

72



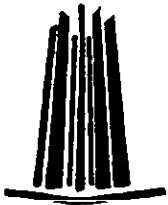
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON**

**ARMÓNICAS: CAUSAS, EFECTOS Y
MEDIDAS CORRECTIVAS EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
SILVESTRE JORGE PARRA BAZÁN

ASESOR:
ING. DAVID MOISES TERAN PEREZ





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

ARMÓNICAS:

**CAUSAS, EFECTOS Y MEDIDAS CORRECTIVAS EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN**

Dedicada a mis padres por su invaluable apoyo

**Joaquín Parra Hernández
Guadalupe Antonia Bazán de Parra**

Gracias a mis hermanos por su confianza

Víctor Eduardo
Juan Daniel
Roberto Ángel
Demetrio Adrián

Prólogo

En un sistema de potencia ideal el voltaje suministrado al equipo del usuario resultaría en una corriente de carga perfectamente senoidal, sin embargo en la práctica dista mucho de ser así, de modo que estas son por lo regular distorsionadas.

El problema de la distorsión no es un problema nuevo, los esfuerzos para limitar sus efectos a proporciones aceptables a sido razón de más estudio por los ingenieros de hoy día que en el pasado, ya que la distorsión típicamente conocida era causada por saturación magnética de transformadores y cargas industriales como la fundición de arco o soldadoras de arco.

En nuestros días sin embargo las armónicas se han convertido en un tema ampliamente discutido debido al considerable incremento de cargas productoras de armónicas (dispositivos no-lineales) conectados a los sistemas de potencia actuales.

La categoría más amplia de los dispositivos no lineales son los convertidores de potencia estáticos (inversores de C.D. a C.A. y rectificadores), controladores de velocidad variable, equipo controlado por computadoras, trenes eléctricos, aparatos eléctricos, etc. En suma el problema es agravado por la tendencia a implementar capacitores en las plantas industriales, con el fin de incrementar el factor de potencia.

La combinación de las fuentes de armónicas de los convertidores y los capacitores puede inducir una resonancia en paralelo entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva de la fuente, resultando en grandes corrientes oscilatorias y consecuentemente altos niveles de voltaje.

***ARMÓNICAS: CAUSAS, EFECTOS Y
MEDIDAS CORRECTIVAS EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN***

Contenido

Agradecimientos

Prólogo

Capítulo 1

Antecedentes _____ 12

Introducción _____ 13

¿Que son las armónicas? _____ 16

Origen de las armónicas en los sistemas de potencia _____ 19

¿Cómo saber cuando es necesario un estudio de armónicas? ____ 20

Capítulo 2

Fuentes de armónicas _____ 23

Fuentes conocidas y establecidas de armónicas _____ 24

Fuentes nuevas y futuras de armónicas _____ 26

Aparatos ferromagnéticos _____ 28

Transformadores

Máquinas rotatorias

Convertidores de energía _____ 31

Grandes convertidores de potencia

Convertidores de mediano tamaño	
Convertidores de baja potencia	
Televisores	
Cargadores de baterías	
Aparatos de arqueo _____	35
Hornos de arco	
Otras fuentes de armónicas _____	36
Luz fluorescente	

Capítulo 3

Efectos de las armónicas en sistemas de potencia 37

Problemas causados por las armónicas _____	38
Antecedentes _____	40
Transformadores _____	41
Capacitores _____	43
Máquinas síncronas _____	45
Interferencia a cargas no lineales _____	46
Computadoras y televisores	
Comunicaciones _____	47
Factores que influyen en la interferencia	
Equipo de medición _____	50
Equipo de protección _____	52

Capítulo 4

Métodos de detección y medición de armónicas __ 66

Cargas lineales generalizadas _____	56
Distinción de componentes _____	57
Componentes lineales	
Componentes no-lineales	
Limites de armónicas _____	58
Medición de armónicas _____	60
Recomendaciones generales _____	61
Equipo de medición _____	62
Equipo de monitoreo y registro _____	63

Capítulo 5

Control y atenuación de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia _____ 66

Atenuación de las armónicas _____	68
Criterios de diseño de filtros _____	68
Filtros de armónicas _____	71
Tipos de filtros _____	72
Filtros sintonizados	
Filtros autosintonizados	

Filtros amortiguados	
Propiedades de los componentes de los filtros _____	77
Capacitores	
Inductores	
Costos de los filtros _____	79
Alternativas para la eliminación de las armónicas _____	81
Compensación magnética del flujo	
Inyección de armónicas	

Capítulo 6

Normalización: tendencias a nivel mundial _____	83
Propósitos generales _____	84
Derechos de los consumidores	
Establecimiento de los niveles de armónicas _____	85
Armónicas típicas de los dispositivos _____	88
Rectificadores	
Hornos de arco	
Transformadores	

Capítulo 7

Caso práctico _____	91
Panorama general _____	92
Introducción _____	93

Punto de acoplamiento común (PAC)

Relación de corto circuito (RCC)

Factor de distribución (Fd)

Distorsión de voltaje armónico individual (DVin)

Distorsión total de voltaje (DAT)

Distorsión de corriente armónica individual (DCin)

Distorsión total de corriente (DCT)

Factor armónico (Fn)

Antecedentes _____	97
Determinación de la impedancia de la red y la planta _____	101
Adopción de niveles de distorsión admisibles _____	103
Cálculo de los niveles de distorsión actuales _____	104
Detección de la resonancia de la red _____	108
Proposición de medidas correctivas _____	114

Conclusiones

Bibliografía

Capítulo 1

Antecedentes

Antecedentes

Introducción

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 electricistas por muchos años.

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.

Por mucho tiempo los motores y las 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 del otro. Sin embargo estos equipos eran muy voluminosos y su mantenimiento era muy costoso.

Mas adelante otro intento por lograr la rectificación eléctrica era acompañado por medios mecánicos. En dicho método el 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 incomodo y colocarlos a tiempo

difícil. Además el problema del costo de mantenimiento no se solucionó pues resultaba más caro que el anterior.

Los rectificadores mecánicos se reemplazaron rápidamente por equipo estático, incluyendo diodos de mercurio, selenio y sílice 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 considerable 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 armónicos.

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.

Los problemas actuales de armónicas se deben a varios factores:

El aumento sustancial de cargas no lineales 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.

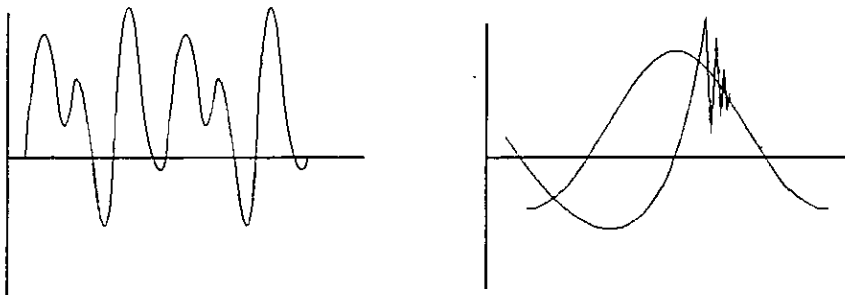
Un cambio en la filosofía de diseño del equipo. En el pasado se tendía al sobre diseño. Actualmente para ser competitivos, el equipo de potencia se diseña en forma mas crítica y en caso de equipos con núcleo de acero sus puntos de operación se encuentran frecuentemente en regiones no lineales. La operación en estas regiones resulta en un incremento de las armónicas.

¿Qué son las armónicas?

Los términos armónicos y transitorios son usados a menudo intercambiamente por los ingenieros, probablemente resulte de la idea de globalizar todos los términos de la frecuencia no energética dentro de una sola categoría, sin embargo estos términos descubren dos fenómenos muy diferentes.

Las armónicas son un fenómeno de estado estable o normal mientras los transitorios como su nombre lo implica, son instantáneos.

Sería más correcto y probablemente menos confuso, si estos dos términos fueran usados como adjetivos; corriente armónica ó evento transitorio en lugar de la práctica común de usarlos como sustantivos. En la Fig. 1.1 se muestra la diferencia entre la un forma de onda armónica y una forma de onda transitoria.



Forma de onda armónica

forma de onda transitoria

Figura 1.1 Forma de onda armónica y forma de onda transitoria

Aunque la causa de que aparezcan señales de corriente no energética en la forma de onda, estas no son periódicas ni continuas, por esto es impropio referirse a ellas como armónicas. De hecho las frecuencias no son armónicas pero deben naturalmente generarse cuando el sistema de potencia oscila al estar sujeto a un cambio brusco.

Las armónicas no son una función de la frecuencia fundamental del sistema de potencia, sino asimétricos, que continuarán existiendo indefinidamente, mientras que los transitorios se amortiguan después de algunos ciclos o inclusive segundos

Las armónicas son voltajes o corrientes o ambos, presentes en un sistema eléctrico con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (50 Hz ó 60 Hz).

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 fundamental. En forma similar con señales eléctricas, una armónica se define como el contenido de una señal cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia del sistema.

Cuando una señal compleja es vista desde un osciloscopio, su forma de onda se observa en el dominio del tiempo. Si la misma señal se alimenta a un amplificador de alta fidelidad, entonces el oído escucha el sonido resultante como una combinación de frecuencias. La forma de onda se puede escribir entonces 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, esto no es en el caso de las señales eléctricas donde la fase relativa de la armónica puede alterar de forma global en forma considerable.

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 del factor de potencia. Bajo dichas condiciones ocurren voltajes armónicos altos que pueden dar a lugar a corrientes dañinas para los capacitores, que son equipos vulnerables a las armónicas. Estos voltajes armónicos ocasionan grandes esfuerzos dieléctricos en los capacitores produciendo que estos fallen.

Ocasionalmente cuando las armónicas parecen ser la causa de los problemas del sistema, es deseable determinar el punto resonancia armónica. 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:

$$hr = \frac{MVAcc}{MVAR}$$

Donde:

hr = Punto resonante por unidad de la frecuencia fundamental

MV_{Acc} = Capacidad de corto circuito del sistema.

$MVAR$ = Potencia reactiva del banco de capacitores

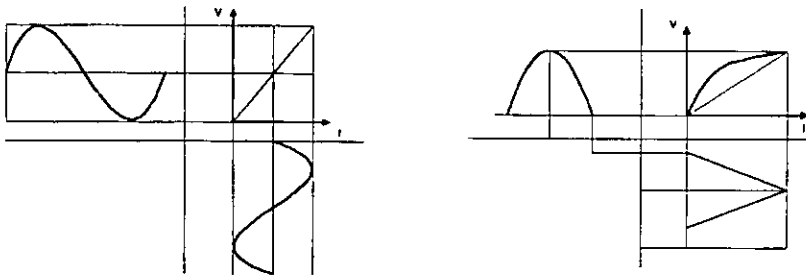
Esta ecuación es útil en la evaluación inicial. Si el punto resonante se encuentra cerca de una de las frecuencias armónicas y existen indicios de su existencia en el sistema, es muy probable que los capacitores se vean afectados.

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

Origen de las armónicas en los sistemas de potencia

La distorsión armónica se debe a los elementos no lineales del sistema de potencia. Un elemento no lineal es un componente en un circuito en el cual el voltaje no es directamente proporcional a la corriente. Si consideramos un inductor con núcleo de aire, observamos que al aplicarle un voltaje la forma de corriente adquiere valores que no son proporcionales con respecto a ese voltaje, esto es en otras palabras que la forma de corriente adopta una forma de onda distinta a la del voltaje aplicado, no así sucede cuando se aplica un voltaje a un elemento lineal, ya que al aplicarle un voltaje la forma de corriente toma la misma forma que la onda

de voltaje creciendo o disminuyendo en forma directamente proporcional, como se ilustra en la Fig. 1.2



Dispositivo lineal

dispositivo no-lineal

Figura 1.2 Ondas de corriente y de voltaje en dispositivos lineales y no-lineales

¿Cómo saber si es necesario un estudio de armónicas?

Aunque es difícil dar un criterio normalizado para definir con exactitud dicha pregunta, los siguientes puntos pueden ser indicadores para llevar a cabo un estudio de armónicas en el sistema.

1. Cuando se añaden bancos de capacitores para corrección del factor de potencia en sistemas que se encuentran constituidos en un 20% ó más de convertidores u otros equipos generadores de armónicas.
2. Para corregir un problema existente como falla de equipo (motores, capacitores, etc.) o una existencia de excesiva distorsión de voltaje o cuando existe interferencia en los equipos de comunicación.

3. En una etapa de diseño durante la selección de equipo, que tienda a generar armónicas.
4. Cuando debido a restricciones de la compañía eléctrica se limita la inyección de armónicas.
5. 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 prevé una excesiva distorsión de voltaje.

El objetivo del estudio es determinar como suprimir o atenuar las armónicas. La técnica generalmente es mediante la utilización de 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 nivel de sobretensiones resonantes, un voltaje distorsionado afecta directamente a los usuarios y puede resultar en calentamiento excesivo del equipo en general, las corrientes también pueden viajar a otras redes a través del alimentador produciendo resonancias locales, resultando en voltajes distorsionados en exceso. Adicionalmente las armónicas incrementarán las pérdidas en el alimentador debido al sobrecalentamiento producido por estas.

La consecuencia más obvia de las armónicas es 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 los equipos de protección o control y la sobrecarga de los equipos de potencia.

El determinar límites de contenido armónico no es una tarea fácil. El conocimiento actual de las 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 el conocimiento de eventos que ya pasaron, por lo que las normas y limitaciones introducidas a la fecha reflejan los resultados de la experiencia práctica pasada con el objeto de prevenir situaciones similares en un futuro.

Las limitantes básicas para un estudio cabal de armónicas se pueden enfocar sobre dos vertientes. La primera es la medición exacta de las armónicas y la segunda son los modelos computacionales para el análisis a detalle de un sistema debido a que los valores arrojados por el programa computacional pueden diferir de los valores reales del sistema.

En los años recientes han ocurrido desarrollos a nivel industrial que se basan en la 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 el equipo tiene una impedancia armónica muy alta. Consecuentemente, los usuarios industriales 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.

En muchos países se han implantado normas que limitan la inyección de las armónicas al sistema eléctrico y han establecido leyes, sancionando 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 ello.

Capítulo 2

Fuentes de armónicas

Fuentes de armónicas

Existe 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 los 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 identificar cual de ellas pudiera estar ocasionando problemas dentro de un sistema de potencia. Las fuentes de armónicas pueden dividirse en dos grupos:

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

Fuentes conocidas y establecidas de armónicas

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

- a) Las variaciones de la reluctancia del entre hierro sobre el polo de la 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 sea 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 la máquina, sin cambios en el flujo, de ahí que se genere una onda de flujo distorsionada.
- d) La generación de fuerzas electromotrices (f.e.m.'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 cantidades de corrientes no pura, ocurre en redes que contienen elementos no lineales. Por ejemplo: rectificadores, inversores, plantas soldadoras, hornos de arco, controladores de voltaje de estado sólido, convertidores de frecuencia, etc.

Fuentes nuevas y futuras de armónicas

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

- a) El uso de dispositivos semiconductores o microprocesadores para medidas de control ahorro de energía, para lograr un ahorro en la eficiencia de los motores y cargas, los cuales producen formas de onda irregulares de voltaje y de corriente 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 onda tan distorsionada que se obtiene a la salida. Estas ondas se pueden propagar amplificándose en puntos remotos del sistema.
- d) El desarrollo potencial del uso de vehículos eléctricos, incrementarán las armónicas en los sistemas de fuerza debida a la cantidad significativa de energía rectificada en la carga de baterías.
- e) Transmisión de corriente en alto voltaje, debido a que la conversión de corriente alterna a corriente directa produce corrientes de armónicas y la posibilidad de propagación de armónicas 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 sílice en sistemas de transmisión.

Haciendo un análisis general de algunos de los dispositivos, así como su comportamiento, será posible entender de qué forma contribuyen dichos dispositivos a distorsionar la forma de onda de 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 fuera del rango 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 las lámparas fluorescentes.

Se puede considerar que en general hay tres tipos de elementos no-lineales en los sistemas de potencia que generan armónicos.

Aparatos ferromagnéticos

Transformadores

En un núcleo normal si 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 debida a los efectos piel y de proximidad, pero los elementos en paralelo donde se involucran corrientes magnetizantes 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 x/R contra la frecuencia, debido a que X depende de la frecuencia.

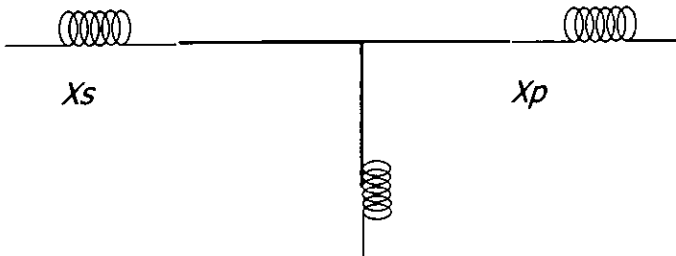


Figura 2.1 circuito simplificado del transformador

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 de onda 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 del orden de múltiplos de tres, pero principalmente a la tercera. Por lo que para mantener una alimentación de voltaje senoidal, es necesario proyectar una trayectoria para esas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados 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 de 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 armónica también pueden ser considerables, entre un 5 y 10% como para producir distorsión apreciable que no puede ser ignorada.

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

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 veces la corriente nominal. El decremento de esta corriente de energización con el tiempo es función principalmente del devanado primario. Para transformadores muy grandes esta corriente puede permanecer por unos 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 magnetomotrices (f.m.m.'s) se observa que la f.m.m. fundamentalmente es una onda viajera en la dirección positiva y las armónicas se comportan como lo muestra la tabla 2.1.

ORDEN DE ARMÓNICA	SECUENCIA DE FASE
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
7	+
8	-
9	0

Tabla 2.1 secuencia de fases de armónicas de un sistema balanceado

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 electromotriz (f.e.m.) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda.

Convertidores de energía

Es difícil de clasificar todos los convertidores de energía dentro de una sola clase porque hay muchos tipos muy diferentes: hay rectificadores, inversores, aunque algunos realizan ambas funciones, convertidores de frecuencia y fuentes estáticas de VARS. Hay controladores de rangos de energía para controlar motores grandes hasta los ligeros, la mayoría de estos aparatos tienen línea conmutada, lo cual implica que el aparato descansa sobre el sistema de potencia para encender o energizar los tiristores o diodos después de que empiezan a conducir. Otros aparatos emplean interrupción electrónica para encender o apagar el flujo de corriente a voluntad.

Los aparatos de línea conmutada son los de mayor interés con respecto a las armónicas. Teóricamente los aparatos de conmutación forzada pueden ser diseñados para producir formas de ondas que estén libres del problema de armónicas. En total la distorsión armónica en la forma de onda de corriente de aparatos de línea conmutada es típicamente del 10 al 30% de la corriente de carga.

Las principales fuentes de 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 y ferrocarrilera para control de motores.
- 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 corriente directa que en el lado de corriente alterna, por ello la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de corriente directa. 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 las de orden 5 es de secuencia negativa, como lo indica la tabla 2.1.

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 afectados por la reactancia del sistema de corriente alterna.

Convertidores de mediano tamaño

El número de convertidores de mediano tamaño, esta creciendo rápidamente en la industria, las primeras aplicaciones se basan en el control de la velocidad para motores de corriente directa, que aún representa el mayor mercado para este tipo de convertidores, sin embargo el énfasis esta 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 le 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 control de corriente directa el puente rectificador produce una 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 activadas en forma simultánea.

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. 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.

La tendencia en los receptores a color es hacia reguladores basándose en transistores e inversores con protección para sobretensiones y sobrecorrientes y mejoras en la eficiencia de los circuitos.

Cargadores de baterías

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

Así como en los televisores, radios, estéreos y otros artículos que emplean corriente directa, los cargadores de baterías producen corrientes armónicas de secuencia cero, las cuales sobrecargan el 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.

Aparatos de arco

Hornos de arco

Una combinación de retraso en la ignición del arco y las características altamente no-lineales en 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 30.0 KHz, cada una de ellas con armónicas a su alrededor. Este efecto se hace 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.

Otras fuentes de armónicas

Luz fluorescente

Los tubos de luz fluorescente 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 de situar adyacentes a las otras cargas y no situarlos como compensación individual de las lámparas.

Capítulo 3

**Efectos de las armónicas en los sistemas de
potencia**

Efectos de las armónicas en los sistemas de potencia

Problemas causados por las armónicas

Durante los años 20's los rectificadores empezaron a extenderse y el problema debido a la generación de armónicas fue la interferencia en los circuitos de comunicación, particularmente los teléfonos que compartían líneas de cableado comunes con corriente alterna alimentando las instalaciones de los 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 en el contenido armónico en el sistema, arrojará un afecto 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 lleva un contenido armónico) y por lo tanto se elimina en gran parte este tipo de problemas.

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

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

En las 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 los 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 exceder la capacidad nominal del capacitor.

Otro de los problemas asociados con armónicas es la interferencia con el control de ondas y de los transportadores de línea de fuerza. Los sistemas de onda 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 sistemas de comunicación y 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 interferencias que arrojen como resultado una operación indeseable o falta de operación en los equipos de control.

Los sobrevoltajes y las corrientes excesivas en el sistema pueden ser debidas 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 este se transmite a través de la red. Esto a su vez ocasiona la inestabilidad dieléctrica de los cables aislados que componen al sistema.

La interferencia de armónicas en grandes controladores de motores, es un 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 armónicas de que se esté tratando, así como 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 carga no lineales, principalmente el regreso de la transmisión de corriente directa y la proliferación de la electrónica de potencia están causando un incremento en la ocurrencia de problemas causados por armónicas en los sistemas de potencia.

Antecedentes

Para hacer frente a este problema, las características de carga del sistema deben de ser analizadas y entendidas mediante un 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 en el sistema.

El voltaje periódico, algunas veces, se encuentra constituido de armónicas que son múltiplos de la frecuencia fundamental del

sistema. El efecto de distorsión de voltaje se puede dividir principalmente en:

- Fatiga de los aislamientos debido a efecto 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.

Transformadores

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

- Pérdidas en el cobre.
- Pérdidas en el hierro.
- 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 con respecto al voltaje nominal. La presencia del 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 dentro del conductor. El impacto de este efecto se vuelve importante en conductores de gran diámetro y es aún más dramático en los motores de inducción.

En lo referente a pérdidas en el núcleo estas 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 del flujo magnético. Para un voltaje armónico dado, se conoce que la frecuencia y la densidad del flujo magnético son proporcionales 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:

$$E = 4.44 f N \phi_{max} \times 10^8$$

$$\phi_{max} = \beta_{max} \times A = E \times 10^8 / 4.44 f N$$

$$\beta_{max} = (108 / 4.44 N A) E / f$$

$$K = (108 / 4.44 N A)$$

$$\beta_{m\acute{a}x} = K (E / f)$$

Donde:

$\phi_{M\acute{a}x.}$ = Densidad máxima del flujo en el cobre.

f = frecuencia.

Entonces la histéresis se encuentra dada por:

$$Ph = Kh f \beta m^{1.6}$$

Donde:

Kh = Constante dependiente del tamaño del núcleo y calidad en el hierro.

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

Capacitores

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 esa razón los bancos de capacitores actúan como sumidero de armónicas (corto circuito). En el sistema con fuentes de armónicas distribuidas, las armónicas convergirán en al 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 las armónicas 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 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 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 DESING MASTER ELECTRICAL TRANSMITION 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.

Máquinas síncronas

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 a la eficiencia y las oscilaciones torsionales.

Un buen entendimiento de los efectos de las armónicas en las máquinas rotatorias requiere de un perfecto conocimiento de los campos electromagnéticos dentro de las máquinas debido 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 de 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 en el campo magnético de la frecuencia fundamental.

Considérese 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 genera un par pulsante de 360 Hz. Por lo que los pares de armónicas generan pares pulsantes a 180, 360, 540 Hz. Etc., En un sistema típico, el par a 360 Hz. Es significativo y resulta en oscilaciones en la flecha del generador. Es posible que la frecuencia natural de la turbina este próxima a esta frecuencia. En este caso se pueden desarrollar oscilaciones mecánicas resonantes que ocasionan 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 que se puedan quemar algunos de sus componentes.

Interferencia a cargas no lineales

Computadores y televisores

La interferencia con cargas sensibles, como computadoras 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 al tamaño de la figura de la pantalla y en el brillo.

En computadoras, los estándares de diseño, contemplan limites aceptables de distorsión causadas por armónicas en la computadora en los circuitos de suministro de los sistemas de procesamiento de datos. Los niveles de armónicas medidos en vacío, deben de ser menores que el 3% (Honeywell, DEC) o del 5% (IBM). CDC

especifica que el valor del voltaje de pico efectivo debe de ser igual a 1.41 Volts. 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 simultanea 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 a ayudar a reducir el problema.

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 perdida de la información. En casos extremos el ruido puede hacer a un circuito inutilizable

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

Debido a la interferencia entre los niveles de potencia, los componentes de pequeñas audiofrecuencias 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 de 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.

Factores que influyen 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 las 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 estándar en combinación con un aparato telefónico, tiene una sensibilidad de audiofrecuencias máximo, cerca de 1 KHz.

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 psicométrica por la Comisión Nacional 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 Canadá.

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 telecomunicaciones. 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.

En la práctica, la severidad de los problemas es determinada mediante la ayuda de un psonómetro, el cual es un voltímetro 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.

Equipo de medición

Los instrumentos de medición básicamente fueron diseñados para medir formas de voltaje y de corriente puramente senoidal.

La magnitud y dirección del flujo de las armónicas son de tomase en consideración debido a los errores que se reflejarían en un aumento o disminución de la lectura en la medición.

El instrumento de medición de energía más ampliamente utilizado es el kilowattorímetro basado en el principio de motor Ferraris cuyo principio de funcionamiento es electromagnético, produciendo flujos que producen impulso y freno que son aplicados

a su rotor (disco), además esta provisto de elementos secundarios para efectos de compensación de fricción y mejora en la precisión de la lectura.

Estos flujos producen torques primarios y secundarios que son esencialmente no lineales en consecuencia de la amplitud y la frecuencia.

La respuesta de este medidor es ineficiente a frecuencias fuera de los parámetros de diseño y producen gran imprecisión.

Una expresión para la potencia total como es vista por el medidor es:

$$\begin{array}{cccc} \text{Potencia total} = & V_{dc} I_{dc} & + V_f I_f \cos \theta_f & + V_h I_h \cos \theta_h \\ & (P_{dc}) & (P_f) & (P_h) \end{array}$$

El equipo no medirá P_{dc} pero será sensitivo a su presencia, medirá P_f con precisión, más no así P_h debido al error determinado por la frecuencia.

La potencia total armónica se obtiene se obtiene de la suma de los productos de las corrientes y los voltajes de todos los armónicos.

Cualquier señal de C.D. suministrada hacia ó generada por el usuario, causará un error proporcional, con una relación de P_{dc}/P_t con una señal de error relacionado al sentido de flujo de la potencia. La potencia de C.D. por si sola no produce torques en el disco, pero si degradan la capacidad de medir la potencia fundamental, además las corrientes directas distorsionan los flujos actuantes y alteran la permeabilidad de los elementos magnéticos.

Similarmente la deficiencia en la medición de la potencia armónica P_h causará un error representado por $\pm K P_h/P_t$. Donde K es un factor dependiente de la capacidad de respuesta del medidor y similarmente la señal de error estará relacionada al sentido de dirección del flujo de la potencia.

Equipo de protección

La existencia de armónicas en los sistemas de transmisión y distribución seguramente incrementarán las posibilidades de interferencia de las señales y mal funcionamiento de reveladores 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 las corrientes 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 de operar más lentos y/o con valores de operación mayores. Los relevadores estáticos de baja frecuencia se vuelven susceptibles a cambios sustanciales debido a sus características de operación, los relevadores 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.

Capítulo 4

Métodos de detección y medición de armónicas

Métodos de detección y medición de armónicas

Los problemas por armónicas se pueden investigar analíticamente y/o por 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 de 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 la 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 motores 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 utilizar un modelo de componentes del sistema preciso al momento de realizar estudios sobre armónicas. En muchos de los casos, componentes convencionales de los sistemas de fuerza no 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 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 del 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 que en algunos casos no es posible plantear las ecuaciones exactas, 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 de las ocasiones es desconocida para muchos de los usuarios. 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 principales autores sobre el tema, piensan que de todos modos, el uso de series de elementos inductivos produce erróneamente grandes impedancias en paralelo aunadas a grandes múltiplos de armónicas; aunque en el termino 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 un patrón en su comportamiento el cual es posible predecir matemáticamente, dado que cumple 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

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 de 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 dicha frecuencia.

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

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

Donde:

V_t = valor total de la tensión distorsionada en P.U.

V_n = valor eficaz de una tensión armónica de orden "n" en P.U.

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

Para establecer un criterio o guía 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 pueden 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:

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

De forma análoga el factor de distorsión de corriente (*FDC*) se plantea como:

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

Donde:

V_1 = Valor eficaz de voltaje fundamental

I_1 = Valor eficaz de corriente fundamental

Medición de armónicas

Una vez que se ha establecido la necesidad de caracterizar las distorsiones de la señal de voltaje en sus componentes armónicos, simplemente porque el tipo de carga corresponde a una de las que se han identificado como generadoras de 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 medición de distorsión armónica pueden resumirse en las siguientes:

1. Los componentes del equipo 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 25^{ava} armónica (1500 Hz.)
4. La precisión de los instrumentos debe de estar entre un 5 y 10%.
5. Para usar con mayor eficiencia el tiempo de medición en campo, se debe de 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 los puntos seleccionados donde se hayan identificado problemas o que 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 de 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 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 en un osciloscopio convencional para verificación de las señales y de un registrador.

Tal vez el equipo más adecuado en cuanto a su simplicidad para registrar las señales medidas sea una grabadora 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, directamente en el sitio de la medición. El analizador de espectros para aplicaciones en tiempo real se basa en la descomposición de la señal en sus componentes armónicas por medio de un análisis en series de Fourier.

Recientemente se ha popularizado el uso de tarjetas digitalizadas 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 de corriente
- Un osciloscopio digital (para verificación de señal)

- Una grabadora analógica de señal con cinta de alta precisión
- Un analizador de espectros
- Alternativamente, una PC con tarjeta digitalizada y programas para adquisición y análisis de datos.

Capítulo 5

**Control y atenuación de las armónicas en los
sistemas de potencia**

Control y atenuación de las armónicas en los sistemas de potencia

Una vez que se ha determinado la existencia de problemas armónicos 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 en 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 aun 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 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 la 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 las 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 implica 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. El uso combinado de filtros serie y filtros paralelo, es un filtro el cual tiene una frecuencia sintonizada de tal forma que logra que la impedancia capacitiva y la impedancia inductiva sean iguales permitiendo el control y disminución de corrientes y voltajes armónicos 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 esta 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, esta determinado por los requerimientos de potencia reactiva de la

fuerza de armónica y que 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 ellas se mencionan la interferencia de las líneas telefónicas, que es uno de los problemas más difíciles de eliminar completamente. De cualquier forma este criterio de diseño es irrealizable debido a las 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 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 cumplir con los requerimientos en la limitación de armónicas se deben de satisfacer los siguientes puntos:

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 filtro en

paralelo con el sistema de corriente alterna a frecuencia relevante. La siguiente Fig. 5.1 muestra el circuito.

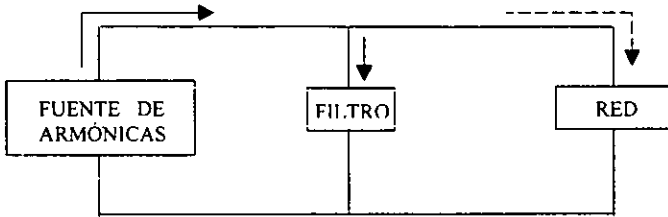


Fig. 5.1 Modelo generalizado para cálculo de voltajes armónicos

- a) Los resultados del punto anterior se utilizan para determinar parámetros específicos tales como: distorsión de voltaje, factor de influencia telefónica, etc.
- b) La fatiga en los componentes de los filtros (capacitores, inductores y resistores) puede 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 de filtro
- Admitancia de sistema

Filtros de armónicas

En general el control de armónicas en diferentes situaciones debe de incluir diferentes 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 pueden 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 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 de considerar primordialmente antes de evaluar la selección de componentes resistivos, inductivos y capacitivos. Este componente es el factor de calidad del 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 o la capacidad del circuito para discriminar entre diferentes frecuencias. Entre más alto sea el factor de calidad, menor numero 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:

$$Q = \frac{WrL}{R}$$

Donde: Wr = 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

ω_1 y ω_2 = 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 se muestra en la figura 5.2

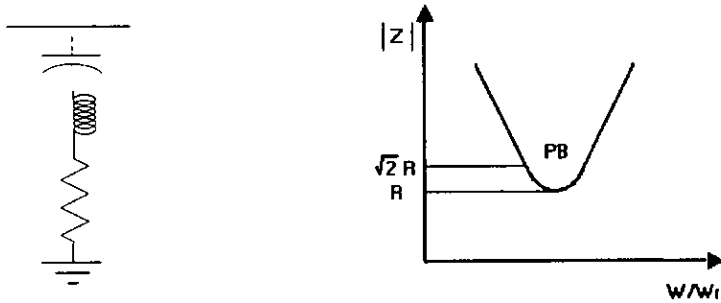


Fig.5.2 filtro sintonizado

La impedancia del circuito se encuentra dada por la expresión:

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

Filtros autosintonizados

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 la 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 muy 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

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

Los filtros amortiguados ofrecen varias ventajas:

- a) Su desempeño y carga es menos sensitiva a las variaciones de temperatura, variaciones de frecuencia, tolerancias a 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 paralela 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 sintonizado. En el caso de uno o varios filtros sintonizados es la alternativa más aceptable.

Las principales desventajas de este tipo de filtros son:

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

- c) Falla de todo el sistema de filtro por falla del capacitor

Tipos de filtros amortiguados

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

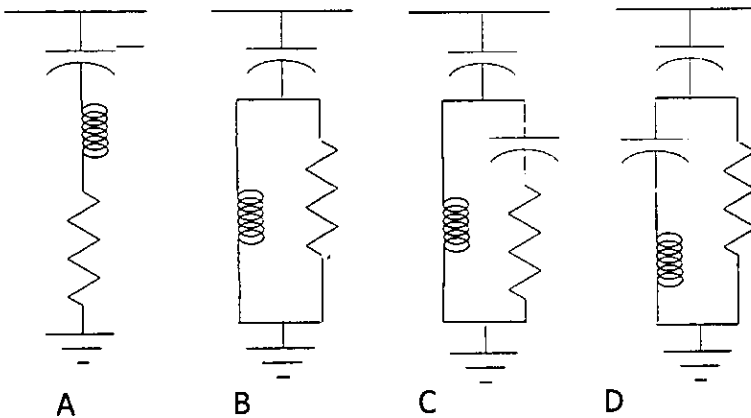


Fig. 5.3 Tipos de filtros, A: primer orden, B: segundo orden, C: tercer orden, D: tipo C

1. El 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 a la impedancia a

esa frecuencia causado por el capacitor C_2 . Además el valor de este capacitor es mucho menor que al del capacitor C_1 .

4. Actualmente, se han introducido los filtros de tipo C, los cuales en comparación con los filtros de segundo y de 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 de los componentes de los filtros

Con el conocimiento del valor de la frecuencia fundamental, así como de los voltajes armónicos relevantes de la línea, los valores de voltaje y de 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 deseados.

Las principales propiedades de los capacitores son:

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

Para filtros sintonizados, es deseable un valor muy bajo de coeficiente de temperatura por capacitancia, para evitar la desintonización 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 de diseñarse teniendo en cuenta las frecuencias más altas involucrada, por ejemplo el efecto piel o las pérdidas por histéresis deben de ser incluidas en los cálculos de pérdidas de potencia, incluso también se debe de considerar el efecto de nivel de flujo en el entrehierro.

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

Costo de los 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.

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

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

El costo de los capacitores es aproximadamente una constante arriba de la matriz mínima que contiene los 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 al tamaño del capacitor es directamente proporcional a su costo.

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

$$\text{COSTO} = U_k \cdot U_l \cdot \text{MVAR}_{\text{valor total}}$$

Donde:

U_k = Constante del costo del componente

U_l = Incremento del valor en MVAR del inductor

El valor de potencia de la resistencia para el ajuste del valor de calidad Q en cada rama del filtro afecta sin duda alguna 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

Capítulo 6

Normalización: tendencias a nivel mundial

Normalización: tendencias a nivel mundial

Excepto en algunos casos, tales como en 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 de estándares para la limitación de armónicas en las redes eléctricas sobre todo en países desarrollados.

Propósitos generales

El propósito de estos estándares se resume de la siguiente forma.

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

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 de armónico, 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 sí 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 otro tipo 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 panorama sobre las tendencias a nivel mundial en la tabla siguiente se puede 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 por ciento 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 la 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 regirá las emisiones de armónicas al sistema en un futuro.

PAÍS	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% impares)
Estados Unidos	IEEE guide for harmonics control (IEEE STD-519)	5% para 2.4-69 KV (u 8% para alimentador convertidor únicamente) 1.5% para 115 KV y mayor
Unión Soviética	Norma de gobierno GOST 131109-67,	5% en la terminal de cualquier equipo eléctrico.
Francia	Electricité de France	0.6% de la fundamental para armónicas normales 1% para armónicas pico 1.6% de THD.
Australia	AS-2279-1979	33 KV (distribución primaria y secundaria) 2% armónicas regulares 4% armónicas pico 5% de THD 22,33,66 KV 1% armónicas regulares 2% armónicas pico 3% de THD 110 KV o más 0.5% armónicas regulares 1% armónicas pico 1.5% de THD

Tabla 6.1 NORMALIZACIÓN: Tendencias a nivel mundial

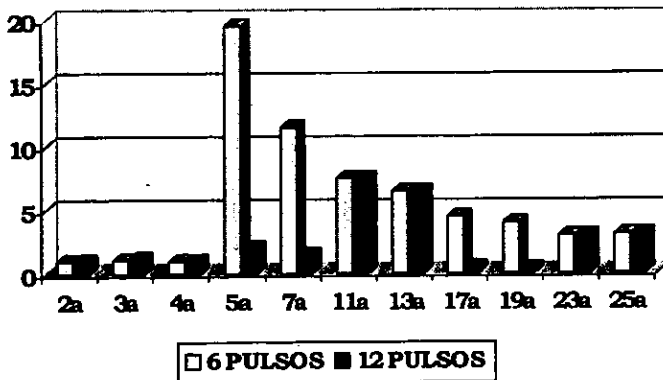
Armónicas típicas de los dispositivos

Rectificadores

Los circuitos rectificadores de seis pulsos tienen una forma de onda muy aproximada a la rectangular con una duración de 120° en ambas mitades de los ciclos positivo y negativo.

La corriente armónica en por unidad de la fundamental es el inverso del orden armónico para esta forma de onda. Sin embargo la corriente de onda de este rectificador no es perfectamente rectangular.

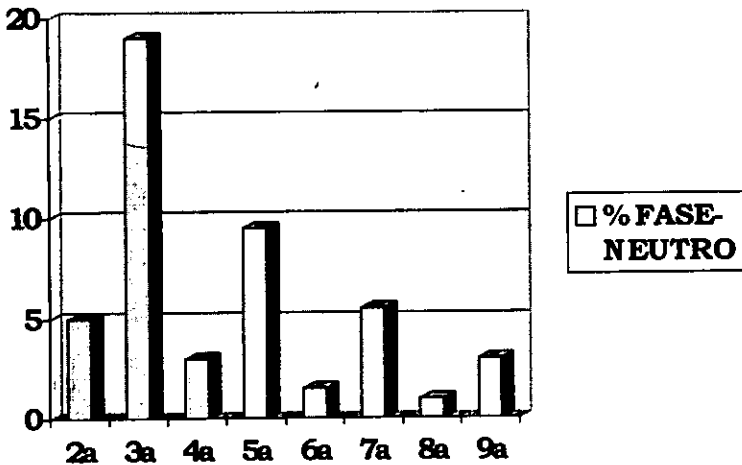
Durante su operación de los controladores de 6 y 12 pulsos los tiempos de disparo del tiristor, pueden variar mínimamente de los 60° de retraso deseado y esto aunado al desbalanceo del sistema producen la existencia de algunas armónicas no características como lo muestra la gráfica 6.1.



Gráfica 6.1 Niveles de armónicas de los controladores de 6 y 12 pulsos

Hornos de arco

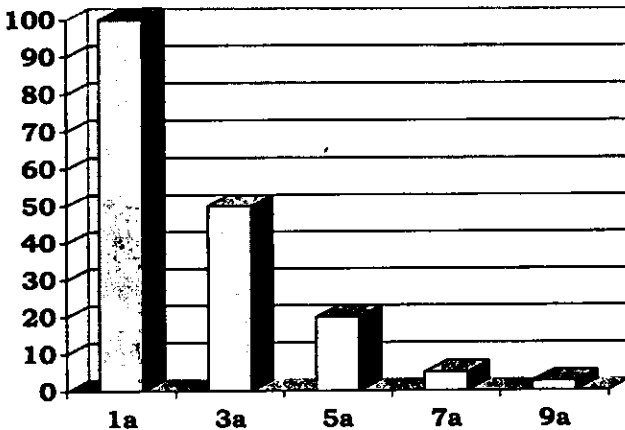
Mediciones hechas en los hornos de arco han indicado una alta variación en su salida, por ejemplo: 8% de la 5ª armónica al comienzo del fundido, 6% al final y 2.5% durante el refinamiento. Bajo las condiciones de desbalanceo de los electrodos de arqueo, la tercera armónica puede llegar a tener valores de consideración importante, además de la 5ª y la 7ª armónica se pueden incrementar significativamente durante las condiciones de desbalanceo del arco. Ver gráfica 6.2



Gráfica 6.2. Niveles de armónicos de un horno de arco

Transformadores

Con objeto de reducir las dimensiones de los transformadores y hacer que su fabricación resulta más económica, se adoptan en su núcleo inducciones elevadas, las cuales tienen influencia preponderante sobre las pérdidas en el hierro y sobre la intensidad de la corriente en vacío. Un valor elevado de la inducción da origen también por causa de saturación del hierro a armónicos de orden superior que aparecen en la corriente magnetizante, como lo muestra la gráfica 6.3



Gráfica 6.3. Niveles de armónicos típicos de un transformador.

Como se ha expresado con anterioridad los niveles de distorsión armónica dependen de los dispositivos no-lineales y de su ubicación dentro del sistema de potencia, se pueden establecer hasta cierto punto los valores típicos de algunos dispositivos. Para poder tener una orientación más amplia del tipo de armónicas y niveles que producen estos equipos, se exponen una serie de tablas de algunos de ellos, aunque es importante verificar para cada caso en especial debido al diseño particular de cada uno de ellos.

Capítulo 7

Caso práctico

Caso práctico

Panorama general

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

Lugar: Guadalajara, México

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

Hasta el momento se han planeado causas, efectos, medidas correctivas, etc. A un problema en general. En este estudio se plantea el caso real de una 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 "la compañía" 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 a demás 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 esta 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 de la potencia de corto circuito de la red. Para los objetos de este estudio a continuación se definen unos términos a emplear durante el desarrollo del mismo.

Punto de acoplamiento común (PAC)

Entre la suministradora de la 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 a la red y la generada por la fuente.

Distorsión de voltaje armónico individual (DV_{in})

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

$$DV_{in} = I_n * Z_{th}$$

Distorsión total de voltaje (*DAT*)

Se encuentra dada por la siguiente expresión:

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

Distorsión de corriente armónica individual (*DCIn*)

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

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

Distorsión total de la corriente (*DCT*)

Se encuentra dada por la siguiente expresión:

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

Factor armónico (F_n)

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

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

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

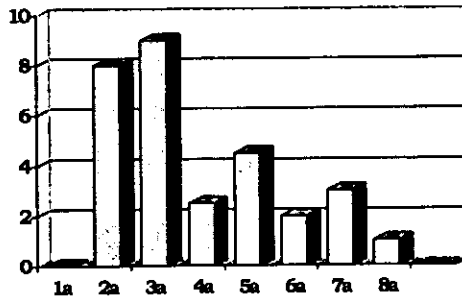


Figura 7.1. Valores de armónicos del horno de fundición de CSG.

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 Guzmán (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 7.1 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 el objetable. Una vez efectuado el cambio en el flicker en GUD-230 será de aproximadamente 1%, el cual es un valor perfectamente tolerable.

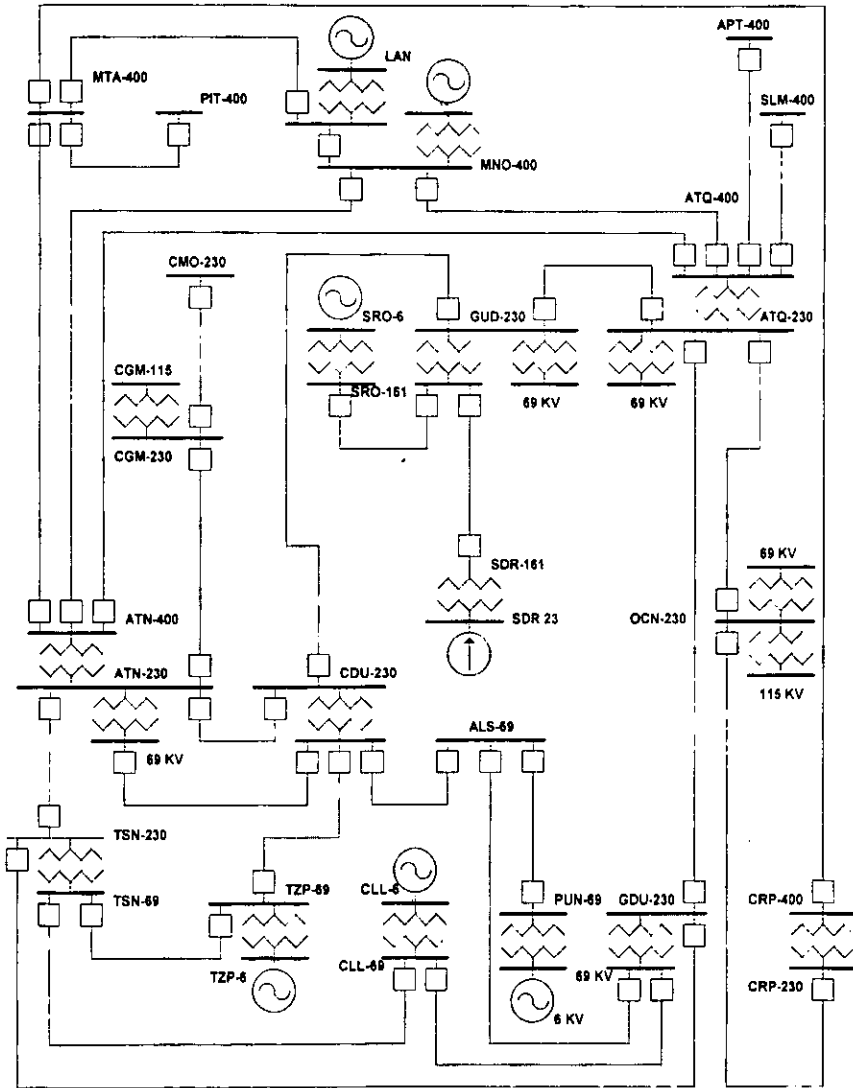


Figura 7.2 Diagrama unifilar de la red en estudio

En la figura puede apreciarse el grado de detalle necesario para el estudio de la penetración de armónicas ya que la reducción a equivalentes no refleja el comportamiento de la red a altas frecuencias.

La CSG cuenta con dos hornos de arco eléctrico de 6 y 8 MVA, así como dos bancos de capacitores de 4.8 y 6.9 MVAR, respectivamente, tal y como lo muestra la figura 7.2.

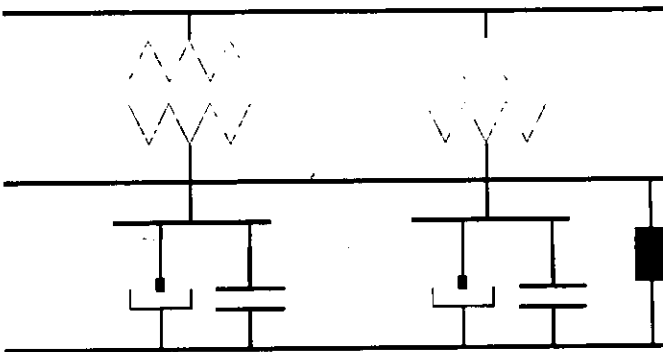


Figura 7.3 Diagrama unifilar de CSG

Aunque se sabe que próximamente será sustituido el horno chico por uno grande 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 100 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 la 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 R_{cc} 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 admisible.
3. Cálculo de niveles de distorsión actuales
4. Detección de resonancias en la red de CFE.
5. Proposición de medidas correctivas.

Determinación de la impedancia de la red y de la planta

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:

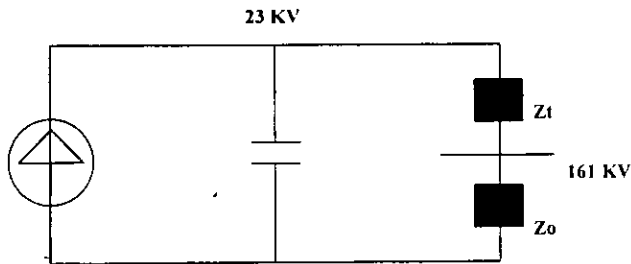


Figura 7.4 Impedancia Thevenin vista desde CSG-23

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

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

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

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)

Del resultado anterior puede anticiparse que la resonancia paralelo entre red y banco dará como resultado una amplificación considerable de corrientes entre la quinta y la décima armónica cuyo máximo es alcanzado alrededor de la séptima. Lo anterior significa que corrientes inyectadas por los hornos de arco circularán por ambas ramas de este circuito. La figura 7.5 ilustra lo anterior con claridad, mostrando el factor de distribución F_d , entre la primera y la quinceava armónica a intervalos de 10 Hz. Puede apreciarse por medio de la Fig. 7.1 que el factor armónico, F_n , para hornos de arco no contiene valores apreciables más allá de la octava armónica, sin embargo los porcentajes de ésta y la quinta son dignos de tomarse en cuenta.

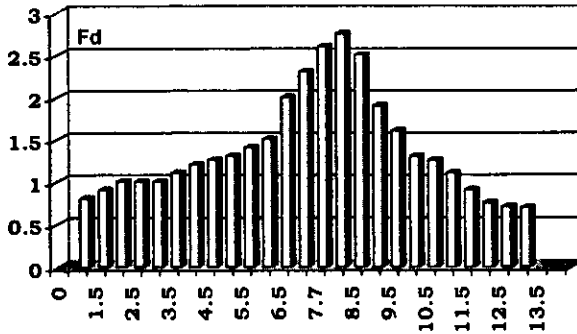


Fig. 7.5 Factor de distribución

Adopción de niveles de distorsión admisibles.

Con el objeto de mantener el 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 7.1, en la que puede confirmarse el grado de congruencia entre los valores impuestos en los países incluidos en esta tabla. Para los fines del presente estudio se adoptarán los niveles adoptados por el IEEE.

PAÍS	NORMA	DISTORSIÓN INDIVIDUAL						DAT %	DAG %	PAR
		2	4	5	6	7	8			
FRANCIA	ELECTRICITE DE FRANCE	0.6 ----	1 ----	0.6 ----	0.6 ----	1 ----	0.6 ----	1.6 ----	5 ----	V I
SUECIA	SEF THYRISTOR COMMITE	0.7 ----	0.7 ----	0.7 ----	0.7 ----	0.7 ----	0.7 ----	1 ----	----	V I
U.S.A	IEEE-518	1	1	1	1	1	1	1.5	----	V
		0.5	2	0.5	0.5	2	0.5	2.5	----	I
		0.9	3	0.9	0.9	3	0.9	4	----	I
		1.3	5	1.3	1.3	5	1.3	6	----	I
REINO UNIDO	G5/3	0.5	1	0.5	0.5	1	0.5	1.5	----	V
		5	1	3	2	3	1	----	----	I
INTERNACIONAL	IEC 36.05	0.5 ----	3 ----	0 ----	0 ----	3 ----	0.4 ----	----	5 ----	V I
R. F. A.	DIN 57160	2 ----	2 ----	2 ----	2 ----	2 ----	2 ----	4 ----	10 ----	V I
AUSTRALIA	AS2279	0.5 ----	1 ----	0.5 ----	0.5 ----	1 ----	0.5 ----	1.5 ----	----	V I
FINLANDIA	RESTRICTION OF HARMONICS	1 4	1 4	1 4	1 4	1 4	1 4	1.5 ----	----	V I
NUEVA ZELANDA	LIMITATION OF HARMONICS LEVELS	0	2.3	0	0	1	0	----	----	V
		0	2.9	0	0	1.3	0	----	----	I <
		0	5.7	0	0	2.5	0	----	----	I >

Tabla 7.1. Niveles de armónicos sancionados por el IEEE

Cálculo de los niveles de distorsión actuales.

El estudio exploratorio se lleva a cabo mediante la inyección de 1 (p.u.) de corriente en CSG, 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 y la distribución de parámetros de las líneas de transmisión, por lo que la relación de corrientes y de voltajes en un mismo elemento del circuito, puede cambiar en forma considerable a distintas frecuencias.

En la figura 7.6 se observa la variación de las impedancias en función de la frecuencia vistas desde CSG-23. Puede apreciarse como la curva de la 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.

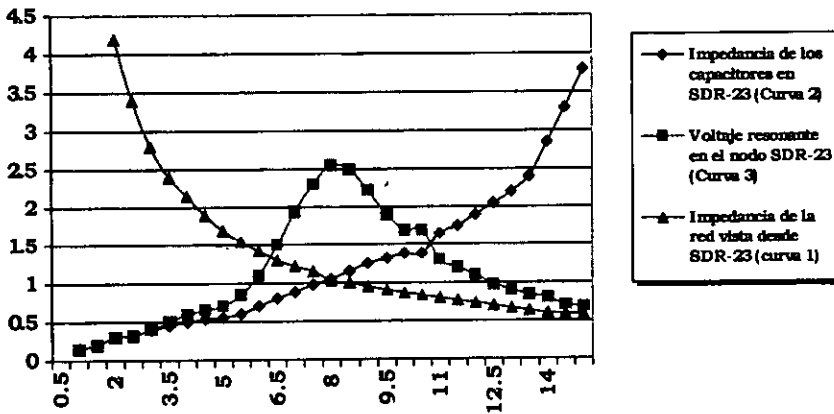


Fig. 7.6 Impedancias vistas desde CSG-23

La curva de impedancia resultante representa también el voltaje en pu desarrollado en el citado nodo, pues como se dijo se considera una inyección de una unida en P.U. 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 valores de distribución y del punto de esta corriente multiplicada por la impedancia armónica respectiva en el PAC, podrá determinarse el voltaje.

Lo anterior se condensa en forma cualitativa en la tabla 7.2.

1 <i>n</i>	2 <i>f_n</i>	3 <i>F_d</i>	4 <i>I_n</i>	5 <i>I_{amp}</i>	6 <i>Z_{th}</i>	7 <i>DVI</i>	8 <i>DCI</i>
2	0.080	1.008	0.055	19.6	0.1467	0.80	6.85
3	0.090	1.079	0.056	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	0.43	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	3.25	13.92

Tabla 7.2. Distorsión armónica bajo condiciones actuales

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

En la tercera columna aparecen los valores del factor de distribución (*F_d*). Puede apreciarse que mediante 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 p.u.; éste es obtenido de la siguiente fórmula

$$I_n = F_n * F_d * S_h$$

Donde:

I_n = corriente armónica en p.u.

F_n = factor armónico del 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 161 KV.
Dado en amperes.

En la sexta columna se localiza el valor en p.u. 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 columnas 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 por encima del 1.5% considerado como aceptable.

En el caso de la distorsión de corriente para los 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 5 MVA a fin de no rebasar dicho límite. A su vez el valor de 2% aceptable para armónicas nones también es superado para cada caso y como es de esperarse el 2.5% reconocido para la DCT es ampliamente vencido por un excesivo de 13.9%.

Detección de la resonancia en la red

En la tabla 7.3 se muestra el contenido de corriente armónica en los bancos referidos. En ella pueden detectarse altas concentraciones en la 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 230/69 KV. en serie con la capacitancia del citado banco entra en resonancia con los capacitores de compensación reactiva de la CSG con la red.

<i>N</i>	<i>GCM-115</i>		<i>ATQ-69</i>		<i>GDU-69</i>		<i>TSN-69</i>	
	<i>I_{amp.}</i>	<i>% I_c</i>	<i>I_{amp.}</i>	<i>% I_c</i>	<i>I_{amp.}</i>	<i>% I_c</i>	<i>I_{amp.}</i>	<i>% I_c</i>
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 7.3: Corriente armónica en los bancos de capacitores

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 armónica, creando así un libre 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.

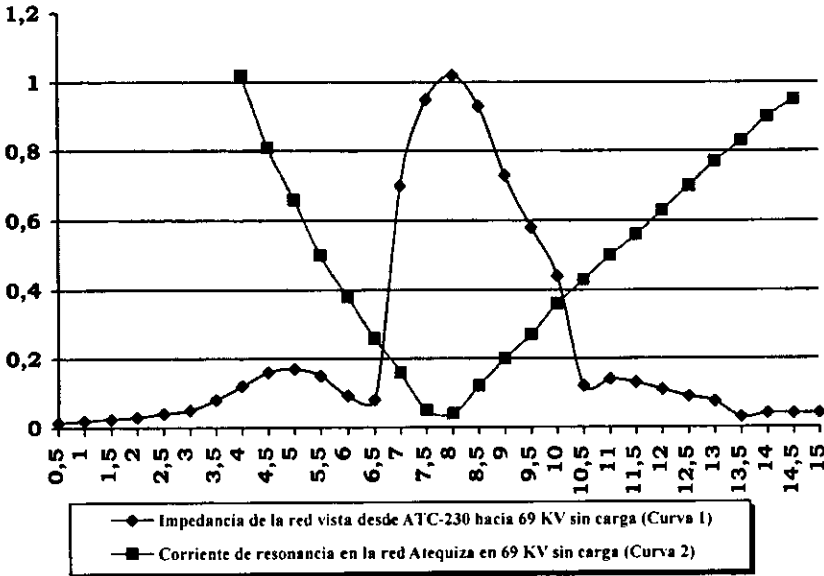


Fig. 7.7 Curva característica de la impedancia vista desde ATQ-230 hacia ATQ-69

Debido a la relocalización del punto de conexión de la planta hidroeléctrica Santa Rosa de GUD-161 a TSN-69, la planta de acero 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 nivel del valor 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 el nivel de corto circuito de CSG-161 de menos de 3%, con lo que los factores de distribución obtenidos hasta ahora permanecerán inalterados. En la tabla 7.4 aparecen los valores de distorsión con el nuevo PAC. Al comparar esta tabla con la tabla 7.2, 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	13.90

TABLA 7.4: Distorsión armónica en GUD-230

El nuevo valor de la relación de corto circuito esta 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 7.4 se advierte que estos valores todavía son fácilmente rebasados por lo que se deberá de 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 7.5, en la cual, los factores de distribución acusan amplificaciones 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 éste y la línea de la planta citada.

	<i>SIN CARGA</i>			<i>CON CARGA</i>		
	<i>Id</i>	<i>Iamp.</i>	<i>% Inom.</i>	<i>Id</i>	<i>Iamp.</i>	<i>% Inom.</i>
2	0.015	0.69	0.46	0.015	0.69	0.46
3	0.046	2.36	1.57	0.042	2.20	1.46
4	0.123	1.75	1.16	0.108	1.54	1.02
5	0.188	4.82	3.20	0.161	4.13	2.75
6	0.093	1.06	0.70	0.077	0.87	0.58
7	1.010	17.24	11.49	0.417	7.13	4.75
8	1.830	10.44	6.96	0.953	5.43	3.62
		20.97	13.97		10.28	6.85

TABLA 7.5: Carga de los capacitores en ATQ-69

Se puede intuir y confirmar en la tabla 7.5 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 representan los valores de distribución para ambos casos descritos. Es de notarse como la cresta de la curva sin carga conectada alcanza un valor de 5.7 p.u. en la vecindad de la séptima armónica, por lo que cabe señalar debido a las variaciones de frecuencia del sistema y de la propia red, así como las derivadas imprecisiones en los datos de ésta, 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 69 KV. Representaría corrientes del orden del orden de 100 amperes.

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 quema de fusibles frecuentemente, fallas de aislamientos, sobrecalentamientos etc., y por ende la reducción de la vida útil del equipo.

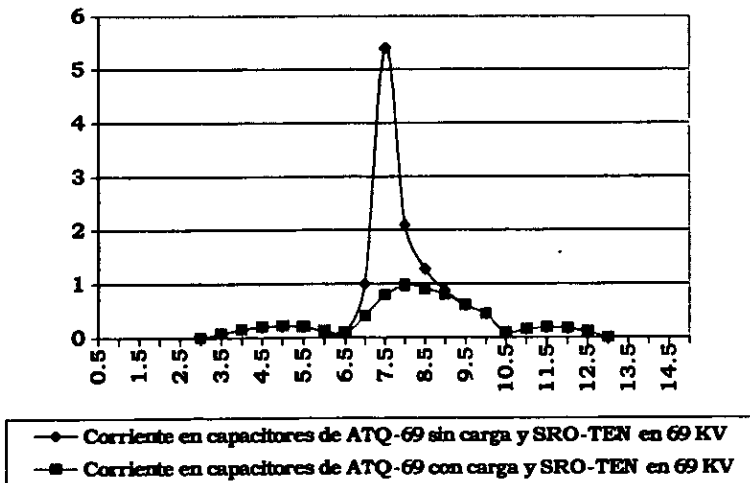


Fig. 7.8 factores de distribución para ambos casos

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 un aparte 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 los circuitos deberá resolver el problema de interacción de ambos. El cambio en la especificación en 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 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 subestación CGS, donde hasta el momento no se ha hecho ningún 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 de estas frecuencias y no al 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 demostrados en las tablas 7.2 y 7.4, por lo que es de esperarse que mediante la inserción de reactores en serie con los bancos de capacitores de CGS 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 7.6, puede encontrarse la 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 la distorsión de corriente. Estos valores no se consideran como de peligro como se puede advertir mediante la comparación de las tablas 7.5 y 7.7, donde se aprecia la reducción substancial 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 casos a fin de cubrir la mayor cantidad de condiciones de operación, incluyendo contingencias más onerosas en lo que se refiere a la distorsión de voltaje y corriente son las de demanda mínima, por lo que los casos analizados pertenecen precisamente a dichas condiciones.

<i>N</i>	<i>I_n</i>	<i>Z_{th}</i>	<i>DVI</i>	<i>DCI</i>
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 7.6: Distorsión armónica en GUD-230 con filtros

<i>n</i>	<i>Fd</i>	<i>Ipu</i>	<i>Iamp.</i>	<i>% Inom</i>
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
			4.670	3.1000

TABLA 7.7 Corriente en los capacitores con filtros

Conclusiones

Conclusiones

Con el presente trabajo de tesis se puede concluir 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 en el sistema; pero cierto es que ya varias empresas por el tipo de maquinaria que emplean, se han encontrado con varias fallas en los bancos de capacitores, lo que ocasiona que el factor de potencia se empobrezca y entonces sean acreedores de una serie de multas por parte de la compañía de luz y el gran costo de reemplazo de bancos.

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

A lo largo de este trabajo de investigación se trataron diversos conceptos teóricos sobre la existencia de armónicas, de manera que se plantearon 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 estudios sobre el 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 se vean afectadas por el problema, prefieren pasarlo por alto, corrigiendo únicamente el factor de potencia (porque éste si se encuentra reglamentado) y olvidando (mientras soporten los bancos de capacitores) el problema de armónicas.

Además, cualquier expansión de la red necesitara 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.

Son muchos los factores que se deben de tomar en cuenta en el 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 una idea generalizada sobre los puntos 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 mas profundo sobre el problema.

Se recomienda el manejo del análisis de armónicas mediante una PC. utilizando algunos de los programas existentes para la recopilación y análisis de datos, pudiéndose obtener datos interesantes y valiosos como el orden de las armónicas que se encuentran afectando cierto punto del sistema y el desglose 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 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 continúa presente, que como se comento en dicho capítulo. Actualmente la distorsión total de voltaje es superior al 3% en 161 KV. Entre las opciones que se presentan para resolverlo, están en la adquisición de un compensador estático de VARS. 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 el hecho 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

- J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger
Power System Harmonics
John Wiley and Sons
- Kimbark E. W.
Direct Current Transmission. Vol. I
John Wiley
- IEEE Tutorial Course
Power System Harmonics
IEEE Service Center
- IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive
Compensation
IEEE Service Center
- IEEE Recommended Practices and Requirements for
Harmonic control in Electrical Power Systems.
IEEE Service Center
- Dobinson, L. G.
Closer Accord on Harmonics
Electronics and Power
- Electric Power System Harmonics
Design Guide
Cooper Power Systems