargas no lineales con espectros de frecuencia diferentes. Hay que agrupar, en la medida de lo posible las cargas por su espectro de frecuencias. Esto ayuda a realizar la medición y la caracterización de los armónicos. También se evita interferencias con sistemas telefónicos. Se debe de usar la mínima cantidad de filtros sino hay necesidad de compensación reactiva. Esto con la intención de alcanzar el límite máximo de THD.

Existe un factor preponderante para el diseño e implementación de filtros es su factor de calidad (Q), que es la medida de la nitidez de la sintonización del filtro, para un tipo de factor Q alto o bajo. Con un factor Q alto la sintonización se enfoca en un armónico de componente bajo y su valor varía entre 30 y 60. En el caso de filtros con un Q bajo, que típicamente varía entre 0.5 y 5 ofrece baja impedancia para una amplia gama de frecuencias y se usa para tratar armónicos de componente mayor a 17.

A continuación se ilustran ambos tipos de filtros. En la figura (6.2a) se muestra el diagrama eléctrico de un filtro de primer orden, en la figura (6.2b) se muestra el comportamiento de la impedancia del filtro contra la frecuencia del sistema. Del mismo modo la figura (6.3a) es el diagrama eléctrico del filtro de segundo orden y la figura (6.3b) es la gráfica de la reacción de la impedancia del filtro contra la frecuencia del sistema.

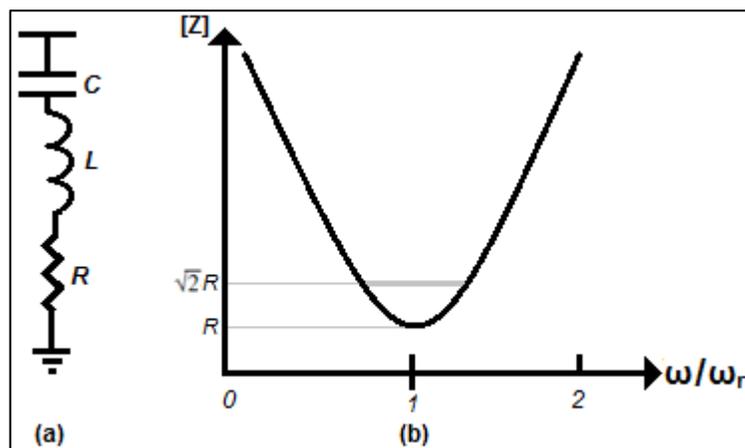


Figura (6.2) Filtro sincronizado, esquema (a) y gráfica de comportamiento impedancia vs frecuencia (b).
"Power systems harmonics" [2].

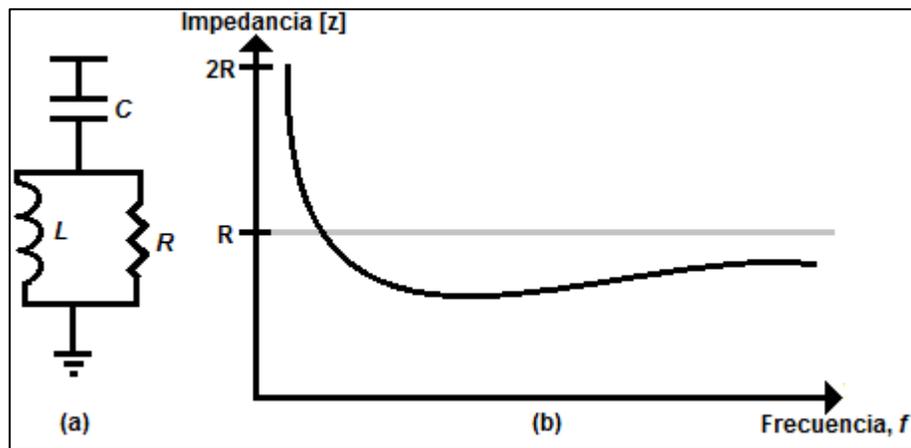


Figura (6.3) Filtro amortiguado de segundo orden, esquema (a) y gráfica de comportamiento impedancia vs frecuencia (b). “Power systems harmonics” [2].

Sabiendo que es y para que se usa es momento de ver como se calcula Q . Este factor está definido como una relación de inductancia ó capacitancia entre la resistencia o frecuencias resonantes, ésta es [6.1]:

$$Q = \omega_n / PB \quad [6.1]$$

Donde PB es el valor de filtro pasa-banda y (ω_n) es la frecuencia fundamental sintonizada, caracterizada en radianes por segundo.

Otro factor importante en los filtros, es el factor δ que se indica la desafinación del filtro respecto a la frecuencia de sintonización a la que fue diseñado. Este factor considera las variaciones en la frecuencia fundamental, en la capacitancia interna del filtro así como en su inductancia, variaciones de parámetros de filtro por temperatura o por el paso del tiempo con el consiguiente deterioro y las salidas de la frecuencia de sintonización que se tienen en el arranque del equipo. El factor δ se calcula con [6.2]:

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad [6.2]$$

O bien, si se tienen los datos como inductancia (L o L_n para el armónico de orden n), capacitancia (C o C_n para el armónico de orden n) y frecuencia (f o f_n para el armónico de orden n) se usa [6.3]:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad [6.3]$$

Conociendo los factores que se acaban de mencionar se pueden comenzar a describir los criterios de diseño de los filtros de modo que se apaguen a normatividad y que a la vez los factores se mantengan de modo que el filtro cumpla con calidad su función.

Los criterios están encaminados a modificar el diseño de filtros para que eliminen la distorsión armónica. Pueden cambiar características eléctricas como frecuencias, capacitancias, inductancias,

etc., o características físicas, como calibre de conductores, tamaño de componentes etc. Por ejemplo el tamaño general del filtro dependerá de la potencia reactiva producida por la frecuencia fundamental. Un filtro se ramifica, para cubrir las necesidades de la red donde está instalado, es en esta situación cuando el tamaño de las corrientes distorsionadas tiene injerencia en el tamaño del filtro, pues cambian los valores de potencia reactiva en estas ramas. El principal criterio a seguir es diseñar el filtro para evitar que los armónicos interfieran en las líneas telefónicas pues éste efecto es el más difícil de eliminar.

Desde el punto de vista económico, lo mejor para evitar ruido en líneas telefónicas es medir los factores del sistema eléctrico sobre el telefónico y tomar medidas adecuadas, como añadir filtros ó determinar el calibre del blindaje. Se debe de tomar como base del diseño el voltaje armónico, pues es más fácil predecir su comportamiento y mantenerlo en minutos aceptables, comparado con corrientes distorsionados para esto se usa el índice THD, pues proporciona información más útil que si usáramos la suma de voltaje fundamental y sus armónicos. Es recomendable usar componentes armónicos de componentes grandes, pues al tratarse de sistemas de potencia, incluso armónicos por arriba de la componente 25 siguen teniendo influencia de consideración. Por ser de naturaleza aleatoria, cada componente tiene su efecto más perjudicial en diferentes puntos de operación del sistema, por lo que se recomienda considerar que ocurren al mismo tiempo en cierto rango de frecuencias, generalmente, lo que se alcanza fácilmente.

El tipo de filtro más efectivo y más buscado al diseñarse es aquel que asemeja un filtro pasa -banda capaz de evitar toda la gama de armónicos en la red. También se debe de tomar en cuenta que lo mejor es dividir la red en segmentos mediante filtros, pues el incrementar su tamaño y número de componentes, se tienen más frecuencias resonantes. Cuando se tienen grandes cargas no lineales se debe de considerar la interacción de las reactancias de tales cargas con las del sistema, además que el filtrado se robustece mediante el uso de varios filtros a modo de “repetir” su acción.

Las funciones que puede llevar a cabo el filtro son: Eliminar frecuencias no deseadas, evitar pérdidas, regular factor de potencia y suministrar potencia reactiva. No todas estas funciones son necesarias a la vez, por lo que pueden relegarse en cuanto a prioridades, resultando en costos más bajos pero con las necesidades cubiertas. Una gran reducción de los costos se logra usando los bancos de capacitores como componentes de filtro. La principal ventaja de esto es que el precio de los bancos varía poco, respecto a las capacitancias con que se ofrecen, haciéndolo un elemento flexible para la implementación de filtros. Las variaciones de costo más fuertes son a causa de los inductores usados pues cambia su precio con su arquitectura, material, tipo de construcción, tipo de enfriamiento, etc. El costo de los inductores varía dependiendo de los MVA o que sean capaces de controlar.

Configuración pasa banda.

La configuración pasa-banda es especialmente útil porque cualquier condición su uso garantiza que se pueda ahorrar el uso de filtros para quinto y séptimo armónicos. Primero se analizará el filtro pasa-banda de doce pulsos, que es un filtro convencional hecho a partir de la unión de varios filtros

resonantes que trabajando para las onceavas y treceavas armónicas; y de filtros pasa-altas de mayores órdenes. Como desventaja se tiene el elevado costo derivado de la parte de los filtros resonantes pues para que cumplan su función requiere un capacitor que por sus características no resulta barato. Una opción más sencilla y barata es sustituir ésta etapa con un filtro amortiguado con un valor Q pequeño, jamás mayor a 4. Esta es una opción variable desde el punto de vista económico, aunque desde el punto de vista eléctrico no es aconsejable, pues con su uso se eleva la impedancia del sistema en presencia de armónicos de baja frecuencia. Esta construcción se conoce como configuración híbrida. Como consecuencia de la alta impedancia presenta en esta configuración sumada la capacitancia presenta en el sistema a causa de largas líneas de AC paralelas entre sí se obtienen resonancias severas. Otra condición en las que se presentan terceras armónicas es en situación de desbalance en el convertidor. En este caso se tiene la particularidad de que cuando se genera distorsión, la componente armónica no puede ser filtrada por arreglo del transformador.

Ahora que se conocen las configuraciones más usuales de los filtros y sus esquemas de uso, se revisarán las propiedades de los componentes más usuales de los filtros, además de sus características, sentando bases para sus aplicaciones específicas en una red eléctrica, dependiendo de las condiciones de operaciones normales, o de fallas transitorias.

Los capacitores se diseñan tomando en cuenta la temperatura a la que operarán, capacitancia deseada, volumen, potencia reactiva y pérdida de potencia que tendrá. Al igual que en cualquier otro tipo de aplicación, estos capacitores pueden conectarse en arreglos en serie, paralelo a ambos, para obtener las características deseadas. Es importante controlar la temperatura en estos dispositivos, pues cuando varía este parámetro, la capacitancia cambia también, lo que causa desintonización de filtro. El volumen es un parámetro determinante, pues de este depende la potencia reactiva que el capacitor inyecte al sistema. El diseño de los inductores se proyecta en base a las frecuencias en que se va a operar, especialmente las altas. Son elementos muy sensibles, pues en su operación influyen el efecto piel y la histéresis. En su libro dedicado al análisis de armónicos, llamado "*Power system harmonics*" [2] Arrillaga nos propone que el valor de Q debe de estar entre 50 y 150 (pág. 247).

Filtros sintonizados.

Ya se han mencionado diferentes técnicas para eliminar armónicos de los sistemas de potencia, y más particularmente en este capítulo se han descrito el desarrollo y aplicaciones de filtros diseñados específicamente para paliar este problema. Llegando a este punto es importante comenzar a clasificarlos de acuerdo a su forma de operación.

Comenzando por los más básicos, se encuentran los filtros pasivos, que son llamados así porque están diseñados y configurados para operar en cierto rango de frecuencias. Dada esta característica son filtros baratos aunque sumamente confiables, lo que los convierte en la opción más difundida en el sector público e industrial. La primera gran división de los filtros pasivos, es los filtros sintonizados, que son circuitos de primer y de segundo orden. La otra gran división de los filtros pasivos es la que engloba a los filtros pasa-altas o pasa-banda, que van desde primer hasta cuarto orden.

Una de las características de los filtros pasivos es la baja impedancia que presentan en la frecuencia de operación para la que fueron diseñados. Con esto se logra que todas las corrientes en esta frecuencia disminuyan, por lo que la configuración final del filtro dependerá de la proyección a futuro en la zona donde se instalará el dispositivo, además de información específica del tipo y cantidad de distorsión armónica, configuración topología de la red y variación de las condiciones de carga.

Una característica muy apreciada es que aportan cierta cantidad de potencia reactiva al sistema, y debe de considerarse cuando se usan bancos de capacitores para corregir el factor de potencia. Como se describieron antes, los filtros son circuitos que básicamente por están compuestos por capacitores, inductores y resistores. Físicamente están compuestos por capacitores e inductores, pues la resistencia que aparece en su modelo eléctrico está contenida en los otros elementos, evitando usar más componentes. Además si se usara una resistencia física se presentaría calentamiento innecesario. Con esto se logra también que todas las corrientes que estén en la frecuencia del diseño del dispositivo se drenen por el mencionado camino de baja impedancia. Esta frecuencia resonante se encuentra con [6.4]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [6.4]$$

Donde: L es la inductancia (en Henrys) y C la capacitancia en Farads.

En el caso de filtros sintonizados el factor Q se calcula con [6.5]:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad [6.5]$$

Donde R es la resistencia del filtro, X_L la reactancia inductiva y X_C la reactancia capacitiva

Para cargas intensas de armónicos, dicho factor debe de estar entre 15 y 80, dependiendo si están en una sección de bajo voltaje o de medio voltaje, con valores bajos o altos dentro de un rango anteriormente mencionado, respectivamente.

Conociendo ya las características relevantes se analizaran las ecuaciones con las que controlar tales parámetros en el diseño de filtros sintonizados. La impedancia de la sección del sistema donde se colocará el filtro se calcula con [6.6]:

$$Z = R + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right] \quad [6.6]$$

En la ecuación anterior R , L y C son respectivamente la resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos del filtro y ω es la frecuencia del sistema de potencia. Las reactancias en frecuencia de resonancia se obtienen con [6.7] y [6.8]:

$$X_{Lh} = h\omega L \quad [6.7]$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{(h\omega C)} \quad [6.8]$$

Existe una relación entre la frecuencia armónica y fundamental, representada por h , y se define por [6.9]:

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad [6.9]$$

Recordando que los filtros son básicamente circuitos RCL podemos establecer una frecuencia a la cual estos dispositivos trabajan en resonancia. Para determinar esa frecuencia se usa [6.10]:

$$f_{par\ res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S+L)C}} \quad [6.10]$$

Esta frecuencia también depende también de la interacción del filtro con la impedancia del sistema. Tal parámetro varía sensiblemente cuando se conecta o desconecta algún transformador o con la puesta en operación de bancos de capacitores, especialmente si están cerca del filtro. El factor de calidad (Q) es un dato que describe la capacidad del filtro de absorber energía en la frecuencia a la que trabajan. El factor de calidad se obtiene con [6.11]:

$$Q = \frac{\omega_\theta}{(\omega_1 - \omega_2)} \quad [6.11]$$

Donde ω_θ es la frecuencia nominal, ω_1 la frecuencia mínima armónica alcanzada y ω_2 la frecuencia armónica máxima alcanzada

O bien, teniendo en cuenta los valores de resistencia, capacitancia e inductancia se usa [6.12]:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{X_{Lh}}{R} = \frac{X_{Ch}}{R} \quad [6.12]$$

Donde X_{lh} es la reactancia capacitiva y X_{ch} ha reactancia inductiva. La figura (6.4) ilustra la composición básica de un filtro pasivo sintonizado y el comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia. La tabla (6.1) enlista los restantes parámetros significativos para el diseño de filtros.

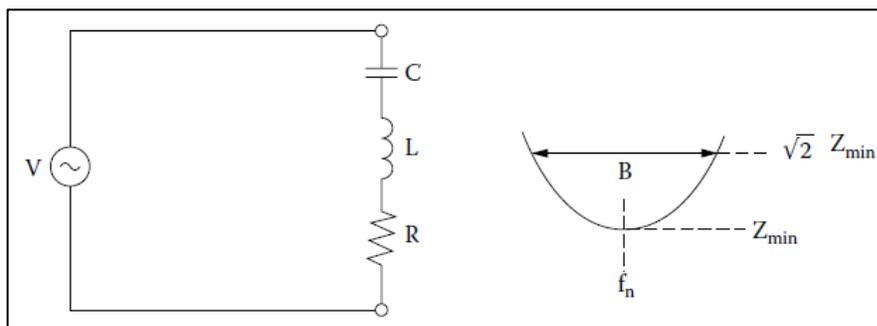


Figura (6.4) Circuito y gráfica de comportamiento de filtros pasivos “Harmonics and power systems” [1].

Orden de armónico	Factor de calidad	Ancho de banda	Potencia reactiva en freq. fundamental	Potencia activa a frecuencia fundamental (perdidas)
$h = \frac{f_n}{f_1} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$	$Q_f = \frac{n \cdot X_L}{R} = \frac{X_C}{n \cdot R}$	$B = \frac{f_n}{Q_f}$	$Q_C = \frac{V^2}{X_C} \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)}$	$P \cong Q_C \cdot \frac{n}{n^2 - 1} \cdot \frac{1}{Q_f}$

Tabla (6.1) Factores relevantes para filtros sintonizados. “Harmonics and power systems” [1].

Con todos los parámetros descritos es posible diseñar filtros altamente efectivos a precios comparativamente bajos. De los últimos aspectos a considerar cuando se diseña un filtro son valores de parámetros a los cuales es conveniente operar sus componentes. Como es conocido, los capacitores son componentes sensibles al voltaje, porque se pueden someter a cambios de valor del mencionado parámetro condicionado al cambio de la potencia reactiva (incrementándose el valor RMS un valor igual al cuadrado de la variación que entre al capacitor). La tabla (6.2), emitida por la IEEE en el estándar 18-2002 [9] menciona los valores en los cuales los capacitores pueden operar sin problemas en condiciones extremas asegurando aún su funcionamiento. Nos enuncia los límites máximos recomendados para operación continua de capacitores en condiciones de emergencia.

VAR	135%
Voltaje RMS	110%
Voltaje nominal, incluyendo armónicos	120%
Corriente RMS	135%

Tabla 6.2. Límite de operación para capacitores en sobrecargas. “Harmonics and power systems” [1].

El voltaje que llega al filtro lo hace con un incremento en su valor, pues está expuesto a la distorsión armónica. La dimensión de este voltaje aumentado se encuentra con [6.13]:

$$V_{cap} = \frac{h^2}{(h^2 - 1)} (V_{sistema}) \quad [6.13]$$

La importancia de este valor radica en que típicamente la tolerancia de los capacitores se sitúa en $\pm 8\%$.

Cuando el banco de capacitores del sistema hace las veces capacitor el filtro se debe calcular la eficacia del banco. Para esto se usa [6.14]:

$$kVAR_{efectivo} = \left(\frac{V_{sistema\ L-L}}{V_{cap\ L-L}} \right)^2 (kVA_{considerados}) \quad [6.14]$$

Si un componente del filtro es un reactor de expresión cambia a: [6.15]

$$kVAR_{filtro} = \frac{V_{capL-L}}{(Z_C - Z_L)} \quad [6.15]$$

Si se toma en cuenta la relevancia del banco de capacitores, se debe de considerar también el uso de detectores de desbalance para proteger la integrar de los capacitores y del filtro en general. Es decir, aunque la potencia alcanza al filtro en su totalidad, de detección de desbalance, desconecta solamente el banco de capacitores. Para seleccionar el tipo de filtro que se va a utilizar, se debe conocer ciertas características. La primera de ellas es saber si se requiera compensación de potencia reactiva. En caso afirmativo, se dimensiona el banco de capacitores para que sea capaz de proveer la potencia reactiva que se necesita. Una vez que se conoce el banco de capacitores y sus características, se toman como base para continuar con la elección del filtro. Otro aspecto relevante es considerar la red en general para determinar la cantidad de filtros por aplicarse. Continuando el punto de vista de la red completa, hay aplicaciones donde las cargas no lineales están conectadas de modo que los armónicos se presentan en ciclos. En esta situación usar filtros múltiples puede ser redundante y se presenta la ventaja de poder prescindir de ciertos componentes, que son realmente los que se repiten, desde el punto de voto eléctrico.

Como se ha mencionado antes, las características distintiva de los filtros pasa-banda (muy remarcadamente los filtros pasa-altas) es la impedancia prácticamente nula en frecuencias cercanas a la que esta sintonizado por lo que tal frecuencia debe de seleccionarse cuidadosamente de modo que la ausencia de impedancia que se provoca sirva para drenar los armónicos de presencia dominante. Esta singularidad en el segmento de los filtros pasa-altos se debe a que las dimensiones de sus componentes cambian en comparación a los demás filtros pasa-banda, también dependiendo evidentemente, del orden de armónicos que se deba eliminar. Utilizar filtros pasa-altas de órdenes superiores cambia el modo de operación, lo que representa ventajas o inconvenientes, dependiendo del caso. Dentro de las opciones viables los filtros pasa-altas de segundo orden ofrecen facilidad de aplicación y de operación lo que se refleja en bajas pérdidas, especialmente comparado con filtros de primer orden, otorgándole una enorme ventaja en relación costo-beneficio. En cambio los filtros pasa-banda de tercer orden tienen perdidas bastante más grandes, que lo ubican entre los de primer y segundo orden, pero al ser necesarios más componentes en su construcción se hacen más caros, lo que hace inviable su uso. Está justificado entonces centrarse en los parámetros propios de los filtros pasa-altas de segundo orden.

En primer lugar, su impedancia se obtiene con [6.16]:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}\right)} \quad [6.16]$$

Su frecuencia de operación se calcula con [6.17]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [6.17]$$

Y el factor de calidad, se obtiene con [6.18]:

$$Q_f = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad [6.18]$$

Cuyo valor se encuentra entre 0.5 y 2.0 para la mayoría de las aplicaciones.

Los filtros sintonizados son circuitos RLC que están diseñados para filtrar una cierta frecuencia armónica, por lo general la componente de mayor tamaño. A continuación se presentan las fórmulas para obtener sus parámetros eléctricos. Para obtener su impedancia se usa [6.19]:

$$Z_1 = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad [6.19]$$

Como para la mayoría de los filtros, las grandes consideraciones de diseño son el factor de calidad (Q) y la desviación estándar de la frecuencia (δ). El primero se calcula con [6.18] Y δ se considera despreciable: Cuando hay varios armónicos cuyo valor representa un riesgo para el sistema, se utiliza una configuración de filtro de doble sintonización el cual se ilustra a continuación, en la figura (6.5)

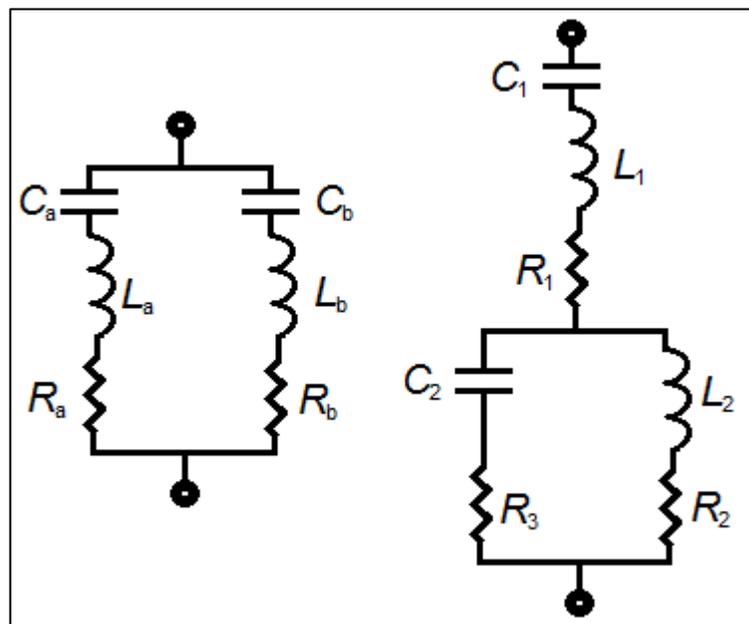


Figura (6.5) Transformación de dos filtros sintonizados en uno de doble sintonización. “Power system harmonics” [2].

La operación óptima se da cuando existen ciertas configuraciones entre sus componentes que son [6.20], [6.21], [6.22], [6.23] y [6.24]:

$$C_1 = C_a + C_b \quad [6.20]$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad [6.21]$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad [6.22]$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \quad [6.23]$$

$$R_2 = R_a \left[\frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_b \left[\frac{1-x^2}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_1 \left[\frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+x^2)(1-ax^2)} \right] \quad [6.24]$$

Donde f_0 es [6.25]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} \quad [6.25]$$

Los filtros de doble sintonización tienen gran ventaja en las líneas de alto voltaje, donde la cantidad de elementos inductivos aminora, lo que provoca un diseño más estable para soportar voltajes de impulso en el sistema. Para situar la desviación de la frecuencia en un margen recomendable, ($\pm 5\%$) se diseñan filtros capaces de variar la capacitancia a la inductancia. Estas variantes, los filtran automáticamente sintonizados, cuentan con dispositivos de control y medición, que censan los valores de distorsión y actúan en consecuencia, conectando capacitores o inductores. Esto a su vez tiene como consecuencia, una Q más alta, lo que se traduce en menos pérdidas.

Filtros amortiguados.

Estos son el segundo gran grupo para filtros de armónicos. Respecto a los filtros sintonizados tienen ventajas como menores perdidas, principalmente en los elementos capacitivos, insensibilidad ante las variaciones de temperatura y menor desviación de frecuencia, con lo que se consigue baja impedancia para una banda de frecuencias más amplia, lo cual facilita y abarata el mantenimiento. Además con los filtros amortiguados se evita el riesgo de resonancias paralelas que surgen de la interacción entre admitancias del sistema y el propio filtro. Por el contrario, sus desventajas están en las perdidas en elementos resistivos, que son superiores en comparación a la de los filtros sintonizados. Para lograr el mismo desempeño, si se ve desde el punto de vista de eficiencia del filtrado, se necesita que el factor de potencia se mantenga cerca al punto de diseño. La siguiente ilustración, figura (6.6), muestra los subtipos de filtros amortiguados.

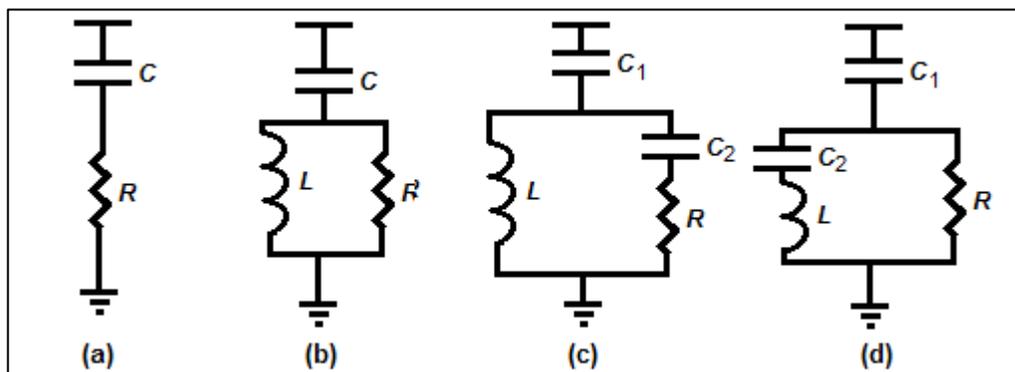


Figura (6.6) Subtipos de filtros amortiguados. "Power system harmonics" [2].

- a) Es el filtro amortiguado que se usa como base para el diseño y desarrollo de filtros de orden mayor. No tiene una aplicación práctica, pues lo básico de su diseño hace que sea poco práctico modificarlo para cosas reales. Siempre requiere capacitores de los valores grandes y sus pérdidas son elevadas.
- b) El filtro de segundo orden permite un mejor desempeño y por su construcción su diseño se vuelve practicable. Sin embargo sus pérdidas con sus elevadas, principal desventaja desde el punto de vista económico.
- c) El filtro que mejor se ubica en cuanto a pérdidas aunque al estar compuesto por dos capacitores su impedancia es superior en la frecuencia fundamental. Aun así el valor de la segunda capacitancia puede reducirse, de modo que con este filtro se logre un desempeño superior al resto de las configuraciones.
- d) El tipo C es una configuración especial que busca reducir la impedancia, entonces, caso contrario al filtro de tercer orden la capacitancia es menor, lo que logra mejor filtrado pero en una banda de frecuencias mucho más estrecha, dada la relación entre el capacitor 2 y el inductor. Es por esta misma razón por lo que este filtro es susceptible a incrementar pérdidas de frecuencia. En cuanto a pérdidas eléctricas, su desempeño se sitúa entre los filtros de segundo y tercer orden.

A diferencia de los filtros sintonizados, los filtros amortiguados se diseñan con base en una Q que optimice el desempeño del dispositivo para una banda de frecuencias, no solo una específica. Para encontrar la frecuencia base se usa [6.26]:

$$m = \frac{1}{R^2 C} \quad [6.26]$$

Cuyos valores se deben situar entre 0.5 y 2.

Los filtros amortiguadores trabajan con una admitancia mínima a partir de la cual se tienen R y L adecuadas y por lo tanto también f_0 y m. La admitancia mínima se determina con [6.27]:

$$Y = B_f \cos \phi_m + G_f \sin \phi_m \quad [6.27]$$

Para obtener la conductancia y susceptancia requeridas en la expresión anterior se usan [6.28] y [6.29]:

$$G_f = \frac{m^2 x^4}{R_1 [(1-mx^2)^2 + m^2 x^2]} \quad [6.28]$$

$$B_f = \frac{x}{R_1} \left[\frac{1-mx^2+m^2 x^2}{(1-mx^2)^2 + m^2 x^2} \right] \quad [6.29]$$

En las fórmulas anteriores $x=f/f_0$

Tanto los filtros amortiguados como los sintonizados representan las más grandes familias de los dispositivos para eliminar la distorsión armónica, y depende de su configuración, combinación y disposición la efectividad y el alcance del filtrado.

Configuraciones convencionales de filtros.

Poco a poco se han ido desglosando los parámetros que inciden en el comportamiento de los filtros. Ahora se revisará un punto que se había tocado en los primeros capítulos, es decirse profundizará en las configuraciones para determinar su eficacia y variabilidad en cada caso.

Por simplicidad se analizará primero el filtro de seis pulsos. Como en su momento se mencionó, para situaciones reales, deben de usar filtros 12 pulsos o superiores. Actualmente, el único uso admisible para filtros de 6 pulsos es en situaciones de mantenimiento o de cualquier situación que requiera poner fuera de línea una parte del sistema. Bajo gran cantidad de condiciones de operación, las configuraciones de 6 pulsos producen distorsión de quinto y séptimo orden así como órdenes relacionadas con los filtros configurados en 12 pulsos. Para filtrarlos se usan combinados filtros de banda sintonizadas para armónicos hasta orden 15 y filtros pasa-alta para armónicos superiores a orden 17 y superiores. Por otra parte la configuración de 12 pulsos garantiza operación óptima en cualquier circunstancia y los filtros de quinto y séptimo orden pueden ser omitidos. El aspecto a tomar en cuenta cuando un sistema eléctrico opera con convertidores de 12 pulsos son los pulsos de resonancia que pueden aparecer en órdenes de armónicos relativamente bajos principalmente la onceava, treceava y vigésimo séptima armónica. Los convertidores de 12 pulsos trabajan también con filtros pasa-banda, pues en la mayoría de los casos usar filtros sintonizados para armónicos de orden bajo y filtros pasa-altos para órdenes superiores resulta muy caro, aunque indudablemente con un desempeño superior.

La solución desde el punto de vista económico es, como se mencionaba usar filtros pasa-banda. Existen 2 opciones, la primera, es sustituir la parte que filtra armónicos de orden bajo, (generalmente filtros sintonizados para cada orden 11 y 13) normalmente hasta la quinceava armónica, por un solo filtro amortiguado configurado para tener como banda base el armónico 12 con una Q entre 20 y 50. El segundo caso indica sustituir todos los filtros, por un amortiguado, cuya banda-base también debe aproximarse al armónico 12 pero su Q se sitúa su valor entre 2 y 6, con lo que se garantiza una impedancia baja para armónicos grandes.

Filtros activos.

Como se habrá podido notar con el estudio de los capítulos anteriores y más particular en los temas inmediatamente anteriores, los filtros tienen la desventaja de que sólo se enfocan en una frecuencia, o una banda-base que suele ser poco amplia y que además difícilmente puede hacer algo contra los interarmónicos. Esto, aunado a los costos, que resultan elevados en relación a las ventajas que representan, ha orillado al desarrollo de otro tipo de dispositivos.

Los nuevos desarrollos se valen de los últimos avances en el campo de la electrónica, empleando los más modernos sensores y actuadores, para eliminar las desventajas de los desarrollos antiguos. Estos dispositivos conocidos como filtros activos pueden cumplir 2 funciones, dependiendo de la configuración en la que se conecte. La primera conocida como conexión en serie sirve para filtrar

corrientes armónicas, la segunda conexión, llamada de derivación, filtra todo tipo de distorsión en la red. La figura (6.7) muestra ambos tipos de conexión.

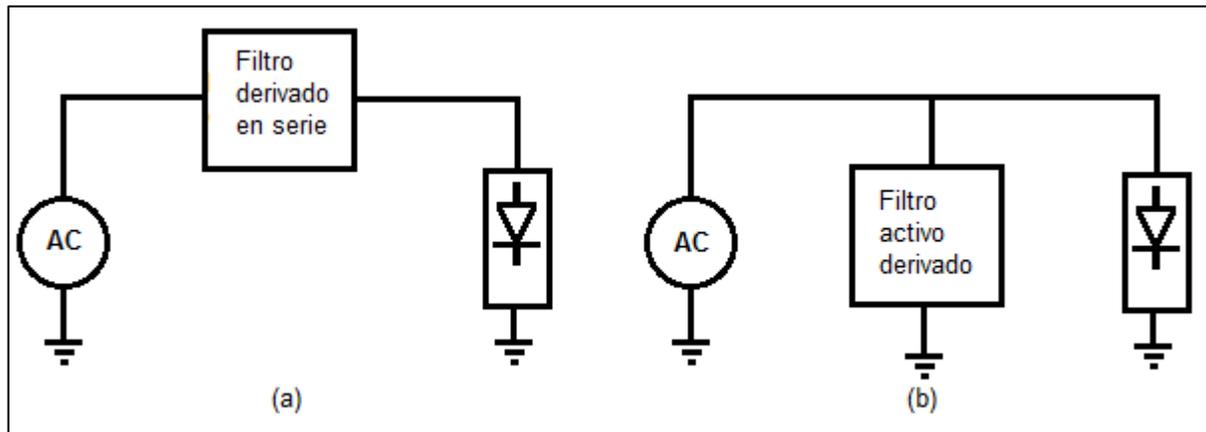


Figura (6.7) Filtros activos (a) en serie. (b) Derivado. "Power system harmonics" [2].

Los filtros activos normalmente operan en conjunto con filtros pasivos, que se encargan de los armónicos que genera la fuente, mientras los activos evitan su propagación. De éste modo los filtros activos están aislado de la impedancia del sistema con lo que se evitan sobrecargas. La ilustración (6.8) mostrada continuación, es el esquema que muestra la operación de un filtro activo en serie, para una fase. En el mismo diagrama se puede ver el flujo de armónicos y su interacción con la impedancia del sistema. La fuente del voltaje es la fuente del sistema. Dado que en el sistema desde la fuente hasta las cargas no lineales no hay impedancia, sino sólo resistencia para las frecuencias armónicas que está limitada por la banda de frecuencias del filtro activo. Así los armónicos son drenados por la impedancia del filtro pasivo. Para poder llevar a cabo está configuración se deben de compaginar las frecuencias de los dispositivos.

A diferencia de los filtros activos conectados en derivación, se valen de una serie de equipos, o son parte de un sistema más elaborado, para llevar a cabo su función. Como ejemplo más básico se tiene una configuración donde el filtro se conecta a un TC que actúa como sensor de la corriente de un convertidor, la corriente fundamental se elimina y el resto es amplificado y enviado a otro devanado del TC, que elimina los armónicos por compensación magnética. Los desarrollos más modernos cuentan con unidades que sintetizan ondas sensibles en la fase con la fundamental, para eliminar armónicos. Ambos diagramas se muestran a continuación. La figura (6.8) muestra el compensador magnético de un compensador de armónicos. La figura (6.9) es un sistema activo de compensación de armónicos.

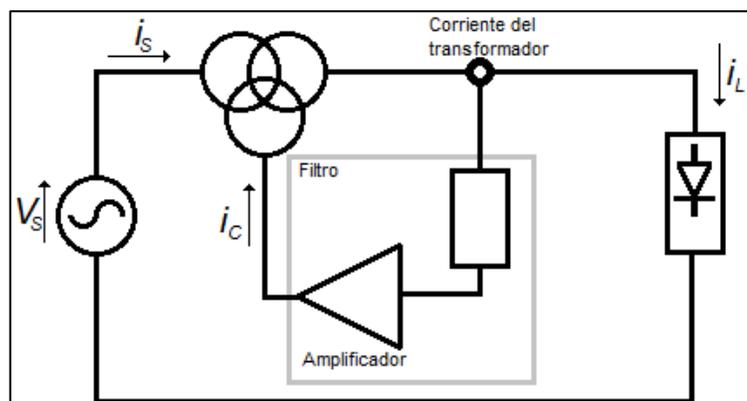


Figura (6.8) Esquema de un compensador magnético de un convertidor de armónicos. “Power system harmonics” [2]

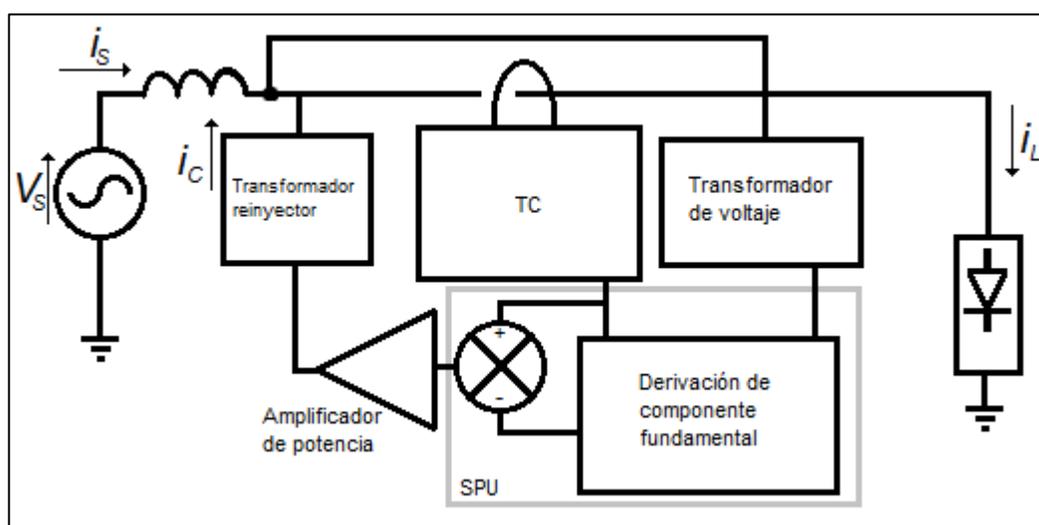


Figura (6.9) Sistema activo de compensación de armónicos. “Power system harmonics” [2].

Otros métodos para disminuir los niveles de distorsión armónica

De las descripciones anteriores se puede deducir, el costo que implica la eliminación. Donde este punto de vista, es fácil concluir porque el sector industrial, es el único tipo de consumidor que puede sufragar el tratamiento y eliminación de armónicos.

Además desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica, la eliminación de armónicos en el sector industrial se vuelve prácticamente obligatorio pues al presentarse en esos valores de volt-amperes, las consecuencias de no tratar las señales de voltaje y corriente pueden ser desastrosas. Dada la potencia que alcanzan, los armónicos pueden migrar a instalaciones cercanas e incluso dañar subestaciones de distribución. Incluso para la industria, la inversión sobre este tema resulta delicada, por lo que es común usar métodos alternativos que ayuden a reducir carga armónica.

Una de las situaciones más usadas se da en los transformadores, que cada vez están más y más conectados a dispositivos que usan frecuencias diferentes a lo nominal. Estos dispositivos, llamados

transformadores tipo K deben su nombre, precisamente a que su diseño involucra valores especiales del factor K, que no permiten que el transformador opere en valores K por debajo del especificado en su diseño. Para su construcción se usa hierro de bajas pérdidas para el núcleo y devanados sobredimensionados, que aunque no eliminan los armónicos sí evitan calentamiento. Solo algunos armónicos pueden llegar a cancelarse dependiendo de la conexión entre el transformador y por ejemplo, convertidores de seis pulsos.

Para sitios donde la carga de armónicos se ha incrementado considerablemente. La práctica más usual y eficaz es reconfigurar la red. Este método se refiere a redistribuir las cargas no lineales entre los diferentes alimentadores de la red, tanto si se trata de una fase a tres fases. Conectar nuevos circuitos que permitan la redistribución es el método más rápido y económico para lograr tal objetivo. De éste modo se evita que la distorsión del total de equipos que la producen se acumule en pocos caminos de la red. La redistribución también puede incluir cargas lineales, intercaladas con las cargas no lineales, pues aquellas que son puramente resistivas atenúan los picos resultantes de resonancias paralelas.

Cuando se incrementa el tamaño de la subestación o añaden algún método de cogeneración al bus, de modo que se asegure el suministro de energía durante picos de operación, se incrementa la relación entre la corriente de cortocircuito y la carga instalada. Esta relación se logra usando fuentes de energía rígidas, que también absorben variaciones transitivas, corrientes inrush en el núcleo de transformadores, menos pérdidas de voltaje a causa de la menor impedancia incluso cuando hay armónicos de corriente de alta frecuencia. Estas fuentes rígidas están asociadas también a altas corrientes de corto-circuito.

Un tercer método es el uso de convertidores de onda multipulso que permiten la cancelación de los armónicos. Para aplicaciones de potencia los rectificadores de media onda son soluciones impracticables, pues generan una componente de corriente directa que satura los transformadores. En éstos casos se usan rectificadores de onda completa.

De éstos los más recomendado es el convertidor de 12 pulsos, pues neutraliza armónicos de bajo orden, principalmente quinto y séptimo aunado a que los siguientes armónicos relacionados son el 23 y 26 y que, generalmente los armónicos 17 y 19 no son características, solo se tienen los armónicos 11 y 13 con sus relacionados.

Tomando como base el convertidor de 6 pulsos, se pueden generar convertidores diversos a modo de ejemplo, el convertidor de 24 pulsos compuesto por 4 convertidores de 6 pulsos, con un ángulo de 15° en cada cambio de fase. Se nota ahora, que para que la cancelación puede llevarse a cabo, las configuraciones deben contar con un número par de convertidores de 6 pulsos. Por ejemplo, si en un convertidor de 24 pulsos, algún convertidor de la configuración quedara fuera de servicio, solo un par de ellos podría realizar la cancelación, el tercero seguiría generando armónicos.

Francisco De la Rosa [1] menciona que las condiciones para eliminar armónicos con rectificadores de 6 pulsos en configuraciones de N secciones son:

- “Todos los transformadores relacionados al proceso deben tener la misma relación de transformación y tener impedancias de fuga similares.
- La carga debe de estar distribuida de forma de lo más uniforme posible entre los convertidores.
- El ángulo de disparo de los convertidores debe de ser el mismo en todos los dispositivos.
- La diferencia de fase entre los transformadores es $60/N$ en grados eléctricos.”

Para determinar los armónicos característicos que disminuyen este método se usa [6.30]:

$$h = kq \pm 1 \quad [6.30]$$

Donde: h es el orden del armónico, q es $6xN$, N es el número de rectificadores de 6 pulsos, K es el número entero (1, 2, 3,...)

Al igual que sucede con los convertidores, si se conectan reactores en ciertas configuraciones actúan como atenuadores de armónicos. Generalmente los reactores sirven para controlar los niveles de corto circuito. Conectándolos en serie, actúan como acumuladores de energía, que ayudan a sobrellevar las situaciones transitorias que pueden llegarse a alcanzar.

CAPITULO 7. Medición de armónicos.

Una de las principales cuestiones para compañías eléctricas es la calidad del servicio que ofrecen, y uno de los principales factores que determinan la calidad del servicio es, justamente la pureza de la señal. Grandes esfuerzos se destinan para lograr éste cometido. Uno de los parámetros relacionados con la calidad del servicio es justamente la uniformidad de los niveles de voltaje, es decir, la uniformidad de la forma de onda.

Para lograr y asegurar que éste parámetro esté dentro de los límites tolerables es necesario realizar mediciones para conocer los niveles de distorsión y actuar en consecuencia dado lo variable en la cantidad y distribución de las cargas. En México, la comisión Reguladora de energía en la “Resolución RES/119/2012” [7] establece los límites permitidos para media tensión:

“2.5.1 Niveles de armónicos

El nivel de distorsión de armónica se medirá en el Punto de Interconexión. Los límites de distorsión armónica de la tensión en la interconexión aplican conforme a las Tablas 7.1 y 7.2. El intervalo de tensión abarca las posibles tensiones de interconexión de las Fuentes de Energía consideradas en este documento. A continuación se muestran los valores de los niveles de armónicas impares y pares permitidos.

Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)
3	4
5	5
7	4
9	1.2
11	3
13	2.5
15	0.3
17	1.7
19	1.5
21	0.2
23	1.2
25	1.09
27	0.2
29	0.91
31	0.84
33	0.2

Tabla 7.1. Niveles armónicas (impares) en la tensión para MT (% de la fundamental). [7]

Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)
2	1.8
4	1
6	0.5
8	0.5
10	0.47
12	0.42
14	0.39
16	0.37
18	0.35
20	0.34
22	0.33
24	0.32
26	0.32
28	0.31
30	0.3
32	0.3

Tabla 7.2. Niveles armónicas (pares) en la tensión para MT (% de la fundamental).
[7]

El nivel de distorsión armónica total permitida es $THD_{MT} = 6.5\%$

La distorsión armónica total será medida en forma continua y las armónicas individuales sólo cuando se exceda la distorsión total.”

Así mismo, se establecen límites para alta tensión:

“3.5.1. Niveles de armónicos

El nivel de distorsión de armónica se medirá en el Punto de Interconexión. Los límites de distorsión armónica de la tensión en la interconexión aplican conforme a las Tablas No 7.3 y 7.4. El intervalo de tensión abarca las posibles tensiones de interconexión de la Fuente de Energía consideradas en este documento. A continuación se muestran los valores de los niveles de armónicas impares y pares permitidos:

Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)
3	2
5	2
7	2
9	1
11	1.5
13	1.5
15	0.3
17	1.2
19	1.07
23	0.89
25	0.82
29	0.7
31	0.66
33	0.2
35	0.58

Tabla 7.3. Niveles armónicas (impares) para AT (% de la fundamental). [7]

Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)
2	1.4
4	0.8
6	0.4
8	0.4
10	0.35
12	0.32
14	0.3
16	0.28
18	0.27
20	0.26
22	0.25
24	0.24
26	0.23
28	0.23
30	0.22
32	0.22

Tabla 7.4. Niveles armónicas (pares) en la tensión para AT (% de la fundamental). [7]

El nivel de distorsión armónica total permitido es $THD_{AT} = 3.0\%$. La distorsión armónica total será medida en forma continua y las armónicas individuales sólo cuando se exceda la distorsión total."

Referente a la distorsión la medición se vuelve indispensable para la coordinación de las protecciones. Gran parte de la problemática es gran crecimiento en el consumo eléctrico en prácticamente todos los sectores.

Ya en el campo de la medición, la cuestión de realizarla es evitar los errores que se pueden producir por las altas frecuencias distorsionadas. En éste rubro hay que cuidar especialmente la distorsión que pudiera provenir de bases o instalaciones cercanas.

Una vez con los principales aspectos a considerar en mente, se puede comenzar a considerar los diseños especiales que deben tener los transductores y los equipos que interpretan la información que éstos últimos recopilan. Las mediciones para sistemas de potencia se llevan a cabo en subestaciones eléctricas como la mostrada en la figura (7.1), donde equipos de medición encuentran fácil ubicación.



Figura (7.1) Ejemplo de una subestación eléctrica.

Equipamiento

El primer punto con el que se debe de cumplir el equipo de medición especial para armónicos es un apartado para almacenamiento de datos, que permita llevar una estadística con las mediciones representativas.

Para asegurar una medición adecuada la IEEE-519-2014 [8] establece que el ancho banda de $3\pm 0.5\text{Hz}$ entre los puntos de -3dB con una atenuación mínima de 40dB a una frecuencia de $f_h + 15\text{Hz}$ debe usarse. Se debe disponer también de una entrada análoga de 1.5 kHz cuyo ancho de la banda limita la medición al armónico 25 en sistemas a 60Hz esto para cubrir los armónicos más representativos y dañinos. Si es necesario hacer mediciones por encima del armónico 65 (casi en los 4kHz) la frecuencia de muestreo debe de cambiarse a dos veces el ancho de la banda deseada. Cuando son armónicos por debajo de ese valor si se tiene una frecuencia de muestreo del ancho de banda requerido es suficiente. Sea cual sea el caso, la precisión en las mediciones, para que sean confiables es de al menos

95% con atenuaciones mínimas de 50 a 60 dB por debajo de 30 Hz, 30 a 50 dB hasta los 50 Hz, 50 a 120 dB de 51 a 720 Hz, 20 a 40 dB hasta 1200 Hz y entre 15 y 35 dB hasta los 2400 Hz.

Transductores

Como ya se había hecho mención unas de las principales características con las que debe de contar los transductores dedicados a operar en entornos con distorsión constante es que puedan soportar operaren los valores de amplitud que se alcanzan, pero también deben contar con respuestas a la frecuencia lo suficientemente buenas como para otorgar información confiable.

Los transformadores de potencial (TP), figura (7.2) y transformadores de corriente (TC) figura (7.3) son elementos lo suficientemente robustos para valores de voltaje o corriente distorsionados y que operan con un ancho de banda que asegura mediciones fidedignas y sin distorsión. Los TP se usan para medir distorsiones de voltaje. Los TC miden la distorsión del lado del primario.

La IEEE 519-2014 [8] nos indica que se debe de considerar que los TP operan con una precisión promedio del 97%, cuando operan en un ancho de banda de 5 kHz. También hace referencia a los TC, que también se sitúan, en 97% de precisión, pero con anchos de banda de 20 kHz. Así mismo, recomienda para éstos equipos, tierras físicas adecuadas y cable coaxial con blindaje para salvaguardar la información. Como comúnmente ocurre, para distancias mayores a 10 metros, ésta recomendación cambia, en favor del uso de fibra óptica.



Figura (7.2) Transformados de potencial

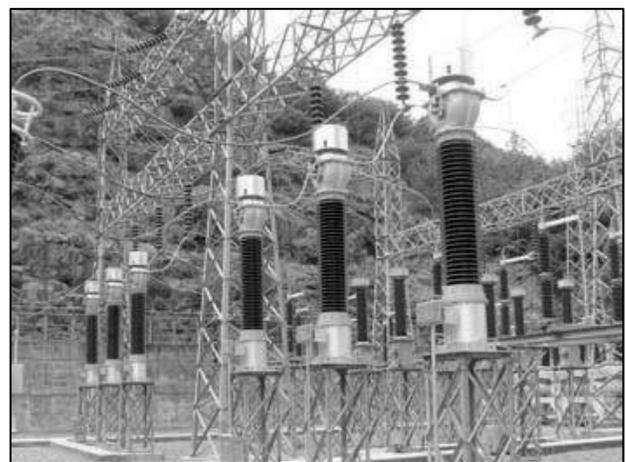


Figura (7.3) Transformador de corriente

Aspectos relevantes

Algunos aspectos que debe de considerarse para medir armónicos se mencionan a continuación:

Antes que nada la importancia de la medición, que da referencia en la calidad del servicio. Así al determinar la magnitud de la distorsión se puede evitar daños al sistema. Con miras al futuro, para planear. Tomando el estándar IEEE-519-2014 [8] se analizará la metodología usada para realizar la

medición. El capítulo 3 “Definiciones y símbolos” del mencionado estándar sugiere que la demanda máxima, diaria, en un periodo de 15 a 30 minutos promediada por 12 meses se usa como parámetro I_L que se usa para la relación I_{SC}/I_L .

Otro estándar de IEC, el 61000 parte 4-7 [12] menciona que la ventana de medición para armónicos por arriba del cuadragésimo debe de ser de 200 milésimos de segundo y el instrumento de medición debe dar las lecturas en valores RMS, y por 12 ciclos. Para fines estadísticos y de ingeniería éstas mediciones de 12 ciclos son procesados cada 3 segundos, 10 minutos y 2 horas.

El estándar IEC 61000 parte 3-6 [11] del 2007 clasifica los equipos de 4 grupos: A, B, C, D. El equipo de potencia está incluido en grupo D. De acuerdo a este estándar las mediciones se realizan en ventanas de 1.5 segundos y se suavizan en un filtro de primer orden.

Ejemplo de aplicación

A manera de ejemplo de aplicación de medición de armónicos y aplicación de algunos conceptos tratados en éste trabajo, se llevó a cabo la medición de parámetros eléctricos del lado secundario de un transformador de 500KVA, 220/127vca (punto de conexión barras) ubicado en cuarto eléctrico, en la Procuraduría General de la República (SEIDO, PGR), ubicado en Paseo de la Reforma No. 74, Col. Guerrero. El reciente incremento en el tamaño de la carga instalada en el edificio hizo necesaria una revisión de los parámetros eléctricos, y en su caso tomar acciones correctivas.

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las mediciones realizadas con el analizador de redes Hioki modelo 3197 PQA, durante 7 horas, periodo en el que se garantizó el uso de las distintas cargas. Se presentarán los valores máximos y promedios censados por el aparato. En la imagen que se presenta se marcaran dichos valores con una flecha roja (no confundirse con la flecha que indica máximo o promedio, ya que estas flechas son colocadas automáticamente por el aparato). Posterior a las gráficas se presentan los valores de forma numérica en el resumen correspondiente. Se presentaran además las gráficas de la distorsión armónica, consumos de voltaje y corriente por cada fase.

Los analizadores de redes, como el usado en éste caso, Figura (7.4), se basan en el análisis del THD para evaluar la distorsión armónica, ya sea de voltaje o de corriente. Tomando en cuenta la entrada del sistema, mediante un filtro pasa banda y un osciloscopio integrado en el equipo, éste es capaz de determinar la frecuencia a la que se trabaja. En la salida del sistema, del mismo modo, mediante filtros pasa banda se determina la magnitud y frecuencias de armónicos en el sistema. Con ésta información el analizador calcula el THD el cual toma en cuenta para hacer las evaluaciones de distorsión en voltaje y corriente.



Figura (7.4) Analizador de redes Hioki 3197 PQA

Del caso de estudio descrito, se obtuvieron las siguientes mediciones:

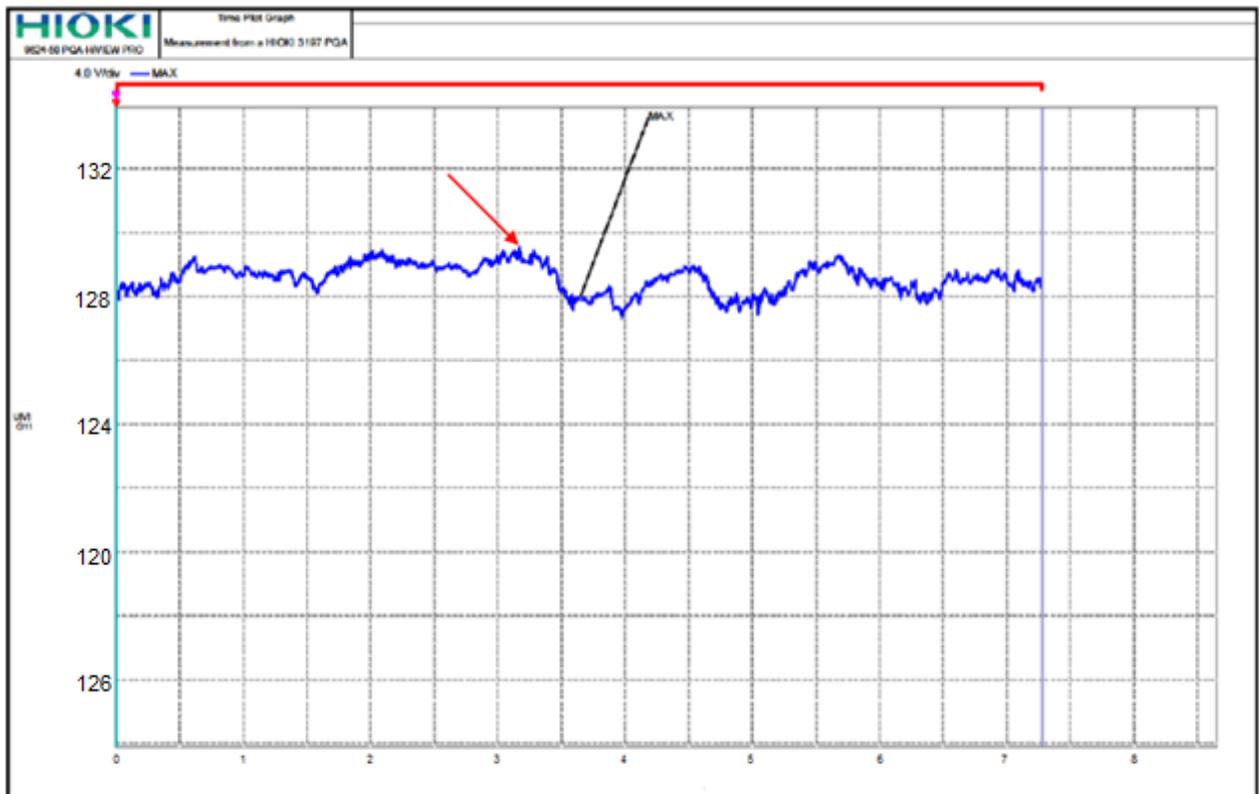


Figura (7.5) Gráfica de voltaje, fase A

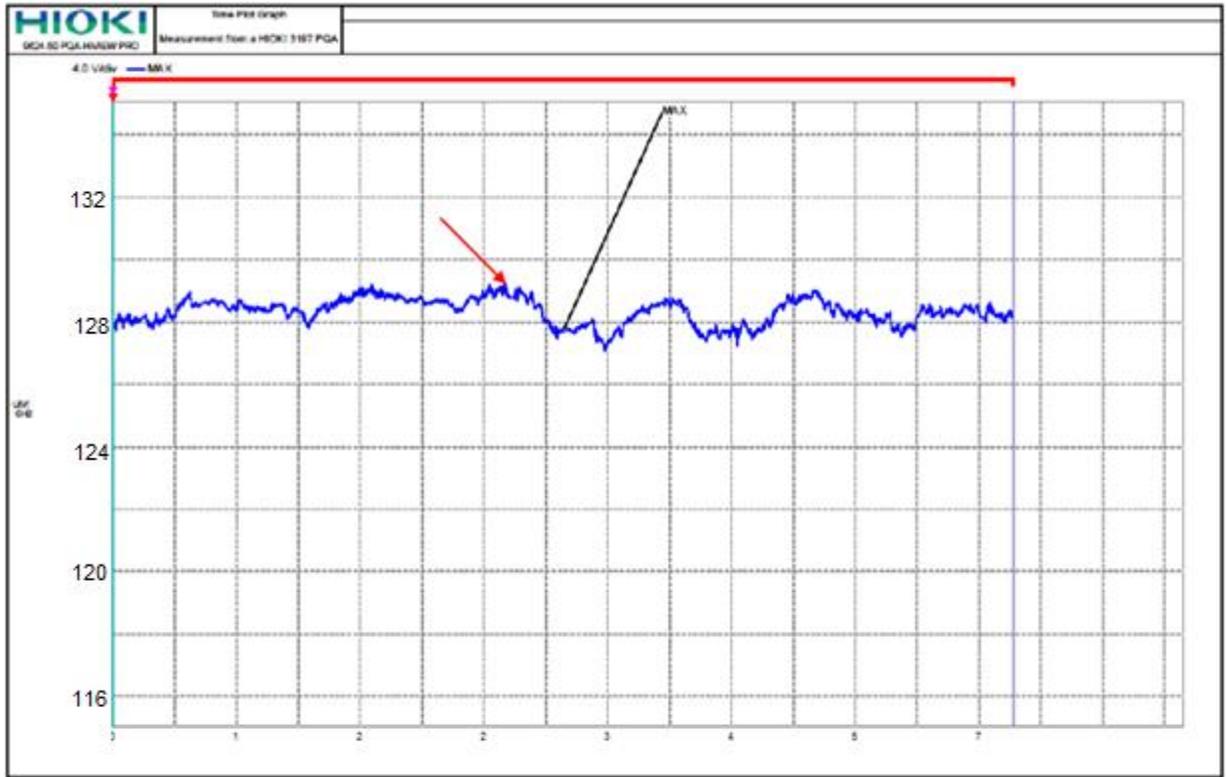


Figura (7.6) Gráfica de voltaje, fase B

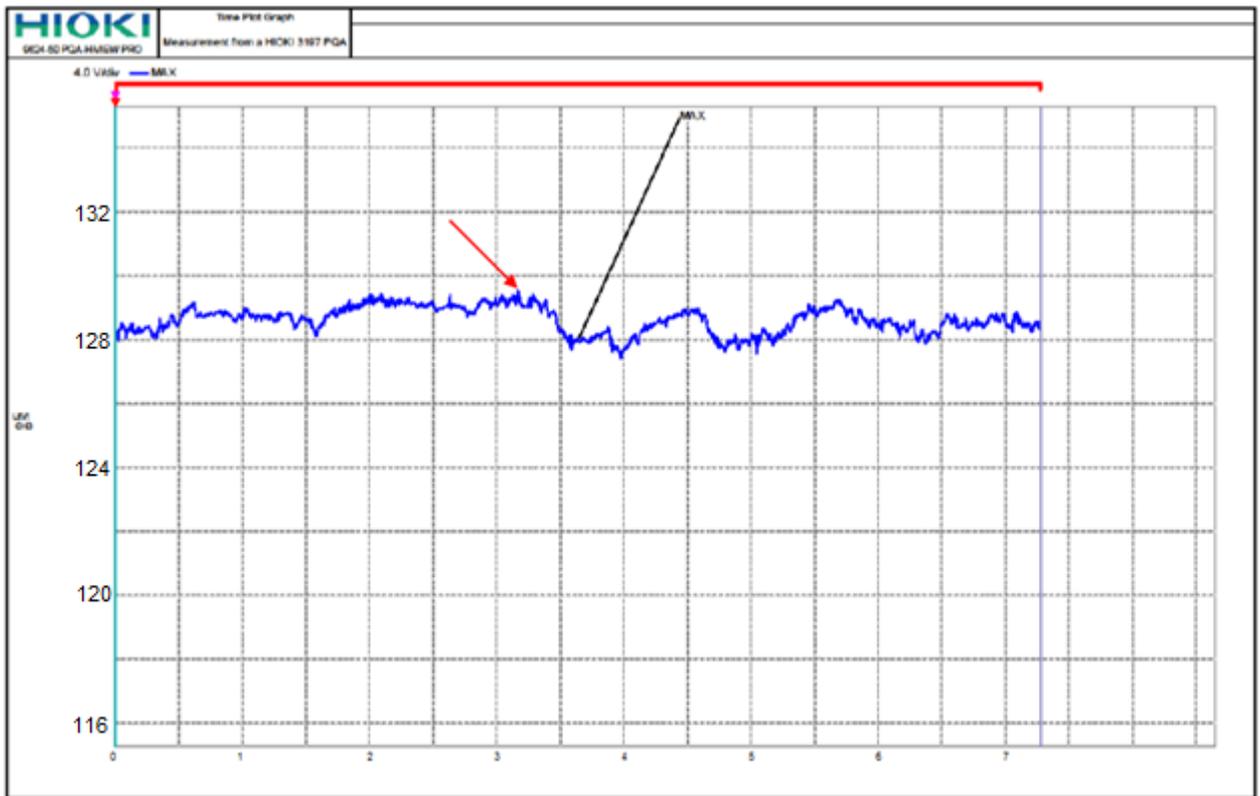


Figura (7.7) Gráfica de voltaje, fase C

En las gráficas anteriores, Figuras (7.5), (7.6) y (7.7), se nota que hay una variación importante de voltaje en el secundario del transformador, para poder dar una conclusión del porqué, se analizan los gráficos de distorsión armónica.

Aunque el equipo es capaz de determinar la distorsión armónica de voltaje y corriente para el caso de estudio se considera determinante la medición de la distorsión armónica de voltaje pues es lo que la normatividad vigente toma en cuenta el porcentaje de distorsión para realizar acciones preventivas o correctivas.

Efectivamente, el peligro para el sistema viene de las corrientes armónicas que se generan dentro de él, y aunque las mediciones de corriente también se realizaron son de menor impacto dado que es un sistema de baja potencia, donde es fácil proteger a los equipos de la distorsión con reguladores de corriente con supresores de pico.

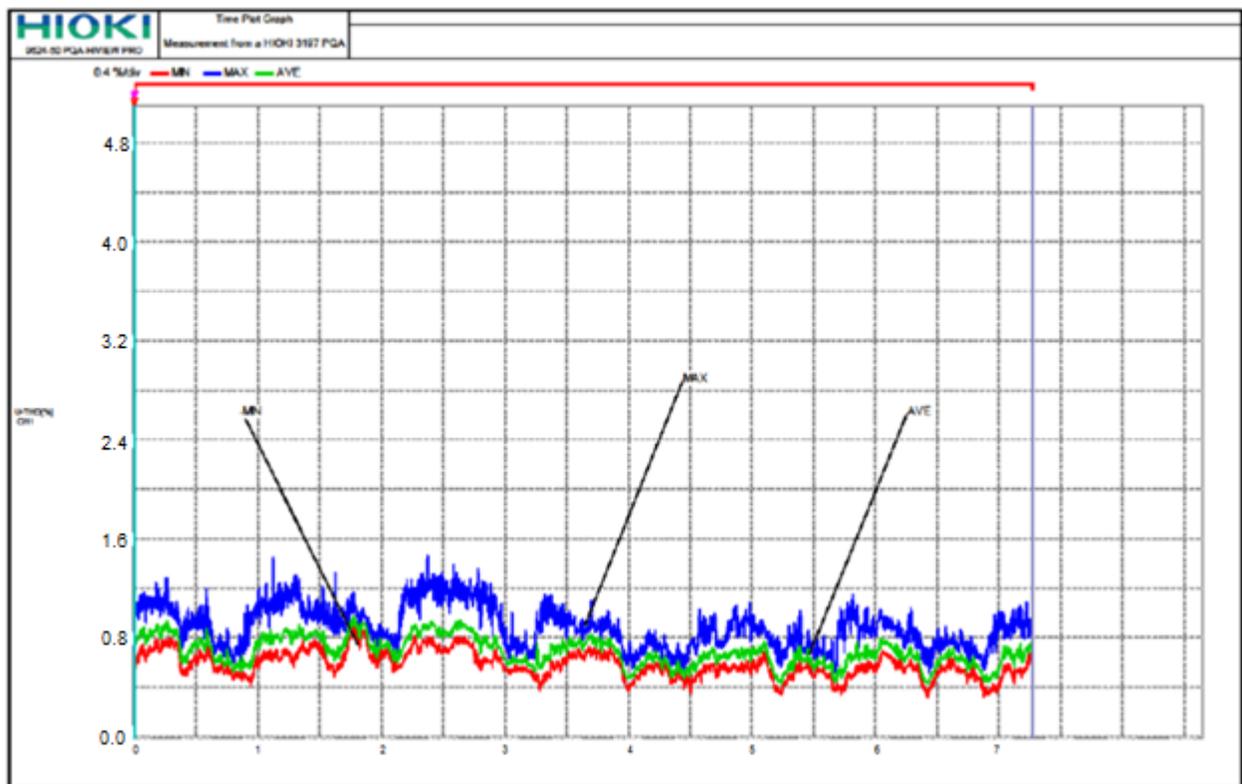


Figura (7.8) THD de voltaje de fase A, mínimo, máximo, promedio.

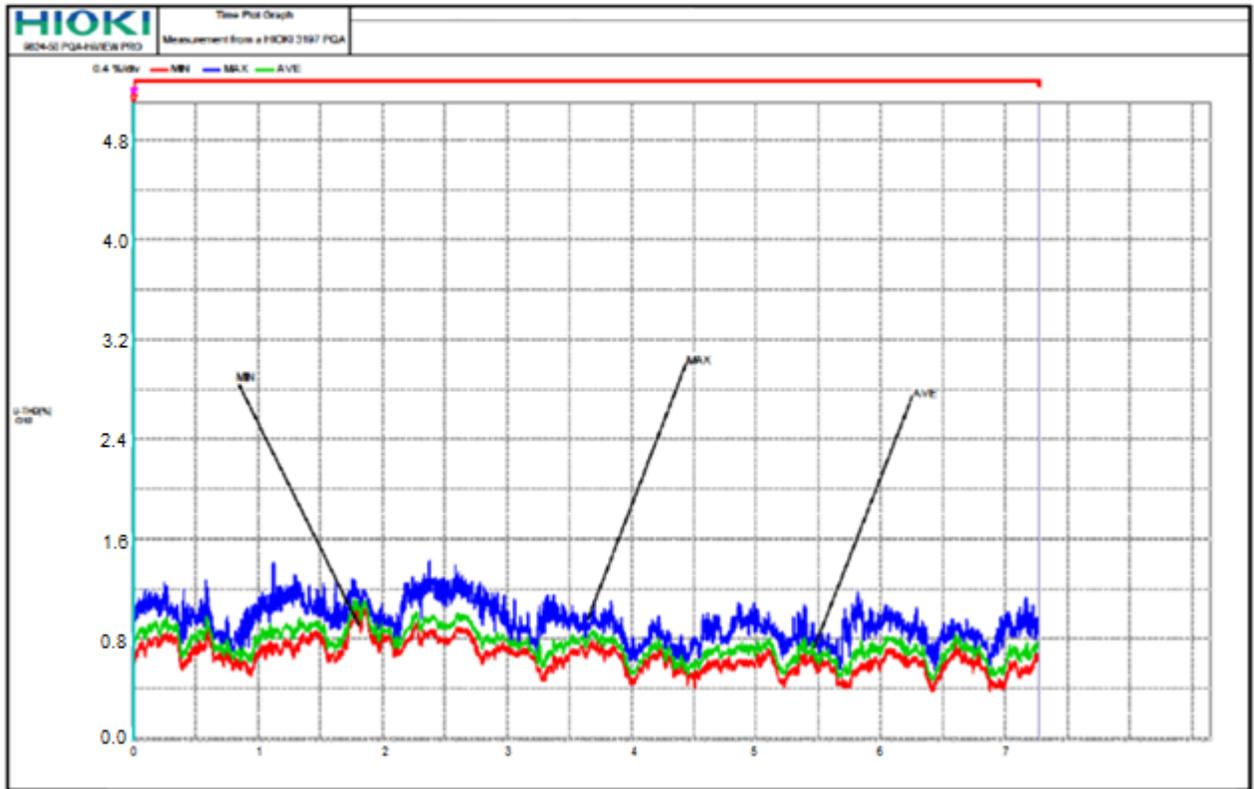


Figura (7.9) THD de voltaje de fase B, mínimo, máximo, promedio.

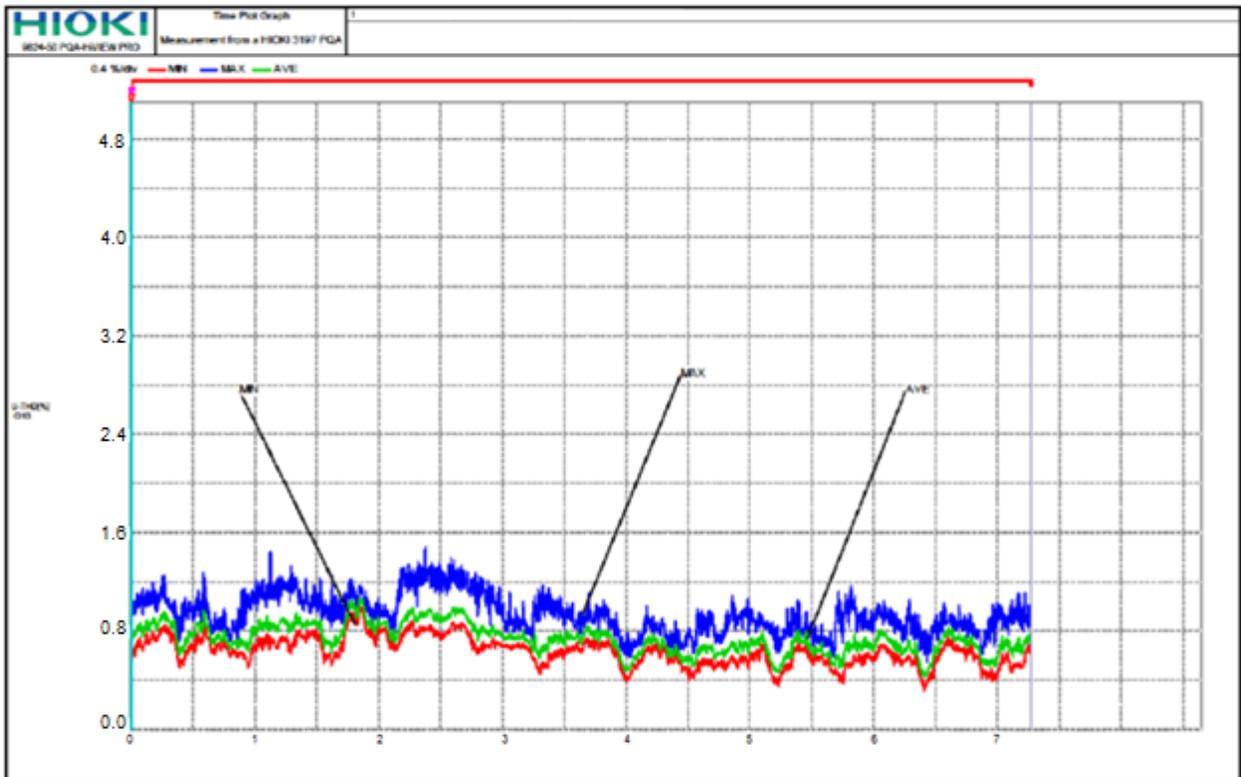


Figura (7.10) THD de voltaje de fase B, mínimo, máximo, promedio.

De las gráficas de voltaje, figuras (7.5), (7.6) y (7.6) se nota que el voltaje no se distorsiona más allá del 5% en ninguna de las 3 fases, lo cual cumple con la NOM-001-SEDE-2012. Sin embargo aún no es suficiente para dar una conclusión respecto a la colocación del filtro de armónicos. Para ello se recurre a las gráficas de THD de cada fase, presentadas en las figuras (7.8), (7.9) y (7.10) se observa que las variaciones a través del tiempo del THD son bastantes similares en cada fase, y no rebasan en ningún momento el 5% requerido por el IEEE-519 [8], representada por la tabla (7.5) por lo cual no es necesaria la reconfiguración de la instalación o la aplicación de algún filtro de armónicos.

En las gráficas, presentadas en las figuras (7.8), (7.9) y (7.10) se puede apreciar que el equipo realiza la medición de THD mínima, máxima y promedio. La primera se mide tomando en cuenta los primeros armónicos, generalmente hasta el 17, los cuales son los más peligrosos para los sistemas, la máxima se mide con todos los armónicos presentes en el sistema y se usa para determinar justamente los casos donde dicha distorsión llegue a sobrepasar los límites permitidos y la promedio la calcula usando los valores mínimos y máximos y generalmente sirve para valores estadísticos.

Voltaje	THD (%)
Menor a 69Kv	5
Entre 69Kv y 161 Kv	2.5
Mayor a 161Kv	1.5

Tabla (7.5). Límites permitidos de THD respecto al nivel de tensión del sistema

Capítulo 8. Conclusiones

Se conocen ahora los principales aspectos de los armónicos. Comenzando por sus causas, pasando por sus efectos, analizando también las medidas que se toman para eliminarlos y por supuesto los métodos de medición especializados que requieren.

Analizando los capítulos de eliminación y de medición se hace patente que éstos dos últimos apartados los que requieren mayor desarrollo de diseño, pues cada caso es particular y único dentro de las bases que se han establecido, es justamente en éste punto en que la ingeniería es clave para determinar las acciones a tomar dentro de la normatividad, pero más importante aún, los criterios que se han establecido en, por ejemplo el capítulo de eliminación de armónicos, que sirven como base para diseño e implementación.

Son también aspectos de suma importancia, dado que en ellos se invierte una parte importante de los recursos destinados a proyectos industriales y de ampliación de la red eléctrica. Un correcto diseño permite maximizar los resultados de ingeniería, es decir, crear sistemas, equipos e instalaciones eficientes y seguras, pero económicamente viables, optimizando equipo y material.

Se han emitido recomendaciones, y normas con el propósito de estandarizar, en medida de lo posible los diseños de redes y de equipos destinados al tratamiento de armónicos. Ésta normatividad parte de la ingeniería que se ha desarrollado en el tema de armónicos.

A lo largo de la investigación realizada para éste trabajo, se encontraron numerosas recomendaciones, emitidas por importantes asociaciones y organismos dedicados a la investigación en ingeniería eléctrica, dirigidas a mantener los armónicos bajo ciertos niveles tolerables, de acuerdo a las investigaciones que éstas instituciones han llevado a cabo en situaciones muy específicas y variadas. Entre las más importantes se encuentran las situaciones donde los armónicos rebasan los límites tolerables por los equipos en las subestaciones, por eso el trabajo tiene un enfoque hacia los filtros que se colocan en las subestaciones. Incluso, los parámetros que deben mantenerse bajo control son varios y dependen no solo de la calidad de la señal, sino de la respuesta del diseño y equipos en condiciones de distorsión.

La normatividad actual es menos específica en comparación con los estándares emitidos por organismos como el IEC y la IEEE y en varios casos se limita a determinar los límites permisibles de distorsión en puntos determinados de la red o que un equipo puede producir para considerarse aceptable de usar. Incluso documentos de la comunidad reguladora de energía recomiendan niveles permisibles en puntos específicos de la red. También es cierto que existen normas oficiales mexicanas específicas para gran cantidad de equipos modernos y que, hasta éste momento han sido suficientes, pues el estado actual de la distorsión armónica en redes de distribución y líneas de transmisión se ha incrementado no la llegado a rebasar las capacidades de filtración de los mismos sistemas.

Sin embargo, el crecimiento en la demanda eléctrica proyectada, asociado al crecimiento demográfico e industrial del país hace que estas normas estén quedando justas e incluso en mediano plazo pueda verse superadas, por lo cual será necesario revisarlas en años próximos, para asegurar el

control de distorsión. Del mismo modo de los estándares se han ajustado. La primera versión del IEEE-519 emitido en 1981 abarcaba la generación de armónicos en convertidores pero no consideraba la interacción con el sistema de potencia, situación que se consideró e incluyó en la actualización de 1992 (IEEE-519-1992). La nueva tendencia de estándares y recomendaciones se encamina límites en el lado de los consumidores, más específicamente para evitar excesiva distorsión de voltaje, como se refleja en la última actualización de éste estándar, el IEEE-519-2014 *“Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas de potencia”*.

A diferencia de la normatividad, los estándares ven la problemática de la distorsión como un asunto del sistema en general no como del equipo en particular. Poca normatividad emite regulaciones específicas referentes a la interferencia con sistemas de comunicación, que es un apartado cada vez más frecuente en la práctica.

Finalmente con el ejemplo de aplicación revisado en el capítulo 7 se nota el uso de la metodología de medición plasmada en los estándares del IEC, como el 61000 parte 4-7, con un instrumento que entrega valores RMS, el 61000 parte 3-6, clasificando al equipo de potencia (el transformador) en el grupo D y con mediciones en ventanas de 1.5 segundos.

Entonces podemos decir que todo el marco teórico revisado, labor de ingeniería da la pauta para emisión de normas y estándares que rigen el marco regulatorio en que se deben regir los nuevos desarrollos. En éste trabajo se conjuntaron las bases con las que el lector comience con el análisis de armónicos, logrando así el objetivo de ser el primer contacto estructurado específico referente a los armónicos en sistemas de potencia. Con el estudio teórico se consigue una clara noción de los armónicos en sistemas eléctricos en primera instancia y posteriormente se integra a ésta noción las características prácticas en equipos y sistemas específico desprendiéndose esto del estudio teórico del tema. Se definen éstas como las bases de los armónicos en sistemas de potencia porque a partir de la revisión de los temas que se presentaron es ésta obra se puede partir hacia estudios más especializados. Finalmente, en el ámbito práctico, con la inclusión de un caso de estudio práctico se puede ver, se manera rápida cómo se relaciona la normatividad con la ingeniería desarrollada. Es decir, la inclusión un caso práctico es observar cómo la normatividad no es sino el resultado que la ingeniería ha plasmado para conseguir un equilibrio entre el estado del arte, en éste caso de los armónicos con los desarrollos que la misma ingeniería desarrolla en éste momento y hacia el futuro, estado de arte que parte del desarrollo teórico que se ve reflejado en aplicaciones prácticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Harmonics and Power systems. De la Rosa, Francisco C.
Taylor & Francis, 2006. 208 páginas
ISBN: 9780849330162
- [2] Power system harmonics. Arrillaga, Jos; Watson, Neville R.
Wiley, 2004. 412 páginas
ISBN: 978-0-470-85129-6
- [3] Análisis de armónicos en sistemas de distribución. Parra López, Esperanza
Universidad Nacional de Colombia, 2004, 86 páginas
ISBN: 9789587013658
- [4] NOM-001-SEDE-2012 “Instalaciones eléctricas (utilización)”. Secretaría de energía.
Limusa, México, 2012. 1086 páginas
ISBN: 9786070505973.
- [5] NOM-017-ENER/SCFI-2012, “Eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastadas. Límites y métodos de prueba.”
Secretaría de energía; Secretaría de comercio y fomento industrial. 2012
DOF: 26/08/2012. 29 páginas.
- [6] NOM-031-ENER-2012 “Eficiencia energética para luminarios con diodos emisores de luz (leds) destinados a vialidades y áreas exteriores públicas. Especificaciones y métodos de prueba.”
Secretaría de energía. 2012.
DOF: 06/11/2012.
- [7] RESOLUCIÓN Núm. RES/119/2012.
Comisión reguladora de energía, 2012.
DOF: 22/05/2012.
- [8] IEEE 519-2014. “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”.
IEEE Power and Energy Society, 2014.
Online ISBN: 978-0-7381-9005-1.

- [9] IEEE 18-2002 “Standard for Shunt Power Capacitors”
IEEE Power and Energy Society, 2002.
Online ISBN: 978-0-7381-3244-0.
- [10] IEC 61000 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-2:1994 Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase), Primera edición.
International Electrotechnical Commission, 1994.
- [11] IEC 61000 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-6:2007 “Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems”
International Electrotechnical Commission, 2007.
- [12] IEC 61000 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-7 “Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto”, Segunda edición.
International Electrotechnical Commission, 2002.
- [13] Emanuel, A. E. “Power in non sinusoidal situations. A review of definitions and physical meaning”.
Publicado en IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 5, Issue: 3)
páginas 1377 – 1389
INSPEC Accession Number: 3770615
DOI: 10.1109/61.57980
IEEE Power and Energy Society, 1990.
- [14] Czarnecki, L.S. (1987) “What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned”
Publicado en IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Volume: IM-36, Issue: 3) páginas 834 – 837
INSPEC Accession Number: 3072258
DOI: 10.1109/TIM.1987.6312797
IEEE Power and Energy Society, 1987.
- [15] Antoniu, S., “Le régime énergétique déformant. Une question de priorité”
RGE, 1984. 357-362

- [16] Carson, J. R., “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return”
Bell system technical Journal, 1926
DOI: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x
- [17] Shepherd, W.; Zakikhani, “Suggested definition of reactive power for non sinusoidal systems
Publicado en: “Proceedings of the Institution of Electrical Engineers”
IET, 1972, página 1361.

