



300617
16
24

UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

ARMONICAS: CAUSAS, EFECTOS Y MEDIDAS
CORRECTIVAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE
DISTRIBUCION

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ELECTRONICA
P R E S E N T A :
EDITH FAVIAN RUIZ
DIRECTOR DE TESIS
ING. GUILLERMO ARANDA PEREZ

MEXICO, D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1993



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Introducción

Introducción	i
--------------	---

Capítulo 1 **Antecedentes**

Antecedentes	1-1
¿Que son las armónicas?	1-3
¿Cuando se necesita realizar un estudio sobre armónicas?.....	1-5

Capítulo 2 **Fuentes de armónicas.**

Fuentes de armónicas	2-1
Fuentes establecidas y conocidas de armónicas	2-2
Fuentes nuevas y futuras de armónicas	2-3
Transformadores.....	2-4
Máquinas rotatorias.....	2-6
Hornos de arco.....	2-6
Luz Flourescente.....	2-7
Fuentes de armónicas actuales	2-7
Grandes convertidores de potencia.....	2-7
Convertidores de mediano tamaño.....	2-8
Convertidores de baja potencia.....	2-9
Otras fuentes de armónicas.....	2-9
Análisis de armónicas y fuentes que las producen	2-11

Motores de inducción.....	2-12
Otros dispositivos.....	2-12

Capítulo 3

Efectos de las armónicas en sistemas de potencia

<u>Efectos de armónicas en sistemas de potencia</u>	3-1
¿Cuales son los problemas causados por las armónicas?.....	3-1
Problemática Actual.....	3-1
Antecedentes.....	3-4
Fatiga térmica debido a armónicas.....	3-5
Interferencia a cargas no-lineales.....	3-9
Interferencia en las comunicaciones.....	3-9
Modelo simplificado del circuito telefónico.....	3-10
Factores que influyen en la interferencia.....	3-11

Capítulo 4

Métodos de detección y medición de armónicas

<u>Métodos de detección y medición de armónicas</u>	4-1
Cargas lineales Generalizadas.....	4-2
Distinción de Componentes.....	4-3
Componentes lineales.....	4-3
Componentes No-lineales.....	4-3
Límites de armónicas.....	4-4
Mediciones de armónicas.....	4-5
Recomendaciones Generales.....	4-5
Equipo de medición.....	4-6
Equipo de monitoreo y registro.....	4-7

Capítulo 5

Control y atenuación de las armónicas en sistemas eléctricos de potencia.

Control y atenuación de las armónicas en sistemas eléctricos de potencia	5-1
Atenuación de armónicas	5-1
Criterios de diseño de filtros	5-2
Filtros de armónicas	5-4
Tipos de Filtros.....	5-5
Filtros sintonizados.....	5-6
Filtros automáticos sintonizados.....	5-6
Filtros amortiguados.....	5-7
Tipos de filtros amortiguados.....	5-8
Propiedades en los componentes de filtros	5-9
Capacitores.....	5-10
Inductores.....	5-10
Costos de filtros.	5-11
Ideas alternativas para la eliminación de las armónicas.	5-12
1.- Compensación magnética del flujo.....	5-12
2.- Inyección de armónicas.....	5-13

Capítulo 6

Normalización: Tendencias a nivel mundial

Normalización: Tendencias a nivel mundial	6-1
Propósitos Generales	6-1
Derechos de los consumidores.	6-2

Capítulo 7

Caso Práctico.

Caso Práctico.	7-2
----------------	-----

Panorama General.....	7-2
-----------------------	-----

Introducción.	7-2
---------------	-----

Punto de Acoplamiento Común (PAC).....	7-3
--	-----

Relación de Corto Circuito (RCC).....	7-3
---------------------------------------	-----

Factor de distribución y/o amplificación (F_d).....	7-4
---	-----

Distorsión de voltaje armónica individual (DVin).....	7-4
---	-----

Distorsión total de voltaje (DAT).....	7-4
--	-----

Distorsión de corriente armónica individual (DCIn)	7-4
--	-----

Factor armónico (F_n).....	7-4
--------------------------------	-----

Antecedentes	7-5
--------------	-----

1.- Determinación de impedancia entre planta y red.....	7-8
---	-----

2.- Adopción de niveles de distorsión admisibles.....	7-10
---	------

3.- Cálculo de niveles de distorsión actuales.....	7-11
--	------

4.- Detección de Resonancia en la red de CFE.....	7-14
---	------

5.- Proposición de Medidas Correctivas.....	7-19
---	------

Conclusiones

Conclusiones	I-I
--------------	-----

Bibliografía

Bibliografía	1-IV
--------------	------

Capítulo 1

Antecedentes

Capítulo 1 Antecedentes

En un sistema eléctrico de potencia ideal, la energía se proporciona a una frecuencia única y constante, a niveles de tensión especificados y de magnitudes constantes. Sin embargo, ninguna de estas condiciones se satisface en la práctica.

El problema de la distorsión armónica en un sistema de potencia no es un fenómeno nuevo, y el limitarlo a niveles aceptables ha sido la preocupación de ingenieros eléctricos durante años.

Por mucho tiempo los motores y otras cargas que requieren de corriente directa habían obtenido su energía de generadores de corriente directa impulsados por motores de corriente alterna, realizando una rectificación que aislaba a ambos sistemas y los conectaba físicamente por medio de una flecha. Mecánicamente hablando, la relación que guardaban ambos sistemas era la de transmitirse mutuamente energía, aislándose eléctricamente el uno con respecto al otro. Sin embargo estos generadores eran equipo muy voluminoso y su mantenimiento era costoso.

Más tarde otro intento por lograr una rectificación eléctrica era acompañado de métodos mecánicos. En dicho método un motor maneja físicamente la apertura y cierre de interruptores controlado por una señal de voltaje para lograr la rectificación. Obviamente el control de varios interruptores era incómodo, y colocarlos a tiempo difícil. Además el problema del costo de mantenimiento no se solucionó pues resultaba aún más caro que el anterior.

Los rectificadores mecánicos se reemplazaron rápidamente por equipo estático, incluyendo diodos de mercurio, selenio y silíce para obtener finalmente Tiristores como los Rectificadores controlados de silicio (SCR's).

Cuando la rectificación por estado sólido pareció ser la panacea, surgieron otros problemas en el sistema: según el tamaño del dispositivo rectificador y dependiendo

de la cantidad de cargas que atendiera dicho dispositivo podía llegar a convertirse en una gran sección de falla dentro del sistema.

La principal falla asociada a este problema fue la baja, definitivamente pobre, del factor de potencia del sistema asociado a rectificadores estáticos.

Por economía y debido a los requerimientos de regulación de voltaje del sistema, resulta necesario mejorar el factor de potencia, añadiendo al sistema bancos de capacitores en paralelo. Sin embargo se detectó que estos equipos eran sensibles a las sobrecargas y sobrevoltajes producidos por las corrientes y voltajes de armónicas.

Por otra parte la excesiva interferencia telefónica inducida debido al acoplamiento entre el sistema eléctrico y el sistema de comunicaciones resultaron ser problemas asociados con armónicas.

Si se quisiera enmarcar el tema en una perspectiva histórica, es necesario remontarse hasta el siglo XVIII cuando J.B.J. Fourier sentó las bases de la teoría de la descomposición de funciones en sus componentes armónicas.

Ya en este siglo, en Alemania durante las décadas de los 20's y 30's se comenzó a desarrollar el tema de la distorsión armónica debida a convertidores eléctricos. Durante los 50's y 60's el estudio de la distorsión armónica se intensificó al estudiar la transmisión de corriente directa en alta tensión. En la actualidad este tema se discute en congresos y simposios internacionales, a nivel de empresas eléctricas e industriales. Los problemas actuales de armónicas se deben a varios factores:

- El aumento sustancial de cargas no-lineales, resultantes de nuevas tecnologías como rectificadores de silicio (SCR's), transistores de potencia y controles con microprocesadores que ocasionan armónicas generadas por la carga en el sistema.
- Un cambio en la filosofía de diseño del equipo. En el pasado se tendía al sobrediseño. Actualmente, para ser competitivos, el equipo de potencia está diseñado en forma más crítica, y en caso de equipos con núcleo de acero, sus puntos de operación se encuentran frecuentemente en

regiones no lineales. La operación en estas regiones resulta en un incremento de las armónicas.

¿Que son las armónicas?

Las armónicas, son voltajes o corrientes, o ambos, presentes en un sistema eléctrico con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (normalmente a 50 ó 60Hz). Los valores comunes de estas frecuencias se encuentran en la tercera, quinta (300 Hz), séptima (420 Hz), onceava (660 Hz), etc.

La palabra armónica se origina en el campo de la acústica, en donde significa la vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia básica (o fundamental). En forma similar, con señales eléctricas, una armónica se define como el contenido de una señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia del sistema.

Cuando una señal compleja es vista en un osciloscopio, su forma de onda se observa en el dominio del tiempo; esto es, para cada instante de tiempo se despliega la magnitud correspondiente de la señal. Si la misma señal se alimenta a un amplificador de alta fidelidad, entonces el oído escucha el sonido resultante como una combinación de frecuencias; esto es, se oye como una nota musical (Dominio de la frecuencia). La forma de onda se puede describir entonces, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

La relación de fase de la armónica con respecto a la frecuencia fundamental es significativa en la determinación de la forma de onda resultante. En acústica se acepta en general que el efecto auditivo no se afecta por dicha relación de fase. Este no es el caso con las señales eléctricas, donde la fase relativa de la armónica puede alterar el efecto global en forma considerable.

Recientemente, la predicción de voltajes y corrientes armónicas ha sido foco de diversas publicaciones y estudios, debido al rápido desarrollo y uso extenso de cargas no-lineales; por ejemplo: cargadores de baterías, convertidores, máquinas rotatorias, hornos de arco y en general equipo que utiliza electrónica de potencia para aplicaciones domésticas e industriales y que típicamente son fuentes de armónicas. La presencia de estas cargas y la configuración del sistema de distribución puede ser tal que ocasione condiciones de resonancia. Por ejemplo, esta situación se puede dar con el uso de capacitores en derivación para corrección de un factor de potencia. Bajo dichas condiciones ocurren voltajes armónicos altos que pueden dar lugar a corrientes dañinas en los capacitores, que son equipo vulnerable a los efectos producidos por armónicas. Estos voltajes armónicos altos ocasionan altos esfuerzos dieléctricos en el capacitor ocasionando fallas en los mismos.

Ocasionalmente, cuando las armónicas parecen ser la causa de los problemas del sistema, es deseable determinar el punto armónico de resonancia. Para determinarlo de manera aproximada, es necesario conocer la capacidad de corto circuito del sistema y la potencia de cada uno de los bancos de capacitores, aplicando la siguiente ecuación:

$$hr = \sqrt{\frac{MV_{Acc}}{MVAR}}$$

en donde:

hr = Es el punto resonante en por unidad de la frecuencia fundamental

MV_{Acc} = Es la capacidad de corto circuito del sistema

$MVAR$ = Es la potencia reactiva del banco de capacitores

Esta ecuación es útil en una evaluación inicial. Si el punto resonante se encuentra cerca de una de las frecuencias armónicas y existen indicios de su existencia en el sistema, es muy probable que los capacitores se vean afectados.

Es importante también mencionar que los transformadores son fuentes muy importantes de armónicas debido a que la saturación del núcleo en el circuito magnético de estos, tiende a distorsionar la onda de voltaje. Generalmente la tercera, quinta, y ocasionalmente la séptima, armónicas son de consideración y bajo ciertas condiciones específicas del sistema en resonancia estas armónicas alcanzan magnitudes que valen la pena ser estudiadas.

Los procedimientos para llevar a cabo estudios de armónicas están cobrando importancia en el área de ingeniería de distribución, siendo la principal preocupación los efectos de resonancia y la distorsión en el voltaje.

¿Cuándo se necesita realizar un estudio sobre armónicas?

Aunque una respuesta específica no es fácil de definir, los siguientes puntos son indicadores de dicha necesidad:

- Cuando se añaden bancos de capacitores para corrección del factor de potencia en sistemas que se encuentren constituidos en un 20% o más, de convertidores u otros equipos generadores de armónicas.
- Para corregir un problema existente como falla de equipo (motores, capacitores, etc.) o una existencia de excesiva distorsión en el voltaje, o cuando existe interferencia en los equipos de comunicación.
- En una etapa de diseño durante la selección de equipo, que tienda a generar o producir armónicas.
- Cuando debido a restricciones de la compañía eléctrica se limita la inyección de armónicas al sistema eléctrico a pequeñas magnitudes.
- Expansiones en las plantas que añadan equipo generador de armónicas en forma significativa operando en conjunción con bancos de capacitores o que dadas estas nuevas adiciones al sistema se prevee una excesiva distorsión de voltajes.

Primordialmente, el objetivo del estudio es determinar como suprimir o atenuar las armónicas. La técnica generalmente utilizada es algún tipo de filtro.

Cuando alguna fuente importante de armónicas se adiciona al sistema, se debe de llevar a cabo un estudio para determinar el potencial de sobretensiones resonantes. Un voltaje distorsionado afecta directamente a los usuarios y puede resultar en calentamiento excesivo de equipo en general. Las corrientes también pueden viajar a otras redes a través del alimentador con resonancias locales, resultando en voltajes distorsionados en exceso. Adicionalmente, las armónicas incrementan las pérdidas en el alimentador.

Como en cualquiera otra forma de contaminación, la generación de armónicas afecta todo el ambiente eléctrico, posiblemente a grandes distancias desde su punto de origen.

La consecuencia más obvia de las armónicas en los sistemas de potencia sea la degradación de las comunicaciones telefónicas ocasionadas por el ruido armónico inducido. Sin embargo existen otros efectos, aunque sean menos audibles, pero no menos desastrosos, como lo es la operación incorrecta de equipo de protección o control y la sobrecarga de equipos de potencia.

En muchas ocasiones la existencia de contaminación en la forma de onda solo se detecta después de una falla catastrófica, como la destrucción de los capacitores utilizados para la corrección del factor de potencia.

El determinar límites de contenido armónico no es una tarea fácil. El conocimiento actual de los niveles de armónicas no está lo suficientemente avanzado, como para determinar hasta que nivel de armónicas puede soportar un sistema de potencia determinado. El conocimiento de armónicas se basa en eventos que ya pasaron, por lo que las normas y limitaciones a la fecha introducidas reflejan los resultados de la experiencia práctica pasada, con el objetivo de prevenir situaciones similares en un futuro. Dos de los obstáculos que se presentan para un entendimiento cabal de las armónicas son la obtención de mediciones exactas y los modelos del sistema para un análisis en detalle.

En años recientes han ocurrido desarrollos a nivel industrial que se basan en rectificación controlada, y que por lo tanto generan armónicas. Sin embargo, el diseño de dicho equipo generalmente supone la existencia de una fuente de voltaje libre de distorsión armónica, situación que ocurre únicamente si el sistema de potencia que alimenta al equipo tiene una impedancia armónica muy alta. Consecuentemente, los usuarios industriales pequeños han estado sujetos a dificultades ocasionadas por la interacción de su propio equipo de control con la fuente de potencia. Las empresas eléctricas requieren diagnosticar los problemas operacionales y de diseño ocasionados por las armónicas; es decir quieren modelar la creación y propagación de armónicas.

En muchos países se han implantado normas que limitan la inyección de armónicas al sistema eléctrico y han establecido leyes, sancionando a aquellos usuarios que no limiten su generación de armónicas. Algunas de estas normas han sido establecidas por organismos ampliamente reconocidos a nivel mundial, en donde se plantea el problema y las medidas correctivas para los mismos.

En México aún no existe ninguna norma que limite dicho problema, más sin embargo la proliferación de electrónica de potencia y de estado sólido en todas partes, va creando una tendencia a hacer necesaria una normatividad por parte de las autoridades para proteger los sistemas.

Capítulo 2

Fuentes de armónicas.

Capítulo 2

Fuentes de armónicas

Existen un gran número de dispositivos que producen señales de armónicas. Algunos de ellos han existido desde la formación de los sistemas de potencia. Otros han existido por muchos años pero en números relativamente pequeños. La razón principal en el incremento de los niveles de armónicas es el desarrollo y aplicación de dispositivos semiconductores y que han proliferado en todas las aplicaciones de electrónica de potencia.

Es importante ubicar cada una de las fuentes de armónicas y clasificarlas, de modo que sea sencillo distinguir cual de ellas pudiera estar ocasionando problemas dentro del sistema. Las fuentes de armónicas se pueden dividir en dos grupos:

- 1.- Fuentes establecidas y conocidas.
- 2.- Fuentes nuevas y futuras.

Fuentes establecidas y conocidas de armónicas

Se han determinado como fuentes conocidas a una serie de elementos que dado su comportamiento, caen en esta clasificación:

- a) Las variaciones en la reluctancia del entrehierro sobre el polo de una máquina síncrona, establece una variación en el flujo que penetra a la forma de onda y da como resultado la generación de armónicas.
- b) Las rápidas pulsaciones y oscilaciones del flujo magnético, causadas por el movimiento de los polos frente a las salientes de la armadura, son causa de armónicas en máquinas síncronas, aunque su presencia es mínima.
- c) La distorsión de flujos en máquinas síncronas puede ser causada por variaciones en la carga. Variaciones repentinas en la carga dan como resultado cambios repentinos en la velocidad de las máquinas, sin cambios en el flujo, de ahí que se genere una forma de onda distorsionada.
- d) La generación de Fuerzas electromotrices (FEM's) no- senoidales, debidas a la distribución de flujo no-senoidal en el entrehierro de las máquinas síncronas.
- e) Los transformadores generan corrientes de armónicas cuando se sobreexcitan sin carga, lo cual genera un alto contenido de armónicas.
- f) La existencia de pequeñas y limitadas cantidades de corrientes no-senoidales, aunque los voltajes de entrada sean de onda senoidal pura, ocurren en redes que contienen elementos no- lineales. Ejemplos típicos de estos elementos son: rectificadores, inversores, soldadoras, hornos de arco, controladores de voltaje de estado sólido, convertidores de frecuencia, etc.

Fuentes nuevas y futuras de armónicas

Como fuentes nuevas y futuras se consideran a los siguientes dispositivos y mecanismos:

- a) El uso de dispositivos semiconductores o microprocesadores para medidas de control y ahorro de energía, para lograr una mejora en la eficiencia de motores y cargas, los cuales producen formas de onda irregulares de voltaje y corrientes con alto contenido de armónicas.
- b) Otros tipos de control de motores, tales como controles de velocidad, que producen formas de onda irregulares y, por lo tanto, generan armónicas.
- c) La utilización de inversores de energía solar y eólica al sistema de distribución, causa serias corrientes y voltajes armónicos, como un resultado de la forma de onda tan distorsionada que se obtiene a la salida. Estas ondas se pueden propagar, amplificándose en puntos remotos del sistema.
- d) El desarrollo potencial y uso extendido de vehículos eléctricos, incrementará las armónicas en los sistemas de fuerza debido a la cantidad significativa de energía rectificada en la carga de baterías.
- e) Transmisión de corriente directa en alto voltaje, debido a que la conversión AC-DC produce corrientes de armónicas y la posibilidad de la propagación armónica en el sistema de transmisión. Sin embargo esta fuente es limitada debido al uso de filtros en las estaciones de conversión.
- f) Compensación reactiva controlada por rectificadores de silicio (SCR's) en sistemas de transmisión.

Haciendo un análisis general de algunos de los dispositivos, así como su comportamiento, será posible entender de que forma contribuyen dichos dispositivos a distorsionar la forma de onada del voltaje y/o corriente.

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

Los transformadores y las máquinas rotatorias modernas operando en estado estable no ocasionan, por sí mismos, distorsión significativa en la red. Sin embargo, durante disturbios transitorios y cuando operan en rangos fuera de su estado normal, entonces pueden incrementar su contenido armónico en forma considerable. Dos cargas no-lineales que conviene considerar debido a su contribución armónica son los hornos de arco y la lámparas fluorescentes.

Transformadores.

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionadas entre sí mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones.

El modelo más general utilizado en estudios sobre armónicas, es el que se muestra en la figura 2.1. La resistencia serie, depende de la frecuencia debido a los efectos piel y de proximidad, pero los elementos en paralelo donde se involucran corrientes magnetizantes en paralelo, son por lo general ignorados. Algunos autores recomiendan que para realizar estudios de armónicas, el parámetro R debe de ser variado para mantener un valor constante de $\frac{X}{R}$ contra la frecuencia, debido a que R depende de la raíz cuadrada de la frecuencia. (Teoría de Carlson del modelo de transmisión)

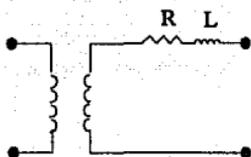


Fig. 2.1 Modelo del Transformador

Aún en esta condición, si graficamos la corriente de magnetización contra el tiempo para cada valor de flujo, la forma de onda resultante dista mucho de ser senoidal. Cuando se incluye el efecto de histéresis, esta corriente magnetizante no senoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se observa se debe a las armónicas de orden de múltiplos de tres (armónicas triples), pero principalmente a la tercera. Por lo que para mantener una alimentación de voltaje razonablemente senoidal, es necesario proporcionar una trayectoria para esas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta.

Con transformadores de tres piernas, las fuerzas magnetomotrices de las armónicas triples están todas en fase y actúan en cada pierna en la misma dirección. Por lo que la trayectoria para el flujo de armónicas triples debe regresar por el aceite y la carcasa del transformador y la alta reluctancia de dicha trayectoria reduce el flujo de armónicas triples a un valor muy pequeño. Las componentes de la quinta y séptima armónicas también pueden ser considerables, 5 a 10%, como para producir distorsión apreciable que no se puede ignorar.

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

Al desenergizar un transformador, es posible que retenga flujo magnético residual en el núcleo. Cuando se vuelve a energizar, la densidad de flujo puede alcanzar niveles pico de hasta tres veces el flujo de operación normal. Este efecto puede llevar al

transformador a niveles extremos de saturación y producir corrientes de magnetización de 5 a 10 p.u. de la corriente nominal. El decremento de esta corriente de energización con el tiempo es función principalmente de la resistencia del devanado primario. Para transformadores muy grandes, esta corriente puede permanecer por algunos segundos debido a su baja resistencia.

Máquinas rotatorias

Si tomamos el devanado trifásico de una máquina rotatoria suponiendo un entrehierro constante y la ausencia de saturación del acero, al realizar un análisis de Fourier de la distribución de las fuerzas magneto motrices (fmm's) se observa que la fmm fundamental es una onda viajera en la dirección positiva, y las armónicas se comportan como la tabla 2.1 lo indica.

Como resultado del contenido armónico de la distribución de la f.m.m. se producen estas armónicas en el tiempo que son dependientes de la velocidad. Estas armónicas inducen una fuerza electro motriz (fem's) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda.

Hornos de arco

Una combinación de retraso en la ignición del arco y las características altamente no-lineales de la curva de voltaje de arco contra corriente introduce armónicas de la frecuencia fundamental. Adicionalmente, los cambios de voltaje ocasionados por alteraciones en la longitud del arco producen una gama de frecuencias, predominantemente de 0.1 a 30 kHz, cada una de ellas con armónicas a su alrededor. Este efecto se hace más evidente en la fase de fundición, en la interacción de las fuerzas electromagnéticas de los arcos.

Los niveles de corriente armónicas varían en forma marcada con el tiempo y se presentan comúnmente en forma de gráficas probabilísticas.

Luz Flourescente.

Los tubos de luz flourescente son cargas altamente no-lineales y dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante. En una carga trifásica de 4 hilos, las armónicas triples, básicamente se suman en el neutro, siendo la tercera la más dominante.

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

Fuentes de armónicas actuales

Las principales fuentes de corrientes armónicas en la actualidad son los inversores y rectificadores con control en ángulo de fase y estos se pueden agrupar de la siguiente manera:

- a) Grandes convertidores de potencia, que se utilizan en la industria metálica o la transmisión de corriente directa en alto voltaje.
- b) Convertidores de mediano tamaño como los usados en la industria manufacturera para control de motores y también en la industria ferrocarrilera.
- c) Rectificación de baja potencia de fuentes monofásicas como en los televisores y cargadores de baterías.

Grandes convertidores de potencia

Su potencia nominal se especifica en megawatts y generalmente tienen mucha más inductancia en el lado de c.d. que en el lado de c.a. Por ello, la corriente directa es

prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de c.d. y como una fuente de corriente en el lado de c.a. Más aún, con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son exactamente iguales en todas las fases.

Mediante un análisis de Fourier en un circuito equivalente de un convertidor típico se puede observar que las componentes armónicas de la forma de onda de corriente no existen armónicas de orden par, las armónicas de $n = 1, 4, 7$ son de secuencia positiva y la de orden 5 es de secuencia negativa.

<u>Orden de armónica</u>	<u>Secuencia de Fase</u>
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
7	+
8	-
9	0

Tabla 2.1 Secuencia de fase de armónicas en un sistema trifásico balanceado

Una observación importante al realizar un análisis de Fourier en convertidores, es que la inclusión de la impedancia del sistema reduce el contenido armónico de la forma de onda de la corriente, siendo el efecto mucho más pronunciado en el caso de la rectificación sin control. Con ángulos de disparo grandes los pulsos de corriente prácticamente no se ven afectadas por la reactancia del sistema de corriente alterna.

Convertidores de mediano tamaño.

El número de convertidores de mediano tamaño (de decenas de kW) está creciendo rápidamente en la industria. las primeras aplicaciones se basan en el controlador de velocidad para motores de c.d. que aún representa el mayor mercado para este tipo de convertidores. sin embargo el énfasis está inclinado hacia la utilización de inversores

y motores de inducción. Más aún, el uso de transistores de potencia y de tiristores GTO (gate turn off) gradualmente están ganando adeptos en las redes de control de motores de corriente alterna.

De manera similar, en el caso de trenes eléctricos, es común utilizar un control individual en cada puente convertidor. Durante el periodo de aceleración inicial, con corriente máxima en el motor de c.d. el puente rectificador produce gran cantidad de corrientes armónicas y opera con un factor de potencia bajo. Para aliviar esta situación a bajas velocidades uno de los puentes se "puentea" mientras que al otro se le aplica el control de fase.

Convertidores de baja potencia

Existen ciertos tipos de cargas cuya potencia nominal no es lo suficientemente grande para ameritar un tratamiento importante, más sin embargo estos dispositivos toman fuerza cuando un gran número de unidades se encuentran activas en forma simultánea.

Otras fuentes de armónicas

1.- Televisores

Los televisores generalmente se alimentan por un rectificador y una alta capacitancia suavizante. Algunos receptores de generaciones anteriores utilizaban rectificación de media onda y por lo tanto producían niveles considerables de armónicas de orden par. Un registro de corrientes realizado hace algunos años muestra valores pico a las 21 horas que se considera la hora pico para ver televisión.

Los aparatos receptores modernos utilizan rectificación de onda completa y más recientemente se ha añadido un tiristor, el cual dispara en los picos de voltaje a manera de proteger los circuitos electrónicos. Sin embargo produce altas corrientes pico, con un mayor contenido armónico.

Los receptores a color demandan una corriente pico de 2 a 3 veces mayor que la de un receptor monocromático.

En estudios estadísticos realizados en Francia, se concluyó que en la mayoría de los casos, la cresta de armónicas coincide con la cresta de onda fundamental, de manera que las armónicas de las diferentes fuentes refuerzan el pico. También se observó que la armónica más fuerte es la tercera que se suma en el circuito neutro, dando lugar a grandes corrientes indeseables en el circuito donde idealmente no debería haber corriente.

La tendencia en los receptores a color es hacia reguladores a base de transistores e inversores con protección para sobretensiones y sobrecorrientes y mejoras en la eficiencia de los circuitos. Sin embargo, cada vez mayor número de aparatos en el hogar compensa la reducción de corriente que demanda cada unidad. Por otro lado, no es probable que se reduzca la componente de tercera armónica, excepto a un gran costo para el consumidor.

2.- Cargadores de baterías

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

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

Análisis de armónicas y fuentes que las producen

Las redes que contienen parámetros no-lineales de circuito, siempre tendrán corrientes con forma de onda no senoidal, aún cuando el voltaje que se les aplique sea de onda puramente senoidal. Estas "no linealidades" causan que las formas de onda de los voltajes así como de las corrientes, se distorsionen. Teniendo ésta forma de onda, no importando si ésta fuera de una sola fase o de tres fases, su contenido armónico puede ser analizado. El análisis para determinar la magnitud y orden de las armónicas se encuentra usualmente basado en el Teorema de Fourier o en la transformada rápida de Fourier. A continuación se despliega una lista en donde se exponen las fuentes de armónicas, indicando según el caso la componente armónica que generan.

A. TRANSFORMADORES

- 1.- Conexión estrella-estrella: Terceras Armónicas
- 2.- Corriente magnetizante: Segunda y cuarta armónicas
- 3.- Corrientes parásitas: histéresis, eddy, etc.

B. HORNOS DE ARCO

- 1.- Acción rectificadora del arco: armónicas dominantes
 - Segunda, 8%
 - Tercera, 6%
 - Cuarta, 3%
 - Quinta, 4%
 - Sexta, 1%
 - séptima, 3%

2.- Otras frecuencias en menor grado.

3.- Dos porciones del ciclo del horno:

- Fusión
- Refinación

4.- Hornos de arco de corriente directa

C. CONVERTIDORES DE FRECUENCIA ESTÁTICA

1.- Teoría rectificadora

2.- Tipos de cargas

a) Electroquímicas, de aluminio, etc.

1.- Multi pulsos

2.- Mejoramiento y filtrado de factor de potencia

b. Motores de corriente directa.

1.- Operación de seis pulsos

2.- Operación de doce pulsos

c.- Motores de corriente alterna- frecuencia ajustable

D. MOTORES DE INDUCCIÓN

1.- Embobinados

OTROS DISPOSITIVOS

1.- Dispositivos de descarga de arco

2.- Dispositivos magnéticos saturados

Capítulo 3
Efectos de las armónicas en sistemas de potencia

Capítulo 3

Efectos de armónicas en sistemas de potencia

¿Cuales son los problemas causados por las armónicas?

Durante los años 20's los rectificadores empezaron a extenderse y el primer problema debido a la generación de armónicas fue la interferencia en los circuitos de comunicación (teléfonos), que compartían líneas de cableado comunes; con corriente alterna alimentando las instalaciones de rectificadores.

El acoplamiento inductivo entre las líneas de alimentación de corriente alterna y las líneas de circuito abierto de los teléfonos, inducían voltaje armónico en los sistemas telefónicos, y generaban niveles de ruido altos, de forma que era imposible comprender los mensajes transmitidos por la línea telefónica. La magnitud del efecto resultante, depende del medio de transmisión que se emplee para efectuar la comunicación, sin embargo un incremento del contenido armónico en el sistema, arrojará un efecto perjudicial.

En años recientes, las técnicas telefónicas, que emplean cableado subterráneo y microondas, han aislado los circuitos de comunicaciones de líneas de transmisión o cableado de fuerza -que siempre llevan un contenido armónico- y por lo tanto, eliminan en gran parte este tipo de problemas.

Problemática Actual

Actualmente, una amplia perspectiva de los problemas en redes de potencia arroja como resultado que gran número de fallas son causadas por la existencia de armónicas en el sistema.

Solo por mencionar algunos de estos problemas se pueden mencionar los siguientes:

En máquinas síncronas las corrientes de secuencia positiva y de secuencia negativa se suman y causan un calentamiento adicional en la parte sólida del rotor y esto ocasiona que la vida útil del generador disminuya. Estos efectos son atribuidos principalmente a las armónicas de orden inferior y de grandes magnitudes. Las armónicas de orden superior reducen el torque disponible en las máquinas de inducción, a ciertas velocidades y torques parásitos, con armónicas de orden inferior. Actualmente las armónicas en sistemas de fuerza, son consideradas como la mayor causa que precede la falla de un generador.

La fatiga dieléctrica es proporcional al voltaje de cresta, y es alcanzada fácilmente por voltajes armónicos. La potencia total reactiva, que incluye la fundamental y las armónicas generadas no deben de excederla capacidad nominal del capacitor.

Otro de los problemas asociados con armónicas es la interferencia con el control de ondas y los transportadores de líneas de fuerza. Los sistemas de ondas que utilizan tonos de audio-frecuencias y los sistemas de portadores, emplean frecuencias en el rango de los 5 a los 50 kHz, sirviendo como líneas de comunicación realizando operaciones de apertura y cierre entre líneas remotas, control de cargas y medición. Las armónicas y el ruido generado a altas frecuencias, pueden producir interferencia que arroja como resultado una operación indeseable, o falta de operación en los equipos de control.

Los sobrevoltajes y corrientes excesivas en el sistema, pueden ser debido a resonancias causadas por armónicas en la red.

Varias son las posibilidades que pueden estar causando este tipo de conflictos; entre ellos se puede mencionar que los bancos de capacitores producen resonancia y esta se transmite a través de la red. Esto a su vez ocasiona la inestabilidad dieléctrica de los cables aislados que componen al sistema.

En la medición del consumo de energía, se generan errores dado que los instrumentos para realizar la medición se encuentran procesando formas de onda distorsionadas por

armónicas, siendo que estos fueron creados para medir formas de onda senoidales, lo que causa que el consumo de electricidad indicado es aún mayor que en la ausencia de armónicas, aunque para las armónicas producidas en la actualidad este error no excede el 1%.

La existencia de armónicas en los sistemas de transmisión y distribución seguramente incrementarán las posibilidades de interferencia de señales y mal funcionamiento de relevadores de protección, particularmente a los sistemas controlados por microprocesadores y elementos de estado sólido.

Las armónicas del sistema afectan la operación del relevador de una forma compleja. Aquellos que dependen para su operación de picos de voltaje/corriente o ceros en el voltaje obviamente se ven afectados por la distorsión armónica. Los relevadores electromecánicos (con disco de inducción) se afectan por la presencia de corrientes armónicas que resulta en componentes adicionales al par que alteran las características de retraso de tiempo de los relevadores. Los relevadores de tierra no pueden distinguir entre la corriente de secuencia cero y la corriente de tercera armónica por lo que corrientes excesivas de tercera armónica puede ocasionar la operación de relevadores de tierra.

En general los relevadores tienen una tendencia a operar más lentos y/o con valores de operación mayores. Los relevadores estáticos de baja frecuencia se vuelven susceptibles a cambios sustanciales en las características de operación, los de sobrecorriente y sobretensión (según el fabricante) exhiben diversos cambios en las características de operación, o dependiendo del contenido armónico los pares de operación de los relevadores se pueden invertir, los tiempos de operación pueden variar ampliamente como función de la combinación de frecuencias en la cantidad media y pueden deteriorar la operación de alta velocidad de los relevadores diferenciales.

La interferencia de armónicas en grandes controladores de motores, es una de las causas reportadas, en la falla de motores y la uniformidad en el voltaje de salida.

Claro está que este tipo de efectos, dependerán directamente de la fuente de armónica de la que se esté tratando, así como de la configuración del sistema de distribución, y

de las características de la red que promuevan la propagación de armónicas en la red.

El incremento en el uso de cargas no lineales, principalmente, el regreso de la transmisión en corriente directa y la proliferación de electrónica de potencia están causando un incremento en la ocurrencia de problemas causados por armónicas en sistemas de potencia.

Antecedentes

Para hacer frente a este problema, las características de carga del sistema deben ser estudiadas y entendidas mediante el estudio de la respuesta de la carga, ante una forma de onda distorsionada en sus terminales. La distorsión que nos ocupa aquí, es la de voltaje periódico no-fundamental resultado de la operación de los elementos no-lineales conectados al sistema.

Este voltaje periódico, algunas veces (pero no siempre) se encuentra constituido de armónicas múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema. El efecto de distorsión de voltaje se puede dividir principalmente en:

- Fatiga de los aislamientos debido a efectos de voltaje.
- Falla en la carga. Se entiende como falla en la carga, a algún tipo de anomalía en la operación de la misma o falla causada por distorsión de voltaje, debido a que mucho equipo electrónico, basa su funcionamiento en que su entrada sea una forma de onda senoidal.

Fatiga térmica debido a armónicas

El calentamiento excesivo en transformadores es provocado por el incremento en pérdidas que son el resultado de corrientes armónicas. Estas pérdidas son las siguientes:

- Pérdidas del cobre
- Pérdidas del Hierro: histéresis, corrientes de eddy, corrientes parásitas
- Pérdidas dieléctricas

La fatiga en los aislamientos depende principalmente de la magnitud del voltaje instantáneo y en segundo término del incremento en el valor del voltaje respecto al voltaje nominal. La presencia de voltaje armónico arroja como resultado un incremento en el valor de cresta del voltaje y por lo tanto incremento en la fatiga del aislamiento. Con respecto a las pérdidas del cobre, podemos decir que la resistencia de los conductores eléctricos aumenta con la frecuencia. Esta variación se debe al efecto piel (skin) dentro del conductor. El impacto de este efecto se vuelve importante en conductores de gran diámetro, y es aún más dramático en motores de inducción.

En lo referente a pérdidas del núcleo, éstas son de dos tipos: pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. Las pérdidas totales del núcleo son una función no-lineal de la frecuencia y de la densidad máxima de flujo magnético. Para un voltaje armónico dado, se conoce que la frecuencia y la densidad de flujo magnético es proporcional a la corriente armónica. Y por último las pérdidas dieléctricas son importantes en cables y capacitores.

Lo anterior en términos de voltaje, es como sigue:

$$E = 4.44 f N \Phi_m \times 10^{-8}$$

$$\Phi_m = \beta_m \times A = \frac{E \times 10^8}{4.44 f N}$$

$$\beta_m = (10^8 / 4.44 NA) E / f$$

$$K = (10^8 / 4.44 NA)$$

$$\beta_m = K (E/f)$$

En donde:

F_m = Densidad máxima del flujo en el cobre

f = Frecuencia

Entonces la histéresis se encuentra dada por:

$$P_h = K_h f \beta_m^{1.6}$$

y las corrientes de eddy

$$P_e = K_e f^2 \beta_m^2$$

En donde :

K_h = Es una constante dependiente del tamaño del núcleo y calidad en el hierro

K_e = Constante que depende del tamaño del cobre, ancho de las laminaciones y de la resistividad del hierro.

La resonancia de voltaje es el problema más inmediato asociado con armónicas en sistemas de distribución. En los bancos de capacitores la impedancia del capacitor disminuye con la frecuencia. Por esta razón los bancos de capacitores actúan como

sumidero de armónicas (cortos circuitos). En un sistema con fuentes de armónicas distribuidas, las armónicas convergirán en el banco de capacitores. Estos bancos para distribución forman un circuito resonante con la inductancia de las líneas de distribución a una frecuencia próxima a la armónica de interés. En este caso las armónicas se pueden amplificar en el sitio de los capacitores y en la práctica se encuentran limitadas por los siguientes factores:

- Las fuentes de armónicas no son fuentes de voltaje ideales.
- La resistencia del circuito aumenta con el orden de las armónicas reduciendo así el factor de amplificación.
- La inductancia del circuito disminuye con el orden de la armónica lo que empuja a la frecuencia de resonancia a valores mayores donde la atenuación es alta.

Estas limitaciones no significan que la presencia de capacitores no pueda afectar adversamente la operación del circuito por motivo de las armónicas. Estas condiciones de resonancia se pueden predecir con programas de computadora (existentes en el mercado) capaces de analizar la respuesta en frecuencia de los elementos del sistema de potencia. por mencionar algunos de ellos, se tiene: CYMHARMO, de la compañía CYME, el cual permite al usuario evaluar y predecir las distorsiones por armónicas en sistemas de potencia, mediante la evaluación de la respuesta en frecuencia de la red. Otro producto similar, es el de la compañía EDSA, llamado: EDSA Design Master Electrical Transmission and Distribution Systems, el cual incorpora programas de análisis y de diseño.

Las corrientes armónicas a su vez son responsables del calentamiento excesivo en transformadores provocado por el incremento en pérdidas que son el resultado de este tipo de corrientes.

Los efectos en máquinas rotatorias debido a armónicas son los siguientes:

- Calentamiento debido a pérdidas del cobre y del acero.

- Cambios en el par electromagnético que afectan la eficiencia y las oscilaciones torsionales.

Un buen entendimiento de los efectos de las armónicas en las máquinas rotatorias requiere de un buen entendimiento de los campos electromagnéticos dentro de las máquinas debidos a corrientes armónicas. Dada la construcción compleja de estas máquinas, la frecuencia de flujo magnético puede no coincidir con la frecuencia de las corrientes de la armadura. Además, a una armónica determinada, la frecuencia del flujo magnético en el rotor es diferente a la frecuencia en el estator.

El comportamiento de un motor de inducción operando con una fuente de voltaje rica en armónicas, se deteriora debido a que la presencia de armónicas de secuencia negativa genera pares opuestos y la presencia de cualquier armónica incrementa las pérdidas en el cobre y en el hierro. Otro efecto negativo resulta de la interacción del campo magnético generado por una armónica y el campo magnético de la frecuencia fundamental.

Considérese, por ejemplo, la séptima armónica en una máquina síncrona. El campo magnético de la séptima armónica gira con una velocidad relativa al campo del rotor. La interacción de los dos campos produce un par pulsante a una frecuencia de 360 Hz. De forma similar, la quinta armónica generará un par pulsante de 360 Hz. Por lo que los pares de armónicas generan pares pulsantes a 180, 360, 540 etc., Hz. En un sistema típico, el par a 360 Hz. es significativo y resulta en oscilaciones de la flecha del generador. Es posible que la frecuencia natural de la turbina esté próxima a esta frecuencia. En este caso se pueden desarrollar oscilaciones mecánicas resonantes que ocasionen fatiga en la flecha. Estos pares pulsantes, debido a la presencia de armónicas, también resultan en emisiones altas de ruido comparados con una excitación puramente senoidal.

Es sabido que teóricamente, las armónicas afectan equipo de velocidad variable controlados por tiristores, produciendo mal funcionamientos, e incluso provocar que se quemen algunos de sus componentes.

Interferencia a cargas no-lineales

La interferencia con cargas sensibles, como computadores y televisores han determinado que aún con 0.5% de contenido armónico, se produce agrandamiento y reducción periódica de la imagen en la pantalla. En televisores las armónicas afectan el voltaje de pico y pueden causar cambios en el tamaño de la figura de la pantalla y en el brillo.

En computadoras, los estándares de diseño, contemplan límites aceptables de distorsión causada por armónicas en el computador y en los circuitos de suministro del sistema de procesamiento de datos. Los niveles de armónicas medidos en vacío (geométricamente), deben ser menores que el 3% (Honeywell, DEC) o del 5% (IBM). CDC especifica que el valor del voltaje pico efectivo debe ser igual a 1.41V con variación de ± 0.1 volts.

Los problemas mencionados anteriormente pueden ser experimentados incluso por otros consumidores si están conectados a la misma línea de alimentación. Si un consumidor no tenía problemas con la operación simultánea de tiristores controladores, entonces es poco probable que interfiera con otros consumidores. Los consumidores que se encuentran conectados a distintas líneas pueden interferirse los unos a los otros, pero la "distancia eléctrica" que los separa; es decir la impedancia de las líneas, cables y transformadores, puede ayudar a reducir el problema.

Interferencia en las comunicaciones

El ruido en las comunicaciones degrada la calidad de la transmisión e interfiere con las señales. En bajos niveles el ruido causa molestias y en altos niveles la calidad de la transmisión es degradada y origina como resultado la pérdida de información. En casos extremos el ruido puede hacer a un circuito inutilizable.

Las continuas mejoras tecnológicas en sistemas de comunicaciones y potencia demandan reconsideración de los problemas causados por interferencia en líneas telefónicas localizadas cerca de sistemas de potencia.

La señal a niveles de ruido comúnmente usada en circuitos de comunicaciones como medición de calidad de transmisión, debe ser usada con precaución al momento de considerar interferencia en sistemas de potencia, debido a los niveles relativos de potencia (dados en megawatts) y los de circuitos de comunicación (dados en miliwatts).

Debido a la diferencia entre los niveles de potencia, los componentes de pequeñas audiodfrecuencias desbalanceadas aunados a los de potencia de la red, pueden fácilmente producir ruido considerable, cuando se acoplan a circuitos de comunicación. Además el propósito de un sistema de potencia es el de transmitir energía con alta eficiencia pero relativa baja en la pureza de la forma de onda, por otro lado, en un circuito de comunicaciones la forma de onda no debe ser distorsionada porque el contenido de los mensajes es alterado, es por ello que se le da una importancia secundaria a la eficiencia del sistema.

Modelo simplificado del circuito telefónico

Físicamente, un circuito telefónico consiste, en un par de cables trenzados, con equipo terminal asociado, y su modelo simplificado se muestra en la figura siguiente:

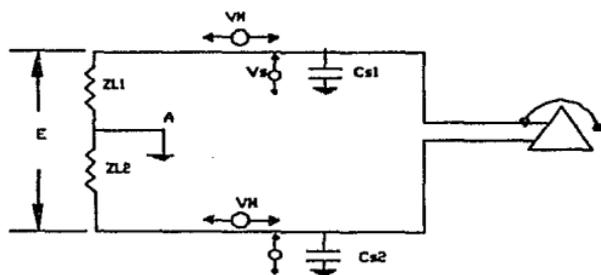


Fig. 3.1 Modelo Telefónico Simplificado

Por seguridad y razones prácticas, los circuitos telefónicos son referenciados a tierra y el circuito equivalente telefónico (ver figura) incluye en sus terminales impedancias Z_{L1} y Z_{L2} referidas a tierra. Un voltaje electromagnético inducido está modelado como un voltaje fuente V_m y un voltaje electrostático inducido tomado como V_s . Las impedancias terminales Z_{L1} y Z_{L2} son generalmente de gran valor en comparación con la autoimpedancia en la línea telefónica y por lo general son ignoradas.

En la ausencia de un conductor de retorno a tierra el circuito de retorno a tierra es completado por las capacitancias aisladas C_{s1} y C_{s2} .

Factores que influyen en la Interferencia

Tres factores se combinan para producir problemas de ruido en líneas de comunicación:

- a) **Influencia del sistema de fuerza.** Esto depende de las fuentes de los componentes de audiofrecuencia, además del sistema de potencia y la magnitud relativa de armónicas desbalanceadas (de voltaje y de corriente) presentes en el circuito de potencia en la vecindad del circuito de comunicaciones.
- b) **Acoplamiento en los circuitos de comunicación.** Esto es el acoplamiento de voltajes y corrientes de interferencia en el circuito de comunicaciones.
- c) **Efectos en los circuitos de comunicaciones (susceptibilidad).** El efecto del ruido de interferencia en un circuito de comunicaciones depende de las características del circuito y del equipo asociado.

Estos tres factores básicos deben de estar presentes en orden de que exista un problema de ruido. La ausencia de cualquiera de estos tres factores elimina completamente el problema. Una eliminación completa resulta impráctica y el grado del problema va a estar en función de los factores básicos que tengan mayor influencia.

El efecto de la interferencia por armónicas no es uniforme en el espectro de audiofrecuencias. El oído humano estandar en combinación con un aparato telefónico, tiene una sensibilidad de audiofrecuencias máximo, cerca de 1KHz.

Para obtener una indicación razonable del nivel de interferencia de cada armónica, varios sistemas son utilizados para tomar el tiempo de respuesta del equipo telefónico y la sensibilidad del oído humano. Dos sistemas son ampliamente utilizados:

- a) Medición Psonométrica por la Comisión Internacional de Consulta en Sistemas Telefónicos y Telegráficos. (CCITT), usada en Europa.
- b) Medición C-message manejado por la Bell Telephone Systems (BTS) y el Instituto Eléctrico Edison (EEI) usado en Estados Unidos y Canada.

En ambos sistemas las mediciones han sido actualizadas conforme los sistemas de telefonía han sido desarrollados.

La medición psonométrica provee un significado para evaluar el efecto de interferencia que un sistema de potencia tendrá en un sistema de comunicaciones. Asimismo la sensibilidad del oído humano en combinación con un equipo telefónico a audiofrecuencias determinado por el CCITT, se puede determinar mediante varios tipos de curvas que grafican a la frecuencia contra decibeles, según CCITT, Cmessage, etc.

En la práctica, la severidad de los problemas es determinada mediante la ayuda de un psonómetro, el cual es un vólmetro R.M.S. con un filtro conteniendo la frecuencia característica de un teléfono psonométrico.

El C-message es un sistema que utiliza el factor de influencia telefónica (TIF), el cual es un valor adimensional empleado para medir la interferencia de una línea de transmisión de potencia en una línea telefónica.

Capítulo 4 **Métodos de detección y** **medición de armónicas**

Capítulo 4

Métodos de detección y medición de armónicas

Los problemas por armónicas se pueden investigar analíticamente y/o por medio de mediciones en la red eléctrica. Aunque se han desarrollado programas digitales para el análisis de armónicas en los sistemas de distribución, las mediciones de armónicas son necesarias para determinar los valores reales de los niveles de distorsión y verificarlos con las predicciones analíticas. En este capítulo se presenta de forma generalizada la metodología para realizar mediciones de distorsión armónica en las señales de voltaje y corriente en la red eléctrica y se propone un método para controlar el flujo de corrientes armónicas.

Los sistemas eléctricos industriales generalmente se encuentran expuestos a deformaciones de la señal de voltaje por causas tales como saturación del núcleo de reactores y transformadores, cargas desbalanceadas, operación de hornos de arco, etc. El uso de rectificadores y convertidores de gran tamaño, controladores de velocidad de mototres de C.D. con base en tiristores y en general equipo con electrónica de potencia en procesos industriales constituyen fuentes potenciales de armónicas en la red.

Es necesario entonces, caracterizar el contenido armónico en diversas partes de una red eléctrica para determinar si su nivel no excede los límites establecidos por las normas. En ciertos casos deberán de tomarse las medidas necesarias para controlar las armónicas.

Ahora bien, es de gran importancia el utilizar un modelo de componentes del sistema preciso al momento de realizar estudios sobre armónicas. En muchos de los casos, componentes convencionales del sistema de fuerza son tomados como elementos lineales, es decir que no tienen interacción entre armónicas de distinto orden. Las no-linealidades de los transformadores debido a la saturación y a la histéresis son por lo general olvidadas, y muchos de los componentes son modelados con combinaciones apropiadas de grupos de resistores, capacitores y elementos inductores, que son susceptibles de variar con la frecuencia. Las cargas no lineales son tratadas como

fuentes de corriente constante y son descritas en términos de ecuaciones de corriente, voltaje o potencia. Es importante el manejo de los modelos de algunos de los elementos más comunes. En los componentes lineales se asume que no son fuentes de señales armónicas, aunque permitan el flujo de armónicas dentro de ellos. Su impedancia en paralelo equivalente, para el propósito de un estudio sobre armónicas, consiste en un conjunto de elementos de circuito lineales. Los transformadores y máquinas síncronas son productores de armónicas, pero estos son tratados como componentes lineales, dado que las armónicas que estos producen son relativamente pequeñas en comparación con aquellos que producen grandes problemas tales como los convertidores. En algunos casos no es posible el plantear las ecuaciones exactas de un componente, entonces es necesario recurrir a simplificaciones para su modelado.

Es importante, según el caso plantear el modelo adecuado del componente a estudiar, empleando para ello todas las consideraciones de cada uno de los componentes.

Cargas lineales Generalizadas.

Es difícil modelar muchos de los sistemas de fuerza, dado que la composición exacta de los mismos, en muchas ocasiones es desconocida al propio usuario. El autor Pileggi sugiere que en ausencia de información específica en la composición de la carga, esta debe de ser modelada como si fuera una resistencia en paralelo con una inductancia o capacitancia también en paralelo, seleccionada tomando en cuenta la respectiva potencia activa o reactiva a 60 Hz.

Algunos de los principales autores sobre el tema, piensan que de todos modos, el uso de series de elementos inductivos producen erróneamente grandes impedancias en paralelo aunadas a grandes múltiplos de armónicas; aunque en el término resistivo ha sido probado el hecho de que se tiene un gran efecto de disminución en la propagación de armónicas.

Distinción de Componentes

Componentes lineales

Se consideran como componentes lineales a los elementos que tienen un comportamiento que sigue una constante en su comportamiento la cual es posible predecir matemáticamente, dado que cumplen con los teoremas de linealidad y son funciones continuas. Se consideran como componentes lineales en los circuitos eléctricos a los siguientes:

- Líneas de transmisión y Cables
- Transformadores
- Capacitores
- Inductores
- Máquinas síncronas
- Máquinas de inducción

Componentes No-lineales

Los componentes no lineales, son aquellos elementos que en su operación periódica no tienen un comportamiento constante, y por lo tanto no es posible predecir cual será su comportamiento en un momento determinado.

- Lámparas Fluorescentes
- Convertidores de línea conmutados
- Convertidores de pulso modulado
- Hornos de arco

Límites de armónicas

Para estudiar el efecto producido por las armónicas hay que medir la distorsión producida, analizando las formas de tensión y corriente de la red que lo alimenta en sus componentes senoidales, que son la fundamental a 60 Hz y las componentes armónicas que son múltiplos enteros de 60 Hz.

El valor eficaz de una tensión armónica V_n de orden n se expresa como un valor en porcentaje (%) del valor eficaz de la tensión fundamental.

El valor total de tensión distorsionada por contener armónicas, está expresado en por unidad del valor de la tensión fundamental según la expresión siguiente:

$$V_t = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}$$

Donde: V_t = valor total de tensión distorsionada en pu

V_n = valor eficaz de una tensión armónica de orden "n" en pu

De la misma manera, el valor eficaz de la corriente armónica de orden I_n se expresa en por unidad de la fundamental.

Para establecer un criterio o gafa de protección de armónicas es conveniente tener en cuenta que la distorsión de tensión no es el único criterio a tener en cuenta, esto es que bajo ciertas condiciones, se puedan producir corrientes armónicas que sobrecarguen capacitores y filtros sin producir valores excepcionales de distorsión de la tensión.

El factor de distorsión del voltaje (FDV) se define como:

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

En forma análoga el valor de la distorsión de la corriente (FDC) se plantea como:

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

Donde: V_1 = valor eficaz de voltaje fundamental

I_1 = valor eficaz de corriente fundamental

En los siguientes capítulos se muestran las limitaciones que existen a nivel internacional para el control de la distorsión en estos niveles.

Mediciones de armónicas

Una vez que se ha establecido la necesidad de caracterizar las distorsiones de la señal de voltaje en sus componentes armónicas, simplemente porque el tipo de carga corresponde a una de las que se han identificado como generadoras de armónicas, se hace necesario realizar mediciones para caracterizar el nivel de las diferentes componentes armónicas.

En general existen dos maneras de hacer mediciones para determinar las componentes armónicas de una señal de voltaje o de corriente:

- 1.- Determinación directa de las armónicas por medio de mediciones en el dominio de la frecuencia.
- 2.- Medición en el dominio del tiempo para posteriormente determinar el contenido armónico, mediante el análisis de Fourier.

Recomendaciones Generales

Las recomendaciones generales para realizar mediciones de distorsión armónica pueden resumirse en las siguientes:

- 1.- Los componentes del equipo de medición deben de ser móviles, de manera que faciliten la medición en varios puntos del alimentador.
- 2.- Los sensores deben de ser colocados y removidos de manera que no interfieran la operación del sistema.
- 3.- Las mediciones deben de ser confiables al menos hasta la 25a armónica (1500 Hz).
- 4.- La precisión del los instrumentos debe de estar entre un 5 y 10% (según la experiencia de los laboratorios).
- 5.- Para usar con mayor eficiencia el tiempo de medición en campo, se debe registrar en una grabadora analógica de cinta, , particularmente cuando las mediciones a realizar incluyen un gran número de puntos.
- 6.- Medir en dos puntos al menos, uno en la fuente y el otro en un punto remoto.

Equipo de medición

La mejor forma de determinar la existencia de armónicas en una red es la medición directa en puntos seleccionados de la misma donde se hayan identificado problemas o se sospeche que estos pueden producirse. En cualquier proceso de medición de señales para determinar su contenido armónico es necesario considerar los siguientes puntos.

Transductores: Son elementos que convierten el parámetro a medir en una señal a un voltaje proporcional. Como transductores se pueden utilizar transformadores de potencial.

Dependiendo del voltaje de configuración de la red, así como del tipo de carga , el voltaje se puede supervisar en los puntos de interés utilizando transductores de señales adecuados. Por ejemplo, en redes de distribución puede medirse el voltaje en el lado de alta tensión utilizando un transformador de potencial o en el lado de baja tensión con atenuadores de voltaje con anchos de banda adecuados. Adicionalmente puede medirse la corriente con transformadores (toroides) con una respuesta en frecuencia suficientemente grande para registrar las armónicas de alto grado.

La determinación del contenido armónico de una señal tiene una gran dependencia del equipo usado como transductor de señales, por lo que debe de conocerse o determinarse la respuesta en frecuencia de los transductores para evitar que el resultado del análisis se altere. Según pruebas realizadas a los transformadores de potencial, la respuesta a frecuencia se comporta con cierta linealidad hasta cerca de los 1000 Hz, para un voltaje primario de 20 kV. Para el caso de los transformadores de corriente su comportamiento es parecido.

Posiblemente el método más adecuado para registrar la información en mediciones de armónicas sea el utilizar un osciloscopio digitalizador con capacidad de almacenar la información en discos flexibles para su procesamiento posterior en una computadora.

Este método permite determinar el espectro en frecuencia (Análisis de Fourier) computacionalmente. Alternativamente, se puede utilizar un analizador comercial de espectros de señales para este fin. En este caso se requiere almacenar la información de las mediciones en grabadoras de cinta magnética, preferentemente calibradas en cuanto a su respuesta en frecuencia previo a las mediciones.

Equipo de monitoreo y registro

Este puede consistir de un osciloscopio convencional para verificación de las señales y de un registrador.

Tal vez el equipo más adecuado en cuanto a sus simplicidad para registrar las señales medidas sea una grabadora analógica de cinta magnética de varios canales, particularmente en casos donde el número de puntos seleccionados para realizar las mediciones es elevado. Es necesario, si se cuenta con este recurso utilizar cintas de alta precisión debido a que las cintas normales de audio no tienen la respuesta en frecuencia adecuada. La gran ventaja de registrar las mediciones en cinta es que posteriormente se cuenta con información completa de la señal, la cual puede registrarse durante periodos, en los cuales se presentan todas las deformaciones de la señal, por ejemplo en procesos industriales. Esta señal después se analiza mediante un analizador de espectro.

En el caso de contar con una grabadora adecuada conviene considerar la utilización de un analizador de espectro con posibilidades de almacenamiento de información de información, directamente en el sitio de medición. El analizador de espectros para aplicaciones en tiempo real se basa en la descomposición de la señal en componentes armónicas por medio de un análisis en series de Fourier.

Recientemente se ha popularizado el uso de tarjetas digitalizadoras de adquisición de datos con las cuales es posible también el registro de señales para su análisis posterior. Esta alternativa requiere conectar la tarjeta a una computadora personal para su manejo. Es importante, en caso de seleccionar esta alternativa, tener disposición y recursos. Para realizar las adecuaciones necesarias al equipo como a los programas de adquisición de datos para realizar las mediciones de acuerdo a las necesidades, será necesario preparar los programas para poder determinar el contenido armónico mediante el análisis de Fourier. Alternativamente, existen paquetes comerciales de software para el manejo de la tarjeta y el análisis de la información.

Puede así resumirse en forma general que el equipo necesario para realizar mediciones de armónicas es el siguiente:

- Transformadores de voltaje y corriente
- Un osciloscopio digital (para verificación de señal)
- Una grabadora analógica de señal con cinta de alta precisión (Si se encuentra disponible)
- Una analizador de espectros (generalmente disponibles comercialmente como estaciones de trabajo)
- Alternativamente, una PC con tarjeta digitalizadora y programas para adquisición y análisis de datos.

Capítulo 5
Control y atenuación de las
armónicas en sistemas
eléctricos de potencia.

Capítulo 5

Control y atenuación de las armónicas en sistemas eléctricos de potencia

Una vez que se ha determinado la existencia de problemas armónicos y/o resonancia, la solución es proporcionar un camino de baja impedancia en el "bus" de carga, para que de este modo sea posible absorber las corrientes armónicas inyectadas en el sistema.

Esto se puede lograr añadiendo un circuito que consiste en un capacitor y un inductor, sintonizados a la armónica que se desee atenuar, y a esto se le conoce como filtro de armónicas. Para este fin se pueden aún utilizar, los capacitores instalados en la red para corregir el factor de potencia, siempre y cuando estos sean lo suficientemente grandes para soportar la corriente armónica máxima esperada y el voltaje asociado. En algunos casos donde existen varias armónicas con un niveles considerables de distorsión, deberán añadirse varios filtros sintonizados a las frecuencias armónicas de interés. Puede incluso considerarse la división del banco de capacitores utilizados para corrección del factor de potencia en varios bancos más pequeños, posiblemente ubicarlos en varios puntos de la red y sintonizarlos a las frecuencias armónicas encontradas en cada uno de los puntos seleccionados.

Atenuación de armónicas

El objetivo principal de un filtro de armónicas es el de mitigar la amplitud de una o más frecuencias fijas de corrientes o voltajes.

Cuando el único propósito es el de prevenir una frecuencia en particular a la entrada de los componentes del sistema de potencia (por ejemplo el control de rizados en la señal), es posible el uso de filtros serie. Estos filtros consisten en inductores y capacitores en paralelo, que presentan una gran impedancia a frecuencias relevantes. Este tipo de

soluciones no implican que desaparezcan por completo estos problemas, pues cualquier método de atenuación es simplemente eso, un dispositivo que disminuye los efectos.

En el caso de los convertidores estáticos, las corrientes de armónicas que se inyectan al sistema se encuentran controladas por medio del uso de una ruta en paralelo de baja impedancia, a las frecuencias armónicas. El uso combinado de filtros serie y filtros paralelo un filtro en paralelo, es un filtro el cual tiene su frecuencia sintonizada de tal forma que logra que la impedancia capacitiva y la impedancia inductiva sean iguales permite el control y disminución de corrientes y voltajes de armónicas en un sistema de potencia de corriente alterna sin importar la magnitud de su impedancia. Desgraciadamente este tipo de solución es muy cara.

Criterios de diseño de filtros

El tamaño de un filtro está definido por la potencia reactiva que el filtro suministra a la frecuencia fundamental. Específicamente el tamaño del filtro corresponde a la potencia reactiva suministrada por los capacitores. El tamaño total de todas las ramas de un filtro, está determinado por los requerimientos de potencia reactiva de la fuente de armónica y qué tanto este requerimiento puede ser suministrado por la red de corriente alterna.

El criterio ideal para el diseño de filtros es el de eliminar todos aquellos efectos perjudiciales debidos a la distorsión de la forma de onda. Entre ellos se mencionan la interferencia en líneas telefónicas, que es uno de los problemas más difíciles de eliminar completamente. De cualquier forma este criterio de diseño es irrealizable debido a razones técnicas y económicas. Desde el punto de vista técnico es sumamente difícil determinar el avance en la distribución de armónicas a través de la red eléctrica. Por otro lado desde el punto de vista económico, para la reducción de la interferencia en la línea telefónica, es preferible tomar acciones preventivas, más que correctivas, dado el alto costo que estas últimas implican.

Un criterio bastante práctico, sugiere el reducir el problema a un nivel aceptable en un punto común de conexión con los demás consumidores, y expresar el problema en términos de corrientes armónicas, voltajes armónicos o de ambos. El criterio de basarse en el voltaje armónico es aún más conveniente para el diseño de filtros, debido a que resulta más fácil el garantizar que se mantendrá un límite razonable de voltaje, que el limitar el nivel de la corriente, porque en una red de corriente alterna la impedancia varía.

Para de cumplir con los requerimientos en la limitación de armónicas, se deben de satisfacer los siguientes puntos:

- a) Para realizar el cálculo de los voltajes armónicos que se encuentran en el sistema, es necesario que el espectro de corrientes armónicas producido por la existencia de cargas no-lineales se inyecte a un circuito. Este circuito consiste en un arreglo de un filtro en paralelo con el sistema de corriente alterna a frecuencias relevantes.

La siguiente figura muestra el circuito:

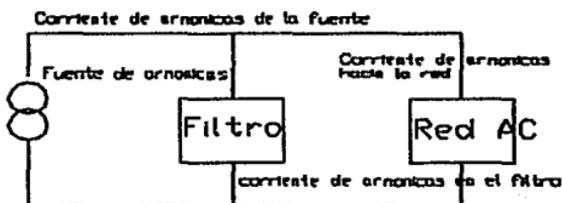


Fig. 5.1 Circuito para el cálculo de distorsión

- b) Los resultados del punto anterior se utilizan para determinar parámetros específicos tales como: distorsión de voltaje D, Factor de influencia telefónica TIF, etc.
- c) La fatiga en los componentes de los filtros, (capacitores, inductores, y resistores) pueden ser calculada con estos datos y de esta forma determinar sus pérdidas y ganancias.

Tres componentes requieren de análisis detallado para cualquier consideración en el diseño de filtros.

- Fuente de corriente
- Admitancia del filtro
- Admitancia del sistema

Filtros de armónicas

En general el control de armónicas en diferentes situaciones, debe de incluir diversos diseños de filtros, dependiendo de la tolerancia a las distorsiones de voltaje para diferentes tipos de cargas y usuarios.

Para la atenuación de las distintas armónicas se usan los bancos de filtros.

Un filtro consiste en una o más ramas de elementos sintonizados y puede también incluir una rama amortiguada para las armónicas altas.

Normalmente los filtros de armónicas en corriente alterna son conectados al bus para cortocircuitar estas corrientes a tierra y limitar la inyección de corriente al alimentador del sistema de corriente alterna.

Los filtros de armónicas tienen dos propósitos:

- 1.- Reducir los voltajes y corrientes de armónicos en la red de potencia a niveles aceptables
- 2.- Proveer de parte o de toda la potencia reactiva consumida por el convertidor; la restante es dada por los bancos de capacitores en paralelo o por el sistema de corriente alterna. Los filtros de armónicas en corriente directa, sirven solo para reducir armónicas en la línea de corriente directa.

Tipos de Filtros

Al momento del diseño de filtros se deben de tomar en cuenta los modelos existentes para poder determinar cual de ellos es el adecuado.

Así mismo al momento del diseño existe un parámetro básico que se debe considerar primordialmente antes de evaluar la selección de componentes resistivos R , inductivos L , capacitivos C . Este componente es el factor de calidad del filtro Q . Se define como factor de calidad de un filtro a la relación que existe entre la máxima energía almacenada en el sistema y la potencia disipada por el periodo. Mide que tan aguda será la respuesta del circuito (corriente), o la capacidad del circuito para discriminar entre diferentes frecuencias. Entre más alto sea el factor de calidad, menor número de frecuencias tendrán amplitudes mayores de corriente. El factor de calidad se define en términos de R y L , y se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q = \frac{W_r L}{R}$$

donde: W_r es la media entre dos frecuencias.

Al considerar más de una frecuencia en estudio, es necesario entonces hablar de un ancho de banda. El ancho de banda (BW) se define como el intervalo de frecuencias para el cual el ancho de banda no debe de caer por debajo del 70.71% de su valor de resonancia; y se define como:

$$BW = W_2 - W_1$$

en donde BW , es el ancho de banda y W_1 y W_2 son las frecuencias de corte.

Filtros sintonizados

Un filtro sintonizado es un circuito RLC en serie, el cual atenúa a una sola frecuencia en particular. El modelo del filtro y su respuesta en frecuencia se muestran en la siguiente figura:

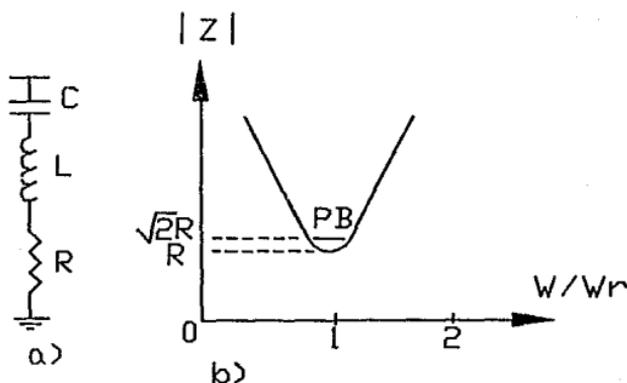


Fig. 5.2 Modelo y Respuesta en frecuencia de un filtro sintonizado

La impedancia del circuito se encuentra dada por la expresión:

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

Filtros automáticos sintonizados

Un filtro automático sintonizado es muy útil para reducir la desviación máxima de frecuencia. Esto puede ser logrado, haciendo que los filtros se sintonicen, ya sea mediante el cierre y apertura automática de la capacitancia o mediante la variación de

la inductancia. El rango de desviación máxima de frecuencia de $\pm 5\%$ es considerado como adecuado. Este tipo de filtros ofrecen las siguientes ventajas:

- a) El costo de los capacitores es bajo.
- b) El capacitor utilizado puede combinar un coeficiente de temperatura elevado y una potencia reactiva alta, por unidad de volumen y por unidad de costo.
- c) Debido a la potencia reactiva alta, las pérdidas de potencia son menores.

Los dos primeros incisos, reducen el costo del capacitor, el cual es el componente más caro del filtro. La tercera ventaja se refiere a la reducción del costo de la resistencia del filtro y del costo de las pérdidas del sistema.

Filtros amortiguados

Los filtros amortiguados ofrecen varias ventajas:

- a) Su desempeño y carga es menos sensible a las variaciones de temperatura, variaciones de frecuencia, tolerancias en la manufactura de componentes, pérdidas en los elementos capacitivos, etc.
- b) Provee de baja impedancia para un espectro amplio de armónicas sin la necesidad de subdividir en ramas paralelas, por lo que problemas por cambios y mantenimiento se ven disminuidos.
- c) El uso de filtros sintonizados a veces da como resultado la existencia de resonancia paralelo entre el filtro y las admitancias del sistema, a frecuencias armónicas por debajo de las frecuencias bajas del filtro, o entre las frecuencias del filtro sin-

tonizado. En esos casos el uso de uno o varios filtros sintonizados es la alternativa más aceptable.

Las principales desventajas de este tipo de filtros son:

- Las pérdidas en los elementos reactivos e inductivos son por lo general altas.
- Para lograr un desempeño a un nivel similar, el filtro amortiguado necesita ser diseñado para valores altos de VA's fundamental; aunque en muchos casos el buen desempeño puede ser logrado dentro de los niveles requeridos para la corrección de factor de potencia.
- Falla de todo el sistema de filtro por falla del capacitor.

Tipos de filtros amortiguados.

Existen cuatro tipos de filtros amortiguados: filtros de primer orden, de segundo orden, de tercer orden y de tipo C.

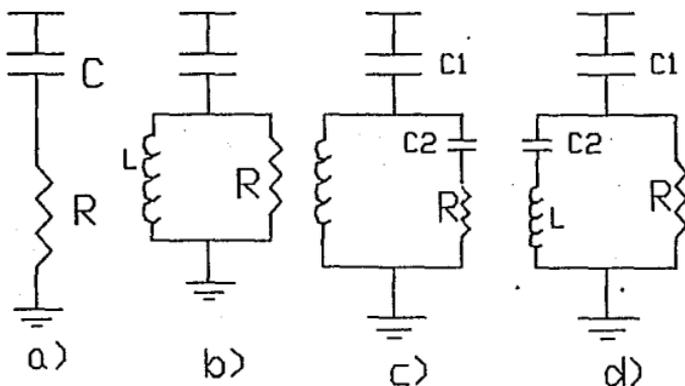


Fig. 5.3 Modelos de filtros amortiguados a) 1er orden b) 2do orden c) 3er orden d) tipo C

La figura anterior muestra los modelos de este tipo de filtros.

- 1.- El filtro de primer orden, no se utiliza normalmente debido a que necesita de un gran capacitor y tiene pérdida excesiva a la frecuencia fundamental.
- 2.- El filtro de segundo orden provee de un excelente desempeño en el filtrado, pero tiene grandes pérdidas a frecuencias fundamentales, comparados con los filtros de tercer orden.
- 3.- La principal ventaja del filtro de tercer orden sobre los filtros de segundo orden es el hecho de la reducción de las pérdidas a frecuencia fundamental, debido al incremento en la impedancia a esa frecuencia causado por el capacitor C_2 . Además el valor del capacitor C_2 es mucho menor al del capacitor C_1 .
- 4.- Actualmente, se han introducido los filtros tipo C, los cuales en comparación con los filtros de segundo y tercer orden, reducen considerablemente las pérdidas a frecuencia fundamental, dado que C_2 y L son elementos serie sintonizados a esa frecuencia. El filtro, sin embargo es más susceptible a las variaciones y desviaciones en las componentes de dicha frecuencia.

Propiedades en los componentes de filtros

Con el conocimiento del valor de la frecuencia fundamental, así como de los voltajes armónicos relevantes en la línea, los valores de voltaje y corriente de los capacitores, inductores y resistores se pueden calcular, y con ellos conocer los valores de las pérdidas de potencia reactiva y activa de los mismos. Para prevenir daños en estos componentes, sus valores deben de estar basados en las peores condiciones que se esperen, por ejemplo: la frecuencia fundamental más alta, la variación de frecuencia más alta, corrientes armónicas provenientes de otras fuentes o de posibles resonancias entre el sistema y el filtro.

Capacitores

Los capacitores se encuentran compuestos de unidades estándar conectadas en serie y/o paralelo para obtener generalmente los valores de voltaje y kVA's deseados.

Las principales propiedades de los capacitores son:

- a) Coeficiente de temperatura de capacitancia.
- b) Potencia reactiva por unidad de volumen.
- c) Pérdida de potencia.
- d) Confiabilidad
- e) Costo.

Para filtros sintonizados, es deseable un valor muy bajo de coeficiente de temperatura por capacitancia, para evitar la des-sintonización causada por los cambios de capacitancia a temperatura ambiente, o por el calentamiento propio de los capacitores durante su funcionamiento. Esta propiedad es irrelevante para filtros amortiguados o para capacitores de potencia.

Los capacitores obtienen su potencia máxima reactiva por unidad de volumen, cuando se encuentran operando a bajos niveles de fatiga por voltajes y cuando se tienen pocas pérdidas. Debido a esto, la operación prolongada a sobrevoltajes debe de ser evitada para prevenir destrucción térmica del dieléctrico o ionización del mismo.

El valor de la potencia reactiva requerida del capacitor es la suma de las potencias reactivas de cada una de las frecuencias a las cuales se encuentra sometido.

Inductores

Las inductancias usadas en los circuitos de filtros deben diseñarse teniendo en mente las frecuencias más altas involucradas, por ejemplo el efecto piel o las pérdidas por histéresis deben de ser incluidas en los cálculos de pérdidas de potencia. Incluso el efecto del nivel de flujo en el hierro, también se deben considerar.

Los valores del inductor dependen principalmente del valor máximo R.M.S. de la corriente y del nivel de aislamiento requerido para resistir a sobretensiones. Normalmente un acoplamiento R-L forma la rama a tierra de un filtro sintonizado.

Costos de filtros.

Un filtro efectivo suprime adecuadamente armónicas al menor costo e incluso suministra potencia reactiva al sistema. Los costos de pérdidas incurridas en los filtros pueden ser cargados al suministro de potencia reactiva y poco a filtrado, aunque no siempre se cumple esta condición.

Las consideraciones siguientes se hacen para el análisis de costos de filtros.

1.- En una instalación típica, un banco de capacitores consiste en una "matriz" de unidades de capacitor, cada una conteniendo un valor nominal que se encuentra prescrito por el voltaje de operación y por la protección externa de un fusible.

El costo de los capacitores es aproximadamente una constante arriba de la matriz mínima que contiene valores máximos. Para valores mayores, se añaden una o dos unidades a cada grupo de series, según vayan siendo requeridas, y de esta forma se puede llegar a un valor razonable y preciso por MVA o por tamaño. Aunque la situación se complica cuando la disponibilidad en el mercado no coincide con los valores nominales calculados, lo más recomendable es recurrir al valor siguiente hacia arriba, con el fin de sobredimensionar al elemento, protegiéndolo de cualquier variación. Se asume además, de que el tamaño del capacitor es proporcional a su costo.

2.- Aunque el costo de inductores de filtros dependen en mucho del tipo de aislamiento que tengan (de aceite, de papel, etc), su costo no varía notablemente entre un valor y otro. La siguiente expresión es útil para el cálculo aproximado del costo de un inductor:

$$\text{Costo} = U_k \cdot U_L \cdot \text{valor total MVAr}$$

en donde, U_k es una constante de costo del componente, y U_L es el incremento del valor de MVar del inductor.

3.- Resistencias

- a) El valor de potencia de la resistencia necesaria para ajuste del factor de calidad Q , en cada rama del filtro afecta sin duda el costo, incrementándolo. La resistencia nominal por unidad es difícil de predecir en un análisis general debido a que depende obviamente del factor Q natural del inductor. Por esta razón y además porque el costo de un resistor enfriado por aire es pequeño comparado con otros elementos, un valor de costo constante se utiliza para realizar el análisis de costo.
- b) Finalmente es asumido el hecho de que la resistencia del inductor para propósitos de cuantificación de pérdidas de potencia, es constante a cualquier frecuencia.

Ideas alternativas para la eliminación de las armónicas.

Dado la complejidad para escoger un filtro, así como sus costos, existen métodos alternativos para el control de armónicas mediante otros caminos. Estos son:

1.- Compensación magnética del flujo

De modo general, el método consiste en el uso de un transformador de corriente, el cual es utilizado para detectar los componentes armónicos provenientes de cargas no-lineales, y estos son alimentados a través de un amplificador, en las espirales de su

embobinado terciario, de tal forma que causan una cancelación de corrientes de armónicas tratadas.

La principal área de atenuación, mediante este método, involucra el acoplamiento de la salida del transformador del embobinado terciario, de tal forma que el flujo de la corriente fundamental no daña el amplificador. Un embobinado cuaternario y un filtro son utilizados para reducir la corriente fundamental en la salida del amplificador.

Una de las ventajas de este método es su habilidad para manejar armónicas triples; pero la principal desventaja, es la falta de capacidad para eliminar armónicas de otros ordenes, sin la necesidad de un gran amplificador de retroalimentación

2.- Inyección de armónicas

Usando este método las armónicas se pueden eliminar añadiendo una corriente armónica a una forma de onda rectangular producida. Este principio se puede emplear para reducir algunas armónicas en un punto específico de operación. Por este método se produce un defasamiento a 180° de las armónicas que afectan al sistema para eliminarlas matemáticamente.

La principal ventaja de este método sobre el filtrado es que la impedancia del sistema no forma parte del criterio de diseño. Aunque su principal desventaja es que se necesita mantener una fuente de armónicas triples constante en sincronía con el sistema.

Capítulo 6
Normalización: Tendencias a
nivel mundial

Capítulo 6

Normalización: Tendencias a nivel mundial

Excepto en algunos casos, tales como subestaciones, grandes instalaciones de rectificadores/inversores de alta tensión, industrias siderúrgicas o industrias electroquímicas, en realidad la existencia de armónicas en los sistemas eléctricos no han sido un problema de consideración. Sin embargo esta situación cambió notablemente al crecer tanto en tamaño como en número la cantidad de cargas no-lineales conectadas al sistema. Esto trajo como consecuencia la introducción en muchos países desarrollados de estándares para la limitación de armónicas a las redes eléctricas.

El término de "estandar" se refiere a las reglamentaciones, guías o recomendaciones que gobiernan la generación a niveles permitidos, de armónicas en el sistema de potencia.

Propósitos Generales

El propósito de estos estándares se resumen de la siguiente forma:

Primero; debido a la necesidad de controlar los niveles de corrientes y voltajes armónicos que el sistema puede soportar, es necesario determinar cuales son las tolerancias de los componentes del sistema a dichos voltajes o corrientes.

Segundo; determinar cuales son los requerimientos de los consumidores conectados al sistema, para sus aplicaciones particulares.

Finalmente; la necesidad de asegurar que el sistema de fuerza no interferirá en contra de la operación de otros sistemas, tales como la red telefónica.

Derechos de los consumidores.

Es muy importante al momento de establecer una norma, el considerar que existen grandes industrias que inyectan grandes cantidades de armónicas a la red, y que por otro lado existen pequeños consumidores que quizá su consumo sea insignificante. En estos casos, lo mejor es determinar quien es el generador de armónicas y que instale filtros que atenúen la inyección de estas al sistema. Estas acciones benefician a los grandes consumidores e incluso a los pequeños.

Establecimiento de niveles de armónicas

El nivel de inmunidad con el que cuenta el equipo eléctrico o electrónico es en general, desconocido. De hecho la tendencia mundial, es a diseñar equipo que ya contenga protecciones contra variaciones de niveles armónicos, aunque esto en realidad, no disminuye el problema. En si el problema principal se presenta en la inyección y propagación de armónicas en la red.

Antes de considerar la fijación de los límites que serán adoptados, es necesario tomar en cuenta los diferentes tipos de cargas que existen, y que tipo de armónicas generan. La primera categoría la constituyen las cargas domésticas, tales como televisores o máquinas lavadoras que por si mismas no constituyen un problema, pero sin embargo su conexión simultánea al sistema ocasiona problemas a la red. Las limitaciones para este tipo de problemas se encuentran contenidas en algunos estándares.

Para los consumidores industriales se han publicado otros tipos de normas, con el fin de ser una guía para el diseñador al momento de expandir la red o como una forma de normar el funcionamiento de la planta.

Con el fin de proporcionar un amplio panorama sobre las tendencias a nivel mundial en la tabla siguiente se pueden apreciar los estándares de algunos países, que de alguna forma, cuentan con un avance tecnológico más amplio, y de los cuales se pueden

elaborar interesantes conclusiones. En su mayoría, estos estándares se enfocan a los límites en porcentaje de distorsión de la onda de voltaje.

Es oportuno comentar en este punto, que en México a la fecha no existen regulaciones por parte de la compañía suministradora de energía eléctrica, para limitar la distorsión armónica en el punto de entrega al usuario. Más sin embargo, la necesidad de una normatividad en este sentido, cada día se hace más latente y seguramente una norma eléctrica, regirá las emisiones de armónicas al sistema en un futuro.

PAIS	REFERENCIA	LIMITES
Alemania	DIN 57160-II, OCT. 1975	5% Arriba de la treceava, 1% en la cienava; 10% total
Polonia	(Recomendación del Instituto de Ingenieros Eléctricos en Katowice, 1980)	7% para 380/220 V, 5% para 6-30 KV, 1.5% arriba de 110 KV
Suecia	(Recomendación de la autoridad de energía eléctrica)	4% arriba de 430/250 V, 3% entre 3.3 y 24 KV, 1% arriba de 84 KV
Reino Unido	European Standard EN 50006- BS, 5406-1976	5% para 415 V (4% armónica impar, 2% armónica par), 4% para 11 KV (3% impares, 1.75% pares)
Estados Unidos	IEEE guide for harmonic control (IEEE STD-No. 519)	5% de 2.4 a 69 KV (u 8% en alimentador de convert- idor únicamente), 1.5% para 115 KV y mayores.
Unión Soviética	GOST 131109-67, Norma del Gobierno	5 % en la terminal de cualquier equipo eléctrico
Francia	Electricité de France	.6% de la fundamental para armónicas normales, 1% para armónicas pico, 1.6% de distorsión total de armónicas. (THD).
Australia	AS-2279-1979	@33KV, (distribución primaria y secundaria) armónicas regulares 2%, armónicas pico 4%, THD 5%, @ 22,33,66 KV , armónicas regulares 1%, armónicas pico 2%, THD 3%, @ 110 KV o más armónicas regulares .5 %, armónicas pico 1%, THD 1.5%.

Capítulo 7
Caso Práctico.

Capítulo 7

Caso Práctico.

Problemas en la Red occidental debido a la adición de bancos capacitores en presencia de corrientes armónicas

Panorama General.

Lugar: Guadalajara, México

No es extraño encontrar porciones de sistemas eléctricos en cuyos elementos han circulado sin restricción y por largos períodos, corrientes con un alto grado de distorsión y solo después de realizarse cambios en la configuración de la red han surgido problemas resonantes delatando la presencia de las componentes armónicas de la corriente.

Hasta el momento se han planteado causas, efectos, medidas correctivas, etc. a un problema en general. En este estudio se plantea el caso real de un planta localizada en la porción occidental de la República Mexicana llamada Compañía Siderúrgica de Guadalajara, la cual se nombrará a lo largo de este estudio como CSG, y que durante años ha operado sin problemas aparentes. La expansión natural de la Red implica cambios que plantean la necesidad de normalizar el grado de distorsión atribuible a cada usuario. Se analizarán sus antecedentes y problemas, así como los orígenes de los mismos y también se plantean soluciones.

Introducción.

El nivel actual de la tecnología ha favorecido la proliferación de dispositivos eléctricos y electrónicos cuyas características de carga no lineales, ocasionan que la corriente que toman de la línea, esté integrada además de la corriente de frecuencia fundamental, por una serie de componentes armónicos cuya magnitud y orden dependen del grado

de distorsión de la corriente. Dichas componentes a su paso por la impedancia de la red producen caídas de tensión armónicas que provocan también la distorsión de la onda de voltaje. Es evidente que estas caídas serán mayores cuanto mayores sean las magnitudes de las corrientes armónicas y cuanto mayor sea la impedancia de la red vista desde el punto de vista de inyección.

Es interesante y hasta irónico que la mayoría de los dispositivos que generan armónicas, son susceptibles de operar en forma incorrecta y aún de fallar cuando se les alimenta con tensiones que distan mucho de ser una senoide pura. Más aún, puesto que todo sistema eléctrico está compuesto por elementos resistivos, inductivos y capacitivos siempre existen frecuencias a las cuales la reactancia inductiva de algún fragmento de la red es igual a la reactancia capacitiva ($X_L = X_C$) y si existe una fuente capaz de generar dichas frecuencias, estas excitarán un modo resonante, serie o paralelo cuya manifestación consistirá en amplificaciones de corriente y/o voltaje limitadas solo por la resistencia del circuito y cuyas magnitudes serán susceptibles de provocar daños por la falla de aislamiento o sobrecalentamiento del equipo expuesto a ellas.

Es de esperarse que los efectos mencionados se vuelvan más severos en la medida que la planta responsable de causar la distorsión sea mayor que un vigésimo ($\frac{1}{20}$) de la potencia de corto circuito de la red.

Para los objetivos de este estudio a continuación se definen algunos términos a emplear durante el desarrollo del mismo.

Punto de Acoplamiento Común (PAC).

Entre la empresa suministradora de energía y la que representa el foco de inyección armónica, es el nodo de la primera al cual se encuentran conectados circuitos que sirven a otros usuarios del servicio eléctrico.

Relación de Corto Circuito (RCC).

Es el cociente entre el nivel de corto circuito de la red medido en el PAC y la potencia en MVA de la fuente de armónicas.

Factor de distribución y/o amplificación (Fd).

Es el cociente entre la corriente armónica inyectada en la red, y la generada por la fuente.

Distorsión de voltaje armónica individual (DVIn).

Se encuentra expresada como el producto de la corriente armónica por la impedancia de Thevenin a la misma frecuencia. Ambas constantes se deben manejar en por unidad (pu).

$$DV_{in} = I_n \cdot Z_{th}$$

Distorsión total de voltaje (DAT).

Se encuentra dada por la siguiente expresión:

$$DAT = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (DV_{In})^2}$$

Distorsión de corriente armónica individual (DCIn)

Es el cociente entre la corriente armónica inyectada a la red y la capacidad total de la planta.

$$DCIn = \frac{I_n}{Sp}$$

Distorsión total de corriente (DCT). Se encuentra dada por la siguiente expresión.

$$DCT = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (DCIn)^2}$$

Factor armónico (Fn).

Es el cociente entre la corriente armónica generada por la carga y la corriente de frecuencia fundamental que esta toma.

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

Conviene aclarar que este no tendrá el mismo valor para cada armónica y cada tipo de dispositivo tendrá sus propios factores a sus armónicas características. La siguiente figura muestra los factores típicos de un horno de arco eléctrico durante el proceso de fundición.

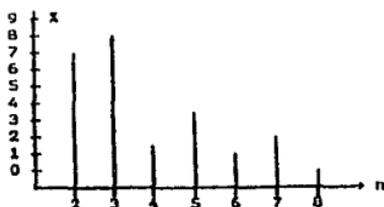


Fig. 7.1 Factores armónicos típicos de un horno de arco

Antecedentes

La expansión de la red eléctrica Occidental incluye la instalación de bancos de capacitores en las barras de 69 KV de las subestaciones de Guadalajara I sur (GDU-69). Atequiza (ATQ- 69) y Tesistán (TSN-69) y en el bus de 115 Kv de Ciudad Guzman (CGM-115).

Es sabido que este tipo de bancos son particularmente vulnerables cuando operan en presencia de voltajes cuyo grado de distorsión revela un alto contenido de armónicas. La figura No.2 muestra el diagrama unifilar simplificado que contiene las condiciones actuales de la red por modelar. Aquí aparece la planta hidroeléctrica de Santa Rosa (SRO) conectada al bus de 161 KV de la subestación Guadalajara II (GUD-161); se sabe sin embargo que para Julio de 1990 dicha planta se conectó a TSN-69, con lo cual el PAC se corrió automáticamente a GUD-230. Actualmente el flicker en GUD-161 es de 3.2% que es objetable. Una vez efectuado el cambio en el flicker en GUD-230 será de aproximadamente 1%, el cual es un valor perfectamente tolerable.

La CSG cuenta con dos hornos de arco eléctrico de 12 MVA, así como dos bancos de capacitores de 4.8 y 6.9 MVAR, respectivamente, tal y como lo muestra la figura 3.

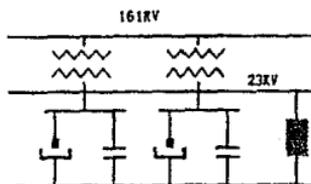


Fig. 7.3 Diagrama unifilar simplificado de CSG

Aunque se sabe que próximamente serán sustituidos el horno grande y un chico por uno de 60 MVA, puede suponerse en uno y otro caso que una demanda máxima de 68 MVA, debida a los hornos es adecuada para el presente análisis.

Se sabe también que la planta esta equipada con un controlador de demanda máxima por lo que las crestas de potencia absorbidas no llegan a exceder 80 MVA tomados en todo el proceso de la planta, de ahí este valor se considerará como la potencia total (SP).

Del nivel de corto circuito en el PAC bajo condiciones de demanda mínima y la capacidad de los hornos se obtiene la siguiente relación de corto circuito:

$$R_{cc} = \frac{1100}{68} = 16.18$$

Aunado al hecho de que la RCC es baja, no existe restricción alguna que impida la libre penetración de corrientes armónicas a la red de la Comisión Federal de Electricidad CFE, por lo que fue necesario practicar un análisis exploratorio, que se enumera a continuación:

- 1.- Determinación de la impedancia entre planta y red.
- 2.- Adopción de niveles de distorsión admisibles.

- 3.- Cálculo de niveles de distorsión actuales.
- 4.- Detección de resonancias en la red de CFE.
- 5.- Proposición de medidas correctivas.

1.- Determinación de Impedancia entre planta y red.

Considerando los hornos como una fuente de corriente armónica, la impedancia que observan estos consiste en el circuito formado por el paralelo entre la impedancia de Thevenin vista desde CSG-23 y los bancos de compensación reactiva de la propia planta tal y como se muestra en la siguiente figura:

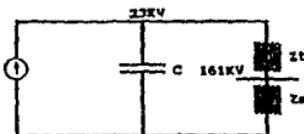


Fig. 7.4 Impedancia vista por los hornos

La frecuencia natural de este circuito está dada por la expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

6

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Donde:

f_0 = Frecuencia natural de oscilación del circuito LC dada en Hertz

n = Armónica o múltiplo de la frecuencia fundamental.

L = Inductancia del transformador más inductancia de la red.

C = Capacitancia del banco de compensación.

ω = Frecuencia fundamental (60 Hz)

A su vez n también puede expresarse mediante la siguiente igualdad:

$$n = \frac{MVAsc}{Qc} = \frac{632}{11.7} = 7.35$$

Donde:

$MVAsc$ = Potencia de corto circuito en CSG-23 (632 MVA).

Qc = Potencia reactiva del banco de capacitores (11.7 MVAR).

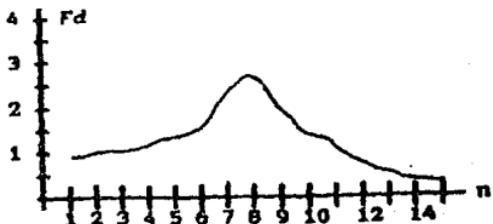


Fig. 7.5 Factor de Distribución de corriente

Del resultado anterior puede anticiparse que la resonancia paralelo entre red y banco dará por resultado una amplificación considerable de corriente entre la quinta y décima armónicas cuyo máximo es alcanzado alrededor de la séptima. Lo anterior significa que corrientes mayores que las inyectadas por los hornos de arco circularán por ambas ramas de este circuito. La figura 5 ilustra lo anterior con claridad, mostrando el factor de distribución F_d , entre la primera y la quinceava armónicas a intervalos de 10 Hz. Puede apreciarse por medio de la fig. 1 que el factor armónico, F_n , para hornos de arco no contiene valores apreciables más allá de la octava armónica, sin embargo los porcentajes entre esta y la quinta son dignos de tomarse en cuenta.

2.- Adopción de niveles de distorsión admisibles.

Con el objeto de mantener un control de calidad adecuado en la energía suministrada a los usuarios y limitar el riesgo de estimular circuitos resonantes, es necesario establecer una cuota en la cantidad de distorsión armónica que puede inyectar una carga al sistema. Las normas internacionales disponibles han publicado los límites contenidos en la tabla 1, en la que pueden confirmarse el grado de congruencia en los valores impuestos en los países incluidos en esta tabla. Para los fines del presente estudio se adoptarán los niveles sancionados por el IEEE.

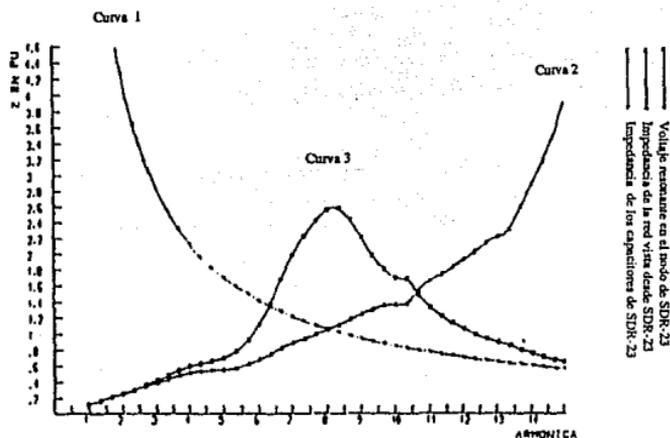
País	Norma	Distorsión Individual							DAT %	DAG %	PAR
		2	3	4	5	6	7	8			
Francia	Electricité de France	0.60	1.00	0.60	1.00	0.60	1.00	0.60	1.60	5.00	V
		---	---	---	---	---	---	---	---	---	I
Suecia	Sef Thyristor Committee	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	1.00	---	V I
U.S.A.	IEEE-518	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	---	V
		0.50	2.00	0.50	2.00	0.50	2.00	0.50	2.50	---	I
		0.90	3.50	0.90	3.50	0.90	3.50	0.90	4.00	---	I
		1.30	5.00	1.30	5.00	1.30	5.00	1.30	6.00	---	I
Reino Unido	G5/3	0.50	1.00	0.50	1.00	0.50	1.00	0.50	1.50	---	V
		5.00	1.00	3.00	4.00	2.00	3.00	1.00	---	---	I
Interna- cional	IEC 36.05	0.50	3.00	0.00	4.00	0.00	3.00	0.40	---	5.00	V I
R.F.A.	DIN 57160	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	10.00	V I
Australia	AS2279	0.50	1.00	0.50	1.00	0.50	1.00	0.50	1.50	---	V I
Finlandia	Restriction of harmonics in elect. net.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	---	V
		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	---	---	I
Nueva Zelanda	Limitation of harmonic levels	0.00	2.30	0.00	1.40	0.00	1.00	0.00	---	---	V
		0.00	2.90	0.00	1.70	0.00	1.30	0.00	---	---	I<
		0.00	5.70	0.00	3.40	0.00	2.50	0.00	---	---	I>

Tabla 1: Niveles de armónicas sancionados por el IEEE

3.- Cálculo de niveles de distorsión actuales.

El estudio exploratorio se lleva a cabo mediante la inyección de 1 pu de corriente en CSG-23, cubriendo el rango de 60 hasta 900 Hz en incrementos de 10 Hz. El programa toma en cuenta, además de las variaciones de la reactancia con respecto a la frecuencia, aquellas derivadas del efecto piel (skin) y la distribución de parámetros de las líneas de transmisión, por lo que la relación de corrientes y voltajes en un mismo elemento del circuito, puede cambiar en forma considerable a distintas frecuencias.

En la figura 23 se observa la variación de las impedancias en función de la frecuencia vistas desde CSG-23. Puede apreciarse como la curva de impedancia de los capacitores (curva 2) cruza la curva anterior aproximadamente a la octava armónica, y es en este punto que el paralelo del circuito inductivo de la red resuena con el circuito capacitivo de los bancos de capacitores dando como resultado la curva 3. Esto confirma el diagnóstico establecido anteriormente.



ESTUDIO DE ARMÓNICAS GENERADAS POR LA SIDERURGICA DE GUADALAJARA
 RESONANCIA ENTRE LA RED Y LOS CAPACITORES DE LA PLANTA SIDERURGICA

CFE/SOC/DEPES/GUADALAJARA

Fig. 7.6 Estudio de armónicas generadas por la siderúrgica

La curva de impedancia resultante representa también el voltaje en pu desarrollado en el citado nodo puesto que como se dijo se considera una inyección de 1 pu lo cual hace que $V_{pu} = Z_{pu}$ en este punto. La corriente real inyectada a cada armónica, sin embargo debe de calcularse a partir de los factores de distribución, y del producto de esta corriente multiplicada por la impedancia armónica respectiva en el PAC, podrá determinarse el voltaje.

1 n	2 f_n	3 F_d	4 I_n	5 I_{amp}	6 Z_{th}	7 DVI	8 DCI
2	0.080	1.008	0.055	19.6	0.1467	0.80	6.85
3	0.090	1.079	0.066	23.7	0.2252	1.48	8.25
4	0.025	1.169	0.020	7.1	0.2917	0.58	2.48
5	0.045	1.291	0.039	14.2	0.2674	1.05	4.93
6	0.020	1.696	0.023	8.2	0.3304	0.48	2.86
7	0.030	2.336	0.047	17.1	0.4611	2.20	5.95
8	0.010	2.589	0.017	6.3	0.5468	0.96	2.20
					DAT	3.250	13.920

Tabla 2 Distorsión armónica bajo condiciones actuales

Lo anterior se condensa en forma cuantitativa en la tabla 2.

La primera columna de esta tabla muestra el número de armónica, mientras que la segunda, contiene el factor armónico utilizado para hornos de arco.

En la tercera columna aparecen los valores del factor de distribución F_d . Puede apreciarse que bajo las condiciones representadas la corriente inyectada a la red es siempre mayor que la producida por los hornos.

La cuarta columna muestra el valor de la corriente en pu; este es obtenido de la siguiente manera:

$$I_n = F_n \cdot F_d \cdot S_h$$

Donde:

I_n = Corriente armónica en p.u.

F_n = factor de armónico de horno.

F_d = Factor de distribución.

S_h = Potencia de los hornos en pu (0.68).

La quinta columna contiene el valor de la corriente a 161KV dado en amperes.

En la sexta columna se localiza el valor en pu de la impedancia de Thevenin vista desde el PAC, mientras que en la séptima aparece cien veces el producto de dicha impedancia por la corriente de la columna 4.

Este producto representa el porcentaje de distorsión armónica de voltaje DVI en el PAC.

En la octava columna aparecen los valores de distorsión de corriente, estos son obtenidos del cociente entre los valores de corriente de la columna 4 y la demanda total de la planta (0.8pu).

Finalmente en la parte inferior de las dos últimas aparecen los valores de distorsión de corriente armónica total y cuya obtención se describió con anterioridad.

Puede apreciarse que la DVI a la tercera (1.48%) y séptima (2.2%) armónicas exceden el 1% recomendado por la norma citada. Así mismo la DAT (3.25%) se encuentra bien por encima del 1.5% considerado como aceptable.

El caso de la distorsión de corriente para valores de RCC como la presente es aún más grave ya que el valor permisible de 0.5% para armónicas pares es excedido en cada caso, particularmente por la segunda (6.85%), que resulta aproximadamente trece veces mayor que el permitido. Lo anterior significa que bajo las condiciones actuales la planta solo podría operar sus hornos a una capacidad del orden de 5MVA a fin de no rebasar dicho límite. A su vez el valor de 2% aceptable para armónicas nones también es superado en cada caso y como es de esperarse el 2.5% reconocido para la DCT es ampliamente vencido por un excesivo 13.9%.

A pesar de estas circunstancias no se han presentado condiciones anómalas directamente atribuibles, por desconocimiento tal vez, a la operación de la CSG, sin embargo, la próxima conexión de bancos capacitores de 18 MVA en las subestaciones mencionadas con anterioridad plantea otro panorama, ya que se hace necesario localizar las frecuencias a los que estos han de resonar con la inductancia presente en la red.

4.- Detección de Resonancia en la red de CFE

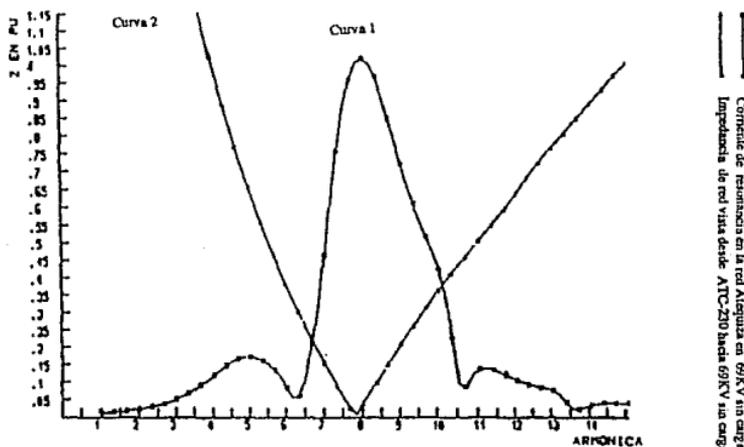
En la tabla Tabla 3 se muestra el contenido de corriente armónica en los bancos referidos. En ella pueden detectarse altas concentraciones de séptima y octava armónicas en el banco de capacitores de ATQ-69. Esto se debe a la desafortunada coincidencia de que el circuito formado por la inductancia del banco de transformación de 230/69 KV, en serie con la capacitancia del citado banco resuena a la misma frecuencia que los capacitores de compensación reactiva de la CSG con la red.

La figura 7.7 muestra como la curva característica de la impedancia vista desde ATQ-230 hacia ATQ-69, sin carga, es igual a la de un filtro cuyo mínimo coincide también entre la séptima y octava armónicas, creando así un libre sendero al paso de las armónicas generadas y amplificadas por la planta siderúrgica. También en esta figura se ha trazado la curva del factor de distribución para los capacitores de ATQ-69. La

cresta de la curva 1, como habría de esperarse alcanza su máximo a la misma frecuencia en que la curva 2 toca fondo.

n	CGM-115		ATQ-69		GDU-69		TSN-69	
	I _{amp}	%I _c						
2	0.31	0.34	0.67	0.44	0.64	0.43	0.58	0.39
3	1.14	1.26	2.24	1.48	2.05	1.35	1.91	1.27
4	0.93	1.02	1.59	1.05	1.32	0.88	1.30	0.86
5	2.99	3.31	4.28	2.84	3.10	2.06	3.33	2.21
6	1.06	1.17	0.94	0.62	0.59	0.40	0.88	0.58
7	0.21	0.24	7.99	5.29	2.31	1.54	1.74	1.15
8	0.49	0.54	5.81	3.85	1.83	1.21	1.69	1.12
T	3.55	3.92	11.20	7.40	5.00	3.32	4.84	3.20

Tabla 3: Corriente armónica en los bancos de capacitores



ESTUDIO DE ARMÓNICAS GENERADAS POR LA SIDERURGICA DE GUADALAJARA
RESONANCIA DE LOS BANCOS DE CAPACITORES Y TRANSFORMACION 230/69 EN ATEQUIZZA

CFE/SOC/DEPES/GUADALAJARA

Fig. 7.7 Curva característica de la impedancia vista desde ATQ-230 hacia ATQ-69

Debido a la relocalización del punto de conexión de la planta hidroeléctrica Santa Rosa de GUD-161 a TSN-69, la planta acerera se convierte en un único usuario conectado a 161 KV por lo que el PAC se recorre automáticamente a GUD-230, en el cual debido a su menor impedancia equivalente se presentarán menores valores de distorsión de voltajes. Adicionalmente, el nuevo valor del nivel de corto circuito (3060 MVA) permitirá mayores niveles de distorsión armónica de corriente. El nuevo valor de RCC es el siguiente:

$$RCC = \frac{3060}{68} = 45$$

El cambio de conexión de la planta mencionada se traduce en un decremento en el nivel de corto circuito de CSG-161 de menos del tres por ciento; con lo que los factores de distribución obtenidos hasta ahora permanecerán inalterados. En la tabla 4 aparecen los valores de distorsión con el nuevo PAC. Al comparar esta tabla con la 2 se aprecia como cambia el valor de la impedancia y como gracias a esta reducción, ningún valor supera a los establecidos por la norma. La distorsión de corriente no es función directa de la impedancia y por lo tanto no sufre cambio alguno, modificándose no obstante, los límites permisibles.

<i>n</i>	<i>I_n</i>	<i>Z_{th}</i>	<i>DVI</i>	<i>DCI</i>
2	0.0548	0.0537	0.29	6.85
3	0.0664	0.0865	0.57	8.25
4	0.0198	0.1212	0.24	2.48
5	0.0395	0.0890	0.35	4.93
6	0.0229	0.0360	0.08	2.86
7	0.0476	0.0940	0.44	5.95
8	0.0176	0.1134	0.20	2.20
		TOTAL	0.910	13.900

Tabla 4: Distorsión armónica en GUD-230

El nuevo valor de la relación de corto circuito está comprendido entre 20 y 50, por lo que los valores individuales de distorsión de corriente serán de 0.9% para armónicas pares y 3.5%, para armónicas nones. En la tabla 4 se advierte que estos valores todavía

son fácilmente rebasados por lo que se deberá continuar con la fase exploratoria del estudio.

La consecuencia de lo anterior se refleja nuevamente en los capacitores de ATQ-69 según lo muestra la tabla 5 en la cual los factores de distribución acusan ampliificaciones de corriente aún mayores que antes de cambiar el punto de conexión de la planta hidroeléctrica. Esto se debe al hecho de que ahora toda la corriente se inyecta en el nodo de GUD-230 en tanto que antes de dividir entre este y la línea de la citada planta.

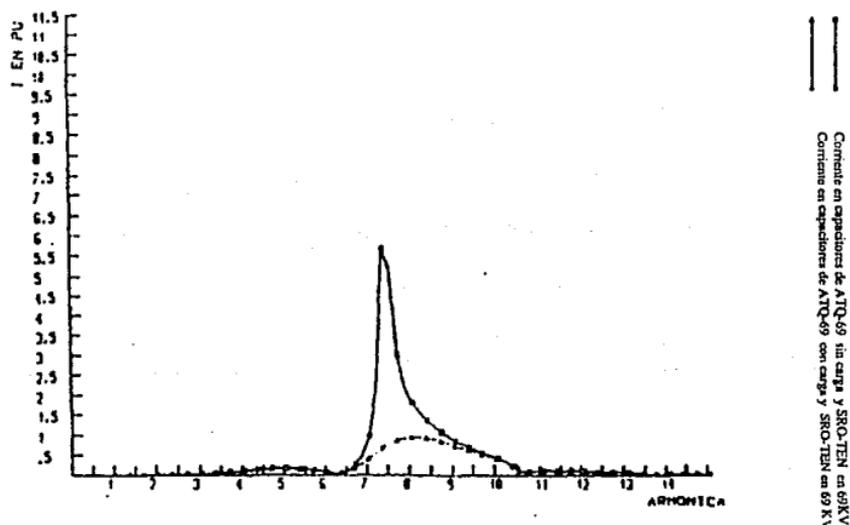
n	SIN CARGA			CON CARGA		
	Id	Iamp	%Inom	Id	Iamp	%Inom
2	0.015	0.69	0.46	0.015	0.69	0.46
3	0.046	2.36	1.57	0.042	2.2	1.46
4	0.123	1.75	1.16	0.108	1.54	1.02
5	0.188	4.82	3.2	0.161	4.13	2.75
6	0.093	1.06	0.7	0.077	0.87	0.58
7	1.01	17.24	11.49	0.417	7.13	4.75
8	1.83	10.44	6.96	0.953	5.43	3.62
		20.97	13.97		10.28	6.85

Tabla 4: distorsión armónica en GUD-230

Se puede intuir y confirmar en la tabla 5 que cuando existe carga en ATQ-69 las condiciones no son tan severas como cuando se desconecta esta, sin embargo debe de tenerse en cuenta que el esfuerzo al que estará sometido el equipo será mayor cuanto menor sea la carga y líneas conectadas a este nodo.

En la figura 7.8 se presentan los factores de distribución para ambos casos descritos. Es de notarse como la cresta de la curva sin carga conectada alcanza un valor de alrededor de 5.7 pu en la vecindad de la séptima armónica, por lo que cabe señalar que debido a las variaciones de frecuencia del sistema y de la propia red, así como las derivadas de impresiones en los datos de esta, o de los parámetros de los equipos por temperatura o tolerancia de diseño, dicha cresta bien podría localizarse sobre la armónica referida, lo cual traducido a amperes a 69KV representaría corrientes del orden de 100A.

Es importante destacar el hecho de que la cantidad de corriente calculada bajo las peores condiciones, representaría una sobrecarga del orden de dos tercios de la corriente nominal de los capacitores, lo cual se traduciría, en voladura de fusibles, fallas de aislamientos, sobrecalentamiento, etc y por ende la reducción de la vida útil del equipo.



ESTUDIO DE ARMÓNICAS GENERADAS POR LA SIDERURGICA GUADALAJARA
FACTORES DE DISTRIBUCION DE LA CORRIENTE EN LOS CAPACITORES DE ATEQUIZA

CFE/SDC/DEPES/GUADALAJARA

Fig. 7.8 Factores de distribución para ambos casos

5.- Proposición de Medidas Correctivas.

Se ha establecido que el problema armónico de la zona analizada es más intenso alrededor de la séptima y octava armónicas y que esto se debe, por una parte a la resonancia paralelo del circuito formado por la CSG y la red de CFE y por la otra a la resonancia serie de los bancos de transformación y compensación reactiva de ATQ. Ambas coincidentes cerca de las armónicas mencionadas. Se puede deducir de lo anterior que la desintonización de uno de estos circuitos deberá resolver el problema de interacción de ambos. El cambio en la especificación de la capacitancia del banco proyectado para instalarse en ATQ-69 de 18 a 12 MVAR, por ejemplo desplazaría el punto resonante de su circuito asociado, hasta la décima armónica, aproximadamente. Esto constituiría únicamente una solución parcial y por lo tanto temporal, ya que tarde o temprano debido al comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos, una nueva resonancia reviviría este problema.

La solución lógica es, por lo tanto, limitar el flujo de armónicas en el punto mismo donde se producen, es decir en la CSG, donde hasta el momento no se ha hecho un esfuerzo importante por controlar dicho flujo.

Evidentemente no se requiere de la colocación de filtros de séptima u octava armónicas ya que el problema existente es derivado de resonancias a estas frecuencias y no a un exceso de producción de las mismas. De los valores de los factores armónicos se sabe que los hornos producen cantidades importantes de segunda y tercera armónicas lo cual es comprobado por los altos niveles de distorsión de corriente mostrados en las tablas 2 y 4, por lo que es de esperarse que mediante la inserción de reactores en serie con los bancos de capacitores de CSG se podrán filtrar y limitar las frecuencias correspondientes a estas armónicas. Así por ejemplo es posible convertir un banco en un filtro de segunda armónica de 7 MVAR y el otro en un filtro de tercera armónica de 8 MVAR.

Procediendo de este modo, en la tabla 6, puede encontrarse la plena solución al problema de distorsión de voltaje, en tanto que solamente la cuarta (1.65%) y la séptima

(2.2%) armónicas son ligeramente excedidas en sus niveles recomendados en lo que se refiere a distorsión de corriente. Estos valores no se consideran como de peligro como se puede advertir mediante la comparación de las tablas 5 y 7, donde se aprecia la substancial reducción de corriente en ATQ-69. Así mismo no se detectan niveles preocupantes a lo largo de la red por lo que la solución sugerida se considera la adecuada.

Después de analizar un gran número de casas a fin de cubrir la mayor cantidad de condiciones de operación, incluyendo contingencias más honerosas en lo que se refiere a distorsión de voltaje y corriente son las de demanda mínima, por lo que los casos analizados pertenecen precisamente a dichas condiciones.

n	I_n	Z_{th}	DVI	DCI
2	0.00021	0.05375	0.0011	0.0260
3	0.00000	0.08658	0.0001	0.0000
4	0.01324	0.12122	0.1605	1.6500
5	0.02574	0.08603	0.2292	3.2100
6	0.01186	0.03603	0.0426	1.4700
7	0.01780	0.09405	0.1670	2.2000
8	0.00596	0.11342	0.0676	0.7400
		DAT	0.3355	4.5300

Tabla 6 Distorsión armónica en GUD230 con filtros

n	F_d	I_{pa}	I_{amp}	$\% \text{ Encos}$
2	0.00005	0.000002	0.0022	0.0015
3	0.00000	0.000000	0.0000	0.0000
4	0.07454	0.001260	1.0600	0.7000
5	0.10888	0.003330	2.7800	1.8500
6	0.04257	0.000570	0.4800	0.3200
7	0.17480	0.003560	2.9800	1.9800
8	0.34640	0.002350	1.9700	1.3000
		TOTAL	4.670	3.100

Tabla 7 Corriente en los capacitores con filtros

Conclusiones

Conclusiones

Con el presente trabajo de tesis se puede concluir que la necesidad de una normatividad en México para la inyección de armónicas al sistema eléctrico de distribución, se vuelve imperativa, ya que se pueden evitar una gran cantidad de problemas para otros usuarios y para la compañía de suministro eléctrico.

Por el momento en nuestro país, no se cuenta con ninguna normatividad sobre la emisión de armónicas al sistema; pero cierto es que ya varias empresas por el tipo de maquinaria que emplean, se han encontrado con grandes fallas en bancos de capacitores, lo que ocasiona que el factor de potencia se empobrezca y entonces sean acreedores a multas por parte de la compañía de luz, y el gran costo de reemplazo de los bancos.

A pesar de que en México todavía no existen controles de armónicas, eso no significa que no existan problemas.

A lo largo de este trabajo de investigación se tratarán diversos conceptos teóricos sobre la existencia de armónicas, de manera que se plantearan las suficientes bases para entender el estudio en particular de un caso tratado por la Comisión Federal de Electricidad.

Esto, además de causar problemas a dichas empresas, causa resonancia en la red interna y por lo tanto daños a usuarios remotos.

La principal limitante para llevar a cabo estudios sobre control de armónicas es como siempre el factor presupuesto. Efectuar un estudio sobre corrección de factor de potencia y control de armónicas es tan costoso que aunque muchas empresas sean afectadas por el problema, prefieren pasarlo por alto, corrigiendo únicamente el factor de potencia (porque éste si se encuentra reglamentado) y olvidando (mientras sopor-ten los bancos de capacitores) el problema de armónicas.

Además, cualquier expansión de la red necesitará de un nuevo diseño o adecuaciones al anterior, lo cual -por supuesto- implicará más erogaciones de presupuesto.

En México, organismos como el Instituto de Investigaciones Eléctricas ofrecen la realización de este tipo de estudios, para diferentes tipos de usuarios.

Son muchos los factores que se deben de tomar en cuenta al momento de estudiar y particularizar en algún problema. Es por ello que para la realización de este trabajo de tesis solamente se recopiló información que brindara un idea generalizada sobre los puntos que fueron tratados.

Definitivamente, todas las fórmulas y algoritmos que se mencionan tratan sobre casos generales, mencionando la teoría básica sobre armónicas, tratando de proporcionar al lector los conceptos principales sobre su manejo.

Por consiguiente, si lo que se desea es efectuar un estudio en particular, se debe de recurrir a un análisis más profundo sobre el problema.

Se recomienda el manejo del análisis de armónicas mediante una P.C. utilizando algunos de los programas existentes para la recopilación y análisis de los datos, pudiéndose obtener datos tan interesantes y tan valiosos como el orden de las armónicas que se encuentran afectando cierto punto del sistema, y el desglose una a una de cada una de ellas. Además, cuentan con simuladores que permiten verificar tolerancias y mejores niveles de control.

En cuanto al caso práctico analizado en el capítulo 7, después de analizar la solución propuesta se considera que ésta es bastante satisfactoria para la Comisión Federal de Electricidad y sus otros usuarios debido al desplazamiento del Punto de acoplamiento común. Sin embargo en la planta siderúrgica, el problema de la regulación de voltaje o flicker continúa presente, que como se comentó en dicho capítulo. Actualmente, la distorsión total de voltaje es superior al 3% en 161kV. Entre las opciones que se presentan para resolverlo, están la adquisición de un compensador estático de Var's, generación interna o el cambio de suministro a 230 kV.

De todas ellas, la última es la solución más factible por su mayor flexibilidad, confiabilidad y economía, pero sobre todo por el hecho de que el nivel de voltaje que ahora surte a la Siderúrgica se encuentra en proceso de desaparición. Por ello en caso de falla de aislamientos, equipo de medición, protección y potencia, la reposición o reparación de estos será, en el mejor de los casos, lenta y costosa.

Bibliografía

Bibliografía

- 1.- J. Arrillaga, D.A. Bardley, P.S. Bodger
Power System Harmonics
John Wiley & Sons
1989

- 2.- IEEE Tutorial Course
Power System Harmonics
IEEE Service Center
1990

- 3.- IEEE
Harmonic Pollution on power systems
IEEE Service Center
1980

- 4.- IEEE
Industrial And Comercial Power system analysis
1985

- 5.- IEEE
Guide for Harmonic Control and reactive compensation
New York
1981

- 6.- Dr. Francisco de la Rosa
Distorsiones causadas por armónicas en sistemas eléctricos
Deptac
1991
- 7.- Luis R. Escalante
Problemas en la red occidental debido a la adición de bancos de
capacitores en presencia de corrientes armónicas,
Comisión Federal de Electricidad
1991